

Ⅲ-A89 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデル

中部電力（株）電力技術研究所

正会員

○熊崎幾太郎

〃

〃

杉山 武

〃

〃

上田 稔

〃

〃

長谷川英明

1. 緒言

等価線形解析法よりも高度な方法論を有しており、基礎地盤の設計実務にも導入される動向にある地震応答解析手法としては非線形時刻歴解析法があるが、この解析法ではいかに優れた方法論および解析コードを用いていても、そこで用いられている各地盤要素の履歴モデルが動変形試験で得られた等価せん断剛性率 G_{eq} および履歴減衰係数 h のひずみ依存性と高精度に適合し、それが履歴曲線関数として正確かつ忠実に解析へ反映され得るようになっていなければ、解析結果の意味も薄れてしまうことになる。そこで、本稿では、動変形試験で得られた G_{eq} および h のひずみ依存性をより正確に非線形時刻歴解析へ反映させることが可能な地盤要素の履歴モデルの提案を行う。

2. 既往モデルの問題点

現在、非線形時刻歴解析コードに導入され、実務レベルでよく用いられている履歴モデルとしては、修正 R-O モデル¹⁾ と修正 H-D²⁾ モデルがある。どちらのモデルにも一長一短はあるが、本稿では、比較的大きいひずみレベルにおける履歴減衰係数の表現が修正 H-D モデルよりも適切である修正 R-O モデルを代表的な履歴モデルとして取り上げ、提案モデルと比較検討する。

修正 R-O モデルのパラメータは、モデルによる G_{eq} および h のひずみ依存性が試験結果とできるだけ広いひずみレベルの範囲で適合するように決められる。図-1 に、石灰灰埋立土の繰返し三軸試験で得られた G_{eq} および h のひずみ依存性データに対して、修正 R-O モデルのパラメータを決定した状況を示す。図-1 は、修正 R-O モデルが試験結果に最も適合した状態を表しており、これよりも適合した状態はいかにパラメータ設定しても得られない。この時、モデルの最大せん断剛性率 G_{max} は 49.183 MPa 、参照せん断ひずみ γ_r は 0.059% 、最大履歴減衰係数 h_{max} は 22.0% である。図-1 のひずみ依存性データの左から 8 番目のひずみレベルの G_{eq} と h を求めるのに用いられた履歴データを図-2 に示す。上記のパラメータのもとで、この履歴データにおけるせん断ひずみの時刻歴データを外力として修正 R-O モデルに入力すると、図-3 の破線で示される履歴曲線が出力され、減衰および最大せん断応力について試験データと有意な差異が認められる。

3. 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデルの提案

修正 R-O モデルで上述のような問題がしばしば起こるのは、瞬間変形係数、すなわち、繰返し荷重が反転する瞬間の変形係数（接線剛性）のひずみレベルに応じた変化が考慮されていないことが支配的な原因である。事実、図-2 から認識できるように、ひずみレベルが大きくなり、供試体が軟化するにつれて、瞬間変形係数は小さくなっており、この現象を適切に定量化して考慮すれば、より実験事実には適合する履歴モデルが得られるものと考えられる。

各ひずみレベルごとの瞬間変形係数は、繰返し三軸試験の各偏差応力レベルにおける 10 サイクル目の履歴ループから、最小二乗法による回帰接線の勾配として求める方法も可能であるが、あまり実用的であるとは言えない。そこで、より簡易に瞬間変形係数のひずみ依

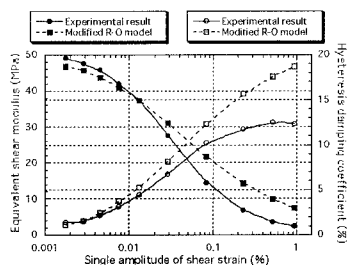


図-1 修正 R-O モデルのパラメータ決定

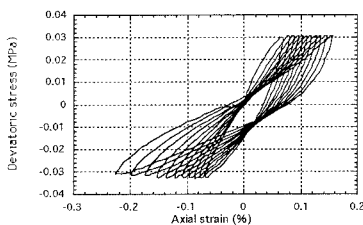
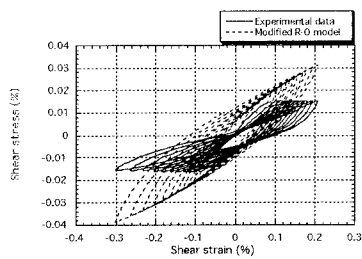
図-2 第 8 偏差応力レベルの履歴曲線
(動変形試験のデータ)

図-3 修正 R-O モデルによる履歴曲線

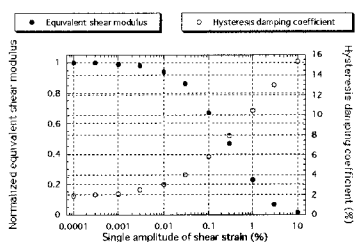


図-4 粘土の動的物性値

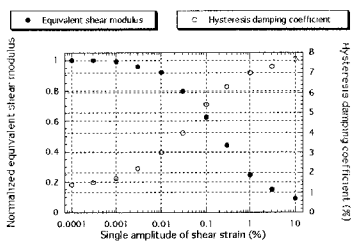
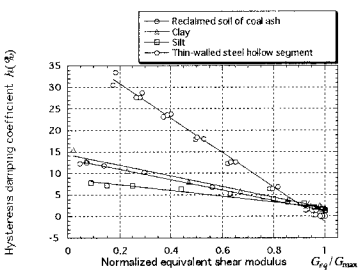


図-5 シルトの動的物性値

図-6 減衰係数と正規化した
等価剛性の関係

キーワード : 履歴モデル, 瞬間変形係数, 動的物性値, ひずみ依存性, 非線形時刻歴地震応答解析
連絡先 : 〒459-8522 名古屋市長区大高町字北関山 20-1 TEL 052-621-6101 Fax 052-623-5117

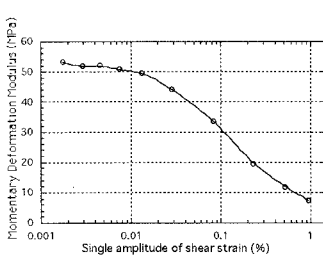


図-7 瞬間変形係数のひずみ依存性

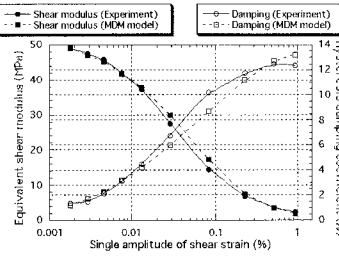


図-8 提案モデルのパラメータ決定

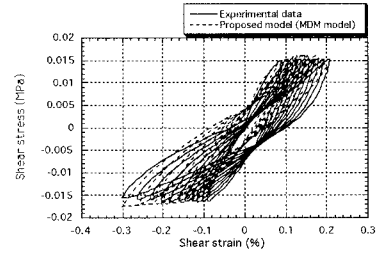


図-9 提案モデルによる履歴曲線

存性が求められる方法を提案する。図-1の実線、図-4および図-5は、それぞれ、石炭灰埋立土、粘土、シルトの動的物性値である。これらの土は同じサイトから採取されたものである。これらの土の h と正規化した等価せん断剛性率 G_{eq}/G_{max} の関係をプロットすると、いづれの土でもその関係は、ほぼ直線的な関係となり、次式で表される。

$$h(\gamma) = -h_{max} \cdot [G_{eq}/G_{max}(\gamma)] + h_{max} \quad (1)$$

ここに、 $h(\gamma)$ および $[G_{eq}/G_{max}(\gamma)]$ は、それぞれ、せん断ひずみレベル γ における h および G_{eq}/G_{max} であり、 G_{max} は瞬間変形係数に該当する。この関係は、土質、間隙比、有効拘束圧、せん断ひずみレベル、繰返し回数にかかわらず、ほぼ成立する³⁾。よって、本研究では、まず、式(1)が正しいと仮定し、これに基づいて、演繹的に瞬間変形係数のひずみ依存性を簡易に求める方法を提案し、履歴モデルを構築する⁴⁾。

前述のように、瞬間変形係数はひずみレベルの増大に応じて変化するので、式(1)のせん断ひずみレベル γ における瞬間変形係数 G_{max} を $G_{MDM}(\gamma)$ とおき、式(1)をこれについて解くと、次式が導かれる。

$$G_{MDM}(\gamma) = h_{max} \cdot G_{eq}(\gamma)_{experiment} / (h_{max} - h(\gamma)_{experiment}) \quad (2)$$

ここに、 $G_{eq}(\gamma)_{experiment}$ と $h(\gamma)_{experiment}$ は、それぞれ、せん断ひずみレベル γ における等価せん断剛性率と履歴減衰係数の試験データである。式(2)により、 $G_{eq}(\gamma)_{experiment}$ および $h(\gamma)_{experiment}$ のデータさえあれば、実験事実と適合する $G_{MDM}(\gamma)$ のひずみ依存性が簡易に求められる。図-7は、図-1の実線で示される $G_{eq}(\gamma)_{experiment}$ と $h(\gamma)_{experiment}$ の試験データを式(2)に代入して求められた石炭灰埋立土の瞬間変形係数のひずみ依存性である。 $G_{MDM}(\gamma)$ のひずみ依存性を考慮した提案モデル (MDM (Momentary Deformation Modulus) モデル) のパラメータ γ_r と h_{max} は、 $G_{MDM}(\gamma)$ のデータと式(3a), (3b), (4a), (4b)を用いて次のように決定する。まず、図-7に示される各せん断ひずみレベルの $G_{MDM}(\gamma)$ を参照しながら、 h の試験データとモデルとの誤差が最小となるような γ_r と h_{max} を求め、この時の h_{max} をモデルのパラメータとして決定する。次に、各せん断ひずみレベルの $G_{MDM}(\gamma)$ を参照しながら、今度は G_{eq} の誤差が最小となるように γ_r を決定する。図-8に、MDMモデルのパラメータを決定した状況を示す。この場合、モデルのパラメータの γ_r は0.091%、 h_{max} は18.0%である。

$$\beta = 2\pi h_{max} / (2 - \pi h_{max}), \quad \alpha = \{2/(\gamma_r G_{MDM}(\gamma))\}^\beta \quad (3a), (3b)$$

$$G_{eq}/G_{MDM}(\gamma) = 1/(1 + \alpha |\gamma G_{eq}|^\beta), \quad h = h_{max} (1 - G_{eq}/G_{MDM}(\gamma)) \quad (4a), (4b)$$

図-7に示される $G_{MDM}(\gamma) \sim \gamma$ 関係と上記の物理パラメータの値を用いた場合に、図-2の繰返し三軸試験データのせん断ひずみの時刻歴を外力として次式(5a), (5b)に入力すると、MDMモデルの履歴曲線が図-9の破線で示されるように描ける。式(5a)は履歴曲線の骨格部を求めるのに用い、式(5b)は履歴部を算定するのに用いる。ここで、 τ はせん断応力であり、式(5b)における γ^* 、 τ^* は荷重の反転した点を意味する。また、 $G_{MDM}(\gamma)$ の値は骨格部を描いている時のみ逐次更新する。 $G_{MDM}(\gamma)$ を逐次更新することは、 $G_{MDM}(\gamma)$ がある一定の値である場合の骨格曲線を逐次乗り換えることを意味する。図-9において、MDMモデルは試験結果の減衰と最大せん断応力をほぼ正確に表現できているのが分かるが、これは、図-8に示される試験データとモデルのひずみ依存性の適合状態が忠実に反映されたものである。

$$\gamma = \tau (1 + \alpha |\tau|^\beta) / G_{MDM}(\gamma), \quad \gamma = \gamma^* + (\tau - \tau^*) \{1 + \alpha (|\tau - \tau^*|/2)^\beta\} / G_{MDM}(\gamma) \quad (5a), (5b)$$

なお、MDMモデルの骨格部、履歴部における時々刻々の接線剛性は、それぞれ、次式で表される。

$$d\tau/d\gamma = G_{MDM}(\gamma) / (1 + \alpha (1 + \beta) |\tau|^\beta), \quad d\tau/d\gamma = G_{MDM}(\gamma) / (1 + \alpha (1 + \beta) (|\tau - \tau^*|/2)^\beta) \quad (6a), (6b)$$

4. 結語

本稿では、地盤要素の動的変形試験で得られた G_{eq} および h のひずみ依存性と極めて高精度に適合でき、より正確かつ忠実に G_{eq} と h のひずみ依存性を非線形時刻歴解析へ反映させることが可能な履歴モデルを提案した。

提案モデルは、ひずみ硬化挙動のみでなく、ひずみ軟化挙動も表現可能である。また、提案モデルで設定しなければならない物理パラメータは、修正R-Oモデルと同じく3つだけであり、パラメータの物理的な意味の解釈とモデルの扱いは非常に簡単であって、実務に供しやすい。それでなくかつ、石炭灰埋立地盤のような特殊地盤も含め、種々多様な地盤の動的物性のひずみ依存性や履歴曲線を比較的柔軟かつ正確に表現できるという点が提案モデルの特徴であり、これにより、非線形時刻歴地震応答解析の信頼度の向上が期待できる。

今後は、提案モデルを組み込んだ非線形時刻歴解析コードによる実地盤の地震応答解析および液状化判定の事例や提案モデルが土要素のみではなく、岩盤要素や鋼構造部材の適切な履歴モデルとしても適用可能であることを報告する予定である。

参考文献

- 1) 龍岡文夫、福島伸二： 砂のランダム繰返し入力に対する応力-歪関係のモデル化について (1)、生産研究, Vol. 30, No. 9, pp. 26-29, 1978. 9.
- 2) 龍岡文夫、福島伸二： 砂のランダム繰返し入力に対する応力-歪関係のモデル化について (2)、生産研究, Vol. 30, No. 10, 1978. 10.
- 3) Hardin, B. O. and V. P. Drnevich: Shear modulus and damping in soils, Design equations and curves, J. SMFD, Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM 7, pp. 667-692, 1972.
- 4) 熊崎幾太郎： Chaos in Dynamic Deformation Properties of Nonlinear Elements and Prediction of their Constitutive Relations, 博士論文 (京都大学), 1998. 3.