

論文 混合より線を用いた PCaPC 梁の力学的性状に関する研究

渡邊 有香子^{*1}・河野 進^{*2}・西山 峰広^{*3}・荒金 勝^{*4}

要旨 : PCaPC 構造において, 低強度素線と高強度素線から成る混合より線を PC 鋼材として用いることで, 低強度素線が履歴によるエネルギー消費を担い, 高強度素線が残留変形を抑制する構造形式を提案した。アンボンドの性状を有する混合より線, および超高強度素線を用いた混合より線の 2 種類のより線を開発し, それぞれを配置した片持ち梁の正負交番漸増載荷実験によって, エネルギー消費性能に改善の余地はあるものの, 残留変形および損傷が十分に制御できることを確認した。

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

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り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可能であるが, 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欠点がある。

丹羽ら^{2)~4)}は緊張材に強度の異なる素線を組み合わせた混合より線を用いることで, 十分なエネルギー消費を行い, かつ残留変形を抑制する構造システムを提案し, 実験により目的とする履歴性状が実現できることを確認したが, より線破断のおそれがあるという問題点を残した。

そこで, 新たな混合より線として, アンボンドの性状を有するより線, および超高強度素線を用いたより線を開発し, 片持ち梁の正負交番漸増載荷実験を行って, 力学的性状を確認した。

2. 混合より線

2.1 混合より線とは

混合より線 Graded Composite Strands (以下 GCS) は, 図-1 のように 4 本の低強度素線と 3 本の高強度素線から成る。図-2 に示すように, 低強度素線は降伏, 高強度素線は未降伏のひず

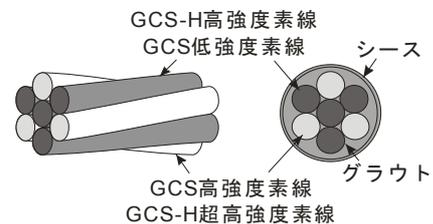


図-1 GCS・GCS-H 概要

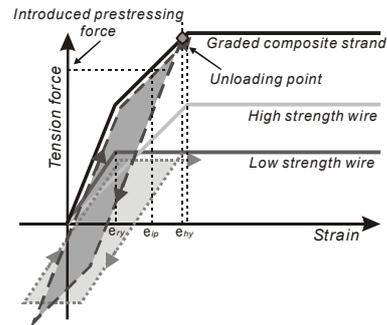


図-2 GCS エネルギー消費概念

み範囲でより線が挙動するよう導入プレストレス力を定めれば, 低強度素線がエネルギー消費を, 高強度素線が残留変形抑制を担う。

丹羽らは PCa 圧着接合の片持ち梁形式曲げ試験を行い, 図-3 に示すように, GCS によって十分なエネルギー消費と残留変形の抑制が実現できること確認した。しかし導入プレストレス力の大きな試験体では, より線に破断を生じたものがあつた。

*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 京都大学 大学院工学研究科 工博 (正会員)

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

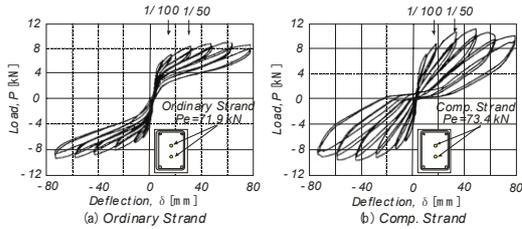


図-3 GCS 実験結果

2.2 新たな混合より線

本研究では新たな混合より線として、図-4に示す GCS-U、および図-2に示す GCS と同形状で超高強度素線を使用した GCS-H を用いる。

(1) GCS-U

GCS-U は、前述の GCS と同様、低強度素線によりエネルギー消費を、高強度素線により復元性を実現するものであるが、より線の周囲に配した低強度素線はボンド、中心に配した高強度素線はアンボンドとしているのが特徴であり、
 a)従来の GCS より復元性が高い、
 b)高強度鋼材が部材全長で一様に伸びるためひずみの集中によるより線破断のおそれがない、
 c)施工時にグラウトが不要、という利点を持つが、アンボンドであるためひび割れが一箇所に集中する可能性が問題であり、また力学的には PRC 構造と同様の性状を示すと予想されるため、実用に向けては施工上有利となるよう施工性に優れた定着金具等の開発が必要と考えられる。

(2) GCS-H

GCS-H は、従来の高強度素線の約 1.2 倍の降伏強度を有する超高強度素線を使用し、高強度素線 4 本、超高強度素線 3 本から成る。

利点としては、
 a)高プレストレスを作用させて使用することが可能、
 b)高強度コンクリートとの併用が可能、であることが挙げられるが、作用する引張力が小さな状況下では高強度素線が降伏に達せず、素線の降伏によるエネルギー消費が生じない可能性がある。

3. 実験概要

3.1 実験目的

片持ち梁形式の正負交番漸増載荷実験によって、GCS-U および GCS-H を用いた梁部材の力学

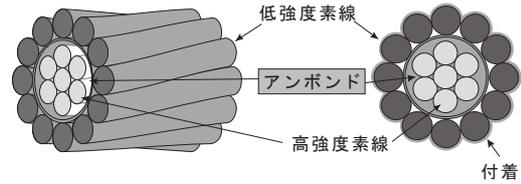


図-4 GCS-U 概要

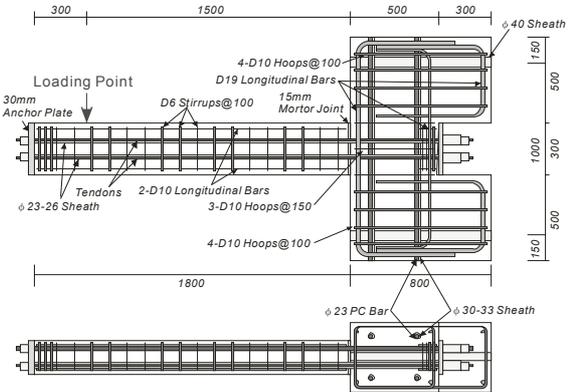


図-5 試験体詳細

的特性把握を目的とする。特に、
 (1)履歴復元力特性、
 (2)より線の応力-ひずみ履歴、
 (3)コンクリートの損傷領域と損傷量の確認、に焦点を当てる。

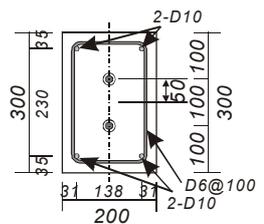


図-6 試験体断面詳細

3.2 試験体

梁断面 200×300 [mm]、部材長 1800 [mm] であり、載荷点はスタブ界面から 1500 [mm] の位置 ($a/D = 5$) とした。

図-5 に試験体、図-6 に断面の詳細を示す。

3.3 実験変数

実験変数は PC 鋼材の種類とし、普通より線、GCS-U、GCS-H の計 3 体の試験体を用いた。載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、より線 1 本あたりの導入プレストレス P_i を設定した。試験体種類を表-1 に示す。

表-1 試験体種類

試験体	より線	軸力比 $P_i/F_c bD$
A	普通より線 SWPR7B $\phi 15.2$ (bonded)	0.06
B	GCS-U 12-Mild Steel Wires $\phi 5.6$ (bonded), SWPR7B $\phi 12.7$ (unbonded)	0.06
C	GCS-H 3-High Strength Wires $\phi 5.1$ (bonded) 4/7-Wires of SEPR7A $\phi 15.2$ (bonded)	0.12

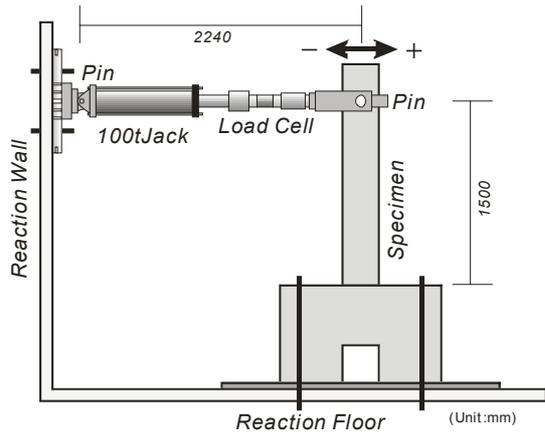


図-7 載荷装置

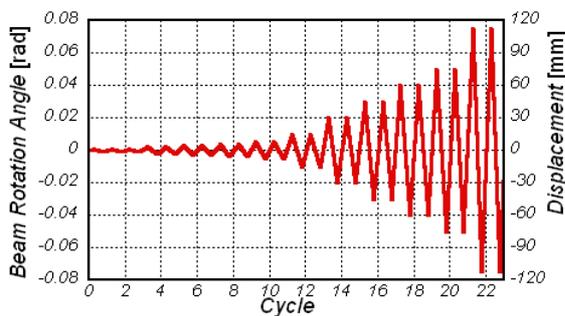


図-8 載荷履歴

3.4 載荷装置と載荷履歴

図-7に載荷装置を示す。試験体は90°回転させ、梁を垂直に立てた状態で載荷を行った。

図-8に示すように、変位制御により、梁部材角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載荷を行った。

3.5 使用材料

表-2~5に各材料特性を示す。

表-2 鉄筋の材料特性

	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
D6	370	519	173
D10	377	511	171
D19	346	539	159

表-3 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	51.8	3.1	28.4
スタブ	60.3	2.7	31.0

表-4 より線の材料特性

呼び名	断面積 [mm ²]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	
普通より線 (試験体 A)	SWPR7B 7本より 15.2mm	138.7	1702	1932	191
GCS-U 中心素線 (試験体 B)	SWPR7B 7本より 12.7mm	98.7	1773	2715	193
GCS-U 外周素線 (試験体 B)	低強度素線 5.6mm	24.6	577	610	195
GCS-H (試験体 C)	第1降伏点	140.7	1702	2146	192
	第2降伏点		1877		

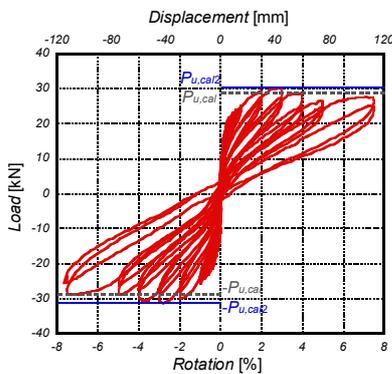
表-5 目地モルタル・グラウトの材料特性

	圧縮強度 [MPa]
目地モルタル	49.4
グラウト	45.4

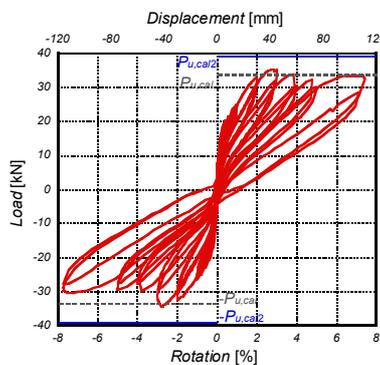
4. 実験結果

4.1 荷重-部材角関係

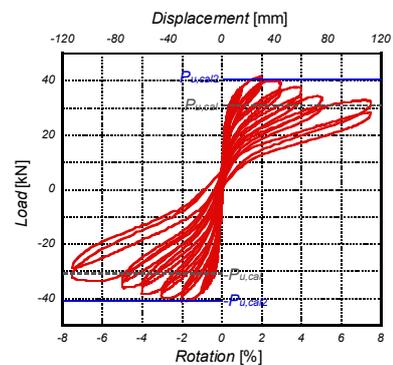
図-9に、実験より得られた荷重-部材角関係を示す。図中の $P_{u,cal1}$ および $P_{u,cal2}$ は曲げモーメント $M_{u,cal1}$ および $M_{u,cal2}$ をそれぞれ荷重に換算したものであり、 $M_{u,cal1}$ 、 $M_{u,cal2}$ については4.2節で述べる。いずれの試験体も原点指向型の履歴となり、残留変形は大変小さい値に抑制された。特に試験体CはPC部材特有のくびれのある履歴性状を示し、残留変形を非常に小さく留める構



(a) 試験体 A (Ordinary Strand)



(b) 試験体 B (GCS-U)



(c) 試験体 C (GCS-H)

図-9 荷重-部材角関係

造といえる。ただし、いずれの試験体も履歴ループ面積は小さく、これに関しては 4.3 節で考察する。

4.2 曲げ耐力

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⁵⁾ (以下 PRC 指針) における曲げ耐力式を以下に示す。

$$M_{u,cal} = (7/8) T_y d + T_p (d_p - d/8) \quad (1)$$

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 : 曲げ破壊時 PC 鋼材引張合力、 d_p : PC 鋼材に対する有効高さ。

表-6 に曲げ耐力として、実験結果 M_u および式(1)により算定した $M_{u,cal}$ を示す。試験体 A および B は精度良く評価できたが、試験体 C は計算結果が実験結果を大きく下回った。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るが、これを考慮した式(1)'を用いると今度は試験体 A, B の計算結果が実験結果を上回ってしまう。ただし本実験では試験体製作時のグラウト不良が疑われることから、より線の応力として、アンボンドの場合の式(2)に基づき降伏強度に達する割合を変更した式(2)'を適用した。補正結果を表-6 に $M_{u,cal2}$ として示す。この補正により、耐力式の精度を向上させることができた。

$$M_{u,cal2} = (7/8) T_y d + T_{p,bottom} (d_{p,bottom} - d/8) + T_{p,top} (d_{p,top} - d/8) \quad (1)'$$

$$\sigma_{pu} = 0.75\sigma_{pe} + 0.25\sigma_{py} \quad (2)$$

$$\sigma_{pu} = 0.50\sigma_{pe} + 0.50\sigma_{py} \quad (2)'$$

ここに、 σ_{pu} : 終局曲げモーメント時の 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。

4.3 等価粘性減衰定数

各部材角における第 2 ループに関して求めた等価粘性減衰定数 h_{eq} を図-10 に示す。

いずれの試験体においても h_{eq} は 4~6[%]程度で、普通より線と混合より線の違いは見られず、本実験では 1.章で述べた履歴性状の改善は実現できなかった。原因として、(1)より線の材軸か

表-6 曲げ耐力比較

Specimen	M_u [kN·m]	$M_{u,cal}$ [kN·m]	$\frac{M_u}{M_{u,cal}}$	$M_{u,cal2}$ [kN·m]	$\frac{M_u}{M_{u,cal2}}$
A	+45.3	43.0	1.05	45.4	1.00
	-47.0		1.09		1.04
B	+52.5	50.6	1.04	58.5	0.90
	-51.5		1.02		0.88
C	+62.1	46.2	1.34	60.9	1.02
	-61.4		1.33		1.01

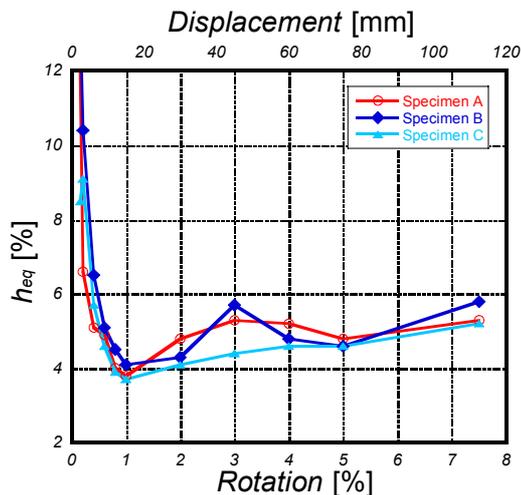


図-10 等価粘性減衰定数

らの距離が小さかったため、変形が小さな範囲では低強度素線が降伏しなかったこと (特に試験体 B の GCS-U 周辺素線)、(2)試験体 C では GCS-H の 2 種の素線の降伏強度差が小さいため、2 段階の剛性変化が明確に発生せず、普通より線と大差のない挙動となったこと、が考えられる。改善方法としては、より線の材軸からの距離を大きくし、小変形時でも低強度素線を降伏させることが考えられる。より線のひずみに関する詳細な考察については 4.4 節で述べる。

4.4 より線のひずみ-部材角関係

図-11 に試験体 A および B の目地部におけるより線 (試験体 B は GCS-U の周辺素線) のひずみ-部材角関係を示す。なお、試験体 C の目地部における GCS-H 各素線のひずみも考察予定であったが、測定不良のため割愛する (試験体 C は導入プレストレス力が大きいので、より線緊張時にひずみゲージが破断したと推測される)。図-11 より、試験体 A, B とともに部材角 5.0[%]までより線が降伏せず、特に早期に GCS-U 周辺素線の降伏を見込んでいた試験体 B は、これに

より期待したような履歴エネルギー消費が生じなかったと考えられる。降伏時期が遅れた理由としては、付着劣化の影響が挙げられる。

4.5 ひび割れ性状

いずれの試験体も目地部が大きく開き、圧縮縁が圧壊して終局に至った。

図-12 に载荷終了時のひび割れ性状を示す。図中のグリッドは 50[mm]間隔である。

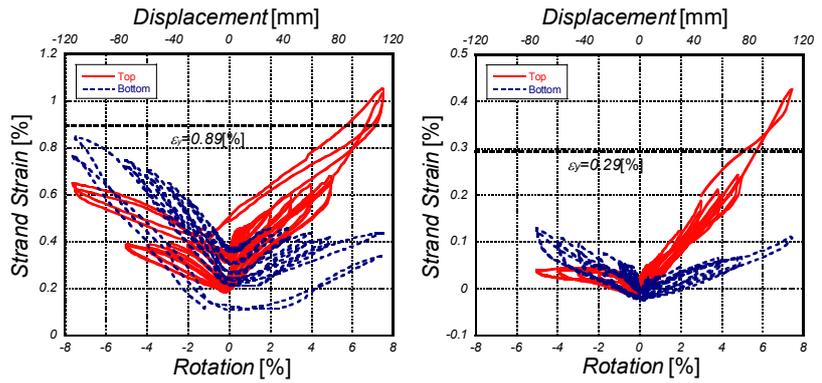
曲げひび割れは、試験体 A および C では目地から 1000[mm]まで、試験体 B では目地から 600[mm]までの範囲に分散した。ひび割れ間隔は 45 ~ 207[mm]で、いずれの試験体でも平均 110[mm]程度であった。ここで、PRC 指針によるひび割れ間隔と最大ひび割れ幅の算定式を以下に示す。

$$l_{av} = 2(c + s/10) + 0.1 \phi / (a_t / A_{ce}) \quad (3)$$

$$w_{max} = 1.5 l_{av} e_{t,av} \quad (4)$$

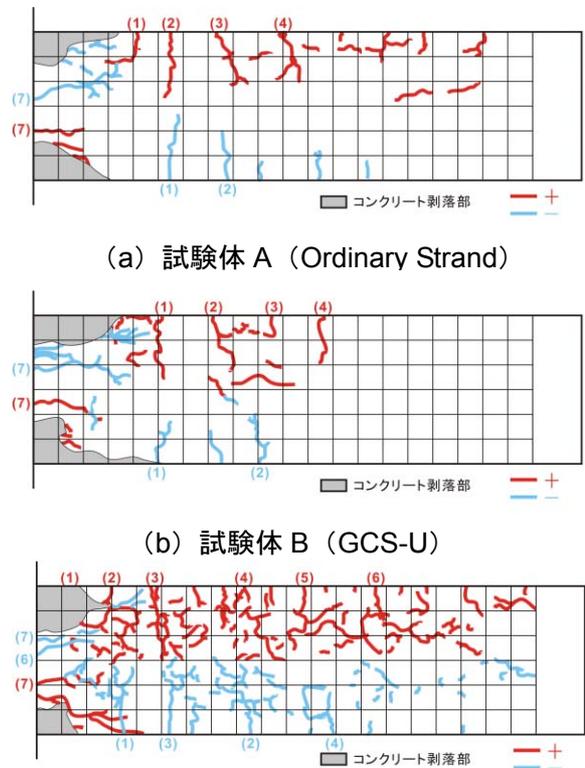
ここに、 l_{av} : ひび割れ間隔、 c : 側面および底面でのコンクリートのかぶり厚さの平均、 s : 鉄筋の中心間隔、 ϕ : 鉄筋の直径、 a_t : 引張鉄筋の断面積、 A_{ce} : コンクリートの有効引張断面積（鉄筋の重心とその重心が一致する引張側コンクリートの断面積）、 w_{max} : 最大ひび割れ幅、 $e_{t,av}$: 平均鉄筋ひずみ。

式(3)より求めたひび割れ間隔 l_{av} は 137.7[mm]であり、この値を用いて式(4)より最大ひび割れ幅 w_{max} を算出した。その際、梁端の変位は目地部の開閉および梁の曲げ変形から生じると考え、平均鉄筋ひずみ $e_{t,av}$ は、図-13 に示すように三角形分布の曲率を仮定し、まず ϕ_2 と ϕ_3 の平均値より目地部の曲率 ϕ'_1 を算出した。この ϕ'_1 と ϕ_1 の差を目地の回転曲率とし、また三角形分布曲率の平均値 ϕ_{ave} が梁全長で一定すると、これらの曲率から算出した梁端の変位 δ_{cal} は実験値とよく一致するため、この ϕ_{ave} より求めた鉄筋ひずみを $e_{t,av}$ として用いた。



(a) 試験体 A (Ordinary Strand) (b) 試験体 B (GCS-U)

図-11 より線のひずみ-部材角関係



(a) 試験体 A (Ordinary Strand)

(b) 試験体 B (GCS-U)

(c) 試験体 C (GCS-H)

図-12 ひび割れ図

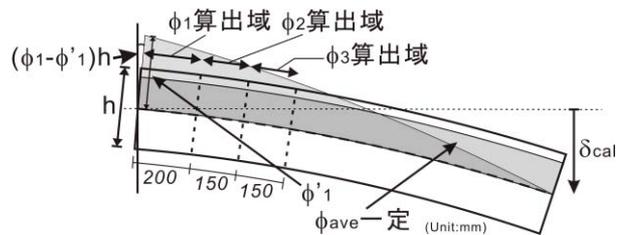


図-13 梁変形概念

図-14 に最大変形時ひび割れ幅の実験結果（クラックスケールにより目視にて測定）と計算結

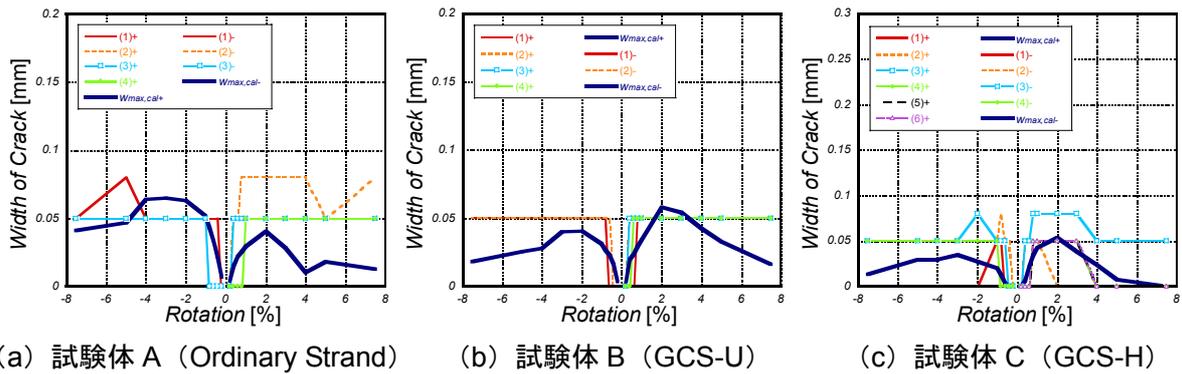


図-14 最大変形時ひび割れ幅

果を示す。なお、ひび割れ番号は図-12 と対応している。計算値が実験値を下回る部分も見られるが、両者はある程度の一致を示した。

また、ひび割れ幅はほとんどが 0.05[mm]で、最大でも 0.3[mm]であった。除荷時の残留ひび割れ幅はいずれも 0.05[mm]未満で測定不能であり、圧着接合工法における残留ひび割れは目地に集中し、部材の損傷は軽微であることが確認された。

5. 結論

以下に本研究の結論を示す。

- (1) いずれの試験体も履歴ループの面積は小さく、混合より線の使用によるエネルギー消費増大や等価粘性減衰定数の改善は実現できなかったが、より線は大変形時まで未降伏であったことが確認されたため、断面配置を改善すればエネルギー消費を増大できる可能性が示唆された。履歴性状は原点指向型であり、特に GCS-H を用いた試験体は大変形後も残留変形がよく抑制された。
- (2) 実験時にグラウト不良が疑われるが、これによるより線の付着劣化を考慮することにより、PRC 指針曲げ耐力式の精度を向上させることができた。
- (3) 除荷時の残留ひび割れはほとんどなく、圧着接合工法における変形は目地に集中し、部材は損傷しないことが確認された。またひび割れは部材にほぼ一様に分布し、目地部の開閉と梁の曲げから成る変形を仮定す

ることにより、ひび割れ間隔・最大ひび割れ幅ともに PRC 指針式によりある程度評価可能であることがわかった。

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。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) fédération internationale du béton : Seismic design of precast concrete building structures, 2003
- 2) 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
- 3) 江陸敏ほか: 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
- 4) 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
- 5) 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