

(137) 高ブレン高炉スラグ微粉末を用いた高性能コンクリートの開発

(株) 鴻池組 土木技術部 正会員 池尾 孝司  
 同 上 ○小林 仁  
 (株) 鴻池組 土木設計部 岡田 茂  
 住金鹿島鉱化(株) 島崎 信明

1. はじめに

現在、高強度・高耐久・自己充填性を持つ超高性能コンクリート<sup>1)</sup>、いわゆるSQC(Super Quality Concrete)の研究・開発が盛んに進められているが、筆者らもこのSQCに対応したコンクリートの開発に平成8年から取り組んできた。このコンクリートは、比表面積が10,000cm<sup>2</sup>/gを超える高ブレンの高炉スラグ微粉末を混和材として使用したもので、現在、開発の最終段階として各種の耐久性試験を行っている状況である。このコンクリートは第1ステップとして橋梁を対象に開発を進めてきた経緯があり、PC箱桁橋を模した実大の構造物による施工試験を経て、非合成鋼桁橋の床版部にも適用を行った。

本報告は、このコンクリートの配合選定にはじまり物理的性質などの特徴、および施工試験や実施工の詳細を紹介するものである。

2. 高炉スラグ微粉末について

今回、適用を検討した高炉スラグ微粉末は、比表面積が10,000cm<sup>2</sup>/g以上のものでJIS規格外である。これは8,000cm<sup>2</sup>/gの高炉スラグ微粉末をボールミルによりさらに細かく粉砕し、分級することで得られる比表面積が10,000から15,000cm<sup>2</sup>/gのものである。こうした極めて粉末度の高いスラグを使用することで、硬化後には非常に緻密なセメントマトリクスが形成され、コンクリートの高強度化および耐久性の向上が期待される。また、高炉スラグ微粉末がセメントペーストに適度な粘性を与えることで、材料分離に対する抵抗性も向上する。

価格的には量産体制が整備されていないためJIS規格品より高価であるが、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート施工指針」<sup>2)</sup>で推奨している30~70%を下回る置換率での効果が期待できる。また、こうした混和材として代表的なシリカヒュームと比べると廉価である。

3. 高炉スラグ微粉末がコンクリートに与える影響について

高炉スラグ微粉末の粉末度(比表面積)、置換率が、コンクリートのフレッシュ時、及び硬化後の性状に及ぼす影響を調べるために各種試験を実施した。結果を以下に示す。

3-1. コンシステンシーに対する影響

比表面積4,000~22,100cm<sup>2</sup>/gの6種類の高炉スラグ微粉末を用いて、セメントに対する置換率がコンシステンシー指標(スランプフロー、○漏斗流下時間)に及ぼす影響を調べたものが、図-1、図-2である(配合条件は図中に示す)。

図-1より、置換率とスランプフローについては、3パターンの相関が存在することが分かる。

①置換率の増加に伴いフローも増大する

(比表面積 4,000、6,000cm<sup>2</sup>/g)

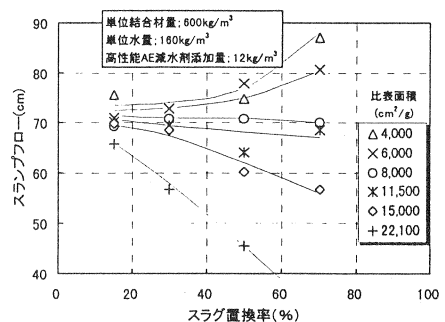


図-1. 粉末度と置換率がフローに及ぼす影響<sup>1)</sup>

②置換率はフローにほとんど影響しない

(比表面積 8,000、11,500 $\text{cm}^2/\text{g}$ )

③置換率の増加に伴いフローは減少する

(比表面積 15,000、22,100 $\text{cm}^2/\text{g}$ )

JIS規格程度の粉末度では、その使用量に応じてコンクリートの流動性は向上するが、15,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 以上になるとコンクリートの粘性が増加するため、過度の置換は逆にフローの低下につながっている。また、8,000~10,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ のものは、置換率に対し安定したフローを示すことがわかる。

一方、置換率と○漏斗流下時間との関係については、図-2より6,000、22,100 $\text{cm}^2/\text{g}$ を除く4つのものに相関が認められ、流下時間は置換率30%でいずれも最小値を示している。

以上より、高流動コンクリート混和材としての高炉スラグ微粉末は、比表面積が10,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 前後のものが安定したフレッシュ性状を示すこと、またセメント量に対し30%程度置換した場合、所要のコンシステンシーに対し単位水量、高性能AE減水剤の添加量を低減できることがわかる。

### 3-2. 圧縮強度に対する影響

比表面積が11,500 $\text{cm}^2/\text{g}$ である高炉スラグ微粉末において、置換率(15、30、50%)と圧縮強度との相関を調べたものが図-3である。これによると、置換率が大きくなるほど強度が若干増加する傾向があるものの、15、30%の置換率においては大きな差が認められない。

一方、図-4は高炉スラグ微粉末の比表面積、置換率が異なる7種類の配合(全て普通セメント、うち1種類はスラグ未混和)における圧縮強度の試験結果である。4,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、スラグ未混和のものに対して早期強度がかなり低下しているが、8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の粉末度では同等の強度発現を示している。また、データに一部ばらつきがあるものの、比表面積が大きくなるほど強度が大きくなる傾向のあることがわかる。

以上より、同一の粉末度では50%以上の置換を行わないと顕著な強度差は現れないこと、また粉末度が高くなるほど発現する強度が大きくなる傾向があり、P.C橋梁として必要な早期強度を得るためには8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の高炉スラグ微粉末を使用するのが望ましいことがわかる。

### 3-3. 水和熱に対する影響

比表面積が11,500 $\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末において、置換率(15、30、50、70%)と断熱温度上昇量との関係を調べたものが図-5である。これによると、置換率が15、30%のものは温度上昇量がともに75℃とほとんど変わらず、セメントとの置換による発熱量低減の効果は現れていない。水和熱によるひび割れ発生が問題となる構造物においては、やはり50%以上の置換が前提となるようである。

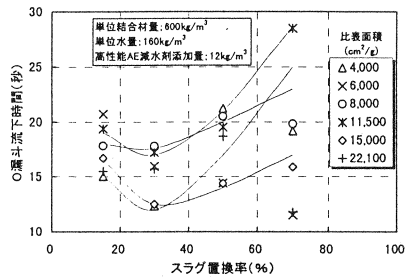


図-2. ○漏斗流下時間に及ぼす影響<sup>4)</sup>

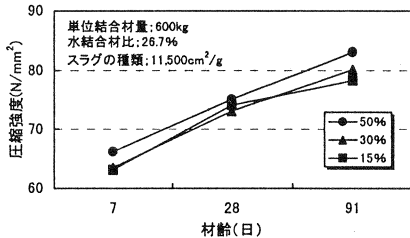


図-3. 圧縮強度と置換率の相関

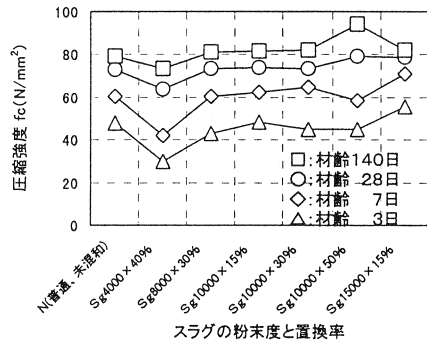


図-4. 圧縮強度と粉末度の相関

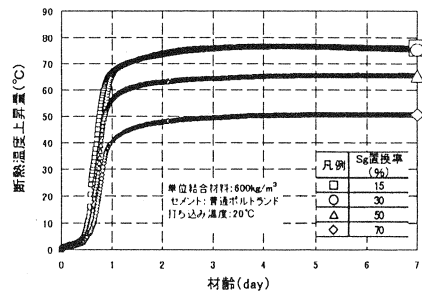


図-5. 水和熱と置換率の相関

3-4. 自己収縮ひずみに対する影響

図-6は、高炉スラグ微粉末の比表面積、置換率が異なる6種類の配合(全て普通セメント)において、自己収縮ひずみの経時変化を計測した結果を示すものである。図には比較のため、スラグ未混和のコンクリート(普通セメント、早強セメント)のデータも併記した。

これによると、10,000cm<sup>2</sup>/g、置換率30%のものが特異データとなっている他は、置換率の大小に関わらず、比表面積が大きくなる(粉末度が高くなる)につれひずみ量が大きくなるのがわかる。また、最もひずみ量が小さいのはスラグ未混和の普通セメントで、次が早強セメントであるが、早強セメントと10,000cm<sup>2</sup>/gまでのスラグを混和したものとの差は、最終ひずみ量で50μ(1μ=1×10<sup>-6</sup>)程度である。

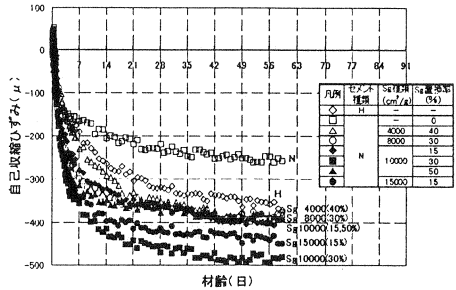


図-6. 自己収縮ひずみの経時変化

今回の試験でひずみ量が最大の500μを示した10,000cm<sup>2</sup>/g、置換率30%のものは、乾燥収縮と合わせた総収縮ひずみ量が一般的なコンクリートの2倍程度になる可能性があり、収縮特性の改善が必要であると思われる。その他のものについては、PC橋梁を当面のターゲットとする場合、早強セメントと同程度の自己収縮量ということで大きな問題はないものと判断される。

3-5. まとめ

以上の結果をまとめると、

- ①10,000cm<sup>2</sup>/g前後のスラグを使用した場合、安定したフレッシュ性状を示す。また、所要のコンシステンシーを得るのに必要な単位水量、高性能A E減水剤の量は、スラグを30%程度置換した場合に最小となる。
- ②普通セメントと同程度の早期強度を得るためには、8,000cm<sup>2</sup>/g以上のスラグを使用するのが望ましい。また、高ブレンになるほど強度が増加する傾向があり、置換率についても50%を超えると強度が大きくなる。
- ③発熱量の低減については、比表面積が10,000cm<sup>2</sup>/g以上の高ブレンでは、50%の置換から効果が現れる。
- ④10,000cm<sup>2</sup>/gのスラグを30%置換したコンクリートは、自己収縮ひずみの発現が最大となった。高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは全般に自己収縮量が大きくなるが、早強セメント使用のものとの大差がないため、外部拘束をあまり受けない構造物への適用に際しては問題が少ない。

4. 基本配合について

配合条件を表-1に示す。これは、自己充填性を有する高流動コンクリートとしては標準的なものであり、設計基準強度については「超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案)」<sup>1)</sup>に基づき60N/mm<sup>2</sup>としている。

粉体系の高流動コンクリートでは、自己充填性より必要となる粉体量(セメント+高炉スラグ微粉末)は、過去の実績から500~600kg/m<sup>3</sup>程度になるものと考えられる。

このうち、セメントについては温度ひび割れ対策として中庸熱ポルトランドセメント、低発熱セメントの使用も考えられるところであるが、今回、対象がPC橋梁で早期強度発現(材齢3日で30N/mm<sup>2</sup>以上)が必要なことから、普通ポルトランドセメントの使用を基本とした。

表-1. 配合条件

項目	条件	備考
最大骨材寸法	20mm	
設計基準強度	60N/mm <sup>2</sup> 以上(材齢91日)	材齢3日で30N/mm <sup>2</sup> 以上
空気量	4.5±1.5%	
スランブフロー	65±5cm	
○漏斗流下時間	10秒	管理目標値
U型充填高さ	300mm以上	間隙設定条件: 障害R2

また、単位水量については「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート施工指針」に準拠し、上限を175

kg/m<sup>3</sup>と設定した。

一方、高炉スラグ微粉末については、3-1より比表面積が10,000cm<sup>2</sup>/gのものが安定したフレッシュ性状を示しており有望である。置換率については、コンシステンシーを重視すると30%程度、水和熱低減効果を重視すると50%以上ということになる。耐久性の観点からは、置換率が大きいほどコンクリートが緻密となり性能が向上するものと思われるが、こちらは実施中の試験結果待ちである。さらに費用対効果という経済面からのアプローチも必要である。以上を踏まえると、高炉スラグ微粉末は10,000cm<sup>2</sup>/gのものを15%~30%の比率で置換することが最適であると判断される。

以上より、上記の条件を満足する配合を試験練りにより定めた。表-2に配合の例を示す。

表-2. 室内試験練り結果

実施日と 打設対象	高炉スラグ		水結合 材比 W/B	細骨 材率 s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュコンクリートの試験結果						圧縮強度試験結果		
	比表 面積	置換 率			単位 水量	単位結合材量B セメント	スラグ	細骨 材	粗骨 材	高性能AE 減水剤	スランプ フロー	漏斗 落下時間	U型充填 高さ	モルタル 温度	空気量	材齢 3日	材齢 28日
	(cm <sup>2</sup> /g)	(%)	(%)	W	C	Sg	S	G	SP	(cm)	(秒)	(cm)	(°C)	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	
H10.5.25 PC箱桁複型試験	10,000	15.0	29.2	48.9	175	600 510 90		733	786	9.0	62×65	12.1	34.5	22.0	4.2	51.1	82.0
H10.10.12 歩道橋床版	10,000	30.0	30.9	52.2	170	550 385 165		811	754	11.0 B×2.0%	61×62	9.5	32.5	24.1	3.8	49.4	73.7

## 5. PC箱桁橋実大模型による施工試験

### 5-1. 概要

今回開発したコンクリートがPC箱桁橋に適用できるか、実大模型による施工試験を行った。試験の概要は以下の通りである。

- 試験日：平成10年7月
- 模型の規模：橋梁箱桁を模したL型構造(図-1)

固定支保工モデル 延長 l=10.0m、打設量13.4m<sup>3</sup>

カンチレバーモデル 延長 l= 2.0m、打設量 2.7m<sup>3</sup>

固定支保工、カンチレバーと2つのモデルを用意しているが、両モデルの差は実施工の経験と、プラントの供給能力(時間最大50m<sup>3</sup>)からシュミレートした打設速度(ウェブ立ち上がり速度)の相違で表現した。

模型については、コンクリートの流動性、充填性を確認するため、ウェブ部は片面を全面アクリル板による型枠とした。また通常の配筋に加え、塩ビ管によりPC鋼材の配置を表現した(写真-1)。

### 5-2. 試験結果

今回の試験により以下の事実が明らかになった。

#### ①施工性について

箱桁の施工で最も問題となるのが、ハンチ部からのコンクリート流出である。通常は、ウェブから

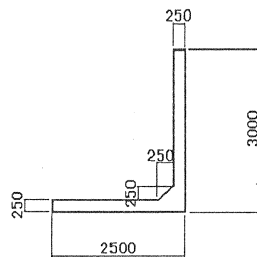


図-1. 模型断面図

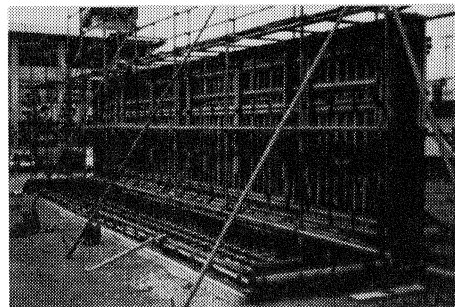


写真-1. 模型全景

コンクリートを投入し、下スラブが充填された後に時間を置いてウェブの打設に移る。しかし、高流動コンクリートの場合は打継目部のバイブレーター処理が行えないため、下スラブ、ウェブは連続打設とせざるを得ない。また、施工中はウェブ部の重量が液圧として作用する。従って、ハンチ部から連続的にコンクリートが流出する恐れがあり、下スラブを部分的に押さえ型枠(浮き型枠)で覆う必要があるものと考えられた。

試験においては当初、幅50cmの押さえ型枠を用意していたが、コンクリートの流出を抑止できず、結局下

スラブ全面に押さえ型枠が必要となった。これは下スラブの厚さが薄い箱桁橋においてはやむを得ないこととも言えるが、今後課題を残した。

### ② 施工中のコンクリートの性状について

試験では投入口を1カ所とし、コンクリートを自然流動させた。結果、3%の縦断勾配に対し流動距離は約9mであった。この場合、投入口と流動最遠点における粗骨材量は、コンクリートとの重量比でともに0.35となり、分離の傾向は見られなかった。従って、1ロットの打設延長が長い橋梁においては、コンクリート投入口は約9m程度の間隔で配置すればよいと思われる。

一方、ウェブ部分の流動勾配は一般的には1/10以下とされるが、今回、4~6%となり流動性は良好であった。

セパレータに取付けた歪みゲージから型枠に作用する圧力を計算すると、比重2.3の理論液圧に対し60~70%の値となった。型枠の片面にアクリル板を使用していたこともあるが、計算上、型枠の縦バタ(角鋼管φ60)は30cmピッチと密になった。また、下スラブ押さえ型枠に対する揚圧力は理論値の100%を示した。

なお、流動中に天端表面部分がエアを巻込むため、のろ状のモルタルが型枠端部に溜まる傾向があった。一般には、バキュームで吸取るなどの処理方法が用いられているようであるが、硬化後の弱点となりやすい為、発生そのものを防止する必要があると考えられる。

### ③ 硬化後の性状について

押さえ型枠を施した下スラブ、ハンチ部はコンクリートが完全に充填されており、ジャンカ等が全く見られない美しい仕上がりであった(写真-2)。

### ④ 品質管理試験

暑中でコンクリート温度は最高34℃に達したが、スランプロスについては出荷時と荷卸し時(約30分経過)で概ね2cm程度であり、高性能AE減水剤の影響で逆に5cm程度伸びるケースもあった。

また、圧縮強度については、3日で56N/mm<sup>2</sup>、7日で75N/mm<sup>2</sup>、28日で83N/mm<sup>2</sup>であった。



写真-2. 脱型後

## 6. 実構造物への適用

### 6-1. 概要

- 非合成単純H桁橋(歩道橋) (図-2)

橋長 21.3m、有効幅員2.0m

縦断勾配 1.7%片勾配、横断勾配 1.5%両勾配

- 上部工 RC床版 幅2.6m×厚さ14cm(中央部)

(実施工9.2m<sup>3</sup>+事前試験4.6m<sup>3</sup>)

下部工 逆T式橋台2基(計58.8m<sup>3</sup>)

### 6-2. 施工について

平成10年10月から平成11年1月にかけて計6回、打設を行った(1度は事前試験)。橋台については比較的マシブな為、事前に温度解析を行い、ひび割れに対する安全性を確認した。解析上の最大上昇温度は壁中央で80℃であったが、熱電対による計測では71℃であった。施工については、フーチングと壁を別に打設したため特に問題はなく、バラベツトと壁を同時打設した際に、沓座部分に押さえ型枠を施した程度であった。

床版については、1.7%の片勾配に加え、1.5%の両勾配があり、表面仕上げがうまく行えるかがポイントとなった。従って、現場近くのヤードで実大の床版(延長10.0m)を試験打設し、施工性を確認した上で実施

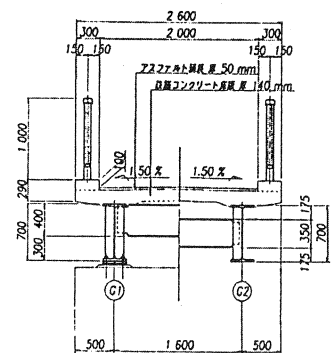


図-2. 標準断面図

工に望んだ(写真-3:表面の白い部分は養生剤)。

まず縦断勾配については、試験時に勾配の上部からコンクリートを流すと材料分離の傾向が認められた。従って、全体を橋軸方向で7つのブロックに分け、低所のブロックから順に充填していく方法を採用した。ブロック間は簡単な仕切り板を上筋の上に設置し、充填後引き抜くというだけのものではあったが、コンクリートの流動を抑制し良好な成果を得た(写真-4)。横断勾配については打設後、3時間程度で表面がこぼり、通常のコテで勾配通りに仕上げることができた。ただし、ブリージング水の発生がなく、打設完了直後から表面が乾燥し始めるため、養生剤を散布しながらの仕上げとなった。冬期で凝結の遅延が心配されたが、仕上げは作業時間内に終了し、その後も再振動を与えなければ仕上げ面が変形することはなかった。

床版の厚さが14cmと薄いため、解析では断熱温度上昇量が無視し得るほど小さかったが、型枠は1週間存置し、夜間には練炭による保温養生を行うなど温度ひび割れ発生の防止に努めた。

### 6-3. 今後の課題

床版については、打設後3週間ほど経過した時点で、橋軸直角方向に収縮によるひび割れが発生した。今回は、床版の厚さが薄く乾燥収縮が急激に進行すること、また鋼桁の拘束度が比較的高いことから、普通コンクリートでも収縮でひび割れが発生し得る条件であった。しかし、今回のコンクリートは自己収縮量が比較的大きいため、ひび割れのスケールを大きくしたことは事実であり、今後は膨脹材の使用も含めて配合の見直しを進める必要がある。

### 7. おわりに

SQCの要求性能である高強度、高流動に関しては、一連の試験、実施工を経て、基本的な性状、今後の課題については把握できたものと考えられる。残る耐久性については、化学抵抗性、凍結融解抵抗性など耐久性に関する各種試験を実施中で、今年度中には結果が得られる見通しである。

さらに、低発熱セメントによる水和熱抑制タイプ、及び一般構造物を対象に粉体量を低減したタイプも開発・計画中である。今後は、構造物のトータルライフコストを正しく評価した上で、構造物の用途に応じて様々なタイプのコンクリートをサービスできるようなシステムの構築を目指したい。

### 【参考文献】

- 1) 超高性能コンクリート構造物設計施工指針に関する委員会: 超高性能コンクリート構造物設計施工指針(案)
- 2) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート施工指針
- 3) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅: H/G<sup>+</sup>フォーメーションコンクリート、技報堂出版
- 4) 為石昌宏ほか: 高炉スラグ超微粉末が高流動コンクリートのフレッシュ時の性状に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、1997
- 5) 為石昌宏ほか: 高炉スラグ超微粉末が凝結時間および断熱温度上昇量に及ぼす影響について

土木学会第53回年次学術講演会講演便覧集第5部、1998.9

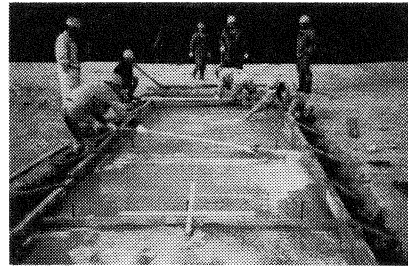


写真-3. 床版の試験打設

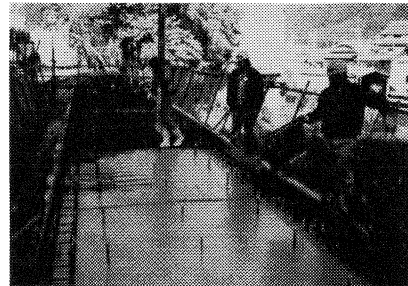


写真-4. 床版打設状況

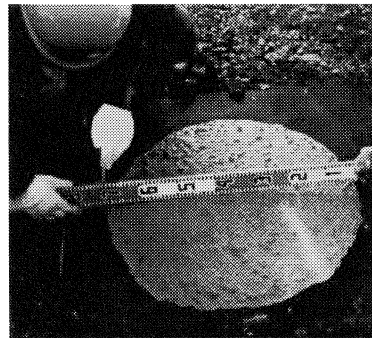


写真-5. スランプフロー試験