サドルサポート上の水圧鉄管に生じる周方向曲げモーメントと応力評価法について

東電設計㈱　フェロー会員　○中村　秀治
東京発電㈱　正会員　日比野悦久

１．はじめに

水力発電所建設の最盛期（昭和 20 年代後半～昭和 30 年代）を過ぎて 50 年以上になる[1]．水門，鉄管などの水力鋼構造物も材質と規模において新規建設対応の技術開発が行われてきたが[2]，既に維持管理問題が中心になって久しい．しかしながら，近年の大規模太陽光・風力開発の機運と既設水力設備の高経年化により，改めて負荷追従性に優れた既設水力の重要性が再確認されている．

Turner らの論文(1956)に始まる FEM 構造解析技術が普及したのは昭和 40 年代後半である．したがって，既設の水力鋼構造の多くは，今日の数値解析技術を背景に設計・製作されたものではない．2 次元解析モデルなどの簡易化が図られた設計評価法の採用から，今日的見直しが図られないまま．既設構造物が高経年を迎えている例は多い．

本報告では，一例として，サドルサポート上の水圧鉄管(図-1)に生じる周方向応力評価を取り上げ，維持管理にあたっての留意点について，指摘を試みる．

２．現行基準における規定

水門鉄管技術基準において，現行評価法の背景となっている Illinois 大学の Wilson らによる試験的検討[3),4)]は，図-2 に示す通り，鉄管(長さ＝12ft.)を横置きし，両端支持，中央載荷(支持角 β=90°, 105°, 120°, 135°)条件で行われている．併せて，管壁と載荷板の間で，管壁の接線方向せん断力により力の伝達がなされる前提の下，解析的検討が行われている．これらの試験・解析の比較に基づいて結果は式(1)～(4)のようにモーメント係数 C を用いた形で整理されている(図-3)．

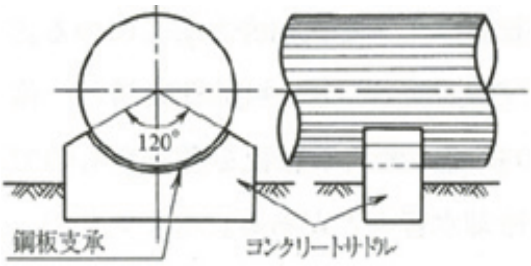

図-1　水圧鉄管のサドルサポート

$$M=CQ\,r_m \tag{1}$$

$$\sigma_\theta=\frac{6}{t^2}\frac{M}{B}=\frac{6}{t^2}M_0 \tag{2}$$

ここに，
M：管胴の有効幅に働く周方向全曲げモーメント
M_0：管胴に働く周方向単位幅当り曲げモーメント
Q：支台からの全反力（水重による支台反力）
C：モーメント係数，　r_m：鉄管の板厚中心半径
σ_θ：鉄管表面の周方向曲げ応力
t：鉄管板厚，　B：管軸方向有効幅(=4 r_m)
β：支持角（図-3 参照 ）

$$C=\frac{1}{2\pi K}\left\{\begin{aligned}&\cos\theta\left(\sin^2\beta-\frac{5}{8}\beta\sin2\beta+\frac{\beta^2}{4}\cos2\beta\right)\\&+\theta\sin\theta\left(\frac{\beta^2}{2}+\frac{\beta}{4}\sin2\beta-\sin^2\beta\right)\\&+\frac{\beta}{4}\cos\beta(2\beta+\sin2\beta)-\sin\beta\left(\frac{\beta}{2}+\frac{1}{8}\sin2\beta+\frac{\beta}{4}\cos2\beta\right)\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

$$K=\sin^2\beta-\frac{\beta^2}{2}-\frac{\beta}{4}\sin2\beta \tag{4}$$

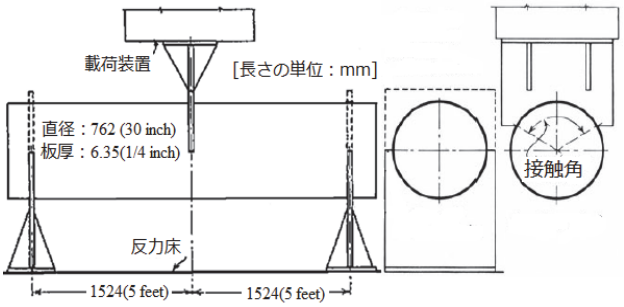

図-2 Illinois 大学 Wilson らによる円筒試験体の寸法と載荷条件

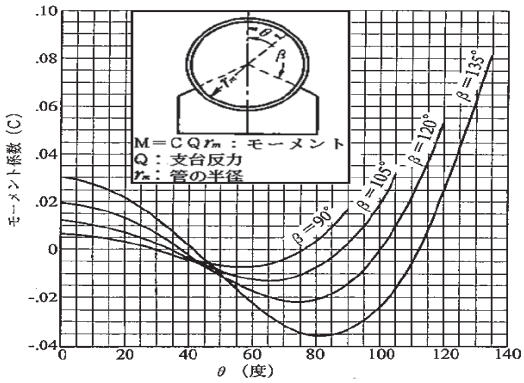

図-3　周方向全曲げモーメント算定に用いるモーメント係数

キーワード　水圧鉄管，サドルサポート，周方向曲げモーメント，簡易応力評価法，FEM 解析
連絡先　〒135-0062　東京都江東区東雲 1-7-12　東電設計株式会社電気本部　Tel.03-6372-5720

© Japan Society of Civil Engineers

3．数値解析による確認

解析モデルは図-4の通りであり，Wilsonらの試験条件に一致させている．鉄管には4節点シェル要素，支持部および載荷部には8節点ソリッド要素を用いている．載荷板は中央に置き，支持角βは試験条件に合わせて変更可能なように周方向要素分割し，管軸方向分割幅は載荷板厚，支持板厚と同じにしている．

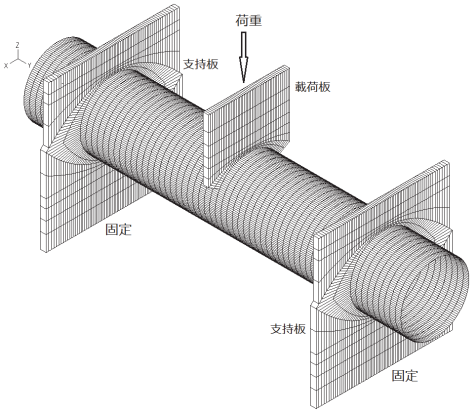

図-4　解析モデル

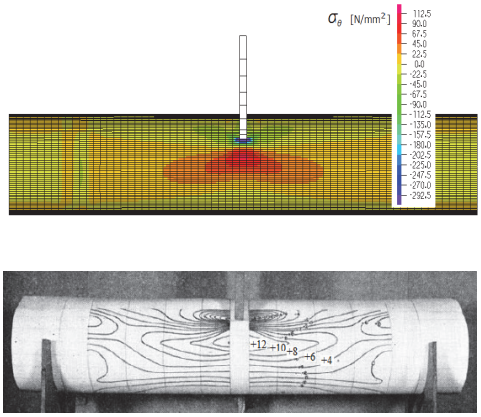

図-5 解析と試験による周方向応力分布の比較

鉄管と載荷板および支持板は，実態通り完全に切り離し，接触条件を考慮するものとしている

図-5 は鉄管表面に生じた周方向応力 σ_θ の解析結果を，等高線で示された試験結果と比較して示したものである．両者は定性的，定量的に概ね良く一致している．図-6 は載荷板位置の断面における単位幅当り周方向曲げモーメント M_0 の解析結果を，現行基準の式(1)～(4)による結果と比較して示したものである．サドル肩部近傍(θ=80°～120°)では，現行基準式と解析結果は整合していると言える．しかしながら，サドル設置断面の肩部だけでなく，断面全体の M_0 の分布について見れば，外側へ膨らむ位置や，θ = 0°近傍における M_0 の値など，現行設計基準と FEM 解析結果は明らかに異なっている．

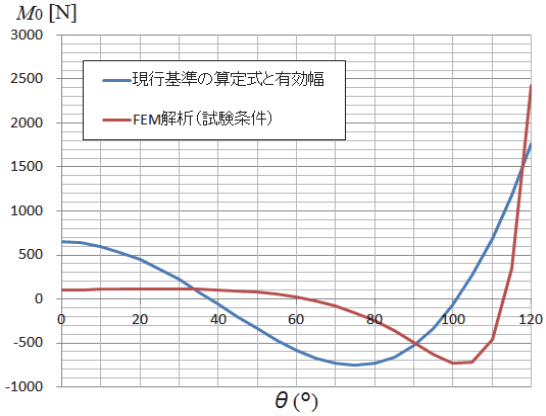

図-6　単位幅当り周方向曲げモーメント M_0 に関する現行基準算定値とFEM 解析値の比較

4．維持管理にあたっての留意点

図-7に示した通り，我が国の既設水圧鉄管の（半径／板厚）比は，概ね，40<（半径／板厚）<160 である[1]．前述の検討は，Wilsonらの試験研究に合わせて，（半径／板厚）=60で行っているが，同様の検討を（半径／板厚）=40, 60, 140について行った結果，現象が大きく異なることが確認されている．

モーメント係数Cは，支持角 β のみではなく，（半径／板厚），およびサドルの管軸方向長さなどに大きく影響されるので，これらの関数であることに留意する必要がある．

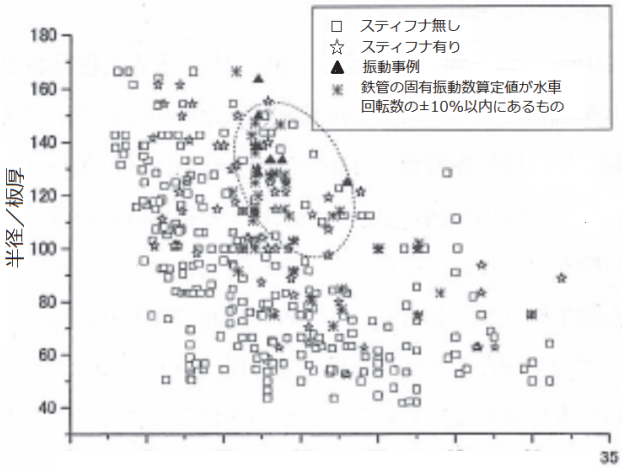

図-7　我が国における既設水圧鉄管の形状比

5．結　び

サドルサポート上の水圧鉄管に生じる周方向曲げモーメントの評価方法について，現行基準の現在に至る経過をたどり，FEM 解析結果との比較検討を行った．1940 年代の試験結果と，せん断力による伝達機構の仮定に基づく現行設計式において，①鉄管の（半径／板厚）比が考慮されていない，②サドルの管軸方向長さの影響等について，今日的視点での見直しの必要性を指摘した．

参考文献

1) 電力土木技術協会：水力技術百年史，1992.
2) （社）水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編－付解説－第 5 回改訂版, 2007.
3) Wilson, W.M., Olson, E.D.: Tests of Cylindrical Shells; A Report of an Investigation, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin Series No.331, p.79-105, 121-124, 1941.
4) American Society of Civil Engineers: Steel Penstocks, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.79, 2012.

© Japan Society of Civil Engineers