

(114)プレッシャメータによる軟岩地盤の動的変形特性把握のための模型実験

東京電力(株)	正会員	安田 登
同	正会員	藤谷 昌弘
応用地質(株)	正会員	田中 荘一
同	正会員	西田 和範
同	正会員	○小池 豊

Model Test to Evaluate Dynamic Deformability of Weak Rock Using Pressuremeter

Noboru YASUDA, Masahiro FUJITANI

Tokyo Electric Power Company

Soichi TANAKA, Kazunori NISHIDA, Yutaka KOIKE

OYO Corporation

ABSTRACT

Dynamic deformability of foundation should be estimated when considering the stability of ground against earthquake. Authors have been studying the methods to evaluate it by means of borehole pressuremeter test. As a first step of this study, authors conducted model test using pressuremeter which holds strain measuring system made with hall effect semiconductor, and large scale model ground. As a result, the followings are clarified. It is possible to measure very small strain level($\gamma=10^{-4}$) which is one tenth smaller than that measured with conventional pressuremeters. And dynamic deformability measured with pressuremeter are very similar to that of cyclic triaxial test.

1. まえがき

地震時における地盤の安定性を検討する上で、地盤のせん断弾性係数ならびに減衰定数のひずみ依存性等の動的変形特性を把握することは重要である。筆者らは、軟岩地盤における動的変形特性の把握手法として、原位置のボーリング孔内で実施する繰り返し載荷試験の適用の研究を進めている。その第一段階として、載荷試験時の詳細な周辺地盤の挙動の把握、および孔内載荷試験機の微小変位測定への適用性検討を目的に、均質な軟岩地盤を模擬した材料を用いて大型実験を実施した。

2. 実験装置ならびに実験方法

2-1 孔内載荷試験機

動的変形特性を把握するためには、ボーリング孔壁の微小な変形から比較的大きな変形までを高精度で測定できる試験機が必要である。実験に用いた試験機は、Clarkeらによって開発された軟岩用セルフボーリング型プレッシャメータ¹⁾の改良型である(図-1、表-1)。変位は3本の角型のアームに取り付けられたホール効果素子の出力電圧から求められ、1/1000mm程度の分解能を有する。また、セルフボーリング型のため、測定変位の誤差の一因となるゴムパッカーの厚さは3.5mmときわめて薄い。

表-1 セルフボーリング型プレッシャメータ (RSBP) の諸元

ゾンデ外径	73.6mm
載荷部分長	450mm (直径長さ比 1:6.1)
加圧能力	200kgf/cm ²
加圧媒体	油
測定変位量	4mm (孔壁面のひずみ約10%)
変位計位置	パッカー一部中央
変位計形状	幅1cm×長さ5cm、3本、120°展開
パッカー材質	ゴム漬けナイロン繊維
パッカー厚	3.5mm
変位検出方法	ホール効果素子
変位分解能	1/1000mm程度
掘削方法	先端ビット回転泥水循環方式
ビット回転	地上部ボーリングマシン

表-2 模型地盤の諸元

配合 (1m ³)	粉碎泥岩:砂 :固化剤:水 230kg :700kg:180kg :597kg
湿潤密度	1.75g/cm ³
含水比	45%
強度	qu≒45kgf/cm ²
大きさ	直径 80cm 高さ100cm 円筒状
試験孔	φ75mm、モールド仕上げ、削孔仕上げ

2-2 模型地盤と測定システム

均質な軟岩地盤を模擬した材料²⁾の配合、基本物性等を表-2に示す。模型地盤は直径80cm、高さ100cmの円筒状であり、載荷時の地盤内変形挙動を把握するため、防水型のひずみゲージを図-2に示す位置に埋設した。模型地盤は図-3の実験装置の概要に示すように、大型圧力容器に収納し、等方圧で圧密後、載荷試験を行った。

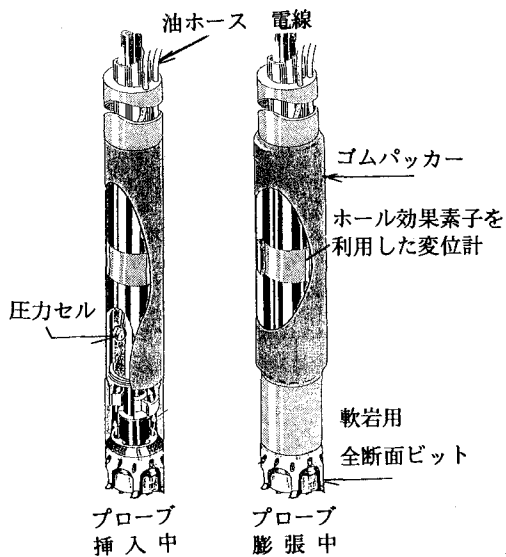


図-1 RSBP外観図

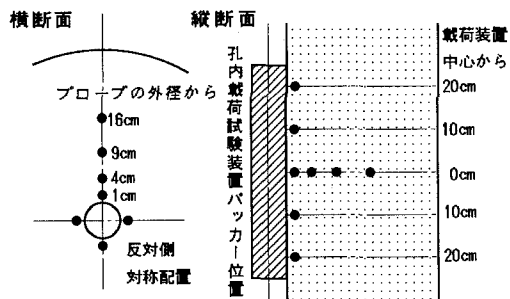


図-2 模型地盤内のひずみゲージ配置

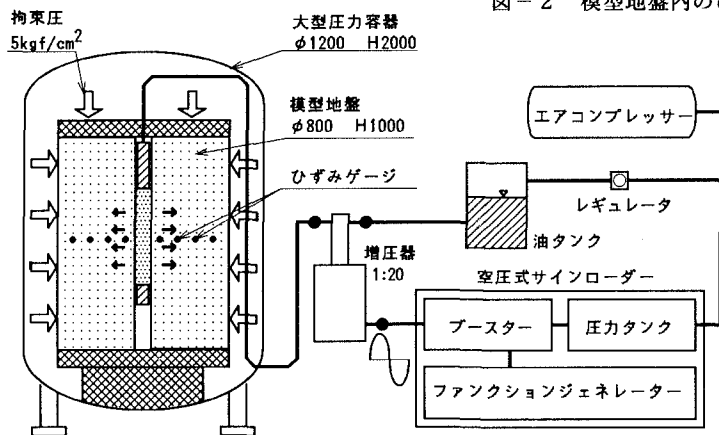


図-3 模型実験装置概要図

2-3 実験ケース

表-3に実験ケースを示す。ボーリング孔を模擬した孔は、ボーリング時に生じる孔壁面の凹凸の影響を検討するため、模型地盤材料の打設の際にモールドを用いて滑らかな面に仕上げたものと、打設後コアドリ

ルで削孔して、凹凸のある面に仕上げたものの2種類を用意した。载荷パターンは図-4に示す正弦波の繰り返しを基本とした。また、孔内载荷試験で通常用いるような単調载荷・除荷も参考のために実施した。正弦波の繰り返し圧力はバイアス荷重に加える形とし、空圧式サイロローダーで発生させた。载荷手順は、同一圧力振幅条件のもとで周波数を0.5、0.1、0.01Hzの順に変化させ、以後、順次圧力振幅を大きくしていくものとした。同一周波数での繰り返し回数は11回とし、このうち10回めの载荷圧～ひずみ関係から、せん断弾性係数G、減衰定数h、せん断ひずみ γ を求め、 $G \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係を整理して、動的変形特性として評価した。せん断ひずみはすべて片振幅で評価した。

3. 測定結果と考察

3-1 地盤内ひずみの測定結果

図-5は孔内载荷試験機の変位計で測定した地盤の孔壁面におけるひずみ ϵ_r の記録例である。孔壁ひずみ ϵ_r は $\Delta r/r_0$ (Δr : 半径方向変位、 r_0 : 初期半径)で定義され、孔壁面における円周方向ひずみ ϵ_θ に相当する。このひずみ波形から図にしめすヒステリシスループを作成し、圧力振幅、ひずみ振幅をそれぞれ求めた。図-6はこの孔壁ひずみ ϵ_r と埋設ひずみゲージで測定した模型地盤内の円周方向ひずみ ϵ_θ 、半径方向ひずみ ϵ_r の分布状況の一例である。孔内载荷試験で発生するひずみは孔壁のごく近傍に集中することがわかる。さらに地盤内のどの位置においても、円周方向と半径方向のひずみの絶対値がほぼ一致しており、地盤内の変形はおおむね等体積変形と考えられる。図-6中の曲線は、孔内载荷試験で求めた $G \sim \gamma$ 関係にもとづいて非線形弾性数値解析で計算した各圧力振幅に対応したひずみ分布である。測定値と計算値がよく一致している。この結果から、孔内载荷試験機の微小変位測定や埋設ひずみゲージなど本実験の計測システムが、全体として良好に動作していると判断した。

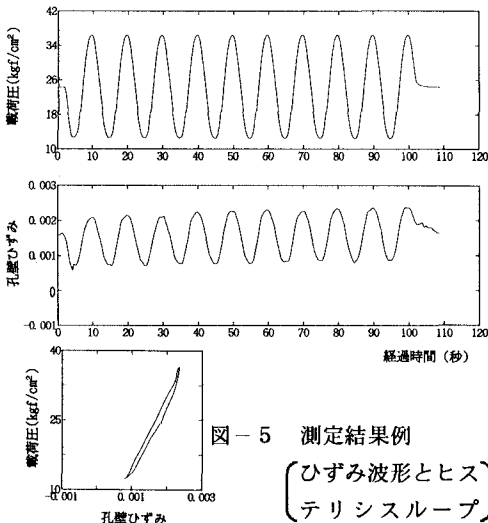


図-5 測定結果例

(ひずみ波形とヒステリシスループ)

表-3 実験ケース

ケース	①	②	③	④
試験孔作成	モールド	モールド	削孔	モールド
試験孔状態	平滑	平滑	凹凸	平滑
载荷方法	繰り返し正弦波	繰り返し正弦波	繰り返し正弦波	単調载荷・除荷
繰り返し	0.5	0.5	0.5	
周波数 (Hz)	0.1 0.01	0.1 0.01	0.1 0.01	

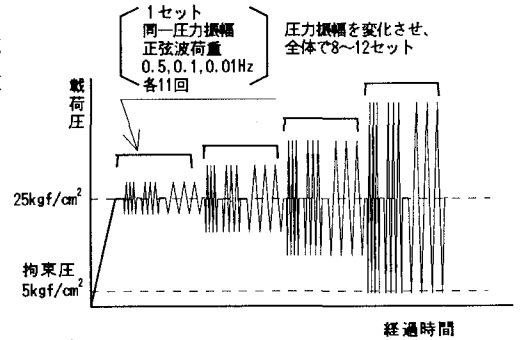


図-4 繰り返し载荷試験载荷パターン

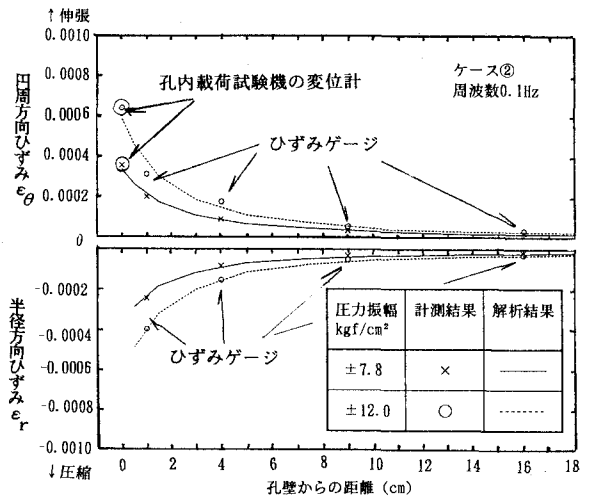


図-6 地盤内ひずみ分布

図-7は全実験ケースのG~ γ 関係、h~ γ 関係を取りまとめたものである。ここには比較のために実施した振動三軸試験結果（繰り返し周波数0.5Hz）も併記した。孔内載荷試験機にホール効果素子変位計を搭載したことで、測定できた最小せん断ひずみ振幅は 1×10^{-4} 程度であった。これは、従来の孔内載荷試験機で測定できるせん断ひずみに比べて、1オーダー以上小さいものであり、原位置での測定から微小ひずみにおける変形特性の非線形性を評価できる見通しが得られた。

凡例

周波数Hz	ケース			振動三軸
	①	②	③	
0.5	△	▲	×	+
0.1	○	●	×	
0.01	□	■		
孔壁作成方法	モルド	モルド	削孔	コア

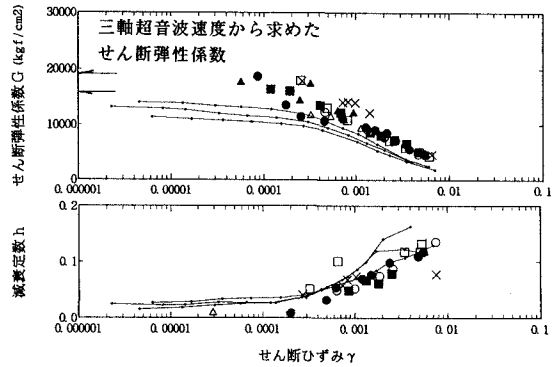


図-7 せん断弾性係数、減衰定数のひずみ依存性

3-2 G、hの値のひずみ依存性について

図-7のG~ γ 関係についてみると、同一のひずみレベルに対するGの値は、振動三軸試験による値よりも孔内載荷試験による値の方が若干大きくなっているものの、非線形性を示し始めるひずみレベル、せん断弾性係数の低減の傾向は両者で類似する結果となっている。値の相違の要因としては、せん断変形の形態の違い、試験時の応力経路の違い、地盤の受ける応力履歴の違い、試験時の地盤の排水条件の違い、等が考えられる。これらの各要因はさらに相互に影響し合っていると考えられ、今後、詳細に検討していきたいと考えている。なお、三軸等方圧拘束下で測定した超音波速度から求めたせん断弾性係数は、これらの試験のG~ γ 関係の延長上のほぼ中央に位置している。

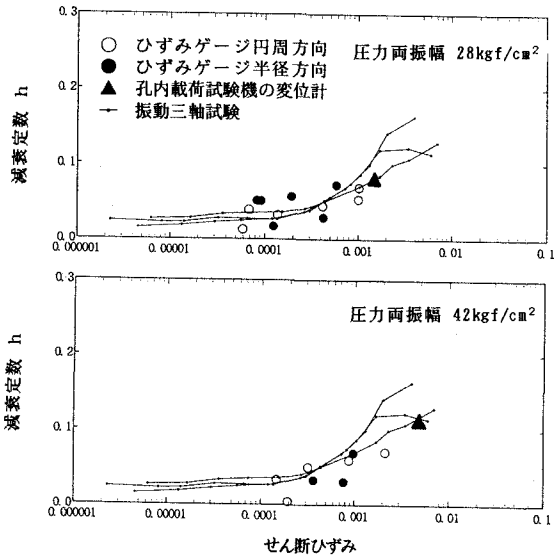


図-8 ひずみゲージで測定した減衰定数

h~ γ 関係についてみると、孔内載荷試験による値は振動三軸試験による値とほぼ一致した。図-8は、各載荷ステップについて、ひずみゲージで測定したひずみと孔壁面における載荷圧の関係から減衰定数を求め、これを孔内載荷試験機から求めた値および振動三軸試験で求めた値と対比したものである。試験装置で測定した減衰定数はひずみゲージで測定したものの延長上に位置している。また地盤内のひずみレベルが大きくなるに従って、振動三軸試験のh~ γ 関係をたどるような傾向を示している。これらのことから、地盤の減衰定数を正しく評価できたものと考えている。

3-3 G~ γ 関係、h~ γ 関係に対する繰り返し周波数の影響

図-7には繰り返し周波数を0.5~0.01Hzで変化させた場合のG~ γ 、h~ γ 関係を示した（実験ケース①②）。全体的な傾向として、繰り返し周波数によらずG~ γ 関係、h~ γ 関係はほぼ一致している。またひずみゲージで測定した地盤内のひずみ分布についても各周波数で大きな違いは認められない。従って、この周波数の範囲では、地盤の非線形な変形特性は大きく変化していないと考えられる。なお、繰り返し周波数の違いは、地盤の排水条件にも密接に関連することから、今後、各種地盤における実験データを集積し、周波数の影響についてさらに検討していきたいと考えている。

3-4 G~ γ 関係、h~ γ 関係に対する孔壁面の状態の影響

図-7のうち、×印はコアドリルで1~5mmピッチ、高さ1mm程度の凹凸をつけて削孔した孔におけるG~ γ 関係、h~ γ 関係である(実験ケース③)。これは、通常のボーリングで生じる、凹凸のある孔壁面を再現し、それが測定結果に与える影響を確認するための実験ケースにあたる。この場合のG~ γ 関係、h~ γ 関係は、モールドを用いて作成した滑らかな孔壁面の場合とほぼ同様な傾向をとっている。孔内载荷試験機の変位計の変位検出面は1×5cmの角型であり、これは凹凸の間隔に対して大きく、変位計が凹凸を含む孔壁面の平均的な変位を捕らえている状況の結果によるものと考えられる。測定結果に影響を与える孔壁面の状態としては、このほか応力の解放による地盤の緩み等があり、これらの現象の影響については今後の実験で確認していきたいと考えている。

3-5 G~ γ 関係に対する载荷パターンの影響

図-9は、孔内载荷試験で通常用いているような単調载荷を基本とした場合に求まるG~ γ 関係(実験ケース④)と、繰り返し载荷で求まるG~ γ 関係(実験ケース①②)とを対比したものである。実験ケース④の载荷パターンは、図中に示すように初期载荷・除荷・再载荷・最終除荷を基本として、さらに初期载荷、最終除荷の段階で細かい圧力ステップの繰り返しを数回を行った。せん断弾性係数Gは、それぞれの段階の

载荷圧~孔壁ひずみ関係をスプライン関数で平滑化し、载荷開始点を孔壁ひずみの0点として、0点からの割線勾配から算出した。正弦波の繰り返し载荷の場合と同一ひずみレベルでGの値を対比すると、初期载荷過程の場合は1/5程度、再载荷過程、最終除荷過程の場合でも1/4程度の値と、きわめて小さくなっている。しかしいずれの場合とも、ひずみが大きくなると、この差は小さくなり、正弦波の繰り返し载荷の場合のGの値に漸近していく。細かい繰り返しの場合には、载荷圧~孔壁ひずみ関係がヒステリシスループを描くため、せん断弾性係数Gは、正弦波の繰り返し载荷の場合と同様に算出した。Gの値を正弦波の繰り返し载荷の場合と対比すると、最終除荷過程での繰り返しの場合には、ほぼ同様となっているが、初期载荷過程での繰り返しの場合には、若干小さくなっている。これらのせん断弾性係数Gの値の違いについては、せん断弾性係数算定時の応力レベル、地盤の受けた応力履歴、試験時の排水条件、繰り返し载荷の効果などの影響が想定され、载荷パターンの設定方法や結果の整理方法については、今後、十分に検討することが必要と考えられる。

4. あとがき

今回の実験の結果、理想的な条件のもとでは、地盤の動的変形特性をボーリング孔内で行う孔内载荷試験で評価できる見通しを得た。データ解釈の上で未解明な点に関する検討については、原位置に適用したときの問題点の検討とあわせ、今後、詳細に進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Clarke, B. G. and Allan, P. G. (1989): A Self-Boring Pressuremeter for Testing Weak Rock, Proc. of 12th ICSMFE, pp211~213.
- 2) 岸 清、野尻 陽一(1989):人工軟岩材料の開発、セメントコンクリート、No. 511、pp78~86.

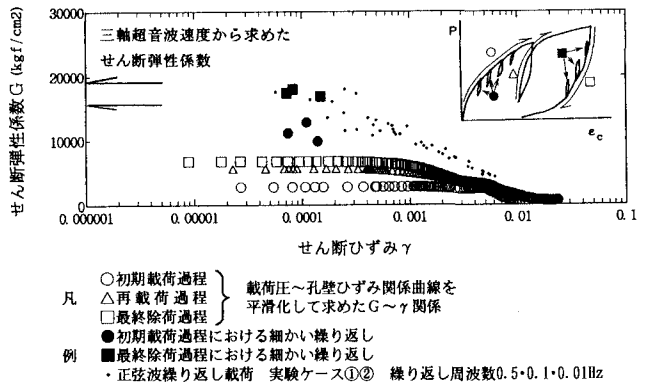


図-9 孔内载荷試験で通常行う
载荷パターンで求めたG~ γ 関係