

粘性土の履歴型 Hardin-Drnevich モデルについて

平 間 邦 興 鳥 井 原 誠

Hysteretic Hardin-Drnevich Model of Cohesive Soil

Kunioki Hirama Makoto Toriihara

Abstract

At present, earthquake response analysis methods that include non-linearity of the stress-strain relationships of soil may be broadly divided into the equivalent linearization method and the sequential integration method. The information on the ground necessary for the equivalent linearization method consists of strain dependencies of shear modulus (G) and damping ratio (h). And, the information for the sequential integration method consists of a mechanical model of the stress-strain relationship. As one of the mechanical models, Kokusho proposed the modified Hardin-Drnevich model. However, it is said that h is too large at large strain in this model. The authors therefore tried some dynamic hollow torsional tests of undisturbed soil for study of a mechanical model. Consequently, it was possible to obtain a new model that agrees well with test results by improvement of the abovementioned model.

概 要

現在、土の応力～ひずみ関係の非線型性を考慮した地震応答解析法には、大きく分けて、等価線型化法と逐次積分法の2通りがある。等価線型化法に必要な地盤の情報は、せん断剛性率 (G) と減衰定数 (h) のひずみ依存性であり、逐次積分法に必要な情報は、応力～ひずみ関係の力学モデルである。この力学モデルの一つとして、国生らの提案した修正 Hardin-Drnevich モデルがある。しかし、このモデルには、ひずみが大きくなると h が大きくなりすぎるという不自然さが指摘されている。そこで、今回、沖積粘性土の不カク乱試料を用いた動的中空ねじりせん断試験を実施し、得られた試験結果をもとに、履歴曲線のモデル化について検討を加えた。その結果、上記モデルを改良することにより、実測値との対応がすぐれた新しいモデルを得ることができた。

1. まえがき

現在、土の応力～ひずみ関係の非線型性を考慮した地震応答解析法には、大きく分けて、等価線型化法と逐次積分法の2通りがある。等価線型化法に必要な地盤の情報はせん断剛性率 (G)～ひずみ (γ) 関係と、減衰定数 (h)～ひずみ関係であり、逐次積分法に必要な情報は、応力～ひずみ関係の力学モデルである。

この力学モデルの一つとして、国生¹⁾らの提案した修正 Hardin-Drnevich モデルがある。しかし、このモデルには、ひずみが大きくなると h が大きくなりすぎるという不自然さが指摘されている。

そこで、今回、沖積粘性土の不カク乱試料を用いた動

的中空ねじりせん断試験を実施し、得られた試験結果をもとに、履歴曲線のモデル化について検討を加えた。

2. 試料

使用した試料は、埼玉県三郷市の沖積層地盤で採取した不カク乱試料であり、地質柱状図および PS 検層結果を図-1 に示す。

調査地付近は、旧利根川水系によって形成された沖積低地に位置している。このような沖積低地は、荒川水系にも広がっており、調査地付近で一つとなり南方の東京下町低地に続いている。

当地点での沖積層の厚さは 40 m 前後で、主として軟弱な粘性土が厚く堆積しており、一部にルーズな砂質土

がはさまれている。沖積層の下部は洪積層が分布しており、沖積層と同様に未固結な粘土や砂および砂レキ層が主体となっているが、比較的安定した地盤を形成している。

このうち、今回、動的中空ねじりせん断試験を実施したのは GL-32 m で採取した試料であり、地層名としては、シルト～シルト質細砂 ($I_p=24$) に分類されるものである。

3. 試験方法

試験はすべて CU 条件で、応力振幅を段階的に上げて

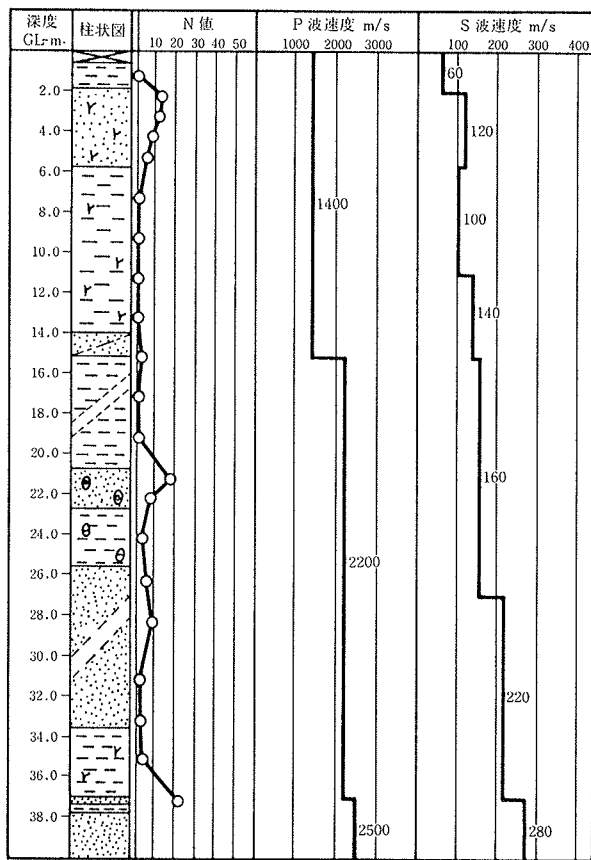


図-1 地質柱状図と PS 検層結果

いく応力制御ステージテストであり、拘束圧は原位置で受けていたと思われる平均有効土被り圧を等方に加えたものである。動的载荷中の振動数は 0.5 Hz、一段階の载荷回数数は10波である。

試験機の機構およびデータ処理システムの詳細は既報²⁾を参照されたい。

4. 結果と考察

図-2 は、動的中空ねじりせん断試験と、参考のために実施した共振法ねじり振動試験で得られた G と γ の関係を示したものである。図中の実線は、式(1)に示す Hardin-Drnevich モデルに、試験結果より求まる定数 $G_0=591.7 \text{ kg/cm}^2$, $\gamma_r=1.49 \times 10^{-3}$ を代入して求めたものであるが³⁾、試験結果との対応は非常に良いようである。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots\dots\dots(1)$$

G_0 : 微小ひずみ時の G

γ_r : 規準ひずみ

図-3 は、図-2 と同じ試験で得られた h と γ の関係を示したものである。図中の実線は、式(2)に示す Hardin-Drnevich モデルに、試験結果より求まる定数 $h_0=18.5\%$ を代入して求めたものであるが²⁾、 G の場合と同様に試験結果との対応は非常に良いようである。

$$h = h_0 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

h_0 : 最大減衰定数

図-4 は、Hardin-Drnevich が提案した式 (3) で示される骨格曲線と各種ひずみ振幅での実測履歴曲線を併せて示したものである。

$$\tau = G_0 \cdot \gamma / (1 + |\gamma/\gamma_r|) \quad \dots\dots\dots(3)$$

図中の実測履歴曲線の頂点は、ほぼ骨格曲線上を移動していることが明らかである。このことは、図-2 の $G \sim \gamma$ の試験結果と Hardin-Drnevich 曲線が良い一致を示

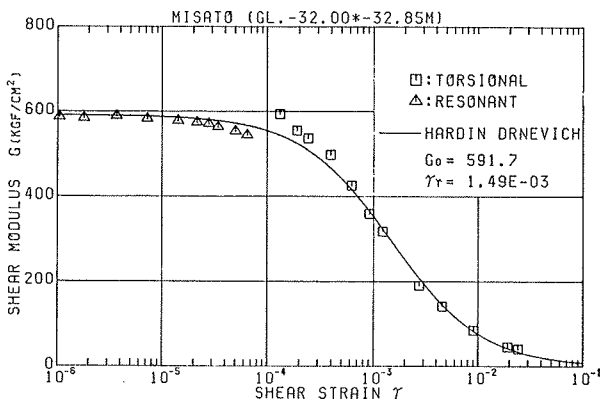


図-2 G と γ の関係

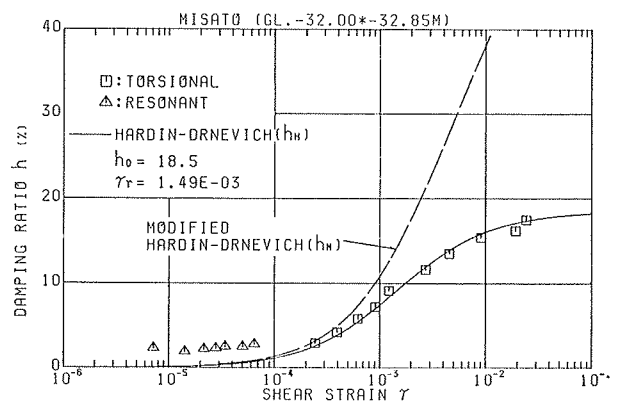


図-3 h と γ の関係

していることと同じ意味であり、当モデルが土の動的変形特性を表現する上で非常に有効であることを示唆している。

本来、Hardin-Drnevich モデルは、履歴曲線を求めるために提案されたモデルではないが、国生らは履歴曲線を求めるために、Masing の法則を用いて式(4)に示す修正 Hardin-Drnevich モデルを提案している。

$$\tau = \tau^* + \frac{G_0 \cdot (r - r^*)}{1 + |r - r^*|/2r_r} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(r^* , τ^*): 履歴曲線の頂点の座標

このモデルを用いて、各種ひずみ振幅での計算履歴曲線を示したのが図-5 である。各履歴曲線のひずみ振幅としては、図-4 で示した実測履歴曲線の場合と同じ値を採用しているが、ひずみ振幅が大きくなるにしたがって、履歴曲線が大きく膨らんでくる傾向があきらかである。

このような計算曲線から得られる h と r の関係を示したのが図-3 の破線 (h_M) である。この曲線は r が小さいうちは実測値との差はあまりないが、 r が大きくなるにつれて、極端に過大な値を与えるようになっている。この点が修正 Hardin-Drnevich モデルの欠点である。

図-6 は、比較的大きなひずみ振幅における実測履歴曲線を実線で、修正 Hardin-Drnevich モデルによる計算履歴曲線を点線で示したものである。この図を参考にして、実測値との対応が良い新しい履歴曲線のモデルを考えてみる。

図-7 は、修正 Hardin-Drnevich モデルによる履歴曲線を補正することにより、新しいモデルを求める手法

を示したものである。この時も、履歴曲線の頂点は骨格曲線上を通るということを前提とする。図中の B 点は、その時のひずみ振幅における図-3 の 2 本の計算曲線上の値 h_M (破線), h_H (実線) を用いて式(5)より求める。

$$\overline{BC} = \overline{AC} \cdot \frac{h_H}{h_M} \quad \dots\dots\dots(5)$$

こういった補正を 1 周期にわたって行なうと、補正後の履歴曲線が図-7 の内側の曲線のように得られる。こ

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)

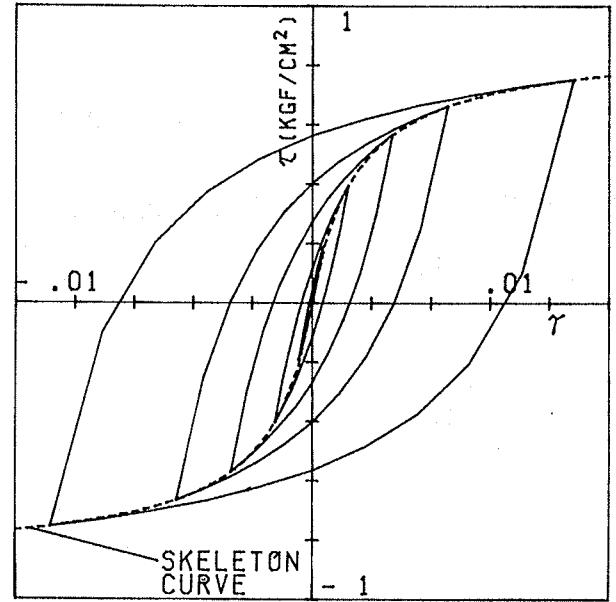


図-5 各種ひずみ振幅での修正 Hardin-Drnevich モデルによる計算履歴曲線

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)

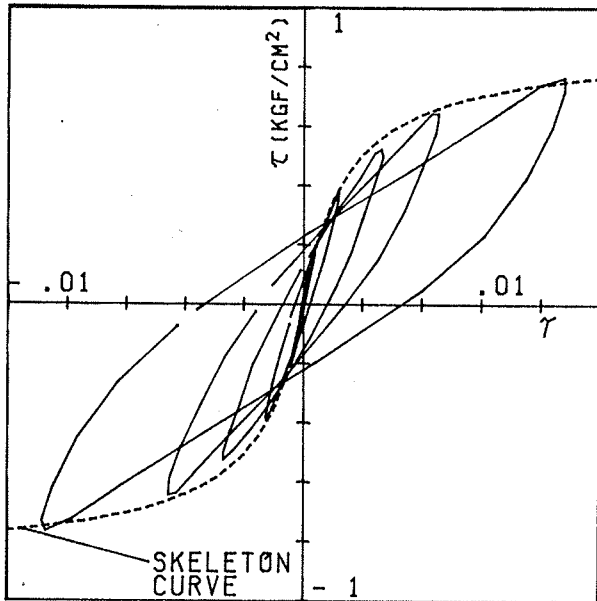


図-4 Hardin-Drnevich モデルによる骨格曲線と各種ひずみ振幅での実測履歴曲線

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)
DATA NO. 16 36

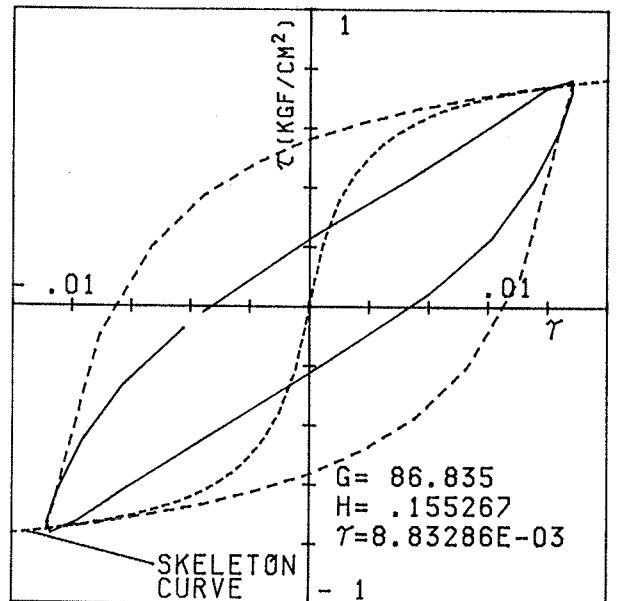


図-6 ひずみ振幅が大きい場合の実測履歴曲線と計算履歴曲線 (修正 Hardin-Drnevich)

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)

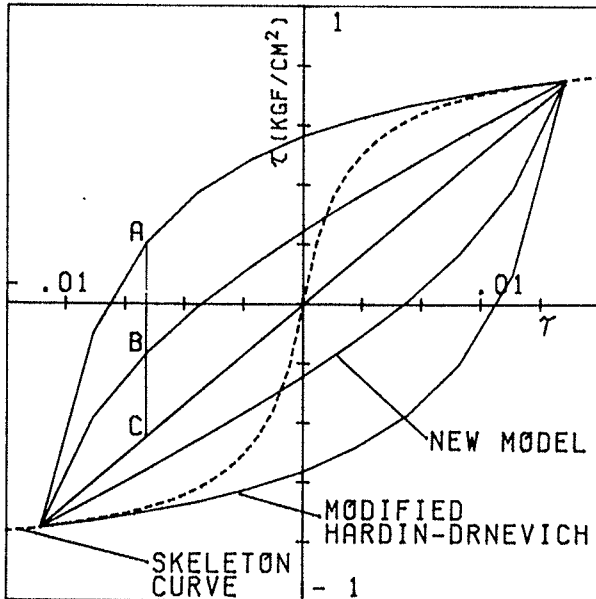


図-7 履歴曲線の補正法

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)

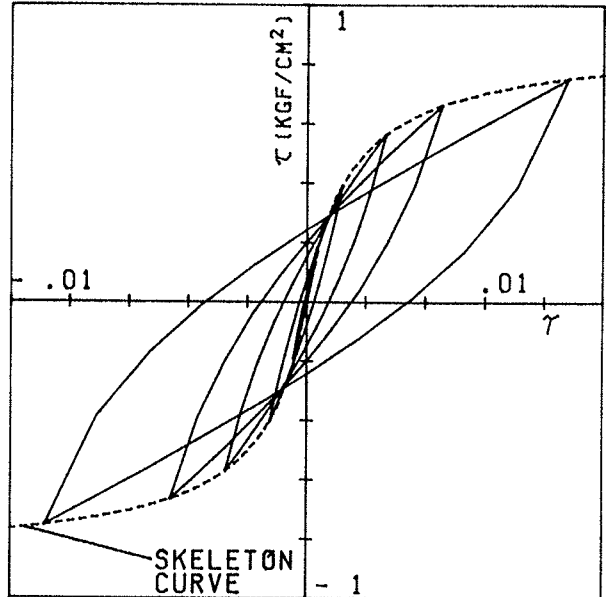


図-9 各種ひずみ振幅での計算履歴曲線 (補正後)

TEST NO. MISATO (GL. -32.00*-32.85M)
DATA NO. 16 36

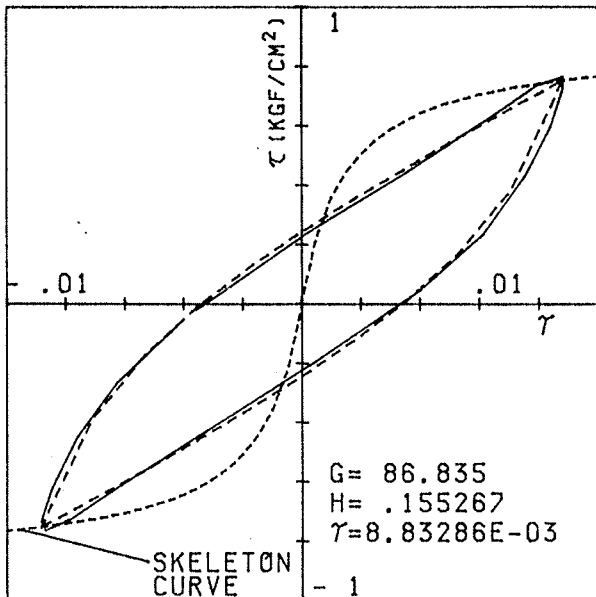


図-8 実測履歴曲線と計算履歴曲線 (補正後)

の補正法によれば、補正後の履歴曲線から求まる h は図-3の Hardin-Drnevich 曲線 (実線) 上の値と等しくなっており、したがって、実測の h と良好な対応を示していることになる。

図-8は、図-6と同じ実測履歴曲線と補正後の計算履歴曲線を比較したものである。両者は非常に良く合っ

ており、この補正法が履歴曲線のモデル化手法として、かなり有効であることを示している。

図-9は、図-4で示した実測履歴曲線と同じひずみ振幅における補正後の計算曲線を示したものである。図-5の修正 Hardin-Drnevich モデルの場合と比較して、実測値との対応が非常に良いことが明らかである。

5. あとがき

この報告で提案した履歴曲線のモデルは、修正 Hardin-Drnevich モデルを補正して求めたものであるが、実測値との対応は非常に良いようである。ただし、このモデルでは、今まで一般的に用いられてきた Masing の法則と乗り移り法則が成り立たなくなるので、ランダム波の解析のためには、何か別の法則が必要となるであろう。この点については今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 国生, 桜井: Modified Hardin-Drnevich モデルについて, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和53. 9), pp. 116~117
- 2) 平間, 鳥井原: セメント混合改良土の動的特性, 大林組技術研究所報, No. 26, (1983), pp. 92~96
- 3) 鳥井原, 平間: 飽和粘性土の剛性率と減衰定数のひずみ依存性について, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和56. 10), pp. 58~59