

はじめに

護岸の地震時変位の予測には、詳細な地盤調査結果に基づいて有限要素法動的解析を利用するのが、一般的な発想であろう。しかし本稿で想定しているのは、通常のボーリング程度の地盤情報しか利用できず、しかも地震直後に液状化層厚の推定結果だけに基づいて護岸変位および周辺地盤の変形を迅速に推定しなければならない、という状況である。限られた土質情報しかないならば、いたずらに数値解析手法のみを精緻化しても、予測結果の改善にはならない。むしろ力学的合理性を保ちつつ、既往の被害経験や実験結果を利用して不必要な複雑解析を排除して簡潔な変位推定を行なった方が、大地震直後の緊急対応には意義が深い。このような見地から、重力式護岸の地震時変位の推定法を考案した。

変位推定の理論

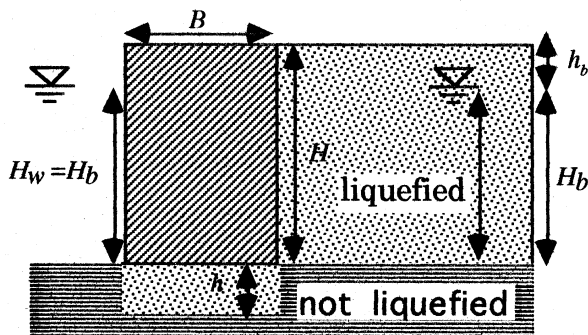


図1 解析用護岸モデル

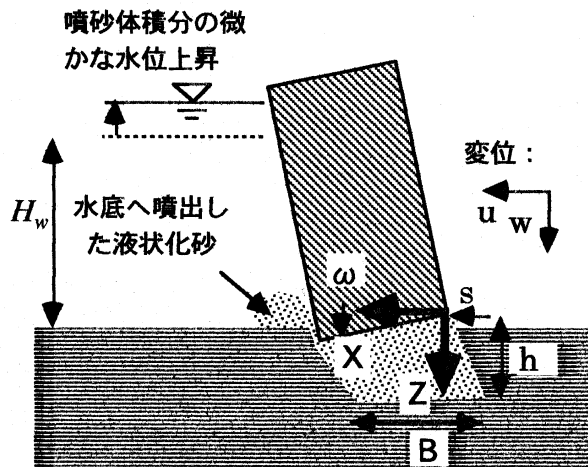


図2 護岸変位パラメータ s と ω

図1に護岸モデルを示す。本稿では、裏込めが護岸底面の深さまで液状化し、かつ護岸の下に厚さhの置き換え砂があって、剛性を喪失している状況を想定する。護岸に影響する外力としては重力や静的土水圧が表裏に存在するほか、動的な土水圧も作用する。有限要素解析では、未知数が節点ごとに存在し、計算量が大きくなる。しかし本稿では、振動台実験 (Ghalandarzadeh et al., 1998) を参照して、図2のようにケーソン変位を水平移動sと、かかと周りの回転角ωの2未知数で表現する。その結果、置換砂の変位分布も、体積一定条件を仮定して、

$$u = \left(1 - \frac{z}{h}\right)s + \frac{\omega x^2}{2h} \quad \text{および} \quad w = \frac{h-z}{h}\omega x \quad (1)$$

のように表現できる。

上述した振動台実験によれば、護岸の変位には最終的に収束する値が無く振動継続とともに進展し、加振終了とともに停止する。したがって護岸変位予測もsをωに関する運動方程式を使用して時間の効果を考慮しなければならない。本研究では Lagrangeの運動方程式理論を用いて (Towhata et al., 1999) sとωに関する運動方程式を作成するが、そのためにはケーソンのみならず置換砂の変位をも式1のようにsとωで表現することが必要であった。

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial Q_M}{\partial \dot{s}} \right\} + \left\{ \frac{\partial Q_G}{\partial \dot{s}} \right\} = \left\{ \frac{\partial Q_F}{\partial s} \right\} \quad (2)$$

ここで Q_M はケーソンおよび置換砂の運動エネルギー、 Q_G は重力のポテンシャルエネルギー、 Q_F は土圧など外力

がケーソンに対してする仕事である。ポテンシャルエネルギーにはケーソンや置換砂の高さ変化の他に、水底へ噴出した体積 $B^2 \omega / 2$ の砂の獲得したエネルギー、そして対応して水面が上昇したことによるエネルギー増加 $H_w \times B^2 \omega / 2$ (水位上昇は微小だがエネルギーは無視できない) も考慮しなければならない。また静的外力としては、護岸表の静水圧、裏の液状化砂層の過剰間隙水圧を含む等方的土圧 (= 上載圧) を考えた。地表の不飽和層と護岸との間には亀裂や段差が生じて接触が失われるのが既往の被害事例における経験なので、この部分の土圧は考慮しなかった。

解析の簡略化への工夫

上述の議論では、動的な土水圧や裏込めおよび置き換え砂のせん断強度の議論が抜けている。これらを詳細に解析に取り込むと、簡潔な変位予測という目的が果たせない。そこで振動台実験から得られた図3を参照する。これによれば、慣性力 (一振動台加速度と同じ位相) が負へ減少するときに護岸変位が進展し、逆に正へ増加するときには変位停止または逆移動する。このような相関が生じる原因は明らかではないが、前節で議論しないままに残した土の強度や動的土水圧の影響が総合された結果であることは間違いない。そこで本解析では、設計地震入力として与えられる慣性力が除荷されているとき (振動の半周期に対応) は、砂には強度が一切無く、静的荷重によって自由に変形が進展する、一方慣性力が増加するときには強度が発現されて変位は完全に停止する、というモデル化を行なった。

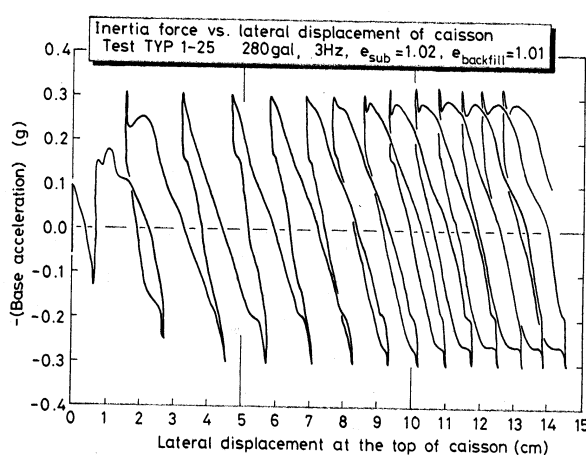


図3 振動台実験における慣性力と護岸変位との関係

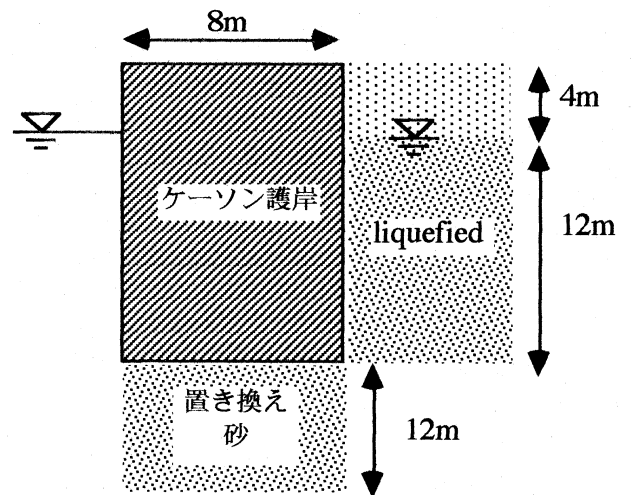


図4 計算例に使用した護岸モデル

計算例

図4のモデルについて、5秒間10サイクルの加振中の変位を計算した結果が、図5である。滑動変位 (translation, s) よりも回転 $\omega \times$ ケーソン高さ H の方が、合計された天端変位への寄与が大きくなった。両者の比率は護岸変位に応じて変動する。

参考文献

Ghalandarzadeh et al.. (1998): "Shaking table tests on seismic deformation of gravity quay walls," Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.2, Soils and Foundations, pp.115-132.

Towhata et al. (1999): "Mathematical principles in prediction of lateral ground displacement induced by seismic liquefaction," Soils and Foundations, Vol.39, No.2, pp.1-19.

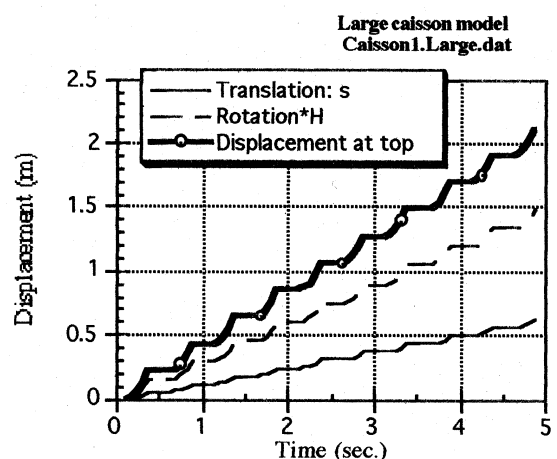


図5 ケーソン護岸変位の計算例