

京都大学防災研究所 正会員 三浦房紀
京都大学防災研究所 正会員 土岐憲三
京都大学大学院 学生員 寺田倫康

1. まえがき 本報告は、有限要素法を用いて動水圧の影響を考慮した水-地盤-構造物系の震動解析を行い、地震時における動水圧に関する詳細な検討を加え、さらに動水圧が構造物の安定性に及ぼす影響について検討を試みたものである。

2. 構造物-地盤-水系の運動方程式 構造物-地盤系の運動方程式と水系の運動方程式を両者間の境界における力のつり合い条件を考慮することによって系全体の運動方程式は次式で与えられる¹⁾。

$$([K] + i\omega[C] - \omega^2[M^*])\{Z_0\} = -[M^*]\bar{a}_g \quad \dots\dots (1)$$

$$[M^*] = [M] + \rho_w[L]([H] - \omega^2[Q])^{-1}[L]^T \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ はそれぞれ構造物-地盤系の剛性、減衰、質量マトリクス、 $[H]$ 、 $[Q]$ は水系の剛性及び質量マトリクスに対応するマトリクス、 $[L]$ は境界での動水圧を構造物-地盤系の節点に付加質量として組み込むための変換マトリクスである。また、 $\{Z_0\}$ は節点変位ベクトル、 $\bar{a}_g$ は入力加速度、 ω は円振動数、 ρ_w は水の密度である。境界上の節点の絶対加速度 $\{\ddot{a}_g + \ddot{z}_0\}$ を用いて動水圧 $\{p_0\}$ は次式で与えられる。

$$\{p_0\} = -([H] - \omega^2[Q])^{-1}\rho_w[L]^T\{\ddot{a}_g + \ddot{z}_0\} \quad \dots\dots (3)$$

3. 解析結果とその検討

3.1 解析モデル 解析に用いたモデルは2通りあり、図-1に示すように水が存在する場合をモデル1、また水が存在しない場合をモデル2と呼ぶ。ここでは、地盤、構造物ともに線形弾性体と仮定し、構造物と地盤との間の剥離や滑動はないものとする。また水系については側方に半無限要素を導入している。モデルの物理定数を表-1に示す。

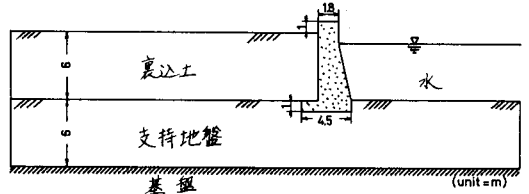


図-1 モデル図

3.2 動水圧の分布に関する検討 鉛直な壁体が運動するときの動水圧の分布はWestergaardの近似式が良く知られており、また壁面が傾斜している場合についての近似式は、Zangarらによって提案されている。図-2、図-3は本解析手法による結果とこれらの近似解とを比較したものである。図-2より低い振動数の領域では両者の間には良い一致がみられる。図-3に示すように共振点付近 $f=3.36$ Hzにおける動水圧の分布は水深中央付近から上部での増加が著しく、また動水圧の大きさは低い振動数の時に比較して5~7倍の値となっており

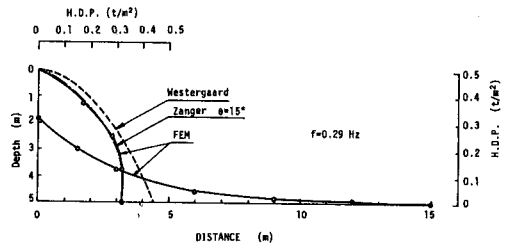


図-2 動水圧の分布 (f=0.29 Hz)

表-1 モデルの物理定数

、もはや壁体が剛体で地盤と同じ運動をするものと仮定している

	単位体積重量 (ton/m³)	せん断波速度 (m/sec)	ポアソン比
構造物	2.35	1600	0.17
埋込め土	1.7	120	0.4
表層地盤	1.8	160	0.4
水	1.0	水中の音速 1440 (m/sec)	

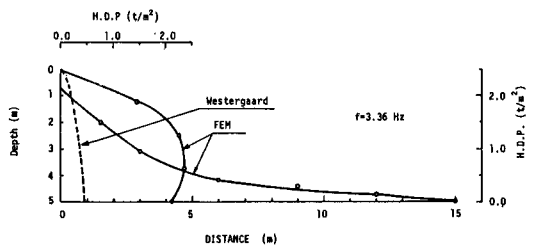


図-3 動水圧の分布 (f=3.36 Hz)

Westergaard や Zangar らの近似式は適用できないことがわかる。

3.3 護岸構造物の応答特性に及ぼす動水圧の影響 動水圧の影響が付加質量として構造物-地盤系の運動方程式に組み込まれることは式(1)から明らかである。図-4はモデル1, モデル2の構造物天端における水平方向の加速度応答倍率を示したものである。モデル2の1次の共振振動数は固有値解析の結果 3.37Hzであり、一方動水圧を考慮したモデル1のそれは 3.35Hzであり、付加質量による1次の共振振動数の低下はごくわずかにすぎない。しかしながら、2次および8Hz付近の共振振動数にみられるように、高次になるに従い共振振動数の低下はわずかではあるが大きくなる傾向にある。表-2はEl Centro (1940) NS成分の最大加速度を100galに修正した波形を入力とし、フーリエ変換により得られた構造物天端の最大応答量を示したものであるが、いずれも動水圧を考慮に入れたモデル1の方が2~5%とわずかに大きい結果となっている。

4. 護岸構造物-地盤系の非線形挙動 地震時には裏込土の

沈下、護岸構造物のはらみ出し等の被害が多く報告されており、これらの現象に関する検討は非線形震動解析法によるなければならない。ここでは地盤を完全弾塑性体と仮定し、地盤と構造物との接触面にはジョイント要素を導入して、この面での滑動や剝離の生じ得るモデル化³⁾を行い構造物の安定性に関する検討を行う。地盤及び滑動に関する降伏条件はMohr-Coulombの破壊基準に従うものとし、その強度パラメータを表-3に示す。

ここで付加質量は図-5に示すように振動数に対してほぼ一定とみなせることから、これを定数として非線形の振動方程式に組み込み、近似的に動水圧を考慮に入れたモデル(モデル1に対応)に対してEl Centro 波形(最大振幅200gal)を入力した際に降伏した領域を斜線で示したものが図-6である。

図には併せて、滑動したジョイント要素を実線で、剝離を生じたジョイント要素を破線で示してある。またモデル2に対して同様の解析を行なった結果を図-7に示す。このとき構造物天端における水平最大加速度は両モデルとも約680galであり、両者の間にほとんど差はない。しかしながら、モデル2においては裏込土のほぼ全域にわたって降伏が生じており、接触面での滑動も最下点(深さ6m)にまで達し、剝離も3mの深さまで達している。一方モデル1では地盤の降伏領域および滑動、剝離の生じた範囲ともにモデル2より狭い結果となっている。即ち、護岸構造物の動的安定性に対して最も危険となるのは水が存在しない場合であることをここでの結果は示唆していると言えよう。

◎参考文献1) P. Bettess and O.C. Zienkiewicz: Coupled Hydrodynamics

Response of Concrete Gravity Dam

Using Finite and Infinite Elements

, 1979. 2) 土岐三浦, 地盤-構造物系の

非線形地震応答解析, 学術論文報告集第

317号. 3) 土岐三浦, 強震時における

地盤と構造物の間の剝離と滑動, 土

木学会論文報告集 第302号.

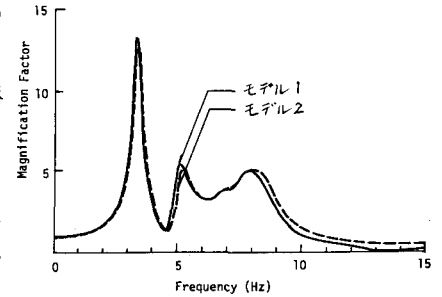


図-4 加速度応答倍率

表-2 構造物天端での最大応答量

		モデル1	モデル2
水平	加速度(gal)	330	313
	速度(kine)	14	13
	変位(mm)	6.0	5.9
上下	加速度(gal)	61	58
	速度(kine)	2.10	1.81
	変位(mm)	0.60	0.56

表-3 地盤及び接触面の強度パラメータ

	粘着力 (kg/cm ²)	内部摩擦角 (度)
裏込め土	0	40°
支持地盤	0.3	35°
接触面	0	30°

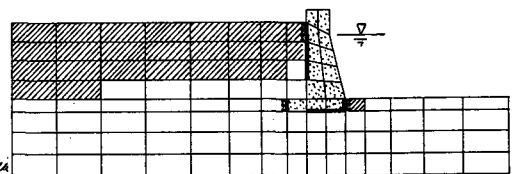


図-6 地盤の降伏及び剝離・滑動領域(モデル1)

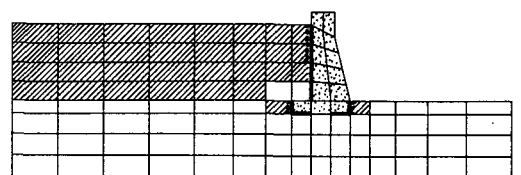


図-7 地盤の降伏及び剝離・滑動領域(モデル2)

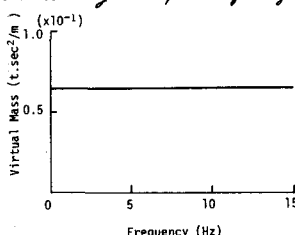


図-5 付加質量の振動数特性.