

(93) 2次元有効応力解析法(プログラムDIANA-G)による
模型振動実験のシミュレーション

竹中技術研究所 津國 正一 畑中 宗憲 田中 芳行
(株)竹中工務店原子力本部 塩見 忠彦 情報センター 広瀬 忠孝

1. まえがき

くり返しせん断により地盤中に過剰間隙水圧が発生、著積して有効応力が低下する現象を予測する解析法として、Zienkiewicz¹⁾らによって提案されている、多孔質体の2相系の振動理論と弾塑性理論をカップルさせた方法にもとづいた有効応力解析法(プログラムDIANA-G)がある。

本報ではこの解析法で用いる地盤定数の検討を行ない、一様な飽和砂質地盤と飽和砂質地盤中央部地表に模型構造物が載っている模型振動実験をシミュレーションし、水平方向応答加速度(地表面と構造物天端)、地盤中の過剰間隙水圧及び沈下量(地表面と構造物)について解析結果と実験結果を比較したので以下に報告する。

2. 解析方法(構成式)

解析に用いた構成式は反射曲面(Riflecting Surface)モデル²⁾である。これは境界曲面モデルの一種で、塑性歪の方向を図-1に示すように、載荷時には外向きの法線ベクトルの方向に、除荷時には内向きの法線ベクトルの方向に取ることににより、くり返し荷重が作用した時の挙動を表現出来るようにしたモデルである。

硬化則は図-2の実線で示された勾配を用いている。載荷時にA点では傾きが κ に近い勾配を取り、B点では正規圧密曲線に接するように勾配 λ を取る。除荷時の勾配は膨張係数 κ に常に近い値となる。境界曲面の大きさはこの勾配とその時点の歪および応力の関数として求められる。

3. 模型実験のシミュレーション

①実験と数値解析モデル: 解析対象は図-3に示す一様な飽和砂質地盤中央部地表に模型構造物が無い場合と有る場合の2ケースで、各ケース共地下水位は地表面下2cm、両端には幅5cmのフォームラバーが取り付けられている。計測は図に示されている12点の過剰間隙水圧、地表面と、構造物が有る場合には構造物天端での水平方向応答加速度、地盤と、構造物が有る場合には構造物の最終沈下量に対して行なわれている。³⁾

解析は、構造物が無い場合には要素数60、節点数78の2次元モデルで(図-4 a.)、構造物が有る場合には要素数72、節点数93の2次元モデル(図-4 b.)で行ない、地盤中の過剰間隙水圧、地表面と、構造物が有る場合には構造物天端での水平方向応答加速度、地盤と、構造物が有る場合には構造物の最終沈下量について実験結果と比較を行なった。

②地盤の材料定数: 解析に必要な主な地盤の材料定数を表-1a.b.に示す。以下に主な定数である内部摩擦角 ϕ d、ヤング

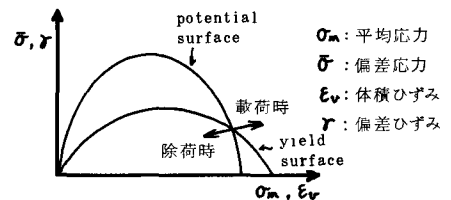


図-1 境界曲面モデル概念図

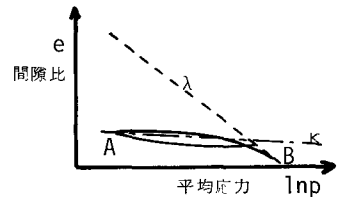


図-2 硬化則概念図

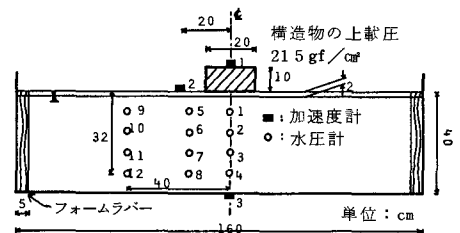


図-3 模型地盤・構造物の断面図

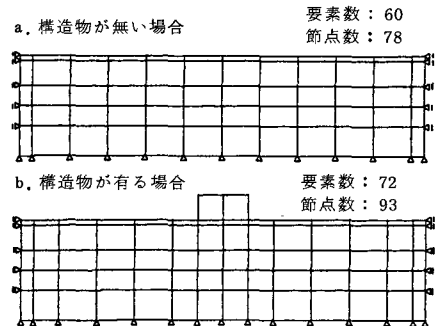


図-4 計算モデル

率E、圧縮指数λ、膨張指数κの設定法について説明する。

(1)φd: 模型実験で用いたのと同じ豊浦標準砂についての実験式⁴⁾

$$\phi d = 32.5 + 20.6 (Dr - 40) / 100 \quad Dr: \text{相対密度} \quad (1)$$

を用いて、構造物が無い場合の実測値Dr=48 (%)からφd=34.1°、構造物が有る場合の実測値Dr=50.1 (%)からφd=34.6°とした。

(2)E: $E = 2 \cdot G (1 + \nu)$, $\nu = K_0 / (1 + K_0)$ から静止土圧係数K₀=0.5と仮定してE=8/3・G、またせん断剛性Gは有効平均拘束圧σ_m′、間隙比eおよびひずみγの関数で、文献5に示す低拘束圧下での実験結果(γ=10⁻⁵, Dr=50%)を代入してG=59.3・σ_m^{0.5} (kg/cm²)とした。

(3)λとκ: e-1np 曲線における圧縮指数と膨張指数は、模型実験と同様な低拘束圧下で行なった実験で得られた値を用いた。

実験は図-5に示す実験装置を用いた。砂試料への載荷と除荷はAタンクとBタンクの水頭差による浸透力(図-6)と自重で行ない、体積圧縮係数m_vと体積膨張係数m_sを求めた。⁶⁾

$$\lambda = (1 + e) \cdot P \cdot m_v / 0.434$$
$$\kappa = (1 + e) \cdot P \cdot m_s / 0.434 \quad (2)$$

の関係式に深さ-20 cmでの有効鉛直応力P=0.0186 (kg/cm²)、間隙比eと図-7から求まるm_v、相対密度50%でのm_s/m_v=0.236⁶⁾を代入してλとκを決定した。

4. 解析結果及び考察

I. 構造物が無い場合のシミュレーション結果

解析用入力加速度は、模型振動実験において振動砂箱の底面で測定された加速度波形(最大振幅約100gal, 加速時間約6.5秒)を用いた(図-8)。

①応答加速度: 振動箱の中央から20 cm離れた地表面の水平方向応答加速度の実験結果(図-9a.)と解析結果(同図b.)を比較した場合、第4周期目まで両者は良く対応している。実験では液状化発生後において加速度計が傾き、地表での水平方向応答加速度を正確にとらえていないことを考えると、地表面の水平方向応答加速度は解析結果と実験結果が良く対応していると言える。

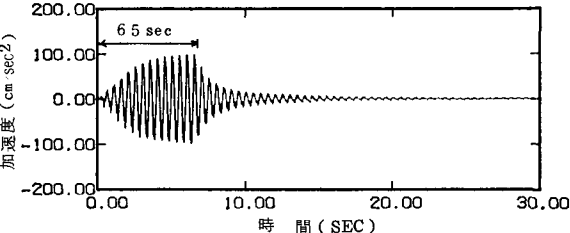


図-8 入力に用いた加速度波形

表-1 解析用模型地盤の材料定数

a. 地盤の材料定数	
ポアソン比	0.33
土粒子の単位体積重量	2.65 g/cm ³
圧縮指数	0.01675
膨張指数	0.00452
水の単位体積重量	1.00 g/cm ³
内部摩擦角	34.1°, 34.6°
水の圧縮係数	2.22 × 10 ⁻⁶ kg/cm ²
土の圧縮係数	3.70 × 10 ⁻⁸ kg/cm ²
RSモデルの定数	0.98
透水係数	0.026 cm/sec
間隙率	0.441, 0.439

b. 構造物の材料定数	
ポアソン比	0.30
構造物の単位体積重量	2.15 g/cm ³
ヤング率	2.0 × 10 ⁵ kg/cm ²

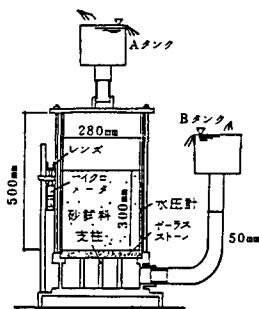


図-5 試料容器断面図

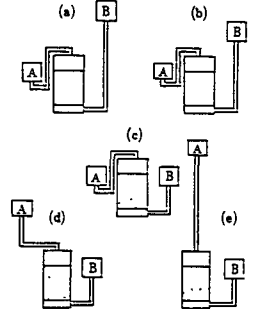


図-6 実験方法模式図

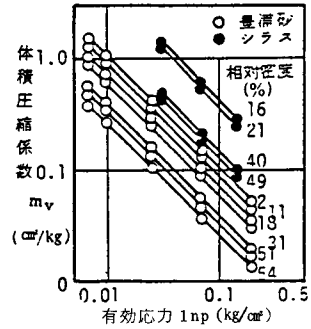


図-7 log m_vとlog Pの関係

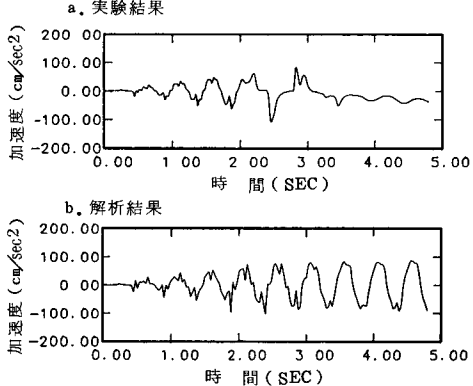


図-9 地表面の水平方向応答加速度

②過剰間隙水圧： 振動箱の中央と中央から40cm離れた地点での過剰間隙水圧の時刻歴の解析結果と実験結果を比較したのが図-10 b.a.である。過剰間隙水圧の発生開始から最大値に到達するまでは似ている。逸散過程では両者の間に差があり、入力加速度が最大値を過ぎてかなり小さくなった後でも、過剰間隙水圧がピーク値を維持続ける現象は解析では見られない、これは解析では液化化発生後数秒間、砂粒子が水にけんだくしている状況で加振されている現象を表現できないためであると考えられる。

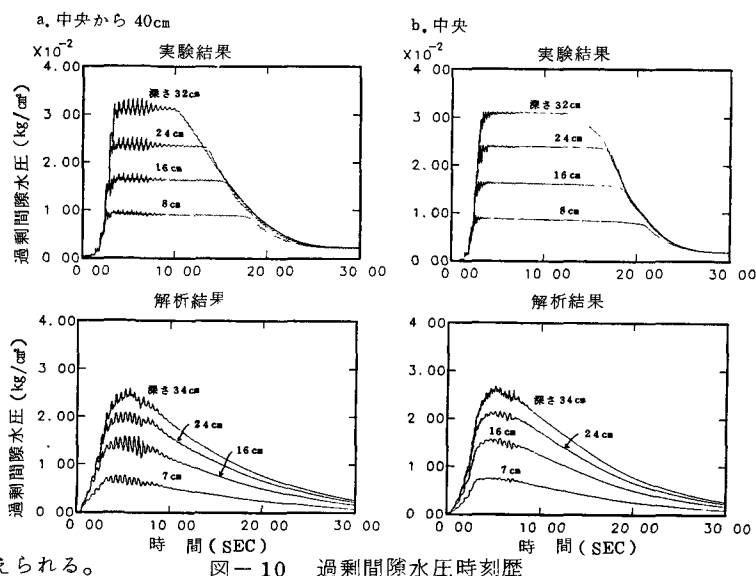


図-10 過剰間隙水圧時刻歴

過剰間隙水圧のピーク値を比較した場合、振動箱の中央と振動箱の中央から40cm離れた両地点とも、解析結果は実験結果の80~95%で、深い部分の方が両者の差は大きい(図11)。

図-12は6秒後の過剰間隙水圧分布図である。図より側面境界の影響は側面に近い部分にしか表われておらず、中心付近には影響を及ぼしていないことが分る。

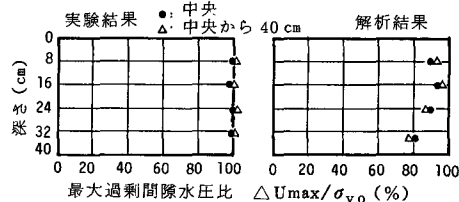


図-11 地盤中の最大過剰間隙水圧比

③地盤の沈下量： 図-13は時刻30秒での土要素の変形を变形拡大率15倍で描いている。

この時、振動箱中央での沈下量は0.37cmで、実験で得られた最終沈下量0.63cmと比較して小さい。図に見られる地表面の变形パターンは実験結果と対応している。

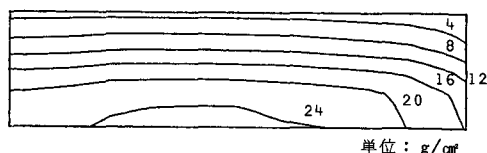


図-12 過剰間隙水圧分布図(時刻6秒)

II. 構造物がある場合のシミュレーション結果

解析用入力加速度はI.の場合と同じく実測値(最大振幅約100gal, 加振時間約11.4秒)をそのまま用いた(図-14)。

① 応答加速度： 図-15 a. b. では解析で得られた構造物天端と振動箱の中央から20cm離れた地表面での水平方向応答加速度を実験結果と比較している。

両地点とも解析結果は実験結果と比較して、その差が分らないほど良く対応している。

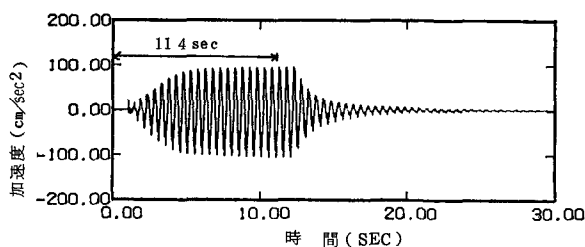


図-14 入力に用いた加速度波形

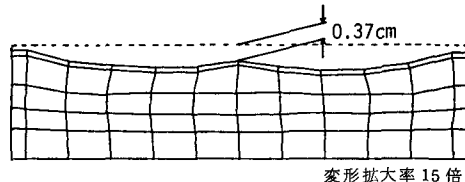


図-13 土要素の変形(時刻30秒)

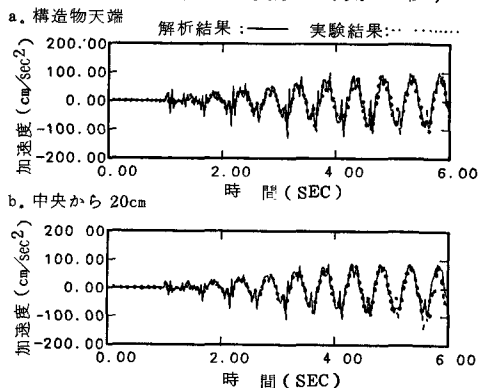


図-15 水平方向応答加速度

② 過剰間隙水圧： 構造物の直下と中央から40cm離れた地点での過剰間隙水圧の時刻歴の解析結果と実験結果を比較したのが図-16 b.a.である。両地点とも全体的に過剰間隙水圧の発生開始から最大値に到達する時間は解析結果の方が実験結果よりも早い。

定性的には構造物直下部での過剰間隙水圧の発生開始からピーク値に至る経路、および過剰間隙水圧の逸散過程については解析結果と実験結果の対応が比較的良好、直下部と比べると中央より40cmの地点の方が対応がよくない。

振動箱の中央から40cmの地点での最大過剰間隙水圧比は解析結果と実験結果が良く対応しているのに対して、構造物直下部では、最大過剰間隙水圧比の分布は似ているが、値は解析結果の方が全体的に大きい(図-17)。

図-18は6秒後の過剰間隙水圧分布図である。図より側面境界の影響は構造物が無い場合と同様に小さいが、中央部では構造物の影響が少しみられる。影響が少ないのは、この振動数では模型構造物の回転モードがゆうきされなかったからであろう。

③ 構造物の沈下量： 図-19は解析で得られた構造物沈下量の時刻歴である。時刻24秒での沈下量は0.95cmであった。これに対して実験で得られた構造物の最終沈下量は1.93cmで、解析結果よりも大きかった。

図-20は時刻歴24秒での土要素の変形を变形拡大率15倍で描いている。図より構造物が沈下した影響で土が側方に押しやられているのが分る。この変形パターンは実験結果とも対応している。

5. まとめ

- (1) 構造物が無い場合・有る場合とも、水平方向応答加速度は解析結果と実験結果が良く対応している。
- (2) 過剰間隙水圧は構造物の有る場合の対応があまり良くない。
定数・モデルに対する検討が必要であると考えられる。
- (3) 地盤・構造物の沈下量は実験結果と比較した場合小さいが、
定性的には現象をよく表現している。

参考文献 1) Zienkiewicz: Proc of 4th Conf on Num. Mech. in Geomech, Edomonton, Canada, 1982 2) Pande: Proc Int Symp. on Num. Models in Geomech, Zurich, 1982 3) 宮本他: 土質工学会, 1985 4) 畑中宗憲: 東工大学位論文, 1977 5) 杉本他: 土質工学会, p501~p502, 1983 6) 杉本他: 土質工学会, 1985

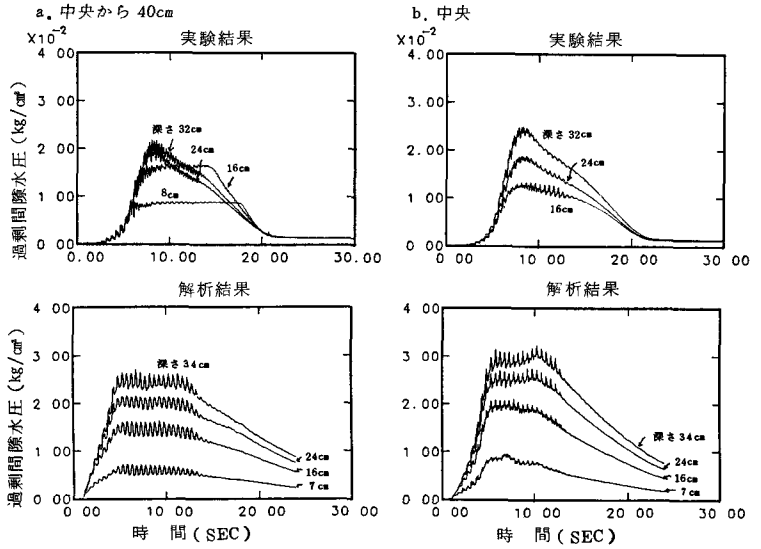


図-16 過剰間隙水圧時刻歴

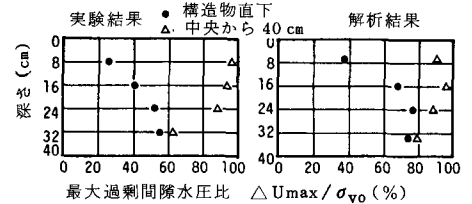


図-17 地盤中の最大過剰間隙水圧比

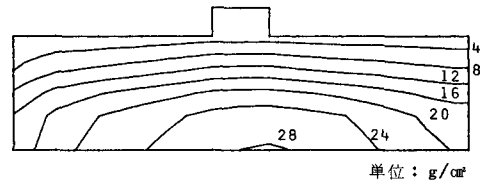


図-18 過剰間隙水圧分布図 (時刻6秒)

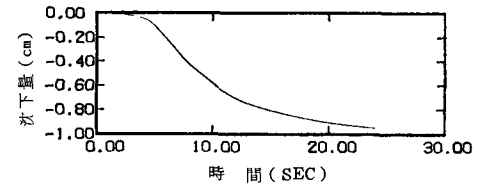


図-19 構造物沈下量の時刻歴

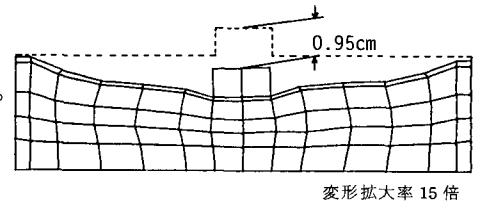


図-20 土要素の変形 (時刻24秒)