

PCグラウトの品質改善に関する基礎的研究

出雲 淳一

正会員 工博 関東学院大学教授 工学部土木工学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦4834)

既存構造物の調査において、PCグラウトの充填不良による劣化事例が報告されており、PCグラウトの性能改善が望まれている。本研究では、従来のグラウトに高炉スラグ微粉末と高性能減水剤とを添加した場合のJ14漏斗の流下時間とブリーディング率の予測式を実験結果に基づいて定式化し、さらに導出された予測式によるパラメータ解析を行うことによって、グラウトのブリーディングおよび流下時間に影響を及ぼす要因について検討を行っている。さらに、PCグラウトの性能を改善するために、流動性を有するノンブリーディングタイプのグラウトの配合方法についても検討を行っている。

Key Words : PC grout, non-bleeding, high quality of PC grout, quenched blast furnace fine slag, superplasticizer, fluidity

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下PCと呼ぶ）グラウトは、PC鋼材とシーストの間の空隙を埋めてコンクリートと一体とするとともに、PC鋼材の腐食を防ぐ働きをしている。しかし、グラウトが不良の場合には、高応力下で用いられるPC鋼材の腐食を引き起こし、PC構造物の耐久性を低下させる。これまでに行われた既存PC構造物の調査においても、グラウトの充填不良による構造物の劣化事例が報告されている^{1), 2)}。

PCグラウトの充填状況の検査方法およびグラウト不良に対する補修方法^{3), 4)}を確立していく一方で、施工時におけるグラウト注入が確実にされるようなグラウトの品質改善を図っていくことも必要と考えられる。特に、ブリーディング率がゼロであることはシースト内の空隙を少なくするとともにPC鋼材の腐食を防ぐために、耐久性の面から望ましいと考えられるが、そのような配合は現時点では一部のノンブリーディングタイプのグラウトを用いる場合に限定されている。

プレストレストコンクリート建設業協会(PC建協)では、従来のグラウトからノンブリーディングタイプへの移行を推進し、PCグラウトの品質の向上に対して積極的な取り組みを行っている。⁵⁾ 土木学会コンクリート標準示方書(施工編)⁶⁾およびその他各機関の示方書、施工マニュアルにおいてもノンブリー

ディングタイプのグラウトの使用を推奨する傾向にあり、今後ノンブリーディングタイプのグラウトの施工は増加するものと考えられる。

現在、PC建協で採用されているノンブリーディングタイプのグラウトは増粘剤を添加させたタイプのもので主流を占めている。増粘剤を用いたグラウトの流動性は従来のグラウトに比べ一般に低下し、施工時の注入圧力は高くなる傾向にある。また、ブリーディングを抑制するために用いられる増粘剤の使用方法は、その製品仕様によって異なり、その結果グラウトの流動特性も各製品ごとに異なるものとなっている。

増粘剤を用いたノンブリーディングタイプのグラウト⁷⁾以外に、グラウトのブリーディングを抑えるためには、単位水量を減らすあるいは高炉スラグ微粉末⁸⁾、シリカフェウム⁹⁾、ガラス微粉末¹⁰⁾などの粉体をグラウトに添加することによってブリーディングを抑える方法が挙げられる。しかし、その一方ではグラウトの流動性は一般に低下し、グラウトの施工性および充填性が損なわれることになる。

グラウトが施工性、充填性のための流動性を適度に保ち、しかもブリーディングを極力ゼロに抑えたPCグラウトを安価に製造できれば、PC構造物の耐久性、信頼性向上にとって好ましいと考えられる。このような観点から、著者は空き瓶を粉砕したガラス微粉末などの資源をグラウトに利用して、PCグラウトの性能改善を図ることの検討を行ってきた¹⁰⁾。しか

し、粉体の性質がグラウトの流動性およびブリーディングに及ぼす影響が大きいことから、比表面積の異なる粉体（今回は種々の比表面積が選択できる高炉スラグ微粉末）と高性能減水剤とを用いた場合のJ14漏斗を用いたグラウトの流動性試験およびブリーディング試験を行い、J14漏斗の流下時間およびブリーディング率の予測式の定式化を本研究では試みている。その結果、粉体をグラウトに添加することによるブリーディングの抑制効果と流動特性の低下という相反する作用を高性能減水剤の使用下で最適に制御するための配合設計が可能となり、より品質の高いPCグラウトを製造することができると考えられる。

本研究はPCグラウトのブリーディングを極力ゼロに抑え、しかも施工に必要とされる流動性を制御するための配合方法を定量的に検討することを目的として、高炉スラグ微粉末の粉末度、添加量を変えながら高性能減水剤を添加した場合のブリーディングに対する抑制効果と流動特性について検討を行ったものである。以下にその検討内容を報告する。

2. 実験計画

(1) 使用材料

実験に用いた材料には、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末およびナフタリンスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤を用い、練混ぜ水には上水道水を用いた。実験に用いた普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末の比重、比表面積の実測値を表-1に示している。高炉スラグ微粉末は、公称のブレン値がそれぞれ6000cm²/g、8000cm²/g、10000cm²/g、15000cm²/gの4種類を用いることにした。

表-1に示すセメントの比表面積の測定はブレン値およびBET法による測定結果を示しているが、普通ポルトランドセメントに比べて比表面積の大きい高炉スラグ微粉末の場合には、測定精度の点からBET法で行うことが適切と判断してBET法で測定した値を示している。表-1に示すように高炉スラグ微粉末の比表面積の測定値と公称のブレン値との間にはかなり開きがあることが認められる。

(2) 配合

実験は、セメント、水、高性能減水剤で構成されるグラウトの流動特性およびブリーディング特性を調べるための実験（実験シリーズ1）、実験シリーズ1で構成される材料に高炉スラグ微粉末を加えた場合のグラウトの流動特性およびブリーディング特性を

表-1 試料の比重および比表面積

試料名	比重	比表面積 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	3.16	3600 (8900)*
高炉スラグ微粉末 (6000)	2.99	16200
高炉スラグ微粉末 (8000)	2.98	17600
高炉スラグ微粉末 (10000)	3.01	23900
高炉スラグ微粉末 (15000)	3.07	30400

*BET法

調べるための実験（実験シリーズ2）およびこれらの実験結果から定式化した流下時間およびブリーディングの予測式の検証のための実験（実験シリーズ3）に大きく分けられる。

実験シリーズ1の場合の実験パラメータとしては、水セメント比、高性能減水剤の添加量を選び、水セメント比を|25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%|とし、高性能減水剤はセメント重量の|0%、0.3%、0.5%、0.8%|添加することにした。高性能減水剤の添加量が多い場合にはブリーディングを増加させることが予想され、実験の目的からその量はセメント重量の0.8%を限度とした¹⁰⁾。

実験シリーズ2においては、水セメント比を一定(W/C=45%)とし、実験パラメータとしては高炉スラグ微粉末のセメントに対する置換率、高性能減水剤の添加量を選んだ。高炉スラグ微粉末は、セメント重量の|5%、10%、30%、40%、50%、75%|を高炉スラグ微粉末で置換することにした。水セメント比45%を一つの水準としたのは、コンクリート標準示方書(施工編)⁶⁾におけるPCグラウトの水セメント比の上限値が45%であること、ノンブリーディングタイプの配合例⁷⁾においても一般に水セメント比45%が用いられていることからである。また、高性能減水剤はセメント重量と高炉スラグ微粉末の重量の総重量に対して、|0.3%、0.5%|添加することにした。

実験シリーズ1および実験シリーズ2の場合の配合の組み合わせを表-2および表-3に示している。実験パラメータを変化させて実験を行う過程において、パラメータをそれ以上変えても流下時間が著しく増加したり、グラウトがJ14漏斗内で閉塞して測定が不能となったりした場合にはそれ以後の実験は行わなかった。したがって、表-2および表-3においては、全ての実験パラメータの組み合わせの中で測定が行

われた実験結果のみを示している。

表-2 配合および実験結果

(3)練混ぜ方法

実験シリーズ1および実験シリーズ2の場合、1バッチ当たり2lのグラウトをJIS R 5201「セメントの物理試験」で用いられるモルタルミキサーを使用して製造した。練混ぜ方法は一括練りとし、3分間練混ぜを行った。また、実験シリーズ3の場合には、ミキサーの性能の違いを考慮するために実験シリーズ1および実験シリーズ2で用いたモルタルミキサー以外にハンドミキサーも用いて練混ぜを行った。モルタルミキサーには仕様書に記載される回転数が140r.p.m.のものを、ハンドミキサーには回転数の仕様が1000r.p.m.のものを、グラウトの練混ぜは実験室内で行い、練混ぜ後のグラウトの温度は、24±2℃の範囲であった。

(4)試験方法

試験は土木学会規準「PCグラウトの試験方法(JSCE-F531-1993)」に従い、流動性試験、ブリーディング率の測定を行った。ただし、グラウトの流下時間の測定には、JA漏斗の代わりにJ14漏斗を用いた。これは、JA漏斗の場合J14漏斗の場合よりも流下時間は長くなり、配合を変化させた場合の流下時間の測定可能な範囲に限られるためである。

また、ブリーディング率の測定にはポリエチレン袋を用い、練混ぜ後1時間、3時間、6時間、および20時間以上経過したブリーディング水をピペットで吸い取り、20mlのメスシリンダーを用いて測定した。試験は3個の供試体について行い、実験結果は3個の供試体の測定値を平均して表すことにした。

3. 実験結果

(1)ブリーディング率

a)水セメント比とブリーディングとの関係

図-1は実験シリーズ1によって得られた3時間後のブリーディング率と水セメント比の関係を示したものである。図中の縦軸にはブリーディング率を横軸には水セメント比をとっている。ブリーディング率は測定開始時から時間の経過とともに変化するが、今回行った実験結果の観察からは、3時間後まではブリーディング率は増加し、6時間後においては3時間後のブリーディング率よりも減少する傾向が大まかに認められた。また、土木学会規準「PCグラウトの試験方法(JSCE-F531-1993)」においては3時間経過したブリーディング率と20時間以上経過したブリーディング率が測定されることから、ここで議論する

No.	W/C (%)	C (kg)	W (kg)	S.P. (%)	Time (sec)	B (%)
1	25	1765	432	0.5	—	0.0
2	25	1765	427	0.8	25.1	0.1
3	30	1622	487	0.0	—	0.0
4	30	1622	482	0.3	—	0.4
5	30	1622	478	0.5	—	0.7
6	30	1622	474	0.8	20.0	0.4
7	35	1501	525	0.0	—	0.7
8	35	1501	521	0.3	—	1.5
9	35	1501	518	0.5	13.0	2.1
10	35	1501	513	0.8	5.2	1.3
11	40	1396	558	0.0	20.3	2.5
12	40	1396	555	0.3	9.1	2.8
13	40	1396	552	0.5	5.4	3.8
14	40	1396	547	0.8	3.1	2.6
15	45	1305	587	0.0	9.8	4.5
16	45	1305	583	0.3	3.1	4.0
17	45	1305	581	0.5	2.9	6.2
18	45	1305	577	0.8	2.5	3.6
19	50	1225	612	0.0	5.3	6.2
20	50	1225	608	0.3	2.4	6.0
21	50	1225	606	0.5	2.3	6.1
22	50	1225	602	0.8	2.4	9.1
23	55	1155	635	0.0	3.0	8.5
24	55	1155	632	0.3	2.2	8.3
25	55	1155	629	0.5	2.3	8.4
26	55	1155	625	0.8	2.3	9.4
27	60	1092	655	0.0	2.7	10.2
28	60	1092	652	0.3	2.3	13.6
29	65	1035	672	0.0	2.4	9.1

Time : J14漏斗流下時間, B : ブリーディング率

ブリーディング率とは、特にことわらない限り、3時間後のブリーディング率を指すことにする。

高性能減水剤を添加しない場合、および高性能減水剤をセメント量の0.3%、0.5%、および0.8%添加した場合のブリーディング率と水セメント比との関係は、水セメント比が増加するのに伴いブリージン

表-3 配合および実験結果

No.	ブレン値 (cm ² /g)	スラグ置換率 (%)	W/C (%)	C (kg)	W (kg)	スラグ (kg)	S.P. (%)	T (sec)	B (%)
1	6000	0	45	1305	583	0	0.3	3.1	4.0
2	6000	5	45	1238	582	66	0.3	3.2	4.7
3	6000	10	45	1170	581	128	0.3	4.5	4.1
4	6000	30	45	904	578	390	0.3	3.9	2.6
6	6000	50	45	642	573	641	0.3	3.3	2.1
8	6000	0	45	1305	581	0	0.5	2.9	6.2
9	6000	5	45	1238	579	66	0.5	2.7	4.7
10	6000	10	45	1170	578	128	0.5	2.8	4.1
11	6000	30	45	904	575	390	0.5	3.6	3.5
13	6000	50	45	642	571	641	0.5	3.0	2.5
15	8000	0	45	1305	583	0	0.3	3.1	4.0
16	8000	5	45	1238	582	66	0.3	3.8	3.4
17	8000	10	45	1170	581	128	0.3	3.6	3.4
18	8000	30	45	904	578	390	0.3	7.5	2.3
20	8000	50	45	642	573	641	0.3	17.2	1.6
21	8000	75	45	318	568	954	0.3	36.0	1.1
22	8000	0	45	1305	581	0	0.5	2.9	6.2
23	8000	5	45	1238	579	66	0.5	3.2	4.9
24	8000	10	45	1170	578	128	0.5	3.1	4.1
25	8000	30	45	904	575	390	0.5	3.3	2.7
27	8000	50	45	642	571	641	0.5	4.8	1.9
28	8000	75	45	318	566	954	0.5	10.1	0.9
29	10000	0	45	1305	583	0	0.3	3.1	4.0
30	10000	5	45	1238	582	66	0.3	3.7	3.1
31	10000	10	45	1170	581	128	0.3	3.8	3.0
32	10000	30	45	904	578	390	0.3	8.8	1.4
33	10000	40	45	772	575	513	0.3	—	1.0
34	10000	50	45	642	573	641	0.3	—	0.1
36	10000	0	45	1305	581	0	0.5	2.9	6.2
37	10000	5	45	1238	579	66	0.5	3.2	3.9
38	10000	10	45	1170	578	128	0.5	3.2	3.4
39	10000	30	45	904	575	390	0.5	3.6	1.6
41	10000	50	45	642	571	641	0.5	7.4	1.0
42	10000	75	45	318	566	954	0.5	—	0.3
43	15000	0	45	1305	583	0	0.3	3.1	4.0
44	15000	5	45	1238	582	66	0.3	3.8	2.8
45	15000	10	45	1170	581	128	0.3	3.5	2.0
46	15000	30	45	904	578	390	0.3	10.3	0.6
47	15000	40	45	772	575	513	0.3	23.0	0.1
50	15000	0	45	1305	581	0	0.5	2.9	6.2
51	15000	5	45	1238	579	66	0.5	2.8	3.2
52	15000	10	45	1170	578	128	0.5	2.9	2.4
53	15000	30	45	904	575	390	0.5	4.5	0.7
54	15000	40	45	772	573	513	0.5	5.2	0.3

C:セメント, W:水, S.P.:高性能減水剤, T:J14漏斗流下時間, B:ブリーディング率

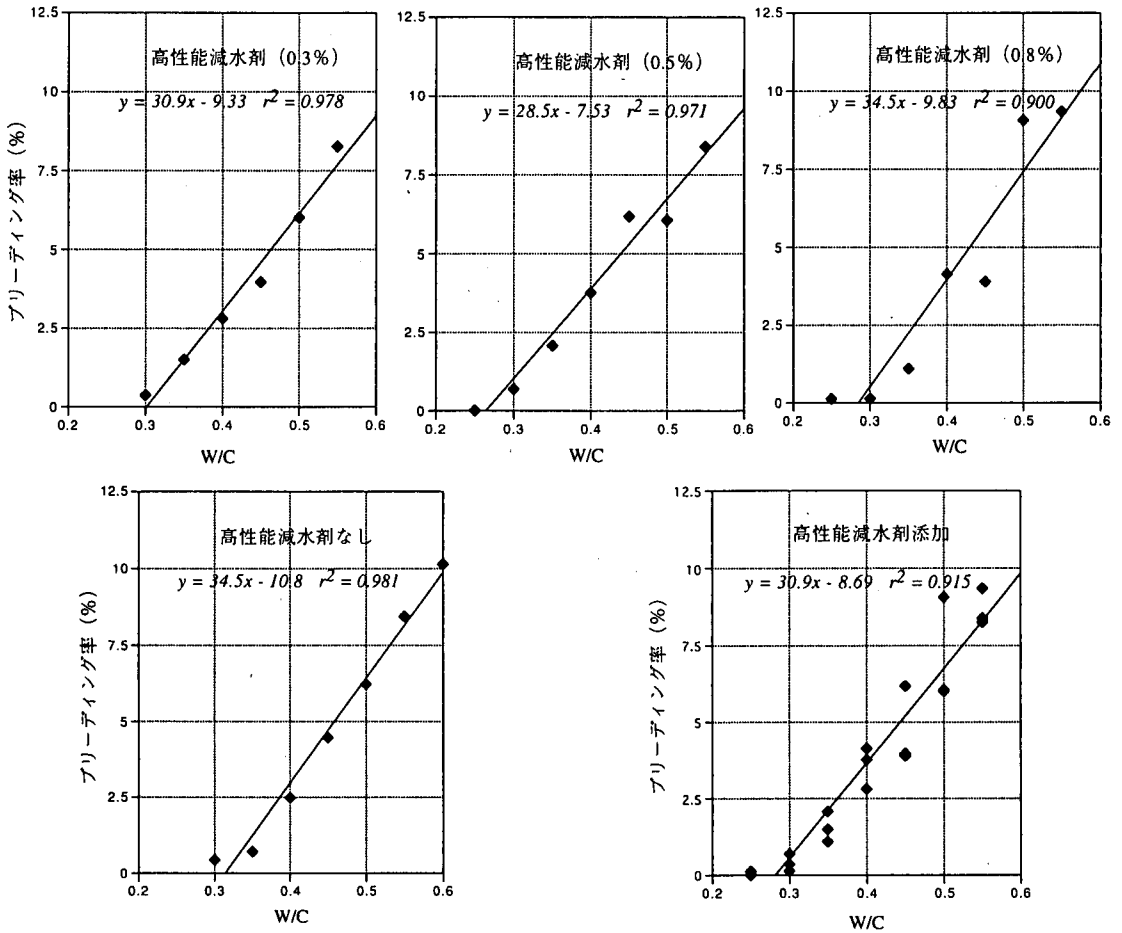


図-1 水セメント比とブリーディング率との関係

グ率も増加する傾向が認められ、その増加の傾向はほぼ直線的な変化を示している。ブリーディング率と水セメント比との関係に直線近似をあてはめた場合の相関係数は0.95～0.99の範囲にあり、強い相関関係が認められる。

b)高炉スラグ微粉末がブリーディングに及ぼす影響

図-2は水セメント比を45%の一定とし、高性能減水剤を0.3%添加した場合および0.5%添加した場合の実験シリーズ2によって得られたブリーディング率と高炉スラグ微粉末のセメントに対する置換率との関係を示したものである。図中の縦軸には、高炉スラグ微粉末の置換率がゼロの場合のブリーディング率に対するブリーディング率の比をとり、横軸には高炉スラグ微粉末の置換率をとっている。さらに図中には、実験結果の回帰曲線(指数曲線)も実線で示している。実験結果からは、水セメント比が一定の場合、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するのに伴いブリーディング率が減少する傾向が認められる。また、高炉ス

ラグ微粉末の比表面積の違いがブリーディングに及ぼす影響は、その比表面積が大きくなるのに伴いブリーディング率を減少させることも理解される。これは、高炉スラグ微粉末の比表面積が普通ポルトランドセメントよりも大きく、粉体の比表面積が増すことによってその保水能力が高まり、その結果ブリーディングが低下するものと考えられる。高性能減水剤の添加量の違いによるブリーディングの差は、高性能減水剤の添加量が0.3%の場合と0.5%の場合とはそれ程差が認められないが、高性能減水剤を0.5%加えた方が若干ブリーディングが増えるような傾向が見られる。

(2)流下時間

a)水セメント比と流下時間との関係

図-3は実験シリーズ1によって得られたJ14漏斗を用いた場合の流下時間と水セメント比との関係を示したものである。図中の縦軸には流下時間を横軸には水セメント比をとっている。ただし、縦軸の流下時

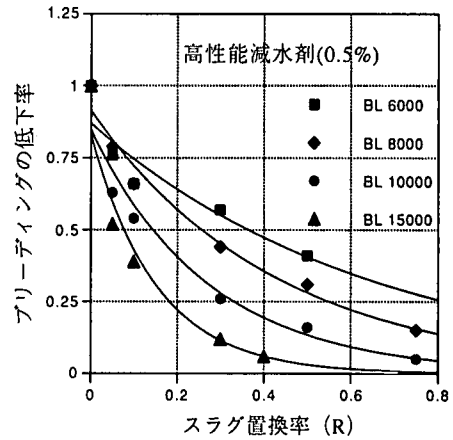
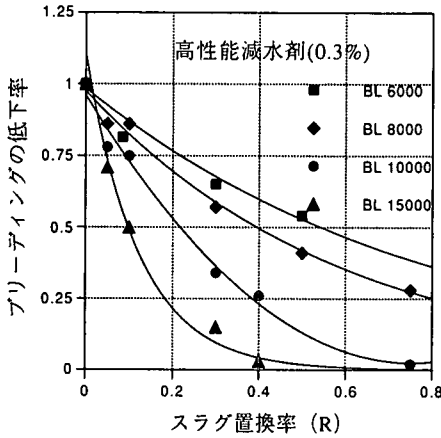


図-2 スラグ置換率とブリーディングの低下との関係

間は、測定から得られた流下時間 t から水をJ14漏斗から流下させた時の流下時間 $t_0=2.1$ (秒)を差し引いた値をプロットしている。したがって、図中における流下時間は、水セメント比が大きくなるにつれて流下時間は限りなくゼロに漸近することになる。また図中には、実験結果の回帰曲線(指数曲線)も実線で示している。グラウトの流下時間から水の流下時間を差し引いた時間は、水セメント比の増加に伴い減少し、その減少の程度は指数で近似できることが理解される。また、高性能減水剤の添加に伴い、流下時間は減少し、流下曲線は全体として左側に移動するような傾向を示す結果となっている。

b)高炉スラグ微粉末が流下時間に及ぼす影響

図-4は水セメント比を45%とし、高性能減水剤を0.3%および0.5%添加した場合の流下時間と高炉水砕スラグ微粉末のセメントに対する置換率との関係を示したものである。図中の縦軸には、高炉スラグ微粉末の置換率がゼロの場合の流下時間に対する流下時間の比 η をとり、横軸には高炉スラグ微粉末の置換率をとっている。図中には、実験結果の回帰曲線(指数曲線)を実線で示している。

高炉スラグ微粉末の比表面積が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合には、高性能減水剤の添加量が0.3%および0.5%のいずれの場合もスラグの置換率が増加しても、流下時間はほとんど増加せず、スラグの置換率は流下時間に影響を及ぼさない。しかし、スラグの比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $10000\text{cm}^2/\text{g}$ および $15000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合にはスラグの置換率が増加するのに伴い、流下時間も増加する傾向が認められる。しかも、比表面積が大きい程、流下時間の増加の程度が大きいことが理解される。高性能減水剤の添加量が0.3%の場合と0.5%の場

合とを比較した場合、流下時間の比 η は高性能減水剤の添加率が0.5%の方が小さくなる傾向が認められ、また添加率が0.5%の場合には比表面積の違いによる影響も顕著に認められない結果となっている。

4. ブリーディング率および流下時間の定式化

(1)ブリーディング率の定式化

実験結果に基づいて、ブリーディング率の予測式を定式化することを試みることにする。図-1に示すように実験結果からはブリーディング率と水セメント比との間には線形の相関関係が認められ、さらに高性能減水剤の添加の有無で若干ブリーディング率に差が認められる。高性能減水剤の添加は、一般にブリーディングを増加させると言われているが、実験を行った0.3%~0.8%の範囲では、添加量の違いによるブリーディングの差は少ないと判断される。このような実験結果を踏まえて、普通ポルトランドセメントと水のみで構成される場合のグラウトのブリーディング率を式(1)で表し、普通ポルトランドセメントと水に高性能減水剤を0.3%~0.8%の範囲で加えた場合のブリーディング率を式(2)で表すことにした。

$$B = 34.5 \left(\frac{W}{C} \right) - 10.8 \geq 0 \quad (1)$$

$$B = 30.9 \left(\frac{W}{C} \right) - 8.69 \geq 0 \quad (2)$$

ここに、 W/C は水セメント比である。

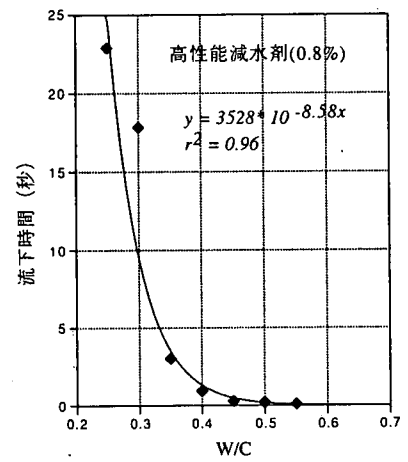
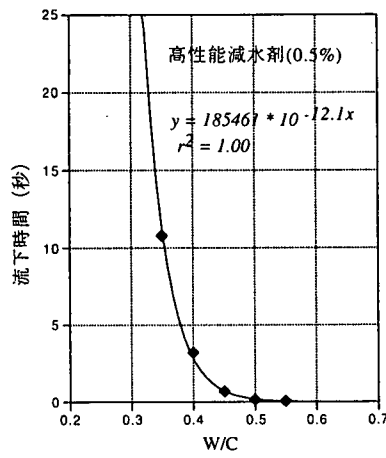
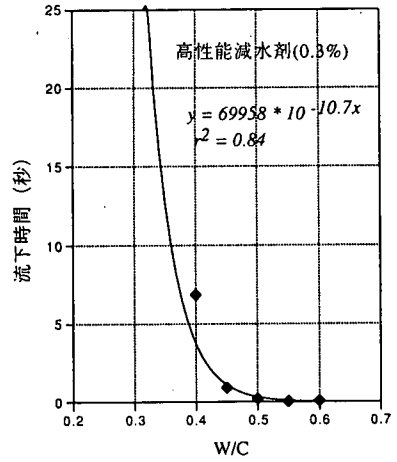
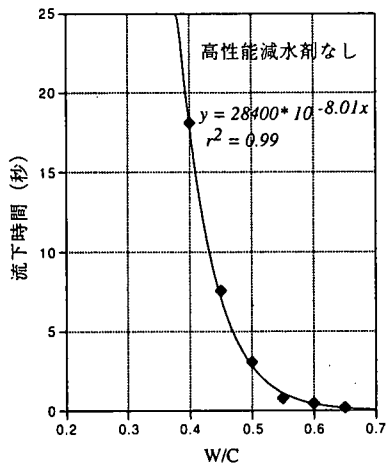


図-3 水セメント比と流下時間との関係

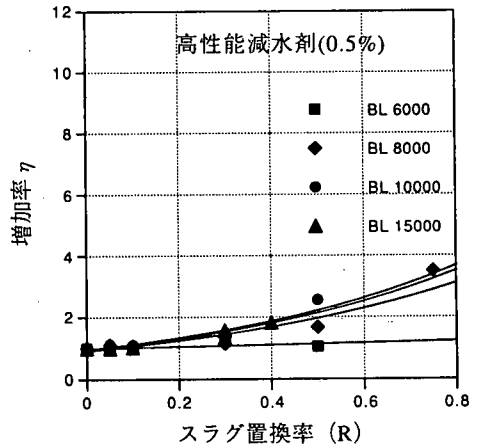
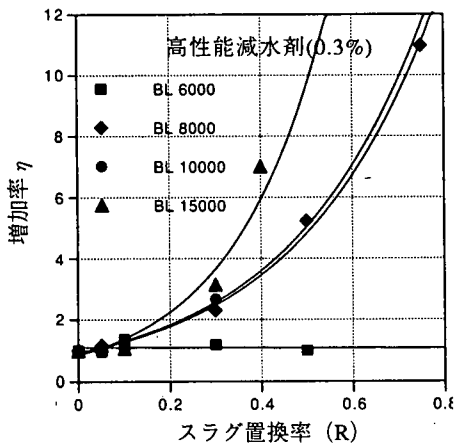


図-4 スラグ置換率と流下時間の増加率との関係

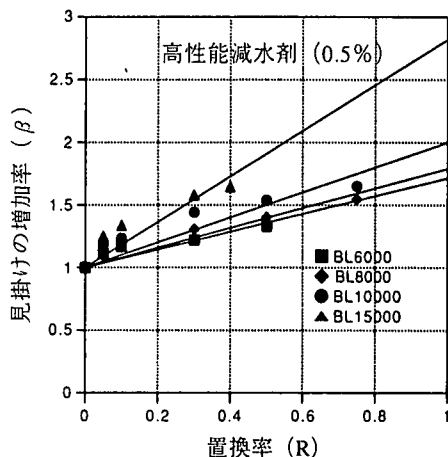
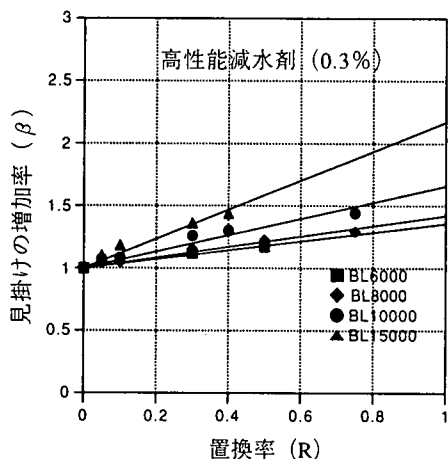


図-5 スラグ置換率と見掛けの増加率との関係

式(1)および式(2)と実験値との相関係数はそれぞれ、0.99および0.96であり良い相関関係が認められる。

セメントを高炉スラグ微粉末で置換した場合、比表面積の大きさに応じてブリーディング率は低下する。この傾向を表すために、セメントをスラグに置換することによる見掛けのセメント量の増加を表す係数 β を導入する。セメントの見掛けの増加率 β は、式(1)および式(2)のセメント量に影響し、スラグ置換率がゼロの場合には $\beta=1.0$ となる。したがって、セメント量の見掛けの増加を表す係数 β を導入することにより、式(2)は式(3)のように修正される。

$$B = 30.9 \left(\frac{W}{C\beta} \right) - 8.69 \geq 0 \quad (3)$$

係数 β は、実験2シリーズの結果に基づき以下の手順で定式化することにした。

スラグの置換率がゼロの場合のブリーディング率を B_0 とし、スラグで置換した場合のブリーディング率を B で表すと、高性能減水剤を加えた場合には、 B_0 は式(2)で表され、 B は式(3)で表される。式(2)および式(3)を用いて β は式(4)で表すことができる。

$$\beta = \frac{B_0 + 8.69}{B + 8.69} \quad (4)$$

図-5は、実験結果を整理して式(4)から求められるセメントの見掛けの増加率 β を縦軸に、スラグ置換率 R を横軸にとった場合の関係を示している。セメントの見掛けの増加率は、スラグ微粉末の置換率の増加に伴い増加する傾向にあり、その増加の傾向はほぼ直線で表されることが理解される。

高性能減水剤を0.3%および0.5%添加した場合のセ

メントの見掛けの増加率とスラグ置換率との関係に直線を近似した場合の相関係数は、高性能減水剤を0.3%添加した場合には0.97～0.99の範囲にあり、高性能減水剤を0.5%添加した場合には0.91～0.97の範囲にあった。また、スラグ置換率に対する見掛けの増加率 β の増加の割合は、スラグ微粉末の比表面積が大きい程大きくなることも理解される。

比表面積の違いがセメントの見掛けの増加率 β に及ぼす影響を定量化するために、セメントの見掛けの増加率 β とスラグ置換率 R との関係を直線で表わした場合の傾き a を縦軸にとり、セメントの比表面積に対するスラグの比表面積の比 ν を横軸にとった場合の関係を図-6に示している。ここに、比表面積比はブレン値で求めている。比表面積比 $\nu=1$ の時はスラグによる置換がない場合であり、見掛けの増加率 β はゼロとなり、傾き a もゼロとなると考えられるので、図-6においてはプロット点に対して、横軸の切片が $\nu=1$ となる回帰直線およびその相関係数も示している。図-6からは傾き a と比表面積比との間にも強い相関関係が認められ、傾き a は比表面積比の増加に伴い増加する傾向が認められる。すなわち、セメントの見掛けの増加率 β は粉体中の比表面積と関係があり、粉体中の比表面積の増加が見掛け上増加させる効果があると言える。その結果、ブリーディングに対しても抑制効果が現れるものと考えられる。

また、図-6からは高性能減水剤の添加量の違いによって、傾き a と比表面積比 ν との関係に若干の差が認められる。図-6中の $a-\nu$ の関係を表す直線の傾きと高性能減水剤の添加量との間に線形関係があると仮定して、この傾きを高性能減水剤の添加量で表す

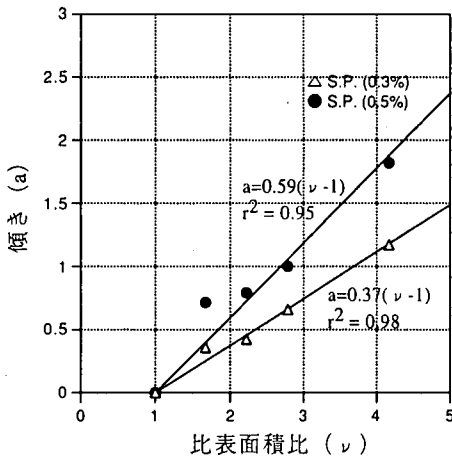


図-6 比表面積と傾きとの関係

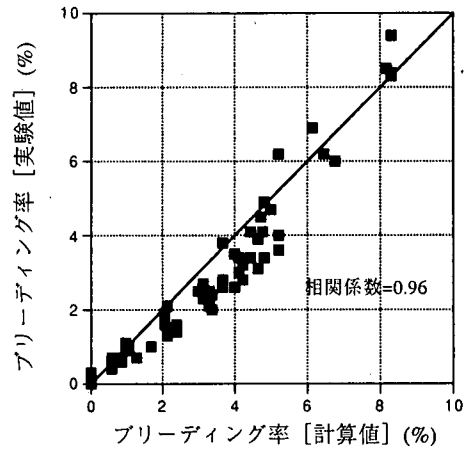


図-7 ブリーディングの計算値と実験値との関係

ことにした。したがって、セメントの見掛けの増加率 β は、図-6の解析結果から、スラグの置換率 R 、比表面積比 ν および高性能減水剤の添加量 $k(\%)$ を用いて式(5)で表すことにした。

$$\beta = 1 + (1.11k + 0.04)(\nu - 1)R \quad (5)$$

高性能減水剤の効果は、高性能減水剤の添加量が0.3%の場合および0.5%の場合、傾き a の係数がそれぞれ0.37および0.59の値で内挿される直線で表すことにした。また、高性能減水剤の添加量の違いがセメントの見掛けの増加率 β に及ぼす影響は小さいと考えて、傾き a を高性能減水剤の添加量が0.3%と0.5%の場合の平均値と比表面積比で表した場合の見掛けの増加率 β を式(6)で表した。

$$\beta = 1 + 0.48(\nu - 1)R \quad (6)$$

以上の過程で得られたブリーディング率の算定式は、セメントをスラグで置換した場合と置換しない場合とに事象を分けて定式化を行い、それを一つにまとめてブリーディングの算定式を構築している。導出された算定式は実験結果に基づいているため、実験結果と一致するのは当然であるが、水セメント比、高炉スラグ微粉末の種類、スラグの置換率、高性能減水剤の添加量をパラメータとして、グラウトのブリーディングを表現する式(3)が実験結果とどの程度一致するか検討しておく必要があると考えられる。

表-4は実験から得られたブリーディング率と式(1)および式(3)に式(5)および式(6)を用いて求められたブリーディング率を示している。実験結果とセメント

の見掛けの増加率 β に式(5)を用いた場合の計算値との相関係数は0.95となり、また式(6)を用いた場合の計算値と実験値との相関係数は0.96であった。何れの場合にも、計算値は実験値とはほぼ一致していると判断される。参考までに図-7には、式(6)を用いて求められたブリーディング率の計算値を横軸に実験値を縦軸にとって、計算結果と実験結果をプロットしている。計算値は実験値を精度良く予測できることを示している。また、高性能減水剤を用いた場合のブリーディング率の算定には式(3)と式(5)の代わりに式(6)とを用いて算定を行ってもよいと判断される。

見掛けの増加率 β は比表面積比 ν の関数として表されている。比表面積比 ν はセメントのブレン値に対するスラグのブレン値で与えられるが、比表面積が大きくなるとブレン法で求めるよりも BET 法で測定する方がより実用的である。BET 法で測定された粉体の比表面積も式(6)に適用できるようにするために、比表面積をブレン法で求めた場合と BET 法で求めた場合との換算についても検討を行ってみた。

図-8は今回用いたセメントおよびスラグのブレン法で求めた比表面積と BET 法で求めた比表面積との関係を示している。両者の間には強い相関関係が認められ、その関係を式(7)で表すことができる。

$$h_{bet} = 2.20h_{bl} \quad (7)$$

ここに、 h_{bet} は BET 法によって測定された比表面積であり、 h_{bl} はブレン法によって測定された比表面積である。

表-4 実験結果および計算結果

W/C (%)	ブレン値 (cm ² /g)	スラグ置換率 (%)	S.P. (%)	B(%)			α	T(sec)	
				実験値	式(5)	式(6)		実験値	計算値
30	3600	0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
35	3600	0	0.0	0.7	1.3	1.3	—	—	—
40	3600	0	0.0	2.5	3.0	3.0	1.6	20.3	17.9
45	3600	0	0.0	4.5	4.7	4.7	1.6	9.8	9.2
50	3600	0	0.0	6.2	6.5	6.5	1.6	5.3	5.4
55	3600	0	0.0	8.5	8.2	8.2	1.6	3.0	3.5
60	3600	0	0.0	10.2	9.9	9.9	1.6	2.7	2.5
65	3600	0	0.0	9.1	11.6	11.6	1.6	2.4	1.8
30	3600	0	0.3	0.4	0.6	0.6	—	—	—
35	3600	0	0.3	1.5	2.1	2.1	—	—	—
40	3600	0	0.3	2.8	3.7	3.7	2.0	9.1	5.6
45	3600	0	0.3	4.0	5.2	5.2	2.0	3.1	3.3
50	3600	0	0.3	6.0	6.8	6.8	2.0	2.4	2.1
55	3600	0	0.3	8.3	8.3	8.3	2.0	2.2	1.5
25	3600	0	0.5	0.0	0.0	0.0	—	—	—
30	3600	0	0.5	0.7	0.6	0.6	—	—	—
35	3600	0	0.5	2.1	2.1	2.1	2.0	13.0	9.1
40	3600	0	0.5	3.8	3.7	3.7	2.0	5.4	4.9
45	3600	0	0.5	6.2	5.2	5.2	2.0	2.9	3.1
48	3600	0	0.5	6.9	6.1	6.1	2.0	2.5	2.4
50	3600	0	0.5	6.1	6.8	6.8	2.0	2.3	2.1
55	3600	0	0.5	8.4	8.3	8.3	2.0	2.3	1.5
25	3600	0	0.8	0.1	0.0	0.0	—	—	—
30	3600	0	0.8	0.4	0.6	0.6	2.0	20.0	12.0
35	3600	0	0.8	1.3	2.1	2.1	2.0	5.2	6.4
40	3600	0	0.8	2.6	3.7	3.7	2.0	3.1	4.0
45	3600	0	0.8	3.6	5.2	5.2	2.0	2.5	2.8
50	3600	0	0.8	9.1	6.8	6.8	2.0	2.4	2.1
55	3600	0	0.8	9.4	8.3	8.3	2.0	2.3	1.7
45	6000	5	0.3	4.7	5.0	5.0	—	—	—
45	6000	10	0.3	4.1	4.9	4.8	—	—	—
45	6000	30	0.3	2.6	4.2	4.0	—	—	—
45	6000	50	0.3	2.1	3.7	3.3	—	—	—
45	8000	5	0.3	3.4	4.9	4.8	2.0	3.8	3.9
45	8000	10	0.3	3.4	4.6	4.4	2.0	3.6	4.6
45	8000	30	0.3	2.3	3.5	3.1	2.0	7.5	9.0
45	8000	50	0.3	1.6	2.6	2.1	2.0	17.2	17.8
45	8000	75	0.3	1.1	1.7	1.0	2.0	36.0	41.6
45	10000	5	0.3	3.1	4.8	4.6	2.0	3.7	3.9
45	10000	10	0.3	3.0	4.4	4.1	2.0	3.8	4.6
45	10000	30	0.3	1.4	2.9	2.4	2.0	8.8	9.0
45	10000	40	0.3	1.0	2.3	1.7	—	—	—
45	10000	75	0.3	0.1	0.6	0.0	—	—	—
45	15000	5	0.3	2.8	4.4	4.2	2.0	3.8	3.9
45	15000	10	0.3	2.0	3.7	3.4	2.0	3.5	4.6
45	15000	30	0.3	0.6	1.6	0.9	2.0	10.3	9.0
45	15000	40	0.3	0.1	0.8	0.0	2.0	23.0	12.7
45	6000	5	0.5	4.7	4.9	5.0	—	—	—
45	6000	10	0.5	4.1	4.7	4.8	—	—	—

表-4 実験結果および計算結果 (続き)

W/C (%)	ブレン値 (cm ² /g)	スラグ置換率 (%)	S.P. (%)	B(%)			α	T(sec)	
				実験値	式(5)	式(6)		実験値	計算値
45	6000	30	0.5	3.5	3.7	4.0	—	—	—
45	6000	50	0.5	2.5	2.9	3.3	—	—	—
45	8000	5	0.5	4.9	4.7	4.8	2.0	3.2	3.3
45	8000	10	0.5	4.1	4.3	4.4	2.0	3.1	3.5
45	8000	30	0.5	2.7	2.7	3.1	2.0	3.3	4.7
45	8000	50	0.5	1.9	1.5	2.1	2.0	4.8	6.2
45	8000	75	0.5	0.9	0.3	1.0	2.0	10.1	8.9
45	10000	5	0.5	3.9	4.5	4.6	2.0	3.2	3.3
45	10000	10	0.5	3.4	3.9	4.1	2.0	3.2	3.5
45	10000	30	0.5	1.6	1.9	2.4	2.0	3.6	4.7
45	10000	50	0.5	1.0	0.4	1.1	2.0	7.4	6.2
45	10000	75	0.5	0.3	0.0	0.0	—	—	—
45	15000	5	0.5	3.2	4.0	4.2	2.0	2.8	3.3
45	15000	10	0.5	2.4	3.0	3.4	2.0	2.9	3.5
45	15000	30	0.5	0.7	0.2	0.9	2.0	4.5	4.7
45	15000	40	0.5	0.3	0.0	0.0	2.0	5.2	5.4

B: プリーディング率
T: J14漏斗流下時間

相関係数 0.95 0.96 0.95

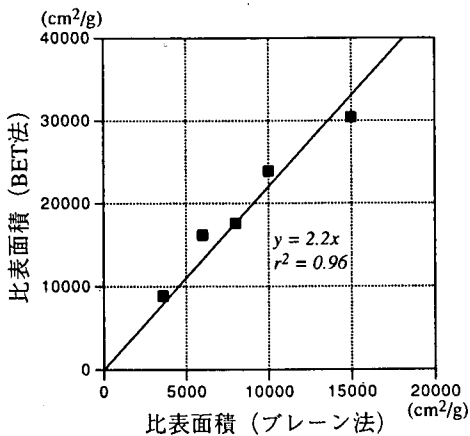


図-8 ブレン法と BET 法との関係

(2) 流下時間の定式化

J漏斗内をグラウトが流れ落ちる時間を円錐内を流れる流体に連続の式を適用して理論的に求めることが可能である。しかし、グラウトは粘性を有するビンガム流体と考えられ、流下時間の算出には漏斗管内を流れるグラウトのせん断降伏領域が予めわかっていることが算定の前提となるが、実際に降伏領域を求めることは難しい¹¹⁾。ここでは、グラウトの粘性やせん断降伏領域などを仮定して、流下時間を定式化することはせずに、実験結果から直接グラウトのJ14漏斗の流下時間を導出することにした。グラウトのJ14漏斗の流下時間の定式化においても、プリーディ

ング率の算定式の導出と同じように、高炉スラグ微粉末でセメントを置換しない場合と置換する場合とに分けて定式化を行い、その後それらを組み合わせてグラウトのJ14漏斗の流下時間の算定式を構築することにした。

実験シリーズ1で得られた流下時間の傾向は、図-3で示されるように高性能減水剤の添加に関わらず、水セメント比の増加に伴って指数関数で表される程度で減少していくことが理解される。

流下時間のモデル化に際して、グラウトの絶対的な流下時間でモデル化するよりも水がJ14漏斗を流れ落ちる時間との相対時間で考えることにして、図-9に示すような流下時間のモデルを仮定することにした。図-9の縦軸には水の流下時間 t_0 を基準にした時のグラウトの流下時間 t の割合を対数でとり、横軸にはC/Wすなわち水セメント比の逆数をとっている。C/Wは原点に近づくとも水の流下時間に限りなく近づくことになるために、 $\ln(t/t_0)$ は原点に収束することになる。一方、C/Wが増加すると $\ln(t/t_0)$ はある時点を境に急激に増加することを仮定することにする。また、高性能減水剤の添加は、 $\ln(t/t_0)$ が増加し始めるC/W軸上の位置を右方向に移動させる働きをし、高性能減水剤の添加量は $\ln(t/t_0) - C/W$ 曲線の立ち上がり部分の傾きに影響を及ぼし、高性能減水剤の添加量が増すとその傾きが減少すると仮定することにした。

図-10は実験結果を図-9と同じ座標軸で整理した

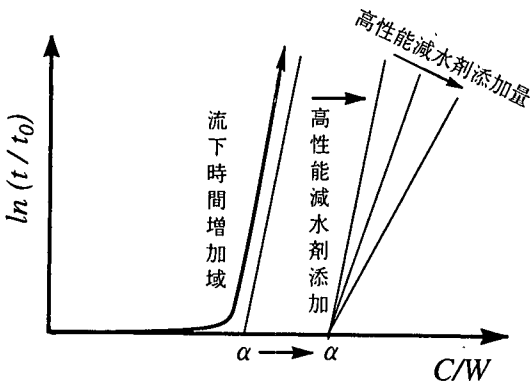


図-9 流下時間モデル

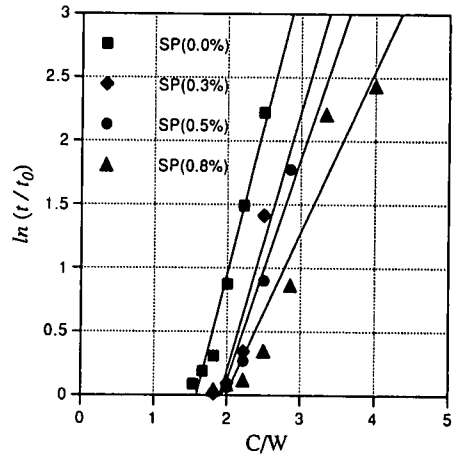


図-10 C/Wとln(t/t0)との関係

結果と立ち上がり部分を直線と仮定した場合の回帰直線も示している。実験結果から得られる $\ln(t/t_0)$ と C/W との関係には図-9に示すモデルと同じような傾向が見られる。また、 $\ln(t/t_0) - C/W$ 曲線の立ち上がりを開始する付近では、ある曲率を持っていると考えられ、実際図-10においてもそのような傾向が認められる。しかし、 $\ln(t/t_0) - C/W$ 曲線の定式化においては、その曲線が急激に立ち上がっている部分が重要であり、原点から流下時間が急激に立ち上がる部分までは流下時間がかかなり小さく、またこの領域での水セメント比でのグラウト製造があまり実用的でないことから、流下時間が急激に増加する区間のみを定式化することにした。さらに、曲線の立ち上がり部分の曲率部分は $\ln(t/t_0) - C/W$ 曲線の増加部分に対して占める割合は比較的小さいことから、 $\ln(t/t_0) - C/W$ 曲線の増加部分のみを直線でモデル化することにした。その結果、 $\ln(t/t_0)$ と C/W との関係を表すことができる。

$$\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = (-1.34k + 2.38)\left(\frac{C}{W} - \alpha\right) \quad (8)$$

ここに、 α は直線が立ち上がりを開始する点で、図-10から高性能減水剤を添加しない場合には1.6とし、高性能減水剤を添加する場合には2.0を与えることにした。また、 k は高性能減水剤の添加量 (%) である。

式(8)を整理することにより、グラウトの流下時間 t は、式(9)で表すことができる。

$$t = t_0 \exp\left\{(-1.34k + 2.38)\left(\frac{C}{W} - \alpha\right)\right\} \quad (9)$$

セメントをスラグで置換した場合のグラウトの流下時間は式(9)を基本とし、セメントをスラグで置換することによって増加する流下時間を表すために η を導入することにした。スラグの置換率がゼロの時、 $\eta = 1$ となるように設定することにより、スラグの置換率に関わらず式(10)でグラウトの流下時間を表現することができる。

$$t = t_0 \eta \exp\left\{(-1.34k + 2.38)\left(\frac{C}{W} - \alpha\right)\right\} \quad (10)$$

η は水セメント比が変化しても、スラグによる置換の効果はほとんど変わらないことを仮定して、 η としてスラグ置換率がゼロの場合の流下時間に対する比をとることにした。

縦軸に $\ln \eta$ の値を横軸にスラグ置換率をとって、実験シリーズ2の実験値を整理したのが図-11である。ただし、スラグの比表面積が $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合には、図-4に示すようにスラグの置換による流下時間の増加は全く認められないので、図-11には比表面積が $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合の実験値を除いている。また、厳密にはスラグの比表面積の違いによって、 $\ln \eta - R$ 直線にも差があると考えられるが、比表面積の違いによる明確な差を実験結果からは認めがたいので、比表面積が $8000 \text{ cm}^2/\text{g} \sim 15000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のデータをまとめて取り扱っている。図-11の縦軸には $\ln \eta$ をとり、横軸にはスラグ置換率 R をとっており、また図中には実験値に対する回帰曲線およびその相関係数も示している。 $\ln \eta$ とスラグ置換率との間には高性能減水剤の添加量が0.3%および0.5%の何れの場合にもほぼ線形の関係が認められるので、高性能減水剤の添加量に応じて直線の傾きが変化することを考慮して、 η

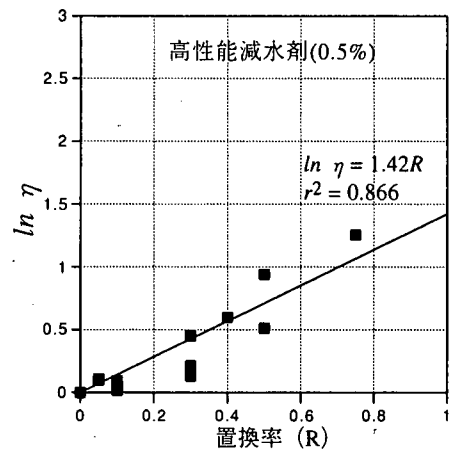
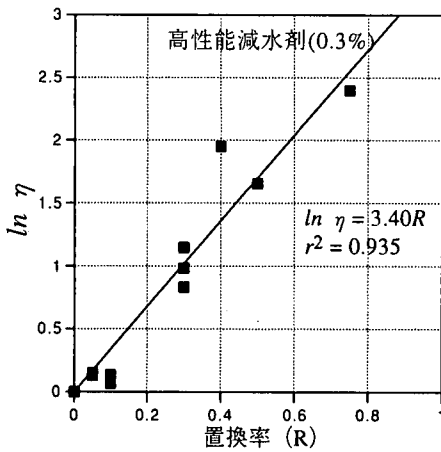


図-11 置換率と $\ln \eta$ との関係

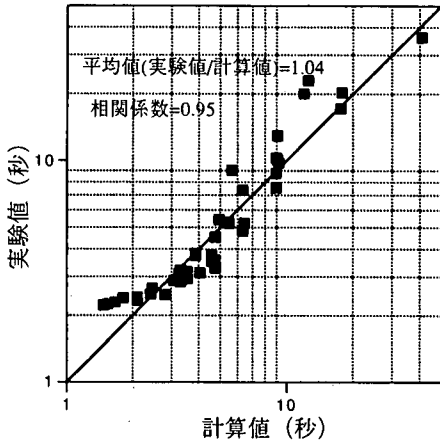


図-12 流下時間の実験値と計算値

を式(11)で表すことにした。

$$\eta = \exp(12.6e^{-4.37k} R) \quad (11)$$

図-11において、 $\ln \eta - R$ の関係を表す直線の傾きは、高性能減水剤の添加量 k が、 $k \rightarrow \infty$ の時限りなくゼロに近づき、 $k=0.3(\%)$ および $k=0.5(\%)$ の時それぞれ、図-11中に示されている傾きの値 3.40 および 1.42 の値をとるような指数関数を仮定している。

導出された流下時間の算定式は、ブリーディング率の定式化の場合と同様に実験結果との検証が必要があると考えられる。表-4は実験から得られた流下時間と式(9)および式(11)を用いて求められた流下時間を示している。また、図-12には、流下時間の計算値を横軸に実験値を縦軸にとって、計算結果と実験結果をプロットしている。プロットの際に実験値が限られた範囲に集中するので、プロット点を見やすく

するために、図-12では両対数軸を用いて表示している。計算値と実験値との相関係数は 0.95 であり、計算値は実験値とほぼ一致していると判断される。

5. 数値シミュレーション

(1) ブリーディング

グラウトの配合の違いがブリーディングに及ぼす影響を導出されたブリーディングの算定式を用いて、パラメータ解析を行ってみた。ブリーディングに影響を及ぼす要因は、式(3)および式(6)から水セメント比、スラグの比表面積およびスラグの置換率である。

図-13は水セメント比とスラグ置換率を変数とした場合のブリーディングの変化を3次元的に表したものである。パラメータとして、スラグの比表面積を $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $10000\text{cm}^2/\text{g}$ および $15000\text{cm}^2/\text{g}$ の4種類選び、水セメント比は $0.4 \sim 0.6$ 、スラグ置換率は $0.0 \sim 1.0$ まで変化させた場合のブリーディング率を表示している。図-13において、スラグの比表面積が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合には $B=0$ となる平面が存在せず、水セメント比が $0.4 \sim 0.6$ 、スラグ置換率が $0.0 \sim 1.0$ の範囲の配合ではブリーディングがゼロとなるようなグラウトを製造することができないことが理解される。スラグ比表面積が大きくなるにつれて $B=0$ となる平面が大きくなる。すなわち、ブリーディングをゼロにすることが可能な配合の自由度が増し、ノンブリーディングタイプのグラウトの製造が容易になることが理解される。水セメント比が一定の場合、ブリーディングを減少させるためにはセメントをスラグで置換することによってセメントの見掛けの量を増やすことが必要となる。スラグ置換によるセメントの見掛け上の増加は、式(6)からスラグ置換率と比表

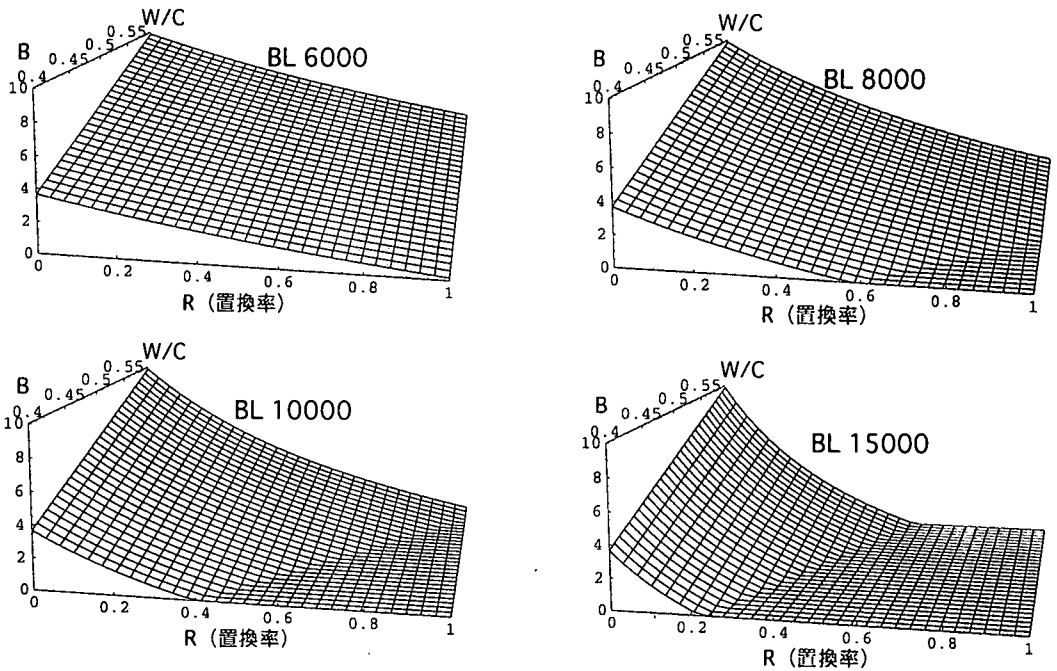


図-13 数値シミュレーション (ブリーディング率)

面積比の影響を受ける。しかし、スラグ置換率は0.0～1.0の範囲の値をとるのに対して、比表面積比は1.0～4.0程度の値をとりうるため、ブリーディングの抑制には置換率よりも比表面積比を大きくすることが効果的であることがわかる。図-13からは、スラグ置換率を例えば50%程度までに抑えた場合には、ノンブリーディングタイプのグラウトの製造には比表面積が10000cm²/g以上のスラグを用いる必要があると考えられる。

(2) 流下時間

定式化されたJ14漏斗の流下時間の算定式を用いて、グラウトの配合の違いが流下時間に及ぼす影響についてパラメータ解析を行った。流下時間に及ぼす要因は、式(9)および式(11)から水セメント比、高性能減水剤の添加量およびスラグ置換率である。図-14は水セメント比とスラグ置換率を変数とした場合の流下時間の変化を3次元的に表したものである。パラメータとして、高性能減水剤の添加量を0.0%、0.3%、0.5%および0.8%の4種類選び、水セメント比は0.4～0.6、スラグ置換率は0.0～1.0まで変化させた場合の流下時間を表している。図-14において高性能減水剤を添加しない場合の流下時間の傾向は、高性能減水剤を添加する場合と大きく異なる傾向を示している。図-14においては時間軸は60秒までを表示しているが、高性能減水剤を添加しない場合には、流

下時間-水セメント比-スラグ置換率が作る曲面は流下時間が60秒を越えるために、 $t=60$ 秒となる水セメント比-スラグ置換率が作る平面で輪切りにされる。しかし、高性能減水剤を添加した場合には、高性能減水剤を加えない場合に比べて流下時間はかなり低下する。高性能減水剤の添加量が0.3%の場合には、流下時間は水セメント比よりもスラグ置換率の影響を受けやすく、スラグ置換率の増加に伴い流下時間は著しく増加する傾向が見られる。

一方、水セメント比の変化に対しては、流下時間はスラグの置換率の変化ほどは変化しないことがわかる。高性能減水剤の添加量が0.5%になると、スラグ置換率の影響もあまり受けなくなり、流下時間-水セメント比-スラグ置換率が作る曲面は比較的平らな平面となる。高性能減水剤の添加量が0.8%の場合には、流下時間-水セメント比-スラグ置換率が作る曲面は0.5%の添加の場合とほぼ同じような平面となる。グラウトの流動性改善のためには高性能減水剤を添加することは必要であり、スラグで置換した場合にも効果があることが期待されるが、一方において、ある程度の高性能減水剤が添加されるとそれ以上高性能減水剤を添加しても流動性に対する効果が少ないことも理解される。しかも、高性能減水剤の添加量が流動特性に効果的に作用する量から、あまり効果的に作用しない量までの範囲は今回の実験に用いた高性能減水剤では0.3%～0.8%とその範囲が狭

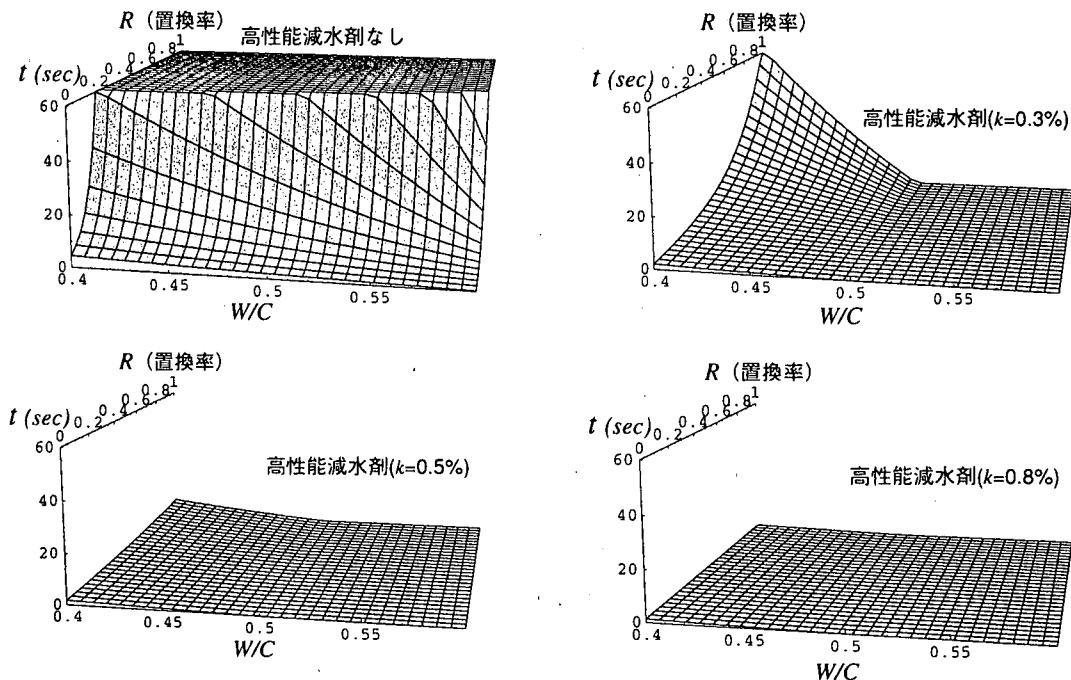


図-14 数値シミュレーション (流下時間)

い。スラグで置換したグラウトを製造する場合、高性能減水剤の添加量は、入れ過ぎずしかも流下時間がスラグの置換にあまり影響を受けないような量が適当と考えられ、今回の実験の場合には0.5%程度が適切な量のように考えられる。

(3) ノンブリーディンググラウトの配合

PCグラウトの品質の向上のために、最近では従来のグラウトからノンブリーディングタイプのグラウトへ移行しつつある。ノンブリーディングでしかも流動性を有するグラウトの製造が、セメントの一部をスラグ微粉末によって置換し、さらに高性能減水剤を用いることによって可能となるかどうかを数値シミュレーションによって検討することにした。スラグの比表面積と高性能減水剤の添加量をパラメータにとり、式(3)と式(6)とを用いてブリーディングがゼロとなる水セメント比とスラグ置換率を求める。一方、ブリーディングの算定式に設定したスラグの比表面積と高性能減水剤の添加量に対して、求めたい流下時間以下となる水セメント比とスラグ置換率を式(10)と式(11)とから求める。比表面積を10000cm²/g、15000cm²/gおよび20000cm²/gの3種類を設定した。また、高性能減水剤の添加量を0.3%~0.6%の範囲を設定した。現行のコンクリート標準示方書「施工編」にはPCグラウトの流動性に必要とされるJ漏斗の流下時間が特に規定されていないが、従来のグラウト

に対してはJA漏斗の流下時間が15~30秒の範囲とすることが解説に記述されている。本研究ではJ14漏斗による流下時間を定式化している。石橋ら¹²⁾は、同一PCグラウトの配合のJ14漏斗とJA漏斗との流下時間の測定を行い、両者の間には強い相関性が見られることを報告している。石橋らが行った測定結果を参考にするとJA漏斗の流下時間の30秒はおおよそJ14漏斗の10秒程度に対応している。今回の数値シミュレーションにおいては、J14漏斗の流下時間が10秒以下となるような配合を求めることにした。

図-15はスラグの比表面積と高性能減水剤の添加量を変化させた時のブリーディング率がゼロでJ14漏斗の流下時間が10秒以下となる配合の範囲を示している。高性能減水剤の添加量が0.3%の場合には、比表面積が10000cm²/gおよび15000cm²/gの何れの場合にも流下時間が10秒以下のノンブリーディンググラウトの配合が存在しない結果となっている(図-15(a)~15(b)参照)。比表面積が20000cm²/gまで大きくなると、高性能減水剤を0.3%添加しても、目的のグラウトを製造するための配合が水セメント比42%以上、置換率0.2以上辺りから存在するようになるがその範囲は極めて狭い(図-15(c))。

高性能減水剤の添加量が0.5%および0.6%の場合には、比表面積が10000cm²/g、15000cm²/gおよび20000cm²/gの何れの場合にも目的のグラウトを製造するための配合が存在している。しかし、比表面積が

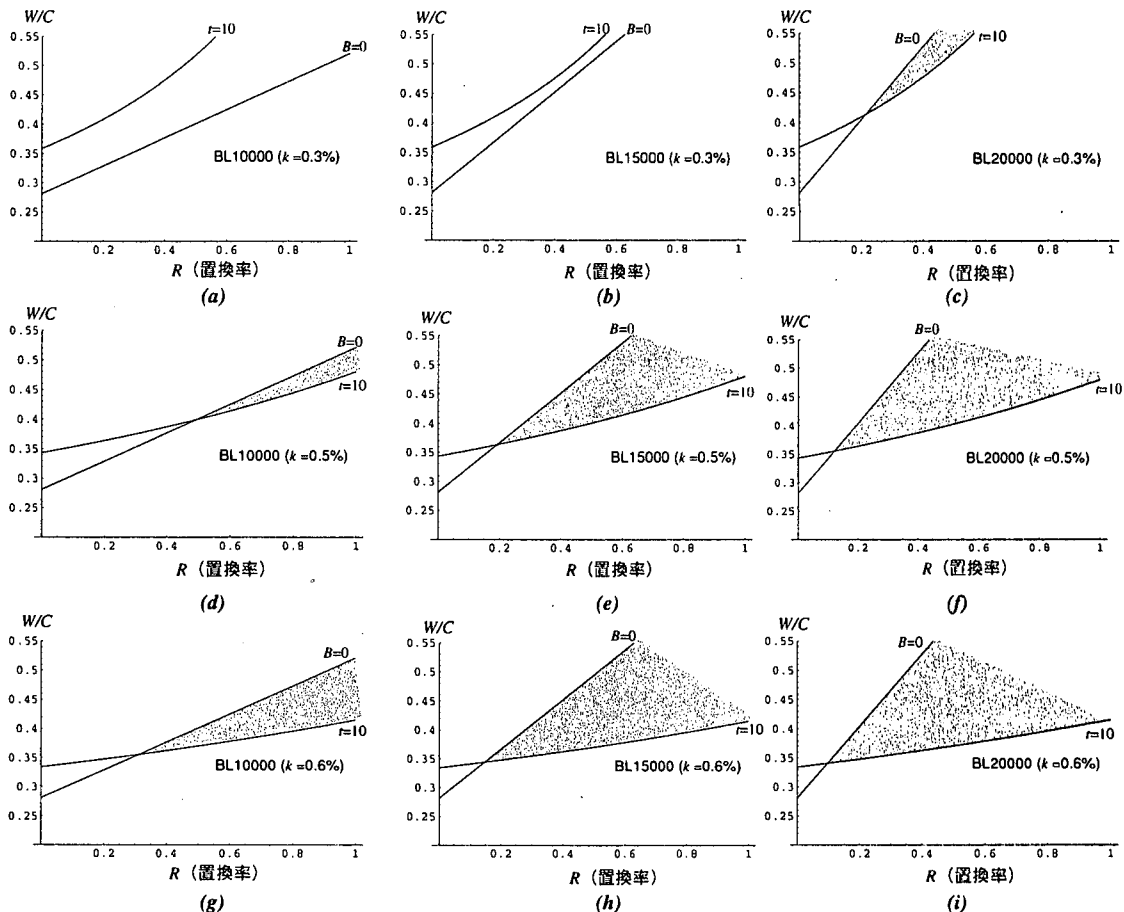


図-15 数値シミュレーション (ノンブリーディングタイプの配合)

10000cm²/g の場合にはその範囲が狭い。比表面積が15000cm²/g 以上になると、比較的広い範囲に目的のグラウトを製造するための配合が存在し、配合の自由度が増していることが理解される(図-15(d)~(i))。

以上の解析結果からは、J14漏斗の流下時間が10秒以下のノンブリーディングタイプのグラウトを製造するためには、高性能減水剤は0.5%程度は添加する必要があると判断され、比表面積は15000cm²/g程度以上のスラグを用いた方がその製造が容易であると考えられる。

(4) 確認実験

ブリーディングおよびJ14漏斗の流下時間の算定式は、実験結果から導出されたものであり、別の実験で検証が行われる必要がある。そこで検証のための実験を新たに行うことにした。

配合は流動性のあるノンブリーディングタイプのグラウトの製造を考えて、J14漏斗の流下時間が10秒以下で、ブリーディング率が1%以下となるような配合を算定式から選ぶことにした。ブリーディング率

を0%とせず1%以下としたのは、ブリーディングがゼロとなる配合だけでなく、色々な配合で検証を行った方がよいと考えたためである。前節の数値シミュレーション結果から、グラウトの性能条件を満たすための配合において高性能減水剤の添加量は0.5%とし、水セメント比を41%、43%、45%の3通りを選び、スラグとしては比表面積が10000cm²/gと15000cm²/gの2種類を選び、スラグ置換率は50%以下として配合を考えた。このような条件に合う配合の組み合わせとして12通りを選定した。また、グラウトの練混ぜには実験シリーズ1および実験シリーズ2で用いたモルタルミキサー以外にハンドミキサーも用いた。これは実際のグラウトの製造においては、回転数が1000r.p.m.のものが一般に用いられているためにミキサーの回転性能の違いも調べるためである。モルタルミキサーおよびハンドミキサーによる練混ぜ量は、いずれの場合も1バッチ当たり2lとした。

表-5はモルタルミキサーを用いた場合のブリーディング率およびJ14漏斗の流下時間の実験値と計算結果とを示している。また、表-6はハンドミキサー

表-5 実験結果および計算結果 (モルタルミキサー)

ブレン値 (cm ² /g)	W/C (%)	置換率 (%)	S.P. (%)	B(%)		B _{exp} -B _{cal} (%)	T(sec)		T _{exp} -T _{cal} (sec)
				実験値	計算値		実験値	計算値	
10000	41	40	0.5	0.0	0.2	0.2	6.0	7.8	1.8
10000	41	50	0.5	0.0	0.0	0.0	7.0	9.0	2.0
10000	43	40	0.5	0.0	0.6	0.6	5.0	6.5	1.5
10000	43	50	0.5	0.0	0.0	0.0	6.2	7.4	1.2
10000	45	40	0.5	0.8	0.7	0.1	4.9	5.4	0.5
10000	45	50	0.5	0.5	0.4	0.1	6.3	6.2	0.1
15000	41	30	0.5	0.0	0.0	0.0	7.6	6.8	0.8
15000	41	40	0.5	0.0	0.0	0.0	15.0	7.8	7.2
15000	43	30	0.5	0.1	0.0	0.1	6.0	5.6	0.4
15000	43	40	0.5	0.0	0.0	0.0	11.8	6.5	5.3
15000	45	30	0.5	0.0	0.2	0.2	4.6	4.7	0.1
15000	45	40	0.5	0.0	0.0	0.0	6.0	5.4	0.6
B:ブリーディング率				平均値		0.1	平均値		1.8
T:J14漏斗流下時間									

を用いた場合のブリーディング率およびJ14漏斗の流下時間の実験値と計算結果とを示している。モルタルミキサーを用いた場合とハンドミキサーを用いた場合のブリーディング率およびJ14漏斗の流下時間の計算結果は配合が同じであるために同じ値となる。

実験値と計算値との比較において、ブリーディング率は1%以下、流下時間は2~10秒程度の値であるので、ブリーディングの場合0.5%の違いでも相関係数は大きく変動し、流下時間の場合1~2秒の違いでも10秒に対しては10~20%変動することになり相関係数は悪くなる。ブリーディング率をポリエチレン袋で測定することを考慮すると、0.5%程度の誤差は実際問題としては許容しうる範囲と考えられる。また、流下時間の測定に関しても許容しうる誤差を明示することは難しいが、実際問題として1~2秒程度の差は許容する範囲と考えられる。これらの点を考えて、実験値と計算値との比較には両者の値の差の絶対値で検討することにした。

モルタルミキサーを用いた場合およびハンドミキサーを用いた場合のブリーディング率の実験値と計算値とはほとんど一致していると考えられる。実験値と計算値の差の絶対値の平均値は、モルタルミキサーを用いた場合0.1%およびハンドミキサーを用いた場合0.5%となり、ハンドミキサーを用いた場合の方がモルタルミキサーを用いた場合よりも若干ブリーディング率が大きくなる傾向が見られるが許容の範囲と考えられる。

モルタルミキサーを用いた場合の流下時間の実験値と計算値との差はほとんど2秒以下となっている

が、水セメント比が41%および43%で比表面積が15000cm²/gで置換率が40%の場合には実験値と計算値との間に5~7秒の差がある。水セメント比が比較的 low、比表面積の大きいスラグの置換率が高いために、粘性の高いグラウトの練混ぜになる傾向にある。同一の配合でもハンドミキサーの場合には、実験値と計算値との差がモルタルミキサーほどには差が開いていないことから、回転数が140r.p.mのモルタルミキサーによる練混ぜ方法が十分でなかったことが原因として考えられる。

ハンドミキサーを用いた場合には、流下時間の実験値は計算値よりおよそ2~6秒下回っている。しかも、実験値と計算値との差は水セメント比が大きいほどあるいは置換率が大きくなるほど大きくなる傾向が見られる。ミキサーの回転性能は、練混ぜ後のグラウトの流動特性に影響を及ぼすものと考えられる。ハンドミキサーがグラウトの流動特性を向上させる効果を式(9)における α を修正することにより考慮することにした。これは高性能減水剤を添加することにより、添加しない場合に比べ流動性が改善されることを α を1.6から2.0に設定することによって表したのと同じ考えによるものである。 α の設定は計算による試行錯誤の結果、2.5に修正することにした。表-6には、 α を2.5を用いて流下時間を求めた結果を修正値の欄に示している。また、その値と実験値との差の絶対値も示している。計算結果と実験結果との差は最大で0.9秒、平均値で0.5秒の差となっており計算結果と実験値とはほぼ一致していると考えられる。以上の検討から、定式化されたブリーディ

表-6 実験結果および計算結果 (ハンドミキサー)

ブレン値 (cm ² /g)	W/C (%)	置換率 (%)	S.P. (%)	B(%)		B _{exp} -B _{cal} (%)	T(sec)			T _{exp} -T _{cal} (sec)
				実験値	計算値		実験値	計算値	修正値	
10000	41	40	0.5	0.7	0.2	0.5	2.8	7.8	3.6	0.8
10000	41	50	0.5	0.5	0.0	0.5	3.3	9.0	4.2	0.9
10000	43	40	0.5	0.0	0.6	0.6	2.6	6.5	3.0	0.4
10000	43	50	0.5	0.5	0.0	0.5	2.8	7.4	3.4	0.6
10000	45	40	0.5	0.2	0.7	0.5	2.7	5.4	2.5	0.2
10000	45	50	0.5	0.7	0.4	0.3	3.8	6.2	2.9	0.9
15000	41	30	0.5	0.6	0.0	0.6	3.1	6.8	3.2	0.1
15000	41	40	0.5	0.4	0.0	0.4	4.1	7.8	3.6	0.5
15000	43	30	0.5	0.7	0.0	0.7	2.5	5.6	2.6	0.1
15000	43	40	0.5	0.1	0.0	0.1	2.8	6.5	3.0	0.2
15000	45	30	0.5	0.8	0.2	0.6	2.5	4.7	2.2	0.3
15000	45	40	0.5	0.5	0.0	0.5	3.3	5.4	2.5	0.8
B:ブリーディング率				平均値		0.5	平均値			0.5
T:J14漏斗流下時間										

ングおよび流下時間の算定式は検証のために行った実験結果をある程度表すことができると判断される。

6. まとめ

従来のグラウトにスラグなどの微粉末と高性能減水剤を用いて、グラウト品質の向上を図るための配合設計を念頭において、グラウトのブリーディング、およびJ14漏斗の流下時間の定式化を実験結果に基づいて行った。さらに、導出されたブリーディングおよび流下時間の算定式を用いて数値シミュレーションを行い、ブリーディングおよび流下時間に影響を及ぼす要因について検討を行った。また、最近積極的に導入されているノンブリーディンググラウトを一般に推奨される程度の流動特性を保持しながら、製造するための条件についても考察を行った。今回の検討で得られた結果をまとめると以下の通りとなる。

(1)グラウトのブリーディングは水セメント比と相関関係があり、水セメント比で表すことができる。さらに、セメントの一部をスラグで置換する場合にはセメント量の見掛けの増加を考慮することにより、ブリーディングを予測することができることが確認された。

(2)グラウトのJ14漏斗の流下時間は、水セメント比と高性能減水剤の影響を考慮して、定式化することができた。さらに、スラグ置換率がゼロの場合の流下時間に対する流下時間の比を導入して、スラグ置換による影響を定式化することにより、グラウトの流下

時間を予測することができることが確認された。

(3)定式化されたブリーディングの算定式を用いてパラメータ解析を行った結果、ブリーディングの抑制にはスラグ置換率よりもスラグの比表面積比を大きくすることが効果的である。

(4)定式化された流下時間の算定式を用いてパラメータ解析を行った結果、セメントをスラグで置換する場合も流動性改善のために高性能減水剤は効果がある。しかし、ある程度高性能減水剤が添加されるとそれ以上は必要がなく、その使用においては適切な量を設定することが必要である。

(5)数値シミュレーションの結果、ある程度の流動性を有するノンブリーディングタイプのグラウトの製造が、スラグによる置換と高性能減水剤の使用によって可能であることが確認された。しかし、置換率があまり高くないこと、配合の自由度などを考慮すると比表面積が15000cm²/g程度、高性能減水剤の添加量0.5%程度が必要と判断される。

(6)グラウトの流動性はミキサーの性能によって大きく影響を受ける。しかし、流下時間の算定式中の α を修正して流動性の効果を考慮することにより、高回転のミキサーを用いた場合の流下時間も推定することができる。

7. おわりに

今回の検討においては、高性能減水剤の種類は1種類であった。グラウトの流動性に対して高性能減水剤の影響は大きく、他の高性能減水剤に対しても今

回行った定式化の過程と同じ手法で定式化が可能であるかは今後の課題である。また、実験データ数の少なさから粒子分布、比表面積などの粒子性状が流下時間に及ぼす影響が明確にされず、定式化された流下時間の算定式は粉体の性状の影響を受けない表現となっている。しかし、スラグの種類が変わった場合、あるいはシリカフェウム、ガラス微粉末などを用いる場合には粉体の粒子性状が流下時間に影響を及ぼすことが考えられ、今後の課題と考えられる。

今回行った研究はグラウトの構成材料がブリーディング特性、流動性に及ぼす影響を把握し、ブリーディング率および流下時間を定量的な方法で制御するを目的としている。本研究をさらに発展させて、PCグラウトの品質を向上させるための配合設計に役立てることを考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株)ピー・エスおよび(株)ニューテックから研究費の補助を受けました。さらに、町田 武(ピー・エス)氏には試料の物理試験および化学分析など終始研究にご協力頂きました。また、実験に際しては関東学院大学工学部に在学中であった佐野浩章、落合郁真 各氏の協力を得ました。ここに記して深く感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 小林和夫, 宮川豊章, 杉江 功, 森 拓也: PC 構造物のグラウト不良とその補修のための注入材料に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol.36, No.3, pp.75-81, 1994.
- 2) 佐々木 慎一, 堺 孝司: グラウト不良により劣化した PC

橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1089-1094, 1996.

- 3) 望月秀次, 本間淳史, 上東 泰: 非破壊検査を用いた PC グラウトの点検と補修, プレストレストコンクリート, Vol.37, No.6, pp.67-74, 1995.
- 4) 中原繁則, 長田晴道, 高田三郎: PC グラウトの検査方法の一例, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, pp.86-89, 1985.
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会耐久性委員会: ノンブリーディンググラウトへの移項について, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.3, pp.71-75, 1998.
- 6) コンクリート標準示方書(施工編), 平成 8 年制定, 土木学会.
- 7) 菅原 操: プレストレストコンクリートのグラウト作業とグラウトの品質の改良, セメントコンクリート, No.603, pp.8-15, May, 1997.
- 8) 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.
- 9) 池田正志, 辻 幸和, 橋本親典, 武川早苗: シリカフェウムを用いた PC グラウトの配合選定, 土木学会第 49 回年次講演概要集第 5 部, pp.432-433, 1994.
- 10) 出雲淳一: ガラス微粉末を添加した PC グラウトの性状について, 土木学会論文集, No.564/IV-35, pp.227-283, 1997. 5.
- 11) 谷川恭雄, 森 博嗣, 黒川善幸, 小村理恵: セメント系粘性材料の漏斗試験に関するレオロジー的考察, セメント系充填材に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1992.12.
- 12) 石橋忠良, 中原繁則, 中山佳伸: PC グラウトの配合および注入方法に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.6, pp.58-69, 1985.

(1999. 5. 6 受付)

STUDY ON THE QUALITY IMPROVEMENT OF PC GROUT

Junichi IZUMO

In the investigation of the existing Prestressed Concrete structures on the deterioration, the several examples of the defects of PC grout have been reported. The quality improvement of PC grout has been requested. In this study, the formulations that predict the bleeding and the efflux time for flow from J14 funnel have been done for PC grout made by adding the quenched blast furnace fine slag and the superplasticizer. Through the formulated equations, the parametric study has been carried out for the effect on the bleeding and the the efflux time of PC grout. Moreover, the mix proportion design to improve the quality of PC grout has been investigated.