

円弧形防潮水門の耐震性について

京都大学工学部 正員 後藤 尚男
富士製鉄 正員 ○岡村 秀夫

1. まえがき

高潮から市民を守るという目的で建設される世界でも前例の少ない円弧形防潮水門を対象として、その耐震安定性について検討するために、面内の振動と地震応答について研究を実施してきた。^{1,2)} 引続き基礎の影響を考慮した扉体の地震応答計算、扉体の支持点での境界条件による振動性状の変化、面外への地震応答等について研究を進めたので、ここに報告する。数値計算例としては大阪府によって建設中の実例を対象とした。

2. 基礎を考慮した扉体面内の地震応答計算

円弧形防潮水門は図-1のように略示される。基礎の部分は上部に比べて重量が大きく、かつ上部との結合がヒンジに近いことから連成効果は小さいものと考えられる。そこで扉体への入力地震波は基礎との接合点での地震応答波形を用いることにした。基礎および扉体の振動の運動方程式はそれぞれ次式で与えられる。^{1),2)}

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{Z} + k_h Z - k_h S\theta &= -M\ddot{x} \\ J_g \ddot{\theta} + (k_r + k_h S^2)\theta - k_h SZ &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1)

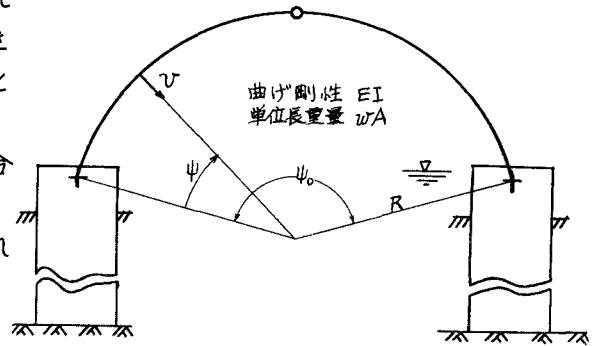


図-1 円弧形防潮水門概要図(捲き上げ時)

ただし、Z: 水平相対変位、θ: 回転角、 $\ddot{x}$: 地動加速度、S: はね中心と重心の距離

$$\frac{EI}{R^4} \left(\frac{\partial^4 v}{\partial \psi^4} + 2 \frac{\partial^3 v}{\partial \psi^2 \partial t} + v \right) + \frac{WA}{g} \frac{\partial^3 v}{\partial t^3} = - \frac{2WA}{g} \ddot{x}_r \sin \left(\frac{\psi_0}{2} - \psi \right) \quad (2)$$

ただし、 $\ddot{x}_r$: 基礎と扉体の接合点の地震応答絶対加速度

式(1)をロッキング中心まわりの回転角に関する式に変換し、また式(2)にModal Analysisを適用して規準座標に関する式に変換した後、Newmarkのβ法によって数値計算を行なった。その結果の一部を表-1に示す。

表-1

基礎と扉体の接合点の地震応答 $\alpha_1, \alpha_2 = 0.1$ CASE-I*				扉体1/4点の地震応答 $\alpha_1, \alpha_2 = 0.01$ CASE-I*			
入力波	最大相対変位 (cm)	最大絶対加速度 (gal)	応答最大加速度 入力最大加速度	入力波	最大相対変位 (cm)	最大絶対加速度 (gal)	最大曲げ応力 (kg/cm ²)
定常振動	2.70	1426	7.13	TAFTSEIII*と直接	7.68	1340	459
TAFTSEIII* max 138 gal	0.82	526	2.80	接合点の地震応答 (× TAFT)	8.71	3392	792
OLYMPIASEIT6 max 195 gal	0.84	598	3.07	接合点の地震応答 (× OLYMPIA)	13.83	4064	1142
スペクトル図**			2.67	スペクトル図 (20 gal)	9.69	1304	
* CASE-I 安治川ゲート 12×24×44 ^m $T_1=0.28$ sec				扉体 $R=33$ m $T_1=0.59$ sec $T_2=0.31$ sec			
** 建設省土研の平均応答倍率曲線							

3. 境界条件に対する検討

扉体の面内振動に関する支持点の境界条件は、力学的には完全なヒンジではないので、半固定の状態を回転ばねに置きかえて検討した。回転ばね支承はモーメントに対して抵抗し、 $K_r = M/\phi$ (ϕ は回転角) で与えられるので、この場合の境界条件は対称変形の場合については次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \psi=0, \psi=\psi_0 : V=0, \quad \frac{EI}{K} \frac{d^2 V}{d\psi^2} &= \frac{K_r}{R} \frac{dV}{d\psi} \\ \psi=\frac{\psi_0}{2} : \frac{d^2 V}{d\psi^2} + V=0, \quad \frac{d^3 V}{d\psi^3} + \frac{dV}{d\psi} &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

運動方程式の一般解と式(3)等の境界条件より振動数方程式を求めた。いま回転ばねの強さを $K = k_r R / EI$ なる無次元量で表わし、 K を変化させて振動数方程式より固有値を求めて、固有周期と K との関係として図示したのが図-2 である。原型の K の正確な値は求められないが、1/50 模型実験より推察された $K \approx 0.4$ について、モードおよびモーメント分布を求めて図示したのが図-3 である。

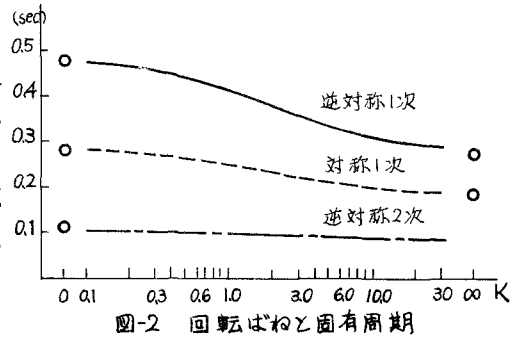


図-2 回転ばねと固有周期

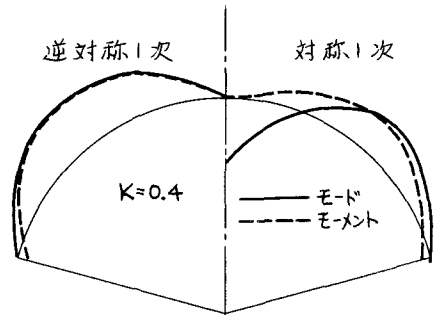


図-3 モードとモーメント分布

4. 面外ロッキング振動と地震応答

水門の側面図は図-4(a)で示され、面外に対する支持条件は完全にヒンジであって平常時は偏心支持され、転倒に対してはワイヤーで引張った状態にある。扉体の面外への剛性は非常に大きいので、剛体としてのロッキング振動が支配的であろうと考えられる。図-4(b)は面外ロッキング振動のモデル表示であり、このモデルについての運動方程式を導くと次式となる。

$$J\ddot{\theta} + K_l^2(\theta + \Delta\alpha) - Wl_1 \sin(\alpha + \Delta\alpha + \theta) = -\frac{W}{g} l_1 \cos(\alpha + \theta) \ddot{z} \quad (4)$$

ただし、 K : ワイヤーのばね定数、 W : 自重、 J : 0点まわりの慣性2次モメント

ワイヤーは圧縮に対してほとんど抵抗しないことを考慮して、式(4)の K は非線形ばねとして取り扱った。式(4)の右辺の $\ddot{z}$ に強震記録を入れて地震応答計算を行なった結果、ワイヤーの圧縮側に対してかなり大きく変位し、引張り側には衝撃的な挙動を示すこと、またワイヤー1本についての最大張力は121 ton (カカ0.4MPa)となり、ワイヤーの破壊荷重365 ton に比べて安全であることがわかった。なお数値計算はすべて京都大学電子計算機による。

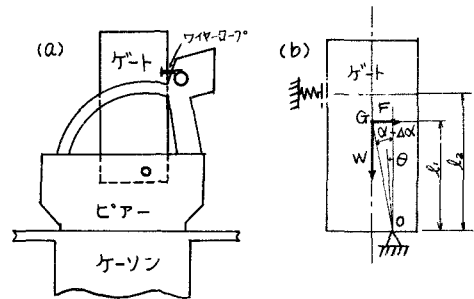


図-4 面外ロッキング振動のモデル化

1) 笠藤土岐・小園・高岡: 円形防犯水門の耐震性について, 京都大学防災研究所年報, 第11号A, 昭44:3

2) 後藤・高岡: 円形防犯水門の耐震性に関する2.3の考察, 土木学会関西支部学術講演会要録, 昭42:11