

# 報告 [1006] 高炉スラグ微粉末を使用して施工したコンクリート桁

正会員 ○小林明夫 (財)鉄道総合技術研究所)  
 正会員 沼田晋一 (新日本製鐵株式会社)  
 正会員 近田孝夫 (新日本製鐵株式会社)

## 1. まえがき

高炉スラグ微粉末 (GGBFS) コンクリートは、長期強度を増進し緻密な組織のコンクリートをつくるので、塩分浸透に対して抵抗性を示し、その他いくつかの優れた点を持っている。しかし、初期強度の発現が遅いため、適切な養生が行なわれない場合には、所期の目的は得られないおそれがある。そのため、冬期においては比較的薄い部材に対して、この種のコンクリートが施工された実績は少ない。本報告は、冬期に施工された鉄筋コンクリート桁に、GGBFS コンクリートを試験使用した例に関するものである。

コンクリート橋は、全長 15.9m の鉄道橋 (単線 2 主桁、 $f'_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ ) で地上 15 m、海岸より約 80 m で塩風が直接当たる位置にある。今回施工した桁本体のコンクリートは約  $51 \text{ m}^3$  であり、桁の断面を図-1 に示した。

なお、隣接スパンの普通ポルトランドセメント (OPC) コンクリートのうち一連を選び GGBFS コンクリートとの比較用の桁とした。

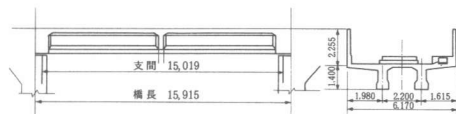


図-1 構造物概要

## 2. 施工に伴って行った試験

試験練りは施工時期が冬期であることから、OPC、早強ポルトランドセメント (HPC) およびこれらの GGBFS コンクリート (OPC+Sg, HPC+Sg) について試験練りを行い、強度発現性を観察した。

また、実施工では、セメントには OPC を選び、コンクリートの桁内部の温度および地上に桁の床版 (最小厚 25 cm) を模したモデル床版 (25 cm 厚) を製作し、その温度、強度の発現性を観察した。

また、生コンクリートの中の高炉スラグ微粉末の置換率の推定試験を行った。

### 2.1 コンクリート配合

耐塩害性、耐アルカリ骨材反応性を考慮し、GGBFS コンクリートは、置換率を既往の実験結果から 55% と定め、土木学会「コンクリート標準示方書」に示される「はりおよびスラブ下」の型枠を取り外してよいコンクリートの圧縮強度の標準値として、 $140 \text{ kgf/cm}^2$  を材令 7 日で確保できることを条件に、また 7 日現場強度が OPC の場合となるべく同程度となるように W/C を 48% とした。OPC, OPC+Sg, HPC+Sg の示方配合を表-1 に、使用した GGBFS の品質を表-2 に示す。

表-1 コンクリートの示方配合 ( $f'_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ )

	Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合 材比 (%)	置換率 (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							W	結 合 材		S	G	ad.
								C	Sg			
OPC				53	—	45.0	173	326	—	796	1001	0.82
OPC+Sg	20	8±2.5	4±1	48	55	41.0	170	159	195	714	1056	0.89
HPC+Sg				48	55	40.4	174	163	200	715	1053	0.91

ad.: AE減水剤

表-2 高炉スラグ微粉末の性質

比重	粉末度 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	化学成分 (%)				塩基度	JSCEモルタル強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )			活性度指数 (%)		
		Ig.loss	MgO	S	SO <sub>3</sub>		7日	28日	91日	7日	28日	91日
2.89	4.210	1.0	6.2	0.95	2.0	1.88	247	468	601	82	116	124

OPCモルタル強度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) 302(7日)、405(28日)、484(91日)

## 2.2 フレッシュコンクリート

GGBFS コンクリートの練り混ぜに当っては、粗骨材、細骨材、セメント+スラグ、水+混和剤の順に材料をミキサに投入し、練り混ぜ所要時間は、計量15秒、投入20秒、練り混ぜ45秒、排出15秒、計95秒とした。これは OPC の場合と同じである。

スランプ試験の結果では、W/Cの大きいOPCの配合に比べてW/(C+Sg)が5%小さいGGBFSコンクリートの場合でもスランプは約2.5cm大きく、スラグを加えることによって、ワーカビリティが改善された。

土木学会標準のサリチル酸メタノール法により測定したスラグの置換率の試験結果は、 $54.4 \pm 0.3\%$ の範囲にあった。

## 2.3 圧縮強度

試験練りの標準養生および現場養生の結果を図-2に示す。

標準養生、現場養生とも材令10日までは、その強度にあまり差はないが、28日以降は後者の強度増進は小さい。これは、現場養生が材令3日から10日までは平均 $13 \sim 10^\circ\text{C}$ であったが、それ以降は $10^\circ\text{C}$ 以下に低下した日が続いたため強度発現が遅れたためと思われる。

また、OPC+SgとHPC+Sgとの強度の差は標準養生と現場養生ともほぼ同様であり、OPC+Sgに対するHPC+Sgの強度比は初期材令3日で1.36~1.38であるのに対し長期材令91日では1.01~1.04と次第に近づいた。これはスラグを含まないコンクリートと同様の傾向である。実施工ではこの結果からセメントにはOPCを採用した。

実施工で打設したコンクリートの標準養生下でのOPCとOPC+Sgコンクリートの圧縮強度は、7日強度では $\text{OPC+Sg}/\text{OPC} = 0.94$ とOPCよりもやや小さいが28日強度ではこの強度比が1.19、91日で1.32と材令とともに大きくなった(表-3)。

また、同時に打設した現場地上放置のモデル床版から採取したコアの強度は、材令7日までは強度比が0.91となったのは標準養生の場合とほぼ同様であるが、28日ではこの強度は1.07さらに91日では1.19となりGGBFSコンクリートの長期強度の増進が標準養生の場合に比していくらか抑制されている(図-3)。

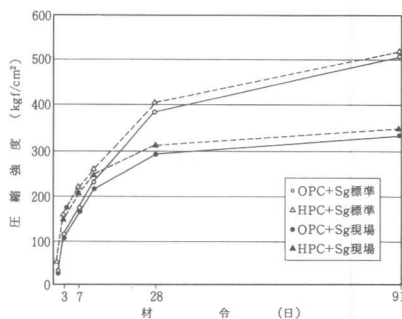


図-2 試験練り圧縮強度試験結果

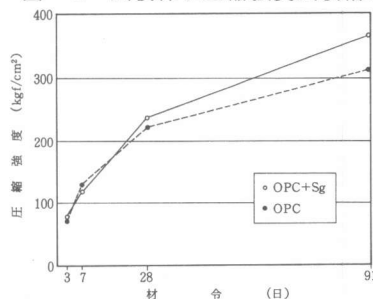


図-3 モデル床版コンクリートのコア強度推移

表-3 標準養生の圧縮強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

材令	1d	3d	4d	6d	7d	28d	91d
結合材							
OPC	-	124	175		239	332	390
OPC+Sg	48	145	-	207	225	395	515
					(0.94)	(1.19)	(1.32)

標準養生供試体に対して、モデル床版ではGGBFSコンクリートの方がOPCの場合よりも低気温と乾燥の影響をより大きく受けやすいためと考えられる。

## 2.4 若材令時の積算温度と圧縮強度

GGBFSコンクリートの冬期施工について実際の桁およびモデル床版、ならびにシート内の温度・外気温等を観測し、若材令時の強度の発現との関係を検討した。施工現場におけるGGBFSコンクリート打設時の温度測定位置を図-4に示す。OPCコンクリート打設の場合は、図-4のT-5, T-6を設置していない。

温度測定は、コンクリート打設後コンクリート温度が、外気温に近づいた7日まで行い、それ以降の温度履歴は近くの多度津測候所の測定データを用いた。また、コンクリート強度は、所定材令毎の標準養生および桁上の現場養生供試体ならびにモデル床版から採取したφ10のコアの強度である。OPCおよびOPC+Sgコンクリートを打設した桁の養生方法は表-4の通りである。

しかし、防風用の保護シートが翌日の強風によって破損し、実際には温度測定の結果に見られるように、初期保温養生効果は殆ど現われていない状態となった。

躯体内の温度測定結果(図-5)から、桁中心部のように部材厚の厚いものは、比較的外気温の影響を受けにくい。床版、モデル床版等は主桁より外気温の影響を受け易い。水和熱による主桁内部での最高温度に達するまでの時間と打ち込み時のコンクリート温度との差の関係は、OPCが38時間、12℃、OPC+Sgでは28時間、8℃で、OPC+Sgでは打設時の外気温が高かった影響が若干見られるが、時間当たりの温度上昇は、OPCが0.32℃/時、OPC+Sgが0.28℃/時となり、スラグ混入による発熱の遅延状況が推察できる。また、同時に打設したモデル床版においても、外気温は打設時8℃、7時間後に最高温度の15℃さらに18時間後に5℃と変化しているが、発熱速度はOPC

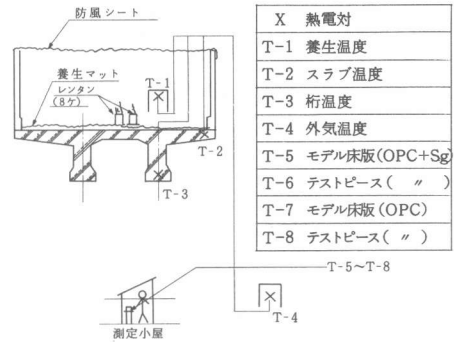


図-4 測定概要

表-4 桁コンクリートの養生方法

	初期養生	躯体養生
OPC	防風シート掛け、 ランタン火鉢4ヶ	翌朝からシート3日
OPC+Sg	防風シート掛け、 ランタン火鉢8ヶ	翌朝から養生マット (10mm)6日

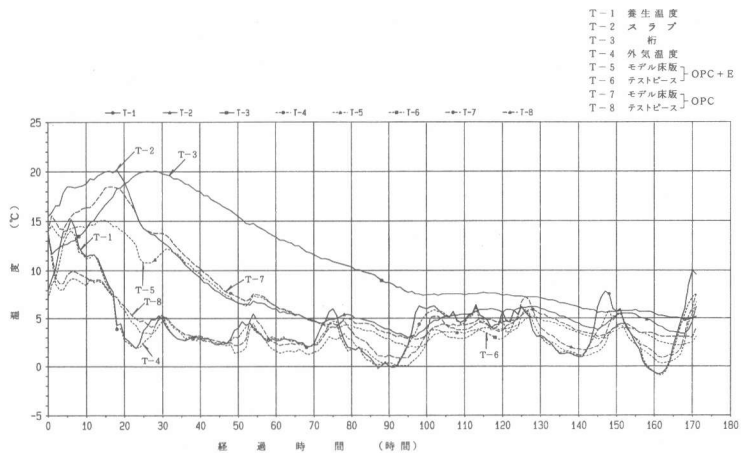


図-5 熱電対による温度測定結果

推察できる。また、同時に打設したモデル床版においても、外気温は打設時8℃、7時間後に最高温度の15℃さらに18時間後に5℃と変化しているが、発熱速度はOPC

が  $0.22^{\circ}\text{C}/\text{時}$ 、 $\text{OPC} + \text{Sg}$ では  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{時}$ であり桁本体と同様であった。

$\text{OPC} + \text{Sg}$ と $\text{HPC} + \text{Sg}$ について、圧縮強度と積算温度との関係を図-6に示す。

標準養生の場合はほぼ直線を示すが、現場養生の場合は若材令ではほぼ直線を示すものの、それ以降は直線関係にはない。これは現場養生温度の測定結果からみて、材令が進むにつれて日平均気温が  $13.4^{\circ}\text{C}$  (3日)、 $11.1^{\circ}\text{C}$  (6日)、 $10.1^{\circ}\text{C}$  (7日)、 $10.0^{\circ}\text{C}$  (10日)、 $8.5^{\circ}\text{C}$  (28日)、 $7.4^{\circ}\text{C}$  (91日)と次第に低くなった影響が、スラグの水和反応に表れているものと考えられる。

また、同一の積算温度では、 $\text{HPC} + \text{Sg}$ は $\text{OPC} + \text{Sg}$ に比べて圧縮強度は大きい。その差は、積算温度が大きくなるに従い小さくなっている。

次に実際の桁コンクリートにおいて施工した $\text{OPC}$ 、 $\text{OPC} + \text{Sg}$ についての標準養生、現場養生（桁上でビニールシート2枚で養生）、モデル床版および $\text{OPC} + \text{Sg}$ コンクリートと同時に打設した $\text{OPC}$ コンクリートのモデル床版についての圧縮強度と積算温度との関係を図-7に示す。

図-7によると、若材令では比較的良好な直線性を示すが、 $500 (^{\circ}\text{D}\cdot\text{D})$ 以上になると、 $\text{OPC}$ 、 $\text{OPC} + \text{Sg}$ 、 $\text{HPC} + \text{Sg}$

のいずれの現場養生でも直線が下方に折れている。現場養生の場合は図-6の試験練りの結果と同様に標準養生の場合を下回っている。積算温度が高い範囲で、スラグの置換の有無にかかわらず現場養生が標準養生に比べて小さいのは、水和に必要な水分の補給が不十分なことが28日強度の発現にかなり影響していると考えられる。

### 3. 塩分、中性化に対する耐久性試験

試験に用いたコンクリートは表-1に示した3種類の配合とした。

供試体の寸法・形状は、 $15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ の角柱供試体とし、高架橋中層床版(高さ8m)上に栈木を置き、中心間隔50cmをとって鉛直に静置した。

試験項目は、塩分浸透、細孔径分布および中性化深さである。測定材令は0(脱型直後)、6ヶ月、1、3、10年とし、現在1年までの結果が判明している。

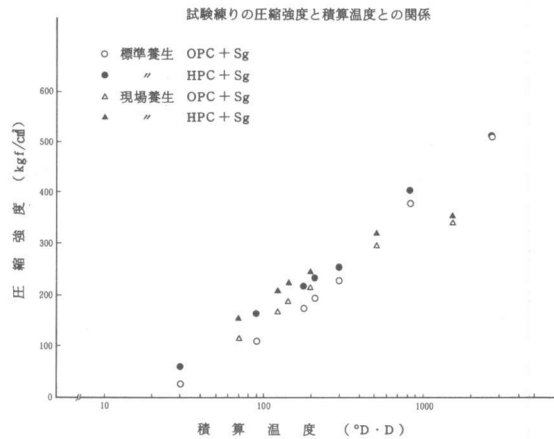


図-6 試験練りの圧縮強度と積算温度との関係

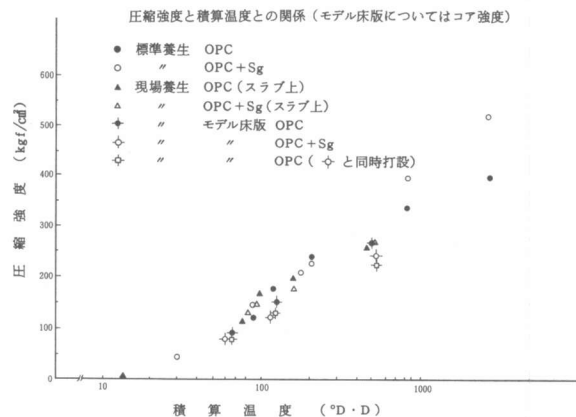


図-7 圧縮強度と積算温度との関係  
(モデル床版についてはコア強度)

供試体は、コンクリート打ち込み後、翌日脱型し2日間水中養生後、暴露試験に供した。

### 3.1 塩分浸透試験

塩分含有量測定に用いた供試体は、断面をスライスした部分を用いて、JCI規準〔硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法(案)〕に準拠して行った。

測定結果を図-8に示す。表面1cm部分の測定結果は表面に付着した塩素分も含んだものであるが、いずれの種類とも表面の塩分含有量は材令とともに増加している。しかし、これより内部においては練混ぜ時の塩素量を上まわらない結果であった。

### 3.2 細孔径分布

細孔径分布は、供試体より50mm塊を採取後2.5~5mmのモルタル塊に粗砕し、付着水をエタノールで置換し真空乾燥処理して、水銀圧入式ポロシメータで測定した。試料採取位置は供試体の高さ中央部の表面から1cm、2cmおよび断面中心部の3ヶ所とした。

暴露前の断面中心部における全細孔容量はOPC、OPC+SgおよびHPC+Sgとも $70 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{g}$ 程度であるが、材令1年ではOPCの場合よりも、OPC+Sg、HPC+Sgのスラグ添加したものの細孔容量の減少が著しい。また、細孔径分布については、いずれの場合も、水和の進行にともない比較的大きな細孔は少なくなるが、OPC+SgおよびHPC+Sgでは $1000 \text{\AA}$ 程度以下の比較的微細な細孔量が増大しているのに対して、OPCの場合は $10000 \text{\AA}$ の中程度の細孔量まで幅広く分布している(図-9)。

供試体の深さ方向でみると、細孔容量は中心部では表面よりOPCで15~20%、OPC+Sgで20%程度小さくなっている。

### 3.3 中性化深さ

中性化深さは、供試体を切断してフェノールフタレインアルコール1%溶液を噴霧して、その変色範囲を測定した。測定結果を図-10に示すが、OPC、OPC+Sgコンクリートは殆ど差が見られないが、HPC+Sgは小さい値を示している。中性化速度は若材令たとえば7日強度とも関連しているものと考えられる。

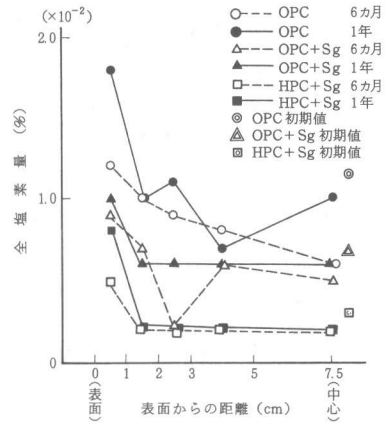


図-8 塩素量の分布

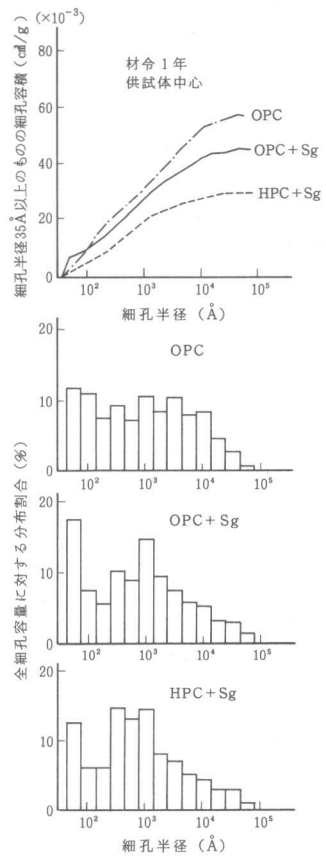


図-9 細孔径分布

#### 4. 結 論

実際のコンクリート桁を施工して、粉末度  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、7日活性度指数80級のGGBFSを用いたコンクリートに関して、次のようなことがわかった。

- (1) GGBFSコンクリートは、OPCの場合に比べて単位水量を減じ、施工性に富む。

しかし、OPCと同等の脱型時期となるような初期強度を得るための水結合材比は、若干小さくする必要があり、これには現場養生の条件がOPCよりも大きく強度発現性に影響することを考慮しなければならない。練り混ぜ操作は、必要とする貯蔵・計量に対する考慮を除けばOPCの場合と同様としてよい。

- (2) 圧縮強度は、材令7日まではOPCに比べて小さいが、28日以上  
の材令ではOPCに比べて大きくなり、長期強度に特長がある。また、桁、床版の型  
枠取外しに必要な圧縮強度  $140 \text{ kgf/cm}^2$  は冬期（日平均気温  $6 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ ）でも数日の養  
生で満足できる。
- (3) 初期材令においては、標準養生、現場養生とも積算温度と圧縮強度との関係は、良  
好な関係が見られる。
- (4) スラグ置換率の推定試験においては、良好な結果が得られた。
- (5) 塩分浸透に対する抵抗性は、OPCコンクリートに比べて良好である。細孔径分布は、  
OPCに対して、大径のものが少なく、微細径が多く、かつ全細孔量も小さい。
- (6) 中性化深さは、OPCコンクリートと同程度であるが、HPC+Sgコンクリートがより  
小さい結果となっている。これは、材令3日で暴露した結果であり、HPC+Sgに対  
してはこの程度の養生でよい結果であったが、OPC+Sgについては中性化対策の観  
点からもさらに養生を十分に行うことが重要である。

謝辞 本試験を実施するにあたり、旧国鉄大阪工事事務局、大豊建設(株)、大和生コン(株)  
および新日鐵化学(株)の皆様にご多大なるご協力を頂いた。  
ここに、心から御礼申し上げます。

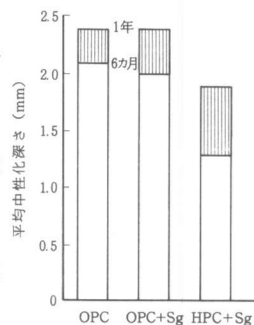


図-10  
中性化試験結果