

IEA 水力実施協定 ANNEX 11 水力発電設備の更新と増強
第二次事例収集（詳細情報）

事例のカテゴリーとキーポイント

Main : 2-c)土木建築分野の技術革新, 適用拡大, 新材料

プロジェクト名	: 神一(じんいち)・神二(じんに)・仏原(ほとけばら)ダムラジアルゲート取替工事
国、地域	: 日本, 富山県・福井県
プロジェクトの実施機関	: 北陸電力株式会社
プロジェクトの実施期間	: 2009年～2012年
更新と増強の誘因	: (A) 老朽化／故障頻発
キーワード	: ラジアルゲート, ゲート取替, 設計基準, 大規模地震

要旨

ラジアルゲートの設計について, 昭和48年にトラニオン支承部の詳細な強度計算法が民間基準として初めて規定されたことを受け, 北陸電力(株)では, 昭和48年以前に建設されたラジアルゲートについて, 腐食状況を把握しながら机上での応力解析, 現地での実応力測定等を行い, 安全性の確認を行ってきた。この結果を踏まえ, 神一ダム・神二ダム・仏原ダムの洪水吐ゲートについて, 扉体・開閉装置の取替を実施することとした。

ゲート取替に際して, ゲートの安全性を確保しながら, いかに効率的な設備形成を行うかという観点から, 工事範囲, 設備諸元, 施工時期, 大規模地震への対応等について検討した。¹⁾

1. プロジェクト地点の概要（改修前）

富山県の一級河川神通川の中流域に位置する神一ダム・神二ダムのラジアルゲートは設置以来54年が経過し, また, 福井県の一級河川九頭竜川の上流域に位置する仏原ダムのラジアルゲートは40年が経過していた。これらのゲートについて安全性評価を行った結果, 扉体・開閉装置の取替が必要であると判断し, 2009年11月から既設ゲート撤去工事に着手し, 2012年6月に工事を完了した。ダムならびにラジアルゲートの位置図, 諸元, 写真を図1, 表1, 写真1～3に示す。

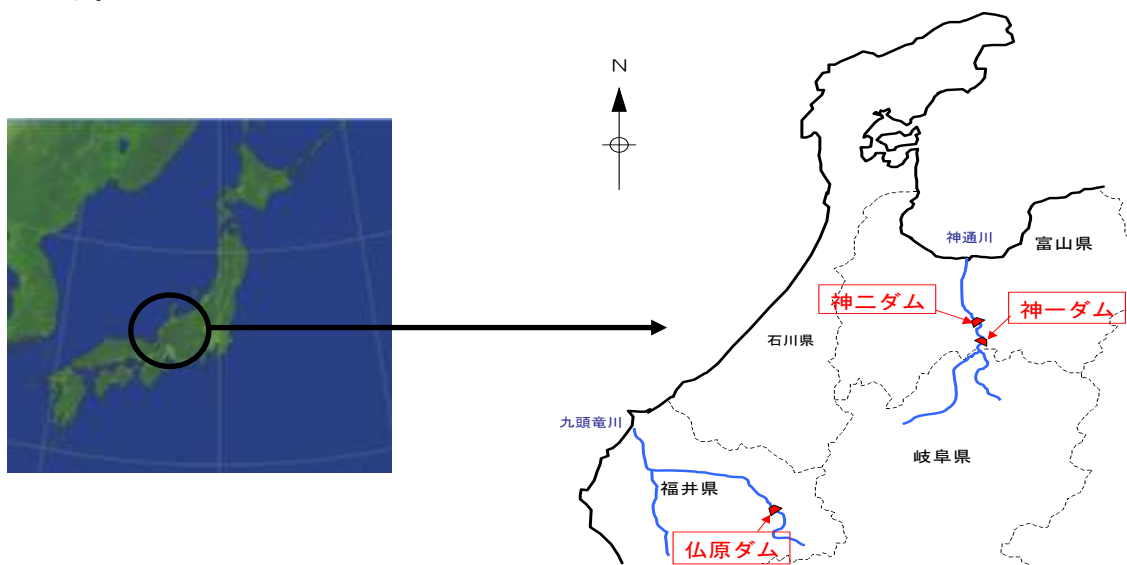


図1 ダム位置図

表1 ダム、ゲートの諸元

		神一ダム	神二ダム	仏原ダム
ダム	河川名	神通川水系 神通川	神通川水系 神通川	九頭竜川水系 九頭竜川
	流域面積	1.960.00 k m ²	2.060.00 k m ²	421.92 k m ²
	タイプ	コンクリート重力式	コンクリート重力式	コンクリート重力式
	高さ	45.00m	40.00m	48.60m
	堤頂長	344.40m	336.766m	141.0m
	堤体積	108,000m ³	107,000m ³	50,000m ³
	総貯水容量	11,346×10 ³ m ³ (建設時)	11,265×10 ³ m ³ (建設時)	4,100×10 ³ m ³ (建設時)
	有効貯水容量	3,494×10 ³ m ³ (建設時)	3,227×10 ³ m ³ (建設時)	1,650×10 ³ m ³ (建設時)
ゲート	タイプ	ラジアルゲート ワイヤロープ式	ラジアルゲート ワイヤロープ式	ラジアルゲート ワイヤロープ式
	門数	9門	9門	3門
	寸法	幅 9.20m 高さ 12.35m	幅 9.20m 高さ 12.35m	幅 9.20m 高さ 14.85m
	扉体半径	13.2m	13.2m	14.0m



上流より望む



下流より望む

写真1 神一ダム



上流より望む



下流より望む

写真2 神二ダム



上流より望む



下流より望む

写真3 仏原ダム

2. プロジェクト（更新/増強）の内容

2.1 誘因と促進要因（具体的なドライバー）

① 状態、性能、リスクの影響度等

(A)–(c),(d) 老朽化／故障頻発－低コスト化

社内規則で定めている「洪水吐ゲートの安全性評価指針」に基づき腐食状況調査、実応力測定等を行い安全性評価した結果、応力値がほぼ維持管理基準に近づいている状態にあり取替を計画した。

なお、維持管理基準は、2008年5月に公表された「水門扉等鉄鋼構造物の維持管理基準」²⁾を参考にした。

② 価値（機能）の向上

（該当なし）

③ 市場における必要性

（該当なし）

2.2 経緯

当プロジェクトの経緯を表2に示す。

表2 経緯

項目	神一ダム	神二ダム	仏原ダム
内容	1954.1 全ゲート運用開始	1954.2 全ゲート運用開始	1968.5 全ゲート運用開始
	2007.4 プロジェクト本格 検討開始	2007.4 プロジェクト本格 検討開始	2007.4 プロジェクト本格 検討開始
	2009.8 工事着工	2009.8 工事着工	2009.10 工事着工
	2010.5 I期(3門)工事完了	2010.5 I期(3門)工事完了	2010.4 I期(1門)工事完了
	2010.10 II期(3門)工事着工	2010.10 II期(3門)工事着工	2010.10 II期(1門)工事着工
	2011.5 II期工事完了	2011.5 II期工事完了	2011.4 II期工事完了
	2011.10 III期(3門)工事着工	2011.10 III期(3門)工事着工	2011.10 III期(1門)工事着工
	2012.6 III期工事完了	2012.6 III期工事完了	2012.4 III期工事完了

2.3 内容（詳細）

2-c) 土木建築分野の技術革新，適用拡大，新材料

新規のゲートの設計に際し、常時荷重については現行基準の「水門鉄管基準（水門扉編）」³⁾，「ダム・堰施設技術基準（案）（基準解説編・マニュアル編）」⁴⁾に準拠した。

なお、水力発電設備の既設ラジアルゲートの取替としては全国で初めて大規模地震に対する照査を行い、安全性を確認した。照査に際しては、「大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針（案）・同解説」⁵⁾を参考として、以下の条件で行った。

(1) 設計荷重

大規模地震時の設計荷重は、静水圧荷重，地震時動水圧荷重，地震時慣性力を見込むものとした（表3）。

表3 ラジアルゲートの大規模地震時の設計荷重

	神一ダム	神二ダム	仏原ダム
静水圧荷重 (常時満水位)	HWL182.0-EL170.5 =11.5[m]	HWL116.8-EL105.3 =11.5[m]	HWL335.0-EL320.916 =14.084[m]
地震時動水圧 荷重	8.444×10^3 kN	8.444×10^3 kN	1.276×10^4 kN
地震時慣性力	扉体自重×0.92	扉体自重×0.92	扉体自重×0.92

静水圧荷重は、供用中のダムにおいて通常時の状態として想定される水位で、地震が発生した場合にダムの構造物に対する影響が最も大きくなる常時満水位の荷重とした。

地震時動水圧は、堤体-貯水池連成系での2次元線形時刻歴地震応答解析を行い、動水圧荷重が圧縮側でピークとなる時刻を抽出した。更に、この時刻の動水圧分布をゲート受圧面で積分し、上下流方向の動水圧荷重を求めた。入力地震動は、「大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針(案)・同解説」で定義されている「照査用下限応答スペクトル」に適合する波形を用いた。

地震時慣性力は、取替前のゲートの安全性評価に用いた3次元FEM解析モデルを保有していたため、このモデルを利用し、上述した地震応答解析結果から得られたトラニオンピン位置の上下流方向応答加速度波形を用いて動的解析を行い、トラニオンピン位置での上流方向反力の最大値を求めた。本検討は、仏原ダムラジアルゲートについてのみを行い、扉体自重に対する地震時動水圧荷重の比率を求め、神一ダム・神二ダムでも同様な比率で作用するものとした。

(2) 許容応力

大規模地震時の許容応力は、降伏点を基準として「水門鉄管技術基準(水門扉編)」³⁾第15条に基づき設定した。

(3) 照査方法

上述した設計水圧を用い、現行基準に基づく設計計算結果と許容応力とを照査した。

なお、照査に際してゲートの状態は全閉状態とした。

上記(1)~(3)に基づき照査した結果、今回の場合は常時荷重が支配的な条件となり部材形状を決定した。

コストダウンと今後の維持管理に対して配慮した事項は、以下のとおりである。

(1)ゲート形状の変更

平面構造を門型からπ型に変更し、据付及び維持管理時等のスペースの配慮と重量減に努めた。(図2)

断面構造では、脚柱を不静定構造である3本脚から静定構造である2本脚に変更し、構造の単純化と重量を減少させ、コストダウンと維持管理の効率化を図った。

また、骨組構造は、現行と同じ縦補助桁横主桁方式とした(図3)。

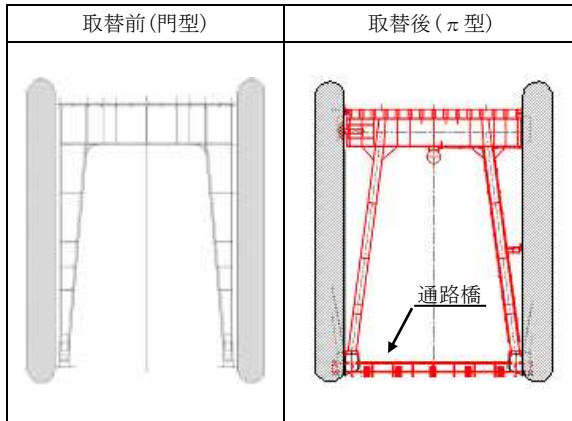


図2 平面構造の比較

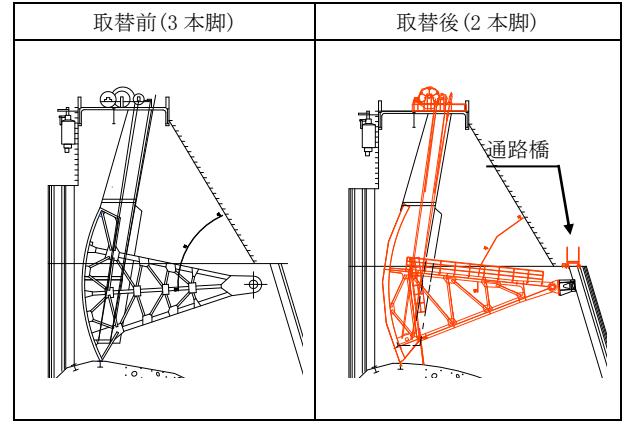


図3 断面構造の比較

(2)開閉装置電動機出力の変更

設置時の電動機出力は、機械効率の悪いウォーム減速機を採用していたことと、冬期の潤滑油の粘度を考慮し余裕を持たせていたことから、大きな電動機出力となっていた。

今回、機械効率の良いヘリカル減速機を採用したことと、冬期はヒーターにより潤滑油の粘度を一定に保つこととし、電動機出力を大幅に小さくする(神一ダム・神二ダム 22kW→7.5kW, 仏原ダム 15kW→11kW) ことでコストダウンを図った。

(3)通路橋の設置

神一・神二ダムでは、扉体点検時には、これまで開閉装置のスラブ上からタラップを昇降する必要があったが、トラニオンガード部と同じ高さでピア一間の通行が可能な点検歩廊(幅0.98m×長さ106.2m)をゲート撤去前に設置し、据付作業及び今後の維持管理作業時の安全性向上を図った(図2, 3, 写真4)。



写真4 通路橋設置状況(神二ダム)

(4)固定部・戸当りの流用

固定部については、現行基準（「水門鉄管基準（水門扉編）」、「ダム・堰施設技術基準（案）（基準解説編・マニュアル編）」）に基づき強度上安全であることを確認した。また、ダムコンクリートについては、ピア一部のボーリングを行い採取したコアを用いて、コンクリート物性値を確認した。（写真5）

コンクリート物性値について、圧縮強度試験，静弾性係数試験，超音波伝播速度試験等を行い，設計計算書で用いる許容値（建設時の許容値）で問題がないことを確認した。

戸当りについては、若干の腐食は生じているが、再塗装により使用可能であると判断し、既設を流用しコスト低減に努めた。

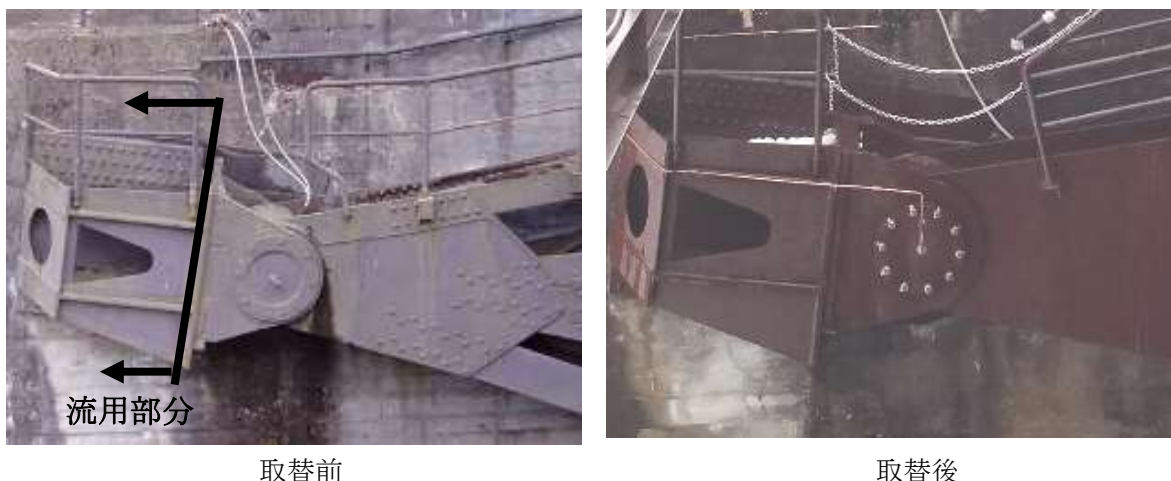


写真5 固定部の状況（神一ダム）

3. プロジェクトの特徴

3.1 好事例としての要素（注目点）

- ・ 大規模地震に対する対応
- ・ コストダウン及び維持管理を考慮した設備形成

3.2 成功の理由

ラジアルゲートの安全性評価の結果、応力値が維持管理基準に近づいていることから、できるだけ早い段階での更新が必要であった。

しかし、当ゲートは洪水流量を流下させるための洪水吐ゲートであり、神一ダム・神二ダムは11月～4月、仏原ダムは11月～3月の非洪水期に施工するよう、河川管理者からの指導があった。

神一ダム・神二ダムは過去30年の工事期間中の既往最大流量を調査し、施工中のゲート以外での放流能力から、最大2門を同時に施工し、6ヵ月で3門を更新する計画とし、3期で9門を更新した。

仏原ダムは、3門の洪水吐ゲートがあるが、1門施工中に出水によりゲート放流が必要となった場合に、1門がトラブルで故障した場合でも他の1門でバックアップ放流が可能となるよう配慮し、4ヵ月で1門を更新する計画とし、3期で3門を更新した。

なお、施工方法は、ダム水位を制限することなく、ラジアルゲート上流側に仮締切用の角落しを挿入して施工した。

4. 他地点への適用にあたっての留意点

(1) 大規模地震に対する対応

大規模地震に対する照査方法としては、前述した設計荷重を用い、現行基準に基づく設計計算結果と許容応力とを照査したが、FEM解析に基づく解析結果と比較することも可能である。

設計荷重によってはFEM解析で行った方が経済的な設計となる場合もあり、FEM解析費用との得失を検討する必要がある。

(2) 脚柱の垂直曲げ応力

後述する5. 事後評価において、脚柱のトラス部材に作用する軸力が、従来の設計では考慮していなかった脚柱の曲げモーメントを発生させることが判明しており、ゲートの構造によってはトラス軸力を加味した設計を行う必要がある。

(3) ゲートの維持管理基準

当プロジェクトでは、ゲートの維持管理基準として「水門扉等鉄鋼構造物の維持管理基準」を参考にしたが、その後も日本国内で維持管理基準の検討が進められ、「ダムゲートの応力照査に関わる不確実性と管理基準値の検討」⁶⁾が公表されている。

5. その他（モニタリング、事後評価）

I期、II期、III期工事で施工したうちのそれぞれ1門について、扉体の安全性の確認と今後の維持管理のための資料を取得する目的で、扉体の安全照査を行った。⁷⁾

安全性照査として、応力評価、振動評価、座屈評価を行い、いずれも基準内にあり安全であると評価した。以下にそれぞれの評価の概要を述べる。

(1) 応力評価

応力評価では、静的及び動的応力測定を行い、許容応力と照査を行った。また、応力測定結果からトランソンプインの摩擦係数を推定し、設計値との照査を行った。

静的応力は、主桁、スキンプレート、脚柱間トラスの主要部材を対象とし、ひずみゲージを貼付けて静水圧を作用させ測定を行った。(図4, 5)

動的応力は、主桁、脚柱、脚柱間トラスに発生する応力変化とトランソンプインの摩擦係数を推定するための位置を選定し、ひずみゲージを貼付けてゲート開操作時の実放流時の応力増分を測定した。(図6, 7)

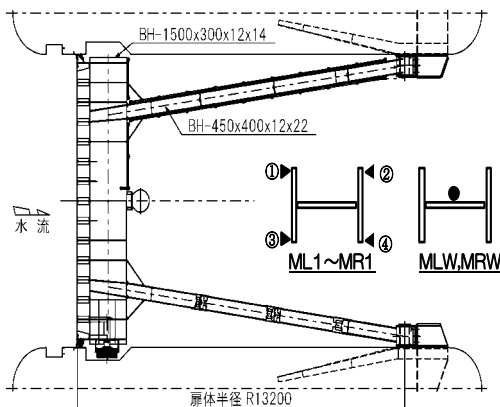


図4 主桁の静的応力測定位置図

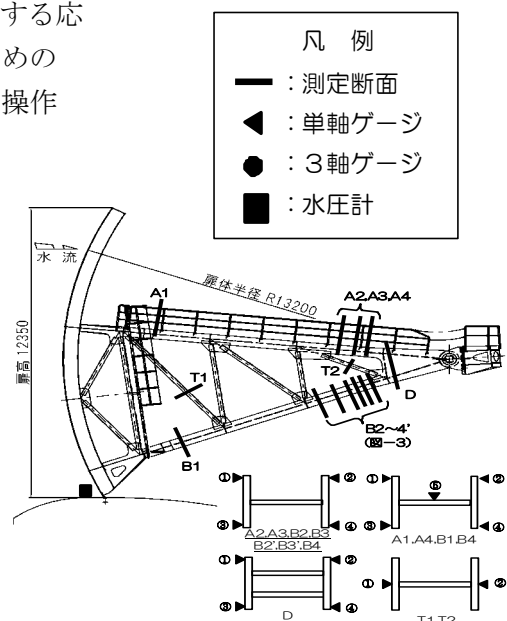


図5 脚柱・脚柱間トラスの静的応力測定位置図

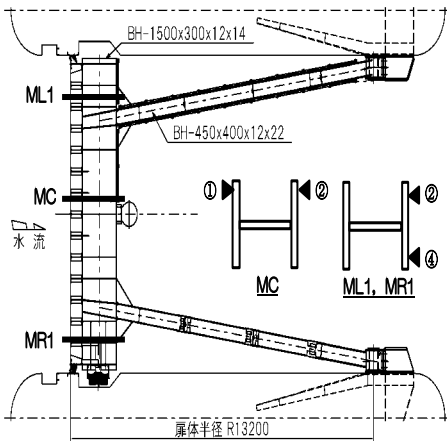


図6 主桁の動的応力位置

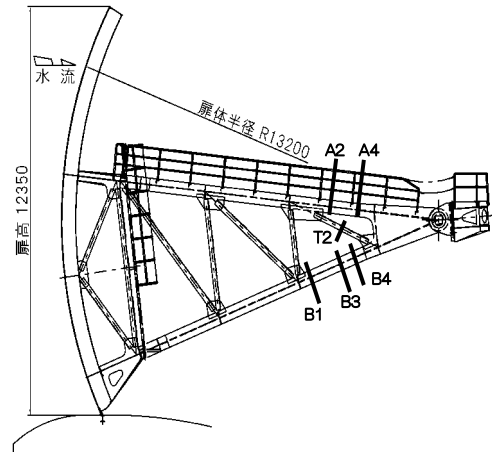


図7 脚柱の動的応力測定位置図

測定した結果、静的応力、動的応力のいずれの応力も許容応力を下回っており、安全上問題がないことを確認した。

また、トラニオンピンの摩擦係数は、最大で 0.16 と設計値の 0.2 を満足したものの、取替直後の値としては、比較的大きな値となった。これは、冬期の最も過酷な低温条件下で測定を行っており、グリースの固化の影響等によるものと考えられ、今後の運転においてもトラニオン軸受への給油を確実に行えば安全であると評価した。

(2) 振動評価

動的応力測定に合せ、加速度計を設置し放流に伴うゲートの振動測定を行い、ペトリカット図表により評価した。

測定位置は下段主桁中央部で3方向（水流方向、左右方向、鉛直方向）、最下端補助桁中央部で1方向（鉛直方向）とした。いずれの測定位置でも、ペトリカット図表では、「非常に静かな領域」で「構造物に影響を及ぼす下限」以下の範囲であり、安全であると評価した(図8)。

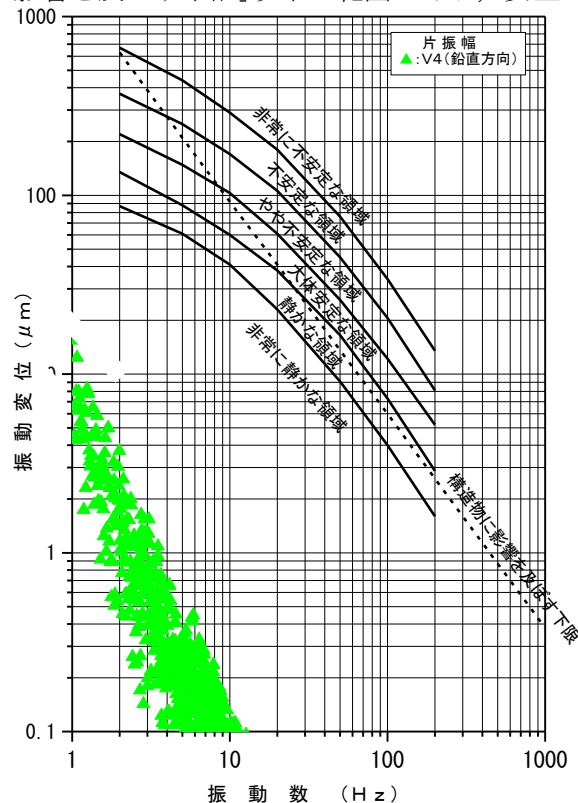


図8 開度 3 cm放流（測定点：最下端補助横桁）時のペトリカット図表による振動評価

(3) 座屈評価

軸方向力と曲げモーメントを同時に受ける部材の設計においては、軸方向力と曲げモーメントの組み合わせに対して座屈に対する「安定の照査」^{3),4)}を行う必要があり、脚柱を対象として応力測定結果に基づき照査を行った。照査する式としては、全体座屈と局部座屈の2式があるが、本ケースでは全体座屈の式の方が危険側の値となることから全体座屈について以下に述べる。

全体座屈は(1)式で表され左辺が1以下であれば安全であるという判定になる。

$$-\frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao}} \leq 1 \quad \dots (1)$$

ここに、

σ_t : 照査する断面に作用する軸方向力による引張応力度(N/mm²)

σ_{ta} : 許容軸方向引張応力度(N/mm²)

σ_{bcy} , σ_{bcz} : それぞれ強軸及び弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ圧縮応力度(N/mm²)

σ_{bagy} : 局部座屈を考慮しない強軸まわりの許容曲げ圧縮応力度(N/mm²)

σ_{bao} : 局部座屈を考慮しない許容曲げ圧縮応力度の上限値(N/mm²)

照査に際して、トラニオンピンの摩擦係数は実測値が0.16であったが、今後のトラニオンピン摩擦係数の増加を見込み、設計値の0.2を用いて行った。その結果、(1)式左辺が「0.98」となり、設計計算値の「0.835」を超えたが、「1以下」を満足しており、安全であると評価した。

設計計算値の「0.835」を超えた原因は、脚柱の垂直曲げ応力が大きいことが主要因として挙げられるが、製作・施工上の誤差による応力増分も含まれている。

6. 参考情報

6-1 参考文献

- 1) 和泉満;白石徳光;大坂和弘. ダム洪水吐ゲート取替工事の設計・施工概要—神一ダム、神二ダム、仏原ダムラジアルゲート取替—. 電力土木. No. 349. 2010. 9.
- 2) 「水門扉等鉄鋼構造物の維持管理基準に関する検討会」の成果報告. 水門鉄管. No. 234. 2008. 6.
- 3) 水門鉄管技術基準(水門扉編). (社)水門鉄管協会. 2007. 9.
- 4) ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編). (社)ダム・堰施設技術協会. 1999. 3.
- 5) 大規模地震に対するダム耐震性能調査指針(案)・同解説. 国土交通省. 2006. 3.
- 6) 塩竈裕三. ダムゲートの応力照査に関わる不確実性と管理基準値の検討. 電力中央研究所報告, 2011, 総合報告 No. 12.
- 7) 和泉満;白石徳光;神藤拓也. ラジアルゲート取替後の安全性照査と設計手法への考察—神一ダム・神二ダム・仏原ダムラジアルゲート取替—. 電力土木. No. 363. 2013. 1.

6-2 問合せ先

会社名: 北陸電力株式会社

URL: <http://www.rikuden.co.jp/>