

博士論文

内部固定定着部を用いたプレストレス補強工法の適用性の向上

*Improved Applicability of the Strengthening System Using
Post-tension Tendon with Internal Anchorage*

2021 年 3 月

三原 孝文
Takafumi MIHARA

山口大学大学院創成科学研究科

目次

学位論文要旨	i
Summary of the Doctoral Dissertation	iii
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 インフラを取り巻く環境と課題	1
1.1.2 既設コンクリート構造物の補強技術	3
1.2 既往の研究	8
1.2.1 既設コンクリート構造物の補強技術に関する研究	8
1.2.2 プレストレスを用いた補強技術に関する研究	9
1.2.3 補強材・緊張材の固定定着技術に関する研究	10
1.2.4 繊維補強材料を用いた補強技術に関する研究	12
1.2.5 本研究に関する先行研究	15
1.3 本研究の目的	17
1.4 論文の構成	18
1.5 第1章の参考文献	20
第2章 既設コンクリート部材内に固定定着したプレストレス補強工法の特徴	26
2.1 工法概要と特徴	26
2.2 施工方法	28
2.2.1 施工手順	28
2.2.2 拡径削孔方法	30
2.2.3 緊張材の固定方法	33
2.3 工法の適用事例	35
2.3.1 工法の適用対象	35
2.3.2 橋台の増しフーチング部の打継ぎ補強事例	37
2.4 第2章の参考文献	41
第3章 可撓性を有する緊張材の適用性の検討	42
3.1 検討目的	42

3.2	中空 PC ストランドの特徴	43
3.3	コルゲート管へのグラウト実験	45
3.3.1	実験概要	45
3.3.2	グラウト材	45
3.3.3	実験方法	46
3.3.4	実験結果および考察	50
3.3.5	まとめ	52
3.4	中空 PC ストランドの引抜き実験	53
3.4.1	実験概要	53
3.4.2	供試体	53
3.4.3	実験方法	59
3.4.4	実験結果および考察	61
3.4.5	まとめ	67
3.5	水平方向施工を想定したグラウト実験	68
3.5.1	実験概要	68
3.5.2	実験方法	68
3.5.3	実験結果および考察	70
3.5.4	まとめ	72
3.6	水平方向施工を想定した引抜き実験	73
3.6.1	実験概要	73
3.6.2	実験方法	73
3.6.3	実験結果および考察	74
3.6.4	まとめ	77
3.7	有限要素解析による検証	78
3.7.1	解析方法	78
3.7.2	解析結果および考察	80
3.7.3	まとめ	82
3.8	第3章の参考文献	82
第4章	小径緊張材の適用性の検討	83
4.1	検討目的	83
4.2	検討方法	84
4.3	小径用拡径ビットを用いた緊張材の定着実験	86
4.3.1	実験概要	86
4.3.2	供試体	86

4.3.3	実験方法	91
4.3.4	実験結果および考察	93
4.3.5	まとめ	95
4.4	小径緊張材の引抜き実験	96
4.4.1	実験概要	96
4.4.2	供試体	96
4.4.3	実験方法	101
4.4.4	実験結果および考察	103
4.4.5	まとめ	106
4.5	有限要素解析による検証	107
4.5.1	解析方法	107
4.5.2	解析結果および考察	109
4.5.3	まとめ	113
4.6	第4章の参考文献	113
第5章	炭素繊維複合ケーブル緊張材の適用性の検討	114
5.1	検討目的	114
5.2	炭素繊維複合ケーブル緊張材の特徴	115
5.3	炭素繊維複合材ケーブル緊張材の定着実験	117
5.3.1	実験概要	117
5.3.2	緊張材先端部の加工方法	117
5.3.3	供試体	119
5.3.4	実験方法	124
5.3.5	実験結果および考察	126
5.3.6	まとめ	130
5.4	第5章の参考文献	131
第6章	結論	132
6.1	本研究のまとめ	132
6.2	今後の課題と展望	135
本論文に関する著者の発表論文		137
謝辞		138

学位論文要旨

内部固定定着部を用いたプレストレス補強工法の適用性の向上

三原 孝文

経年劣化による性能低下や現在の技術基準に対して要求性能を満足していない構造物が増加するなかで、既設コンクリート構造物を長寿命化し、安心・安全に活用していくためには、効率的、経済的に構造物を補修・補強する技術の実用化が必要とされている。そのなかで、部材の内部補強や打継部の一体化にも用いられるプレストレス補強工法にも期待が寄せられている。

しかし、既設コンクリート構造物を補強する場合、補強対象部材の周辺に補強材を配置・挿入するための作業空間を必要とするため、施工条件や周辺環境等によっては、実施が困難なケースも少なくない。また、対象とする部材形状や供用環境も構造物毎に異なり、補強の仕様も多様である。

そこで本研究では、既設コンクリート構造物の性能回復および性能向上を目的とし、先行研究で開発された「内部固定定着部を用いたプレストレス補強工法」をより実用的に発展させ、上記の課題に対処した。本研究では、施工条件や対象とする部材、および供用環境を想定し、それぞれに適用するための新たな緊張材として、「中空 PC ストランド」、「小径 PC 鋼棒 ($\phi 13\text{mm}$ ・ $\phi 17\text{mm}$)」、「炭素繊維複合ケーブル」に着目し、その適用性をグラウト試験およびコンクリートブロックを用いた緊張材の引抜き試験による実験的検討を行った。

本論文は全 6 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では、本研究の社会的・技術的な背景を述べたうえで、本研究に関連した既往の研究を調査・整理し、現状の問題を抽出したうえで、本研究の目的を示した。

第 2 章では、先行研究で開発した「内部固定定着部を用いたプレストレス補強工法」の概要と特徴を示したうえで、工法の適用事例と現状の課題について示した。

第 3 章では、本工法を実用的に発展させるために、PC 鋼棒と比べて狭隘な作業スペースでも施工することができ、充填材の注入も容易となる緊張材として、可撓性を有し断面中央に充填材を注入するためのコルゲート管（内径 10mm）を配置した「中空 PC ストランド緊張材」に着目した。

5m の長尺コルゲート管を用いたグラウト試験を 6 種類の配合により行い、適用可能な 3 配合を選定した。次に部材断面寸法 400mm のコンクリートブロック ($\sigma_c=24\text{MPa}$) を用いて、鉛直下向き方向の施工により固定定着した中空 PC ストランドの引抜き試験を実施して、3 配合の定着性能を調べた。

さらに、透明アクリル管を用いて水平方向施工を模したグラウト試験を行い、水平方向への施工にも最適な配合の特定した上で、部材断面寸法 400mm のコンクリートブロック ($\sigma_c=24\text{MPa}$) に水平方向の施工により固定定着した中空 PC スtrandの引抜き実験を実施して、固定定着部の定着性能を調べた。その結果、特定した充填材を使用して構築した固定定着部は、中空 PC スtrand緊張材の規格引張荷重 (588kN) 以上の定着性能を満たしており、実構造物に適用できることを明らかにした。

第4章では、本工法を床版等の薄肉部材に適用するために、「小径 PC 鋼棒 ϕ 13mm, ϕ 17mm」に着目した。部材寸法を 150~250mm に変化させた小型供試体 ($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$) に小径用拡張ビットを用いて削孔を行い、小径 PC 鋼棒を固定定着させて引抜き試験を行い、定着性能を調べた。

この結果をもとに、実大供試体 ($\sigma_c=24\text{MPa}$) に水平定着した小径 PC 鋼棒の引抜き載荷実験を行い、固定定着部の定着耐力を調べた。その結果から、 ϕ 13mm PC 鋼棒では、1辺 150mm 以上の部材寸法があれば B 種 1 号の規格引張荷重 (143.3kN) 以上の定着性能を発揮し、 ϕ 17mm PC 鋼棒では、250mm 以上の部材寸法があれば B 種 1 号の規格引張荷重 (245.2kN) 以上の定着性能を発揮していることから、床版等の薄肉部材へ適用できることを示した。

第5章では、本工法を塩害等の過酷な環境下にある構造物に適用するために、耐腐食性に優れる非鉄系緊張材である「炭素繊維複合ケーブル緊張材」に着目した。ここでは、床版等の薄肉部材への適用を想定し、 $1\times 7-10.5\phi$ と $1\times 7-12.5\phi$ の2種類の炭素繊維複合材ケーブルを対象とした。第4章の小径 PC 鋼棒と同様に、部材寸法を 150~250mm に変化させた小型コンクリートブロック ($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$) を用いて、固定定着部に挿入する緊張材先端部の加工方法を変えた供試体を製作し、引抜き実験により固定定着部の定着耐力を調べた。先端部の加工方法には、緊張材の外周に鋼管を配置し膨張材で一体化させたスリーブ式と、ストランドを解いて房を形成する解撚式(一房・二房)を用いた。

その結果、先端部加工にスリーブ式を用いた場合、 $1\times 7-10.5\phi$ の補償破断荷重 (141kN) に対して、部材厚さ 200mm~250mm、 $1\times 7-12.5\phi$ の保証破断荷重 (184kN) に対して、同 150mm~250mm への適用性が窺えるものの、施工性には課題があり、固定定着部に空隙が発生する等の懸念があることが分かった。一方で、解撚式を用いた場合、一房でも部材厚さが 150mm~250mm への適用性が窺え、スリーブ式と同等な引抜き耐力が得られたこと、また現場での加工の容易性や経済性の観点から、この方法が望ましいことが分かった。

第6章では、本研究で得られた知見を取り纏めるとともに、今後の課題と展望を示した。

Summary of the Doctoral Dissertation

Improved Applicability of the Strengthening System Using Post-tension Tendon with Internal Anchorage

TAKAFUMI Mihara

General concrete is vulnerable to tensile forces, and cracks often occur due to internal and external forces. Post-tensioning prestressing is a reliable method for reinforcing concrete structures. Post-tensioned prestressed concrete (PC) members are generally employed in civil infrastructure such as bridges. Post-tensioning prestressing is also an effective method for strengthening existing concrete structures. The strengthening system with external prestressing cables is widely used to increase the load-bearing capacity of concrete bridge girders.

However, it may be hard to arrange such prestressing cables for some concrete members, because the workspace available may be inadequate for the strengthening work. To avoid workspace issues, the authors developed an internal prestress strengthening system for existing concrete members, by which a post-tension prestressing tendon is embedded in a wedge-shaped internal anchorage. Previous studies confirmed that post-tensioned prestressing bars can be firmly anchored in the internal wedge hole filled with high-strength filling material and that the system can contribute to the durability of jointed concrete members.

The purpose of this study is to improved applicability of the strengthening system using post-tension tendons with internal anchorage. “Hollow type prestressing tendons”, “Small diameter prestressing bars”, and “Carbon fiber composite prestressing tendons” were employed as new tension materials for use in differing specific structural members, construction conditions, and environmental situations.

The applicability of the technique to each case was investigated experimentally via grout testing and pull-out testing of the tension materials using a concrete block.

The thesis consists of 6 chapters, and contents of each chapter are shown below.

Chapter 1 describes current maintenance techniques of concrete structures, and shows examples of application of strengthening system with prestressing tendons.

In this chapter, the purpose of this study and outline of the thesis are presented.

Chapter 2 describes the strengthening system using post-tension tendons with internal anchorage, as developed in previous research. This chapter summarize advantages of the system and targeted applications. Also, applicable ranges and concerns of the strengthening system are also summarized in the chapter.

Chapter 3

Under conditions with narrow work spaces, it was difficult to employ the previous system using a post-tensioned prestressing bar, as adequate backspace was required to install the bar. A flexible hollow corrugated pipe covered with steel wire cables seemed applicable even in such narrow spaces. Interestingly, the hollow stranded tendon could also be used as a grouting-pipe to fill the internal anchorage. The foci of this study were to develop a grouting material suitable for passage through a hollow corrugated pipe, and to determine the applicability of the hollow-type prestressing tendon for the internal strengthening system. In the study, a horizontal grouting test was first conducted using 5 m-long corrugated pipes of 10 mm internal diameter. It was confirmed from the grout and strength tests that some grouting materials were applicable for filling the hollow type prestressing tendons. In addition, pull-out tests of the prestressing tendon embedded in the anchorage of mock-up RC blocks were conducted to examine their load-bearing capacity. Furthermore, visible tests of the horizontal and upward grouting were conducted to confirm the filling condition in the wedge-shaped anchorage. The test results confirmed adequate load-bearing capacity of the hollow prestressing tendon embedded in the anchorage when the filler applicable to horizontal grouting was used.

Chapter 4

In order to apply this method to thin structural members such as floor slabs, we focused on small diameter ($\phi 13$ mm and $\phi 17$ mm) prestressing bars. Pull-out testing of the tendons was performed using small specimens with the dimensions altered to about 150 to 250 mm, and their basic fixing performance was investigated. Then another full-scale pull-out test was conducted with an assumed horizontal orientation, also investigating its fixing performance. The $\phi 13$ mm PC steel rods demonstrated a fixing performance of 150 mm or more on a side, while the $\phi 17$ mm ones attained 250 mm or more, which exceeds the standard value. Accordingly, this method can be applied to thin structural members.

Chapter 5

In this chapter “Carbon fiber composite prestressing tendons”, a non-ferrous tensioning material, was employed for application to structures in salt-damaged environments. Here, assuming application to thin-walled members such as floor slabs, two types of carbon fiber composite cable were selected. Pull-out testing was conducted on a small concrete block with dimensions of 150 to 250 mm. The tension material was prepared using different processing methods for the tip. The fixing strength of the fixed part was examined. To manufacture the tip, we used a sleeve-type technique in which a steel pipe was placed on the outer circumference of the tension material and integrated with an expansion material, and an untwisting technique in which the strands were

unwound to form tufts. When the untwisting type was used, even one bunch was shown to be applicable for member thickness of 150 to 250 mm, and the pull-out strength was equivalent to that of the sleeve type. It was also found that this method is desirable for its ease of on-site manufacturing and economic efficiency.

Chapter 6 presents the remarkable conclusions of this study, and describes future problems at the end of this thesis.

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 インフラを取り巻く環境と課題

我が国の国土は、気象、地形、地質等が極めて厳しい状況下であり、加えて、高度経済成長期に整備されたインフラが今後一斉に老朽化することが見込まれている。

図-1.1.1に示すように玉越ら [2012] による橋梁の統計（橋長 15m 以上）では、2020年時点で、約 41,000 橋が建設後 50 年以上経過するといわれている。

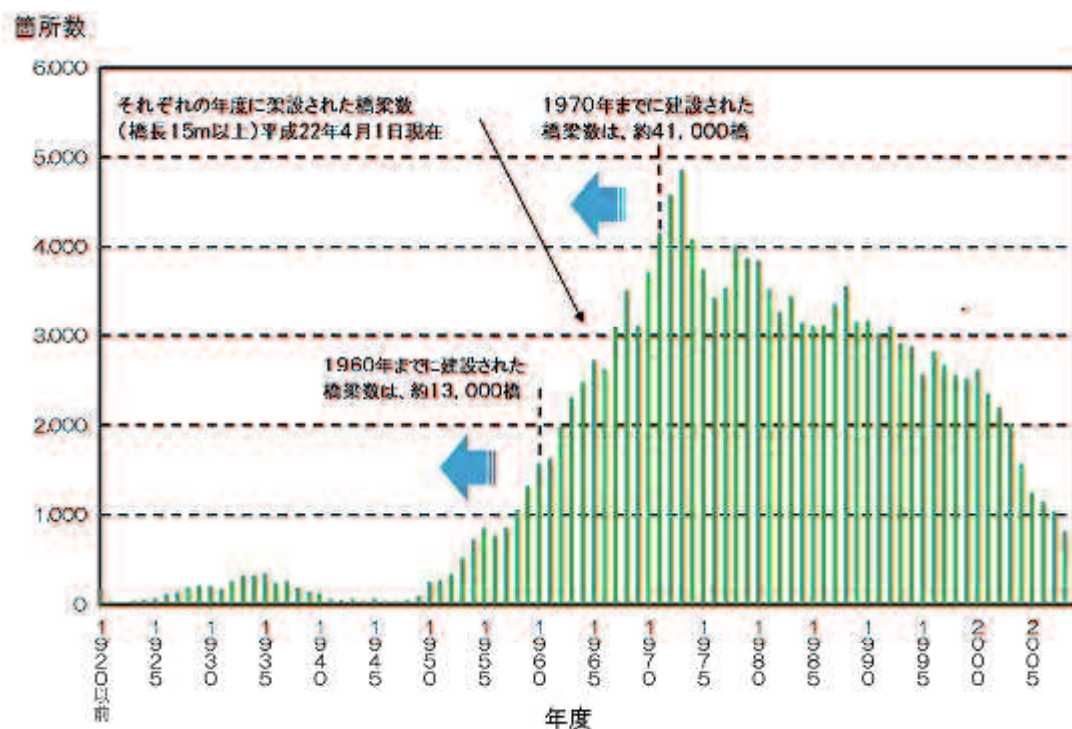


図-1.1.1 橋梁建設数の推移

〔土木研究所 構造物メンテナンスセンター, 2020〕

この間、構造物では、経年劣化が進む（図-1.1.2）とともに、規格荷重や耐震基準の見直しがなされている（図-1.1.3）。こうした要因により、老朽化・要求性能を満たさない構造物を今後も供用していくためには、補修・補強といった対策が必要とされている。



塩害による劣化（主桁）

ASRによる劣化（橋脚梁）

地震による損傷（橋脚）

図-1.1.2 コンクリート構造物の劣化・損傷事例
〔土木研究所 構造物メンテナンスセンター，2020〕

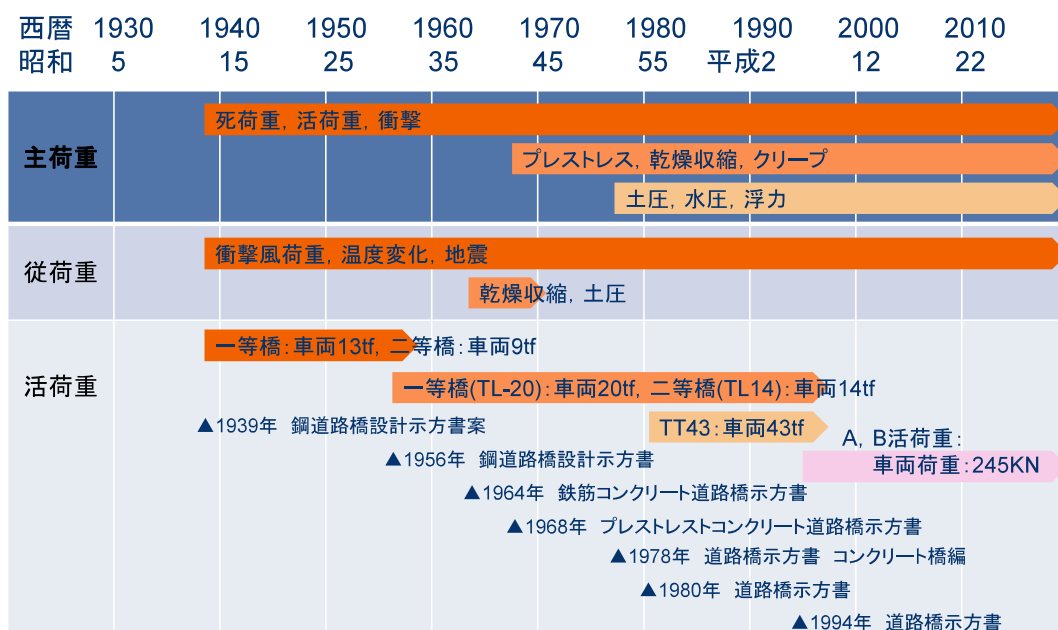


図-1.1.3 設計荷重の種類と変遷

このような背景のなかで、2015年9月に第4次社会資本整備重点計画（2015～2020年度）が閣議決定されており、厳しい財政制約の下、①切迫する巨大地震や激甚化する気象災害、②加速するインフラ老朽化、③人口減少に伴う地方の疲弊、④激化する国際競争、という4つの構造的課題に対応するため、社会資本のストック効果の最大化を図ることを基本理念とし、「既存施設の有効活用（賢く使う）」や「集約・再編」を進めながら、ストック効果の高い事業に「選択と集中」を徹底することが示された。さらに、中期的な見通しを持った社会資本整備を進めていくための4つの重点目標のなかには、「社会資本の戦略的な維持管理・更新を行う」、「災害特性や地域の脆弱性に応じて災害等のリスクを低減する」が示され、まさに推進されているところである。

このように、コンクリート構造物を含めたインフラの老朽化や災害に対する対策は、現在の社会資本整備において重点施策に位置付けられている。本研究では、ここに示されている「社会資本のストック効果の最大化を図る」ために既存施設の有効活用していくための技術として、既設コンクリート構造物の補強に着目した。

現在、既設コンクリート構造物に対する様々な補強工法が研究され提案されている。なかでもプレストレスを用いた技術は、コンクリートの応力やひび割れを制御することが可能であるため、効果的な補強技術の1つとして考えられている。

1.1.2 既設コンクリート構造物の補強技術

(1) 外ケーブル補強工法

外ケーブル補強工法は、既設コンクリートの部材外面にPC鋼材を追加配置し、外付けした定着体を介してコンクリート部材にプレストレスを与えて耐荷性能を回復・向上させる技術である。

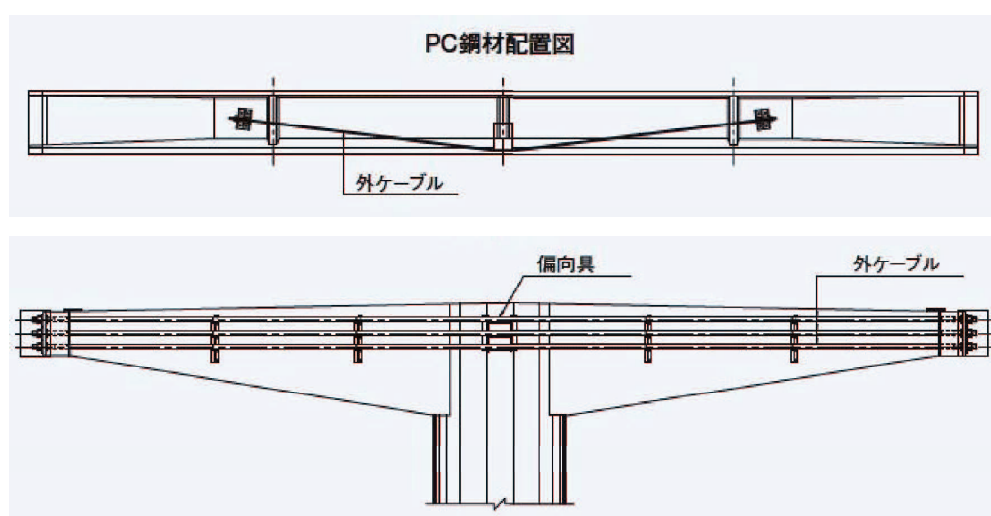


図-1.1.4 外ケーブル補強工法の適用例
〔株式会社エスイー，2020〕

により設計手法に関する研究が進められ [鄭ら, 1996], 橋梁上部工の補強や橋脚梁の補強等に広く用いられている (図-1.1.4). また, 外ケーブル補強工法は, コンクリート構造のみならず鋼桁の補強 (図-1.1.5) にも採用されており [原田ら, 2001], 更には, 緊張材として炭素繊維補強材を用いたした工法も開発されており [原田ら, 2012], 実績を伸ばしている技術である.



図-1.1.5 鋼桁への適用事例

外ケーブル補強工法は, 追加緊張や取替えが容易にできるため, 部材劣化の進行や要求性能の増加に対応することができる. こうしたことから, 緊張材の張力をモニタリングする技術 (図-1.1.6) についての研究も進められている [村田ら, 2013].

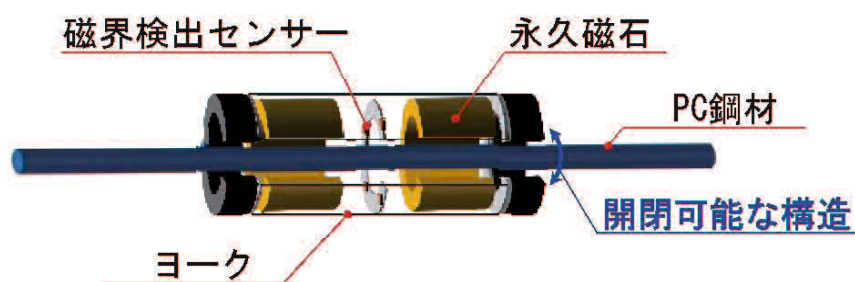
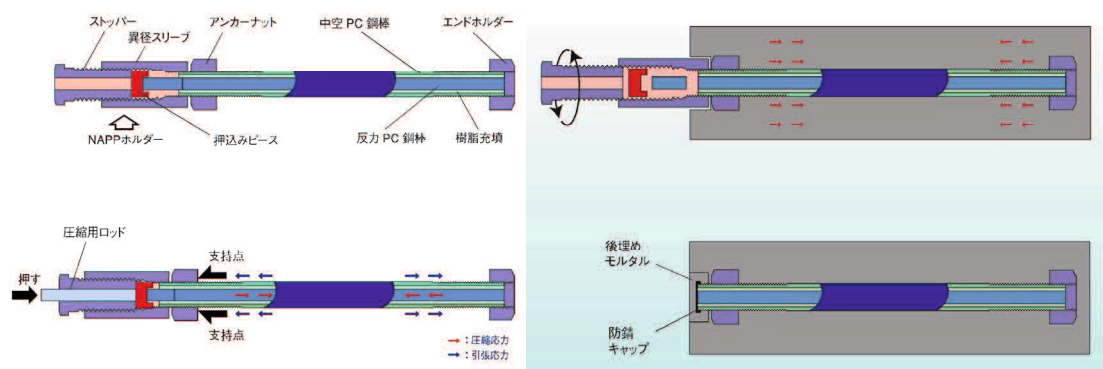


図 1.1.6 張力センサーの例

一方で, 緊張力を既設部材に伝達する部材である定着体の耐荷性能を十分に確保する必要があることや, 外ケーブルの腐食に対する防錆方法や耐火性の確保に留意が必要である. さらに, 外ケーブル工法は緊張材を配置するための空間や緊張するための作業空間が必要であり, 構造物の設置環境によっては採用が難しい場合がある.

(2) プレテンション方式中空 PC 鋼棒を用いた補強工法

プレテンション方式中空 PC 鋼棒を用いた補強工法は、1992 年に開発された中空 PC 鋼棒を用いたプレストレス導入工法であり、NAPP ユニットと呼ばれるあらかじめ緊張された状態の中空 PC 鋼棒を型枠の所定の位置に配置し、コンクリートが硬化した後、緊張力を開放してコンクリートにプレストレスを導入する工法である。中空 PC 鋼棒の緊張力は、中空 PC 鋼棒の内部に配置した反力 PC 鋼棒に圧縮力を与え、その反力を中空 PC 鋼棒に取らせる方法で導入される [中橋ら, 2008]。現場でのプレストレス導入は専用の開放装置により反力 PC 鋼棒に作用していた圧縮力を開放することで行われる (図-1.1.7)。プレストレスの導入方式としてはプレテンション方式に類似した工法である。この技術を用いることで、既設部材に新たな部材を増設する場合にプレストレスを導入して一体化を図ることができる (図-1.1.8)。



工場工程（上：組立，下：緊張力導入） 現場工程（上：開放，下：跡埋め）

図-1.1.7 工法概念図

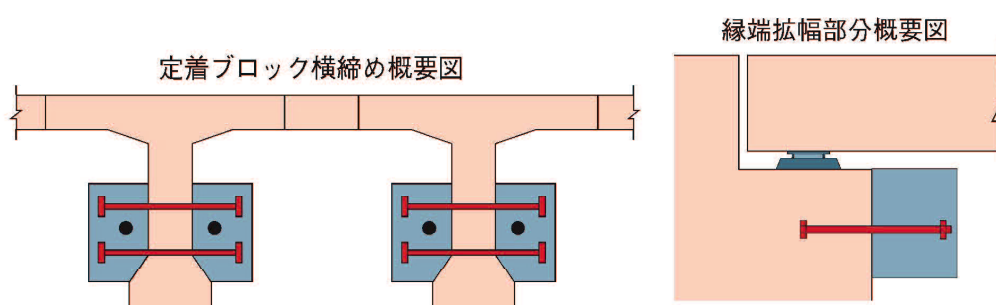


図-1.1.8 工法の適用例

[NAPP 工法技術研究会, 2020]

しかし、NAPP ユニットの埋設するための比較的大きな削孔が必要なことや現場において導入緊張力の調整や長さの調整ができないこと等について留意する必要がある。

(3) PC 巻立て工法

PC 巻き立て工法は、高強度の PC 鋼材を補強帯鉄筋として用いた既設 RC 橋脚の耐震補強技術である。PC 鋼材による拘束（コンファインド）効果が有効に働くため、耐荷力および変形性能をより効率良く改善・向上でき、じん性に優れたねばり強い RC 橋脚に生まれ変わる。

また、プレキャストコンクリートパネルを用いた工法では、水中橋脚の耐震補強等に適用されており（図-1.1.9）、仮締切りが必要となる RC 巻立て工法と比較すると、大幅なコストの縮減が期待できる。

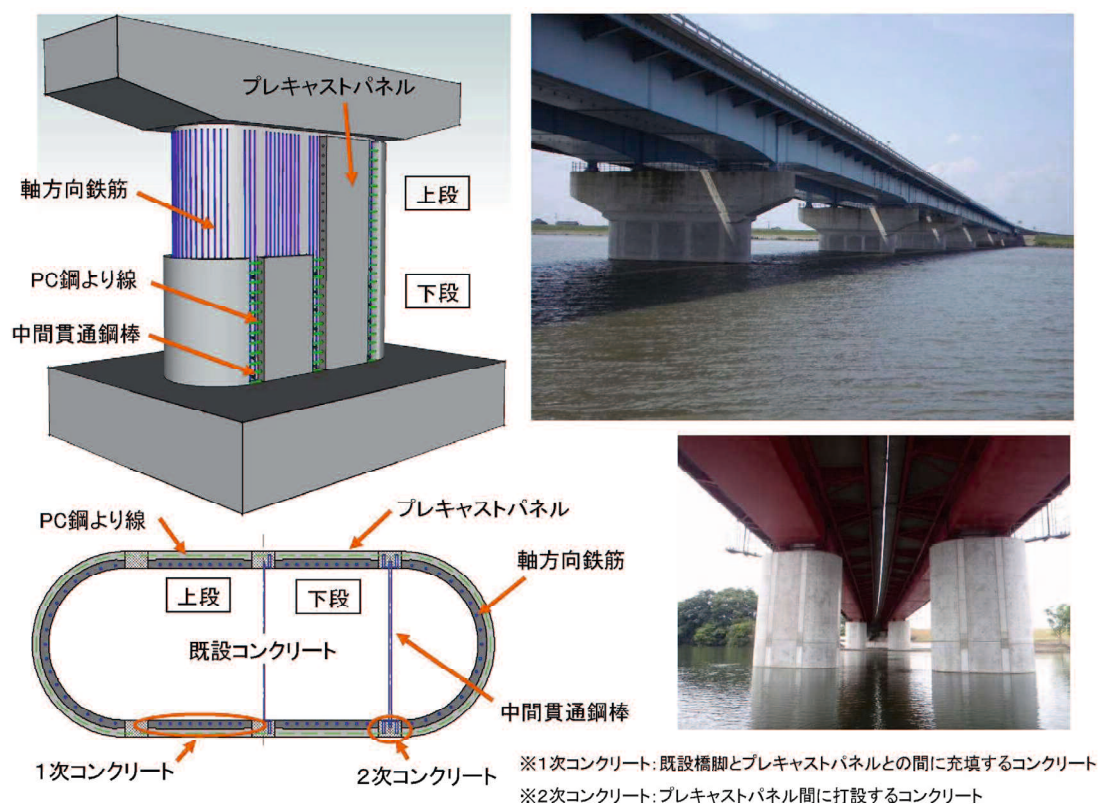


図-1.1.9 工法概念図と水中橋脚への適用事例

〔株式会社ピーエス三菱，2020〕

(4) CFRP プレート緊張材工法

CFRP プレート緊張材工法は、両端に定着体を有する CFRP プレートを緊張して、既設コンクリート躯体に固定・接着することでプレストレス補強する工法である（図-1.1.10）[濱田ら，2005]。連続繊維シート接着工法に比べると CFRP プレートを緊張することによりコンクリートにプレストレスを導入することが可能で、少ない補強材料で大きな補強効果を得ることができる技術である。緊張材には、薄い CFRP プレートを正在しているため補強後の外観形状、断面変化等への影響は少ない。

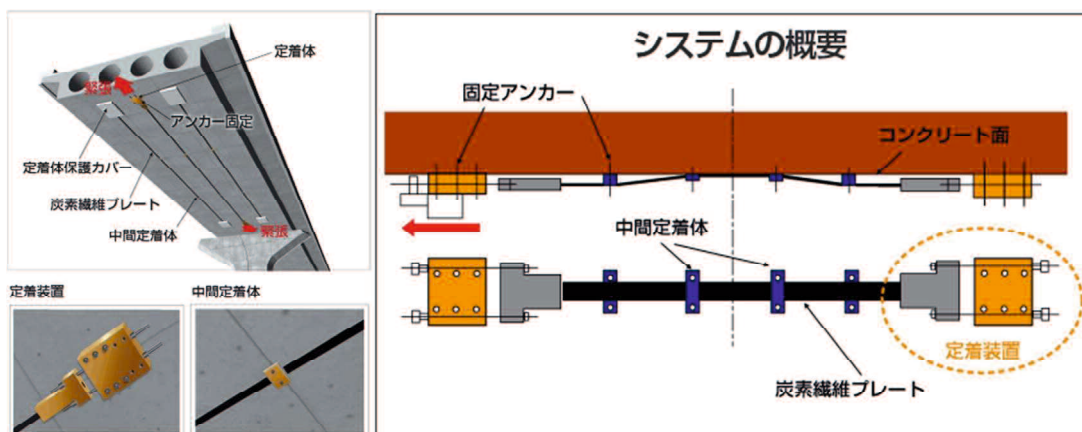


図-1.1.10 工法概念図
 [アウトプレート工法研究会, 2020]

また、使用する CFRP プレートは、鋼材の 10 倍近い強度を持ち、水や塩分等による腐食にも強いという軽量なため、効果的な補強と耐久性・施工性の改善も期待できる。RC、PC のホロースラブ・T 桁をはじめ多くの橋梁に対して適用が可能である (図-1.1.11)。



ホロースラブ



T 桁

図-1.1.11 適用事例

1.2 既往の研究

1.2.1 既設コンクリート構造物の補強技術に関する研究

現在においてコンクリートは主要な建設材料の一つであり、様々な用途のコンクリート構造物が建設されてきた。そして、これらの既設コンクリート構造物の補強に対する研究は、様々な環境や施工上の制約に対応するために、これまでに多数実施されてきた。以下に、その研究の代表例を列挙して示す。

佐野ら [1996] は、鋼板接着によるコンクリート部材の補強に際し、補強効果を十分に発揮するために重要な鋼板の接着長を、合理的に定める方法を提案した。まず、両引き試験および線形有限要素法を用いた接着部の応力解析により、鋼板のはく離現象を明らかにし、同様の解析をはり部材の鋼板接着部にも適用して検討を行い、鋼板定着長および鋼板はく離荷重の算定式を提案した。提案した算定式により補強設計した RC はり供試体を用いて曲げ載荷実験を行い、算定式の妥当性を検証した。

奥田ら [1997] は、アルカリシリカ反応 (ASR) が原因で劣化したコンクリート構造物の補修・補強が重要な課題となっていることを背景に、PC 鋼材を補強材として用いる工法 (PC 巻き立て工法) に着目し、コンクリート試験体を用いてその適用性を確認し、ASR が原因で損傷を受けた実橋脚に適用した。その結果、プレストレスを与えたことにより ASR によるひび割れが拘束されることを示し、加えて PC 鋼材の高降伏点応力度によって大きな横拘束効果が得られることから良好な耐震効果も示した。

阿部ら [2014] は、RC 床版の押抜きせん断破壊に起因する斜めひび割れおよび輪荷重走行により発生する水平ひび割れの抑制を図るために、せん断筋を挿入して補強効果および耐疲労性を評価するために輪荷重走行疲労実験を実施した。その結果、せん断筋を車両走行付近に配置することで輪荷重走行による水平ひび割れが抑制され、耐疲労性が大幅に向上した。

Lai and Ho [2015] は、コンクリート充填鋼管 (CFST) 柱を使用した補強システムを検討した。彼らは、円形のスチールジャケットが CFST カラムの一軸挙動を改善できることを示した。また、ストレスラグがその効果を低下させている可能性を示した。

Kumar and Patel [2016] は、ステンレス鋼ワイヤメッシュ (SSWM) を用いた軸方向荷重を受ける円形コンクリート柱の補強方法を示した。彼らは、SSWM は、炭素繊維またはガラス繊維ポリマーと経済性を比較しても、コンクリート柱の補強材として適用できると結論付けた。

Lampropoulos *et al.* [2016] は、超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) を用いた、既存 RC はりの補強について、その有効性を検証した。彼らは、UHPFRC を 3 面に配置したジャケットで優れた性能を実証し、この技術と他の補強技術との比較を示した。

Sneed *et al.* [2016] は、鋼繊維補強セメント系マトリックス (steel-FRCM) 複合材料で補強された鉄筋コンクリート (RC) はりの曲げ応答について調査した。彼らは、5 体の梁試験片を用いた剪断試験を実施してその効果を実証した。

1.2.2 プレストレスを用いた補強技術に関する研究

プレストレス技術は重量や寸法の制約を受ける補強工法・部材接合方法として適しており、一般的な外ケーブル工法やコンクリート内部に緊張材を固定定着し内部からプレストレスを導入する工法など、さまざまな工法が研究開発されている。

新津ら [1999] は、外ケーブルによるせん断補強効果を明らかにするため、外ケーブル式 PC はりのケーブルの配置角度を要因に載荷実験を行い、外ケーブルによるプレストレスを外力としてモデル化、二次元有限要素法により解析的にせん断補強効果を求めた。解析結果を実験値と比較することで解析の妥当性について検討を行い、既往のせん断耐力算定式が外ケーブル式 PC はりに対する適用性を確認した。

今井ら [2001] は、パイプ状に加工された PC 鋼棒を用いることで、緊張された PC 鋼棒を固定するための強固な固定装置（アバット装置）を必要としないプレテンション方式によるプレストレス導入方式（HPC システム）を開発した。このシステムの実用化を目的として基礎実験および実大構造物による定着性能確認実験を実施し、PC 鋼棒のねじ部の付着定着と終局荷重時や衝撃などによりねじ部の付着が破壊した場合においても、定着耐力を確保できる、径が最小の専用治具（定着用ナット）の指圧定着との複合定着状態を定量的に表せることを明らかにした。

Faria *et al.* [2011] は、エポキシ接着剤により PC スtrandを既設コンクリート外部に接着することによって形成されたアンカーを用いてポストテンションを導入する新しいフラットスラブ補強技術について研究を行った。定着させた PC スtrandに引抜き載荷および押抜き載荷により負荷を加えることで引張力が増加したときのスtrandおよび補強スラブの挙動を調べ、そのモデル化を試みた。その結果、非補強スラブと比べて補強スラブの載荷時のたわみは 70%低減し、ひび割れ幅を大幅に減少させることを示した。また、補強スラブの最大荷重が非補強スラブと比べて 36%～54%増加する結果を示した。

Steensels *et al.* [2017] は、プレテンションコンクリート桁のアンカー領域における非線形ひずみと応力分布の予測を目的として新たな二段階モデリング手法を提案した。その結果、モデル化のアプローチによって広範囲で導入するプレストレス力を正確に評価し、導入後のアンカー領域における非線形ひずみ分布を評価できることを示した。また、結合すべり挙動の数値的評価とアンカー領域モデルのひずみの数値評価の両方が、合理的な数値を与える場合に対して許容可能で正確なレベルを示すことを明らかにした。

Ng and Tan [2006a] は、外部からプレストレスを与えられたはりの曲げ挙動を調べるために数値解析を行った。彼らは、外部プレストレスはりの構造的挙動を予測するために、単純な支持における二次効果に関して「pseudo-section analysis」法を開発した。さらに、Ng and Tan [2006b] は、外部からプレストレスを与えられたはりの曲げ挙動を検証し、提案した方解析方法の妥当性を確認した。

Park *et al.* [2005] は、外部からプレストレスをあたえて補強した供用中の既設鋼版桁橋に対して、補強から4年後の経時的なプレストレスの変化と補強前後の橋梁の挙動を検証した。彼らは、実車荷重による載荷実験と数値解析により、外ケーブル補強によるプレストレスの長期的な損失が、ごくわずかであることを示した。

Turmo *et al.* [2006] は、数値シミュレーションにより、外部プレストレスによって接合されたセグメントコンクリート要素の構造的挙動を予測した。その結果と実証実験との比較により妥当性を確認した。

Hara *et al.* [2008] は、既設コンクリート部材にプレストレスを導入する方法として、部材内を削孔し孔壁に凹凸を設けた後、反力鋼棒により引張力を保持した中空鋼棒を組立てた部品を挿入し、グラウト充填した後、保持した引張力を除荷して付着定着によるプレテンション方式でプレストレスを与える方法を開発している。

Maa *et al.* [2012] は、外部からプレストレスをあたえて組積構造物の耐震性能を改善する方法を提案した。彼らは、振動台モデル試験によりプレストレスによる補強効果を実証した。

Shahverdi *et al.* [2016] は、加熱すると初期形状に戻る特性を有する鉄系形状記憶合金 (Fe-SMA) を用いた既存 RC はりのプレストレス補強について、その有効性を検証した。彼らは、RC はりの底面に増設した吹付けコンクリート層にリブ付きの Fe-SMA を埋設し、プレストレスを導入した補強はりでの曲げ載荷試験により、プレストレスの効果を実証した。

Park *et al.* [2016] は、高強度ストランドを用いてポストテンション方式で補強された桁供試体の曲げ試験を実施し、高強度ストランドがコンクリート桁の曲げ挙動におよぼす影響を調査した。結果は、ストランドの引張強度に関係なく現在の設計基準予測と実際の曲げ挙動がよく一致することを示した。

Huang *et al.* [2017] は、コンクリート充填鋼管 (CFT) トラスはりを外部プレストレスにより補強する構造の挙動について実験により検証した。彼らが開発した有限要素モデルで合理的にその挙動が予測できることを示した。

1.2.3 補強材・緊張材の固定定着技術に関する研究

緊張材を既設コンクリートの外部あるいは内部に固定定着する方法についても多くの研究が行われている。以下に PC 定着方法の中でも主にコンクリート内部に固定定着した構造およびアンカーを用いた部材の定着に関連する既往の研究を示す。

岡田ら [1988] は、高強度グラウトを利用した PC 鋼より線埋込み定着工法における定着ボルトの形状および定着ボルト周囲の補強筋が、短期または長期的な定着部の定着性能におよぼす影響について検証実験を行った。実験結果より、短期載荷時に定着ボルトをくさび型にすることで、コンクリート間の付着効果や支圧板による応力緩和が期待でき、ストランドのすべり量の減少および荷重の増大に伴う定着ボルトのめり込みによ

り生じるコンクリートブロックのひび割れ抑制効果を有することを示した。

Cai *et al.* [2016] は、既往実験のデータと複合アンカーの形状に関する解析、および界面接触、付着すべりなどの合理的な仮定に基づいて ANSYS モデルを作成し、CFRP 緊張材のための複合アンカーの性能に関する数値的調査を行った。ANSYS モデルは、アンカーリング、ウェッジランプおよびスリーブの間の接触要素を考慮して作成されている。シミュレーションの結果は実験結果とよく一致しており、くさび締め付けによるスリーブ内部の半径方向応力は、アンカー性能を反映するための重要な指標であることを示した。また結果は、ウェッジランプ角度 (θ_2) およびアンカーリング角度 (θ_1) とウェッジランプ角度 (θ_2) との角度差 ($\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$) の両方がアンカー性能に対して影響を与えやすく、そして事前締め付け力についてはアンカー性能に対して影響を与えないことを示した。

Tahershamsi *et al.* [2017] は、腐食した RC 構造のアンカー挙動を分析するレベル 1~4 までの異なるアプローチの範囲を提示し、異なるレベルのモデルにおける解析値と実際の RC 構造の自然腐食による実験値と比較検討した。その結果、レベル 4 のモデルは定着特性および、ひび割れ挙動の点で実験値とほぼ一致した。しかし、このモデルに要する分析時間と潜在的な収束の問題に対処するために多大な労力が必要であるというデメリットも明らかにした。

Fan *et al.* [2017] は、異なる岩盤タイプにおける 3 種類の CFRP 地中アンカーの特殊な二重ストラップ型端部の引抜き挙動をシミュレートするために引抜き実験を実施した。CFRP 緊張材は、地中側に異なる厚さの鋼管で覆われた二つの CFRP ストラップが高強度グラウト内に埋め込まれたプレハブ式円錐アンカー式である。結果は、CFRP 緊張材とグラウトの界面で摩擦が卓越して生じ、特に大小ストラップの分岐点や CFRP 緊張材の自由長からストラップ部分への分岐点で集中荷重が発生することを示した。

Mei *et al.* [2018] は、アンカー内部の CFRP 緊張材の定着-すべり挙動や鋼製スリーブの多軸応力などの定着型アンカーの機械的性質を調べるため、CFRP 緊張材用にストレート型、インナーコーン型、およびコンポジット型の異なる形状のアンカーを提案した。その結果、コンポジット型アンカーが最も信頼できる荷重伝達モードを示し、インナーコーン型アンカーで発生した切り欠き効果を排除できることを証明した。また、散乱端部緊張材を有するアンカーのすべりは、非散乱端部緊張材を有するアンカーよりも小さく、散乱端部緊張材を有するアンカーが優れた定着特性を有することを示した。

Xie *et al.* [2018] は、CFRP 緊張材のための固定定着システムの機械的性能および定着性能に対する繰り返し荷重の影響を調査するために、異なる応力振幅と載荷周期の下で一連の単調および周期的実験を行った。また、固定定着システムの疲労損傷と損傷-載荷周期および損傷-界面温度上昇の間の関係を解析により求め、周期的引張-引張荷重は固定要素間の相乗的に相互作用を強化し、また応力振幅が固定定着システムの最大引張容量の 10%より低く保たれるならば固定定着性能全体を安定化することを示した。

Xie *et al.* [2019] は、弾性理論に基づく CFRP 緊張材のための定着アンカーにおける応力分布を予測するための普遍的な理論モデルを提案した。提案されたモデルは直線アンカーだけでなく異なる円錐形のアンカーの応力分布を予測することが可能であり、実験結果と比較することで検証された。また、開発した理論モデルに基づいてアンカーゾーンの応力分布に及ぼすアンカーの構造形態、円錐度および結合材料の影響を調べるためにパラメトリック解析を行った。結果は、緊張材のすべりに対する抵抗が円錐度にともない増加することを明らかにしたが、円錐度が高いと深刻な応力集中およびせん断・圧縮損傷の高い危険性がアンカーゾーンに現れることを示した。

Zhuge *et al.* [2019] は、CFRP の定着型アンカー (C225FRP) を充填するための荷重伝達媒体 (LTM) として使用されるエポキシ樹脂は、三次元圧縮条件下でクリープを生じさせ、それによって固定定着部の耐荷性能を低下させる問題から、LTM のクリープが固定定着部の耐荷性能に及ぼす影響を評価し、固定定着部の LTM のクリープの悪影響を排除するために理論的な方法を提案した。また、CFRP 緊張材の固定定着部における緊張材と LTM の接着界面のせん断応力分布モデルを提案し、耐荷性能に関する実験結果は、理論的予測と良好に一致することを示した。

醍醐ら [2019] は、アラミド FRP ロッドを用いた耐震補強工法の適用事例として、橋脚天端から削孔をおこない、躯体内にアラミド FRP ロッドを挿入し先端部を定着した緊張することでプレストレスを与えて曲げ補強した事例を報告している。

1.2.4 繊維補強材料を用いた補強技術に関する研究

近年では、部材の補強材として、炭素繊維強化ポリマー (CFRP) およびガラス繊維強化ポリマー (GFRP) 等を含む繊維強化ポリマーが広く利用されており、その適用範囲はプレストレスを導入するための緊張材にもいたる。そして、現在も補強方法や効果の検証に関する研究が幅広くなされている。

これらの材料を用いた補強工法や材料そのものに焦点を当てた既往の研究を以下に示す。

Omran *et al.* [2012] は、NSM-CFRP ストリップでプレストレス補強された RC はりの非線形 3 次元有限要素解析を行った。モデルにおいて、エポキシコンクリート界面での剥離効果は内面固定部の破壊エネルギーおよび双線形せん断応力-ひずみ、引張応力-ギャップモデルによって考慮された。FE モデルによる結果は、文献で入手可能な実験データから検証され、補強されていない基準はりに等しい強度のはりのエネルギー吸収量を維持することによって、供用中のはり性能および終局荷重を高める NSM-CFRP ストリップの最適なプレストレス導入レベルが決定された。

Kim *et al.* [2014] は、既設コンクリート橋のコンクリート表面に埋込み定着した CFRP プレートを用いてポストテンションによりプレストレス補強するための補強構造の挙動を三次元有限要素解析により示した。その結果、アンカー領域の破壊は、せん断によ

るアンカーボルトの破壊ではなく、コンクリートの破壊によって制御されていることを示した。また、この工法のポストテンションレベルは補強桁の挙動に影響を与え、桁長とポストテンションの間に相関性があることを示した。

Wang *et al.* [2015] は、外部プレストレス補強材として新たに開発された玄武岩繊維補強ポリマー (BFRP) 緊張材を用いた RC はりの構造挙動の検討を行った。BFRP は、高いクリーブ破断応力を有しているため、プレストレス用途に優れた材料である。その結果、BFRP 緊張材を RC はりの外部プレストレス材として用いることで、引張応力および緊張材形状にかかわらず、ひび割れ、降伏荷重および終局荷重を向上できることを示した。

Alsaad *et al.* [2017] は、炭素繊維補強ポリマー (CFRP) シートで巻き付けた直径 150mm × 高さ 550mm の RC 柱を原油または海水中に異なる期間浸漬した後、負荷容量および変形挙動の評価を行い、CFRP シートのコンクリート海洋構造物への有効性を調べた。その結果、CFRP シートで巻き付けた RC 柱の負荷容量は、原油または海水中に 90 日間浸漬することによって影響を受けなかったが、CFRP シートで巻き付けていない RC 柱の負荷容量は大幅に減少したことを示した。また、CFRP シートで巻き付けることにより、RC 柱における縦軸方向および横軸方向ひずみの大幅な減少が報告された。

Mohee *et al.* [2017] は、既設コンクリート構造物の曲げ補強に用いるプレストレスを導入した CFRP プレートのための新開発プレストレス CFRP プレートアンカーについて引張強度と破壊モードに焦点をあてて研究を行った。その結果、新開発 CFRP プレートアンカーが CFRP プレートの規格引張荷重を超える引張強さを有することを示し、アンカーの破壊モードがアンカー外部自由長における CFRP プレートの引張破断であることを示した。アンカー部の CFRP プレートのすべり量もわずかであり、新開発 CFRP プレートアンカーの実用性が示された。

Al-Saadi *et al.* [2017] は、グラフェン酸化物セメント系接着剤を用いた直引張試験によるコンクリートに埋設した NSM CFRP ストリップの接着性能を調べるために An innovative highstrength self-compacting non-polymer cementitious adhesive (IHSSC-CA)、エポキシおよびポリマーセメント系接着剤によってコンクリート基盤に接着された CFRP ストリップの直引張試験を行い、さらに接着強度を予測するための解析モデルを提案した。結果は、解析モデルにより予測された NSM 引抜き強度と実測による NSM 引抜き強度との良好な一致を示した。

Yang *et al.* [2018] は、縦補強筋比、異なるセメント系マトリックス構造 (ECC, エポキシモルタル)、異なる導入工法 (プレハブ, プレキャスト)、そして CFRP 格子について異なる剛性を試験変数として、ECC マトリックスを用いた CFRP 格子を外部に結合した RC はりの一連の曲げ性能について調査した。結果は、ECC は FRP 格子を外部補強材として用いる補強について適したセメント系マトリックスであることを示し、なかでもエポキシ系接着剤を使用した CFRP 格子補強 ECC プレートの曲げ強化構造は、最

も効率的なものだと証明した。

坂井ら [1990] は、ポストテンション方式 PC 桁橋の一部に CFRP 製緊張材を使用し、適性を検証するとともに張力を長期計測した。その結果、通常の PC 鋼材で緊張した主桁と CFRP 緊張材緊張した主桁とを比較すると、荷重の分担性能等の性能に劣るところは見受けられないものの、長期計測のなかで若干ではあるが、温度変化に起因して張力変動が発生することが示された。これは、CFRP とコンクリートとの線膨張係数の差によるものと示されている。

原田ら [2012] は、炭素繊維複合材ケーブル (CFCC より線) を対象とした曲げ引張試験を実施し、耐力低下に及ぼす要因の耐力低下のメカニズムについて実験的な検討を行うとともに、曲げ径比や緩衝材など、耐力低下を緩和できる方法について検討した。さらに、CFRP より線を外ケーブルとして用いる場合の偏向具の設計と導入緊張力の考え方についても言及した。

Schmidt *et al.* [2012] は、機械式定着システムの 3 つの方法、スパイク、ウェッジ、クランプについて議論した。彼らは、一次文献レビューを通して FRP 定着システムの適する領域を示した。

Hadjazi *et al.* [2016] は、曲げひび割れにより誘起する界面せん断応力の長期挙動に対するクリープ応答モデルを開発した。彼らは、界面剥離に対する FRP、コンクリートおよび接着剤の機械的性質および厚さの変動の影響を実証した。

Doror and Rabinovitch [2016] は、XFEM 解析モデルを用いて、繊維強化ポリマー複合材料で補強されたはりの剥離破壊におけるサイズ効果の可能性を検証した。彼らは、サイズが小規模はりから大規模はりへと変化する中間亀裂剥離安定性に対し、その寸法特性を明らかにした。

Yazdanbakhsh and Bank [2016] は、リサイクルコンクリート骨材 (RCA) を使用したコンクリートはりの FRP せん断補強に焦点を当てた。彼らは、RCA を含むコンクリートはりのせん断強度は、元の骨材を含むはりよりも低いことを示した。

Si -Larbi *et al.* [2012] は、FRP ロッドでプレストレス補強した複合繊維セメント板により RC はりを補強し、実験により検証を行った。彼らは、実験および数値分析により、ひび割れメカニズムおよび内部応力分布に対するプレストレス FRP ロッドの有効性を明らかにした。

You *et al.* [2012] は、RC はりを補強するためのプレストレス CFRP システムの効果と可能性を調査した。彼らは、プレストレスを加えた CFRP ストリップと固定システムで補強された 8 本の小規模 RC ビームと 2 本の大規模 RC ビームで実験的試験を行った。

Kim *et al.* [2014] は、ポストテンション NSM/CFRP 法を最適化するために曲げ応答の数値実験を実行し、その補強方法を確立した。

Wang *et al.* [2015] は、新しく開発されたバサルト FRP 緊張材技術を外部プレストレスシステムに適用し、その有効性を研究した。彼らは、実験および解析により、バサルト FRP 緊張材の諸元等が示された。

Peng *et al.* [2016] は、プレストレスト CFRP プレートで補強した RC はりの曲げ疲労試験を実施して非プレストレスト CFRP プレートで補強した RC はりの試験結果と比較した。プレストレスト CFRP プレートの有効性と実用性を示した。

Kara *et al.* [2016] は、プレストレスト NSM FRP bars/strips で補強した RC はりの曲率、たわみおよび耐力を推定するための数値解析の方法を示した。さらに実験により数値解析の妥当性を検証するとともに、プレストレスによる構造性能の改善効果が示された。しかしながら、非プレストレスで強化されたはりと比較して延性が減少したことが報告された。

Rezazadeh *et al.* [2016] は、NSM 法の End concrete cover separation (CCS) に着目して簡易解析手法を開発した。彼らは、この解析手法を用いて補強効果を最適に評価するための設計上の推奨事項を提案した。

他にも、近年では部材の表面付近に (NSM) FRP/CFRP ストリップを使用する補強技術の研究が広くなされている [Fernandes *et al.*, 2015; Al-Abdwais and Al-Mahaidi, 2016; Teng *et al.*, 2016; Sharakya *et al.* 2018]。

1.2.5 本研究に関する先行研究

本研究について、これまでに報告されている研究成果を以下に示す。

三本ら [2013] は、本補強工法で施工される固定定着部の耐荷性能を調べるため、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒を使用した実物大コンクリートによる載荷実験を行った。その結果、本補強工法で用いられる固定定着部が SBPR930/1080 (丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$) の規格引張荷重を上回る耐荷性能を有することを示し、固定定着部におけるくさび形構造が引抜き力に対して抵抗力を発揮したため固定定着部における PC 鋼棒の抜け出し変位は急激に増加しないことが明らかになった。

Mimoto *et al.* [2015] は、本補強工法を適用させた実物大コンクリートを用いて高強度モルタルおよびエポキシ樹脂で定着させた PC 鋼棒の押抜き実験、PC 鋼棒の引抜き実験および線形有限要素解析により応力-ひずみ関係の検証を行った。その結果、コンクリート部材の寸法が 400mm 以上である場合、高強度モルタルを充填材として使用すると PC 鋼棒 (丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$) の降伏荷重まで割裂破壊することなく固定定着させることが可能であり、エポキシ樹脂を充填材に使用すると、PC 鋼棒 (丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$) が引張破壊する前に固定定着部での破壊が先行されると予想された。したがって、エポキシ樹脂を充填材に使用する場合、エポキシ樹脂の材料剛性を高めてコンクリート躯体と材料の弾性変形特性を同程度のものとする、固定定着可能なコンクリート構造物の最小部材寸法を 400mm 以上に設定するなどの必要があることを示した。さ

らに、固定定着部の拵径形状の違いによる有意な差異は認められなかった。プレストレッシング時に 1mm 単位で管理・計測される PC 鋼棒の伸び変位に対して引抜き実験における PC 鋼棒の固定定着部からの抜け出し量は充分小さい値であったため、固定定着構造における PC 鋼棒の変位の影響は実用上において無視できる可能性があることを示した。

Sakaki *et al.* [2015] は、使用状態のプレストレスによる固定定着構造周辺の局部挙動を把握するため、PC 鋼棒と高強度モルタルが完全に付着している理想化された状態をシミュレーションするため、両者の接点を完全結合したモデルおよびリングナットによる機械的な抵抗だけを考慮するため、リングナット支圧面のみ結合し、それ以外の接点は同一座標となる 2 重接点を設けて互いの要素を結合していないモデルを作成し、線形有限要素プログラム (midas-FEM) を用いた解析を行った。結果から、固定定着構造の引抜き力に対する荷重伝達機構は、リングナットの機械的抵抗に加え、PC 鋼材と高強度モルタル充填材の付着による荷重伝達が行われていることが示された。また、PC 鋼棒と充填材の付着が切れたとしてもコンクリート躯体には一定のプレストレスを伝達されることを示した。

Mimoto *et al.* [2016a] は、本補強工法において実構造と同じ作用となるように引抜き荷重を固定定着構造へ与えた状態における定着性能を調べる目的で、コンクリート内部に PC 鋼棒を定着した実物大コンクリート供試体を用いて PC 鋼棒を緊張して荷重載荷する引抜き実験を実施した。その結果、最大引張荷重は使用した PC 鋼棒の規格引張荷重である 448.7kN 以上の荷重を保持し、実構造と同じ荷重作用である引抜き力を与えた状態においても固定定着構造は十分な定着耐力を有していることを明らかにした。また、FEM 結果から固定定着構造において PC 鋼材と使用した高強度モルタル充填材の付着がない場合でも、コンクリートに一定のプレストレスを導入できることを示した。

Mimoto *et al.* [2016b] は、本補強工法により打継ぎ補強した実物大コンクリートはり供試体を用いて曲げ載荷実験を実施し、その補強制度を検討した。その結果、本補強工法が旧部材と新規部材との打継ぎ部におけるひび割れ抵抗性を大幅に向上させ曲げに対する耐荷性能も向上させることを示した。また、本補強工法により補強した打継ぎ部の塩化物イオン浸透深さを計測した結果、従来のあと施工アンカーで補強した場合に得られる計測値に対して 2.3%と著しく小さくなったことを示し、本補強工法を適用させた場合の打継ぎ部は高い水密性を有することを明らかにした。

1.3 本研究の目的

本研究は、既設コンクリート部材内にくさび形の固定定着構造を構築し、PC 鋼材を配置した後ポストテンション方式でプレストレスを導入することにより、既設構造物の内部補強あるいは新旧部材の一体化を図る補強工法に焦点を当てた。既往の研究では、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 B 種 1 号 (SBPR930/1080) を緊張材に使用した構造を想定して、固定定着構造の形状や使用材料が異なる要素供試体を用いて押抜き載荷実験実施して耐荷性能を調べ固定定着構造のくさび形状および PC 鋼棒 B 種 1 号を定着するコンクリートの部材寸法を定めた。また、押抜き載荷実験から得られた結果を踏まえて実構造を模した部材寸法 400mm の供試体を用いて、高強度モルタルにより定着した PC 鋼棒 B 種 1 号を緊張する引抜き載荷実験を行い固定定着構造の定着耐力を調べた。その結果、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 B 種 1 号の規格引張荷重以上の引抜き力を与えた状態においても固定定着構造は十分な定着耐力を有していることが分かった。

しかしながら、本補強工法を実用的に発展させるためには、使用条件にあわせた緊張材の選定が不可欠となる。そこで本研究では、「狭隘な施工環境」、「薄肉部材」、「塩害環境」という 3 条件に焦点をあて、 $\phi 23\text{mm}$ PC 鋼棒 B 種 1 号以外の緊張材から、それぞれの条件に対応するための緊張材を選定し、その適用性を調べることを目的とした。

「狭隘な施工環境」に対しては、長尺となる緊張材を孔内に挿入し配置するためには、PC 鋼棒の場合では、その長さに応じた挿入空間が必要となる。そのため、作業空間が狭隘な条件下では本補強工法の適用が困難となることが想定された。そこで、狭隘空間における本補強工法の適用を想定し、内径 10mm のコルゲート管と PC 鋼より線の組み合わせにより構成された可とう性のある中空 PC スtrand の本補強工法への適用を検討した。

「薄肉部材」に対しては、例えば、橋梁床版等の薄肉部材への適用が想定されるが、これまで本工法を適用するためには、 $\phi 23\text{mm}$ PC 鋼棒で、1 辺 400mm 以上の部材断面寸法が必要であった。そこで、部材寸法 250mm 以下の薄肉部材にも本工法を適用するため、固定定着部の小型化を図り、小径 PC 鋼棒の適用を検討した。

「塩害環境」に対しては、飛来塩分や融雪剤散布地域では、耐腐食性に優れる材料性能が要求されることが想定された。そこで、塩害環境下にある構造物に本工法を適用するため、炭素繊維複合ケーブル緊張材の適用を検討した。

なお、本研究では、固定定着構造を対象としており、緊張側の定着方法については既存技術を用いることを基本としている。

1.4 論文の構成

本論文は、序章を含め計 6 章から構成されている。各章の概略を以下に示す。

第 1 章：序論

本研究の背景として、既設コンクリート構造物の維持管理に関する現状について述べるとともに、コンクリート構造物の補修・補強に関する研究の代表例とその課題について明示した。その上で、本研究の目的を明らかにし、本論文の構成および各章の内容について紹介している。

第 2 章：既設コンクリート部材内に固定定着したプレストレス補強工法の特徴

既設コンクリート部材内に固定定着した PC 鋼棒を用いたプレストレス補強工法について補強対象、工法の施工手順、固定定着構造の構築方法などを概説するとともに、先行研究での課題について明示した。

第 3 章：可撓性を有する緊張材の適用性の検討

中空 PC ストランドは、コルゲート管を通じて緊張材定着のためのグラウト材を固定定着部に注入することができるため施工性の改良が期待できる緊張材である。そのため、要求される材料強度を満たし、長さ 5m、内径 10mm のコルゲート管内を介して中空 PC ストランドをコンクリート部材内部に固定定着できるグラウト材の検討を実験的に行った。

選定したグラウト材を用いて、実構造物を模した寸法が 400×400×1200mm の実物大供試体を用いて、圧送実験により選定された 3 種類のグラウト材で定着した中空 PC ストランドの引抜き実験を行い、固定定着構造の定着耐力を調べた。なお、固定定着部内の空気溜まりの発生等の施工に起因する課題を排除し、各種グラウト材で形成した固定定着構造の定着性能を調べるために、中空 PC ストランドの固定定着作業を鉛直下向きにて実施した。

中空 PC ストランドの水平方向への適用においては、注入したグラウト材が孔内で流動することにより固定定着部の上縁側に空気溜まりが発生して内部くさび効果が十分に得られないことが懸念された。そのため、固定定着部の形状を模した透明アクリル管にグラウト材を注入し、目視で確認することによりそれぞれの充填性能を評価した。また、十分な充填性能が確認されたグラウト材により中空 PC ストランドを水平方向にて固定定着させた供試体を用いて引抜き実験を実施し、固定定着構造の定着耐力を再度確認した。

第 4 章：小径緊張材の適用性の検討

道路橋床版等の薄肉部材への適用にむけて、固定定着部の小型化を図るとともに、PC 鋼棒 $\phi 13\text{mm}$ 、 $\phi 17\text{mm}$ を対象として、適用性についての検討を行った。要素実験では、 $150\sim 250\text{mm}$ に断面を変化させた高さ 350mm の小型コンクリートブロックに、試作した小型用の専用拡径ビットを用いて削孔を行った供試体により、引抜き実験をおこない、固定定着部の定着性能と必要部材寸法の相関を調べた。そのうえで、実際の施工を想定し、水平施工を模した実大供試体を 3 体製作しその定着性能を調べた。

第 5 章：炭素繊維複合ケーブル緊張材の適用性の検討

炭素繊維複合ケーブル緊張材は、非鉄材で錆びないため、耐腐食性に優れる緊張材で、単線を撚った構造をしている。しかし、PC 鋼棒のように先端部にネジ加工を行い、リングナット配置する方法や、中空ストランドのように、圧着によりグリップを配置する方法は、材料の特性上困難である。そのため、本工法に炭素繊維複合ケーブル緊張材を適用するために、先端部の加工方法について検討した。

第 6 章：結論

本論文を総括し、得られた知見と今後の課題について述べた。

1.5 第 1 章の参考文献

- Alaa Alsaad., Gulan Hassan. : Utilization of CFRP for strengthening RC columns in marine environment, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.7, pp.30-35, 2017.
- Al-Abdwais A., and Al-Mahaidi R. : Modified cement-based adhesive for near-surface mounted CFRP strengthening system, *Construction and Building Materials*, Vol.124, pp.794-800, 2016.
- Al-Saadiab Nihad Tareq Khshain., Mohammedab Alyaa. Al-Mahaidi Riadh. : Performance of RC beams rehabilitated with NSM CFRP strips using innovative high-strength self-compacting cementitious adhesive (IHSSC-CA) made with graphene oxide, *Composite Structures*, Vol.160, pp.392-407, 2017.
- Cai Dong-sheng., Xu Zhao-hui. Yin Jie. Liu Rong-gui. Liang Ge. : A numerical investigation on the performance of composite anchors for CFRP tendons, *Construction and Building Materials*, Vol.112, pp.848-855, 2016.
- Doror E.B., and Rabinovitch O. : Size effect in the debonding failure of FRP strengthened beams, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.156, pp.161-181, 2016.
- Faizul M.Mohee, Adil Al-Mayah, Alan Plumtree. : Development of a novel prestressing anchor for CFRP plates: Experimental investigations, *Composite Structures*, Vol.176, pp.20-32, 2017.
- Faria D.M.V., Lúcio V.J.G. and Ramos A.P. : Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding, *Engineering Structures*, Vol.33, pp.2025-2043, 2011.
- Fernandes P.M.G., Silva P.M. and Sena-Cruz J. : Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading, *Engineering Structures*, Vol.84, pp.350-361, 2015.
- Hadjazi K., Sereir Z. and Amziane S. : Creep response of intermediate flexural cracking behavior of reinforced concrete beam strengthened with an externally bonded FRP plate, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.94-95, pp.196–205, 2016.
- Haifeng Fan., Anastasios P. Vassilopoulos. Thomas Keller. : Pull-out behavior of CFRP ground anchors with two-strap ends, *Composite Structures*, Vol.160, pp.1258-1267, 2017.
- Hara K. and Abe H. : The development of NAPP-ANCHOR-METHOD for anchoring NAPP-UNIT in the core of existing concrete structure , *Proceeding of The 17th Symposium on Developments in Prestressed Concrete* , Vol.17, pp.203-208, 2008.
- Huang W., Lai Z., Chen B. and Yao P. : Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steeltube (CFT) truss girders, *Engineering Structures*, Vol.152, pp.607-618, 2017.

- Kara I.F., Ashour A.F. and Koroglu M.A. : Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed near-surface-mounted FRP reinforcements, *Composites: Part B*, Vol.91, pp.371-383, 2016.
- Kim Y.J., Hyun S.W., Kang J-Y. and Park J-S. : Anchorage configuration for post-tensioned NSM CFRP upgrading constructed bridge girders, *Engineering Structures*, Vol.79, pp.256-266, 2014.
- Kumar V. and Patel P.V. : Strengthening of axially loaded circular concrete columns using stainless steel wire mesh (SSWM) – Experimental investigations, *Construction and Building Materials*, Vol.124 pp.186-198, 2016.
- Lai M.H. and Ho J.C.M. : Axial strengthening of thin-walled concrete-filled-steel-tube columns by circular steel jackets, *Thin-Walled Structures*, Vol.97, pp.11-21, 2015.
- Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T. and Dritsos S.E. : Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Engineering Structures*, Vol.106, pp.370-384, 2016.
- Maa R., Jiang L., He M., Fang C. and Liang F. : Experimental investigations on masonry structures using external prestressing techniques for improving seismic performance, *Engineering Structures*, Vol.42, pp.297-307, 2012.
- Mei Kuihua., Sun Shengjiang. Li Bo. Sun Yamin. Jin Guoqing. : Experimental investigation on the mechanical properties of a bond-type anchor for carbon fiber reinforced polymer tendons, *Composite Structures*, Vol.201, pp.193-199, 2018.
- Mimoto T., Yoshitake I., Harada M. and Sakaki T. : An internal prestressing system to strengthen existing concrete members, *IF CRASC '15; International Conference Proceedings Papers*, pp.515-523, 2015.
- Mimoto T., Sakaki T., Mihara T. and Yoshitake I. : Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members, *Engineering Structures*, Vol.124, pp.29-35, 2016a
- Mimoto T., Yoshitake I., Sakaki T. and Mihara T. : Full scale flexural test of jointed concrete members strengthened with post-tension tendons with internal anchorage, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.139-148, 2016b.
- Mohammad Tahershamsi., Ignasi Fernandez. Kamyab Zandi. Karin Lundgren. : Four levels to assess anchorage capacity of corroded reinforcement in concrete, *Engineering Structures*, Vol.147, pp.434-447, 2017.
- Ng C.K. and Tan K.H. : Flexural behaviour of externally prestressed beams. Part I: Analytical model, *Engineering Structures*, Vol.28, No.4, pp.609-621, 2006a.
- Ng C.K. and Tan K.H. : Flexural behaviour of externally prestressed beams. Part II: Experimental investigation, *Engineering Structures*, Vol.28, No.4, pp.622-633, 2006b.

- Omran Hamid Y., El-Hacha Raafat. : Nonlinear 3D finite element modeling of RC beams strengthened with prestressed NSM-CFRP strips, *Construction and Building Materials*, Vol.31, pp.74-85, 2012.
- Park H., Jeong S., Lee S-C. and Cho J-Y. : Flexural behavior of post-tensioned prestressed concrete girders with high-strength strands, *Engineering Structures*, Vol.112, pp.90-99, 2016.
- Park Y H., Park C. and Park Y G. : The behavior of an in-service plate girder bridge strengthened with external prestressing tendons, *Engineering Structures*, Vol.27, pp.379-386, 2005.
- Peng H., Zhang J., Shang S., Liu Y. and Cai C.S. : Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates, *Engineering Structures*, Vol.127, pp.62-72, 2016.
- Ping Zhuge., Zhi-yu Jie. Zi-hua Zhang. Yong Ding. Su-wei Hou. : The influence of load transfer medium creep on the load-carrying capacity of the bond-type anchors of CFRP tendons, *Construction and Building Materials*, Vol.206, pp.236-247, 2019.
- Rezazadeh M., Barros J.A.O., and Ramezansfat H. : End concrete cover separation in RC structures strengthened in flexure, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.415-427, 2016.
- Rik Steensels., Lucie Vandewalle. Bram Vandoren. Herve Degée. : A two-stage modelling approach for the analysis of the stress distribution in anchorage zones of pre-tensioned, concrete elements, *Engineering Structures*, Vol.143, pp.384-397, 2017.
- Sakaki T., Mimoto T. and Yoshitake I. : Experimental investigation of an internal prestressing system to strengthen concrete, *The 2015 World Congress on Advances in Civil Environmental and Materials Research (ACEM15)*, 2015.
- Schmidt J.W., Bennitz A., Taljsten B., Goltermann P. and Pedersen P. : Mechanical anchorage of FRP tendons - A literature review, *Construction and Building Materials*, Vol.32, pp.110-121, 2012.
- Shahverdi M., Czaderski C., Annen P. and Motavalli M. : Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer, *Engineering Structures*, Vol.117; 263-273, 2016.
- Sharakya I A., Baenaa M. Barrisa C. Sallame H E M. and Torresa L. : Effect of axial stiffness of NSM FRP reinforcement and concrete cover confinement on flexural behaviour of strengthened RC beams: Experimental and numerical study, *Engineering Structures*, Vol.173, pp.987-1001, 2018.
- Si-Larbi A., Agbossou A., Ferrier E. and Michel L., Strengthening RC beams with composite fiber cement plate reinforced by prestressed FRP rods: Experimental and numerical analysis, *Composite Structures*, Vol.94, pp.830-838, 2012.

- Sneed L. H., Verre S., Carloni C. and Ombres L. : Flexural behavior of RC beams strengthened with steel-FRCM composite, *Engineering Structures*, Vol.127, pp.686-699, 2016.
- Teng J.G., Zhang S.S. and Chen J.F. : Strength model for end cover separation failure in RC beams strengthened with near-surface mounted (NSM) FRP strips, *Engineering Structures*, Vol.110; pp.222-232, 2016.
- Turmo J., Ramos G. and Aparicio A.C. : FEM modelling of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joints, *Engineering Structures*, Vol.28, No.13, pp.1852-1863, 2006.
- Wang X., Shi J., Wu G., Yang L. and Wu Z. : Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique, *Engineering Structures*, Vol.101, pp.34-44, 2015.
- Xie Gui-hua., Tang Yong-sheng. Wang Chien Ming. Li Shi-quan. Liu Rong-gui. : Experimental study on fatigue performance of adhesively bonded anchorage system for CFRP tendons, *Composites Part B:Engineering*, Vol.150, pp.47-59, 2018.
- Xie Gui-hua., Feng Qian-hong. Wang Chien Ming. Tang Yong-sheng. Liu Rong-gui. : Prediction and optimization of stress distribution in bonded anchors for CFRP tendons, *Engineering Structures*, Vol.180, pp.50-66, 2019.
- Yang Xu., Gao Wan-Yang. Dai Jian-Guo. Lu Zhou-Dao. Yu Ke-Quan. : Flexural strengthening of RC beams with CFRP grid-reinforced ECC matrix, *Composite Structures*, Vol.189, pp.9-26, 2018.
- Yazdanbakhsh A. and Bank L.C. : The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol.102; pp.133-140,2016.
- You Y-C., Choi K-S. and Kim J-H. : An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system, *Composites: Part B*, Vol. 43, No.8, pp.3026-3036, 2012.
- 阿部 忠, 高野真希子, 澤野利章, 川井 豊 : せん断筋補強した RC 床版の補強効果および耐疲労性の評価, 構造工学論文集 A, Vol.60A, pp.1095-1104, 2014.
- アウトプレート工法研究会 HP : アウトプレート工法とは, <http://www.outplate.com/about/index.html> , アクセス日時:2020/10/01 13:00.
- 今井昌文, 出光 隆, 横田 勉, 溝口 茂 : 中空 PC 鋼棒を用いたプレテンション方式の定着に関する研究, 土木学会論文集, No.679, VI-51, pp.81-92, 2001.
- 株式会社エスイー HP : 外ケーブル方式による橋梁補強工法(カタログ), <http://sekyoryokozo.jp/prod06-1.html> , アクセス日時:2020/10/01 13:00.
- 岡田克也, 持田哲雄, 柿沢忠弘, 尾高英雄 : 高強度グラウトを利用した PC 鋼より

線埋込み定着部の定着性能について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.215-220, 1988.

- 奥田由法, 鈴木義晃, 森 拓也, 久保欣也 : PC 巻き立て工法による ASR 劣化橋脚の補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.8, pp.9-14, 1997.
- 坂井廣道, 茶木謙介, 古賀政二郎, 川本幸広 : CFRP 製緊張材用ポストテンション方式 PC げたのスラブ橋耳げたへの適用例, コンクリート工学, Vol.28, No11, pp.14-24, 1990.
- 佐野 正, 三浦 尚 : 鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.117-129, 1996.
- 醍醐潤一, 渡辺修三, 安藤直文, 佐藤伸夫 : アラミド FRP ロッドを用いた耐震補強一開橋一, プレストレストコンクリート工学会, 第 28 回シンポジウム論文集, pp453-456, 2019.
- 玉越隆史, 大久保雅憲, 横井芳輝 : 平成 23 年度道路構造物に関する基本データ集, 国土交通省 国土技術政策総合研究所資料, No.693 号, pp.36, 2012.
- 鄭 勝仁, 中村秀明, 宮本文穂 : 外ケーブルプレストレス補強設計のシステム化に関する研究, 土木学会論文集, No. 623, VI-43, pp.203-218, 1999.
- 国立開発研究法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター CAESAR (シーザー) HP: 橋の維持管理, <https://www.pwri.go.jp/caesar/overview/02-01.html>, アクセス日時:2020/10/01 13:00.
- 中橋一壽, 原 健吾, 二井谷教治, 渡瀬 博 : 中空 PC 鋼棒を用いたアンカー工法の開発ープレストレスを導入したアンカー工法ー, プレストレストコンクリート, Vol.50, No.5, pp.27-34, 2008.
- NAPP 工法技術研究会 HP: NAPP 工法 (カタログ), http://napp-kouhou.com/openpdf/napp_Catalog.pdf, アクセス日時:2020/10/01 13:00.
- 新津正義, 睦好宏史, 佐野 正, 殿川康一 : 外ケーブルを用いた RC 梁のせん断補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1999.
- 濱田 讓, 安森 浩, 小林 朗, 葛目和宏 : 炭素繊維プレート緊張材によるコンクリート構造物の補強, コンクリート工学, Vol.43, No.8, pp.17-24, 2005.
- 原田哲夫, 榎本 剛, 佐々木謙二, 牛島健一 : CFRP より線の曲げ引張特性と外ケーブル工法への適用に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.330-342, 2012.
- 原田哲夫, 生田泰清, 佐々木健二, 大畑裕志, 徳山ミヨーキン : 定着用膨張材による CFRP より線と PC 鋼より線の定着機構に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.370-389, 2014.
- 原田政彦, 上腰正人, 梶川康男 : 外ケーブルプレストレス工法で補強された既設鋼げた橋の構造特性, 土木学会論文集, No.675, I-55, pp.331-341, 2001.

- 株式会社ピーエス三菱 HP : PC コンファインド工法 (カタログ) :
<http://www.psmic.co.jp/project/hashimori/maintenance/pdf/method05.pdf>, アクセス日
時:2020/10/01 13:00.
- 三本竜彦, 溝垣恒雄, 山根隆志, 吉武 勇 : 中間定着部を用いたプレストレス導入
工法に関する実験的検討, コンクリート年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1357-1362, 2013.
- 村田一郎, 及川将司, 大坪正行, 森川英典 : 鉄道 PCI 形桁のケーブル破断を想定し
た維持管理一外ケーブル張力モニタリング方式の設計・施工・計測一, プレスト
レストコンクリート, Vol.55, No.6, pp.66-73, 2013.

第2章 既設コンクリート部材内に固定定着したプレストレス補強工法の特徴

2.1 工法概要と特徴

本研究で対象とするプレストレス補強工法を図-2.1.1に示す。

既設コンクリートに削孔をおこない、あと施工により内部くさびを構築する固定定着構造を設け、そこに定着した緊張材により内ケーブルを用いたポストテンション方式にてプレストレスを導入し、既設部材のプレストレス補強あるいは新旧部材のプレストレスによる一体化を図る工法である。

この工法の特徴は、コアドリルを用い削孔した最深部を専用削孔機により円錐台形に拡径削孔し、そこに突起を設けた緊張材と高強度の充填材で満たすことにより、硬化した充填材を介して緊張材の突起と既設コンクリートが噛み合うことで内部くさびとなり、引抜き力に対して抵抗する機構にある。これにより、既設コンクリート部材および追加部材にプレストレスを導入することができる。

本工法の利点を以下に列挙する。

- ・削孔、緊張に必要な作業空間が確保できればプレストレスによる部材補強が可能であり、補強する部材周辺に追加部材を設置する空間が不要である。
- ・コンクリートを打継ぐ場合に、プレストレスによりあと施工アンカーの本数、削孔の本数を少なくできる。
- ・コンクリートを打継ぐ場合に、打継面にプレストレスを作用させることができるため、一般的なRC構造と比べるとひび割れ抵抗性および水密性を向上させることができる。
- ・プレキャスト部材を追加する場合に、プレストレスにより既設部材と一体化させることができる。

本工法は、緊張材の一端をコンクリート内部に固定定着するため、部材の一面のみに削孔や緊張材の挿入、緊張固定作業をするためのスペースが確保できれば、固定定着部を形成できる。そのため、従来工法のように、貫通削孔して緊張材を配置し両端に定着具を設置して補強する場合や、部材外周面に補強材を設置する場合と比べると、合理的な部材補強が可能となる。

Mimoto *et al.* [2016a ; 2016b] の先行研究では、本工法の実用化を目的として、 $\phi 23\text{mm}$ のPC鋼棒B種1号を緊張材に使用した構造を想定し、固定定着構造に焦点を当てた要素実験により構造詳細を定めた後、実大供試体を用いて固定定着構造の定着耐力と長期定着性能を明らかにした。さらに本工法を適用した場合の補強効果を実大はり実験を用いた曲げ載荷実験により調べた。

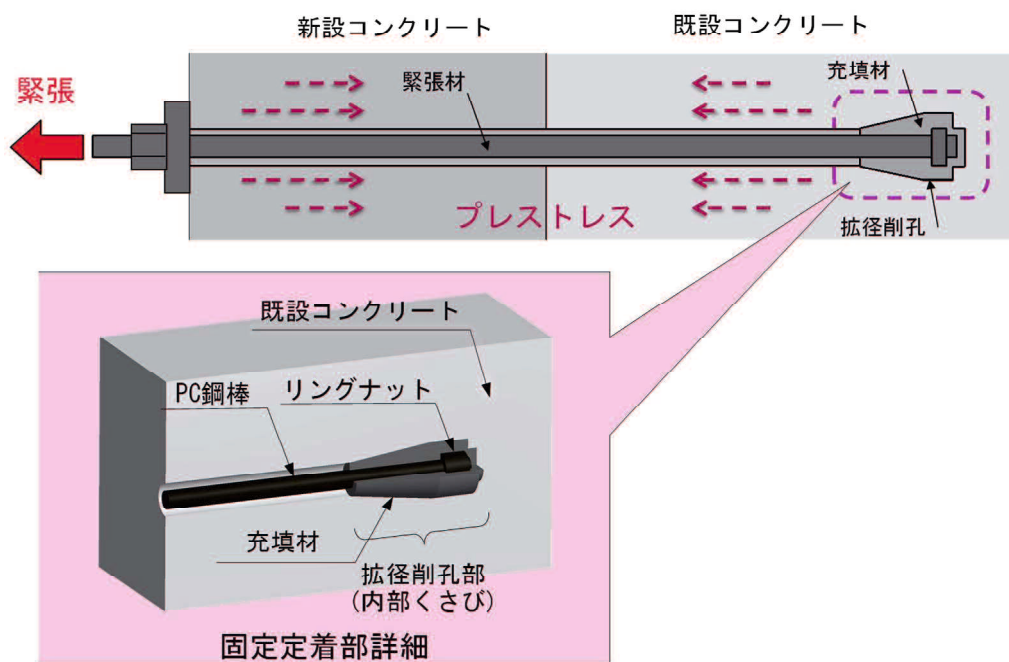


図-2.1.1 工法の概念図

2.2 施工方法

2.2.1 施工手順

本工法の施工手順を以下に示す（図-2.2.1）。

STEP1：1次削孔（定径）

既設コンクリート部材にダイヤモンドコアドリルを用いて削孔を行う。削孔径は、設計深さまで同径の削孔を行う。

STEP2：2次削孔（拡径）

1次削孔の最深部を専用の拡径ビットを用いて拡径削孔する。

STEP3：充填材注入

削孔部へ粘性を調整した高強度の充填材を注入する。

STEP4：緊張材の挿入・固定

先端に突起グリップを設けた緊張材を挿入することで固定定着部を満たし固定する。

STEP5：新設コンクリート打設（打継ぐ場合）

新設部のコンクリートを増設する。

STEP6：緊張

充填材および新設コンクリートの強度が所定の値に達した後に、緊張材を片引き緊張してプレストレスを導入する。

STEP7：PCグラウト施工

プレストレス導入後、緊張材の防錆および部材と一体化させる目的で、緊張材周辺にセメントミルクによるPCグラウトを注入する。

STEP8：緊張側定着部の後埋め

緊張・定着後に、緊張側定着具の後埋め処理を行う。後埋め処理はコンクリートもしくは、無収縮材により行い、緊張側定着具に対して所定のかぶり厚を確保する。

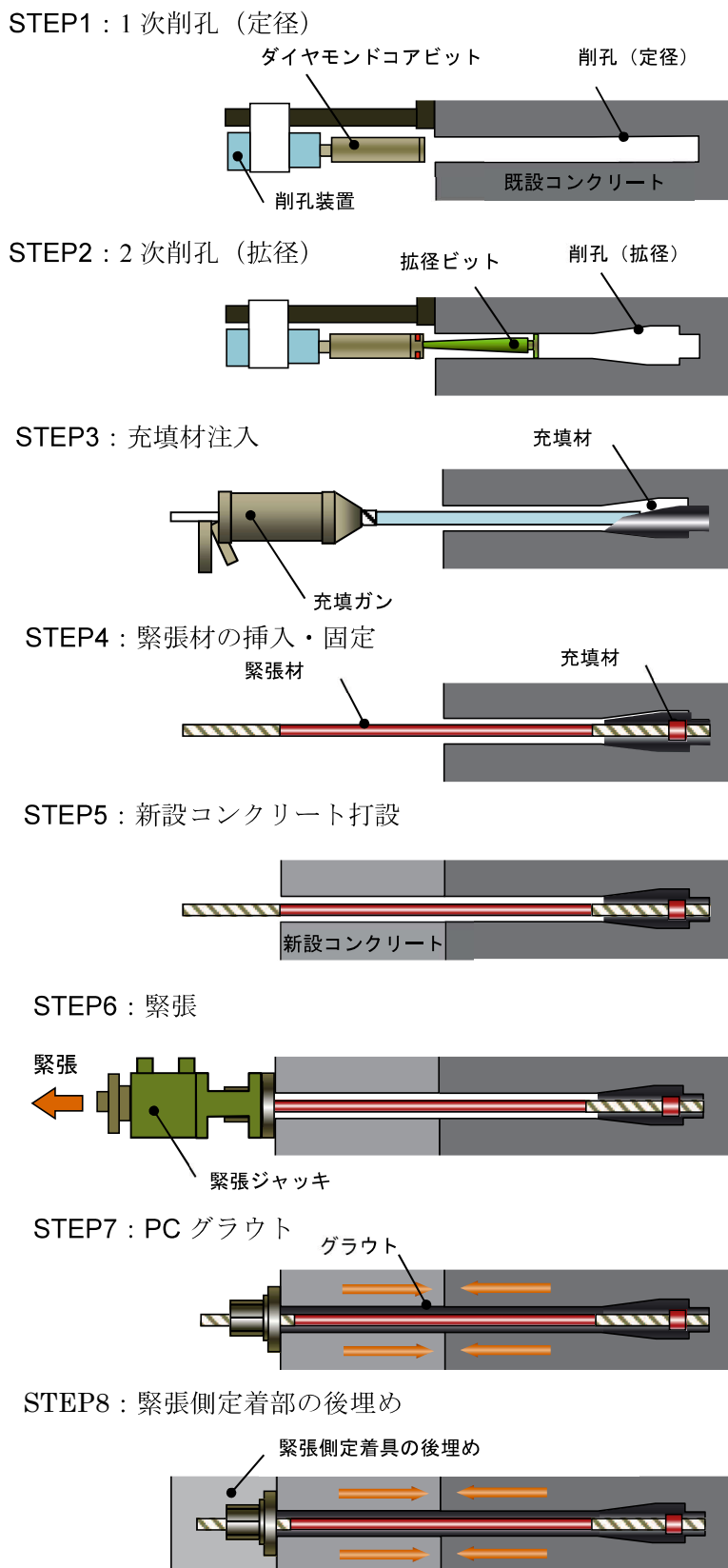


図-2.2.1 施工手順

2.2.2 拡径削孔方法

既設コンクリート内部に固定定着構造を構築するための拡径削孔は、本工法を確立するうえで重要な要素である。拡径削孔には、**図-2.2.2**に示す専用の削孔ビット（拡径ビット）を用いる。この拡径ビットは、コア削孔装置のアタッチメントとして開発された特殊ビットであり、先端のダイヤモンドビットと付け替えることで使用することができる。そのため、同じ削孔装置を用いて1次削孔（定径）から2次削孔（拡径）まで連続した作業が可能である。

拡径ビットは、先端リングとテーパ加工を施したシャフトおよび、コンクリート内面を削るためにダイヤモンド加工を施したセグメントを取り付けたケーシングから構成される。

拡径削孔の手順を**図-2.2.3**に示す。1次削孔（定径）の最深部に挿入した拡径ビットは、先端リングが最深部に突き当たる状態となり、その後、ケーシングを回転しながらさらに挿入を進めることで、ケーシング内に格納しているセグメントがシャフトのテーパに沿って外周へ徐々に押し出される。押し出されたセグメントはコンクリートの内面を削りながら先端リングの手前まで徐々に進んでいき、シャフトのテーパが終了した位置でセグメントがケーシング内に格納されることで、拡径ビットを引き抜くことが可能となる。

これらの過程が完了すると、既設コンクリート内部に円錐台と円柱を組み合わせた形状の空洞が形成される。

なお、先行研究で $\phi 23\text{mm}$ PC 鋼棒に使用した拡径ビットは、1次削孔径が $\phi 42\text{mm}$ 、2次削孔径が $42\text{mm}\sim 66\text{mm}$ である。

本研究で使用した拡径ビットは、中空ストランドでは、1次削孔径が $\phi 65\text{mm}$ 、2次削孔径が $65\text{mm}\sim 93\text{mm}$ を、小径緊張材および炭素繊維複合材ケーブルでは、1次削孔径が $\phi 34\text{mm}$ 、2次削孔径が $34\text{mm}\sim 45\text{mm}$ をそれぞれ用いた。

実施工においては、不可視箇所となる拡径削孔部の計測管理に**図-2.2.4**に示す専用の計測装置（シリンダーゲージ）を用いる。シリンダーゲージは、先端に配置したV字型の計測端子を手元のレバーで開閉操作することができ、手元のレバーとスケールが連動することで変化する内径を計測確認することができる。

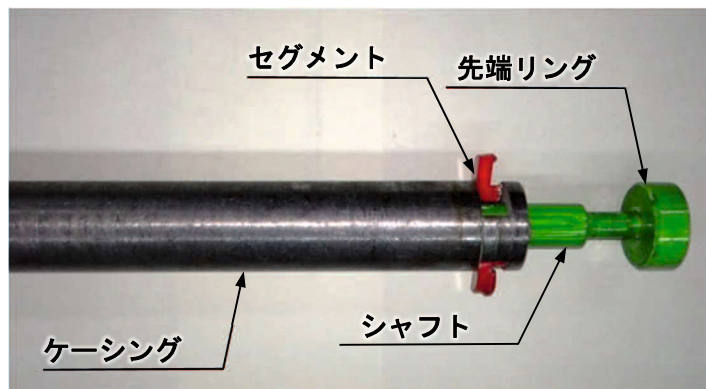
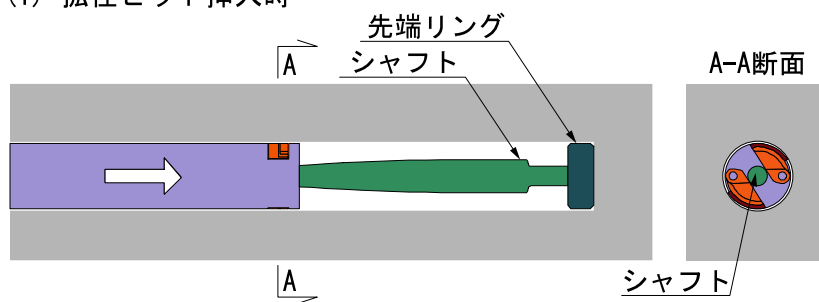
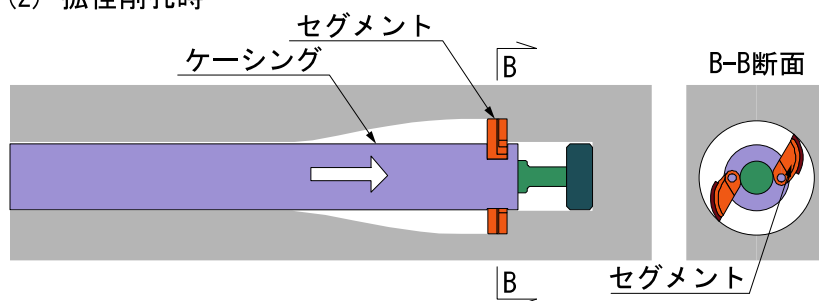


図-2.2.2 拡径ビット

(1) 拡径ビット挿入時



(2) 拡径削孔時



(3) 削孔終了(拡径ビット回収)

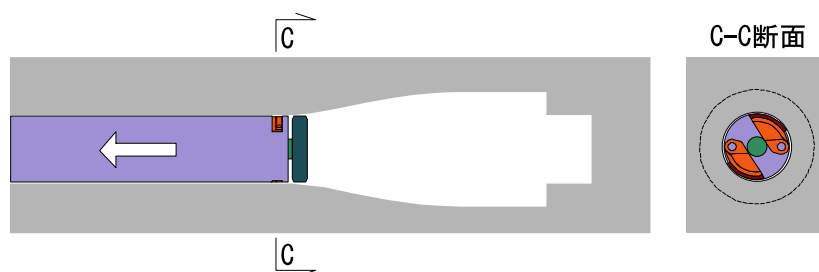


図-2.2.3 拡径削孔の手順



図-2.2.4 拡径削孔の計測装置

2.2.3 緊張材の固定方法

既設コンクリート内部に充填材を用いて緊張材を固定定着する方法は、本工法を確立するうえで重要な要素である。特に水平方向への施工においては、**図-2.2.5**に示すように、一般的な充填材を用いると、注入した充填材が孔内で流動するため、固定定着構造の上縁側に空隙が発生し、内部くさびの効果が不十分となることが懸念される。

そのため、本工法の水平方向への施工においては、**図-2.2.6**に示すように、流動性を調整した専用充填材を所定量先行注入し、緊張材をあと挿入することを基本とする。この方法により、水平方向への施工においても、内部が充填材で満たされ緊張材の規格引張荷重以上の引抜き耐力を有する固定定着構造が構築できる。既設コンクリートに水平方向での施工により構築し、 $\phi 23\text{mm}$ のPC鋼棒の規格引張荷重以上まで引抜き力を载荷した後に抜き出した固定定着部の様子を**図-2.2.7**に示す。懸念された上縁での空隙の発生等はみられず良好な充填状況であったことが分かる。

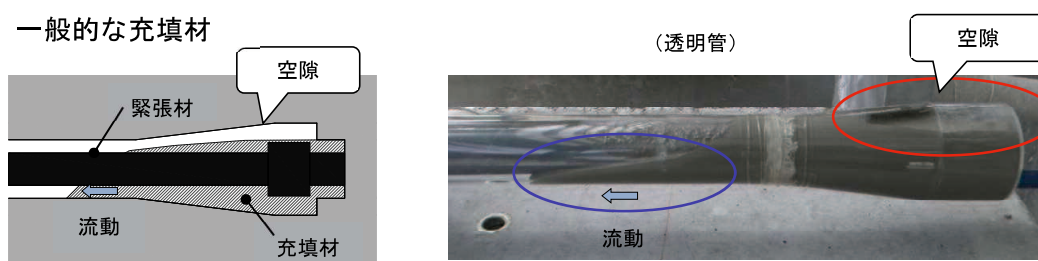
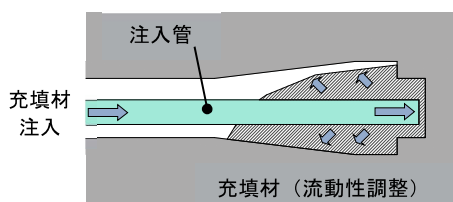


図-2.2.5 水平方向施工での空隙（透明管での検証）

流動性を調整した充填材

STEP1: 充填材注入



STEP2: 緊張材挿入

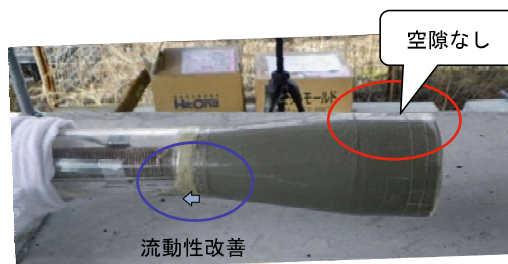
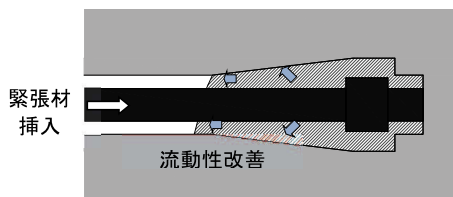


図-2.2.6 緊張材の固定手順（透明管での検証）

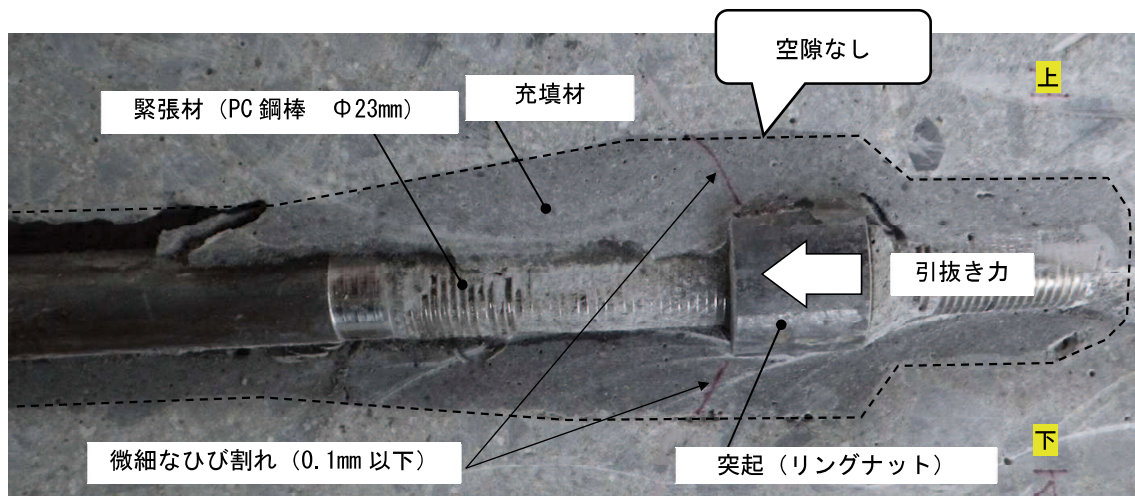


図-2.2.7 水平方向への施工で構築した固定定着部の内部

2.3 工法の適用事例

2.3.1 工法の適用対象

本工法は、あと施工でプレストレスを導入することにより既設部材の内部補強や打継ぎ部材の新旧一体化を図る目的で用いられることを想定しており、それぞれの目的に応じた適用例を以下に示す。

まず、内部補強であるが、本工法の最大の利点は、既設部材を補強するにあたり、外周面に補強材を配置する必要がないことにある。これにより、特に土中部や水中部の構造物においては、部材の露出箇所および作業空間を最小限とすることができるため、大掛かりな仮設や交通への影響を大幅に低減できる。その結果、コストの縮減は勿論、工事期間の短縮や交通規制の抑制を図ることができる。

図-2.3.1 に示す適用例では、耐震性能不足や劣化進行により補強が必要とされる橋台フーチングに対し、従来の部材外周面に補強材配置する技術では、橋台背面側を補強するために、大掛かりな仮締切や土工が必要となるうえ、長期間の交通規制がともなうことが予想される。しかし、桁下側から本工法を適用しプレストレスによる内部補強することで、交通に影響を与えることなく、部分的な土工だけで、合理的な部材補強が可能となる。

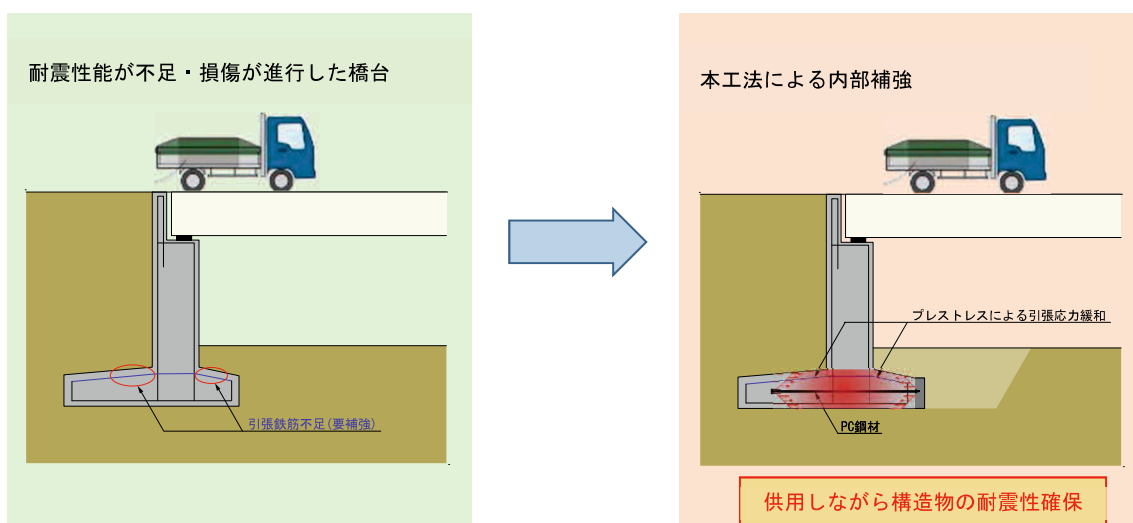


図-2.3.1 橋台フーチング部への内部補強の適用例

一方、打継ぎ部材の新旧一体化であるが、道路改良や耐震補強等により部材追加や拡幅が必要とされる構造物が増加しているなかで、新旧部材の打継ぎ面は、構造的な弱点となりやすい。

既設部材の打継ぎ面に下地処理（チップング）を行ったうえで、削孔し、エポキシ樹脂を用いて打継ぎ用の鉄筋を定着するあと施工アンカーが一般的には用いられるが、材料の付着のみによる一体化となるため、部材によっては、早期のひび割れや肌剥きが生

じることがある。こうなると打継ぎ面の水密性が低下し、水や酸素、塩化物等の劣化因子の侵入経路となり耐久性に悪影響を及ぼす。

特に、水中部や土中部となる構造物においては、この水密性がより重要となる。打継ぎ部材の新旧一体化での適用例を図-2.3.2に示す。

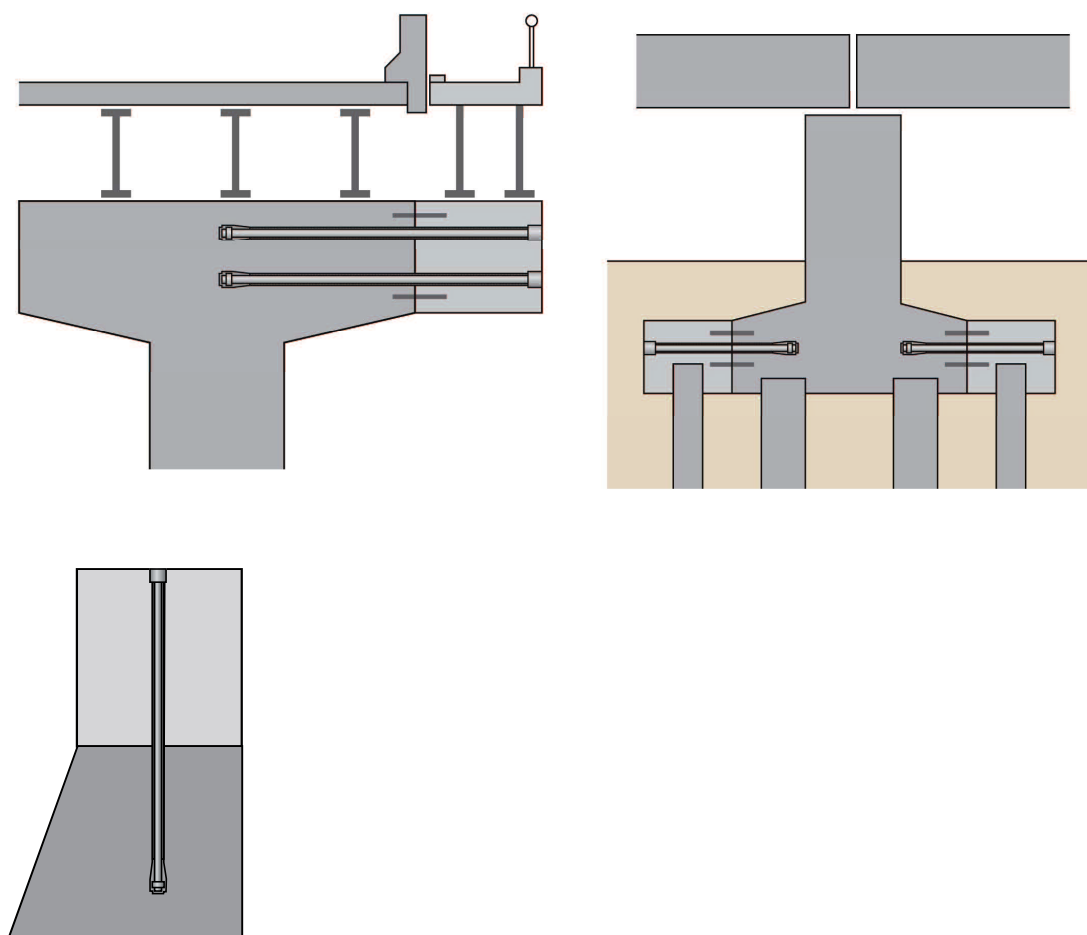


図-2.3.2 打継ぎ部材の新旧一体化での適用例

2.3.2 橋台の増しフーチング部の打継ぎ補強事例

大阪府の2径間PC単純桁橋の耐震補強工事において本工法を実構造物に適用した〔三原ら, 2017〕。橋梁一般図と架設位置をそれぞれ図2.3.3, 図2.3.4に示す。

この工事では、耐震補強として新たな増し杭（ST マイクロパイル）と既設橋台を一体化させるための増しフーチングが増設される。そのため、既設橋台コンクリートと増しフーチングコンクリートを確実に一体化させることが構造的にも長期耐久性を確保する上でも重要となる。特に対象構造物は、海岸線近くに位置しており、干満の影響によって海水の影響を受けることから、特に打ち継ぎ面の水密性が重要となる。そこで、新旧コンクリートの打ち継ぎ面に対して、標準のあと施工アンカーによる差し筋およびチップング処理に加えて、接合面にプレストレスを導入することで、打ち継ぎ面の水密性・耐久性を向上させることができる本工法を適用した。本適用事例では、既設橋台の背面に長さ1000mmの削孔（コアドリル）を行い、躯体内部に固定定着部を設けることで打ち継ぎ面の全高に対してプレストレスが分配するようにPC鋼棒を配置した。構造図を図2.3.5に示す。各橋台にはPC鋼棒を4本配置した。

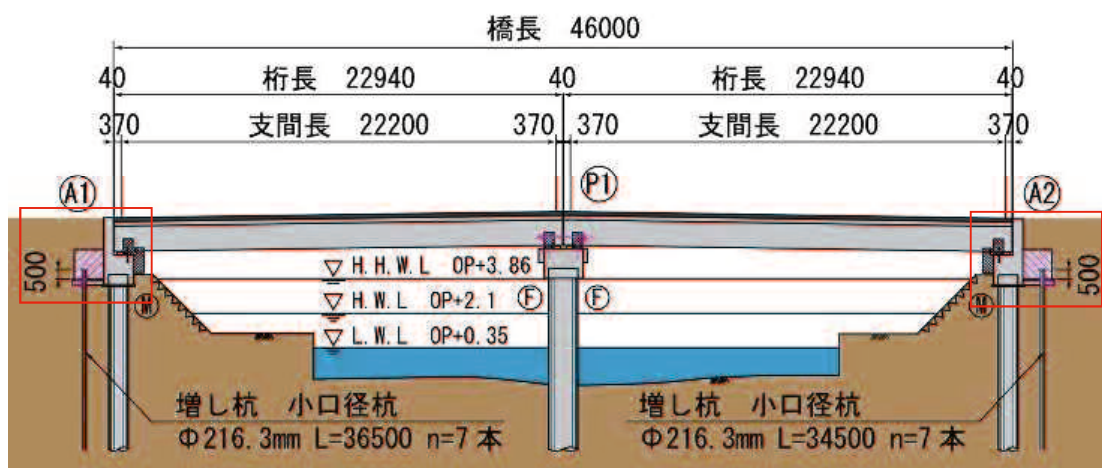


図-2.3.3 橋梁一般図



図-2.3.4 架設位置図(上空より)

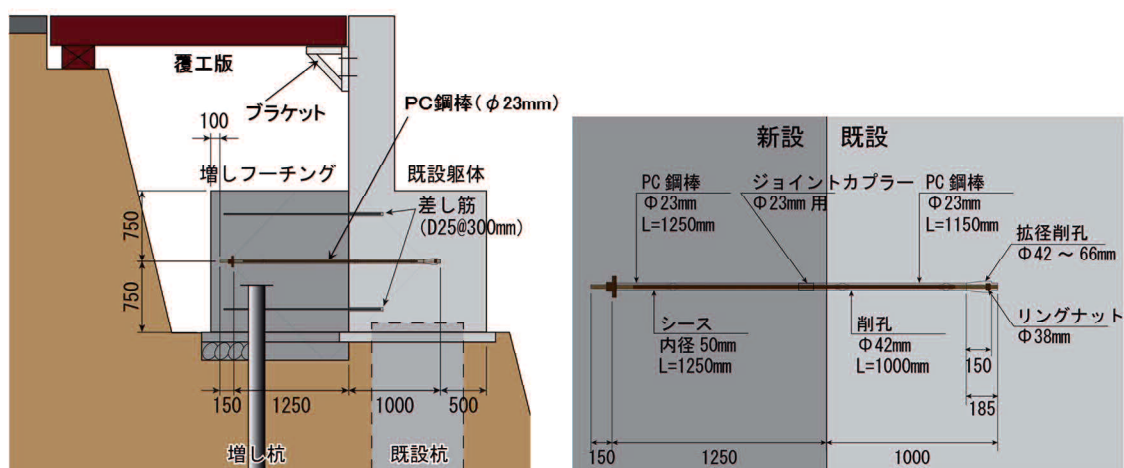


図-2.3.5 構造図

本工事における実施フローを図 2.3.6 に示す。施工は以下の要領で行った。

- (1) 既設躯体にコアドリルにより削孔を行うため、レーダー法により、内部鉄筋探査を行った。
- (2) 既設鉄筋を避けた位置でコアドリルを用いて、所定の長さ（1,000mm）までφ42mmの1次削孔を行った。
- (3) 完了したコア削孔の最深部に拡張用ビットを挿入して2次削孔（拡張）を行った。
- (4) 拡張削孔完了後に掃除機により孔内を清掃した後に、拡張部に所定の内空断面が確保されているか調べるため、シリンダーゲージを用いて計測した。
- (5) 先端部充填材を削孔内部に注入した。注入に先立ち先端部充填材の練上り直後のフロー性状を確認した。
- (6) 先端部にリングナットを配置した PC 鋼棒（φ23mm）を孔内に挿入し、先端部充填材が硬化するまで自重や外力により動かないように固定して養生した。
- (7) 既設部に定着し配置した PC 鋼棒をカプラー接続により延長し、新設部 PC 鋼棒を配置した。新設部 PC 鋼棒には、シースを配置した。
- (8) 増しフォーミング工を行った。
- (9) 新設コンクリートおよび先端部充填材の強度を確認した後に、センターホールジャッキを用いてプレストレスを導入した。導入緊張力は、荷重計を使用して管理した。
- (10) 予め配置した注入ホースから超低粘性グラウトを注入して孔内およびシース内の空隙を充填した。
- (11) 定着部（箱抜き）を無収縮モルタルにて後埋めした。

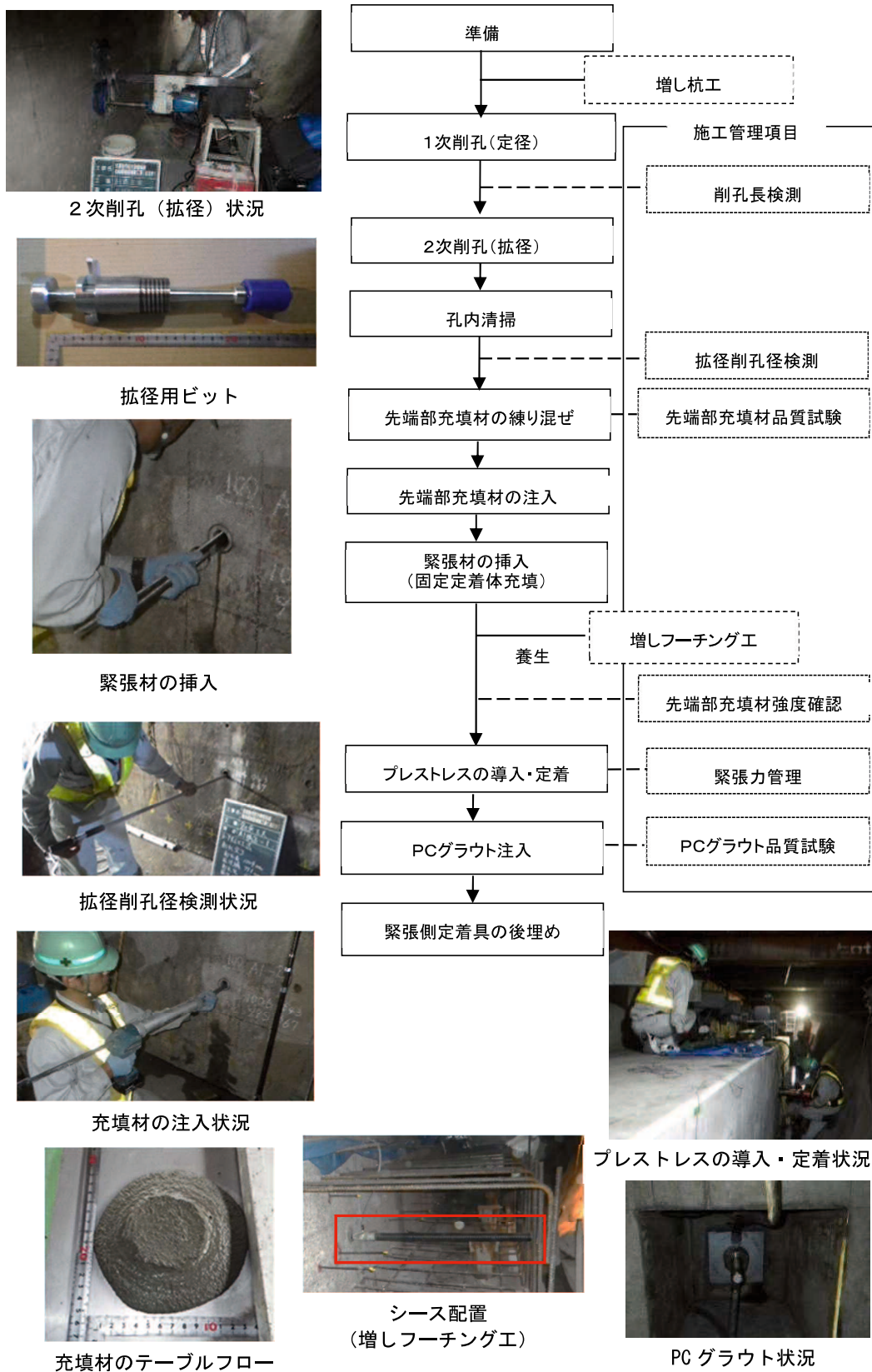


図-2.3.6 施工フロー

2.4 第2章の参考文献

- Mimoto T., Sakaki T., Mihara T. and Yoshitake I. : Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members, *Engineering Structures*, Vol.124, pp.29-35, 2016a
- Mimoto T., Yoshitake I., Sakaki T. and Mihara T. : Full scale flexural test of jointed concrete members strengthened with post-tension tendons with internal anchorage, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.139-148, 2016b.
- 三原孝文, 三本竜彦, 倉富芳郎, 虻川真大, 吉武 勇 : 内的固定定着部を用いたポストテンション方式プレストレス導入工法の実構造物への適用と先端充填材に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.587-592, 2017.

第3章 可撓性を有する緊張材の適用性の検討

3.1 検討目的

Mimoto *et al.* [2016a ; 2016b] の先行研究では、PC 鋼棒 ($\phi 23\text{mm}$, B 種 1 号) を緊張材に使用した構造が検討されたが、この場合、**図 3.1.1** に示す通り、緊張材を既設コンクリート部材内に挿入するための十分なスペースが必要とされる。

そこで本章では、狭隘空間における本プレストレス補強工法の適用を想定し、コルゲート管 (内径 10mm) と PC 鋼より線 ($\phi 6.2\text{mm}$, 9 本より線) を組み合わせた可撓性のある中空 PC スtrand (60t 級) の使用を検討する。本検討の目的は、中空 PC スtrand の内部定着構造に用いる高強度グラウト材を選定することである。

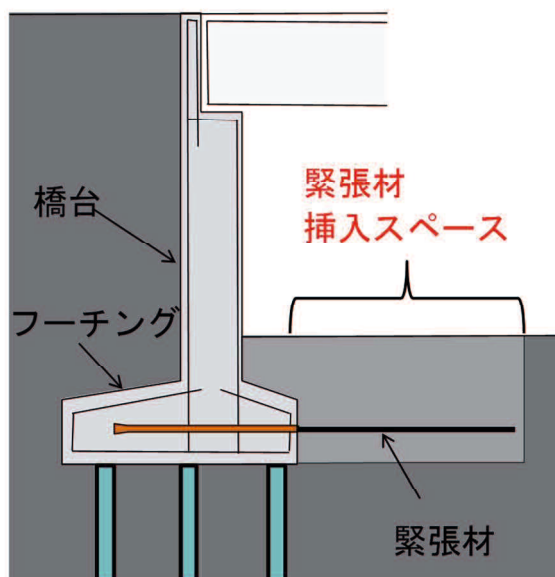


図-3.1.1 PC 鋼棒の課題

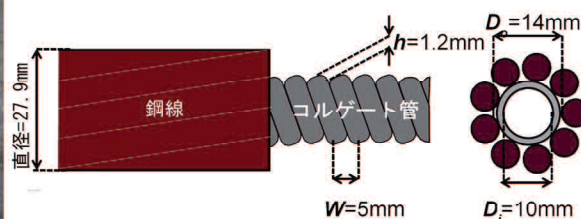
3.2 中空 PC ストランドの特徴

中空 PC ストランドは、内径 10mm のコルゲート管とコルゲート管の外周を取り囲むように配置された緊張力を負担する 9 本の緊張素線とが一体となった構造をしているため、従来の PC 鋼より線と同等の可撓性を有している (図-3.2.1(a))。また、中空 PC ストランドではコルゲート管がグラウト材注入用のパイプとして働くため、グラウト材の注入作業と緊張材の配置作業をほぼ同時に行うことができる。そして、実施工において、コルゲート管内部からのグラウト材の圧入による固定定着部の先端充填を想定しており、自由長部は従来の方法と同様、緊張作業後に PC グラウトによる充填を想定する。図-3.2.1(b)に中空 PC ストランドの詳細寸法を示す。また、中空ストランドの先端部グリップには、図-3.2.2 に示す圧着グリップを用いた。

中空 PC ストランドを使用した場合の活用例を図-3.2.3 に示す。従来の PC 鋼棒を緊張材として使用する場合、PC 鋼棒をコンクリート部材の孔内へ挿入するために PC 鋼棒の長さに応じた十分なバックスペースを必要とした。そのため、従来の PC 鋼棒は、橋脚のフーチングなどの狭隘な作業空間において適用できない場合があった。一方、可撓性に優れた中空 PC ストランドは、鋼材長に応じたバックスペースを必要とせず、狭い空間を縫ってコンクリート部材の孔内に配置することが可能である。中空 PC ストランドの外径は 27.9mm であり、固定定着部において緊張時に引張力に抵抗するためにストランドの端に長さ 159mm、外径 57mm の圧着グリップ (図-3.2.2) が取り付けられている。中空 PC ストランドおよび既往の研究において緊張材として使用した $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 B 種 1 号 (SBPR930/1080) と中空 PC ストランドの諸元を表-3.2.1 に示す。



(a) 中空 PC ストランドの可撓性



(b) 詳細寸法

図-3.2.1 中空 PC ストランド (60t 級)

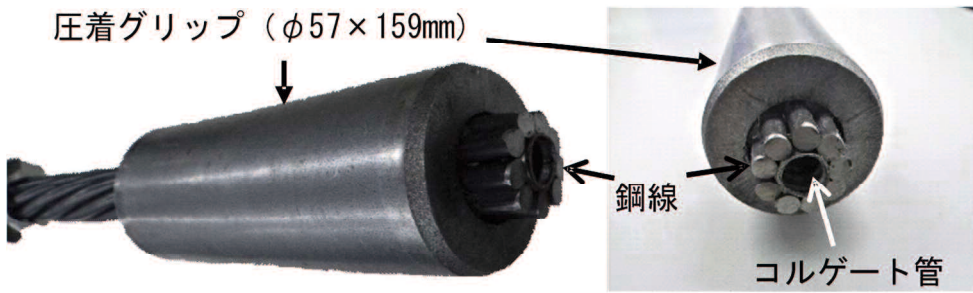


図-3.2.2 中空 PC スtrandの圧着グリップ

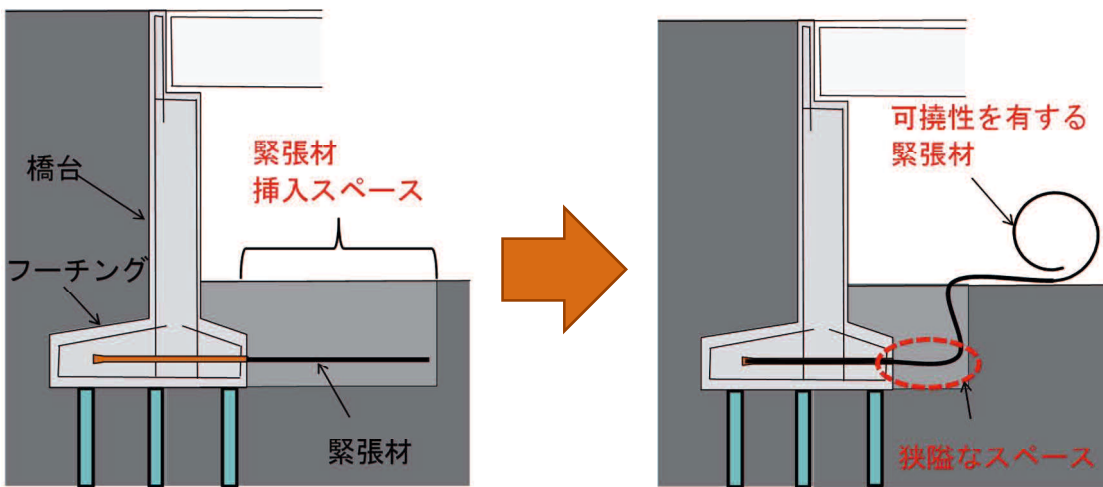


図-3.2.3 可撓性を有する緊張材の効果

表-3.2.1 緊張材の材料諸元

材料	PC 鋼棒(丸鋼 B 種 1 号)	中空 PC スtrand
外径	23 mm	27.9 mm
静弾性係数	202 GPa	162 GPa
規格降伏荷重	386.4 kN (930 MPa)	N/A
規格引張荷重	448.7 kN (1080 MPa)	588 kN (1732 MPa)
規格	JIS G 3109	N/A

3.3 コルゲート管へのグラウト実験

3.3.1 実験概要

本実験では、小型電動モルタルポンプを用いて検討したグラウト材をコルゲート管(5m 長)内に圧送し、通管可能な高強度グラウト材の選定を行った。また、コルゲート管先端からの排出が確認されたグラウト材については、通管前後で $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を3体ずつ作製し、材齢7日まで $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中にて養生させ JISA1108 に準拠した圧縮強度試験を実施した。高強度グラウト材の目標圧縮強度は先行研究[三原ら, 2015]の結果から90MPaとした。

3.3.2 グラウト材

本実験で使用したグラウト材の配合条件を表-3.3.1に示す。固定定着部に注入する充填材には、流動性、圧送性、無収縮性、ノンブリージングといった性能が求められる。また、プレストレス力を伝達するための内部アンカーの役割を担う硬化後の充填材は高い圧縮強度(90MPa以上)が求められるため、いずれの配合も水結合材比を20%程度とした。セメントには市販の普通ポルトランドセメントを用いた。

Type A は、セメント、混和剤、細骨材があらかじめ混合された材料に水を加えて練り混ぜるプレミックスタイプであり、既往の研究において緊張材である PC 鋼棒を定着するために使用した比較的に粘性の高い高強度モルタルである [三原ら, 2017]。

モルタルの配合は、プレミックスマ 25kg/袋に対し水 3.0kg である。Type B は、コルゲート管内への圧送性に対する細骨材の影響を検討するために用いた、基準となるセメントペーストである。Type C および Type D は、シリカフェームをセメントに対してそれぞれ 5%、10%質量置換したペースト状のグラウト材である。シリカフェームは完全な球形で大きさは $1\mu\text{m}$ 以下、平均粒径は $0.1\mu\text{m}$ 、比表面積は $200000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の超微粒子粉体である。一般に、シリカフェームをセメントと質量で10%程度置換した材料は、高性能 AE 減水剤と併用することでマイクロファイバー効果により所要の流動性が得られ、シリカフェームと水酸化カルシウムが練混ぜ後短時間の間に反応し、ゲル層を生成し水の移動を拘束することでブリージングや材料分離の小さいものが得られることが確認されている。これらの、諸効果を得ることを目的に低い置換率で混和材として用いた。また、硬化過程の収縮量の低減を目的として、収縮低減剤を使用した。

Type E, F は、グラウト材として必要な特性を備えるために、Type A を基に調製し作製したプレミックスタイプの材料であり、主成分はセメント系結合材、膨張剤、増粘剤、減水剤である。

表-3.3.1 グラウト材の諸元と配合



材料	種別	密度
水(W)	水道水	1.00 g/cm ³
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm ³
混和材 (F)	シリカフェーム	2.21 g/cm ³
細骨材 (S)	砕砂	2.60 g/cm ³
高性能AE減水剤 (HRWRA)	ポリカルボン酸系	1.04 g/cm ³
収縮低減剤 (SRA)	グリコールエーテル	0.98 g/cm ³
プレミックスモルタル (I)	メーカー ^S ^a	N/A
プレミックス材 (II)	メーカー ^S ^a	N/A
プレミックス材 (III)	メーカー ^T ^a	N/A

type	w/cm	W	C	F	S	HRWRA	SRA
A	0.12	1.2 kg/mix	10 kg/mix ^I			0	0
B	0.20	2.0 kg/mix	10 kg/mix	N/A	0	cm*1.4%	0
C	0.20	2.0 kg/mix	9.5 kg/mix	0.5 kg/mix	0	cm*1.5%	W*1.5%
D	0.20	2.0 kg/mix	9.0 kg/mix	1.0 kg/mix	0	cm*1.5%	W*1.5%
E	0.20	2.0 kg/mix	10 kg/mix ^{II}			0	0
F	0.26	2.6 kg/mix	10 kg/mix ^{III}			0	0



a:配合および成分については公開不可.

I: プレミックスモルタル (I); II: プレミックス材 (II); III: プレミックス材 (III)

3.3.3 実験方法

本実験では、に示す要領図の通り、小型のハンドミキサーを用いて練り混ぜたグラウト材を、市販の小型電動モルタルポンプ ()を用いて長さ5m、内径10mmのコルゲート管内に圧送し(最大速度:2000cm³/min)、通管可能な高強度グラウト材の選定を行った(以下、圧送実験)。使用した小型電動モルタルポンプの仕様を表-3.3.2に示す。練り混ぜ方法は、普通ポルトランドセメントおよびその他の結合粉体材料をハンドミキサーにより30秒間空練りを行った後、混和材を含む水を投入し120秒間の練混ぜを行った。

以下に、圧送の手順を示す。

- (1) 充填材をホッパーに入れて送り出す前に水(5L程度)をホッパーに入れて送り出す。入れた水はすべて送り出し、ホース内に残った水はホースを持ち上げて排出する。
- (2) ホッパーに投入した水の排出が概ね確認された後、充填材をホッパーに入れて送り出す。このとき、ポンプ内に残存している水が最初に排出されるため廃棄し、正状態充填材の排出が確認されるまで圧送する ()。
- (3) 一旦圧送を停止してホース先端に専用のノズル ()を取り付け、充填材を送り出し、ノズルから排出されることを確認した後、コルゲート管に繋いで圧送実

験を開始する (図-3.3.5).

- (4) コルゲート管先端からの排出が確認された充填材については、通管前後で $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体を各充填材につき3体ずつ作製し、材齢7日まで $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中にて養生させ JISA1108 に準拠した圧縮強度試験を実施した (図-3.3.6). 充填材の目標圧縮強度は 90MPa とした.

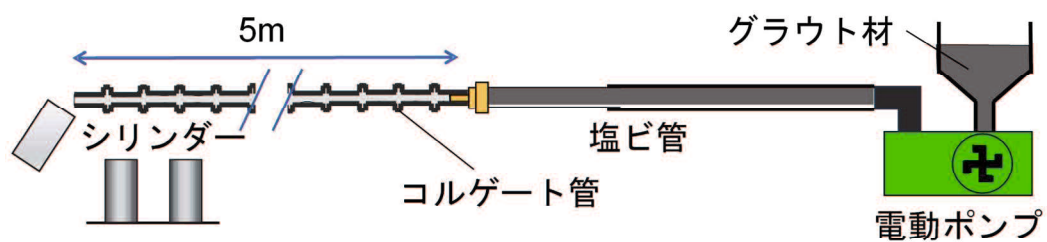


図-3.3.1 グラウト試験要領図



図-3.3.2 使用した電動ポンプ

表-3.3.2 電動ポンプの仕様

吐出量	2～8L/min
最大吐出力	1.5MPa
吸込, 吐出口径	15A(1/2)mm



図-3.3.3 グラウト材の排出



図-3.3.4 先端ノズル



図-3.3.5 圧送実験の様子



図-3.3.6 強度試験の様子

3.3.4 実験結果および考察

小型電動モルタルポンプによる各種充填材のコルゲート管（5m長）への圧送実験およびグラウト材の通管前後の圧縮強度試験結果を表-3.3.3に示す。練混ぜ直後に採取したすべてのグラウト材の試験材齢7日における圧縮強度は、固定定着部の定着体として必要な最小圧縮強度90MPaを上回った。

従来の高強度モルタル（Type A）は、十分な流動性が確保できず、管内の圧力が急増し圧送開始直後に圧力を上げてでもグラウト材の送り出しができない状況となった。これは、Type Aに含まれる細骨材が、コルゲート管内面の凹凸部分で堆積したことで、管内が閉塞したものと推測する。

Type Bは、モルタルに含まれる細骨材の影響を検討するために作製された普通セメントペーストであるが、コルゲート管内部の閉塞により圧力が上昇し、電動ポンプの吐出ホースとコルゲート管との接続部が破損したため、グラウト材を送り出すことができなかった。また、圧送後のホッパー内にセメント分のみが多く残存していることが観察された。このことから、圧送時の加圧作用により材料分離が発生し、水分のみが送管されていたことが考えられる。しかしながら、コルゲート管先端から僅かにセメント分を含んだ水の排水が確認された。このことから、グラウト材のコルゲート管への圧送性に与える細骨材の影響は大きく、グラウト材に骨材を添加することで、対象とする5m長のコルゲート管（内径10mm）への通管を難しくさせることが判明した。

Type C, D, E, Fのグラウト材は、高い流動性から5mのコルゲート管を通管できた。Type C, Dの結果から、シリカフェームをセメントの質量に対して低い置換率で混入した場合、通管に必要な流動性および粘性を有するグラウト材が得られることが分かった。これは、シリカフェームが有するマイクロファイラー効果、ボールベアリング効果といった諸効果が、骨材を含まないペースト材料に対しても有効に作用したためである。しか

し、通管後に採取されたType Dの圧縮強度は45.2MPaであり、必要な最小強度（90MPa）の半分に過ぎなかった。Type Dに関しては圧送途中に一部材料分離が観察され（図-3.3.7）、これが原因となり通管後の圧縮強度が通管前と比較して著しく低下したと考えられる。

Type C, E, Fのグラウト材は、圧送時に材料分離を起こすことなく5mのコルゲート管を通管し、必要な圧縮強度を発現することができた。通管後に採取したType C, E, Fの圧縮強度はそれぞれ、132.7MPa, 103MPa, 98.4MPaであった。

前述のように、コルゲート管は細径で内面に凹凸を有するため、そこに細骨材、セメント、その他材料が堆積することにより管内を閉塞させてしまう可能性がある。そのため、グラウト材を圧送することで、グラウト材の性状に影響を与えることが推察される。一部例外もみられるが、Type Dと同様に通管前よりも通管後で圧縮強度が低い傾向がある。通管による圧縮強度の低下を考慮して通管前の圧縮強度は目標圧縮強度（90MPa）よりも十分に高い強度を確保する必要がある。

以上のことから、コルゲート管への通管が可能で、かつ通管後の圧縮強度が設定値を満足するグラウト材は Type C, E, F と判断された。

表-3.3.3 圧送実験および圧縮強度試験結果

Type	フロー ^a (mm)	通管試験(5m長)	材料分離	f'_{7d} (MPa)	充填状況
A	189	不可	N/A	109.6 ^b / --	N/A
B	>300	不可	有	104.5 ^b / --	N/A
C	244	可	無	118.7 ^b / 132.7 ^c	Full
D	193	可	有	90.1 ^b / 45.2 ^c	N/A
E	265	可	無	113.0 ^b / 103.0 ^c	Full
F	163	可	無	103.6 ^b / 98.4 ^c	Full

^a テーブルフロー試験; ^b コルゲート管通管前; ^c コルゲート管通管後



図-3.3.7 材料分離の様子

3.3.5 まとめ

本試験では、プレストレス内部補強工法で用いる緊張材となる中空 PC ストランドを既設コンクリートの拡径削孔内部に定着するために必要となる流動性や圧縮強度（90MPa）を有したグラウト材の検討を目的として、小型電動モルタルポンプを用いた圧送実験を行った。この実験により得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 練混ぜ直後に採取したすべてのグラウト材の試験材齢 7 日における圧縮強度は、目標とした圧縮強度（90MPa）を上回った。
- (2) $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 B 種 1 号を定着するために用いられる従来の高強度モルタル（Type A）は、コルゲート管を通管することができないため、中空 PC ストランドを定着するためのグラウト材には適していないと判断された。
- (3) コルゲート管は細径で内面に凹凸を有するため、そこに細骨材、セメント、その他材料細径で内面に凹凸を有するコルゲート管内にグラウト材を圧送することで、グラウト材の性状に影響を与えることが分かった。一部例外もみられるが、通管前よりも通管後で圧縮強度が低い傾向がある。通管による圧縮強度の低下を考慮して通管前の圧縮強度は目標圧縮強度（90MPa）よりも十分に高い強度を確保する必要がある。
- (4) 内径 10mm で 5m 長のコルゲート管を通管でき、通管後に採取された試料の材齢 7 日圧縮強度が目標圧縮強度（90MPa）を上回った配合は、Type C（132.7MPa）、Type E（103.0MPa）、Type F（98.4MPa）であった。

上記の結果を踏まえて、コルゲート管への通管が可能で、かつ通管後の圧縮強度が設定値を満足する配合 Type C, E, F について引抜き実験を行い、中空 PC ストランドの引抜き耐力を検討した。

3.4 中空 PC ストランドの引抜き実験

3.4.1 実験概要

本実験では、コルゲート管への圧送実験により選定した Type C, E, F を用いて中空 PC ストランドをコンクリートブロックの内部に固定定着した実物大供試体を製作し、引抜き実験により中空 PC ストランドに作用させた緊張力に対する固定定着構造の定着耐力を調べた。

引抜き実験は、定着具の試験方法を定めた土木学会基準である JSCE-E-503「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法」[土木学会, 2018]における、定着具をコンクリートと組合わせた性能試験の方法を準用して実施した。

3.4.2 供試体

既往の研究と同様に供試体は載荷面の断面寸法を許容最小寸法の $400 \times 400 \text{mm}$ とし、緊張材方向の長さは載荷面の寸法の 2 倍以上の寸法として、 $400 \times 400 \times 1200 \text{mm}$ のコンクリートブロックを用意した。実際の施工と同様にコンクリートの内部を専用の拡張ビットにより削孔し、削孔後に残留した水や削り出したコンクリートをクリーナーにより除去した後、孔内径を小型の内視カメラ（直径 8mm 、30 万画素）で確認した。固定定着構造の詳細を図-3.4.1 に示す。中空 PC ストランドを配置する際には中空 PC ストランドが孔の中心に配置されるように、ストランドに提灯型のスペーサーを取り付けて挿入した。その後、中空 PC ストランド内側のコルゲート管を通じてグラウト材を注入してストランドを垂直方向にて固定定着した。固定定着が確実に行われるように、グラウト材の試験充填を行った後に本充填を行った。また、本充填時に小型の内視カメラを使用して充填状況の目視確認を行った。

コンクリートの設計基準強度は 24MPa とし、劣化した既設補強部材を模擬するために比較的高い水セメント比 ($w/cm = 0.90$) の配合で作製した。供試体作製に使用した材料の諸元とコンクリートの配合を表-3.4.1 に示す。供試体は 7 体作製し、それぞれグラウト材として Type C を用いたものが 3 体、Type E を用いたものが 3 体、Type F を用いたものが 1 体である（図-3.4.2, 図-3.4.3）。使用したグラウト材とコンクリートの材料特性を表-3.4.2 に示す。また、供試体製作時の写真を図-3.4.4 に示す。

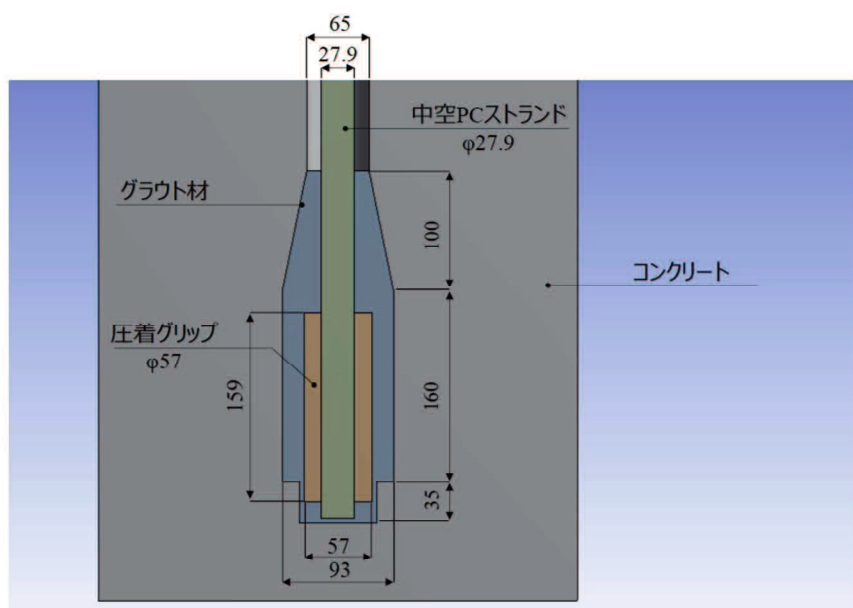


図-3.4.1 固定定着構造の寸法形状：単位 mm

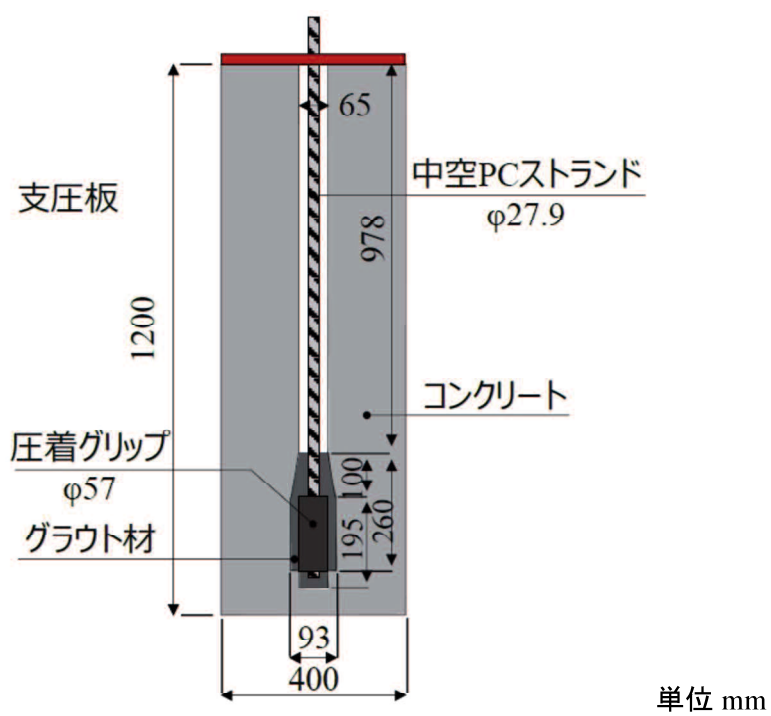
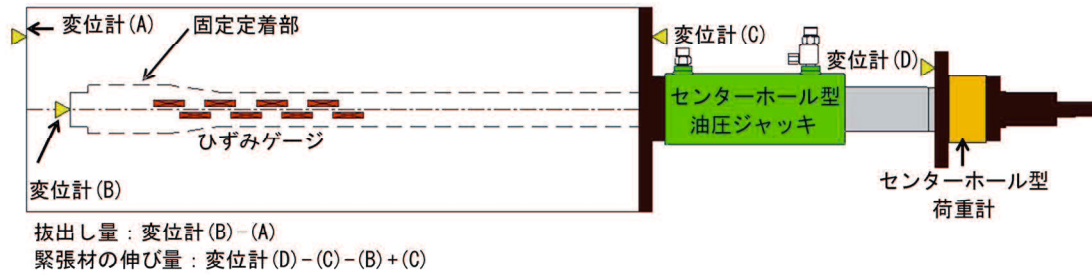
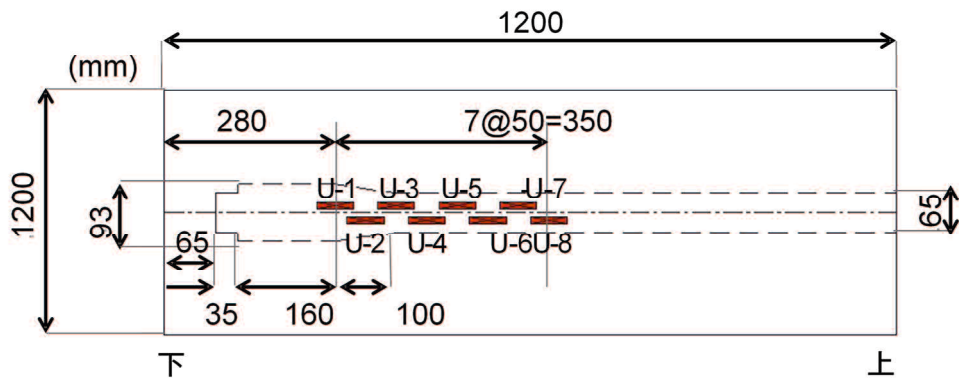


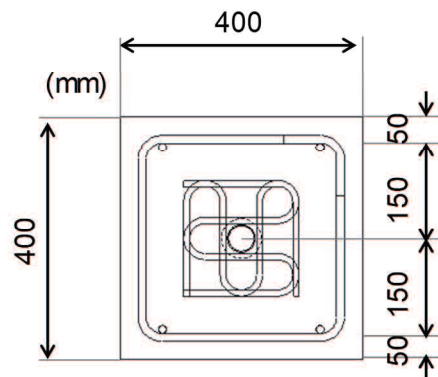
図-3.4.2 供試体



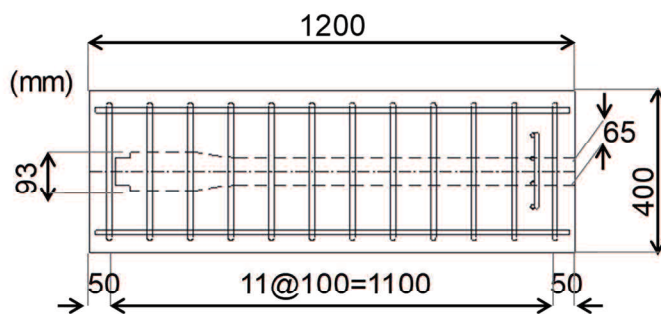
(a) 試験要領



(b) 形状寸法



(c) 配筋図 - 断面 -



(d) 配筋図－側面－

図-3.4.3 配筋図および計測要領：単位 mm

表-3.4.1 供試体の使用材料およびコンクリート配合

鋼材	材料諸元						
鉄筋	JIS G-3112; 呼び径: 13 mm (D13) 降伏強度: 345 MPa; 静弾性係数: 206 GPa						
中空PCストランド	表-3.2.1 参照						
圧着グリップ	径: 57 mm; 長さ: 159 mm						
支圧板	JIS G-3101; 寸法: 120×120×25 mm 降伏強度: 235 MPa; 静弾性係数: 206 GPa						
コンクリート	種類		密度				
水 (W)	水道水		1.00 g/cm ³				
セメント (C)	普通ポルトランドセメント		3.16 g/cm ³				
細骨材 (S)	砕砂		2.64 g/cm ³				
粗骨材 (G)	砕石		2.68 g/cm ³				
混和剤 (AD)	高性能減水剤		1.04 g/cm ³				
Type	w/cm	W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³	AD kg/m ³	Air %
Conc.	0.90	190	211	993	930	0.63	4.5

表-3.4.2 グラウト材およびコンクリートの材料特性

グラウト材	フロー値	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
Type C	244 mm	118.3 MPa	26.7 GPa	0.25
Type E	225 mm	89.2 MPa	20.2 GPa	0.24
Type F	160 mm	95.7 MPa	21.8 GPa	0.26
コンクリート	スランプ	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
Conc.	80 mm	25.1 MPa	25.3 GPa	0.20



(a) 削孔



(b) 拡径削孔ビット



(c) 中空 PC ストランド (スペーサー付)



(d) グラウト材の充填作業（鉛直方向）

図-3.4.4 供試体製作状況

3.4.3 実験方法

本実験では、引抜き実験の状況を図-3.4.5に示す。緊張端に設置した1000kN型のセンターホールジャッキにより緊張する方法で、中空PCストランドの規格引張荷重(P_u)である588kNを超える引抜き力を負荷した。載荷ステップを表-3.4.3に示す。実際の施工材齢を想定し、固定定着部にグラウト材を充填してから12日目に荷重を載荷した。

センターホール型荷重計(1000kN)をジャッキ上面に設置して引抜き力を計測した。固定定着部における中空PCストランドのすべり量を調べるために、供試体底面とストランドの底面に変位計を設置し、その相対変位からすべり量を求めた。また、ストランドの伸び変位はストランドの緊張端に取り付けた変位計の値からすべり量を差し引いて求めた。コンクリート外面には、荷重載荷により発生する応力を計測するために、長さ60mmのひずみゲージを中空PCストランドの軸方向および水平方向に貼付した。コンクリートのひずみゲージ設置位置を図-3.4.6に示す。



図-3.4.5 引抜き実験の状況

表-3.4.3 引抜き実験の荷重ステップ

荷重段階	荷重値(kN)	
0	0	
0.15 <i>Pu</i>	83.7	
0.30 <i>Pu</i>	176.4	
0.45 <i>Pu</i>	264.6	
0.60 <i>Pu</i>	352.8	設計荷重時プレストレス力
0.70 <i>Pu</i>	411.6	導入直後プレストレス力
0.80 <i>Pu</i>	470.4	プレストレッシング中のプレストレス力
0.90 <i>Pu</i>	529	
<i>Py</i>	—	規格降伏荷重
0.95 <i>Pu</i>	559	
<i>Pu</i>	588	規格引張荷重

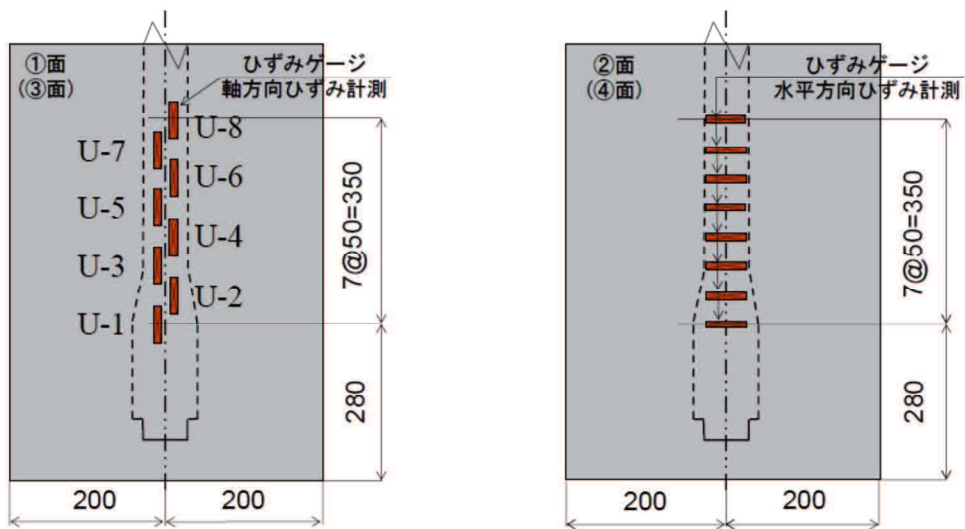


図-3.4.6 ひずみ計測位置

3.4.4 実験結果および考察

(1) 最大荷重

引抜き実験において計測した各供試体の最大引抜き荷重を表-3.4.4 に示す。いずれのグラウト材を用いた場合でも中空 PC ストランドの規格引張荷重 (P_u) である 588kN 以上の荷重を保持していた。また、最大荷重時点においても固定定着部およびコンクリートにひび割れ等の損傷は生じなかった。このことから、Type C, E, F のグラウト材を使用して形成した固定定着構造が中空 PC ストランドの規格引張荷重以上の引抜き力に対して十分な定着耐力を有することが分かった。なお、実験の安全のために、コンクリート表面のひび割れを確認した直後に荷重を除荷した。

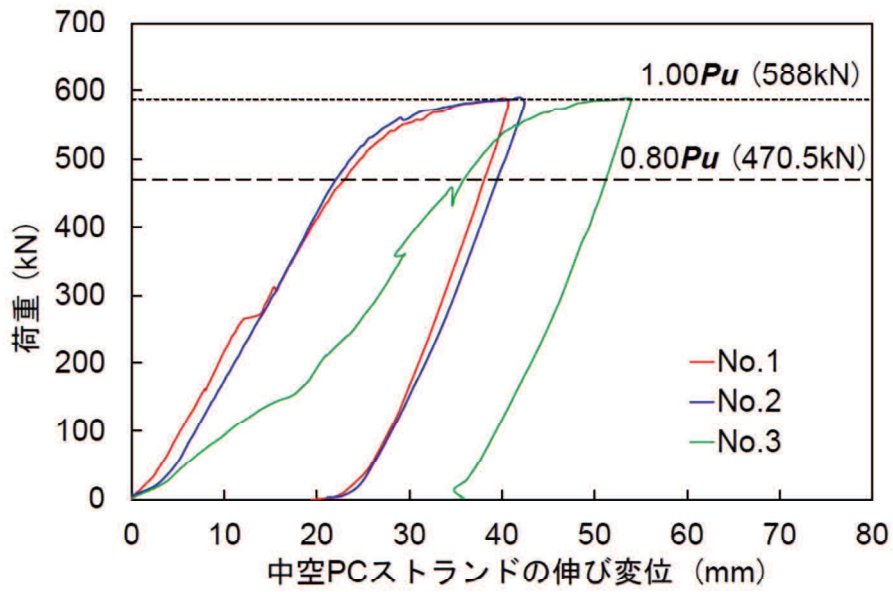
表-3.4.4 最大引抜き荷重

グラウト材	No.1	No.2	No.3
Type C	589 kN	590 kN	589 kN
Type E	588 kN	589 kN	593 kN
Type F	589 kN	N/A	N/A
規格引張荷重	588 kN		

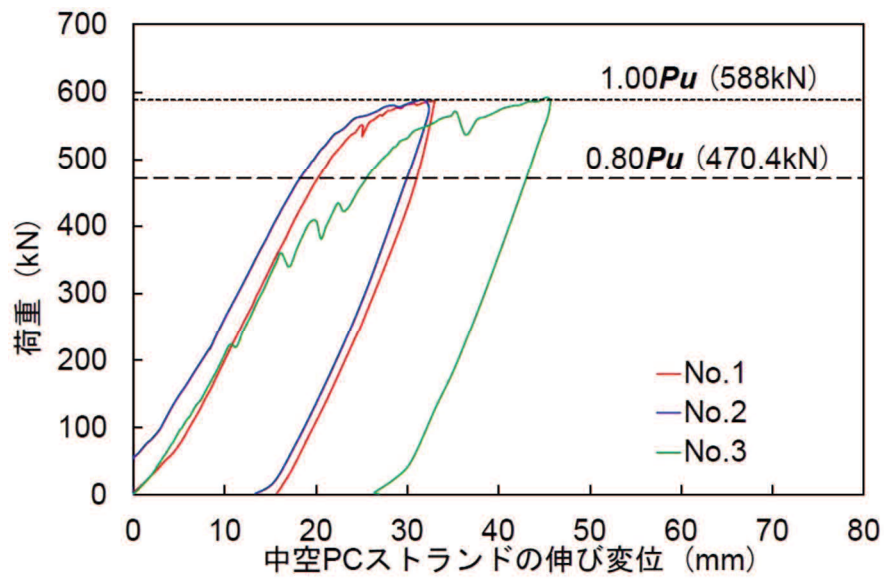
(2) 緊張材の伸びとすべり

いずれのグラウト材で定着した中空 PC ストランドの伸び変位は、引抜き力が 490kN を超えるあたりまでは荷重の増加と比例する線形挙動を示したが、それ以降は明瞭な降伏点を示さずに伸びが増加する PC 鋼材特有の非線形挙動を示した (図-3.4.7)。

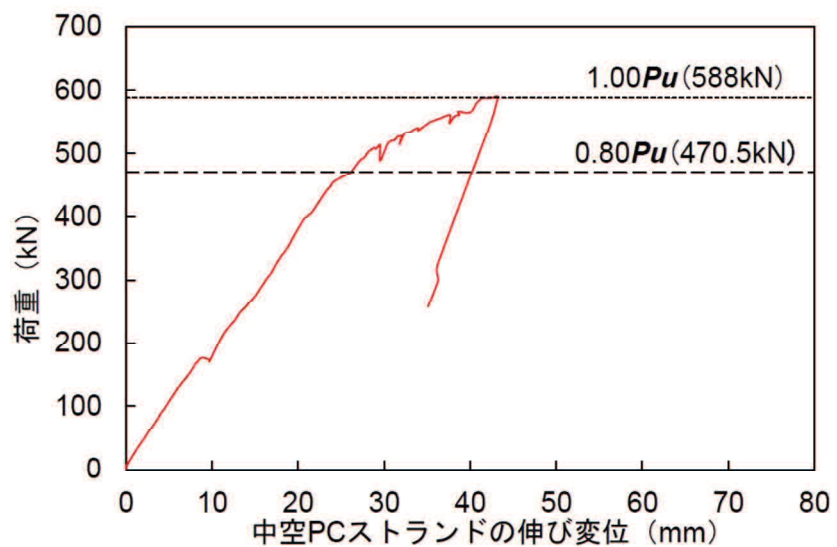
図-3.4.8 は、各グラウト材を使用した固定定着部における中空 PC ストランドのすべり量 (拔出し量) を示している。実際の施工時に、中空 PC ストランドに作用する最大の引抜き力はプレストレス中の緊張材の引張応力度の制限値である $0.8P_u$ (470.5kN) 程度であるが、その時の拔出し量の計測値は、それぞれ Type C: 0.7~0.8mm, Type E: 1.1~1.7mm, Type F: 1.3mm であり、その差は少量であった。また、固定定着部における緊張材の拔出し量が最も小さいグラウト材は Type C であった。



(a) 荷重—変位 (Type C)

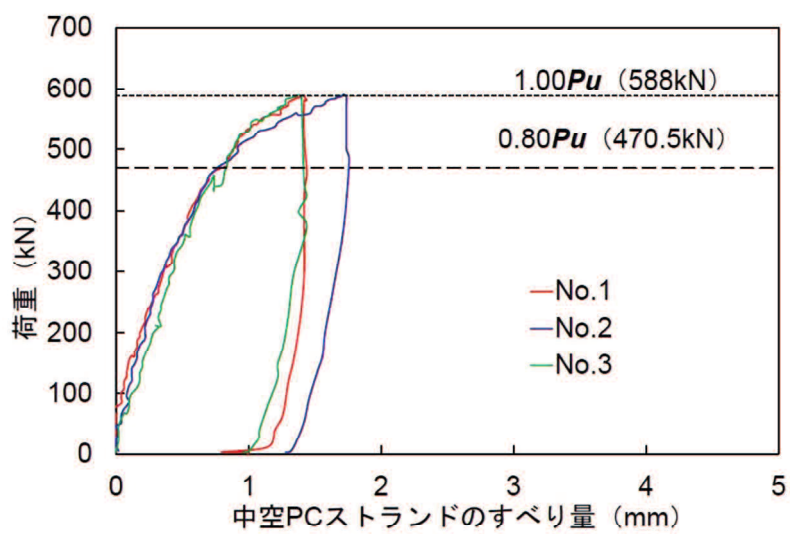


(b) 荷重—変位 (Type E)

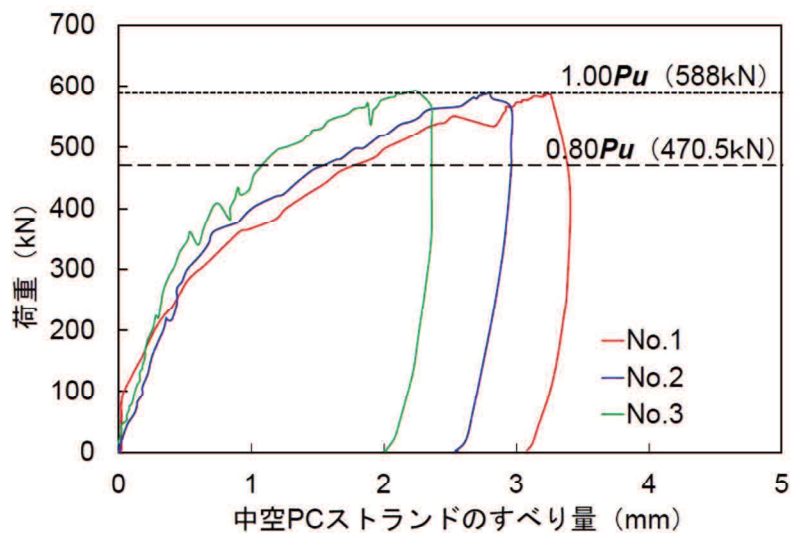


(c) 荷重—変位 (Type E)

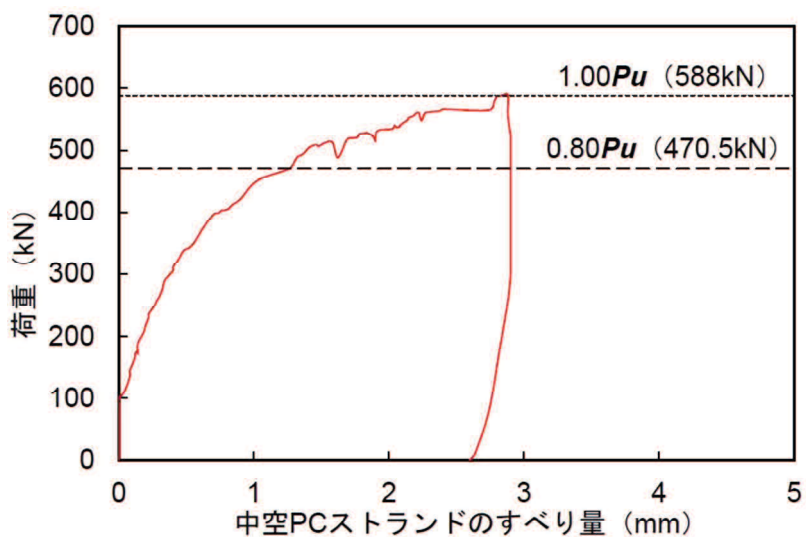
図-3.4.7 引抜き荷重と緊張材の伸び変形



(a) 荷重—変位 (Type C)



(b) 荷重—変位 (Type E)



(c) 荷重—変位 (Type E)

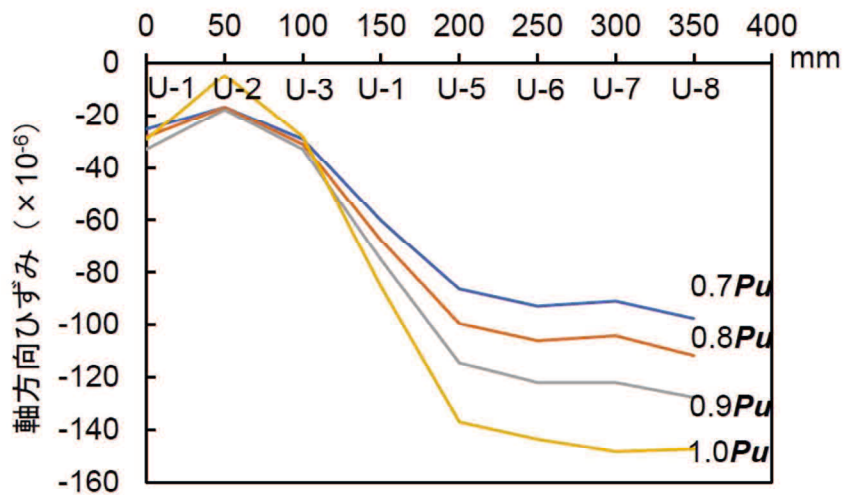
図-3.4.8 引抜き荷重と緊張材の伸び変形

(3) コンクリート表面のひずみ

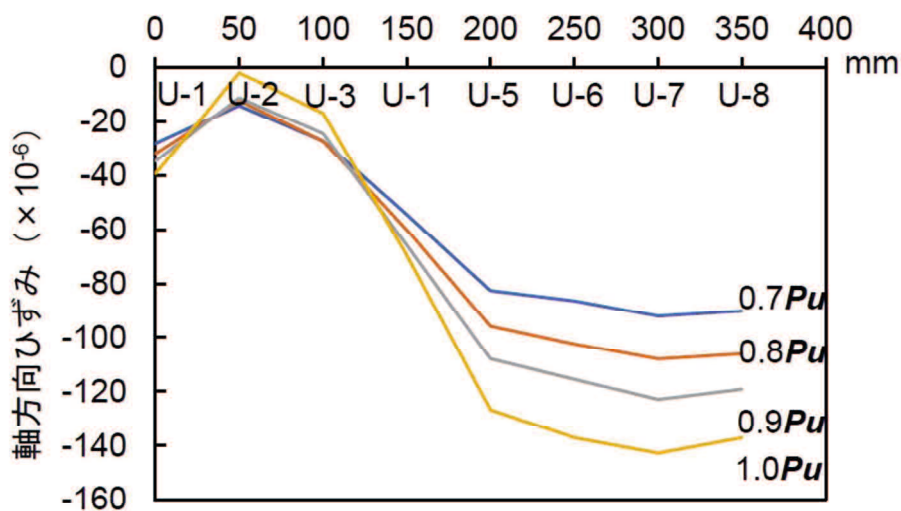
0.7Pu~1.0Pu の荷重段階におけるコンクリートの表面の軸方向ひずみ分布を図-3.4.9に示す。引抜き荷重が1.0Pu (588kN) 時点におけるグラウト材 Type C を使用した供試体のコンクリート表面の最大ひずみはひずみゲージ位置 U-7 (拡径削孔部の下端から 300mm) で -148×10^{-6} であった。この値は、載荷試験により得られたコンクリートの圧縮強度 (25.1MPa) と静弾性係数 (25.3GPa) から求めたひずみ -145×10^{-6} と比べて同等であった。また、観察された各荷重段階におけるひずみ分布はひずみゲージ位置 U-6 (拡径削孔部の下端から 250mm) 以上で安定した。これは、緊張材として $\phi 23$ の PC 鋼棒 B 種 1 号を使用したときと同様に、内部くさびの先端から 45 度方向へコンクリート表面まで達した位置で一定のプレストレスが導入できることを示している。

引抜き荷重が1.0Pu (588kN) 時点におけるグラウト材 Type E を使用した供試体のコンクリート表面の最大ひずみはひずみゲージ位置 U-7 (拡径削孔部の下端から 300mm) で -143×10^{-6} であり、Type C の結果と同程等の値を示した。観察されたひずみ分布はひずみゲージ位置 U-7 (拡径削孔部の下端から 300mm) 以上で安定した。

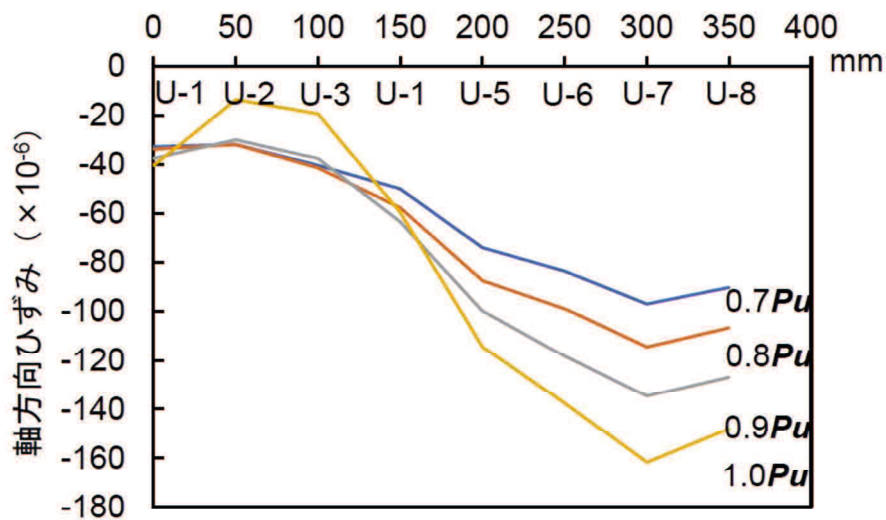
引抜き荷重が1.0Pu (588kN) 時点におけるグラウト材 Type F を使用した供試体のコンクリート表面の最大ひずみはひずみゲージ位置 U-7 (拡径削孔部の下端から 300mm) で -162×10^{-6} であった。この値は、コンクリートの設計基準強度と静弾性係数から求めたひずみ (-145×10^{-6}) と比べてわずかに大きかった。



(a) ひずみ—計測位置(Type C)



(b) ひずみ—計測位置(Type E)



(c) ひずみ—計測位置(Type F)

図-3.4.9 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布

3.4.5 まとめ

本項では、Type C, E, F のグラウト材を用いた固定定着部の中空 PC ストランドの引抜き力に対する定着性能を調べるため、コンクリートブロックの内部に中空 PC ストランドを定着した実物大供試体を用いてストランドを緊張して荷重を負荷する引抜き実験を実施した。この実験により得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 引抜き実験の結果、Type C, E, F のグラウト材を使用して形成した固定定着部は引抜き力に対して中空 PC ストランドの規格引張荷重 (P_u) である 588kN 以上の定着耐力を保持した。
- (2) $0.8P_u$ (470.5kN) の引抜き力に対して、固定定着部における中空 PC ストランドの拔出量 (すべり量) はそれぞれ Type C : 0.7~0.8mm, Type E : 1.1~1.7mm, Type F : 1.3mm であり、その差は少量であった。
- (3) $1.0P_u$ (588kN) の引抜き力に対して、コンクリート表面の最大軸方向ひずみはいずれもひずみゲージ位置 U-7 (拡径削孔部の下端から 300mm) で Type C : -148×10^{-6} , Type E : -143×10^{-6} , Type F : -162×10^{-6} となり、既往の研究と同様に固定定着構造周辺のプレストレスは、内部くさびの先端から伝達するという設定で設計可能と考えられる。

上記は、グラウト定着を鉛直下向きに行うことにより固定定着部での空気溜まり発生などの施工に起因する課題を排除し、各種グラウト材で形成した固定定着部の定着性能を確認した結果である。次項では、本補強工法をより実用的に検討するために各種グラウト材 (Type C, E, F) の水平方向および斜め上向きへの充填性の評価と、その時の固定定着部の定着耐力の実験結果について報告する。

3.5 水平方向施工への適用を想定したグラウト実験

3.5.1 実験概要

水平方向への充填時には、注入したグラウト材が孔内で流動することにより拡径削孔部の上縁に空隙を生じさせ、固定定着部構造の内部くさび効果が十分に得られないことが懸念される。

そこで、水平方向においても完全な充填が可能か調べるために、**図-3.5.1** に示す固定定着部を模擬した透明な亚克力管を用いて各種グラウト材（Type C, E, F）の水平方向への充填性能の検証を行った。



図-3.5.1 固定定着部を模した透明亚克力管

3.5.2 実験方法

充填性能実験では、透明亚克力管に各種グラウト材を注入し、目視で確認することによりそれぞれの充填性能を評価した。使用したグラウト材は、コルゲート管（5m長）への圧送実験および鉛直方向引抜き実験において、要求性能を満たした3種類のグラウト材 Type C, E, F である。実際の先端部拡径形状を模擬した透明亚克力管の内部に圧着グリップを設置した中空 PC ストランド（1m長）を配置した供試体を作製した。グラウト材の注入は、中空 PC ストランド内部のコルゲート管から小型電動モルタルポンプを使用して行った。使用した小型電動モルタルポンプは圧送実験に用いたものと同じ仕様である。充填性能実験の要領を**図-3.5.2** に示す。また、グラウト材の流出抑制の必要性を確かめるために条件として、無対策の供試体に加えて、流出抑制のためのスチールウールを拡径部手前に配置した供試体、さらに透明亚克力管に 0.35rad の上向き勾配を設けた供試体、の3ケースでの充填性能実験を実施した。なお、使用したスチールウールは、孔内からの排気のみを許す材料である。充填性能実験ケースを**図-3.5.3** に示す。

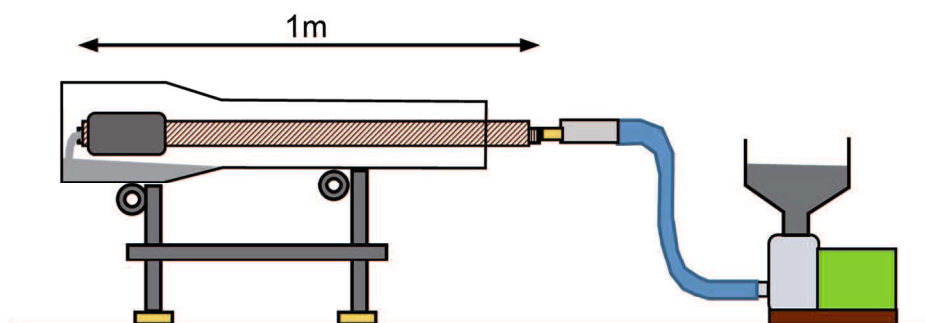


図-3.5.2 充填実験の要領

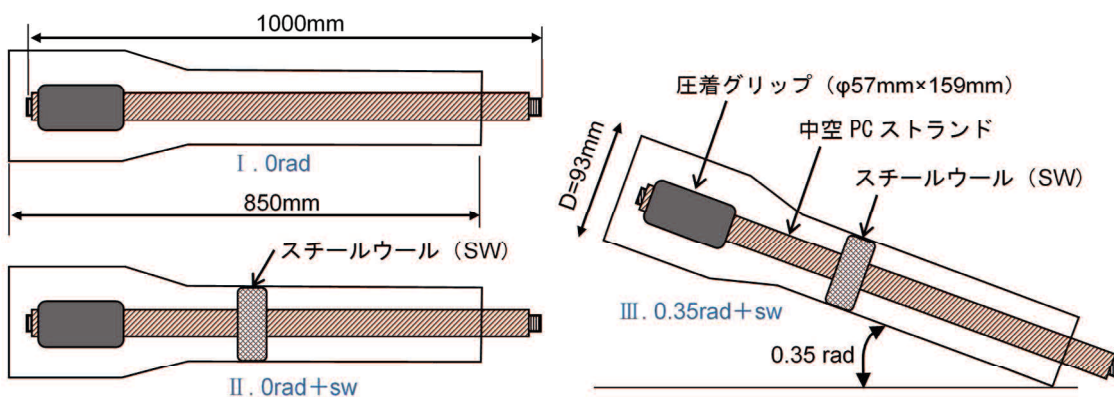


図-3.5.3 実験ケース

3.5.3 実験結果および考察

充填性能実験の結果を表-3.5.1 に示す。無対策の供試体において拡径削孔部内の十分な充填が確認できた配合は、Type F のみであった。Type C, E は、先端部に留まることが出来ず孔外部へ流出したため、拡径削孔部内を十分に充填することができなかった（図-3.5.4）。

また、フロー試験の結果、グラウト材 Type F は 163mm, Type C, E は 200mm 以上の値となり、Type F が最も低い流動性を示した。しかし、グラウト材の流出抑制を講じたケースでは、Type C, F で拡径削孔部内が完全に充填されることが確認された（図-3.5.5）。一方で、Type E では、グラウト材が孔内に留まる改善がみられたものの、亚克力管上縁に空気溜まりの発生が観察された（図-3.5.6）。これらより、スチールウールを孔内に配置することによりある程度空気溜まりを抑制できることが分かった。さらに、0.35rad の上向き勾配を設けた供試体において、スチールウールを孔内に設置することによりグラウト材 Type C, F で拡径削孔部内を完全に充填できることが確認できた（図-3.5.7）。

表-3.5.1 充填実験の結果

ケース	条件	空気溜り		グラウトの流出	
		有	無	有	無
I	0 rad	C, E	F	C, E	F
II	0 rad + sw	C	E, F	C	E, F
III	0.35 rad + sw	C	E, F	C	E, F

SW:スチールウール



図-3.5.4 グラウト材の流出

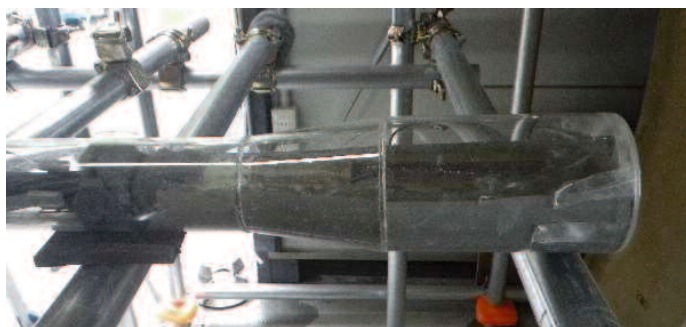


図-3.5.5 スチールウールによるグラウト流出抑制

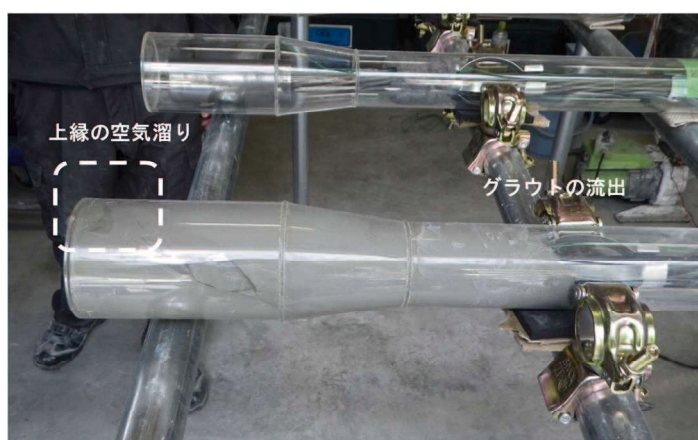


図-3.5.6 アクリル管上縁の空気溜り



図-3.5.7 0.35rad 勾配配置

3.5.4 まとめ

本項では、本補強工法をより実用的に検討するために各種グラウト材（Type C, E, F）の水平方向および斜め上向きへの充填性を評価した。充填性能実験の結果、スチールウールを孔内に配置することによりある程度空気溜まりを抑制できることが分かった。さらに、グラウト材として Type F を用いた場合、上向き（ 0.35rad ）への充填を可能とした。この実験結果に基づき、いずれの条件下でも充填できることが確認された Type F を用いて、水平方向に充填および固定定着させた場合の固定定着部の定着性能を中空 PC スtrandの引抜き実験により調査した。

3.6 水平方向施工を想定した引抜き実験

3.6.1 実験概要

充填性能実験により、水平方向への充填に適した材料として判断されたグラウト材 Type F を用いて水平方向へ充填および硬化させた場合の固定定着部の定着耐力およびコンクリート部材のプレストレス力の伝達挙動を調べるために、中空 PC スtrandの引抜き実験を行った。

3.6.2 実験方法

寸法が 400×400×1200mm のコンクリートブロックを水平方向へ配置したうえで Type F のグラウト材を拡径削孔部へと注入し中空 PC スtrandの定着を行った。供試体作製や引抜き載荷方法は、先述の引抜き実験と同様である。供試体の作製状況より、水平方向への充填の様子を図-3.6.1 に示す。ただし、実験の安全を確保するために、緊張作業は供試体を立て鉛直上向きに行った（図-3.6.2）。また、緊張作業は実施工における工程を想定し、定着から 10 日後に行った。



図-3.6.1 グラウト材の注入（水平方向）



図-3.6.2 引抜き実験状況

3.6.3 実験結果および考察

計測した最大荷重は 591kN であった。Type F で充填した固定定着部は、規格引張強度（588kN）以上の荷重を保持しており、十分な定着耐力を有していることが確認された。なお実験においてコンクリート表面にひび割れは生じなかった。固定定着部における中空 PC ストランドのすべり量および中空 PC ストランドの伸び変位を計測した結果を図-3.6.3、図-3.6.4 に示す。図-3.6.3、図-3.6.4 には、比較のために Type F により鉛直方向にて固定定着した場合の引抜き実験の結果も示している。固定定着部におけるストランドのすべり量は約 4.0mm だった。鉛直方向へ充填および固定定着した場合のすべり量の値と比べて 1.1mm 大きかったが、プレストレスング中のストランドの引張応力度の制限値である 470kN ($=0.8P_u$) 時のすべり量は同程度 (1.5mm) であった。また、中空 PC ストランドの伸び量は PC 鋼棒の伸び量よりも大きく、荷重-変位関係曲線の傾きは小さくなった。ストランドの伸び量が大きいため、緊張時にはストロークの長いジャッキが必要となるが、コンクリートの温度変化や固定定着部におけるストランドのすべりによる影響や緊張側のアンカーくさびのめり込み量 (セットロス) 等の影響は減少し、プレストレスの損失を軽減できるものと考えられる。

0.7 P_u ~1.0 P_u の荷重段階におけるコンクリートの表面の軸方向ひずみ分布を図-3.6.5 に示す。引抜き荷重が 1.0 P_u (588kN) 時点におけるコンクリート表面の最大ひずみはひずみゲージ位置 U-8 (拡径削孔部の下端から 350mm) で -153×10^{-6} であった。また、観察されたひずみ分布はひずみゲージ位置 U-6 (拡径削孔部の下端から 250mm) 以上で安定した。これより、鉛直方向へ充填および固定定着した場合の結果と概ね一致した。試験後の供試体から固定定着部を切り出して撮影した画像を図-3.6.6 に示す。固定定着部内に引抜き荷重による大きな損傷はなく、母材コンクリートとグラウト材との

境界部が密実に充填されていることを確認した。しかし、グラウト材の内部には幾つかの小さな空隙が確認された。これは、グラウト材の練混ぜ・圧送時に混入した空気が残留したものと考えられる。また、固定定着部内部で中空 PC ストランドの先端が約 3% 垂れ下がっていることが確認された。これは、圧着グリップの自重により柔軟な中空 PC ストランドの先端部付近にたわみが発生したものと考えられる。このようなたわみの抑制のために、流出抑制のためのスチールウールおよびセンターリング材を拡径削孔部の直ぐ手前に配置し、ストランドの先端を支える構造にする必要がある。また、このような先端部の偏心によるプレストレス力の伝達に与える影響を今後検討する必要がある。以上のようにグラウト材内の残留空隙や圧着グリップの偏心が生じながらも、引抜き実験により固定定着部の十分な定着性能が確認された。

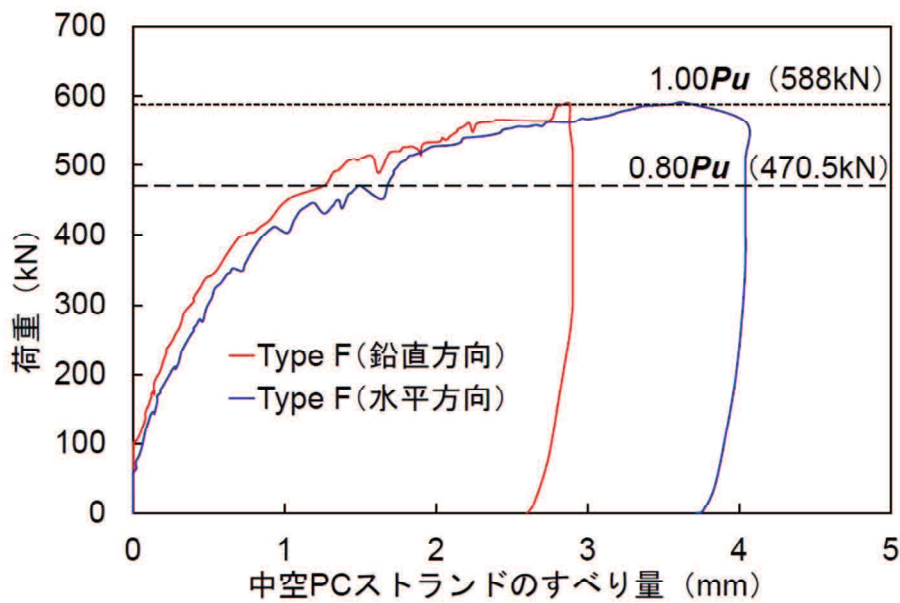


図-3.6.3 固定定着部における緊張材のすべり量

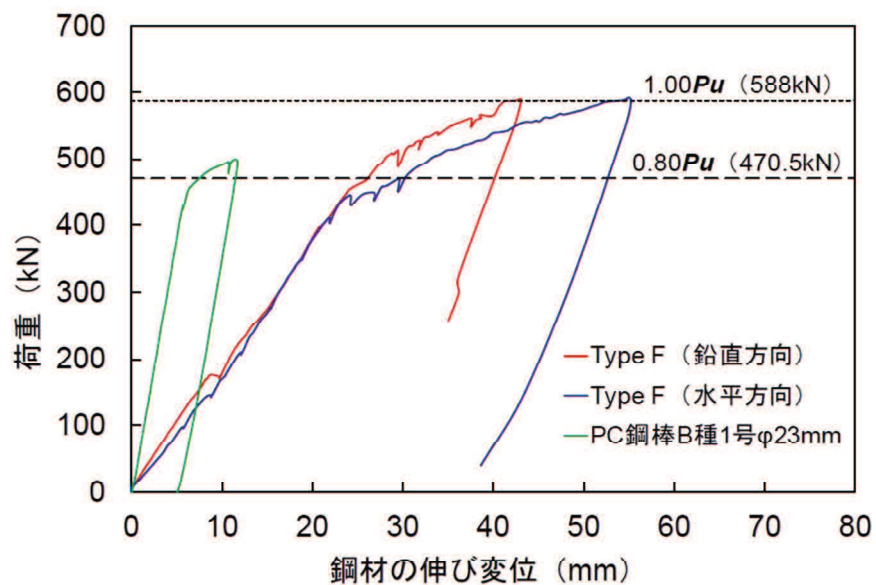


図-3.6.4 引抜き荷重と緊張材の伸び変形

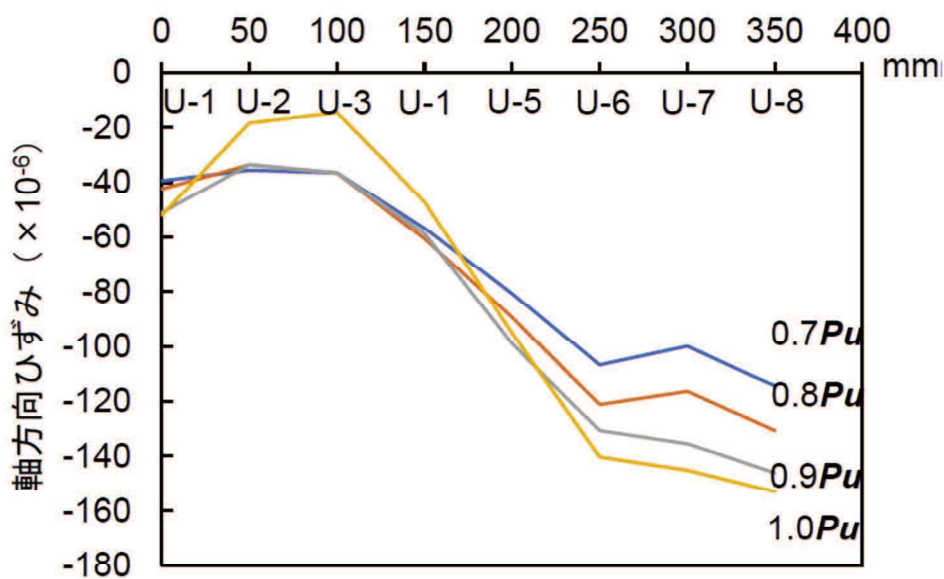


図-3.6.5 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布

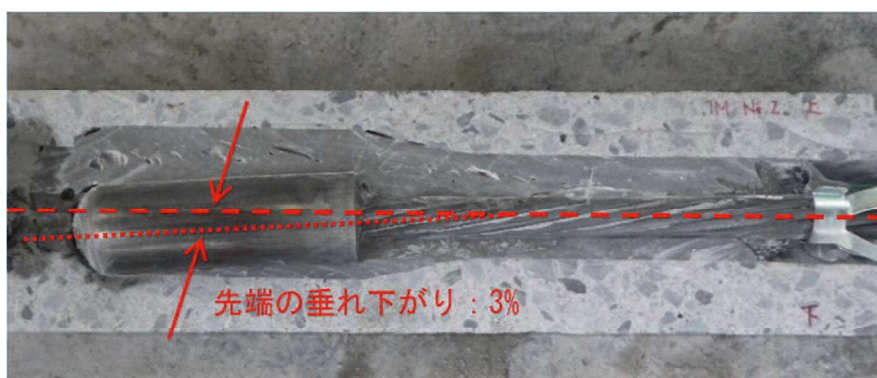


図-3.6.6 引抜き実験後の固定定着部の状況

3.6.4 まとめ

本項では、本補強工法をより実用的に検討するためにグラウト材 Type F を水平方向に充填させて中空 PC スtrand を定着させた時の固定定着部の定着耐力を確認するために、充填性能実験および引抜き実験を行った。引抜き実験（水平方向）の結果、最大引抜き荷重は 591kN であり、Type F を用いて形成した固定定着部は中空 PC スtrand の規格降伏荷重（588kN）以上の定着耐力を有していた。また、グラウト材の内部には幾つかの小さな空隙が見られたものの、固定定着部内に引抜き荷重による大きな損傷はなく、母材コンクリートとグラウト材との境界部は密実に充填されていた。

3.7 有限要素解析による検証

3.7.1 解析方法

中空 PC ストランドの緊張によるプレストレス補強効果を実験結果と比較し検証するために、有限要素法解析ソフトウェア（ANSYS Workbench）を用いて解析を行った。作成した解析モデルを図-3.7.1 に示す。解析モデルは鉄筋コンクリート、グラウト材、中空 PC ストランドを 3D モデルで作成した。なお、解析モデルは引抜き実験で使用した供試体の 2 分の 1 サイズであり、 $200 \times 400 \times 1200 \text{mm}$ とした。有限要素解析に用いた材料物性を表-3.7.1 に示す。また、既往の研究から緊張材とグラウト材の付着による荷重伝達が行われているという結果を考慮して、緊張材とグラウト材が完全に接着しているモデルを採用した。なお、図-3.7.2(a) に示す XY 面は境界条件として固定されている。引抜き実験で使用した支圧板の位置には、図-3.7.2(b) に示す位置に Y 方向を固定する境界条件を定めた。引抜き荷重は図-3.7.1 の矢印の方向に負荷した。

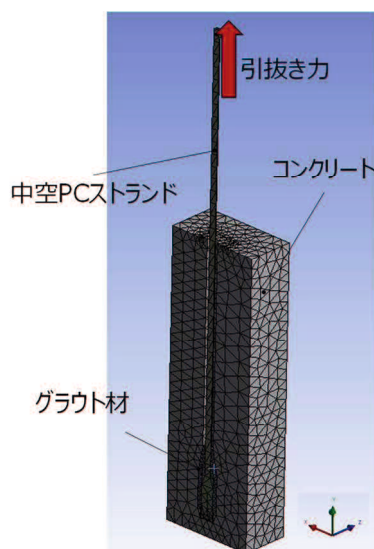
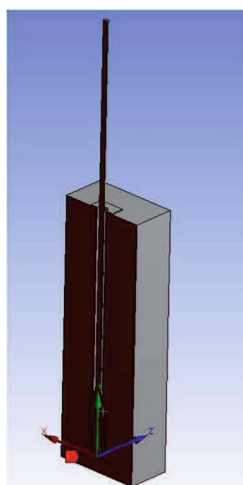


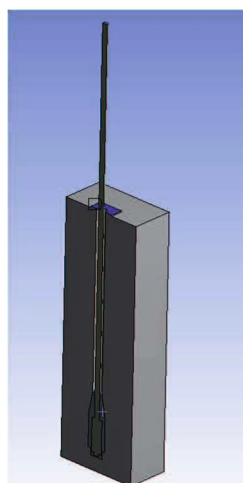
図-3.7.1 解析モデル（1/2 モデル）

表-3.7.1 有限要素解析に用いた材料物性

材料	静弾性係数	ポアソン比
コンクリート	25.3 GPa	0.20
中空 PC ストランド	183 GPa	0.30
グラウト材（Type F）	21.8 GPa	0.26



(a) 側面



(b) 支圧板

図-3.7.2 境界条件

3.7.2 解析結果および考察

図-3.7.3 に荷重 $0.6P_u$ (352.7kN) を与えたときのコンクリートの軸方向ひずみ分布を示す。図には、引抜き実験によりコンクリートの両側面から観測された実測値と有限要素解析から得られた解析値を示している。その結果、同定パラメータを用いた解析値は引抜き実験から得られた結果とよく一致した。また、実験結果と同様に内部くさびの先端から45度方向へコンクリート表面まで達した位置でピーク値 (59.8×10^{-6}) を示し、その後供試体の下端から500~600mmの範囲で安定したひずみ分布が得られた。

図-3.7.4 は荷重が $0.6P_u$ (352.7kN) の時点におけるコンクリート表面の周方向ひずみについて実験と解析結果を示す。周方向ひずみ分布においても実験結果と比べて概ね同じ解析結果が得られた。また、最大の周方向ひずみは 39.4×10^{-6} (実測値) および 42.3×10^{-6} (解析値) であり、これらのひずみから求めた引張応力は 1.0MPa (実測値) および 1.1MPa (解析値) である。二つの値ともコンクリートの割裂強度 (2.5MPa) と比べて小さい値であるため、実際の施工において本工法で導入されるプレストレス力のみによりコンクリート部材が割裂破壊に至ることは無いものと考えられる。

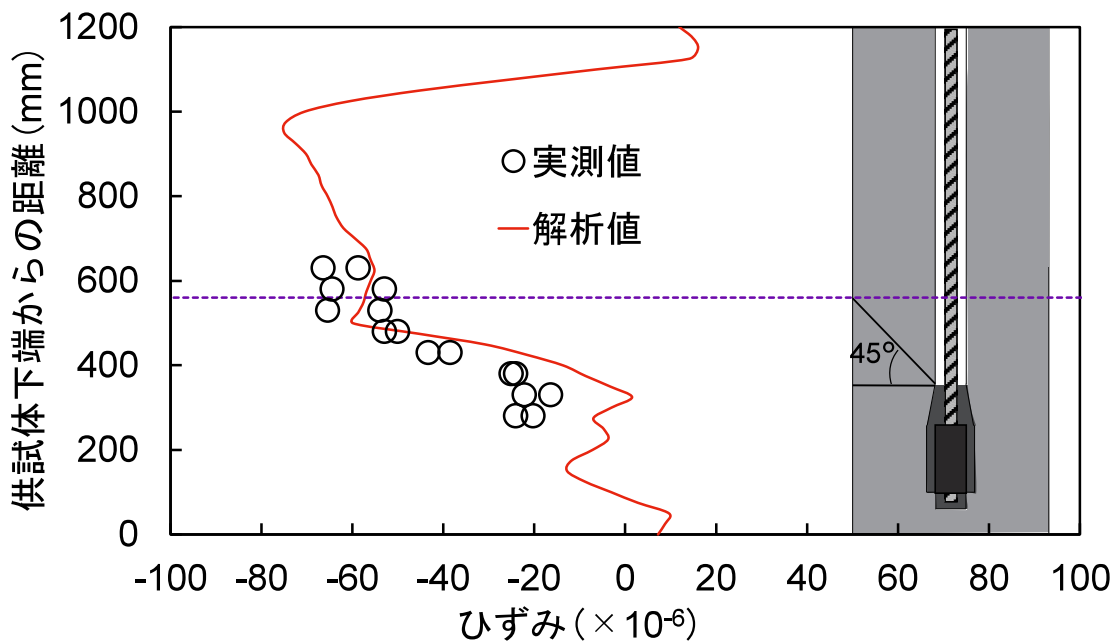


図-3.7.3 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布（引抜き荷重 352.7kN 時点）

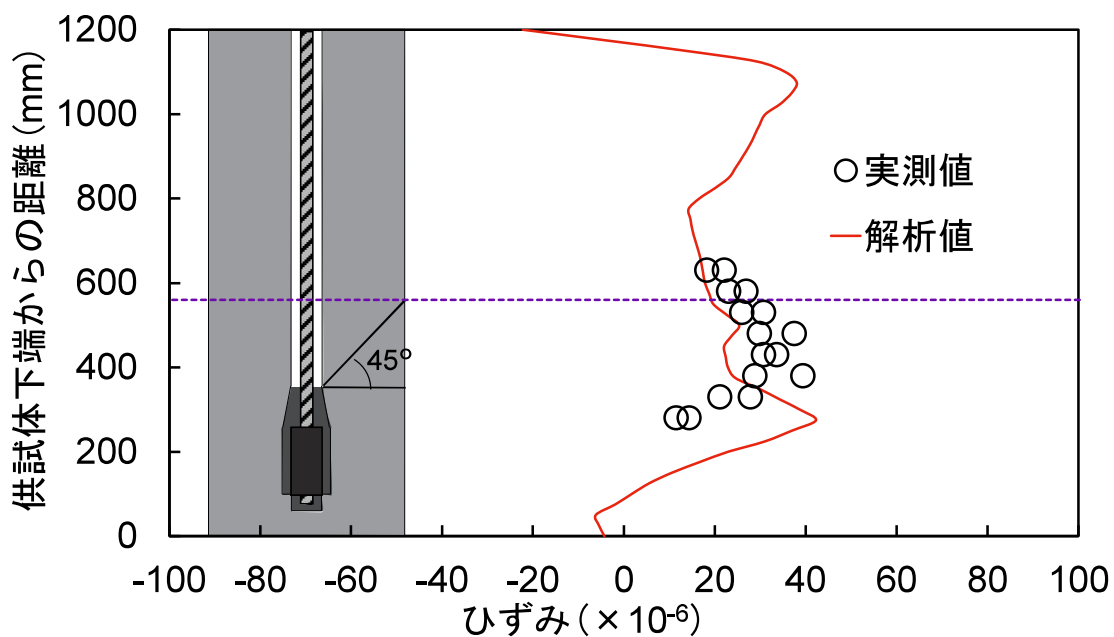


図-3.7.4 コンクリート表面の周方向ひずみ分布（引抜き荷重 352.7kN 時点）

3.7.3 まとめ

本項では、有限要素解析により、プレストレスの応力分布等の推定・検証を試みた。

検証結果では、有限要素解析と引抜き実験による軸方向および周方向ひずみ分布の結果はよく一致した。有限要素解析による軸方向ひずみ分布の結果、供試体の下端から500mm以上の範囲で安定したプレストレス力が導入できることが分かった。

3.8 第3章の参考文献

- Mimoto T., Sakaki T., Mihara T. and Yoshitake I. : Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members, *Engineering Structures*, Vol.124, pp.29-35, 2016a
- Mimoto T., Yoshitake I., Sakaki T. and Mihara T. : Full scale flexural test of jointed concrete members strengthened with post-tension tendons with internal anchorage, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.139-148, 2016b.
- 三原孝文, 三本竜彦, 児島大輔 : 固定定着体を有する既設構造物プレストレス導入工法の水平施工適用実験報告, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, pp445-448, 2015.
- 三原孝文, 三本竜彦, 倉富芳郎, 虻川真大, 吉武 勇 : 内的固定定着部を用いたポストテンション方式プレストレス導入工法の実構造物への適用と先端充填材に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.587-592, 2017.
- 土木学会, コンクリート標準示方書 [規準編], 2018.

第4章 小径緊張材の適用性の検討

4.1 検討目的

Mimoto *et al.* [2016a ; 2016b] の先行研究では、PC 鋼棒 ($\phi 23\text{mm}$, B 種 1 号) を緊張材に使用した構造が検討されたが、この場合、圧縮強度 24MPa 以上のコンクリートで、部材寸法で 400mm 以上、緊張材までの縁端距離 200mm 以上が必要とされていた。

一方で、道路橋の床版や建築スラブ等の既設部材を対象とした場合に、部材寸法で、 $200\sim 300\text{mm}$ 程度を想定する必要がある。

そこで、本章では図-4.1.1 に示すように、コンクリート床版等の薄肉部材への本プレストレス補強工法の適用を想定し、PC 鋼棒 ($\phi 13\text{mm}$; B 種 1 号)、および PC 鋼棒 ($\phi 17\text{mm}$; B 種 1 号) の使用を検討する。本検討の目的は、それぞれの小径緊張材での最小部材厚さを調べることである。

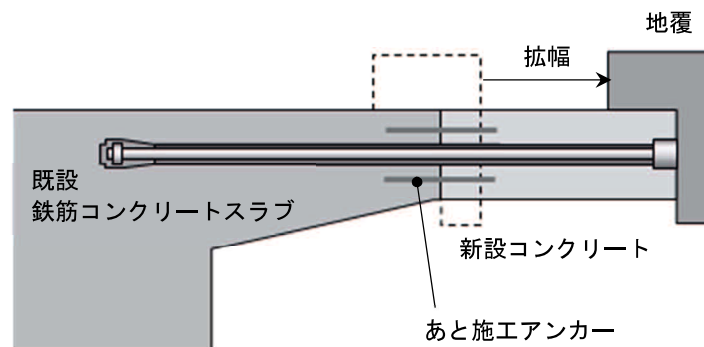


図-4.1.1 道路橋床版への適用例

4.2 検討方法

先行研究で適用性が実証された径 23mm に加えて、PC 鋼棒の径は、多様なものがある一般に用いられている B 種 1 号の PC 鋼棒径とその規格引張荷重を表-4.2.1 に示す。

しかし、床版に適用するためには、薄肉部材のなかで緊張材の規格引張荷重以上の定着性能を有する固定定着構造が必要である。そのためには、規格緊張材の小径化とともに、固定定着部をよりコンパクトにする必要がある。そこで、市場で一般的に使用されている $\phi 34.1\text{mm}$ (1-1/4in.) のコアドリル径を標準径として、可能な範囲で小型化した拡径削孔用の特殊ビットを製作した。拡径 34 mm~45mm の削孔形状とした。形状を図-4.2.1 に示す。

本検討では、要素試験として、この小型拡径ビットと小径緊張材の適合性を確認するために、実際に拡径削孔した 1 片が 150mm~250mm の小型コンクリートブロックでの定着実験を行った。

そのうえで、実物を想定し、水平方向への施工を模して緊張材を定着した実物大のコンクリートブロックを用いて引抜き試験を行い、その定着性能を調べた。

表-4.2.1 PC鋼棒の種類 (B種1号)

呼び名	径 (mm)	公称断面積(mm ²)	規格引張荷重(kN)
9.2 mm	9.2	66.48	71.8
11 mm	11.0	95.03	103
13 mm	13.0	132.7	144
17 mm	17.0	227.0	234
23 mm	23.0	415.5	449
26 mm	26.0	530.9	574
32 mm	32.0	804.2	869
36 mm	36.0	1018	1100
40 mm	40.0	1257	1360

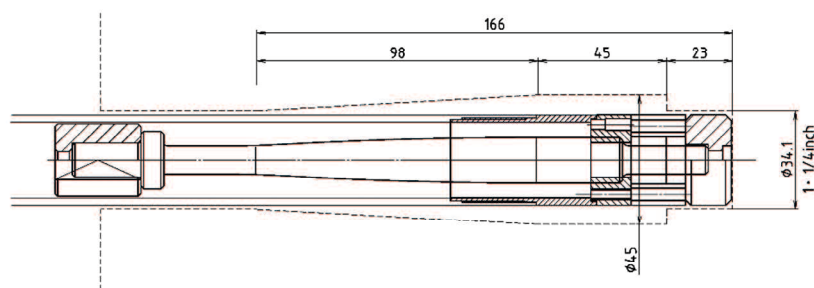


図-4.2.1 小径用拡径ビット(1-1/4inch用)

4.3 小径用拡張ビットを用いた緊張材の定着実験

4.3.1 実験概要

本実験では、断面寸法を変化させた小型コンクリートブロックに、今回製作した小径用拡張ビットを用いて削孔した後に定着したφ13mmとφ17mmのPC鋼棒に引抜き力を加えることで、固定定着構造の基礎的な定着耐力を調べた。

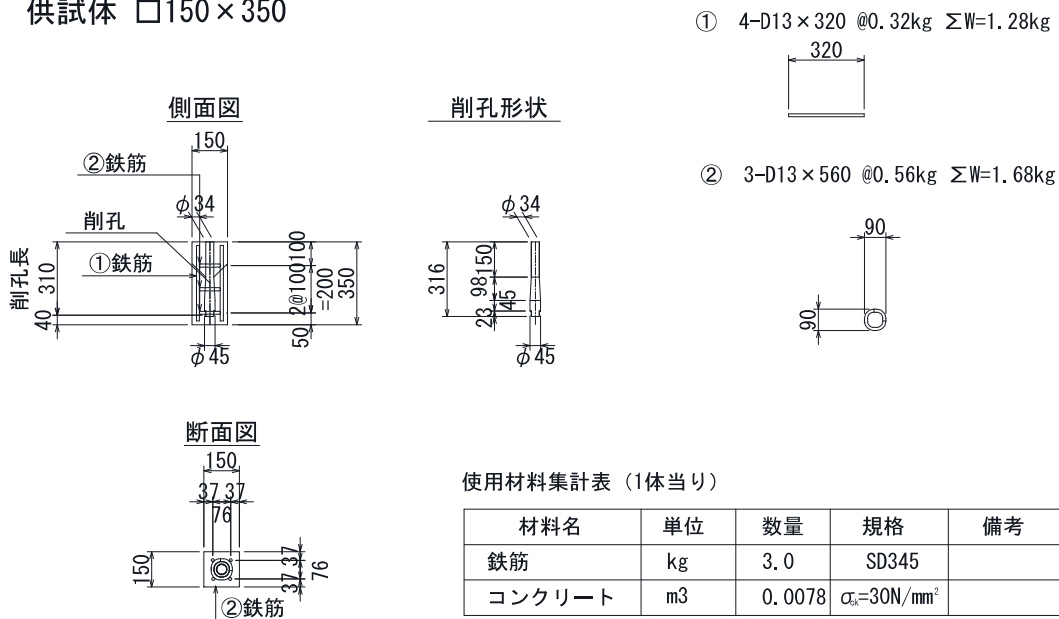
4.3.2 供試体

本研究では、基礎的実験の位置付けとして多様なケースについて検討するため、ケース毎に各1体のコンクリート製供試体を製作した。標準高さを350mmとしたうえで、1辺の断面寸法を150mm、200mm、250mmとした3タイプの小型供試体とした。供試体の配筋図を図-4.3.1に示す。実際の施工と同様にコンクリートの内部を拡張ビットにより削孔した。固定定着構造の詳細寸法を図-4.3.2に示す。

PC鋼棒の定着は、より確実に充填できる鉛直方向で実施し、充填材を先行で注入した後にPC鋼棒を挿入した。PC鋼棒を配置する際には、PC鋼棒が孔の中心に配置されるよう、孔口に提灯型のスペーサーを取り付けて挿入した。

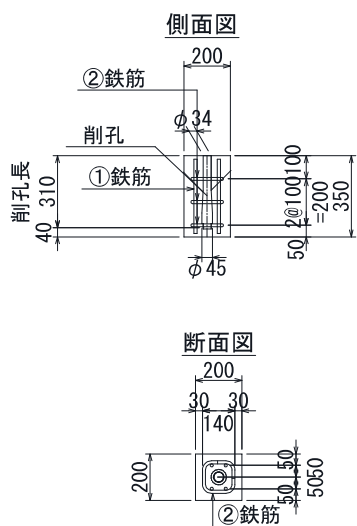
コンクリートの設計基準強度は30MPaとし、場所打ちのPC床版を想定した配合で製作した。供試体の製作に使用した材料の諸元とコンクリートの配合を表-4.3.1に示す。供試体は、断面形状と緊張材を変化させ計6体を作製した(表-4.3.2)。使用した充填材とコンクリートの材料特性を表-4.3.3に示す。また、供試体製作時の写真を図-4.3.4に示す。

供試体 □150×350

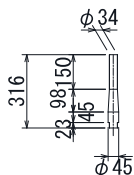


(a) □150mm タイプ

供試体 □200×350

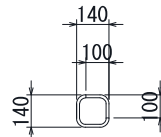


削孔形状



① 4-D13×320 @0.32kg ΣW=1.28kg

② 3-D13×760 @0.756kg ΣW=2.27kg

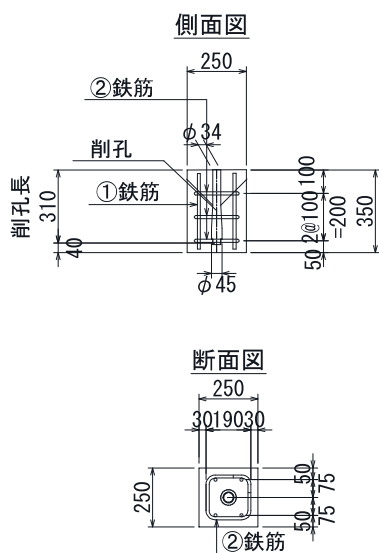


使用材料集計表 (1体当たり)

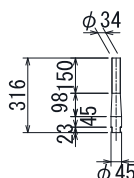
材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	3.65	SD345	
コンクリート	m ³	0.014	$\alpha_c=30\text{N/mm}^2$	

(b) □200mm タイプ

供試体 □250×350

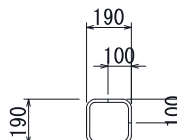


削孔形状



① 4-D13×320 @0.32kg ΣW=1.28kg

② 3-D13×960 @0.955kg ΣW=2.87kg



使用材料集計表 (1体当たり)

材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	4.15	SD345	
コンクリート	m ³	0.022	$\alpha_c=30\text{N/mm}^2$	

(c) □250mm タイプ

図-4.3.1 配筋図：単位 mm

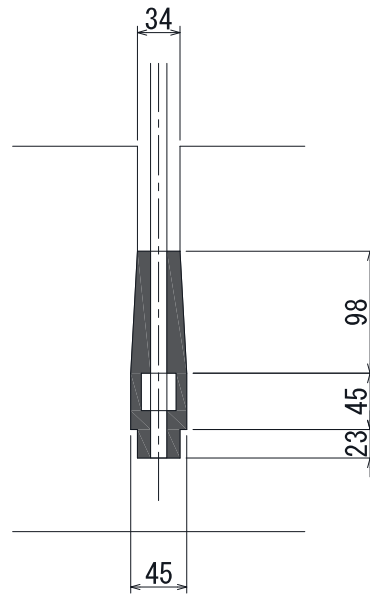


図-4.3.2 固定定着構造の寸法形状：単位 mm

表-4.3.1 供試体の使用材料およびコンクリート配合

使用材料	種類	密度	備考			
水 (W)	地下水	1.00g/cm ³				
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm ³				
粗骨材 (G)	砕石(広島県安芸高田産)	2.68g/cm ³	最大寸法：20mm			
細骨材 (S)	砕砂(広島県三次産)	2.64g/cm ³				
混和剤 (AD)	フローリック VP700	1.04g/cm ³	高性能減水剤			
W/C	S/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
53.0%	48.0%	175	330	887	978	1.16

表-4.3.2 供試体の製作数

緊張材		PC 鋼棒	
種別		φ 13	φ 17
規格荷重 *補償破断荷重		143.3 kN	245.2 kN
先端加工		リングナット式 L 30 mm	リングナット式 L 30 mm
断面寸法	□150	1 体	1 体
	□200	1 体	1 体
	□250	1 体	1 体

表-4.3.3 充填材およびコンクリートの材料特性

材料	フロー	スランプ	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
モルタル	132mm	N/A	116.1 MPa	39.2 GPa	0.23
コンクリート	N/A	80 mm	38.7.1 MPa	30.5 GPa	0.19



(a) 削孔



(b) 拡径ビット



(c) PC 鋼棒



(d) 充填材

図-4.3.3 供試体製作状況

4.3.3 実験方法

本実験での状況を図-4.3.4に示す。緊張端に設置した350kN型のセンターホールジャッキにより緊張する方法で、PC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) を超える引抜き力を負荷した。載荷ステップを表-4.3.5に示す。実際の施工材齢を想定し、固定定着部にグラウト材を充填してから10日目に荷重を載荷した。

センターホール型荷重計 (500kN) をジャッキ上面に設置して引抜き力を計測した。固定定着部におけるPC鋼棒のすべり量を調べるために、供試体底面とストランドの底面に変位計を設置し、その相対変位からすべり量を求めた。また、PC鋼棒の伸び変位はストランドの緊張端に取り付けた変位計の値からすべり量を差し引いて求めた。コンクリート外面には、荷重載荷により発生する応力を計測するために、長さ60mmのひずみゲージをPC鋼棒の軸方向および水平方向に貼付した。コンクリートのひずみゲージ設置位置を図-4.3.6に示す。

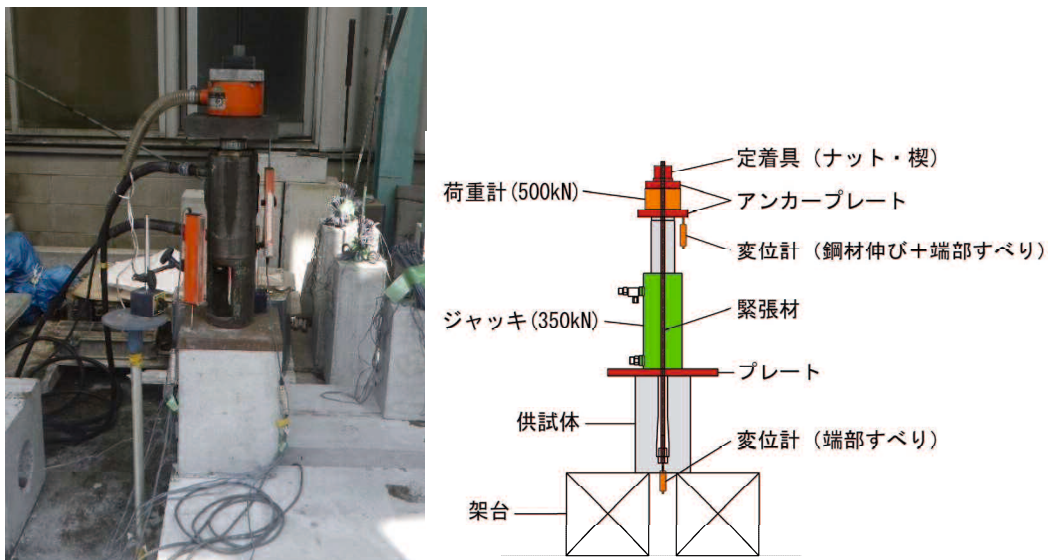


図-4.3.4 定着実験の状況

表-4.3.4 定着実験の载荷ステップ

荷重段階	荷重値 (kN)		
	φ 13	φ 17	
0	0	0	
0.15 <i>Pu</i>	21.5	36.8	
0.30 <i>Pu</i>	43.0	73.6	
0.45 <i>Pu</i>	64.5	110.3	
0.60 <i>Pu</i>	86.0	147.1	設計荷重時プレストレス力 導入直後プレストレス力 プレストレスング中のプレ ストレス力
0.70 <i>Pu</i>	100.3	171.6	
0.90 <i>Py</i>	111.1	190.0	
<i>Py</i>	123.4	211.1	規格降伏荷重
0.90 <i>Pu</i>	128.97	220.7	
0.95 <i>Pu</i>	136.1	232.9	
<i>Pu</i>	143.3	245.2	規格引張荷重

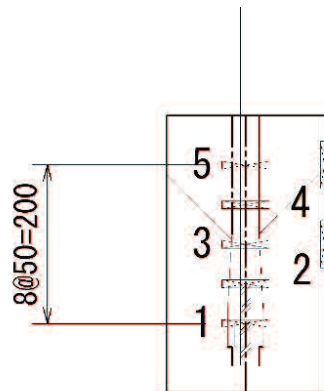


図-4.3.5 ひずみ計測位置

4.3.4 実験結果および考察

(1) 最大荷重

定着実験において計測した各供試体の最大引抜き荷重を表-4.3.5に示す。いずれの場合でもPC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) 以上の荷重を保持していた。また、最大荷重時点においても固定定着部およびコンクリートにひび割れ等の損傷は生じなかった。このことから、小型拡張ビットを使用して形成した固定定着構造がPC鋼棒の規格引張荷重以上の引抜き力に対して十分な定着耐力を有することが分かった。なお、実験の安全のために、コンクリート表面のひび割れを確認した直後に荷重を除荷した。

表-4.3.5 最大荷重

緊張材		PC 鋼棒	
種別		$\phi 13$	$\phi 17$
規格荷重		143.3 kN	245.2 kN
*補償破断荷重			
断面 寸法	$\square 150$	163.8 kN	259.2 kN (ひび割れ発生)
	$\square 200$	165.6 kN	269.5 kN
	$\square 250$	164.2 kN	269.3 kN

(2) 緊張材の伸びとすべり

1) PC 鋼棒 $\phi 13$

荷重-変位グラフを図-4.3.7(a)に示す。3体全ての供試体においてB種1号の規格荷重143.3kNまでは線形挙動を示しており、十分な引抜き耐力を有していることを確認した。規格荷重以降も载荷を継続したが、150kNを超えたところで降伏挙動を示したため、安全上の理由から载荷を終了した。なお最大荷重まで端部すべりは、発生しなかった。

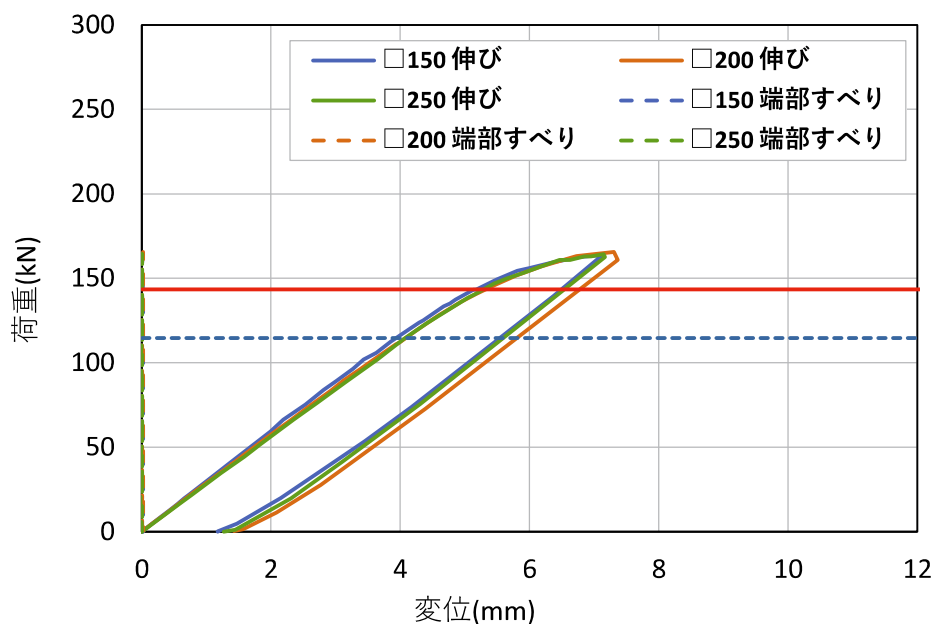
2) PC 鋼棒 $\phi 17$

同様に荷重-変位グラフを図-4.3.7(b)に示す。 $\square 200\text{mm}$ 、 $\square 250\text{mm}$ の供試体においては、B種1号の規格荷重245.2kNまでは、線形挙動を示し、十分な引抜き耐力を確認した。その後250kNを超えたところで降伏挙動が確認されたため载荷を終了した。一方、 $\square 150\text{mm}$ の供試験体においては、载荷荷重190kN付近で母材コンクリートに割裂ひび割れが発生した。この割裂ひび割れは、引抜き力に対して固定定着部が内部くさびとして機能した結果、母材コンクリートに周方向への応力が生じさせたことに起因している。

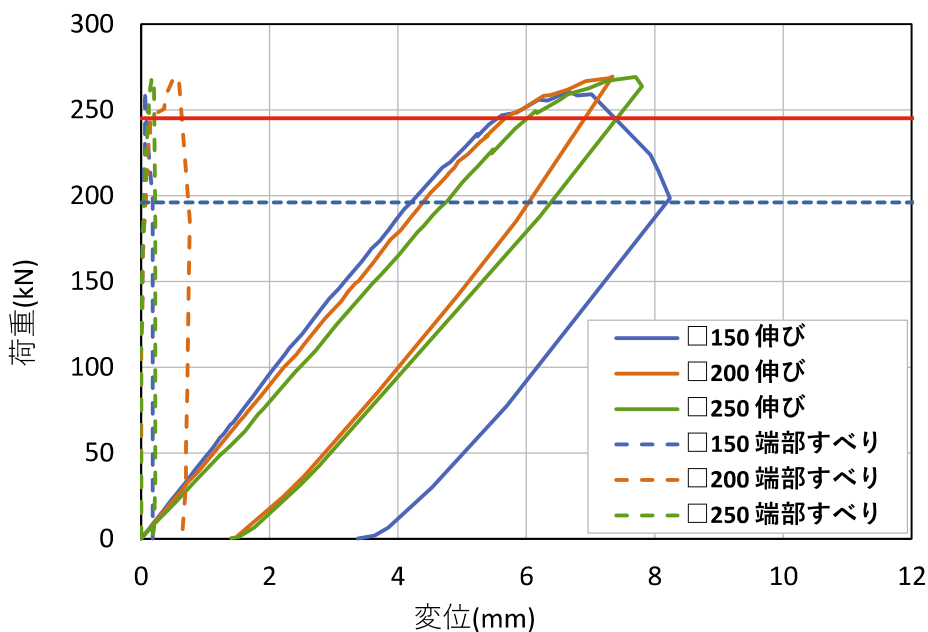
ひび割れ発生後も载荷を継続し、規格荷重までの载荷し試験を終了した。ひび割れの発生状況を図-4.3.8に示す。この結果から、 $\phi 17\text{mm}$ のPC鋼棒を用いる場合、少なく

とも 200mm 以上の部材厚さがあれば割裂ひび割れは生じないと判断される。

また、□150mm, 250mm 供試体では、緊張材の端部すべりは、ほとんど発生しなかったものの、□200mm 供試体では、最大荷重時に 0.68mm の端部すべりがみられた。ただし、実際の緊張時 (0.8*Pu* 相当) の端部すべりは、0.08mm と極めて小さく、2m の緊張材における影響は 1%未満で、ほぼ無視できるものと考えられる。



(a) 荷重—変位(φ 13mm)



(b) 荷重—変位(φ 17mm)

図-4.3.7 引抜き荷重と緊張材の伸び変形

図-4.3.8 ひび割れ発生状況 ($\phi 17\text{mm}$ $\square 150\text{mm}$)

4.3.5 まとめ

本項では、このプレストレス内部補強工法を薄肉部材にも適用できるようにコンクリートの必要部材厚さの基本を調べるとともに、新たに製作した小径拡張ビットとの適用性を確認するために定着実験を実施した。その結果、リングナット式のPC鋼棒（B種1号）の場合、対象部材のコンクリート強度が30MPa程度で、 $\phi 13\text{mm}$ では部材厚さ150mm～250mm、 $\phi 17\text{mm}$ では同200mm～250mmに適用できる可能性がある。

次項では、ここで得られた知見を基に、実施工を想定して製作した実大供試体を用いた引抜き実験結果について報告する。

4.4 小径緊張材の引抜き実験

4.4.1 実験概要

本実験では、実際の適用をふまえ、RC床版を想定した、圧縮強度 24MPa のコンクリートを用いたコンクリートブロックを使用した。実施工を模して定着したφ13mm とφ17mm の PC 鋼棒に引抜き力を与えることにより固定定着構造の定着耐力を調べた。

引抜き実験は、定着具の試験方法を定めた土木学会基準である JSCE-E-503「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法」[土木学会, 2018]における、定着具をコンクリートと組合わせた性能試験の方法を準用して実施した。

4.4.2 供試体

本実験では、試験ケース毎に3体のコンクリート製の実大供試体を製作した。前項での結果をふまえて、φ13mm の鋼棒では、断面 150×150mm, 200×200mm, φ17mm の鋼棒では、断面 200×200mm, φ250×250mm を試した。供試体配筋図を図-4.4.1 に示す。

実際の施工と同様にコンクリートの内部を拡張ビットにより削孔した。固定定着構造は、前項で示したものと同一形状を用いた。

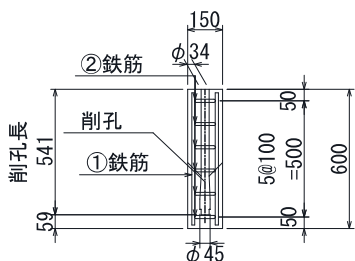
PC 鋼棒の定着は、実施工を想定した水平方向で実施し、充填材を先行で注入した後 PC 鋼棒を挿入した。PC 鋼棒を配置する際には、PC 鋼棒が孔の中心に配置されるよう、孔口に提灯型のスペーサーを取り付けて挿入した。

実際の施工と同じくダイヤモンドコアドリルを用いて削孔を行い、供試体を水平方向に配置した状態で充填材を注入し PC 鋼棒を固定定着した。供試体製作時の写真を図-4.4.2 に示す。

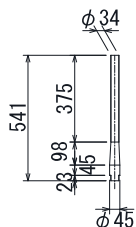
コンクリートの設計基準強度は 24MPa とし、劣化した既設補強部材を模擬するために比較的高い水セメント比 ($w/cm = 0.85$) の配合で作製した。供試体作製に使用した材料の諸元とコンクリートの配合を表-4.4.1 に示す。供試体は断面寸法を変化させた合計 12 体を製作した。使用した充填材とコンクリートの材料特性を表-4.4.2 に示す。

供試体 □150×600

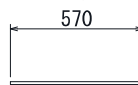
側面図



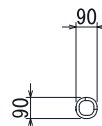
削孔形状



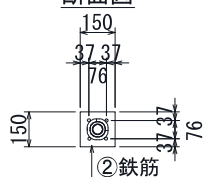
① 4-D13×570 @0.57kg ΣW=2.28kg



② 6-D13×560 @0.56kg ΣW=3.36kg



断面図



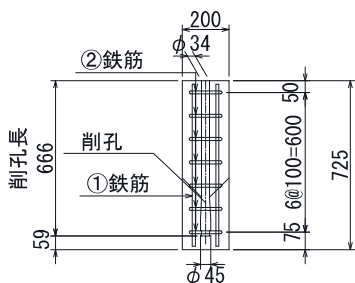
使用材料集計表 (1体当り)

材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	5.64	SD345	
コンクリート	m ³	0.014	α=24N/mm ²	

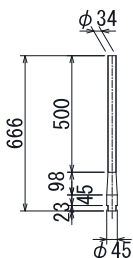
(a) □150 タイプ

供試体 □200×725

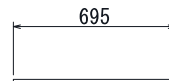
側面図



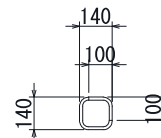
削孔形状



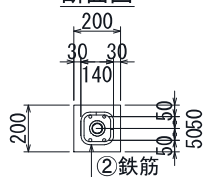
① 4-D13×695 @0.69kg ΣW=2.76kg



② 7-D13×760 @0.76kg ΣW=5.32kg



断面図

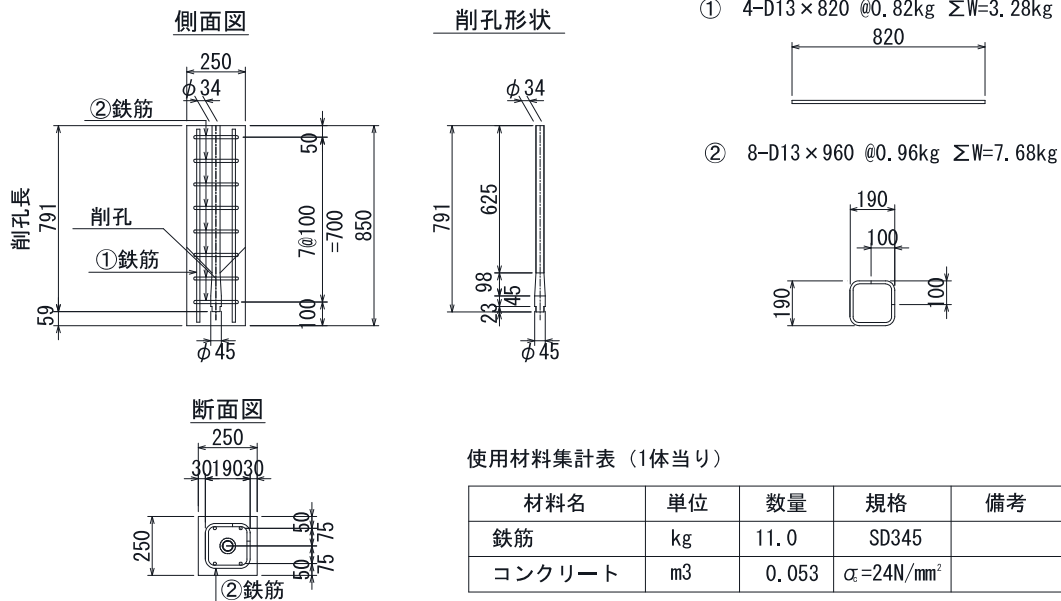


使用材料集計表 (1体当り)

材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	8.08	SD345	
コンクリート	m ³	0.029	α=24N/mm ²	

(b) □200 タイプ

供試体 □250×850

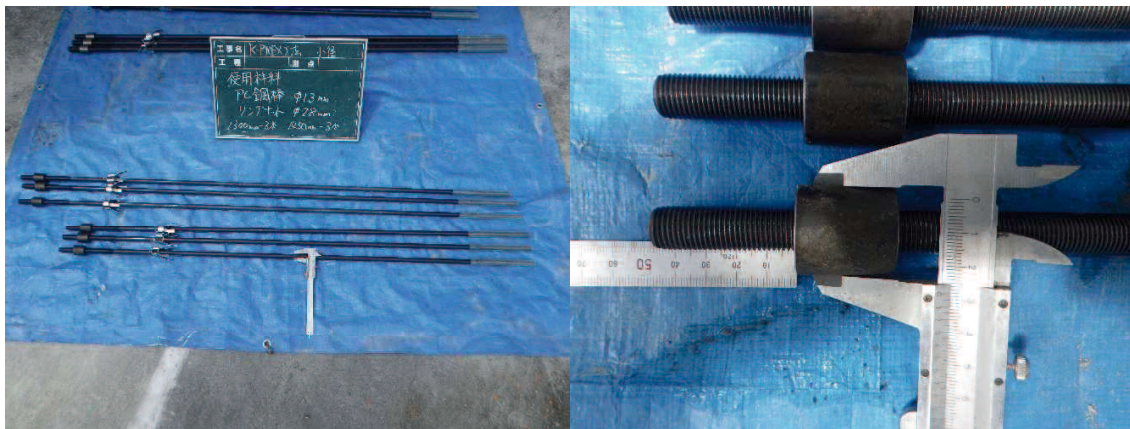


(c) □250 タイプ

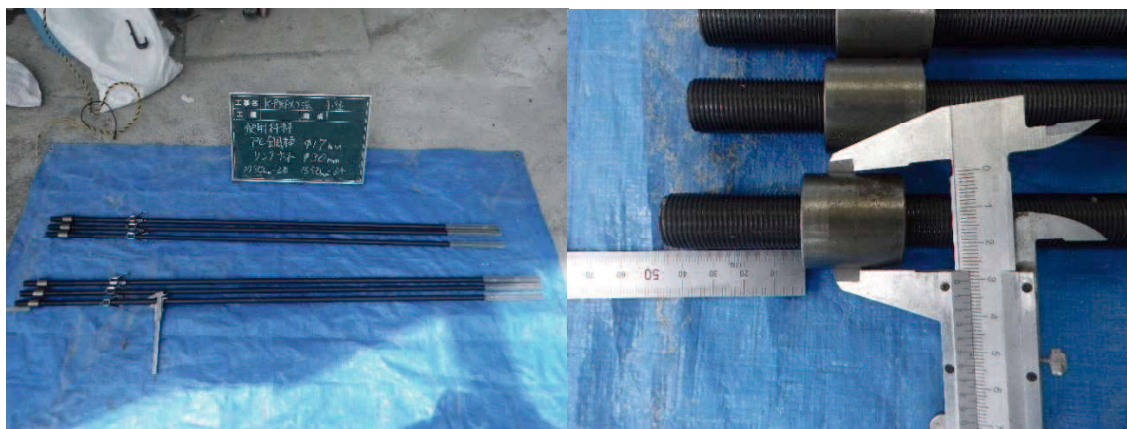
図-4.4.1 配筋図：単位 mm



(a) 削孔



(c) PC 鋼棒 $\phi 13\text{mm}$



(b) PC 鋼棒 $\phi 17\text{mm}$



(d) 緊張材の定着作業（水平方向）

図-4.4.2 供試体製作状況

表-4.4.1 供試体の使用材料およびコンクリート配合

使用材料	種類	密度	備考			
水 (W)	地下水	1.00g/cm ³				
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm ³				
粗骨材 (G)	砕石(広島県安芸高田産)	2.68g/cm ³	最大寸法：20mm			
細骨材 (S)	砕砂(広島県三次産)	2.64g/cm ³				
混和剤 (AD)	フローリック VP700	1.04g/cm ³	高性能減水剤			
W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
85.0%	52.0%	190	224	987	924	0

表-4.4.2 充填材およびコンクリートの材料特性

材料	フロー	スランプ	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
モルタル	125mm	N/A	127.7 MPa	42.2 GPa	0.24
コンクリート	N/A	80 mm	24.1 MPa	25.2 GPa	0.19

4.4.3 実験方法

本実験引抜き実験の状況を図-4.4.3に示す。緊張端に設置した350kN型のセンターホールジャッキにより緊張する方法で、PC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) である kN を超える引抜き力を負荷した。載荷ステップを表-4.4.3に示す。実際の施工材齢を想定し、固定定着部にグラウト材を充填してから10日目に荷重を載荷した。

センターホール型荷重計 (500kN) をジャッキ上面に設置して引抜き力を計測した。固定定着部におけるPC鋼棒のすべり量を調べるために、供試体底面とストランドの底面に変位計を設置し、その相対変位からすべり量を求めた。また、PC鋼棒の伸び変位はストランドの緊張端に取り付けた変位計の値からすべり量を差し引いて求めた。コンクリート外面には、荷重載荷により発生する応力を計測するために、長さ60mmのひずみゲージをPC鋼棒の軸方向および水平方向に貼付した。コンクリートのひずみゲージ設置位置を図-4.4.4に示す。

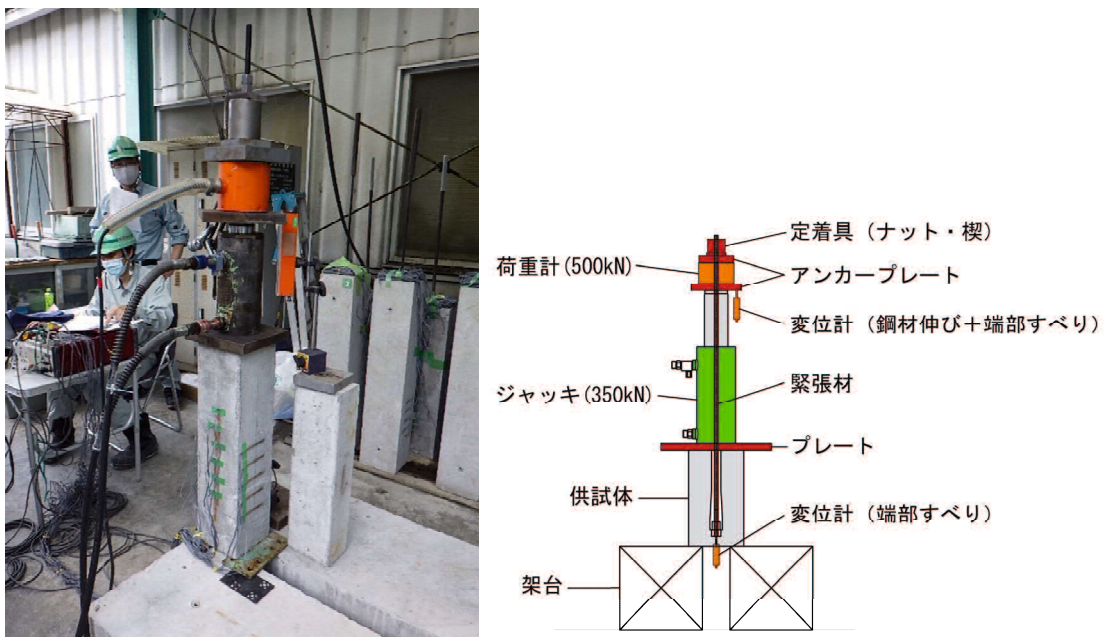


図-4.4.3 引抜き実験の状況

表-4.4.3 引抜き実験の荷重ステップ

荷重段階	荷重値(kN)		
	φ 13	φ 17	
0	0	0	
0.15 <i>Pu</i>	21.5	36.8	
0.30 <i>Pu</i>	43.0	73.6	
0.45 <i>Pu</i>	64.5	110.3	
0.60 <i>Pu</i>	86.0	147.1	設計荷重時プレストレス力 導入直後プレストレス力 プレストレッシング中のプレ レストレス力
0.70 <i>Pu</i>	100.3	171.6	
0.90 <i>Py</i>	111.1	190.0	
<i>Py</i>	123.4	211.1	規格降伏荷重
0.90 <i>Pu</i>	128.97	220.7	
0.95 <i>Pu</i>	136.1	232.9	
<i>Pu</i>	143.3	245.2	規格引張荷重

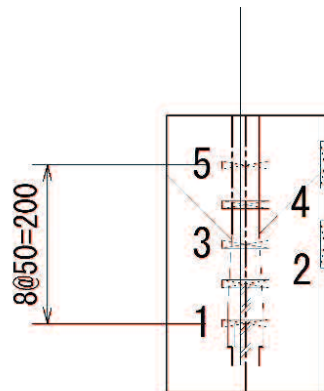


図-4.4.4 ひずみ計測位置

4.4.4 実験結果および考察

(1) 最大荷重

引抜き実験において計測した各供試体の最大引抜き荷重を表-4.4.4に示す。

φ13mmのPC鋼棒では、いずれの場合でもPC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) 以上の荷重を保持していた。また、最大荷重時点においても固定定着部およびコンクリートにひび割れ等の損傷は生じなかった。このことから、コンクリート強度が一般的なRC部材に用いる24MPa程度の場合では、1辺が150mm以上の断面寸法があれば、内部に形成した固定定着構造がPC鋼棒の規格引張荷重以上の引抜き力に対して十分な定着耐力を発揮することが分かった。なお、実験の安全のために、コンクリート表面のひび割れを確認した直後に荷重を除荷した。

一方、φ17mmのPC鋼棒では、1辺が250mm断面の場合は、PC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) 以上の荷重を保持していたが、1辺が200mm断面の場合は、PC鋼棒の規格引張荷重 (P_u) 以上の荷重を保持することができず、規格引張荷重の99%で母材コンクリートにひび割れが発生し、その後、荷重増加はみられなかった。このことから、コンクリート強度を一般的なRC部材に用いられている24MPa程度とした場合では、1辺が250mm以上の断面寸法があれば、内部に形成した固定定着構造がPC鋼棒の規格引張荷重以上の引抜き力に対して十分な定着耐力を発揮することが分かった。

表-4.4.4 最大引抜き荷重

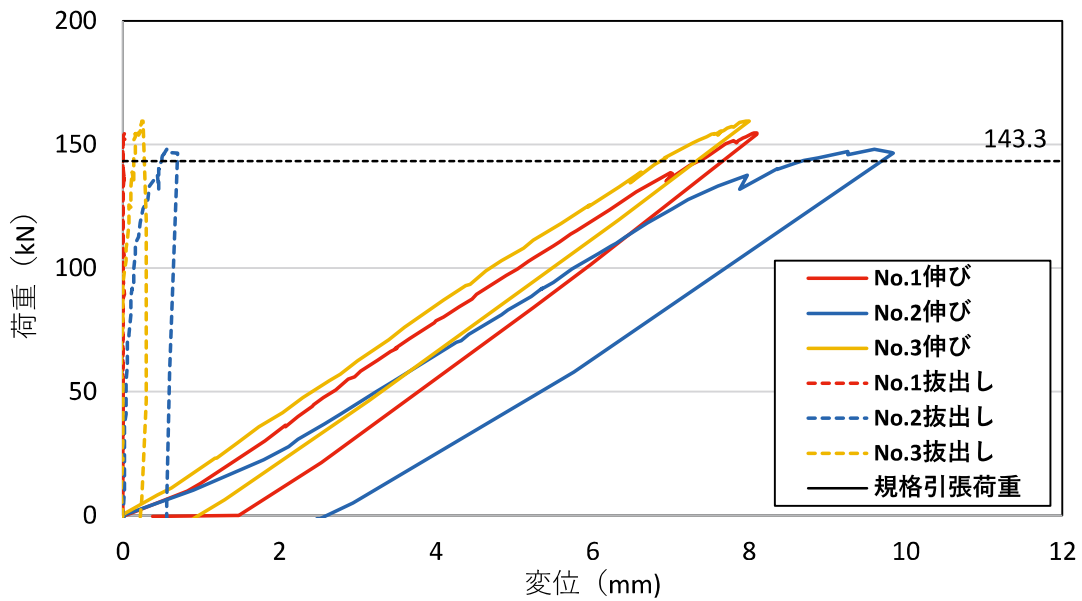
緊張材		PC鋼棒		
種別		φ13	φ17	
規格荷重 *補償破断荷重		143.3 kN	245.2 kN	
断面寸法	□150	1	155 kN	
		2	148 kN	
		3	160 kN	
	□200	1	156 kN	244 kN (母材ひび割れ)
		2	160 kN	245 kN (母材ひび割れ)
		3	160 kN	244 kN (母材ひび割れ)
	□250	1	—	273 kN
		2		270 kN
		3		268 kN

(2) 緊張材の伸びとすべり

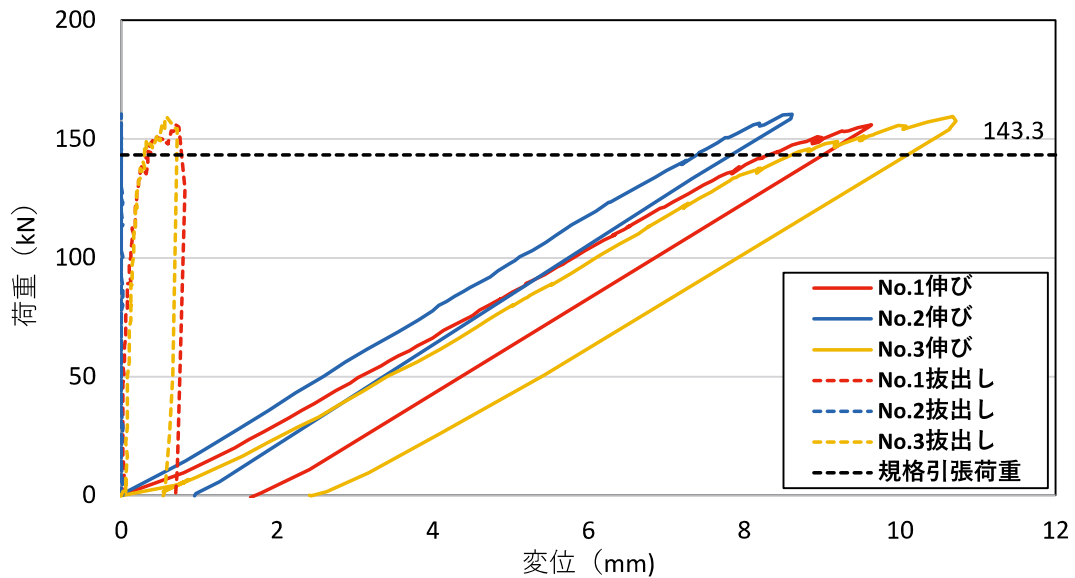
1) PC鋼棒φ13

荷重-変位グラフを図-4.4.5に示す。1辺が150mm, 200mmの断面形状において、各

3体全ての供試体で、B種1号の規格荷重143.3kNまでは線形挙動を示しており、十分な引抜き耐力を有していることを確認した。規格荷重以降も载荷を継続したが、150kNを超えたところで降伏挙動を示したため、安全上の理由から载荷を終了した。



(a) 荷重—変位(ϕ 13mm □150mm)

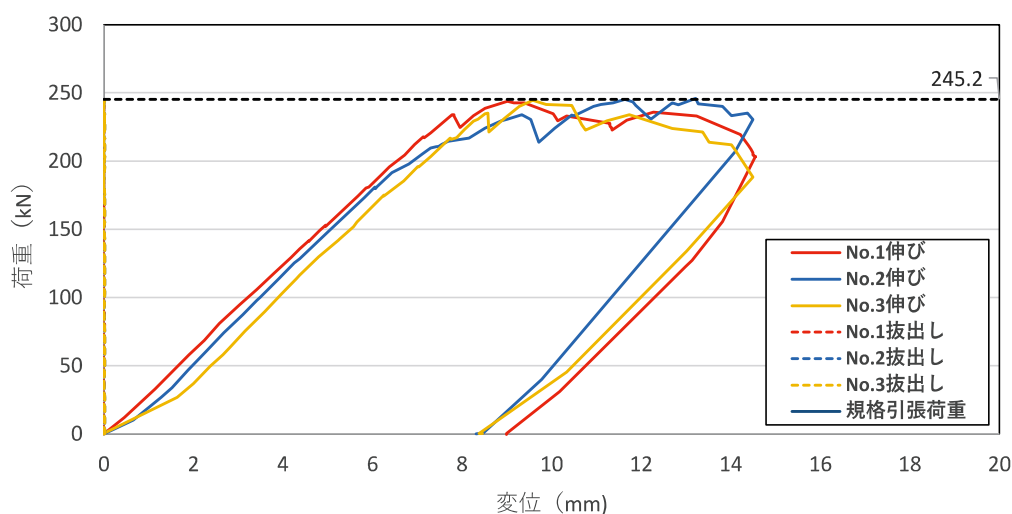


(b) 荷重—変位(ϕ 13mm □200mm)

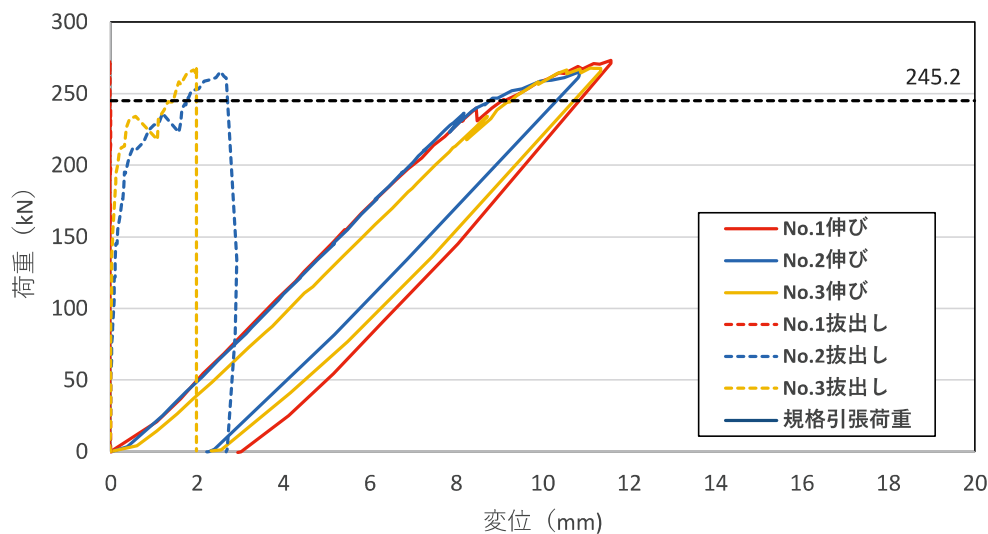
図-4.4.5 引抜き荷重と緊張材の伸び変形

2) PC 鋼棒 $\phi 17$

同様に荷重—変位グラフを図-4.4.6 に示す。1 辺が 250mm の供試体においては、B 種 1 号の規格荷重 245.2kN までは、線形挙動を示し、十分な引抜き耐力を確認した。その後 250kN を超えたところで降伏挙動が確認されたため載荷を終了した。一方、 $\square 200$ mm の供試験体においては、載荷荷重 245kN 付近で母材コンクリートに割裂ひび割れが発生した。ひび割れ発生後も載荷を継続し、規格荷重までの載荷し試験を終了した。ひび割れの発生状況を図-4.4.7 に示す。この結果から、 $\phi 17$ mm の PC 鋼棒を用いる場合、少なくとも 250mm 以上の部材厚さがあれば割裂ひび割れは生じないと判断された。



(a) 荷重—変位($\phi 17$ mm $\square 200$ mm)



(b) 荷重—変位($\phi 17$ mm $\square 250$ mm)

図-4.4.6 引抜き荷重と緊張材の伸び変形

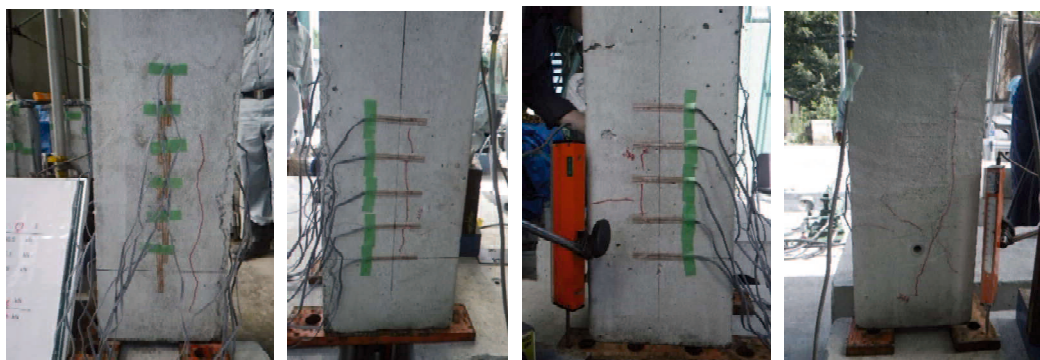


図-4.4.7 ひび割れ発生状況(φ17 □200)

4.4.5 まとめ

本項では、このプレストレス内部補強工法を薄肉部材に適用するために、実際のコンクリート物性および実施工を想定した、実大供試体を用いて引抜き試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) φ13mmPC 鋼棒 (B 種 1 号) では、母材のコンクリート強度が 24MPa 以上の場合で、1 辺 150mm 以上の部材に適用できる。
- (2) φ17mmPC 鋼棒 (B 種 1 号) では、母材のコンクリート強度が 24MPa 以上の場合で、1 辺 250mm 以上の部材に適用できる。

4.5 有限要素解析による検証

4.5.1 解析方法

小径 PC 鋼棒の緊張によるプレストレス補強効果を実験結果と比較し検証するために、有限要素法解析ソフトウェア（ANSYS Workbench）を用いて解析を行った。作成した解析モデルを図-4.5.1 に示す。解析モデルは鉄筋コンクリート、モルタル（先端部）、PC 鋼棒を 3D モデルで作成した。なお、解析モデルは引抜き実験で使用した供試体の 2 分の 1 サイズとした。有限要素解析に用いた材料物性を表-4.5.1 に示す。また、既往の研究から緊張材とモルタルの付着による荷重伝達が行われているという結果を考慮して、緊張材とモルタルが完全に接着しているモデルを採用した。なお、図-4.5.2(a) に示す XY 面は境界条件として固定されている。引抜き実験で使用した支圧板の位置には、図-4.5.2(b) に示す位置に Y 方向を固定する境界条件を定めた。引抜き荷重は図-4.5.1 の矢印の方向に負荷した。

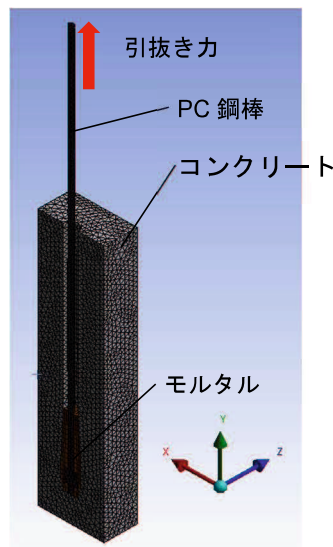
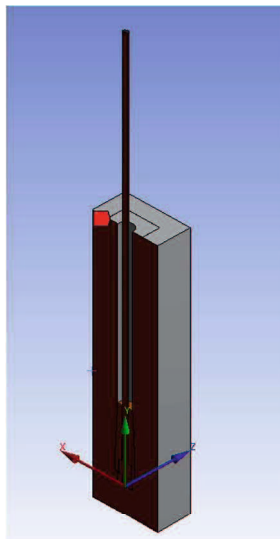


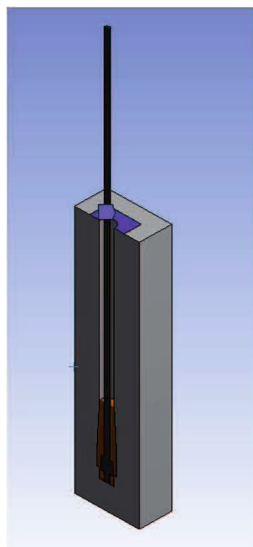
図-4.5.1 解析モデル（1/2 モデル）

表-4.5.1 有限要素解析に用いた材料物性

材料	静弾性係数	ポアソン比
コンクリート	25.0 GPa	0.19
PC 鋼棒	200 GPa	0.30
モルタル(先端部)	43.1 GPa	0.24



(a) 側面



(b) 支圧板

図-4.5.2 境界条件

4.5.2 解析結果および考察

(1)PC 鋼棒 $\phi 13$

図-4.5.3には、1辺が150mm断面の供試体に、荷重 $0.6Pu$ (86.0kN) を与えたときのコンクリートの軸方向ひずみ分布を示す。図には、引抜き実験によりコンクリートの両側面から観測された実測値と有限要素解析から得られた解析値を示している。その結果、同定パラメータを用いた解析値は引抜き実験から得られた結果と類似の傾向であった。また、実験結果と同様に内部くさびの先端から45度方向へコンクリート表面まで達した位置付近でピーク値 (82.5×10^{-6}) を示し、供試体の下端から250~350mmの範囲で安定したひずみ分布が得られた。

図-4.5.4には、1辺が150mm断面で荷重が $0.6Pu$ (86.0kN) の時点におけるコンクリート表面の周方向ひずみについて実験と解析結果を示す。周方向ひずみ分布においても実験結果と類似した傾向が得られた。また、最大の周方向ひずみは 37.2×10^{-6} (実測値) および 63.7×10^{-6} (解析値) であり、安全側の解析結果となっている。これらのひずみから求めた引張応力は 0.9MPa (実測値) および 1.6MPa (解析値) である。いずれの値ともコンクリートの割裂強度 (2.5MPa) と比べて小さい値であるため、実際の施工において本工法で導入されるプレストレスのみによりコンクリート部材が割裂破壊に至ることは無いものと考えられる。

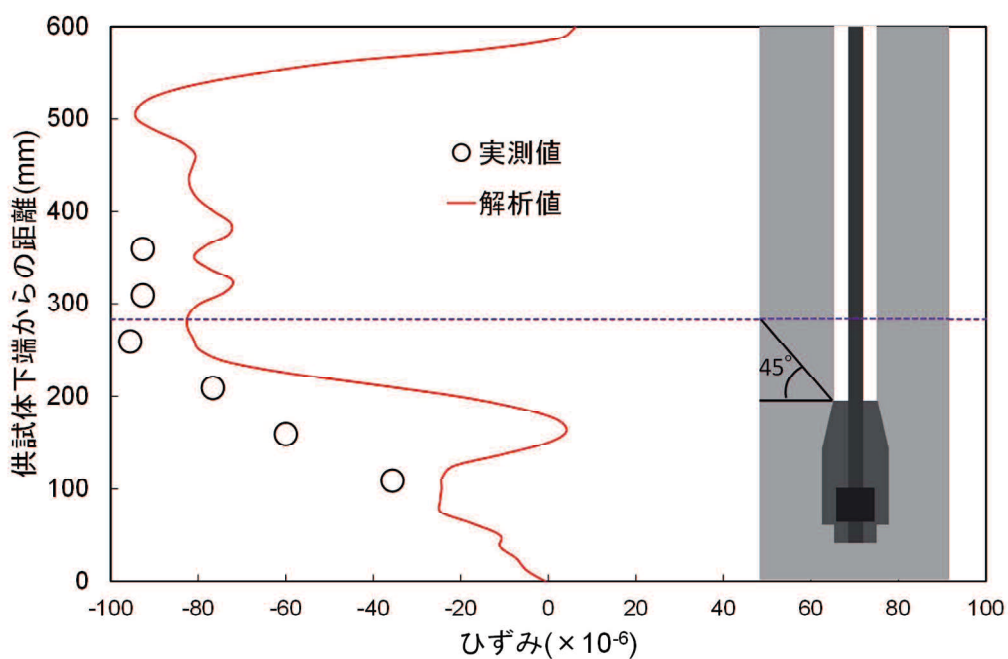


図-3.7.3 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布（引抜き荷重 86.0kN 時点）

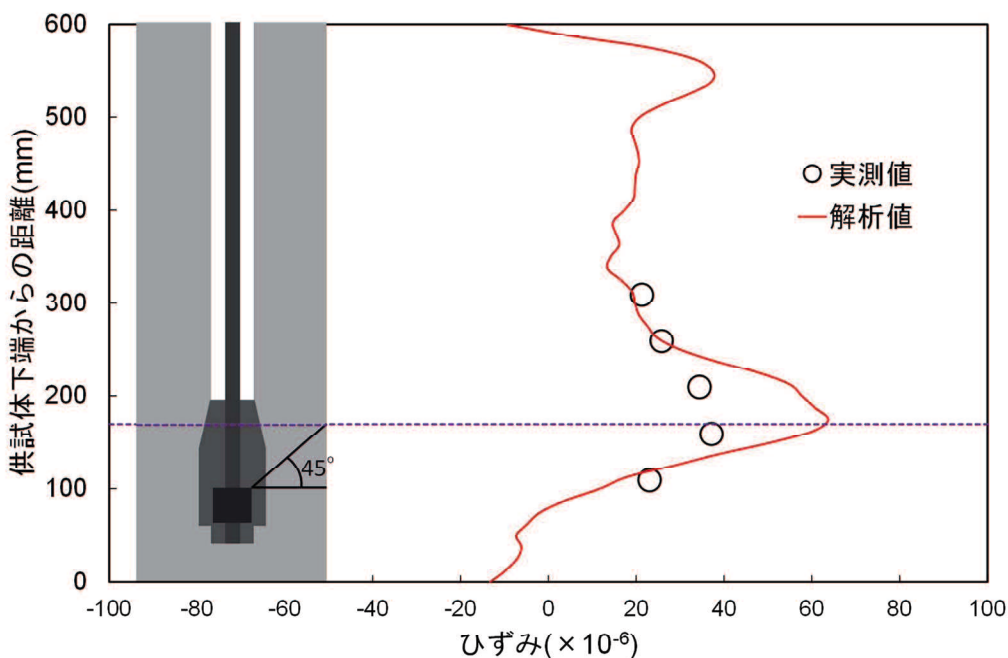


図-3.7.4 コンクリート表面の周方向ひずみ分布（引抜き荷重 86.0kN 時点）

(1)PC 鋼棒 $\phi 17$

図-4.5.4には、1辺が250mm断面の供試体に、荷重 $0.6Pu$ (147.1kN) を与えたときのコンクリートの軸方向ひずみ分布を示す。図には、引抜き実験によりコンクリートの両側面から観測された実測値と有限要素解析から得られた解析値を示している。その結果、同定パラメータを用いた解析値は引抜き実験から得られた結果と類似の傾向であった。また、実験結果と同様に内部くさびの先端から45度方向へコンクリート表面まで達した位置付近でピーク値 (59.7×10^{-6}) を示し、供試体の下端から300~400mmの範囲で安定したひずみ分布が得られた。

図-4.5.5には、1辺が250mm断面で荷重が $0.6Pu$ (147.1kN) の時点におけるコンクリート表面の周方向ひずみについて実験と解析結果を示す。周方向ひずみ分布においても実験結果と類似した傾向が得られた。また、最大の周方向ひずみは 32.7×10^{-6} (実測値) および 53.1×10^{-6} (解析値) であり、安全側の解析結果となっている。これらのひずみから求めた引張応力は 0.8MPa (実測値) および 1.3MPa (解析値) である。いずれの値ともコンクリートの割裂強度 (2.5MPa) と比べて小さい値であるため、実際の施工において本工法で導入されるプレストレス力のみによりコンクリート部材が割裂破壊に至ることは無いものと考えられる。

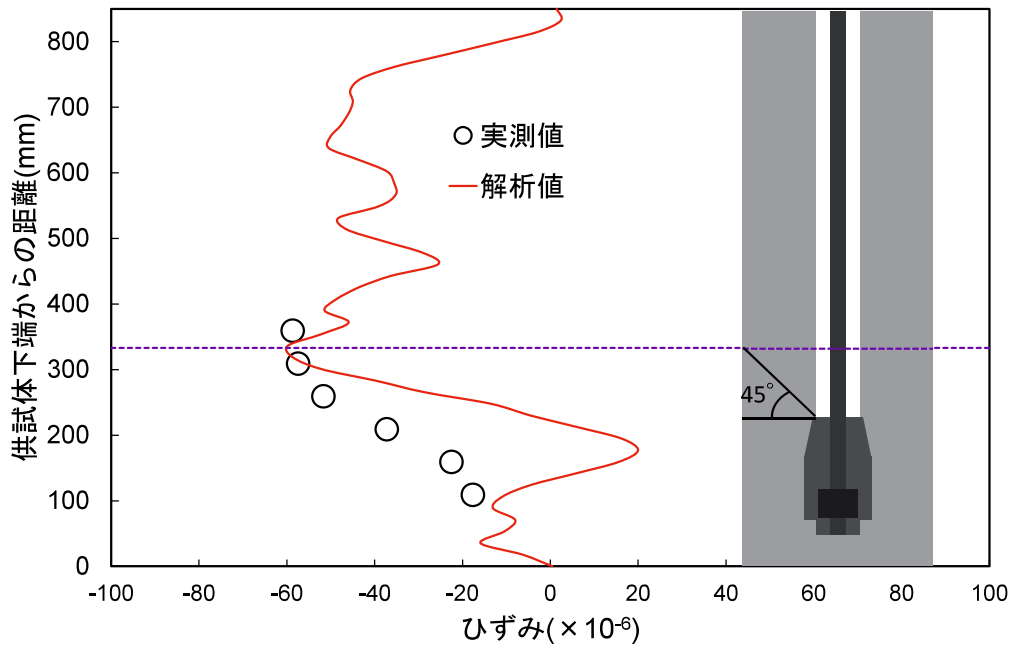


図-3.7.5 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布（引抜き荷重 147.1kN 時点）

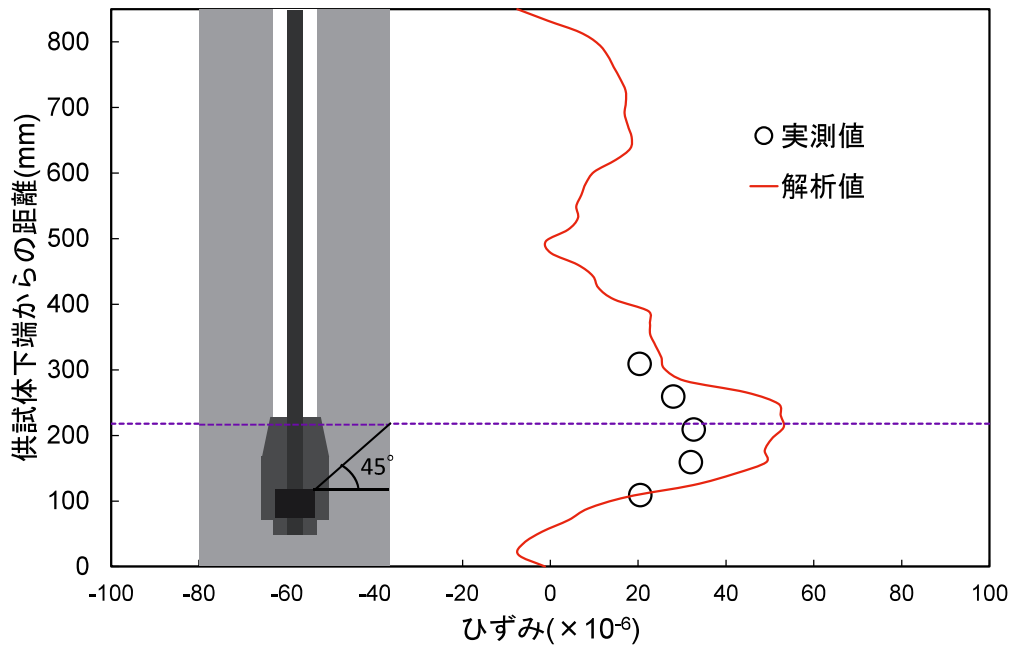


図-3.7.6 コンクリート表面の周方向ひずみ分布（引抜き荷重 147.1kN 時点）

4.5.3 まとめ

本項では、有限要素解析により、プレストレスの応力分布等の推定・検証を試みた。

検証結果では、有限要素解析と引抜き実験による軸方向および周方向ひずみ分布の結果は類似の挙動を示した。有限要素解析による軸方向ひずみ分布の結果、 $\phi 13\text{mm}$ 鋼棒で1辺が150mm 供試体の場合で、下端から250mm 以上の範囲で、 $\phi 17\text{mm}$ 鋼棒で1辺が250mm 供試体の場合で、下端から300mm 以上範囲で、それぞれ安定したプレストレスが導入できることが分かった。

4.6 第4章の参考文献

- Mimoto T., Sakaki T., Mihara T. and Yoshitake I. : Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members, *Engineering Structures*, Vol.124, pp.29-35, 2016a.
- Mimoto T., Yoshitake I., Sakaki T. and Mihara T. : Full scale flexural test of jointed concrete members strengthened with post-tension tendons with internal anchorage, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.139-148, 2016b.
- 土木学会, コンクリート標準示方書 [規準編], 2018.

第5章 炭素繊維複合ケーブル緊張材の適用性の検討

5.1 検討目的

Mimoto *et al.* [2016a ; 2016b] の先行研究では、PC 鋼棒（ $\phi 23\text{mm}$ ，B 種 1 号）を緊張材に使用した構造が検討されたが、補強が必要とされる既設構造物のなかには、その過酷な劣化環境により、既に高濃度の塩化物イオンが供給されている構造物や、コンクリート内部の深い位置にまで中性化が進行している構造物等も想定される。こうした構造物では、内部に配置した補強材が経時とともに腐食してしまい、やがて補強効果が不十分となってしまうことが懸念される。そのため、以後の維持管理性から使用する緊張材にも高い耐久性が要求されることがある。

そこで、本検討では図-5.1.1 に示すように、第4章と同じくコンクリート床版等の薄肉部材を対象として、さらに塩害環境での本プレストレス補強工法の適用を想定し、高い強度と優れた防食性能を持つ炭素繊維複合ケーブル緊張材の使用を検討する。本検討の目的は、炭素繊維複合ケーブル緊張材の薄肉部材への適用性を検証するとともに、内部定着構造に用いる際の緊張材先端加工方法を選定することである。

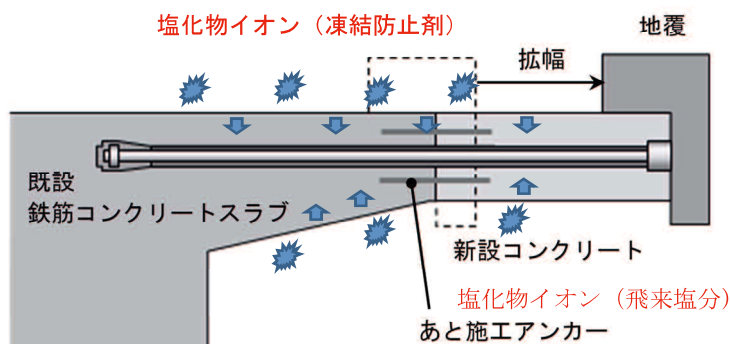


図-5.1.1 道路橋床版への適用例（塩害環境）

5.2 炭素繊維複合ケーブル緊張材の特徴

炭素繊維複合ケーブル緊張材は、炭素繊維とエポキシ樹脂を複合化し、より合わせて形成したケーブルで、高強度、高弾性、軽量、高耐食性、非磁性、低線膨張などの炭素繊維補強材としての特長を有する（図-5.2.1）。その特長から海岸地域の PC 床版やコンクリート部材の補強筋、かぶりが不要となることから超薄肉の板製作等に用いられており、緊張材の仕様も多数整備されている（表-5.2.1）。

本実験で使用する炭素繊維複合ケーブル緊張材は、前章で示した、薄肉部材への適用を想定し、 $\phi 13\text{mm}$ ～ $\phi 17\text{mm}$ の PC 鋼棒と同程度の径と耐力を有する、呼び名 10.5 ϕ （直径：10.5mm，保証破断荷重：141kN），12.5 ϕ （直径：12.5mm，保証破断荷重 184kN）を選定した。いずれのケーブルも芯材とその外周を取り囲むように配置された計 7 本の素線で構成されたより線構造となっている。また、より線構造のため、炭素繊維ロッドに比べると、その可撓性により狭隘な作業スペースへの挿入が容易となることは勿論、緊張材表面の凹凸によりコンクリートやモルタルとの付着性が高いため、炭素繊維複合ケーブル緊張材を検討した。

本章で使用した炭素繊維複合ケーブル緊張材の諸元を表-5.2.2 に示す。

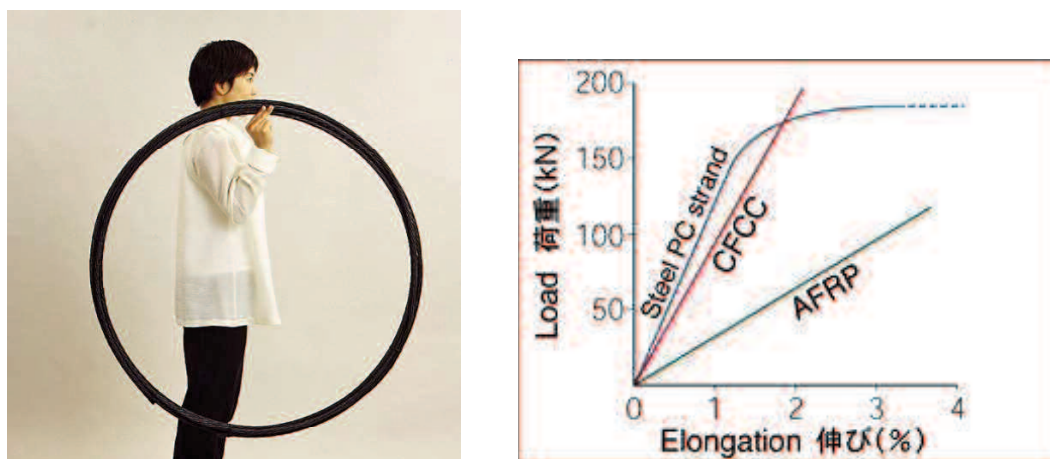



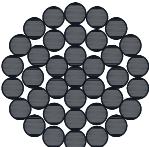


図-5.2.1 炭素繊維複合ケーブル緊張材の特長
〔東京製綱インターナショナル株式会社，2020〕

表-5.2.1 炭素繊維複合ケーブル緊張材の標準仕様

呼び名	径 (mm)	有効断面積 (mm ²)	保証破断荷重 (kN)	
 U	5.0 φ	5.0	15.9	38
 1×7	7.5 φ	7.5	31.1	76
	10.5 φ	10.5	57.8	141
	12.5 φ	12.5	76.0	184
	15.2 φ	15.2	115.6	270
	17.2 φ	17.2	151.1	385
	19.3 φ	19.3	186.7	445
 1×19	20.5 φ	20.5	206.2	316
	25.5 φ	25.5	304.7	467
	28.5 φ	28.5	401.0	594
 1×37	35.5 φ	35.5	591.2	841
	40.0 φ	40.0	798.7	1,200

※2019年8月時点

表-5.2.2 緊張材の材料諸元

呼び名	10.5 φ	12.5 φ
直径	10.5 mm	12.5 mm
静弾性係数	155 GPa	155 GPa
降伏荷重	N/A	N/A
保証破断荷重	141 kN 以上	184 kN 以上
単位長さ質量	111g/m	145g/m

※2019年8月時点

5.3 炭素繊維複合ケーブル緊張材の定着実験

5.3.1 実験概要

本実験では、断面寸法を変化させた小型コンクリートブロックに、小径用拡径ビットを用いて削孔し、さらに先端加工方法を変えた 10.5φ と 12.5φ の炭素繊維複合ケーブル緊張材を定着した後に、緊張材を引抜くことにより、固定定着構造の基礎的な定着耐力を調べた。

5.3.2 緊張材先端部の加工方法

本工法において、緊張材と充填材が一体となり、引抜き力に抵抗するための緊張材先端部の加工は非常に重要な要素である。PC 鋼棒では、**図-5.3.1** に示すように緊張材の先端部をネジ切り加工し、そこにリングナット (L30mm) を装着する方法を採用しているほか、前述した中空ストランド緊張材では、鋼製スリーブを先端に圧着する方法を用いた。しかし、せん断方向からの直接的な外力に弱い炭素繊維複合ケーブル緊張材では、このようなネジ切り加工や、圧着加工に緊張材が切断し、適用が困難であった。

そこで、本実験では、先端ストランドを解いて房を形成する 2 種類 (一房-L140mm, 二房-L350mm) の解撚式と膨張材を内部充填したスリーブ式 (L300mm) を対象として検討を行った。それぞれの先端部加工について**図-5.3.2** に示す。

ここで、スリーブ式は、定着部の加工としては一般的ではあるが、鋼材を用いる必要があることに加えて、加工および設置に費用と時間を要する。一方、解撚式は、現場で容易に形成・加工が可能のため、実用的な方法の一つと考えられる。



図-5.3.1 PC 鋼棒の先端加工方法 (リングナット式)



(a) 解撚式（一房）



(b) 解撚式（二房）



(c) スリーブ式

図-5.3.2 炭素繊維複合ケーブル緊張材の先端加工方法

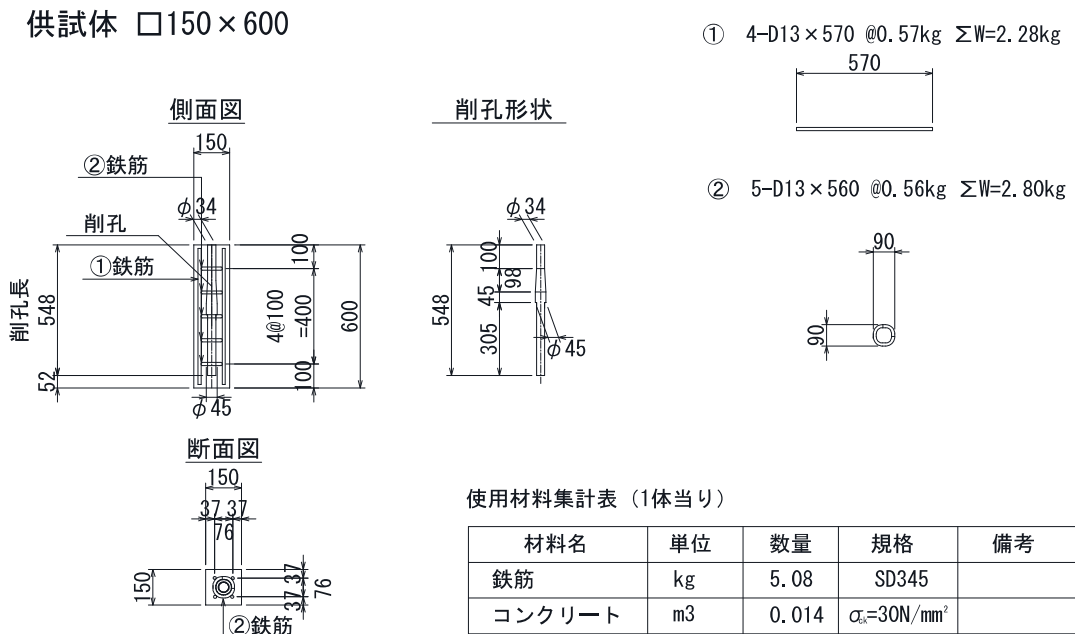
5.3.3 供試体

本研究では、基礎的実験の位置付けとして多様なケースについて検討するため、ケース毎に各1体のコンクリート製供試体を製作した。標準高さを600mmとしたうえで、1辺の断面寸法を150mm, 200mm, 250mmとした3タイプの小型供試体とした。供試体の配筋図を図-5.3.1に示す。

実際の施工と同様にコンクリートの内部を拡張ビットにより削孔した。固定定着構造の詳細寸法を図-5.3.2に示す。

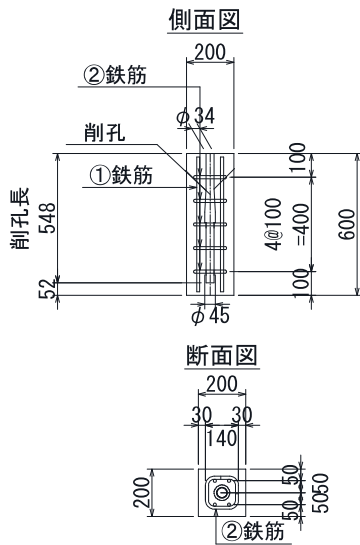
緊張材の定着は、より確実に充填できる鉛直方向で実施し、充填材を先行で注入した後に緊張材を挿入した。緊張材を配置する際には、緊張材が孔の中心に配置されるよう、孔口に提灯型のスペーサーを取り付けて挿入した。

コンクリートの設計基準強度は30MPaとし、場所打ちのPC床版を想定した配合で製作した。供試体の製作に使用した材料の諸元とコンクリートの配合を表-5.3.1に示す。供試体は、断面形状と緊張材を変化させ計6体を作製した(表-5.3.2)。使用した充填材とコンクリートの材料特性を表-5.3.3に示す。また、供試体製作時の写真を図-5.3.4に示す。

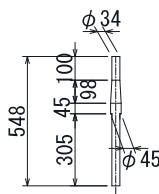


(a) □150mm タイプ

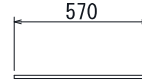
供試体 □200×600



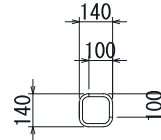
削孔形状



① 4-D13×570 @0.57kg ΣW=2.28kg



② 5-D13×760 @0.756kg ΣW=3.78kg

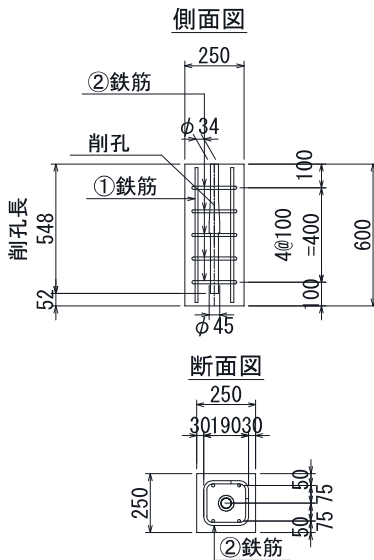


使用材料集計表 (1体当たり)

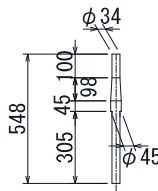
材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	6.06	SD345	
コンクリート	m ³	0.024	$\alpha_s=30\text{N}/\text{mm}^2$	

(b) □200mm タイプ

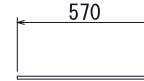
供試体 □250×600



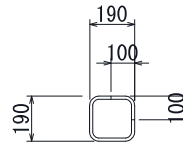
削孔形状



① 4-D13×570 @0.57kg ΣW=2.28kg



② 5-D13×960 @0.955kg ΣW=4.78kg



使用材料集計表 (1体当たり)

材料名	単位	数量	規格	備考
鉄筋	kg	7.06	SD345	
コンクリート	m ³	0.038	$\alpha_s=30\text{N}/\text{mm}^2$	

(c) □250mm タイプ

図-5.3.1 配筋図：単位 mm

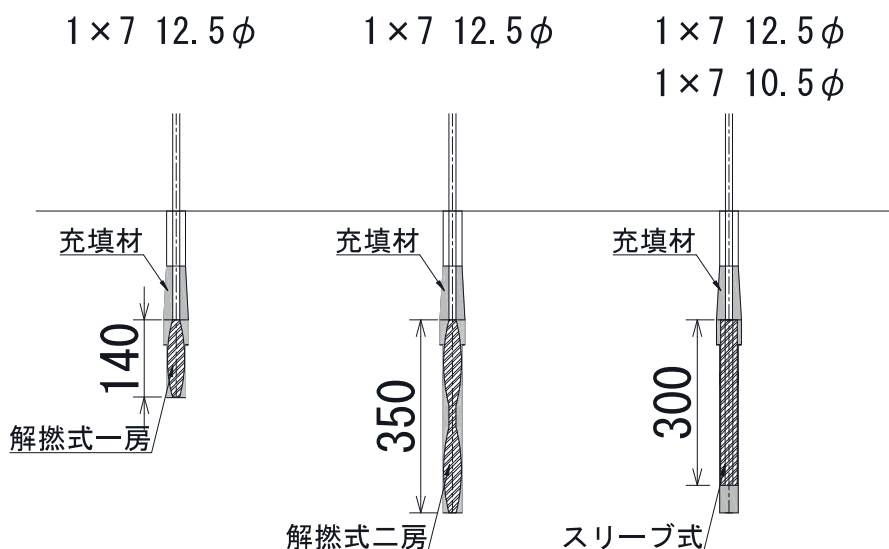


図-5.3.2 固定定着構造の寸法形状：単位 mm

表-5.3.1 供試体の使用材料およびコンクリート配合

使用材料	種類	密度	備考			
水 (W)	地下水	1.00g/cm ³				
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm ³				
粗骨材 (G)	砕石(広島県安芸高田産)	2.68g/cm ³	最大寸法：20mm			
細骨材 (S)	砕砂(広島県三次産)	2.64g/cm ³				
混和剤 (AD)	フローリック VP700	1.04g/cm ³	高性能減水剤			
W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
53.0%	48.0%	175	330	887	978	1.16

表-5.3.2 供試体の製作数

緊張材		炭素繊維複合材ケーブル			
種別		1×7-10.5φ	1×7-12.5φ		
保証破断荷重		141.0kN *	184.0kN *		
先端加工		スリーブ式 L300mm	解撚式一房 L140mm	解撚式二房 L350mm	スリーブ式 L300mm
断面寸法	□150	—	1体	—	1体
	□200	1体	1体	1体	1体
	□250	1体	1体	1体	1体

表-5.3.3 充填材およびコンクリートの材料特性

材料	フロー	スランプ	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
モルタル	132mm	N/A	116.1MPa	39.2GPa	0.23
コンクリート	N/A	80 mm	38.7.1MPa	30.5GPa	0.19



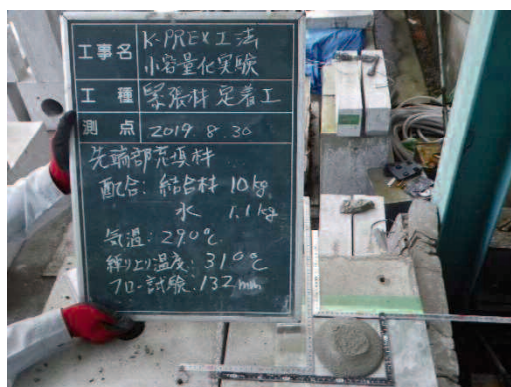
(a) 削孔



(b) 拡径ビット



(c) 炭素繊維複合材ケーブル



(d) 充填材

図-5.3.3 供試体製作状況

5.3.4 実験方法

定着実験の状況を図-5.3.4に示す。緊張端に設置した350kN型のセンターホールジャッキにより緊張する方法で、緊張材の保証破断荷重 (P_u) を超える引抜き力を負荷した。载荷ステップを表-5.3.5に示す。実際の施工材齢を想定し、固定定着部にグラウト材を充填してから10日目に荷重を载荷した。

センターホール型荷重計 (500kN) をジャッキ上面に設置して引抜き力を計測した。1×7-10.5φ スリーブ式については、固定定着部における緊張材のすべり量を調べるために、供試体底面とストランドの底面に変位計を設置し、その相対変位からすべり量を求めた。また、コンクリート外面には、荷重载荷により発生する応力を計測するために、長さ60mmのひずみゲージを緊張材の軸方向および水平方向に貼付した。コンクリートのひずみゲージ設置位置を図-5.3.5に示す。

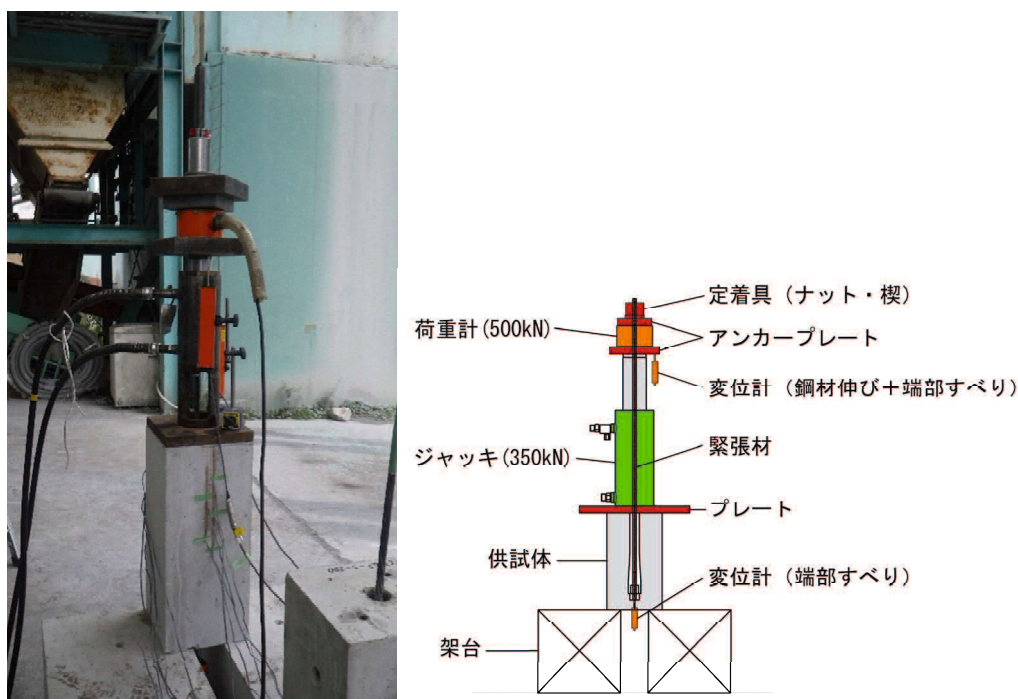


図-5.3.4 定着実験の状況

表-5.3.4 定着実験の载荷ステップ

荷重段階	荷重値(kN)		
	1×7-10.5 φ	1×7-12.5 φ	
0	0	0	
0.15 <i>Pu</i>	21.2	27.6	
0.30 <i>Pu</i>	42.3	55.2	
0.45 <i>Pu</i>	63.5	82.8	
0.60 <i>Pu</i>	84.6	110.4	設計荷重時プレストレス力
0.70 <i>Pu</i>	98.7	128.8	導入直後プレストレス力
0.90 <i>Py</i>	—	—	プレストレス中のプレストレス力
<i>Py</i>	—	—	規格降伏荷重
0.90 <i>Pu</i>	126.9	165.6	
0.95 <i>Pu</i>	134.0	174.8	
<i>Pu</i>	141	184	保証破断荷重

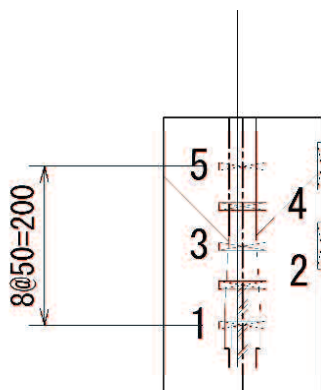


図-5.3.5 ひずみ計測位置

5.3.5 実験結果および考察

(1) 最大荷重

定着実験において計測した各供試体の最大引抜き荷重を表-5.3.5 に示す。いずれの場合でも炭素繊維複合ケーブル緊張材の保証破断荷重 (P_u) 以上の耐力を有していることを確認した。また、最大荷重時点においても固定定着部およびコンクリートにひび割れ等の損傷は生じなかった。次項でそれぞれのケースについて考察する。

なお、実験の安全のために、コンクリート表面のひび割れを確認した直後に荷重を除荷した。

表-5.3.5 最大荷重

緊張材		炭素繊維複合ケーブル緊張材			
種別		1×7-10.5φ	1×7-12.5φ		
保証破断荷重		141kN	184kN		
先端加工		スリーブ式 L300mm	解撚式一房 L140mm	解撚式二房 L350mm	スリーブ式 L300mm
断面寸法	□150	—	199.6kN	—	200.6kN
	□200	150.7kN	200.2kN	190.1kN	184.0kN (抜け出し発生)
	□250	151.3kN	200.2kN	200.4kN	200.2kN

(2) 緊張材の伸びと端部すべり

1) 1×7-10.5φスリーブ式

10.5φのスリーブを装着した炭素繊維複合ケーブル緊張材の荷重-変位グラフを図-5.3.6 に示す。いずれの試験においても保証破断荷重 141kN を超えても線形挙動を示しており、十分な引き抜き耐力を確認した。なお最大荷重まで端部すべりは、発生しなかった。

2) 1×7-12.5φスリーブ式

12.5φのスリーブを装着した炭素繊維複合ケーブル緊張材の荷重-変位グラフを図-5.3.7 に示す。□150mm, 250mm の供試体においては、保証破断荷重 184kN を超えても線形挙動を示し、十分な引抜き耐力を確認した。一方、□200mm の供試体では、荷重 110kN を超えたところで緊張材に約 2mm の伸びが突然発生し、荷重が 50%まで低減した。その後、再び荷重は増加し規格荷重まで載荷することができた。

試験後に、荷重が急減した原因を調べるため、固定定着部を切り出して内部の破損状況を確認した (図-5.3.8)。固定定着部の内部では、スリーブ部の不具合や充填材の圧壊等はみられなかったもののスリーブ端部に空隙が観察された。これは、先端部充填材

を注入後、緊張材先端部を孔内に配置する際に空気を巻き込み空隙が発生したものと推察する。スリーブ式は先端加工部の充実断面延長が長くなるため、拡径削孔部内への挿入が困難となるため注意が必要である。

3) 12.5φ 解撚式一房

解撚式炭素繊維複合ケーブル緊張材（一房）の荷重－変位グラフを図-5.3.9に示す。他の試験と同様に全ての供試体において保証破断荷重 184kN を超えても線形挙動を示した。最大荷重 200kN 程度と十分な引抜き耐力を確認した。この結果は、緊張材の先端加工として、解撚式一房でも十分な引抜き耐力を発現することを意味しており、現場で容易に形成・加工が可能のため、実用性に優れるものと考えられる。

4) 12.5φ 解撚式二房

解撚式炭素繊維複合材ケーブル（二房）の荷重－変位グラフを図-5.3.10に示す。一房でも十分な引抜き耐力を示した結果から推察されるように、二房においても保証破断荷重 184kN を十分に超過でき、優れた引抜き耐力を確認した。これらの結果より、解撚式一房でも先端加工として充分であることが分かった。

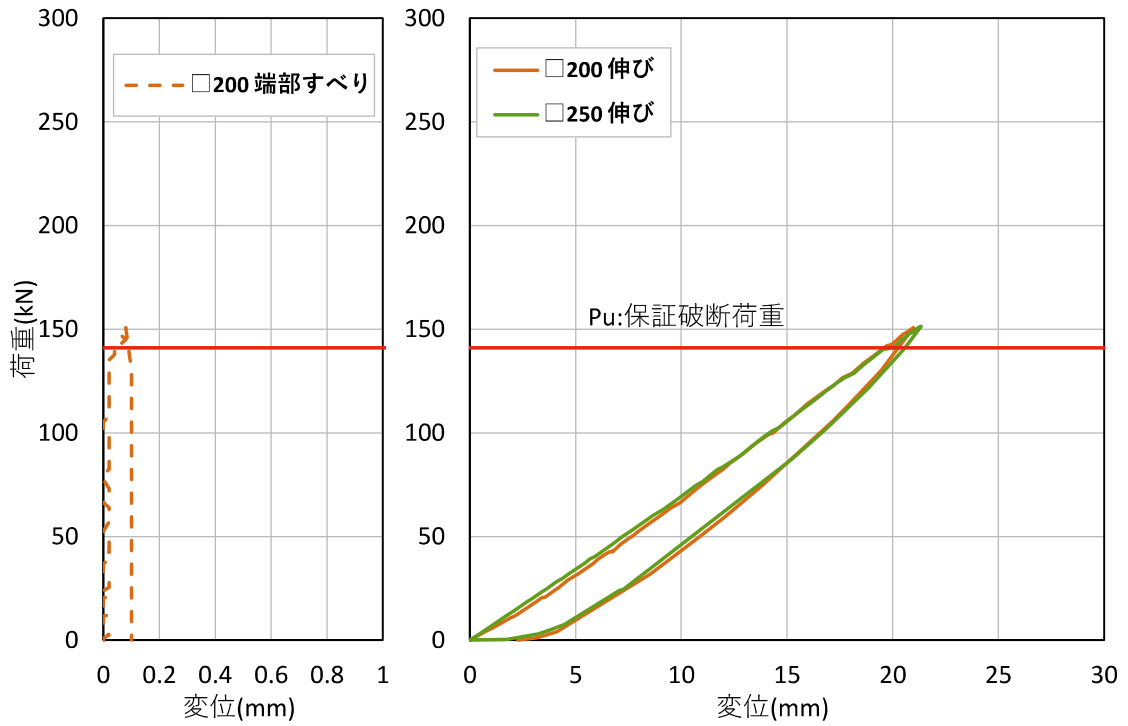


図-5. 3. 6 引抜き荷重と緊張材の伸び変形(1×7-10.5φスリーブ式)

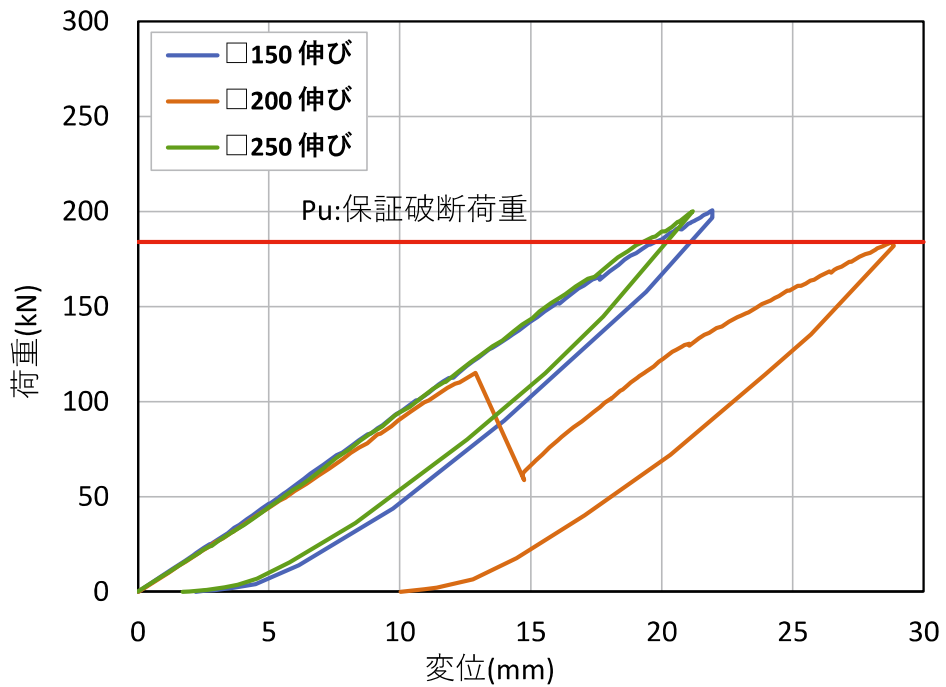


図-5. 3. 7 引抜き荷重と緊張材の伸び変形(1×7-12.5φスリーブ式)

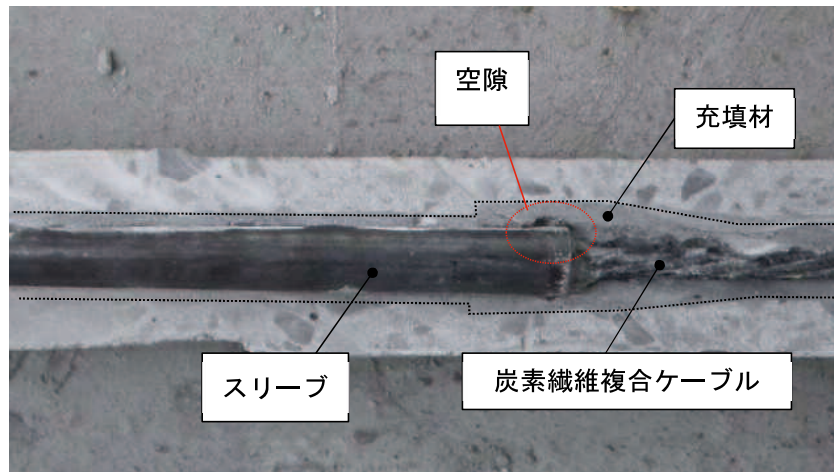


図-5.3.8 試験後の内部状況 (1×7-12.5φスリーブ式□200)

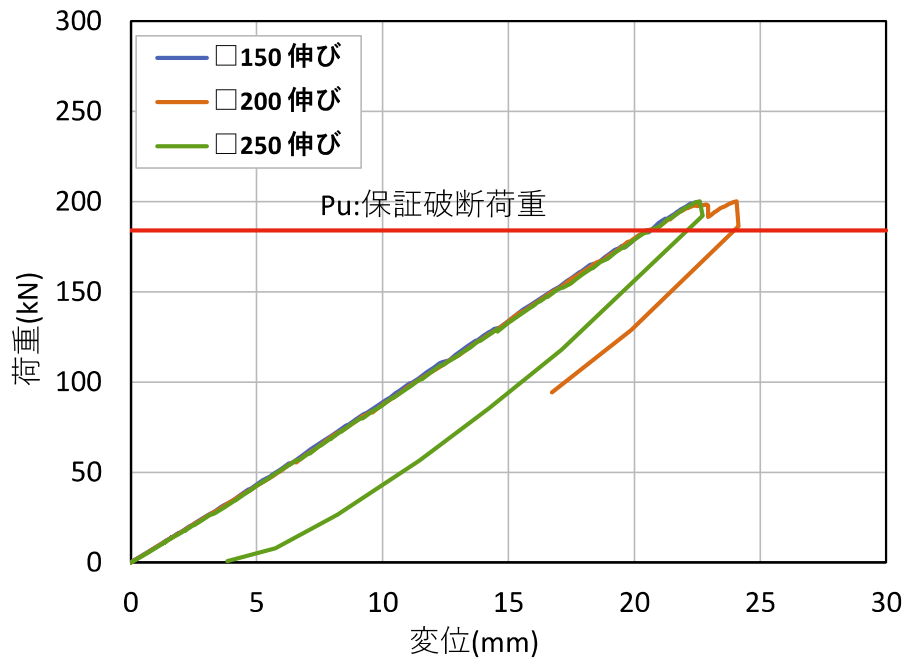


図-5.3.9 引抜き荷重と緊張材の伸び変形 (12.5φ解撚式一房)

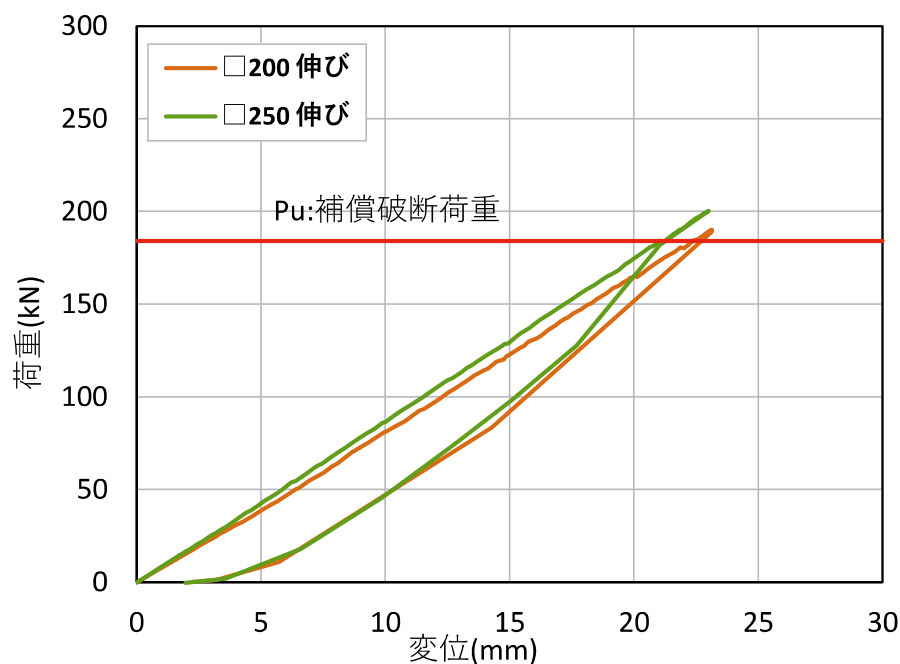


図-5.3.10 引抜き荷重と緊張材の伸び変形(12.5φ解撚式二房)

5.3.6 まとめ

本項では、炭素繊維複合ケーブル緊張材を対象に、プレストレス内部補強工法を薄肉部材にも適用できるようにコンクリートの必要部材厚さを調べるとともに緊張材の先端部加工方法を変えた定着実験を実施した。得られた知見を以下に列挙する。

- (1) スリーブ式の炭素繊維複合材ケーブルの場合、 $1 \times 7-10.5 \phi$ では部材厚さ 200mm～250mm、 $1 \times 7-12.5 \phi$ では同 150mm～250mm への適用性が窺えるものの、施工性に課題があり、固定定着部に空隙が発生する等の懸念がある。また、金属性スリーブを追加することで、耐腐食性や経済性の観点からも課題が生じる。
- (2) 解撚式の炭素繊維複合材ケーブルの場合、一房でも部材厚さ 150mm～250mm への適用性が窺え、十分な引抜き耐力が得られたこと、また現場での加工の容易性や経済性の観点から、この方法が望ましいものと判断された。

5.4 第5章の参考文献

- Mimoto T., Sakaki T., Mihara T. and Yoshitake I. : Strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of concrete members, *Engineering Structures*, Vol.124, pp.29-35, 2016a
- Mimoto T., Yoshitake I., Sakaki T. and Mihara T. : Full scale flexural test of jointed concrete members strengthened with post-tension tendons with internal anchorage, *Engineering Structures*, Vol.128, pp.139-148, 2016b.
- 東京製綱インターナショナル株式会社 HP : CFCC の概要 : <https://tokyoropec-intl.co.jp/ja/cfcc/cfcc.html> , アクセス日時:2020/10/16 14:00.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

これまでに整備されてきた膨大な数の構造物の老朽化が進む中で、構造物を補強する必要性が高まっており、様々な補強工法が開発・提案されてきた。しかし、その多くは、部材の外部に補強材を設置する方法であり、構造物の供用環境・条件によっては、補強の実施が困難なことがあった。

本研究で対象とした工法は、既設コンクリート内に固定定着部を構築することにより、補強部材内に配置した内ケーブルを用いてポストテンション方式でプレストレスを導入することで、既設部材のプレストレス補強や増設部材のプレストレスによる一体化を図るものであった。

本工法は、先行研究において、既設コンクリート部材内に固定定着した PC 鋼棒を用いたプレストレス補強工法の実用化を目的として、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 B 種 1 号を緊張材に使用した構造を想定した実験的研究により、構造詳細を定め、その性能を明らかにした。

本研究では、本工法を実用的に発展させるために、「狭隘な施工環境」、「薄肉部材」、「塩害環境」での適用を想定し、使用条件にあわせた緊張材としてそれぞれ、可撓性を有する緊張材、小径 PC 鋼棒、炭素繊維複合ケーブル緊張材に焦点を当てた実験的研究により、各種緊張材の適用性について明らかにした。

本論文は、これらの実験的研究をまとめたものであり、その主な要旨・結論を以下にまとめて示す。

第3章「可撓性を有する緊張材の適用性の検討」では、

PC 鋼棒と比べて狭隘な作業スペースでも施工することができ、充填材の注入も容易となる緊張材として、可撓性を有し断面中央に充填材を注入するためのコルゲート管（内径 10mm）を配置した「中空 PC ストランド緊張材」を対象とした。

最初に、5m の長尺コルゲート管を用いたグラウト試験を 6 種類の配合により行い、適用可能な 3 配合を選定した。ここでは、配合により、細径で内面に凹凸を有する長尺コルゲート管にグラウト材を圧送することが、グラウト材の硬化物性に変化を及ぼすことが分かった。例外もみられるが、基本的には通管前よりも通管後に圧縮強度が低下する傾向であった。また、従来構造で用いた高強度モルタルでは、圧送時に管内で閉塞してしまい適用できないことが分かった。

次に、部材断面寸法 400mm のコンクリートブロック ($\sigma_c=24\text{MPa}$) を用いて、鉛直下向き方向の施工により固定定着した中空 PC ストランドの引抜き実験を実施して、3 配合の定着性能を調べた。その結果、いずれのグラウト材においても中空 PC ストランドの規格引張荷重 (588kN) 以上の定着耐力を保持しており、通管後の性状変化が小さく、

圧縮強度（1週強度）が 90MPa を越え細骨材を添加しないグラウト材の適用性を示した。

さらに、透明アクリル管を用いて水平方向施工を模したグラウト試験を行い、水平方向への施工にも最適な配合を特定した。ここでは、水平方向施工において固定定着部内の空隙をグラウト材で満たすためには、粘性を付与した配合（フロー値 160mm 程度）が有効であることが分かった。その他、拡径削孔部の手前にスチールウールを配置することでグラウト材の流出を抑制する方法も効果的であることが分かった。

最後に、部材断面寸法 400mm のコンクリートブロック ($\sigma_c=24\text{MPa}$) に水平方向の施工により固定定着した中空 PC スtrandの引抜き実験を実施して、固定定着部の定着性能を調べた。その結果、特定した充填材を使用して構築した固定定着部は、中空 PC スtrand緊張材の規格引張荷重 (588kN) 以上の定着性能を満たしており、実構造物に適用できることを明らかにした。

第4章「小径緊張材の適用性の検討」では、

本工法を床版等の薄肉部材 (200mm 程度) に適用するために、「小径 PC 鋼棒 $\phi 13\text{mm}$, $\phi 17\text{mm}$ 」を対象とした。

先行して、部材寸法を 150~250mm に変化させた小型供試体 ($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$) に、新たに製作した小径用拡径ビットを用いて削孔を行い、小径 PC 鋼棒を固定定着させて引抜き試験を行い、基本的な定着性能を調べた。この結果をもとに、実大供試体 ($\sigma_c=24\text{MPa}$) に水平定着した小径 PC 鋼棒の引抜き実験を行い、固定定着部の定着耐力を調べた。その結果から、 $\phi 13\text{mm}$ PC 鋼棒では、1辺 150mm 以上の部材寸法があれば B 種 1 号の規格引張荷重 (143.3kN) 以上の定着性能を発揮し、 $\phi 17\text{mm}$ PC 鋼棒では、250mm 以上の部材寸法があれば B 種 1 号の規格引張荷重 (245.2kN) 以上の定着性能を発揮していることから、床版等の薄肉部材へ適用できることを示した。

第5章「炭素繊維複合ケーブル緊張材の検討」では、

本工法を塩害等の過酷な環境下にある構造物に適用するために、耐腐食性に優れる非鉄系緊張材である「炭素繊維複合ケーブル緊張材」を対象とした。ここでは、床版等の薄肉部材への適用を想定し、 $1\times 7-10.5\phi$ と $1\times 7-12.5\phi$ の2種類の炭素繊維複合材ケーブルを対象とした。

第4章の小径緊張材と同様に、部材寸法を 150~250mm に変化させた小型コンクリートブロック ($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$) を用いて、固定定着部に挿入する緊張材先端部の加工方法を変えた供試体を製作し、引抜き試験により固定定着部の定着耐力を調べた。先端部の加工方法には、緊張材の外周に鋼管を配置し膨張材で一体化させたスリーブ式と、ストランドを解いて房を形成する解撚式（一房・二房）を用いた。

その結果、先端部加工にスリーブ式を用いた場合、 $1\times 7-10.5\phi$ の保証破断荷重 (141kN)

に対して、部材厚さ 200mm～250mm, 1×7-12.5 φ の保証破断荷重 (184kN) に対して、同 150mm～250mm への適用性が窺えるものの、施工性には課題があり、固定定着部に空隙が発生する等の懸念があることが分かった。一方で、解撚式を用いた場合、一房でも部材厚さが 150mm～250mm への適用性が窺え、スリーブ式と同等な引抜き耐力が得られたこと、また現場での加工の容易性や経済性の観点から、この方法が望ましいことが分かった。

本研究の成果から想定した各種緊張材の適用範囲を表-6.1.1 に示す。

性能において可撓性と耐久性を持ちあわせる炭素繊維複合ケーブル緊張材が最も広く適用できるものと考えられるが、実際の施工においては、それぞれの構造物における使用条件や要求性能に加え、経済性も考慮しながら最適な緊張材を選定することが重要となる。

炭素繊維複合ケーブル緊張材は、PC 鋼材と比較すると非常に高価な材料であるが、本工法の工事費全体の緊張材料の占める割合はさほど大きくはなく、炭素繊維複合ケーブル緊張材を適用することによる経済性の影響としては、10～25%程度の増加が見込まれる。

表-6.1.1 各種緊張材の適用範囲

緊張材		PC 鋼棒			中空 PC ストランド	炭素繊維複合 ケーブル緊張材	
先端部加工		リングナット			圧着グリップ	解撚式	
規格		φ 23	φ 17	φ 13	60t 級	12.5 φ	10.5 φ
規格荷重(kN)		448	245	143	588	184	141
部 材 厚	400mm 以上	○	○	○	○	○	○
	250mm 以上	×	○	○	×	○	○
	150mm 以上	×	×	○	×	○	○
環 境	狭隘	△			○	○	
	塩害	△			△	◎	
経済性		◎			○	△	

× : 不適 △ : 適用には留意が必要 ○ : 適する ◎ : 最適

6.2 今後の課題と展望

本研究では、各種緊張材の適用性に焦点をあてて検討を実施した。その結果、本工法への適用性を明らかにして発展をさせることができた。一方で、課題についても幾つか明らかになった。以下にそれぞれの課題を示す。

中空 PC スtrand

本工法を用いて構造物を補強する場合に、緊張材の長さが 5m 以下での適用も想定される。その場合、一般的なポストテンション方式の PC 橋梁等と比べると鋼材の伸び量は少なく、楔定着を用いた場合には、セットロスの影響が大きくなる。そのため、ねじ式定着を含めた緊張側定着具の工夫が必要である。

加えて、検討した中空 PC スtrand の固定定着部は、PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ と比べると、サイズが大きくなり内部の充填材の量も増加する。さらに、選定した充填材は、細骨材を含まないため、固定定着部内の変形量（拔出し量）が大きくなる傾向が確認された。そのため、実施工時においては、鋼材の伸び量を参考として、荷重計を用いた緊張力管理を実施する必要がある。今後は、これらの基準化を図る必要がある。

また、本研究では主な施工方向として、鉛直下方向と水平方向を対象として検討を進めた。しかし、多様な構造物を想定すると、上向き方向への適用も少なからず考えられることから、グラウト実験では中空スtrand 緊張材の特性を活かして、斜め上向きへの充填を試みた。この結果も今後の更なる展開に繋がるものと考えている。

小径緊張材

本工法を用いて薄肉部材を補強する場合に、適用方法によっては変動荷重の影響が大きいことから、今後は繰返し荷重等に対しても検討していく必要があると考えている。

炭素繊維複合ケーブル緊張材

本研究では、炭素繊維複合ケーブル緊張材を本工法に用いる場合の先端部加工方法と必要部材寸法を確認した。今後は、実用化に向けて実施工を模した実大供試体を用いて定着耐力を確認するとともに、本研究で選定した先端加工方法による長期的な定着性能の検証が必要である。

加えて、緊張材以外の部材についても同等の耐久性が要求されるため、緊張側定着具についても非鉄化することが望ましい。そのため、緊張側の定着構造についても今後検討する必要がある。方針としては、固定定着した緊張材を緊張した状態で仮定着し、削孔と緊張材との空隙に PC グラウト材を充填する。PC グラウト材が硬化した後に緊張力を解放して、緊張材と PC グラウト材との付着によりプレストレスを導入する方法が考えられる。また、定着部から補強効果を効率的に発現させるためには、付着を増強させ定着効率を向上させることが重要となるため、珪砂や削孔形状についても検討する必

要があり，さらにこれらの基準化を図る必要がある．

本研究で対象としたプレストレス補強工法は，各種緊張材との組み合わせにより多種・多様な構造物への適用が図れるため，今後も上記の課題を解決しつつ，さらに発展させていくことが重要である．

本論文に関する著者の発表論文

査読のある雑誌等

1. Grouting and pull-out tests of hollow-type prestressing-strands for an internal strengthening system, Takafumi MIHARA, Isamu YOSHITAKE, Ryosuke ANAMI, Naoyuki TSUMURA and Tatsuhiko MIMOTO, Engineering Structures, Vol.206, 110176, 2020 年 3 月.
(本論文との関連：第 3 章)

査読のある国際会議の会議録等

1. 内的固定定着部を用いたポストテンション方式プレストレス導入工法の実構造物への適用と先端部充填材に関する検討, 三原 孝文, 三本 竜彦, 倉富 芳朗, 虻川 真大, 吉武 勇, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.587-592, 2017 年 10 月.
(本論文との関連：第 2 章)
2. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON HIGH-STRENGTH MORTAR GROUT FOR AN INTERNAL STRENGTHENING SYSTEM WITH POST-TENSIONING TENDONS, Takafumi MIHARA, Isamu YOSHITAKE, Ryosuke ANAMI, Naoyuki TSUMURA and Vanissorn VIMONSATIT, Proceedings of the 5th fib Congress 2018, pp.311~318, 2018 年 10 月.
(本論文との関連：第 2 章)
3. High-Strength Grouting Materials for the Internal Prestressing System Using a Hollow-Type Tendon, Takafumi Mihara, Ryosuke ANAMI, Takashi YAMANE and Isamu YOSHITAKE, Proceedings of the BEI-2019, pp.233~236, 2019 年 7 月.
(本論文との関連：第 3 章)
4. 内部固定定着部を用いたポストテンション方式プレストレス補強工法における小径緊張材の引抜き耐力に関する検討, 三原 孝文, 安居 紗奈子, 小野 雅樹, 吉武 勇, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1111-1116, 2020 年 7 月.
(本論文との関連：第 4 章, 第 5 章)
5. PULL-OUT TEST OF HOLLOW-TYPE PRESTRESSING-TENDON FOR THE INTERNAL STRENGTHENING SYSTEM, Takafumi MIHARA, Naoyuki TSUMURA, Katsuhito OOSIMA and Isamu YOSHITAKE, Proceedings of the 6th International Conference on Construction Materials (ConMat'20), pp.1681~1690, 2020 年 8 月.
(本論文との関連：第 3 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、社会人学生として山口大学大学院創成科学研究科博士後期課程に在籍し、2018年4月から2021年3月までの3年間で取り組んだ「内部固定定着部を用いたプレストレス補強工法の適用性の向上」に関する研究を取りまとめたものであります。

本論文の査読を務めていただいた山口大学大学院創成科学研究科准教授 吉武 勇先生には、入学準備から始まり、研究の進め方、実験計画、論文作成等に至るまで、多岐にわたり終始懇切丁寧に御指導をいただきました。また、オーストラリアで開催された国際会議（*fib-congress 2018*）では、英語の拙い筆者を論文投稿・発表できるまでに、導いてくださいました。多くの学生の研究指導で御多忙の中、ときには休日、ときには深夜にも関わらず、御対応をくださいました。衷心より感謝申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 進士正人先生、同教授 中村秀明先生、同教授 麻生稔彦先生、同准教授 中島伸一郎先生には、御多忙の折、本論文の査読をお引き受けただけでしたことに深く感謝申し上げますとともに、論文審査においては、先生方から貴重なご意見を頂戴し、本研究の成果をブラッシュアップすることができました。ここに御礼申し上げます。

本研究で対象とした工法については、筆者が所属する極東興和株式会社の技術企画課長 三本竜彦博士が先行研究として取り纏めたものであり、筆者が発展的研究を引き継ぐにあたり、業務で御多忙にも関わらず数多くの適格な御指導・御助言をいただきました。ここに深く感謝を申し上げます。

本研究を通じて多様な実験を実施しました。そのなかで多方面からの御支援・御指導をいただきました。日本スプライススリーブ株式会社の常務取締役 虻川真大氏には、高強度充填材の材料提供ならびに品質改良において、御支援賜りました。住友電気工業株式会社の大島克仁氏、崎中 稔氏には、中空 PC ストランド緊張材の材料提供ならびに実験において、御支援を賜りました。東京製綱インターナショナル株式会社の瀬尾利之氏、菅原公理氏、小野雅樹氏には、炭素繊維複合ケーブル緊張材の材料提供ならびに先端加工方法の工夫において、御支援・御助言を賜りました。株式会社シブヤの山足和儀氏、吉村一彦氏には、拡張ビットの改良や特殊ドリルの製作・試行において、御支援を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

筆者が山口大学大学院在学中に所属し、共に貴重な時間を過ごした施設材料学研究室の卒業生、在学生の皆様からは、意見交換の場を通じて多角的な御助言・御支援を頂戴しました。特に本研究と一緒に取り組んでいただきました、当時大学院生であった、阿波亮祐氏（現 株式会社建設技術研究所）、大学院博士前期課程1年生の宮地和博氏、工学部4年生の坂本健太氏には、広島での弊社工場での実験対応のみならず計測結果や

解析による検証などの取り纏めに真摯かつ誠実に御対応いただきました。山口大学での実験においては、技術職員の牧原貴之氏、当時大学院生であった山田浩司氏（現 日本ピーエス株式会社）には、計測機器の使用や供試体の搬入・安全面等において、御支援をいただきました。そして、偶然にも時を同じく博士論文に取り組んだ、三菱ケミカルインフラテック株式会社の長谷川泰聰氏、日本ピーエス株式会社の福島邦治氏、とはお互いに励ましあうことで迷うことなく研究を進めていくことができました。本研究を通じてご縁をいただいた皆様に心より感謝するとともに、これからの御活躍をお祈り申し上げます。

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営業本部長 山根隆志氏、元営業本部副本部長 千場善信氏（現 取締役福岡支店長）、技術企画部長 谷慎太郎博士、元補修部長 岡田繁之氏（現 PC 建設業協会中国支部 事務局長）、補修部長 大谷圭介氏、補修技術課長 江良和徳博士、補修営業課長 稲富芳寿博士には、筆者の大学院入学に際して多大なる御支援や御協力を頂戴し、感謝するばかりです。特に山根氏は、大学院入学の機会に導いていただき、在学中にも多くの御助言と励まし、そしてサポートを頂戴致しました。また、在学中の3年間で筆者が在籍した、営業本部の同僚の皆様からは、研究と実務のなかで、ときに途方に暮れている私を温かくサポートしていただきました。研究開発の実務面においては、技術企画課 中森武郎課長、開発課 河金 甲博士、同 下江珠代氏、補修技術課 津村尚佑氏、補修工事課 村田 悟課長、同 鈴木充寛氏、同 三浦康利氏、同 安居紗奈子氏、同 田中 凜氏には、実験遂行等の面において労を惜しまず協力していただき、研究を遂行することができました。供試体製作や載荷実験の履行においては、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、生産技術部長 森江昭則氏、製造課長 菊池慎吾氏には、いつも無理なお願いばかり申し上げましたが、快く引き受けてくださいました。事務的な面では、管理本部管理部長 ト部 穰氏、元管理課長 小嶋通彦氏（現福岡支店）、総務課 森下 健氏に多岐に渡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いただいたことを、極東興和株式会社ならびにグループ会社の全社員に対して深い敬意と感謝を示し、御礼申し上げます。

このように書き綴ると、本当に多くの方への感謝しかございませんが、これからは皆様にお返しができるよう、そして今後は筆者が後進の支援・育成ができるよう努めていく所存です。

最後に、筆者の大学院入学にあたり、家庭からサポート・応援してくれた妻と二人の子供に感謝を記し、謝辞といたします。

2021年3月
三原 孝文