ダム下流面の越流部における真空パネル工法適用の耐摩耗性に関する検討

西松建設(株)　正会員　○山本　泰介
西松建設(株)　八木　秀親
西松建設(株)　白武　知浩

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．洪水吐の越流部の形状は，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曲線越流面を構築する場合，曲線型枠の使用と綿密なコンクリート打設管理が欠かせず，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くなる．そのため，フレッシュコンクリートの品質管理やバイブレータによる締固め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，硬化初期に曲線型枠を脱型し，金鏝による表面の仕上げを行うことが一般的である．

型枠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．また，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．

筆者らは，配合を変更することなく，打ち込まれたコンクリートの品質を確保・向上できるコンクリート舗装分野において豊富な適用実績を有する真空コンクリート工法に着目し，真空コンクリート工法をダムの越流部に適用し，耐摩耗性向上を図る手法について検討した．

本稿では，実大実験により得られた知見や現場適用事例について報告する．

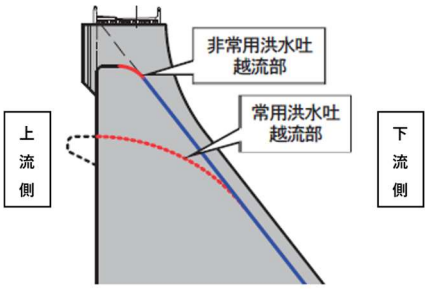


図-1 越流部の形状イメージ

２．真空コンクリート工法について

(1) 真空コンクリート工法の概要

真空コンクリート工法は，マット等のシートや木製等のパネル，ロータリーブロワー（真空ポンプ）により，大気圧を利用して打込み直後のコンクリートから余剰水を除去する工法である．このとき，コンクリート面には $1m^2$ あたり 6～8 t の大気圧が作用するとされており，コンクリートの水セメント比や水結合材比が低下するとともに，コンクリートは締め固められることになる[1]．そのため，真空コンクリート工法を行わないコンクリートに比べて，摩耗抵抗が増加するとともに，初期強度が増大するとされており，従来では一般道路，高速道路，駐車場のアプローチ部や坂道等のコンクリート舗装工において多くの適用実績を有する工法である．

(2) 真空コンクリート工法のダムへの適用

真空コンクリート工法は，任意のコンクリート部位の耐摩耗性向上が可能となる技術であり，耐摩耗性を必要とする越流部への適用は効果的であると考えた．また，配合については，ダムにおける構造用コンクリートへの適用を基本として，構造用コンクリートと比較して高い耐摩耗性を確保するため，高強度コンクリートへの適用性や効

キーワード　ダム，越流部，真空コンクリート工法，耐摩耗性
連絡先　〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-2-1 住友不動産虎ノ門タワー 西松建設(株)技術研究所 TEL03-3502-0247（代表）

果についても検討が必要であると考えた．

真空コンクリート工法のダムへの適用では，パネルを用いる工法（以下，真空パネル工法）を採用し，真空パネルを端太材等で固定することで，コンクリート打設時の型枠と真空コンクリート工法適用を一体とする構造とした．真空パネル工法は，既往の研究 [2)]において，余剰水に加えて気泡も除去できるため，表面気泡の発生抑制が期待できる．このことからも，ダム越流部への適用は有効であると考えた．

図-2 に真空パネルの一例，**図-3** に適用手順を示す．真空パネル工法で使用するパネル（以下，真空パネル）は，コンクリート打込み前に所定位置へ型枠として設置し，真空パネル工法における吸引（以下，真空処理）後に脱型する．なお，真空パネル工法において余剰水および気泡を吸引するための主要な資機材はロータリーブロワー，吸引ホース，真空パネル，シートおよび吸引口などで構成される．

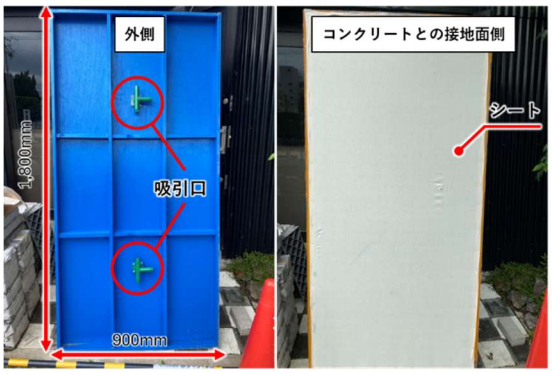


図-2 真空パネルの一例

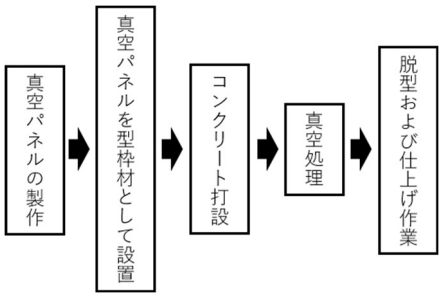


図-3 真空パネル工法の適用手順

３．実大実験

(1) 使用材料および配合

表-1 に実大実験に使用したコンクリートの材料を示す．使用材料は，当社が JV で工事を進めている川内沢ダム本体工事（後述）の使用材料である．結合材の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-2** に示方配合およびフレッシュ試験結果を示す．配合は，構造用コンクリート（C2 配合）と事前の実機試し練りにより定めた高強度コンクリート(C2H 配合)の 2 配合とした．C2H 配合は，本工事の使用材料を用いて圧縮強度が 50N/mm^2 以上となるように水結合材比（W/B）を設定した．圧縮強度は実機試し練りにおいて，材齢 91 日で 62.0N/mm^2 であった．

フレッシュコンクリート試験のスランプ，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 に準拠した．

表-1 使用材料

材料	記号		物性値等
セメント	C		中庸熱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	砕石 40～20mm (表乾密度：2.73 g/cm^3)
		G4	砕石 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

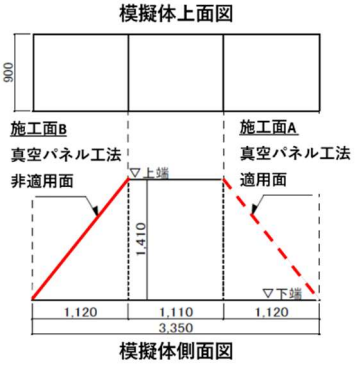


図-4 模擬試験体の形状

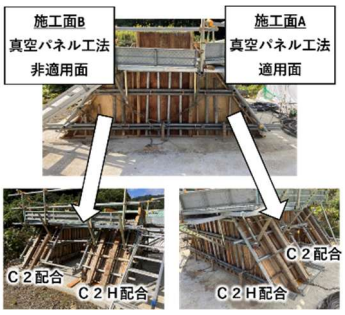


図-5 模擬試験体の状況

表-2 示方配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

配合	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3） W	B C	B F	S	G G3	G G4	Ad(C2) SP(C2H) (B×%)	AE (B×%)	フレッシュ試験結果 スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)
C2 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

(2) 模擬試験体

図-4 および**図-5** に模擬部材となる模擬試験体の形状および状況を示す．模擬試験体は，本工事のダム下流面の越流部を模擬した 1:0.79 となる最大勾配を施工面とした．模擬試験体の形状は，真空パネル工法の適用面と非適用面を対に配置した台形状とした．なお，模擬試験体は配合ごとに製作した．

(3) 実大実験

写真-1 に実大実験のコンクリート打設状況を示す．コンクリートは，本工事のコンクリート製造設備で製造し，模擬試験体への打込みは本工事のヤード内で実施した．コンクリートは練混ぜ後，トラックアジテータでヤードまで場内運搬し，フレッシュコンクリートが所定の品質であることを試験で確認した後に，コンクリート用ホッパーで型枠内に打ち込んだ．真空処理はコンクリートの打込み完了直後から開始した．**図-6** に真空処理状況を示す．真空処理に要した時間は C2 配合で 43 分，C2H 配合では 36 分程度で，C2 配合より水結合材比が小さい C2H 配合の方が短くなった．これは，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，ブリーディング水などの余剰水が相対的に少なかったためと考える．なお，既往の文献[1]によると真空処理の影響深さは 30cm 程であり，真空処理の時間については，深さ 25cm で 38.5 分との指標もあり，今回の処理時間は妥当な時間であったと考えられる．



写真-1 実大実験の打設状況



図-6 真空処理の状況

図-7 に一例として C2H 配合における脱型直後および仕上げ後の状況を示す．真空処理の適用面（施工面 A）は真空処理の非適用面（施工面 B）と比較して，脱型直後に現れる表面気泡が少ない状況であった．なお，金鏝仕上げ後の模擬試験体のコンクリート面には，ひび割れや剥離等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り湿潤養生した．

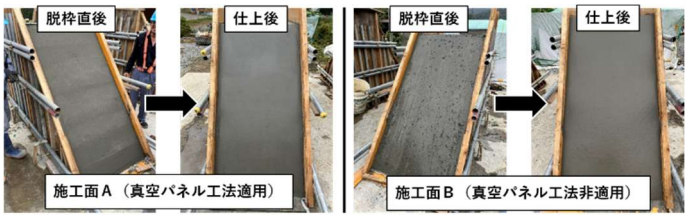


図-7 脱型直後および仕上げ後の状況

表-3 品質評価項目

評価項目	参考規格
表層透気係数	Torrent 法
表面反発度	JIS A 1155 JSCE-G 504
コア強度	JIS A 1107
摩耗係数	ASTM C 418
気泡間隔係数	ASTM C 457

4．品質評価

実大実験で製作した模擬試験体について，各種品質評価を実施した．**表-3** に今回実施した品質評価項目を示す．

(1) 表層透気係数

図-8 に表層透気係数の評価結果，**表-4** に表層透気係数グレーディング[3]を示す．表層透気係数の測定は，コンクリート表面含水率が 5.5%以下の条件で材齢 88 日に実施した．C2 配合では表層透気係数の変化は小さいが，C2H 配合では真空処理を適用した施工面 A が施工面 B より表層透気係数が大幅に低減した．表層透気係数は値が小さいほど緻密性が高いことを表しており，真空処理によるコンクリート表層部の緻密性向上が確認された．なお，表面反発度では真空処理を適用した施工面 A

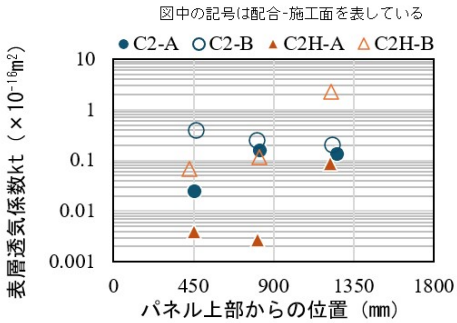


図-8 表層透気係数

表-4 表層透気係数グレーディング

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

が，施工面 B の同様箇所より高くなり，1：0.79 の傾斜面における改質が認められた．

(2) 圧縮強度

コア供試体を材齢 88，89 日に模擬試験体から採取した．**図-9** に C2H 配合のコア供試体採取位置の一例を示す．図中の①，②からは真空処理の影響深さの評価を目的に深さ方向に供試体を 2 本採取して，表層部と深部で区分して圧縮強度を比較した．コア供試体の寸法は，粗骨材の最大寸法（40mm）の 3 倍以上となる直径 150mm 程度とし，高さは 300mm 程度に施工面と直交方向に採取した．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．

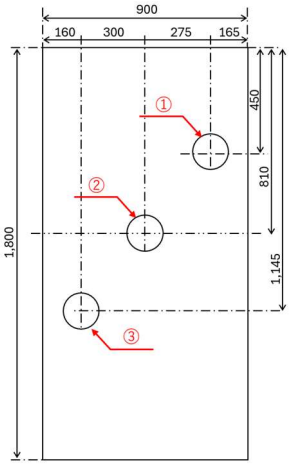


図-9 コア供試体採取

図-10 に，コンクリート表層部におけるコア供試体の圧縮強度を示す．表層部においては，いずれも真空処理した施工面 A から採取した供試体の圧縮強度が高い結果となった．**図-11** に，コンクリート表層部と深部の圧縮強度の比較結果を示す．表層部と深部の比較では，いずれも表層部の圧縮強度が高い結果となった．以上より，コンクリート表層面から深さ方向 30cm 程度で圧縮強度が向上することを確認した．

(3) 気泡間隔係数

気泡間隔係数の測定は，真空処理した施工面の耐凍害性評価を目的に実施した．試料は，C2H 配合の模擬試験体から採取したコア供試体中央付近で 150mm 角，厚さ 20mm 程度に切り出した．**表-5** に C2H 配合における気泡間隔係数の測定結果を示す．真空処理しても，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 200～250μm 以下を確保することを確認した．

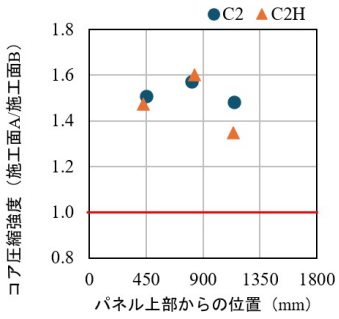


図-10 コア強度（表層部）

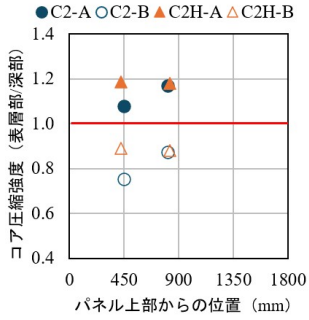


図-11 コア強度（表層部および深部）

(4) 摩耗係数

図-12 にコンクリート表層面における摩耗係数の評価結果，**写真-2** に測定状況を示す．測定用の試料は模擬試験体から採取した直径 150mm 程度の円柱供試体で，全ての施工面の同様位置から各 2 本採取した．採取した供試体においてコンクリート表層面から長さ 50mm 程度を切り出し測定用試料とした．摩耗係数は，測定用試料の施工面に所定の圧力および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．測定は 1 試料あたり 4 点とし，8 点の平均値を摩耗係数として算出した．摩耗係数は，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が，今回の測定では真空処理により，いずれの配合でもコンクリート表層面の耐摩耗性が向上した．

水結合材比が小さいことから C2 配合と比較して C2H 配合の方が高い耐摩耗性を示した．一方で，1:0.79 となるダム越流部においても，舗装コンクリートでの適用と同様，真空パネル工法の適用により耐摩耗性が向上することを確認した．

表-5 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

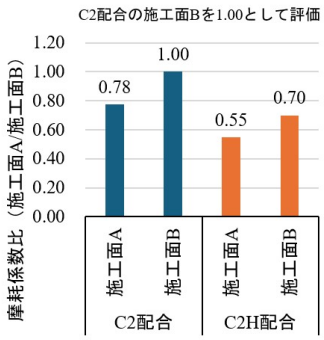


図-12 摩耗係数



写真-2 摩耗係数の測定状況

５．現場適用事例

表-6 に越流部において真空パネル工法を適用した川内沢ダム本体工事および適用部位等の概要を示す．本工事は，一級河川名取川水系川内沢川上流に位置し，名取市愛島笠島地内の治水や 10 年に 1 度程度発生する渇水に対する利水等を目的に建設するものである．

(1) 適用実績

写真-3 にコンクリートの打込み状況，仕上げ状況や仕上げ完了後の状況を示す．真空処理は，コンクリート打設が概ね完了した時点で開始した．真空処理する時間は，ロータリーブロワー（バキューム車）と繋がるホースの通水状況を目視確認するとともに，実大実験時の時間を参考に実施した．

今回の常用洪水吐および非常用洪水吐への適用では，実大実験時と同様に，仕上げ後におけるひび割れの発生等の不具合は確認されなかった．

(2) 現場適用における品質評価

品質評価は，施工したうちの 2 ブロック（4BL，6BL）を対象に，材齢はそれぞれ 50，47 日に非破壊測定により参考で実施した．品質評価は，実大実験時と同様に表面反発度の測定とあわせて，今回は超音波伝播速度を測定した．測定箇所は，非常用洪水吐における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（施工面 B）のそれぞれを相対的に評価した．

図-13 に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示す．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値+5 とした．表面反発度は施工面 B と比較して，施工面 A は 3 割程度向上した．

また，超音波伝播速度の測定では配合ごとにおいて，施工面 A の方が施工面 B の方より数値は高くなった．既往の文献 [4]によると，超音波伝播速度はコンクリートの圧縮強度との相関性が高いことから，真空パネル工法を適用することで，圧縮強度の向上が推察できる結果となった．

６．まとめ

今回の実験において，従来のコンクリート舗装で適用されている真空パネル工法は，1 : 0.79 のダム越流部への適用において，耐摩耗性の確保では有効であることを確認した．さらに，真空パネル工法の高強度コンクリートへの適用により，ダムにおける構造用コンクリートへの適用と比較して，緻密性や耐摩耗性が向上することを確認した．

現場適用においては，真空パネル工法を適用したコンク

表-6 川内沢ダムの工事概要等

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／提頂長	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-3 真空パネル工法適用状況

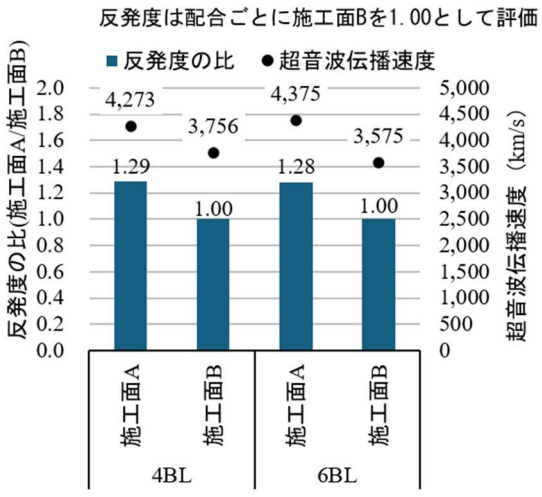


図-13 品質評価結果

リート施工面で，非破壊測定によりコンクリートの品質向上を確認した．ただし，真空パネル工法のダムへの適用にあたっては，品質向上の程度が使用材料やコンクリートの性状によって異なることが想定されるため，事前に実験等により作業手順を含めて確認するのが望ましいと考える．

ダム越流部における耐摩耗性の向上がダム全体の耐久性を直接的に向上させるものではない．しかしながら，本稿で示したダム越流部における耐摩耗性の向上に関する技術は，ダムの長寿命化や機能維持を図る上で有効な知見であると考える．

参考文献

1）高林利秋，真空コンクリート工法，pp.1-10，理工図書，昭和 37 年

2) 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, VI-81，2020 年

3）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

4）松土雄妃，超音波を用いたコンクリートの力学的特性の推定に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010 年