

## 論文

## [1051] 高流動コンクリートの充填性に関する研究

正会員 ○坂田 昇 (鹿島建設技術研究所)

正会員 万木 正弘 (鹿島建設技術研究所)

山本 博之 (鹿島建設技術研究所)

正会員 古澤 靖彦 (鹿島建設技術研究所)

## 1. はじめに

将来のコンクリート工事の合理化・省力化を、信頼性を伴って実現するものとして、鉄筋量の多いところでも自重により密に充填されるコンクリートが注目されている。<sup>1)</sup> 高性能減水剤の添加によってスランプフローを大きくしたコンクリートは、良好な充填性に必要な横方向への拡がり能力が大きい。そこで今回は、高流動コンクリートについて、ある配筋条件を想定したモデル空間に対する充填性を石粉量及び細骨材率を要因として試験的に検討した結果を報告する。

## 2. 石粉による骨材の置換

コンクリートの充填性は、骨材-骨材間、骨材-鉄筋間の接触による摩擦抵抗によって阻害される。したがって、コンクリート中の骨材の間隔が大きいほど充填性に有利となる。また、骨材の間隔を確保するためには、ペーストと骨材もしくはモルタルと粗骨材の分離抵抗性<sup>2)</sup>がある程度以上必要である。骨材の間隔を大きくするためには、コンクリート中の骨材量を低減する必要があり、単位水量を増やす、 $W/C$ を小さくしてペースト中に占める微粉末結合材量を大きくするなどの方法がある。しかし、単位水量を増加する方法ではコンクリートの分離抵抗性は低下し、また硬化後の耐久性の観点からも望ましくない。また、 $W/C$ を小さくする方法では過剰強度、温度ひびわれの問題が残る。そこで今回は、化学的に不活性な微粉末である石粉で、骨材を置換する方法を用いた。石粉は、強度に対しては細骨材の一部として考えられるが、90%粒径が $50\mu\text{m}$ 以下の微粉末であるため、コンクリートの変形を阻害する摩擦抵抗には寄与しないものと考えられる。また、この方法によってコンクリート中に占める微粉末量が増加するため、粘性も増加し分離抵抗性を高める上でも有利となる。

## 3. 試験の前提条件及び検討方法

コンクリートは、構造物の種類や施工条件によって配合条件が大きく変化し、各々の条件下で良好な充填性を示すコンクリートの配合が存在するものと考えられる。その中で今回は、設計基準強度が $240 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の一般的な強度の高流動コンクリートを対象とし、水セメント比(水結合材比)は55%として試験を実施した。また、結合材には普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を1:1(体積比)で使用した。さらに硬化後の耐久性を考慮すると、単位水量をできるだけ少なくすることが望まれるため、 $170 \text{ kg/m}^3$ を上限として検討を実施した。高性能減水剤はスランプロス低減型のものを用い、すべての試験において少なくとも60分間は所定のスランプを維持することを確認した。

検討は、以下の手順で実施した。

- ① 充填性に要求される横方向の広がり能力をスランプフローに代表させ、そのスランプフローを選定するため、いくつかの配合で高性能減水剤の添加量によりスランプフローを変化させたコンクリートについて検討する。
- ② ①で選定したスランプフローの範囲で、石粉量及び細骨材率を要因とし、コンクリートが高い充填性を示す条件について検討する。
- ③ 硬化後の耐久性を確保するために、ある程度の充填性を確保する最少の単位水量について検討する。

#### 4. 使用材料及び試験方法

表-1に使用材料を示す。練りませには、100ℓ強制式二軸ミキサー（60RPM）を用いて、微粉末及び骨材を投入し30秒空練後、水と高性能減水剤を投入し90秒練ませた。練上り温度は $20 \pm 2$ ℃とした。練上り時のスランプ、スランプフロー及び空気量及び温度を測定後、図-1に示す装置によりコンクリートの充填性試験を行った。充填性試験におけるコンクリートの打込みは、図に示す5cm間隔（純間隔3.4cm）でφ16mmの塩ビ管を設置した容器の片側から取付けた投入口から行った。打込み速度は充填性に影響するものと考えられるが、今回は $0.2 \text{ ℓ/s}$ とした。そして、最終打上り高さに達したときの先端部でのコンクリートの高さ（充填高さ）を測定し、これを充填性を評価する値とした。また、硬化後、試験体をコンクリートカッターで切断し粗骨材の分布を観察してコンクリートの均一性を評価した。ここで、塩ビ管の純間隔3.4cmは、土木学会RC示方書で定められている最小鉄筋間隔（粗骨材最大寸法の $4/3$ ）とした。

表-1 使用材料

使用材料	
セメント	普通ポルトランドセメント (比重3.16, プレーン値3200cm <sup>3</sup> /g)
スラグ	高炉スラグ微粉末 (比重2.91, プレーン値3800cm <sup>3</sup> /g)
石粉	石灰石粉(炭酸カルシウム) (比重2.70, 200メッシュ(プレーン値3000cm <sup>3</sup> /g相当))
水	水道水
細骨材	川砂(大井川産) (比重2.59, F.M.2.75, 実積率67.4%)
粗骨材	川砂利(富士川産) (比重2.65, Gmax25mm, F.M.7.38, 実積率64.1%)
高性能減水剤	β-ナフタリンスルホン酸カルシウム+ 反応性高分子

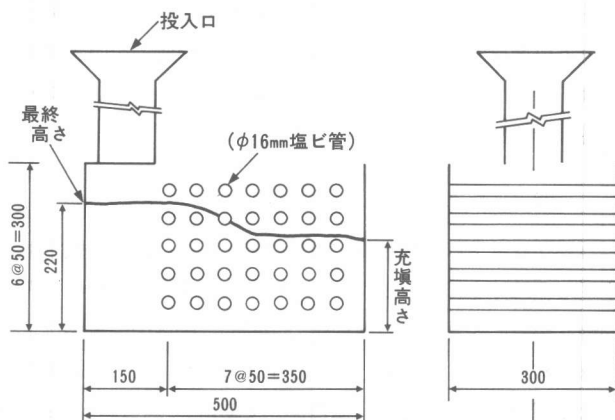


図-1 充填性試験装置

表-2 コンクリートの配合

配合No.	W/C (%)	W/P <sup>*1)</sup> (%)	s/a <sup>*2)</sup> (%)	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプフロー (cm) (S P 添加率 <sup>*3)</sup> (%)		
				水	C	スラグ	石粉	細骨材	粗骨材	45±5 (0.4)	60±5 (0.75)	75±5 (1.1)
1	55.0	55.0	46.5	170	161	148	0	857	1000	45±5 (0.4)	60±5 (0.75)	75±5 (1.1)
2	55.0	41.1	46.5	170	161	148	105	805	950	45±5 (0.3)	60±5 (0.8)	75±5 (1.0)
3	55.0	32.8	46.5	170	161	148	209	753	901	45±5 (0.5)	60±5 (0.85)	75±5 (1.0)
4	55.0	27.3	46.5	170	161	148	313	705	848	45±5 (0.85)	60±5 (1.1)	75±5 (1.4)

\* 1) 水/微粉末 (セメント, スラグ, 石粉)

\* 2) 細骨材 / (細骨材 + 粗骨材)

\* 3) 高性能減水剤の微粉末 (セメント, スラグ, 石粉) に対する添加率

### 5. 充填性に適したスランプフローの検討

#### (1) 試験内容

充填性に要求されるスランプフローを選定するために、石粉量を要因とした表-2に示す4配合のコンクリートを、それぞれ高性能減水剤の添加量によってスランプフロー45±5 cm, 60±5 cm, 75±5 cmに調整し、充填性試験を行った。

#### (2) 試験結果及び考察

スランプフローと充填高さの関係を図-2に示す。図に示すように、スランプフローが45±5 cmでは、検討したすべての配合で充填高さは0~3 cmと小さかった。また、スランプフローが75±5 cmでは充填高さは4~15 cmであったが、高さの大きいものでも図-3に示すように塩ビ管付近で段差が観察され、段差が生じた部分に粗骨材が集中し流動先端部ではモルタル部分が多くなっていた。スランプフローが小さすぎる場合には、横方向への広がり能力が小さいために配合によらず充填性が低くなるものと考えられる。また、スランプフローが大きすぎる場合には分離抵抗性が小さくなり、障害物付近で骨材の間隔が小さくなって骨材-障害物間、あるいは骨材-骨材間の摩擦抵抗が卓越してコンクリートの充填性を阻害したものと考えられる。

これに対してスランプフローが60±5 cmでは、配合No. 1を除く各配合で充填高さが最も大きくなり粗骨材も均等に分布していた。ただし充填高さは、スランプフローがこの範囲であっても石粉量によって異なり、充填性を高める上で最適な石粉量があるものと考えられる。したがって、鉄筋間隔を極めて小さくした今回のモデルでは、スランプフローだけでコンクリートの充填性を評価することはできず、他の配合要因も大きく関係することが明らかとなった。

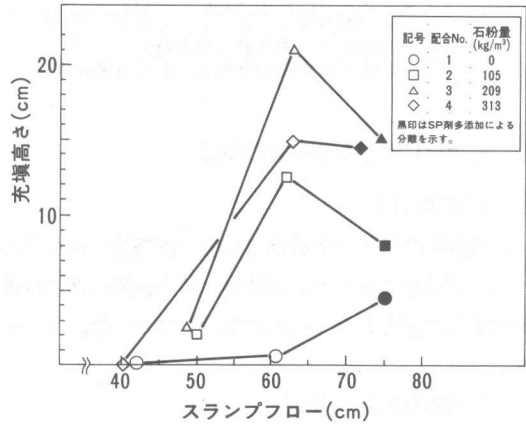
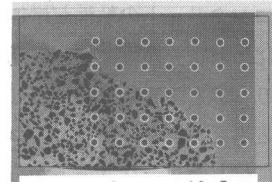
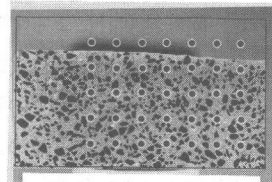


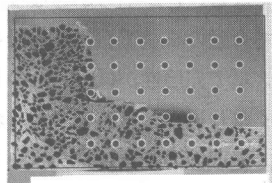
図-2 スランプフローと充填高さの関係



スランプフロー40.5 cm



スランプフロー63.0 cm



スランプフロー75.0 cm

図-3 骨材の分布状況

表-3 コンクリートの配合

ケース No.	配合 No.	W/P <sup>*1)</sup> (%)	s/a <sup>*2)</sup> (%)	単体量 (kg/㎡)					SP添加率 <sup>*3)</sup> (%)	
				水	C	スラグ	石粉	細骨材		粗骨材
1	1-1	55.0	46.5	170	161	148	0	857	1000	0.75
	1-2	55.0	49.5	170	161	148	0	906	950	0.75
	1-3	55.0	52.5	170	161	148	0	954	901	0.75
2	2-1	41.1	46.5	170	161	148	105	805	950	0.80
	2-2	41.1	49.5	170	161	148	105	853	901	0.80
	2-3	41.1	52.5	170	161	148	105	905	848	0.80
3	3-1	32.8	46.5	170	161	148	209	753	901	0.85
	3-2	32.8	49.5	170	161	148	209	804	848	0.85
	3-3	32.8	52.5	170	161	148	209	860	791	0.85
4	4-1	27.3	46.5	170	161	148	313	705	848	1.10
	4-2	27.3	49.5	170	161	148	313	761	791	1.10
	4-3	27.3	52.5	170	161	148	313	808	742	1.10

- \* 1) 水/微粉末 (セメント, スラグ, 石粉)
- \* 2) 細骨材 / (細骨材 + 粗骨材)
- \* 3) 高性能減水剤の微粉末に対する添加率

## 6. 充填性に適した石粉量の検討

### (1) 試験内容

充填性を高める上で最適な石粉の置換量を検討するため、表-3に示す配合のコンクリートについて試験を実施した。充填性には石粉量の他に細骨材率が影響するものと考えられるため、細骨材率も要因とした。なおスランプフローは、5.の結果よりすべて60~65cmとして試験を行った。

### (2) 試験結果及び考察

図-4に石粉量と充填高さの関係を示す。図から充填高さは石粉量で209 kg/㎡で最大となり、最適な石粉量があることが明らかになった。石粉で骨材を置換すると、①骨材の間隔を大きくする、②コンクリートの粘性が増加する、の2つの効果がある。このうち①については石粉量が増加するにつれて充填性に有利に働くことは明らかである。一方、粘性が必要以上に大きくなると、コンクリートと障害物間の付着など、粘性に起因する抵抗によりコンクリートの変形が阻害されるものと考えられる。そこで、コンクリートの流体部を水と微粉末の混合物に代表させて、上記の試験に供したコンクリートから【水+減水剤+結合材+石粉】を取り出した配合について、回転粘度計によって降伏応力及び塑性粘度を測定した。試験の結果、図-5に示すようにすべての配合で降伏応力はほぼ同じ値であったのに対し、塑性粘度は石粉量が多くなるにしたがって大きくなることが明らかとなった。したがって今回の試験で石粉量が最も多い313 kg/㎡で充填性が低下したのも粘性が大きくなり過ぎたためと考えられる。そして、充填性の高いコンクリートを得るためには分離抵抗性と粘性抵抗の観点から最適な粘性があり、今回の試験では

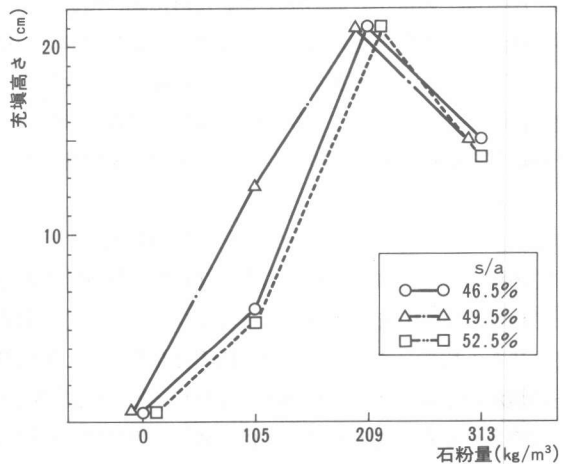


図-4 石粉量と充填高さの関係

石粉量 $209 \text{ kg/m}^3$ のコンクリート中の流体部、つまり石粉の結合材に対する添加率が70%で水/微粉末（結合材+石粉）比が32.8%のときに最適粘性となることが明らかとなった。

また、図-4に示すように同一石粉量においては細骨材率による充填高さの違いが認められたが細骨材率が46.5~52.5%の間ではその差はわずかであり、石粉量が充填高さに対して支配的である結果となった。

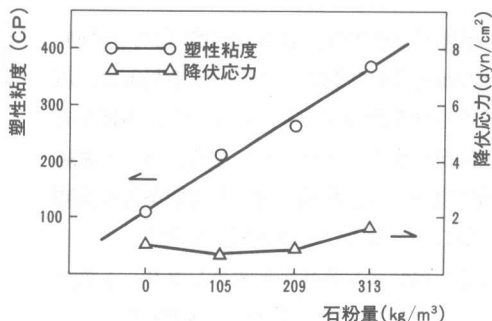


図-5 石粉量とペーストのレオロジー定数の関係

## 7. 最少単位水量の検討

### (1) 試験内容

これまでの検討により、コンクリートの充填性が最適となるスランプフローと流体部の粘性が明らかとなった。一方、硬化後の耐久性を考慮した場合、単位水量はできるだけ少なくすることが望まれる。そこで、前述の結果からスランプフロー60~65cm、石粉の結合材に対する添加率70%、水微粉末比32.8%としたコンクリートについて単位水量を低減する試験を実施した。この固定条件では単位水量を低減することにより単位微粉末量も低減されるので、単位骨材量は逆に増加することになる。したがって、本試験はコンクリートが良好な充填性を示すための単位骨材量の上限值を検討することと同義である。また、ここでは細骨材率も要因とした。コンクリートの配合を表-4に示す。

### (2) 試験結果及び考察

図-6に細骨材率と充填高さの関係を示す。図に示すように単位水量 $170 \text{ kg/m}^3$ で最も充填高さが大きく、単位水量が少なくなるにしたがって充填高さは小さくなった。ただし、単位水量が $160 \text{ kg/m}^3$ で最適な細骨材率（45~48%）では充填高さは14cmであり、図-7に示すように塩ビ管付近で段差は生じず、粗骨材も均一に分布していた。これに対し、単位水量が $155 \text{ kg/m}^3$ では、細骨材率にかかわらず充填高さは0~1cmであった。これより、単位水量 $160 \text{ kg/m}^3$ 、つまり単位骨材量が体積比率で65.1%程度であれば、細骨材率を変化させることによりコンクリートの充填性を高められ、これ以上の骨材量では充填性が急激に低下することが明らかとなった。

表-4 コンクリートの配合

ケース No.	配合 No.	W/P*1) (%)	s/a*2) (%)	単位量 (kg/m³)					S P 添加率*3) (%)	
				水	C	スラグ	石粉	細骨材		粗骨材
1	1-1	32.8	43.2	170	161	148	209	705	950	0.85
	1-2	32.8	46.5	170	161	148	209	753	901	0.85
	1-3	32.8	49.5	170	161	148	209	804	848	0.85
	1-4	32.8	52.5	170	161	148	209	860	791	0.85
2	2-1	32.8	44.1	165	156	144	203	732	950	0.95
	2-2	32.8	47.1	165	156	144	203	782	898	0.95
	2-3	32.8	50.1	165	156	144	203	832	847	0.95
	2-4	32.8	53.4	165	156	144	203	887	791	0.95
3	3-1	32.8	42.1	160	151	140	197	709	1000	1.00
	3-2	32.8	45.0	160	151	140	197	758	950	1.00
	3-3	32.8	47.8	160	151	140	197	807	900	1.00
	3-4	32.8	50.9	160	151	140	197	858	848	1.00
4	4-1	32.8	40.1	155	147	135	191	687	1050	1.15
	4-2	32.8	42.8	155	147	135	191	733	1003	1.15
	4-3	32.8	45.8	155	147	135	191	784	950	1.15
	4-4	32.8	48.6	155	147	135	191	832	901	1.15

\*1) 水/微粉末（セメント、スラグ、石粉）

\*2) 細骨材 / （細骨材+粗骨材）

\*3) 高性能減水剤の微粉末に対する添加率

## 8. まとめ

比較的一般的な設計基準強度 (240 ~ 300 kgf/cm<sup>2</sup>) の高流動コンクリートを対象に、石粉で骨材を置換する方法によって、良好な充填性を示すコンクリートの配合について試験的に検討した。今回検討した実験条件の範囲で明らかとなった事項を以下に示す。

- (1) 良好な充填性を示すコンクリートのスランプフローは60~65cmである。
- (2) 充填性の良否はコンクリートの流体部 (水+微粉末) の粘性に影響され、最適な粘性がある。今回の実験条件では、水微粉末比32.8%のときの粘性が最適である。
- (3) 充填性が急激に低下する単位水量がある。今回の実験条件では、水微粉末比32.8%の最適粘性条件下でコンクリートが良好な充填性を示すためには、単位水量が160 kg/m<sup>3</sup>以上必要であり、単位骨材量では65.1% (体積比) 以下となる。

なお、今回検討したコンクリートの圧縮強度は、材令28日ですべて350 ~ 400 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲にあった。また、今回供試したうち単位水量160 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートの乾燥収縮量は、同一単位水量のスランプ8cmの普通コンクリートと同程度であることを確認している。

## 9. おわりに

今回は材料、特に骨材の粒形や粒度等の特性の変化が充填性に与える影響は把握していない。また、充填性試験のモデルも限られている。今後は、材料特性や充填環境について広い範囲で検討を実施し、充填性の高いコンクリートの配合設計手法を確立する上でのデータを収集する予定である。

### 【参考文献】

- 1) 小沢 一雅, 前川 宏一, 岡村 甫: ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989 pp. 699-704
- 2) 前川 宏一, 山田 浩司, 岸本 達也, 小沢 一雅: 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの流動途上における分離抵抗性, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム, 土木学会, Mar. 1987

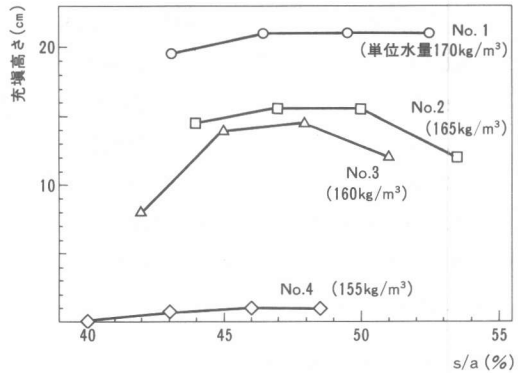


図-6 細骨材率と充填高さの関係

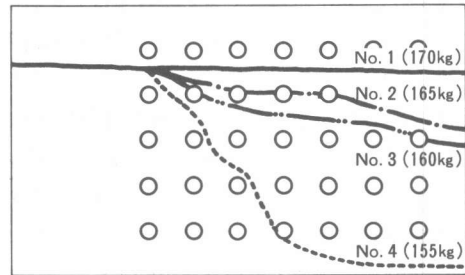


図-7 最終打上り面の形状