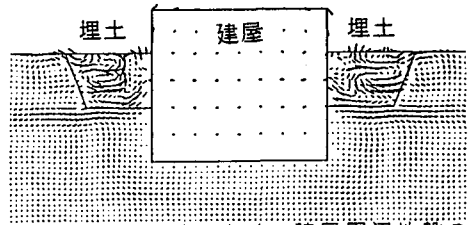


(60) 任意応力条件下の土の構成式を用いた建屋周辺地盤の液状化解析

清水建設(株) 大崎研究室 正会員 福武 毅芳、大槻 明、竹脇 尚信

1. はじめに

地震時の地盤の非線形挙動を適切に評価するには、応答解析に適切な土の構成式を導入することが重要である。地震時に土中の要素は、主応力の回転や垂直応力の変化も含む任意応力経路下の繰返しせん断を受ける。成層地盤にせん断波が垂直入射する場合においてさえ、初期応力状態においては一般に $K_0=0.5$ であるため、主応力の回転は必ず存在する。また、埋込みを有する建屋周辺地盤の波動伝播を調べてみると、図・1に示すように建屋周辺地盤ではせん断波が卓越するだけでなく表面波などの二次的な反射波が発生している。このような地盤の挙動を表すには、主応力の回転や垂直応力の変化も考慮に入れた2次元解析が必要である。一方、液状化の研究では、せん断ひずみに対するこの種の主応力の回転の影響が実験的にも理論的にも注目^{1),2)}されて来っており、主応力の回転の影響のみによっても、液状化することが指摘されている。そこで、本研究では主応力の回転や垂直応力の変化も含めた繰返しせん断を統一的に説明できる構成式を用いて、任意応力経路下の液状化解析を試み、埋土地盤における主応力の回転の影響を明らかにした。



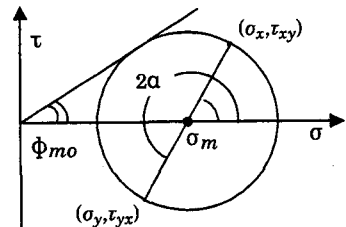
図・1 せん断波入力時の建屋周辺地盤の変位ベクトル

2. 解析手法と土の構成式

液状化の地震応答解析手法として有効応力解析が数多く提案されているが、本研究では効率良くかつ実際に近いモデルを解析できる手法という観点から、透水性を考慮しない二次元有効応力解析手法³⁾を用いている。この解析手法では地盤の剛性に比べかなり剛な構造物を含む解析モデルを対象としていることから、陽解法と陰解法を融合したハイブリット手法を用いている。

また、体積ひずみ零の条件を使い、非排水条件下の間隙水圧を推定している。

土の構成式としては松岡らの提案する構成式⁴⁾を任意応力条件下に拡張したものを⁵⁾を用いている。この構成式は、せん断、主応力の回転、等方および異方圧密を全て取り扱え、また排水および非排水条件下に適用可能なモデルである。このモデルに用いられている応力パラメータは図・2に示す3つ(ϕ_{mo} , α , σ_m)であり、それぞれせん断挙動、主応力の回転挙動、圧密挙動に関与している。



図・2 構成式に用いる3つの応力パラメータ ϕ_{mo} , α , σ_m

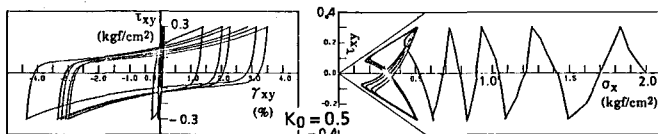
松岡らはひずみを、①せん断成分、②主応力の回転成分、③圧密成分の三成分に分けており、それぞれ以下のような関数形としている。「①せん断成分 $=f_1(\phi_{mo}, \alpha, \sigma_m) \cdot d\phi_{mo}$ 、②主応力回転成分 $=f_2(\phi_{mo}, \alpha, \sigma_m) \cdot da$ 、③圧密成分 $=f_3(\phi_{mo}, \alpha, \sigma_m) \cdot d\sigma_m$ 」そして、 $(d\sigma_x, d\tau_{xy})$, $(d\sigma_y, d\tau_{yx})$ の作用する面のひずみ増分 $(d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy})$ を、上記①、②、③成分の和と考えると、 $\{d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}\}^T = [D_1]^{-1} \cdot \{d\phi_{mo}, da, d\sigma_m\}^T$ のような構成関係を見出している。さらに $\{d\phi_{mo}, da, d\sigma_m\}^T = [D_2]^{-1} \cdot \{d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}\}^T$ と表せるから、一般面(任意面)上の応力~ひずみ関係を、 $\{d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}\}^T = [D]^{-1} \cdot \{d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}\}^T$ のように定式化している。

任意応力経路の繰返し載荷時には、せん断成分、主応力の回転成分、圧密成分のそれぞれについて、 $d\phi_{mo}$, da , $d\sigma_m$ の正負により場合分けを行って、定式化した。特にせん断成分については、 ϕ_{mo} の方向性(正負)を決定するため、応力反転パラメータ⁶⁾を用いた。この応力反転パラメータは2次元の場合、 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の3つの応力成分により決定され、土粒子の滑動方向を決定できるものである。不変量で記述された構成式を一般応力条件下へ適用する場合は、その不変量と、 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ との対応付けが問題となるが、この応力反転パラメータ

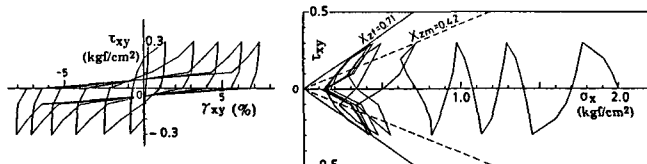
タは一般応力と不変量とを橋渡しするパラメータである。従って、この応力反転パラメータは松岡モデルに限らず、どの構成式にも適用可能である。この構成式を用いれば、三軸、単純せん断などの試験形態や応力条件によらず、統一的に繰返し挙動を説明できる。

以上が二次元応力条件下におけるモデルの概要であるが、複合滑動面(CMP)⁶⁾の概念を用いれば三次元応力条件下にも適用可能となる。

図・3は上記の構成式に側方ひずみ $\epsilon_y=0$, 体積ひずみ $\epsilon_v=0$ という条件を課すことによって、非排水単純せん断を計算した結果である。液状化時のサイクリックモビリティや、hard-spring形の履歴曲線も説明できており、図・4の松岡らの実験結果⁶⁾とも良く対応している。



図・3 非排水繰返し単純せん断の計算結果 (振幅 $\tau = \pm 0.3 \text{ kgf/cm}^2$)

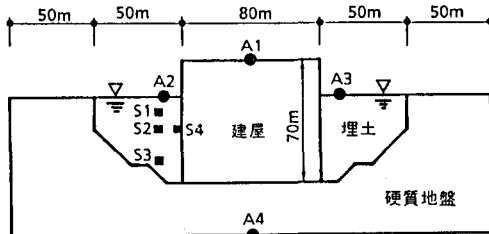


図・4 非排水繰返し単純せん断の実験結果⁶⁾ (振幅 $\tau = \pm 0.3 \text{ kgf/cm}^2$)

さらに、既往の液状化実験結果のシミュレーション⁵⁾を行なった結果、本解析結果は液状化過程の基本的挙動を表現できており、本手法の有効性が認められた。

3. 主応力回転を含む建屋周辺地盤の地震応答解析⁷⁾

解析モデルは、図・5に示すように半地下式の構造物で、構造物周辺には埋土を有している。表・1に解析に用いる定数を示してあるが、埋土部は地表まで地下水が存在する中密な砂地盤である。解析では埋土部の非排水条件下の構成式を適用し、周辺地盤および建屋は弾性として取り扱った。また側方および下方境界にはそれぞれ重ね合わせ境界および粘性境界を用いた。埋土部の初期応力は自重計算より求めた。



図・5 解析モデル図

埋土部の基本的挙動を検討するためSine波を2波入力した。埋土部における測点S2, S4の応力・ひずみ関係、有効応力経路、せん断応力と軸差応力の関係をそれぞれ図・6~8に示した。埋土の応力・ひずみ関係は非線形ループを示しており、特に建屋近傍のそれは片振りとなっている。埋土各点では間隙水圧の蓄積が認められる。図・8に示す応力経路は、原点より離れて楕円状の軌跡を描いている。これより土中の要素は単純せん断形の変形に加え、圧縮~伸張モードの変形や主応力の回転による変形をしていることが分かる。せん断、主応力の回転、異方圧密の各成分が、どの程度せん断ひずみに寄与しているかを明らかにするため、各成分の45度面上の累加せん断ひずみ $\sum|\Delta\gamma|$ を求めた。そして式(1)に示す主応力の回転の寄与率を求め、表・2に示した。本解析モデルでは主応力の回転が5割程度せん断ひずみに寄与している要素もあり、主応力の回転の影響を無視できないことが分かる。特に、応力比 ϕ_{mo} が大きい時の主応力の回転は、せん断変形に大きく影響する。また異方圧密成分は、サイクリックモビリティ時の応力比一定ラインに沿う経路以外では影響が小さい。

El Centro波入力に対する地表の加速度を調べてみると、図・9に示すようにに基盤で514galに対し、測点A2および測点A3では222galおよび183galとなっている。両者の加速度波形を比較すると、測点A3の加速度波形の振幅は3秒以後で抑えられ、また周期は伸びている。これは測点A3の埋土地盤では図・10に示すように液状化がかなり進行しているためと考えられる。埋土部における測点S2, S4の応力・ひずみ関係、有効応力経路をそれぞれ図・11~12に示してあるが、Sine波入力の解析結果と定性的に類似している。図・13~14には測点S2, S4のせん断応力、せん断ひずみ、間隙水圧の波形を示している。測点S2では6秒付近から急に大きなせ

せん断ひずみが発生しており、同時にせん断応力が小さくなっている。測点S4ではせん断応力振幅が片振りに近いため、せん断ひずみは負の方向へ漸増しており、それに伴いせん断応力は漸減している。建屋上部では図-9に示すように700gal程度の加速度が生じている。本解析モデルでは、建屋は基盤に直接載っており、また建屋の基礎幅は大きいことから、基盤からの入力波が建屋の応答に与える影響は、建屋側方から入力波の場合よりも大きい。

表-1 解析定数

[建屋]	縦波速度2800(m/s)	横波速度1200(m/s)
	密度1.0(t/m ³)	[周辺地盤]
		縦波速度1200(m/s)
		横波速度500(m/s)
		密度2.0(t/m ³)
[埋土地盤]	せん断剛性(1/G)0.23%	せん断強度40°
	ストレスダイレタンスの勾配1.2	摩擦係数0.2
	圧縮指数4.53%	膨潤指数2.58%

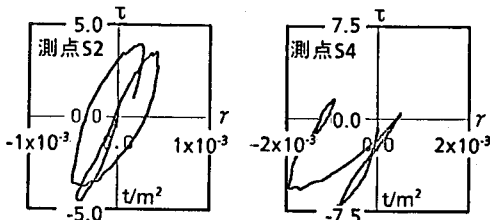


図-6 せん断応力～せん断ひずみ関係 (Sine波入力)

表-2 主応力の回転によるせん断ひずみへの寄与率

要素番号	測点S1	測点S2	測点S3	測点S4
寄与率P	51%	52%	56%	37%

$$P = \frac{\sum |dr^r|}{\sum |dr^r| + \sum |dr^s| + \sum |dr^c|} \dots\dots(1)$$

s;せん断成分 r;主応力の回転成分 c;圧密成分

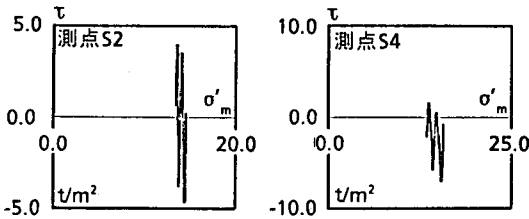


図-7 有効応力経路 (Sine波入力)

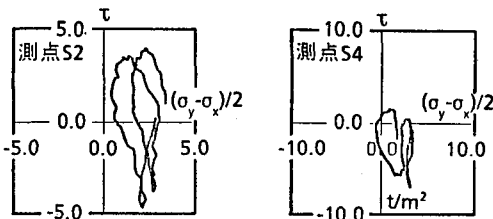


図-8 せん断応力～軸差応力関係 (Sine波入力)

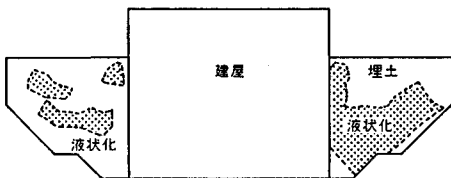


図-10 液状化分布図

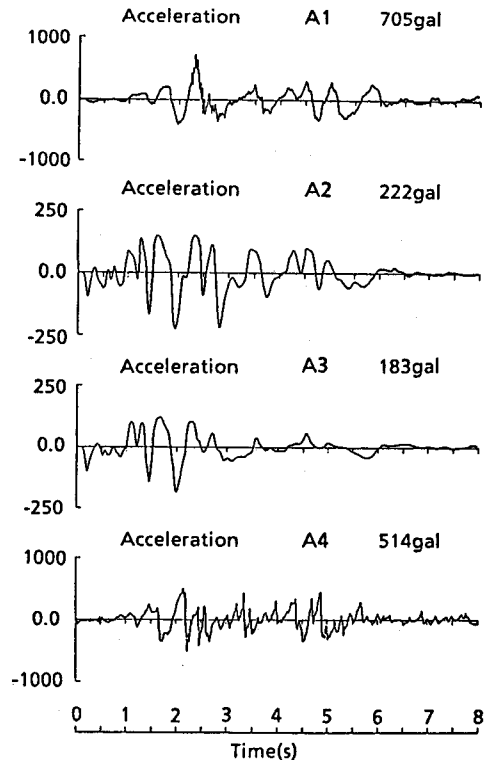


図-9 加速度波形(El Centro波入力)

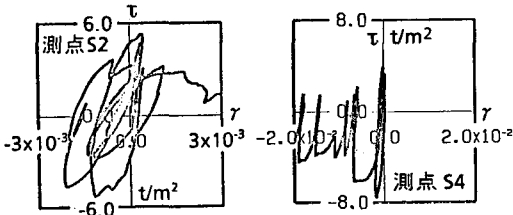


図-11 せん断応力～せん断ひずみ関係 (EI Centro波入力)

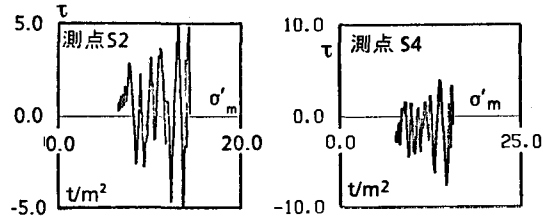


図-12 有効応力経路 (EI Centro波入力)

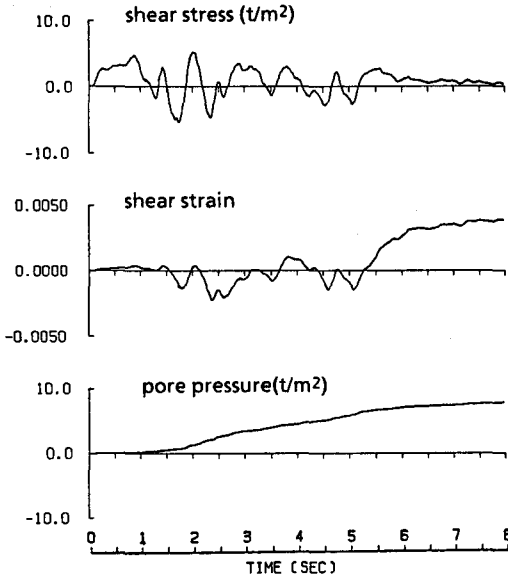


図-13 測点 S2 における波形

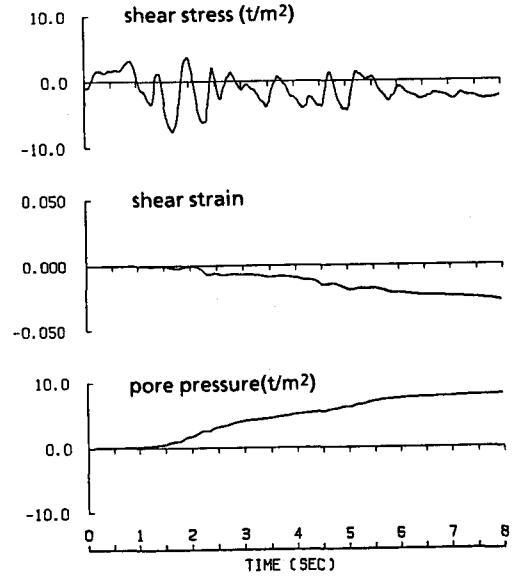


図-14 測点 S4 における波形

4. おわりに

埋込みを有する建屋周辺地盤の液状化解析を行い、埋土地盤における主応力の回転の影響を明らかにし、その重要性を定性的に確認した。この結果より本手法によれば、せん断応力に加え垂直応力もランダムに変化し、さらに主応力の回転も含むような応力経路に対しても統一的に解析できることが示された。したがって、建屋地盤系モデルの液状化解析を行うには、任意応力経路下の繰り返しせん断を表現できる構成式を用いることが重要であるといえる。

謝辞

本研究を行うに当たって、有益な助言を頂いた名古屋工業大学 松岡元 助教授に心より感謝致します。

参考文献 1) K. Ishihara, and I. Towhata, Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads, *Soils & Foundations*, Vol.23, No.4 pp.11~26,1983 2) 松岡・岩田・原「主応力方向の回転によって発生する間隙水圧の解析」第41回土木学会年次講演会Ⅲ, pp.261~262 3) A.Ohtsuki and T. Itoh, Two dimensional effective stress analysis of liquefaction including soil-structure interaction, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.15, No.3, pp345~366 (1987) 4) 松岡他「主応力方向の回転の影響も考慮できる一般座標系表示の砂と粘土の構成式」第21回土質工学講演会概要集, pp341~344 5) 福武・大槻・竹脇「任意応力経路下の土の構成式と液状化解析」第7回日本地震工学シンポジウム, pp.691~696 6) 福武・松岡他「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 7) 大槻・福武・竹脇「埋込みを有する建屋周辺地盤の液状化解析」第41回土木学会年次講演会Ⅰ