

電源開発株式会社
大間原子力発電所

意見聴取会指摘事項について
(地盤関係)

平成19年1月
原子力発電安全審査課

目 次

1. 動的解析に用いる物性値について

1. 動的解析に用いる物性値について

- 1) 原子炉建屋基礎地盤の安定性評価に用いる動的物性値の設定について説明すること。

1.1 はじめに

申請者は、原子炉建屋基礎地盤の動的解析を行うに当たって、社団法人土木学会 原子力土木委員会・地盤安定性評価部会（以下「地盤安定性評価部会」という。）で得られた動的鉛直動を考慮した地盤安定性評価に関する研究成果¹⁾等に基づき地盤剛性並びに減衰定数を設定すると共に、動的せん断強度として静的せん断強度試験の結果を用いることの妥当性について以下のように検討している。

1.2 鉛直動を考慮した地盤剛性の設定方法

通常の水平動の等価線形による動的解析は、収束計算の結果得られたせん断弾性係数 G_d と一定値のポアソン比 ν_d から、弾性論によって体積弾性係数 K_d を設定するような解析（ ν 一定解析）を行っている。このため、発生ひずみが大きく、 G_d の低下が激しくなると、①式及び②式に示す V_p や K_d も大きく低下することになり、鉛直動の応答に影響を与える V_p 特性（①式によって算定される飽和地盤の V_p は、間隙水の体積弾性係数によって定まる V_p より小さくなり得ない）に対して矛盾を生じる可能性があるとしている。

$$V_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K_d + \frac{4}{3} G_d \right)} \quad \dots\dots\dots ①$$

$$K_d = \frac{E_d}{3(1-2\nu_d)} = \frac{2(1+\nu_d)}{3(1-2\nu_d)} G_d \quad \dots\dots\dots ②$$

このような矛盾点を改善する方法として、地盤安定性評価部会では、初

期の V_s 、 V_p より求められるポアソン比からあらかじめ K_d を求めておき、 G_d が変動しても K_d は常に初期値一定になるように、ポアソン比 ν_d を変更する方法（ K 一定解析）を提案している¹⁾。

この鉛直動に対する解析手法の妥当性を検討する目的から、地盤安定性評価部会¹⁾では、1995年兵庫県南部地震においてポートアイランドで観測された地震記録を対象に、上述の2種類の等価線形解析手法を用いた比較解析（水平・鉛直の同時入力）を行っている。鉛直加速度の解析結果を図-1.1に示す。図によれば、地表付近の軟弱な地盤に対しては、従来の等価線形解析（ ν 一定解析、CASE1）は実測値に比べて応答が小さくなるが、 K 一定解析（特にCASE3）は良く一致していることが分かる。

また、軟岩クラスまで（初期S波速度 $V_{s0}=200\text{m/s} \sim 600\text{m/s}$ まで）を想定した飽和地盤に対して、上述の2種類の等価線形解析より精度の高い解析である二相系解析（Biotの式に基づく）も実施し、解析結果を比較している。図-1.2に最大鉛直加速度の深度分布の比較を、図-1.3に鉛直加速度の伝達関数の比較を示す。これらの図によれば、 $V_{s0}=200\text{m/s}$ の地盤では ν 一定解析結果は K 一定解析及び二相系解析結果と一致していないが、軟岩クラスの $V_{s0}=600\text{m/s}$ の地盤においては ν 一定解析結果も K 一定解析及び二相系解析結果とほぼ等しくなっていることが分かる。

以上のことから、水平動と鉛直動を同時入力する等価線形解析を行うに当たっては、飽和地盤においては K 一定解析の手法を用いることが基本となるが、 $V_{s0}=600\text{m/s}$ 以上の地盤であれば従来の ν 一定解析の手法を用いても良い結果が得られていることが分かる¹⁾とされている。

大間地点の基礎地盤の安定性検討においては、地下水位を地表面に設定

し、地表面付近には $v_{s0}=600\text{m/s}$ 以下の表土等の土質材料が分布することから、上記の研究成果に基づき地盤剛性は K 一定解析の手法を用いて動的解析を実施している。

1.3 鉛直動を考慮した地盤の減衰定数

地盤安定性評価部会¹⁾では、図-1.4に示す比較的良好な第四紀地盤（茨城県鹿島地点）における中小地震（地表面での水平動の最大加速度が 20gal を超える20地震を対象）の鉛直アレーの記録（水平動と鉛直動を同時に観測）から、P波の減衰特性を表す Q_p 及びS波の減衰特性を表す Q_s を同定している。同定結果を示した図-1.5によれば、既往の研究成果と同様に、 $Q_p < Q_s$ の関係が成り立ち、 Q_p と Q_s の周波数依存性はG2より上層の地盤(G9-G6, G6-G2)で若干異なるものの、以深の硬質な地盤(G2-G1)になるほど両者が概ね一致することが分かる。以上のことから、水平動と鉛直動を同時に入力する等価線形解析において、減衰定数として $h_s = 1/2Q_s$ を設定することは安全側の鉛直動応答を与えることを示唆していることが分かる¹⁾とされている。

また、申請者は、「はぎとり解析地盤モデルについて」（意見聴取会資料「04-大間設C-68」）に示すように大間地点で観測された代表的な4地震（1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震）の水平成分及び鉛直成分の地震観測記録を用いて速度構造及び減衰定数の同定解析を実施している。4地震の水平及び鉛直成分に同定された減衰定数 $h (= h_0 f^{-\alpha})$ 、ここに、 h_0 は 1Hz における減衰定数、 α は減衰定数の周波数依存の度合いを表すパ

ラメータ)の平均値を図-1.6に示す。ここで、 h_s は水平動の減衰定数、 h_p は鉛直動の減衰定数である。図によれば、地盤安定性評価部会¹⁾の検討結果と同様に $h_p > h_s$ の関係が成り立つことから、鉛直動を考慮する等価線形解析において、鉛直動の減衰定数として水平動の減衰定数 h_s を設定することは安全側の鉛直動応答を与えることが分かるとしている。

これらの検討結果に基づき、大間地点の基礎地盤の安定性検討においては、水平動の減衰定数と同じ値を、鉛直動においても用いるとしており、減衰定数の周波数依存性は考慮せず、岩盤については保守的に減衰定数 $h = 3\%$ 一定として動的FEM解析を実施するとしている。

1.4 動的せん断強度

基礎地盤の安定性検討は動的解析を主体に行われるが、地盤の動的せん断強度を評価するための標準的な方法が確立されていないため、地盤のせん断強度については、解析用物性値として静的せん断強度試験の結果を用いている。このため、地盤の動的せん断強度と静的せん断強度との関係を把握する目的で、原子炉建屋基礎底面地盤である淡灰色火山礫凝灰岩及び弱層であるシームの動的せん断強度試験を実施している。

動的せん断強度試験の試験条件は、表-1.1に示すとおりである。淡灰色火山礫凝灰岩の試験は供試体直径9.2cm、高さ18.4cmの繰返し三軸試験とし、拘束圧 0.49N/mm^2 で3個、拘束圧 0.98N/mm^2 で3個、合計6個の試験を行っている。シームの試験は供試体直径3.5cm、高さ7.0cmの繰返し三軸試験とし、拘束圧 0.59N/mm^2 で3個の試験を行っている。なお、各試験の拘束圧は、静的せん断強度試験で実施している原子

炉建屋の常時の接地圧相当の値に設定している。シームの供試体は、シーム S-10 を対象に試掘坑内で採取した中から厚さ 7cm 以上のブロック試料を選定し鉛直方向にくり抜き成形している。

繰返し三軸試験の方法は、図-1.7 に示すように一定振幅の繰返し荷重を段階的に増加させながら、供試体が破壊するまで与える多段階繰返し試験であり、繰返し荷重は軸差応力の最大値を淡灰色火山礫凝灰岩で 0.59N/mm^2 、シームで 0.15N/mm^2 ずつ増加させ、応力段階ごとに同一荷重を 10 回繰返ししている。

また、静的せん断強度試験として、淡灰色火山礫凝灰岩では拘束圧 0.49N/mm^2 で 5 個、拘束圧 0.98N/mm^2 で 5 個、合計 10 個、シームでは拘束圧 0.59N/mm^2 で 3 個の圧密非排水条件の三軸試験を実施し、動的せん断強度試験結果と比較している。

動的及び静的せん断強度試験の結果を表-1.2 に示す。淡灰色火山礫凝灰岩の動的三軸圧縮強度／静的三軸圧縮強度は、拘束圧 0.49N/mm^2 で $1.16\sim 1.20$ 、平均値 1.18 、拘束圧 0.98N/mm^2 で $1.02\sim 1.19$ 、平均値 1.12 である。シームの動的三軸圧縮強度／静的三軸圧縮強度は、拘束圧 0.59N/mm^2 で $1.04\sim 1.10$ 、平均値 1.07 である。ここで、淡灰色火山礫凝灰岩の静的三軸圧縮強度は拘束圧毎の 5 個の平均値、シームの静的三軸圧縮強度は 3 個の平均値としている。

また、動的せん断強度試験と静的せん断強度試験との試験結果の比較例を図-1.8 に示す。

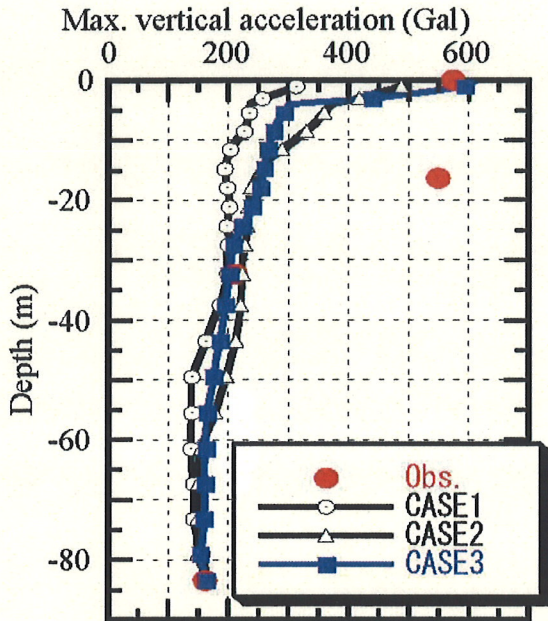
試験結果によれば、軟岩における既往の研究例^{2)~3)}と同様に、岩盤に対して動的せん断強度は静的せん断強度を上回っている。また、シームや

断層に対しても，図-1.9 に示す締固めた粘性土や不かく乱土の繰返し試験により求めた動的強度を取りまとめた結果例⁴⁾及び図-1.10 に示す母岩の岩片などを含んだ断層材料の動的強度試験結果例⁵⁾と同様に，試験結果によれば動的せん断強度は静的せん断強度を上回っている。

以上より，地盤の静的せん断強度を動的せん断強度は下回らないことから，基礎地盤の動的FEM解析におけるせん断強度として静的せん断強度を用いることは妥当であるとしている。

1.5 参考文献

- (1) 社団法人 土木学会 原子力土木委員会・地盤安定性評価部会
(2003) : 原子力発電所基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価手法の体系化—動的上下動を考慮した地盤安定性評価—, 平成 15 年 3 月.
- (2) R. Yoshinaka & M. Osada (1995) : The comparison between dynamic and static strength of soft sedimentary rocks, Rock Foundation, Yoshinaka & Kikuchi (eds) © 1995 Balkema, Rotterdam, pp. 109-114.
- (3) 西 好一 (1984) : 繰返し荷重下における泥岩の強度-変形特性, 土木学会論文集, 第 352 号 / III-2, pp. 41-50.
- (4) 石原 研而 : 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp. 209-231.
- (5) 社団法人 土木学会 原子力土木委員会 (1985) : 原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法—報告書—, 第 3 編 地盤調査・試験法, 昭和 60 年 8 月, p. 45, p. 51.



CASE1: すべての層に対して、 G_d の変化に連動して、ポアソン比一定の条件で K_d も変化する方法

CASE2: すべての層に対して、 K_d を常に初期値一定とする方法

CASE3: 地下水以浅は従来型、地下水以深は K_d を初期値一定とする方法

図-1.1 最大鉛直加速度の深度分布の比較¹⁾

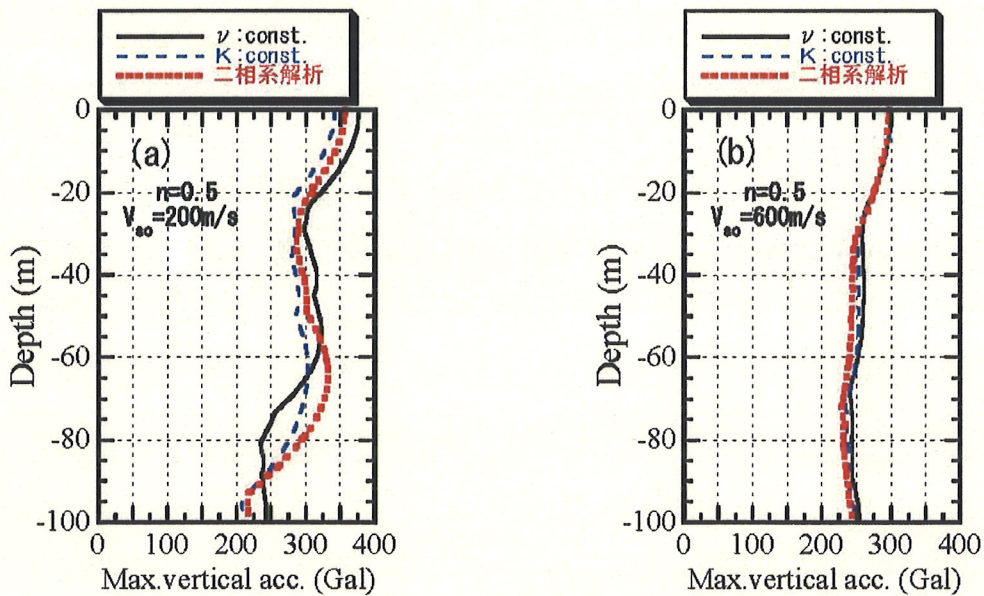


図-1.2 最大鉛直加速度の深度分布の比較¹⁾

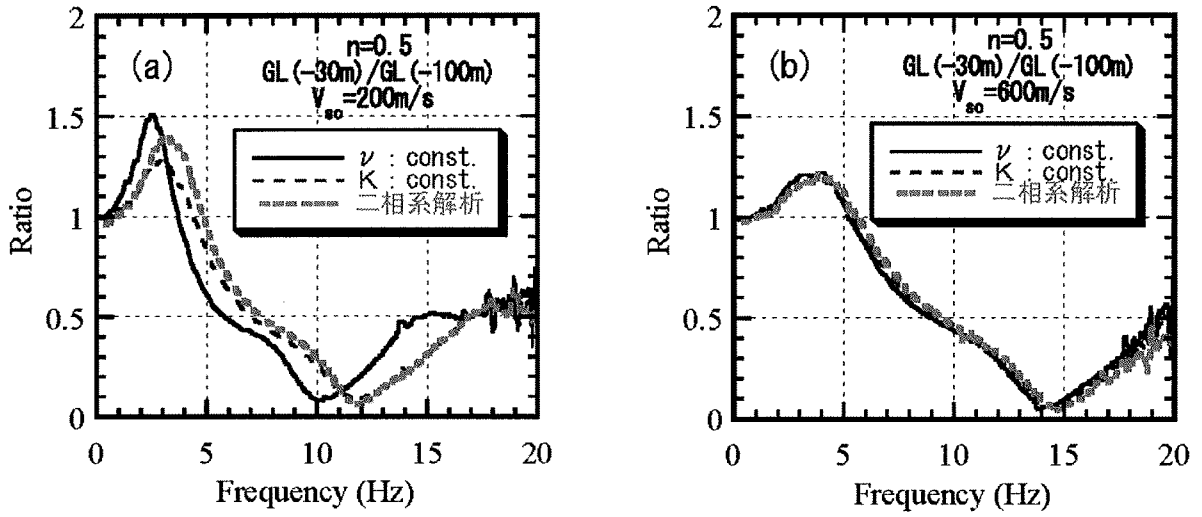


図-1.3 鉛直加速度の伝達関数の比較¹⁾

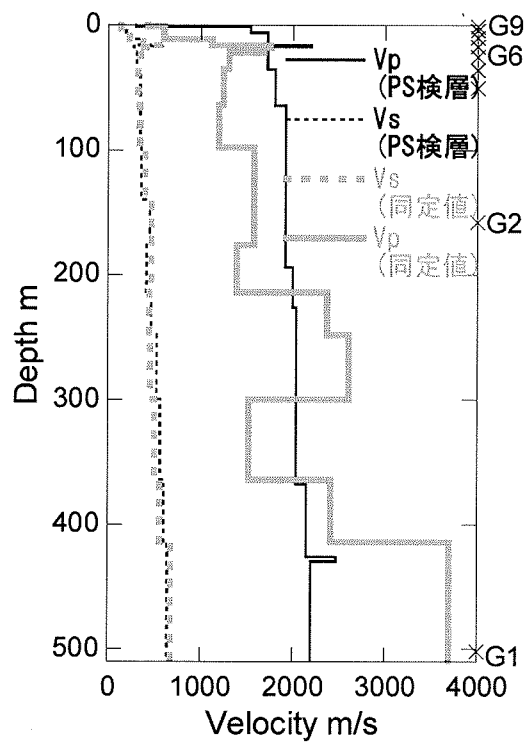


図-1.4 速度構造と地震計位置¹⁾

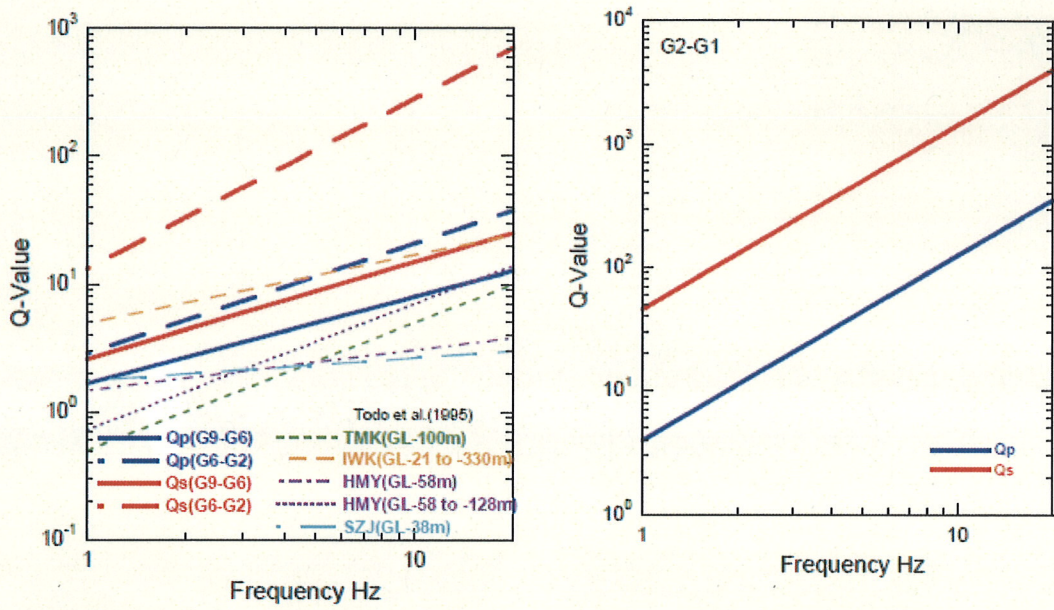


図-1.5 Q_p 及び Q_s の比較¹⁾

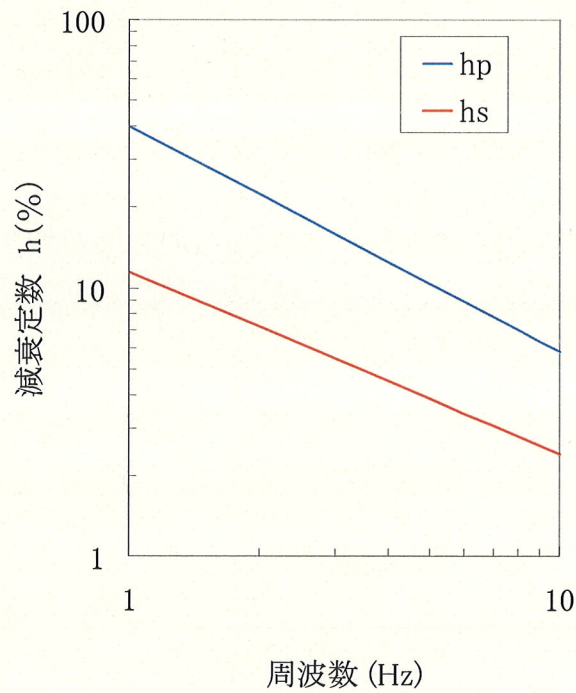


図-1.6 大間地点の減衰定数 (h_p と h_s の比較)

表-1.1 (a) 動的せん断強度試験の試験条件(淡灰色火山礫凝灰岩)

試験個数	6 個	
供試体寸法	$\phi = 9.2 \text{ cm}$, $h = 18.4 \text{ cm}$	
試験法	三軸圧縮試験	
排水条件	圧密非排水	
載荷方法	応力制御法	
側圧	0.49 N/mm^2 , 0.98 N/mm^2	
静的載荷	載荷荷重	最初と各段階の間に最大軸差応力の 1/2 の初期せん断応力を載荷
	載荷速度	$0.49 \text{ N/mm}^2/\text{min}$
多段階繰り返し載荷	周波数	0.5 Hz
	波形	正弦波
	載荷荷重	1 段階当たりの最大軸差応力の増分は 0.59 N/mm^2
	載荷回数	各段階で 10 回

表-1.1 (b) 動的せん断強度試験の試験条件(シーム)

試験個数	3 個	
供試体寸法	$\phi = 3.5 \text{ cm}$, $h = 7.0 \text{ cm}$	
試験法	三軸圧縮試験	
排水条件	圧密非排水	
載荷方法	応力制御法	
側圧	0.59 N/mm^2	
静的載荷	載荷荷重	最初と各段階の間に最大軸差応力の 1/2 の初期せん断応力を載荷
	載荷速度	$0.49 \text{ N/mm}^2/\text{min}$
多段階繰り返し載荷	周波数	0.5 Hz
	波形	正弦波
	載荷荷重	1 段階当たりの最大軸差応力の増分は 0.15 N/mm^2
	載荷回数	各段階で 10 回

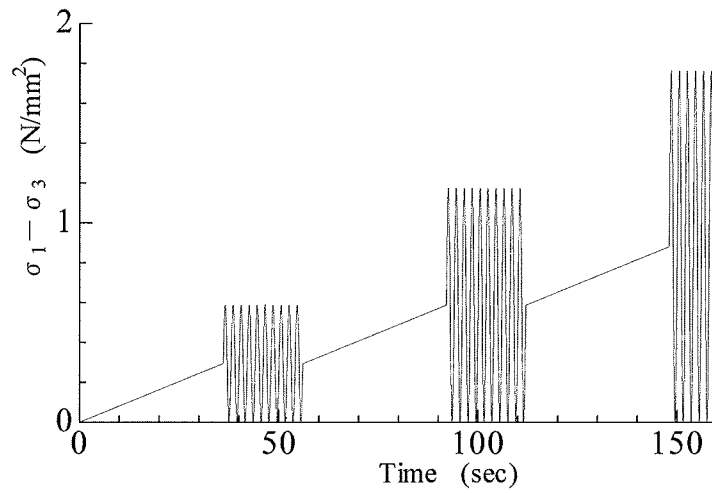
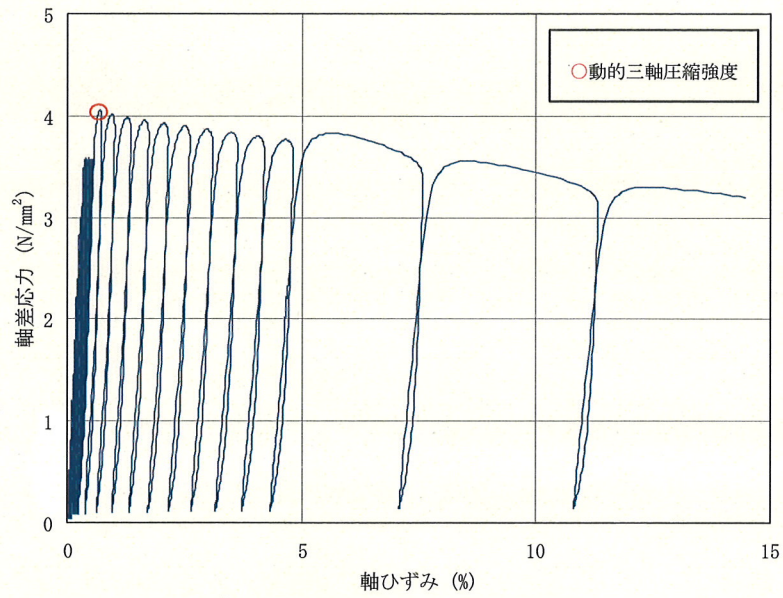


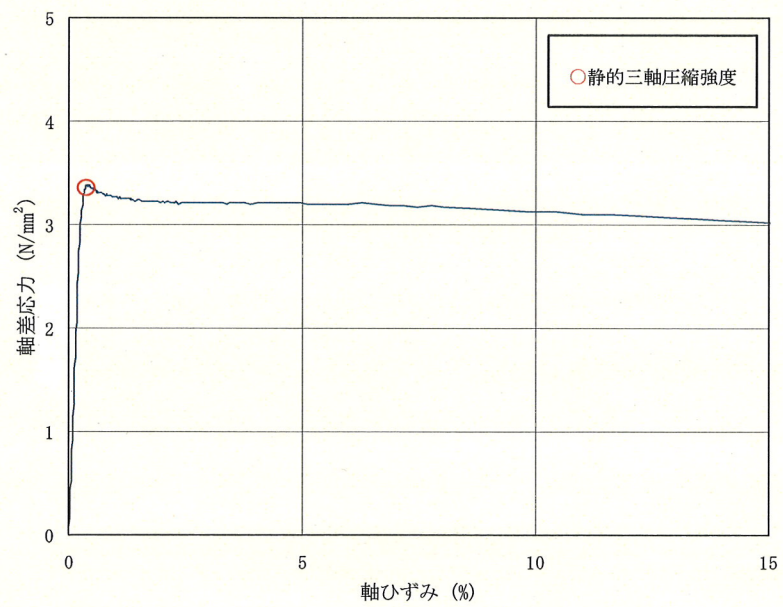
図-1.7 繰り返し载荷のパターン（淡灰色火山礫凝灰岩）

表-1.2 動的せん断強度試験結果

岩盤区分	側圧 σ_3 (N/mm ²)	動的三軸圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ (N/mm ²)	静的三軸圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ (N/mm ²)	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_d}{(\sigma_1 - \sigma_3)_s}$
淡灰色火山礫凝灰岩 00 tf	0.49	4.05	3.50	1.16
		4.18		1.19
		4.20		1.20
	平均	4.14		1.18
	0.98	3.80	3.74	1.02
		4.44		1.19
		4.29		1.15
平均	4.18		1.12	
シーム	0.59	0.78	0.71	1.10
		0.74		1.04
		0.76		1.07
	平均	0.76		1.07

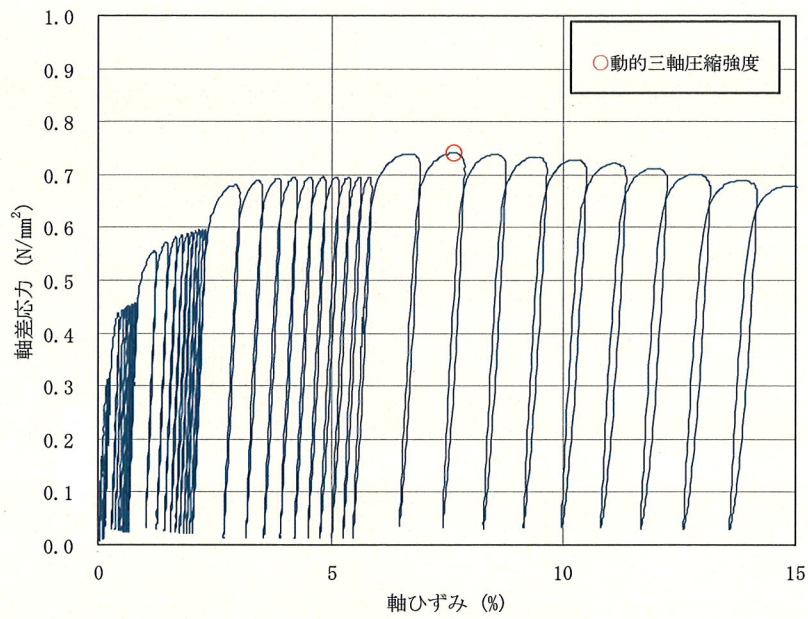


(a) 動的せん断強度試験

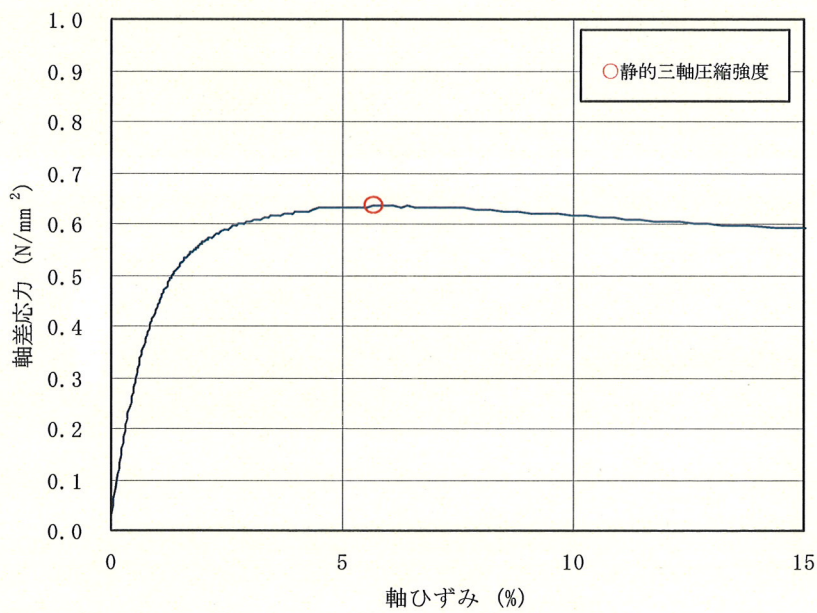


(b) 静的せん断強度試験

図-1.8(a) 応力～ひずみ関係の比較 (淡灰色火山礫凝灰岩)



(a) 動的せん断強度試験



(b) 静的せん断強度試験

図-1.8(b) 応力～ひずみ関係の比較 (シーム)

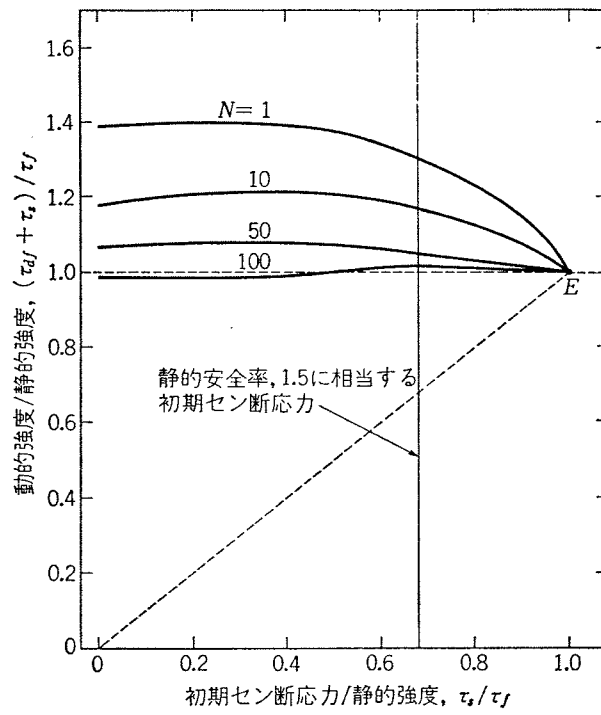
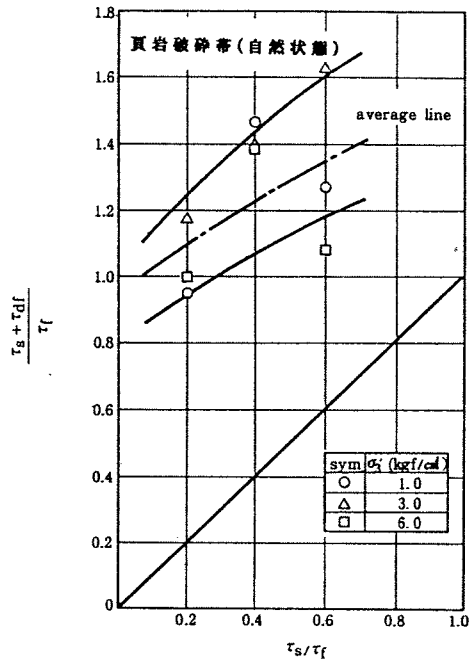
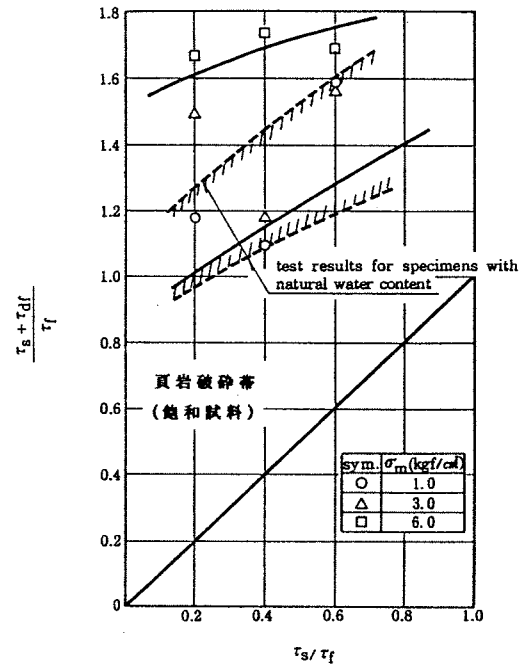


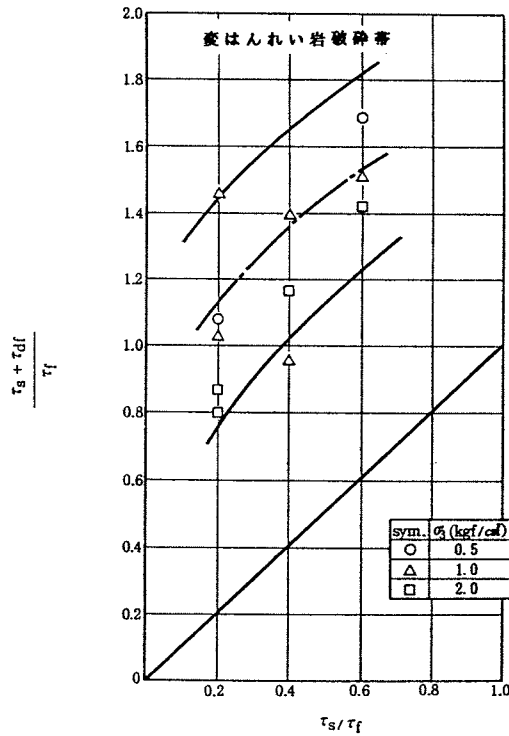
図-1.9 動的強度と初期せん断応力の関係 (締固めた粘性土及び不かく乱土) ⁴⁾



図(a) 動的強度と初期せん断応力の関係 (断層破砕帯・自然含水状態)



図(c) 動的強度と初期せん断応力の関係 (断層破砕帯・飽和状態)



図(b) 動的強度と初期せん断応力の関係 (断層破砕帯)

図-1.10 動的強度と初期せん断応力の関係 (断層破砕帯) ⁵⁾