

# 粒鉄を用いた超硬練り重量セメント硬化体 (*Cemented Heavy Slag*) の開発

天明敏行<sup>1</sup>・望月武<sup>2</sup>・横尾正義<sup>2</sup>・村上祐治<sup>3</sup>・江口正勝<sup>4</sup>・岩井正樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 ハザマ土木事業総本部ダム統括部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>2</sup>正会員 新日本製鐵(株)八幡製鐵所設備部土建技術グループ (〒804-8501 福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 ハザマ技術研究所技術研究部 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間字西向515-1)

<sup>4</sup>正会員 ハザマ土木事業総本部構造物統括部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>5</sup>ハザマ九州支店土木部新日鉄作業所 (〒808-0001 福岡県北九州市若松区小石本村地先)

港湾構造物などにおいて、躯体を水中へ沈下・安定させる場合の揚圧力による浮上がり防止の材料として、鉄鋼製造工程での副産物である粒鉄に着目し、これを用いた超硬練りの重量セメント硬化体 (*Cemented Heavy Slag*) の試験施工を実施した。硬化体の製造は、エージング処理をした粒鉄に砂、セメントと水を添加した後、バックホウで攪拌する方法で行い、ブルドーザで敷均し、振動ローラで転圧する方法で施工した。試験施工の結果、供試体の単位容積質量は約 $3.3\text{t/m}^3$ であった。また、3箇所のコアリングにより密実で良好なコアを採取することができた。

キーワード：粒鉄，重量セメント硬化体，浮上がり防止材，超硬練り，エージング

## 1. まえがき

港湾構造物などでは、揚圧力による浮上りを防止する材料として、一般にコンクリートが使用されている。浮上がり防止材料は所要の単位容積質量が確保されていることが重要であり、コンクリートよりも単位容積質量の大きい材料を用いれば構造物全体の大きさを小さくすることができ、施工時の仮設備用地などの縮小も含めて総合的にコストを削減する可能性があると考えられる。そこで、鉄鋼製造工程での副産物で密度が約 $5\text{g/cm}^3$ の粒鉄に着目し、これを用いた重量セメント硬化体 (*Cemented Heavy Slag*) の開発を試みた。

硬化体は設計上有利となるように重量を極力大きくし、汎用機械による合理化施工を行う目的で、単位水量の少ない超硬練りとした。製造方法では、骨材として用いる粒鉄の密度が大きいことから、ミキサの磨耗によるコストの増大が懸念されることと、コンクリートのように圧縮強度の品質の変動を厳しく管理する必要がなく、主として単位容積質量のみを管理すればよいことからより簡易にバックホウで攪拌することとした。また、運搬・打込みにあたっては、汎用機械による合理化施工法であるRCC (*Roller Compacted Concrete*) の技術を応用した。

骨材プラントやコンクリートプラントを使用しない

で現地発生材を有効利用し、構造物を急速施工する工法は、コスト削減、環境負荷低減の面から近年注目されており、例えばダム分野ではCSG (*Cemented Sand and Gravel*) 工法が適所に採用されている。

本工法の開発にあたっては、まず室内試験により配合を検討し、既存の技術を活用しながら実用化に向けた試験施工を実施した。

## 2. 使用材料

### (1) 使用材料一覧

粒鉄を用いたセメント硬化体の使用材料一覧を表-1に示す。

表-1 使用材料一覧

項目	仕様
セメント	高炉セメントB種 密度 $3.2\text{g/cm}^3$
水	水道水
粒鉄	新日鉄八幡製鐵所産
砂	コンクリート用粗砂・細砂 (北九州産海砂)

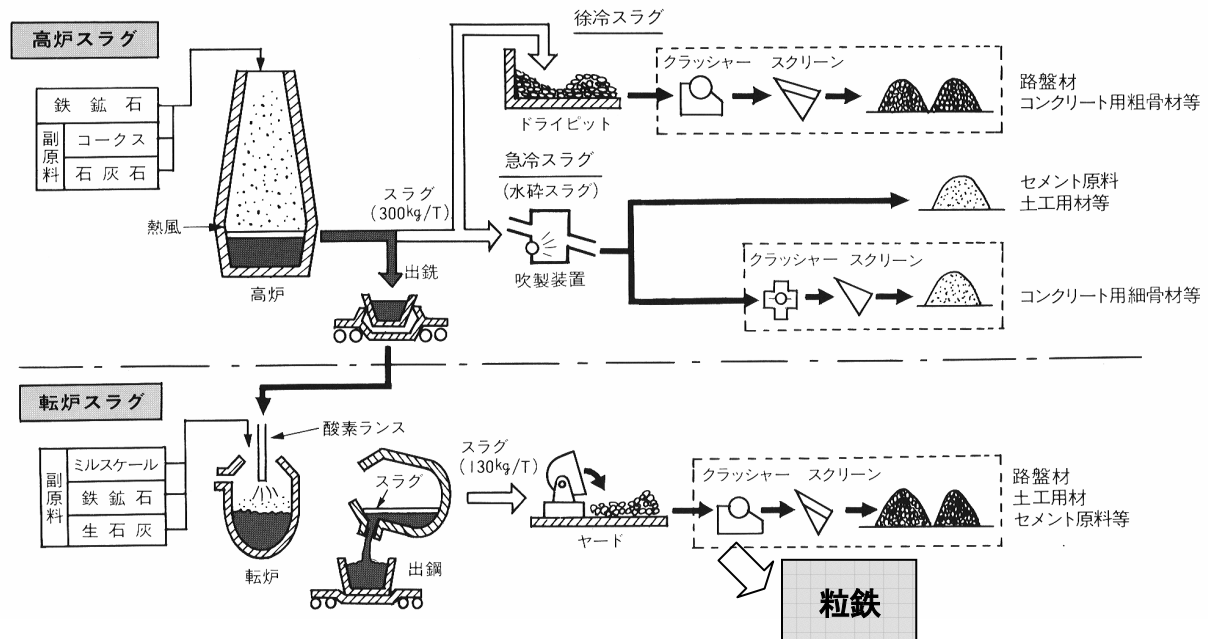


図-1 粒鉄の製造プロセス

## (2) 粒鉄について

粒鉄は鉄鋼製造工程での副産物である。製造プロセスを図-1に示す。高炉で作られる銑鉄の精錬工程で生成する製鋼スラグ（溶銑予備処理スラグ、転炉スラグ等）を破碎プラントにて破碎する際に磁選回収される鉄分が粒鉄であり、今回セメント硬化体に用いたものはこの粒鉄を5~70mmにふるい分けしたものである。

## (3) 骨材試験結果

粗骨材として用いた粒鉄とコンクリート用細骨材の粒度分布を図-2、3に示す。粒鉄は5~70mmにふるい分けしたものであるが、JIS A 1102のふるい分け試験の結果によれば、最大寸法は40mmであった。コンクリート用細骨材は、コンクリート標準示方書に示される粒度の標準<sup>1)</sup>を参考にし、粗砂と細砂を1:1で混合して用いた。その他の物理試験結果を表-2に示す。

粒鉄はコンクリート用骨材に比して密度が大きいいため、現場配合時における表面水率の差が補正する水量に与える影響が大きい。また、粒径5mm以下の粒鉄のJIS A 1109による密度吸水試験の結果、表乾密度は $2.90\text{g/cm}^3$ と小さく、吸水率は8.22%と大きい結果であったことから、細粒分についてはスラグが主成分であると予想された。セメント硬化体は、コンシステンシーが単位水量に敏感な超硬練りであることも考慮して、現場配合時には表面水量をより正確に把握するため、粒径5mm以下の細粒分の混入率を測定し、粒鉄全体の吸水率と密度を修正した。

## (4) 粒鉄のエイジング処理

粒鉄の製造過程では、靱性を高めるために精錬工程

において生石灰などの副原料を混入する。これら副原料の使用により、転炉スラグは含有する遊離石灰の水和反応などで膨張し、これを用いたセメント硬化体では膨張破壊を起こすことがある。このため、転炉スラグを用いる場合にはあらかじめ遊離石灰と水の促進反

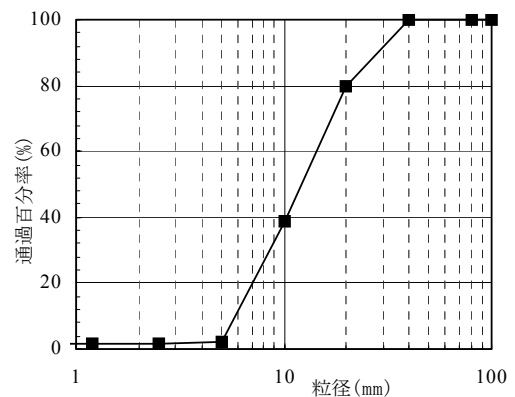


図-2 粒鉄の粒度分布

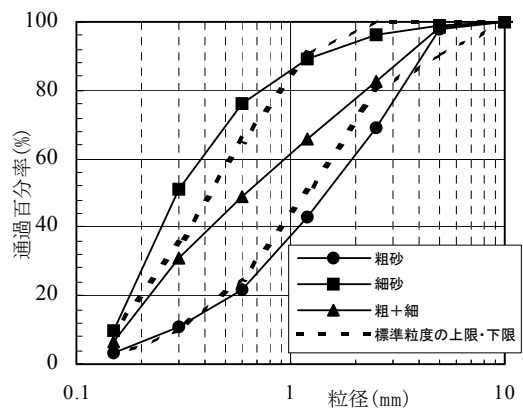


図-3 コンクリート用細骨材の粒度分布

応を実施しておく抑制方法がある<sup>2)</sup>。

粒鉄についても、転炉スラグと同様な成分を多く含有することから膨張することが予想されたため、図-4

表-2 粒鉄とコンクリート用細骨材の物理試験結果

		生コン用購入砂			
		粒鉄 70-5mm	粗砂	細砂	粗+細 1:1 (容積比)
JIS A 1109・1110	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	5.03	2.60	2.58	2.59
JIS A 1109・1110	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	5.14	2.63	2.61	2.62
JIS A 1109・1110	吸水率 (%)	2.25	1.33	1.14	1.24
JIS A 1104	単位容積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	—	—	1.69
JIS A 1104	実積率 (%)	53.7	—	—	65.2
	(振動法) <sup>(20秒)</sup> (%)	58.8	—	—	70.5
JIS A 1103	微粒分量試験 (%)	2.43	2.88	1.41	2.15
JIS A 1102	粗粒率	6.71	3.54	1.79	2.67

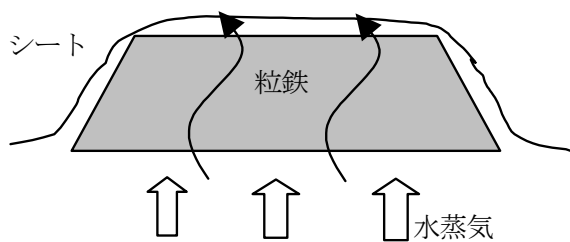


図-4 蒸気エージングの方法

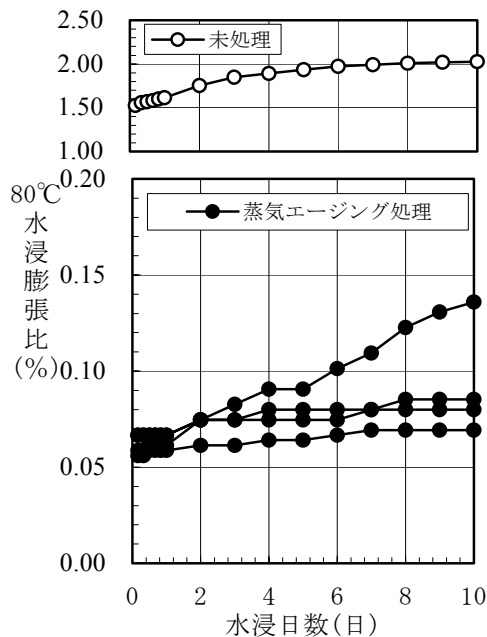


図-5 エージング時間別の水浸膨張試験結果

表-4 室内試験練りにより選定した示方配合

配合名	コンシステンシー 目標VC値 (秒)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					理論 密度 (kg/m <sup>3</sup> )
					水 W	セメント C	細骨材		粒鉄 G2	
							粗砂 S1	細砂 S2		
富配合CHS Hi-paste Type	20秒	1.5	65	40	125	192	419	416	2409	3562

粒鉄：密度5.0g/cm<sup>3</sup>

に示すような蒸気エージングを行った。

蒸気エージングを実施した粒鉄について、JIS A 5015 付属書2による鉄鉱スラグの水浸膨張試験を実施した結果を図-5に示す。粒鉄は蒸気エージングによって膨張率を著しく低下できることがわかった。

### 3. 試験練りと示方配合

エージング処理をした粒鉄を使用して室内試験練りを実施した。試験練りは水セメント比を110%とした貧配合と65%とした富配合の各ケースについて、VC値が20秒となる配合を選定した。また、粒鉄の膨張による破壊の抑制効果の確認を目的として、フライアッシュ混合の有無の各ケースを実施した。VC値とは、RCD用コンクリートのコンシステンシーを示す値であり、標準容器を用いた振動台式コンシステンシー試験で得られる試験値を秒数で表したものである。通常は20秒程度を目標とする場合が多い。

各ケースの選定された配合において、JIS A 1108による圧縮強度試験と粒鉄の膨張による破壊の確認試験を実施した。膨張性の確認試験は材齢28日において80℃の温水養生を4週間実施し、ひび割れの有無など外観を観察することによって実施した。貧配合でフライアッシュを混入しないケースにおいて、温水養生中にひび割れの発生が認められた。フライアッシュを混入する配合は、単位容積質量が小さくなり、設計上不利となることから、選定配合はフライアッシュを混入しない富配合とした。試験練り結果を表-3に、選定配合を表-4に示す。

表-3 試験練り結果

	フライアッシュ 混合率 F/粒鉄	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		単位容積 質量 (kg/m <sup>3</sup> )	膨張性 確認試験
		σ7	σ28		
貧配合 W/C=110%	0%	8.12	12.8	3,628	ひび割れ 発生
富配合 W/C=65%	0%	18.4	25.8	3,493	異常なし
貧配合 W/C=110%	10%	9.54	20.7	3,301	異常なし
富配合 W/C=65%	10%	19	31.2	3,257	異常なし

#### 4. 試験施工の方法

##### (1) 試験施工概要

試験施工は、各構成材料をコンクリート枀で計量、バックホウで攪拌、ダンプトラックで運搬、ブルドーザで敷均し、振動ローラで転圧する方法により実施した。試験施工のフローを図-6に示す。

##### (2) 製造方法

超硬練り重量セメント硬化体をバッチャープラントで練混ぜることは、密度の大きい粒鉄の使用によりミキサーが磨耗しコストがかかることと、コンクリートほどの厳格な品質管理をする必要のないことから、バックホウにより現地混合する方法で行った。現地発生土にセメントを添加して強度の増加をはかる工法としてCSG (Cemented Sand and Gravel) 工法がダムの上流締切りなどで採用されており、これを参考にしてコンクリートで枀を築造し、バックホウによる現地攪拌を実施した。製造状況を図-7, 8に示す。

各構成材料のうち、粒鉄と砂については構築したコンクリート枀において容積計量を行った。セメントは重量計量し、水は水槽に計量目盛を取付け、容積を管理してポンプで送水した。攪拌は50m<sup>3</sup>の枀に対して0.7m<sup>3</sup>のバックホウ2台と0.3m<sup>3</sup>のバックホウ1台を補助として使用した。

##### (3) 敷均し・転圧方法

攪拌した超硬練り重量セメント硬化体を0.7m<sup>3</sup>バックホウで10tダンプトラックに積込み、施工ヤードへ運搬した。施工ヤードは幅7m、長さ23mで、あらかじめ厚さ10cmの均しコンクリートを施工しておいた。

施工ヤードでは、15t級のブルドーザを使用してダンプトラック1台毎の材料を1リフト30cmの厚さで敷均した。敷均し終了後、RCD工法での転圧回数を参考にして、10t級の振動ローラにより無振動2回、振動12回の転



図-7 製造状況 (セメント投入)



図-8 製造状況 (攪拌)



図-9 敷均し状況

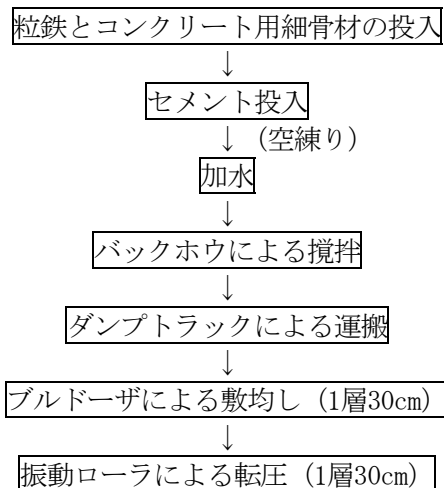


図-6 試験施工のフロー



図-10 転圧状況

圧を実施した。敷均し状況を図-9に、転圧状況を図-10に示す。



## 5. 試験施工の結果

### (1) 試験施工結果概要

試験施工当日の天候は、晴れ後一時薄曇りで地域気象台による日平均気温は25.6℃、最高気温は30.6℃であった。

セメント投入以降、各リフトの各段階で費やした時間を表-5に示す。1リフト目の加水はポンプの能力不足で長くなった。セメント投入から転圧完了までの時間は約3時間で、慣れるにしたがい時間は短縮した。攪拌の平均時間は46分、加水開始から転圧完了までの平均時間は151分であった。

表-5 各段階での時間 (分)

	1リフト目	2リフト目	3リフト目
セメント投入	25	37	35
加水	45	12	20
攪拌	48	60	30
撤出し	40	40	30
転圧	40	42	45
合計時間	198	191	160

### (2) VC値 (経時変化)

1, 2リフト目では各1箇所, 3リフト目では3箇所から試料を採取してVC試験を実施した。試験結果を表-6に示す。3リフト目の1試料 (VC値49.7秒) を除いてVC値は5.2秒~16.5秒と室内試験練り時の目標VC値20秒に近い値となった。全採取ケースの平均値は18.2秒, 変動係数は88.9%であった。

また, 1リフト目で実施したVC値の経時変化を図-11に示す。経時変化では, 攪拌直後に5.2秒であったVC値が約4時間後に約60秒へと増加した。RCD工法による実績の一例<sup>3)</sup>では, 練混ぜ後2~3時間後の転圧開始時のVC値は50~100秒程度であるが, 本試験施工当日の気温が比較的高かったことも考慮すると, VC値の経時保持性は良好であったと考えられる。

### (3) 沈下量

各リフト毎に振動ローラの転圧による沈下量を測定した。測定結果を図-12に示す。図において, 沈下率は

表-6 VC試験結果

リフト	NO.	空気量 (%)	VC値 (秒)	コンクリート温度 (℃)
1リフト	—	2.6	5.2	30.3
2リフト	—	—	10.0	30.6
3リフト	①	2.4	9.5	29.8
	②	—	16.5	—
	③	—	49.7	—

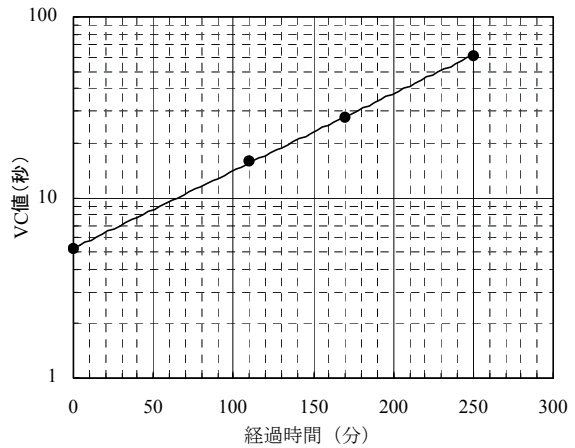


図-11 VC値の経時変化

は, 沈下量をブルドーザの敷均し厚さで除した値である。各リフトの平均沈下量は2~4cm程度であり, 沈下率は約10%であった。

RCD工法では理論密度に対する相対密度が98%以上確保されている場合に強度比90%程度となることが示されている<sup>4)</sup>。実施工の一例でこれに相当する沈下率はリフト厚さ1mに対して沈下量2.5cmの2.5%であり, これを全面にわたり超過する振動転圧の回数は12回であった<sup>5)</sup>。本試験施工の結果では4回転圧で締固めの大部分は終了しており, 沈下率の平均値も6.8%と大きかったことから適切な転圧回数を目安になると考えられるが, その後も若干上昇する傾向であることから, 別途詳細検討が必要と思われる。

### (4) 圧縮強度

各リフトで採取したサンプリング試料についてφ125mm×250mmの円柱供試体を作成し, JIS A 1108による圧縮強度試験を実施した。結果を図-13に示す。材齢28日の供試体において全ケースの平均値は22.1 N/mm<sup>2</sup>, 変動係数は11.4%であった。また, 試験時に測定した単位容積質量について, 全ケースの平均値は3.30 g/cm<sup>3</sup>, 変動係数は1.1%であり, 圧縮強度と比較して変動は大幅に小さい結果であった。

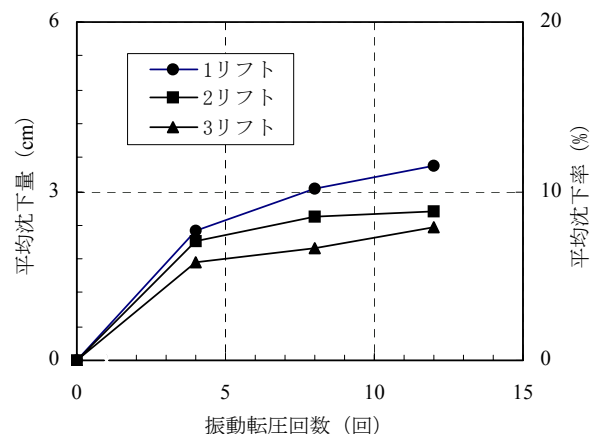


図-12 転圧回数と平均沈下量・率

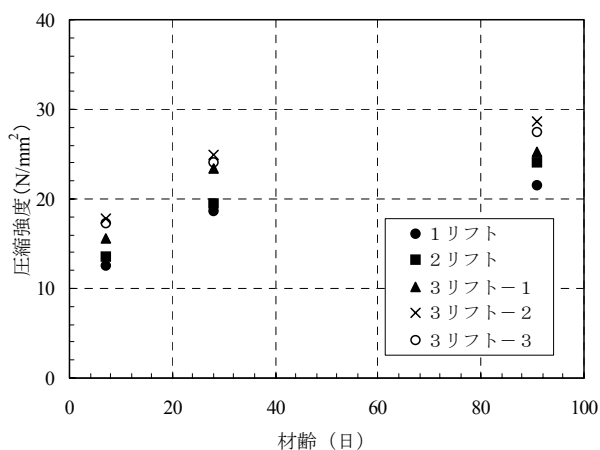


図-13 圧縮強度試験結果

### (5) コア評価

試験施工ヤードから3本のコアを採取した。写真を図-14に示す。また、コアの観察結果から表-7に示すような5段階に評価し、各コアに対し式(1)により計算したコア評価点<sup>6)</sup>をつけた。

$$\text{コア評価点} = \frac{a \times 5 + b \times 4 + c \times 3 + d \times 2 + e \times 1}{\text{全長}} \quad (1)$$

ここに、 $a \sim e$ は区分A～Eに評価された各部分の長さである。

3本のコア評価点はそれぞれ4.5, 4.9, 4.9点であった。各コアは良好で打継面においてレイタンス処理やモルタル敷などの処理をしていないにもかかわらず打継ぎ目がわからないほどであった。



図-14 コア供試体

## 6. まとめ

鉄鋼製造工程での副産物である粒鉄を使用した超硬練り重量セメント硬化体 (Cemented Heavy Slag) の開発を目的として室内試験および試験施工を実施した結果、以下の知見が得られた。コンクリートの代替材料とし

表-7 コア評価点

区分	コアの外観評価	評価点
良 (A)	表面が緻密で通常のダムコンクリートに比べてさほど遜色がない部分	5
ほぼ良 (B)	表面がややポーラスな部分、砂分が少し現われている部分	4
やや良 (C)	表面がポーラスな部分、モルタルがややほげ落ちている部分	3
不良 (D)	モルタルが粗骨材のまわりに十分に行き渡らず、豆板状になっている部分	2
極めて不良 (E)	粗骨材がバラバラな部分、またはモルタルが大きく欠損してコンクリートコアの外観を全く呈していない部分	1

ての可能性が考えられることから、今後はコア供試体の物性試験などを行うとともに、経年変化を継続的に調査していく予定である。

(1) 単位水量の管理をVC値で実施した結果、目標の20秒に対して5.2～49.7秒と多少のばらつきはあったが、平均では18.2秒であり目標値に近かった。また、高い気温の中で経時保持性は良好であった。

(2) 各リフトの平均沈下量は2～4cm程度であり、沈下率は約10%であった。また、沈下率の上昇傾向をみると締固めの大部分は4回転圧で終了しているが、その後も12回まで若干上昇していた。

(3) 材齢28日の標準供試体の圧縮強度は平均値で21.7 N/mm<sup>2</sup>、変動係数は21.7%であった。単位容積質量は全ケースの平均値で3.30 g/cm<sup>3</sup>、変動係数は1.1%であり、圧縮強度と比較して変動係数が小さかった。

(4) コアリングをした供試体の観察結果は概ね良好で密実なコアであった。

### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編, p.63, 2002
- 2) (株)沿岸環境開発資源利用センター：FSコンクリートの手引き, 1998.11
- 3) 原田譲二, 岡田輝夫：玉川ダムにおけるRCD工法, ダム技術, Vol. 3 増刊1, pp.40-55, 1985
- 4) 永山功ほか：標準供試体を用いたRCD用コンクリートの配合設計に関する検討, ダム技術, No.80, pp.21-30, 1993.5
- 5) 舎川徹ほか：RCD用コンクリートのリアルタイム締固め管理システムの研究開発, 土木学会論文集VI, 693巻, pp.105-115, 2001.12
- 6) (財)国土開発技術研究センター：RCD工法技術基準(案), p. p.47, 1989.8