

東京大学工学部土木工学科 正会員 石原研而

佐藤工業(株)中央技術研究所 正会員 ○辻野修一, 吉田望

1. はじめに 水平地盤の非線形地震応答解析に用いる土のせん断応力(τ)—せん断ひずみ(γ)関係をモデル化するのによく行われる方法は、単調載荷に対する τ — γ 関係を骨格曲線とし、除荷した場合にはMasing 則を用いる方法である。骨格曲線にはHardin—Drnevich モデルやRamberg—Osgood モデル(R—Oモデル)がよく用いられる。筆者らは、土の材料非線形として与えられるせん断定数比(G/G_0)— γ 関係および等価粘性減衰定数(D)— γ 関係に上記モデルを適用した結果、 G/G_0 — γ 関係と D — γ 関係の両方を大ひずみ域まで合せるようにモデルのパラメータを決めることが困難であることを示した¹⁾。これは、図-1に示すように材料の G/G_0 — γ 曲線より求めた骨格曲線とMasing 則を用いて計算した等価粘性減衰定数が実験値とあわない、すなわち実験値はMasing 則が成立していないためである。本報では、この点を考慮した履歴法則を提案する。

2. 履歴法則の提案 実験より G/G_0 — γ 、 D — γ 関係を求めるとき、繰返し載荷により得た τ — γ 曲線で、 G/G_0 は除荷点位置に、 D はエネルギー吸収量のみに着目している。この意味で、 G/G_0 — γ 関係は骨格曲線を、 D — γ 関係は骨格曲線より除荷後の τ — γ 関係(履歴曲線)を規定する量である。ここでは、この両者を別々に扱う。すなわち、骨格曲線は材料の G/G_0 — γ 曲線から決める。これを図-2で骨格曲線Aとする。ここで提案する方法では、A上の点(γ_R , τ_R)から除荷した後の履歴曲線として、(γ_R , τ_R)を通り振幅 τ_R の載荷に対する等価粘性減衰定数が材料の D — γ 曲線から決まる等価粘性減衰定数と等しくなる骨格曲線BとMasing 則を用いて決まる履歴曲線Bを用いる。このように履歴曲線を決めることにより、より実験値に近い G/G_0 — γ 、 D — γ 関係を得ることができる。なお、骨格曲線Bを決める条件は2つあるので、モデルには少なくとも2つのパラメータが必要である。

3. Ramberg—Osgood モデルへの適用 R—Oモデルは、骨格曲線を実験値とよく一致させることができる¹⁾ので、これを例とし履歴曲線の決め方を示す。原の修正式²⁾を用いると、骨格曲線は次式で表される。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^m} \quad (1)$$

ここで、 G_0 ：初期剛性、 τ_f ：降伏応力、 α , r ：パラメータ($\alpha = \tau_f / \gamma_r - 1$, γ_f ：破壊ひずみ、 γ_r ：基準ひずみ $= \tau_f / G_0$)である。

履歴曲線では、 α , r を変える。履歴曲線に対応する量に*を付けると、パラメータを決める条件式は、

$$D = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{r^* - 1}{r^* + 1} (1 - \tau_R / G_0 \gamma_R) \quad (2) \quad \tau_R = \frac{G_0 \gamma_R}{1 + \alpha^* \left| \frac{\tau_R}{\tau_f} \right|^m} \quad (3)$$

である。(2)式より r^* が直接求まり、これを(3)式に代入することにより α^* が求まる。なお、ひずみに依存した等価粘性減衰定数は、実験値をスプライン曲線で補間し求めた。図-3に適用例を示す。

4. 地震応答解析例 表-1に示す地盤に、1940 El-Centro N-S 成分の最初の10秒を最大加速度を150 galに正規化して入力する。材料非線形に図-1を用い、提案式による方法(CASE-1)と従来のMasing則による方法(CASE-2)の2つの計算を行った。図-4に材料非線形を比較して示す。CASE-2では全体的にDを小さく評価している。表-2に最大応答値を、図-5, 6に時刻歴応答値および τ — γ 関係を示す。最大応答値は、加速度、変位とも全層でCASE-1の方が小さくなっている。これは、図-4から明らかのように、CASE-2は、減衰を全ひずみ域で小さ目に評価しているためである。また、時刻歴応答値では、最大値の発生する約1.7秒までは骨格曲線上を動くため両ケースともほとんど一致しているが、それ以降はCASE-1の方が減衰が大きいため、応答値は全体的に小さくなり、位相にずれが生じている。

5. むすび 実験値により近い $\tau-\gamma$ 関係の非線形モデルを得る目的で、履歴法則の改良法を提案した。この方法をR-Oモデルに適用した結果得られた $\tau-\gamma$ 関係は、骨格曲線は実材料のよい近似であり、等価粘性減衰は実材料と一致している。単純な地盤に対し全応力解析でこれまでの方法との比較を行った結果、最大応答値、時刻歴応答ともかなりの差が見られた。

表-1 解析地盤

層厚 (m)	初期剛性 G_0 (t/m)	単位体積重量 γ (t/m)
5.0	3000	1.8
5.0	5000	1.9
7.0	8000	2.0
8.0	10000	2.0

表-2 最大応答値

節点	CASE-1		CASE-2	
	加速度 (gal)	変位 (cm)	加速度 (gal)	変位 (cm)
1	262	3.71	308	4.18
2	256	3.36	267	3.66
3	185	2.50	204	2.56
4	149	1.32	146	1.34
—	150	0.00	150	0.00

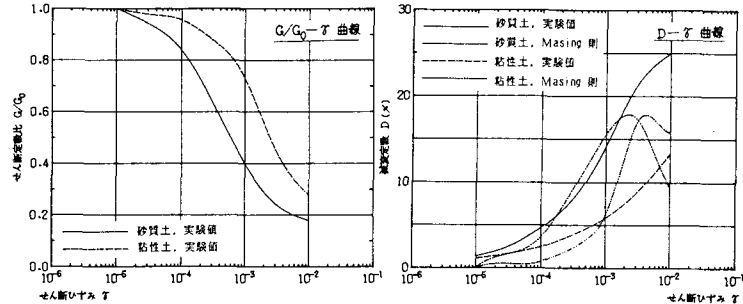


図-1 材料のひずみ依存性とMasing 則による等価粘性減衰定数

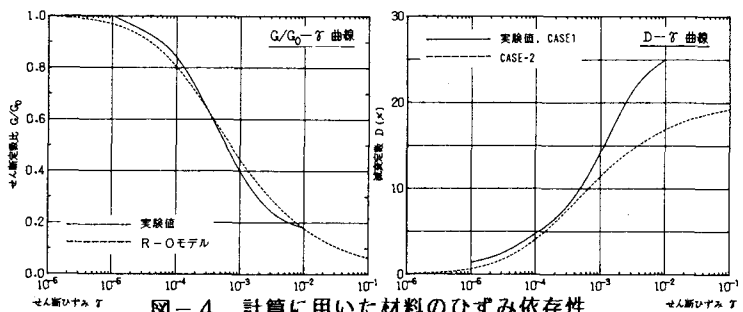


図-4 計算に用いた材料のひずみ依存性

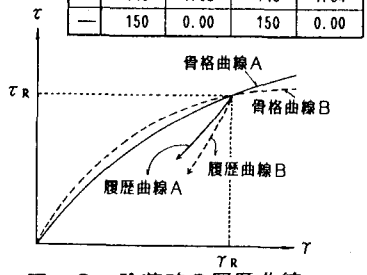


図-2 除荷時の履歴曲線

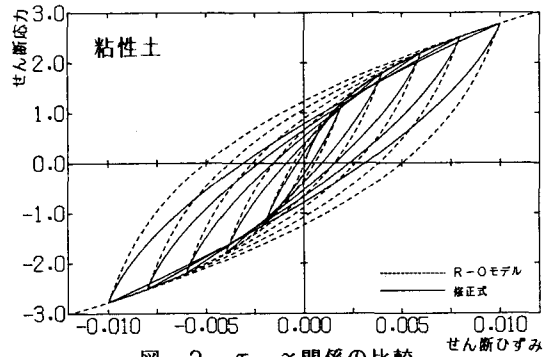
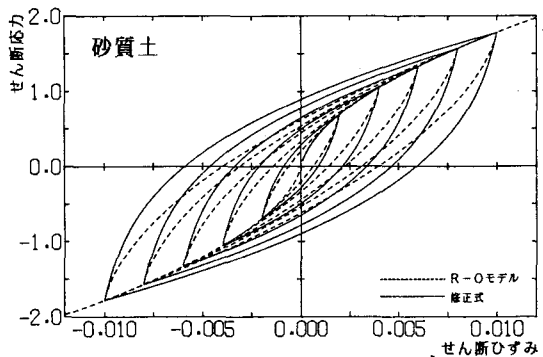


図-3 $\tau-\gamma$ 関係の比較

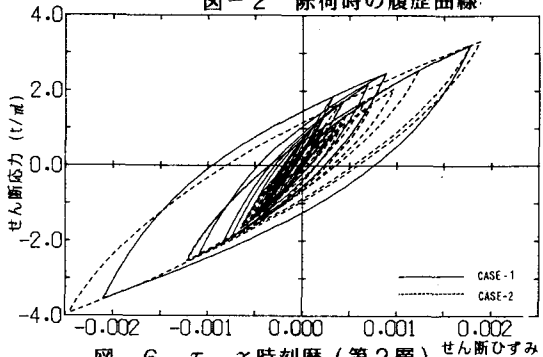


図-6 $\tau-\gamma$ 時刻歴 (第2層)

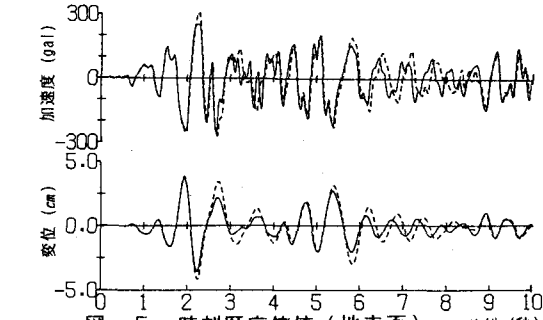


図-5 時刻歴応答値 (地表面)

参考文献 1) 田中勉, 有沢裕, 古田望, 石原研而「地盤の非線形地震応答に与える応力-ひずみモデルの影響」土質工学研究発表会, 1983
2) 石原研而, 木村孟「土工学大系8土質力学」彰国社, 1980