

中空PC鋼棒を用いたPPC構造物の耐震性能確認試験

ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 正会員 工修

○岡田 典高

ジェイアール東日本コンサルタンツ(株)

栗原 啓之

オリエンタル白石(株) 正会員 工修

原 健悟

Abstract : This study on the loading tests confirms high bending resistance and toughness of PC beams and piers by using unification method of ‘hollow-’ and ‘reacting-’ prestressing bar which anchorages fixed in the end of both bars. As a result of experimental studies, the relationship of two different stress states of each bars could be simulated by analysis method of the beams considering unbonded characteristic of the ‘reacting -’ prestressing bar. And the load-deflection relation of test results showed high ultimate bending resistance during seismic loading.

Key words: partial prestressed concrete, bending resistance, load-deflection relation, unbonded

1. はじめに

現行の耐震設計において図-1に示されるように鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC 橋脚とする。）に要求されるL2地震時における最大弾性応答スペクトルは最大2000gal (G2地盤)とされている。一般に、L2地震動に対する応答加速度は非線形領域に入ることを前提として、降伏震度 K_{hy} および応答塑性率 μ の関係を1質点系の簡易モデルに置換えることで下記式により表現される。

$$K_e = 980 \cdot K_{hy} \sqrt{2\mu - 1} \quad \dots (1)$$

これは非線形領域に入る構造物の荷重-変位曲線をエネルギー一定則に基づき弾性応答加速度に置換したものであり、降伏震度 K_{hy} および応答塑性率 μ (変形性能) が高いほど高いエネルギー吸収効果が期待できる構造物である。

耐震性能向上、および断面縮小による経済性の観点から、通常のRC構造物に若干のプレストレスを導入したPPC構造物の耐震性能確認試験を行った。配置するPC鋼棒は引張、圧縮側ともに鋼材強度に対してある一定の割合のプレストレス力を導入した。PC鋼棒を引張鋼材にカウントすることで降伏耐力(引張耐力)を増加するとともに、若干導入するプレストレス力により地震時に生じる引張側鋼材の引張応力度を低減し、L1降伏震度 K_{hy} を向上することが目的である。一般的にRC構造物の断面形状および軸方向筋量はL1降伏震度 K_{hy} により決定されるケースが多いため、若干のプレストレスによる部材断面および配筋の縮小化を図ることによる経済的な構造物の開発が目的である。

2. 載荷試験概要

2.1 使用PC鋼棒および開発内容

本試験により使用した従来の中空PC鋼棒の構造的性質、および本開発における改良点を以下に記す。

地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル(L2スペクトルII)

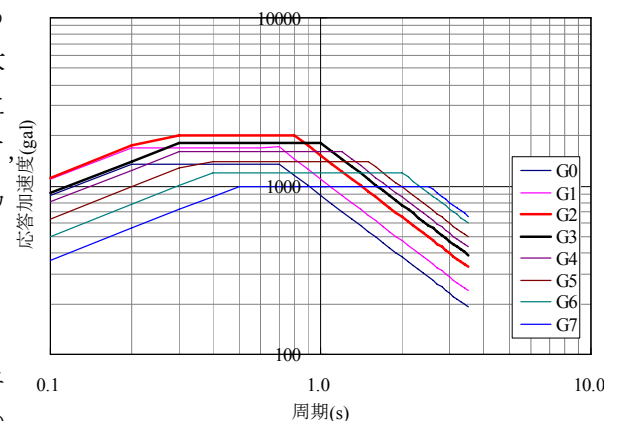


図-1 弾性加速度応答スペクトル
(出典：【鉄道構造物等設計標準・同解説】)

使用する PC 鋼棒は工場製作段階にて緊張作業を行い、打設したコンクリートの強度発現後、解放レンチにより躯体にプレストレスを導入する比較的簡易な方法で緊張ジャッキの搬入および緊張スペースの制約を受けない中空 PC 鋼棒を用いている。

従来の中空 PC 鋼棒は工場にて張力を導入するために用いられる反力 PC 鋼棒と定着用ナットとが構造的に分離しており、コンクリートへのプレストレス導入後は反力 PC 鋼棒の変形を拘束する定着体は撤去することが一般であった。本開発では圧縮側コアコンクリートの防護を目的として、従来の中空 PC 鋼棒の端部において反力 PC 鋼棒を定着することで、中空 PC 鋼棒と反力 PC 鋼棒とを一体化する構造を開発した。本試験では、図-2 に示されるように従来の中空 PC 鋼棒内に埋設されている反力 PC 鋼棒の端部を中空鋼棒端部エンドホルダー一部にて定着を図ることにより、中空・および反力 PC 鋼棒の一体化による部材性能向上効果の確認を行なう。

また、反力 PC 鋼棒の中空 PC 鋼棒への一体化による L2 地震時における鋼棒破断抑制効果を確認する。

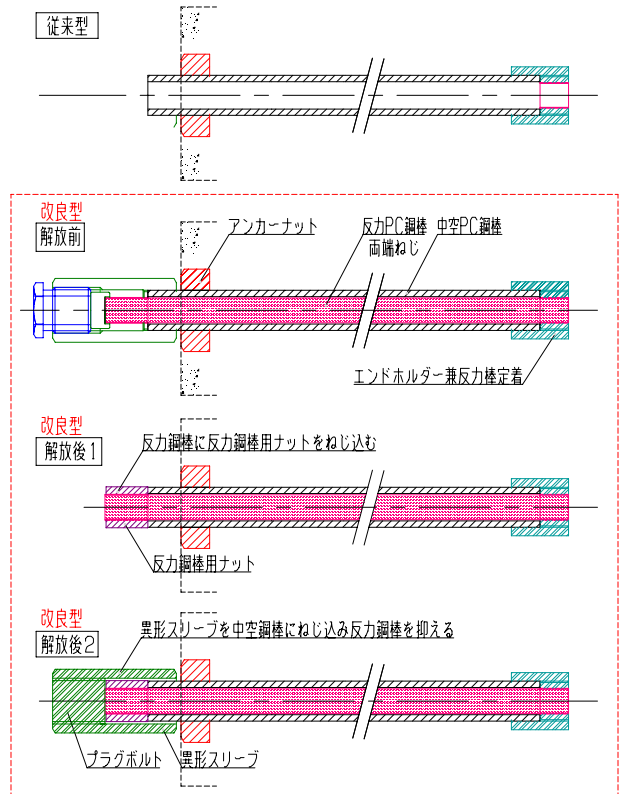


図-2 中空、反力 PC 鋼棒一体化手順

2.2 荷重試験試験体概要

試験は単純梁の静的荷重試験、および柱の交番荷重試験を反力 PC 鋼棒、および中空 PC 鋼棒の定着の有無により各 2 ケース行なう。単純梁荷重試験によりプレストレスを導入することによる耐力向上、および中空 PC 鋼棒の反力 PC 鋼棒の一体化によるひずみ増加量の抑制効果の確認を行ない、柱交番荷重試験により、L2 地震時荷重レベルでの反力 PC 鋼棒の一体化による変形性能向上効果の確認を行なう。

- ① 一体化した反力 PC 鋼棒を引張側鋼材としてカウントすることによる降伏耐力向上効果の確認。
- ② 一体化した反力 PC 鋼棒を圧縮側鋼材としてカウントすることによる変形性能向上効果の確認。
- ③ 一体化した反力 PC 鋼棒は中空 PC 鋼棒と異なり緊張力が導入されていないため、引張側・圧縮側ともに初期応力 0N/mm^2 からスタートする。初期応力レベルの異なる 2 鋼材の応力分担率の推移の確認。
- ④ 中空 PC 鋼棒と反力 PC 鋼棒は鋼棒端部における定着であるため、反力 PC 鋼棒の応力増加量は全鋼材長にて平均化されるものと考えられる。応力増加率の異なる 2 鋼材の応力分担率の推移の確認。

2.3 荷重試験試験体条件

以下表-1 に単純梁静的荷重試験、柱静的交番荷重試験の試験概要を記す。

表-1 荷重試験 CASE

試験条件	単純梁静的荷重試験		柱静的交番荷重試験	
	PPC 1-1	PPC 1-2	PPC 2-1	PPC 2-2
断面形状	□-500(mm)×500(mm)		□-500(mm)×500(mm)	
せん断スパン	2,000 (mm)		2,000 (mm)	
設計基準強度	24 (N/mm ²)		24 (N/mm ²)	
荷重荷重方法	静的試験機による静的荷重		アクチュエータによる静的交番荷重	
最大荷重荷重(kN)	300kN~400kN程度		300kN~400kN程度	
プレストレス導入時期	材齢28日		材齢28日	
固定用治具	4箇所		2箇所	
試験CASE名	PPC 1-1	PPC 1-2	PPC 2-1	PPC 2-2
異形鉄筋	D19(SD345)×2	D19(SD345)×2	D19(SD345)×2	D19(SD345)×2
プレストレス導入PC鋼棒	20T(反力鋼棒無)×1	20T(反力鋼棒有)×1	20T(反力鋼棒無)×1	20T(反力鋼棒有)×1
上部工反力考慮軸力	-	-	1.0 (N/mm ²)	1.0 (N/mm ²)
鋼材導入緊張力	735 (N/mm ²)	735 (N/mm ²)	735 (N/mm ²)	735 (N/mm ²)
部材断面導入緊張力	1.7 (N/mm ²)	1.7 (N/mm ²)	1.7 (N/mm ²)	1.7 (N/mm ²)

2.4 中空 PC 鋼棒および反力 PC 鋼棒の機械的性質， および中空 PC 鋼棒初期導入緊張力

中空 PC 鋼棒の初期緊張力は， 異形鉄筋(SD345)と同一のタイミングで降伏が生じる様， 引張応力度の増加余裕量が各々概ね等価となる様設定する。 但し， 増加応力の余裕量は中空 PC 鋼棒が PPC 断面として平面保持が成立することを前提としている。 $1080-735$ (初期導入緊張力) $=345 \text{ N/mm}^2$ (降伏までの中空 PC 鋼棒の増加余裕応力=異形鉄筋の降伏強度)。 表-2 に各 PC 鋼棒の機械的性質を記す。

表-2 中空 PC 鋼棒および反力 PC 鋼棒の機械的性質

呼び名	ユニットの標準緊張荷重 (kN)	中空PC鋼棒			反力PC鋼棒			中空+反力PC鋼棒 (kg/m)
		強度レベル (N/mm ²)	形状 (外形×厚さ) (mm)	公称断面積 (mm ²)	径の呼び名 (mm)	圧縮耐力 (N/mm ²)	公称断面積 (mm ²)	
20T	220	930/1080	29×3.6	287.3	20	930	314.2	4.73
30T	320		32×5.0	424.1	20	1275	314.2	5.80
40T	420		40×5.0	549.8	28	930	615.8	9.15
60T	620		43×7.2	809.8	27	1275	572.6	10.85

2.5 反力 PC 鋼棒ひずみ測定用治具

本試験の目的の一つである反力 PC 鋼棒の有効性の確認にあたり反力 PC 鋼棒のひずみの測定を行う。 反力 PC 鋼棒は中空 PC 鋼棒内に配置されておりコンクリートとの付着がある中空 PC 鋼棒に対し， 1mm のギャップを介して貫通配置されており鋼材端部においてのみ一体化されているため， 荷重荷重に伴う応力増加量は鋼棒全長に対して均一になると推定している。 本試験では， 梁試験体の耐力向上に寄与することが期待される反力 PC 鋼棒の応力増加量を図-3 に示されるように端部においてひずみゲージをセットすることにより確認する。

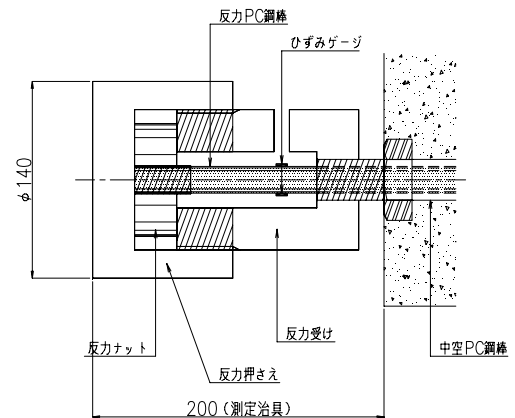


図-3 反力 PC 鋼棒ひずみ測定用固定治具

2.6 載荷試験体

図-4 に単純梁載荷試験・交番載荷試験における試験体図を示す。 単純梁載荷試験体は左右対称であることから左半分のみを示した。 交番載荷試験の試験体の断面形状， 配筋・中空 PC 鋼棒配置条件， およびせん断スパン長などの構造詳細は単純梁試験体と同一とした。 また， 通常の鉄道構造物における上部工反力による柱部材の軸力規定値から柱断面応力として $1.0 \text{ (N/mm}^2)$ を PC 鋼棒により導入した。 PC 鋼棒 (φ26 SWPR 930/1080) は柱中心に引張鋼材として機能しない様， φ50mm の開口内に配置し， 交番載荷時の軸力値は一定とした。

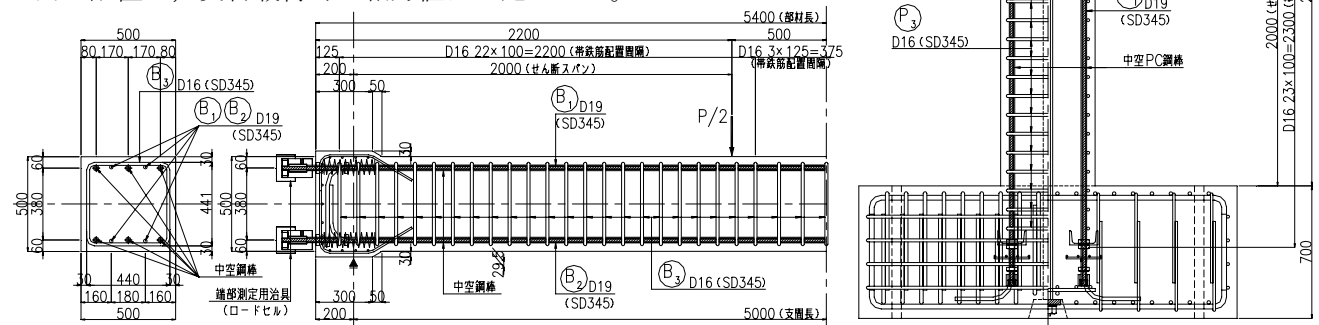


図-4 単純梁載荷試験体 (左) と静的交番載荷試験体 (右) 概要図

3. 試験結果

3.1 単純梁静的荷重試験結果

図-5に本試験から得られた荷重-変位関係を示す。反力鋼棒無しの PPC1-1 については中空 PC 鋼棒の破断が破断音と中空 PC 鋼棒のひずみ増加量の急激な減少が確認されたため、荷重試験を終了し、反力鋼棒を有する PPC1-2 については荷重レベルが想定値より大幅に超えたため荷重試験を終了した。何れの CASE についてもコンクリート圧壊開始後も荷重は低下することなく、耐力レベルを保持していることが確認できる。

また、反力 PC 鋼棒の一体化による最大耐力値の相違は概ね 1.2 倍程度の増加であることが確認された。

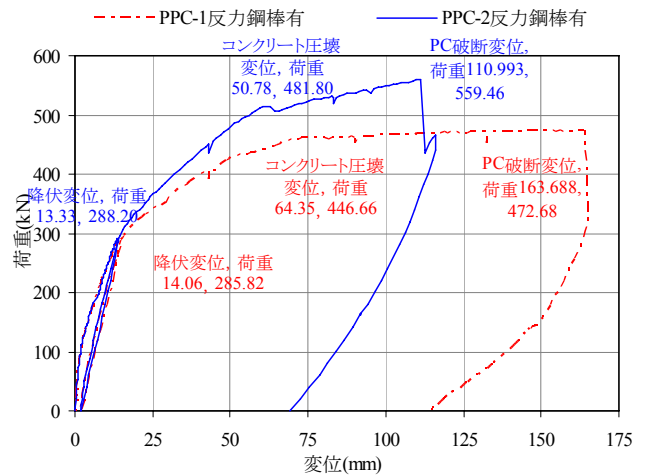


図-5 梁荷重試験 荷重-変位関係

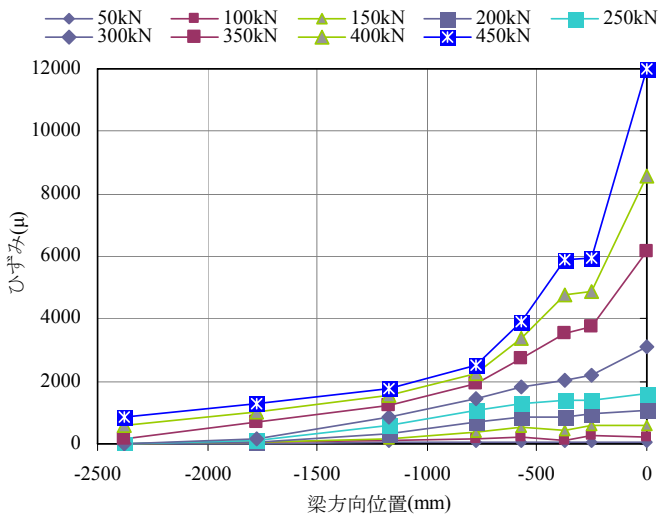


図-6 中空 PC 鋼棒ひずみ (PPC1-1)

図-6, 7に本試験から得られた各荷重レベルにおける中空 PC 鋼棒のひずみ分布を示す。反力 PC 鋼棒の有無による中空 PC 鋼棒のひずみ分布の相違は顕著である。径間中央部の荷重レベル 450kN 荷重時の中空 PC 鋼棒のひずみは、反力鋼棒の無い PPC1-1 が 12,000 μ に対し、反力鋼棒を鋼棒端部にて定着した PPC1-2 が 7,000 μ と概ね 60%程度であり、反力鋼棒が応力分担することによる中空 PC 鋼棒のひずみ増加量の低減効果が確認できる。

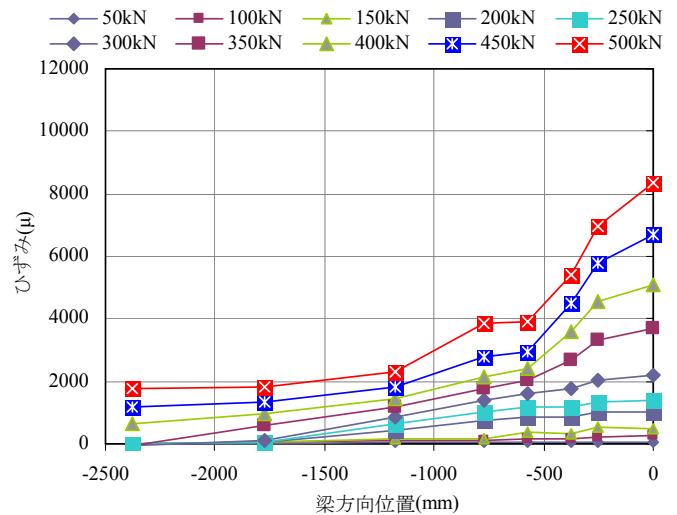


図-7 中空 PC 鋼棒ひずみ (PPC1-2)

図-8に鋼材端部ひずみゲージから測定した反力 PC 鋼棒のひずみ履歴を示す。降伏荷重レベル 300kN 以降の引張側反力 PC 鋼棒のひずみ増加が顕著である。

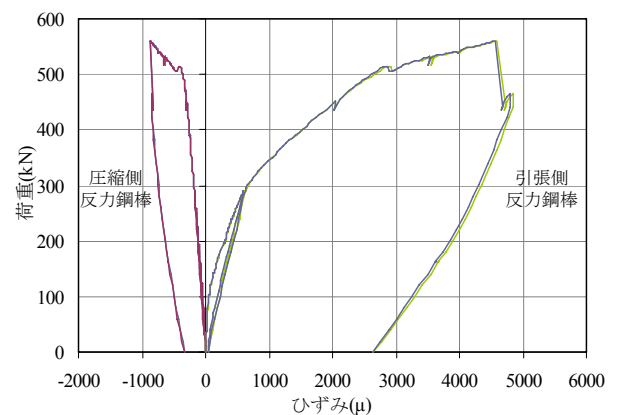


図-8 反力 PC 鋼棒ひずみ (PPC1-2)

中空 PC 鋼棒と反力 PC 鋼棒の応力分担率に関して、荷重レベル 500kN 荷重時の引張側中空 PC 鋼棒のひずみが 8,000 μ に対し、引張側反力 PC 鋼棒のひずみは 3,000 μ 程度と引張側中空 PC 鋼棒の約 1/3 程度のひずみ増加量が生じていることが確認できる。

3.2 柱静的交番荷重試験結果

最終荷重時の状況写真を写真-1, 2に示す。



写真-1 PPC 2-1; 反力鋼棒無 (15 δy)



写真-2 PPC 2-2; 反力鋼棒有 (16 δy)

PPC2-1(反力鋼棒無)試験体については、15 δy にて柱断面の全鋼材が破断したため、載荷を終了した。PPC2-2(反力鋼棒有)試験体については、16 δy 載荷終了においても全鋼材の破断は確認されなかったため載荷可能であったが、静的アクチュエーターのストローク限界に達したため、載荷を終了した。PPC2-2 については、載荷終了時にはかぶりコンクリートは剥落したが、鋼材内コアコンクリートはほぼ無損傷であった。また、鋼材について、異形鉄筋は柱基部で座屈した後、引張載荷で破断したが、中空 PC 鋼棒については座屈せず、フーチング内部にて破断した(写真-3 参照)。



写真-3 柱基部損傷状態 (PPC2-2)

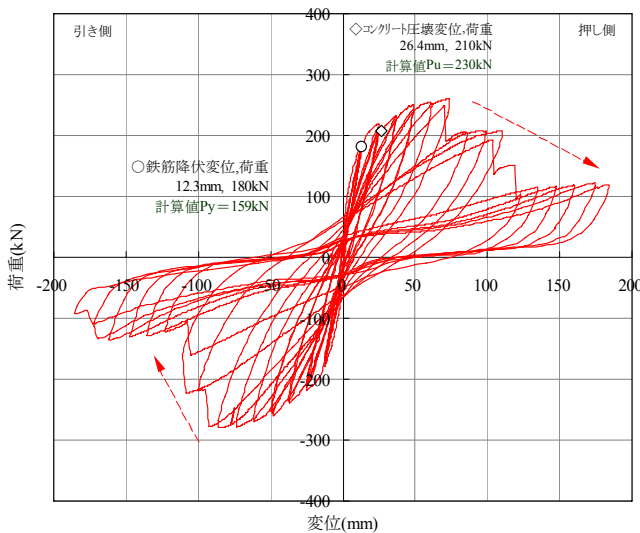


図-9 PPC2-1 荷重-変位履歴

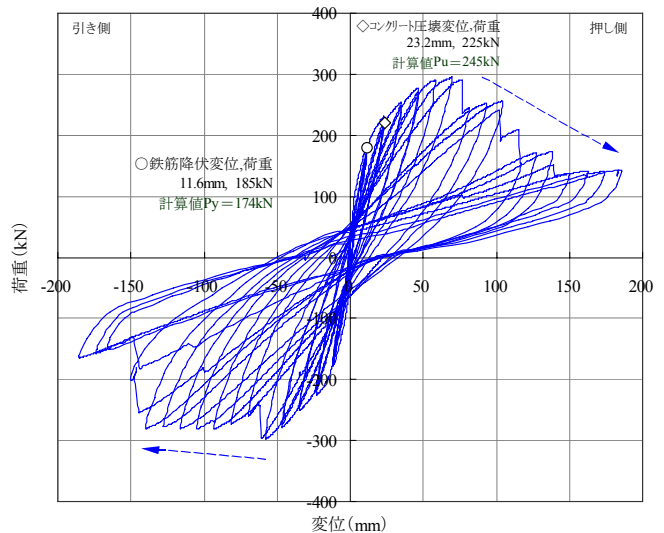


図-10 PPC2-2 荷重-変位履歴

PPC2-2にて反力 PC 鋼棒は断面中心に引張側・圧縮側ともに1本ずつ設置しているのみである。耐力値の増加率は降伏耐力 P_y (1.0倍)、終局耐力 P_u (1.1倍)、最大耐力 P_m (1.2倍)とわずかであるが、引き側の変形性能は顕著な差異が確認された。PPC2-1については、8 δy 以降軸方向鋼材の座屈および破断が生じ、急激に耐力値が低下したが、PPC2-2の引き側については鋼材の座屈・破断が12 δy まで生じなかったため、耐力値が12 δy まで低下することはなかった。反力 PC 鋼棒が圧縮側鋼材の座屈、引張側鋼材の破断を抑制しているものと考えている。PPC2-2の押し側は帯鉄筋の定着が不十分であったため軸方向鉄筋が座屈・破断を起こし、期待した変形性能を確保する結果が得られなかった(図-9, 10参照)。詳細は考察に記す。

3.3 試験結果から得られた考察

図-11に単純梁試験から得られた荷重-変位曲線にプレストレスを考慮しないCASEを通常のRC部材と仮定して、断面計算を行ない降伏耐力線を追加したところ降伏耐力は200kN程度であった。PPC部材の降伏耐力が反力PC鋼棒の有無に関わらず概ね290kN程度なので、プレストレス導入による降伏耐力の増加量は概ね1.45倍と確認できる。また、プレストレスを考慮したRC断面計算の降伏耐力値は280kNなので試験降伏値が若干上回る結果となった。

図-12に交番載荷試験から得られた各ケースにおける荷重-変位履歴の包絡線を示す。反力PC鋼棒を有するPPC2-2の試験体の方が耐力、および変形性能に関して優れていることが確認できる。

PPC2-2の押し側の変形性能が引き側と比較して向上しなかった理由として帯鉄筋の加工が適切でなく、定着不足から面外方向にばらける傾向を示した。この結果、引き側軸方向鋼材の面外方向変位を十分に拘束できず、圧縮載荷時の座屈・引張載荷時の破断を早め、期待する変形性能を確保する結果が得られなかった。今後は十分な定着が得られるよう帯鉄筋の加工等、構造細目に留意することを心がける。

また、図-13に等価弾性応答加速度算出概略図を示す。構造物の変形性能は台形状の震度($K_h = P/W$) - 変位曲線に囲まれた面積(gal)で表され、面積が大きい程、エネルギー吸収能力の優れた構造物とされる。反力PC鋼棒の有無による変形性能の相違は以下表-3の試算結果の通りである。(P;水平力 W;自重)

表-3 各CASEにおける変形性能の比較

	耐震性能 (引き側)	耐震性能 (押し側)
PPC2-1	3,778 (gal)	3,664 (gal) 以上
PPC2-2	4,486 (gal)	4,180 (gal) 以上

4. まとめ

今回の実験において以下の結果が得られた。

- (1) 梁試験結果よりプレストレス導入(1.7N/mm²)によりRC部材と比べ降伏耐力は1.5倍程度向上した。
- (2) プレストレスを考慮したRC断面計算の降伏耐力値より梁試験耐力の降伏値が上回る結果となった。
- (3) 梁試験結果より反力PC鋼棒と中空PC鋼棒のひずみ分担率は概ね1:3であった。
- (4) 梁試験結果より反力PC鋼棒と中空PC鋼棒の一体化により中空鋼棒のひずみが60%程度抑制された。
- (5) 柱試験結果より反力PC鋼棒と中空PC鋼棒の一体化によりL2地震時変形性能が1.2倍程度向上した。

参考文献

【鉄道構造物等設計標準・同解説】 (耐震設計) (H11.10 (財) 鉄道総合技術研究所 編)

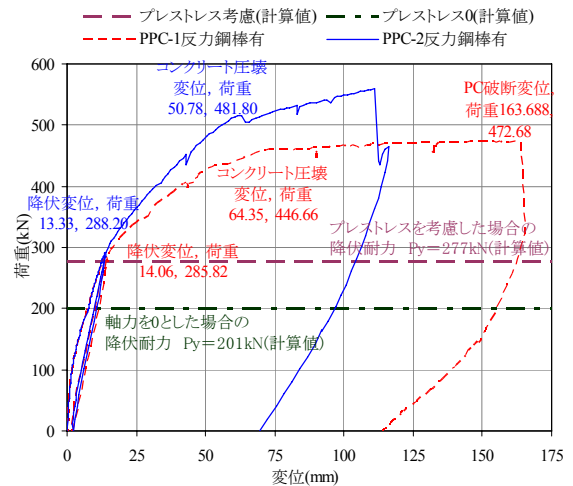


図-11 プレストレス非考慮時との比較

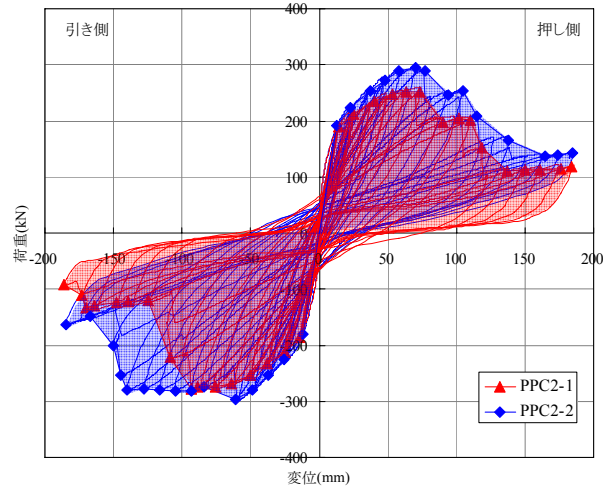


図-12 各CASEの荷重-変位履歴包絡線

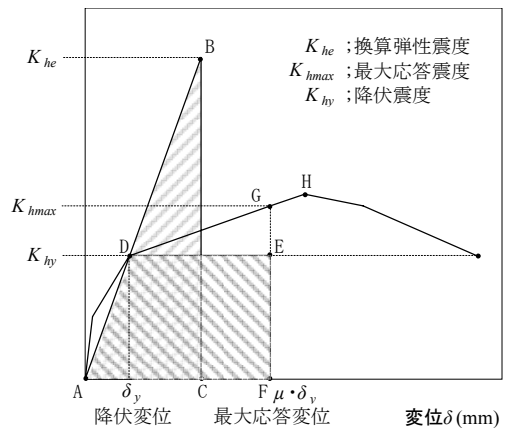


図-13 等価弾性応答加速度算出概略図