

円弧型防潮水門の耐震性に関する2・3の考察

京都大学工学部 正 員 後藤 尚男
 京都大学大学院 学生員 岡村 秀夫

1. まえがき

円弧型の防潮水門はわが国では前例がなく、しかも比較的たわみやすい構造であるので、われわれはまず面内の振動と地震応答についての研究を実施した。¹⁾引続き現地の常時微動とその解析、基礎構造体の振動性状、扉体に対する入力波の周波数成分、扉体の地震応答計算などについての研究を進めたので、ここにそれらについて報告する。

2. 常時微動の測定および解析

常時微動の振動性状は地盤特有のものであり、これを解析することによって地震時の地盤の振動性状を推察する目安にしようと試みられている。今回、常時微動を測定した場所は図-1に示されている大阪府の水門建設地付近の3地点である。地盤はいずれも沖積層であり、3地点の代表的な土質柱状図を図-2に示した。測定時間は近接振動源の少ない夜半から未明にかけて行なった。測定に用いた振動計は固有周期1秒の換振器(上下動, 水平動), 積分回路付増幅器であり地盤の微動変位を測定することができ、記録はすず書と磁気テープに収録した。すず書記録については波形が基線を切る時間を0.01秒単位で読み取り、これを2倍して周期とし周期・頻度分布図を画いた。その一例を図-3に示した。各測点について上下・水平2成分の周期・頻度分布図を描いて卓越周期を調べ図-4に一括した。これらは変位に対する卓越周期であり、加速度に対してはもっと小さくなるものと考えられる。

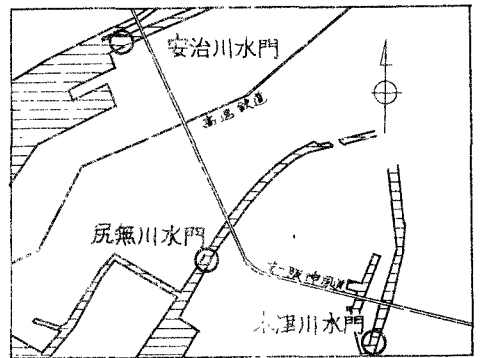


図-1 常時微動観測位置

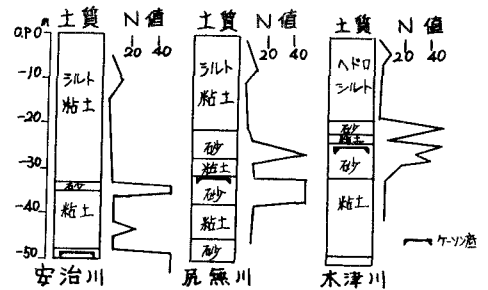


図-2 土質柱状図

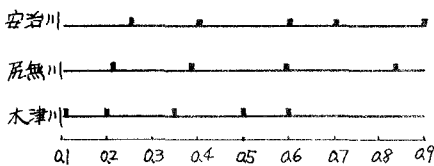


図-4 地盤の卓越周期

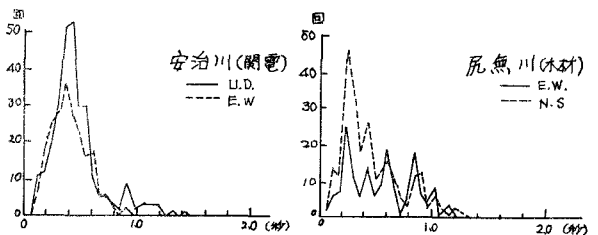


図-3 周期・頻度分布

3. 常時微動の振幅に関する考察

磁気テープに収録した常時微動の再生記録を0.04秒間隔で読み取り、各測点について20秒間のパワースペクトルを次式により計算した。

$$S(f) = \frac{2\lambda}{N} \left[\left\{ \sum_{k=0}^N x(k\lambda) \cos(2\pi f k\lambda) \right\}^2 + \left\{ \sum_{k=0}^N x(k\lambda) \sin(2\pi f k\lambda) \right\}^2 \right]$$

ただし、 N :データの個数 λ :時間間隔

図-5にその一例を示した。同時に10帯域の周波数成分に分けた周期・頻度分布をも図示した。図-5において両者を比較すると周期・頻度のピークとスペクトルのそれとは0.2~0.6秒間ではかなりよく一致するが、1秒以上では周期・頻度は減少するがスペクトルの値は小さくならない。このことは地盤の変位を与える波動エネルギーにかなり大きい周期の波が貢献しているためと考えられる。この変位スペクトルに ω^2 を乗じて加速度スペクトルを求めたのが図-6である。この図から、地震時における地盤の振動加速度の周波数構成を推測することができる。

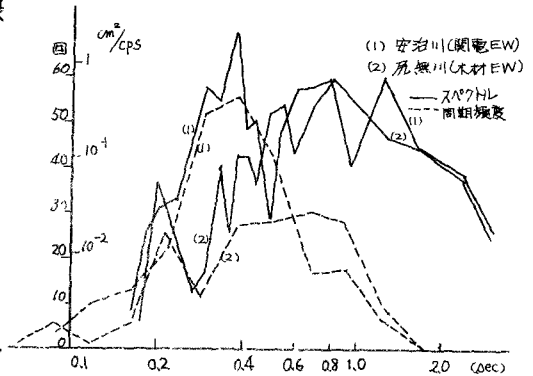


図-5 常時微動のパワースペクトル

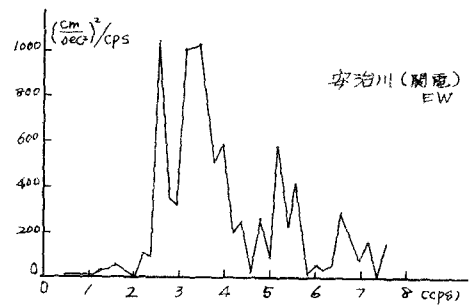


図-6 常時微動の加速度スペクトル

4. 基礎の振動性状

防潮水門の構造は井筒・ピラー・扉体の3つの部分に大別でき、その重量比は(11,000~20,000):3,600:250程度であり、扉体の重量はピラー部の約7%程度にすぎない。扉体が軽量な上にピラーとの結合部がヒンジであることから、扉体の振動が下部の振動に及ぼす影響は小さいと考えられるので、扉体の重量はピラー部の重量増加で考慮して、基礎のロッキング振動を解析した。鉛直地盤係数はボーリング結果より推察し、水平地盤係数の値は固有周期に大きく影響するので $0.5 \sim 8.0 \text{ kg/cm}^2$ まで変化させて計算した。また水平地盤係数の分布は等分布および三角形分布を考えた。ボーリング結果によれば水平地盤係数の値は平均 $2 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ であろうと思われる。基礎のロッキング振動の運動方程式は図-7より次式で与えられる。

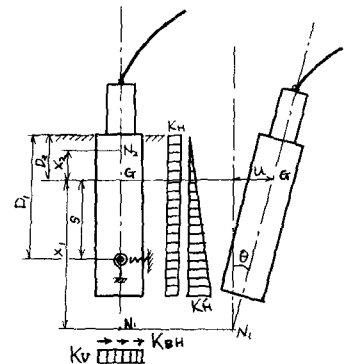


図-7 構造物断面図

$$\left. \begin{aligned} M \ddot{U} + K_H U - K_H S \theta &= 0 \\ I_G \ddot{\theta} + (K_R + K_H S^2) \theta - K_H S U &= 0 \end{aligned} \right\} \text{-----(1)}$$

ただし、 K_H, K_R は水平および回転バネ定数。

上式より第1次および第2次の固有円振動数は次式のように求まる。

$$\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{\omega_H^2}{2} \left\{ 1 + \frac{e_o^2}{I_o^2} + \frac{S^2}{I_o^2} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{e_o^2}{I_o^2} + \frac{S^2}{I_o^2} \right)^2 - 4 \frac{e_o^2}{I_o^2}} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $e_o^2 = K_R / K_H$, $I_o^2 = I_g / M$

$$\omega_H^2 = K_H / M$$

各基礎について計算したのが図-8である。正弦応答は式(1)をロッキング中心回りの1自由度の式に変換し、適当な減衰定数を仮定して次式が得られる。

$$\ddot{\theta}_j + 2\beta_j \omega_j \dot{\theta}_j + \omega_j^2 \theta_j = -\frac{M \ddot{z}_j}{I_j} \alpha e^{i\omega t} \quad (3)$$

ただし、 β_j : j次の減衰定数

α : 加速度振幅

I_j : j次のロッキング中心回りの質量慣性モーメント

一方式(3)を θ_j について解くと、

$$\theta_j = -\frac{M \ddot{z}_j}{I_j \omega_j^2} \alpha \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 \right\}^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2}} e^{i(\omega t - \phi_j)} \quad (4)$$

これより扉体との結合点の変位応答を計算して図-9の共振曲線を得た(減衰定数10%)。計算ではヒヤード部の変位の最大値は2.5cm程度と考えられる。

5. 扉体への地震入力波の周波数成分

扉体への地震入力波は、地震そのものの特性に地盤特性や基礎の振動特性が加わったものと考えられている。いま、地盤から基礎に働く地震波のパワースペクトル $S_x(f)$ を設定すると、基礎と地盤とで構成される振動系の周波数伝達関数 $|\alpha_a(f)|$ は共振曲線を用いて求めることができるから、扉体における振動加速度のパワースペクトル $S_p(f)$ は次式で求められる。

$$S_p(f) = |\alpha_a(f)|^2 S_x(f)$$

ここでは図-6に示した常時微動の測定結果を参考にして地盤ごとのパワースペクトルを決め、上式の関係で与えられる $S_p(f)$ を扉体の応答計算に用いる入力加速度のパワースペクトルとした。周波数-周波数伝達関数の関係は一般に減衰が大きいほど形状は偏平になり、基礎の固有振動数が大きい場合には $S_x(f)$ のピークよりかなり高い振動数でピークが現われる傾向が知られている。このような場合は $S_p(f)$ は $S_x(f)$ に近づくので、基礎の固有周期が小さく、

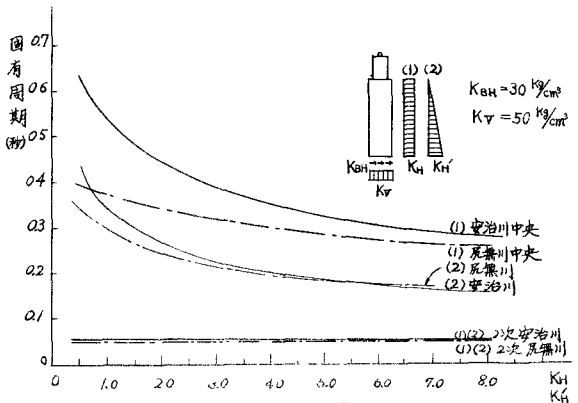


図-8 基礎の固有周期

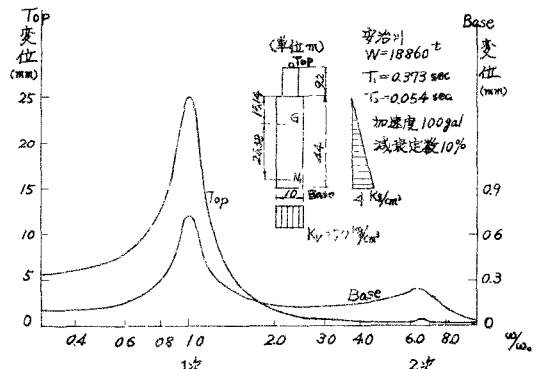


図-9 共振曲線(加速度振幅一定)

減衰も大きい場合にはピラー上部での加速度スペクトルは地盤でのそれを用いることも可能である。

6. 扉体の地震応答計算

以上のようにして扉体結合点での入力加速度のスペクトルを求めることができる。このような周波数特性を持つ人工地震波³⁾を電子計算機によって発生させ扉体への入力波を求めた。

扉体を図-10のようなヒンジアーチで表わすと、その面内強制振動の運動方程式は次式で与えられる¹⁾。

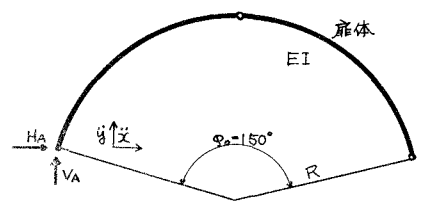


図-10 上部工

$$\frac{EI}{R^4} \left(\frac{\partial^4 v}{\partial \varphi^4} + 2 \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + v \right) + \frac{wA}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = - \frac{2wA}{g} \left\{ \ddot{x} \sin\left(\frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) - \ddot{y} \cos\left(\frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) \right\} \quad \text{----- (5)}$$

ただし、EI:曲げ剛性、R:半径、 $\frac{wA}{g}$:扉体の単位長当りの質量
式(5)に modal analysis を用いて各振動次数の常微分方程式に変換し、減衰定数を導入すれば、規準座標 q_n に関する次式が得られる。

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = W_{nx} \ddot{x} + W_{ny} \ddot{y} \quad \text{----- (6)}$$

ただし、 $W_{nx} = -\frac{4}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0/2} V_n \sin\left(\frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) d\varphi$, $W_{ny} = \frac{4}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0/2} V_n \cos\left(\frac{\varphi_0}{2} - \varphi\right) d\varphi$
式(6)を Newmark の β 法によって数値計算を行なった。

地震時における水平反力 H_A 、鉛直反力 V_A は、第2次以上のモードを無視すれば次式により近似表示できる。

$$H_A = -0.14315 \ddot{x} - 0.07098 \ddot{y} - 0.05535 \text{ ㈬}$$

$$V_A = -0.07084 \ddot{x} - 0.14315 \ddot{y} + 0.014552 \text{ ㈬}$$

ただし、㈬は1/4点の相対加速度。

水平反力の応答の一部を図-11に示した。これより動的な水平反力は静的計算の1.5倍程度(1%減衰)になり、またその周期は扉体の固有周期0.58秒に近いことから、扉体自身のたわみ振動の影響が大きいことを示しているものと思われる。その他の計算結果は講演時にゆずる。

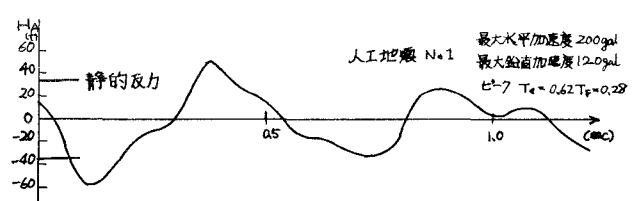


図-11 水平反力の時間変化

とを示しているものと思われる。その他の計算結果は講演時にゆずる。

なお数値計算は京都大学電子計算機KDC-IIによった。

7. あとがき

この研究は、大阪府土木部高潮課による防潮水門を対象とした研究の一環であり、関係者の御支援に対して謝意を表すものである。

- 参考文献 1) 後藤秋吉・岡田昭四; 円形アーチの動と耐震性に関する研究, 第22回年次学術講演会概要I-70
2) 金井田中他; 常時微動について(第10報) 英文, 東大地震研究所彙報, 第44号, 昭41
3) 後藤秋吉; 電子計算機による耐震設計用の人工地震波に関する研究, 日本地震工学シンポジウム, 1966