S字型履歴曲線を有する土の応力~ひずみモデルとその標準パラメータの設定

鉄道総研 〇野上 雄太 室野 剛隆

 (γ_a, τ_a)

せん断ひずみ

骨格曲線

1. はじめに

土の繰り返し載荷試験よりせん断応力τ~せん断ひずみγ関係を求めると、せん断ひずみγが1%前後から履歴減 衰hが低下する場合がある.これはひずみが小さいとτ~γ関係は紡錘型の形状を描き,ひずみと共に履歴減衰は 大きくなるが、ひずみが大きくなると、τ~γ関係はスリップ状の形状を示し、その結果履歴減衰が大きくならな いためである.そこで、本研究では、Masing 則の相似則んをひずみγの関数として定義することでスリップ形状を 表現できる履歴モデル(GHE-S)を提案する.また、繰り返し載荷試験が行われない土層のための標準パラメータ を設定した. せん断応力*τ*

2. GHE-S モデルの概要¹⁾

骨格曲線は、微小ひずみからピーク強度に至るまで広いひずみ領域で実験値 にフィッティング可能な GHE モデル²⁾を用いる. このモデルには $C_1(0), C_2(0),$ $C_1(\infty)$, $C_2(\infty)$, α , β という 6 個のパラメータが存在し、土の繰返し載荷試 験から得られたせん断剛性比G/G₀~せん断ひずみγ関係から算定可能である. 次に履歴曲線について述べる.通常の Masing 則は、図1に示す骨格曲線上の 除荷点 A から除荷されると、相似比 λ=2 倍に拡大した骨格曲線を履歴曲線と して、原点に対称な点Bまで履歴を辿るというものである.しかし、対称点B に戻るためには、点Bにおいてんが2であれば良い.特に、A点から除荷され て B 点に至るまでに、相似比 λ を 2→ α →2 と変化させると、履歴曲線がスリ ップ形状を示す. つまり, 除荷点 A から対称点 B まで相似比Aをひずみ yの 関数(相似関数 $\lambda(\gamma)$)として定義し、繰り返し載荷試験から得られた $h \sim \gamma$ 関 係を満足するように、相似関数 λ(y)を決定することにより、室内試験から得 られた実際の土の非線形特性を精度良く追跡することが可能になる.なお,相 似関数 λ(γ)には図1の下に示す2次関数を採用した. 除荷時の接線剛性につ いては、初期剛性G。として定義するのが一般的であるが、吉田ら³⁾は要素実 験から除荷時の接線剛性も非線形性を示すとしており、除荷時接線剛性を提 案している.よって、本研究でも吉田らの式を採用する.以上のような履歴 モデル(GHE-S)の試算例として、漸増した2Hzの正弦波を入力した計算結 果を図2に示す.ひずみγが小さい間は紡錘型の履歴を描いているが、ひず みγが大きくなるとともにスリップ型の形状を表現できている.

GHE-Sモデルは歪みとともに変化 せん断ひずみ Masing 則における相似比 λ の影響 図1 判らわ Ч С -0.02 0.02 -0.0 せん断ひずみ **図2** 試算例

<u>従来は一定 2</u>.0

3.標準パラメータの設定

2章で示したモデルを適用する際,現地の土の動的な変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)や強度特性(粘着力c,内部摩擦角 ϕ)が必要である.しかし,設計

実務においては、解析対象となる地盤の全土層にわたって詳細に試験されることは少なく、応答に大きな影響を与 える可能性のある土層などに絞って実施されることが多い.そこで、試験値が得られない土層に対して本モデルを 適用するために, GHE-S モデルの標準パラメータを定める.標準値の設定にあたっては, GHE-S モデルのパラメー タの設定に必要な変形特性と強度特性の両者が得られている 20 試料(砂質土:5,粘性土:15)の試験結果を用い た. これらは、様々な土質、様々な拘束圧下の非排水条件で実施されたものである.

(1) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係: 要素試験の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係において, $G/G_0 = 0.5$ となる時のひずみ(以下, 規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ と呼ぶ) で横軸を正規化した $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係は、図3に示すように、様々な拘束圧や土質条件で実施された試験結果が含 まれているにも関わらず,狭い範囲の曲線で表現される.このことから,本研究では、 γ_{05} で正規化した $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{05}$ 関係は土質や拘束圧によらず一定であると仮定し、室内試験より得られた $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{05}$ 関係に GHE-S モデルをフィ ッティングし、平均値をパラメータの標準値として設定した.なお、本来であれば GHE-S モデルは、せん断強度の

キーワード 非線形履歴モデル,逆S字形状,履歴曲線

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (財)鉄道総合技術研究所 耐震構造 TEL042-573-7394



概念を取り入れ、せん断強度 τ_f 及び初期せん断剛性 G_0 から求まる規準ひずみ $\gamma_r = \tau_f/G_0$ で横軸を正規 化すべきである.よって、単純に $\gamma_{0.5}$ を用いて横軸を 正規化すると、せん断強度の概念が欠落してしまう. そこで本研究では、全20試料から γ_r と $\gamma_{0.5}$ の関係を 調べ、 $\gamma_r = 2.5\gamma_{0.5}$ の関係を導き出し、これを用いて せん断強度の概念を取り入れた.具体的には、横軸 を γ_r で正規化した場合には、 $\gamma \rightarrow \infty$ のとき、 $C_2(\infty)=1.0$ となるが、 $\gamma_{0.5}$ で正規化した場合には、 $C_2(\infty)=2.5$ が得られることになる.よって本研究では、 $C_2(\infty)=2.5$ とすることで、横軸を $\gamma_{0.5}$ で正規化しても、



せん断強度の概念が入るようにした.設定した標準パラメータを用いて描いた $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係を図3に併記する. (2) $h \sim \gamma$ 関係: $G/G_0 \sim \gamma$ 関係と同様に,規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ で横軸を正規化した $h \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係について標準値を設定 する. $h \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係は, $h = h_{max}(1 - G/G_0)^{\beta}$ で示す形でモデル化し, h_{max} , β の2つのパラメータでフィッティングし た.本研究では,一般的には,粘性土よりも砂質土の方が h_{max} は大きい傾向にあることを勘案し,砂質土と粘性土 の2種類に分類して標準値を設定した. $h \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係の平均曲線と検討に用いた試料及び既往の文献から読み取っ た $h \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係を重ね描いたものを図4,図5に示す.図5の粘性土は既往の研究も含めてばらつきが小さく,図4 の砂質土ではばらつきが大きい.しかし,いずれも設定した標準値は既往の研究も含めた平均的な曲線を示してい ることが分かる.なお,設定した $h \sim \gamma/\gamma_{0.5}$ 関係は, h_{max} に漸近する形となっているが,ひずみが1%程度を超えると hは減少してくる.そこで,本研究では, γ が1%を超えたらhを単調に減少させている.

4. 地盤応答解析

GHE-Sモデルを用いて地盤の1次元時刻歴動的解析を行なった.用いるパラメータは,全層に対して実測 した $G \sim_{\gamma}$, $h \sim_{\gamma}$ 関係よりパラメータを決定した場合(Case①)と全層に対して標準パラメータを用いた場合 (Case②)について検討を行なった.規準ひずみは両者とも実測値を用いた.入力地震動は,鉄道構造物等設計 標準によるL2地震動スペクトルII⁴を基盤に入力した.解析結果の例として,図6にS波速度分布,最大加速度, 最大変位分布を示す.Case①とCase②は,ほぼ同じ結果が得られており,標準パラメータは適切に設定されて いると考えられる.なお,解析は3地盤に対して実施したが,Case①とCase②は概ね同じ結果が得られている ことを確認している.

5. まとめ

大ひずみ時に現れる場合がある逆S字型の履歴形状を表現できるGHE-Sモデルを提案した.また,現地の土の動 的な変形特性や強度特性の試験値が無い土層に対しても本モデルを適用するために標準パラメータを設定し,地震 応答解析の結果,概ね妥当な標準パラメータを設定できたと考えられる.

参考文献

- 1) 室野剛隆,野上雄太:S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係,第12回日本地震工学シンポジウム, pp.494-497, 2006.
- 2) Tatsuoka, F. and Shibuya, S. : Deformation characteristics of soils and rocks form field and laboratory tests, Theme Lecture 1, *Proc. of Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.101-170, 1992.
- 3) 吉田望,澤田純男,竹島康人,三上武子,澤田俊一:履歴減衰特性が地盤の地震応答に与える影響,土木学会地震工学論文集 Vol.27, 2003.
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所編,運輸省鉄道局監修:鉄道構造物等設計標準同解説,耐震設計,丸善, 1999.