

論文 ハーフプレキャスト RC 開削トンネル中床版の部材性能

中田 裕喜^{*1}・田所 敏弥^{*2}・谷村 幸裕^{*2}・徳永 光宏^{*3}

要旨：構造物の建設，特に既設構造物の改良工事等では多くの時間的・空間的制約のもとで行わなければならない。施工性の向上と工期の短縮を実現する一案として，ハーフプレキャスト（HPCa）工法の適用が考えられるが，その部材性能は場所打ちコンクリート一体部材と異なる可能性がある。そこで，HPCa 工法を適用した開削トンネル中床版の基礎的な載荷試験を行い，場所打ち部材と比較することにより，その部材性能の評価を行った。その結果，HPCa 中床版は，場所打ち部材に比べ，降伏荷重・最大荷重・変形性能に大きな差がないが，降伏剛性に違いが生じることや定着などの配筋詳細に留意する必要があることが明らかになった。

キーワード：ハーフプレキャスト，場所打ちコンクリート，開削トンネル，スラブ，部材性能

1. はじめに

構造物の建設においては施工性と工期の短縮が求められる。特に，既設鉄道構造物の改良工事等においては，営業線の安全確保を優先するため，多くの時間的・空間的制約のもとで行わなければならない。

合理化・省力化を図る一案として，ハーフプレキャスト（HPCa）工法の適用が考えられる。HPCa 工法とは，プレキャスト（PCa）部材であるプレストレスト版を先行設置し，これを型枠として用いて場所打ちコンクリートとの一体化を図るものである。打設時のコンクリートの自重によるたわみを制限するため，PCa 版にはプレストレスが導入される。

一般的な場所打ち工法においては，型枠および支保工を設置し，コンクリートを打設後，それらの撤去作業が生じる。一方で，HPCa 工法は PCa 版を型枠，構造部材として用いるため，支保工の設置や型枠および支保工の撤去作業が省略される。既設構造物の工事においては，営業線の安全確保はもちろん，資材ヤードの削減も可能となる本工法は，工期の短縮やトータルコストの低減に貢献するなど，非常に有効であると考えられる。

一方で，HPCa 工法は PCa 版を型枠・構造部材として用いるため，PCa 版が部材性能に影響を及ぼす可能性がある。また，場所打ちコンクリートとの一体性や，HPCa スラブと他部材との接合方法によっても，場所打ちコンクリート一体部材と異なる可能性がある。鉄道ラーメン高架橋の柱や梁，スラブに対しては，HPCa 工法の適用した場合の設計手法が提案され¹⁾，実構造物への適用がある。また，鋼繊維を混入したプレキャスト型枠工法も提案されている²⁾。本研究では検討の行われていない開削トンネルの中床版を対象に，HPCa 工法の適用を考慮し，耐震性能照査に用いるための部材性能（曲げ剛性，

降伏耐力，曲げ耐力，変形性能，破壊性状）の検討を目的として，基礎的な試験を行った。具体的には，実構造物を想定して，スラブおよびその取付け部の形状，配筋状況を設定した実大の HPCa 試験体および場所打ち一体 RC 試験体を製作し，正負交番載荷試験を行い，両者を比較することで，HPCa 試験体が RC 試験体に比べてどの程度の部材性能を有しているか評価を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

試験体は開削トンネルにおける中床版を対象とし（図-1 参照），HPCa 製の実大試験体（以下，HPCa 試験体）および比較用に場所打ち鉄筋コンクリート製とした実大試験体（以下，RC 試験体）の計 2 体とした。

表-1 に試験体に使用した材料と材料試験結果を，表-2 および図-2 に試験体の諸元を示す。図-3 に試験体設置状況を示す。

試験体は側壁（スタブ）と受台，スラブから構成される。HPCa 工法はプレストレスを導入した PCa 版を設置後，PCa 版を型枠として場所打ちコンクリートを打設するが，PCa 版を支持するために，図-2 に示すように側壁およびコーベル状の受台が先行して施工される。HPCa 試験体においても実施工を想定して，側壁，受台を先行

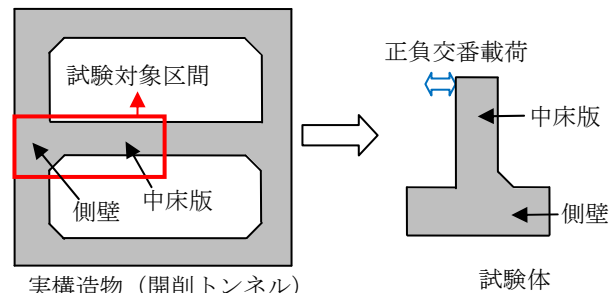


図-1 対象構造物概念図

*1 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修（正会員）

*2 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工博（正会員）

*3 九州旅客鉄道（株） 工事事務所 計画課 工修（正会員）

表-1 使用材料と材料試験結果

(a) コンクリート

試験体	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
HPCa	PCa版	75.6	38.1	5.3
	スラブRC部	37.2	28.3	2.7
	側壁・受台	36.1	30.7	2.8
RC	スラブ	39.5	28.9	2.7
	側壁・受台	38.0	30.5	2.6

(b) 鋼材

試験体	部位	使用鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
HPCa	上側鉄筋	SD345-D19	392	1.92	563
	下側鉄筋	SD345-D16	368	1.91	582
	スターラップ	SD345-D13	376	1.90	568
	PC鋼材	PC鋼より線	1835	2.03	1930
	ラチス筋	SWM-B $\phi 8$	488	1.95	498
RC	上側鉄筋	SD345-D19	392	1.92	563
	下側鉄筋	SD345-D16	368	1.91	582
	スターラップ	SD345-D13	357	1.88	564

表-2 試験体諸元

試験体	断面形状 (mm)	せん断スパン (mm)	引張鉄筋比 (正載荷時) (%)	引張鉄筋比 (負載荷時) (%)	せん断補強筋比 (%)
HPCa RC	415×1000	2090	0.40	0.75	0.30

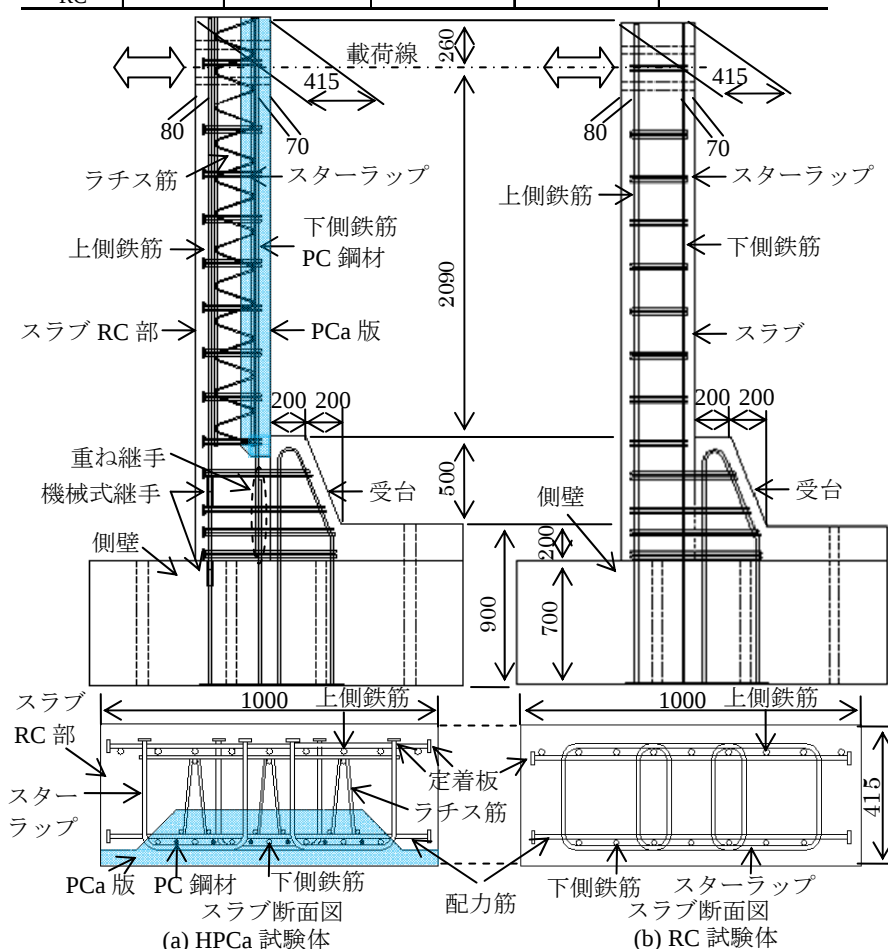


図-2 試験体諸元 (単位: mm)

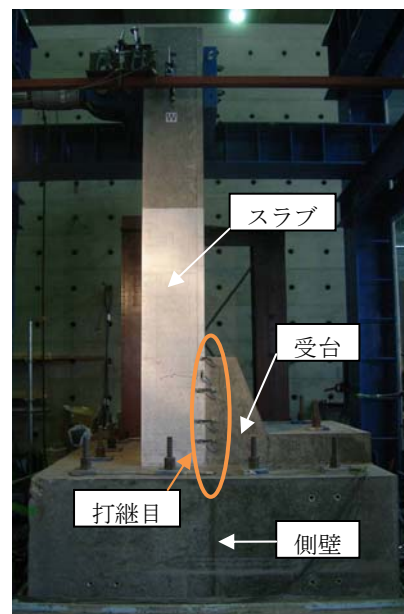


図-3 試験体設置状況

表-3 計測項目

測定項目	位置
荷重	水平荷重
変位	載荷点水平変位
	載荷点鉛直変位
	打継目開き
	フーチング水平変位
	フーチング浮き上がり変位
鉄筋ひずみ	軸方向鉄筋ひずみ
	帯鉄筋ひずみ
	トラス筋ひずみ
	PC鋼より線ひずみ
ひび割れ・損傷状況	

施工し、PCa版を受台上に設置し(PCa版と受台の重なる長さは120mm)、スラブリの配筋、打設を行った。

HPCa試験体の断面は、実際の開削トンネルの断面を考慮して、図-2に示すようなものとした。ただし、断面幅は、PCa版の寸法や施工性を勘案して、1000mmとした。PCa版にはPC鋼材とは別途軸方向鉄筋(実構造物におけるスラブリの下側軸方向鉄筋)およびスターラップをあらかじめ設け、軸方向鉄筋はあらかじめ設置した側壁からの鉄筋と重ね継手(継手長430mm程度)により接合している。上側軸方向鉄筋はPCa版設置後に配筋

を行うが、側壁からの鉄筋とねじ節鉄筋継手により機械的に接合している。スターラップに関して、PCa版にあらかじめスターラップを設けているため、上側鉄筋の配置の都合上、閉合した形にすることは困難である。そこで、円形の定着板を有するU形のスターラップを採用した。なお、上側鉄筋の座屈の抑制の観点から、上側鉄筋と直交する方向に、U形のスターラップと取り囲むように配力鉄筋を配置した。

RC試験体においては、HPCa試験体と比較を行うため、軸方向鉄筋比やスターラップの鉄筋比、受台等の形状は

HPCa 試験体と同一とした。ただし、スターラップは溶接により閉合した形としている。また、側壁（スタブ）と受台、スラブを一体打設とした。

受台からの試験体高さは実際のスラブにおける塑性ヒンジのせん断スパン（実際のスラブの 1/2 程度）を想定し、2090mm とした。また、試験体はスラブが直立した状態で設置した。なお、実構造配置を考慮して、以下、図-2 の左側面を上側、右側面を下側と称する。

計測項目一覧を表-3 に示す。

2.2 試験方法

図-2 に示すように、せん断スパン（受台天端からの高さ）2090mm の位置で、水平ジャッキにて正負交番载荷を行った。なお、実構造物のスラブには軸力が作用すると考えられるが、その大きさは小さく、影響は小さいと考えられるため、試験では軸力を導入していない。

载荷制御方法は軸方向鉄筋降伏前までは荷重制御、降伏以降は変位制御による正負交番载荷とした。引張鉄筋の降伏時の変位を δ_y とし、载荷サイクルは δ_y 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y \cdots n\delta_y$ （ n は整数）と δ_y の整数倍とし、各サイクル 3 回繰り返して载荷を行った。ただし、PCa 版が引張になる方向（図-2 における左方向、荷重・変位は正とし、以後は下側引張と称す）と圧縮になる方向（図-2 における右方向、荷重・変位は負とし、以後は上側引張と称す）で水平剛性、降伏点が異なると考えられるため、上側引張時と下側引張時でそれぞれの引張鉄筋が降伏した変位 δ_y を基準とした。図-4 に加力サイクルを示す。

なお、RC 試験体については HPCa 試験体と比較を行うため、HPCa 試験体と同一の降伏変位による制御により正負交番载荷を実施した。

3. 試験結果

3.1 荷重－変位関係の比較

(1) 変形性能の比較

スターラップのひずみ分布を図-5 に示す。スターラップは RC 試験体における受台端部から上方 0.5D（D：断面高さ）の箇所を除き、両試験体の計測箇所全てで降伏していないことから、両試験体とも曲げ破壊したと考えられる。なお、RC 試験体において降伏した帯鉄筋は、軸方向鉄筋が座屈した $-8\delta_y$ で降伏しているため、軸方向鉄筋の座屈の影響によるものと思われる。

図-6、7 に荷重－変位関係とその包絡線を示す。荷重－変位関係は引張鉄筋降伏後、顕著な水平荷重の低下はみられず、両試験体とも変形性能を有する履歴となっている。载荷方向で比較すると、両試験体とも上側引張から下側引張に向かう時の履歴は、荷重が 0kN 付近まで低下した後、過去に経験した最大点に向かっていく。上側引張から下側引張に向かう時は、原点付近に向かった

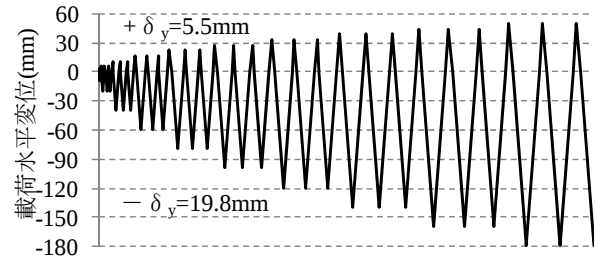


図-4 载荷サイクル（HPCa 試験体の降伏変位基準）

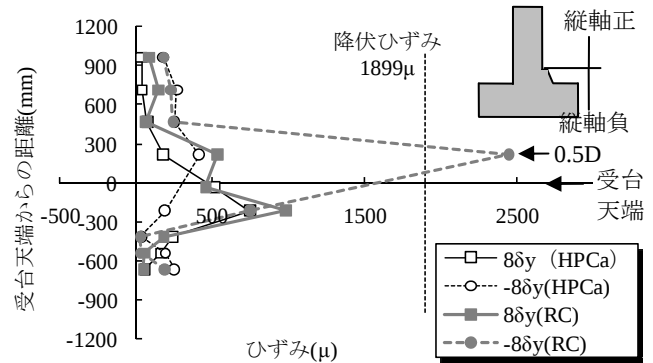
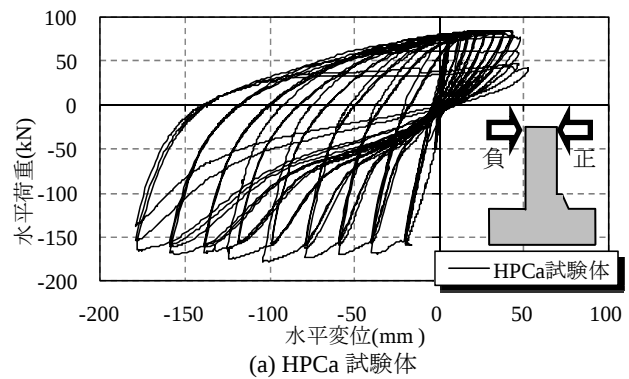
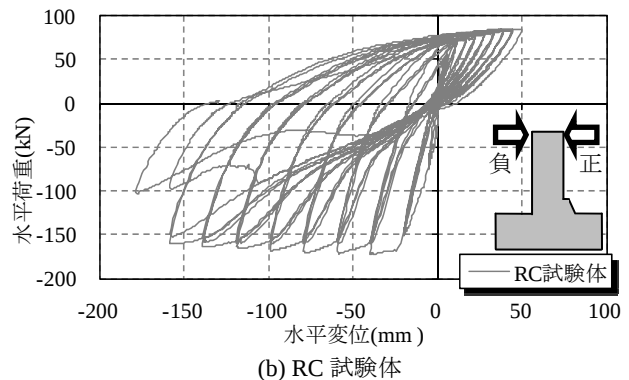


図-5 スターラップのひずみ分布



(a) HPCa 試験体



(b) RC 試験体

図-6 荷重－変位関係

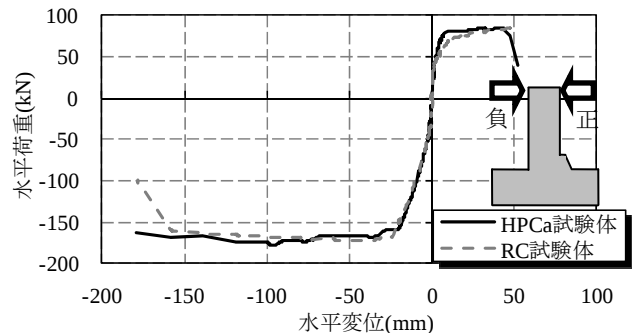


図-7 包絡線の比較

後、新規の変位から荷重が大きく増加している。図-8に $+1\delta_y$ 、 $+2\delta_y$ 時の受台とスラブ境界の目開き（ひび割れ）の分布を示しているが、下側引張時に両試験体とも目開きが生じていることが確認できる。したがって、上側引張時に新規変位から荷重が大きく増加するのは、受台とPCa版（スラブ）の面接触の影響と考えられる。

図-6より、上側引張時において、HPCa試験体は $6\delta_y$ （119mm）で、RC試験体は $3\delta_y$ （60mm）で水平荷重が増加しなくなったが、その後も荷重を維持し続けた。また、HPCa試験体は $+10\delta_y$ の1ループ目で、RC試験体は $-9\delta_y$ の1ループ目でコンクリートのはく離・はく落、軸方向鉄筋の座屈により水平荷重が大きく低下した。よって、HPCa試験体の変形性能はRC試験体以上であると考えられる。なお、履歴法則は両試験体で類似した傾向が見られた。

図-6に示した包絡線においても、下側引張時の剛性変化点（降伏点）と荷重低下点を除き、両試験体で類似した傾向を示した。

(2) 降伏剛性の比較

表-4に降伏荷重 P_y と降伏変位 δ_y 、最大荷重 P_{max} 、降伏剛性 K に関してまとめたものを示す。なお、降伏剛性 K とは降伏点と原点を結ぶ割線剛性（ $=P_y/\delta_y$ ）を意味している。

表-4より、荷重方向で降伏点を比較すると、下側引張時の引張鉄筋比は上側引張時のそれよりも小さいため、両試験体とも降伏耐力 P_y 、降伏変位 δ_y ともに下側引張時の方が小さい。RC試験体における剛性 K は上側・下側引張時で差はないが、HPCa試験体の降伏剛性 K は下側引張時の方が大きく、上側引張時の1.74倍の降伏剛性を示した。これは、PCa版にはPC鋼より線が配置されていること、またそれにより曲げひび割れが抑制されたため、PCa版が引張を受ける下側引張時で降伏剛性が大きくなったと考えられる。

(3) 降伏荷重、最大荷重の比較

両試験体の降伏荷重 P_y を比較すると、上側・下側引張時ともにHPCa試験体の方が大きく、下側引張時では1.08倍、上側引張時では1.02倍となった。最大荷重 P_{max} は両試験体で同程度となった。

以上より、HPCa試験体はRC試験体以上に降伏荷重、最大荷重、変形性能を有していると評価でき、HPCa試験体の鉄筋の定着法や構造が曲げ性能に及ぼす影響は小さいと考えられる。ただし、HPCa試験体の下側引張時の降伏剛性は、PCa版の影響により、RC試験体よりも大きくなるのが分かった。

3.2 損傷状況の比較

図-9に $7\delta_y$ （1ループ目）時における両試験体の損傷状況を示す。HPCa試験体の下側引張時では受台天端よ

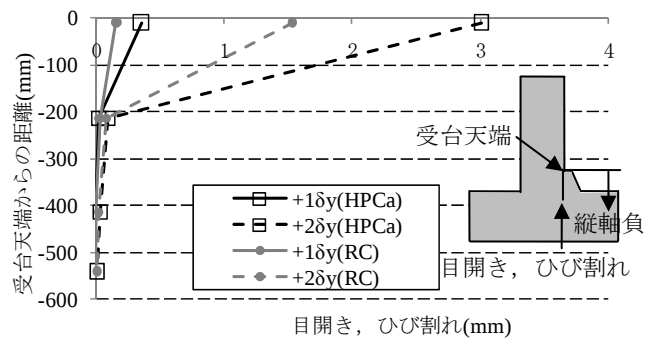


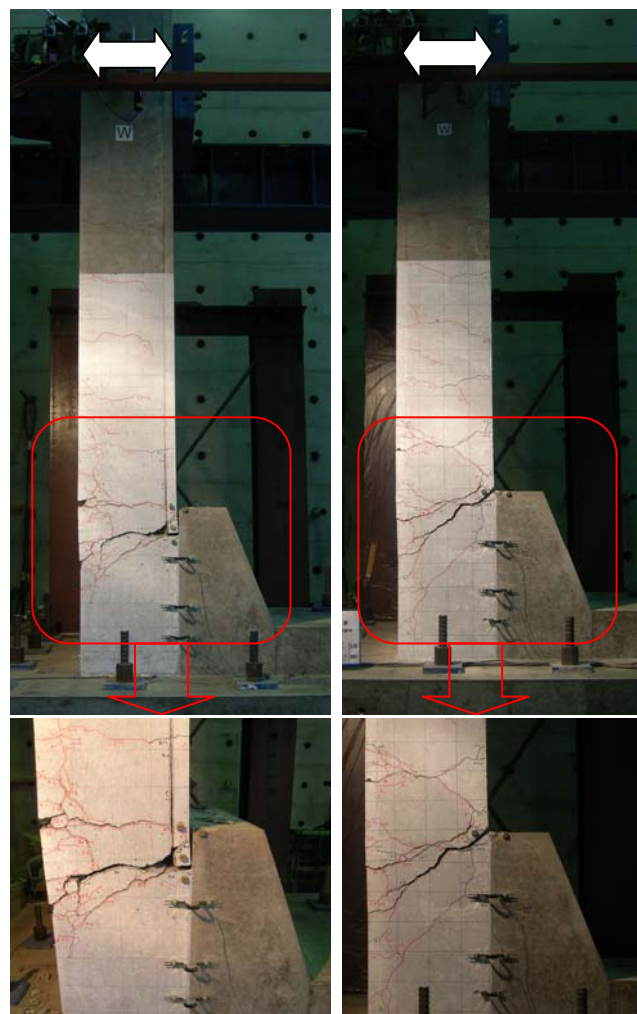
図-8 受台とスラブ境界における目開き（ひび割れ）

表-4 降伏荷重、最大荷重、降伏変位および曲げ剛性

試験体	荷重方向	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
HPCa 試験体	下側引張	69.9	84.9	5.5	12.7
	上側引張	-155.7	-178.1	-19.8	7.9
RC 試験体	下側引張	64.3	84.9	8.8	7.3
	上側引張	-152.0	-172.5	-19.9	7.6
HPCa/ RC	下側引張	1.09	1.00	0.63	1.74
	上側引張	1.02	1.03	0.99	1.03

P_y : 降伏荷重, P_{max} : 最大荷重, δ_y : 降伏変位,

K : 降伏剛性 ($=P_y/\delta_y$)



(a) HPCa 試験体

(b) RC 試験体

図-9 損傷状況（ $7\delta_y$ 1ループ目）

り 120mm 下の PCa 版と場所打ち RC 部との境界にて曲げひび割れが生じ、以降はひび割れが水平方向および側壁方向（帯鉄筋位置）へ進展した。PCa 版には大きな損傷は確認されなかったが、図-8 に示したように、受台と PCa 版で目開き（ひび割れ）が見られた。上側引張時では、受台天端高さ位置より曲げひび割れが生じ、水平方向に進展した。 $9\delta_y$ の正載荷時の 3 サイクル目において、受台天端位置で圧縮鉄筋（上側鉄筋）の座屈、かぶりコンクリートの剥落が発生し、荷重が著しく低下した（図-10 参照）。座屈長およびはく落範囲は受台天端の高さ位置を中心に 400mm 程度であった。また、U 形スタラップに配置している円形の定着板が、横方向の配力筋および上側鉄筋からはずれていることが観察された。

RC 試験体は、上側・下側引張時とも受台天端より曲げひび割れが生じ、側壁方向（帯鉄筋位置）へ進展した。 $8\delta_y$ の負載荷時の 3 サイクル目において、圧縮側でかぶりコンクリートが大きく剥離し、圧縮鉄筋（下側鉄筋）の座屈が確認された。座屈長は受台天端より上方 200mm 程度、はく落範囲は 400mm 程度であった。

両試験体で比較すると、曲げひび割れ発生領域や進展方向は若干差異がみられるが、基部での曲げひび割れ、圧壊までは同様の損傷過程であった。ただし、軸方向鉄筋の座屈面は両試験体で異なった。

図-11 に引張鉄筋のひずみ分布（ $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 5\delta_y$ 時）を示す。曲げひび割れの発生状況は両試験体で若干異なる傾向を示したが、引張鉄筋のひずみ分布は下側引張時の $+1\delta_y$ を除き、大きな差異は認められない。なお、下側引張時の降伏変位は、前述のように PCa 版の影響により RC の降伏変位よりも小さくなっている。即ち、 $+1\delta_y$ 時の引張鉄筋のひずみ分布の違いは水平荷重の作用レベルの違いである。よって、両試験体の曲げひび割れの発生状況の差が及ぼす影響は小さいと考えられる。

軸方向鉄筋の座屈に関して、座屈発生面は両試験体で異なる。HPCa 試験体の上側引張時の圧縮側には高強度の PCa 版が配置されていること、座屈発生箇所では PCa 版内の PC 鋼より線が抵抗すると思われるため、上側引張時の圧縮側では座屈しなかったと考えられる。

なお、図-8 で示したように、HPCa 試験体は受台と PCa 版（スラブ）境界での目開き（ひび割れ）が RC 試験体よりも大きい、3.1 節の荷重-変位関係より、RC 試験体と比較して部材性能への影響は少なく、PCa 版の剛性による影響の方が大きい結果となった。

4. 計算値との比較

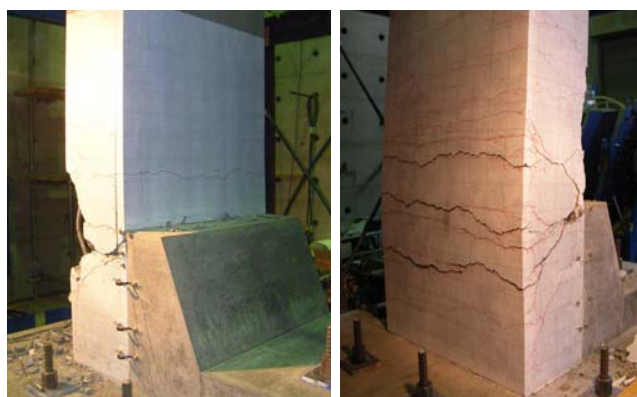
図-10、表-5 に実験と計算値を比較した荷重-変位関係（包絡線）、降伏荷重および最大荷重を示す³⁾。計算値は文献 3) により算定したが、その計算値は高架橋柱の



*横方向配力筋は撤去済

(a) 上面 (HPCa 試験体)

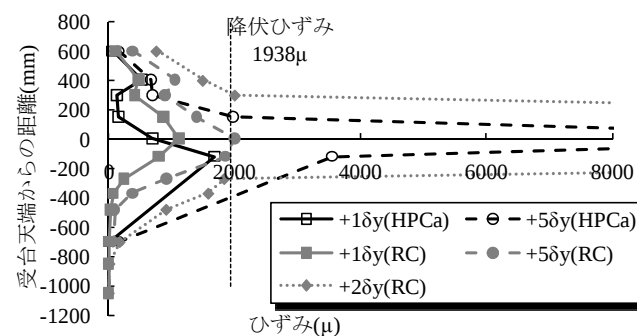
(b) 下面 (RC 試験体)



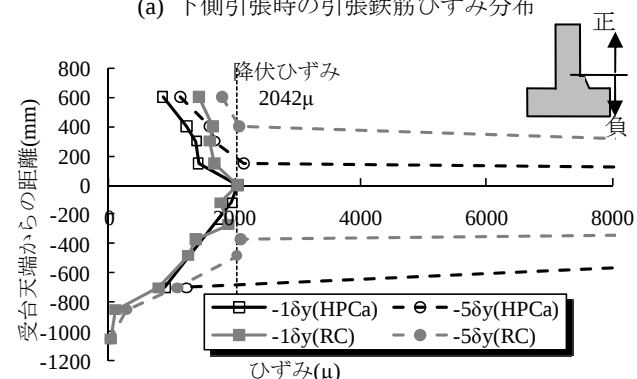
(c) 上面 (HPCa 試験体)

(d) 下面 (RC 試験体)

図-10 軸方向鉄筋座屈状況（試験終了時）



(a) 下側引張時の引張鉄筋ひずみ分布



(b) 上側引張時の引張鉄筋ひずみ分布

図-11 引張鉄筋のひずみ分布

載荷実験を基に提案されたものである。現在の設計では、高架橋柱以外の部材でも提案式が準用されているため、提案式で評価できるかどうかの検討を行った。なお、HPCa 試験体の計算値において、HPCa 版（コンクリート強度、PC 鋼より線）の影響は考慮せずに算定した。即ち、RC 試験体と同値とした。また、せん断スパンは受台天端から載荷点までの距離 2090mm とした。

上側引張時において、両試験体の降伏荷重、最大荷重のいずれも試験値が計算値を上回った。一方、下側引張時においては、両試験体とも降伏荷重、最大荷重のいずれも試験値が計算値を下回った。図-11 に示したように、HPCa 試験体は、下側引張時の $1\delta_y$ で受台天端から下 120mm の点での引張ひずみ (1690μ) が降伏ひずみ (1938μ) 近くまで達し、RC 試験体においては、 $2\delta_y$ 時に同箇所が引張降伏した。つまり、せん断スパンが想定よりも大きくなったことが一因と考えられる。また、図-9 でみられるように、下側引張時の曲げひび割れは進展するにつれ側壁方向（図の左下方向）に向かっている。したがって、計算上の決定断面は受台端部における水平方向断面であるが、本試験体のような形状の場合には決定断面が水平方向ではない、あるいは平面保持の仮定が成立しない可能性がある。

変形性能に関しては、HPCa 試験体は RC 試験体を上回ったが、下側引張時の計算値は過大評価する結果となった。HPCa 試験体は U 形スターラップに配置している円形の定着板が、横方向の配筋筋および上側鉄筋からはずれ、座屈することにより耐力低下が生じた。つまり、座屈は定着板の性能に依存すると考えられるが、文献 4) において、定着板の形状が耐力低下（座屈）に影響を及ぼすことが明らかになっている。また、今回の試験は上側・下側引張で載荷変位が異なるが、既往の研究では、上側・下側引張の載荷履歴の影響により上側・下側引張の変形性能が変動することも示唆されている⁵⁾。

本検討で用いた諸元を有する部材性能を精度よく算定するには、HPCa 試験体・RC 試験体関わらず、今後さらに検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

開削トンネルの中床版を想定して、スラブおよびその取付け部の形状、配筋状況を設定した実大の HPCa 試験体および一般的な場所打ち一体 RC 試験体を製作、正負交番載荷試験を行い、両者の部材性能の比較・評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) HPCa 試験体の降伏荷重、最大荷重、変形性能は RC 試験体と大きな差はみられなかった。
- (2) HPCa 試験体の下側引張時の降伏剛性は、PCa 版には PC 鋼より線が配置されていること、またそれにより

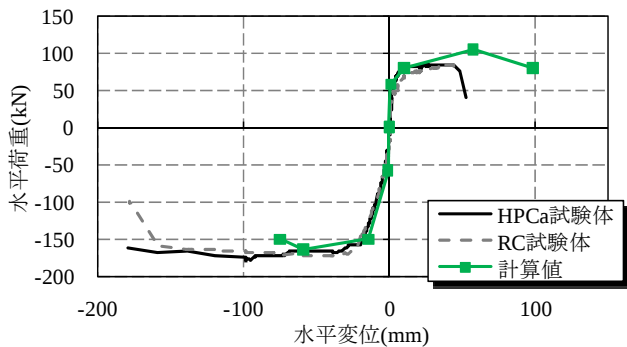


図-12 荷重-変位関係の計算値との比較

表-5 降伏荷重、最大荷重の計算値との比較

試験体	載荷方向	実験値		計算値	
		P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_{ycal} (kN)	P_{mcal} (kN)
HPCa 試験体	下側引張	69.9	84.9	80.5	105.3
	上側引張	-155.7	-178.1	-150.4	-164.6
RC 試験体	下側引張	64.3	84.9	80.5	105.3
	上側引張	-152.0	-172.5	-150.4	-164.6

P_y : 降伏荷重, P_{max} : 最大荷重, P_{ycal} : 計算降伏荷重,
 P_{mcal} : 計算最大荷重

曲げひび割れが抑制されたため、RC 試験体の 1.74 倍であった。

- (3) HPCa 試験体の損傷の過程は、軸方向鉄筋の座屈前までは、RC 試験体と概ね同様であった。ただし、曲げひび割れの発生位置や進展方向に若干の差異がみられたが、引張鉄筋のひずみ分布は概ね同等であった。また、RC 試験体の軸方向鉄筋の座屈面はスラブ下面に対し、HPCa 試験体はスラブ上面に発生した。
- (4) 計算値と比較した場合、下側引張時の降伏耐力、最大荷重は過大評価した。損傷状況や引張鉄筋ひずみ分布から、せん断スパン比が大きくなったことが過大評価の一因と考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：ハーフプレキャスト工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針, 1999.3
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所：プレキャスト型枠工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針, 1999.3
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計一, 丸善, 1999
- 4) 小林雅彦, 山東徹生, 進藤良則：機械式定着工法を用いたせん断補強鉄筋の耐震性能の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp1119-1120, 2008
- 5) 田所敏弥, 田中浩一, 谷村幸裕, 黒川浩嗣, 服部尚道, 室野剛隆：鉄筋コンクリート柱の崩壊に関する限界の評価法, 土木学会論文集 E Vol.64 No.2, pp298-313, 2008.4