

異なる品質のPCグラウトを有するPPCはりの力学的性状

群馬大学大学院 正会員 博士(工学) ○李 春鶴
 群馬大学工学部 正会員 池田 正志
 群馬大学大学院 正会員 工学博士 辻 幸和

1. はじめに

PCグラウトは、PC鋼材とシーースとの間の空隙を埋めて、PC鋼材を防錆するほか、付着により部材のひび割れの分散性状や曲げ破壊耐力等を高めることを目的としている¹⁾。しかし、普通ポルトランドセメントに含有される塩化物イオンが近年増加しており、その許容値が200ppmから350ppmに緩和された。そのため、単位セメント量として1000kg/m³を超える量を用いるPCグラウト中の塩化物イオンは、0.3kg/m³を超えてしまう。塩化物イオンの許容値がセメント量の0.035%に変更された²⁾ものの、PC鋼材の腐食は従来の許容値に適合していたセメントを用いた場合に比べて懸念される。

PCグラウト自体には腐食性のある構成物を極力抑えたい一方で、所要の流動性、材料分離抵抗性、充填性、および圧縮強度等の品質を有するようなPCグラウトの高性能化を図るために、当研究室では高炉スラグ微粉末の種類と置換率および高性能AE減水剤の添加率、練混ぜ方法などを要因にとって製造したPCグラウトの諸性状について、特に圧縮強度、流動性などの基礎的実験研究をこれまで行ってきた^{3)~5)}。

本研究では、既往の研究結果を踏まえて、まず圧縮強度の異なるPCグラウトを用いて、PCグラウトの圧縮強度が普通および高強度のコンクリートを用いたPPCはりの力学的性状に及ぼす影響について実験的な検討を行った結果を報告する。次に、2種類の高炉スラグ微粉末を用いて製造したPCグラウトを注入した高強度コンクリートを用いたPPCはりの力学的性状について言及する。

2. 実験概要

2.1 材料および配合

表-1は、本研究で使用したコンクリートの配合を示す。普通コンクリートと高強度コンクリートは、材齢28日における目標強度がそれぞれ35N/mm²、70N/mm²である。高強度コンクリートの場合は2種類の水セメント比であるが、材齢28日における実際の圧縮強度がそれぞれ77.7N/mm²および78.1N/mm²なので、同一の圧縮強度とみなすことができる。

表-1 コンクリートの配合

目標強度 (N/mm ²)	スランプ (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					圧縮強度 (N/mm ²)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
35	8	4.5	50.5	44.8	156	309	820	1014	3.71	35.5
70	12	4.5	33.0	42.0	159	482	730	1040	6.75	77.7
	12	4.5	30.7	40.0	156	508	680	1080	6.61	78.1

表-2 PCグラウトの種類、配合、フレッシュ性状および圧縮強度

種類	1バッチあたりの量(g)					ブリーディング率(%)	収縮率(%)	流下時間(s)	圧縮強度 (N/mm ²)
	水	セメント	高炉スラグ微粉末	PCグラウト用混和剤	高性能AE減水剤				
40NG	11250	12500	12500	250	0	0	0.32	11.3	38.4
60NG	8750			125	250	0	0.40	20.8	50.5
40SG	12500			250	0	0	-0.18	7.5	39.5
20SC	16250			500	0	0	0.31	14.6	19.4
40SC	12500			175	75	0	0.37	26.7	39.5

PC グラウトは、材齢 28 日における目標強度を 20N/mm²、40N/mm²、60N/mm² の 3 種類とした。その配合を、表-2 に示す。普通ポルトランドセメントの質量の 50% を、高炉スラグ微粉末で置換して製造した。高炉スラグ微粉末は、表-3 に示すように、比表面積が小さいもの（以下、N と称する）、および大きいもの（以下、S と称する）の 2 種類とした。また PC グラウト用混和剤も、その主成分がメラミンスルホン酸系化合物と水溶性高分子エーテル系化合物（以下、G と称する）、および有機ポリマー（以下、C と称する）の 2 種類を使用した。表-2 の PC グラウトの種類の前 の 2 桁数値は材齢 28 日における目標強度を示し、次の 2 個の英文字はそれぞれ高炉スラグ微粉末の種類と PC グラウト用混和剤の種類を示す。

鉄筋および PC 鋼棒の力学的性質を表-4 に示す。主鉄筋には D13 を、Φ13 の PC 鋼棒とともに用いた。

2.2 PC グラウトのフレッシュ性状および圧縮強度

PC グラウトのブリーディング率、収縮率および流動性（流下時由）の測定を行った。その測定結果と圧縮強度についての実験結果は、表-2 に示したように、PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル（改訂版）に規定された品質標準¹⁾を満たしている。ただし、60N/mm² の目標強度は 50N/mm² しか得られなかった。

表-3 結合材の品質

結合材	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	3.16	3320
高炉スラグ微粉末 N	2.88	4230
高炉スラグ微粉末 S		6250

表-4 鉄筋および PC 鋼棒の力学的特性

鋼材	材質	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
主鉄筋 D13	SD345	191	384	588
スターラップ D6	SD345	178	369	562
PC 鋼棒 Φ13	SBPR930/1080	200	930	1080

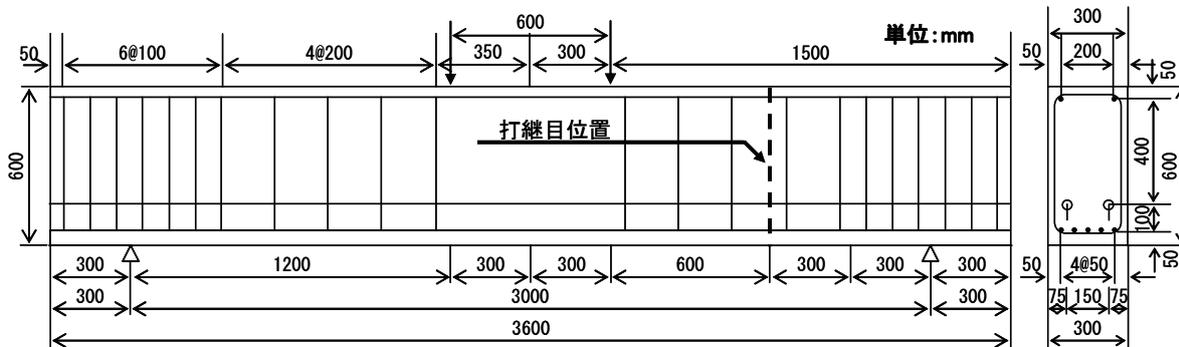


図-1 供試体の形状寸法

2.3 供試体形状および養生

図-1 は、PPC はり供試体の断面形状と寸法を示す。断面は高さが 600mm、幅が 300mm の矩形断面とし、引張鉄筋および圧縮鉄筋には D13、スターラップには D6 の鉄筋を配置し、PC 鋼棒は Φ13 を使用した。PC 鋼棒に緊張力を導入し、その後 PC グラウトを充填して 28 日以降に、載荷試験に供した。プレストレスの導入量は、PC 鋼材の耐力の 80% と 60% の 2 種類とした。

はり供試体の種類を表-5 に示す。はり供試体名の前半部分の英文字は順次コンクリートの強度、打継目

表-5 供試体の種類

はり名	コンクリートの種類	プレストレス導入量(%)	グラウトの種類
Na-20SC	普通	80	20SC
Na-40NG			40NG
Na-60NG			60NG
Ha-20SC	高強度	60	20SC
Ha-40NG			40NG
Hb-40NG		80	60NG
Ha-60NG			40SG
Ha-40SG	60	60	
Hb-40SG			

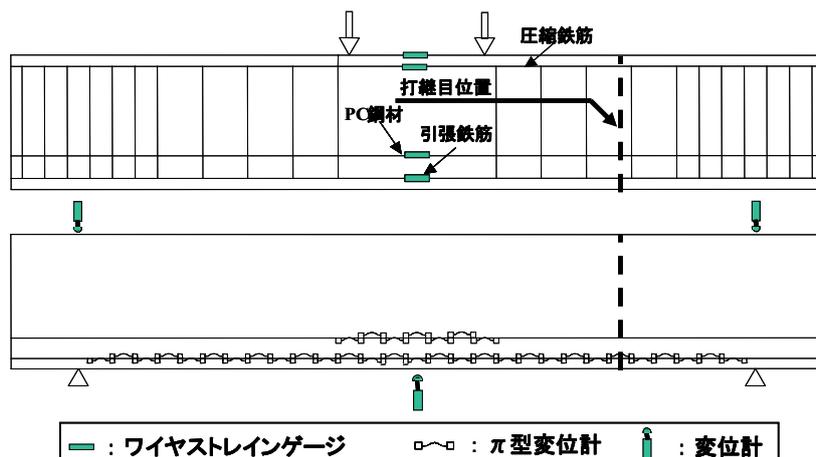


図-2 荷重位置と測定位置

位置, プレストレス導入量を表し, 後半部分の英文字は PC グラウトの種類を表す。供試体は, せん断スパン中央位置に鉛直打継目を設けたものである。張出施工の橋梁を想定している。打継目の処理方法は, 打継目位置の型枠に遅延剤を塗布した後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。旧コンクリートの養生は, 材齢 1 日までは蒸気養生を行った。打継目の処理を行い, 新コンクリートを打ち込んだ後の 1 日までは蒸気養生を行い, その以降は, 湿布養生とした。

2.4 PPC はりの荷重試験

図-1 に示したように, PPC はりは支点間が 3000mm, 荷重スパンが 600mm の 2 点集中荷重とし, 荷重方法は静的漸増荷重試験とした。

測定項目としては, コンクリート圧縮縁, 引張鉄筋, 圧縮鉄筋, PC 鋼棒の各ひずみに加えて, はり側面引張鉄筋位置における支点間と PC 鋼棒位置における曲げモーメント一定区間のそれぞれのひび割れ幅の測定である。荷重位置と各測定位置を, 図-2 に示す。

3. 普通および高強度のコンクリートを用いた PPC はりにおける PC グラウトの圧縮強度が及ぼす影響

目標強度が 20~60N/mm² の PC グラウトを注入し, プレストレスの導入量が PC 鋼材耐力の 80% の供試体における PC グラウトの圧縮強度が及ぼす影響について, 以下の検討を行った。

3.1 曲げひび割れ発生モーメント

図-3 は, PC グラウトの圧縮強度と曲げひび割れ発生モーメントの関係を示す。図に示すように, PC グラウトの圧縮強度にかかわらず, 高強度コンクリートを用いた供試体は普通コンクリートを用いた供試体よりも曲げひび割れ発生モーメントは大きいことが確かめられた。

圧縮強度が 35.5N/mm² の普通コンクリートを用いた供試体では, PC グラウトの圧縮強度を 20N/mm² から 50N/mm² へと増加するに従って, 曲げひび割れ発生モーメントは増加する傾向がある。しかしながら, 圧縮強度が 70N/mm² を超える高強度コンクリートを用いた供試体では, その強度より小さい範囲において PC グラウトの圧縮強度を変化させても, はりの曲げひび割れ発生モーメントにはほとんど影響

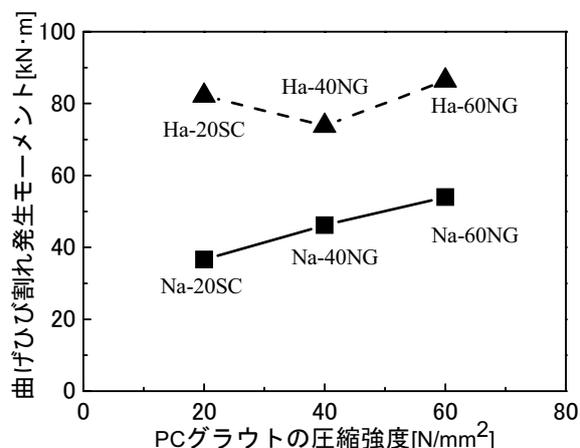


図-3 曲げひび割れ発生モーメントと PC グラウトの圧縮強度との関係

を及ぼさなかった。コンクリートの圧縮強度を挟んでPCグラウトの圧縮強度を増加させると、PC鋼材とコンクリートの付着強度が向上して、両者の複合効果が高まったために、はりの曲げひび割れ発生モーメントが増加したと考えられる。

3.2 曲げひび割れの本数

図-4には、PPCはりの曲げひび割れの本数を示す。1200mmのせん断スパンの打継目の有る側(以下、SJと称する)と無い側(以下、SNと称する)、600mmの曲げモーメントが一定(以下、MMと称する)の3区間に分けて示している。図に示すように、いずれの区間においても、高強度コンクリートを用いたPPCはりでは普通コンクリートを用いたPPCはりよりも、曲げひび割れの本数が少なくなる傾向がある。

弱点となりやすい鉛直打継目のあるSJ区間では、普通コンクリートを用いたPPCはりではPCグラウトの圧縮強度の増加に伴って、曲げひび割れの本数が減っていく傾向がある。しかしながら高強度コンクリートを用いたPPCはりでは、PCグラウトの圧縮強度によるこのような傾向は認められなかった。また、他の区間での曲げひび割れの本数についても、PCグラウトの圧縮強度が及ぼす影響は見られなかった。

3.3 引張鉄筋のひずみ

引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係を、図-5に示す。図に示すように、PCグラウトの圧縮強度に関わらず、高強度コンクリートを用いた供試体は普通コンクリートを用いた供試体よりも同じ引張鉄筋のひずみ時の曲げモーメントが大きい。PCグラウトの圧縮強度を20~50N/mm²に変化してもその影響はほとんど認められない。

曲げひび割れ発生モーメント、曲げひび割れの本数、引張鉄筋のひずみと曲げモーメントの関係についての実験的検討から、以下のことが考えられる。すなわち、PPCはりでは、PCグラウトの圧縮強度よりもはりに用いたコンクリートの圧縮強度が、その力学的性状を支配している。趙ら⁶⁾および睦好ら⁷⁾の研究によれば、2段以上に配置された鉄筋およびPC鋼材がはりの曲げひび割れ性状に及ぼすPCグラウトの圧縮強度の影響は小さいと報告している。それで、図-3に示したような普通コンクリートを用いたPPCはりの場合の曲げひび割れ発生モーメント、および図-4に示した普通コンクリートを用い鉛直打継目を有するせん断スパンのSJ区間における曲げひび割れの本数のように、コンクリートの圧縮強度が比較的に小さい場合には、その強度を挟んで変化したPCグラウトの圧縮強度が及ぼす影響は現れる。しかしながら高強度コンクリートを用いる場合には、その強度よりも小さい範囲におけるPCグラウトの圧縮強度の変化が及ぼす影響は小さく、コンクリートの圧縮強度が及ぼす影響が大きくなることが推察される。

PCグラウトの品質を最大に発揮できるコンクリートの圧縮強度は、断面形状、配筋方法、プレストレスの導入量などの種々要因と水準によって決まると考えられるが、高強度コンクリートの適用が広がりつつある現段階では、PCグラウトの圧縮強度が及ぼす影響は相対的に小さくなることを定性的に推定できたとと言える。

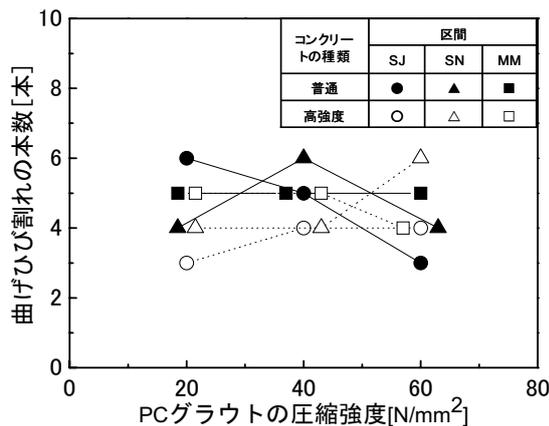


図-4 曲げひび割れの本数

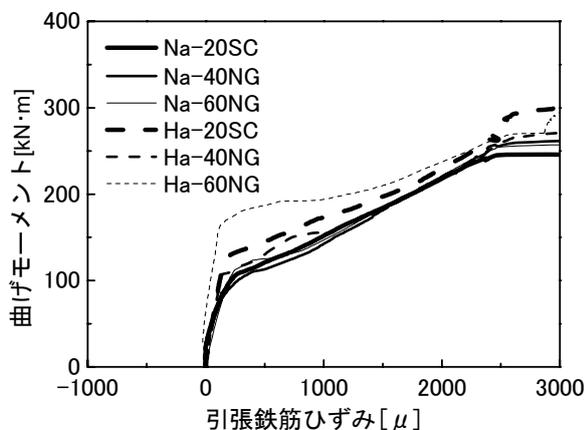


図-5 引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係

4. 高強度コンクリートを用いた PPC はりにおける PC グラウトの品質が及ぼす影響

異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を用いた PC グラウトが高強度コンクリートを用いた PPC はりの力学的性状に及ぼす影響について、以下の検討を行う。各 PPC はりの中央位置のたわみ-曲げモーメント曲線を、**図-6** に示す。すべての PPC はりは曲げ挙動が卓越し、引張鉄筋が降伏して、その後に圧縮縁のコンクリートが圧縮する曲げ破壊を生じた。

図-6 に示すように、曲げモーメントが $250\text{kN}\cdot\text{m}$ を超えると、プレストレスの導入量に関わらず、高炉スラグ微粉末の比表面積が小さい NG 型の PC グラウトを充填した PPC はりのほうが、同一のたわみにおける曲げモーメントが大きくなった。この理由は、以下のように説明できる。

各 PPC はりは荷重の増加によって、曲げモーメントが $250\text{kN}\cdot\text{m}$ まではほぼ同じ曲げ剛性で挙動しているが、引張鉄筋が降伏段階の $250\text{kN}\cdot\text{m}$ を超えると、異なる断面剛性を示している。PC 鋼材およびそれに付着している PC グラウトとコンクリート、ならびに引張鉄筋によって曲げモーメントに主に抵抗しているので、引張鉄筋が降伏段階に入り、その後の断面剛性は、PC グラウトの充填性および PC グラウトと PC 鋼材の付着力に関わる影響力が大きくなると考えられる。

NG 型の PC グラウトは、SG 型の PC グラウトよりも置換した高炉スラグ微粉末の比表面積が小さいので、PC グラウトの流動性が高く、良好な充填性が得られたと考えられる。従って、PC 鋼材との付着が改善されて、断面剛性が大きくなり、たわみが小さくなったと考えられる。

図-7 には、引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係を示す。上述のとおり、引張鉄筋の降伏に伴い、プレストレスの導入量に関わらず、比表面積が小さい NG 型の PC グラウトを充填した場合において、同一の引張鉄筋のひずみにおける PPC はりの曲げモーメントが大きいのである。

平均曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を、**図-8** に示す。ここでの平均曲げひび割れ幅は、はり側面の引張鉄筋位置での曲げモーメントが一定区間における曲げひび割れ幅の平均値である。図に示すように、各 PPC はりは、NG 型の PC グラウトの使用によって、平均曲げひび割れ幅を小さくしていることが分かる。

この現象は、**図-9** を用いて説明できると考えられる。**図-9** には、PC 鋼材ひずみと平均曲げひび割れ幅の

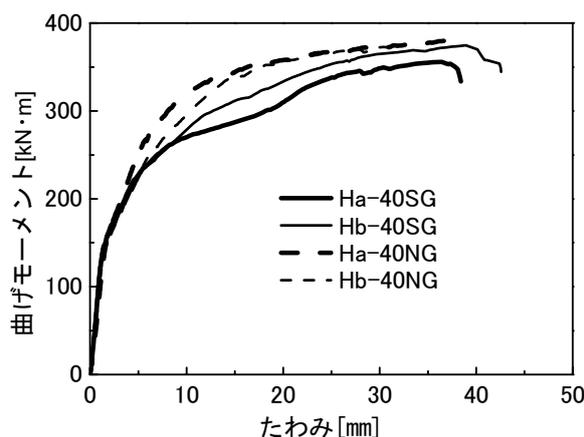


図-6 たわみと曲げモーメントの関係

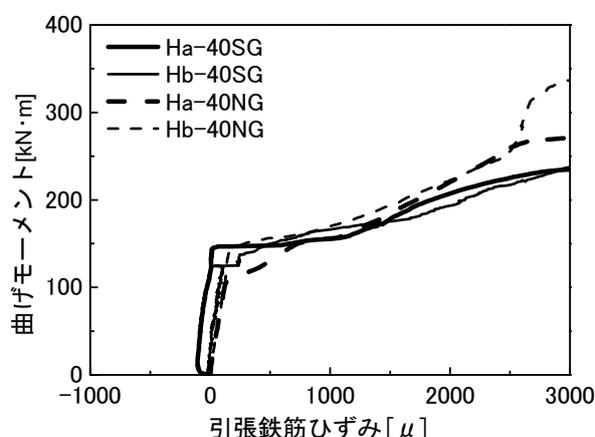


図-7 引張鉄筋ひずみと曲げモーメントの関係

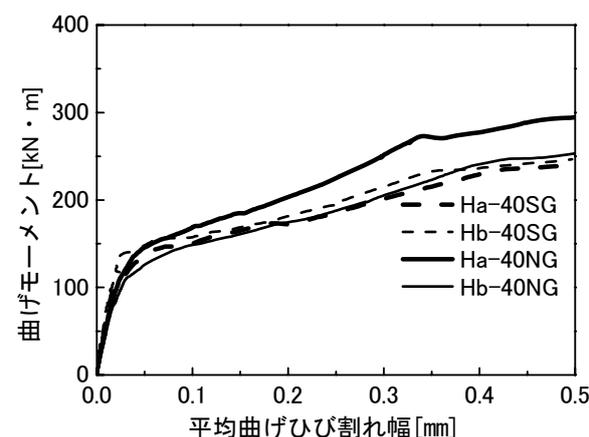


図-8 平均曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係

関係を示す。たわみの場合と同様に、NG型のPCグラウトは、SG型のPCグラウトよりも高炉スラグの比表面積が小さいため、流動性が高く、充填性が向上して、PC鋼材とコンクリートの付着が増している。そのため、同一のPC鋼材のひずみに対する平均曲げひび割れ幅が小さくなっており、曲げひび割れの制御効果が大きくなったと推察される。

PPCは供試体の充填性については、実際に確かめていないが、今後の研究課題としたい。

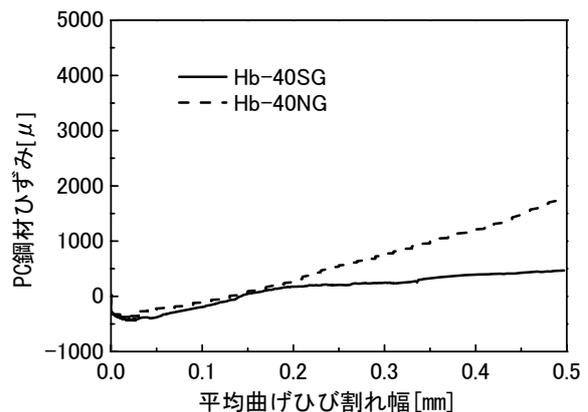


図-9 PC鋼棒のひずみと平均曲げひび割れ幅の関係

5. まとめ

単位セメント量の半分を高炉スラグ微粉末で置換したPCグラウトをPPCはりに用いた際、PCグラウトの品質がPPCはりの力学的性状に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、本研究の範囲内で次の知見を得た。

1) PPCはりの曲げ性状については、コンクリートの圧縮強度が比較的小さい場合には、その強度を挟んで変化したPCグラウトの圧縮強度が及ぼす影響のあることが確認された。しかしながら、高強度コンクリートを用いる場合には、その強度よりも小さい範囲におけるPCグラウトの圧縮強度の変化が及ぼす影響は小さく、コンクリートの圧縮強度が及ぼす影響が大きくなることが確かめられた。

2) 高炉スラグ微粉末の比表面積がPCグラウトの品質に及ぼす影響を、PPCはりという部材レベルで確かめた。すなわち、比表面積が小さい高炉スラグ微粉末を使用して充填性を向上させることによって、PPCはりの変形および曲げひび割れの制御が効果的になることが確かめられた。比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を用いたPCグラウトの充填性を向上させることが、今後の課題である。

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諸氏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) PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル(改訂版),(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会,2002.10
- 2) PCグラウトの設計施工指針,(社)プレストレストコンクリート技術協会, 2005. 12
- 3) 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, pp.47-56, 1994.5
- 4) 辻 幸和, 池田正志, 谷口友一, 杉山隆文: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, 土木学会コンクリート技術シリーズ 52, pp.285-292, 2003.6
- 5) 藤本謙太郎, 辻 幸和, 池田正志, 谷口友一:高炉スラグ微粉末を用いた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) 趙 唯堅, 丸山久一:多段配置を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.137-145, 1994.5
- 7) 倉岡希樹, 睦好宏史, Eakarath Witchukreangkrai, 浦松達也:プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1663-1668, 2004