

GHE モデルと簡易な履歴則を用いた 土の非線形モデルの提案と実験的検証

西村昭彦¹⁾, 室野剛隆²⁾

¹⁾正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

²⁾正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

レベル2地震動を考えた場合には表層地盤の非線形性の影響を精度良く評価することは構造物の耐震設計を考える上で重要な課題の一つである。本研究は、1次元の全応力解析を行うのに必要な土の応力～ひずみ関係について、骨格曲線を GHE モデルで、履歴法則を Masing 則を改良することにより、任意の $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係を満足できるとともに、ピーク強度の概念を取り入れたモデルを提案した。その妥当性について大型せん断土槽を用いた乾燥砂の実験をシミュレーションすることで検証した。その結果、 $\tau \sim \gamma$ 関係のみならず減衰特性についてもモデル化することが必要であり、本モデルが有効であることが検証された。

Key Words: Non-linear shear stress-strain model, GHE model, Masing rule, Shaking table test

1. はじめに

レベル2地震動を考えた場合、表層地盤の非線形性の影響を精度良く評価することは構造物の耐震設計を考える上で重要な課題の一つである。本研究は、1次元の全応力解析を行うのに必要な土の応力～ひずみ関係について既往のモデルを修正することで提案し、その妥当性について大型せん断土槽を用いた乾燥砂の振動実験をシミュレーションすることで検証する。

レベル2地震動に対する地盤の1次元全応力解析では次の①～④までの条件を満足する必要がある。①広いひずみ範囲で室内試験の $\tau \sim \gamma$ 関係を満足できる、②ピーク強度の概念が考慮できる、③減衰特性についても、室内試験 ($h \sim \gamma$ 関係)の結果を満足できる、④パラメータの決定が容易であること。これまで多くのモデルが提案されているが、上記①～④全てを満足しているとは限らない。ここでは、①～④を満足でき、しかも設計実務でも適用可能な簡易な構成モデルを提案する。

2. モデル化の方法

(1) 骨格曲線

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モデルとして、龍岡・澁谷が提案したモデル(GHE)¹⁾を用いる。

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_f}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left(\frac{\gamma}{\gamma_f} \right)}, \text{ または, } y = \frac{x}{\frac{1}{C_1} + \frac{x}{C_2}} \quad (1)$$

ここに、 x, y は正規化ひずみ、正規化せん断応力で、 $x = \gamma /$

$\gamma_f, y = \tau / \tau_f$ である。 γ_f は規準ひずみで、せん断強度 τ_f を初期せん断係数 $G_{\max}$ で除した値 ($\gamma_f = \tau_f / G_{\max}$) である。また、 $C_1(x), C_2(x)$ は補正係数で以下の式によって与えられる。

$$C_1(x) = \frac{c_1(0) + c_1(\infty)}{2} + \frac{c_1(0) - c_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha/x + 1} \right\}$$

$$C_2(x) = \frac{c_2(0) + c_2(\infty)}{2} + \frac{c_2(0) - c_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta/x + 1} \right\} \quad (2)$$

このモデルには、 $c_1(0), c_2(0), c_1(\infty), c_2(\infty), \alpha, \beta$ という6個のパラメータが存在する。原論文では、単調載荷試験に対して、このモデルを適用しているが¹⁾、ここでは、1次元の動的問題を扱うことにするので、繰り返し載荷試験から得られた $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係に対して、このモデルを適用する。応力～ひずみの関係として $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係を用いることには問題点があるものの、これまで $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係についてはデータが豊富なことより、この方法を採用した。各種パラメータの決定方法は次に示す通りである。

- 1) 試験データを横軸 $y (= \tau / \tau_f)$ 、縦軸 $y/x (= G/G_{\max})$ のグラフに整理する ($y-y/x$ 関係の決定)。
- 2) 正規化ひずみ $x = \gamma / \gamma_f = 0$ で、 $dy/dx = 1.0$ の条件から、 $C_1(0) = 1.0$ である。
- 3) $C_2(0)$ は載荷初期の $y-y/x$ 関係での x 軸切片である。ここで、 y/x は割線せん断剛性 G と微小ひずみ時の初期せん断剛性の比であり、 $y/x = G/G_{\max}$ 。
- 4) $C_1(x = \infty)$ と $C_2(x = \infty)$ は大きなひずみレベルにおける $y-y/x$ 関係での y/x 軸切片と y 軸切片である。

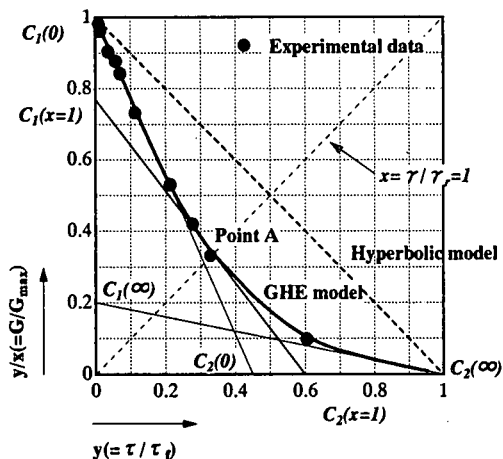


図1 GHE モデルのパラメータ決定例(y-y/x 関係図)

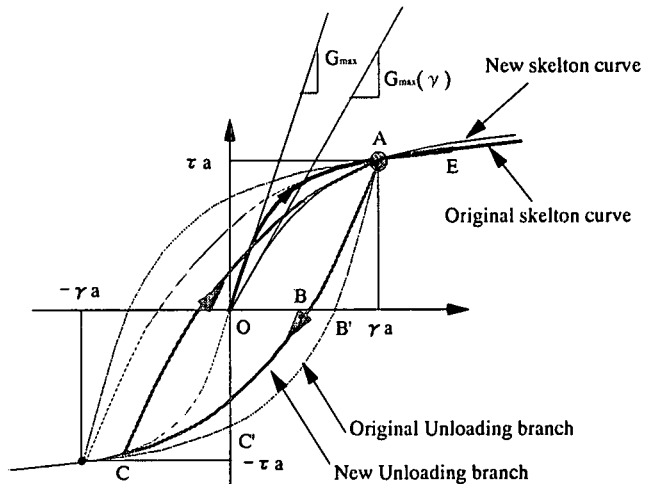


図3 Masing 則の改良方法

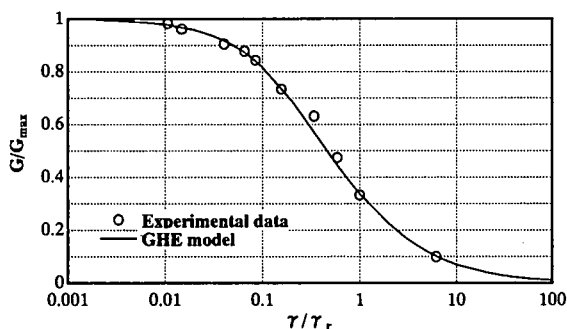


図2 GHE モデルによる $G/G_{\max} \sim \gamma$ の Fitting 例

- 5) 図-1 で右上から左下への対角線 ($x = \gamma / (\gamma_r) = 1$) とデータ曲線との交点 A における実測曲線との接線を求める。
- 6) 4) で求めた接線と y/x 関係での y/x 軸切片と y 軸切片が $x = \gamma / (\gamma_r) = 1$ の時の $C_1(x=1)$ と $C_2(x=1)$ である。
- 7) 5) で求めた $C_1(x=1)$ と $C_2(x=1)$ を式(2)に代入して α , β が得られる。

適用の例を図1と図2に示す。これは霞ヶ浦砂について適用したものである。実験データを広い歪みレベルにおいて適切にモデル化していることが確認できる。

(2) 履歴法則

履歴法則には工学的に便利な法則である Masing 則を改良して用いることとした。式(1)に Masing 則を適用すると、その履歴曲線は式(3)のように得られる。

$$\tau \pm \tau_a = G_{\max} \cdot \frac{\gamma \pm \gamma_a}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r} \right|} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{c_1(0) + c_1(\infty)}{2} + \frac{c_1(0) - c_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha \left\{ \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r} \right| + 1 \right\}} \right\} \\ C_2 = \frac{c_2(0) + c_2(\infty)}{2} + \frac{c_2(0) - c_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta \left\{ \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r} \right| + 1 \right\}} \right\} \end{cases}$$

この式を用いて等価減衰定数を算定すると、双曲線モデル

の改良であること、履歴法則に Masing 則を用いていることから $\gamma \rightarrow \infty$ のときに減衰が大きくなりすぎる。その結果、ひずみが大きい範囲で、実験値と大きくはずれる。そこで、以下のように考える。 $G_{\max}$ が小さいと減衰定数 h が小さく、 $G_{\max}$ が大きいと h が大きくなる。よって、反転点 (γ_a, τ_a) で除荷 (または載荷) が起こると式(3)中の $G_{\max}$ を1つのパラメータとして考えて、目標とする $h \sim \gamma$ になるように $G_{\max}$ を調整し、仮定の骨格曲線を想定する。そして、再度この反転点 γ_a を越えるまではこの $G_{\max}$ を用いる。オリジナルの骨格曲線に達した後は、再び式(1)のオリジナルの骨格曲線に戻る。なお、オリジナルの骨格曲線は変化させない。これにより任意の $h \sim \gamma$ 関係を満足することが可能となる。この考え方を図-3 に示す。なお、今回の試験では γ が 1% を越える領域の $h \sim \gamma$ 関係は得られておらず、室内試験の結果をそのまま外挿している。また、吉田ら²⁾の指摘しているような h が減少する過程は考慮していない。

3. 大型せん断土槽を用いた乾燥砂の振動実験

(1) 実験概要

実験には防災研究所の大型振動台 (12×12m) を使い、その上に深さ 6m、長さ 12m、幅 3.5m の大型せん断土槽を設置した。用いた砂は霞ヶ浦産の砂を自然乾燥状態で実験に用いた。入力波は、ホワイトノイズ (振幅レベルが 100, 200, 400(gal))、振動数 3Hz の振幅漸増型の正弦波、L2 地震を対象とした耐震設計用の暫定波 G0C 波である。本実験はもともと、杭基礎の挙動を検討することも目的としていたため、せん断土槽中には杭基礎模型も埋め込まれている。

また室内試験では、拘束圧を 3 段階変化させた三軸試験により c, ϕ を求め、せん断強度 τ_r をモール・クーロンの破壊規準で算定した。規準ひずみ γ_r は、 $\gamma_r = \tau / G_{\max}$ より算定した。また、繰返三軸試験により $G/G_{\max} \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係を求めた。

表1 土の非線形モデルの設定方法

	解析手法	解析パラメータ	決定方法
1	双曲線モデル1	規準ひずみ γ	$G/G_{\max}=0.5$ となるときの γ として決定
2	双曲線モデル2	規準ひずみ γ	$\gamma_r = \tau_r / G_{\max}$ により算定 拘束圧依存を考慮
3	修正 RO モデル	規準ひずみ γ 最大減衰定数 $h_{\max}$	$G/G_{\max}=0.5$ となるときの γ として決定 想定されるひずみレベルで、 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係に一致するように設定
4	GHE+通常の Masing 則適用	規準ひずみ γ α, β, C_1, C_2	$\gamma_r = \tau_r / G_{\max}$ により算定 拘束圧依存考慮 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係より求める
5	提案法	規準ひずみ γ α, β, C_1, C_2 $h \sim \gamma$ 関係	$\gamma_r = \tau_r / G_{\max}$ により算定 拘束圧依存考慮 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係より求める 室内試験値をそのまま用いる

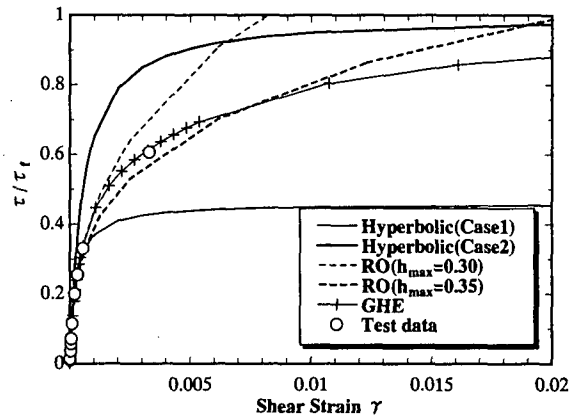


図4 各モデルによる応力～ひずみ関係

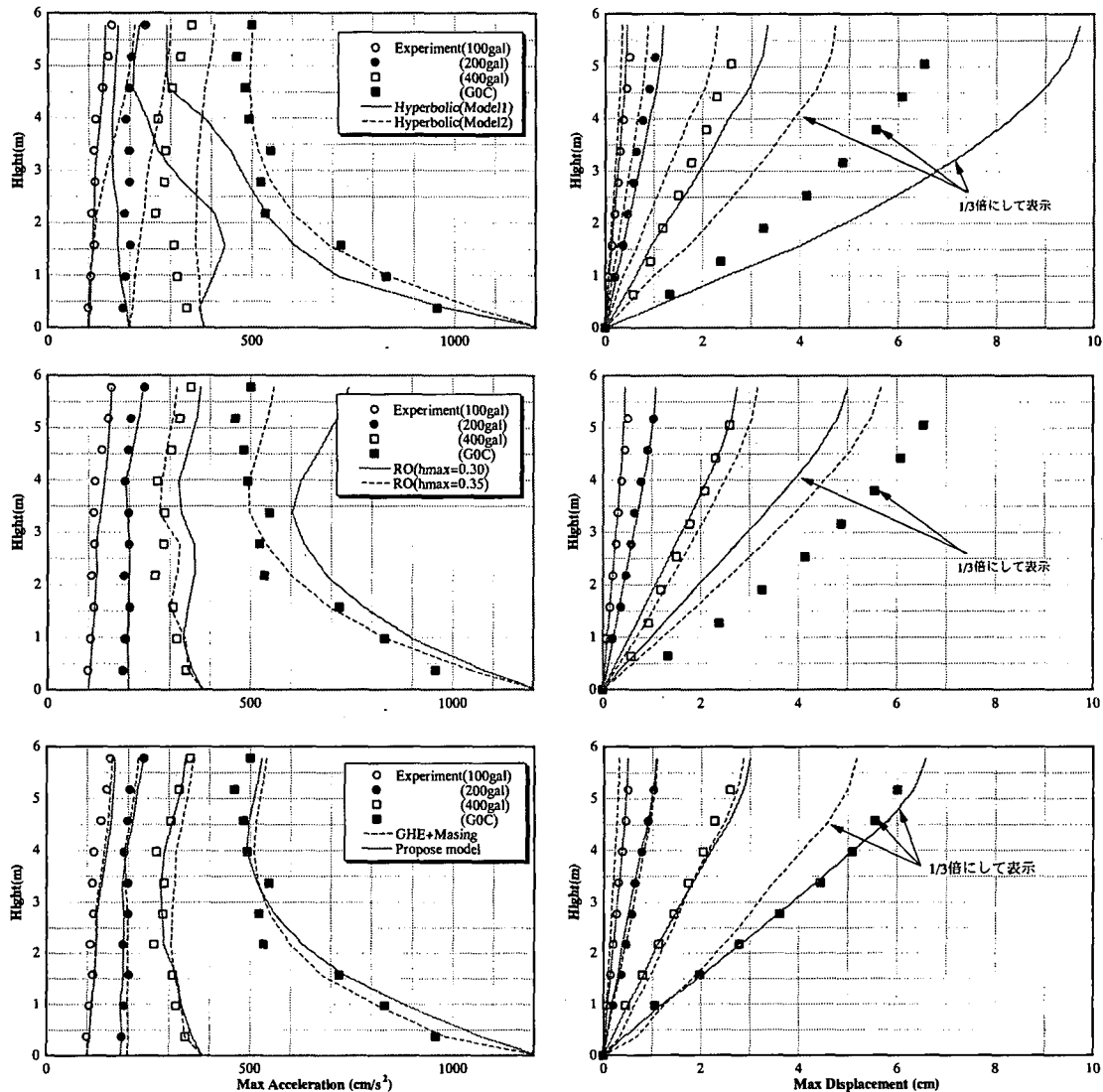


図5 各非線形モデルを用いた場合のシミュレーション結果と実験結果との比較(左:最大加速度, 右:最大変位)

(2) 解析モデルの設定

解析に用いた土の非線形モデルは、表-1 に示す5通りである。なお Case4 と Case5 は骨格曲線は同じで、減衰効果の影響を見たものである。各モデルで室内試験の結果をシミュレーションした結果を図4に示した。双曲線モデル1では微小レベルは室内試験結果とよく一致するが、せん断強度を過小に評価している。双曲線モデル2は小～中ひずみ

レベルでせん断力を過大評価する。RO モデルでは $h_{\max}$ を調整することにより一致度は高くなる。GHE モデルはほぼ全ひずみ領域にわたって $\tau \sim \gamma$ 関係を満足している。

(3) シミュレーション結果

各モデルを用いて計算した最大加速度、最大変位の鉛直方向分布を図5に示す。双曲線モデル1では、 γ_r を $G/G_{\max}=0.5$ となる γ から決定しており、この決め方では、小

ひずみレベルまでは室内実験値の $\tau \sim \gamma$ 関係と合致しているものの、中～大ひずみレベルでは室内実験値から大きくそれ、 $\tau \sim \gamma$ 関係を過小評価する。その結果、100gal 程度の小加速度入力では、変位、加速度とも実験値と概ね一致しているが、入力加速度レベルが大きくなると、応答加速度は小さく、変形を大きく評価している。双曲線モデル2では、中小ひずみ領域では $\tau \sim \gamma$ 関係を実際よりも過大に評価してしまうので、100～400gal 入力では、加速度を過大に、変位を過小に評価している。一方、 γ_r を τ_r から求めたので、 τ_r に近い大ひずみ域では室内試験値に近づくために、G0C 入力では加速度はほぼ実験値と一致している。ただし、Masing 則を適用しているので減衰が過大に評価され、変位を小さく見積もってしまう。修正 RO モデルでは、100～400gal 入力では最大減衰定数 $h_{max}=0.30$ ($\tau \sim \gamma$ 関係で 10^3 レベルで一致)とした場合に、変位、加速度とも実験値と概ね一致し、G0C 入力では $h_{max}=35\%$ としないと加速度は実験値と一致しない。しかし、変位は2割程度も過小に評価している。考慮する地震レベルに応じて h_{max} を設定する必要があり工学的判断が必要となる。骨格曲線を GHE モデルでモデル化し、履歴法則を通常の Masing 則で与えたモデルの場合には、100～400gal 入力まで、加速度・変位とも実験値とよく一致している。しかし、G0C 入力では、加速度は問題ないが、変位が過小に評価されてしまう。これは、骨格曲線が土の室内試験値とよく合致していたので加速度は概ね評価できたが、Masing 則を使ったためにひずみが大きい範囲で減衰を過大に評価したために変位が過小に評価されたと考えられる。提案法では、100～G0C 波入力まで、いずれの入力レベルにおいても、最大加速度、最大変位とも実験値をうまくシミュレーションしている。L1 から L2 地震動まで広い入力レベルにおいて提案モデルが有効であることが確認できた。

(4) 時刻歴応答波形

G0C 入力について、観測波とシミュレーションの加速度応答波形を比較したのが図6である。最大加速度が比較的良好な結果を示した3つのモデル(双曲線モデル2、修正 RO モデル、提案モデル)についてのみ示した。

観測波の特徴としては、入力レベルが大きくなる13秒以降で、非線形化がすすみ、応答値の長周期化が明瞭に見られる。この領域の加速度波形は、400(gal)程度で頭打ちになっており、フラットな形状を有する波形となっている。双曲線モデルでは、波形が頭打ちになりフラットになる特徴は再現されているものの、位相のずれが見られる。修正 RO モデルは、絞のヒレ状の波形となっており、特に $h_{max}=30\%$ の場合には顕著である。これは、ひずみが大きくなるとせん断応力が無限大になりせん断強度の概念が欠落しているためである。最大減衰定数 h_{max} を大きくすると、見かけ上は応

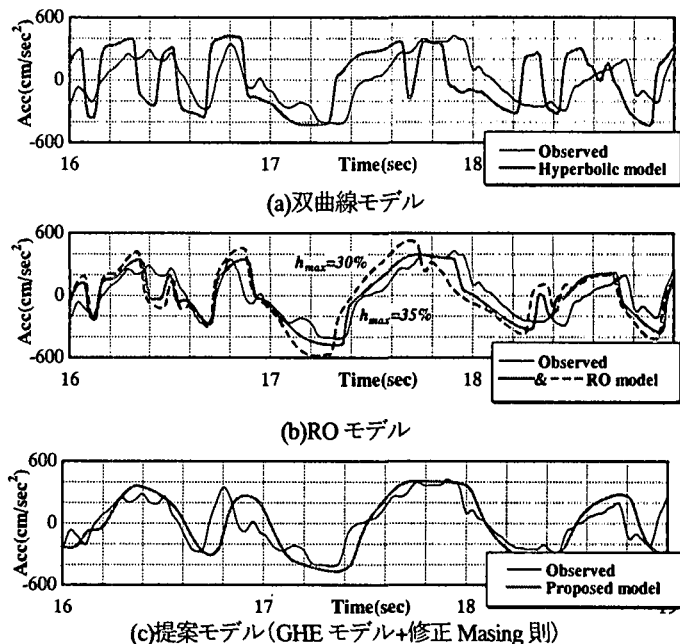


図6 加速度応答波形の比較

力～ひずみ関係の勾配が小さくなるので、波形の形状はフラットに近づく傾向にある。これらに対して、提案モデルは波形の形状、位相ともよく似ており、概ね実験波形の特徴を捉えている。L2 レベル地震に対しても十分適用性があることが確認できた。ただし、主要動以後では、シミュレーション波の方が位相が遅れる傾向があった。工学的には問題にならないと思われるものの、大きなひずみを受けた後の履歴法則の設定に今後改良の余地がある。

4. おわりに

本研究では、1次元の全応力解析を行うのに必要な土の応力～ひずみ関係について、骨格曲線を GHE モデルで、履歴法則を Masing 則を改良することにより、任意の $G/G_{max} \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を満足できるとともに、ピーク強度の概念を取り入れたモデルを提案した。提案法と既存の代表的な土の応力～ひずみモデルを用いた振動実験のシミュレーションを行った。その結果、 $\tau \sim \gamma$ 関係のみならず、 $h \sim \gamma$ 関係を満足する必要があり、両者を満足できるモデルを採用すれば概ね地盤の挙動を正確に捉えることができることが分かった。

謝辞: 本実験を行うにあたり、科学技術庁・防災研究所の大型せん断土槽を利用させていただきました。科学技術庁防災研究所の箕輪氏、東京ソイルリサーチの阿部氏に多大な協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澁谷・龍岡ら: 地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係, 第26回地盤工学研究発表会, 2) 吉田, 規矩ら: レベル2地震動に対する地盤の地震応答解析に関する検討, 第10回日本地震工学シンポ, 1998.