

(7) 繰返し荷重により劣化する土の復元力のモデル化

武蔵工業大学大学院 永尾 浩一
日本工営(株) 佐久間和弘
武蔵工業大学 片田 敏行

1. まえがき

構造物が変形してそのひずみレベルが大きくなると、それを構成する構造材料は非弾性的性質を示すようになる。地震のように繰返し作用する荷重の場合、構造材料の強度は徐々に低下し、その結果として履歴曲線はその傾きが徐々に低下する。表層地盤や土構造物を構成する土の場合も複雑な非線形復元力特性を示す。土は固体、液体、空気の3相混合体であることから、他の構造材料よりもその復元力特性は一層複雑である。

地盤および土構造物の非線形挙動を数値解析するためには、土の非線形復元力関数モデルを必要とする。それゆえ、土の繰返し載荷時における非線形挙動のモデル化は土質動力学の分野での重要な研究課題のひとつである。最近では、液状化時の側方流動のように大変形な領域までを対象とした解析の必要性も生じている。このため、大ひずみ時にみられる変形特性をも表現できるモデルが重要となっている。

土質工学分野で動的解析に用いられる非線形復元力モデルには、修正Ramberg-Osgoodモデル(R.O.型モデル)や修正Hardin-Drnevichモデル(H.D.型モデル)などがある。これらのモデルでは、まず骨格曲線が規定され、それに基づいて履歴カーブが定められる。そのため、履歴曲線の面積の大きさと定まる減衰性、いわゆる履歴減衰は表現されが、強度低下にともなう骨格曲線そのものは変化しない。それゆえ、強度の低下にともない骨格曲線も変化するような、より自由度の高いモデルが必要となる。

本研究では、土の動的問題で見られる繰返し荷重効果による劣化現象を表現するために、BoucおよびWenらにより提案されたVersatileモデル¹⁾の土質工学分野への適用を試みる。このため、室内土質試験結果から、どのようにしてモデル・パラメータを決定すればよいかを検討することにする。

2. 劣化程度を表すパラメータ

Wenらのモデルでは繰返し効果による履歴曲線の傾きの低下を表すパラメータとしてひずみエネルギー量を用いている⁴⁾。しかし、土、コンクリート、鋼など材料の違いや荷重の性質などによっては、ひずみエネルギー量が必ずしも最適なパラメータであるとは断言できない。荷重の繰返し効果を表すパラメータには、最大ひずみ、累積ひずみ、最大応力などがある。これらのうち最もよく使われるのは最大ひずみであろう。

これに対して、飽和砂の液状化の進行状況が履歴曲線で囲まれた面積で示される非線形ひずみエネルギーの累積状況と類似していることから、地震による地盤の動的破壊現象において最も重要な指標となるのは非線形ひずみエネルギーであるという指摘もある⁷⁾。このような振動時の非線形ひずみエネルギーは履歴エネルギーとも呼ばれる。この履歴エネルギーは振動による土粒子構造の破壊や状態変化に要する塑性仕事量を表し、土の内部で消費される。材料の劣化状況を表すパラメータとしての履歴エネルギー量にはそれなりの物理的根拠があるといえる。本研究では履歴エネルギー量を振動系が劣化にいたるまでの情報源と位置づけて、その蓄積量で劣化程度の進行状況を表すことにする。

3. Versatileモデルの土質動力学へ応用

(1) 応力、ひずみによるVersatileモデルの表現

Versatileモデルでは復元力～変位の関係は次式のように弾性的復元力と塑性的復元力の和で表されている。

$$T = \alpha K u_e + (1 - \alpha) K \phi(u_p(t)) \quad (1)$$

ここで、 T :復元力、 K :ばね係数、 u_e :弾性変形、 u_p :塑性変形、 $\phi(u_p(t))$:せん断復元力の履歴成分、 α :弾塑性の割合

また、土の変形がほぼ塑性変形のみから成るとすれば $\alpha = 0$ となり、 T は次式のように表される。

$$T = K \phi(u_p(t)) \quad (2)$$

このとき、復元力の履歴成分 $\phi(u_p(t))$ が次式のようなVersatile型モデルで表されるものとする。

$$\dot{\phi} = A_0 \dot{u} - \lambda (|\dot{u}| |\phi|^{n-1} \phi + \dot{u} |\phi|^n) \quad (3)$$

(2) モデルパラメータの検討

(3)式で表現された履歴曲線では、 λ の値により様々な曲率の載荷カーブを描くことができるが(図-1)、除荷カーブは線形表現となる。本研究では(3)式で表されたVersatile型モデルを用いることにする。

さらに、ひずみエネルギー量 $e(t)$ を用いて、次式のようにモデルパラメータ A_0 、 λ の値を変化させて、振動中における劣化の進行状況を表現する。

$$A = A_0 - \delta A e^* \quad (0 \leq A \leq 1) \quad \cdots (4), \quad \Lambda = \lambda + \delta \Lambda e^* \quad \cdots (5), \quad e^* = e / e_{\max} \quad (0 \leq e^* \leq 1) \quad \cdots (6)$$

ここで、 A 、 Λ 、 e 、 e^* は $A(t)$ 、 $\Lambda(t)$ 、 $e(t)$ 、 $e^*(t)$ を意味する。また、 δA 、 $\delta \Lambda$ 、 $e_{\max}$ は劣化の進行状況を表すパラメータである。 e の値は繰返し載荷時に入力されるひずみエネルギーの蓄積量を表している。したがって、繰返し載荷によって劣化して、最後には破壊状態になって、それ以上エネルギーが蓄積されなくなる。それゆえ、その最大値 $e_{\max}$ はその材料がどの程度の履歴エネルギー量の吸収能力があるかを示すことになる。

さて、(4)、(5)式を用いて(3)式を書き換えると以下ようになる。

$$\dot{\phi} = A \dot{u} - \Lambda (|\dot{u}| |\phi|^{n-1} \phi + \dot{u} |\phi|^n) \quad (7)$$

(7)式では履歴形状を支配するパラメータ A_0 、 λ を定数ではなく、材料に吸収される履歴エネルギー量で表現された関数 A 、 Λ で劣化状況が表現されている。

(3) 室内土質試験によるモデル・パラメータの決定

(7)式で用いているパラメータは、履歴形状を支配する A_0 、 λ と劣化状況を表す δA 、 $\delta \Lambda$ およびその材料のエネルギー吸収能力を表す $e_{\max}$ の5つである。以下にその求め方を述べる。 A_0 は $\phi-u$ 曲線の初期カーブの傾きを表し、 λ はその曲率を表す値である。まず、解析対象とする土の繰返し載荷試験を行い、その履歴曲線を求める。その最初の載荷カーブである荷重 T ～変位 u 曲線から初期剛性 K_0 を求めて、この値で荷重を除して $\phi-u$ 曲線を求める。この曲線の傾きと曲率から A_0 、 λ の値を定める。次に、繰返し荷重による履歴曲線の割線の傾きの低下状況から δA 、 $\delta \Lambda$ の値を決める。また、 $e_{\max}$ の値は履歴曲線より算出される履歴エネルギーの蓄積曲線の最大値より決められる。

4. 劣化する1自由度系の応答解析

解析例として、中空試験機による繰返し載荷試験結果を用いて飽和砂の非線形復元力特性が(7)式で与えられる非線形復元力モデルのパラメータを定める。次にこれを用いて1自由度系の非線形振動解析を行う。

(1) 飽和砂の繰返し載荷試験

飽和砂より成る供試体に対して、中空ねじり試験機を用いた繰返しせん断試験を行った。その供試体の状態を表-1、載荷条件を表-2に示す。試験結果を図-2に示す。図-3中の四角で示されるカーブは載荷試験結果より得られる初期載荷の $\phi-u$ 曲線である。

(2) モデルパラメータの算出

履歴曲線に関わるパラメータ： A_0 、 λ は次のように求める。 A_0 は1とする。 λ は載荷試験結果より得られる $\phi-u$ 曲線と同じ曲率となるように定める。すなわち、表-3に示す解析条件で、修正Versatile型モデルを用いた応答解析を行って、載荷試験結果より得られる $\phi-u$ 曲線とほぼ同じ曲率の $\phi-u$ 曲線を持つ λ の値を求める。その結果、 $\lambda=1.5$ となった(図-2中の実線)。

劣化現象に関わるパラメータ： δA 、 $\delta \Lambda$ は次のように求める。同じ状態の供試体に対する繰返し載荷試験結果より履歴曲線の割線の傾きの低下状況を求める。この試験結果に対して、(7)式で示される復元力モデルを用いて1自由度系の応答解析を行い、履歴曲線の割線の傾きと履歴減衰係数を求めた。その結果、 $\delta A=0.8$ 、 $\delta \Lambda=2.5$ の値の時、載荷試験結果とほぼ同等な劣化状況となる。このようにして、載荷試験結果から δA 、 $\delta \Lambda$ の値が求められる。 $e_{\max}$ は繰返しせん断試験結果より得られた履歴エネルギーの蓄積曲線の最大値で与えられる。

(3) 地震加速度波入力に対する応答解析

解析条件を表-4に示す。図-3は劣化型モデルによる振動系の応答波形を示し、図-4はその時の ϕ - u 履歴曲線である。図-3aによると応答加速度波形では約12(sec)以後の加速度振幅の減少傾向がうかがえる。これは劣化型モデルの振動系の剛性低下の影響によるものと思われる。また、図-3bによると応答変位波形では振動系の剛性低下に伴う変位振幅の増幅傾向がみられ、変位のずれもうかがえる。履歴曲線（図-4）を見ると、振動系の剛性低下を示す割線の低下がみられる。また剛性低下後の振動系の変位の増幅傾向もみられる。このような傾向は、液状化現象の時に典型的に見られる。このモデルはそれをうまく表現している。

5. あとがき

本研究では、飽和砂の液状化のように、その履歴曲線の傾きや面積が急激な変化あるいは永久変位を伴うような地震動を表す非線形復元力特性をVersatileモデルで表して、地盤応答解析を行うことを提案している。このため、Versatileモデルを応力とひずみで表現して必要なパラメータを室内土質試験より決定する手法と手順を提案した。検証のために、飽和砂の載荷実験をもとにモデルパラメータを定めて、このモデルによる簡易な振動系の応答解析を行った。

以上の結果、このモデルは繰返し荷重によって急激な強度低下をともなう地盤の振動解析に適用できると思われる。今後はこのモデルを液状化する飽和砂地盤の振動解析への適用性を検討したい。

謝辞：本研究で用いた地震加速度記録は運輸省港湾技術研究所で公開されているものを使用しました。記して謝意を表します。

参考文献：(1)Wen, Y. K.: Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, Jour. EM., ASCE, 1975. 8.

(2)Zaiming, L., et. al.: Markovian Hysteretic Characteristics, Jour. EM., ASCE, August, 1990. 8.

(3)Zaiming, L., et. al.: Synthesis and Extension of One-Dimensional Nonlinear Hysteretic Models, Jour. EM. ASCE, 1991. 1.

(4)Baber, T. T. and Y. K. Wen: Random Vibration of Hysteretic, Degrading System, J. EM., ASCE, 1981. 12, Vol. 107. EM6, pp. 1069-1087.

(5)Igarashi, S: Energy-Based Factor of Safety Against Liquefaction, No. 455/ I (pp. 13~23), JSCE, 1992. 10

(6)星谷勝・丸山収：非線形構造系の地震時挙動特性の同定、土木学会論文集 I, No. 386, pp. 397~406, 1987. 10.

(7)片田敏行・阿部幸樹・東山晃：ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考察、第388号 / III-8, pp. 43-50, 1987. 12.

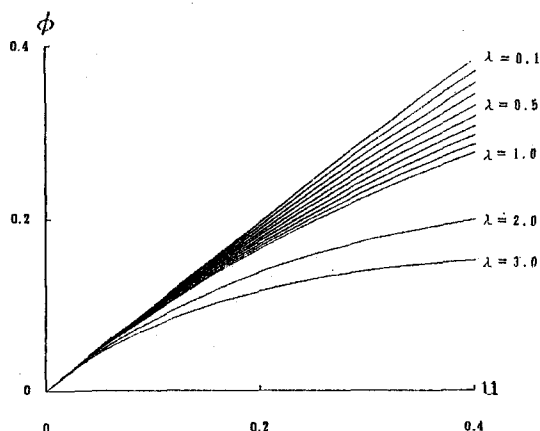


図-1 λ の値による初期載荷 ϕ の違い

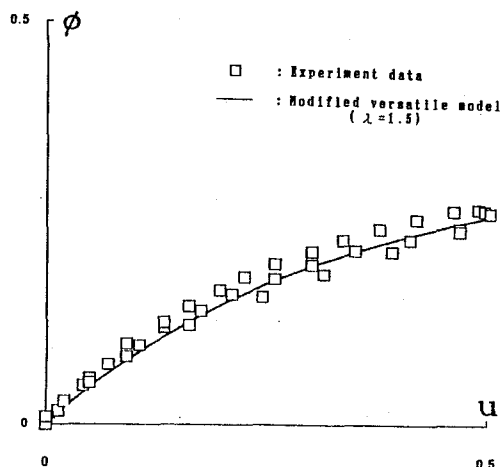


図-2 初期載荷曲線：載荷実験結果、Versatileモデル

表 - 1 飽和砂供試体の状態

砂	豊浦標準砂
状態	飽和
相対密度	63.0 %
B 値	74.0
間隙比	0.757
単位体積重量	1.50 kgf/cm ³

表 - 2 載荷条件

横圧	2.0 kgf/cm ²
背圧	1.0 kgf/cm ²
載荷周波数	1.0 Hz

表 - 3 修正されたVersatileモデルを用いて
求める初期載荷カーブの解析条件

固有振動数 F_0	2.0 Hz
減衰定数 h_0	0.1
A_0	1.0
λ	1.5
入力加速度波	40 cm/sec ²
正弦波-周波数	1.0 Hz

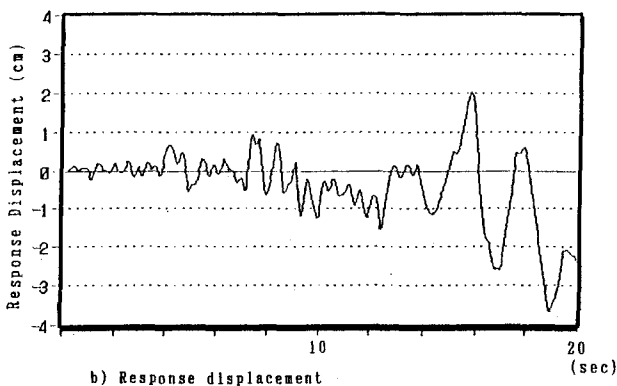
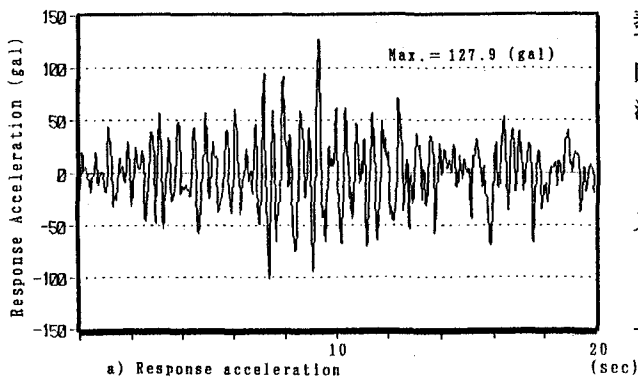


図-3 Versatileモデルを用いた
応答解析結果：応答値

表 - 4 1自由度系の応答解析条件

固有振動数 F_0	2.0 Hz
減衰定数 h_0	0.1
A_0	1.0
λ	1.5
入力加速度波	日本海中部地震 秋田港湾記録 E W 成分 100 cm/s ²

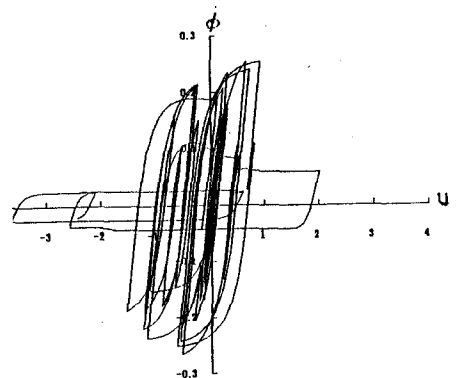


図-4 Versatileモデルを用いた
応答解析結果：履歴曲線