

論文

軽量安定処理土の一軸圧縮特性

林 泰弘*・鈴木敦巳**・北園芳人***

Unconfined Compression test of the Light Weight Stabilized Soil

Yasuhiro HAYASHI*, Atsumi SUZUKI** and Yoshito KITAZONO***

1. はじめに

これまで、重要構造物の基礎築造や軟弱な地盤上の建設工事における地盤改良の一つとして、土のせん断強度の増加、変形係数の増大、圧密特性の改善、透水係数の低減などを目的としてセメント系固化材を用いた安定処理が多く行われてきた。近年では、都市域の拡大、生活基盤の多様化などから沿岸部での開発も増加している。しかし、このような沿岸部では軟弱地盤が厚い場合が多く、従来のセメント安定処理で軟弱層全体を改良すると処理土量膨大になる。造成後の地盤が、大きな支持力を要求されないような場合(道路、公園、駐車場など)には、必要最小限の支持力を確保しつつ、軽量化により地盤に与える荷重を軽減する方法が有効であると考えられる。そのような安定処理の方法として、近年では、セメント系固化材に、発泡ビーズや気泡を混入¹⁾して固化とともに軽量化を目標とする軽量安定処理がとり入れられてきている²⁾。また、この方法は土留め構造物に作用する土圧の低減、盛土や構造物の重量に起因する沈下や地盤破壊の抑制にも効果的である。

セメント安定処理効果はセメントの添加量、あるいは対象とする土の性質など種々の要因に影響されるため、現地の土を用いての配合試験が欠かせないものとなっている。最近では、土固有の性質から改良効果を推定する試みもなされているが、まだ明確に推定でき

る段階にない室内配合試験の重要性が再認識されている³⁾。本研究では、安定材として気泡セメントミルクを用いた軽量安定処理の実用化に向けて種々の実験を行ってきたが、処理目標が密度(間隙比)と強度であること、しかも気泡の混入によりセメント系安定処理以上に不確定な要素が増加し、一層強度の推定が困難になっている。そこで、軽量安定処理土と一般のセメント安定処理土との相違点を明確にし、軽量安定処理土の一軸圧縮強特性(一軸圧縮強度と間隙比の関係)を得ることを目的とした。

2. 対象土及び安定材の諸元

今回の対象土はいずれも熊本港付近から浚渫され埋立に用いられたものである。採取地点、採取時期の違いから6種類に分類される(表-1)。このような浚渫埋立土では、含水比等は時間とともに大きく変化してくるが、ここでは採取時のものを示している。また採取時の飽和度はいずれもほぼ100%である。これらの対象土は日本統一土質分類を用いるとCH、MH、SMの3種類に分類できる。セメントを用いた安定処理には対象土の物理特性が影響すると思われる。また、同じ土に対する安定処理でも、含水比は地盤の置かれた環境条件によっても変化し、セメント安定処理効果にも影響を与えることから、試験時には含水比を数種類に調整して用いた。

安定材は、セメントミルクに気泡を混合した気泡セメントミルク(以下、ACM)を用いた。気泡は、動物性蛋白質を原料とした発泡液を水で4倍に希釈したものを約150kPaの圧縮空気とともに塩ビパイプ($\phi = 2\text{mm}$, $L = 5\text{mm}$)の詰まった管の中を通過させることによって発泡させたシェーピングフォーム状のものであり、密

平成8年6月26日受付

* 助手, 環境システム工学科

** 教授, 環境システム工学科

*** 助教授, 環境システム工学科

表-1 対象土の諸元

対象土 (分類)	含水比 w(%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	間隙比 e	WL (%)	Ip	粒度組成(%)		
						砂分	シルト分	粘土分
A(CH)	95.0	1.44	2.63	57.8	21.9	3.8	59.7	36.5
B(CH)	54.7	1.62	1.58	54.4	21.0	19.0	58.7	22.3
C(MH)	68.6	1.59	1.86	50.5	17.0	35.2	40.2	24.8
D(MH)	67.7	1.58	1.83	53.8	19.5	23.1	61.9	15.6
E(SM)	50.0	1.66	1.42	38.6	6.8	57.3	25.2	17.5
F(SM)	48.2	1.72	1.95	31.3	4.6	55.5	31.6	12.9

度は 0.031 g/cm^3 である。ACM は構成材料の配合比を変えることで、目的に応じ必要とされる密度やコンシステンシーが得られるが、今回の実験では、普通ポルトランドセメント：水：気泡=1：1：0.1の質量比で混合し、密度が 0.46 g/cm^3 になるものを用いた。

3. 試験方法

対象としている地盤が浚渫地盤で含水比の変動が大きく、しかも、セメントを用いる安定処理においては強度発現に含水比の影響が大きいため、また、軽量安定処理に用いる気泡は不安定なものであり、対象土の物理特性や含水比の影響が考えられるため、対象土は、採取時の含水比を基準に液性指数 (I_L) を指標にして加水調整して使用した。

今回の配合試験における含水比及び ACM 添加率の組み合わせを表-2 に示す。ここで、ACM の添加率 (P) は対象土の乾燥質量に対するセメント質量の百分率で表し、5%きざみとした。これらの条件による処理土供試体は次のようにして、各条件毎に5本ずつ作成した。

表-2 配合試験条件

試料名 (分類)	対象土の液性指数 I_L	ACM 添加率 P(%)
A(CH)	2.7, 3.0, 3.5, 4.0	5~30
B(CH)	1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.2	5~30
C(MH)	2.1, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	5~30
D(MH)	1.7, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	10~30
E(SM)	2.7, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0	5~30
F(SM)	1.0, 2.0, 3.0	10~30

まず、対象土を各条件の含水比になるように調整したものに、所定の配合で作成した ACM を所定量混合し、均一になるまで手で攪拌混合した。処理土は塩ビモールド ($h = 10 \text{ cm}$, $d = 5 \text{ cm}$) にタンピング充填しそのまま約1日養生し、脱型が可能な強度であることを確認して脱型し、質量と寸法の測定を行った。その後含水比が変化しないようにポリエチレンフィルムで密封し恒温 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$)⁴⁾ 養生し、処理後6日目に封を切り同温で1日水浸養生した。

所定の養生が終了すると再び質量を測定し、万能試験機を用いてひずみ速度 $1\%/min$ で一軸圧縮試験を行い強度を確認した。

4. 試験結果と考察

4.1 湿潤密度と一軸圧縮強度

軽量安定処理は、強度の増加とともに軽量化することが目的であるため、配合設計の目標は湿潤密度 (ρ_t) と一軸圧縮強度 (qu) で設定される。対象土の違いによる軽量安定処理効果を比較するため、土質分類の異なる3種類 (A, C, E) の土に対する軽量安定処理効果を図-1.1~1.3 に示した。いずれの対象土についても ACM の添加率 (P) の増加に伴い混入する気泡量が増加するため、 ρ_t は単調に減少している。含水比が高い対象土ほど未処理状態の ρ_t が小さいが、 P が小さい範囲ではその影響が大きいものの、 P の増加に従って気泡による軽量化の割合が大きくなるため初期の含水比の違いによる ρ_t の違いが明確でない。

一般のセメント安定処理ではセメントの添加量の増加につれて qu も増加するが、ある添加率以上では、強度の増加割合が小さくなるか、または、ほぼ一定となる。軽量安定処理では ACM の添加率の増加に比例してセメントのみならず気泡の混入量も増加するため、セメン

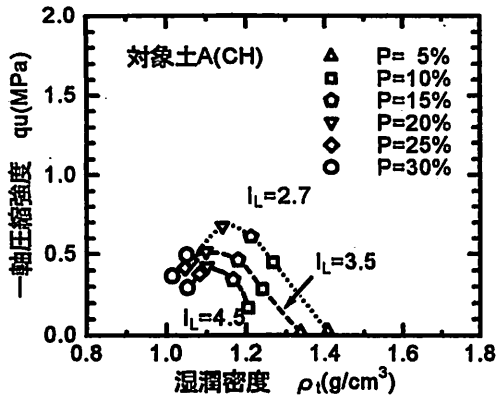


図-1.1 ρ_t と q_u の関係 (対象土 A)

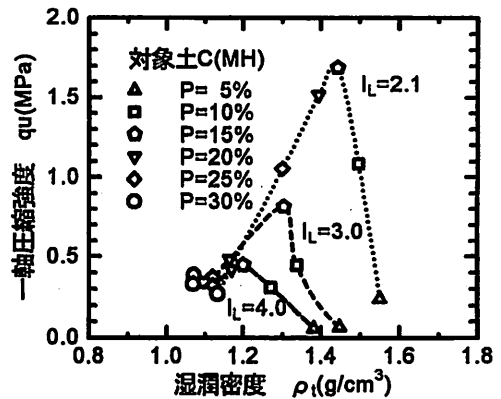


図-1.2 ρ_t と q_u の関係 (対象土 C)

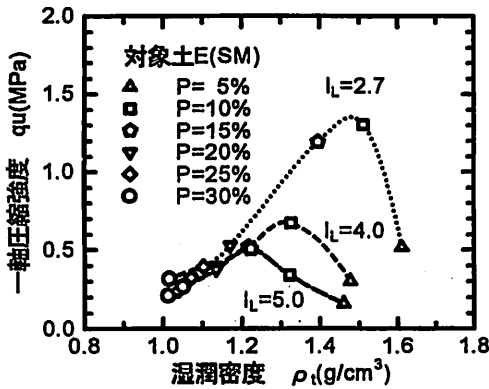


図-1.3 ρ_t と q_u の関係 (対象土 E)

トによる骨格の強度増加割合が低下した場合に処理土としての強度は小さくなる。今回の対象土については、一軸圧縮強度は、湿潤密度の変化に対して $P = 10 \sim 20$ (%) の範囲で極大 (この時、 $P = P_{qm}$ とおく) を示す凸状の曲線をなしており、含水比の変化に関係なく P_{qm} は対象土毎にほぼ一定であることがわかる。この P_{qm} は試料の物理特性との関連が深いと考えられるため、ここでは土の物理化学的性質を良く表わす液性限界を指標として P_{qm} との関係について図-2 に示す。この図からは対象土 E を除外して考えると、液性限界の増加に伴って P_{qm} が増加していることがわかる。これが一般的な傾向かどうかは今後更に検討する必要がある。また、 P_{qm} における最大の q_u の値は、先程述べたように含水比に依存するものであるが、単に同じ液性指数で比較しても q_u は異なる。そのため、その

他の要因についても考慮する必要がある。

安定処理による配合設計の目標範囲は目的によって異なるものであるが、密度と強度の両面から考えなくてはならない。処理後の密度については、軽量化の目標として現地盤の湿潤密度に対して 20% 程度の低減することを目標とすると、今回の対象土における処理後の ρ_t は、 $\rho_t = 1.1 \sim 1.4$ (g/cm^3) 程度が要求される。これは図-1.1~1.3 より $P \geq P_{qm}$ の添加率範囲で得られる。そのため、軽量安定処理においてはこの範囲の処理土の性質を把握することが重要であると考えられる。さらに、強度については処理後の利用を考えると、処理土の強度は最小限のトラフィカビリティーを確保するために、一軸圧縮強度で 200 kPa 程度は必要である。そのため $P \geq P_{qm}$ の添加率範囲で必要な強度を満足するかどうかを確認しておく必要もある。

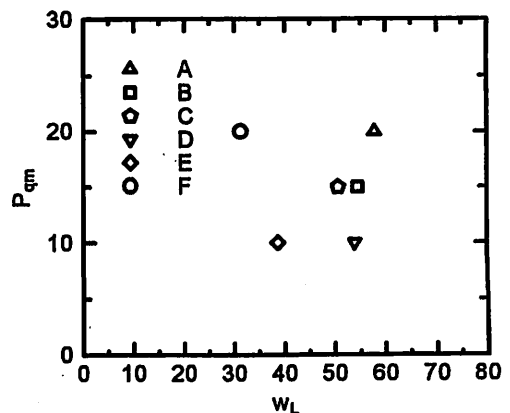


図-2 液性限界 (w_L) と P_{qm} の関係

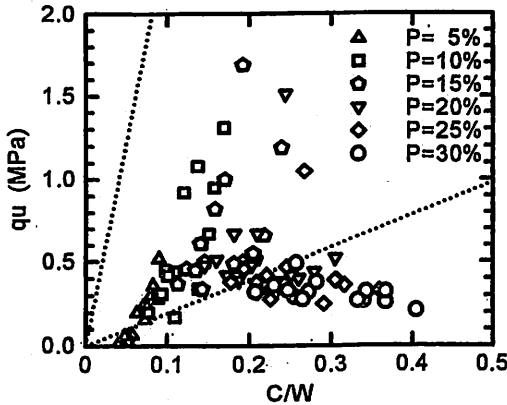


図-3 セメント水比 (C/W) と q_u の関係

4.2 セメント水比と一軸圧縮強度

一般のセメント安定処理では、セメント水比 (C/W) が高くなるほど、強度が増加することが知られている。添加したセメントの質量と処理後の含水比から算出した処理土の水の質量とから C/W を求め、一軸圧縮強度との関係を示したものを図-3 に示す。図中の点線は、有機物含有量や pH の影響を排除するため強熱減量 (Ig.loss) が 15% 以上や pH が 5 以下といった土を除外して行った一般のセメント安定処理において³⁾得られた結果から C/W と q_u の関係について求め、得られたデータの範囲を示したものである。対象土の固有の性質も影響するためばらつきは大きいが、C/W の増加に伴って q_u は増大する傾向を示している。しかし、軽量安定処理土の場合 $P < 20\%$ では一般のセ

メント安定処理土の範囲に属すが、 $P \geq 20\%$ では下側の点線以下の強度しか得られない。これは、気泡量の増加で処理土中の間隙が大きくなり、強度を C/W のみで関連づけることが困難であるためだと考えられる。

4.3 間隙比と一軸圧縮強度

これまで述べたように、軽量安定処理土は水、空気の影響を考慮しなければならない。しかし、 $P \geq 20\%$ では飽和度が約 70% 以下と低くなり、間隙水圧がほとんど発生しないと考えられることから、強度は骨格部分の体積に支配されると考えることも出来る。そのため強度を推定する指標として処理土の間隙比 (e_c) が挙げられる。対象土 A, C, E についての e_c と q_u の関係を図-4.1~4.3 に示す (ただし、図中の記号は各配合の実験データの平均値)。

これらの関係は、ACM の添加率に依存しているが、

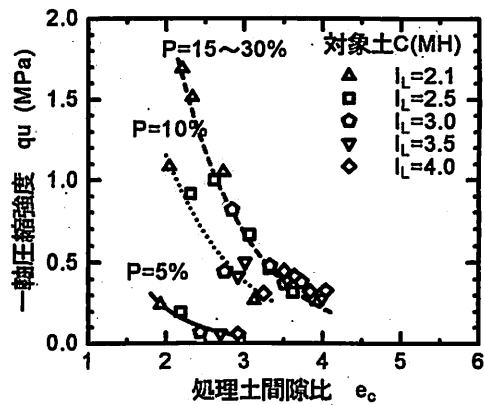


図-4.2 e_c と q_u の関係 (対象土 C)

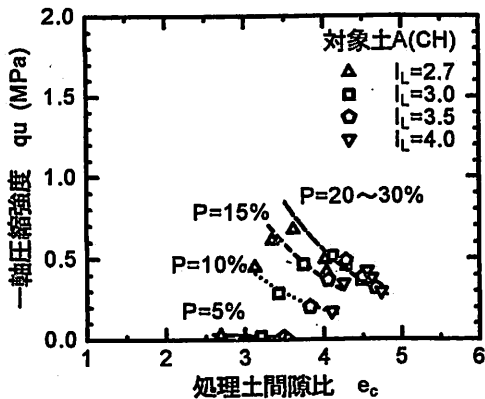


図-4.1 e_c と q_u の関係 (対象土 A)

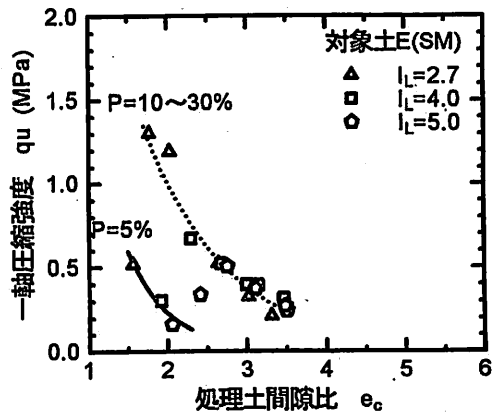


図-4.3 e_c と q_u の関係 (対象土 E)

間隙比の増加に伴い一軸圧縮強度が低下していることもわかる。また同じ土であれば液性指数が異なっても同じ傾向にあるので、三相体として考える必要はなく「間隙」のみで扱うことが可能だと考えられる。

セラミックス等の多孔材料においては、破壊強度の気孔率依存性が指摘されており、多くの実験が行われている。その結果多くの実験式が提案されているが、その中で「多孔体の強度は気孔率の増加とともに指数関数的に減少する」という仮定がある⁵⁾。この仮定は理論的な根拠は乏しいものの、指数式は適用範囲が非常に広く実験式としては重要な意味を持ち、また、これまでの研究からあらゆる種類の多孔体について成り立つとされている。この仮定を利用したものとして、山内⁶⁾は気泡セメント(FC)においても間隙比と一軸圧縮強度の間に同様の関係が成り立つとしている。

これらの仮定を軽量安定処理土についても導入してみる。ここでは、間隙比だけでなくセメント添加率の影響も受けるので、以下の式を回帰式として用いることとした。

$$qu(P) = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot ec(P)) \quad (1)$$

- 但し、 qu : 一軸圧縮強度 (Mpa),
- ec : 処理土の間隙比,
- α, β : 定数
- P : ACMの添加率 (%)

式(1)を確認するために P が等しい場合の ec と qu の関係について適用してみる。未処理土の含水比の違いにより、処理土の間隙比 (ec) は変化する。このような処理土に対して式(1)による回帰曲線を図-4.1~4.3中に示しているが、 P ごとにこれらの関係をうまく表わすことができる。

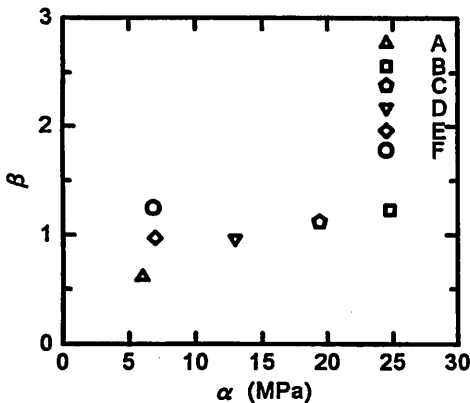


図-5 回帰式1による定数 α と β の関係

この中で $P \geq P_{qm}$ では回帰曲線は一つの曲線として表せる。いいかえれば、同じ間隙比で比較した場合 $P < P_{qm}$ では、 P の増加に伴い qu も増加するが、 $P \geq P_{qm}$ (ただし、 $P_{qm} = 10 \sim 20\%$) では qu は変化しない。このことから、 $P \geq P_{qm}$ から得られる曲線は、それぞれの処理土間隙比における一軸圧縮強度のとりうる最大値を表わすと考えられる。そこでこの曲線を $qu_{max}(e)$ と表すことにする。 $qu_{max}(e)$ が得られる P は 4.1 で述べた配合設計目標範囲を得るための ACM の添加率の範囲とほぼ同じであり、4.2 で議論した C/W と qu との関係における一般のセメント安定処理とは性質が異なる範囲である。

4.4 一軸圧縮強度の推定

軽量安定処理土としての利用範囲や C/W と qu から見た一般のセメント安定処理土との特性の違い、及び、処理土間隙比と一軸圧縮強度から見た $qu_{max}(e)$ を考えあわせると、軽量安定処理土の一軸圧縮強度を推定する上で $P \geq P_{qm}$ で処理したものに注目すればよいことがわかった。そこで、その範囲における一軸圧縮強度を推定する方法について考察する。式(1)の利用がかなり有効であるが、対象土毎に2つの定数 (α, β) を決定する必要がある。これらの定数の決定方法を簡略化することで配合試験を簡略化し、一軸圧縮強度を容易に推定できると思われる。

今回対象とした6種類すべての対象土に対する配合試験の結果より得られた α と β の関係を図-4に示す。定数 α と β は間隙比を介して関係が深いと思われるが、この図からは、「 α の増加に従い β も増加する (対象土 F を除外した場合)」と「 β は α にかかわらず一定である (対象土 A を除外した場合)」の2通りの

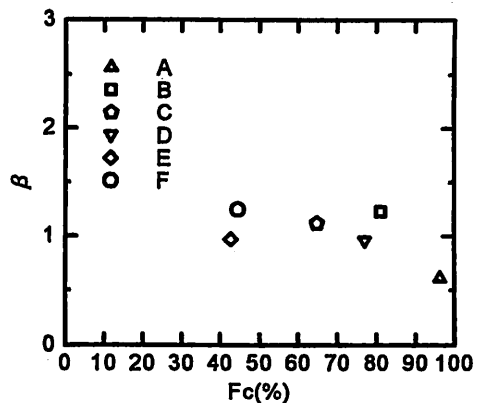
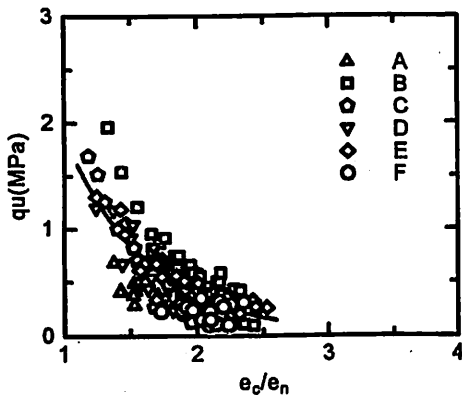
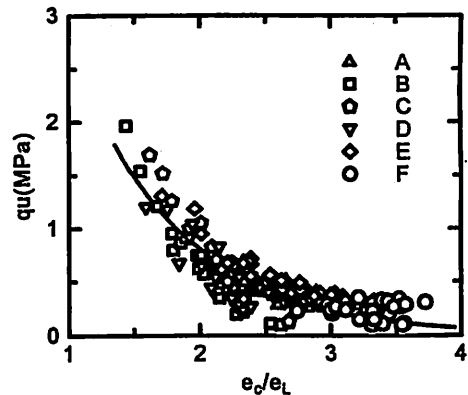


図-6 対象土の Fc と定数 β の関係

図-7.1 e_c/e_n と qu の関係図-7.2 e_c/e_L と qu の関係

見方が出来る。また、一般のセメント安定処理では対象土中の細粒分（シルト粒子以下）が処理土強度へ影響を与えとも言われるが、今回の結果による対象土の細粒分含有率（ F_c (%)）と β との関係では（図-5）対象土 A の値が若干小さいものの、 F_c の変化にかかわらず β の値はほぼ一定である。

処理土の間隙比（ e_c ）を、対象土処理前（ e ）に対する相対比（ $= e_c/e$ ）で表わす事で対象土の違いを無視できるかどうかを試みた。分母となる間隙比は出来るだけ対象土の特性を反映することが望ましいことから、採取時の間隙比（ e_n ）と液性限界時の間隙比（ e_L ）を用いることとした。用いる値はそれぞれ、 e_n は表-1 の値を、 e_L は対象土が液性限界の含水比での飽和状態として計算し求めた。これらと一軸圧縮強度との関係を図-7.1, 7.2 に示す。

$e_c/e_n \sim qu$ では若干ばらつきが大きく図-3 と同様、対象土 A, F が他のものと一致していない。ところが $e_c/e_L \sim qu$ ではすべての対象土に対して一つの曲線で回帰できる事がわかる。液性限界は埋立方法や埋立時間の経過に支配されない物理特性値であるため、この値を用いて一軸圧縮強度を推定することは有効であるといえる。このことから式(1)の回帰曲線は、以下の式に書きかえられる。

$$qu = \alpha \cdot \exp\left(-\beta \cdot \frac{e_c}{e_L}\right) \quad (2)$$

今回のデータを用いて式(2)を適用すると2つの定数はそれぞれ、 $\alpha = 9.41$, $\beta = 1.23$ が得られた。

5. ま と め

熊本港付近の浚渫土に対する、ACM を用いた軽量

安定処理から得られた一軸圧縮強度の特性は、以下のとおりである。

1. 軽量安定処理土として利用する ACM 添加率の範囲（ $P \geq P_{qm}$ ）では、一般のセメント安定処理土とは異なった一軸圧縮強度特性を持つ。
2. 軽量安定処理土の一軸圧縮強度は、間隙比の増大に伴い指数関数的に低下する。また、 $P \geq P_{qm}$ では一つの曲線で示される。この曲線は間隙比に対する最大の一軸圧縮強度線を表わす。
3. $P \geq P_{qm}$ では処理土の間隙比を対象土の液性限界時の間隙比で除したものと、 qu の関係を式(2)の曲線を用いて表わすことで、対象土に関係なく一つの曲線で一軸圧縮強度が推定できる。

一般にセメント改良による強度に影響する要因としては他に pH, 有機物含有量, 粘土鉱物の種類も考えられる。しかし、今回は対象土の採取地点がごく狭い範囲であり、また、極めて含水比が高いため、土の物理特性のうち粒度, 含水比, コンシステンシーに注目して配合試験の結果を整理した。特に間隙比の影響が大きいことがわかったが、この結果が他の対象土についても適用できるのかを今後検討することが必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル [第二版]、セメント協会、1994
- 2) 寺師昌明：地盤改良のニューフロンティア、土と基礎、Vol 42, No. 2, pp 2-6, 1994
- 3) 馬場崎亮一・寺師昌明・鈴木健夫・前川淳・川村政史・深沢栄造：安定処理土の強度に及ぼす影響因子、セ

- ント系安定処理土に関するシンポジウム, pp. 20-41, 1996
- 4) (社) 日本道路協会:舗装試験方法便覧, 丸善, pp. 199-202, 1995
- 5) 近藤連一:多孔材料, 技報堂出版, pp. 169-174, 1978
- 6) 山内豊聡, 浜田英治:軽量盛土材としての気泡セメントの力学的特性と降伏基準に関する一考察, 土木学会論文集, 第406号/III-11, pp. 283-290, 1989