

清水建設㈱ 海洋開発部 正会員 清川哲志
清水建設㈱ 海洋開発部 正会員 小林 浩

〔1〕 概説： 地震時の構造物近傍の液状化現象を把握する事は、液状化防止対策を立てる上で重要であり、本研究はこのような目的で行われたものである。液状化の研究は多いが、構造物がある場合の研究は比較的少なく、石原等¹⁾による実験的研究、また吉見等²⁾³⁾による実験及び解析的研究があるにすぎない。特に、構造物がある場合の過剰間隙水圧の発生から消散までを浸透流を考慮して解析的に取り扱ったものは無いようである。構造物が無い場合は、尾島⁴⁾が発生と消散を理論的に取り扱っており、また時松等⁵⁾は発生量に関する実験式と圧密方程式を組合せて間隙水圧の経時変化を解析している。本研究では上述の目的に従い、時松等の方法を拡張する事によって構造物が有る場合の液状化解析を試みた。そして、解析法の妥当性を確めるために解析値と実験値とを比較したが両者は良く一致した。さらに、構造物の接地圧の影響を見るための数値実験を行った結果、接地圧の増加は構造物下の液状化を押さえる効果を持つ事、また逆に構造物を埋め立てた場合、構造物下の有効応力が周辺にくらべて低くなると、かえって構造物下は液状化し易くなる事などがわかった。

〔2〕 解析方法： 地震時の間隙水圧の発生と消散は、非定常浸透流の方程式とたとえばSeed⁶⁾等による間隙水圧の発生量に関する実験式とを組合せ、排水による体積変化が鉛直方向のみに起ると仮定すれば次式のように表わせる。

基礎式：
$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{1}{m_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_x}{r_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_y}{r_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z}{r_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (1)$$

実験式：
$$\frac{u_g}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\left(\frac{1}{T_l} \right)^{\frac{1}{2\delta}} \right) \quad (2)$$

ただし、 u ：過剰間隙水圧、 m_v ：体積圧縮率、 r_w ：水の単位重量、 k_x k_y k_z ：透水係数、 T_l ：液状化に要する時間、 δ ：実験定数、 u_g / σ'_0 ：過剰間隙水圧比である。今回は簡単のために問題を2次元に限り、透水係数も一様かつ一定とし、基礎方程式を差分化して数値解析を行った。差分化式は次のようである。

$$u_{ij}^{n+1} = \frac{k \Delta t}{\gamma_w m_v h^2} (u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n - 4u_{ij}^n) + u_{ij}^n + u_{gi,j}^{n+1} - u_{gi,j}^n \quad (3)$$

ここで、 i, j ：それぞれX, Y方向の格子番号、 n ：時間ステップ数、 h ：格子幅、 Δt ：時間刻みである。次に計算に使用する係数であるが、透水係数 k はポリマー水溶液を使用して $0.00149 \sim 0.00188 \text{ cm/sec}$ に調整した。また、体積圧縮率 m_v は図1のように拘束圧の関数であり、計算では各ステップごとに過剰間隙水圧 u の値から新しい m_v を求めて逐次計算を続ける方法を用いた。また、あらかじめ地盤の応力解析、連成振動解析をそれぞれ非線形理論、および弾性振動理論を用いた有限要素法によって行った。

〔3〕 解析結果： 表1は縮尺1/125で行った液状化模型実験のケースの1例であり、解析もこれと同じ条件で行った。表1中のJH0901のケースについて、過剰間隙水圧 u の解析値と実験値を比較した1部を図2に示す。この図からわかるように解析値と実験値は良く一致しており、特に模型直下35 cmの位置で解析値、実験値ともに1秒近く

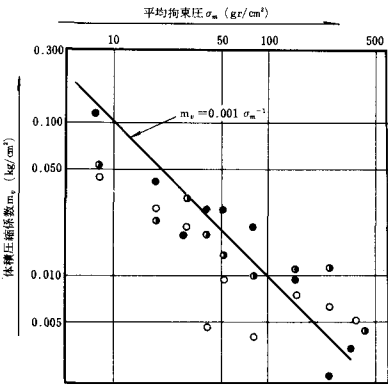


図1 体積圧縮係数

ケース番号	相対湿度 (%)	加速度 (gal)		加振振動数 (Hz)	埋入れ深さ (cm)	接地圧 (g/cm ²)	水深 (cm)	砂層厚 (cm)	透水係数 (cm/sec)	備考
		平均	最大							
JH0106	400	87	1215	1.0	0	0	27.5	46.5	1.66 × 10 ⁻³	模型なし
JH304	370	135	160	1.0	7.9	7.19	33.5	48.5	1.49 × 10 ⁻³	模型あり 周辺地盤式
JH0901	399	972	109	1.0	16.5	17.2	24.3	48.4	1.88 × 10 ⁻³	模型あり

表1 実験および解析条件

にピークがあり、一旦下降してからまた上昇しているなど、解析は実際の現象を良く追跡している。また、図3は解析の結果得られた液状化に要する繰返し回数の等値線図であり、接地圧の影響を見るために上から順に接地圧を9, 10, 14 gr/cm^2 としたものである。模型の1 gr/cm^2 が原型では1.25 t/m^2 に相当している。また、図中で等値線の描かれていないところは非液状化領域である。図を見ればわかるように、接地圧の増加にともなって構造物下の非液状化領域が広がって行き、構造物下は液状化しにくくなっている。これは次のように説明できる。1) 構造物下と周辺では有効応力が異なるので、間隙水圧発生量に差ができる。2) この結果、間隙水は高い方から低い方へと流れるので、有効応力の高い構造物下の砂層では排水が行われ液状化しにくくなる。3) この傾向は構造物下と周辺で有効応力の差が大きい程著しいはずであり、図3からわかるように数値実験の結果はそれを裏付けている。また、図は省略するが、構造物を埋め立てた事によって構造物下の方が周辺にくらべて有効応力が小さくなるときには、周辺から流入する浸透流があり、このためにかえって構造物下が液状化し易くなるという結果を得た。

[4] まとめ： この研究の目的は、地震によって発生する構造物近傍の浸透流と液状化現象の把握であったが、この点では総合的に満足のいく結果が得られた。しかし、今回解析に用いた基礎式はTerzaghiの式を単純に拡張したものであるため、応力ひずみ関係が満たされていないなどの理論的欠陥を持っている。これを解決するために現在Biotの多次元圧密理論を応用した液状化解析を検討中であり、今後の課題としたいと考えている。ただ、実用上は今回行った解析法で十分液状化予測ができるので、このような方法は今後さらに適用例を十分に積み重ねて、液状化予測の手法として確立して行きたいと考えている。

[5] 謝辞： この研究は、通産省より日本海洋開発産業協会、(JOIA)が委託を受けた「石油の海洋備蓄システムの開発調査」の一環として清水建設㈱が行った液状化模型実験の理論解析の1部である。この機会を与えていただいたJOIA、また、貴重な助言をいただいた東工大時松氏に感謝致します。

[参考文献] 1)石原・松本・早瀬,「振動時の間隙水圧と基礎の支持力についてのモデル実験」,第10回土質工学発表会(1975)
 2)店見・時松・桑原・木村,「構造物近傍における砂の液状化発生条件」,第10回土質工学発表会(1975), 3)吉見・桑原,「構造物近傍における砂の液状化発生後の間隙水圧」,第10回土質工学発表会(1975), 4)尾島,「飽和砂層の液状化機構に関する理論的研究」,土木学会論文集184号(1970), 5)時松・吉見,「砂地盤の地震時における間隙水圧変化」,第12回土質工学発表会(1977), 6)Seed,H.B,Martin,P.P,Lysmer,J, "Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction", ASCE, Vol,102 No, GT 4 (1976)

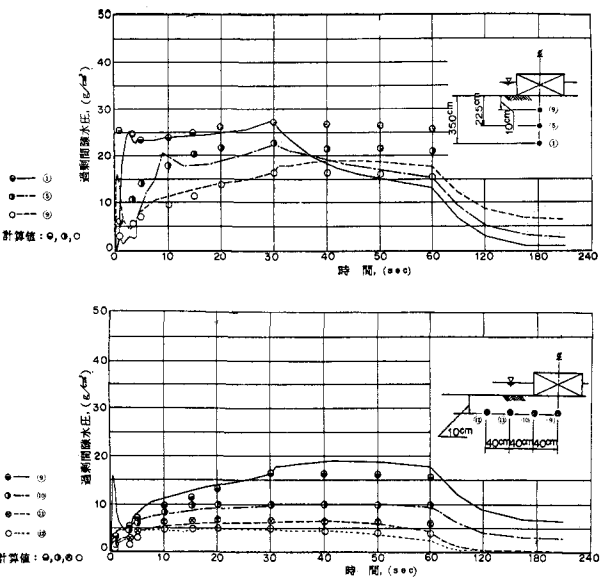


図2 過剰間隙水圧の解析値と実験値の比較

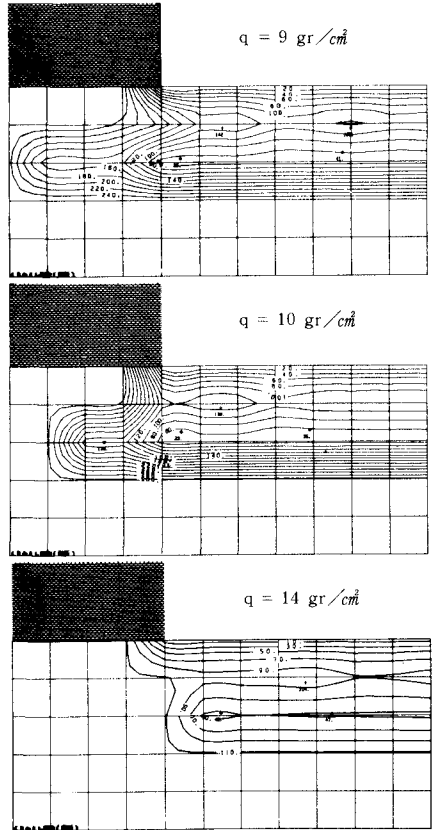


図3 構造物の接地圧の違いによる液状化可能性の比較