

(2) 高強度PCグラウトを用いたPC鋼より線の付着性状とPRCはりの曲げ性状

群馬大学 建設工学科 正会員 ○橋本 親典
 群馬大学 建設工学科 正会員 辻 幸和
 群馬大学 建設工学科 杉山 隆文
 ドービー建設工業(株) 正会員 金井 昌義

1. はじめに

PCグラウトは、ポストテンション方式のPRCはりにおいて、PC鋼材とその周囲のコンクリートとの一体化やPC鋼材の防食の点で重要な役割を果たしている。現行の土木学会コンクリート標準示方書では、このPCグラウトの圧縮強度は 20N/mm^2 以上と規定されている¹⁾。

しかし、構造体コンクリートの設計基準強度は一般に 40N/mm^2 以上であり、最近では 80 、 100N/mm^2 といった超高強度コンクリートも製造可能である。ポストテンション方式による超高強度PC構造物の設計・施工を考えた場合、より一層の高強度PCグラウトを用いないと、周囲の構造体コンクリートとPC鋼材との一体化を図ることは相当に困難と予想される。すなわち、PCグラウトの充てん性が良好であっても、超高強度コンクリートのPC部材では、従来のPC部材における付着応力度より相当高い応力が発生する。したがって、PC鋼材とコンクリートの間でこの高い付着応力を伝達させるためには、従来のPCグラウトでは問題があり、グラウト自体の高強度化が必要である。

これに対し著者らは、圧縮強度が 50N/mm^2 程度の高強度でかつ従来の充てん性を有する高性能PCグラウトの製造方法を開発してきた²⁾。

本研究では、PCグラウトの高強度化によってPC部材の曲げ性状が向上することを検証するために、まず、高強度PCグラウトと従来の圧縮強度が 20N/mm^2 程度のPCグラウトを用い、要素実験としてシース管中に埋設されたPC鋼より線をPCグラウトで充てんした供試体の付着強度試験を行う。次に、ポストテンション方式のPRCはり部材ならびにプレテンション方式のPRCはり部材を用いて、PCグラウトの圧縮強度がPRCはり部材の曲げ性状に与える影響について実験的に検討する。

2. PC鋼より線とPCグラウトの付着強度試験

2.1 実験概要

実験に用いた供試体の形状寸法を図-1に示す。本試験の原理は、十分に埋め込まれた異形鉄筋の付着試験³⁾を参考にしたものである。なお、埋込み長さはPC鋼より線の伝達長以上であればよいと考え、本試験に用いたPC鋼より線の直径が 15.2mm であることから、伝達長は直径の60倍($60 \times 15.2 = 912\text{mm}$)以上となり 1000mm にした。載荷方法は、油圧式センターホールジャッキを用いて直接PC鋼より線を引っ張り、荷重が増加しなくなるまで静的に斬増載荷した。測定項目は、引張荷重、載荷端側の引張量および自由端のずれ量であり、PC鋼より線の相対的な伸び量は引張量とずれ量の差とした。

実験に用いたPC鋼材は、 $\phi 15.2\text{mm}$ のPC鋼より線(SWPR7BN)で、引張荷重が 273.6kN 、 0.2% 永久伸びに対する荷重は 241.2kN である。シース管の径は、 $\phi 42\text{mm}$ である。PCグラウトは、流動性はJA漏斗の流下時間が $15 \sim 30$ 秒程度で一定とし、圧縮強度 20

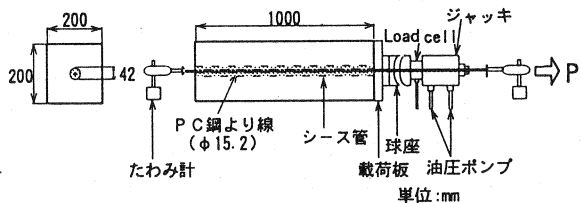


図-1 供試体の形状および付着試験方法

表-1 PCグラウトの配合と圧縮強度結果

	水セメント比(%)	高性能減水剤添加率(%)	膨脹剤添加率(%)	圧縮強度(N/mm ²)
高強度グラウト	3.0	2.0	0.008	58.3
通常グラウト	4.0	0.0	0.008	31.1

N/mm²程度の通常のPCグラウトと50N/mm²程度の高強度PCグラウトの2種類とした。実験に用いたPCグラウトの配合ならびに試験時における圧縮強度を表-1に示す。セメントは、高強度グラウトにはM社製の比重3.01、ブレン値が6000cm²/gのシリカフューム混入セメントを、通常グラウトには比重が3.16、ブレン値が3230cm²/gの普通セメントを使用した。混和剤は、主成分がアリルスルホネートの高性能減水剤と反応遅延性のアルミニウム粉末を主成分とする膨張剤を用いた。練混ぜ水は上水道水を用いた。外部コンクリートは、粗骨材の最大寸法が15mmの普通コンクリートであり、材齢28日の圧縮強度は46.2N/mm²であった。

2.2 実験結果および考察

引張荷重とPC鋼より線の伸び量の関係を図-2に示す。同一引張荷重に対して、高強度グラウトの方が通常グラウトよりも伸び量が小さい。グラウト中に埋め込まれたPC鋼より線の付着機構を考えると、図-3に示す抵抗機構が考えられる。PC鋼より線は、ある一定の巻きピッチ長さでPC鋼線がよられることによって形成される凹凸が周囲のグラウトとかみ合うことにより引張荷重に対して抵抗する。引張荷重が増大するに従って、より線の凹凸とかみ合っているグラウトが破壊され、より線の巻きピッチ長さが長くなり、PC鋼より線の伸び量が増加する。したがって、グラウトが高強度化するとPC鋼より線の凹凸とかみ合っているグラウトが破壊されにくくなり、より線のよりが戻りにくくなる。そのため、同一引張荷重において、高強度グラウトの方が通常グラウトよりも伸び量が小さくなる。

図-4は、各引張荷重レベルにおける見掛けの付着力を示す。見掛けの付着力は、PC鋼より線の断面積を一定と仮定し、各荷重レベルの単位伸び量に対する荷重の増加率と定義した。高強度グラウト、通常グラウトともに、荷重レベルが増加するに従い、見掛けの付着力は減少する。これは、上述したより線の戻りによるより線の凹凸の減少によって伸び量が増加するためである。

高強度グラウトの見掛けの付着力は、通常グラウトの場合と比較していずれの荷重レベルにおいても大きい。これは、PCグラウトの圧縮強度が増加することによって、PC鋼より線とグラウトの付着力が良好なることを示唆する。

また、最大引張荷重は、高強度グラウトでは218.7kN、通常グラウトでは186.7kNであった。高強度グラウトではPC鋼より線の引張荷重の80%のレベルまで引張荷重を載荷しても十分な付着力が存在する。

3. PRCはり部材の曲げ載荷試験

3.1 概要

シース管中にグラウトで埋め込まれたPC鋼より線の付着強度試験を行った結果、著者らが開発してきた圧縮強度が50N/mm²程度の高強度でかつ従来の充てん性を有する高強度グラウトの方が通常グラウトと比較して、優れた付着性状を有することが明らかになった。

この要素試験で得られた知見の妥当性を検証するために、ポストテンション方式のPRCはり部材を用いて、圧縮強度が異なるPCグラウトとPC鋼より線の付着性状がPRCはり部材の曲げ性状、特に曲げひび

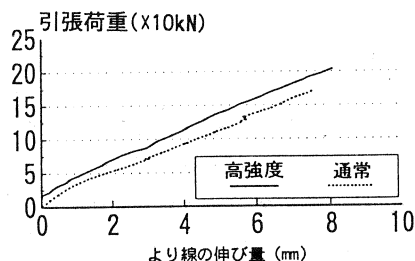


図-2 荷重-より線のび量の関係

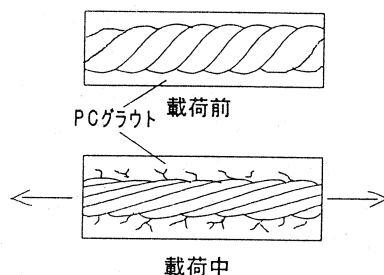


図-3 載荷中のPC鋼より線の変形状況

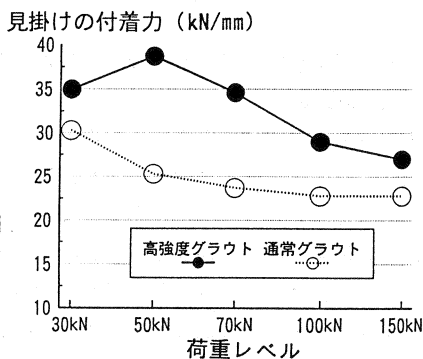


図-4 各荷重レベルにおける付着力の変化

割れ幅に及ぼす影響について検討する。

3.2 供試体および使用材料

実験に用いたPRCは供試体の形状寸法を図-5に示す。供試体は、60cm×30cmの矩形断面で、長さを360cmとし、圧縮鉄筋ならびに引張鉄筋としてSD345 D13鉄筋(公称断面積1.267cm²,降伏点351N/mm²,引張強さ508N/mm²,ヤング係数1.96×10⁵N/mm²)を、PC鋼材としてSWPR7BN7本よりφ15.2mmのPC鋼より線を使用した。PC鋼材は、「2. 付着強度試験」で用いたものと同じである。

曲げ破壊に至る前にせん断破壊をしないように、SD295A D10鉄筋をせん断スパン内に25cm間隔で配置し、はり端部の定着部60cmの区間はSD345 D10鉄筋を10cm間隔で配置した。なお、等曲げモーメント区間にはせん断補強鉄筋は配置していない。

作製した供試体は全部で13体であり、表-2に供試体種類の詳細を示す。ポストテンション方式のPRCはりは、グラウトの圧縮強度が50N/mm²程度の高強度グラウトによるボンドはりと20N/mm²程度の通常のグラウト強度によるボンドはりがそれぞれ4体、比較用としてPCグラウトを充てんしないアンボンドはりが3体である。また、PC鋼より線が完全付着状態にあるPRCはりとして、プレテンション方式のPRCはりを2体作製した。PCグラウトの圧縮強度以外の実験パラメータとしては、引張鉄筋を2本と4本の2種類とし、コンクリート圧縮強度を

50N/mm²程度と70N/mm²程度の2種類とし、有効プレストレス量を907.1N/mm²と453.6N/mm²の2種類とした。

実験は4シリーズで構成されており、完全付着状態であるプレテンション方式のPRCはり1体、グラウトを充てんしたポストテンション方式のPRCはり2体ならびにグラウトを充てんしていないアンボンドタイプのPRCはり1体の計4体が1組となっている。

導入した有効プレストレス量907.1N/mm²は、ポストテンション部材でのPC鋼より線の初期緊張力を176.5kN(1272.3N/mm²) /本とし、はり中央断面位置で算出した有効プレストレス量である。また、ポストテンション方式とプレテンション方式においてPC鋼より線の引張応力の減少量が異なるため、プレテンション方式での初期緊張力は153.0kN/本とした。PC鋼より線にはひずみゲージが貼付できないため、初期緊張時

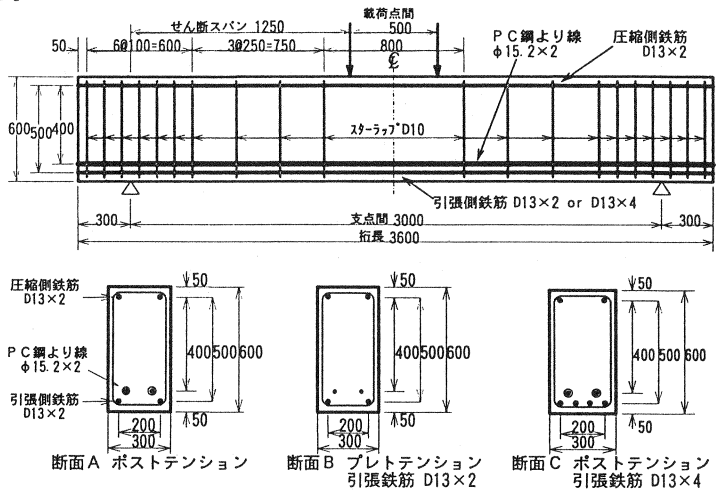


図-5 実験に用いたPRCはりの形状および寸法(単位: mm)

表-2 供試体種類

実験	供試体名*	グラウト強度 (N/mm ²)	緊張方式	引張鉄筋の本数	コンクリート強度 (N/mm ²)	有効プレストレス量(N/mm ²)
1	P 2 NN	—	Preten.	D13×2	49.3	907.1
	HB 2 NN	58.1	Postten.	D13×2	49.6	907.1
	NB 2 NN	16.3	Postten.	D13×2	47.7	907.1
	UB 2 NN	—	Postten.	D13×2	53.2	907.1
2	P 2 HN	—	Preten.	D13×2	71.4	907.1
	HB 2 HN	49.6	Postten.	D13×2	78.2	907.1
	NB 2 HN	16.5	Postten.	D13×2	68.7	907.1
	UB 2 HN	—	Postten.	D13×2	71.4	907.1
3	HB 4 HN	49.6	Postten.	D13×4	72.5	907.1
	NB 4 HN	16.5	Postten.	D13×4	70.1	907.1
4	HB 2 NL	49.6	Postten.	D13×2	54.1	453.6
	NB 2 NL	16.8	Postten.	D13×2	49.0	453.6
	UB 2 NL	—	Preten.	D13×2	46.1	453.6

[共通事項] 圧縮鉄筋の本数:D13×2, PC鋼より線の本数:φ15.5×2
 [供試体名の説明] “○○◎□△”: ○○はグラウトの種類および付着の有無(P:プレテンション方式による完全付着, HB:高強度グラウトによる付着, NB:通常グラウトによる付着, UB:付着なし), ◎は引張鉄筋本数, □はコンクリート圧縮強度(N:普通強度, H:高強度), △は有効プレストレス(N:通常, L:半減)を示す。

から載荷試験時までのPC鋼より線に与えられている引張応力(ひずみ)の経時変化は計測していない。その結果、実際に各供試体に設定された有効プレストレス量が導入されているかどうかは確認できなかった。また、曲げ耐荷特性の情報として必要なPC鋼より線近傍のひずみとしては、引張鉄筋と圧縮鉄筋に貼付したひずみゲージから求め、有効プレストレスはこれらのひずみの経時変化から推定することとした。

供試体に用いたコンクリートの配合としては、目標圧縮強度が50N/mm²では粗骨材の最大寸法20mm,水セメント比37.3%,細骨材率40.0%,目標スランプ6±1.5cm,空気量3±1%であり、目標圧縮強度が70N/mm²では粗骨材の最大寸法20mm,水セメント比32.3%,細骨材率43.0%,目標スランプ8±2.5cm,空気量3±1%である。セメントは早強ポルトランドセメント(比重3.14)を使用し、細骨材および粗骨材は群馬県川場村産の砕砂(表乾比重2.63,粗粒率2.74)および碎石(表乾比重2.74,粗粒率6.64)を使用した。

実験に用いたPCグラウトの配合は、表-3に示す。セメントは、比重が3.16,ブレン値が3230cm²/gの普通セメント、混和材は、比重が3.00,ブレン値が9210cm²/gの高炉スラグ微粉末を使用した。混和剤は、上述の付着強度試験で用いたものと同じである。練混ぜ水は上水道水を用いた。

表-3 PRCはり部材に用いたPCグラウトの配合

	水結合材比(%)	スラグ置換率(%)	高性能減水剤添加率(%)	膨張剤添加率(%)
高強度グラウト	41	30	0.5	0.008
通常グラウト	40	0	0.0	0.008

3.3 載荷および測定方法

載荷試験方法は、スパン300cm、等曲げモーメント区間50cmの2点集中載荷とし、曲げひび割れが発生してそのひび割れが安定してくると思われる荷重300kNまで静的単調増加で載荷した。その後一度荷重を除荷し、再びコンクリート圧縮縁が圧壊し、それ以上荷重が増加しなくなるまで載荷した。

載荷試験での各種測定はすべて荷重ステップ毎に行うこととし、等曲げモーメント区間のコンクリート圧縮上面(5箇所)、引張下面(5箇所)および引張鉄筋(6箇所)に貼付したワイヤーストレインゲージにより、コンクリートの圧縮縁ひずみ、引張縁ひずみおよび圧縮鉄筋のひずみを測定した。また、10cmピッチで引張下縁から5cm上方の供試体側面位置に貼付したパイゲージ(7箇所)によって、等曲げモーメント区間のひび割れ幅を測定した。たわみは、スパン中央と両支点位置に高感度変位計を設置し相対変位として測定した。

3.4 実験結果および考察

(1) 破壊性状

ひび割れ幅の発達、破壊状況と各種の荷重を、表-4に一覧にして示す。供試体はすべて、曲げひび割れが発生し、その後引張鉄筋が降伏した後に、コンクリートの圧縮部の破壊によって最大荷重に達して終局状態に至るとい破壊性状を示した。ただし、引張鉄筋量が2倍のHB4HNおよびNB4HN供試体や有効プレストレス量を1/2に低減したHB2NL、NB2NL供試体は、曲げひび割れ発生後にせん断スパン内に斜めひび割れが発生し、その後引張鉄筋が降伏する破壊性状であった。

表-4 破壊状況と各種の荷重一覧(単位:kN)

実験	供試体名	ひび割れの種類および破壊形式	曲げひび割れ発生荷重	引張鉄筋降伏荷重	最大荷重
1	P2NN	曲げのみ・分散・曲げ引張	132.3	343.2	519.8
	HB2NN	曲げのみ・分散・曲げ引張	103.0	362.8	513.9
	NB2NN	曲げのみ・分散・曲げ引張	127.5	343.2	517.8
	UB2NN	曲げのみ・集中・曲げ引張	220.6	294.2	459.0
2	P2HN	曲げのみ・分散・曲げ引張	225.6	392.3	527.6
	HB2HN	曲げのみ・分散・曲げ引張	215.7	323.6	548.2
	NB2HN	曲げのみ・分散・曲げ引張	205.9	411.9	517.8
	UB2HN	曲げのみ・集中・曲げ引張	245.2	275.6	527.6
3	HB4HN	曲げと斜め・分散・曲げ引張	191.2	348.1	543.3
	NB4HN	曲げと斜め・分散・曲げ引張	196.1	362.8	555.1
4	HB2NL	曲げと斜め・分散・曲げ引張	88.3	333.4	518.8
	NB2NL	曲げと斜め・分散・曲げ引張	156.9	240.3	493.3
	UB2NL	曲げのみ・集中・曲げ引張	156.9	225.6	427.6

HB4HNおよびNB4HN供試体では、引張鉄筋量が2倍であり引張鉄筋降伏耐力が斜めひび割れ発生

時せん断耐力を上回ったためと考えられる。有効プレストレス量が半減された2体の供試体は、プレストレスの軸方向成分による斜めひびわれ発生時せん断耐力の寄与分が小さくなり、この耐力が引張鉄筋降伏耐力よりも下回ったためと考えられる。

曲げひび割れの発生状況では、グラウトを充てんしていない付着なしのUB2NN、UB2HNやUB2NL供試体は、それ以外の付着を有する供試体と比較して曲げひび割れの本数が少なく集中して発生し、ひび割れ間隔が大きい。これは付着の有無によるものと考えられ、アンボンドはりではPC鋼材がはり軸方向でひずみが一定となり引張側のコンクリートや引張鉄筋に引張応力を伝達されないために、曲げひび割れが分散しなく、結果としてひび割れが1箇所集中するのである。また、UB2NL供試体が有効プレストレス量が半減したにもかかわらず斜めひび割れが発生していない原因としては、PC鋼材の付着がないためにせん断スパン内の引張下縁側のコンクリートに曲げひび割れを発生させるだけの十分な引張力を、PC鋼材がコンクリートに伝達させることができなかったためと考えられる。

一方、同一実験シリーズの付着を有する供試体では、完全付着状態であるプレテンション方式と、グラウトの強度が異なるポストテンション方式の3種類のPRCはりには有為な差は見られない。また、曲げひび割れ発生荷重には多少のばらつきはあるものの、引張鉄筋降伏荷重や最大荷重に関しては、アンボンドタイプの供試体を除いてほとんど有為な差は見られない。アンボندはりの最大荷重が小さいのは、PC鋼材の付着がないために、曲げひび割れが1箇所集中し、他の付着を有するPRCはりと比較して、PC鋼より線の引張ひずみが十分に増加する前に、圧縮側のコンクリートが終局ひずみに達するためである。

以上の結果から、完全付着状態やグラウトの強度によるPC鋼より線の付着性状の違いが、PRCはりの曲げ破壊性状全体に及ぼす影響はほとんど見られないと判断される。

また、荷重-たわみ関係、荷重-コンクリートの圧縮縁ひずみ関係や荷重-引張鉄筋のひずみ関係においても、曲げひび割れ発生以前の初期剛性はほぼ同一であるのに対し、300kN前後の引張鉄筋降伏時前後から、荷重レベルが増加するに従い付着がないアンボンド方式のPRCはり供試体のたわみやひずみが増加する傾向にある。完全付着状態であるプレテンション方式の供試体やグラウトを充てんしたポストテンション方式の供試体はほとんど同様な挙動を示す。この傾向はすべての実験シリーズにおいて同様であり、上述の曲げ破壊性状と同様に、グラウトの圧縮強度がPC鋼より線とグラウト間の付着性状に及ぼす影響はあまり明確に現れていない。

そこで、本論文では、PRCはりの曲げ特性のうち微視的な力学的挙動として、等曲げモーメント区間に発生する曲げひび割れ幅に着目し、PC鋼より線とグラウト間の付着性状とグラウトの圧縮強度の関係について検討することとした。

(2) 曲げひび割れ幅

各荷重レベルにおける曲げひび割れ幅を実験シリーズ別に図6と図7に示す。曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区間に7箇所貼付したパイゲージによるひび割れ幅の測定値のうち、最大3点の平均値によって、各荷重レベルにおけるひび割れ幅とした。したがって、曲げひび割れ1本の最大ひび割れ幅を測定したものではない。なお、パイゲージによるひび割れ幅の測定は最大2.5mmまでであるため、それ以上のひび割れは測定していない。

実験シリーズ1では、UB2NN供試体は、終局限界状態に近づくと曲げひび割れ幅が急激に増大する。一方、グラウトを充てんしていないアンボンドのUB2NN供試体を除く他の供試体では、ほとんど同様な挙動を示す。ただし、載荷荷重200kNと300kNでは、通常グラウトのNB2NNの曲げひび割れ幅の方が高強度

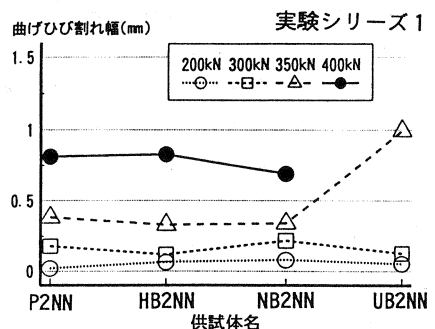


図-6 各荷重レベルにおける曲げひび割れ幅(1)

グラウトのHB 2 NNより若干大きい傾向が見られ、グラウトの強度による附着性状の違いが現れている。

実験シリーズ2においても、荷重レベルが300kN以下では、グラウトの強度に関係なくほぼ同様な傾向を示す。350kNでは、アンボンドのUB 2 HN供試体の曲げひび割れ幅が急激に増大する。一方、HB 2 HNとNB 2 HNを比較すると、高強度グラウトであるHB 2 HNの方が、同一荷重レベルにおいて曲げひび割れ幅が少し小さい傾向にある。

実験シリーズ3においても、荷重レベルが300kN以下では、グラウト強度に関係なくほぼ同様な値であるが、350kN、400kNと増加するに伴い、通常グラウトの方が高強度グラウトよりも若干曲げひび割れ幅が大きい傾向にある。実験シリーズ2と3では、構造物コンクリートが高強度であるために、PC鋼より線の附着性状が曲げひび割れ幅に敏感に影響したものと考えられる。

実験シリーズ4では、有効プレストレス量が半減しているため、全体に曲げひび割れ幅の値が大きい。そのため、アンボンドのUB 2 NL供試体は、300kNの荷重レベルにおいてひび割れ幅が増大している。HB 2 NLとNB 2 NLを比較すると、350kNまではほぼ同じ曲げひび割れ幅であるが、400kNにおいて通常グラウトのNB 2 NLの方が大きくなる。この傾向は、実験シリーズ1～3で見られた傾向よりも顕著である。実験シリーズ4では、有効プレストレス量を半減しており、曲げひび割れ発生以後のPC鋼より線が受けるひずみの変化が大きいためであると考えられる。

以上の結果から、PRCはりの曲げひび割れ幅に関しては、荷重レベルが最大荷重に近くなると、通常グラウトと高強度グラウトに有為な差が現れることが確認された。これは、「2. 附着強度試験」によって得られた知見の妥当性を示唆するものである。

4. 結論

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- ① 高強度PCグラウトを用いると、PC鋼より線とグラウト間の附着性状が良好になり、曲げひび割れ発生以後の最大荷重に近い荷重レベルにおいてPRCはりの曲げひび割れ幅の抑制効果がある。
- ② 構造物コンクリートが高強度であるPRCはりや導入される有効プレストレス量が小さいPRCはりでは、高強度PCグラウトが曲げひび割れ幅の抑制に貢献する程度が顕著である。

謝辞 本研究は、公益信託齋藤記念プレストレスト・コンクリート技術研究奨励基金平成5年度(第17回)研究助成を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年度版】施工編28章プレストレストコンクリート, pp. 259~262, 1991. 9. 30
- 2) 辻幸和・池田正志・橋本親典・浦野真次：高強度PCグラウトの製造に関する基礎研究, プレストレストコンクリート, Vol. 36, No. 3, May, pp. 47-56, 1994. 5
- 3) 島弘・周礼良・岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の附着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp. 165-174, 1987. 2

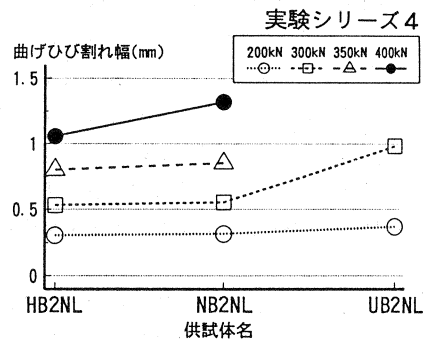
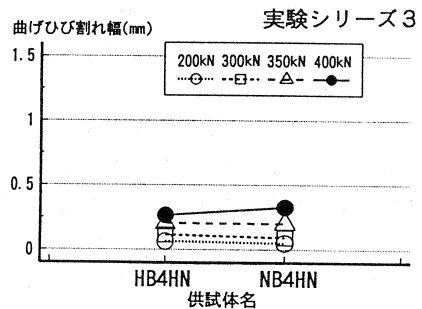
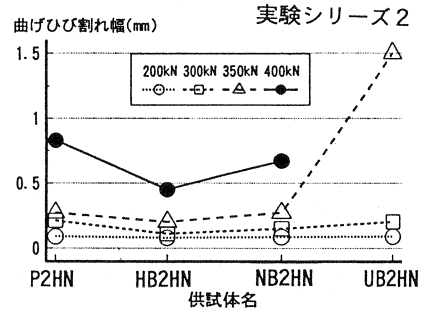


図-7 各荷重レベルにおける曲げひび割れ幅(2)