

格子状改良地盤の過剰間隙水圧発生量を予測できる解析法の検討

(株)竹中土木 正会員○津國 正一

(株)竹中工務店 正会員 塩見 忠彦

1. まえがき

深層混合処理工法を用いた格子状改良地盤の液状化抑止効果は、模型実験¹⁾あるいは阪神大震災における被害調査²⁾で確認されている。格子状改良地盤の液状化抑止効果のメカニズムを解明し³⁾、合理的な格子間隔の設計を可能にするために必要な解析法の検討を目的として、格子状改良地盤模型の遠心実験を3次元有効応力解析コード MuDIAN⁴⁾でシミュレーションした結果について報告する。

2. 土の構成式

シミュレーションにはZienkiewicz等が提案したDensificationモデル⁵⁾を修正したモデルを用いた。Densificationモデルでは、体積ひずみに対する硬化則とせん断ひずみに対する硬化則を独立に考えることにより（増分形で塑性ひずみ $d\epsilon^p = d\epsilon_v^p + d\epsilon_s^p$ ），土の構成式のパラメータが土質試験結果より直接的に求められる特徴がある。以下に今回修正した構成式の硬化則を示す。

I. ダイレイタンシーによる塑性体積ひずみ増分 ($d\epsilon_v^p$)

塑性体積ひずみ増分はダイレイタンシーによって発生する自生体積ひずみ増分 $d\epsilon_{v0}$ だけを考えている。 $d\epsilon_{v0}$ は土が受けたダメージの程度を表す損傷パラメータ κ から求まる関数 $f(\kappa)$ と、応力比 ($\theta = \bar{\sigma}/\sigma_m$ σ_m : 平均有効応力、 $\bar{\sigma}$: 偏差応力) から求まる関数 $h(\theta)$ によってコントロールされる。

$$d\epsilon_{v0} = f(\kappa) \cdot h(\theta) \cdot d\kappa \quad d\kappa = \bar{\sigma} / \sigma_{m0} \cdot d\xi \quad (1) \quad \begin{cases} \kappa_n = \kappa_{n-1} + d\kappa & \text{for loading} \\ \kappa_n = \kappa_{n-1} - d\kappa & \text{for unloading} \end{cases}$$

(σ_{m0} : 初期平均有効応力、 $d\xi$: 偏差ひずみの第二次不変量の増分)

II. 塑性せん断ひずみ増分 ($d\epsilon_s^p$)

塑性せん断ひずみの計算には下負荷面モデルの考え方⁶⁾を取り入れる。下負荷面モデルでは降伏面の内部に応力が存在する場合でも、常に現応力点を通して降伏面と相似な形を保ちながら膨張・収縮する下負荷面を仮定（図-1参照）することによって、降伏面の内部でも塑性ひずみの発生を考慮することができる。また相似中心 s が移動することによってある程度 Masing 則が満足される。

塑性せん断ひずみの計算は関連流れ則による。降伏関数とポテンシャル関数 f に角度 $\phi=0$ とした Mohr - Coulomb 面を下負荷面として用いる。図-1に示す主応力空間上で降伏面の大きさを F とし、降伏面と下負荷面の相似比を R とすると $f=R \cdot F$ である。

下負荷面の外向き単位法線ベクトル $N_f (= (\partial f / \partial \hat{\sigma}) / \|\partial f / \partial \hat{\sigma}\|)$ から

$$d\epsilon_s^p = \lambda \cdot N_f \quad (\lambda > 0) \quad (2) \quad \hat{\sigma}: \text{下負荷面上の応力}$$

$$\lambda = N_f \cdot E \cdot d\epsilon' / (H + N_f \cdot E \cdot N_f) \quad d\epsilon' = d\epsilon - d\epsilon_v^p \quad (3)$$

H は塑性係数で、 $H \rightarrow \infty$ は弾性、 $H=0$ は完全塑性を示す。

相似比 R の微分を (5) 式で定義することによって H が求まる。

また相似中心の移動則は (6) 式で定義している。

$$H = (1-R) \cdot c \cdot \text{tr}(N_f \cdot \tilde{\sigma}) + U / R \cdot \text{tr}(N_f \cdot \hat{\sigma}) - U \cdot \text{tr}(N_f \cdot s) \quad (4)$$

$$R = U(R) \cdot \|d\epsilon_s^p\| \quad U = -u \cdot \ln R \quad (5) \quad ds = c \cdot \|d\epsilon_s^p\| \cdot \tilde{\sigma} \quad (6) \quad \tilde{\sigma} = \sigma - s \quad (7) \quad c, U: \text{パラメータ}$$

3. 遠心模型振動実験のシミュレーション

振動実験の概略図を図-2に示す。改良地盤は、土槽底盤部に直接固定されている。排水条件は地表面からだけである。振動実験は50G場で行い正弦波で20波加振した。1G場に換算した入力加速度レベルは最大187(gal)。解析は図-3に示すソリッド要素で定義した3次元モデルで行った。豊浦砂は修正Densificationモデルを用い、

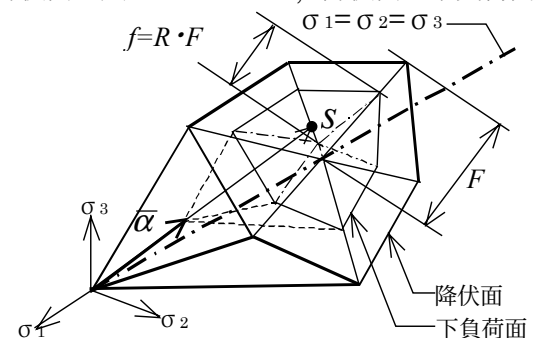


図-1 降伏関数の概念図

キーワード：動的、有効応力解析、構成式、ダイレイタンシー、遠心実験、シミュレーション

連絡先：(株)竹中土木技術本部 (〒104-8234 東京都中央区銀座 8-21-1 TEL 03-3543-6321 FAX 03-3248-6545)

(株)竹中工務店技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1 TEL 0476-47-1700 FAX 0476-47-3060)

大井川砂は Mohr－Coulomb の降伏規準に従うとした。修正 Densification モデルのパラメータは、繰返し三軸試験結果で両振幅軸ひずみ 5 % となる波数を目標に設定した。設定結果を図－4 に示す。動的解析に用いたレイリー減衰は、改良体 5 %、地盤 2 % で設定。

過剰間隙水圧比時刻歴の解析結果と実験結果の比較を図－5 に示す。周辺地盤部では過剰間隙水圧比 1.0 まで過剰間隙水圧が上昇しているのに対して、格子内地盤では過剰間隙水圧の発生が抑えられている。4 m 格子内地盤では、格子間隔が広い 6 m 格子内地盤よりも過剰間隙水圧の発生量と振幅が大きい。

面内方向改良体に作用するせん断応力の最大値の深度別分布を図－6 に示す。液状化によりせん断応力の分担が小さくなっている周辺地盤に接している部分と、せん断ひずみが抑えられる面外方向改良体との接合部でせん断応力が小さくなっている。面外方向改良体の相対水平変位の最大値分布を図－7 に示す。液状化している周辺地盤に接している I-1 と I-5 の相対水平変位は、格子に囲まれている I-2、I-3、I-4 に比べて大きく、接している格子の間隔が広くなるに従って最大相対水平変位が大きくなり、4 m 格子を除いて過剰間隙水圧発生量と最大相対水平変位が対応していることから、各格子内での過剰間隙水圧発生量は、面外方向改良体の曲げによる影響を大きく受けると考えられる。

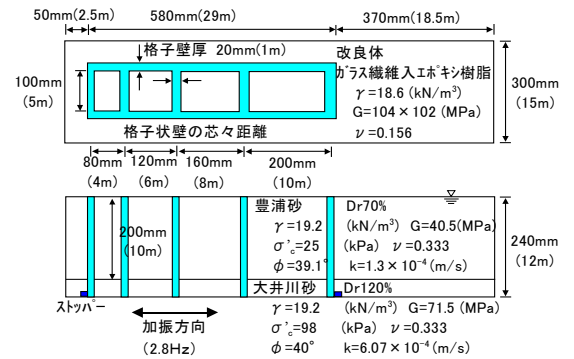
4. まとめ

周辺地盤と各格子内での過剰間隙水圧発生量について、今回の解析では遠心実験結果を良くシミュレーションすることができ、解析を通じて次のことが分かった。

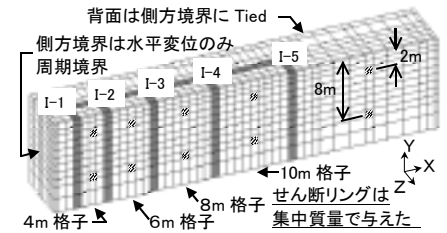
- ① 液状化する周辺地盤に接している面外方向改良体は周辺地盤の影響によって、格子内の面外方向改良体に比べて、改良体の水平変位量大きい。
- ② 面外方向改良体の曲げと格子内の過剰間隙水圧発生量は関係している。

面外方向改良体と面内方向改良体の液状化抑止効果の分担については、今後さらに検討を加えて行きたい。

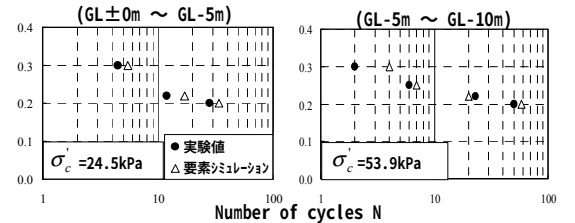
【参考文献】1) 馬場崎, 他(1991) 固化工法を用いた耐液状化基礎地盤改良工法 (その2), 第 26 回土質工学研究発表会 pp1007-1008 2) 鈴木, 他(1996) 深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策 I, 土と基礎, 44-3, pp46-48 3) 吉澤 (1999) 格子状改良地盤の力学特性を考慮した 2 次元有限要素法解析モデルの作成について, 第 34 回地盤工学研究発表会 pp231-232 4) 塩見, 他 (1998) 地盤と構造物の非線形挙動を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究所報告 No.54, pp1-8 5) Zienkiewicz, O.C., Chng, C.T. and Hinton, E (1978) Nonlinear seismic response and liquefaction, Int. Num. and Anal. Meth. in Geomech. Vol2, 381-404. 6) 橋口広一・上野正美・陳忠平(1996) 下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.567/III-3 6, pp127-144



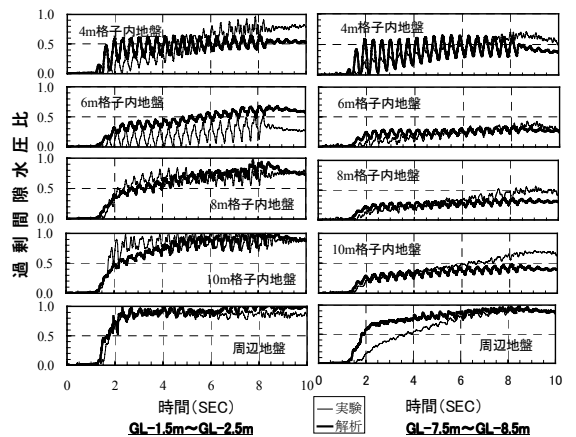
図－2 振動実験の概要図 ()内は 1G 場に換算した



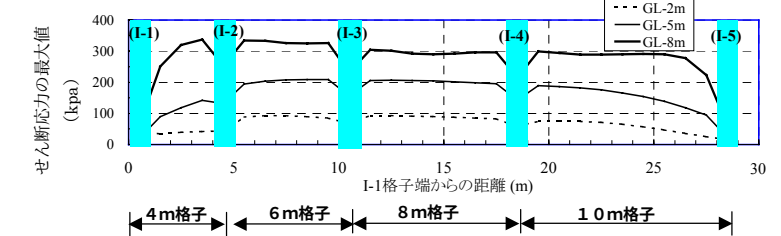
図－3 シミュレーション解析モデル図



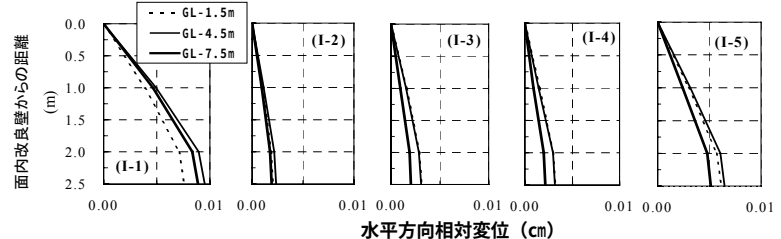
図－4 液状化強度の設定



図－5 過剰間隙水圧比の時刻歴の比較



図－6 面内方向改良体のせん断応力の分布図 (xy 面)



図－7 面外方向改良体の最大相対変位分布図 (xz 面)