

(28) 動的せん断試験による岩盤の動的力学特性と繰返しの影響

電力中央研究所 土木研究所
 立地部 地盤構造研究室
 ○藤原義一 日比野敏 金川忠 駒田広也 石田毅
 中川加明一郎 新寿一

1. はじめに

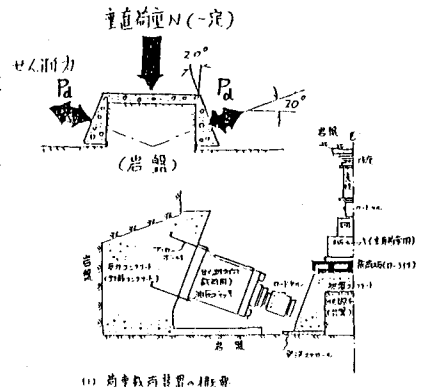
原子力発電所などの重要構造物は、現状では硬質および軟質岩盤上に構築されている。従来、これらの重要構造物に対する地震時の安定性を検討するには必要なる動的物性値は、軟質岩盤の場合には原位置で採取したボーリングコアによる室内振動三軸試験などによることが多い。しかし、硬質岩盤では、節理、亀裂が介在してボーリングコアの採取が困難であることが多く、室内試験の実施が難しい。そこで、今回、原位置動的せん断試験装置を試作し、岩盤のひずみ依存性と考慮した動的力学特性、強度特性の把握を試みた。さらに、室内試験と原位置試験との動的力学特性、強度特性の比較を行ったので、ここに報告する。

2. 供試体、試験装置および試験方法

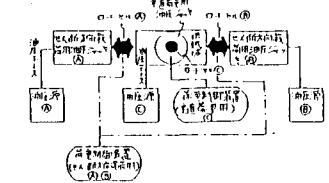
1) 供試体 供試体は、岩盤をラインドリリングして切出した。その寸法は、巾約45cm×30cm、高さ30cmとした。供試体寸法は、あらかじめ実施した静的せん断試験、平板載荷試験結果および油圧ジャッキの出力等を考慮して定めた。供試体の個数は、各3個とした。

2) 試験装置 試験装置の概要を図-1に示す。装置は、大別すると載荷装置と計測装置に分けられる。装置の構成と仕様を表-1に示す。載荷装置は、垂直荷重を静的に載荷するための油圧ジャッキおよび動的せん断荷重を載荷するための供試体左右の油圧ジャッキより成り、荷重増巾器により荷重を制御する。計測成分は、供試体のせん断方向変位(岩盤と供試体との相対変位)を測る非接触型変位計4成分、岩盤の変位を測る差動変位計2成分、垂直方向変位を測る差動変位計2成分、回転方向変位を測る差動変位計2成分および垂直荷重、動的せん断荷重を測るロードセル5成分の合計13成分である。これらは、増巾器を介して電磁オッシュログラフ、データレコーダにて記録をした。解析は、データレコーダよりA/D変換器を介して計算機により行った。

3) 試験方法 試験は、通常の前位置における静的せん断試験方法に準拠した。供試体の静的垂直荷重 σ_n は、構造物の自重による地圧(約5kg/cm²)を基とし、 $\sigma_n = 0 \sim 8 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で定めた。



(1) 荷重載荷装置の概略



(2) 荷重計測系統図

図-1 試験装置の概要

表-1 各装置の構成と仕様

品名	仕様	数量
荷重載荷装置	載荷機	1.50×10 ² kgf/2700×10 ² kgf
	支柱	直径120mm 長さ500mm
	支柱	直径120mm 長さ300mm
	支柱	直径120mm 長さ150mm
	支柱	直径120mm 長さ100mm
	基準梁	長さ1000mm
	油圧源	圧力: 210kgf/cm ² 流量: 210L/min
	油圧シリンダ(垂直方向)	径: 50mm 行程: 100mm
	油圧シリンダ(せん断方向)	径: 50mm 行程: 100mm
	油圧ホース	径: 10mm 長さ: 10m
計測装置	非接触型変位計	測定範囲: ±10mm 精度: ±0.01mm
	差動変位計	測定範囲: ±10mm 精度: ±0.01mm
	ロードセル	型式: 2432-21 10kg
	データレコーダ	型式: MR-85 32kg
データ処理装置	計算機	型式: IBM 360 32kg
	A/D変換器	型式: MR-85 32kg
プロセッサ	プロセッサ	型式: MR-85 32kg
	プロセッサ	型式: MR-85 32kg

供試体のせん断面の動的せん断荷重 τ_d は、 2 kg/cm^2 ずつ順次増大させ、供試体が破壊に至るまで行った。各荷重段階における繰返し波数 N は、25波とし、振動数 f は、 1 Hz とした。いま、供試体に作用する垂直応力 σ_N と動的せん断荷重 τ_d を数式表示すれば、次式となる。

垂直応力: $\sigma_N = \sigma_0 + P_d \sin \theta / A$ 動的せん断応力;

$\tau_d = P_d \cos \theta / A$ (1)

ここで、 P_d は

、供試体に作用する傾斜荷重 ($P_d = P \sin(2\pi f t)$)、 A は、供試体のせん断面積、 θ は、傾斜荷重の作用角度 ($\theta = 20^\circ$ とした) である。動的せん断ひずみ振巾 γ は、供試体と岩盤の平均相対水平変位 δ_H と岩盤面から変位計までの平均高さ H から近似的に、次式により求めた。

$\gamma = \delta_H / H$ (2)

図-3 動的せん断弾性係数 G_d と動的せん断ひずみ γ の関係 (岩種: 凝灰角礫岩) ここで、 δ_H は、供試体に固定した4個の変位の平均相対変位、 H は、岩盤面から4個の変位計の個々の高さの平均値とした。これらの関係より岩盤の動的せん断弾性係数 G_d および減衰定数 h を求めることとした。

すなわち、 G_d と h は、

$G_d = \tau_d / \gamma$, $h = \Delta W / 4\pi W$ (3)

である。 ΔW , W については、図-2参照。

3. 結果

1) 動的力学特性

G_d と γ との関係の例を図-3、図-7に示した。図によれば、 γ が增加すると G_d は、低下する傾向を示す。また、垂直応力 σ_N が增加すると G_d は、大きくなる傾向を示す。一方、動的せん断荷重の繰返し波数 N による G_d への影響は、少ない。次に、 h と γ との関係の例を図-4、図-8に示した。図によれば、データのばらつきは大きい h の値は、おおよそ、 γ が增加すると増加する。

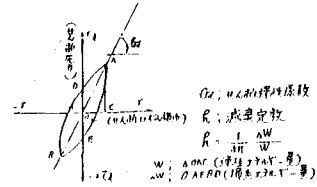


図-2 履歴曲線

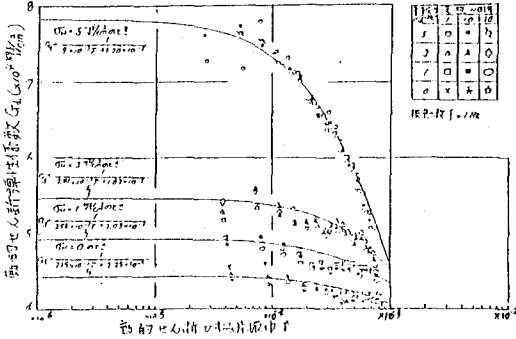


図-3 動的せん断弾性係数 G_d と動的せん断ひずみ γ の関係 (岩種: 凝灰角礫岩)

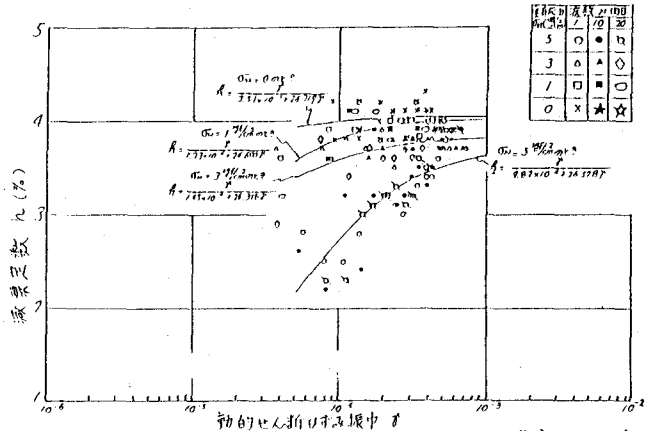


図-4 減衰定数 h と動的せん断ひずみ γ との関係 (岩種: 凝灰角礫岩)

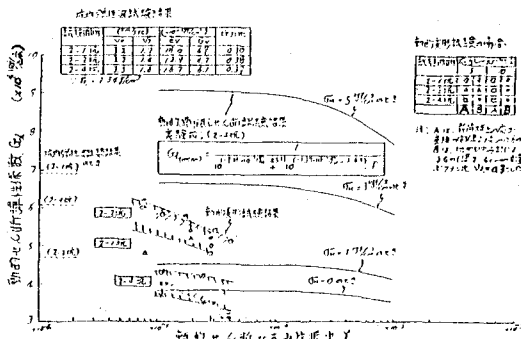


図-5 各種試験方法による動的せん断弾性係数の比較 (岩種: 凝灰角礫岩)

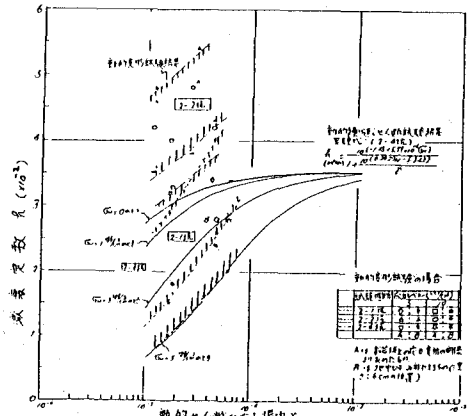


図-6 各種試験方法による減衰定数の比較 (岩種: 凝灰角礫岩)

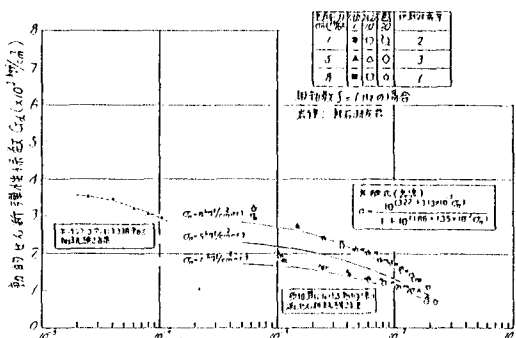


図-7 初期せん断弾性係数 G_d の変化 (岩種: 軽石凝灰岩)

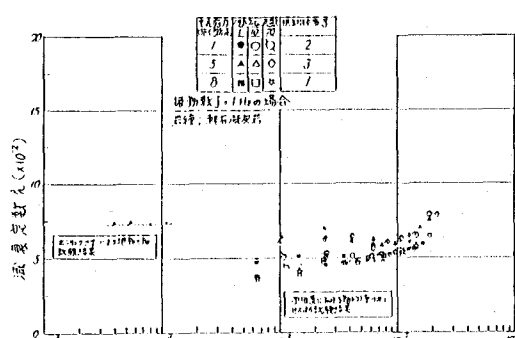


図-8 減衰定数 γ と初期せん断弾性係数 G_d の関係 (岩種: 軽石凝灰岩)

傾向を示す。また、垂直応力 σ_n が増加すると、 γ は低い値を示す傾向が認められる。

次に、今回の試験結果と他試験結果との G_d および γ と δ の関係と比較してみた。その結果を図-5, 6, 7, 8に示した。結果によれば、両者とも概略今回の試験結果に類似した傾向が見られた。

2) 繰返し載荷による弾性特性

凝灰角礫岩の場合岩盤が非常に硬く、載荷装置の能力の限度で、破壊試験が出来なかった。そこで、 $\sigma_n = 0$, $\tau_d = 32 \sim 36 \text{ kg/cm}^2$ で持続的に繰返し載荷する疲労試験を行った。軽石凝灰岩の場合は垂直荷重下 ($\sigma_n = 1.5, 8 \text{ kg/cm}^2$) で動的せん断荷重を順次増加させながら破壊に至らせた。

(1) 凝灰角礫岩の場合

δ と N との関係を図-9に、 G_d と N の関係を図-10に、 γ と N の関係を図-11に示した。図-9において、 δ は、破壊に近づくとき急激に増大する傾向がある。そこで、この δ が急激に増大する点を降伏点とし、降伏点の動的せん断ひずみ振幅 δ_B を求めてみると、 δ_B の値は、概略 $\delta_B = 3.4 \sim 4.1 \times 10^{-3}$ の範囲であった。さらに、図-10, 11によれば、破壊に近づくとき、 G_d は低下し、 γ は急激に増大する傾向が認められた。

(2) 軽石凝灰岩の場合

垂直荷重 σ_n を $1.5, 8 \text{ kg/cm}^2$ (一定) とし、動的せん断荷

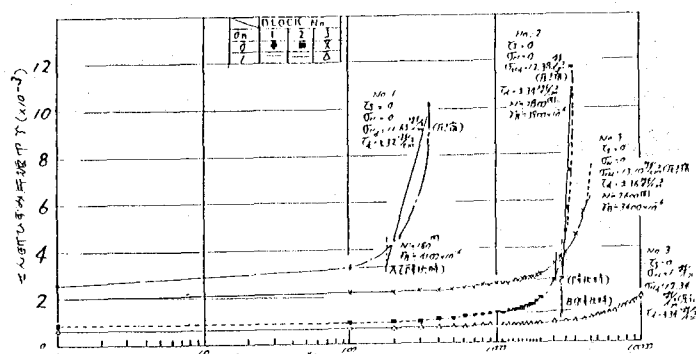


図-9 繰返し載荷による動的せん断ひずみ振幅 δ の変化 (岩種: 凝灰角礫岩)

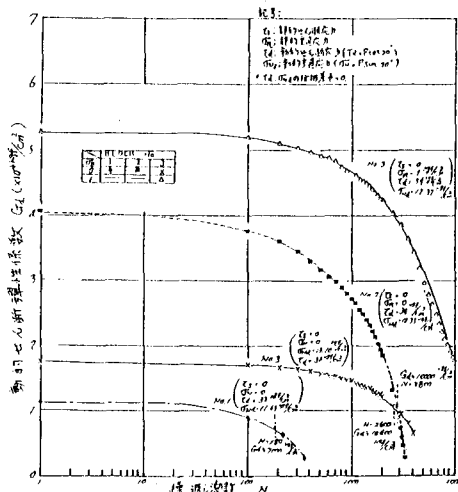


図-10 繰返し載荷による初期せん断弾性係数 G_d の変化 (岩種: 凝灰角礫岩)

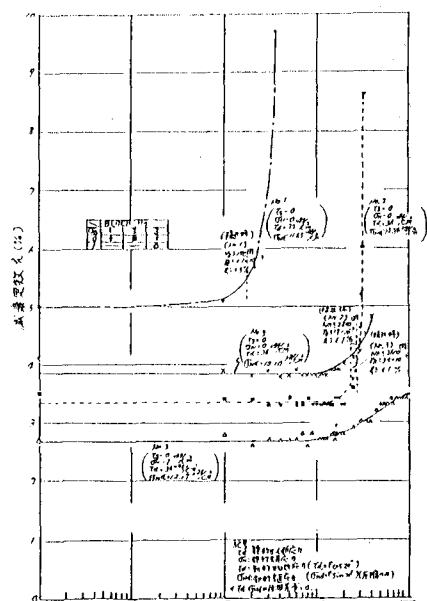


図-11 繰返し載荷による減衰定数 γ の変化 (岩種: 凝灰角礫岩)

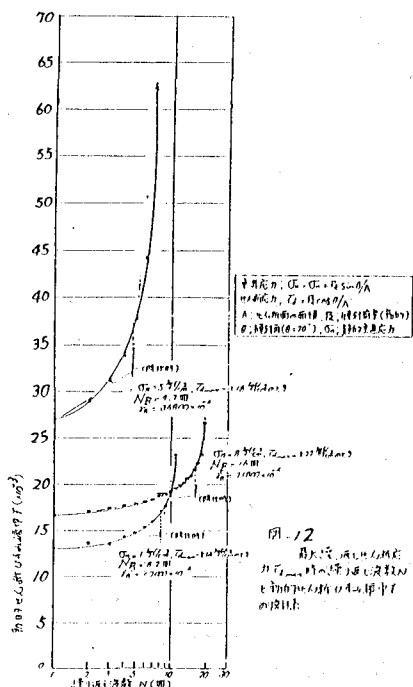


図-12 静・動的せん断試験の結果 (岩種: 軽石凝灰岩)

重を順次増大させ破壊に至らしめたとき、破壊時の τ_d の値は、14、18、22 kg/cm^2 であった。また N との関係を示すと図-12の結果を得た。結果によれば、すは、凝灰角礫岩の場合と同様に破壊に近づくとき急激に増加する傾向がある。さらに、動的せん断荷重を順次増大させたときの τ_d と N との関係の例を図-13に示した。この結果より各動的せん断荷重時の履歴曲線の包絡線を書いてみると、破壊に近づくとき τ_d が低下する傾向が認められた。図-14には、各重直荷重下での履歴曲線の包絡線を示した。

次に、原位置における静的せん断試験と動的せん断試験とによる強度特性を比較してみると、図-15のごとくである。結果によれば、 $\sigma_n = 1 \sim 8 \text{ kg/cm}^2$ の範囲では、強度特性は、前者に比して後者の方が約23%低い結果であった。この原因は、おそらく繰返し載荷による影響と思われる。

以上、2箇所での動的せん断試験結果をここに述べたが、今後、多くの箇所での試験を実施し、岩盤の動的力学特性について検討をしたいと考えている。

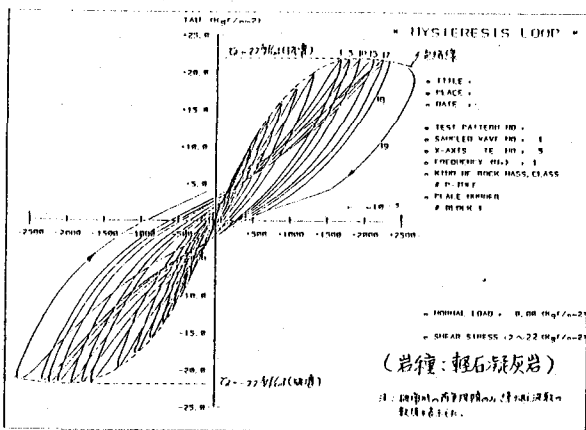
4. 今後の課題

今後同試験を実施するにあたり、さらに考慮していなければならない事項を列記する。

- 1) 動的せん断ひずみの計測方法
- 2) 振動数を考慮した動的せん断強度の把握
- 3) 動的向げき水圧の把握

謝 辞

本試験の準備、試験の実施にあたり、古屋、田中、田村、高嶋、小山田、谷藤、坂本各氏をはじめ、多くの関係者諸氏に多大な御援助、御協力をいただき、ここに感謝の意を表します



(岩種: 軽石凝灰岩)

注: 静的せん断試験の結果は、動的せん断試験の結果より約23%低い。

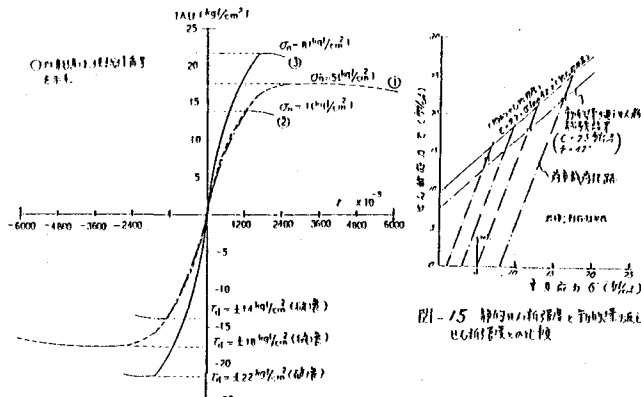


図-14 動的せん断試験時のひずみ包絡線 (岩種: 軽石凝灰岩)

図-15 静的せん断試験と動的せん断試験の結果の比較

(28) DYNAMIC DEFORMATION AND FAILURE CHARACTERISTIC OF
ROCK FOUNDATION BY CYCLIC SHEAR LOADING TEST

By Y. Fujiwara, S. Hibino, T. Kanagawa, H. Komada, T. Ishida,
K. Nakagawa and K. Shin

Central Research Institute of Electric Power Industry
Siting Technology Dept. Geomechanics Sec.
1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba-ken, Japan

Synopsis

Nuclear power station are built on rock foundations. Dynamic properties of foundations have been obtained by dynamic triaxial tests using boring cores in case of weak rock foundations. In case of hard rock foundations, however, it is very difficult to obtain dynamic properties of foundations by core samples due to cracks and joints. The authors, therefore, have newly developed the in situ dynamic shear loading apparatus. Using this device various dynamic characteristics such as shear modulus, ultimate strength, damping ratio are obtained.

Some results obtained are as follows ;

The kinds of rock foundations are tuff-breccia and pumice-tuff .

- (1) Dynamic shear moduli G_d increase in proportion to increase of normal stress magnitude σ_n .
- (2) Dynamic shear moduli G_d decrease in proportion to increase of shear strain magnitude γ within the range of 3×10^{-5} to 2×10^{-2} .
- (3) Damping ratio h increase as shear strain γ increase.
- (4) Near the yielding of specimen, shear strain γ increase immensely.
- (5) In case of the tuff-breccia, dynamic shear yield γ_B were $(3.4 \sim 4.1) \times 10^{-3}$.
- (6) In case of the pumice-tuff, the dynamic shear strengths were 14, 18 and 22 kgf/cm². Comparing the static shear strengths, the dynamic shear strengths were lower by about 23 %.