

論文 緊張材に混合より線を用いたPCaPC片持ち梁の力学的性状に関する研究

市岡 有香子^{*1}・南 尚孝^{*1}・河野 進^{*2}・荒金 勝^{*3}

要旨：PCaPC 構造において、降伏強度の異なる 2 種の素線から成る混合より線を緊張材として用い、高強度素線は弾性範囲で挙動させることにより残留変形を抑制したまま、低強度素線を降伏させて履歴によるエネルギー消費を増大する構造システムを提案した。しかし 2004 年度の研究では、主に低強度素線が早期に降伏しなかったことが原因で、望ましい結果が得られなかった。そこで 2005 年度の研究では、より大きな降伏強度差を有する混合より線を開発し、またより線の偏心距離を増大させた片持ち梁試験体を用い、正負交番漸増載荷実験を行って、提案する構造システムが実現可能であることを確認した。

キーワード：混合より線，PCaPC 構造，残留変形，高エネルギー消費

1. はじめに

PCa 構造は安定した品質や精度の提供，施工の省力化・期間短縮・低コスト化が可能であり，更に緊張材のみを通し配筋とする PCaPC 構造は，圧着目地部の開閉に変形を集中させることによって他の部材の損傷を軽微に留めると同時に，PC 鋼材の復元力により残留変形を抑制することができる。

ただし履歴ループ面積が小さくエネルギー消費が少ないという問題点があり，これを解決するために，筆者らは混合より線 Graded Composite Strands (以下 GCS) の使用を提案した。しかしながら 2004 年度の研究では，より線の偏心距離が小さかったため変形が小さな範囲では想定したほどのひずみが発生しなかったこと，ならびにより線に用いた素線の降伏強度差が小さかったことから，残留変形は良好に抑制されたが期待したようなエネルギー消費能力の向上は確認できなかった。¹⁾

そこで 2005 年度はより降伏強度差の大きな素線から成る GCS を開発し，またより線の偏心距離も大きくとった片持ち梁試験体を製作して，

正負交番漸増載荷実験を行った。実験目的は GCS を用いた梁部材の力学的特性を把握することであり，特に

- (1) 履歴復元力特性の確認
- (2) より線が想定したひずみ範囲で挙動することの確認
- (3) コンクリートの損傷領域と損傷量の確認に焦点を当てた。

2. 実験概要

2.1 GCS について

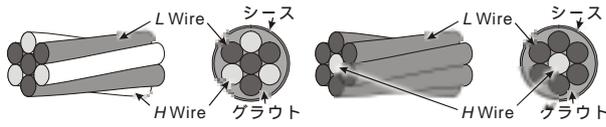
GCS の概要は文献 1)を参照のこと。以下では簡単のため，低強度素線(降伏強度 $f_y = 560$ MPa，降伏時ひずみ $\varepsilon_y = 0.29\%$)を L wire，高強度素線($f_y = 1700$ または 1770 MPa， $\varepsilon_y = 0.85\%$)を M wire，超高強度素線($f_y = 2110$ MPa， $\varepsilon_y = 1.06\%$)を H wire と称する。本研究では L Wire と H Wire から成るより線を新たに用いた。

新たに製作した GCS は，図 - 1 に示す H wire 3 本 + L wire 4 本から成る GCS-H3L4，および H wire 1 本(芯線)+ L wire 6 本から成る GCS-H1L6 の 2 種である。(参考：2004 年度はアンボンドの

*1 京都大学 大学院工学研究科 (正会員)

*2 京都大学 大学院工学研究科 工博 (正会員)

*3 住友電工スチールワイヤー(株) PC 統括部 PC 技術部 (正会員)



(a) GCS-H3L4 (b) GCS-H1L6

図 - 1 新たに製作した GCS

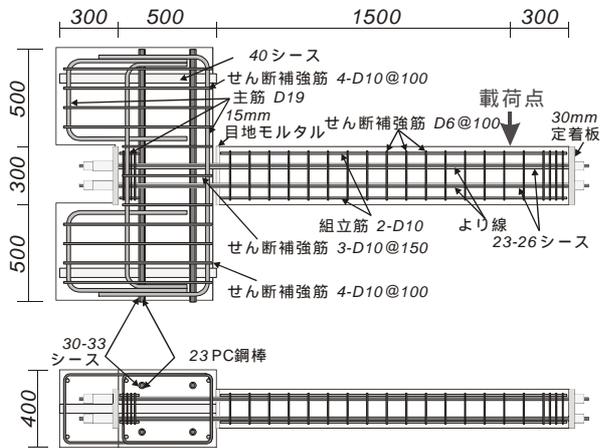


図 - 2 試験体詳細 (単位: mm)

中心素線 + ボンドの周辺素線から成る GCS-U ,
H wire 3 本 + M wire 4 本から成る GCS-H3M4 を
使用した。))

2.2 試験体

新たに製作した試験体は、より線の配置位置
および本数以外の仕様は共通であり、図 - 2 に
詳細を示す。梁断面 $200 \times 300\text{mm}$ 部材長 1800mm ,
荷点はスタブ界面から 1500mm の位置 ($a/D =$
 5) とした。

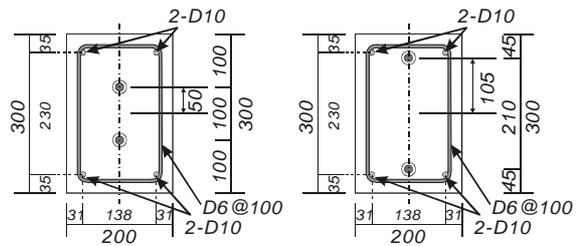
2.3 実験変数

試験体種類を表 - 1 に、梁断面詳細を図 - 3
に示す。実験変数は PC 鋼材の種類であり、アン
ボンド普通より線, GCS-H3L4, GCS-H1L6 を用
いた 3 体の試験体を新たに製作した。またボン
ド普通より線 (2004 年度の試験体 A) を比較の
ため加え、計 4 体の試験体を研究対象とする。
より線 1 本あたりの導入プレストレス力 P_i は、
荷時に低強度素線が降伏し、高強度素線は未
降伏の範囲を挙動するように設定した。またより
線の偏心距離は、断面解析に基づいて終局曲げ
耐力が概ね等しくなるよう決定したが、設計コ
ンクリート強度を 36MPa としていたのに対し、
実験時コンクリート強度は約 47MPa であったた

表 - 1 試験体種類

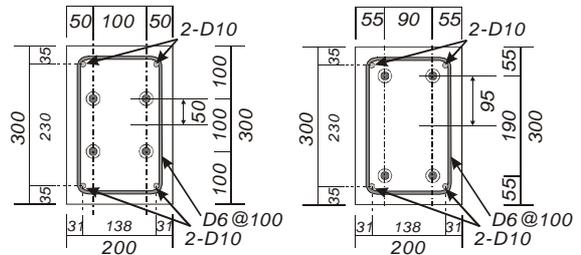
試験体	より線	P_i kN	$P_i/f'_c bD$	e mm
CNBOND (2004 年度 A)	SWPR7B 15.2mm ボンド	100	0.064	50
CNUNBD	SWPR7B 15.2 mm アンボンド	190	0.122	105
CCH3L4	GCS-H3L4 15.2 mm	80	0.103	50
CCH1L6	GCS-H1L6 15.2 mm	75	0.096	95
(参考) CCH3M4 (2004 年度 C)	GCS-H3M4 15.2 mm	200	0.128	50

e : より線の材軸からの偏心距離,
 P_i : より線 1 本あたり初期導入 PC 力,
 f'_c : 実験時コンクリート強度,
 b : 梁幅 (200mm), D : 梁せい (300mm)



(a) CNBOND

(b) CNUNBD



(c) CCH3L4

(d) CCH1L6

図 - 3 梁断面詳細 (単位: mm)

め、実験結果には差が生じた。

2.4 荷装置と荷履歴

荷装置は 2004 年度の実験と同様であるので
文献 1)を参照のこと。荷履歴も同じく変位制
御とし、梁部材角(以下 R とする) $0.1, 0.2, 0.4,$
 $0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5\%$ で 2 サイ
クルずつの正負交番荷を行った。

2.5 使用材料

表 - 2 ~ 5 にコンクリート, 目地モルタル・

グラウト，異形鉄筋，および各素線を 7 本よりとして計測した材料特性を示す。なお，試験体 CNUNBD のみ目地部製作を失敗しやり直したため，目地モルタルの強度が異なっている。

表 - 2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 MPa	割裂引張強度 MPa	弾性係数 GPa
梁	47.2	3.3	30.0
スタブ	59.6	3.6	31.9

表 - 3 目地モルタル・グラウトの材料特性

	圧縮強度 MPa	割裂引張強度 MPa
目地モルタル (CNUNBD 以外)	61.2	4.2
目地モルタル (CNUNBD)	35.4	2.3
グラウト	36.8	1.9

表 - 4 異形鉄筋の材料特性

呼び径	公称強度 MPa	降伏強度 MPa	引張強度 MPa	弾性係数 GPa
D6	295	370	519	173
D10	295	377	511	171
D19	295	346	539	159

表 - 5 より線の材料特性

より線	断面積 mm ²	降伏強度* MPa	引張強度 MPa	弾性係数 GPa
L Wire 7本より 15.2mm	140.7	540	604	190
M Wire(SWPR7A) 7本より 15.2mm	138.7	1702	1932	191
M Wire(SWPR7B) 7本より 15.2mm	138.7	1774	2718	191
H Wire 7本より 15.2mm	140.7	2111	2331	194

*0.2%オフセット値とした

表 - 6 最大水平耐力および部材角

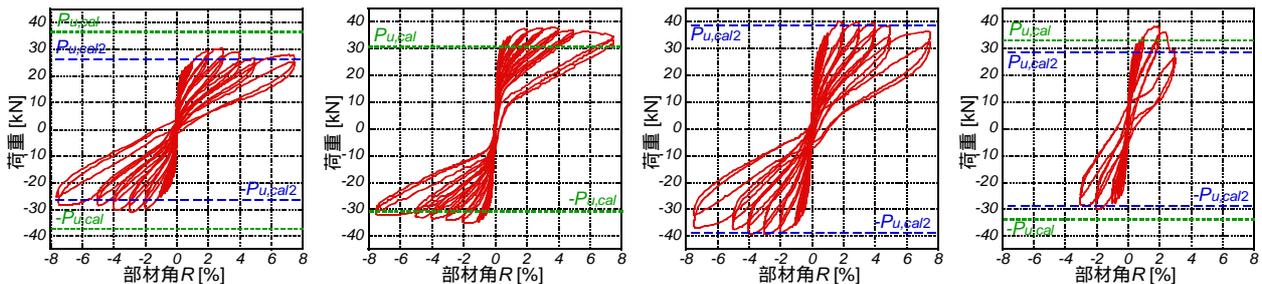
試験体	正方向		負方向	
	R, %	最大水平 耐力, kN	R, %	最大水平 耐力, kN
CNBOND	2.95	30.2	-2.81	-31.3
CNUNBD	3.78	37.7	-1.93	-35.2
CCH3L4	1.76	39.9	-3.95	-39.4
CCH1L6	1.77	38.0	-1.88	-30.1

3. 実験結果

3.1 履歴復元力特性

表 - 6 に各試験体の最大水平耐力およびその際の部材角を示す。なお，試験体 CCH1L6 は $R = +3.0\%$ 第 1 サイクル時に上端 GCS の低強度素線が破断して大きな耐力低下を生じたため，除荷後，負側へ載荷を続けプッシュオーバーを行った。しかし， $R = -3.6\%$ で今度は下端 GCS の低強度素線が破断し，ここで載荷を終了した。このため，試験体 CCH1L6 のみ正負の最大耐力に大きな差が生じている。試験体 CNUNBD および CCH3L4 は $R = 2.0$ サイクル時に，試験体 CNBOND は $R = 3.0\%$ サイクル時に最大耐力を経験した。最大耐力は試験体 CNBOND のみ 30kN 程度で，その他の試験体は 40kN 程度であった。

図 - 4 に各試験体の水平荷重 - 部材角関係を示す。図中の $P_{u,cal}$, $P_{u,cal2}$ は 3.5 節に示す曲げモーメント計算値 $M_{u,cal}$, $M_{u,cal2}$ をせん断スパン 1500mm で除したせん断力に換算したものである。いずれの試験体も残留変形は非常に小さく抑制されたが，CCH1L6 は他の 3 体に比べてやや残留変形が大きかった。載荷を $R = 3.0\%$ サイクルで終了しているため，更に大変形を受けた



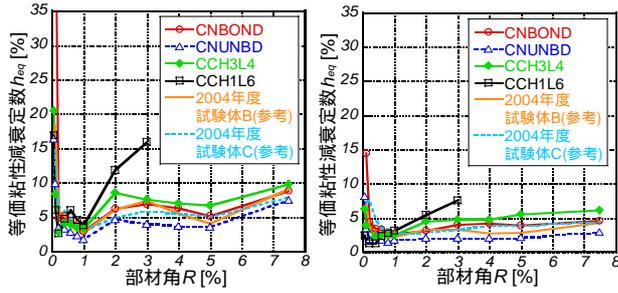
(a) CNBOND

(b) CNUNBD

(c) CCH3L4

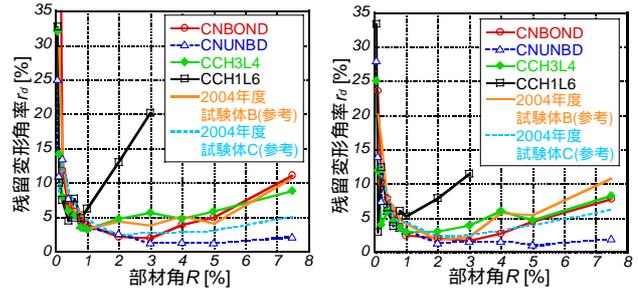
(d) CCH1L6

図 - 4 荷重 - 部材角関係



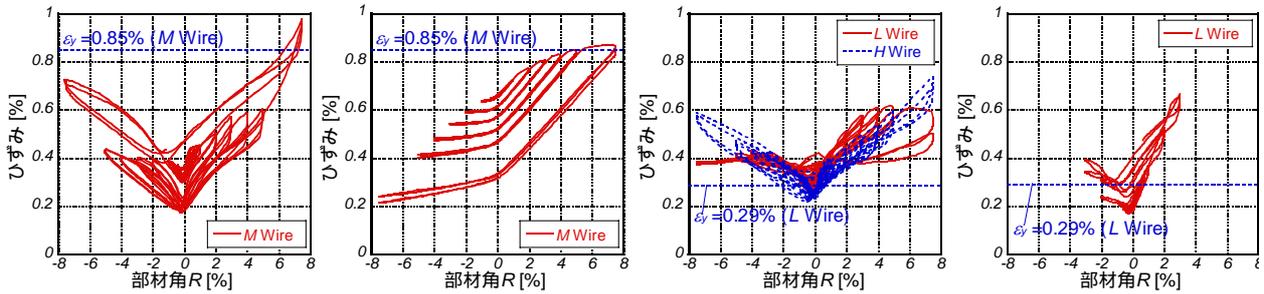
(a) 第1サイクル (b) 第2サイクル

図 - 5 等価粘性減衰定数



(a) 第1サイクル (b) 第2サイクル

図 - 6 残留変形角率



(a) CNBOND(M Wire) (b) CNUNBD(M wire) (c) CCH3L4(L & H wire) (d) CCH1L6(L wire)

図 - 7 より線ひずみ - 部材角関係 (()内は計測した素線種類を示す)

場合にはもっと大きな残留変形を示したと考えられる。最大耐力経験後の耐力劣化は、試験体 CCH1L6 を除きいずれも小さかった。R = 7.5% 時の水平耐力は、CCH1L6 を除き概ね 30kN (曲げモーメント換算 45kN・m) 前後であった。

3.2 等価粘性減衰定数

図 - 5 に等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。一般には定常サイクルとなる 2 回目以降のサイクルで h_{eq} を考察するが、GCS は主に第 1 サイクルでエネルギーを消費する構造システムであるので、第 1, 第 2 両サイクルの結果を示している。CCH1L6 は非常に大きな h_{eq} を示したが R = 3.0% 時に素線が破断した。試験体 CCH3L4 では R = 0.2 ~ 0.4%, CCH1L6 では R = 0.2 ~ 0.6% の区間で h_{eq} が増加傾向にあるが、その後減少している。これは試験体製作時のグラウト不良によってより線がアンボンド化したことの影響ではないかと考えられ、より線の付着が十分であれば、R = 0.4% 以降も h_{eq} が増加した可能性がある。R = 2.0% 時には h_{eq} は試験体 CCH1L6 が一番大きく、

次いで CCH3M4 が大きい。アンボンド部材である CNUNBD が最も小さかった。通常 PC 構造の h_{eq} は 5% 程度であるので、CCH3L4 および CCH1L6 ではエネルギー消費能力が改善されたと言える。

3.3 残留変形角率

図 - 6 に残留変形角率 - 部材角関係を示す。等価粘性減衰定数と同様、第 1, 第 2 各サイクルの結果を示している。残留変形角率 r_d は式(1)より算出した。

$$r_d = \frac{R_r^+ - R_r^-}{R_p^+ - R_p^-} \quad (1)$$

ここで、 R_r^+ 、 R_r^- ：正側および負側の最大変形角、 R_p^+ 、 R_p^- ：正側および負側の残留変形角。

試験体 CCH1L6 が大きな残留変形角率を示したのに対し、他の試験体は概ね $r_d = 3.0\%$ 程度の値を示し残留変形をよく抑制した。特に試験体 CCH3L4 では h_{eq} が比較的大きかったにも関わらず、 r_d の値は十分小さく、エネルギー消費能力と復元性を兼ね備えた構造が実現できたと言える。

3.4 より線ひずみ

図 - 7 により線のひずみ - 部材角関係を示す。CNUNBD の M Wire ひずみ履歴はより線端部に設置したロードセルの測定結果より算出したものである。その他の結果はより線の危険断面位置に貼付したひずみゲージ測定値である。

CNBOND および CNUNBD の素線はいずれも $R = 7.5\%$ サイクルまで降伏しなかったが、CCH3L4 および CCH1L6 では部材変形の比較的小さい段階で L wire が降伏した。CCH3L4 では H wire は未降伏であり、GCS-H3L4 が想定どおり (L wire 降伏、 H wire 未降伏) に挙動したことが確認された。CCH1L6 の H wire は 7 本よりの芯線であるためひずみゲージが貼付できず、CCH3L4 のような挙動確認はできなかった。

3.5 曲げ耐力算定

プレストレスト鉄筋コンクリート (III 種 PC) 構造設計・施工指針・同解説⁶⁾ (以下 PRC 指針) における曲げ耐力式を以下に示す。

$$M_{u,cal} = (7/8) T_y d + T_p (d_p - d/8) \quad (2)$$

ここに、 $M_{u,cal}$: 断面の終局曲げモーメント、 T_y : 引張側普通鉄筋の引張合力、 d : 引張側普通鉄筋に対する有効高さ、 T_p : 曲げ耐力時 PC 鋼材引張合力、 d_p : PC 鋼材に対する有効高さ。

表 - 7 に実験結果 M_u および式(2)により算定した $M_{u,cal}$ を示す。試験体 CCH1L6 は精度良く評価できたが、他の試験体では精度に大きなばらつきがあった。原因として実験時に上端より線も引張となったことが考えられ、このため式(2)' を用い、また試験体製作時のグラウト不良が疑われることから、PC 鋼材応力に関してアンボンド時の式(3)における係数を、完全付着時との中間値をとって変更した式(3)' を用いることにより、表 - 7 に示すように精度の向上した補正結果 $M_{u,cal2}$ を得ることができた。今後厳密に耐力を見積もるためには、付着性状の評価に関する検討が必要である。

$$M_{u,cal2} = (7/8) T_y d + T_{p,bottom} (d_{p,bottom} - d/8) + T_{p,top} (d_{p,top} - d/8) \quad (2)'$$

$$\sigma_{pu} = 0.75 \sigma_{pe} + 0.25 \sigma_{py} \quad (3)$$

表 - 7 曲げ耐力比較

試験体	M_u	$M_{u,cal}$	$\frac{M_u}{M_{u,cal}}$	$M_{u,cal2}$	$\frac{M_u}{M_{u,cal2}}$
CNBOND	+45.3	55.2	0.82	39.3	1.15
	-47.0		0.85		1.20
CNUNBD	+56.6	45.7	1.24	-	-
	-52.8		1.16		-
CCH3L4	+59.9	79.8	0.75	58.1	1.03
	-59.1		0.74		1.02
CCH1L6	+57.0	50.3	1.13	42.6	1.34
	-45.2		0.90		1.06

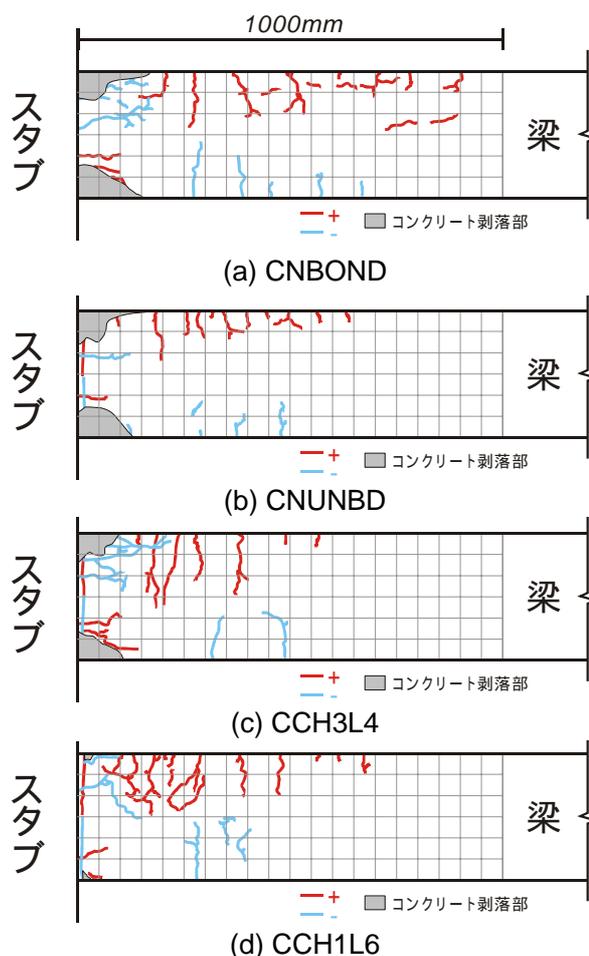


図 - 8 載荷終了時ひび割れ状況

$$\sigma_{pu} = 0.50 \sigma_{pe} + 0.50 \sigma_{py} \quad (3)'$$

ここに、 σ_{pu} : 曲げ耐力時の PC 鋼材引張応力度、 σ_{pe} : PC 鋼材有効引張応力度、 σ_{py} : PC 鋼材の規格降伏点応力度。

3.6 載荷終了時損傷性状

図 - 8 に載荷終了時の損傷状況を示す。曲げひび割れの状況はいずれの試験体もほぼ同様であった。いずれの試験体も正載荷時 (梁上端が

引張)に負荷荷時より多くの曲げひび割れを生じたが、これは載荷前に上端のみ乾燥収縮によると見られるひび割れが観測されたことなどから、打設方向の影響によると考えられる。アンボンド試験体である CNUNBD においても、特にひび割れ本数が少なく変形が集中するという現象は見られず、他の試験体と同様ひび割れは間隔 100mm 程度で分散した。

いずれの試験体も目地が開き始めると、すでに生じているひび割れの幅は以後増加せず、新たなひび割れも生じなかった。変形は梁端の目地の開閉に集中し、損傷はコンクリートの圧壊に集中した。いずれの試験体も $R = 2.0$ または 3.0% 時に圧縮縁コンクリートの剥離・剥落が生じた。試験体 CCH1L6 を除き、大変形時にもコンクリートの圧壊以外に大きな損傷は生じなかった。

4. 結論

以下に本研究から得られた結論を示す。

- (1) GCS-H3L4 を用いた試験体は、普通より線を用いた試験体と同程度に残留変形を抑制しながら、部材角 $R = 2.0\%$ 時に 9% 程度の等価粘性減衰定数 h_{eq} を示して、理想とする構造システムを実現することができた。なお、より線の付着が完全であれば、より大きなエネルギーを消費できたと考えられる。
- (2) GCS-H1L6 を用いた試験体は、 $R = 2.0\%$ 時に 12% 程度の大きな h_{eq} を示したが $R = 3.0\%$ 付近でより線の破断を生じた。残留変形角率 r_d は他の試験体よりも大きかったが、通常の RC 構造よりはるかに小さく抑えられた。より線の断面配置や導入 PC 力を検討すれば、理想とする構造システムを実現できる可能性がある。
- (3) より線のひずみ履歴は、GCS-H1L6 および GCS-H3L4 において L wire が降伏し、特に GCS-H3L4 では H wire が未降伏で想定どおりの挙動を示したことが確認された。
- (4) より線の付着劣化を考慮することにより、曲げ耐力算定式の精度を向上させることができ

た。ただし付着性状に関してはより詳細な検討が必要と考えられる。

- (5) いずれの試験体でも大変形時までコンクリートには甚大な損傷が発生せず、アンボンドより線や GCS-U を用いた試験体でもひび割れは部材全体に分散した。

謝辞

本研究は、国土交通省建設技術開発費補助金（研究代表者・渡邊史夫）および文部科学省科学研究費（課題番号・16360276、研究代表者・田中仁史）を用いて行なわれたものです。また本研究の一部は、東京工業大学建築物理研究センターとの共同研究です。実験に際しては、高周波熱錬株式会社および電気化学工業株式会社から資材の提供を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊有香子ほか: 混合より線を用いた PCaPC 梁の力学的性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 27, No. 2, pp.571-576, 2005
- 2) fédération internationale du béton : Seismic design of precast concrete building structures, 2003
- 3) 丹羽幸彦ほか: エネルギー消費型プレキャスト柱梁圧着接合工法, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 II, pp.535-536, 1993.9
- 4) 江陸歆ほか: 混合ストランドを用いたプレキャスト圧着接合部骨組みの履歴性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 II, pp.1033-1036, 1994.9
- 5) 田中久也ほか: 混合ストランドを用いた圧着工法による架構の構造性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 III, pp.939-942, 1995.8
- 6) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(III種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 2003