

Ⅲ-240 不規則繰返し荷重を受ける飽和砂の間隙水圧及び変形の評価

三井建設（株）技術研究所 正会員 ○山本陽一 石田義博
 山口大学工学部 正会員 兵動正幸

1. まえがき

著者らは、地震時の砂質地盤の液状化の検討において、有効応力解析法による現象のシミュレーションが、今後、実務設計等の実用に広く供されるためには、有効応力モデルの簡易化が重要であると考え、繰返し試験結果の表現方法として最も一般的な、繰返し強度～繰返し回数関係を用いた有効応力モデルの提案を行った^{1), 2)}。ここでは、規則波による繰返し試験結果に基づき、軸差応力 q ～平均有効主応力 p ～ひずみ ε の三者を関連付ける、有効応力比 η ($=q/p$)～ひずみ ε 関係の定式化を示した。したがって、有効応力比を適切に評価することにより、間隙水圧及び変形を予測することができる。ここでは、不規則繰返し応力に対する有効応力比の算定法について示す。また、不規則波による繰返し試験結果と計算結果との比較から、モデルの適用性について検討した。

2. 試料及び試験方法

試験に用いた試料は豊浦標準砂 ($G_s=2.643$, $e_{\max}=0.973$, $e_{\min}=0.635$) であり、供試体は初期相対密度 $D_r=50\%$ ($e=0.804$) になるよう空中落下法により作成した。試験には電気油圧サーボ式の繰返し三軸試験機を使用し、供試体は、所定の有効拘束圧 p_c まで等方圧密を行った後、非排水条件で不規則繰返し载荷を行った。不規則波はエルセントロ・NS波 (1940)、タフト・NS波 (1952) の2種類の加速度記録と相似な波形を荷重として载荷した。

3. 有効応力比の定量化

図-1は、一様な繰返し荷重振幅による試験から得られた、相対有効応力比 η^* と強度比 R/R_i の関係を示したものである¹⁾。ここで、相対有効応力比 η^* は、図-2に示すように初期有効応力比 η_i と破壊時の有効応力比 η_p の間で、任意の繰返し回数におけるピーク有効応力比 η_p の相対的な位置を表す応力比であり、次式で定義される。

$$\eta^* = \frac{\eta_p - \eta_i}{\eta_f - \eta_i} \quad (1)$$

ここで、初期有効応力比 η_i は各繰返し応力サイクルピーク時の軸差応力 q_p と有効拘束圧 p_c の比 ($\eta_i = q_p/p_c$) で表される。また、強度比 R/R_i は外力としての繰返し応力比 R ($=q_{yc}/p_c$) を次式で与える液状化強度 R_i で除して正規化したものである。

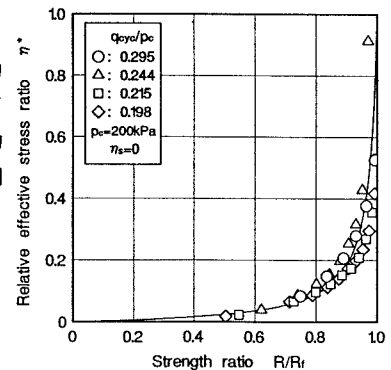
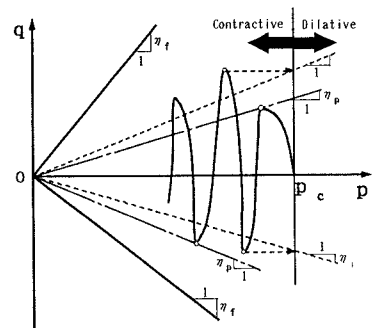
$$R_i (=q_{yc}/p_c)_f = \kappa N^\beta \quad (2)$$

ここで、 κ は繰返し回数 $N=1$ 回の繰返し強度の値であり、 β は上式で定義された液状化強度線の勾配を表す定数である。

図-1の $\eta^* \sim R/R_i$ 関係は、繰返し応力、繰返し回数の違いによらず一義的であることから、この関係を初期状態の0から破壊状態の1を通る双曲線により、次のように定式化した。

$$\eta^* = \frac{R/R_i}{a - (a-1)R/R_i} \quad (3)$$

ここで、 a は実験定数である。これにより、規則波については、繰返し応力比 q_{yc}/p_c と繰返し回数 N_i が与えられれば、 N_i における η_p を求めることができる。一方、不規則な繰返し応力が作用する

図-1 相対有効応力比 η^* と強度比 R/R_i 図-2 相対有効応力比 η^* の概念

場合の有効応力比の算定については、次のように考えた。

今、 $q_{p,i}$ なる大きさの繰返し応力が、半波作用する場合を考える。この時までの繰返し応力履歴により、有効応力はすでに、 p_{i-1} まで減少していたとする。この繰返し応力が、仮に一樣な応力振幅として作用するとし、有効応力が p_{i-1} まで減少するに必要な等価繰返し回数 N_{eq} は、次式で与えることができる。

$$N_{eq} = \left[\frac{1 + (a - 1)\eta_{eq}^*}{\kappa a \eta_{eq}^*} \right]^{1/\beta} \quad (4)$$

ここで、 η_{eq}^* は、式（1）の相対有効応力比の定義から、次のように表される。

$$\eta_{eq}^* = \frac{q_{p,i}/p_{i-1} - q_{p,i}/p_c}{\eta_f - q_{p,i}/p_c} \quad (5)$$

したがって、 $q_{p,i}$ の大きさの繰返し応力が、半波作用する時の有効応力比 $\eta_{p,i}$ は、

$$\eta_{p,i}(=q_{p,i}/p_i) = \eta_f^*(\eta_f - q_{p,i}/p_c) + q_{p,i}/p_c \quad (6) \quad \text{図-3 規則波による実験結果と計算結果の比較}$$

で与えられる。ここで、 η_f^* は式（3）において $R = |q_{p,i}/p_c|$ 、 $N = N_{eq} + 0.5$ としたものに他ならない。これを半波毎に繰返し計算することによって、有効応力比の変化を連続的に求めることができる。この方法は、履歴の影響を考慮した、Martinら³⁾や石井ら⁴⁾の考え方と基本的には同じである。

4. モデルによる計算結果と実験結果との比較

図-3に参考として、応力振幅一定の試験結果と計算結果の有効応力経路を比較したものを示した。モデルは文献1)と基本的に同じものだが、細部において若干の改良を加えている。図から、計算結果が最初の半サイクルの有効応力の減少量を過大評価している他は、実験結果と良好な対応にあることが分かる。また、変相線に達して液状化に至った後に、破壊線に漸近する形で応力回復を繰り返す挙動についても、表現できることが分かる。図-4(a)，(b)にそれぞれ、エルセントロ(NS)、タフト(NS)波により行った試験結果と計算結果とを軸ひずみ、軸差応力、間隙水圧の時刻歴変化について比較したものを示す。(a)は液状化に至った例であり、(b)は液状化に至らなかった例である。計算結果は、いずれの場合も十分な精度で実験結果を評価している。したがって、モデルは不規則な繰返し応力に対しても、微小ひずみ領域から破壊領域の広範囲にわたる変形及び間隙水圧挙動を評価できることが明らかである。

【参考文献】

- 1) 山本他：液状化強度線を用いた飽和砂の間隙水圧モデルについて，第30回土質工学研究発表会講演集，1995。
- 2) 山本他：繰返しせん断を受ける飽和砂の液状化過程における有効応力比～ひずみ関係の評価，第30回土質工学研究発表会講演集，1995。
- 3) Martin 他：Fundamental of Liquefaction under Cyclic Loading, Proc. ASCE, Vol.101, No.GT5, pp.423 ~ 438, 1975。
- 4) 石井他：不規則繰返しせん断による砂のダイレイタンス特性及び液状化抵抗，第14回土質工学研究発表会講演集，pp.577 ~ 580, 1979。

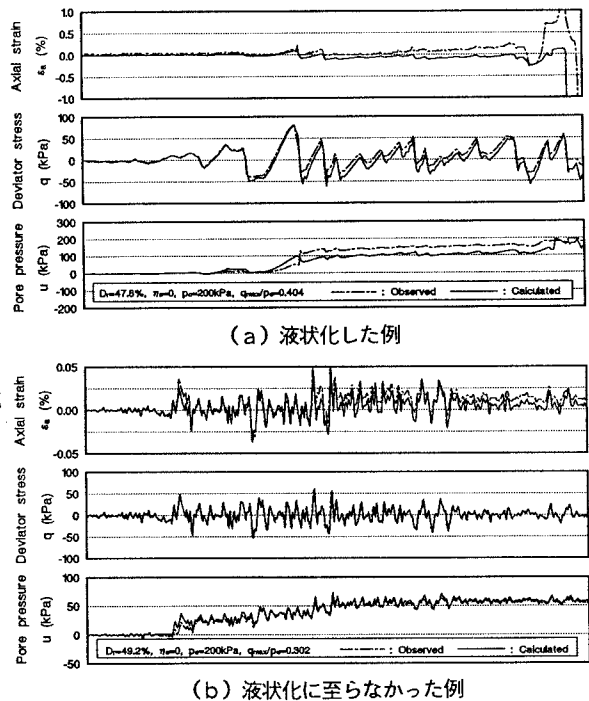
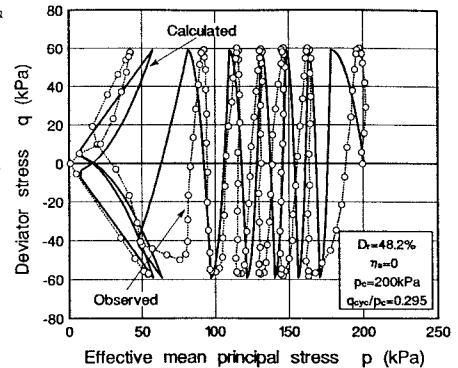


図-4 不規則載荷時の実験結果と計算結果の比較