

(27) PC 鋼材の定着に関する研究

名城大学 理工学部土木工学科 正会員 泉 満明
 (株)安部工業所 技術本部 技術部 正会員 ○葛西 康幸
 同上 正会員 北園 英明
 同上 正会員 今尾 勝治

1. はじめに

PC 構造物における PC 鋼材の定着は、固定端の定着にはデッドアンカーと呼ばれる固定用定着具を、また、PC 鋼材を接続する場合には、カップラーと呼ばれる接続用金具を用いるのが一般的である。これらの構造に対し、作業の省力化、コスト縮減などを目的として、鉄筋の NC(Non-Contact)継手¹⁾の原理を採用した構造を考案した。本構造は、PC 鋼材の定着と PC 鋼材間の応力伝達を、一般に使用されている定着具等を使用しないで、鋼材とコンクリートの付着力を有効に利用して機能させるものである。

本研究は、鉄筋の NC 継手の原理を採用した PC 鋼材の定着方法における、PC 鋼材間の応力伝達の可能性および合理的な定着長を確認するための基礎的な実験的研究^{2,3)}である。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験で使用した供試体の概念図を図-1 に示す。供試体は、PC 鋼材種類を $\phi 12.7\text{mm}$ 、 $\phi 15.2\text{mm}$ 、 $\phi 21.8\text{mm}$ の 3 種類のストランド、定着長を $40\phi+100$ 、 65ϕ 、 80ϕ 、 100ϕ 、 120ϕ (ϕ は PC 鋼材径) の 5 種類、PC 鋼材間隔を 1ϕ および 8ϕ の 2 種類、横方向鉄筋の有無を考慮した表-1 に示す 21 体とした。したがって、供試体の PC 鋼材方向および PC 鋼材直角方向の寸法はそれぞれの供試体により異なるが、部材厚については、 $\phi 12.7\text{mm}$ 、 $\phi 15.2\text{mm}$ 、 $\phi 21.8\text{mm}$ それぞれの供試体に対して、 100mm 、 120mm 、 200mm で鋼材種類ごとに一定とした。

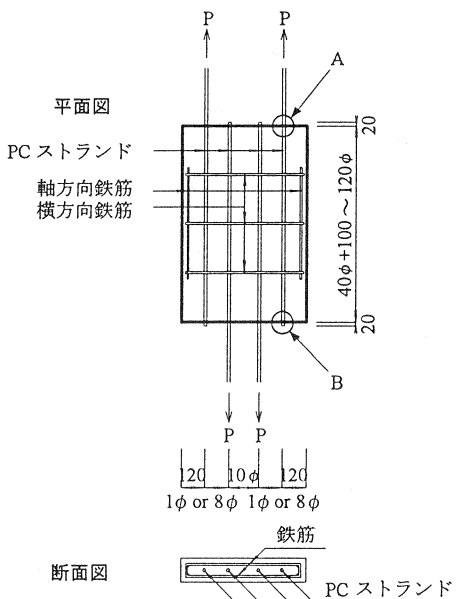


図-1 供試体概略図

表-1 供試体一覧

供試体番号	荷重方法	P C ス ト ラ ン ド			横方向鉄筋
		径(φ) (mm)	定着長 (mm)	間 隔	
T-(1)-5-12-A-1-R	単 調 増 加	12.7	40φ +100	1φ	有
T-(1)-5-12-A-8-O				8φ	無
T-(1)-5-12-A-8-R			65φ	1φ	有
T-(1)-5-12-B-1-R					
T-(1)-5-12-B-8-R				8φ	
T-(1)-5-12-C-8-R					
T-(1)-5-15-A-1-R		15.2	40φ +100	1φ	有
T-(1)-5-15-A-8-O				8φ	無
T-(1)-5-15-A-8-R			65φ	1φ	有
T-(1)-5-15-B-1-R					
T-(1)-5-15-B-8-R				8φ	
T-(1)-5-15-C-8-R					
T-(1)-5-21-A-1-R	21.8	40φ +100	1φ	有	
T-(1)-5-21-A-8-O			8φ	無	
T-(1)-5-21-A-8-R		65φ	1φ	有	
T-(1)-5-21-B-1-R					8φ
T-(1)-5-21-B-8-R			8φ		
T-(1)-5-21-C-8-R					
T-(2)-5-15-C-8-R	繰 返 し	15.2	80φ	有	
T-(2)-5-15-D-8-R			100φ		
T-(2)-5-15-E-8-R			120φ		

2.2 使用材料

(1) コンクリート

早強セメントを使用し、設計基準強度を 49.1N/mm²とした。コンクリートの配合を表-2 に、各供試体の強度試験結果を表-3 に示す。

(2) PC 鋼材

PC 鋼材は、φ 12.7mm、φ 15.2mm、φ 21.8mm の 3 種類のストランドである。PC 鋼材の規格値を表-4 に示す。

(3) 鉄筋

鉄筋は、軸方向鉄筋にはいずれの供試体も D10 を、横方向鉄筋には φ 12.7mm、φ 15.2mm、φ 21.8mm それぞれの供試体に対して、D6、D10、D13 を使用した。なお、材種は SD295A である。

2.3 載荷方法および測定項目

本実験では、図-2 に示す載荷フレームを用い、片側 2 本の PC 鋼材を固定し、他方の 2 本を緊張端として、単調増加載荷および繰返し載荷(PC 鋼材の降伏荷重までの載荷・除荷を 10 サイクル行った後、引張荷重までの載荷・除荷を 1 サイクル行う繰返し載荷)による引張試験を実施した。各供試体の載荷方法については、表-1 中に示すとおりである。

測定項目については、PC 鋼材の緊張荷重(以下、荷重と呼ぶ)、引抜け量、引込み量、コンクリートおよび鉄筋のひずみとした。ここでいう PC 鋼材の引抜け量とは、図-1 中の右端の PC 鋼材についていえば、A の位置で測定した PC 鋼材が抜け出る量であり、引込み量とは、B の位置で測定した PC 鋼材が引き込まれる量である。なお、実験結果中の各測定値は 4 本の PC 鋼材の平均値である。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	10±2.5	2±1	38.0	44.0	150	395	820	1056	2.6

表-3 コンクリートの強度試験結果

供試体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
T-(1)-5-12-A-1-R	58.8	3.92
T-(1)-5-12-A-8-O	55.1	3.97
T-(1)-5-12-A-8-R	52.8	3.44
T-(1)-5-12-B-1-R	61.4	4.01
T-(1)-5-12-B-8-R	62.3	3.24
T-(1)-5-12-C-8-R	62.4	4.24
T-(1)-5-15-A-1-R	59.4	3.90
T-(1)-5-15-A-8-O	49.9	3.93
T-(1)-5-15-A-8-R	52.5	4.13
T-(1)-5-15-B-1-R	62.3	3.24
T-(1)-5-15-B-8-R	61.0	3.76
T-(1)-5-15-C-8-R	64.9	4.23
T-(1)-5-21-A-1-R	52.9	4.33
T-(1)-5-21-A-8-O	47.6	3.33
T-(1)-5-21-A-8-R	47.3	4.06
T-(1)-5-21-B-1-R	62.4	4.24
T-(1)-5-21-B-8-R	61.0	3.76
T-(1)-5-21-C-8-R	62.5	3.83
T-(2)-5-15-C-8-R	56.7	3.80
T-(2)-5-15-D-8-R	58.1	3.58
T-(2)-5-15-E-8-R	55.5	3.43

表-4 PC 鋼材の規格値

鋼材種別	φ 12.7mm	φ 15.2mm	φ 21.8mm
0.2% 永久伸びに対する荷重 (kN)	156 以上	222 以上	495 以上
引張荷重 (kN)	183 以上	261 以上	573 以上
伸び (%)	3.5 以上	3.5 以上	3.5 以上

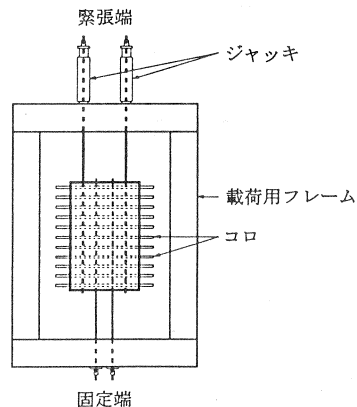


図-2 載荷フレーム概略図

3. 実験結果

実験結果一覧を表-5に、また、ひび割れ発生状況を写真-1, 2に示す。表-5中の引込み開始荷重とは、4本のPC鋼材のうち1本でも引込みが発生し始めたときの荷重であり、最大荷重とは実験終了時の荷重である。なお、実験においてはPC鋼材の引抜けにより荷重が上がらなくなった時点で載荷を終了した。また、 $\phi 21.8\text{mm}$ の供試体については、載荷フレームの関係上、定着長が65 ϕ の供試体についてはPC鋼材の降伏荷重で、80 ϕ の供試体については471kNで載荷を終了した。

最大荷重時における単調増加載荷供試体は、いずれの供試体もPC鋼材の引込みが発生した。また、全ての供試体ではないが、載荷途中コンクリートにひび割れが発生した供試体があり、鋼材間隔が1 ϕ の供試体および定着長の短い供試体についてはPC鋼材に沿ったひび割れが、定着長が長い供試体については供試体中央にPC鋼材直角方向のひび割れが発生する傾向にあった。

図-3~5に単調増加載荷における荷重とPC鋼材引

抜け量の関係を示す。これらの結果より、全ての供試体ではないが、鋼材間隔が8 ϕ または定着長が長い供試体は、鋼材間隔が1 ϕ または定着長が短い供試体に比べ、最大荷重が大きく、また、同一荷重に対する引抜け量が小さい傾向にあった。表-5中の引込み開始荷重については、 $\phi 12.7\text{mm}$ および $\phi 15.2\text{mm}$ の供試体は定着長80 ϕ の供試体に比べ65 ϕ の供試体は小さく、 $\phi 21.8\text{mm}$ の供試体については、これらの差異は明確ではなかった。

表-5 実験結果一覧

供試体番号	ひび割れ発生状況		引込み開始荷重(kN)	最大荷重(kN)
	発生状況	発生荷重(kN)		
T-(1)-5-12-A-1-R	PC鋼材方向	153	*	153
T-(1)-5-12-A-8-O	発生なし	-	*	176
T-(1)-5-12-A-8-R	発生なし	-	*	139
T-(1)-5-12-B-1-R	PC鋼材方向	148	59	148
T-(1)-5-12-B-8-R	発生なし	-	59	180
T-(1)-5-12-C-8-R	発生なし	-	97	180
T-(1)-5-15-A-1-R	PC鋼材方向	192	*	192
T-(1)-5-15-A-8-O	PC鋼材方向	175	*	175
T-(1)-5-15-A-8-R	PC鋼材方向	190	*	190
T-(1)-5-15-B-1-R	PC鋼材方向	241	118	241
T-(1)-5-15-B-8-R	発生なし	-	138	249
T-(1)-5-15-C-8-R	発生なし	-	194	249
T-(1)-5-21-A-1-R	PC鋼材方向	358	*	358
T-(1)-5-21-A-8-O	PC鋼材方向	451	*	451
T-(1)-5-21-A-8-R	PC鋼材方向	399	*	399
T-(1)-5-21-B-1-R	PC鋼材直角方向	118	346	495
T-(1)-5-21-B-8-R	PC鋼材直角方向	198	402	502
T-(1)-5-21-C-8-R	PC鋼材直角方向	281	321	471
T-(2)-5-15-C-8-R	発生なし	-	199(1サイクル目)	265
T-(2)-5-15-D-8-R	発生なし	-	189(2サイクル目)	265
T-(2)-5-15-E-8-R	PC鋼材直角方向	118	発生なし	265

*引込み量を計測しなかった供試体

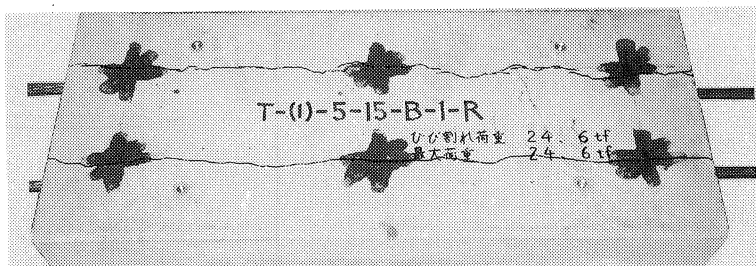


写真-1 ひび割れ発生状況(PC鋼材方向)

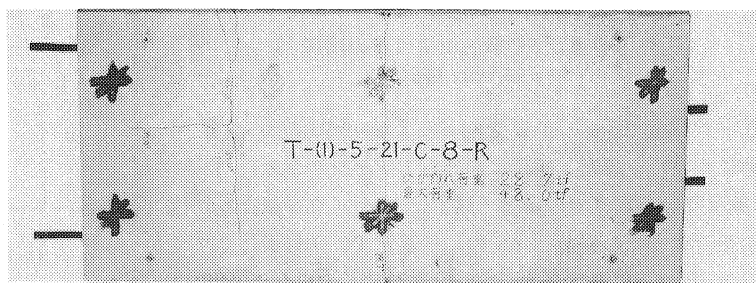


写真-2 ひび割れ発生状況(PC鋼材直角方向)

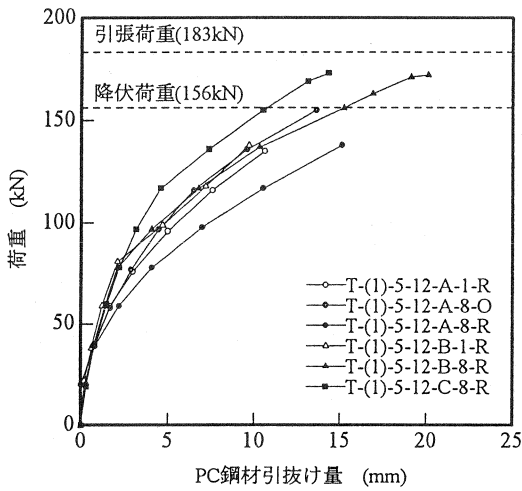


図-3 荷重とPC鋼材引抜き量の関係 (φ12.7mm 供試体)

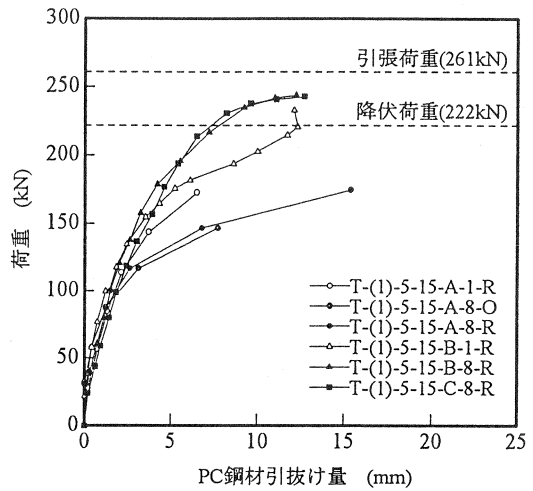


図-4 荷重とPC鋼材引抜き量の関係 (φ15.2mm 供試体)

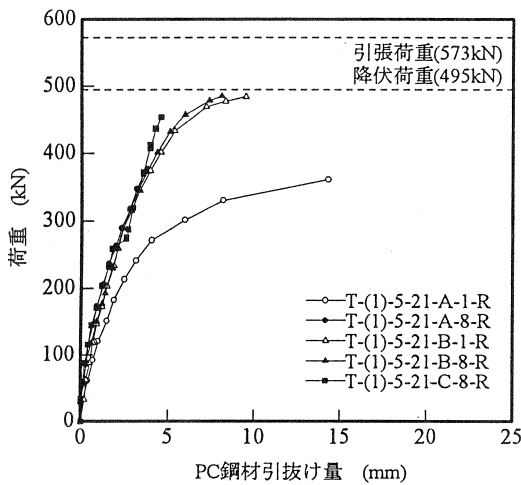


図-5 荷重とPC鋼材引抜き量の関係 (φ21.8mm 供試体)

図-6 に φ15.2mm の定着長 80φ および 100φ の供試体について、繰返し載荷における1サイクル目のPC鋼材降伏荷重までの載荷・除荷と11サイクル目の引張荷重までの載荷・除荷の、荷重とPC鋼材引抜き量、引込み量の関係を示す。繰返し載荷の場合、φ15.2mm の定着長が 80φ および 100φ の供試体については、いずれの供試体も引込みが発生し、引抜き量、引込み量は載荷を重ねるごとに徐々に増加した。しかし、図中には示されていないが、120φ の供試体については引込みの発生はなかったものの、供試体中央にPC鋼材直角方向のひび割れが発生した。

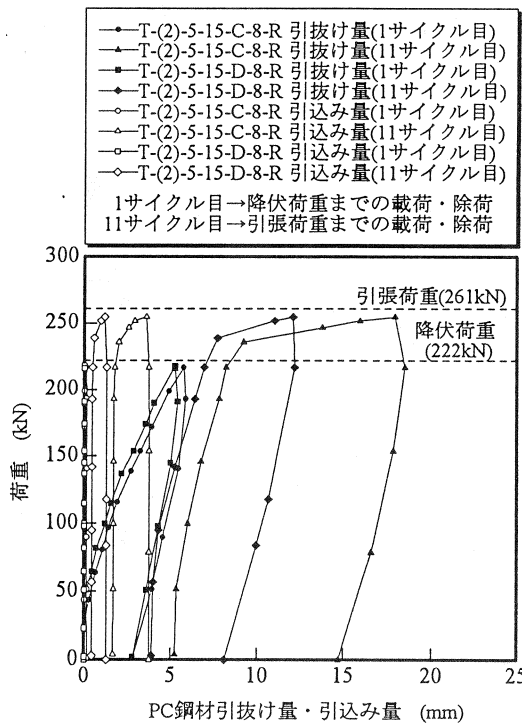


図-6 荷重とPC鋼材引抜き量、引込み量の関係

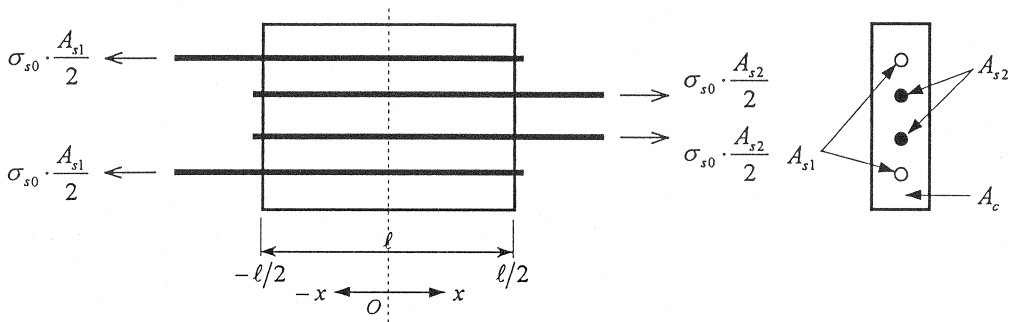


図-7 コンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度分布算出モデル

4. コンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度分布

図-7に示すモデルにおいて、コンクリートのひび割れ直前またはPC鋼材の引込み開始直前における、コンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度分布は次式により算出できる⁴⁾。

$$\sigma_{s1} = -\frac{\sigma_{s0}}{2} \cdot \frac{\sinh(K_2 \cdot x)}{\sinh\left(K_2 \cdot \frac{\ell}{2}\right)} + \frac{\sigma_{s0}}{2(1+2n\rho)} \left(\frac{\cosh(K_1 \cdot x)}{\cosh\left(K_1 \cdot \frac{\ell}{2}\right)} + 2n\rho \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{s2} = \frac{\sigma_{s0}}{2} \cdot \frac{\sinh(K_2 \cdot x)}{\sinh\left(K_2 \cdot \frac{\ell}{2}\right)} + \frac{\sigma_{s0}}{2(1+2n\rho)} \left(\frac{\cosh(K_1 \cdot x)}{\cosh\left(K_1 \cdot \frac{\ell}{2}\right)} + 2n\rho \right) \quad (2)$$

ここに、 A_c : PC鋼材断面積を考慮したコンクリートの断面積

A_s : PC鋼材断面積

$\rho = A_s/A_c$

ℓ : PC鋼材の定着長

E_c : コンクリートのヤング係数

E_s : PC鋼材のヤング係数

$n = E_s/E_c$

K : 変位係数(実験により求めるものであり、ここでは K_1 、 K_2 とする)

σ_{s0} : PC鋼材の緊張応力度

σ_{s1} : x 軸の負側よりのPC鋼材に対するコンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度

σ_{s2} : x 軸の正側よりのPC鋼材に対するコンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度

一例として、図-8に供試体 T-(1)-5-15-B-8-R における引込み開始荷重 138kN 時の、コンクリート中に定着された PC 鋼材応力度分布計算結果を示す。

ここでは、変位係数 K を既往の研究から仮定し、PC

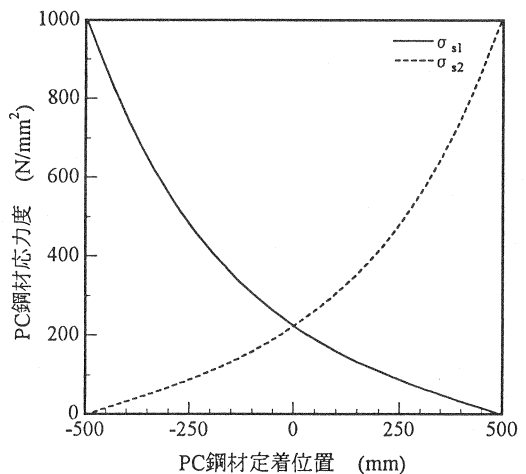


図-8 コンクリート中に定着されたPC鋼材の応力度分布 (供試体 T-(1)-5-15-B-8-R, 138kN 緊張時)

鋼材の応力度分布を算出したが、今後コンクリート中に定着された PC 鋼材の応力度分布を精度よく求めるためには、実験による実測値との比較検討を行う必要がある。

5. FEM 解析

本実験で用いた供試体について有限要素法(FEM)による弾性解析を行った。本解析では、コンクリート中に定着された PC 鋼材の応力度を、4. で算出した分布でモデル化した。その結果の一例として、代表的な荷重図、変形図を図-9に、主応力図(引張)を図-10に示す。

実験においてコンクリート表面ゲージにより計測した主応力の方向と FEM 解析により得られた結果は概ね一致していた。

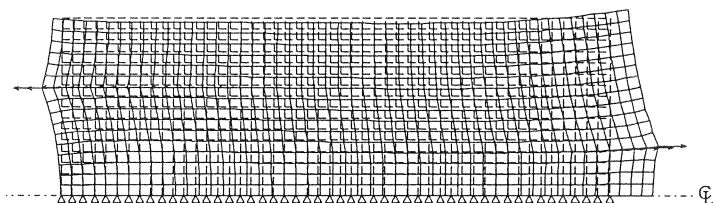


図-9 荷重図, 変形図の一例

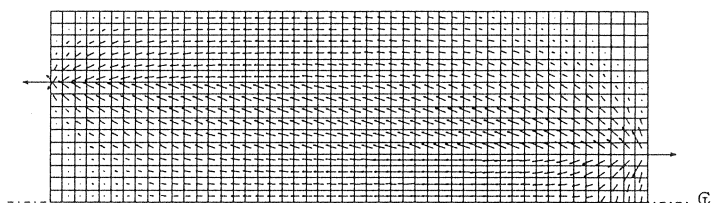


図-10 主応力図(引張)の一例

6. まとめ

本実験の研究により、以下の点が明らかとなった。

- ① 単調増加荷重供試体は、いずれの供試体も最大荷重時には PC 鋼材の引込みが発生した。
- ② 鋼材間隔が 8ϕ または定着長が長い供試体は、鋼材間隔が 1ϕ または定着長が短い供試体に比べ最大荷重が大きく、同一荷重に対する引抜け量が小さい。
- ③ $\phi 15.2\text{mm}$ の供試体における繰返し荷重の場合、定着長 80ϕ および 100ϕ の供試体は引込みが発生したが、 120ϕ の供試体は引込みが発生しなかった。
- ④ コンクリート中に定着された PC 鋼材の応力度分布を精度よく求めるためには、今後、実験値との比較検討を行う必要がある。
- ⑤ 主応力の方向は、実験による計測値と FEM 解析の結果が概ね一致していた。

謝辞

本研究のデータ整理については、当時名城大学卒業研究生であった大友誠一氏、岡田高明氏、福井徹氏、村瀬達也氏の協力によって行われた。ここに記して、深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 泉満明：NC 継手の力学的挙動について、名城大学理工学部研究報告，第 37 号，pp.97-101，1997。
- 2) 泉満明，井上浩之，今尾勝治，西尾浩志：PC 鋼材定着端の応力伝達に関する研究，第 8 回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，pp.111-116，1998.10
- 3) 葛西康幸，泉満明，北園英明，今尾勝治，西尾浩志：PC 鋼材の定着に関する研究，土木学会第 54 回年次学術講演会(発表予定)，1999.9
- 4) 福井徹，村瀬達也：PC 鋼材定着端の応力伝達に関する研究，名城大学卒業研究，1999.3