

(59) 繰返し荷重を受ける堆積軟岩の長期強度の推定

○東京電力(株) 正会員 中山武樹
(株)間 組 正会員 平井光之
(株)間 組 正会員 吉村和彦
(株)間 組 正会員 岩下夏季

Long-term Strength of Soft Rock Under Cyclic Loading

Takeki NAKAYAMA	TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY
Mitsuyuki HIRAI	HAZAMA CORPORATION
Kazuhiko YOSHIMURA	HAZAMA CORPORATION
Natsuki IWASHITA	HAZAMA CORPORATION

Abstract

In order to advance the effective use of underground space, it is necessary to clarify the mechanical property of soft rock.

In this report, fatigue characteristics and long-term strength of sedimentary soft rock (mud stone) under static and cyclic loading are investigated in undrained test conditions.

The obtained main conclusions are as follows:

- (1) At a same intensity of applied load, mud stones under cyclic loading take less time to fail than that of under creep loading.
- (2) Over-porewater pressure under cyclic loading causes effective confining pressure's decreasing. For that reason, strain rate under cyclic loading becomes larger than that of under creep loading.
- (3) Total strain to fail, that is independent of loading condition, is relatively constant. So the duration time to fail can be calculated by only relationship between intensity of applied load and strain rate.
- (4) Residual strength, that hardly depends on strain rate, is useful to clarify the long-term strength.

1. はじめに

首都圏およびその近郊の地下空間に諸施設を建設しようという構想が盛んになって久しい。特に、電力貯蔵施設を地下空間に設けた場合、周辺の岩盤に1日～数日周期の繰返し荷重が長期にわたって作用することになる。関東地域では、これらの施設の立地の対象となるのは、上総層群に代表される泥岩を主体とする堆積軟岩であり、そこに地下構造物を安全に建設するためには、堆積軟岩の力学的挙動、なかでも疲労特性と長期強度に関する知見の集積が不可欠である。

堆積軟岩の力学特性に関しては、大谷石を用いた一連の実験に基づき破壊基準・時間依存性に検討を加えた足立らの研究^{1)～3)}、泥岩を用いた西らの系統的な研究⁴⁾を挙げることができるが、堆積軟岩の挙動

にはまだ不明な点も多い。

本研究は、堆積軟岩のうち2種の上総層群泥岩を試料として、各種載荷速度による静的三軸圧縮試験、クリープ試験、繰返し載荷試験を実施した結果、特に繰返し載荷の効果について両泥岩試料に共通した知見を得たので報告するものである。

表-1 試料の基本物性

2. 試験方法・供試体

試験に用いた試料は房総半島で採取した上総層群国本層泥岩ならびに神奈川県東部で採取した上総層群中里層泥岩である。両試料の基本物性は表-1に示すように、国本層泥岩で30~40kgf/cm²、中里層泥岩で20kgf/cm²程度の一軸圧縮強度を有している。供試体は直径50mm、高さ100mmの円柱状とし、24時間の水中脱気の後試験に供した。

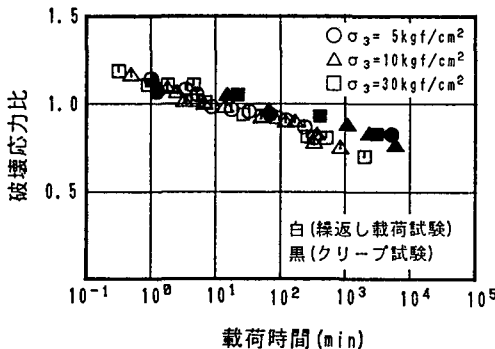
試験条件の概要は表-2に示す通りであり、いずれの試験も圧密非排水試験とし、圧密時の排水はペーパーによる側面排水方式によった。また、両試料とも側圧条件を先行圧密荷重以下に設定しており、過圧密状態での試験となっている。

実験に使用した装置は油圧式サーボ機構を有する振動三軸試験装置および圧縮空気載荷型の三軸クリープ試験装置である。繰返し載荷時の載荷パターンは、圧密終了後あらかじめ設定した初期軸差応力まで静的に載荷し、その後初期軸差応力を中心に一樣振幅の繰返し荷重を作用させるという方法を用いた。

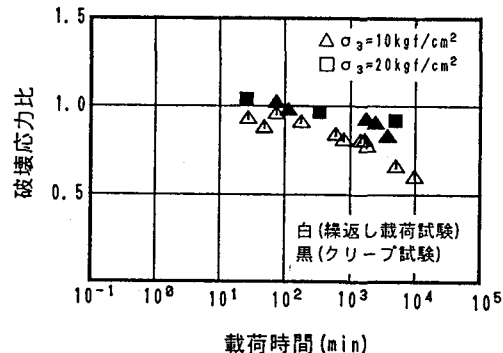
項 目		(a)国本層泥岩	(b)中里層泥岩
比 重	自然含水比(%)	2.703	2.673
	湿潤密度(gf/cm ³)	25.9	26.3
	乾燥密度(gf/cm ³)	1.958	1.932
	液性限界(%)	1.550	1.524
	塑性限界(%)	43.5	55.8
	27.9	22.0	
粒 度	砂 分(%)	23	29
	シルト分(%)	53	40
	粘土分(%)	24	31
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)		35.6	22.0
弾性係数(kgf/cm ²)		3.85×10 ³	2.28×10 ³

表-2 試験条件一覧

試験項目	(a) 国本層泥岩	(b) 中里層泥岩
静的三軸圧縮試験	側圧 5kgf/cm ² 10kgf/cm ² 30kgf/cm ²	側圧 5kgf/cm ² 10kgf/cm ² 20kgf/cm ²
	載荷ひずみ速度 0.03%/min	載荷ひずみ速度 0.001%/min 0.03%/min 0.1%/min 1.0%/min
クリープ試験	側圧 5kgf/cm ² 10kgf/cm ² 30kgf/cm ²	側圧 10kgf/cm ² 20kgf/cm ²
	破壊応力比 0.7~1.1	破壊応力比 0.8~1.0
繰返し載荷試験	側圧 5kgf/cm ² 10kgf/cm ² 30kgf/cm ²	側圧 10kgf/cm ² 20kgf/cm ²
	載荷周波数 0.5Hz 0.1Hz 0.01Hz	載荷周波数 0.5Hz 0.1Hz 0.01Hz
	破壊 応力比 0.7~1.2	破壊 応力比 0.6~0.9



(a) 国本層泥岩



(b) 中里層泥岩

図-1 載荷応力レベルと破壊までの時間の関係

3. 寿命と載荷条件の関係

クリープ試験、繰返し載荷試験における破壊は、それぞれひずみ速度が上昇し始める時点をもって定義しており、その時点におけるひずみ（破壊ひずみ）は静的三軸圧縮試験における最大強度発揮時点のひずみにほぼ対応している。また、破壊ひずみは試験時の側圧、載荷応力レベルには特に依存しなかった。

図-1に示すように、両試料とも応力レベルの低下に伴ってクリープに比べ繰返し載荷の方が破壊に至るまでの時間が短くなる傾向が現れている。同一の応力レベルでの供試体に加えられる力積としてはクリープの場合の方が大きいにもかかわらず、こうした結果が得られているのは、荷重変動による何らかの影響があることを示していると考えられる。

なお、図の破壊応力比とは載荷応力と静的三軸圧縮試験時の最大応力の平均値との比を表す。

次に、最小ひずみ速度と破壊時間の関係を見ると、図-2に示すように両対数グラフ上で1本の直線で近似でき、クリープ、繰返し載荷において差はない。これは、破壊ひずみが載荷条件によって変わらないことを裏付けるものである。ここで、繰返し載荷におけるひずみ速度は、応力ピーク時のひずみの時間変化をとっている。

一方、載荷応力レベルと最小ひずみ速度の関係では、図-3に示すように両者には依存性があり、同一の応力レベルにおいてはクリープ試験に比べ繰返し載荷試験の方がひずみ速度が大きいため、破壊までの時間が短くなっていると考えられる。

4. 荷重変動の影響

最小ひずみ速度と破壊時の間隙水圧の大きさの関係をみてみると、図-4からわかるように静的三軸圧縮試験、クリープ試験に比べ、繰返し載荷試験において大きな間隙水圧が発生している。繰返し載荷の場合、1波ごとの載荷速度が最大数% / min 程度と比較的速く、その場合、間隙水圧が真の値より小さく測定される傾向があるので、発生している間隙水圧は実際にはさらに大きい可能性がある。

間隙水圧の上昇は有効拘束圧 (σ_3') を低下させることになる。破壊時有効拘束圧とひずみ速度との関係を図-5に示す。同図によると、繰返し載荷試験の場合には破壊時の有効拘束圧が低く、また破壊時軸差応力を等応力線として引いてみると、同程度の軸差応力の場合、有効拘束圧が小さいほどひずみ速度が大きくなることがわかる。

これらの結果から、荷重変動による寿命の低下のメカニズムを以下のように考えることができる。

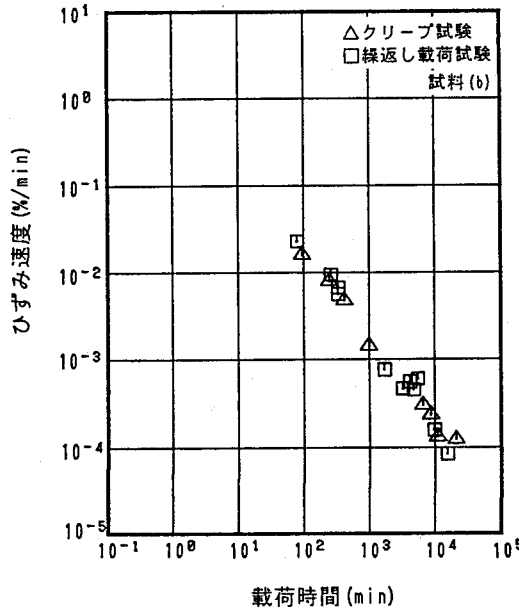
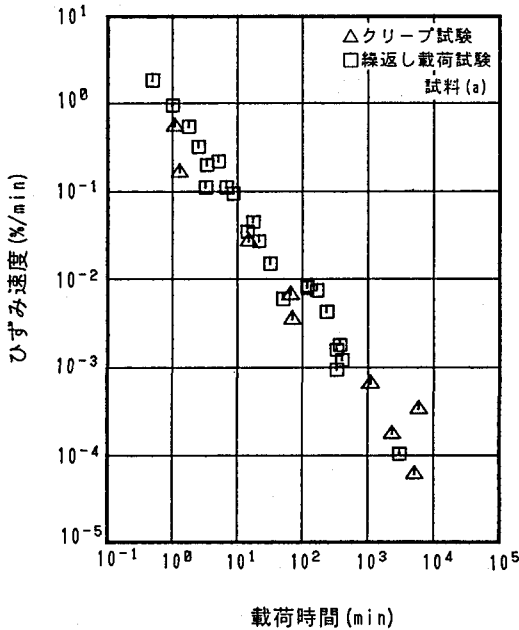


図-2 最小ひずみ速度と破壊までの時間の関係

- ①荷重変動により供試体内に過剰な間隙水圧が生じ、有効拘束圧の低減をもたらす。
- ②有効拘束圧の大きさとひずみ速度との間には負の相関関係があるため、ひずみ速度が上昇し、寿命の低下に至る。

5. 破壊時の応力状態（破壊基準）

破壊時の平均有効応力と軸差応力の関係を図-6に示す。同図から上総層群泥岩の破壊時応力状態について、以下のようなことがわかる。

- ①静的三軸圧縮試験における最大強度はひずみ速度に依存するため、最大強度に関する破壊基準線はひずみ速度ごとに異なるが、残留強度はひずみ速度に比較的依存しないため、載荷速度の違いによらず1本の直線上に並ぶ。
- ②クリープ試験における最小ひずみ速度は静的試験における載荷速度とほとんど等価であり、破壊時の応力状態は静的三軸圧縮試験のひずみ速度に応じた基準線で評価できる。
- ③繰返し載荷試験における破壊時応力状態はクリープ試験、静的三軸圧縮試験のものとは、明らかに異なり、ひずみ速度別に描いた同一の破壊基準線では評価できない。これは、間隙水圧の発生量が他の載荷条件の場合に比べ大きく、平均有効応力を押し下げているためである。

6. 長期強度の推定

図-3には静的三軸圧縮試験における最大強度および残留強度と載荷速度の関係もあわせて示しているが、静的三軸圧縮試験における最大強度とひずみ速度の関係はクリープ試験における載荷応力と最小ひずみ速度の関係とほぼ等価であり、両載荷方法については共通した見方が可能であることを示している。

図-2および図-3の関係をを用いれば、載荷荷重から破壊までの時間を知ることができる。実用的には、ひずみ速度を数通り変化させて静的三軸圧縮試験を行えば、クリープを含めた載荷条件下での長期強度を推定できる。ただし、繰返し載荷の場合には、同一荷重に対応するひずみ速度が他の載荷条件の場合より大きくなるので、別の評価が必要である。

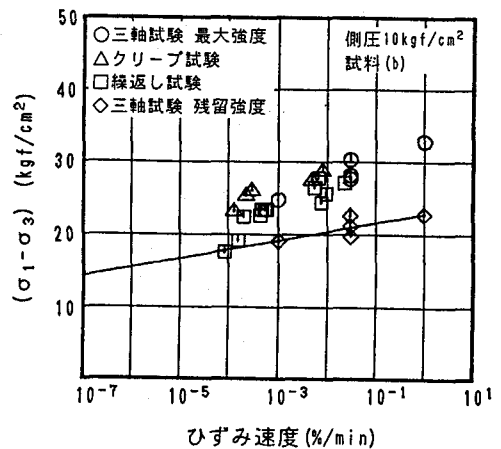
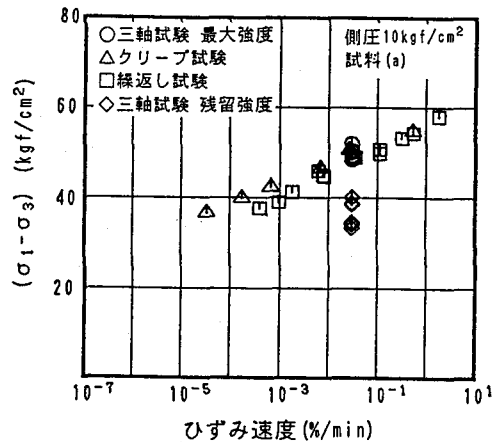


図-3 載荷応力レベルと最小ひずみ速度の関係

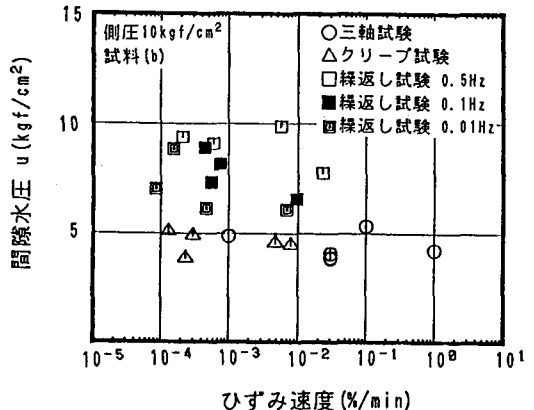


図-4 最小ひずみ速度と破壊時間隙水圧の関係

一方、残留強度については、西らも指摘しているように⁴⁾、比較的ひずみ速度への依存性が小さく、また、ひずみ速度を十分小さくした場合の最大強度は残留強度に一致することが予想されることから、数十年といった長期の強度を問題とする場合は残留強度を設計強度として考えればよいと推定される。

7. まとめ

2種類の堆積軟岩を用いた種々の载荷試験を通して、载荷荷重を変動させることによって供試体の破壊が促進されることがわかった。また、そのメカニズムのひとつとして動的载荷による過剰間隙水圧の発生が有効拘束圧の低下を招いている可能性を指摘した。ただし、ここで扱ったのは圧密非排水条件下での試験のみであること、繰返し载荷の周波数は0.01~0.5Hz という比較的狭い範囲に限られていることから、他の試験条件の場合の現象の確認が今後必要と思われる。

泥岩における各種载荷条件下での寿命の推定を行うためには、荷重レベルとひずみ速度の関係および破壊ひずみを知ればよいが、変動荷重が作用する場合には、過剰な間隙水圧の発生によるひずみ速度の上昇にも留意すべきである。

施設の稼働時の荷重に関する実際の構造物の設計に関しては、数十年といった長期の安全性を考慮することになろうが、その場合には静的三軸圧縮試験における残留強度が設計上の目安になると考えられる。

参考文献

- 1) 足立、小川：堆積軟岩の力学特性と破壊基準、土木学会論文報告集、第295号、1980年3月
- 2) 赤井、足立、西：堆積軟岩（多孔質凝灰岩）の時間依存特性と構成式、土木学会論文報告集、第282号、1979年2月
- 3) 足立、林：軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響、土木学会論文報告集、第305号、1981年1月
- 4) 西、岡本、江刺：各種载荷条件下における泥岩の強度-変形特性とその統一的解釈、土木学会論文報告集、第338号、1983年10月

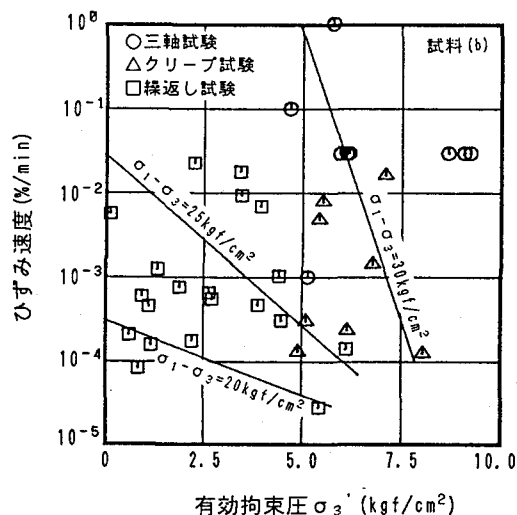


図-5 破壊時有効拘束圧とひずみ速度の関係

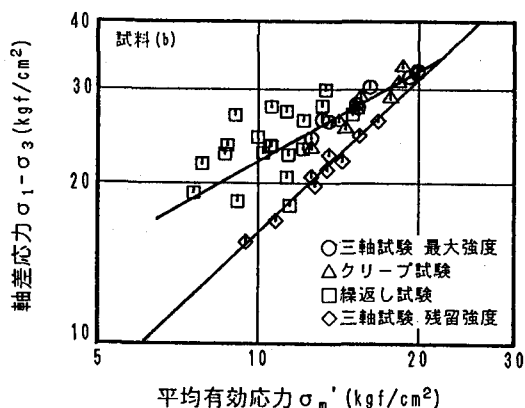
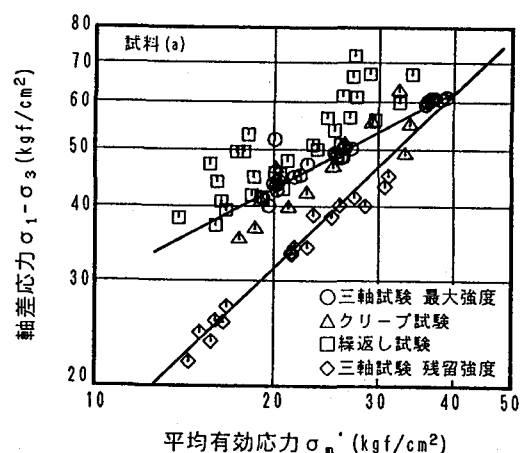


図-6 破壊時の応力状態