

ラジアルゲートの耐震性に関する考察

ASSESSMENT ON EARTHQUAKE RESISTANCE OF RADIAL GATE

渡邊 英一*、杉浦 邦征**、宇都宮 智明***、牛尾 正之****、船越 亘*****

Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Tomoaki UTSUNOMIYA, Masayuki USHIO and Wataru FUNAKOSHI

*工博 Ph. D. 京都大学教授 土木工学教室 (〒606-01京都市左京区吉田本町)

**Ph. D. 京都大学助教授 土木工学教室 (〒606-01京都市左京区吉田本町)

***工博 京都大学助手 土木工学教室 (〒606-01京都市左京区吉田本町)

****工博 (株)ニチゾウテック 技術本部 (〒551大阪市大正区鶴町2丁目)

***** (株)ニチゾウテック 技術本部 (〒551大阪市大正区鶴町2丁目)

The radial gates are the most popular among various types of hydraulic gates. However, the radial gates are more complicated in details than the other types of gates. In this paper, the stress analysis for a typical radial gate is carried out by using FEM and the working stress computed are compared to those measured on the real radial gate. Based on the numerical results, the strength of radial gates against earthquake loading is discussed and structural details of radial gates are proposed to reduce the working stress induced by earthquake loads.

Key Words : steel structure, hydraulic gate, earthquake-resistant design, FEM

1. まえがき

平成7年兵庫県南部地震は、阪神間地域の橋梁等の土木構造物に多大な被害を与えた。現在、被害を受けた構造物の補修・補強または取り替え等の復旧工事が迅速に進められている。また同時に、構造物の地震に対する安全性を再検討し、必要に応じて、耐震設計基準を見直すことも急務となっている。種々の土木構造物のうち、その安全性が周囲に与える影響度の非常に大きい構造物のひとつとして、ダム等に設置されている水門扉(ゲート)があげられる。平成7年7月には、米国ネバダ州において、河川の増水によりラジアルゲートの決壊事故がおり、周辺では大きな被害が発生した。

本研究においては、数多い形式のゲートの中から、特に、構造的に複雑であるラジアルゲートに着目し、地震時の耐荷力について再評価すると共に、その耐震設計手法について実験的・解析的に検討を試みた。

2. ラジアルゲートの構造 [1, 2]

ゲートは、大きく分けるとローラ、スライドおよびヒンジの3つの形式に分類される。ヒンジ形式のゲートのうち、代表的なものとしてラジアルゲートがあげられる。ラジアルゲートは経済性およびダム全体の美観等において優れているため、数多くのダムに採用されている。しかし、他の形式のゲートと比較すると、複雑な立体構造を呈しており、その設計においては、より詳細な検討が

必要とされている。ラジアルゲートの一般的な構造と部材名称を図-1に示す。

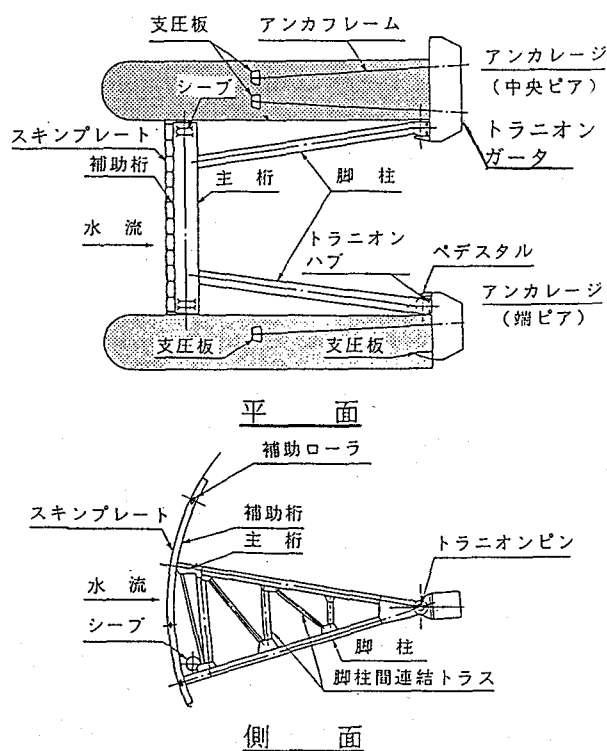


図-1 ラジアルゲートの構造

3. 現在の設計方法

現在、ラジアルゲート等のゲートを設計・製作する場合の基準として、一般的には、水門鉄管技術基準〔1〕またはダム・堰施設技術基準〔3〕が用いられている。これらの技術基準は、道路橋示方書や日本工業規格等の基準および種々の法規をベースにして作成されており、現在までに数多くの実績を残している。

3.1 構造系の仮定

ラジアルゲートの主構部材は、主桁・脚柱・補助縦桁及び脚柱間連結トラスより構成される。現在の設計計算におけるラジアルゲートの主構部材の構造系に対する基本的な考え方を以下に示す。

1) 水平面内強度に対しては、トラニオンピン部を固定とし、脚柱と主桁の中立線を結んだラーメン構造として計算する。また、脚柱の断面2次モーメントは計算の簡略化のため部材長手方向に一定（等価断面2次モーメント）とする。（図-2）

2) 垂直面内強度に対しては、上部脚柱・下部脚柱および脚柱間連結トラスによるラーメン・トラス構造として計算する。即ち、水圧の作用による補助縦桁の変形（曲率の変化）に伴い脚柱に伝達される曲げモーメントは考慮しない。（図-3）

3) 補助縦桁は、主桁で支持され、扉体円弧長を全長とする単純真直梁として計算し、スキンプレートとの連成は考慮しない。

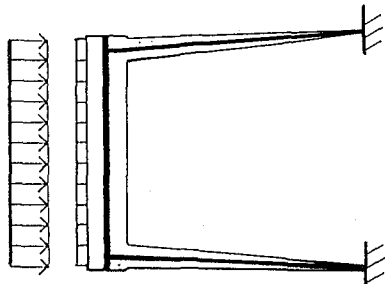


図-2 水平面内モデル

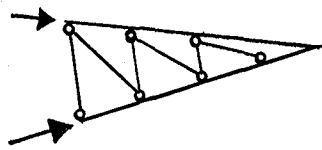


図-3 垂直面内モデル

3.2 荷重の組合せ

設計計算において考慮するゲートの作用荷重の種類を表-1に示す。なお、本研究においては、主に、地震時の全閉状態におけるゲートの安全性に着目する。地震時の全閉状態の荷重として、設計計算においては、常時（地震時以外）に考慮されている荷重（自重と静水圧）

以外に動水圧と慣性力を考慮している。また、地震時の静水圧には、地震による波浪高さが含まれている。

表-1 水門扉の設計荷重

原則として考慮する荷重	その他必要に応じて考慮する荷重
静水圧、自重、開閉力 地震時動水圧 地震時慣性力	泥圧、波圧、浮力 風荷重、温度荷重 氷圧、水撃圧 その他の荷重

3.3 許容応力

ゲートの許容応力を表-2に示す。一般的なラジアルゲートに採用されている構造用鋼材（SS400相当）の常時の許容応力は1,200 kgf/cm²である。但し、この値は、引張及び曲げ引張に対する許容応力であり、圧縮部材については、座屈を考慮した許容応力が設定される。

表-2 許容応力 単位:kgf/cm² (MPa)

鋼種	厚さ ≤ 40mm	厚さ > 40mm
SS400相当	1,200 (118)	1,104 (108)
SM490	1,600 (157)	1,504 (147)
SMA490	1,800 (176)	1,710 (168)

3.4 耐震設計

ゲートの耐震設計を実施するうえでの基本的な考え方を以下に示す。

1) 水平方向（水流方向）の地震のみを考慮し、最大設計震度は、重力式ダムの場合は0.12とする。また、アーチダムの場合は、地震に対する応答倍率が大きいので0.24とする。表-3には、土木・建築構造物の基準震度と最大設計震度の代表例を示した。ゲートの設計震度は、その重要度を考慮すると、他の構造物と比較して小さい値であることがわかる。

2) 地震は短期的な挙動であるので、地震時の許容応力は、常時の許容応力の1.5倍とする。

上記の考え方に基づき、設計計算においては計算の簡略化のため、地震時にゲートに作用する全荷重 F_e が、常時の全荷重 F_n の1.5倍よりも大きい場合のみ、地震時の部材応力について詳細な検討を実施する。通常、重力式ダムに設置されているゲートの場合、設計震度を0.12とするので、殆どの場合、 $F_e < 1.5 F_n$ となる。従って、常時の部材応力についてのみ照査し、地震時の部材応力についての照査は省略することが一般的である。しかし、本来は地震時についても各部材毎に応力を評価することが必要である。

表ー3 土木・建築構造物の基準震度と最大設計震度

基準名	基準震度	最大設計震度
道路橋示方書	0.2	0.3
国鉄建造物設計標準	0.2	0.25
鋼構造限界状態設計基準（案）	0.2	0.5
建築荷重指針	0.2以上	0.2
鋼構造設計基準	0.2以上	0.2
クレーン構造規格	0.2	0.2
原子力発電所耐震設計指針	0.2	0.6
煙突構造設計施工指針（案）解説	0.3	1.0

4. 合理的設計手法の提案

4.1 構造系の仮定

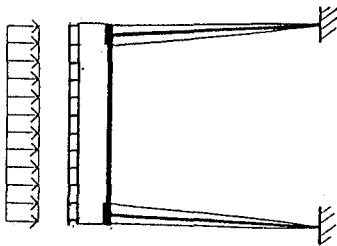
実際のゲートの構造を詳細に検討し、より実際の応力状態に近似した構造モデルを提案した。なお、解析モデルは、本研究の成果を実務へ移行する際の簡便さを考慮して、現状の設計計算と同様に水平面内と垂直面内の平面骨組モデルとした。

1) 水平面内強度に対しては、トラニオンピン部を固定とし、脚柱の中立軸と主桁の下流側フランジを結んだラーメン構造として計算する。また、断面2次モーメントは実断面形状より算出する。（図ー4）

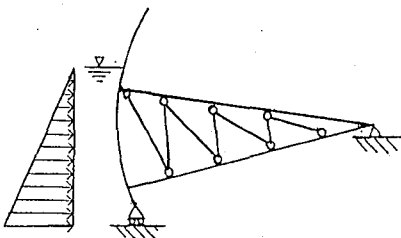
なお、脚柱と主桁の取合部近傍の脚柱応力の集中度をより簡便に算出するため、モデル化における主桁の位置は、従来の中立軸位置から下流側フランジ位置に変更する。

2) 垂直面内強度に対しては、補助縦桁・主桁・上部脚柱・下部脚柱・脚柱間連結部材によるラーメン・トラス構造として計算する。即ち、補助縦桁の変形に伴い脚柱に伝達される垂直面内の曲げモーメントについても考慮する。（図ー5）

3) 通常、補助縦桁とスキンプレートは、溶接により一体化されている。従って、補助縦桁の断面2次モーメントは、スキンプレートとの連成を考慮して求める。



図ー4 水平面内モデル



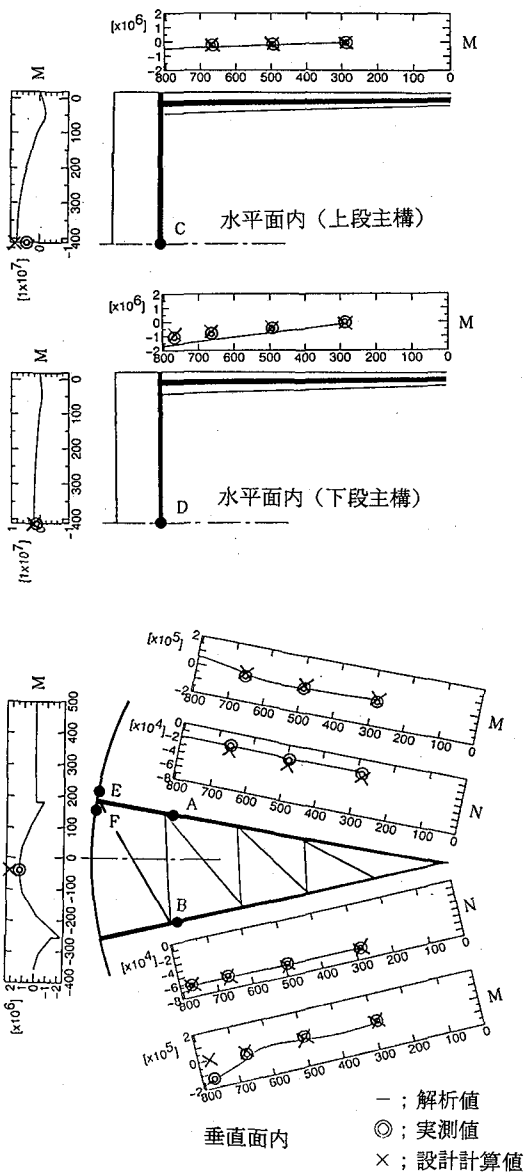
図ー5 垂直面内モデル

4.2 解析モデルの照査

今回提案した解析モデルの妥当性を検証するため、Aダム（重力式ダム）のラジアルゲートを対象として応力測定を実施した。計測時の最高水深は、6.1mであった。Aダムラジアルゲートの主要諸元を以下に示す。

純径間 8.600 m
扉高 8.700 m
回転半径 9.800 m
総重量 37.000 tf (362.6 kN)
設計水深 9.144 m

最高計測水深における、提案モデルを用いたFEM解析結果、実測応力値および現在の設計計算手法に基づく計算結果を比較し図ー6に示す。



図ー6 FEM解析結果、実測応力および設計計算値の比較

単位 軸力N ; kgf
曲げモーメントM ; kgf・cm

図中のFEM解析結果は、水平面内の曲げモーメント以外については、実測値をよく近似している。特に、脚柱の垂直面内の曲げモーメントは、設計計算では考慮されていないが、実測結果とFEMの結果はよく一致している。

なお、水平面内の曲げモーメントについては、FEM解析結果は、実測値より大きい値になっている。このことは、スキンプレートが主桁の曲げ変形に対して連成することにより、主桁の曲げ剛性が増加し、応力が軽減されることに起因するものである。しかし、スキンプレート、補助縦桁、主桁の構造及び接合方法等は、ゲートにより異なるので、スキンプレートの連成による主桁剛性の増加の度合いを定量的に把握することは困難である。詳細な解析を行うためには主桁とスキンプレートとの連成を考慮することが必要であるが、解析の簡略化のため、今回は連成を考慮せず今後の課題とした。

以上、今回提案した構造モデルをラジアルゲートの強度計算に用いることにより、従来より正確かつ合理的に部材応力の照査を行うことが可能であるものと判断した。

4.3 耐震設計

ゲートの安全性に着目し、震度法に基づく地震外力を想定して、今回提案したモデルを用いてラジアルゲートの耐震性の評価を実施する。

最大設計震度および荷重の組合せを以下に示す。

4.3.1 最大設計震度

今回の、兵庫県南部地震において観測された最大地動加速度は0.8Gを上回った。従って、橋梁等の構造物については最大1.0G程度の水平加速度に対しての保有耐力の照査の必要性が検討されている[5]。

このことに習い、ゲートの耐震性の評価も最大1.0Gまで応答加速度に対して実施することとした。また、水圧の作用方向がほぼ水平であることから、水平方向の地震に対するゲートの挙動についてのみ検討した。

4.3.2 地震時作用荷重[3]

地震時の荷重の組合せは、静水圧・地震による波浪高さ・動水圧・慣性力および自重の5項目とした。これらの荷重の計算方法は現行の設計計算に習うものとした。自重以外の荷重の計算方法を以下に示す。

1) 静水圧

静水圧は、扉体との接触面に対して垂直に作用するものとし、次式によって計算する。

$$P = W_0 h_0$$

ここに、P : 静水圧(tf/m²)

W₀ : 水の単位体積重量(tf/m³)

h₀ : 波浪高さを加えた水位から静水圧を求めようとす点までの水深(m)

2) 地震による波浪高さ

地震による波浪高さは、佐藤清一の式によって計算する。

$$h_e = \frac{K \tau}{2 \pi} \sqrt{g H}$$

ここに、h_e : 半波高(m)

K : 設計震度

τ : 地震周期(s) (1秒とする)

g : 重力の加速度(m/s²)

H : 水面から基礎地盤までの距離(m)

3) 動水圧

ダムの上流面の1/2以上の高さの部分が鉛直に近いので、上流面が鉛直であるとの条件から求められたウェスタガード(Westergaard)の式を用いる。

$$p_d = \frac{7}{8} W_0 K \sqrt{H h}$$

ここに、P_d : 水深hの点での動水圧(tf/m²)

W₀ : 水の単位体積重量(tf/m³)

K : 設計震度

H : 水面から基礎地盤までの水深(m)

h : 動水圧の作用する点までの水深(m)

4) 慣性力

各部材に働く地震時慣性力は、水平方向に作用するものとし、次式によって計算する。

$$I = WK$$

ここに、I : 地震時における各部材の慣性力(tf)

W : 各部材の重量(tf)

K : 設計震度

5. 応力解析

5.1 平面骨組モデルによる応力照査

4章で提案した構造モデル及び作用荷重を用いて、Aダムのラジアルゲートを検討対象として、地震時にゲートに発生する部材力を照査する。なお、Aダムのラジアルゲートは、現行の設計基準に基づく標準的なゲートである。従って、Aダムを対象とした検討結果は、他の一般的なゲートにも適用できるものとする。

5.1.1 計算結果

図-6の計測水深時の解析結果をみると、脚柱と主桁との取合部(A点、B点)、主桁中央部(C点、D点)に大きな曲げモーメントが作用している。また、高水位時に地震が発生した場合、補助縦桁と上段主桁との取合部(E点、F点)においても大きな応力が発生するものと推測される。従って、これらの断面についてゲートの応答加速度と部材応力の関係を算出し図-7～図-12に示した。なお、図-7～図-9は常時満水位時(ゲートの運用上許容されている最大水位であり、風波浪高さを考慮していない)における計算結果であり、図-10～図-12は設計水位時(常時満水位と風波浪高の和)における結果である。

5.1.2 安全性の評価

重力式ダムの場合、非常に剛性が高く、ほぼ完全に

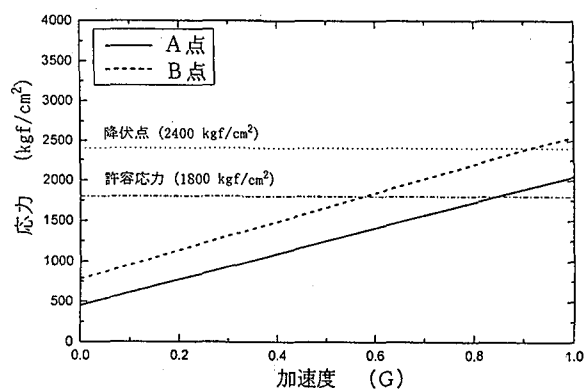


図-7 脚柱の応力と応答加速度の関係
(常時満水位時)

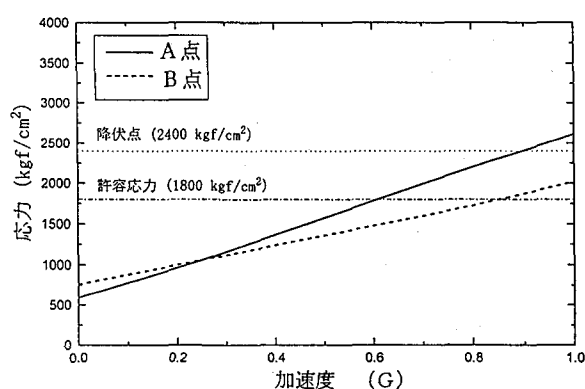


図-10 脚柱の応力と応答加速度の関係
(設計水位時)

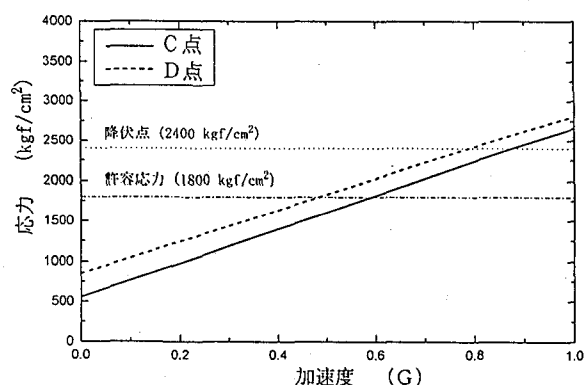


図-8 主桁の応力と応答加速度の関係
(常時満水位時)

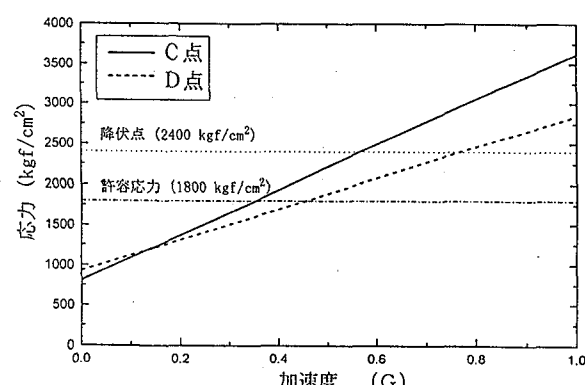


図-11 主桁の応力と応答加速度の関係
(設計水位時)

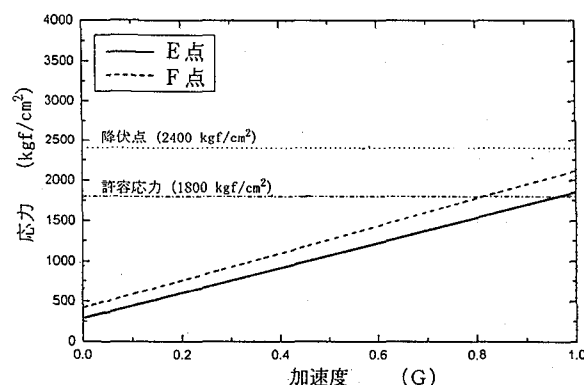


図-9 補助縦桁の応力と応答加速度の関係
(常時満水位時)

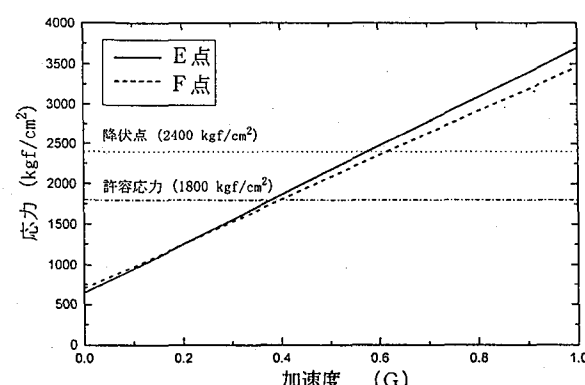


図-12 補助縦桁の応力と応答加速度の関係
(設計水位時)

基礎地盤に固定されているので、岩盤の加速度に対するゲートの応答倍率を1.2～1.3倍程度に設定すれば十分安全である〔6〕。今回の、兵庫県南部地震において岩盤の最大加速度は0.4 G程度であった。従って、重力式ダムゲートの応答加速度として0.5 Gを想定することとした。また、アーチダムの場合は応答倍率を2以上とする必要がある〔6〕。従って、アーチダムのゲ

ートの応答加速度は、最大0.8 G程度となる。

図-7～図-12をみると、応答加速度0.5 G以下では、降伏点(2400 kgf/cm²)を超過する応力は発生していない。しかし、一部の部材においては地震時の許容応力(1800 kgf/cm²)より大きな応力となっていることから、0.5 G程度の地震時の主構部材応力は、かなり高いレベルになるものと推測される。また、今回

は重力式ダムのゲートを対象としたが、アーチダムのゲートについては、ダムの応答倍率が大きいので、より強度の高い部材の使用を検討することが必要となる。

5.2 局部応力の照査

ここでは、水圧荷重が扉体から脚柱に伝達する部分（主構部材のラーメン構造隅角部）と水圧荷重が脚柱からコンクリートピアに伝達する部分（トラニオンピン部）に着目し安全性の評価を行う。

5.2.1 隅角部の応力

脚柱と主桁の取合部はラーメン構造の隅角部であり、他の部分と比較すると、より複雑な応力状態となることが推測される。従って、隅角部をシェル要素の3次元モデルとしてFEM解析を実施した。

解析結果によると、隅角部では応力集中により骨組構造での解析結果と比較して最大1.17倍の局部応力が算出された。図-8及び図-9に示した主桁との取合部における脚柱応力を1.17倍大きく見積もるとかなり高レベルの応力値となるが、0.7G程度までの範囲では降伏点を超過することはない。

5.2.2 トラニオンピン部の強度

設計水位時に応答加速度0.5G程度の大きな地震が発生する可能性は極めて稀でありゲートの耐用期間中に起こる可能性がないと判断してもよいものと考え。従って、ここでは、常時満水位時に0.5Gの地震が発生した時のトラニオンピン部の強度について検討する。FEM解析による全水圧荷重は358tfであり、常時の設計計算値（設計水位時）の全荷重359tfとほぼ一致している。即ち、常時満水位時に0.5G程度の地震が発生してもトラニオンピン部の応力は設計上考えている範囲内であり強度的に問題ないものと考えられる。

6. 耐震構造の検討

トラニオンピン部の強度検討と同じ理由により、常時満水位時に着目し、耐震性の向上策について検討した。常時満水位において高レベルの応力状態である部材は、図-7～図-9に示したように、脚柱、主桁および補助縦桁の上部である。しかし、実際には主桁の応力はスキンプレートとの連成によりかなり軽減されるものと推測される。従って、脚柱と補助縦桁の応力軽減手法について検討した。これらの部材の応力を軽減するためには、特に、動水圧による扉体の変形を拘束することが肝要である。扉体の変形を拘束する為には扉体背面にトラス材を設置することが最も容易かつ効果的な方法である（図-13）。図-6のA点、B点、E点およびF点に着目し、0.5Gの応答加速度を想定し、扉体背面に脚柱間連結トラスと同一断面を有するトラス材を設置した場合の部材応力を設置していない場合と比較して表-4に示した。上段脚柱以外については、トラス材を設置することにより、応力がかなり軽減されている。即ち、ラジ

アルゲートの扉体背面にトラス材を設置することにより、比較的容易に、耐震強度を向上させることが可能であるといえる。なお、上段脚柱については、常時満水位時には、垂直面内の曲げは非常に小さく、軸力が支配的であるので、トラス材設置の効果が小さく算出されている。しかし、垂直面内の曲げが大きく発生する水位においては、下段脚柱と同様の効果をトラス材に期待することができるものと考えられる。

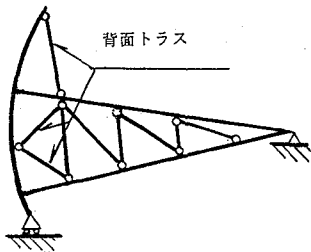


図-13 背面トラス

表-4 背面トラスの効果 単位 kgf/cm² (MPa)

	トラス無 (1)	トラス有 (2)	(2)/(1)
上段脚柱A点	1,251 (123)	1,190 (117)	0.95
下段脚柱B点	1,666 (163)	1,297 (127)	0.78
補助縦桁E点	1,083 (106)	755 (74)	0.70
補助縦桁F点	1,261 (124)	850 (83)	0.67

7. まとめ

- 1) 本研究で提案した構造モデルを用いてラジアルゲートの応力解析を行うことにより、高精度かつ合理的な応力照査が行えるものと考え。
- 2) 現行の設計基準に従い設計されたゲートについては、応答加速度0.5G程度の場合には、部材応力が降伏点を超過する可能性はないものと推定される。しかし、部分的に許容応力を超過する応力が発生する可能性がある。
- 3) 地震時の保有耐力を向上させる為の対策としては、補助縦桁の背面にトラス材を設置することが効果的である。
- 4) 経年変化の著しいゲートと比較的部材剛性の低いゲートを対象として耐震性の再評価を実施することが必要であると考え。
- 5) 今後、ダム本体との連成挙動を考慮した動的解析を実施することにより、地震時のゲートの挙動をより詳細に把握することが必要である。

参考文献

- 1) 社団法人 水門鉄管協会, 水門鉄管技術基準 1981
- 2) 社団法人 水門鉄管協会, 水門扉設計参考例 1986
- 3) 社団法人 ダム・堰施設技術協会, ダム・堰施設技術基準 1994
- 4) 社団法人 土木学会, 平成5年度「鋼構造設計法の総合化と将来展望」講習会資料 1993
- 5) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様(案) 1995
- 6) 社団法人 土木学会、動的解析と耐震設計 第3巻 エネルギー施設 1989