

# 銅スラグ微粉末を用いたプレパックドコンクリート用グラウトの 充填性および均等性に関する研究

## STUDIES ON COMPACTNESS AND UNIFORMITY OF PREPACKED CONCRETE USING FINELY-DIVIDED COPPER SLAG AS ADMIXTURE

村田二郎\*・清水 昭\*\*・斉藤良夫\*\*\*・大作 淳\*\*\*\*  
By Jiro MURATA, Akira SHIMIZU, Yoshio SAITOH and Atsushi OHSAKU

Finely-divided copper slag made by granulating slag produced in refining of copper will improve the filling properties and uniformity of grout and is thought to be usable as a grout admixture, but there is substantial reduction in the strength of grout. The study reported here was for the purpose of developing a grout for prepacked concrete having filling properties and uniformity that are good as well as ample strength through the combined use of a grout material containing a high-range water-reducing admixture with finely-divided copper slag. Uniformity was ascertained by mix proportion analyses of various parts of 180×60×15-cm prepacked concrete specimens and core strengths, while analyses of liquid level gradient of the grout were also performed to show the advantages of copper slag grout.

### 1. 緒 言

混和材としてフライアッシュを用いた通常のプレパックドコンクリート用グラウトにおいては、水中におけるフライアッシュとセメントの比重差に起因する両者の分離が問題となる<sup>1)</sup>。

これに対し、銅精錬時に発生するスラグを水冷微粉化し、整粒した銅スラグ微粉末は、含有する多量の鉄分によりその比重は4以上であるが、粒形が不整形であるため保水性が良好で、セメントとの分離が少ないこと、またグラウトの単位重量が大となるため、充填性が改善されること等が確かめられている<sup>2)</sup>。しかし、銅スラグ微粉末は活性を有しないので、化学的に安定である反面グラウトの強度を相当に低下させる。

本研究は、銅スラグ微粉末と高性能減水剤を含むグラウト剤を併用し、水セメント比を低減してグラウト強度を確保するとともに、充填性が良好で分離の少ないプレ

パックドコンクリート用グラウトの開発を目的としたものであって、プレパックドコンクリート供試体各部の均等性を配合分析とコア強度によって確かめるとともに、グラウトの液面勾配の解析を行い、特に従来に比べて流動性がかかなり大きいグラウトの実用化の可能性を示した。

本研究の実施に当たり、液面勾配の解析について貴重なご教示を賜った山梨大学 荻原能男教授ならびに終始熱心の実験に協力された東京都立大学助手 鈴木一雄、川崎道夫の両氏に衷心から感謝の意を表します。

### 2. 使用材料

実験に用いた銅スラグ微粉末はM社H精錬所において銅精錬時に発生するスラグを水冷破砕し、さらにボールミル内で多量の水を用いて微粉化するとともにスレーキングしたもので化学的に安定となっている。比重は4.44、プレーン比表面積は3930 cm<sup>2</sup>/gである。銅スラグ微粉末の物理的性質および化学成分を表-1に示す。

フライアッシュはD社製のもので、その物理的性質

表-1 銅スラグ微粉末の物理的性質および化学成分

比重	粉末度		化学成分(%)						
	88μ 残分	比表面積	Cu	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	その他	合計
4.44	0.05	3927	0.38	57.60	18.80	1.20	0.28	21.70	99.94

\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

\*\* 正会員 三井金属鉱業(株) 技術顧問  
(〒103 中央区日本橋室町 2-1-1)

\*\*\* 三井金属鉱業(株) 生産技術部部長補佐(同上)

\*\*\*\* 正会員 東京都立大学助手 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

表-2 フライアッシュの物理的性質および化学成分

比重	ブレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	化学成分 (%)							
		強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	合計
2.19	3200	0.22	55.28	33.79	8.61	0.28	1.88	0.41	98.45

表-3 セメントの物理的性質および化学成分

比重	ブレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝結			安定性	フロー値	圧縮強さ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )			
		水率 (%)	始凝(分)	終凝(分)			1日	3日	7日	28日
3.07	3660	28.3	3-57	5-19	良	251	77	186	270	431
化学成分 (%)										
強熱減量	不溶残分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	合計		
2.6	0.3	23.3	4.5	0.22	85.2	0.6	2.7	89.4		

および化学成分は表-2 のようである。

セメントはO社製白色ポルトランドセメントおよびカラーセメント No.103 (黄色) で、比重3.07、ブレン比表面積は3650  $\text{cm}^2/\text{g}$  である。セメントの物理的性質および化学成分を表-3 に示す。なお、カラーセメントを用いた理由は、グラウト注入後、その液面形状が観察できるよう配慮したのである。

細骨材は利根川産川砂で、比重2.52、吸水率4.08%、粗粒率は1.83である。粗骨材は美山産碎石4020であって、比重2.63、吸水率は1.41%である。

使用したAE減水剤はN社製リグニンスルホン酸カルシウム(遅延型)、高性能減水剤を含むグラウト剤はN社製の高縮合芳香族スルホン酸塩とアルミニウム粉末を主成分とするいわゆる高強度プレバッドコンクリート用混和材であって、それぞれ結合材重量の0.25%および1%を使用した。

膨張材として用いたアルミニウム粉末はJIS K 5906「塗料用アルミニウム粉」の第2種に適合するものである。

### 3. 銅スラグ微粉末を用いたグラウトの特性

#### (1) グラウトの配合

銅スラグ微粉末を用いたグラウトの特性をフライアッシュ

ッシュを用いた通常のグラウトと比較して論ずるために、フライアッシュ代替率20%、水結合材比50%、遅延型減水剤を用いてPルート流下時間を約16秒としたフライアッシュグラウトを基準とした。この配合における砂結合材比は1.1であった。

銅スラググラウトとフライアッシュグラウトとで単位重量が相違すること、前者は高性能減水剤を含むグラウト剤を添加していることから、Pルートによって両者のコンシステンシーを比較することは難しいので傾斜管試験法<sup>3)</sup>を用いた。

まずフライアッシュグラウトの傾斜管試験(管径20mm、管長70cm、傾斜角10度)を行った結果、流量として70.7  $\text{cc}/\text{s}$ を得た。銅スラググラウトの配合は砂結合材比を1.1に一定とし、傾斜管流量がフライアッシュグラウトの場合の約1倍、1.5倍および2.5倍となるよう単位水量を調整して定めた。その結果、水結合材比はそれぞれ39.4%、43.6%および47.9%となった。傾斜管流量をフライアッシュグラウトの約2.5倍までとしたのは、予備実験において、銅スラググラウトの傾斜管流量をフライアッシュグラウトの約4倍とした場合、グラウトの練りませ後約20秒で砂が沈降し、顕著な分離を示したからである。

アルミニウム粉末はグラウトの膨張率が約5%となるよう添加した。グラウトの配合を表-4 に示す。なお、フライアッシュグラウトをF-I、銅スラググラウトを傾斜管流量の小さいものからD-I、D-IIおよびD-IIIの記号で示すこととする。

#### (2) グラウトのコンシステンシー、単位容積質量、ブリージング率および膨張率

グラウトのコンシステンシー、単位容積質量、ブリージング率および膨張率の試験結果を表-5 に示す。

##### a) コンシステンシー

表-4 グラウトの配合

グラウトの種類	混和材	混和剤	水結合材比 (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
				湿和材率=20% 砂結合材比=1.1					
				水	セメント	混和材	混和剤	細骨材	アルミニウム粉末 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
F-I	フライアッシュ	AE減水剤 (No.8) $\times 0.25\%$	50.0	389	622	156	1.95	856	101.1
D-I	銅スラグ微粉末	高強度プレバッド用 $\times 0.25\%$	39.4	349	708	177	8.95	974	44.3
D-II		高強度プレバッド用 $\times 0.25\%$	43.6	372	683	171	8.54	939	42.7
D-III		高強度プレバッド用 $\times 1\%$	47.9	392	655	164	8.19	901	41.0

表-5 グラウトの特性

グラウトの種類	Pルート流下時間 (秒)	傾斜管流量 (傾斜角10度) ( $\text{cc}/\text{sec}$ )	レオロジー定数				単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{l}$ )	ブリージング率 (%)		膨張率 (%)	圧縮強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	
			傾斜管		回転粘度計			3時間	最終		28日	91日
			$\eta_{sp}/c$ (poise)	$\tau_f$ ( $\text{gf}/\text{cm}^2$ )	$\eta_{sp}/c$ (poise)	$\tau_f$ ( $\text{gf}/\text{cm}^2$ )						
F-I	16.1	70.7	2.13	0.156	2.15	0.162	1.99	1.8	0.7	5.0	241 (1.30)	320 (1.30)
D-I	21.8	65.0	3.82	0.056	3.46	0.041	2.16	0	0	5.5	388 (1.38)	443 (1.38)
D-II	14.7	106.7	2.87	0.039	2.97	0.041	2.12	0.4	0	5.6	288 (1.28)	348 (1.08)
D-III	12.5	173.0	1.86	0.031	1.91	0.030	2.09	0.9	0	4.8	288 (1.18)	318 (0.98)

注) ( ) 内はフライアッシュグラウトの強度に対する比を示す。

P ロート流下時間、傾斜角 10 度における傾斜管流量および傾斜管と回転粘度計によるレオロジー定数を示した。P ロート流下時間は一般に試料の粘度の影響を大きく受けるので、傾斜管流量と異なった傾向を示している。

傾斜管によるレオロジー定数の測定は傾斜角度を 5 度、10 度および 15 度として流量を測定し、Buckingham の塑性流動式 (1) を用いてレオロジー定数を算定した。

$$Q = (\rho gh)A + \frac{B}{(\rho gh)^3} - C$$

$$\eta_{pl} = \frac{\pi R^4}{8l} \frac{1}{A}$$

$$\tau_r = \frac{3R}{8l} \frac{C}{A}$$

.....(1)

ここに、 $Q$  : 流量 (cc/s),  $\rho$  : 試料の単位容積質量 ( $g/cm^3$ ),  $h$  : 水頭差 (cm),  $R$  : 傾斜管の半径 (cm),  $l$  : 傾斜管の長さ (cm),  $\eta_{pl}$  : 塑性粘度 ( $gf \cdot s/cm^2$  または  $\times 980$  poise),  $\tau_r$  : 降伏値 ( $gf/cm^2$ )

使用した回転粘度計は内円筒半径 1.25 cm, 高さ 7.0 cm, 外円筒半径 2.5 cm の外円筒回転型同軸回転粘度計である。回転粘度計と傾斜管とによって測定したレオロジー定数はよく一致しており、試料と管壁との間にすべりが生じない場合傾斜管試験法が便利であることを示している。

銅スラググラウトは高性能減水剤の使用によりその降伏値は著しく低減し、フライアッシュグラウトの 1/3~1/5 程度となっている。

**b) 単位容積質量**

銅スラググラウトの単位容積質量は 2.09~2.16  $kg/l$  であって、フライアッシュグラウトより 5~8 % 大きい。

**c) ブリージング率および膨張率**

ブリージング率および膨張率は土木学会規準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリージング率および膨張率の試験方法」によって試験した。銅スラググラウトのブリージング率は小さく、最終ブリージング率はフライアッシュグラウトの場合 0.7 % であるのに対し、銅スラググラウトはすべて 0 % となっており、保水性が良好であることを示している。

**(3) グラウトの圧縮強度**

圧縮強度は土木学会規準「プレパックドコンクリートの注入モルタルの圧縮強度試験方法」によって試験した。材令 28 日および 91 日における圧縮強度を表—5 に示す。表—5 において、材令 91 日の銅スラググラウトの圧縮強度は 316~443  $kgf/cm^2$  であって、施工性を約 2.5 倍としてもフライアッシュグラウトと同等の圧縮強度が得られることを示している。

表—6 は、銅スラグ微粉末の混入がモルタルのコンシ

表—6 銅スラグ微粉末の混入率がモルタルのコンシステンシーおよび圧縮強度に及ぼす影響

銅スラグ微粉末混入率 (%)	フロー	圧縮強度 ( $kgf/cm^2$ )		
		3 日	7 日	28 日
0	226	125 (1.00)	228 (1.00)	383 (1.00)
10	224	120 (0.96)	207 (0.91)	275 (0.72)
20	230	89 (0.74)	151 (0.66)	211 (0.55)
30	240	77 (0.62)	138 (0.60)	162 (0.42)

注) 供試体は  $150 \times 150 \times 150$  mm の立方体であり、銅スラグ微粉末を用いない場合に對する比を示す。

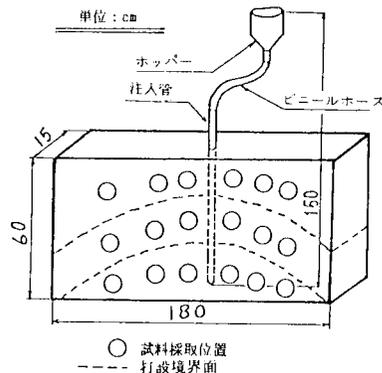
ステンシーおよび圧縮強度に及ぼす影響を予備的に調査した資料であって、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定する標準モルタルによる実験結果である。したがって混和剤は使用していない。表—6 において、銅スラグ微粉末の置換率が増すほどフロー値が増している。これはモルタルの単位水量および単位質量の若干の増加等に起因する。しかし、圧縮強度は銅スラグ微粉末の使用量が増すほど低下し、その傾向は材令が長いほど顕著となる。たとえば、銅スラグ微粉末 20 % の混入により、圧縮強度は材令 3 日~28 日において約 75~55 % に低下している。表—6 と表—5 の結果を比較して、高性能減水剤の著しい効果が認められるのであって、銅スラグ微粉末との併用の有利性が示されている。

**4. 銅スラググラウトを用いたプレパックドコンクリートの均等性**

**(1) プレパックドコンクリート供試体の製造**

図—1 に示す幅 180 cm, 高さ 60 cm, 厚さ 15 cm の鋼製型枠の中央に注入管を鉛直に設置して砕石 4020 を充填し、水を満たしたのち、グラウトを注入した。グラウト注入は落差を 150 cm に保ち、ホッパーからの自然落下によって行った。グラウトの打設高さ 20 cm ごとに注入管を引き上げ、使用セメントの色を変え、3 層に分けて注入した。

**(2) 均等性試験方法**



図—1 グラウト注入状況および試料の採取位置

プレバッドコンクリートの均等性は、供試体各部の配合分析と圧縮強度によって評価した。すなわち、注入管を中心として左右からそれぞれ配合分析用試料および圧縮強度試験用試料を採取した。前者はグラウト注入終了直後に行い、後者は材令約80日においてコアの採取を行った。試料の採取位置は図-1に示すように、各層において、注入管から約10 cm、約35 cm および約60 cmの位置であって合計9か所である。

a) 配合分析試験方法

所定の位置から採取したコンクリート試料を5 mm ふるいで湿式ふるい分けし、モルタル試料200 gを得た。この試料を高周波加熱装置（発振周波数2.45 GHz、高周波出力500 W）を用いて急速乾燥し、試料の重量差に細骨材の吸水率を補正して水量を決定した。なお、乾燥には試料9個の同時加熱で約40分を要した。

次に、乾燥試料をほぐし、0.15 mm ふるい残留分を求め、あらかじめ試験した細骨材中の0.15 mm ふるい通過分を補正し、細骨材量を決定した。この場合、細骨材によっては高周波加熱によって微粉化するものがあることに注意を要する。本実験に用いた細骨材中の0.15 mm 通過分は、気中乾燥の場合4.0%であるのに、高周波加熱した場合は10.0%となった。

セメントの分析は、フライアッシュグラウトの場合は0.15 mm ふるい通過試料を硝酸で溶解し、その希釈液について蛍光分析を行い、カルシウムイオン濃度を定量した。この方法は簡易で、短時間に試験できるので銅スラググラウトにも適用したが、図-2に示すように銅スラグの含有量によりセメント量の推定値が変化し、試験値の再現性が乏しかった。これは、銅スラグに含まれる鉄分がいったん硝酸で溶解されるが、希釈液中でその一部が再び析出し、セメントの検量線を変化させるためと考えられる。そこで、水酸化ナトリウムの逆滴定法を適用した。すなわち、0.15 mm ふるい通過試料を塩酸で溶解し、水酸化ナトリウムの滴定により、塩酸の消費量

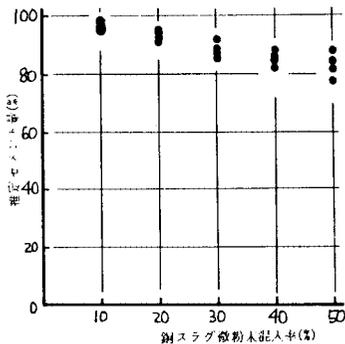


図-2 銅スラグ微粉末未混入率が推定セメント量に及ぼす影響

を求めた。

b) 圧縮強度試験方法

材令約80日において、JIS A 1107に従い、所定位置から直径10 cmのコアを採取した。圧縮強度は材令91日において湿潤状態で試験した。コアの仕上り高さは採取時の損傷等のために12~15 cmとなったので、圧縮強度試験値はJIS A 1107に示されている補正係数を用い、直径10 cm、高さ20 cm 供試体の場合に換算した。

(3) 均等性試験結果

a) 配合分析試験結果

前記の9か所から採取したグラウト試料中の水量、セメント量および細骨材量の測定結果を原配合との比で表わし、表-7に示した。

表-7において、フライアッシュグラウトの場合、供試体各部における測定値の変化が銅スラググラウトの場合より幾分か大きい。全体としては、グラウトの配合や採取位置にかかわらず、水量、セメント量および細骨材量の測定値は原配合に比較的近い値となっている。

これに対し、混和材量の原配合に対する変化はその母数が小さいためかなり大きい。表-8に混和材量の測定結果を配合別および採取位置別に示した。表-8において、混和材量は一般に注入管から遠ざかるに従い減少する傾向が認められ、この傾向はフライアッシュグラウトの場合に最も顕著であった。すなわち、フライアッシュ量の測定値の原配合に対する比は、注入管から約10 cmの位置で1.23、60 cmの位置で0.75となっており、銅スラググラウトのこれに対応する値は配合により1.12から0.95、0.92から0.83および1.15から0.99と減少傾向が緩やかである。その結果、採取位置による混和材量の変動係数は、フライアッシュグラウトの場合約34%に達しているが、銅スラググラウトの場合は15~25%と小さく、分離傾向が少ないことを示している。

なお、セメント量および混和材量の測定結果から計算した混和材率は、フライアッシュグラウトの場合0.25

表-7 水量、セメント量および細骨材量の測定結果

項目	グラウトの種類	原配合 (モルタル200gに対する値) (g)	測定結果 (原配合との比)			
			範囲	平均値	標準偏差	変動係数(%)
水量	F-I	38.5	0.94~1.24	1.05	0.09	8.7
	D-I	31.6	0.86~0.99	0.93	0.05	5.4
	D-II	34.4	0.81~1.01	0.91	0.06	7.2
	D-III	37.1	0.82~0.94	0.89	0.04	4.8
セメント量	F-I	61.5	0.88~1.08	0.95	0.07	6.6
	D-I	64.1	0.88~0.97	0.93	0.04	3.8
	D-II	63.1	0.90~1.12	1.01	0.07	7.1
	D-III	62.0	0.91~1.17	0.97	0.08	8.4
細骨材量	F-I	84.6	0.91~1.16	1.03	0.09	8.2
	D-I	88.2	1.00~1.14	1.07	0.04	3.9
	D-II	86.7	0.97~1.21	1.06	0.08	7.8
	D-III	85.3	0.92~1.16	1.07	0.07	6.7

(注) 測定結果の詳細は文献4) 参照

表-8 混和材量の変化

グラウトの種類	原配合率(%) 当り (g)	採取位置 (注入管からの距離) (cm)	測定結果 (原配合との比)		採取位置による混和材量のばらつき			
			範囲	平均値	範囲	平均値	標準偏差	変動係数(%)
F-I	15.4	10	0.99~1.47	1.23	0.37~1.47	0.91	0.31	34.2
		35	0.82~0.95	0.87				
		60	0.37~1.10	0.75				
D-I	16.0	10	0.93~1.23	1.12	0.72~1.23	1.04	0.18	15.0
		35	0.98~1.14	1.04				
		60	0.72~1.07	0.95				
D-II	15.8	10	0.84~1.03	0.92	0.59~1.03	0.81	0.14	17.3
		40	0.59~0.83	0.68				
		70	0.77~0.94	0.83				
D-III	15.5	10	0.92~1.36	1.15	0.58~1.36	1.01	0.25	24.9
		40	0.59~1.30	0.88				
		70	0.98~1.08	0.99				

~0.17, 銅スラググラウトの場合, D-Iで0.23~0.20, D-IIで0.17~0.16, D-IIIで0.23~0.20であった。

b) 圧縮強度試験結果

コアの圧縮強度試験結果を表-9に示す。表-9において, 注入管からの距離が同じでも, グラウトの層によ

り試験値に若干の差異があるが, それらの平均値で論ずれば, 注入管からの距離とコア強度との間に, グラウトの種類により異なった傾向が認められる。すなわち, フライアッシュグラウトの場合, 注入管から遠ざかるに従い, 圧縮強度は急激に低下し, 約60cmの位置では注入管近傍の約60%に低下している。この結果は, フライアッシュ混入率20%, Pルート流下時間15~21秒としたグラウトを用い, グラウトの水平流動距離を100cmとして行った原田らの実験結果<sup>5)</sup>とよく一致している。これに対し, 銅スラググラウトの場合, 注入管からの距離によってコア強度はほとんど変化せず, 平均強度はD-I, D-IIおよびD-IIIの場合それぞれ326 kgf/cm<sup>2</sup>, 319 kgf/cm<sup>2</sup>および289 kgf/cm<sup>2</sup>となっており, いずれもフライアッシュグラウトの強度より大きい。

注入管からの距離とコア強度との関係は図-3に示すように, 配合分析結果から計算した結合材水比との関係と類似しており, 強度変化が主としてグラウトの分離に起因することを示している。すなわち, 配合分析結果が

表-9 コアの圧縮強度試験結果

グラウトの種類	注入管からの距離 (cm)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	配合別平均強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
F-I	—	—	270 (1.00)	
	7	289		
	10	250		
	35	202		199 (0.74)
		228		
		168		
	60	150		160 (0.59)
179				
50	152			
D-I	5	333	326	
	10	333		
	10	308		
	35	310		
	40	357		323 (0.98)
	35	301		
	60	303		329 (1.01)
60	353			
330				
D-II	5	308	319	
	18	312		
	10	297		
	40	301		321 (1.05)
		318		
	344			
	84	316		328 (1.07)
70	341			
60	330			
D-III	23	250	289	
	30	303		283 (1.00)
		298		
	40	278		276 (0.98)
		288		
	261			
	70	310		307 (1.08)
339				
63	271			

注) 個々の圧縮強度試験値は上層, 中層, 下層の順に記載してあり, 約10cmの位置の圧縮強度に対する比を示す。供試体の寸法=91φ

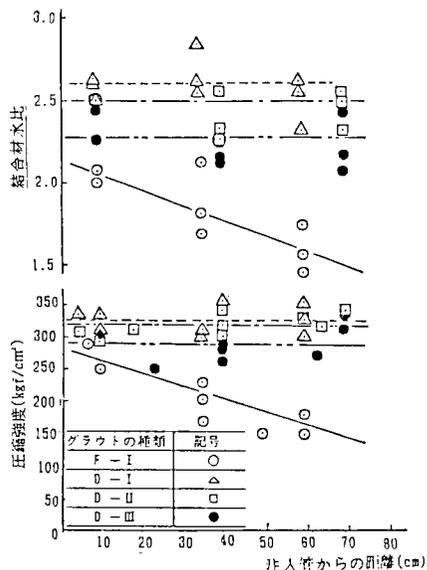


図-3 注入管からの距離とコア強度および結合材水比との関係

表-10 水結合材比の変化

グラウトの種類	原配合	採取位置(注 入管からの距離 (cm))	測定結果 (原配合との比)	
			範囲	平均値
F-I	0.50	10	0.48 ~ 0.50	0.49
		35	0.47 ~ 0.59	0.54
		60	0.57 ~ 0.69	0.63
D-I	0.40	10	0.37 ~ 0.39	0.38
		35	0.35 ~ 0.39	0.37
		60	0.38 ~ 0.43	0.40
D-II	0.44	10	0.39 ~ 0.41	0.40
		40	0.40 ~ 0.43	0.41
		70	0.39 ~ 0.43	0.40
D-III	0.48	10	0.40 ~ 0.43	0.40
		40	0.44 ~ 0.47	0.41
		70	0.40 ~ 0.45	0.44

表-11 フライアッシュグラウトにおける水量、セメント量および混和材量の変化の詳細 (原配合との比)

項目	原配合(200g 当り)(%)	注入管からの距離 (cm)		
		10	35	60
水量	38.5	0.93	0.99	1.05
セメント量	61.5	0.97	0.94	0.91
フライアッシュ量	15.4	0.93	0.85	0.87

注) 個々の試験値は上から上層、中層および下層の値を示す。

ら計算した水結合材比は表-10 に示すように、フライアッシュグラウトの場合、注入管近傍で0.49、約60 cmの位置で0.63と増加しているが、銅スラググラウトの場合その増加量は最大0.04に過ぎない。表-7においては、水量、セメント量の変化をごく概括的に示したが、フライアッシュグラウトにおける水量、セメント量および混和材量の変化を詳細に検討すれば表-11のようであって、注入管からの距離に伴い、水量は増加し、セメント量および混和材量は減少する傾向が認められる。これはグラウトの流動過程における水の分離、前層のグラウト面の勾配が大きいこと(5.参照)による充填水のまき込み等に起因するのである。

### 5. グラウトの液面勾配

グラウトはビンガム体近似であって、降伏値を有するから注入後も液面に勾配が残る。液面勾配の大小はグラウトの充填性、均等性に関係し、注入管の設置間隔にも影響するグラウトの重要な特性であり、水平に近いことが望ましいのはいうまでもない。

図-4は注入後の第1層(最下層)のグラウトの液面形状の観察結果であるが、この実験の場合、水平距離がわずか90 cmに限定されており、注入管出口におけるグラウトの盛り上がりの影響も顕著に表われ、一般性に乏しいので、液面勾配を解析的に検討することとした。

水で満たされた粗骨材中に注入したグラウトの流れは非定常流となり、一般にその運動方程式および連続の方程式を適当な初期条件および境界条件を用いて解くことはできない。ここでは、長方形断面の開水路としてのグ

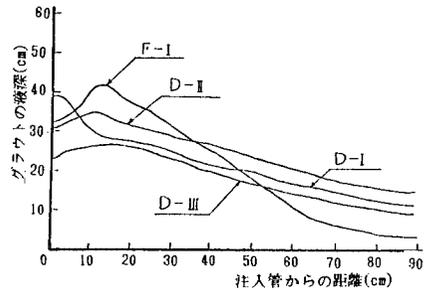


図-4 グラウトの液面形状の観察結果

ラウトの流れを一次元流とし、流れが停止したのちの液面形状の予測を行った。

一次元流の場合の運動方程式および連続の方程式は式(2)および式(3)となる。

$$\frac{(w-1)}{g} \lambda A dx \left( \frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right) = (w-1) \lambda A dx \times \sin \theta - \lambda A \frac{\partial p}{\partial x} dx - \tau s dx \dots (2)$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial x} + \lambda \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \dots (3)$$

ここに、 $w$ :グラウトの単位容積重量、 $\lambda$ :粗骨材の空隙率、 $A$ :流積、 $\theta$ :床の傾斜角(流れの方向に低下する場合正とする)、 $u$ :グラウトの流速(Darcy流速)、 $u'$ :グラウトの実流速( $u'=u/\lambda$ )、 $\tau$ :粗骨材中のグラウトの流動抵抗、 $s$ :潤辺、 $h$ :グラウトの液深

式(2)の両辺を  $\frac{(w-1)}{g} A dx$  で除せば、

$$\frac{\lambda}{g} \left( \frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right) = \lambda \sin \theta - \frac{\lambda}{(w-1)} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau s}{(w-1)A} \dots (4)$$

流れの抵抗則はDarcyの法則に従うものとすれば、

$$\frac{\tau s}{A} = (w-1) \frac{u}{k} \dots (5)$$

ここに、 $k$ :粗骨材中のグラウトの透過係数

$$\therefore \tau = \frac{(w-1)A}{ks} u \dots (6)$$

しかし、モルタルはビンガム体とみなせるから、式(7)のように書くのが適当である。

$$\tau = \frac{(w-1)A}{ks} u + \tau_r \dots (7)$$

式(7)を式(4)に代入すれば、

$$\frac{\lambda}{g} \left( \frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right) = \lambda \sin \theta - \frac{\lambda}{w-1} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{u}{k} - \frac{\tau_r s}{(w-1)A} \dots (8)$$

床が水平の場合( $\theta=0$ )について、グラウトの流れが停止した後の液面形状は、式(8)において、慣性項および重力項を0とし、 $u=0$ として求められる。

$$\frac{dh}{dx} = - \frac{\tau_r s}{(w-1)A} \dots (9)$$

潤辺  $s$  は液深  $h$  に一次比例すると仮定すれば、

$$s = \alpha h + B \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $\alpha$  : 比例定数

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{\tau_f}{(w-1)\lambda B} \left( \alpha + \frac{B}{h} \right) \dots\dots\dots(11)$$

$$-\frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{B/\alpha}{h+B/\alpha} \right) dh = \frac{\tau_f}{(w-1)\lambda B} dx$$

$$x - x_0 = -\frac{(w-1)\lambda B}{\alpha \tau_f} \left\{ \frac{B}{\alpha} \ln \left( h + \frac{B}{\alpha} \right) - h \right\} \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $x_0$  : 積分定数

比例定数  $\alpha$  は次のようにして求めた。

粗骨材を直径  $d$  の斉等球形粒子とし、密に充填されたものとする。粗骨材の間隙を直径  $\epsilon$  の一様な水平円管と仮定し、潤辺  $s$  はこれらの仮想円管の周長の総和に比例するものとする。仮想円管は平均粒径に等しい間隔で存在すると思われるから、

$$\epsilon = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \lambda d \dots\dots\dots(13)$$

仮想円管一層の潤辺  $s_a$  は、

$$s_a = \alpha d = \gamma \pi \epsilon \times \frac{B}{d} \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $\gamma$  : 比例定数

$$\alpha = \gamma \sqrt{4\pi} \frac{B}{d} \dots\dots\dots(15)$$

式 (12) において、 $h$  が  $B/\alpha$  に比べて十分大きい場合は近似的に、

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -\frac{(w-1)\lambda B}{\alpha \tau_f} h \\ &= -\sqrt{\frac{\lambda}{4\pi}} \frac{(w-1)d}{\gamma \tau_f} h \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

すなわち、グラウトの液面勾配はグラウトの降伏値に比例し、水中重量に反比例すると考えてよい。

本実験に用いたグラウトの液面勾配を、表—4 に示したグラウトの特性値ならびに粗骨材の平均粒径  $d=30$  mm、空隙率  $\lambda=49.0\%$  (実測値) を用い、式 (16) によって計算すれば、表—12 のようになる。表—12 の値は近似的に  $\gamma=1.0$  として計算したもので、フライアッシュグラウトの液面勾配が約 1/4 (液面傾斜角約 15 度) であるのに対し、銅スラググラウトの場合は約 1/12~1/21 (液面傾斜角約 5 度~3 度) となっている。これらの値は計算の過程で種々の仮定を設けているので、絶対値として取り上げるのは早計であることは当然であっ

表—12 グラウトの液面勾配

グラウトの種類	降伏値 (gf/cm <sup>2</sup> )	水中重量 (g/cm <sup>3</sup> )	液面勾配 $i_c = \frac{dh}{dx} = \frac{\tau_f}{(w-1)\lambda B} \left( \alpha + \frac{B}{h} \right)$	液面傾斜角
F-I	0.156	0.99	1/3.7	15°07'
D-I	0.056	1.16	1/12.2	4°41'
D-II	0.039	1.12	1/17.1	3°21'
D-III	0.031	1.09	1/20.9	2°44'

注) グラウトの降伏値は傾斜管試験結果を用いた。  
 $d=30$ mm,  $\lambda=0.49$

て、将来大型試験によって確かめることが必要である。しかし、相対値として、フライアッシュグラウトと銅スラググラウトの液面勾配の比較は十分可能であって、銅スラググラウトの方が水平に近く、充填性が格段に良好となることを示している。

なお、参考までに、図—4 において注入管からの距離が 70 cm 程度以上の部分における液面勾配の実測値はフライアッシュグラウトの場合約 1/5、銅スラググラウトの場合約 1/8~1/23 であった。

## 6. 結 論

省資源の見地から、プレバッドコンクリート用混和材としての銅スラグ微粉末の利用について検討し、高性能減水剤を含むグラウト剤を併用することにより、通常のフライアッシュを用いたグラウトより、充填性、均等性、強度発現性等が良好なグラウトが得られることを確かめた。この研究の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 傾斜管流量が通常のフライアッシュグラウトの約 1 倍、1.5 倍および 2.5 倍とした銅スラググラウトの特性は次のとおりであった。

- i) 銅スラググラウトは高性能減水剤を含むグラウト剤を併用したので、その降伏値は 0.06~0.03 gf/cm<sup>2</sup> となり、フライアッシュグラウトの約 1/3~1/5 に低減した。
- ii) 銅スラググラウトの単位容積質量は 2.09~2.16 kg/l であって、フライアッシュグラウトより 5~8% 大であった。
- iii) ブリージング率の最終値はフライアッシュグラウトの場合 0.7% であるのに対し、銅スラググラウトではすべて 0% となり、保水性が良好であった。
- iv) 銅スラググラウトの圧縮強度は材令 91 日においてフライアッシュグラウトと同等以上であった。

(2) 幅 180 cm、高さ 60 cm、厚さ 15 cm のプレバッドコンクリート供試体の各部の配合分析およびコア強度により、各種のグラウトを用いた場合の均等性を比較した。その結果、

- i) 供試体各部における水量、セメント量および細骨材量の変化は少なく、原配合に近い値を示したが、混和材量は注入管から遠ざかるに従って減少する傾向が認められ、この傾向はフライアッシュグラウトの場合顕著であった。すなわち、フライアッシュ量の原配合に対する比は注入管近傍で 1.23、60 cm の位置で 0.75 となりその差は 0.48 となっているが、銅スラググラウトの場合注入管近傍と 60 cm の位置の差は約 0.17 であった。そ

の結果、採取位置による混和材量の変動係数はフライアッシュグラウトの場合約 35 % であるのに対し、銅スラググラウトの場合は 15~25 % であつて分離が少ないことが示された。

- ii) 注入管からの距離に伴うコア強度の変化は配合分析結果から計算した結合材水比の変化と同様な傾向を示し、グラウトの種類により相違した。すなわち、フライアッシュグラウトを用いた場合のコア強度は注入管からの距離に伴い急激に低下し、注入管から 60 cm の位置のコア強度は、注入管近傍の約 60 % となった。これに対し、銅スラググラウトを用いた場合は、注入管からの距離によってコア強度はほとんど変化せず、材令 91 日におけるコアの平均強度は配合により  $326 \text{ kgf/cm}^2 \sim 319 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲であつて、いずれもフライアッシュグラウトの強度より大となった。

(3) 注入後のグラウトの液面形状を一次元流として解析した結果、液面勾配は近似的にグラウトの降伏値に比例し、水中重量に反比例することが示された。本実験に用いたグラウトにこの解析結果を適用すると、フライ

アッシュグラウトの液面勾配は約 1/4 (液面傾斜角約 15 度) となるが、銅スラググラウトの場合は約 1/12 ~ 1/21 (液面傾斜角約 5 度 ~ 3 度) となり、グラウトの充填性、均等性が良好となり、注入管の設置間隔の拡大等も期待できる。

#### 参 考 文 献

- 1) 野口 功：プレバックドコンクリートによる基礎の施工、コンクリートジャーナル、Vol.6, No.9, 1968 年 9 月。
- 2) 村田二郎・鈴木一雄・大作 淳・清水 昭：銅スラグを用いたプレバックドコンクリートに関する研究、セメント技術年報 35, 1981。
- 3) 村田二郎・鈴木一雄：傾斜管試験法によるグラウトの粘度測定、フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集、土木学会、1983。
- 4) 清水 昭・斉藤良夫・大作 淳：銅スラグ微粉末を用いたプレバックドコンクリート用グラウトの特性、セメント技術年報 38, 1984。
- 5) 原田 豊・岩井徳雄・板井則之：プレバックドコンクリート工法における注入でん充材の流動性状に関する諸実験、鉄道技術研究報告、No.730, 1970 年 10 月。

(1985.2.22・受付)