

(179) 岸壁裏埋め地盤の透水係数と動水圧と有効動土圧の分担関係

運輸省港湾技術研究所 風間基樹

運輸省港湾技術研究所 稲富隆昌

1. 研究の目的

岸壁の地震時安定性を検討する場合は、その外力である地震時土圧を合理的に評価することが必要となる。特に水中に建設される岸壁では、裏埋め地盤から動水圧を含む土圧を受けることになるが、裏埋め地盤の透水性と外力の載荷速度が地震時土圧現象に密接に関係することが容易に想像できる。すなわち、地震外力の載荷速度に比較して地盤の透水性が小さい場合には、土粒子間の間隙水の移動は無視でき、地盤を土粒子骨格と間隙水の一体となったものとして取り扱うことができる。一方、外力の載荷速度に比較して地盤の透水性が大きい場合には、土粒子間の間隙水は載荷中に移動することになり、土粒子と間隙水を一体とみなすことはできない。この両者の極端な例としては、地震時の砂質土の液状化現象と粘土の圧密現象があげられる。

従来から、このような考えのもとに水中の地震時土圧を算定する場合に二つの概念がある。一つは極端に透水係数の大きな材料を裏込めに使用する場合であり、動水圧と有効動土圧を別々に算定するという立場である。他方は、地震時に土粒子と間隙水が一体として運動すると考え全応力的に土圧を算定し、動水圧は考慮しないという立場である。この動水圧と有効動土圧の分担関係は古くから研究対象でありいくつかの研究^{1)~4)}があるが、この両者の中間的な場合は十分に明らかにされておらず、今のところ設計は後者の立場で行われている。また、地震応答解析などに用いる地盤物性なども、非排水条件下で求められてきた経緯がある。

現行の港湾施設の技術上の基準⁵⁾によると水中での地震時土圧は陸上と同じく物部岡部式を用いて算定する。このとき浮力を考えた重力と地震力の合成角を考慮するため次の見掛けの震度を用いて土圧を算定することになっている。

$$k_{\text{水中}} = \frac{\gamma_{\text{sat}}}{\gamma_{\text{sat}} - 1} k = \frac{Gs + e}{Gs - 1} k \quad (1)$$

ここに、 $k_{\text{水中}}$ ：水中における見掛けの震度、 k ：空気中における震度、 γ_{sat} ：水で飽和した土の空気中における単位体積重量、 G_s ：土粒子の比重、 e ：間隙比である。なお、同式は飽和度100%、水の単位体積重量 1tf/m^3 、土載荷重なしとした場合のものである。

図-1は、水で飽和した裏埋め地盤の単位体積重量と地震時土圧の関係、設計震度0.1のときについて示したものである。縦軸は、単位体積重量 2tf/m^3 の場合の土圧合力で規準化してある。図から裏埋め地盤の単位体積重量が 1.6tf/m^3 から増していくと、土圧合力は土の単位体積重量に比例して大きくなる。一方、裏埋め地盤の単位体積重量が 1.6tf/m^3 から小さくなくても土圧合力は大きくなるが、これは(1)式において水中震度が大きくなるためである。また、極端に単位体積重量が小さくなる場合には計算不能となる。この結果は、極限で無限大になることから単位体積重量が小さい領域では明らかに不合

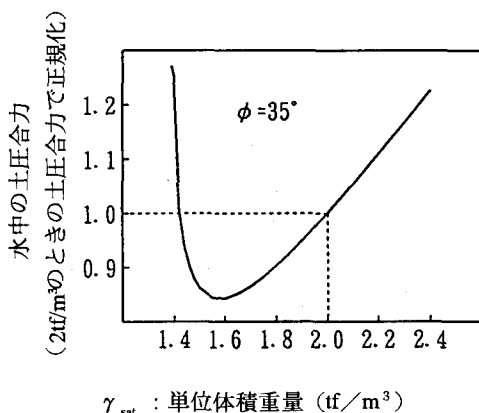


図-1 水中における地震時土圧合力と裏埋め地盤の単位体積重量の関係

理であると同時に、土圧低減のため軽量裏込材を用いることができない原因の一つになっている。

Ishibashi ら⁶⁾、Matsuzawa ら⁷⁾は、極端に透水性の高い場合から低い場合まで適用可能な一般化した水中震度を(2)式のように提案している。

$$k_{\text{水中}} = \frac{Gs + m e}{Gs - 1} k \quad (2)$$

同式中のパラメータ m は0から1までの間を変化する変数（なぜなら、間隙水が何の抵抗もなく土粒子と独立に動くとき $m = 0$ であり、逆に間隙水が土粒子とまったく一体となって動くとき $m = 1$ ）であり、裏埋め地盤の透水性、地盤の高さ、地震の周期等に応じて変化させることにより中間的な透水性を持つ地盤の地震時土圧が計算できるようになっている。また、 m にWestergaardの動水圧成分を加えることにより、地震時の全土圧を算定するスキームを組み立てている。しかしながら、この式を用いる場合でも基本的に物部岡部式を用いることから前述した不合理さを解消できるものになっていない。なお、筆者らは土圧を受ける構造物の地震安定性に関して構造物と地盤の動的相互作用を考慮して滑動外力を算定し、地震時土圧公式を使用しないことを提案しているが水中での考え方については言及していない⁸⁾。本報告は、水中で岸壁背後に作用する地震時土圧における動水圧成分と有効動土圧成分の分担関係を明らかにするために実施した基礎的数値計算結果を報告するものである。

2. 計算条件

裏埋め地盤の動的圧力の挙動は、薄層要素法により解析した。定式化は流体で飽和した多孔質弾性体の動的挙動を表わせるBiotの式に基づいている。定式化の詳細は、参考文献9)を参照されたい。

図-2は、ここで解析の対象とした地盤を示したものである。水で地表面まで飽和した半無限地盤に $x=0$ 面において水平方向に角振動数 ω の調和振動変位を与えている。層分割は11層とし、各層中間点において全応力(σ)、有効応力(σ')、間隙水圧(π)を計算した。このうち有効応力は土粒子骨格による有効動土圧、間隙水圧は動水圧、全応力は全動土圧に対応することになる。また、計算に使用した物理定数は図中に示したとおりである。

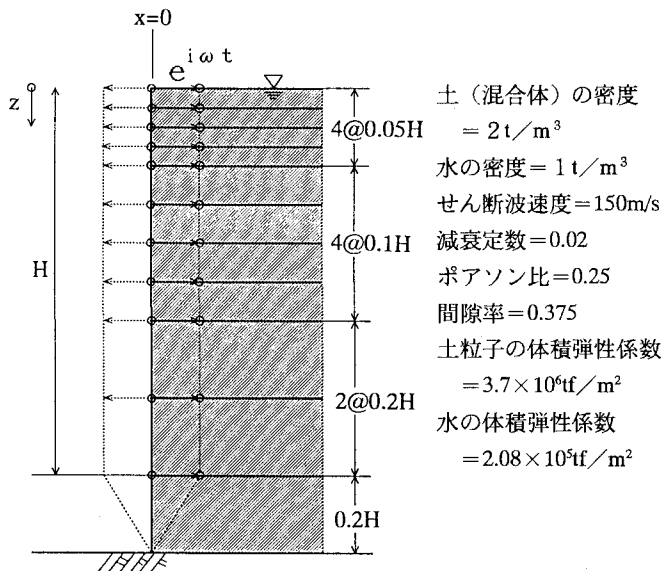


図-2 計算条件および層分割

3. 数値解析結果

図-3は、振動数1 Hzの外力に対して計算された $x = 0$ 面での応力比 $(\sigma x' / \sigma x)$ 、 $(\pi / \sigma x)$ の振幅を種々の地盤の透水係数に対して示したものである。図中の点線は、非排水条件下（すなわち間隙水の土粒子骨格に対する相対変位がなく一体として運動する条件下）の計算値を示している。透水係数が小さくなると

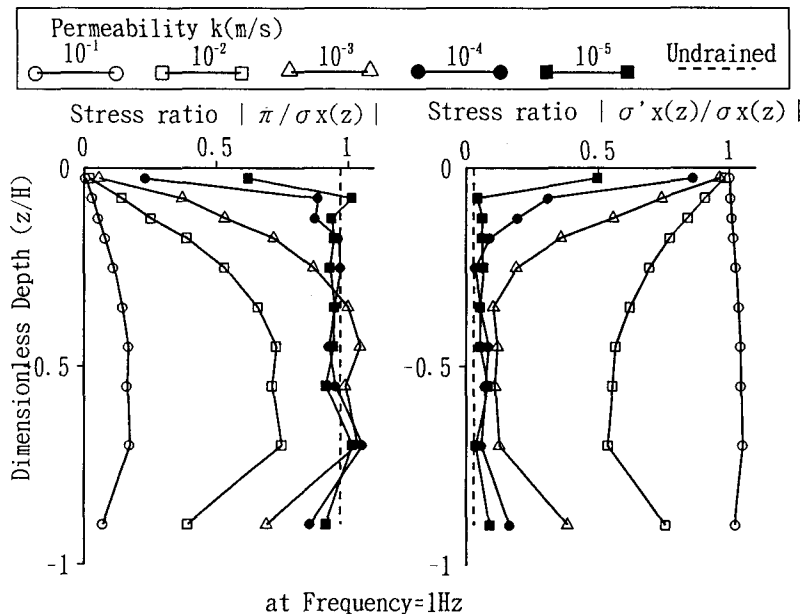


図-3 動水圧および有効動土圧の深さ方向分布（1 Hz加振の場合）

間隙水の土粒子骨格に対する移動が困難になるため、全応力に対する間隙水圧の占める割合(π/σ_x)は大きくなる。また、有効応力の全応力による割合(σ'_x/σ_x)は当然ながら逆の性質を示す。しかしながら、(σ')と(π)に位相差があるために(σ'_x/σ_x)と(π/σ_x)を加えたものは1とはならない。また、非排水条件の計算では土粒子間の間隙水の移動を全く許さないため、地表面においてもある間隙水圧の値を持ち、応力の分担関係は流体の体積弾性係数と土粒子骨格の体積弾性係数の比となる。また、深さ方向の応力の分布で透水係数が 10^{-4} m/s以下のものと非排水条件の結果を比較すると地表面を除いてほぼ一致することがわかる。したがって、 10^{-4} m/s以下の低い透水係数の地盤に1 Hz程度の荷重が加わる場合には、地盤を非排水条件として取扱うことができる。

一方、透水係数が 10^{-1} m/sの場合、(σ'_x/σ_x)がほぼ1であることから、動的土圧は主に有効動土圧のみで表わされ動水圧の影響は小さい。また、この場合の動水圧の分布形はいわゆるWestergaardの動水圧公式から得られる動水圧分布とよく一致している。

以上のような動水圧と有効動土圧の分布関係は、図-4のように要約することができる。同図は、全応力に対する間隙水圧の応力比(π/σ_x)の等高値を表わしている。横軸が無次元振動数 $\omega H/V_s$ すなわち外力の荷重速度の代表値を表わしており、縦軸が地盤の透水係数を表わしている。図の応力比(π/σ_x)は、深さ方向の応力比を次式に従って求めたものである。

$$(\pi/\sigma_x)_{\text{total}} = \left\{ \sum_{i=1}^{10} (\pi/\sigma_x)_i H_i \right\} / H \quad (3)$$

地盤の透水係数に比較して荷重の荷重速度が早ければ、明らかに地盤は非排水条件とみなせる。逆に荷重の速度が相対的に小さければ、有効動土圧のみを考慮すればよい。ちなみに、地震動の卓越振動数成分を0.2 Hz～5 Hz、地盤のせん断速度を100～200 m/s、岸壁の高さを10 mとすれば、 $\omega H/V_s$ は $6 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^0$ の範囲となる。また、岸壁背後によく使用される砕石やきれいなレキの透水係数を 10^{-2} m/s以上と考えると、その領域は図中でハッチで示した部分となる。この図から、実際のケースでは非排水条件と完全な排水条件との中間的な状態にあることがわかる。また、図中で地盤の固有振動数（この場合、せん断波

の1次固有振動数は $V_s/$
($4 \times 1.2H$)であるから、無次元
固有振動数 $\omega H/V_s$ は
1.31) 付近で等高値に不連続
が見られることから、地盤
の動的応答特性の影響を
受けることもわかる。

4. 結論および今後の課題

本研究では、水中の飽和
地盤から受ける動的圧力を
間隙水による動水圧と土粒
子骨格による有効動土圧成
分に分けて考える立場から
数値計算を実施し、両者の
分担関係が地盤の透水性、
荷重の載荷速度に大きく依
存することを示した。軽量
裏込め材の利用をはかるた
めには、早急にこれら特性

を解明し適切な設計法を提示することが必要と考えるが、研究上の今後の課題として以下のものが上げられる。今回の数値解析条件は実際の地震荷重をうける岸壁の条件（岸壁背後地盤の構成、構造物の変形モード等）とかなり異なっている。より現実に近い条件で計算する必要がある。また、そのときには単に土圧の大きさを問題にするのではなく構造物の破壊モードとの関連づけが重要となる。また、岸壁が変形した場合の圧力の解放、あるいは地盤に大きなひずみが発生したり、間隙水圧が上昇した場合の地盤の軟化の影響等、非線形性に起因する挙動も今後の課題である。

参考文献

- 1) 安蔵善之輔：地震時岸壁の前面ならびに背面に及ぼす水圧に就て、第3回工学会大会講演集、1943, pp.304-307.
- 2) 石井靖丸、土田肇、古部哲兵：振動時の飽和砂の土圧と間隙動水圧に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol. 2, No. 2, 1963, pp.25-71.
- 3) 大原資生：岸壁裏込間隙水による動水圧について、土木学会論文集、No.87, 1964, pp.9-16.
- 4) 松尾春雄、大原資生：重力式岸壁の耐震性についての一考察、土木学会論文集、No.70, 1960, pp.1-7.
- 5) 港湾の施設の技術上の基準同解説（上）、日本港湾協会編、1989, p.219.
- 6) Ishibashi, I., Matsuzawa, H. and Kawamura, M.: Generalized Apparent Seismic Coefficient for Dynamic Lateral Earth Pressure Determination, Proc. of 2nd Internat. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, edited by C. A. Brebbia, A. S. Cakmak and A. M. Abdel Ghaffer, QE II, 1985, pp.6-33 - 6-42.
- 7) Matsuzawa, H., Ishibashi, I. and Kawamura, M.: Dynamic Soil and Water Pressure of Submerged Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No.10, 1985, pp.1161-1176.
- 8) Inatomi, T., Kazama, M. and Murakami, Y.: Shaking table tests for the seismic stability of caisson type quaywalls both in ordinary 1g field and in centrifugal field, Proc. of the 10WCEE, 1992, pp.2801-2806.
- 9) 風間基樹、野上仁昭：薄層要素法による二相系飽和地盤の動的応答解析、土木学会論文集、No.446/I-19, pp.187 - 196.

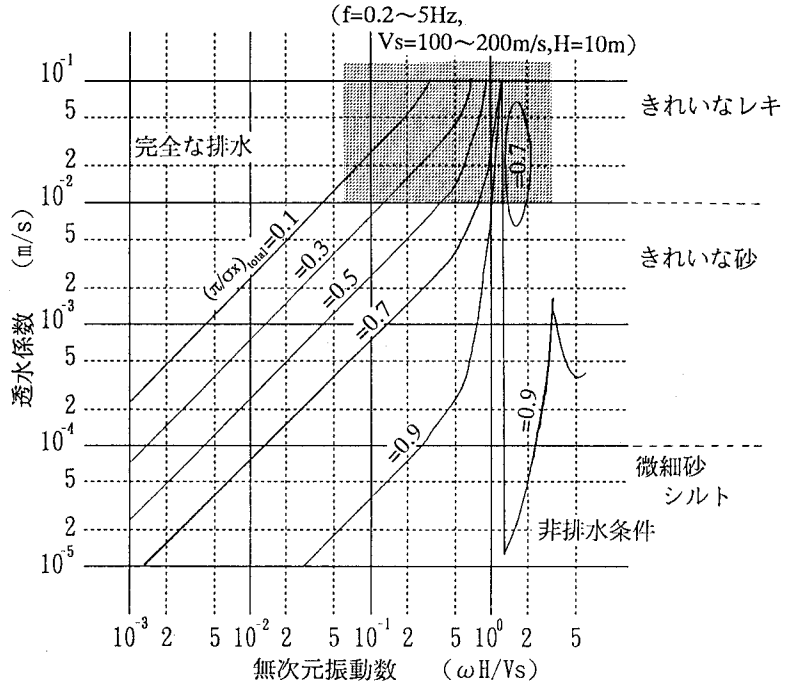


図-4 動水圧の全土圧に対する比の等高線図