

論文 異なる径の引張鉄筋を用いた PPC はりの曲げひび割れ性状

池田 正志*1・李 春鶴*2・辻 幸和*3・半井 健一郎*4

要旨：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、異なる径の引張鉄筋を用いた PPC はりの曲げひび割れ性状について、実験的に比較検討した結果を報告する。そして、PPC はりの曲げひび割れ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、鉄筋径が太い場合には、打継目の有無が大きな影響を及ぼすこと、また、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 はりの引張鉄筋と PC 鋼棒のひずみ、および曲げひび割れ幅に及ぼす影響は小さいことなどを報告する。

キーワード：PPC はり、曲げひび割れ、引張鉄筋、コンクリート強度、打継目、鉄筋径、プレストレス

1. はじめに

近年、コンクリート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み、構造物を構築することは困難である。特に、プレストレストコンクリート（PC）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。打継目は、コンクリート構造物の弱点となるが、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 部材については十分に行っていない^{4),5)}。引張鉄筋の配置とコンクリートの強度を影響要因に採って、打継目が PPC はりの曲げひび割れ性状に及ぼす影響についての説明は喫緊の課題である⁶⁾。

本論文では、引張鉄筋の径、コンクリート強度、打継目の有無を影響要因に採り上げて、異なる径の鉄筋を引張鉄筋に用いた PPC はりの曲げひび割れ性状について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の断面形状寸法および鉄筋と PC 鋼棒の配置を、図-1 に示す。試験体の断面は 300mm×600mm の矩形断面とし、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、圧縮鉄筋には圧縮縁から 50mm の位置に呼び名 D13 を 2 本配置した。また、下面から 150mm の位置に呼び径 30mm 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おいて φ13 の PC 鋼棒を緊張し、PC グラウトの充填を経

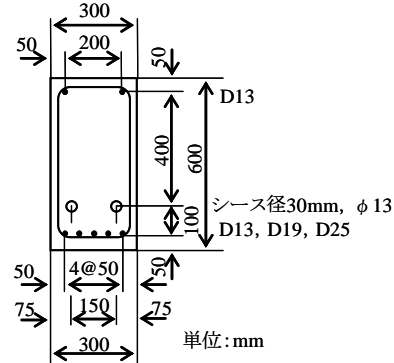


図-1 試験体の断面形状寸法および鋼材の配置

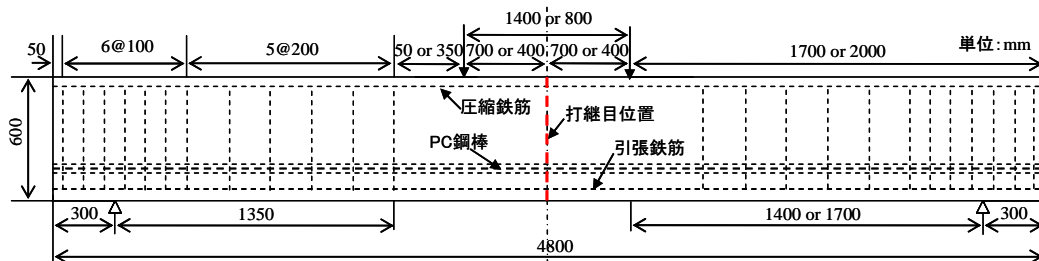


図-2 試験体の形状寸法、配筋および打継目位置

*1 群馬大学 工学部社会環境デザイン工学科技術専門職員 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻講師 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体の諸元

試験体名	圧縮強度* (N/mm ²)	打継目有無	鋼材の材質・種類			引張鉄筋比 (%)	a** (mm)	a/d	BM一定区間 (mm)	
			引張鉄筋	スターラップ	PC 鋼棒					
NO-D13	47.1	無	D13	D6	SBPR 930/ 1080 φ 13	0.38	1400	2.55	1400	
NO-D19			D19			0.87				
NO-D25			D25			1.53	1700	3.10	1400(800)***	
NG-D13			D13			0.38	1400	2.55	1400	
NG-D25	有	D25	1.53			1700	3.10	800		
HO-D13	79.5	無	D13			1400	2.55	1400		
HO-D19			D19						0.87	
HO-D25			D25			1.53	1700	3.10	800	
HG-D13			有			D13	0.38	1400	2.55	1400
HG-D25			D25			1.53	1700	3.10	800	

*:試験体と同一の養生を行ったコンクリート圧縮強度, **:せん断スパン, ***:第1回目の荷重は1400mm

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	φ 13	199	1370	1467

て、荷重試験に供した。また図-2に示すように、試験体の全長は4800mmの一定とした。そして、スターラップには、SD345のD6をせん断スパン内と端部に配置した。

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、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、数字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試験体と同一の養生を行った場合の圧縮強度は、それぞれ47.1N/mm²と79.5N/mm²であった。

打継目は、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。

なお試験体の養生は、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。荷重試験における試験体間の材齢が及ぼす影響を小さくするため材齢57日において、すべての試験体にφ13のPC鋼棒によりその耐力の80%まで緊張・定着し、コンクリート下縁にはほぼ等しい2.8N/mm²のプレストレスを導入した。導入後は、直ちにPCグラウトの注入を行った。そして、その後28日以後において、荷重試験を実施した。荷重時のPCグラウトの圧縮強度は、51.6N/mm²であった。

2.2 荷重試験

図-3には、荷重方法および測定位置を示す。荷重は2点集中荷重とし、曲げモーメント一定区間は、1400mmとしたが、引張鉄筋の呼び名がD25では、普通コンクリートを用いた打継目有りの試験体の1400mm以外は、最初の荷重より800mmとした。これは、呼び名がD25の普通コンクリートの打継目無しの試験体の荷重において、破壊させるには試験機の容量が少し不足したため、その後の試験体についてはスパンが一定のまま、せん断スパンを1400mmから1700mmに増加したことによる。荷重速度はいずれの試験体でも10kN/minの荷重制御で

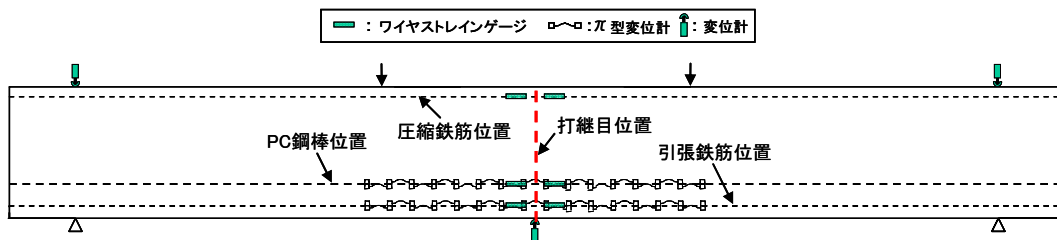


図-3 試験体の荷重状況および曲げひび割れ幅、ひずみ、たわみの測定位置

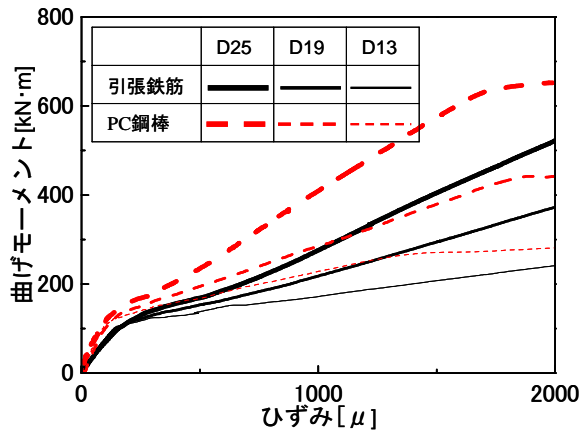


図-4 曲げモーメントと引張鉄筋およびPC鋼材のひずみ関係（普通強度コンクリート、打継目無）

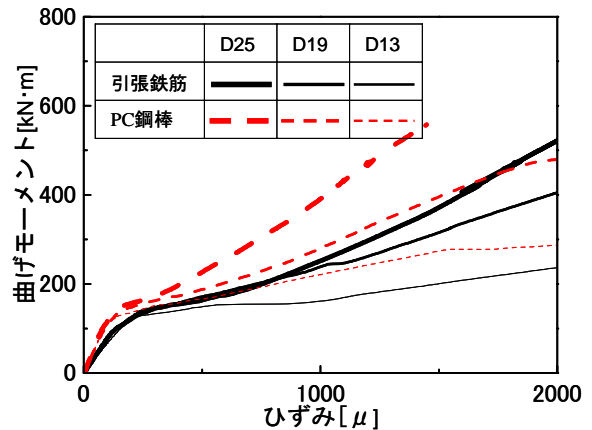


図-5 曲げモーメントと引張鉄筋およびPC鋼材のひずみ関係（高通強度コンクリート、打継目無）

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、曲げひび割れ幅、鉄筋、PC鋼棒およびコンクリートのひずみ、ならびにたわみとした。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、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測定した。たわみは、支点間中央および支点到たわみ計を設置して測定を行った。

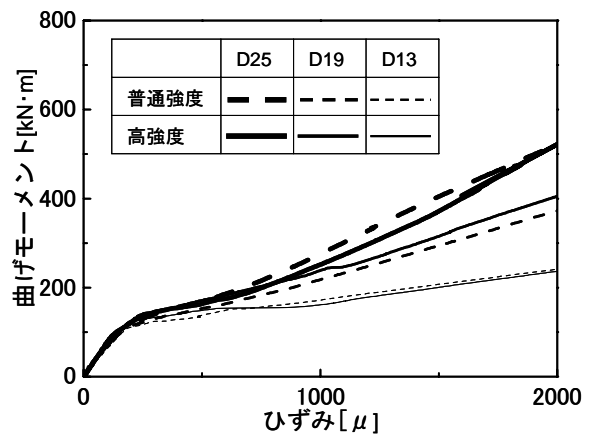


図-6 引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係（打継目無）

3. 実験結果および考察

3.1 曲げモーメントとひずみの関係

図-4 および図-5 は、打継目が無いはりにおける普通強度コンクリートおよび高通強度コンクリートのそれぞれの曲げモーメントと引張鉄筋およびPC鋼棒のひずみの関係を示す。図に示すように、引張鉄筋の径が大きくなることによって、同じひずみに達する荷重が大きくなり、引張鉄筋が分担する荷重の割合が大きくなる。これはコンクリート強度に関わらず、ほぼ同様な傾向を示している。

図-6 および図-7 はそれぞれ、打継目が無いはりの曲げモーメントと引張鉄筋ひずみの関係および曲げモーメントとPC鋼棒ひずみの関係を示す。図-4 および図-5 と同様に、引張鉄筋径が大きくなることによる同一の曲げモーメントにおける引張鉄筋およびPC鋼棒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

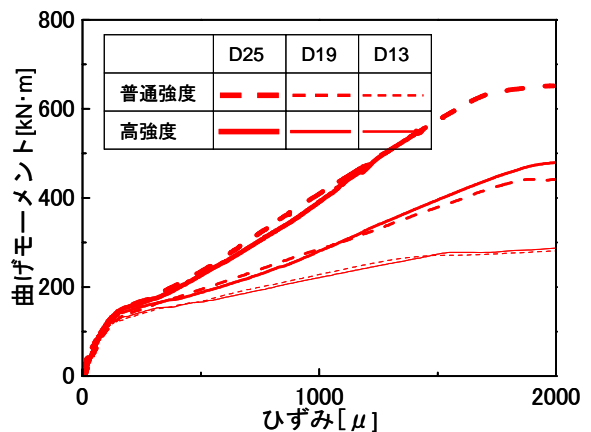


図-7 PC鋼棒ひずみと曲げモーメントの関係（打継目無）

ぼす影響は、今回のコンクリート強度範囲内ではほとんど認められない。

3.2 曲げひび割れ間隔

各試験体に発生するひび割れは、曲げひび割れが卓越した。図-8 および図-9 はそれぞれ、平均曲げひび割

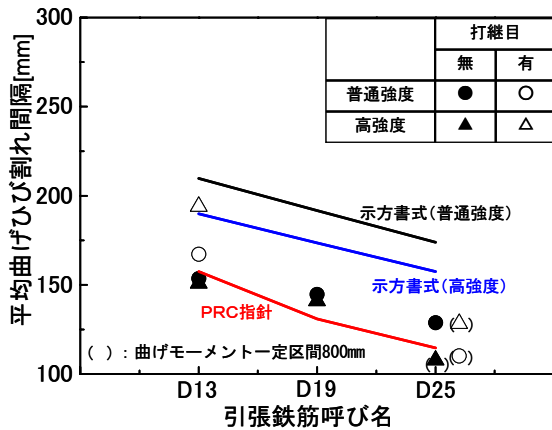


図-8 平均曲げひび割れ間隔

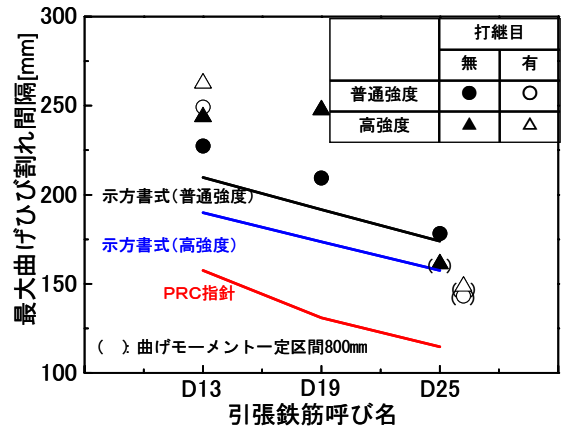


図-9 最大曲げひび割れ間隔

れ間隔の測定値と計算値の比較、および最大曲げひび割れ間隔の測定値と計算値の比較を示す。ここで、示方書式は、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている式⁷⁾、PRC指針は、日本建築学会プレレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針に規定されている式⁷⁾より算定した値を示す。ひび割れ幅は、ひび割れ間の鉄筋の伸びとコンクリートの伸びの差により生じるものであり、一般にはひび割れ間隔に関する項とひずみに関する項との積として与えられる。ゆえに、同一荷重作用時のひび割れ幅は、ひび割れ間隔に大きな影響を受ける。

今回の実験要因の中で、示方書式は引張鉄筋（主鉄筋）径、コンクリート強度、かぶり（厚さ）などの影響が考慮されている。しかしながらPRC指針式には、引張鉄筋（主鉄筋）径、かぶり（厚さ）などの影響が考慮されているが、コンクリート強度は考慮されていない。ここで述べる平均曲げひび割れ間隔の測定値は、引張鉄筋ひずみが1500 μ 前後のひび割れがほぼ定常状態となった時における曲げモーメントが一定区間に発生したひび割れ間隔の平均値である。

図-8に示すように、主鉄筋径が太いほどひび割れの分散性が良いという傾向は、両算定式にも考慮されている。本試験体の測定値においても、引張鉄筋径（主鉄筋径）を大きくすることで、ひび割れの分散効果が明確に認められる。また、土木学会の示方書式は、強度が大きいほどひび割れの分散性がよいことを示しているが、本試験体では、コンクリート強度の影響が打継目が無いよりは認められない。これはコンクリート強度が異なることによる自己収縮の影響が大きいと推測される。

図-8に示すように、土木学会示方書式を用いて、平均曲げひび割れ間隔は、大きく算定される。しかしながら図-9に示すように、最大の曲げひび割れ間隔は、土木学会の示方書式では小さく算定されることが明らかになった。

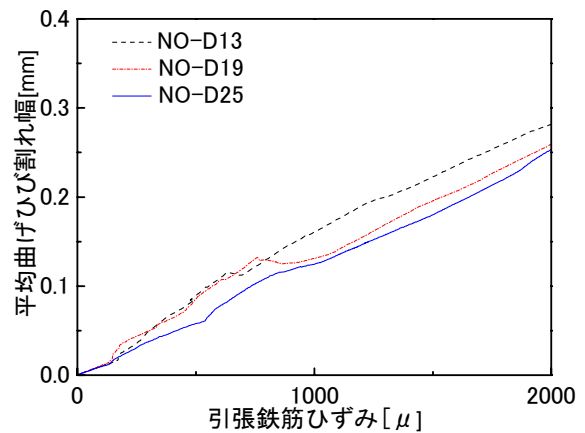


図-10 平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係（普通強度コンクリート、打継目無）

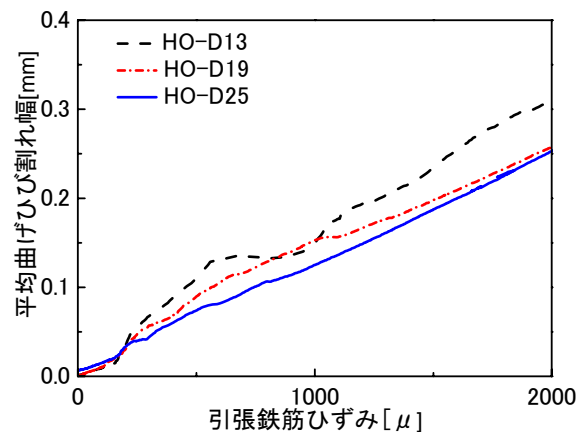


図-11 平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係（高強度コンクリート、打継目無）

打継目が有るはりにおいて曲げひび割れ間隔が大きくなる傾向が、呼び名D13を配置したはりでは明瞭である。しかしながら、呼び名D25を配置したはりでは認められない。

3.3 曲げひび割れ幅

図-10 および図-11は、それぞれ打継目が無いはり

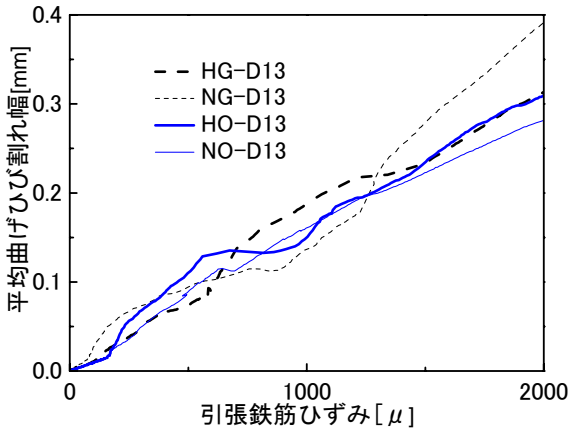


図-12 平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係 (D13)

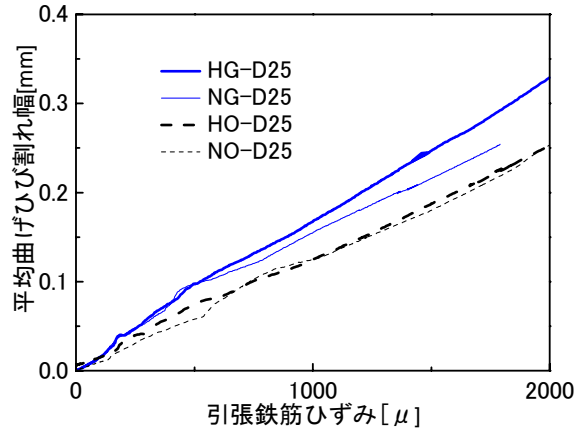


図-13 平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係 (D25)

における、普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートの平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係を示す。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、コンクリート強度に関わらず、引張鉄筋径(主鉄筋)が大きくなることにより、同一の引張鉄筋のひずみに対応する曲げひび割れ幅は少し小さくなるのが認められる。

平均曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係を、D13の場合を図-12に、D25の場合を図-13に、それぞれ示す。引張鉄筋径(主鉄筋径)が小さい限りでは、コンクリート強度および打継目の有無の影響が認められないが、引張鉄筋径(主鉄筋径)が大きい限りでは、打継目がないほうが、コンクリート強度が小さいほうが、同一の引張鉄筋のひずみに対応する平均曲げひび割れ幅が小さいことが認められる。

図-14および図-15は、それぞれ平均曲げひび割れ幅および最大曲げひび割れ幅に及ぼす引張鉄筋径の影響を、コンクリート強度および打継目の有無などの影響も考慮して総合的に示している。平均曲げひび割れ幅および最大曲げひび割れ幅は、引張鉄筋のひずみが500 μ および1500 μ に達した時の測定値である。平均曲げひび割れ幅および最大ひび割れ幅のいずれにおいても、引張鉄筋径が大きくなることによって、曲げひび割れ幅が制御されることが認められるが、コンクリート強度の影響は明確ではない。また、打継目があると、最大曲げひび割れ幅だけではなく、平均曲げひび割れ幅も大きくなることは、引張鉄筋の呼び名がD25を用いた場合で高い荷重レベルにおいて明瞭である。

4. まとめ

PPCはりの引張鉄筋径に加えて、打継目の有無とコンクリート強度の要因が複合的に変化した場合における曲

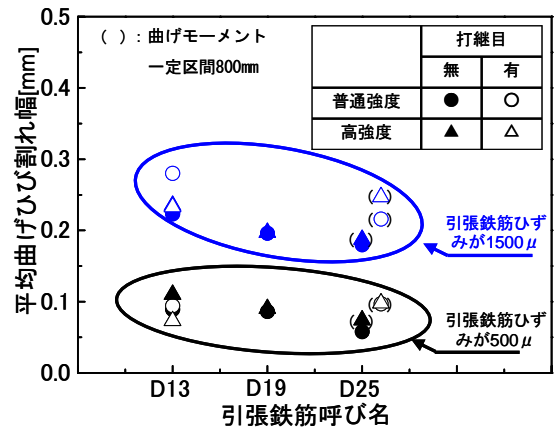


図-14 平均曲げひび割れ幅

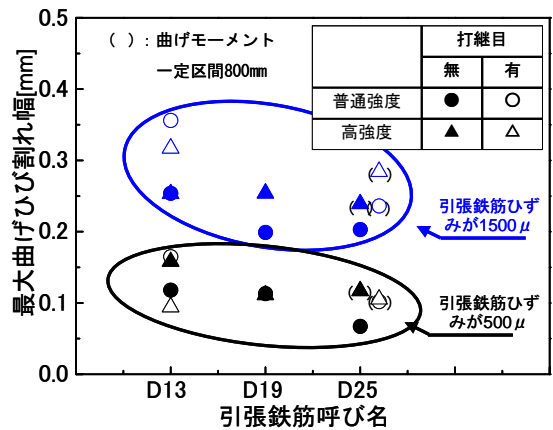


図-15 最大曲げひび割れ幅

げひび割れ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はりの曲げひび割れ性状に及ぼす影響要因としては、引張鉄筋径(引張鉄筋比)が最も支配的であるが、鉄筋径が太いD25を配置した場合には、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 はりの引張鉄筋と PC 鋼棒のひずみ、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であった有賀大峰氏（現、鹿島建設株式会社）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、ドーピー建設工業(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、杉山隆文、山口光俊：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、横田隆雄、辻幸和、杉山隆文：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論文報告集, Vol.20, No.1, pp.479-484, 1998
- 4) 池田正志、辻幸和、李 春鶴、杉山隆文：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) 李春鶴、辻幸和、半井健一郎、有賀大峰：異なる呼び名の引張鉄筋を用いた PPC はりの曲げ性状、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.16, pp.141-146, 2007
- 6) 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
- 7) 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