

## 信頼性理論に基づくラジアルゲートの維持管理基準に関する検討

A study on technical standards for maintenance of radial gates based on reliability theory

中村秀治\*, 塩竈裕三\*\*, 木村哲也\*\*\*  
Hideharu Nakamura, Yuzo Shioyama, Tetsuya Kimura

\*工博, 広島大学教授, 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

\*\* 工修, (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

\*\*\* 工修, 関西電力株式会社, 土木建築室土木グループ (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島 3-6-16)

Maintenance standards with quantity of a corroded steel structure are requested strongly for practitioner to maintain the deteriorated structures rationally. Because stresses in aged structures have been increasing gradually due to corrosion, it is necessary to judge the following problems: a) Is it rational to use the same evaluation procedure as design standard in maintenance? b) If not, what is a preferable maintenance management procedure? In this paper, we investigated the current maintenance standards in various technological fields, and through the comparative study of stress estimation methods of radial gates, we propose a way of thinking for maintenance of radial gates based on reliability theory.

*Key Words: steel structure, deterioration, maintenance, reliability theory*  
キーワード: ラジアルゲート, 経年劣化, 維持管理, 信頼性理論

### 1. はじめに

事業用電気工作物は, 電気事業法第 39 条において, 「経済産業省令で定める技術基準に適合するように維持しなければならない」とされており, 電力会社保有の代表的な鋼構造物である, ダム洪水吐きに設置された水門扉もその適用を受けることとなっている。

具体的な基準の例としては, 「発電用水力設備に関する技術基準を定める省令」に「使用する材料ごとにそれぞれの許容応力を超えないこと」と規定され, 「発電用水力設備に関する技術基準の解釈」において許容応力度の具体的な数値として設置時(設計時), 維持管理時共通の値が示されている。

一方, 自主保安重視の考え方が導入されており, 省令の内容に照らして十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠があれば「発電用水力設備に関する技術基準の解釈」によらなくとも, 省令に適合するものと判断することとなり, 設置者の判断により設置することが可能となっている。

ここで, 水門扉は経年的な板厚の減耗により(図-1), 設計時よりも確実に応力が増加する方向にあるため, 設置者は,

- ・設計時の「設計基準」と維持管理時の「維持管理基準」が同一であることが合理的かどうか,
  - ・もし合理的でないとすれば, 望ましい「維持管理基準」はどうあるべきか,
- という疑問に直面し解決を迫られることになる。

他の鋼構造物を鑑みると, 水圧鉄管では「補修または取替えの目安」として「管胴の最大応力又は平均応力がそれぞれ材料の降伏点の 90% 又は 65% を越えて破壊の恐れがあると認められるとき<sup>1)</sup>」、鉄道構造物では「保守限度<sup>2)</sup>」など, 維持管理時の応力に関する基準値として設計時許容応力度よりも大きな値が設定されている例があるが, 水門扉では同様の維持管理に特化した定量的な基準は存在しない。

一方, 近年の国際的な規格整合化の動きのなかで, 維持管理基準においては, ISO2394 (構造物の信頼性に関する一般原則), ISO13822 (構造物の設計の基本-既存構造物の性能評価) など, 性能規定型の国際規格との整合が望まれる。

本論文では, 高度成長期に建設された多数の社会基盤構造物の劣化が進むなか, それらを今後どのように維持・管理していくかという社会的な大命題に対する解決策が強く求められている事実と, 性能規定化の世界的潮流

を背景に、信頼性理論に基づいて鋼構造物の維持管理基準のあり方を検討し、解決のための一方向を提案する。

具体的検討対象構造物はダム洪水吐きに設けられたラジアルゲートであるが、その選択理由は、(i)作用荷重が水圧および自重で明確なこと、(ii)経年劣化の大部分は鋼の腐食であること、(iii)座屈耐力が重要な力学的構造物であること、等である。

水門扉における従来の維持管理基準類が精神規定に留まり、実務者の拠り所となる基準が望まれているという実態に鑑み、解決のための一検討結果を以下に述べる。

## 2. 水門扉の経年劣化の実態

ラジアルゲート、ローラゲートは発電用ダムの洪水吐きに設置される水門扉の主要な構造形式である。維持管理の重要性が高いと考える、設置年代の古い水門扉の設置門数を、表-1に示す<sup>3)</sup>。ラジアルゲートとローラゲートは、それぞれ、730門、540門程度となっている。

昭和62年以降、平成20年現在において、すでに補修あるいは取り替えられたものもかなりあるが、建設当時のゲートで経過年数60~70年に達するものも多数存在することがわかる。

損傷については、ラジアルゲートの場合、脚柱部材の座屈防止に留意すべきであり、

- ①建設当初であれば不整あるいは補助部材配置に起因した座屈強度不足、
- ②長年供用したものであれば腐食による座屈強度低下、の状況下で操作が重なり、部分的損傷あるいは全体破壊で流失した事例などがある。

ローラゲートの場合、流失するほどの事例はほとんど無いが、主桁端部ウェブの腐食減厚によりせん断座屈を生じるのが終局状態と考えられる。

なお、過去の調査結果に基づいてゲートの構造的特徴を指摘すれば、

- a) 部材設計の考えに立つ設計計算式自体が安全側の値を与えることにより、特に主桁とスキンプレートおよび補助部材に安全性の余裕が大きい、
  - b) ラジアルゲートの脚柱については、最重要部材であるため構造力学的検討が十分なされ、補剛材や脚柱間連結材の配置が適切になされている上、腐食自体が主桁・スキンプレートに比べて進行しづらい、
- という特徴を有し、安全に供用されているのが実態である。しかし、建設当初に比べれば明らかに、部材の座屈や破壊に関する限界状態(終局限界状態)、水門扉の操作性や水密性に関する限界状態(使用限界状態)に対する余裕は低下していることも事実である。

また、古い構造物の維持管理にあたって、管理者を悩ませるのは、設計、施工、使用材料など様々な不安要因である。水門扉および水圧鉄管の設計基準が整備されたのは昭和35年であり、それ以前は道路橋示方書等が準用

されていたものと考えられるが、計算書が残っていないケースも多々ある。

鋼材もまた、欧米からの輸入品、あるいは、戦時規格の品質の悪い鋼材が用いられていた時期もあり、接合方法もリベットや鍛接、初期の溶接など様々である。

一般的に判断すれば、わが国の気象および使用条件下で80年~100年以上使用するのであれば、腐食に伴う剛性低下と発生応力増加の実態把握、および個々の構造物の建設から今日に至る経過を勘案しつつ、適切な補修・補強、更新時期の判断が必要である。

ここで、定量性のある、真に管理者に有益な維持管理基準が必要な時期に来ていることは明らかである。

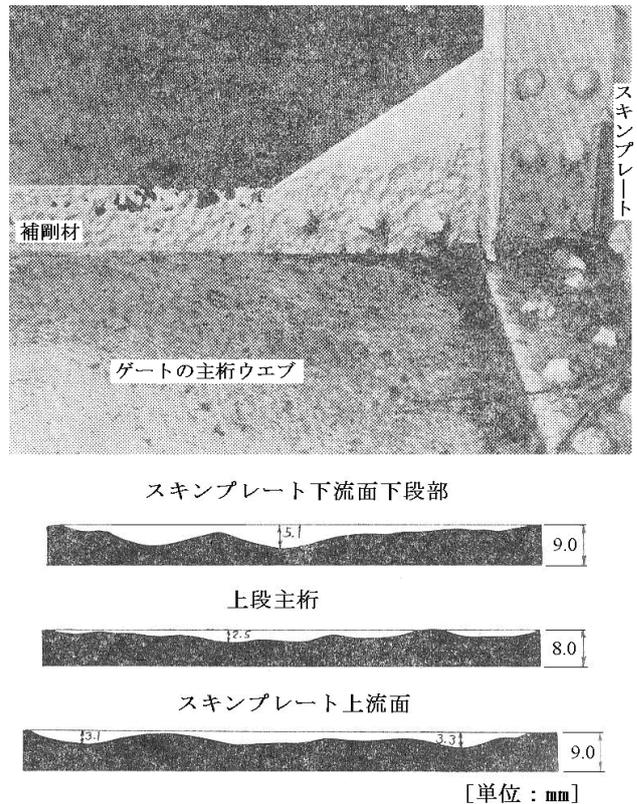


図-1 経年劣化したゲートの顕著な腐食状態の例

表-1 発電用ダム洪水吐きゲートの年代別設置数(昭和62年時点)

	ラジアルゲート	ローラゲート
昭和1~10年	34 (7)	10(3)
昭和11~20年	155 (27)	70(18)
昭和21~30年	120 (21)	109(27)
昭和31~40年	90 (33)	209(60)
昭和41~50年	104 (24)	71(30)
昭和51~60年	193 (27)	70(23)
昭和61, 62年	30 (4)	2

注) ( ) 内は地点数を表している。

### 3. 信頼性理論に基づく新たな維持管理基準の考え方

#### 3.1 水門扉における安全性照査

水門扉の安全性照査においては、ダム・堰施設技術協会発行の「ダム・堰施設技術基準（案）」<sup>4)</sup>、あるいは、水門鉄管協会発行の「水門鉄管技術基準 水門扉編」<sup>5)</sup>などの技術基準が参照されている。

これらの技術基準では、水門扉の安全性照査は主として応力照査によって行われており、技術基準に定められた設計時許容応力度と、例えば、文献<sup>6)</sup>に記載されているような、簡便な設計計算式によって算出された応力値とを比較することによって安全性を照査している。ここで水門扉の設計時許容応力度は、使用する材料の降伏点又は耐力に対して安全率 2.0 をとることで規定されており<sup>5)</sup>、たとえば水門扉の使用材料として一般的な SS400 材で板厚 40mm 以下の場合、降伏点 235N/mm<sup>2</sup> に対して許容引張応力度 118N/mm<sup>2</sup> とされている。なお、この安全率 2.0 という値は、同じ許容応力度法で設計される水圧鉄管における安全率 1.8<sup>7)</sup>、鋼道路橋における約 1.7<sup>8)</sup> に比べて大きな値となっている。

応力照査は維持管理時においても行われており、設計時許容応力度をそのまま維持管理時の安全性照査における基準応力度（以下、維持管理基準応力度と呼ぶ）として流用することが多い。

さて、安全性照査の対象が想定でしかない設計時と、実在する水門扉を対象として安全性照査を行う維持管理時では、照査に用いることができる情報量に圧倒的な差があると考えられる。例えば、腐食量や、初期不整、またこれに伴う応力増加については、維持管理時における点検、調査によってはじめて定量的に把握することができるものである。

このように、設計時点では得られない実測結果、あるいは、設計計算よりも詳細な解析結果をもとに応力照査を実施できる維持管理時においては、設計時点での多くの不確定要素を考慮するために設定された許容応力度、あるいは安全率の合理化が可能であると考えられる。そして、定量性を持って合理化を行えるならば、水門扉の管理者にとって有益な維持管理基準になりうると考える。

以下では、設計時と維持管理時の差として、応力照査に用いる応力値の取得方法に着目し、合理的に維持管理基準応力度を設定する手法の検討を行う。

#### 3.2 評価される安全性の照査用応力による差異

水門扉における維持管理時の応力照査では、一般に、腐食による板厚の減耗を考慮しながら設計計算式によって算出した応力（以下、設計計算応力）が、維持管理基準応力度（=設計時許容応力度）以内にあることを確認している。

一方、維持管理時には、設計計算式よりもさらに詳細な構造解析（例えば、3次元有限要素解析）によって算出

した応力を用いることができ、実構造物における発生応力の推定精度は設計計算応力を用いる場合よりも高いと考える。

現状の維持管理基準応力度、あるいはこれを規定している安全率のうち、設計計算式の簡便性による実現象との若干の不整合を考慮している部分については、より精度が高い応力値を用いる場合には、これを合理化することが可能であると考えられる。すなわち、照査に用いる応力（以下、照査用応力）の精度に応じて、維持管理基準応力度を合理的に設定することが可能だと考える。

図-2 は、照査用応力の違いによる、信頼性理論により評価される安全性の差異を説明したものである。

図-2 の a) は、従来どおり設計計算式に基づいて維持管理時の応力照査を行う場合、b) は設計計算式よりも精度が高い解析応力や実測応力（ある荷重条件で測定された応力を、設計荷重における応力に推定した値）を照査用応力とする場合である。

図-2 の右側は強度の確率分布である。a)、b) で共通で、ここでは、材料の降伏応力を強度の代表とした。規格上の降伏応力は  $\sigma_y$  であるが、実際に構造物に用いられる材料は  $\sigma_y$  よりも大きな材料強度を有している場合が多く、分布の平均値は  $\sigma_y$  よりも大きく、軸上右側にあると考える。

一方、図-2 の左側の分布はある照査用応力  $\sigma$  が計算された場合に、実際に構造物に発生していると推定される応力（以下、推定発生応力）の確率分布である。設計計算応力、あるいは、より精度の高い解析・実測応力と、実際に構造物で発生する応力は必ずしも一致せず、得られた応力値  $\sigma$  は、実際に構造物で発生する応力の推定値でしかない。したがって、実際に構造物で発生するであろう応力は、 $\sigma$  の周りに分布を持つことになると考える。

これらの分布を想定する上で参考となるのが、道路橋において、実測応力と、設計計算応力、有限要素解析応力とを比較した事例である<sup>9),10),11)</sup>。

道路橋における実測応力と設計計算応力を比較した事例<sup>9),10)</sup>では、実測応力の設計計算応力に対する比（実応力比=実測応力/設計計算応力）は、概ね 1.0 未満すなわち設計計算応力は安全側の値となっている。

そのため、ここでは、設計計算応力は安全性の照査において安全側の値を与える傾向があり、実際に構造物で発生する応力は平均的には  $\sigma$  よりも小さいと仮定し、図-2 において、a) の推定発生応力の分布の中心を  $\sigma$  より軸上左側に置いた。

次に、図-2 の b) に示すより精度が高い応力を用いる場合として、有限要素解析などの設計計算式よりも詳細な構造解析を行う場合と実測応力を用いる場合を想定する。

道路橋において実測応力、有限要素解析応力を比較した事例<sup>11)</sup>では、有限要素解析モデルを、設計計算式と同等の簡易なモデルから、床版と桁の合成効果など、より実構造物に近い詳細なモデルとすることで、実応力比が

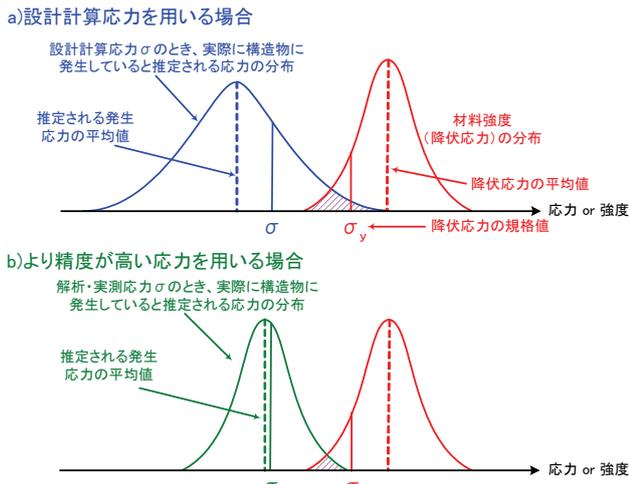


図-2 照査用応力の違いに応じた信頼性理論によって評価される安全性の差異

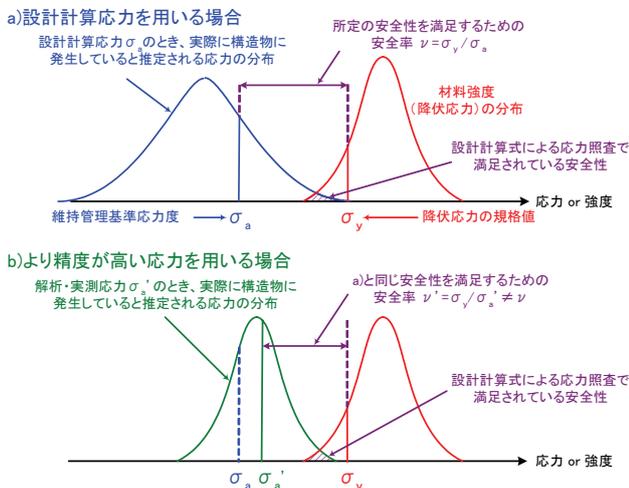


図-3 安全性の確保に必要な維持管理基準応力度の照査用応力による差異

1.0 に近づく結果が得られている。

また、実測応力は測定方法や設計荷重条件への換算方法によるばらつきはあるにしても、高い精度を有しているものと推察される。そこで、図-2 の b) では設計計算式よりも、実際に構造物で発生する応力を高い精度で推定できるものと仮定し、推定発生応力の分布の中心は、a) の場合より  $\sigma$  に近接するとともに分布の幅が小さくなるものとした。なお、水門扉における、設計計算応力および有限要素解析応力のそれぞれと実測応力との関係の実例は 4 章以降で示す。

さて、信頼性理論によれば、構造物の安全性は、強度の基準値（例えば、図-2 の  $\sigma_y$ ）に対する発生応力（例えば、図-2 の  $\sigma$ ）の近接度合いではなく、発生応力が強度を超えない確率によって表現される。

逆に、危険度は発生応力が強度を超える確率（破壊確率）として表現される。

図-2 において、強度側と発生応力の分布が重なる面

積を、説明の便宜上、破壊確率に相当するものであると考えると、a)、b) で、算出、測定された応力が  $\sigma$  という同一の値であったとしても、このときの、推定発生応力の分布の違いにより、評価される破壊確率、あるいはその裏返しである安全性が異なる。

そのため、図-2 の a)、b) のような分布であれば、より精度が高い応力を用いて照査を行った場合ほど、評価される破壊確率は小さく、すなわち安全性は高いことになる。

### 3.3 一定の安全性確保のために必要な維持管理応力度

算出・測定された応力が同じでも、照査用応力の差異によって評価される安全性が異なる場合があることを示した。

一方、構造物の管理においては、照査用応力として何を用いるか選択の余地はありながらも、その選択によらず、ある一定以上の安全性が確保されることが望ましい状態であるとする。

図-3 の a) は、現状の、設計計算応力による照査で確保されている安全性について考察したものである。単純な引張応力の場合、維持管理基準応力度  $\sigma_a$  は、降伏応力  $\sigma_y$  に対して安全率  $\nu$  をとることにより規定されている。

ここで設計計算式によって維持管理基準応力度  $\sigma_a$  に等しい応力が得られたとする。すなわち現状の設計基準で認められたぎりぎりの応力状態を考える。

このとき、強度側の分布と照査用応力の分布の重なる面積が、現状で許容されている危険度、あるいは確保されている安全性ということになる。逆に、この安全性を確保するために安全率  $\nu$  の値が与えられているとも解釈できる。

一方、図-3 の b) は、より精度の高い解析・実測応力を応力照査に用いる場合である。一定以上の安全性を確保するという立場に立てば、b) における強度側の分布と照査用応力の分布の重なる面積は、a) の場合と同じであればよい。

さて、図-2 で見たように、設計計算応力を用いる場合と、それより精度が高い応力値を用いる場合で、実際に構造物で発生すると推定される応力の分布は異なっていると考える。そのため、図-3 の b) において、強度、応力の分布の重なる面積を a) と等しくする際に許される解析・実測応力  $\sigma_a'$  は、a) 中の  $\sigma_a$  とは異なることになる。

図-2 で考察した分布に従えば、 $\sigma_a' > \sigma_a$  となり、精度の高い応力値を照査に用いるほど、所定の安全性を確保するための維持管理基準応力度は大きく、安全率は小さくすることが可能となる。

このように、確保される安全性を一定以上に保つために規定すべき維持管理基準応力度は、照査用応力毎に異なり、照査用応力に応じて設定する方がより合理的であるとする。

### 3.4 信頼性理論に基づく維持管理応力度の設定

以上のように、照査用応力の差異に応じて維持管理応力度を設定するにあたっては、強度側、発生応力側の双方の確率分布を考慮する必要がある。

強度側と荷重側の確率分布を考慮しながら、信頼性理論に則って一定の安全性を確保する照査法の一つとして、荷重耐力係数法がある<sup>12)</sup>。同手法は、荷重、耐力双方に、信頼性理論によって定量的に評価された部分安全係数を乗じて構成された照査式を安全性照査に用いる。

本論文では、荷重耐力係数法を参考に式(1)のような応力照査式を出発点とし、実務上の簡便さを考慮して、照査用応力に応じて補正係数を乗じて維持管理応力度を設定する、現行の許容応力度法に類似した照査式を導く。

$$\frac{1}{\gamma_m} \sigma_{Rn} \geq \gamma_a \cdot \sigma_{Sn} \quad \dots (1)$$

ここに、

$\sigma_{Rn}$  : 強度の公称値 (使用材料の規格上の降伏応力)

$\sigma_{Sn}$  : 荷重効果の公称値 (設計荷重の組み合わせの下で発生する応力)

$\gamma_m$  : 材料係数

$\gamma_a$  : 構造解析係数

式(1)において、 $\nu = \gamma_m \cdot \gamma_a$  とすると、式(1)は、式(2)のような許容応力度法における応力照査式の表現に一致し、式(2)の左辺が、図-3の a)における維持管理基準応力度  $\sigma_a$  に相当する。

$$\frac{\sigma_{Rn}}{\nu} \geq \sigma_{Sn} \quad \dots (2)$$

式(1)中の  $\gamma_m$ ,  $\gamma_a$  の値については、目標信頼性指標と、強度および推定発生応力の基本的な統計量をもとに、信頼性理論によって定量的に算定することができる。文献12), 13)を参考にすると、強度および推定発生応力がそれぞれ正規確率変数と仮定することにより、 $\gamma_m$ ,  $\gamma_a$  は、式(3)、式(4)によって表される。

$$\gamma_m = \left\{ \left( 1 - \beta_T \cdot \alpha_{\sigma R} \cdot V_{\sigma R} \right) \frac{\mu_{\sigma R}}{\sigma_{Rn}} \right\}^{-1} \quad \dots (3)$$

$$\gamma_a = \left( 1 + \beta_T \cdot \alpha_{\sigma S} \cdot V_{\sigma S} \right) \frac{\mu_{\sigma S}}{\sigma_{Sn}} \quad \dots (4)$$

ここに、

$\beta_T$  : 目標信頼性指標

$\mu_{\sigma R}$  : 材料強度の平均値

$V_{\sigma R}$  : 材料強度の変動係数

$\alpha_{\sigma R}$  : 式(5)で表される係数

$\mu_{\sigma S}$  : 推定発生応力の平均値

$V_{\sigma S}$  : 推定発生応力の変動係数

$\alpha_{\sigma S}$  : 式(6)で表される係数

$$\alpha_{\sigma R} = \frac{\rho_{\sigma R}}{\sqrt{\rho_{\sigma R}^2 + \rho_{\sigma S}^2}} \quad \dots (5)$$

$$\alpha_{\sigma S} = \frac{\rho_{\sigma S}}{\sqrt{\rho_{\sigma R}^2 + \rho_{\sigma S}^2}} \quad \dots (6)$$

ここで、 $\rho_{\sigma R}$  : 材料強度の標準偏差 ( $\mu_{\sigma R} \cdot V_{\sigma R}$ ),  $\rho_{\sigma S}$  : 推定発生応力の標準偏差 ( $\mu_{\sigma S} \cdot V_{\sigma S}$ ) である。

さて、 $\gamma_m$ ,  $\gamma_a$  の算定に用いる統計量は照査用応力によって異なることから、設計計算応力以外の照査用応力を用いる場合の統計量や、得られた  $\gamma_m$ ,  $\gamma_a$  には、特に、「'」をつけて区別することとする。

すなわち、式(1)から式(4)に対応して、以下の式(7)から式(10)とする。

$$\frac{1}{\gamma_m'} \sigma_{Rn} \geq \gamma_a' \cdot \sigma_{Sn}' \quad \dots (7)$$

$$\frac{\sigma_{Rn}}{\nu'} \geq \sigma_{Sn}' \quad \dots (8)$$

$$\gamma_m' = \left\{ \left( 1 - \beta_T \cdot \alpha_{\sigma R}' \cdot V_{\sigma R} \right) \frac{\mu_{\sigma R}}{\sigma_{Rn}} \right\}^{-1} \quad \dots (9)$$

$$\gamma_a' = \left( 1 + \beta_T \cdot \alpha_{\sigma S}' \cdot V_{\sigma S}' \right) \frac{\mu_{\sigma S}'}{\sigma_{Sn}'} \quad \dots (10)$$

ここに、

$\sigma_{Sn}'$  : 荷重効果の公称値 (設計荷重の組み合わせの下で、設計計算以外の方法で算出された応力)

$\gamma_m'$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の材料係数

$\gamma_a'$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の構造解析係数

$\nu'$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の安全率 ( $\gamma_m' \cdot \gamma_a'$ )

$\alpha_{\sigma R}'$  : 式(11)で表される係数

$\mu_{\sigma S}'$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の推定発生応力の平均値

$V_{\sigma S}'$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の推定発生応力の変動係数

$\alpha_{\sigma S}'$  : 式(12)で表される係数

$$\alpha_{\sigma R}' = \frac{\rho_{\sigma R}}{\sqrt{\rho_{\sigma R}^2 + \left( \rho_{\sigma S}' \right)^2}} \quad \dots (11)$$

$$\alpha_{\sigma S}' = \frac{\rho_{\sigma S}'}{\sqrt{\rho_{\sigma R}^2 + \left( \rho_{\sigma S}' \right)^2}} \quad \dots (12)$$

表-3 解析対象ゲートの概要

	使用開始年	扉体寸法			脚柱			設計水深(m)
		径間(m)	高さ(m)	扉体半径(m)	段数	門構	脚柱間	
① SYダムゲート	昭38	11.5	9.5	8.5	2	π	ラーメン	9.5
② SIダムゲート	昭38	9.2	12.6	12.5	3	π	Nトラス	12.3
③ NSダムゲート	昭55	9	8.55	10.5	2	門	Kトラス	9.1
④ Tダムゲート	昭58	8	6.5	7.3	2	門	Nトラス	6.25
⑤ Iダムゲート	昭17	8	6.2	7.5	3	門	ラーメン	6.46
⑥ ODダムゲート	昭32	8.5	6.8	7.5	2	π	Kトラス	6.8
⑦ NHダムゲート	昭31	8	9.4	10	2	π	Nトラス	9.7
⑧ Kダムゲート	昭50	8.2	14.5	15	3	π	ラーメン Nトラス	15.21

ここで、 $\rho_{\sigma_s'}$  : 設計計算応力以外の応力を用いる際の推定発生応力の標準偏差 ( $\mu_{\sigma_s'} \cdot V_{\sigma_s'}$ ) である。

式(8)の左辺が、図-3のb)における、設計計算応力よりも精度の高い解析・実測応力を用いる場合の維持管理基準応力度  $\sigma_a'$  に相当する。

したがって、設計計算応力よりも精度の高い解析・実測応力を用いる場合には、設計計算応力を用いる場合の維持管理基準応力度  $\sigma_a$  に対して、式(13)で表される  $\sigma_a'$  を維持管理基準応力度としてよいと考える。

$$\sigma_a' = \frac{v}{v'} \cdot \sigma_a \quad \dots (13)$$

ここで、 $v/v'$  は、維持管理基準応力度  $\sigma_a$  を照査用応力の違いによって補正する係数であることから、これを維持管理基準応力度補正係数  $\alpha$  として新たに定義し、式(13)を以下のように書き直す。

$$\sigma_a' = \alpha \cdot \sigma_a \quad \dots (14)$$

したがって維持管理時の応力照査は、所定の荷重条件下で発生する応力  $\sigma$  と、その算出方法の違いに応じて係数  $\alpha$  により基準応力度  $\sigma_a$  を補正した値とを比較する、式(15)によって行われる。

$$\alpha \cdot \sigma_a \geq \sigma \quad \dots (15)$$

なお、腐食による板厚の減耗で生じる断面性能の低下については、減耗した板厚を発生応力算定に用いることで発生応力の増加として考慮される。

4章以降で、既設ラジアルゲートにおける3次元有限要素解析、実測応力をもとに  $\alpha$  を算定する。

以上、材料強度の分布を固定し、発生応力の推定精度の差により、維持管理基準応力度  $\sigma_a$  を補正する方法について式展開を行った。

一方、これまでの考察とは逆に、発生応力の分布に変化はなく、材料強度の分布に差が生じる場合(例えば、発生応力の評価には従来どおりの設計計算式を用いるが、強度については、実構造物から試験片を抜き取り、材料試験を行って強度を求める場合など)、あるいは、発生応

表-2 検討に用いる材料強度の統計量

材料強度の公称値 $\sigma_{Rn}$	235N/mm <sup>2</sup>
材料強度の公称値に対する平均値の比	1.16
材料強度の平均値 $\mu_{\sigma R}$	273 N/mm <sup>2</sup> ( $\sigma_{Rn} \times 1.16$ )
材料強度の変動係数 $V_{\sigma R}$	0.13
材料強度の標準偏差 $\rho_{\sigma R}$	35.5 N/mm <sup>2</sup> ( $\mu_{\sigma R} \times V_{\sigma R}$ )

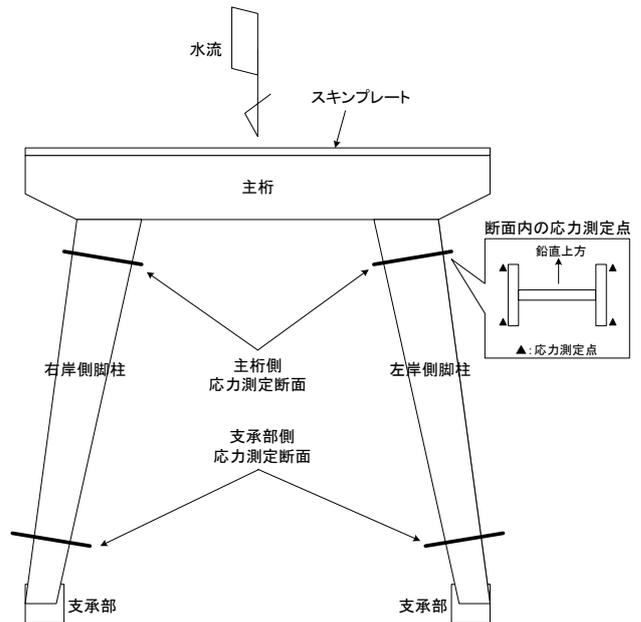


図-4 応力測定箇所のご略

力、材料強度の双方に差が生じる場合を考慮することができる。

この場合、式(7)から式(14)において、材料強度に関する変数  $\mu_{\sigma R}$ 、 $V_{\sigma R}$  のみを、 $\mu_{\sigma R}'$ 、 $V_{\sigma R}'$  などと変化させる、あるいは、発生応力、材料強度の双方の変数を変化させればよい。

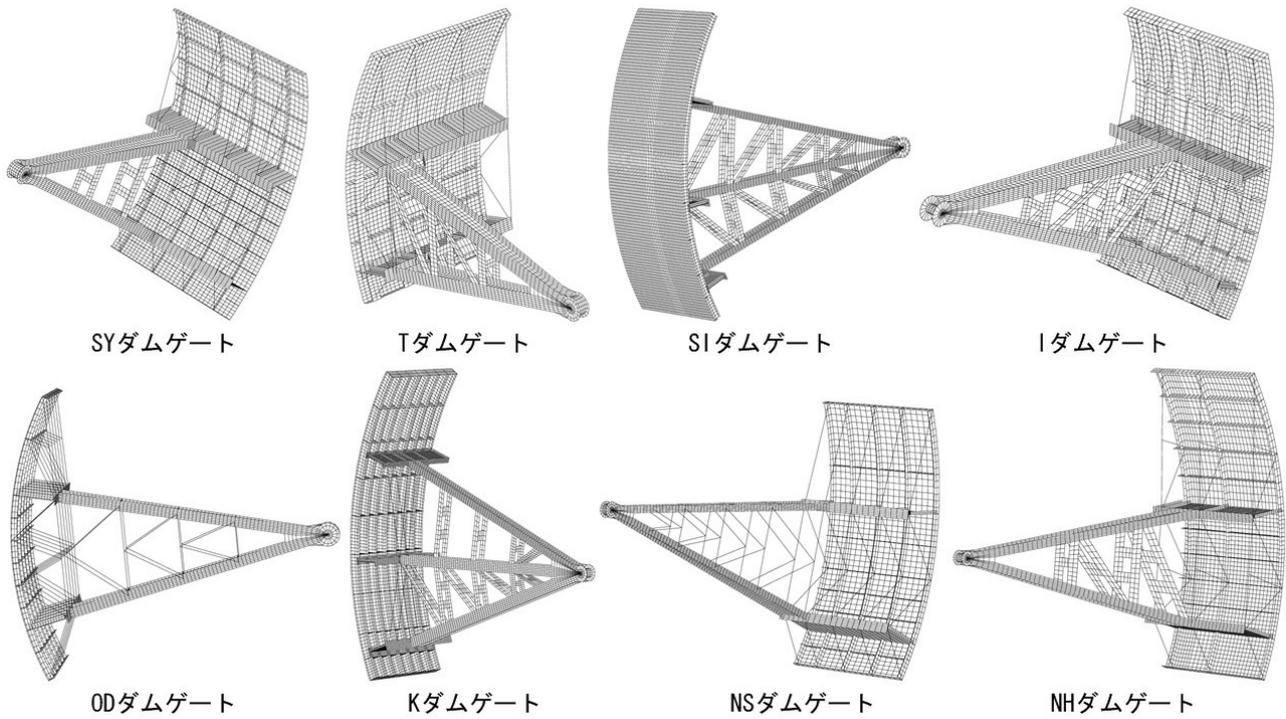


図-5 解析対象ゲートの3次元有限要素解析モデル

地点	実測応力 $\sigma_M$ / 設計計算応力 $\sigma_D$								実測応力 $\sigma_M$ / 3次元有限要素解析応力 $\sigma_F$							
	SY	SI	T	I	OD	NH	SY	SI	T	I	OD	NH				
脚柱	0.88	0.38	1.04	0.90	0.85	0.46	1.20	0.69	0.97	0.55	1.30	1.03	1.09	0.63	0.96	0.67
	0.65	1.04	0.72	0.67	1.17	0.87	1.26	1.35	0.59	1.10	0.76	0.68	1.45	1.15	1.03	1.14
	0.38	0.91	0.95	0.95	0.93	1.03	0.92	0.78	0.48	0.74	0.92	0.90	0.98	1.04	1.15	0.94
	0.60	0.44	1.06	0.84	1.37	1.24	0.58	1.56	0.65	0.63	1.09	0.81	1.40	1.22	0.70	1.59
	0.69	0.90	0.82	1.51	0.84	0.56	1.52	0.66	0.62	0.96	0.99	1.39	1.08	0.76	1.60	0.64
	0.44	0.54	0.65	1.23	1.25	0.99	1.43	1.68	0.56	0.43	0.72	1.06	1.55	1.30	1.22	1.42
	0.50	1.35	0.65	0.98	0.94	0.98	0.61	0.58	0.53	1.15	0.79	1.00	0.99	0.99	0.75	0.70
	1.11	1.21	0.86	0.64	1.41	1.23	0.91	1.33	0.97	0.99	1.14	0.81	1.44	1.21	0.90	1.36
	1.46	0.79	1.12	1.31	0.73	0.98	1.21	0.87	1.08	0.90	1.24	1.20	0.83	1.05	1.37	0.96
	0.60	0.65	0.41	0.73	1.23	0.72	1.18	0.77	0.77	0.72	0.42	0.63	1.19	0.79	1.12	0.81
	0.78	0.59	0.92	0.94	0.88	1.02	0.53	1.25	0.84	0.51	0.87	0.96	0.97	0.98	0.61	1.24
	0.39	0.90	1.10	0.69	1.38	0.92	0.74	1.12	0.34	0.74	1.12	0.87	1.28	0.89	0.71	1.09
	1.05	1.01			0.80	0.86	1.35	0.95	0.77	1.15			0.92	0.92	1.58	0.95
	0.69	1.04			1.22	0.70	1.07	0.80	0.89	1.15			1.18	0.77	1.17	0.85
	1.61				0.95	1.18	0.68	0.93	1.74				1.05	1.13	0.65	0.94
					1.49	0.96	0.52	0.93					1.39	0.93	0.47	0.99
					0.88	1.20		0.77					0.91	1.15		0.72
					0.99	0.70		1.06					0.84	0.68		0.98
					1.14	0.95		0.72					1.35	1.01		0.78
					0.88	0.63		1.21					0.86	0.68		1.29
				0.84	1.00		0.75					0.87	0.96		0.70	
				0.98	0.58		1.11					0.83	0.56		1.03	
				0.98	1.29		0.51					1.16	1.37		0.56	
				1.37	0.76		1.06					1.34	0.82		1.14	
データ数	141								141							
平均値	0.93								0.96							
変動係数	0.31								0.29							

#### 4. ラジアルゲートを対象とした維持管理基準応力度の試算

##### 4.1 維持管理基準応力度定量化のための基礎データ

維持管理基準応力度の定量化（前章  $\alpha$  の算定）にあたっては、強度、推定発生応力に関する統計量が必要である。

本論文では、まず、材料強度については、文献 12)に

記された、SS400 材に関する降伏応力のデータ（降伏応力の規格値に対する平均値の比 1.16、降伏応力の変動係数 0.13）を参考に、表-2 に示す値を材料強度に関する統計量として用いることとした。

推定発生応力の分布の設定にあたって、まず、実測応力を真の発生応力と考えた。続いて、実測応力  $\sigma_M$  が得られている各点における、設計計算応力  $\sigma_D$ 、ならびに、3次元有限要素解析応力  $\sigma_F$  を得て、それぞれに対する

表-5 推定発生応力に関する統計量  
(設計計算応力を用いる場合)

発生応力の基準値 $\sigma_{Sn}$	118N/mm <sup>2</sup>
基準値に対する 推定発生応力の平均値の比	0.93 ( $E_D$ )
推定発生応力の平均値 $\mu_{\sigma S}$	110 N/mm <sup>2</sup> ( $\sigma_{Sn} \times E_D$ )
推定発生応力の変動係数 $V_{\sigma S}$	0.31 ( $V_D$ )
推定発生応力の標準偏差 $\rho_{\sigma S}$	34.1 N/mm <sup>2</sup> ( $\mu_{\sigma S} \times V_{\sigma S}$ )

表-6 推定発生応力に関するの統計量  
(3次元有限要素解析応力を用いる場合)

発生応力の基準値 $\sigma'_{Sn}$	118N/mm <sup>2</sup>
基準値に対する 推定発生応力の平均値の比	0.96 ( $E_F$ )
推定発生応力の平均値 $\mu'_{\sigma S}$	113 N/mm <sup>2</sup> ( $\sigma'_{Sn} \times E_F$ )
推定発生応力の変動係数 $V'_{\sigma S}$	0.29 ( $V_F$ )
推定発生応力の標準偏差 $\rho'_{\sigma S}$	32.8 N/mm <sup>2</sup> ( $\mu'_{\sigma S} \times V'_{\sigma S}$ )

表-7 推定発生応力に関する統計量  
(実測応力を用いる場合)

発生応力の基準値 $\sigma'_{Sn}$	118N/mm <sup>2</sup>
基準値に対する 推定発生応力の平均値の比	1.00 ( $E_M$ )
推定発生応力の平均値 $\mu'_{\sigma S}$	118 N/mm <sup>2</sup> ( $\sigma'_{Sn} \times E_M$ )
推定発生応力の変動係数 $V'_{\sigma S}$	0.05
推定発生応力の標準偏差 $\rho'_{\sigma S}$	5.9 N/mm <sup>2</sup> ( $\mu'_{\sigma S} \times V'_{\sigma S}$ )

実測応力の比  $\sigma_M/\sigma_D$ ,  $\sigma_M/\sigma_F$  が、真の発生応力に対する  $\sigma_D$ ,  $\sigma_F$  の整合度合いを表すと考えた。

そして、多くの実測点において、 $\sigma_M/\sigma_D$ ,  $\sigma_M/\sigma_F$  を得て、それぞれの平均値(無次元量)  $E_D$ ,  $E_F$ , および、変動係数  $V_D$ ,  $V_F$  を求め、これらを基に、照査用応力に関する統計量を算定する方法をとることとした。

具体的には、応力の測定実績がある実在ラジアルゲートを対象にすることとし、選定にあたって、まず(社)水門鉄管協会「水門扉等鉄鋼構造物の維持管理基準に関する検討会」の参加電力各社に、管理するラジアルゲートの諸元の調査を行った。

調査結果をもとに、平面架構形式( $\pi$ 型, 門型), 脚柱

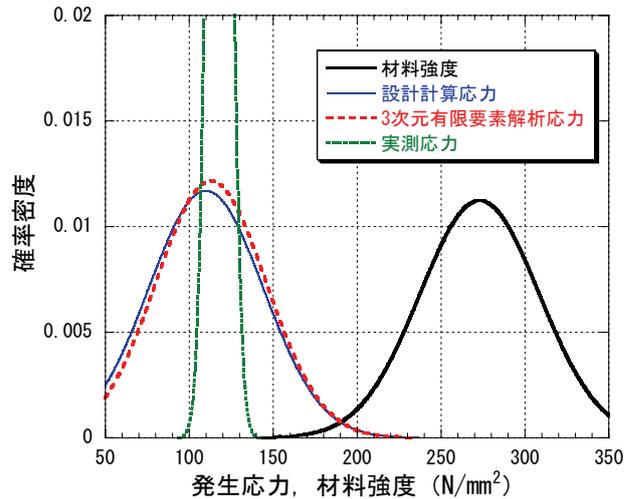


図-6 推定発生応力, 材料強度の確率密度関数

本数(2段, 3段), および補剛形式(Nトラス, Kトラス, ラーメン)などが偏らないように8門を選定した。

そして、選定した8門のラジアルゲートに対し、実測時の荷重条件下で、各実測点における設計計算応力の算出、3次元有限要素解析を実施した。

なお、応力実測点は、ゲートごとに測定点数の大小はあるものの、概ね、図-4に示すような、左右岸脚柱の主桁に近い断面、支承部に近い断面で測定されたものであった。そして、測定点は、1断面あたり、両フランジの上下端の4点であった。

これらの測定点の特性を考慮して、左右岸、断面内での測定値の極端な逸脱がないことをもって実測の精度の確認とし、これらが満足されていたことから精度良く応力測定が行われたものとして以降の検討に用いた。

図-5に8門のラジアルゲートの3次元有限要素解析モデルを、表-3にその概要をそれぞれ示す。これらの解析モデルのデータ作成は、データ生成プログラムを新たに作成することにより行い、応力解析には汎用解析コードABAQUSを使用した。

選定したラジアルゲートの脚柱部材についての、 $\sigma_M/\sigma_D$ ,  $\sigma_M/\sigma_F$ の算出結果の一覧を表-4に示す。表中、Kダムゲート、NSダムゲートが除外されているのは、実測応力が欠落していたことによる。

表-4より、平均値  $E_D$ ,  $E_F$  として、それぞれ0.93, 0.96を、変動係数  $V_D$ ,  $V_F$  としてそれぞれ0.31, 0.29を得た。

以上の結果をもとに、照査用応力に関する統計量を算定した。

まず、現状の設計計算応力による照査は、設計時許容応力度ぎりぎり設計された構造物に対しても安全性を確保していると考え、発生応力側の公称値  $\sigma_{Sn}$  として、降伏応力の規格値 235N/mm<sup>2</sup>を設計時安全率 2.0で除した 118N/mm<sup>2</sup>を用いることとした。

そして、これを基本に、照査用応力として設計計算応力、3次元有限要素解析応力を用いる場合の各統計量を、

表-5、表-6のように定めた。

最後に、実測応力を照査用応力として用いる場合についての統計量の扱いである。

実測応力は、設計荷重よりも小さな荷重条件で得られるのが普通である。ゲートにおいては、水压荷重が主たる荷重であり、設計水位よりも低い水位での測定値となる。ゲートの応力照査においては、測定時の水位と、設計水位での荷重分担の比の差などにより、測定された応力値を設計水位まで外挿することになる。

このとき、水压荷重、および、それらの上下架構への分担比の算定は、部材の詳細構造の影響を受けづらく、精度よく設計水位までの外挿が行えると考える。

軸力圧縮が主となる脚柱において、実測と解析値が整合しない状況は、脚柱への軸力の分担が実測と解析で異なっていることを意味する。

表-4の結果から、平均的には、実測と解析がよく整合しており、荷重分担は、実測と解析で差がないと考える。

そこで、実測応力に対しては、荷重分担による外挿を行っても、実際に設計水位をかけた場合と一致すると考え、設計計算応力、3次元有限要素解析応力における平均値 $E_D$ 、 $E_F$ に対応する平均値 $E_M$ として、1.0を用いることとした。また、変動係数 $V_M$ については、ばらつきも小さいであろうと考え0.05を用い、各統計量を、表-7のように定めた。

図-6に、表-2、および、表-5から表-7の統計量をもとにした正規確率密度関数を示す。傾向としては、設計計算応力を用いる場合に比べて、3次元有限要素解析応力を用いる場合の確率密度関数のほうが、平均的には発生応力が高く、分布の幅も小さく、先に図-2、図-3で考察した傾向と一致している。実測応力を用いる場合については、よりこの傾向が顕著である。

#### 4.2 維持管理基準応力度の算出結果

式(1)から式(12)、および、4.1節の解析応力、実測応力に関する統計量をもとに、目標信頼性指標 $\beta_T$ を満足するために必要な応力照査式中の安全率 $\nu$ 、あるいは、 $\nu'$ を求めた結果を、図-7から図-9に示す。

図-7は、設計計算応力を照査に用いる場合の安全率 $\nu$ の算出結果である。目標信頼性指標 $\beta_T$ が大きくなるほど、安全率 $\nu$ も大きくなる右肩上がりの曲線となっている。

この曲線から、現行の水門扉の技術基準で定められた安全率の値である2.0に相当する $\beta_T$ の値を求めると、3.3となった。ここで、文献13)によると国内外の設計示方書における目標信頼性指標の例として、2.0~3.5(許容破壊確率 $2.27 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-4}$ )と設定されており、本検討で得られた $\beta_T$ はそれらと同程度であると言える。

図-8は、3次元有限要素解析応力を照査用応力として用いる場合の安全率 $\nu'$ の算出結果である。表-5、表

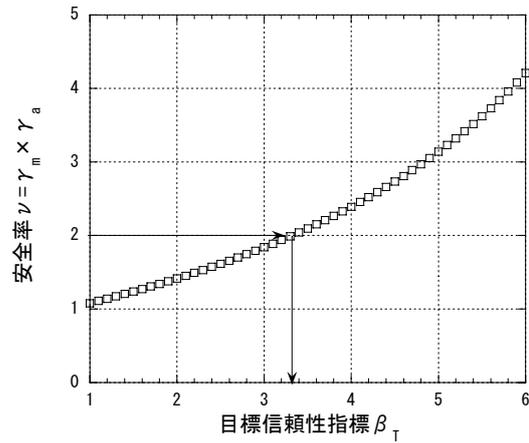


図-7 設計計算応力を照査用応力に用いる場合の目標信頼性指標と安全率の関係

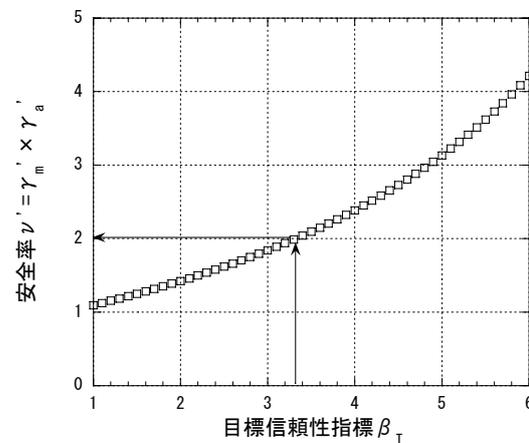


図-8 3次元有限要素解析応力を照査用応力に用いる場合の目標信頼性指標と安全率の関係

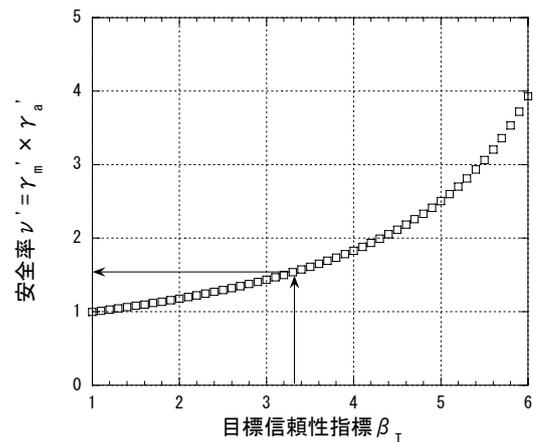


図-9 実測応力を照査用応力に用いる場合の目標信頼性指標と安全率の関係

図-6からわかるように、基本的な統計量がほぼ同程度であることから、図-8の曲線は、図-7のそれと酷似している。

図-7から得た、設計計算応力を用いる場合の安全率2.0に対応する信頼性指標値3.3を図-8に適用すると、

これに対応する安全率 $\nu'$ は2.0となる。

これより、式(13)中の維持管理基準応力度の補正係数 $\alpha$ は $2.0/2.0=1.00$ となり、今回の試算では、設計計算応力を用いても、3次元有限要素解析応力を用いても、維持管理基準応力度は変わらないという結果となった。

これは、試算に用いた実測応力が静水圧荷重のもとでの測定結果であり、この荷重下で脚柱は軸力成分が主となることから、設計計算応力と3次元有限要素解析応力の差が生じなかったことによると考える。

一方、ラジアルゲートの応力照査においてもうひとつの重要な荷重である、ゲートの開閉操作時のトラニオンピン周りの摩擦抵抗荷重については、脚柱間の斜材の入り方により、設計計算式と実構造物とが異なる傾向にあることが文献5)で指摘されている。今後、摩擦抵抗荷重に対する応力測定結果を用いれば、今回の試算よりも構造解析法によって維持管理基準応力度に差が生じるものとする。

最後に、図-9は、実測応力を照査に用いる場合の安全率 $\nu'$ の算出結果である。図-8と同様に、信頼性指標値3.3を図-9に適用すると、対応する安全率 $\nu'$ は1.53となる。これより、補正係数 $\alpha$ は $2.0/1.53=1.31$ となり、実測応力を照査に用いる場合は、維持管理基準応力度を30%程度高めに設定できるという試算結果となった。

なお、実測応力による推定発生応力 $V_{\sigma s}'$ の値として0.0から0.20まで変化させても、補正係数 $\alpha$ の値は1.0を上回り、維持管理基準応力度を高めに設定できることを確認しているが、定量データに基づいたものではなく、実測応力による推定発生応力の分布の設定方法については、今後の課題である。

## 5. 結 び

設計時よりも確度が高い多くの情報をもとに安全性照査を行うことが可能な維持管理時において、設計時と同じ基準値により管理を行うことは必ずしも合理的ではないと考え、信頼性理論に基づいて合理的に応力照査における基準応力度を設定する方法について考察した。

同設定方法では、照査に用いる応力により実構造物における発生応力の推定精度が異なることに着目し、一定の安全性を確保するために必要な安全率を、信頼性理論に基づいて照査用応力毎に与えることにより、基準応力度を設定する。

そして、同設定方法に従い、実測応力が得られている実在のラジアルゲートを対象に、設計計算式による応力、3次元有限要素解析による応力を算出して維持管理時の基準応力度の試算を行った。

その結果、設計時点の技術基準により達成される安全性の水準を確保するという前提のもと、設備管理者はよ

り実態に近い応力が得られる維持管理時には、設計時と異なる維持管理用の基準値、すなわち維持管理基準応力度が採用できる可能性を見出した。

今後、検討事例の追加・データ蓄積を行って本手法の信頼性を高め、適切な応力照査位置の設定や腐食実態調査方法の検討など、実務的な適用性に十分な配慮がなされた安全性照査手法として確立していく予定である。

## 謝 辞

本論文における検討内容の多くは、(社)水門鉄管協会「水門扉等鉄鋼構造物の維持管理基準に関する検討会」(平成18-19年度)の成果であることを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編一付解説一第5回改訂版, pp.232, 2007.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)鋼・合成構造物, pp.56-58, 丸善, 2007.
- 3) 中村秀治, 小林精一, 加藤 治, 松浦真一, 沼崎吉次, 寺野隆雄, 松井正一, 篠原靖志：水力鋼構造物の寿命予測手法の開発, 電力中央研究所報告, 総合報告：U04, 1987.
- 4) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編), 1999.
- 5) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水門扉編一付解説一第5回改訂版, 2007.
- 6) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準水門扉設計参考例, 1986.
- 7) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編一付解説一第5回改訂版, pp.32-33, 2007.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, pp.129-130, 2002.
- 9) Miki,C., Toyofuku,T., Yoshimura,Y. and Murakoshi,J.: Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridges, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., No.386/I-8, pp.341s-349s, 1987.
- 10) 藤原稔, 村越潤, 鹿島久義：鋼プレートガーダー橋における応力測定結果に関する報告, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1181-1188, 1991.
- 11) 三木千壽, 山田真幸, 長江進, 西浩嗣：既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.281-294, 2000.
- 12) 日本建築学会：建築物の限界状態設計指針, 2002.
- 13) 星谷勝, 石井清：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.

(2008年9月18日受付)