

博士論文

モルタル充填継手の適用範囲拡大に向けた継手構造の
コンパクト化に関する研究

2022年3月

村上 力也

Rikiya MURAKAMI

熊本大学大学院自然科学教育部

目次

学位論文要旨	i
Summary of the Doctoral Dissertation	iii
第1章 序論	1
1.1 本研究の目的	2
1.2 社会的背景	3
1.3 プレキャスト部材の接合方法の現状	7
1.4 本論文の構成	10
1.5 第1章の参考文献	12
第2章 既往の研究	13
2.1 グラウト充填継手のスリーブ構造に関する研究	14
2.2 引張鋼材の定着に膨張材を用いる技術についての研究	16
2.3 スリーブ背面にせん断補強筋を集約した工法に関する研究	17
2.4 まとめ	18
2.5 第2章の参考文献	20
第3章 開発した継手工法の特徴	23
3.1 工法の概要	24
3.2 施工手順	27
3.3 適用範囲	29
3.3.1 対象構造物	29
3.3.2 現段階における適用範囲	29
3.4 留意点	30
第4章 スリーブ構造のコンパクト化に向けた実験的検討	31
4.1 概要	32
4.2 スリーブの片側一端と鉄筋の接続方法についての検討	33
4.2.1 接続方法の案	33
4.2.2 ネジ切り接合継手の検討	34
4.2.3 摩擦圧接継手の検討	38
4.3 スリーブ材質の検討	40
4.3.1 検討事項	40
4.3.2 解析モデル	40
4.3.3 解析結果および考察	41
4.4 スリーブ内部形状の検討	43
4.4.1 形状案	43
4.4.2 供試体	45
4.4.3 実験結果および考察	46
4.4.4 スリーブの変形挙動	47

4.5	充填材の種別の検討	50
4.5.1	種別	50
4.5.2	実験結果および考察	50
4.6	充填材強度の検討	51
4.6.1	局部応力の評価	51
4.6.2	高強度充填材の検討	51
4.6.3	実験結果及び考察	52
4.7	挿入側鉄筋の先端形状	54
4.7.1	ヘッド加工方法	54
4.7.2	供試体	55
4.7.3	実験結果および考察	55
4.8	高膨張型充填材	57
4.8.1	供試体	57
4.8.2	実験結果および考察	59
4.9	太径鉄筋への適用	61
4.9.1	供試体	61
4.9.2	実験結果および考察	63
4.10	埋込み長3.5Dで母材鉄筋破断を達成した組合せ	65
4.11	まとめ	65
4.12	第4章の参考文献	67
第5章 コンパクト化したモルタル充填継手を有するRCはりの実験的検討		68
5.1	概要	69
5.2	供試体概要	69
5.2.1	継手構造	69
5.2.2	RCはり供試体概要	69
5.2.3	供試体の製作	71
5.3	実験方法	73
5.4	実験結果および考察	75
5.4.1	荷重変位関係	75
5.4.2	破壊状況	78
5.4.3	スリーブ周辺のひずみ	80
5.5	まとめ	82
5.6	第5章の参考文献	83
第6章 継手構造の実用性向上に向けた検討		84
6.1	概要	85
6.2	継手構造の簡素化	86
6.2.1	継手の概要および検討ケース	86
6.2.2	実験結果および考察	87
6.3	PC橋への適用検証	90
6.3.1	プレキャストセグメントを使用したPC橋について	90

6.3.2	検証方法	91
6.3.3	試設計	92
6.4	PCIはりの曲げ荷重試験	100
6.4.1	実験の概要	100
6.4.2	供試体の設計	101
6.4.3	供試体の概要	104
6.4.4	供試体の製作	107
6.4.5	実験方法	109
6.4.6	実験結果および考察	112
6.5	まとめ	125
6.6	第6章の参考文献	126
第7章	結論	127
7.1	本研究のまとめ	128
7.2	今後の課題と展望	131
	本論文に関する著者の発表論文	132
	謝辞	133

学位論文の要旨

モルタル充填継手の適用範囲拡大に向けた継手構造のコンパクト化に関する研究

村上 力也

我が国の建設業就業者数は、平成9年度の685万人をピークに減少しており、平成31年度ではおよそ500万人となっている。さらに、建設業就業者の高齢化が他産業と比較しても顕著であり、近い将来大量離職に伴う建設技能者数のさらなる現象が見込まれている。

一方で、建設投資額は平成4年度の約84兆円をピークに、建設業就業者数の減少とともに平成22年度では約41兆円まで減少したが、その後は増加に転じて平成31年度には約66兆円まで回復している。

このように、建設業就業者数が減少する一方で公共工事等の需要は高まっている社会情勢を受け、今後持続的な社会を維持していくためには、労働者一人当たりの生産性を向上させることが喫緊の課題となっている。

そこで本研究では、建設現場での生産性を向上させる技術として期待が寄せられるプレキャスト部材の活用に着目し、プレキャスト部材の鉄筋同士を接続する鉄筋継手構造に焦点を当てた。プレキャスト部材の鉄筋継手には、一般にモルタル充填継手が適用されるが、市場に流通するモルタル充填継手のスリーブは、必要な鉄筋埋込み長を確保する性質上、スリーブ長が比較的大きいのが特徴である。このため、スリーブ位置を避けてせん断補強鉄筋を配置する際、本来配置すべき配筋間隔で配置できないケースも多く、スリーブより後方に集約して配筋する工法などによる特別な工夫が必要とされる。

本研究では、モルタル充填継手の継手構造の一層の合理化を図り、スリーブをよりコンパクトなものとするために、継手構造を構成する各要素（スリーブ形状、挿入側鉄筋先端加工、充填材種類）に着目し、一軸引張試験によるケーススタディを実施し、RCはり供試体による曲げ載荷実験を行った。また、将来的な実用性の向上を視野に入れ、PCセグメント部材への適用を想定した試設計を行い、試設計に準じたPCはり供試体による曲げ載荷試験により、適用性を検証した。

本論文は全7章で構成され、各章の内容は以下のとおりである。

第1章では、社会的背景として、生産性向上などに関する国土交通省の取り組みについて紹介するとともに、そのための有効な手段の一つとされるプレキャスト部材の活用およびその接合方法の課題について述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、本研究で着目したモルタル充填継手の研究内容の新規性や有用性を評価するため、関連する既往の論文についてレビューした。

第3章では、本研究で開発したモルタル充填継手の継手部構造について、形状寸法などを概説するとともに、その適用範囲や工法の施工手順を留意点とともに示した。

第4章では、スリーブ内の鉄筋の埋込み長を短くし、スリーブ長の短縮を図るための要素実験として、一軸引張試験によるケーススタディを行った結果を示した。

従来、スリーブの両側から鉄筋を挿入してそれぞれの鉄筋で埋込み長を確保する継手構造が一般的であるが、スリーブ長を短縮するため、片側の鉄筋とスリーブの一端を摩擦圧接により接合することで片側の鉄筋の埋込み長分を低減させた継手構造に関する一軸引張試験および有限要素解析を行い、必要な引張耐荷力を有することを確認した。

上記の継手構造をベースに、スリーブの内部形状や挿入側鉄筋先端部への加工、充填材種類に関するケーススタディを一軸引張試験により行い、鉄筋の埋込み長を鉄筋径の3.5倍とした場合でも母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を有する継手構成を明らかにした。

第5章では、鉄筋径の3.5倍の埋込み長で母材鉄筋の破断を達成した継手構造について、RCはりの静的曲げ載荷試験を実施し、曲げ引張を受ける状況下での挙動について調べた。その結果、母材鉄筋が降伏に至るまでスリーブ鉄筋の拔出し等は確認されず、本継手構造がRCはりの曲げ挙動に対して十分な耐荷力を有することがわかった。

第6章では、第4章、第5章で示した継手構造の実用性向上のため、継手部材の低廉化を図るべく継手構造の簡素化について実験的検討を行った。第4章で実施した充填材種類をパラメータとしたケーススタディのうち、高膨張型の充填材を用いたケースにおいて、引張耐荷力が大きく向上する効果が確認できたため、高膨張型の充填材を使用したうえで、スリーブ内部加工および挿入側鉄筋の先端加工のないシンプルなスリーブ構造とした供試体で一軸引張試験を実施した。その結果、短い埋込み長(4.0D)で母材破断を達成し、継手構造を簡素化できることがわかった。

また、モルタル充填継手の実構造物への適用範囲拡大を検証すべく、プレキャストセグメントをプレストレスで一体化するPC橋を対象に試設計を行った。従来、各セグメントはPC鋼材のみで一体化する構造が一般的であるが、引張鉄筋も鉄筋継手により連続させる条件を仮定した試設計により、設計上PC鋼材本数を低減できる可能性があることを示した。さらに、試設計したPC橋梁を模してスケール調整したPCはり供試体について曲げ載荷試験を行い、十分な耐力を有することを示した。

第7章では、本論文を総括し、得られた知見とともに今後の課題および展望を述べた。

Summary of the Doctoral Dissertation

Compactification of joint structures to expand the applicability of mortar-filled joints

MURAKAMI Rikiya

The number of construction workers in Japan peaked at 6.85 million in 1997 and then decreased to approximately 5 million in 2019. The aging problem of this industry is particularly remarkable and a mass turnover is expected in the near future.

Moreover, the amount of construction investment peaked at approximately 84 trillion yen in 1992 and decreased to approximately 41 trillion yen in 2010, corresponding to the decrease in the number of construction workers. However, it has since started to recover, to nearly 66 trillion yen in 2019.

Given the decreased number of construction workers and the increased demand for public works, improving employee productivity is a key task for maintaining a sustainable society.

Therefore, there are two major objectives of this study: one is the utilization of precast members, which are expected to improve productivity on construction sites, and the other is reinforcement of the bar joint structures that connect the reinforcing bars of the precast members.

Mortar-filled joints are generally applied to the rebar joints of precast members, but the sleeves of the mortar-filled joints available on the market are characterized by a relatively large sleeve length, which is in turn dictated by the required length of the embedding bar.

In addition, when shear reinforcing bars are arranged to avoid the sleeve position, there are many cases where they cannot be laid using the original reinforcement spacing. Thus, a special countermeasure is required, such as a method of consolidating and arranging the reinforcing bars, which is are considered to be more important than the sleeve.

In order to achieve a better understanding of the joint structure of the mortar-filled joint and to make the sleeve more compact, this research focused on three factors: sleeve shape, insertion-side reinforcing-bar tip processing, and filler type, which constitute the joint structure. A case study was conducted incorporating a uniaxial tensile test and a bending load experiment was carried out using a reinforced-concrete (RC) beam specimen.

A trial design was also developed in order to identify any practical improvements that could be made, assuming application to precast concrete (PC) segment members. Its applicability was verified using a bending load test using a PC beam specimen in accordance with the trial design mentioned above.

This paper consists of seven sections, and the contents of each section are as follows.

Section 1 introduces the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism's efforts to improve productivity in Japan as background. Additionally, the problems associated with the utilization of precast members and their joining methods are discussed.

Section 2 shows the results of a review of previous papers in order to evaluate the level of innovation and serviceability of the mortar-filled joints examined in this study.

In Section 3, the shape and dimensions of the joint structure of the developed mortar-filled joint are outlined. The scope of application and the construction procedure are also shown, with points of interest highlighted.

Section 4 presents the results of a case study incorporating a uniaxial tensile test in an experiment on shortening the embedding length of the reinforcing bar and the sleeve length.

Up to now, the use of a joint structure in which reinforcing bars are inserted from both sides of the sleeve and the embedded length is secured by each reinforcing bar has been relatively common.

For the purpose of shortening the sleeve length, a uniaxial tensile test and finite-element analysis were conducted on the joint structure. In addition, in order to reduce the embedded length of the reinforcing bar on one side, the reinforcement bar and one end of the sleeve were joined by friction welding. The required tensile load capacity was confirmed as well.

Based on the above joint structure, a case study on the internal shape of the sleeve, the processing of the reinforcing bar on the insertion side, and the type of filler was conducted based on a uniaxial tensile test. The joint configuration was confirmed to have a tensile load bearing capacity equal to or higher than that of the base metal reinforcing bar, even when the embedded length of the reinforcing bar is 3.5 times its diameter.

In Chapter 5, a static bending load test of RC beams for a joint structure is presented. The results show that a fracture occurred in the base metal reinforcing bar that had an embedded length 3.5 times its diameter. Its behavior under bending tension is also investigated.

As a result, it was not confirmed that the sleeve reinforcing bar was pulled out until the base metal reinforcing bar yielded. Therefore, it was found that this joint structure had sufficient yield strength against the bending behavior of the RC beam.

To improve the practicality of the joint structure shown in Sections 4 and 5, Section 6 presents an experimental study on simplifying the joint structure in order to reduce the cost of the joint members. From the case studies using the filler type as a parameter carried out in Section 4, a great improvement in the tensile load-bearing capacity was confirmed in the case of using the high expansion filler.

A uniaxial tensile test was carried out for that case with a specimen having a simple sleeve structure without internal processing of the sleeve but with processing of the tip of the reinforcing bar on the insertion side. It was found that the joint structure was simplified while retaining a short embedding length (4.0 D).

In addition, to verify the applicability of the expanded filler to actual structures, a trial design was conducted for a PC bridge that integrated precast segments with the prestressed method.

Structures in which each segment is integrated using only PC cables have been a popular approach, but it is possible to reduce the number of PC cables by using a trial design that assumes that the tension reinforcing bar is continuous with the reinforcing bar joint.

Furthermore, a bending load test was performed on a PC beam specimen that was scale-adjusted to imitate a trial-designed PC bridge. The results showed that it demonstrated a sufficient yield strength.

Section 7 summarizes this paper and describes the findings, future challenges, and prospects for further research.

第 1 章

序論

1.1 本研究の目的

本研究は、後述の1.2で述べる社会的背景を背に、将来的にプレキャスト部材の活用範囲が拡大する可能性を見据え、プレキャスト部材同士の鉄筋継手を接続するためのモルタル充填継手におけるスリーブのコンパクト化に焦点を当てた。

モルタル充填継手は、後打ちコンクリートが不要で、太径鉄筋への良好な適用性ならびに鉄筋位置の誤差などへの対応が可能であることから、プレキャスト部材同士の鉄筋接合に適する工法であることが知られている。わが国では1970年前半から研究が進められ、日本で初めて実用化されたNMBスプライススリーブを筆頭に多くの研究が進められてきた（畑野ら [1973]）。

第2章 既往の研究に示すように、モルタル充填継手のスリーブ内に挿入する鉄筋の埋込み長は鉄筋径の7~10倍程度のもが多く、スリーブ両側から挿入される鉄筋のそれぞれで定着長が必要となるため、スリーブの大きさは少なくとも鉄筋埋め込み長の2倍以上は必要となる。このため、既存のモルタル充填継手のスリーブ長は長くなり、せん断補強筋を標準的な配置間隔で配筋すると、スリーブ範囲にせん断補強筋が配置される形となる。この場合、スリーブ径は鉄筋径よりも大きいため、スリーブ位置のせん断補強筋のかぶり厚は標準部のかぶり厚より小さくなってしまう。このような課題に対して、現状ではせん断補強筋をスリーブ範囲から背面に避けて集約して配筋する手法や、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用するなどのような特殊な対応が必要となっている。

上記のような課題に対応し、小規模な部材にも適用範囲を拡大できるよう、モルタル充填継手のスリーブ長をより短縮できる継手構造の確立を目的とした。

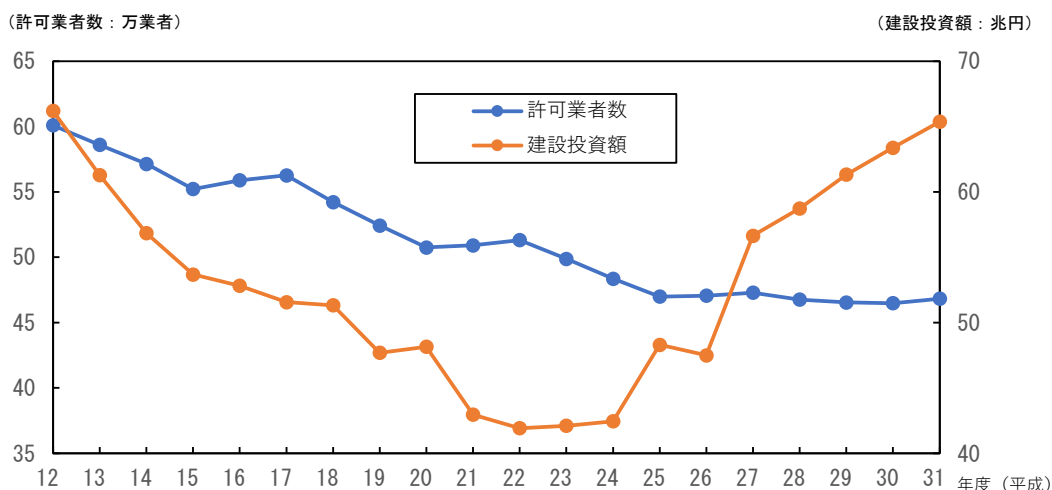
1.2 社会的背景

(1) 建設業就業者数の推移

我が国の建設許可業者数は、平成11年度の約60万業者をピークに減少し、**図1.2.1**をみると、その後平成25年度あたりまで減少を続け、それ以降は概ね横ばいで推移し、平成31年度には約47万業者になり、ピーク時に対して約8割となっている。また、建設業就業者数は、平成9年度の685万人がピークであり、**図1.2.2**に示す建設業就業者数の推移によると、その数は建設業者数と同じ傾向で推移していることがわかる。平成31年度では約500万人であり、ピーク時からおよそ200万人弱減少したことになる。そのうち、建設技能者に関しては、平成31年度で約320万人となっている。

一方で、建設投資額は平成21年度までは、建設許可業者数と同様に減少傾向であったが、平成24年度以降は急激な回復傾向を見せ、平成31年度の建設投資額は65.4兆円と平成12年度の66.2兆円に匹敵する額まで回復している。

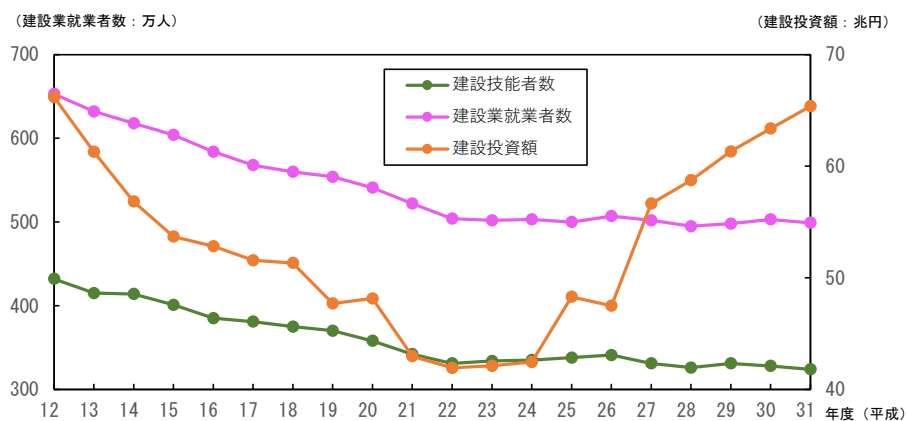
これらから分かるように、建設業者数や労働者の数はピーク時から減少している一方で、建設投資額はピーク時と同等となっているため、労働生産性を向上させることが非常に重要な課題となっていることがわかる。



資料出典：国土交通省「建設業許可業者数調査」「建設投資見通し」より作成

図1.2.1 建設許可業者数の推移

(国土交通省 [2021a], 国土交通省 [2021b] より作成)



資料出典：総務省「労働力調査」、国土交通省「建設投資見通し」より作成

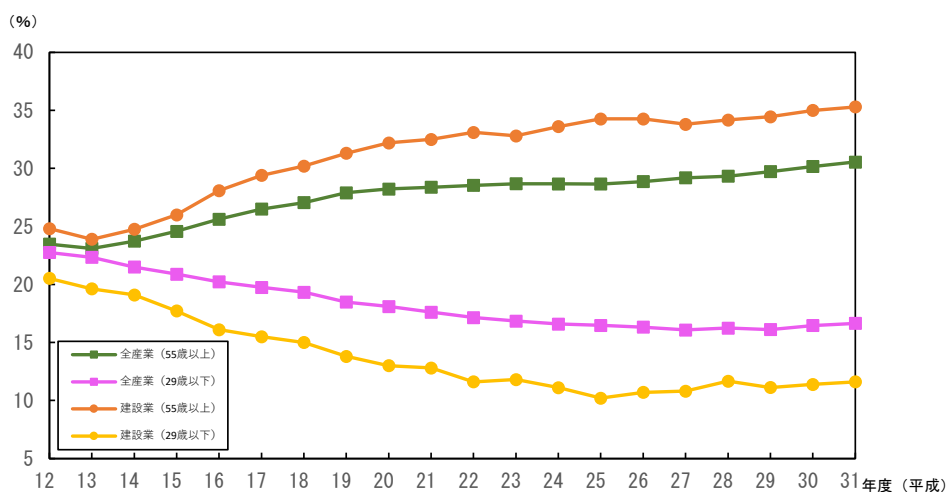
図 1.2.2 建設業就業者数の推移

(総務省 [2021], 国土交通省 [2021b] より作成)

(2) 高齢者の増加

我が国の人口は、2010年の1億2806万人をピークに人口減少が始まり、高齢化が加速している。2030年まで生産年齢人口は毎年1%近く減少していくと見込まれている (i-Construction 委員会 [2016])。

ここで、建設業就業者の高齢化について着目すると、図 1.2.3 のとおり、平成 31 年度時点で建設業就業者は 55 歳以上が約 35%、29 歳以下が約 12%と他産業と比べて高齢化が著しいことがわかる。図 1.2.2 では、平成 31 年度から遡って約 10 年間は建設技能者数が横ばいであることを見て取れるが、このうち 55 歳以上の高齢者の割合が多いということは、近い将来、大量離職による建設技能者数の大幅な減少が待ち受けていることを示唆する。



資料出典：総務省「労働力調査」より作成

図 1.2.3 建設業就業者数の高齢化の進行

(総務省 [2021] より作成)

(3) 国土交通省の取組み

前述のとおり、建設業就業者数の減少は確実視されていることから、今後持続可能な社会を維持していくためには、労働生産性を向上させることが重要である。高度経済成長期の実質的なGDP成長率は、9.6%（1956年～1970年間の年平均）とされており、一方で、同時期の労働者数の伸び率は年平均1.4%程度であることから、高度経済成長期を支えた土台は労働者の生産性向上であったものと考えることができ、そのような経緯からも「生産性向上」がこれからの社会の成長のキーワードとなっている。

そのような中、2018年当時の石井国土交通大臣は、2018年を「生産性革命元年」と位置づけ、「国土交通省生産性革命本部」を設置し、調査や設計、施工、維持管理などの建設生産プロセス全般にわたり、抜本的な生産性向上を目指す施策の一つとして、「i-Construction」と銘打った取組みを立ち上げた。

i-Constructionは、3つの視点のトップランナー施策として、「ICTの全面的な活用（ICT土工）」、「全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）」、「施工時期の平準化」を設定し、それぞれについて取り組むべき事項を整理している（図1.2.4）。

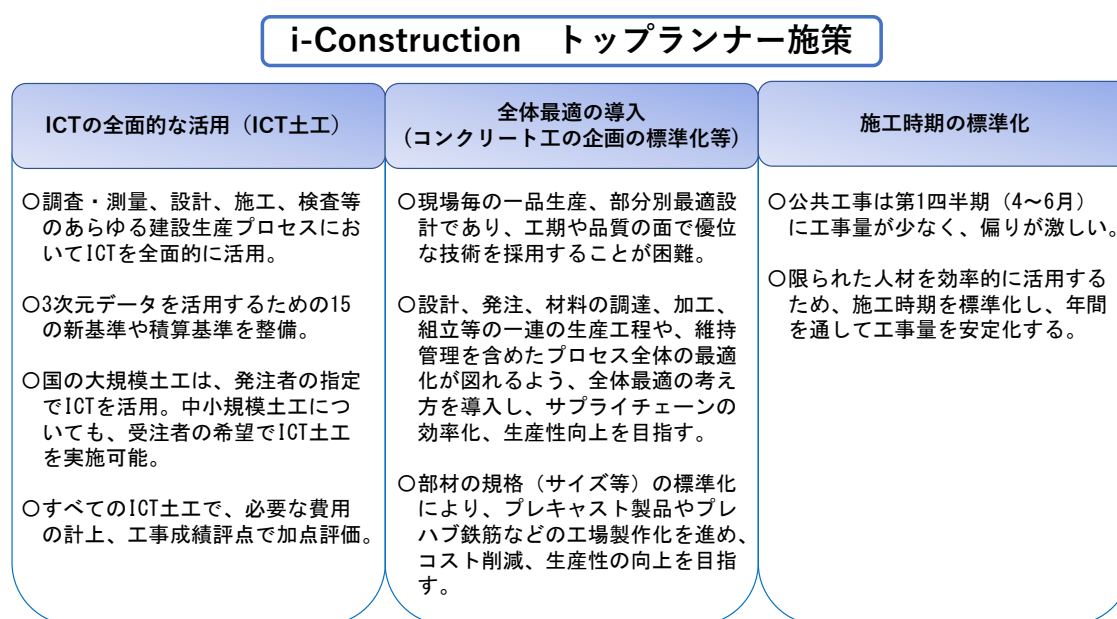


図1.2.4 i-Construction トップランナー施策

（i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会 [2017] より作成）

労働力不足は、現代の建設業界にとって危機的な課題である一方で、業界全体のイノベーションを喚起し、建設現場を変革する機会でもあると考えられている。このような観点からも、建設現場の生産性向上のためには、i-Constructionの取組みを広く浸透させることにより、建設現場の生産性革命を実現させていくことが重要視されている（i-Construction委員会 [2016a]）。

i-Construction を推進させていくため、i-Construction 委員会が設立され、全4回の委員会が開催されており、委員会報告書によると、プレキャスト部材の活用などが生産性向上に対する有効な手段の一つであるとされている。図1.2.5に示す「全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）」では、本研究の着眼点にもなっている鉄筋継手方法の改善が直ちに取り組むべき事項として記されている（i-Construction 委員会 [2016b]）。

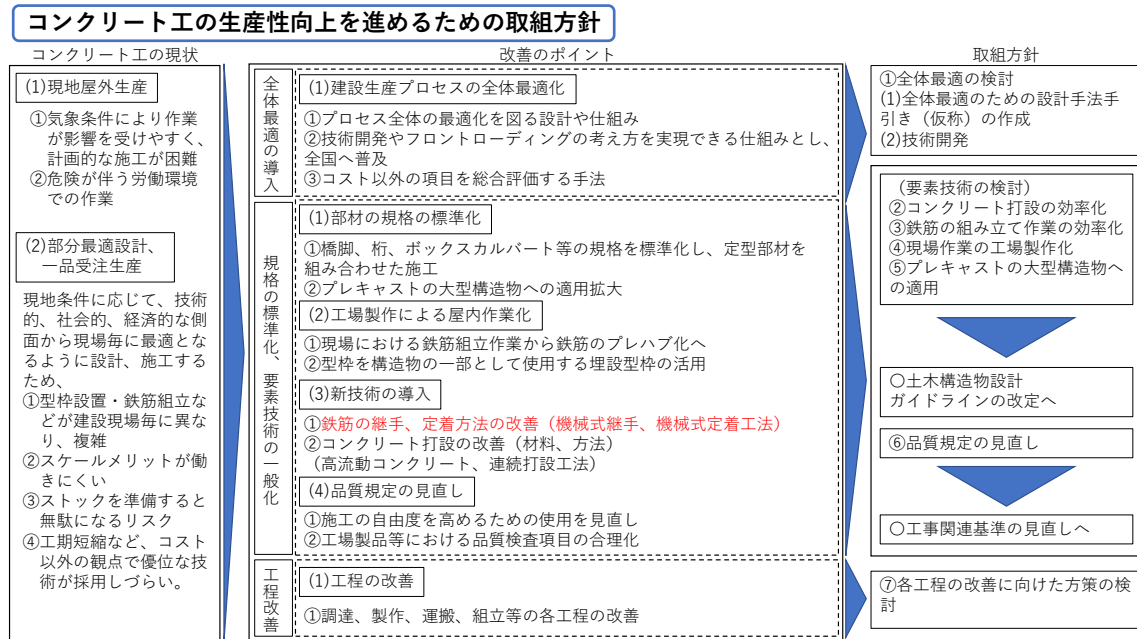


図 1.2.5 i-Construction 報告書概要資料
(i-Construction 委員会 [2016b] より作成)

1.3 プレキャスト部材の接合方法の現状

(1) プレキャスト部材の特徴

前述の社会的背景で述べたように、国土交通省は i-Construction の取組みを通じて、「全体最適の導入」の一環として、現場作業の省力化・省人化に期待できるプレキャスト部材を用いた工法にも着目している。プレキャスト部材は、工場などで部材を事前に製作するため、天候による影響を受けにくい特徴があり、前もって部材を製作するため、施工現場では鉄筋組立作業や型枠組立作業、コンクリート打設作業などが大幅に削減できるため、労働生産性を大きく向上できる可能性がある。

プレキャスト部材を用いて構造物を構築する場合、運搬制限や現地の施工条件などから、部材を分割する必要性が生じる。この際、プレキャスト部材同士の接合部が必ず発生することになり、その接合部には鉄筋コンクリート構造の場合、鉄筋継手による鉄筋の接合が必要となる。

(2) プレキャスト部材の鉄筋継手

鉄筋コンクリート部材をプレキャスト化し、部材同士を接合する際の鉄筋を接合させる工法としては、一般に機械式継手工法が用いられる。鉄筋の継手工法は、**図 1.3.1** に示すように大きく 6 つに分類され、プレキャスト部材同士の接合には一般的にモルタル充填継手が用いられる（道路プレキャストコンクリート工技術委員会 [2019]）。モルタル充填継手は、**図 1.3.2** に示すような施工手順が標準的な施工となり、スリーブを設置した側のプレキャスト部材に鉄筋を突出させた側のプレキャスト部材を差し込む形で組立て、その後、スリーブ内および接合遊間部にグラウトを注入して一体化させる。プレキャスト部材同士の鉄筋を接合させる場合、お互いの鉄筋がそれぞれ固定された状態になるため、鉄筋を回転させたりする工法や、高い精度が必要なカップラ接続は適用が困難であることから、このようなモルタル充填継手が適した工法となる。

モルタル充填継手を適用する際、スリーブ部は鉄筋よりも太径になるため、所定のかぶり厚を確保するため、せん断補強筋はスリーブ部を避けて配置するのが一般的である。ここで、現在流通しているモルタル充填継手はスリーブ長が比較的長いため、せん断補強筋を配置する際は、**図 1.3.3** のようにスリーブ部背面に集約して配置する方法やエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いてかぶり内に配置する方法などのように配置の工夫が必要となる。

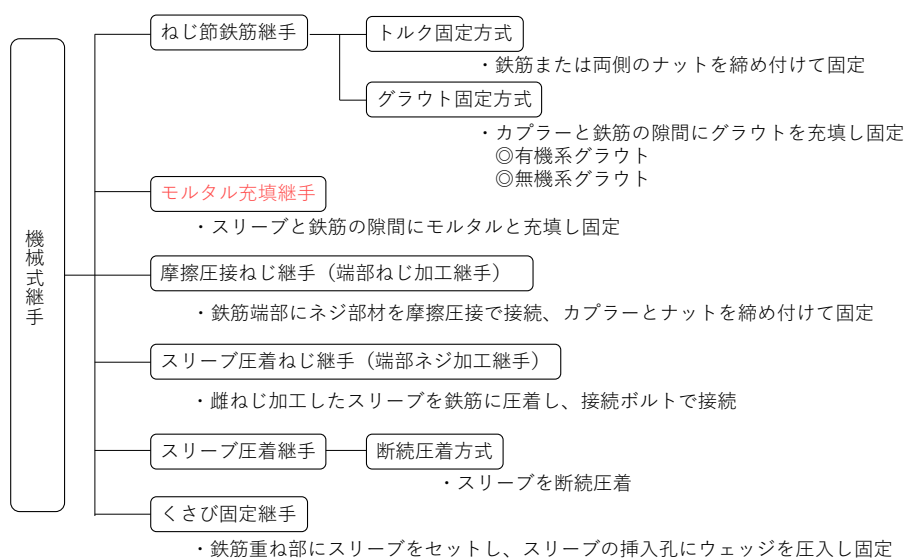


図 1.3.1 機械式継手の分類 (土木学会 [2020] より作成)

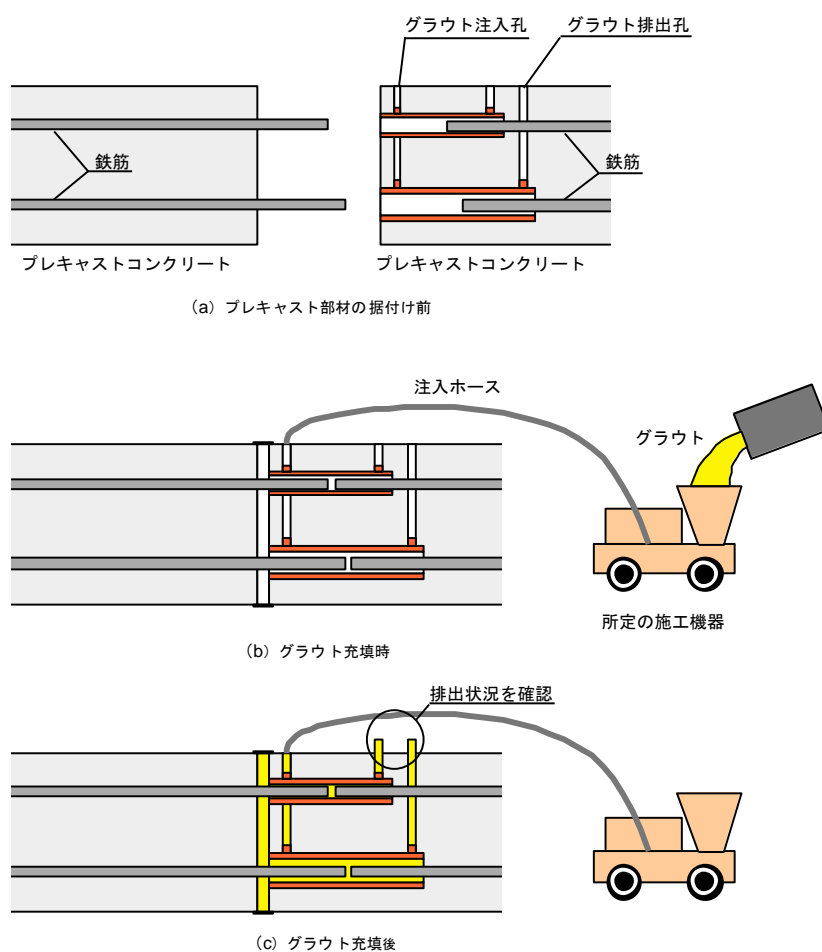
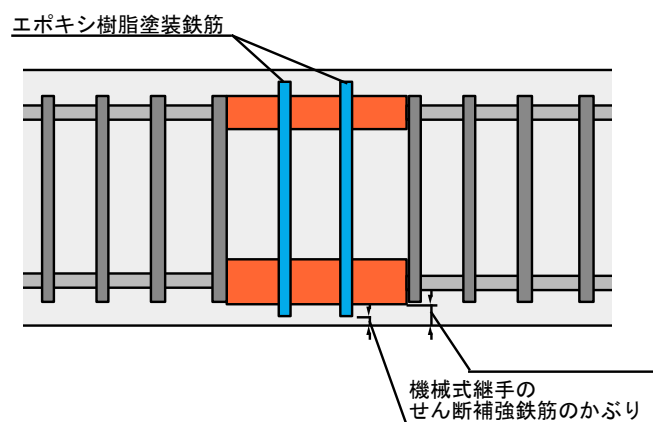
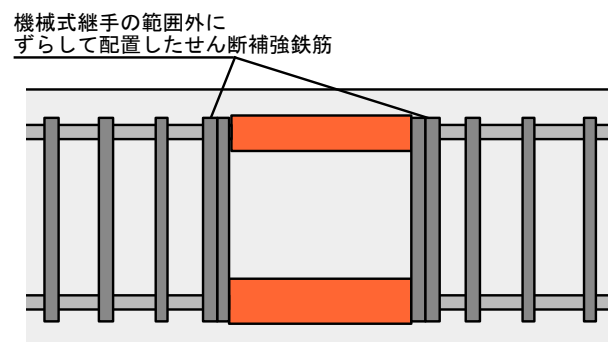


図 1.3.2 プレキャスト部材同士の接合の施工手順の例
(道路プレキャストコンクリート工技術委員会 [2019] より作成)



(a) 機械式継手にせん断補強鉄筋を配置した場合の例



(b) せん断補強鉄筋を機械式継手の範囲外にずらして配置した場合の例

図 1.3.3 スリーブ周りのせん断補強筋の配置例
(道路プレキャストコンクリート工技術委員会 [2019] より作成)

1.4 本論文の構成

本論文は、序章を含め計7章から構成されている。各省の概略を以下に示す。

第1章 序論

建設技能労働者の減少などの問題を背景に、生産性向上に関する国土交通省の取り組みについて紹介するとともに、そのための有効な手段の一つとされるプレキャスト部材の活用およびその接合方法の課題について述べた。そのうえで、本研究の目的を明らかにし、本論文の構成および各章の概要を示した。

第2章 既往の研究

本研究で着目したモルタル充填継手の研究内容の新規性や有用性を評価するため、関連する既往の論文についてレビューした。

第3章 開発した継手構造の特徴

本研究で開発したモルタル充填継手の継手部構造について、形状寸法などを概説するとともに、その適用範囲や工法の施工手順を留意点とともに示した。

第4章 スリーブ構造のコンパクト化に向けた実験的検討

スリーブ内の鉄筋の埋込み長を短くし、スリーブ長の短縮化を図るための要素実験として、SD345のD13鉄筋を対象に一軸引張試験を実施した。スリーブ内の鉄筋の埋込み長は、 $3.5 \times$ 鉄筋径（以下、 $3.5D$ ）を目標とした。

スリーブ長を最小化するため、スリーブの一端と鉄筋を摩擦圧接して接合したものをメス側のスリーブ構造とし、スリーブ内に充填材を充填した後に挿入する鉄筋をオス側の挿入側鉄筋とする構造を基本とした。

スリーブ内の埋込み長を短縮するための検討として、引張力に耐えうる適切なスリーブの材質について検討を行うとともに、以下の点に着目したケーススタディを実施した。

- ・スリーブの内部形状についてのケーススタディ
- ・挿入側鉄筋の加工に関するケーススタディ
- ・充填材種類に関するケーススタディ

第5章 コンパクト化したモルタル充填継手を有するRCはりの実験的検討

要素実験にて $3.5D$ の埋込み長で母材鉄筋の破断を達成した継手構造について、曲げ引張を受ける状況下での挙動を確認するため、RCはりの静的曲げ載荷試験を実施した。曲げ試験の供試体は、小規模な部材を想定し、 $300 \times 250 \times 2000\text{mm}$ とし、継手がなく鉄筋が連続するプレーン供試体と、 $300 \times 250 \times 1000\text{mm}$ のセグメント供試体同士の鉄筋を $3.5D$ の埋込み長で母材鉄筋の破断を達成した継手構造で接続した供試体の2種類を製作した。

第6章 継手構造の実用性向上に向けた検討

第4章、第5章で述べた鉄筋継手構造において、3.5Dの埋込み長で鉄筋の母材破断を達成できたものの、スリーブ内部の先端にすぼみを設ける加工が必要であり、また、挿入側鉄筋についても先端にヘッド加工を設ける必要があり、実用上コストが抑えにくい構造となる問題があった。このため、埋込み長のコンパクト性を維持しつつ、継手構造を簡素化するための検討を実施した。

要素実験で実施した充填材種類をパラメータとしたケーススタディのうち、高膨張型の充填材を用いたケースにおいて、引張耐荷力が大きく向上する効果が確認できたため、高膨張型の充填材を使用したうえで、スリーブ内部加工および挿入側鉄筋の先端加工のないシンプルなスリーブ構造とした供試体で一軸引張試験を実施した。埋込み長は1.0Dずつ刻みで増加させ、最大10Dまで延長した埋込み長の供試体について確認を行った。

また、モルタル充填継手の適用範囲を拡大するための検証として、プレキャストセグメントをプレストレスで一体化するPC橋を対象に試設計を行い、実橋梁を模してスケール調整したPCはり供試体について、曲げ載荷試験を行った。PC橋のセグメントは鉄筋を連続させず、プレストレスのみで一体化させる構造が標準であり、セグメント同士の継ぎ目は鉄筋が連続しておらず、弱点となりやすいため、設計上継目部の要求性能が高く、PC鋼材本数は「継ぎ目部の設計」で決まりやすい特徴がある。そこで、鉄筋を連続化させることで継ぎ目部の要求性能を抑え、PC鋼材本数を低減できるかどうか検討を行った。

第7章 結論

本論文を総括し、得られた知見とともに今後の課題および展望について述べた。

1.5 第1章の参考文献

- 国土交通省ウェブサイト：i-Construction 委員会報告書，
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>，2016a.（閲覧日：2022年1月20日）
- 国土交通省ウェブサイト：i-Construction 委員会報告書概要資料，
<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>，2016b.（閲覧日：2022年1月20日）
- 国土交通省ウェブサイト：i-Construction 推進コンソーシアム企画委員会資料，
https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000033.html，2017.（閲覧日：2022年1月20日）
- 国土交通省ウェブサイト：建設業許可業者数調査結果，
https://www.mlit.go.jp/report/press/tochi_fudousan_kensetsugyo13_hh_000001_00044.html，
2021a.（閲覧日：2022年1月20日）
- 国土交通省ウェブサイト：建設投資見通し，
https://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_001014.html，2021b.（閲覧日：2022年1月20日）
- 総務省ウェブサイト：労働力調査，<https://www.stat.go.jp/data/roudou/index.html>，2021.
（閲覧日：2022年1月20日）
- 畑野肇，宇佐美滋，堀口和雄，池田捷也：スプライススリーブを用いた鉄筋継手の引張繰返し荷重下における疲労強度の実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.271-272，1973.
- 道路プレキャストコンクリート工技術委員会，ガイドライン検討小委員会；プレキャストコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン，2019.
- 土木学会；コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針，2020.

第2章 既往の研究

2.1 グラウト充填継手のスリーブ構造に関する研究

プレキャストコンクリート部材の鉄筋同士を接続する際、スリーブ内に鉄筋を挿入し、スリーブと鉄筋の隙間にはグラウト材を充填して一体化するグラウト充填継手が一般的である。本技術については、これまでにスリーブ形状や挿入する鉄筋の加工に様々な工夫を施し、継手構造の合理化を図るための研究がなされている。

継手部の構造に焦点を当てた既往の研究について以下に示す。

児玉ら [1975] は、スプライススリーブ工法の開発に先立ち、継手の要求性能について鉄筋降伏強度を保証するタイプと鉄筋引張強度まで保証するタイプの2種類に分けつつ、スリーブの長さが継手耐荷力に及ぼす影響を検討した。鉄筋降伏強度を保証するタイプでは鉄筋径の約10倍、鉄筋引張強度まで保証するタイプでは鉄筋径の約14倍のスリーブ長が必要であることを明らかにした。また、スリーブにテーパーを設けたフラスタム型スリーブとテーパーのないストレート型のスリーブの繰返し載荷試験により、フラスタム型スリーブの方が疲労特性が高いことを明らかにした。

林ら [1994] は、電縫鋼管スリーブ材とグラウト充填材で構成されるグラウト充填継手について一軸引張試験を実施し、鉄筋の定着長やグラウト強度、および、挿入鉄筋への添え筋溶接やらせん鉄線の巻付け等の性能改善手法が継手の基礎性能に与える影響について調べた。その結果、定着長やグラウト強度の増大、鉄筋への添え筋溶接等によって継手性能が顕著に改善されることがわかった。また、鉄筋未降伏、既降伏部分に対して一定の付着応力度を仮定することにより、継手の耐荷力が破壊モードも含めて推定できることを明らかにした。

Einea *et al.* [1995] は、グラウト充填継手のスリーブ内部形状に着目し、スリーブの内面や開口部近傍に充填材の拘束効果を高めるための工夫を施し、その効果について一軸引張試験により検証した。その結果、スリーブの両端に鋼製リングを溶接し開口径をすぼめることでグラウトの拘束作用を促し高い定着強度を実現できることを明らかにし、鉄筋直径に対して7倍の埋込長さで必要な引張耐荷力を得られることを示した。

大橋ら [1999] は、スリーブ表面が平滑であることに焦点を当て、スリーブ部の付着性能に関する実験的検討を行った。実験の結果、スリーブ継手を有する場合でもスリーブ両端の主筋のひずみは継手の無い場合とほぼ同じ分布であること、継手の位置に関わらずスリーブ部分の付着力で応力が伝達されることが示された。

又刈ら [2001] は、スプライススリーブ端部の支圧の影響が付着特性に及ぼす影響を明らかにするため、理論解析と実験を行い、スリーブ端部に支圧強度が加わることでスリーブ使用時の付着耐荷力を向上させる効果があることを報告している。

Ling *et al.* [2012] は、モルタル充填継手のスリーブをテーパー形状（中央から外側に向けてすぼめる形状）とすることで、円柱状のスリーブを用いた場合と比較して、引張耐荷力が25～35%向上することを明らかにし、鉄筋直径に対して8倍程度の埋込長さで必要な引張耐荷力を得られることを示した。

Ling *et al.* [2014] は、円柱状もしくは角柱状のスリーブ内部に細径 ($\phi 10\text{mm}$) の鋼棒を溶接したものや、先端付近のスリーブ内面にリブや補強リングを取り付けた継手構造に関して、各ケースの補強効果を一軸引張試験により実証した。また、挿入側鉄筋の先端にナットを取り付けた構造を複合した継手構造についても検証を行い、必要な鉄筋の埋込み長が鉄筋径の9倍程度必要であることを示した。

Sayadi *et al.* [2014] は、円柱状のスリーブの側面に高強度ボルトを貫通させることで、充填材の抜け出しに対して抵抗させる機構とした継手構造について、RCはり供試体を用いた性能確認を実施した。この結果、ボルトのない供試体と比較してボルトを有する供試体では、引張耐荷力が最大で180%向上することを明らかにした。ただし、ボルトの本数を多く配置した場合、逆に引張耐荷力が低下するケースも確認された。

Henin *et al.* [2015] は、円柱状のスリーブの内面にねじ山を設けて充填材とスリーブ内面の摩擦抵抗に関する検証を行い、スリーブを設計する際の定着力推定式を提案し、推定式に用いる摩擦係数について定量的に評価した。

Seo *et al.* [2015] は、グラウト充填継手における挿入側鉄筋の先端に鉄筋径より一回り大きい径のヘッド構造を設けることで、引張耐荷力が向上することを明らかにした。また、この際先端ヘッド部の適切な大きさについて検討した結果を示した。

Sakata *et al.* [2016] は、モルタル充填継手に用いるテーパ付きスリーブの力学性状について検討するため、一軸引張試験を実施するとともに有限要素解析による再現を実施した。その解析によってモデルの有効性を確認した後、スリーブの最適形状について解析的検討を実施した。その結果、定着長や充填材強度がモルタル充填継手の性能を支配する重要な要因であること、およびテーパ付きの試験体やスリーブ内部の凹凸加工による付着力増加がスリーブの小型化に必要であることを示している。

安田ら [2016] は、モルタル充填継手を同一断面に配置したRCはりの曲げ性状をRCはり供試体の曲げ載荷実験で確認した。その結果、RCはりのひずみ・変位の分布性状にはほとんど影響を与えないことが明らかとなり、継手部分での付着伝達性能も良好であった。

また、荷重レベルや配筋の状態によって継手の影響が顕著となる場合を除けば、既往の算定式を用いて継手を有するRCはりの曲げひび割れ幅を概ね予測できることを報告している。

Lin *et al.* [2016] は、繰返し荷重下でのグラウト充填継手の挙動について実験的に行い検証した。この結果、鉄筋が降伏するまでは耐荷力の低下はみられなかったものの、破壊時の耐荷力は繰返し荷重を受けた供試体の方が小さくなる傾向にあることを報告している。

Xu *et al.* [2018] は、グラウト充填継手の充填不良に着目し、グラウト充填不良が発生した複数のケースについて充填状態を再現した供試体にて実験を行い引張耐荷力に与える影響について検証した。この結果、グラウトの充填不良が付着特性や破壊モードに顕著な影響を及ぼすことを明らかにした。

Zheng *et al.* [2018] は、スリーブ内部の先端側に円周方向のリブを設けたシームレスなスリーブについて、リブの本数および鉄筋の埋込み長をパラメータにした検証を行った。この

結果、リブ本数が多いほど引張耐荷力は向上し、継手として必要な引張耐荷力を得るには鉄筋径の6倍の埋込み長が必要であることを示した。

Liu *et al.* [2020] は、グラウト充填継手の破壊プロセスを3次元有限要素解析で検証することにより、継手を構成する要素の中で引張耐荷力に影響を与える要素について言及し、スリーブ内の力が集中する範囲について示した。また、内面に一定間隔のリブを有するスリーブに必要とされる鉄筋の埋込み長は鉄筋径の7倍であることを実験的に示した。

2.2 引張鋼材の定着に膨張材を用いる技術についての研究

プレストレストコンクリート構造物には、PC 鋼材により緊張力が導入されているが、PC 構造物の補強・補修の際に、部材を拡幅、切断したりするケースもあり、このような場合、部材に導入されているプレストレス量を低減させることなく PC 鋼材を途中で切断する必要がある。そこで、PC 鋼材を中間で一時的に定着するための中間定着工法が必要となるが、その手法の一つとして、グラウト充填継手と似た要領で、充填材に膨張材を用いた定着工法に関する研究がなされている。

スリーブ内部に挿入した鋼材や連続繊維補強材をスリーブ内の膨張材による拘束効果で定着する技術は、本研究で対象とした鉄筋のモルタル充填継手の研究に関連する技術である。充填材の膨張性能による鋼材の定着に関する既往の研究を以下に示す。

渡辺ら [1998] は、マルチストランドを対象とした中間定着工法として、鋼製スリーブと膨張材で構成される中間定着装置の開発を行った。高い膨張性能を有する充填材（定着用膨張材）を使用することで、スリーブ内部の拘束効果が向上し、緊張力が導入されている PC 鋼材を定着可能であることを静的引張試験および疲労試験により実証している。また、実工事において中間定着に採用した事例について紹介している。

原田ら [1999] は、連続繊維緊張材の新たな定着方法として、定着用膨張材を使用した定着工法を開発し、主として CFRP より線を用いたポストテンション工法の永久定着法として用いるための基礎的な検討を実施した。この結果、定着に必要な膨張圧やスリーブ長の関係性を明らかにし、実用上十分な性能を有していることを示した。

山田ら [1999] は、連続繊維補強材の定着に用いられる定着用膨張材の耐久性に関して、材料的な面から、鋼管スリーブ内で膨張圧を発現した状態での各種促進試験と暴露試験を実施した。その結果、スリーブ内の作用膨張圧は長期的に設計膨張圧以上の状態を維持できることを確認し、定着体が長期的に安定していることを示した。

久保田ら [2004] は、定着用膨張材を使用した中間定着工法の定着メカニズムを明らかとするための基礎的な研究を実施し、定着用膨張材を使用した定着部の定着機構は、プレテンション方式の定着機構の原理と同様である考えを示した。

篠崎ら [2013] は、PC 鋼材の中間定着工法として、定着スリーブ内に充填した膨張材の膨張圧により定着させる工法について、PC 鋼より線 (7S12.7) についての定着力の確認を行

い、PC 鋼材の定着力推定式に用いる摩擦係数に既往の要素実験結果で得られた値を用いることで、定着力を安全側に評価できることを示した。

また、膨張圧の管理手法として、定着体に取り付けたひずみゲージの計測結果を評価する簡易的な手法を提案しており、FEM 解析結果と比較することで膨張圧を比較的精度良く推定できることを報告している。

2.3 スリーブ背面にせん断補強筋を集約した工法に関する研究

グラウト充填継手のスリーブの径は鉄筋よりも太くなるため、スリーブ部のせん断補強筋によりかぶり厚が決定してしまう。そこで、スリーブ部でのせん断補強筋をスリーブ範囲後方に避けた位置に集約して配筋することができれば、施工上や設計上で有利となるため、スリーブを集約した構造に関する研究がなされている。

以下に既往の研究について示す。

安田ら [2014] は、スリーブ及び集約配筋を有する RC はり部材の載荷実験を行い、そのせん断性状についての検討を行った。その結果、斜めひび割れがスリーブを貫通する場合は、鉄筋より径の大きいスリーブのダウエル作用によりせん断耐荷力が上昇するものの、スリーブの長さが長く、かつ付着が不十分である場合、脆性的な破壊となることを報告している。

安田ら [2015] は、スリーブの一端にせん断補強鉄筋を集約配筋した状態の RC はりのせん断破壊性状を把握するため、集約配筋を伴うスリーブ位置を RC はりの中で変化させ、複数ケースの実験を行った。その結果、既往の修正トラス理論式を用いることで RC はりのせん断耐荷力を安全側に評価できることを示した。また、スリーブと集約配筋を併用することで集約区間へのひび割れの集中を防ぐことができることを示した。

森ら [2017] は、プレキャスト部材の接合部にモルタル充填継手と集約配筋を有する RC はりのせん断性状に与える影響をはり載荷実験で確認した。その結果、接合目地を有することで一時的な耐荷力低下の可能性のあるものの、既往の修正トラス理論式を用いることで、せん断耐荷力を安全側に評価できることを示した。

2.4 まとめ

2.1 で示したグラウト充填継手のスリーブ構造に関する研究をまとめたものを表 2.1.1 に示す。これまで研究されているスリーブの構造は、ほとんどが鉄筋をスリーブの両側から差し込んで定着させる構造であり、その定着長はスリーブ形状や充填材強度、挿入側鉄筋の工夫により短い定着長を達成している研究も見受けられるが、鉄筋径の 7~10 倍程度のものが標準的である。日本国内で現在流通している継手も定着長は鉄筋径の 7 倍程度のものが多く、スリーブ両側から挿入する構造のため、スリーブの長さは少なくとも定着長の 2 倍必要となる。このため、せん断補強筋の配筋間隔内にスリーブを収めることが難しく、スリーブ範囲に配置される鉄筋は、2.3 に示す集約工法のようにスリーブ端面に複数本集約して配置する手法などにより対処していることが多い。このように、スリーブ長の長い現状のグラウト充填継手は小規模な構造物への適用は不向きな面があり、近い将来、プレキャスト部材のニーズが高まることが想定される昨今の社会情勢を鑑みると、小規模な部材等への適用性を拡大すべく継手のさらなるコンパクト化が必要と考える。

各研究成果を見ると、スリーブ形状としては、スリーブ内部のテーパ化や先端付近に補強リング等でリブを設けることにより継手の引張耐荷力が向上しており、充填材の高強度化や挿入側鉄筋のヘッド加工も継手の引張耐荷力向上に有効であることがわかる。しかし、これらすべてを組合せた継手の性能検証はなされていない。

また、2.2 で示す膨張材を利用した PC 鋼材の定着技術は、鉄筋継手の定着にも応用できると考えられるが、鉄筋継手の定着に応用した場合の研究は行われていない。

これらを踏まえ、本研究では継手構造を最大限コンパクト化するために、スリーブの両側から差し込む機構の改良や既往の研究成果で継手の引張耐荷力向上に有効であった各要素の組合せについての性能確認に取り組んだ。さらに新たな要素として、充填材の膨張性能に着目した性能確認についても検証した。

表 2.1.1 グラウト充填継手のスリーブ構造に関する既往の研究

筆頭著者	年	主な検討	パラメータ				主な研究成果 ※D：鉄筋径
			スリーブ形状	充填材	挿入側鉄筋	その他	
児玉	1975	継手構造	テーパ型	-	-	-	定着長 14D
林	1994	継手構造	-	・普通強度 ・高強度	添え筋等	-	普通強度：定着長 7D 高強度：定着長 4.5D
Einea	1995	継手構造	・添え筋 ・補強リング	-	-	-	定着長 7D
大橋	1999	スリーブ表面付着特性	表面が平滑なスリーブ	-	-	-	表面が平滑なスリーブを用いた場合でもスリーブ部の付着性能はスリーブ無しの場合とほぼ同等
又刈	2001	スリーブ端部支圧影響	-	-	-	-	スリーブ端部に支圧強度が加わることで付着耐力が向上
Ling	2012	継手構造	テーパ型	-	-	-	テーパ型スリーブは円柱型に比べ引張耐力が 25～35%向上 定着長 8D
Ling	2014	継手構造	・円柱，角柱 ・添え筋 ・補強リング	-	先端ナット	-	定着長 9D
Sayadi	2014	継手構造	スリーブ側面に高強度ボルト貫通	-	-	-	ボルト有り供試体はボルト無し供試体に比べ 180%引張耐力が向上
Henin	2015	スリーブ内面摩擦定量評価	スリーブ内面ねじ山	-	-	-	スリーブ設計時の定着力推定式を提案し，推定式に用いる摩擦係数を定量評価
Seo	2015	挿入側鉄筋ヘッド加工構造	-	-	先端ヘッド加工	-	挿入側鉄筋の先端にヘッド加工を設けることで引張耐力が向上
Sakata	2016	テーパ型スリーブの力学性状	テーパ型	-	-	-	定着長や充填材強度，スリーブ内部の凹凸加工が引張耐力に影響する要素である
安田	2016	継手同一断面配置時の挙動	-	-	-	モルタル充填継手同一断面配置	継手同一断面配置時も RC はりのひずみ・変位の分布性状にはほとんど影響を与えない
Lin	2016	繰返し荷重下の挙動	-	-	-	-	鉄筋降伏までは引張耐力の低下はみられないが，破壊時の引張耐力は繰返し荷重を受けた供試体が顕著に低下
Xu	2018	充填不良の影響	-	-	-	-	グラウトの充填不良は付着特性や破壊モードに顕著に影響
Zheng	2018	継手構造	スリーブ内面リブ	-	-	-	内面リブ本数が多いほど引張耐力は向上 定着長 6D
Liu	2020	継手部破壊プロセス解析	スリーブ内面リブ	-	-	-	定着長 7D

2.5 第 2 章の参考文献

- Einea A., Yamane T., Tadros M.K. : Grout-filled pipe splices for precast concrete construction, *Precast/Prestressed Concrete*, Vol. 40, pp. 82–93, 1995.
- Lin F., Wu X. : Mechanical Performance and Stress–Strain Relationships for Grouted Splices Under Tensile and Cyclic Loadings, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 10, No. 4, pp. 435–450, 2016.
- Ling J.H., Abd. Rahman A.B., Ibrahim I.S., Abdul Hamid Z. : Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load. *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 90–98, 2012.
- Ling J.H., Abd. Rahman A.B., Ibrahim I.S. : Feasibility study of grouted splice connector under tensile load. *Construction and Building Materials*, Vol. 50, pp. 530–539, 2014.
- Liu C., Pan L., Liu H., Tong H., Yang Y., Wei Chen, Experimental and numerical investigation on mechanical properties of grouted-sleeve splices, *Construction and Building Materials*, Vol. 260, pp. 1–12, 2020.
- Henin E., Morcou G. : Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction, *Engineering Structures*, Vol. 83 , pp. 154–162, 2015.
- Sakata H., S Kobayashi S., Yusuke M., Shimazaki K., Saeki E. : Mechanical characteristics of tapered couplers used for mortar grouted sleeve, *AIJ Journal of Technology and Design*. Vol. 22, No. 51, pp. 527–530, 2016.
- Sayadi A.A., Abd. Rahman A.B., Jumaat M.Z., Johnson Alengaram U., Ahmad S. : The relationship between interlocking mechanism and bond strength in elastic and inelastic segment of splice sleeve, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 227–237, 2014.
- Seo S.Y., Nam B.R., Kim S.K. : Tensile strength of the grout-filled head-splice-sleeve, *Construction and Building Materials*, Vol. 124, pp. 155–166, 2016.

- Xu F., Wang K., Wang S., Li W., Liu W., Du D. : Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect, *Construction and Building Materials*, Vol. 185, pp. 264–274, 2018.
- Zheng Y., Guo Z., Guan D., Zhang X. : Parametric study on a novel grouted rolling pipe splice for precast concrete construction, *Construction and Building Materials*, Vol. 166, pp. 452–463, 2018.
- 大橋茂信, 槇谷栄治, 吉野次彦, 寺戸一哉 : モルタル充填式継手を有する鉄筋コンクリート部材の力学的性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 295–300, 1999.
- 久保田 慶太, 原田 哲夫, 山崎 一之, 生田 泰清 : 定着用膨張材を用いた中間定着工法に関する基礎的研究と適用事例, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 13, pp. 491–494, 2004.
- 児玉 和巳, 堀口 和雄, 二階堂 賢, 池田 捷也 : スプライススリーブ工法による異形鉄筋継手について, 材料 (24 巻 260 号), pp. 386–393, 1975.
- 篠崎裕生, 加納 嘉, 浅井 洋, 安川和公 : 中間定着工法を用いた PC 大梁の部分解体—膨張材による PC 鋼より線の仮定着—, プレストレストコンクリート, Vol. 55, No. 1, pp. 33–38, 2013.
- 林 芳尚, 清水良平, 中塚 侑, 鈴木計夫 : 電縫鋼管スリーブを用いたグラウト充填式鉄筋継手の基礎的性能, コンクリート工学論文集, Vol. 5, No. 2, pp. 65–75, 1994.
- 原田 哲夫, 出光 隆, Khin Myo, 副田 孝一, 渡辺 明 : 定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着法に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 627, pp. 77–90, 1999.
- 又刈克英, 阿瀬正明, 南宏一 : スプライススリーブ継手を含んだ鉄筋の付着性状に関する実験的研究 (その 1), 日本建築学会学術講演梗概集 (関東) 構造IV, pp. 133–134, 2001.
- 森 敬倫, 中村拓郎, 松本智夫, 二羽淳一郎 : 接合目地とモルタル充てん継手を有する RC はりのせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 469–474, 2017.

- 安田瑛紀, 松本浩嗣, 二羽淳一郎, 松本智夫: モルタル充填式継手と集約されたせん断補強鉄筋を有する RC はりのせん断性状, 土木学会年次学術講演会, Vol. 186, 2014.
- 安田瑛紀, 松本浩嗣, 松本智夫, 二羽淳一郎: モルタル充填式継手と集約配筋が RC はりのせん断性状に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, pp. 517–522, No. 2, 2015.
- 安田瑛紀, 中村拓郎, 松本智夫, 二羽淳一郎: モルタル充填継手を同一断面に配置した RC はりの曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 595–600, 2016.
- 山田 一夫, 原田 哲夫, 出光 隆, 副田 孝一, Khin Myo: 高膨張圧を受ける定着用膨張材の耐久性に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 634, pp. 145–156, 1999.
- 渡辺泰行, 菊池秀二, 長橋弘和, 中島規道: 中間定着工法の開発とその施工, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 3, pp. 26–30, 1998.

第 3 章

開発した継手工法の特徴

3.1 工法の概要

プレキャスト部材同士の鉄筋同士を接合するためのモルタル充填継手のスリーブ長を短縮するため、図 3.1.1 に示すスリーブを構成する要素に着目し、第 4 章から第 6 章に示す実験的検討により、スリーブ内の鉄筋の埋込み長を最小 3.5D とした継手構造で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を有する組合せを確認した。

本研究では、スリーブ長を短縮できる継手構造として、2 種類の継手構造を成果として示しており、第 4 章、第 5 章で示す〔埋込み長 3.5D のスリーブ〕と、第 6 章で示す継手構造の低廉化を検討した〔埋込み長 4.0D のスリーブ〕を作製した。

埋込み長 3.5D のスリーブの概要を図 3.1.2 に、埋込み長 4.0D のスリーブの概要を図 3.1.3 に示す。また、それぞれの継手の特徴を以下に列挙する。

〔埋込み長 3.5D のスリーブ〕

- ・スリーブの一端と鉄筋を摩擦圧接により一体化
- ・スリーブ内面の先端にすぼみ加工を設置
- ・挿入側鉄筋の先端にヘッド加工
- ・充填材に高膨張型の充填材を使用

〔埋込み長 4.0D のスリーブ〕

- ・スリーブの一端と鉄筋を摩擦接合により一体化
- ・充填材に高膨張型の充填材を使用

スリーブの一端と鉄筋との接合は、スリーブ長を最小化するために突合せの状態での一体化が可能な摩擦圧接を用いた。内面に加工を施したスリーブに関しては、充填材の抜け出しに対してくさび効果で抵抗する機構となるよう先端の内面にすぼみを設けた。挿入側鉄筋の先端に加工を施したケースに関しては、鉄筋の抜け出しに対して抵抗する機構とするため、挿入側鉄筋の先端に SS400 の丸鋼を使用し突起を設けた。この突起と挿入側鉄筋の接合は摩擦圧接により一体化させた。充填材については、静的破砕剤と同様の機構で膨張する高膨張型の充填材を用いた。

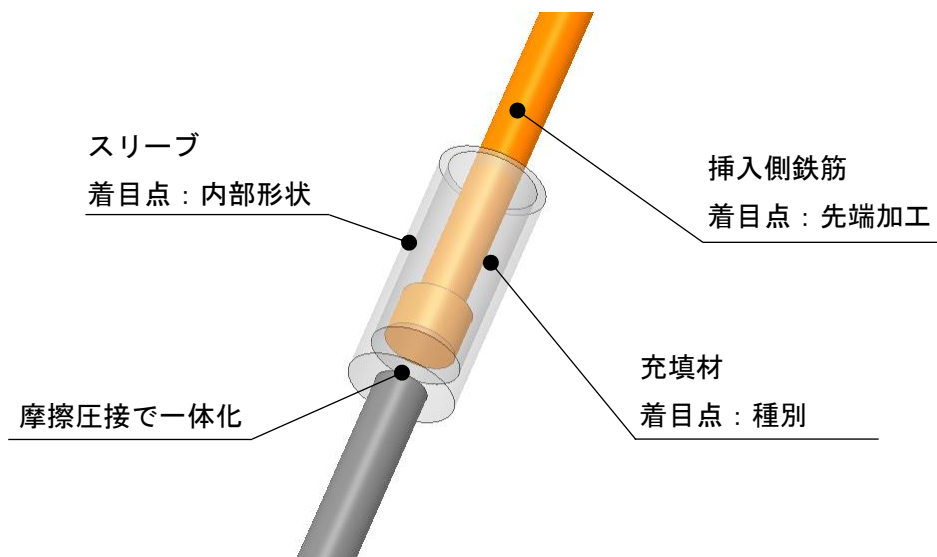


図 3.1.1 継手構造イメージ

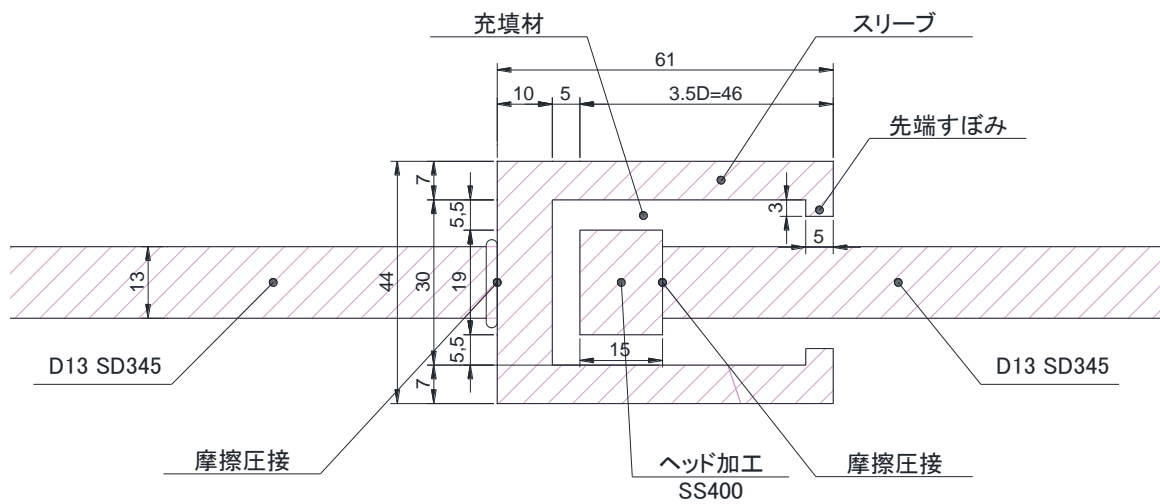


図 3.1.2 埋込み長 3.5D のスリーブ概要

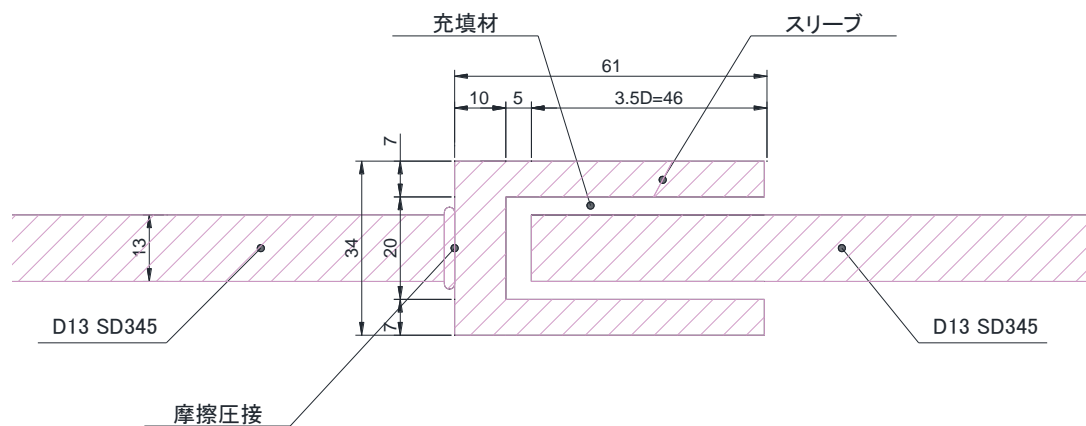


図 3.1.3 埋込み長 4.0D のスリーブ概要

3.2 施工手順

プレキャスト部材同士の接合は、以下に示す手順で接合を行う。以下に、柱部材を接合する例を示す。

〔STEP1：スリーブ側部材の設置〕

継手部のスリーブ側が下になるよう、スリーブ側のプレキャスト部材を設置する。

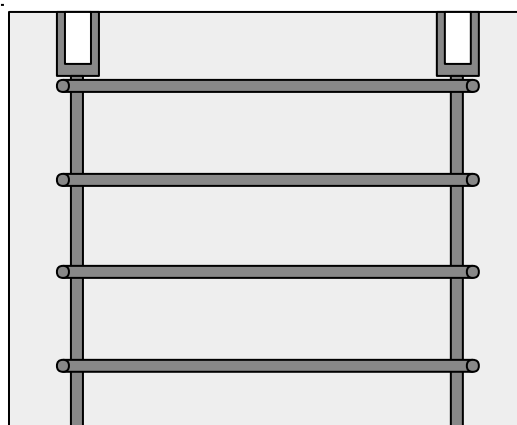


図 3.2.1 STEP1

〔STEP2：充填材注入〕

接合面に接着剤を塗布し、スリーブ内に充填材を注入する。注入する充填材は、鉄筋挿入時の充填材溢出防止のため、挿入側鉄筋の埋込み長分の鉄筋の体積を控除した量とする。

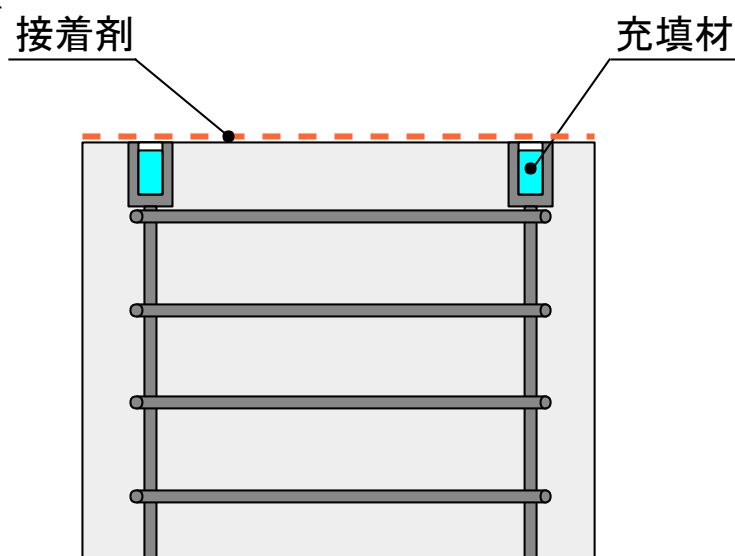


図 3.2.2 STEP2

〔STEP3：接合〕

充填材注入後，すみやかに挿入側鉄筋のプレキャスト部材を接合する。



図 3.2.3 STEP3

3.3 適用範囲

3.3.1 対象構造物

本研究は、今後プレキャスト部材の利用が拡大する可能性を視野に入れ、継手部のコンパクト化を行うことで、その適用範囲を広げることが狙いの一つであり、柱部材などの帯鉄筋配置間隔の拡大防止のほか、薄肉部材や小規模なプレキャスト部材同士の接合などを想定している。

例えば、橋梁の壁高欄などにおいて、図 3.3.1 のようにプレキャスト床版とプレキャスト壁高欄を接合するケースの場合、上下の鉄筋を直接接合することで一体性の高い構造を構築することが可能となり、プレキャスト床版の自重を軽減するために高強度化・薄肉化した場面を想定すると、その適用性は高まる。

また、重量物を運搬困難な険しい山間部に構造物を構築するようなケースとして、例えば砂防ダムなどが考えられ、人力でも運搬できるほど細かく分割したプレキャストブロックとすれば、大型の重機を必要としない施工が可能となる。この際、継手をコンパクトなものとするすることで、配筋の自由度が上がり、複雑な部材形状であっても細やかな対応が可能となる。

プレキャストセグメント工法による PC 橋の施工では、PC 鋼材のみでセグメント部材同士を一体化し、引張鉄筋は連続していない構造が一般的である。引張鉄筋を連続化することで、セグメント継目部設計時の制限値を緩和できる可能性があり、PC 鋼材本数を低減できる可能性があるため、PC 構造物への鉄筋継手適用も考えられる。

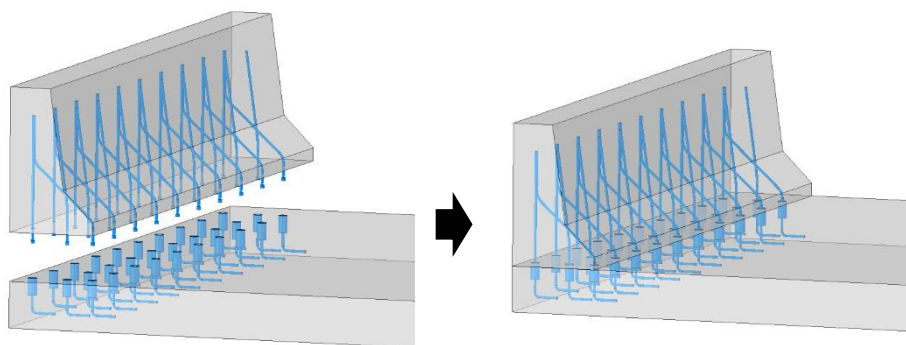


図 3.3.1 プレキャスト床版とプレキャスト壁高欄の接合イメージ

3.3.2 現段階における適用範囲

本研究で使用した充填材は、良好な充填性能を有する代わりに粘性が小さく、水平方向の接合に対しては充填材注入の際、充填材がスリーブ内に留まることができないため、鉛直方向に上方向に向かって接合することが条件となり、施工の方向性に制限がある。

また、正負交番の繰り返し载荷による疲労性能については、今回の研究では確認に至っていないため、疲労性能が要求される部材については、適用性は明らかでない。

3.4 留意点

第5章で示すRCはりの曲げ載荷試験において、継手を有する供試体と継手のないプレーン供試体とを比較すると、継手を有する供試体は継手のないプレーン供試体と比べ変形性能に劣る傾向が確認されたため、地震時などに際の変形性能を要求される構造物に適用する場合には留意が必要である。

また、スリーブと挿入側鉄筋との隙間は数ミリしかないため、プレキャスト部材を製作する際、スリーブおよび鉄筋配置に高い精度が要求されることに留意する必要がある。高精度に製作する手法として、工場等で製作する際に、組立てる部材自体の接合面を型枠として、接続する側の部材の打設を行い、硬化後に一旦分離し、現地搬入後に同じ接続面を接合するマッチキャスト方式がある。

充填材の材料面においても留意点があり、本研究で使用した充填材は適用温度の範囲が20～30℃を適正範囲として推奨された材料であることから、施工環境に制約があることに留意が必要である。

第4章
スリーブ構造のコンパクト化に向けた
実験的検討

4.1 概要

モルタル充填継手のスリーブ長の短縮化を図るためには、スリーブの片側一端と鉄筋との接合部の長さおよびスリーブ内に挿入する側の鉄筋の埋込み長の短縮に焦点を当てる必要がある。このため、本章ではスリーブの片側一端と鉄筋との接合方法およびスリーブ内の埋込み長を短縮するための方法について、一軸引張試験を基本にケーススタディを実施した。

スリーブ内の埋込み長について、図 4.1.1 に示すように標準的なせん断補強筋の間隔を 150mm と想定し、その中に納まる程度のスリーブ長を目安に考え、埋込み長 3.5D (D13 鉄筋の場合： $3.5 \times 13 = 45.5\text{mm}$) を目標にケーススタディを行った。

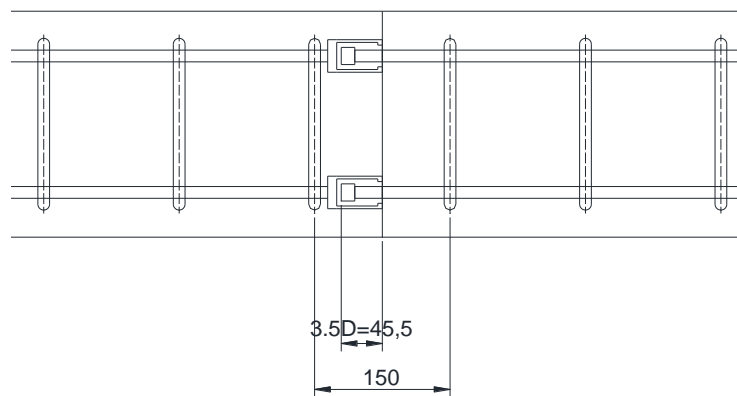


図 4.1.1 埋込み長の目安 (D13 の例)

4.2 スリーブの片側一端と鉄筋の接続方法についての検討

4.2.1 接続方法の案

モルタル充填継手は、一般的に図4.2.1に示すように、接合する鉄筋同士を接合用スリーブ内に一定の定着長分埋込み、スリーブ内部にグラウト材を注入して一体化を図る構造となる [土木学会, 2020]。本研究では、スリーブ長の短縮化を目標としたため、スリーブの片側一端と鉄筋を接合する手法として、一定の定着長が必要となるグラウト充填式の接合ではなく、機械的に接合する手法を検討した。

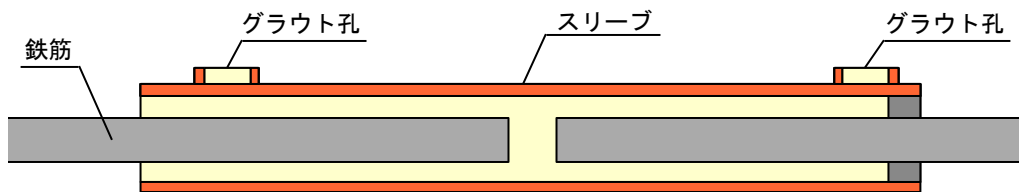


図 4.2.1 一般的なモルタル充填継手 [土木学会, 2020]

スリーブの片側一端と鉄筋を機械的に接合する手法として、図4.2.2の3案を考えた。このうち、圧着接合と摩擦圧接接合は、専用の機材を備えた施設にて加工を行う必要がある一方で、ネジ切り接合は専門的な加工技術が不要で簡便かつ安価に加工することが可能である。スリーブ長を最小化する点のみを考えると、3案のうち摩擦圧接接合が最適となる。摩擦圧接は、金属同士を突き合わせ高速回転で接触させた際に発生する摩擦熱のエネルギーを利用し、高い圧力を加えて接合する工法であり、異種金属同士の接合に適しており、部材同士の定着距離が不要となる工法である。

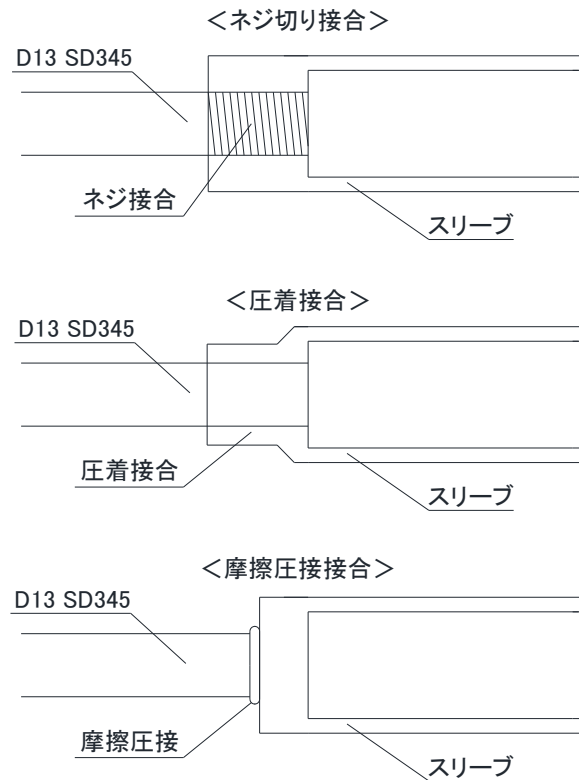


図 4.2.2 スリーブの片側一端と鉄筋の接続方法の案

4.2.2 ネジ切り接合継手の検討

(1) 供試体

簡便かつ安価に製作が可能なネジ切り接合によるスリーブについて、引張力が作用した際の接続部の挙動を確認するための試験を実施した。実験は、ネジ切り加工を施した D13 (SD345) 鉄筋とネジ切り孔を設けたスリーブを接合した状態のスリーブ内にエポキシ樹脂系の充填材を充填し、挿入側の鉄筋を差し込む形とした継手部を構築して一軸引張試験を実施した。スリーブの材質は、一般構造用の鉄鋼材である SS 材（一般構造用圧延鋼材）のうち、最も広く流通している SS400 を用い、写真 4.2.1 に示すようなスリーブを製作した。この際、D13 (SD345) 鉄筋の降伏応力に対して、スリーブが先行して降伏しないように、スリーブの部材断面積は鉄筋の降伏強度に対して十分な強度を有する断面積とした。表 4.2.1 に使用鉄筋とスリーブの仕様を示す。また、写真 4.2.2 に充填材充填状況を示す。

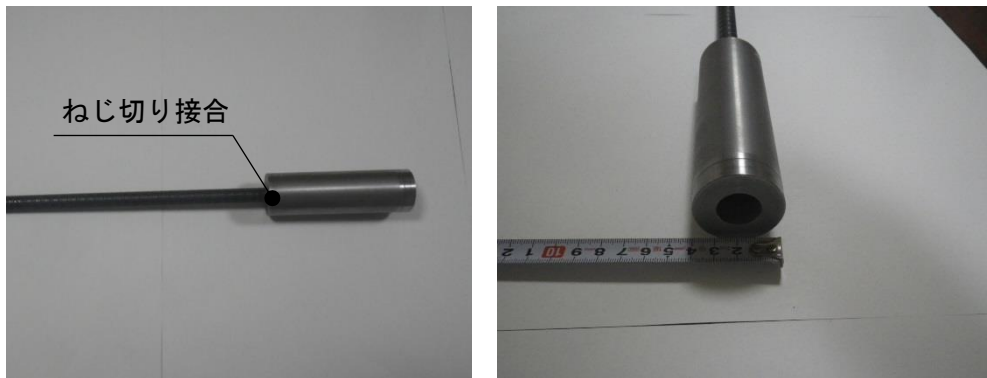


写真 4.2.1 製作スリーブ

表 4.2.1 使用材料

	引張試験	規格値	引張力
鉄筋 (D13 SD345) 断面積 : 126.7 mm ²	引張強さ(N/mm ²)	490 以上	62 kN
	降伏点又は 0.2%耐力強さ (N/mm ²)	345~440	43.7~55.7 kN
	伸び (%)	18 以上	-----
スリーブ (SS400) 断面積 : 549.5 mm ²	引張強さ(N/mm ²)	400~510	220~280 kN
	降伏点又は 0.2%耐力強さ (N/mm ²)	245 以上	134 kN
	伸び (%)	17 以上	-----



写真 4.2.2 充填材充填状況

(2) 実験結果および考察

製作したスリーブにより継手を設けた供試体および継手のない鉄筋単体のみの供試体について、それぞれ1体ずつ一軸引張試験を行った結果を図4.2.3に示す。また、実験状況を写真4.2.3に、継手あり供試体の破壊状況を写真4.2.4に示す。

荷重-変位曲線の結果をみると、鉄筋が降伏するまでは継手あり供試体と継手なし供試体はほぼ同等の挙動を示すが、母材鉄筋降伏後、継手あり供試体が先に破壊する形となった。この際の破断位置は、写真4.2.4のとおりスリーブと鉄筋のネジ切り接合部であり、鉄筋のネジ切りによる断面積減少部に応力が集中することで引張耐荷力が低下したことが要因と考えられる。

ネジ切り接合によるスリーブ接合方法は、加工が容易であるものの、鉄筋のネジ切り部の断面減少が弱点になる点はカバーが困難であるため、ネジ切り接合によりスリーブの一端と鉄筋を接続する手法は適用が困難であると判断した。

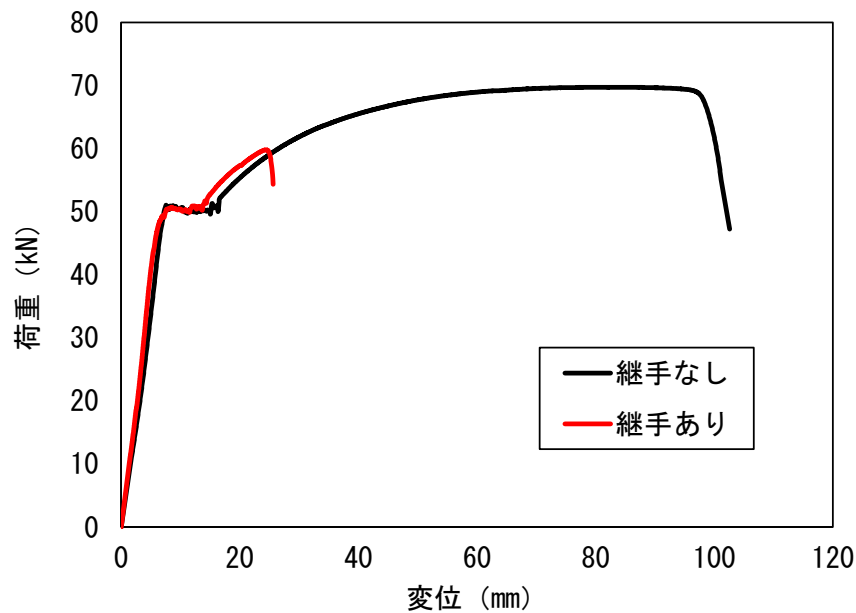


図 4.2.3 引張荷重と伸び変形



写真 4.2.3 一軸引張試験状況



写真 4.2.4 ねじ切り部の破断状況

4.2.3 摩擦圧接継手の検討

(1) 異種金属溶接部の性能確認供試体

摩擦圧接は、異種金属同士の溶接に適している工法として知られており、スリーブ材と鉄筋の接合にも適用性が高いと考えられる。そこで、図 4.2.2 のうち、最もスリーブ長を短縮できる摩擦圧接による接合方法について、摩擦圧接部の引張耐荷力を確認するため、摩擦圧接でスリーブと鉄筋を溶接接合した供試体を作製し、一軸引張試験を行った。摩擦圧接部にのみ着目した確認を行うため、スリーブ材は無垢の SS400 丸鋼とし、そこに SD345 の異形鉄筋を摩擦圧接で接合した供試体とした。写真 4.2.5 に供試体の摩擦圧接部の状況を示す。接合部に生じているカール状のバリは、溶融した金属が圧接時に外側に押し出されたもので摩擦圧接時に必ず生じるものであるが、耐荷力に影響を及ぼすものではないため、除去は行わずに実験を行った。



写真 4.2.5 摩擦圧接部の状況

(2) 性能確認結果および考察

摩擦圧接で接合した供試体 2 体について一軸引張試験を行った結果を図 4.2.4 に示す。写真 4.2.6 に示すように母材鉄筋部分で破壊に至り、摩擦圧接部はいずれも変状はみられなかった。このため、摩擦圧接接合を行うことで、D13 の鉄筋径のような細径の異種金属同士の接合でも母材と同等以上の耐荷性能を確保しつつ、スリーブとの接合長を最小化することが可能であることを確認できた。

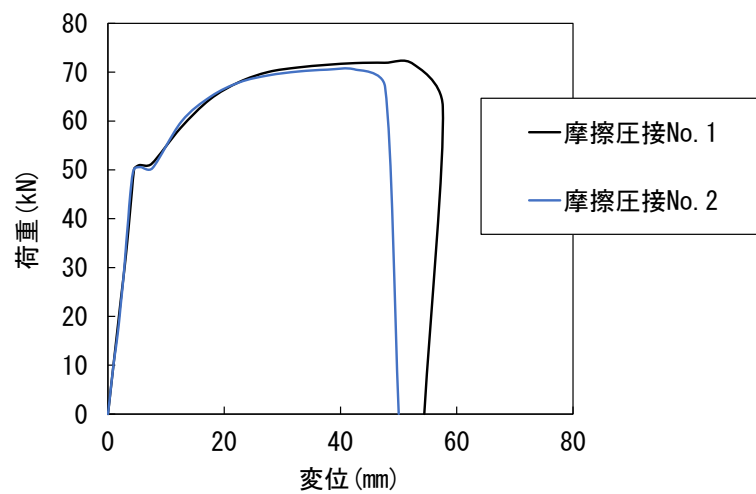


図 4.2.4 引張荷重と伸び変形



写真 4.2.6 母材鉄筋の破断状況

4.3 スリーブ材質の検討

4.3.1 検討事項

4.2.3 で、スリーブと鉄筋の接合は摩擦圧接による接合がスリーブの短縮化を図るうえで性能上も問題ないことが確認できたが、4.2.3 での実験で使用した供試体のスリーブは無垢材料を使用しており、肉厚が薄くなる実際のスリーブとは条件が異なる。SS400 は SD345 よりも材質面で降伏点や引張強度が劣るため、強度差をカバーする断面積を確保したスリーブとした場合でも、局部的な力に対して必ずしも安全であるとは言い切れない。このため、引張力が作用した際の局部応力の確認を行うため、3次元 FEM 解析により確認を行うこととした。

4.3.2 解析モデル

FEM 解析のモデルは 1/2 モデルとし、図 4.3.1 に示すように、D13 鉄筋とスリーブの一端が摩擦圧接で接合された状態を再現した。挿入側の鉄筋は充填材を介して一体化する形とし、スリーブ内部の表面と充填材との界面は一定の引張力が作用した際に付着が切れることを想定し、ヤング係数を 1 N/mm^2 と小さく設定した薄い仮想部材を設定した。モデルの各部材のヤング係数は、表 4.3.1 のとおりに設定した。

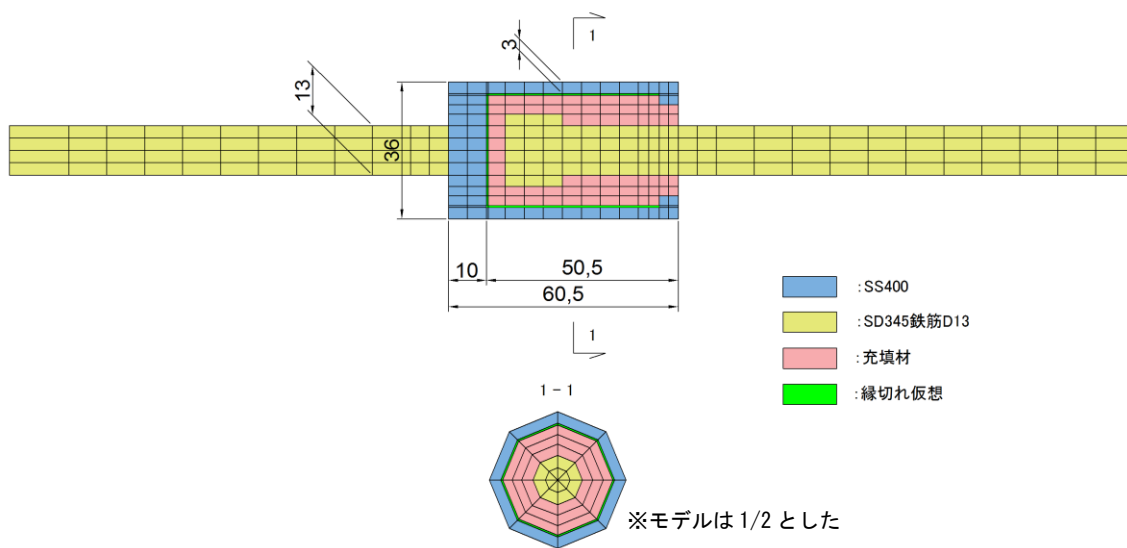


図 4.3.1 解析モデル

表 4.3.1 解析モデル部材のヤング係数

部材	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
スリーブ (SS400)	200000	0.3
鉄筋 (SD345)	200000	0.3
充填材	22000	0.24

4.3.3 解析結果および考察

解析は、汎用有限要素法プログラム「FEMLEEG ver.8」により実施した。D13 鉄筋の引張強度相当となる 70kN の引張荷重 (約 550 N/mm²) を与えた際の解析結果の主応力コンター図を図 4.3.2 に示す。

スリーブに発生する局部応力のうち、最も大きな引張応力が発生する箇所はスリーブ接合部付近で、その引張応力は 322 N/mm² であった。このため、一般的に広く使用されている SS400 (降伏点：235 N/mm² 以上) では、スリーブが局所的に鉄筋より先に降伏する可能性が高いことがわかった。実際に、SS400 のスリーブを解析で想定した形状で引張試験を実施すると、写真 4.3.1 のように接合部付近のスリーブが鉄筋母材破断前に破壊に至った。

このため、スリーブの材質は解析値の局部応力値 322 N/mm² よりも高い降伏強度を有する材料を選定する必要があることがわかった。適用できる材質としては、SS400 よりも高強度な S45C (降伏点：490 N/mm² 以上) などが挙げられる。

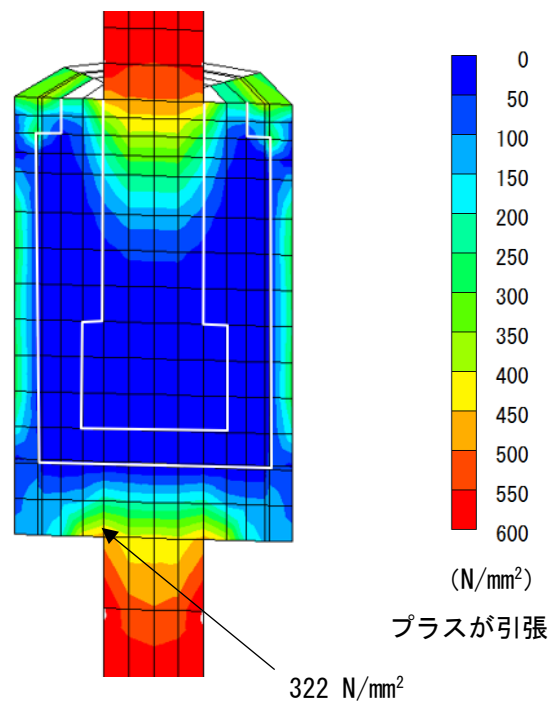
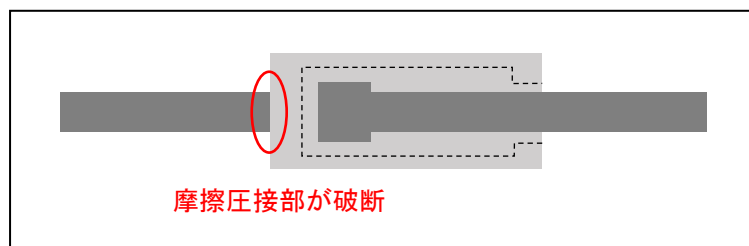


図 4.3.2 FEM 解析結果 (主応力コンター)



(a) 破断位置



(b) 摩擦圧接部の破断状況（側面）



(c) 摩擦圧接部の破断状況（断面）

写真 4.3.1 スリーブ材に SS400 を使用した際の摩擦圧接部の破断状況

4.4 スリーブ内部形状の検討

4.4.1 形状案

スリーブ内部形状について、図4.4.1に示すとおり、「内面を凹凸状に加工したもの」と「スリーブ孔内先端にすぼみを設けた構造」、および「凹凸加工と先端すぼみ加工の両方を併せ持つ構造」の3案を検討した。それぞれ、スリーブの内空深さは、D13鉄筋を使用した場合の埋込み長3.5Dに余裕量5mmを確保した。

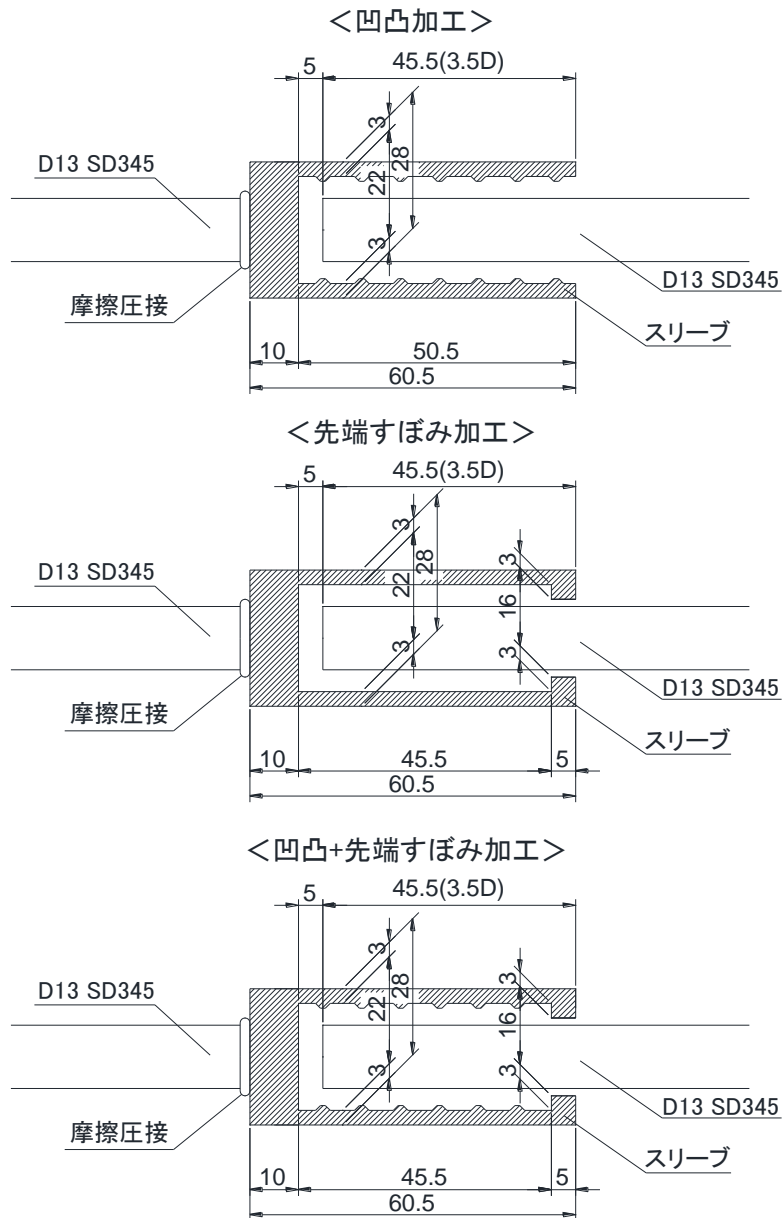


図 4.4.1 スリーブ内部形状案

Sakata *et al.* [2016] は、スリーブ内面の凹凸加工がスリーブの小型化に必要であることを示しており、スリーブ内面に凹凸を設けたケースについて、充填材とスリーブの付着性を向上させる目的で設定した。また、先端にすぼみを設けた構造は、図 4.4.2 のようなくさび効果による拘束力が引張耐荷力向上に寄与することに期待したケースである。坂田ら [2019] によると、スリーブ内部にテーパーを設けてくさび効果を発揮させることが引張耐荷力向上に大きく寄与することが明らかとなっているが、今回のようにテーパーではなく、先端にすぼみを設けることでも、同様のくさび効果が見込めるものと考えた。これは、Einea *et al.* [1995] がスリーブ内部の先端付近に鋼製リングを溶接し、先端をすぼませる構造と同様の機構となる継手において拘束効果が向上することを明らかにしているためである。凹凸および先端すぼみを両方設けたケースはそれら両方の効果を期待したケースとした。

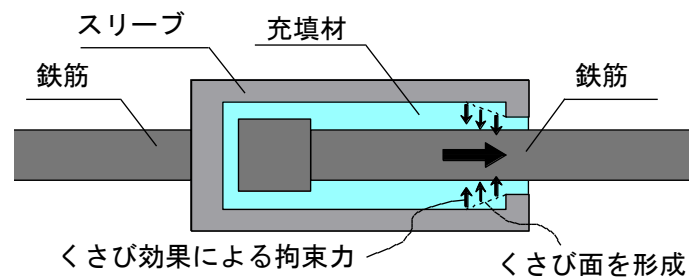


図 4.4.2 スリーブ内部の先端すぼみ部におけるくさび効果の概念図

4.4.2 供試体

本章では、スリーブの内部形状のほか、挿入側鉄筋の先端の加工や充填材の種別にも着目している。本項に示す実験は、スリーブの内部形状の違いによる差異を確認するため、スリーブの内部形状のみを変化させた図4.4.1に示す3案の形状により実験を行った。表4.4.1にスリーブ内部形状の違いによる影響を比較するための検討ケースを示す。

供試体の組立は、充填材の粘性が低いことから、鉛直方向に挿入・組立を行う必要があったことから、写真4.4.1のようにスリーブを鉛直方向に仮固定できる冶具を準備し、充填材の強度発現まで直線的に固定して製作した。

表 4.4.1 スリーブ内部形状比較組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	凹凸	エポキシ樹脂系	ヘッド加工なし	スリーブ内部形状の影響
2	先端すぼみ			
3	凹凸+先端すぼみ			



写真 4.4.1 供試体組立状況

4.4.3 実験結果および考察

各ケースで2体ずつ一軸引張試験を実施した結果を図4.4.3に示す。グラフの値は2体の平均値による結果を示す。いずれのケースも写真4.4.2のように挿入側鉄筋と充填材の界面で付着が切れて母材鉄筋の降伏前にスリーブ部で抜け出す結果となった。その中で、先端すぼみケースに関して、内面凹凸ケースの方が低い荷重で抜け出しており、内面凹凸よりも先端すぼみを設ける方が引張耐荷力向上に有利であることがわかる。また、先端すぼみと内面凹凸の両方を併せ持つケースと先端すぼみのみのケースを比較すると、抜出しに至った際の荷重には差が無かったことから、引張耐荷力向上に寄与するスリーブの形状として、今回の供試体の条件では内面凹凸を設けることでの引張耐荷力向上効果はほぼ期待できないことがわかった。

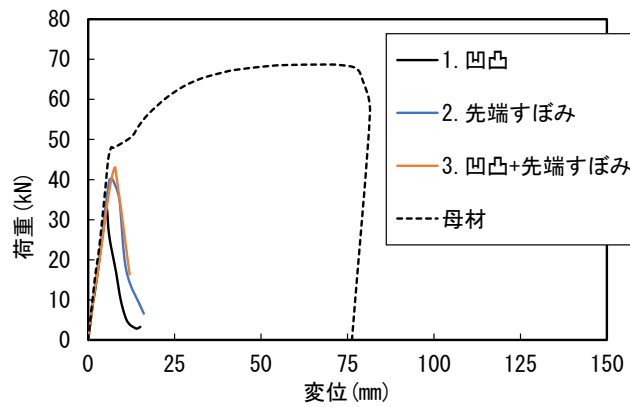


図 4.4.3 引張荷重と伸び変位（スリーブ内部形状比較）



写真 4.4.2 スリーブ部の抜出し状況

4.4.4 スリーブの変形挙動

(1) スリーブの剛性について

スリーブ内面形状を先端すぼみとした場合、くさび効果により継手構造の引張耐荷力が向上することが期待できるが、これによりスリーブ先端付近には高い内部拘束力が発生し、スリーブの径を外側に押し広げようとする力が働く。その際、くさび効果を十分に発揮するためには、スリーブがその力に対して変形せず、十分な剛性を保有していることが条件となる。そこで、表 4.4.2 に示すようにスリーブの肉厚を 3 mm, 6 mm, 9 mm と変化させて、スリーブの変形挙動について確認した。スリーブ変形挙動の確認は、図 4.4.4 に示すようにスリーブ外面に検長 3 mm のひずみゲージを 4 枚貼付してひずみを計測することで行った。

表 4.4.2 スリーブ肉厚比較組合せ

ケース	スリーブ内部形状		充填材	挿入側鉄筋	備考
1	先端すぼみ	肉厚 3 mm	セメント系 高強度 材齢 28 日： 120 N/mm ²	ヘッド 加工なし	スリーブ肉厚 の影響
2		肉厚 6 mm			
3		肉厚 9 mm			

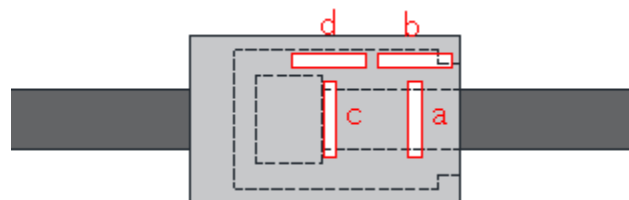


図 4.4.4 ひずみゲージの貼付箇所

(2) 実験結果および考察

図 4.4.5 にスリーブ肉厚別の荷重－変位曲線を示す。各肉厚で引抜き時の耐荷力のばらつきはあるものの、相関性はみられなかったこともあり、スリーブ厚は鉄筋の引張強度相当の荷重に耐えることができるように設定すれば充分であるとわかる。図 4.4.6, 図 4.4.7, 図 4.4.8 には各肉厚のスリーブ側面における荷重－ひずみ関係を示す。スリーブ先端部 (a および b) は拘束力に対して大きなひずみ変化はみられず、拘束力は維持できていたものと考えられる。スリーブ中央部 (c および d) で軸方向にひずみが発生しているが、径を広げる方向への変位はみられなかった。

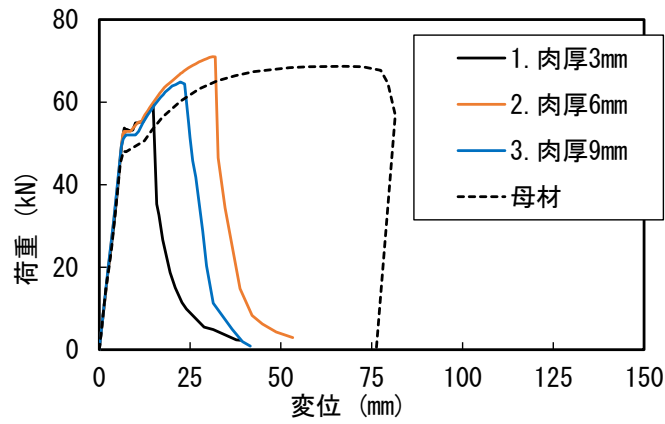


図 4.4.5 引張荷重と伸び変位 (スリーブ肉厚比較)

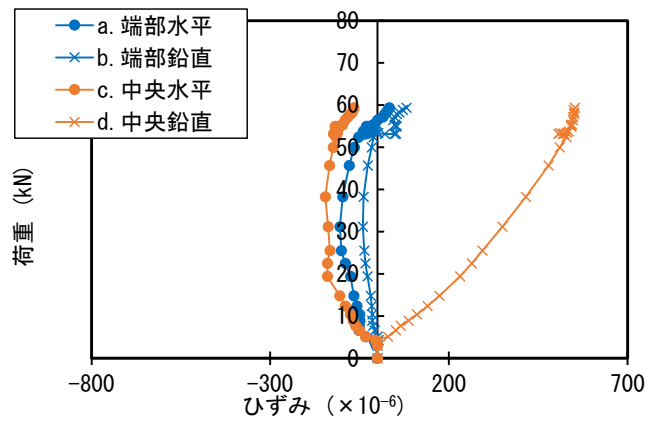


図 4.4.6 スリーブ肉厚 3mm の荷重－ひずみ関係

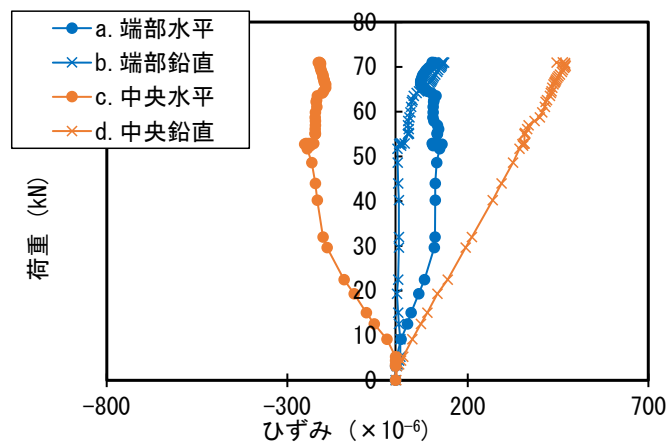


図 4.4.7 スリーブ肉厚 6mm の荷重－ひずみ関係

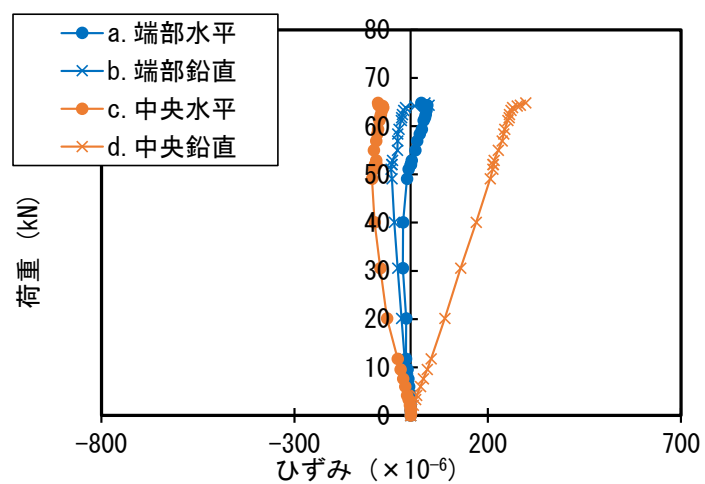


図 4.4.8 スリーブ肉厚 9mm の荷重－ひずみ関係

4.5 充填材に関する検討

4.5.1 種類

充填材の種類として、大きく分けてエポキシ樹脂系とセメント系の充填材が考えられる。この種類の違いが引張耐荷力に及ぼす影響を確認するため、表 4.5.1 に示す供試体について一軸引張試験を行った。

エポキシ樹脂系は主成分がエポキシアクリレート樹脂性で圧縮降伏強度 190 N/mm² 程度、圧縮弾性率 2900 N/mm² 程度を有する材料を使用した。セメント系については、充填性を考慮して骨材径が小さいものを選定し、材齢 28 日で 60 N/mm² 程度の圧縮強度を発現する材料を使用した。

表 4.5.1 充填材種別比較組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	先端すぼみ	エポキシ樹脂系	ヘッド	エポキシ樹脂系とセメント系の比較
2		セメント系	加工なし	

4.5.2 実験結果および考察

図 4.5.1 に一軸引張試験の結果を示す。エポキシ樹脂系とセメント系の結果を比較すると、いずれも鉄筋母材破断前にスリーブ部での抜け出しで破壊に至ったが、セメント系の方は約 55 kN でスリーブ部の抜け出しが発生した状況に対し、エポキシ樹脂系は約 40 kN で抜け出した。セメント系の充填材がエポキシ樹脂系よりも約 4 割程度引張耐荷力が上回る結果となったが、これは、セメント系の充填材が骨材を有する材料であることから、骨材同士の噛み合わせ効果が有利に働いたものと推察できる。

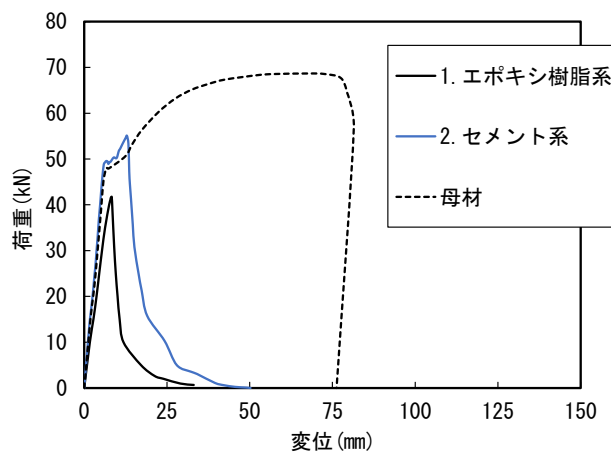


図 4.5.1 引張荷重と伸び変位（充填材種類比較）

4.6 充填材強度の検討

4.6.1 局部応力の評価

4.3 で示した FEM 解析は、スリーブの内部形状として先端すぼみ形状を再現したモデルとしており、この際の最小主応力図（図 4.6.1）を確認すると、スリーブの先端すぼみ付近の充填材に局所的な圧縮応力が発生することが確認できた。これは、4.4.1 で述べたくさび効果による拘束により局所的に応力が集中することが要因と考えられる。解析上、充填材に発生する最大圧縮応力は 124 N/mm^2 であり、4.5 で使用した強度（材齢 28 日で 60 N/mm^2 程度）では、くさび効果による局所的な圧縮応力に耐えられず、その結果所定の引張耐荷力が得られない可能性がある。このため、充填材の高強度化についても検討が必要と考えられた。

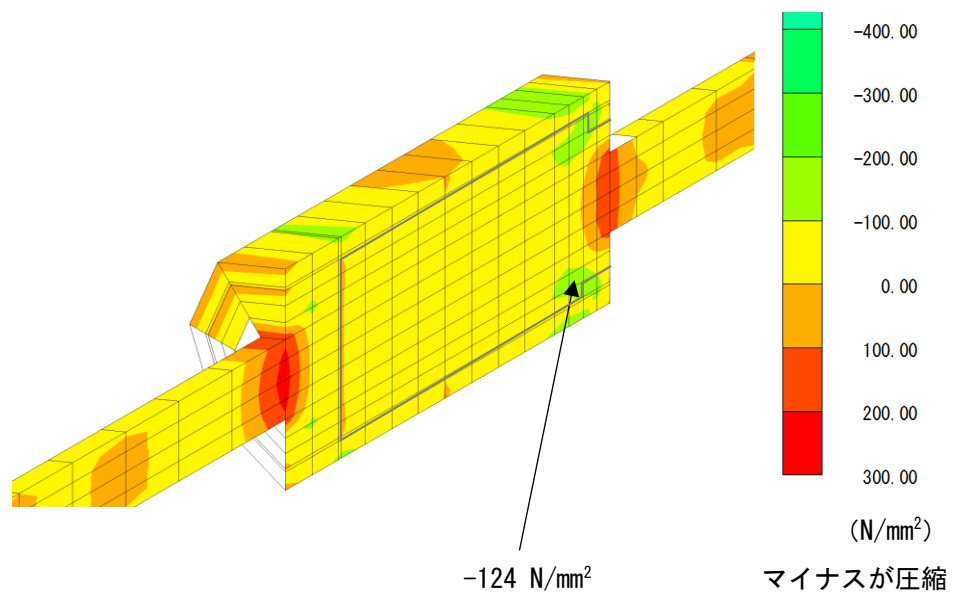


図 4.6.1 最小主応力コンター図

4.6.2 高強度充填材の検討

充填材強度が継手の引張耐荷力に及ぼす影響を確認するため、高強度充填材を用いた継手供試体について一軸引張試験を実施した。充填材の材料は普通強度ケースと高強度ケースの2種類について比較を行った。両ケースの材料は同様にセメント系とし、普通強度ケースでは4.5.1で使用した材料（材齢28日で 60 N/mm^2 程度）とし、高強度ケースでは材齢28日で 120 N/mm^2 程度の圧縮強度を発現する材料を用いた。表 4.6.1 に示すとおり、スリーブ内部形状はすぼみ形状、挿入側鉄筋はヘッド加工なしに統一した組み合わせにより実験を実施した。

表 4.6.1 充填材強度比較組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	先端すぼみ	セメント系 普通強度 材齢 28 日： 60 N/mm ²	ヘッド 加工なし	充填材強度の影響
2		セメント系 高強度 材齢 28 日： 120 N/mm ²		

4.6.3 実験結果及び考察

(1) 荷重－変位曲線結果

図 4.6.2 に一軸引張試験の結果を示す。いずれのケースも母材鉄筋破断前にスリーブ部で抜け出す破壊形態であったが、普通強度充填材を使用した供試体は 55 kN 付近で引抜き破壊に至ったのに対し、高強度充填材を使用した供試体は 66 kN 付近で引抜き破壊に至った。これは、解析で得られた結果のとおり、スリーブ先端のすぼみ形状部の充填材で発生する高い圧縮応力に対して、より抵抗できる高強度充填材の方が引張耐荷力も向上したためと考えられる。写真 4.6.1 に示す普通強度ケースの引抜き破壊状況をみても、すぼみ付近の充填材がひび割れていることが確認でき、このことから、充填材には一定の圧縮強度を有する必要があることがわかった。

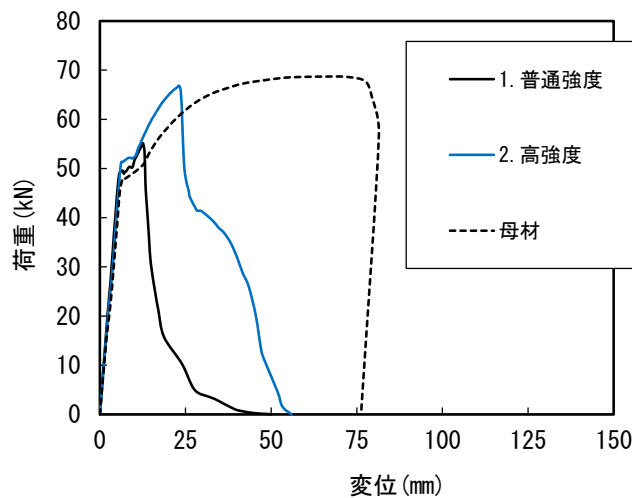


図 4.6.2 引張荷重と伸び変位（充填材強度比較）



写真 4.6.1 引抜き破壊状況

4.7 挿入側鉄筋の先端形状

4.7.1 ヘッド加工方法

挿入側の鉄筋について、引張荷重作用時に充填材と鉄筋の付着切れにより鉄筋が抜け出す挙動を防ぐため、挿入側鉄筋の先端に鉄筋径よりも一回り大きいコブ状のヘッド加工を設け、ヘッド加工背面の充填材のせん断抵抗面積を広げる工夫を施した。

ヘッド加工部は、**図 4.7.1** のように $\phi 19$ mm の SS400 丸鋼を鉄筋の先端に摩擦圧接することで一体化させた。**写真 4.7.1** に加工後の状況を示す。

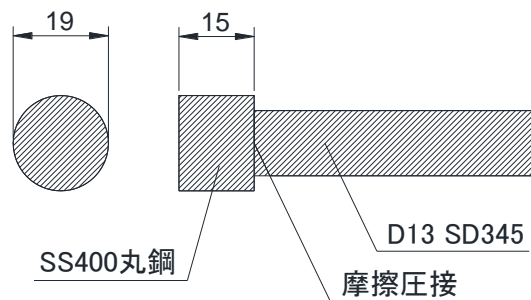


図 4.7.1 挿入側鉄筋ヘッド加工の概要



写真 4.7.1 ヘッド加工状況

4.7.2 供試体

挿入側鉄筋の先端にヘッド加工を設けたケースについて、継手の引張耐荷力への影響を確認するため、表 4.7.1 に示す組合せによる一軸引張試験結果を比較した。ベースとなるヘッド加工なしのケース 1 およびケース 3 は、表 4.6.1 のケース 1 とケース 2 の結果とし、スリーブ内部形状および充填材を変更せずに挿入側鉄筋のヘッド加工をそれぞれ設けたケースをケース 2、ケース 4 とした。

表 4.7.1 挿入側鉄筋のヘッド加工比較組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材		挿入側鉄筋	備考
1	先端すぼみ	セメント系	セメント系 普通強度	ヘッド加工 なし	充填材強度および ヘッド加工の影響
2			材齢 28 日： 60 N/mm ²	ヘッド加工 あり	
3			セメント系 高強度	ヘッド加工 なし	
4			材齢 28 日： 120 N/mm ²	ヘッド加工 あり	

4.7.3 実験結果および考察

図 4.7.2 に一軸引張試験の結果を示す。ケース 1 からケース 4 は、いずれも鉄筋が降伏後、母材鉄筋の破断前にスリーブ部で抜け出す破壊形態であったものの、破壊荷重に差がみられた。ケース 1 とケース 2 を比較すると、ヘッド加工のないケース 1 は 55 kN で引抜き破壊に至ったが、ケース 2 のヘッド加工ありの供試体は 60 kN まで破壊荷重が大きくなった。また、ケース 3 とケース 4 においても、ヘッド加工のないケース 3 は 66 kN で引抜き破壊に至ったが、ケース 4 のヘッド加工ありの供試体は 69 kN まで破壊荷重が大きくなった。

これらの結果より、ヘッド加工を設けることによる引張耐荷力への影響としては、著しい向上効果はみられなかったものの、一定の引張耐荷力向上効果を確認できた。

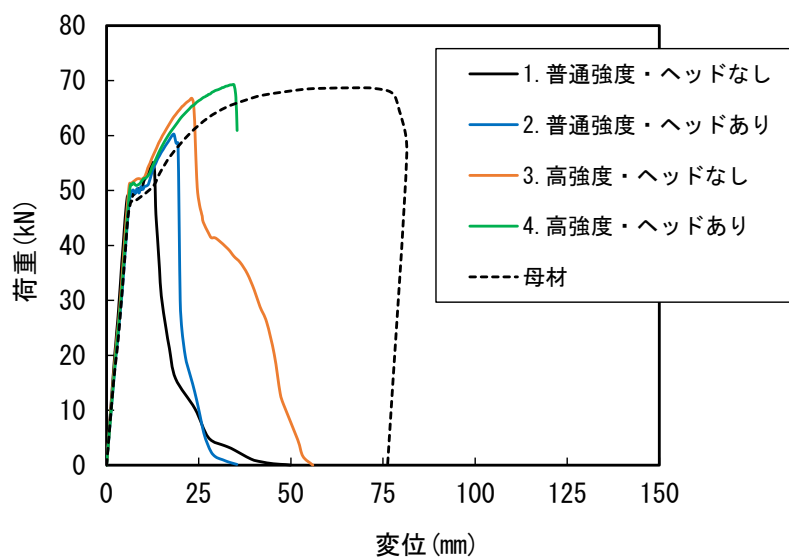


図 4.7.2 引張荷重と伸び変位（挿入側鉄筋のヘッド加工比較）

4.8 高膨張型充填材

4.8.1 供試体

スリーブ内部の拘束効果を高める手法として、渡辺ら [1998] により PC 鋼材の定着工法として開発された膨張材を用いた方法が考えられる。この工法は、鉄筋よりも高い引張強度を有する PC 鋼材を定着可能な技術であり、原田ら [1999] や山田ら [1999] の研究により、十分な定着性能を有することが確認されている。そこで、高い膨張性能を有する膨張材を鉄筋継手に使用した場合の引張耐荷力に対する影響を確認するため、表 4.8.1 に示すケースにて一軸引張試験を実施した。使用する充填材は、48 時間膨張圧で 33 N/mm^2 以上を発現する生石灰および珪酸塩を主成分とする膨張材を用いた。なお、スリーブの内部形状に着目した 4.4 の実験では、スリーブの内部の先端にすぼみを設ける構造が有利であることがわかっているが、4.4 の実験で用いた充填材とは性質が異なるため、本ケースでは、改めてスリーブの内部形状に凹凸を施したケースについても検証を行った。また、充填材が高い膨張性能を発揮する際、スリーブ自体にはその膨張圧を拘束できる剛性を有することが求められる。このため、スリーブの肉厚は図 4.4.1 で示した肉厚 3 mm のものから図 4.8.1 に示す肉厚 7 mm のものに改良した。

表 4.8.1 高膨張材充填材を用いた比較組合せ

ケース	スリーブ 内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	凹凸	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33 N/mm^2 以上	ヘッド加工なし	充填材の膨張性能 による影響
2			ヘッド加工あり	
3	先端すぼみ		ヘッド加工なし	
4			ヘッド加工あり	

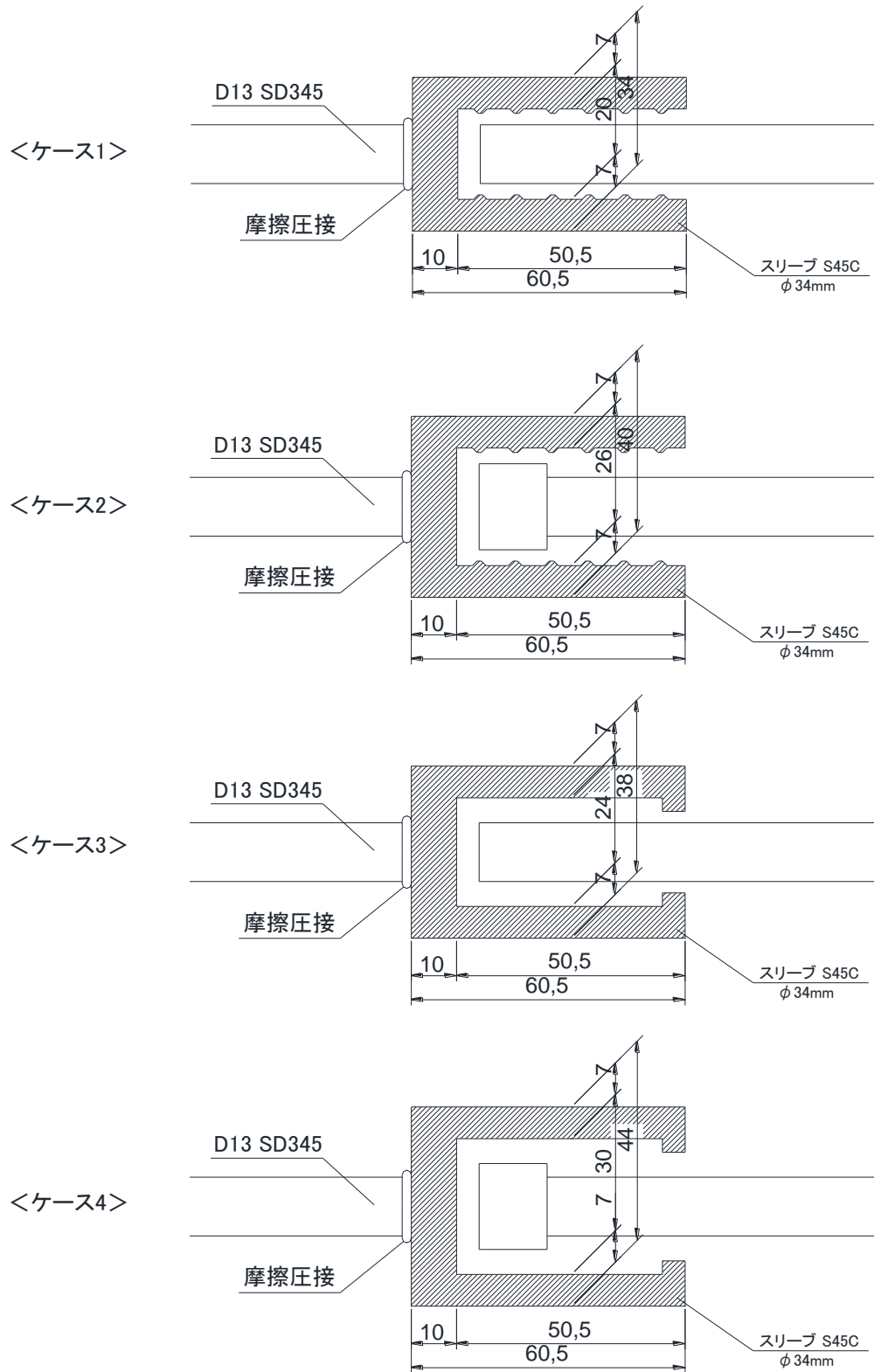


図 4.8.1 高膨張型充填材使用ケースのスリーブ形状

4.8.2 実験結果および考察

図 4.8.2 に一軸引張試験の結果を示す。ケース 1 およびケース 3 のヘッド加工がないものは、鉄筋降伏後 55 kN 付近の引張荷重が作用した段階で挿入側鉄筋が鉄筋周囲の付着切れによりスリーブ部から抜け出した破壊形態となった(写真 4.8.1)。その一方で、ケース 2 およびケース 4 のヘッド加工を有するケースでは、写真 4.8.2 に示すように母材鉄筋での破断を達成でき、本ケースの組合せによる継手構造が鉄筋母材と同等以上の引張耐荷力を有することが確認できた。

スリーブの内部形状や挿入側鉄筋の先端形状、充填材の高強度化についての組合せでは 3.5D の埋込み長での継手構造で母材鉄筋の破断まで達成することができなかつた点に対し、高膨張型の充填材を使用したケースにおいてのみ母材鉄筋の破断を達成することができた。これは、充填材の膨張圧をスリーブが拘束することで挿入側鉄筋の摩擦抵抗が向上することによる効果が大きく寄与したものと考えられる。

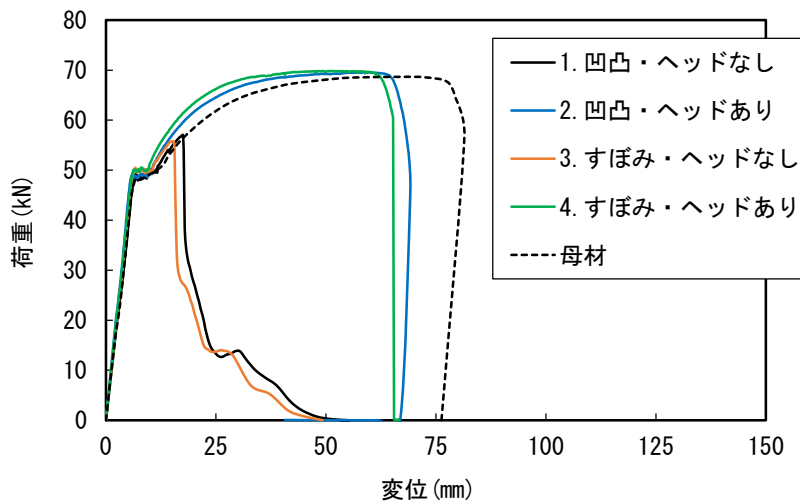
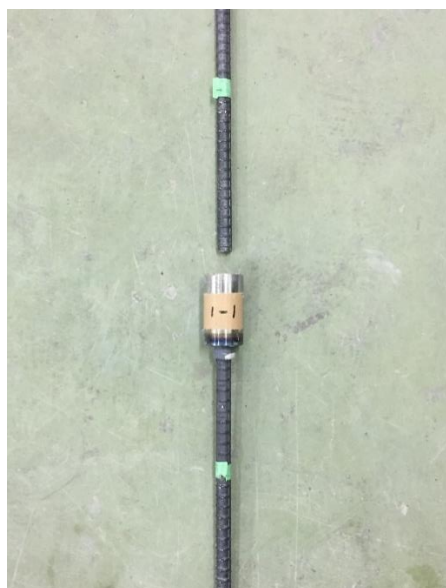


図 4.8.2 引張荷重と伸び変位 (高膨張型充填材使用)



(a) 全景



(b) 断面

写真 4.8.1 ケース1の継手部拔出し破壊状況



(a) 全景



(b) 断面

写真 4.8.2 ケース2の母材鉄筋破断状況

4.9 太径鉄筋への適用

4.9.1 供試体

表 4.8.1 のケース 2 およびケース 4 の組合せにより、3.5D の短い埋込み長で母材鉄筋の破断を達成できることが確認できたため、同様の組合せによる継手構造で D13 以外の鉄筋径でも同様の耐荷力が確保できるか確認を行った。検討する異形鉄筋は D16 と D19 を対象とした。この際、D13 も同様に検証を行うこととしたが、D13 については 4.8 で母材鉄筋の破断を達成できたケースの組合せからスリーブ内部形状を簡素化した状態でも母材鉄筋の破断まで継手部での抜け出し破壊が生じないか検証を行った。検証を行ったケースを表 4.9.1 に、各ケースの供試体形状を図 4.9.1 に示す。また、製作した供試体を写真 4.9.1 に示す。供試体は各ケース 3 体ずつ製作した。

表 4.9.1 D16, D19 適用確認組合せ

ケース	鉄筋径	スリーブ 内部形状	充填材	挿入側 鉄筋	備考
1	D13	なし	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33N/mm ² 以上	ヘッド加工 あり	D16, D19 適用 性確認
2	D16	凹凸			
3	D19				

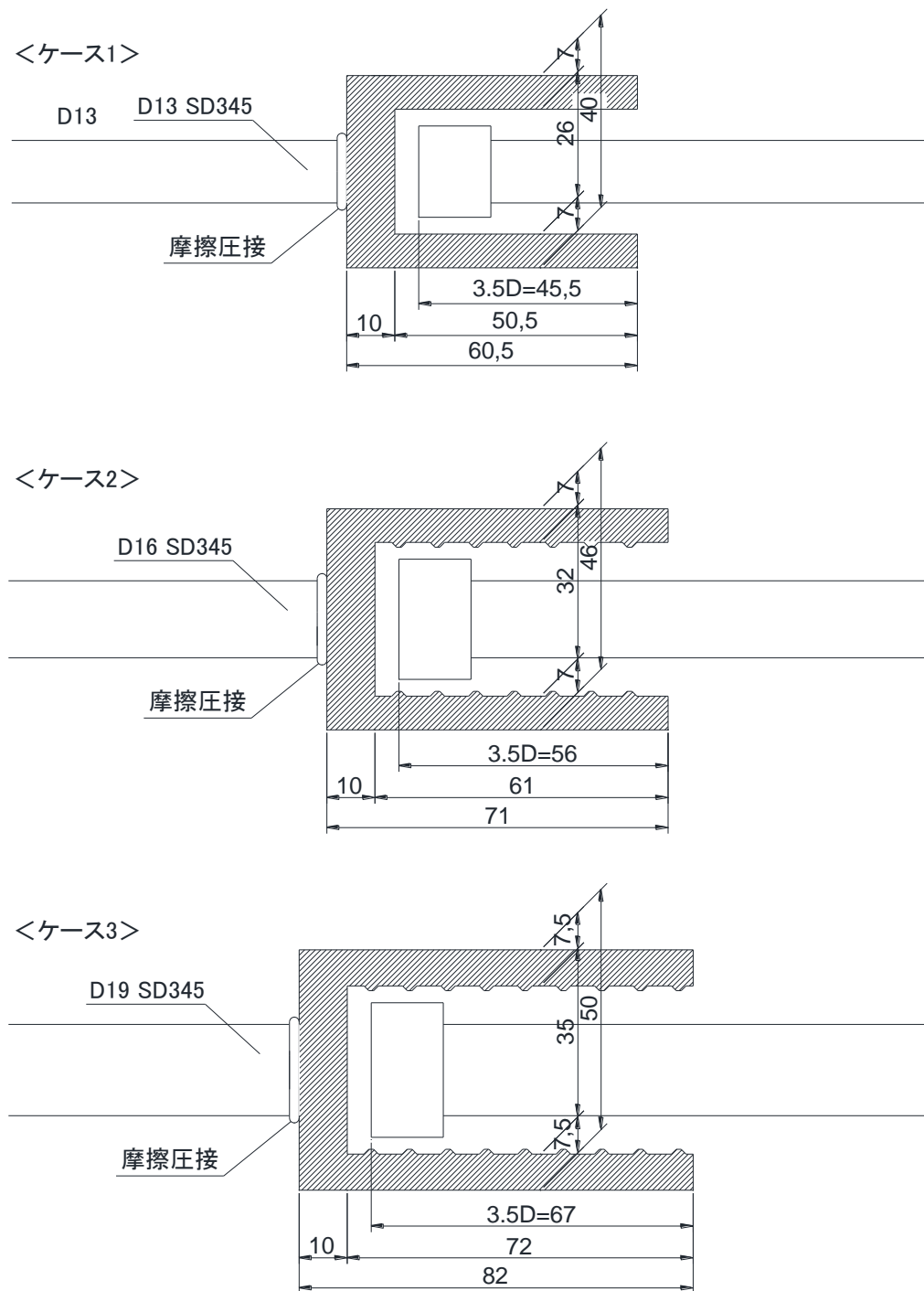


図 4.9.1 太径確認用スリーブ形状



写真 4.9.1 供試体製作状況

4.9.2 実験結果および考察

図 4.9.2 に各ケースのそれぞれ代表 1 体についての一軸引張試験結果を示す。試験の結果は、各ケースの 3 体すべてで母材鉄筋の破断による破壊モードであった。写真 4.9.2 に各ケースの破壊状況を示す。このことより、4.8 で母材鉄筋の破断を達成した組み合わせとすることで D13 と同じく D16 と D19 においても 3.5D の埋込み長で鉄筋母材と同等以上の引張耐荷力を確保することができることがわかった。

また、ケース 1 では 4.8 で母材鉄筋の破断を達成できたケースの組合せから、スリーブ内部形状を簡素化（凹凸や先端のすぼみ加工のないスリーブ）した状態でも母材鉄筋の破断を達成できた。このことから、高膨張型充填材を使用することにより継手の引張耐荷力を大きく向上させることができると考えられる。

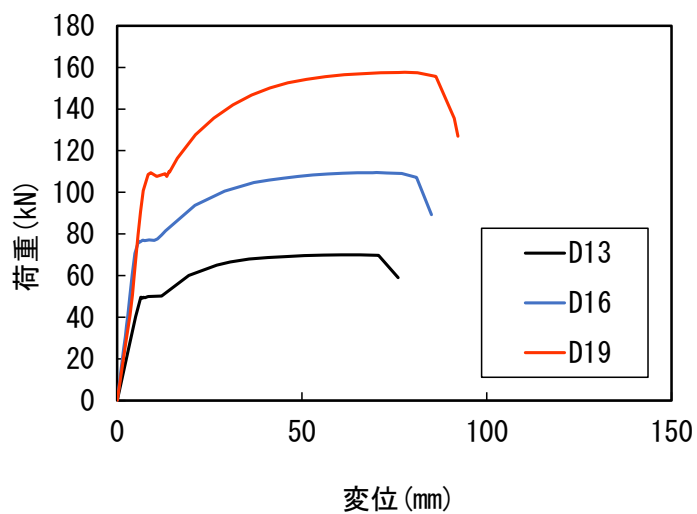
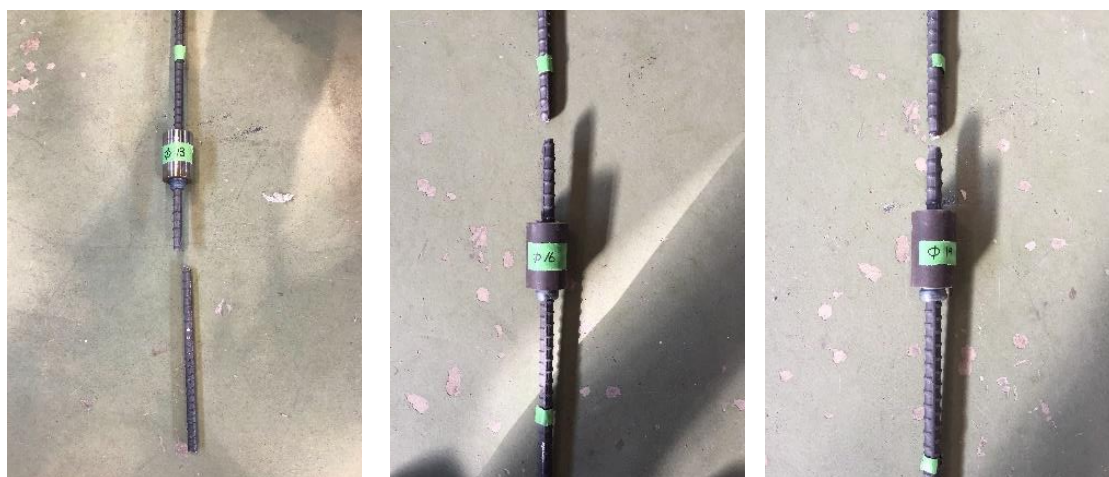


図 4.9.2 引張荷重と伸び変位



(a) ケース 1

(b) ケース 2

(c) ケース 3

写真 4.9.2 各ケースの破壊状況

4.10 埋込み長 3.5D で母材鉄筋破断を達成した組合せ

本章に示すケーススタディにより，3.5D の埋込み長で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を有する継手の組合せは表 4.10.1 のとおりであった。

表 4.10.1 埋込み長 3.5D で母材鉄筋破断を達成した組合せ

ケース	スリーブ 内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	凹凸	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33N/mm ² 以上	ヘッド加工あり	3.5D 母材鉄筋破断 達成
2	先端すぼみ		ヘッド加工あり	
3	なし		ヘッド加工あり	

4.11 まとめ

モルタル充填継手のスリーブのコンパクト化に向けた取り組みとして，スリーブの内部形状や挿入側鉄筋の先端形状，充填材の種別や強度および膨張性に着目し，各着目点をパラメータとした組合せで一軸引張試験によるケーススタディを行った．本章で得られた知見を以下に示す．

- (1) スリーブの片側一端と鉄筋とを摩擦圧接により接合した場合，FEM 解析によると，D13 の引張強度相当となる 70 kN の引張荷重が作用した際，摩擦圧接部のスリーブに 322 N/mm² の局所的な引張応力が発生するため，スリーブの材質としては一般的に広く使用されている SS400（降伏点：235 N/mm² 以上）ではスリーブが鉄筋母材破断より前に降伏することがわかった．このため，本研究で用いたスリーブの材質は S45C（降伏点：490 N/mm² 以上）とした．
- (2) スリーブの内部形状について，内側の表面に凹凸を設けた場合と先端にすぼみを設けた構造とでは，後者の方が継手の引張耐荷力は上回る．このとき，先端すぼみ部付近の充填材にはくさび効果による拘束力で局所的に応力が集中し，FEM 解析の結果，D13 の引張強度相当となる 70 kN の引張荷重が作用した場合，124 N/mm² の圧縮応力が充填材に発生することがわかった．
- (3) 挿入側鉄筋の先端にコブ状のヘッド加工を設けることで，ヘッド加工のない継手よりも引張耐荷力が向上した．

- (4) 充填材の種別は、エポキシ樹脂系よりもセメント系の充填材を用いる方が継手部の引張耐荷力は高かった。また、材齢 28 日で 60 N/mm^2 を発現する普通強度の充填材を用いた場合と材齢 28 日で 120 N/mm^2 を発現する高強度の充填材を用いた場合とで比較すると、後者の方が継手部の引張耐荷力は向上した。
- (5) 充填材に高膨張型の充填材（48 時間膨張圧で 33 N/mm^2 以上を発現する生石灰および珪酸塩を主成分とする膨張材）を使用し、挿入側鉄筋にヘッド加工を設けたケースにおいて、 $3.5D$ の埋込み長の継手で母材鉄筋の破断を達成できた。また、母材鉄筋の破断を達成した組合せで、 $D16$ および $D19$ の異形鉄筋を使用した場合の引張耐荷力を確認した結果、 $D13$ と同様に母材鉄筋で破断する破壊モードとなることを確認した。
- (6) 母材鉄筋の破断を達成した組合せのうち、スリーブの内部形状の工夫を無し（単に筒状の内空を有するスリーブ）としたケースについても検証を行ったところ、母材鉄筋の破断を達成したため、引張耐荷力向上に寄与する要因として高膨張型の充填材を用いることによる影響が支配的である可能性が高いことがわかった。

4.12 第4章の参考文献

- Einea A., Yamane T., Tadros M.K. : Grout-filled pipe splices for precast concrete construction, *Precast/Prestressed Concrete*, Vol.40, pp.82-93, 1995.
- Sakata H., S Kobayashi S., Yusuke M., Shimazaki K., Saeki E. : Mechanical characteristics of tapered couplers used for mortar grouted sleeve, *AIJ Journal of Technology and Design*. Vol. 22, No. 51, pp. 527-530, 2016.
- 坂田弘安, 小林駿介, 毎田悠承, 島崎和司, 佐伯栄一郎 : モルタル充填式機械式継手に用いるテーパ付カップラーの力学性状, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.51, pp. 527-530, 2019.
- 土木学会 ; コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針, 2020.
- 原田 哲夫 , 出光 隆 , Khin Myo , 副田 孝一 , 渡辺 明 : 定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着法に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 627, pp. 77-90, 1999.
- 山田 一夫 , 原田 哲夫 , 出光 隆 , 副田 孝一 , Khin Myo : 高膨張圧を受ける定着用膨張材の耐久性に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 634, pp. 145-156, 1999.
- 渡辺泰行, 菊池秀二, 長橋弘和, 中島規道 : 中間定着工法の開発とその施工, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 3, pp. 26-30, 1998.

第 5 章
コンパクト化したモルタル充填継手を有する
RC はりの実験的検討

5.1 概要

第 4 章で示すスリーブ構造のコンパクト化に向けて実施したケーススタディにより，表 4.10.1 に示す組合せで，埋込み長 3.5D において母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を有する継手構造であることがわかった村上ら [2020]，森本ら [2020]．そこで，母材鉄筋の破断を達成した継手構造の曲げ性状について検討するため，本章では，継手接合部を有する RC はりを用いた曲げ載荷試験を実施した結果を示す．

5.2 供試体概要

5.2.1 継手構造

RC はりの継手部に使用したモルタル充填継手は，3.5D 埋込み長での引張試験で母材鉄筋の破断を確認したケースのうち，表 5.2.1 に示す組合せの継手を用いた．

表 5.2.1 RC はり供試体を使用した継手構成

スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋
先端すぼみ	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33 N/mm ² 以上	ヘッド加工あり

5.2.2 RC はり供試体概要

表 5.2.2 に供試体の共通諸元を，図 5.2.1 に供試体概要を示す．供試体は曲げ引張型となるように設計し，全長 2000 mm，断面幅 250 mm，高さ 300 mm，有効高さ 250.5 mm とした．供試体の支間は 1800 mm で，載荷スパンは 500 mm とした．せん断補強筋は，主鉄筋および圧縮鉄筋と同様に，SD345 D13 を使用した．せん断補強筋間隔は継手あり供試体のスリーブ周辺を除いて $s=125$ mm 間隔で配置した．

表 5.2.2 供試体の共通諸元

せん断 スパン比 a/d	コンクリート	主鉄筋			せん断補強筋		
	呼び強度 (N/mm ²)	規格および 呼び径	p_w (%)	a_t (mm ²)	規格および 呼び径	r_w (%)	s (mm)
2.59	21	SD345 D13	0.38	253	SD345 D13	0.81	125

a ：せん断スパン， d ：有効高さ， p_w ：主鉄筋比， a_t ：主筋断面積， r_w ：せん断補強筋比
 s ：せん断補強筋間隔（スリーブ周辺を除く）

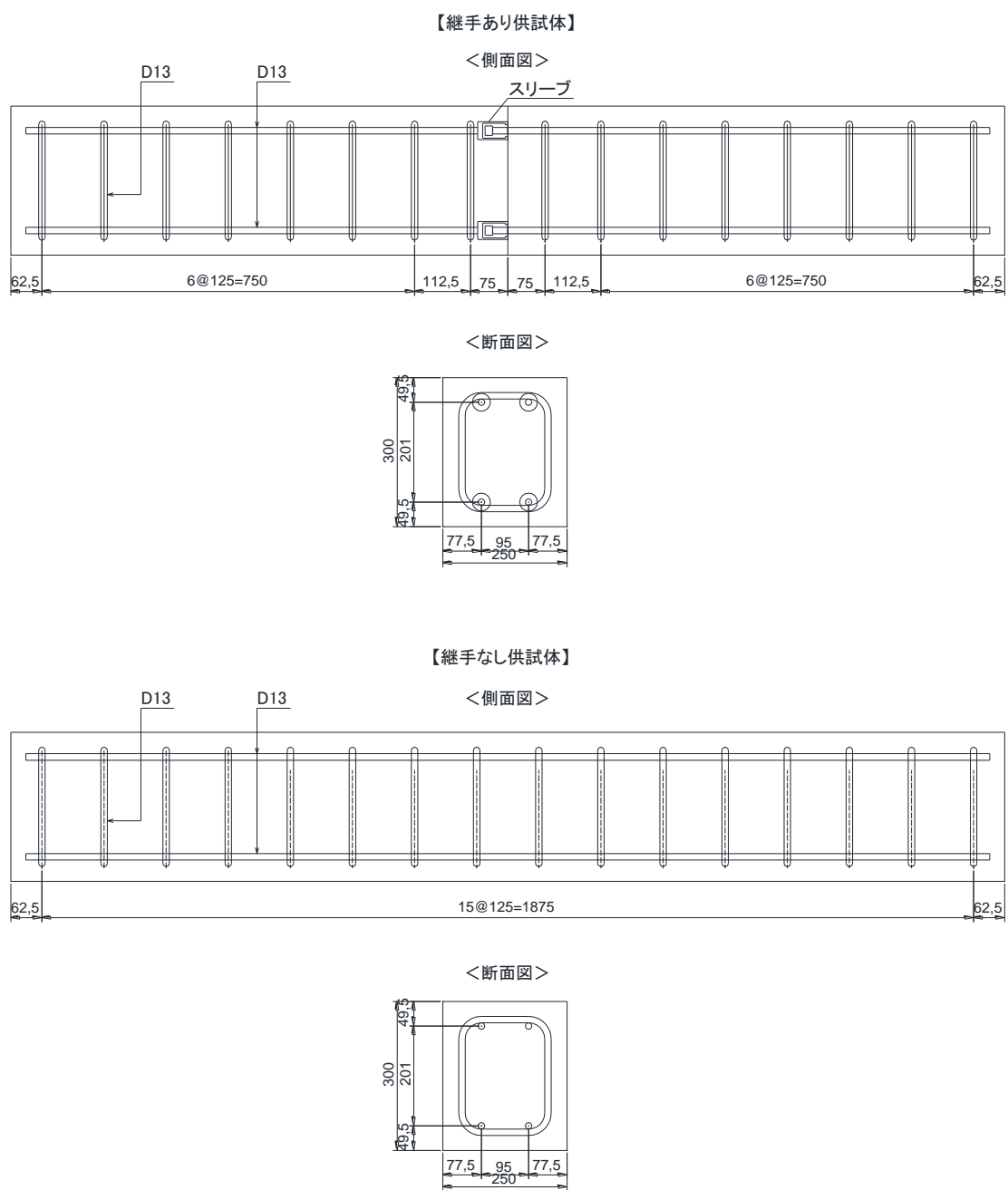


図 5.2.1 曲げ試験供試体概要（上：継手あり供試体，下：プレーン供試体）

5.2.3 供試体の製作

コンクリートは、呼び強度 21 N/mm²、スランプ値 10 cm、粗骨材最大寸法 20 mm のレディーミクストコンクリートを使用し、2 体（プレーン 1 体、継手あり 1 体）の供試体を同日に打設した。主鉄筋および圧縮鉄筋は、SD345 の D13 とし、かぶり厚は道路橋示方書（平成 29 年）を参照し、一般的なかぶり厚 30 mm で配筋した。

継手あり供試体は、各セグメントを分離した状態で打設した。接合時、スリーブと挿入側鉄筋の位置が精度よく接合できるよう、接合部の型枠にはスリーブと挿入側鉄筋位置を固定するための専用の接合面型枠を作製した。打設後は、3 週間の湿布養生を実施した後に継手部分の接合を行い、その後 1 週間は気中養生を行った。プレーン供試体も同様の養生方法とした。

ここで、継手あり供試体の接合は、充填材の粘性が低いため、スリーブ側の供試体を鉛直に立てた状態で充填材をスリーブに流し込み、上から挿入鉄筋側の供試体を差し込む形で接合を行った。この際、接合面には表 5.2.3 に示す物性の 1 液性エポキシ樹脂接着剤を塗布した。写真 5.2.1 にスリーブ側の供試体の接合前の状況（エポキシ樹脂接着剤塗布、充填材充填）を、写真 5.2.2 に挿入鉄筋側の供試体を、写真 5.2.3 に供試体接合後の状況を示す。

表 5.2.3 エポキシ樹脂接着剤諸元

項目	数値
可使時間	3 時間
引張強さ (N/mm ²)	17.0
圧縮強さ (N/mm ²)	75.5
引張せん断接着強さ (N/mm ²)	14.0
接着強さ (N/mm ²)	7.0



写真 5.2.1 スリーブ側の供試体の接合前状況



写真 5.2.2 挿入側供試体



写真 5.2.3 供試体接合状況

5.3 実験方法

載荷試験は手動の油圧ポンプを使用し、静的 4 点曲げ載荷試験を実施した。載荷点には円柱状の鋼板を 2 枚の支圧板で挟むようにして載荷を行った。支点には鋼棒の上に支圧板を設置し、円柱鋼板の水平方向の変位を制御する目的で円柱鋼板の両脇に鋼板を設置した。

ひずみゲージはコンクリート表面およびスリーブ周辺に貼付した。コンクリート表面のひずみゲージの貼付位置を図 5.3.1 に、スリーブ周辺のひずみゲージの貼付位置を図 5.3.2 に示す。モルタル充填継手による応力の伝達を検討するためにスリーブ側主鉄筋にも同様にひずみゲージを貼り付けた。継手あり供試体は、写真 5.3.1 に示すとおり、供試体接合部分に開口変位を測定する目的でクリップゲージを設置した。

載荷試験中は、荷重が 50 kN 増加する毎に載荷を中断し、ひび割れ発生状況を確認しながら実験を行った。載荷試験の様子を写真 5.3.2 に示す。

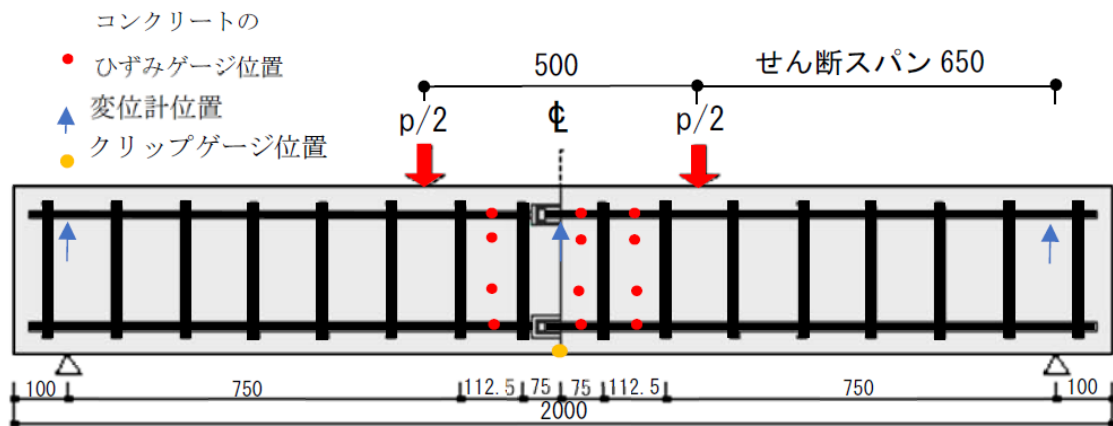


図 5.3.1 ひずみゲージ等貼付状況

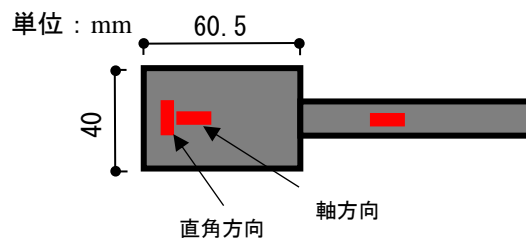


図 5.3.2 スリーブ周辺のひずみゲージの貼付位置



写真 5.3.1 クリップゲージ設置状況



写真 5.3.2 載荷試験

5.4 実験結果および考察

5.4.1 荷重変位関係

表 5.4.1 に初期ひび割れ荷重，降伏荷重および終局荷重の計算値を示す．コンクリートの圧縮強度および曲げ強度は JISA 1108 [日本産業規格,2021a]，JISA 1106 [日本産業規格,2021b] に準拠して値を求めた．ひび割れ発生荷重の実験値 P_{cr-exp} は目視によってひび割れを確認した際の値，実験値の鉄筋降伏荷重 P_{y-exp} は引張鉄筋降伏により RC はりの荷重低下が見られた最初の値，また終局荷重 P_{u-exp} は載荷試験における最大荷重を使用した．この結果，ひび割れ発生荷重は計算値と比較して値が小さくなった．また，鉄筋降伏荷重および終局荷重は計算値と比較すると大きくなった．

表 5.4.1 曲げ耐力計算結果および実験値

供試体名	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生荷重		鉄筋降伏荷重		終局荷重	
		P_{cr-cal} (kN)	P_{cr-exp} (kN)	P_{y-cal} (kN)	P_{y-exp} (kN)	P_{u-cal} (kN)	P_{u-exp} (kN)
プレーン	32.3	48.0	36.3	63.0	71.9	81.0	97.5
継手あり			39.4		72.2		90.2

載荷荷重と供試体中央の鉛直変位の関係を図 5.4.1 に示す．一部荷重が減少している部分はひび割れ確認時に，荷重増加を中断したためである．プレーン供試体はコンクリートの圧壊を確認した後に載荷を中断した．継手あり供試体は鉄筋の降伏を確認した後に載荷途中で接合面の目開きが進行して接合部上縁のエポキシ樹脂接着剤の破砕に至った時点で載荷を中断した．図 5.4.1 より初期剛性に関しては，プレーン供試体と継手あり供試体とで大きな差が見られず，継手の抜出し等も確認されなかったため，弾性範囲で継手が曲げ引張挙動に対して十分な耐力を有していることがわかった．一方で，破壊に至った変位は継手ありの供試体の方がプレーン供試体よりも小さかったため，変形性能はプレーン供試体よりも劣る傾向がみられた．

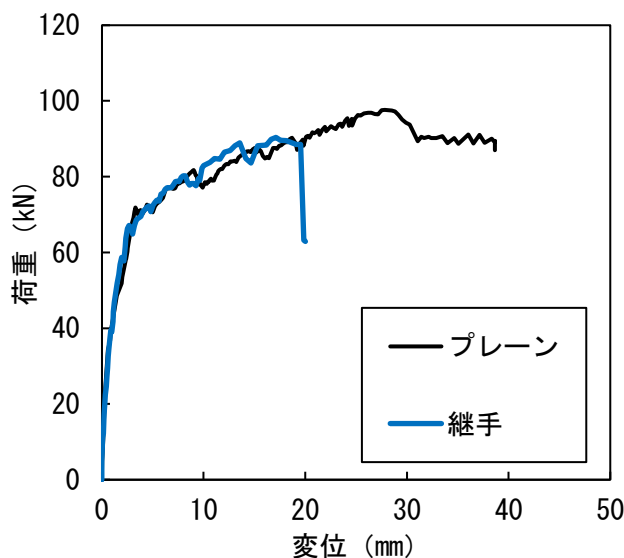


図 5.4.1 載荷荷重と供試体中央の鉛直変位の関係

図 5.4.2 に荷重および供試体中央のクリップゲージの開口変位関係を示すが、鉄筋降伏後に接合部の開口変位の値が大きくなっていることがわかる。なお、初期のひび割れ発生は接合面以外で確認した。

図 5.4.3 に弾性範囲内における継手あり供試体の荷重－開口変位関係を示す。鋼材腐食に関してコンクリート標準示方書（土木学会 [2017]）ではひび割れ幅の限界値 W_a をコンクリートのかぶり c の関数で与えており、鉄筋コンクリートの場合 $0.005c$ としてよいとされている。本研究で使用した供試体のかぶりは 30 mm であり、ひび割れ幅の限界値 W_a は 0.15 mm となる。ここで、本実験の継手あり供試体の鉄筋降伏荷重は 72.2 kN であり、図 5.4.3 より、開口変位がひび割れ幅限界値 0.15 mm 程度となるのは、鉄筋降伏荷重の約 4 割にあたる 29.5 kN 付近であることがわかる。SD345 の鉄筋降伏応力の 4 割は計算上約 140 N/mm^2 となる点に対し、実際の RC 構造物の引張鉄筋に永続的に作用する引張応力度は、一般に 100 N/mm^2 以下に制御して設計するため、通常の弾性域内での使用状況下では十分な性能を有していると考えられる。

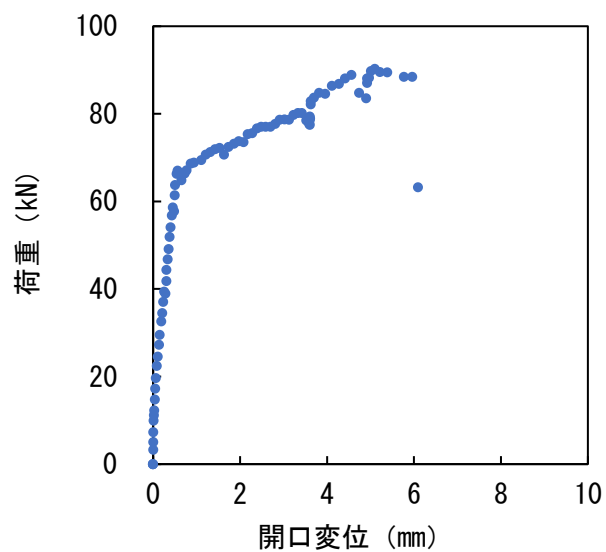


図 5.4.2 継手接合面の開口変位

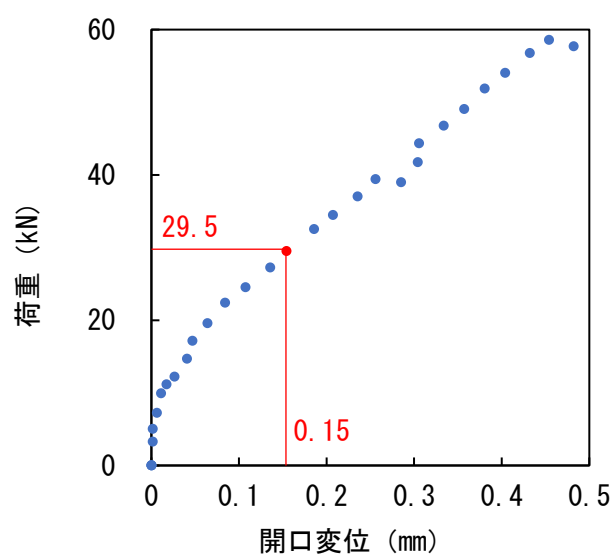


図 5.4.3 弾性域の継手接合面の開口変位
(図 5.4.2 を拡大)

5.4.2 破壊状況

試験終了後に撮影した供試体中央付近の破壊状況について全景を写真5.4.1に、中央付近の状況を写真5.4.2に示す。いずれの供試体においても等曲げ区間に均等にひび割れが進行しており荷重の伝達が円滑に行われていることがわかる。

図5.4.4にひび割れ発生状況を示す。載荷スパン中のひび割れを比較するとプレーン供試体のひび割れが継手あり供試体と比較して荷重が小さい段階で進行しており、ひび割れ本数も多いことがわかる。これは、曲げ引張力によって継手あり供試体の接合部の目開きにより、プレーン供試体よりもひび割れ分散性が低下したことが要因の一つと推察される。その一方で、継手あり供試体でも接合部近傍にひび割れは発生しており、一定のひび割れ分散性は確認できた。大野ら[2013]より、機械式鉄筋継手をRCはりに使用した際、継手部にひび割れが集中することが報告されているが、本継手構造を有する接合部付近で一定のひび割れ分散性が確認できていることから、曲げ荷重下において良好な結果が得られていると考えられ、本継手構造を有する場合でも、曲げ引張を受ける部材の連続性やひび割れ分散性が失われないことが確認できた。



写真 5.4.1 破壊状況全景

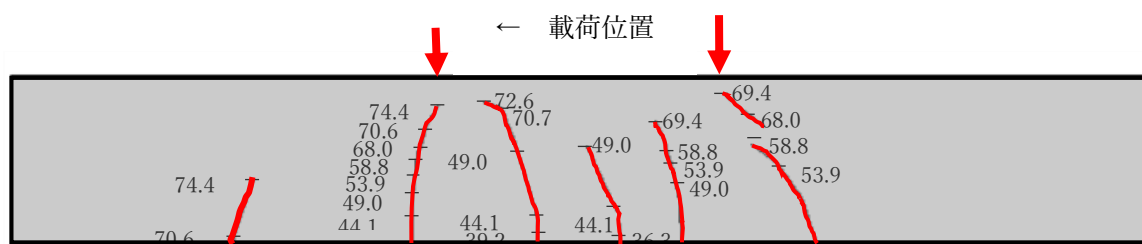
(写真手前：プレーン供試体、写真後方：継手あり供試体)



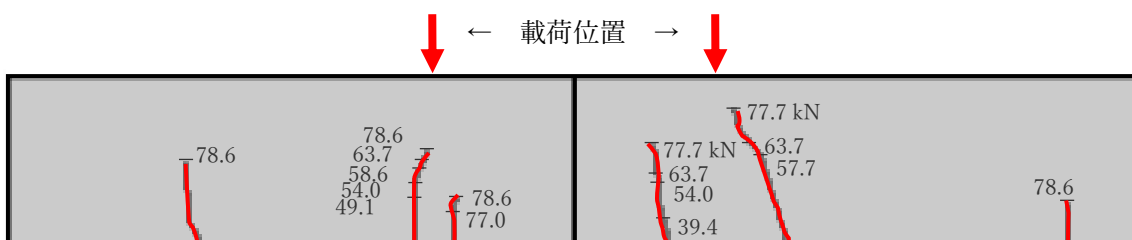
(a) プレーン供試体

(b) 継手あり供試体

写真 5.4.2 供試体中央付近のひび割れ状況



(a) プレーン供試体



(b) 継手あり供試体

図 5.4.4 ひび割れ発生状況

5.4.3 スリーブ周辺のひずみ

スリーブ部分のひずみに関して、圧縮側スリーブの荷重とひずみの関係を図 5.4.5 に、引張側スリーブの荷重およびひずみの関係を図 5.4.6 に示す。図 5.4.5 より、引張鉄筋が降伏した後に、中立軸位置が徐々に上端寄りになることで圧縮側鉄筋が引張側に移行していることが確認できる。図 5.4.6 より、引張側スリーブ部分の軸方向ひずみの値はおよそ 125×10^{-6} であり、スリーブ部分に作用する応力は 25 N/mm^2 程度であることから、スリーブ自体の降伏はなかったものと考えられる。

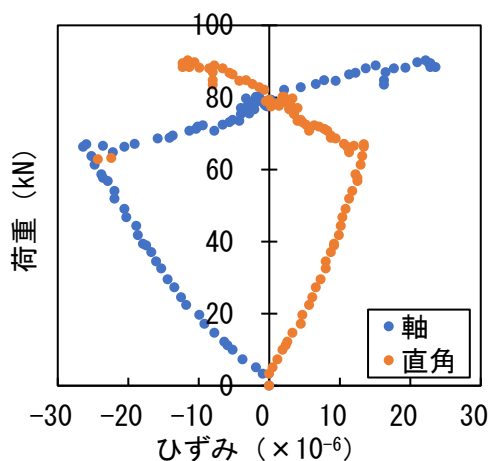


図 5.4.5 圧縮側スリーブの荷重－ひずみ関係

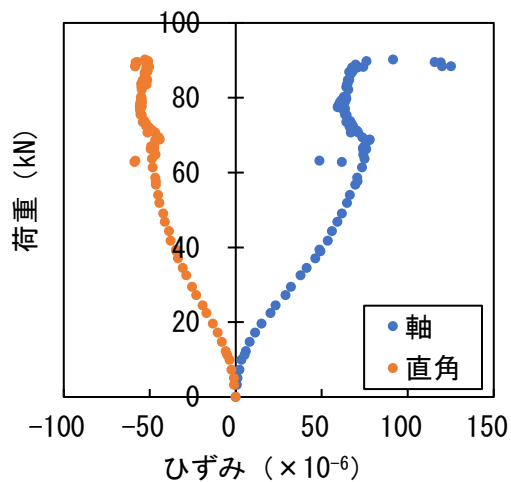


図 5.4.6 引張側スリーブの荷重－ひずみ関係

圧縮側主筋の荷重およびひずみの関係を図5.4.7に示す。図5.4.7のプレーン供試体の荷重－圧縮鉄筋ひずみ関係よりコンクリートの圧壊後に再度圧縮側に移行していることがわかる。図5.4.8は引張側主筋の荷重およびひずみの関係を示す。図5.4.8より、継手側および挿入側鉄筋をプレーン供試体と比較すると両供試体に大きな差は見られなかった。

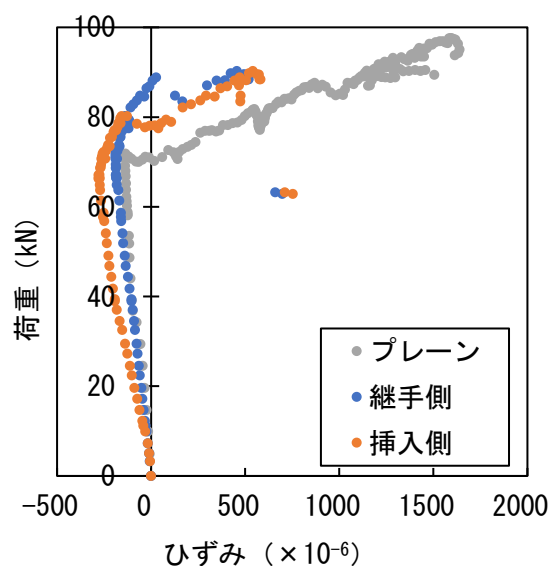


図 5.4.7 圧縮側主筋の荷重－ひずみ関係

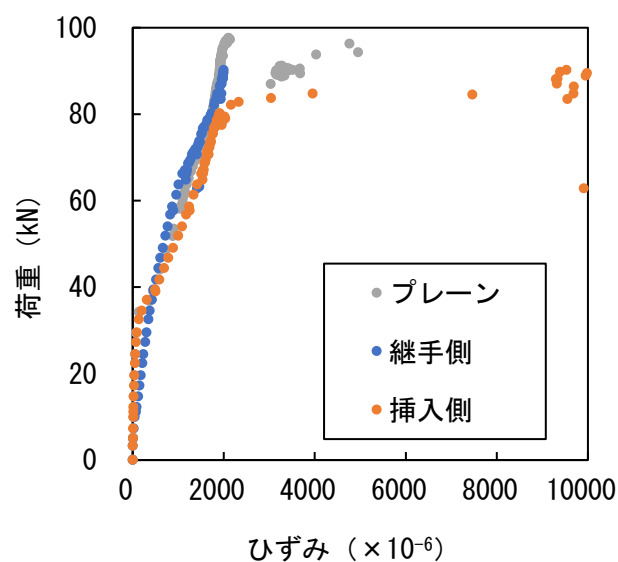


図 5.4.8 引張側主筋の荷重－ひずみ関係

5.5 まとめ

3.5D の埋込み長で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を示した継手構造を有する RC はりの曲げ荷重下での挙動を確認するため、プレキャスト部材を想定して分割した部材を継手にて接合した RC はりについて静的 4 点曲げ載荷試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 継手あり供試体の RC はりの荷重－変位関係は、曲げ変形性能がプレーン供試体よりも劣る傾向がみられたものの、鉄筋が降伏するまでは継手あり供試体と大きな違いは見られず、プレーン供試体と同等の性能を有することが確認できた。コンクリート標準示方書の鉄筋腐食に関する限界ひび割れ幅の算定より、鋼材腐食に対して、通常使用する荷重状況下では問題ないことが確認できた。
- (2) 継手あり供試体のひび割れはプレーン供試体と比較するとひび割れ本数が少なく、ひび割れの進行も少なかった。これは、継手あり供試体の接合面の目開きによる影響によってひび割れ分散性が低下したことが主な要因であると推察される。一方、継手あり供試体でも、接合部近傍にひび割れは発生していることから、継手を有する場合でも、部材の連続性やひび割れ分散性が失われないことが確認できた。
- (3) 母材鉄筋が降伏に至るまでスリーブ鉄筋の抜出し等は確認されなかったため、本実験で使用したモルタル充填継手が RC はりの曲げ挙動に対して十分な耐力を有することが示された。

5.6 第5章の参考文献

- 大野拓也, Nguyen Dac Phuong, 睦好 宏史, 牧 剛史: 機械式鉄筋継手の性能がRC部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 2, pp. 589–594, 2013.
- 土木学会: コンクリート標準示方書—設計編—, 2017.
- 日本産業規格: JISA1108 コンクリートの圧縮強度試験方法, 2021a.
- 日本産業規格: JISA1106 コンクリートの曲げ強度試験方法, 2021b.
- 村上力也, 森本健斗, 下野聖也, 尾上幸造: モルタル充填継手の耐荷性能に及ぼす各種パラメータの影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 499–504, 2020.
- 森本健斗, 村上力也, 尾上幸造: 充填材の種類及び挿入側鉄筋のヘッド加工がモルタル充填継手の耐荷性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 493–498, 2020.

第 6 章

継手構造の実用性向上に向けた検討

6.1 概要

3.5D の埋込み長を目安にスリーブ内部形状，挿入側鉄筋のヘッド加工，充填材種別の工夫を行い，表 6.1.1 のケースの継手構造とすることで母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力となることを確認できたが，スリーブ内部の加工や挿入側鉄筋のヘッド加工に多くのコストが必要となる課題があった．そこで，第 4 章で得られた知見より，引張耐荷力向上に寄与する要因として高膨張型の充填材を用いることによる影響が支配的である可能性が高いことがわかったため，スリーブの内部加工や挿入側鉄筋のヘッド加工を無しとした高膨張型充填材使用のみの継手構造について検証し，継手構造の簡素化を図った．

また，そのうえで将来的なプレキャスト部材への実用化の一例として，プレストレストコンクリート橋への適用を想定し，プレキャストセグメント（工場などで分割して製作された部材）を使用した橋梁に焦点を当て，PC 部材に本継手構造を適用した場合の挙動について実験的検討を実施した．すなわち，実橋に配置される PC 鋼材量を実験レベルにスケール調整した鋼材の配置を行った PC はりによる曲げ載荷試験を行った．また，プレキャストセグメントによる PC 橋の施工は，通常，セグメント継ぎ目の接合は鉄筋を連続させず，専用の PC 鋼材により導入するプレストレスのみで接合を行うが，鉄筋を連続させることで PC 鋼材量を低減できるかどうか試設計を行い検証した．

表 6.1.1 3.5D 埋込み長で母材鉄筋破断を達成した組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋	備考
1	凹凸	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33N/mm ² 以上	ヘッド加工あり	3.5D 母材鉄筋破断 達成
2	先端すぼみ		ヘッド加工あり	
3	なし		ヘッド加工あり	

6.2 継手構造の簡素化

6.2.1 継手の概要および検討ケース

継手構造を簡素化するため、3.5Dの埋込み長で母材鉄筋の破断を達成した表6.1.1の組合せのうち、最も引張耐荷力向上効果が高いと考えられた高膨張型充填材の使用のみの継手構造について一軸引張試験を行った。第4章の要素実験により、高膨張型充填材を使用し、ヘッド加工の無い継手構造では3.5Dの埋込み長で母材鉄筋の破断前にスリーブ部での抜け出しによる破壊モードであることがわかっているため、表6.2.1のとおり、高膨張型充填材の使用のみの継手構造とした場合の検討ケースは、埋込み長を4.0D~10.0Dに変化させたものとした。図6.2.1に簡素化した継手構造の概要を示す。

表 6.2.1 簡素化した継手構造組合せ

ケース	スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋	埋込み長	備考
1	なし	セメント系 高膨張圧 48時間膨張圧： 33 N/mm ² 以上	ヘッド加工 なし	4.0D	スリーブの 簡素化
2				5.0D	
3				6.0D	
4				7.0D	
5				8.0D	
6				9.0D	
7				10.0D	

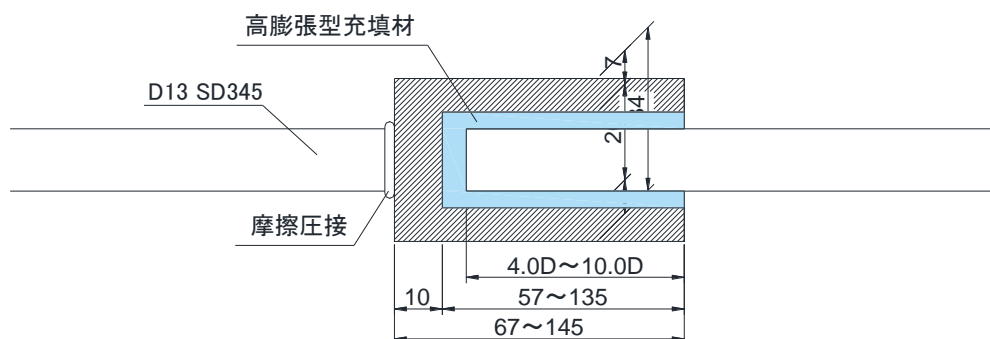


図 6.2.1 簡素化した継手構造

6.2.2 実験結果および考察

図 6.2.2 に埋込み長 4.0 D ~ 7.0 D の荷重-変位曲線を、図 6.2.3 に埋込み長 8.0 D ~ 10.0 D の荷重-変位曲線を示す。写真 6.2.1 にも示すように、埋込み長 4.0 D ~ 10.0 D までの全ケースにおいて母材鉄筋の破断による破壊モードとなり、埋込み長が 4.0 D 以上あれば簡素化した継手構造で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を得ることができたことがわかった。各ケースで 1 体ずつの供試体で実験を行っているため、耐荷力のバラつきについては検証できていないものの、第 4 章で 3.5 D の埋込み長の場合はスリーブ部での抜け出しによる破壊形態であったことから、高膨張型充填材を使用した場合に母材鉄筋と同等の引張耐荷力を得られる限界の埋込み長は、3.5 D ~ 4.0 D 付近となることがわかった。

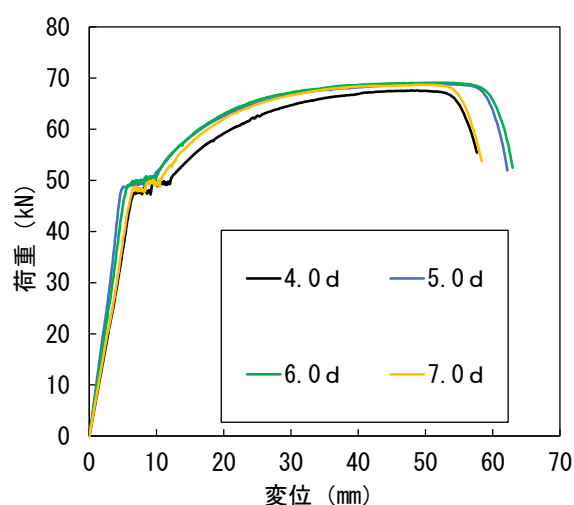


図 6.2.2 載荷荷重と伸び変位 (4.0D ~ 7.0D)

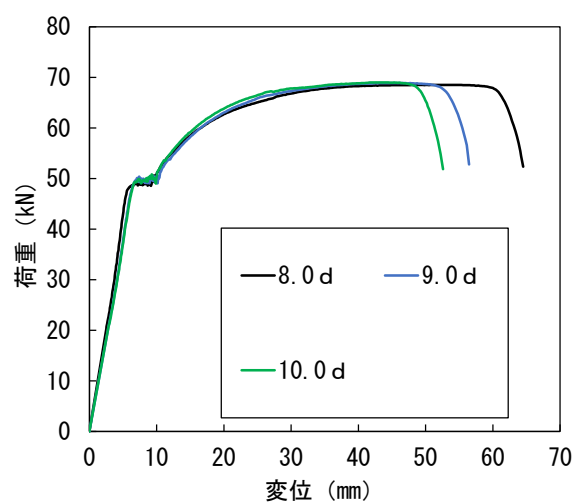


図 6.2.3 載荷荷重と伸び変位 (8.0D ~ 10.0D)



(a) 4.0D



(b) 5.0D



(c) 6.0D



(d) 7.0D



(e) 8.0D



(f) 9.0D



(g) 10.0D

写真 6.2.1 破壊状況

6.3 PC橋への適用検証

6.3.1 プレキャストセグメントを使用したPC橋について

図6.3.1にプレキャストセグメントを使用したPC橋の例を示す。プレキャストセグメントを使用したPC橋は、工場などで製作したセグメント部材を現地に運搬し、プレストレスを導入して一体化させた後、架設する工法が一般的である。この際、セグメント同士の接合部は鉄筋を連続させずプレストレスのみで一体化させる方法が標準となるが、接合部は鉄筋が連続していないことから、設計荷重が作用した際に接合部に引張応力を発生させないように制御した設計を行うことが道路橋示方書で規定されている。

過去には、東山ら [1998, 1999] により、PCプレキャストセグメント工法の接合部の鉄筋を接続させた場合、PRC設計として制御できる可能性が示唆されており、東山ら [2001] によると、PCプレキャストセグメント工法の軸方向引張鉄筋を重ね継手と同等の性能を有する継手にて接続化させることで、接合鉄筋の応力伝達で一体部材と同等の性能を確保できるものと考察している。本研究で取り扱う継手構造も、母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を有することが確認できているため、本継手構造を用いてPCプレキャストセグメント工法の接合部の引張鉄筋を連続化させることで設計時の制御レベルを緩和し、配置するPC鋼材量の最適化を図れる可能性がある点に着目した。

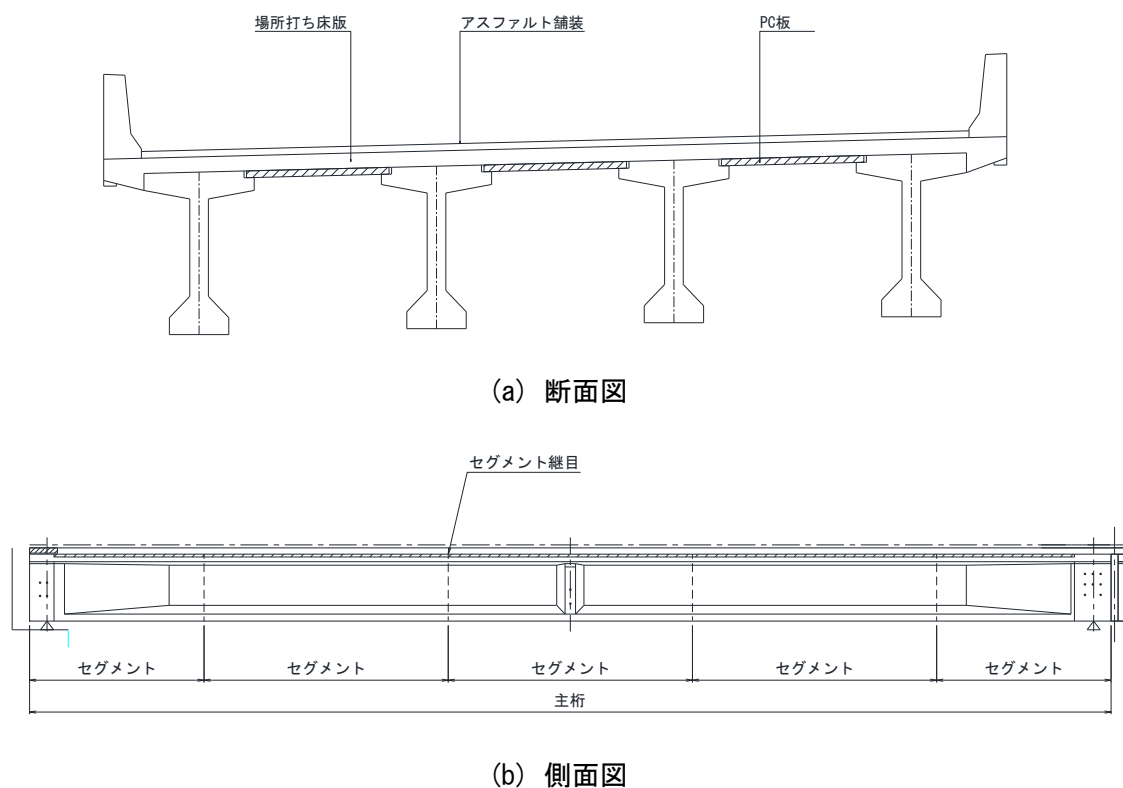


図 6.3.1 PCプレキャストセグメント工法によるPC橋の例
(PC合成床版を用いたPC合成桁橋)

6.3.2 検証方法

(1) 試設計

本研究の継手構造により、セグメント接合部の引張鉄筋を連続化させることで、一体部材と同等であることを前提とした場合に、PC鋼材量を軽減し経済的に有効であることを確認するために、接合部の応力制御レベルを低減したPCプレキャストセグメント工法を想定したPC橋の試設計を行った。

(2) 曲げ載荷試験

セグメント接合部が一体部材と同等であることを前提に試設計を行ったため、本継手構造によりセグメント接合部の引張鉄筋を接合させた場合を想定したPCはりの静的曲げ載荷試験により、継手部の挙動について確認を行った。曲げ載荷試験の供試体は、試設計を行った橋梁のPC鋼材量を実験供試体レベルにスケール調整したPC鋼材量を配置したはり供試体とし、中央にセグメント接合部を設けて、鉄筋継手を行ったうえでプレストレスを導入して一体化させた状態で実験を実施した。

6.3.3 試設計

(1) 設計条件および検討ケース

試設計を行う条件は下記の条件とし、表 6.3.1 のケースについて検討した。橋梁のケースは 4 径間の橋梁について支間長を変化させた 3 種類の橋梁を想定し、それぞれ接合部の引張鉄筋が連続しない標準ケースと鉄筋が連続することを想定したケースについて PC 鋼材本数の比較検討を行った。図 6.3.2 に各ケースのセグメントの割付を示す。

[設計条件]

構造種別 : プレストレストコンクリート道路橋
 構造形式 : ポストテンション方式連結合成桁橋 (PC 合成床版タイプ)
 径間数 : 4 径間
 幅員構成 : 全幅
 10.650 m
 地覆 + 車道 + 地覆
 0.445 m + 9.760 m + 0.445 m
 活荷重 : B 活荷重
 衝撃係数 : $i = 10 / (25+L)$
 斜 角 : 90° 00' 00"
 PC 鋼材 : 12S12.7
 設計基準 : 平成 29 年 道路橋示方書

表 6.3.1 試設計ケース

ケース番号	支間長 (m)	桁高(m)	セグメント継目部の引張鉄筋
ケース 1-1	30	1.9	鉄筋非連続
ケース 1-2			鉄筋連続
ケース 2-1	35	2.2	鉄筋非連続
ケース 2-2			鉄筋連続
ケース 3-1	40	2.5	鉄筋非連続
ケース 3-2			鉄筋連続

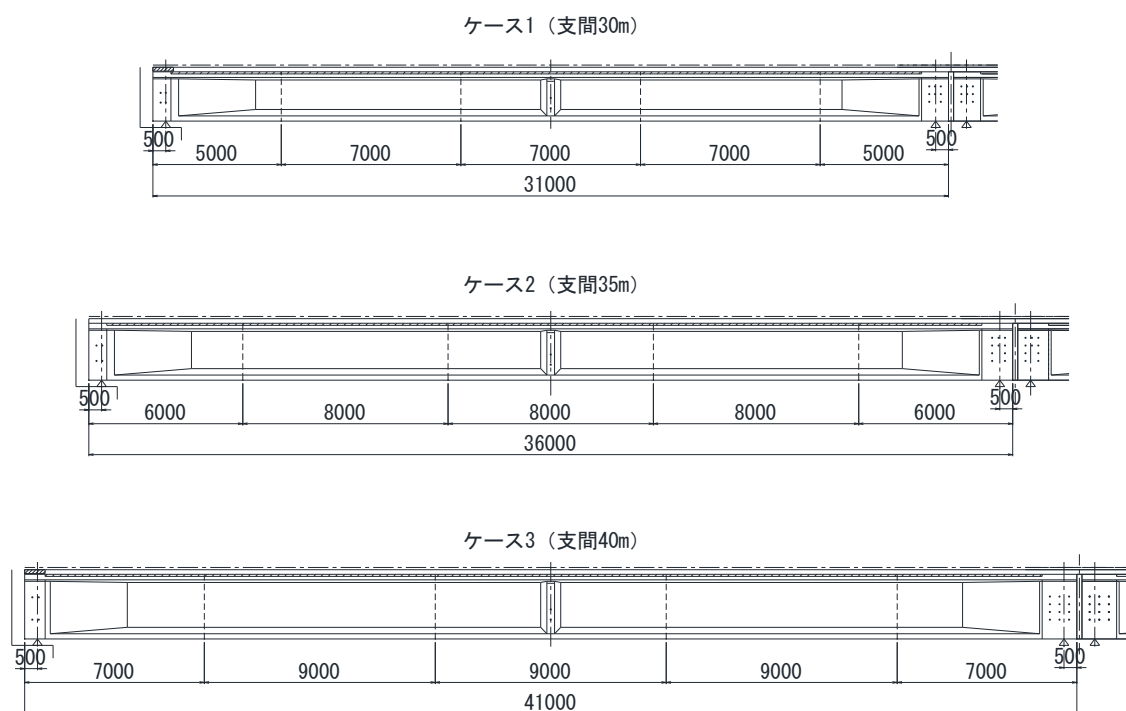


図 6.3.2 各ケースのセグメント割付

(2) 継目部の制御方法

図 6.3.3 に鉄筋非連続ケースの主桁の応力制御の概要を示し，図 6.3.4 に鉄筋連続ケースの主桁の応力制御の概要を示す．連続部の引張応力制限値 3.1 N/mm^2 に対して，鉄筋非連続の場合の継目部は引張応力を生じさせないように制御する条件となる．その一方で，連続部材であると仮定した鉄筋連続ケースは，主桁の引張応力制限値はすべて 3.1 N/mm^2 とした．

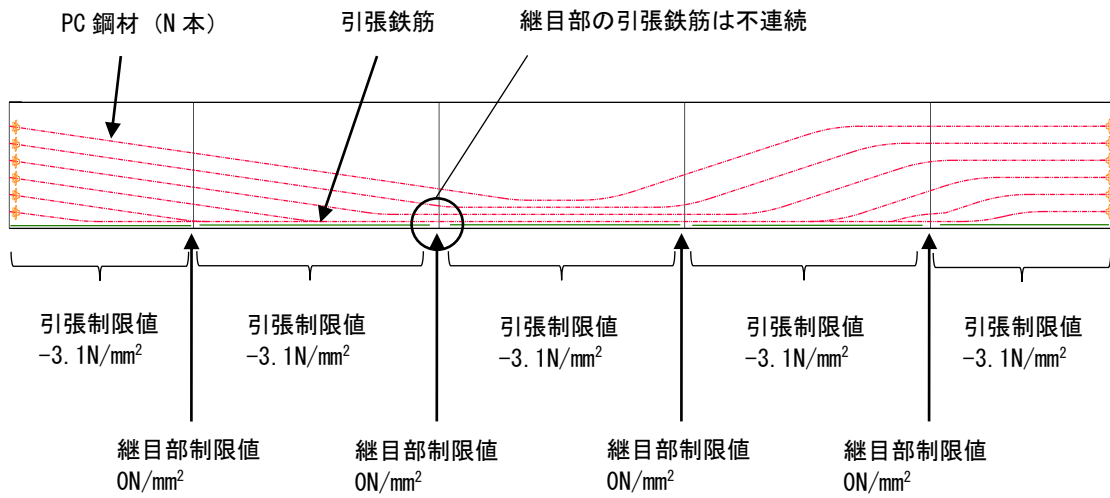


図 6.3.3 鉄筋非連続ケースの主桁応力制御の概要

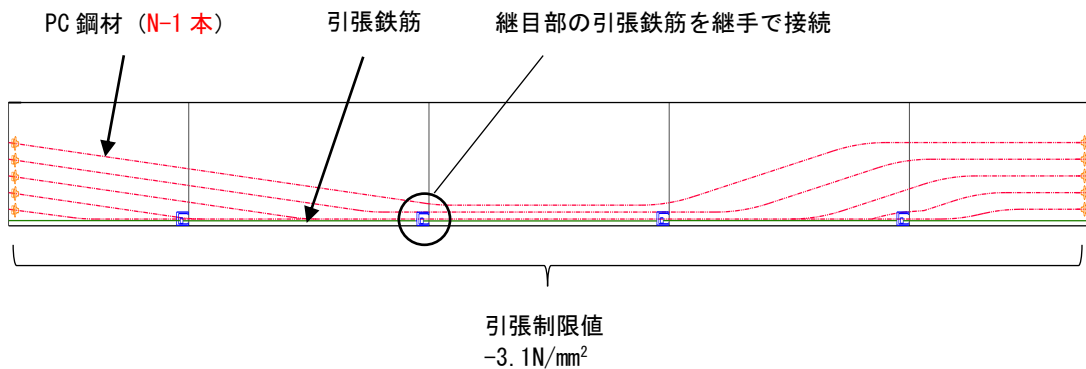


図 6.3.4 鉄筋連続ケースの主桁応力制御の概要

(3) 設計結果および考察

試設計した結果のうち、本項では図 6.3.5 に示す支間部の代表設計断面についての検討結果を示す。表 6.3.2 にケース 1 の結果を、表 6.3.3 にケース 2 の結果、表 6.3.4 にケース 3 の結果を示し、表 6.3.5 に試設計結果のまとめを示す。

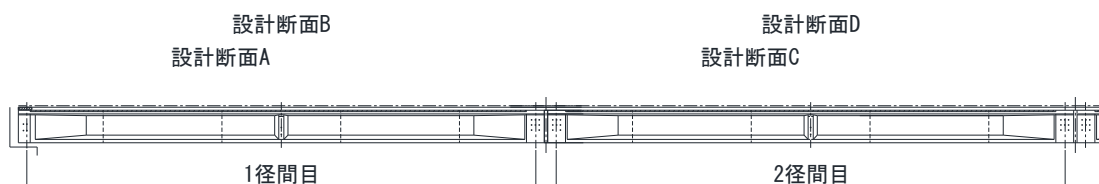


図 6.3.5 設計断面代表箇所

表 6.3.2 限界状態 1 の主桁曲げ応力度 (ケース 1)

(a) ケース 1 : 支間長 30m (第 1 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 A (N/mm ²)		支間中央 設計断面 B (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 1-1	5	死荷重	6.733	2.455	3.840	6.050
		死荷重+ 活荷重	5.879	1.024	3.357	0.212
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 1-2	4	死荷重			3.753	3.597
		死荷重+ 活荷重			3.050	-2.857
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	OK

(b) ケース 1 : 支間長 30m (第 2 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 C (N/mm ²)		支間中央 設計断面 D (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 1-1	5	死荷重	4.726	4.835	4.594	2.985
		死荷重+ 活荷重	4.073	0.783	4.021	-1.739
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 1-2	4	死荷重			4.398	1.081
		死荷重+ 活荷重			3.585	-4.234
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	NG

表 6.3.3 限界状態 1 の主桁曲げ応力度 (ケース 2)

(a) ケース 2 : 支間長 35m (第 1 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 A (N/mm ²)		支間中央 設計断面 B (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 2-1	6	死荷重	5.421	6.228	4.675	6.194
		死荷重+ 活荷重	4.848	1.591	4.158	0.361
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 2-2	5	死荷重			4.571	4.099
		死荷重+ 活荷重			4.054	-1.750
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	OK

(b) ケース 2 : 支間長 35m (第 2 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 C (N/mm ²)		支間中央 設計断面 D (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 2-1	6	死荷重	5.808	4.823	5.304	3.580
		死荷重+ 活荷重	5.106	0.747	4.680	-1.188
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 2-2	5	死荷重			5.190	1.686
		死荷重+ 活荷重			4.566	-3.094
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	OK

表 6.3.4 限界状態 1 の主桁曲げ応力度 (ケース 3)

(a) ケース 3 : 支間長 40m (第 1 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 A (N/mm ²)		支間中央 設計断面 B (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 2-1	7	死荷重	6.845	6.715	6.135	6.262
		死荷重+ 活荷重	8.293	1.737	8.861	0.475
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 2-2	6	死荷重			6.014	4.303
		死荷重+ 活荷重			8.56	-1.496
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	OK

(b) ケース 3 : 支間長 40m (第 2 径間)

ケース	PC 鋼材 本数 (本)	荷重 条件	セグメント目地 設計断面 C (N/mm ²)		支間中央 設計断面 D (N/mm ²)	
			上縁	下縁	上縁	下縁
ケース 2-1	7	死荷重	7.137	5.065	6.537	3.772
		死荷重+ 活荷重	8.922	1.052	8.629	-0.984
		許容値	0.0 ≤ σ _c ≤ 24.0		-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定	OK	OK	OK	OK
ケース 2-2	6	死荷重			6.427	1.959
		死荷重+ 活荷重			8.518	-2.807
		許容値			-3.1 ≤ σ _c ≤ 24.0	
		判定			OK	OK

表 6.3.5 試設計結果のまとめ

ケース	支間長 (m)	桁高 (m)	セグメント継目部の 引張鉄筋	PC 鋼材 本数	検討結果
ケース 1-1	30	1.9	鉄筋非連続	5 本	NG
ケース 1-2			鉄筋連続	4 本	
ケース 2-1	35	2.2	鉄筋非連続	6 本	OK
ケース 2-2			鉄筋連続	5 本	
ケース 3-1	40	2.5	鉄筋非連続	7 本	OK
ケース 3-2			鉄筋連続	6 本	

表 6.3.5 で示した結果のとおり，検討ケースによっては引張鉄筋を継目部で連続させることで，PC 鋼材本数を低減できる可能性があることが確認できた．このため，PC プレキャストセグメント工法で継手により引張鉄筋を連続させることで，一体部材と同等の条件として設計できれば，経済的に優位な構造を検討することが可能であることがわかった．

6.4 PC はりの曲げ載荷試験

6.4.1 実験の概要

6.3 で示した試設計結果により，PC プレキャストセグメント工法の引張鉄筋を連続させ，一体部材とみなすことで，PC 鋼材本数を低減し経済的に優位となる可能性があることがわかった．このため，本項では試設計した PC 橋に配置した PC 鋼材量やプレストレス量を実験はりサイズにスケール調整して再現した PC はり供試体により静的曲げ載荷試験を行い，プレストレスが導入されたセグメントはりの接合部に本研究の継手構造を適用した際の検討を行った結果を示す．

6.4.2 供試体の設計

試設計を行った PC 橋を実験供試体サイズにスケール調整する際、実橋梁に近い条件となるように供試体の設計を行った。PC 橋はプレストレスの導入によりその構造が成立しており、PC 鋼材の配置高さおよび鋼材量が重要な要素となる。このため、配置される鋼材の有効高さ d および鋼材量 A に着目し、図 6.4.1 の要領で PC 鋼材と引張鉄筋について $d \times A$ の比率が試設計した PC 橋と供試体とで概ね整合するように供試体を設計した。

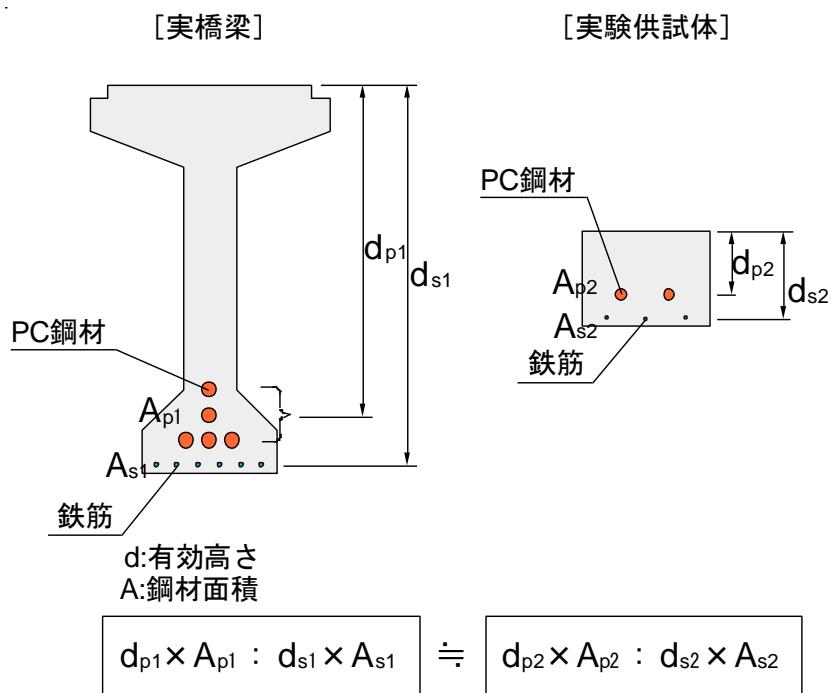


図 6.4.1 供試体サイズへのスケール調整要領

表 6.4.1 に供試体の設計結果を示し、図 6.4.2 に設計した供試体の形状を示す。ここで、PC 鋼材を緊張する際、部材製作後に緊張力を導入するポストテンション方式での PC 鋼材定着方法は、くさび式とねじ式の 2 種類がある。PC 橋の桁内に配置する PC 鋼材の定着はくさび式による定着が一般的であるが、くさび式の定着具は定着時にくさびがめり込む分、定着具付近では緊張力のロスが生じるため、小規模な部材の緊張には不向きな面もあることから、供試体に用いた定着具はねじ式によるタイプを選定した。また、PC 鋼材は付着を有する PC 鋼より線が一般に使用されるため、供試体に配置する PC 鋼材も PC 鋼より線とした。これにより、PC 鋼材は「ねじ式定着できる PC 鋼より線」を用いた。使用した PC 鋼材の諸元を表 6.4.2 に示す。

表 6.4.1 供試体設計結果

	桁高 (mm)	PC 鋼材 [束数× 素線径]	鉄筋	$d \times A$ (mm ³)		
				PC 鋼材	鉄筋	PC 鋼材 : 鉄筋
試設計	2216	12×12.7mm N=6 本	D16 N=6 本	13436010	2572664	5.2 : 1
供試体	450	19×10.8mm N=2 本	D13 N=3 本	794340	150140	5.3 : 1

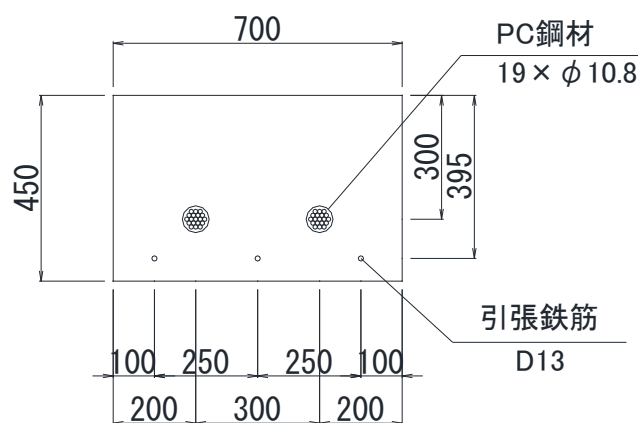


図 6.4.2 供試体の鋼材配置概要

表 6.4.3 供試体に使用した PC 鋼材の諸元

項目	単位	諸元
構成	-	19×φ10.8
記号	-	SWPR7AL
公称径	mm	54.0
断面積	mm ²	1323.9
単位質量	kg/m	11.10
引張荷重 P_u	kN	2280
降伏点荷重 P_y	kN	1938
断面図	-	

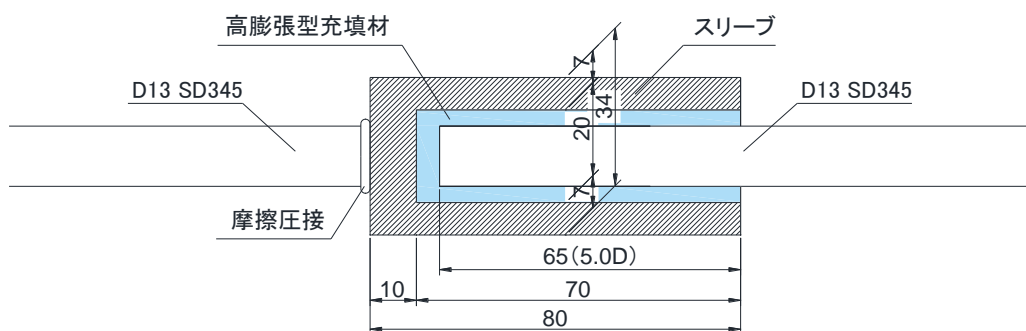
6.4.3 供試体の概要

(1) 継手構造

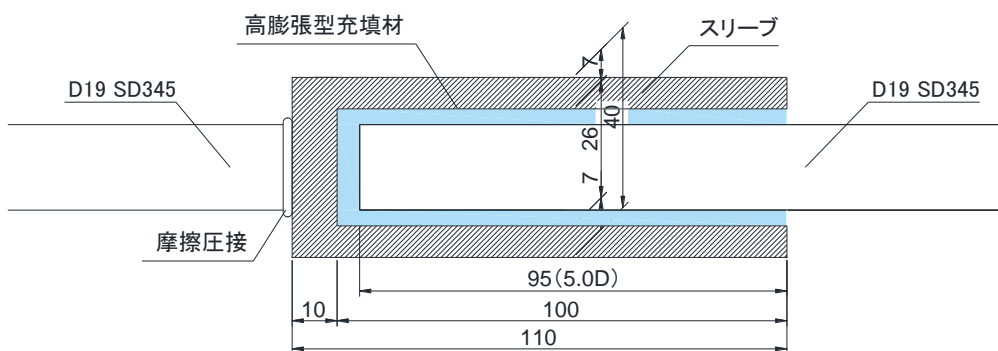
PC はり供試体の継手部に使用したモルタル充填継手は、6.2 で継手構造の簡素化を検討した表 6.4.4 に示す継手構成とし、埋込み長は 4.0D 以上で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力が得られることがわかっていることから、5.0D に設定した。なお、本実験では D13 および D19 の 2 種類の継手を使用しており、図 6.4.3 にその継手形状を示す。

表 6.4.4 PC はり供試体に使用した継手構成

スリーブ内部形状	充填材	挿入側鉄筋
なし	セメント系 高膨張圧 48 時間膨張圧： 33N/mm ² 以上	ヘッド加工なし



(a) D13 継手



(b) D19 継手

図 6.4.3 PC はり供試体に使用した継手寸法

(2) PCはり供試体概要

表 6.4.5 に供試体諸元を，図 6.4.4 に供試体概要を示す．供試体は曲げ引張型となるように設計し，全長 4500 mm，断面幅 700 mm，高さ 450 mm，PC 鋼材有効高さ 300 mm，主鉄筋有効高さ 395 mm とした．供試体の試験区間は 4000 mm で，載荷スパンは 800 mm とした．せん断補強筋には，主鉄筋および圧縮鉄筋と同様に D13 を使用した．せん断補強筋間隔は継手あり供試体のスリーブ周辺や端部付近を除いて 200 mm 間隔で配置した．

供試体は，セグメント接合部で鉄筋継手のない標準的なケースを想定したケース 1 と，セグメント接合部で主鉄筋を鉄筋継手で連続させたケース 2，接合部のないプレーン供試体のケース 3 とした．このうち，ケース 2 については PC 部材とした性質上，鉄筋の鋼材量が PC 鋼材量に対して少なくことは避けられず，鉄筋継手の有無による挙動の差が明確に確認できない可能性もあるため，鉄筋継手の有無による挙動の違いを明確に確認するためのケースとして，主鉄筋に D19 を用いたケースについても検討を行った．

PC 鋼材の緊張力は，選定した PC 鋼材の緊張可能な最大引張力までは緊張せずに，試験時の死荷重時の応力程度となるような緊張力を算出して調整した．表 6.4.6 に PC 鋼材の緊張力を示す．

表 6.4.5 供試体諸元

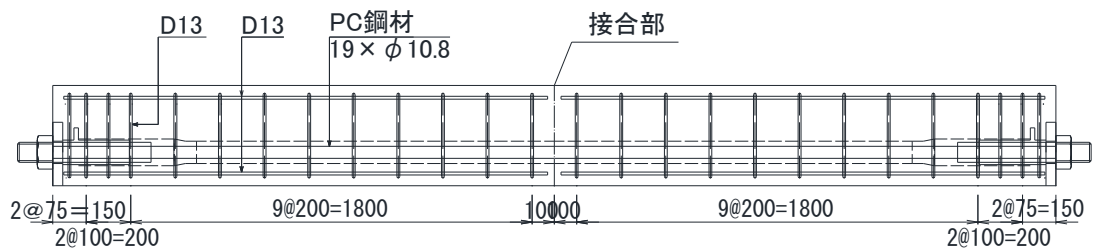
せん断スパン比 a/d	コンクリート	PC 鋼材		主鉄筋		せん断補強筋	
	呼び強度 (N/mm ²)	規格および構成	p_{w1} (%)	規格および呼び径	p_{w2} (%)	規格および呼び径	r_w (%)
4.05	50	SWPR7AL 19×φ10.8	0.84	SD345 D13 ※SD345 D19	0.12 ※0.27	SD345 D13	0.18

a ：せん断スパン， d ：有効高さ， p_{w1} ：PC 鋼材比， p_{w2} ：主鉄筋比， r_w ：せん断補強筋比
※は，図 6.4.3 のケース 2-2 の諸元を示す．

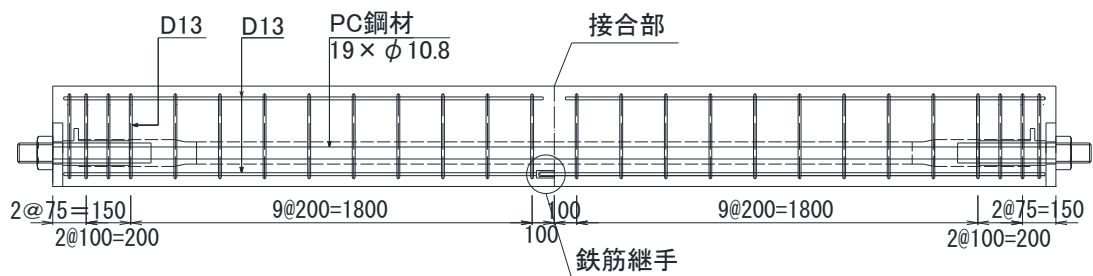
表 6.4.6 PC 鋼材緊張力

項目	値
供試体に与える緊張力 ΣP (kN)	866
1 本あたりの緊張力 P (kN)	433
許容荷重 $0.9P_y$ (kN)	1744.2

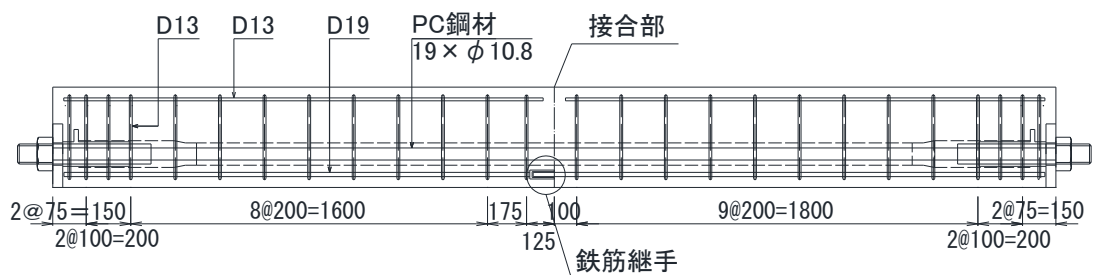
ケース1：継手なしセグメント



ケース2-1：継手ありセグメント (D13)



ケース2-2：継手ありセグメント (D19)



ケース3：プレーン

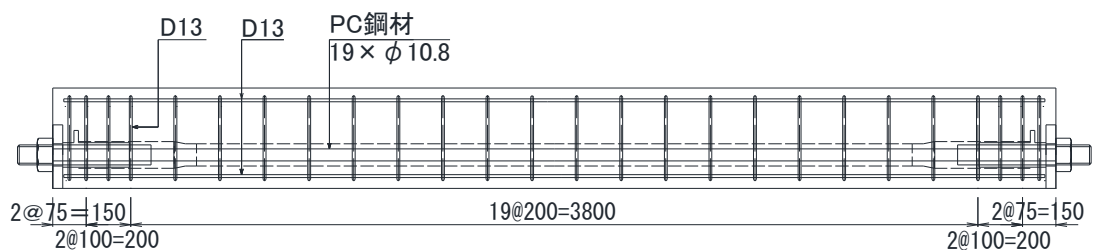


図 6.4.4 PC はり供試体概要

6.4.4 供試体の製作

各ケースの供試体はレディーミクストコンクリートを使用して製作を行った。全ケースでポストテンション方式による緊張作業を行うため、硬化後の部材内に PC 鋼材を挿入するための鋼製シースを配置した。このうち、ケース 1 およびケース 2 については、各セグメントを分割して製作（写真 6.4.1）した後、接合面にエポキシ樹脂接着剤を塗布（写真 6.4.2）して接合し、接着剤の可使用時間内に緊張作業を行い一体化した。エポキシ樹脂接着剤は第 5 章で示した RC はり供試体製作に使用した材料と同じ物（第 5 章 表 5.2.3 参照）を使用した。なお、ケース 2 については、充填材の粘性が低いため、スリーブ側の供試体を鉛直に立てた状態で充填材をスリーブに流し込み、上から挿入鉄筋側の供試体を差し込む形で接合を行い緊張した（写真 6.4.3）。継手のないケース 1 およびケース 3 については、水平方向に供試体を仮置きした状態で緊張作業を行った（写真 6.4.4）。緊張後は、すみやかにシース内にグラウトを充填した（写真 6.4.5）。



写真 6.4.1 セグメント製作後の状況



写真 6.4.2 セグメント接合面の接着剤塗布状況



写真 6.4.3 セグメント接合



写真 6.4.4 緊張作業



写真 6.4.5 グラウト作業

6.4.5 実験方法

実験はアムスラー型 1000 kN 万能試験機を使用して、静的 4 点曲げ載荷試験を行った。載荷点および支点には丸鋼を 2 枚の支圧板で挟むようにして載荷を行った。丸鋼が水平方向に移動しないよう丸鋼の両脇にはストッパーを設置した。

ひずみゲージは第 5 章で示した RC はり曲げ試験と同じ要領でコンクリート表面と鉄筋およびスリーブに貼付した。セグメント接合部を有するケース 1 およびケース 2 は、接合部の目開きを確認するために、パイ型変位計（標点距離：100 mm）を設置した（写真 6.4.6）。図 6.4.5 にひずみゲージ等の設置要領を示す。

載荷試験は、供試体両側側面のひび割れ発生状況を目視確認しながら実験を行った。PC 部材であるため、コンクリート破壊時まで載荷を行うと危険となることから、圧縮側のコンクリートが圧壊しない程度の荷重で試験を終了した。載荷試験の様子を写真 6.4.7 に示す。



写真 6.4.6 パイ型変位計取付状況

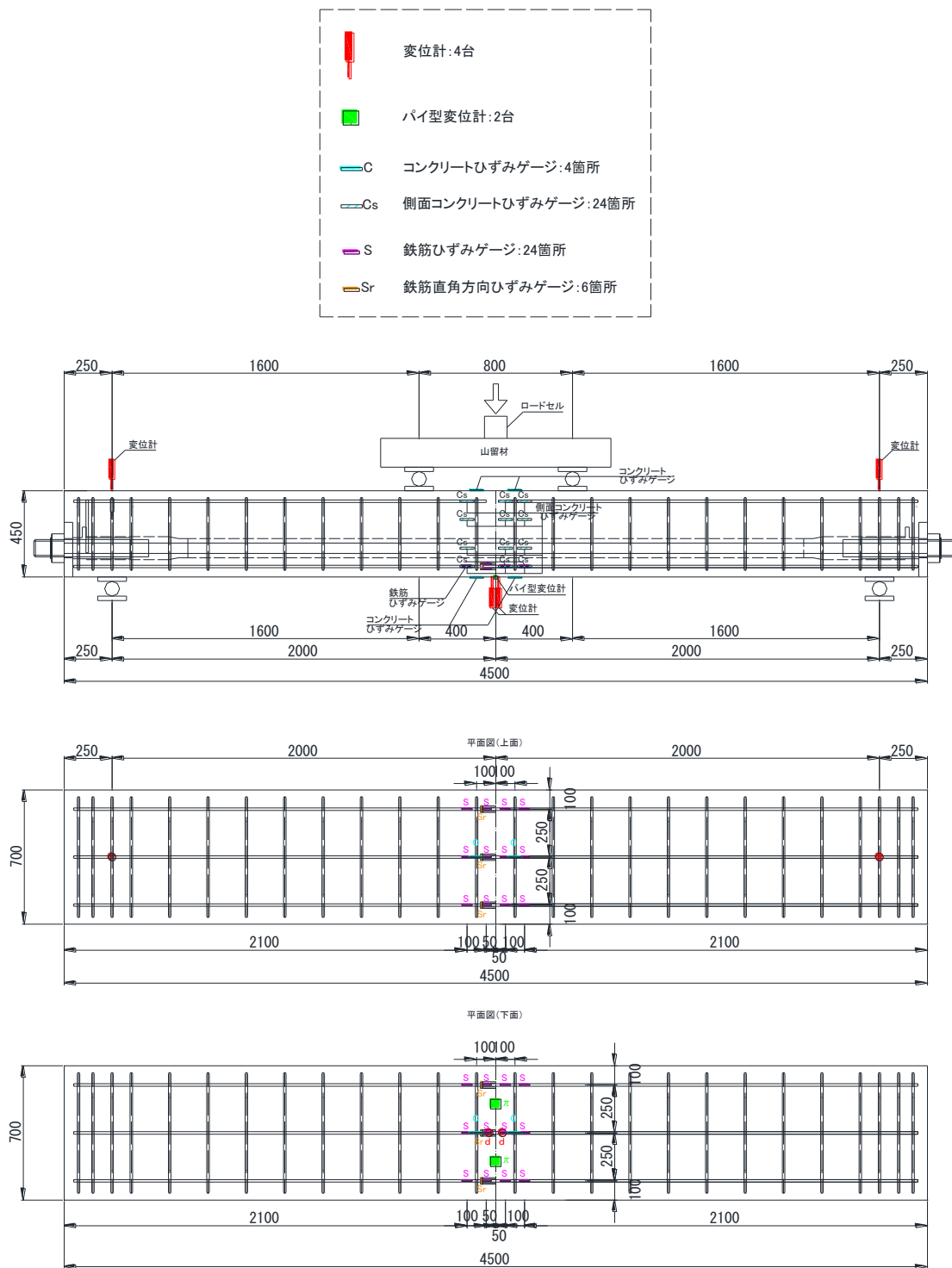


図 6.4.5 ひずみゲージ等の設置要領



写真 6.4.7 載荷試験状況

6.4.6 実験結果および考察

(1) 荷重変位関係

表 6.4.7 に初期ひび割れ荷重，初降伏荷重および終局荷重の計算値を示す．ここで示す計算値は，供試体の自重分を控除した計算値である．ひび割れ発生荷重の実験値 P_{cr-exp} は目視によってひび割れを確認した際の値とした．プレストレスが導入されている影響により，鉄筋降伏のタイミングで変位に明確な変化が生じにくく，荷重と変位の関係からは初降伏荷重を判断することは困難なため，初降伏荷重の実験値は示していない．また，終局荷重より手前で載荷を終了したため，終局荷重の実験値も示していない．

ケース 3 のプレーン供試体は概ね計算値に近い荷重でひび割れが確認できたが，セグメント継ぎ目を有するケース 1 およびケース 2 では，ひび割れ発生を確認できた荷重は計算値よりも大きくなった．これは，セグメント接合部の開口変位が生じることでひび割れ分散性が一体部材と比較して低下することにより，周辺のひび割れ発生荷重が見掛け上大きくなったものと考えられる．ケース 1 は鉄筋が連続しておらず，各ケースのなかで最も部材の連続性は低く，ひび割れ発生荷重の実験値は全ケース中最も大きい 340 kN であった．ケース 2 のひび割れ発生荷重の実験値はケース 1 よりも計算値に近く，D13 で 310 kN，D19 で 290 kN であった．D13 よりも D19 の方が計算値に近かったのは，鋼材量の多い D19 の方が接合部の開口変位が抑制されたためと考えられる．

表 6.4.7 曲げ耐力計算結果および実験値

ケース	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生荷重		初降伏荷重 P_{y-cal} (kN)	終局荷重 P_{u-cal} (kN)
		P_{cr-cal} (kN)	P_{cr-exp} (kN)		
ケース 1 [継手なし]	56.9	244	340	493	989
ケース 2-1 [D13 継手]	58.7	244	310	493	989
ケース 2-2 [D19 継手]	55.1	244	290	559	1024
ケース 3 [プレーン]	59.3	244	264	493	989

図 6.4.6 に載荷荷重と支間中央の鉛直変位の関係を示す。鉛直変位に関しては、主鉄筋に D13 を配置したケース 1、ケース 2-1、ケース 3 において概ね同様の傾向となった。このうち、ケース 3 については、ひび割れ発生荷重付近まではケース 1、ケース 2-1 よりも変位は小さいが、ひび割れ発生後はケース 1、ケース 2-1 と同様の挙動を示した。主鉄筋に D19 を配置したケース 2-2 については、他ケースよりも変位は小さかった。

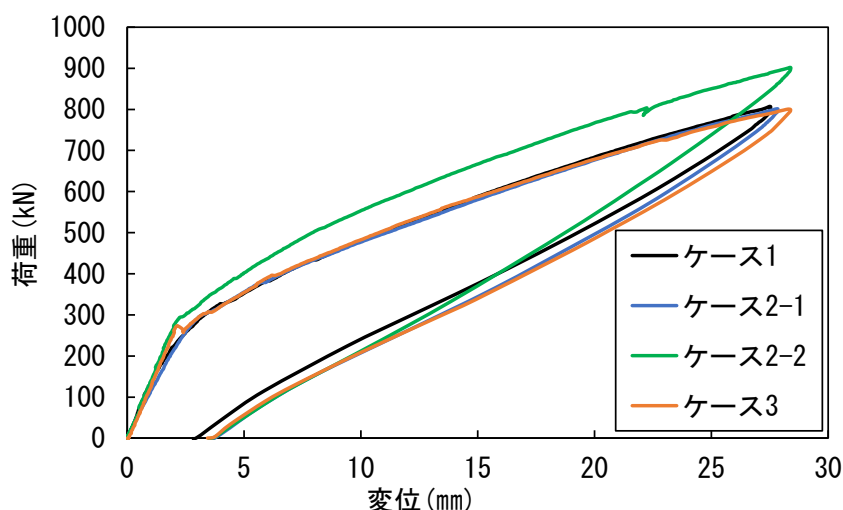


図 6.4.6 載荷荷重と支間中央鉛直変位の関係

図 6.4.7 に載荷荷重とパイ型変位計の変位の関係を示し、初期変位付近を拡大したものを図 6.4.8 に示す。初期変位付近の挙動に着目すると、計算上プレストレスによる圧縮力が相殺される変位量 0.013 mm となる荷重を超えた段階からケース 1 とケース 2-1 では勾配が変化しているため、接合部のエポキシ樹脂接着剤に引張ひずみが生じ始め、目開きを生じさせる挙動に移行したものと推察される。プレーン供試体のケース 3 では、ひび割れ発生荷重付近で変位が急変しているが、ケース 3 のひび割れ発生位置はパイ型変位計設置位置を跨ぐように発生したことから、ひび割れ発生時に敏感に反応したものと推察する。

ここで、継手のないケース 1 と D13 継手を有するケース 2-1 を比較すると、ケース 2-1 の方が変位は小さく、ひび割れ発生荷重を超えた後はプレーン供試体のケース 3 とほぼ同等の挙動を示した。このため、ひび割れ発生後の終局荷重相当の力が作用するような状況下では、鉄筋継手を有する部材の接合部がプレーン供試体と同等の耐荷力を有しているといえる。また、ひび割れ発生荷重前の設計荷重時相当の力が作用する状況においても、鉄筋継手を有するケース 2-1 の供試体の開口変位は 0.2 mm 以下に収まるレベルであり、一般的な環境下では問題ない性能を有していると考えられる。なお、D19 継手を使用したケース 2-2 では、ケース 2-1 よりもさらに変位は抑制されており、接合部に鉄筋継手を設ける優位性が D13 よりも明確に確認できる。

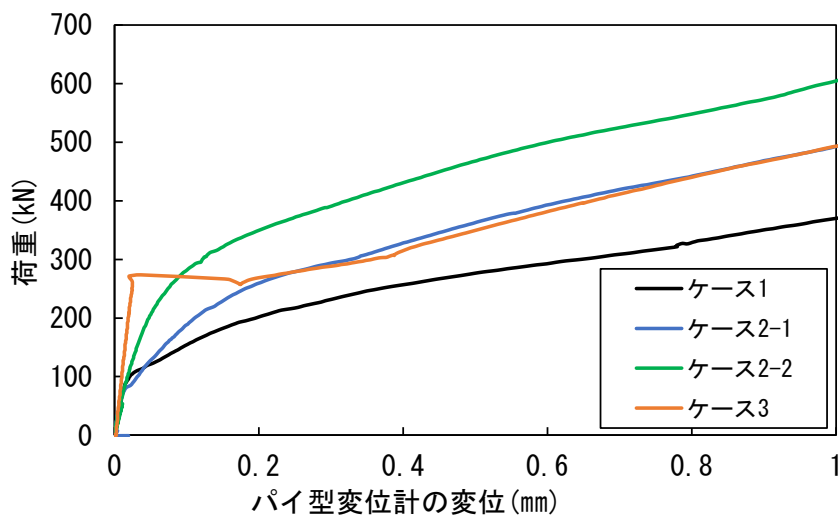


図 6.4.7 載荷荷重とパイ型変位計の変位の関係

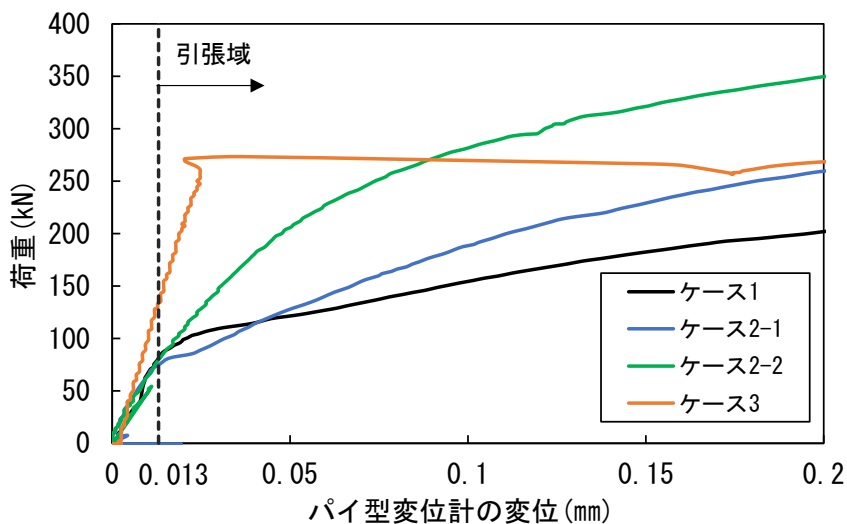
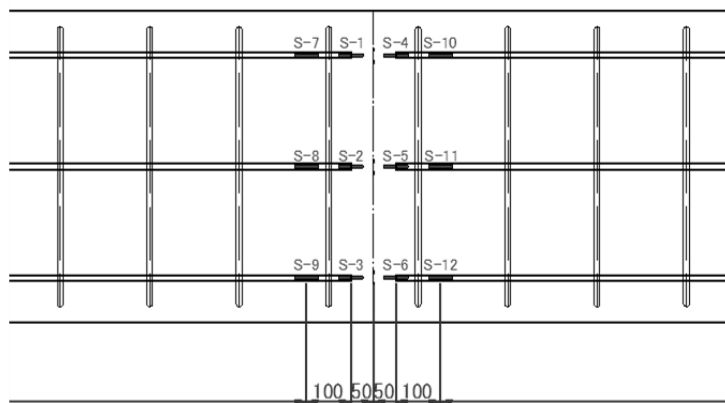


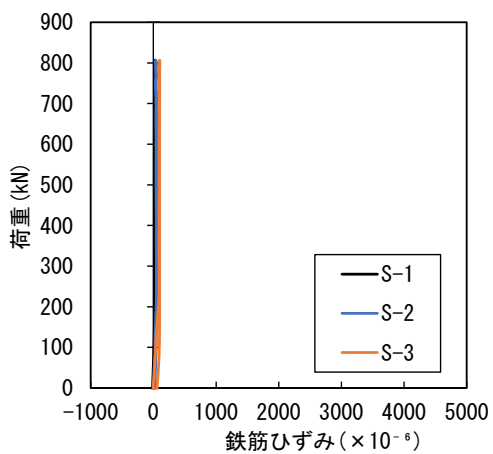
図 6.4.8 載荷荷重とパイ型変位計の変位の関係
(図 6.4.7 を拡大)

(2) 荷重ひずみ関係

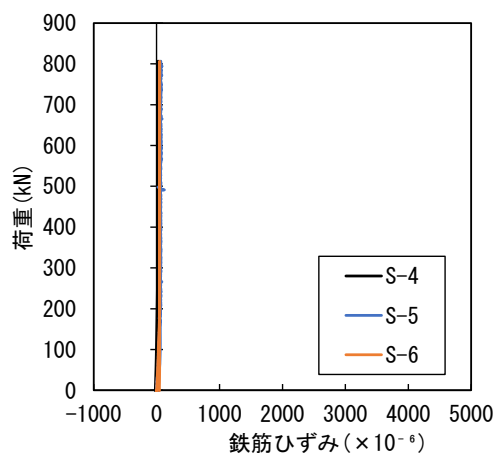
各ケースにおける荷重と主鉄筋ひずみの関係を図 6.4.9～図 6.4.12 に示す。図 6.4.9 のケース 1 は、接合部で主鉄筋が連続していないため、載荷荷重に伴う鉄筋ひずみがほぼ発生していない。図 6.4.10 および図 6.4.11 は、継手のあるケースを示すがスリーブ部のひずみは最大で 688×10^{-6} であり、スリーブ部分に作用する応力は 138 N/mm^2 となり、スリーブ自体の降伏はなかったものと考えられる。プレーン供試体のケース 3 については、S-1, S-5, S-6 の位置で鉄筋降伏と思われる荷重付近でひずみが引張側に急変している。これは、目視によるひび割れ発生箇所が S-1, S-6 付近であったことから、ゲージ貼付位置が鉄筋降伏位置であったためであると考えられる。なお、ケース 2-1, 2-2, 3 において荷重除荷後に圧縮に転じているが、これは、プレストレスによる復元能力により、塑性化後の鉄筋に圧縮力が伝達したためと推察できる。



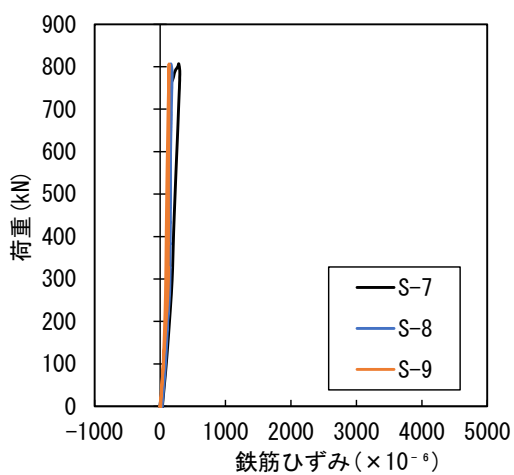
(a) ひずみゲージ平面位置図 (下縁)



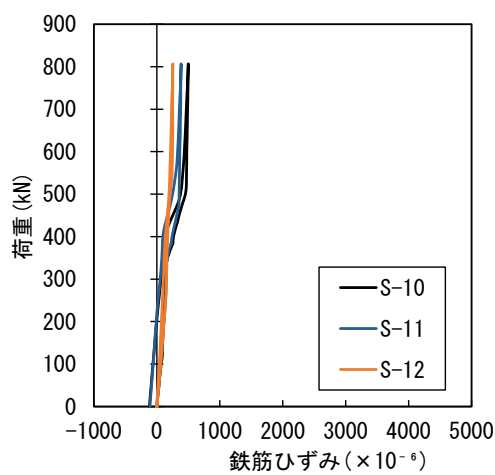
(b) S-1~S-3



(c) S-4~S-6

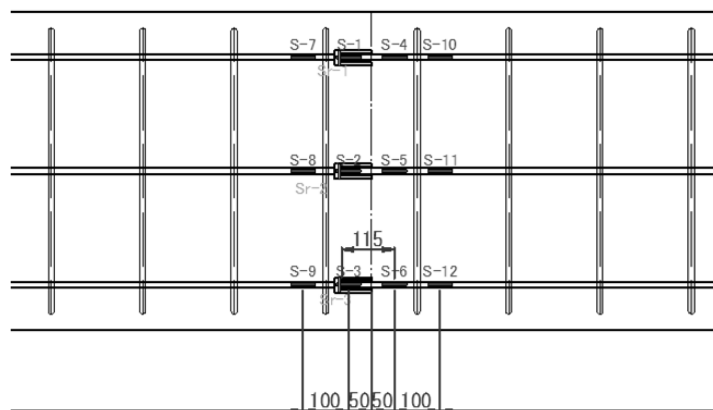


(d) S-7~S-9

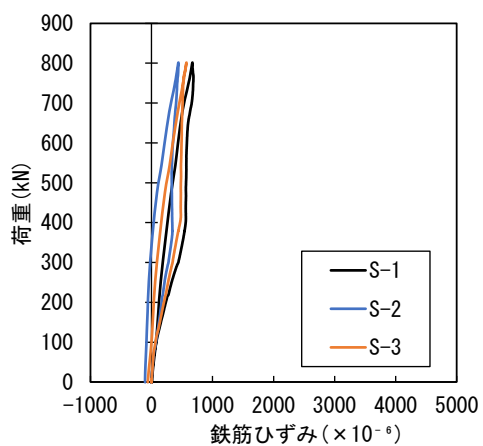


(e) S-10~S-12

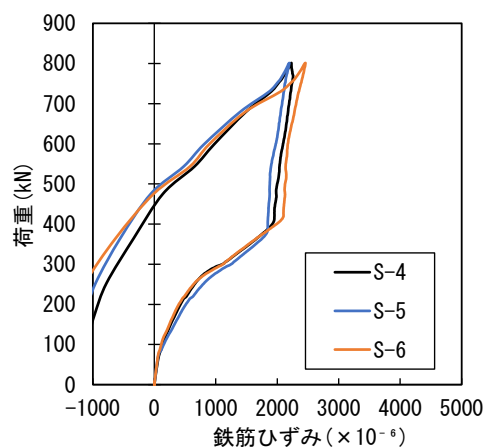
図 6.4.9 載荷荷重と主鉄筋ひずみの関係 (ケース 1)



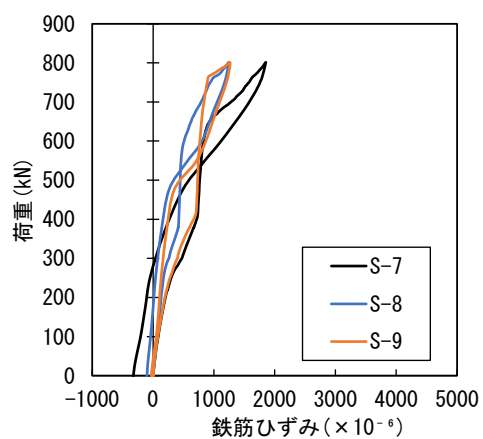
(a) ひずみゲージ平面位置図 (下縁)



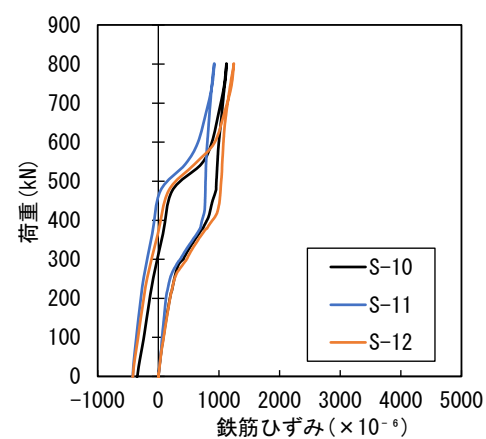
(b) S-1~S-3(スリーブ)



(c) S-4~S-6

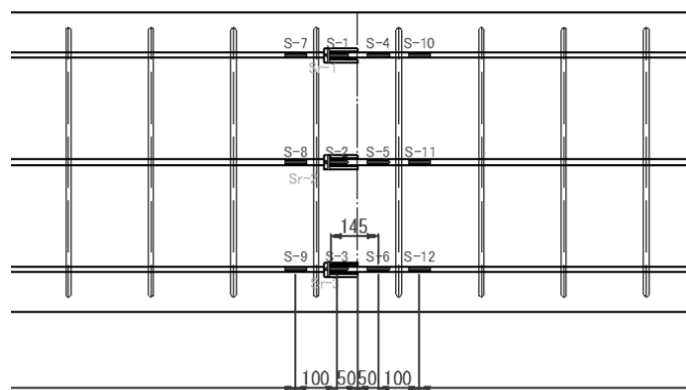


(d) S-7~S-9

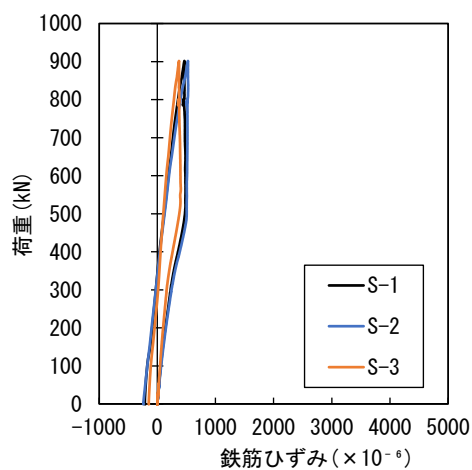


(e) S-10~S-12

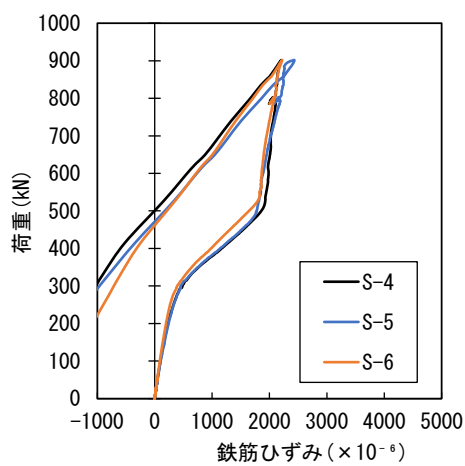
図 6.4.10 載荷荷重と主鉄筋ひずみの関係 (ケース 2-1)



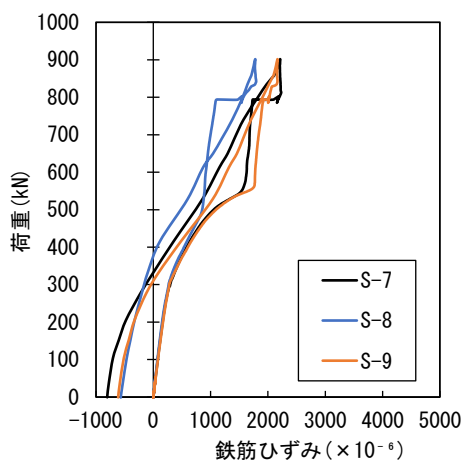
(a) ひずみゲージ平面位置図 (下縁)



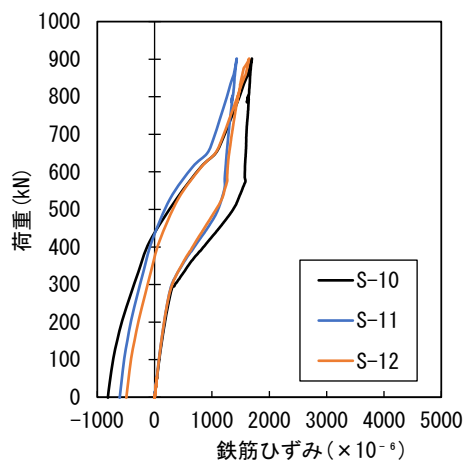
(b) S-1~S-3(スリーブ)



(c) S-4~S-6

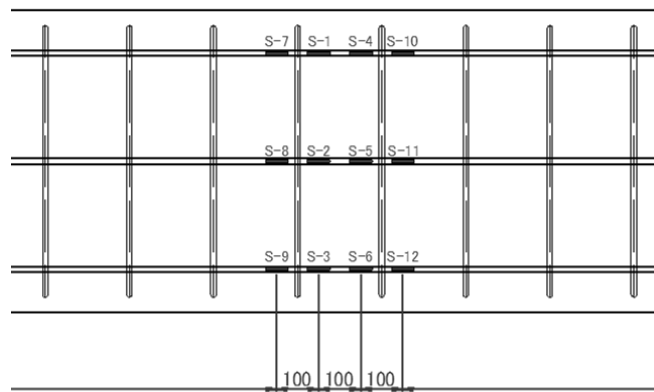


(d) S-7~S-9

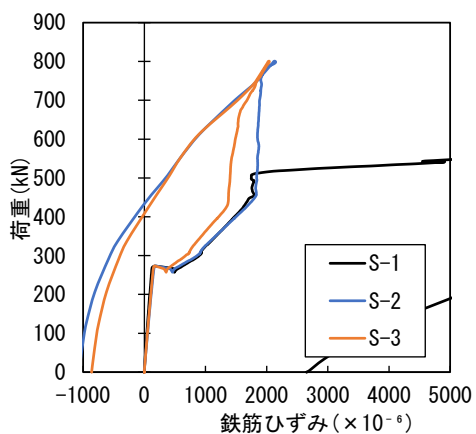


(e) S-10~S-12

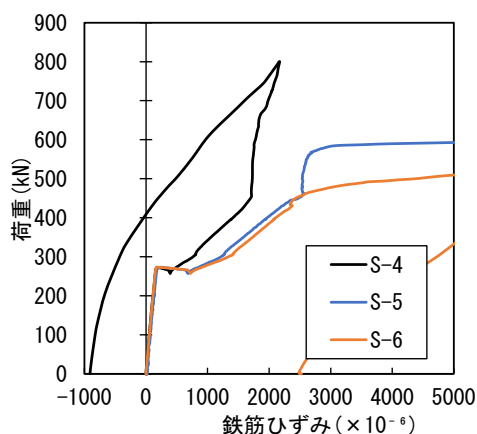
図 6.4.11 載荷荷重と主鉄筋ひずみの関係 (ケース 2-2)



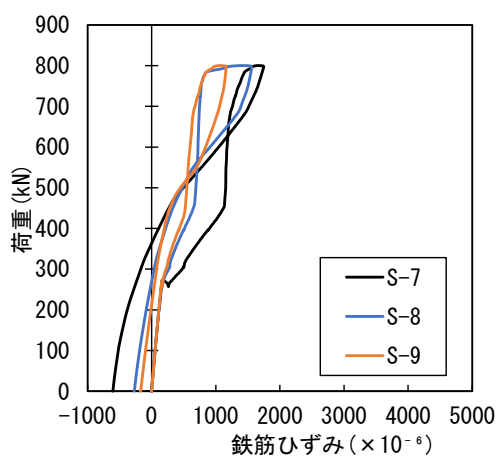
(a) ひずみゲージ平面位置図 (下縁)



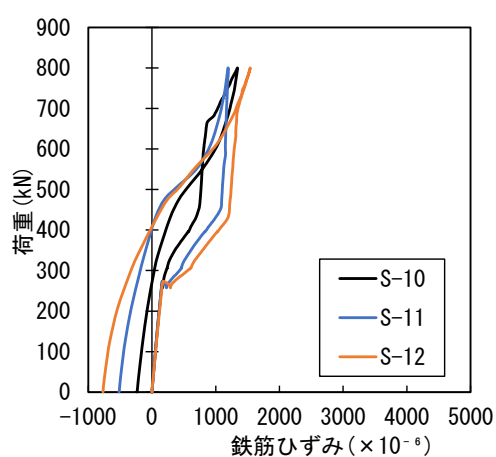
(b) S-1~S-3



(c) S-4~S-6



(d) S-7~S-9

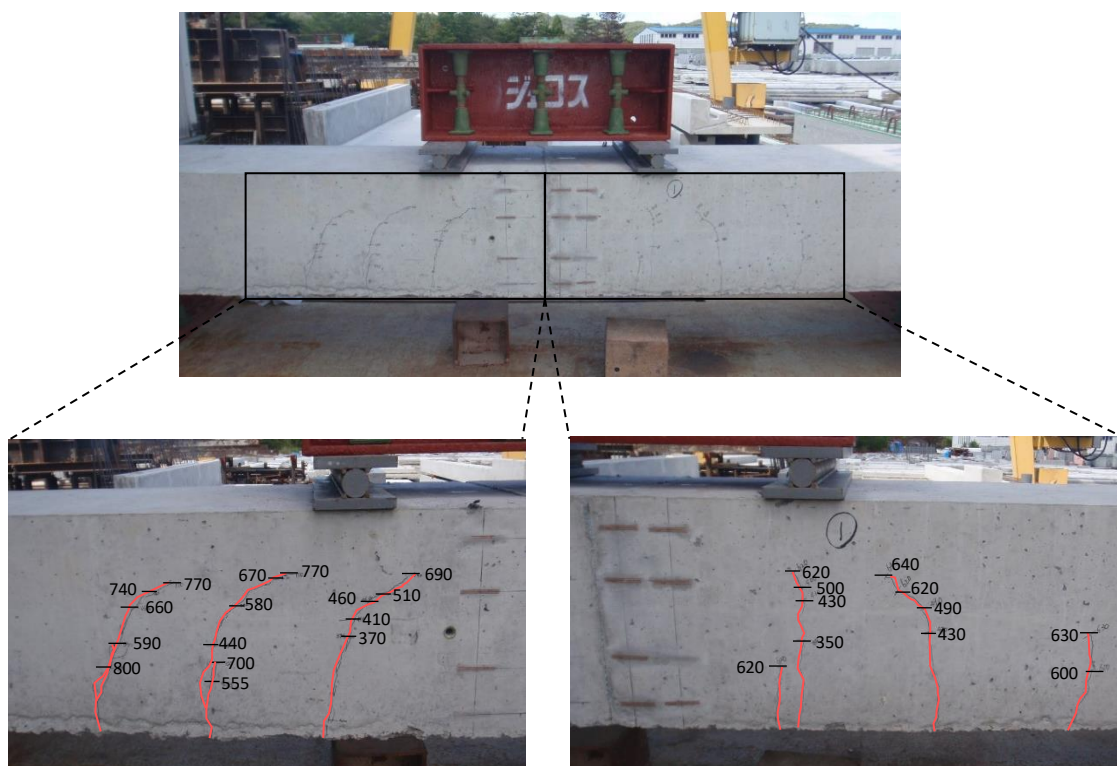


(e) S-10~S-12

図 6.4.12 載荷荷重と主鉄筋ひずみの関係 (ケース 3)

(3) ひび割れ状況

実験終了後に撮影した供試体側面のひび割れ発生状況を写真 6.4.8～写真 6.4.11 に示す。鉄筋継手のないケース 1 と D13 鉄筋継手のあるケース 2-1 とで、ひび割れ分散性に関しては、大きな違いはみられなかった。また、プレーン供試体のケース 3 についても、接合部が無い場合支間中央にひび割れの発生がみられたが、ひび割れ分散性はケース 1 やケース 2-1 と大きな違いはみられなかった。D19 鉄筋継手を設けたケース 2-2 については、D13 を用いたケースと比較してひび割れ本数が増え、ひび割れ分散性が向上した。これにより、主鉄筋を表 6.4.4 に示す継手構造で接続した際の部材の連続性が確保できていることが確認できた。

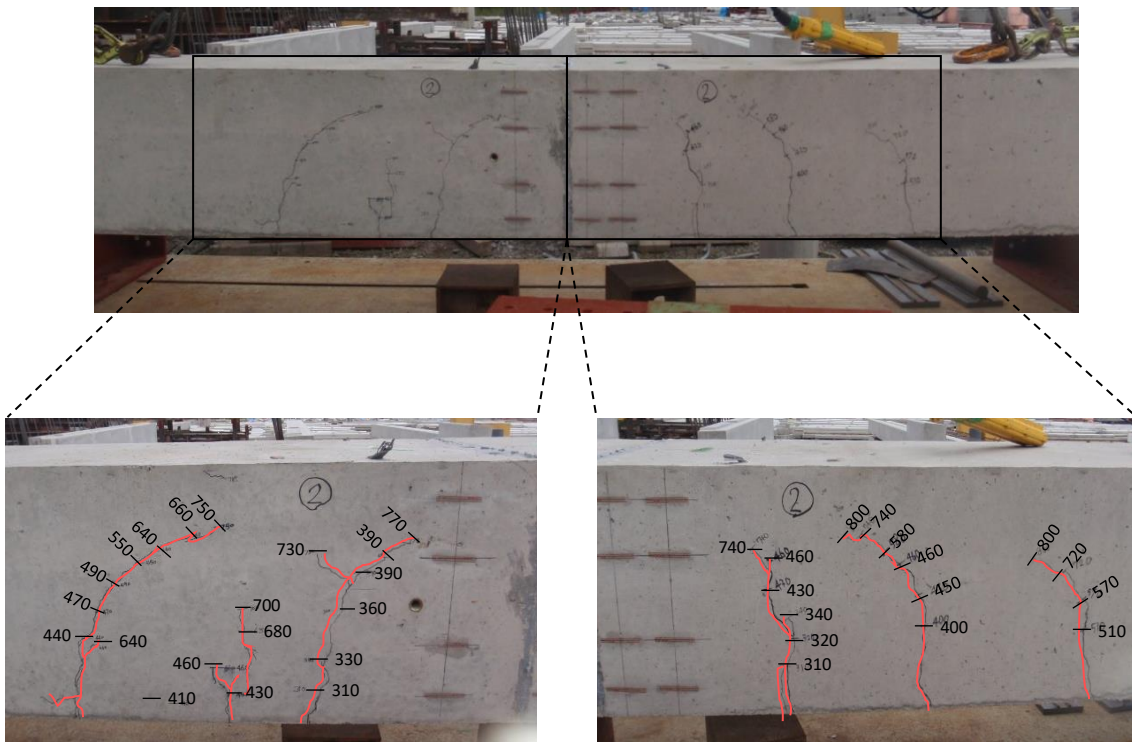


(a) 側面 1

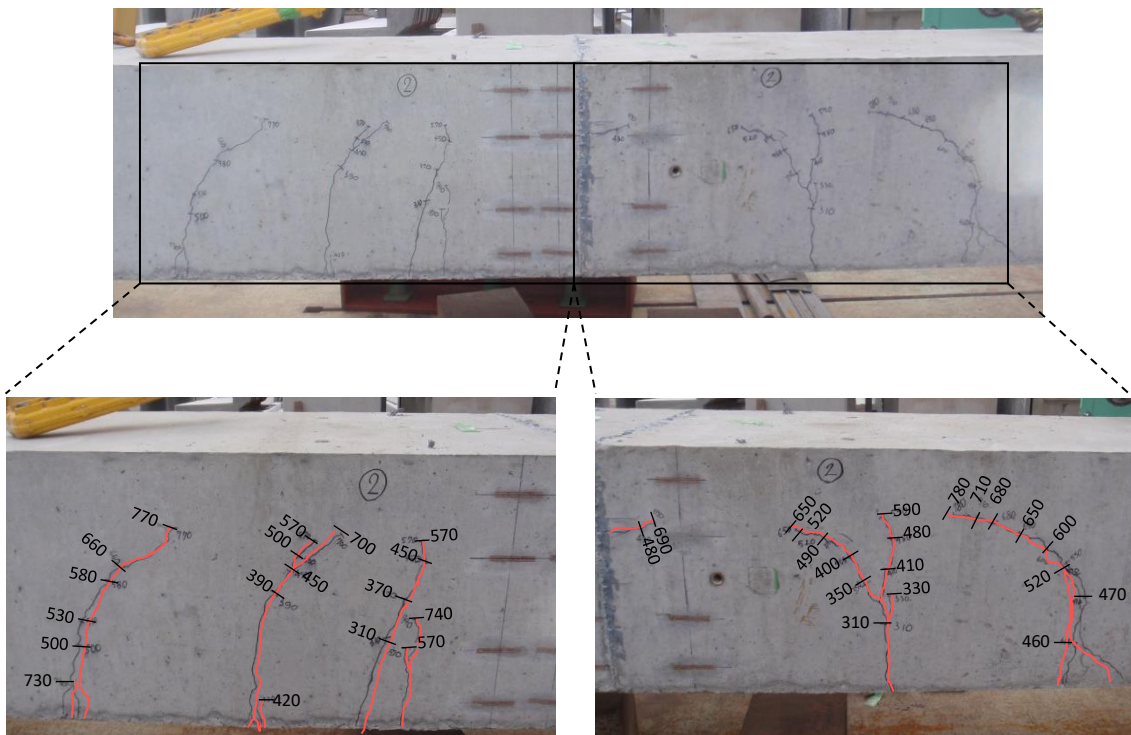


(b) 側面 2

写真 6.4.8 ひび割れ状況 (ケース 1)

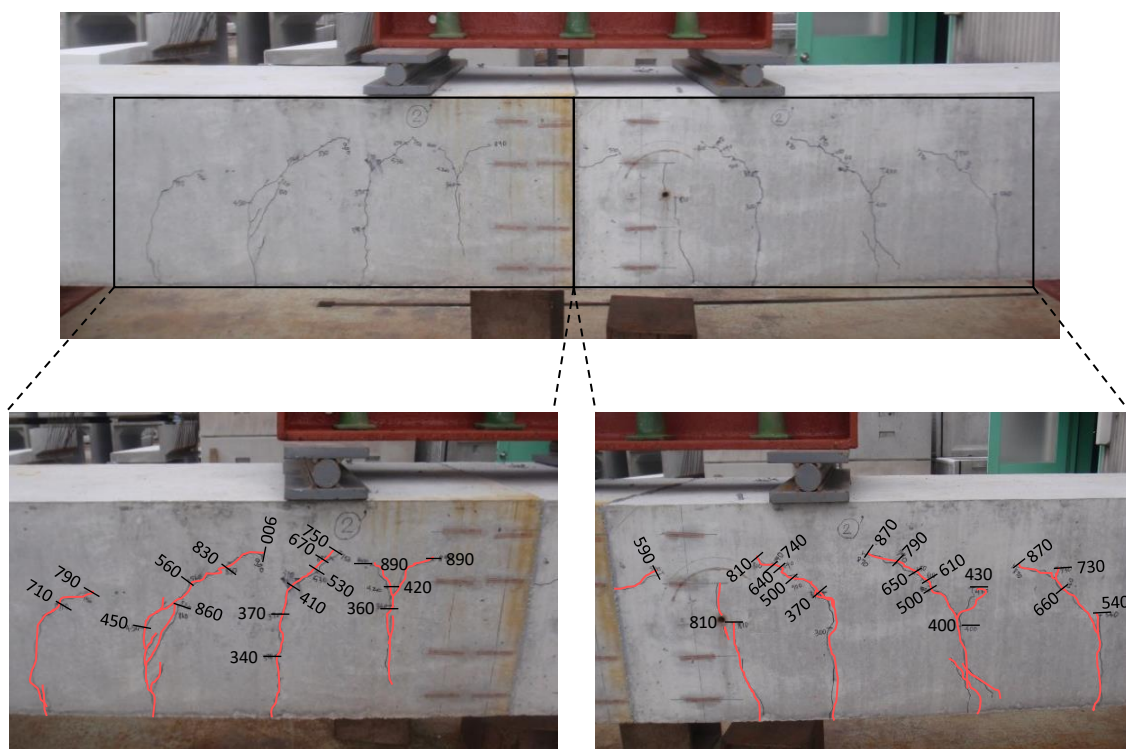


(a) 側面 1

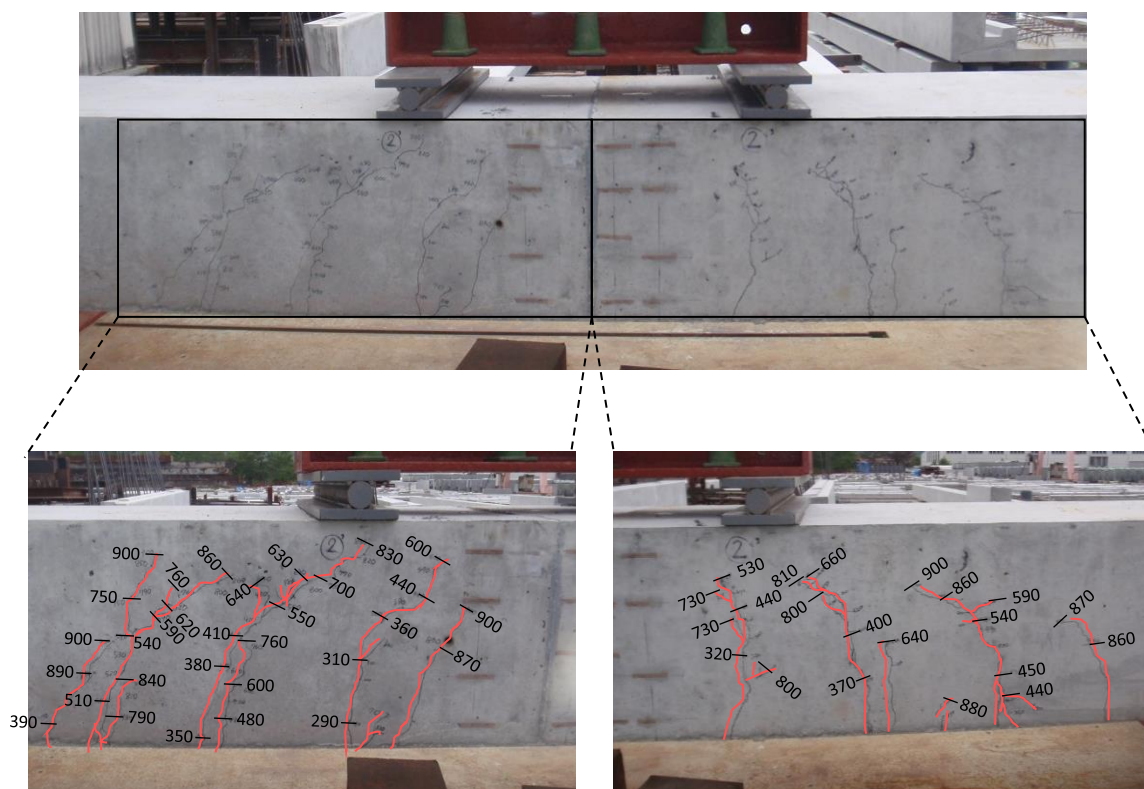


(b) 側面 2

写真 6.4.9 ひび割れ状況 (ケース 2-1)

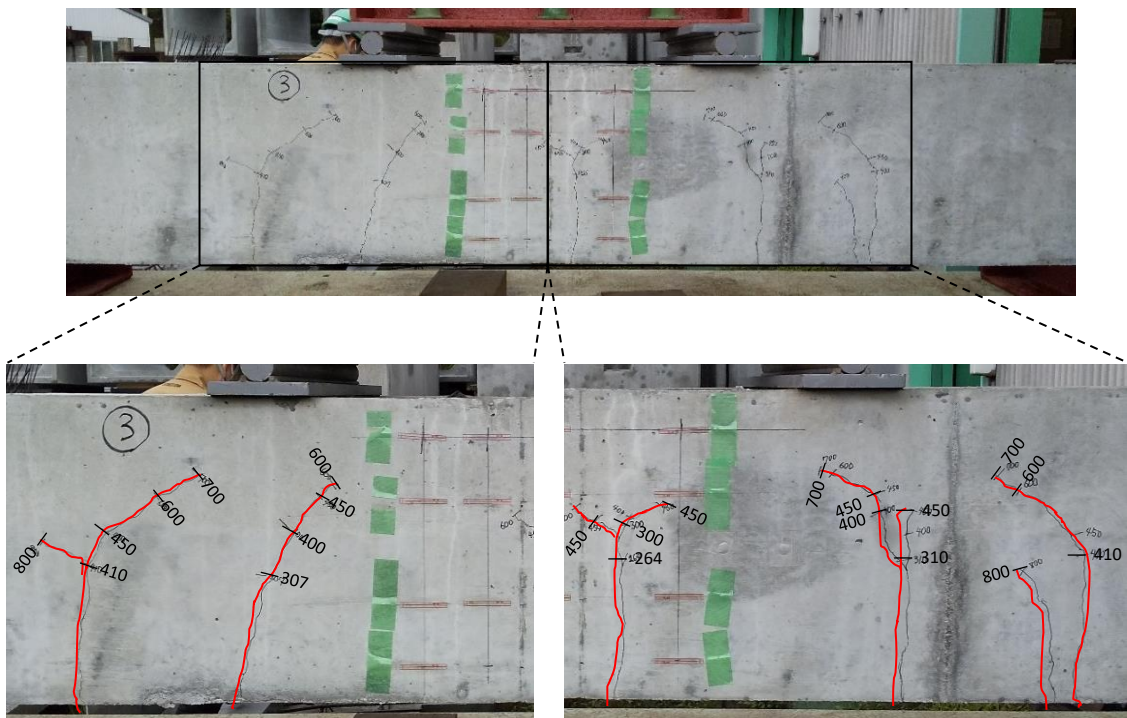


(a) 側面 1

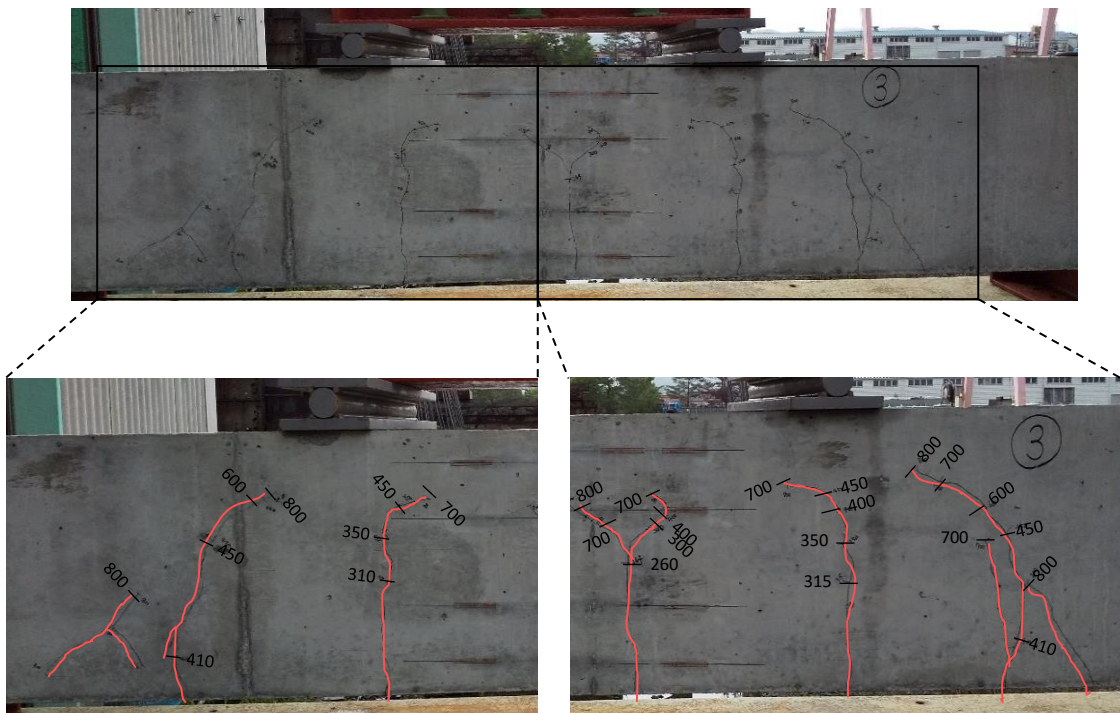


(b) 側面 2

写真 6.4.10 ひび割れ状況 (ケース 2-2)



(a) 側面 1



(b) 側面 2

写真 6.4.11 ひび割れ状況 (ケース 3)

6.5 まとめ

継手の実用性向上を目的に、継手構造の簡素化のための要素実験を実施した。また、プレキャストセグメント工法による PC 橋梁への適用性検証のために、試設計および PC はり供試体による曲げ載荷試験を行った。これらの実験および検証により以下の知見が得られた。

- (1) 本研究で検討した継手構成の組合せのうち、充填材種別を高膨張型の充填材を使用することで、スリーブ内部形状の加工や挿入側鉄筋のヘッド加工のないシンプルな形状としたスリーブでも、埋込み長が $4.0 D$ 以上あれば母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を確保できた。
- (2) プレキャストセグメント工法を用いた PC 橋梁のセグメント継ぎ目部の主鉄筋を接続することで、継目部のない連続部材と同等と仮定した試設計を 3 ケース行い、そのうち 2 ケースで主桁に配置する PC 鋼材本数を低減できた。このため、PC プレキャストセグメント工法において継手により引張主鉄筋を連続させ、一体部材と同等の条件として設計できれば、経済的に優位な構造を検討することが可能であることがわかった。
- (3) PC 橋の試設計に基づいてスケール調整した PC はり供試体による曲げ載荷試験の結果、弾性域内においてセグメント接合部に継手を有する供試体の接合部の開口変位は、接合部のないプレーン供試体に比べて大きくなるが、開口変位量は 0.2 mm 以下であり一般の環境下では問題ないレベルであった。また、ひび割れ発生後の終局荷重相当の力が作用するような状況下では、鉄筋継手を有する部材の接合部の開口変位はプレーン供試体と同じ挙動を示し、プレーン供試体と同等の耐荷力を有していることが確認できた。

6.6 第 6 章の参考文献

- 東山博明, 中條友義, 宮本基行, 田中浩一郎: プレキャストセグメントの接合方法に関する研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 8, pp. 101–106, 1998.
- 東山博明, 宮本基行, 丸山武彦, 渡辺 卓: プレキャストセグメントの PRC 構造への適用性実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 9, pp. 111–114, 1999.
- 東山博明, 丸井俊介, 丸山武彦, 松本隆明: PC プレキャストセグメント構造の引張鉄筋を接続化した梁に関する曲げ性能実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 11, pp. 119–122, 2001.

第 7 章

結論

7.1 本研究のまとめ

本研究は、建設業界の建設技能労働者の減少を背景に、社会的なニーズとなっている生産性向上に寄与するため、プレキャスト部材の活用範囲拡大に焦点を当て、プレキャスト部材の鉄筋同士を接続するモルタル充填継手のコンパクト化に関する実験的研究を行った。

継手構造はスリーブ、挿入鉄筋、充填材で構成され、これらの構成要素の形状や種別をパラメータとした実験的研究により継手部スリーブ内への鉄筋埋込み長を 3.5D まで短縮可能な組合せ構成を明らかにし、本継手構造を適用した場合の効果について、RC はりを用いた曲げ載荷実験により確認した。

また、上記で得られた継手構造の実用性を向上させるために、継手構造の簡素化についても実験的検討を行い、複雑な部材加工を必要としない構成とした場合でも、最小 4.0D の埋込み長で母材鉄筋と同等の引張耐荷力が得られることを明らかにした。さらに、プレキャストセグメント工法による実際の PC 橋梁を対象に、本来 PC 鋼材のみで一体化するセグメント部材の引張主鉄筋を継手で連続させた条件での試設計を行い、PC 鋼材本数を低減できる可能性があることを明らかにした。また、試設計した PC 橋をスケール調整して再現した PC はり供試体による曲げ載荷実験により、PC セグメント部材に本継手構造を用いた場合の効果について確認した。

本論文は、これらの実験的検討および試設計についてとりまとめたものであり、各章における結論を以下に示す。

第4章 スリーブ構造のコンパクト化に向けた実験的検討

モルタル充填継手のスリーブのコンパクト化に向けた取り組みとして、スリーブの内部形状や挿入側鉄筋の先端形状、充填材の種別や強度および膨張性に着目し、各着目点をパラメータとした組合せで一軸引張試験によるケーススタディを行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) スリーブの片側一端と鉄筋とを摩擦圧接により接合した場合、FEM 解析によると、D13 の引張強度相当となる 70 kN の引張荷重が作用した際、摩擦圧接部のスリーブに 322 N/mm² の局所的な引張応力が発生するため、スリーブの材質としては一般的に広く使用されている SS400 (降伏点：235 N/mm² 以上) ではスリーブが鉄筋母材破断より前に降伏することがわかった。このため、本研究で用いたスリーブの材質は S45C (降伏点：490 N/mm² 以上) とした。
- (2) スリーブの内部形状について、内側の表面に凹凸を設けた場合と先端にすぼみを設けた構造とでは、後者の方が継手の引張耐荷力は上回る。このとき、先端すぼみ部付近の充填材にはくさび効果による拘束力で局所的に応力が集中し、FEM 解析の結果、D13

の引張強度相当となる 70 kN の引張荷重が作用した場合、 124 N/mm^2 の圧縮応力が充填材に発生することがわかった。

- (3) 挿入側鉄筋の先端にコブ状のヘッド加工を設けることで、ヘッド加工のない継手よりも引張耐荷力が向上した。
- (4) 充填材の種別は、エポキシ樹脂系よりもセメント系の充填材を用いる方が継手部の引張耐荷力は高かった。また、材齢 28 日で 60 N/mm^2 を発現する普通強度の充填材を用いた場合と材齢 28 日で 120 N/mm^2 を発現する高強度の充填材を用いた場合とで比較すると、後者の方が継手部の引張耐荷力は向上した。
- (5) 充填材に高膨張型の充填材（48 時間膨張圧で 33 N/mm^2 以上を発現する生石灰および珪酸塩を主成分とする膨張材）を使用し、挿入側鉄筋にヘッド加工を設けたケースにおいて、3.5D の埋込み長の継手で母材鉄筋の破断を達成できた。また、母材鉄筋の破断を達成した組合せで、D16 および D19 の異形鉄筋を使用した場合の引張耐荷力を確認した結果、D13 と同様に母材鉄筋で破断する破壊モードとなることを確認した。
- (6) 母材鉄筋の破断を達成した組合せのうち、スリーブの内部形状の工夫を無し（単に筒状の内空を有するスリーブ）としたケースについても検証を行ったところ、母材鉄筋の破断を達成したため、引張耐荷力向上に寄与する要因として高膨張型の充填材を用いることによる影響が支配的である可能性が高いことがわかった。

第5章 継手を有する RC はりの実験的検討

3.5D の埋込み長で母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を示した継手構造を有する RC はりの曲げ荷重下での挙動を確認するため、プレキャスト部材を想定して分割した部材を継手にて接合した RC はりについて静的 4 点曲げ載荷試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 継手あり供試体の RC はりの荷重－変位関係は、曲げ変形性能がプレーン供試体よりも劣る傾向がみられたものの、鉄筋が降伏するまでは継手あり供試体と大きな違いは見られず、プレーン供試体と同等の性能を有することが確認できた。コンクリート標準示方書の鉄筋腐食に関する限界ひび割れ幅の算定より、鋼材腐食に対して、通常使用する荷重状況下では問題ないことが確認できた。
- (2) 継手あり供試体のひび割れはプレーン供試体と比較するとひび割れ本数が少なく、ひび割れの進行も少なかった。これは、継手あり供試体の接合面の目開きによる影響によ

ってひび割れ分散性が低下したことが主な要因であると推察される。一方、継手あり供試体でも、接合部近傍にひび割れは発生していることから、継手を有する場合でも、部材の連続性やひび割れ分散性が失われないことが確認できた。

- (3) 母材鉄筋が降伏に至るまでスリーブ鉄筋の拔出し等は確認されなかったため、本実験で使用したモルタル充填継手が RC はりの曲げ挙動に対して十分な耐力を有することが示された。

第6章 継手構造の実用性向上に向けた検討

継手の実用性向上を目的に、継手構造の簡素化のための要素実験を実施した。また、プレキャストセグメント工法による PC 橋梁への適用性検証のために、試設計および PC はり供試体による曲げ載荷試験を行った。これらの実験および検証により以下の知見が得られた。

- (1) 本研究で検討した継手構成の組合せのうち、充填材種別を高膨張型の充填材を使用することで、スリーブ内部形状の加工や挿入側鉄筋のヘッド加工のないシンプルな形状としたスリーブでも、埋込み長が 4.0D 以上あれば母材鉄筋と同等以上の引張耐荷力を確保できた。
- (2) プレキャストセグメント工法を用いた PC 橋梁のセグメント継ぎ目部の主鉄筋を接続することで、継目部のない連続部材と同等と仮定した試設計を 3 ケース行い、そのうち 2 ケースで主桁に配置する PC 鋼材本数を低減できた。このため、PC プレキャストセグメント工法において継手により引張主鉄筋を連続させ、一体部材と同等の条件として設計できれば、経済的に優位な構造を検討することが可能であることがわかった。
- (3) PC 橋の試設計に基づいてスケール調整した PC はり供試体による曲げ載荷試験の結果、弾性域内においてセグメント接合部に継手を有する供試体の接合部の開口変位は、接合部のないプレーン供試体に比べて大きくなるが、開口変位量は 0.2mm 以下であり一般の環境下では問題ないレベルであった。また、ひび割れ発生後の終局荷重相当の力が作用するような状況下では、鉄筋継手を有する部材の接合部の開口変位はプレーン供試体と同じ挙動を示し、プレーン供試体と同等の耐力を有していることが確認できた。

7.2 今後の課題と展望

本研究では、継手構造のコンパクト化に焦点を当て、継手部の鉄筋埋込み長を最小 3.5D まで短縮することができた。一方で、課題についても幾つか明らかとなった。以下にそれぞれの課題と今後の展望を示す。

充填材の使用性

本継手構造に使用した高膨張型充填材は、練り混ぜ後スラリー状となり、スリーブ内への充填性は良好であった。一方で、粘性が低いため本研究で実施した実験はすべてスリーブを鉛直方向に向けた状態で充填材を充填した後、上から挿入側鉄筋を差し込む形で接続する必要があった。

実際の建設現場に使用するプレキャスト部材の接合方向は、鉛直方向だけでなく水平方向も多い。第6章で試設計を行ったプレキャストセグメント工法を用いた PC 橋も、実施工では水平方向でセグメントの接合を行う。このため、適用性の拡大を図るためには、水平方向の充填が可能となるように粘性の調整や充填方法の工夫について検討を行う必要がある。

また、今回使用した高膨張型充填材は、非常に高い膨張性能を発揮する一方で、施工時の適用温度（20℃～30℃）や可使時間（練り混ぜ後 10 分以内）に厳しい制約のある材料であった。このため、実際の現場での施工性を考慮すると、必要な膨張性能を維持しつつ、施工時の制約を緩和するための工夫も重要であると考えられる。

繰り返し荷重下での挙動

本研究で実施した実験はすべて静的荷重を単調载荷して実施した。このため、本継手構造を用いた部材が繰り返し荷重を受ける状況下での疲労性能は明らかでない。今後、適用性の拡大を図るうえで、橋梁の活荷重のような繰り返し荷重を受ける部材でも適用できるようにするためには、本継手構造の疲労特性についても明らかにしていく必要がある。

製作精度

プレキャスト部材へモルタル充填継手を適用する場合、一方のプレキャスト部材にスリーブを設置し、もう一方のプレキャスト部材に挿入側の鉄筋を配置することになる。この際、一方の部材を型枠面にしてもう一方の部材の打設を行うマッチキャスト方式では、スリーブと挿入側鉄筋の位置関係は高い精度が確保できるが、各部材を個別の型枠で製作する場合はスリーブと挿入側鉄筋の位置関係に施工誤差が生じやすい。本継手構造のスリーブと挿入側鉄筋の隙間は 3 mm 程度であり、わずかな誤差でも接続不良のリスクを伴うため、製作時の合理性を考慮すると、施工誤差に焦点を当てた検証や許容施工誤差を緩和するための継手構造のより一層の最適化などについても検討の余地がある。

本論文に関する著者の発表論文

- モルタル充填継手の耐荷性能に及ぼす各種パラメータの影響に関する実験的検討, 村上力也, 森本健斗, 下野聖也, 尾上幸造, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 505–510, 2020.
(本論文との関連: 第 4 章)
- 充填材の種類及び挿入側鉄筋のヘッド加工がモルタル充填継手の耐荷性能に及ぼす影響, 森本健斗, 村上力也, 尾上幸造, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 493–498, 2020.
(本論文との関連: 第 4 章)
- スパン中央部にモルタル充填継手を有する RC はりの曲げ荷重下での挙動に関する実験的検討, 村上力也, 森本健斗, 尾上幸造, 橋本涼太, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 325–330, 2021.
(本論文との関連: 第 5 章)
- Effects of expansive filler and headed rebar on the shortening of development length of mortar-filled joints, Rikiya MURAKAMI, Kozo ONOUE, Kento MORIMOTO and Ryota HASHIMOTO, Journal of Building Engineering, Vol.40, 102338, 2021.
(本論文との関連: 第 6 章)

謝辞

本論文は、筆者が極東興和株式会社に在籍しながら、社会人学生として熊本大学大学院自然科学教育部博士後期課程に在籍し、2019年4月から2022年3月までの3年間で取り組んだ「モルタル充填継手の適用範囲拡大に向けた継手構造のコンパクト化に関する研究」について取りまとめたものです。

本論文の主査を務めていただいた熊本大学大学院先端科学研究部（工学系）准教授 尾上幸造先生には、本研究の進め方や実験計画、論文作成、さらには履修に関連した相談や大学の事務手続きに至るまで細やかな気配りを賜りながら終始懇切丁寧に御指導をいただきました。Journal of Building Engineering への論文投稿時は、ご多忙中にも関わらず、英語の拙い筆者の相談に多くの時間を割いていただきました。衷心より感謝申し上げます。

熊本大学大学院先端科学研究部（工学系）教授 重石光弘先生、熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター教授 松村政秀先生、熊本大学大学院先端科学研究部（工学系）教授 村上聖先生には、ご多忙の折、副査をお引き受けいただきましたことに深く感謝申し上げるとともに、研究に関して貴重なアドバイスを頂戴いたしました。ここに御礼申し上げます。

本研究では、小型の要素実験を経て実大実験に至るまで、数多くの試験体を製作し、数値解析なども行いながら研究を進めました。研究を始めた当初、特に最初の1年目は、試験体の形状や材料の種別などに様々な工夫や改善を繰り返しながら、多くの時間を試行錯誤に費やしました。このような中、熊本大学工学部技術部の友田祐一博士、橋本淳弘氏、戸田善統氏、濱崎ありさ氏、当時大学院学生であった森本健斗氏、橋本涼太氏、学部学生であった井上みなみ氏には、多くの実験に真摯に対応頂き、データ整理や論文投稿を手伝っていただきました。特に、森本健斗氏は筆者が入学する前から本研究に共に取り組んでいただき、大学院を修了するまでの間、実験を含めて交流を深めることができたのは、私にとって忘れられない貴重な経験となりました。ここに、深く感謝の意を表します。

本研究での成果の多くは、熊本大学との研究により得られたものです。諸氏のご協力なくして本論文の執筆は叶いませんでした。ここに、本研究を通じて関わって頂いた多くの熊本大学関係者の皆様に、重ねて感謝申し上げます。

また、実験供試体作製にあたり、太平洋マテリアル株式会社の保井渉氏には充填材料のご提供を頂くとともに、供試体形状などに関するご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

筆者が在籍する極東興和株式会社の代表取締役社長 藤田公康氏、筆者の上司である常務取締役事業本部長 山根隆志氏、取締役事業本部副本部長 千場善信氏、技術企画部長 谷慎太郎博士、技術企画課長 三本竜彦博士、元技術企画課長 中森武郎氏には、筆者の大学

院入学に際して多大なるご支援・ご協力を頂きました。深く感謝いたします。特に山根氏は、大学院入学のきっかけを与えて頂いたばかりでなく、本研究の先駆者の立場から技術的なご助言や数多くのサポートを頂き、先の見えない状況になった際には、熱心に相談に乗って頂き強く後押しして頂きました。研究開発の実務面に関しては、開発課 森江昭則氏，河金甲博士，北田佳純氏，下 友希氏，下江珠代氏（現 松田珠代氏），NASERY MOHAMMAD EMRAN 氏，技術企画課 下野聖也氏，LE ANH VAN 氏，井手優花氏には、多忙な業務の中で実験計画や実験データの整理，数値解析，設計計算などの面で惜しめない協力を頂きました。また，補修技術課長 三原孝文博士には、実験材料に関して貴重なご助言，ご意見を賜りました。供試体製作や載荷実験の履行の面では，グループ会社であるキョクトウ高宮株式会社の工場長 古永真治氏，営業部長 西尾昌明氏，製造課長 菊池慎吾氏には、急な依頼にも快く対応頂きました。事務的な面では，管理本部管理部長 ト部 穰氏，総務課 篠崎淳子氏，森下 健氏に多岐にわたるサポートを賜りました。筆者に学位取得の機会を与えて頂いたことを，極東興和株式会社ならびにグループ会社の全役職員に深く感謝の意を表します。

大学院に入学した当初は，様々な面で不安を抱えながらのスタートでしたが，なんとか大きなトラブルもなく 3 年間で博士論文をまとめることができ，当初抱いていた不安が最終的には杞憂で終わったことは，これまで携わって頂いた関係者の皆様のお陰であり，感謝の念に堪えません。これまでお世話になった関係者の皆様へ心より感謝申し上げます。

最後に，筆者の大学院入学にあたり，ときに不規則生活になる夫を陰ながらサポート・応援してくれた妻の美和に心からの感謝を伝えます。

2022 年 3 月

村上 力也