

# PCa 柱の埋込み部に関する実験的研究

## An Experimental Study on Embedded Part in Precast Concrete Columns

平田 裕一 YUICHI HIRATA

江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA

建築技術部 伊藤 彰 AKIRA ITO

建築技術部 西成田 由 YU NISHINARITA

構造設計ディビジョン 徳武 茂隆 SHIGETAKA TOKUTAKE

構造設計ディビジョン 牧田 瑞記 MIZUKI MAKITA

本研究で対象とする工法は、PCa 柱を基礎梁内部に埋込む形式となっている。埋込み部は、柱より大きな断面積を有しており、付着力を高めるため、両面リブ付き鋼管を用いている。リブ付き鋼管の耐荷挙動に及ぼす影響を検討するため、リブ付き鋼管を対象とした付着実験および基礎梁の埋込み部を対象にした鉛直荷重実験を行った。付着実験より、リブ付き鋼管の付着力は、おおむね告示式、RC 規準と同等以上であることを確認した。また、鉛直荷重実験より、リブ付き鋼管の設置およびコンクリートの高強度化により埋込み部の最大耐力が増大することを確認した。

**キーワード**：PCa 柱，埋込み部，付着実験，鉛直荷重実験

The construction method proposed in this paper is about precast concrete columns embedded to the footing beam. The embedded part of the column has a bigger cross-sectional area than the column itself, and the steel pipe with ribs is used to have higher bond capacity. In order to study influence of the steel pipe with ribs on the strength of the embedded part, the bond tests and the vertical loading tests were carried out. The bond tests showed that the bond stress of the steel pipe was greater than the value proposed in the Building Code of Japan and the RC standard of AIJ. In the vertical loading tests, it was observed that the maximum strength of the embedded part increased notably by using the steel pipe with ribs and high strength concrete.

**Key Words**: Precast Concrete Column, Embedded Part, Bond Test, Vertical Loading Test

### 1. はじめに

近年、RC 構造物の工期短縮や労務環境の改善を目的として、構造体の PCa 化が進められている。現状の標準的な PCa 化工法は、基礎梁までを在来工法で施工し、基礎梁天端より上位に架構される上部構造を PCa 化することが多い。

本研究で対象とする PCa 化工法は、PCa 柱の下端を従来の基礎梁天端から耐圧版直上まで延長するものである。また、基礎梁の内部に柱断面積より大きな埋込み部を設けている点に特徴がある。埋込み部には、鋼管の内外両面にリブを有する両面リブ付き鋼管を用いている。

本研究は、本工法の埋込み部におけるリブ付き鋼管

の耐荷挙動に及ぼす影響を検討するために行った。埋込み部は柱応力を基礎梁に伝達する必要がある。本実験は柱応力のうち主に軸力の伝達特性を確認している。本報は工法の概要を示し、リブ付き鋼管の付着実験と PCa 柱の埋込み部の鉛直荷重実験について報告する。

### 2. 本工法の概要

図-1 に、本 PCa 工法の概要を在来工法と比較して示す。在来工法では、基礎梁のコンクリート強度が柱より小さい場合、柱軸力を伝達するため、基礎梁上部に柱と同強度の柱断面積より大きい断面積の部位（強度切替部）が必要になる。本工法では、この部分を、PCa 柱を

両面リブ付き鋼管により拡径することで構成し、その底面を耐圧版直上まで延長させている。このため、PCa 柱の建て方を耐圧版コンクリートの打設後から行うことができ、工期短縮が可能となる。

また、一般に基礎梁のコンクリート強度が、軸力伝達に必要な値より、架構として求められる値が小さい場合、基礎梁の強度の打ち分けを行えば、施工コストを低減することができる。在来工法の場合、打ち分けには、基礎梁の全せいに対する打継ぎ面が必要となる。このような打継ぎ面は、施工上の理由から最小限に止めたいと考えられている。本工法では、埋込み部を耐圧版天端に設置するため、強度の打ち分けによる打継ぎ面が耐圧版の内部に限定される。これは施工性を向上し、コストの低減に寄与する。

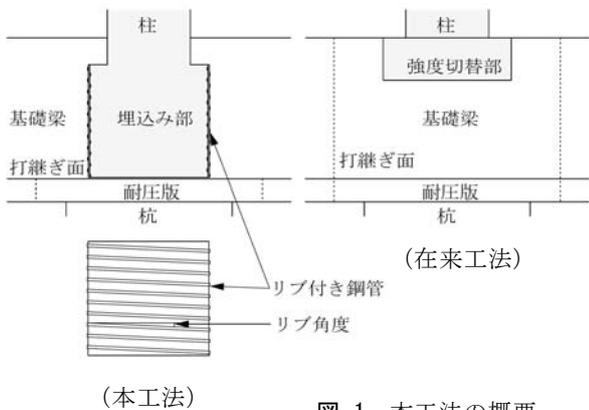


図-1 本工法の概要

### 3. 付着実験概要

本工法の埋込み部は、両面リブ付き鋼管を用いて打設される。リブ付き鋼管の付着力が大きい場合、埋込み部底面の応力を低減することが期待される。また柱に引抜き力が作用する場合、引抜き力の伝達を行うことができる。そこで、リブ付き鋼管の付着特性を評価するために、小型の試験体を用いた付着実験を行った。実験方法は、土木学会規準に示されている付着強度試験方法<sup>1)</sup>に準じて行うものである。試験体形状を図-2に示す。試験体は、150×150×150mmのコンクリートの立方体の中に、リブ付き鋼管のリブ面を模擬した鋼材を設置した形状のものである。実験の付着区間は、128mmである。付着力を評価するリブ面は、幅40mmの面の両面である。幅22mmの面には、グリースを塗布して付着力を低減した。

またコンクリート内部には、直径6mmのスパイラル筋を設置している。実験パラメータは、コンクリート強度とリブ付き鋼管のリブ角度（図-1参照）である。

表-1に付着実験の試験体一覧を示す。コンクリート強度は、5段階である。 $\sigma_B=44.8\text{N/mm}^2$ に対して、リブ

角度を3段階に変動させた。他の強度のリブ角度は17°である。リブの高さ、幅、ピッチは、それぞれ、2.5mm、6~8mm、40mmである。

加力方法は、図-2に示すように試験体のコンクリート部分を載荷版に固定し、鋼材に引張力を与える形式である。計測項目は、鋼材のすべり量である。引張力を用いていない側の鋼材の小口面に変位計を設置して計測した。なお、各ケースの試験体数は、各々3体である。

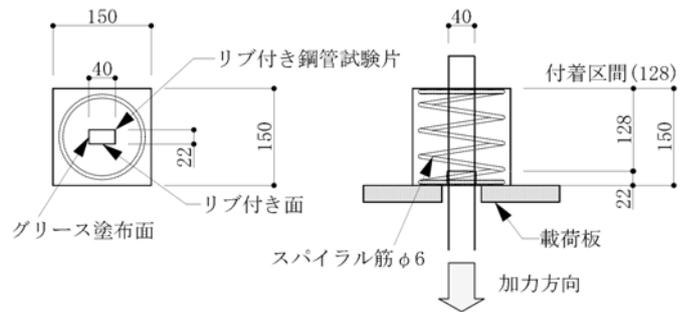


図-2 試験体

表-1 付着実験試験体一覧

CASE No.	1	2	3	4	5	6	7
$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	29.4	44.8			59.2	70.6	141.8
リブ角度 (°)	17	14	17	20	17	17	17

リブ(高さ2.5mm,幅6~8mm,ピッチ40mm)

### 4. 付着実験結果

図-3に、試験体 No.1~No.7の付着応力度と変位の関係を示す。試験体 No.1は0.2~0.6mmのすべり量で、顕著な剛性低下が見られた。同様に、試験体 No.2~No.4では0.15~0.5mm、試験体 No.5では0.2~0.6mm、試験体 No.6では0.25~0.65mm、試験体 No.7では0.2~0.4mmのすべり量で剛性低下が生じた。図中には、上記の剛性低下が顕著に現れたすべり量の範囲を青色で表示している。各試験体とも0.15~0.2mm以下のすべり量では、弾性的な挙動に近い傾向を示した。

最大応力度は、各試験体ともにすべり量が4~5mmを超えた領域で生じている。コンクリート強度が小さい試験体は、最大応力度近傍の応力変動が緩やかである。これに対して、試験体 No.7の高強度のものは、最大応力度経験後の負勾配がやや大きい。

リブ角度をパラメータとした試験体 No.2~No.4は、大きな差異は生じなかった。

付着強度の評価には想定しているすべり量の大きさが影響する。図-3の付着応力度と変位の関係では、剛性低下するすべり量と最大応力度に達するすべり量の差が大きいため、すべり量の想定の影響が大きいと思われる。

表-2に付着強度の評価値をまとめる。評価方法は、下記の7通りである。

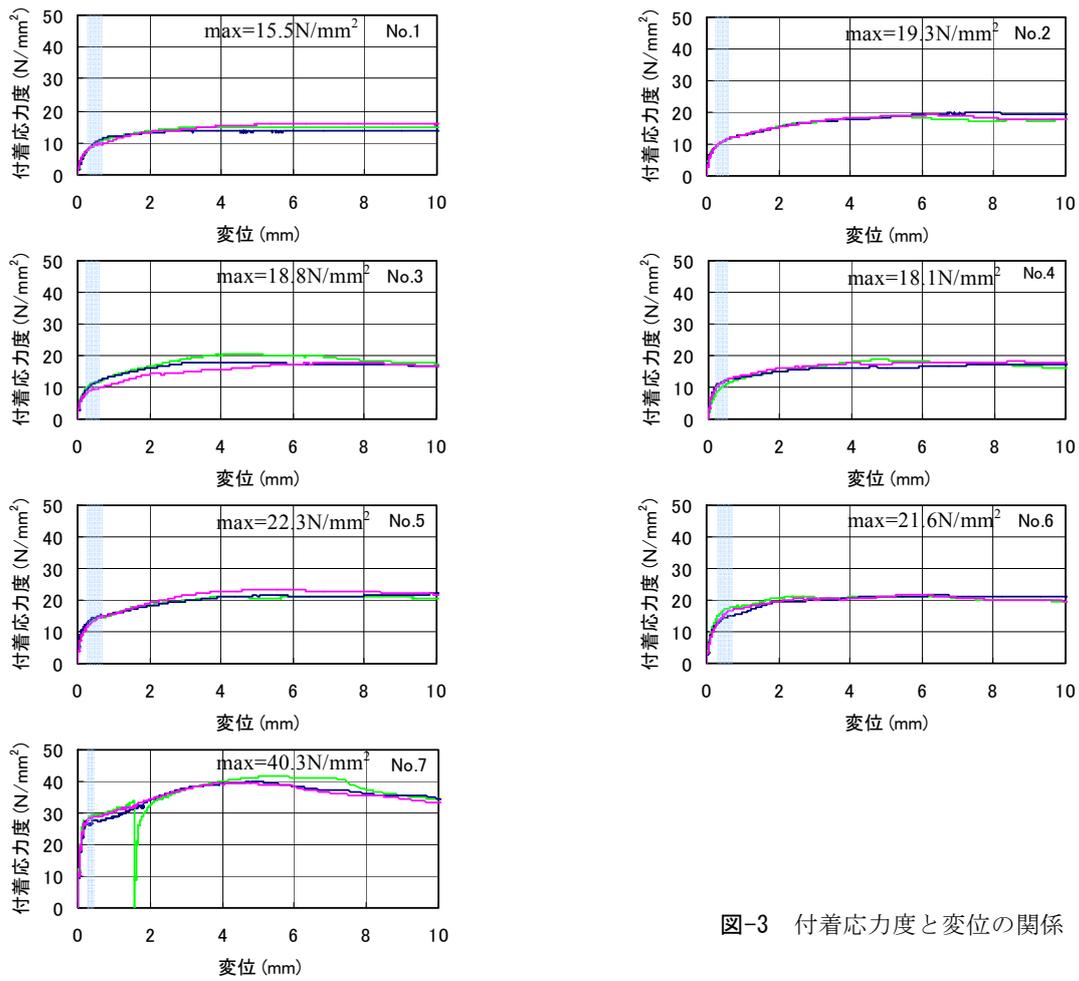


図-3 付着応力度と変位の関係

表-2 付着強度

コンクリート圧縮強度	付着強度(N/mm <sup>2</sup> )				
	29.4	44.8	59.2	70.6	141.8
最大荷重	15.5	18.8	22.3	21.6	40.3
JSCE ( $\delta=0.064\text{mm}$ )	3.5	5.2	7.5	6.0	17.4
$\delta=0.25\text{mm}$	7.3	8.9	11.9	12.4	27.3
$\delta=0.1\text{mm}$	4.6	6.4	9.0	7.9	21.4
$\delta=0.05\text{mm}$	2.9	4.5	6.8	5.2	15.0
API基準	4.3	6.0	7.5	8.7	16.4
RC規準(長期)	2.5	3.1	3.7	4.2	7.0
RC規準(短期)	3.8	4.7	5.6	6.3	10.5
告示式(短期)	5.1	6.3	7.4	8.3	14.0
靱性指針	6.7	8.8	10.6	12.0	19.0

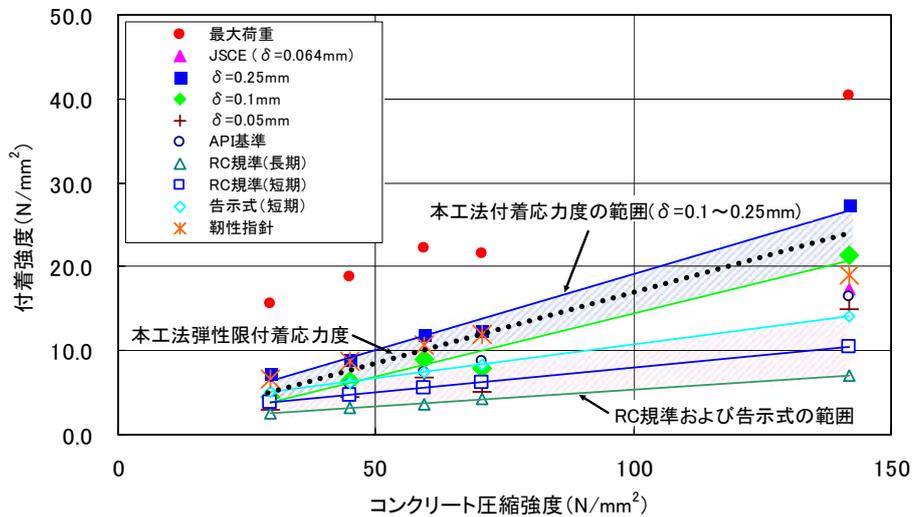


図-4 付着強度と圧縮強度の関係

- ① 最大荷重から最大応力度を評価する方法
- ② 土木学会規準の鉄筋の付着強度<sup>1)</sup>に準拠して、すべり量 $\delta$ を設定する方法 ( $\delta=0.064\text{mm}$ )
- ③ 土木学会規準の連続繊維補強材<sup>2)</sup>を参考にすべり量 $\delta$ を設定する方法 ( $\delta=0.25, 0.1, 0.05\text{mm}$ )
- ④ 鉄道構造物等の設計標準<sup>3)</sup>に示されている API 基準による方法
- ⑤ 学会 RC 規準 (長期, 短期)
- ⑥ 告示式 (短期)
- ⑦ 靱性指針式

なお表中の値は、3体の平均値である。これらの評価値とコンクリート圧縮強度の関係を図-4に示す。

図-3より、すべり量 0.15~0.2mm 以下を弾性限とすると図-4の $\delta=0.1\text{mm}$ と 0.25mm の間に弾性限の付着応力があると考えられる。図-4に、この範囲を本工法の付着応力の範囲として斜線で示している。また同図には、RC 規準および告示式の許容値も同様に示している。図より、本工法付着応力の範囲は、RC 基準および告示式の上側に位置している。特に、本工法の弾性限の付着応力は、圧縮強度が小さい領域では告示式 (短期) に近く、RC 規準 (短期) の値より若干大きい。圧縮強度が大きい領域では、告示式 (短期)、RC 規準 (短期) より大きくなっている。

### 5. 鉛直載荷実験概要

PCa 柱の埋込み部の軸力伝達特性を把握するために、鉛直載荷実験を行った。図-5に、試験体図を示す。試験体は、基礎梁およびフーチング (以下、外周部と記す) に PCa 柱を埋込んだ状態を模擬している。縮尺は約 1/4 である。外周部の大きさは 650×650mm である。

また、PCa 柱の断面は 275×275mm である。PCa 柱の埋込み部の形状は、直径 400mm の円筒形である。埋込み部は、リブ付き鋼管を設ける場合とコンクリートのみの場合の試験体を作製している。なお、試験体は、本工法の施工手順に準じて、耐圧版のコンクリートを打設した後に、別途打設しておいた柱および埋込み部を設置し、外周部を打設した。

表-3に鉛直載荷実験の試験体一覧を示す。試験体は3体である。実験の変動因子は、埋込み部のコンクリート強度とリブ付き鋼管の有無である。埋込み部の強度は、Fc70, 120の2種類であり、耐圧版および外周部の強度は、埋込み部の強度に対応させて、それぞれ Fc30, 48としている。リブ付き鋼管の有無の確認は、Fc70の場合で行った。

なお、本載荷実験で、埋込み部の終局状態を確認す

るため、埋込み部直上の柱の強度を Fc120にするとともにスパイラル筋で補強し、柱の圧壊を防止した。各部位におけるコンクリートの物性を表-4にまとめる。

加力方法は、PCa 柱の上面を鉛直方向に載荷するものである。加力ルールを図-6に示す。載荷と除荷を1セットとして、コンクリートの長期許容軸力を2回載荷し、続いて短期許容軸力を2回載荷した。その後、圧縮破壊するまで加力している。なお、試験体 No.2, 3では、最後の圧縮破壊の段階で加力フレームにトラブルが生じたため、9000kN 程度載荷した段階で一旦除荷し、後日圧縮破壊までの載荷を実施した。

計測項目は、載荷点の変位および、鉄筋、リブ付き鋼管の軸方向ひずみである。柱主筋、鋼管、杭筋、外周部補強筋のひずみを、同じ3深度で測定している。また耐圧版のひずみをモールドゲージを用いて測定した。長期

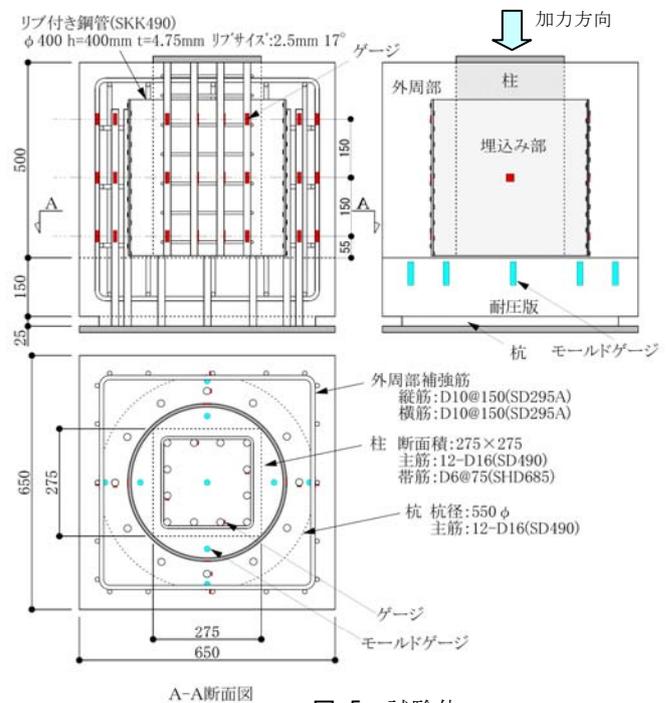


図-5 試験体

表-3 鉛直載荷実験試験体一覧

試験体名		No.1	No.2	No.3
コンクリート強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	埋込み部	70	70	120
	耐圧版, 外周部	30	30	48
	柱	120	120	120
リブ付き鋼管		なし	あり	あり
鉄筋		共通(図1参照)		

表-4 コンクリートの物性

試験体名	コンクリート部位	圧縮強度 $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	密度 $\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	ヤング率 $E_c$ [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]	割裂強度 $\sigma_{cs}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
No.1	埋込み部	73.0	2.39	3.93	3.86
	耐圧版	34.1	2.28	2.90	2.94
	外周部	32.9	2.32	2.96	2.81
	柱	116.8	2.48	—	—
No.2	埋込み部	74.4	2.39	3.87	4.69
	耐圧版	33.5	2.27	2.86	3.26
	外周部	33.4	2.32	2.94	2.77
	柱	116.3	2.47	—	—
No.3	埋込み部	115.5	2.46	4.45	4.86
	耐圧版	47.6	2.27	3.15	3.62
	外周部	49.8	2.28	3.16	3.53
	柱	115.5	2.46	4.45	4.86

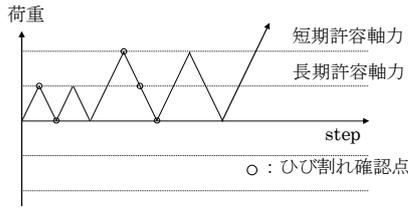


図-6 加力ルール

軸力、短期軸力の折り返し点において、外周部のひび割れをクラックスケールで測定した。

### 6. 鉛直載荷実験結果

図-7, 8, 9 に各試験体の荷重変形曲線を示す。また、表-5 に実験結果一覧を示す。表中の耐圧版の計算支圧耐力は、杭径φ550 と鋼管径φ400 の面積比から計算した。また埋込み部の計算耐力は、鋼管内のコンクリートのコンファインド効果<sup>4)</sup>を考慮した内部コンクリートの耐力である。

試験体 No.1 は、長期軸力時には無損傷であった。初ひび割れは短期軸力時に確認されている。ひび割れ幅は、0.05 mm 以下の微細なものであり、外周部コンクリートの側面に鉛直方向に生じた。最大耐力は、7585kN である。最大耐力時のひび割れは、水平より斜めの方向に生じている。これは、初ひび割れがそのまま成長したものではない。

試験体 No.2 も同様に長期軸力時には無損傷であった。

初ひび割れは短期軸力時に確認され、ひび割れ幅は、0.05 mm 以下の微細なものであった。最大耐力は、12331kN である。

試験体 No.3 は、長期軸力時に、幅 0.05 mm 以下の微細なひび割れが生じた。ただし、短期軸力時においてもひび割れ幅は成長していないため、問題は生じないと考えられる。最大耐力は、15013kN であった。

表-5 より、試験体 No.1, 2 を比較すると、最大耐力が、約 1.6 倍に増加している。これは、リブ付き鋼管の影響と思われる。また、試験体 No.2, 3 の比較より、埋込み部の高強度化によって、最大耐力が約 1.2 倍に増加した。この値は、耐圧版のコンクリート強度の No.2 と 3 の比である 1.4 倍、埋込み部の場合の 1.6 倍より小さい値である。

また、表-5 より、実験最大耐力①と計算支圧耐力②の比率 (①/②) は、No.1 が 1.3, No.2 が 2.1, No.3 が 1.8 である。No.1 と比較して、No.2, 3 では、実験最大耐力が計算支圧耐力を大幅に上回っている。これは、埋込み部鋼管が耐圧版を拘束したことにより、耐圧版の支圧強度が大きくなったためと思われる。

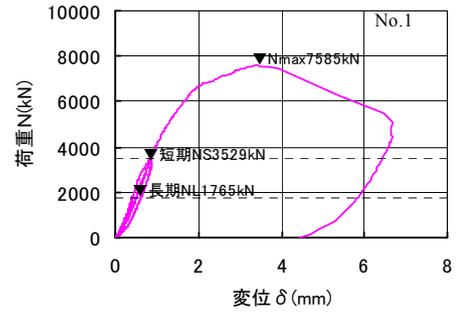


図-7 荷重変形曲線 (No.1)

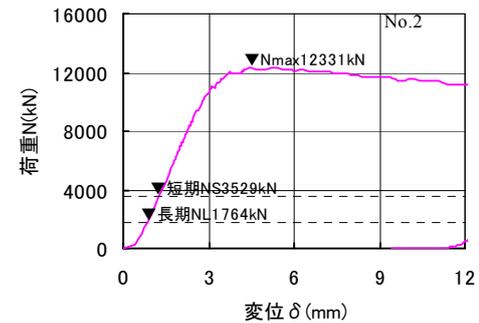
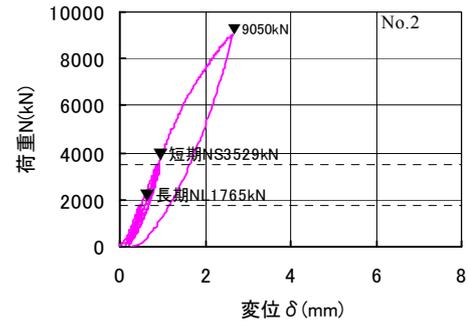


図-8 荷重変形曲線 (No.2)

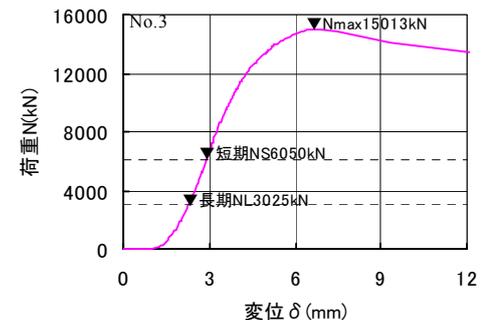
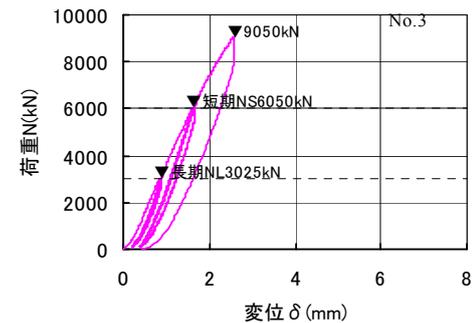


図-9 荷重変形曲線 (No.3)

表-5 鉛直載荷実験結果一覧

試験体	試験体寸法		耐圧版	埋込み部	鋼管	実験 最大 耐力(kN)①	計算 支圧 耐力(kN)②	計算 埋込み部 耐力(kN)③	比率 ①/②	比率 ①/③
	杭径 (mm)	鋼管径 (mm)	$\tau\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$u\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )					
No.1	550	400	34	73	397	7585	5892	9173	1.29	0.83
No.2	550	400	34	74	397	12331	5788	9989	2.13	1.23
No.3	550	400	48	116	397	15013	8225	15154	1.83	0.99

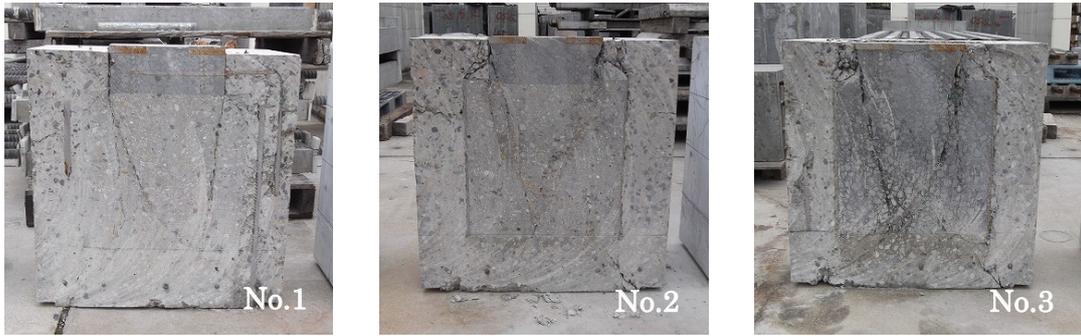


写真-1 試験体の切断面

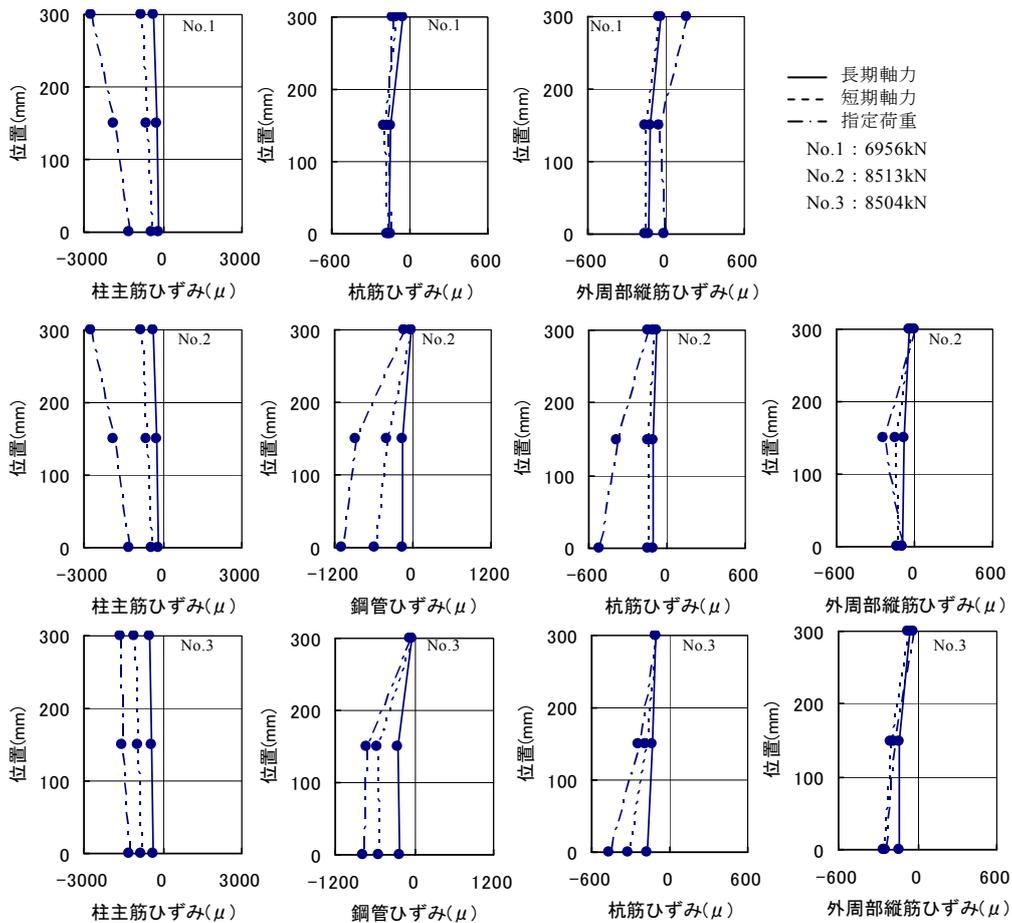


図-10 各部位のひずみ分布

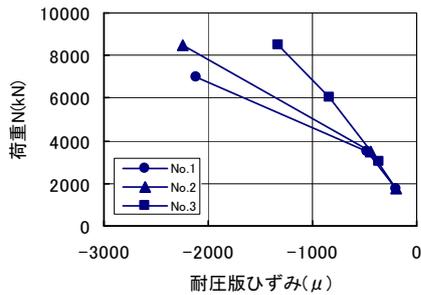


図-11 耐圧版のひずみ

実験最大耐力①と埋込み部の計算耐力③の比率 (①/③) は、No.1 が 0.83, No.2 が 1.23, No.3 が 0.99 である。No.1 では、埋込み部の計算耐力は、実験最大耐力より大きい。No.1 は、耐圧版が先行して破壊し最大耐力に到ったと考えられる。これに対して、No.2, 3 では、比率 (①/③) より、最大耐力は、埋込み部の計算耐力とほぼ対応している。これは、埋込み部の鋼管の拘束効果により耐圧版の支圧強度が上昇し、耐圧版より埋込み部が先行して破壊し最大耐力に達したためと思われる。また No.2 の最大耐力は、埋込み部の計算軸耐力より約 2 割大きい。これは、鋼管のコンファイド効果に加えて、外周部の RC 構造のコンファイド効果によって、鋼管内のコンクリート耐力が増加したためと思われる。一般に高強度コンクリートのコンファイド効果による耐力上昇割合は、普通コンクリートに比べて小さくなる。これは、No.2 に対する No.3 の最大耐力の割合 1.2 が、埋込み部の材料強度比 1.6 に比べて小さいことと対応する。

試験体の破壊状況を確認するため、実験終了後、試験体を切断し内部を確認した。試験体切断面を写真-1 に示す。各試験体ともに、埋込み部直上の柱の隅から斜めに、押し抜きせん断状のすべり面が形成されている。鋼管のない No.1 のすべり面は、柱の 2 つの隅からそれぞれ鉛直方向と斜め方向にひび割れが生じ交差している。これに対して、鋼管のある No.2, 3 は、両方とも斜め内側に向かってひび割れが交差する CFT の破壊性状を示しており、鋼管の拘束の影響が見られる。

図-10 に各部位の鉄筋および鋼管の軸方向ひずみ分布を示す。ひずみは同じ部位の同じ深度のものを平均した。図は荷重レベルをパラメータにしている。長期軸力、短期軸力、指定荷重におけるひずみ値を示した。なお指定荷重は最大荷重近傍でひずみが安定していた荷重であり、図中に示した値である。いずれの試験体も柱主筋のひずみが最も大きく、上部から下部に向かって減少する分布形状を示した。また No.1 では、杭筋、外周部縦筋のひずみ分布が、No.2, 3 では、鋼管、杭筋、外周部縦筋のひずみ分布が、上部から下部にかけて大きくなる分布形状を示した。これより、柱主筋から外周部にひずみが伝

わったことが分かる。

図-11 に各試験体における荷重と耐圧版のひずみの関係を示す。図より荷重が小さい場合、各試験体は同じ傾向を示した。これに対して、荷重が大きい場合、試験体 No.1, 2, 3 の順番でひずみが小さくなった。これはリブ付き鋼管によって外周部の損傷が少なくなり、付着力により荷重が外周部に流れたためと思われる。また、高強度コンクリートを用いた No.3 では、耐圧版のひずみが No.2 より小さくなった。No.2, 3 の外周部の材料強度は、No.3 は、No.2 の約 1.5 倍である。これは実験最大耐力の上昇率である 1.2 倍より大きい。このため、No.3 では No.2 より外周部に荷重が多く流れたと思われる。

## 7. まとめ

本報では、PCa 柱の埋込み部の概要を示すとともに、両面リブ付き鋼管の付着実験、鉛直載荷実験についてまとめた。実験結果より、以下のことが確認された。

- ① 付着実験では、すべり量が、0.15~0.2mm を超える領域で剛性低下を生じている。
- ② 弾性限の付着応力は、おおむね告示式 (短期)、RC 規準 (短期) の付着応力度と同等以上と考えられる。
- ③ 鉛直載荷によって過大なひび割れは生じていない。
- ④ 鋼管の設置により、耐圧版の支圧耐力が上昇し埋込み部で押し抜きせん断によるすべり破壊が生じた。
- ⑤ 高強度コンクリートにより、最大耐力は増大する。その割合はコンクリート強度の割合より小さい。
- ⑥ リブ付き鋼管により外周部へ応力が流れ、耐圧版のひずみ (応力) が小さくなる傾向がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会, コンクリート標準示方書, 規準編, 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)(JSCE-G 503-2007), pp.249-252
- 2) 土木学会, コンクリート標準示方書, 規準編, 引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)(JSCE-E 539-2007), pp.136-138
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—鋼とコンクリートの複合構造物, 1998
- 4) 日本建築学会, コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008