

III-32 遠心載荷装置による液状化実験のシミュレーション解析 その(1) 実験結果と準備解析

(株)竹中工務店 原子力本部

塩見忠彦

技術研究所 ○正員

田中芳行

情報センター

広瀬忠孝

1 はじめに

地盤の液状化問題は、港湾、沖合等の砂層地盤の構造物の耐震性確保のために重要な課題である。近年この分野の数値解析では、砂の応力-歪関係を、増分形式の構成式で表わし有限要素法等を用いて、境界値問題の解法に取り入れている〔1〕。しかしながら、実用化については検証中の段階であるといえる〔2〕。本報告では、飽和砂地盤の運動方程式を用いた液状化解析プログラムの検証のために遠心載荷実験〔3〕シミュレーション解析を行ったのでその結果について報告する。その(1)では、実験結果の概要と初期応力解析等の準備解析について報告し、その(2)でマルチメカニズムモデルを用いた液状化シミュレーションの結果について報告する。

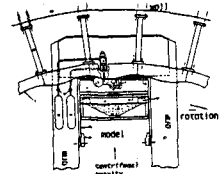


Fig.1 Centrifuge Equipment

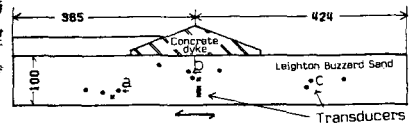


Fig.2 Experimental model

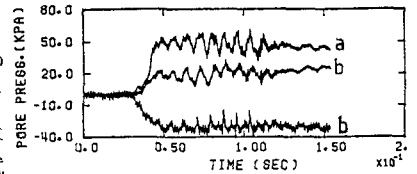


Fig.3 Time history of pore pressure

2. 遠心載荷実験

遠心載荷実験は、Cambridge 大学 Schofield教授によって行なわれた。試験体は、Fig.1 に示すように装置のアーム先端に設置され、78G の遠心力が載荷された。この状態で、外周に取り付けられた正弦波形状のガイドを用いて試験体に10波の加振が行なわれた。試験体は、Fig.2 に示すように 100 mm の厚の飽和砂地盤上にコンクリート製の堤防と、堤防の一方側に粘性度 80centi-stokes のシリコン・オイルが貯えられたモデルである。

時刻歴の測定は加速度と間隙水圧について計14点 (Fig.2) でなされた。この内3点の間隙水圧を示す。堤防直下の間隙水圧の立上りが平地部に比べて、少ないのは応力比が小さいためと考えられる。

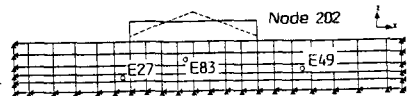


Fig.4 Finite element model

3. 準備解析

Fig.4 に、有限要素法解析で用いたモデルと検出測定器の位置を示す。堤防は、プログラムの都合上、底辺の大きさと重心位置が等しい四辺形剛体要素でモデル化した。初期応力を求めるために、まず静的解析を行った。これに用いた弾性材料定数のうちせん断弾性係数は三軸試験結果 $q - \gamma$ 関係 (Fig.5) から求め、体積弾性係数は、等方圧密試験結果 $e - \ln(p)$ 曲線 (Fig.6) の除荷時勾配 κ を求め、平均有効応力を 80 kPa と仮定し求めた。他の物理定数を Table 1 に示す。静的解析によって求めた、平均有効応力とせん断応力を Fig.7 に示す。これらの結果から応力比は、堤防両端で最大になり、その点から放射方向に行くに従って小さくなっていることがわかる。ここで最大せん断応力は約 100 kPa であった。

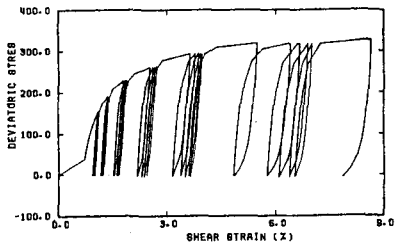


Fig.5 Shear strain curve

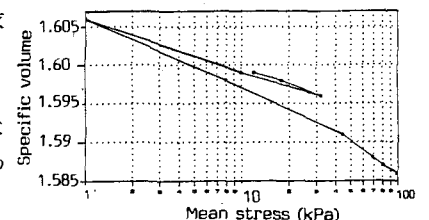


Fig.6 Consolidation curve

線形動解析：入力加速度には、実験時に試験体の底面で測定され

た加速度（Fig.8）を、用いて線形動解析を行った。最大加速度は、相似則によってプロトタイプに変換すると290gal に相当する。本結果では、モデル及び数値積分の減衰を 0 とすると、水相が高次振動を起こすため、数値積分の減衰（ニューマークβ法において $\gamma = 0.6$, $\beta = 0.3025$ ）を用いて求めている。

間隙水圧：点 E49 の間隙水圧の時刻歴応答を Fig.9 に示す。この間隙水圧は、入力波の振動数に高周波が重なって振動しているが、最大応答値は初期有効応力にくらべて約 1/10 と小さく、液化化解析では、ダイレータンスーによって発生する間隙水圧の上にリップルとして現れる。Fig.10 に時刻 90ms の間隙水圧のコンター図を示すが、左右に反対称の分布が見られる（実線は+、破線は-を示す）。これは、堤防の回転運動による堤防端部の上下運動により生じた間隙水圧が、地盤内に伝播していることを示す。

平均有効応力：Fig.11 に平均有効応力の時刻 90 ms におけるコンター図を示す。このコンター図は、Fig.7 に示した初期平均有効応力のコンター図とほとんど同じである。これは、水の高い剛性によって堤防の回転運動が非常に小さいものに拘束されているために、回転による力はほとんどが水によって分担され、土の骨格には伝わらないためである。このことは、基礎盤直下が地下水で満たされているような構造物では、水を考慮した解析（2相系、又は非排水動的解析）を行う必要があることを示唆している。

変形：時刻 90m sec における変形図をFig.12に示す。水平変形が回転変形に比べて卓越していることがわかる。しかも回転運動は、堤防の慣性力によるのではなく、側面境界の拘束によるスロッシング的な動きに対応しているものと考えられる。

4. まとめ

2相系非線形応答解析法とそのプログラムの妥当性を検証するために、実地盤の応力レベルにおける振動実験を可能にした遠心載荷試験のシミュレーション解析を行い、そのうち実験内容と準備計算結果について報告した。このシミュレーションは、数値解析法の妥当性検証にとって最適の方法であると考えられる。準備解析からは、次のことがわかった。（1）減衰が無い場合には、水の高次振動が入力振動数と同じレベルに達するが、有効応力には影響を及ぼさない。（2）堤防の回転変形は、問題がほぼ非排水状態と考えられるため、地盤のうねりによって生じる量の方が大きく、水平慣性力に誘発される量は少ない。（3）堤防の回転運動の影響が、間隙水圧には現れるが有効応力には現れないため、土のモデルはその影響をほとんど受けない。（4）また土のモデルによって履歴減衰が十分に表現されれば、間隙水圧の高次振動をも吸収することができる。

Table 1 Material Properties

Phase	2 phase
Thickness	1.0m
Young's modulus	0.768E 5kPa
Poisson's ratio	0.28
K (bulk mod.)	5.818E 5kPa
K (shear mod.)	0.3 E 5kPa
Bulk mod. of particle	1.0 E 4kPa
Bulk mod. of fluid	1.09 E 6kPa
Density of skeleton	2.65Mg/m ³ ±3
Density of fluid	0.98Mg/m ³ ±3
Porosity	0.4186
Permeability	0.200E-5m/s

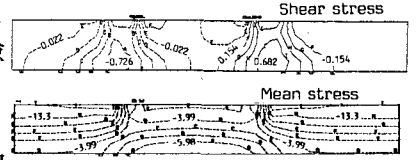


Fig.7 Contour of init. stresses

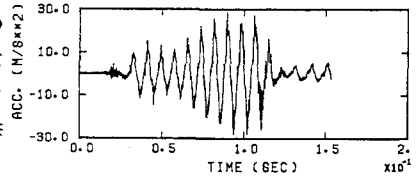


Fig.8 Input motion recorded

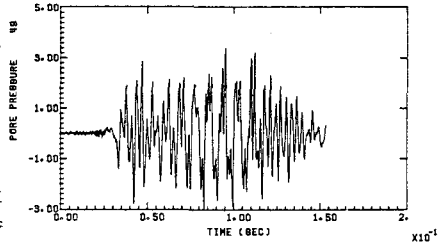


Fig.9 Pore pressure history

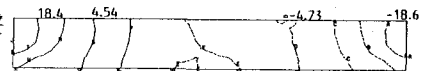


Fig.10 Pore pressure at 90ms

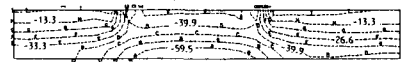


Fig.11 Effective mean stress at 90ms

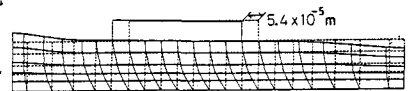


Fig.12 Deformation pattern at 90ms

謝辞： 本論文は鹿島建設(株)、千代田化工建設(株)、(株)ソフトウエアサイエンス研究所および当社が中心に進めている DIANA プロジェクトにおける成果をまとめたものであります。プロジェクト参加の方々の協力に謝意を表します。

(参考文献) [1] Zienkiewicz, O.C. et al, Nonlinear response liquefaction, Int. J. Num. and Analytical Meth. in Geo-mechanics, 1978, 2, No.4, 381-404. [2] 津国他、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土木学会第18回地震工学研究会、1985 [3] Venter, K.V., Data report of a centrifuge model test and two tri-axial test, KVV03 data report, DIANA Project internal report, July 1985.