

(117) 樹脂防錆ストランドの付着性能改善に関する研究

フドウ建研(株)技術本部 正会員 ○南 伊三男
 同 東京本店 正会員 竹田 清二
 昭和プレハブ(株)管理部 正会員 内田 國彦
 京都大学 名誉教授 正会員 六車 熙

1. はじめに

コンクリート系構造物の耐久性劣化は鉄筋またはPC鋼材の発錆・腐食に負うところが多い。プレストレストコンクリート構造物におけるPC鋼材は、普通鉄筋と比較して特に錆びやすい性質を持っていることから、PC鋼材の防錆対策はきわめて重要である。米国では1983年に表面エポキシ被覆PCストランドが開発されたが[1]、これに先立ち開発されていたエポキシ被覆鉄筋が、建設後5年も経過しないフロリダキースを繋ぐ海上橋において腐食しはじめるという事故がおこってその防錆信頼性に疑問が投げかけられる事態となり[2~4]、その影響でエポキシ被覆PCストランドの普及もはかばかしくなかった。今日の米国におけるエポキシ被覆PCストランドの被膜厚さは0.66~0.92mmであり[5]、このままでは従来慣用のくさび定着装置をそのまま使用できない不便さがある。わが国では1986年に、六車等により全くピンホールの発生しないポリエチレン系樹脂を用い、被膜厚さ0.4~0.6mmの表面防錆PCストランドが開発され[6]、また1992年には、特殊防錆樹脂を加圧注入する事によってPCストランドのよりを戻すことなく内部まで浸透させ、表面と内部空隙を同時に被覆、充填した世界で初めての完全防錆ストランドが開発された[7]。この完全防錆加工法は単に7本よりストランドばかりではなく、19本よりストランドにも適用できるものであり、かつ、裸ストランドに慣用のくさび定着装置がそのまま使用できるのが特徴である。

しかしながら、樹脂系の被覆材は表面の滑らかさ故に総じて付着性能が劣る。このような防錆ストランドをポストテンショングラウト部材に用いる場合、付着性能の改善は必要不可欠である。本研究は、開発された防錆ストランドの付着性能改善を目的として防錆被膜の表面に数種の溝加工を施した付着改良型完全防錆ストランドにつき、引抜き試験及びポストテンショングラウト梁の曲げ試験を行って改良効果を検討したものである。

2. 表面溝加工防錆ストランド

本研究で用いた防錆ストランドは特殊防錆樹脂をストランドのよりを戻すことなく加圧注入してストランド内部空隙を完全充填すると同時に外表面を完全被覆防錆したものである。本研究ではこのストランドのことを完全防錆ストランドと呼称する。この完全防錆ストランドは、表面被覆の標準厚さが0.4mmで、使用樹脂の特性からピンホールは全く発生せず、また防錆樹脂はストランドの破断に至るまで、その伸びに追随する優れた性質を持つ理想的な防錆ストランドである。また、従来慣用の定着用くさびがそのまま使用できるという利点がある。本研究で使用した付着改良型ストランドは完全防錆加工後のストランドに高さ0.2mmの溝加工を行ったもので、溝加工後の溝底から測った表面防錆層の厚さは標準厚さ0.4mmである。試験には溝付方向の角度で3種類の溝加工を施したφ15.2mm 7本より完全防錆ストランドを使用した。



図-1 ストランドの形状

また比較のために裸ストランド及び溝加工の無い完全防錆ストランドについても実験を行った。図-1はこれを示したもので、BSは裸ストランド、CSは溝加工の無い完全防錆ストランド、CBa、CBb、CBcは溝加工を施した完全防錆ストランドで、CBaはストランド外周素線のより方向に、CBbはストランド材軸方向に対してより方向と対称の角度方向に、CBcはストランドのより方向とほぼ直角方向にそれぞれ溝加工したものである。溝加工の個数はCBa、CBb、CBcを通じて、ストランド外周に対し60山とした。なお、図-2には使用したφ15.2mm7本よりストランドの応力-ひずみ曲線を示す。防錆加工後も図-2と同様の応力-ひずみ曲線を示すことを確認している。

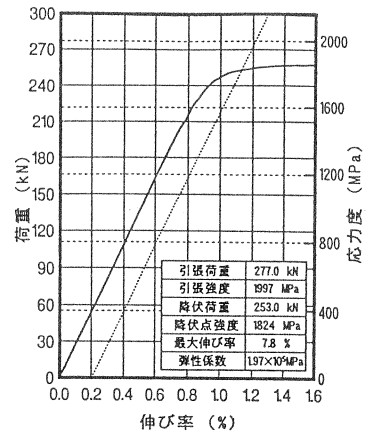


図-2 応力-歪曲線 (φ15.2mm7本よりPCストランド)

3. 引抜試験

梁の曲げ荷重実験に先立ち、防錆ストランドの表面溝加工によって付着性能が改善されるかどうかを確認するために、φ15.2mm完全防錆ストランドの引抜試験を行った。用いたストランドは、図-1に示すうちのBS、CS、CBa、CBbである。供試体は図-3に示すように、断面150×150mm、長さ400mmのコンクリート角柱の中心軸上に各ストランドを配置したものである。同図には試験のセットアップも同時に示してある。各供試体は打設後試験直前まで湿潤養生を行い、引抜試験は材令12日で行った。試験時における圧縮強度は平均52MPaであった。引抜はコンクリート角柱の一端からセンターホールジャッキによりストランドを引抜く方法により行った。荷重階は2kN~4kNとし、各荷重階に対して緊張端におけるストランドの引抜きすべり量及び自由端における引込みすべり量を変位計により測定した。

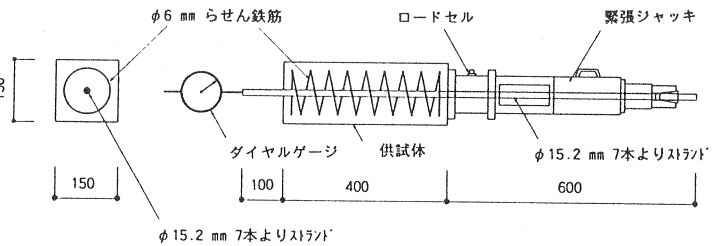


図-3 引抜試験装置概要

表-1 引抜試験結果

試験体	使用ストランド種類	引込み量 1mm 時		最大荷重時	
		引抜荷重 P(kN)	付着応力 τ (MPa)	引抜荷重 P(kN)	付着応力 τ (MPa)
P-BS	裸ストランド	82.6	3.24	155.3	6.09
P-CS	完全防錆ストランド	11.2	0.44	31.4	1.24
P-CBa	完全防錆ストランド 溝加工タイプ A	32.5	1.27	53.3	2.09
P-CBb	完全防錆ストランド 溝加工タイプ B	—*	—*	72.6	2.84

* P-CBb は引込み量が 1mm に達する前に最大荷重に達し、抜出しが起り始めた

試験結果を表-1に、荷重-自由端引込み量関係を図-4に示す。溝加工を施していない完全防錆ストランドを用いた供試体P-CSは最も低い付着力を示した。溝加工を施したストランドはこれに比べ付着力の改善が見られた。特に供試体P-CBbは図-4に示すように裸ストランドの供試体P-BSと全く同様の荷重-引込み量関係となっているが、自由端引込み量が1mmに達する直前にコンクリート柱体全長にわたる滑動が起った。これはストランドCBbの溝角度が、ストランドのより方向に対し逆方向であるために部分的な付着力集中

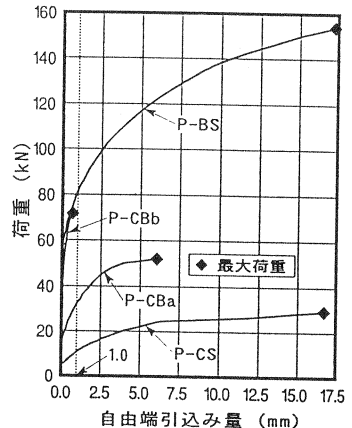


図-4 荷重-自由端引込み量関係

を招き、進行性破壊が起ったものと思われる。しかしながら表面樹脂被膜の剥落、損傷等は見受けられなかった。これらの引抜試験結果から、溝加工による付着改良型完全防錆ストランドは、溝加工の角度等を修正することにより、裸ストランドと同等または、これに近い付着性能に改善でき、グラウト施工によるポストテンション部材に適用しても、裸ストランドと同等の部材力学的性質が得られるものと判断した。

4. ポストテンショングラウトPC梁の曲げ載荷試験

4.1 供試梁の概要

引抜試験により良好な結果が得られた付着改良型完全防錆ストランドのポストテンション部材への適用性を確認するために、図-5に示す全長 3.3 m、120×300 mmの長方形断面を持ち、φ 15.2 mm 7本よりストランド1本を偏心距離 50 mmの位置に直線配置したポストテンションPC梁の曲げ載荷試験を行った。シー스는内径 32 mmの薄鉄板製スパイラルシースを使用した。ストランドは図-1に示す5種類を使用した。各ストランドに対し3体、合計15体の供試梁を用いた。供試梁の一覧を表-2に示す。コンクリートの材料特性は表-3の通りである。コンクリートの圧縮強度は試験時で 67.8 MPaであった。供試梁はコンクリート打設後湿潤養生を行い、材令 10日で 176.5 kN (18.0 tf)のプレストレスを導入、直ちにシース内にセメントグラウトを注入した。各シリーズにおいて、グラウト強度または膨張剤の有無が各々のストランドの付着性能に与える影響をみるために、表-4に示す3種類のグラウトを用い、5種類のストランドそれぞれに対する3本の供試梁につき、これら3種類のグラウトを施工した。

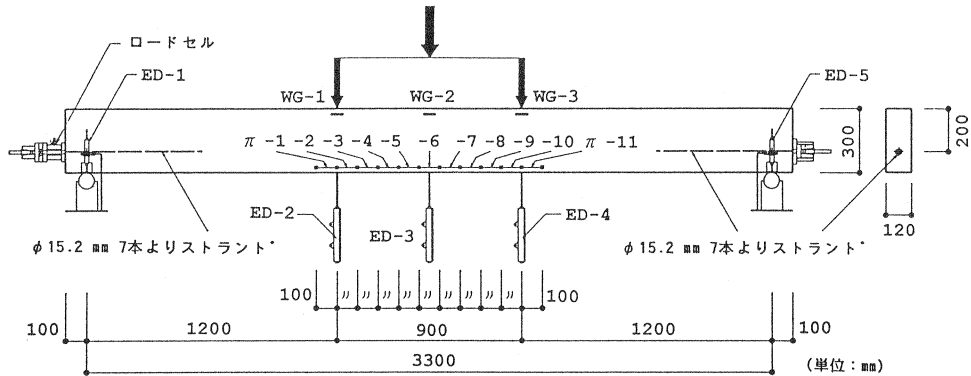


図-5 梁曲げ載荷試験装置概要

ED: 変位計
π: πゲージ (検長100 mm)
WG: ワイヤーストレインゲージ

表-2 供試梁一覧

シリーズ	供試梁 No.	使用ストランド種類	グラウト種類
BS	BS-1	裸ストランド	LE
	BS-2		HE
	BS-3		H
CS	CS-1	完全防錆ストランド	LE
	CS-2		HE
	CS-3		H
CBa	CBa-1	完全防錆ストランド 溝加工タイプ A (ストランド'同方向型)	LE
	CBa-2		HE
	CBa-3		H
CBb	CBb-1	完全防錆ストランド 溝加工タイプ B (ストランド'逆方向型)	LE
	CBb-2		HE
	CBb-3		H
CBC	CBC-1	完全防錆ストランド 溝加工タイプ C (ストランド'逆方向型, 角度大)	LE
	CBC-2		HE
	CBC-3		H

表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 fc'(MPa)	引張強度 fct'(MPa)	曲げ引張強度 ftb'(MPa)	ヤング係数 Ec(MPa)
67.8	4.0	6.7	4.21×10 ⁴

表-4 グラウトの種類一覧

種類 記号	対応する 梁 No.	W/C	混和剤			試験時 圧縮強度 (MPa)
			特性	呼び膨張率 (24時間)	使用量 (C×%)	
LE	1	0.46	高流動性 膨張剤含	5.3 %	1.0	22.1
HE	2	0.35	高流動性 膨張剤含	4.0 %	1.2	48.0
H	3	0.45	高流動性	-0.4 %	1.0	44.2

4.2 荷重及び測定方法

各供試梁は、材令4週で図-5に示す荷重条件のもとで漸増曲げ荷重実験を行った。各荷重階における中央たわみ、及び、中央曲げスパン内の相対たわみをそれぞれ高感度変位計を用いて測定した。また中央曲げスパン内の下縁に検長100mmの π ゲージを連続して取付け、曲げスパン内に発生する曲げひび割れ幅を測定した。加えて歪ゲージを上縁3カ所の位置に貼付し、コンクリート圧縮縁歪を測定した。図-5にはこれら測定装置の配置もあわせて示してある。

荷重は容量1000kNのサーボコントロール型の試験機で行った。曲げひび割れ発生までは10kN、ひび割れ発生後は5kNの荷重階で行い、特に、曲げ破壊近傍では約0.2mmのたわみ増分制御により塑性変形の測定を行った。

4.3 試験結果と考察

試験結果より得られたひび割れ発生モーメントと曲げ破壊モーメントをそれぞれの計算値と併せて表-5に示す。また、曲げひび割れの発生した箇所の π ゲージの読みをそれぞれのひび割れ幅とし、荷重荷重に対してプロットした図のうち4供試梁(BS-1, CS-1, CBb-1, CBc-1)を代表として図-6に示す。同図の上部には各供試梁に発生した曲げひび割れも図示した。図-7は各シリーズのひび割れ性状の比較をより明快にするために、ひび割れ発生後の曲げモーメントの増分と図-6より求めた平均ひび割れ幅の関係を各グラウト種別ごとに示したものである。図-8には曲げモーメント-曲率関係を示す。なお表-5には、各試験体の平均のひび割れ間隔及びひび割れ発生後のモーメントの増分12.5kN・m時の平均ひび割れ幅の数値もまとめて示した。

曲げひび割れモーメントは各供試梁とも同様の値を示した。曲げ破壊モーメントに関しては、溝加工のない完全防錆ストランドを用いたCSシリーズの供試梁が計算値を下回ったが、溝加工を行ったストランドを使用したCBa、CBb、CBc各シリーズでは裸ストランドを使用したBSシリーズとほぼ同等の値を得た。CSシリーズが低い値を示したのは、防錆樹脂被膜表面が平滑なためにグラウトとの付着性能が悪く、早期に付着切れがせん断スパン内まで進展し、その結果、曲げ破壊時ストランド引張力が低くなったためと考えられる。このことは実験においてストランドの定着端に取付けたロードセル値が早期に増大し始めたことから明らかである。また図-6のCS-1に代表されるように、CSシリーズの梁は、他のシリーズの梁と比較してひび割れ本数が少なく、ひび割れ発生後のひび割れの開口が急速であった。表-5及び図-7より、完全防錆ストランドを用いた供試梁は、平均ひび割れ間隔についてはBSシリーズと比較して全般にやや大きめの値を示し、CS-3では倍以上の値を示した。また平均ひび割れ幅に関しては、付着改良型の

表-5 梁曲げ荷重試験結果一覧

供試梁 No.	試験時 アプライス力 (kN)	ひび割れ発生モーメント				曲げ破壊モーメント			曲げ 破壊時 中央 たわみ (mm)	平均 ひび割れ 間隔 (mm)	平均 ⁺⁺ ひび割れ 幅 (mm)	鋼材端部 引張力 発生時の 載荷モーメント (kN・m)	曲げ 破壊時 鋼材端部 引張力 (kN)
		① 実験値 [*] (kN・m)	② 計算値 ^{**} (kN・m)	①/②	③ 実験値 [*] (kN・m)	④ 計算値 ^{**} (kN・m)	③/④						
BS-1	173.3	26.3(43.9)	28.2	0.94	50.0(83.3)	45.7	1.09	49.2	301	0.67	-	0	
BS-2	172.3	27.5(45.8)	28.1	0.98	48.9(81.5)	45.7	1.07	39.7	292	0.91	-	0	
BS-3	171.6	27.4(45.7)	28.1	0.98	48.5(80.9)	45.7	1.06	43.8	278	0.86	-	0	
CS-1	167.1	27.6(46.0)	27.6	1.00	45.6(76.0)	45.7	1.00	40.2	371	2.23	36.5	22.6	
CS-2	166.7	25.7(42.9)	27.6	0.93	43.5(72.6)	45.7	0.95	39.8	309	1.67	33.5	24.9	
CS-3	166.3	25.7(42.9)	27.5	0.93	43.1(71.9)	45.7	0.94	39.5	660	3.53	28.1	36.6	
CBa-1	170.5	27.6(46.0)	28.0	0.99	48.2(80.3)	45.7	1.05	46.3	304	1.51	44.7	5.3	
CBa-2	173.6	26.4(44.0)	28.3	0.93	47.5(79.2)	45.7	1.04	47.3	295	1.21	44.7	5.3	
CBa-3	164.6	25.4(42.4)	27.4	0.93	46.7(77.8)	45.7	1.02	53.4	407	1.77	37.1	22.3	
CBb-1	162.9	26.5(44.2)	27.2	0.97	49.5(82.5)	45.7	1.08	51.3	368	1.13	-	0	
CBb-2	167.6	26.5(44.1)	27.7	0.96	49.5(82.6)	45.7	1.08	55.6	352	1.07	-	0	
CBb-3	164.6	26.4(44.0)	27.4	0.96	47.5(79.1)	45.7	1.04	47.5	359	1.46	40.0	1.6	
CBc-1	173.2	25.9(43.1)	28.2	0.92	48.0(80.0)	45.7	1.05	39.3	339	1.06	-	0	
CBc-2	169.7	26.3(43.8)	27.9	0.94	48.8(81.4)	45.7	1.07	45.6	339	1.09	-	0	
CBc-3	168.1	25.4(42.3)	27.7	0.92	46.2(77.1)	45.7	1.01	40.0	385	1.16	40.0	0.8	

* ()内は試験時の荷重P(kN)値

** 試験梁自重によるモーメント1.15kN・mは計算値より差引いている

+ 応力P/P₀係数 k₁k₃=0.62, 重心軸比 k₂=0.39

++ ひび割れ発生後のモーメントの増分 12.5 kN・m 時の平均ひび割れ幅

シリーズがCSと比べずっと小さな値を示し、特にCBb, CBcにおいては附着性能の大幅な改善が見られる。同様の結果が、図-8に示す曲げモーメント-曲率関係からも得られた。グラウト種類が附着性能に与える影響は、完全防錆ストランドを用いた各シリーズの梁No.3に見ることができる。これらの梁には高強度グラウトが注入されているにもかかわらず平均ひび割れ幅や鋼材端部引張力の発生から附着性能の低下がみられ、その結果曲げ破壊モーメントがそれぞれの梁No.1, No.2に比べやや小さな値を示した。この結果は膨張性グラウトが樹脂被膜ストランドとの附着特性改善に有効であることを示唆するものである。

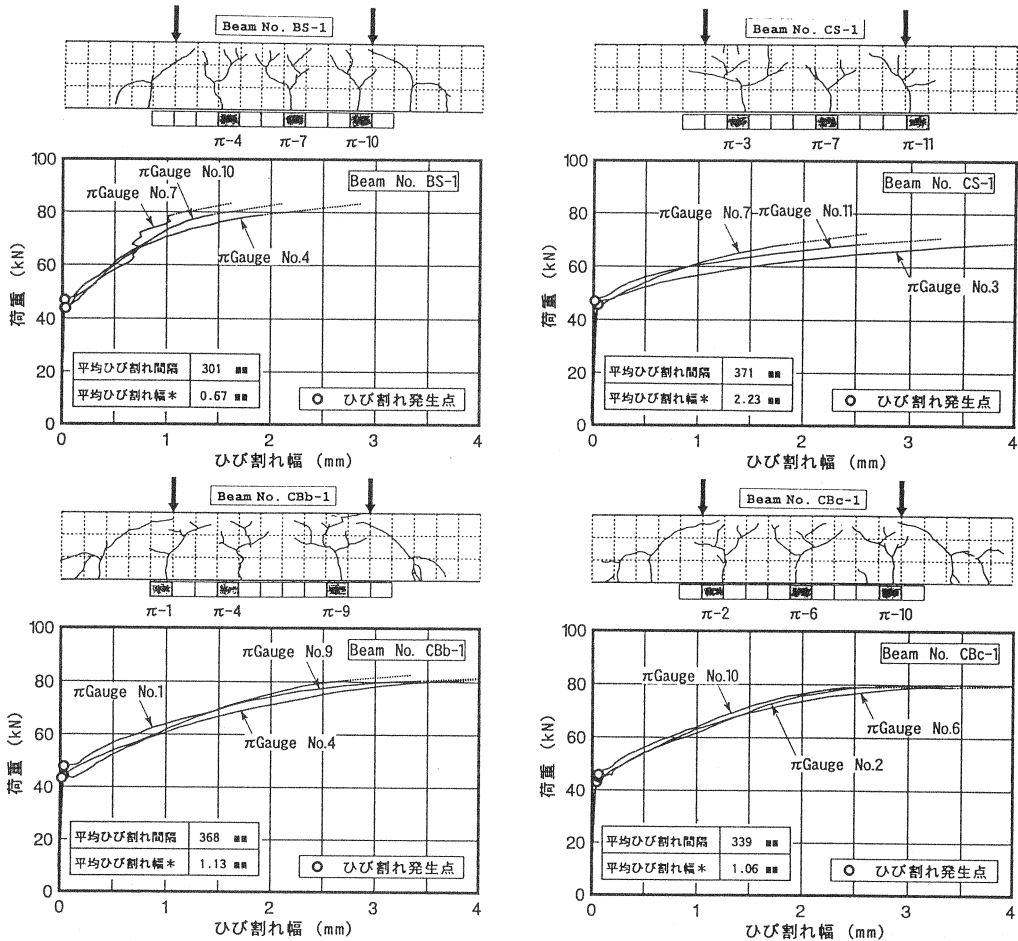


図-6 ひび割れ状況及び荷重-ひび割れ幅関係

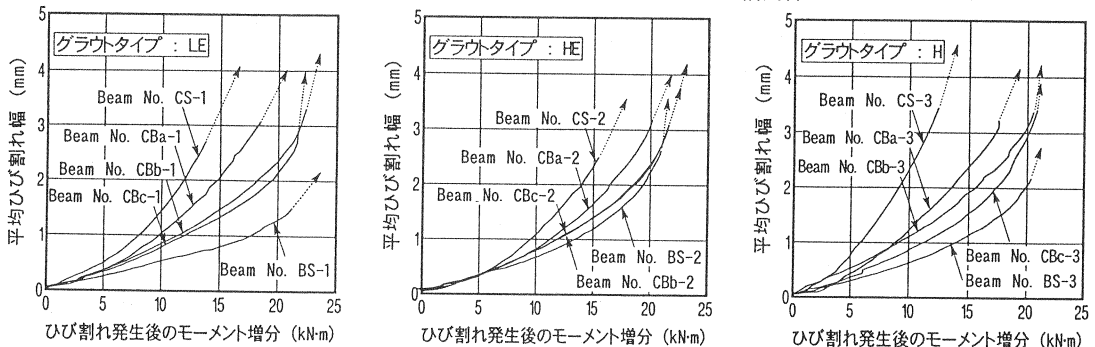


図-7 ひび割れ発生後における曲げモーメント増分-平均ひび割れ幅関係

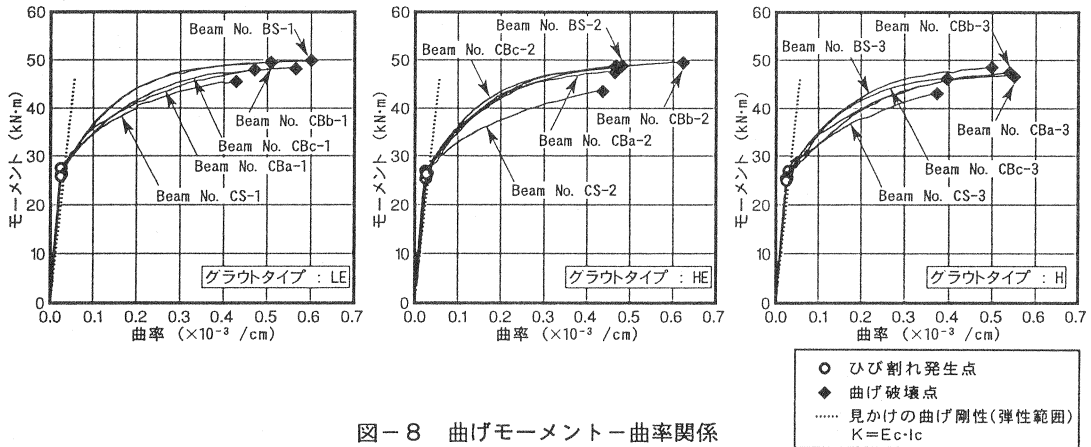


図-8 曲げモーメント-曲率関係

5. まとめ

本研究から得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 溝加工を施さない完全防錆ストランドは、引抜き付着試験においても、梁の曲げ試験においても、裸ストランドと比較して低い付着性能を示した。それ故、曲げモーメントが他の梁と比較して低くなった。
- (2) これに対し、本研究における溝加工を施した完全防錆ストランドでは、梁試験において裸ストランドとほぼ同等の曲げひび割れ間隔、ひび割れ開口幅、曲げモーメント-曲率関係が得られた。ただし、溝加工C B aのストランドについてはC B b、C B cと比較して付着改善効果がやや劣る。
- (3) 以上の試験の結果から、本研究で使用した溝加工C B bおよびC B cの完全防錆ストランドはポストテンションングラウト部材に適用可能であると判断される。
- (4) なお、膨張性グラウトの使用は完全防錆ストランドの付着力改善に効果的であることが梁試験から確認された。

本研究は高耐久構造研究会での研究の一環として行われたものであることを記す。

[参考文献]

- 1) V. Dorsten, F. F. Hunt & H. K. Preston : Epoxy coated seven-wire strand for prestressed concrete, PCI Journal, Vol. 29 No. 4, pp. 12-129, July-August 1984.
- 2) One metal save another, Engineering News record, Vol. 226, 1991.6.3, Rebar coating plants to be certified, Engineering News record, Vol. 227, 1991.7.29.
- 3) Cracks open over rebar research, Engineering News record, Vol. 228, 1992.5.11.
- 4) 日経コンストラクション、海外短信、No. 66, 1992.6.26.
- 5) W. Podolny : Corrosion of Prestressing Steels and Its Mitigation, PCI Journal, Vol. 37 No. 5, pp. 34-35, Sept. / Oct. 1992.
- 6) H. Muguruma, F. Watanabe & M. Nishiyama : Development of new corrosion protection prestressing tendons and their use in bonded and unbonded prestressed concrete members, Proc. of the Pacific Concrete Conference, Vol. 2, pp. 581-590, 1988.11.
- 7) K. Takeda, S. Kikuchi, I. Minami & H. Muguruma : Development of new corrosion protection prestressing strand, Proc. of the FIP Symposium Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Vol.3, pp.1717-1724, 1993.10.