

(84) 密な飽和砂地盤・建屋系の模型振動実験のシミュレーション

清水建設(株) 大崎研究室 正員 大槻 明 福武 毅芳
清水建設(株) 技術研究所 正員 佐藤 正義 社本 康広
センチュリリサーチセンタ(株) 吉田 潔 亀岡 裕行

1. はじめに

近年、ウォーターフロント開発計画に見られるように、締固めにより地盤改良された地点に重要構造物が建設される場合が想定される。本研究では、佐藤・社本らによって行われた飽和した密な砂地盤・構造物系の模型振動実験を基に、二次元非線形解析手法を用いてこの実験結果のシミュレーションを実施した。解析手法としては、間隙水圧の変化に伴う有効応力の変化が土の応力・ひずみ関係に影響する有効応力解析と、影響しない全応力解析の2種類を用いた。そして、両者の結果を比較し、各手法の適用性について考察した。

2. 実験概要 実験では、空中落下法により作成した模型地盤を、地盤の共振振動数で加振することによって密な地盤を作成した。この砂地盤に剛体構造物(アクリルブロック)を設置し、地盤・構造物系の模型振動実験を実施した。実験に用いた模型地盤を図-1に示す。用いた試料は浅間山砂でその物性を表-1に示す。ブロックの単位体積重量は 0.362tf/m^3 であり、土中に 4cm 埋込まれている。水位は $\text{GL}-4\text{cm}$ である。入力地震波は、1968年十勝沖地震の八戸港で観測されたEW成分を時間軸を $1/4$ に縮尺し、振動台入力最大加速度 268gal としたものである(図-5(a)のA3の波形)。地表の最大応答加速度は、 489gal に達しているが、模型地盤の液化化強度が大きいため、間隙水圧の上昇度は最大 70% 程度で完全液化化には至っていない。また、加振終了時には地盤やブロックの沈下や残留変形などは見られなかった。

3. 有効応力解析と全応力解析

3.1 解析手法 用いた解析コードは二次元有効応力解析コードALISS^{(2), (3), (4)}である。ALISSは、有効応力法に基づいた非線形地盤-建屋相互作用解析コードである。また、水は土粒子骨格に比べてほとんど体積変化がないものとして水の体積弾性係数 K_w を十分大きく評価し、水と土とは一体となって振動すると仮定しており、地盤の透水性は考慮していない。今回の実験では完全液化化には至っていないので、有効応力法に加え全応力法でも解析することとした。

3.2 土の構成式 用いた構成式は、せん断応力・せん断ひずみ関係($\tau_{xy} \sim \gamma_{xy}$)として修正R-Oモデル⁽⁵⁾を用い、ダイレタンシーはおわんモデル^{(6), (7), (8)}のダイレタンシー部分($\gamma_{xy} \sim \varepsilon_v$)を用いた。おわんモデルによればダイレタンシー ε_v は、式(1),(2)のように表せる。小さいせん断振幅での過剰間隙水圧の発生を抑えるため、せん

表-1 実験に用いた浅間山砂の物性

単位体積重量	γ	2.0 tf/m^3
相対密度	D_r	90%
初期間隙比	e_0	0.64
固有振動数	f_0	19.75 Hz
平均粒径	D_{50}	0.31 mm

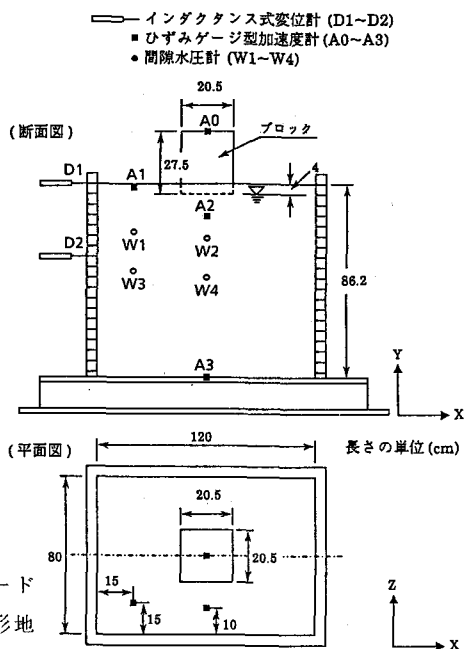


図-1 模型地盤および計器配置

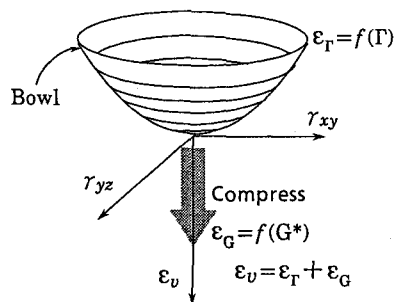


図-2 おわんモデルの概念図

断ひずみ半径 $r_e=0.0004$ なる弾性ひずみ領域を考慮し、この弾性領域内では $\varepsilon_G=0$ としている。

$$\text{合せん断ひずみ: } \Gamma = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2}, \quad \text{累加合せん断ひずみ: } G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta\gamma_{yz}^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_T + \varepsilon_G, \quad \text{膨張成分: } \varepsilon_T = A \cdot \Gamma^B, \quad \text{圧縮成分: } \varepsilon_G = \frac{G^*}{C + D \cdot G^*} \quad (2)$$

今回の解析では x 方向のみの加振で一方向せん断となるため、奥行き方向の z 成分はゼロとなる($\gamma_{yz}=0$, $\Delta\gamma_{yz}=0$)。有効応力や間隙水圧は、非排水条件(体積ひずみ増分 $de_v=0$ の条件)を課すことにより得られる。有効応力解析においては、修正R-Oモデルのパラメータである初期接線せん断係数 G_0 と規準ひずみ $r_{0.5}$ について、式(3)に示すように平均有効応力 σ'_m の関数としている。全応力法では、 G_0 と $r_{0.5}$ は初期の有効応力の関数としているが、せん断中は一定としている。二次元平面ひずみ状態の弾性マトリックスにおけるせん断係数 G に対応する成分を、修正R-Oモデルから算定される接線せん断係数 G' に置き換え、式(4)に示すようにポアソン比 $\nu(=0.4)$ と G' からヤング率 E を算定し、二次元応力・ひずみマトリックスを作成している。

$$G_0 = G_{0i} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_{mi}} \right)^{0.5}, \quad r_{0.5} = r_{0.5i} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma_{mi}} \right)^{0.5} \quad (3) \quad \nu = \text{一定}, \quad E = 2(1+\nu)G' \quad (4)$$

4. 土質パラメータ

模型実験では、常時微動測定より地盤の1次固有振動数が19.75Hzと分かっている。そこで土質パラメータの内、初期接線せん断係数 G_0 については、固有値解析により解析モデルの1次固有振動数が実験結果のそれと等しくなるように定めた。残りのパラメータについては、単純せん断の要素試験シミュレーションより決定した。ただし、密な浅間山砂の要素試験結果が無いため、相対密度 $D_r=80\%$ ではば粒径の等しい豊浦砂の結果を用いることとした。要素シミュレーションに用いたデータは、東畑⁹⁾が行った密な豊浦砂の単純せん断試験の結果である。実験と同様に繰返し回数12回でせん断ひずみ γ_{xy} が2.2%となるようにパラメータを設定した。そのときの有効応力経路や応力ひずみ関係および液状化強度曲線の実験値と計算値の比較を図-3, 4に示し、決定されたパラメータを表-2に示す。実験では、サイクリックモビリティ時にせん断ひずみが急増せず徐々に大きくなるという密な砂に特有の挙動を示しており、計算値もこの傾向を説明できている。

表-2 土質パラメータとその物理的意味

修正 R-O モデル ($\tau_{xy} \sim \gamma_{xy}$ 関係)			おわん モデル ($\gamma_{xy} \sim \varepsilon_v$ 関係)			
初期せん断剛性	最大減衰定数	規準ひずみ	膨張成分を規定		圧縮成分を規定	
$G_{0i}(\text{kgf/cm}^2)$	h_{max}	$r_{0.5i}$	A	B	C	D
550.8	0.22	0.0008	-3.0	1.6	15	100
			膨潤指数			
			$C_g/(1+e_0)$			
			0.006			

($G_{0i}, r_{0.5i}$ は $\sigma_{mi}=1.0\text{kgf/cm}^2$ のときの値)

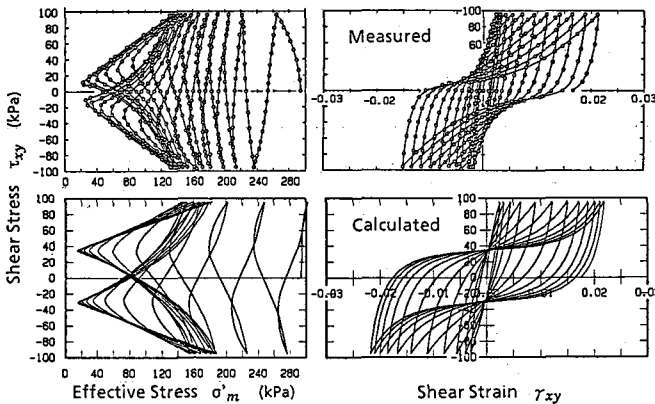


図-3 密な豊浦砂の単純せん断のシミュレーション

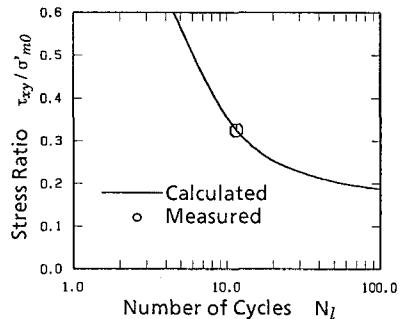


図-4 密な豊浦砂の液状化強度曲線

5. 実験結果と解析結果の比較検討

図-5(a),(b),(c)には加速度波形を示す。地盤では実験値に比べ解析値の方がやや振幅が大きくなっているが、全体の傾向はよく表している。有効応力法と全応力法との差異はそれほど大きくない。図-6には間隙水圧を初期拘束圧で正規化した間隙水圧比波形を示す。実験の間隙水圧は、3秒付近までは全く発生しておらず3.3秒から急に増加しているが、解析値もそのような傾向を説明できている。また、実験では強いサイクリックモビリティによるものと思われる波形の波打ちが見られるが、解析ではそれほど強くは現れていない。全応力解析では、有効応力の減少が応力・ひずみ関係に反映されないため、図-9に示すようにせん断ひずみ振幅が小さく累加せん断ひずみ G^* も小さくなる。したがって、全応力解析では有効応力解析に比べて間隙水圧が小さくなっている。図-7には基盤と地表の間の伝達関数を示す。有効応力法および全応力法による伝達関数は、観測結果を概ね表現できている。図-7で10Hz付近に認められるピークは、非線形時の地盤の一次固有振動数と考えられ、常時微動時の固有振動数19.75Hzに比べその周期は伸びている。図-8(a),(b)には相対変位波形を示す。有効応力法に基づく解析値は実験値と良く一致している。主要動後の波形を見ると、有効応力法による波形は全応力の波形に比べ周期が伸び、振幅も大きい。図-9には応力・ひずみ関係の解析結果を示す。有効応力法の解析値は全応力法のそれに比べ非線形性がやや強い。土槽上部の地盤には0.4%程度のせん断ひずみが生じているものと推測される。

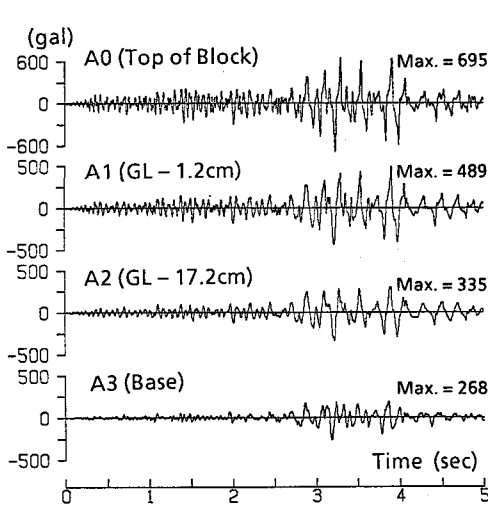


図-5(a) 加速度時刻歴波形 (実験値)

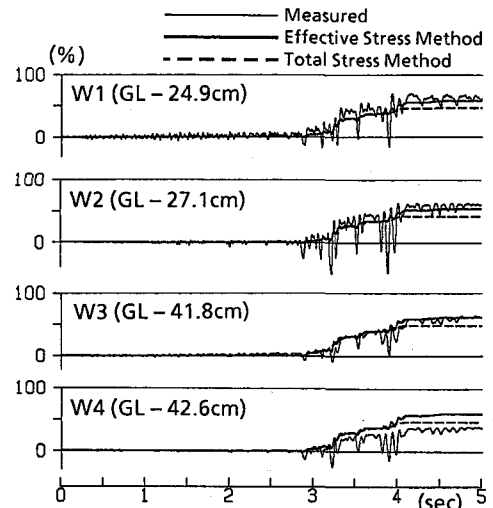


図-6 間隙水圧比時刻歴波形

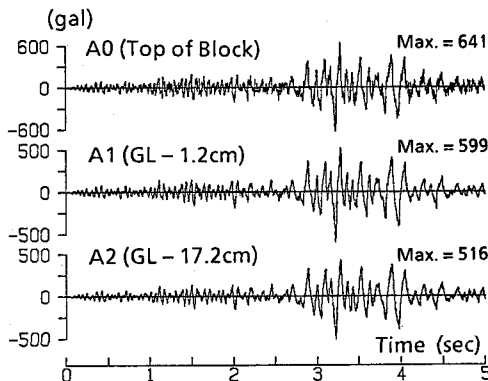


図-5(b) 加速度時刻歴波形 (有効応力法による解析値)

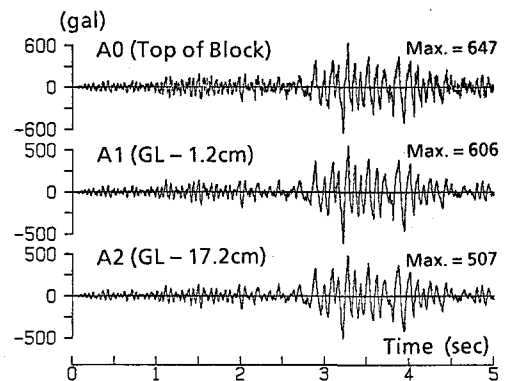


図-5(c) 加速度時刻歴波形 (全応力法による解析値)

6. おわりに

二次元に拡張した修正R-Oモデルとおわんモデルを組み合わせた本モデルは、成層性を有する密な飽和砂地盤中の構造物の地震時挙動をある程度評価できることが分かった。このモデルは安定した解が得られ、また簡易なモデルであるため二次元動的解析に容易に適用できる。相対密度が90%程度まで密に締固められた砂地盤であれば、間隙水圧は発生するものの液状化の可能性は低く、顕著な残留変形や沈下も起こりにくいといえる。このような地盤であれば、全応力法に基づく解析でもシミュレーション可能であることが分かった。しかし、今回よりも主要動の継続時間の長い入力波を想定した場合には、両手法による応答に差異が生じることも考えられ、さらに検討が必要である。また、初期接線せん断係数 G_0 を適切に評価しておけば、非線形性や間隙水圧に与えるパラメータは、砂の種類が異なっても同じ密度の要素試験シミュレーションで決まるパラメータで概ね対処できる。

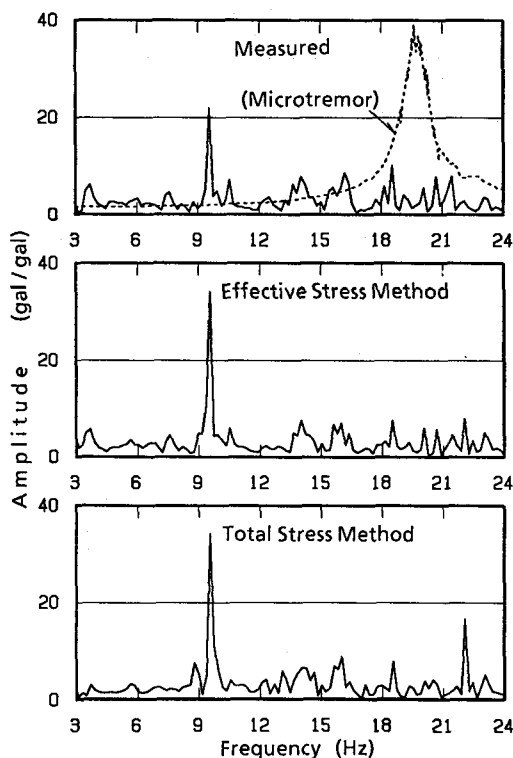


図-7 底板(A3)に対する地表(A1)での伝達関数

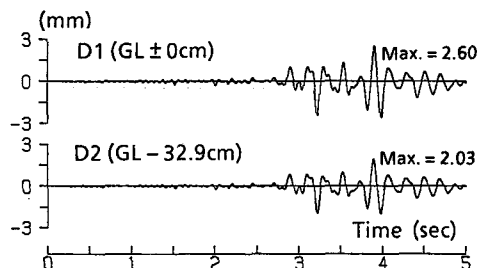


図-8(a) 相対変位時刻歴波形(実験値)

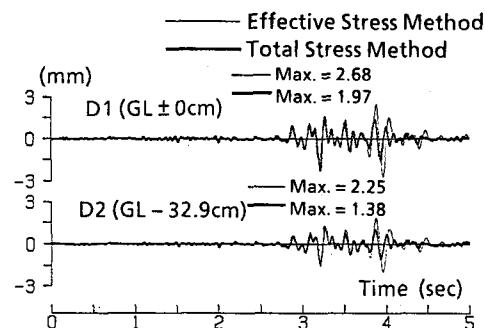


図-8(b) 相対変位時刻歴波形(解析値)

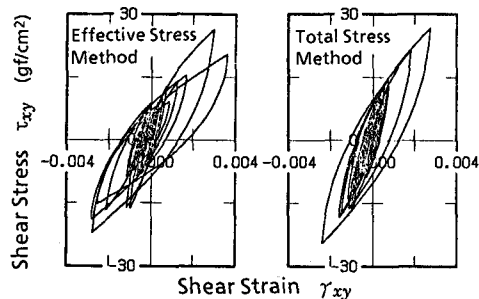


図-9 応力・ひずみ関係の解析結果(要素W2)

参考文献

- 1) 社本・佐藤・石川・若原「密な砂の液状化模倣振動実験と解析」第23回土質工学研究発表会 pp.939~940
- 2) 大槻・福武「ウォーターフロントにおける高層建屋周辺地盤の液状化解析」第43回土木学会年次講演会 I, pp.1050~1051
- 3) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム, 委員会報告「2. 地盤および土構造物の有効応力解析」土質工学編, pp.50~53, 84~93, (1989)
- 4) 大槻・渡辺・竹脇「不整形地盤における二次元建屋地盤系液状化解析」土木学会論文集, 第368号, I-5, pp.363~372, (1986)
- 5) 足立・龍岡「新大系土木工学 18 土の力学(III)」技報堂出版
- 6) 松岡・福武・伊藤・三田村「任意方向単純せん断時の砂の応力・ひずみ関係と液状化解析」第20回土質工学研究発表会 pp.287~290
- 7) 福武・松岡・伊藤・三田村「任意方向繰返し単純せん断時の砂の非排水応力・ひずみ関係と液状化強度の解析」第40回土木学会年次講演会 III pp.419~420
- 8) 福武・大槻・社本・佐藤・吉田・亀岡「密な砂地盤・建屋系模倣振動実験と解析」第24回土質工学研究発表会
- 9) 東畑「砂の繰返しせん断変形特性に及ぼす主応力軸回転の影響」東京大学博士論文(1981)