

セメント混合改良土の動的特性 (その2)

—応力～ひずみ関係のモデル化とセメント添加率, 初期含水比の影響—

平 間 邦 興 鳥 井 原 誠

Dynamic Properties of Cement-Mixed Soils (Part 2)

—Simulation of Stress-Strain Relation and Influences of Cement Content and Initial Water Contents—

Kunioki Hirama Makoto Toriihara

Abstract

Predicting what kind of behavior will be shown during earthquake by foundation ground improved by the deep mixing treatment method using cement or lime is very important in carrying out earthquake-resistant design of structures. At present, earthquake response analysis methods 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). Therefore, dynamic laboratory tests of prepared soil were carried out in order to find the effects on G and h of cement-mixed soils of percentage of cement addition (a_w), number of days of curing (t), and initial moisture content. The testing apparatus used were the two kinds of resonance method torsional vibration testing machine and dynamic hollow torsional testing machine. Also, studies were made of a modified Hardin-Drnevich model as a mechanical model of the stress-strain relationship necessary for the sequential integration method.

概 要

セメント等を用いた深層混合処理工法によって改良された基礎地盤が地震時にどのような挙動を示すかを予測することは、構造物の耐震設計をする上で非常に重要な課題である。現在、地震応答解析法としては、大別すると、等価線型化法と逐次積分法がある。等価線型化法に必要な地盤の情報、せん断剛性率 (G) と減衰定数 (h) のひずみ依存性である。そこで、今回、セメント添加率 (A_w)、養生日数 (t)、初期含水比 (W_0) が改良土の G , h にどのような影響を及ぼすかを知るために、調整試料について室内的試験を実施した。利用した試験装置は共振法ねじり振動試験機と動的中空ねじりせん断試験機の2種類である。また逐次積分法に必要な応力～ひずみ関係の力学モデルとして修正 Hardin-Drnevich モデルについて検討を加えた。

1. まえがき

セメント等を用いた深層混合処理工法によって改良された基礎地盤が地震時にどのような挙動を示すかを予測することは、構造物の耐震設計をする上で非常に重要な課題である。

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。

等価線型化法は、あるひずみ振幅における土の繰り返し応力～ひずみ関係を、等価な剛性率と減衰定数を持つ線型モデルで表現し、周波数領域で応答計算をする方法である。計算に必要な情報としては、せん断剛性率 (G) ～せん断ひずみ (γ) 関係と、減衰定数 (h) ～せん断ひずみ (γ) 関係である。

そこで、今回、セメント添加率 (a_w)、養生日数 (t)、初期含水比 (W_0) が改良土の G , h にどのような影響を及ぼすかを知るために調整試料について室内動的試験を実施

した。使用した試験装置は共振法ねじり振動試験機（共振）と動的中空ねじりせん断試験機（中空）の2種類である。

一方、逐次積分法は、応力とひずみの時間履歴を、逐次追跡してゆく方法であり、計算に必要な情報としては、繰り返し応力の時間履歴が与えられた時に、それに応じたひずみの時間履歴を与えることができる、土の応力～ひずみ関係の力学モデルである。この報告では、このような力学モデルの一つである修正 Hardin-Drnevich モデル¹⁾について検討し、そのモデルにおける各種定数の決定法や、試験で得られた応力～ひずみ関係と計算曲線との比較等について考察を加えた。

2. 試験

使用した試料は千葉県佐倉市白井で採取した軟弱な沖積粘性土を乱したものであり、LL=73.2%，PL=34.8%である。粒度組成としては、砂：4.3%，シルト：26.2%，粘土：69.5%である。

初期含水比： $W_0=120, 150, 180\%$ の調整試料にセメント添加率（試料の乾燥土重量に対する重量比）： $a_w=15, 20, 30\%$ となるようにセメントミルクを加え十分に混合した後モールドに入れ、温度：20℃、湿度：80%の恒温恒湿室で所定の養生をおこなった。養生日数は7, 14, 23日である。

3. 試験方法

試験はすべてCU条件で応力制御のステージテストであり、波形は正弦波、拘束圧は等方1.0 kgf/cm²である。中空の振動数は0.5 Hz、一段階の载荷回数は10波である。

共振で使用した供試体の形状は、直径3 cm、高さ6 cmの円柱であり、中空のそれは、外径7 cm、内径3 cm、高さ14 cmの中空円筒である。

図-1は、中空試験中のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴の一例である。せん断応力振幅を段階的に大きく

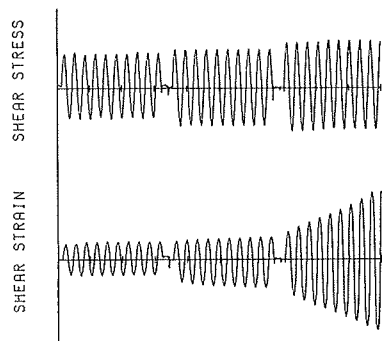


図-1 試験中のせん断応力とせん断ひずみ（中空）

していくと、最終的にはせん断応力振幅が一定であるにもかかわらず、せん断ひずみが急激に増大して破壊に至る様子が明らかである。

4. 骨格曲線と履歴曲線

土の動的変形特性に関する履歴モデルは、一般に、図-2に示すような骨格曲線と履歴曲線で構成されている。Hardin-Drnevichは、この骨格曲線として式(1)に示す双曲線関数を提案している。

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

G_0 : 微小ひずみ時のG

γ_r : 規準ひずみ

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¹⁾らは以下に示す Masing の仮定と式(1)から、履歴曲線として修正 Hardin-Drnevich モデルを提案している。

Masing の第1法則：除荷点と再乗荷点での $G = \partial\tau/\partial\gamma$ は、初期乗荷時のGすなわち G_0 に等しい。

Masing の第2法則：履歴曲線の型は、骨格曲線を τ

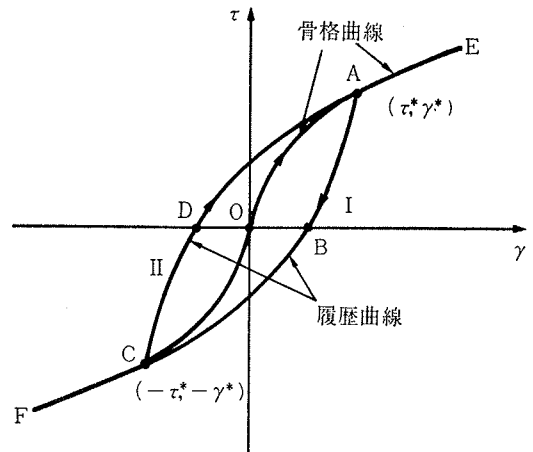


図-2 骨格曲線と履歴曲線

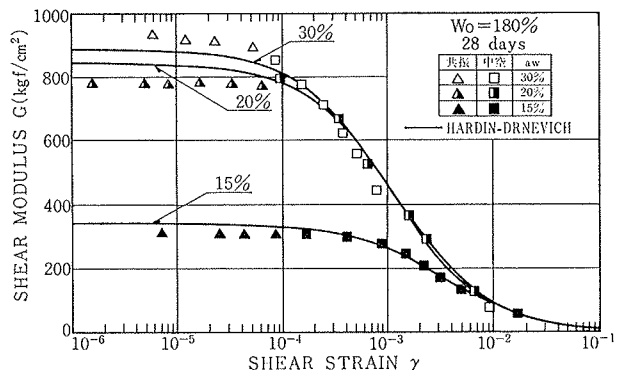


図-3 Gとγの関係

軸、 r 軸の両方に対して2倍したものである(すなわち、図-2のOAを2倍に大きくした曲線がCDAとなっている)。

このモデルによると、任意の点(τ^* , r^*)を反転の点とする履歴曲線は式-(2)のようになる。

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

5. 結果と考察

図-3は、等価線型化法に必要な G と r の関係を各添加率ごとに示したものである。微小ひずみ領域では添加率が增大するほど G が大きくなる傾向が顕著であるが、ひずみが大きくなるにつれて、その差が小さくなっている。図中の実線は、式-(1)を変形した式-(3)で表わされている。

$$G = \frac{G_0}{1 + r/r_r} \dots\dots\dots(3)$$

式-(3)に含まれる定数 G_0 , r_r は、中空の試験結果をプロットした図-4より求めることができる。図中の実線は、式-(3)を変形した式-(4)で示される直線である。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_0 \cdot r_r} \cdot r \dots\dots\dots(4)$$

すなわち、図-4の直線の切片より G_0 が、勾配より r_r が求まる。これらの定数を用いた図-3の計算曲線は、いずれの添加率においても、試験結果と良い対応を示している。従って、Hardin-Drnevich モデルによる計算曲線は、等価線型化法を用いた地震応答解析をおこなう際には有効であるといえることができる。

図-3では初期含水比が一定で添加率を変化させた場合の試験結果を示したが、逆に添加率が一定で初期含水比を変化させた時に G の値がどうなるかを示したのが図-5である。この図は $r=1 \times 10^{-5}$ の時の共振の結果であるが、各添加率とも初期含水比が大きくなるほど G が低下している。しかも、添加率が大きくなるほど、その低下傾向が顕著となっている。従って、初期含水比が大きくなると、添加量を増やしたからといって改良効果が大幅に増大するとは言い難いようである。

図-6は、図-3と同様に等価線型化法に必要な h と r の関係を示したものである。添加率が大きくなるほど h が大きくなる傾向が明らかである。図中の実線は式-(5)に示す Hardin-Drnevich モデルを適用して求めたものである。

$$h = h_0 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \dots\dots\dots(5)$$

h_0 : 最大減衰定数

式-(5)に含まれる定数 h_0 は、中空の試験結果をプロットした図-7より求める。図中の実線は式-(5)で表わされる直線であり、その切片より h_0 を求めることができる。こうして得られた定数を用いた計算曲線は、いずれの添加率においても、試験結果と良い対応を示している。従って、 $h \sim r$ 関係についても $G \sim r$ 関係と同様に、Hardin-Drnevich モデルによる計算曲線は、等価線型化法を用いた地震応答解析をおこ

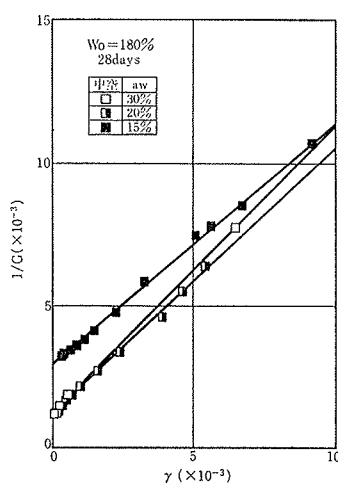


図-4 1/G と r の関係

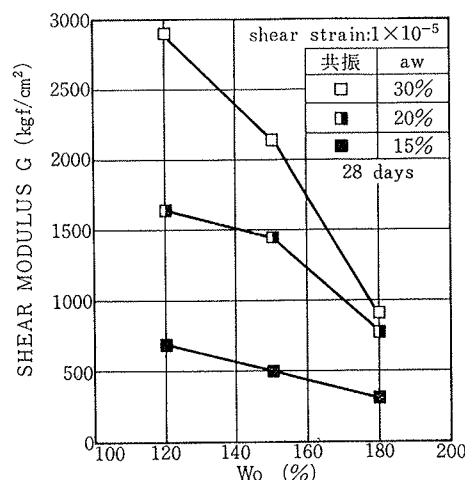


図-5 G と初期含水比の関係

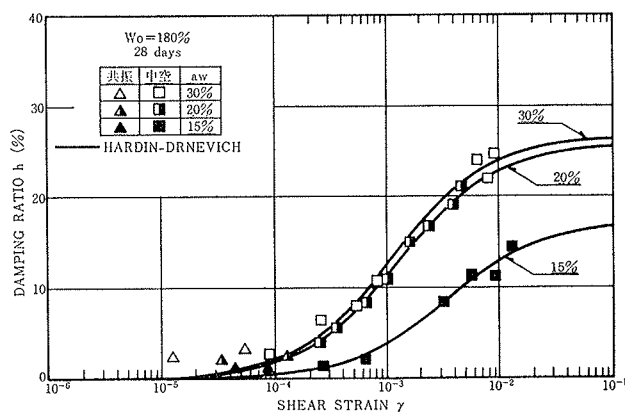


図-6 h と r の関係

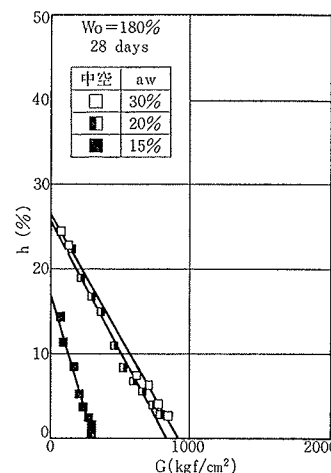


図-7 h と G の関係

なう際には有効であるということができる。

図-8は、式(1)で表される骨格曲線と各種ひずみレベルでの試験結果を併せて示したものである。ひずみが小さい場合の履歴曲線は勾配が大きく、そのふくらみは小さく直線的で、弾性的な様相を強く呈している。ところが、ひずみが大きくなるにつれて履歴曲線の勾配が小さくなり、そのふくらみは大きく、弾塑性的な様相を強く呈している。また、この図で特記すべきことは履歴曲線の頂点の軌跡が、ほぼ骨格曲線上を移動していることである。このことは、等価線型化モデルである図-3の $G \sim \gamma$ の試験結果と Hardin-Drnevich 曲線が良い一致を示していることと同じ意味を持つ。なぜなら、 G の値は履歴曲線の頂点を結んだ直線の勾配で決定されるからである。以上、等価線型化モデルに関する考察をしてきたが、次に、履歴曲線のモデル化について以下に示す。

図-9~12は各ひずみレベルでの試験結果と式(2)で示される修正 Hardin-Drnevich モデルによる履歴曲線を示したものである。実線が試験結果であり、点線が計算曲線である。図-9、10のようにひずみが小さい時は両者は良い一致を示すが、図-11、12のようにひずみが大きくなると計算曲線が膨らんできて実測値と合わなくなってくる。この原因としては、骨格曲線の関数型や、履歴曲線を決定する時の Masing の仮定の妥当性などの他に、式中で用いた各種の定数の値も大きな影響を持っていると考えられる。今回の検討では、小ひずみから大ひずみまで定数は一定値と考えたが、本来はひずみ履歴等によって刻々と変化していくものである。特に、ひずみが大きくなって有

効応力が変化してくると、各種の定数を変化させる必要がより強くなってくると考えられる。

6. あとがき

今回の報告は、特にセメント混合改良土の応力~ひずみ関係のモデル化を主な目的としたものである。採用したモデルは修正 Hardin-Drnevich モデルであるが、ひずみが小さい場合には試験結果との対応は比較的良いようである。しかし、ひずみが大きくなると、当モデル曲線と試験結果が良く合わなくなってくる。この点については、今後の研究課題としたい。

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

TEST NO. 180-20-28

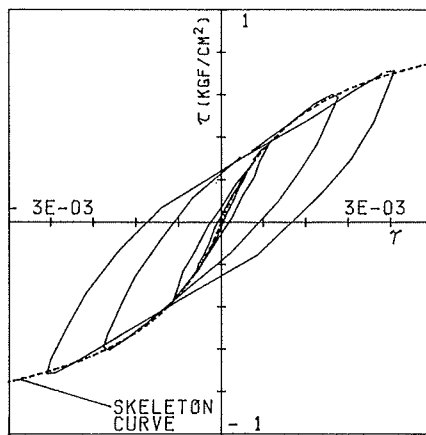


図-8 骨格曲線と履歴曲線の推移

TEST NO. 180-20-28
DATA NO. 880 900

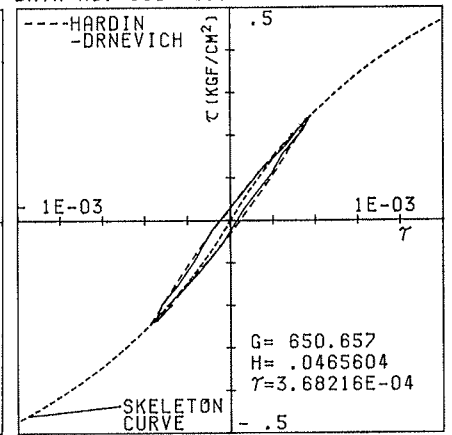


図-9 履歴曲線 ($\gamma=3.68 \times 10^{-4}$)

TEST NO. 180-20-28
DATA NO. 260 280

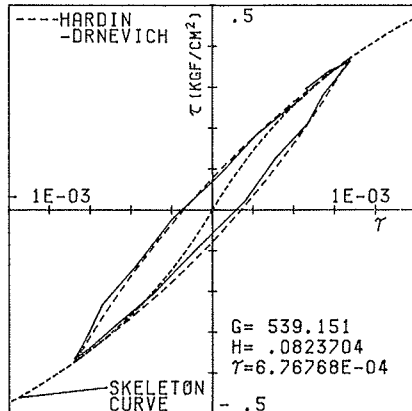


図-10 履歴曲線 ($\gamma=6.77 \times 10^{-4}$)

TEST NO. 180-20-28
DATA NO. 560 580

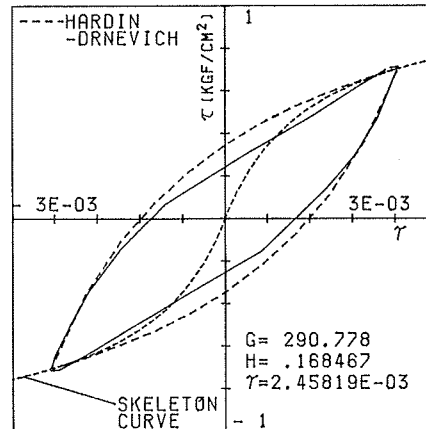


図-11 履歴曲線 ($\gamma=2.46 \times 10^{-3}$)

TEST NO. 180-20-28
DATA NO. 730 750

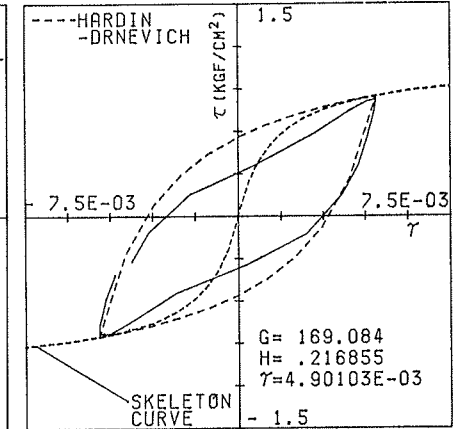


図-12 履歴曲線 ($\gamma=4.90 \times 10^{-3}$)