

異なる呼び名の引張鉄筋を用いたPPCはりの曲げ性状

群馬大学大学院	工学研究科	正会員	博士(工学)	○李	春鶴
群馬大学大学院	工学研究科	正会員	工学博士	辻	幸和
群馬大学大学院	工学研究科	正会員	博士(工学)	半井	健一郎
鹿島建設株式会社	東京土木支店	正会員	修士(工学)	有賀	大峰

1. はじめに

近年、土木構造物の長大化が進んでいるが、施工設備、施工能力、温度ひび割れの制御等の観点から、コンクリートを連続して打ち込むことは困難である上に、不経済である。特に、プレストレストコンクリート橋の場所打ち張出し架設工法等では、鉛直打継目が施工上避けられない。コンクリート構造物にとって打継目は、構造上当然弱点となる。しかしながら土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、構造細目において、打継目の位置および方向は、構造物の強度、外観および耐久性を害しないように定めることと言及するに留まっている。また当研究室においても、打継目がコンクリート部材やRC部材の力学的性状に及ぼす影響についての報告^{2) 3)}を行ってきたが、PPC部材では十分に行っていない⁴⁾。引張鉄筋の配置とコンクリートの強度を要因に採って、打継目がPPCはりの曲げ性状に及ぼす影響についての解明は喫緊の課題である⁵⁾。

本論文では、引張鉄筋の量、コンクリート強度、打継目の有無などの影響要因を採り上げて、異なる呼び名の鉄筋を引張鉄筋に用いたPPCはりの曲げ性状について、実験的に比較検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験に用いた試験体の形状寸法および配筋を図-1に示す。試験体の断面は全て300mm×600mmの矩形断面とし、試験体の全長は4800mmとした。主鉄筋は、引張鉄筋はコンクリート引張縁から50mmの位置に呼び名を3種類に変えた5本を配置し、圧縮鉄筋は圧縮縁から50mmの位置に呼び名D13を2本配置した。スターラップにはSD345D6を配置した。また、下面から150mmの位置に呼び径13mmのシースを2本配置し、コンクリートの打込み後シース内にてΦ13のPC鋼棒を緊張し、PCグラウトの充填を経て、載荷試験に供した。

試験体の諸元を表-1に示す。はり試験体名の前半部分の英文字は順次コンクリートの強度(普通強度コンクリートはNで、高強度コンクリートはHで示す。)を示し、打継目の有無(打継目無しはOで、打継目有りはGで示す。)を示し、英数は引張鉄筋の呼び名を表す。試験体は、普通強度および高強度の2種類のコンクリート、打継目の有無、異なる径の3種類の引張鉄筋比をパラメータとして、計10体を作製した。鉄筋およびPC鋼棒の力学特性を表-2に示す。

普通強度および高強度コンクリートの圧縮強度はそれぞれ47.1N/mm²と79.5N/mm²で、これは試験体と同一の養生を行った場合のコンクリートの圧縮強度である。

打継目は、試験体の曲げモーメント一定区間の中央に設けた。打継目は、打継目位置の型枠に遅延剤を塗布し

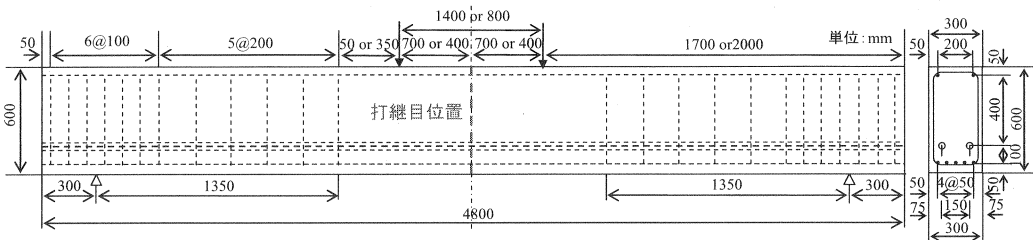


図-1 試験体の形状寸法および配筋

表-1 試験体諸元

供試体名	圧縮強度 [*] (N/mm ²)	打継目 有無	鋼材の材質・種類			引張 鉄筋 比(%)	$\sigma_{c,ps}$ ^{**} (N/mm ²)	PC グラウト 圧縮強度 (N/mm ²)	a ^{***} (mm)	a/d	載荷点 距離 (mm)
			引張鉄筋	スターラップ	PC 鋼棒						
NO-D13	47.1	無	SD295D13	SD295D6	PC 鋼棒	0.38	2.8	51.6	1400	2.55	1400
NO-D19			SD345D19			0.87					
NO-D25			SD345D25			1.53					
NG-D13		有	SD295D13			0.38					
NG-D25			SD345D25			1.53					
HO-D13			79.5			無					
HO-D19	SD345D19	0.87									
HO-D25	SD345D25	1.53									
HG-D13	有	SD295D13		0.38							
HG-D25		SD345D25		1.53							

*: 供試体と同一の養生を行ったコンクリート圧縮強度, **: プレストレス設計導入量, ***: センズスパン

た後に、コンクリートを打ち込み、材齢 1 日において打継目位置の型枠を外した後に水洗い処理した。その後、残りの部分のコンクリートを打ち込んだ。なお供試体の養生は、材齢 1 日までは蒸気養生を行い、それ以降は気中養生をした。材齢 57 日目に、Φ13 の PC 鋼棒の耐力 80%まで緊張し、直ちに PC グラウトの注入を行い、その後 28 日以後に載荷試験を実施した。

表-2 鉄筋および PC 鋼棒の力学特性

鋼材	呼び名	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
圧縮鉄筋	D13	190	364	515
引張鉄筋	D13	190	364	515
	D19	192	403	564
	D25	187	390	557
スターラップ	D6	187	374	541
PC 鋼棒	Φ13	199	1370	1467

2.2 載荷試験

図-2 には、載荷方法および測定位置を示す。載荷は 2 点集中載荷とし、載荷点間距離は、引張鉄筋の呼び名が D13, D19 の試験体の場合は 1400mm, 引張鉄筋の呼び名が D25 の試験体の場合は 800mm とした。載荷速度はいずれの試験体でも 10kN/min の荷重制御で行った。鋼材の降伏、試験体の最大耐力を確認した後、コンクリートの圧縮縁の圧壊に至る、いわゆる静的漸増載荷試験とした。測定項目は、荷重、たわみ、引張鉄筋ひずみ、コンクリートの曲げひび割れ幅とした。曲げひび割れ幅は、曲げモーメント一定区間の引張鉄筋位置と PC 鋼棒の位置となるはり側面部に、測定長が 100mm の π 型変位計を用いて測定した。PC 鋼棒、引張鉄筋、圧縮鉄筋およびスターラップのひずみは、貼付したゲージ長が 6mm のワイヤーストレインゲージによりデータロガーを介してひずみを測定し、記録を行った。また、コンクリートの圧縮縁ひずみは曲げモーメント一定区間の中央位置で、引張縁ひずみは曲げモーメント一定区間全体および打継目位置で、ゲージ長が 60mm のワイヤーストレインゲージによりそれぞれ

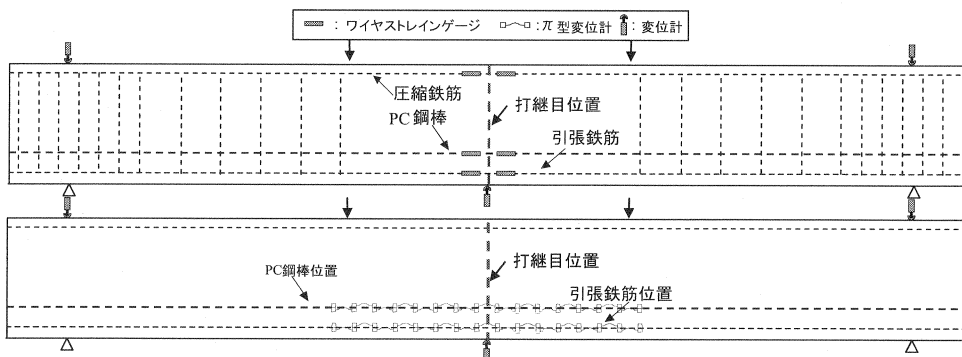


図-2 試験体の載荷状況および測定位置

れ測定した。たわみは、支点間中央および支点にたわみ計を設置して測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊モードおよび各種耐力に及ぼす影響

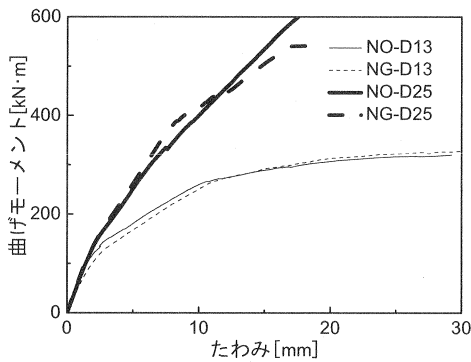
試験体の破壊状況と曲げひび割れ、引張鉄筋の降伏、終局のモーメントを、表-3に一覧を示す。曲げひび割れ発生モーメントに関しては、打継目が及ぼす影響が鉄筋径(引張鉄筋比)およびコンクリート強度の影響よりも大きい。終局耐力、引張鉄筋の降伏耐力に関しては、打継目が及ぼす影響が小さいと考えられる。

打継目が試験体の耐荷挙動に及ぼす影響を考えたとき、最も大きなウエイトを占めるのが弱点となる打継目への応力集中である。すなわち、打継目が早期に付着力(引張抵抗力)を失うことにより応力集中が生じ、打継目がない一体型に比べて打継目付近で抑制された引張応力やひび割れを、打継目が全て負担するためである。しかし、荷重レベルの進展、打継目以外でのひび割れの進展に伴い、中立軸より下の断面ではコンクリートの引張負担力が急激に低下する。つまり、構造物の引張力の分担は

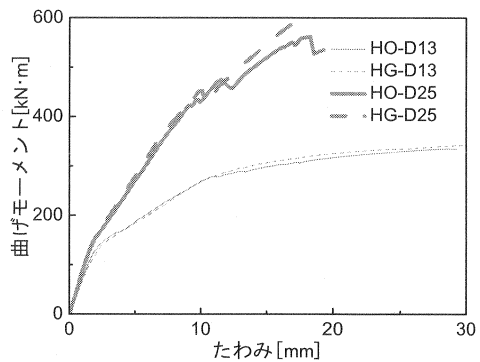
表-3 破壊状況と各種荷重

試験体名	M_{cr} (kN·m)	M_{sy} (kN·m)	M_u (kN·m)	FM
NO-D13	102	263	338	F
NO-D19	100	441	508	F
NO-D25	81	625	666	S
NG-D13	40	267	347	F
NG-D25	46	-	541	S
HO-D13	107	277	354	F
HO-D19	95	480	559	F
HO-D25	92	-	561	S
HG-D13	47	331	356	F
HG-D25	57	-	661	S

M_{cr} : 曲げひび割れ発生モーメント,
 M_{sy} : 引張鉄筋降伏モーメント, M_u : 終局モーメント,
 FM: 破壊モード, F: 曲げ引張破壊,
 S: セン断圧縮破壊

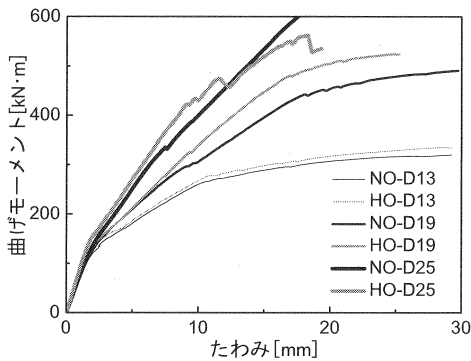


(a) 普通強度コンクリート

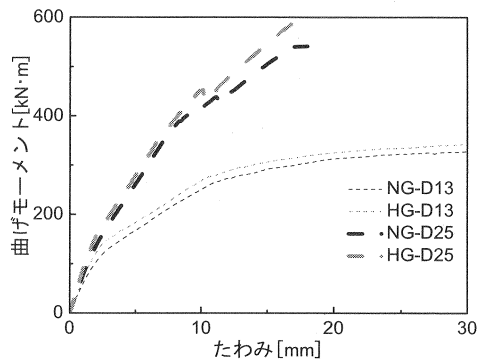


(b) 高強度コンクリート

図-3 たわみと曲げモーメントの関係 (打継目の有無の影響)



(a) 打継目なし



(b) 打継目あり

図-4 たわみと曲げモーメントの関係 (コンクリート強度の影響)

鋼材に移行していく。打継目はコンクリート躯体の耐荷挙動に影響を及ぼす存在であることから、コンクリートの引張分担力と鋼材の引張力の合力で、外力の引張力に抵抗する初期段階においてはその影響が大きいと想定されるが、鋼材が分担する引張力が支配的になる終局付近においては、打継目の影響が小さくなると考える。破壊モードは、打継目の有無とコンクリート強度に関わらず、引張鉄筋の呼び名が D13, D19 の試験体の場合は曲げ引張破壊、呼び名が D25 の試験体の場合はせん断圧縮破壊であった。

3.2 曲げモーメント-たわみ関係

各種要因に関する曲げモーメントとたわみとの関係を、図-3、図-4 に示す。曲げひび割れの発生後、打継目の有無とコンクリート強度に関わらず、鉄筋径は試験体のたわみに大きい影響を及ぼすことが確認できる。つまり、鉄筋量が大きいほど、同じ曲げモーメントに対してのたわみが小さくなった。また、図-3 に示すように、打継目の有無によるたわみの違いはほとんど認められないものの、図-4 に示すように、高強度コンクリートは普通コンクリートよりたわみが小さくなり、コンクリート強度は引張鉄筋の呼び名に次ぐ影響要因になる。これは、曲げひび割れの発生後の曲げ剛性は、鉄筋径および鉄筋とコンクリートの付着力の影響を受け、打継目の有無の影響は小さいためである。

3.3 引張鉄筋ひずみ

図-5、図-6 に引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係を示す。図-5 はコンクリート強度別に分類し、打継目の有無の影響を比較したもの、図-6 は打継目の有無別に分類し、コンクリート強度の影響を比較したものを示す。図-5 に示すように、同一の曲げモーメントにおける引張鉄筋のひずみは、鉄筋径により大きく異なることが明確に確認された。しかし、打継目の影響は明確でない。引張鉄筋の呼び名が D13 の試験体で打継目を有する場合、曲げひび割れの発生から使用状態にかけて、打継目への応力集中が生じるため、一体型と比較してひずみの増加が

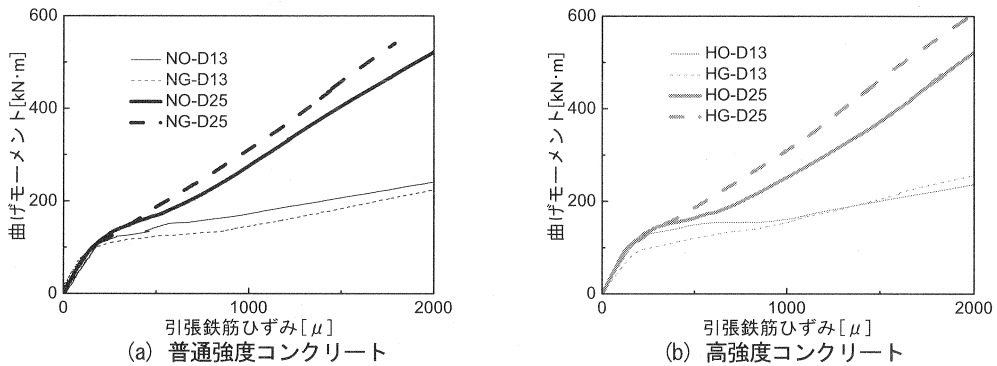


図-5 引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係 (打継目の有無の影響)

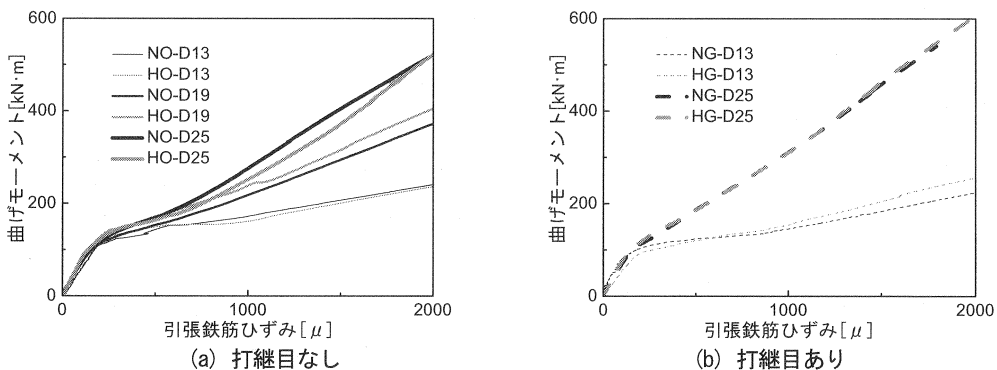


図-6 引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係 (コンクリート強度の影響)

見られる。この傾向は、コンクリート強度に関係なく同様に認められる。しかし引張鉄筋の呼び名が D25 の試験体では、その傾向はほとんど認められないうえに、さらに打継目の存在によりひずみの抑制が見られた。この傾向は、コンクリート強度の影響を受けずに、同様に確認された。また、図-6 に示すように、鉄筋径の相違による同一の曲げモーメントにおける引張鉄筋ひずみの制御は明確に確認されるが、コンクリート強度の及ぼす影響は明確ではない。

この理由を以下に説明する。まず、鉄筋径の相違による影響を考える。本研究で対象とした試験体は、引張鉄筋の呼び名を増加させる場合、有効高さを一定にしているためかぶりが減少する。すなわち、引張鉄筋径(引張鉄筋比)を大きくすることで、コンクリートと鉄筋の付着が強くなることによるひび割れの分散とひび割れ幅の抑制に加え、曲げひび割れの発生後の鉄筋位置への到達が早く、早い段階で鉄筋によるひび割れ制御が行われる。そのため、引張鉄筋の呼び名が D13 の試験体に比べ、曲げひび割れ幅の進展が抑えられると考えた。すなわち、この考え方を打継目のある場合にも当てはめると、付着力の小さい打継目においても、引張鉄筋径を大きくすることで曲げひび割れ幅を制御でき、打継目の影響を低減させることが可能である。次に、測定位置の影響について検討を行った。引張鉄筋ひずみの測定位置は、打継目より両側 100mm の位置であり、 π 型変位計は 3 測定点とも連続した位置にある。打継目を有する試験体においては、打継目にひび割れが発生し、その付近でひずみが抑制される傾向となるが、打継目の無い試験体ではひび割れの発生位置は不規則である。つまり、試験体ごとにひび割れとひずみゲージの相対的な位置関係により、その傾向は変化してしまうと考えられる。

以上の結果より、プレストレスが導入されたはりの引張鉄筋のひずみは、打継目の有無により異なる。打継目をはりの中央断面に設けることで、打継目位置のひずみは増大するが、打継目の影響は鉄筋の量により制御可能であることが確かめられた。しかし、打継目の影響によりその付近でのひずみは抑制されること、また打継目がない一体型の試験体では、打継目位置に相当するスパン中央部にひび割れが必ずしも発生しないことなどが課題である。本試験のように打継目の有無による引張鉄筋ひずみの相違を検討する場合には、引張鉄筋のひずみ測定位置の適切な検討、打継目以外でのひび割れ発生位置の把握、検討位置と打継目位置との相対的な関係の把握などに、特に留意する必要がある。

3.4 平均曲げひび割れ幅

図-7、図-8に平均曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を示す。図-7 はコンクリート強度別に分類し、打継目の有無の影響を比較したもの、図-8は打継目の有無別に分類し、コンクリート強度の影響を比較したものを示す。ここでの平均曲げひび割れ幅とは、曲げモーメント一定区間内に発生したひび割れの中で最も大きいもの 3 本の平均値である。図に示すように、鉄筋径による同一の曲げモーメント時における曲げひび割れの制御は明確に確認された。しかし、打継目が及ぼす影響とコンクリート強度が及ぼす影響については、引張鉄筋の種類によって一律の傾向が認められない程度である。図-7(a)に示すように、普通強度コンクリートの引張鉄筋の呼び名が D13 の

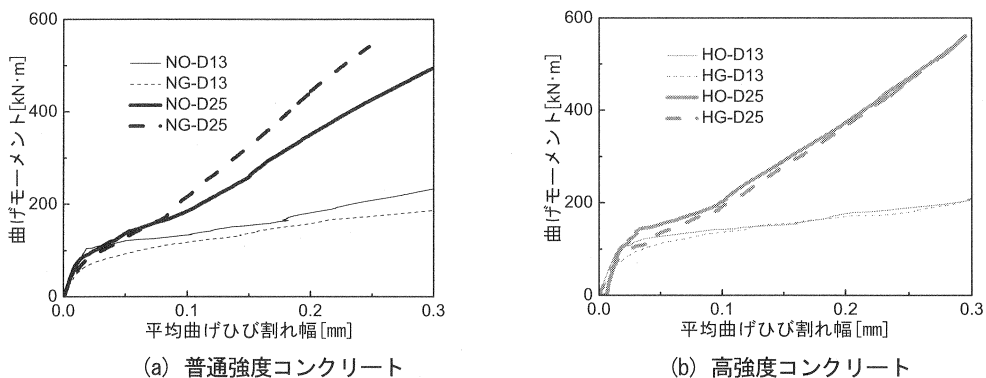


図-7 平均ひび割れ幅と曲げモーメントの関係 (打継目の有無の影響)

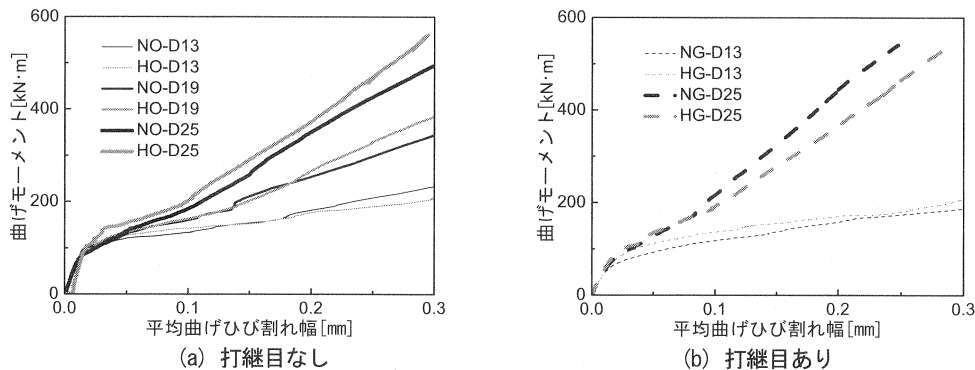


図-8 平均ひび割れ幅と曲げモーメントの関係 (コンクリート強度の影響)

試験体で打継目を有する場合、曲げひび割れの発生から使用状態にかけて、打継目への応力集中が起こるため、打継目がない一体型と比較して曲げひび割れ幅の進展が見られる。しかし高強度コンクリートでは、その影響が低減されている。これは前項でも触れたように、コンクリート強度の増加による曲げひび割れの抑制効果によるものと考えられる。また高強度コンクリートでは、引張鉄筋の呼び名が D25 の試験体においても打継目の影響を抑制できており、コンクリート強度と打継目の影響を確認できる。しかし普通強度コンクリートの引張鉄筋の呼び名が D25 の試験体では、引張鉄筋ひずみと同様に打継目による影響が異なる。

4. まとめ

PPC はりの引張鉄筋の呼び名の変化に、打継目の有無とコンクリート強度の要因が複合的に作用した際における曲げ性状について実験的に検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) PPC はりの曲げ性状に及ぼす影響要因としては、鉄筋径(引張鉄筋比)が最も支配的であるが、鉄筋径が小さい場合には、打継目の有無が大きな影響を及ぼすと考えられる。
- 2) 本試験のプレストレスの導入量の範囲内では、コンクリートの強度が PPC はりの引張鉄筋のひずみ、曲げひび割れ幅に及ぼす影響は小さいことが認められた。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)課題番号15360229, 代表者:辻 幸和 群馬大学教授)および極東鋼弦コンクリート振興(株)との共同研究を受けて実施したものである。本研究の実施には、当時当研究室の院生と学部学生であった斉藤郁恵氏(現、大成建設株式会社)に多大なご援助を頂いた。そして、供試体の作製と載荷実験には、ドービー建設工業(株)関東工場に多大なご支援とご援助を頂いた。付記して、厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 2002.
- 2) 辻幸和ほか:鉛直打継目を有する RC はりの鋼板被覆による補強効果, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.179-192, 2002.
- 3) 太田友則ほか:鉛直打継目を有するコンクリート強度が異なるRCはりのせん断性状, コンクリート工学年次報告集, Vol.20, No.1, pp.479-485, 1998.
- 4) 池田正志ほか:鉛直打継目を有するコンクリート強度が異なるPPCはりの曲げおよびせん断性状, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.15, pp.297-302, 2006.
- 5) 池田尚治:PPC 構造概論, プレストレストコンクリート, Vol.34, No.6, pp.8-11, 1996.