

堆積軟岩における動的破壊強度の時間依存性に関する検討

埼玉大学工学部 正会員 長田 昌彦
 埼玉大学工学部 正会員 吉中龍之進

1.はじめに

近年、長大吊橋や原子力発電所などの重要構造物の支持地盤として堆積軟岩が用いられることが多い。地震の多い我が国では地震動程度の周波数および振幅を持つ振動に対して十分安全となるように、これらの構造物を設計しなければならない。岩石の力学特性は時間に依存するため、岩石に地震動のような繰り返し荷重が加わった場合、破壊強度の荷重速度依存性と疲労の2つの現象が生じるはずである。このとき変形速度が0.01mm/min.程度の通常の圧縮試験を基準とすると、これらの現象は破壊強度に関して逆の効果、すなわち荷重速度の増加に伴い強度は増加するが、疲労により強度は低下することとなる。従ってどちらの現象が支配的であるかを検討しておく必要がある。本報告では4種類の堆積軟岩を対象として実施した静的および動的荷重試験をもとに、上記の問題点を検討した結果を報告する。

2.実験方法および結果

用いた試料は神戸層砂岩・泥岩、横浜シルト岩、大谷石の4種類で、いずれも新第三紀中新世に堆積した軟岩である。直径：高さが2である円柱形(φ50×100mm)に整形した供試体を強制飽和させ、所定の拘束圧で等方圧密したあと非排水条件下で各試験を実施した。試験は拘束圧をパラメータとした静的三軸圧縮試験・疲労試験・多段階繰り返し試験の3種類を実施した。なお、すべての試験でバックプレッシャーとして0.5MPaを加え、さらに動的試験では繰り返し周波数を0.2Hzとし、波形は正弦波を用いた。試料の物性を表-1に示す。

それぞれの試験の荷重パターンを図-1に示す。静的荷重試験(図-1(a))では0.01mm/min.の変位制御とし、初期拘束圧は0.1-3.4MPaの範囲で変化させた。疲労試験(図-1(b))では初期軸差応力まで静的に荷重したあと、所定の応力振幅で供試体が破壊するまで繰り返し荷重を加えた。ただし繰り返し回数は1試験当たり1000回を最大とし、その中で軸ひずみが急増したときの軸差荷重を疲労強度と定義した。多段階繰り返し試験(図-1(c))の荷重方法は疲労試験とほぼ同様であるが、応力振幅を各ステップ毎に各拘束圧における破壊強度のおよそ1/10ずつ増加させ、破壊にいたるまでこの作業を繰り返す。各ステップの繰り返し回数は5回とした。

図-2に静的荷重試験と多段階繰り返し試験の結果の一例を示す。これより多段階繰り返し試験の応力-ひずみ-間隙水圧曲線は静的荷重試験のそれとほぼ同じ形状を示すことがわかる。またどちらの試験でも

表-1 試料の物性値

Rock Type	G	γ_t	n	T_0	qu
		(N/m ³)	(%)	(MPa)	(MPa)
神戸層砂岩	2.61	2.215	24.2	0.112	2.11
神戸層泥岩	2.65	2.213	26.8	0.131	1.26
横浜シルト岩	2.68	1.991	41.5	0.217	3.41
大谷石	2.31	1.754	41.6	0.565	6.82

G :比重, γ_t :湿潤単位体積重量, n :間隙率, T_0 :引張強度, qu :一軸圧縮強度

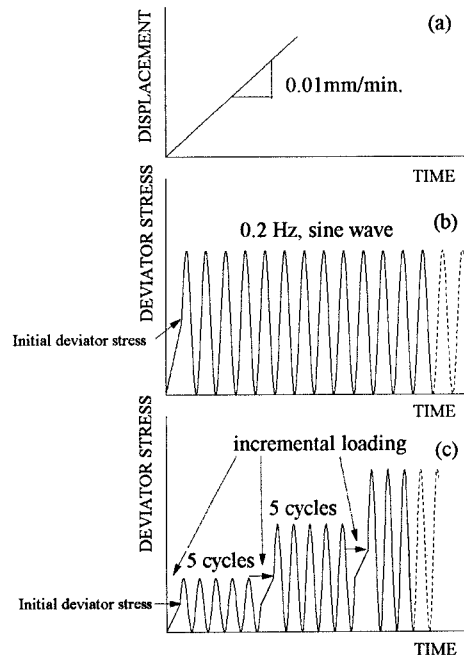


図-1 荷重パターン.(a)静的荷重試験,(b)疲労試験,(c)多段階繰り返し試験

最大軸差応力を記録し、これをそれぞれ静的強度、動的強度と定義した。図-3には、疲労試験から求まるS-Nプロットが示してある。ただし縦軸の軸差応力は同拘束圧下での静的強度で正規化している。図より破壊するまでの繰り返し回数の対数と加えた軸差応力は逆比例関係にあることがわかる。ばらつきはあるものの、最少二乗法で計算したこれらの関係の近似線（図中の破線）は次式で表わされる。

$$S=1.18-0.043 \log N \quad (\text{大谷石, 拘束圧} 0.5 \text{ MPa}) \quad (1)$$

$$S=1.26-0.061 \log N \quad (\text{横浜シルト岩, 拘束圧} 0.5 \text{ MPa}) \quad (2)$$

$$S=1.13-0.051 \log N \quad (\text{横浜シルト岩, 拘束圧} 2.0 \text{ MPa}) \quad (3)$$

3. 考察と結論

静的載荷試験と多段階繰り返し試験より得られた静的強度と動的強度の大きさを比較するために、図-4のように初期拘束圧に対するこれらの比をプロットした。ただし神戸層泥岩については試験した供試体数が少ないこともあり、データがばらついていてため除外して考えることとする。図よりほとんどのデータが初期拘束圧の大きさに問わず1.0-1.5の範囲に入っていること、また最少二乗法より求めたこれらの平均値（図中の実線・破線・一点鎖線）は岩質によらず1.1-1.3の範囲に入っていることがわかる。

多段階繰り返し試験の場合、載荷速度の増加に伴う破壊強度の増加だけでなく、その前の繰り返し荷重による疲労の影響も含んでいるはずであり、図-2に示した応力-ひずみ曲線のピーク付近の繰り返し載荷において履歴ループが大きく開いてきていることからその傾向が伺える。地震動の場合卓越する周波数は0.1-1.0Hz程度であり、本実験で用いた0.2Hzという周波数はその下限に近く載荷速度としては小さいほうに当たる。また地震動の加速度波形を見る限り、ピークを記録するような振動は数波程度であり本実験で用いた5回の繰り返し載荷で地震動のような徐々に増加する振幅に対する疲労の影響をある程度考慮できるものとする。さらに式(1)-(3)の右辺第一項は載荷速度の増加のみに伴う強度増加を表わしているが、この値も上で求めた動的強度と静的強度の比の範囲内にある。従って図-4の結果は疲労より載荷速度の影響が強く現れることを示唆している。さらに表-2に示したように、この関係は内部摩擦角よりも粘着力の増加として表現されることがわかる。

以上より堆積軟岩では地震動に対して静的試験の破壊基準を用いて設計を行えばよいと考えられる。

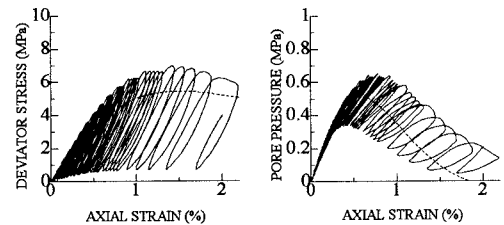


図-2 応力-ひずみ-間隙水圧曲線の一例

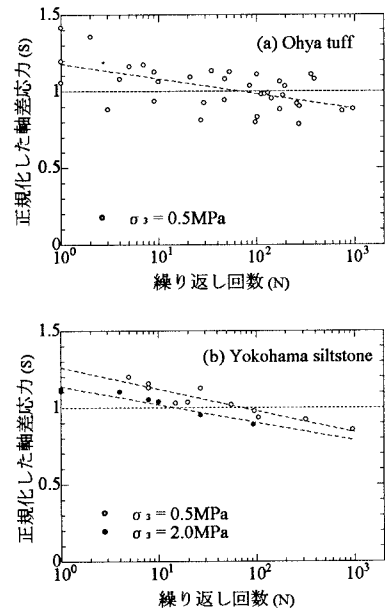


図-3 S-Nプロット。(a)大谷石、(b)横浜シルト岩

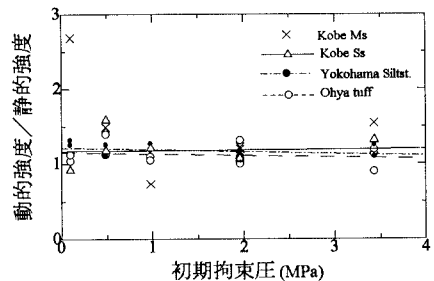


図-4 静的強度に対する動的強度の比。

表-2 モーラー・クロンの破壊基準における定数

Rock Type	C_s (MPa)	ϕ_s (°)	C_d (MPa)	ϕ_d (°)	C_d/C_s	ϕ_d/ϕ_s
神戸層砂岩	0.78	43	0.72	49	1.08	1.13
神戸層泥岩	0.35	35	0.47	33	1.34	0.95
横浜シルト岩	1.09	32	1.32	34	1.21	1.05
大谷石	-	-	0.72	48	-	-