

2019年度 博士論文

サンドコンパクションパイル工法による締固め改良地盤の
微視構造に関する研究

2020年3月

熊本大学大学院
自然科学研究科 環境共生工学専攻

江副 哲

Doctoral Thesis

**Study on microstructure of compacted ground by
Sand Compaction Pile method**

March 2020

EZOE Akira

**Graduate School of Science
and Technology
Kumamoto University**

サンドコンパクションパイル工法による締固め改良地盤の微視構造に関する研究

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
参考文献	7
第 2 章 砂質土の締固めにおける SCP 工法の概要と現状	9
2.1 SCP 工法の概要	10
2.1.1 SCP 工法の改良原理	10
2.1.2 設計・施工・材料の変遷	11
2.2 砂質土の締固めとしての SCP 工法の現状	17
2.2.1 締固め工法の分類	19
2.2.2 砂質土に対する設計法	21
2.3 SCP 工法の改良地盤の評価に関する既往の研究	24
2.3.1 SCP 工法による改良地盤の評価にあたっての留意点	27
2.3.2 SCP 工法の改良効果に関する既往の研究	28
2.4 まとめ	41
参考文献	43
第 3 章 X 線 CT の概要と現状	47
3.1 X 線 CT の基本	48
3.1.1 X 線の発生	48

3.1.2	X 線の減衰と再構成	49
3.1.3	熊本大学における X 線 CT 装置	51
3.1.4	X 線 CT 画像	54
3.2	画像解析手法	55
3.2.1	画像相関法による地盤内に生じる変形現象の解析	56
3.2.2	画像解析による土粒子同士の接触点数の算出	58
3.3	X 線 CT を用いた砂質土の締固めに関する既往の研究	64
3.3.1	締固めやせん断変形を受けた砂質土の内部構造評価	64
3.3.2	SCP 工法と異なる締固め工法による砂質土の締固め	66
3.4	まとめ	67
	参考文献	68
第 4 章	SCP 工法を模擬した X 線 CT 用実験装置の開発	72
4.1	実験装置の開発	72
4.1.1	実験装置の概要	72
4.1.2	実験手順	74
4.1.3	SCP 工法を模擬した砂杭の造成方法	75
4.2	実験装置の検証	77
4.2.1	検証実験の概要	77
4.2.2	砂杭造成時の押力	79
4.2.3	砂杭造成時の可視化	81
4.3	まとめ	84
	参考文献	86
第 5 章	砂質土の微視構造に関する基礎実験	88
5.1	基礎実験の概要	88
5.1.1	実験材料	88
5.1.2	実験ケース	90

5.1.3	供試体作製方法と実験手順	91
5.2	基礎実験の結果	94
5.2.1	X線CT画像	94
5.2.2	画像解析による微視構造の評価	95
5.3	まとめ	99
	参考文献	101
第6章	SCP工法による改良地盤の微視構造に関する応用実験	102
6.1	応用実験の概要	102
6.1.1	実験材料	102
6.1.2	実験ケース	103
6.1.3	実験手順	104
6.2	応用実験の結果	105
6.2.1	ケーシングパイプ貫入時の押力	105
6.2.2	X線CT画像	107
6.2.3	砂杭周辺地盤の変形現象の可視化	107
6.2.4	砂杭周辺地盤の相対密度と接触点数の変化	111
6.3	締固め杭工法との比較	129
6.3.1	締固め杭工法を模擬した実験概要	129
6.3.2	実験結果とSCP工法との比較	131
6.4	まとめ	153
	参考文献	155
第7章	SCP改良地盤の微視構造の評価への展開と今後の課題	157
7.1	実施工におけるSCP改良地盤の微視構造の評価への展開	157
7.1.1	複数打設のSCPにおける実施工との比較	157
7.1.2	SCP改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性	170

7.2 SCP 改良地盤の微視構造の評価に関する今後の課題	・ ・ ・	179
7.3 まとめ	・ ・ ・ ・ ・	180
参考文献	・ ・ ・ ・ ・	182
第 8 章 結論	・ ・ ・ ・ ・	184
APPENDIX-A 実施工における SCP 杭間地盤の体積ひずみ計測結果	・ ・ ・	190
APPENDIX-B 異なる供試体作製方法による液状化強度試験結果	・ ・ ・	196
謝辞	・ ・ ・ ・ ・	199

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

我が国における代表的な液状化対策工法であるサンドコンパクションパイル工法（Sand compaction pile method, 以降、SCP 工法）は、1950 年代半ばに我が国で開発された写真-1.1¹⁾に示す木製やぐらによるパーカッション方式を契機に、写真-1.2²⁾に示すケーシングパイプを貫入するためのバイブロハンマー、ケーシングパイプを支持する鋼製リーダーと 3 点式クローラクレーンによる現在の構成になってからも今日までの半世紀を超えて我が国の地盤改良技術の主力を担い、歴史を創ってきた。SCP 工法による地盤改良効果については、過去の地震による実証事例でその有効性が数多く確認され、これまでに様々な報告がなされている^{例えば 3), ~7)}。

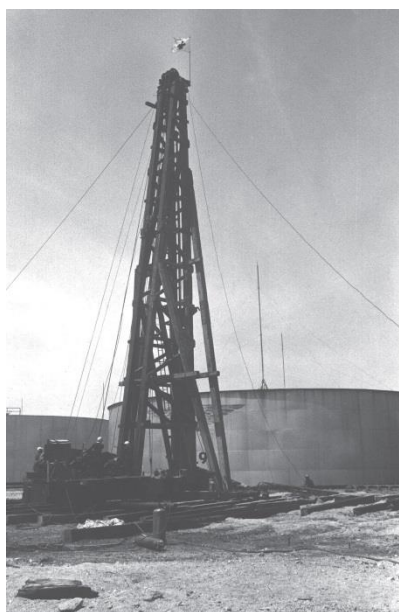


写真-1.1 開発当初の SCP 施工機¹⁾



写真-1.2 現在の陸上 SCP 施工機²⁾

SCP 工法は、「地盤工学用語辞典」によると振動あるいは衝撃荷重を利用して、よく締まった砂杭群を造成し、かつ砂杭周辺の地盤を改良して、軟弱地盤の強化を図る工法をいう⁸⁾と示され、緩い砂質土地盤では、圧入した砂により密度を増加したり地盤全体を均質化して、支持力改善、圧縮性改善、液状化防止等を図る⁸⁾ものと記載されている。

SCP 工法は密度の増大を地盤改良の基本原理とする工法であるが、SCP 改良地盤の液状化抵抗に関する評価は、杭間強度として砂杭から最も離れた点における標準貫入試験による N 値 (N -value) を用いて行われており、現状では、この N 値増加を密度の増大による改良効果として捉え、この効果のみが評価され設計に取り入れられている。しかし、これまでの実測データや既往の地震被害事例分析などから、杭間強度のみで改良地盤を評価する従来の設計法では、改良後の地盤全体の平均的な液状化抵抗を過小評価している可能性があることが言われてきている。たとえば、吉見⁹⁾は砂の液状化抵抗は、密度が高いほど、有効応力が高いほど、微視構造が安定しているほど大きくなることから、SCP 工法はこれらすべてに関与することで液状化抵抗を増大させると考え、SCP 改良地盤はかなりの過負荷に対しても抵抗できる「ねばり」を有していることも指摘している。また、1995 年兵庫県南部地震では、神戸沖の人工島での SCP 工法を含む締固めによる改良地盤において、設計で考慮していた震度よりも大きな震度であったにもかかわらず、有意な沈下が生じていないことが報告され¹⁰⁾、その後の研究により、SCP 工法による液状化強度の増加には、砂杭の圧入によって側方拘束が高まること¹¹⁾や施工時の圧縮空気による不飽和化されること¹²⁾などの密度増加以外の効果も含まれていることがわかってきた。最近の研究事例では、室内実験により砂杭を造成する施工の貫入と造成時に受ける繰返し載荷履歴により、その後の繰返しせん断に強い土粒子構造が形成される¹³⁾ことが確認されている。この繰返しせん断に強い土粒子構造の形成と先に述べた吉見の述べた微視構造の安定化とは同義と捉え、本研究では、砂質土における土粒子の配列状態のことを「微視構造」と呼ぶものとする。しかしながら、これらの研究においても SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造の変化を直接的に捉えているわけではなく、砂杭間の土要素が受ける応力経路を模擬することによって再現した荷重を付加してものであるため、改良地盤内で起きている現象をより詳細に明らかにすることで改良地盤の評価手法の確立による設計法の高度化が求められている。

一方で、地盤工学分野でも広く用いられている非破壊検査法のひとつである X 線 CT (Computed Tomography) ^{例えば, 14),15)}においても, X 線 CT 装置の空間および時間分解能の飛躍的向上により, 近年では研究対象がよりミクロスケールへとシフトし, 土粒子の配列や間隙構造を可視化する事例が多くなっている ¹⁶⁾。

SCP 改良地盤に対して X 線 CT を適用する試みは, 今まで未知であった繰返しせん断履歴による SCP 改良地盤の微視構造の変化を直接的, かつ 3 次元的に非破壊で探ることができる可能性を有しており, 締固め改良地盤の評価手法の確立のために有効なアプローチであると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究においては, 前述した SCP 工法で得られると考えられている密度増加以外のいくつかの特有な改良効果のうち, 定量的な評価がなされていないため, 実務設計では現状, 考慮されていない「微視構造」について取り上げる。

本研究の目的は, SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造を直接的に捉えるため, X 線 CT を適用することにある。このため, まず SCP 工法による砂杭の造成を模擬した X 線 CT 専用の模型実験装置を開発し, X 線 CT 撮影を含む実験方法の検証を行う。次に, 密な砂質土の基本的な微視構造を把握するため, X 線 CT と画像解析により土粒子同士の接触の観点から定量的な評価を行う。

さらに, 開発した模型実験装置や実験手法, 土粒子の接触点数による評価法を応用することで, SCP 工法による砂杭周辺地盤の微視構造に関して, その締固め現象の詳細な可視化と接触点数の変化による定量的な評価を行う。

最後に, X 線 CT を適用して得られた実験データと SCP 施工現場で計測された実測データとの比較や, SCP 改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性について考察し, SCP 工法の施工法, 設計法のさらなる高度化を目指した SCP 改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及する。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章第1節および第2節で述べたことを研究の背景や目的として、X線CTを用いたSCP工法による締固め改良地盤の微視構造に関する研究についてまとめたものである。本論文の各章における内容を以下に列挙し、その構成を図-1.1に示す。

第1章の序論では、本研究の背景および目的を示すとともに、本論文の構成について説明する。

第2章では、研究対象であるSCP工法の基本的な改良原理と設計、施工、材料の変遷について述べるとともに、本研究で対象とする砂質土の締固めを目的としたSCP工法の現状と設計方法について整理する。さらに、SCP工法による改良地盤の評価にあたっての留意点と改良効果に関する既往の研究について概観する。

第3章では、本研究の中心的な役割を果たすX線CTの基本事項およびCT画像の解析手法について述べるとともに、X線CTを用いた砂質土の締固めに関する既往の研究について概観する。

第4章では、本研究に用いるために新たに開発したX線CT専用の模型実験装置と実験手順およびSCP工法を模擬した砂杭の造成方法について詳細に述べるとともに、CT撮影による実験装置の検証を行う。検証実験結果から本装置および手法により、SCP工法を模擬した連続的な砂杭の造成が可能であり、その状況を可視化できることを確認する。

第5章では、砂質土の密な状態における基本的な微視構造を捉えるための実験として、比較的粒径が大きく構造の観察が容易な熊本硅砂を実験材料に選定し、異なる締固め方法で作製した供試体を対象にX線CT撮影を行い、画像解析により相対密度と土粒子同士の接触の観点から定量的な評価を試みる。

第6章では、第4章で開発した模型実験装置や実験手法、第5章で提案した接触点数による微視構造に関する評価手法を応用することで、SCP工法による砂杭周辺地盤の変形現象を可視化し、同時にその微視構造の変化について定量的な評価を行う。さらに、貫入と造成（引抜き・打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルを持つSCP工法の特徴を把握するために、貫入のみで施工される締固め杭工法との比

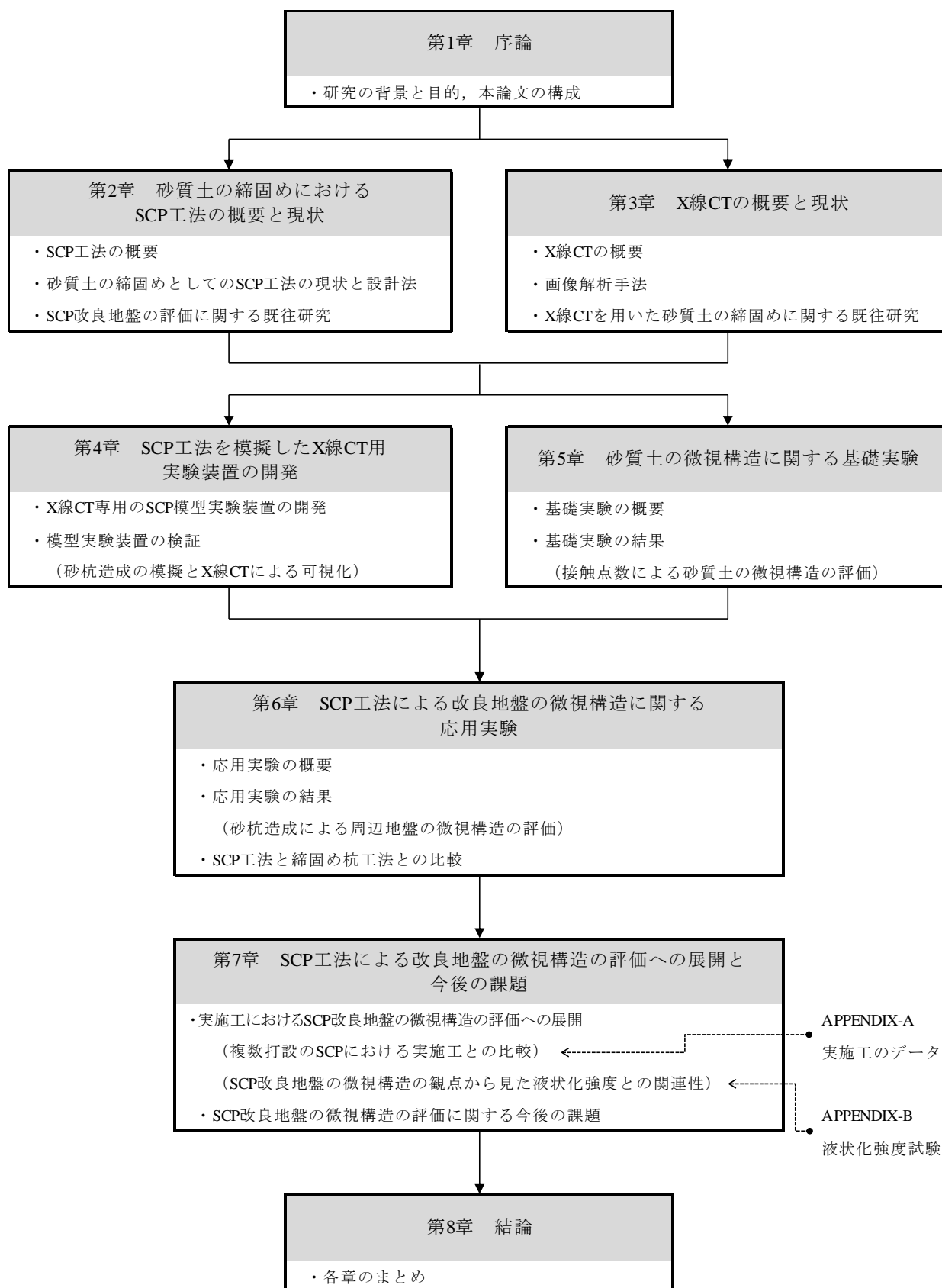


図-1.1 論文の構成

較を行う。

第 7 章では、これまで得られた成果を基に、実施工における SCP 改良地盤の微視構造の評価への展開を試みる。具体的には、より実施工に近い状況を再現するために 4 本の砂杭を模型地盤内に造成し、X 線 CT を用いて複数の砂杭造成過程における地盤の状態変化について評価し、CT 撮影から得られた模型実験データと SCP 施工現場で計測された実測データの比較を行う。SCP 施工現場で計測されたデータは、SCP 杭間地盤の体積ひずみ計測結果を APPENDIX-A として示す。

次に、APPENDIX-B として第 5 章の基礎実験における供試体作製方法と同じ作製条件による液状化強度試験を行い、第 5 章で得られた接触点数により定量化した砂質土の微視構造と液状化強度とを関連付ける。さらには、第 6 章の応用実験結果を踏まえた SCP 改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性についても考察を行い、SCP 工法の施工法、設計法のさらなる高度化を目指した SCP 改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及する。

第 8 章では、各章において得られた成果を総括し、本論文の結論を述べる。

参考文献

- 1) 不動建設株式会社：ふどうの地盤改良史－コンポーザーとともに－，2003.
- 2) 株式会社不動テトラ：打戻し式サンドコンパクションパイル工法 COMPOZER パンフレット，2019.
- 3) Ishihara, K., Kawase, Y. and Nakajima, M.: Liquefaction characteristics of sand deposits at an oil tank site during the 1978 Miyagiken-oki Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.20, Issue2, pp.97-111, 1980.
- 4) 土木学会：1983年日本海中部地震震災被害調査報告書，pp.262-266, 1986.
- 5) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N.: Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.99-107, 1996.
- 6) Yasuda, S. Harada, K. Ishikawa, K. and Kanemaru, Y.: Characteristics of the Liquefaction in Tokyo Bay Area by the 2011 Great East Japan Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.5, pp.793-810, 2012.
- 7) 原田健二，大林淳，吉富宏紀：建築物における締固め工法による液状化対策効果の検証，*基礎工*，Vol.40, No.12, pp47-49, 2012.
- 8) 地盤工学会：地盤工学用語辞典，pp407-408, 2006.
- 9) 吉見吉昭：「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準，*土と基礎*，Vol.38, No.6, pp.33-38, 1990.
- 10) 松尾修，安田進，山本実，原田健二，橋本隆：レベル2地震動における改良地盤の評価に関する実証的研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 273-276, 1997.
- 11) Harada, K., Ishihara, K. Orense, R.P., and Mukai, J.: Relations between penetration resistance and cyclic strength to liquefaction as affected by K_c -conditions, *Proc, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Sacramento CA*, Paper 111, 2008. (in CD-ROM).
- 12) Okamura, M., Ishihara, M. and Oshita, T.: Liquefaction resistance of sand deposit improved

with sand compaction piles, *Soils & Foundations*, Vol.43, No.5, pp.175-187, 2003.

- 13) 古関潤一：締固め砂杭の施工が液状化強度特性に及ぼす影響に関する最近の知見，
基礎工， Vol.46, No.11, pp.2-5, 2018.
- 14) 棕木俊文：地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文， 2001.
- 15) 渡邊陽一：X 線 CT データを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明
に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文， 2011.
- 16) 肥後陽介，高野大樹，棕木俊文：X 線 CT から見る土質力学 2.X 線 CT の概要と研
究動向，地盤工学会誌， Vol.65, No.10, pp.41-48, 2017.

第2章 砂質土の締固めにおける SCP 工法の概要と現状

我が国では、その狭隘な地形を背景として土木構造物構築時に軟弱地盤に遭遇することが多く、そこで生ずる安定・変形・耐震問題（改良目的）に対処するために、軟弱地盤を強化する技術が発展してきたといえる。軟弱地盤の定義は様々で、それらに対応する改良技術もまた、図-2.1 に示すように改良原理や時代のニーズに応じて様々な工法が開発・改良されてきている¹⁾。改良の対象となる軟弱地盤は、大きく粘性土と緩い砂質土に分類される。また、対策工法の改良原理についても対象地盤に応じて排水（脱水）、締固め、固結などがあり、改良技術も SCP 工法に代表される砂杭系と深層混合処理工法に代表される固化系とその他に大別される。

SCP 工法は、半世紀以上も前に我が国で独自に開発され、振動を用いて砂または類似の材料をケーシングパイプで軟弱地盤に圧入することにより、よく締まった砂杭を地中に造成し軟弱地盤を改良する工法であり、「締固め」や「排水」などの基本的な改良原理を併せ持つ。このため、我が国においては、SCP 工法は砂質土地盤には支持力増大や液状化対策、粘性土地盤には沈下・安定対策などのあらゆる地盤に単一の施工機で適用可能な軟弱地盤改良工法として道路、港湾、建築など様々な構造物基礎に採用されてきており、これまでに数多くの施工実績を有している。特に、SCP 工法を緩い砂質土地盤に適用する場合には、液状化対策として広く用いられ、過去の数々の巨大地震においてもその改良効果が確認されており、我が国において最も信頼性の高い液状化対策工法のひとつとなっている。

本章では、研究対象であるこの SCP 工法の基本的な改良原理と設計、施工、材料の変遷や砂質土の締固め工法としての SCP 工法の現状および設計法について述べる。さらに、SCP 工法による締固め改良地盤の評価にあたっての留意事項と SCP 改良効果に関する既往の研究事例についても概観する。

改良原理	一般工法名	工法名	支持力増大	沈下対策 または 変形対策	液状化 対策	止水 対策	施工実績												
							1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代						
置換	置換工法	掘削置換工法	○																
		強制置換工法 (高置換率SCP工法)	○	○															
		砂を利用	サンドドレーン工法	'52 ジェット式	○	○													
				'57 ハイプロ式															
			袋詰め サンドドレーン工法	'67 袋詰めドレーン	○	○													
				'82 部分袋詰めドレーン															
		排水材を使用	○	○															
		砕石を使用				○													
		化学的脱水工法	生石灰パイル工法	○	○														
		締固め	脱水および締固め工法	締固め砂杭工法 (サンドコンパクション パイル工法)	'56														
(自動化) '81																			
					○	○	○												
固結	固結工法	深層 混合処理 工法	石灰系	○	○														
			セメント系	○	○	○													
		粉体噴射攪拌工法	○	○															
		表層処理工法	○																
止水	止水壁工法	薬液注入工法	○	○															
		凍結工法	○	○															
		ジオロック工法																	

図-2.1 我が国における軟弱地盤改良工法の歴史 ¹⁾に加筆・修正

2.1 SCP工法の概要

2.1.1 SCP工法の改良原理 ^{2),3),4)}

SCP工法の基本的な改良原理を図-2.2に示す。SCP工法によって期待される地盤改良効果は、粘性土地盤と砂質土地盤では異なる。粘性土地盤に対しては、図-2.2(a)に示すように軟弱な粘性土地盤内に良く締固まった砂杭を造成することで形成される改良地盤は、剛性の高い砂杭の存在（置換効果，応力集中効果）と、透水性の高い砂杭による周辺粘性土地盤からの脱水機能（圧密排水効果）を併せ持つことによる複合的なものとなる。一方、砂質土地盤に対しては、図-2.2(b)に示すように良く締固まった砂杭を強制的に圧入することで、主に砂杭周辺地盤の間隙を小さくして、密度の増大による支持力や液状化強度の高い地盤にすることである。

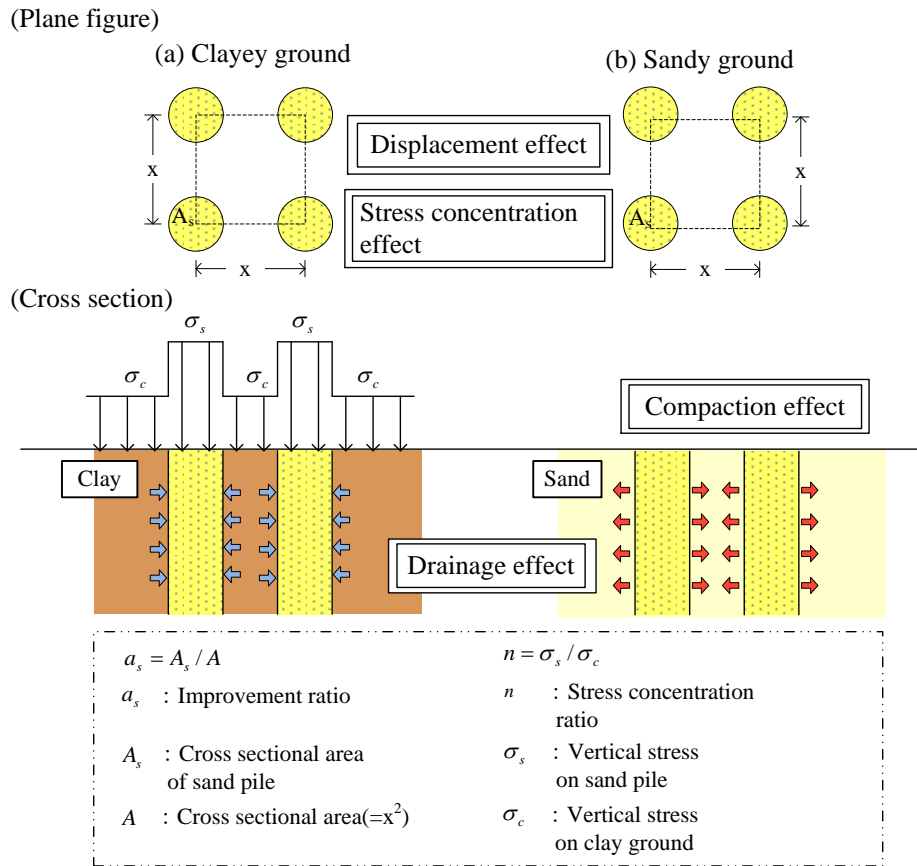


図-2.2 SCP 工法の改良原理³⁾

2.1.2 設計・施工・材料の変遷^{2),3),4)}

SCP 工法の歴史は、1956 年に陸上の振動式 SCP（商標名はコンポーザー）が粘性土地盤を対象とした地盤補強工法として開発されたことに始まる。図-2.3 に示す地盤工学的課題の変遷からもわかるように、1950 年代当時は粘性土の安定や沈下に関する地盤工学的な課題が主たるものであったからである。その後、砂質土地盤としては 1961 年に日本住宅公団（現在の UR 都市機構）の浜甲子園団地で集合住宅の直接基礎地盤の支持力増加と液状化対策として試験工事に採用され、1964 年に発生した新潟地震を契機にその需要が高まり、液状化対策としての実績を積み重ねていった。1965 年には港湾構造物の基礎に対する地盤改良として、海上においても適用されるに至っている（商標名はマンモスコンポーザー）。実際の地震を受けた際の SCP 工法の改良効果は、1978 年の宮城県沖地震で初めて原位置で確認され、学術的な検証が詳細になされた。その後、

(a) 開発に関する事項

[] は商標名

年代		1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
各工法の開発年	振動式		'56 陸上 [コンポーザー]					
	非振動式			'65 海上 [コンポーザー]			'95 陸上 [SAVE コンポーザー]	海上 [SAVE マリン]
	圧入式							'08 [SAVE-SP]
地盤工学的課題								

(b) 設計・施工に関する事項

年代		1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
設計に関する事項		'57 複合地盤理論	'65 方法B	'71 方法A	'82 方法C	'90 方法D		
指針・マニュアル	土木構造物			道路土工指針 '77	'86			'11
	港湾構造物		港湾構造物設計指針 '70		'79	'90	'97 河川堤防マニュアル	'07
	建築構造物			埋立地の液状化対策ハンドブック		'93 '97 (改定)	地盤改良設計指針案 '06	
施工に関する事項		'59 エア導入	'60 パイロ導入	'70 砂面計開発	'90 高周波パイロ	'95 強制昇降装置		
累積施工延長 (千 km)	振動式		12	80	180	330	380	400
	非振動式					1.9	6.8	13.0
	圧入式							0.2

図-2.3 SCP 工法の変遷²⁾

1983年の日本海中部地震など多くの地震を経験したが、地震後の施工箇所の追跡調査結果により、地震による液状化被害はみられず、SCP工法が液状化対策として確立された工法となっていった。しかしながら、これまでのSCP工法は、バイプロハンマーを使用するため振動や騒音などの周辺への環境影響が問題視されることがあり、市街地や構造物近傍などへの適用については困難となるケースが生じた。そこで、周辺環境問題へ対応するために、振動や騒音の低減を目的に締固め機構を強制昇降装置による静的圧入とした静的締固め砂杭工法（商標名はSAVEコンポーザー）が開発され、同工法の海上施工機（商標名はSAVEマリン）も2002年に実用化されている。

静的締固め砂杭工法の開発により、振動・騒音等が問題となる市街地や構造物に近接した施工での適用を拡大させてきたが、近年では、大型の施工機を用いるSCP工法では、狭隘地を対象とする際に施工スペースの確保が問題となり、適用できない場合が増加している。併せて、従来の小型施工機による対策工法（例えば高圧噴射攪拌工法や薬

液注入工法など)と比較し、コストの削減や環境負荷を軽減できる材料(砂)の使用も求められるケースがある。こうした背景の中で、2008年に砂圧入式静的締固め工法(商標名はSAVE-SP)が開発、実用化された。

(1) 設計法

粘性土地盤に対するSCP工法の改良原理は、1957年の村山博士による研究論文に基づいており、図-2.2(a)で示した粘性土地盤と砂杭で構成される複合地盤の概念がその基本である。「サンドコンパクションパイル(SCP)工法」の呼名も同博士によって命名され、後に学術名となった。この概念を基に、複合地盤形成による安定性の増大、圧密沈下量低減、水平抵抗の増大などの改良効果を予測する慣用計算式が構築されており、実用的には設計法は既に確立されている。

一方、砂質土地盤に対して最初に実用設計法を提案したのは、1965年の小川・石堂による論文においてである。これまでに4種類の代表的な設計法(方法A~D)が提案されてきているが、方法A、Bでは細粒分含有率(fine fraction content, 以下、 F_c)の小さい砂を対象としているため実用的には土の F_c の影響を考慮した方法C(β 法と呼ばれる)、D(R_c 法と呼ばれる)が用いられ、最近では地盤の盛上りについても説明が可能であるとされる方法Dが設計法の主流となっている。これらの設計方法は、“2.2.2 砂質土に対する設計法”にて詳述する。

砂質土に対するSCP工法の改良効果、特に液状化対策効果については、1995年兵庫県南部地震時に締固めによる改良地盤が想定以上の外力を受けても被害が少なかった事例を対象に、これまでにその要因や、工法の有効性評価に関する研究などが多くなされている。これらの研究成果に基づいて、2006年に建築学会より刊行された「建築基礎のための地盤改良設計指針案」では、通常評価される杭間の N 値から求まる液状化強度に対し、改良地盤全体の液状化強度は、割増係数を乗じて評価できるとしている。この割増しについても、“2.3.2 SCP工法の改良効果に関する既往の研究”で述べる。

(2) 施工法

1956年にモンケン木製やぐらによるパーカッション方式から開発が始まり、1958年

には現在の振動式 SCP 工法の基本形である「中空管による打ち戻し方式，バイブロハンマー，エアの使用」の基本特許が申請され，1960 年には工法として確立した。①バイブロハンマーの使用による効率化（1960 年），②エア圧によるケーシングパイプからの砂の速やかな排出（1959 年），③砂面計（ケーシング内部の砂の動きを通电によって把握）の開発による高精度な施工管理（1970 年）により高能率で高品質な施工が可能となった。その後，バイブロハンマーによる振動・騒音の弊害を低減する技術開発がなされ，1990 年には高周波のバイブロハンマーを使った高周波小口径 SCP 工法が開発されたが，この問題をほぼ解消したのは 1995 年の静的締固め砂杭工法に装備された強制昇降装置である。図-2.4 にバイブロハンマーと強制昇降装置の概要を示す。その後，近年では流動性を付与した砂（流動化砂）をポンプで圧送し，小型施工機のロッドを通じて地盤内に圧入する技術が開発されたことで，狭隘地での施工や斜め施工も実現可能となり，既設構造物直下の改良へのニーズに対応した。

これら各 SCP 工法の施工規模を図-2.5 に示し，施工手順について図-2.6(a)振動式

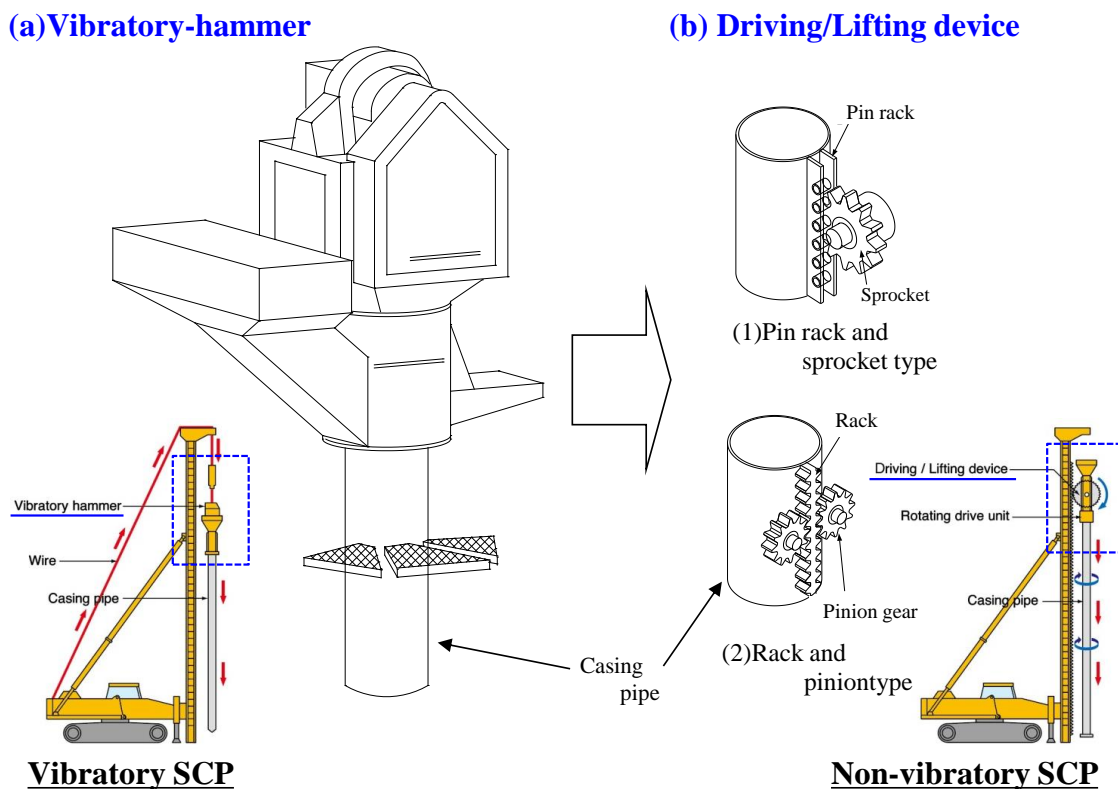


図-2.4 バイブロハンマーと強制昇降装置³⁾に加筆・修正

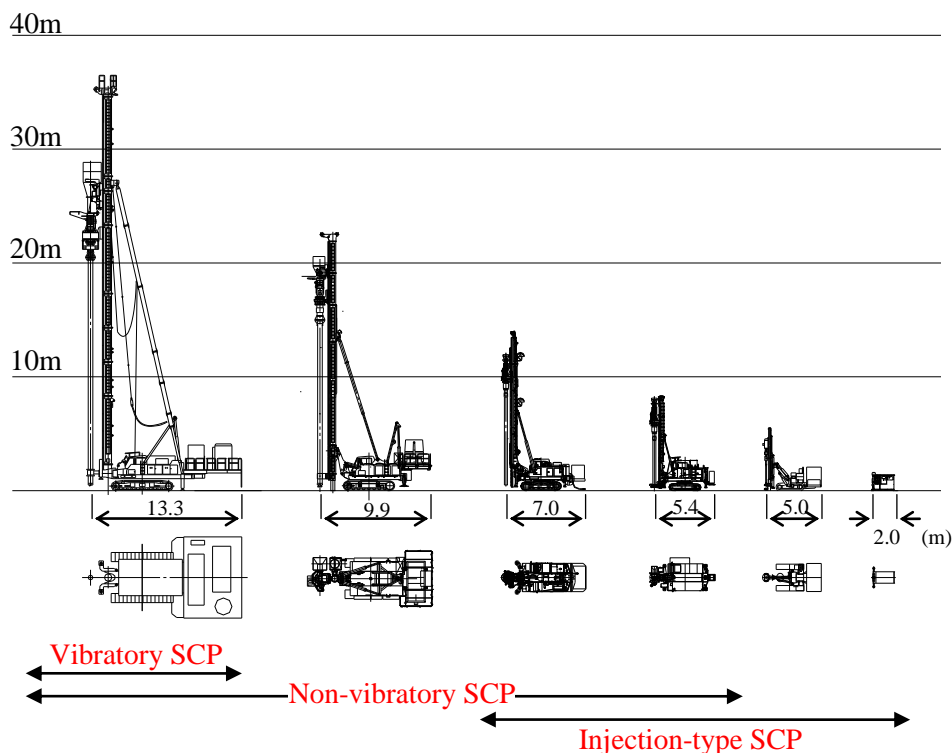


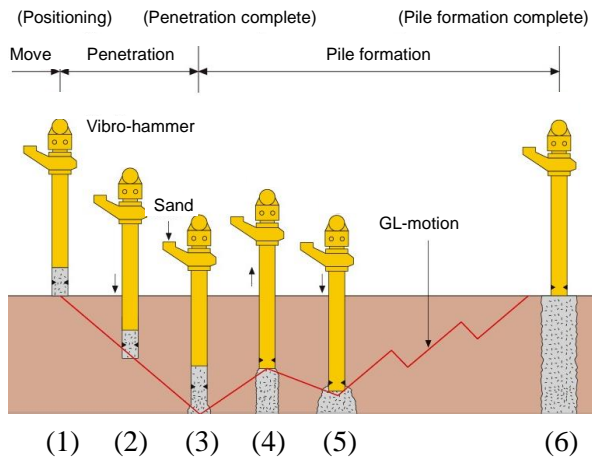
図-2.5 SCP工法の施工規模³⁾に加筆・修正

SCP (Vibratory-SCP), (b)非振動式 SCP (Non-vibratory SCP), (c)圧入式 SCP (Injection-type SCP) をそれぞれ施工状況写真と併せて示す。

(3) 使用材料

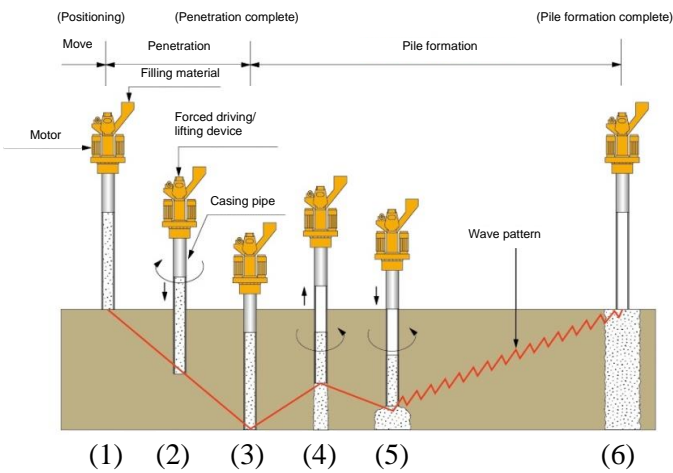
SCP工法の中詰材は、 F_c が小さく、施工時に材料が細粒化（破碎）しないものを使用することが基本となる。砂や礫を使用材料とすることが一般的であるが、リサイクル性などの環境的な配慮から製鋼スラグ、高炉スラグ、造粒石炭灰、再生砕石、貝殻混じり砂などがこれまでに使用されている。図-2.7は、使用材料として現地発生再生砕石①0～40mm、②0～20mm、③20～40mmの3材料にて試験施工を行った際の粒度分布を示し、SCPとグラベルコンパクションパイル（Gravel Compaction Pile、以下、GCP）における使用実績の範囲を併記している。本施工では①材料を採用しており、施工も良好であった。1997年には施工的・設計的改善を加えて建設発生土を有効活用する技術としてリソイル工法が開発されている。ここでいう設計的改善とは、SCP打設のみでも

(a) Vibratory SCP



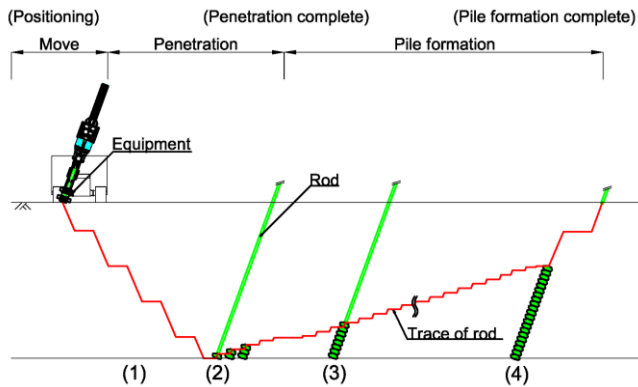
(Chiba, 1995)

(b) Non-vibratory SCP



(Chiba, 1997)

(c) Injection-type SCP



(Tokushima, 2010)

図-2.6 SCP 工法の施工方法³⁾に加筆・修正

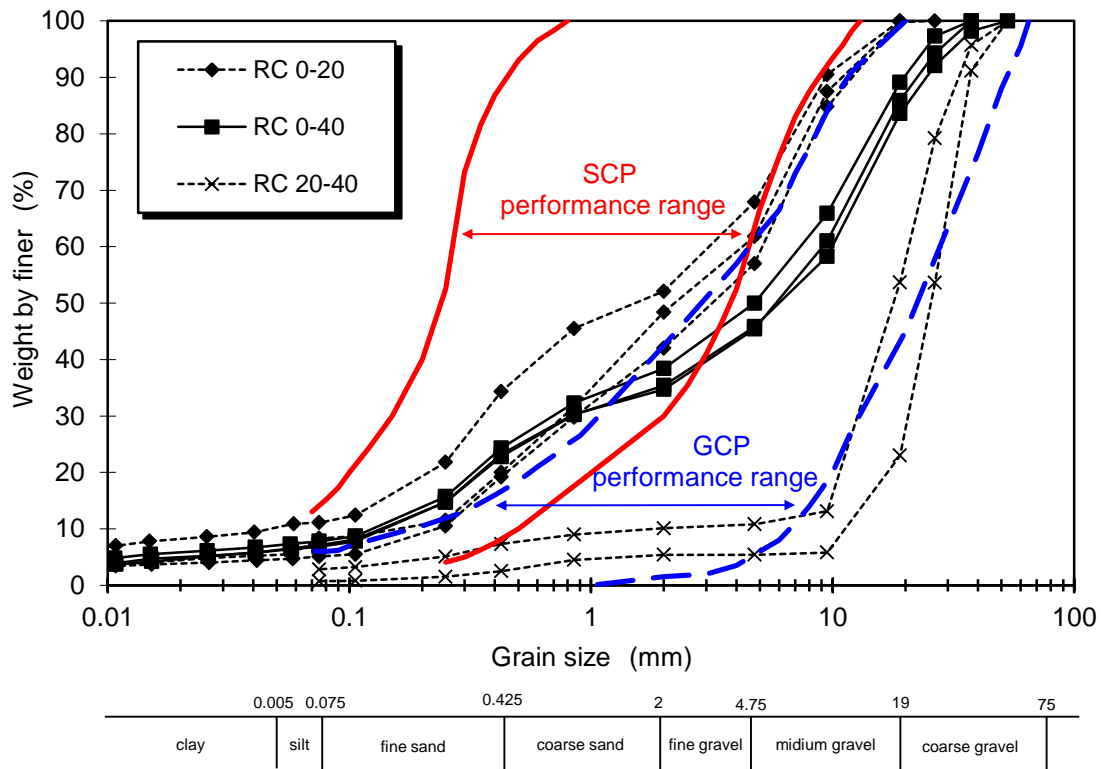


図-2.7 中詰材料の粒度分布⁴⁾に加筆・修正

その圧密効果により杭間粘性土の強度が原地盤以上に増加するという現象を設計に取り込んで評価したものである。また、粒度・膨張率・水硬性などの品質が管理された製鋼スラグを主原料とするスラグコンパクション材料（商標名はエコガイアストーン）の使用実績も高まっている。さらに近年では、製紙スラッジ焼却灰（PS 灰）⁵⁾、不燃性廃棄物の焼却灰^{6),7)}、造粒した廃ガラス⁸⁾などを杭材とする研究もみられ、様々な材料の再利用による循環型社会の形成も資することも期待されている。

2.2 砂質土の締固めとしての SCP 工法の現状

緩い砂質土地盤で地盤工学的課題となるのが地震時の液状化問題であるが、液状化が発生する主な要因としては、

- ① 地盤が緩い砂質土であること

- ② 地下水位が浅く飽和していること
- ③ 地震動の強さと継続時間が十分であること

が挙げられるが、その他にも

- ④ 非排水状態であること
- ⑤ 繰返しせん断が作用すること

があり、これらの要因が一つでも欠けると液状化は発生しないとされる。したがって、これらの液状化発生要因の一つでも阻害できれば液状化対策として成立することになる。例えば、「地盤が緩い砂質土地盤」に対しては、「地盤の密度を高める」ことにより液状化の発生を防ぐことができるし、「土粒子骨格が不安定な地盤」はセメントなどで「固結」してやればよい。図-2.8 に示すように液状化対策は、能動的な対策としては「土の性質を改良する」ことによる液状化強度を増加させる方法（図-2.8 の①～④）と受動的な対策として「応力・変形および間隙水圧に関する条件を改良する」ことにより液状化発生を抑制させる方法（図-2.8 の⑤～⑧）の2つに大別でき、液状化の発生要因と液状化の対策は深く関連していることになる。

地盤改良における施工面積と液状化対策費用の関係を図-2.9 に示す。これによると、締固めを改良原理とする砂杭系工法の場合、施工面積が概ね 1,000m² を超えると大型の

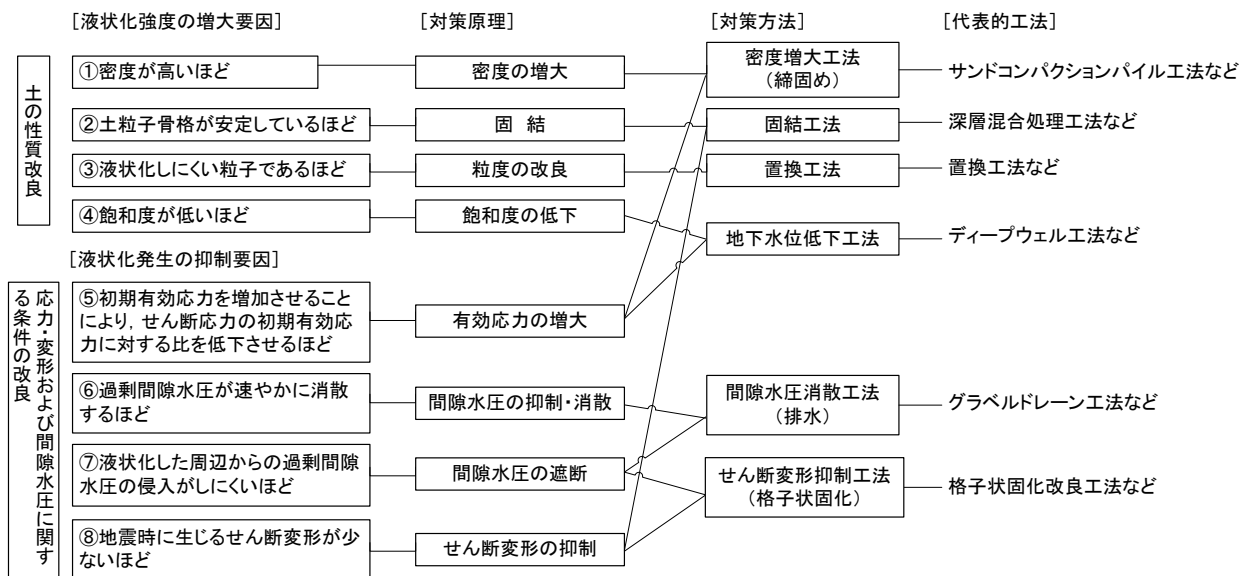


図-2.8 液状化発生の要因と対策工法の関係⁹⁾

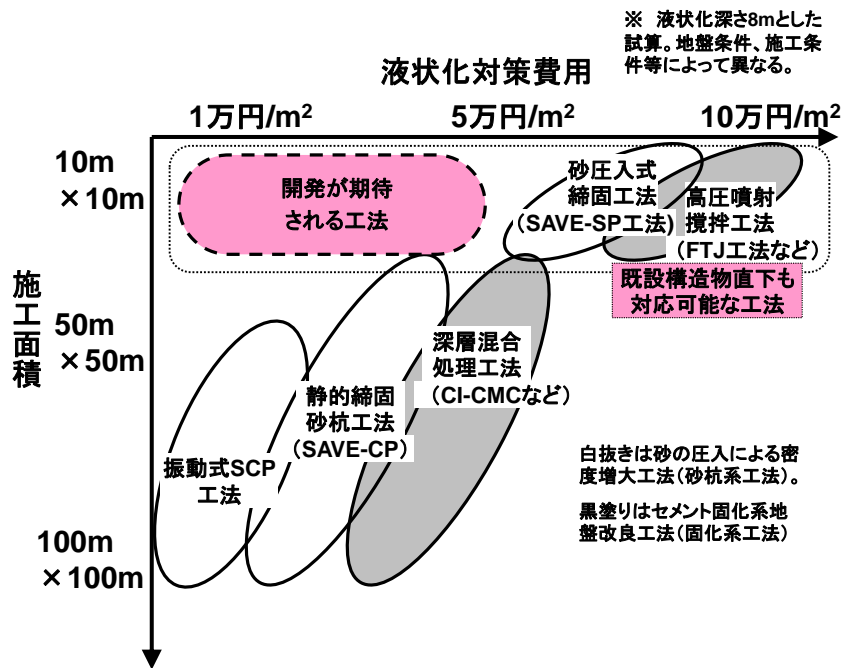


図-2.9 地盤改良における施工面積と液状化対策費用の関係¹⁰⁾に加筆・修正

施工機を有する振動式 SCP 工法や非振動式 SCP 工法は大量施工が可能となるため、液状化対策にかかるコストは比較的安くなるが、それ以下の施工面積では、小型施工機を使用する圧入式 SCP 工法による施工となるため、施工能率の低下や施工機械の運搬費用などの固定費がコストに占める割合が大きくなるなどの理由により施工単価は高くなる。それでも、同じ施工面積であれば SCP 工法の方が、セメント等を用いる一般的な固化系工法と比べてコストは安くなる。

以下より、締固め工法における SCP 工法の位置づけについて整理し、砂質土地盤に対する SCP 工法の設計法について、その基本的な考え方を述べる。

2.2.1 締固め工法の分類

我が国には、締固め工法をはじめとして固化工法、排水工法を主体とする数多くの液状化対策工法があるが、締固め工法はその歴史が最も古く、これまでに数多くの施工実績を有している。図-2.10 に締固め工法の地盤を締固める方法による分類とその模式図

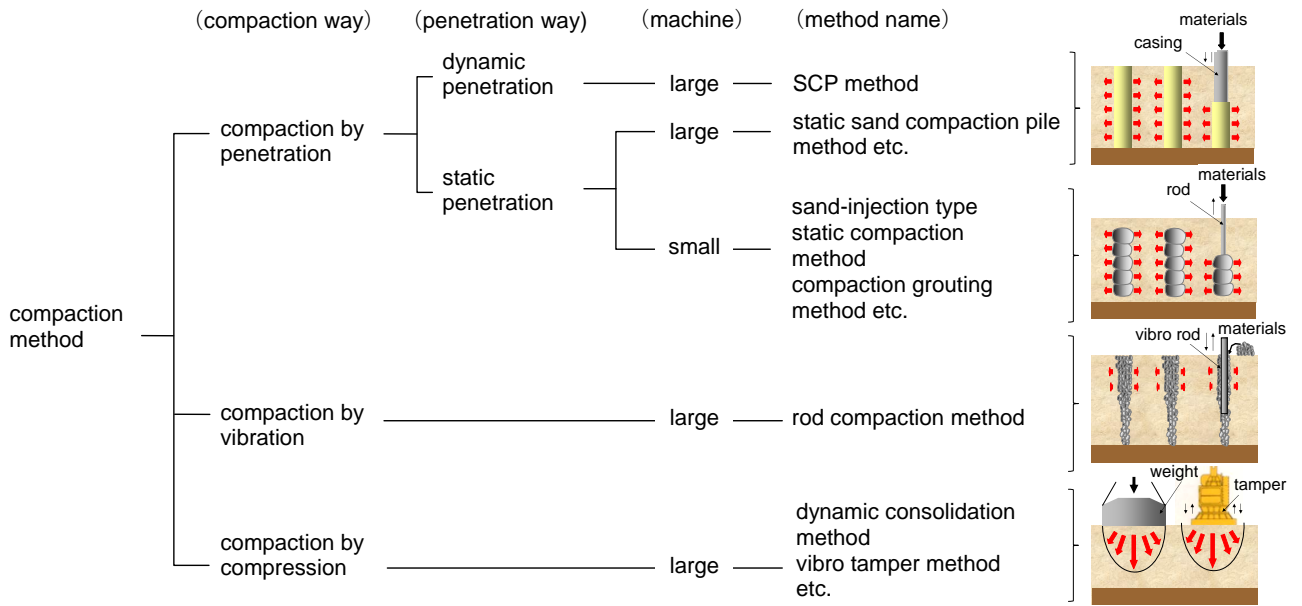


図-2.10 締固め工法の分類¹¹⁾に加筆・修正

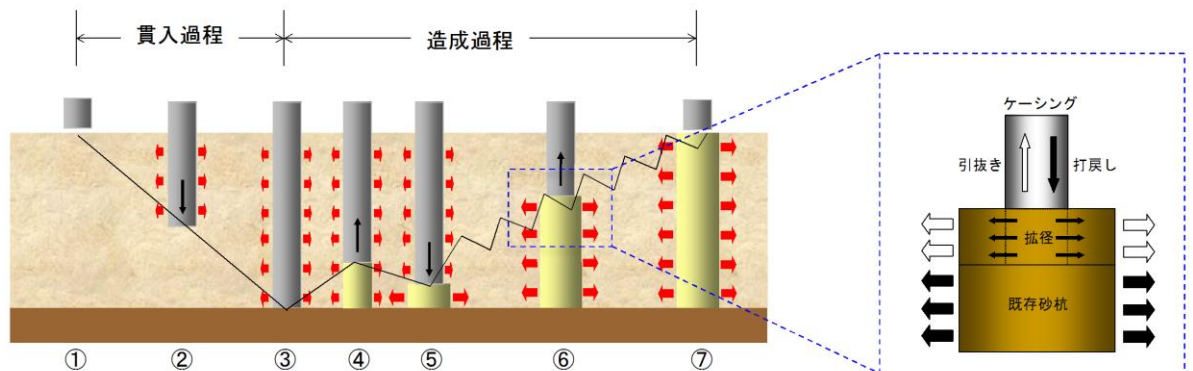
を併せて示す。図に示すように、地盤の密度増大を目的とした締固め工法はその締固める方法により、「圧入締固め」、「振動締固め」、「圧縮締固め」に大きく分類されるが我が国ではSCP工法に代表される「圧入締固め」が主流となっている。

「圧入締固め」にはバイブロハンマーを用いた動的（振動式）圧入と強制昇降装置などを使用した静的（非振動式）圧入がある。同図には示していないが、圧入締固めにはこれ以外にも閉塞した鋼管杭を強制的に地盤中に動的（衝撃的）に圧入して締固める工法¹²⁾や木杭を静的に圧入する工法¹³⁾があり、これらは「締固め杭工法」と呼ばれる。

ここで、SCP工法と締固め杭工法の施工方法の違いについて、その施工手順を比較したものを図-2.11に示す。SCP工法の施工順序を図-2.11(a)に示しており、施工フローは以下のとおりである。

- ① 所定の位置にケーシングパイプをセットする。
- ② バイブレーターを操作してケーシングパイプを地中に貫入する。
- ③ 所定の深度にケーシングパイプが到達したら上部より砂を投入する。
- ④ ケーシングパイプの引抜き時に圧縮空気により砂を地中に排出する。
- ⑤ ケーシングパイプを打戻し、砂杭を拡張する。
- ⑥ 上記の工程を地表まで繰り返すことで良く締め固まった砂杭を造成する。

(a) SCP 工法



(b) 締固め杭工法

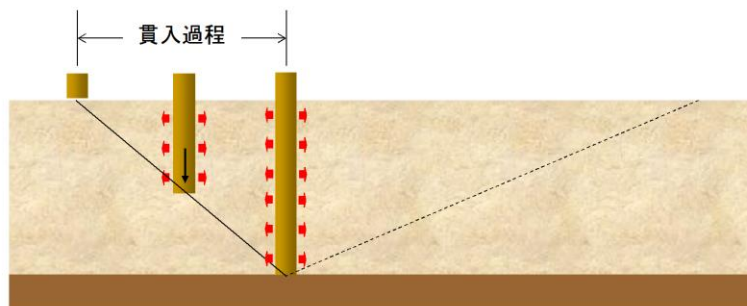


図-2.11 SCP 工法と締固め杭工法の施工方法の相違¹⁴⁾に加筆・修正

⑦ 締固め砂杭の打設完了後に次の打設位置に移動する。

一方、締固め杭工法の施工フローは、SCP 工法の①～⑦の打設手順のうち①～③の貫入過程のみで周辺地盤を締め固めることを基本とする。

また、海外には SCP 工法の類似工法として図-2.12 に概要を示したストーンコラム (stone column) 工法¹⁵⁾がある。この工法には、材料を地表から供給する方式 (surface feed) とプルーブ先端から供給する方式 (bottom feed) があり、同図は後者の方式による説明図である。この工法はドイツで開発され、現在は欧米を中心に世界各地で使用されている技術である。

2.2.2 砂質土に対する設計法¹⁶⁾

SCP 工法による密度増加効果の確認は、通常、標準貫入試験による N 値を用いて行

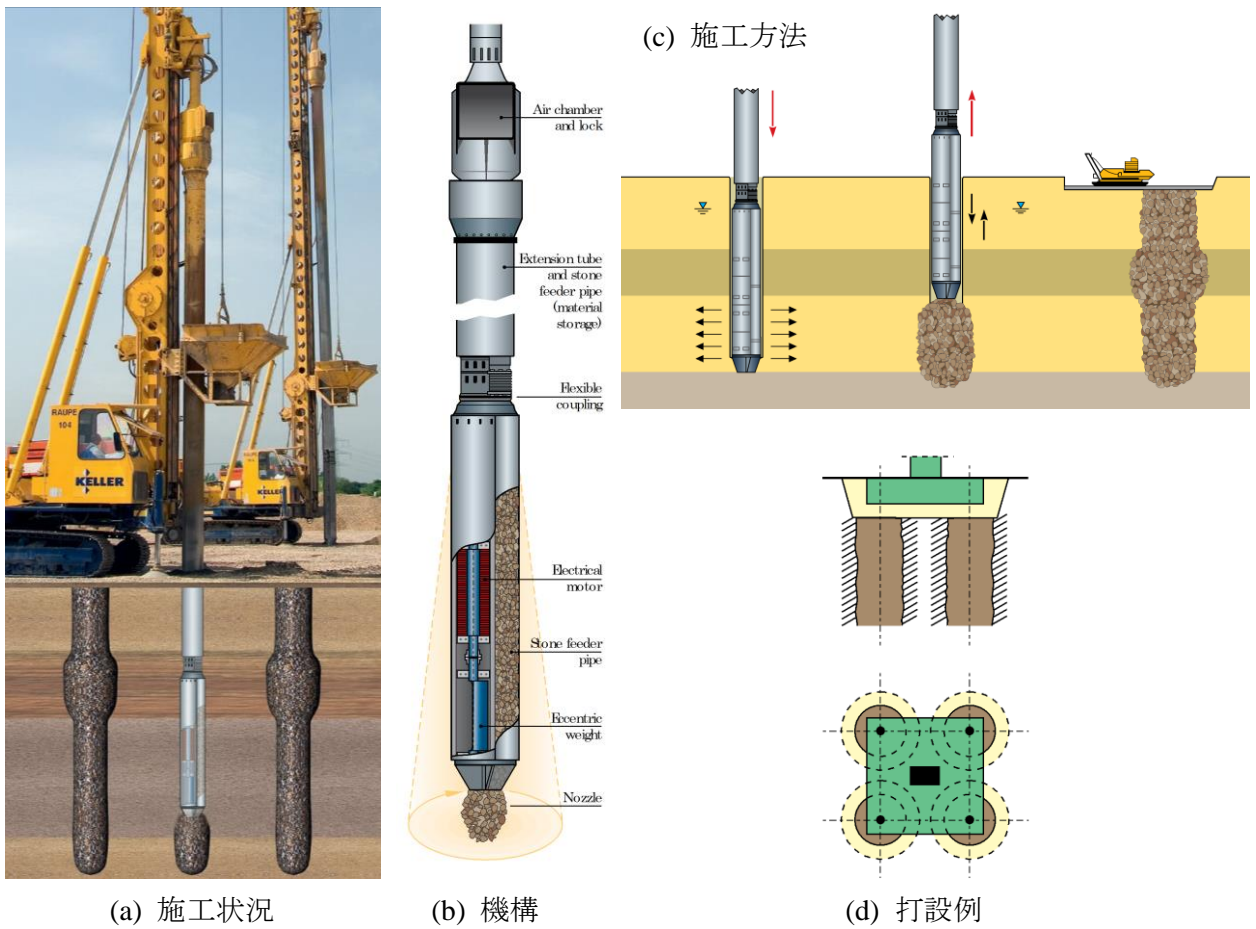


図-2.12 ストーンコラム工法の概要¹⁵⁾

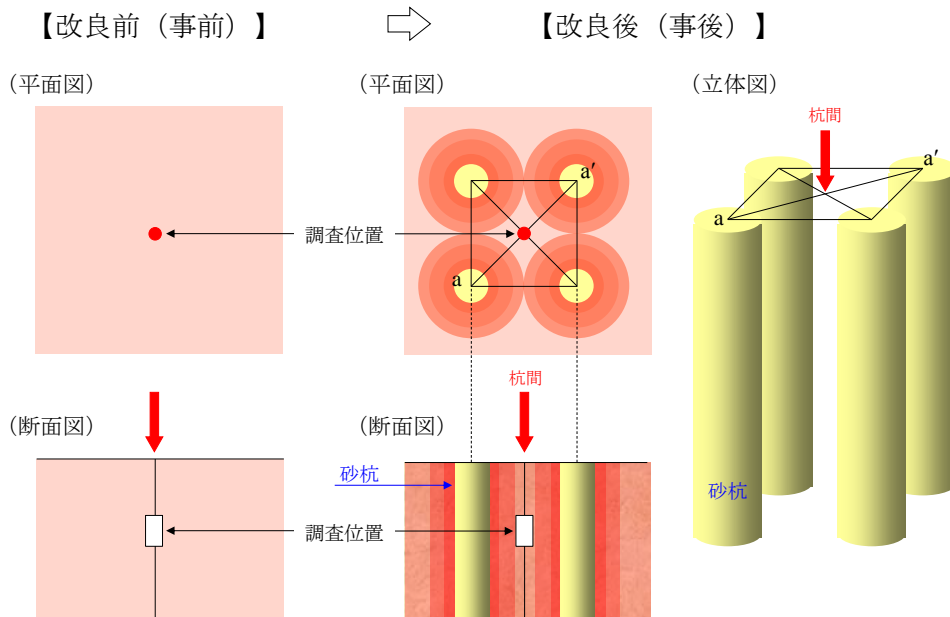
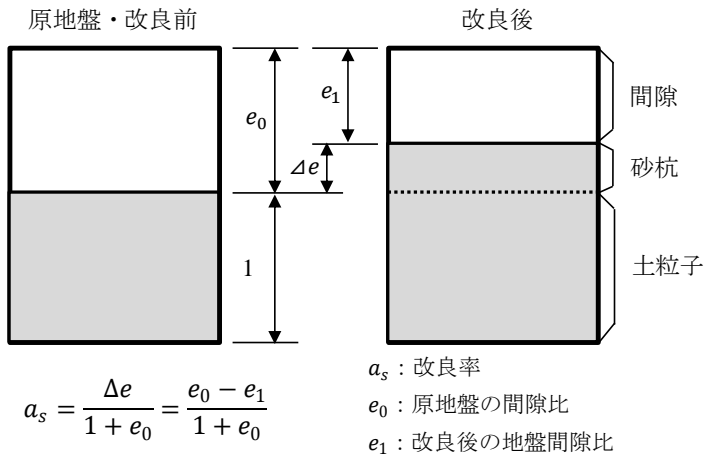
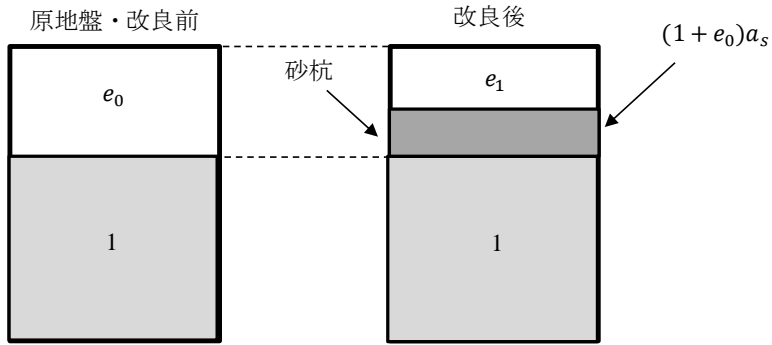


図-2.13 SCP工法における改良効果の確認位置

(a) 基本的な考え方



(b) 方法Cの考え方



(c) 方法Dの考え方

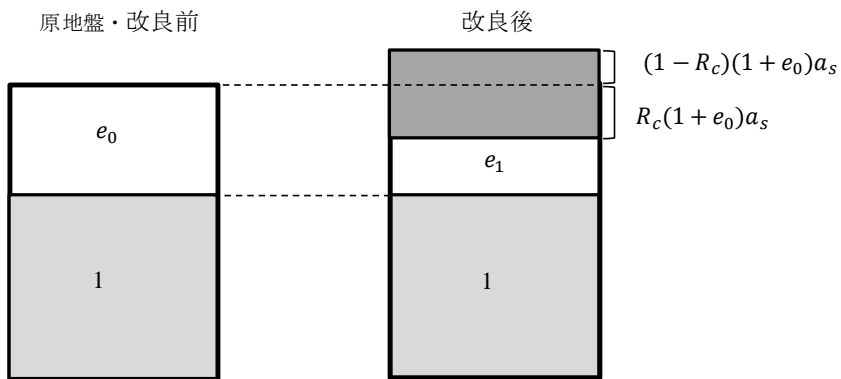


図-2.14 SCP工法の設計の考え方¹⁶⁾

われている。すなわち、**図-2.13**に示すように改良後（事後）の N 値は砂杭間の対角位置で計測され、改良前（事前）の N 値からの増加 N 値を改良効果とみなす。

SCP 工法により砂質土地盤を改良した場合の基本的な設計の考え方は、**図-2.14(a)**に示すように改良前の原地盤の間隙比 e_0 に対して砂杭分の体積 Δe を加えることにより間隙比が e_1 に減少すること、つまり、密度増加するということである。設計法は、**図-2.3**に示したように、古くは実績に基づく簡易設計である「方法 A」、 N 値と相対密度 (relative density, 以下、 D_r) と間隙比 (void ratio, 以下、 e) の関係を用いた設計法である「方法 B」も用いていたが、これらは F_c の小さい砂が対象となり適用地盤が限られていたため、 F_c の影響を考慮できる設計法である「方法 C」が提案された (**図-2.14(b)**参照)。この方法は、 F_c による N 値の増加効果の低減率 β を F_c との関係式で定義しており、 N 値と D_r と e の関係に Meyerhof の式、最大間隙比 e_{max} と最小間隙比 e_{min} の推定に平間の実験式を用いている。「方法 C」においても砂杭の圧入がすべて密度増加に寄与するものとして設計しているが、実際には砂杭打設による盛上りや水平変位などにより密度増加をロスするため、「方法 D」では、これらを考慮した有効締固め係数 R_c を導入して F_c と関連付けて提案された (**図-2.14(c)**参照)。この方法が締固め効果やメカニズムを最も忠実に再現しているとされ、現在では頻繁に用いられており、SCP 工法における設計法の主流となっている。

2.3 SCP 工法の改良地盤の評価に関する既往の研究¹⁷⁾

SCP 工法についての 1960 年代からの研究の系譜と変遷を**図-2.15**に示している。**図-2.3**に示した地盤工学的課題の変遷にみるように研究初期には SCP 工法が軟弱粘性土地盤を対象とすることがほとんどであったために、粘性土地盤と砂杭で構成される、いわゆる複合地盤に関する研究が多くを占めている。1964 年新潟地震においては、SCP 工法の類似工法であるバイブロフローテーションによる液状化対策効果が報告されたが、SCP 工法としての砂質土の液状化に対する改良効果が初めて学術的に示されたのは Ishihara らによる 1978 年宮城県沖地震における石巻のタンクの直接基礎改良についての

ものであろう。その後、1995年兵庫県南部地震において神戸沖の2つの人工島において、SCP工法を含む締固め工法が烈震に効果を発揮した要因についての解明と分析が進んだことが図よりわかる。

以下より、SCP工法による砂質土地盤に対しての締固め改良地盤の評価にあたっての留意点と改良効果に関する既往の研究について述べる。

年代	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代
地震		▼'64 新潟	▼'78 宮城県沖	▼'83 日本海中部	
SCPの変遷	設計		▼'66 方法B ▼'71 方法A	▼'87 方法D	
	施工	▼'56 パーカッション ▼'59 エア	▼'60 バイプロ	▼'70 砂面計	▼'90 高周波バイプロ
研究 (技術課題) の変遷	粘性土地盤	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>支持力・安定性</p> <p>[京大：原理，支持力] [名大：支持力]</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>圧密沈下・変形</p> <p>[京大：変形] [東大：変形] [広大：圧密、応力集中] [名大：応力分担比]</p> <p>[不動：応力分担比，沈下，解析] [愛媛大：応力分布]</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>施工に関する問題</p> <p>[京大：原理] [運輸：強度回復] [早大：強度増加、圧密]</p> <p>[不動：適用，置換]</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>設計法</p> <p>[京大：原理，安定計算] [中大：破壊防止設計] [運輸：円弧すべり]</p> <p>[不動：支持力，円弧すべり，安全率計算，防止効果，実用設計]</p> </div>			
	砂質土地盤	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>設計法</p> <p>[不動：原理，チャート]</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>→ [不動：方法A～C]</p> </div>			

図-2.15(a) SCP工法についての研究の系譜(1950-1980)¹⁷⁾を基に作成

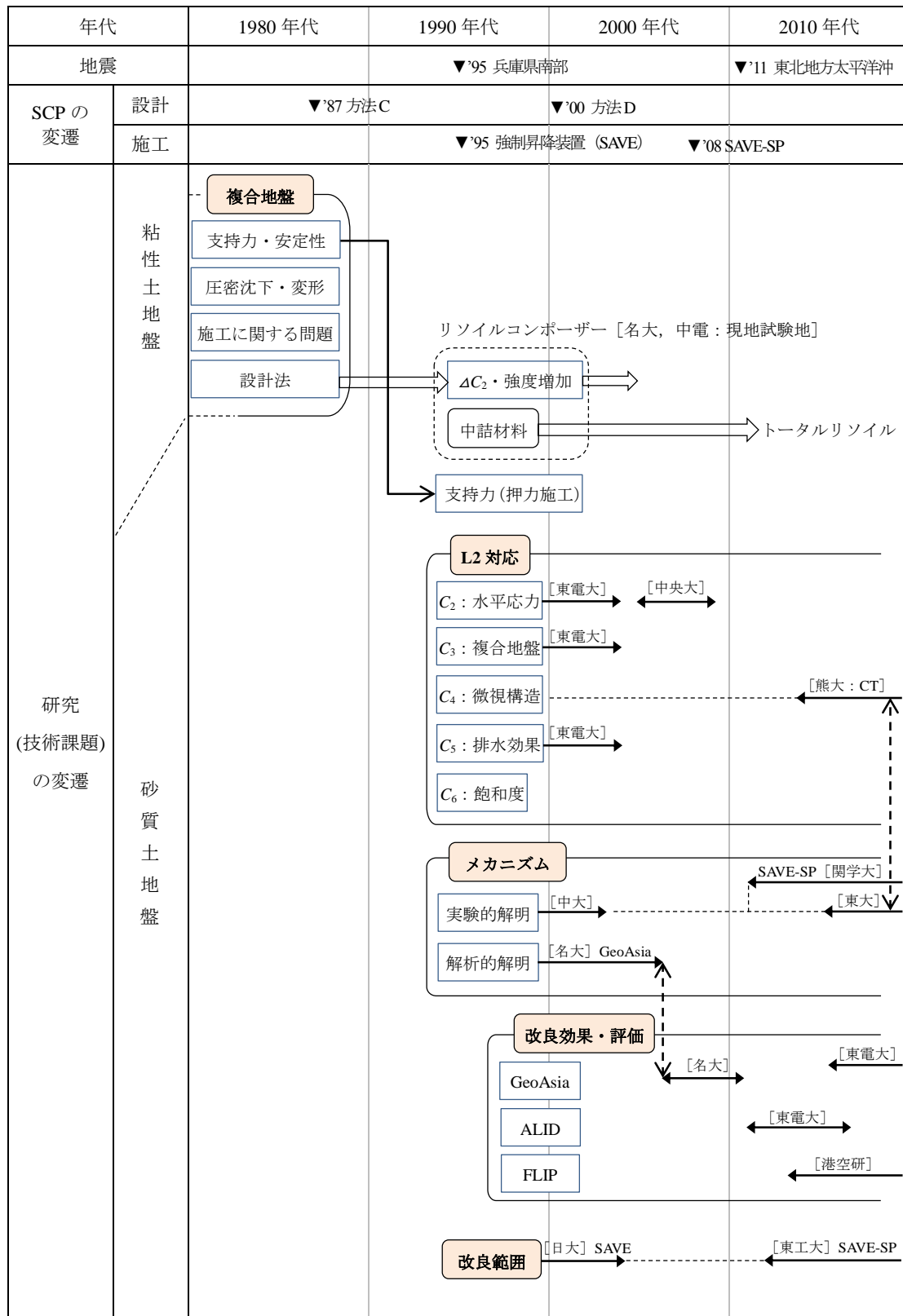


図-2.15(b) SCP 工法についての研究の系譜(1980-2020)

2.3.1 SCP 工法による改良地盤の評価にあたっての留意点¹⁸⁾

SCP 工法などの「圧入締固め」においては、砂杭造成により、砂杭周辺地盤の密度が増加するとともに水平応力も増加すると考えられている。その改良効果は、図-2.16 に示すように改良の前後で標準貫入試験などを実施して確認する。また、改良地盤の水平応力の増加については、孔内水平載荷試験を実施することで原地盤の静止土圧係数 (coefficient of earth pressure at rest, 以下、 K_0) の改良後における増加を確認できる。

地盤の液状化強度を推定する方法としては、

- ① N 値などの貫入抵抗値と液状化強度の関係式を用いる方法 (図-2.16 の①に示す関係)
- ② 不攪乱試料を採取して室内試験 (繰返し三軸試験など) より求める方法 (図-2.16 の②に示す関係)

がある。①の方法では標準貫入試験を実施すれば N 値と液状化強度が関係付けられ、その簡便性から一般によく用いられる。②の方法については、1990 年の道路橋示方書によれば、原位置での液状化強度 R (原位置動的せん断応力比) とチューブサンプリングによる室内での繰返し三軸試験から求められた液状化強度 R_L (繰返し三軸強度比) の関係は式(2.1)で示されており、この関係式を使って推定する。

$$R = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot R_L \cong R_L \quad (2.1)$$

ここに、 C_1 : 繰返し三軸と原位置の応力状態に関する補正係数

$$((1 + 2K_0) / 3 = 2/3 \because K_0 = 0.5)$$

C_2 : 地震荷重波形の不規則性に関する補正係数

$$(= 1/0.55 \sim 1/0.70 : \text{平均 } 1.62)$$

C_3, C_4 : サンプリングから試験までの試料の乱れと密実化に関する補正係数

$$(C_3 \times C_4 \cong 1.0)$$

C_5 : 地震動の水平面での二次元性に関する補正係数 (=0.9)

1996 年の「道路橋示方書」では、 N 値と R_L の関係はすべて凍結不攪乱試料による繰返し三軸試験結果より求められているので、②の方法によっても C_3 と C_4 の影響は考慮しなくてよかった。

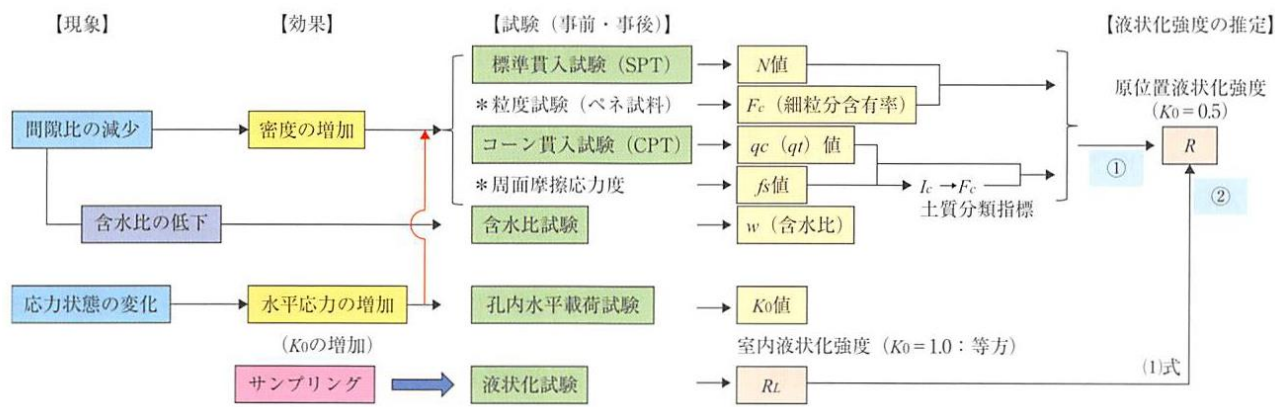


図-2.16 SCPによる改良地盤の事前・事後調査と液状化強度の推定¹⁸⁾

一方、改良地盤の液状化強度を①の方法で推定する場合には、 K_0 が仮定した0.5から増加しているにも拘わらず原地盤と同様の方法で液状化強度を推定しているのが現状であり、締固めによる改良地盤については、この点に留意する必要がある。

2.3.2 SCP工法の改良効果に関する既往の研究

SCP工法の改良効果に関して、「河川堤防の液状化対策の手引き」¹⁹⁾には以下の記述がある。

“1995年兵庫県南部地震では、締固めによる改良地盤において、設計で考慮していた震度よりも実際には大きな震度であったにもかかわらず、有意な沈下が生じていないことが報告されている。その後の研究により、その要因としては、圧入により側方拘束を高める効果や締固めた地盤よりもさらに高い液状化抵抗を有する砂杭の効果（複合地盤効果）などが実際には存在すると考えられている。また、工法によっては施工時に圧縮空気を使っていることから、飽和度が低下し、液状化抵抗が増す場合もある。このような設計で用いる密度増大以外の効果によって砂杭間地盤から得られる液状化強度よりも締固め改良地盤全体のものの方が大きいことがわかってきており、2011年東北地方太平洋沖地震においても同様な事実が検証されている。”

幾種かの締固め工法のうち、SCP工法などの「圧入締固め」における液状化強度の増加の要因としては、地盤状態の変化として捉えると、①密度増加、②水平応力の増加、

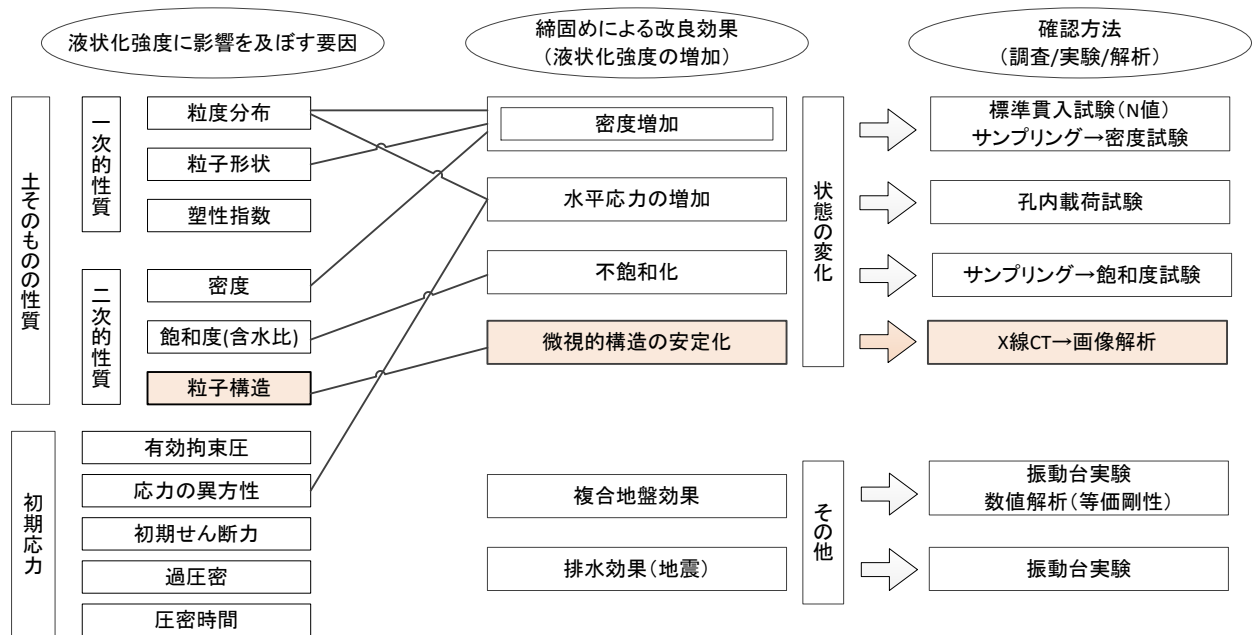


図-2.17 液状化強度に及ぼす影響と SCP による改良効果と確認方法 ²⁰⁾に加筆・修正

③微視構造の安定化, ④不飽和化が挙げられる。地盤の状態の変化以外の要因としては、砂杭の存在による「複合地盤効果」、砂杭の排水性を考慮した「地震時の排水効果」、杭間強度は最も弱い点であるとする「強度の分布」がある。一方、液状化強度に影響を及ぼす要因としては、「土そのものの性質」と「初期応力」に分けられ、前者には一次性質 (primary property) としての「粒度分布」、「粒子形状」などがあり、二次性質 (secondary property) としては「密度」、「粒子構造」、「飽和度 (含水比)」があるとされる。また、後者には「有効拘束圧」、「応力の異方性」などが含まれる。液状化対策としての SCP 工法による改良効果とその確認方法および関連する液状化強度に影響を及ぼす要因は、図-2.17 のように関係付けられる。

SCP 工法などの締固め工法について、「建築基礎のための地盤改良設計指針案」²¹⁾では、これまでの実測データや地震被害事例分析より、杭間強度のみで改良地盤を評価する従来の設計法では、改良後の地盤全体の平均的な液状化抵抗を過小評価している可能性を考慮し、通常評価される砂杭間の N 値から求まる液状化抵抗と締固め改良地盤全体の液状化抵抗の関係を、式(2.2)のように示し、設計では密度増加以外の効果について割増係数 C を乗じて複合地盤として定量的に評価する方法を提案している。ここでは、

基礎形式等に応じて 1.1～1.2 倍の割増しを乗じることが推奨されている。

$$R_{L(\text{複合地盤})} = C \cdot R_{L(\text{改良後杭間})} \quad (2.2)$$

ここに、 R_L : 液状化抵抗比

C : 割増係数

割増係数である C の内訳として地盤の状態変化に限れば、地盤の密度増加以外に、①水平有効応力の増加、②飽和度の低下、③繰返しせん断履歴による微視構造の変化が挙げられ、改良前後の地盤調査や土質試験で確認される。その他の改良効果としては、砂杭の存在を考慮した複合地盤効果や地震時の排水効果があり、これらの効果は振動台実験や数値解析により確認されている。原田ら²²⁾は、実地震における再現解析により、杭間で得られる N 値からの液状化強度は実際の SCP 工法による改良地盤の液状化強度を過小評価していると指摘している。このような締固めによる改良効果と液状化強度に影響を及ぼす要因との関係は図-2.17 に示されており、同図の改良効果の各項目について既往の研究について以下に整理する。

(1) 杭間の密度増加

図-2.17 に示したように、SCP 工法による改良効果としてまず挙げられるのがサウンディングによる N 値などの貫入抵抗値の増加であり、Meyerhof の式に代表される N 値と D_r の関係より、 N 値を D_r に換算することによって密度増加の程度を間接的に確認できる。この SCP 工法による密度増加を直接的にサンプリング試料により確認したものが末松ら²³⁾による図-2.18 に示した 2 例である。ここでは改良率 (improvement ratio, 以下、 a_s) が 13.3～15.0% (□1.6～1.7m ピッチ) で 20～40% 程度の D_r の増加効果が得られていることが分かる。図-2.19 は、密度検層により湿潤密度の増加を確認した事例²⁴⁾である。 a_s が大きいほど湿潤密度は大きくなっているが、事後の試料では含水比も低下しており、乾燥密度の増加はさらに大きなものとなる。これらの密度の増加は、 F_c に影響されることはよく知られているが、最近では均等係数 (uniformity coefficient, 以下、 U_c) や曲率係数 U_c' 、間隙比範囲などの F_c 以外の土の物性にも影響を受けることが知られるようになった。図-2.20 は三軸試験装置を改造して供試体内でバルーンを膨らませて周りの砂の密度増加を計測した実験結果²⁵⁾であり、 F_c や初期状態が同じであって

も U_c の相違により密度変化が異なっていることを示すものである。一方、中空ねじりせん断試験装置を使って SCP 工法の施工（貫入・造成過程）を模擬した実験結果²⁶⁾を示したものが図-2.21 である。図-2.20 と同様に、初期状態が同じでもその後の D_r の増加は、 U_c の相違により 10~30% 程度も異なることが分かる。

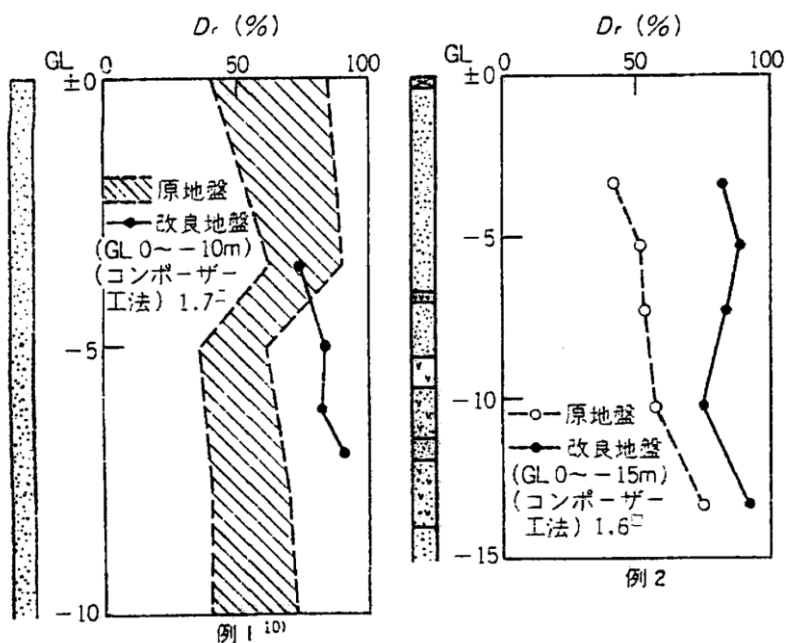


図-2.18 サンプルング試料による相対密度の増加²³⁾

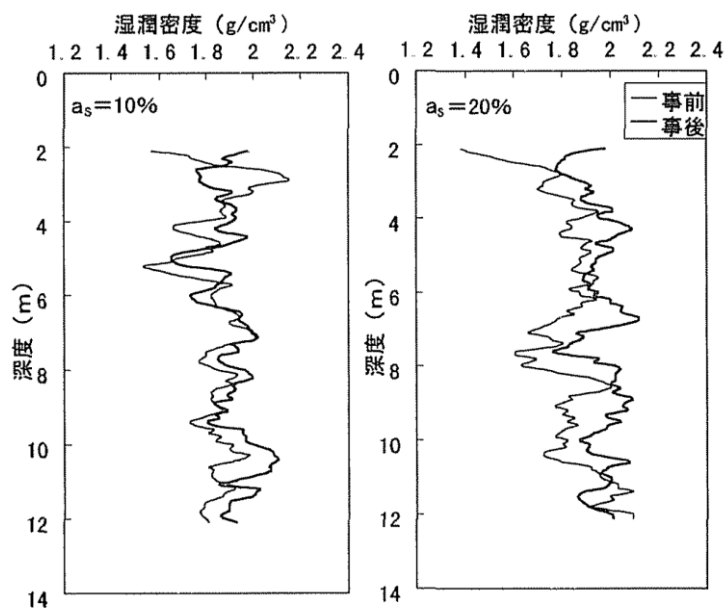


図-2.19 密度検層による湿潤密度の増加²⁴⁾

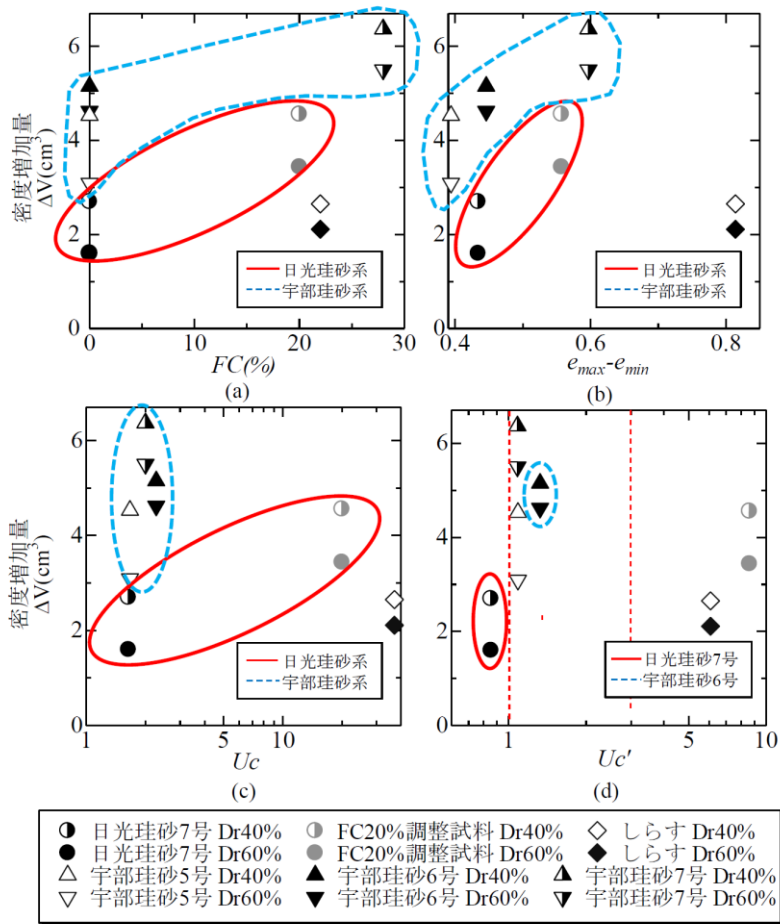


図-2.20 均等係数と増加相対密度の関係（三軸試験装置）²⁵⁾

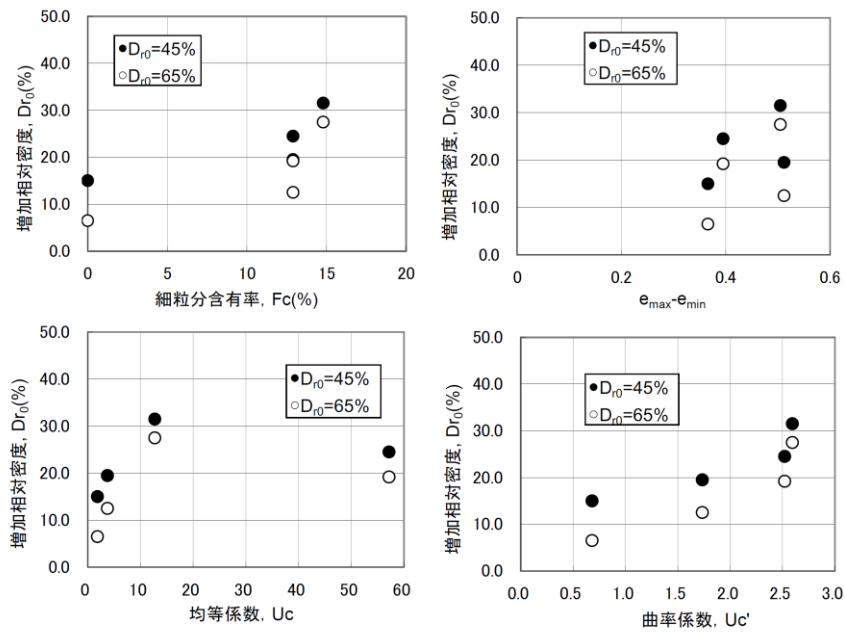


図-2.21 均等係数と増加相対密度の関係（中空ねじりせん断装置）²⁶⁾

(2) 水平応力の増加

Ishihara et al.²⁷⁾は、中空ねじりせん断試験において、等方状態 ($K_0=1.0$) 時の液状化試験と $K_0=0.5, 1.5$ の異方状態時の液状化強度には、式(2.3)の関係があることを示した。(図-2.22 参照) これにより室内試験レベルで K_0 増加による液状化強度の増加が示された。

$$\left(\frac{\tau_\ell}{\sigma_v'}\right)_{\text{異方}} = \frac{1+2K_0}{3} \left(\frac{\tau_\ell}{\sigma_v'}\right)_{\text{等方}} \quad (2.3)$$

また、現地における SCP 打設時の地盤中の水平応力増加による K_0 増加は、末松ら²³⁾により図-2.23 のように 2 現場で示されている。木村ら^{28),29)}は、現地において a_s と K_0 の関係、ならびに長期にわたって K_0 が維持されること確認し、それぞれ図-2.24 と図-2.25 で示し、設計的な検討を行っている。このように、SCP 工法による改良地盤の液状化強度は密度増加によるものに付加して評価すべきといった議論がなされたが、SCP 工法による改良地盤の N 値の増加には密度増加によるものと K_0 増加によるものが含まれているという、いわゆるダブルカウントの問題が残された。Harada et al.³⁰⁾は、この問題について、土層実験と中空ねじり試験により、図-2.26 に示す換算 N 値と液状化強度の関係の推奨図を提案した。同図によれば、改良前の地盤に比べて SCP 工法により K_0 が増加した改良地盤においては、同じ N 値であっても K_0 が増加した地盤の方が液状化強度は大きいことを示し、現在の設計では SCP 工法による改良地盤を過小評価しているとした。

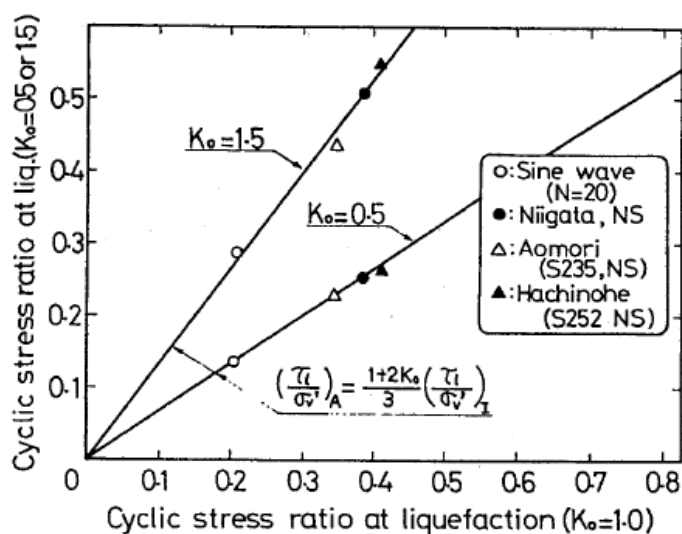


図-2.22 液状化強度と K_0 の関係²⁷⁾

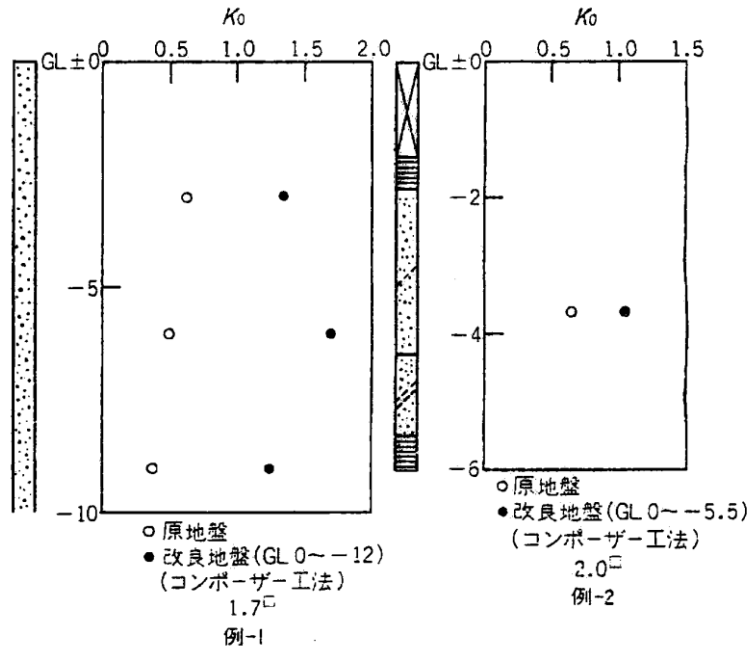


図-2.23 SCP 施工現場における K_0 測定事例²³⁾

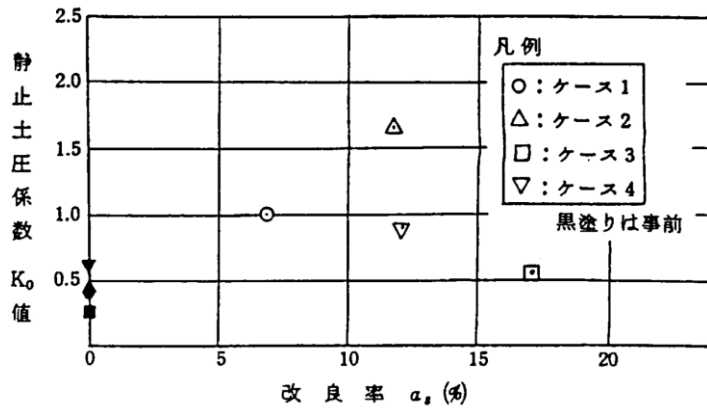


図-2.24 改良率 a_s と K_0 の関係²⁸⁾

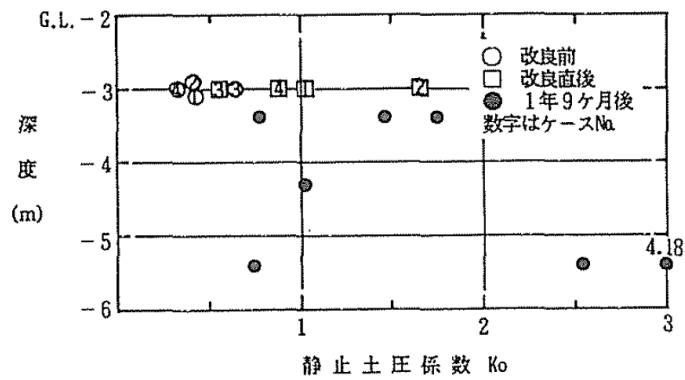


図-2.25 長期的な K_0 の測定事例²⁹⁾

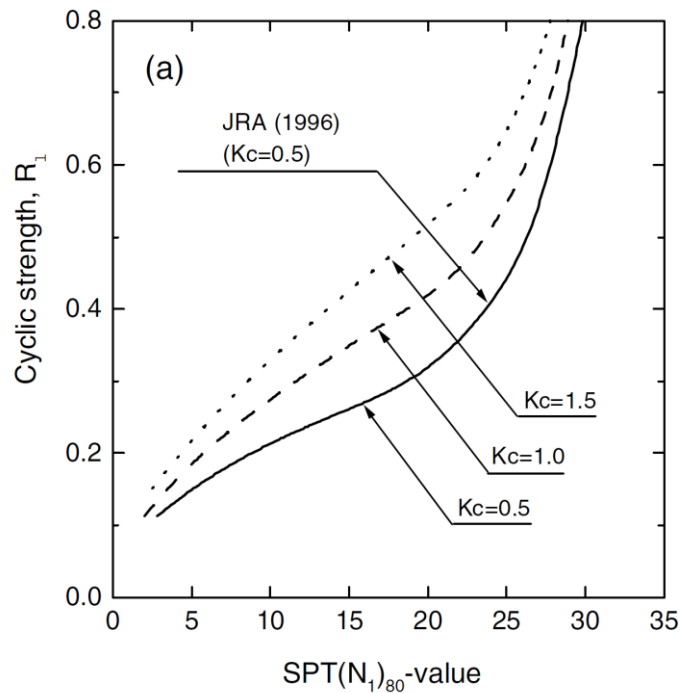


図-2.26 換算 N 値と液状化強度の関係³⁰⁾

(3) 不飽和化

液状化強度に飽和度 (degree of saturation, 以下, S_r) が影響することは, 1978 年に米国で Chaney³¹⁾が図-2.27 に示す S_r と液状化回数 の関係において初めて確認された。我が国においては, 1989 年に Yoshimi et al.³²⁾により液状化強度と S_r の関係が図-2.28 のとおり示されている。これによると S_r が 80%程度に低下すると液状化強度は 2 倍以上に増加することがわかる。SCP 工法の砂杭造成過程では, 砂の排出や周辺地盤の逆流防止のために圧縮空気を使用する。このため地中に空気が残留し, 地盤の S_r が低下するものと考えられている。Okamura et al.³³⁾は, SCP 工法で施工された現場における凍結サンプリング試料の液状化強度を報告している。その調査結果では, 図-2.29 のとおり砂杭間の S_r が 70~90%程度に低下していることを示した。岡村ら³⁴⁾は, 地盤の S_r が液状化強度に大きな影響を及ぼすことについて言及し, SCP 工法による改良効果について地盤の密度増加だけでなく地盤の S_r も考慮して液状化強度を評価することが合理的であると述べている。

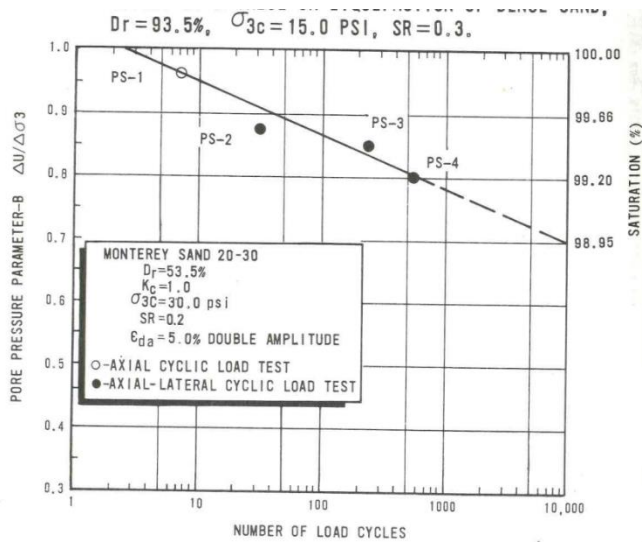


図-2.27 S_r と液状化回数の関係³¹⁾

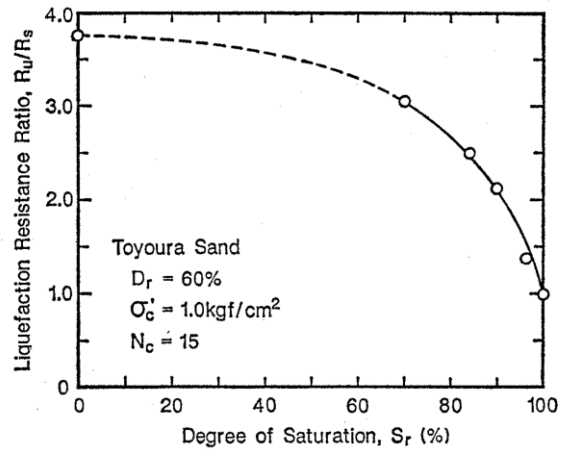


図-2.28 S_r と液状化強度の関係³²⁾

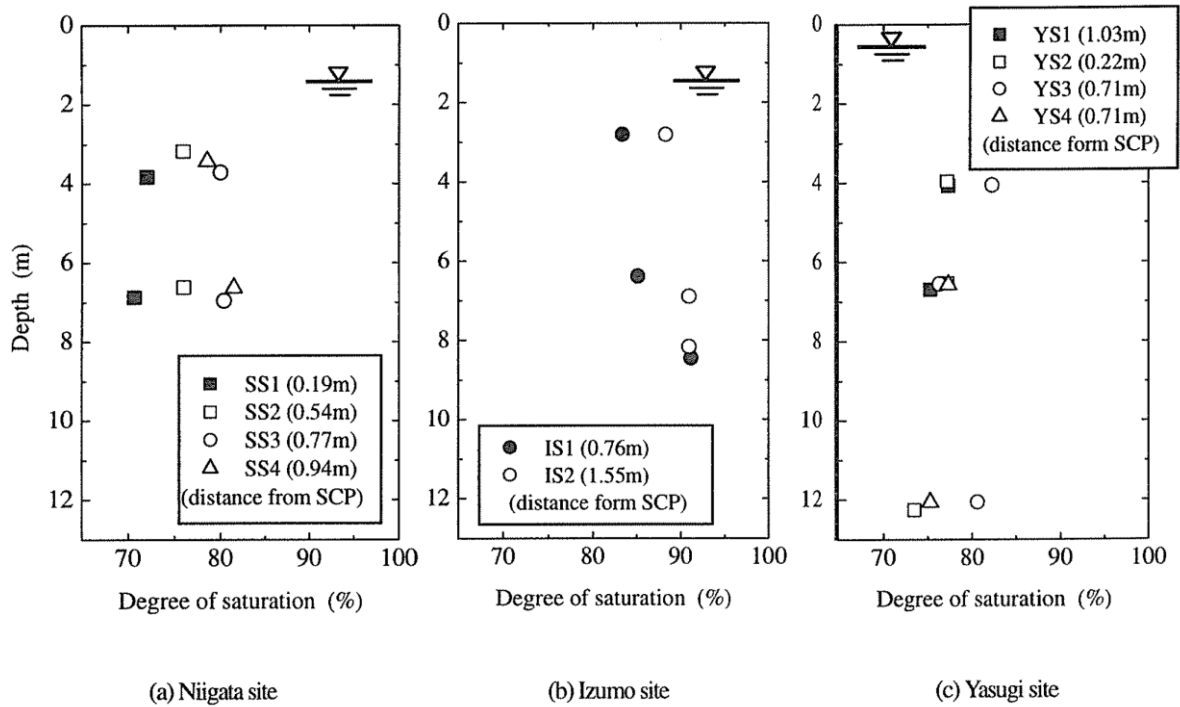


図-2.29 SCP 施工現場における S_r の測定事例³³⁾

(4) 微視構造の安定化

吉見³⁵⁾は、砂の液状化抵抗は、①密度が高いほど、②有効応力が高いほど、③微視構造が安定しているほど高くなることを挙げ、SCP 工法は①～③の要因にすべて関与する

ことにより液状化抵抗を増大させると指摘している。このうち、③の「微視構造の安定化」については、数パーセントにも及ぶような「大ひずみ」の繰返しせん断履歴を受けた砂ではその強度を劣化（液状化現象）させるが、「小ひずみ」の繰返しせん断履歴を受けた砂では、Seed et al.³⁶⁾による実験結果である図-2.30に示すように大きく増加することより導かれたと考えられる。すなわち、SCP工法も打設手順は図-2.11(a)に示したように、ケーシングパイプの貫入と砂杭造成の過程において杭間の土要素は何度も繰返しせん断履歴を受けることで微視構造の安定化が図られるということである。さらにTatsuoka et al.³⁷⁾は、図-2.31に示すように、試料の作製方法により同じ D_r であっても液状化強度は大きく異なることを示している。

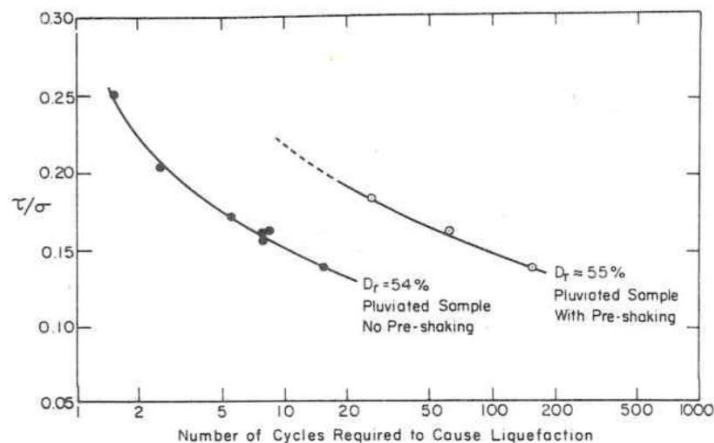


図-2.30 小ひずみ履歴が液状化強度に及ぼす影響³⁶⁾

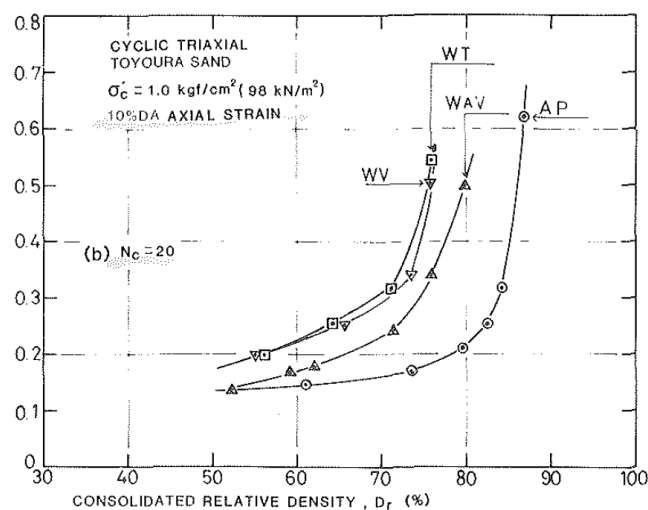
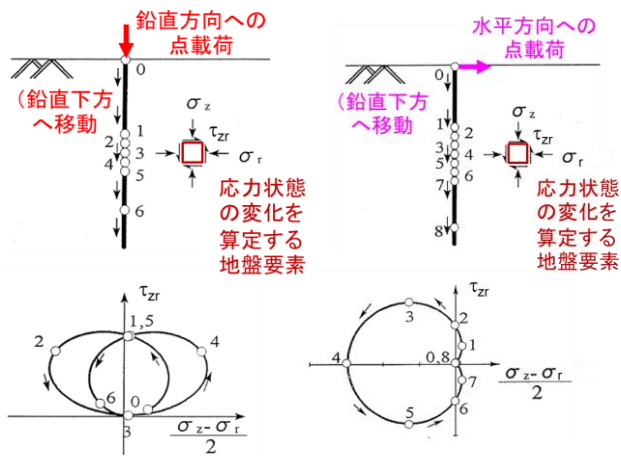
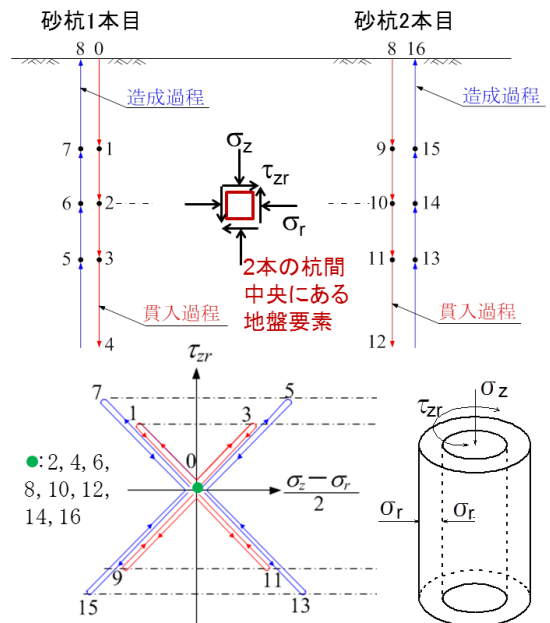


図-2.31 試料作製方法による液状化強度の相違³⁷⁾

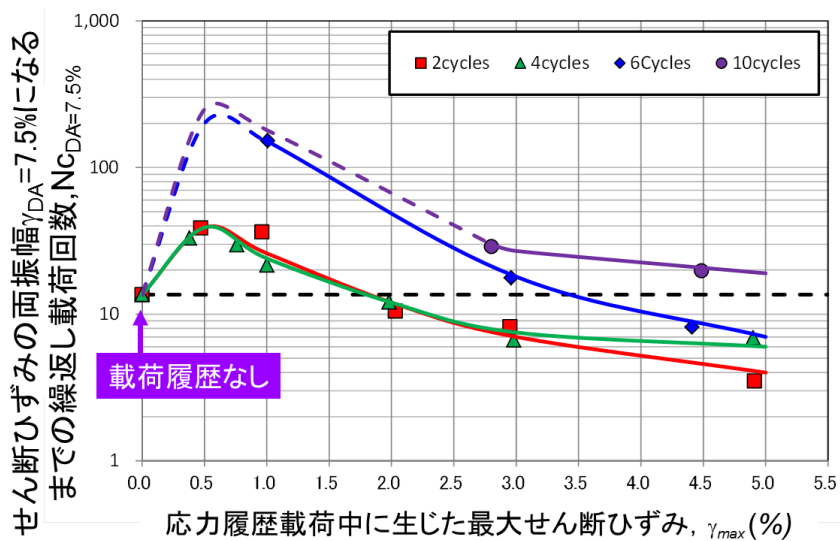


(a) 地盤中での鉛直・水平方向への点荷重載荷時の弾性解による応力変化



(b) 砂杭施工を模擬した空中ねじり

試験の応力履歴設定例



(c) 異なるサイクル数とせん断ひずみの履歴を与えた後の中空ねじりせん断試験結果

図-2.32 液状化強度特性に及ぼす繰返しせん断履歴の影響³⁸⁾

古関³⁸⁾は、図-2.32(a), (b)に示す SCP 施工時（貫入・造成過程）の応力経路を模擬した中空ねじりせん断試験結果を実施し、SCP 工法による液状化強度の増加の要因について「密度増加」や「水平応力の増加」に加えて“施工時のせん断履歴により、その後の繰返しせん断に強い土粒子構造が形成される。”とした。これは、吉見が指摘した①～

③の SCP 改良地盤の強度特性に対応しており、図-2. 32(c)からも明らかなように、同等の D_r であっても応力履歴がない場合よりもより多くのサイクルで応力履歴を与えた場合の方が液状化強度は大きなものとなる。

(5) その他

地盤の状態変化に関わらない改良効果としては、砂杭の剛性を考慮した「複合地盤効果」と地震時に発生する過剰間隙水圧の排水を促す「排水効果」がある。

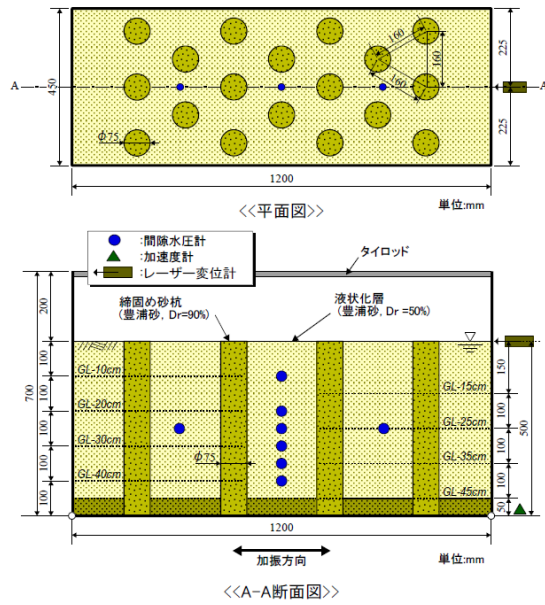
このうち、「複合地盤効果」に関する実験的な研究としては、安田ら^{39),40)}による複数の砂杭を模型地盤内に配置した振動台実験（図-2. 33(a)参照）が挙げられ、図-2. 33(b)に示すように砂杭配置を幾種類か変えることにより過剰間隙水圧の抑制効果が向上することを示している。解析的な検討を行った例としては、佐藤ら⁴¹⁾による均質化法を用いた地震応答解析が挙げられ、図-2. 34(a)に示すような砂杭も含めた砂杭周辺の地盤の剛性を均質化して解析することによる液状化指数 P_L の減少（図-2. 34(b)の□→■）が改良効果として確認されている。

「排水効果」については、Maegawa et al.^{40),42)}が模型実験（図-2. 35(a)参照）において礫杭（グラベルドレーン）の存在による排水、非排水の条件を変えた振動台実験を実施し、その排水効果を図-2. 35(b)に示すとおり確認している。

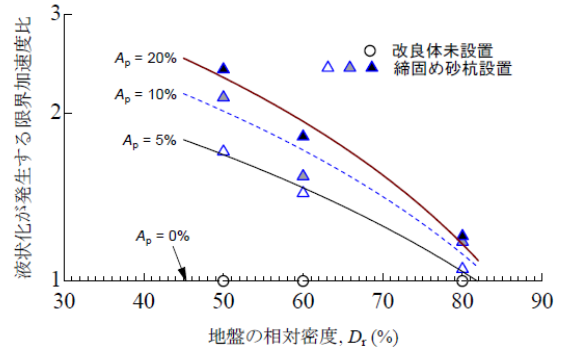
前述したように、SCP 工法による改良効果としては、地盤状態の変化に関わるものとして「密度増加」、「水平応力の増加」、「不飽和化」、「微視的構造の安定化」がある。「微視的構造の安定化」以外は地盤調査や試験により確認され、定量的な評価がなされているが、一方で微視的構造の安定化については現位置で直接的に確認することは困難であるが、古関らの実験結果により、同じ密度であっても小さな繰返しせん断履歴があるほど液状化強度は大きいことが示され、しかもそのサイクルが多いほどさらなる液状化強度の増加が期待できる。このサイクルは、SCP 工法の施工における引抜きと打戻しのサイクルが多いことに相当し、これを地表まで何度も繰返しながらか杭を造成することで効率的で有効性の高い締固めを実現しているものと考えられる。

そこで、次章以降では SCP 工法の施工を模擬した模型実験を行い、造成された砂杭周辺地盤の挙動を詳細に調べることを目的として X 線 CT を適用し、締固め改良地盤の

微視構造に着目した検討を行う。

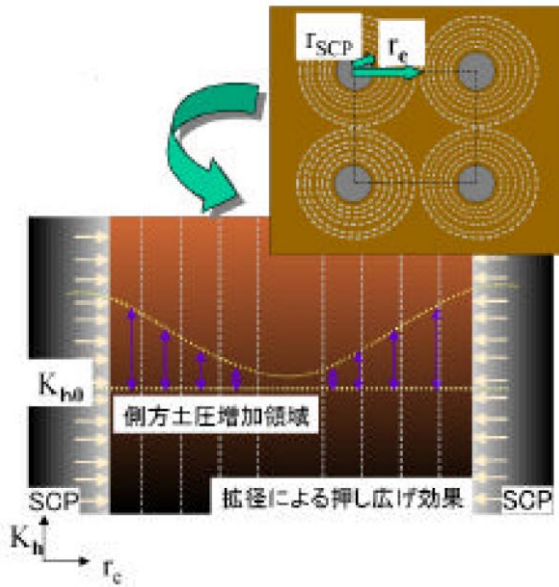


(a) 模型実験概要

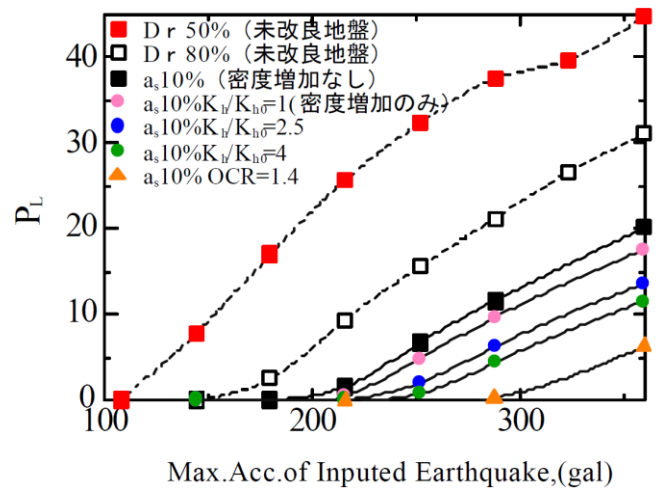


(b) 砂杭間地盤の相対密度と
限界加速度比の関係

図-2.33 砂杭配置による複合地盤効果に関する模型実験結果^{39),40)}

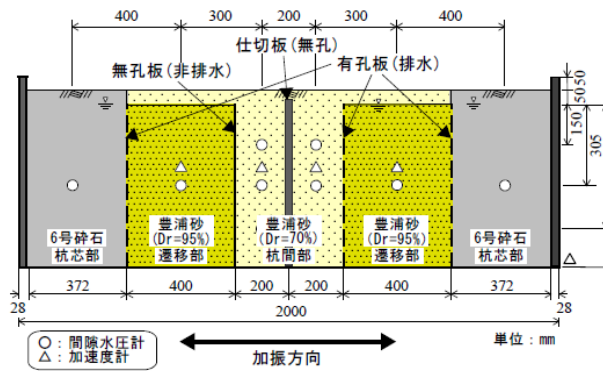


(a) 締固め砂杭と周辺地盤の改良効果

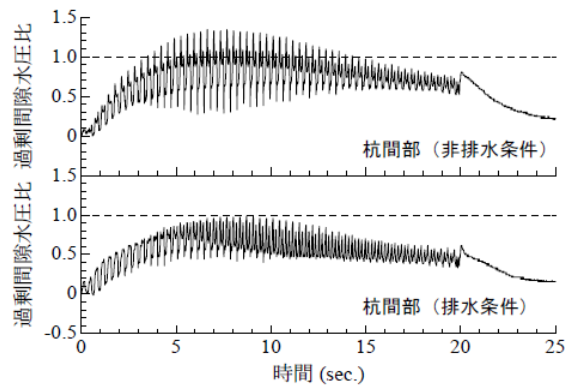


(b) 未改良地盤と改良地盤の
最大加速度と P_L 値の比較

図-2.34 均質化法を用いた締固め改良地盤の地震応答解析結果



(a) 模型実験概要



(b) 排水条件の違いによる杭間地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴

図-2.35 礫杭による排水効果に関する模型実験結果^{40),42)}

2.4 まとめ

本章では、研究対象である SCP 工法の改良原理と設計、施工、材料の変遷について述べるとともに、砂質土の締固めとしての SCP 工法の現状と設計方法について整理した。さらに、SCP 工法による改良地盤の評価にあたっての留意点と改良効果に関する既往の研究について概観した。

以下に得られた知見を列挙する。

- i) SCP 工法は砂質土を対象とした場合の液状化対策として国内では最も実績が多く、その改良効果も認められており、時代のニーズにも対応して進化してきたが、さらなる設計法や施工法の高度化や海外においても幅広く活用されることが期待される。
- ii) 地盤工学的課題が粘性土の安定、沈下問題から砂質土の液状化問題へ移行していることに対応して、SCP 工法における研究対象も砂質土に関するものが主流となってきているが、締固め改良地盤の微視構造についてはその計測の難しさもあって未解明な部分が多く残されており、定量化がなされていない。

- iii) SCP 工法の締固めによる改良効果は、地盤の状態変化として捉えると、密度増加、水平応力の増加、不飽和化、微視構造の安定化が挙げられる。密度増加、水平応力の増加、不飽和化については地盤調査や試験により確認できるが、微視構造の安定化に関しては現位置での直接的な計測は困難であるため、X線 CT を用いた定量的な評価が期待される。

参考文献

- 1) 山本実：液状化対策工法の動向と課題－土質試験・調査の新しい視点から－，地質と調査，第3号，小特集「軟弱地盤対策と地盤調査」，pp.9-16, 1997.
- 2) 大林淳，原田健二，村上恵洋，鈴木亮彦：サンドコンパクションパイル工法（締固め砂杭）工法の歴史と新技術，地盤工学会誌，Vol.63, No.8, pp.16-19, 2015.
- 3) Ezoë, A., Harada, K. and Otani, J.: Sand Compaction Pile Method and Its Applications, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, pp.1-10, 2019. (Published online)
- 4) Ezoë, A., Harada, K., Ohbayashi, J. and Otani, J.: Application Technology of Granule Body as Infilling Material for Ground Improvement, *2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials*, pp.15-19, 2017.
- 5) 浅田素之，永島三雄，久富浩介，松井淳：PS 灰を利用したリサイクル材のサンドコンパクションパイル工法への適用，土木学会第 62 回年次学術講演会，Ⅲ-401, pp.2221-2222, 2008.
- 6) 久保陽太郎，江副哲，東畑郁生：不燃性廃棄物と焼却灰および一般土質材料を組合せた複合地盤におけるクリープ特性に関する実験的研究，第 8 回環境地盤工学シンポジウム，pp.351-358, 2009.
- 7) 江副哲，東畑郁生：締固め焼却灰杭による不燃性廃棄物地盤の強化に関する大型三軸実験，第 43 回地盤工学研究発表会，pp.2221-2222, 2008.
- 8) 神谷秀孝，北詰昌樹，古関潤一：ガラス造粒砂を使用したサンドコンパクション工法の施工（山砂との比較），第 44 回地盤工学研究発表会，pp.385-386, 2009.
- 9) 原田健二，石川敬祐，安田進，金井勇介，出野智之：液状化強度に及ぼす要因と対策の設計に関するエネルギー的な視点からの考察，エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム委員会活動報告書及びシンポジウム論文集，pp.345-352, 2019.

- 10) 地盤工学会関東支部：造成宅地の耐震対策に関する検討委員会報告書－液状化から戸建て住宅を守るための手引き－， pp.85, 2013.
- 11) Ezoe, A., Harada, K., Nozu, M. and Otani, J.: Construction Technology and Improvement Effectiveness of Sand Compaction Pile Method as Countermeasure, *2The 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, JS-Tainan*, pp.165-170, 2016.
- 12) 成川匡文，大島豊，山内一秀，石川泰，宮崎祐助，石井雄輔，清広歳，鳥井原誠：先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による地盤の締固め効果，建築基礎の設計施工に関する研究資料5 シンポジウム論文集，実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題，日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会， pp.87-92, 1999.
- 13) 村田拓海，沼田淳紀，三輪滋，原忠，坂部晃子，三村佳織：丸太打設液状化対策の実施工位置におけるサウンディング試験，第53回地盤工学研究発表会，pp.1819-1820, 2015.
- 14) 原田健二，大林淳，矢部浩史：貫入/造成を伴う締固め工法の密度増大のメカニズムと改良効果についての考察，第12回地盤改良シンポジウム論文集， pp.235-242, 2016.
- 15) Keller Holding GmbH：Deep Vibro Techniques（ストーンコラム工法パンフレット），
[<https://www.kellerholding.com/>]
- 16) 地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法 設計・施工マニュアル，第3章 砂質地盤を対象とする計画，設計，施工， pp.96-102, 2009.
- 17) 土質工学会：複合地盤の強度および変形に関するシンポジウム発表論文集，1984.
- 18) 原田健二，伊藤竹史，山下勝司：締固めによる改良効果の評価に関する課題と対応事例，基礎工 特集－改良地盤の活用と評価－， Vol.46, No.11, pp.43-46, 2018.
- 19) 土木研究所：土木研究所資料 河川堤防の液状化対策の手引き，第5章 締固め工法の諸元設定，5.2節 対策の原理と工法の選定， pp34-35, 2016.
- 20) 江副哲，原田健二，矢部浩史，出野智之，日下部真祐：粒子構造と粒子形状が液状化強度と損失エネルギーに及ぼす影響－SCP 工法の改良効果の視点から－，年次大会「日本地震工学会・大会－2019」， P1-14, pp.1-10, 2019.
- 21) 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，第Ⅱ編 締固め工法編 第

- 4章 液状化対策としての設計, pp313-342, 2006.
- 22) Harada, K., Ezoe, A., Yasuda, S., Ishikawa, K., Ohbayashi, J. and Nagai, S.: Evaluation of ground improved by compaction based on simulation analysis, *The 7th Technical Conference in Eastern Asia on Geo-Natural Disasters(7TCEAGND)*, pp.55-60, 2018.
- 23) 末松直幹, 竹原有二: 基礎のための地盤改良工法, 特集・構造物基礎の耐震, 橋梁と基礎, 77-12, 1977.
- 24) 山本実, 原田健二, 野津光夫, 大林淳: 砂杭圧入による密度増加の評価について, 第32回地盤工学会研究発表会, pp.2631-2632, 1997.
- 25) 安田悟, 大林淳, 原田健二, 竹内秀克, 規矩大義, 山口恵美, 石渡洗希, 相馬佳奈美: 圧入による密度増加に物理特性が及ぼす影響, 第49回地盤工学会研究発表会, pp.1593-1594, 2014.
- 26) 原田健二, 大林淳, 矢部浩史: 締固め工法の密度増加のメカニズムと改良効果に関する考察, 第14回日本地震工学シンポジウム, pp.2403-2412, 2014.
- 27) Ishihara, K., Iwamoto, S., Yasuda, S. and Takatsu, H.: Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, *Proc. of the 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.11-15, 1977.
- 28) 木村保, 奥村一郎, 三沢久詩, 川鍋修: コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について, 第21回土質工学研究発表会, pp.1863-1866, 1986.
- 29) 木村保, 塩田圭介, 三沢久詩, 川鍋修: コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について (その2), 第22回土質工学研究発表会, pp.1795-1796, 1987.
- 30) Harada, K., Ishihara, K. Orense, R. P. and Mukai, J.: Relations between penetration resistance and cyclic strength to liquefaction as affected by K_c -conditions. *Proc, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Sacramento CA*, Paper 111, 2008. (in CD-ROM).
- 31) Chaney, R. C.: Saturation Effects on the Cyclic Strength of Sands, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics, GED, ASCE, GT78*, pp.342-358, 1978.
- 32) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K.: Liquefaction Resistance of a Partially Saturated Sand, *Soils & Foundations*, 29 (3), 157-162, 1989.

- 33) Okamura, K., Ishihara, M. and Oshita, T. : Liquefaction resistance of sand deposit improved with sand compaction piles, *Soils & Foundation.*, 43 (5), 175-187, 2003.
- 34) 岡村未対, 石原雅規, 田村敬一 : SCP で改良された砂質土地盤の 26 年後の飽和度, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.2027-2028, 2003.
- 35) 吉見吉昭 : 「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準, 土と基礎, 38-5, pp.33-38, 1990.
- 36) Seed, H. B., K. Mori and C. K. Chan: Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands, *J. GED, ASCE*, Vol. 103, No. GT4, pp.257-270, 1977.
- 37) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii S. : Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsion Shear Tests, *Bulletin of ERS, No. 17, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo*, pp.29-61, 1984.
- 38) 古関潤一 : 締固め砂杭の施工が液状化強度特性に及ぼす影響に関する最近の知見, 基礎工, Vol.46, p2-5, 2018.
- 39) 安田進, 原田健二, 田中智宏, 内山純一, 小津裕介, 西川耕司 : 複合地盤における液状化発生軽減効果に関する実験, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.1939-1940, 2004.
- 40) 田中智宏, 安田進, 原田健二, 丹羽俊輔, 内山純一 : レベル 2 地震動下における締固め砂杭および碎石ドレーン工法の有効性に関する検討, 第 28 回土木学会地震工学論文集, pp.1-8, 2005.
- 41) 佐藤友美, 桑原直範, 前田健一 : 締固め砂杭による液状化対策地盤の均質化応答解析と液状化特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-089, pp.177-178, 2002.
- 42) Maegawa, F., Yasuda, S., Arai, D., Fukui, Y. and Harada, K: Effectiveness of compaction of compaction piles method as a measure against liquefaction under intense shaking, *Proc. of the Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 15th ICSMGE*, pp.357-362, 2001.

第3章 X線CTの概要と現状

本研究の主目的である地盤内部構造の微視的観察を行う上で中心的な役割を果たす計測装置が μ フォーカスX線CTスキャナ(Micro-focus X-ray CT Scanner, 以降, μ XCT)である^{1)~3)}。熊本大学が所有する東芝製の μ XCTは、スキャンテーブルの位置変更によって撮影範囲を変えることが可能であり、空間分解能の高い拡大撮影を行うことで、地盤材料の微視的な形状や移動状況なども詳細に観察できる。また、 μ XCTは2次元のディテクタ(フラットパネル)を持つため、比較的短時間の撮影で広い三次元空間の画像データが得ることも特徴である。

X線CTスキャナ⁴⁾は医療用診断装置として一般にも広く知られる装置である。英国EMI社(Electric & Musical Industries Limited)の研究者であったHounsfield⁵⁾が、1972年に断層撮影技術を活用して医療用X線CTスキャナを開発し、放射線医学の分野で革命的な診断技術となった⁶⁾。現在ではこの医療用の装置に加えて、産業用、 μ フォーカス型(ナノフォーカス型を含む)、およびシンクロトロン(大型放射光施設)などが実用化され、様々な検査や計測に用いられている。これらは検査対象の物性と現象のスケール等を勘案して選定されている。

地盤工学の分野におけるX線CTスキャナの適用に関するこれまでの経緯について少し辿ると、我が国では1980年代から石油公団(現在のJOGMEC)のHagiwara and Nanba⁷⁾の岩石を対象とした研究に適用によって始まり、国際的には、1996年にフランスのDesrues et al.⁸⁾が土の変形挙動の計測に医療用X線CTを適用した事例があり、地盤工学分野におけるX線CTスキャナの適用は広がりを見せ始めた。1996年には熊本大学にも産業用X線CT装置が^{9)~12)}導入され、土質試験と産業用X線CTスキャナによる撮影を連動して行う実験システムの構築を世界で初めて発表している¹³⁾。さらには、この分野の国際的なCommunity構築をめざして、2003年に熊本において地盤工学における

X線CTの応用に関する国際ワークショップ GeoX2003 (International Workshop on X-ray CT for Geomaterials) が開催された¹⁴⁾。これらの国際的な活動はすべて2003年に開催した GeoX2003 が起源となっている。その後、2003年には港湾空港技術研究所¹⁵⁾、2007年には京都大学¹⁶⁾他と本装置の導入が加速し、数多くの貴重な研究成果が発表されている。本研究のように模型実験に適用する上では、通常の装置では計測不能な地盤内での現象や挙動もX線CTによって可視化が可能¹⁷⁾となる。また、得られた画像の解析とその他の計測データとの関係性を緻密に分析することで、様々な物理現象の定量化に寄与し、地盤工学分野における試験・設計・施工のさらなる高度化や発展につなげることが期待されている。

本章では、X線CTの基本および得られたCT画像に対する画像処理手法を説明するとともに、X線CTを砂の締固めに関する研究に対して適用したこれまでの事例についても概観する。

3.1 X線CTの基本

CT (Computed Tomography)、コンピュータ断層撮影法とは、非破壊検査法の一つであり、被検体を透過可能な放射線などを線源とし、異なった照射角度から得られる投影データをデジタルデータとして収集し、その複数の投影データを逆解析することにより物体内部の空間情報として再構成し画像化することで被検体内部の定量評価を可能にする手法である¹⁸⁾。X線CT法とは、線源にX線を用い、被検体透過によるX線減衰によって得られる投影データより物体内部のX線吸収量の空間分布を画像化するものである。^{19),20)}

3.1.1 X線の発生^{21),22)}

現在、X線CTスキャナのX線源として一般的な装置に用いられるX線管は密閉管と開放管に分けられる。X線発生の原理としてはいずれも同じであるが、X線のターゲ

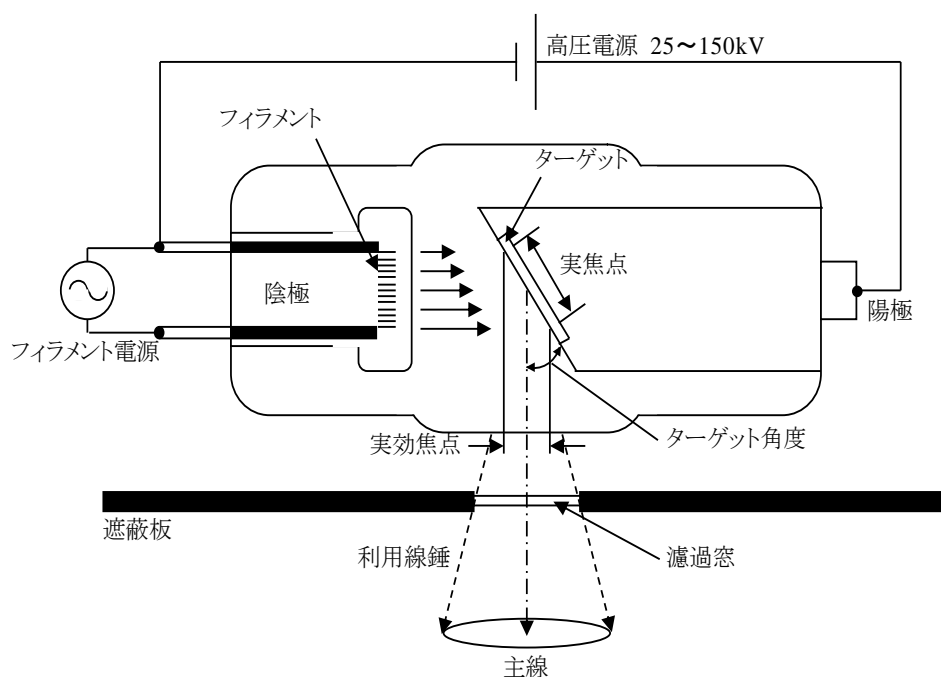


図-3.1 X線管の構造¹⁾

照射方法によって反射型と透過型に分けられている。X線原の一例として反射型密閉管のX線管の構造を図-3.1に示す¹⁾。反射型密閉管のX線管は、陰極と陽極を持つ真空管であり、陰極にコイル状のフィラメント、陽極に銅塊の表面にタングステンターゲットを張り付けた構造となっている。フィラメントが数百度以上に加熱されると表面から熱電子が湧き出し、陽極の正電位により加速されてターゲットに衝突することでX線が放射される。このとき電子は運動エネルギーを失い、そのうちの1%がX線として放出され、残りの99%以上は熱となる。そのため、X線発生装置には熱冷却装置が必要となっている。

3.1.2 X線の減衰と再構成

X線が物体内を透過する際、電子との相互作用が起きるとその分だけX線の強度は減衰する。図-3.2のように一次元の均質な材料に単一エネルギーのX線を照射する場合、被検体透過後のX線強度は式(3.1)で表わされる¹⁾。これはX線線量が透過距離に応じて指数的に減弱することを示している。

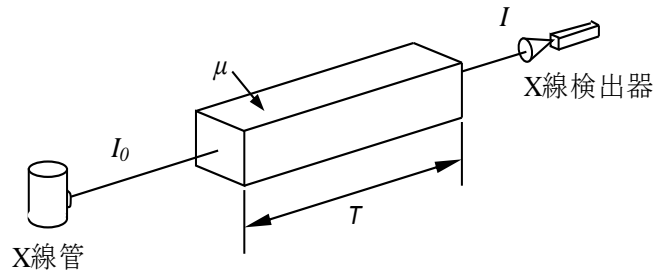


図-3.2 X線CTスキャナの原理（一次元）¹⁾

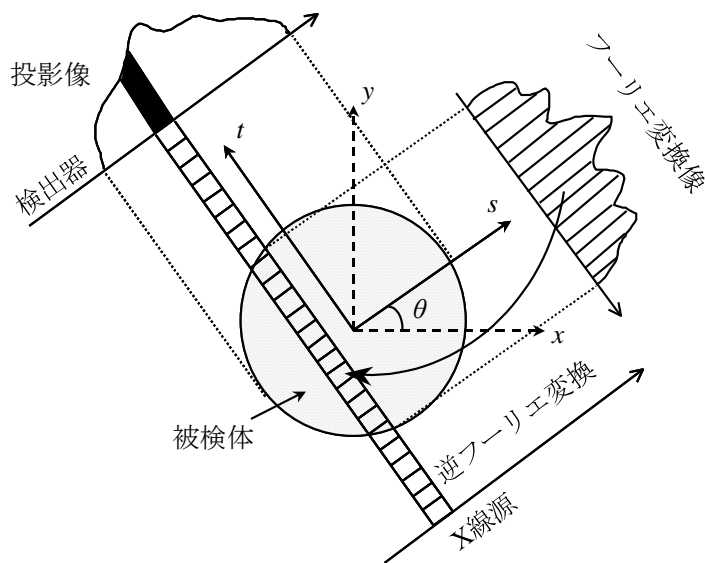


図-3.3 X線CTスキャナの原理（二次元）¹⁾

$$I = I_0 \exp(-\mu W) \quad (3.1)$$

ここに、 I : 透過 X 線強度

I_0 : 入射 X 線強度

μ : X 線吸収係数

W : 被検体の奥行き (X 線の被検体透過長)

一般に、X 線吸収係数は、被検体の密度に比例することが知られている。式(3.1)両辺を I_0 で除して、対数を取ると投影関数 p が式(3.2)で定義される。

$$p = \mu W = \ln(I_0 / I) \quad (3.2)$$

この理論を二次元に拡張したものが次(3.3)であり、それを図示したものが図-3.3 で

ある¹¹⁾。

$$p(s, \theta) = \ln(I_0/I) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(x, y) dt \quad (3.3)$$

ここに、 $\mu(x, y)$: X線吸収係数の空間分布

最終的に断層撮影法 (Tomography) に基づき互いに独立な方向の投影を計測した後にフィルター補正逆投影法²³⁾を用いて X線吸収係数分布 $\mu(x, y)$ が求められる。ここで得られる画像は、X線を照射した断面の二次元画像であるが、各断面の二次元画像を被検体全体で重ね合わせるにより三次元画像を得ることができる。

3.1.3 熊本大学における X線 CT 装置

図-3.4 に X線 CT 装置開発の変遷を示す¹⁾。計測装置として、その世代が進むにつれて X線ビームは細線状のものから扇形のファンビーム、三次元形状を持つコーンビームへと推移し、検出器もその数は格段に増え、それとともに時間分解能、空間分解能など画像の質も向上してきた。熊本大学では、 μ XCT (東芝製 TOSCANER-32300FPD)、および、産業用 X線 CT スキャナ (東芝製 TOSCANER-23200, 以降 IXCT) を有しているが、 μ XCT は第3世代、IXCT は第2世代に分類される。 μ XCT と IXCT の概要を図-3.5 に示し³⁾。それぞれの仕様を表-3.1 に示す。本研究で用いた μ XCT と IXCT で大きく異なる仕様としては X線源、検出器、データ収集方法が挙げられる。IXCT は X線源に反射式密閉管を用いており、そのワット数の高さから密度分解能に優れている。一方、 μ XCT は X線源に反射式開放管を用いており、放射された電子線をコイルで収束させてマイクロレベルのターゲット焦点サイズにすることで、空間分解能に優れるといった特徴を持っている。検出器およびデータ収集方法の違いとしては、 μ XCT では、データ収集において試料台が回転のみ行う RR 方式 (Rotate-Rotate) が採用されている。X線はある一定角度のコーンビームが照射され、フラットパネルディテクター (FPD)²⁴⁾内に設置している 2000×2000 の検出器により、その減衰量が計測される。X線管と検出器は変更可能な任意距離に固定されており、試料台は 180°または 360°回転して投影データを蓄積する。一方、IXCT では、データ収集において試料台が往復並進運動および回転

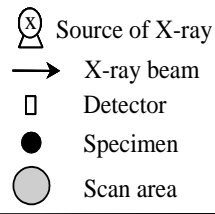
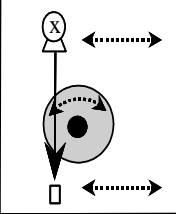
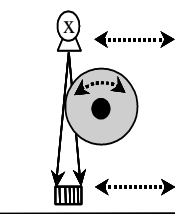
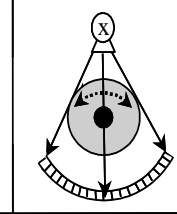
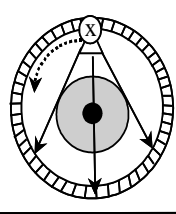
Scan type	1 st generation (Translate -Rotate)	2 nd generation (Translate -Rotate)	3 rd generation (Rotate -Rotate)	4 th generation (Stationary -Rotate)
				
X-ray beam Angular aperture	0° Parallel beam	3°~ 30° Narrow fan beam	30°~ 40° Wide fan beam	30°~ 40° Wide fan beam
Number of detectors	1	3 ~ 60	500 ~ 600	1000 ~ 2000
Scanning time	4 ~ 5 min.	20 ~ 120 sec.	3 ~ 10 sec.	1 ~ 10 sec.

図-3.4 X線CTスキャナの変遷¹⁾

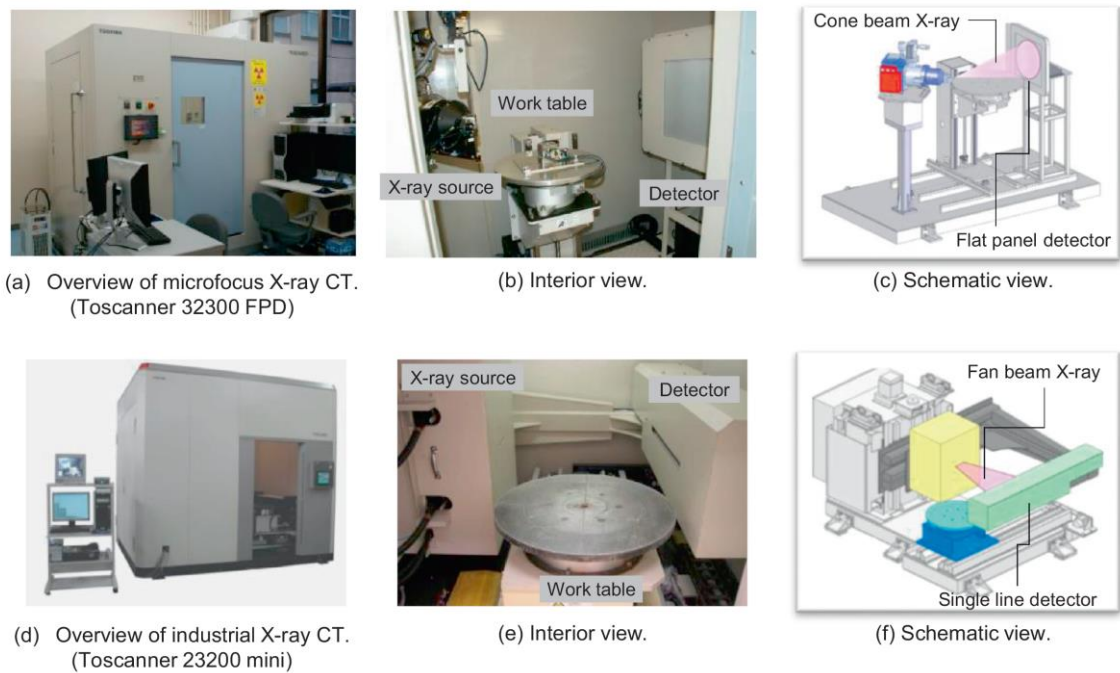


図-3.5 μ XCT と IXCT の概要³⁾

を伴う TR 方式 (Translate-Rotate) を採用している。X 線は 30° のファン角を持つファンビームが照射され、176 チャンネルの検出器によりその減衰量が計測される。X 線管と検出器は一定距離に固定されており、その間を試料台が往復並進運動および回転を行い 180°、360° または 720° から投影データの蓄積を行う。

表-3.1 μ XCT と IXCT の装置仕様

	μ XCT	IXCT
X線管電圧	20kV～230kV	150kV, 200kV, 300kV
管電流	0～0.61mA	4mA, 3mA, 2mA
X線照射厚	2 μ m～4mm	0.3mm,0.5mm,1mm,2mm,4mm
データ加算数	360°(4800分割)	180°, 360°, 720°
撮影ピッチ	1 μ m～	0.1mmの整数倍
時間分解能	データ加算数に依存	180°:2.5min., 360°:5min., 720°:10min.
撮影領域(ϕ , H)	ϕ :～400mm, H:～500mm	ϕ :～400mm, H:～700mm
画像再構成マトリクス数	スキャン:2048 ² , コーン:1024 ²	2048×2048
最小画像サイズ	5 μ m (ϕ 10mm)	73 μ m (ϕ 150mm)
最大積載重量	25kg	100kg
X線検出器	Flat Panel Detector	Line Detector

X線源にコーンビーム、受光装置にフラットパネルを持つ μ XCTはZ軸方向に広い領域を一度に撮影できるため、X線源にファンビーム、受光装置にシングルラインディテクターを持つIXCTに比べて撮影時間を大幅に短縮できる。一回の撮影時間の短縮によって多ステップ撮影が現実的となるため、本研究で対象とする締固め改良地盤へのSCP打設時の砂杭造成過程を模擬した実験における連続撮影などへの利用が可能となる。具体的には、砂杭造成過程におけるその周辺地盤への影響の検討などが可能となる。また、 μ XCTは、スキャンテーブルの位置変更によって撮影領域を変えることが可能であるため、空間分解能の高い拡大撮影を行うことで地盤内の微小変形の観察もできる。ただし、 μ XCTは、スキャンテーブルの許容重量がIXCTの4分の1程度であることや、出力可能なX線源の最大エネルギー（特に照射電流値）が低いため、撮影時間が短い場合にはIXCTほどの密度分解能が得られないなどの留意点がある。 μ XCTとIXCTでは、その装置性能と取得データの性質が異なるため、実施する模型実験における観察や計測目的に沿った装置選定に留意する必要がある。

3.1.4 X線CT画像

X線CT撮影で得られるCT画像は、X線の透過率から求めたCT値やGL (Gray Level) 値などと呼ばれる輝度値の空間分布データとして出力される。この輝度値は、材料の密度と正の相関を示し、事前の装置較正（キャリブレーション）を実施することで輝度値から材料密度への換算が可能となる。

(1) X線CTによるデータの取得

デジタルカメラ等から得られる二次元画像ファイルの画素は、ピクセル (pixel) と呼ばれる小さな離散的な値（整数値）の集合体である。一方、X線CTの場合、図-3.6に示す様に、再構成された画像は断面画像ではなく断層画像であり一定の厚みを有する。¹⁵⁾。CT画像を構成する画素はボクセル (Voxel) と呼ばれ、撮影結果として取得される数値データは、各ボクセル内の平均的なX線吸収量である。

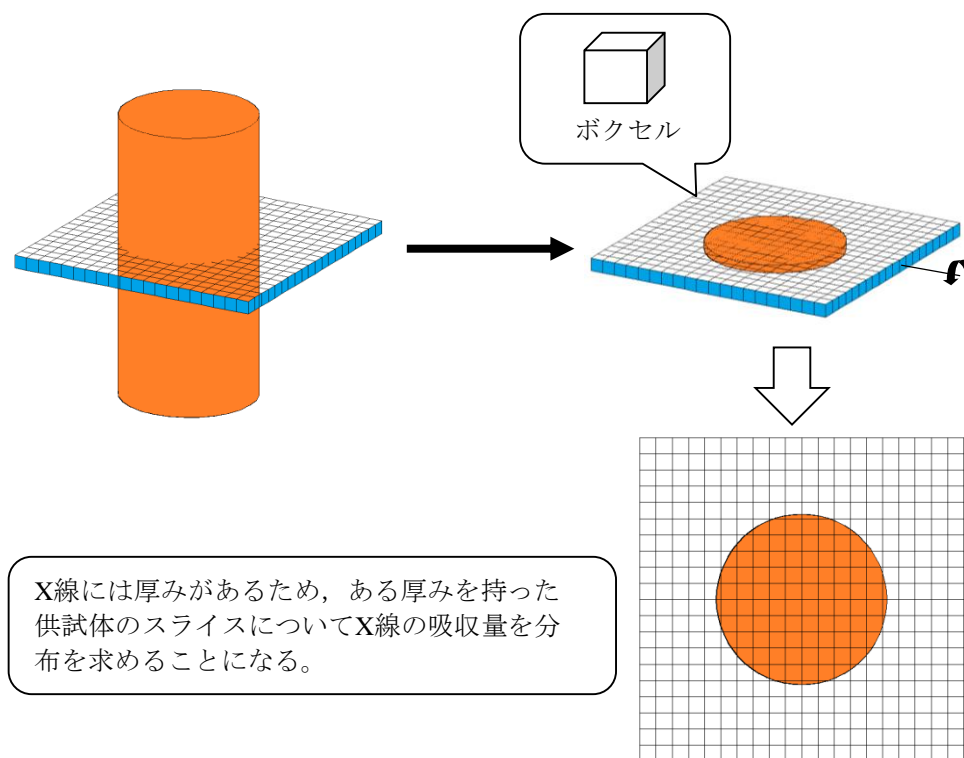


図-3.6 X線CTスキャナによるデータ取得の概要¹⁵⁾

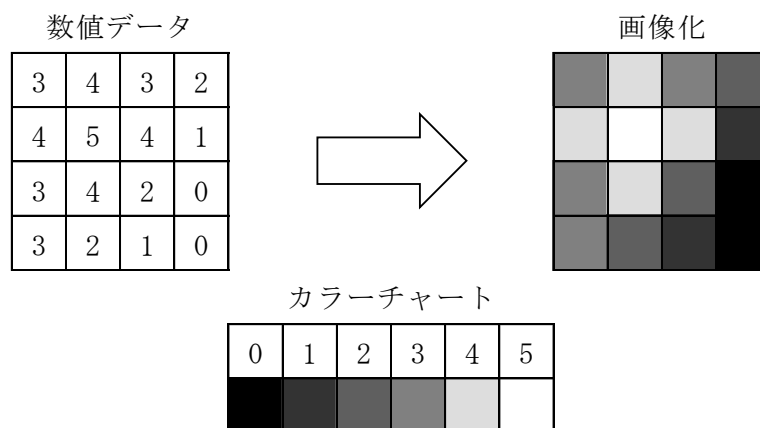


図-3.7 X線CT スキャナにより得られた数値データの画像化¹⁵⁾

(2) X線CTにより得られたデータの画像化

X線CTにより取得したボクセルが持つ数値データに対して、グレースケールなどのカラーチャート¹⁵⁾に変換することにより、断面画像を得ることができる。図-3.7にその模式図を示す。通常、CT画像では、被検体内において密度が大きい領域は白色に、密度が小さい領域は黒色に表示される。

3.2 画像解析手法

本研究では、取得したX線CT画像を用いたSCP工法の施工による模型地盤内部の造成砂杭周辺地盤の挙動計測ならびに砂の微視構造の定量的な評価に際して、大きく2つの画像解析手法を適用した。

1つは、変形前後の1組のCT画像に対してパターンマッチングを行うことにより撮影領域内の変位計測を可能とするデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation, 以降, DIC) を適用する。この解析手法はSCP打設による造成砂杭周辺地盤の大局的な挙動を把握とし、模型供試体の全体撮影画像に対して適用している。

もう1つは、初期地盤としての原地盤, SCP工法による砂杭造成過程それぞれのCT画像に対し、複数の画像処理アルゴリズムを組合せることにより個別土粒子に分割, ラベリングする画像処理手法 (セグメンテーション) である。この解析手法は、個別土粒

子同士の接触点と考えられる領域を特定，集計し，任意空間における砂質土の集合体としての微視構造の特徴量を定量化することを目的とし，砂杭周辺地盤の任意領域に対して適用している。

3.2.1 画像相関法による地盤内に生じる変形現象の解析

DIC 手法は 1980 年代から固体力学や流体力学の分野で発達し，様々な空間や時間スケールにおいて，異なる荷重条件下かつ種々の材料に適用されている²⁵⁾。本研究では，SCP 打設時における模型地盤の変形前後の X 線 CT 画像に対して，デジタル画像の輝度値分布の変化から試料内部の変位場とひずみ場を計測するために開発された解析プログラム (TOMOWARP3D) を用いた^{1),25)~27)}。図-3.8 に DIC の概要を示す。

DIC における解析手順¹⁾は以下のとおりである。

- ① 変形前後のデジタル画像を取得する。
- ② 変形前の画像中に変位ベクトルを求める節点群を配置する。
- ③ 相関窓および検索窓(相関計算を行う範囲)のサイズを決定する。
- ④ 変形後の画像の検索窓の範囲内すべての位置で変形前の相関窓との相関係数，式(3.4)²⁶⁾を算定する。
- ⑤ 相関が最も高い位置を移動後の領域と同定する。この状態でボクセル単位(整数)の移動量が求まる。
- ⑥ ⑤で得られたボクセル単位の移動量に対して，サブピクセル補正(ボクセル単位以下の空間分解能で移動量を補正)を行い，実数値としての変位量を求める。
- ⑦ 得られた変位場からひずみ量(体積ひずみ:式(3.6)，せん断ひずみ:式(3.7)，式(3.8)) を求める。

$$NCC(u, v, w) = \frac{\sum_{x,y,z} (I_1(x, y, z) + I_2(x + u, y + v, z + w))^2}{\sum_{x,y,z} (I_1(x, y, z)^2 + I_2(x + u, y + v, z + w)^2)} - 1 \quad (3.4)$$

本研究での具体的なひずみ量の計算方法^{28)~30)}について以下に述べる。

DIC による変位場解析で得られた直交座標系における変位 3 成分 (x, y, z 方向) を

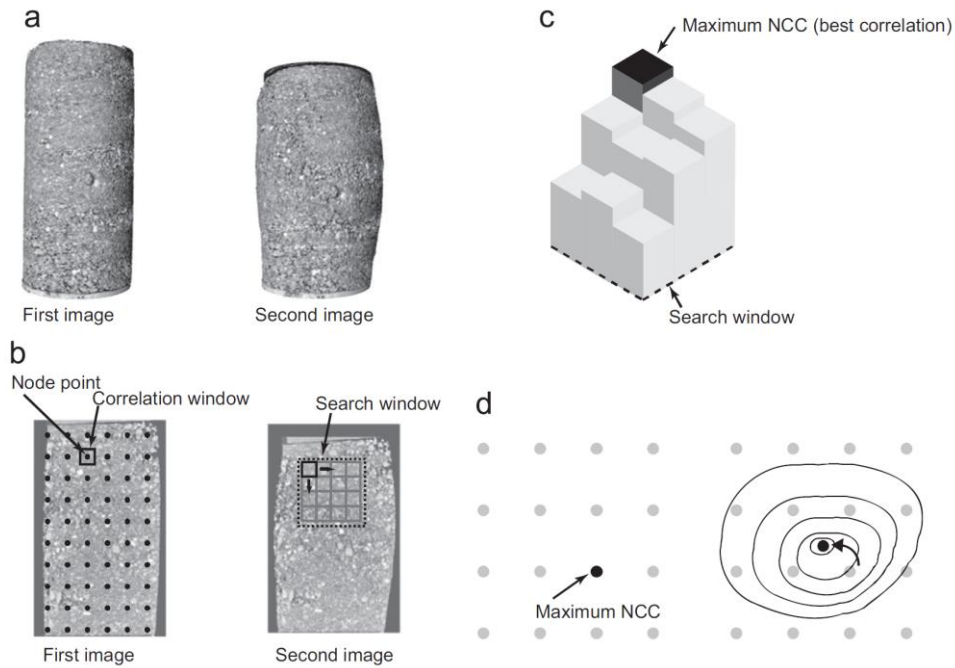


図-3.8 DIC の概要²⁷⁾

持つ節点を頂点とする立方体要素を設定し、頂点（8 節点）の変位ベクトルから各要素におけるひずみテンソルを求める。各要素のひずみテンソルから体積ひずみとせん断ひずみを定義し、スカラー量として算出している。ひずみテンソルは以下の式(3.5)で表される。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.5)$$

ここに、

$$i, j = 1, 2, 3$$

$i=j$ のとき、垂直ひずみ

$$i \neq j \text{ のとき、 } 2\varepsilon_{ij} = \gamma_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

γ_{ij} : 工学せん断ひずみ

体積ひずみ ε_v は、ひずみテンソルの 1 次の不変量と等価であり、以下で算出される。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (3.6)$$

せん断ひずみは、Von Mises の降伏条件を満たす 3 軸応力状態で生じる塑性ひずみ成分 (ε_1^p , ε_2^p , ε_3^p) について、1 軸応力状態に当てはめた場合に相当する量、つまり相当ひずみ $\bar{\varepsilon}$ を定義して以下の式で算出する。これは体積ひずみ成分を含まない偏差

ひずみ成分である。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p)^2 + (\varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p)^2 + (\varepsilon_3^p - \varepsilon_1^p)^2} \quad (3.7)$$

これを一般の直交座標系で表示すると以下の式となる。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6\{(\varepsilon_{xy})^2 + (\varepsilon_{yz})^2 + (\varepsilon_{zx})^2\}} \quad (3.8)$$

3.2.2 画像解析による土粒子同士の接触点数の算出

砂質土の内部構造について微視的視点で考えてみると、土への外力等の作用によって土の状態が変化する際には、土粒子同士の接触状態が変わり、地盤全体の骨格構造も変化するものと考えられる。粒状材料としての性質がその力学挙動に強く反映される砂質土においては、土粒子接点での粒子接触角 θ や土粒子間の摩擦力 ϕ が地盤全体としての強度に影響していると考えられる³¹⁾が、地盤の内部構造が地盤強度に与える影響を実験的に直接捉えることが可能な手法は未だ確立されていない。この課題に対して、土粒子の微視的な骨格構造に特に着目し、模型実験や数値解析によってその評価に取り組む研究がこれまでに数多くある。模型実験としては、光弾性法によって粒状体内部の応力状態の計測技術について研究が進んでいる。また、近年では応力発光材料を用いた新しい計測技術の開発例^{32),33)}も報告されている。ただし、これらの計測技術は平面ひずみ条件下での実験という制約が残されている。

一方、数値解析的手法を用いた研究として代表的なものには、個々の粒子運動を直接演算する DEM（個別要素法）を用いて個々の粒子間の接触力や接触角を数値解析的に求める研究が盛んに行われてきた^{例えば 34),35)}。演算能力の飛躍的な向上によって大規模モデルの計算も現実的になり、非常に有効な研究手法であるが、数値解析の結果を検証するバリデーションの問題が残されている。

これらの研究手法とは別に、 μ XCT を用いてその内部構造の評価を行う研究が進められている¹⁵⁾。空間分解能の高い μ XCT 画像を用いることで砂の粒子形状や間隙構造などの高詳細な空間情報が入手可能となり、画像解析から得られる情報の定量化によって

評価手法が高度化し、これまで確認されていなかった現象が明らかになりつつある。

本研究では、三次元空間解析ソフト Avizo（株式会社サーモフィッシャー社製）を用いて、 μ XCTにより得られた三次元 CT データに図-3.9 に示す画像解析手順を施すことで土粒子間の接触点数 N_{CP} （Number of contact point）を算出した。以下に接触点数算出における主な解析手法を簡単に紹介する。

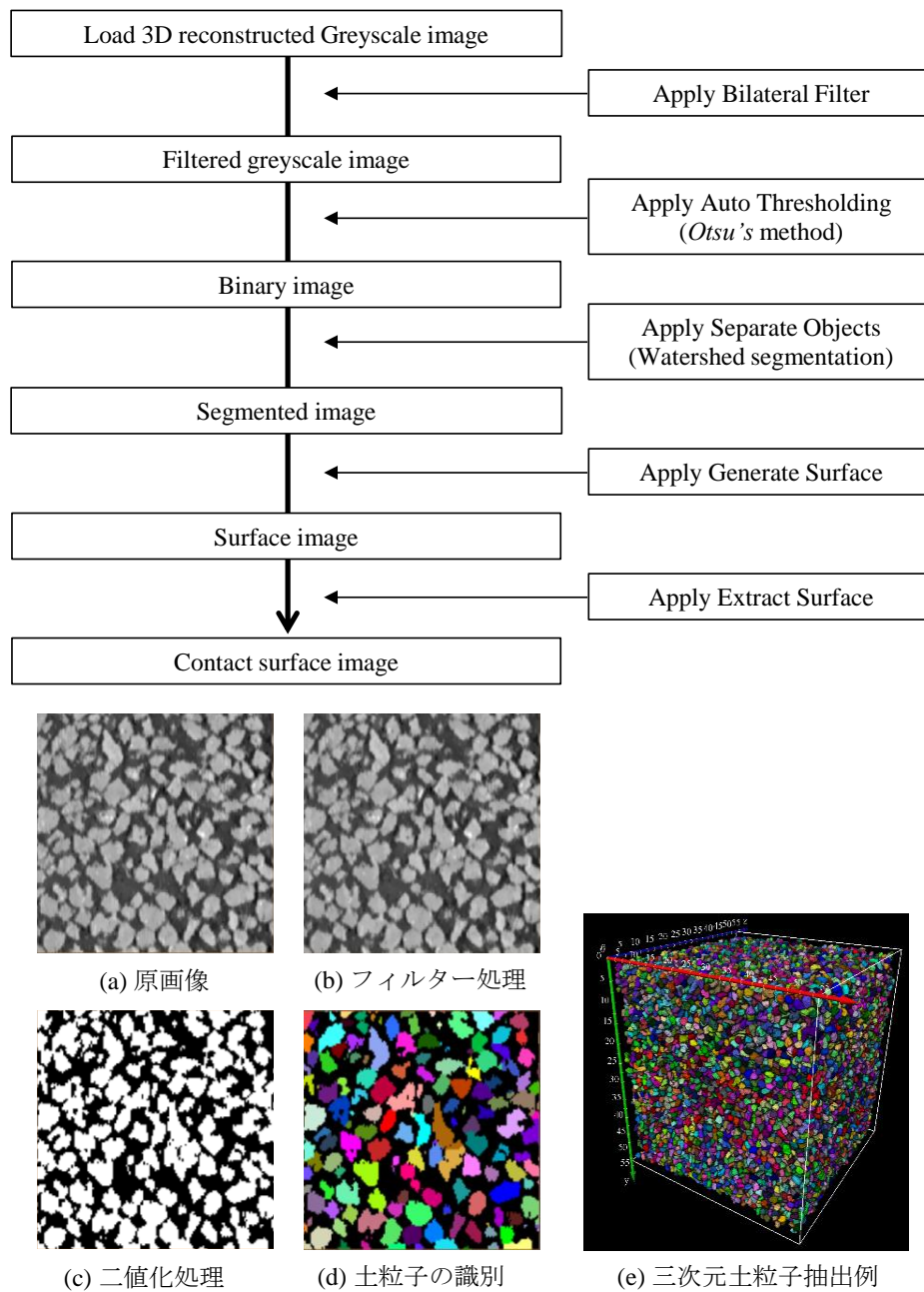


図-3.9 三次元空間解析ソフトを用いた接触点数の算出フロー

(1) Bilateral Filter (バイラテラル・フィルター)

画像の生成や伝送の過程において、数々の要因で物理的に「ノイズ」が含まれることは避けられない。それは X 線 CT から得られる画像も例外ではなく、画像解析において目的に応じた有益な情報を効率よく抽出するためには、この「ノイズ」を取り除いておく必要がある。代表的なノイズ除去アルゴリズムとしては、各画素の値を近傍画素の中央値に置き換える Median フィルターや、対象画素からの距離に応じて平滑化に用いる近傍画素値の重みを変える Gaussian フィルターなどが挙げられる³⁶⁾。しかし、これらのノイズ除去方法では、画素値の異なる領域間の境界部分（エッジ）がぼけてしまうという欠点がある。近年では、エッジをぼかさずにノイズを除去する多種多様な非線形フィルターも考案されているが、本研究では、得られた X 線 CT 画像に対しバイラテラル・フィルター（以下、BF）を施した³⁷⁾。BF は、Gaussian フィルターのノイズ除去能力に加えて、エッジの保存能力も兼ね備えたフィルターであり、最終的に式(3.9)で与えられる。

$$O(i, j, k) = \frac{1}{K(i, j, k)} \sum_{l=-\frac{n_x}{2}}^{\frac{n_x}{2}} \sum_{m=-\frac{n_y}{2}}^{\frac{n_y}{2}} \sum_{n=-\frac{n_z}{2}}^{\frac{n_z}{2}} e^{-\frac{(I(i, j, k) - I(l, m, n))^2}{h^2}} I(l, m, n) \quad (3.9)$$

$$K(i, j, k) = \sum_{l=-\frac{n_x}{2}}^{\frac{n_x}{2}} \sum_{m=-\frac{n_y}{2}}^{\frac{n_y}{2}} \sum_{n=-\frac{n_z}{2}}^{\frac{n_z}{2}} e^{-\frac{(I(i, j, k) - I(l, m, n))^2}{h^2}} \quad (3.10)$$

- ここに、
- $O(i, j, k)$: フィルター処理後の画素値
 - $K(i, j, k)$: カーネル領域における正規化係数
 - (l, m, n) : 対象画素の近傍に位置する画素値
 - n_x : x軸方向における対象画素からの距離
 - n_y : y軸方向における対象画素からの距離
 - n_z : z軸方向における対象画素からの距離

BF では、対象画素からの距離だけで重みを決定するのではなく、対象画素との画素値の差も考慮して重みを決定している。フィルター処理後の画像例を図-3.9(b)に示す。これにより土粒子のエッジが保たれ、次で述べる二値化処理が容易となる。

(2) 二値化処理

画像の特徴を抽出するためには、画像から対象物とそうでないものを分離する必要がある。このような処理を二値化処理と言い、この際問題となるのが閾値の決定方法である。閾値の決定を誤ると、二値化後の画像において解析対象物の領域を過大評価あるいは過小評価してしまう。本研究では、土粒子と間隙を分離するため、二値化の方法として大津の方法（判別分析法）³⁸⁾を採用した。大津の方法は、X線CT画像におけるGL値のヒストグラムを基に分離度を算出し、対象物が最もよく分離する点で閾値を決定する手法である。二値化処理後の画像例を図-3.9(c)に示す。

なお、この二値化処理によって土粒子と間隙を分離することで、画像の任意の領域における土粒子と間隙の割合を算出することが可能となる。後述する画像解析における「CT画像から得られる砂の相対密度」は、この二値化処理後の画像を用いて算出をしている。

(3) 土粒子の識別

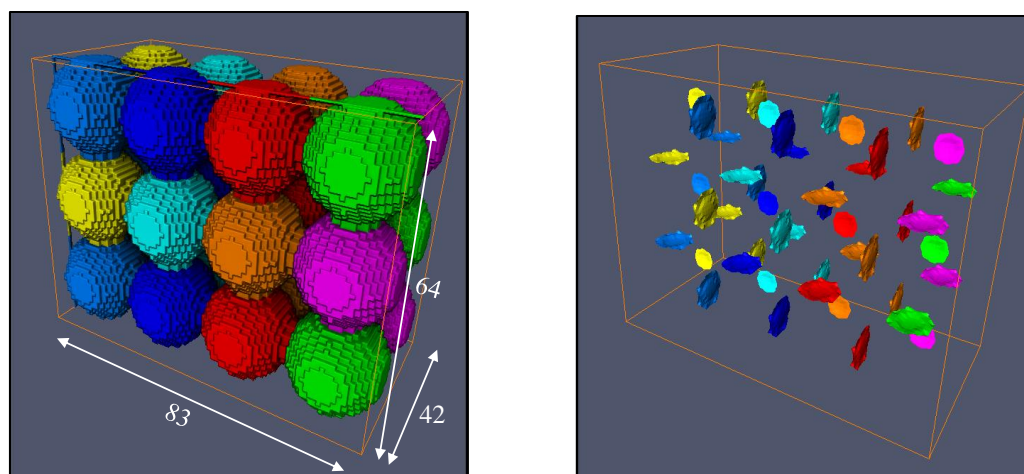
先に述べた二値化処理によって土粒子と間隙それぞれの領域に分割されるが、土粒子と判定された領域は接触部分で空間的につながっており、個々の土粒子として識別することは出来ない。二値化された画像に対し、土粒子一つ一つの接触部分で適切に分割しなければ土粒子同士が接続している状態、つまり団粒化したような土粒子を一つの土粒子として評価してしまい、計測精度が落ちる恐れがある。個々の土粒子の空間情報を適切に抽出するため、Watershed アルゴリズム³⁹⁾を用いて土粒子同士の接触部分と考えられる位置での分割処理を行った。Watershed アルゴリズムは、画像領域の分割手法として広く知られ、CT画像のGL値の勾配を山の嶺とみなし、山の高い(=GL値の高い)位置から流れ込む水の貯留区域を一つの領域として分割する手法である。この分割手法を応用して個々の土粒子としての領域に分割し、その後Label付け(Labeling処理)を行うことで、各土粒子を識別することが可能となる。図-3.9(d)に土粒子識別後の画像を示す。このようにWatershedとLabeling処理を行った後の画像では個々の土粒子の空間的な位置情報や形状データ(体積や表面積など)を抽出することが出来る。

(4) 接触部分の算出

土粒子間の接触部分の算出については、Watershed アルゴリズムによって分割された土粒子同士の境界部分に対して Label 付けを行いデータの抽出を行っている。つまり土粒子の分割が正確に行われれば、土粒子間の接触部分も抽出可能となる。図-3.10 は簡易的な球体画像を動作テスト画像として用い、上述の処理手法を用いて接触部分を表示した例である。接触部分にも Label 付けをしているため、接触数はもちろん、各接触部の接触面積や空間位置、接触面の向きなどのデータ抽出も可能である。

(5) 解析精度の検証

前述した手順によって CT 画像から任意領域の相対密度や接触点数の算出が可能となるが、当然ながらこれらの画像解析から得られた数値情報は CT 画像の解像度に大きく影響をうける⁴⁰⁾。CT 画像の空間解像度が高ければ画像解析から得られる数値情報の精度も高くなるが、空間解像度と撮影空間の大きさはトレードオフの関係にあるため、解析精度を上げるために空間解像度を上げると一度に撮影可能な空間は小さくなり、全体空間の代表値でなくなるといった問題が生じる。現在は X 線 CT スキャナ本体の性能向上や模型実験装置類の改良により解像度の問題は改善されてはいるが、X 線 CT を用いた模型実験を対象とした場合には相似則をどのように満足するかといった問題に加え、



(a) 球体モデルの画像データをラベリングした様子

(b) 球体モデルの接触部を取り出した様子

図-3.10 簡易モデルによる接触部分の算出

解像度をどのように設定するかといった問題の議論も不可欠であると言える。

そこで、本研究では、画像解析から得られる数値情報と物理試験による実測データとの比較を行うことで画像解析精度の検証を行った。具体的には、画像解析によって得られる結果について、土質試験で得られた粒度分布と比較をすることで画像解析精度の検証を行った。土質試験で評価される粒径は、正方のふるい目を通過するか否かで分級されるため、比較的球形の粒子であれば等価直径で評価できる。しかしながら、実際の土粒子の形状は様々であり、粒径評価にどの径を使用するかは対象とする試料によって吟味する必要がある。本解析では、CT 画像から判別した個別土粒子の粒径の評価法として相当径 (Equivalent diameter) を用いている。相当径とは、対象となる土粒子の体積と同体積の球体粒子径であり、式(3.11)で表される。

$$\text{EqDiameter} = \sqrt[3]{\frac{6 \times \text{Volume}}{\pi}} \quad (3.11)$$

この相当径がふるい目を通過するか否かを判定し、球形体積に土粒子密度をかけた値をその土粒子の重量とみなし粒径加積曲線を求めた。この際、画像境界の土粒子が粒度曲線に与える影響を考慮し、境界面に存在する土粒子は取り除いている。

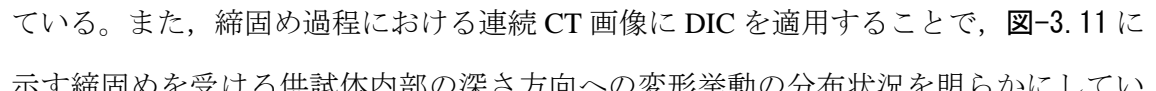
(6) 代表要素体積 (Representative Element Volume)

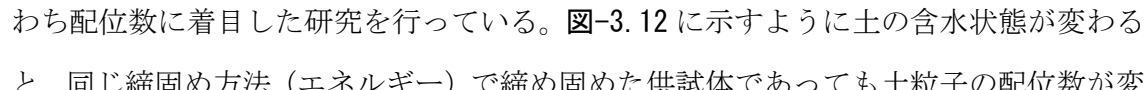
X 線 CT 画像から相対密度や粒径等の特性を評価する際、評価される物理量は解析領域の空間的大きさに依存する。そこで、画像解析から得られる各種物理量が代表であることを保証するために代表要素体積 (以下、REV) を求める解析を行った。REV 解析に関する詳細は参考文献を参照されたい^{2),41)}。本研究で用いた REV 解析では、まずはじめに土粒子と間隙に二値化処理した三次元 X 線 CT 画像から、任意サイズの立方領域をランダムで 20 箇所抽出し、各抽出領域の間隙率の平均と標準偏差を求め、相対標準偏差 (RSD) を算出する。その後、解析領域のサイズを広げながら、同様に各解析領域における RSD を算出し、RSD が 1% 以下に収まる領域サイズ²⁾を検定する。この REV 解析によって、解析領域が小さい範囲では画像解析結果にばらつきがあるが、ある程度の領域 (REV 以上) になると、解析結果がほぼ一定の値に収束すること、つまり REV 以上の空間を使った画像解析結果は画像全体の代表値を評価する一つの基準になる。た

だし、この REV 解析は対象とする CT 画像に対して個別に検定を行う必要がある。ある CT 画像に対する REV は個別の画像情報（被検体、画素寸法等の条件）に対しての REV であり、全ての画像に対して一律ではないことに注意が必要である。

3.3 X線 CT を用いた砂質土の締固めに関する既往の研究

3.3.1 締固めやせん断変形を受けた砂質土の内部構造評価⁴²⁾

岡野ら⁴³⁾は、盛土の締固め管理手法のさらなる高度化を目的とした新たな試みとして、土の締固めを対象に μ XCT を用いて締固め土の内部を詳察し、画像解析によって空隙量や土粒子の移動量を求めることで、締固め方法の違いによる内部構造変化について考察を行っている。山砂を用いた比較実験では、供試体の初期密度が同じ場合でも、締固め方法（静的、動的）の違いによって最終的な空隙の空間分布が異なること、一般的な締固め管理基準である締固め度 90%の状態では多くの空隙が残存していることを報告している。また、締固め過程における連続 CT 画像に DIC を適用することで、 図-3.11 に示す締固めを受ける供試体内部の深さ方向への変形挙動の分布状況を明らかにしている。

宇野⁴⁴⁾は、異なる含水状態で締固めた砂供試体内部の微視的構造の評価のために μ XCT を用いて供試体の拡大撮影を行い、その CT 画像から個々の土粒子接点、すなわち配位数に着目した研究を行っている。 図-3.12 に示すように土の含水状態が変わると、同じ締固め方法（エネルギー）で締め固めた供試体であっても土粒子の配位数が変わること、また、最適な締固め砂の状態と砂の配位数には一定の相関性があることを報告している。同時に、ポータブルコーン貫入試験を実施してその貫入抵抗を比較した結果、締固め土の力学特性と配位数には一定の関係性があることを報告している。

金子⁴⁵⁾は、粒状材料のせん断特性の解明を目的とし、一面せん断試験のせん断過程における供試体の連続 CT 撮影を行うことで、細粒分含有率の違いがせん断挙動に与える影響について考察している。異なる径のガラスビーズを用いた一面せん断試験では、

せん断過程における供試体内部構造の変化を可視化し、せん断中の供試体内部の挙動と力学特性の関係について考察している。その中ではせん断前後の供試体内部の接触点数を比較することで、粒状材料の接触状態の変化がせん断強度に関係すると報告している。

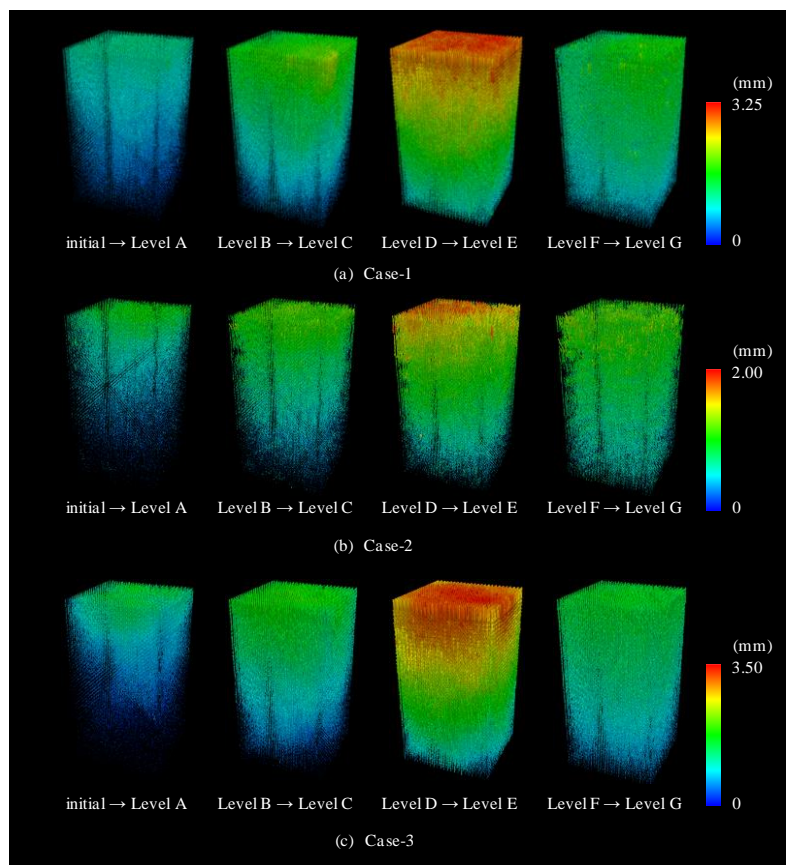


図-3.11 DICによる土粒子移動量の変化

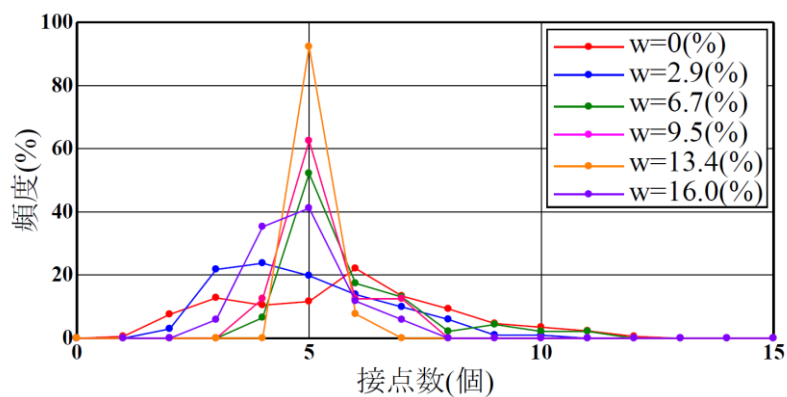


図-3.12 異なる含水比における締固め砂の接点数頻度の関係

3.3.2 SCP 工法と異なる締固め工法による砂質土の締固め

高野⁴⁶⁾は、静的圧入締固め (CPG) 工法を対象に改良率と液状化抑制効果の関係性について検証している。その中で、グラウト注入による改良対象地盤の密度変化を評価するためにグラウト杭 1 本を模型地盤内に打設する実験を実施し、 μ XCT を用いてその打設過程を観察している。DIC 解析を行うことで、グラウト注入過程における地盤内の変位増分と体積ひずみ増分およびせん断ひずみ増分を計測している。注入により生じる周辺地盤の密実化は主にグラウト側面にのみ生じることが明らかとなり、注入深度が浅く初期有効拘束圧が低い場合には、周辺地盤は小さい変形で受動状態となり、地盤の密実化が生じにくいことを報告している。

古賀⁴⁷⁾は、木杭打設による周辺地盤の改良効果に関する研究として、IXCT を活用した模型杭貫入実験を実施することで、周辺地盤の密度変化から地盤改良効果について考察している。図-3.13 に示すように模型杭を複数本打設する実験ケースを比較することで、打設間隔及び打設順序が周辺地盤の密度変化に影響することやその影響範囲の違いについて報告している。このように、IXCT を活用することで模型杭貫入における周辺地盤の密度変化を評価できることが確認されている。

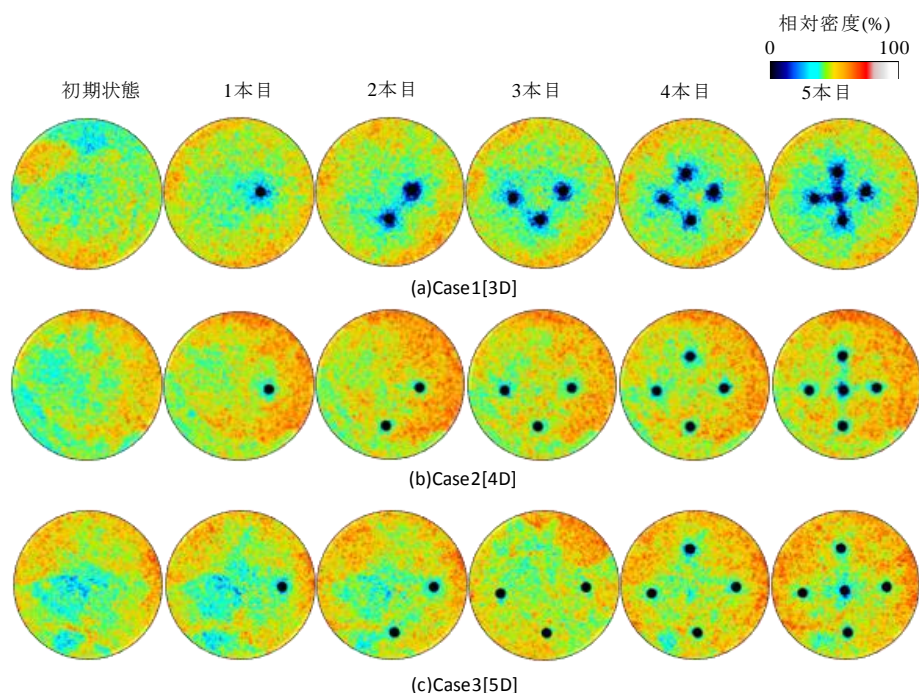


図-3.13 木杭打設による相対密度の変化

3.4 まとめ

本章では、本研究の中心的な役割を果たす X 線 CT の基本および CT 画像の解析手法について述べるとともに、X 線 CT を用いた砂質土の締固めに関する既往の研究について概観した。

以下に得られた知見を列挙する。

- i) X 線 CT では三次元の画像データが得られ、 μ XCT を用いた空間分解能の高い拡大撮影を行うことで、地盤材料の微視的な形状や移動状況などの詳細な観察が可能となる。
- ii) X 線 CT により得られた CT データから SCP 工法による締固め改良地盤を想定した砂質土の微視構造に関する定量化を行うための 2 種類の画像解析手法について取りまとめた。
- iii) 砂質土の締固めに関して X 線 CT を適用した事例では、砂粒子の配列や間隙構造、荷重下における変位やひずみ等の可視化に関する研究が行われており、これらの実験手法や研究成果を整理することで本研究に反映させた。

参考文献

- 1) 渡邊陽一：X線CTデータを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明に関する研究，熊本大学博士論文，2011.
- 2) Mukunoki, T., Miyata, Y., Mikami, K. and Shiota, E.: X-ray CT analysis of pore structure in sand, *Solid Earth*, Vo.7, No.3, pp.929-942, 2016.
- 3) Sato, T., Onda, K. and Otani, J.: Development of a new loading test apparatus for microfocus X-ray CT and its application to the investigation of soil behavior surrounding driven open-section piles, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp776-785, 2018.
- 4) 大谷順：X線CTから見る土質力学 1.講座を始めるにあたって，地盤工学会誌，Vol.65, No.10, pp.39-40, 2017.
- 5) Hounsfield, G.: Computed Transverse Axial Scanning (Tomography) Part 1, Description of System, *British Journal of Radiology*, Vol.46, No.552, pp.1016-1022, 1973.
- 6) 肥後陽介，高野大樹，椋木俊文：X線CTから見る土質力学 2.X線CTの概要と研究動向，地盤工学会誌，Vol.65, No.10, pp.41-48, 2017.
- 7) Hagiwara, T. and Nanba, T.: Generation of proximity function for naturally fractured reservoir simulator using X-ray CT scanner system, *presented at the Eleventh Workshop for the IEA, Collaborative Project on EOR, Paris*, 1990.
- 8) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., and Mazrolle, F.: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Géotechnique*, Vol. 46, No.3, pp.529-546, 1996.
- 9) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No.2, pp.111-118, 2000.
- 10) 大谷順，尾原祐三，菅原勝彦，椋木俊文：地盤工学における産業用CTスキャナーの適用，土と基礎，Vol.48, No.2, pp.1-20, 2000.
- 11) 椋木俊文：地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文，2001.

- 12) 大谷順 : X 線 CT 法, 技術手帳, 土と基礎, Vol.54, No.4, pp.32-33, 2006.
- 13) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Characterization of failure in sand under triaxial compression using an industrial X-ray CT scanner, *International Journal of Physical Modelling in Geomechanics*, 1, pp.15-22, 2002.
- 14) Otani, J. and Obara, Y.: X-ray CT for Geomaterials-soil, concrete, concrete, rocks, *Balkema*, 2003.
- 15) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 畠俊郎 : マイクロフォーカス X 線 CT スキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料第 1125 号, 2006.
- 16) Higo, Y.: Study on Strain Localization of Multi-phase Granular Soils using Microfocus X-ray CT, *The 1st International Workshop on X-ray CT Visualization for Socio-Cultural, Engineering & Environmental Materials, X-Earth (IWX) 2010*, pp.49-53, 2010.
- 17) 江副哲, 大谷順, ファン ダン ホア : 杭の 3 次元水平抵抗メカニズムの可視化, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.467-474, 2003.
- 18) 岩井喜典 : CT スキャナ, 電子工学進歩シリーズ 9, 1979.
- 19) Kak, A.C. and Slaney, M.: Principles of Computerized Tomographic Imaging, *Published under the sponsorship of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1987.
- 20) 辻岡勝美 : X 線 CT 装置の歴史—過去, 現在, そして未来—, 日本放射線技術学会誌, 第 58 巻, 第 1 号, pp.67-71, 2002.
- 21) 飯沼武, 舘野之男 : X 線イメージング, コロナ社, 2001.
- 22) 大槻義彦 : エックス線, 大月書店, 1982.
- 23) 高木幹雄, 下田陽久監修 : 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
- 24) 松本政雄 : フラットパネルディテクタの現状と画質評価について, 日本放射線技術学会近畿部会雑誌, 第 11 巻, 1 号, pp.45-52, 2005.
- 25) Viggiani, G. and Hall, S. A.: Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics, *Fourth Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IOS press*, pp.3-26, 2008.
- 26) Hall, S. A., Lenoir, N., Viggiani, G., Derues, J. and Besuelle, P.: Strain localization in sand under triaxial loading: characterization by x-ray microtomography and 3D digital image

- correlation, *Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics COMGGeo09*, 2009.
- 27) Takano, D., Lenoir, N., Otani, J. and Hall, S. A.: Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation, *Soils and Foundations*, 55 (4), pp. 906-915, 2015.
- 28) 国尾 武：個体力学の基礎，培風館，1977.
- 29) 古川 浩：塑性工学(II) 塑性力学の基礎と加工への応用，精密機械，38 卷 455 号，pp.1077-1089, 1972.
- 30) 大畑 充：溶接接合教室－基礎を学ぶ－ 3-1 材料の力学と強度，溶接学会誌，77 卷 2 号，pp.163-173, 2008.
- 31) 松岡元，山本修一：個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察，土木学会論文集 No.487, III-26, pp.167-175, 1994.
- 32) Kondo, A., Takano, D., Kohama, E. and Bathurst, R. J.: Visualization and measurement of load transmission in granular assemblies using mechanoluminescent-coated particles, *Granular Matter*, 21, Article number: 50, 2019.
- 33) 近藤明彦，高野大樹，小濱英司：応力発光粒子を用いた閉端杭貫入時における先端抵抗の可視化，第 54 回地盤工学研究発表会，pp.1535-1536, 2019.
- 34) 藤岡奨，牛島省：DEM におけるエネルギーの保存性を考慮した法線方向の接触力の評価法，応用力学論文集，Vol.8, pp.287-294, 2005.
- 35) Oda, M.: Coordination number and its relation to shear strength of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.2, pp.29-42, 1977.
- 36) 田村秀行：コンピュータ画像処理，オーム出版社，2002.
- 37) 浦浜喜一：画像の本質を引き出すバイラテラルフィルタによるノイズ除去とイラスト風画像の生成，映像情報メディア学会誌，Vol.62, No.8, pp.1268-1273, 2008.
- 38) 財団法人 画像情報教育振興協会：デジタル画像処理，pp.174-176, 2006.
- 39) Haris, K., Efstratiadis, S. N. and Maglaveras, N.: Hybrid image segmentation using watersheds and fast region merging, *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol.7, No.12, pp.1684-1699, 1998.

- 40) Wiebicke, M., Ando, E., Herle, I. and Viggiani, G.: On the metrology of interparticle contacts in sand from x-ray tomography images, *Measurement Science and Technology*, 28, 2017.
- 41) 藤木祐作： μ X 線 CT 画像と LBM を用いた多孔体の不飽和浸透特性の定量評価，熊本大学大学院自然科学研究科修士論文，2015.
- 42) 椋木俊文, 大谷順：X 線 CT から見る土質力学 4.土の締固め，*地盤工学会誌*, Vol.65, No.11/12, pp.57-62, 2017.
- 43) 岡野寛雄： μ フォーカス X 線 CT を用いた土の締固め特性の解明に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科修士論文，2012.
- 44) 宇野理絵：異なる含水比状態における締固め砂の内部構造評価に関する研究，熊本大学工学部社会環境学科卒業論文，2012.
- 45) 金子勝保：粒状体のせん断挙動における細粒分含有率の影響に関する研究，熊本大学工学部社会環境工学科卒業論文，2017.
- 46) 高野大樹，西村聡，森川嘉之，高橋英紀：静的圧入締固め工法の液状化抑制効果に関する研究，独立行政法人港湾空港技術研究所 港湾空港技術研究所報告，第 52 巻，第 4 号，pp.45-73, 2006.
- 47) 古賀快尚：木杭打設による地盤改良効果に関する研究，熊本大学工学部社会環境学科卒業論文，2012.

第4章 SCP工法を模擬したX線CT用実験装置の開発

本研究では、X線CTを適用することでSCP工法による砂杭造成に伴った砂杭周辺地盤の微視構造に着目するため、本章では、SCP工法の砂杭造成機構の模擬と砂杭造成に伴う砂杭周辺地盤の微小挙動の観察を主目的とした μ XCT専用のSCP模型実験装置の開発を行い、その模型実験装置と実験手法の検証を実施した。

4.1 実験装置の開発^{1)~4)}

4.1.1 実験装置の概要

一般にCT撮影を伴う模型実験^{例えば5)}では、実験室からCT室への移動を繰り返してCT撮影を行うが、撮影の度に実験土槽の移動に伴うため、模型地盤の乱れやCT撮影位置のずれなど取得データへの悪影響が懸念されることがある。そこで今回開発した模型実験装置⁶⁾は、SCP工法を模擬した砂杭の造成と μ XCTによる砂杭造成過程のCT撮影を μ XCT室内で実現可能とすることで、撮影したCT画像を用いた画像解析までの一連の実験精度の向上を図った。

図-4.1に実験装置の概要を示す。図-4.2に μ XCT室内におけるスキャンテーブルへの設置状況を示す。模型土槽(図-4.2(a))には、X線の透過性を考慮したアルミ製の内径140mm、高さ430mmの円筒の試料容器を用い、土槽にリニアラックジャッキを搭載した手動によるケーシングパイプの強制昇降装置を設置し、 μ XCT室内で容器中央部に砂杭の造成を可能とした。ケーシングパイプの昇降装置(図-4.2(b))には、庄司歯車エンジニアリング社製のセルフロックリニアジャッキ(定格保持荷重1960N)⁷⁾を用い

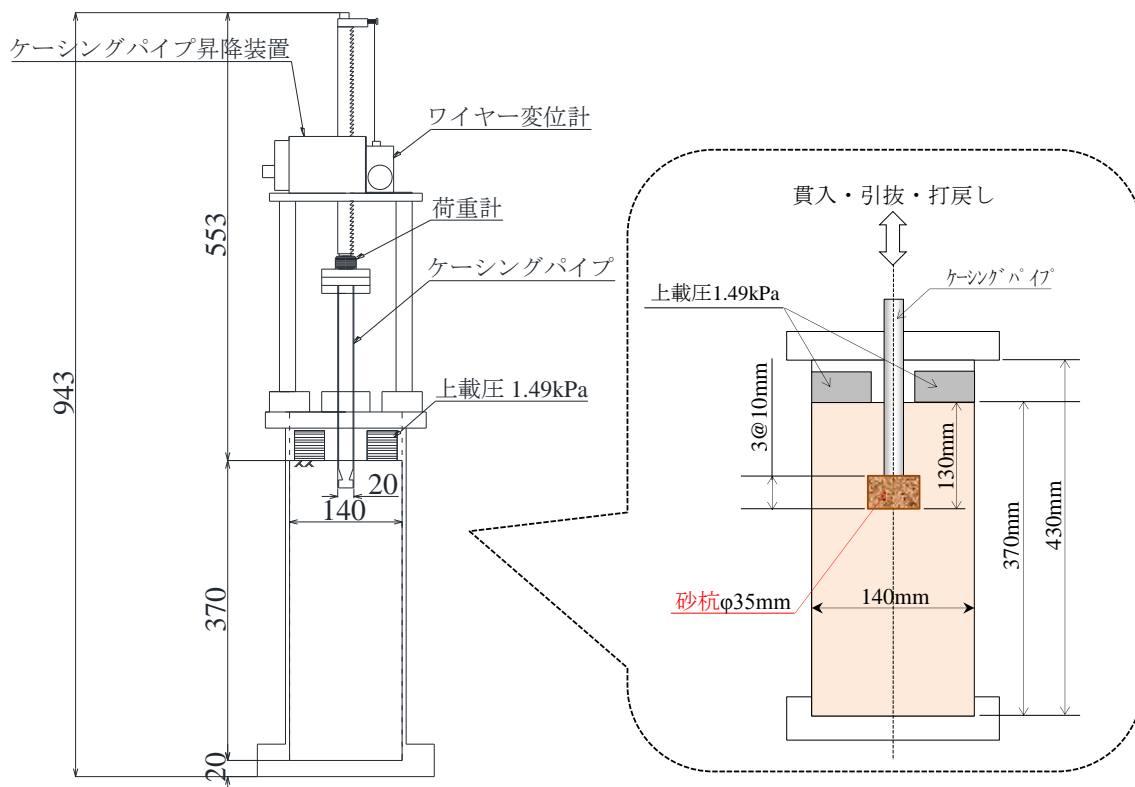


図-4.1 実験装置の概要

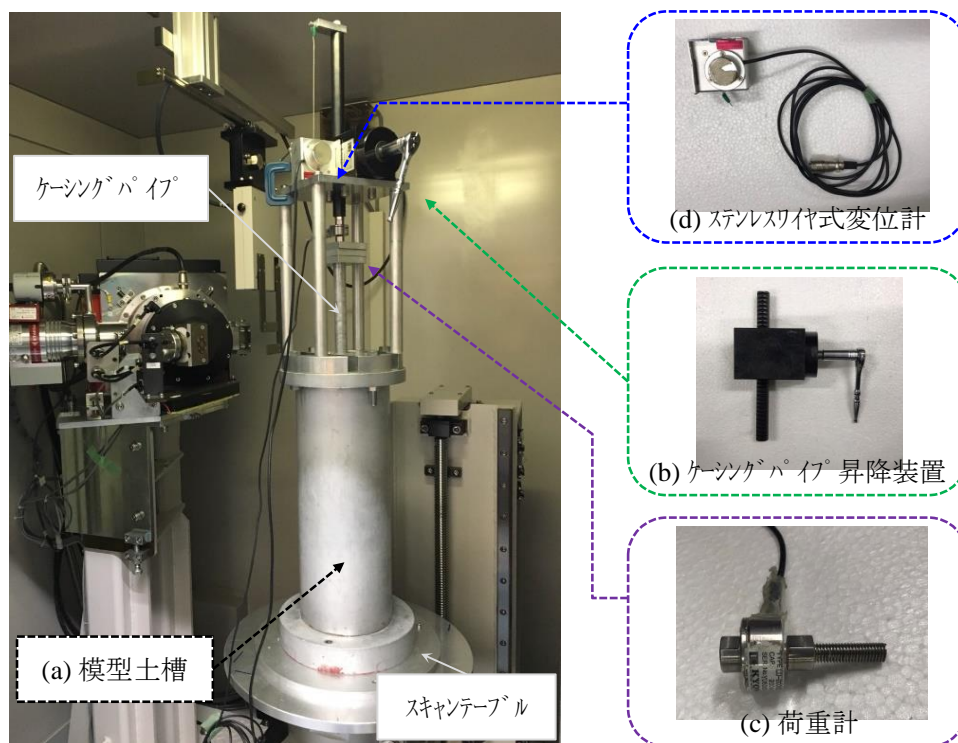


図-4.2 スキャンテーブルへの設置状況

た。これは手動式であるが、同スペックの一般的な電動式アクチュエーターと比べて小型かつ軽量であるため、CT撮影における重量制限に対して優位となる。入力軸一回転当りの移動量も1.15mmと非常に小さく、ギア内部にはメカニカルなセルフロック機構を持つため、入力回転を止めると自動的にラックが固定される点も砂杭造成過程における細かなケーシングパイプの移動毎にCT撮影を行う本実験への適用性が高い。模型実験はスキャンテーブル上で実施し、CT撮影以外に、共和電業社製の荷重計（定格容量2kN）（図-4.2(c)）⁸⁾によるケーシングパイプ貫入による地盤を押し下げる力（以降、押し力）と東京測器研究所社製のステンレスワイヤ式変位計（容量500mm）（図-4.2(d)）⁹⁾による貫入深度を計測することで実験データを取得した。

4.1.2 実験手順

模型実験は、以下に示す手順で行った。主要となる手順における実験状況を図-4.3に示す。

- ① 実験室にて土槽内に乾燥状態の砂を用いて模型地盤を作製。模型地盤の作製は、相対密度 $D_r=50\%$ に相当する量（ここでは、豊浦砂 8,370g）の砂を空中落下法により投入後（図-4.3(a)）、土槽側面を軽く打撃することで所定の高まで調整した（図-4.3(b)）。
- ② 実験装置をCT室内に移動。
- ③ 砂杭の造成治具およびケーシングパイプ昇降装置を設置。
- ④ 模型実験装置をスキャンテーブル上への設置（図-4.3(c)）。
- ⑤ ケーシングパイプを所定の深度まで貫入（図-4.3(d)）。
- ⑥ 砂杭の中詰材としての砂を投入。砂は、砂杭改良径 35mm、造成長 10mm、相対密度 $D_r=80\%$ に相当する量（ここでは、豊浦砂 15.2g）を投入した（図-4.3(e)）。
- ⑦ ケーシングパイプの引抜きによる模型地盤内への砂の排出。
- ⑧ ケーシングパイプの打戻し（貫入）による砂杭の拡張。
- ⑨ ⑥～⑧を繰り返すことで、連続的な砂杭の造成を行った。

なお、CT撮影は、ケーシングパイプのみを固定して行い（図-4.3(f)）、手順④の原

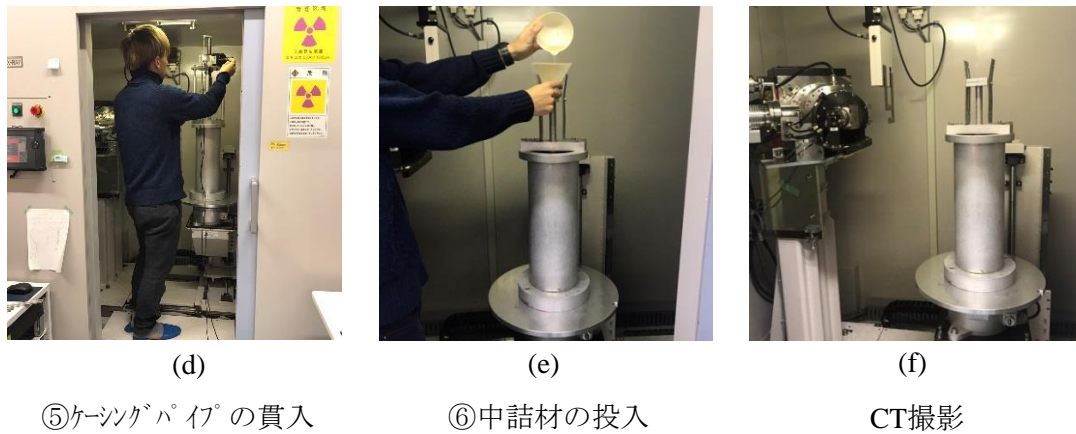


図-4.3 実験状況

地盤としての初期状態，手順⑤のケーシングパイプ貫入時の挙動における任意の貫入深度地点，さらには，砂杭造成時の挙動として手順⑦のケーシングパイプ引抜き後，手順⑧ケーシングパイプの打戻しによる砂杭造成後を対象に行った。

4.1.3 SCP 工法を模擬した砂杭の造成方法

砂杭の造成治具には，図-4.4 に示す外管と管内砂（中詰砂）の排出と打戻し時に拵が可能な中実の内管を用いた二重管構造のケーシングパイプ¹⁰⁾を用いた。

砂杭は，図-4.5 に示すフローを繰り返すことで土槽内の模型地盤中央部に造成した。
①外径 20mm (厚さ 1mm) の外管と中実内管を組合せた状態で目標深度まで貫入した後，外管を固定し，②内管を抜取り，③砂杭の目標相対密度を $D_r=80\%$ とし，砂杭改良径 35mm，

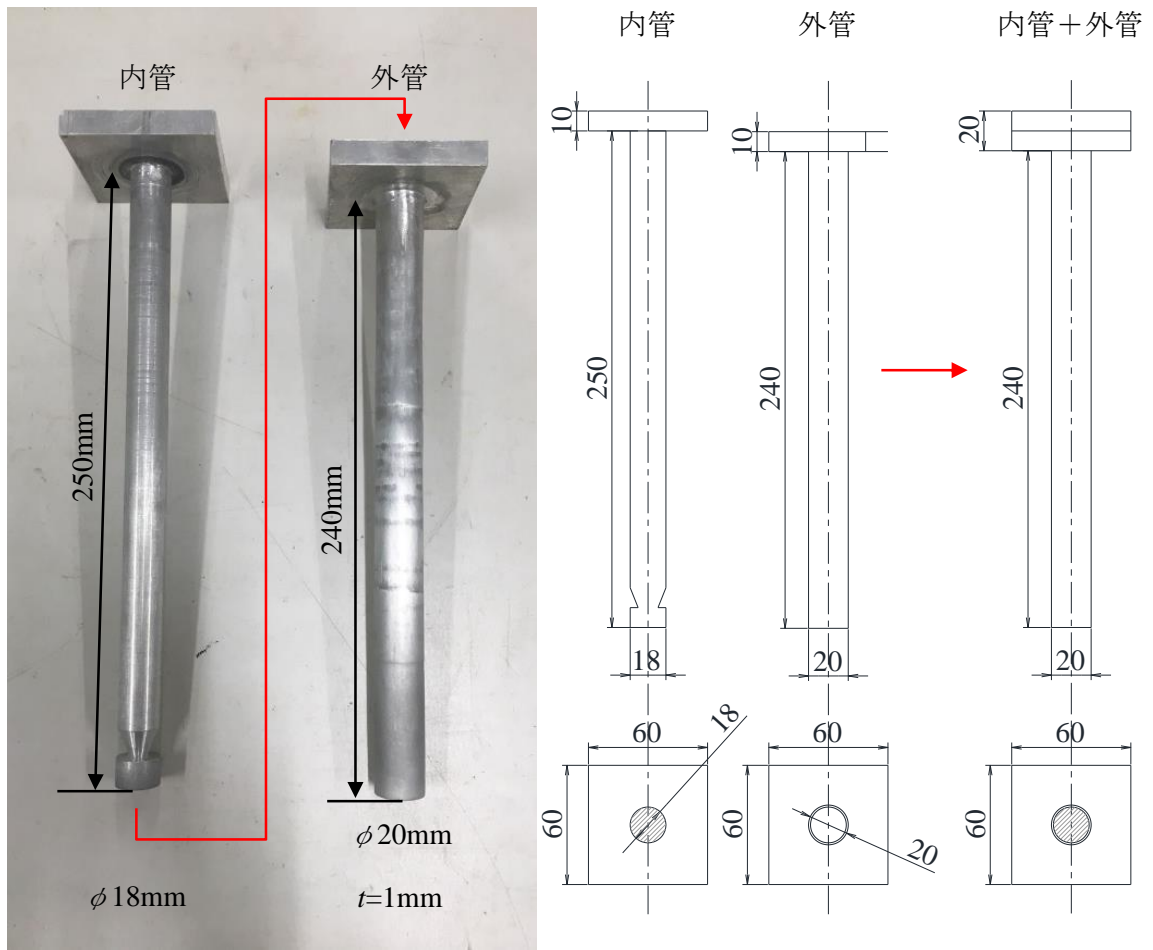


図-4.4 砂杭造成治具

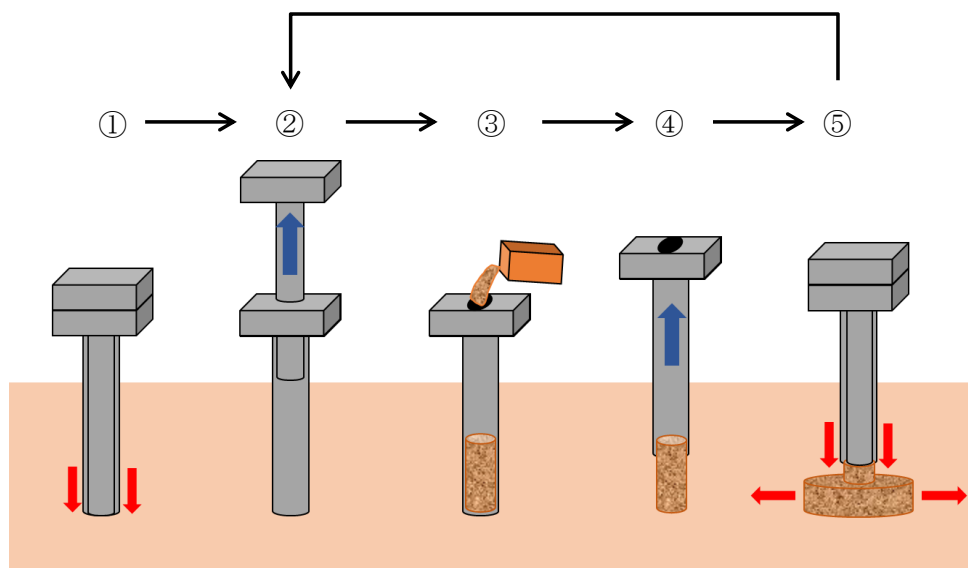
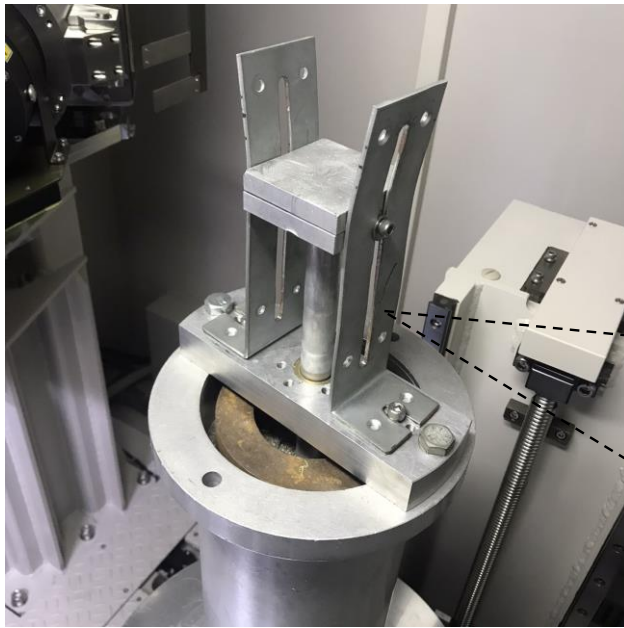


図-4.5 砂杭造成フロー



(a) 固定用専用治具

図-4.6 CT撮影時の固定用専用治具の設置状況

造成長 10mm に相当する砂を投入した。砂投入後，④外管を 40mm 引抜くことで砂を模型地盤内に排出し，⑤内管を挿入した状態で 30mm 打戻すことで 10mm の砂杭を造成する施工を 1 サイクルとし，②～⑤を繰り返すことで 3 サイクル，30mm の連続的な砂杭の造成を行った。砂杭の造成は，バイブロを用いる振動締固めではなく，実施工の概ね 1/20 の縮尺に相当した静的締固め砂杭工法^{11),12)}を想定しており，これら全てを μ XCT 室内で実施し，CT 撮影を行った。

なお，ケーシングパイプ貫入速度は，10mm/min とし，CT 撮影の際は，図-4.6 に示す専用治具で固定した状態で行った。

4.2 実験装置の検証

4.2.1 検証実験の概要

模型地盤および砂杭材は，図-4.7 に示す豊浦砂を用い，模型地盤の初期相対密度を $D_r=50\%$ ，砂杭の目標相対密度を $D_r=80\%$ と設定し，乾燥状態で実験を行った。模型地盤

には、 μ XCT 撮影により得られた CT 画像を検証する際に、造成された砂杭と模型地盤とを区別するためのマーカーとして、鉄製研削材（スチールショットブラスト）を重量比 5% 混合した。図-4.7(d)に混合材料における CT 画像例を示すが、白く表示された部分が鉄粒マーカーとなる。表-4.1 に使用した豊浦砂の物理的性質、図-4.8 に粒径加積曲線を示す。

μ XCT 撮影は、以下の実験過程を対象に合計で 18 回実施した。表-4.2 に撮影条件を示す。

- ・ ケーシングパイプ貫入前の原地盤としての初期状態 : 1 回
 - ・ ケーシングパイプ貫入時に任意の貫入深度地点 : 8 回
 - ・ ケーシングパイプ引抜きに伴う中詰砂の模型地盤内への排出後と
ケーシングパイプ打戻しによる砂杭拡径途中と拡径後 : 3 回×3 サイクル
- 合 計 : 18 回 撮影

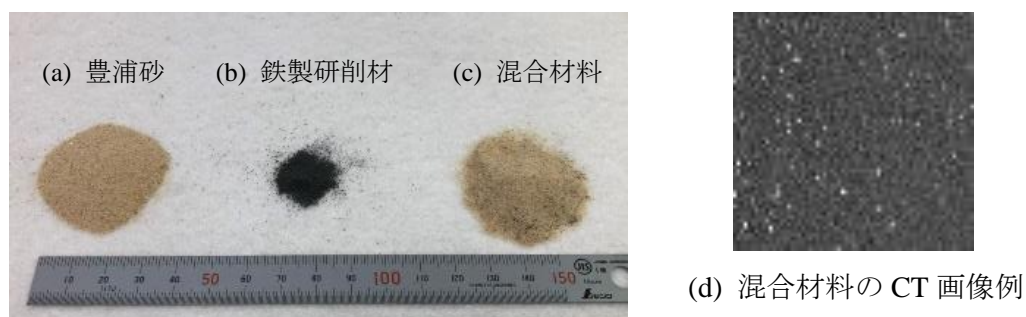


図-4.7 使用砂材料

表-4.1 豊浦砂の物理的性質

項目	物性値	単位
土粒子密度 ρ_s	2.650	g/cm^3
D_{50}	0.175	mm
D_{60}	0.180	mm
D_{10}	0.140	mm
均等係数 U_c	1.290	-
最大間隙比 e_{\max}	0.985	-
最小間隙比 e_{\min}	0.611	-

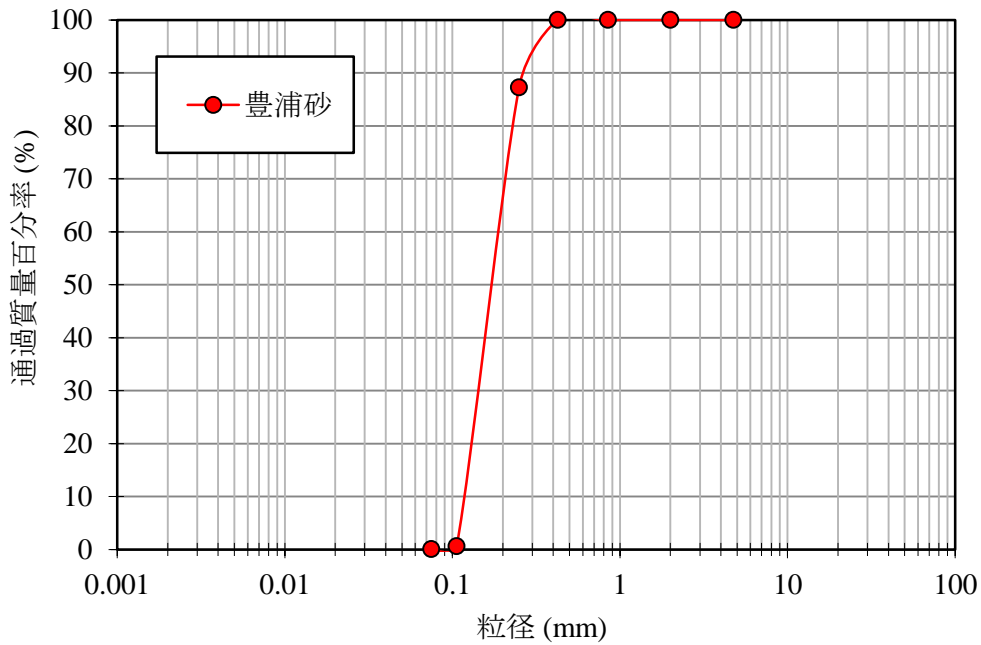


図-4.8 豊浦砂の粒径加積曲線

表-4.2 検証実験の μ XCT 撮影条件

管電圧	220kV
管電流	500 μ A
ビュー数	1000
積算枚数	3枚
1画素サイズ	0.11mm
スライス厚	0.22mm
FPDゲイン	1pF
FPD積分時間	249ms
FCD	295
マトリクスサイズ	1024 \times 1024

4.2.2 砂杭造成時の押力

荷重計およびステンレスワイヤ式変位計を用いて測定したケーシングパイプ貫入に伴う押力と貫入深度の関係を図-4.9に示す。図より各サイクル終了時に押力が最大値

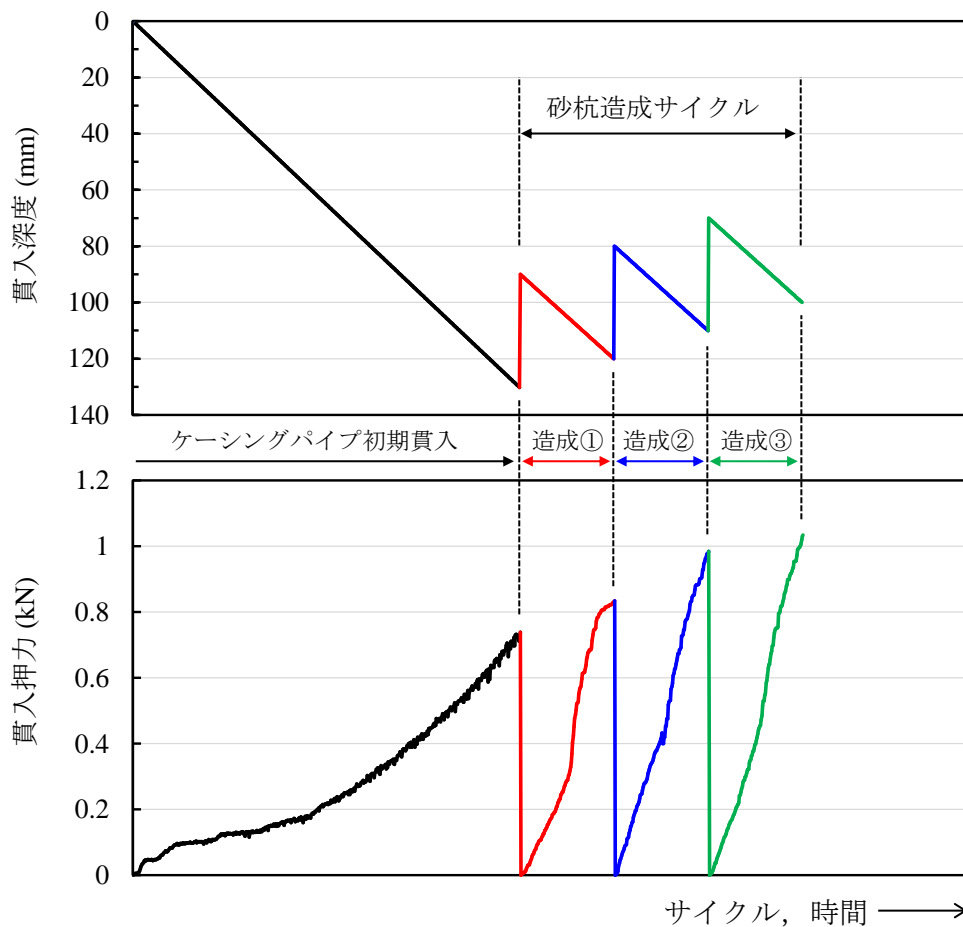


図-4.9 施工サイクルと貫入深度および押力の関係

を示している。また、砂杭造成時の押力ピーク値が造成前の同深度における初期貫入時の押力より増加し、さらにサイクルが増えるにつれて押力ピーク値が増加していることも確認できる。これは、砂杭造成に伴った周辺地盤の締固め効果と、先行造成された砂杭のさらなる密実化によるものと想定することができる。

また、図-4.10に実施工におけるSCP工法の砂杭造成サイクルの押力値(油圧反力値)とケーシング先端軌跡の関係^{13),14)}から考えられている深度計器と押力の模式図¹⁵⁾を示す。図-4.9と図-4.10を比較すると、今回開発した装置を用いた模型実験におけるケーシングパイプの貫入から引抜きによる砂の排出、打戻しによる拡径までの一連の砂杭造成サイクルについて、実施工におけるSCP工法施工サイクルの模式と概ね一致することが確認できる。

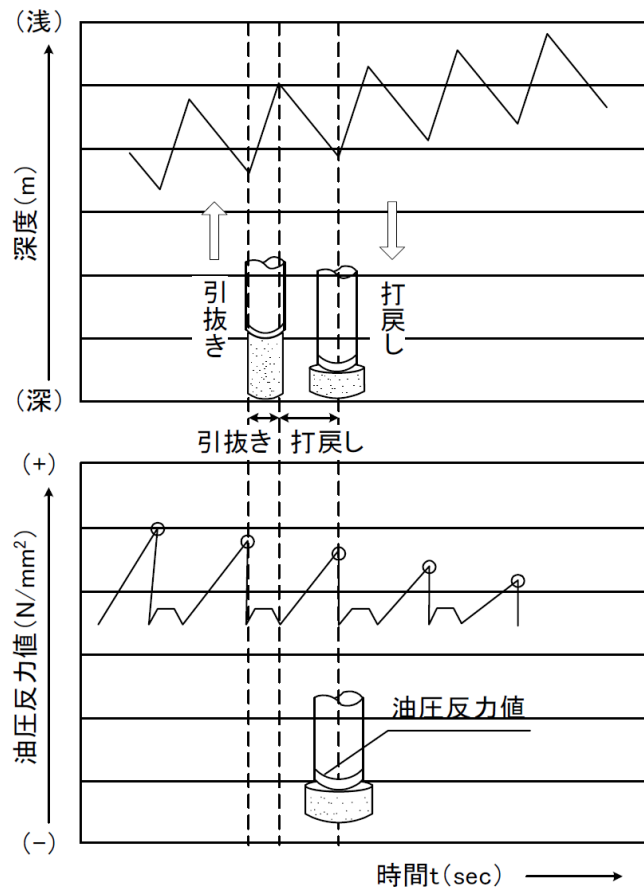


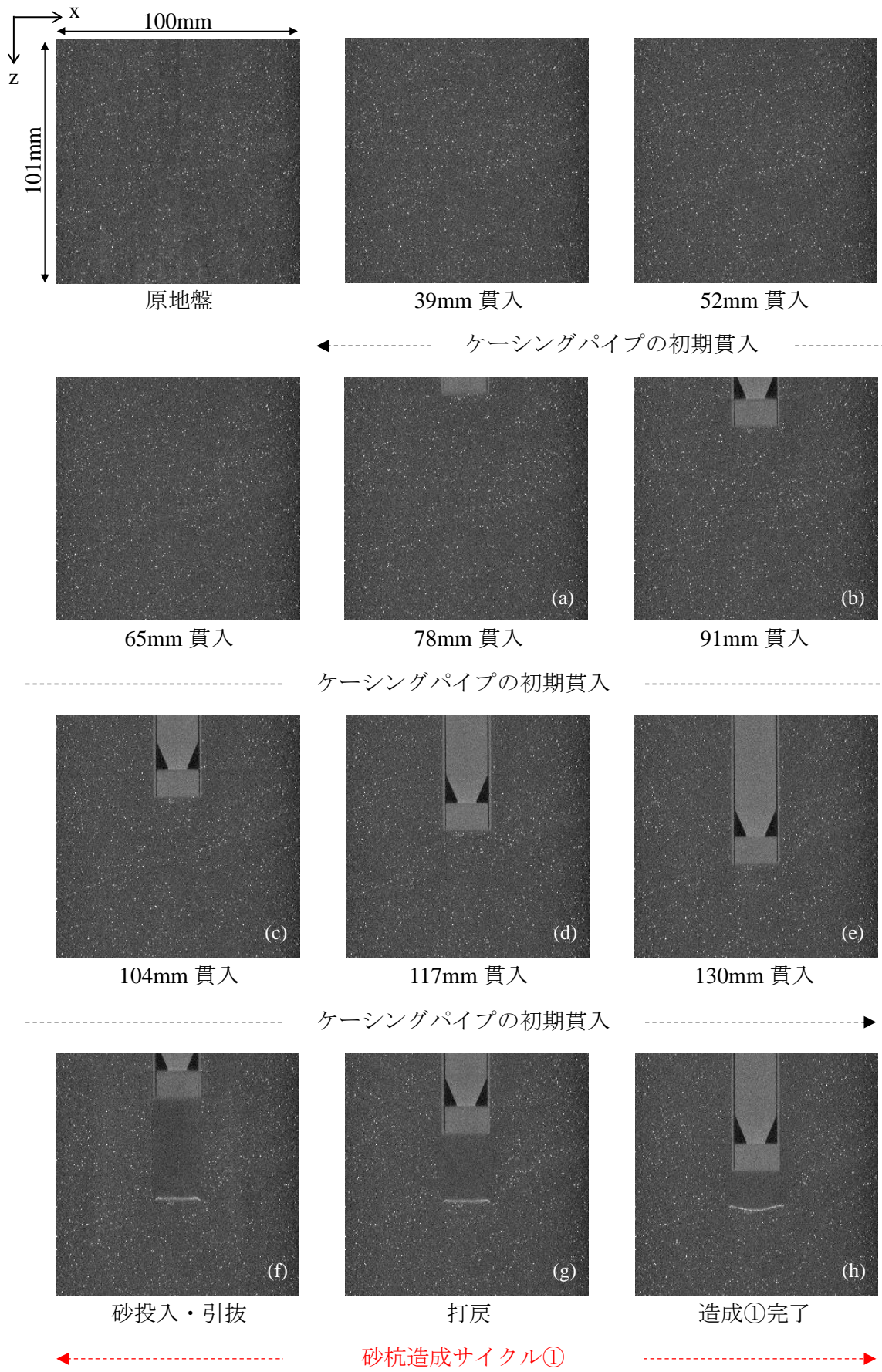
図-4.10 深度計器と押力の模式図¹¹⁾

4.2.3 砂杭造成時の可視化

図-4.11 に撮影した断面 CT 画像を示す。CT 画像から、ケーシングパイプの引抜きに伴ってその先端から投入した砂(鉄粒マーカールを含まない)が打戻しによって拡径され、砂杭として連続的に造成されていることが確認できる。

図-4.12 には、図-4.11(a)～図-4.11(n)までの断面 CT 画像にケーシング先端の軌跡を追記した。図より、前述した図-4.10 に示した実施工における SCP 工法の施工サイクル模式とも概ね一致することが X 線 CT を用いて模型地盤内部の挙動を詳細に可視化することで明らかとなった。

図-4.13 では砂杭造成サイクル③におけるケーシングパイプによる打戻し終了時に



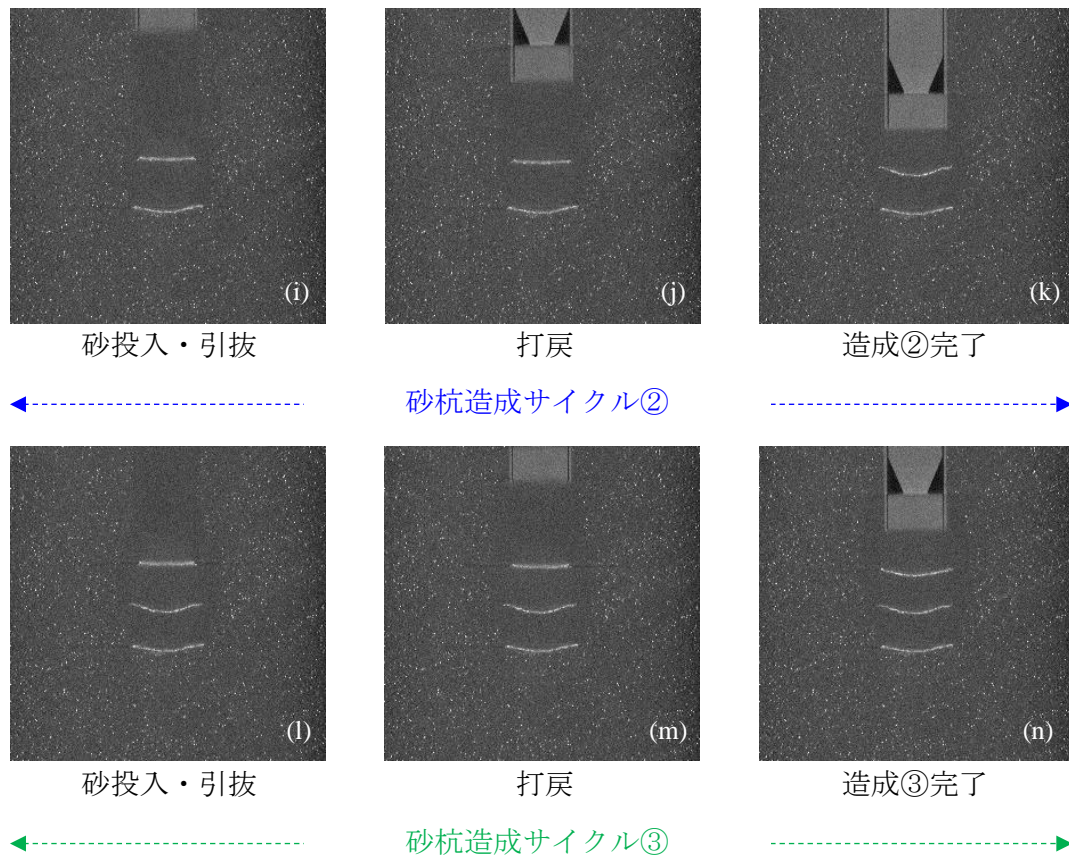


図-4.11 断面 CT 画像

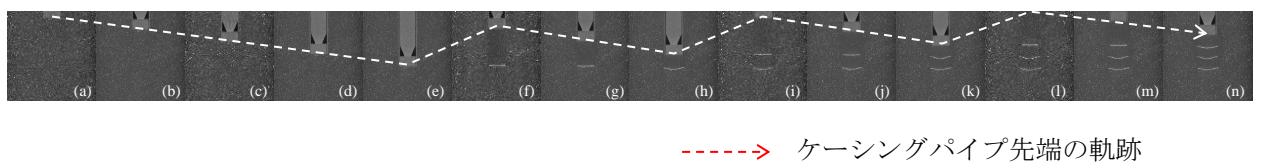


図-4.12 断面 CT 画像におけるケーシングパイプ先端の軌跡

撮影した断面 CT 画像（図-4.11(n)参照）に対して、拡径された砂杭の造成径について確認した。造成した砂杭中央部では、外径 $\phi 20\text{mm}$ のケーシングパイプにより排出された砂が、ケーシングパイプの打戻し貫入によって、砂杭造成径として想定した $\phi 35\text{mm}$ 程度に拡径されていることがわかる。

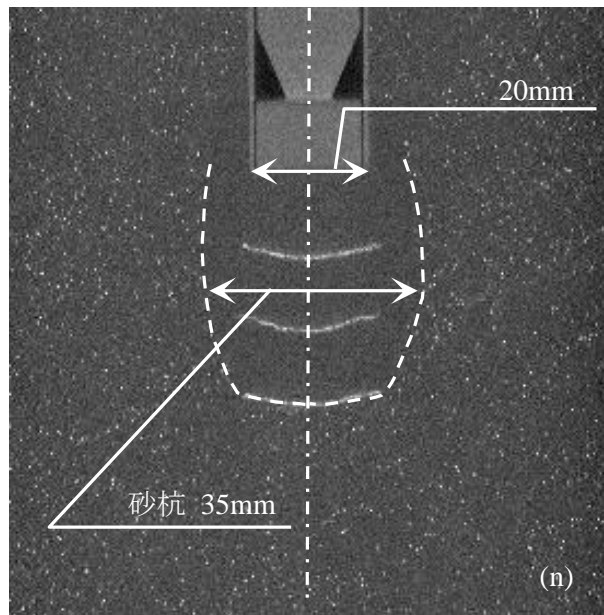


図-4.13 砂杭造成サイクル③終了時の断面 CT 画像

4.3 まとめ

本章では、本研究に用いるために開発した μ XCT 専用の模型実験装置と実験手順および SCP 工法を模擬した砂杭の造成方法について詳細に述べるとともに、CT 撮影による実験装置および実験手法の検証を行った。検証実験の結果から本装置および手法により、連続的な砂杭の造成状況が詳細に可視化することでき、SCP 工法による締固め砂杭の造成を模擬することが可能であることを確認した。

以下に得られた知見を列挙する。

- i) SCP 工法を模擬した砂杭の造成と砂杭造成過程の CT 撮影を μ XCT 室内で実現可能とする模型実験装置を開発した。
- ii) 模型実験では、ケーシングパイプ貫入時の押力を荷重計にて測定し、ケーシングパイプの貫入から引抜きによる砂の排出、打戻しによる拡径までの一連の砂杭造成サイクルについて、実施工における SCP 工法の施工サイクルの模式と概ね一致することを検証した。

- iii) ケーシングパイプの打戻しによる砂杭造成（拡径）時の押力ピーク値が，造成前の同深度におけるケーシングパイプの初期貫入時の押力より増加し，砂杭の造成サイクルが増えるにつれてその押力値が増加することがわかった。これは，砂杭造成に伴った周辺地盤の締固め効果と，先行造成された砂杭のさらなる密実化によるものと想定できる。
- iv) 開発した模型実験装置および実験手法により模擬した SCP 工法において，ケーシングパイプ先端周辺に投入した砂がケーシングパイプの打戻しにより拡径され，拡径された砂杭が連続的に造成されていることを μ XCT 撮影により得られた断面 CT 画像から確認した。

参考文献

- 1) 地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法 設計・施工マニュアル，2009.
- 2) Ezoe, A., Harada, K. and Otani, J.: Sand Compaction Pile Method and Its Applications, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, pp.1-10, 2019. (Published online)
- 3) 渡邊陽一：X線CTデータを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明に関する研究，熊本大学大学院自然科学研究科博士論文，2011.
- 4) Sato, T., Onda, K. and Otani, J.: Development of a new loading test apparatus for microfocus X-ray CT and its application to the investigation of soil behavior surrounding driven open-section piles, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp776-785, 2018.
- 5) 江副哲，大谷順，佐藤宇紘，宮崎公平，原田健二： μ フォーカスX線CTを用いた締固め砂杭造成過程における改良地盤内部構造の可視化，第52回地盤工学研究発表会，pp.719-720, 2017.
- 6) 江副哲，原田健二，大谷順，佐藤宇紘：X線CTを用いた締固め砂杭周辺地盤の微視構造変化に関する模型実験，土木学会第73回年次学術講演会，pp.9-10, 2018.
- 7) 株式会社庄司歯車エンジニアリング：リニアジャッキカタログ，2016.
[<http://www.shoji-lock.jp/>]
- 8) 株式会社共和電業：引張圧縮両用型小型ロードセルカタログ
[<https://www.kyowa-ei.com/jpn/index.html>]
- 9) 株式会社東京測器研究所：変位計カタログ，2019.
[<https://tml.jp/>]
- 10) 山崎浩之：液状化対策としての締固め工法の設計法に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1220, 2010.
- 11) 一般財団法人国土技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書 SAVE コンポーザー（低振動・低騒音の静的締固め工法），2015.

- 12) 地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法 設計・施工マニュアル，第4章 施工方法，施工機械，pp.122-130, 2009.
- 13) 中野健二，大西智晴，安達俊夫：静的締固め砂杭の造成時反力による地盤の変形係数の推定，日本建築学会学術講演概要集，pp.635-636, 1998.
- 14) 杉山徹至，東祥二，中野健二，近藤豊史，塩手博道，妹尾博明，矢部明良：静的締固め砂杭工法による反力一定試験施工（その1 工法及び試験概要），日本建築学会学術講演概要集，pp.489-490, 2000.
- 15) 武田尚也，吉富宏紀：静的締固め砂杭工法における造成時の押力測定結果，日本建築学会学術講演概要集，pp.583-584, 2012.

第5章 砂質土の微視構造に関する基礎実験

本章では、砂質土の密な状態における基本的な微視構造を把握するための実験として、熊本硅砂を実験材料として異なる締固め方法で作製した供試体を対象に μ XCT 撮影を行った。X線CTと画像解析により、締固め方法の相違による熊本硅砂の微視構造に関して相対密度と土粒子同士の接触の観点で定量的な評価を試みた。

5.1 基礎実験の概要^{1)~4)}

5.1.1 実験材料

基礎実験では、乾燥状態の熊本硅砂を用いた。

表-5.1 に使用した熊本硅砂の物理的性質、図-5.1 に粒径加積曲線を示す。

写真-5.1 に熊本硅砂の粒子拡大状況、図-5.2 に Simobe and Moroto⁵⁾によると最大間

表-5.1 熊本硅砂の物理的性質

項目	物性値	単位
土粒子密度 ρ_s	2.637	g/cm^3
D_{50}	1.400	mm
D_{60}	1.500	mm
D_{10}	1.000	mm
均等係数 U_c	1.500	-
最大間隙比 e_{\max}	1.106	-
最小間隙比 e_{\min}	0.769	-

隙比 e_{\max} と空隙比範囲 $Ie=e_{\max}-e_{\min}$ の関係図に今回使用した熊本硅砂をプロットした。写真および図より、熊本硅砂は比較的角張っている粒子形状 (Angular) であることがわかる。

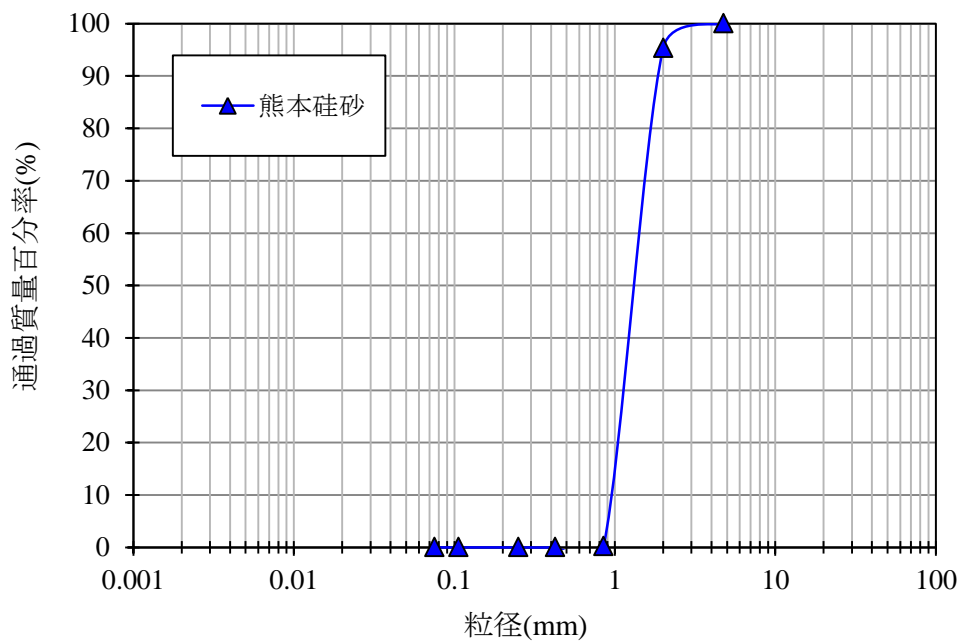


図-5.1 熊本硅砂の粒径加積曲線



写真-5.1 粒子拡大写真

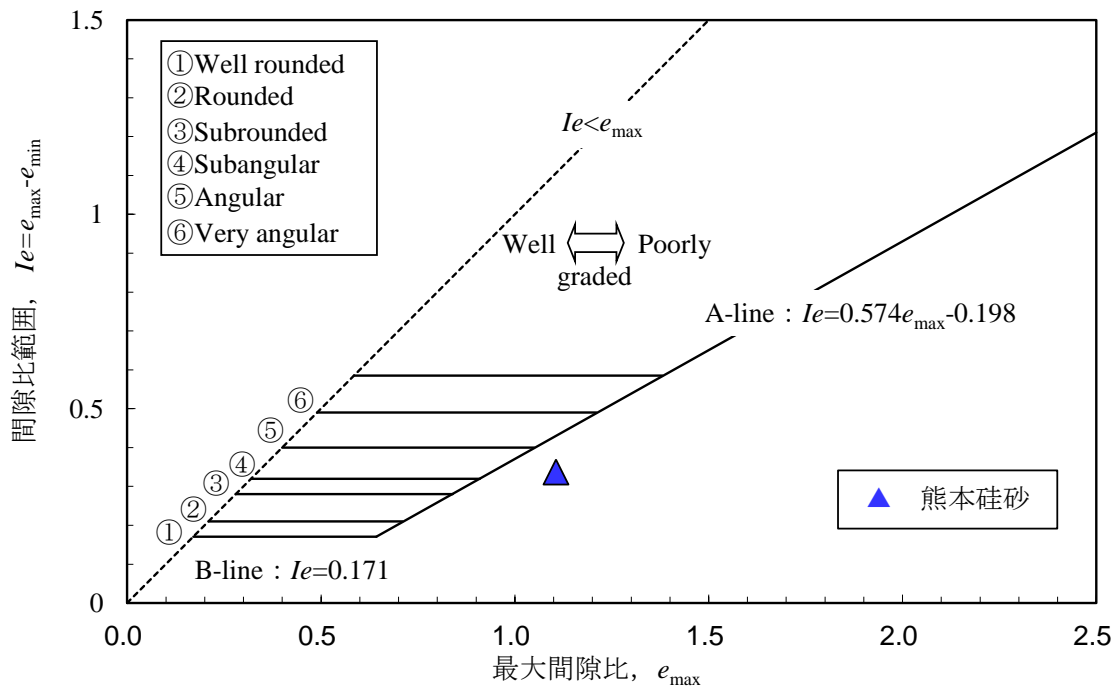


図-5.2 最大間隙比と間隙比範囲との関係

5.1.2 実験ケース

空中落下法（以降，空中法）と打撃による締固め法（以降，打撃法）の2ケースの異なる供試体作製方法を対象に目標相対密度 $D_r=85\%$ の供試体を作製し， μ XCT 撮影を行った。

表-5.2 に実験ケース，表-5.3 に撮影条件を示す。

表-5.2 基礎実験ケース

Case	実験材料	供試体作製条件	
		作製方法	目標相対密度
1	熊本硅砂	空中落下法（空中法）	$D_r=85\%$
2	熊本硅砂	打撃による締固め法（打撃法）	$D_r=85\%$

表-5.3 基礎実験の μ XCT 撮影条件

管電圧	100kV
管電流	600 μ A
ビュー数	1500
積算枚数	5枚
1画素サイズ	0.07mm
スライス厚	0.14mm
FPDゲイン	1pF
FPD積分時間	249ms
FCD	186
マトリクスサイズ	1024 \times 1024

5.1.3 供試体作製方法と実験手順

空中法と打撃法の 2 種類の供試体作製方法で相対密度が $D_r=85\%$ となるように直径 50mm、高さ 100mm のプラスチック製の試料容器内に作成した。

Case1 の空中法では乾燥状態の熊本硅砂を専用漏斗に入れ、漏斗先端から試料容器内にまき出すことで供試体を作製した。図-5.3 に空中法による供試体作製状況を示す。図-5.3(a)に示すまき出し用の専用漏斗はノズル径を 14mm とし、1 回にまき出す試料の全量を一度に入れることができる容量とした。図-5.4 に落下高さと目標相対密度の関係についてキャリブレーションした結果を示す。図より目標相対密度 $D_r=85\%$ の場合、専用漏斗の先端からの落下高さが 2.2m 程度となる。

Case2 の打撃法では熊本硅砂を 5 層詰にし、各層目標とする高さまで試料容器側面を木槌にて打撃して供試体を作製した。写真-5.2 に打撃法による供試体作製状況を示す。図-5.5 に打撃回数と相対密度の関係についてキャリブレーションした結果を示す。図より目標相対密度 $D_r=85\%$ の場合、打撃回数が 250 回 (50 回/層) 程度となる。

実験室内で供試体作製後それぞれのケースで作製した供試体を移動させ、 μ XCT 装置のスキヤンテーブル上に設置し、CT 撮影を行った。写真-5.3 に供試体の CT 撮影状況を示す。



図-5.3 空中法による供試体作製状況

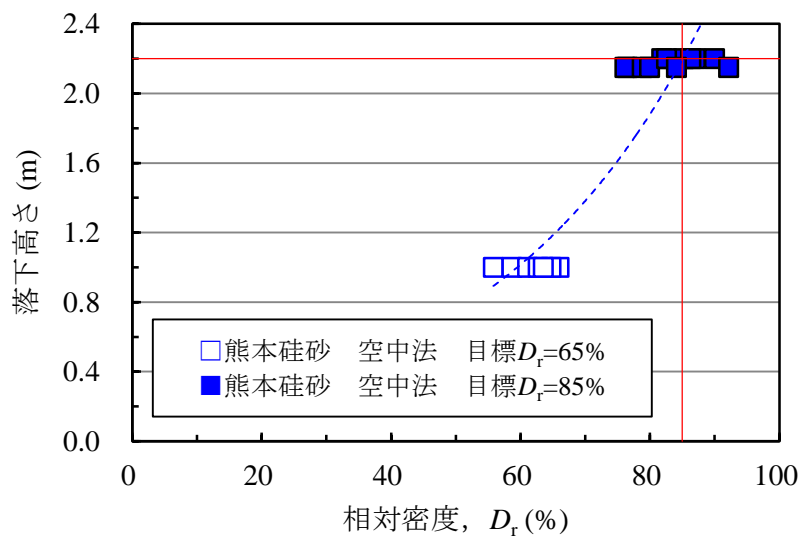


図-5.4 空中法による相対密度と落下高さの関係



写真-5.2 打撃法による供試体作製状況

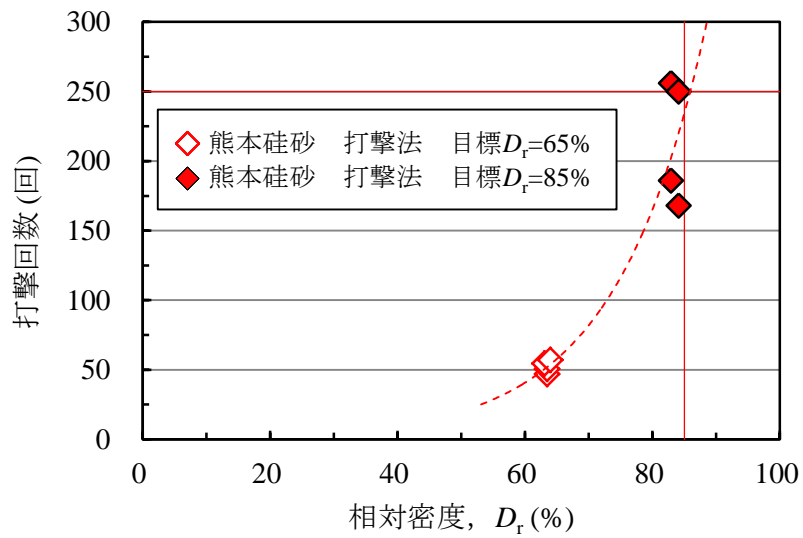


図-5.5 打撃法による相対密度と打撃回数の関係

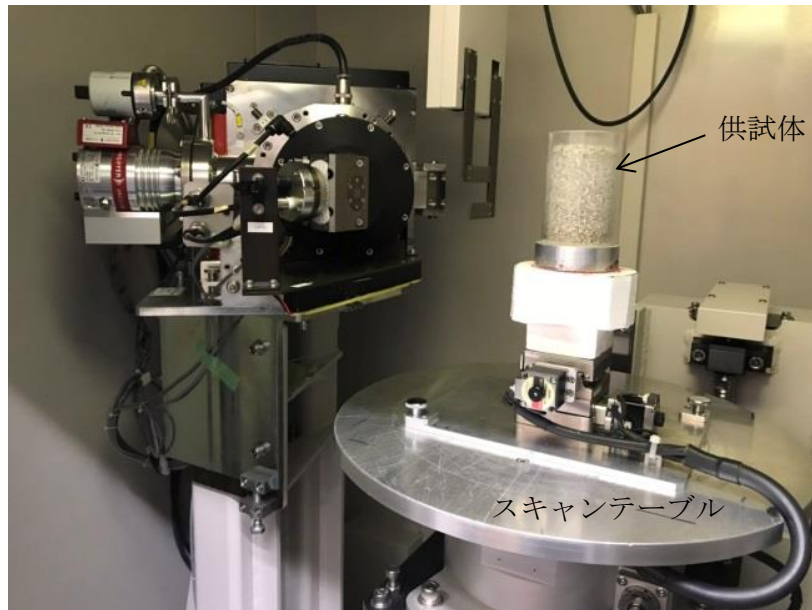


写真-5.3 基礎実験における μ XCT 撮影状況

5.2 基礎実験の結果

5.2.1 X線 CT 画像

空中法と打撃法のそれぞれのケースで μ XCT 撮影した断面 CT 画像を図-5.6 に示す。CT 撮影により得られた CT 画像は、線吸収係数を線形変換することで定義される輝度値の空間分布である。この輝度値が密度との相関関係にあり、高密度領域が白く、低密度領域が黒く表示される。したがって、図-5.6 では熊本硅砂の土粒子部分が白く、間隙となる空気の部分が黒く表示されていることになる。断面 CT 画像より空中法（図-5.6(a)参照）と打撃法（図-5.6(b)参照）のどちらにおいても相対密度 $D_r=85\%$ を目標に作製された比較的密な状態における熊本硅砂の供試体であるため、土粒子が密に配列されていることがわかる。しかしながら、CT 画像を目視するだけでは、供試体作製方法の相違による微視構造の明確な差異を確認することができない。

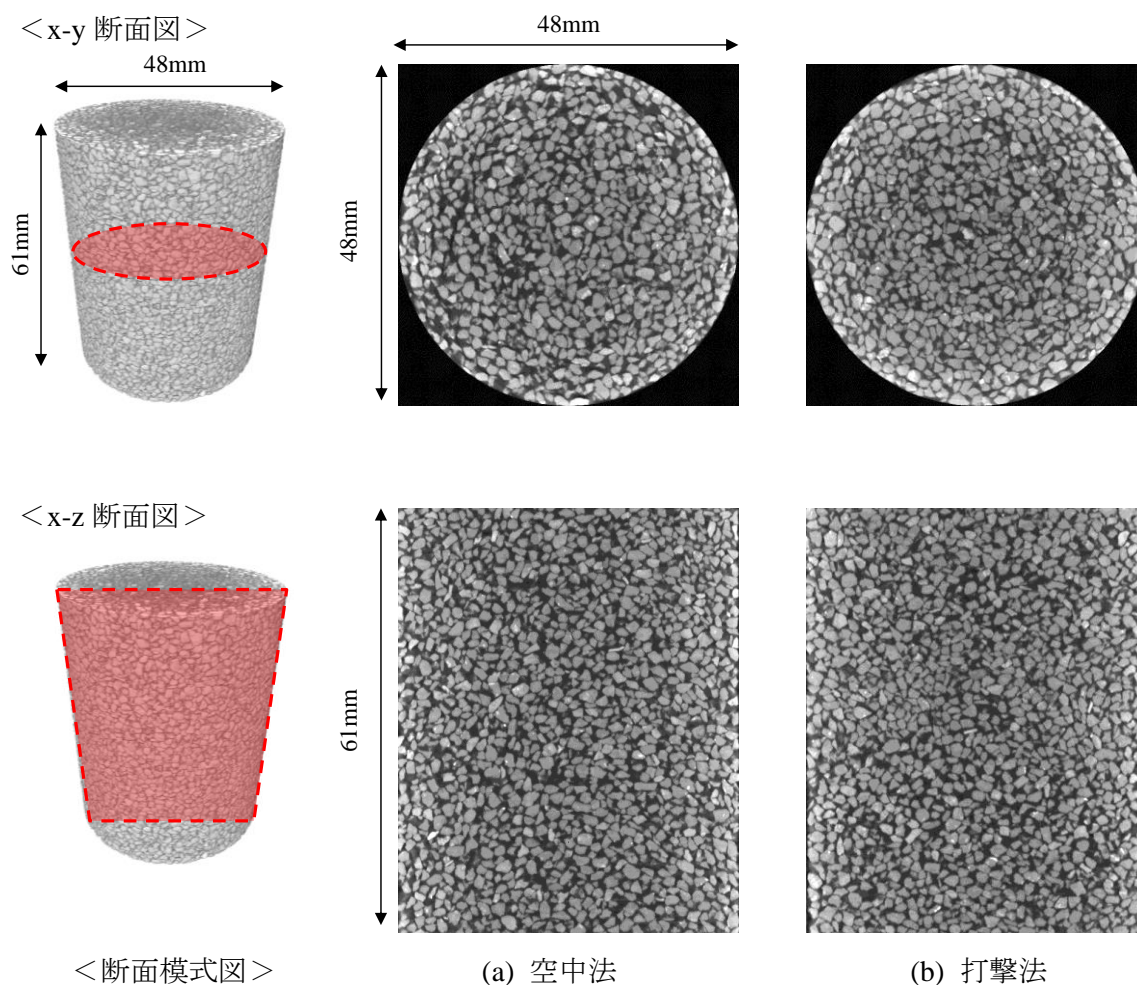
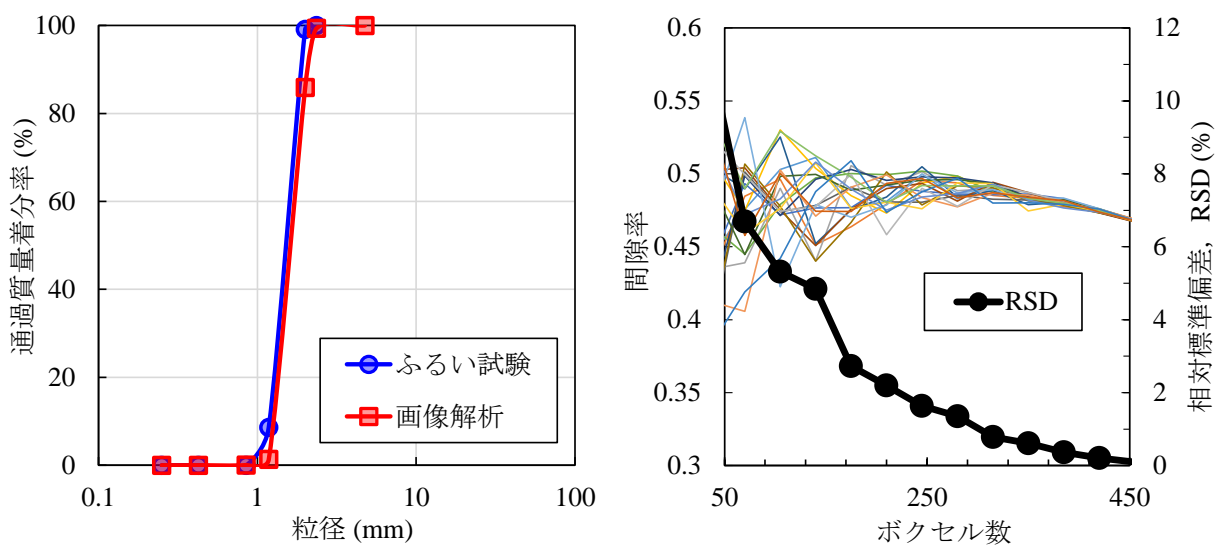


図-5.6 断面 CT 画像

5.2.2 画像解析による微視構造の評価^{6),7)}

異なる作製方法で締固められた砂質土の微視構造について定量的な評価を行うため、得られた CT 画像を用いて“第 3 章 3.2 節 3.2.2 画像解析による土粒子同士の接触点数の算出”で述べた画像解析手法を用い、相対密度や土粒子同士の接触点数および配位数を算出した。

基礎実験における画像解析精度を検証するために、画像解析から得られた土粒子形状データを基にした粒径加積曲線と土質試験におけるふるい分析との比較と代表要素体積について確認した。図-5.7 に解析精度の検証結果を示す。図-5.7(a)により 10%粒径や 90%粒径の付近で若干の誤差が見られるが全体的に概ね一致している。



(a) 粒径加積曲線

(b) 代表要素体積

図-5.7 画像解析精度の検証

また、図-5.7(b)により、ここでは相対標準偏差 RSD が 1%以下となる解析領域は、一画素寸法が 0.07mm の時、代表要素体積の一边が 290voxel、すなわち 20mm となる。そこで、接触点数は、図-5.8 に示す供試体中央部の上、中、下の深度を画像解析位置とし、1 辺が 20mm の立方体領域で抽出した。

表-5.4 に基礎実験結果として画像解析により算出した接触点数および相対密度を示し、図-5.9 に画像解析位置における相対密度を示す。それぞれ目標相対密度 $D_r=85\%$ で供試体作製を行ったが、空中法では平均 $D_r=85.1\%$ となり目標値とほぼ一致したのに対して、打撃法の平均 $D_r=90.4\%$ を示し、供試体中央部は空中法より若干密な状態となった。図-5.10 に画像解析位置における接触点数を示す。図より、接触点数はどの深度においても打撃法の方が空中法より多いことがわかる。また、画像解析位置下部に着目すると、相対密度が打撃法より空中法の方が高いにもかかわらず (図-5.9 参照)、接触点数については、打撃法の方が空中法より多い。図-5.11 に相対密度と接触点数の関係を示す。図には線形近似した直線を追記しているが、接触点数は同じ相対密度の状態であっても打撃法の方が空中法より多いことが確認できる。また、図-5.12 には、一つの土粒子に接触する数である配位数 (Coordination number, CN) ⁸⁾ とその平均個数の関係を示す。配位数で見ると、打撃の方が、6 以上の接触を有する土粒子数が多くなっている。

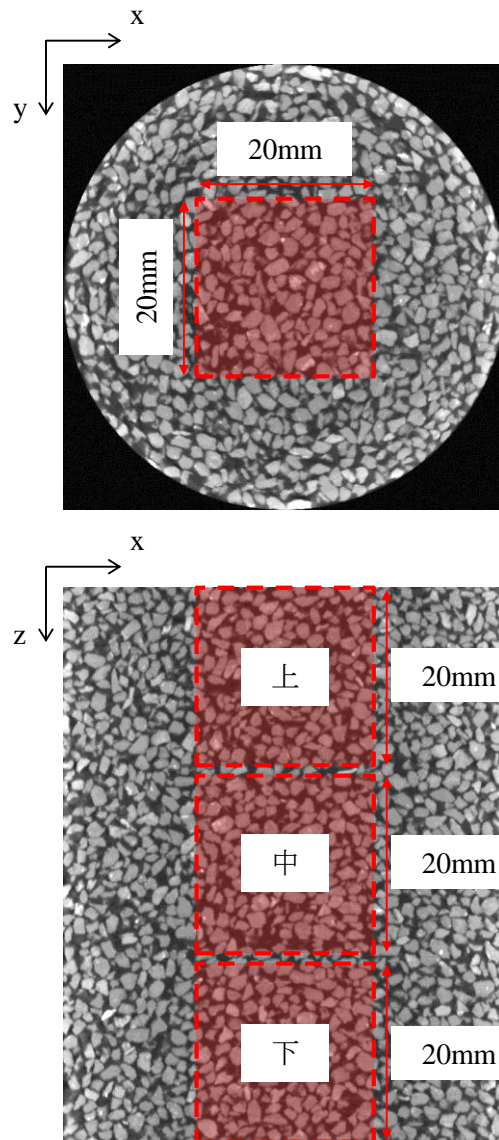


図-5.8 画像解析位置

表-5.4 画像解析による基礎実験結果

作製方法	空中法 (Case1)				打撃法 (Case2)			
	上	中	下	平均	上	中	下	平均
画像解析位置								
接触点数 N_{CP} (個)	6,300	6,196	6,416	6,304	7,118	7,665	7,512	7,432
土粒子体積比率	0.547	0.547	0.555	0.550	0.5544	0.5644	0.5468	0.555
間隙率	0.453	0.453	0.445	0.450	0.446	0.436	0.453	0.445
間隙比 e	0.828	0.827	0.802	0.819	0.804	0.772	0.829	0.801
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.443	1.443	1.463	1.450	1.462	1.488	1.442	1.464
相対密度 D_r (%)	82.5	82.6	90.2	85.1	89.7	99.2	82.2	90.4

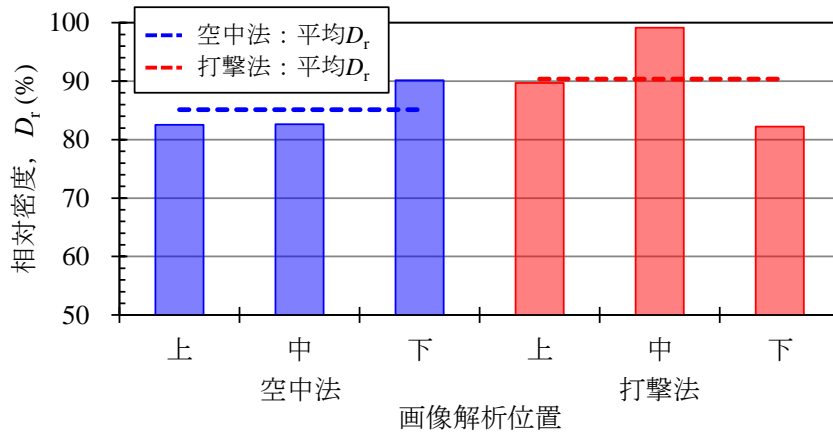


図-5.9 画像解析位置における相対密度

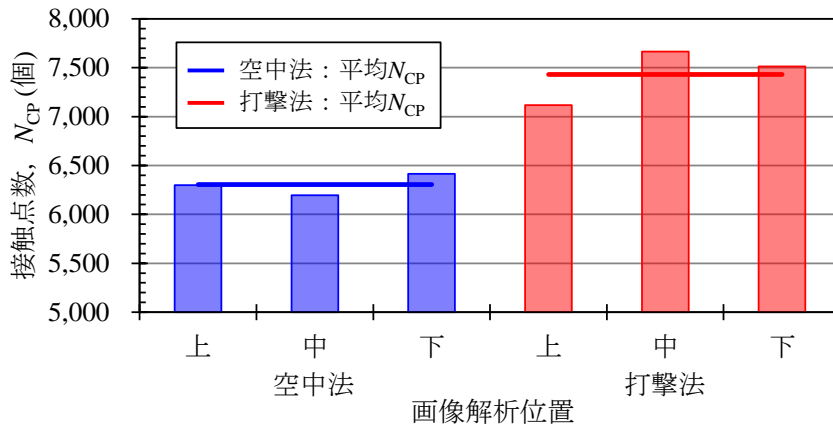


図-5.10 画像解析位置における接触点数

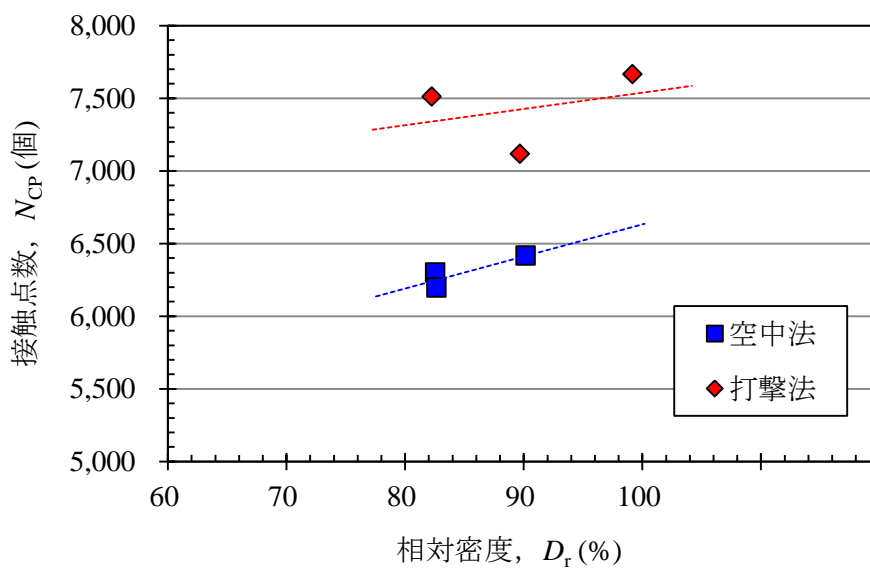


図-5.11 接触点数と相対密度の関係

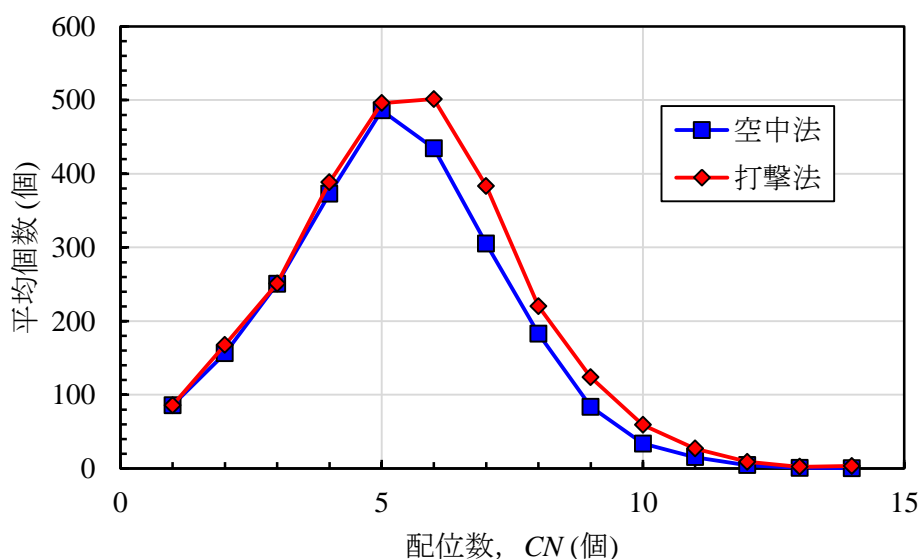


図-5.12 配位数のヒストグラム

熊本硅砂を実験材料として画像解析による土粒子同士の接触の観点で整理したこれらの結果から、締固められた砂質土の微視構造については、接触点数を用いた定量化が可能であることが提案できる。また、同じ相対密度の状態であっても、供試体作製方法が異なれば、すなわち、砂質土の締固め方法が異なれば、接触点数に違いがあることがわかった。これは、同じ相対密度の状態の締固められた砂質土であっても、接触点数が多ければ多いほど砂質土の微視構造がより安定化されることになると考えられる。

5.3 まとめ

本章では、砂質土の密な状態における基本的な微視構造を把握する実験として、熊本硅砂を実験材料として異なる締固め方法で作製した供試体を対象に μ XCT 撮影を行い、画像解析により相対密度と土粒子同士の接触の観点で定量的な評価を試みた。以下に得られた知見を列挙する。

- i) 第3章で述べた三次元空間解析ソフトによる画像解析手法を用いることで、撮影したCT画像から熊本珪砂における相対密度と土粒子同士の接触点数を算出できた。
- ii) 同じ相対密度 $D_r=85\%$ を目標に、空中法と打撃法の2ケースにより作製した供試体の接触点数は、空中法よりも打撃法の方が多いことが分かった。
- iii) 砂質土は、同じ相対密度であっても締固め方法が異なると接触点数に差が生じ、その微視構造には違いがあることが示された。
- iv) 砂質土の微視構造に関して、X線CTと画像解析によって算出できる接触点数を指標とした定量化が可能であることが示された。

参考文献

- 1) 梅田洋彰, 江副哲, 佐藤宇紘, 大谷順: 異なる相対密度における土粒子構造の評価と液状化対策としての SCP 工法への適応, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.815-816, 2018.
- 2) Umeda, H., Ezoe, A., Harada, K., Sato, T. and Otani, J.: Study on the change of micro structure in compacted sand using X-ray CT, *KGS&JGS Joint Workshop/Incheon/Korea*, pp.76-78, 2018.
- 3) 渡邊陽一: X 線 CT データを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2011.
- 4) Sato, T., Onda, K. and Otani, J.: Development of a new loading test apparatus for microfocus X-ray CT and its application to the investigation of soil behavior surrounding driven open-section piles, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp776-785, 2018.
- 5) Shimobe,S. and Moroto,N.: A new classification chart for sand liquefaction, *Earthquake Geotechnical Engineering*, pp315-320, 1995.
- 6) Mukunoki, T., Miyata, Y., Mikami, K. and Shiota, E.: X-ray CT analysis of pore structure in sand, *Solid Earth*, Vo.7, No.3, pp.929-942, 2016.
- 7) 藤木祐作: μ X 線 CT 画像と LBM を用いた多孔体の不飽和浸透特性の定量評価, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文, 2015.
- 8) 宇野理絵: 異なる含水比状態における締固め砂の内部構造評価に関する研究, 熊本大学工学部社会環境学科卒業論文, 2012.

第6章 SCP工法による改良地盤の微視構造変化に関する応用実験

本章では、第4章で開発した μ XCT専用のSCP模型実験装置や一連の実験手法¹⁾、および第5章で提案したCT画像を用いた締固め砂質土供試体を対象とした接触点数算出の解析手法²⁾を応用した模型実験を行った。

模擬したSCP工法による締固め改良地盤の内部挙動について、 μ XCTを用いて砂杭造成に伴ったその砂杭周辺地盤の変形現象の可視化と相対密度および接触点数の変化から締固め改良地盤の微視構造に関する定量的な評価を試みた。さらには、SCP工法の施工方法の特徴の一つである貫入と造成(引抜きと打戻し)過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルによる改良効果との比較を行うため、貫入のみの施工サイクルである締固め杭工法^{3)~5)}を模擬し、SCP工法を対象に実施した模型実験と同様の実験を行い、施工方法の相違による締固め改良地盤の微視構造の違いについての考察を行った。

6.1 応用実験の概要^{1),2),6)~10)}

6.1.1 実験材料

実験材料には“第4章4.2節4.2.1 検証実験の概要”に示したのと同じ豊浦砂を模擬したSCP工法の砂杭材料として用い、模型地盤を構成する材料には、接触点数等の解析が可能な“第5章5.1節5.1.1 実験材料”に示したのと同じ熊本硅砂を使用した。応用実験で使用した実験材料について、表-6.1に物理的性質、図-6.1に粒径加積曲線を示す。

表-6.1 豊浦砂と熊本硅砂の物理的性質

項目	物性値		単位
	豊浦砂	熊本硅砂	
	砂杭材	模型地盤	
土粒子密度 ρ_s	2.650	2.637	g/cm^3
D_{50}	0.175	1.400	mm
D_{60}	0.180	1.500	mm
D_{10}	0.140	1.000	mm
均等係数 U_c	1.290	1.500	-
最大間隙比 e_{\max}	0.985	1.106	-
最小間隙比 e_{\min}	0.611	0.769	-

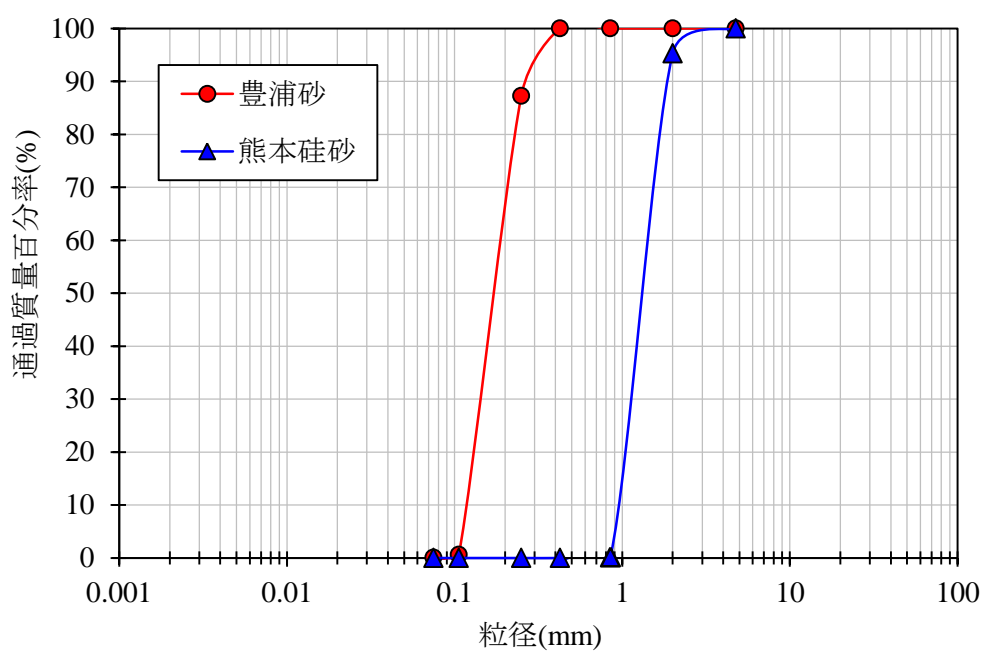


図-6.1 豊浦砂と熊本硅砂の粒径加積曲線

6.1.2 実験ケース

応用実験では、“第4章 4.1 実験装置の開発”で示す装置や手順と同様に、ケーシングパイプの貫入と3回の砂杭造成サイクルで造成長30mmの砂杭を造成する過程におい

表-6.2 応用実験ケース

Case	模擬工法	実験材料						CT 撮影 回数
		模型地盤	杭					
			杭材	貫入径	貫入長	造成径	造成長	
1	SCP	熊本硅砂	豊浦砂	20mm	130mm	35mm	30mm	10回

表-6.3 応用実験の μ XCT撮影条件

管電圧	200kV
管電流	550 μ A
ビュー数	3200
積算枚数	3枚
1画素サイズ	0.13mm
スライス厚	0.26mm
FPDゲイン	1pF
FPD積分時間	166ms
FCD	340
マトリクスサイズ	1024 \times 1024

て μ XCT撮影を行った。 μ XCT撮影は、ケーシングパイプ貫入前の原地盤にあたる初期状態を1回、ケーシングパイプ初期貫入途中の貫入深度70mm、100mm、および改良下端の貫入深度130mmの小計3回、ケーシングパイプ引抜きに伴う中詰砂の模型地盤内への排出後ならびに打戻しによる拡径後の2回を3サイクル行うことで小計6回の合計10回行った。表-6.2に実験ケース、表-6.3に撮影条件を示す。

6.1.3 実験手順

応用実験は、“第4章4.1節4.1.2 実験手順”に示す実験手順および“第4章4.1節4.1.3 SCP工法を模擬した砂杭の造成方法”に示す砂杭造成と同様の手法にて行った。

6.2 応用実験の結果

6.2.1 ケーシングパイプ貫入時の押力

図-6.2 に、荷重計およびステンレスワイヤ式変位計を用いて測定したケーシングパイプ貫入に伴う押力と貫入深度の関係を示す。図より各砂杭造成サイクル終了時、つまりケーシングパイプの打戻しによる砂杭拡径終了時の押力が最大値を示している。また、各砂杭造成終了時の押力ピーク値が造成前の同深度におけるケーシングパイプ初期貫入時の押力より増加しており、さらにサイクルが増えるにつれて押力ピーク値が増加していることも確認できる。これは“第4章4.2節4.2.2 砂杭造成の押力”に示す模型実験装置の検証実験時に確認されたケーシングパイプ貫入押力と貫入深度の関係と同様であり、改良対象の模型地盤に熊本珪砂を用いた応用実験においても砂杭造成に伴った周辺地盤の締め固め効果が確認され、先行造成された砂杭のさらなる密実化も生じていると予想される。

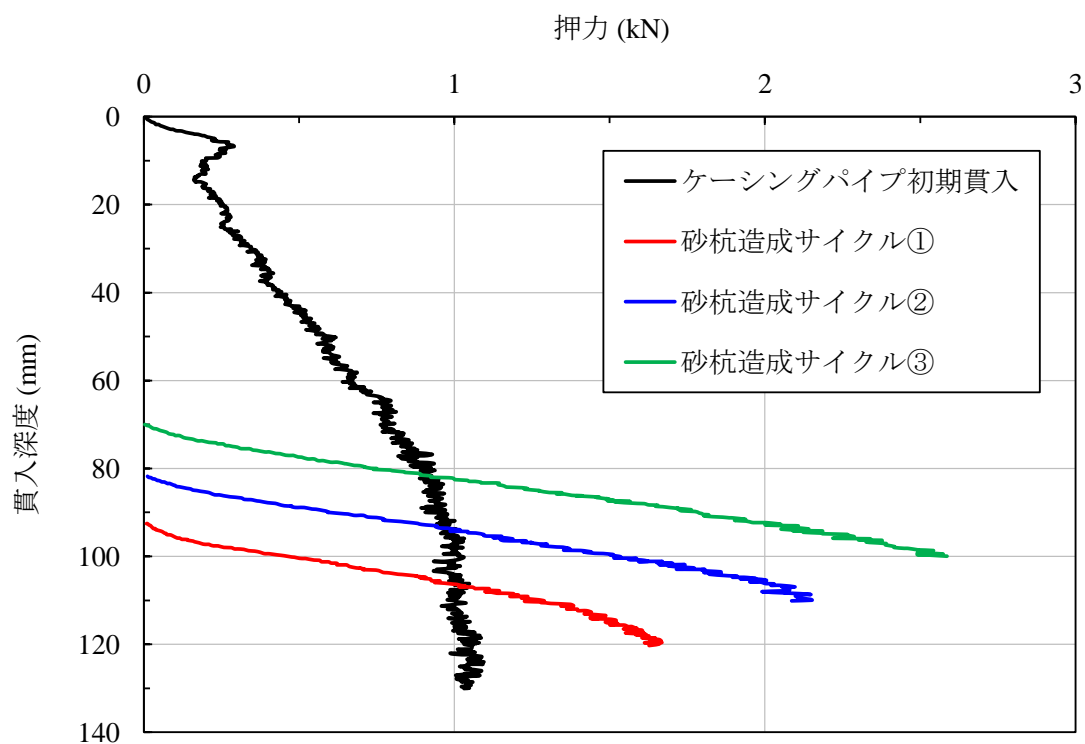


図-6.2 貫入押力と貫入深度の関係

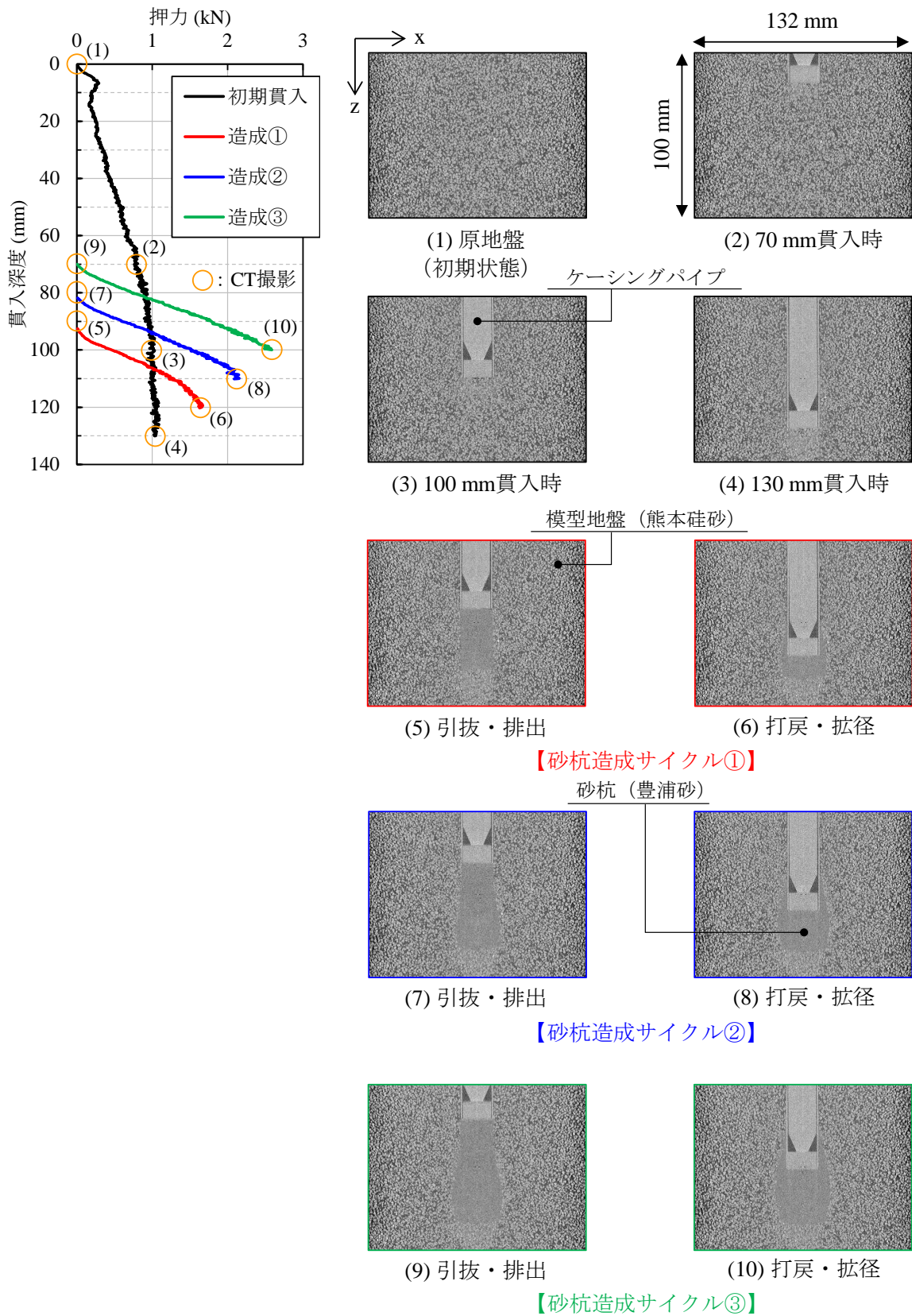


図-6.3 鉛直断面 CT 画像

6.2.2 X線 CT 画像

図-6.3 に各施工段階で撮影した鉛直断面の CT 画像を示す。撮影された画像から、ケーシングパイプの貫入状況や各砂杭造成サイクルにおいてケーシングパイプ引抜き過程でその先端から排出された砂がケーシングパイプの打戻し過程によって拡張され、サイクルの進行に合わせて連続した砂杭が造成されていることが確認できる。

6.2.3 砂杭周辺地盤の変形現象の可視化

(1) 変位量の増分

μ XCT 撮影により得られた CT 画像から砂杭造成に伴う砂杭周辺地盤の変形挙動を解析するため、“第3章 3.2 節 3.2.1 画像相関法による地盤内に生じる変形現象の解析”に示す DIC 解析^{11),12)}を行った。DIC 解析では、変形前後の画像データとして、砂杭造成中に連続撮影した CT 画像を用い、画像内で任意に設定した接点周辺の移動しうる 3 次元領域中の相関を求め、最も相関の高い位置を同定して変位量解析を行う。砂杭の造成過程について、DIC 解析で得られたケーシングパイプ引抜き過程による中詰砂排出時とケーシングパイプの打戻し過程による拡張までの間（施工過程のステップ間）を対象とした砂杭周辺地盤の変位増分を図-6.4 に示す。水平変位は砂杭周囲に集中しており、ケーシングパイプ引抜きによる中詰砂排出時には周辺地盤はケーシングパイプ中心方向へ若干押し戻される挙動を示し、砂杭拡張時には逆にケーシングパイプ外方向に大きく押し広げられる挙動を示す。また、鉛直変位については砂杭上下に地盤を押し広げる挙動が確認できる。

(2) せん断ひずみと体積ひずみの増分

前述した変位分布を基に算出した施工過程のステップ間のせん断ひずみ増分および体積ひずみ増分の空間分布を図-6.5 に示す。せん断ひずみは、ケーシングパイプの打戻しに伴う砂杭の拡張時にはその砂杭周辺に集中する様子が確認できる（図-6.5(a)参照）。体積ひずみは、先行打設された砂杭の周囲に青色で示される収縮傾向の体積ひず

みが発生していることがわかる（図-6.5(b)参照）。また、赤色で示される体積膨張ひずみは、砂杭造成時にその砂杭直近で局所的に発生し、造成サイクルの進行に伴い、土層表面に向かって発達することがわかる。これは、砂杭拡径による膨張挙動で側方へ押された土粒子が、相対的に拘束圧の小さい土層表面に向けて移動することで生じた領域と考えられる。

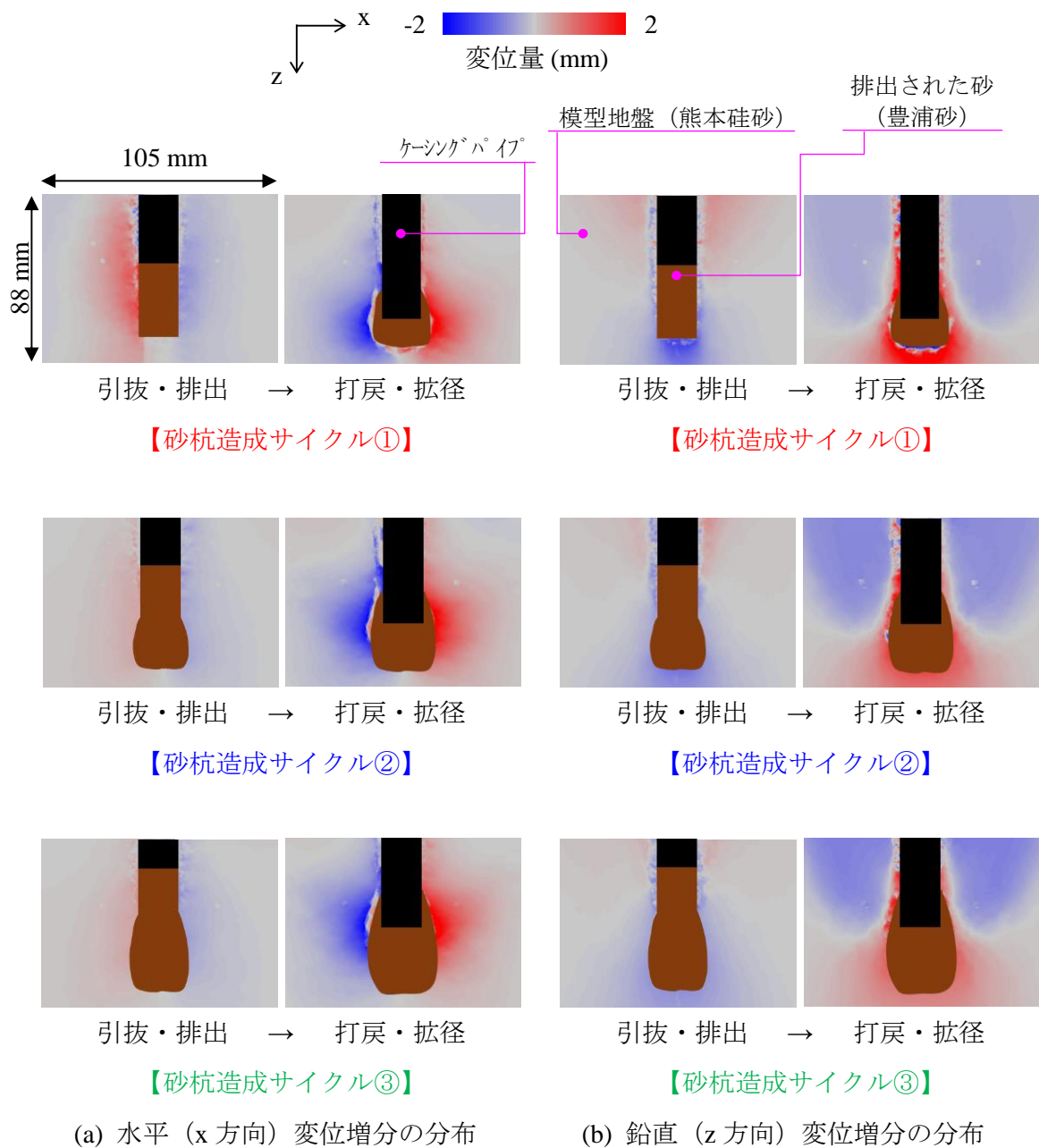


図-6.4 砂杭造成による砂杭周辺地盤の変位増分

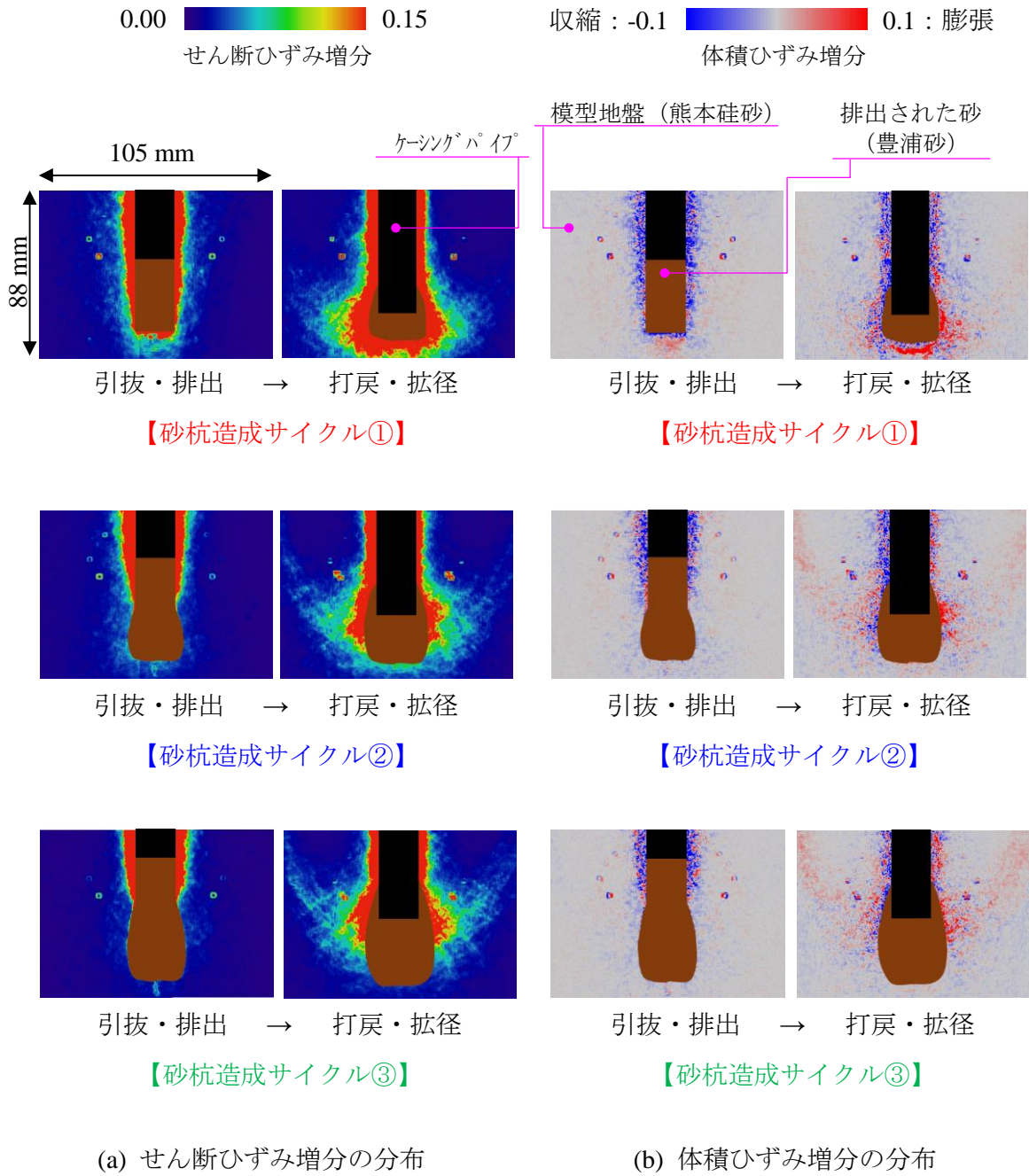
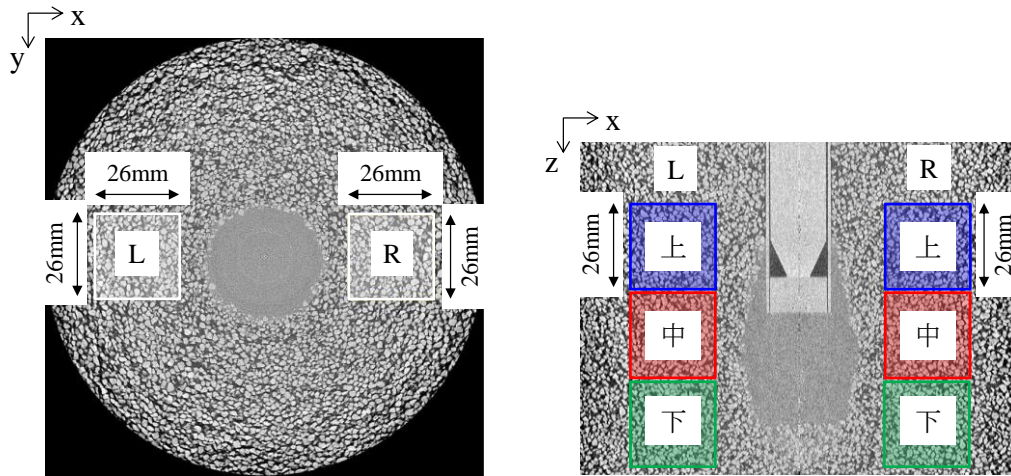
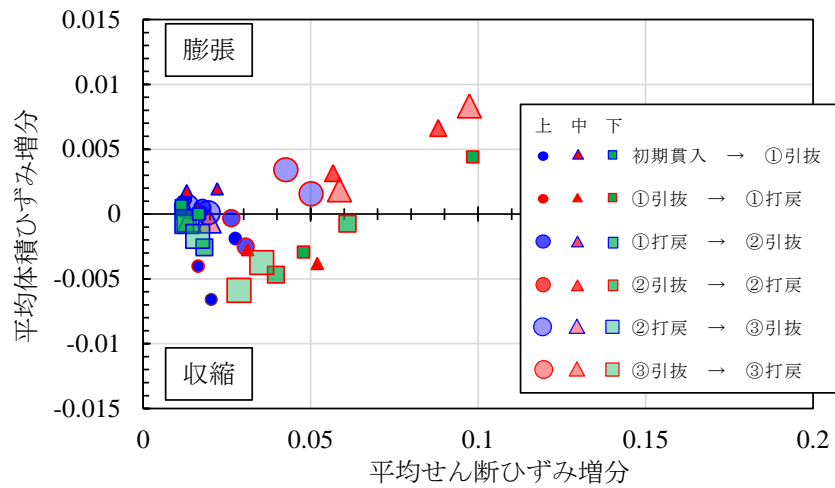


図-6.5 砂杭周辺地盤のせん断ひずみ増分および体積ひずみ増分

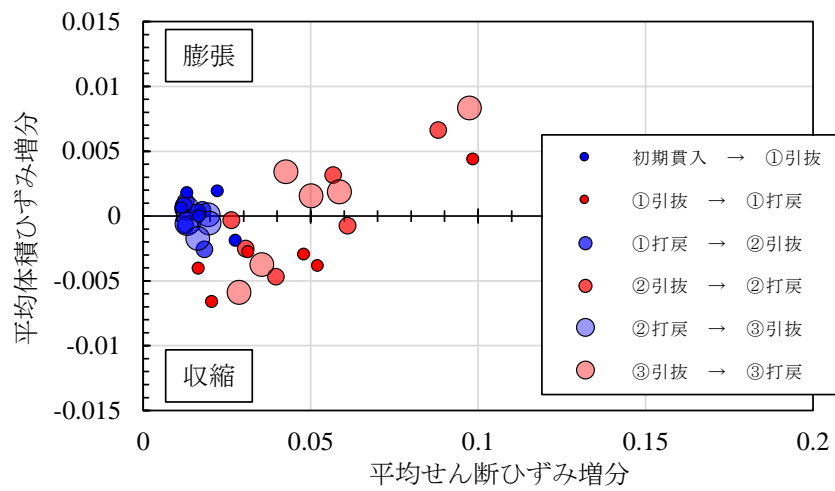
図-6.6 に施工過程のステップ間のせん断ひずみ増分と体積ひずみ増分の任意空間の平均値をプロットした。ひずみの平均値を算出した解析領域は図-6.6(a)に示す砂杭両脇に、撮影領域を鉛直に上部、中部、下部に分割し、それぞれの領域は $200 \times 200 \times 200$ voxel ($26 \times 26 \times 26$ mm) の立方体とした。図-6.6(b)に示した解析深度との関係で見ると砂杭



(a) 平均ひずみの算出領域



(b) 解析深度（位置）におけるひずみ増分



(c) 施工過程（ステップ）におけるひずみ増分

図-6.6 平均せん断ひずみ増分と平均体積ひずみ増分の関係

周辺地盤の下部で体積ひずみは収縮を示している。また、図-6.6(c)に示したケーシングパイプの引抜き過程と打戻し過程による施工過程で比較すると、せん断ひずみ、体積ひずみのいずれも中詰材が排出される引抜き時には小さく、砂杭の拡径が行われる打戻し時には大きく発生していることがわかる。

6.2.4 砂杭周辺地盤の相対密度と接触点数の変化

応用実験で取得した砂杭造成過程における周辺地盤の連続 CT 画像に対して、第 5 章における基礎実験でも実施した“第 3 章 3.2 節 3.2.2 画像解析による土粒子同士の接触点数の算出”に示す解析手法¹³⁾を用いて、砂杭周辺地盤の相対密度と接触点数の変化を算出することで締固め改良地盤の微視構造についての定量的な評価を行った。

(1) 解析精度¹³⁾

応用実験で取得した CT 画像の解析精度を検証するため、画像解析で得られた土粒子形状データを基に、ふるい分析で得られた粒径加積曲線との比較、ならびに取得画像の代表要素体積 (REV) の検定を行った。図-6.7 にその検証結果を示す。検証の結果、REV の相対標準偏差 (RSD) が 1% 以下となる解析領域は、REV の一辺が 200voxel 以上の時であり、一画素寸法が 0.13mm の対象画像においては一辺が 26 mm の立方体領域となる。

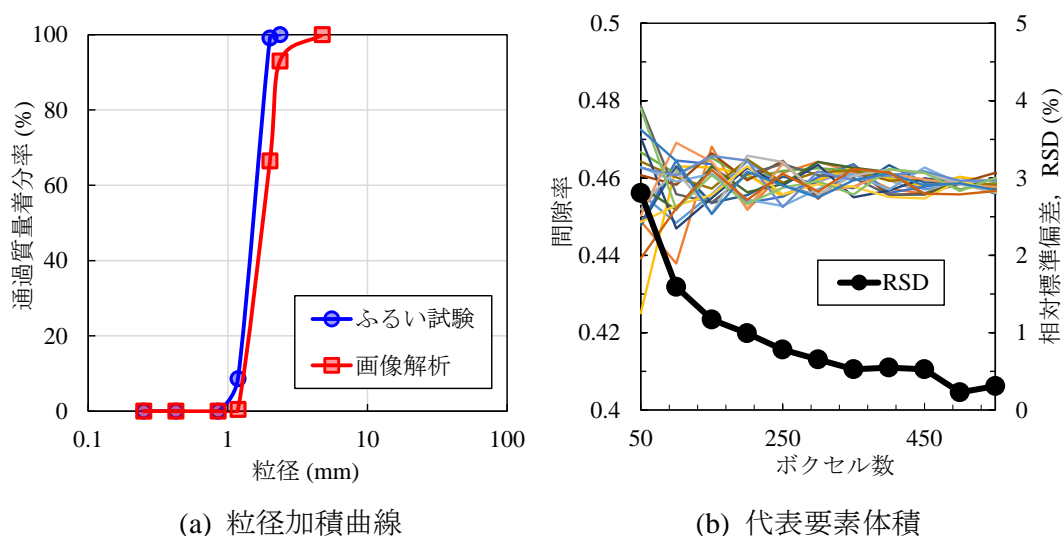


図-6.7 画像解析精度の検証

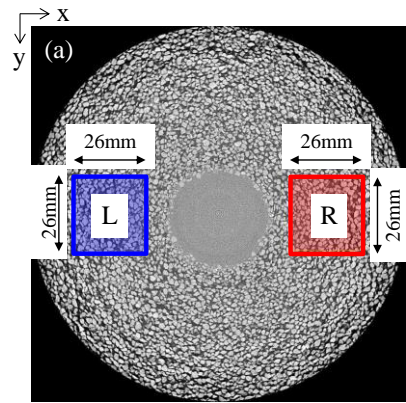
(2) 解析位置

図-6.7(b)示す REV の検証結果より，砂杭周辺地盤に対する接触点数および相対密度の算出領域を $200 \times 200 \times 200 \text{ voxel}$ ($26 \times 26 \times 26 \text{ mm}$) の立方体とした。これは“6.2.3 砂杭周辺地盤の変形現象の可視化 (2)” に示す平均ひずみ増分を算出した領域と同じボクセルサイズであり，接触点数および相対密度の算出についても，図-6.6(a)示した位置と同様に造成された砂杭両脇の模型地盤を対象に，上部，中部，下部それぞれの深度を解析領域とした。

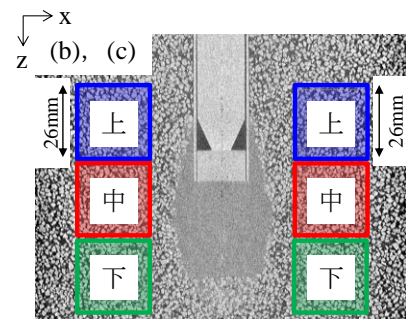
(3) 相対密度の変化

図-6.8～図-6.13 に砂杭周辺地盤の相対密度の変化を示す。図-6.8 では，解析深度の上部，中部，下部の位置における相対密度変化をヒストグラムで整理した。図-6.9 には，ケーシングパイプの初期貫入から砂杭造成サイクルにおける引抜き過程と打戻し過程の施工過程の進捗による相対密度の経時的な変化について，各解析深度と各深度の平均値および全深度の平均値を示し，あわせて全深度の平均値における変動係数の変化を示した。図-6.10 には，原地盤と各砂杭造成サイクル終了時における相対密度と解析深度との関係を示した。図-6.8～図-6.10 が相対密度 D_r の変化に着目して整理したものに対して，図-6.11～図-6.13 は原地盤からの相対密度増分 ΔD_r の変化を示したものである。

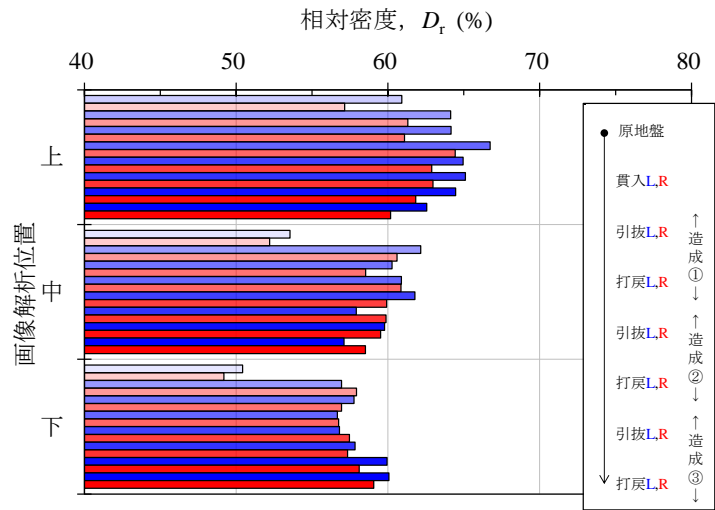
これらの関係図より各解析深度において砂杭の造成サイクル③完了後には，原地盤より相対密度が増加していることがわかる。砂杭周辺地盤の原地盤からの相対密度増分は，上部の位置より下部の位置の方が大きい。また，相対密度の変動係数は，施工過程や砂杭造成サイクルが進捗するにつれて小さくなっており，SCP 工法による締固めに伴って改良地盤の均一化が進んでいると考えられる。これは，実務において SCP 工法により施工した現場において改良前と改良後の N 値を実測した例^{14),15)}でも同様の傾向が示されている。この SCP 工法の施工事例では改良前後の N 値の統計結果からは，一見すると改良後 N 値が大きくばらついて見えるが，N 値の絶対値は改良前と比べて増加している。また，変動係数で評価した場合，改良前 N 値の変動係数が 0.46～0.74 であるのに対して，改良後 N 値の変動係数は 0.28～0.50 となっており，概ね改良前より変動係数が低下していることが示され，本模型実験の解析結果と整合している。



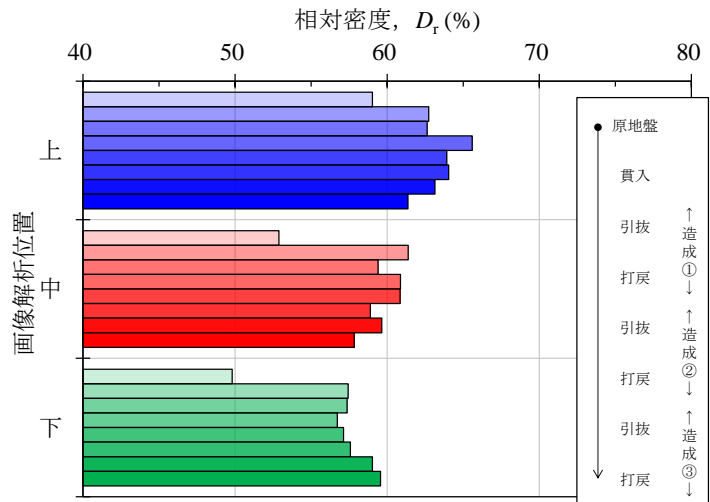
<x-y 断面図>



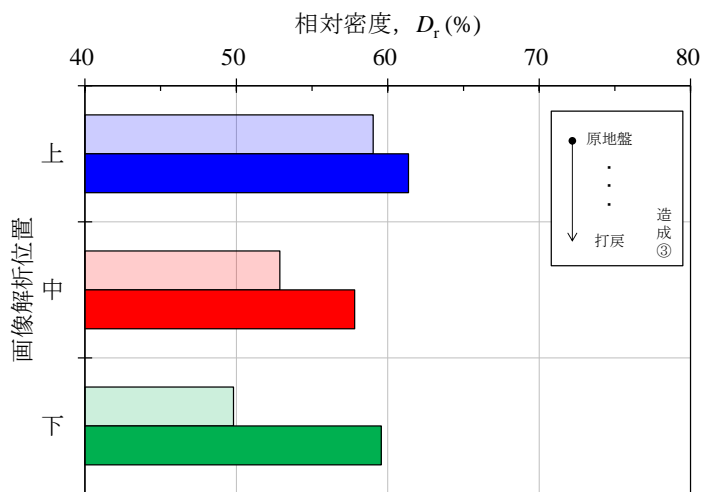
<x-z 断面図>



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程

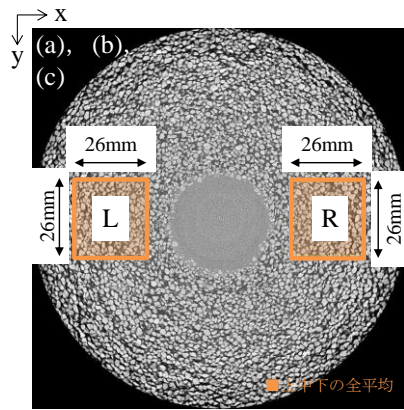


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程

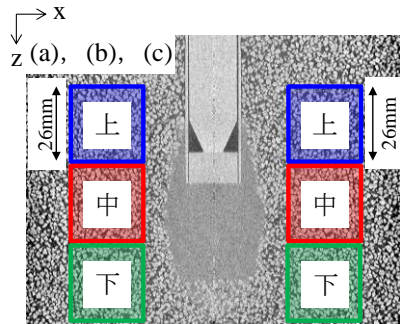


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と造成③打戻

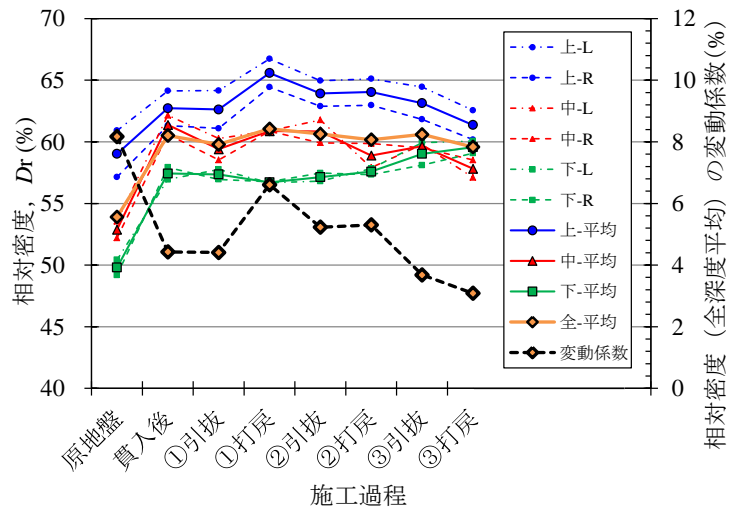
図-6.8 相対密度変化のヒストグラム



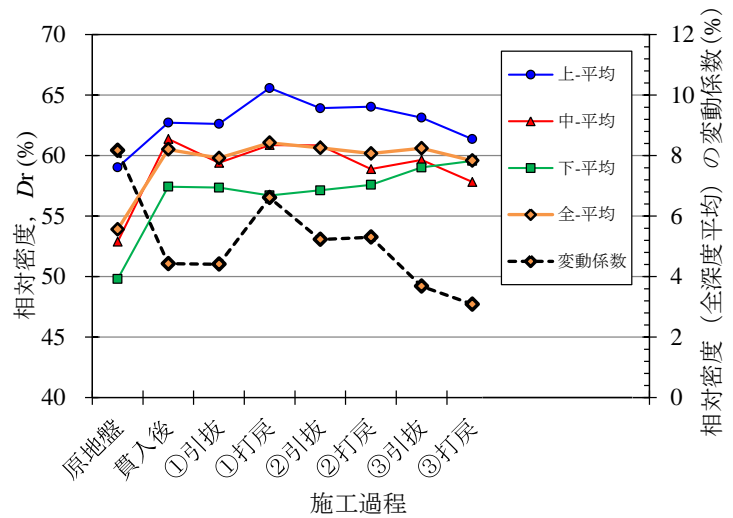
< x-y 断面図 >



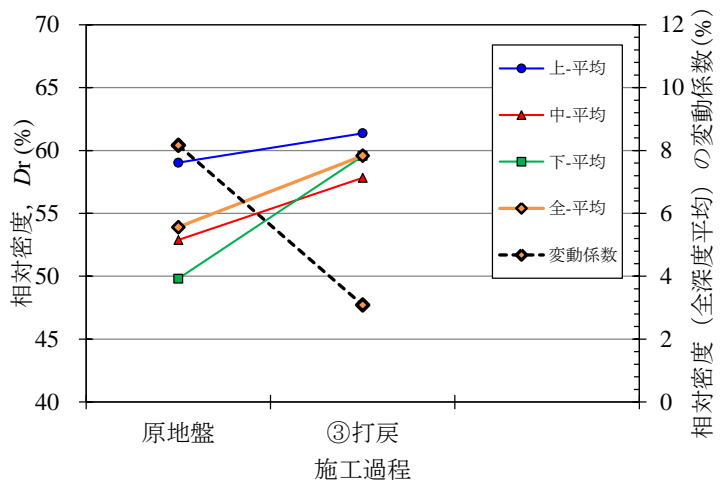
< x-z 断面図 >



(a) 左, 右-上, 中, 下

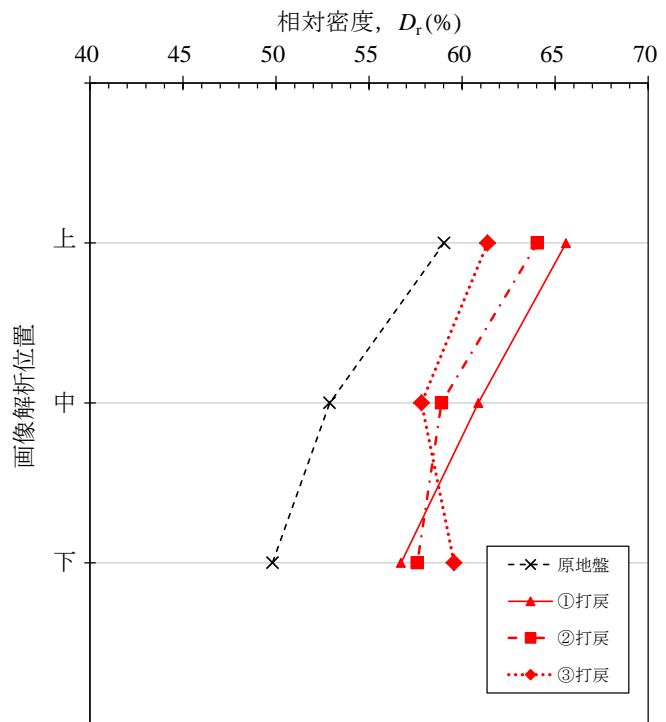
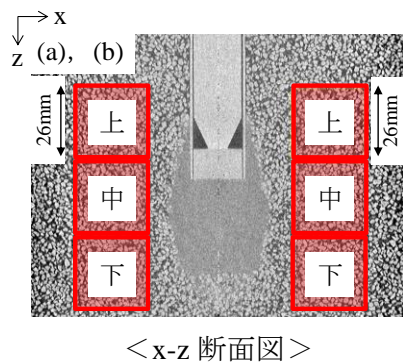
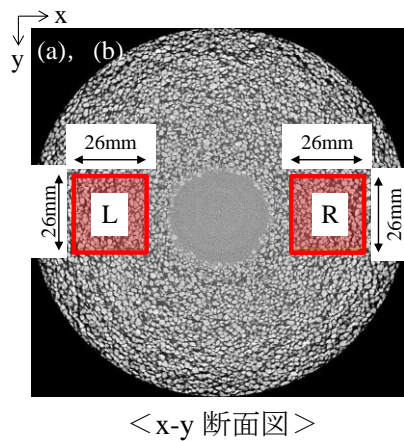


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

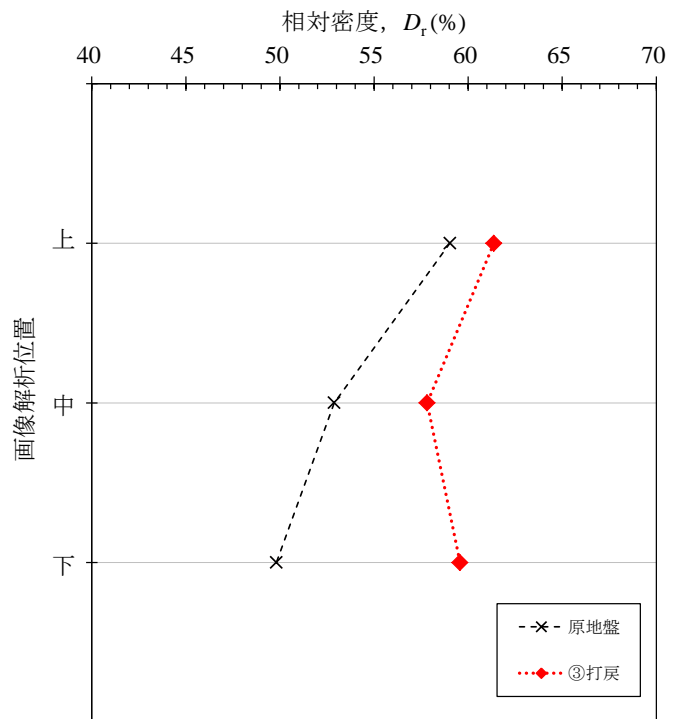


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と造成③打戻

図-6.9 相対密度の経時的な変化

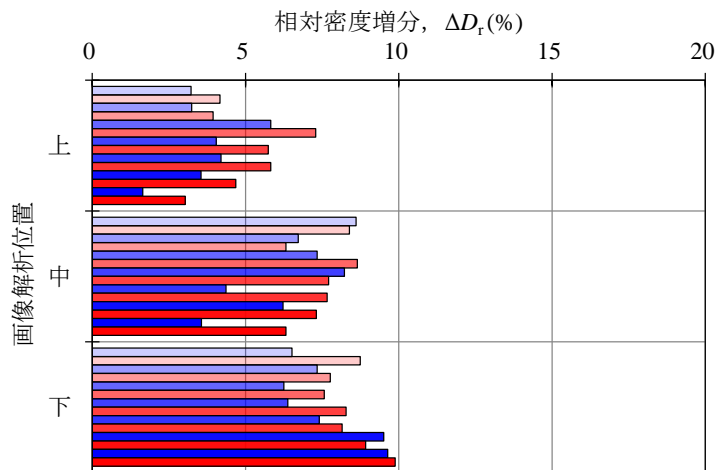
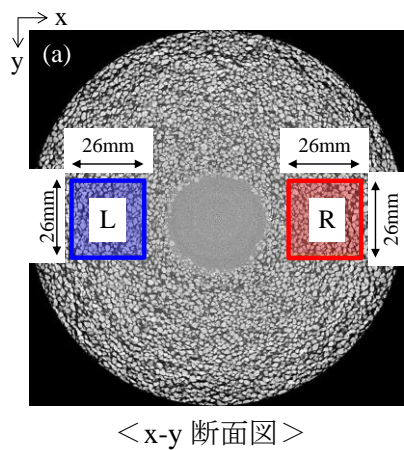


(a) 左, 右の平均—上, 中, 下—原地盤と造成サイクル

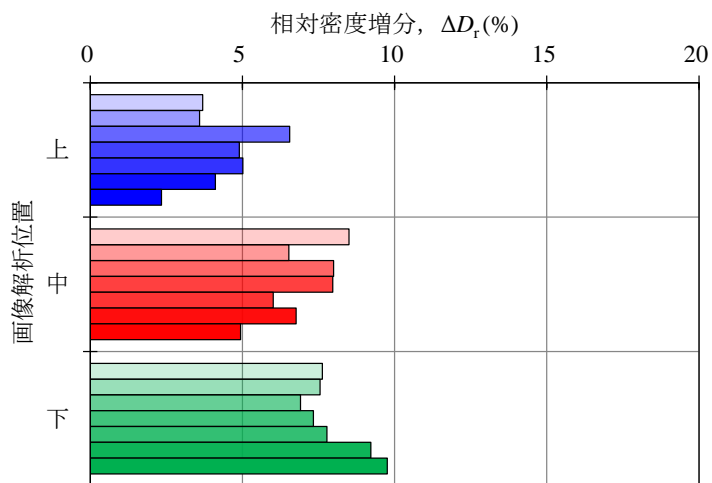
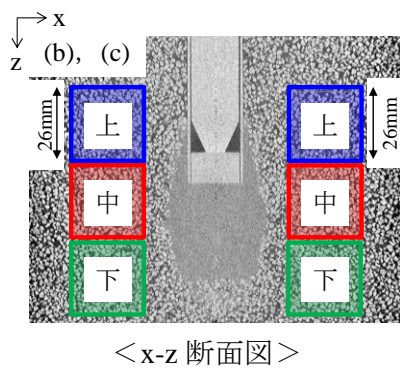


(b) 左, 右の平均—上, 中, 下—原地盤と造成③打戻

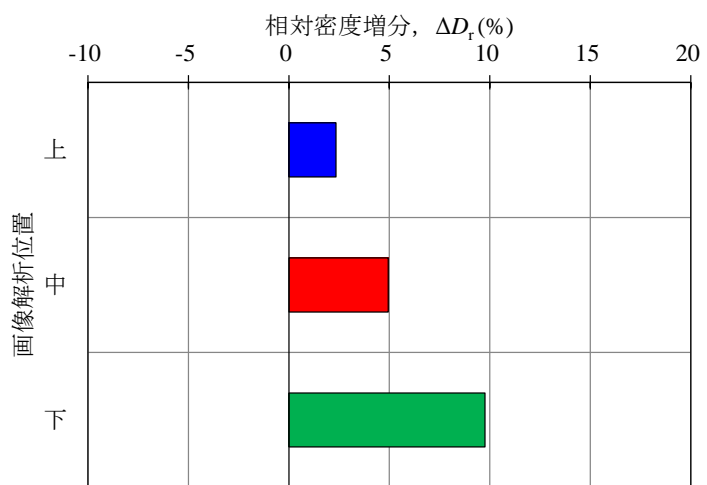
図-6.10 相対密度変化と解析深度との関係



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程

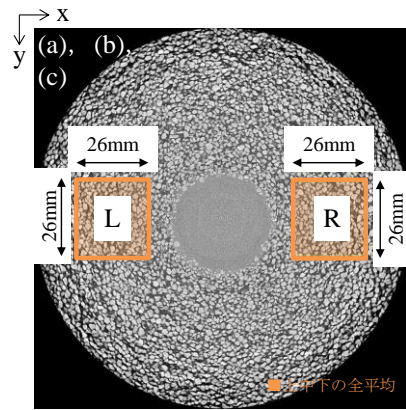


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程

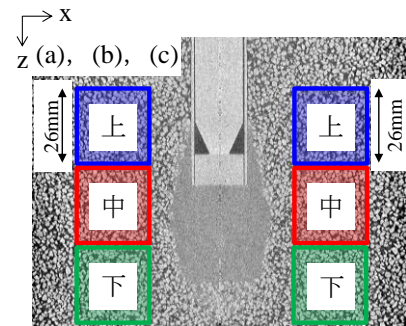


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-造成③打戻

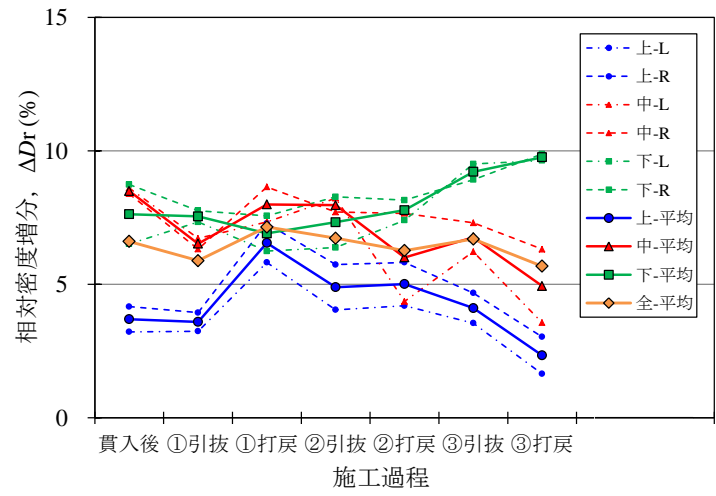
図-6.11 相対密度増分の変化ヒストグラム



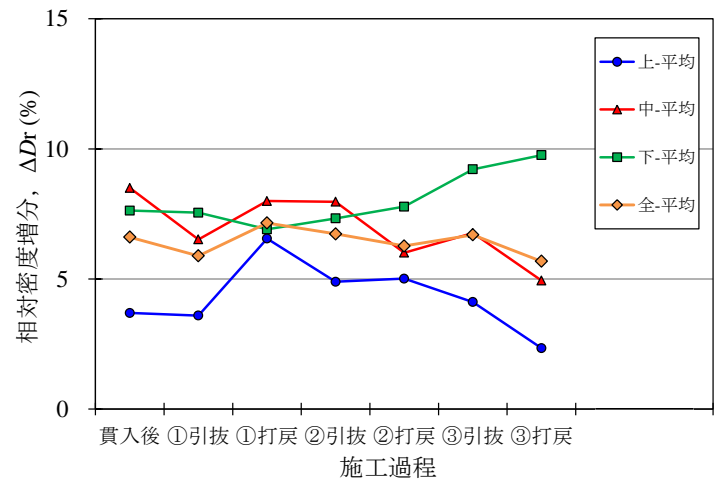
< x-y 断面図 >



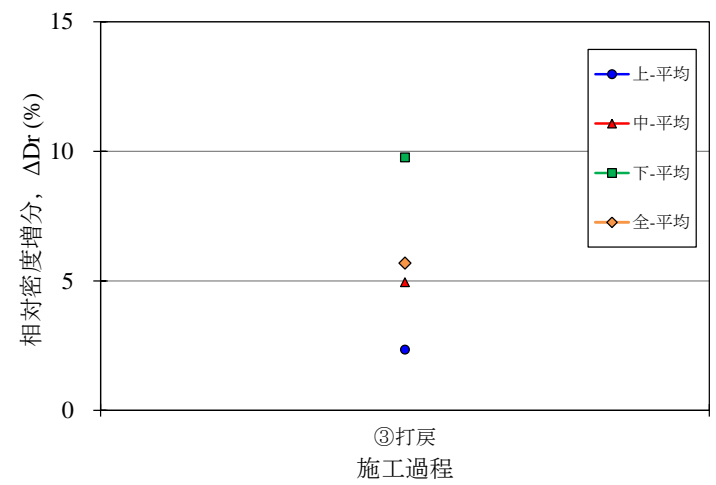
< x-z 断面図 >



(a) 左, 右—上, 中, 下

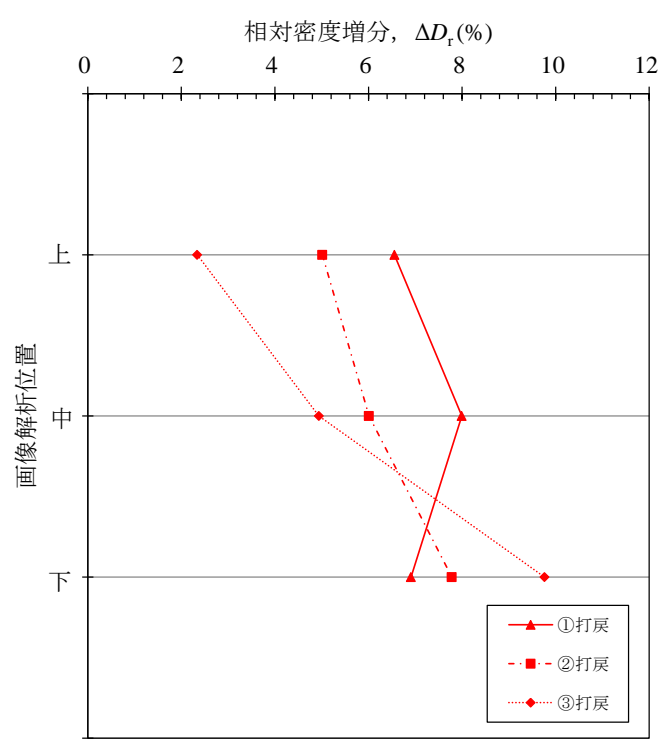
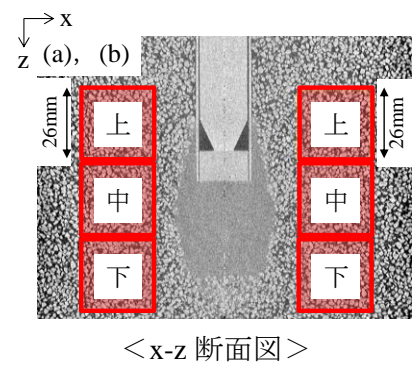
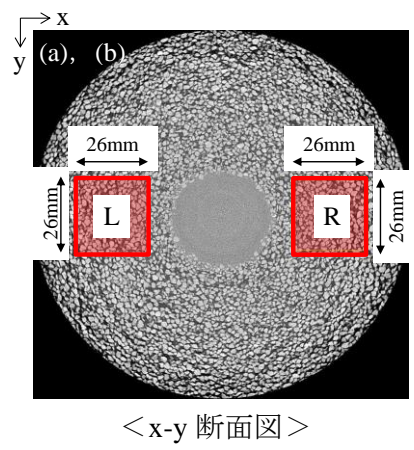


(b) 左, 右の平均—上, 中, 下

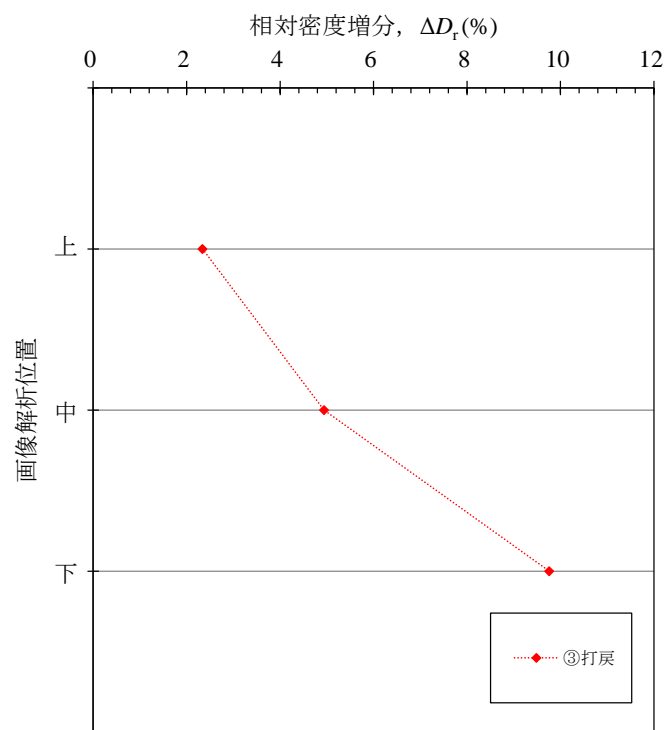


(c) 左, 右の平均—上, 中, 下—造成③打戻

図-6.12 相対密度増分の経時的な変化



(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-造成サイクル



(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-造成③打戻

図-6.13 相対密度増分の変化と解析深度との関係

(4) 接触点数の変化

図-6.14～図-6.19 に砂杭周辺地盤の接触点数の変化を示す。図-6.14 では、解析深度の上部、中部、下部における接触点数変化をヒストグラムで示す。図-6.15 では、ケーシングパイプの初期貫入から砂杭造成サイクルにおける引抜き過程と打戻し過程それぞれの進捗による接触点数について算出し、各解析深度と各深度平均値および全深度平均値を示し、全深度の平均値における変動係数の変化を併記してその経時変化を整理した。図-6.16 では、原地盤と各砂杭造成サイクル終了時の接触点数と解析深度との関係を示す。図-6.14～図-6.16 はその施工過程時の接触点数 N_{CP} の変化について整理しているのに対して、図-6.17～図-6.19 は原地盤からの接触点数増分 ΔN_{CP} の変化で整理したものである。

これらの図からは、接触点数は上部の位置でのみ若干の減少傾向がみられるものの、中部および下部の位置では先に示した相対密度変化と同様に上昇していることがわかる。特に下部の位置では、接触点数が施工サイクルの進捗に応じて継続して増加していることがわかる。また、接触点数の変動係数は、相対密度における変動係数と同様に施工過程や造成サイクルが進捗するにつれて小さくなっており、微視構造の観点で見ても改良地盤の均一化が進んでいると考えられる。

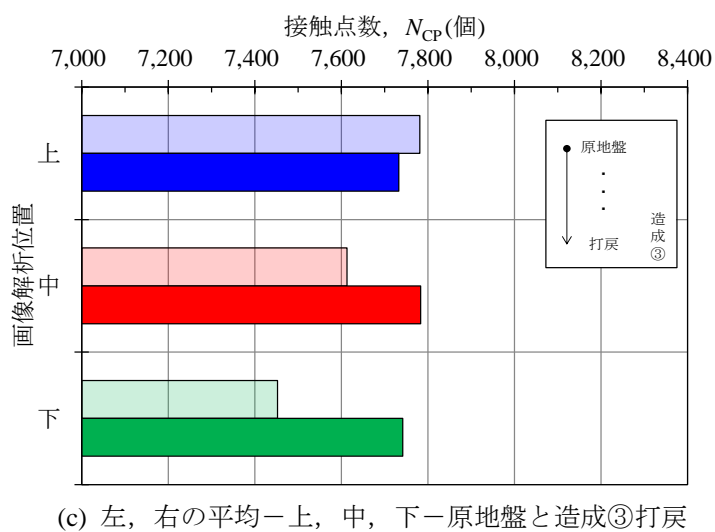
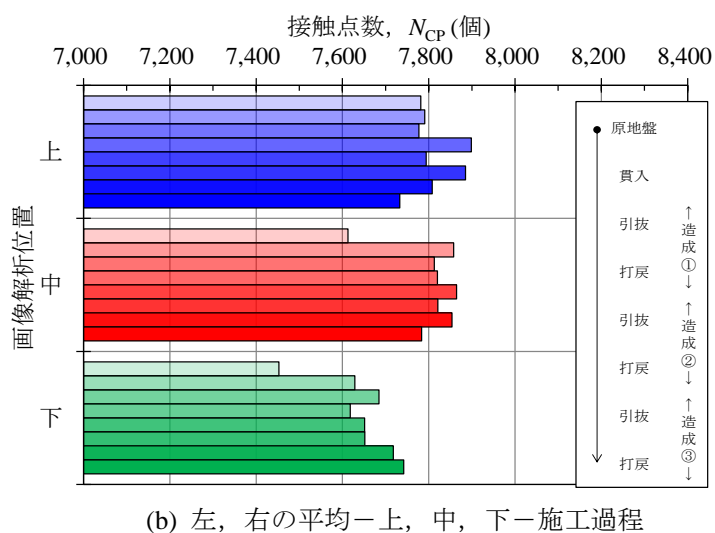
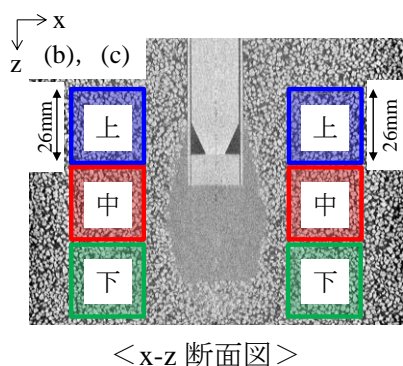
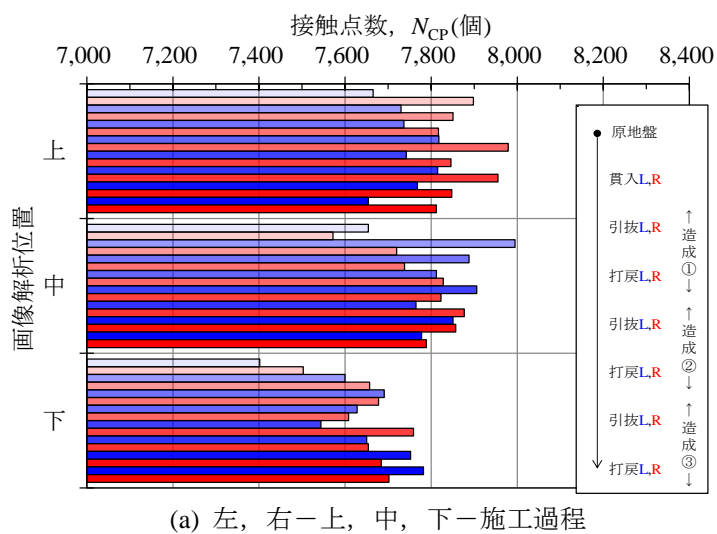
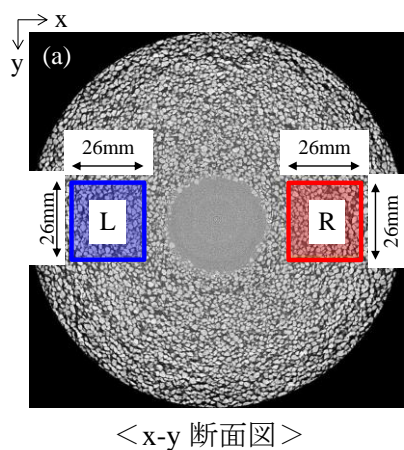
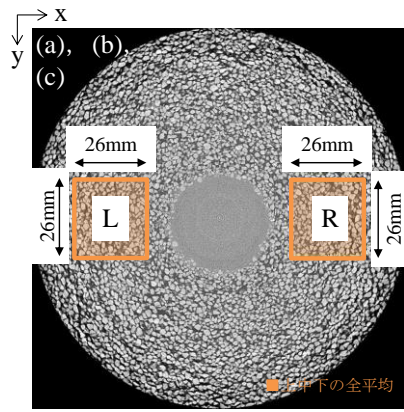
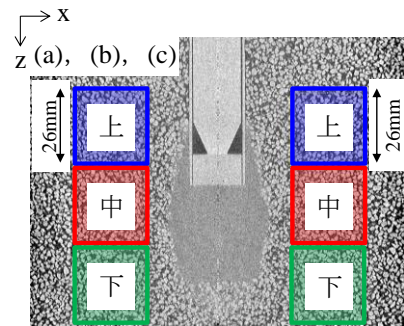


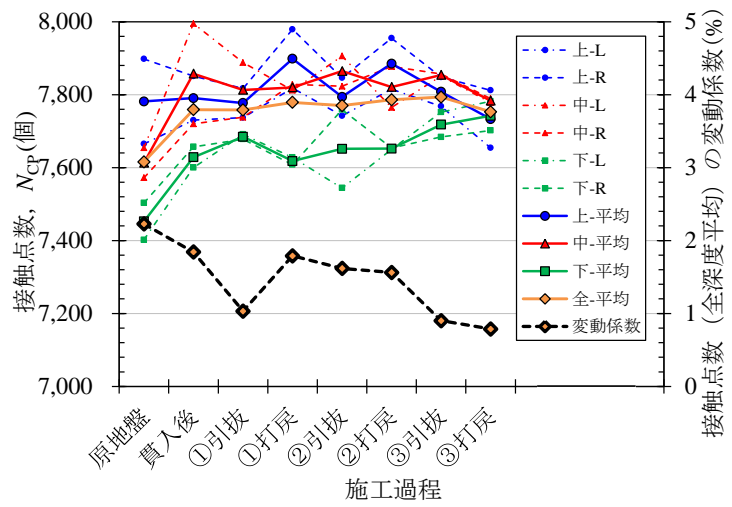
図-6.14 接触点数の変化ヒストグラム



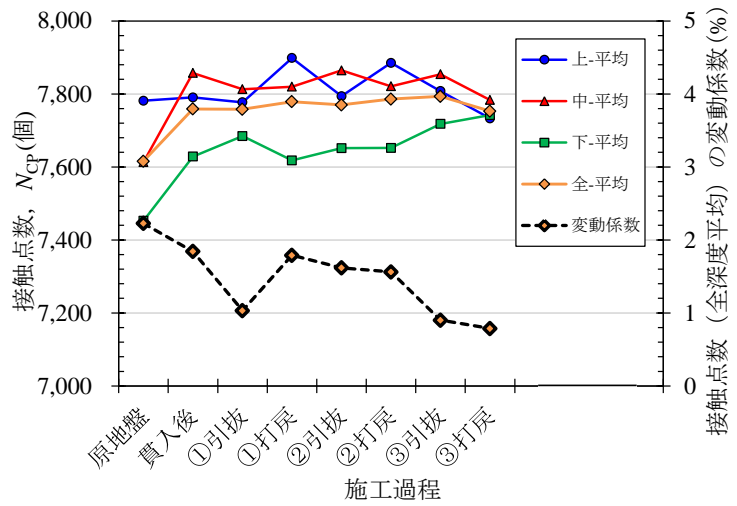
< x-y 断面図 >



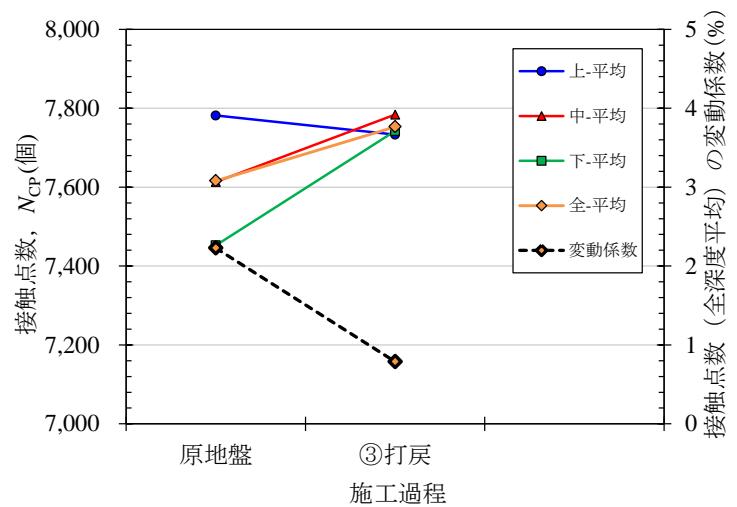
< x-z 断面図 >



(a) 左, 右-上, 中, 下

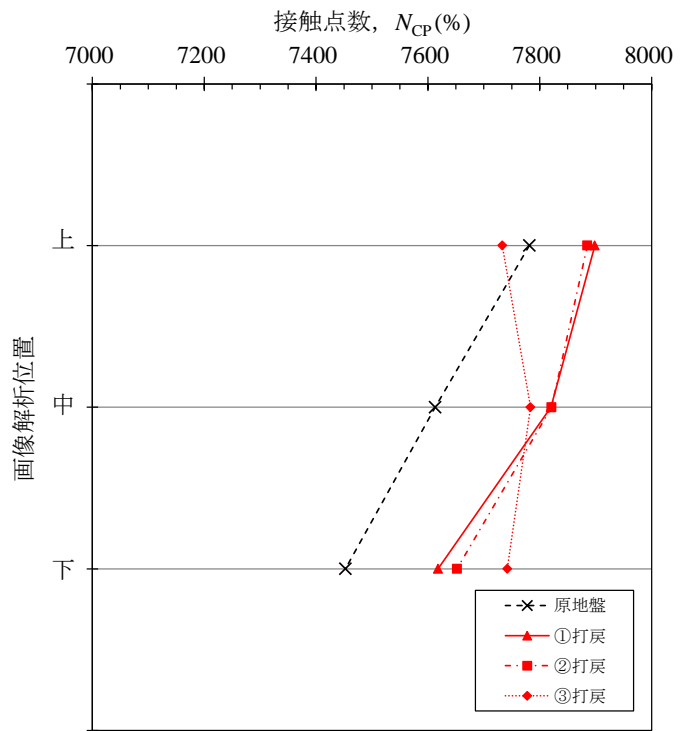
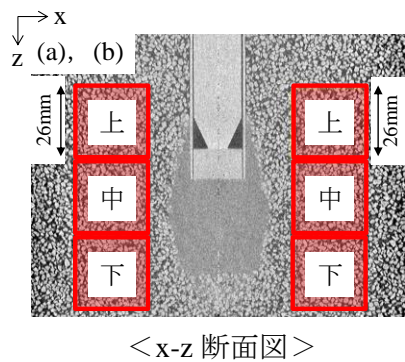
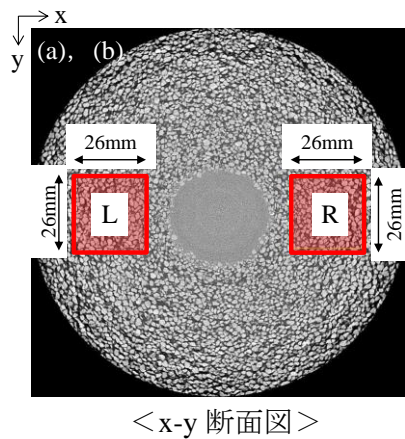


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

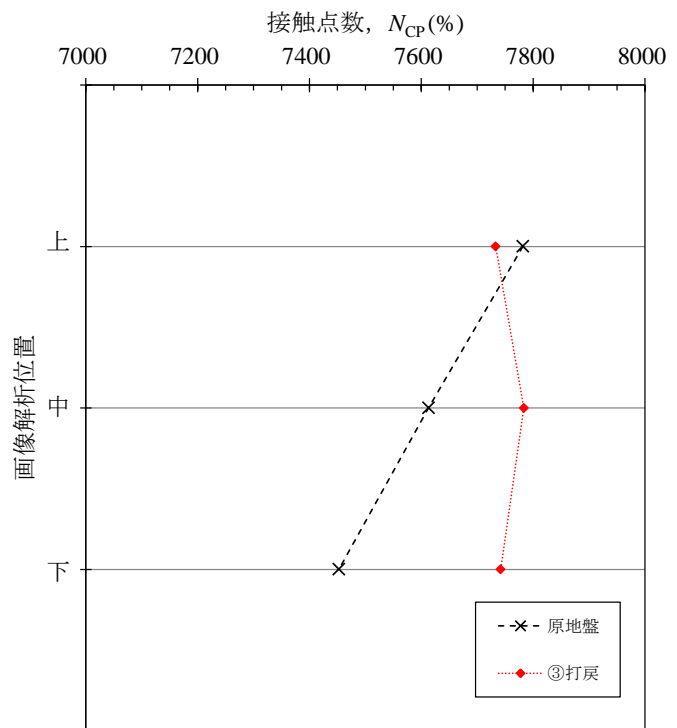


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と造成③打戻

図-6.15 接触点数の経時的な変化



(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-造成サイクル



(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と造成③打戻

図-6.16 接触点数変化と解析深度との関係

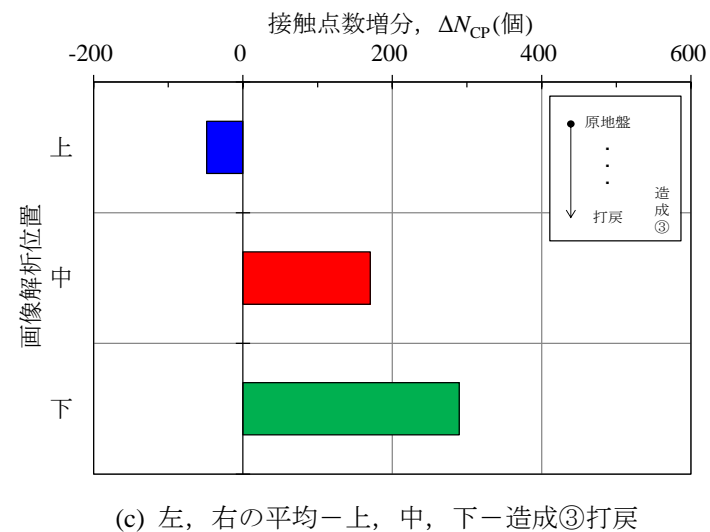
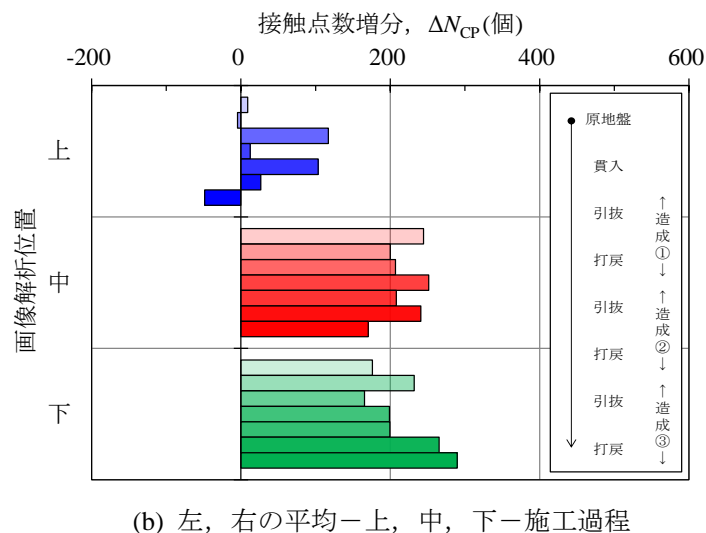
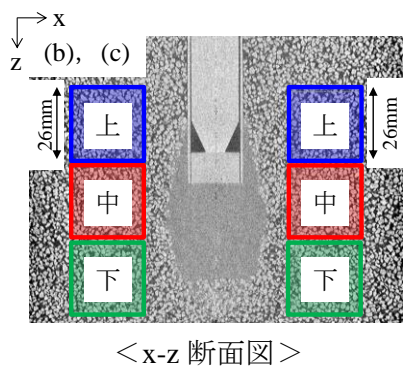
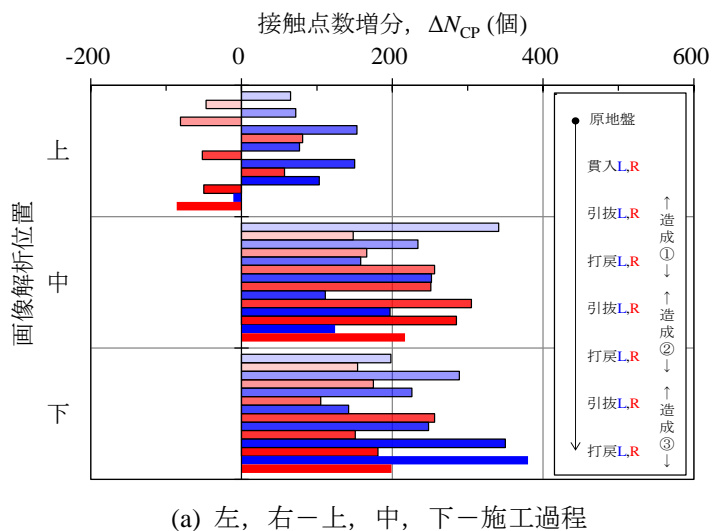
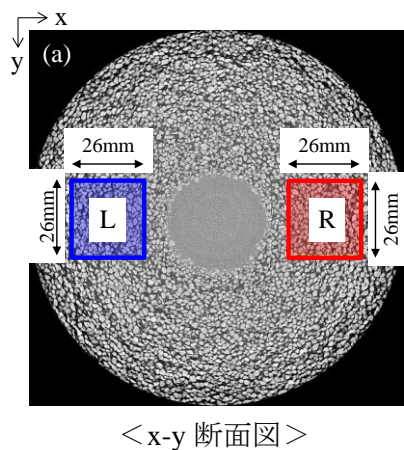
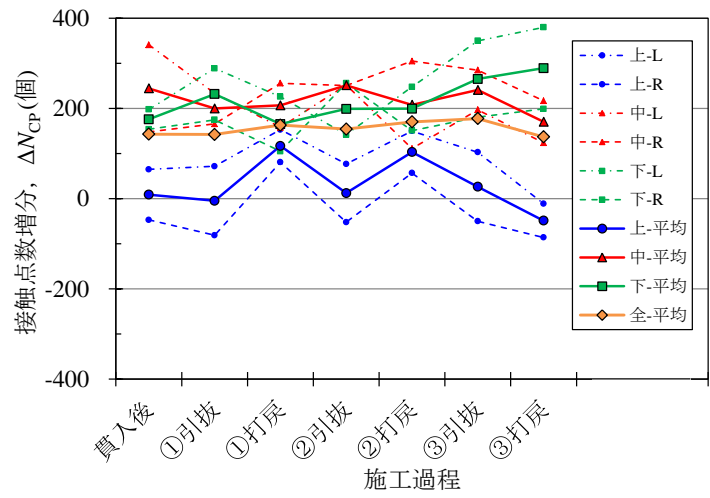
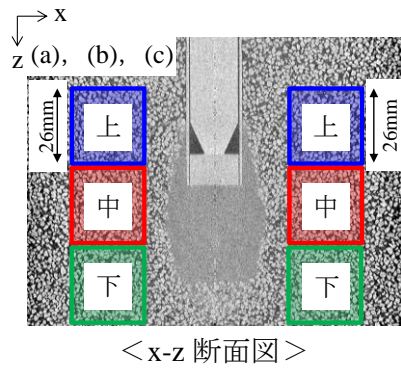
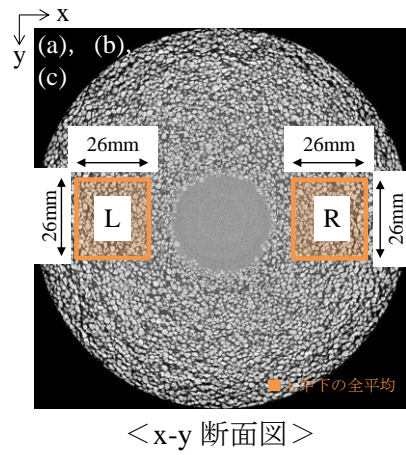
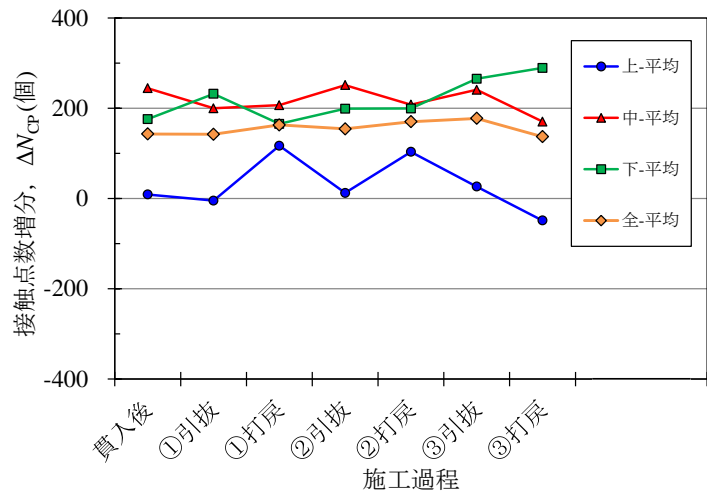


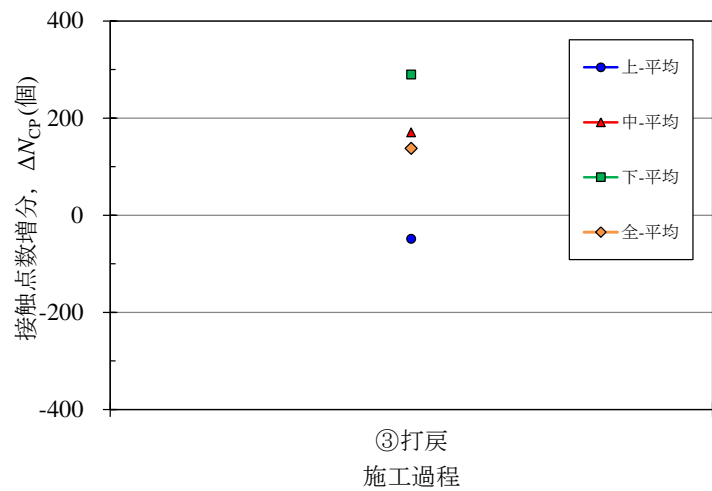
図-6.17 接触点数増分の変化ヒストグラム



(a) 左, 右-上, 中, 下

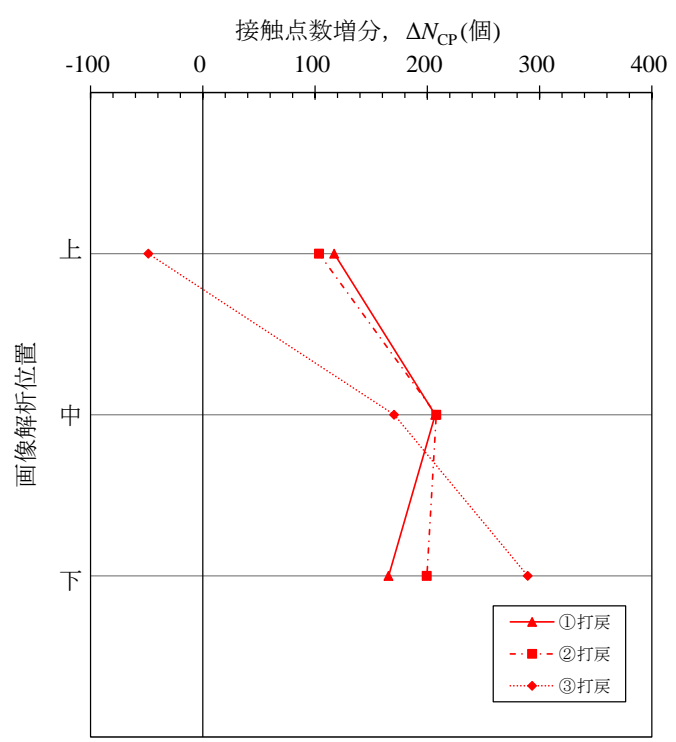
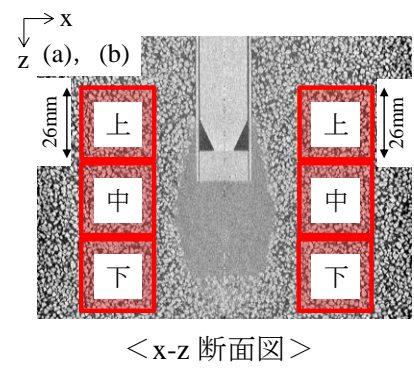
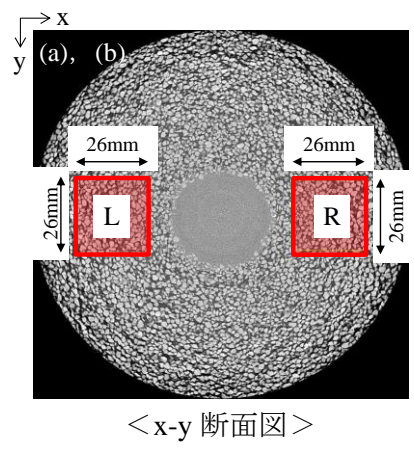


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

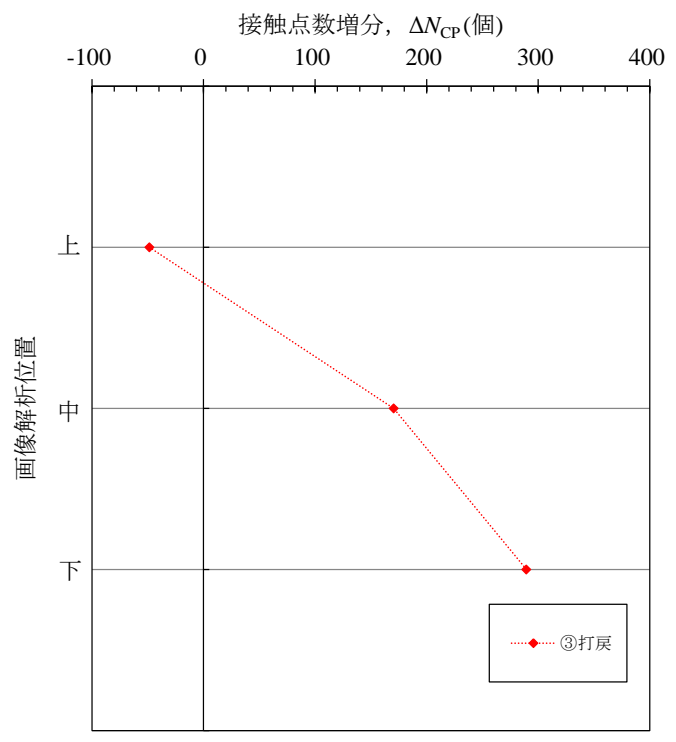


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-造成③打戻

図-6.18 接触点数増分の経時的な変化



(a) 左, 右の平均—上, 中, 下—造成サイクル



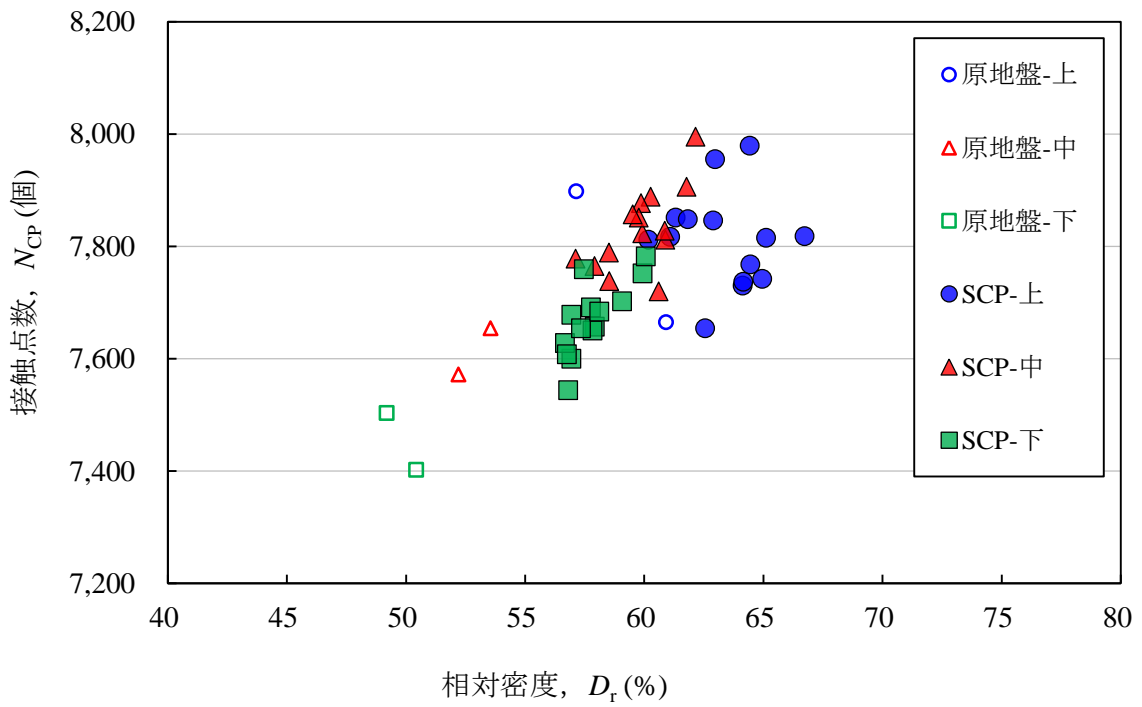
(b) 左, 右の平均—上, 中, 下—造成③打戻

図-6.19 接触点数増分の変化と解析深度との関係

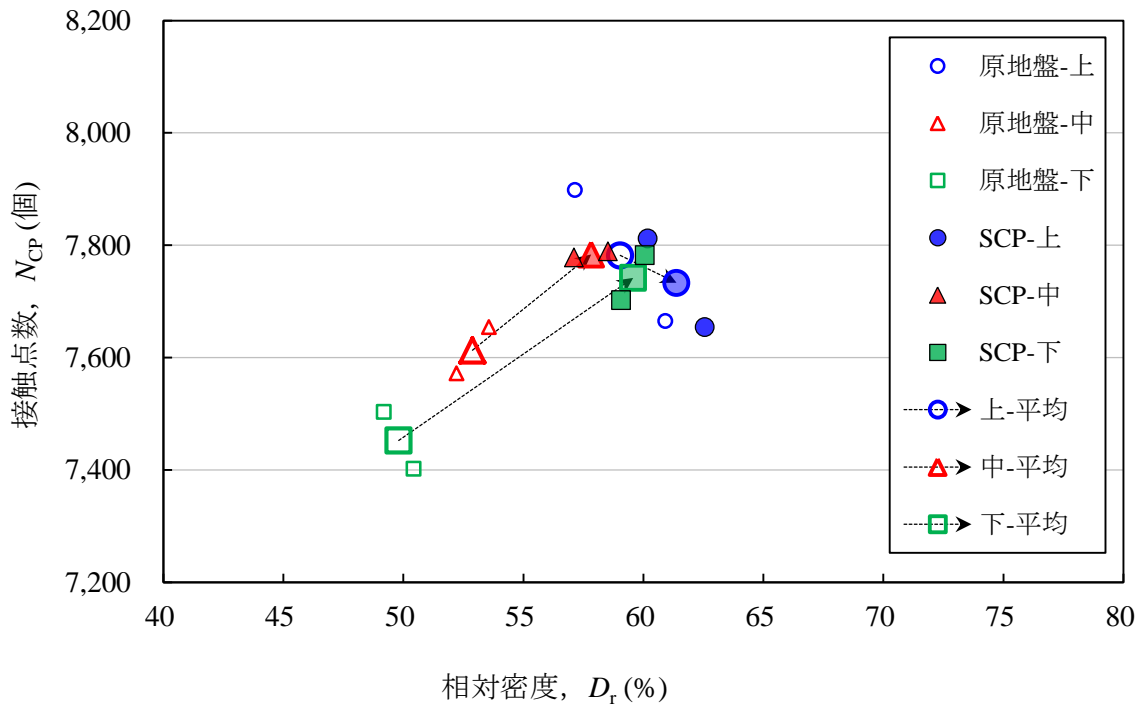
(5) 相対密度と接触点数の関係

図-6.20 に砂杭周辺地盤の相対密度変化と接触点数変化の関係を示す。図より砂杭打設に伴って、相対密度と接触点数が増加することがわかる。図-6.20(b)に示す原地盤から砂杭造成サイクル③打戻し完了時の平均値は、相対密度が各深度で増加傾向を示しているのに対して、接触点数は上部の位置で若干の減少傾向となり、中部と下部の位置で増加傾向を示している。

図-6.21 に原地盤からの相対密度増分変化と接触点数増分変化の関係を示す。図より相対密度と接触点数の増分は、上部、中部、下部の位置の順で大きくなっているが、上部の位置についてのみ、接触点数が原地盤から若干減少している。これは砂杭の造成が下部の位置から行われ、砂杭造成サイクルが進むと先行して造成された砂杭の周辺地盤にもさらなる締固め効果が得られていると考えられる。一方で上部の位置で見られた相対密度増分が小さいことや接触点数の減少は、ケーシングパイプの打戻しによる拡径を行っていない深度位置における解析結果であること、すなわち砂杭造成が行われていない周辺地盤の位置における解析値であることが影響していると想定できる。また、図-6.5(b)に示す体積ひずみ増分分布において確認された局所的な体積ひずみの膨張領域において、造成された砂杭周辺地盤の上部位置での接触点数の減少が起きていると考えられる。

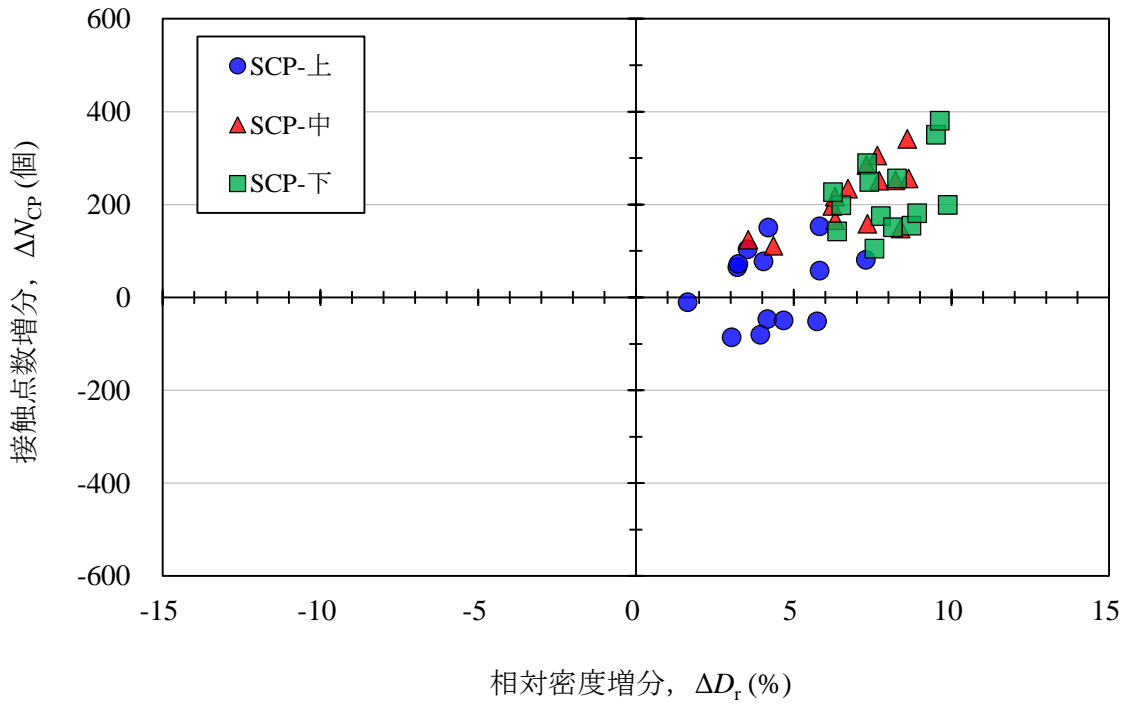


(a) 左, 右-上, 中, 下の全データ

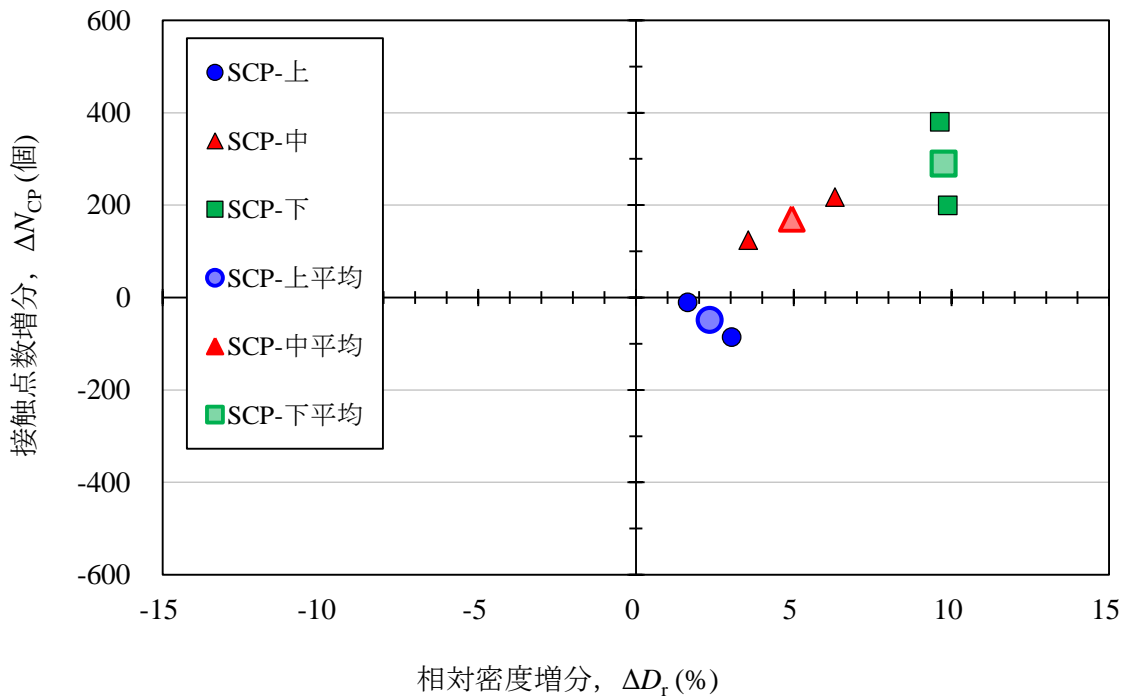


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と造成③打戻

図-6.20 相対密度と接触点数の関係



(a) 左, 右—上, 中, 下の全データ



(b) 左, 右の平均—上, 中, 下—原地盤と造成③打戻

図-6.21 相対密度増分と接触点数増分の関係

6.3 締固め杭工法との比較

ここでは、貫入と造成（引抜きと打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルが特徴の一つである SCP 工法に対して、貫入のみの施工過程で締固めを行う締固め杭工法との比較を実施するための模型実験を行った。

6.3.1 締固め杭工法を模擬した実験概要

締固め杭工法は、図-6.22 に示す模式図のように SCP 工法における貫入と造成（引抜きと打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルに対して、鋼管杭や木杭等の中実杭を貫入施工することで砂質土地盤の締固めを行うものであり、その施工方法は異なる。

締固め杭工法を模擬した SCP 工法との比較実験について、図-6.23 に実験概要、表-6.4 に実験ケースを示す。締固め杭工法では SCP 工法で模擬した砂杭の造成径と同じ、図-6.23(a) に示す $\phi 35\text{mm}$ の中実の塩化ビニル製パイプ（以降、中実杭）を貫入することで模擬した。比較実験においても“6.1 応用実験の概要”に示す SCP 工法における応用実験と同様の実験装置や実験手法および画像解析手法を用いるが、中実杭貫入時の押力がリニアラックジャッキの定格保持荷重を超えるため、図-6.23(b) に示す実験室内に設置されている載荷装置である島津製作所社製の応用試験装置オートグラフ（最大容

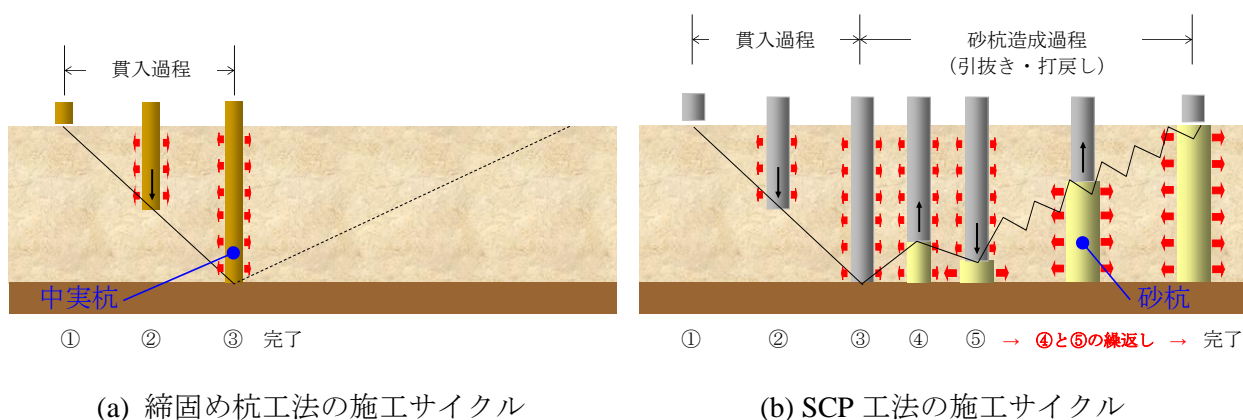
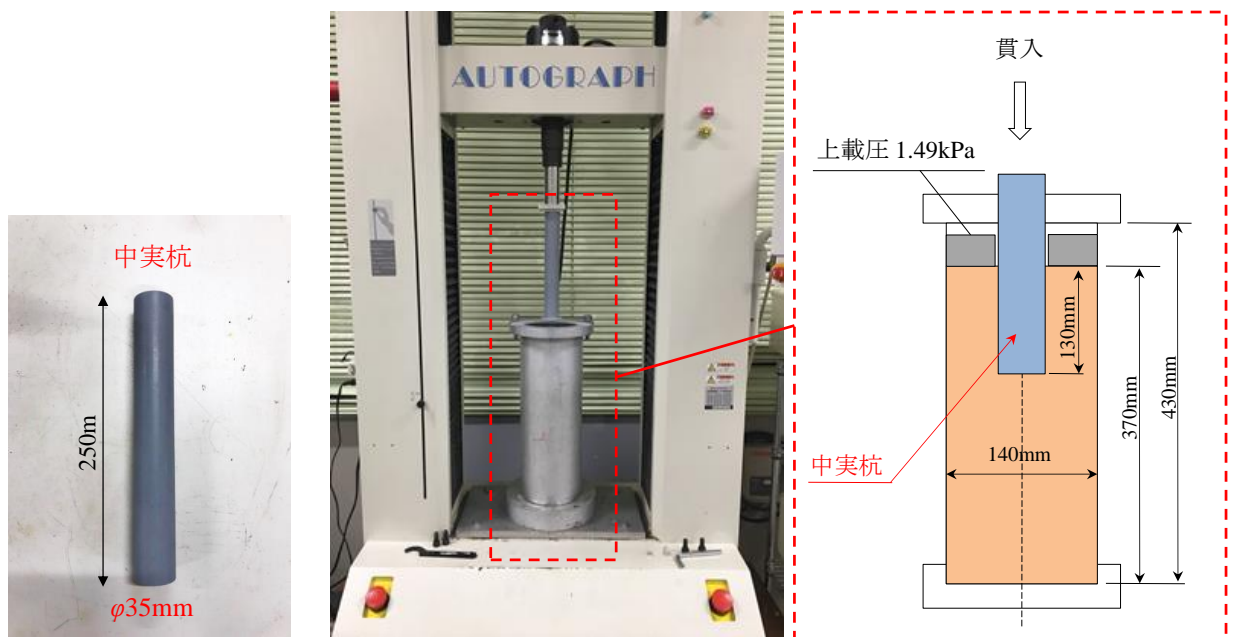


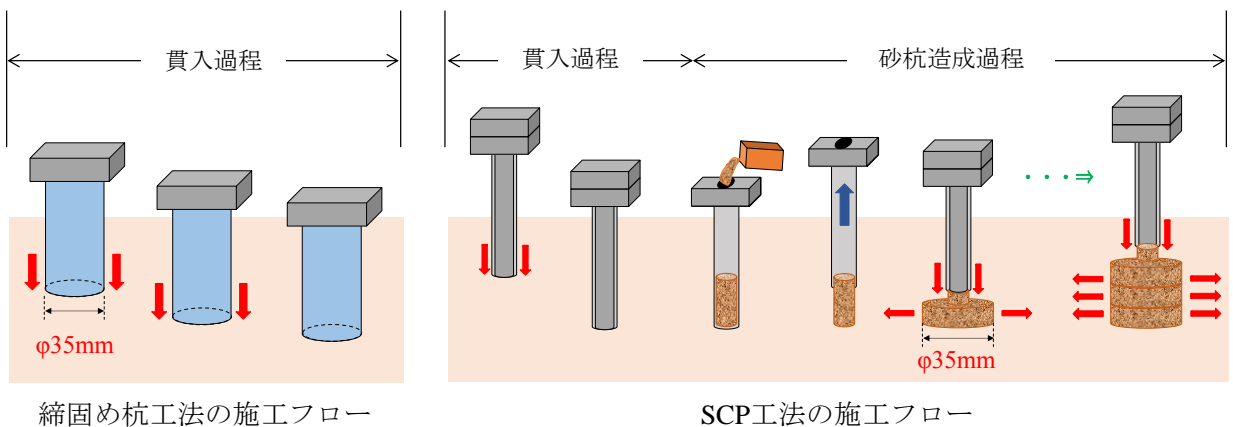
図-6.22 締固め杭工法と SCP 工法の締固め（施工）方法の違い

量 50kN)¹⁶⁾ による貫入実験を行った。中実杭の貫入量は、SCP 工法における貫入下端と同じ 130mm とした。CT 撮影は、撮影パラメータとして応用実験と同様に表-6.3 に示す設定とし、撮影のタイミングとしては中実杭貫入前の原地盤として初期状態を 1 回、中実杭の貫入時に貫入深度 100mm, 110mm, 120mm, 130mm の 4 回、合計で 5 回実施した。



(a) 模擬した締固め杭

(b) 荷装置 (オートグラフ) および模型実験土槽



(c) 模型実験における施工フローの違い

図-6.23 比較実験における締固め杭工法の模型実験概要

表-6.4 比較実験ケース

Case	模擬工法	実験材料						CT 撮影 回数
		模型地盤	杭					
			杭材	貫入径	貫入長	造成径	造成長	
1	SCP	熊本硅砂	豊浦砂	20mm	130mm	35mm	30mm	10回
2	締固め杭	熊本硅砂	塩化ビニル製パイプ	35mm	130mm	—	—	5回

6.3.2 実験結果と SCP 工法との比較

以下に、締固め杭工法による模型実験結果を示し、“6.2 応用実験の結果”に示す SCP 工法による模型実験結果との比較を行う。

(1) 中実杭の貫入時押力

図-6.24 に締固め杭工法を模擬した中実杭の貫入押力と貫入深度の関係を示す。比較のため、図-6.2 に示した SCP 工法による貫入押力の計測結果も図中に併記した。締固め杭工法による中実杭貫入時の押力は、SCP 工法におけるケーシングパイプ初期貫入時と同様に、貫入が進むにつれ押力も増加しているが、貫入下端での押力は SCP 工法における初期貫入時の約 6 倍、砂杭造成時の最大値の約 2.5 倍を示した。これは、実験で用いた中実杭の外径 $\phi 35\text{mm}$ に対して、SCP 工法におけるケーシングパイプが外径 $\phi 20\text{mm}$ と小さいことによるものと考えられる。

(2) X線 CT 画像

図-6.25 に任意の深度まで中実杭を貫入した時に μXCT 撮影した鉛直断面 CT 画像を示す。同図には、図-6.3 に示す SCP 工法におけるケーシングパイプの初期貫入および砂杭造成時の CT 撮影結果も比較のために併記した。図より中実杭の連続的な貫入状況が可視化できる。

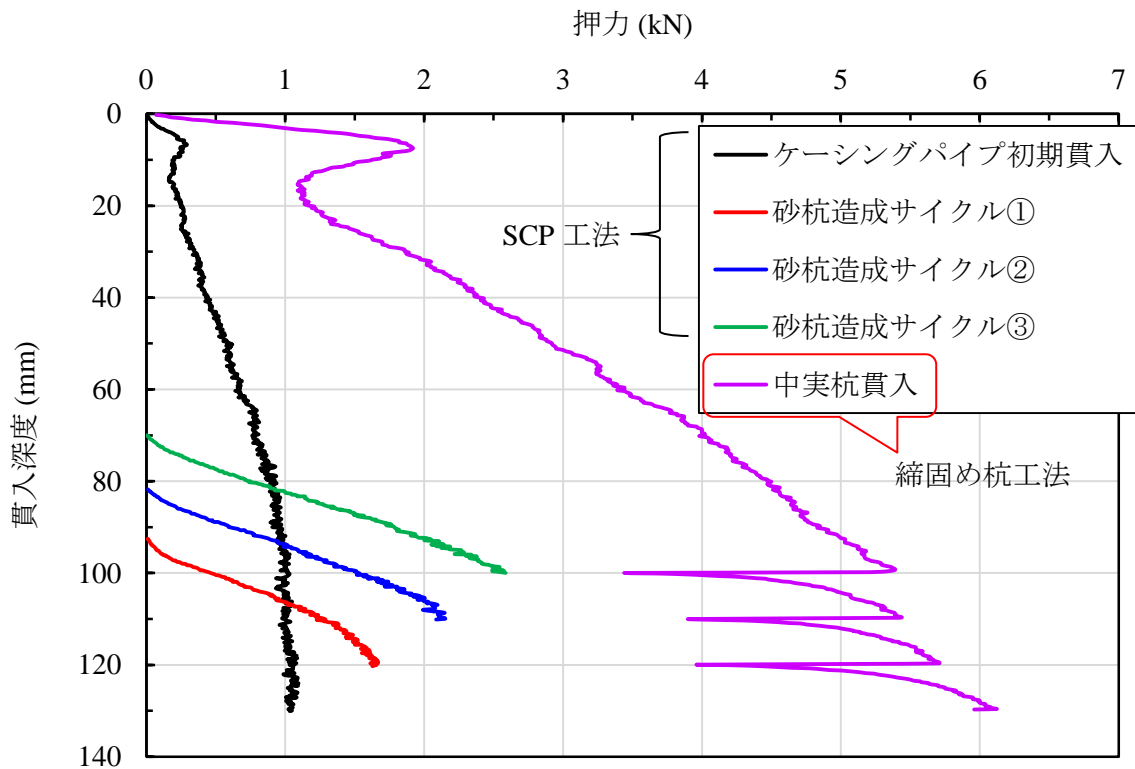


図-6.24 中実杭の貫入押力と貫入深度の関係

(3) 変位量とひずみの増分

図-6.26 に中実杭の貫入過程について、DIC 解析によって得られた中実杭周辺地盤の変位分布を示す。この変位分布を基に算出したせん断ひずみ増分と体積ひずみ増分の分布を図-6.27 に示す。異なる施工方法による比較を行うため、それぞれの図に SCP 工法による砂杭造成サイクル③における打戻し完了時の変位量とひずみの増分図も併記した。変位量については締固め杭工法による中実杭の貫入に伴って、土粒子が中実杭下端からの下 (z) 方向へ移動する動きを示している。せん断ひずみは、中実杭貫入に伴って中実杭の下端部に集中する傾向が見られる。体積ひずみでは、せん断ひずみが卓越した領域で体積ひずみが発生していることがわかる。

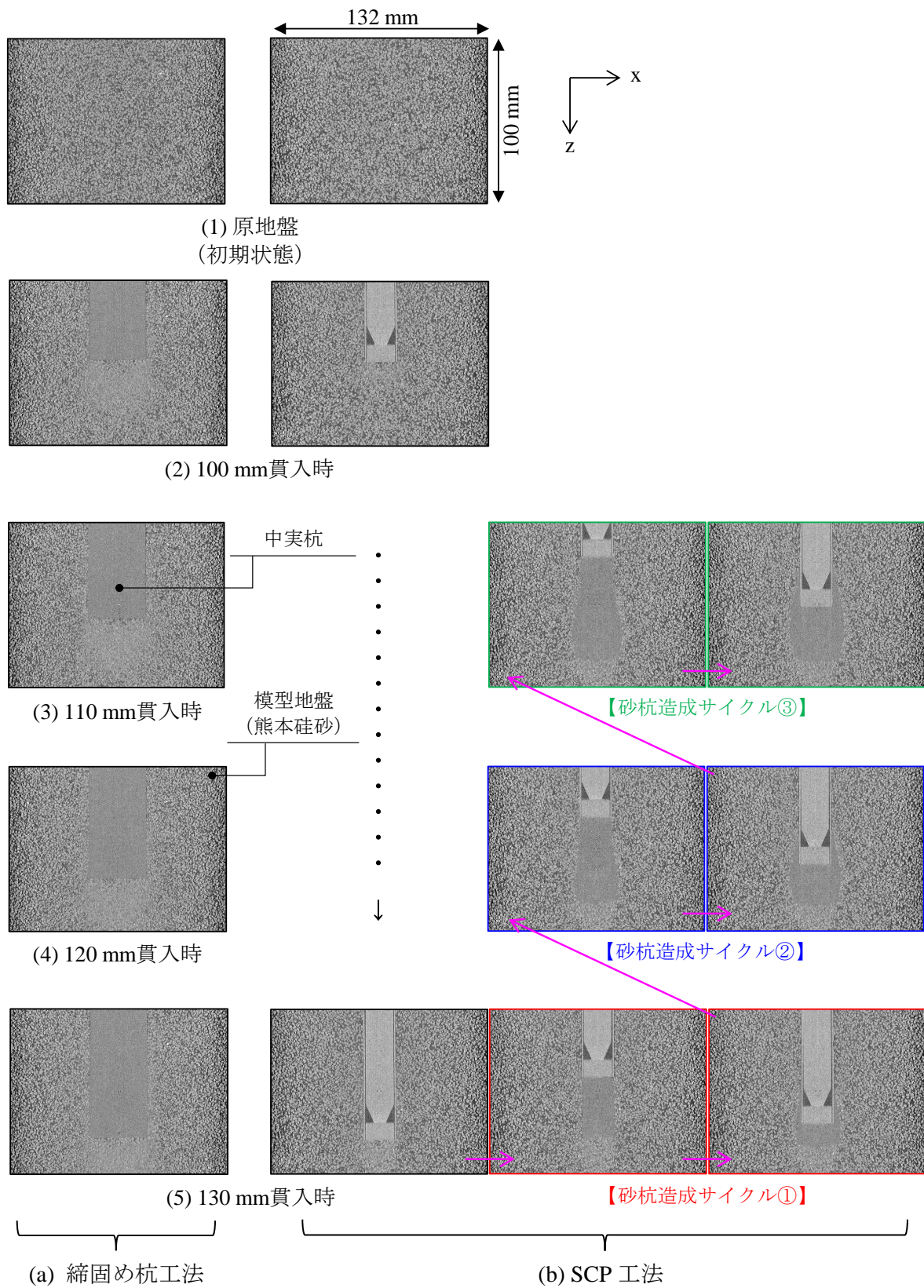
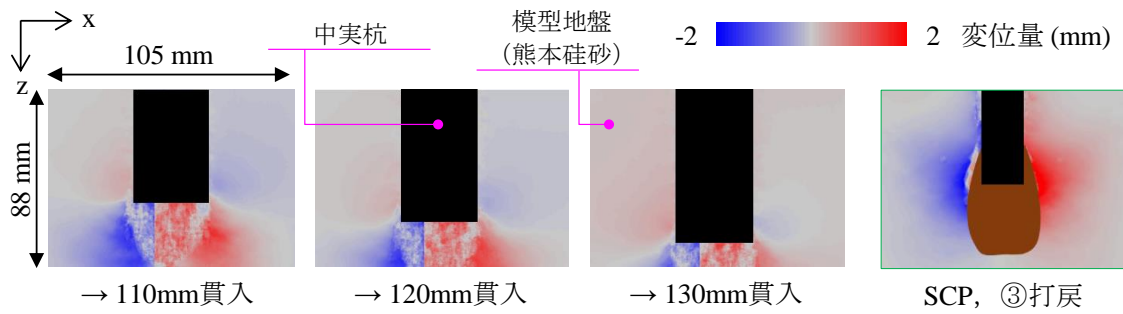
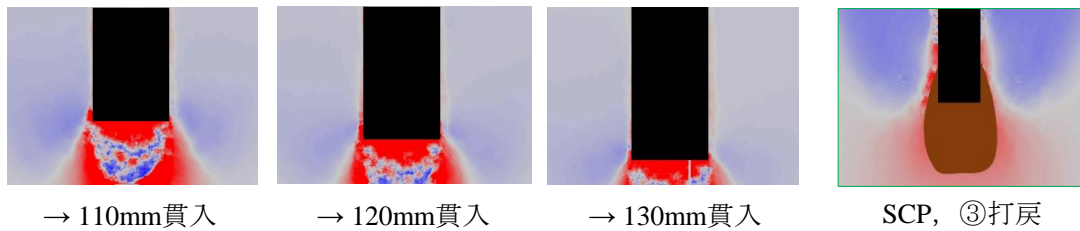


図-6.25 中実杭貫入時の鉛直断面 CT 画像

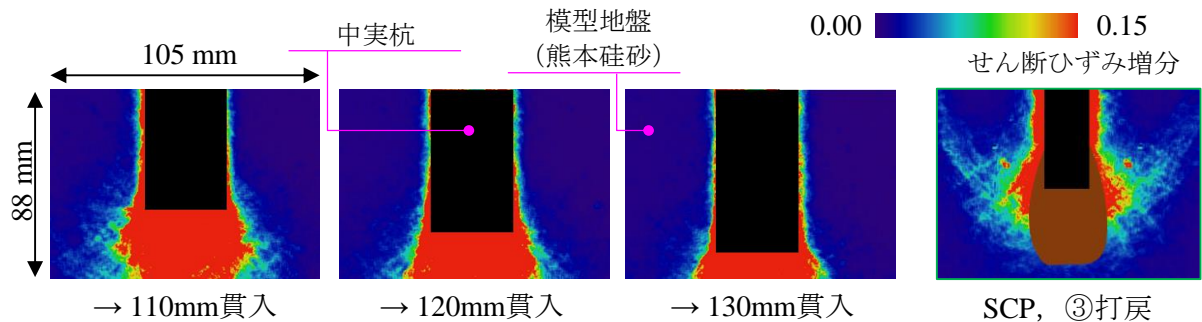


(a) 水平 (x 方向) 変位増分

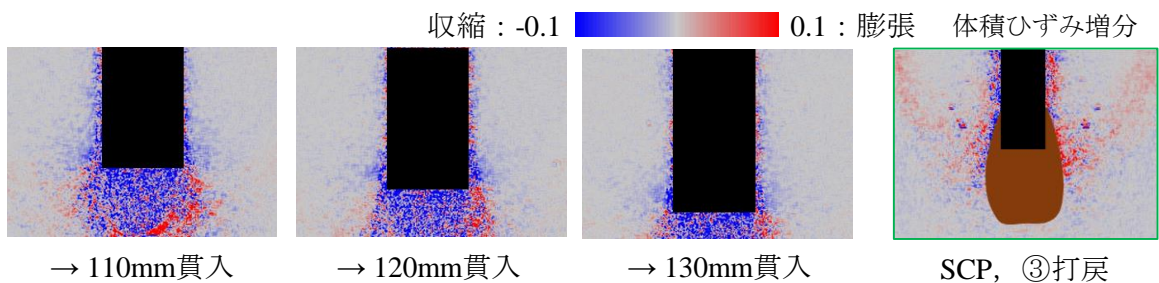


(b) 鉛直 (z 方向) 変位増分

図-6.26 中実杭貫入による杭周辺地盤の変位増分

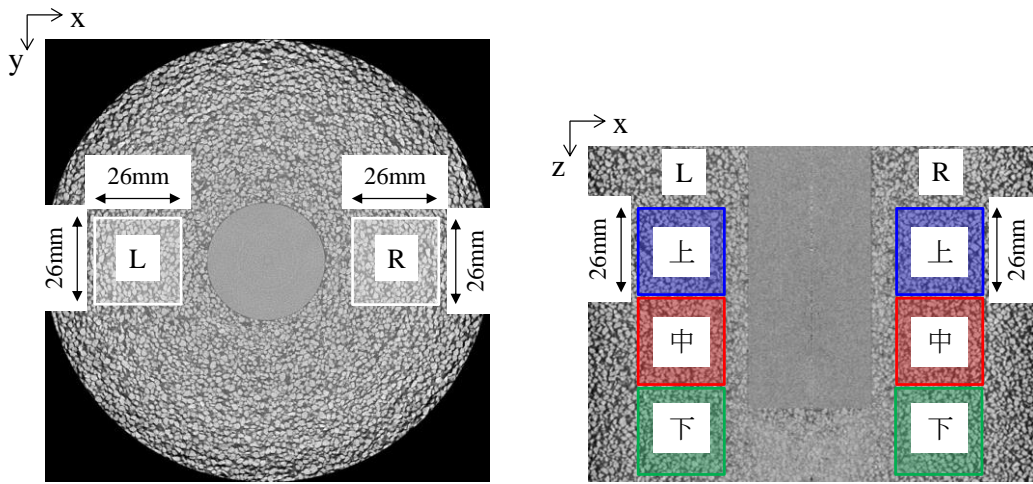


(a) せん断ひずみ増分の分布

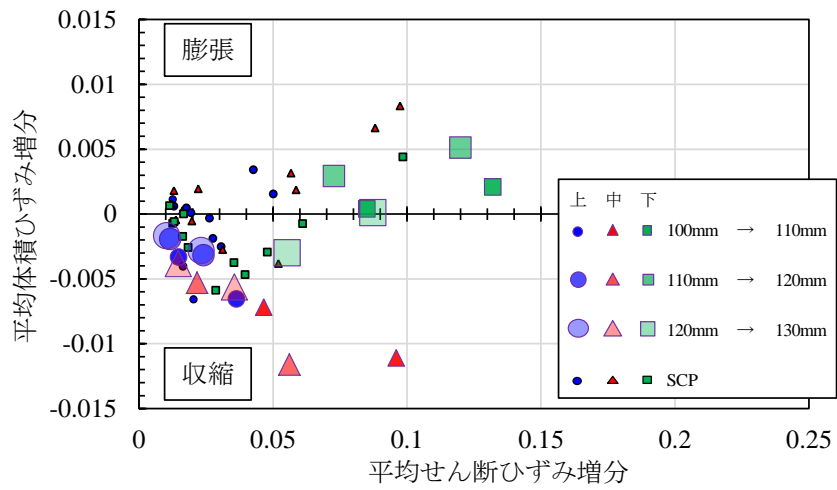


(b) 体積ひずみ増分の分布

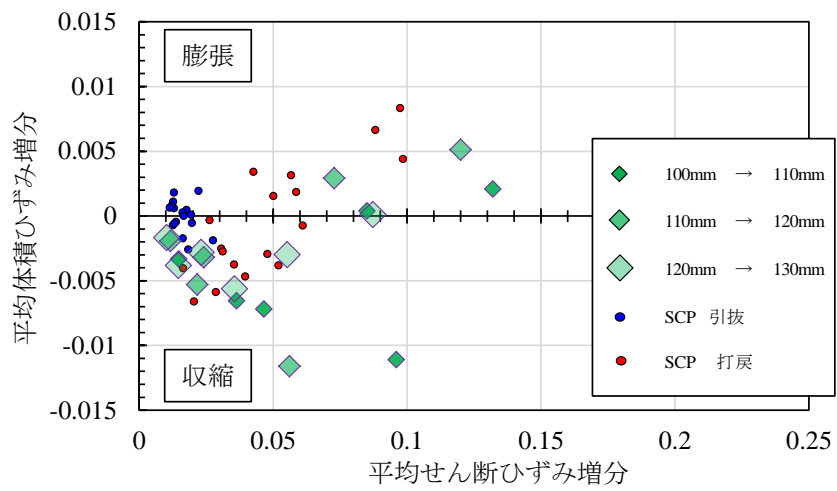
図-6.27 中実杭周辺地盤のせん断ひずみ増分および体積ひずみ増分



(a) 平均ひずみの算出領域



(b) 解析深度 (位置) におけるひずみ増分



(c) 施工過程 (ステップ) におけるひずみ増分

図-6.28 中実杭貫入における平均せん断ひずみ増分と平均体積ひずみ増分の関係

図-6.28 に中実杭の各貫入深度（CT 撮影深度）間のせん断ひずみ増分と体積ひずみ増分の平均値の関係をプロットした。ひずみの平均値を算出した解析領域は、図-6.6(a)に示す SCP 工法における平均ひずみ算出深度と同位置とし、図-6.28(a)に示す貫入された中実杭の両脇を対象に、上部、中部、下部の領域について、それぞれ $200 \times 200 \times 200$ voxel ($26 \times 26 \times 26$ mm) とした。また同図には、図-6.6(b)、図-6.6(c)で示す SCP 工法における実験結果を併記している。締固め杭工法と SCP 工法を比較すると、中実杭貫入に伴ったせん断ひずみや体積ひずみの増分は、砂杭造成に伴ったひずみ増分よりも全体的にバラツキが大きいことがわかる。

(4) 相対密度と接触点数の変化

締固め杭工法における中実杭貫入に伴った杭周辺地盤についても、CT 撮影により得られた CT 画像を用い、画像解析により相対密度および土粒子の接触点数を算出した。その解析箇所は、図-6.28(a)に示す平均ひずみの算出領域と同位置の中実杭両脇を対象に、上部、中部、下部それぞれ $200 \times 200 \times 200$ voxel ($26 \times 26 \times 26$ mm) とした。これは前節の“6.2.4 砂杭周辺地盤の相対密度と接触点数の変化”で示す SCP 工法による砂杭周辺地盤に対する解析箇所と同じ解析領域を対象としている。また、締固め杭工法による周辺地盤の相対密度と接触点数の変化を SCP 工法と比較するため“6.2.4 砂杭周辺地盤の相対密度と接触点数の変化”に示す解析結果を併記する。

図-6.29～図-6.34 に中実杭周辺地盤における相対密度の変化を示す。図-6.29 では、上部、中部、下部の解析領域における相対密度変化をヒストグラムで整理した。図-6.30 では、中実杭貫入の進捗に伴う相対密度の経時変化を各解析深度とそれぞれの深度の平均値および全深度平均値として整理し、その変動係数の変化も併せて示す。図-6.31 では、原地盤と中実杭貫入における相対密度と解析深度の関係を示した。図-6.29～図-6.31 では中実杭貫入に伴った相対密度 D_r 変化を示すものに対して、図-6.32～図-6.34 は原地盤からの相対密度増分 ΔD_r 変化を示すものである。

相対密度および相対密度増分の変化の関係図より、中実杭 130mm 貫入完了時には原地盤より解析上部の位置で相対密度が減少し、中部、下部の位置では相対密度が増加していることがわかる。SCP 工法における解析結果と比較すると中実杭による相対密度の

増加は小さいが、相対密度の変動係数は SCP 工法と同様に中実杭の貫入進捗につれて小さくなり、均一化する傾向を示している。

次に、図-6.35～図-6.40 に中実杭周辺地盤の接触点数の変化を示す。図-6.35 では、上部、中部、下部の解析位置における接触点数の変化をヒストグラムで整理して示す。図-6.36 では、中実杭貫入の進捗による原地盤からの接触点数の経時的な変化について、各解析領域と各領域の平均値および全領域平均値を示し、全領域平均値の変動係数を併記して示す。図-6.37 では、原地盤とそれぞれの貫入深度における接触点数と解析位置の関係を示す。図-6.35～図-6.37 が中実杭貫入に伴った接触点数 N_{CP} の変化について整理したものに対して、図-6.38～図-6.40 では原地盤からの接触点数増分 ΔN_{CP} の変化について示す。

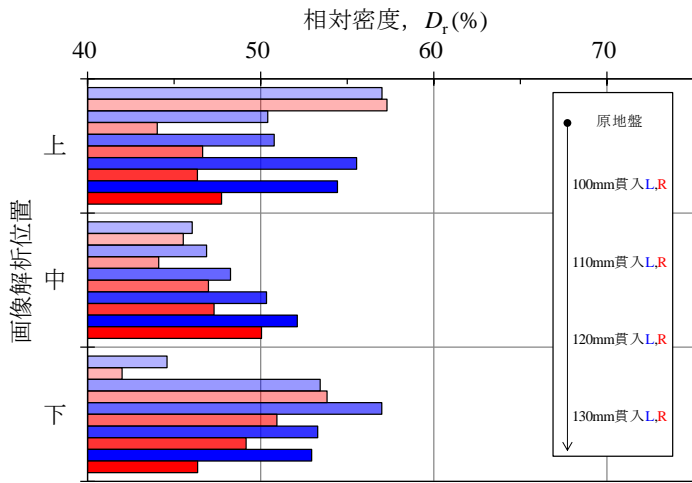
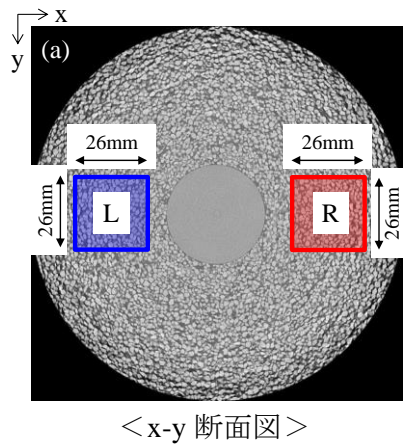
接触点数および接触点数増分の変化の関係図より接触点数は、中実杭の貫入に伴って中部の位置でのみ若干の増加傾向がみられるものの、上部および下部の位置では原地盤より減少している。SCP 工法の解析結果と比べると接触点数の増分は、どの地点においても SCP 工法の方が大きく増加している。また、中実杭貫入に伴う全深度の平均値における変動係数の変化は相対密度の変動係数とは異なり、貫入が進むにつれてバラツキが大きくなっている。SCP 工法の場合、相対密度と接触点数における変動係数が共に施工が進むにつれて小さくなり締固め改良地盤の均一化が進んでいくことが明らかとなったが、一方で、中実杭の貫入においては、相対密度の変動係数は小さくなるが、接触点数の変動係数は大きくなることから、その改良地盤の微視構造は均一化せず、逆に不均一となる傾向を示した。

図-6.41 に中実杭貫入に伴った中実杭周辺地盤の相対密度と接触点数の関係を示し、図-6.42 にその相対密度増分と接触点数増分の関係を示す。これらの図より、中実杭の貫入による周辺地盤の相対密度の増減は解析深度によってバラツキが大きく、接触点数はどの深度においても減少傾向が強いことがわかる。締固め杭工法と SCP 工法を比べてみても、相対密度と接触点数の増加は一樣に締固め杭工法の方が小さいことが確認できる。

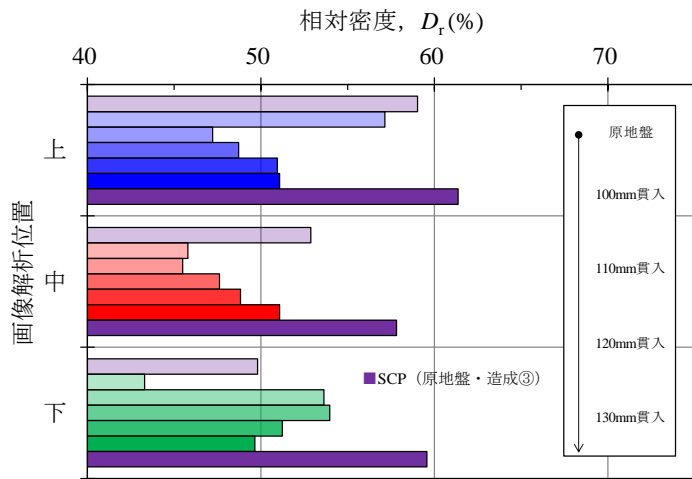
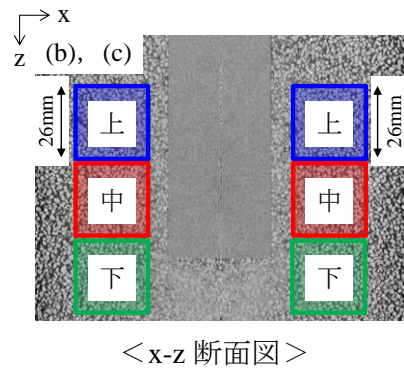
図-6.43 に原地盤となる初期状態と SCP 工法および締固め杭工法の両対策工法の最終工程となる砂杭造成サイクル③完了時（SCP 工法）と中実杭 130mm 貫入完了時（締固

め杭工法)における相対密度と接触点数について整理した。図より SCP 工法と締固め杭工法では, SCP 工法の方が原地盤からの相対密度と接触点数の増加が多いことが明らかである。さらには, 原地盤のデータにおける線形近似曲線を併記しているが, 同じ相対密度における接触点数は, SCP 工法では原地盤よりも多く, 締固め杭工法の場合は原地盤よりも少なくなった。これは SCP 工法の特徴的な施工サイクルである中詰砂の細かな排出と打戻しによって生じる繰返しせん断履歴を受けることで砂杭周辺地盤の接触点数の増加し, その微視構造が安定化すると考えられる。その一方で, 締固め杭工法では, 施工サイクルが鉛直方向の貫入過程のみとなることで中実杭周辺地盤が一度に大きなひずみを受ける可能性が想定され, その周辺地盤の接触数の減少し, 微視構造の不安定化につながる可能性が考えられる。

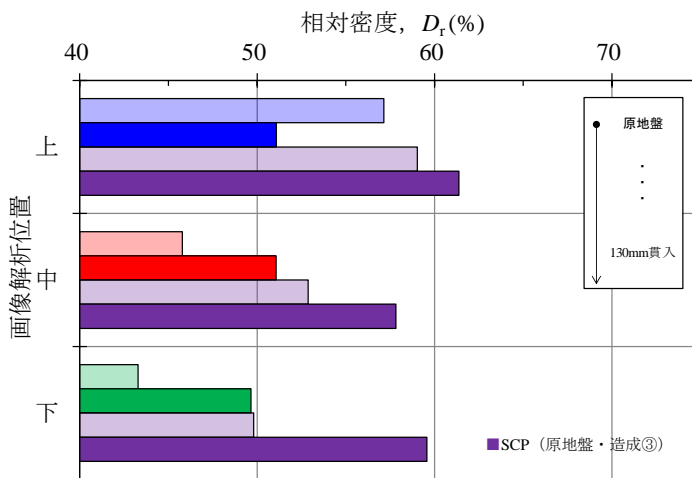
ここでの比較実験では, 模擬した SCP 工法と締固め杭工法の目標とする改良率を同じ条件とするため, 砂杭造成径と中実杭径を同じ $\phi 35\text{mm}$ と設定したが, その施工方法が異なることによって改良地盤の接触点数に差異が生じることが明らかとなった。



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程



(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程



(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と130mm貫入

図-6.29 中実杭貫入における相対密度変化のヒストグラム

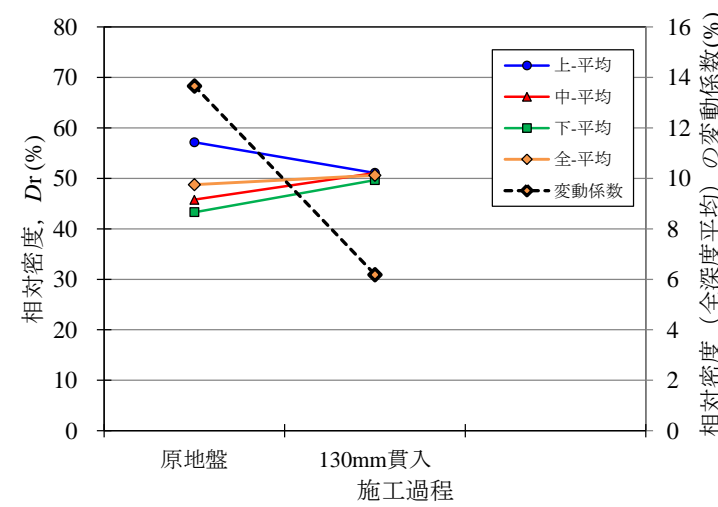
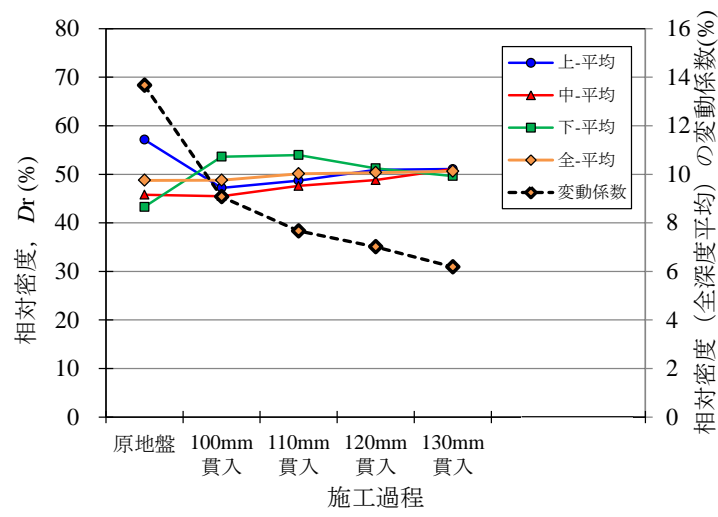
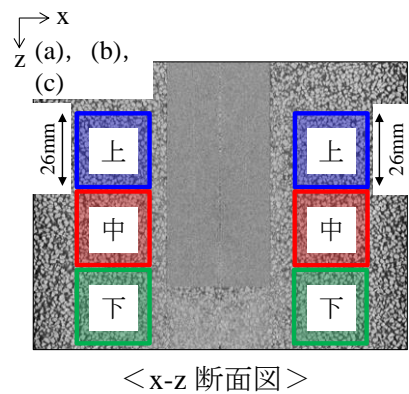
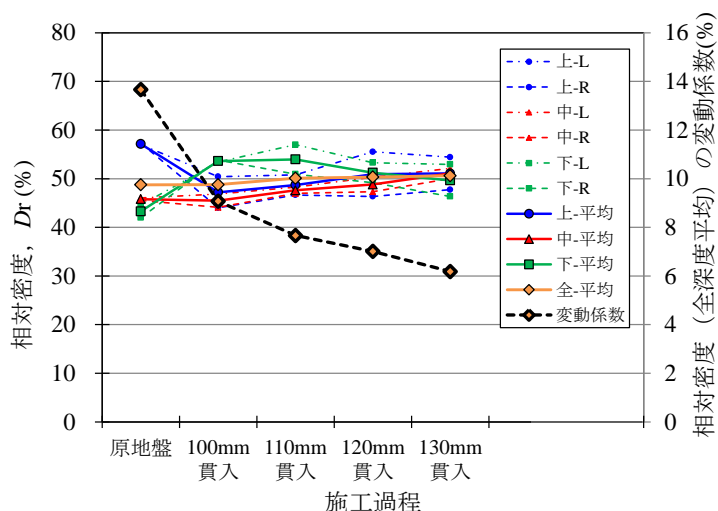
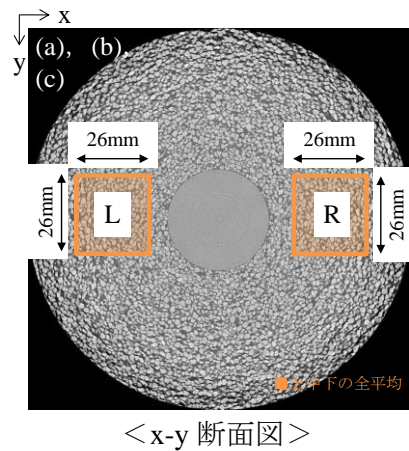
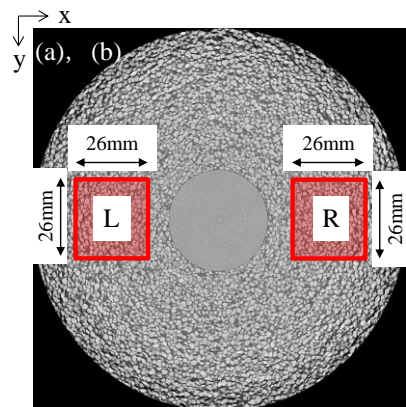
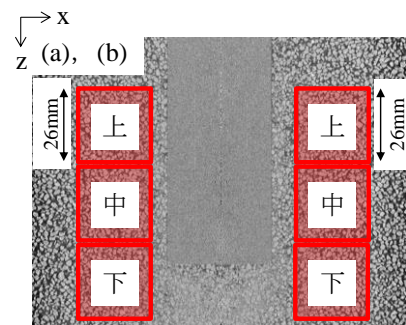


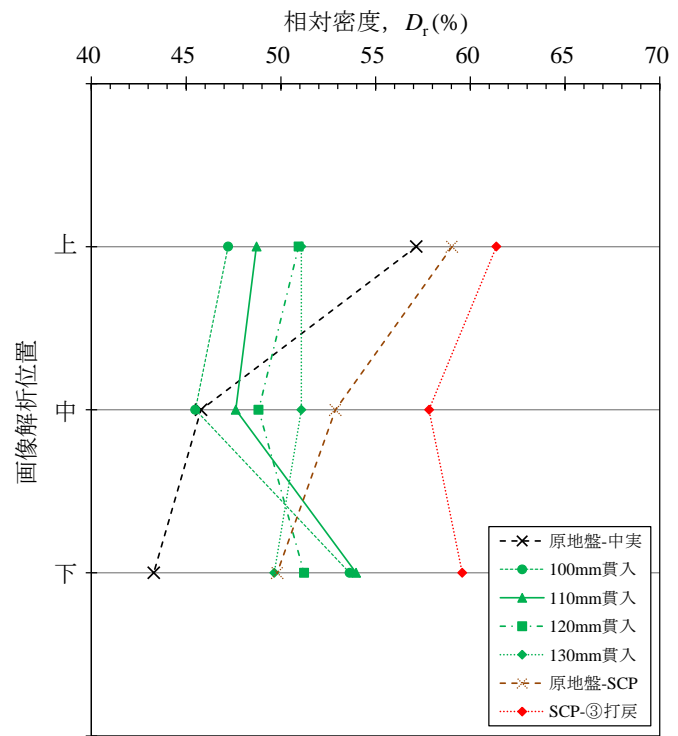
図-6.30 中実杭貫入における相対密度の経時的な変化



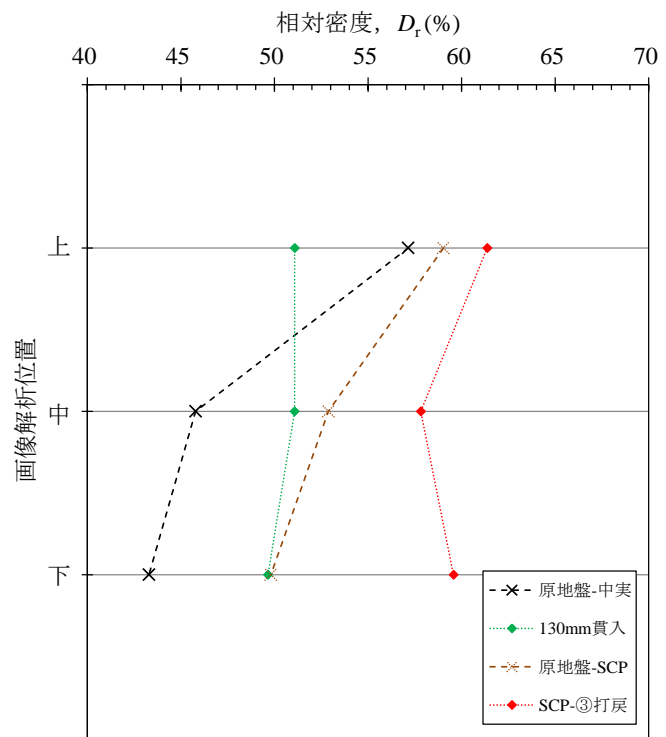
<x-y 断面図>



<x-z 断面図>

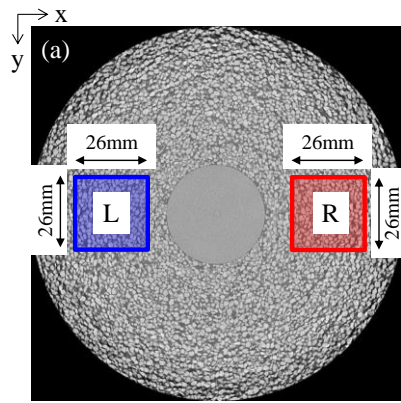


(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-貫入過程

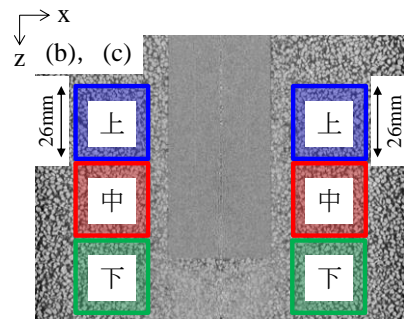


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と130mm貫入

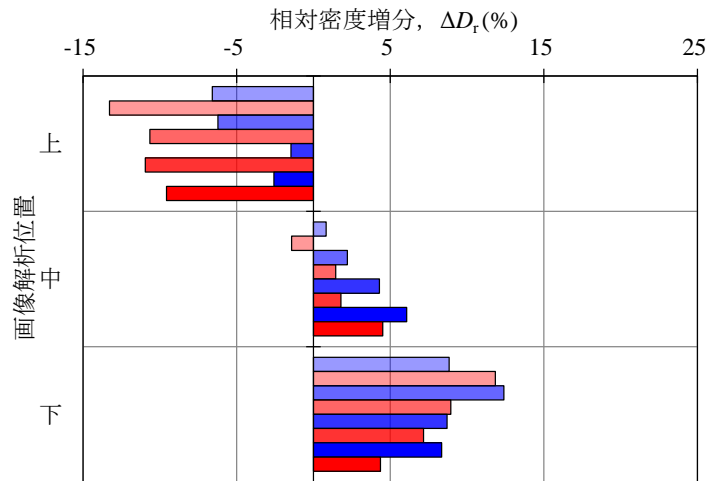
図-6.31 中実杭貫入における相対密度変化と解析深度との関係



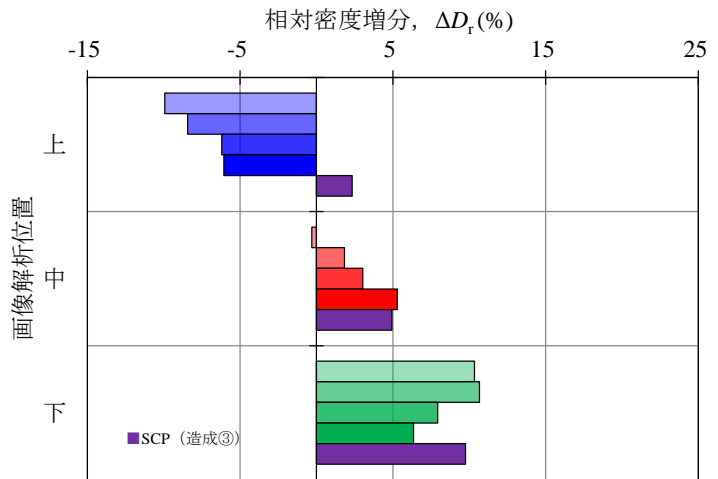
<x-y 断面図>



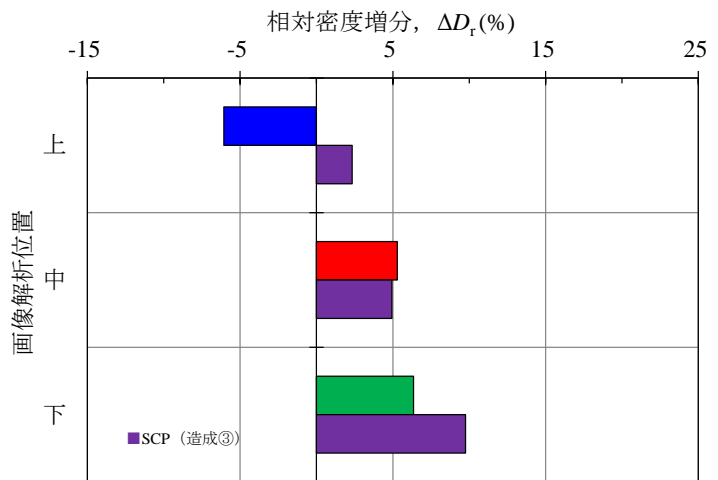
<x-z 断面図>



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程

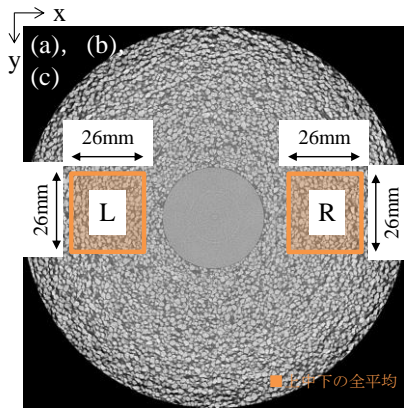


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程

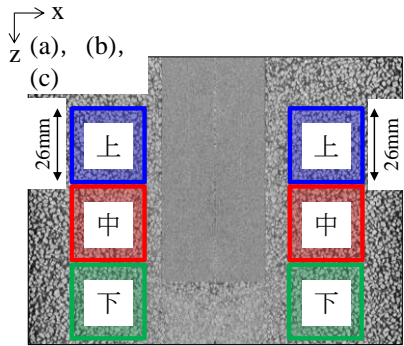


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

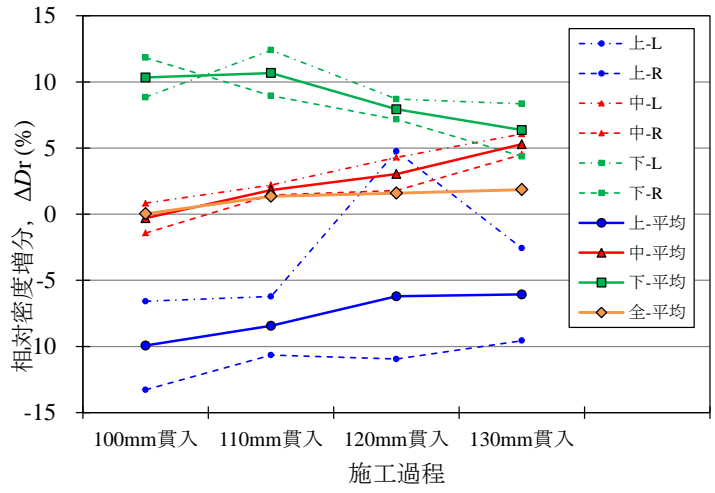
図-6.32 中実杭貫入における相対密度増分の変化ヒストグラム



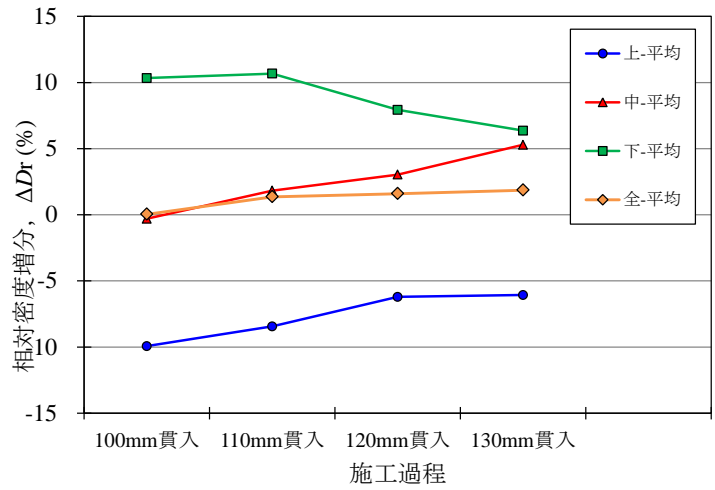
< x-y 断面図 >



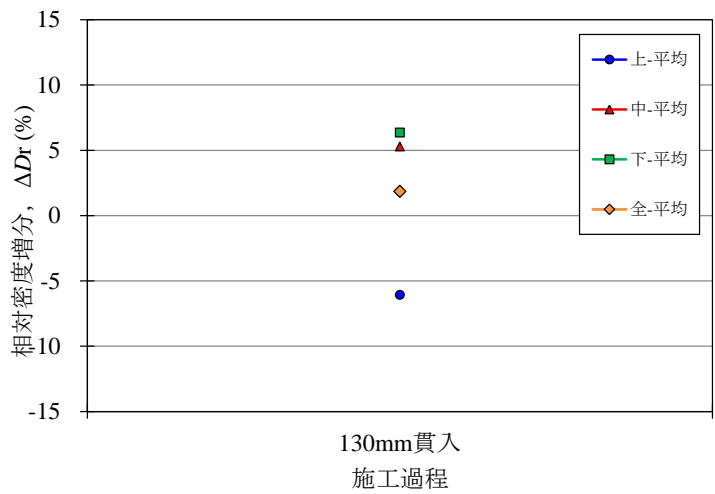
< x-z 断面図 >



(a) 左, 右-上, 中, 下

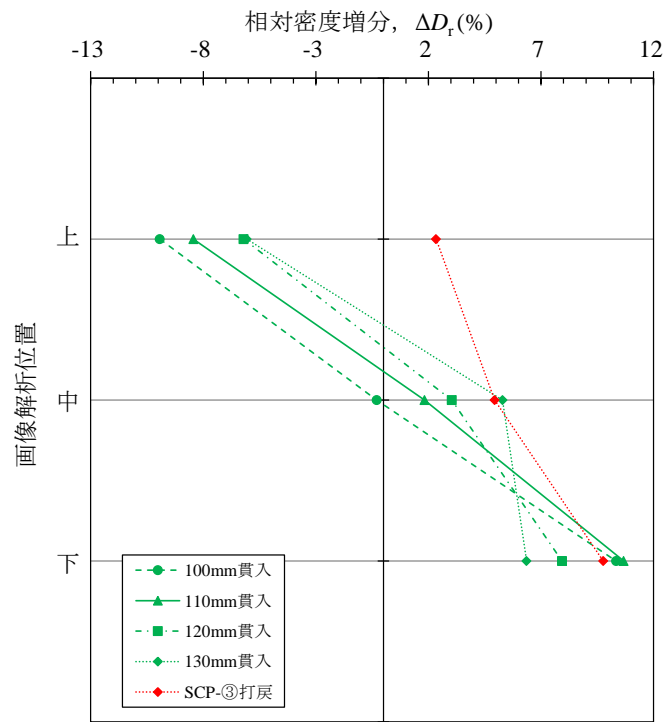
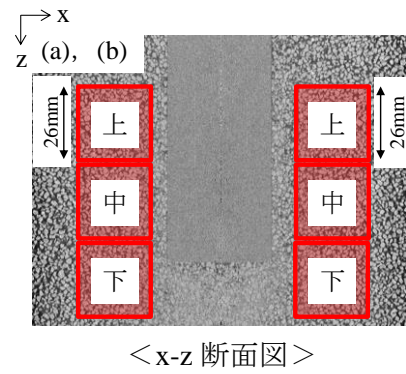
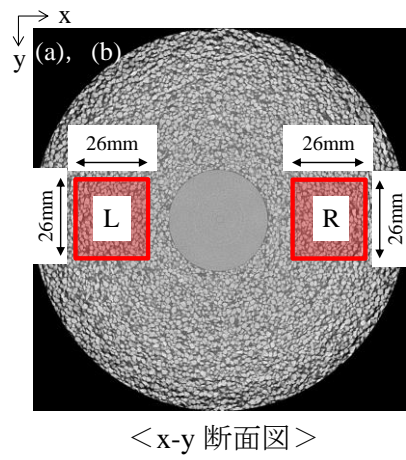


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

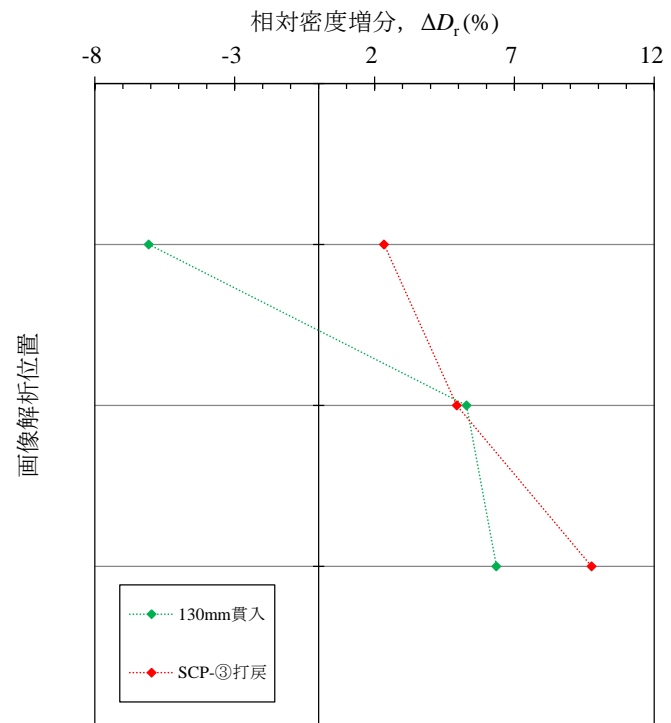


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

図-6.33 中実杭貫入における相対密度増分の経時的な変化

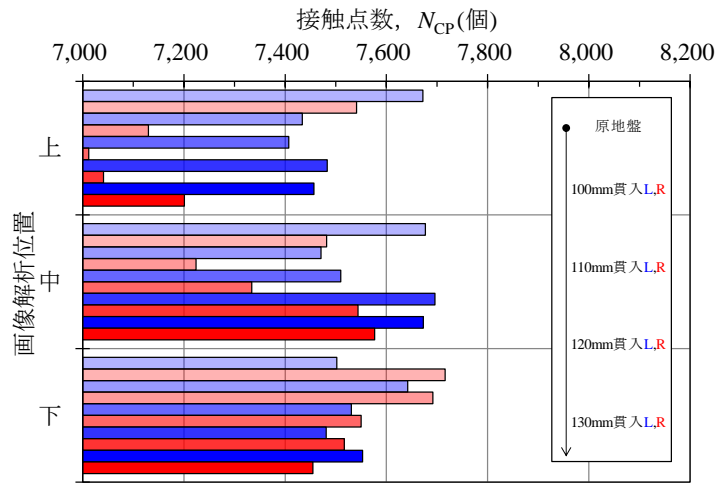
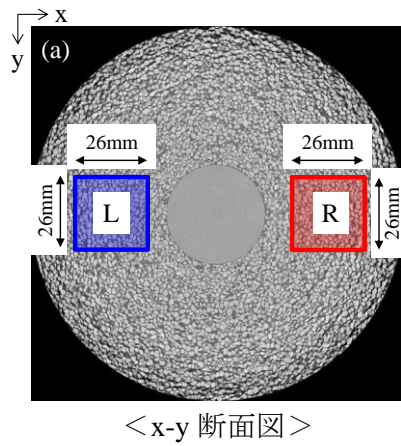


(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-貫入過程

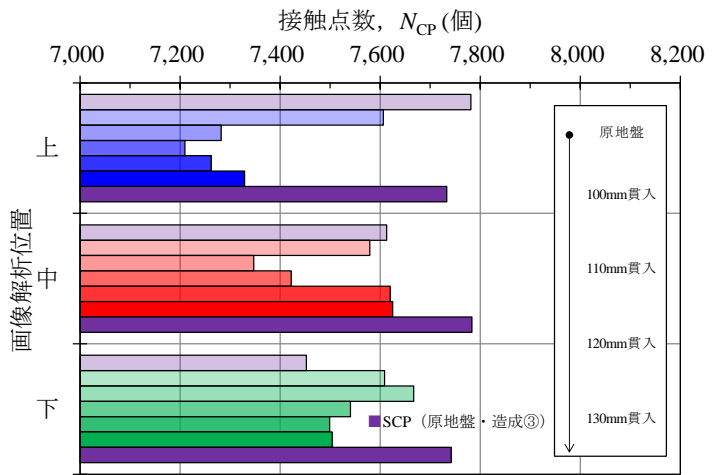
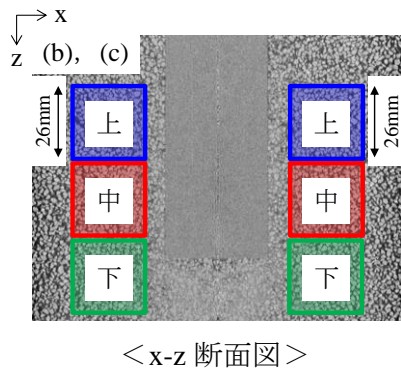


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

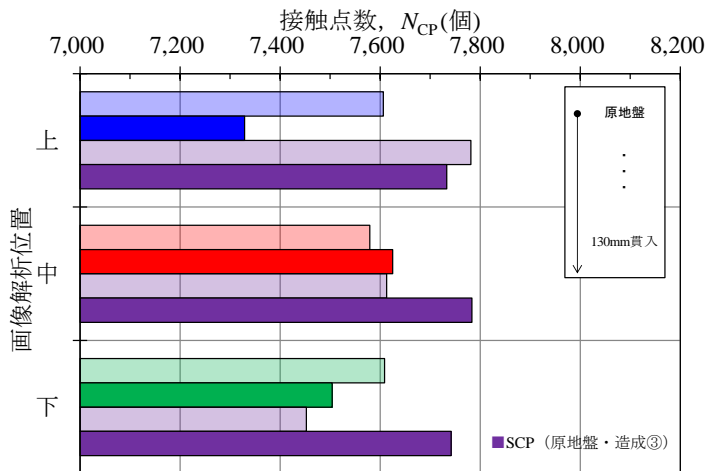
図-6.34 中実杭貫入における相対密度増分の変化と解析深度との関係



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程

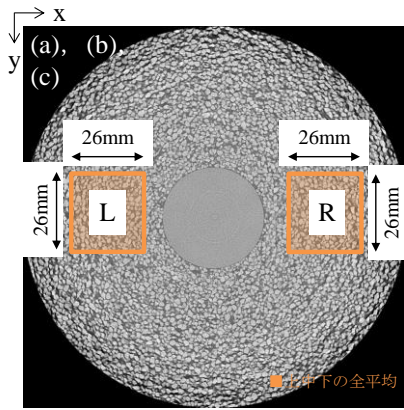


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程

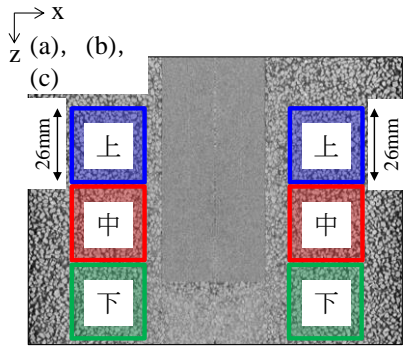


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と130mm貫入

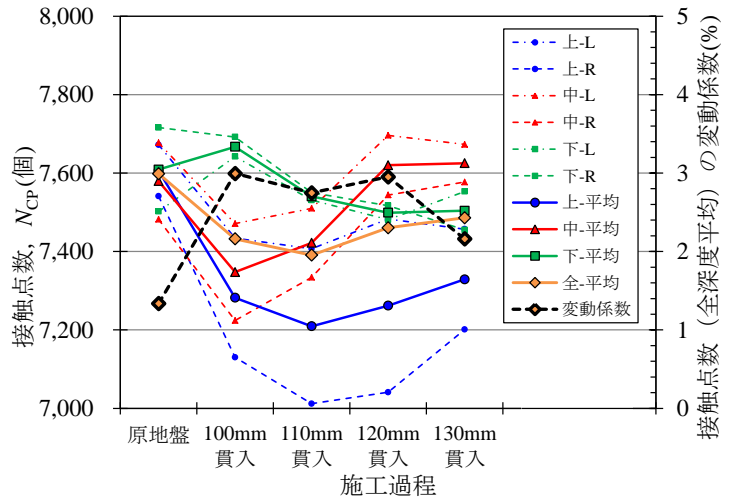
図-6.35 中実杭貫入における接触点数変化のヒストグラム



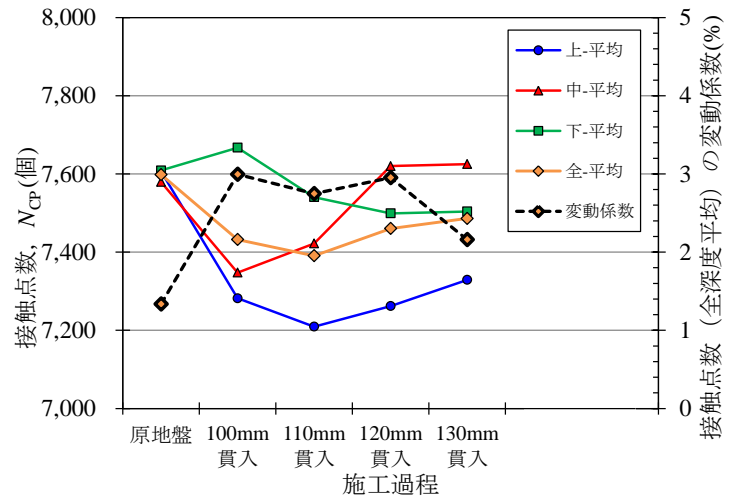
<x-y 断面図>



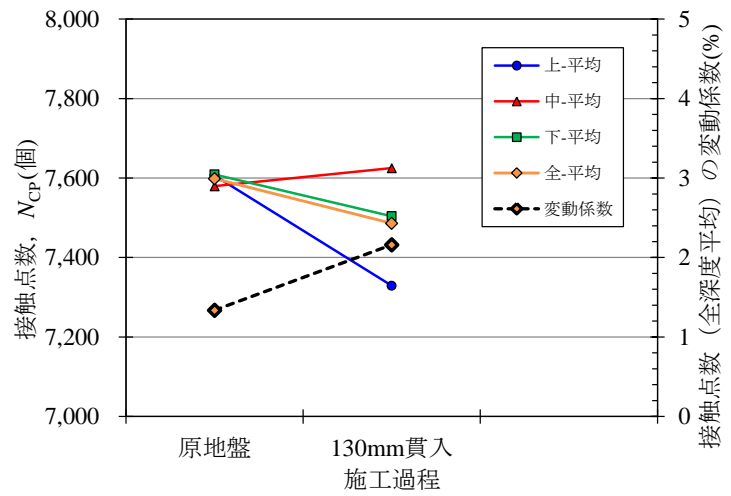
<x-z 断面図>



(a) 左, 右-上, 中, 下

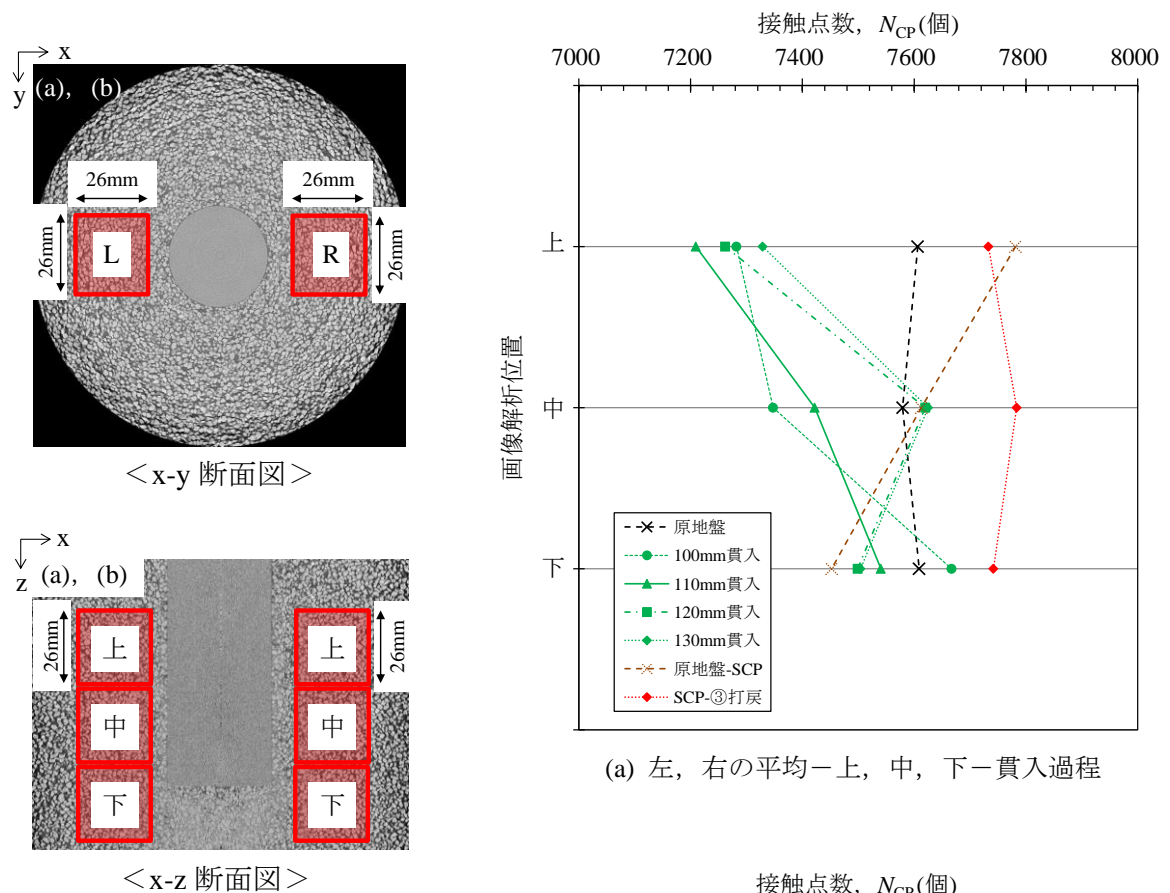


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

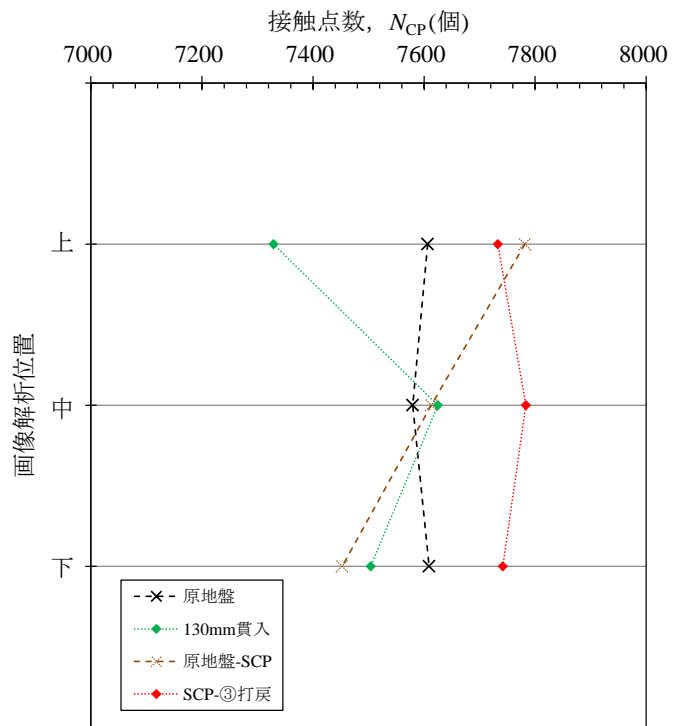


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と 130mm 貫入

図-6.36 中実杭貫入における接触点数の経時的な変化

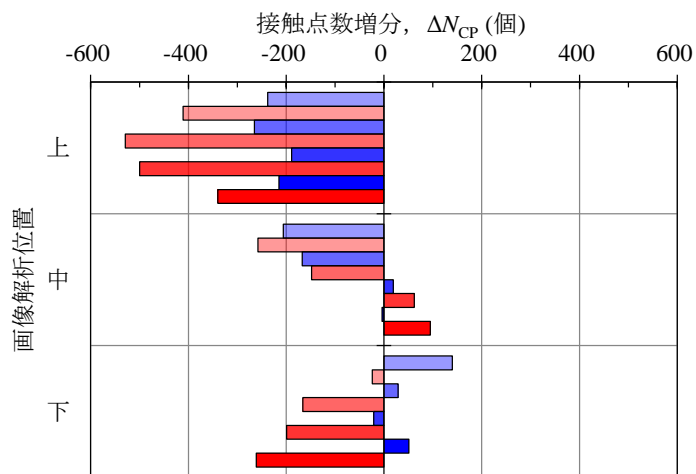
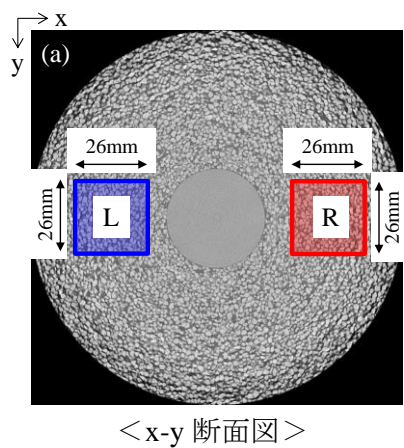


(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-貫入過程

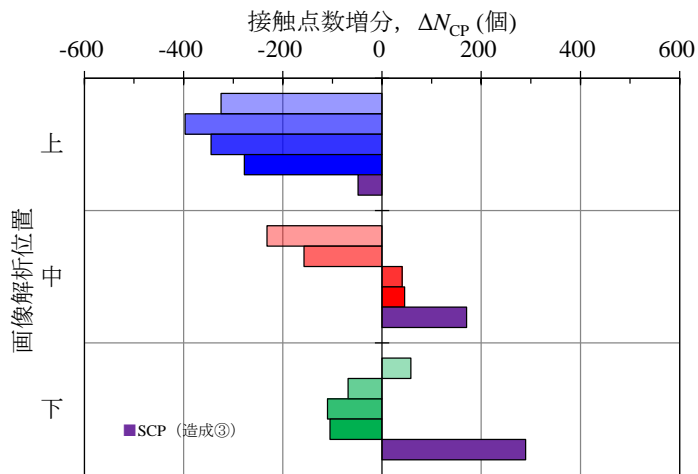
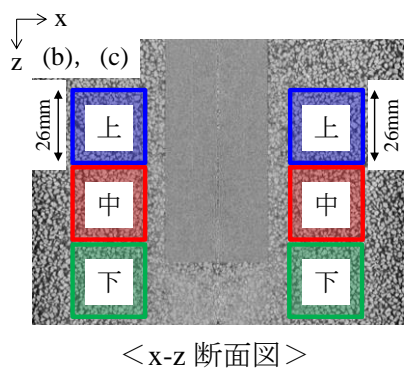


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と130mm貫入

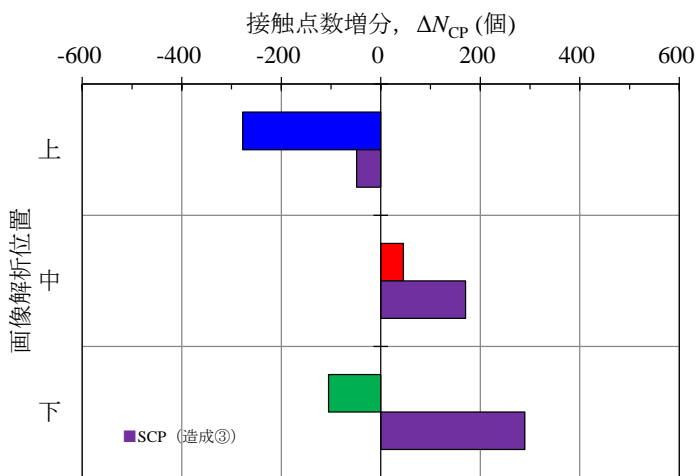
図-6.37 中実杭貫入における接触点数変化と解析深度の関係



(a) 左, 右-上, 中, 下-施工過程

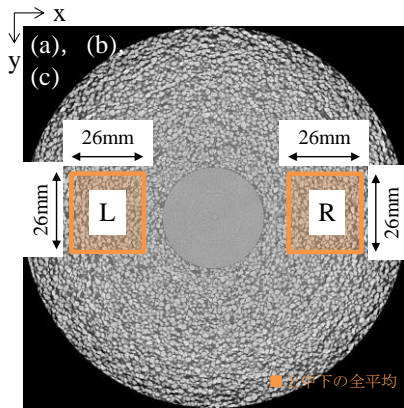


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-施工過程

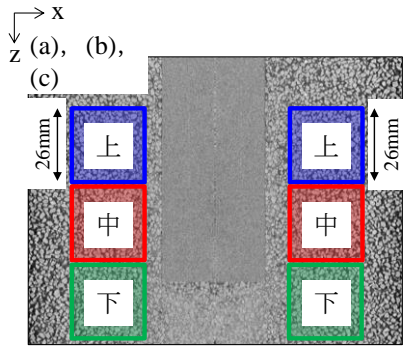


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

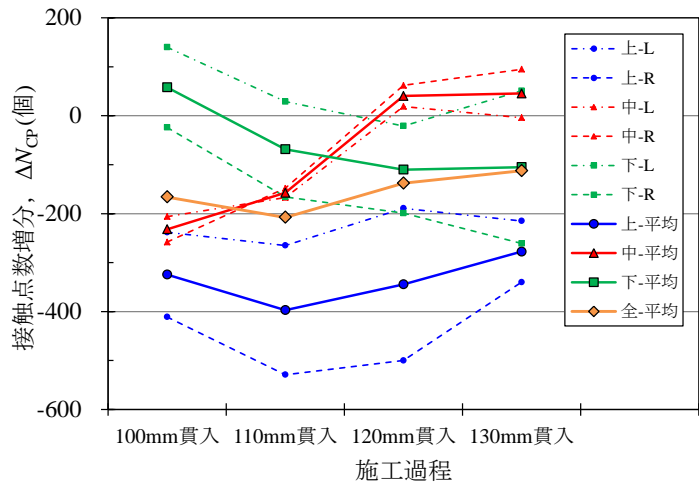
図-6.38 中実杭貫入における接触点数増分の変化ヒストグラム



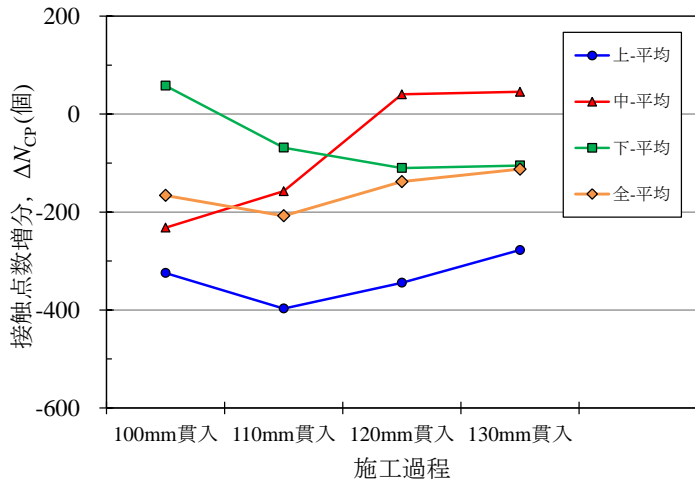
< x-y 断面図 >



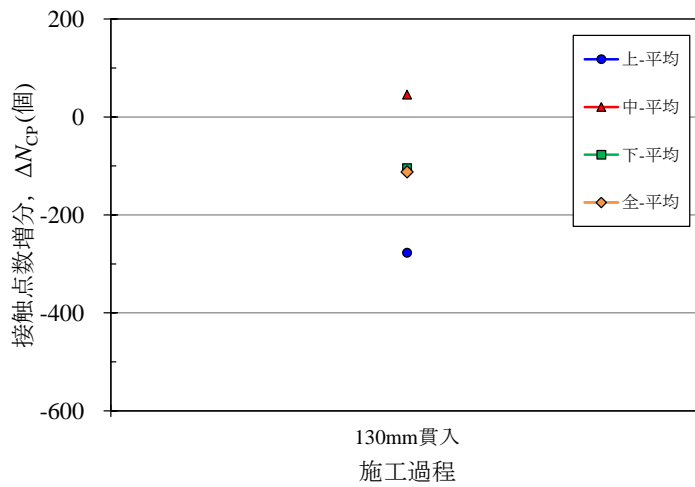
< x-z 断面図 >



(a) 左, 右-上, 中, 下

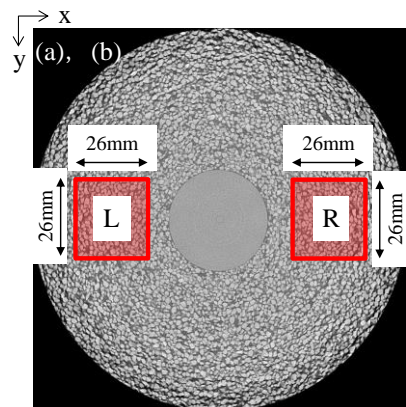


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下

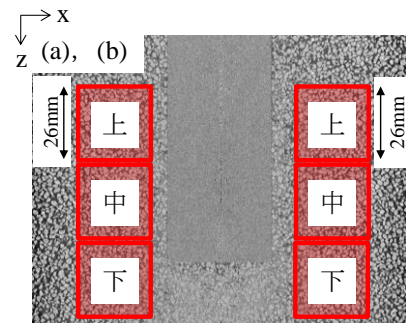


(c) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

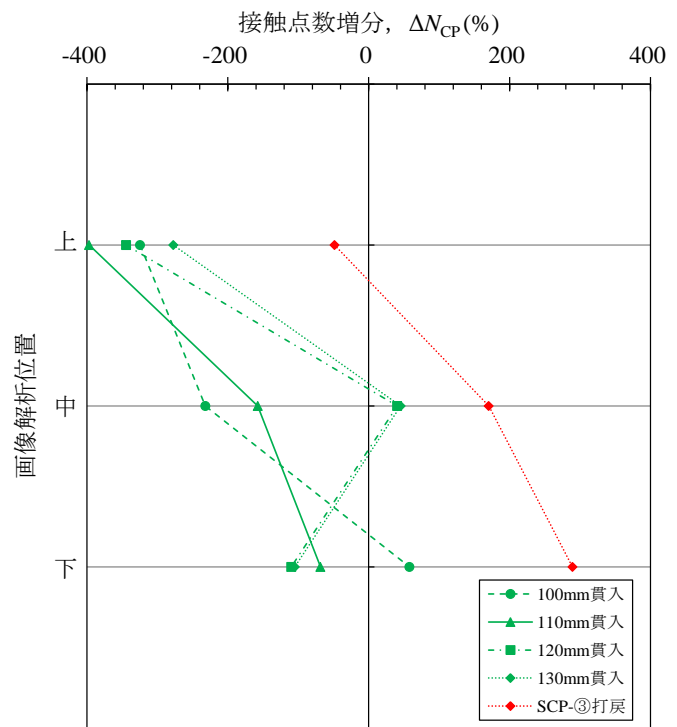
図-6.39 中実杭貫入における接触点数増分の経時的な変化



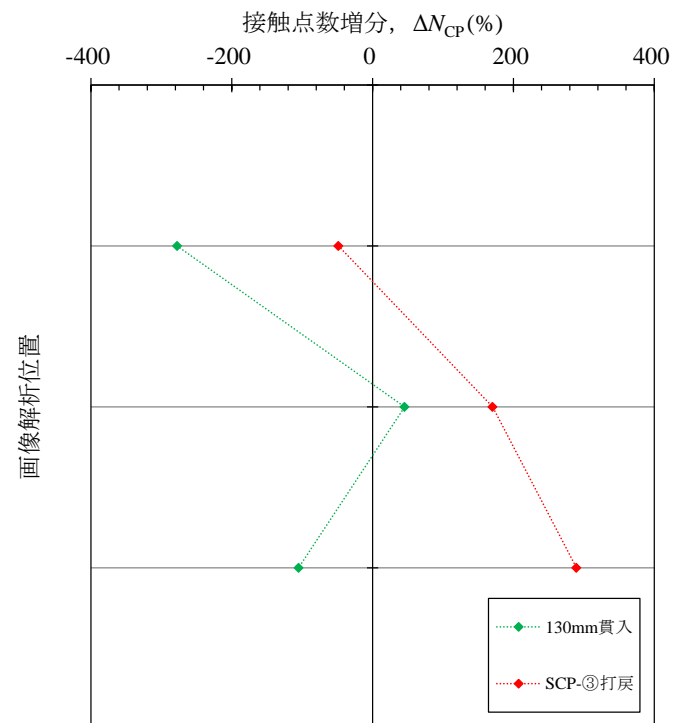
< x-y 断面図 >



< x-z 断面図 >

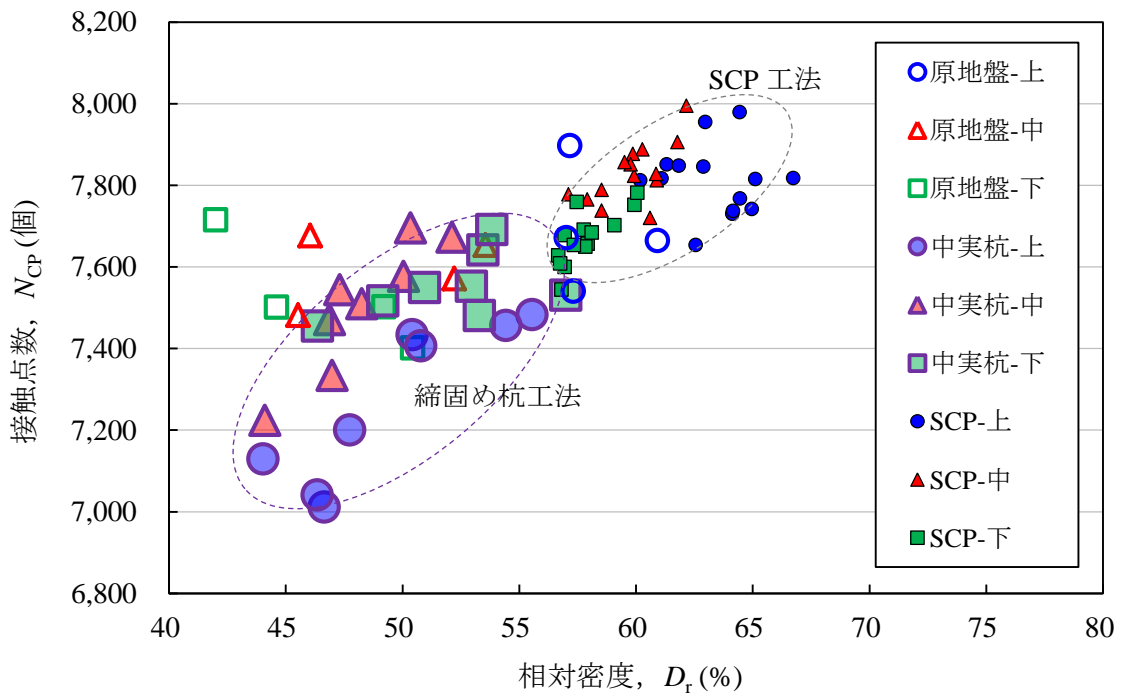


(a) 左, 右の平均-上, 中, 下-貫入過程

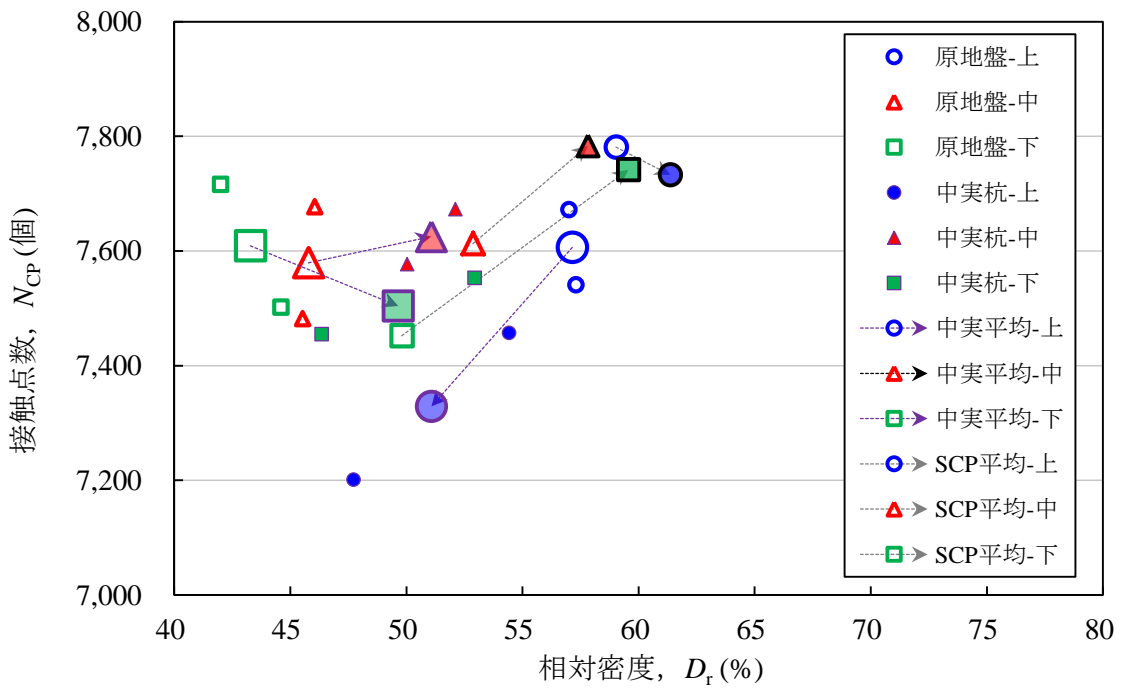


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-130mm 貫入

図-6.40 中実杭貫入における接触点数増分の変化と解析深度との関係

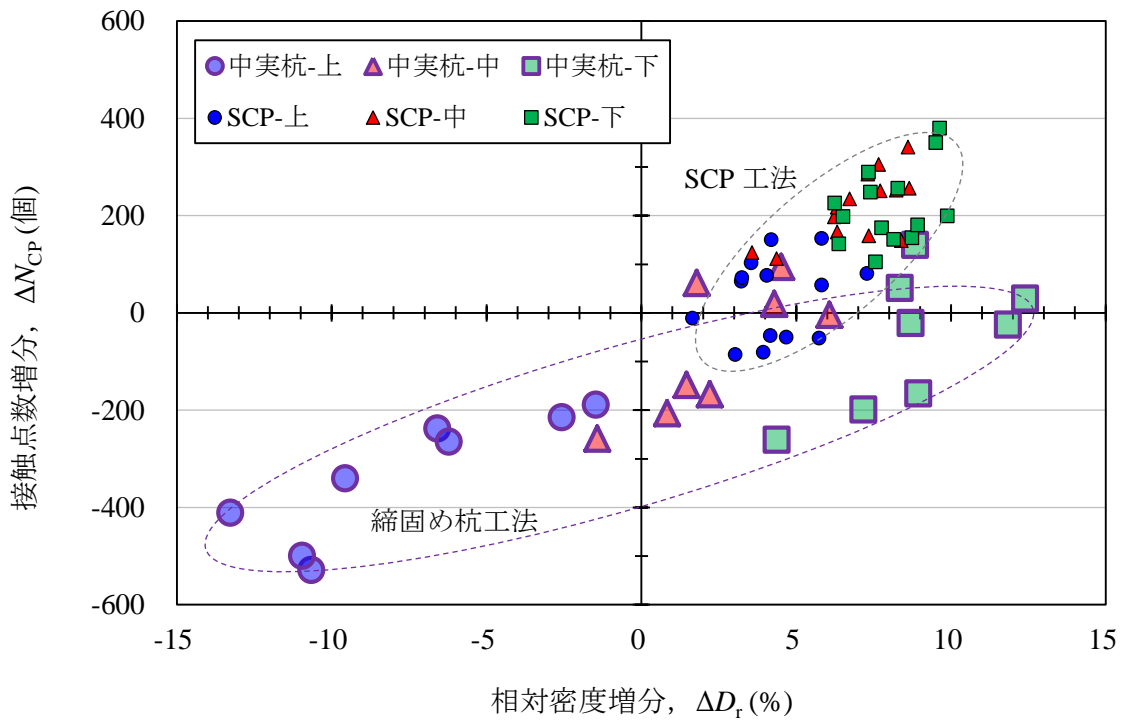


(a) 左, 右-上, 中, 下の全データ

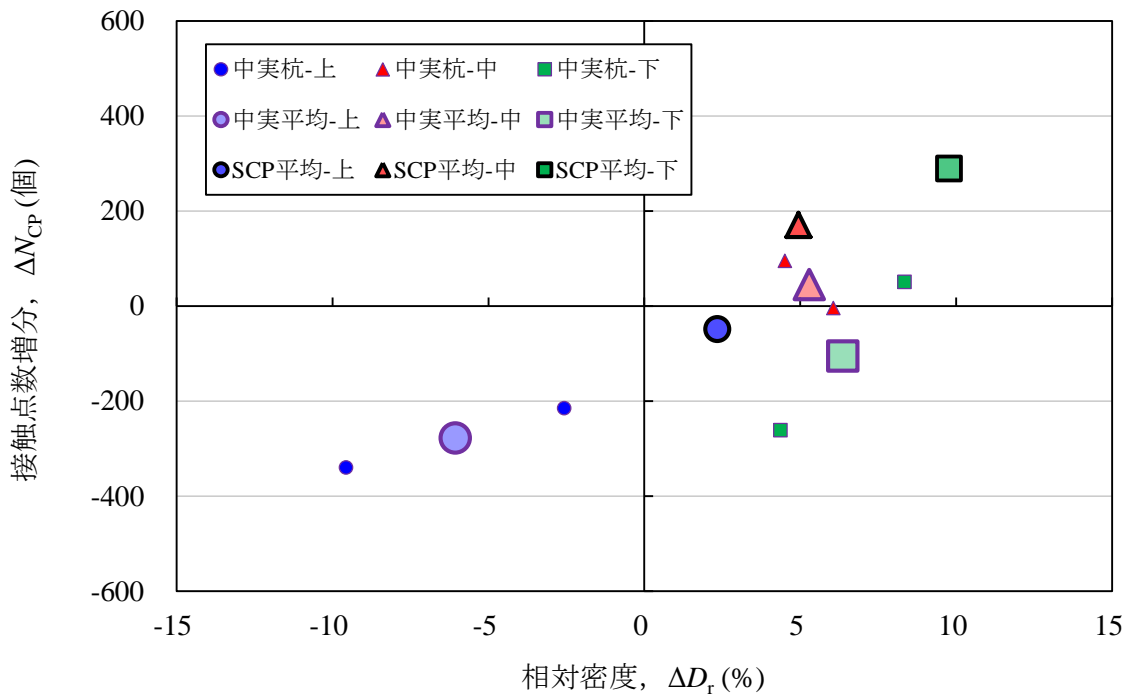


(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と 130mm 貫入

図-6.41 中実杭周辺地盤の相対密度と接触点数の関係



(a) 左, 右-上, 中, 下の全データ



(b) 左, 右の平均-上, 中, 下-原地盤と 130mm 貫入

図-6.42 相対密度増分と接触点数増分の関係 (中実杭)

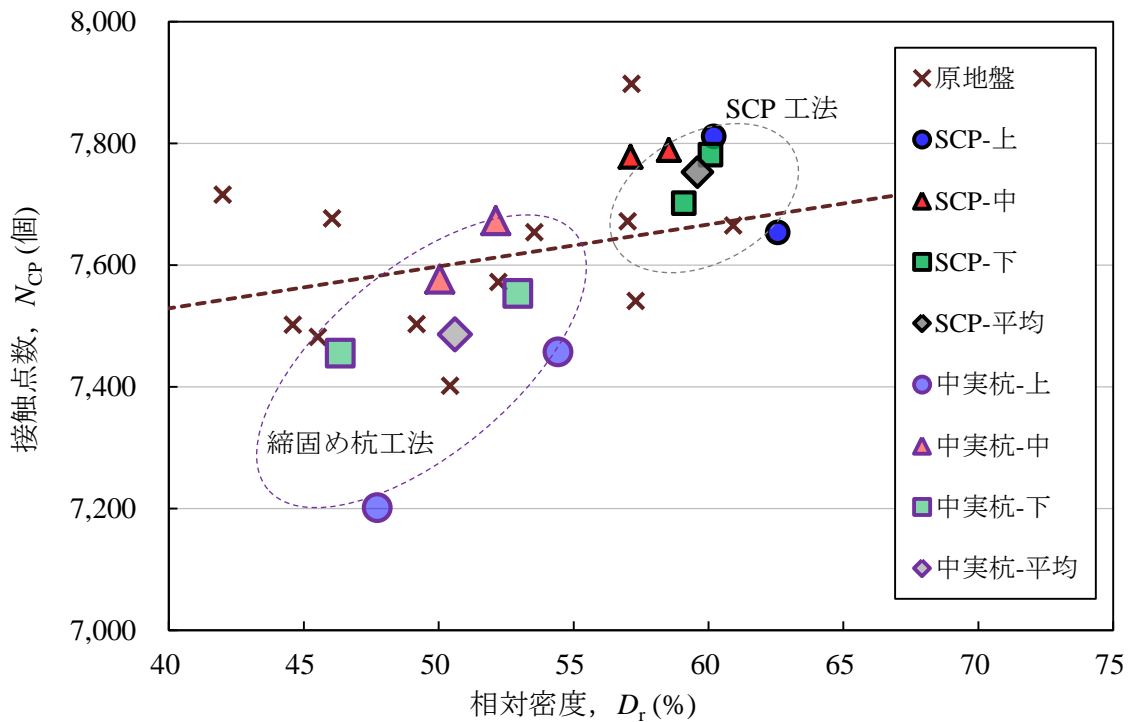


図-6.43 原地盤と SCP 工法および締固め杭工法における相対密度と接触点数の関係

6.4 まとめ

本章では、第4章で開発した模型実験装置や実験手法、第5章で提案した接触点数による評価等を応用することで、SCP工法による砂杭周辺地盤の微視構造に関して、変形現象の可視化と相対密度および接触点数の変化による定量的な評価を試みた。さらに、貫入と造成（引抜きと打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルが特徴の一つであるSCP工法に対して、貫入のみの施工である締固め杭工法との比較も行った。

以下に得られた主な知見を列挙する。

- i) 第3章で示したデジタル画像相関法による画像解析手法を用いることで、砂杭周辺地盤の土粒子の変位量とせん断ひずみおよび体積断ひずみの増分を算出し、砂杭造成に伴った締固めによる周辺地盤の変形現象を詳細に可視化

できた。

- ii) 砂杭造成に伴って発生するせん断ひずみは拡径された砂杭周辺に集中しており、先行して造成された砂杭周囲の体積ひずみが収縮傾向にあることが X 線 CT と画像解析によって可視化することで明らかとなった。
- iii) SCP 工法における砂杭造成に伴って砂杭周辺地盤の相対密度は増加し、接触点数も増加し、それらの変動係数も施工が進捗するにつれ小さくなり改良地盤が均一化することがわかった。
- iv) SCP 工法における砂杭周辺地盤の接触点数は、同じ相対密度の原地盤より多いことがわかり、SCP 工法による改良地盤の微視構造が安定化すると考えられる。
- v) SCP 工法と締固め杭工法の比較により施工方法が異なれば、締固め改良地盤の接触点数に差異が生じ、その接触点数は締固め杭工法より SCP 工法の方が多いたことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 江副哲, 原田健二, 大谷順, 佐藤宇紘: X線 CT を用いた締固め砂杭周辺地盤の微視構造変化に関する模型実験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, pp.9-10, 2018.
- 2) 梅田洋彰, 江副哲, 佐藤宇紘, 大谷順: 異なる相対密度における土粒子構造の評価と液状化対策としての SCP 工法への適応, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.815-816, 2018.
- 3) 成川匡文, 岸野泰章, 山内一秀, 石川泰, 宮崎祐助: 先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による地盤の液状化対策 (その 1 工法および現場実験の概要), 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.915-916, 1998.
- 4) 村田拓海, 沼田淳紀, 三輪滋, 原忠, 坂部晃子, 三村佳織: 丸太打設液状化対策の実施工位置におけるサウンディング試験, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1819-1820, 2015.
- 5) 三村佳織: 丸太による液状化対策工法の地盤改良効果と生物劣化に関する研究, 愛媛大学博士論文, 2017.
- 6) 地盤工学会: 打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法 設計・施工マニュアル, 2009.
- 7) Ezoe, A., Harada, K. and Otani, J.: Sand Compaction Pile Method and Its Applications, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, pp.1-10, 2019. (Published online)
- 8) 渡邊陽一: X線 CT データを用いたひずみ場の定量化に基づく地盤破壊機構の解明に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2011.
- 9) Sato, T., Onda, K. and Otani, J.: Development of a new loading test apparatus for microfocus X-ray CT and its application to the investigation of soil behavior surrounding driven open-section piles, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp776-785, 2018.
- 10) 梅田洋彰, 江副哲, 大谷順, 佐藤宇紘, 原田健二: X線 CT を用いた締固め砂杭周辺地盤の微視的構造変化の評価, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.749-750, 2019.

- 11) Viggiani, G. and Hall, S. A.: Full-field measurements, a new tool for laboratory experimental geomechanics, *Fourth Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IOS press*, pp.3-26, 2008.
- 12) Hall, S. A., Lenoir, N., Viggiani, G., Derues, J. and Besuelle, P.: Strain localization in sand under triaxial loading: characterization by x-ray microtomography and 3D digital image correlation, *Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics COMGGeo09*, 2009.
- 13) Mukunoki, T., Miyata, Y., Mikami, K. and Shiota, E.: X-ray CT analysis of pore structure in sand, *Solid Earth*, Vo.7, No.3, pp.929-942, 2016.
- 14) 駒崎俊治, 笹尾光, 吉田正 : 締固め改良地盤におけるばらつきの評価, シンポジウム資料, 建築基礎のための地盤改良設計指針作成にあたって, 日本建築学会構造委員会, pp41-48, 2003.
- 15) 日本建築学会 : 建築基礎のための地盤改良設計指針案, 第2章 地盤改良の計画, pp.291, 2006.
- 16) 株式会社島津製作所 : 島津精密万能試験機カタログ, [<https://www.shimadzu.co.jp/>]

第7章 SCP改良地盤の微視構造の評価への展開と今後の課題

本章では、第2章から第6章までで得られた成果を基に、実際の現場施工を想定したSCP改良地盤の微視構造の評価への展開を試みるものである。まず、より実施工を想定するため模型地盤内に4本の砂杭造成した杭間地盤を対象に、産業用X線CTスキャナ^{1)~4)} (Industrial X-ray CT Scanner, 以下, IXCT) による撮影を行い、体積ひずみ ε_v と相対密度 D_r の関係についてCT撮影から得られた模型実験データとSCP施工現場で計測された実測データの比較を行った。次に、SCP改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性について考察し、SCP工法の施工法、設計法のさらなる高度化を目指したSCP改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及した。

7.1 実施工におけるSCP改良地盤の微視構造の評価への展開

7.1.1 複数打設のSCPにおける実施工との比較

前章までは、SCP工法による砂杭周辺地盤の内部挙動について μ フォーカスX線CTスキャナ(以下, μ XCT)を用いた1本の砂杭を造成する模型実験を行ってきた。ここでは、より実施工を想定するため模型地盤内に連続的に4本の砂杭造成した杭間地盤を対象に、X線CTを用いた結果と実際のSCP工法による施工現場で計測されたデータとの比較を行った。図-7.1にIXCT模型実験と実施工データの比較検討概要を示す。

(1) 複数打設のSCPによるIXCT模型実験⁵⁾

SCP工法を模擬し、模型地盤内に連続的に4本の砂杭を造成した時の杭間地盤の内部

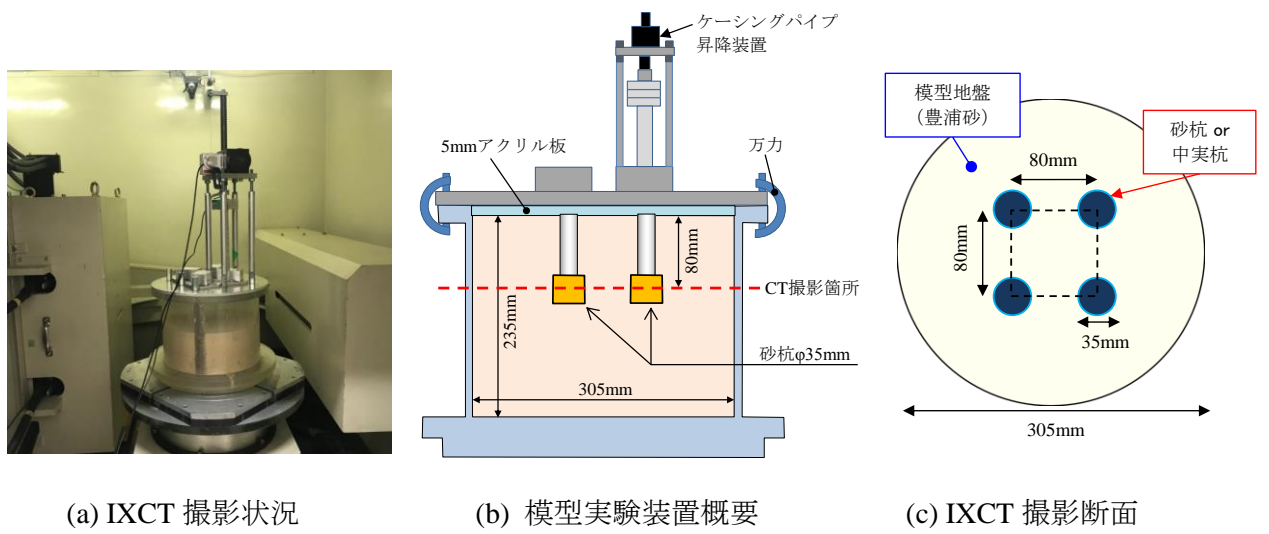


図-7.2 IXCT 実験概要

表-7.1 IXCT 実験ケース

Case	模擬工法	実験材料		改良仕様				IXCT 撮影 深度
		模型地盤	杭材	貫入長	貫入径	打設本数	杭間距離	
		材料	材料					
		目標 D_r	目標 D_r	砂杭長	造成径	配置	a_s	
1	SCP工法	豊浦砂	豊浦砂	100mm	20mm	4本	80mm	80mm
		$D_r=50\%$	$D_r=80\%$	30mm	35mm	正方形	15%	
2	締固め杭工法	豊浦砂	塩化ビニル製パイプ	100mm	35mm	4本	80mm	80mm
		$D_r=50\%$	—	—	—	正方形	15%	

表 7.2 IXCT 撮影条件

管電圧	300kV
管電流	200 μ A
スキャンエリア	ϕ 400mm
スキャン速度	FINE
1画素サイズ	0.195mm
スライス厚	1mm
マトリクスサイズ	2048 \times 2048

IXCTにおけるCT画像は、CT値で定義されるによるデジタル画像であり、CT値の高い領域（高密度領域）は白く、CT値の低い領域（低密度領域）は黒く、256階調の白黒濃淡レベルで表示される。なお、CT値は式(7.1)のように定義されている。

$$CT - value = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (7.1)$$

ここに、 $CT - value$: CT 値

μ_t : 撮影対象の X 線吸収係数

μ_w : 水の X 線吸収係数

K : 比例定数 (1000)

このCT値は、絶対値ではなく相対値であり、使用するX線CT装置により変化し、また同じ装置でも撮影する対象（材料）によっても異なる。これは吸収係数がX線束のエネルギーにより変化し、X線束エネルギーが管電圧などにより変化するためである。この式(7.1)によると、空気のCT値は-1000となる。X線吸収係数が材料の密度に比例することにより、CT値もほぼ密度に比例した値となる。IXCT模型実験で用いた豊浦砂のような粒状材料の密度とCT値には正の相関関係がある。そこでSCP工法による砂杭造成および締固め杭工法による中実杭貫入後の改良地盤の密度変化に着目するため、ここではIXCT撮影で得られた豊浦砂地盤の画像のCT値を乾燥密度 ρ_d に換算し、相対密度を算出する。異なるX線CT画像を定量的に評価するためには、撮影条件を同じとすることが不可欠であるため、事前にIXCT模型実験における撮影条件と同じ条件で豊浦砂のCT値と乾燥密度のキャリブレーションを行った。図-7.3に使用した豊浦砂における乾燥密度とCT値の関係を示す。CT値と乾燥密度の関係をプロットした点から傾向を見るため、最小二乗法により線形近似した式(7.2)が得られる。

$$y = 1075.4x - 1313.5 \quad (7.2)$$

ここに、 y : CT 値

x : 乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)

式(7.3)に示す乾燥密度と相対密度の関係から締固め改良地盤の相対密度変化を定量化した。

$$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} \times 100 \quad (7.3)$$

ここに、 D_r : 相対密度 (%)

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm^3)

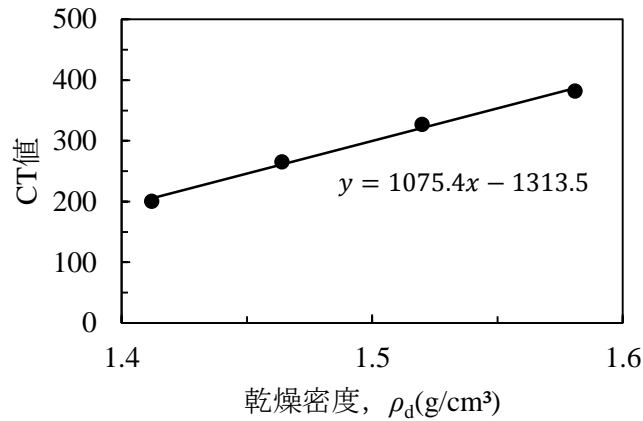


図-7.3 豊浦砂の乾燥密度 (ρ_d) と CT 値の関係

ρ_{dmax} : 最大乾燥密度 (1.645g/cm^3)

ρ_{dmin} : 最小乾燥密度 (1.335g/cm^3)

また、IXCT模型実験では、空気と土粒子が混在する地盤材料の密度変化をCT値により定量的な評価を行うことになる。その際、1画素（本実験では $0.195\text{mm} \times 0.195\text{mm}$ ）ごとに評価するよりも、ある領域ごとの平均値を求めて評価した方が、データのばらつきの考慮や定量的な評価を考察しやすくなる。そこでGaussianフィルターを用いることで、得られたCT画像中の局所領域において式(7.4)で定義される平滑化を行っている^{6),7)}。

$$G(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7.4)$$

ここに、 $G(x)$: 一次元ガウス関数

x, y : 中心画素を原点とした時の座標

σ : 平滑化パラメータ

(b) IXCT 模型実験の結果

IXCT 模型実験の結果は、砂杭造成に伴うケーシングパイプ貫入時と中実杭貫入時の

押力、X線CT画像、および、相対密度の変化について整理した。

図-7.4にSCP工法における砂杭打設本数ごとのケーシングパイプ貫入時の押力を示す。図より砂杭造成サイクルの増加に伴い押力が増加していることが確認できる。さら

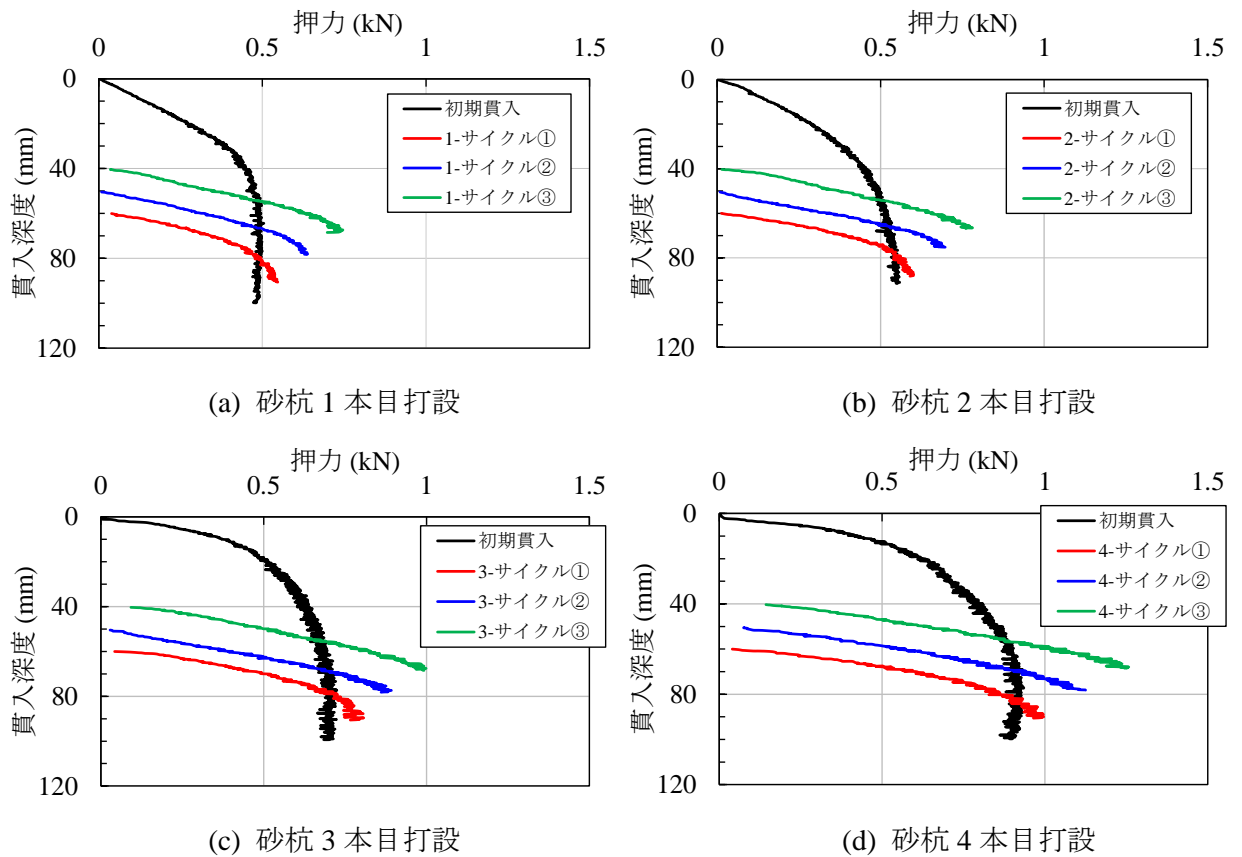


図-7.4 SCP工法における砂杭造成時の貫入押力

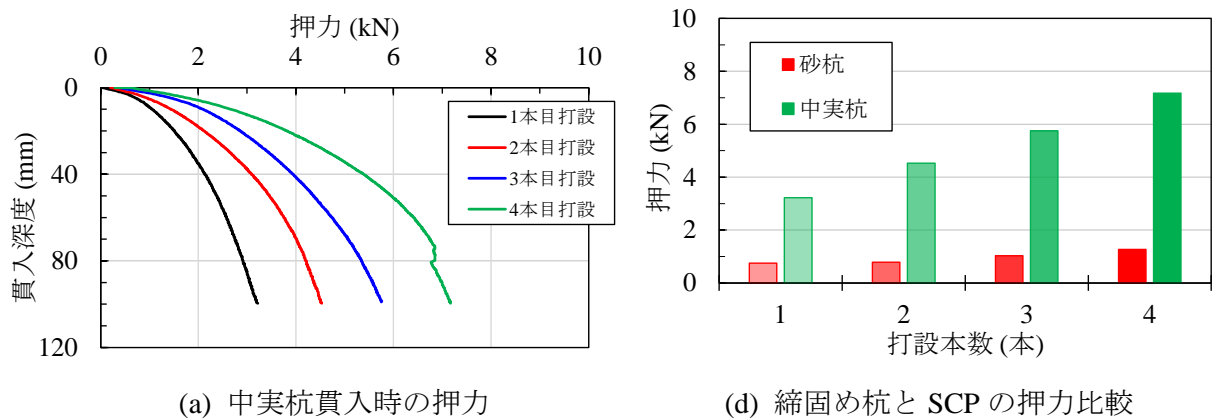
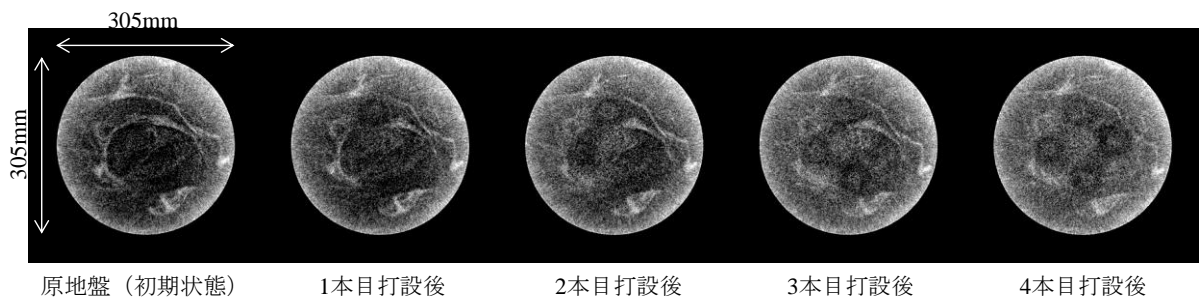


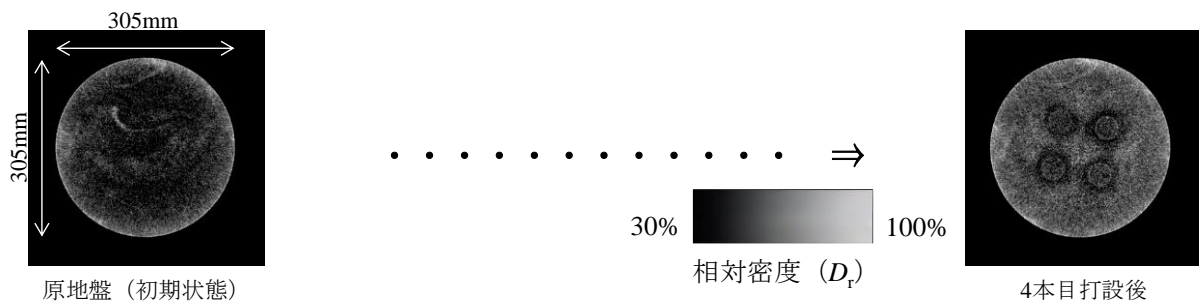
図-7.5 締固め杭工法における貫入押力とSCP工法との押力比較

には、砂杭打設本数の増加に伴い、各サイクル時の押力ピーク値も増加していくことが確認できる。これは先行打設された砂杭による杭間地盤の密実化によるものと考えられる。図-7.5(a)に中実杭貫入時に測定した押力、図-7.5(b)に SCP 工法と締固め杭工法の打設本数ごとの押力ピーク値の比較を示す。図より、中実杭貫入時における押力が砂杭造成時に比べて最大で約 7 倍程度と大きな押力が発生することが確認された。これは、6.3.2 (1) で示した応用実験における 1 本の砂杭造成および中実杭打設時の比較結果と同様の傾向を示している。

次に、模型地盤面から深度 80mm 位置における SCP 工法による砂杭造成後と締固め杭工法による中実杭貫入後の水平断面 CT 画像を図-7.6 に示す。CT 画像を見ると、どのケースにおいても不均一ではあるが、原地盤となる初期状態と 4 本貫入後を比較するとそれぞれ全体的に密になっていることがわかる。また、砂杭間の中心部に着目すると、打設本数が増加するにしたがって密度が増加していくことが確認できる。なお、全体的に外側が比較的高密度になっているが、これは木槌を用いて土層に打撃を与えることで相対密度を調整しながら初期状態としての模型地盤を作成したことに加えて、ビーム



(a) SCP 工法による砂杭の造成



(b) 締固め杭工法による中実杭の貫入

図-7.6 水平断面 IXCT 画像

ハードニング現象によるカップング効果^{3),8)}が要因だと考えられる。また、どの砂杭も中実杭でも杭に接する周辺部の密度が杭間中心より低いことが確認できる。これは、土粒子が、杭貫入または引き抜きに伴う杭周面摩擦力によるせん断応力による影響で緩詰になり低密度領域が形成されたものだと考えられ、古賀⁹⁾もこの現象を確認している。

また、図-7.6 で得られた CT 画像から図-7.7 に示す解析領域を対象に相対密度を算出した。図-7.8 に杭間中心部における相対密度 D_r と原地盤からの相対密度増分 ΔD_r の

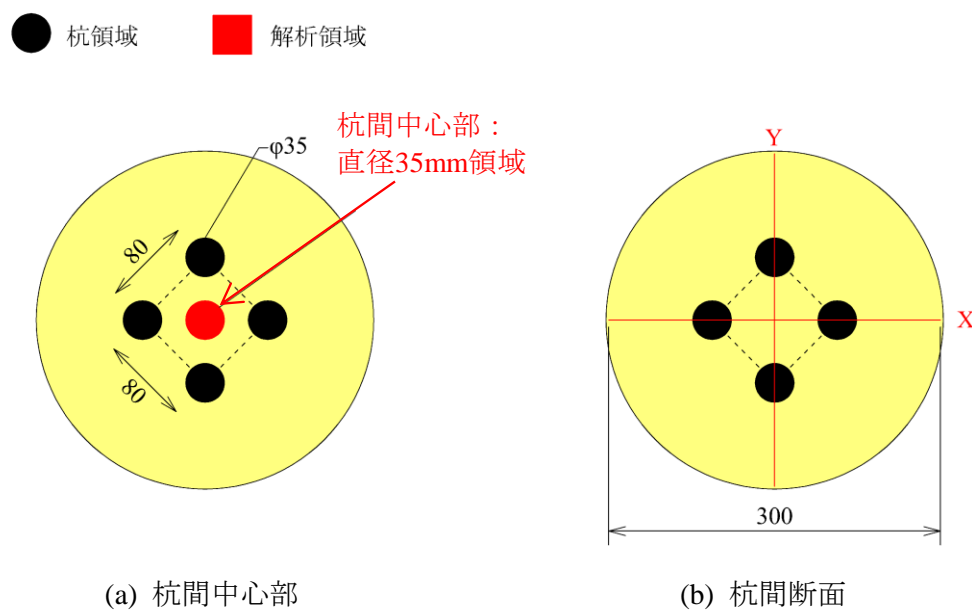


図-7.7 相対密度の算出領域

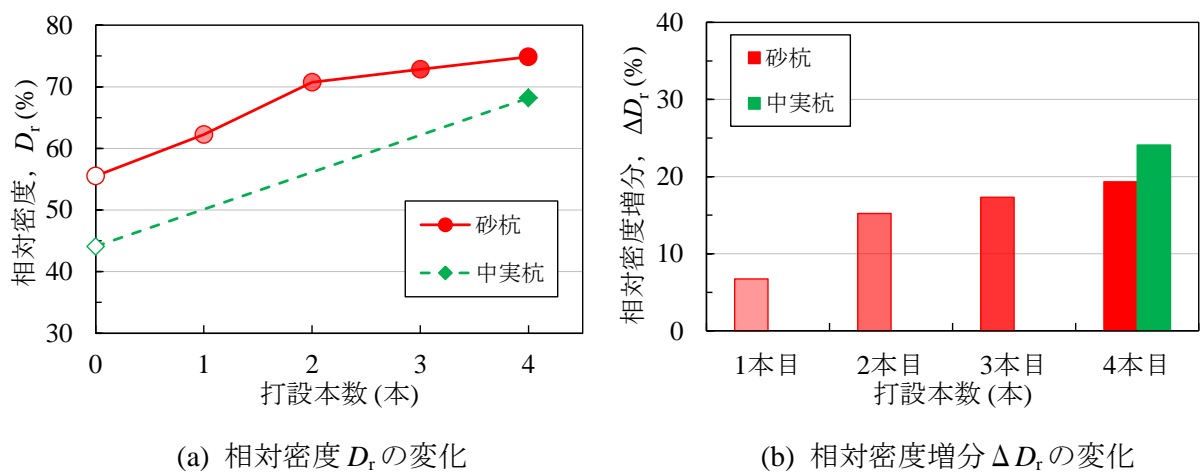


図-7.8 杭間中心部における相対密度と相対密度増分の変化

変化を示す。図より SCP 工法において、砂杭の打設本数の増加に伴った相対密度の増加がみられる。これは、締固め杭工法における中実杭貫入によっても同様の傾向が確認できる。4本の打設終了後の相対密度増分は、締固め杭工法を模擬した中実杭の貫入の方が SCP 工法より若干大きい値を示した。これには SCP 工法では砂杭造成を3サイクル、長さ30mmの砂杭造成しか実施しておらず、その上部は打戻しによる拡径を行っていないのに対して、締固め杭工法では砂杭の拡径後に想定している造成径 $\phi 35\text{mm}$ と同じ径の中実杭が模型地盤面から貫入されていることによる影響も想定される。図-7.9にX方向、Y方向それぞれの杭間断面の相対密度の変化を示す。図より SCP 工法、締固め杭工法の両工法とも4本目打設完了後の杭間地盤における原地盤からの密度増加が確認できる。また、図-7.8と図-7.9より IXCT 実験における杭間地盤の相対密度変化の平均値を表-7.3に整理してまとめる。締固め改良に伴った杭間断面における原地盤からの相対密度増分は、両工法同程度の値を示していることから、同じ改良率を想定

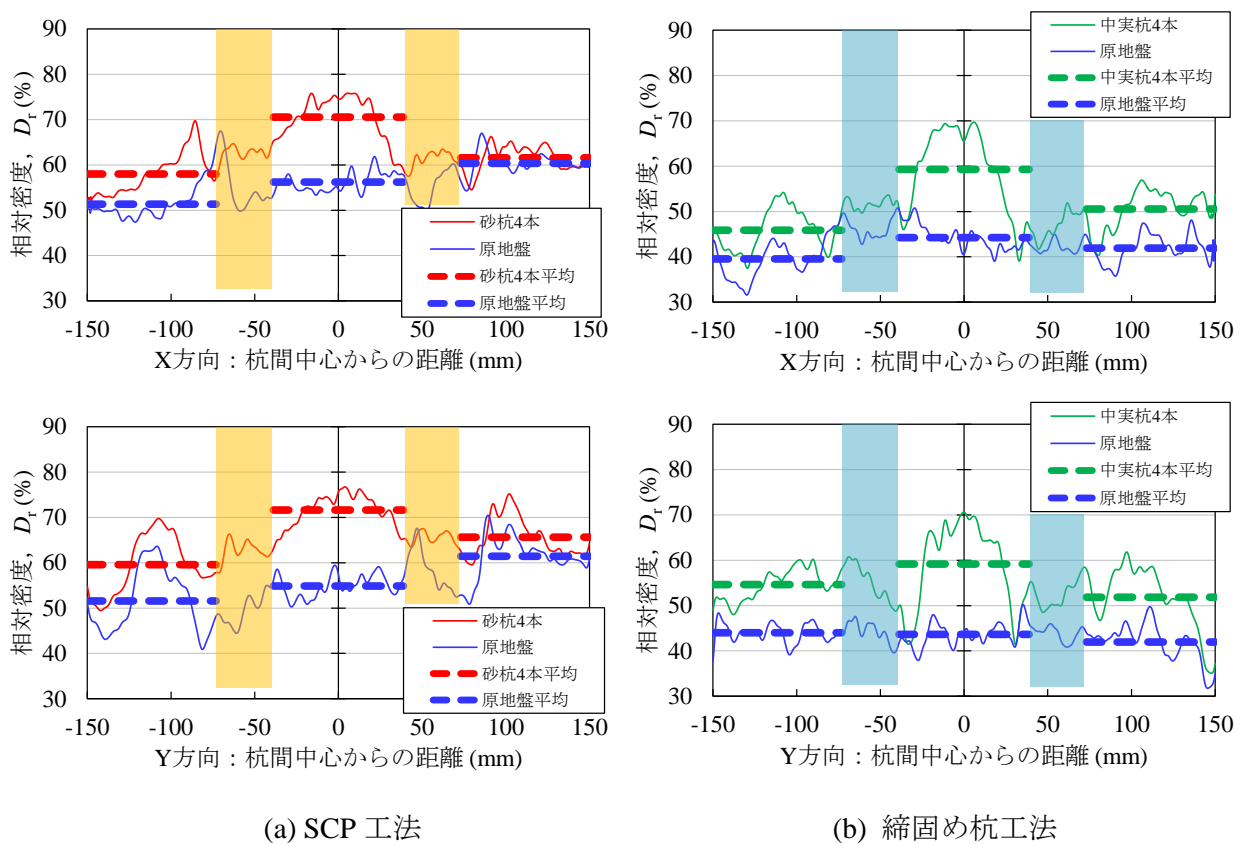


図-7.9 杭間断面における相対密度の変化

表-7.3 杭間地盤の相対密度変化のまとめ

模擬工法	SCP工法（砂杭）				締固め杭工法（中実杭）			
解析領域	杭間中心	杭間断面			杭間中心	杭間断面		
		X方向	Y方向	XY平均		X方向	Y方向	XY平均
原地盤平均相対密度 D_{r0} (%)	55.5	56.2	54.9	55.6	44.1	44.2	43.6	43.9
D_{r0} の標準偏差	—	2.12	2.45	2.29	—	2.69	2.58	2.64
D_{r0} の変動係数 (%)	—	3.77	4.46	4.12	—	6.09	5.92	6.00
改良後平均相対密度 D_{r1} (%)	74.9	70.5	71.6	71.1	68.2	59.3	59.2	59.3
D_{r1} の標準偏差	—	4.87	3.53	4.2	—	9.25	9.45	9.35
D_{r1} の変動係数 (%)	—	6.91	4.93	5.9	—	15.60	15.96	15.8
平均相対密度増分 ΔD_r (%)	19.3	14.3	16.7	15.5	24.1	15.1	15.6	15.4

した SCP 工法と締固め杭工法の改良後における杭間地盤の密度増加はほぼ同等であると考えられる。ただし、杭間断面の改良後の相対密度における変動係数は、SCP 工法より締固め杭工法の方が大きいことから、改良地盤のばらつきで見ると SCP 工法による締固め改良地盤の方が締固め杭工法より均一化が図られると想定される。

(2) IXCT 実験結果と実施工における杭間で計測した体積ひずみの比較

7.1.1 (1) では SCP 工法を模擬し、模型地盤内に連続的に 4 本の砂杭造成と比較工法として締固め杭工法を模擬した中実杭の貫入を行った際のそれぞれの杭間地盤における内部挙動変化について、IXCT を用いた模型実験により可視化し、密度変化を定量的に評価した。ここでは IXCT 実験結果から得られた締固め改良効果によって杭間地盤の増加した相対密度から体積ひずみを算定し、模型実験で得られた体積ひずみと増加した相対密度および改良率との関係について、実際の SCP 工法の施工現場で計測されたデータとの比較を行うものである。実際の SCP 工法による施工現場において、異なる改良率の砂杭間地盤で計測された体積ひずみと相対密度増分のデータは、“APPENDIX-A”に詳細を示す。

IXCT を用いた 4 本杭打設時の実験データにおける体積ひずみの算出方法は、実験で

求められた平均相対密度から換算した間隙比より以下のように求めた。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_1}{1 + e} \times 100(\%) \quad (7.5)$$

ここに、 ε_v : 体積ひずみ

e_0 : IXCT実験における原地盤の間隙比

e_1 : IXCT実験における改良後の間隙比

また、IXCT 実験における相対密度と間隙比、相対密度増分の関係は以下のように算出した。

$$D_{r0} = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad D_{r1} = \frac{e_{\max} - e_1}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (7.6)$$

$$\Delta D_r = D_{r1} - D_{r0} \quad (7.7)$$

ここに、 D_{r0} : IXCT実験における原地盤の平均相対密度

D_{r1} : IXCT実験における改良後の平均相対密度

表-7.4 IXCT 実験における杭間地盤の体積ひずみ

模擬工法	SCP工法 (砂杭)				締固め杭工法 (中実杭)			
	杭間中心	杭間断面			杭間中心	杭間断面		
		X方向	Y方向	XY平均		X方向	Y方向	XY平均
原地盤平均相対密度 D_{r0} (%)	55.5	56.2	54.9	55.6	44.1	44.2	43.6	43.9
D_{r0} の標準偏差	—	2.12	2.45	2.29	—	2.69	2.58	2.64
D_{r0} の変動係数 (%)	—	3.77	4.46	4.12	—	6.09	5.92	6.00
改良後平均相対密度 D_{r1} (%)	74.9	70.5	71.6	71.1	68.2	59.3	59.2	59.3
D_{r1} の標準偏差	—	4.87	3.53	4.2	—	9.25	9.45	9.35
D_{r1} の変動係数 (%)	—	6.91	4.93	5.9	—	15.60	15.96	15.8
平均相対密度増分 ΔD_r (%)	19.3	14.3	16.7	15.5	24.1	15.1	15.6	15.4
原地盤間隙比 e_0	0.777	0.775	0.780	0.777	0.820	0.820	0.822	0.821
改良後間隙比 e_1	0.705	0.721	0.717	0.719	0.730	0.763	0.764	0.763
体積ひずみ ε_v	4.068	3.013	3.510	3.262	4.954	3.103	3.202	3.153

表-7.5 IXCT 実験において定義される改良率

砂杭造成径 φ (mm)	砂杭断面積 A_s (mm ²)	砂杭間隔 x (mm)	土槽内径 X (mm)	改良率の定義	改良率 a_s (%)
35	962	80	305	①通常のSCP設計法	15.0
				②土槽断面積を改良範囲	5.3

e_{\max} : 最大間隙比

e_{\min} : 最小間隙比

ΔD_r : 相対密度増分

表-7.3 に示した IXCT 実験より得られた相対密度変化の結果から体積ひずみを算定した結果を表-7.4 に示す。

また、体積ひずみと改良率の関係性について考察するため、IXCT 模型実験における改良率を以下の2通りで定義した (図-7.10 参照)。

① 通常の SCP 設計法¹⁰⁾と同じ考え方

$$a_s = \frac{A_s}{x^2} \quad (7.8)$$

② 土槽断面積を改良範囲とする考え方

$$a_s = \frac{4 \times A_s}{\frac{\pi X^2}{4}} \quad (7.9)$$

ここに、 a_s : 改良率

A_s : 砂杭断面積

x : 砂杭間隔

X : 実験土槽の直径

表-7.5 に上記2通りで定義した IXCT 実験における改良率を示す。図-7.11 に“APPENDIX-A”で得られた実測データにおける体積ひずみと相対密度増分の関係を表-7.4 に示した IXCT 実験結果をプロットした。図より SCP 工法と締固め杭工法を模擬した IXCT 実験において、実施工と同程度の杭間地盤における密度増加と体積ひずみの

関係が確認された。図-7.12に

“APPENDIX-A”で得られた実測データにおける体積ひずみと改良率の関係に表-7.4, 表-7.5に示すIXCT実験結果をプロットした。実測データにおける改良率と体積ひずみの関係は, 改良率の1/2程度の体積ひずみが発生する結果となっており, IXCT実験における改良率を②土槽断面積を改良範囲とする考え方で定義した結果と概ね一致することになる。一方, 改良率を①通常のSCP設計法と同じ考え方で定義すると, IXCT実

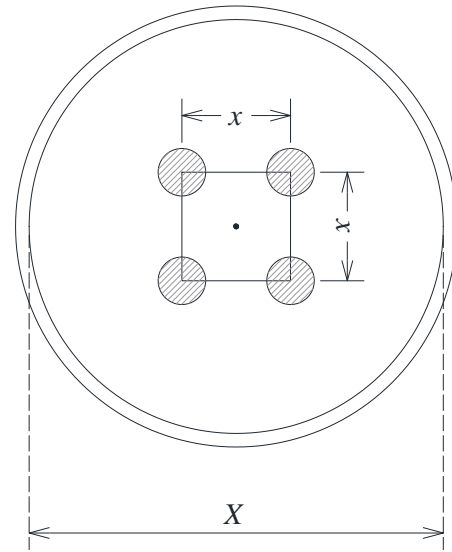


図-7.10 改良率の考え方

験結果の体積ひずみは実測値より小さくなる。これは, IXCT実験が4本のみの砂杭を造成した杭間地盤に対して, 実施工におけるSCP工法は数百~数万本の砂杭を造成すること, 造成長や拘束圧条件等の相違によるものも影響していると考えられる。

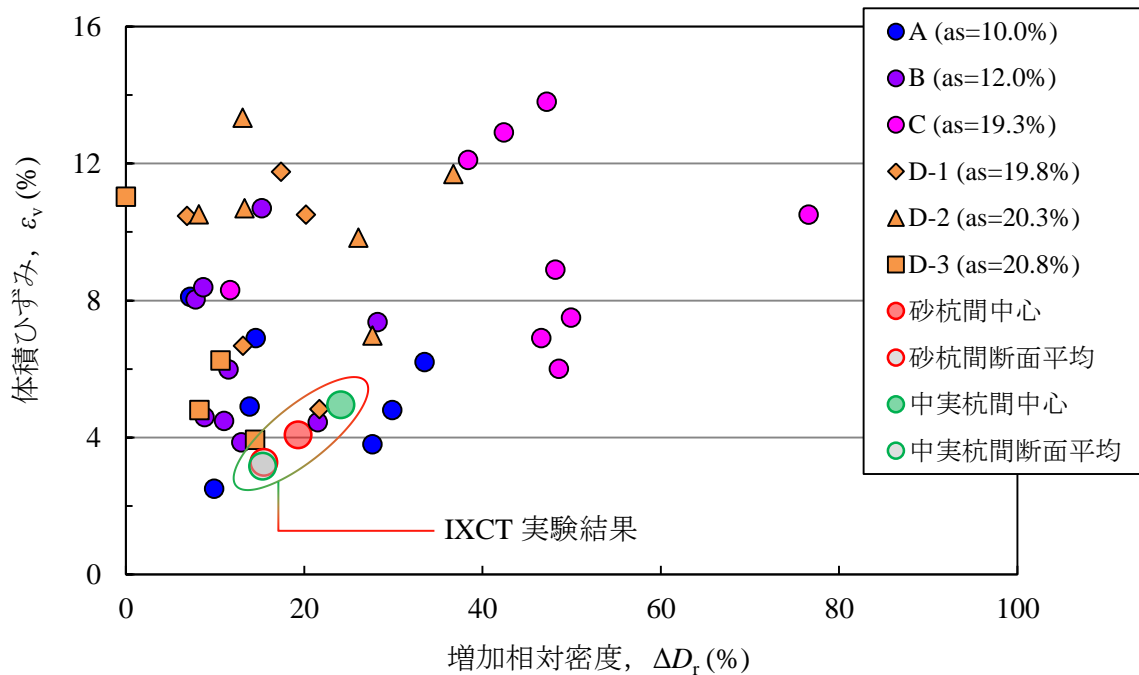


図-7.11 体積ひずみと相対密度増分の関係

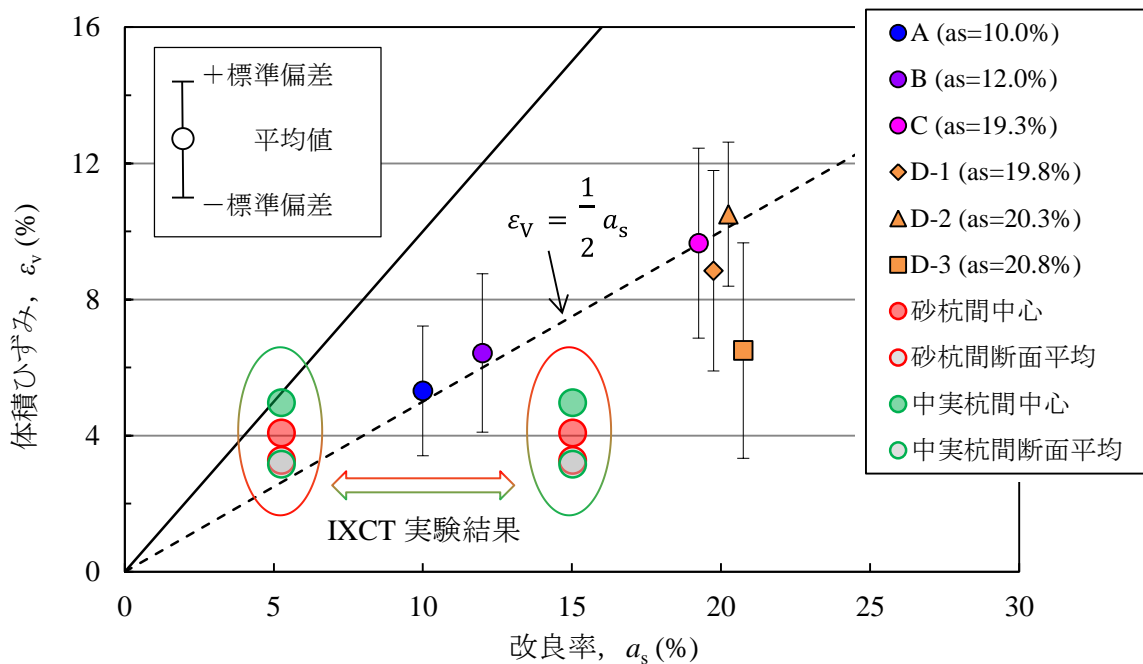


図-7.12 体積ひずみと改良率の関係

IXCT 模型実験における改良率が①～②で定義した 5～15%の範囲を有していることを考慮すると、IXCT 実験で模擬した砂杭造成と実施工における SCP 工法が、概ね同じような砂杭周辺地盤の挙動を示していると考えられる。また、これにより IXCT 実験と同様の砂杭造成方法や手順を用いた第 4 章、第 6 章で行った 1 本の砂杭造成による μ XCT 実験についても実験手法の妥当性が言え、本研究において実施した一連の模型実験手法の有効性が示されたと考えられる。

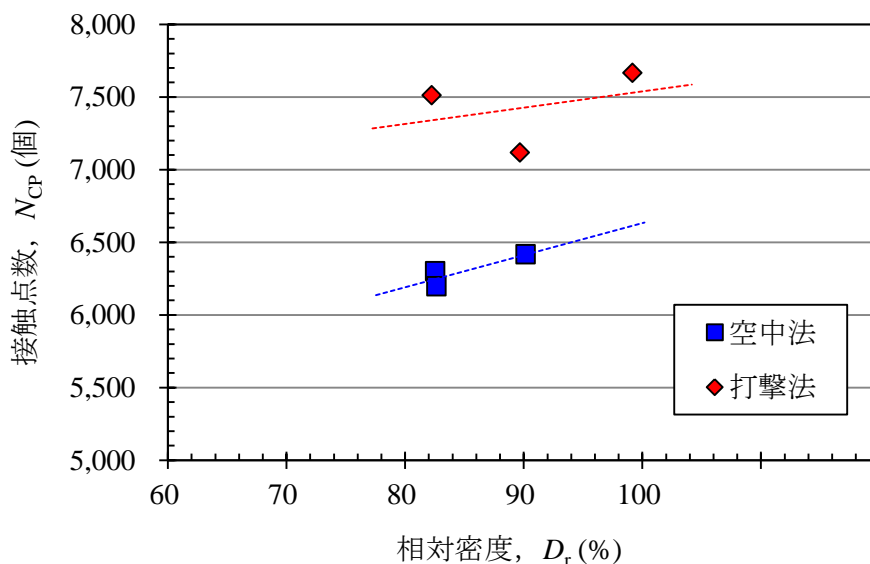
7.1.2 SCP 改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性

SCP 改良地盤の微視構造に関して、前章までで得られた μ XCT を用いた基礎実験および応用実験における CT 撮影と画像解析を用いて算出した接触点数と相対密度の関係を実務への展開を想定し、液状化強度との関連性についての考察を行う。

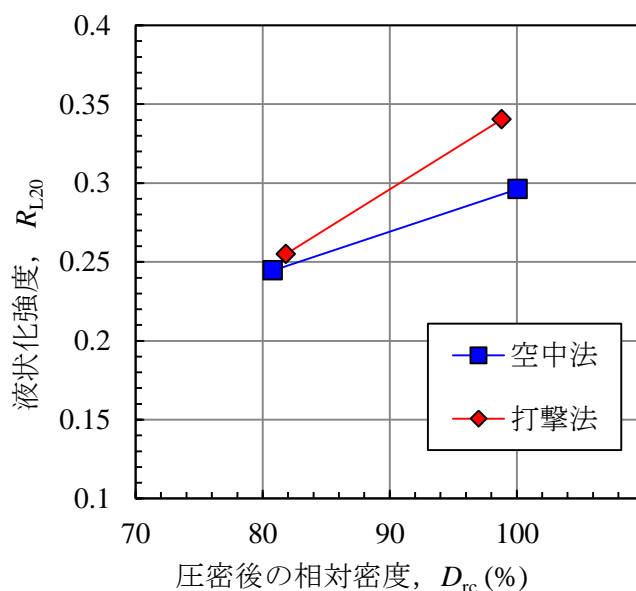
まず、第 5 章の基礎実験結果から得られた熊本硅砂を対象とした接触点数と相対密度の関係と“APPENDIX-B”で示す第 5 章で用いた同じ材料、かつ、同じ作製方法における砂供試体の相対密度と液状化強度の関係を用いて、接触点数と相対密度および液状化

験を行い、その液状化強度と第5章における基礎実験結果を関連付けて考察する。なお、その繰返し三軸試験結果の詳細は、“APPENDIX-B”に記載する。

図-7.14に“第5章5.2 基礎実験の結果”より得られた相対密度と接触点数の関係



(a) 基礎実験における D_r と N_{CP} の関係



(b) APPENDIX-B における D_r と R_L の関係

図-7.14 実験結果から得られた D_r と N_{CP} の関係, D_r と R_L の関係

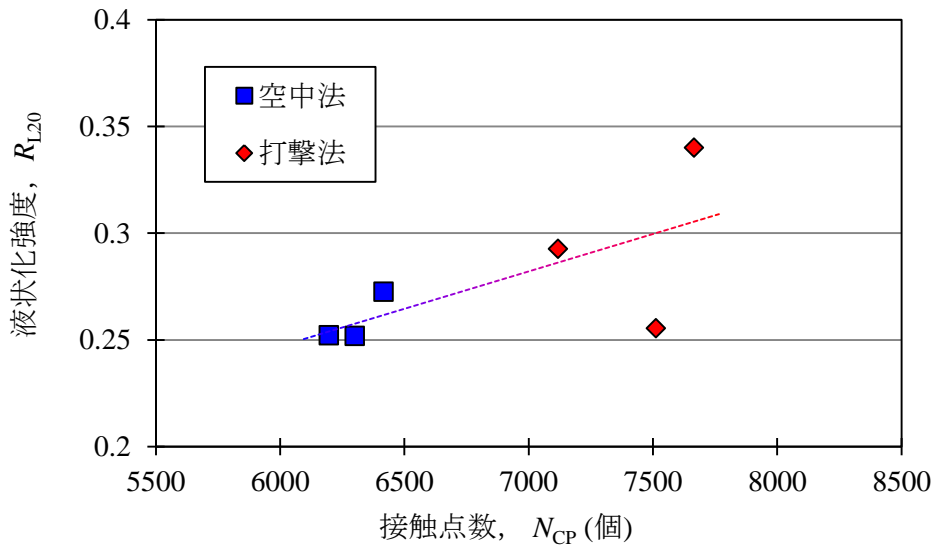


図-7.15 接触点数 N_{CP} と液状化強度 R_L の関係

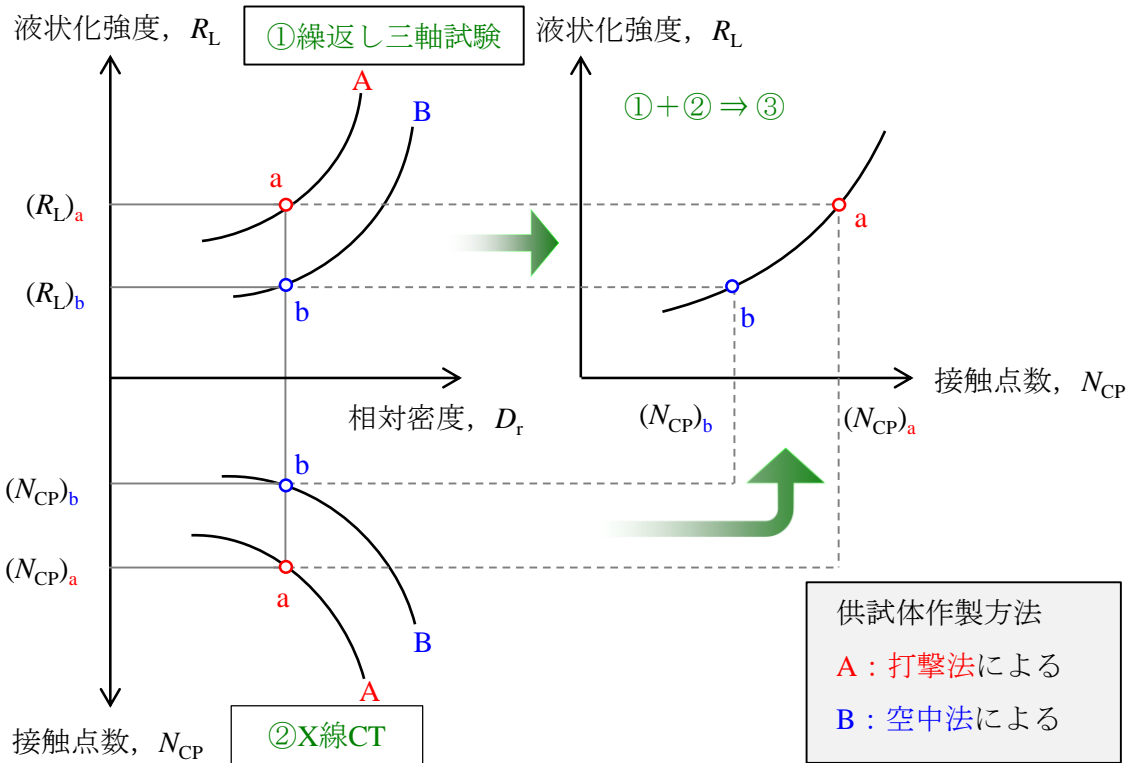


図-7.16 砂質土における相対密度と液状化強度および接触点数の関係模式

(図-7.14(a)参照)と“APPENDIX-B”より得られた相対密度と液状化強度の関係(図-7.14(b)参照)を併記する。これらの図より、図-7.15に示すように密な状態における砂質土の接触点数と液状化強度の関係について導くことができる。空中法と打撃法では、同じ相対密度 D_r でも接触点数 N_{CP} は打撃法の方が多い。また、空中法と打撃法では、同じ相対密度 D_r でも液状化強度 R_L は打撃法の方が高いことから、同じ相対密度でも、接触点数が多いほど微視構造は安定しており液状化強度が高いことが言える。すなわち、密な状態の砂質土は同じ相対密度の状態であっても、供試体作製方法の相違による接触点数の違いで評価できる微視構造が異なれば、その液状化強度に差が生じることがわかる。この相対密度と液状化強度と接触点数の関連性を図-7.16に示すように模式化することができ、密な状態の砂質土においてX線CTと画像解析による接触点数を指標とすることで微視構造に関する定量的な評価が可能であると考えられる。

(2) SCP工法による改良効果としての微視構造についての考察

7.1.2 (1) では砂質土における相対密度と液状化強度および接触点数の関係性を示した。ここではSCP工法による締固め改良地盤の微視構造評価への展開を図るため、第6章で述べた μ XCTを用いた応用実験結果から得られたSCP改良地盤における相対密度と接触点数の関係を7.1.2 (1)と同様に液状化強度と関連付けて考察する。

7.1.2 (1)より密な状態の砂質土は同じ相対密度の状態であっても接触点数が多いほど、液状化強度が高いことが確認された。第6章よりSCP工法による締固め改良地盤における接触点数は、同じ相対密度の原地盤より多く、さらには施工方法が異なる締固め杭工法よりも多いことが確認された。また、古関¹²⁾や武田ら¹³⁾によると、図-7.17に示すSCP工法の施工による応力履歴をモデル化(図-7.17(a)~(d)参照)した中空ねじり試験結果から、SCP工法のようにより多くのサイクルで小さなひずみによる応力履歴を与えた方が、その履歴がない場合よりも大きな液状化強度を示すことが確認されている(図-7.17(e)参照)。この図-7.17(e)に示す異なるサイクル数による最大せん断ひずみ γ_{max} と液状化強度特性としてのせん断ひずみの両振幅 $\gamma_{DA}=7.5\%$ になるまでの繰返し載荷回数(number of loading cycles, N_C)の関係にTatsuoka et al.¹⁴⁾の研究による式(7.10)および式(7.11)を用いると相対密度と液状化強度の関係に変換することが可能となる。両振

幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA} = 5\%$ の時の応力比 $R_{L(N_c=20)}$ とした場合の任意の繰返し回数での応力比 $R_{L(N_c)}$ との関係は、以下のとおりである。

$$R_{L(N_c)} = R_{L(N_c=20)} \times \left(\frac{N_c}{20}\right)^{-0.1-0.1\log_{10}DA} \quad (7.10)$$

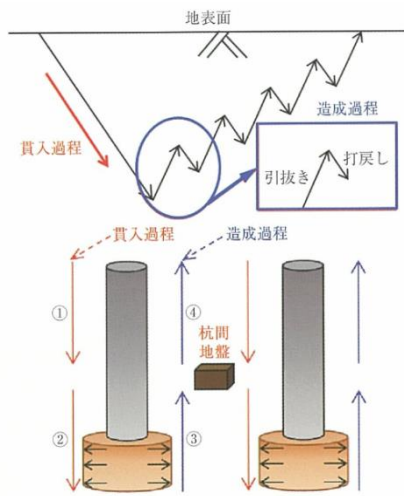
ここに、 $\gamma_{DA} = 7.5\%$ は $\varepsilon_{DA} = 5\%$ に相当する。

したがって、応力比 $R_{L(N_c)}$ を加えて繰返し回数 N_c で破壊基準である $\varepsilon_{DA} = 5\%$ （両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA} = 7.5\%$ ）に達した時の液状化強度（ $N_c = 20$ の時の応力比） $R_{L(N_c=20)}$ は式(7.11)で推定できる。

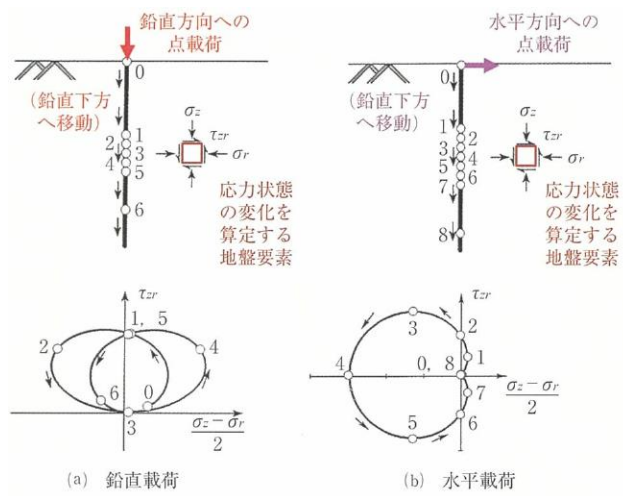
$$R_{L(N_c=20)} = \frac{R_{L(N_c)}}{\left(\frac{N_c}{20}\right)^{-0.1-0.1\log_{10}DA}} \quad (7.11)$$

これらの既往の研究成果を用いて、**図-7.17(e)**に示す関係を液状化強度に変換した結果を**表-7.6**および**図-7.18**に示す。図より SCP 改良地盤は、同じ相対密度であってもサイクル数や応力履歴が多いほど液状化強度が高いことが言える。また、砂質土は同じ相対密度の状態であっても接触点数は応力履歴のない空中法より応力履歴が受けた打撃法の方が多いことが第5章の基礎実験結果と“APPENDIX-B”の結果から導かれ、**図-7.15**に示す接触点数と液状化強度の関係における接触点数が多いほど液状化強度が高いことを踏まえると、それぞれの使用した材料などの実験条件は異なるが、これらの2つの関係性により SCP 改良地盤についても相対密度と接触点数の関係性に関連付けることができる。それは、多くのサイクルにより小さなひずみ数多く受ける SCP 改良地盤は、同じ相対密度の状態のひずみ履歴のない原地盤より接触点数が多くなると予測され、このことは第6章の応用実験結果である**図-7.19**示す SCP 改良地盤における相対密度と接触点数の関係と一致する。

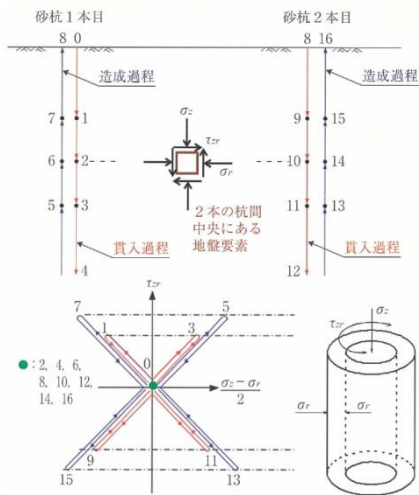
SCP 工法による砂杭の造成時の施工過程は、ケーシングパイプの初期貫入に加えて砂杭造成時のケーシングパイプの引抜きと打戻しによる拡張を細かく繰返すため、中実の杭材の貫入のみの施工過程となる締固め杭工法と比べて圧倒的にサイクル数が多い。この細かく多くの施工サイクルにより繰返しせん断履歴を与えることで SCP 改良地盤の接触点数が増えることが、すなわち SCP 改良地盤の微視構造が安定化され、同程度の相対密度を有する原地盤よりも高い液状化強度を有することになると想定できる。



(a) SCP が杭間地盤に及ぼす影響

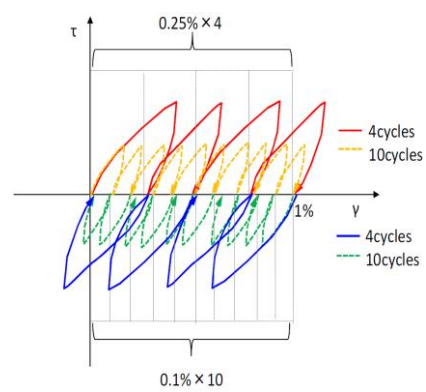


(b) 地盤中での鉛直・水平方向への点荷重
 鉛直方向への点荷重 (鉛直下方へ移動)
 水平方向への点荷重 (鉛直下方へ移動)
 応力状態の変化を算定する地盤要素



(c) 砂杭2本の施工を単純化して模擬した

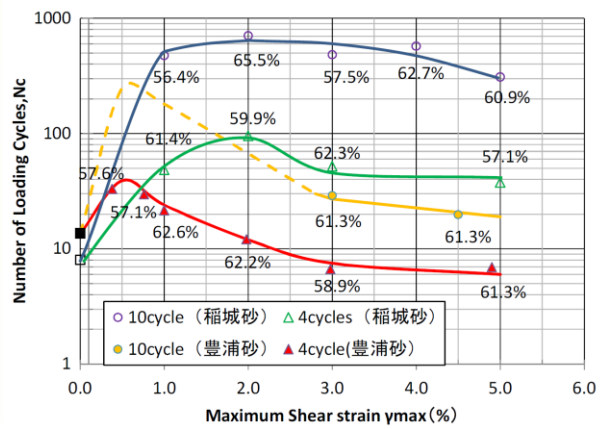
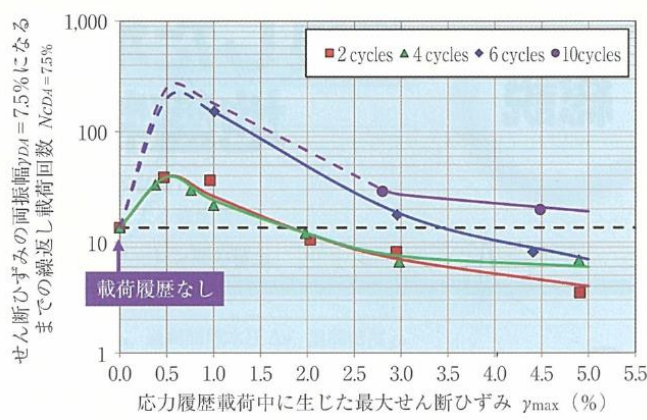
載荷時の弾性解による応力変化



(d) 砂杭の応力履歴時のせん断応力と

中空ねじり試験の応力履歴設定例

せん断ひずみの模式図 ($\gamma_{max}=1\%$ の場合)

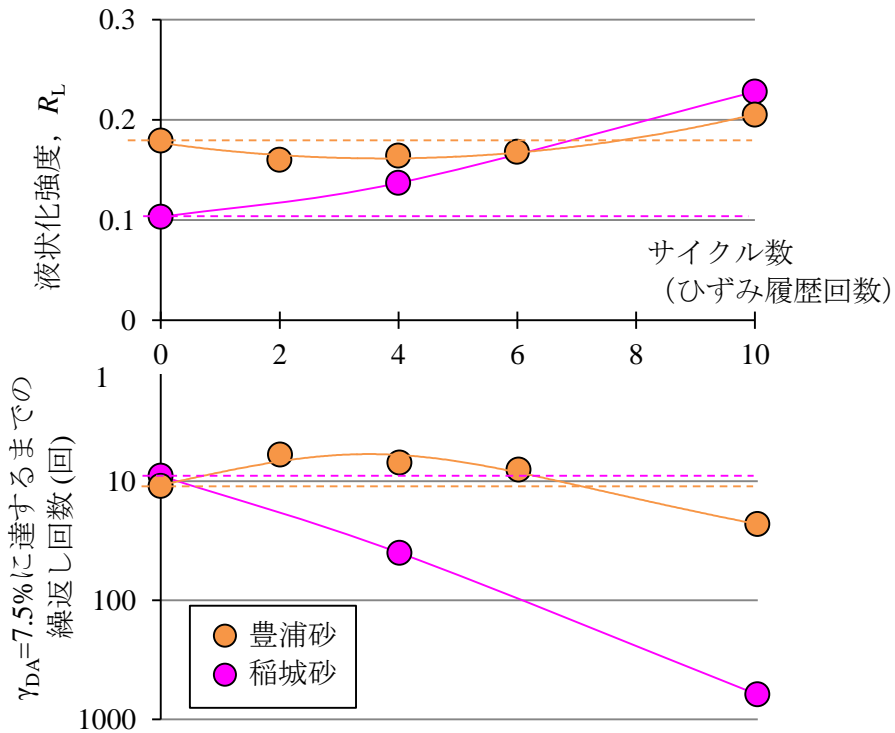


(e) 液状化強度特性に及ぼす履歴時 γ_{max} の影響

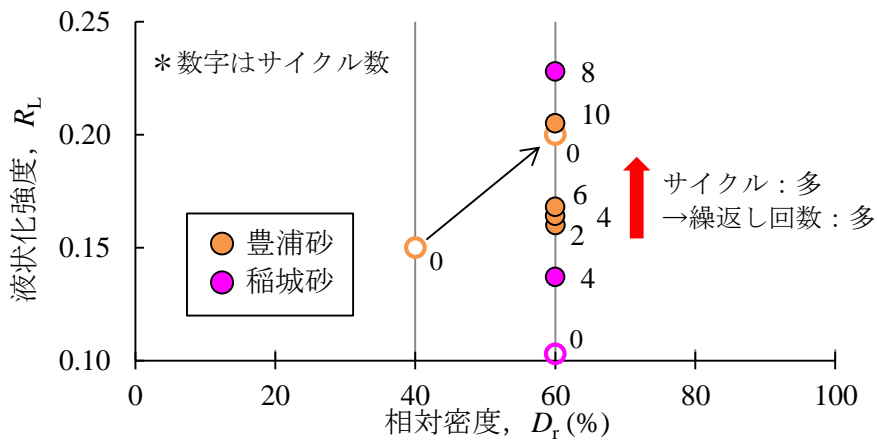
図-7.17 SCP工法の施工による応力履歴をモデル化した中空ねじり試験結果^{12),13)}

表-7.6 既往の研究成果における相対密度とサイクル数と液状化強度の関係

試料名	相対密度 D_r	液状化強度 R_L ($\gamma_{DA}=7.5\%$ になるまでの繰返し载荷回数)				
		0	2cycles	4cycles	6cycles	10cycles
豊浦砂	60%	0.179 (11)	0.160 (6)	0.164 (7)	0.168 (8)	0.205 (23)
稲城砂	60%	0.103 (9)	-	0.137 (40)	-	0.228 (620)



(a) サイクル数と液状化強度および液状化強度特性の関係



(b) 相対密度と液状化強度の関係

図-7.18 既往の研究成果における相対密度とサイクル数と液状化強度の関係

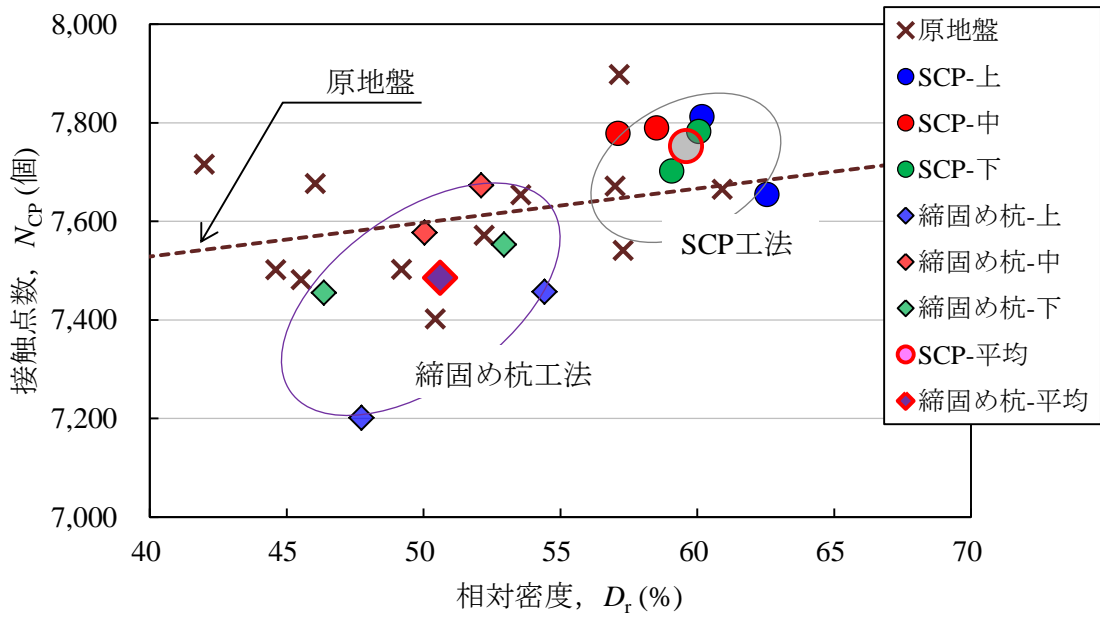


図-7.19 第6章応用実験結果における相対密度と接触点数の関係

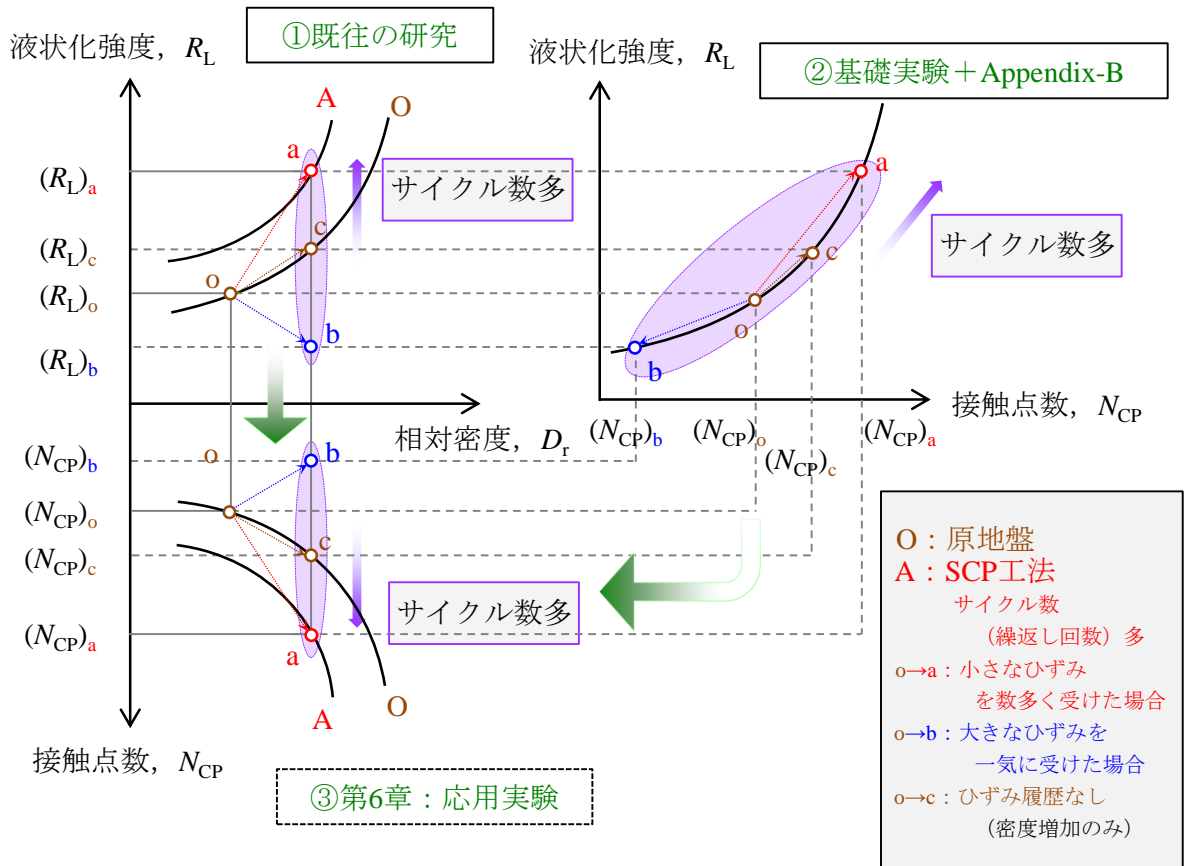


図-7.20 SCP改良地盤の相対密度と液状化強度および接触点数の関係模式

以上のことから SCP 工法による改良効果は図-7.20のように模式することができると考えられ、SCP 改良地盤についても X 線 CT と画像解析による接触点数を指標とすることで微視構造に関する定量的な評価へと展開していくことが可能であると推察できる。

7.2 SCP 改良地盤の微視構造の評価に関する今後の課題

7.1.2(1)により締固められた砂質土の微視構造に着目した場合、相対密度と液状化強度と接触点数の3つのパラメータに関連性があることが明らかとなり、さらには7.1.2(2)により SCP 工法による締固め改良地盤についてもこの3つのパラメータに関連性があることが考察できた。

また、本研究によって密な状態の砂質土の微視構造ならびに SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造について X 線 CT と画像解析による接触点数を用いることで定量化できることを示した。締固め改良地盤の微視構造を定量化できることは、設計法においては、液状化強度と関連付けることで、SCP 工法による締固め改良地盤の「微視構造の安定化」による効果を従来の杭間位置の N 値により算出した液状化抵抗 R_L に割増係数¹⁵⁾として乗じる評価手法へと展開できる。また、施工法においては、効率的な接触点数の増加を目指した施工サイクルの確立へと展開できる。

ただし、本研究で得られた SCP 改良地盤の「微視構造の安定化」に関する定量的な評価は、さらなる設計法と施工法の高度化を図る上で、以下の今後の課題が考えられる。

- ① μ XCT 模型実験において、より拘束圧や境界条件および相似則を考慮した微視構造評価の必要がある。
- ② SCP 改良地盤の液状化強度との関係性をより明確にするためには、飽和状態の原地盤を模擬する必要がある。
- ③ 砂杭の複数打設による SCP 改良地盤を対象とした、 μ XCT 模型実験による接触点数の算出による微視構造評価の必要がある。
- ④ 実際の SCP 工法の施工現場における締固め改良地盤に対して X 線 CT を適用することで微視構造評価を行う必要がある。

上記において①～③の課題は、今後の実験装置や実験手法の向上を図ることで解決できると考えられ、④については、砂質土における高精度なサンプリング手法の確立やそれに関わる高額な費用などの克服すべき問題があるが、実施工におけるデータを蓄積することで、SCP改良地盤の微視構造評価に関する定量化は一気に飛躍するとも考えられる。

7.3 まとめ

本章では、第6章までに得られた成果を基に、実施工におけるSCP改良地盤の微視構造の評価への展開を試みた。より実施工を想定するため模型地盤内に4本の砂杭造成した杭間地盤を対象に、IXCTによるCT撮影を行い、体積ひずみと相対密度の関係についてCT撮影から得られた模型実験データとSCP施工現場で計測された実測データの比較を行った。さらに、SCP改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性について考察し、SCP工法の施工法、設計法のさらなる高度化を目指したSCP改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及した。

以下に得られた知見を列挙する。

- i) 砂杭を複数打設した模型実験における杭間地盤でも、実施工のSCP工法と同様に密度増加効果をIXCTにより確認した。
- ii) IXCT実験結果とAPPENDIX-AによるSCP施工現場で計測された実測データを比較することで、模擬した砂杭造成と実施工におけるSCP工法が、概ね同じような砂杭周辺地盤の挙動を示していると考えることができ、本研究で行ったSCP工法を模擬した砂杭造成手法の妥当性と実施した一連の模型実験手法の有効性が示されたと考えられる。
- iii) APPENDIX-Bによる密な状態における熊本硅砂の繰返し三軸試験結果から、同じ相対密度であっても、空中法より打撃法で作製した供試体の方が液状化強度は高いことから、第5章の基礎実験結果を踏まえると、砂質土は同じ相

対密度の状態であっても接触点数が多いほど高い液状化強度を有している
と考察される。

- iv) 既往の研究成果や第 5 章の基礎実験および第 6 章の応用実験結果を関連付けることで SCP 改良地盤と原地盤では、同じ相対密度であっても接触点数は SCP 工法の方が多いことから、繰返しせん断履歴を与えるサイクル数が多い SCP 工法による改良地盤の液状化強度は、同じ相対密度の繰返しせん断履歴のない原地盤が有する液状化強度より大きいと推察される。
- v) 実務設計における SCP 改良地盤の評価について、X 線 CT と画像解析を用いて算出できる接触点数を指標とすることで、改良地盤の微視構造の安定化による液状化強度の割増係数として定量化できる可能性を示した。

参考文献

- 1) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.111-118, 2000.
- 2) 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 椋木俊文: 地盤工学における産業用 CT スキャナーの適用, *土と基礎*, Vol.48, No.2, pp.1-20, 2000.
- 3) 椋木俊文: 地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2001.
- 4) 大谷順: X 線 CT 法, 技術手帳, *土と基礎*, Vol.54, No.4, pp.32~33, 2006.
- 5) 赤木俊介, 江副哲, 梅田洋彰, 大谷順, 佐藤宇紘, 原田健二: 締固め砂杭造成後の杭間地盤の密度変化に関する X 線 CT 模型実験, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.751-752, 2019.
- 6) 高木幹雄, 下田陽久監修: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
- 7) 内村圭一, 上瀧剛: 実践画像処理入門, pp21-22, 森北出版株式会社, 2013.
- 8) 肥後陽介, 高野大樹, 椋木俊文: X 線 CT から見る土質力学 2.X 線 CT の概要と研究動向, *地盤工学会誌*, Vol.65, No.10, pp.41-48, 2017.
- 9) 古賀快尚: 木杭打設による地盤改良効果に関する研究, 熊本大学工学部社会環境学科卒業論文, 2012.
- 10) 地盤工学会: 打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法 設計・施工マニュアル, 第 2 章 粘性土地盤を対象とする計画, 設計, 施工, pp.22-23, 2009.
- 11) 原田健二, 山本実, 大林淳: 静的締固め砂杭工法による締固め改良地盤の密度増加の評価について, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.2155-2156, 1998.
- 12) 古関潤一: 締固め砂杭の施工が液状化強度特性に及ぼす影響に関する最近の知見, *基礎工*, Vol.46, p2-5, 2018.
- 13) 武田尚也, 原田健二, 矢部浩史, 中出雄也, 古関潤一: 砂杭打設時の载荷履歴が液状化強度特性に及ぼす影響, *土木学会第 74 回年次学術講演会*, III-247, 2019.
- 14) Tatsuoka, F., Yasuda, S., Iwasaki, T. and Tokida, K.: Normalized dynamic undrained

strength of sands subjected to cyclic and random loading, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.3, pp.1-16, 1980.

- 15) Ezoe, A., Harada, K., Nozu, M. and Otani, J.: Construction Technology and Improvement Effectiveness of Sand Compaction Pile Method as Countermeasure, *The 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, JS-Tainan*, pp.165-170, 2016.

第8章 結論

本研究では、SCP 工法による砂質土の締固め改良効果のうち、定量的な評価がなされていない微視構造について取り上げた。まず、SCP 工法による砂杭造成機構を模擬し、砂質土の締固めに伴った砂杭周辺地盤の挙動をミクロスケールで観察するため X 線 CT 専用の模型実験装置の開発を行った。次に、砂杭周辺の改良地盤の微視的構造について、土粒子の接触点数と変形挙動の変化に着目して、X 線 CT と画像解析技術を用いることで詳細な可視化と改良効果の定量的な評価を行った。最後に、実施工における SCP 改良地盤の微視構造の評価への展開と今後の課題について考察し、接触点数を指標とした締固め改良地盤の評価により設計法と施工法の高度化につながる成果を導いた。

以下に各章で得られた結論を総括する。

第1章では、SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造に関する本研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べた。

第2章では、研究対象である SCP 工法の改良原理と設計、施工、材料の変遷について述べるとともに、砂質土の締固めとしての SCP 工法の現状と設計方法について整理した。さらに、SCP 工法による改良地盤の評価にあたっての留意点と改良効果に関する既往の研究について概観した。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) SCP 工法は砂質土を対象とした場合の液状化対策として国内では最も実績が多く、その改良効果も認められており、時代のニーズにも対応して進化してきたが、さらなる設計法や施工法の高度化や海外においても幅広く活用

されることが期待できる。

- ii) 地盤工学的課題が粘性土の安定、沈下問題から砂質土の液状化問題へ移行していることに対応して、SCP 工法における研究対象も砂質土に関するものが主流となってきているが、締固め改良地盤の微視構造についてはその計測の難しさもあって未解明な部分が多く残されており、定量化がなされていない。
- iii) SCP 工法の締固めによる改良効果は、地盤の状態変化として捉えると、密度増加、水平応力の増加、不飽和化、微視構造の安定化が挙げられる。密度増加、水平応力の増加、不飽和化については地盤調査や試験により確認できるが、微視構造の安定化に関しては現位置での直接的な計測は困難であるため、X 線 CT を用いた定量的な評価が期待できる。

第 3 章では、本研究の中心的な役割を果たす X 線 CT の概要および画像解析手法について述べるとともに、X 線 CT を用いた砂質土の締固めに関する既往の研究について概観した。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) X 線 CT では三次元の画像データが得られ、 μ XCT を用いた空間分解能の高い拡大撮影を行うことで、地盤材料の微視的な形状や移動状況などの詳細な観察が可能である。
- ii) X 線 CT により得られた CT データから SCP 工法による締固め改良地盤を想定した砂質土の微視構造に関する定量化を行うための 2 種類の画像解析手法について取りまとめた。
- iii) 砂質土の締固めに関して X 線 CT を適用した事例では、砂粒子の配列や間隙構造、荷重下における変位やひずみ等の可視化に関する研究が行われており、これらの実験手法や研究成果を整理することで本研究に反映させた。

第 4 章では、本研究に用いるために開発した SCP 工法を模擬した X 線 CT 専用の模型実験装置と実験手順および砂杭の造成方法について詳細に述べるとともに、CT 撮影

による実験装置および実験手法の検証を行った。検証実験結果から本装置および手法により、連続的な砂杭の造成状況が詳細に可視化することができ、SCP工法を模擬することが可能であることを確認した。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) SCP工法を模擬した砂杭の造成と砂杭造成過程のCT撮影を μ XCT室内で実現可能とする模型実験装置を開発した。
- ii) 模型実験では、ケーシングパイプ貫入時の押力を荷重計にて測定し、ケーシングパイプの貫入から引抜きによる砂の排出、打戻しによる拡張までの一連の砂杭造成サイクルについて、実施工におけるSCP工法の施工サイクルの模式と概ね一致することを検証した。
- iii) ケーシングパイプの打戻しによる砂杭造成（拡張）時の押力ピーク値が、造成前の同深度におけるケーシングパイプの初期貫入時の押力より増加し、砂杭の造成サイクルが増えるにつれてその押力値が増加することがわかった。これは、砂杭造成に伴った周辺地盤の締固め効果と、先行造成された砂杭のさらなる密実化によるものと想定できる。
- iv) 開発した模型実験装置および実験手法により模擬したSCP工法において、ケーシングパイプ先端周辺に投入した砂がケーシングパイプの打戻しにより拡張され、拡張された砂杭が連続的に造成されていることを μ XCT撮影により得られた断面CT画像から確認した。

第5章では、砂質土の密な状態における基本的な微視構造を捉える実験として、熊本硅砂を実験材料として異なる締固め方法で作製した供試体を対象に μ XCT撮影を行い、画像解析により相対密度と土粒子同士の接触の観点で定量的な評価を試みた。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) 第3章で述べた三次元空間解析ソフトによる画像解析手法を用いることで、撮影したCT画像から熊本硅砂における相対密度と土粒子同士の接触点数を

算出できた。

- ii) 同じ相対密度 $D_r=85\%$ を目標に、空中法と打撃法の 2 ケースにより作製した供試体の接触点数は、空中法よりも打撃法の方が多いことがわかった。
- iii) 砂質土は、同じ相対密度であっても締固め方法が異なると接触点数に差が生じ、その微視構造には違いがあることが示された。
- iv) 砂質土の微視構造に関して、X 線 CT と画像解析によって算出できる接触点数を指標とした定量化が可能であることが示された。

第 6 章では、第 4 章で開発した模型実験装置や実験手法、第 5 章で提案した接触点数による評価等を応用することで、SCP 工法による砂杭周辺地盤の微視構造に関して、変形現象の可視化と相対密度および接触点数の変化による定量的な評価を試みた。さらに、貫入と造成（引抜きと打戻し）過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える特徴的な施工サイクルである SCP 工法に対して、貫入のみの施工である締固め杭工法との比較も行った。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) 第 3 章で示したデジタル画像相関法による画像解析手法を用いることで、砂杭周辺地盤の土粒子の変位量とせん断ひずみおよび体積断ひずみの増分を算出し、砂杭造成に伴った締固めによる周辺地盤の変形現象を詳細に可視化できた。
- ii) 砂杭造成に伴って発生するせん断ひずみは拡張された砂杭周辺に集中しており、先行して造成された砂杭周囲の体積ひずみが収縮傾向にあることが X 線 CT と画像解析によって可視化することで明らかとなった。
- iii) SCP 工法における砂杭造成に伴って砂杭周辺地盤の相対密度は増加し、接触点数も増加し、それらの変動係数も施工が進捗するにつれ小さくなり改良地盤が均一化することがわかった。
- iv) SCP 工法における砂杭周辺地盤の接触点数は、同じ相対密度の原地盤より多いことがわかり、SCP 工法による改良地盤の微視構造が安定化すると考えら

れる。

- v) SCP 工法と締固め杭工法の比較により施工方法が異なれば、締固め改良地盤の接触点数に差異が生じ、その接触点数は締固め杭工法より SCP 工法の方が多いたことが明らかとなった。

第 7 章では、第 6 章までに得られた成果を基に、実施工における SCP 改良地盤の微視構造の評価への展開を試みた。より実施工を想定するため模型地盤内に 4 本の砂杭造成した杭間地盤を対象に、IXCT による CT 撮影を行い、体積ひずみと相対密度の関係について CT 撮影から得られた模型実験データと SCP 施工現場で計測された実測データの比較を行った。さらに、SCP 改良地盤の微視構造の観点から見た液状化強度との関連性について考察し、SCP 工法の施工法、設計法のさらなる高度化を目指した SCP 改良地盤の評価に関する今後の展望と課題について言及した。

得られた結論は以下のとおりである。

- i) 砂杭を複数打設した模型実験における杭間地盤でも、実施工の SCP 工法と同様に密度増加効果を IXCT により確認した。
- ii) IXCT 実験結果と APPENDIX-A による SCP 施工現場で計測された実測データを比較することで、模擬した砂杭造成と実施工における SCP 工法が、概ね同じような砂杭周辺地盤の挙動を示していると考えることができ、本研究で行った SCP 工法を模擬した砂杭造成手法の妥当性と実施した一連の模型実験手法の有効性が示されたと考えられる。
- iii) APPENDIX-B による密な状態における熊本珪砂の繰返し三軸試験結果から、同じ相対密度であっても、空中法より打撃法で作製した供試体の方が液状化強度は高いことから、第 5 章の基礎実験結果を踏まえると、砂質土は同じ相対密度の状態であっても接触点数が多いほど高い液状化強度を有していると考えられる。
- iv) 既往の研究成果や第 5 章の基礎実験および第 6 章の応用実験結果を関連付けることで SCP 改良地盤と原地盤では、同じ相対密度であっても接触点数は

SCP 工法の方が多いことから、繰返しせん断履歴を与えるサイクル数が多い SCP 工法による改良地盤の液状化強度は、同じ相対密度の繰返しせん断履歴のない原地盤が有する液状化強度より大きいと推察される。

- v) 実務設計における SCP 改良地盤の評価について、X 線 CT と画像解析を用いて算出できる接触点数を指標とすることで、改良地盤の微視構造の安定化による液状化強度の割増係数として定量化できる可能性を示した。

地盤中に締固め砂杭（サンドコンパクションパイル）を造成する SCP 工法は、我が国で独自に開発し実用化され、その工法の誕生以来、今日までの半世紀を超えて地盤改良工法の主力をなしている。また、SCP 工法が有していると言われる様々な複合的な改良効果については今なお明らかにされていない研究テーマが見出されており、またこれからも工法発展が期待できるという点では他に例を見ない地盤改良技術である。これは時代のニーズに合わせて研究開発に取り組み、常に改良改善を進めてきた成果によるものだと考えられる。

今回、砂質土における SCP 改良地盤に対して新たな試みであった X 線 CT を適用したことで得られた知見をベースとし、締固め改良地盤における X 線 CT の適用がさらなる拡大をすることで、その改良地盤の微視構造評価についての定量化がより一層の発展を遂げ、実務へ展開されていくことによる SCP 工法の設計法および施工法などがより高度化されることを期待する。

APPENDIX-A 実施工における SCP 杭間地盤の体積ひずみ計測結果

A.1 計測結果の整理¹⁾

SCP 工法による締固め改良地盤の密度増加について、砂杭間地盤の密度増加と体積ひずみの関係に着目して考察した。異なる改良率 a_s で SCP 工法を施工した A~D の 4 現場において改良前（事前：原地盤）と改良後（事後：改良地盤の杭間）で標準貫入試験と密度検層を行い、標準貫入試験用サンプラーによる採取試料については含水比試験と粒度試験を追加した。D 現場は 3 箇所（D-1, D-2, D-3）で実施しているため合計 6 箇所のデータを以下の 6 項目で事前と事後のデータを整理して比較した。SCP 工法における施工した改良率は、A, B, C, D 現場でそれぞれ 10, 12, 20, 20% である。また、事後ボーリングの位置は、正方形配置で打設した砂杭の対角線交点である。

- ① 事前、事後の N 値の深度分布
- ② 事前、事後の換算 N 値 (N_1) の深度分布

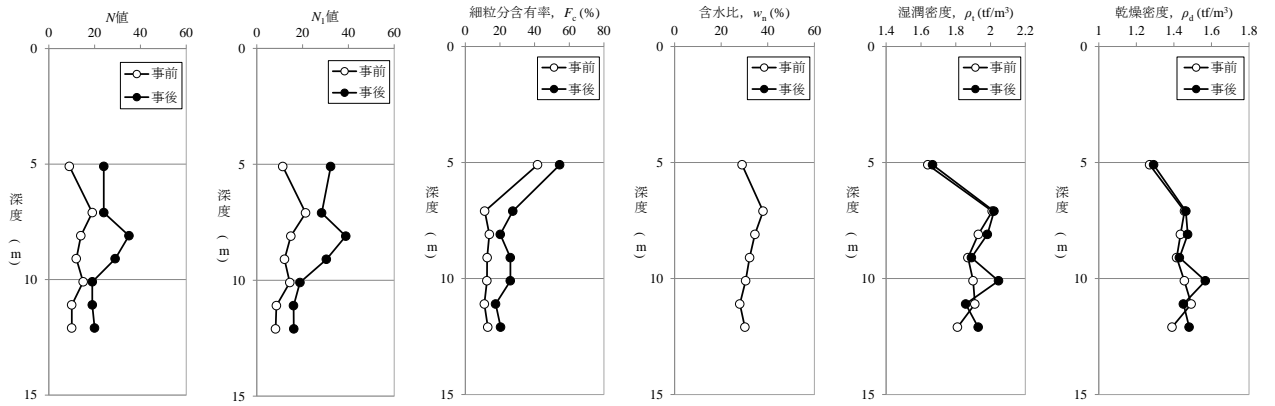
$$N_1 = \frac{1.7N}{\sigma_v'/98 + 0.7} \quad (\text{A.1})$$

ここに、 σ_v' : 有効土被り圧 (kPa)

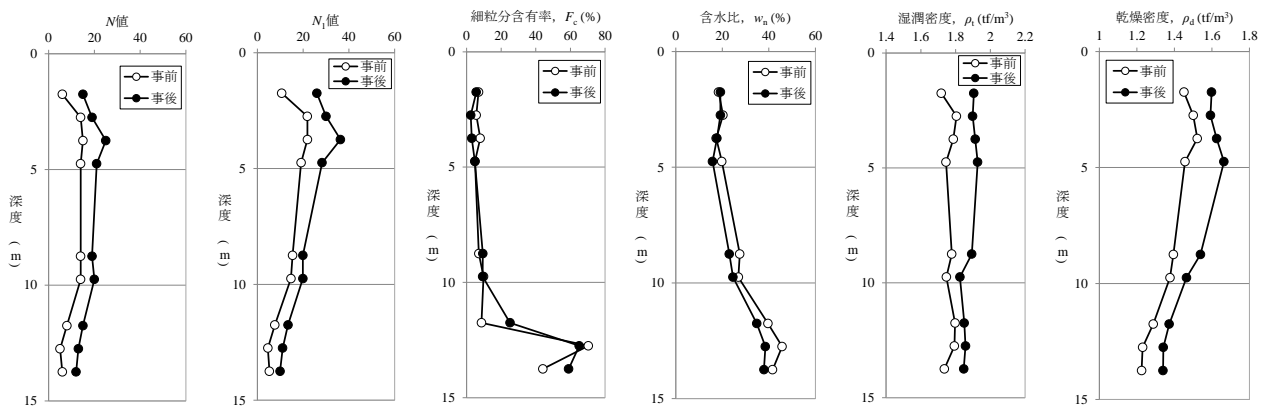
- ③ 事前、事後の細粒分含有率 F_c の深度分布
- ④ 事前、事後の含水比 w_n の深度分布 (A, C 現場は事前のみ)
- ⑤ 事前、事後の湿潤密度 ρ_t の深度分布：標準貫入試験の 1 深度当りの範囲 (30cm) に相当する密度検層による湿潤密度の平均値
- ⑥ 事前、事後の乾燥密度 ρ_d の深度分布

$$\rho_d = \rho_t \left(1 + \frac{w_n}{100}\right) \quad (\text{A.2})$$

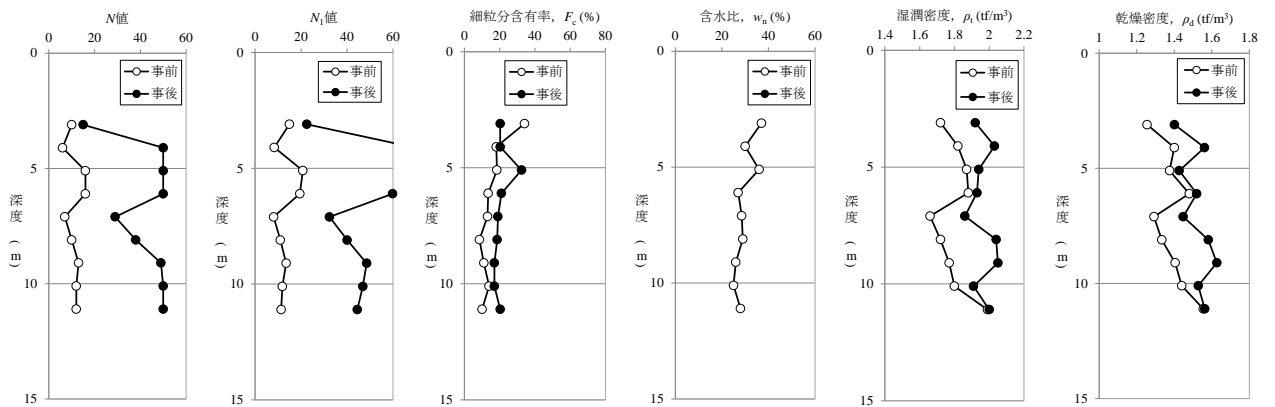
上記、項目について各現場における計測結果を整理して図-A.1、図-A.2に示す。



(a) A 現場の計測結果

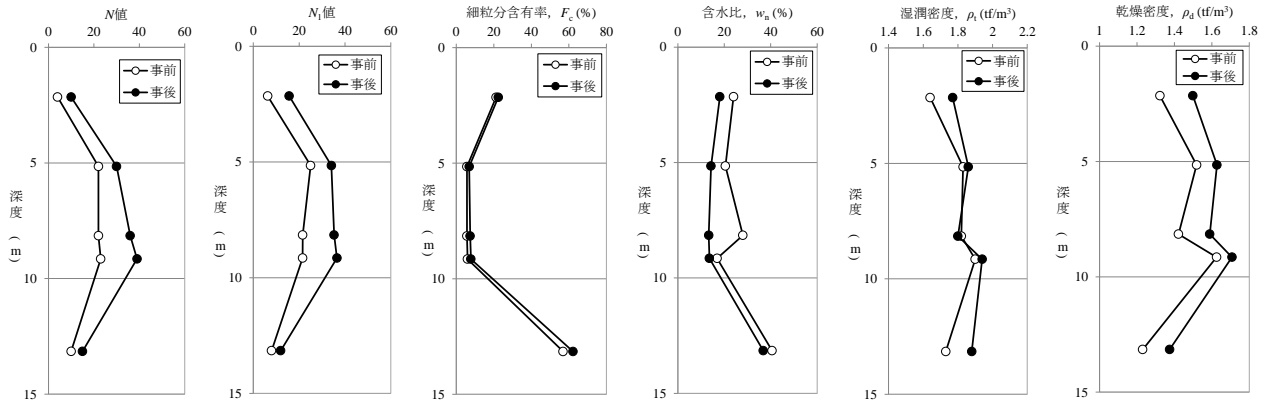


(b) B 現場の計測結果

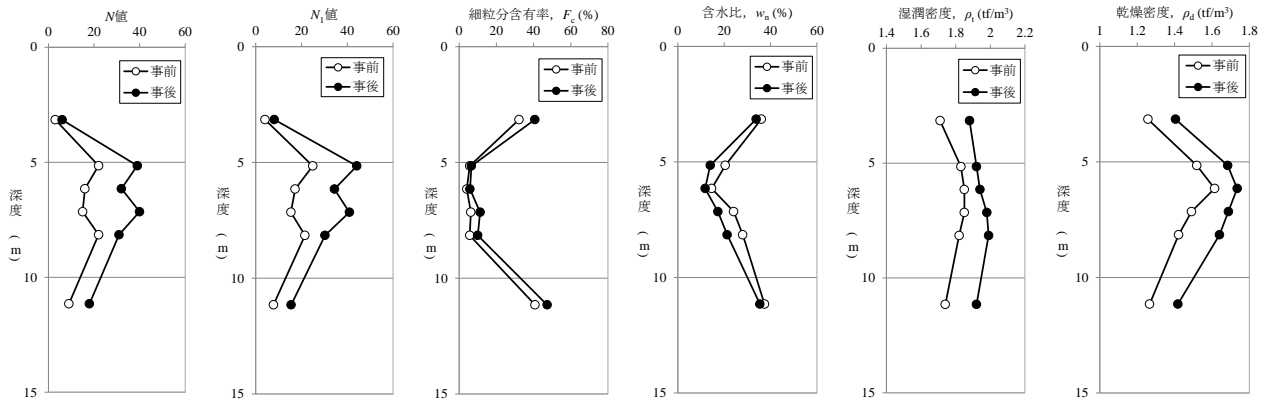


(c) C 現場の計測結果

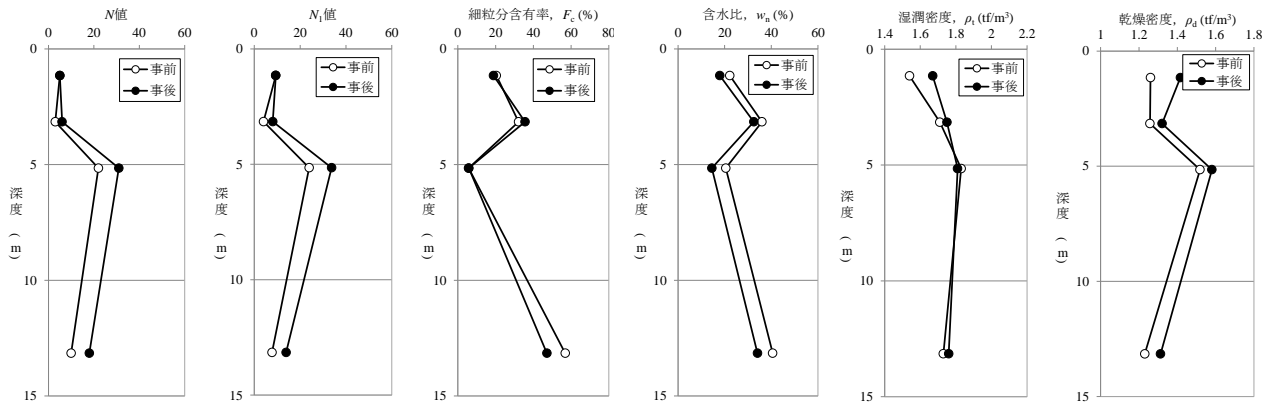
図-A.1 A~C 現場の計測結果



(d) D-1 現場の計測結果



(e) D-2 現場の計測結果



(f) D-3 現場の計測結果

図-A.2 D 現場の計測結果

SCP 工法による締固め改良地盤の杭間地盤における密度増加と体積ひずみ ε_v の関係に着目するため、密度検層の結果から得られた湿潤密度などから求めた事前と事後の間隙比を使って体積ひずみを以下のように換算して算出した。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \times 100(\%) \quad (\text{A.3})$$

$$e_0 = \frac{\rho_{s0}}{\rho_{t0}} \left(1 + \frac{w_{n0}}{100}\right) - 1 \quad e_1 = \frac{\rho_{s0}}{\rho_{t1}} \left(1 + \frac{w_{n1}}{100}\right) - 1 \quad (\text{A.4})$$

ここに、
 e_0, e_1 : 事前, 事後の間隙比
 ρ_{s0}, ρ_{s1} : 事前, 事後の土粒子密度 (g/cm^3)
 ρ_{t0}, ρ_{t1} : 事前, 事後の湿潤密度 (g/cm^3)
 w_{n0}, w_{n1} : 事前, 事後の含水比 (%) : A, C 現場の事後の含水比は事前の含水比と同じとした。

また、増加 N 値から求まる相対密度増分 ΔD_r については以下のようにして求めた。

$$\Delta D_r = D_{r1} - D_{r0} \quad (\text{A.5})$$

$$D_{r1} = 21 \sqrt{\frac{N_0}{0.7 + \sigma_v'/98} + \frac{\Delta N_f}{1.7}} \quad D_{r0} = 21 \sqrt{\frac{N_1}{0.7 + \sigma_v'/98} + \frac{\Delta N_f}{1.7}} \quad (\text{A.6})$$

ここに、
 D_{r0}, D_{r1} : 事前, 事後の相対密度
 σ_v' : 有効土被り圧
 N_0, N_1 : 事前, 事後の N 値
 ΔN_f : 補正 N 値

細粒分含有率, F_c (%)	ΔN_f
0~ 5	0
5~10	1.2(F_c -5)
10~20	6+0.2(F_c -10)
20~	8+0.1(F_c -20)

A.2 計測結果の考察¹⁾

図-A.3 に (A-3) 式より求めた体積ひずみ ε_v と (A-4) 式より求めた相対密度増分 ΔD_r の関係を示す。同図によればバラツキはあるものの、密度増加に伴った体積ひずみの増加は正の相関を指摘できる。

また、各現場のデータの体積ひずみの平均値と標準偏差を求め、改良率との関係を示したものが図-A.4 である。改良率が大きくなるに従い体積ひずみは大きくなるが、その値は改良率の概ね 1/2 となることがわかる。これは砂杭造成により盛上りや水平変位を生じ、砂の圧入のすべてが密度増加に寄与しているわけではなく 1/2 程度をロスしていることに寄因しているものと考えられる。

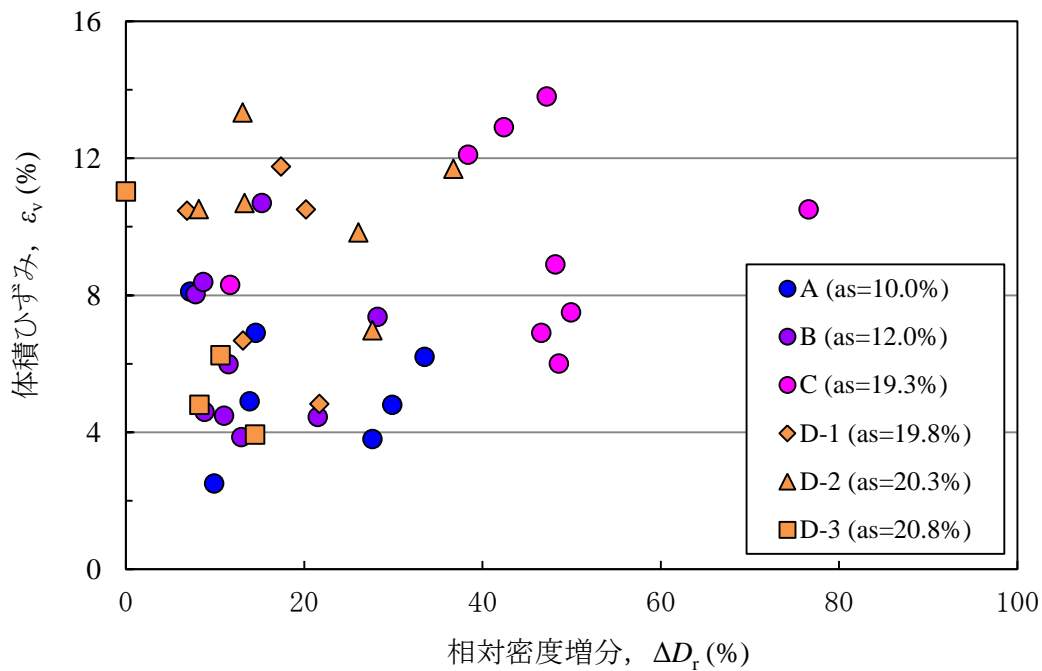


図-A.3 増加相対密度と体積ひずみの関係

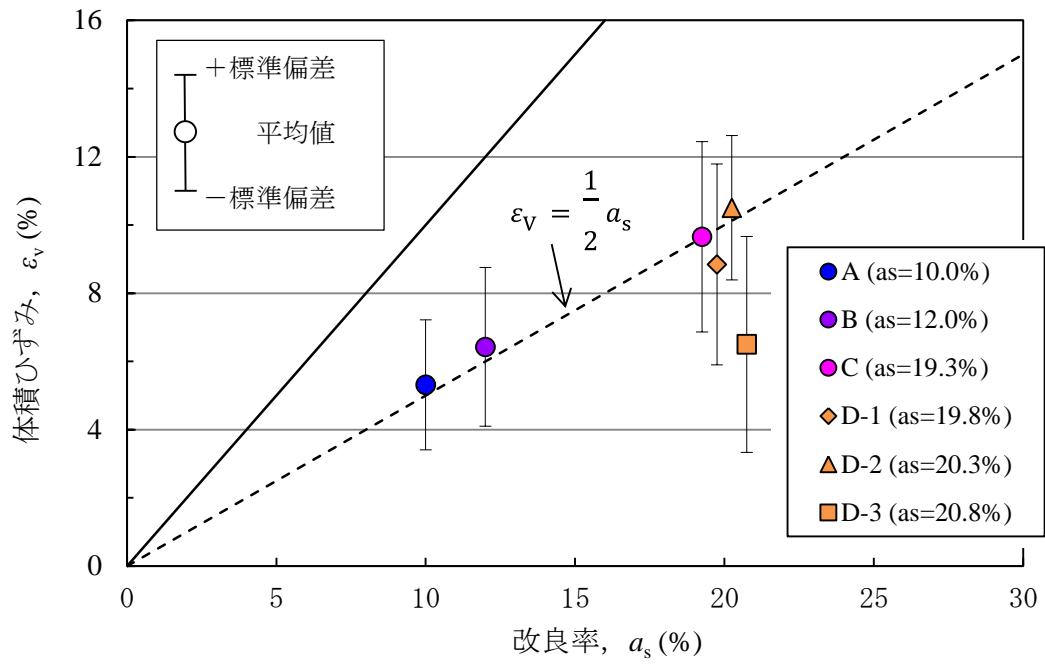


図-A.4 改良率と体積ひずみの関係

参考文献

-
- 1) 原田健二, 山本実, 大林淳: 静的締固め砂杭工法による締固め改良地盤の密度増加の評価について, 第33回地盤工学研究発表会, pp.2155-2156, 1998.

APPENDIX-B 異なる供試体作製方法による液状化強度試験結果

B.1 試験材料および試験条件^{1)~3)}

供試体作製方法の違いが液状化強度に及ぼす影響を定量的に把握する目的で、繰返し三軸試験を実施した。

繰返し三軸試験は、第5章の基礎実験で使用した“5.1.1 実験材料”で述べた同じ熊本硅砂を使用し、“5.1.3 供試体作製方法と実験手順”で述べた手法と同じ手順で空中法と打撃法により2種類の供試体作製を行った。それぞれ初期相対密度 $D_{r0}=65, 85\%$ となるように供試体（直径5cm，高さ10cm）を作製し、その後、通水し飽和供試体を作製し、拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ で等方圧密した後、非排水条件で周波数 $f=0.1\text{Hz}$ のもと繰返し三軸試験を行った。

B.2 試験結果^{1)~3)}

図-B.1 に液状化強度曲線を示す。図では、両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したときの載荷回数 N_c と応力振幅比 τ_d/σ'_c の値を、初期相対密度が $D_{r0}=65\%, 85\%$ の各供試体について示した。図より初期相対密度が $D_{r0}=65\%$ の場合の供試体作製方法の違いによる液状化強度曲線の相違はさほどは見られないが、 $D_{r0}=85\%$ の場合には多少の相違が確認できる。

図-B.2 に相対密度と液状化強度 $R_{L20}((\tau_d/\sigma'_c)_{N_c=20})$ の関係図を示す。ここでの相対密度は、図-B.2(a)に初期相対密度 D_{r0} 、図-B.2(b)にせん断前の相対密度 D_{rc} の平均値における液状化強度との関係を示している。図より打撃法は空中法に比べて、同じ相対密度の状態であっても液状化強度が高く、より密な状態相対密度になると液状化強度の相違が

大きくなる傾向を示している。密な状態の熊本硅砂は、同じ相対密度の状態であっても、供試体作製方法が異なれば、液状化強度に差が生じることが明らかとなった。

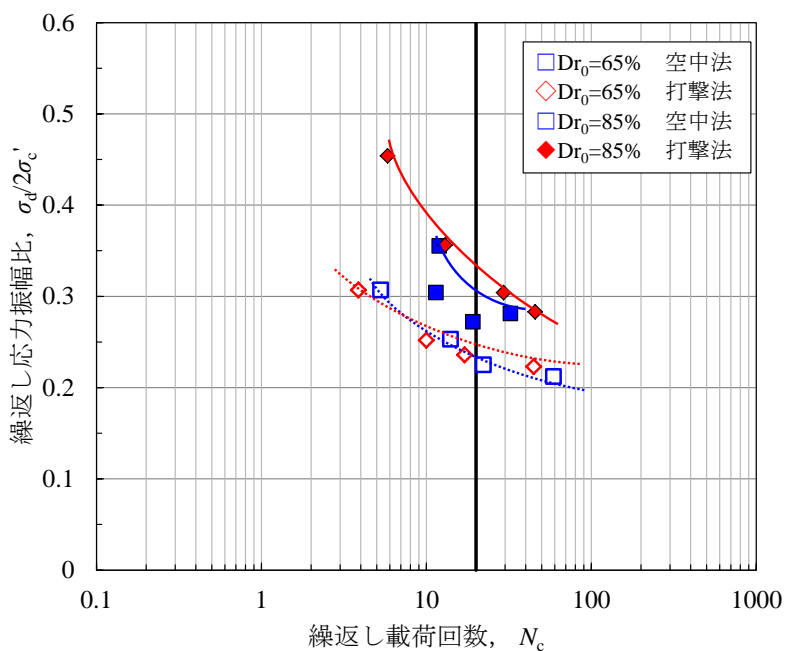
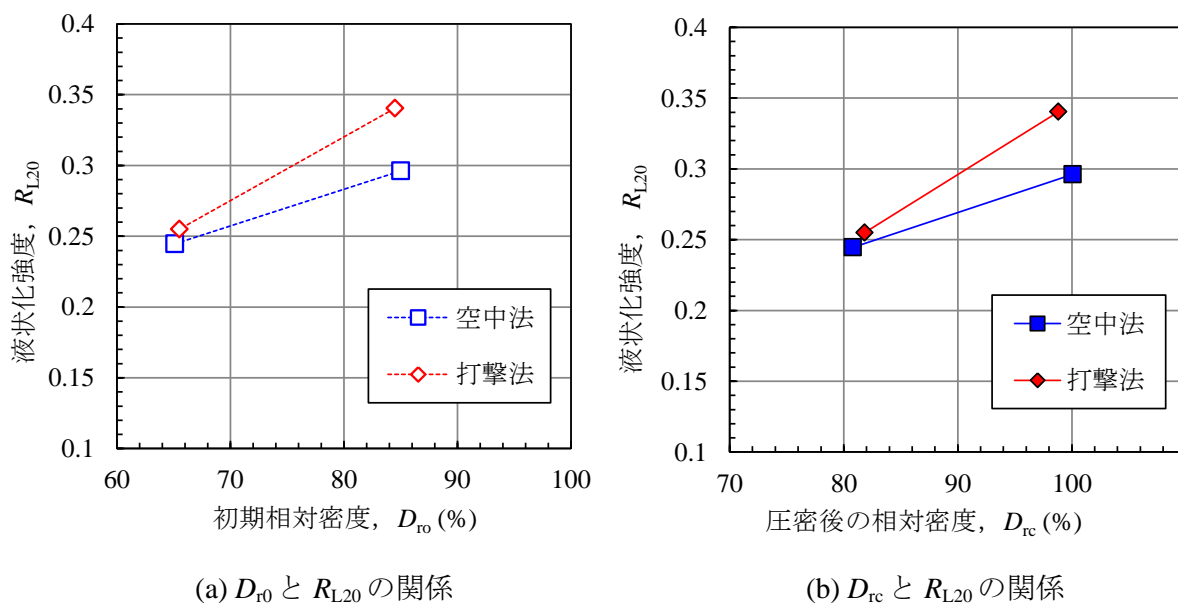


図-B.1 液状化強度曲線



(a) D_{r0} と R_{L20} の関係

(b) D_{rc} と R_{L20} の関係

図-B.2 相対密度と液状化強度の関係

参考文献

- 1) 日下部真祐，原田健二，矢部浩史，江副哲：粒子構造と粒子形状が液状化強度に及ぼす影響，第 54 回地盤工学研究発表会，pp.365-366, 2019.
- 2) 出野智之，原田健二，矢部浩史，江副哲，日下部真祐：粒子構造と粒子形状がひずみの発達過程と損失エネルギーに及ぼす影響，土木学会第 74 回年次学術講演会，III-313, 2002.
- 3) 江副哲，原田健二，矢部浩史，出野智之，日下部真祐：粒子構造と粒子形状が液状化強度と損失エネルギーに及ぼす影響－SCP 工法の改良効果の視点から－，年次大会「日本地震工学会・大会－2019」，P1-14, pp.1-10, 2019.

謝辞

本論文は、筆者が熊本大学大学院博士後期課程で行った研究成果を学位論文としてまとめたものです。本研究および本論文の作成を進めるにあたり、研究指導委員会の先生方、ならびに多くの方々にお世話になり、多大なる御助言、御指導を頂きましたことに深く感謝いたします。

熊本大学副学長大谷順教授には、研究の全般にわたって親身に御指導いただきました。学部4年時に地盤工学研究室に所属して以来、博士前期課程の期間、不動テトラ入社後、そして博士後期課程の今日にいたるまでの長い間、御支援いただきましたこと、研究者としての心得が乏しい私にこのようなチャンスをいただきましたことに深甚なる感謝の意を表する次第です。

尾原祐三教授、辻本剛三教授には、ご多忙の中、本論文草稿を査読いただき、審査にあたり熱心な討議と貴重な御助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

椋木俊文准教授には、研究のことは勿論のこと、大谷研究室の先輩としても様々な場面で的確な御指導と温かい励ましをいただきました。ありがとうございました。

防衛大学校宮田喜壽教授、基礎地盤コンサルタンツの田上裕博士、日建設計シビルの片桐雅明博士、鹿島建設の永谷英基博士、港湾空港技術研究所の高野大樹博士には、公聴会にも来ていただき、貴重な御指摘、御助言を賜りました。衷心より感謝いたします。

熊本大学技術職員の佐藤宇紘博士には、大学での研究環境を整えていただき、研究の進め方や実験装置の製作、実験手法の確立、解析ツールなど様々な研究内容の相談にのっていただき、幅広い御支援をいただきました。深く御礼申し上げます。

大谷研究室、椋木研究室のスタッフ、卒業生、在学生の方々にも親切にいただき、大変お世話になりました。ありがとうございました。

特に、大谷研究室の梅田洋彰氏、赤木俊介氏には、本研究に関連した研究を行っていただき、貴重な実験データを取得していただきました。公私にわたり二人の若さに日々刺激を受けながら研究を進めることができました。深く感謝いたします。

本研究は不動テトラに在籍しながら行い、完成にいたりました。この間、不動テトラの皆様には言葉では言い尽くせないたくさんの御支援と御協力をいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。

竹原有二代表取締役会長、奥田眞也代表取締役社長には、本研究に対して多くの御支援と御配慮をいただきました。ありがとうございました。

取締役地盤事業本部長大林淳博士には、熊本大学での研究に向けて御尽力いただき、研究と会社勤務の両立への様々な御配慮をいただきました。衷心より感謝いたします。

直属の上司である地盤事業本部橋本則之技術部長には、研究を進めやすい環境へのご配慮と多大なるサポートをしていただきました。深く御礼申し上げます。

原田健二博士には、研究全般にわたって相談にのっていただき、多くの御支援と御指導をいただきました。研究に行き詰って意気消沈しそうになっても温かく励ましていただきました。ありがとうございます。

野津光夫博士には、私が不動テトラを志望するきっかけと博士後期課程にチャレンジするきっかけを作っていただきました。深く感謝いたします。

この博士後期課程の期間は、九州支店地盤研究室長として勤務しながらの研究活動となりました。九州支店の皆様には様々な面で激励をいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。特に、九州支店地盤営業部、九州支店地盤工事部の皆様には、私の研究活動にご理解をいただき、色々なご配慮をいただきました。また、ともに机を並べて仕事をした九州支店地盤研究室の皆様には、たくさんのご迷惑をおかけしたことと思います。この場を借りてお詫び申し上げますとともに皆様に深く感謝いたします。

以上のお名前をあげた方以外にも研究期間中は様々な方々に多大なる激励、御支援をいただきましたことに心から厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究を応援してくれた両親、いつも支え続け、元気づけてくれた妻、二人の息子たちに心より感謝します。

2020年3月 江副 哲