

大きなひずみレベルでの動的相互作用問題に 適用可能な地盤非線形モデルの提案

福嶋研一¹・岡本晋²・坂下克之³・立石章¹・志田智之¹

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計第一部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

²正会員 工博 大成建設株式会社 技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

³正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

従来の土の非線形構成則のうち、履歴曲線型と呼ばれる R-O モデルや H-D モデルはパラメータの設定が容易に行え、計算が簡便であるため動的応答解析に多く用いられている。しかし、これらの非線形モデルにより、大きなひずみが生じる地盤-構造物系の相互作用問題を数値解析するには多くの課題がある。本研究は実務での使用を前提とし、地震時における地盤の挙動を的確に表現できる地盤の非線形モデルを提案する。また、この非線形モデルを用いて兵庫県南部地震時に観測された鉛直アレー記録をシミュレートしたところ、観測記録を精度よく再現することができた。

Key Words : non-linear , dynamic response analysis , soil-structure interaction

1. はじめに

大地震時の地盤に起こる現象を正確に予測するためには、実際の土の動力学特性を反映した数値解析モデルが必要である。

従来、全応力解析を行う場合は取り扱いの容易な Ramberg-Osgood(R-O)モデルや Hardin-Drnevich(H-D)モデルが広く用いられてきた。しかし、これらの履歴曲線型非線形モデルを大きなひずみが生じる地盤-構造物相互作用問題に適用するには、以下のような問題点が挙げられる。

1)大ひずみ領域における構成則の精度

近年耐震設計を行う場合には、数%にも達する大きなひずみレベルが対象となることが多く、従来の非線形モデルの適用範囲を超えている。

2)履歴減衰の評価

履歴曲線型非線形モデルの多くは、徐荷・再載荷の考え方に Masing 則を採用している。ところが多くの研究により、この手法による履歴ループは実際の土の挙動と適わないことが指摘されている。

3)垂直ひずみによる地盤の非線形性

地震時の地盤はせん断振動をするという工学的な知見から、従来の非線形モデルの多くはせん断応力とせん断ひずみの関係を定式化したものが多い。しかし、動的相互作用問題を考える場合には、垂直ひずみの影響も無視できない¹⁾。

これらの問題点に対して、著者らは大きなひずみレベルにおける土の挙動を把握するための室内試験を行い、その履歴曲線について検討を行った²⁾。また、応力経路の異なる載荷方法により中空ねじり試験を実施し、その履歴特性を検証した³⁾。

本研究では、これらの成果を踏まえた地盤の非線形モデルを提案する。以下、このモデルを複合履歴モデルと呼ぶ。ちなみに、本文ではテンソルを使用することにより、座標軸の取り方に依存しない複合履歴モデルの構成則、すなわち、応力とひずみの関係を表記している。

2. 複合履歴モデル

(1) 骨格曲線について

通常地盤では、大きなせん断力が作用するとせん断強度で降伏する。このため、大きなひずみレベルでの応力-ひずみ関係が問題となる場合は、H-D モデルを用いることにより実際の挙動を表現しやすいと考えられている。しかし、H-D モデルには骨格曲線の形状を設定するためのパラメータが少なく、

広範囲なひずみレベルに対して応力～ひずみ関係を適切に表現することは困難である。

そこで、H-D モデルの骨格曲線にパラメータ δ を付加した次式を複合履歴モデルの骨格曲線とする。

$$J_2 = \frac{2G_0 J_2'}{1 + |2J_2'/J_r'|^\delta} \quad (1)$$

$$\delta = A \log_{10} |2J_2'| + B \quad (2)$$

上式の J_2 と J_2' はそれぞれ応力とひずみのテンソル第2 不変量を表し、 G_0 は初期せん断弾性係数、 J_r' は地盤のせん断弾性係数が初期値と比べて 1/2 となるときのひずみ量である。また、 δ は式(2)により表される J_2' の関数として定義する。ここで A 、 B はフィッティング・パラメータである。

(2) 徐荷・再載荷曲線について

H-D モデルの骨格曲線に Masing 則を適用して徐荷・再載荷曲線を規定した場合、その履歴曲線は実際の土の履歴ループよりも大きく膨らみ、履歴減衰が過大に評価される。一方、R-O モデルの骨格曲線に Masing 則を適用した場合、履歴減衰のひずみ依存特性は実地盤のものとよく整合している。

ここで、式(1)により定義した骨格曲線に Masing 則を適用すると、前述の理由により減衰は過大に評価されるため、複合履歴モデルでは図-1 に示す概念を用いて徐荷・再載荷曲線を定義する。

いま、骨格曲線上にある応力状態から徐荷が行われた場合を考える。ここで、載荷から徐荷に転じた点を折返し点 $A(J_2'^*, J_2^*)$ とし、この点を通るような仮想の骨格曲線を設定する。複合履歴モデルの徐荷ならびに再載荷時における応力～ひずみ関係は、この仮想骨格曲線に対して Masing 則を適用した履歴曲線上を移動するものとして定義する。仮想骨格曲線は次式により規定する。

$$J_2' = \frac{J_2}{2G_0} \left(1 + \alpha |J_2|^\beta\right) \quad (3)$$

この式は R-O モデルの骨格曲線をテンソル表記したもので、 G_0 は初期せん断弾性係数である。ここで、パラメータ α 、 β は以下のように定める。

まず、地盤要素が点 A の応力状態から繰返し単調載荷を受ける場合を考えると、履歴曲線は式(3)の仮想骨格曲線に Masing 則を適用した徐荷・再載荷曲線により構成されるループを描く。このときの履歴減衰を数学的に求めると次式のようになる。

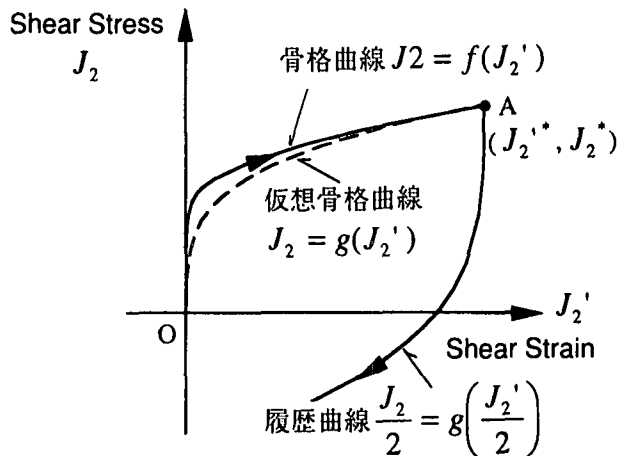


図-1 仮想骨格曲線の概念

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta + 2} \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \quad (4)$$

上式において、 G は点 A における割線せん断弾性係数で、 $2G = J_2^*/J_2'^*$ の関係にある。ここで、 $G/G_0 = 0$ とみなせるような大きなひずみ振幅で繰返し載荷を行った場合の h を $h_{\max}$ とすると、式(4)から次式のような $h_{\max}$ と β の関係が得られる。

$$\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (5)$$

次に、仮想骨格曲線は骨格曲線上の点 $A(J_2'^*, J_2^*)$ を通るという適合条件を式(3)に代入し、これを α について整理することにより次式を得る。

$$\alpha = \left(2G_0 \frac{J_2'^*}{J_2^*} - 1\right) / |J_2^*|^\beta \quad (6)$$

以上により、仮想骨格曲線を規定するためのパラメータは全て定義することができた。ここで、 G_0 と $h_{\max}$ が与えられれば α と β は自動的に、なおかつ一義的に決まるので、計算プログラムにより複合履歴モデルを使用する際に、ユーザーは仮想骨格曲線を意識することなく解析を行うことが可能である。

3. 中空ねじり試験による構成則の検証

複合履歴モデルの妥当性を検証するために、気乾状態の 4 号ケイ砂 ($\rho_d = 16.2 \text{ kN/m}^3$) を用いて、中空ねじり試験を大きなひずみ領域まで実施した。試験によって得られたひずみ振幅依存特性を図-2 に示し、一例として $\sigma_c' = 19.6 \text{ kPa}$ の試験結果に対して複合履歴モデルのパラメータの設定方法を説明する。

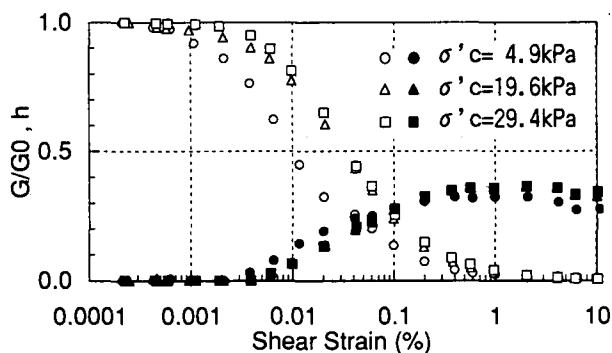
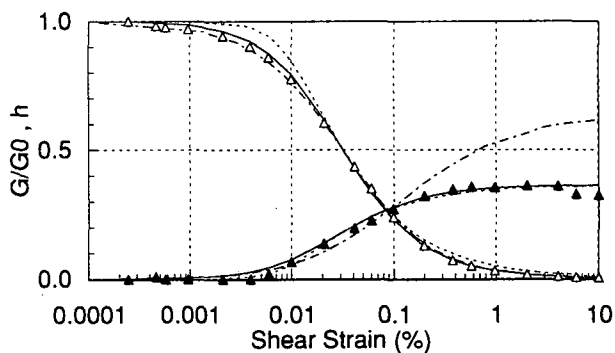


図-2 4号ケイ砂のひずみ振幅依存特性



(a) ひずみ振幅依存特性

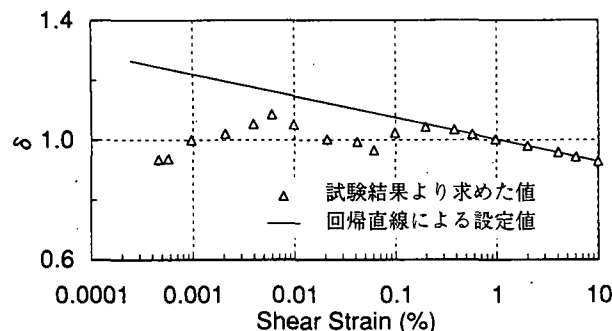


図-3 パラメータ δ のひずみ依存性

一般的に、中空ねじり試験を実施した結果はせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係で整理される。ここでは簡単のために、先に説明した複合履歴モデルの構成則を $\tau \sim \gamma$ の関係に直し、以下のように表す。

$$\text{骨格曲線: } \tau = G_0 \gamma / (1 + |\gamma/\gamma_r|^\delta) \quad (7)$$

$$\delta = A \log_{10} |\gamma| + B \quad (8)$$

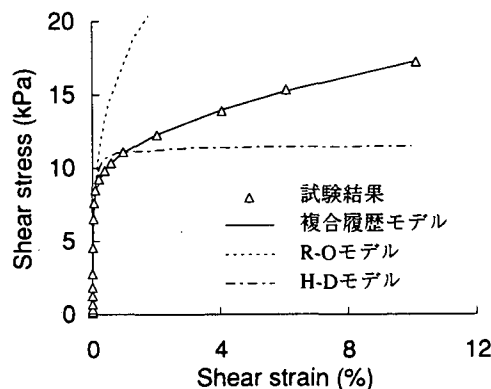
$$\text{仮想骨格: } \gamma = \frac{\tau}{G_0} (1 + \alpha |\tau|^\beta) \quad (9)$$

曲線

ここで、 γ_r は基準ひずみである。また、式(7)をパラメータ δ について解くと次のように表される。

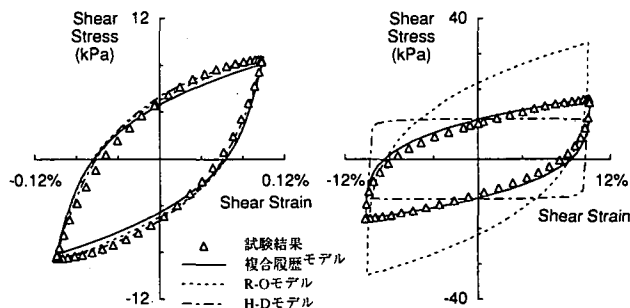
$$\delta = \log_{|\gamma/\gamma_r|} (G_0/G - 1) \quad (10)$$

図-2より γ_r ならびに $G/G_0 \sim \gamma$ 関係が与えられるので、式(10)により $\delta \sim \gamma$ 関係を求めると図-3に示した Δ 印のプロットが得られる。前述のH-Dモデルは δ が γ に依存せず、常に $\delta=1.0$ とした場合の構成則であるのに対し、複合履歴モデルでは δ を式(8)で示した γ の関数として定義する。図-3の直線は試験結果のうち、大きなひずみレベルに対して $\delta \sim \log_{10} |\gamma|$ 関係の回帰式を求め、式(8)のパラメータに $A=-0.07$ 、 $B=0.86$ とした場合の $\delta \sim \gamma$ 関係である。



(b) 応力～ひずみ関係

図-4 試験結果のシミュレーション結果



(a) 最大発生ひずみ0.1% (b) 最大発生ひずみ10%

図-5 繰返し載荷時における履歴曲線の比較

中空ねじり試験より $G_0=36\text{MPa}$ 、 $\gamma_r=3.20 \times 10^{-4}$ 、 $h_{\max}=36\%$ と設定し、これをシミュレートした結果を図4に示す。ひずみ振幅依存特性について各非線形モデルの結果を比較すると、非線形モデルの違いによる差異がないように感じられる。しかし、これを応力～ひずみ関係で見ると、ひずみが1%を越える領域では大きな違いが表れており、複合履歴モデルの有効性を確認できる。

また、履歴ループの形状についても着目し、その比較を行った(図-5)。発生するひずみが0.1%程度であれば、非線形モデルによる違いは見られないが、大きなひずみが生じる場合にはR-OモデルやH-Dモデルでは試験結果を十分に表現することは出来ない。

4. 鉛直アレー観測記録のシミュレーション

複合履歴モデルを用いて中空ねじり試験をシミュレートしたところ、試験結果を精度よく再現できた。ここではこの非線形モデルを用い、兵庫県南部地震において高砂発電所（関西電力（株））で観測された鉛直アレー記録のシミュレーションを行う。当該地点の地盤条件および地震計設置位置を図-6に示す。ちなみに、この観測地点は強い地震動を記録したにも関わらず、液状化の影響が比較的少なかったと考えられている。

地表面で観測された加速度記録、ならびに数値解析結果を図-7に示す。また、図-8は深さ方向の最大応答加速度分布である。加速度時刻歴波形について見ると、最大値は異なるが波形の振動数成分と位相特性は複合履歴モデルを用いることにより、実現象をよく表すことができた。

また、加速度の最大値分布については、地盤の非線形特性を表すモデルによる違いがほとんど見られず、定性的に観測記録と一致している。

5. まとめ

本研究では複合履歴モデルを提案し、基本的な検証を行った。今後は著者らが実施している大型振動台を用いた地盤-構造物系の振動実験結果を数値シミュレートすることにより、動的相互作用問題についての適用性を検討する予定である⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

参考文献

- 1) 福岡研一 他：垂直ひずみによる剛性低下を考慮した構造物-地盤相互作用解析に用いる地盤非線形履歴モデルの検討、第52回年次学術講演会概要集 I-B pp.746~747、1997。
- 2) 福岡研一 他：大きなせん断ひずみをうける砂の非線形挙動、第53回年次学術講演会概要集 III-A pp.314~315、1998。
- 3) 志田智之 他：さまざまな応力経路により繰返し荷重を受ける砂の非線形挙動、第54回年次学術講演会概要集、1999。（投稿中）
- 4) 岡本晋 他：レベル2地震動入力時のケーソン基礎の模型振動実験、第25回地震工学研究発表会、1999。（投稿中）
- 5) 坂下克之 他：模型砂地盤の強震時非線形挙動解析、第25回地震工学研究発表会1999。（投稿中）
- 6) 福岡研一 他：地盤-構造物間の相互作用の非線形性を考慮したFEM動的応答解析、第54回年次学術講演会概要集、1999。（投稿中）

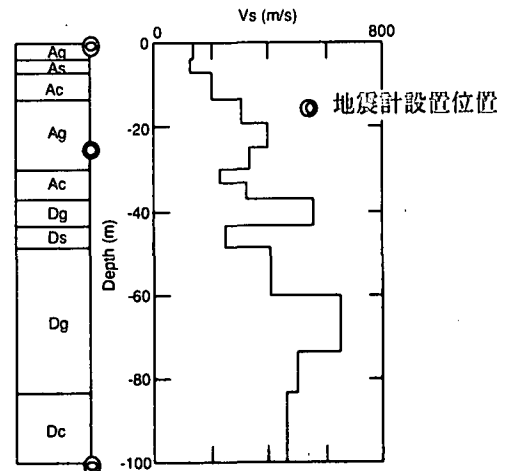


図-6 地盤条件と地震計設置位置

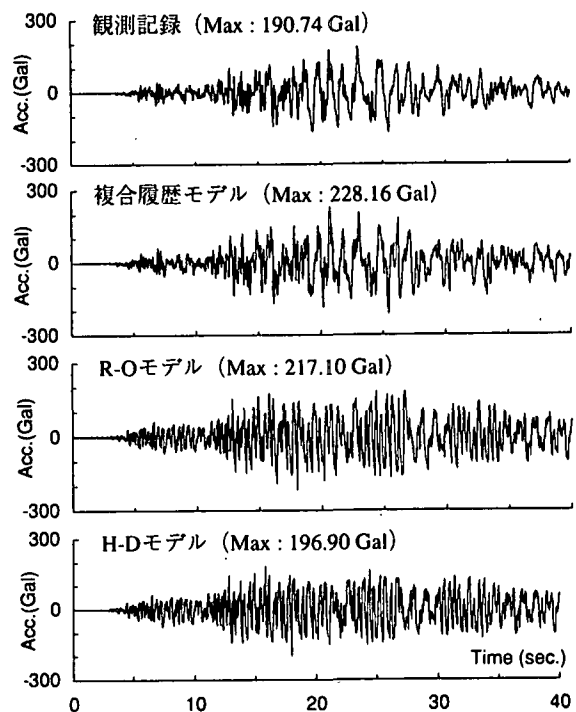


図-7 地表面における加速度時刻歴波形

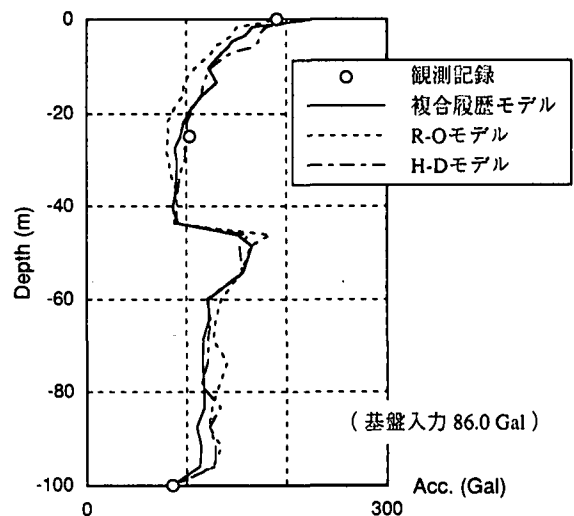


図-8 深さ方向の加速度応答最大値分布