

新型（ベローズ式）選択取水設備の研究開発について

内閣府 沖縄総合事務局 北部ダム事務所 調査設計第二課 しろまかつみ 城間克巳

1. 目的

公共工事のコスト縮減は、きわめて重要な課題となっている。ダムに設置される各種ゲート設備も例外ではなく、新技術を導入してライフサイクルコストの縮減を図ることが強く求められている。そこで、北部ダム事務所では民間の新技術を活用した選択取水設備の研究開発を行うこととした。

2. 新技術の提案

大保ダムの選択取水設備について、平成15年度に設計・施工に関して豊富な経験を有する専門業者（19社）に対して、下記に示す条件の小規模の選択取水設備の構造形式や細部技術について、従来の経験に囚われることのない新技術の提案を募集することとした。

【募集する技術の条件】

- 技術の範囲・・・ライフサイクルコストも含めたコスト縮減に資する新技術の提案
- 対象設備・・・重力式コンクリートダムの堤体に付属して設置する選択取水設備
- 設備機能・・・
 - ①放流水及び貯留水の水質対策のため、常時満水位から最低水位までの標高差45m間の任意位置での取水が可能である
 - ②最大取水量 $2.2\text{ m}^3/\text{s}$ とする
 - ③貯水位が常時満水位の状態メンテナンスが容易に実施できる
 - ④下流放流管の中心標高はE L 15.5 m程度とし、水位低下用放流設備として最大 $26.6\text{ m}^3/\text{s}$ を放流する
 - ⑤取水後は管理用発電設備及び圧力管路による直接送水に分流する

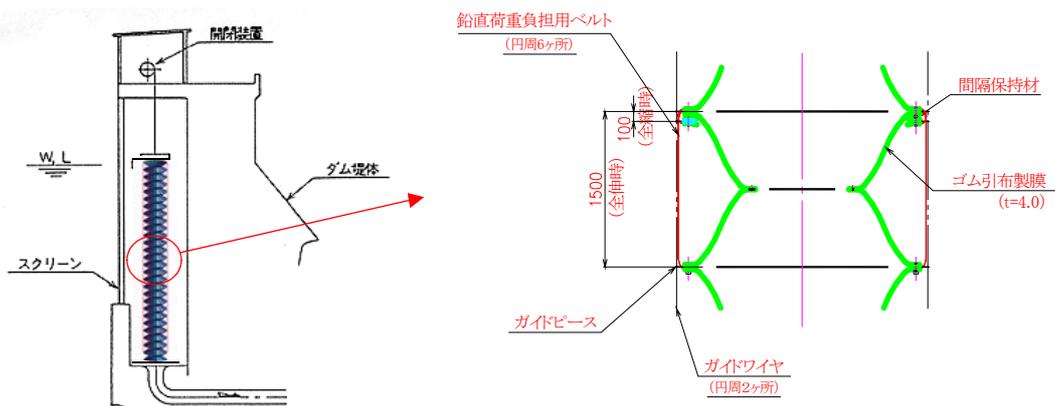
新技術の提案依頼を行った結果、10社から新技術提案を得ることが出来た。それらについて、①設計条件に適合していること、②実現の可能性があること、③コスト縮減に寄与すること、等の観点から評価を行い、最終的に「ベローズ式選択取水設備」を選定した。

2. 1. 新技術の内容

「ベローズ式選択取水設備」の最大の特徴は、従来のダムで実績の多い円形多段式選択取水設備の鋼製円形ゲートの部分を、安価で軽量、耐食性に優れたゴム製品を多用するゴム引き布製のシート及びステンレス製のリングにより構成された蛇腹構造（ベローズ）に置き換えることで、建設コストと維持管理コストを低減できることである。

この蛇腹構造の取水管は、その伸縮により任意の位置での取水を実現するものであり、また水密性にも優れている。

また、主材料には、金属材料に比較して安価で軽量、耐食性に優れたゴム製品を多様することで、初期コストと維持管理コストを低減できる。



図－1 蛇腹構造（ベローズ）概要図

比較ケース		A案	B案	C案
比較項目		側壁付円形多段式 (従来型)	側壁付円形多段式 (コスト削減型)	ベローズ式 (今回提案型)
機械設備費	(製作据付)	147%	100%	80%
土木工事費	(側壁部)	162%	100%	76%
維持管理費	(30年間)	166%	100%	97%
機器更新費	(30年間)	197%	100%	104%
合計		159%	100%	86%

表－1 経済性比較表

2. 2. 技術的課題

「ベローズ式取水設備」の主要部分となる蛇腹構造においては、柔軟性のあるゴム引き布製シートを加硫接着加工して製作する蛇腹ユニットを組み合わせる用いることから、以下の技術的課題を解決する必要がある。

I. 材料関係

- ① ゴム引き布製シート及び鉛直荷重用ベルトの機械的性質の確認
- ② 蛇腹ユニットを構成するゴム引き布製シート等の接合部強度の確認

II. 構造関係

- ③ 蛇腹構造の伸縮作動性能の確認
- ④ 蛇腹ユニットの内外水位差に対する形状保持性能の確認

III. 水理関係

- ⑤ ベローズ内部の水理特性（エネルギー損失、流体力による振動）の確認

ゴム引き布製シートはゴム引き布製起伏堰等の重要構造物にも用いられてきており、材料としての基本的な課題は解決されていると考えられるが、構造及び水理関係の課題を含め、各種の実験を通して、その解決策を検討することとした。

3. 共同研究

平成16年度は技術的課題を解決するために、北部ダム事務所と民間業者（1社）との

間で共同開発協定を締結し、その中で北部ダム事務所は水理模型実験を行い、構造及び水理特性を把握・検討することとし、民間業者は材料特性試験及び作動模型実験を行い、耐久性等の把握やベローズの作動性の確認をする共同研究を行うこととした。

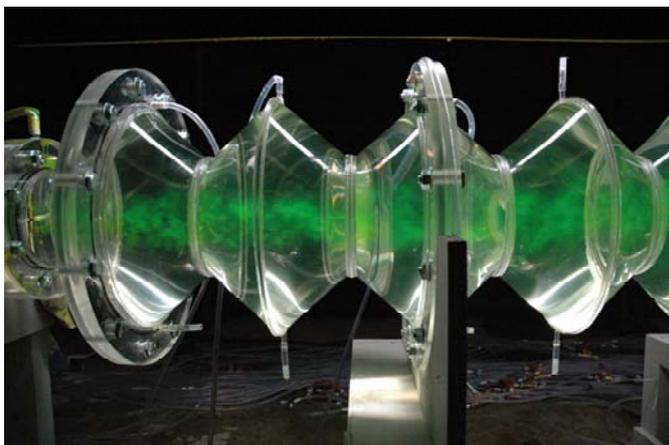
【北部ダム事務所】

ベローズ部について、流路としての特性を調査するため、剛体模型と柔構造模型による水理模型実験を実施した。

1) 剛体模型実験

①流況調査

ベローズ部の連続する凹凸形状による流況を把握する目的で、管内に色素もしくは空気を注入し、流れの剥離と渦流の発生状況等、ベローズ部の流れパターンを観察・記録する。



写真－1 剛体模型

②圧力特性調査

流況調査の結果を踏まえて、ベローズ部の3節にピエゾメータを配置し、平均圧力の分布及び各部の圧力変動を調査する。

③損失特性調査

ベローズ部の連続する凹凸形状による形状損失特性を把握するため、取水量～損失水頭の関係を調査し、損失係数を評価する。



写真－2 柔構造模型

2) 柔構造模型実験

①振動発生状況調査

剛体模型による流況調査の結果を踏まえ、ベローズ構造の振動・変形状況を調査する。

【民間業者】

1) ゴム引き布機械的性質測定試験

①ベローズ部

ベローズは取水機能を確保するために最も基本となる部材であるため、想定される荷重条件に対して十分な耐力、耐久性を保持する必要がある。そのため、以下の実験を行った。

・耐水圧試験

内外水位差 3.0 m に相当する内圧を 100 万回繰り返し作用させる試験

- ・ 屈曲疲労試験

ベローズの作動時、取水時に発生する曲げによる疲労特性を明らかにするため、100万回の屈曲を作用させる試験

- ②吊ベルト部（鉛直荷重用ベルト）

吊りベルトは、ベローズの自重を支える重要な部材である。そのため、以下の実験を行った。

- ・ 繰り返し疲労特性試験

ベローズの作動時、取水時に変局部に発生する引っ張りによる繰り返し疲労特性を明らかにするため、10秒周期で10万回の引っ張りを繰り返し作用させた試験

- ・ 屈曲疲労特性試験

曲げによる疲労特性を明らかにするため、100万回の屈曲を作用させる試験

- ・ 端部構造の検討

吊りベルトの固定部に関する構造断面の有効性を検討するため、静的引張実験を行い、引張強度が所定の強度を満足するか確認するための試験

2) 作動模型実験

ベローズの伸縮作動性能の確認をするために、実機の1/3模型を使用して①気中②水中（内外水位差なし）③水中（内外水位差あり）の状態における作動性・維持管理性（ベローズの交換手順等）の作動実験を行った。

4. 結論

4. 1 流況

模型実験結果より、ベローズ形状は、急拡、急縮部が連続する構造であるため、急縮部から噴流状に噴出する主流が急拡部において剥離し、渦領域が形成されることが把握できた。このことから、急拡部の剥離領域では、大小様々なスケールの渦構造が入り交じった不規則で三次元的な流れの構造が形成されていると推定される。これは、圧力測定の結果等からも同様であると推定される。

また、数値解析シュミレーション結果とも整合がとれており、今回実施した流量に対する流況については、ほぼ把握できたものと判断される。



写真-3 剛体模型流況調査

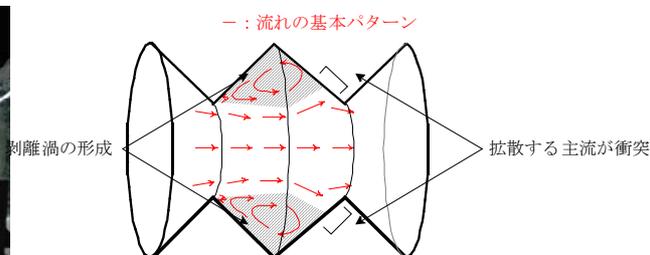


図-2 流れパターン図

4. 2 圧力変動特性

今回実施した3節分の詳細な圧力測定の結果から、ベローズに作用する平均的な圧力

分布の特性は、図-4に示すように急拡部において圧力が低下し、急縮部では主流が衝突することにより圧力が急激に増加していることが確認された。

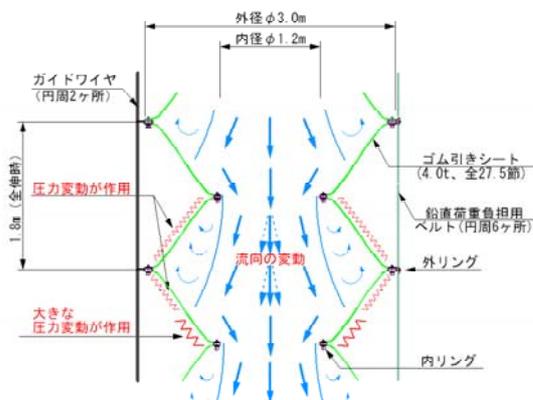


図-3 ベローズ圧力変動概要図

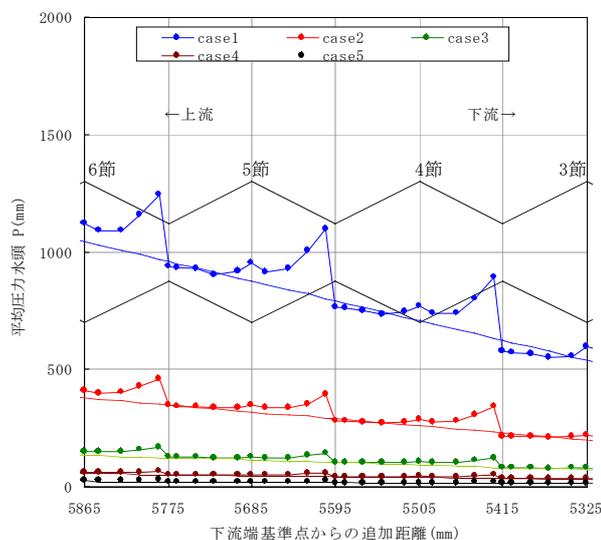


図-4 圧力変動図

4. 3 ベローズの損失特性

剛体模型を使用して得られた1節あたりの損失係数は0.478である。この結果からベローズ全体(27.5節)の損失水頭を計算すると2.6m程度と推定される。鋼製ゲートでは、一般に損失水頭を1.0m程度としており、そのままでは、ベローズ部の発生張力の増大、保安施設の操作性等、施設の安全性等懸念されることから、損失水頭を軽減するための対策が必要となった。

そこで、実験形状との相似形を前提に評価すると、内リング径を現行の1.2mから1.5m程度に変更することで27.5節分の損失水頭を1.0m程度に抑えることが出来た。

$$H_{\text{Loss}} = N \times f \frac{v^2}{2g}$$

ここに、N：節数(27.5)、f：ベローズ形状損失係数(0.478)、v：計画最大取水時の内リングを通過する平均流速(1.946m/s)、g：重力加速度(9.8m/s²)

内リング径	平均流速	損失係数	節数	損失水頭
φ1.2m	1.946	0.478	27.5	2.537
φ1.5m	1.246	0.478	27.5	1.039

4. 4 振動

柔構造模型を使用した実験結果では、取水時に発生する振動は、流水力の変動に起因する各節毎の内リング振動が支配的であり、柔構造模型全体(9節)の振動はほとんど検出されなかった。

内リング振動は、各節毎に動いており、隣接する内リングの振動は、180°の位相差を持っているため、お互いの振動をうち消しあって全体に波及しないことが推定できる。そのため、内リングの変動周波数とベローズ全体の固有振動数が近づいた場合でも全体系に波及する可能性は低いと判断される。

さらに、模型のベローズ部剛性が実機に対する相似剛性より低かったため、その変位はかなり拡大されており、実際の振動振幅は非常に小さいものと推測される。

なお、水理模型実験から予想できない全体振動が発生する場合でも、固定ガイドを増設し、ベローズ全体の固有振動数を上げることにより対応が可能である。

また、柔構造模型実験において流水力に起因する内リング振動が卓越していたため、放流口での流量変動を確認した結果、管理用（水力）発電設備の制御に影響を及ぼすほどの流量変動が生じる可能性は低いと判断される。

4. 5 ゴム引き布の材料特性

①ベローズ部

ベローズは取水機能を確保するために最も基本となる部材であるため、想定される荷重条件に対して十分な耐力、耐久性を保持する必要がある。

耐水圧実験、屈曲疲労実験を行った結果によると、永久ひずみが生じた場合の強度保持率、屈曲疲労を繰り返し受けた場合の強度保持率がともに80%以上であったことから、実機に適用した場合でも必要な耐久性が確保できるものと判断される。

②吊ベルト部（鉛直荷重用ベルト）

吊りベルトはベローズの自重を支える重要な部材である。作用する荷重は自重以外に様々な変動成分が想定されるが、ベルトの繰り返し疲労、屈曲疲労、端部構造の検討結果により、70%以上の強度保持率を確保しており、外観上も問題は認められなかったことから、実機に適用した場合でも必要な耐久性が確保できるものと判断される。

4. 6 作動模型実験

実機の1/3模型を使用して気中及び水中での内外水位差ありの状態における作動状況を確認したところ、水中での内外水位差ありの状態では、スムーズに作動しないことが判明したが、ベローズの収納形状を変更することによって、開閉操作がスムーズに行えることを確認した。実際の運用では、流水に伴う振動の影響が考えられ、実施において検証が必要と考えられるが、基本的な作動性能については確保されているものと判断される。

上述したとおり、水理模型実験や材料特性実験によって、当初想定した技術的課題が解決されたことから、民間の新技术を活用したベローズ式選択取水設備の実現が可能となった。今年度は、これまでの検討結果を踏まえて実施設計に取り掛かっているところである。

5. 今後の課題

水理模型等の各種実験によってベローズ形状の材料・水理特性等は、ほぼ把握できたと判断されるが、ゴム引き布製シートをダム用選択取水設備に採用することは、日本で初めての試みであることから、施設の機能維持を確認するためのモニタリングを行うなど慎重に検討を進めていきたいと考える。