

「自密実堆石混凝土」技術の特徴と施工上の留意点

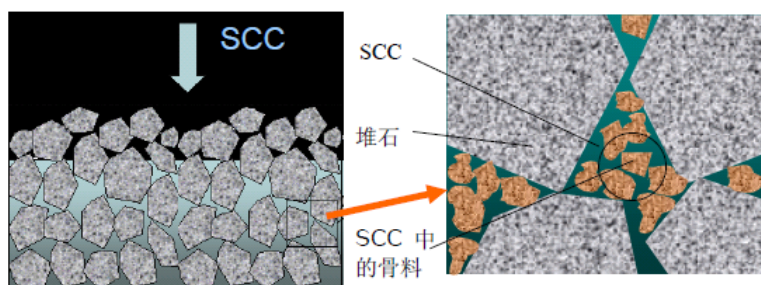
中華人民共和国における自己充てんコンクリートを用いた新しいダム施工技術の開発

中島 良光^{*1}・小原 孝之^{*2}・安 雪暉^{*3}・金 峰^{*3}

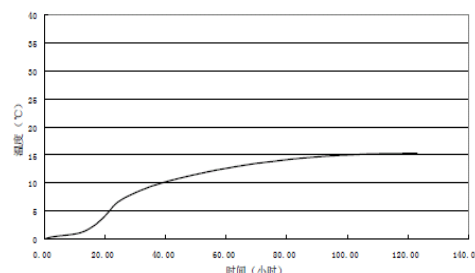
Rock filled Concrete, its technical properties and the notices for construction

Development of new dam construction method using self-compacting concrete in China

Yoshimitsu NAKAJIMA, Takayulki OBARA, Xuefei AN, Feng JIN



堆石コンクリートの施工イメージ



堆石コンクリートの断熱温度上昇曲線

研究の目的

「自密実堆石混凝土」とは 30cm～100cm 程度の石を型枠内に積んで、隙間に自己充てんコンクリート（SCC）を充てんする新しいマスコンクリートの施工法である。この技術は日本で開発された自己充てんコンクリートを有効に使い、低コスト、短工期でダムなどを施工する工法として清華大学の金教授、安教授らが考案し、清華・前田（岡村）先端建設技術研究センターで開発・実用化された新工法である。この新工法について、コンクリートの充てん性や力学的特性などを明らかにするとともに、品質を確保するための施工技術について基準を策定した。これにより、近年、いくつかの実施工が本格化しつつある。

中国においてはもちろん、日本においてもダムなどの工期短縮、低コスト化が社会的要請となっており、この工法が今後広がると考えられる。そこで本報告では、この技術の特長を明らかにするとともに、施工方法、施工上の留意点などを明らかにする。

技術の説明

自己充てん堆石コンクリート工法は堆石の中に充填する自己充てんコンクリートの性能が品質のキーポイントとなるため、その製造、施工、品質管理が極めて重要となる。そのため清華・前田（岡村）先端建設技術研究センターにおいて自己充てんコンクリートの配合設計、混和剤の成分調整、製造方法、品質管理方法について検討し、実用化した。また、堆石中に SCC を確実に充填させるために必要な堆石の粒度および投入方法などを検討し、施工基準を作成した。

主な結論

力学的試験および温度上昇量測定の結果、この工法で打設したコンクリートブロックは堆石と SCC 十分な強度を有し、かつ、温度上昇量も低く抑えられることから、ダムの施工に適していることを明らかになった。施工において不具合が生じると考えられる要因を分析し、不具合を生じさせないための留意点を施工基準としてまとめることで、この新しい技術がスムーズに展開・普及できるようになった。現在、複数の実プロジェクトで施工を実施し、効果をあげている。

* 1 海外 コトマレ LOT-2 作業所

* 2 前田（北京）経営諮詢有限公司

* 3 中華人民共和国 清華大学 土木水利学院 教授

中華人民共和国における自己充填コンクリートを用いた 新しいダム施工技術「堆石コンクリート」の開発

中 島 良 光^{*1}

小 原 孝 之^{*2}

安 雪 暉^{*3}

金 峰^{*3}

要 旨

「堆石コンクリート工法」は中国で開発された、自己充填コンクリート（SCC）を用いたマスコンクリートの新しい施工法である。同工法は構築された堆石中に自己充填コンクリートを充填してマスコンクリートを構築する合理化施工法である。本工法は低コスト、硬化熱による温度上昇の低減、高品質、急速施工の4つの利点を有する。室内試験結果から、堆石コンクリートの施工性と品質がすでに確認されている。堆石コンクリート工法は中国においてすでに数箇所の水力発電所に採用されている。そこで本報告では、この技術の特長を明らかにするとともに、施工方法、施工上の留意点などを明らかにする。

キーワード 堆石コンクリート／自己充填コンクリート／マスコンクリート

目 次

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. 堆石コンクリート工法の概要 | 4. 現場施工時の問題点と解決方法 |
| 2. 堆石コンクリートの性能試験とその結果 | 5. 堆石コンクリート工法の今後の展望 |
| 3. 堆石コンクリート工法の適用工事事例 | 6. まとめ |

DEVELOPMENT OF NEW CONSTRUCTION METHOD “ROCK FILLED CONCRETE” WHICH USE SELF-COMPACTING CONCRETE FOR DAM STRUCTURE IN CHINA

Yoshimitsu NAKAJIMA

Takayuki OBARA

Xuehui AN

Feng JIN

Synopsis:

A new type of construction technology namely “rock filled concrete(RFC)” has been developed in China, and it's a new construction method which uses self-compacting concrete(SCC) for mass concrete structures. RFC is constructed by pouring the self-compacting concrete into the rock-fill body. RFC construction technology has four advantages: low cost, low hydration heat, high quality, and high efficiency. Laboratory test results show that by using this technology a dense and high strength concrete structure can be easily constructed. It has been succeeded in application of several hydropower projects, the possibility of new types of dam based on this technology are investigated.

*1 海外 コトマレLOT-2作業所

*2 前田（北京）経営諮詢有限公司

*3 中華人民共和国 清華大学 土木水利学院 教授

1. 堆石コンクリート工法の概要

1.1 堆石コンクリート工法の開発経緯

ダムコンクリートに代表されるマスコンクリートに対しては、コンクリートの硬化熱低減とコスト縮減のためにセメントの使用量を極力低減する必要があるが、一般に、単位水量を減少させる方法と、大粒径の粗骨材を採用して単位骨材量を増加させる方法がとられる。前者は、RCD（Roller Compacted Dam-Concrete）工法に代表される固練りコンクリートを使用する方法である。しかし、同工法は締固めに大容量の振動ローラーが必要となり、コストアップの原因となる。一方、大粒径の粗骨材の採用に関して言えば、ダムコンクリートの粗骨材の最大粒径は 150mm に達するが、練混ぜ及び締固め品質の確保の観点から、さらに大きな粗骨材を用いることは困難である。したがって、中国の中小型ダムの建設工事においては、打設したコンクリート中に粒径 150mm 以上の巨石を配置する粗石コンクリート、埋石コンクリート工法が採用される。しかし、これらの工法は人力作業であり、多くの熟練作業員を必要とし、品質は個人の技量に左右されるところが大きいため、現場での安定した品質の確保が困難である。さらに、近年の人件費の高騰も影響し、これらの工法はますます優位性を失ってゆくと予想される。

中小型工事中のマスコンクリート施工におけるこれらの状況を克服するために、中国清華大学は堆石コンクリート工法を開発し、中国特許《堆石コンクリートダム施工方法》（特許番号 ZL03102074.5）を取得した。その後、2003 年に設立した清華一前田研究センターにおいて同工法の研究・開発を継続し、2008 年にはプレパックド方式の施工法に関する中国特許《普通型堆石コンクリートダム施工方法》（特許番号 ZL200710100315.3）を申請・取得し、さらに、ポストパックド方式に関する《抛石型堆石混凝土施工方法》（特許公開番号 CN101144279）を申請し、現在公開中である。

1.2 堆石コンクリート工法の概要

堆石コンクリートは、一定の粒径範囲内にある岩塊、玉石を敷き詰めて空隙を有する堆石体を構成した後に、堆石体表面から品質要求を満足した自己充填コンクリート（Self-Compacting Concrete, 以降SCCと言う）を流し込み、SCCの自重とその自己充填性によって、締固めをすることなくSCCが堆石体の間隙に充てんされ、マスコンクリートとして構成されるものである。堆石コンクリートの概念を図 1.1 および図 1.2 に示す。堆石コンクリートの基本力学性能は普通コンクリートと同等以上であるとともに、コンクリート硬化時の発熱が低く、温度応力に対して有利である点に利点がある。また、在来工法に比較して、施工速度が速く、工事費用も低減できる点に大きな利点がある¹⁾。

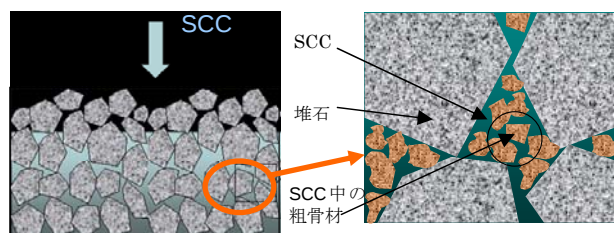


図-1 堆石コンクリート施工及び構成の概念



図-2 堆石コンクリート施工概念及び断面切断状況

1.3 堆石コンクリート工法の特徴と利点²⁾

堆石コンクリート施工技術は新しいマスコンクリート施工技術であり、大量の石を材料として用いるとともに、SCCの性能を生かすことによって、低発熱性を実現したものであり、以下の特徴と利点を有している³⁾。

(1) 低単位セメント量及び低発熱

設計強度 15～25N/mm²のコンクリートに対する単位セメント量は一般に 200～350kg/m³であるが、堆石コンクリートは 70～100kg/m³で程度であり、おおよそ、RCDコンクリートの単位セメント量に相当し、普通コンクリートに比較して 70%程度のセメント量を低減することができる。堆石コンクリートには大量の石が含まれ（体積比率 55%程度）、本コンクリートの主な構成材料となると同時に、体積比率で 45%程度の空隙をSCCによって充てんするが、SCCの配合を低セメント量とすることによって、更なる低セメント量を実現できる。実工事において測定されたマスコンクリートの硬化熱による温度上昇は 10℃程度あり、温度応力対策を必要としない。

(2) 充填性と強度

SCC の配合設計を適切に行うことにより、所定の充填性能と石との間の表面付着強度を有し、且つ、密実なマ

スコンクリートを形成することができる。実際の工事における計測結果がそれを証明しており、堆石コンクリートの実測密度は普通コンクリートのそれよりも高く、所定の強度と水密性を有していることが分かっている。

(3) 高施工速度と工期効果

堆石コンクリートに用いる設備及び機械は、通常のコンクリート施工に用いている設備及び機械で施工することができる。また、コンクリートの生産量、打設量を低減できるだけでなく、SCC の自己充填性により締固めが不要であるため、コンクリートの締固めの工程を省略することができる。

(4) コスト縮減効果

実工事への適用事例結果から、堆石コンクリートは大量の石を含み、低単位セメント量であり、施工が簡便であることから、その全体コストは通常のマスコンクリートに比較して明らかに有利であることがわかっている。

(5) 堆石収縮安定性

堆石コンクリートは、その内部に粒径の大きな石が相互に接触した骨組み構造を有しており、良好な堆石安定性を有するとともに、体積収縮が小さく、高いひび割れ抵抗性を有する。

(6) 高い層間せん断強度、打継処理工程の省略

堆石コンクリートはその打継面に大粒径の石が露出した形になっている。この石のかみ合わせ効果により、打継面のせん断強度は向上し、打継処理工程を省くことができる。

(7) 高い適用性

堆石コンクリート工法は既に、北京、河南、四川、貴州、新疆、江西、山西等の省区で実際の工事に適用され、堆石には岩塊及び玉石が用いられ、SCC の粗、細骨材には人工碎石・砕砂及び天然石・砂が用いられ、セメント・フライアッシュは当地の生産品が用いられている。すなわち、堆石コンクリートには中国各地の異なる材料を適用することができ、高い適用性を有していると言うことができる。

(8) 環境

堆石コンクリートには、大量の石とフライアッシュを用いてセメント使用量を大幅に減少できるとともに、締固めに用いる機器を省略することができる。在来工法と比較して、二酸化炭素の排出量を減少し、使用エネルギーを減少することができる。すなわち、環境保護に適した工法であると言うことができる⁴⁾。

1.4 堆石コンクリート工法の施工手順

堆石コンクリート工法の施工フローを図-3に示す。

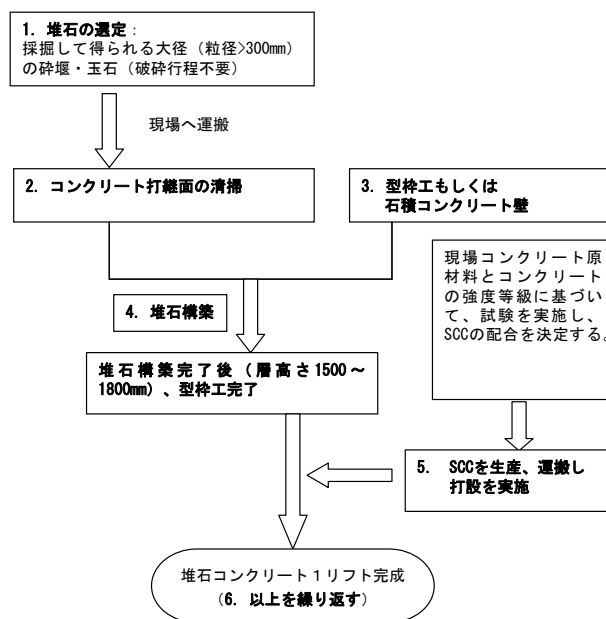


図-3 堆石コンクリート施工フロー

(1) 堆石の選定

堆石コンクリートに用いる堆石は、原則として、粒径300mm 以上とし、堆石の輸送、配置の可否を考慮した上でできる限り大きな石を選定するものとする。

(2) 打設面の処理

コンクリート打継面の処理は、SCC 表面のレイタンスを完全に取り除き、不純物が残らないように清掃する。

(3) 鉛直型枠・石積みコンクリート構築壁

SCC の型枠は普通コンクリートのそれよりも高い安定性と剛性、水密性を必要とする。外観に特に特殊な要求が無い場合には、石積みコンクリート構築壁を型枠の代替とすることができ、型枠の安定性、剛性、水密性等の問題を解決することができる。

(4) 堆石の配置

堆石が自然に積み重なるように配置すればよい。人力で積み重ねるのがもっとも密実になり、経済的にも有利である。

(5) SCC の生産と打設

バッチャープラントで SCC を製造した後、打設位置に輸送し、打設を行う。締固めをすることなく、密実な充てんが可能である。打設方法としては、ポンプ車を用いる方法と、ポンプ圧送とフレキシブルホース、バックホウ、縦シュート鋼管等を組み合わせる方法がある。生産時に管理される SCC の品質は一般に、スランプフロー

630mm±80mm、V ロート流下時間 5〜20 秒である。

(6) 連続循環施工による多リフト連続打設

堆石コンクリートの各リフトの打設高さは 1,500mm〜1,800mm を超えてはならない。施工能力の許す範囲内で連続循環施工を行うことができる。前リフトの打設完了 4 時間以内に堆石の配置、SCC の打設の工程を繰り返すことで、連続循環施工が実現され、施工速度が大幅に上昇する。

2. 堆石コンクリートの性能試験とその結果

2.1 堆石コンクリート工法充てん試験

(1) 堆石コンクリート充てん試験方法

堆石コンクリート工法の信頼性を検証することを目的に図-4に示す大型の充てん試験型枠を作製し、充てん試験を行った。アクリル板で構成した 500mm×500mm×2000mm の型枠内に粒径 150mm〜200mm の石をランダムに敷き詰め、片方の開口から SCC を充てんした。堆石体の空隙率は 48%であった。また、SCC の粗骨材には最大粒径 10mm の河砂利を用いた^{5,6)}。3 種類の試験を行った。試験 1 は SCC の堆石体中での流動性能を確認する目的で実施したものであり、開口側の水平方向 500mm の範囲内には堆石体を配置せず、SCC が堆石体を通して側方に最長 1500mm 流動して充てんする、SCC の水平充てん性能を検証した(図-5a)。試験 2 は図-4に示す堆石体の配置状況に対して、開口部の堆石体の表面化から SCC を充てんする基本的な充てん方式を模擬した。試験 3 は堆石体を通過した後の SCC の品質を検証するものであり、開口部より遠い部分の型枠長手方向 500mm の範囲に堆石体を配置せず(図-5b)、堆石体を通過した後の SCC をサンプリングし、その品質を検証した。

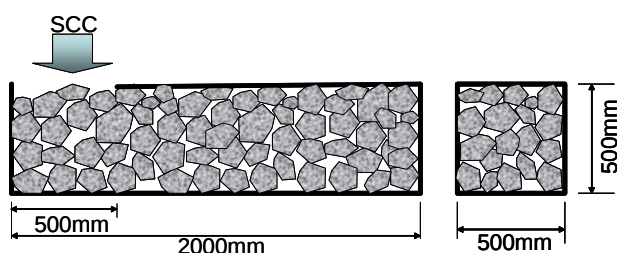
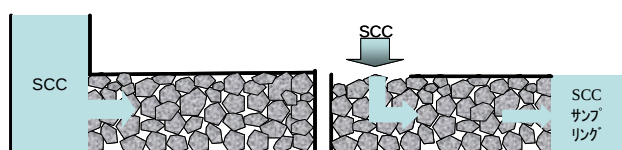


図-4 充てん試験型枠と堆石体配置状況



a)試験 1 (SCC 側方充てん) b)試験 3 (SCC 堆石体通過)

図-5 充てん試験の概要

(2) 堆石コンクリート充てん試験結果

図-6に示すように、SCCは堆石体中で打設点を頂点とする斜面を形成し、SCCの打設にともないそれが前進し、徐々に堆石体全体に充填されていく様子が確認された。図-7は試験 1 のSCC打設試験後に型枠を脱型した状況である。同試験体の表面の状況から、SCCが堆石体の空隙に良く充填されていることが分かる。



図-6 SCCの流動状況



図-7 試験後の堆石コンクリート (試験 1)

さらに充てん状況を把握するために、試験体の内部状況の観察を行なった。試験 1 の試験体を用いて曲げ試験を実施し、破断面を観察し、SCCの充てん状況を確認した。曲げ試験の状況を図-8に、破断面の状況を図-9に示す。破断面の状況から、SCCが堆石体の空隙に良く充てんしていて、空隙等の未充てん部分がないことが分かる。また、SCC自身の最大径 100mmの粗骨材も均一に分布しているのが分かる。曲げ破壊後の破断面は平滑であり、堆石塊は破断面において断裂している。これより、SCCと堆石骨材石の間の付着力は極めて高く、骨材表面のSCCにブリージングが発生していないことが分かる⁷⁻⁹⁾。



図-8 試験 1 試験体の曲げ試験状況



a) 左側破断面 b) 右側破断面
図-9 曲げ試験後の試験 1 試験体の破断面

2.2 堆石コンクリート性能試験

(1) 堆石コンクリート試験体

堆石コンクリートの力学性能を確認するため、室内施工試験を行なって試験体を作成し、力学試験に供した。石の平均粒径は 25cm 程度であり、SCC の設計強度は 15N/mm^2 (実際の 28 日強度は 17.2N/mm^2) とした。試験体の寸法は $2\text{m} \times 1\text{m} \times 1.8\text{m}$ 、3 層に分けて打設を行い、各層の高さは 0.6m とした。SCC の打設にはポンプ圧送を模擬した方法を採用した。施工試験の概要を図-10に示す。一層目の打設完了後、直ちに二層目を打設し、その後、一・二層が材令 3 日に達した時点で三層目を打設した。一層目と二層目の接合面はフレッシュコンクリート同士の打継面を模擬したものであり、二層目と三層目の接合面は施工継目を模擬したものである。



図-10 試験施工の概要

(2) 試験方法と試験体部位

施工試験後の堆石コンクリートを切断し、4 体の試験体を切り出した。図-11に試験体の切断位置を示す。各試験体の寸法は $500\text{mm} \times 600\text{mm} \times 900\text{mm}$ 、試験体は施工試験後に切り出し、普通部位（打継目を含まない）、施工継目を含むもの、フレッシュ状態での打継目を含むものの 3 種類とし、それぞれに関して性能試験を実施した。圧縮試験に関しては、すべて普通部位から切り出した供試体

によって行い、3 体一組とした。施工継目を含むもの、及びフレッシュ状態での打継目を含むものに関しては浸透試験を実施した。圧縮試験に用いた直方体試験体の寸法は $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。透水試験に用いた試験体は上面が直径 175mm、底面が直径 185mm、高さ 150mm の円柱体である。

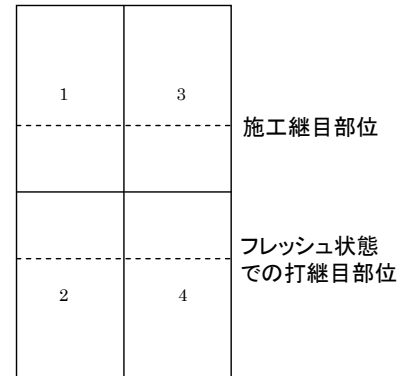


図-11 試験体の切断位置

(3) 圧縮強度

圧縮試験は中国規準《水工コンクリート試験規定》(DL/T 5150-2001)に基づいて実施した。圧縮試験結果を表 1に、試験より得られた代表的な応力-ひずみ関係を図-12に示す。試験の過程において、鉛直方向に岩石を通過する縦方向のひび割れ、岩石と SCC の接合面に沿って発達するひび割れが見られた。破壊後の試験体の状況を図-13に示す。

表1 堆石コンクリート切出し供試体圧縮試験結果

供試体番号	圧縮強度 (MPa)	平均強度 (MPa)
CN1-1	22.2	16.8
CN1-2	13.2	
CN1-3	15.1	
CN2-1	11.6	18.9
CN2-2	23.2	
CN2-3	21.9	
CN3-1	21.3	15.4
CN3-2	14.4	
CN3-3	10.4	
平均	17.0	

(4) 透水試験

透水試験は、《水工コンクリート試験規定》(DL/T 5150-2001)に準拠し、高強度自己充填モルタルで切り出した試験体を補修したものを標準透水試験体として、図-14に示すフローに従って実施した。

普通部位、施工継目を含むもの、フレッシュ状態での打継目を含むもののそれぞれに対して試験を行った計測結果を表 2に示す。普通部位とフレッシュ状態での打継目を含むものに関しては、その透水等級は W30 以上に達し、

一般水工構造物の標準を大きく上回った。水密性が劣ると見られる施工継目を有するものに関しても透水等級はW14に達し、一般の要求を満足するものであった。確実に充てんされた堆石コンクリートは良好な耐透水性能を有することが分かった。

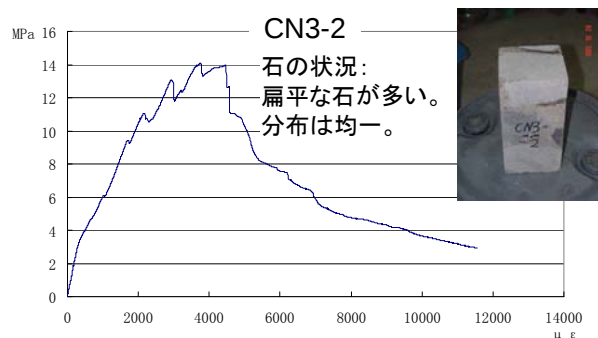
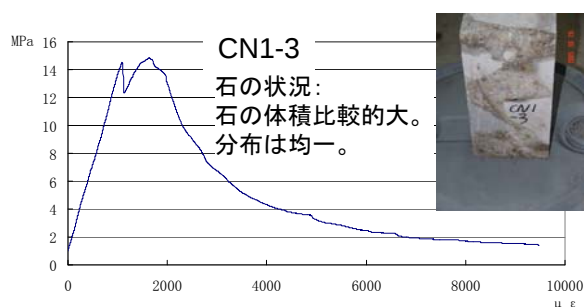
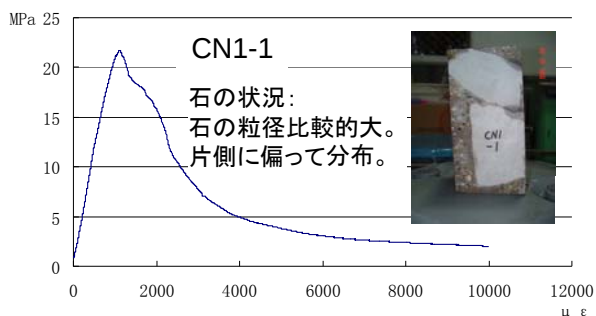


図-12 圧縮試験結果の応力-ひずみ関係



図-13 供試体破壊状況



図-14 堆石コンクリート切出し供試体浸透試験

表2 堆石コンクリート切出し供試体浸透試験結果

供試体部位	普通部位	施工継目	フレッシュ状態 打継目
浸透等級	W35	W14	W31

(5) 断熱温度上昇試験

堆石コンクリート内部の断熱温度上昇はSCCの硬化熱が引き起こすものであり、堆石コンクリートは、内部のSCCが周囲を大径の石に囲まれた構造であるとともに、その体積比率を適切に設定した後に、SCCは発熱し、堆石は発熱しないものと仮定することによって堆石コンクリート全体の温度上昇特性を想定することができるものと予想される。等級C20のSCC（単位セメント量約 200kg）単体の断熱温度上昇特性を図-15に示す。最大温度上昇量は35℃である。

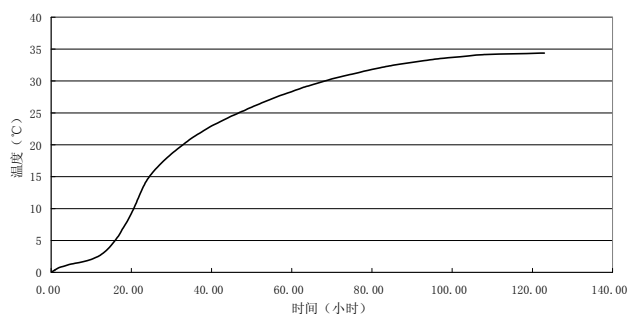


図-15 SCC断熱温度上昇曲線（実測値）

一般に、堆石コンクリート中の堆石とSCCの体積比は0.6 : 0.4であるため、本SCCを使用した堆石コンクリートの断熱温度上昇特性は図-16のように計算され、最大温度上昇量は約15℃である。

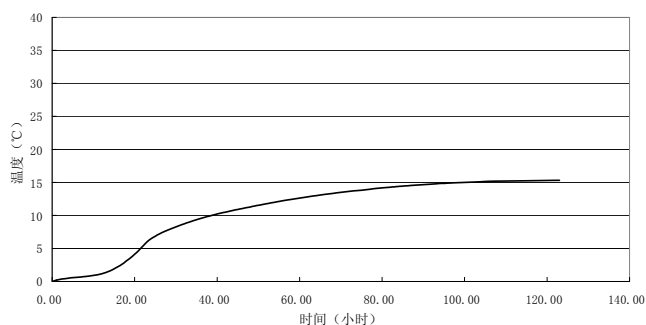


図-16 堆石コンクリート断熱温度上昇曲線（計算値）

北京市内の貯水池工事の施工時において、堆石コンクリートの内部温度を、光ファイバーを用いて実測した。施工時期は2005年9～10月であり、一リフトの寸法がおおよそ20m×10m×1.5mである。実測結果から、最大温度上昇量は10℃であり、堆石コンクリートの温度上昇量が極めて小さいことが確認された。

3. 堆石コンクリート工法の適用工事事例

3.1 国網河南宝泉揚水式発電所工事

(1) 工事概要

宝泉揚水式発電所は河南省輝縣市薄壁鎮大王廟から2.4kmの溪谷上に位置し、発電所の主要な構造物は上下ダムに加えて、導水路、地下発電所及び地上制御ステーション等から成る。上ダムはコンクリートフェーシングロックフィルダムであり、下ダムは谷河上に既に建設済みの宝泉ダムであるが、宝泉ダムは堤高を増し、補強をする必要があった。発電所発電設備の容量は120万kW、年発電量20.1億kW・h、年揚水電力消費量は26.42億kW・h、総合効率は0.76である。発電所建設後、500kVが河南省電力網に加入し、電力網におけるピーク調整、谷間補充の役割を担うと同時に、事故時の補助、周波数調整、位相調整等の機能を持つ。

本工事中において、上貯水池副ダム、下貯水池主ダム及び護岸等に粗石コンクリート工法が採用されていた。しかし、上貯水池副ダムの施工において施工品質や施工効率等に問題を解決する必要があった。本上貯水池副ダムを例にとると、約100人の工夫が一日三交代の24時間施工を行ったとして、約200m³の粗石コンクリートが施工できるが、施工速度は遅く、工期は著しく遅延した。所期の工期に達した時点で全体の1/2の工事が完了したのみであり、工期は倍に遅延することが予想された。毎日120万kWでピーク調整運行5時間、総合効率75%と仮定して経済的な損失を試算した結果、一日の工程遅延によって180万円の発電収益の損失を生むことが判明した。

以上を踏まえて、同事業発注者は堆石コンクリートの採用の検討を開始し、堆石コンクリートの現場施工試験を実施し、堆石コンクリートの施工効率と施工品質を確認した。

(2) 現場施工試験の実施

堆石施工からSCCの充てんに至るまでの作業は、ダンプトラック、バックホウ、コンクリートプラント及びトラクタジテータ等の設備を用いて行った。これら設備の操作に関わる人員以外には、ごく少数の作業員を必要とするのみであった。堆石施工状況を図-17に、SCC充てん状況を図-18に示す。

堆石コンクリートの現場試験として、密度試験、コアボーリング採取及びコア孔を用いた透水試験等を行った。試験結果を表3に、現場密度試験実施状況を図-19に示す。透水試験は深さ1.5mの二つの孔に対して実施し、BW-150型ポンプを用いて注水した。試験時の水圧は0.3MPaであった。何れにおいても良好な試験結果が得られ、発注者、設計者の認可を得ることができた。



図-17 ダンプトラック及びバックホウによる堆石の施工



図-18 バックホウによるSCCの打設

表3 堆石コンクリート現場試験結果一覧

	単位体積重量	コア強度	透水試験
測定平均値	2415 kg/m³	23.7MPa	1.33Lu
合格規準	2350 kg/m³	15MPa	<3Lu <5Lu



図-19 現場密度試験実施状況

(3) 副ダムへの適用

現場試験によって発注者、設計者、監理者及び施工者の認可が得られた後に、さらなる論証と施工計画が実施され、堆石コンクリートの宝蓄工事副ダムへの正式な適用が開始された。同工事への堆石コンクリートの適用に先立ち、《河南国網宝蓄揚水式発電所工事堆石コンクリート施工技術要求》が編集された。《技術要求》中では、堆石コンクリートは発電所上貯水池（C1 工区）、下貯水池（C2 工区）の粗石コンクリート、建築物構造基礎、埋め戻し堤防、各種粗石コンクリート工事の代替とできるものであるとした。さらに、《技術要求》中では、原材料、SCC 配合設計、検査と生産、堆石コンクリートの施工及び検査等について、詳細な要求事項を明示された。

工事において 4000 m³の堆石コンクリートが構築されたが、施工者は堆石コンクリートの施工技術を十分に習得し、スムーズな施工を実施できたのみならず、品質面においても、発注者、設計者、監理者の好評を得ることができた。

(4) 堆石コンクリートの施工状況

堆石コンクリート施工技術は現設計の粗石コンクリートの代替として用いられ、副ダムの高さ 773m よりも上の部分から 779m の高さまで用いられた。図-20 に適用部位の概要を示す。

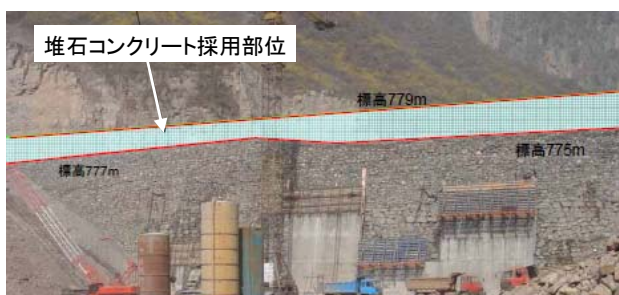


図-20 副ダムの堆石コンクリート使用部位と分量

副ダムにおける堆石コンクリートの施工の現場の状況を図-21、図-22 に示す。堆石の施工にはダンプトラックとバックホウを併用した。コンクリートプラントは副ダムの下流に位置し、生産された SCC はタワークレーンにより直接打設した。倉面には 5～6 人の作業員が打設面の清掃、型枠用の粗石コンクリート壁の構築等の作業に当たった。2 リフト分の施工指導を終えた段階で、作業員は堆石コンクリートの施工技術を充分掌握し、単独でも堆石コンクリートの施工を実施できるようになり、所定の施工品質も確保できるようになった。堆石コンクリートの品質管理の要点は二つある。一つは、石の粒径を管理し、粒径の小さな石を堆石に用いないことである。二つ目は、要求品質を満足する SCC を生産することである。SCC の打設において締固めが不要であるため、マスコンクリートの施工に対して大幅な施工の簡略化が可能であり、施工効率を大幅に向上することができる。上述の二つの要求を満足することにより、SCC が堆石中の間隙に確実に充てんされる。



図-21 副ダムの施工状況



ダンプトラックによる堆石の投入 クレーンホッパーを用いた SCC 打設

図-22 堆石コンクリート施工状況



図-23 本体工事完成後の副ダム

宝泉工事副ダムの検査規準に基づき、堆石コンクリートの現場密度試験を実施した。結果は工事の仕様を満足した。検査結果を表4に示す。

表4 堆石コンクリート現場試験結果一覧

試験項目	試験結果
SCC 体積比	42.8%
堆石体積率	53.2%
乾燥密度	2401 kg/m ³
空隙率	4.0%
合格規準	乾燥密度 $\geq$ 2350 kg/m ³

(準拠規準 SD120-84)

(5) 堆石コンクリートの施工効率

宝泉工事の現状を踏まえると、二つのコンクリート練混ぜシステムを有しているが、その最大練混ぜ能力はそれぞれ 1.5 m³、0.5 m³であり、実際の生産能力は 1.2 m³、0.4 m³である。2 分間に 1 バッチでの SCC 生産が可能であると仮定すると、それぞれ毎時間 36 m³、12 m³の SCC 生産が可能であり、SCC の充てん率を 45%と仮定するとそれぞれ毎時間 80 m³、27 m³の堆石コンクリートが施工可能である。したがって、1 施工パーティー (8 時間施工) が 1 日当り 640 m³、216 m³の堆石コンクリートを施工することが可能である。本現場においては、堆石コンクリートの施工効率はコンクリートプラントの生産能力によって決まっている。したがって、コンクリートプラントの練混ぜ能力を向上することによって、施工効率のさらなる向上を図ることも可能である。

3.2 三峡総公司四川向家ダム水力発電所工事

(1) 向家ダム水力発電所工事の概要

向家水力ダム水力発電所は三峡総公司が金沙江下流部において投資開発している物件であり、三峡上流の金沙江の離段式発電所の最も下流に位置する水力発電所建設工事である。ダムの目的は主に発電であるが、同時に航路の改善、洪水調整、灌漑、並びに砂防、溪洛渡水力発電所の反調整等の機能を有する。主な構造物は、重力式コンクリートダム、左岸ダム後方建屋、右岸地下引水発電システムの反調整等の機能を有する。主な構造物は、重力式コンクリートダム、左岸ダム後方建屋、右岸地下引水発電システム及び左岸河中垂直シブプリフト等によって構成される。重力式ダムのダム高 162m、ダム頂長 909.26m、発電所は右岸地下と左岸ダム後方にそれぞれ配置され、容量 750MW の発電装置を各 4 台ずつ備えており、総容量 6,000MW を誇る、中国国内で三番目となる水力発電所である。2004 年～2005 年は計画を実施し、2006 年～2008 年は左岸第一期工事を実施、2008 年 11 月に主河床転流後、第二期工事に入り、今後は、2012 年 10 月ダム貯水を開始後、右岸地下発電所の 2 台の発電機の稼動を開始し、2015 年 6 月にはダム後方の最後の 1 台の発電機が稼動開始し、竣工を迎える予定である。



図-24 本体工事完成後の副ダム

(2) 堆石コンクリート工法のケーソン内部充てん工事への適用

向家ダム水力発電所工事におけるケーソン工事は 23m × 17m の断面を持つ 10 函のケーソン群を設置するものである。頂部の高度は 270m。初めに、擁壁及び縦方向仮締め切りの基礎に対して基礎掘削を行い、第二期仮締め切り構造の一部分を構築。仮締め切り基礎岩着部の処理及び工期に関する問題を解決した。ケーソン 1 号～10 号は、第一期施工の堆石仮締め切りと L 型で、且つ、ずらしながら配置する形になり、隣接するケーソン間の間隙は 2m である。ケーソン単体の内部は隔壁によって 6 つの部屋に分割され、各部屋の内空は 5.2m × 5.6m (400mm × 400mm のハンチを含む) である。外壁厚は 2m、隔壁厚は 1.6m、最大沈設深さは 57.4m (9 号)。

ケーソン内部充てん工事はケーソンの沈設が完了した後に行われる最後の施工工程である。元設計は、普通コンクリートを用いて充てんする仕様であった、コンクリートの硬化熱の制御や、各リフト高さ 4m のコンクリートを打設し、且つ、内部から振動締固めを行わなければならない等の問題を解決する必要があった。また、理想的な状況下における本工程の設計施工時間は一つのケーソンに対して 35 日以上かかるというものであった。しかし、ダム基礎の地質条件が複雑であり、ケーソン施工に予想以上に時間がかかり、工期が遅延した。元計画では、2007 年 3 月にケーソン沈設および内部充てんを完了する予定であったが、2007 年 4 月の段階においても、ケーソンの沈設が完了していない状況であった。ここに、さらに一ヶ月の内部充てん工事の時間を加えると、工期の遅延は著しいものになることが予想された。そこで、向家ダム建設部は堆石コンクリート工法の採用を決定した。

堆石コンクリートは、硬化熱による温度上昇を低減し、ケーソン内に充てんすることにより締固め不要であり、施工が非常に簡便である。また、現地の石材資源を用いることによって堆石率 50%前後が実現でき、施工コスト

も元設計から低減することが可能である。

(3) 現場試験の実施

堆石コンクリートのケーソン内部充てん工事の適用性を検証するため、三峡総公司向家ダム建設部は、葛洲ダム施工局および設計、監理各社に呼びかけて現場試験を実施した。現場試験は、向家ダム右岸の馬延坂製品蔵7井の擁壁を選定して行われた。通常の堆石コンクリート工法（以降、普通型堆石コンクリート工法と言う）と、投石型堆石コンクリート工法（SCCを先に充てんした後に、石を充てんする、所謂、ポストパacked方式）を用いた試験が行われた。図-25に概要を示す。堆石コンクリート工法の施工は、初めに、1mの高さの堆石を構築した後にSCCを充填して一層目を構築した後に、それ以降は、SCCを充てんしながら、随時、上から石をSCC中に投じ、厚さ4mの堆石コンクリートを構築した。現場試験の実施状況を図-25に示す。充てん完了後、堆石コンクリートの内部温度、SCCの圧縮強度、堆石コンクリートのコア採取供試体の28日強度試験、密度試験等を行った。試験結果を表5、表6に示す。

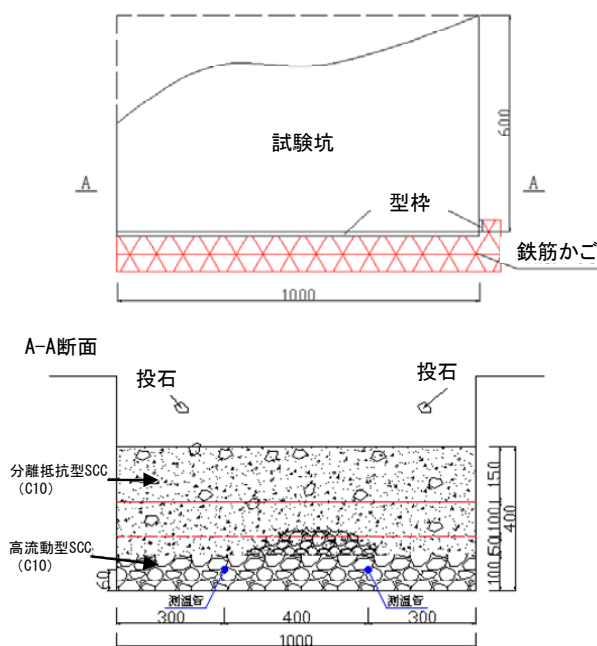


図-25 現場施工試験概要

表5 SCCの品質及び力学性能

種別	スランプフロー (規格値)	コンクリート 温度 (℃)	圧縮強度(MPa)	
			材令 7日	材令 28日
普通型用 高流動型 SCC	660mm (630-680)	8.0	7.3	17.5
投石型用 分離抵抗型 SCC	600mm (550-600)	8.5	8.1	18.4

表6 現場施工試験結果（密度及び圧縮強度）

サンプル 番号	材令(日)	単位体積重量 (kg/m ³)	圧縮強度 (MPa)
1	42	2510	36.7
2	42	2505	26.2
3	42	2501	33.2
4	42	2516	37.3

向家ダム工事項目部は、堆石コンクリート現場試験の結果を以下のように分析した。普通型堆石コンクリート工法と投石型堆石コンクリート工法の二つの施工方法はどちらも有効であるが、経済性、施工性の観点からは評価が異なる。普通型堆石コンクリート工法に用いる高流動型 SCC は経済的であるが、同工法の施工は、ケーソン内部のような狭い場所、深い位置の特殊環境では困難であり、施工性で劣る。一方、投石型堆石コンクリート工法に用いる分離抵抗型 SCC は経済性に劣るが、施工性で勝る。本工事の条件を踏まえ総合的に考えると、投石型堆石コンクリート工法が有利である。以上により、投石型堆石コンクリート工法が多く採用された。

(4) ケーソン内部充てん工事への適用

堆石コンクリート工法は、2007年5月に向家ダム水力発電所工事ケーソン内部充てん工事に正式に採用された。SCCをケーソンの上部開口から充てんし、50m下の底部に充てんされると同時に石を投入することによって、合理的な施工が実施された。施工状況を図-26、図-27に示す。

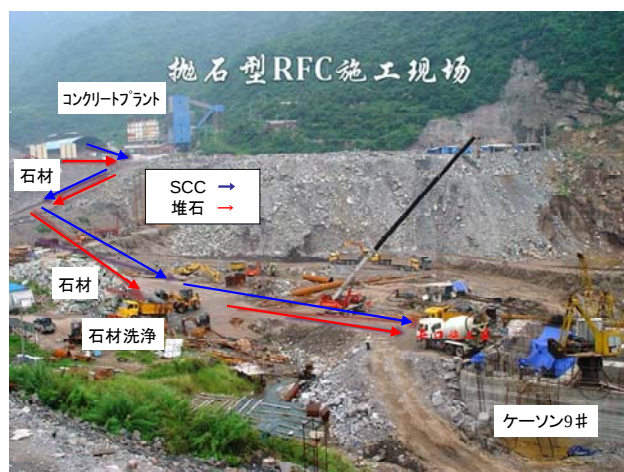


図-26 向家ダムケーソン充てん工事現場状況



SCCの充てん 堆石の投入
図-27 堆石コンクリート施工状況

10 箇のケーソンの沈設が次々に行われ、20007 年 9 月に、すべてのケーソンの充てん工事が完成した。堆石コンクリートの総施工量は 69,095.98 m³、施工結果の一覧を表 7 に示す。3 井の充てんコンクリートに対してコアサンプリング供試体圧縮強度試験及び透水試験を実施した。圧縮強度試験結果を表 8 に、透水試験結果を表 9 に示す。

ケーソン内部充てん工事において、堆石コンクリートはその特徴である、施工が簡便で、施工速度が速く、硬化熱に伴う温度上昇が低いといった特徴を十分に発揮し、元設計の普通コンクリートを用いた場合に想定された問

題点をすべて解決することができた。一立方メートル当りのコンクリートのコストを約 10 元（約 140 円）低減することができ、充てんコンクリートのボリュームが 7 万 m³であることを考えると、最終的には 70 万元（約 1000 万円）のコスト縮減が図られた。また、施工速度が速いため、ケーソン内部充てん工事の工期を 70～80%に短縮し、工期を 1 ヶ月間短縮した。向家ダム水力発電所の立場から言えば、一日当りの発電量は 0.84 億 kW 以上であり、さらに価値のあるものであると言える。

表7 堆石コンクリート施工結果

ケーソン番号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
充てん深度(m)	39.6	37.6	36.4	38.3	37.5	38.2	39.1	41.8
充てん量(m ³)	6837	6490	6293	6611	6482	6601	6748	7219
SCC 施工量(m ³)	3250	3246	3045	3310	3254	3405	3380	3582
石方方量(m ³)	3587	3244	3248	3301	3228	3196	3368	3637
含石率(%)	52.5	50	52	50	50	48	50	50
充てん施工日時	7.2～7.6	6.21～6.27	5.3～5.13	6.3～6.10	6.11～6.17	8.3～8.11	5.14～5.21	7.2～7.12

表8 コアサンプリング圧縮強度試験結果

サンプル番号	24(3/5)-1	24(3/5)-2	31(2/4)	17(1/3)	17(2/3)	10(3/5)	平均
圧縮強度 (MPa)	43.9	34.9	39.5	27.9	30.0	32.2	34.7

表9 透水試験結果

サンプル番号	3#-1	3#-2	3#-3	平均	評価
透水係数 K(cm/s)	5.46×10^{-5}	3.07×10^{-4}	2.62×10^{-4}	2.08×10^{-4}	弱透水性

4. 現場施工時の問題点と解決方法

4.1 堆石中の石の粒径管理に関する問題

河南宝泉ダム工程の現場施工試験において、構築した堆石の中に粒径 30cm を下回る石が非常に多く、粒径 10cm 以下の碎石が大量に見受けられ、粒径 2、3cm 程度の石も見受けられた。図-28 に示す。堆石を構築する際に、これらの小径の碎石を排除する必要がある、さもなければ、SCC の充てん性が損なわれる結果となる。これらの現象が起こる原因は、施工人員が堆石コンクリートの品質要求を重視していないことにあり、現場で堆石の中に小径の碎石が発見された後に、それを取り除く形で所定の品質を確保した。しかし、施工試験実施後の副ダムの施工においては、施工人員が堆石コンクリートの原理をよく理解し、技術的にも熟練したため、堆石の粒径は所定の要求品質を満足するようになり、施工効率も向上した。これによって、施工もスムーズになるとともに、所

定の品質を確実に確保することが可能になった。



図-28 堆石施工状況（粒径 10cm 以下の石が多い）

4.2 型枠・支保工の強度の問題

現場試験において、毎回発生するのが、型枠及び支保工の剛性不足、強度不足が引き起こす問題である。SCCの打設後に型枠が変形してしまったり、支保工がその圧力に耐え切れずに型枠が移動、崩壊してしまったりする問題が発生した。図-29、図-30に型枠に問題が発生した状況を示す。図-29では、型枠が崩壊し、大量のSCCが型枠外に流れ出した。図-30では、型枠の底部と側部に比較的大きな隙間が発生し、その隙間は大きいところで20cmに至った。SCCの流動性は非常に高いため、一旦、型枠からSCCが漏れ始めると、簡単にはそれを防ぐことはできない。これも、施工人員のSCCに対する知識の不足が原因であり、SCC打設時の側圧やSCCの流動性に対する認識不足がこれらの問題を引き起こしている。事前にSCCの側圧の大きさ、流動性の高さを施工人員に認識させることが重要である。型枠には2mm以上の隙間は許されないこと、支保工の強度はSCCの高流動性を考慮して、液圧を仮定した計算方法で設計することが必要であることを充分認識させる必要がある。また、実際の現場では、型枠に砌石壁を採用して、鋼製型枠の代替に用いることを提案し、上述の型枠の問題を解決することができた。型枠としての砌石壁の採用も有効な方法である。



図-29 型枠内からSCCが外へ流れ出ている状況 1



図-30 型枠内からSCCが外へ流れ出ている状況 2

4.3 SCCの製造及び打設能力

河南宝泉工事副ダム工事において、1.2 m³のクレーンを用いてSCCを打設していたが、毎時間6 m³のSCCを打設

するのが最大能力であり、施工人員の稼働時間は30%程度であり、それ以外の時間は待ち時間となっていた。施工人員とその他設備の利用効率はきわめて低く、経済的観点から見ても合理的ではなかった。コンクリートの施工に時間がかかり、コンクリートの打重ね時間間隔が空いてしまうことは、堆石コンクリートの品質にも影響を及ぼしかねない。同工事においては、以上を踏まえて、SCCの製造及び打設を対応させた調整を行って、SCCの製造及び打設の効率を向上させた。特に、沖溝埋戻工事においては、アジテーター車から直接、SCCを打設する方法を採用し、堆石コンクリートの構築平面面積の拡大を図り、一つのリフトで3000 m³以上の体積のコンクリートの構築が可能となった。以上の経験から判断して、SCCの生産及び打設能力は15 m³毎時を上回るように計画する必要がある。

5. 堆石コンクリート工法の今後の展望

堆石コンクリート技術はその構想から、現在の中国国内の重大工事への正式な適用に至るまで、3年の時間を要し、各関係者や専門家から多大な支持を受けるに至った。2009年度は、山西省の6.9万m³のコンクリート重力式ダム本体全てに同工法を適用し、現在施工中であり、同じく山西省の高さ69mのアーチダム（1950年代施工）の補強工事に同工法を適用し、施工中である。これらの大型の工事が完了すれば、同工法の認知度がいっそう高まり、充分な実績を持った工法として認識されるであろう。今後は、中小型ダムのコスト縮減、工期短縮工法としてますます認知度が高まり、発展していくことが予想される。

ダム以外の構造物、たとえば重力式基礎構造物や、擁壁等のマスコンクリートにも応用することが可能で、適用範囲は非常に広範囲であり、本工法は非常に大きな可能性を秘めていると言える。また、現地の材料を用いることを原則とした工法であり、且つ、低コストであることから、アフリカや東南アジアの発展途上国の水力発電所工事への適用性も高いと考えることができる。

堆石コンクリート工法は、低コストであり、施工が簡便であると同時に工期短縮が可能な、非常に有用な工法であり、土木分野における今後の発展が期待される一方で、その工法独特の注意点は在来のコンクリートを用いた工法とは異なるため、特に、施工に携わる作業人員、施工管理人員には、堆石コンクリート工法に対する深い理解と知識が必要である。したがって、関係者に対する事前の十分な教育と初期実施段階での指導が必要である。著者らは同工法の発展普及のために、現地での教育、指導に努力を惜しまない所存である。

6. まとめ

堆石コンクリート工法は、ダムコンクリートに代表されるマスコンクリートの新しい施工であり、施工が簡便

であるのみならず、単位セメント量を低減することが可能であるため、硬化熱による発熱を低減することができるとともに、コストの縮減が可能である。

本稿では、本工法の開発経緯と中国での適用事例を中心に紹介するとともに、工法の問題点とその解決方法にまで議論を進めた。本工法は、中国において十分な実績を積みつつあり、マスコンクリートの標準的な工法の一つとして数えられる日も近いと著者らは見ている。

本工法は中国において、開発、実用されたものであるが、今日の日本においてもダム構造物等の工期短縮、低コスト化が課題となっていることから、日本における本工法の展開の可能性も充分ありうる。今後も、同工法のさらなる向上と発展を目指して開発を進めるとともに、高品質・低コスト・低環境負荷の社会資本整備の実現に貢献すべく努力する所存である。

参考文献

- 1) 金峰, 安雪晖, 石建军, 张楚汉, “堆石混凝土及堆石混凝土大坝”, 水利学报, No. 11, Vol. 36, 1347-1352, 2005
- 2) 安雪晖, 黄绵松, 周虎, 金峰, “堆石混凝土施工技术综述”, 全国混凝土新技术及其工程应用”技术交流会暨 2007 年年会
- 3) 周虎, 安雪晖, 金峰, “低水泥用量自密实混凝土配合比设计试验研究”, 混凝土, No. 1, 20-23, 2005
- 4) Huang Miansong, Zhou Hu, An Xuehui, Jin Feng, “The Environmental Impact Assessment of Rock-Filled-Concrete Technology in Dam Construction”, International Conference Hydropower, C314, Kunming, 2006
- 5) 安雪晖, 金峰, 石建军, “自密实混凝土充填堆石体试验研究”, 混凝土, No.1, 3-6, 2005
- 6) 石建军, 张志恒, 金峰, 安雪晖, 张楚汉, 杨晓峰, 秦至谦, “自密实混凝土充填堆石体的试验”, 南华大学学报(自然科学版), No.1, 2005
- 7) 石建军, 周绍青, 张志恒, 金峰, 张楚汉, 杨晓峰, 秦至谦, “自密实堆石混凝土梁的正截面受力性能”, 水利与建筑工程学报, No.4, 2005
- 8) 石建军, 张志恒, 金峰, 张楚汉, “自密实堆石混凝土力学性能的试验研究”, 岩石力学与工程学报, 增刊 1, 2007
- 9) 张志恒, 石建军, 杨晓峰, 金峰, “自密实堆石混凝土抗拉性能的试验研究”, 混凝土, No.10, 38-41, 2007
- 10) 石建军; 周绍青; 金峰; 张楚汉, “用回弹法测试自密实堆石混凝土强度”, 无损检测, No.6, 2006
- 11) 宋殿海, 刘剑, “自密实堆石混凝土在宝泉抽水蓄能电站的应用”, 水力发电, No.9, 2007