

コンクリート中に埋設するPC鋼より線の付着に関する研究

大阪大学大学院 正会員

○森田 和也

大阪大学大学院 正会員 博士(工学)

岸本 一蔵

大阪大学大学院 正会員 工博

大野 義照

1. はじめに

近年、建築構造物ではより高強度の材料を使用しようとする試みが盛んになりつつある。高強度材料の使用は構造部材のスリム化を可能とするが、一方、コンクリート構造では、鋼材の高強度化は鋼材-コンクリート間の付着確保が課題となる。本論文は、PC鋼より線を通常の鋼材のように無緊張でコンクリート中に埋め込み使用する事を想定し、そのような状態でのPC鋼より線の付着について実験を用いた検討を行うものである。実験は2種類行われており、1つはPC鋼より線のコンクリート中での基本的な付着特性を調べる実験、もう1つは、PC鋼より線に定着体を着装した場合の付着特性についてである。

2. 実験概要

2. 1 シリーズ1 (付着定着実験)

シリーズ1はPC鋼より線のみを埋設した場合のコンクリート中での付着特性を把握することを目的とする。図-1に試験体図および載荷装置図を示す。試験体は $150 \times 150 \times 1776(\text{mm})$ のコンクリートブロックに同図のようにPC鋼より線を断面重心位置に直線状に配置した(試験体長さは製作の都合等も含めて可能な限り長くした)。鋼材には $10\phi(193\text{mm})$ 間隔でひずみゲージを貼付した。付着区間は 1776mm で、使用鋼材は19本より線 $\phi 19.3$ である。割裂防止筋として材軸方向に $D6@40(\text{mm})$ のスパイラル筋^①を材軸方向全長に入れた(実験中においてスパイラル筋は弾性状態であるため、スパイラル筋の強度は結果に影響を及ぼさない)。載荷はPC鋼材規格降伏荷重が 387kN であることから、 387kN まで行う予定であったが、鋼材の抜け出し量が非常に大きく(20~30mm程度)、実用的な範囲を考え 350kN までとした。載荷は 700kN センターホールジャッキを用いて単調引き抜き載荷を行った。載荷端では装着したくさびに大きな圧力が発生するため、PC鋼より線の抜け出しに伴う回転が拘束されている。測定項目は引き抜き荷重(500kNロードセル)、引き抜き側の鋼材の抜け出し量、自由端側の鋼材変位量、および鋼材ひずみである。表-1に試験体一覧を、表-2に材料特性を示す。実験のパラメータはコンクリート圧縮強度とし、低強度(F_c24)と高強度(F_c36)の2種類(試験体本数は各3体)である(ここで高強度とは2種類を比較して高いことを意味する)。

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート強度	各3体
$F_c\text{-low}$	低強度($F_c=24$)	
$F_c\text{-high}$	高強度($F_c=36$)	

表-2 材料特性

コンクリート	圧縮強度 $\sigma_c(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 E_c ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
$F_c=24\text{N/mm}^2$	33.9	2.5
$F_c=36\text{N/mm}^2$	49.1	2.79

鋼材	降伏荷重 $\sigma_y(\text{kN})$	引張荷重 $\sigma_u(\text{kN})$
19本より線 $\phi 19.3(\text{SWPR19L})$	456	480

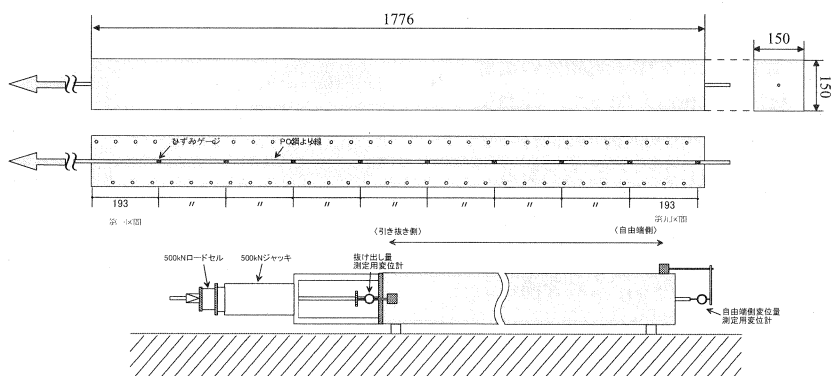


図-1 試験体図および載荷装置図

2. 2 シリーズ2 (機械式定着試験)

シリーズ2はPC鋼より線の端部に定着板を用いて機械式定着するときの性状(PC鋼より線部の τ -S関係、支圧力と付着力の負担率)を把握することを目的とする。図-2に試験体図および載荷装置図を示す。試験体は鋼材の降伏で耐力が決まるように $\phi 300 \times 1000\text{mm}^2$ (または 800mm)の筒状のコンクリートブロックの断面重心位置にPC鋼より線を直線状配置した。使用鋼材は19本より線 $\phi 19.3$ である。同図に示すようにシリーズ1と同様に鋼材にひずみゲージを貼付した。材軸方向全長にD6@40mmのスパイラルを入れた(シリーズ1と同様にスパイラル筋の強度は測定していない)。機械式定着は円形金属板を用いて行い、あらかじめPC鋼より線に装着した圧着グリップにパテを用いて円形金属板を固定し、打ち込み時などに円形金属板にがたつきが生じないようにした。使用材料の材料特性はシリーズ1と同様である。(表-2 参照)

載荷は700kN センターホールジャッキを用いての単調引き抜きであり、鋼材の規格降伏荷重である387kNまで行った。シリーズ1と同様に載荷端でPC鋼より線の抜け出しに伴う回転が拘束されている。測定項目は引き抜き荷重(500kN ロードセル), 引き抜き側の鋼材の抜け出し量(左右の平均値), および鋼材ひずみである。

表-3に試験体一覧を示す。実験のパラメータはコンクリート圧縮強度, PC鋼より線の埋め込み長さ, 支圧面積でありNo.1試験体を標準試験体としている。文献3および4を参考にして標準試験体の定着板の設計耐力は387kNの約75%とした。定着板にはSS400を使用した。

基準試験体と比較して, No.2試験体はコンクリート強度が高く, No.3試験体は定着長さが短く, No.4試験体は支圧面積が20%大きく, No.5試験体は支圧面積が20%小さく, No.6試験体は定着長さが短かつ支圧面積が20%小さい試験体である。定着板の大きさは次式に基づいて決定した。

$$P_{c,a} = m \times F_c \times A_p^3 \quad 4)$$

ここで, $P_{c,a}$: 支圧板耐力
 m : 短期 2.0 長期 1.5 A_p : 定着金物の支圧面積

上記の式より標準試験体の定着板は $\phi 84\text{mm}$ となった。なお支圧面積は円の面積から鋼材の断面積を差し引いたものである。また定着板の厚さは文献5によれば必要最低厚さ δ が約25mmであることから, これを満足する30mmとした。

表-3 試験体一覧

試験体番号	試験体名	F_c (N/mm ²)	l (mm)	a_n
No.1	$F_{c,24-40d-a_n,22.8}$	24	40d	22.8
No.2	$F_{c,36-40d-a_n,22.8}$	36	40d	22.8
No.3	$F_{c,24-30d-a_n,22.8}$	24	30d	22.8
No.4	$F_{c,24-40d-a_n,27.1}$	24	40d	27.1
No.5	$F_{c,24-40d-a_n,18.4}$	24	40d	18.4
No.6	$F_{c,24-30d-a_n,18.4}$	24	30d	18.4

* F_c : コンクリート強度

l : 定着長さ(30d=579, 40d=772) d は鋼材径

a_n : 支圧面積比(=支圧面積/鋼材断面積)

定着板半径: $a_n, 18.4=76, a_n, 22.8=84, a_n, 27.1=92(\text{mm})$

(試験体図)

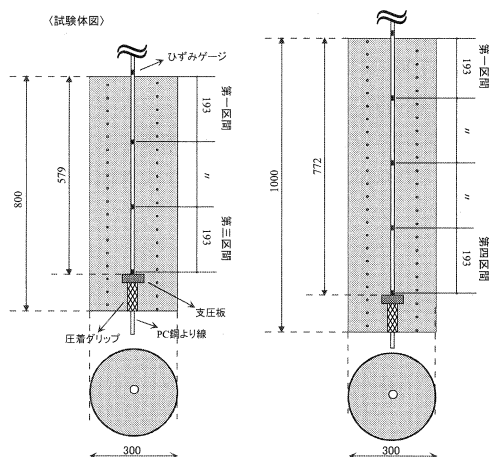


図-2 試験体図および載荷装置図

3. 実験結果

3. 1 シリーズ1

図-3 に実験で得られた荷重 - 引き抜き量関係図を試験体F_c-low②とF_c-high②を例にとりて示す。引き抜き量は、載荷側で計測される先端抜け出し量から、変位測定用ジグとコンクリート面間の鋼材の伸び量を除いたものである。同図よりPC鋼より線の荷重 - 引き抜き量関係には次のような特徴がある。即ち、荷重の増加に伴い剛性が徐々に低下し、250kN付近で剛性が大きく低下する。これは鋼材の自由端側にまで荷重が伝達し鋼材全体がすべり始めた (PC鋼より線が定着できていない) ことによる。これらの傾向はコンクリート強度の高いF_c-highを含め全ての試験体にみられた現象であり、表-4 に示すように、自由端滑り出しの荷重 (P_s)、引き抜き量 (S_{ps}) はコンクリート圧縮強度との相関は明確ではない。この原因は、PC鋼より線の付着力は、コンクリートと鋼材肌面との粘着や摩擦によるものであり、異形鉄筋の場合に見られる機械的メカニズムによる付着とは根本的に異なるものであるからと考える。一方、荷重 350kN時の引き抜き量を示すS_{pu}はコンクリート強度が低いF_c-low試験体の値がF_c-high試験体に比べて大きい。これは、次のようなメカニズムによると考えられる。鋼材の載荷側での引き抜き、自由端側での引き込みは共にコンクリート中のPC鋼より線により作られた溝 (以下コンクリートの溝) に沿っての移動であり鋼材自身の回転を伴う。しかし、鋼材には引張力が作用している。そのため初期の状態である無応力の状態とは形状が変化する、その結果コンクリートの溝とは形状の不整合が発生し、鋼材とコンクリート間では引き抜き力に対して機械的な抵抗力が生じる。ヤング係数の大きい高強度コンクリートの試験体でより大きな抵抗力を発揮する (τ - S 関係では τ 一定領域における τ が大きくなることに対応) ことが考えられる。

図-4 に試験体F_c-low②について、各荷重階 (25kN毎) におけるPC鋼より線のひずみ分布を示す。同図では、縦軸をPC鋼より線のひずみ、横軸にゲージ貼付位置を示している。同図よりPC鋼より線のひずみ分布を表す各荷重階でのひずみを結ぶ線はほぼ平行である。これはPC鋼より線の付着程度がすべり量によらずおおむね一定であることを示している。より具体的に見るために、試験体

表-4 P_s, S_{ps}, S_{pu}一覧

	F _c -low				F _c -high			
	(1)	(2)	(3)	平均値	(1)	(2)	(3)	平均値
P (kN)	279	258	279	272	275	250	254	260
S _{ps} (mm)	5.71	5.83	5.86	5.8	6.05	6.1	-	6.1
S _{pu} (mm)	22.14	29.6	29.26	27.0	22.14	18.9	-	20.5

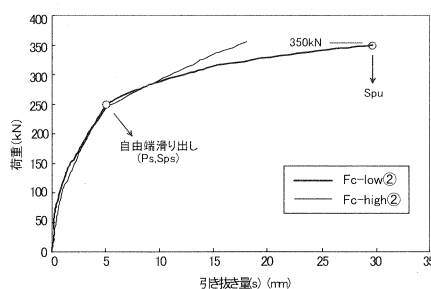
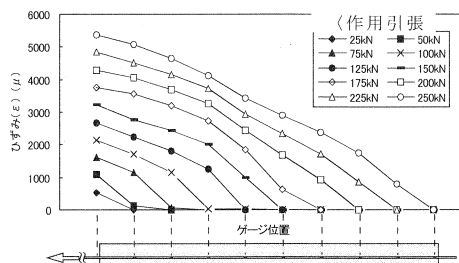
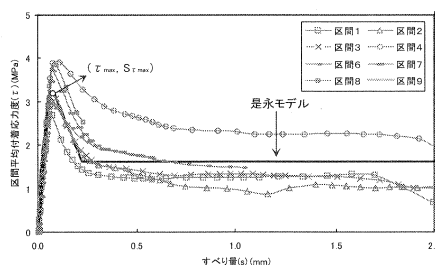


図-3 荷重 - 引き抜き量関係の一例

図-4 ひずみ分布の一例 (F_c-low②)図-5 τ - S 関係の一例 (F_c-low②)表-5 τ_{av} , τ_{max} および $S_{\tau max}$ 一覧

		τ_{av} (MPa)	τ_{max} (MPa)	$S_{\tau max}$ (mm)
fc-low	(1)	1.89	2.69	0.074
	(2)	1.75	3.29	0.071
	(3)	1.9	3.25	0.071
	平均値	1.85	3.08	0.072
fc-high	(1)	1.87	3.29	0.081
	(2)	1.7	2.76	0.071
	(3)	1.73	2.86	0.063
	平均値	1.77	2.97	0.072

$F_c\text{-low}$ について各

測定区間 (各ゲージ間を 1 区間として全 9 区間) の τ - S 関係を調べたものが図-5 である。ここでの τ は該当区間の両端のひずみ差に鋼材ヤング係数と断面積を乗じて、鋼材の周長と付着長さ (該当区間長さ) で除

して求めた。 S は鋼材のひずみから計算した伸び量の積分値とした。19 本より線の周長は文献 6 に従い $1.4\pi D^6$ (D は鋼材径) として計算した。図-5 より PC 鋼より線の τ - S 関係には次のような特徴がある。すべり量が極めて小さい領域 (0.1mm 程度) で最大付着強度が出現し、その後最大強度の半分程度に低下するが、 S が大きくなってもその値を保持し続けている。よって付着区間全長で平均化した付着

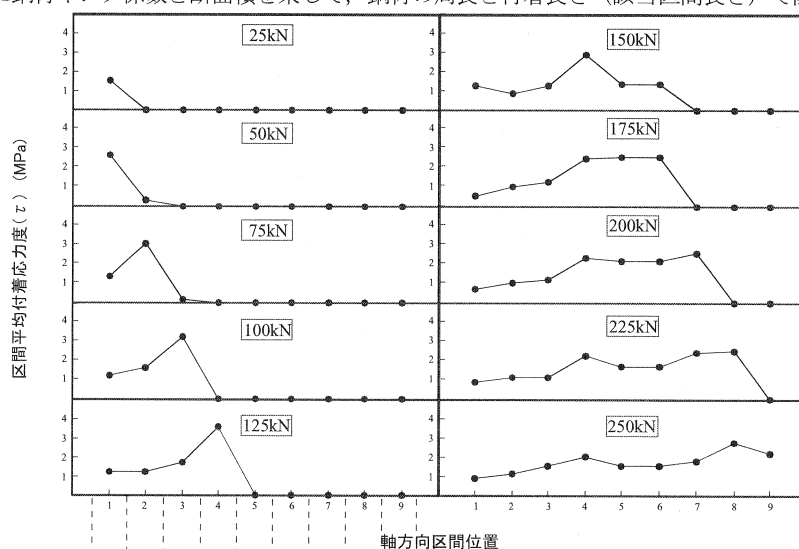


図-6 τ 分布の一例 ($F_c\text{-low}②$)

応力度 τ_{av} は一定値に近づくと考えられる。自由端滑り出し時の付着応力度 (引き抜き荷重を付着区間全長の表面積で除した) を τ_{av} とすると、その値は 1.8 (MPa) 程度である (後の表に詳細を示す)。同図には過去の研究⁷⁾ において提案されている是永モデルを併記しているが、概ね良好にその関係をとらえていることが分かる。表-5 に τ_{av} , τ_{max} (各区間の τ - S 関係における最大 τ の平均値) と $S_{\tau_{max}}$ (各区間の最大 τ 時のすべり量の平均値) を示す。同表より τ_{max} , $S_{\tau_{max}}$ とコンクリート圧縮強度とは相関はみられない。図-6 は、試験体 $F_c\text{-low}$ について、縦軸に τ , 横軸に試験体材軸位置をとり、各荷重段階での τ 分布を示したものである。同図より載荷初期引き抜き側 τ の上昇に始まり、荷重増加と共に試験体後方への付着発生領域の広がりとともに、試験体全域で一様な τ 分布となる様子がみてとれる。なお、試験体に割裂によるひび割れは観察されなかった。

3. 2 シリーズ 2

図-7 に No.2 試験体の荷重-引き抜き量関係を示す。図-2 に示すように本シリーズの試験体には定着板が設置されており、定着板に荷重が作用し始める時点も図-7 上にプロットしている。同図より定着板を有する PC 鋼より線の荷重-引き抜き関係には次のような特徴がある。即ち、載荷の初期段階では引き抜き量の増加に伴い剛性は徐々に低下する。引き抜き量が 1.5mm 付近で、定着板に荷重が作用し始め (定着板への荷重の伝達は定着板近傍に貼付した鉄筋ゲージに発生するひずみから判断した)、その後は一定の剛性となり、線形的な荷重-引き抜き量関係となる。定着板に力が作用し始める荷重の一覧を表-6 に示す。同表より定着長さが長いにもかかわらず定着長の短い試験体より P が小さい試験体 (No.2) について記述すると、No.2 ではコンクリート圧縮強度が大きいが付着強度には関係なく、付着強度はむしろ小さくなっている (後述の表-7 参照) ことに起因する。図-8 に試験体 No.1 について、各荷重段階 (25kN 毎) における PC 鋼より線のひずみ

表-6 荷重-引き抜き量データ一覧

試験体番号	試験体名	P(kN)	S(mm)
No.1	F _c 24-40d-a _{22.8}	163	1.76
No.2	F _c 36-40d-a _{22.8}	125	1.44
No.3	F _c 24-30d-a _{22.8}	146	1.28
No.4	F _c 24-40d-a _{27.1}	155	1.58
No.5	F _c 24-40d-a _{18.4}	163	1.8
No.6	F _c 24-30d-a _{18.4}	117	1.08

P: 定着板に力が作用し始める荷重

S: 定着板に力が作用し始めるときの引き抜き量

表-7 τ_{max} および $S_{\tau_{max}}$ 一覧

試験体番号	試験体名	τ_{max} (MPa)	$S_{\tau_{max}}$ (mm)
No.1	F _c 24-40d-a _{22.8}	3.37	0.079
No.2	F _c 36-40d-a _{22.8}	2.41	0.055
No.3	F _c 24-30d-a _{22.8}	3.37	0.099
No.4	F _c 24-40d-a _{27.1}	3.46	0.089
No.5	F _c 24-40d-a _{18.4}	3.34	0.076
No.6	F _c 24-30d-a _{18.4}	3.1	0.091

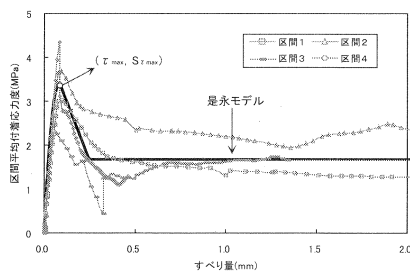
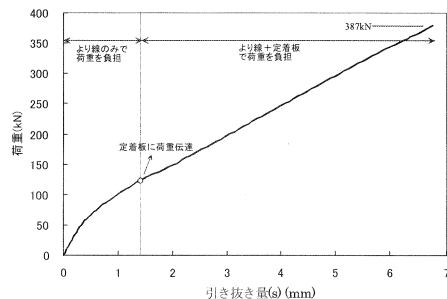
図-9 τ -S関係の一例 (No.1)

図-7 荷重-引き抜き量関係の一例 (No.2)

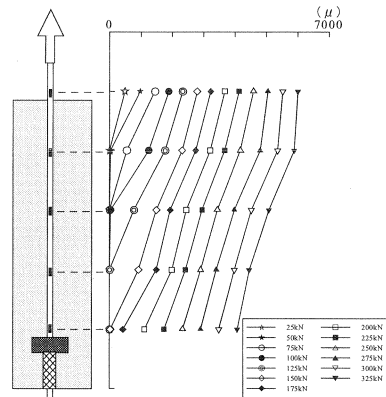


図-8 ひずみ分布の一例(No.1)

分布を示す。同図より、荷重の増大に伴う試験体内部のひずみの増加の程度は鉄筋のゲージ貼付位置によらずほぼ一定、即ち図中の各ラインがほぼ平行になっていることがわかる。これは、シリーズ1での結果と同様、PC 鋼より線の付着程度が滑り量によらずほぼ一定した状態にあることを示している。より具体的にみるために、試験体 No.1 について各測定区間の τ -S 関係を調べたものが図-9 である (τ , S の計算法についてはシリーズ1と同様)。同図によれば位置によるばらつきはあるものの、滑り量約 0.1mm 程度で最大付着強度が出現し、その後最大強度の半分程度に低下し、その値を保持し続けていることがわかる。同図にシリーズ1と同様、是永等の算定式を用いたラインを併記しているが概ね良好にその関係をとらえていることが分かる。表-7 に最大付着強度および最大付着強度時の引き抜き量の平均値を示す。同表より最大付着強度および同時点での滑り量と、本実験でのパラメータ（コンクリート強度等、定着長、定着板大きさ）とは明確な相関はみられない。次に、PC 鋼より線と定着板の荷重負担比率について検討する。図-10 に各試験体の PC 鋼より線と定着板の荷重負担割合を各荷重段階毎に示している。また定着板が負担する荷重（支圧力）は定着板近傍の PC 鋼より線に貼付のゲージから得られるひずみにヤング係数と鋼材の断面積を乗じて求めた。従って、より線部分の負担する荷重は引き抜き荷重（ロードセルから得られる荷重）から前述の定着板の負担する荷重を引いた値とした。荷重負担比率は引き抜き荷重に対するそれぞれの負担荷重の割合である。表-8 に 387kN 時の荷重負担率を示す。同図より、定着長の短い No.3,6 試験体では最終荷重（387kN）時における定着板の負担割合が定着長の長い No.1, 4 試験体に比べて高いこと。また、高強度コンクリートを用いた No.2 試験体では、荷重が同じであれば、定着板の負担割合はその他の試験体に比べて大きく（例えば、150kN の時点では No.2 では既に定着板が 27%負担しているのに対し、No.6 を除くその他の試験体では同時点での負担率は 0 である）。これはコンクリート圧縮強度が付着強度に関係ないことに起因すると考えら

表-8 387kN 時の荷重分担比率表

試験体番号	より線(%)	定着板(%)
No.1	34	66
No.2	22	78
No.3	23	77
No.4	31	69
No.6	17	83

れる。ただし、No.2, 3, 6 以外の試験体についても、最終荷重では負担割合は 70% 以上であり、本実験での最終荷重 387kN 以上の荷重を作用させる場合（前述したように PC 鋼より線の付着力は滑り量に対し一定、またはすべり量の増加に対して若干の低下傾向にある）、定着板の負担割合はより大きくなると推測される。以上より、定着板を用いて PC 鋼より線をその降伏荷重に対して定着する場合、その荷重のほぼ全てが定着板に作用するとした考え方が必要と思われる。なお、試験体には割裂によるひび割れは観察されなかった。

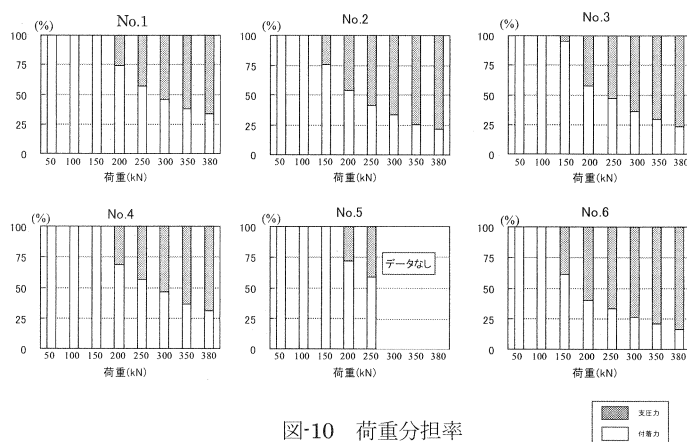


図-10 荷重分担率

4. まとめ

1. 是永らの提案 τ -S 関係のモデルである是永モデルは、19 本より線 $\phi 19.3$ においても、シリーズ 1 と 2 の両方において概ね一致した。
2. 19 本より線 $\phi 19.3$ を PC 鋼より線の付着のみでコンクリート中に定着するには、シリーズ 1 の試験体のように 1.8m の付着長さでは定着できず（降伏荷重 387kN に対して）、定着長さが非常に長くなる。
3. 19 本より線 $\phi 19.3$ を機械式定着（より線に鉄板を装着）する場合、規格降伏荷重（387kN）時には定着板の荷重負担割合は定着長さが 40d (772mm) で 80%程度、30d (579mm) では 85%程度となるが、387kN 以上の荷重作用時には定着板の荷重負担割合はさらに大きくなると考えられるので、ほぼ全ての荷重が定着板に作用するとした設計が必要になると考えられる。

謝辞：本稿の実験では（株）神鋼鋼線工業より材料の提供をいただきました。ご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表わします。

【参考文献】

- 1) 異形鉄筋コンクリート設計法，異形鉄筋コンクリート設計法研究会編，技報堂，1971
- 2) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（3 種 PC）構造設計・施工指針・同解説
- 3) 川勝康志郎，田才晃，清原俊彦：梁主筋を機械式定着した外部柱・梁接合部のせん断性状(その 3 機械式定着した梁主筋の定着性状)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.105-106, 2001.9
- 4) 東京鐵鋼株式会社：プレートナット工法の設計施工指針，BCJ-C2280, 1999
- 5) 財団法人 日本建築総合試験所 機械式鉄筋定着工法研究委員会：機械式鉄筋定着工法設計指針，2006.1
- 6) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会：PC 鋼より線と被覆 PC 鋼より線の周長について，プレストレストコンクリート vol.43 No.4, pp.59-66, 2001
- 7) 是永健好，渡辺英義：PC 鋼より線とグラウト材の付着特性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.1083-1084, 1999.9