

ゴム大変形解析適用によるゲート水密機構の開発

Development of Rubber Seal for Gates by Application of Hyper Elasticity Stress Analysis Method

横浜製作所 金子 徹^{*1} 小口 菊雄^{*2}

技術本部 幕田 宏^{*3} 菊池 愛子^{*4}

菱日エンジニアリング株式会社 今村 建二^{*5}

ゲートの適用水頭の高度化に伴い、水密機構のゴムの動作状態に過酷さが増大してきている。現在当社が建設中の建設省中国地方建設局温井ダム向けのゲートは我が国最高水頭の105mであるため、それへの適用また将来の更なる高水頭化を考慮した新型水密機構の開発研究を行なった。研究においては新たにゴム等の超弾性体の応力解析手法を開発し、それを用いて開発実験と並行して、従来は困難であったゴム内部の応力の理論的評価を行った。また、実験研究では従来の静水圧水密実験のほかに実機でゲート開度を変更する際に生じる高速噴流の下での安全性確保策も明らかにした。開発した水密機構は目標とした温井ダム向けの実機ゲートに採用される。また、将来設備に関しては最高水頭150mまで適用可能であるとの成果を得た。

The operation head of dam discharge gates has become higher, for example up to a 105 m head at Nukui dam in the Chugoku district of Japan. This has led to difficulties in the design of rubber seals increasing. The authors developed a hyper-elastic stress analysis program to study stress and strain in rubber. A new type of rubber seal was developed for heads up to 150 m, using this program. The new rubber seal developed is to be applied for the roller gates of the Nukui dam.

1. 緒 言

ダムの放流設備のゲートが適用される水頭は次第に高くなってきており、現在当社が建設中の建設省中国地方建設局温井ダムのゲートの放流水頭は105mに至る。これは我が国で最高の放流水頭である。

本報は上記の温井ダムへの適用を第一目標に置き、また、将来の更なる高水頭化への対応を考慮して水密機構を開発した成果を記す。

上述のように、適用水頭は高くなっていくが、水密機構に用いる材料としては現状ではゴムを上回るものに出会っていない。そのためゴムにいかにか高信頼性を確保するかが研究課題になる。

研究では、新型の水密機構の開発実験に並行して、新たにゴム等の超弾性体応力解析技術を開発して、従来は困難であったゴム内部の応力等の理論検討を行い、新開発水密ゴムの信頼性評価を行った。

また、従来の静水圧水密特性実験に加え、実機のゲート開閉時に発生する高速噴流中での安全性確保策についても明らかにした。

2. ゲートの高圧水密機構の概要と研究課題

2.1 概 要

ダムの主放流設備のゲートの水密機構は大別すると、主として低水頭領域を対象とするしゅう動式（他のシール機構におけるオーリングに類似）と、研究で採上げた高水頭領域を対象とした圧着式とに二分される。

圧着式の特徴は下記と言える。

- (1) 水密のための強い圧着力を発生させる目的で、ゴムを液圧で膨張させる。
- (2) ゲート開閉操作時には摩擦力を除去するために液圧除去機能を備えている。
- (3) ゲートが半開状態にあるときへの対処に各種の難しさを有し

ている。これについては具体的課題を各々後に詳述するが、その一つを次に記す。

ゲートが半開状態にあるときにも水密ゴムには液圧をかける。それによりゲートに接しているゴム部分では水密を達成するが、ゲートに接していないゴム部分は液圧で自由な突出をする。したがってゴムは、水密に必要なゲート圧着特性と、自由に突出しても破壊に至らない特性を両立して備えなくてはならない。

2.2 新開発のゴム形状

図1に新開発のゴム形状を示す。特徴を要約すると下記のとおりである。

- (1) 水密特性向上の目的で止水線をゴムの中心からダム圧の方向に偏らせた。これによりゴムがダム圧で押返される作用が小さくなり、水密に必要な圧着作用が増大する。
- (2) ゴムの過大変形抑制策として、一つはステンレス補強板を導入した。次にゴムに肩部段付き形状を与えると同時に押え金具の形状を工夫して最大突出量を抑制した。

上記が最も特徴的事項であり、この方式の実用化の実験研究については既報⁽¹⁾を参照されたい。

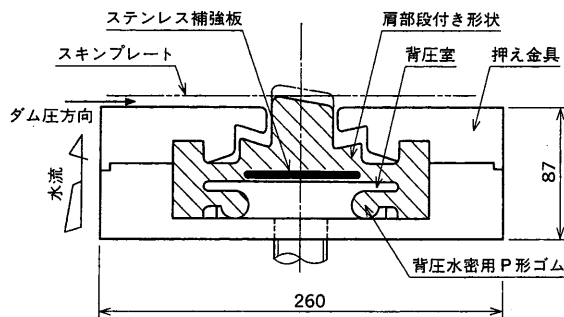


図1 新型ケーソンゴム 今回開発したもので、低圧から最高水頭150mまで水密が可能である。
New type caisson rubber seal

*1 鉄構技術部水門・鉄管設計課長

*4 横浜研究所構造・強度研究室

*2 鉄構技術部水門・鉄管設計課

*5 みなとみらい事業所技術情報部主管

*3 横浜研究所次長

本報では既報に加え、ゴムの内部応力の理論解析及び流水実験による更に踏込んだ信頼性確認研究の成果を報告する。

3. ゴム大変形解析法の概要

水密ゴムの解析は以下に示す非線形性が複合した解析となる。

(1) 材料非線形

ゴムの応力とひずみの関係が非線形となる。

(2) 幾何学非線形

ゴム引張りひずみが100%程度を示す大変形となる場合もあり、変形に伴う荷重、応力方向変化を考慮しなければならない。

(3) 境界非線形

荷重の変化に伴い水密ゴムの押え金具及び扉体等への接触境界条件及びその領域を変化させながら解く必要がある。

3.1 ゴムのモデル化

ゴム材料は有限ひずみの領域でもほとんど体積変化がなく、ポアソン比が0.5となるため通常のFEM解析法では扱えず、非圧縮の処理が別途必要となる。

これにはOden, 山田・菊池がLagrange未定乗数法に基づく方法を, Haggbladら, Peekenら, Simoらはペナルティ法を用いており, 最近では渡辺・久田⁽²⁾らが両法を比較し大変形解析には計算時間の面から前者の手法が望ましいと述べている。

今回, 対象とした高圧ゲート水密ゴムは強い圧縮応力が発生するため, 解析が不安定になりやすく, 誤差は極力排除しなければならない。したがって精度のよいLagrange未定乗数法に基づいて完全非圧縮性を付帯条件式とした定式化を行った。

応力, ひずみは大変位・大回転の場合に一般的に用いられる第2種Piola-Kirchhoff応力とGreenのひずみを用いた。

ゴムは超弾性体として扱う。超弾性体ではひずみエネルギーから構成方程式が導かれ, ひずみエネルギーの関数形としてはNeo-Hookean, Mooney-Rivlin, Signiorini等が提案されているが, ここではこれらを統一的に表現できる形式を用いた。

$$\hat{W} = \sum_{ij} c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

ただし,

$\hat{W}$: ひずみエネルギー

c_{ij} : ゴム定数

I_1, I_2 : 変形テンソル不変量 (1次, 2次)

一般化ひずみエネルギーを式(2)で表した。第2項はLagrangeの未定乗数法により導かれた非圧縮のためのポテンシャルである。非圧縮条件は, 変形範囲内で関数が滑らかに変化するように $g(I_3)$ を付帯条件式とした。 a, b は固定定数であり, パラメトリックスタディにより収束性の良好な定数に決定した。

$$W = \hat{W}(I_1, I_2) - P/2 \cdot g(I_3) \quad (2)$$

ただし,

W : 一般化ひずみエネルギー

P : 静水圧用変数

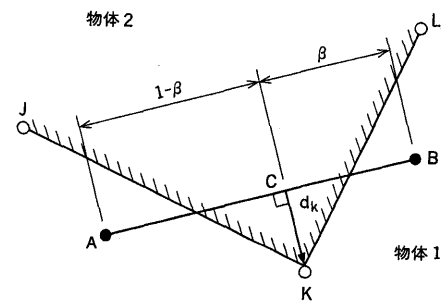
I_3 : 変形テンソル不変量 (3次)

$g(I_3) = a(I_3^b - 1)$: 非圧縮性を表す付帯条件式

3.2 接触変形・摩擦の作用の定式化

まず接触条件であるが, 図2でA, Bは物体1の節点, J, K, Lは物体2の節点であり, 計算のステップで節点Kが物体1の内部に食込んだ状態を示す。

接触条件を満たすには, 節点Kを辺AB上に戻さなければならないが, それは節点A, B及び節点Kがさらに変位して節点Kと辺AB上の点Cとの相対変位が0となることを意味している。



C: 節点Kより辺ABへ下ろした垂線の足
 d_K : 垂線の長さ
 β : 距離比 CB/AB

図2 接触処理 変形体が他の変形体または剛体に接触する場合は各境界上に押戻される。
Contact process

この条件は式(3)で表わされる。

$$d_K + \Delta u_K - \beta \Delta u_A - (1 - \beta) \Delta u_B = 0 \quad (3)$$

$\Delta u_A, \Delta u_B, \Delta u_K$: 節点A, B, Kの変位増分

上式にLagrangeの未定乗数 λ_K を乗じて接触力ポテンシャルを定義する。

$$W_K = -\lambda_K \{d_K + \Delta u_K - \beta \Delta u_A - (1 - \beta) \Delta u_B\} \quad (4)$$

W_K : 節点Kに働く接触力によるポテンシャル

接触力ポテンシャルを含めた全体ポテンシャルの極値を求めれば, 節点Kと辺ABの上の点Cの相対変位が0となるように変位増分が求まり, λ_K は接触力として求まる。摩擦力はクーロンの法則に従うとする。

3.3 変分原理

Lagrangeの未定乗数法を用いた混合型変分原理により式(1), 式(4)の和を全体のポテンシャルとすると, その極値では式(5)が成り立つ。

$$\int_V (\partial W / \partial E_{ij} \cdot \delta E_{ij} + \partial W / \partial P \cdot \delta P) dv - \int_V Q_i \delta u_i dv - \int_S T_i \delta u_i ds + \sum \delta W_K = 0 \quad (5)$$

ただし,

E_{ij} : Greenのひずみテンソル

Q_i : 変形前の体積領域に作用している体積力

T_i : 変形前の表面に作用している表面力

v : 変形前の体積領域

s : 表面力の作用している変形前の表面領域

上式を離散化して求解方程式を得る。増分解析手法としてはNewton-Raphson法を用いた。ゴムの変形と応力は強い非線形性を示すため, 変位増分が十分小さくないと変形経路に追従できず, 荷重増分を小さく与えた場合でも収束途中の変位誤差により発散しやすい。したがって反復計算中の変位の増加量を一定値以下に制限した。

4. 水密機構開発実験と解析

4.1 静的特性実験と解析による確認

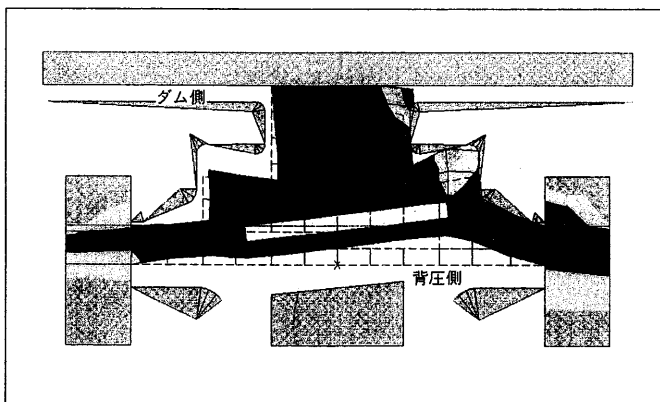
前述の手法による解析及び実験を圧着式水密ゴムに適用し, 本水密機構の妥当性を検証した。

(1) ゴムの特性把握

ゴムは天然ゴム(硬度60°)を使用した。ゴム材料特性を単軸引張試験結果から求め, 式(1)に示すゴム定数を, $c_{01} = 0.02$,



(a) 実験



(b) 数値解析

図3 扉体全閉時のゴム変形と応力 ダム側、ゴムの背側ともに 10.5 kgf/cm^2 載荷したときのゴムの挙動。

Deformation and stress of seal rubber in case of gate closed

$c_{10}=0.04$ と設定した。

(2) 扉体全閉時のゴム変形と止水性能

水密ゴムでは強度とともに止水性能の確保が重要である。扉体全閉時におけるこれらの確認を実験と解析で行った。

実験装置は実機と同一の寸法の二次元構造とし、両側部に透視ガラスを備えている。

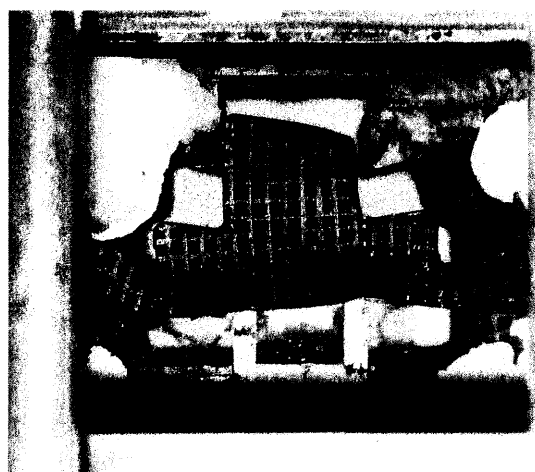
実験はゴム背側にダム水压に等しい $0 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ の水压を加えてゴムを扉体に圧着させ、そのときのゴム変形及び止水性能を観察した。水压 10.5 kgf/cm^2 におけるゴムの変形挙動を図3(a)に示す。同図においては左方のダム放水口からダム水压が加わり、右方は大気に開放されているが、ゴムはダム水压及び背圧に押されながら幅広く扉体に接触して完全に止水しており、過大な変形も見られない。

上記と同条件での数値解析によるゴム変形形状と扉体圧着方向の応力分布を図3(b)に示す。

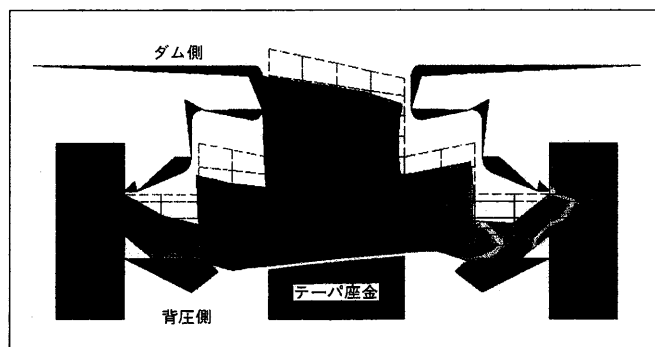
変形形状は実験結果とよく一致しており、また、ゴム頭頂の左側にダム水压より強い圧縮応力 (18.0 kgf/cm^2) が発生し、解析結果からも止水性能が裏付けられた。ゴム頭頂の右側に引張応力のピーク値 3.3 kgf/cm^2 が発生しているが、天然ゴムの引張強さは 300 kgf/cm^2 程度であり、今回の応力値は十分低く問題ない。

(3) ゴム圧着解除直後のゴム変形

ゲート開放時にはゴム圧着解除のためまず背圧を抜く。したがって解除直後は流出したダム水によりゴム上方にダム水压が載荷されている。この条件を模擬した実験結果を図4(a)に、数値解析結果を(b)に示す。圧力条件は背圧が 1 kgf/cm^2 、ゴム上方は 10.5 kgf/cm^2 である。実験と解析のゴム変形はよく一致している。ゴムは水压により押え金具内部に押込まれるが、テ-



(a) 実験



(b) 数値解析

図4 扉体圧着解除時のゴム変形とひずみ ダム側 10.5 kgf/cm^2 載荷しゴムの背側は 1 kgf/cm^2 に除荷したときのゴムの挙動。

Deformation and strain of seal rubber when gate begins to open

バ座金に支えられ過大な変形は生じない。

このときのゴム引張りひずみ最大値は約 23 % となった。ゴム耐久試験結果によれば、対応する繰返し許容回数は 10^7 回以上であり扉体の開閉は 1000 回程度と予想されることから、十分な強度を持つと考えられる。

4.2 金具とゲート扉体との間の噴流に対する信頼性確認実験

ゴムが圧着止水しているときは当然ながら金具とゲート扉体とのすきまには流れは発生しない。しかしゲートを上下動させる際は圧着を解除するから、このすきまに流れが発生する。温井ダムの場合最大水頭は 105 m であるから、その理論速度は $V_{th} = \sqrt{2gH} = 45 \text{ m/s}$ と高速の噴流であり、それへの検討が必要になる。そこで次のような実験研究を行った。

(1) 実験装置

実験装置の概要を以下に記す。

- 二次元モデルであり、ゴム及び金具は断面形状を実機と同じとし、幅方向寸法を 100 mm とした。また、金具とゲート扉体モデルとのすきま値も実機設計値と同じ 9 mm にした。
- 圧力測定を、ゴム背圧、ゴム上流、ゴム下流の 3 点で行った。
- 放流実験水頭は温井ダム実機と同じく最高 105 m とした。

(2) 静的安定性

圧着を解除した静的な状態の安全性については、解除時のゴム背圧とすきまの水圧とがいかなる関係にあるかが問題になる。ゴム背圧をすきま水压より低く設定すれば、ゴムは金具の内部に押込まれて安全である。

温井ダムでは圧着解除時の背圧は装置のレイアウトから水頭

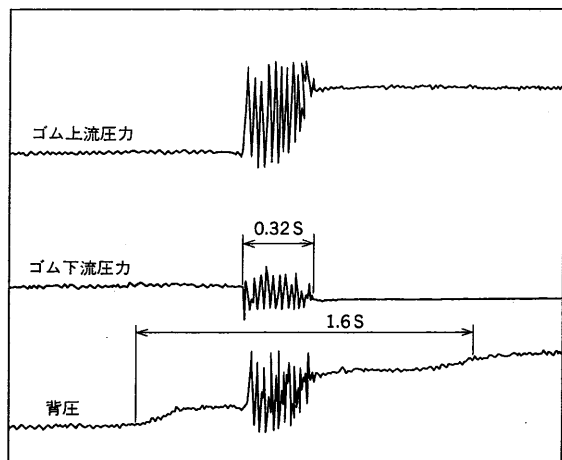


図5 圧着動作途中の各部の圧力記録の例 背圧から判断される圧着動作時間は1.6 s、その間の約0.32 sの間振動が発生する。

Oscillogram of pressures during seal operation

約10 mとなった。実験ですきま部の水压を測定の結果、放流水頭約40 m以上では上記の背圧を上回り、ゴムは押込まれることが把握できた。温井ダムでの放流水頭は70~105 mであるから、それに関する静的な安全性が確認された。他ダムへの応用に関しては、今回のすきま部実験水压を参照して、圧着解除時の背圧がそれより低くなるように装置を設計することが可能である。

(3) 過渡的振動

圧着解除状態からゴムを噴流の中に押し出し、ゲート扉体に圧着させるまでに要する時間は、ゴム背圧の圧力水の充水に必要な時間から決まり、通常2 s内外である。この時間内に過渡的ながらゴムが振動する。同現象は圧着解除時にもある。

図5は圧着動作時の振動を圧力変動でとらえた例である。ゴムの背圧が定常値に到達するまでの時間は1.6 sであった。この途中の約0.32 s間に振動が発生している。類似の記録が圧着解除時にもとらえられた。

図6は高速度ビデオカメラで撮影したゴムの振動変形の記録の例である。この記録から振動中のひずみは最大約30 %と把握できた。これは通常のゴムの疲労破壊限界以下であり、問題ない値である。

上記から、設備として、動作時間1.5~2 sの圧着動作系を設計して、振動に関する安全策を確立することとした。

5. 結 論

水頭150 mまで対応可能な圧着式止水機構を開発した。本研究の特徴を以下に示す。

- (1) ゴム等を扱うための超弾性体解析プログラムを開発し、ゴム



図6 振動中のゴム変形記録の例 高速ビデオで記録した、ゴムの伸びの最大値は約30 %と読み取れた。
High speed video pictures of rubber in vibration

内部の応力やひずみを解析し安全性を確認した。

- (2) 上記プログラムの開発に当たっては非圧縮性の処理に独自の定式化を行った。
- (3) ゲート扉体とゴム押さえ金具とのすきまの高速流に関する安全性についても実験で確認した。
- (4) 当止水機構は我が国最高放流水頭の温井ダムゲートに採用される。

参 考 文 献

- (1) 渋谷ほか、超高压ゲート用水密機構の開発、三菱重工技報 Vol.27 No.5 (1990) p.415
- (2) 渡辺ほか、超弾性有限要素法によるKingKing解析、日本機械学会論文集 Vol.59 A編 (1993.1) p.183
- (3) 菊地ほか、ゲート用水密ゴムの超弾性応力解析技術の研究、ダム工学 No.16 (1994.12)