

ダム下流面の越流部における真空パネル工法の高強度コンクリート適用の検討

Study on the application of vacuum panel construction to high-strength concrete in the spillway section of a dam's downstream face

山本 泰介*

Taisuke Yamamoto

白武 知浩***

Tomohiro Shiratake

八木 秀親**

Hidechika Yagi

要 約

ダム越流部の耐摩耗性を確保するため、従来の構造用コンクリートに代わって高強度コンクリートを使用し、さらに真空パネル工法による表層品質の向上効果を実大実験で検証した。検証の結果、真空パネル工法を高強度コンクリートに適用した場合、コンクリート表層の緻密性や耐摩耗性が一層向上することを確認できた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 真空パネル工法の概要
- § 3. 実大実験
- § 4. 品質評価
- § 5. 現場適用の紹介
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

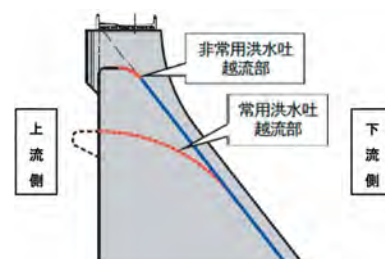
コンクリートダムには、貯水池に流入する水を安全に下流へ流下させるための洪水吐が設けられる。洪水吐は、通常運用から計画洪水規模までの放流制御を担う常用洪水吐と、計画を超える異常洪水時にダムの安全を確保する非常用洪水吐により構成される。越流部の形状は、下流面勾配まで緩やかな曲率を連続させ、キャビテーションや表面摩耗を防止するよう設計される（図－1）。

現場打ちコンクリートによりこの曲線越流面を構築する場合、曲線型枠の使用と打設管理が重要である。特に下流面の勾配が緩くなる部位では、型枠面に気泡が滞留しやすく、表面気泡の発生リスクが高まるため、フレッシュコンクリートの性状とバイブレータの管理等が重要となる。発生した軽微な表面気泡については、硬化の初

期段階で曲線型枠を脱型し、金鋸による表面の仕上げを行うことが一般的である。

型枠の脱型のタイミングはコンクリートの硬化進行や環境条件に影響を受けるため、現場の熟練技能者による最終判断に依存している。越流部は常時越流水に曝される重要部位であるため、表層品質と耐摩耗性を確保することが求められる。そのため、近年のダム再開発事業では、施工性と耐摩耗性の観点から、高強度のプレキャストパネルを越流部に敷設する事例が増加している。しかし、供用後の越流水の影響で、プレキャストパネルの剥離や浮き、目地部の開きが発生し、既設堤体と高強度プレキャストパネルとの一体性の確保が課題となっている。

本報では、コンクリート舗装分野で実績のある真空パネル工法を越流部の曲線型枠へ適用し、現場打ちコンクリートにより高い耐摩耗性を確保する手法を検討した。ここでは、従来の構造用コンクリートに代わって高強度コンクリートを採用し、実大実験を通じて真空パネル工法の適用によって得られた知見について報告する。



図－1 越流部の形状イメージ

* 技術研究所 土木技術グループ

** 本社 土木技術部（現：本社 土木計画部）

*** 北日本支社 川内沢ダム出張所（現：名取小山出張所）

§ 2. 真空パネル工法の概要

真空パネル工法は、打込み直後のコンクリートから強力なロータリーブローワーを使用し、コンクリート表面に敷設したパネルを介して自由水、余剰水や気泡を強制的に吸引する（以下、真空処理と称する）技術である。これにより、コンクリート表層部の水結合材比が低減され、耐摩耗性を向上することができる¹⁾。真空パネル工法の適用箇所は従来、一般道路、高速道路、駐車場へのアプローチや坂道などのコンクリート舗装工である。真空パネル工法の主要な資機材は、ロータリーブローワー、吸引ホース、パネル、シートや吸引口から構成される。

§ 3. 実大実験

3-1 配合選定

実大実験に先立ち、高強度コンクリート配合を実機試し練りにより定めた。実機試し練りにおけるコンクリートの使用材料を表一1、コンクリートの示方配合およびフレッシュ試験結果を表一2に示す。実大実験における配合は、越流部に適用する構造用コンクリートであるC2配合と実機試し練りにより定めた高強度コンクリート配合となるC2H配合の2配合とした。C2H配合は、材齢91日（標準養生）の圧縮強度が50N/mm²以上を目標として定めた。また、C2H配合の水結合材比（W/B）は、C2配合の示方配合を定める室内試し練り結果を参考に定めた。なお、化学混和剤としてC2配合でAE減水剤、C2H配合では高性能AE減水剤を使用した。結合材であるセメントとフライアッシュの使用割合は質量比で70：30である。

表一1 コンクリートの使用材料

材料	記号	物性値など
セメント	C	中庸熟ポルトランドセメント (密度：3.21g/cm ³)
フライアッシュ	F	JIS II種品 (密度：2.26g/cm ³)
細骨材	S	砕砂 (表乾密度：2.69 g/cm ³)
粗骨材	G	G3 碎石 40～20mm (表乾密度：2.73 g/cm ³)
		G4 碎石 20～5mm (表乾密度：2.73 g/cm ³)
水	W	河川水
化学混和剤	Ad	AE減水剤 遅延形 (I種) リグニンスルホン酸化合物
	SP	高性能AE減水剤 標準形 (I種) ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE剤 (I種) 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

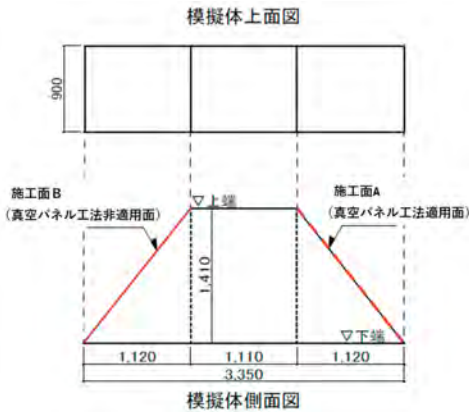
表一2 示方配合およびフレッシュ試験結果 (実機試し練り)

配合	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						SP (B×%)	AE (B×%)	フレッシュ試験結果		
						W	B		S	G				スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)
							C	F		G3	G4					
C2H 配合	40	12.0 ±2.5	4.0 ±1.0	39.0	37.9	150	269.5	115.5	687	572	572	0.75	0.007	10.9	3.9	8.9

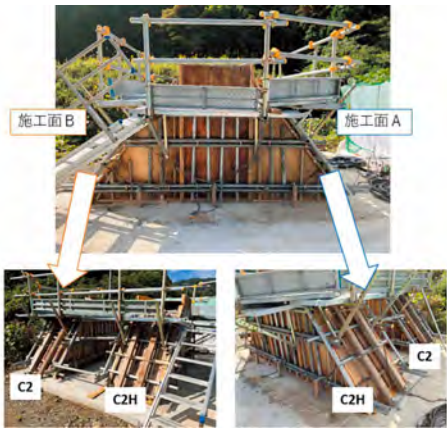
C2H 配合を定める実機試し練りのフレッシュ試験状況を写真一1に示す。スランプ、空気量は所定の性状を満足した。圧縮強度は、材齢91日において62.0N/mm²であり、目標強度を満足したことから、C2H 配合は実機試し練り時の配合構成で実大実験を実施することとした。なお、フレッシュ試験時の試験項目であるスランプ、空気量、コンクリート温度は、それぞれJIS A 1101, JIS A 1128, JIS A 1156, 圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠して実施した。実大実験は、当社がJVで工事を進めている川内沢ダム本体工事ヤード内で実施した。



写真一1 フレッシュ試験の状況



図一2 模擬試験体の形状



図一3 模擬試験体の状況

3-2 模擬試験体

模擬試験体の形状を図-2、状況を図-3に示す。図中の施工面Aおよび施工面Bは、それぞれ真空パネル工法適用、非適用面を示している。模擬試験体は、ダムにおける下流面の越流部を模擬した勾配 1:0.79 となる面を対に對置した台形状として木製合板、セパレータや端太材により配合ごとに作製した。真空パネル工法を適用するパネルはコンクリートの打込み前にあらかじめ設置している（写真-2）。

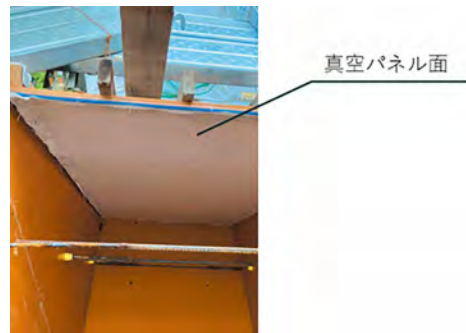


写真-2 型枠内の状況

3-3 実大実験

実大実験の状況を写真-3、実大実験におけるコンクリートの示方配合およびフレッシュ試験結果を表-3に示す。コンクリートは、本体工事のコンクリート製造設備で製造した。コンクリートは、フレッシュ試験を実施後にトラックアジテータで場内運搬して、コンクリート用ホッパーを使用し型枠内に打ち込んだ。真空処理の状況を写真-4に示す。真空処理は、コンクリート打込み完了後に開始した。真空処理に要した時間は、C2H 配合部で 43 分、C2H 配合部では 39 分と C2H 配合の方が短くなった。C2H 配合は高性能 AE 減水剤を使用し、結合材あたりの単位水量を低減しているため、ブリーディング水を含む余剰水が相対的に少なかったと考える。写真-5に C2H 配合における脱枠直後および仕上げ作業完了後の状況の一例を示す。真空処理を行うことで、真空処理を適用しない場合と比較して、脱枠直後に現れる表面気泡が少ない状況となり、真空処理により傾斜面の仕上がり向上することがわかった。なお、金鍍仕上げ作業完了後のコンクリート面には、ひび割れや剥離などの不具合は確認されなかった。模擬試験体は、材齢 91 日における品質評価前まで養生マットによる湿潤養生を実施した。



写真-3 実大実験の状況



写真-4 真空処理の状況（施工面A）

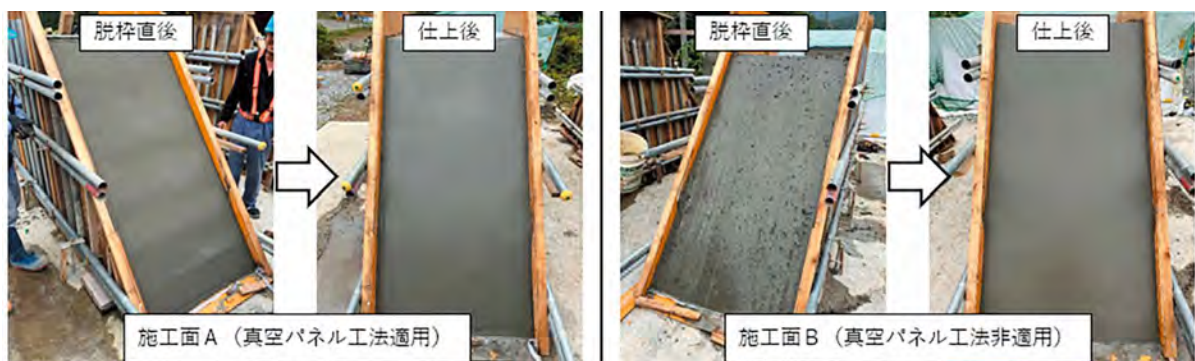


写真-5 脱枠直後および仕上げ状況

表-3 示方配合およびフレッシュ試験結果（実大実験）

配合	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						Ad(C2) SP(C2H) (B×%)	AE (B×%)	フレッシュ試験結果		
						W	B		S	G				スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)
							C	F		G3	G4					
C2H 配合	40	8.0 ±2.5	4.0 ±1.0	54.2	40.0	150	193.9	83.1	767	590	588	1.10	0.008	8.0	4.8	19.9
C2H 配合	40	12.0 ±2.5	4.0 ±1.0	39.0	37.9	150	269.5	115.5	687	578	576	0.75	0.008	11.0	4.8	20.6

§4. 品質評価

実大実験により作製した模擬試験体においてコンクリート表層の品質評価を実施した。品質評価項目を表一4に示す。品質評価の時期は冬季となったため、低温による測定機器の不具合の防止対策として、テントやジェットヒーターを使用し、測定環境を整備した(写真一6)。

(1) 表面反発度

表面反発度は、JIS A 1155 に準拠したリバウンドハンマーを使用して測定した。表面反発度の値は、真空処理の有無により比較し、コンクリート表層部の処理効果を材齢 90 日で確認した。

表面反発度は、角度補正、乾燥状況補正を行った数値により算出した。なお、後述する表層透気係数を評価するため、模擬供試体の表面含水率を調整した。表面反発度の測定は、模擬供試体の真空処理を適用した施工面 A と真空処理を適用していない施工面 B において、他の評価試験位置に干渉しないそれぞれ 6 箇所で測定した。今回、真空処理による表層品質の処理効果を比較するため表面反発度を施工面 A から施工面 B で除して相対的に評価した。表面反発度の評価を図一4に示す。その結果、真空処理を実施した面の方が、いずれの配合や測定位置においても表面反発度が高い結果となった。このことから、コンクリート表層部の余剰水を除去したことでコンクリート表層部の見かけ上の水結合材比が低減し、表面反発度が高くなったと考える。

(2) 表層透気係数

表層透気係数の表層透気性評価グレード²⁾の結果を図一5に示す。測定は材齢 88 日に実施した。図中の記号は、配合と測定面を示している。表層透気係数のグレーディングを表一5に示す。表層透気係数 kT は値が小さいほど緻密性が高いことを表している。C2 配合の表層透気性評価グレードの変動は緩慢ではあるが、真空処理を実施した施工面 A は、施工面 B より表層透気係数が低減した。写真一7に表層透気係数の測定状況を示す。なお、表面含水率はすべての測定点で 5.5% 以下であった。表層透気係数について、高強度コンクリートへ適用した結果、表層部の水結合材比を低減でき、より高い緻密性を確保することができた。

(3) コア強度

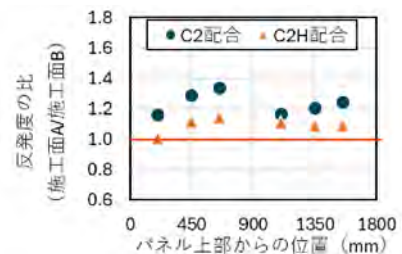
コア強度を測定するために模擬試験体からコア供試体采取了。コア供試体の採取状況を写真一8に示す。また、C2H 配合におけるコア供試体の採取位置の一例を図一6に示す。コア供試体は材齢 88、89 日に採取した。図中の①、②からは深さ方向に供試体を 2 本採取して、表層側と深部側で強度比較した。コア供試体の寸法は、粗骨材の最大寸法 (40mm) の 3 倍以上となる $\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ 程度として、施工面と直交に採取した。採取したコア供試体は材齢 91 日まで気中養生して圧縮強度試験を実施した。コア強度の比較を図一7に示す。

表一4 品質評価項目

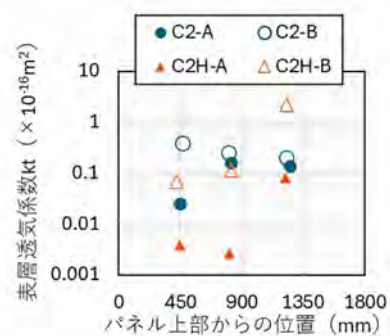
評価項目	評価目的	参考規格
表面反発度	処理効果	JIS A 1155, JSCE-G 504
表層透気係数	緻密性	Torrent 法
コア強度	影響深さ	JIS A 1107
気泡間隔係数	耐凍害性	ASTM C 457
摩耗係数	耐摩耗性	ASTM C 418



写真一6 品質評価の試験環境



図一4 表面反発度



図一5 表層透気係数

表一5 表層透気係数のグレーディング

表層透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	優	良	一般	劣	極劣
0.001~ 0.01	0.01~ 0.1	0.1~ 1	1~ 10	10~ 100	



写真一7 表層透気係数測定状況
(左：含水率測定 右：表層透気係数測定)

左図が表層部におけるコア供試体の強度結果を施工面 A から施工面 B で除して評価した図である。右図は図一 6 の図中の①、②から深さ方向に 2 本採取したコア供試体の強度を表層部から深部で除して、それぞれ比較した図である。その結果、表層部においては真空処理をした施工面 A の方が圧縮強度が向上した。また、表層部と深部で比較すると表層部の強度が高い結果となった。これは、既往の研究³⁾において、脱水効果が充分におよぶ範囲として深さ方向におよそ 150mm とした知見を考慮すると、表層部において真空処理の効果が得られた結果であることが推察できる。

(4) 気泡間隔係数

C2H 配合における気泡間隔係数の測定結果を表一 6 に示す。気泡間隔係数の測定は、C2H 配合の模擬試験体から採取した円柱コア供試体を切り出した 150mm 角の試験体で実施した。気泡間隔係数は施工面 A、B ともに、コンクリートの凍結融解に対する抵抗性の確保として一般的に推奨される 200~250 μm 以下であった。

(5) 摩耗係数

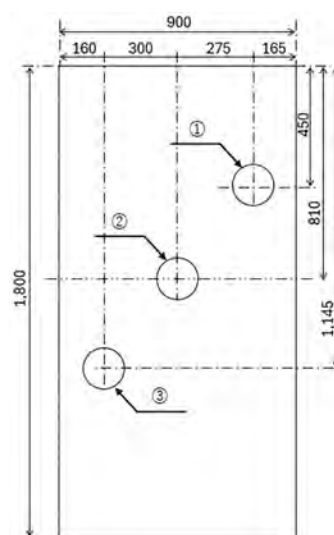
コンクリート表層部の耐摩耗性の評価として摩耗試験を実施した。摩耗試験状況を写真一 9 に示す。摩耗試験用の試料は模擬試験体から採取した。供試体の寸法は ϕ 150mm として、それぞれの配合および施工面から 2 試料を採取した。採取した供試体においてコンクリート表面から長さ 50mm 程度を切り出し摩耗試験用試料とした。試験は 1 試料あたり 4 点の摩耗試験を行い、配合および施工面について 8 点の平均値を摩耗係数として算出した。摩耗係数の比較を図一 8 に示す。摩耗係数は、摩耗試験用試料の施工面に所定の圧力や質量の珪砂を噴射させ摩耗させたのち摩耗体積 (cm^3) と摩耗面積 (cm^2) との比から摩耗係数 (cm^3/cm^2) を算出するものである。そのため、摩耗係数の値が小さいほど摩耗に対する抵抗が高いことを示している。今回の試験では、真空処理することで、いずれの配合でもコンクリート表層部の耐摩耗性が向上する結果を得たが、C2 配合と比較して C2H 配合の方が高い耐摩耗性を示した。

§ 5. 現場適用の紹介

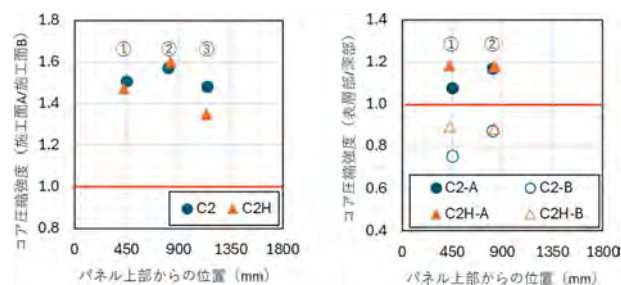
工事においてダム越流部における真空パネル工法を適用した事例について紹介する。



写真一 8 コア供試体採取状況
(左：コア供試体採取 右：コア供試体引き抜き後)



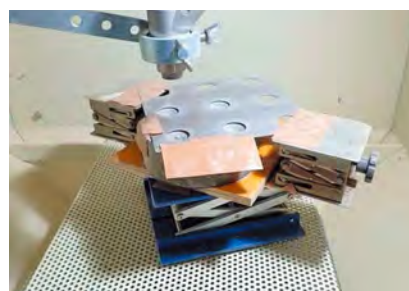
図一 6 コア供試体の採取位置（正面図）



図一 7 コア強度の比較
(左：表層部 右：表層部および深部)

表一 6 気泡間隔係数

配合記号	施工面	気泡間隔係数 (mm)
C2H	A	0.134
	B	0.167



写真一 9 摩耗試験状況



図一 8 摩耗係数の比較

(1) 適用概要

真空パネル工法をダム越流部に適用した現場や適用部位などの概要を表一7に示す。

(2) 適用実績

常用洪水吐および非常用洪水吐に真空パネル工法を適用した。コンクリートの打込み状況、仕上げ状況や脱枠後の仕上がり状況を写真一10に示す。

(3) 品質評価

真空パネル工法を適用した非常用洪水吐における品質評価を図一9に示す。品質評価は施工した2ブロック(4BL, 6BL)で行い、材齢はそれぞれ50, 47日で実施した。品質評価は、JIS A 1155に準拠したリバウンドハンマーを使用してJSCE-G 504を参考に表面反発度と超音波伝播速度を測定した。非常用洪水吐において真空パネル工法を適用した面(施工面A)と曲線変化点以下の真空パネル工法の非適用面である面(施工面B)のそれぞれを対比して評価した。表面反発度は、湿潤養生中であることから乾燥状況は補正值+5とした。評価の結果は、それぞれの部位において施工面Bと比較して、施工面Aの表面反発度は2割程度向上した。また、併せて実施した超音波伝播速度の測定においても、施工面Bと比較して施工面Aの方が高い数値を示した。コンクリートの品質と伝播速度について表一8に示す。超音波伝播速度は、判定の一部において、コンクリート品質「やや良」となった施工面Bと異なり、施工面Aはいずれもコンクリート品質「良」の判定となった⁴⁾。

§6. まとめ

本報ではダム越流部において、真空パネル工法の高強度コンクリートへの適用効果について以下の知見を得た。

- (1)真空パネル工法の適用は、高強度コンクリートでも適用することが可能であることを確認した。
- (2)勾配 1:0.79 を有するダム越流部において、真空パネル工法の構造用コンクリートへの適用と比較して、高強度コンクリートへ適用した方が、コンクリート表層部の耐摩耗性をより高く確保できることを確認した。
- (3)真空処理を実施しても、耐凍害性の目安である気泡間隔係数 200~250 μ m 以下を満足することを確認した。

参考文献

- 1) 我彦聡志ほか：真空パネル工法のコンクリートダム越流部への適用，土木学会全国大会第75回年次学術講演会，V I -81，2020
- 2) R. Torrent, G. Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete". International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp. 985-992, 1995
- 3) 畑中重光ほか：真空脱水工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究

表一7 現場適用の概要

工事件名	川内沢ダム本体工事
工事場所	宮城県名取市愛島笠島地内
施工者	西松・奥田・グリーン企画特定建設工事共同企業体
形式	重力式コンクリートダム
堤高／堤頂長	36.7m／140.0m
堤体積	51,000m ³
適用部位	常用洪水吐，非常用洪水吐
適用配合	C2 配合



写真一10 真空パネル工法の適用状況



図一9 品質評価

表一8 コンクリートの品質と伝播速度

超音波伝播速度 (m/s)	コンクリートの品質
4,600～	優
3,700～4,600	良
3,100～3,700	やや良
2,100～3,100	不良
～2,100	不可

- 日本建築学会構造系論文集、第558号、7-14、2002年8月
- 4) コンクリートの非破壊試験法 研究委員会報告、