

1. 概説

本報は密な砂に特有のサイクリックモビリティの効果を定量的に表現できる有効応力モデル¹⁾²⁾により砂地盤の液状化解析を行い、従来用いられている有効応力解析および全応力解析の結果との対比から、提案する有効応力モデルによる液状化解析手法の応答特性を示したものである。

2. 有効応力モデル

筆者らはこれまで土の応力-ひずみ関係はRamberg-Osgood型に代表される指数関数型モデルが、要素試験結果あるいは地震観測記録をよく表現できることを指摘してきた³⁾⁴⁾。筆者らの提案する有効応力モデルは、指数関数型の近似式を有効拘束圧が変化する場合に対しても適用できるように拡張したもので、骨格曲線は次式のように表せる。

$$\gamma_a = \frac{\tau_a}{G_0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\tau_a}{G_0} \right)^\beta \right\}, \quad \alpha = \left(\frac{2}{\gamma_r} \right)^\beta \cdot \left(\frac{\sigma_o'}{\sigma_{oi}'} \right)^a, \quad \beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}} \quad (1)$$

ここで、 τ_a と γ_a は繰返しせん断反転後のせん断応力とせん断ひずみであり、 γ_r は規準ひずみで剛性低下率 G_{eq}/G_0 が0.5になる時のせん断ひずみである。また、 a は拘束圧の変化に伴う骨格曲線の変化を表すパラメータで、拘束圧の変化を考えない場合は龍岡らの提案する修正Ramberg-Osgoodモデル⁵⁾と一致する。有効応力解析では応力-ひずみ関係は繰返しせん断による過剰間隙水圧の変化に対応して時々刻々と変化するため、式(1)を微分して応力とひずみの増分形で表した骨格曲線および履歴曲線を用いている。

繰返しせん断に伴う過剰間隙水圧の変化に関しては、せん断による負のダイレタンシーによって水圧の上昇が見られる部分と、正のダイレタンシーによって水圧が減少する部分の2つに分けて次のように表現する。

過剰間隙水圧の上昇 ($M_0 \geq \tau_a/\sigma_o'$)

$$\frac{\delta u}{\sigma_o'} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1}(R_n)^{1/2\alpha}, \quad R_n = \sum \frac{A}{2} \left(\frac{1}{N_{i+1}} - \frac{1}{N_i} \right), \quad N_i = c_1 \left(\frac{\tau_a}{\sigma_o'} \right)^{1/c_2} \quad (2)$$

過剰間隙水圧の減少 ($M_0 < \tau_a/\sigma_o'$)

$$\delta u = -\theta \cdot \Delta \tau_a, \quad \theta = -\theta_0 \frac{\tau_a}{\sigma_o'} \quad \text{ただし、} \theta \leq \theta_{max} \quad (3)$$

ここで、 M_0 は変相角と呼ばれ過剰間隙水圧が上昇から減少に変化するせん断応力比を表わす。

3. 地震応答解析結果

上部に豊浦砂が存在し下部に洪積粘性土層があるという仮想地盤に対して、提案モデルによるサイクリックモビリティを考慮した解析を行い、通常のサイクリックモビリティを考慮しない有効応力解析および全応力解析結果との対比を行った。

解析モデルおよび解析定数は表1に示すとおりである。入力地震波は1968年十勝沖地震八戸記録(E-W成分)を用い、基盤の最大加速度を50 galとした(図1参照)。

図2は有効応力解析による要素⑤の水圧上昇度とせん断ひずみの時刻歴変化を示したものである。サイクリックモビリティの生じていない前半部分までは、水圧の上昇度およびせん断ひずみの値は

表1 解析モデルおよび解析定数

要素番号	節点番号	湿潤密度 ρ_s (t/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	規準ひずみ γ_r	最大履歴定数 h_{max}	有効応力解析 パラメータ
-2.0m ① ② ③ ④ ⑤	1	2.00	140	1.78×10^{-3}	0.26	—
	2					
	3					
	4					
	5					
-10.0m ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩	6	2.00	190	9.37×10^{-4}	0.26	$a = 0.974$ $m = 0.604$ $\alpha = 0.835$ $c_1 = 0.64$ $c_2 = 0.327$ $\theta_0 = 0.78$ $\theta_{max} = 1.4$
	7			7.40×10^{-4}		
	8			6.20×10^{-4}		
	9			5.38×10^{-4}		
	10					
-20.0m ⑪	11	1.70	300	1.06×10^{-3}	0.20	—

両解析とも一致するが、それ以後の応答結果においてサイクリックモビリティを考慮しない解析ではひずみが増大し、過剰間隙水圧が100%に近付いた時点で不安定になるのに対し、サイクリックモビリティを考慮した解析ではひずみの応答が押さえられ不安定にはならない。

図3は全応力解析におけるせん断ひずみとの対比を行ったものである。水圧上昇の顕著ではない4秒前後までは両者の値はよく一致しているが、有効応力解析では水圧の上昇に伴い著しくひずみが増大する傾向がある。

図4はサイクリックモビリティを考慮した解析における要素⑤の応力-ひずみ関係とストレスパスを示したものである。従来の解析では紡錐形のループを描くのに対して、サイクリックモビリティを考慮したモデルでは剛性回復のため逆S字型のループを描くことが分かる。

図5は3種類の解析によって得られた地表の応答加速度波形を示したものである。各解析とも6秒前後までの応答結果には大きな差異は見られないが、水圧上昇の顕著な6秒以降において、有効応力解析結果は応答が小さくかつ長周期化する傾向が見られる。

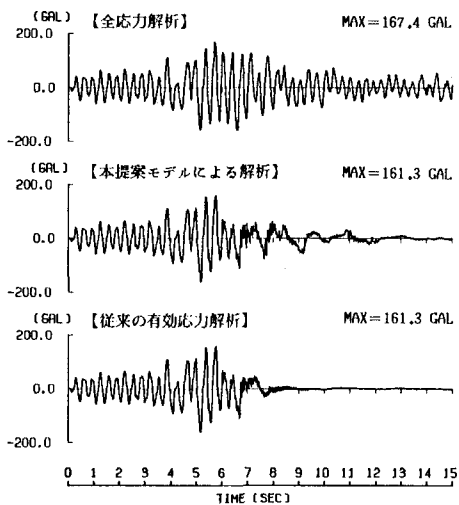


図5 地表面の応答加速度

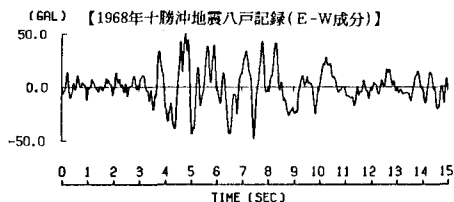


図1 入力地震波

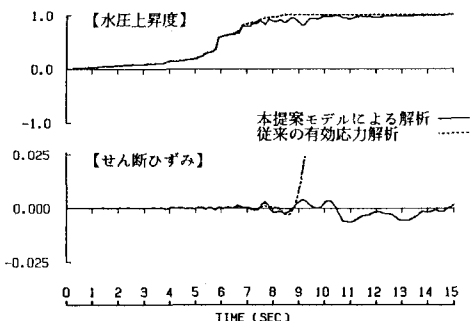


図2 要素⑤の水圧上昇度とせん断ひずみ

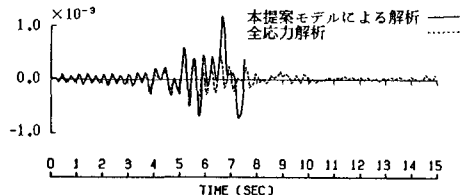


図3 有効応力解析と全応力解析のせん断ひずみ

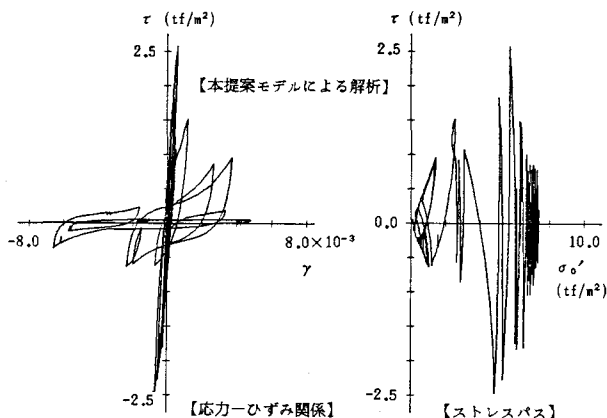


図4 要素⑤の応力-ひずみ関係およびストレスパス

4. 謝 辞

本解析にあたり東京工業大学 吉見吉昭教授には貴重なご意見を賜った。また、(株)アイム 本田龍朗氏には解析結果の取りまとめに多大なる協力を頂いた。記して感謝の意を表します。

5. 参 考 文 献

- 1) 社本(1984)：繰返しせん断時における密な砂の有効応力モデル、清水建設研究所報第41号
- 2) 社本・吉見・中松・清水(1985)：サイクリックモビリティを考慮した砂地盤の有効応力解析手法、第20回土質工学研究発表会
- 3) 社本(1981)：不攪乱粘性土に対する動力学モデルの適用性とパラメータの決定法、清水建設研究所報第34号
- 4) 田蔵・清水・嶋田・横田(1982)：土の動力学モデルの振動特性と実地盤に対する適用性について、第6回日本地震工学シンポジウム
- 5) 龍岡・福島(1978)：砂のランダム繰返し入力に対する応力-歪関係のモデル化について(Ⅰ)、生産研究