

㈱大林組技術研究所 正会員 ○伊藤 浩 二
同 上 正会員 表 佑 太 郎

1. まえがき

実際の地震時においては、一般に、地盤の水平面で二方向のせん断力が作用する三次元的な応力条件となる。したがって、このような地盤に支持される土構造物や他構造物の地震時挙動を予測するにあたっては、三次元応力条件下の地盤材料の変形挙動を適切に表現した構成モデルを用いた、液状化を含む地震応答解析手法を開発する必要があると考えられる。

そこで本報告では、主応力軸の回転を考慮した "Multi-mechanism"モデル¹⁾により、不規則波を用いた多方向せん断入力の下非排水繰返し単純せん断条件の解析を行ない、一方向入力による入力波の不規則性、ならびに二方向入力による入力波の多方向性が地盤の液状化強度に及ぼす影響の解析的検討を基に、このような三次元応力条件に対する本モデルの適用性を検討した。

2. 主応力軸の回転を考慮した "Multi-mechanism"モデル

本報で用いたモデルでは、kメカニズム(異なる2主応力 $\sigma_i - \sigma_j$ 平面)の塑性ひずみ増分が以下の2成分から構成される。

$$\{d\varepsilon^p\}_k = \{d\varepsilon_s^p\}_k + \{d\varepsilon_r^p\}_k \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $\{d\varepsilon^p\}_k$: 塑性ひずみ増分

$\{d\varepsilon_s^p\}_k$: せん断による塑性ひずみ増分

$\{d\varepsilon_r^p\}_k$: 主応力軸の回転による塑性ひずみ増分

したがって、全塑性ひずみ増分 $\{d\varepsilon^p\}$ は、式(1)のkメカニズムの総和($k=1\sim 3$)に等方圧密による塑性ひずみ増分 $\{d\varepsilon_c^p\}$ を付加することにより算定される。ここで $\{d\varepsilon_s^p\}_k$ 、 $\{d\varepsilon_r^p\}_k$ の大きさを規定する比例定数 $\lambda_{s,k}$ 、 $\lambda_{r,k}$ は、式(2)、(3)で定義され、特に $\lambda_{r,k}$ 中の $d\alpha$ は、各メカニズムに対し式(4)から算定している。

$$\lambda_{s,k} = \frac{a^m \cdot \sin \phi_r \cdot \cos \phi_{m0}}{\mu_k \cdot (\sin \phi_r - \sin \phi_{m0})^2} d\phi_{m0} \quad \text{--- (2)}$$

$$\lambda_{r,k} = \frac{2 \cdot a^m \cdot \sin \phi_{m0}}{\mu_k \cdot (\sin \phi_r - \sin \phi_{m0})} d\alpha \quad \text{--- (3)}$$

$$d\alpha = \frac{\beta_{ij} \beta_{ji}}{\sigma_i - \sigma_j} d\sigma_{ji} \quad \text{--- (4)}$$

ここに ϕ_{m0} : mobilized angle, ϕ_r : 破壊時の内部摩擦角, α : 主応力軸の回転角, a^m : 硬化パラメータ, μ_k : ガイランシーパラメータ, σ_{ij} : 一般応力, β_{ij} : i, j軸の方向余弦である。

3. 非排水繰返し単純せん断条件の解析

地震波の不規則性(衝撃型・振動型)、多方向性が地盤の液状化強度に及ぼす影響は、既往の研究成果²⁾を基に、室内試験から決定される液状化強度に対する補正係数 C_2 、 C_5 として設計指針中で考慮される。そこで本報では、異なる不規則性を有する2地震波について、上記モデルによる多方向せん断入力の下非排水繰返し単純せ

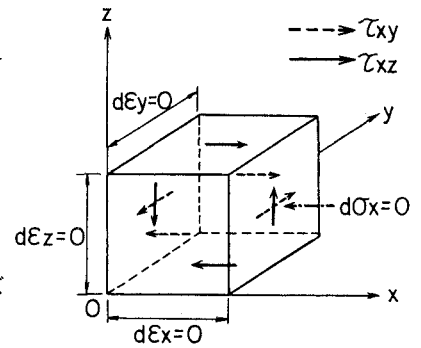


図-1 解析モデル

表-1 解析ケースと応力条件

ケース	地震波成分	$\tau_{xy, max}$	$\tau_{xz, max}$
Case 1	八戸 NS	13.72	0
Case 2	八戸 EW	0	13.72
Case 3	八戸 NS, EW	13.70	11.13
Case 4	TAFT NS	13.72	0
Case 5	TAFT EW	0	13.72
Case 6	TAFT NS, EW	9.69	11.16
Case 7	正弦波 1Hz	13.72	0

衝撃型: 八戸 NS
振動型: 八戸 EW, TAFT NS, EW
 $\sigma'_{xi} = \sigma'_{yi} = \sigma'_{zi} = 98.0$, $\tau_{max} = 13.72 \text{ KN/m}^2$

表-2 モデルパラメータ

せん断	ϕ_r	40.0°	弾性	λ_c	0.043	
	C	0.45		圧密	λ_s	0.013
	μ_{max}	1.20			e_0	0.760
	S_c	0.0035			G_0	29400
	a^m	0.00002			K_0	78200
	a^c	0.00002			σ'_{ref}	98.0
回転	δ	30°	G_0, K_0, σ'_{ref} (KN/m ²)			

せん断条件の解析を行ない、算定される過剰間隙水圧 u の経時変化と既往の補正係数を比較する。解析モデルを図-1に示す。

ここで、載荷荷重として二方向せん断応力 τ_{xy} , τ_{xz} を作用させる場合の非排水単純せん断条件は、直ひずみ増分 $d\varepsilon_x = d\varepsilon_y = d\varepsilon_z = 0$, 全応力増分 $d\sigma_x = 0$ で表現され、応力制御の解析からこの条件を満足するように u が算定される。

解析ケースと応力条件、モデルパラメータを表-1, 2に示す。

初期有効応力は、等方圧密状態を仮定し、モデルパラメータが等しい条件で、不規則波を用いた τ_{xy} , τ_{xz} による一方向入力、 τ_{xy} と τ_{xz} の同時載荷による二方向入力の他に、通常の液状化強度試験を想定した振動数 1 Hz, 波数 20 波の正弦波による一方向入力を行なう Case 1~7 である。

また、解析で用いたせん断応力 $\tau_{xy}(t)$, $\tau_{xz}(t)$ は、衝撃型を含む八戸波 NS, EW 成分、振動型に属する TAFT 波 NS, EW 成分の継続時間 20 秒の加速度波形を、一方向入力では $\tau_{xy, \max}$, $\tau_{xz, \max} = 13.72 \text{ KN/m}^2$ 、二方向入力では $\sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}_{\max} = 13.72 \text{ KN/m}^2$ に振幅調整している。ここで、Case 1, 2, 4, 5 で用いた $\tau_{xy}(t)$, $\tau_{xz}(t)$ を図-2に示す。

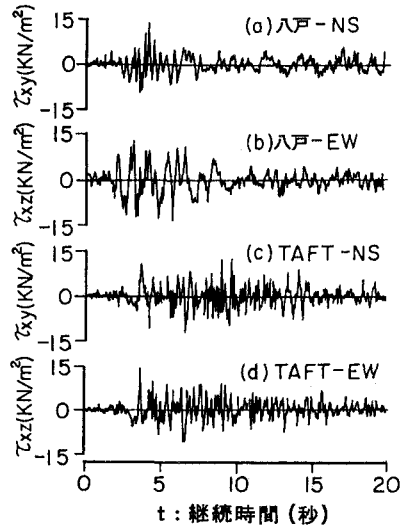


図-2 せん断応力波形

4. 解析結果

八戸波, TAFT波を入力波とする解析ケースの $u-t$ 関係を図-3, 4に示す。また図中には、Case 7の結果も併記している。

Case 1, 2とCase 7の最大過剰間隙水圧 u_{\max} は、不規則性の影響として既往の設計指針で採用される衝撃型 ($1/C_2=0.55$), 振動型 ($1/C_2=0.70$) の補正係数 C_2 に対応して、Case 1, 2, 7の順に小さな値を示す。またCase 4, 5は、典型的な振動型の地震波に属するため、 u_{\max} はCase 7とほぼ等しい値を示している。

次に多方向性の影響についても、Case 3の主要動部ならびにCase 6の過剰間隙水圧増加率 du/dt をCase 7と比較すると、既往の補正係数 $C_5 (=0.8 \sim 0.9)$ に対応して、 $1/C_5$ 倍程度の増加率を示している。

このように、本報で用いた地盤構成モデルにより、地震波の不規則性・多方向性が地盤の液状化強度に及ぼす影響を定量的に表現できるようである。

5. まとめ

(1) 主応力軸の回転を考慮した“Multi-mechanism”モデルによる多方向せん断入力の非排水繰り返し単純せん断条件の解析から、三元応力条件に対する適切な予測が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 伊藤, 表 (1990) : “主応力回転を考慮したモデルによる地中構造物の液状化解析”, 土木学会第45回年次学術講演会概要集, pp.632-633.
- 2) Ishihara, K. and Nagase, H. (1988) : “Multi-directional irregular loading tests on sand”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, No.4, pp.201-212.

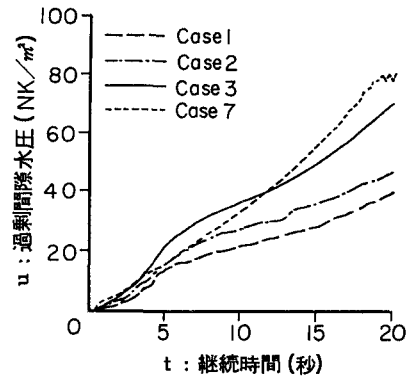


図-3 $u-t$ 関係 (八戸波)

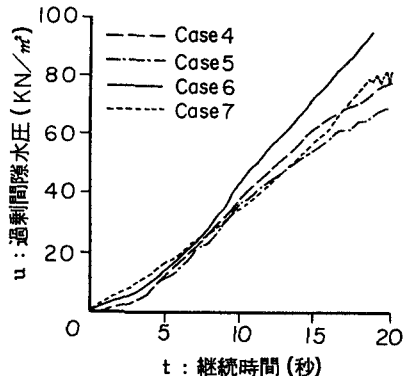


図-4 $u-t$ 関係 (TAFT波)