

## 高炉スラグ微粉末併用のPCグラウトを用いたPPCはりの力学的性状

群馬大学工学部 正会員 ○池田 正志  
 群馬大学工学部 正会員 工博 辻 幸和  
 群馬大学大学院 佐藤 明  
 (株)ピーエス三菱 工修 藤本謙太郎

### 1. はじめに

PCグラウトは、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート(PC)構造物において、①PC鋼材を腐食から保護し、②コンクリートとPC鋼材に付着を与えて一体化させる役割を持つ。近年、普通ポルトランドセメントに含まれる塩化物イオンが増加し、その許容値は200ppmから350ppmにJISが改正され緩和された。そのため、①の役割であるPC鋼材の腐食が懸念される。その解決の一方法として、セメントの約半分を高炉スラグ微粉末等で置換して塩化物イオン含有量を減少させる研究を実施し、その結果を報告した<sup>1)</sup>。しかしながら、このような高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトを用いたPCはりあるいはPPCはりの力学的性状については、これまで報告されていない。

本研究では、セメントの50%を高炉スラグ微粉末で置換したPCグラウトを製造して<sup>2)</sup>、これを用いたパーソナルプレストレストコンクリート(PPC)構造のはりの力学的性状を報告する。すなわち、PPCはりでは、PCグラウトの強度、鉛直打継目の位置とその施工方法およびプレストレス導入量などを要因とし、これらを組み合わせてPPCはり供試体を作製した。そして、作製したPPCはり供試体の曲げ強度試験を行い、曲げひび割れ発生モーメント、曲げひび割れ幅、最大荷重および破壊形式などについて、比較検討した結果を報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体

本研究で使用したはり供試体は、幅が300mm、高さが600mm、全長が3600mm、スパン長が3000mmの対称2点荷重を受ける単純はりである。そして、曲げモーメント一定区間を600mmとした。断面内には主鉄筋として引張鉄筋D13を5本、圧縮鉄筋D13を2本、PC鋼棒φ13を2本配置した。せん断スパンにはスターラップD6を100mm間隔で配置した。表-1に使用した鉄筋および

表-1 鉄筋およびPC鋼棒の力学的特性

	弾性係数 $E_s$ ( $\text{kN/mm}^2$ )	降伏点 $f_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強さ $f_u$ ( $\text{N/mm}^2$ )
鉄筋D13	191	384	588
スターラップD6	178	369	562
PC鋼棒φ13	200	930	1080

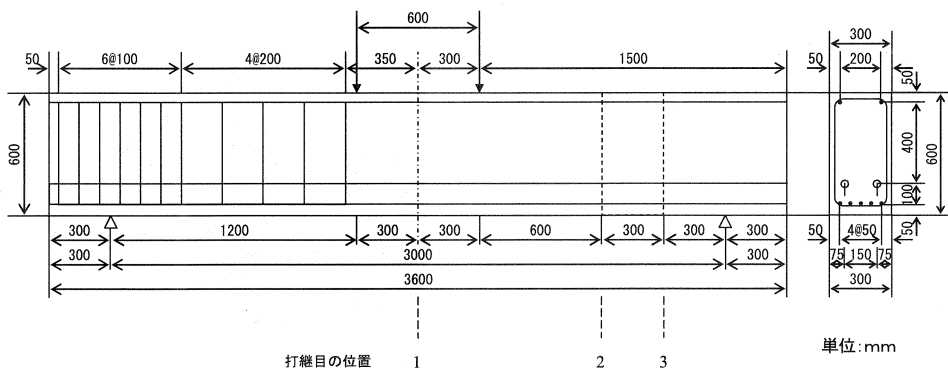


図-1 PPCはり供試体の形状・寸法

よびPC鋼棒の力学的特性を示す。図-1にPPCはり供試体の形状・寸法を示す。鉛直打継目の有無、鉛直打継目の位置、鉛直打継目の施工方法、PCグラウトの品質、プレストレスの導入量を変化

表-2 PPCはり供試体の種類

供試体名	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	打継目処理方法	打継目位置	グラウト強度 (N/mm <sup>2</sup> )	プレストレス導入量 (%)	備考	
N-40a	35	-	-	40	80		
NG1-20a		良	1	20	80		
NG2-20a		良	2	2	20		80
NG2-40a					40		
NG2-60a					60		
NB2-20a					20		
NG2-40b		良	40	60			
NG2-20ac		良	20	80	80		主鉄筋2本切断
NB2-20ac		悪					
NG3-20a		良					

させて、これらの組合せにより供試体を作製した。表-2にPPCはり供試体の種類を示す。

2.2 コンクリート

材齢28日における目標圧縮強度を35N/mm<sup>2</sup>としたコンクリートを使用した。表-3に骨材の物理的性状を、表-4にコンクリートの配合を示す。

表-3 骨材の物理的性状

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		吸水率 (%)
	絶乾状態	表乾状態	
細骨材	2.60	2.65	2.13
粗骨材	2.79	2.81	0.84

実際に使用したレディーミクストコンクリートは9回に分けて

表-4 コンクリートの配合

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤	AE剤
35	20	12±2.5	4.5±1.5	56.2	44.0	159	283	830	1120	2.83	1.13

打ち込み、その圧縮強度は44.3~60.2 N/mm<sup>2</sup>と大幅にばらついた。圧縮強度のばらつきは、PPCはりの曲げひび割れ発生荷重には大きな影響を及ぼすが、曲げひび割れ幅への影響は比較的小さい。本研究では、曲げひび割れ幅を主として検討したため、強度が異なったことの影響は、以後の検討で考慮しなかった。

2.3 鉛直打継目

鉛直打継目の位置を、図-1に示す。鉛直打継目位置は、曲げ区間の中央位置 (以下、1 と称する。)、せん断スパンの中央位置 (以下、2 と称する。)、せん断スパンの中央位置と支点との中央位置 (以下、3 と称する。) の3箇所のいずれかとした。

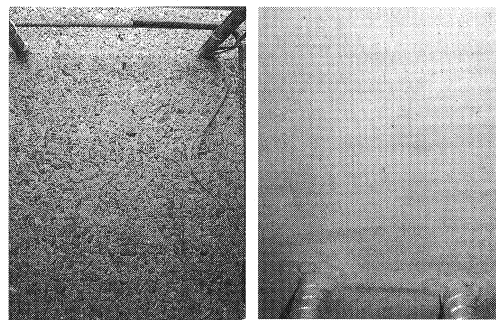
打継目の施工方法として、遅延剤を塗布し、1日後に洗い出しを行ったもの (以下、Gまたは良と称する。) と、材齢1日においてワイヤーブラシを用いて洗浄処理したもの (以下、Bまたは悪と称する。) の2種類とした。写真-1に打継目処理後の断面の状態を示す。

また、作製した供試体は主鉄筋が5本配置しており、その内の2本を打継目で切断している (以下、c と称する。) 供試体を2体作製した。

2.4 PCグラウト

PCグラウトの品質として、材齢28日における目標圧縮強度を20 N/mm<sup>2</sup> (以下、20 シリーズと称する。)、40 N/mm<sup>2</sup> (以下、40 シリーズと称する。)、60 N/mm<sup>2</sup> (以下、60 シリーズと称する。) の3種類とした。

PCグラウトの配合は、普通ポルトランドセメント



(a) 遅延剤の塗布 (b) ワイヤーブラシ

写真-1 打継目の施工方法

の 50%を高炉スラグ微粉末で置換したものを使用した。PCグラウト用混和剤は、ノンブリーディング高粘性タイプの混和剤を使用した。なお、PCグラウト用混和剤の標準的な添加率は結合材量の質量比で 1.0%である。20 シリーズの配合については、W/B を大きくする必要があるが、ブリーディングの発生を考慮し、混和剤の添加率を 2.0%とした。表一5にPCグラウトに使用した結合材の物理的性状を、表一6に供試体に使用したPCグラウトの配合を示す。

実際に使用したPCグラウトの圧縮強度は、20 シリーズは 32.5 N/mm<sup>2</sup>、40 シリーズは 39.5N/mm<sup>2</sup>、60 シリーズは 46.5N/mm<sup>2</sup>であった。目標圧縮強度と比較すると、20 シリーズでは 10N/mm<sup>2</sup> 以上大きく、60 シリーズでは 10 N/mm<sup>2</sup> 以上小さくなったため、目標とした強度の差が小さくなった。

2.5 プレストレスの導入量

導入するプレストレスとして、PC鋼棒の緊張力は、PC鋼棒の降伏点の 80% (以下、a と称する。) を主体としたが、60% (以下、b と称する。) を導入したほりを 1 体作製した。

2.6 測定事項

測定事項としては、測定長が 100mm の  $\pi$  ゲージによるはり全長のひび割れ幅  $w$  と曲げモーメント一定区間のひび割れ幅  $w'$ 、および中央断面位置での主鉄筋のひずみ  $\epsilon_s$  である。

3. 実験結果

3.1 全体の評価

表一7に、曲げひび割れ発生モーメント、引張鉄筋が降伏した曲げモーメント、最大荷重、破壊形式を示す。1 あるいは 2 の鉛直打継目位置に曲げひび割れが最初に発生したが、その曲げひび割れ発生モーメントは、各供試体で 104~127kN・m であり、コンクリート強度のばらつき、本実験で採用した打継目の位置と処理方法、PCグラウトの強度、およびプレストレス導入量にかかわらず、大きな差は見られなかった。

はり中央位置における引張鉄筋に貼付したワイヤストレーンゲージより求めた引張鉄筋が降伏した曲げモーメントは、各供試体で 220~259kN・m であった。その中で鉛直打継目位置が 1 である供試体は 259kN・m と最大であった。鉛直打継目を曲げモーメント一定区間に設置したため鉛直打継目に曲げひび割れが集中して、それより 10cm 離れた位置に貼付したワイヤストレーンゲージ位置では曲げひび割れが横切っていないため、引張鉄筋の降伏が遅れて判定されたことによると考え

表一5 結合材の物理的性状

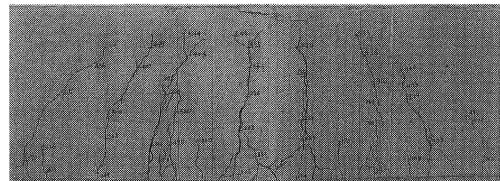
	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
普通ポルトランドセメント	3.16	3320
高炉スラグ微粉末	2.88	6250

表一6 PCグラウトの配合

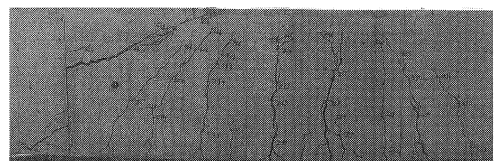
目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/B (%)	混和剤の添加率 (%)	1バッチあたりの量 (g)			混和剤
			水 W	結合材 B		
				セメント	高炉スラグ微粉末	
20	65	2.0	16250		500	
40	50	1.0	12500	12500	250	
60	40	1.0	10000		250	

表一7 PPCはり供試体の力学的性

供試体名	曲げひび割れ発生モーメント (kN・m)	引張鉄筋降伏曲げモーメント (kN・m)	最大荷重 (kN)	破壊形式
N -40a	116	234	549	曲げ破壊
NG1-20a	114	259	583	曲げ破壊
NG2-20a	104	235	568	曲げ破壊
NG2-40a	114	235	583	曲げ破壊
NG2-60a	114	222	582	曲げ破壊
NB2-20a	120	231	556	せん断圧縮破壊
NG2-40b	114	220	583	曲げ破壊
NG2-20ac	120	234	545	曲げ破壊
NB2-20ac	112	228	550	せん断圧縮破壊
NG3-20a	127	246	589	曲げ破壊



写真一2 曲げ破壊の一例



写真一3 せん断圧縮破壊の一例

られる。

最大荷重は、後述する破壊形式にかかわらず、各供試体で545~589kNであり、曲げひび割れ発生モーメントと同様に、大きな差は見られなかった。

写真-2には曲げ破壊の一例を、写真-3にはせん断圧縮破壊の一例を示す。ほとんどの供試体が曲げ破壊であるのに対し、鉛直打継目がせん断スパン中央位置の2で、施工方法が悪いBである供試体では、せん断圧縮破壊となった。鉛直打継目には曲げひび割れが最初に発生し、鉛直打継目の施工方法が適切でないことから、付着強度が小さくてずれが大きくなったためであると考えられる。そして、鉛直打継目において付着強度が小さくなる影響により、斜めひび割れが鉛直打継目をまたいで不連続に発達した。

鉛直打継目の位置が2でも施工方法が良好なGである供試体では、鉛直打継目に先ずひび割れが発生したが、斜めひび割れが発生せずに、引張鉄筋が降伏した後、圧縮縁のコンクリートが圧壊する曲げ破壊となった。鉛直打継目における付着強度が大きいことから、その部分でもずれがなく、一体化されていたためであると考えられる。

この結果から、鉛直打継目の位置と施工方法の違いが、破壊形式に大きな影響を与えることが認められた。なお、PCグラウトの強度が異なることによる破壊形式の変化は見られなかった。

### 3.2 PCグラウトの強度の違いによる評価

図-2にPCグラウトの強度の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅の関係を示す。なお総ひび割れ幅は、はり側面の引張鉄筋位置においてゲージ長が10cmのπゲージで測定したひび割れ幅と伸びの合計値を示している。そして、測定区間が300cmの支点間を「はり全長」と、60cmの曲げモーメント一定区間を「曲げモーメント一定区間」と、それぞれ表示している。

60シリーズと比較すると40シリーズは、引張鉄筋の降伏まではり全長の総ひび割れ幅は同等の値であるが、曲げモーメント一定区間では小さくなっている。PCグラウトの強度が小さいことにより、ひび割れが分散し1本あたりのひび割れ幅が小さくなったためである。また、引張鉄筋が降伏した後の曲げモーメント一定区間では、40シリーズが60シリーズの総ひび割れ幅に近づくとともに、はり全長での大きさが著しくなっている。PCグラウト強度が40シリーズでは、曲げモーメント一定区間での総ひび割れ幅が大きくなるのが、そのままはり全長の総ひび割れ幅の増加につながっているのである。しかしながら、20シリーズと60シリーズのPCグラウト強度では、このような現象が認められなかった。

PCグラウトの目標強度の差より実際の強度の差は小さかったが、これらのことから、PCグラウトの強度がひび割れに及ぼす影響は大きいことが示唆された。

### 3.3 鉛直打継目の位置の違いによる評価

鉛直打継目の位置が異なる場合の曲げモーメントと総ひび割れ幅の関係を、図-3に示す。せん断スパンの中央部に鉛直打継目を有するNG2-40aと比較すると鉛直打継目が無いN-40aは、はり全長の総ひび割れ幅についてはほぼ同様な値を示すが、曲げモーメント一定区間での総ひび割れ幅は、引張鉄筋の降伏までは大きくなっている。鉛直打

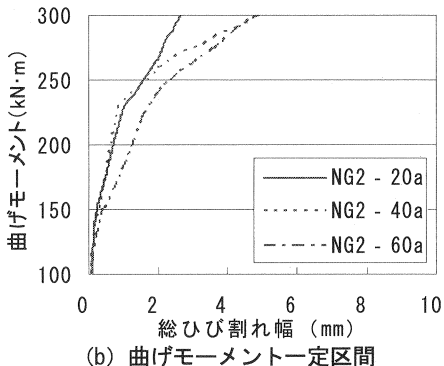
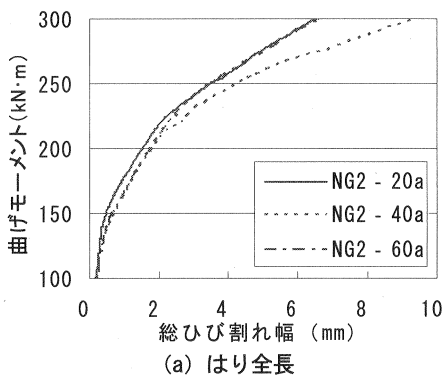


図-2 PCグラウトの強度の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅

継目がせん断スパンの中央位置にあることで、打継目部分のひび割れが大きくなり、曲げモーメント一定区間でのひび割れ幅が小さくなるためである。

鉛直打継目が曲げモーメント一定区間の1の位置であるNG1-20aは、引張鉄筋の降伏後における総ひび割れ幅が、はり全長ではNG2-40aより、曲げモーメント一定区間ではNG2-60aより、それぞれ大きくなっている。PCグラウトの強度が20シリーズで小さいため、曲げひび割れが全体に広がるはずが、鉛直打継目の位置が曲げモーメント一定区間にあるため、その打継目にひび割れが集中してしまっただけである。

鉛直打継目が3の位置であるNG3-20aは、はり全長の総ひび割れ幅は鉛直打継目が2の位置のNG2-20aと同等あるいは小さくなっているが、曲げモーメント一定区間では引張鉄筋の降伏後に総ひび割れ幅が大きくなっている。PCグラウトの強度が小さいため、曲げひび割れが全体に分散し、鉛直打継目の位置がせん断スパン中央位置の2の位置より支点側にあることから、打継目にひび割れが集中せず、打継目の無い供試体と同等になると考えられる。

### 3.4 鉛直打継目の施工の良否による評価

図-4に、鉛直打継目の施工方法が異なる場合の曲げモーメントと総ひび割れ幅の関係を示す。鉛直打継目の施工方法が悪いBであるNB2-20aは、はり全長の総ひび割れ幅では施工方法の良いNG2-20aより大きくなっている。PCグラウトの強度が小さいためひび割れが全体に広がっているが、打継目の施工方法が適切でなく付着強度が小さいことから、打継目に発生したひび割れが大きくなったためであると考えられる。鉛直打継目の施工方法が、打継目に発生したひび割れに及ぼす影響が大きかったことが確認できた。

引張鉄筋を切断しているNG2-20acおよびNB2-20acは、切断していないNG2-20aと比較すると、はり全長および曲げモーメント一定区間のいずれにおける総ひび割れ幅も、大きくなっている。引張鉄筋を切断

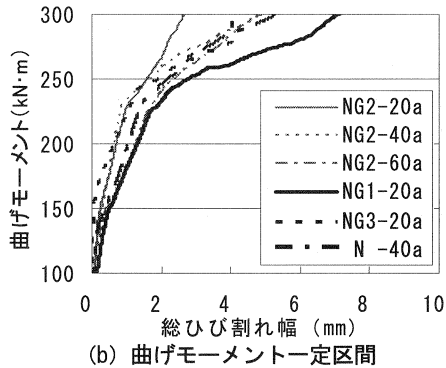
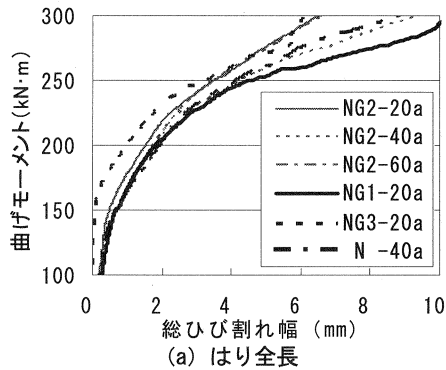


図-3 鉛直打継目の位置の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅

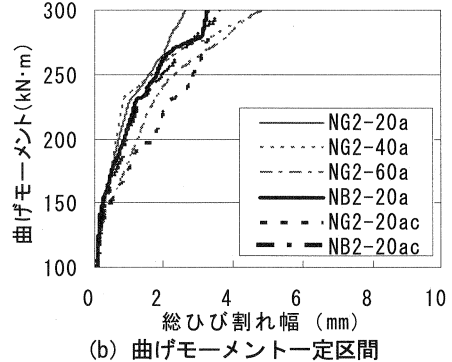
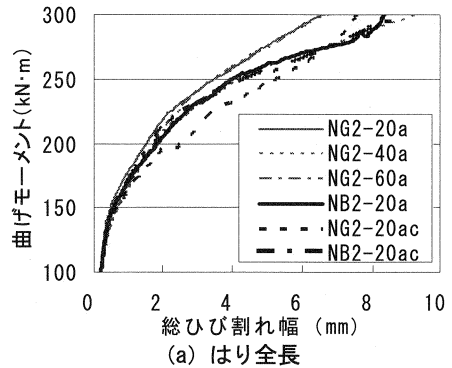


図-4 鉛直打継目の施工方法の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅

することにより、鉛直打継目での主鉄筋1本あたりの分担する応力が大きくなるため、ひび割れ幅も大きくなるのである。

### 3.5 プレストレス導入量の違いによる評価

プレストレス導入量の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅の関係を示した図-5より、プレストレスの導入量が少ないNG2-40bは、導入量が多いNG2-40aと比較すると、はり全長および曲げモーメント一定区間における総ひび割れ幅がそれぞれ大きくなる傾向が見られる。プレストレスの導入量が小さいことから、ひび割れを抑制する効果が小さいためである。しかし主鉄筋の降伏後は、NG2-40bはNG2-40aの総ひび割れ幅に近づく傾向を示す。

### 4. まとめ

塩化物イオン量を減少するために、普通ポルトランドセメントの半分を高炉スラグ微粉末で置換したPCグラウトを用いて、PPCはりを作製し、曲げ強度試験を行った結果を報告した。本研究の範囲内で、以下の知見が得られた。

- (1) 鉛直打継目の位置と施工の良否が、ひび割れの発生やPPCはりの破壊形式に及ぼす影響は大きい。
- (2) 鉛直打継目を有するPPCはりには、打継目部分でのひび割れ幅が大きくなり、打継目の施工方法によりひび割れの発生やその発達性状は大きく異なる。
- (3) PCグラウトの強度の違いは、発生する曲げひび割れ幅に影響を与える。
- (4) 強度が小さいPCグラウトを用いるとひび割れは全体に広がり、大きい強度のPCグラウトを用いるとひび割れの数減少して1本あたりの幅が大きくなる。
- (5) 導入プレストレス量を大きくすることにより、ひび割れを抑制できることが確かめられた。

### 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。

### 参考文献

- 1) 辻幸和ほか:高炉スラグ微粉末を用いたPCグラウトの流動性および強度, PC構造物の現状の問題点とその対策, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.52, pp.285-292, 2003.6
- 2) 藤本謙太郎ほか:高炉スラグ微粉末を併用したPCグラウトのフレッシュおよび強度性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.129-134, 2004.6

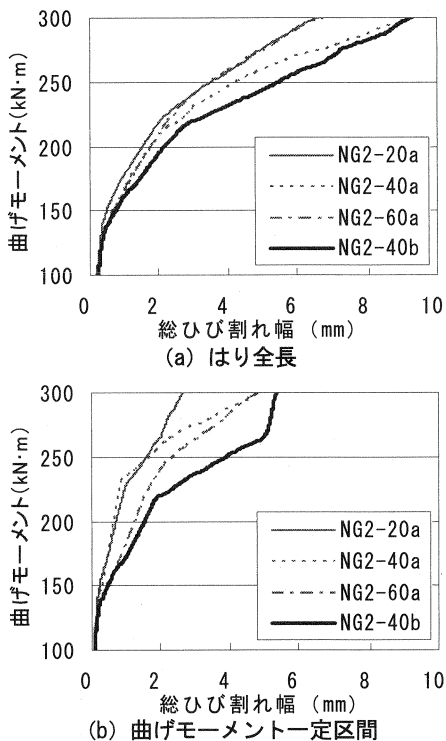


図-5 プレストレス導入量の違いによる曲げモーメントと総ひび割れ幅