

(59) 液状化地盤中の構造物の動的挙動解析

神戸大学 高田至郎・田辺揮司良

1. 序論 本研究は、液状化地盤中にある構造物の動的挙動を明らかにするための解析モデルおよび手法について検討したものである。本解析では、地中構造物の挙動を液状化時の過剰間隙水圧発生に伴う浮力による構造物の浮上、さらに地震動停止後の過剰間隙水圧消散に伴う地盤沈下の2現象としてモデル化している。数値計算では、一例として1983年日本海中部地震時の大潟村に埋設されていた電話通信施設（マンホール）の液状化時の構造物挙動の様相を、地盤一構造物を一体解析した場合と別々に解析した場合によりシミュレートしている。

2. 液状化解析手法 地盤・構造物とも2次元平面ひずみ問題として有限要素法解析を行った。

2.1 初期有効応力解析（静的） 構造物自重の影響による初期の地盤内有効応力状態を求めた。

2.2 有効応力液状化解析（動的） 基盤に地震波を入力し、地盤応答値を求める。せん断応力一ひずみ関係は Hardin-Drnevich 履歴ループでモデル化し、その接線剛性を用いた増分形式で非線形時刻歴応答解析を行った。数値計算は Wilson の θ 法で直接積分した。

(i) 過剰間隙水圧量の従来の評価法は、次の5つに大別できる (ア) 体積ひずみモデル、(イ) 有効応力経路モデル、(ウ) Endochronic 理論、(エ) 弾塑性理論、(オ) 被害蓄積の概念。しかし、未だ確立した考え方は見当たらない。そこで、本解析では、不規則波の時刻歴応答解析を行う上で簡便に数値計算に取り入れられる Finnら⁽¹⁾による Endochronic 理論を用いた場合と、Finnらの実験結果 (Fig. 2.1) を簡単な三角関数で表し、1回のせん断ひずみ振幅で液状化に至る液状化限界ひずみ (γ_{cri}) を推定し、次式を与えた。

$$\frac{\partial}{\partial N} \left(\frac{P}{\sigma_{vo}} \right) = \left\{ 1 - \left(\frac{P}{\sigma_{vo}} \right)^4 \right\} \sin \left(\frac{\gamma}{\gamma_{cri}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.1)$$

ここに、 α は砂の相対密度等の物性により表される値、 P は過剰間隙水圧、 σ_{vo} は初期有効応力、 N はせん断ひずみの繰り返し回数、 γ はせん断ひずみ振幅である。さらに、1回の繰り返し回数を時間増分の形式に書き改めると、せん断ひずみの時間増分と過剰間隙水圧比の関係は次のように示される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{P}{\sigma_{vo}} = \left\{ 1 - \left(\frac{P}{\sigma_{vo}} \right)^4 \right\} \sin \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{cri}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.2)$$

Fig. 2.1 の点線は (2.2) 式で $\dot{\gamma}_{cri} = 0.55$ とした場合の値と実験値を比較している。低ひずみでは若干の違いはあるが、概ね適用できると考えられる。しかし、この考え方をとれば地震時の排水性の問題を考慮に入れなければならない。また実験的検証もないので、さらに検討を進める必要がある。(ii) 液状化に伴うせん断剛性の低下は、体積圧縮係数 m_v の変化と関連付ける。Seed⁽²⁾によれば、体積圧縮係数 m_v は過剰間隙水圧比が小さいところでは一定であるが、60%を越える過剰間隙水圧比の場合、次式が成り立つとしている。

$$m_v / m_{v0} = e^y / (1 + y + y^2 / 2) \quad (2.3)$$

ここに、 $y = 5(1.5 - Dr)(\gamma_u)^{0.2} \geq 0$ であり、 m_{v0} は初期体積圧縮係数、 m_v は変化後の体積圧縮係数、 γ_u は過剰間隙水圧比、 Dr は砂の相対密度である。ここで、地盤を等方等質の弾

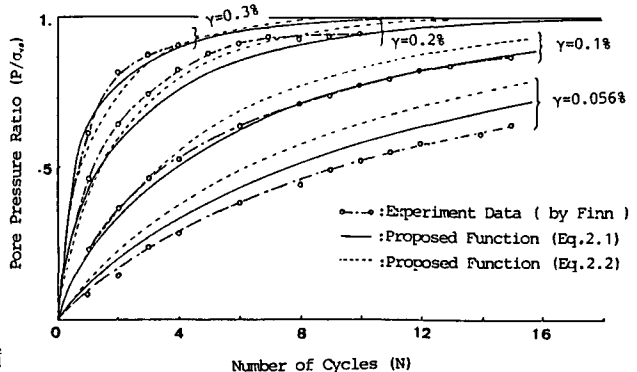


Fig. 2.1 Experimental Data and Proposed Pore Water Generation Function

性体と仮定すれば m_v は G_0 と反比例の関係にある。この式が液状化時に成立するとすれば、初期剛性の低下率は約1/50~1/1.84の範囲内にあることになる。

(iii) 構造物の液状化に伴う浮上量を解析するため、有効応力液状化解析から求まる水圧増分を構造物底面に浮力として作用させた。なお、地盤-構造物間にはジョイント要素を用いている。

2.3 過剰間隙水圧消散・沈下解析 (動的)

2.2の最終状態の水圧分布を与え、Biotの圧密理論を用いて過剰間隙水圧消散過程および地盤沈下量を求める。

数値計算には中間差分を用いた。

3. 液状化解析 (大潟村のマンホール)

2. で説明した解析手順で、大潟村に埋設されていた電話通信施設のマンホール被害をシミュレートした。

Fig.3.1は大潟村のマンホールの実被害状況を示している。地震前にマンホール頂部のレベルが地表レベルと等しく、マンホール頂部と管路の取付部のレベルが不変との仮定に基づくと、地盤は地震前

の地表レベルに対し約18.0cm沈下し、マンホールは地震前の地表レベルに対し5.0cm浮上したことを示している。地盤中に、見かけの比重0.54のマンホールがある場合の初期有効応力解析より求めた初期有効応力値および地盤モデル、諸物性値をFig.3.2に示す。基盤入力地震波は、運輸省秋田港湾事務所内で観測された加速度波形を波動伝播の式を用いて基盤に変換された加速度波形を用いた。Fig.3.3に、それぞれの加速度波形を示している。

(i) 地盤と構造物を別々に解析した場合

Fig.3.2に示すB,C点の加速度応答をFig.3.3に併記する。B点では地盤が液状化し、加速度応答が0に収束し、変位が発散する液状化特有の現象が表れている。また、Fig.3.4にA,B,C点の加速度のフーリエスペクトルを示す。最初に液状化したB点では高振動数成分がかなり含まれてくることが把握できた。しかし、実地盤でのB点はシルト質で、実際は液状化しないと考えられるが、砂地盤と水圧発生関数を同等に扱っているため、剛性の低いシルト質で液状化するという現象が現れている。

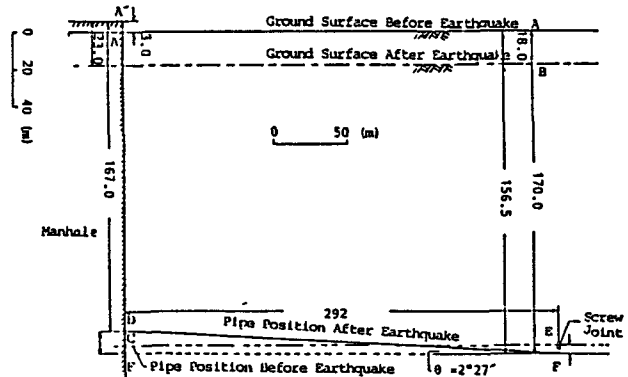


Fig.3.1 Pipeline Behavior in The Vicinity of No.29 Manhole

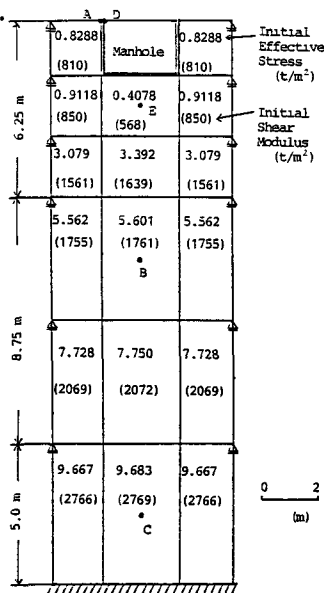


Fig.3.2 Analytical Model of Liquefaction and Characteristics of Ground

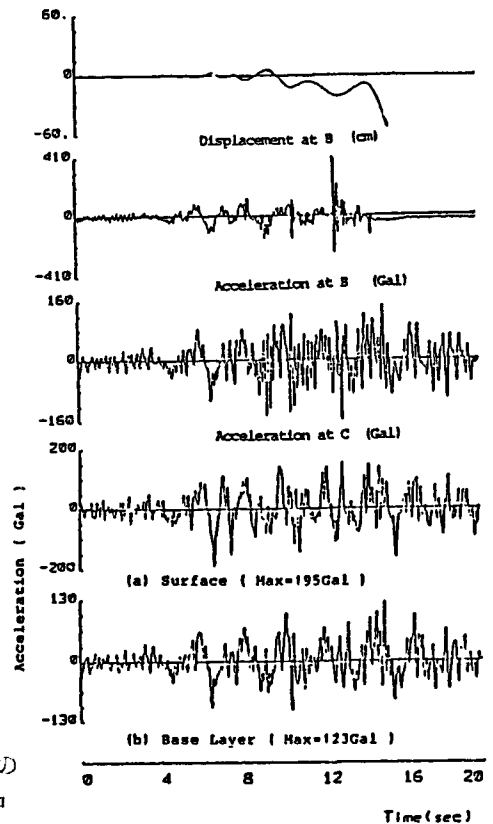


Fig.3.3 Time History of Response Displacement and Accelerations

Fig.3.5に示すモデルに対し、液状化解析より求めた過剰間隙水圧増分より算出される浮力増分を与え、地中構造物の浮上解析を行った。ジョイント要素の地盤側は両方向固定としている。ジョイント要素のばね剛性は、 $k_x, k_y = 20t/m^3$ としたが、これは $2t/m^2$ の力が作用した時、相対変位量10cmとなる係数である。解析はWilsonの θ 法で、 $\Delta t = 0.01$ sec, $\theta = 1.7$ を用いて20.48秒間について計算した。

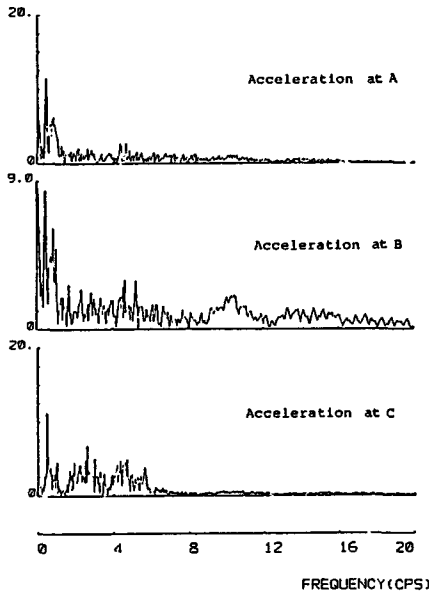


Fig.3.4 Fourier Spectra of Acceleration

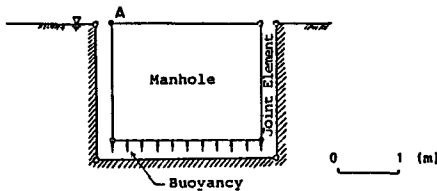


Fig.3.5 Analytical Model of Underground Structure Subject to Buoyancy

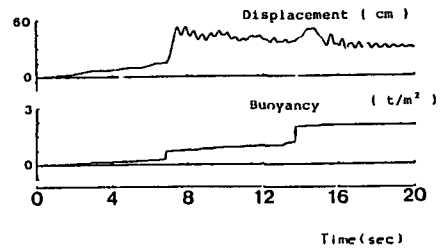


Fig.3.6 Time History of Response Displacement and Pore Water Pressure at Point A

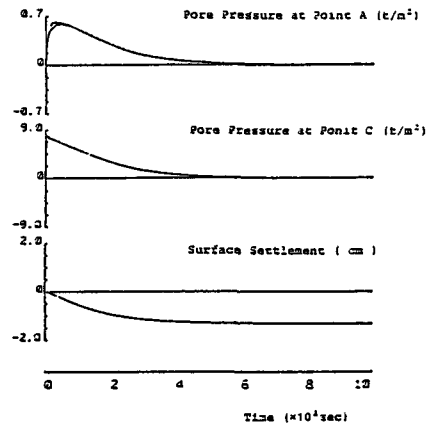


Fig.3.7 Pore Water Pressure Response and Ground Surface Settlement After Earthquake

た。Fig.3.6に点Aの変位応答履歴および浮力履歴を示す。7秒付近で浮力増分が大きく作用するため急激に変位が増大するが、浮力増分が0もしくは極めてわずかであれば、構造物は自由振動している。この浮力の急増による構造物の浮上量の増大は、初期（不完全）液状化時に地中構造物のひずみが急増し最大値を示すという、片田ら⁽³⁾や北浦ら⁽⁴⁾の実験と一致する現象をシミュレートできたと考えられる。また、構造物の最大浮上量は約50cmとなり、実際の被害調査によるマンホールの浮上量の23cmと比較すると(Fig.3.1参照)、約2倍程度の値となっている。

さらに、有効応力液状化解析より得られた水圧分布を与え過剰間隙水圧消散・沈下解析を行った。Fig.3.7に過剰間隙水圧および沈下量の経時変化を示す。透水係数は全層で $k_x, k_y = 1.0 \times 10^{-4}$ m/sと仮定し、 $\Delta t = 1.0$ sec, $D_r = 0.7$, $\nu = 0.4$ で計算した結果、沈下量は約1.3cmとなった。これは、全層厚の0.065%に当たる。点Aの過剰間隙水圧の経時変化から地震動停止後50秒間ほどは水圧が上昇しているのがわかる。この水圧上昇は浸透流による力として構造物の浮上解析に取り入れる必要がある。

解析解では、実現象に対し沈下量がさほどでないのは、実現象では砂の側方流動や噴砂現象を伴っており、今回の解析法では限界があると思われる。

(ii) 地盤と構造物を一体に解析した場合 Fig.3.2に示す全体モデルをWilsonの θ 法で $\Delta t = 0.01$ sec, $\theta = 2.0$ として解析した。過剰間隙水圧発生量はEndochronic理論でFinnら が用いている定数をそのまま使用することにより求めているが、本来は、解析対象地盤の実験により求められなければならない。また、中間層のシルト層では、砂層に比べ水圧発生量が少ないということより、砂質土と同様の過程で求められる水圧を、

半分にして評価している。

ここで、地盤内構造物と地盤の動的相互作用を取り扱う場合、地盤と構造物の剛性の違いが、モデル自体に高振動数成分を持たせ、直接積分法による解析を困難にしている。さらに、液状化地盤特有の地盤剛性の低下を考慮すると、地盤と構造物間の剛性の差が著しくなり、桁落ちなどによる解の振動現象や発散現象が生じ、益々数値解析を困難としている。

Fig. 3.8にE,B点とD点の鉛直方向の加速度および変位応答を示す。過剰間隙水圧が発生し、地盤の剛性低下がまだ著しくない時点までは、3.(i)の地盤のみの有効応力解析の場合と同じく、地盤の挙動および構造物の挙動を追跡しているが、完全液状化にいたり、地盤剛性が急激に低下すると、構造物と地盤間の剛性の著しい差により、さらに地盤の変位の発散現象に伴う構造物の水平・鉛直方向の変位の発散により信頼性を持たない解となっている。このため、解析上なんらかの工夫が必要と思われる。また、解の発散を抑えるために $\theta=2.0$ としたため高振動数成分が除去され、加速度応答値が、入力加速度よりも低下するという非現実的解析になることも注意が必要と思われる。また、Fig. 3.9にA,E,B点での過剰間隙水圧の経時変化を示している。構造物の比重が地盤に比べ小さいため、構造物直下の地盤が最初に液状化している。

4. まとめ 数値計算より得られた知見は以下に要約される。
 (i)液状化解析はせん断剛性の低下として評価される。
 (ii)過剰間隙水圧が急激に増加する時に構造物が大きく浮上する。
 (iii)構造物の直下では他の箇所と比較して早く液状化に至る。

以上の知見がえられたが、液状化現象の時刻歴のシミュレートでは、今後さらに次に点について詳細な検討が必要と考えられる。(i)液状化地盤のように地盤変位が発散する現象を数値解析でどこまで評価できるか。また、側方流動のような液状化特有の現象を数値解析で定量化することができるか。(ii)地盤一構造物を一体として解析する場合の解の安定性の問題。(iii)地盤一構造物間の液状化時の相互作用の取り扱い。(iv)砂地盤以外での水圧発生の評価。

参考文献 1)Finn & Bhatia,"Endochronic Theory of Sand Liquefaction,"Proc.7th World Conf.on Earth-quake Engi., Istanbul,1980,pp.149-153.,2)Seed,"A Computer Program for The Analysis of Pore Pressure Generation and Dissipation during Cyclic or Earthquake Loading,"Earthquake Engi.Res. Cen.Repo.,76-24,Oct.,1976.,3)高田他,"液状化を受ける通信用管路の挙動解析と地震対策,"建設工学研究所報告,No.26,1984,pp.44-50.,4)片田・伯野,"液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究,"土木学会論文報告集,第306号,1981.2.,5)北浦・宮島,"液状化過程における地中埋設管路のひずみ特性に関する実験的研究,"土木学会論文報告集,第323号,1982.7.

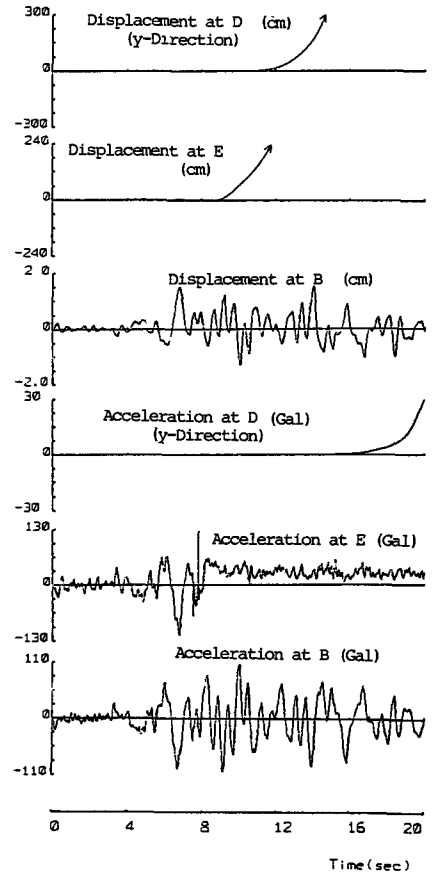


Fig.3.8 Time History of Response Displacement and Acceleration

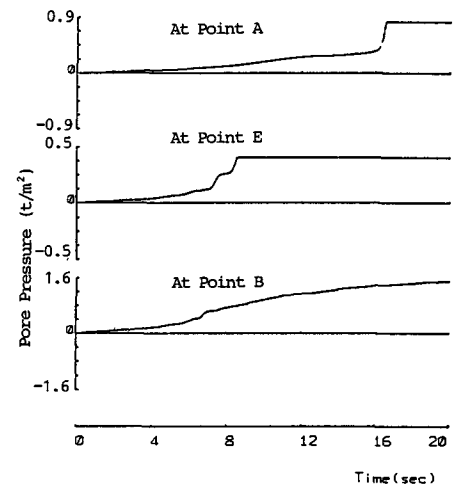


Fig.3.9 Pore Water Pressure Response