Architectural Institute of Japan

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集　第600号，163-169，2006年2月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 600, 163-169, Feb., 2006

エポキシ防錆被膜されたPC鋼より線とセメントグラウトの付着性状に関する実験研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BOND BEHAVIOR BETWEEN RUST PROOFING PC STRANDS COATED WITH EPOXY RESIN AND CEMENT GROUT

松崎育弘*1，池澤　誠*2，坂田弘安*3
杉山智昭*4，和田　章*5，中野清司*6
Yasuhiro MATSUZAKI, Makoto IKEZAWA, Hiroyasu SAKATA, Tomoaki SUGIYAMA, Akira WADA and Kiyoshi NAKANO

In this paper, we aim to clarify the bond behavior between EC(Epoxy Coated) strands and cement grout through the experiments, and propose the estimation method for the tension force (P)-displacement (⊿) relationship. EC strands are rust proofing PC strands coated with epoxy resin. This paper represents the pulsating pullout tests of EC strands with cement grout encased in PC beam. The 4 parameters are established; the number of EC strands arranged in steel sheath, the compressive strength of cement grout, the initial prestressing tension of EC strands, and with or without steel sheath. Pulsating pullout tests of PC deformed bar and PC strands are also carried out in order to compare with EC strands. The following conclusions were drawn from the study. 1) The bond strength of EC strands is smaller than that of PC deformed bar. The bond stress is almost constant throughout the transmission surface. During unloading, the bond stress near the end of beam is produced in opposite direction indicating same magnitude under loading. 2) The bond surface of EC strands in the case the 3, 5, 10 strands arranged in steel sheath is evaluated multiplying a bond surface of 1 strand by the number of strands. 3) The compressive strength of cement grout, the epoxy resin coating, the initial prestressing tension and the steel sheath have little influence on bond behavior between PC strands and cement grout. 4) The P-⊿ relationship could be estimated with proposed method.

Keywords: *PC Strands, Cement Grout, Bond Behavior, Distribution of Strains*
PC鋼より線，セメントグラウト，付着性状，歪み度分布

1. 序論

コンクリート系構造における地震時の損失を制御する一つの方法として，PC圧着関節工法[1),2),3)]を提案している。図1には，PC圧着損傷制御架構の概要を示した。本工法の架構は，PCaPC梁とPCa柱をエポキシ防錆被膜済みPC鋼より線（以下，ECストランド（Epoxy Coated strand））を用いて圧着接合することで形成し，圧着の導入プレストレス力を通常のPC圧着工法の場合よりも低い0.5Py/本（Py:規格降伏荷重）程度とすることで，架構の損傷を制御しようとするものである。これまでに十字形部分架構実験を通じて，本工法を用いた架構の損傷制御効果を検証し，その力学的性状に関して考察をしている[2),3)]。

本架構の変形性状は，損傷制御効果を得るため，梁端の回転変形が支配的となるように設計している。そして，その梁端（関節部）の回転変形は，ECストランドが柱・梁接合部および梁部材から圧着面へ伸び出す挙動によって決定される。したがって，架構の履歴性状を予測するためにはECストランドとセメントグラウトとの付着性状を把握することが重要である。この様なエポキシ防錆被膜済みPC鋼より線の付着特性については，異形鉄筋のくさび的な付着特性と異なることなどが示されている[4),5),6)]が，その付着特性と種々の要因（シース管内に配線された本数，グラウト圧縮強度等）との関係はまだ明確に示されているとはいえない。

本報では，種々の条件を変動要因とした付着実験を行い、シース管内に複数本配線されたECストランドとセメントグラウトとの付着性状について明らかにし，さらに，実験で得られた付着応力度と歪み度分布により、そのモデル化を示し、引張力－抜け出し（伸び出し）量関係を予測する方法を提案することを目的とする。

2. 実験計画

2.1 試験体

図2に試験体および載荷・計測方法を，表1に試験体のパラメータおよび材料特性を示す。試験体形状及び配筋は，文献2）における十字形部分架構試験体（NoC42）の梁部材と同一としており，梁部材端の引張力と抜け出し量を模擬する設定である。各梁には節を有する鋼製シース管を2本ずつ配置し，そこにPC鋼材を通してプレストレス導入を行った後，セメントグラウトを充填した。試験体は総数9体とし，試験は各シース管で要因

*1 東京理科大学工学部建築学科　教授・工博
*2 元　東京工業大学大学院　修士課程・修士（工学）
*3 東京工業大学建築物理研究センター　助教授・工博
*4 東京理科大学工学部建築学科　助手・博士（工学）
*5 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博
*6 中野建築研究所　所長・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Managing Director, Nakano Building Research & Associate, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

表1　試験体パラメータおよび材料特性

	試験名称	梁形状 断面 mm × mm	梁形状 定着長さ L mm	PC鋼材 材種 *1	PC鋼材 呼び径	PC鋼材 公称断面積 a_p mm²	PC鋼材 本数	PC鋼材 降伏強度 $\sigma_{0.2\%}$ N/mm²	PC鋼材 ヤング係数 E_{exp} *2	PC鋼材 初期導入緊張力 P_{ini} *3	セメントグラウト 圧縮強度 $_G\sigma_B$ N/mm²	セメントグラウト ヤング係数 $_GE$ *4	セメントグラウト 膨張率 %	鋼製シース管の有無 *5	コンクリート圧縮強度 N/mm²	せん断補強筋	主筋	幅止め筋
1	NC3-40-SS-25	230 × 420	1522	エポキシ被膜無し PC鋼より線(NC)	12.7	98.7	3	1642	2.14	0.25Py/本	78	2.28	0.0	○ (SS)	92	D6@75 SD295A	4-D10 SD295A	D6@300 SD295A
2	NC3-40-SS-50									0.50Py/本	45	—	0.0		94			
3	EC3-40-SS-25			エポキシ被膜済み PC鋼より線 ECストランド(EC)						0.25Py/本	78	2.28	0.0		96			
4	EC3-40-SS-50									0.50Py/本	45	—	0.0		98			
5	EC1-90-SS-25						1	1631	2.12	0.25Py/本	92	2.27	0.0		82			
6	EC3-90-SS-25						3				92	2.27	0.0		82			
7	EC5-90-SS-25						5	1692	2.16		92	2.27	0.0		81			
8	EC5-40-SS-25										42	—	0.0		95			
9	EC5-20-SS-25										20	—	7.4		95			
10	EC10-90-SS-25						10				72	2.47	0.0		90			
11	EC10-40-SS-25										44	—	0.0		95			
12	EC1-90-NS-25						1	1631	2.12		92	2.27	0.0	× (NS)	82			
13	EC3-90-NS-25						3				92	2.27	0.0		82			
14	EC5-90-NS-25						5				92	2.27	0.0		81			
15	DB1-90-SS-00			異形PC鋼棒(DB)	26	548	1	1055	2.25	0.0	92	2.27	0.0	○(SS)	81			
16	DB1-90-NS-00										92	2.27	0.0	×(NS)	81			

*1, EC:Epoxy Coated strand(エポキシ防錆被膜済みPC鋼より線), NC:No Coated strand(エポキシ防錆被膜無しPC鋼より線), DB:PC Deformed Bar(異形PC鋼棒), *2, × 10⁵N/mm², *3, Py:規格降伏荷重(=156kN), *4, × 10⁴N/mm², —印は, 材料試験結果のバラツキが多かった試験を表す, *5, SS:Steel Sheath(鋼製シース管有り), NS:No Sheath(鋼製シース管無し)

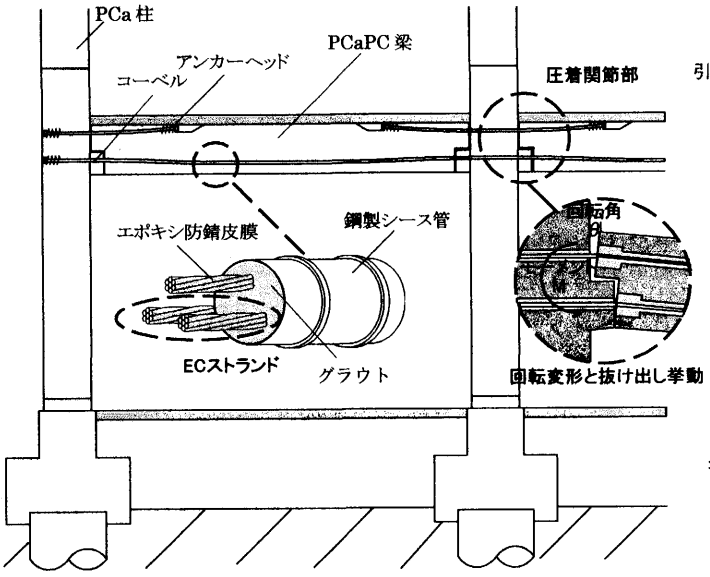


図1　PC圧着損傷制御架構

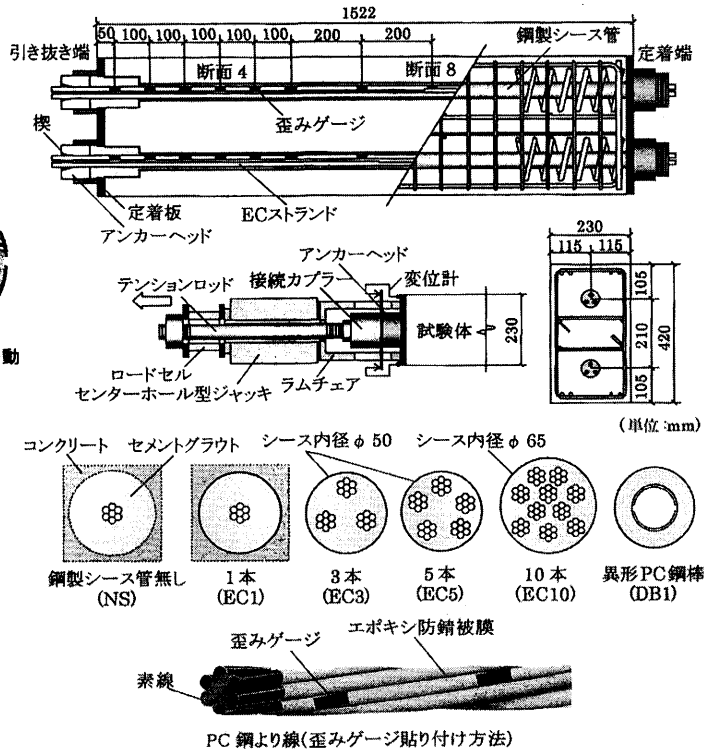


図2　試験体および載荷・計測方法

を変えて独立に，合計16試験を行った。PC鋼より線は全て7本より線(SWPR7B)の公称径12.7 φを使用し，コンクリート設計基準強度(Fc=90N/mm²)は全ての試験体で同一とした。

実験の変動要因は，①PC鋼材の種類(表面形状の差異：ECストランド(EC)，異形PC鋼棒(DB))，②初期導入プレストレス力P_{ini}の大きさ(0.25Py/本，0.50Py/本)，③PC鋼より線のエポキシ防錆被膜の有無(有り(EC)，無し(NC))，④鋼製シース管の有無(有り(SS)，無し(NS))，⑤セメントグラウトの圧縮強度($_G\sigma_B$=20, 40, 90N/mm²)，および⑥鋼製シース管内に配線されたECストランドの本数(1，3，5，10本)の6要因とした。⑥は，鋼製シース管内にECストランドが複数本配線された場合の付着周長の設定方法を検討することを目的とした。

ここで使用したエポキシ防錆被膜済みPC鋼より線(ECストランド)は，素線1本づつがエポキシ樹脂によりコーティングされており，素線7本で『1本』のより線を形成している。異形PC鋼棒(DB)は26mmのネジ節鋼棒であり，その初期プレストレス力は，特に表面の付着特性に影響しないと判断して導入していない(P_{ini}=0.0Py)。鋼製シース管はそれぞれの本数に応じ，1,3,5本タ

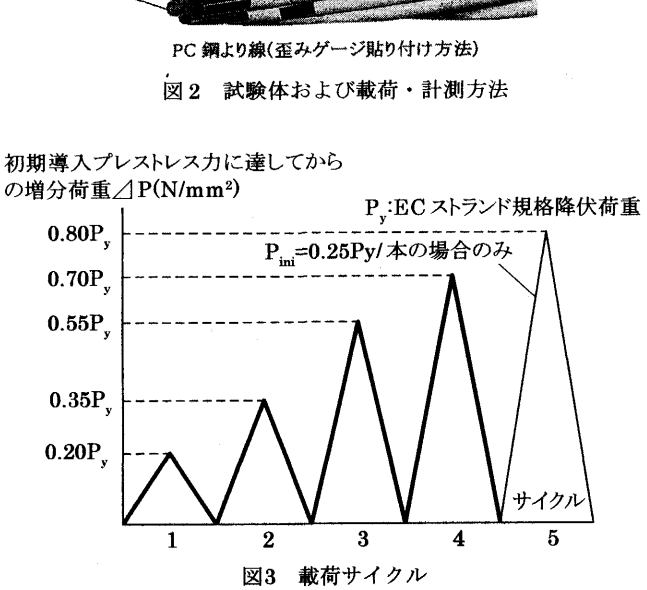


図3　載荷サイクル

NII-Electronic Library Service

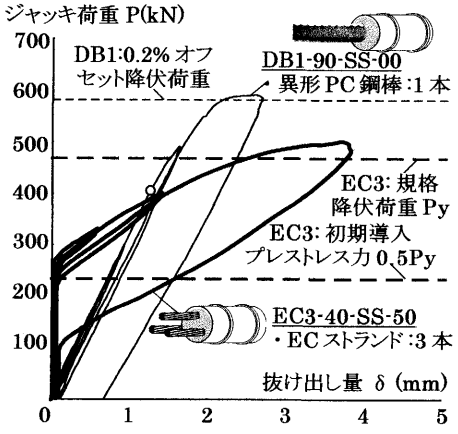


図4 P- δ関係
(ECストランドと異形PC鋼棒の比較)

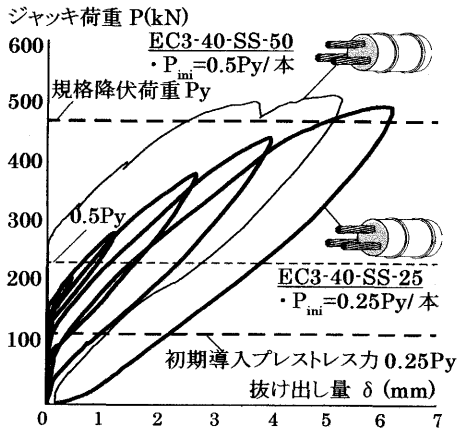


図5 P- δ関係
(初期導入プレストレス力の違いで比較)

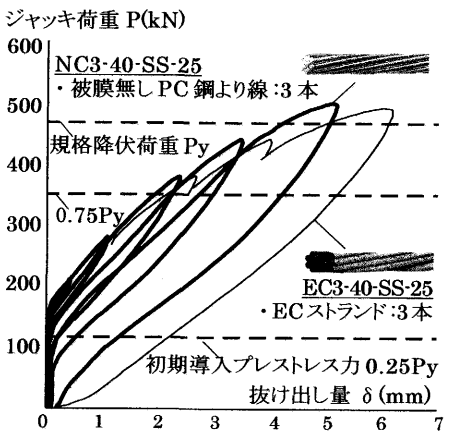


図6 P- δ関係
(エポキシ防錆皮膜の有無で比較)

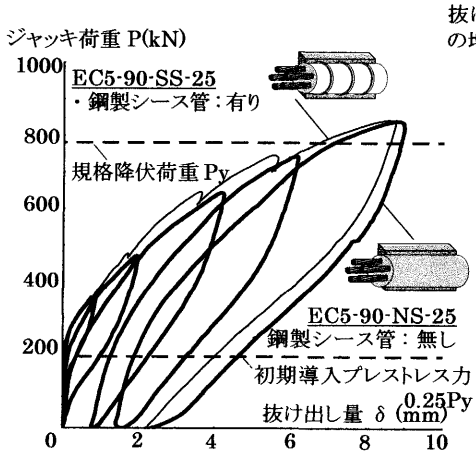


図7 P- δ関係
(鋼製シース管の有無で比較)

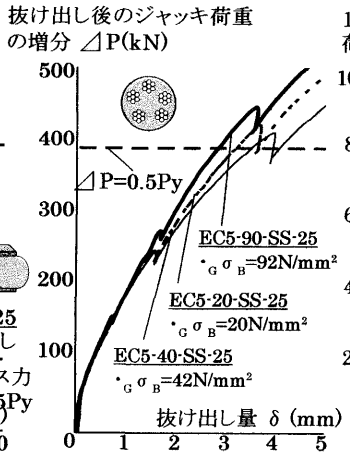
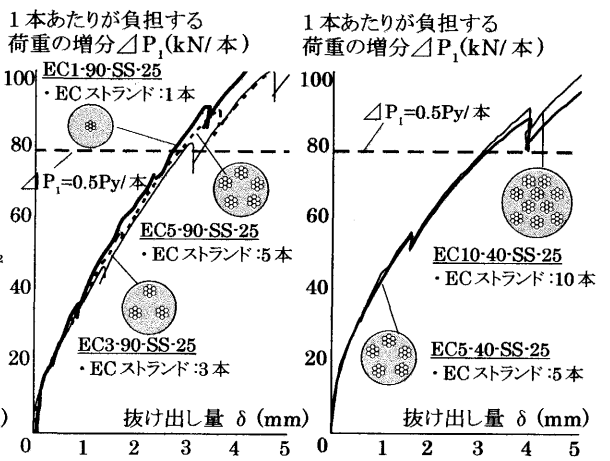


図8 ⊿P- δ関係
(セメントグラウト強度の違いで比較)



(a) Gσ B=90 N/mm² (b) Gσ B=40 N/mm²

図9 ⊿P1- δ関係 (本数の違いで比較)

イプでは内径50mm，10本タイプでは内径65mmを使用した。鋼製シース管の無い試験体(NS)ではコンクリート硬化後，らせん状の鋼製シース管を取り除き，セメントグラウトの充填を行った。使用したセメントグラウトの圧縮強度は、40，90N/mm²では膨張率が0.0%であったのに対し，20N/mm²では7.4%であった。

2.2 載荷方法

載荷は，図2中に示すとおり，引き抜き端アンカーヘッドにカプラーを介してテンションロッドを接続し，そのテンションロッドにセンターホール型油圧ジャッキを用いて引張力を与える形式とした。この形式では，ECストランドはアンカーヘッドを介して束ごと引き抜かれ，反力はラムチェアを介した自己反力型となる。また，異形PC鋼棒の試験体は，余長部にセンターホール型ジャッキを用いて引張力を与えており，反力はECストランドの場合と同様な自己反力型とした。図3に載荷サイクルを示す。図3に示すように，載荷は荷重制御による1方向(引張方向)漸増繰り返し引き抜き載荷とし，折り返し点荷重は，初期導入プレストレス力に達してからの荷重増分⊿Pが全ての試験で等しくなるよう計画した。

2.3 計測方法

ジャッキ荷重Pは、センターホール型ロードセルを用いて計測し，抜け出し量δは、アンカーヘッドと定着板の相対変位で計測した。また，ECストランドの歪み度εは，図2中に示すように加力端(定着板)から100mmまたは200mmの間隔で一本の素線を辿って複数本について計測を行った。その計測点の歪みゲージは，エポキシ防錆被膜を局所的に剥がし取り，素線の方向(PC鋼より線の軸に対して斜め方向)に貼り付けた(図2)。また，防水養生は面積が可能な限り小さい局所的なものにした。なお，表1に示す材料試験結果のヤング係数E_{exp}も同様の方法で計測した歪み度を用いて求めている。

3. 実験結果と考察

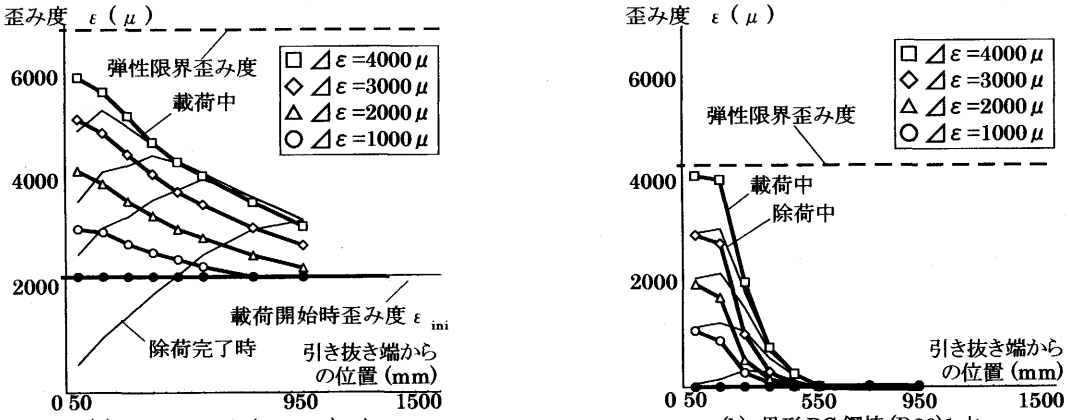
3.1 ジャッキ荷重P- 抜け出し量δ関係

各変動要因毎にジャッキ荷重P- 抜け出し量δ関係を示す。

3.1.1 ECストランドと異形PC鋼棒の比較(表面形状による付着特性の差異)

図4にECストランド(EC3-40-SS-50)と異形PC鋼棒(DB1-90-SS-00)のジャッキ荷重P- 抜け出し量δ関係を比較して示す。ECストランド(EC3)の履歴は，初期導入プレストレス力P_{ini}とほぼ同程度の荷重時にストランドの抜け出し(伸び出し)が生じる。このとき，アンカーヘッドは定着板に対し離間を開始している。そして，抜け出し後の剛性は荷重の増加とともに徐々に低下した。荷重除荷後の残留抜け出し量は，導入プレストレス力により，降伏に達した後もほとんど生じていない。なお，抜け出しが開始する荷重は，加力が繰り返されるほどP_{ini}よりも徐々に小

NII-Electronic Library Service



(a) ECストランド(12.7 φ)1本　　(b) 異形PC鋼棒(D26)1本

図10　歪み度分布

さくなる傾向であった。一方，異形PC鋼棒(DB1)の履歴は，P=400kN程度まではほぼ直線的となり，P≒400kNでシース管に沿って試験体表面にひび割れが生じることで剛性が低下した。そして，そのひび割れ幅は降伏荷重付近で多少広がりを示した。表面が滑らかなECストランドと表面の凹凸の大きい異形PC鋼棒を比較すると，ECストランドは，抜け出し発生以降の剛性が小さい，つまり抜け出し量が大きく，かつ，グラウトやコンクリートを割り裂かない特徴的な付着特性となっている。

3.1.2 初期導入プレストレス力による比較

図5に初期導入プレストレス力P_{ini}が0.25Py/本(EC3-40-SS-25)と0.5Py/本(EC3-40-SS-50)のP-δ関係を比較して示す。ここでは，ECストランド3本タイプについて示しており，0.5Py(EC3-40-SS-50)の試験体は包絡線のみを示している。0.25Py/本と0.5Py/本の試験体をそれぞれ比較すると，抜け出し(伸び出し)を開始する荷重は0.25Pyと0.5Pyのそれぞれに対応する値であり，抜け出し後のP-δ関係は，降伏域に達するまで非常に近似した性状であることが認められる。したがって，抜け出し後から降伏域に達するまで，初期導入プレストレス力が付着性状に与える影響は小さいといえる。よって，降伏域までの付着特性について，より広い領域で観察するため，試験体に導入する初期プレストレス力はP_{ini}＝0.25Py/本を基本とした。

3.1.3 エポキシ防錆被膜の有無による比較

図6にエポキシ防錆被膜有り(EC3-40-SS-25)と無し(NC3-40-SS-25)のP-δ関係を比較して示す。ここでは，PC鋼より線3本タイプについて表している。エポキシ被膜有りのECストランド試験体(EC3)の抜け出し量δは，荷重が大きくなるにつれて，被膜無しの試験体(NC3)よりも若干大きくなる傾向が見られるが，両者のP-δ関係はほぼ同様の性状となっている。本工法では初期導入プレストレス力を0.5Pyとしているので，主として0.25Py(抜け出し発生荷重)から0.75Py(抜け出し後のジャッキ荷重の増分⊿P=0.5Py/本)の間について着目して比較すると，P=0.25Pyの抜け出し発生時において，EC3とNC3の両者に差異はほとんど無く，P=0.75Py時において，抜け出し量は，EC3がδ=2.15mm，NC3がδ=1.95mmとなっており，EC3が約10%大きい程度である。よって，この範囲において，エポキシ防錆被膜がP-δ関係に与える影響は小さいといえる。

3.1.4 鋼製シース管の有無による比較

図7にECストランド5本タイプの鋼製シース管有り(EC5-90-SS-25)と無し(EC5-90-NS-25)のP-δ関係を比較して示す。P-δ関係において，鋼製シース管有り(SS)，無し(NS)の差は小さいといえる。また，鋼製シース管無しの試験体においても，試験体表面にひび割れの発生は特に観察されていない。よって，セメントグラウトの圧縮強度が${}_G\sigma_B$≒90N/mm²と若干高い場合ではあるが，より線が5本と本数の多い条件でも鋼製シース管の有無がP-δ関係に与える影響は小さいといえる。

3.1.5 セメントグラウトの圧縮強度による比較

図8にセメントグラウトの圧縮強度を変動要因とした，⊿P(抜け出し後ジャッキ荷重増分)-δ(抜け出し量)関係包絡線を比較して示す。抜け出し後ジャッキ荷重増分⊿Pは，初期導入プレストレス力P_{ini}を超えてからの荷重の増分であり，図中には，セメントグラウトの圧縮強度${}_G\sigma_B$=20N/mm²(EC5-20-SS-25)，42N/mm²(EC5-40-SS-25)，92N/mm²(EC5-90-SS-25)のECストランド5本タイプについて示している。セメントグラウトの圧縮強度が${}_G\sigma_B$=92N/mm²と高い場合，同一荷重レベルでの抜け出し量δは，${}_G\sigma_B$=20,42N/mm²に比べて若干小さく，その一方で，${}_G\sigma_B$=20N/mm²と圧縮強度が低い場合では，抜け出し量δは${}_G\sigma_B$=42N/mm²よりも若干小さい。この様に，${}_G\sigma_B$の違いによる若干の差異が見られたものの，⊿P=0.5Pyに達するまでは⊿P-δ関係はほぼ同様の性状であるといえる。

3.1.6 ストランド本数による比較

図9に⊿P(ストランド1本が抜け出し後に負担するジャッキ荷重増分)-δ関係包絡線を示す。図9(a)は，${}_G\sigma_B$≒90N/mm²におけるPC鋼より線の本数nが1本(EC1-90-SS-25)，3本(EC3-90-SS-25)，5本(EC5-90-SS-25)の試験体を比較した図であり，図9(b)は，${}_G\sigma_B$≒40N/mm²における5，10本タイプの試験体を同様に比較した図である。ここで，⊿P_1は⊿Pを本数nで除した値である。⊿P_1-δ関係は，ストランド本数に関わらずほぼ同様の性状を示しており，本数による差異は明確に認められない。

3.2 歪み度分布

図10(a)にECストランド(EC1-90-NS-25)の歪み度分布を示す。図中の太線は載荷中の歪み度推移を示し，細線は除荷中の推移を示している。なお，実験では図10(a)に示したよりも大きい荷重レベルまで載荷しているが，ここでは材料試験で得られた弾性範囲内の歪み度ま

NII-Electronic Library Service

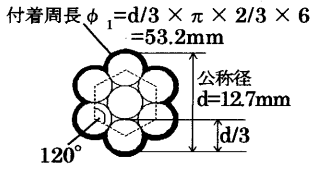


図11　1本タイプ付着周長 ϕ_1

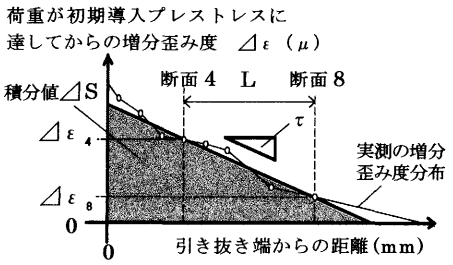


図12　軸方向の増分歪み度積分方法

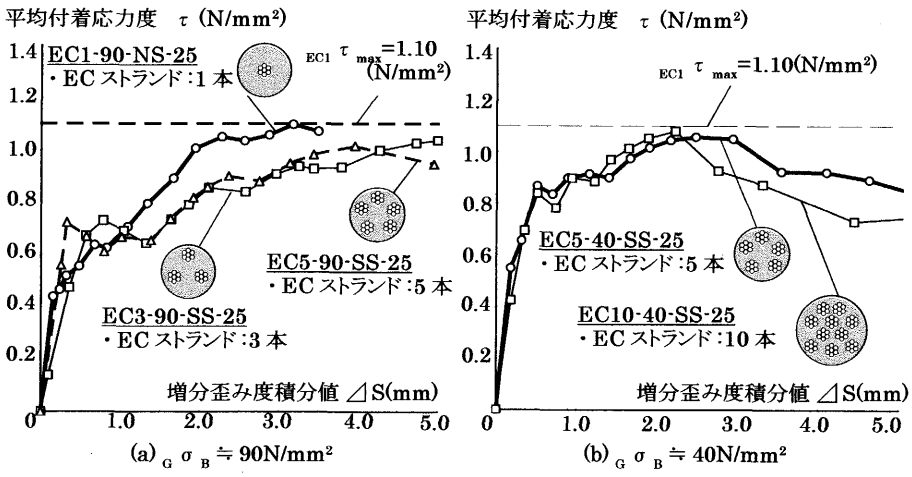


図13　平均付着応力度τ－増分歪み度分布積分値⊿S関係

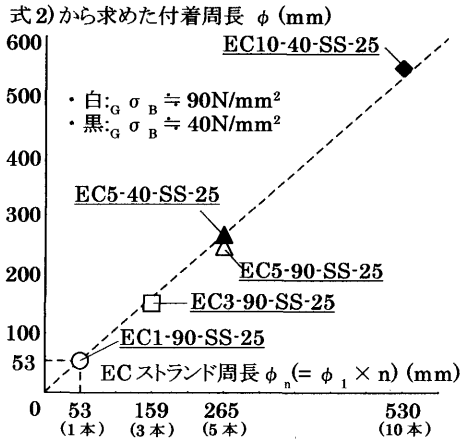


図14　付着周長 φ

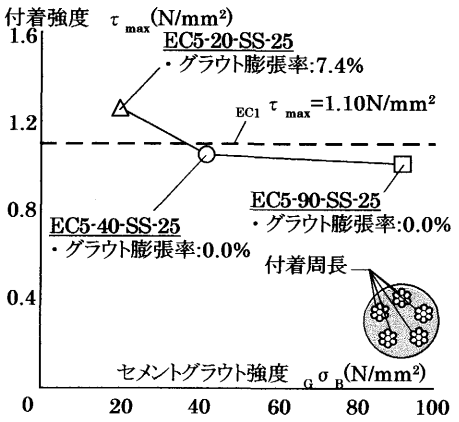


図15　グラウト強度 $_G\sigma_B$－付着強度 τ_{max} 関係

でを示している。また，図中の載荷開始時歪み度 ε_{ini} は，導入プレストレス力による歪み度を意味しており，ここでは実験直前における各測定点の歪み度の平均値とした。

図に見られるように，ECストランドの歪み度分布は，荷重が初期導入プレストレス力（抜け出し発生荷重）に達すると引き抜き端の歪み度が徐々に増加する性状が見られ，歪み度が増加している区間，つまり付着区間全域にかけてほぼ直線的な分布である。その直線的な勾配は，荷重の増加とともに徐々に大きくなり，引き抜き端の歪み度 ε が4000 μ（増分歪み度⊿ε = 2000 μ）を超えた荷重レベルから付着区間が長くなっていることが認められる。そして，⊿ε がほぼ4000 μ（⊿P ≒ 0.5Py に相当）に達する荷重レベルにおいても，引き抜き端近傍での歪み度分布の勾配はほとんど変化せず，付着劣化がほとんど生じていないと推測される。また，除荷中は引き抜き端から徐々に歪み度が減少しており，載荷中と大きさがほぼ同程度で逆向きの付着応力度が作用していることがわかる。除荷完了時には引き抜き端の歪み度が載荷開始時歪み度 ε_{ini} よりも小さくなり，引き抜き端近傍ではプレストレス力が減少している兆候を示している。

図10(b)に異形PC鋼棒(DB1-90-NS-00)の歪み度分布を示す。異形PC鋼棒の試験体において，歪み度（付着力）が生じている区間は400mmから500mm程度であり，荷重の増加とともにその歪み度分布の勾配は徐々に大きくなる傾向を示している。そして，引き抜き端増分歪み度⊿ε が2000 μ を超えた荷重レベルでは，引き抜き端近傍における歪み度分布の勾配は，極端に小さくなっており，付着劣化が生じていることが認められる。

上記の図10(a), (b)に示した様に，ECストランドの場合，異形PC鋼棒と比べて小さな付着応力度が，付着区間全域にかけてほぼ一様に生じる性状となっている。この様に，ECストランドの試験体では，①異形PC鋼棒で観察されたひび割れが特に観察されていないこと，②発生している平均付着応力度が小さいこと，③引き抜き端近傍の歪み度分布の勾配には変化が少ないこと（平均付着応力度の減少が見られないこと），④載荷時と除荷時に同様な平均付着応力度が生じていること，などから，セメントグラウトとの応力伝達メカニズムは異形PC鋼棒のくさび的なかみ合い作用ではなく，摩擦的な挙動が支配的であると推測される。この摩擦的な挙動によって，ECストランドが抜け出す（伸び出す）際にはセメントグラウトを大きく傷めない，『弾性的な付着特性』が形成されると考えられる。

3.3 ECストランドの付着周長φと付着強度 τ_{max}

ECストランドの『弾性的な付着特性』を評価するに必要な付着強度（最大平均付着応力度）τ_{max} とその計算に用いる付着周長φについて考察する。ここでは，後述するP－δ関係の評価法との関連より，各試験体の平均付着応力度τと試験区間内の増分歪み度積分値⊿Sに着目して検討を進める。⊿Sは，⊿ε（荷重が初期導入プレストレス力に達してからのストランドの

NII-Electronic Library Service

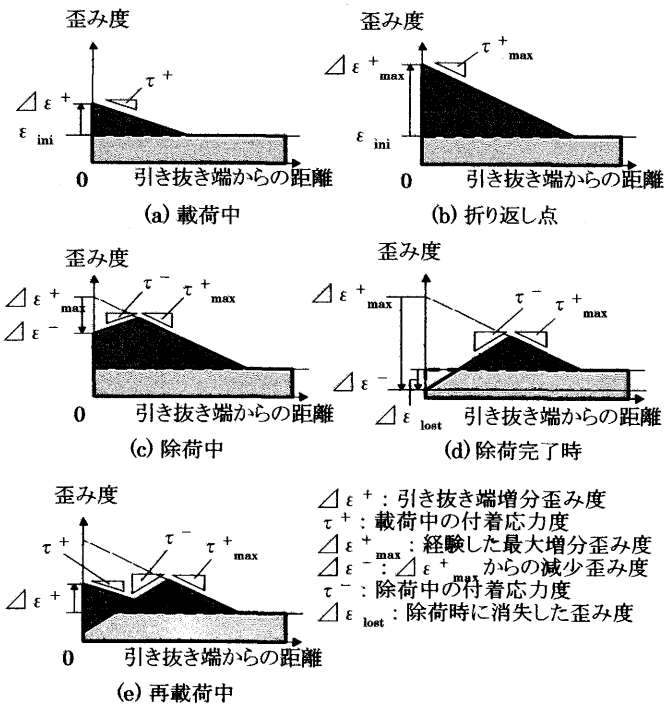


図16　歪み度分布モデル

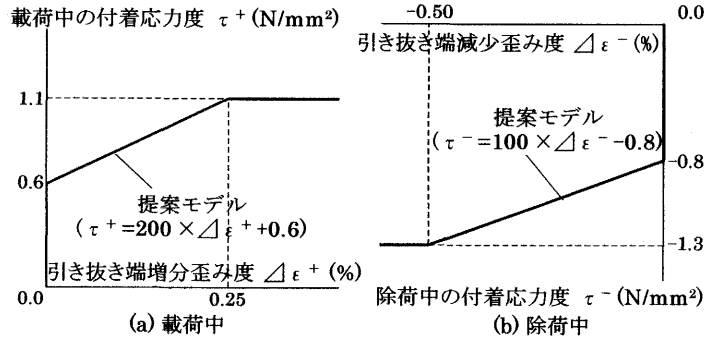


図17 付着応力度τ−引き抜き端増分歪み度Δε関係モデル

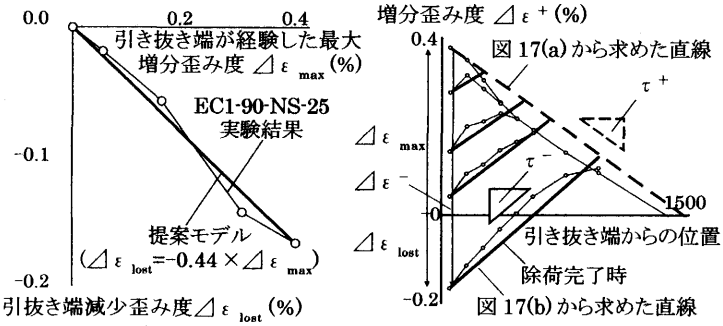


図18 Δε max−Δε lost 関係モデル

図19　提案モデルによる歪み度分布と実験結果の歪み度分布

増分歪み度）を試験区間の全長で積分した値であり，引き抜き端における抜け出し（伸び出し）量δに相当する。

図11にECストランド1本タイプの付着周長ϕ_1の算出方法を示す。ϕ_1はECストランドがセメントグラウトと接する表面周長全体とする。ここでは仮に，3，5，10本タイプの付着周長については，群の効果について考慮せず，便宜的にϕ_1に本数nを乗じた値ϕ_n(=n×ϕ_1)と考える。また，平均付着応力度τは，歪み度のバラツキが少ない断面4から8にかけての区間（図2参照）の平均とし，式1）から算出する。

$$\tau=(\Delta\varepsilon_4-\Delta\varepsilon_8)\times E_{exp}\times a_p\times n/(L\times\phi_n)\cdots 1)$$

[ここに，$\Delta\varepsilon_4$, $\Delta\varepsilon_8$: 断面4,8（図2参照）におけるECストランドの増分歪み度，E_{exp}: 材料試験から得られたヤング係数（表1参照），a_p:PC鋼より線1本（7本より）の公称断面積，n: 本数，L: 断面4から8までの長さ（図2参照），ϕ_n: 付着周長(=n×ϕ_1)]

図12に増分歪み度の積分方法を示す。積分値⊿Sは，歪み度分布を断面4と8の歪み度の2点を通る直線分布と仮定し，その積分値とする（図12の色付き部）。なお，どの荷重段階においても，歪み度積分値⊿Sは，抜け出し量δの90%程度の値となっており，概ね一致することを確認している。

図13(a)に，EC1-90-NS-25, EC3-90-SS-25, EC5-90-SS-25のτ−⊿S関係を，図13(b)に，EC5-40-SS-25, EC10-40-SS-25のτ−⊿S関係の算出結果を比較して示す。τ−⊿S関係は，ストランド本数およびセメントグラウトの圧縮強度に関わらず，全ての試験で同様の性状となっている。平均付着応力度τは，載荷直後0.6N/mm²程度発生し，徐々に増加した後に⊿S≒2.5mm前後で付着強度τ_{max}＝1.10N/mm²に達している。付着強度τ_{max}に達した後は，ほぼその付着応力度を維持していることが見受けられる。

次に，複数本タイプの付着周長φについて考察する。本数nによらずτ_{max}が1本タイプの場合に等しいと仮定すると，φは式2）から計算される。

$$\phi=(\Delta\varepsilon_4'-\Delta\varepsilon_8')\times E_{exp}\times a_p\times n/(L\times {}_{EC1}\tau_{max})\cdots 2)$$

[ここに，$\Delta\varepsilon_4'$, $\Delta\varepsilon_8'$: 最大付着応力度時の断面4,8におけるECストランドの増分歪み度，${}_{EC1}\tau_{max}$: 1本タイプの付着強度(=1.10N/mm²)（図13(a)参照）]

図14に式2）から求めたφとϕ_n（一本の周長ϕ_1に本数nを乗じた値）の比較を示す。図に見られるように，両者はほぼ対応する結果となっており，複数本タイプの付着周長φはϕ_1(=53.2mm)に本数nを乗じて評価できるといえる。

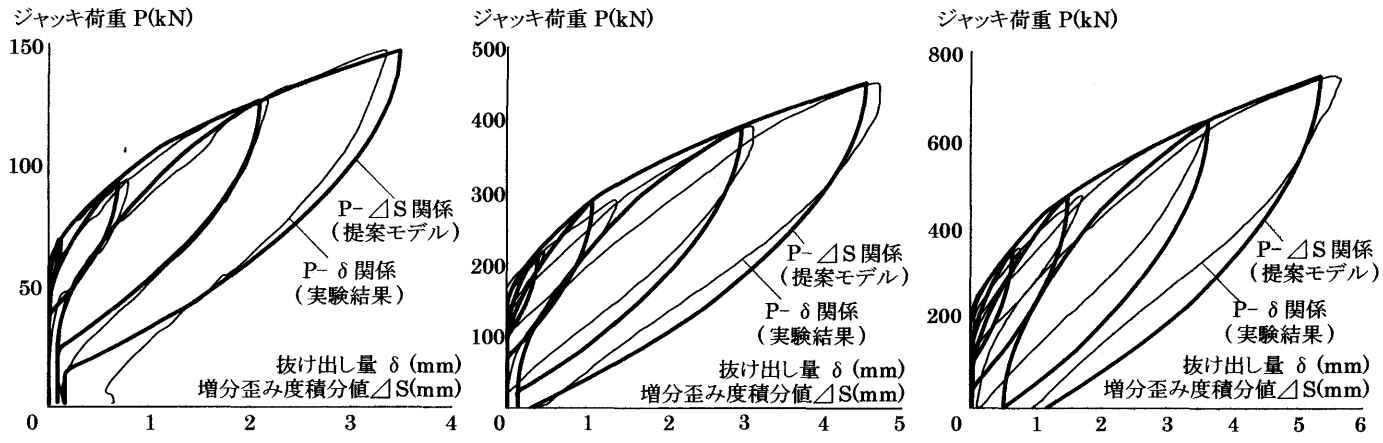
次に，セメントグラウトの圧縮強度${}_G\sigma_B$と付着強度τ_{max}の関係について検討する。図15にEC5-20-SS-25(20N/mm²), EC5-40-SS-25(40N/mm²), EC5-90-SS-25(90N/mm²)の${}_G\sigma_B$−τ_{max}関係を比較して示す。ここではECストランド5本タイプについて示しており，付着周長はϕ_5(=ϕ_1×5本）を用いている。付着強度τ_{max}は，セメントグラウトの圧縮強度に関わらずほぼ1.10N/mm²程度となっている。なお，${}_G\sigma_B$=20N/mm²の場合で1.26N/mm²と若干高くなっているが，${}_G\sigma_B$=20N/mm²のグラウト膨張率は7.4%であったことから，この事項が影響していると思われる[4),7)]。

4. 荷重P−抜け出し量δ関係の推定

4.1 提案モデル

部材端の引張力とストランド抜け出し（伸び出し）量を想定したP−δ関係を予測する手法について検討する。その手法は，荷重（引張力）Pに対する抜け出し（伸び出し）量δ，つまり，増分歪み度積分値⊿Sを求める方法であり，実験結果から得られた歪み度分布および平均付着応力度をモデル化することで求める。なお，提案モデルの適用可能範囲は，本論文の実験範囲で

NII-Electronic Library Service



(a) ECストランド1本タイプ　(b) ECストランド3本タイプ　(c) ECストランド5本タイプ

図20 P-⊿S関係とP-δ関係

ストランドの公称径が12.7 φ，本数が1～10本，セメントグラウト強度が20～90N/mm²とする。

図16に歪み度分布モデルを示す。歪み度分布は，3.2節に示したように，①付着区間が直線的となる(a)載荷中および(b)折り返し点，②載荷中と逆方向の付着応力度が生じる(c)除荷中および(d)除荷完了時，③(d)に(a)の状態が足し合わされた(e)再載荷中，の各状態についてのモデル化を行った。

図17に$\tau - \Delta\varepsilon$関係モデルを，図18に$\Delta\varepsilon_{max}$(引き抜き端が経験した最大増分歪み度)－$\Delta\varepsilon_{lost}$(除荷完了時にε_{ini}から減少した引き抜き端での歪み度)関係モデルを示す。P－δ関係の算定方法を，以下に示す。

①載荷時：荷重Pに対する引き抜き端増分歪み度$\Delta\varepsilon^{+}$から図17(a)より載荷中の付着応力度τ^{+}を求める。歪み度分布を直線分布とし，τ^{+}とϕ_n(=n×ϕ_1)を用いて必要付着長さを求め，歪み度分布を決定する(図16(a),(b))。

②除荷時：荷重減少に伴う引き抜き端歪み度の減少量$\Delta\varepsilon^{-}$を用いて，図17(b)より除荷中の付着応力度τ^{-}を求め，歪み度分布を決定する(図16(c))。また，除荷終了時は，図18より$\Delta\varepsilon_{lost}$を求め，除荷完了時の歪み度分布を決定する(図16(d))。

③再載荷：(d)に(a)の状態を足し合わせて求める。

なお，図17，18中の諸値は，図13に示した値を用いて，実験結果より決定している。図16，17，18のモデルから得られる歪み度分布を実験結果と比較して図19に示す。

4.2 提案モデルの検証

図20に提案モデルにより算出したP-⊿S関係と実験結果のP-δ関係を比較して示す。図20(a)にはEC1-90-SS-25，図20(b)はEC3-90-SS-25，図20(c)にEC5-90-SS-25についてそれぞれ示している。図20(a)，(b)，(c)ともに，計算値は実験値と良く対応した結果となっている。本論文の実験範囲内ではあるが，提案したモデルは，簡便に歪み度分布と平均付着応力度を仮定でき，P－δ関係を予測するのに有用な手法であるといえる。

5. 結論

ECストランドとセメントグラウトとの付着実験を実施し，PC鋼より線の公称径が12.7 φ，本数が1～10本，セメントグラウトの圧縮強度が20～90N/mm²の条件において，以下に示す知見を得た。

1) ECストランドは，異形PC鋼棒と比べて小さな付着応力度が必要付着長さ全域にかけて一様に生じる。除荷中は載荷中と大きさがほぼ同程度で逆向きの付着応力度が生じる。

2) 抜け出し発生後の荷重増分が0.5Py/本に達するまで，エポキシ防錆被膜が引張力P－抜け出し量δ関係に与える影響は小さい。

3) 初期導入緊張力の違いが，抜け出し後降伏域に達するまでのP－δ関係に与える影響は小さい。

4) セメントグラウトの圧縮強度が90N/mm²の条件下において，鋼製シース管がP－δ関係に与える影響は小さい。

5) 鋼製シース管内に複数本のECストランドが配線された場合の付着周長は，1本あたりの付着周長に本数を乗じて設定できる。

6) 本論文の提案モデルは，簡便に平均付着応力度と歪み度分布を仮定でき，引張力P－抜け出し量δ関係の予測に有用である。

【付記】

本研究は，KTB協会のもとに設立されたKTB圧着技術研究所（所長：中野清司）の委員会のメンバー：日本大学 秋山宏教授，千葉大学 小谷俊介教授，東北大学 山田大彦教授，独立行政法人建築研究所 山之内泰之理事長，東京建築研究所 町田重美代表取締役社長，東京理科大学 松崎育弘教授，東京工業大学 和田章教授，KTB協会 田邉恵三技師長のもとで行われているものの一部である。

【参考文献】

1) 中野清司ほか：PC圧着関節工法による損失制御設計(その1～4)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，C-Ⅱ，pp.893-900，2001.9

2) 中野清司，田邉恵三，松崎育弘，和田章，坂田弘安，久保山寛之，杉山智昭，池澤誠：PC圧着関節工法による損失制御架構の力学的性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文報告集，第576号，pp.125-132，2004.2

3) 坂田弘安，久保山寛之，杉山智昭，池澤誠，和田章，松崎育弘，町田重美，中野清司：PC圧着関節を用いた損傷制御架構の柱梁接合部せん断性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文報告集，第588号，pp.141-148,2005.2

4) H. Muguruma, K. Takada, M. Tanno, I. Minami, K. Uchida: INNOVATIVE CORROSION PROTECTION PRESTRESSING STRAND FOR POST-TENSIONING, FIP SYMPOSIUM ON POST TENSHONED CONCRETE STRUCTURES 1996, pp687-694

5) 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(中国)，C-Ⅱ，pp.1083-1084，1999.9

6) 足立将人，高津比呂人，西山峰広：PC鋼より線とグラウト材間の付着特性のモデル化（その1～その4），日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，C-Ⅱ，pp.1009-12，2000.9

7) 中島規道，三上浩，原田哲夫：膨張材を用いたマルチ定着法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17,No.2,pp.1213-1218,1995

(2005年6月10日原稿受理，2005年10月27日採用決定)

NII-Electronic Library Service