

博士論文

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開発

Development of a Strengthening System

*Using Post-tension Tendon with an Internal Anchorage of
Existing Concrete Members*

2017 年 3 月

三 本 竜 彦

Tatsuhiko MIMOTO

山口大学大学院理工学研究科

目 次

学位論文の要旨	i
Abstract	iii
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 わが国の社会資本の現状	1
1.1.2 コンクリート構造物の維持管理における課題・問題点	4
1.2 プレストレス補強工法の現状	7
1.2.1 プレストレストコンクリート（PC）の分類	7
1.2.2 PC 定着工法の現状	8
1.2.3 PC 定着具に求められる性能	10
1.2.4 プレストレスを利用したコンクリート部材に対する補強工法の現状	11
1.3 既往の論文のレビュー	15
1.3.1 既設コンクリート構造物の補強に関する研究	15
1.3.2 PC 定着工法に関する既往の研究	18
1.3.3 緊張材を用いた補強方法や効果に関する研究	20
1.3.4 内部くさびに関する研究	23
1.4 本研究の目的	25
1.5 論文の構成	27
第2章 開発したプレストレス補強工法の特徴	29
2.1 工法概要	29
2.2 工法の適用対象	31
2.3 施工手順	33
2.4 拡径削孔方法	34
2.5 固定定着構造の定着機構	37
2.6 工法の適用範囲や留意点	39
2.7 まとめ	40

第3章 PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討	41
3.1 実験目的	41
3.2 実験供試体	43
3.2.1 実験パラメータ	43
3.2.2 供試体の詳細	45
3.3 実験方法	49
3.3.1 載荷方法	49
3.3.2 計測方法	50
3.4 実験結果および考察	51
3.4.1 破壊荷重	51
3.4.2 荷重－変位関係	55
3.4.3 周方向ひずみ	57
3.5 まとめ	62
第4章 固定定着した PC 鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討	63
4.1 実験目的	63
4.2 実験供試体	64
4.2.1 供試体概要	64
4.2.2 供試体材料	67
4.2.3 供試体製作	72
4.2.4 有限要素解析	74
4.3 実験方法および計測方法	75
4.4 定着耐力実験結果および考察	79
4.5 持続載荷実験結果および考察	84
4.6 まとめ	88
第5章 打継ぎ部を有するコンクリートはりの実験的検討	89
5.1 実験目的	89
5.2 実験供試体	90
5.2.1 供試体概要	90
5.2.2 供試体材料	91
5.2.3 供試体製作	97

5.3 実験方法	102
5.4 一次載荷実験結果および考察	106
5.4.1 打継ぎ部のひび割れ幅	106
5.4.2 打継ぎ部における塩分浸透性	108
5.5 二次載荷実験結果および考察	110
5.5.1 変形挙動	110
5.5.2 PC鋼材に生じる増加力	112
5.6 まとめ	113
第6章 結論	115
6.1 本研究のまとめ	115
6.2 今後の課題と展望	117
参考文献	119
本論文に関する著者の発表論文	125
謝辞	127

学位論文の要旨

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開発

三本 竜彦

既設コンクリート構造物を補強する場合、一般的な補強工法は補強対象部材の周辺に補強材を配置する空間が必要になるため、周辺環境条件やコスト、技術的な問題等により実施が困難であるケースが少なくない。また、既設コンクリート構造物を打ち継いで新たにコンクリートを追加する場合、コンクリート部材同士はあと施工アンカーにて定着した鉄筋を用いた RC 構造とすることが一般的である。この構造では、あと施工アンカー用の多数の削孔が必要となることがあり、鉄筋を避けた削孔が困難となることもある。さらに、耐久性の観点から弱点となりやすい打継ぎ部が RC 構造であるため、PC 構造に比べ耐久性が劣るものと考えられる。

このような課題に対処するため、既設コンクリート内部を拡張削孔し、そこに固定定着した PC 鋼材を用いてプレストレスを導入することで、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工法を開発した。この工法の主な特長は、削孔や緊張に必要な作業空間のみ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部材周辺に追加部材を設置する空間が不要であること、新旧コンクリートを一体化する場合にはプレストレスにより樹脂アンカー本数を少なくできること、新旧コンクリートの打継目にプレストレスが作用するためひび割れ抵抗性が向上することである。

本研究ではこの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、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って調べた。

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「序論」では、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、プレストレストコンクリートの概要と補強への適用事例を例示し、本研究の背景を述べた。また、本研究に関する既往の研究についてまとめた。その上で、本研究の目的を明らかにした。

第 2 章「開発したプレストレス補強工法の特徴」では、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、優位性や適用対象、工法の施工手順、固定定着構造を構築するための拡張削孔方法を概説し、固定定着構造の定着機構を推定した。また、工法の適用範囲や留意点を示した。

第 3 章「PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討」では、緊張材を定着するコンクリート部材寸法、固定定着構造のくさび形状、充填材種類をパラメータとして、固定定着構造を模した実大要素供試体を用いた押抜き載荷試験を行い、パラメータが耐荷力におよぼす影響について実験的検討を行った。その結果、高強度モルタル充填材を用い、かつ定着する既設コンクリート部材寸法が 400mm 以上あれば固定定着構造は十分な性能を有していること、固定定着構造の形状が耐荷力に与える影響は小さいもの

の充てん材の種類が耐荷力におよぼす影響は大きいことを明らかとした。この結果を踏まえ、固定定着構造のディテールを定めた。

第4章「固定定着したPC鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討」では、実構造を模した部材寸法が400mmの実大供試体を用いて、高強度モルタルにより定着したPC鋼棒の引抜き載荷実験を行い、固定定着構造の定着耐力を調べ、さらに使用状態における緊張力を1年間持続載荷して長期定着性能を調べた。その結果、PC鋼棒の規格引張荷重(449kN)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を明らかにした。また、使用状態に作用する引抜き力に対して固定定着したPC鋼棒のすべり量は0.24mmと実用上無視できる程度であり、また1年間の持続載荷におけるすべり量も0.1mm程度とわずかであったことから、固定定着構造は引抜き力に対する十分な定着性能を維持できることがわかった。

第5章「打継ぎ部を有するコンクリートはりの実験的検討」では、打継ぎ面に与えたプレストレスの効果を調べるため、打継ぎを設けた実大はり供試体を用いて曲げ載荷試験を行った。この実験では、一般的なRC構造によるあと施工アンカーを用いた打継ぎ工法とも比較した。さらに打継ぎ部材の耐久性比較のため、打継ぎ部における水密性(塩分浸透性)も調べた。その結果、本工法でプレストレスを与えた打継ぎ部材は、高い曲げ耐力とひび割れ抵抗性、復元性を示すとともに、塩分浸透性の試験より優れた水密性を示す結果が得られた。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題や展望を整理した。

以上

Abstract

Development of a Strengthening System Using Post-tension Tendon with an Internal Anchorage of Existing Concrete Members

MIMOTO Tatsuhiko

Reinforcing materials are generally arranged outside of existing concrete members. Adequate workspaces are often required for this strengthening work. In addition, new and old concrete jointed members are generally constructed as reinforced concrete structures, so steel corrosion may occur at the joint. Conventional strengthening systems are influenced by environmental conditions.

To mitigate the environmental impact and workspace issues, a new strengthening method for existing concrete members has been developed. The strengthening system uses a post-tensioned prestressing tendon embedded into a wedge-shaped internal anchorage of existing concrete member.

The machineries used in the strengthening work are compact and it can locally strengthen concrete members by embedding prestressing tendons at various points. Hence, the system can be used in relatively narrow work spaces such as the foundations. The post-tensioning system enables the addition of new concrete members to existing concrete structures. Whereas conventional RC jointed members are vulnerable to steel corrosion at the joints of the new and old concrete, the developed prestressing system may increase the durability of the jointed structure.

This study reports the results of fundamental tests conducted on structures containing prestressing tendon 23 mm in diameter to examine its deformation behavior under the design load. A push-out test using full-scale concrete specimens embedding the wedge-shaped anchorage was conducted to evaluate the anchor performance. The focus of the test was to determine the dimensions of the anchorage for a pull-out test using full-scale concrete specimens. To examine the load-bearing capacity and long-term behavior of strengthened concrete, a pull-out test of prestressing tendons was also performed using full-scale concrete specimens. In addition, full-scale reinforced concrete beams were connected by the developed method. To confirm the improved structural performance and durability, flexural loading test was conducted using the jointed structures.

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

Chapter 1 “Introduction” 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 the outline of the thesis are presented.

Chapter 2 “Characteristics of the developed strengthening method with internal prestressing” describes the strengthening system using post-tension tendon with an internal anchorage of existing concrete members. This chapter summarizes advantages of the system and targeted applications. Also, the chapter shows the construction procedure of the method. Applicable ranges and concerns of the strengthening system are also summarized in the chapter.

Chapter 3 “Experimental investigation on the internal anchorage” shows the push-off test of the prestressing

tendon. The test was conducted using full-size specimens to examine the anchorage effect. The experimental parameters were dimensions of concrete member and wedge-shaped hole for embedding a tendon as well as filling materials. The result shows that high-strength mortar filler was suitable material for anchoring the tendon, and that the minimum size of concrete was 400 mm. Based on the test result, details of strengthening system were determined.

Chapter 4 “Pull-out tests for the post-tensioned tendon” reports the pull-out test of the prestressing tendon fixed with high strength mortar using full-size specimens having a member dimension of 400 mm. The pull-out test was conducted to examine the load-bearing capacity and the long-term anchoring performance. The test results revealed that the anchor has sufficient anchoring performance even under higher force than the designed tensile load (449 kN) of the prestressing tendon. The observed slips of the tendon were 0.24 mm for the pull-out test and 0.1 mm for the sustained loading test. These slips are negligible for practical use. The test results confirm that the fixed anchor can maintain sufficient anchoring performance against tensile force.

Chapter 5 “Experimental investigations on jointed concrete members” focused on the test of jointed concrete members using the developed method. The strengthening effect of the system was examined in a loading test on jointed full-scale concrete members. Saltwater permeability at the joint was also examined. The flexural properties of the jointed members were compared to those of concrete beams jointed with conventional post-installed adhesive anchors. The concrete beams jointed by the proposed system exhibited superior crack-resistance and load-carrying capacity, and their joints were strongly water-impermeable.

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

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 わが国の社会資本の現状

人類の社会資本整備の起源として、最も有名なものの一つに古代ローマ時代におけるさまざまな構造物があげられる。古代ローマ人は、神殿や円形闘技場の他、アッピウス・クラウディウスによって立案・着工されたアッピア街道やアッピア水道に代表される道路や水道など、大規模な社会資本を多く築き上げてきた(図-1.1.1)。そして、それら社会資本を背景として、ローマ帝国は高い国力を保持し、隆盛を極めた。しかしローマ帝国末期には、大規模な社会資本の維持コストが財政的な負担となり、ローマ帝国が滅亡した原因の一つになったとも言われている。このエピソードは、構築した社会資本の維持管理がいかに困難であるかということを示唆しているといえる。



図-1.1.1 古代ローマ時代の構造物の一例(左:コロッセオ, 右:アッピア水道)

戦後のわが国の経済状況は、復興期を経て1955年頃には高度成長期を迎え、その後1970年代のオイルショックを境に安定成長期へと移行し、1990年代のバブル崩壊によって低成長時代を迎え、現在に至っている。一方、社会資本の整備状況を示す一例として道路橋に着目すると、図-1.1.2に示す通り、わが国の橋梁整備は戦後本格的に行われることとなったが、特に高度成長期に建設された橋梁が全体の約30%を占めており、この時期に積極的に建設が行われてきたことがわかる。建設後50年を経過した橋梁の割合は、2015年時点では約18%であるが、10年後の2025年には約42%に急増し、今後加速度的に橋梁を含む社会資本の高齢化が進んでいくことが予想されている。また、2012年に起きた中央自動車道笹子トンネル上り線の天井板落下事故のように、利用者の人命を奪うような痛ましい事故だけでなく、頻発する高架橋やトンネルからのコンクリート片のはく落事故など、コンクリートの劣化に起因する事象が社会問題となっており、社会資本の維持管理に関する社会的関心が高まってきた。このような状況において、国土交通省の社会資本整備審議会は2014年に「今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切らなければ、近い将来、橋梁の崩落など人命や社会システムに関わる致命的な事態を招くであろう」と述べ、道路の老朽化対策の本格実施に関する提言を行った。この提言を端緒に、2014年に道路法施行規則が改正さ

れ、わが国における約 72 万橋の橋梁や約 1 万本のトンネルなどは、5 年に一度の近接目視による全数監視の実施が義務付けられた。これにより、これまで十分な点検などが実施されていなかった道路構造物を含め、点検診断の結果に基づき修繕などの適切な措置がとられることとなった。

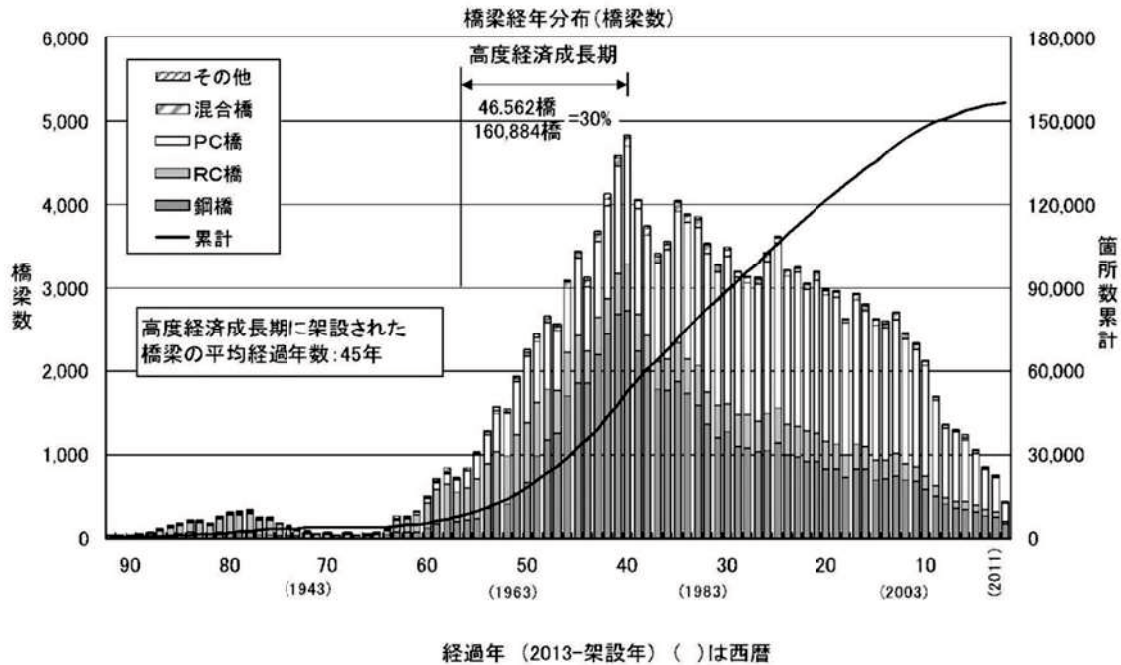


図-1.1.2 橋梁の経年分布 [国土交通省国土技術政策総合研究所, 2015]

また 2015 年に東日本・中日本・西日本高速道路株式会社と阪神高速道路株式会社、本州四国連絡高速道路株式会社の 5 社は、高速道路ネットワークを将来にわたり持続して的確に維持管理するため、総額約 3 兆 4 千億円となる大規模更新、大規模修繕事業に着手し、経年劣化し、かつ現行の基準を満たさなくなった道路橋床版の取替などを含む改築工事など、抜本的な構造物の老朽化対策に取り組み始めたところである (図-1.1.3)。

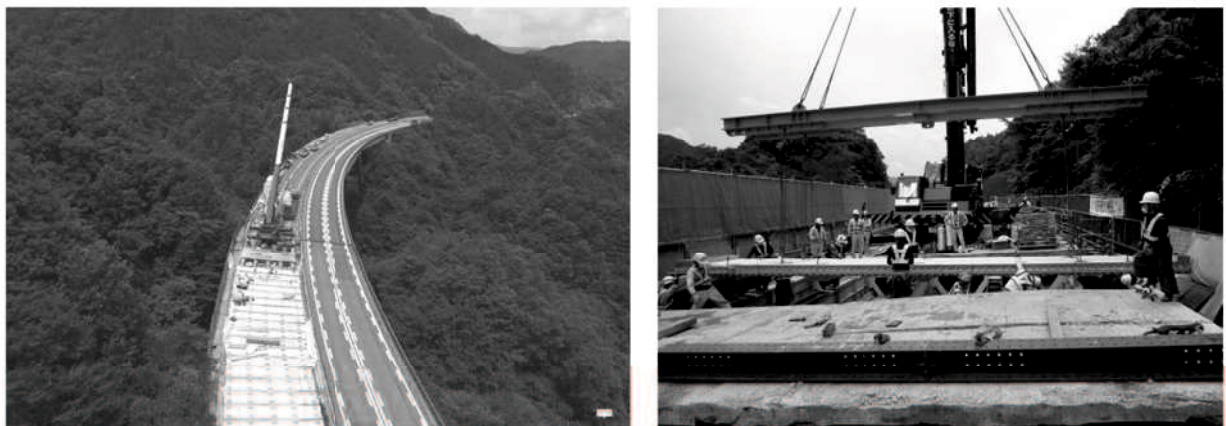


図-1.1.3 高速道路の大規模更新事業の事例 (左: 床版取替工事全景, 右: 床版取替状況)

一方、構造物に適用する設計基準であるが、時代のニーズの変化に応じて適宜見直しが行われ、構造物

が保有すべき要求性能も徐々に向上している。ここでは道路橋の基準となる道路橋示方書における活荷重や耐震基準の変遷を例示する〔プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2015〕。活荷重は、1956年に一等橋に対する TL-20（車両荷重 20tf）と二等橋に対する TL-14（車両荷重 14tf）の荷重体系が定められ、その後 1980 年には TT-43（車両荷重 43tf）が制定された。1993 年には貨物輸送の増加に伴う車両制限令の改正を踏まえ車両荷重が 25tf（245kN）に引き上げられ、それにより橋の等級は廃止し、大型車の走行頻度が高い B 活荷重と低い A 活荷重が設定され、現在に至っている。耐震基準は、1971 年までは 0.2～0.3 の震度に対して震度法により許容応力度に対する照査を行うものであったが、1990 年には RC 橋脚に対して 0.7～1.0（プレート境界型地震）の震度に対して地震時保有水平耐力法の照査を行うのが望ましいと定められた。兵庫県南部地震（1995 年）後の 1996 年には耐震基準が大幅に見直され、供用中に発生する確率が高い 0.2～0.3 の震度（レベル 1 地震動）に対してはいずれの橋も健全性を損なわないことを震度法により照査し、供用中に発生する確率は低い大きな強度を持つ 0.7～1.0（プレート境界型地震）と 1.5～2.0（内陸直下型地震）の 2 つの震度（レベル 2 地震動）に対しては、標準的な橋は損傷が橋として致命的にならないこと、重要度が高い橋については橋としての機能回復が速やかに行い得ることを地震時保有水平耐力法や動的照査法で照査することが定められた。東北地方太平洋沖地震（2011 年）後の 2012 年には被災事例の分析結果を踏まえレベル 2 地震動の見直しが行われている。このような基準の変遷により、建設当時の基準では要求性能を満足していた構造物でも、現在の基準に照らすと建設当時のままでは要求性能を満足しない場合があり、そのような高齢化した構造物に対して優先順位を踏まえながら補強対策が実施されているが、補強対策によって構造物の重量が増加する場合など追加の補強対策が必要となるケースも見られる〔会計検査院, 2013〕。また、高齢化した橋では、交通量が変化し道路幅員が不足する場合やバリアフリーの観点から歩道設置が求められるような場合があるが、橋を拡幅することが技術上困難な場合やコストの問題がある場合には、劣化損傷はなくとも機能上の問題から橋を架替えたりする事がある〔国土交通省国土技術政策総合研究所, 2008〕。

現在のわが国における建設産業は、これまで長年続いてきた右肩下がりの市場環境から一転し、東日本大震災の復興事業、国土強靱化政策のほか、2020 年開催予定の東京オリンピック・パラリンピック関連事業などの影響によって活況を取り戻しつつある。しかし一方で、少子高齢化による入職者の減少と団塊の世代を中心とする定年退職が相まって就業者数は減少しており、労働生産性の向上が喫緊の課題となっている。そのため、就業者数拡大に向けた担い手確保と、情報通信（ICT）技術やプレキャスト化などを活用した生産性向上対策に官民挙げて取り組み始めたところである。

このような状況を踏まえ、今後我々が持続可能な社会を構築していくためには、これまで建設してきたコンクリート構造物を上手に使いながら有効利用していくことが求められる。そのためにはコンクリート構造物を適切に維持管理して性能を保つことはもちろんであるが、ニーズの変化に応じて補強・改良し資産として後世に伝えていく必要がある。

1.1.2 コンクリート構造物の維持管理における課題・問題点

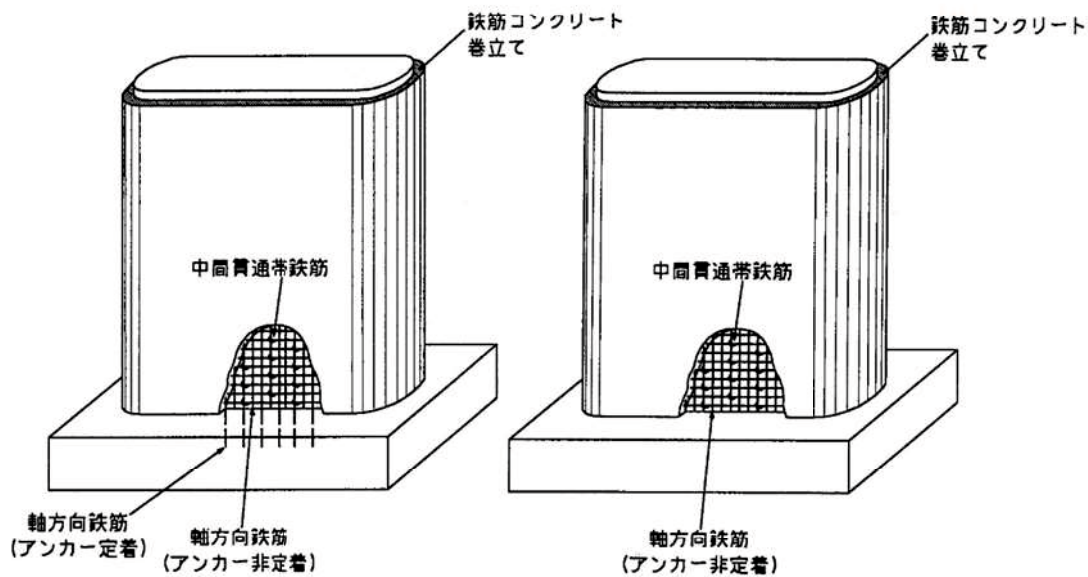
現代において、コンクリートは主要な建設材料の一つである。これまでコンクリートを使用した構造物が、人々の安心・安全を守り、生活や暮らしを向上させるための社会資本として多数建設されてきた。建設材料としてコンクリートが多用されてきたのは、施工しやすくコストパフォーマンスに優れること、さらには強度と耐久性に優れていると評価されてきたからといえる。本来、コンクリートは材料選定、配合設計、施工を適切に行えば、高耐久を有するものであり、そのような高耐久なコンクリートで構築した構造物も高い耐久性が期待できるはずである。しかし、建設当時はメンテナンスフリーといわれていたコンクリート構造物であるが、当時は明らかでなかった劣化メカニズムが作用した場合や、工期や工費の制約から適切な配慮がなされなかった場合において、早期に劣化が進行して損傷が顕在化している構造物もみられる。損傷が致命的となった場合は、撤去して新たに再構築されたものもある。

一方でコンクリート構造物が建設当時の性能を維持できていた場合でも、車両の大型化による荷重条件の見直しや未曾有の震災経験を踏まえて改正された耐震基準などにより、建設当時の基準で建設されたままでは現在の基準における性能を満たさず、新たに補強対策を必要とする構造物も存在する。またニーズの変化に応じて構造を改築する場合など、構造物の支持する荷重が増加することにより補強が必要となることもある。

コンクリート構造物に適用される補強方法として、主に土木構造物を対象に実施されている代表的な補強工法を適用目的別にまとめると表-1.1.1のようになる。コンクリートの補強工法は多岐にわたり、構造物の置かれた環境条件などを踏まえ、適材適所を考えた工法選定が行われる。これまで採用されてきた補強工法は、一般に部材外部にコンクリート部材を増設するか、鋼板や連続繊維シートを補強材として追加設置して補強する工法がほとんどである(図-1.1.4, 図-1.1.5)。しかしこのような工法は、既設構造物を補強するために補強する部材の周辺に作業空間が必要となることが多い。既設構造物の設置条件はさまざまであり、例えば基礎構造物などの様に構造物が土中や水中にあるような場合、現実的には施工性や経済性の他、技術的問題などによって補強実施が容易ならざるケースがあり、補強が必要であっても手付かずとなっている事例も見受けられる。

表-1.1.1 補強工法一覧 [日本コンクリート工学会, 2013]

適用目的	補強工法
コンクリート部材の交換	打換え・取替え工法
コンクリート断面の増加	増し厚工法
	コンクリート巻立て工法
部材の追加	縦桁増設工法
支持点の追加	支持工法
補強材の追加	鋼板接着工法
	FRP接着工法
	鋼板巻立て工法
	FRP巻立て工法
プレストレスの導入	外ケーブル工法



(a)軸方向鉄筋の定着を行う場合 (b)軸方向鉄筋の定着を行わない場合

図-1.1.4 既設構造物のコンクリート巻立て工法による補強模式図 [日本道路協会, 1997]

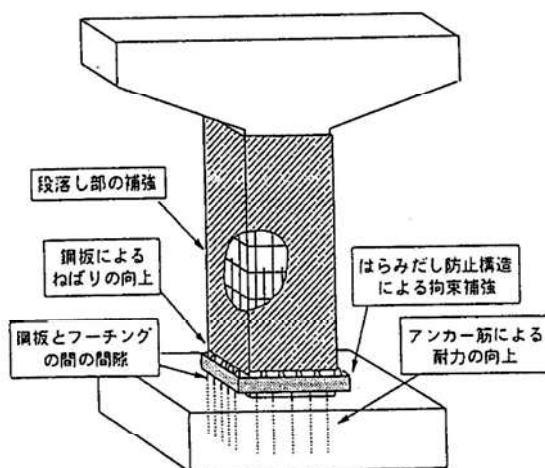


図-1.1.5 既設構造物の鋼板巻立て工法による補強模式図 [日本道路協会, 1997]

補強対策が困難な事例として、図-1.1.6に示す橋台構造を例示する。この橋台は底版の引張鉄筋量が不足しており補強対策が必要であるが、このような場合、橋台背面側を補強するときは上部の盛土を取り除いて施工を行うこととなる。しかし交通を確保しながら盛土撤去することは困難を伴うため、交通量が多い箇所などでは現実的には補強対処な前面側のみを取り急ぎ補強することとなる。背面側を施工する場合は、別途迂回路を準備するなどして交通を切り替えてから着手することとなり、費用と工期がかかりすぎるため費用対効果の観点から対策が後回しとなりやすい。

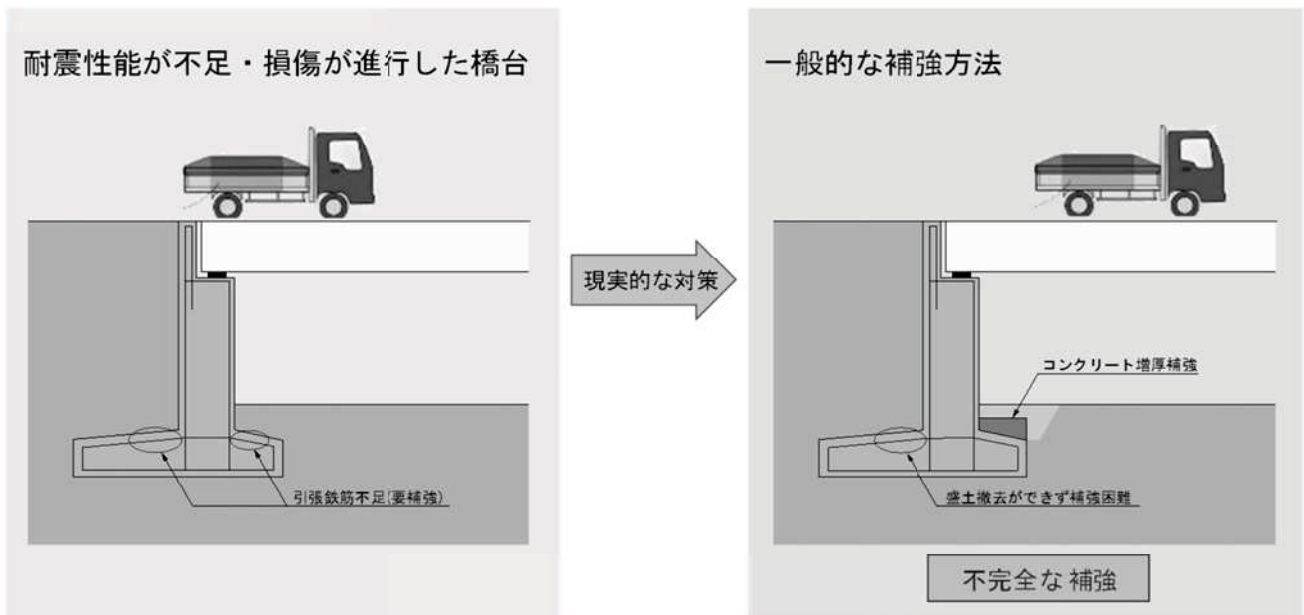


図-1.1.6 補強対策が困難な橋台の事例

また、ニーズの変化や補強部材取り付けに対応するため、既設コンクリート部材に新たにコンクリートを打ち足して部材を追加することもある。このような場合、コンクリート部材同士の接続はエポキシ樹脂などによって既設コンクリートに定着した鉄筋を打継面に直交するように配置し、RC構造として接続とすることが一般的である。この構造では、既設コンクリート内の鉄筋を損傷しないように鉄筋を定着するため、既設コンクリート部材に鉄筋が多く配置されている場合などは多数の削孔が必要となることがある。そのため、既設鉄筋を避けた位置への削孔が現実的に困難となる場合や、既設コンクリートへダメージを与えてしまう懸念がある（図-1.1.7）。さらに耐久性の観点から、弱点となりやすい打継ぎ部がRC構造となるため、PC構造に比べるとひび割れが生じやすく環境の影響を受けやすいという懸念もある。

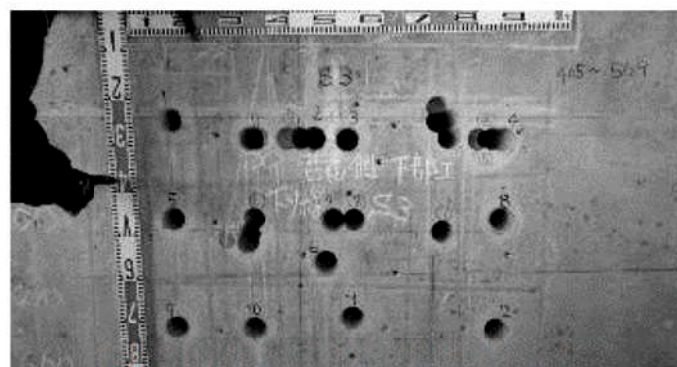


図-1.1.7 既設構造物の削孔例

1.2 プレストレス補強工法の現状

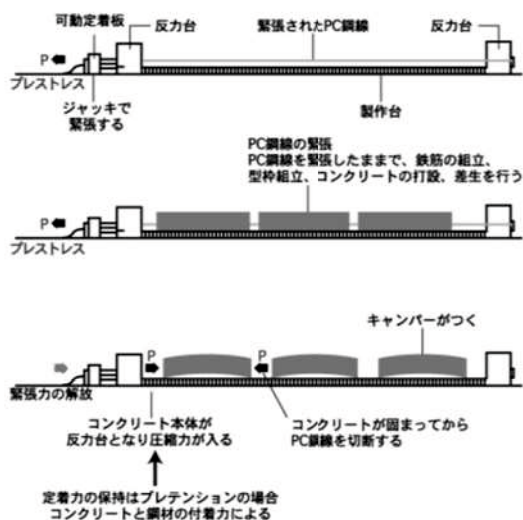
1.2.1 プレストレストコンクリート（PC）の分類

プレストレストコンクリートとはコンクリートに作用する各種荷重による応力を減じる方向に逆方向の応力をあらかじめ与えたコンクリートである。プレストレストコンクリートはコンクリートに応力を与える時期によってプレテンション方式とポストテンション方式に大きく分類されている（図-1.2.1）。

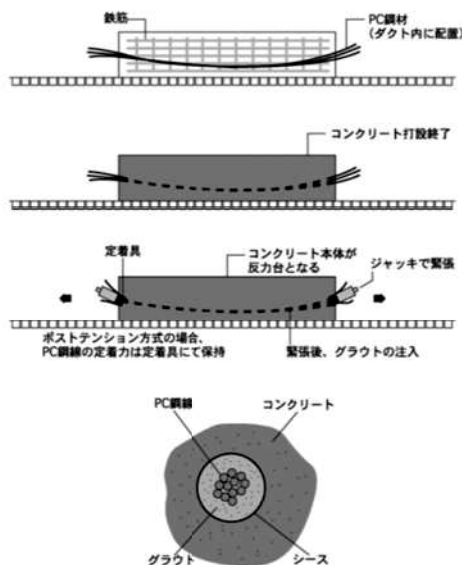
プレテンション方式は、一般に緊張材として用いられているPC鋼材に引張力を与えておいた状態でコンクリートを打設し、コンクリートの硬化後にPC鋼材に与えておいた引張力をPC鋼材とコンクリートの付着によってコンクリートに伝達し、プレストレスを与える方法である。コンクリート打設前にPC鋼材の引張力を支持するための固定台が必要になることから、通常は固定台設備の整った工場で作られる製品に用いられている。

ポストテンション方式は、PC鋼材を配置するためのダクトを設置したコンクリートを製作し、コンクリートの硬化後にダクト内に配置したPC鋼材に引張力を与え、その両端部を専用の定着装置によりコンクリートへ定着し、プレストレスを与える方法である。プレストレスを導入した後はダクト内にセメントペーストのPCグラウトを注入して、コンクリートとの間接的付着を与えると同時に防錆をはかる。PC鋼材の曲線配置が可能であり、現場でのプレストレス導入が可能であるため、大型構造物を中心にさまざまな用途の構造物に使用されている。

プレテンション方式



ポストテンション方式



製作ヤード



反力台・緊張ジャック



主筋鉄筋・シース組立



緊張状況

図-1.2.1 プレテンション方式とポストテンション方式の違い
[プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2016]

1.2.2 PC 定着工法の現状

ポストテンション方式のプレストレストコンクリートに用いられる定着装置 (PC 定着具) として、PC 定着工法ごとに定着機構に特徴を有するさまざまな定着装置が考案されており、構造物の種類、形状および寸法、プレストレスの大きさ、施工方法などを考慮して最も合理的な工法の定着装置を施工者が選定する。現在国内で使用されているポストテンション定着工法と主な定着方式を表-1.2.1 に示す。また定着機構 (定着方式) の一例を図-1.2.2 に示す。

表-1.2.1 ポストテンション定着工法の分類 (工法開発時の定着方式で分類)
[プレストレストコンクリート技術協会, 2010]

	定着方式	工法名
1	くさび式	アンダーソン, CCL, FKK フレシネー, <u>フープコーン</u> , <u>FSA</u> , <u>KCL</u> , <u>KTB</u> , <u>OBC</u> , <u>SK</u> , <u>SM</u> , <u>SWA</u> , スリーストランド, ストロングホールド, <u>TNC</u> , VSL
2	ボタン式	<u>BBR</u> , <u>OSPA</u>
3	ねじ式	ディビダーク, <u>FAB</u> , <u>SEEE</u> , <u>NAPP</u>
4	ループ式	バウル・レオンハルト, プレロード
5	合金式	<u>安部ストランド</u>

※下線を付した工法は国内で考案されたものを示す。

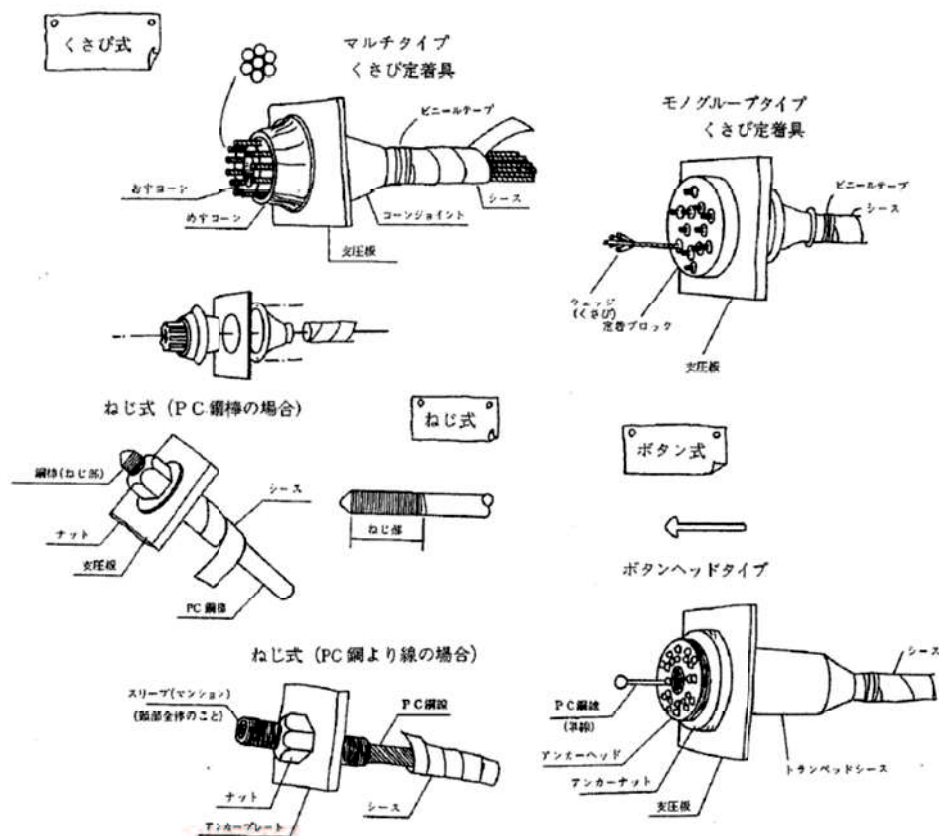


図-1.2.2 定着方式の一例 [プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2002]

また、2012年制定 コンクリート標準示方書〔施工編〕〔土木学会、2012〕では、PC 定着具の形式として表-1.2.2 に示す7形式が示されている。

表-1.2.2 PC 定着具の形式〔土木学会、2012〕

	定着方式	概要
1	くさび式	半径方向のくさび作用または円周方向のくさび作用を利用して PC 鋼線、PC 鋼より線、平行に配置した PC 鋼材群または PC 鋼棒を定着するもの
2	ねじ式	PC 鋼線または PC 鋼棒の端部にネジ転造加工を行って、ナットで定着するもの
3	ボタン式	PC 鋼線または PC 鋼棒の端部に製頭加工によって頭を製作して定着するもの
4	合金式	低温で溶融する合金を用いて、多層 PC 鋼より線の端部を鋼製ソケットに銕込んで定着するもの
5	圧着 グリップ式	PC 鋼より線または多層 PC 鋼より線の端部の外側に、スリーブを冷間引抜きなどによって圧着し、スリーブの PC 鋼より線側端面の支圧で定着するか、またはスリーブの外側にねじを切ってナットで定着するもの
6	ループ式	波状やループ状に曲げ配置した PC 鋼線や PC 鋼より線を直接コンクリートに埋め込んで、コンクリートとの付着または支圧によって定着するもの
7	グラウト式	PC 鋼材を何らかの方法でいったんアンカーヘッドに定着した後、これをプルロッドで緊張し、アンカーヘッドの背面に注入した PC グラウトが硬化した後に支圧と付着によって定着するもの

1.2.3 PC 定着具に求められる性能

2012 年制定 コンクリート標準示方書〔施工編〕〔土木学会, 2012〕では, PC 定着具は定着される PC 鋼材が JIS で規定される規格引張荷重以下で破壊あるいは著しい変形を生じることのないような構造および強さを有するものでなければならないと定めている. 緊張材を付着させて使用する場合には, 引張力作用に対して緊張材の規格引張荷重を上回る性能を発揮できなくてもよい場合もあるが, 緊張作業時の安全性, 定着部のセットの増大防止などを考慮して, 緊張材の規格引張荷重まで, その性能を発揮できるような構造, 強さのものを用いる必要がある.

この要求性能を確認するための試験方法として, JSCE-E 503「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法 (案)」〔土木学会, 2013〕が定められている. この試験により次の項目を満足することで定着具に求められる所要の品質を満足していると判定される.

①定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験 (図-1.2.3)

定着体がコンクリートへ安全にプレストレス力を伝達できるかどうかを確認するための試験であり, 緊張材の規格引張荷重 (P_u) の 100%以上 に耐えうることをとする.

②定着具および接続具を緊張材と組み合わせた性能試験

付着のない状態での静的引張試験であり, 定着具の定着効率および接続具の接続効率が, 緊張材の規格引張荷重 (P_u) の 95%以上とする.

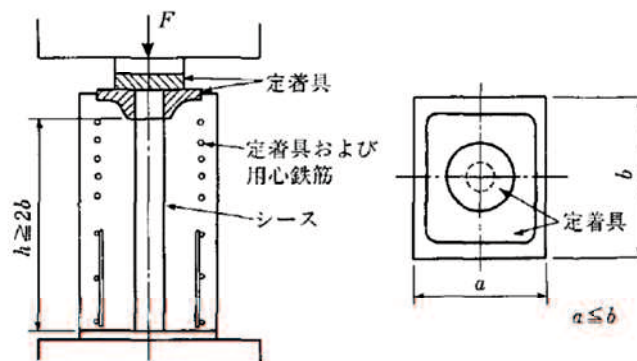


図-1.2.3 定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いる供試体および載荷方法〔土木学会, 2013〕

JSCE-E 503 では, 定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いるコンクリート供試体の 1 辺の長さは定着部の中心からコンクリートの縁までの許容最小距離の 2 倍と規定されており, すなわち短い方の 1 辺の長さが定着部材の許容最小寸法となる. また定着部近傍は用心鉄筋により一様に外周を補強することとし, その用心鉄筋の鉄筋比は 2%以下と規定されている.

1.2.4 プレストレスを利用したコンクリート部材に対する補強工法の現状

(1) 外ケーブル工法

外ケーブル工法はプレストレスを利用した補強工法として最も一般的な工法であり、緊張材をコンクリートの外部に配置し、定着部あるいは変更部を介して部材に緊張力を与えることにより必要な性能の向上を図る工法である(図-1.2.4)。外ケーブル工法は構造物の局所的な補強というよりは、むしろ構造物全体にわたってコンクリート部材の応力状態を改善し、ひび割れ制御やたわみの改善、あるいは単純桁の連続化といった構造系の変更を伴う補強対策において採用されることが多い。緊張材には防錆のため被覆処理したPC鋼材を用いることが一般的であるが、最近では緊張材の腐食が生じないメリットがあるCFRPプレートを緊張材に用いた工法(図-1.2.5)も国内外で実用化されている。しかし外ケーブル工法は、名前の通り部材の外に緊張材を配置する工法であるため、一般的なコンクリート補強工法と同様に部材の周辺に作業空間が必要となる。

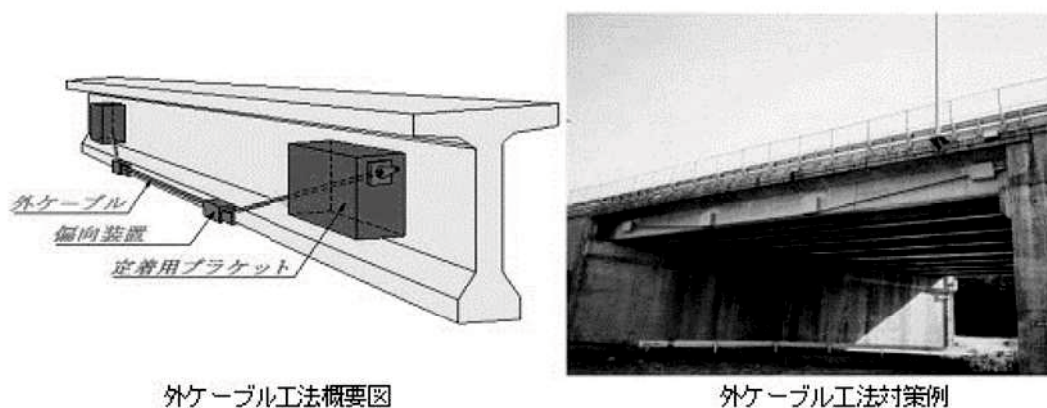


図-1.2.4 外ケーブル工法概念図 [プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2016]

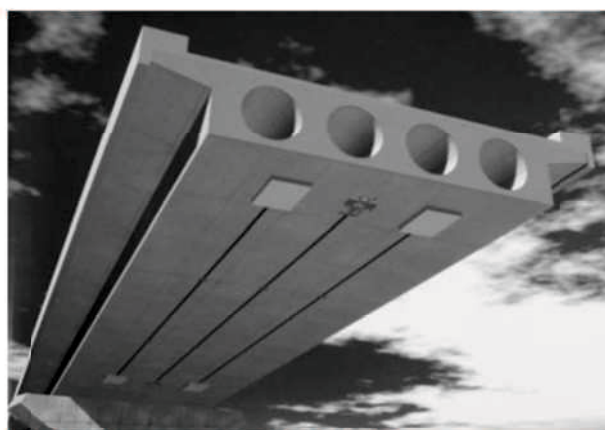


図-1.2.5 CFRPプレートをを用いた外ケーブル工法概念図 [安森ら, 2003]

(2) 中空 PC 鋼棒を用いたプレストレス導入工法

コンクリート部材内に緊張材を配置する工法として、あらかじめ緊張した中空 PC 鋼棒 (図-1.2.6) を用いてプレストレスを導入する工法が国内で実用化されている [中橋ら, 2008]。この工法は、既設のコンクリート構造物に削孔して内面を専用装置で凹凸処理し、あらかじめ緊張された状態の中空 PC 鋼棒をユニットにしたものをこの孔に挿入し、無収縮モルタルなどを注入して、硬化後に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手順で施工される (図-1.2.7)。あらかじめ与えている中空 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 鋼棒にとらせる方法で導入する。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。既設構造物へ適用するプレストレス補強工法ではあるが、プレストレスの導入方式としてはプレテンション方式であるといえよう。充てん材として用いる無収縮モルタルと既設コンクリートとの付着を確保するため、専用装置による孔内の内面処理が必要となる関係から、あまり深い削孔長に対して適用することは難しい。そのため、主に新旧コンクリート部材の打継面にプレストレスを付与して補強し一体化するなど、限られた範囲に対する補強を目的として用いられていることが多い。またこの構造はあらかじめ中空 PC 鋼棒に緊張力を与える必要があり、中空 PC 鋼棒と反力 PC 鋼棒という2種類の鋼棒が必要となることから、必要プレストレスを導入するための鋼材量は通常の工法の2倍程度が見込まれ、材料費は必然的に高くなり、適用範囲が限定される。

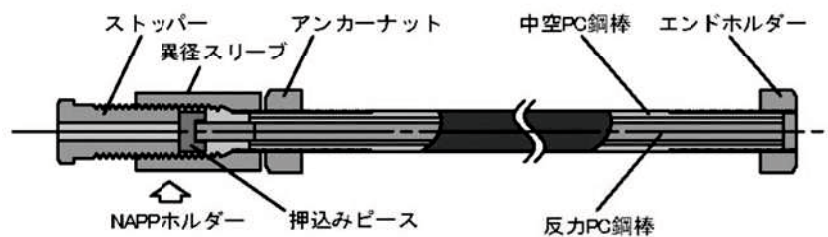


図-1.2.6 中空 PC 鋼棒概念図 [NAPP 工法技術研究会, 2011]

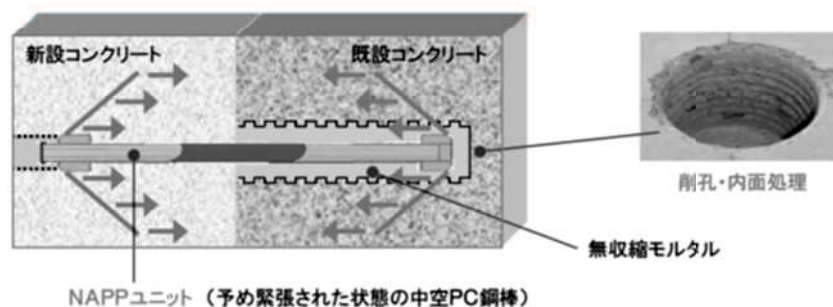


図-1.2.7 中空 PC 鋼棒を用いたプレストレス導入工法 [オリエンタル白石株式会社, 2012]

(3) その他のプレストレス導入工法

既存のポストテンション方式によるプレストレス導入技術を応用した方法として、既設部材を貫通削孔して緊張材を挿入し、一般的に用いられる PC 定着具を両端に配置して、ポストテンション方式でプレストレスを導入して補強する方法もしばしば行われている。一例として既設フーチングの増設に伴う補強にプレストレスを活用した事例を図-1.2.8 に示す。このような補強を行うためには、一般には緊張材の両端において定着具の設置や緊張作業を行うための作業空間が必要となる。また、構造物内の配筋を避けて貫通削孔する必要があり、部材同士の結合部のように鉄筋が輻輳する箇所を貫通削孔する場合など、既設部材の配筋状況によっては必ずしも容易に施工できる方法ではないと考えられる。さらに、プレストレスを導入する方向の部材長が長い場合には削孔長や PC 鋼材長も長くなり、削孔に対する技術的な課題が生じることに加え、例えば打継ぎ部のみに圧縮力を付与するなど部材の一部のみにプレストレスを必要とする場合に、必要範囲に限定して合理的に PC 鋼材を配置することは難しくコストも高くなる。このような既設部材にポストテンション方式でプレストレスを導入しようとするときは、既設部材内に緊張材を固定定着することが合理的であり、施工性にも優れると考えられる。

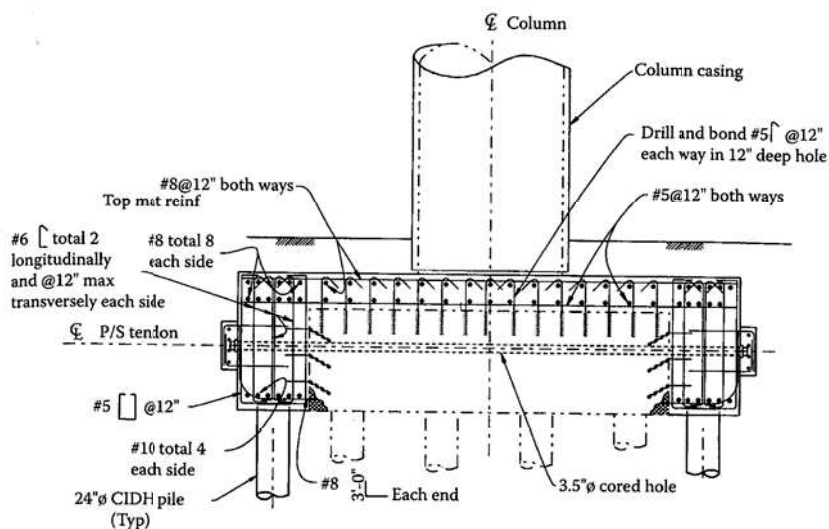


図-1.2.8 プレストレスを用いたフーチング補強例 [Chen ら, 2013]

これまで既設部材内に緊張材を固定定着した事例として、樹脂系接着剤を用いて既設部材内に緊張材の先端を付着させ固定定着してプレストレスを導入した事例 (図-1.2.9) や、鉛直方向にアラミド繊維補強材を配置してグラウトにより固定定着しプレストレスを導入した事例 (図-1.2.10) が報告されている。しかし、これらはいずれも樹脂系接着剤やグラウトなどの充てん材と周辺部材との付着のみに依存した定着構造であるため、付着が失われたときには緊張材が急激に抜け出すことも考えられることから、充てん材は所要の付着性能が確保できるように特に入念に施工することが求められる。また、充てん材はプレストレスによって引抜き力が常時作用することとなるが、樹脂系接着剤の付着に関する長期的耐久性について現状では十分な知見が得られていないとの指摘もあり [トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会, 2013], 適用において明らかにすべき課題も多い。

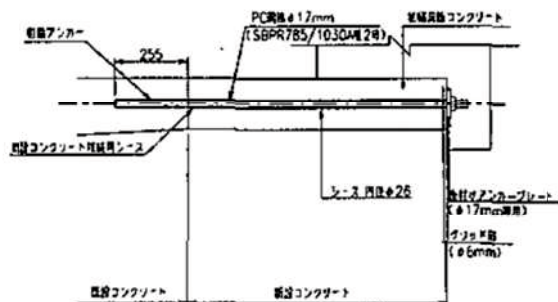


図-1.2.9 樹脂系接着剤により緊張材を固定定着した事例 [日比野ら, 2004]

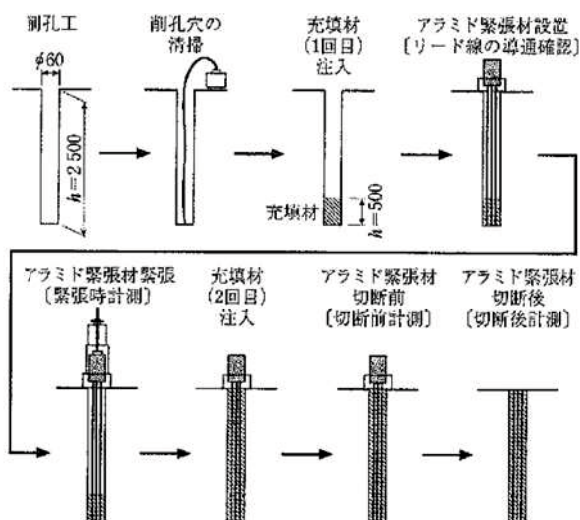


図-1.2.10 グラウトによりアラミド FRP 緊張材を既設部材に固定定着した事例 [加藤ら, 2001]

1.3 既往の論文のレビュー

1.3.1 既設コンクリート構造物の補強に関する研究

既設コンクリート構造物の補強に対する研究は、さまざまな目的で設けられた構造物に対し、作用する荷重や構造特性、環境などの条件や制約に対応できるよう、これまで多くの方法が国内外で研究されてきた。以下にその研究の代表例を列挙して示す。

杉山ら [2006] は、橋脚の耐震補強工法で用いられている RC 巻立て工法を対象に、橋脚基部における曲げ耐力を確保するために重要となる軸方向鉄筋の定着に着目した研究を行った。軸方向鉄筋のフーチングへの定着方法にエポキシ樹脂によるあと施工アンカーを用いた構造を対象として、繰返し載荷に対する定着挙動を調べ、そのモデル化を試みた。その結果、すべり履歴を表現するパラメータをモデルに組み込むことで、種々の載荷履歴を受けるアンカー筋の平均応力-すべり関係を表すことができることを明らかにした。

山口ら [2008] は、既設 RC 橋脚の耐震補強工法として、狭隘な施工条件に対応するための新たな補強工法を研究した。RC 巻立て工法鉄筋に比べ巻立て厚を 1/5 に抑え、巻立て範囲を狭くすることを目的に、鉄筋を既設橋脚表面に接触配置させてポリマーセメントモルタル吹付けにより巻立てを行う工法を検討した。その結果、実施工で標準的に用いられる D22 の鉄筋を用いた付着強度試験およびはり試験により、鉄筋の定着長、既設コンクリート面と補強面との界面の付着特性、はりのせん断補強効果を明らかにした。

園田ら [1988] は、道路橋の床版下面にエポキシ樹脂で鋼板を接着した鋼板接着工法を対象に、補強床版の輪荷重走行に対する力学的特性を明らかにする目的で、損傷度の異なる時期に鋼板接着を施し、その後の走行回数と補強床版の力学的挙動の変化を調べた。その結果、コンクリート断面にせん断ひび割れが発生するような損傷が激しい段階での鋼板接着も補強効果があることを明らかとした。また鋼板接着工法では床版上面のひび割れは防止できないため、雨水浸透による鋼材腐食の防止に留意する必要があることを課題として示した。

星島ら [1998] は、炭素繊維シートによる道路橋床版の補強効果を確認するため、炭素繊維シートの弾性率を変化させるとともに、ベースとなる床版の損傷度が明確な供試体を用いて輪荷重走行疲労試験により補強効果を調べた。損傷した床版の下面に炭素繊維シートを貼り付けて補強することにより、ひび割れ面の動きを拘束することや、断面剛性が向上したわみが小さくなることで床版の劣化速度が著しく低減することがわかった。また、補強する炭素繊維シートの弾性率が高いほど疲労寿命延長に効果があり、炭素繊維シート補強後の床版寿命は 4~16 倍強に延長していると推定される結果が得られた。

小林ら [2005] は、中弾性型炭素繊維シート (ヤング係数: 390kN/mm^2) を使用し、繊維目付け量を従来 ($400\text{g/m}^2 \sim 450\text{g/m}^2$) よりも少ない 200g/m^2 および 300g/m^2 として補強した RC 床版の輪荷重走行試験を実施し、その疲労耐久性を比較検討した。炭素繊維シートの接着方法は、床版中での滞水防止と補強後の床版コンクリートの観察窓を設けるため、主筋方向と配筋方向の炭素繊維シートを、それぞれ間隔を開けて貼り付ける格子接着工法とした。その結果、従来よりも少ない補強量でも RC 床版の疲労耐久性向上に効果があるが、目付け量の多い方が RC 床版のたわみ低減効果や延命効果が高いことを明らかとした。

三田村ら [2010] は、凍害劣化を受けた道路橋床版を延命化させるため、上面コンクリートの損傷劣化

部をウォータージェットなどにより除去してから超早硬コンクリートで埋め戻して補修し、下面の2方向にCFRPシート補強を接着する補強・補修工法の効果を調べた。補強・補修工法を施した供試体を用いて輪荷重走行試験を行い、初期剛性と同等の剛性が得られたことを明らかにした。また、CFRPシートに、鉄筋と比べて大きなひずみが発生し、基準供試体に比べて、鉄筋に生じるひずみは減少すると報告した。

山本ら [1997] は、下水道施設など酸性環境下での連続繊維シートのコンクリート補強への適用性を検討する目的で、連続繊維シート、樹脂、FRP板および補強コンクリートを硫酸水溶液に所定期間浸漬する促進試験後に引張、曲げ、微小硬度および中性化深さ試験を行った。その結果、樹脂には劣化が見られたものの、連続繊維シート、FRP、また連続繊維シート、樹脂およびコンクリートの複合構造としての補強コンクリートに顕著な劣化は認められなかったことを明らかにした。

Shimomura [2006] は、既設コンクリート部材の外周にアラミドやビニロンの連続繊維ローブを巻き付け、その保護を目的とした巻立てコンクリートで被覆する補強方法について基礎的な実験的検討を行った。その結果、鉄筋コンクリート柱部材の正負交番載荷時のじん性を向上させることが明らかになり、既設構造物の耐震補強工法として適用できる可能性を示した。

木村ら [1997] は、炭素繊維を収束・硬化させた炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 板を表面に貼り付けて補強した既存鉄筋コンクリート部材の曲げ性状を実験的に検討した。CFRPによる補強部材は、いずれも鉄筋降伏後に補強材の剥離と、これに伴うコンクリートの圧壊によって終局状態に至ったが、CFRPによる補強量が多いほど曲げ降伏荷重および剥離荷重が増大した。実験結果に基づいて、CFRP補強材の剥離荷重の算定式を提案し、その妥当性を報告した。

堀本ら [2005] は、繊維の方向を任意に設定でき、さらには任意の方向に設定した繊維層を最大4層積層することが可能な多軸繊維シートを使用し、コンクリート部材の補強性能に関する基礎的研究を目的とした円柱供試体による圧縮試験および梁供試体による曲げせん断試験を行った。その結果、斜め方向に繊維を揃えたシートでは円周方向のみの一方向に繊維を揃えたシートよりも急激な破壊に至らないこと、供試体側面をシート補強することで破壊モードがせん断破壊から曲げ破壊に変化していることを報告し、多軸繊維シートが破壊性状に及ぼす影響を明らかにした。

武井ら [1995] は、RC梁部材にテープ状に成型された炭素繊維シートを設置した補強試験体の曲げ載荷試験を行い、補強効果と曲げ性状を調べた。通常、炭素繊維シートは接着剤により既設コンクリートに貼り付けられ、構造上完全に接着したボンド構造として取り扱われている。しかし、実際にはコンクリートおよび接着剤の耐久性や強度の点からボンド構造とアンボンド構造の間を推移すると考えるべきであると指摘し、両構造系での比較試験を行なって相違点を把握し、設計上の留意点について考察した。その結果、炭素繊維テープとコンクリートとの付着が利いた範囲内における耐力はボンド構造の方がアンボンド構造に比べ優位であったが、想定以上の荷重条件などによりボンド構造がアンボンド構造に推移した場合には、アンボンド構造のほうが大変形に至るまで耐力が向上し続けるので構造物のエネルギー吸収能力やじん性の面から好ましい傾向になることを報告した。

小林ら [2007] は、ひび割れ損傷を有する既設建物の布基礎を対象としたT形断面RCはりを作製してガラス繊維シートの片面貼付による補強を行い、その補強効果を実験的に検討した。用いるガラス繊維シートの枚数・貼付位置およびシート剥離を抑制するためのファイバーアンカーの有無をパラメータとし、静的または繰返し曲げ載荷試験を実施した。その結果、ガラス繊維シートによる補強によって、はりの曲げ耐力および変形性能を向上でき、その補強効果はガラス繊維シートの補強量に依存すること、は

りの破壊形式はガラス繊維シートの剥離による剥離破壊型であることを報告した。またシートの剥離耐力向上にファイバーアンカーの施工が有効であることを示した。

岸ら [2001] は、AFRP シート曲げ補強 RC はりの静載荷実験結果を用い、シートの剥離性状を含む RC はりの曲げ耐荷性状を検討した。検討の結果、実験では断面分割法に基づいた計算終局時の変位よりも小さな変位でシートが剥離し終局に至る場合（剥離破壊型）と、計算終局時の変位を上回った後にシートが剥離し終局に至る場合（曲げ圧壊型）があること、これらの破壊形式は主に等せん断力区間における主鉄筋の降伏領域とせん断スパン長の比に依存することを明らかにした。また、本検討結果を基に AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊形式の推定法を提案した。

岡村ら [2003] は、コンクリートの打継ぎを要する補修・補強を対象として、既設コンクリートに対して施す表面処理（はつり）にウォータージェット技術を適用した場合、新旧コンクリートの一体化がどの程度得られるか検討した。ウォータージェット技術によって表面処理条件を変化させた新旧コンクリートの付着性状について、両引き試験と鉄筋コンクリートはりをを用いた繰返し荷重載荷試験を実施した。その結果、平均粗さ Ra が 0.40mm 程度以上の処理深さを確保することで、良好な新旧コンクリートの一体性が得られることを報告した。

1.3.2 PC 定着工法に関する既往の研究

これまでのプレストレストコンクリート技術の発展は、設計・施工技術の研究の他、コンクリートや緊張材などの材料の研究とともに、緊張材を緊張後にコンクリートへ定着するためのPC定着工法の研究の成果によるところが大きい。以下にPC定着工法の中で主にコンクリート内に埋め込んで固定定着した構造を中心に、関連する既往の研究を列挙して示す。

横田 [2009] は、フランスで開発されたフレシネー工法が導入されてから現在に至るまで、国内で用いられているPC定着工法について、それぞれの工法の特徴、ならびに工法導入から現在に至るまでの変遷を報告している。また耐久性向上のため、プレグラウトPC鋼材や樹脂被覆PC鋼材、連続繊維緊張材などの腐食に強い緊張材が開発され、これに対応する定着具も新たに開発されていることを紹介した。

六車ら [1951] は、 $\phi 26\text{mm}$ のPC鋼棒にソロバン状のアンカームッターを取り付けて、周辺をらせん鉄筋で補強した状態で埋設定着したPCはりの静的曲げ試験を行って、定着および定着端コンクリートへの影響を実験的に調べた。その結果、アンカームッターを埋設定着した供試梁と両端に耐圧板を用いた標準供試梁の間に顕著な差は見られず、静的試験の範囲ではアンカームッターによる定着は完全であったことを報告した。

岡田ら [1987] は、鋼製容器（定着ボトル）をあらかじめコンクリート中に埋め込んでおき、後からストランド（SWPR7B 1S12.7mm）を鋼製容器内に挿入して高強度グラウトで固化して埋込み定着体内を形成し、縦方向のプレストレス導入を容易でかつ経済的に行なう後入れ縦方向PCストランドの埋込み定着工法について、鋼製容器内に注入する高強度グラウトの性状、ストランド先端の処理、定着ボトルの形状などの定着性能に関する要因の検討を行った。その結果、グリップのめり込みの大小は高強度グラウトの強度や硬化収縮、ストランド先端に設けた圧着グリップ径の影響を受けること、グラウトはグリップ下方斜め45度のすべり面を形成してせん断破壊すること、圧着グリップの支圧応力ならびにストランドとグラウトの付着応力の累加により定着性能を評価できることを明らかにした。

岡田ら [1988] は、圧着グリップを取り付けた後入れ縦方向PCストランドの埋込み定着部の鋼製容器（定着ボトル）形状、定着ボトル周辺の補強筋などが、短期および3ヶ月間に及ぶ長期的な定着性能に及ぼす影響を検証するための実験を行った。その結果、定着ボトルをくさび形にすれば支圧板による応力緩和の影響で定着ボトルは滑りにくくなり、コンクリート表面のひび割れは小さく幅も小さくなること、グラウトとの付着長が長いほどストランドは滑りにくいことを明らかにした。また定着ボトル内へのストランドの挿入実験を行い、圧着グリップの先端にキャップをつけることで大幅に改善できることを報告した。

柿沢ら [1989] は、圧着グリップを取り付けた後入れ縦方向PCストランドの埋込み定着工法において、シース内に注入するグラウトの有無が長期的な定着性能に及ぼす効果と、定着ボトル内に注入する高強度グラウトの材料特性を実験により調べた。その結果、シース内にグラウトを注入しても、ストランドのすべりを抑える効果は期待できず、ストランドのすべりは主に定着ボトル内グラウトの塑性変形によって生じると考えられることを報告した。また、定着ボトル内に充てんする材料として水セメント比をほぼ同じにした高強度グラウトを用いた場合において、グラウトに砂を混入してモルタルとすることでセメントペーストの0.5倍のめり込みとなることを実験により調べ、充てん材のヤング係数を高めるとストランドのすべりを抑えることができることを明らかとした。

立花ら [2007] は、太径である19本よりPC鋼より線とあらかじめくさびを圧入させた定着具を使用

したプレテンション方式を開発し、定着具性能確認実験やプレストレス導入実験を実施した。通常のコンクリートと PC 鋼材の付着によりプレストレスを伝達する方法では定着端面から鋼材直径の 45~65 倍の伝達長を必要とするが、開発した工法ではくさびの圧入力を導入緊張力の 75%以上で行えば、プレストレスの伝達長を直径の 20 倍程度に短縮することができることを報告した。

今井ら [2001] は、定着ナットを設けた中空 PC 鋼棒と中空 PC 鋼棒内に挿入した反力 PC 鋼棒をユニット化したプレストレス入り中空鋼棒を用いた、アバット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システムについて実験を行い、PC 鋼棒ねじ部の付着と定着用ナットの支圧による複合定着における定着特性をそれぞれ個別に把握することにより、定着状態を定量的に表せることを明らかにした。また実大試験により経時定着性能および定着耐力を調べ、所要の定着性能を有していることを報告した。

中橋ら [2008] は、プレストレス入り中空鋼棒を既設部材のプレストレス補強に用いるため、既設のコンクリート構造物に削孔して内面を凹凸処理した孔に設置し、無収縮モルタルなどを注入して硬化後にプレストレスを導入する工法を開発した。20t 型と 30t 型の中空鋼棒を使用した実験結果から、削孔後の定着部の内壁に凹凸処理を行うことにより、 30N/mm^2 を下回る低強度コンクリート構造物にも定着できることを報告した。また削孔径を小さくする目的で、細径タイプとして 40t 型の中空鋼棒を全ねじ PC 鋼棒と円形薄肉ナットで定着した構造に対する実験を行い、円形薄肉ナット 2 個で定着耐力を満足することを報告した。

久保田ら [2004] は、PC 部材を解体する際に緊張状態にある PC 鋼材を途中定着する目的で、定着用膨張剤 (HEM) を用いた定着具を作成して、CFRP より線 ($\phi 15.2$)、PC 鋼より線 ($\phi 15.2$)、PC 鋼棒 ($\phi 15.0$) の 3 種類に対する中間定着実験を実施した。その結果 HEM 定着部内部にはプレテンション方式と同様の付着長が存在し CFRP より線では約 110mm、PC 鋼より線と PC 鋼棒では約 90mm であったこと、定着機構は重ね合わせの原理で説明できること、HEM をせん断バネと考えた FEM モデルは実験結果をシミュレートできることを明らかにした。

1.3.3 緊張材を用いた補強方法や効果に関する研究

プレストレス技術は重量や寸法の制約を受ける既設構造物の補強方法として適しており、一般的に用いられている外ケーブル工法の他、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った。また外ケーブルによるプレストレスを外力としてモデル化を行い、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、実験値との比較から解析の妥当性について検討した。以上の結果をもとに、既往のせん断耐力算定式が外ケーブル式 PC はりに対しても適用できることを明らかとした。

浅井ら [2007] は、既設桁ウェブ側面に PC 鋼棒を用いて緊結している外ケーブル補強工法の定着装置に着目し、既設桁の打継面の処理方法や緊結力、主桁の傾斜角度は、定着装置の滑動する荷重に大きな影響を及ぼす要因と考えられることから、実物大試験体の載荷試験を行い、これらの要因について検討した。その結果、従来、打継処理に用いられてきたチップング処理に比べ、サンドブラスト処理やウォータージェット処理を行うと、最大荷重は大幅に増加することを明らかとした。また、定着装置を既設桁の傾斜した位置に設けると、傾斜角に応じて最大荷重は低下するが、適切な打継処理を行った定着装置の PC 鋼棒張力は、定着装置の滑動変位が小さければ損失しないことを報告した。

遣田ら [2004] は、旧基準で設計された既存不適格なスラブ付き梁を対象として、梁部材の鉛直方向外周に配置した PC 鋼棒を用いてプレストレスを導入し耐震補強することを提案した。せん断終局強度、せん断ひび割れ抑制への影響を検討することを目的とし、プレストレス導入量、PC 鋼棒径およびその配置間隔を変数として実験を行った。せん断ひび割れ強度はプレストレスを導入することで大きくなる傾向が見られ、同じ補強量でも配置間隔を狭くした方が大きくなること、せん断補強筋とせん断ひび割れのなす角度は、プレストレス導入量に比例して小さくなることを報告した。

加藤ら [2001] は、既設橋脚フーチングのせん断耐力不足を補うため、フーチングの鉛直方向にコア削孔した後、アラミド繊維補強材を配置してグラウトの付着により内部定着し、プレストレスを導入した事例を報告した。アラミド繊維補強材は耐腐食性の高さや付着による定着が可能であることを考慮して選定しており、導入プレストレス 432kN に対して 500mm の定着長を設けて施工した結果、所定の緊張力が導入されていることを示した。

河野ら [2012] は、ASR による損傷を受けたフーチングを想定して製作した供試体に対し、炭素繊維シート貼りつけ、水平プレストレス導入、鉛直プレストレス導入による補強をそれぞれ行なって載荷実験を行った。その結果、炭素繊維シート貼りつけによる補強および水平プレストレス導入による補強はフーチングの曲げ剛性および耐力の回復に寄与すること、鉛直プレストレス導入による補強はフーチングのせん断耐力向上に寄与することを報告した。

呉ら [2000] は、連続繊維シートの緊張接着による RC 曲げ部材への補強効果を検討する目的で実験検討を実施した。その結果、無筋供試体だけでなく、主筋やせん断補強筋の鉄筋比の影響を受ける RC 供試体においても CFRP シートの緊張による曲げ耐力の補強効果およびひび割れ抑制効果が十分あることを明らかにした。また、CFRP シートの端部定着を十分に確保しなければならないこと、供試体の補強前のせん断強度によって CFRP シートの緊張接着による補強効果が大きく影響をうけることを実証した。さらに、通常の RC 梁理論の適用性を検討し、破壊モードごとに補強梁の曲げ耐力の算定および実験値との比較を報告した。

El-Hacha ら [2001] は、積層加工した CFRP 材を用いてプレストレス補強した構造を対象に、補強材の特性や、開発技術、実施工例を紹介した。プレストレスした CFRP 積層材を用いることで、活荷重だけでなく死荷重に対しても補強できること、降伏耐力の向上が見込めることを示した。一方、剥離を避けるため、定着部には特別の注意が必要であると報告した。

濱田ら [2002] は、引抜き形成された幅 50mm 厚さ 2mm の炭素繊維プレートを専用定着具で緊張・定着することにより、既存コンクリート部材にプレストレスを導入して補強する方法を実用化することを目的として、緊張した炭素繊維プレートで補強した RC はりの曲げ疲労載荷試験を実施し、その補強効果を検討した。その結果、補強した RC 梁の曲げ破壊耐力は、炭素繊維プレートの緊張力が大きいほど大きくなった。また、中間定着具を設置することで、炭素繊維プレートの剥離を遅延することができ、部材の変形状と曲げ破壊耐力を効果的に改善できることを明らかにした。また、炭素繊維プレートの緊張力を大きくすると、補強した RC はりの疲労寿命は大きくなり、200 万回疲労強度は静的曲げ耐力の約 50% 程度であることを報告した。

Kim ら [2010] は、プレストレスした CFRP 積層材を用いたプレストレスコンクリートはりを補強するためのプレストレスレベルの効果を調べた。その結果、CFRP 積層材のプレストレスレベルが補強したはりの荷重-たわみ応答に大きな影響を及ぼすことを示し、CFRP 積層材におけるプレストレスのレベルが補強したはりの塑性エネルギーと復元性に影響を与えることを明らかとした。プレストレスした CFRP 積層材をコンクリートはりの補強に用いる場合は、CFRP 積層材の終局設計ひずみに対して 20%~30% の間のプレストレスレベルとすることが推奨されることを示した。

Schmidt ら [2012] は、FRP 緊張材に用いる機械的な定着構造として、スパイク、ウェッジ、クランプの三つを示し、定着部の破壊モードは過度の主応力、局地的な圧壊、樹脂層の摩耗による界面すべりとなる傾向があるが、これらのすべてを解析的に予測することは困難であることを示した。

You ら [2012] は、RC 梁の補強のための緊張力を導入した CFRP システムの有効性と実現可能性を研究した。プレストレスを導入した CFRP 帯板を設置したコンクリート梁の静的載荷試験を実施し、導入プレストレスのレベル、CFRP 帯板の両端部における機械的な定着具の使用による影響を比較した。その結果、プレストレスを導入した CFRP 帯板を用いて補強した梁は、一定のレベルまでプレストレスを与えることで、高い初期ひび割れ、高い降伏点、高い曲げ耐力を示すことを明らかにし、最大プレストレスを CFRP 帯板の引張強さの 50% とすることを提案した。

Michels ら [2013, 2014] は、高温で加熱硬化する接着剤を用いて定着具を用いずに緊張した CFRP 帯板を定着する方法を研究した。この構造を採用することで、金属部品が不要となるため外観もよく耐久性も高く、作業時間や人員も少なくすむという利点を示した。また材料試験では、CFRP 帯板が加熱中に損傷を受けず、加熱後の引張強さが基準値と同一であることを明らかとした。プレストレスした CFRP 帯板で補強したはりを用いた実験では、ひび割れおよび終局荷重が増加することを示した。

El-Hacha ら [2003] は、コンクリートの表面に溝を掘り、そこに設置した FRP 補強材を緊張してエポキシ樹脂で埋め戻した構造を研究した。プレストレス力が増えるに従いひび割れ発生荷重が増加することやたわみを減少させる効果があること、一方でプレストレスレベルが増加するにつれて補強したはりの塑性後の変形能は低下する結果を示した。さらにエポキシ樹脂で埋め戻す緊張材を砂でコーティングした FRP ロッドとすることで、螺旋状の FRP ロッドより定着長が短くなることを示した。また、砂でコーティングした FRP ロッドは接着疲労性も優れることを明らかとした。

Kimら[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帯板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定着構造について研究した。その結果、アンカー領域の破壊は、定着体のアンカーボルトのせん断による破壊よりも、コンクリートの破壊によって制御されることを示した。

Yurdakulら[2016]は、外付けしたポストテンションロッドをRC外部柱梁接合部の補強に使う方法を提案し、接合部のせん断補強不足や低強度コンクリート、丸鋼使用などの欠点がある供試体を準備して、正負交番載荷実験を実施して補強方法の有用性を明らかにした。

日比野ら[2004]は、既設橋の床版拡幅工事において、拡幅する床版の打継ぎ部に対するひび割れ抑制と耐久性向上を目的として、既設床版に樹脂アンカーを用いてPC鋼棒を埋込み定着したことを報告した。PC鋼棒φ17mm(SBPR785/1030 A種2号)を定着するため、既設床版に255mmの定着長を設けて施工したことが紹介されている。

1.3.4 内部くさびに関する研究

百瀬ら [1990] は、埋込深さを変えた4種類のアンダーカット型アンカーボルトについて静的引抜き試験を行い、さらにコンクリートブロック端部からボルト埋込位置までの距離（へりあき距離）をパラメータとした試験も行い、コンクリートがコーン状に破壊する場合の一般的な耐荷機構、破壊のメカニズムを検討し、それに基づいて静的引抜き耐力算定方法を提案した。

蛭子ら [1994] は、ロックアンカーの破壊機構の解明を目的に原位置引抜き実験および拡底形式を含めた模型引抜き実験を実施し、ロックアンカーには引張部とアンカー体の内部に形成される境界面の破壊、拡底形式アンカー模型では地盤の強度に依存した逆円錐形状の破壊面が認められることを報告した。

吉田ら [2001] は、特殊なドリルによりアンカー打込み前にコンクリート躯体に拡底部を成形し、拡底部を母材にネジ込むことで、自由に埋込長を設定でき、コンクリート躯体にストレスを与えずに施工する拡底式あと施工アンカーを考案した。そして拡底式あと施工アンカーの引張耐力と疲労特性を把握するために引抜き試験と疲労試験を行った結果、繰返し回数 200 万回疲労試験後の引抜き試験でも母材の破断まで耐力を有することを報告した。

山本ら [2001] は、壁式橋脚の耐震補強において中間貫通 PC 鋼棒と同様の効果を有する方法として、既設橋脚に途中定着する拡底式アンカーを用いる方法を提案し、拡底式アンカーのアンカー施工位置にひび割れが発生した場合の引抜き耐力と、壁式橋脚のじん性補強に適用した場合の補強効果について検討した。その結果、拡底式アンカーはアンカーの施工位置に幅 1mm 程度（径の 1/15 程度）までのひび割れが生じた場合でも規格母材降伏耐力以上の引抜き耐力を保持すること、既設橋脚に途中定着する拡底式アンカーによって中間貫通 PC 鋼棒と同様のじん補強効果が期待でき、既往の耐震設計手法により耐力及び変形性能を評価できたことを報告した。

酒井ら [2002] は、アンカースラブ上面が傾いた拡底基礎アンカーの拡底角度がアンカー引抜き荷重に及ぼす影響について、豊浦標準砂を用いた密詰め地盤によるモデル実験および有限要素解析から検討を行い、その結果、実験および解析結果とも拡底角度 60 度から 70 度付近で引抜き荷重が最大となることを明らかとした。この原因を、引抜き荷重と変位との関係、およびせん断帯の発達過程の面から検討を行った結果、地盤の進行性破壊の差異が原因であることを明らかとした。

瀬崎ら [2005] は、グラウンドアンカーのアンカー体をくさび形の連続体として生成し、引張り方向への移動によりアンカー体のある点のくさびの径が大きくなる（拡径機能）ことを利用し、側方地盤への支圧力を増大させてアンカー体全長にわたって周辺地盤に荷重を分散（荷重分散機能）させる荷重分散式支圧型（くさび型）アンカーを提案し、実験結果を基にしたアンカーの支持機構について報告した。

澤松ら [2010] は、従来のグラウンドアンカーと比較してアンカー体部を拡大した拡径型アンカーの引抜き特性について検討するため、アンカー体の直径、長さ、アンカー傾角などをパラメータとした遠心模型実験を実施した。また、半断面形状のアンカー模型を用いて土槽のガラス面において鏡像対称場を再現し、種々のアンカー傾角のもとで引抜き時の地盤の変形挙動を観察した。その結果、拡径型アンカーは従来型アンカーと比べ、支圧抵抗が付加されることにより摩擦抵抗がピークに至った後も急激に引抜き力が低下しないこと、摩擦抵抗の最大値と支圧抵抗の最大値をそれぞれ計算して単純に足し合わせると、引抜き力を過大に評価することを明らかにした。

伏屋ら [2010] は、軟弱地盤へグラウンドアンカーを適用するため、定着長部を拡孔しアンカー体の周面摩擦抵抗力に加え支圧抵抗力によりアンカー機能を発揮する拡孔式グラウンドアンカー工法の引抜き

実験を実施した。その結果、摩擦抵抗力と支圧抵抗力が同時に作用することは無く、拡孔式アンカーの極限引抜き力を推定する場合、摩擦抵抗力を考えず支圧抵抗力だけで考えるべきであること、拡孔式アンカーでは載荷中に摩擦抵抗力の縁切れが発生する可能性があるが、その場合でも直後に支圧抵抗力が発現し健全なアンカー機能が保たれること、拡孔式アンカーは軟弱層に対する山留め架工として極めて有効であり、従来型の摩擦形式アンカーでは施工不能であった地盤に対しても十分なアンカー機能を発揮できることを報告した。

轟ら [2012] は、金属拡張式あと施工アンカーの先端が円錐台状に拡張する拡底式あと施工アンカーを対象として、埋込み長や径、アンカータイプをパラメータとした静的せん断試験とせん断疲労試験を行い、アンカーの埋込み長が小さいときはコンクリートのはく離破壊、長い場合はボルト破壊になること、変動荷重 15kN として繰り返し回数 200 万回の疲労試験においてアンカーおよびコンクリート内部に損傷がないことを報告した。

長田ら [2012] は、地山補強土工法において拡孔型補強材を適用するため、拡孔削孔方法の検討や実大実験施工を実施し、先端部を拡孔した補強材は拡孔部分の側面積の増大により摩擦抵抗だけで比較しても通常の補強材より引張り抵抗力が増大したことを報告している。

平林ら [2013] は、接着系あと施工アンカーの高耐力化、信頼性向上を目的に、アンカー筋先端にテーパ型先端定着体を設ける工法を考案し、実験により変位・荷重の関係と比較した。その結果、テーパ型先端定着体による破壊形状は充てん材を押し拡げながら定着体が抜けていく挙動を示すこと、テーパ角 θ が同じ場合テーパ面に摩擦力が生じることで耐荷力が上昇すること、テーパ型先端定着体の底部と首部が同じ寸法の場合テーパ角 θ が小さいほど大きな耐荷力となることを明らかにし、テーパ型先端定着体の引抜き抵抗力の設計式を提案した。

Mahrenholtz ら [2013] は、原子力発電所に使用される拡底式のあと施工アンカーに対する荷重の周波数の影響を調べ、準静的荷重に比べて荷重の周波数を増加させても有意な結果は得られなかったことを報告した。さらに Mahrenholtz ら [2015] は、原子力発電所に使用される拡底式のあと施工アンカーに対する引張とせん断試験を行い、引張に対しては定着したコンクリートの亀裂によって破壊し、せん断に対しては鋼材が破壊すること報告した。

齋藤ら [2013] は、無収縮モルタル接着系あと施工アンカーのためにコア削孔した孔内を特殊コアビットやコアカッターなどの複数の方法により目粗しを行い定着耐力を高める方法を検討し、目粗しにより鉄筋引抜き荷重以上のグラウト引抜き荷重になることを報告した。

矢島ら [2013] は、先端および中間部に拡径部を有する杭の引抜き試験を行い、拡径部の抵抗が大きく発揮されていること、変位の増加に伴い拡径部の荷重負担率が増加していることを報告した。

小林ら [2016] は、あと施工アンカーの高耐力化のため PC 鋼棒のネジ部にテーパ型のナットをはめ込み先端定着体にした構造に対し、破壊挙動に着目した引抜き実験を行った結果、埋込み長を PC 鋼棒径の 20 倍とすることで PC 鋼棒が破断する安定した破壊形態となり、破断後のコンクリート表面の状況は無損傷であることを報告した。

1.4 本研究の目的

今後我々が持続可能な社会を構築するには、コンクリート構造物を適切に維持管理して性能を保つだけでなく、ニーズの変化に応じて構造物を補強・改良して、資産として有効活用することが求められるため、厳しい施工環境やさまざまな条件に適合する工法が求められている。

これまで多くの補強工法が研究され実施されてきたが、コンクリート構造物の補強に用いられる工法の多くは、構造物外部に補強部材を設けて部材を補強する方法であった。そのため、例えば土中や水中にある構造物を補強しようとする、締切や土留などの仮設構造物に費用がかかり、施工条件によっては周辺構造への影響が生じることから、場合によっては補強対策を実施することが困難であることも多いものと推察される。またプレストレスを用いた補強工法として一般的である外ケーブル工法は、一般的なコンクリート補強工法と同様に部材の周辺に作業空間が必要となるという問題がある。部材内に配置した中空 PC 鋼棒を用いたプレストレス導入工法も提案されているが、構造上鋼材量が多くなるためコスト面の課題がある。その他、充てん材を用いて緊張材を付着により固定定着する研究も行われているが、充てん材の付着に依存した構造であるため、持続载荷した状態における付着性能の長期耐久性など明らかにすべき課題もある。

このような課題に対処するため、既設コンクリート内部にあと施工によってくさび状のコンパクトな固定定着構造を設け、そこに定着した汎用品の PC 鋼材を用いてプレストレスを導入し、既設部材の内部補強あるいは新旧部材の一体化を図るプレストレス補強工法（図-1.4.1）の開発を本研究の対象とした。本工法の固定定着構造は、既設コンクリートの削孔最深部を専用削孔機によって円錐台形に拡張削孔し、先端にモルタルとの噛合を高めるための突起を設けた PC 鋼材を挿入し、緊張してから充てん材で拡張削孔部を満たすことにより、硬化した充てん材を通じて PC 鋼材に装着したリングナットと既設コンクリートが噛み合っ内部くさびとなり PC 鋼材に作用する引抜き力に機械的に抵抗する構造である。本工法では、緊張側に一般的な PC 定着具を用いるため、緊張材の種類に応じて拡張削孔のサイズを任意に変えることで、PC 鋼棒や PC 鋼より線といった一般的に緊張材として用いられている PC 鋼材だけでなく、近年研究が進んでいる CFRP に代表される非金属系の緊張材など幅広い緊張材に対応できる汎用性を有していると考えている。また、プレストレスは既設部材とプレキャスト部材の接合にも用いることができるため、本工法をプレキャスト部材の増設工事に採用することで生産性向上にも寄与できることが期待される。

しかしながら、現段階ではコンクリート構造物内部に拡張削孔を行って PC 鋼材を固定定着してプレストレスを与える工法に関する既往の研究は見られず、工法の要となる固定定着構造に関する基礎的データが充分でないため、使用材料や適用性などにおいて明らかにすべき課題も残されていた。また PC 鋼棒に与えた緊張力が固定定着構造に対する引抜き力として持続的に作用するため、固定定着構造の定着耐力だけでなく長期的な定着性能も明確にする必要があった。さらに、本工法を適用した構造に対する補強効果についても明らかにすべき課題であると考えられた。そこで本研究は、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 SBPR930/1080（以下、丸鋼 B 種 1 号）を緊張材に使用した構造を想定し、本工法の実用化を目指して、これらの課題を明らかにすることを目的とした。

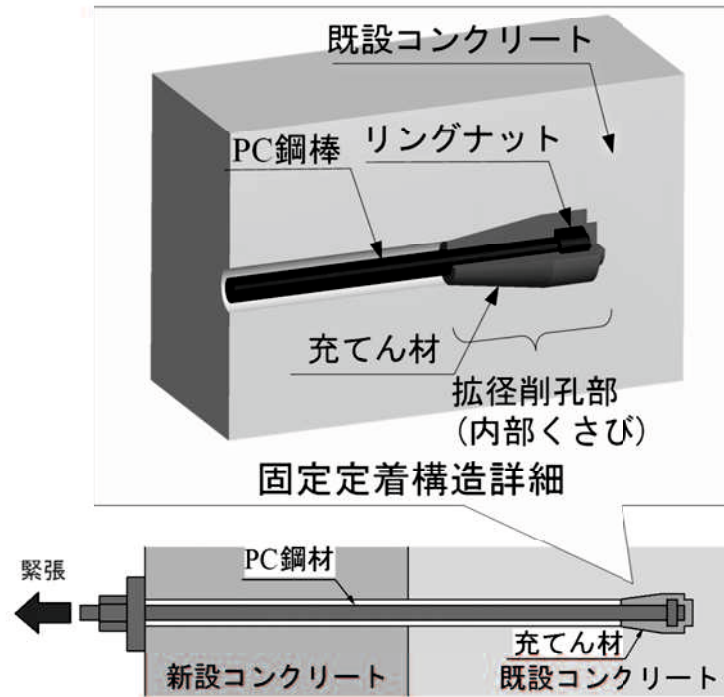


図-1.4.1 プレストレス補強工法の模式図

1.5 論文の構成

本論文は、序論と結論を含め、計 6 章から構成されている。本論文の構成フローを図-1.5.1 に示すとともに、各章の概要を以下に列記する。

第 1 章：序論

コンクリート構造物の補強に関する現状について述べるとともに、プレストレストコンクリートの概要と補強への適用事例を例示した。また、本研究に関連する既往の研究についてまとめるとともに、本研究の位置付けを明確にした。

第 2 章 開発したプレストレス補強工法の特徴

提案するプレストレス補強工法について、優位性や適用対象、工法の施工手順、固定定着構造を構築するための拡径削孔方法や固定定着構造の定着機構、工法の適用範囲や留意点を示した。

第 3 章：PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討

既設コンクリート中に構築する固定定着構造の耐荷性能に焦点を当て、 $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒 SBPR930/1080（以下、丸鋼 B 種 I 号）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を実施して耐荷性能の違いを調べ、固定定着構造のディテールを定めた。

第 4 章：固定定着した PC 鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討

PC 鋼棒を緊張して引抜き力を与えた状態における定着性能を調べるとともに、設計に関する基礎データを得るため、実構造を模した供試体を準備し引抜き実験を実施して耐荷性能を調べた。また、緊張力を持続載荷した状態に対する定着性能を調べるため、載荷期間 1 年におよぶ持続載荷実験を実施し、定着性能の経時変化を明らかにした。

第 5 章：打継ぎ部を有するコンクリートはりの実験的検討

本工法の補強効果を調べるため、打継ぎを設けた実大はり供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、プレストレス補強工法を行った構造と一般的な RC 構造のあと施工アンカーによる打継ぎ構造を比較検討した。さらに耐久性を比較するため、打継ぎ部における塩分浸透性を対比して調べた。

第 6 章：結論

本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題を整理し、さらに本工法の展開について整理した。

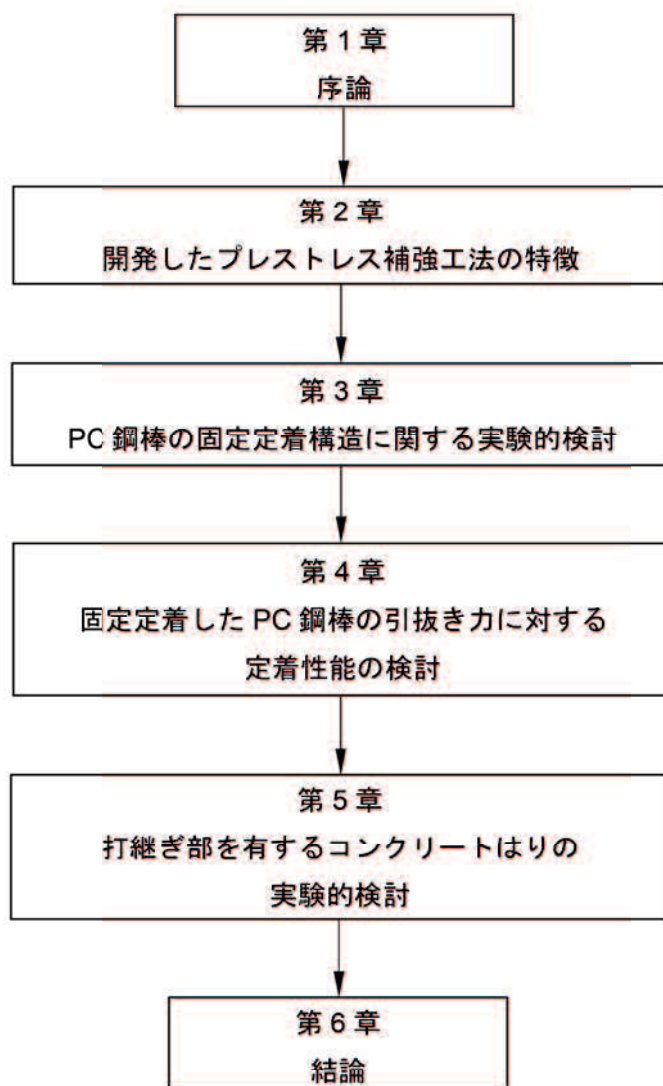


図-1.5.1 本論文の構成フロー

第 2 章

開発したプレストレス補強工法の特徴

第2章 開発したプレストレス補強工法の特徴

2.1 工法概要

本研究で対象とするプレストレス補強工法は、図-2.1.1に示すように、既設コンクリート内部にあと施工によって内部くさびを構築するコンパクトな固定定着構造を設け、そこに定着したPC鋼材によって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、コア削孔した最深部を専用削孔機で円錐台形に拡径削孔し、そこをリングナットによる突起を設けたPC鋼材と高強度の充てん材で満たすことにより、硬化した充てん材を介してPC鋼材に装着したリングナットと既設コンクリートが噛み合い、内部くさびとなって引抜き力に対して定着体として機能することにある。本工法を構造物に適用した時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。
- ・ 新旧コンクリートを一体化する場合、プレストレスによりあと施工アンカーの本数を少なくできる。
- ・ 新旧コンクリートの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構造に比べひび割れ抵抗性を向上させることができる。
- ・ 新コンクリート側に工程短縮が図れるプレキャスト部材を用いて、旧部材とプレストレスで一体化することも可能である。

本工法と従来工法との相違点は、PC鋼材の一端をコンクリート内部に固定定着することで、鋼材の片側のみに削孔やPC鋼材を緊張固定するスペースが確保できれば、固定定着側や補強部材周辺に施工空間が確保できない状態でもプレストレスによる補強が可能となることである（図-2.1.2）。また部材中間の任意の位置で固定定着部を形成できるため、従来工法のように部材全体を貫通削孔してPC鋼材を配置し両側に定着具を設ける必要がなく、プレストレスが必要な箇所へ合理的にPC鋼材を配置することが可能となる。

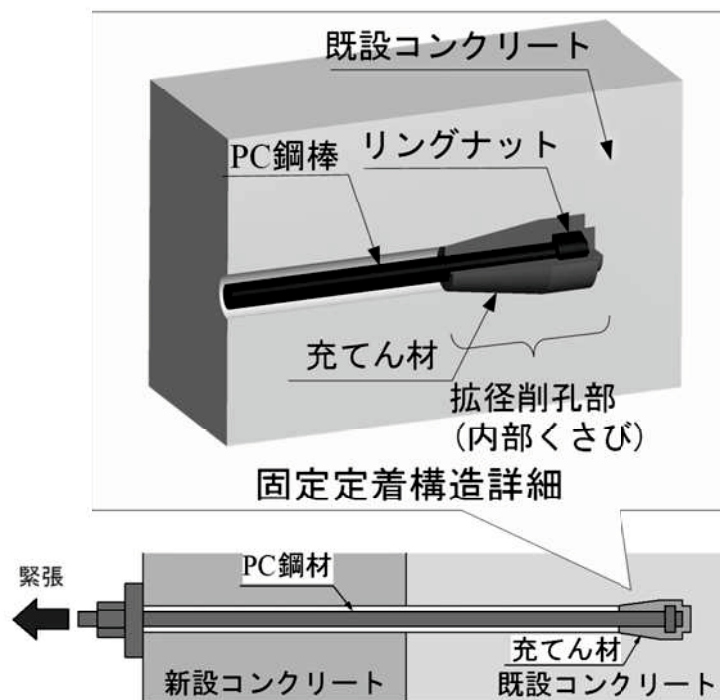


図-2.1.1 工法の模式図

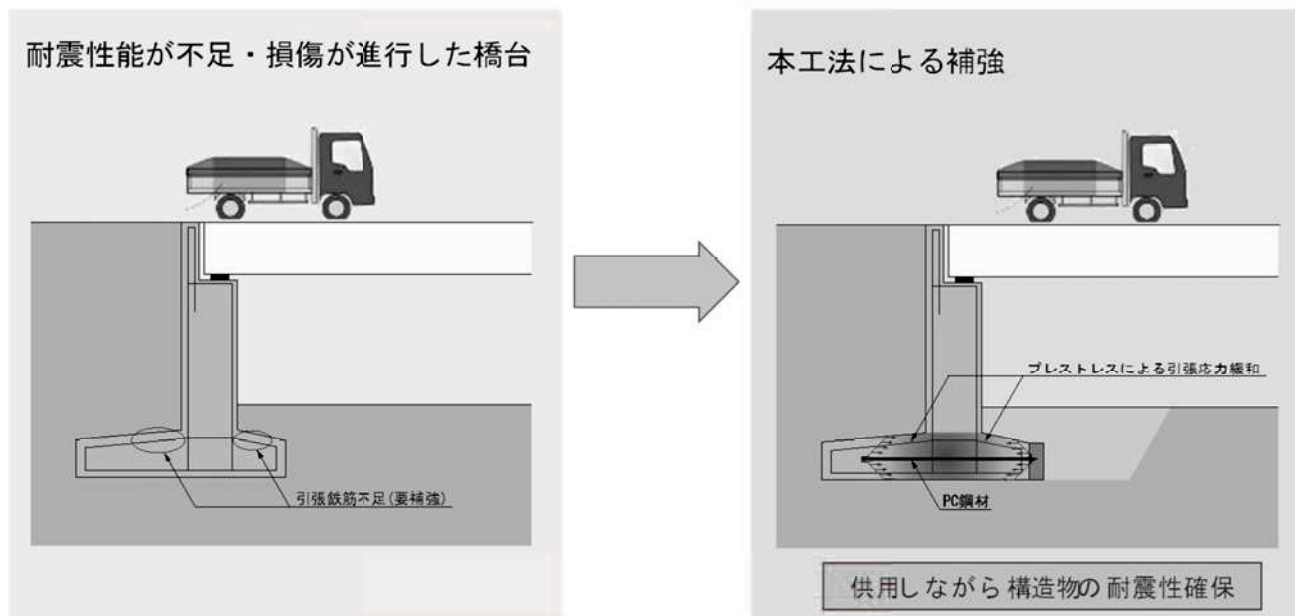


図-2.1.2 工法の適用例

2.2 工法の適用対象

本工法は、主に既設部材のプレストレス補強や新旧部材のプレストレスによる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、既設部材のプレストレス補強であるが、既設構造物に導入したプレストレスにより補強する部材の寸法を変えずに補強を行うことが可能となるという特徴がある（以下、内部補強と称す）。削孔や緊張に必要な作業空間を確保することができれば補強することが可能となるため、特に補強しようとする部材周辺に作業空間を確保しようとする仮設等が大掛かりとなりコストや技術的な課題がある土中や水中の構造物に対して適用性が高いと考えている。図-2.2.1は土中や水中のケーソン基礎の内部補強の概念図であるが、ケーソン基礎周辺に作業空間を設けずに、補強が必要となるケーソン基礎の上部に対してプレストレスによって圧縮力を与えて補強するイメージを示している。

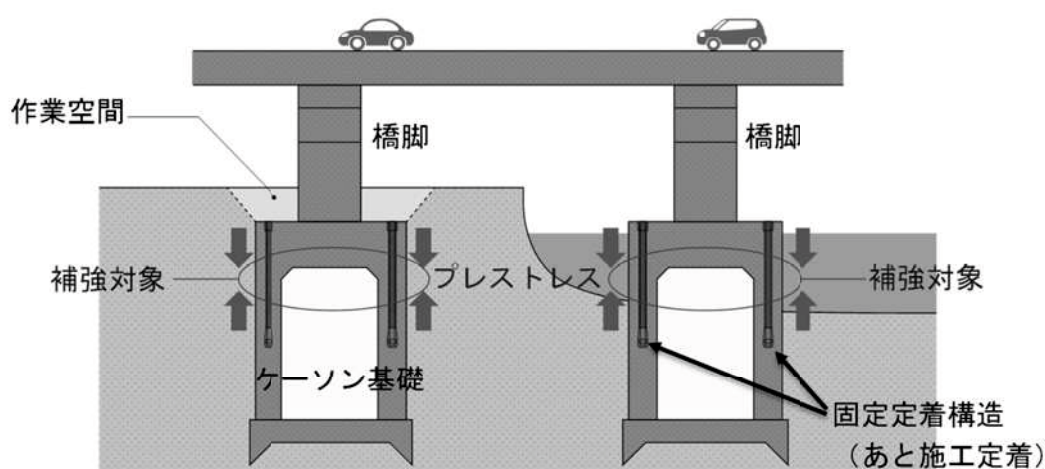
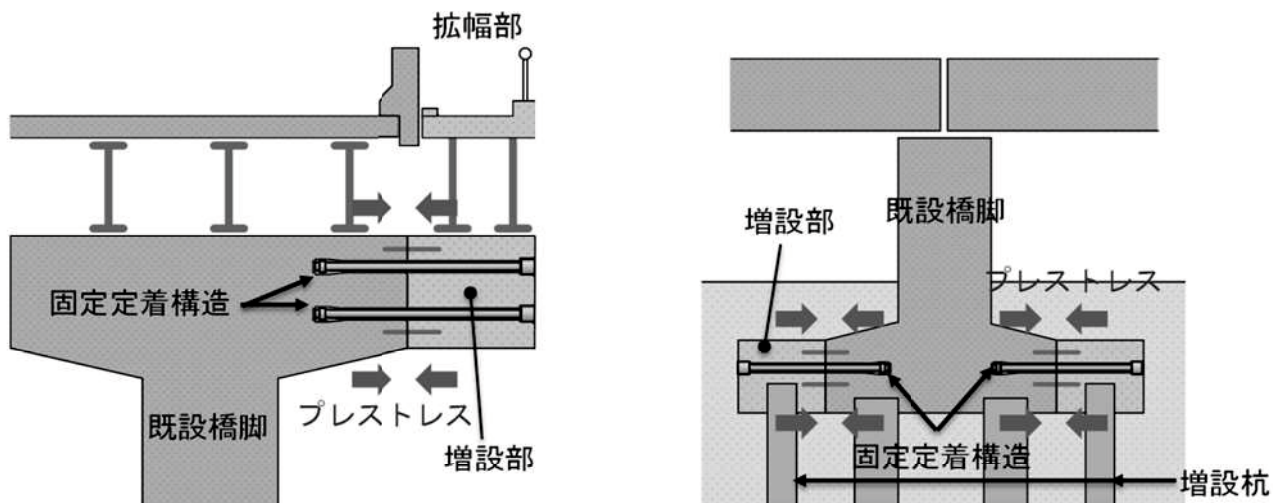


図-2.2.1 土中や水中のケーソン基礎に対する内部補強の概念図

次に、新旧部材のプレストレスによる一体化であるが、既設構造物に部材を打ち継ぐ場合において、打ち継ぎ面に対して直交するようにプレストレスを導入すれば、弱点になりやすい新旧部材打ち継ぎ面のひび割れ抵抗性を向上できるという特徴がある（以下、新旧一体化と称す）。新旧一体化の場合、プレストレスは打ち継ぎ面に対して導入することになるため、PC鋼材は打ち継ぎ面にプレストレスを導入できる一定の範囲にのみ配置すればよいことから、部材内部に固定定着構造を設けることで合理的なPC鋼材配置とすることができる。図-2.2.2は橋脚はりやフーチングの増設による打ち継ぎ面における新旧一体化の概念図であるが、プレストレスによるひび割れ抵抗性の向上やあと施工アンカーの本数減少に伴う施工性の向上が期待できる。



a) 橋の拡幅に伴う橋脚はりの増設部の新旧一体化 b) 杭の増設に伴う橋脚フーチングの新旧一体化

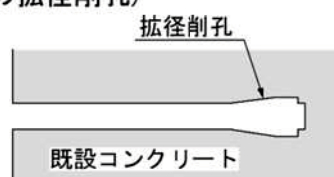
図-2.2.2 新旧一体化の概念図

2.3 施工手順

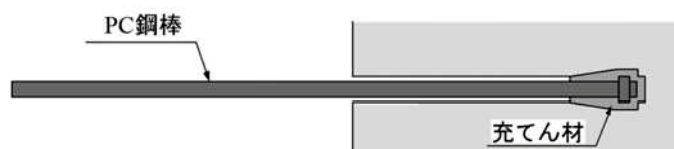
本工法の施工は図-2.3.1に示すSTEP1~4の手順で行う。

- STEP1: 既設コンクリート部材を等径でコア削孔した後、最深部を専用の削孔ビットを使用して円錐型に拡径削孔する。
- STEP2: 削孔部へリングナットを先端に装着したPC鋼棒を挿入して、高強度の充てん材で拡径削孔した固定定着部を満たす。
- STEP3: 充てん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、PC鋼棒を片引き緊張してプレストレスを導入する。導入緊張力の最大値はコンクリート標準示方書〔設計編〕〔土木学会, 2012〕に規定された緊張作業中の緊張材の引張応力度の制限値（使用するPC鋼材の引張強度 P_u の0.80倍または降伏強度 P_y の0.90倍の低い方の値）を下回るように設定する。また、緊張側の定着方式はPC鋼棒の定着工法として一般的に用いられている普通PC鋼棒工法によるねじ式の定着方式を用いる。
- STEP4: プレストレス導入後、PC鋼棒の防錆および部材と一体化させる目的で、PC鋼棒周辺にセメントミルクによるPCグラウトを注入する。

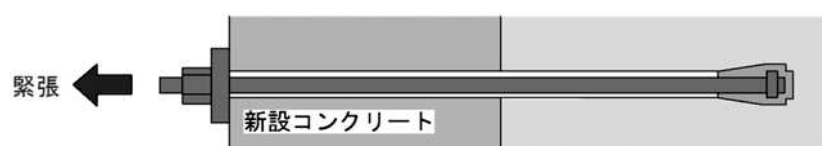
STEP1: コンクリートコア削孔(最深部の拡径削孔)



STEP2: PC鋼材挿入・先端部の充てん材による固定



STEP3: 新設コンクリート打設・緊張



STEP4: PCグラウト施工

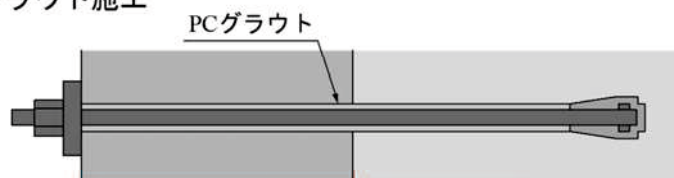


図-2.3.1 施工手順

2.4 拡径削孔方法

固定定着構造を構築するための拡径削孔は図-2.4.1に示す専用の削孔ビット（以下、拡径ビット）を用いて行う。この拡径ビットはコア削孔機のアタッチメントとして開発された特殊ビットであり、先端のアタッチメントをコアビットと取り替えることで、削孔機を取り替えることなくコア削孔から連続して拡径作業が行うことができる。

拡径ビットはコンクリート面を削るセグメントを取り付けたケーシングと、先端リングと結合したシャフトで構成されており、シャフトは途中が膨らんだ形状となっている。コア削孔部に挿入したビットの先端リングが削孔先端に達した後、ケーシングを回転しながらさらに奥に押し込むことで、ケーシング内に格納しているセグメントがシャフトの形状に応じて外周へ徐々に押し出される。これによって、コンクリート内部に円錐台と円筒を組み合わせた形状のダクトを形成するように拡径削孔できる（図-2.4.2）。なお、先端リング付近のシャフトには膨らみがないため、ケーシングを先端まで押し込むと、拡径削孔前の状態と同様にセグメントをケーシング内に格納することができ、削孔後に拡径ビットを引き抜いて回収し再利用することができる構造となっている。削孔が終了したら、孔内に残った水分や不純物を吸引して取り除き清掃を行う。

試作した拡径ビットを用いて拡径削孔したコンクリート内部に型取り材を充てんし、硬化後コンクリート内から取り出して削孔形状を計測した結果、専用の拡径ビットを用いて設計寸法である 70mm で拡径削孔可能であることを確認している（図-2.4.3）。

なお、コア削孔径がφ42mmの場合、拡径ビットの構造上の制約から、拡径削孔径の設計値は新品の状態でφ70mmとし、摩耗による限界はφ66mmと設定した。実施工では目視確認が困難な削孔径について図-2.4.4に示す専用の計測器（シリンダーゲージ）で計測管理することを想定している。

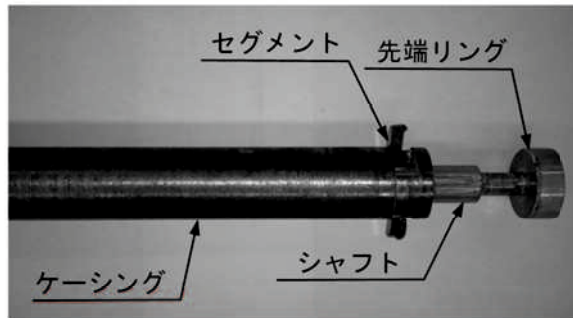


図-2.4.1 拡径ビット

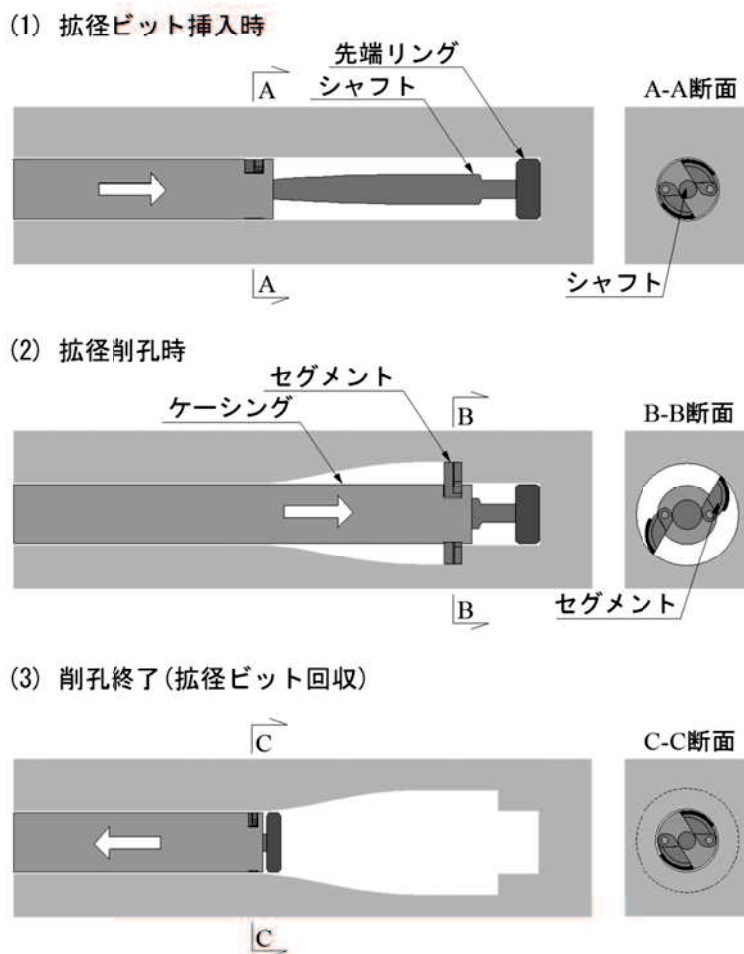


図-2.4.2 拡径ビットによる削孔手順

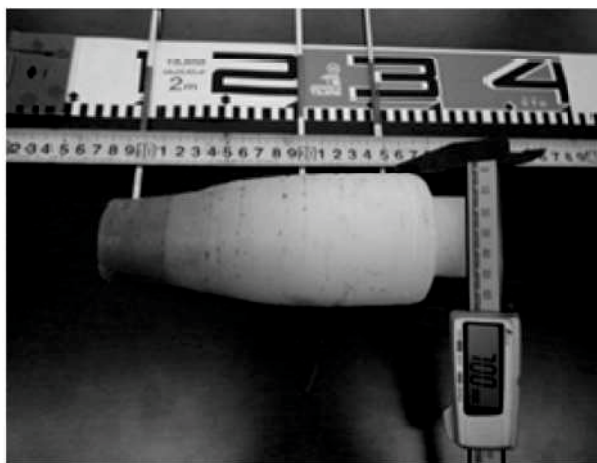


図-2.4.3 拡径削孔形状の確認



図-2.4.4 拡径削孔径計測器

2.5 固定定着構造の定着機構

拡径削孔の有無による違いを線形有限要素解析による主応力により比較した結果を図-2.5.1に示す。両者ともPC鋼材の軸線に対する主応力の角度は同程度であるが、拡径削孔を行わない場合は既設コンクリートと充てん材の境界がPC鋼材と同じ方向になるのに対し、拡径削孔を行った場合は拡径部の既設コンクリートと充てん材の境界がPC鋼材の軸線と10度以上の角度をなすことから、拡径削孔により既設コンクリートと充てん材の境界面に作用するせん断応力は減少し逆に圧縮応力は増加するため境界面の摩擦抵抗が増加すると推測される。すなわち、拡径削孔によって境界面がずれる方向の作用は減少し、逆にずれに対する抵抗は増加することから、PC鋼材に引抜き力が作用したときの固定定着構造の定着性は拡径削孔を行うことで向上すると考えている。

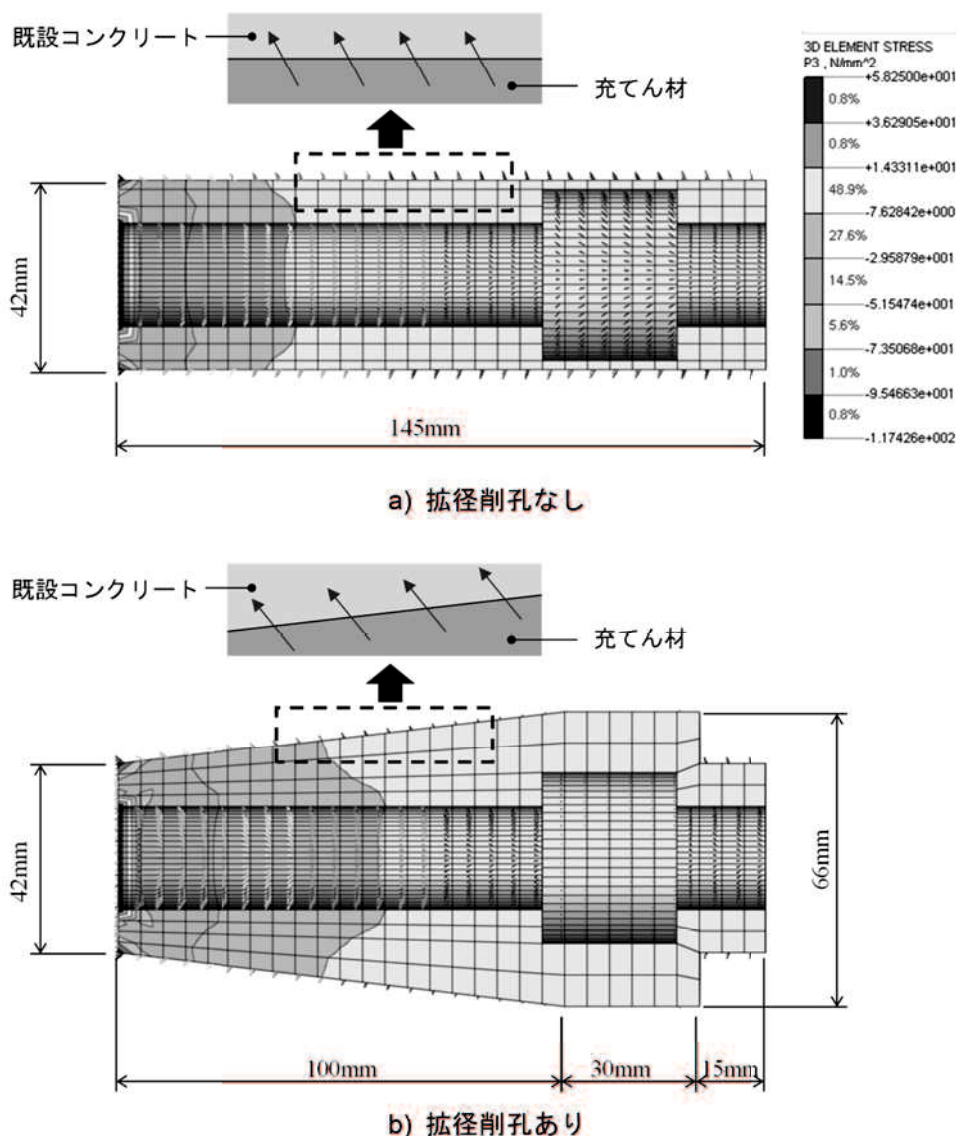


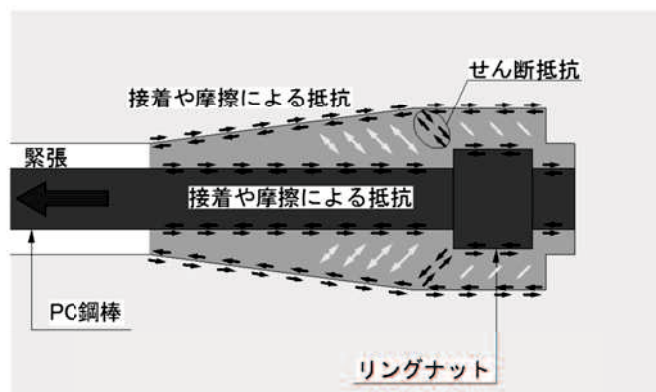
図-2.5.1 拡径削孔の有無によるコンクリートと充てん材の境界面における主応力方向の違い

また、固定定着構造の荷重伝達機構は、緊張力の増加によって以下のように推移するものと仮定した。引抜き力の小さい緊張初期の状態（図-2.5.2 a））では、リングナットと充てん材の機械的なかみ合い

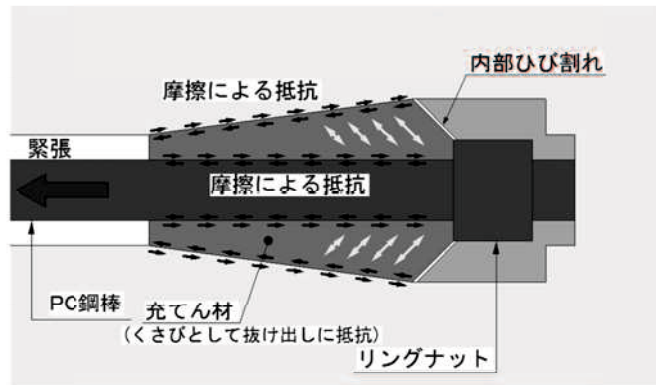
第2章 開発したプレストレス補強工法の特徴

によって生じる充てん材のせん断抵抗と、充てん材と PC 鋼材や既設コンクリートの接着や摩擦による抵抗によって、緊張力が既設コンクリートに伝達すると推測される。このうち充てん材の接着による抵抗は相対ずれが生じた時点で喪失すると考えられ、その後は充てん材のせん断抵抗と摩擦抵抗により荷重を伝達すると考えられる。

緊張による引抜き力が増加して充てん材に内部ひび割れが生じた状態（図-2.5.2 b））においては、リングナット前面の充てん材がコンクリート内で“内部くさび”となって、PC 鋼材の若干の抜け出しを伴いながら引抜き力に抵抗すると考えられる。このとき充てん材の円周直角方向には圧縮力が作用するため、充てん材と PC 鋼材や既設コンクリートの摩擦による抵抗も増加するものと推測される。



a) 緊張初期の荷重伝達機構



b) 内部ひび割れが生じた後の荷重伝達機構

図-2.5.2 固定定着構造の荷重伝達機構の仮定

固定定着構造の終局状態としては、PC 鋼材の引張破壊、充てん材の圧縮およびせん断破壊、既設コンクリートの引張破壊が考えられる。しかし、充てん材や既設コンクリートの破壊が先行する場合、PC 鋼材の性能が十分に発揮できず導入プレストレスの管理が煩雑になることや、充てん材や既設コンクリートの品質によって終局荷重にばらつきが生じることとなる。よって、本構造は一般的な PC 定着具と同様に PC 鋼材の引張破壊を先行させることを原則とした。

2.6 工法の適用範囲や留意点

本工法は一般的な RC 構造物に適用することを想定しているため、コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 以上、部材表面には D16 の鉄筋を 150mm 間隔で配置した場合と同程度以上の鉄筋量が配置されていることを前提としている。本工法は既設コンクリート内に固定定着構造を構築するという性質上、固定定着構造周辺を鉄筋などで補強することが困難なため、無筋コンクリート構造物やコンクリート強度が著しく低下した構造物へ適用する場合には別途検討が必要となる。また、固定定着構造周辺は健全であり劣化によるひび割れなどの損傷がないことが求められ、また補強によりプレストレスが付与されるため部材はその圧縮力に耐えうる強度を有することが求められる。

緊張材に PC 鋼棒を用いる場合、運搬上の制約を踏まえた市場性により PC 鋼棒の長さは 8m 以下となる。通常 PC 鋼棒は専用の接続具でつないで 8m 以上の長さに対応できるが、既設コンクリート内では接続が困難なため、PC 鋼棒を用いる場合の既設コア削孔部の長さは 8m 以下とすることを想定している。また、PC 鋼棒長さが長くなると、挿入のための空間もそれに応じて確保する必要があることに留意が必要である。既設部の長さが長い場合には可とう性がありコイル状の荷姿で運搬できることから運搬上の長さの制約がない PC 鋼より線などを用いる方法も考えられるため、今後の研究課題であると考えている。

本工法は既設コンクリートに削孔が必要となるため、既設コンクリート内の配筋状況によっては削孔位置を設計で想定した位置からずらして削孔することがある。その場合は設計で想定した PC 鋼材の偏心が変わらないように削孔位置を調整することが原則となるが、やむを得ず偏心量に変更が生じる場合は実施する偏心量に対する照査を行う必要がある。

プレストレスを導入しようとする部材がラーメン構造等の不静定構造の場合、プレストレス導入により生じる変形が支点等で拘束されることによって不静定力が発生することから、不静定構造に本工法を適用する場合は設計時に不静定力に対する部材の安全性照査を行っておく必要がある。

2.7 まとめ

本研究で対象とするプレストレス補強工法は、既設コンクリート内部にあと施工によって内部くさびを構築するコンパクトな固定定着構造を設け、そこに定着した PC 鋼材によって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。この工法について、優位性や適用対象、工法の施工手順、固定定着構造を構築するための拡径削孔方法を概説し、固定定着構造の定着機構を推定した。工法の適用範囲として、一般的な RC 構造物に固定定着構造を設けることを想定し、既設コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 以上で部材表面に D16 の鉄筋を 150mm 間隔で配置した場合と同程度以上の鉄筋量が配置されていること、固定定着するコンクリートが健全であることを前提としていることや、設計・施工における留意点を示した。

第 3 章

PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討

第3章 PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討

3.1 実験目的

これまでの研究 [三本ら, 2013] によると, 既設コンクリートが固定定着構造に作用する引抜き力に対して十分な強度を有する場合, 図-3.1.1 に示す丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ を対象とした固定定着構造は, 高強度鉄筋用モルタル充てん継手に用いられる設計基準強度 120N/mm^2 相当の高強度モルタル [虻川ら, 2009] を充てん材に使用することで, 規格引張荷重 (P_u) である 449kN を上回る耐荷性能を有することが確認されている。

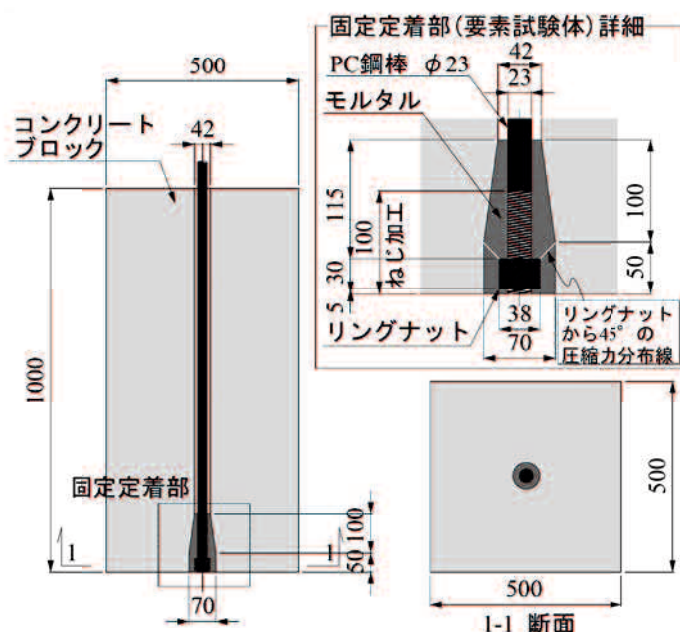


図-3.1.1 既往の研究における固定定着構造：単位mm [三本ら, 2013]

固定定着部の拡径削孔形状のうち, くさび効果に影響を与えるのは主に円錐台形状・寸法と考えられるため, 拡径削孔形状の最適化や品質管理上の知見を得る目的で, 円錐台部の削孔長が変化した場合の耐荷性能への影響について実験的に検討した。また, 過去に検討した拡径削孔形状は円筒形状の削孔長が 50mm と長く拡径ビットに大きな負荷がかかることから, ビットの摩耗が著しく施工性や経済性に影響することが懸念された。そこで, 円筒形状部の長さをビットの構造上最小となる 30mm まで短縮して耐荷性能を調べた。

また, 拡径削孔部に注入する充てん材であるが, PC 鋼棒と既設コンクリート部材は充てん材を介して一体化すること, また拡径削孔した定着部に隅々まで充てんする必要があることから, 充てん材にはプレストレスを伝達する強度のほか, 流動性, 無収縮性, ノンブリージングといった性能が求められる。PC 鋼棒を鉛直下向き方向に配置する場合, あらかじめ必要量の充てん材を先に充てんしてから PC 鋼棒を後挿入することで施工可能であり, 充てん性と耐荷性能が確認されている高強度モルタルが充てん材に適している。一方, PC 鋼棒を水平方向に配置する場合, 固定定着部全体を充てん材で満たした状態で

第3章 PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討

重力に反して固定定着部に留まらせるためには、充てん材に適度な粘性が必要と考えられた。そこで、粘性の調整が比較的容易である二液混合型のエポキシ樹脂を水平方向施工の充てん材として使用することを想定して、高強度モルタルとエポキシ樹脂の2種類の充てん材について検討した。

本工法は既設 RC 部材に用いることから、固定定着するコンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 程度を想定しており、通常のポストテンション方式の PC 部材に使用するコンクリート[日本道路協会, 2012]である 30N/mm^2 に比べて設計基準強度を低く設定している。また、本工法の固定定着構造はコンパクトな構造としているため、一般的な PC 定着具のように剛な面積を有する支圧板を介して定着力を伝達する構造に比べて、固定定着部周辺に局部的に高い引張応力の発生が予想された。このことから、本工法の固定定着を行うために必要となるコンクリートの最小部材寸法は普通 PC 鋼棒工法等で必要とされている最小部材寸法の 250mm より増加させる必要があるものと考え、1 辺の寸法を 250mm とした供試体と 400mm とした供試体の2種類を準備して定着性能の違いを調べた。

なお、図-3.1.2 に示す通り、JSCE-E 503「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法（案）」[土木学会, 2013]では、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いるコンクリート供試体の1辺の長さは定着具の中心からコンクリートの縁までの許容最小距離の2倍と規定されており、本実験ではこの方法に従い供試体1辺の長さを想定する定着部材の許容最小部材寸法（許容最小距離の2倍）となるように設定した。また一般に定着具の許容最小間隔は許容最小距離の2倍を確保している。

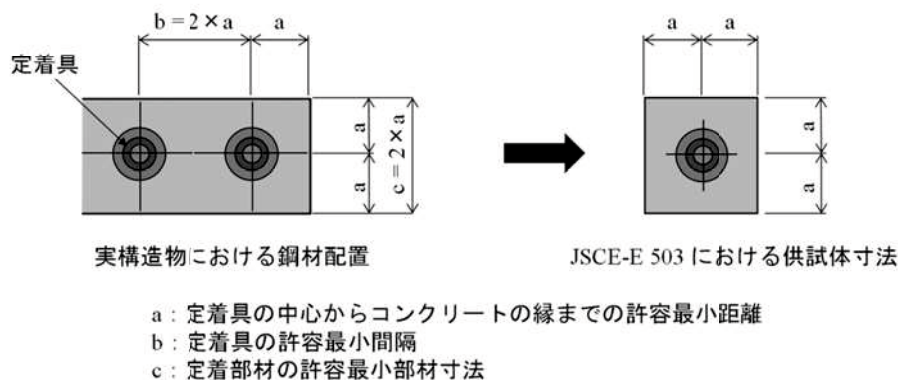


図-3.1.2 実構造物における鋼材配置と供試体寸法の関係

3.2 実験供試体

3.2.1 実験パラメータ

PC鋼材を定着できる最小部材寸法を調べるため、要素供試体であるコンクリートブロックの寸法は250×250×300mmと400×400×450mmの2種類の形状のものを準備し、その中心に木枠を使用して削孔を模したダクトを設けた。要素供試体の形状をそれぞれ図-3.2.1、図-3.2.2に示す。固定定着構造の形状は削孔部の円錐台形状部および円柱形状部の長さが異なる5種類の供試体を準備した。また充てん材は高強度モルタルとエポキシ樹脂の2種類とした。充てん材と固定定着構造の形状の組合せを表-3.2.1に示す。

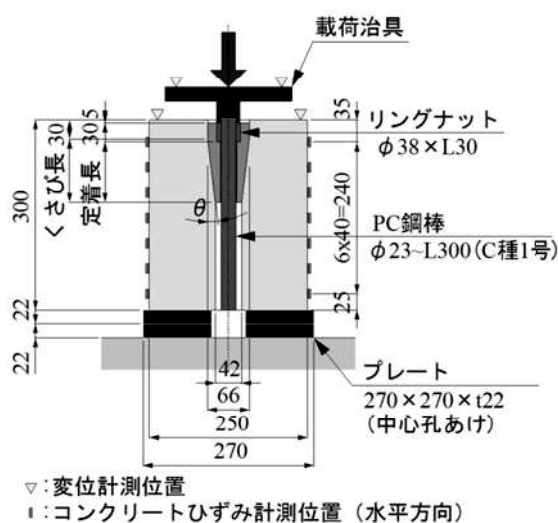


図-3.2.1 要素供試体の断面図 (250×250×300mm) : 単位 mm

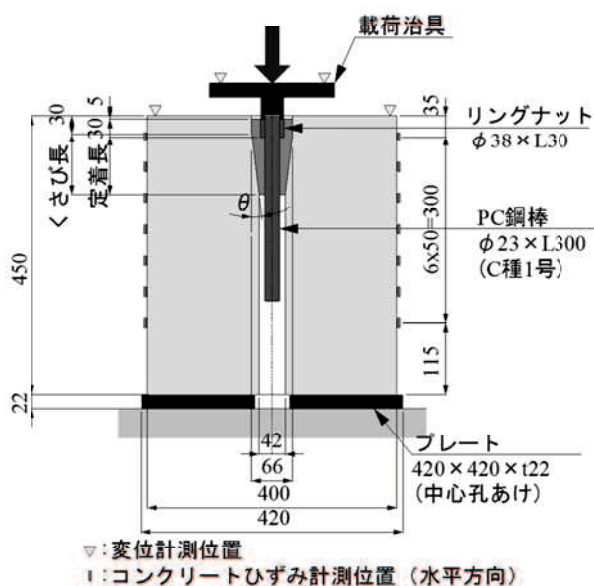
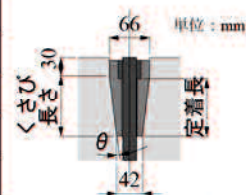


図-3.2.2 要素供試体の断面図 (400×400×450mm) : 単位 mm

表-3.2.1 要素供試体一覧

供試体名	充てん材種類	固定定着構造の形状		
		くさび長さ	定着長	くさび角度
120(A)	高強度 モルタル	120 mm	115 mm	$\tan\theta = 1/10.0$
100(A)		100 mm	95 mm	$\tan\theta = 1/8.3$
80(A)		80 mm	75 mm	$\tan\theta = 1/6.7$
120(B)	エポキシ樹脂	120 mm	115 mm	$\tan\theta = 1/10.0$
100(B)		100 mm	95 mm	$\tan\theta = 1/8.3$
80(B)		80 mm	75 mm	$\tan\theta = 1/6.7$



※ 供試体名の括弧内の英字は、Aが高強度モルタルを、Bがエポキシ樹脂を充てん材に使用していることを示す。

3.2.2 供試体の詳細

供試体は固定定着構造の寸法の異なる3種類と充てん材種類が異なる2種類の全6種類の供試体を、250×250×300mmに対し2体ずつ、400×400×450mmに対し3体ずつ製作した。供試体に用いた各材料を以下に示す。

(1) コンクリート

供試体に使用したコンクリートの使用材料と密度を表-3.2.2に、コンクリートの配合を表-3.2.3に示す。

表-3.2.2 コンクリートの使用材料と密度

使用材料	種類	密度		備考
		250×250×300mm	400×400×450mm	
水 (W)	地下水	1.00 g/cm ³	1.00 g/cm ³	
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.14 g/cm ³	3.16 g/cm ³	
細骨材 (S)	砕砂 (広島県三次産)	2.64 g/cm ³	2.64 g/cm ³	
粗骨材 (G)	砕石 (広島県安芸高田産)	2.68 g/cm ³	2.68 g/cm ³	最大寸法 : 20mm
混和剤 (AD)	フローリック VP700	—	1.04 g/cm ³	高性能減水剤

表-3.2.3 コンクリート配合

供試体寸法	W/C	s/a	単用量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AD
250×250×300mm	85.0%	52.0%	190	224	987	924	0.0
400×400×450mm	53.0%	48.0%	175	330	887	978	1.16

(2) 鉄筋

JSCE-E 503「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[土木学会, 2013]では、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いるコンクリート供試体の定着部近傍は用心鉄筋により一様に外周を補強することとし、その用心鉄筋の鉄筋比は2%以下とするよう規定されている。しかし本工法は既設コンクリート内に固定定着構造を設けるため、固定定着構造周辺を鉄筋などで補強することは困難であることから、一般的なRC構造物において配置されていると想定されるD16の鉄筋を150mm間隔で配置した場合と同程度の鉄筋量を用心鉄筋として供試体に配置した(鉄筋比:0.7~1.0%)。鉄筋には一般的に使用されているSD345を用いた。供試体の配筋を図-3.2.3と図-3.2.4にそれぞれ示す。

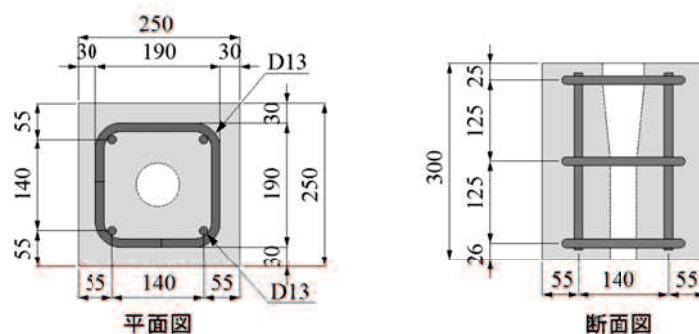


図-3.2.3 要素供試体の配筋図 (250×250×300mm) : 単位 mm

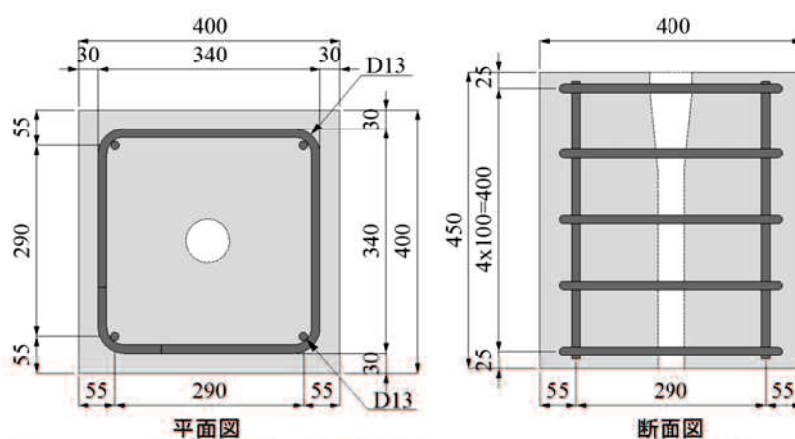


図-3.2.4 要素供試体の配筋図 (400×400×450mm) : 単位 mm

(3) PC 鋼材

PC 鋼棒は JIS G 3109 に適合する種類のうち、引張強さおよび降伏耐力が最も高い SBPR1080/1230 (丸鋼 C 種 1 号) を使用した。なお、本工法に適用する SBPR930/1080 (丸鋼 B 種 1 号) と比較すると、丸鋼 C 種 1 号の降伏耐力と丸鋼 B 種 1 号の引張荷重が同等である (表-3.2.4)。PC 鋼棒の大きさは、既設構造物への適用を踏まえて $\phi 23\text{mm}$ を用いた。

表-3.2.4 PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ の規格値

記号 (種類)	降伏耐力 P_y	引張荷重 P_u
SBPR785/1030 (丸鋼 A 種 2 号)	326.1 kN	427.9 kN
SBPR930/1080 (丸鋼 B 種 1 号)	386.4 kN	448.7 kN
SBPR930/1180 (丸鋼 B 種 2 号)	386.4 kN	490.2 kN
SBPR1080/1230 (丸鋼 C 種 1 号)	448.7 kN	511.0 kN

(4) リングナット

鋼棒に装着するリングナットの外径は、コア削孔部の外径（ $\phi 42\text{mm}$ ）に対し挿入時の余裕を考慮して $\phi 38\text{mm}$ の丸鋼とし、ナットの高さは 30mm とした（図-3.2.5）。なおリングナットの材質は SS400 を用いた。リングの中心は PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ のねじとかん合するように M24 ピッチ 2 のねじ加工を施している。

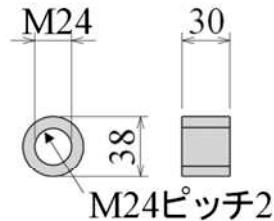


図-3.2.5 リングナット形状図：単位 mm

(5) 充てん材

拡張削孔部に注入する充てん材は、プレストレスを伝達する強度のほか、流動性、無収縮性、ノンブリージングといった性能が求められる。そのため本実験では高強度モルタルとエポキシ樹脂の 2 種類を用いた。

高強度モルタルはセメント、混和剤、細骨材を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、現場で安定した品質が確保可能な無収縮性の高強度モルタルである。モルタルの配合はプレミックス材 25kg/袋 に対し水 3.0kg/袋 となっている。

エポキシ樹脂は 2 液混合型のビスフェノール A 型エポキシ樹脂であり、主剤と硬化剤を 3:1 の割合で充てん直前に混ぜ合わせて充てんした。

供試体は、コンクリートを打ち込んでから 28 日以上が経過した後、 $\phi 38\text{mm}$ のリングナットを装着した $\phi 23\text{mm}$ の PC 鋼棒を設置し、固定定着部に高強度モルタルもしくはエポキシ樹脂を充てんして製作した。

第3章 PC鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討

実験に使用したコンクリートおよび充てん材の載荷時における材料諸元を表-3.2.5に、鋼材の材料諸元を表-3.2.6に示す。

表-3.2.5 コンクリートおよび充てん材の材料諸元（載荷時）

供試体寸法		250×250×300mm	400×400×450mm
コンクリート	設計基準強度	21 N/mm ²	24 N/mm ²
	スランプ	8.0 cm	12.0 cm
	水セメント比	85.0 %	53.0 %
	圧縮強度	20.0 N/mm ²	35.7 N/mm ²
	割裂強度	2.0 N/mm ²	2.6 N/mm ²
	静弾性係数	19.4 kN/mm ²	31.2 kN/mm ²
	ポアソン比	0.15	0.17
高強度 モルタル	圧縮強度	99.7 N/mm ²	90.0 N/mm ²
	割裂強度	5.3 N/mm ²	5.2 N/mm ²
	静弾性係数	36.5 kN/mm ²	36.3 kN/mm ²
	ポアソン比	0.26	0.22
エポキシ樹脂	圧縮強度	93.1 N/mm ²	80.2 N/mm ²
	引張強度	32.1 N/mm ²	20.9 N/mm ²
	曲げ強度	70.8 N/mm ²	37.7 N/mm ²
	静弾性係数	2.9 kN/mm ²	2.5 kN/mm ²
	ポアソン比	0.43	0.45

表-3.2.6 鋼材の材料諸元

鉄筋	降伏強度	345 N/mm ²
PC鋼棒	外径	23 mm
	断面積	415.5 mm ²
	降伏強度	1080 N/mm ²
	引張強度	1230 N/mm ²
リングナット (SS400)	外径	38 mm
	高さ	30 mm

3.3 実験方法

3.3.1 載荷方法

図-3.3.1, 図-3.3.2 に示すように 1000kN 型圧縮試験機を用いて, 専用の載荷治具により要素供試体のリングナットに圧縮力を与える方法で供試体に押抜き荷重を単調載荷した。実構造では PC 鋼棒を緊張して引き抜くことでコンクリートに圧縮力を与えるが, 本実験では供試体が破壊するまで荷重載荷ができるよう, 圧縮試験機で押抜き力を載荷する方法を採用した。リングナットを結合する PC 鋼棒のネジ切り部は, 加工できる最小の長さ (35mm) とすることで PC 鋼棒と充てん材の付着による影響が大きくなるようにした。なお, 載荷実験は供試体に高強度モルタルもしくはエポキシ樹脂を充てんしてから 14 日後に実施した。

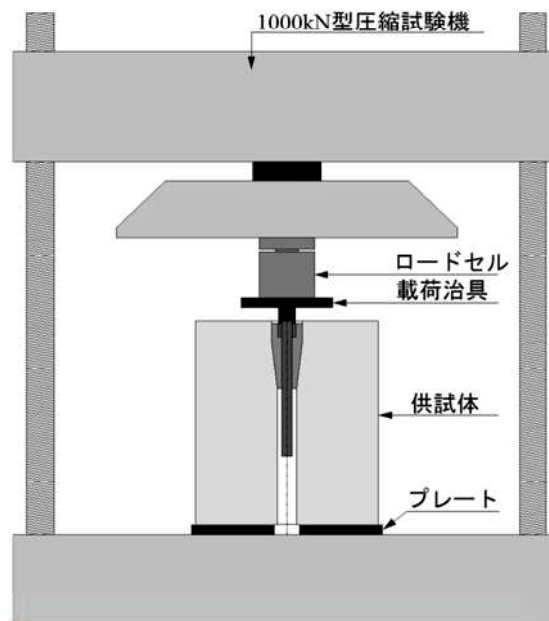


図-3.3.1 押抜き実験模式図

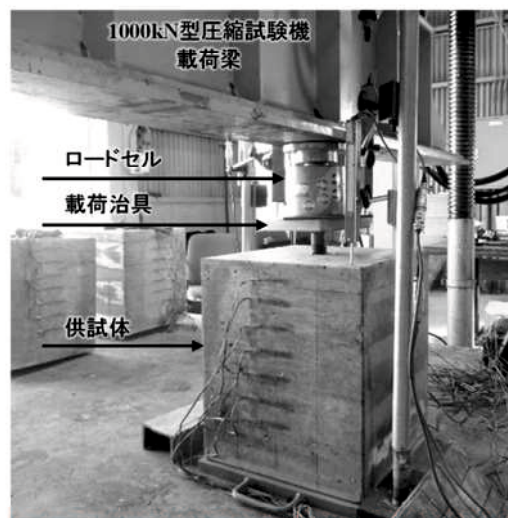


図-3.3.2 押抜き実験状況

3.3.2 計測方法

載荷した押抜き荷重は1MN型のロードセルを圧縮試験機の載荷梁と載荷治具の間に設置して計測した(図-3.3.1, 図-3.3.2 参照)。

固定定着部の押抜きによるリングナットの鉛直変位を調べるため, 載荷治具と供試体天端にそれぞれ2箇所ずつ計4箇所に変位計を設置して, 載荷治具と供試体天端の変位の平均値から相対変位を求めて載荷位置の鉛直変位とした。

供試体コンクリートの側面には水平方向のコンクリートひずみを求めるため, 供試体1体に対し7箇所×2面の計14箇所にゲージ長さ60mmのひずみゲージを設置した(図-3.2.1, 図-3.2.2 参照)。

3.4 実験結果および考察

3.4.1 破壊荷重

実験における破壊荷重を表-3.4.1に、それをグラフに整理したものを図-3.4.1に示す。本実験の破壊は試験時の載荷荷重が低下した時点と定義した。全ての供試体の破壊時には、コンクリートブロックの鉛直方向のひび割れが生じた（図-3.4.2、図-3.4.3）。

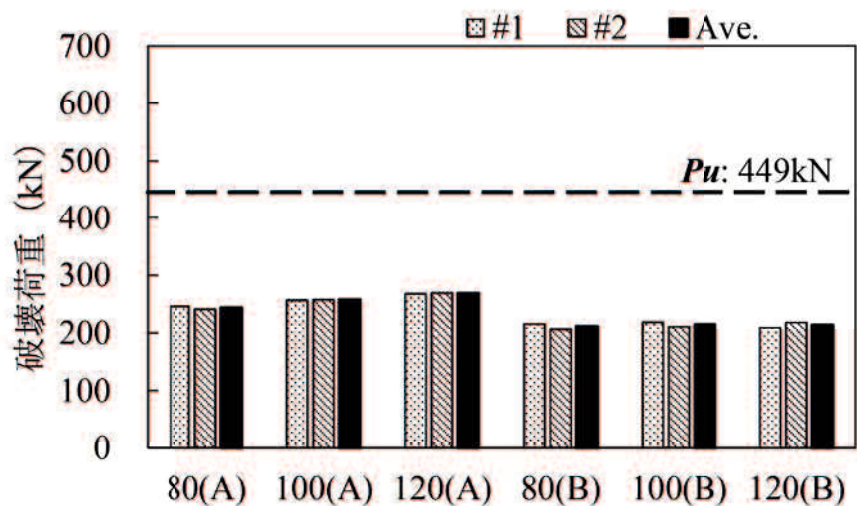
供試体 250×250×300mm の実験では、高強度モルタルを充てん材に使用した供試体の破壊荷重は 240～280kN 程度、エポキシ樹脂を充てん材に使用した供試体の破壊荷重は 210～220kN 程度であった（図-3.4.1 a）。いずれの充てん材を用いた場合においても緊張材の規格引張荷重（ P_u ）に達する前に固定定着構造周辺のコンクリートの引張破壊が先行する結果となり、固定定着するコンクリートの部材寸法が不足していることがわかる。

供試体 400×400×450mm の実験では、高強度モルタルを充てん材に使用した全ての供試体の破壊荷重が 490kN 以上となり、目標としている丸鋼 B 種 1 号 ϕ 23mm の規格引張荷重（ P_u ）の 449kN を上回る耐荷性能が確認された（図-3.4.1 b）。コンクリート標準示方書 [施工編] [土木学会, 2012] では、ポストテンション方式のプレストレストコンクリートに使用する PC 定着具の性能として、緊張材の規格に定められた引張荷重値（ P_u ）に耐えることを要求しており、定着部周辺のコンクリートや PC 定着具の破壊より緊張材の引張破壊が先行するように定められている。この規定に準じると、部材寸法が 400mm 以上の既設コンクリートに高強度モルタル充てん材を用いて丸鋼 B 種 1 号 ϕ 23mm を固定定着すれば、PC 鋼棒の引張破壊がコンクリートや充てん材の破壊より先行することから、固定定着構造は十分な耐荷性能を有していると判断される。なお、既設コンクリートの部材寸法が本試験供試体の寸法より大きくなると、コンクリートの引張破壊より充てん材の破壊が先行する可能性もあるが、その場合でも本実験結果から緊張材の規格引張荷重（ P_u ）以下で充てん材が破壊することはないといえ、固定定着構造の耐荷性能に問題は生じないと考えられる。一方、エポキシ樹脂を充てん材に使用した供試体の破壊荷重は 250～330kN 程度であり、緊張材の規格引張荷重（ P_u ）に達する前に固定定着構造周辺のコンクリートの引張破壊が先行する結果となった。

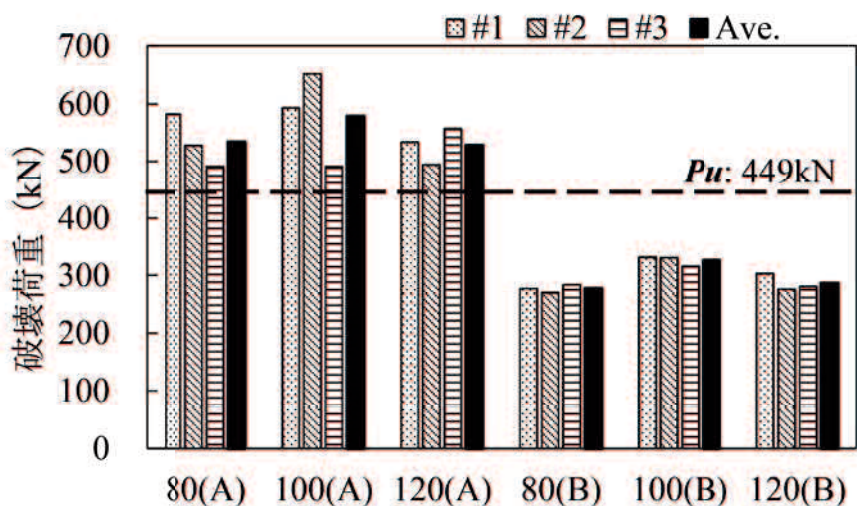
なお、固定定着構造の形状の違いが破壊荷重におよぼす影響に関しては、有意な差異は認められなかった。

表-3.4.1 各供試体の破壊荷重

供試体名	250×250×300mm			400×400×450mm			
	#1	#2	平均	#1	#2	#3	平均
80(A)	245.8 kN	240.8 kN	243.3 kN	582.4 kN	527.8 kN	491.2 kN	533.8 kN
100(A)	256.8 kN	257.4 kN	257.1 kN	593.2 kN	652.2 kN	490.8 kN	578.7 kN
120(A)	267.4 kN	269.2 kN	268.3 kN	534.0 kN	494.2 kN	557.4 kN	528.5 kN
80(B)	215.4 kN	206.6 kN	211.0 kN	277.0 kN	269.6 kN	283.4 kN	276.7 kN
100(B)	218.4 kN	210.4 kN	214.4 kN	331.8 kN	330.6 kN	315.6 kN	326.0 kN
120(B)	208.4 kN	217.6 kN	213.0 kN	302.8 kN	275.6 kN	280.2 kN	286.2 kN



a) 供試体250×250×300mm



b) 供試体400×400×450mm

※ 供試体名の括弧内英字がAのものは高強度モルタル，Bのものはエポキシ樹脂を充てん材に使用している。

図-3.4.1 各供試体の破壊荷重

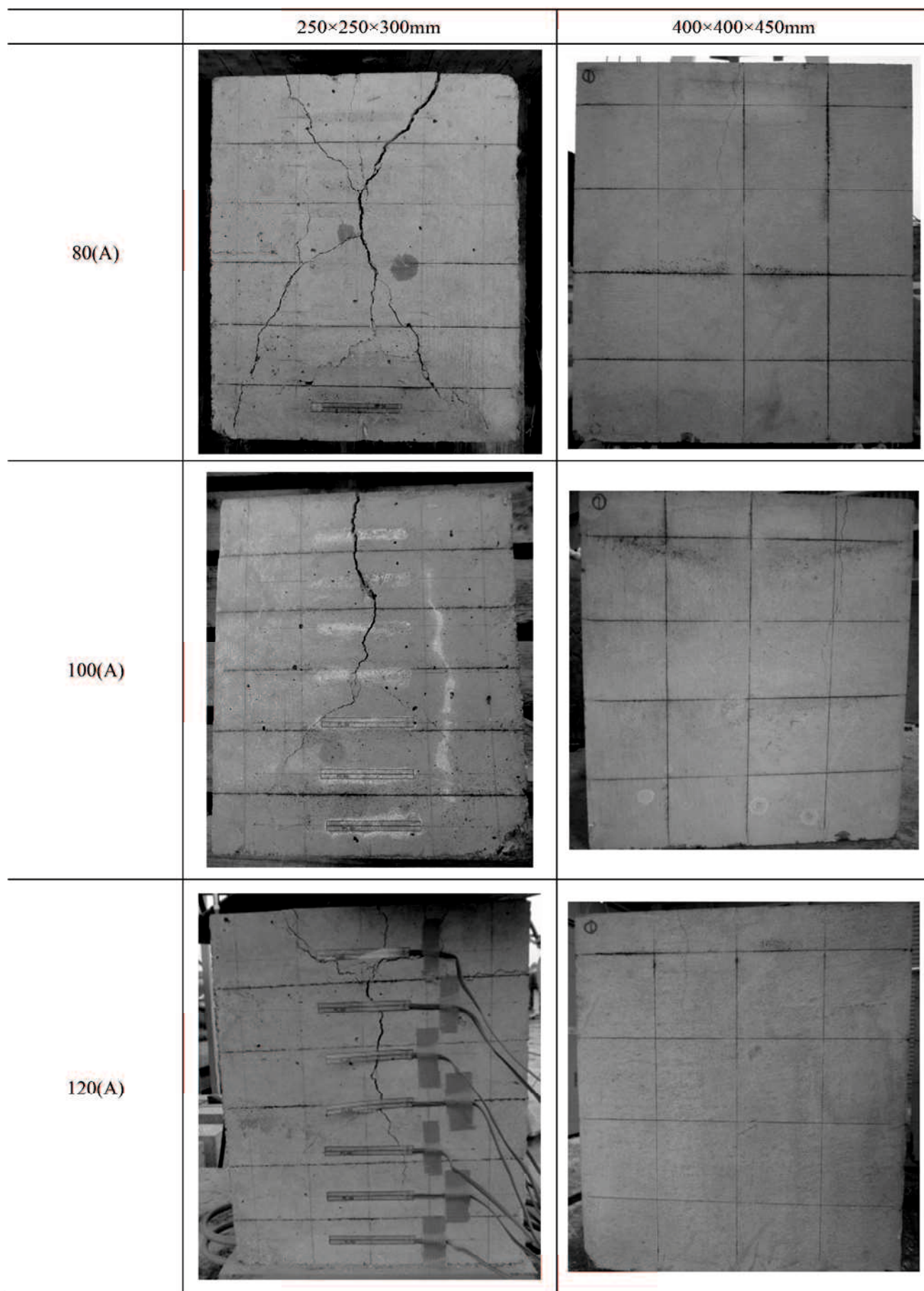


図-3.4.2 試験後の供試体の状況（充てん材：高強度モルタル）




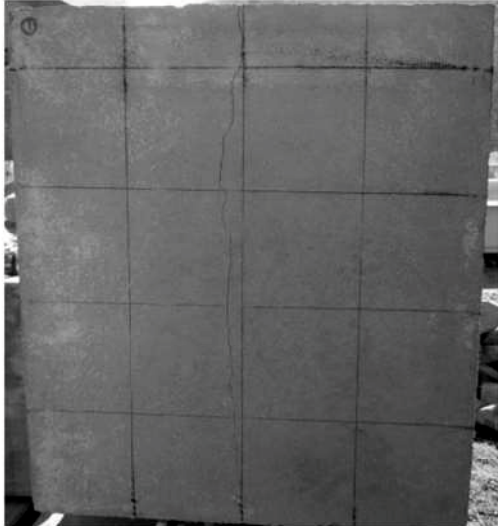
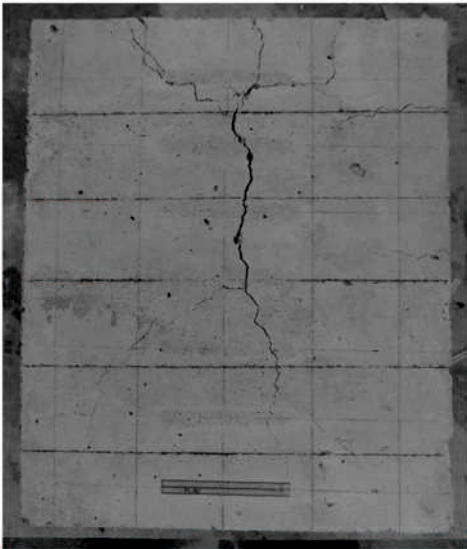
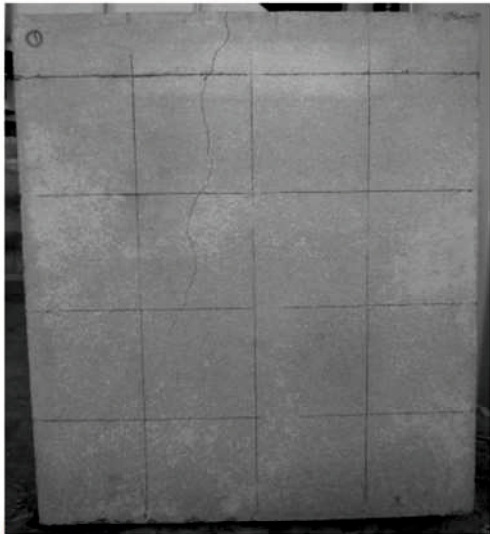
	250×250×300mm	400×400×450mm
80(B)		
100(B)		
120(B)		

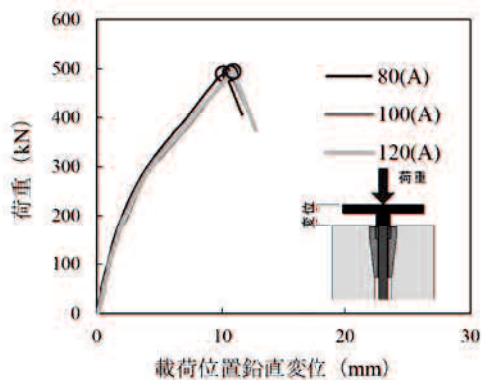
図-3.4.3 試験後の供試体の状況（充てん材：エポキシ樹脂）

3.4.2 荷重－変位関係

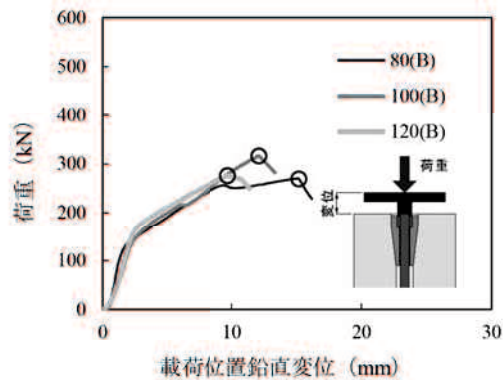
供試体 400×400×450mm の中で耐荷力が最も低い結果が得られた実験結果を対象に、充てん材の種類ごとに載荷荷重－載荷位置の鉛直変位の関係について整理したグラフを図-3.4.4 に示すとともに、固定定着構造の形状ごとに整理したグラフを図-3.4.5 に示す。これらの結果より、固定定着構造の形状の違いが荷重－変位関係に与える影響は小さいものの、充てん材の種類が荷重－変位におよぼす影響は大きいことがわかる。

高強度モルタルを充てん材に使用した供試体は、概ね同じ変形挙動を示し、固定定着構造の形状が異なっても変形挙動に違いはみられなかった。供試体の載荷荷重が 250～300kN を超えたあたりから鉛直変位がわずかに増加する傾向を示したが、荷重－変位関係はその前後においてほぼ線形状態で推移した。鉛直変位が増加したのは、荷重が 250kN を超えたあたりで高強度モルタルに微細な内部ひび割れが生じ、それによって変形性状が変化したことが理由と推測される。ただし、荷重が 250kN を超えても荷重に対する変位の増加傾向は緩やかであり、固定定着構造の形状種類による変形の違いもみられないことから、高強度モルタル全体が抜け出すようなすべり挙動は生じていないものと判断される。つまり、高強度モルタルとコンクリートの界面全体の付着が切れ充てん材が内部くさびとして機能する前に、コンクリートの引張破壊に至ったものと考えられる。このことが、本供試体を用いた実験において、固定定着構造の形状が異なっても結果に有意な差異が生じなかった理由のひとつと推定される。高強度モルタルを充てん材に使用した場合、緊張材の規格引張荷重 (P_u) 以上の荷重を載荷しても固定定着構造の形状種類による変形の違いがみられないことから、実際の使用環境下では本実験に用いた固定定着構造の形状と同程度の違いが施工誤差等により生じても、耐荷性能に大きく影響することはないものと考えられる。

エポキシ樹脂を充てん材に使用した供試体では、載荷荷重 150kN を超えたあたりから変位が急激に増加する傾向を示し、250kN 以上になるとコンクリートの鉛直方向のひび割れ発生とともに耐荷力が低下した。また、固定定着構造の形状が異なることで荷重－変位関係に若干の相違はみられるが、有意な差異は認められなかった。これは、本実験における固定定着構造の形状の違いが耐荷力に与える影響より、供試体製作の際に生じた拡径削孔部を模したコンクリート表面の凹凸によって充てん材とコンクリートの摩擦抵抗が増加した影響が大きく、その結果内部くさびのすべり挙動に有意な差が生じなかった可能性が考えられる。なお、実施工において拡径ビットで削孔した際にも図-2.4.3 に示すように削孔したコンクリート表面に多少の凹凸は生じるため、実際の構造物でも同様の摩擦抵抗は発生すると考えている。



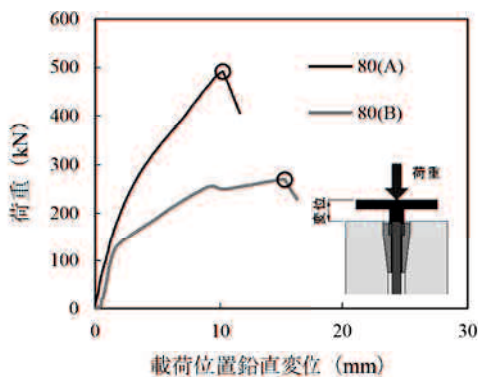
a) 高強度モルタル



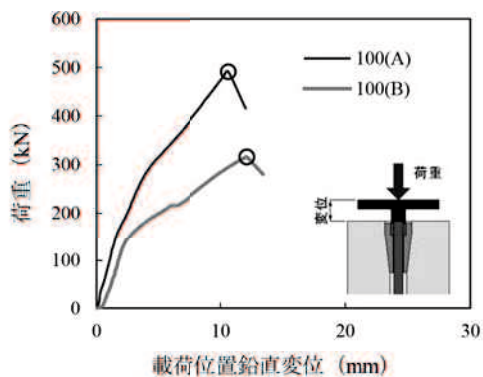
b) エポキシ樹脂

※ ○は破壊点を示す。

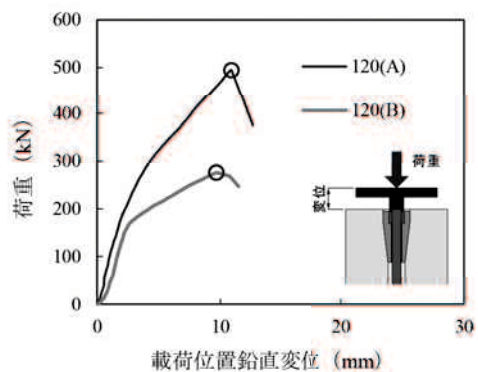
図-3.4.4 充てん材種類ごとの荷重－変位図（供試体400×400×450mm）



a) くさび長さ80mm



b) くさび長さ100mm



c) くさび長さ120mm

※ ○は破壊点を示す。

図-3.4.5 固定定着構造の形状ごとの荷重－変位図（供試体400×400×450mm）

3.4.3 周方向ひずみ

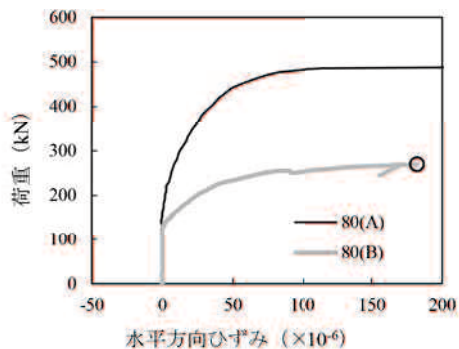
供試体 $400 \times 400 \times 450\text{mm}$ における荷重と周方向ひずみの関係を供試体天端からの位置ごとに図-3.4.6, 図-3.4.7, 図-3.4.8 に示す。いずれの実験においても図-3.4.4, 図-3.4.5 に示す荷重-変位関係が非線形挙動を示す載荷荷重とほぼ同じ荷重値を超えた時点から周方向ひずみも増加する傾向がみられた。

また、載荷荷重 $100 \sim 300\text{kN}$ 時のコンクリートの周方向ひずみ分布を図-3.4.9 に示す。載荷荷重が $250 \sim 300\text{kN}$ になると、エポキシ樹脂を充てん材として用いた供試体の周方向ひずみの最大値は、高強度モルタルを用いた供試体の周方向ひずみの最大値の 2 倍程度となり、その周方向ひずみの分布は固定定着構造周辺となる供試体天端から $85 \sim 135\text{mm}$ の位置で卓越する傾向を示した。

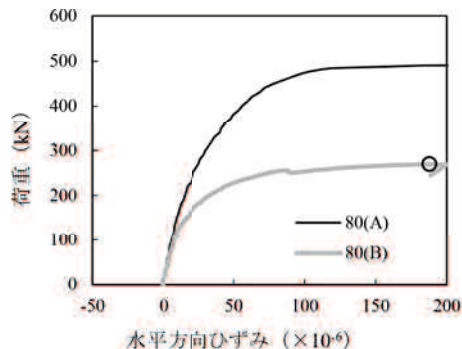
固定定着構造周辺のコンクリート円周方向には、支圧に対するポアソン効果による引張ひずみと、充てん材の変形による周方向の引張ひずみが複合して作用すると考えられる。載荷位置の鉛直変位の急激な増加や周方向ひずみの破壊に至る前の非線形挙動は充てん材の変形に伴い生じたものと推定すると、エポキシ樹脂を用いた供試体は充てん材とコンクリートの界面ですべり挙動が大きくなり、充てん材全体がくさびのように圧入され周辺のコンクリートを押し広げるような変形挙動を示した可能性がある。一方、高強度モルタルを用いた供試体では充てん材とコンクリートの界面の一部ですべりが生じた可能性もあるが、その範囲は限定的なものと考えられ、充てん材全体が圧入されるような大きな変形は生じていないものと推測される。

充てん材の種類によって異なる挙動を示した理由として、次のように考えられる。

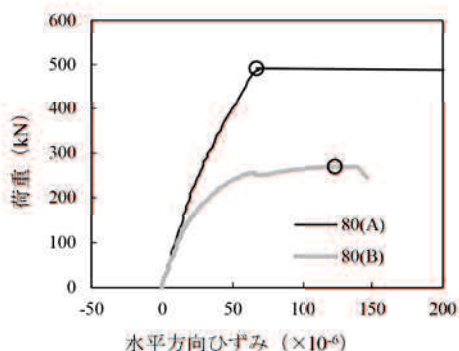
エポキシ樹脂はコンクリートと比較して、ヤング係数が約 $1/10$ かつポアソン比が 2 倍以上という荷重に対して変形しやすい材料特性を有する。そのため、エポキシ樹脂の充てん材に荷重が作用するとコンクリートとの境界面で材料特性の違いによる剥離等を伴う可能性が考えられ、それに伴い充てん材が変形しやすくなったものと思われる。エポキシ樹脂を充てん材に用いる場合は、エポキシ樹脂の材料剛性を高めて既設コンクリートと材料の弾性変形特性を同程度のものとする、固定定着する既設コンクリートの定着面の最小部材寸法を 400mm より大きく設定する等の検討が必要と考えられる。



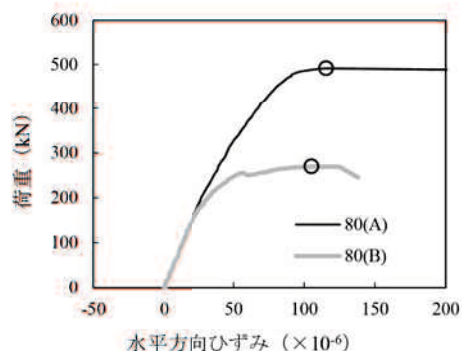
a) 供試体天端から35mmの位置のひずみ



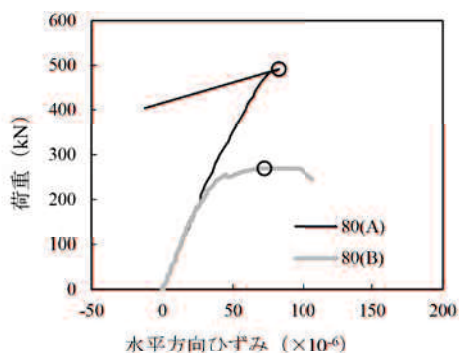
b) 供試体天端から85mmの位置のひずみ



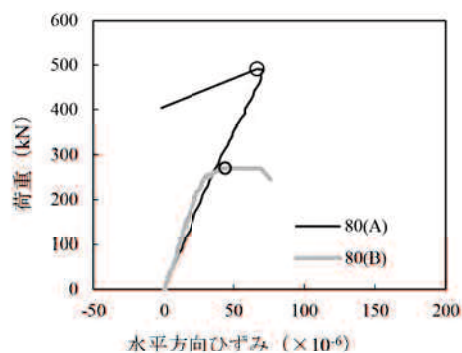
c) 供試体天端から135mmのひずみ



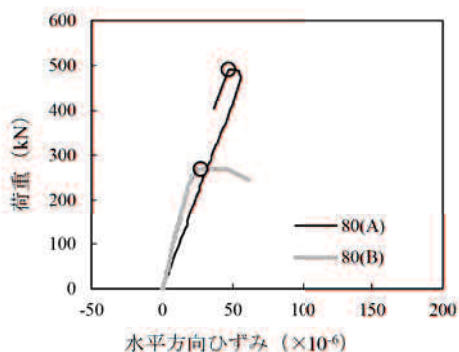
d) 供試体天端から185mmのひずみ



e) 供試体天端から235mmのひずみ



f) 供試体天端から285mmのひずみ



g) 供試体天端から335mmのひずみ

※ ○は破壊点を示す。

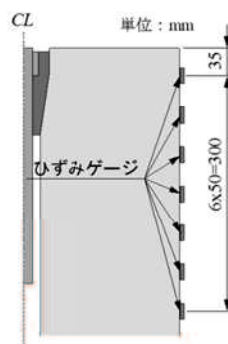
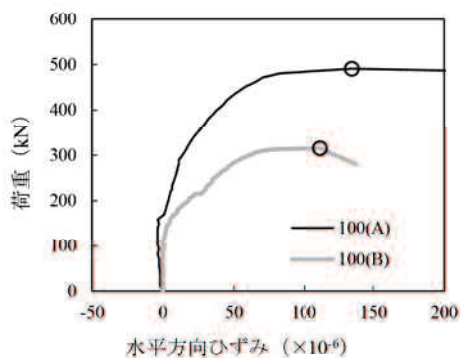
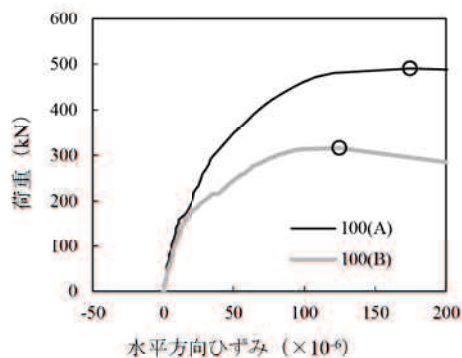


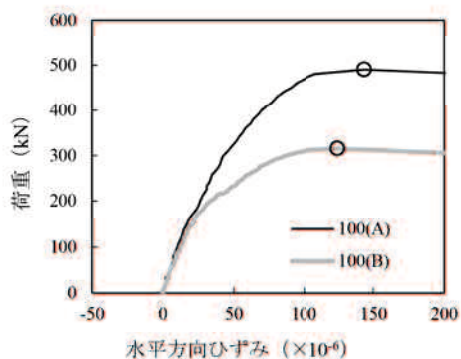
図-3.4.6 荷重一周方向ひずみ（供試体400×400×450mmの80(A)と80(B)を比較）



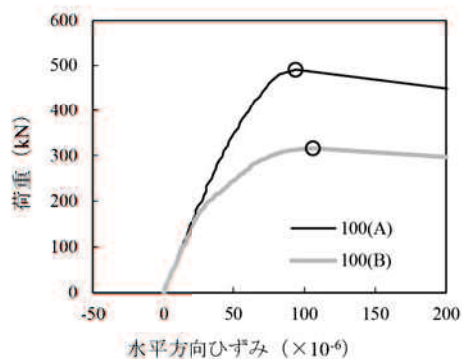
a) 供試体天端から35mmの位置のひずみ



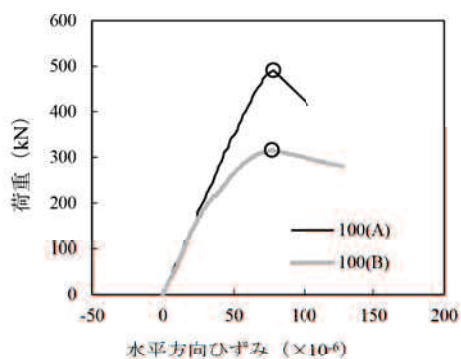
b) 供試体天端から85mmの位置のひずみ



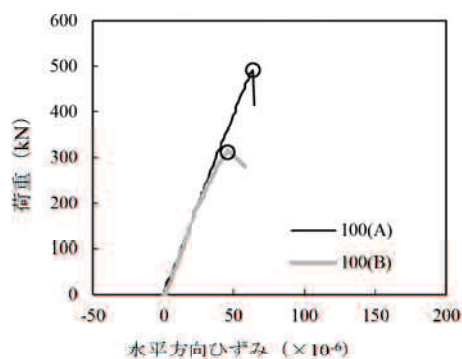
c) 供試体天端から135mmのひずみ



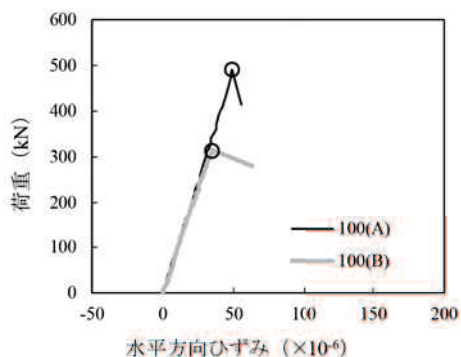
d) 供試体天端から185mmのひずみ



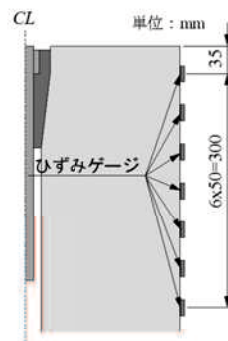
e) 供試体天端から235mmのひずみ



f) 供試体天端から285mmのひずみ

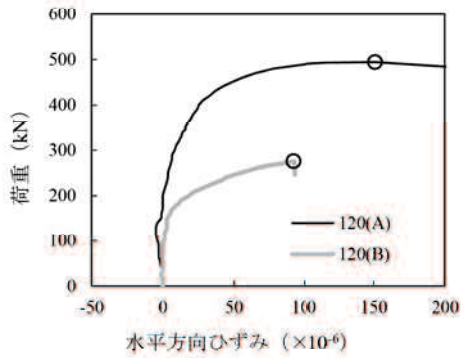


g) 供試体天端から335mmのひずみ

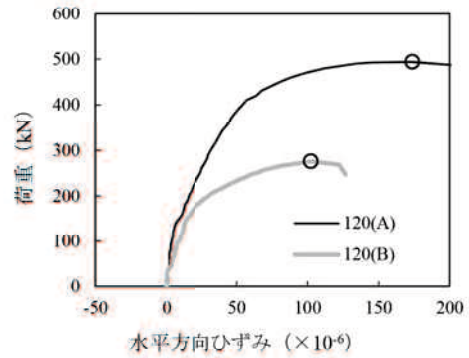


※ ○は破壊点を示す。

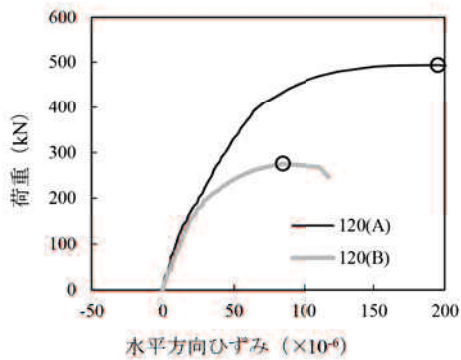
図-3.4.7 荷重一周方向ひずみ (供試体400×400×450mmの100(A)と100(B)を比較)



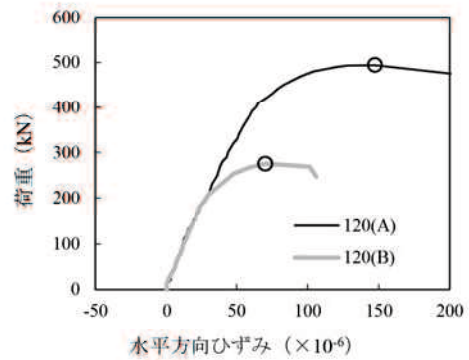
a) 供試体天端から35mmの位置のひずみ



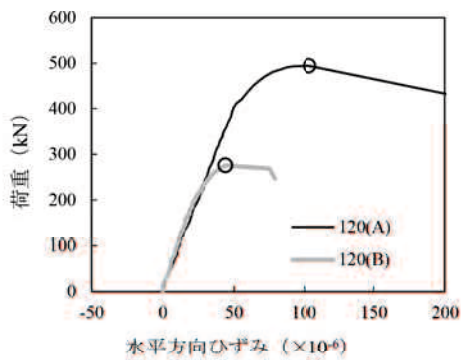
b) 供試体天端から85mmの位置のひずみ



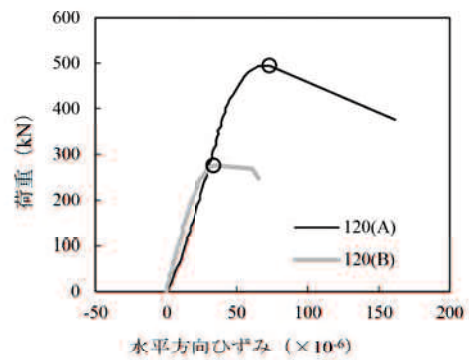
c) 供試体天端から135mmのひずみ



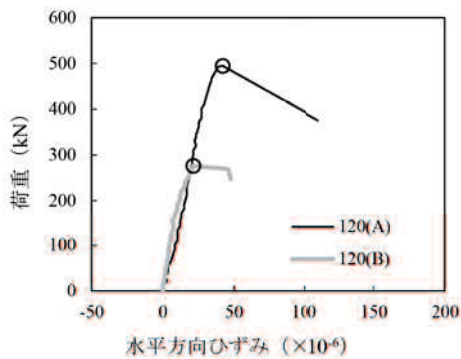
d) 供試体天端から185mmのひずみ



e) 供試体天端から235mmのひずみ



f) 供試体天端から285mmのひずみ



g) 供試体天端から335mmのひずみ

※ ○は破壊点を示す。

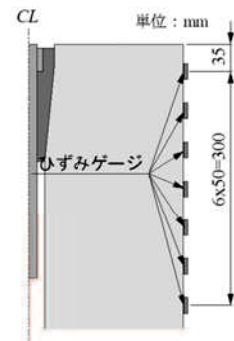
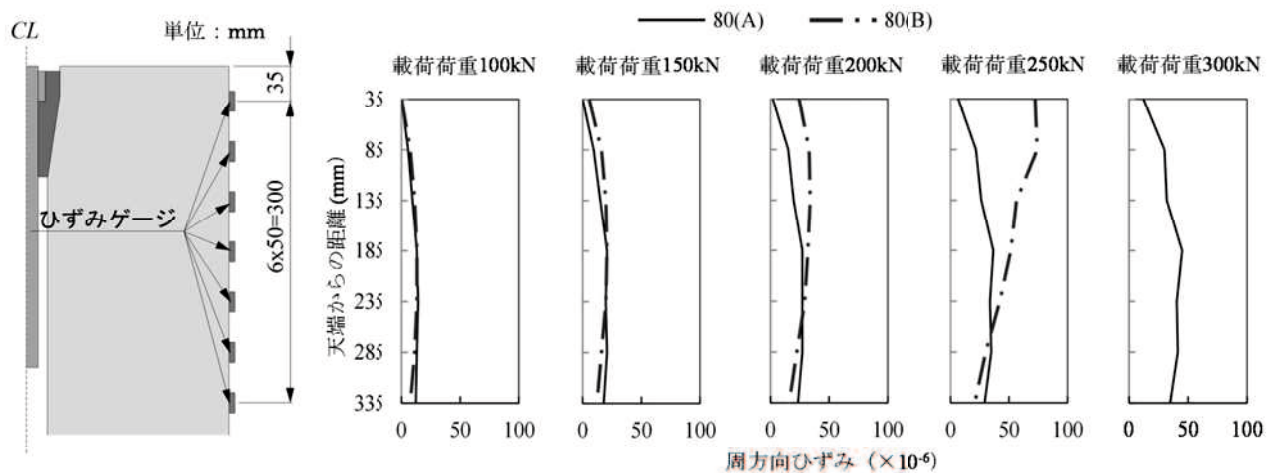
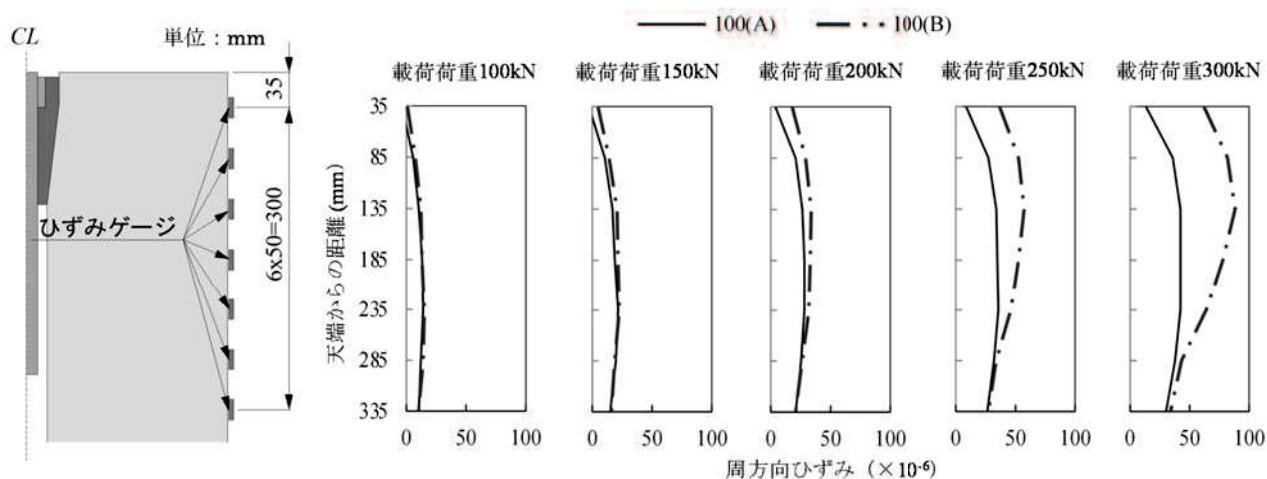


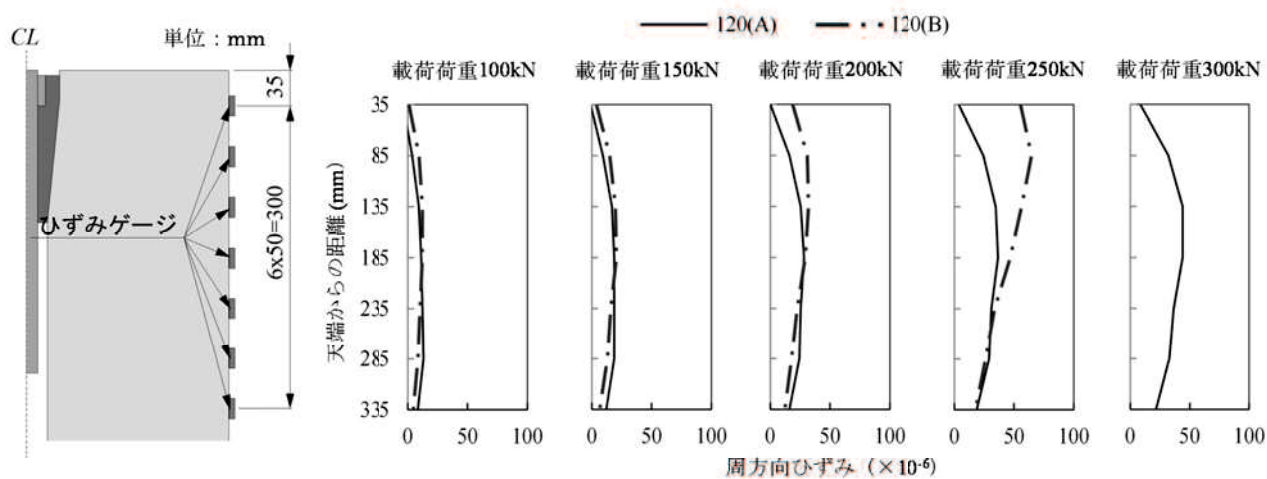
図-3.4.8 荷重一周方向ひずみ (供試体400×400×450mmの120(A)と120(B)を比較)



a) くさび長さ80mm



b) くさび長さ100mm



c) くさび長さ120mm

図-3.4.9 周方向ひずみ分布 (供試体400×400×450mm)

3.5 まとめ

丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ を緊張材に使用した構造を想定し、既設コンクリート中に構築する固定定着構造の性能評価のため、固定定着構造の形状や使用材料が異なる複数の要素供試体を用いた押抜き実験を通して、耐荷性能等の基礎特性を調べた。この実験により得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 高強度モルタルを充てん材に使用することで、既設コンクリートの定着面の部材寸法が 400mm 以上あれば、丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ の規格引張荷重 (P_u) 以下でコンクリートや高強度モルタルの破壊が生じることはなく、固定定着構造は十分な性能を有している。
- 2) エポキシ樹脂を充てん材に使用する場合、丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ を固定定着するためには、エポキシ樹脂の材料剛性を高める、固定定着可能な既設コンクリート部材の最小寸法を 400mm より大きく設定する等の対策を検討する必要がある。
- 3) 本実験で用いた形状の範囲内では、固定定着部の拡径削孔形状による有意な差異は認められなかった。高強度モルタルを充てん材に使用した固定定着構造においては、実施工において本実験に用いた固定定着構造の形状と同程度の違いが施工誤差等により生じても、耐荷性能におよぼす影響は小さい。

上記の結果を踏まえ、定着面の部材最小寸法は 400mm とし、充てん材には高強度モルタルを用いることとした。実験結果では固定定着構造の形状の違いによる有意な差異は認められなかったことから、固定定着構造の形状は拡径ピットの負荷や充てん材の使用量、施工性等を総合的に判断し、くさび長さ 100mm である供試体 100(A)の形状を採用することとした (図-3.5.1)。

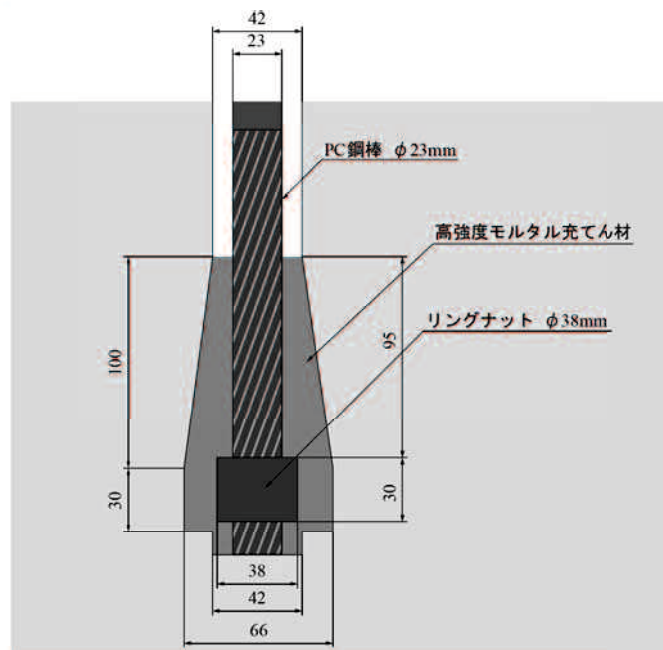


図-3.5.1 採用した固定定着構造の詳細：単位 mm

第 4 章

固定定着した PC 鋼棒の引抜き力に対する 定着性能の検討

第4章 固定定着したPC鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討

4.1 実験目的

押抜き実験で調べた固定定着構造の耐荷性能等の基礎特性に関する結果を踏まえ、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ため、コンクリートブロックの内部にPC鋼棒を定着した実物大供試体を用いてPC鋼棒を緊張して荷重を負荷する引抜き実験を実施した。

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(案)」[土木学会, 2013]における、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験の方法を準用した方法にて実施した。引抜き実験では、固定定着構造がコンクリートへ安全にプレストレスを伝達できるかどうかを確認するため、緊張材の引張破壊が先行するように規格引張荷重 (P_{tu}) の100%以上の引抜き耐力を有していることを調べた(以下、定着耐力実験と称す)。

さらに、固定定着構造に引抜き力が持続载荷した状態に対する長期定着性能を明らかにするため、使用状態における最大緊張力に相当する引抜き力を1年間载荷して経時変化を調べる実験を実施した(以下、持続载荷実験と称す)。

なお、図-4.1.1に示す通り、JSCE-E 503「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[土木学会, 2013]では、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いるコンクリート供試体の1辺の長さは定着具の中心からコンクリートの縁までの許容最小距離の2倍と規定されており、本実験ではこの方法に従い供試体1辺の長さを想定する定着部材の許容最小部材寸法(許容最小距離の2倍)である400mmと設定した。

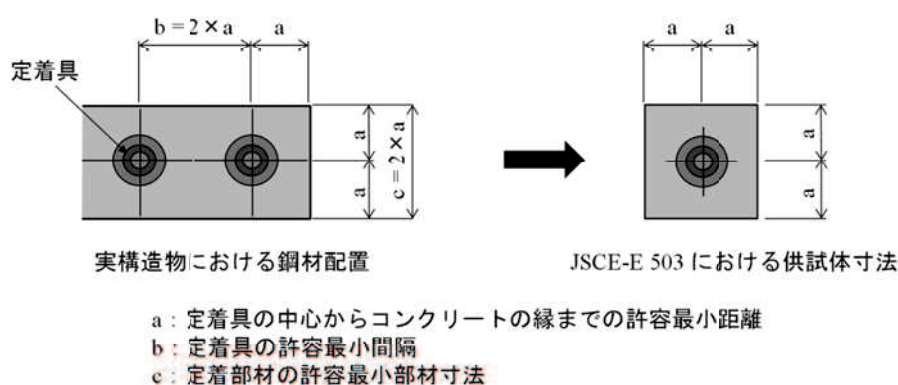


図-4.1.1 実構造における鋼材配置と供試体寸法の関係

4.2 実験供試体

4.2.1 供試体概要

供試体サイズは押抜き実験結果を踏まえて載荷面の部材寸法を許容最小寸法の400mmとし、PC鋼棒方向の長さは土木学会基準 JSCE-E-503 「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[土木学会, 2013]を参考として載荷面の寸法の2倍以上の寸法として、400×400×1300mmのコンクリートブロックを用意した。実験は鉛直方向へのプレストレス導入を想定した方法で実施し、その中心を実施工と同じ機材を用いて削孔した後、高強度モルタル充てん材を用いてPC鋼棒を固定定着する方法で製作した。固定定着構造は押抜き実験の結果を踏まえて図-4.2.1とした。

供試体は4体を同時に製作し、うち3体はPC鋼棒の規格引張強度 ($P_u = 448.7\text{kN}$) 以上の引抜き力を載荷して固定定着構造の定着耐力を調べる定着耐力実験に用い(図-4.2.2)、残り1体は使用状態において固定定着構造に持続して作用する最大引抜き力を長期載荷した状態で経時挙動を調べる持続載荷実験に用いた(図-4.2.3)。なお、使用状態の最大引抜き力は、コンクリート標準示方書[設計編][土木学会, 2012]に規定されるプレストレス導入直後の緊張材の引張応力度の制限値から求めた。

また、持続載荷実験において温度変化や乾燥収縮の経時変化による影響を把握するために、載荷する供試体と同形状の無載荷とする基準供試体(図-4.2.4)も準備した。

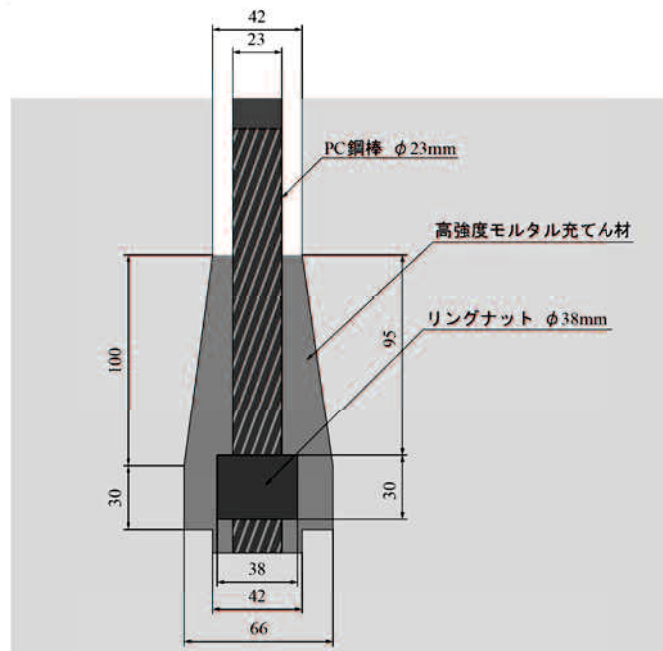


図-4.2.1 採用した固定定着構造：単位 mm

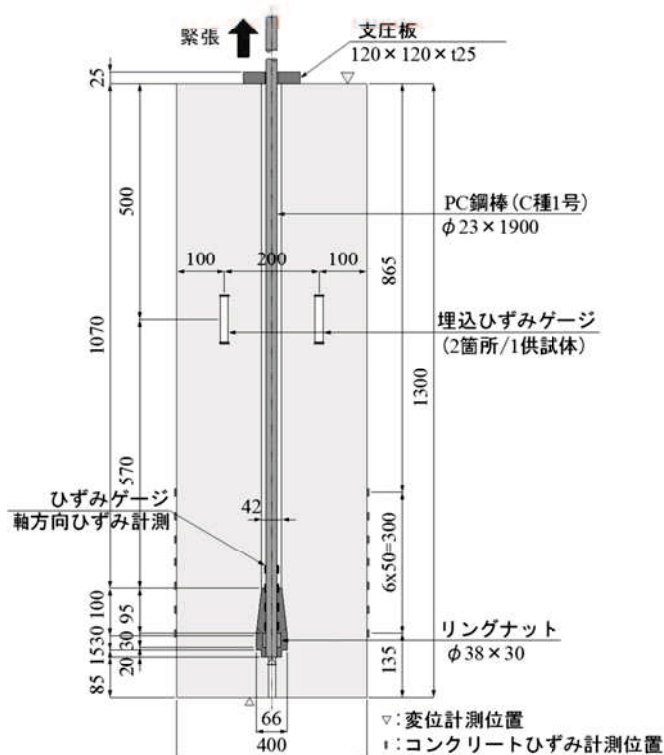


図-4.2.2 定着耐力実験用供試体：単位 mm

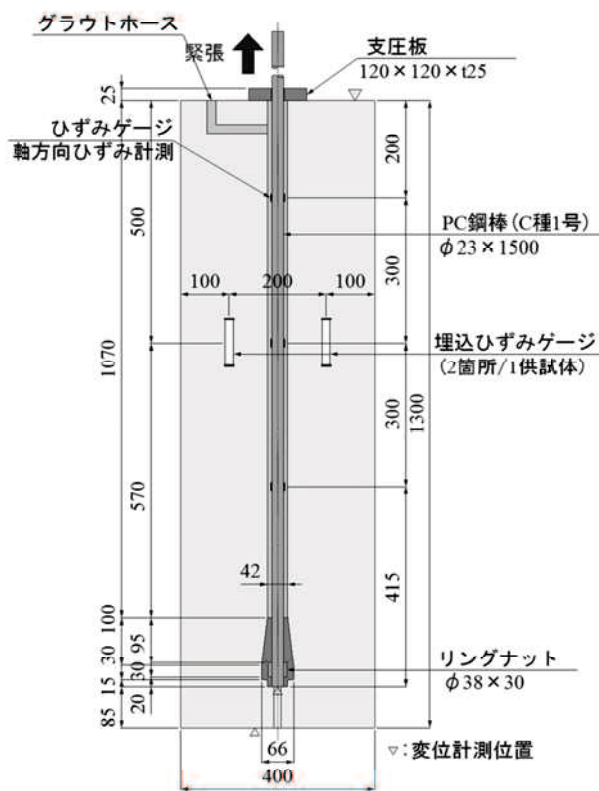


図-4.2.3 持続載荷実験用供試体：単位 mm

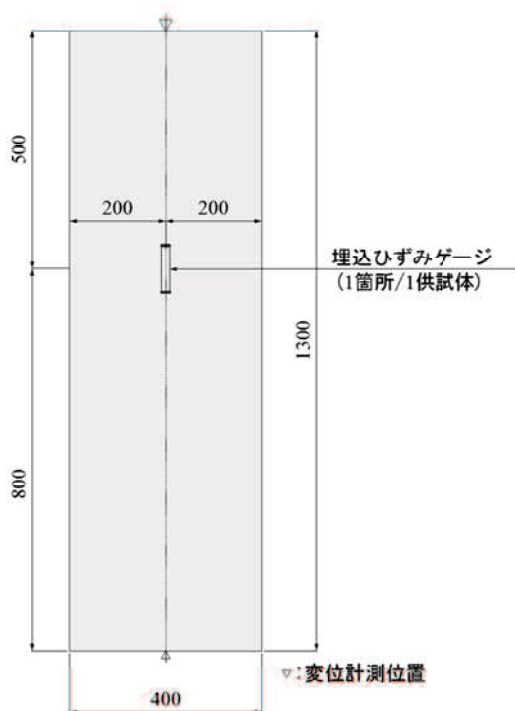


図-4.2.4 無載荷基準供試体：単位 mm

4.2.2 供試体材料

実験に使用した材料を以下に示す。

(1) コンクリート

供試体に使用したコンクリートの使用材料と密度を表-4.2.1に、コンクリートの配合を表-4.2.2に示す。

表-4.2.1 コンクリートの使用材料と密度

使用材料	種類	密度	備考
水 (W)	地下水	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 (広島県三次産)	2.64 g/cm ³	
粗骨材 (G)	砕石 (広島県安芸高田産)	2.68 g/cm ³	最大寸法：20mm
混和剤 (AD)	フローリック VP700	1.04 g/cm ³	高性能減水剤

表-4.2.2 コンクリート配合

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

(2) 鉄筋

JSCE-E 503「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[土木学会, 2013]では、定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験に用いるコンクリート供試体の定着部近傍は用心鉄筋により一様に外周を補強することとし、その用心鉄筋の鉄筋比は2%以下とするよう規定されている。しかし本工法は既設コンクリート内に固定定着構造を設けるため、固定定着構造周辺を鉄筋などで補強することは困難であることから、一般的なRC構造物において配置されていると想定されるD16の鉄筋を150mm間隔で配置した場合と同程度の鉄筋量を用心鉄筋として配置した(鉄筋比:0.5%)。鉄筋には一般的に使用されているSD345を用いた。供試体の配筋を図-4.2.5に示す。載荷を行う供試体の緊張側には普通PC鋼棒工法の定着具周辺に配置する格子鉄筋(D10)を配置した。

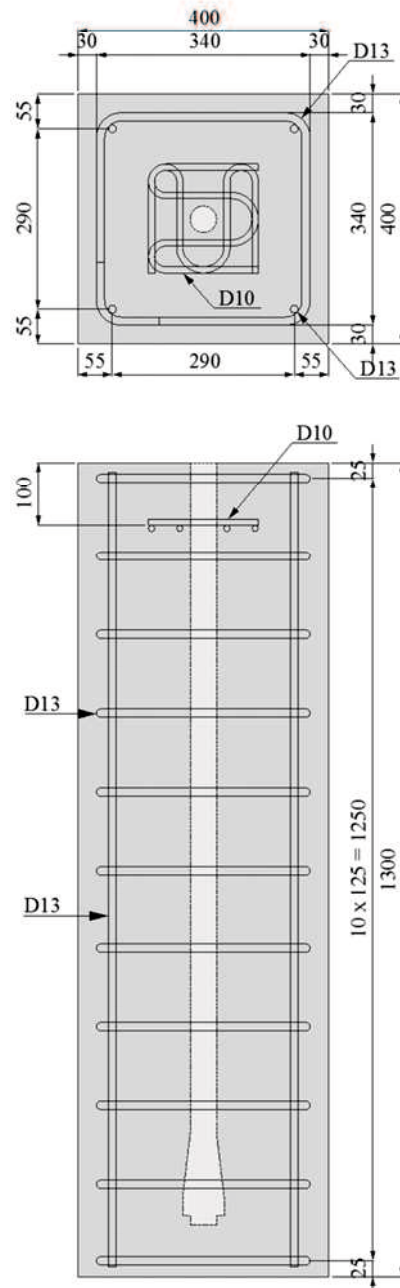


図-4.2.5 供試体配筋図：単位 mm

(3) PC 鋼材

実験に用いた PC 鋼棒は JIS G 3109 に適合する種類のうち、定着耐力実験において使用を想定している丸鋼 B 種 1 号の規格引張強度以上の引抜き力を作用させるため、丸鋼 B 種 1 号より引張強度 (P_u) や降伏耐力 (P_y) が高い丸鋼 C 種 1 号を使用した。なお、PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ の丸鋼 C 種 1 号の降伏耐力 (P_y) と丸鋼 B 種 1 号の引張強度 (P_u) はそれぞれ 449kN である (表-4.2.3)。また丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ の設計に用いる値を表-4.2.4 に示す。なお、使用した PC 鋼棒の検査証明書 (図-4.2.6) における静弾性係数は 202kN/mm^2 、リラクセーション率は 2.8%であった。

表-4.2.3 PC鋼棒 φ23mm の規格値

記号 (種類)	降伏耐力 P_y	引張荷重 P_u
SBPR930/1080 (丸鋼B種1号)	386.4 kN	448.7 kN
SBPR1080/1230 (丸鋼C種1号)	448.7 kN	511.0 kN

表-4.2.4 PC鋼棒丸鋼B種1号 φ23mm の設計諸元

		丸鋼B種1号 SBPR930/1080
降伏耐力 P_y		386 kN
引張荷重 P_u		449 kN
設計荷重時プレストレス力	$0.6P_u$ or $0.75P_y$	270 kN
導入直後プレストレス力	$0.7P_u$ or $0.85P_y$	314 kN
プレストレス中のプレストレス力	$0.8P_u$ or $0.9P_y$	348 kN

新東興和 (株) 発行番号 14-0102
 2014年 5月 20日
 仕様 JIS G 3109
 製作番号 CB8014
 納品数量 PC鋼棒 4 本
 住友電工スチールワイヤードーム株式会社
 品質保証部
 〒166-0205 東京都中野区中野5-1-10
 TEL 03-772-5108 FAX 03-772-5178

検査証明書

品名 PC鋼棒 C種1号 SBPR 1080 / 1230 23.0 ㎜

1. 寸法及び数量

公称	公差 ±	ねじ長さ (mm)	ねじ長さ 公差 ±	数 (本)
1,500	±10.0	200	±2.5	1
1,900	±10.0	200	±2.5	3

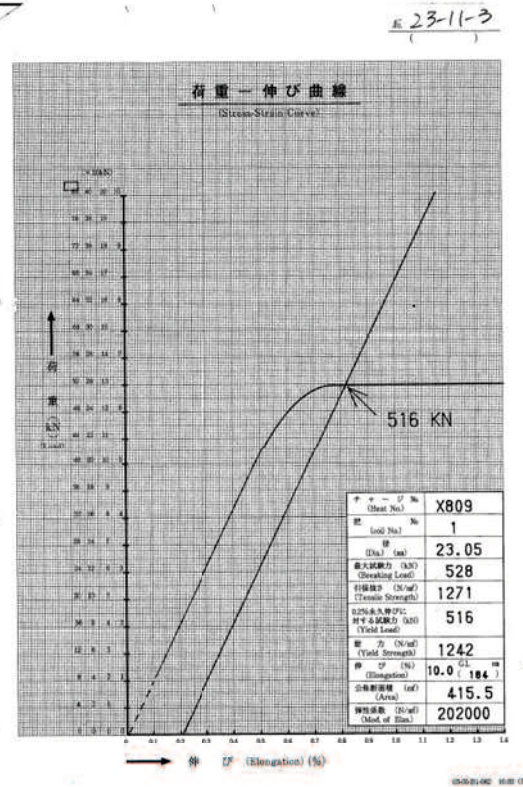
2. 機械的性質

項目	値	引張強さ N/mm ²	伸び %	耐力 N/mm ²	力りり率 %
規格	23.0	1230 ㎫	5.0 ㎫	1080 ㎫	4.0 ㎫
X809 -1	23.05	1271	10.0	1242	2.80
-2	23.05	1284	8.0		
-3	23.02	1258	9.5		

3. 化学成分

項目	C	Mn	P	S	Cu
規格	0.25 以下	0.05 以下	0.01 以下	0.01 以下	
検査	0.22	0.02	0.01	0.01	

a) 検査証明書一覧



b) 荷重-伸び曲線

図-4.2.6 PC鋼材検査証明書

(4) リングナット

鋼棒に装着するリングナットは外径φ38mm、高さは30mmとし、材質はSS400を用いた(図-4.2.7)。リングの中心はPC鋼棒φ23mmのねじとかん合するようにM24ピッチ2のねじ加工を施した。

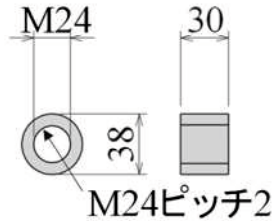


図-4.2.7 リングナット形状図：単位 mm

(5) 支圧板

緊張端に設ける支圧板の寸法は普通PC鋼棒工法に用いられる120mm×120mm×25mmとし、その材質はSS400である。

(6) ナット・ワッシャー

緊張端に用いるナット・ワッシャーは製造メーカーにより性能が保証されている普通PC鋼棒工法φ23mm用の専用品を用いた(図-4.2.8)。

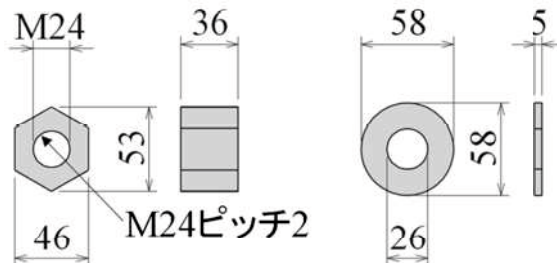


図-4.2.8 ナット・ワッシャー形状図：単位 mm

(7) 充てん材

高強度モルタルは市販のプレミックスタイプであり、配合はプレミックス材 25kg/袋に対し水 3.0kg/袋である。

(8) グラウト材

グラウト材は通常のPCグラウトに用いられているプレミックスタイプのノンブリディング超低粘性型であり、配合はプレミックス材 25kg/袋に対し水 7.75kg/袋である。

実験に使用したコンクリートおよび充てん材の載荷時における材料諸元を表-4.2.5に、鋼材の材料諸元を表-4.2.6に示す。

表-4.2.5 コンクリートおよび充てん材の材料諸元（載荷時）

		定着耐力実験	持続載荷実験
コンクリート	設計基準強度	24 N/mm ²	
	スランプ	12.0 cm	
	水セメント比	53.0 %	
	圧縮強度	42.4 N/mm ²	35.9 N/mm ²
	割裂強度	2.7 N/mm ²	2.6 N/mm ²
	静弾性係数	32.0 kN/mm ²	34.5 kN/mm ²
	ポアソン比	0.19	0.19
高強度 モルタル	圧縮強度	93.7 N/mm ²	90.2 N/mm ²
	割裂強度	4.3 N/mm ²	4.4 N/mm ²
	静弾性係数	37.8 kN/mm ²	39.8 kN/mm ²
	ポアソン比	0.23	0.22

表-4.2.6 鋼材の材料諸元

鉄筋	降伏強度	345 N/mm ²
PC 鋼棒	外径	23 mm
	断面積	415.5 mm ²
	降伏強度	1080 N/mm ²
	引張強度	1230 N/mm ²
リングナット (SS400)	外径	38 mm
	高さ	30 mm
支圧板 (SS400)	平面形状	120 mm × 120 mm
	厚さ	25 mm

4.2.3 供試体製作

供試体は定着耐力実験用供試体3体と持続载荷実験用供試体2体（载荷用1体と無载荷用1体）の計5体を同時に製作した。コンクリート硬化後、引抜き力を载荷する供試体4体の中心において、コア削孔機を用いて削孔した後、専用の拡径ビットを使用して最深部を拡径削孔した。その後、高強度モルタルを自然流下させて拡径削孔部を満たし、PC鋼棒を挿入して固定した。なお、PC鋼棒が孔の中心に配置されるように、PC鋼棒にD25のロックボルトに用いられる提灯型のスペーサーを2箇所取り付けて挿入した。

供試体製作時の写真を図-4.2.9に示す。



a) 供試体打設前全景



b) 配筋状況



c) コンクリート打設状況



d) コンクリート削孔状況



e) 拡径ビット



f) 高強度モルタル充てん状況



g) PC 鋼棒, リングナット, スペース



h) PC 鋼棒挿入後状況

図-4.2.9 供試体製作状況

4.2.4 有限要素解析

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、線形有限要素プログラム (midas-FEA) を用いた解析 (以下、FEM と略記) を行った。FEM モデルは引抜き試験を模した 1/2 モデルとし、固定定着構造における PC 鋼棒と高強度モルタル充てん材の付着の有無により荷重伝達機構が異なる状態を再現した 2 つのモデルを用いた (図-4.2.10)。タイプ B (Bond) は 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である。タイプ UB (Un-Bond) は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 重節点を設けて互いの要素を結合していないモデルである。なお、引抜き力を与えた状態で 2 重節点をもつ要素同士が重なり合うことがないことを解析上で確認している。FEM に用いた材料特性を表-4.2.7 に示す。

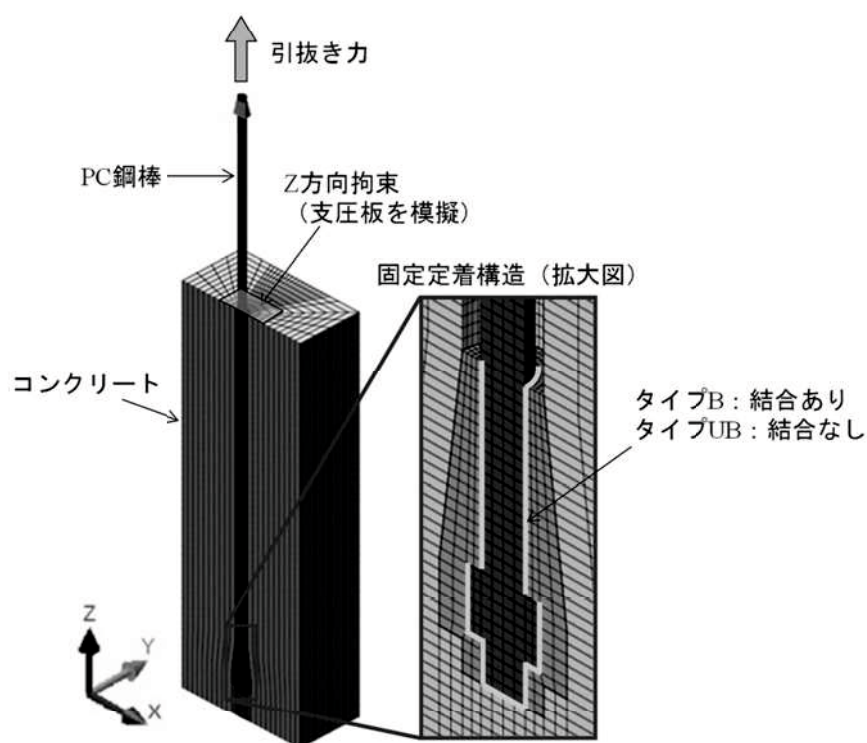


図-4.2.10 FEM モデル (1/2 モデル)

表-4.2.7 FEMに用いた材料特性

材料	静弾性係数	ポアソン比
コンクリート	32 kN/mm ²	0.19
PC 鋼棒	200 kN/mm ²	0.30
高強度モルタル	37.8 kN/mm ²	0.23

4.3 実験方法および計測方法

引抜き力は実施工と同じくPC鋼棒を500kN型センターホールジャッキで緊張する方法で負荷した。

定着耐力実験および持続載荷実験とも、荷重載荷はPC鋼棒の定着端部に高強度モルタルを充てんしてから7日後に実施した。

(1) 定着耐力実験

荷重載荷は図-4.3.1の要領で、表-4.3.1のステップに従い単調載荷した。丸鋼B種1号の規格引張荷重(P_u)である449kNを超えた後はジャッキ能力の限界である500kNまで荷重載荷を試みた。

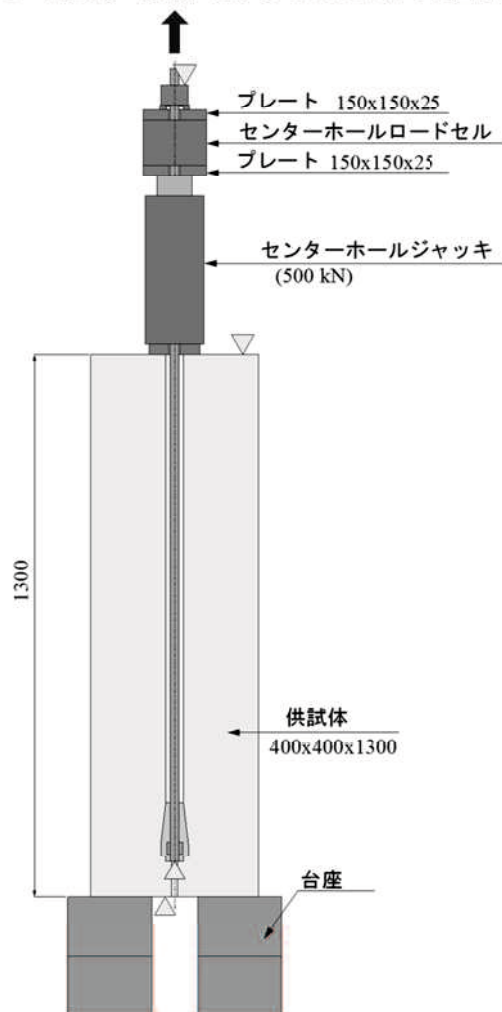


図-4.3.1 定着耐力実験要領図：単位 mm

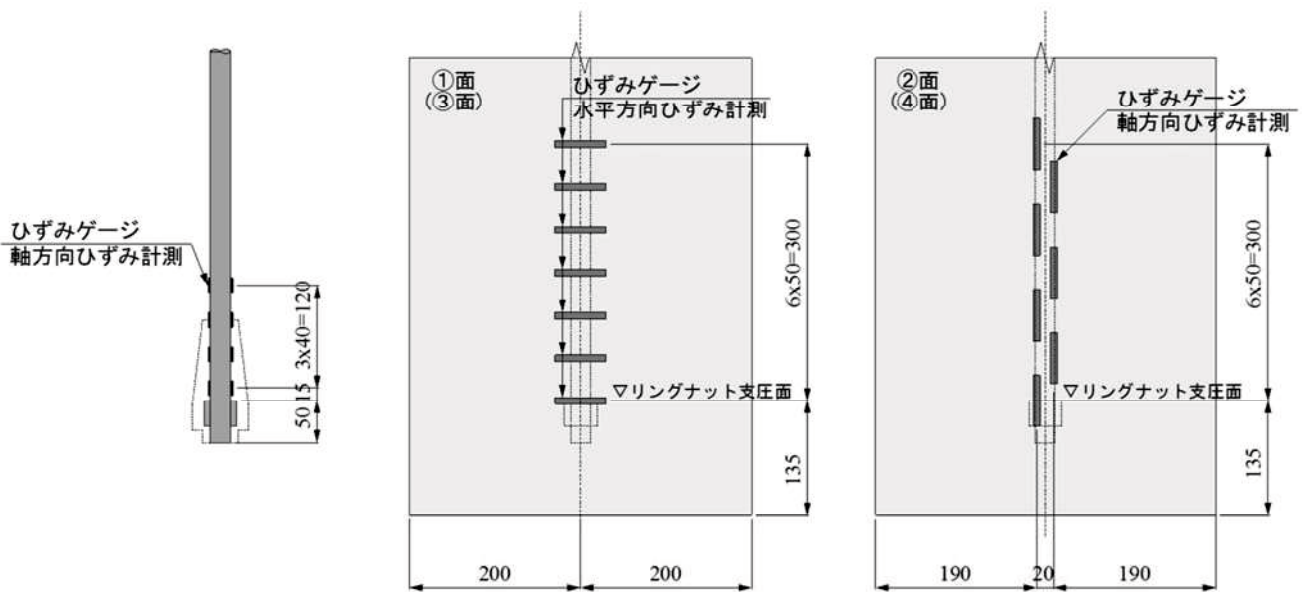
表-4.3.1 定着耐力実験の荷重ステップ

荷重段階	荷重値 (kN)	
0	0	
0.15Pu	67	
0.30Pu	135	
0.45Pu	202	
0.60Pu	270	設計荷重時プレストレス力
0.70Pu	314	導入直後プレストレス力
0.90Py	348	プレストレッシング中のプレストレス力
Py	386	規格降伏耐力
0.90Pu	404	
Pu	449	規格引張荷重
Pmax	↓	500kN 以下

実験時には1MN型のセンターホールロードセルをジャッキ上面に設置して緊張力を計測した。

固定定着部におけるPC鋼棒のすべり量を調べるため、供試体底面と鋼棒底面に変位計を設置して、その相対変位からすべり量を求めた。またPC鋼棒の伸び変位は緊張側のPC鋼棒端部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。

固定定着部付近のPC鋼棒軸方向ひずみを計測するため長さ3mmの防水型ひずみゲージを設置した。また固定定着部周辺のコンクリート表面に長さ60mmのひずみゲージをPC鋼棒軸方向および水平方向に貼付した。PC鋼棒とコンクリートのひずみゲージ設置位置を図-4.3.2に示す。またコンクリート内部のひずみを標点距離60mmの埋込ひずみゲージで計測した。



a) PC鋼棒ひずみ計測位置 b) コンクリート水平ひずみ計測位置 c) コンクリート軸方向ひずみ計測位置

図-4.3.2 定着耐力実験のひずみゲージ設置位置

(2) 持続载荷実験

荷重载荷は図-4.3.3の要領で、表-4.3.2のステップに従いPC鋼棒に314kNの引張荷重を与えた。コンクリートブロックの载荷時の材齢は92日であった。緊張した翌日にコンクリートブロック内のダクトにセメントグラウトを充てんし、PC鋼棒とコンクリートの一体化を図った。载荷後、供試体周辺に乾燥防止フィルムを貼り付け、さらに気泡緩衝材で包み込んで屋内に静置することで、挙動に影響を与える乾燥と温度変化の影響をできるだけ低減した(図-4.3.4)。

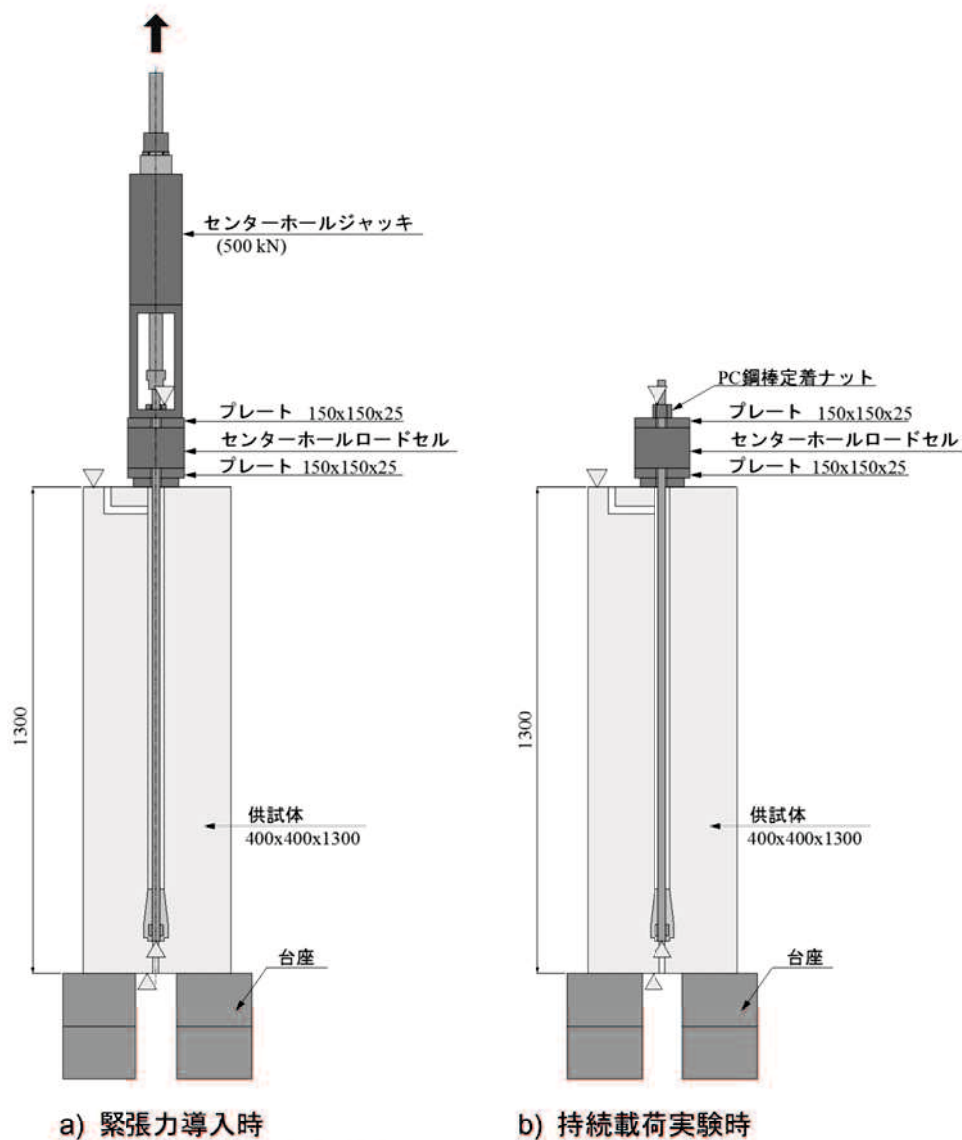


図-4.3.3 持続载荷実験要領図：単位 mm

表-4.3.2 持続載荷実験の荷重ステップ

荷重段階	荷重値 (kN)	
0	0	
0.15 <i>Pu</i>	67	
0.30 <i>Pu</i>	135	
0.45 <i>Pu</i>	202	
0.60 <i>Pu</i>	270	設計荷重時プレストレス力
0.70 <i>Pu</i>	314	導入直後プレストレス力

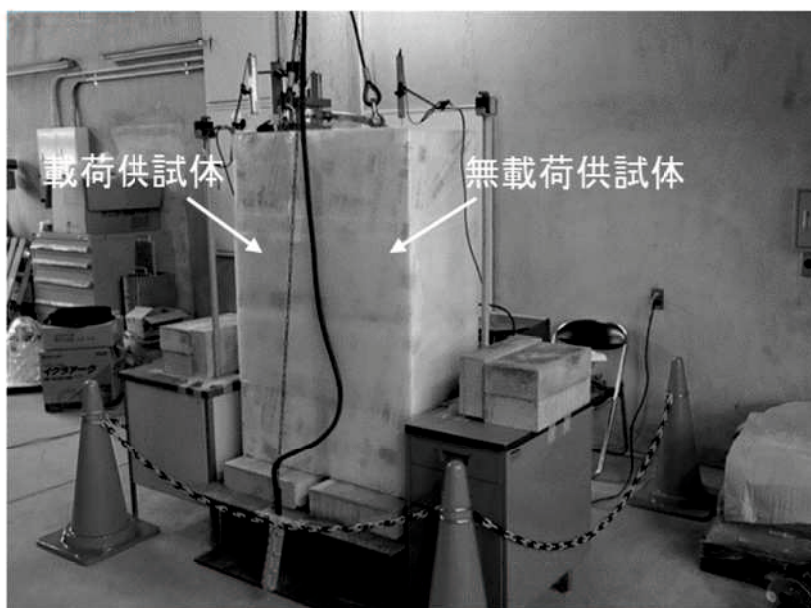


図-4.3.4 持続載荷実験状況

実験時には 1MN 型のセンターホールロードセルを定着用ナットと供試体の間に設置して緊張力を経時計測した。固定定着部における PC 鋼棒のすべり量と PC 鋼棒の伸び変位は定着耐力実験と同様の方法で求めた。PC 鋼棒の軸方向ひずみを計測するため、長さ 3mm の防水型ひずみゲージを PC 鋼棒自由長部の 3 箇所を設置した。またコンクリート内部のひずみを標点距離 100mm の埋込ひずみ計で計測した。

4.4 定着耐力実験結果および考察

荷重載荷は使用したPC鋼棒（C種1号）が降伏するまで載荷した（図-4.4.1）。各供試体の最大荷重を表-4.4.1に示す。3体ともB種1号の規格引張強度（ P_u ）である449kN以上の荷重を保持しており、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がわかった。なお本実験では最大荷重においてもコンクリートブロックにひび割れ等の損傷は生じなかった。



図-4.4.1 定着耐力実験状況

表-4.4.1 定着耐力実験の最大荷重

	No.1	No.2	No.3
最大荷重 (kN)	489.6	490.9	490.5

固定定着構造におけるPC鋼棒のすべり量を計測した結果（図-4.4.2）、引抜き荷重が概ね300kNを超えたあたりから徐々にすべり量が増加する挙動を示し、最大荷重におけるすべり量は1.4～1.9mm程度となった。通常の使用状態においてPC鋼棒に作用する最大引張力はプレストレスング中の緊張材の引張応力度の制限値である降伏強度（ P_y ）の0.90倍の値（B種1号の場合、 $0.90P_y=349\text{kN}$ ）であるが、その時のすべり量の計測値は最大0.24mmであった。これはプレストレスング時に1mm単位で計測・管理されるPC鋼棒の伸び変位に対して充分小さい値であるため、固定定着構造におけるすべりの影響については実用上において無視できるものと考えられる。

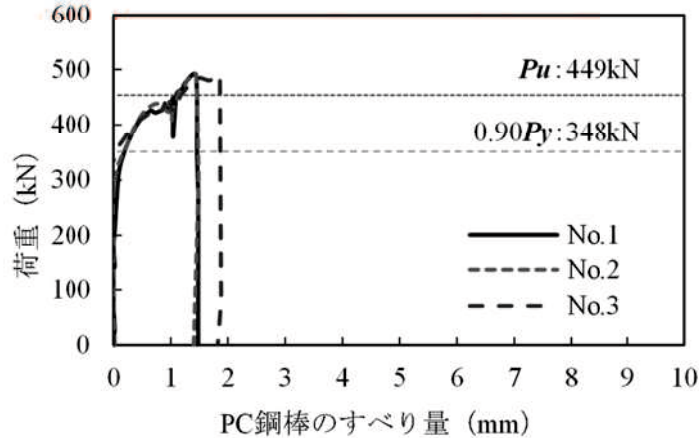


図-4.4.2 引抜き荷重と固定定着部におけるPC鋼棒のすべり量の関係

PC鋼棒の伸び変位（図-4.4.3）は400kNあたりまで荷重の増加と比例する傾向を示し、その後伸び変位が増加する傾向を示した。これはPC鋼棒の検査証明書に示される荷重－伸び曲線（図-4.2.6 b）の挙動と一致していることから、この傾向はPC鋼棒の機械式性質による降伏挙動によるものと推測される。なお図の計算値はPC鋼棒長さ（1.9m）からナットやリングナットの高さと余長を差し引いた自由長（1.765m）に対して検査証明書に示される静弾性係数（202kN/mm²）を用いて求めたPC鋼棒の伸び変位を示している。

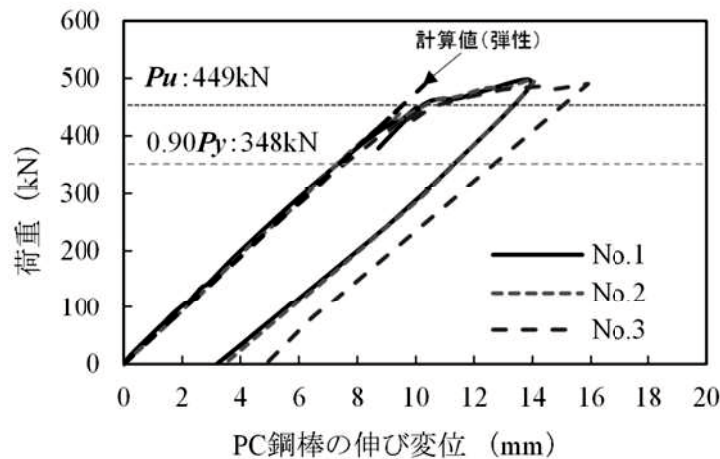
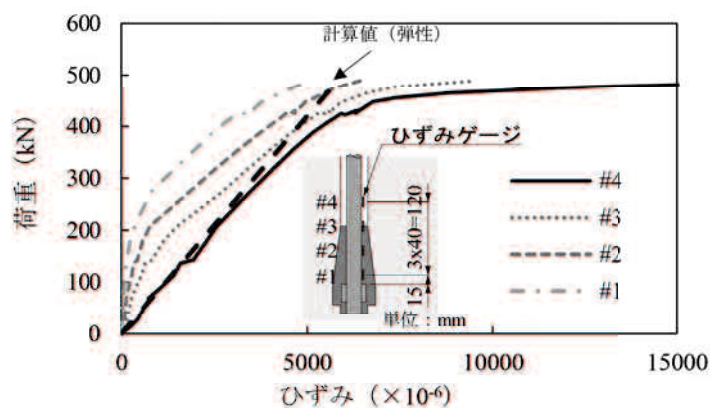


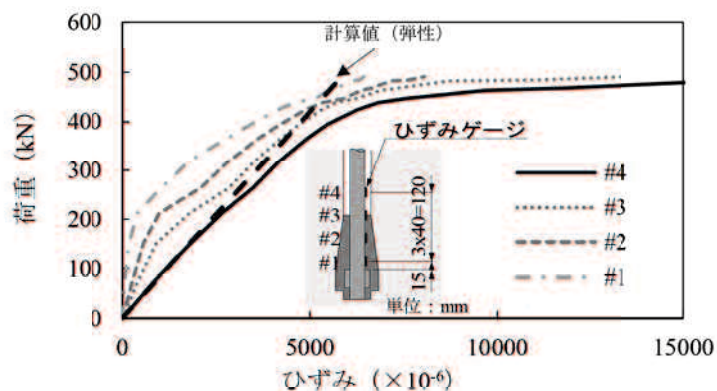
図-4.4.3 引抜き荷重とPC鋼棒の伸び変位の関係

固定定着構造近傍のPC鋼棒の軸方向ひずみの計測結果を図-4.4.4に示す。図の計算値は引抜き荷重によるPC鋼棒の引張応力度を検査証明書に示される静弾性係数（202kN/mm²）で除して求めたひずみを示しており、固定定着構造の外に貼り付けた#4のひずみゲージの計測値は400kN付近まで概ね計算値と一致する傾向を示している。リングナット近傍のひずみ（#1～3のひずみゲージの計測値）は200kN前後から増加する傾向を示し、PC鋼棒と充てん材の付着が徐々に失われ始めているものと考えられる。しかし、最大荷重時点においてもリングナットに近づくにつれてひずみが減少している傾向を示していることか

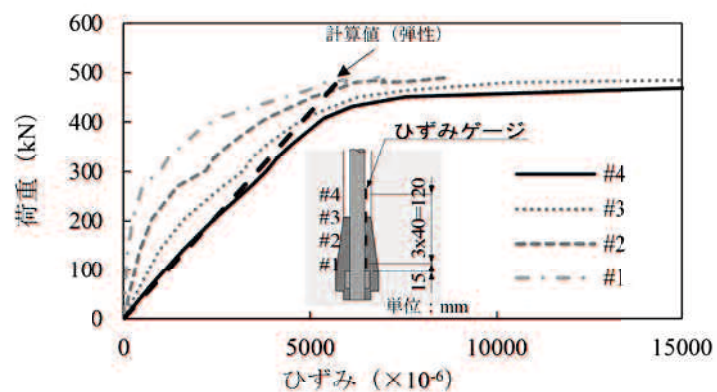
ら、PC鋼棒と充てん材の付着は完全に喪失しておらず、充てん材への荷重伝達はリングナットの支圧によるものに加えPC鋼棒との付着によっても荷重伝達が行われているものと推察される。



a) 供試体 No.1



b) 供試体 No.2



c) 供試体 No.3

図-4.4.4 引抜き荷重と固定定着構造近傍のPC鋼棒ひずみの関係

引抜き荷重が 269.2kN の時点におけるコンクリート表面の軸方向ひずみ分布を図-4.4.5 に示す。図には固定定着部の荷重伝達機構が異なる 2 つの FEM モデルで求めたひずみ分布を比較のために示している。固定定着構造周辺におけるコンクリート表面の軸方向ひずみの実測値は、PC 鋼棒と高強度モルタルの付着を考慮したタイプ B のひずみ分布と比較的一致する傾向を示した。また、実測したコンクリート表面の軸方向ひずみは、内部くさびの先端から 45 度方向へ表面まで伝達したところで埋込みひずみゲージで計測したコンクリート内部ひずみの値を上回るひずみが生じていた。FEM による軸方向応力の分布を図-4.4.6 に示すが、PC 鋼棒と高強度モルタルの付着を考慮したタイプ B は内部くさびの先端から、リングナットによる機械的な抵抗だけを考慮したタイプ UB はリングナットから概ね 45 度にプレストレスが分布している。充てん材と PC 鋼棒の付着が喪失していない可能性を考慮すると、設計におけるプレストレス分布はリングナットからではなく内部くさびの先端から 45 度方向に伝達すると考えたほうが安全であるといえる。

また、図-4.4.5 に示す FEM による軸方向ひずみ分布はタイプ B・タイプ UB とともに供試体天端から 300～900mm の範囲で安定しており、このことは仮に PC 鋼材と高強度モルタル充てん材の付着による荷重伝達がなくても、この区間のコンクリートに一定のプレストレスが導入できることを示している。また固定定着構造の引抜き方向と反対側に局部的な引張ひずみの発生が認められるが、引張ひずみは 10×10^{-6} 以下であり、このひずみから求めた引張応力は 0.3 N/mm^2 程度であることから、コンクリートの割裂強度（実測値： 2.7 N/mm^2 ）に対し充分小さい値であるといえる。ただし、本工法を不静定構造物に適用する場合にはプレストレスによる変形の拘束によって不静定力が作用するため、不静定力と局部的に発生する引張応力の影響を考慮して安全性を照査する必要がある。

図-4.4.7 は引抜き荷重が 269.2kN の時点におけるコンクリート表面の周方向ひずみ分布について実験と解析結果を示す。FEM による周方向ひずみ分布は固定定着部の荷重伝達機構の違いにより供試体天端から 600mm より下の範囲で異なる分布となるが、実測値は付着の影響を考慮したタイプ B の分布とよく一致している。この結果から、実際には PC 鋼材と高強度モルタル充てん材の付着による荷重伝達が行われていることが示唆される。

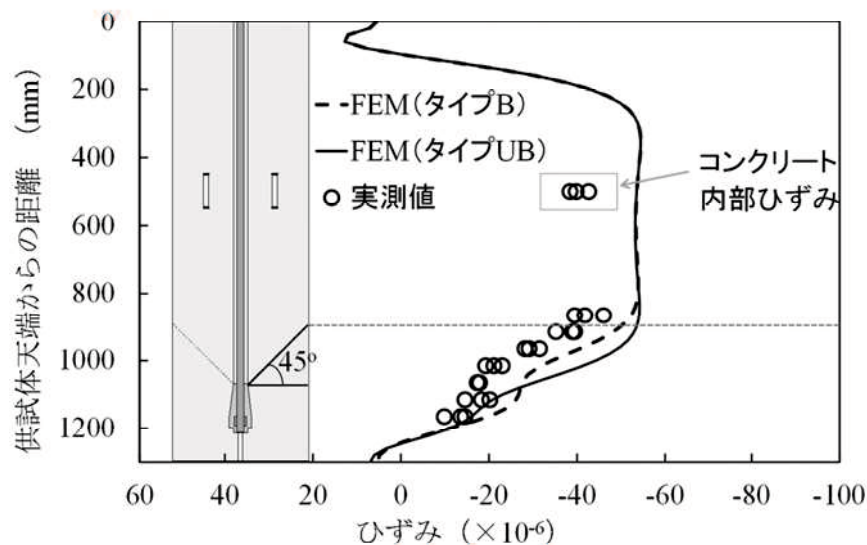


図-4.4.5 コンクリート表面の軸方向ひずみ分布（引抜き荷重 269.2kN 時点）

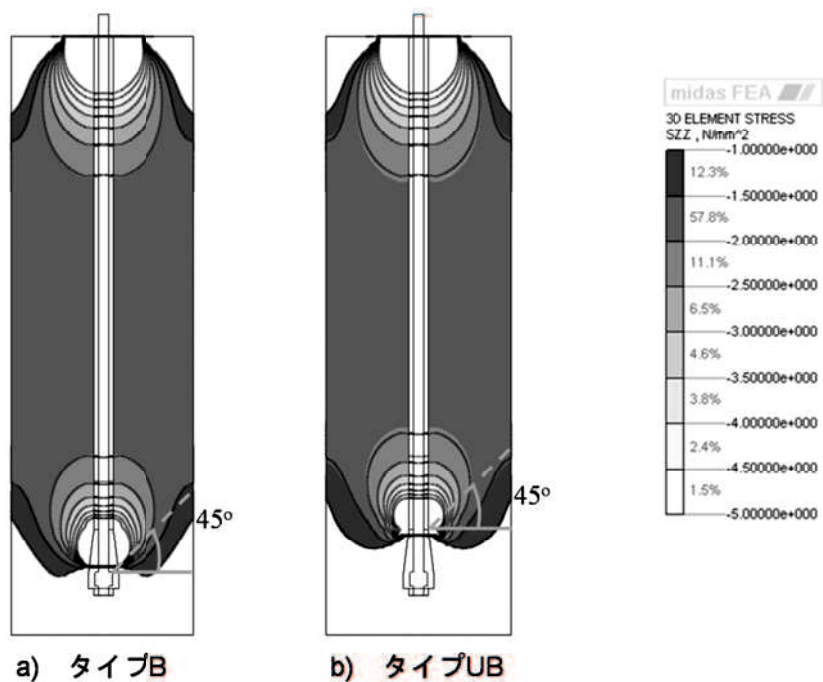


図-4.4.6 FEMによる軸方向応力の分布

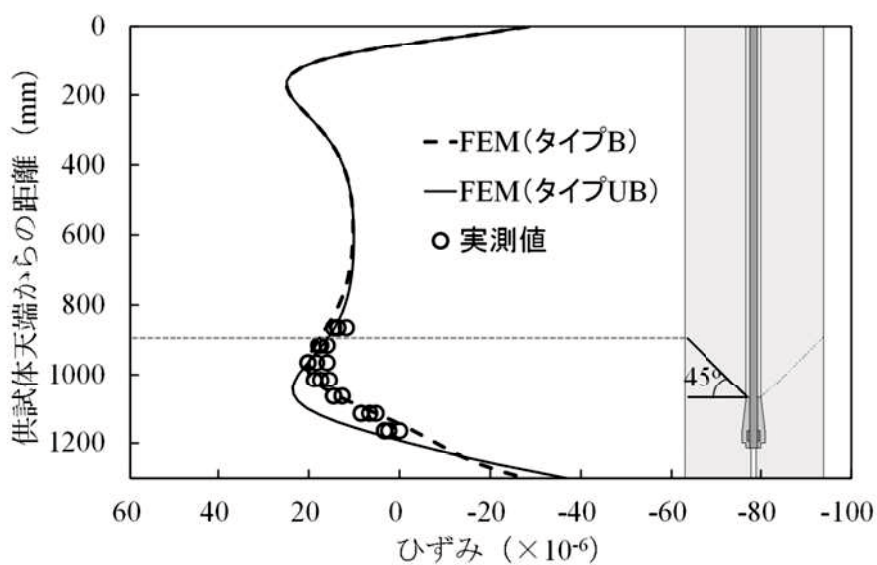


図-4.4.7 コンクリート表面の周方向ひずみ分布（引抜き荷重 269.2kN 時点）

4.5 持続载荷実験結果および考察

引抜き荷重を与えたときの、PC鋼棒のすべり量を図-4.5.1、PC鋼棒の伸び変位を図-4.5.2、PC鋼棒のひずみを図-4.5.3、コンクリート内部ひずみを図-4.5.4に示す。PC鋼棒のすべり量は0mmであり、また伸び変位やひずみは計算値と概ね一致する傾向を示した。そのためプレストレスは計算通り導入されていると判断し、PC鋼棒に314kNの引張荷重を与えた後、緊張側に設けたねじ式の定着具を用いて引張荷重を保持し、固定定着構造に引抜き荷重を持続载荷した状態で緊張力の変化や供試体の変形挙動を1年間計測した。

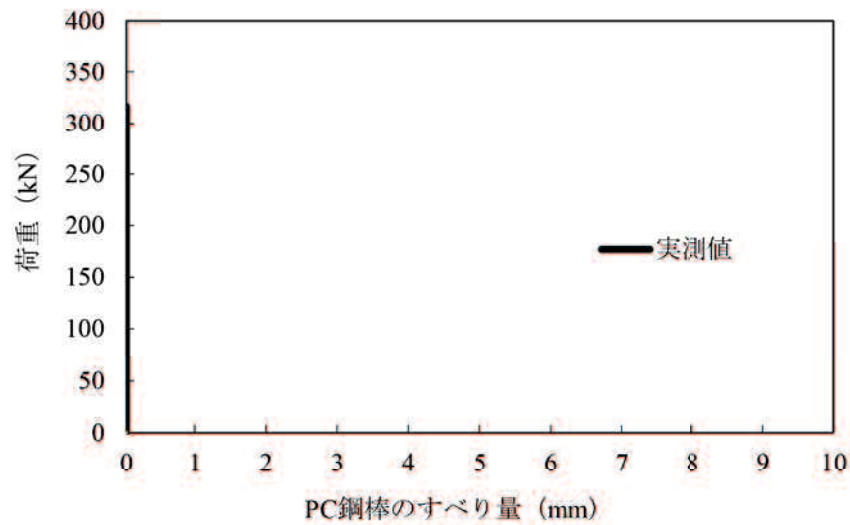


図-4.5.1 引抜き荷重と固定定着構造におけるPC鋼棒のすべり量の関係

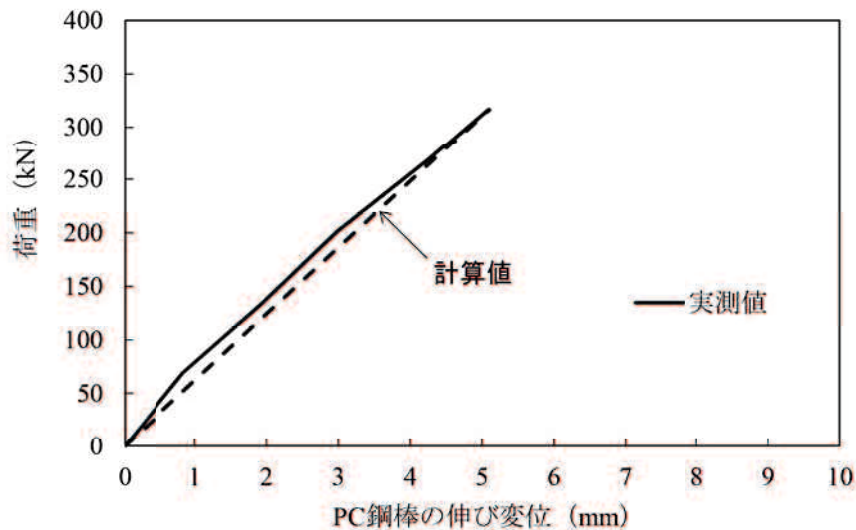


図-4.5.2 引抜き荷重とPC鋼棒伸び変位の関係

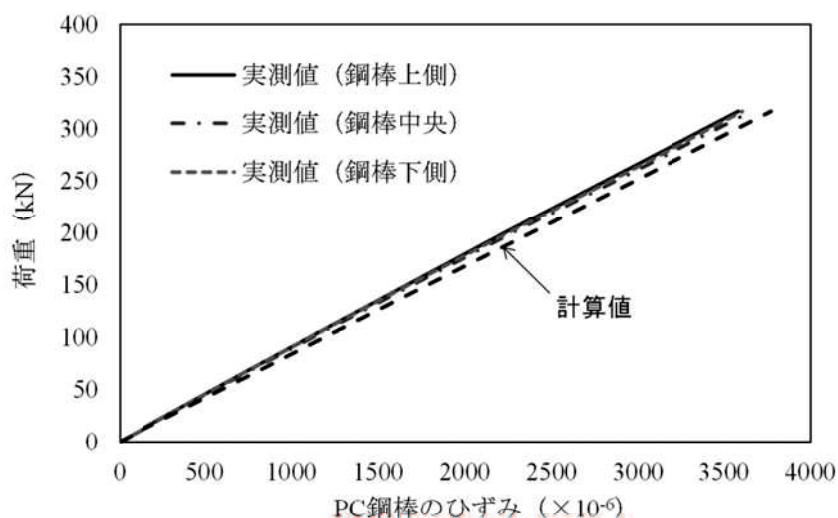


図-4.5.3 引抜き荷重とPC鋼棒ひずみの関係

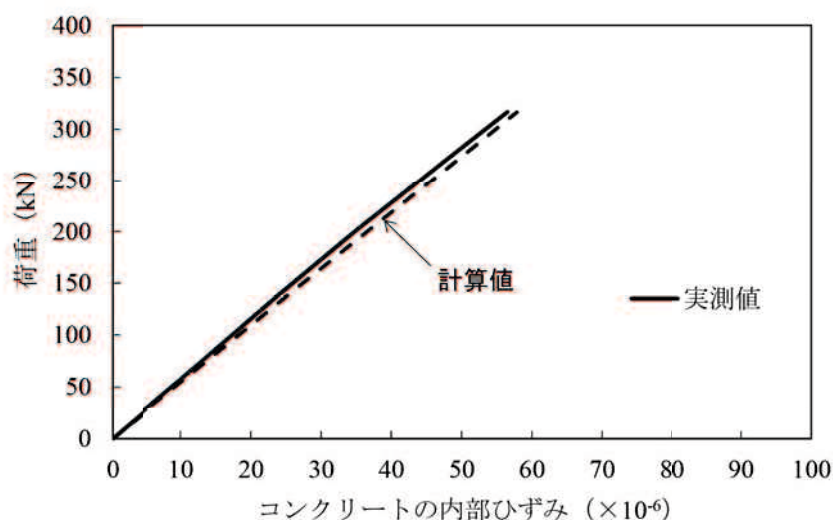


図-4.5.4 引抜き荷重とコンクリート内部ひずみの関係

緊張側に設置したロードセルで計測した引抜き力（PC鋼棒の緊張力）の推移を図-4.5.5に示す。緊張力は100日を過ぎたあたりから減少傾向が緩やかとなって推移しているが、これはPC鋼棒のリラクゼーションや試験に用いたコンクリートブロックのクリープによる影響が緩やかになったためと考えられる。載荷後364日（52週）の緊張力の計測値は初期値に対して95%程度であったが、本工法による補強が必要となる既設コンクリート部材は施工後数十年が経過していると考えられるため、（乾燥）収縮による変形はほとんど生じず、また乾燥の影響を受けるクリープによる変形も減少しているものと考えられることから、本工法を実構造物に適用した時の緊張力の減少量は実験結果よりさらに少なくなるものと考えている。

固定定着構造におけるPC鋼棒のすべり量の経時変化を計測した結果を図-4.5.6に示す。すべり量は緊

第4章 固定定着したPC鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討

張時には生じておらず、その後徐々に0.1mm程度まで計測値は増加したが、すべり量の増加量はわずかであり、その増減も小さいことがわかる。したがって、固定定着構造は引抜き力に対する長期的な定着性能を維持していると判断できる。

持続載荷試験後の固定定着構造付近をコア削孔して割裂した写真を図-4.5.7に示す。拡径削孔部は充てん材で充分満たされており、また固定定着構造周辺の充てん材およびコンクリートにひび割れ等の発生はみられなかった。

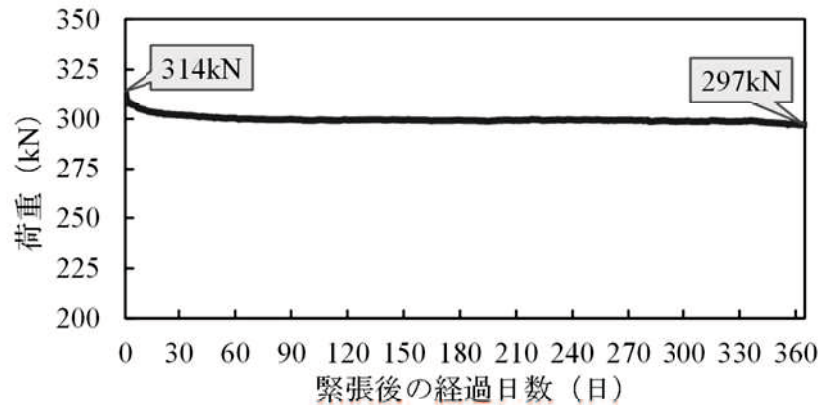


図-4.5.5 引抜き荷重の経時変化

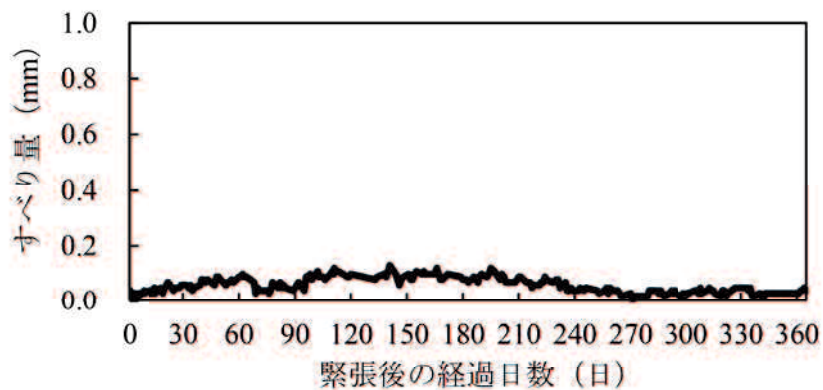


図-4.5.6 固定定着構造におけるPC鋼棒のすべり量の経時変化



図-4.5.7 載荷試験後の固定定着構造

4.6 まとめ

実施工と同じ方法で削孔・定着したコンクリートブロックに高強度モルタルを使用してPC鋼棒を固定定着した実物大供試体を用いて、実構造と同じ作用となるようにPC鋼棒に与えた緊張力を通じて固定定着構造に引抜き力を負荷する実験を行い、定着耐力を調べるとともに、引抜き力を1年間持続載荷した状態に対する長期定着性能を調べた。これらの実験を通じて得た主な知見を以下に示す。

- (1) 高強度モルタル充てん材を使用し、既設コンクリートの部材寸法を400mm以上とすれば、丸鋼B種1号φ23mmの規格引張荷重(P_u)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。
- (2) 使用状態におけるPC鋼棒のすべり量は0.24mmであり実用上無視できる程度であること、1年間の持続載荷におけるすべり量は0.1mm程度とわずかであったことから、固定定着構造は引抜き力に対する長期定着性能を維持できる。
- (3) 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てん材の付着による荷重伝達が行われていることが実験結果から示唆された。一方、FEM結果から、固定定着構造においてPC鋼材と高強度モルタル充てん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がわかった。
- (4) 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。

第 5 章

打継ぎ部を有するコンクリートはりの 実験的検討

第5章 打継ぎ部を有するコンクリートはりの実験的検討

5.1 実験目的

これまでの研究では、PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ 丸鋼 B 種 1 号を緊張材に使用した構造を対象に、主に固定定着構造に焦点を当てた耐荷性能や長期定着性能を調べ、固定定着構造が緊張材を定着するために必要となる耐荷力と長期耐久性を有することを明らかにした。一方、本工法を適用した新旧コンクリート部材の接合部における補強効果については明らかになっていない。そこで本検討では、打継ぎ部に対するプレストレス補強の効果を調べるため、打継ぎを設けた実大はり供試体を用いて曲げ載荷実験を行い、一般的な RC 構造のあと施工アンカーによる打継ぎ構造と挙動を比較した。さらに耐久性比較のため、打継ぎ部における塩分浸透性も調べた。

5.2 実験供試体

5.2.1 供試体概要

実験供試体は、既設コンクリート部材を想定した1次ブロック ($L=1550\text{mm}$, $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$) と増設部材を想定した2次ブロック ($L=1450\text{mm}$, $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$) から構成され、それぞれ異なる打継ぎ構造により部材を一体化させた $400\text{mm}\times 800\text{mm}\times 3000\text{mm}$ の実大はり供試体 (図-5.2.1) を3体製作した。

プレストレスの打継ぎに対する補強効果を調べるため、打継ぎ面に直交するように PC 鋼棒を配置した2体の供試体に対し、一方にはプレストレスを導入せず (供試体名: PC-0), もう一方には PC 鋼材の規格引張荷重 (P_u) の70%に相当する $0.70P_u$ (314 kN) のプレストレスを与えた (供試体名: PC-1). また、本工法と従来工法の打継ぎに対する補強効果を比較するため、打継ぎ部に「あと施工アンカー」で定着した D16 鉄筋を8本配置した供試体を準備した (供試体名: RC). PC-1 と RC の補強量は、はりの降伏荷重がほぼ同程度となるように設定し、その値は PC-1 で 188kN, RC で 186kN である. 打継ぎ部補強材とプレストレスの有無の組合せを表-5.2.1 に示す.

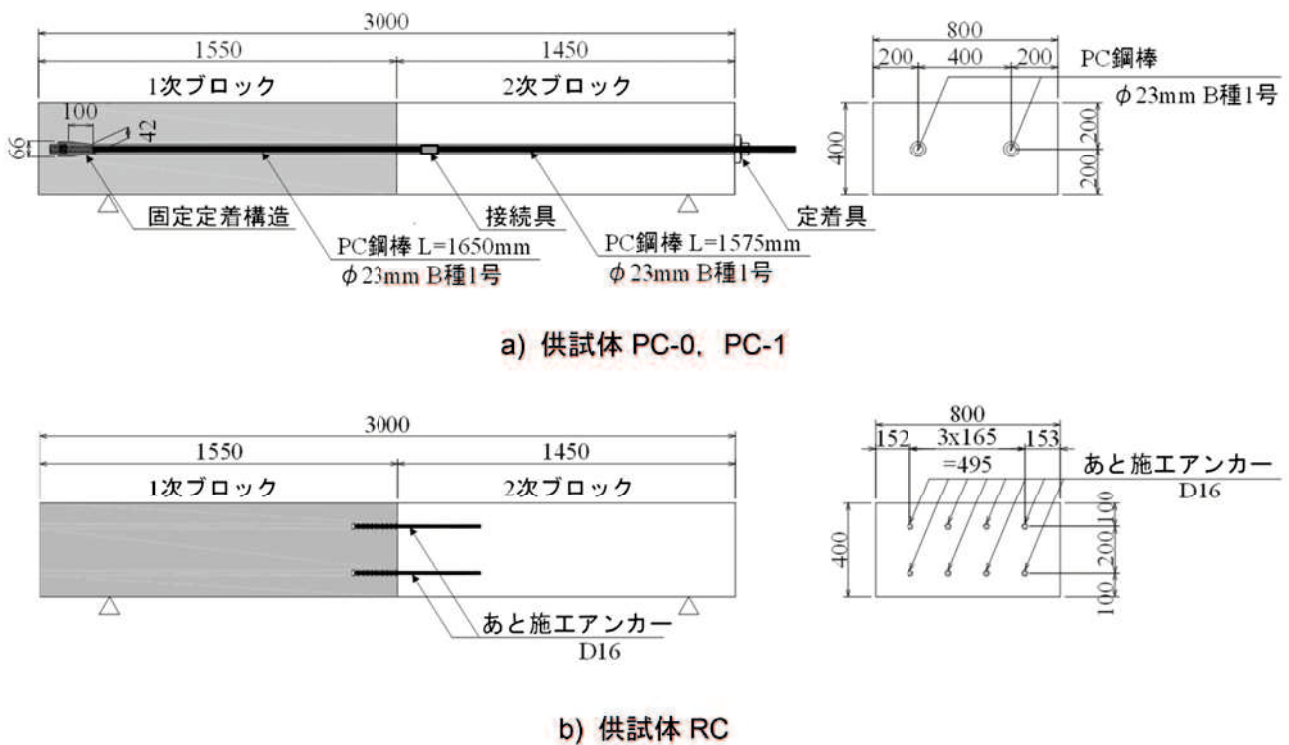


図-5.2.1 実験供試体の概要：単位 mm

表-5.2.1 供試体一覧

No.	呼び名	打継ぎ部補強材	プレストレス
1	PC-0	PC 鋼棒	0.0 kN
2	PC-1	PC 鋼棒	$0.70P_u$ 2@314.1 kN
3	RC	あと施工アンカー (異形鉄筋)	—

5.2.2 供試体材料

実験に使用した材料を以下に示す。

(1) コンクリート

供試体に使用したコンクリートの使用材料と密度を表-5.2.2に、コンクリートの配合を表-5.2.3に示す。

表-5.2.2 コンクリートの使用材料と密度

使用材料	種類	密度	備考
水 (W)	地下水	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 (広島県三次産)	2.64 g/cm ³	
粗骨材 (G)	砕石 (広島県安芸高田産)	2.68 g/cm ³	最大寸法：20mm
混和剤 (AD)	フローリック VP700	1.04 g/cm ³	高性能減水剤

表-5.2.3 コンクリート配合

	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AD
1次ブロック	53.0%	48.0%	175	330	887	978	1.16
2次ブロック	50.0%	47.0%	169	338	874	1000	2.37

(2) 鉄筋

この実験においても先述の実験同様に SD345 の鉄筋を用いた。供試体 PC-0, PC-1 の配筋図を図-5.2.2 に、供試体 RC の配筋図を図-5.2.3 に示す。PC-0, PC-1 の2次ブロック端部には普通 PC 鋼棒工法の定着具付近における補強として必要である格子鉄筋 (D10) を配置した。RC の打継面にはあと施工アンカーとして1次ブロックに定着する D16 の鉄筋を8本配置した。あと施工アンカーの定着長は鉄筋径の15倍とし、2次ブロックへの配置長さはコンクリートの付着強度から求まる定着長 (鉄筋径の30倍) 以上を確保した。

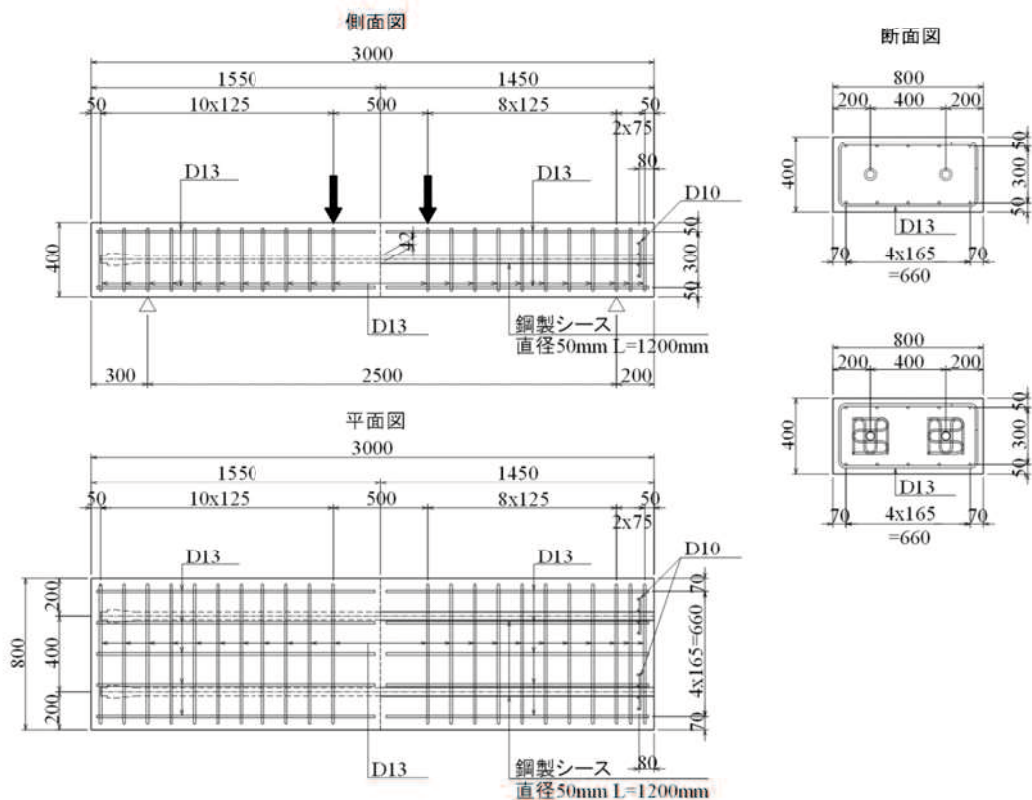


図-5.2.2 供試体配筋図 (PC-0, PC-1) : 単位 mm

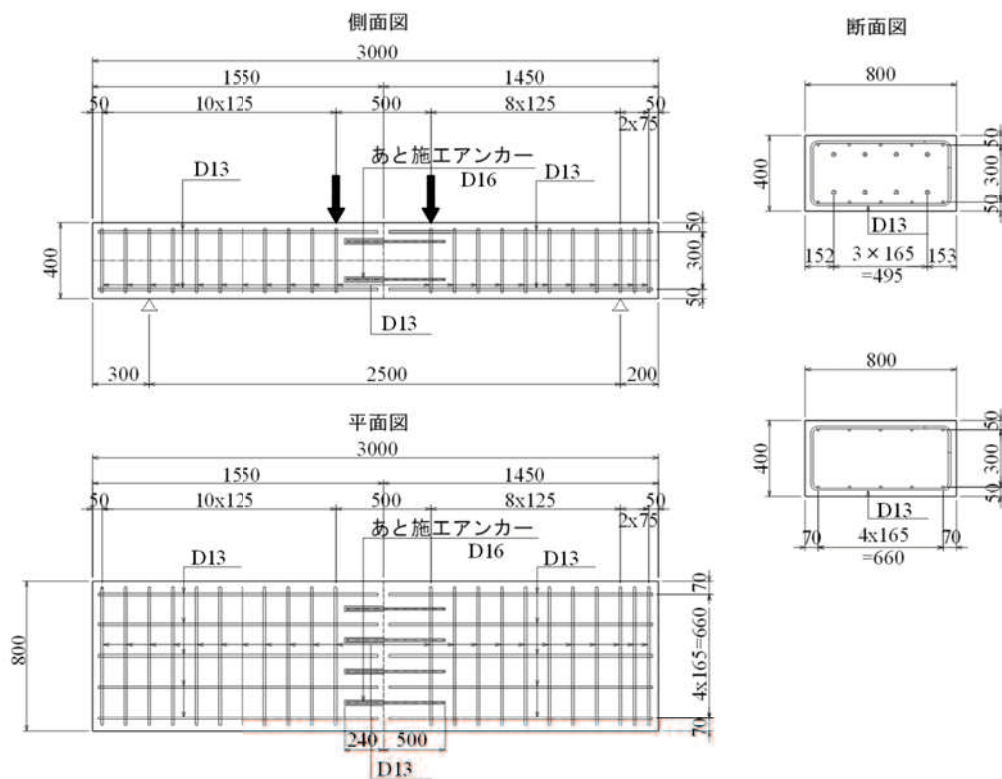


図-5.2.3 供試体配筋図 (RC) : 単位 mm

(3) PC 鋼材

実験に用いた PC 鋼棒は丸鋼 B 種 1 号とした (表-5.2.4)。PC 鋼棒は実施工における打継ぎ補強を想定して 2 分割したものを用意し、それぞれの長さを 1.650m と 1.575m とした。

表-5.2.4 PC 鋼棒丸鋼 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ の設計諸元

		丸鋼 B 種 1 号 SBPR930/1080
規格降伏荷重 P_y		386 kN
規格引張荷重 P_u		449 kN
設計荷重時プレストレス力	$0.6P_u$ or $0.75P_y$	270 kN
導入直後プレストレス力	$0.7P_u$ or $0.85P_y$	314 kN
プレストレス中のプレストレス力	$0.8P_u$ or $0.9P_y$	348 kN

(4) リングナット

PC 鋼棒に装着するリングナットは外径 $\phi 38\text{mm}$ 、高さは 30mm とし、材質は SS400 を用いた (図-5.2.4)。リングの中心は PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$ のねじとかな合するように M24 ピッチ 2 のねじ加工を施した。

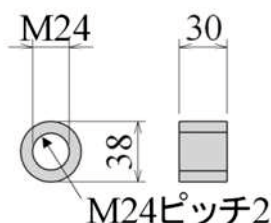


図-5.2.4 リングナット形状図：単位 mm

(5) 支圧板

緊張端に設ける支圧板の寸法は普通 PC 鋼棒工法に用いられる $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 25\text{mm}$ とし、材質は SS400 である。

(6) ナット、ワッシャー

緊張端に用いるナットは製造メーカーにより性能が保証されている普通 PC 鋼棒工法 $\phi 23\text{mm}$ 用の専用品を用いた (図-5.2.5)。

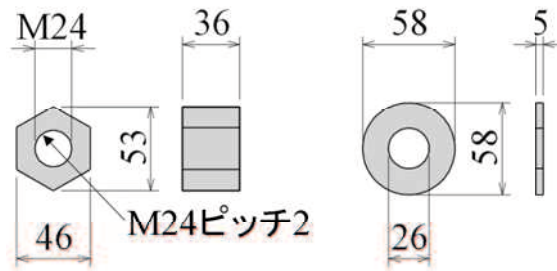


図-5.2.5 ナット・ワッシャー形状図：単位 mm

(7) 接続具

接続具は PC 鋼棒のねじ同士をかん合して接続するカップラーを用いた。カップラーは製造メーカーにより性能が保証されている普通 PC 鋼棒工法φ23mm 用の接続用カップラーを用いた（図-5.2.6）。

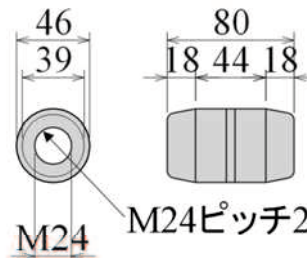


図-5.2.6 接続用カップラー形状図：単位 mm

(8) 充てん材

これまでの実験では、PC 鋼材を鉛直方向に配置することを想定した検討を実施しており、高強度鉄筋用モルタル充てん継手の充てん材として開発された流動性の高い高強度モルタル [虻川ら, 2009] を使用することで、注入したモルタルが空気と置換しながら固定定着構造の隅々まで充てんすることが可能であった。一方、本実験のように PC 鋼材を水平方向に配置する場合、注入した充てん材が孔内で流動すると、固定定着体の上縁に空隙が発生し、固定定着体の内部くさび効果が十分に得られない可能性がある。そこで、流動性を調整した充てん材を先行注入して PC 鋼棒をあと挿入することで空隙のない固定定着体を形成する方法を検討した（図-5.2.7）。その結果、これまで用いてきた高強度モルタルに増粘剤を添加して流動性を調整することで、所要の流動性と強度を両立できることが明らかとなったため [三原ら, 2015]、本実験では流動性を調整した特殊高強度モルタルを使用した。

この特殊高強度モルタルはプレミックスタイプであり、配合はプレミックス材 10kg/袋に対し水 1.20kg/袋である。モルタルの流動性は JASS15M-103 に基づく直径 50mm、高さ 100mm の塩化ビニル管を用いた簡易テーブルフロー試験を実施し、フロー値は過去の充てん実験の結果から 120±15mm で管理した。

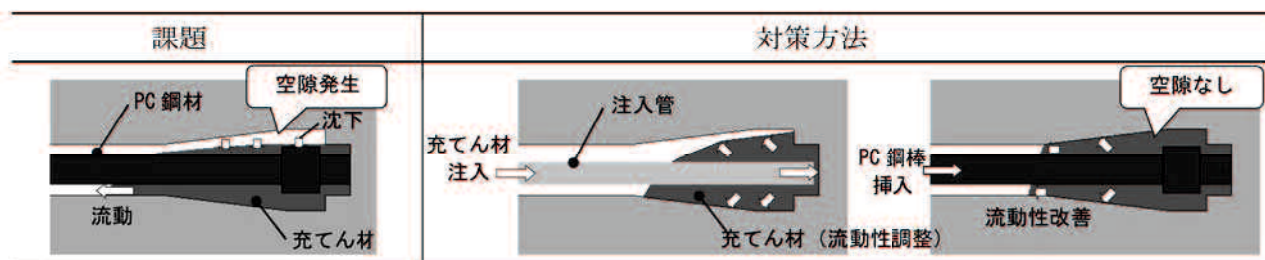


図-5.2.7 水平施工時の課題と対策方法 [三原ら, 2015]

(9) あと施工アンカー用エポキシ樹脂

鉄筋定着用のあと施工アンカーに用いる接着系アンカーのエポキシ樹脂は注入方式とし、カートリッジの先端に取り付けたノズル状のスタティックミキサーにより主剤と硬化剤を2:1の割合で混合した(図-5.2.8).

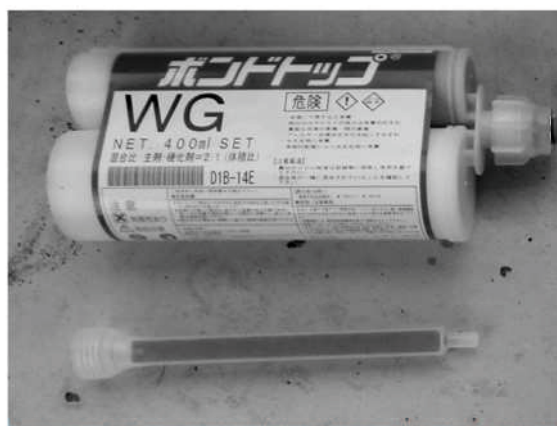


図-5.2.8 エポキシ樹脂カートリッジ・スタティックミキサー

実験に使用したコンクリートおよび充てん材の載荷時における材料諸元を表-5.2.5に、鋼材の材料諸元を表-5.2.6に、あと施工アンカーに用いたエポキシ樹脂の材料諸元を表-5.2.7に示す。

表-5.2.5 コンクリートおよび充てん材の材料諸元 (載荷時)

		1次ブロック	2次ブロック
コンクリート	設計基準強度	24 N/mm ²	30 N/mm ²
	スランブ	12.0 cm	12.0 cm
	水セメント比	53.0 %	50.0 %
	圧縮強度	39.9 N/mm ²	49.1 N/mm ²
	静弾性係数	27.2 kN/mm ²	34.8 kN/mm ²
	ポアソン比	0.17	0.18
特殊高強度 モルタル	圧縮強度	140.1 N/mm ²	
	割裂強度	8.2 N/mm ²	
	静弾性係数	45.0 kN/mm ²	
	ポアソン比	0.22	

表-5.2.6 鋼材の材料諸元

鉄筋	降伏強度	345 N/mm ²
PC 鋼棒	外径	23 mm
	断面積	415.5 mm ²
	降伏強度	930 N/mm ²
	引張強度	1080 N/mm ²
リングナット (SS400)	外径	38 mm
	高さ	30 mm
支圧板 (SS400)	平面形状	120 mm × 120 mm
	厚さ	25 mm

表-5.2.7 エポキシ樹脂の材料諸元

エポキシ樹脂	曲げ強度	47 N/mm ²
	引張強度	22 N/mm ²
	圧縮強度	77 N/mm ²

5.2.3 供試体製作

供試体の製作手順を図-5.2.9、図-5.2.10に示すとともに、施工状況の写真を図-5.2.11、図-5.2.12に示す。

1次ブロックのコンクリート打込みから10日後に、補強材を配置するための削孔をそれぞれの供試体に行った。供試体PC-0、PC-1には、先端部に特殊高強度モルタル充てん材を注入した2本の孔内に、リングナットによる突起を設けたPC鋼棒（ $\phi 23\text{mm}$ B種1号）をそれぞれ挿入して、固定定着構造を形成した。供試体RCには、エポキシ樹脂によるあと施工アンカーによって異形鉄筋（SD345、D16）を8本定着した。

補強材を定着した3日後に、打継ぎ面は一般的な打継ぎ処理であるチップングによる目粗しを施し、その後2次ブロックのコンクリート打ち込んだ。1次ブロックと2次ブロックの材齢差は38日であった。

2次ブロックのコンクリートが設計基準強度（ 30N/mm^2 ）に達した後、供試体PC-1のPC鋼棒に500kN型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。プレストレス導入時における各材料の材齢はそれぞれ、1次ブロックコンクリートは49日、2次ブロックコンクリートは11日、充てん材は39日であった。プレストレス導入と載荷実験時の緊張力を表-5.2.8に示す。

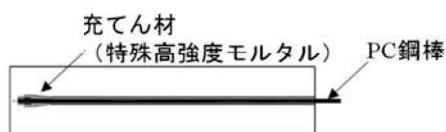
なお、通常の施工ではプレストレス導入後、PC鋼棒の防錆やコンクリートとの付着確保のためダクト内にPCグラウトを充てんするが、本実験では不利な条件となるよう供試体PC-0、PC-1にはPCグラウトを行わずに実験を行った。



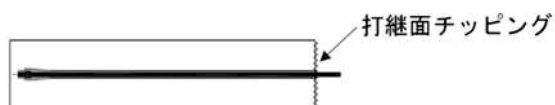
a) 1次ブロック打込み



b) コア削孔, 拡径削孔



c) 充てん材注入, PC鋼棒挿入



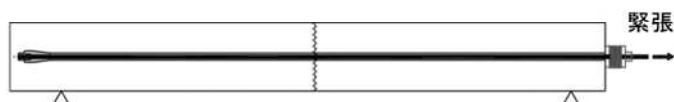
d) 打継面チップング



e) PC鋼棒接続



f) 2次ブロック打込み



g) プレストレス導入 (PC-1のみ)

図-5.2.9 供試体製作手順 (供試体 PC-0, PC-1)



a) 1次ブロック打込み



b) ハンマードリル削孔



c) あと施工アンカーによる打継ぎ補強鉄筋定着



d) 打継面チッピング



e) 2次ブロック打込み

図-5.2.10 供試体製作手順 (供試体 RC)



a) 1次ブロック配筋状況



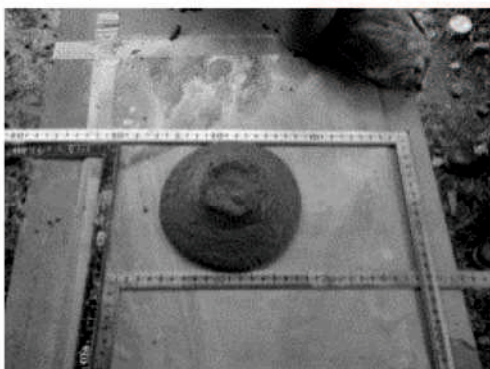
b) 1次ブロック打込み状況



c) 供試体削孔状況 (PC-1)



d) 供試体削孔状況 (RC)



e) 特殊高強度モルタルの材料管理状況



f) あと施工アンカー樹脂充てん状況 (RC)



g) 打継ぎ処理状況 (PC-1)

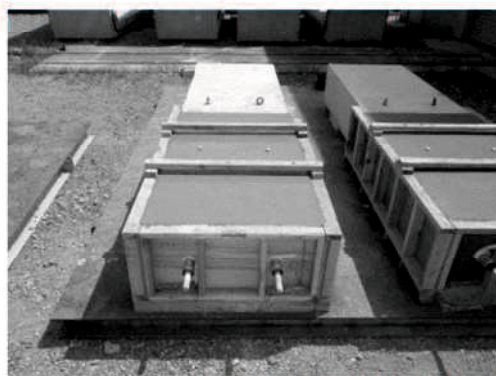


h) 打継ぎ処理状況 (RC)

図-5.2.11 供試体製作状況 (1)



a) 2次ブロック配筋状況



b) 2次ブロック打込み完了



c) プレストレス導入状況 (PC-1)



d) ジャッキポンプ操作状況 (PC-1)

図-5.2.12 供試体製作状況 (2)

表-5.2.8 緊張力の推移 (供試体PC-1)

計測時期	経過日数 ^a	PC 鋼棒緊張力 (kN)		
		#1	#2	平均
プレストレス導入直後	0	322.7	318.9	320.8
一次載荷実験時	24	318.6	311.0	315.0
二次載荷実験時	66	315.7	305.9	310.8

a: 経過日数はプレストレス導入からの日数を示す.

5.3 実験方法

実験手順を図-5.3.1に示す。

一次載荷実験では、まず供試体 RC の打継ぎ部に生じるひび割れ幅が 0.2mm となる荷重まで単調載荷を行い、一次載荷荷重を定めた。供試体 PC-0, PC-1 には、この一次載荷荷重を負荷した (図-5.3.2)。

その後、各供試体の上下を反転させて静置し、打継ぎ部の上面に水槽を設けて濃度 3% の塩水を湛水させ、5 週間の塩分供給を行った (図-5.3.3)。

次に二次載荷実験として、実験の安全性を考慮してスパン中央に 5mm のたわみが生じるまで曲げ載荷を行い、その時の荷重を便宜上、終局荷重とした。

二次載荷実験の後、各供試体の打継ぎ部のコンクリートの一部を乾式コアドリルにより試験片を 2 箇所採取 (図-5.3.4, 図-5.3.5) し、硝酸銀噴霧法により塩分浸透深さを調べた。

曲げ載荷は、1000kN 型圧縮試験機を用いた。図-5.3.6 に示す箇所において、補強材とコンクリートに発生するひずみと打継ぎ部のひび割れ幅、支点変位、およびスパン中央のたわみについて計測を行った。

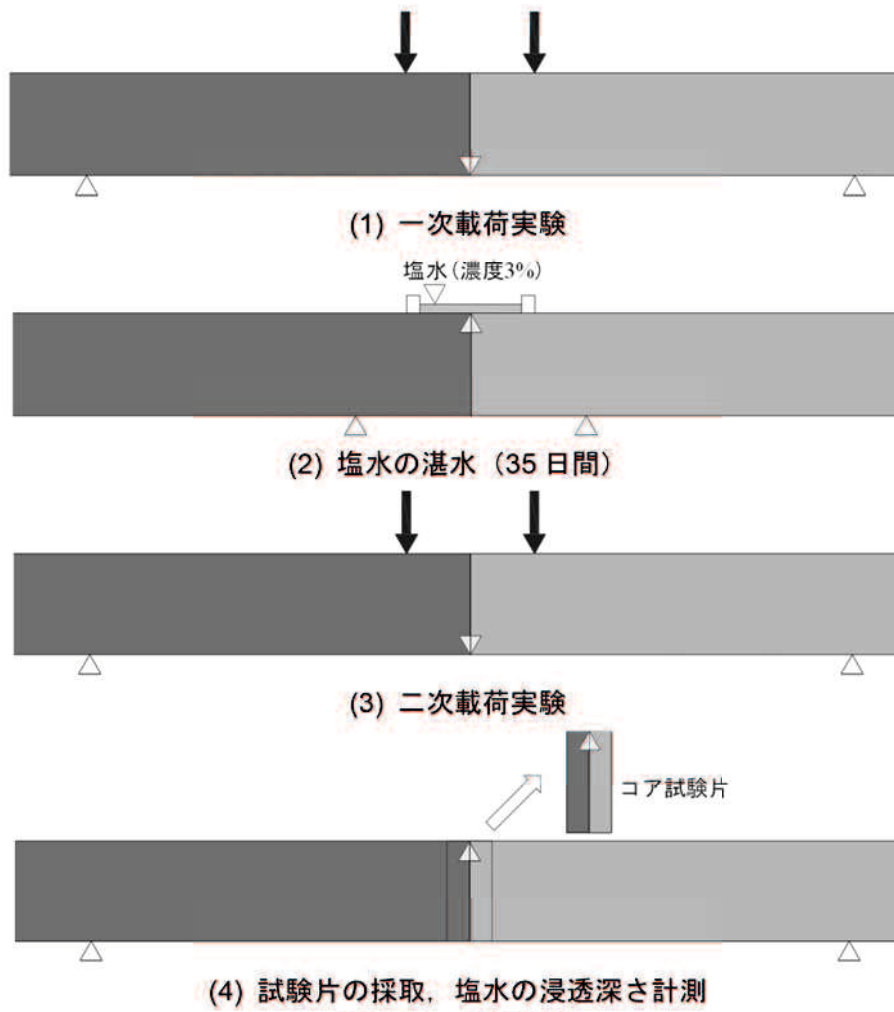


図-5.3.1 実験手順

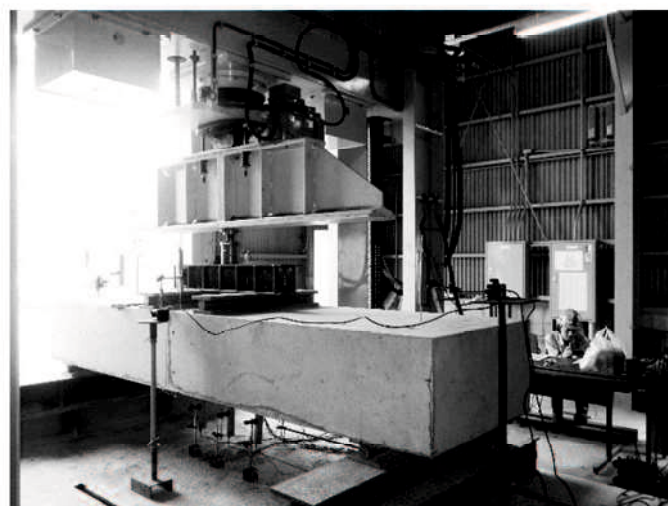


図-5.3.2 载荷実験状況



図-5.3.3 塩分供給状況（左：塩水湛水状況，右：暴露状況）

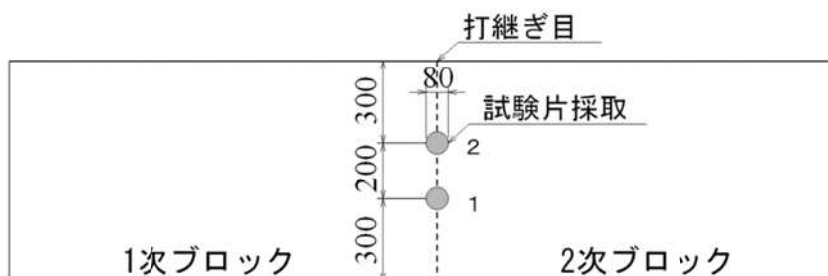
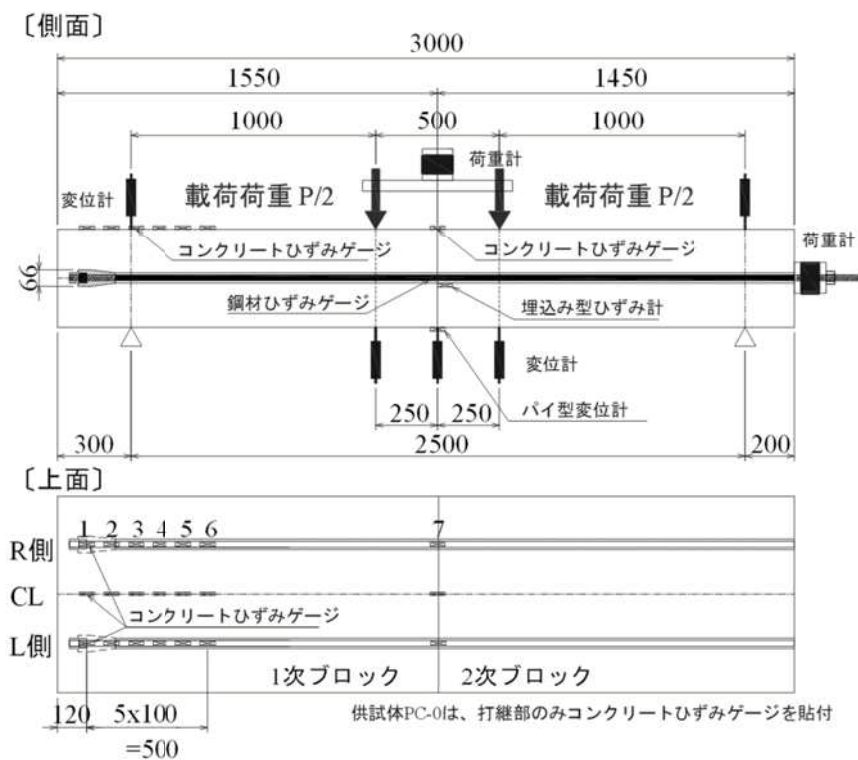


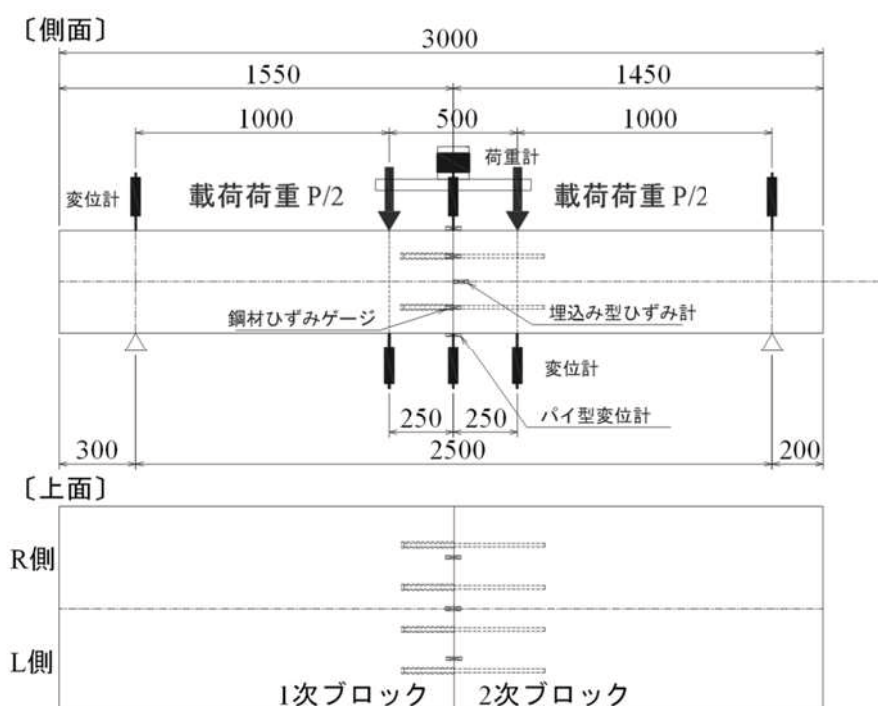
図-5.3.4 コア試験片の採取箇所：単位 mm



図-5.3.5 試験片採取状況（乾式コアドリル）



a) 供試体 PC-0, PC-1



b) 供試体 RC

図-5.3.6 荷重時計測の計測要領：単位mm

5.4 一次載荷実験結果および考察

5.4.1 打継ぎ部のひび割れ幅

一次載荷実験における最大荷重と観測された打継ぎ部の最大ひび割れ幅，除荷後に残留したひび割れ幅の結果を表-5.4.1に示す。供試体 RC では，荷重 68.5kN を載荷した時点で打継ぎ部にひび割れが発生した。その後，荷重 72.7kN で 0.2mm を超えるひび割れ幅を観測したため，除荷を行った。なお供試体 PC-0・PC-1 では，一次載荷荷重（72.7kN）作用時において目視できるひび割れが生じなかったため，ひび割れ発生荷重は計測できていない。

一次載荷実験においてパイ型変位計で計測した打継ぎ部のひび割れ幅の変化を図-5.4.1に示す。供試体 RC では，除荷後の残留ひび割れ幅 0.085mm が計測された。供試体 PC-0・PC-1 では，載荷に応じてわずかにパイ型変位計で計測した変位が増加したものの，供試体 RC にひび割れ幅 0.2mm を発生させる荷重である 72.7kN を与えても，目視できる有意な幅のひび割れは観測されなかった。

次に，一次載荷実験における打継ぎ部上面のコンクリートの圧縮ひずみの変化を図-5.4.2に示す。ひずみは負が圧縮側であることを示す。供試体 PC-1 はプレストレス導入によって -56×10^{-6} の初期ひずみが生じている。供試体 PC-0・PC-1 の荷重-ひずみ関係は，ほぼ線形挙動を示し，供試体 RC では荷重 70kN 付近でひずみが急増する非線形挙動がみられた。これはひび割れの発生に伴いコンクリートの有効断面が減少することで圧縮側のひずみが増加したものと考えられる。

表-5.4.1 一次載荷荷重とひび割れ幅

供試体	PC-0	PC-1	RC
ひび割れ発生荷重 (kN)	— ^a	— ^a	68.5
一次載荷荷重 (kN)	73.0 ^b	73.4 ^b	72.7 ^b
最大ひび割れ幅 (mm)	0.013 ^c	0.008 ^c	0.216 ^c
残留ひび割れ幅 (mm)	0.003 ^c	0.001 ^c	0.085 ^c

a：目視できるひび割れが生じないため計測不能

b：供試体RCに0.2mmのひび割れが生じる荷重

c：パイ型変位計の計測値

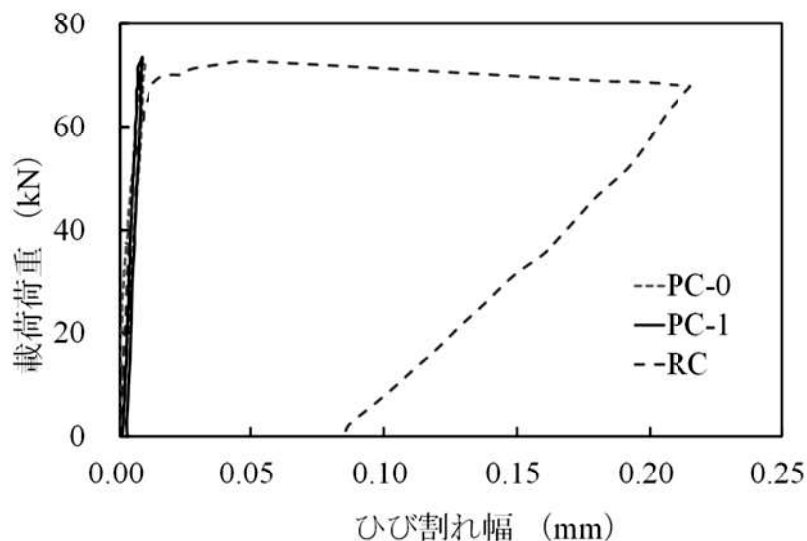


図-5.4.1 打継ぎ部のひび割れ幅（一次載荷実験）

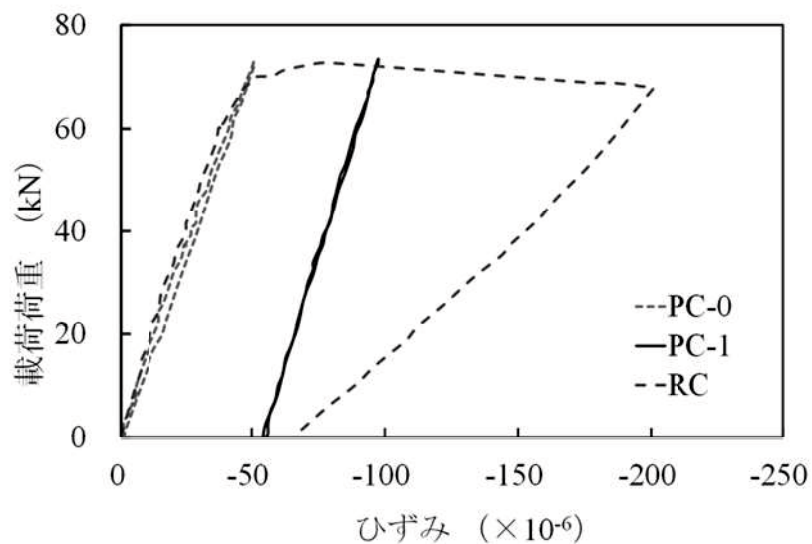


図-5.4.2 荷重-ひずみ関係（一次載荷実験）

5.4.2 打継ぎ部における塩分浸透性

各供試体の打継ぎ部から2箇所のコアを採取し、採取したコア試験片の割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して、一次載荷実験後に実施した塩水湛水による塩分浸透深さを調べた。なお硝酸銀溶液は塩分と反応し、褐色から灰色に呈色反応を示すことから、その呈色範囲より塩分浸透深さがわかる。呈色状況を図-5.4.3に例示し、計測結果を表-5.4.2に示す。なお、図-5.4.3における呈色箇所は、太線より上方の範囲である。

プレストレスを導入した供試体 PC-1 は、塩分浸透深さが最も小さく、0~8.3mm であった。一方、従来方法(あと施工アンカー)で作製した供試体 RC の塩分浸透深さは 149.0mm および 221.5mm であった。供試体 RC の塩分浸透深さを基準(100%)として比較すると、供試体 PC-0 では平均 7.0%、供試体 PC-1 では平均 2.3%と大きく下回る。

これらのことから、打継ぎ部をプレストレス補強することで、水密性が向上し、劣化因子となる塩分の浸透が抑制されることが確認できる。

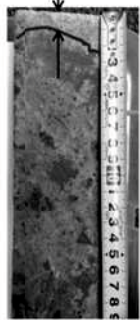

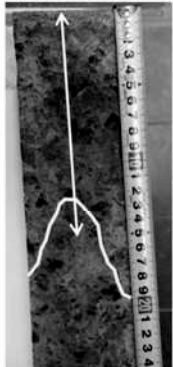
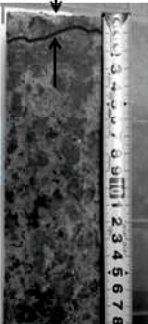
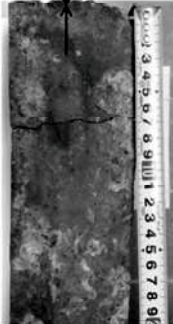

供試体	PC-0	PC-1	RC
#1	<p>15.5 mm</p> 	<p>8.3 mm</p> 	<p>149.0 mm</p> 
#2	<p>10.3 mm</p> 	<p>0.0 mm</p> 	<p>221.5 mm</p> 

図-5.4.3 塩分浸透状況

表-5.4.2 塩分浸透深さ

供試体	PC-0	PC-1	RC
#1	15.5 mm	8.3 mm	149.0 mm
#2	10.3 mm	0.0 mm	221.5 mm
平均 (比)	12.9 mm (7.0%)	4.2 mm (2.3%)	185.3 mm (100%)

5.5 二次載荷実験結果および考察

5.5.1 変形挙動

二次載荷実験の荷重－たわみ関係を図-5.5.1に示す。また、最大たわみ D_{max} 、その時の荷重 P_d 、最大荷重 P_{max} 、残留たわみ D_{res} の結果について表-5.5.1にまとめて示す。

供試体 RC では、荷重 200kN 付近において一旦荷重が低下し、同時にたわみが急増する現象がみられた。荷重の低下と同時に打継ぎ部のひび割れ幅が若干減少する傾向を示したが、これは断面に配置された鉄筋量が減少する「あと施工アンカー」の定着端付近に発生したひび割れ（図-5.5.2）において、打継ぎ部より先に鉄筋が降伏した影響によるものと推測される。

供試体 PC-0 では、80kN 付近で耐荷力が消失し、同時に打継ぎ部のひび割れが大きく進展して、たわみが 4mm 程度まで急増した。このとき発生した打継ぎ部のひび割れは幅 2mm を超え、充分目視できるものであった。

供試体 PC-1 では、荷重 170kN まで荷重とたわみが線形的に増加し、その後たわみが緩やかに増加する傾向を示しながら荷重を保持し、最大荷重 241.0kN 時に 5.06mm のたわみに達した。除荷後の残留たわみは 0.64mm であり、プレストレスを導入することで高い復元能力を示すことが確認された。

打継ぎ部上面のコンクリート圧縮ひずみの変化を図-5.5.3に示す。供試体 PC-0 では、荷重 80kN 程度において打継部下端から PC 鋼棒位置に至るまで幅 2mm を超えるひび割れが発生すると同時に、コンクリート上面のひずみも 1000×10^{-6} 程度まで急増し、除荷後も 500×10^{-6} 程度の残留ひずみが生じた。供試体 PC-1 では、荷重 170kN 程度からひずみの増加が著しくなったが、除荷後のコンクリート上面の残留ひずみはほぼ 0 となった。

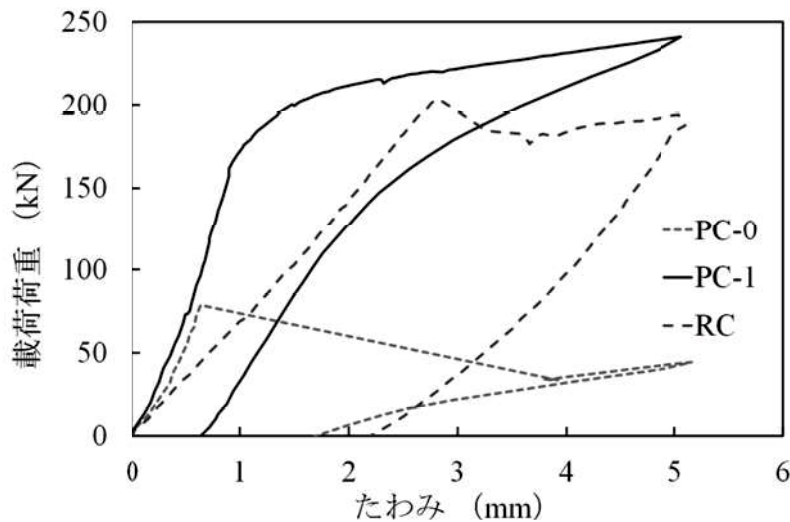


図-5.5.1 荷重－たわみ関係（二次載荷実験）

表-5.5.1 二次載荷実験の結果

供試体	PC-0	PC-1	RC
最大たわみ D_{max} (mm)	5.16	5.06	5.10
D_{max} 時の荷重 P_d (kN)	44.4	241.0	187.8
最大荷重 P_{max} (kN)	78.6	241.0	203.8
残留たわみ D_{res} (mm)	1.68	0.64	2.20

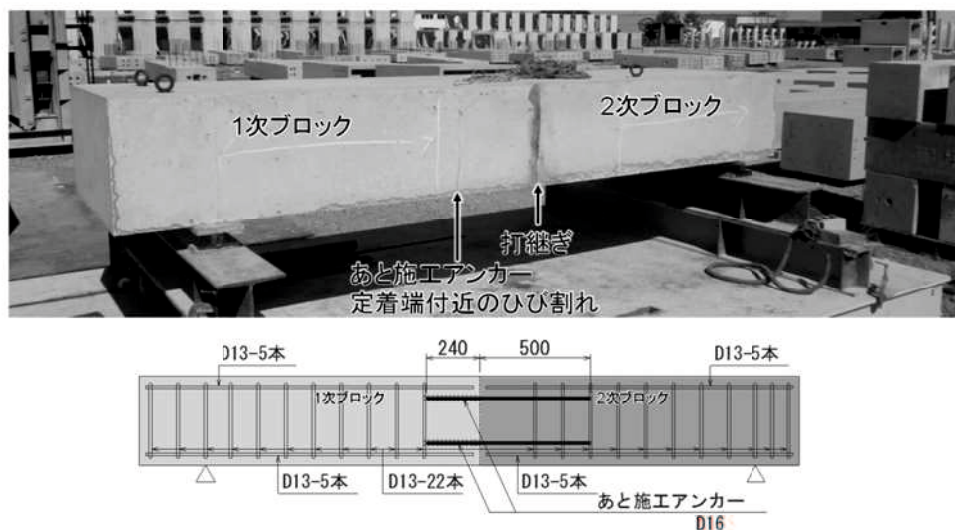


図-5.5.2 供試体 RC の二次載荷実験後のひび割れ状況

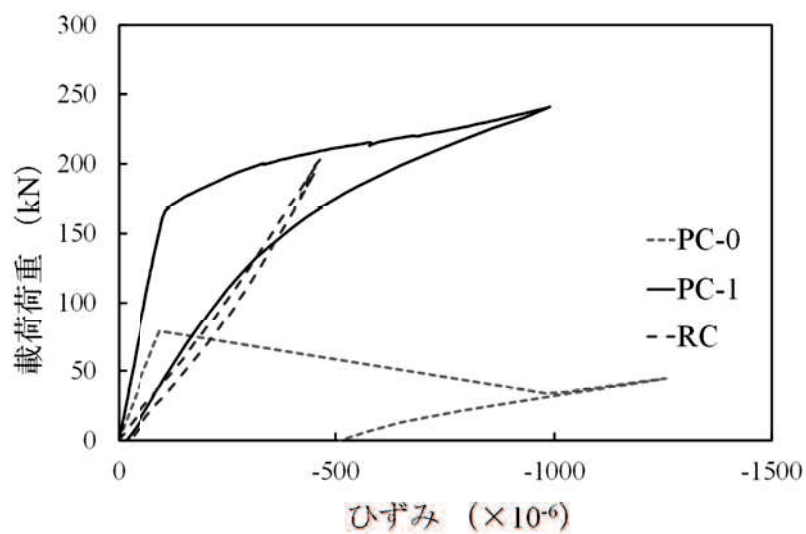


図-5.5.3 荷重－ひずみ関係（二次載荷実験）

5.5.2 PC 鋼材に生じる増加力

二次載荷実験において、供試体 PC-1 の PC 鋼棒の増加応力をロードセルで計測した結果を図-5.5.4 に示す。PC 鋼棒の緊張力は荷重 170kN までほとんど増減がないが、たわみやひずみが増加傾向を示した荷重 170kN 程度から緊張力が漸増する傾向がみられ、その増加量は最大で 25.2kN に達し、導入プレストレスは約 8%増加した。

緊張力の増加は、打継ぎ部に生じたひび割れ幅が増加することで曲げ変形に伴う引張力が PC 鋼棒に作用して生じるものである。この増加したプレストレス力 (336.0kN) は、PC 鋼棒の規格降伏耐力 ($P_y = 386\text{kN}$) や規格引張荷重 ($P_u = 449\text{kN}$) よりも小さく、前章で示した固定定着構造の定着耐力 (P_u 以上であり、実験結果は 489.6kN) を下回る値であった。このことから、本実験に用いた供試体と同程度の補強を行う場合において、補強用 PC 鋼棒の定着性能は増加力の影響を考慮しても充分であると判断できる。

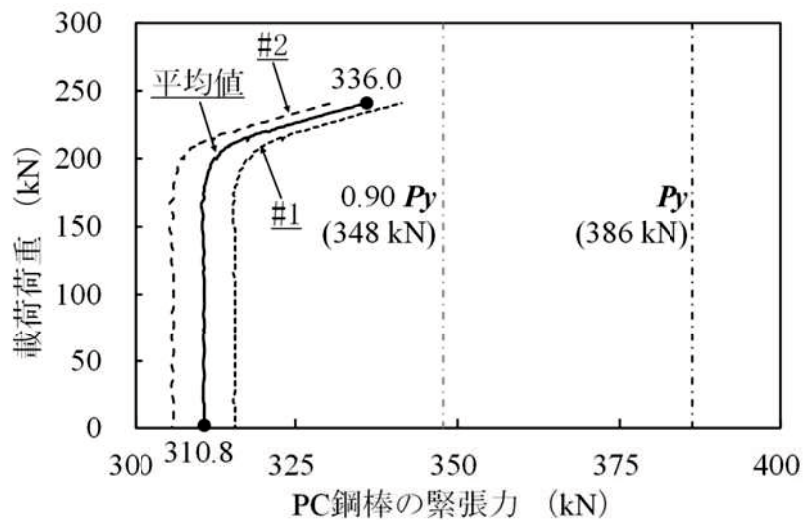


図-5.5.4 供試体 PC-1 における荷重－緊張力関係 (二次載荷実験)

5.6 まとめ

プレストレス補強工法を打継ぎ部に適用した場合の補強効果を調べるため、新旧コンクリートの打継ぎ部を有する実物大のはり供試体を用いて、曲げ載荷実験を実施するとともに、打継部における塩分浸透生（水密性）を調べた。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) プレストレスを導入した新旧コンクリート打継ぎはりは、あと施工アンカーによる打継ぎはりに比べて、高い曲げ耐力とひび割れ抵抗性、復元性を示した。
- (2) 本工法によりプレストレスを導入した場合の打継ぎ部の塩分浸透深さを調べたところ、あと施工アンカーによる補強工法に対して平均 2.3%と著しく小さくなり、高い水密性を示すことが確認された。

第 6 章

結論

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

これまでさまざまなコンクリート補強工法が開発されてきたが、それらの多くは既設建造物の外部に部材を設置する必要があり、建造物の設置条件によっては補強が困難となることもあった。本研究で対象とした補強工法は、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新旧部材のプレストレスによる一体化を図るものである。本工法を適用することで、これまで補強が困難であった土中や水中等にある既設建造物の補強対策ができるようになることや、新旧コンクリートを一体化する場合にはプレストレスにより樹脂アンカー本数を少なくできること、新旧コンクリートの打継目にプレストレスが作用するため一般的な RC 構造に比べひび割れ抵抗性が向上することが期待される。

本研究では、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、既設 RC 建造物内に構築する固定定着構造に焦点を当てた実験的研究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部の定着耐力と長期定着性能を調べた。さらに本工法を適用した場合の効果を実大はり実験を用いた曲げ載荷実験により明らかにした。

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 2 章「開発したプレストレス補強工法の特徴」では、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、優位性や適用対象、工法の施工手順、固定定着構造を構築するための拡径削孔方法を概説し、固定定着構造の定着機構を推定した。工法の適用範囲として、一般的な RC 建造物に固定定着構造を設けることを想定し、既設コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 以上で部材表面に D16 の鉄筋を 150mm 間隔で配置した場合と同程度以上の鉄筋量が配置されていること、固定定着するコンクリートが健全であることを前提としていることや、設計・施工における留意点を示した。

第 3 章「PC 鋼棒の固定定着構造に関する実験的検討」では、固定定着構造に焦点を当てた研究として、緊張材を定着するコンクリート部材寸法、固定定着構造のくさび形状、充てん材種類をパラメータとする実大要素供試体を用いた押抜き載荷試験を行い、各パラメータが耐荷力におよぼす影響について実験的検討を行った。その結果、PC 鋼棒 B 種 1 号 $\phi 23\text{mm}$ を緊張材に使用した場合、高強度モルタル充てん材を用い、かつ定着する既設コンクリート部材寸法が 400mm 以上あればコンクリートや高強度モルタルの破壊が PC 鋼材の引張破壊に先行して生じることはなく固定定着構造は十分な性能を有していること、固定定着構造の形状が耐荷力に与える影響は小さいものの充てん材の種類が耐荷力におよぼす影響は大きいことを明らかとした。この結果を踏まえ、固定定着構造のディテールを定めた。

第 4 章「固定定着した PC 鋼棒の引抜き力に対する定着性能の検討」では、第 3 章の検討結果を踏まえ、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 鋼棒を緊張

する引抜き荷重実験を行い、固定定着構造の定着耐力を調べ、さらに使用状態における緊張力を1年間持続荷重して長期定着性能を調べた。その結果、PC鋼棒B種1号φ23mm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を明らかとした。また、使用状態におけるPC鋼棒の固定定着構造からのすべり量は0.24mmと実用上無視できる程度であり、また1年間の持続荷重におけるすべり量は0.1mm程度と軽微であることから、固定定着構造は引抜き力に対する定着性能を維持できることがわかった。さらに、固定定着構造は引抜き力に対して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の付着で抵抗すること、FEM結果からPC鋼材と高強度モルタル充てん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がわかった。

第5章「打継ぎ部を有するコンクリートはりの実験的検討」では、打継ぎ面に与えたプレストレスの効果を調べるため、打継ぎを設けた実大はり供試体を用いて曲げ荷重試験を行い、一般的なRC構造のあと施工アンカーによる打継ぎ部材と比較した。さらに打継ぎ部材の耐久性比較のため、打継ぎ部における水密性（塩分浸透性）も調べた。その結果、本工法でプレストレスを与えた打継ぎ部材は、高い曲げ耐力とひび割れ抵抗性、復元性を示し、さらに優れた水密性を示すことがわかった。

以上により、本工法は既設コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 以上で部材表面にD16の鉄筋を150mm間隔で配置した場合と同程度以上の鉄筋量が配置され、かつ固定定着するコンクリートが健全である場合において、高強度モルタル充てん材を用い、かつ定着する既設コンクリート部材寸法が400mm以上あれば、既設コンクリート部材内に固定定着したPC鋼棒B種1号φ23mmを用いたプレストレス補強工法として実構造物に適用できる可能性が示唆された。

6.2 今後の課題と展望

本研究では、 $\phi 23\text{mm}$ のPC鋼棒B種1号を緊張材に使用した構造を想定した検討を実施したが、工法普及のためには適材適所にあわせて導入プレストレスが選択できるよう、緊張力が異なる鋼材種類に対応していく必要があると考えている。またPC鋼棒だけでなく、可とう性のあるPC鋼より線やCFRPに代表される腐食に強い非鋼製緊張材の適用も需要に応じて検討していく必要があると考えている。ただしPC鋼より線などのストランド状の緊張材に対して本工法を適用する場合は、PC鋼棒にねじでかん合していたリングナットの代替となる構造を検討し、鋼材と充てん材の機械的抵抗が確保できるよう構造を検討する必要がある。

また、現時点では充てん材を上向き方向に注入したときの検証が行われていないことから、緊張材の配置方向は水平もしくは下向き方向とする必要がある。今後はさまざまな用途に対応できるよう充てん材料や注入方法を工夫し、上向き方向の施工にも適用できるようにしていくことに検討の余地がある。

本工法は現時点で1件の施工実績(図-6.2.1)がある。以下に、この実施工を通じて明らかとなった新たな課題を記す。

拡径ビットは削孔箇所全体をダイヤモンドのビットで削る構造のため、そこに鉄筋等の金属材料が存在すると著しく消耗し使用に耐えない。そのため、削孔前には既設構造物の図面等であらかじめ鉄筋位置を調査し、そこを避けるように削孔位置を定める必要がある。しかしながら、実際の構造物には図面に示されていない組み立て鉄筋や型枠セパレーター等が存在する可能性が考えられるが、事前の調査で拡径削孔位置にこれらの鉄筋等の有無を判別することは難しい。今後は効率的で安定的な施工を目指して、コア削孔した段階で拡径削孔箇所の鉄筋等の有無を確認できるような鉄筋探査方法を開発するなど検討していく必要があると考えている。

本工法は拡径削孔部に充てん材を満たすことによって所要の定着性能を確保している。現状の充てん材の充てん管理は、過去の充てん試験の結果を元に、充てん材の流動性を簡易テーブルフロー試験で検査し、所要の粘性を有する材料を必要量注入することで間接的に管理している。今後は工法の信頼性を高めるため、直接的で客観的な充てん管理方法を確立する必要がある。

緊張後のPCグラウトは、鋼材を防錆し長期的に緊張力を維持するために重要である。確実なPCグラウト充てんのため、過去の水平施工においては孔の奥に向かって若干の下り勾配を付してコア削孔し、流し込んだPCグラウトが奥から手前へ自然流下しながら充てんするように工夫した。しかし、勾配を設けることが難しい場合や上向き施工のニーズがあることも考えられるため、そのような場合におけるPCグラウト注入方法を確立する必要もある。

開発したプレストレス補強技術は国内だけでなく国外でも活用できる可能性を秘めている。そのため、国外での展開も視野に入れながら、さまざまな用途を模索し、工法の普及活動を行っていくことが重要と考えている。

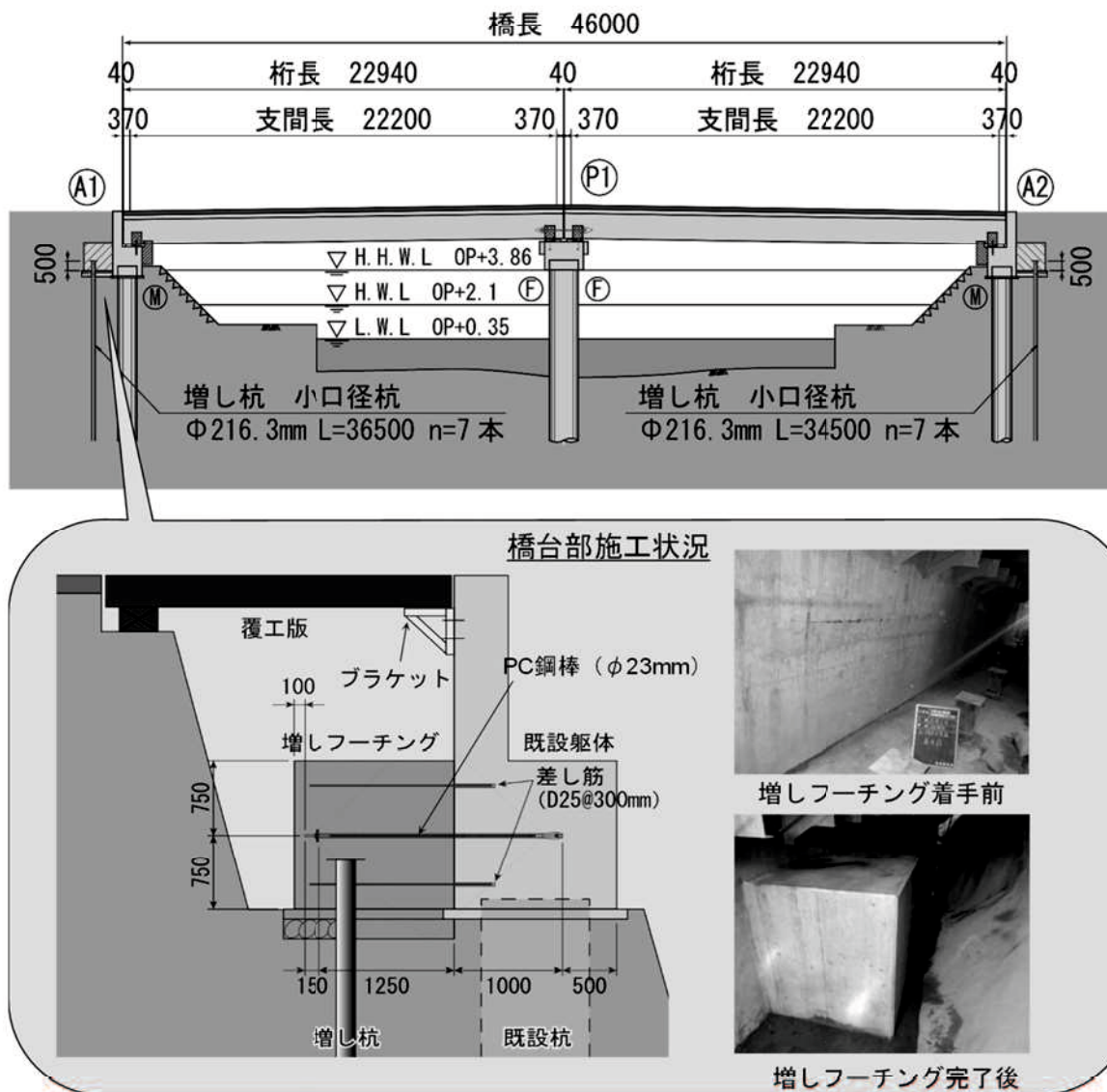


図-6.2.1 本工法の適用事例（橋台フーチングの新旧部材一体化）

参考文献

Chen, F., Duan, L.: Bridge engineering handbook, 2013.

El-Hacha, R., Wight, R.G., Green, M.F.: Prestressed fiber-reinforced polymer laminates for strengthening structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol.3, No.2, pp.111-121, 2001.

El-Hacha, R., Soudki, K.: Prestressed near-surface mounted fiber reinforced polymer reinforcement for concrete structures - A review, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.40, No.11, pp.1127-1139, 2013.

Kim, Y.J., Green, M.F., Wight, R.G.: Effect of prestress levels in prestressed CFRP laminates for strengthening prestressed concrete beams: A numerical parametric study, *PCI Journal*, Vol.55, No.2, pp.96-108, 2010.

Kim, Y.J., Hyun, S.W., Kang, J-Y., Park, J-S.: Anchorage configuration for post-tensioned NSM CFRP upgrading constructed bridge girders, *Engineering Structures*, Vol.79, pp.256-266, 2014.

Mahrenholtz, C., Eligehausen, R.: Dynamic performance of concrete undercut anchors for Nuclear Power Plants, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.265, pp.1091-1100, 2013.

Mahrenholtz, P., Eligehausen, R.: Post-installed concrete anchors in nuclear power plants: Performance and qualification, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.287, pp.48-56, 2015.

Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., Motavalli, M.: Structural strengthening with prestressed CFRP strips with gradient anchorage, *Journal of Composite for Construction*, Vol.17, No.5, pp.651-661, 2013.

Michels, J., Martinelli, E., Czaderski, C., Motavalli, M.: Prestressed CFRP strips with gradient anchorage for structural concrete retrofitting: experiments and numerical modeling, *Polymers*, Vol.6, No.1, pp.114-131, 2014.

NAPP 工法技術研究会 ; NAPP アンカー工法設計・施工マニュアル, 2011.

Schmidt, J.W., Bennitz, A., Taljsten, B., Goltermann, P., Pedersen, P.: Mechanical anchorage of FRP tendons - A literature review, *Construction and Building Materials*, Vol.32, pp.110-121, 2012.

Shimomura, T.: Development of seismic retrofitting method for concrete structures under severe environment, *International Seminar on Durability and Lifecycle Evaluation of Concrete Structures-2006*, pp.85-90, 2006.

You, Y., Choi, K., Kim, J.: An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with

参考文献

prestressed CFRP strips using a durable anchorage system, *Composites Part B: Engineering*, Vol.43, No.8, pp.3026-3036, 2012.

Yurdakul, Y., Avşar, O.: Strengthening of substandard reinforced concrete beam-column joints by external post-tension rods, *Engineering Structures*, Vol.107, pp.9-22, 2016.

浅井 洋, 長田光司, 野島昭二, 藤原保久, 池田尚治: 外ケーブル補強工法定着部に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.223-234, 2007.

虻川真大, 緒方 努: 太径高強度鉄筋に適したモルタル充填式定着工法の開発, *コンクリート工学*, Vol.47, No.7, pp.26-33, 2009.

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.

呉 智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田 建: CFRP シート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641, V-46, pp.153-165, 2000.

蛭子清二, アイダン オメル, 河村精一, 川本眺万: ロックアンカーの引抜き破壊モード, 土木学会論文集, No.504, VI-25, pp.157-166, 1994.

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力学性能試験, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.9, No.2, pp.507-512, 1987.

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.

岡村雄樹, 舌間孝一郎, 足立一郎: ウォータージェット技術による新旧コンクリートの一体化処理に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.25, No.1, pp.1499-1504, 2003.

長田孝史, 桐山和也, 今井雅基, 服部啓二, 小高猛司: 地山補強土工法の拡孔型補強材に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.67, III-292, pp.583-584, 2012.

オリエンタル白石株式会社: NAPP アンカー工法 中空 PC 鋼棒を使用したアンカー工法, 2012.

会計検査院: 平成 24 年度決算検査報告, 2013.

柿沢忠弘, 岡田克也, 尾高英雄: 高強度グラウトを使用した PC 鋼より線埋込み定着部の長期載荷実験,

土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.44, No.5, pp.450-451, 1989.

加藤修平, 佐藤春浩, 藤田 学・熊谷紳一郎:アラミド FRP 緊張材を用いた既設フーチングのせん断補強—男鹿大橋—, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.1, pp.90-34, 2001.

岸 徳光, 三上 浩, 栗林祐介:AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683, V-52, pp.47-64, 2001.

木村耕三, 小島克朗, 平田 亮, 土屋好男:CFRP 板による RC 補強部材の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.267-272, 1997.

久保田慶太, 原田哲夫, 生田泰清, 木村 浩:HEM を用いた PC 緊張材の中間定着と定着機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.847-852, 2004.

河野哲也, 豊島孝之, 七澤利明, 中谷昌一:既設フーチングに対する補強効果の確認実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.21, pp.371-376, 2012.

国土交通省国土技術政策総合研究所:平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集, 国土技術政策総合研究所資料, No.822, 2015.

国土交通省国土技術政策総合研究所:橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料, No.444, 2008.

小林 朗, 蔡 華堅, 下西 勝, 松井繁之:炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1513-1518, 2005.

小林 薫, 伊藤隼人, 今井清史, 藤井保也:テーパ型ナットを PC 鋼棒定着体とした高耐力あと施工アンカー工法の破壊状況, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71, V-636, pp.1271-1272, 2016.

小林憲治, 日野伸一, Basem Abdullah, 佐々部宏:ガラス繊維シートの片面貼付による RC はりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1483-1488, 2007.

齋藤修一, 小松晋一, 松本 憲, 和田収司:あと施工アンカーの目荒らし効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.553-558, 2013.

酒井俊典, 阪上最一, 田中忠次:密詰め砂地盤における拡底基礎アンカーの引抜き荷重に関する研究, 農業土木学会論文集, Vol.2002, No.220, pp.439-445, 2002.

参考文献

澤松俊寿, 小橋秀俊, 宇田川義夫, 小林悟史, 林 豪人, 岡崎賢治: 砂地盤における拡径型アンカーの引抜き特性, 土木学会論文集C, Vol.66, No.4, pp.845-858, 2010.

杉山伸康, 椿 龍哉, 林 和彦: 繰返し荷重を受ける曲げ部材のアンカーの引抜けモデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1117-1122, 2006.

瀬崎 茂, 浜野浩幹, 平島健一: 新しい支圧型アンカーの提案とその支持機構, 地盤工学会論文報告集, Vol.45, No.5, pp.131-140, 2005.

園田恵一郎, 沖野 真, 林 秀侃, 喜田 浩: 道路橋 RC 床版に対する鋼板接着補強工法の信頼性に関する研究, 土木学会論文集, No.398, I-10, pp.245-254, 1988.

武井 昭, 松本良雄, 江上仁士, 秋山 暉: テープ状炭素繊維を用いた RC 構造物補強工法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.911-916, 1995.

立花 弘, 原 健吾, 児玉幹雄, 堀井智紀: 太径 PC 鋼材圧入定着プレテンション工法の実験的検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.445-450, 2007.

轟俊太郎, 堀 慎一, 渡辺 健, 谷村幸裕: 拡底式あと施工アンカーのせん断に関する実験的検討, レストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.21, pp.233-238, 2012.

土木学会: 2013年制定コンクリート標準示方書 [基準編], 2013.

土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2012.

土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2012.

トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会: トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書, 2013.

新津正義, 睦好宏史, 佐野 正, 殿川 康: 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, pp.949-954, 1999.

濱田 譲, 井上真澄, 小林 朗, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集, No.711, V-56, pp.27-44, 2002.

日比野文昭, 橋野敏雄, 古江隆朗: 山手橋拡幅工事の施工, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.13, pp.617-620, 2004.

- 平林雅也, 小林 薫, 鈴木雄大: テーパー型定着体を用いたあと施工アンカーの引抜き抵抗機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1507-1512, 2013.
- 伏屋行雄, 岩崎玄之: 軟弱地盤に対する拡孔式アンカーの現地実験, 中部地盤工学シンポジウム, Vol.22, pp.121-128, 2010.
- プレストレストコンクリート技術協会: PC 定着工法 2010 年度版, 2010.
- プレストレスト・コンクリート建設業協会: やさしい PC 橋の設計, 2002.
- プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC 構造物の維持保全—PC 橋の更なる予防保全に向けて—, 2015.
- プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC はどうやって作るの?, <http://www.pcken.or.jp/pubinfo/pcinfo/pchow/index.shtml>, 2016/9/25 アクセス
- プレストレスト・コンクリート建設業協会: 耐荷力不足、異常変位, <http://www.pcken.or.jp/techinfo/hosyu/shindan/taika.shtml>, 2016/9/25 アクセス
- 星島時太郎, 大田黒博文, 坂井広道, 松井繁之: 損傷した道路橋床版の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.23-28, 1998.
- 堀本 歴, 宮里心一, 保倉 篤: 多軸繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.343-348, 2005.
- 中橋一壽, 原 健吾, 仁井谷教治, 渡瀬 博: 中空 PC 鋼棒を用いたアンカー工法の開発—プレストレスを導入したアンカー工法—, プレストレストコンクリート, Vol.50, No.5, pp.27-34, 2008.
- 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針—2013—, 2013.
- 日本道路協会: 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 1997.
- 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 III コンクリート橋編, 2012.
- 三田村浩, 佐藤 京, 西 弘明, 渡辺忠朋: 積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について, 構造工学論文集 A, Vol.56A, pp.1239-1248, 2010.

参考文献

- 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, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, pp.445-448, 2015.
- 三本竜彦, 山根隆志, 溝垣道男, 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1357-1362, 2013.
- 六車 熙, 下伊豆隆三: ディビダーク式アンカームッター使用ポストテンション型 PC 梁の実験的研究, 日本建築学会論文報告集, Vol.69, 1951.
- 百瀬光広, 丸山久一, 清水敬二, 橋本親典: アンダーカット型アンカーボルトの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告, Vol.12, No.2, pp.801-806, 1990.
- 矢島淳二, 森 利弘, 小林公次, 宮田勝利, 飯田 努, 田中昌史: 先端および中間部に拡径部を有する杭の鉛直載荷試験 (その2 引抜き試験結果), 学術講演梗概集 2014 (構造 I), pp.417-418, 2014.
- 安森 浩, 高橋輝光, 濱田 謙, 小林 朗: 炭素繊維プレート緊張システムの開発, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.12, pp.609-612, 2003.
- 山口浩平, 日野伸一, 中村 智, Amiruddin Arwin: PCM 吹付け工法による補強部界面の付着特性およびはりのせん断補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1285-1290, 2008.
- 山本貴士, 嘉指成詞, 服部篤史, 宮川豊章: 酸性化環境における連続繊維シートを用いたコンクリート補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1237-1242, 1997.
- 山本晴人, 小原孝之, 鈴木顕彰, 三島徹也: 拡底式アンカーを用いて補強した壁式橋脚の耐震性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.973-978, 2001.
- 遣田英亮, 林 静雄, 香取慶一: プレストレス導入による既存 RC 造梁の耐震補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1279-1284, 2004.
- 吉田健太郎, 古市耕輔, 山中宏之, 須藤 豊: 拡底式あと施工アンカーの引張耐力と疲労特性に関する確認試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.56, V-597, pp.1194-1195, 2001.
- 横田 勉: PC 定着工法の歴史, プレストレストコンクリート, Vol.51, No.1, pp.78-85, 2009.

本論文に関する著者の発表論文

- (1) 三本竜彦, 溝垣道男, 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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.2, pp.1357-1362, 2013.
【本文との関連: 第2章】
- (2) Mimoto, T., Yoshitake, I., Harada, M. and Sakaki, T.: An internal prestressing system to strengthen existing concrete members, *Proceedings of IF CRASC'15*, pp.515-523, 2015.
【本文との関連: 第3章, 第4章】
- (3) Sakaki, T., Mimoto, T. and Yoshitake, I.: Experimental investigation of an internal prestressing system to strengthen concrete, *Proceedings of ACEMI5*, SME131_1667F3, 2015.
【本文との関連: 第4章】
- (4) Yoshitake, I., Mimoto, T., Sakaki, T. and Mizushima, J.: Long term behavior of concrete member strengthened with internal prestressing system, *Proceedings of EURO-MED-SEC-1*, pp.117-122, 2016.
【本文との関連: 第4章】
- (5) 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, 2016.
【本文との関連: 第4章】
- (6) 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, *プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集*, Vol.24, pp.445-448, 2015.
【本文との関連: 第5章】
- (7) 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, 2016.
【本文との関連: 第5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、山口大学大学院理工学研究科博士後期課程に2013年10月から2017年3月まで社会人学生として在学し、その間に取り組んだ「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開発」に関する研究の成果を取りまとめたものです。

本論文の主旨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、研究の方向性に対する助言や論文作成に関する指導など、筆者が山口大学大学院に進学する前から懇切丁寧にご指導いただき、また筆者のモチベーションが維持できるように導いていただきましたこと、筆舌に尽くしがたいほど深く感謝しております。またローマで行われた国際会議の発表にあたって、英語が得意でない筆者に対し、論文投稿やプレゼンテーションに関する綿密なご指導を行っていただき、大変貴重な経験を得ることができたことを、重ねてお礼を申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 清水則一先生、同教授 中村秀明先生、同教授 麻生稔彦先生、同准教授 渡邊学歩先生に、ご多忙の折、本論文の副査を快くお引き受けいただきましたことを深く感謝申し上げます。論文の審査では多角的な視点から貴重なご意見やご助言を頂戴し、それによって本研究の成果をより充実した内容にブラッシュアップすることができました。

本研究の遂行にあたっては、多くの方々からご支援・ご指導・ご助言をいただきました。

本研究対象であるプレストレス補強工法は、筆者が所属する極東興和株式会社と、株式会社シブヤ、東京ファブリック工業株式会社、株式会社モルテン、アオイ化学工業株式会社の5社で共同開発した工法です。本研究を進めるにあたり、株式会社シブヤ 山足和儀氏、同 吉村一彦氏、東京ファブリック工業株式会社 池尾孝司氏、株式会社モルテン 若葉典義氏、アオイ化学工業株式会社 二羽 一氏、同 清水博文氏、同 川口慶一郎氏をはじめとする関係者の皆様には、格別のご協力を賜りましたこと、厚く御礼申し上げます。

日本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、高強度モルタル充てん材の材料提供ならびに製品改良において、ご支援賜りましたこと、感謝申し上げます。

筆者が山口大学大学院在学中に所属した施設材料学研究室の卒業生、在校生の皆様には、さまざまな意見交換の場で非常に心温まる助言を頂戴し、深く感謝の意を表します。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原田雅也氏（現 中電技術コンサルタント株式会社）、大学院博士前期課程2年の榎 卓也氏、同1年の水島 潤氏には、非常に真摯な姿勢で計測結果の取りまとめや解析検証などを成し遂げていただき、研究遂行に際し多大なるご支援をいただきました。また山口大学の実習棟で実施した1年間の長期に及ぶ持続載荷実験では、休むことなく定期的に状況確認やデータ収集に取り組んでいただいたことを記し、心より感謝の念を申し上げます。技術職員の牧原貴之氏には持続載荷実験中の安全面において格別のご配慮をいただきましたこと、お礼申し上げます。

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、元代表取締役社長 長谷部正和氏、筆者の上司である取締役営業本部長 山根隆志氏、技術企画部長 中田順憲氏、元技術企画課長 溝垣道男

氏には、筆者の博士後期課程進学に際して多大なるご支援やご協力を頂戴し、本当に感謝に堪えません。特に山根氏は、研究と業務の両立に躊躇していた筆者の背中を強く押していただき、在学中もさまざまな助言と励ましを頂戴致しました。筆者の同僚である営業本部技術企画部の皆様には、筆者の進学を物心両面で直接支えていただき、心より感謝しております。補修技術課長 江良和徳博士、補修技術課 三原孝文氏、技術企画課 中森武郎氏、同 河金 甲博士、同 児島大輔氏には、研究開発の実務面において力強くご協力いただき、研究遂行の大きな助けになりました。供試体製作や載荷実験においては、江津 PC 工場の元工場長 稲原心司氏やグループ会社であるキョクトウ高宮株式会社の代表取締役社長 下岡栄作氏をはじめとする皆様に何度も無理を申し上げましたが、いつも快く引き受けていただき、格別のご配慮をいただきましたこと幸甚に存じます。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職員に対し、深く、深く感謝申し上げます。

筆者の研究は広島県の「イノベーション人材等育成事業」として採択され、研究にかかる費用の一部を広島県に補助していただきました。広島県商工労働局産業人材課人材育成グループの皆さんには補助金の交付に関して事務的な面でサポートしていただきましたこと、お礼申し上げます。

最後に、筆者が博士後期課程へ進学することを快く受け入れて、陰ながら支えてくれた両親ならびに妻と3人の子供に心からの感謝を記し、結びと致します。

2017年3月
三本 竜彦