

# 報告 耐凍害性向上を目的とした中空微小球を用いたダムコンクリートの施工

橋本 学\*1・林 大介\*2・羽原 俊祐\*3・遠藤 裕丈\*4

**要旨：**コンクリートダムの耐凍害性向上を目的として、中空微小球を用いたコンクリートをダムコンクリートへ初適用した。ダムコンクリートにおいても中空微小球を混和することで耐凍害性が確実に向上すること、スランプ 4cm 程度の硬練りの場合でも均等に練混ぜが可能であること、バイバックによる振動締め固めによっても中空微小球が分離することなく均等に分散していることが確認された。中空微小球を用いることで、微細気泡をコンクリート中に確実に混和した耐凍害性の高いコンクリートダムを構築することができた。

**キーワード：**中空微小球, ダムコンクリート, 耐凍害性, 気泡径分布

## 1. はじめに

ダムが建設される山間部の気候の特徴として夏期は 20℃ を超え、冬期は氷点下という厳しい環境に置かれ、冬期の凍結融解の繰返しにより写真-1 および写真-2 に示すような、凍害による堤体表面の劣化事象が多数見受けられる。国土交通省が管理するダムと都道府県が管理する洪水調節を目的としたダムを対象に、土木研究所が実施した総合点検結果<sup>1)</sup>を図-1 に示す。ここで評価指標の「評価 B」とは、現状では支障は生じていないが、このまま放置すると将来的にダム本体やゲート等の安全性や機能に直接または間接的に何等かの影響を及ぼ

すと思われるものに該当する。図より、劣化・損傷事例の報告で、凍害による劣化と考えられる摩耗と剥離・剥落を合計したものは、漏水、ひび割れに次いで件数が多いことから、凍害による堤体コンクリートの劣化が大きな問題となっていることが分かる。

本報は、北海道の内陸部に建設されるコンクリートダムの嵩上げ工事を対象とし、当該地区は冬期では -10℃ を下回る厳冬エリアで、凍害に対して非常に厳しい環境に曝される。既設ダム堤体は竣工（1957 年竣工）から 63 年が経過していることから、写真-3、写真-4 および写真-5 に示すような凍害（主にスケーリングとポップアウト）による劣化が散見された。そこで、嵩上げ工事によって建設する新設ダム堤体の耐凍害性向上を目的として、ダムコンクリートに中空微小球を適用した実



写真-1 スケーリングの状況



写真-2 ポップアウトの状況



写真-3 ポップアウトの状況



写真-4 ジョイント部の劣化

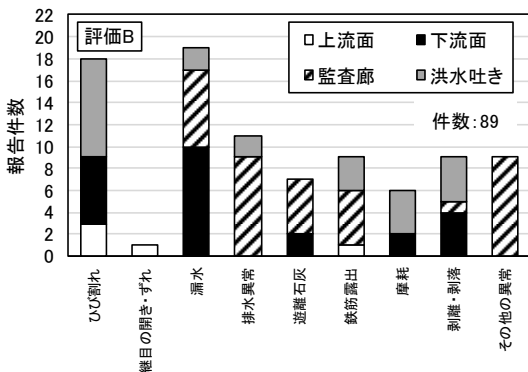


図-1 ダム総合点検結果<sup>1)</sup>



写真-5 スケーリングの状況

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木構造グループ長 博士(工学) (正会員)

\*3 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース 教授 博士(工学) (フェロー会員)

\*4(国研)土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 主任研究員 博士(工学) (正会員)

績について報告する。

## 2. 中空微小球をダムコンクリートへ適用に至った経緯

### 2.1 ダムコンクリートの耐凍害性低下の問題

ダムコンクリートでは、一般的に温度上昇を抑制する目的で、混和材としてフライアッシュをセメントの質量比で 20~30wt.% 置換している場合が多いが、フライアッシュを用いたコンクリートは、普通コンクリートに比べて耐凍害性に劣るという報告<sup>2)</sup>がされている。また、コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]<sup>3)</sup>では、骨材の耐凍害性を評価する際の試験方法として、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A法)」によるものとし、普通ポルトランドセメントを用いた仕様が示されている。これは、混和材としてフライアッシュを用いた場合、フライアッシュの品質が安定せず、コンクリートの耐凍害性が劣る可能性があることを示唆している。フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性が普通コンクリートよりも劣るメカニズムとして、フライアッシュ中の未燃炭素が AE 剤を吸着するため AE 剤の効果が得られにくいことや、連行した空気が経時に伴い減少しやすい<sup>4)</sup>等が考えられる。このような懸念に対し、設計空気量を上げること<sup>5)</sup>や、水セメント比を下げることで、混和剤(AE 剤)の変更等の配合上の対策が施されるが、連行された空気が振動締めめやブリーディング等によって破泡や合泡などによって消失することもあり、実構造物では前述したような凍害によって劣化する可能性も考えられる。こういった状況から、コンクリート中にいかに、確実に微細気泡を連行するかが重要となる。

当該ダムで用いる骨材は密度が小さく、吸水率が高いため、建設当初より耐凍害性の確保が課題であった。そのため、凍害環境に曝される外部配合は設計空気量を 3.5%から 4.0%に上げ、高性能 AE 減水剤を用いることで水結合材比を低減し、耐凍害性の向上を図る対策が設計段階より取り入れられていた。水掛かりがあるような特に厳しい環境に置かれる部位については、更なる対策が必要と考え、中空微小球を適用することとした。

### 2.2 中空微小球による耐凍害性向上技術

筆者らの研究<sup>6)</sup>では、直径 0.15mm 未満の微細気泡を 1.5vol.%程度導入することで、耐凍害性を確保できると報告している。微細気泡を導入する従来技術としては、AE 剤による微細気泡の連行が挙げられる。その他の技術として中空微小球があり、中空微小球とはアクリロニトリル系の樹脂からなる空気を内包した混和材料で、平均粒径が 80 $\mu$ m、見掛け密度で 0.13g/cm<sup>3</sup>と非常に微小かつ軽量である(写真-6)。また、AE 剤によって連行された気泡とは異なり、コンクリート中で消失することのない微細な独立気泡であることが特長の一つである。中

空微小球の SEM 画像を写真-7 に示す。

## 3. 中空微小球をダムコンクリートへ適用するための検討

ダムコンクリートの特徴として、一般的なコンクリートと比較して粗骨材の最大寸法が 150mm と大きいこと、スランプ 4cm 程度で硬練りであること、締め固め時にパイバックと呼ばれるバックホウの先端に  $\phi$ 150mm のパイプレータを 1~4 本取り付け付けた特殊な締め固め機械で施工されること等が挙げられる。以上の特徴を踏まえ、スランプが 4cm 程度の硬練りのダムコンクリートの配合であっても、中空微小球によって確実に耐凍害性を確保できるか、ダムコンクリートにおいても均等に練混ぜが可能か、パイバックによる締め固めにおいても中空微小球が均等に分散するかなどについて事前に検討を行った。

### 3.1 フレッシュ、強度特性および耐凍害性に関する検討

#### (1) 材料およびコンクリートの配合

使用材料およびコンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。混和剤を含む材料は全て当該ダムにて使用しているもので、コンクリートの配合は外部配合を対象としており、標準(外部配合)は当該ダムで実際に使用している配合である。一方で、改善(外部配合)は中空微小球をコンクリート 1m<sup>3</sup>に対し外割で 1.5vol.%混和したものである。空気量の測定では 40mm ふるいでウェッ

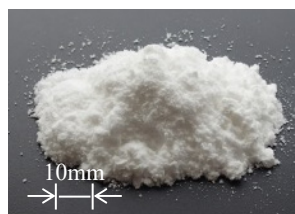


写真-6 中空微小球

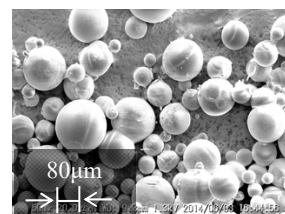


写真-7 SEM 画像

表-1 使用材料

材料名	記号	摘要
水	W	ダム湖水
セメント	MF30	中庸熟フライアッシュセメント(フライアッシュ混合率 30%), 密度: 2.90g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂, 原石山骨材, 密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.02%
粗骨材	G1	砕石 150mm~80mm, 原石山骨材, 密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.12%
	G2	砕石 80mm~40mm, 原石山骨材, 密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.20%
	G3	砕石 40mm~20mm, 原石山骨材, 密度: 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.69%
	G4	砕石 20mm~5mm, 原石山骨材, 密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 3.98%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(遅延形), 主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE 剤, 主成分: 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
中空微小球	MS	アクリロニトリル系樹脂, 見掛け密度: 0.13g/cm <sup>3</sup> , 粒径: 0.05~0.09mm

表-2 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	SL (cm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP (MF30 ×%)	AE <sup>※2</sup> (A)	MS (vol.%)
					W	MF30	S	G1	G2	G3	G4			
標準(外部配合)	41.7	23.0	4.0	4.0	96	230	460	381	383	382	382	1.00	80	—
標準 <sup>※1</sup> (40mm)	41.7	—	5.7 <sup>※1</sup>	4.0	138	331	608	—	—	596	572	—	—	—
改善(外部配合)	41.7	23.0	4.0	4.0	96	230	460	381	383	382	382	1.00	60	1.5
改善 <sup>※1</sup> (40mm)	41.7	—	5.7 <sup>※1</sup>	4.0	138	331	608	—	—	596	572	—	—	1.5

※1 40mm でウェットスクリーニングした際の配合および空気量, ※2 1A=MF30×0.001%

トスクリーニングした試料を用いるため、粗骨材の最大寸法が40mmのコンクリートの配合についても併記した。

### (2) コンクリートの実験項目および実験方法

コンクリートの練混ぜは、粗骨材の最大寸法 150mm のコンクリートの練混ぜが可能な容量 200ℓの強制二軸練りミキサを用い、練混ぜ時間を 90 秒とした。練混ぜ後に、40mm ふるいでウェットスクリーニングを行い、その試料を用いてスランブ、空気量を測定した。さらに、圧縮強度試験用の供試体、硬化後の空気量および気泡間隔係数の測定用の供試体を作製した。供試体作製に際し、2 層で打込み、締固めに棒状パイプレータ (φ28mm, 200Hz) を用い、1 層あたりの振動時間を 15 秒程度とした。硬化後の空気量および気泡間隔係数の測定用の供試体はφ150mm の円柱供試体を用い、材齢 14 日以降に中央部を厚さ 2cm にスライスし、測定表面を鏡面研磨した後に測定した。凍結融解試験の供試体についてのみ、40mm ふるいでウェットスクリーニングした後、さらに、20mm ふるいでウェットスクリーニングした試料を用いて作製した。

コンクリートの実験項目を表-3 に示す。フレッシュコンクリートの圧力法による空気量の測定では、中空微小球を用いたコンクリートの場合、中空微小球が測定の際の圧力伝達を抑制することから、中空微小球を含む実際に混和された空気量よりも小さい値として測定される<sup>7)</sup>。よって、フレッシュコンクリートの空気量の値は参考値として取り扱うこととした。

### (3) フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

フレッシュコンクリートの性状、硬化コンクリートの空気量および圧縮強度の結果を表-4 に示す。スランブの値は標準の 5.0cm に対し、改善では 4.5cm であり、中空微小球を混和することによる影響は認められなかった。また、フレッシュコンクリートの空気量は 40mm ふるいによるウェットスクリーニング後の値で 5.9% と同じであったが、硬化後では標準の 3.6% に対し、改善で 5.1% の結果が得られており、中空微小球により硬化過程において空気量が低下することなく、確実に空気量が確保されていることが確認された。材齢 28 日での圧縮強度についても標準の 19.1N/mm<sup>2</sup> に対し、改善で 18.7N/mm<sup>2</sup> と同程度であり、中空微小球により圧縮強度

表-3 コンクリートの実験項目

試験項目	試験方法	備考
スランブ	JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」	目標: 4.0cm
フレッシュコンクリートの空気量(圧力法)	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」	目標: 5.7% (40mm換算値)
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」	材齢28日
凍結融解試験	JIS A 1148-A法 「コンクリートの凍結融解試験方法」	—
硬化後の空気量および気泡間隔係数	ASTM C 457 「リニアトラバース法」	—
スケーリング試験	ASTM C 672 「塩化物環境下でのスケーリング試験」	-18~+23°C 20サイクル

表-4 フレッシュコンクリートの性状、硬化コンクリートの空気量および圧縮強度の結果

試験項目	標準(外部配合)	改善(外部配合)
スランブ	5.0cm	4.5cm
フレッシュコンクリートの空気量(圧力法)	5.9%	5.9%*
硬化後の空気量	3.6%	5.1%
単位容積質量 (2,280kg/m <sup>3</sup> 以上)	2,343kg/m <sup>3</sup>	2,332kg/m <sup>3</sup>
圧縮強度(材齢28日)	19.1N/mm <sup>2</sup>	18.7N/mm <sup>2</sup>

※値は参考値

が低下するなどの影響は認められなかった。単位容積質量について、硬化後の空気量が多くなった改善において 0.5%程度小さくなる結果が得られた。

### (4) 凍結融解試験およびスケーリング試験

凍結融解試験およびスケーリング試験の結果について、図-2、写真-8 および図-3、写真-9 に示す。標準の相対動弾性係数は 324 サイクル時点で 84% に対し、改善では 94% であり、10% の向上が認められる。相対動弾性係数は 10% の差異であったが、写真-8 に示す 324 サイクル時点での標準の供試体表面は、スケーリングした状況が認められるのに対し、改善では表面のスケーリングした状態はほとんど認められなかった。

スケーリング試験についても、凍結融解試験結果と同様で 20 サイクル時点での表面の状態は、標準は表面のスケーリングした状況が認められるのに対し、改善では表面は健全な状態であることが確認されている。スケーリング抵抗性に対する気泡の効果は、Powers らの浸透圧説<sup>8)</sup>によって説明ができる<sup>9)</sup>。セメントペースト中の空

隙に存在する水溶液 (NaCl 溶液) が凍結する際に純氷が形成され、その周囲の溶液の濃度は高くなる。氷晶は比較的大きな毛細管空隙から形成されるが、純氷が生成された周囲の溶液濃度は高いため、高濃度の溶液が低濃度の空隙水を引き寄せることで水圧が増大し、この膨張圧によってセメントペーストが破壊すると考えられている。この膨張圧を緩和するために、中空微小球のような微細な独立気泡が有効に寄与したものと考えられる。

### 3.2 実機ミキサによるコンクリートの製造

中空微小球の実機ミキサ (容量 3.0m<sup>3</sup>, 強制二軸ミキサ) への投入方法は、コンクリート練混ぜ時にミキサ内へ直接投入することとした。連続的にコンクリートを製造するために、中空微小球についても連続的に計量して投入する必要があった。そこで、グラウトポンプによる圧送で機械的に中空微小球を混和する方法について試行した。投入の概要図を図-4 に示す。投入方法はグラウトポンプにより中空微小球を入れたホッパから圧送用のホースを介し、細骨材用シュートからミキサ内へ直接投入することとした。コンクリート製造時において、5.85kg (3m<sup>3</sup> 分) の中空微小球を圧送するのに 120 秒程度を要した。1 バッチあたりのコンクリートの練混ぜ時間 60 秒を考慮すると、2m<sup>3</sup> 製造時のサイクルタイムとして 180 秒程度を要した。練混ぜ後の性状については室内試験同様に、スランプの低下や圧縮強度の低下等は認められず、実機ミキサにおいても連続的に中空微小球を混和でき、練混ぜ可能であることが確認された。

### 3.3 締め固めによる分散性の確認

締め固めによる影響を確認するために、図-5 に示す 1.0 × 1.0 × 1.0m のブロックを作製し、実際の施工の締め固め作業に用いるバイバックにて 30 秒間締め固めを行った。ブロック作製時に用いたコンクリートの配合は、中空微小球のばらつきを評価するために、表-2 中に示した AE 剤による空気量の調整は行わず、高性能 AE 減水剤と中空微小球のみを混和した。硬化後に図-5 に示す位置でコアを採取し、上、中、下の位置にて気泡径分布を測定し、締め固めによる中空微小球のばらつきを評価した。

気泡径分布の比較を図-6 に示す。図より気泡径分布にばらつきは認められず、バイバックにより締め固めた場合においても中空微小球は分離せず均等にコンクリート中に分散していることが確認された。既往の研究において、コンクリートを非圧縮性のビンガム流体と仮定した場合、コンクリート中に存在する 1.0mm 以下の気泡は浮力により浮上することなく、コンクリート中に留まるものとされており<sup>10)</sup>、バイバックのような通常のバイブレータよりも振動エネルギーが大きい場合においても分離することなく均等に分散したものと考えられる。また、中空微小球は樹脂製の膜が形成されているた

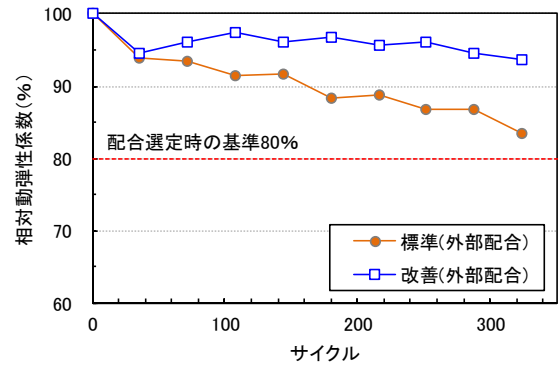


図-2 凍結融解試験結果



(i) 標準 (ii) 改善  
写真-8 供試体の状態 (324 サイクル時点)

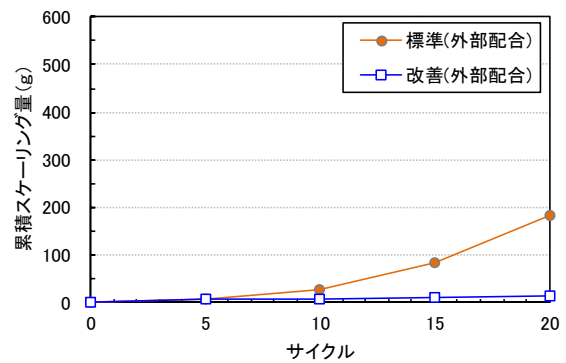
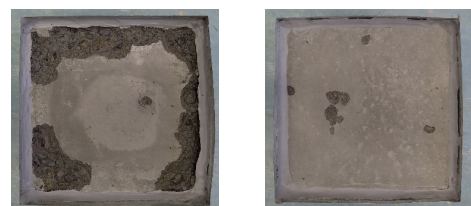


図-3 スケーリング試験結果



(i) 標準 (ii) 改善  
写真-9 供試体の状態 (20 サイクル時点)

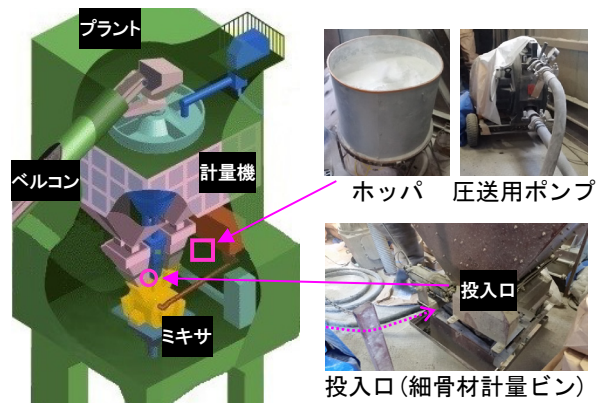


図-4 中空微小球の投入システム

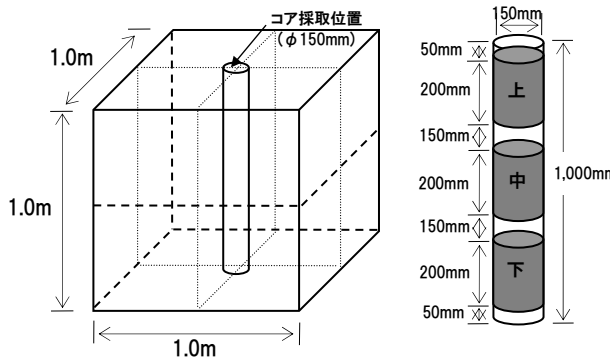


図-5 コアおよび試料採取位置

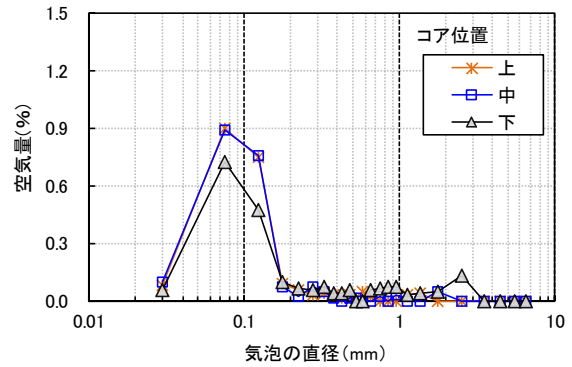


図-6 締固め位置による気泡径分布の比較

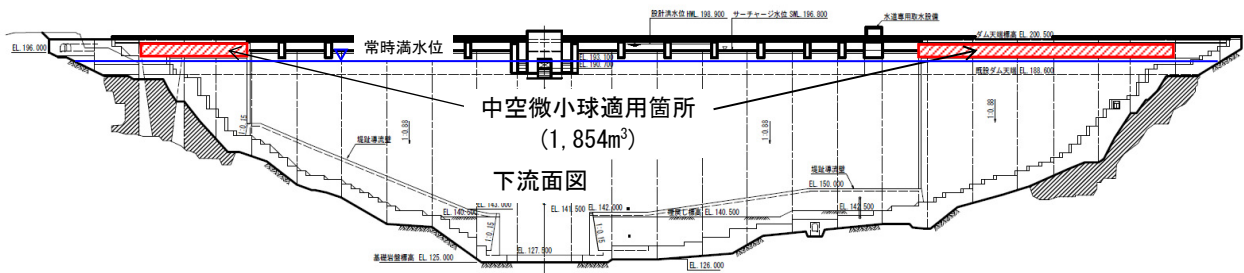


図-7 中空微小球の適用箇所（下流面図）

め、締固めによって合一や破泡が生じることなく独立気泡としてコンクリート中に残留したものと考えられる。

#### 4. 中空微小球のダムコンクリート堤体への適用

##### 4.1 適用実績について

中空微小球を適用した箇所を図-7に示す。適用箇所は非越流部の3.0m分とフーチングの一部を対象とした。施工は2018年10月～11月と、越冬による中断を経て2019年4月～7月の2年にわたり合計で1,854m<sup>3</sup>分の施工を行った。施工状況を写真-10に示す。現場の施工においても良好な性状を示し、大きなトラブル等もなく無事に施工を終えることができた。また、外観も写真-11に示すように、初期欠陥等は認められず良好であった。

##### 4.2 品質管理について

中空微小球を用いたコンクリートの品質管理として、スランプ、空気量、圧縮強度といった通常の品質管理試験に加え、気泡径分布も標準で6試料、改善で7試料を、3.1と同様にφ150×300mmの供試体を作製し、測定した。気泡径分布の比較を図-8に示す。ここではデータ全体の傾向を捉えるため、個々のデータを全て表示した。実際の施工では事前の検討とは異なり、標準と改善ではAE剤の量を同一としたため、改善の方が中空微小球を混和した分だけ空気量が多い結果となっている。設計空気量の5.7%に対し、標準では硬化後の空気量が平均で3.9%(-1.8%減)まで減少することが確認された。一方で、改善配合では硬化後において若干の減少は認められるものの、平均で5.0%(-0.7%減)の空気量が確保されている。次に、前述した0.15mm未満の空気量に着目して考察する。硬化後の空気量および0.15mm未満の空気

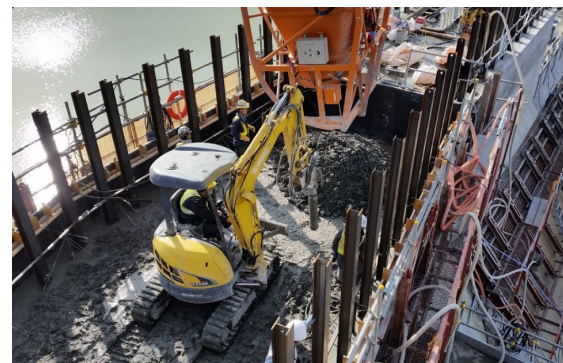
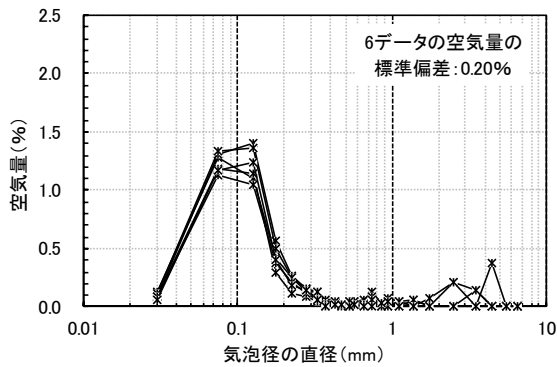


写真-10 コンクリートの打込み状況

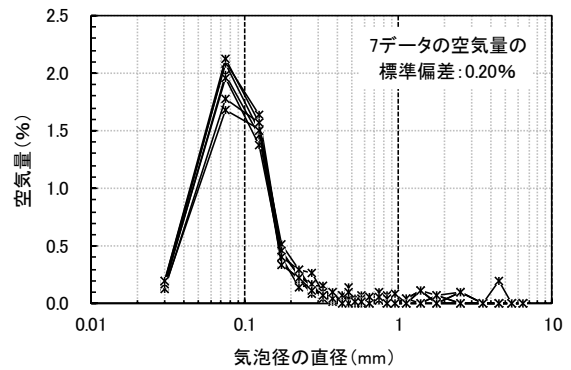


写真-11 打込み後の状況（下流左岸側より）

量の比較を図-9に示す。図より、標準および改善の0.15mm未満の空気量の合計の平均値はそれぞれ2.5%と3.6%でありその差分が1.1%であった。中空微小球の混和量1.5%と比較すると若干少なくなっているものの、概ね合致しており、中空微小球がばらつくことなく、確実に混和されていることが確認された。以上の結果より、当該ダムでは、中空微小球を用いることで微細気泡をコ



(i) 標準



(ii) 改善

図-8 標準配合と改善配合の気泡径分布の比較

ンクリート中に確実に混和したダムコンクリートを打ち込むことができ、耐凍害性に優れるコンクリートダムを構築できたものと考えられる。

### 5. まとめ

本報では、中空微小球をコンクリートダムへ適用するという新たな取組みについて述べ、以下の結論を得た。

- (1) ダムコンクリートにおいても中空微小球を混和することで耐凍害性が確実に向上する。
- (2) スランプ 4cm 程度の硬練りの場合でも均等に練混ぜが可能である。
- (3) バイバックによる振動締め固めによっても中空微小球が分離することなく均等に分散している。

一方で、コンクリート 2m<sup>3</sup>を製造する際のサイクルタイムが 180 秒も要し、連続出荷をするために中空微小球の圧送速度を上げる必要がある。また、ホッパに中空微小球を投入する際に、中空微小球が粉塵となり周囲に飛散し、作業環境としての課題も生じた。そのため、材料の投入方法についても改善する必要がある、これらの課題については引き続き検討を行っていく。今回適用した箇所については、今後、定期的を目視確認および非破壊検査によって追跡調査を行う予定としており、暴露データとして蓄積し、データについては論文等で開示していく予定である。本報が耐凍害性に優れたコンクリートダムを構築するための一助となれば幸いである。

謝辞：本検討に際し、デンカ(株)より材料供給および技術指導を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 山口嘉一, 金銅将史, 佐藤弘行, 小堀俊秀, 坂本博紀, 切無沢徹: ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究, 土木研究所 平成 23 年度プロジェクト報告書, pp.1-45, 2011
- 2) 長瀧重義, 大賀宏行, 嶋田久俊: フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価, セメント技術年報, No.41, pp.371-374, 1987
- 3) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書 [ダ

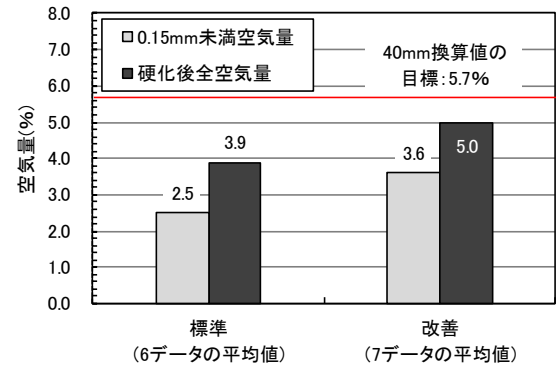


図-9 硬化後の空気量の比較

ムコンクリート編], pp.45-46, 2013.10

- 4) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012
- 5) 大内齊, 福井直之, 安田和弘: 湯西川ダム本体建設工事におけるコンクリート用骨材有効流用実績, 土木建設技術発表会概要集 2012, pp.251-258, 2012.11
- 6) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012
- 7) 橋本学, 林大介, 水野浩平, 五十嵐数馬: 中空微小球を用いたコンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2143-2148, 2017
- 8) Powers, T.C.: Freezing Effects of Concrete, ACI Special Publication SP-47, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp.1-11, 1975
- 9) 日本コンクリート工学会: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, pp.107-111, 2008
- 10) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博: 粉体系高流動コンクリートの空気量や流動性評価指標が表面気泡性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.711/V-5, pp.135-146, 2002.8