

浮体式仮締切設備

Floating Body System Cofferdam



神 藤 拓 也 Takuya Shindoh ①
 田 窪 宏 朗 Hiroaki Takubo ②
 宮 本 修 Osamu Miyamoto ③
 宇都宮 聡 太 Souta Utsunomiya ④

あ ら ま し

当社では国土交通省九州地方整備局、(一財)ダム技術センター、鹿島建設(株)とともに、浮体式仮締切設備を開発し、九州地方整備局向けの鶴田ダム上流仮締切設備として2013年に設置し、ダム再開発に寄与した。浮体式仮締切は扉体の内・外側面に鋼板(スキンプレート)を貼り、底蓋と一体化した仮締切扉体を浮体化し、扉体上方のダム上流面に設置した浮上り防止金物で浮力を支持する構造であるため、従来方式では大規模となっていた支保設備を大幅に低減でき、施工性を飛躍的に向上させた工法である。このため従来方式と比べて、潜水作業を約50%、工期を約4か月短縮することができた。また仮締切内への漏水量を従来方式の約1/10に低減し、品質的にも向上することが確認できた。

Abstract

We developed a floating body system cofferdam, which was installed upstream of the Tsuruda Dam in 2013 and contributed to dam redevelopment. The cofferdam is designed as a floatable connected body with steel plates on both sides of the gate leaf. Buoyancy is supported by brackets installed in the dam face. This reduces the support framework substantially—it was large in scale by the usual method—and improved workability by leaps and bounds. As a result, it was possible to reduce dive work by 50%, and the term of construction by 4 months. Furthermore, it reduced the amount of leakage in the cofferdam to about 1/10 of the usual method and improved quality.

1. 緒 言

近年既存するダムの治水・利水機能を強化するダム再開発事業が増えており、全国的に計画・実施されている。施工はダムを運用しながら行うことが多いため、鋼製の仮締切設備を設置し、その内部の水を抜きドライな空間を確保して各種の作業を実施している。

従来の仮締切は、支持架構形式と台座コンクリート形式が主流であるが、両形式とも大深度での水中施工が多

く、安全性や工程・コストなど多くの課題があった。そこで平成23年に鶴田ダムの再開発工事を契機に新しい形式の仮締切の開発に着手した。その目標は次のとおりとした。

目標：仮締切の組立・設置・撤去工事における以下の課題を克服する工法を確立すること。

課題①危険性が高く作業効率の低い潜水作業を低減。

課題②工程・コスト増となっている台座コンクリート、支持架構の削減。

課題③組立・設置・撤去作業の効率化。

課題④主な作業ヤードであるダム堤頂道路の占有期間短縮。

2. 従来方式の特徴と課題

従来の仮締切工法は、鑑畑ダムに代表される「支持

① Hitz日立造船㈱ 社会インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 水門部 技術士(建設)
 ② Hitz日立造船㈱ 社会インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 水門部 技術士(建設・総合技術監理)
 ③ Hitz日立造船㈱ 社会インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 建設工事部
 ④ Hitz日立造船㈱ 社会インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 水門部

架構方式」と、五十里ダムに代表される「台座コンクリート方式」が主なものである(図1)。

2.1 支持架構式 堤体上流面に仮締切に作用する浮力を受ける支持架構を設置した後、削孔直下部に仮締切受金物を設置し、その上に底蓋を取り付け底蓋上に仮締切を積み上げて構築する方法で、貯水池内に構築物が不要となる。一方、設備重量が大きいこと、支持架構を先に設置するため仮締切を降ろすための吊り材が必要となること、設置に時間を要するとともに潜水作業が長時間にわたること、等の課題があった。

2.2 台座コンクリート式 堤体上流側の削孔位置底部に台座コンクリートを施工し、台座上に仮締切を積み上げて構築していく方法で、仮締切に作用する浮力は台座コンクリートが受けるため支持架構が不要となる。一方、台座コンクリートの施工は、非洪水期での施工制限や難易度の高い水中作業・潜水作業が多い等の課題があった。鶴田ダムにおける当初計画はこの方式であった。

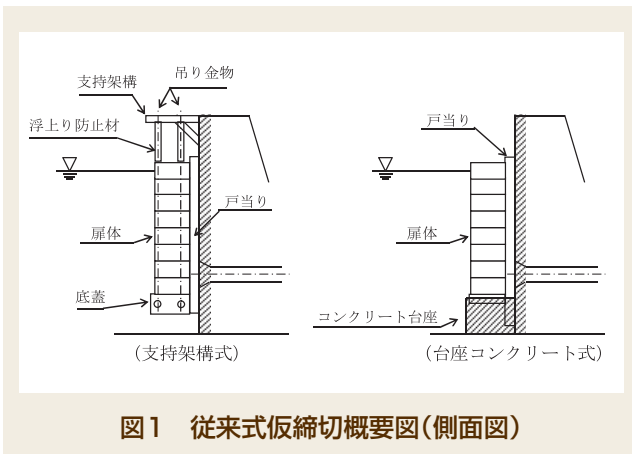


図1 従来式仮締切概要図(側面図)

3. 浮体式仮締切設備の概要

浮体式仮締切は、仮締切扉体の両側にスキンプレートを取り付け、気密室を設けることにより浮体化し、浮上り防止金物を設置することで、仮締切設備の自重および浮力を支持する形式である(図2)。通常工法であれば最下段扉体は台座コンクリートの底部戸当りに載せる形となるが、浮体式ではこれに変えて底蓋を設置する。

浮体式仮締切の利点は以下のとおりである。

- 高深度潜水作業となる台座コンクリート関連工事(掘削・浚渫・水中コンクリート打設)が省略でき、底部戸当り掘付・2次コンクリート打設も不要となる。
- 扉体組立は水上作業となり、潜水作業はバラスト調整の軽作業のみとなる。
- 扉間の水密ゴムつぶれ代が気中で確認できる。
- 仮締切の転用を計画している場合、その作業が軽減される(従来の方式では各ブロック毎に解体し、再度組み立てる必要があるが、浮体式では解体せず一体のままで移設する。)

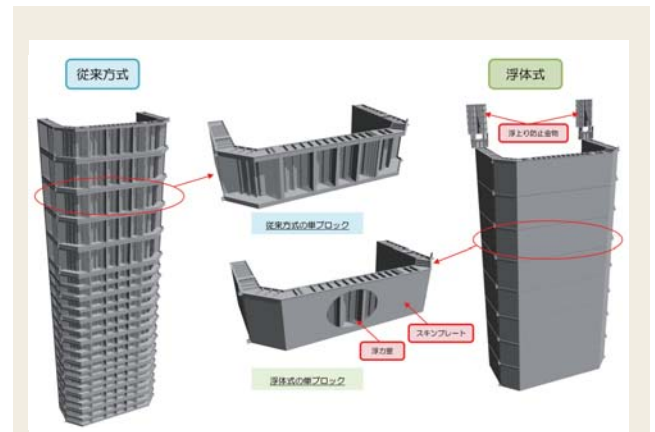


図2 仮締切の方式による扉体構造の違い

3.1 扉体および底蓋 浮体式仮締切の扉体は、従来方式の扉体と基本形状は同様であるが、両面にスキンプレートを設けて気密室をとしていることが特徴である。各ブロック内の気密室はさらに小さな区画に分割され、各々にバルブを取付、充水・排水を可能とし、浮力の調整を行えるようにしている(図3)。



図3 扉体の浮力調整機構

3.2 戸当り 側部戸当り構造は従来の型式と同じであるが、底蓋があるため底部戸当りの施工が不要となり、戸当りは額縁状とした。また戸当り形状を、不陸計測結果にあわせて製作したことで扉体～戸当り接地面の平面度を10mm以下とでき、従来工法と同等の止水性能を確保できる形式とした。

3.3 支承部構造 従来方式の扉体支承部では、戸当りとの接触部分に木材を、止水についてPゴムを、各扉体ごとに取り付けていた。浮体式では、扉体全体を一つのブロックとして戸当り側へ取り付けるため、変形性の高い沈埋函用のゴムガスケットを使用して止水を図ることとした(図4)。沈埋函トンネル用のゴムガスケットは、荷重に対する変位特性や止水性等が室内実験により確認されており、その結果を元につぶれ代を50mmとした。なお、戸当りに接する部分には従来から用いられている木材を併用しており、水深の大きい部分には木材の配置を密にするなどの対応は従来の方式と同様とした。

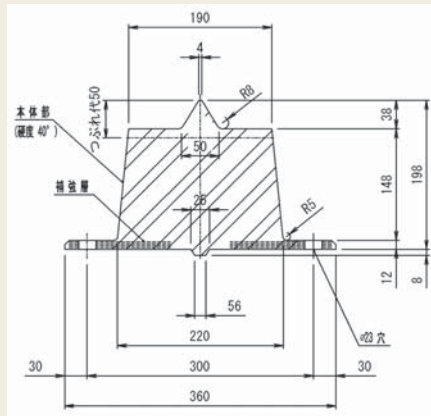


図4 ゴムガスケット形状

3.4 浮上り防止金物 仮締切上部の堤体上流面に浮き上がり防止金物を設置し、浮力を支持している(図5)。金物はアンカーにより堤体に固定する。なお、最上段締切の動きを浮き上がり金物が拘束しないよう、浮き上がり金物と扉体の間には摺動板を設置した。



図5 浮上り防止金物



図6 扉間連結金物と緊定金物

3.5 扉間連結金物 浮体式仮締切では水上で一体化した扉体を曳航して戸当り側へ据付をおこなうた

め、各扉体の間を扉間連結金物で接続した。扉間水密ゴムのつぶれ代確保・確認もこの部分で行った。

3.6 緊定金物 扉体を戸当り側へ密着させ、地震等の荷重が作用しても離れないよう、緊定金物を1ブロックに4本ずつ設置した(図6)。

4. 3Dモデルによる浮力と強度の確認

浮体式仮締切は水上組立から曳航、据付までの各段階で、気密室への充水/排水により浮力調整が逐次可能になったことが大きな特徴であり、扉体の各状態ごとに強度や浮力バランスの検討を行う必要があった。浮体式の設計は、十分確立された従来式仮締切の設計手法の延長であるが、一般的な水門とは異なるコの字形であり、浮心・重心も複雑になることから、3Dモデルによる要素解析を行い、従来手法との比較にて設計の妥当性を評価した。解析ソフトはABAQUS ver 6.12-1を使用した。

4.1 扉体の強度の確認 3D解析の結果は従来手法と大きな相違はなかったが、局所的に大きな応力が生じることが確認された。底蓋と扉体BL8間の支圧部(図7)と最下段扉体の隅角部(図8)である。これらは応力集中によると考えられた。従来手法では応力集中は安全率に見込まれており、発生力も鋼材の引張強度未満であることから、問題ないと考えた。また施工後に該当部を確認したところ、変形等は生じていなかった。

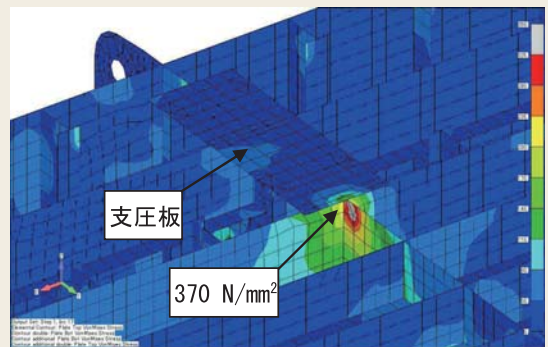


図7 底蓋支圧部のミーゼス応力分布図

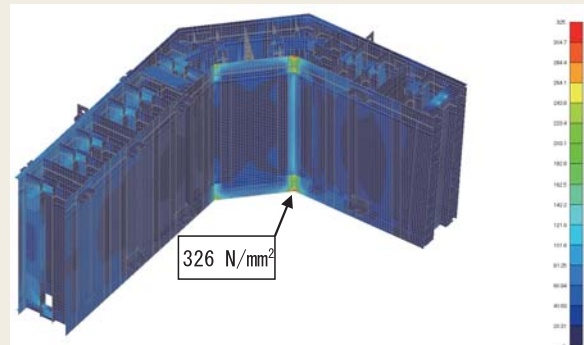


図8 扉体BL8のミーゼス応力分布図

4.2 重心・浮心位置の確認 扉体は主桁、スキンプレート、複数のリブなどが扉体ブロックごとに配置

され組み立てられている。そのため、重心位置や浮心位置の算出は容易ではない。特に浮心位置は組立手順や曳航時など、乾舷と喫水高さの関係による浮力やバラスト水の配置などが変われば常に異なるため、正確に算出することは非常に困難といえる。

これらについて3Dモデルで扉体構造を正確に再現することで、重心位置を把握することができ、さらには浮力やバラスト水重量を荷重として入力することで、浮心位置も把握することが出来た。これらの結果を手計算に反映することで精度の高い組立手順を計画することが出来た。

5. 施工

5.1 施工フロー 浮体式仮締切の施工は、**図9**のフローのように大きく6つのステージに分けられる。

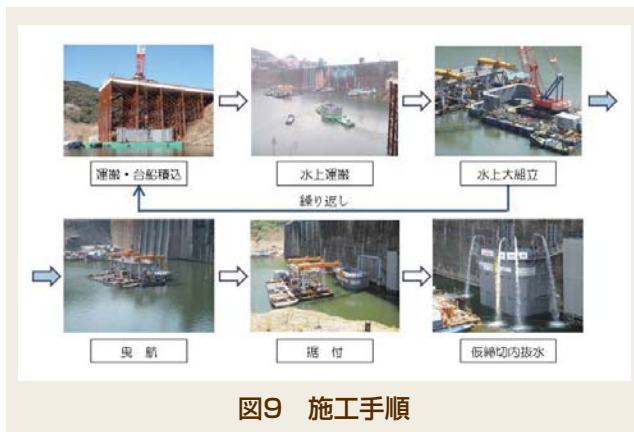


図9 施工手順

このフローの中で、「水上大組立」して一体化された扉体を「曳航」し、一体のまま「据付」を行うことが、浮体式仮締切工法が従来工法と大きく異なる特徴である。「水上大組立」にあたっては、「水上運搬」した扉体を台船クレーンで吊上げ、湖中央部で下部ブロックの上に重ねていく。下部ブロックは扉体組立台船から4つのチェーンブロックで吊り下げており、それぞれの荷重をロードセルを介して管理している。このとき扉体の接合面は水上にあるため、扉間水密ゴムの当り、つぶれを容易に確認できる。また潜水作業が必要最小限にできるため、約50%を低減することができた。

上下ブロックを扉間連結ボルトで締結固定したのち、扉体内部の所定のブロックに注水し、上部ブロックの天端が水面上約1mとなるよう、沈降させる。この上にさらに上部のブロックを繰り返し重ねていくことで、全ブロック（鶴田ダムでは底蓋1ブロック+扉体8ブロックの計9ブロック）を一体化することができる。

従来方式では扉体の一体化を堤体面の据付場所で行う必要があったが、浮体式では側部戸当りの施工期間中に貯水池内で組立できるので15日の工程短縮となるとともに、クリティカルパス工種ではなくなる。また、堤体面での据付期間が短くなることで、主な作業ヤードであるダム堤頂道路の占有期間が短縮される。

さらに鶴田ダムでは台座コンクリートの一部削減となる

ことから、工期を約4ヶ月短縮できた。

6. 設置確認および供用の結果と考察

6.1 浮上荷重 浮上荷重は抜水前（無荷重状態）からの変化量を示しており（**図10**）、抜水後は合計約40tonf程度となり、観測期間中に無負荷になったり異常な上昇が生じることはなかった。この荷重は算定値の850tonfと比較して非常に小さい。これは正面からの水圧が合計約1700tonfと大きく、支圧木材が戸当り面に強く押し付けられたために生じた摩擦力が反対向きに作用したことが原因であると考えられる。

摩擦力は不安定であるため、設計条件としては考慮していないが、計測結果から摩擦係数として以下の値が推定される。

摩擦係数 $\mu = (\text{算定浮上荷重}850\text{tonf} - \text{計測浮上荷重}40\text{tonf}) \div \text{水圧合計}1700\text{tonf} = \text{約}0.5$

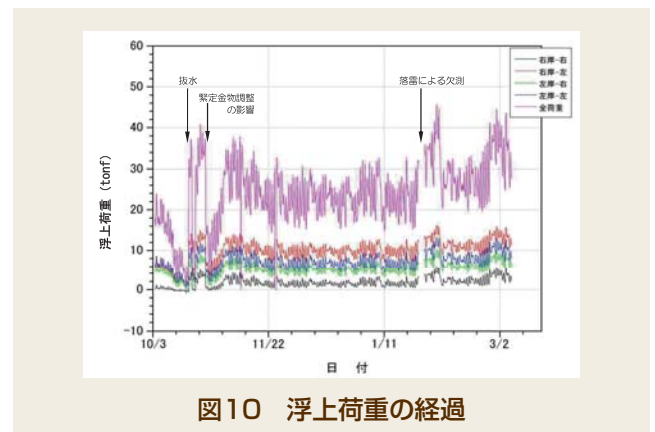


図10 浮上荷重の経過

6.2 扉体の応力 扉体の最大応力度は抜水時に約80N/mm²、運用完了時に約70N/mm²であり、許容応力180N/mm²と比較して問題ないレベルであった（**図11**）。応力は抜水や緊締金物の調整時以外では、貯水位の変動などによる微小な変化が生じたのみであり、また共用期間内で大きな変動もなかったことから十分な性能を有していたと考えられる。

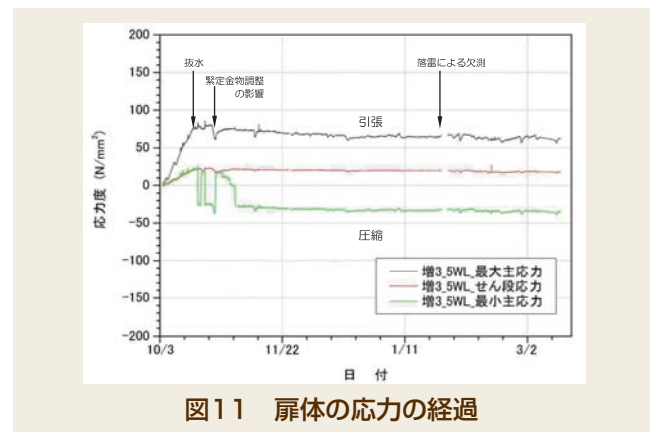


図11 扉体の応力の経過

6.3 戸当りの応力 扉体～戸当り間の摩擦力は、戸当りから堤体へ伝達することになるため、戸当りについても応力計測を行った。戸当たり応力は抜水前（無荷重状態）からの変化を示しているが、観測期間中を含めて

も、摩擦力が戸当りに与えた応力の大きさは、最大でも20N/mm²程度と許容応力120N/mm²に比較して問題ないレベルであった(図12)。この理由として、荷重が戸当りからアンカ金物を通じて局所的に堤体へ伝達されるだけでなく、戸当り裏面に打設した水中コンクリートとの摩擦によって設地面全面で広く分散して伝達したのではないかと推定される。

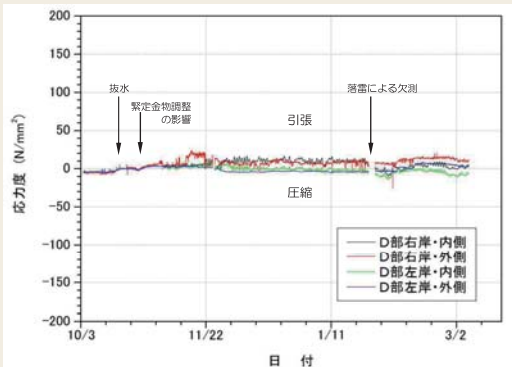


図12 戸当りの応力の経過

6.4 緊定金物の張力 緊定金物は施工により個々に引張荷重が作用しているため、抜水によって扉体がダム堤体に押付けられ、軸力が抜けた状態を零点として監視した(図13)。抜水後、緊定金物はおおよそ2~10tonfを目標値として増し締めした。これはこれまでの経験により、木材や水密ゴムのクリープで荷重が減少する傾向が確認されており、これによる低減分を考慮したためである。増し締めは計二回行った。二回目の調整後から完了時までの左右岸ロードセルの平均値は、クリープによって最大10tonf程度低下しており、おおむね従来の仮締切設備と同様の挙動を示していることがわかった(表1)。

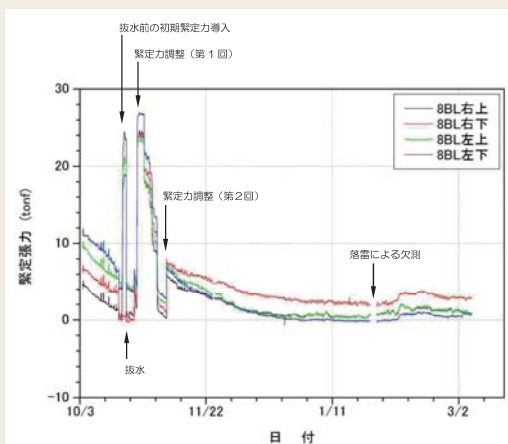


図13 緊縮金物の張力の経過

表1 緊縮張力の変化(単位:tonf)

	左岸	右岸
2回目調整後	13.4	14.7
完了時	2.0	1.9

6.5 漏水量 漏水量は、底蓋に設けた釜場の水位上昇(水位計)から測定した。数回計測したところ、0.92~2.76リットル/minと非常に良好であり、従来方式の約1/10に低減されていることが分かった。

従来の仮締切形式と比して漏水量が改善した理由としては、次のものが考えられる。

- ①扉体~戸当り間の水密ゴムは、従来式では扉体ブロックごとに分割されていたが、浮体式では扉体全ブロックを組み立てた後に連続したゴムガasketを設置している。このため水密ラインにブロック間の隙間が生じることがなくなった。
- ②各扉体ブロック間の水密ゴムは、従来式では積み重ねを行った後、ダイバーにより連結作業を行っていたため、設置状態は水中での確認となっていた。浮体式では各扉体ブロック間の連結を水上で行っており、またその際に設置状態(水密性)の確認を行っている。このため扉間水密ラインの確実性が向上した。

7. 今後の課題

浮体式仮締切設備の設置確認および供用を経て、種々の計測・確認を行った結果、従来方式と同様の性能と安全性が確保できることが確認された。また、鶴田ダムにおける再開発工事のうち最も重要な堤体面の掘削を無事完了することができた。これらの結果を受けて今後の課題(改善点)として、大別すると次の五点があげられる。

7.1 扉体への注排水計画 扉体の湖面上大組立について、注排水による姿勢制御について事前の入念な計画が必要であり、浮力/バラスト室の注排水計画が重要である。今回の施工では注排水装置の誤操作防止などの観点から、5~8ブロックの扉体のみ注排水装置を設け、その他の扉体は固定空気室とした。今後の施工においては、気密溶接の不具合で漏気が生じるなどの万一の事態に備え、扉体没水後であっても対応できるように、より多くの注排水装置設置を検討することが望まれる。

また長い共用期間に、注排水装置からの漏気を生じないように、バルブ出口への閉止プラグ取付や操作レバーの一時撤去など、二重の対策を行うことが望ましい。

7.2 扉体の内空面積 浮体式仮締切では、水上大組立や曳航のため、扉体の外周/内周に連結金物を設ける必要がある。このため、扉体の内側の各所に突起物が発生する。今回のように内部足場や作業時の余裕を考慮した広い内空面積が確保された設備では問題ないが、小規模の浮体式仮締切となる場合には、この突起物について考慮した内空面積の検討が必要である。

7.3 ゴムガasket ゴムガasketが扉体全ブロックに対して連続したゴムであることは水密性の向上に大いに寄与しているが、その全長は約64mと長いので、取付ガイドを設けるなどの工夫を行ったもののその作業は容易ではなかった。

ゴムガasketのツブレ代は50mmと従来タイプの10倍程度の量となっている。また、扉体を戸当りへ据え付ける際には、緊締金物による引き寄せを行うため、ツブレ代が大きい場合は引き寄せの作業が多くなる。また引き寄せは全体を均等に行わないと局所的な反発が大きくなって作業性が悪化する。このため、引き寄せの調整量および引き寄せ力を考慮し、施工性向上を図ったほうがよいと考えられる。

ゴムガasketの水密性はこのツブレ代によるところが大きいことから、安易にツブレ代を小さくすることは得策ではないが、戸当り面の精度を高くできる場合は、やや小さくした場合でも水密性を損なわない最適な量を検討しうると考えられる。

7.4 扉体～戸当り間の摩擦力 扉体正面からの水圧作用時には、扉体～戸当り間に摩擦力が作用していることが分かった。

地震時など水圧が作用しない場合には、摩擦力を期待することはできず、浮上り防止金物や緊定金物にて堤体面へ保持することが必要であると考えられる。

摩擦力とは、二つの物体が接触している際に、その接触面に平行な方向に働く力であり、接触面の状態（ざらざら/つるつる）や、接触面に垂直に働く力によって決まる。

扉体～戸当り間の摩擦力は浮上荷重を大いに低減しているが、接触面の状態はゴムガasketや木材によるものであるため必ずしも均一ではない。また地震時など水圧が作用しない場合には、接触面に垂直に働く力が喪失されることを鑑みると、摩擦力は不安定な現象であり、常時発生する荷重とは考え難い。

よって今後の浮体式仮締切においても、浮上荷重を負担する浮上り防止金物や、扉体を堤体面へ固定する緊締金物は必要な設備であり、摩擦力の発生/喪失にかかわらずに機能を有するよう、仮締切設備を設計・計画することが必要である。

7.5 浮体式仮締切の適用範囲 鶴田ダムでの施工では、従来式仮締切の大きさの実績を鑑みて、増設用3号のみをその対象とし、これまでの実績より大きな寸法である増設用1、2号や発電用仮締切の施工は従来方式にて行った。今回の施工の結果、より大きな寸法についても従来方式で問題なく施工できたことから、浮体式においても同規模の仮締切であっても、入念な施工計画の下で施工可能であると考えられ、他ダムにおいてさらに大規模な仮締切への適用が期待される。

8. 結 言

鶴田ダムにおける施工から、浮体式仮締切は、品質向上・コスト低減・工程短縮・安全性向上・環境負荷の軽減に大きく寄与することが確認された。

浮体式仮締切はダム堤体に新たに孔を空けて放流管やゲートを設置する再開事業の仮締切として、ダムの規模や堤体削孔の数および施工水深にとらわれることなく適用できる。また台座コンクリートが不要になることから、貯水池内での浚渫や基礎掘削にともなう汚濁水の発生および施工設備で使用する油脂類の流出を防止でき、産業廃棄物となる残土が発生しないなど環境負荷の軽減において社会に果たす役割は大きいと思われる。最後に本工事の施工に際し、終始適切な御指導、御支援を頂いた九州地方整備局川内川河川事務所の関係各位、(一財)ダム技術センターの藤澤顧問はじめ関係各位、鹿島建設(株)の関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中田利治, 川口和也, 西原徹: 鎧畑ダム仮締切設備工事の概要, 日立造船技報, 1992, 53 (1), 51-60.
- 2) 仲保京一, 原亮三, 宮本修: 五十里ダム仮締切設備工事, 取水と制水, 2005, 49, 7-19.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 社会インフラ事業本部
鉄構・防災ビジネスユニット 水門部
神藤拓也
Tel : 072-243-6714 Fax : 072-243-6823
e-mail : shindoh@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Infrastructure Business Headquarters
Steel Structure & Disaster Prevention
Business Unit
Hydraulic Gate Execution Department
Takuya Shindoh
Tel : +81-72-243-6714 Fax : +81-72-243-6823
e-mail : shindoh@hitachizosen.co.jp



神藤拓也



田窪宏朗



宮本修



宇都宮聡太