

岩の動的強度に関わる繰返し三軸圧縮試験の基準化

Standardization of the Cyclic Triaxial Compression Test Concerning Dynamic Strength of Rocks

岡田 哲 実 (おかだ てつじ)

(一財)電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員

伊 藤 洋 (いとう ひろし)

(一財)電力中央研究所 研究アドバイザー

船 戸 明 雄 (ふなと あきお)

応用地質(株)エネルギー事業部 技術長

1. はじめに

今般、地盤工学会において、岩の動的強度に関わる二つの室内試験基準、JGS 2561「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」、JGS 2562「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」が制定された。基準化に際しては、岩石の繰返し強度試験方法基準化WG(表1)で検討がなされてきた。以降では、主に基準の解説に記載した内容を基に紹介を行う。

表1 岩石の繰返し強度試験方法基準化WG構成

グループリーダー	伊藤 洋	(一財)電力中央研究所
グループ幹事	岡田 哲実	(一財)電力中央研究所
グループ幹事	船戸 明雄	応用地質(株)
メンバー	上西 幸司	東京大学大学院
メンバー	内村 太郎	東京大学大学院
メンバー	宇野 浩樹	大成建設(株)
メンバー	大熊 信之	九州電力(株)
メンバー	川崎 了	北海道大学大学院
メンバー	鈴木 健一郎	(株)大林組
メンバー	中島 雅之	(株)ダイヤコンサルタント
メンバー	早野 公敏	横浜国立大学大学院
メンバー	山田 卓	大阪市立大学大学院
メンバー	吉田 淳	サンコーコンサルタント(株)

(注) 所属は2013年7月時点

2. 基準化の背景

従来、基礎岩盤や岩盤斜面の地震時の安定解析では、静的解析が主流であったことから、基礎岩盤や岩盤斜面の安定解析に用いる岩盤の強度については、いわゆる「静的強度」が用いられてきた。その一方、近年、重要土木構造物の安定解析で動的解析が行われるようになってきており、その解析に用いる物性の1つとして「動的強度」を適切に評価することが求められている。ここで言う「動的強度」とは、動的解析に用いる強度であるから、耐震設計においては地震波のような不規則波形の繰返しせん断応力が加えられた時に発揮される強度と言える。しかしながら、地震波形は様々であり、またそれに伴って地盤内部に作用する応力(波形)も場所によ

て異なるため、一意的に「動的強度」を定義することは本来困難である。そのような理由から、一般には、サイン波の載荷荷重を与えて、その時に発揮される強度を「動的強度」と称しているのが現状である。

この「動的強度」を求めるために、原子力発電所の耐震設計においては、今回基準化された「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」に類似の試験方法が用いられてきた。しかしながら、必ずしも試験方法が統一されていなかったため、段階数、載荷周波数、繰返し回数等をなるべく限定し、試験方法を統一した。よって、「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」によって得られる「動的強度」は、あくまで限定した条件で発揮される強度であり、地震波のような不規則波形の繰返しせん断応力が加えられた時に発揮される強度とは異なるものである。もう一つの「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」は、規則波と不規則波の影響を関連付けるために必要な試験方法である。

3. 試験の目的

JGS 2561「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」は、地震時の繰返し応力下において発揮される岩石の圧縮強さを把握するために、等方応力状態にある岩石供試体に対して非排水条件で一定のいわゆる片振り(せん断応力の方向が変化しない条件)の繰返し載荷を段階的に行い、多段階繰返し載荷による圧縮強さを求めることを目的としている。本試験では、繰返し載荷時の入力波としては地震波でなく規則的な一定の応力振幅波としているが、これは地震波とサイン波(段階数:5, 繰返し回数:10)に関する既往の試験結果を比較した際に、得られた圧縮強さが同等程度であるという過去の実験事実¹⁾に基づいている。また、繰返し載荷をいわゆる片振りで行う理由は、通常用いられている三軸試験装置の機構や性能では両振り(片振り)が困難であることに加え、本基準がいわゆる「動的強度」と「静的強度」の大小関係を把握することを目的としていることから、単調載荷試験と同様に圧縮応力状態での片振りの繰返し載荷条件下で試験を行う必要があるためである。

JGS 2562「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」の目的は、等方応力状態にある岩石供試体に一定の片振りの応力振幅により非排水条件

で繰返し载荷を行い、その疲労特性を求めることにある。特に、JGS 2561により得られた圧縮強さは疲労による損傷の影響を受けている可能性があると考えられることから、この影響を解釈するためには疲労特性を求める必要がある。

4. 試験の概要

4.1 対象とする材料

両試験基準は、軟岩から硬岩までのすべての岩石及び断層運動や褶曲運動などの構造運動に伴って破碎した岩石の帯状分布である破碎帯を構成する材料を対象としている。なお、岩石以外にも破碎帯を対象とした理由は、これまでの試験実績及び将来的に予想される試験ケースの増加を考慮したことによるものである。その他の材料としては、固結した過圧密粘土や人工軟岩のような人工材料に対しても適用することができる。

4.2 試験器具

両試験基準で使用する三軸試験機については、基本的に岩石の三軸圧縮試験方法とほぼ同様である。異なる点は、圧縮装置のみである。0.1~1.0 Hzの周波数で繰返し軸差応力の振幅を±10%の変動の範囲内で载荷できるものでなければならない。繰返し载荷過程において、所定の振幅及び回数を作用させることができない場合や载荷波形に乱れが生じた場合に、それが岩石自体の特性であるのか、あるいは载荷システムの特性であるのか、評価できないことが懸念されるため、使用する载荷システムを事前に検定しておく必要がある。

4.3 試験方法

両試験基準ともに、繰返し载荷過程までは、基本的に岩石の非排水三軸圧縮試験方法と同様である。繰返し载荷過程においては、载荷波形として、原則としてハーバーサイン波あるいは三角波を用いることを規定している。また、圧縮側のみで振幅一定の繰返し軸差応力を供試体に与えることとし、原則として軸差応力を負（伸張及び引張状態）としてはならない。

JGS 2561「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」では、繰返し载荷過程の载荷パターンは、0.1~1.0 Hzの周波数で、同条件で実施した単調载荷の非排水三軸圧縮試験から得られる圧縮強さの1/5程度の応力増分となるように、繰返し回数を10波ずつ、原則として軸差応力が増加しなくなるまで段階的に増加させていく（図-1）。

JGS 2562「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」では、繰返し载荷過程の载荷パターンは、0.1~1.0 Hzの周波数で、同条件で実施した単調载荷の非排水三軸圧縮試験から得られる圧縮強さを基に3~5種類程の軸差応力振幅を設定し、軸差応力が著しく低下するか、あるいは軸ひずみが15%に達するまで一定振幅で载荷する（図-2）。

4.4 試験結果の整理

JGS 2561「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」では、軸差応力-軸ひずみ関係を図示し、軸差応

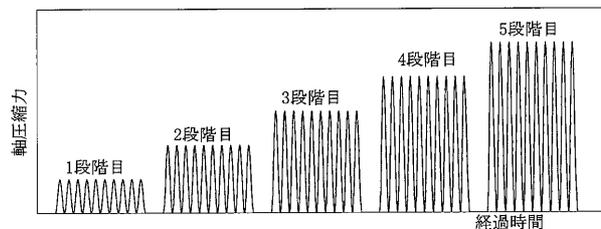


図-1 JGS 2561の载荷パターンの例（ハーバーサイン波）

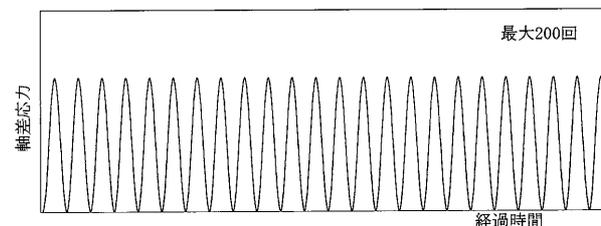


図-2 JGS 2562の载荷パターンの例（ハーバーサイン波）

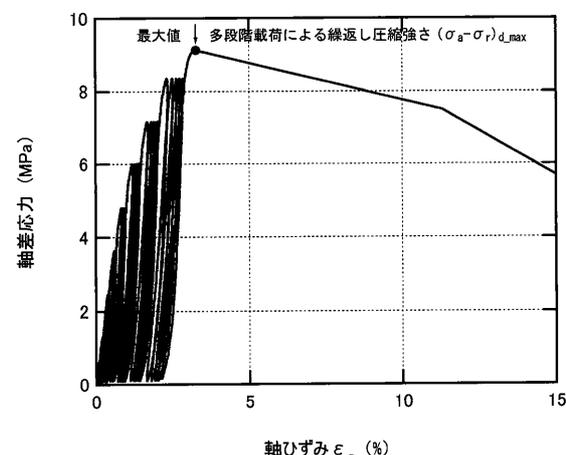


図-3 JGS 2561に示された軸差応力-軸ひずみ曲線の例

力の最大値を図上から求め、「多段階繰返し载荷による圧縮強さ」を求める（図-3）。この値と同条件で実施した単調载荷の非排水三軸圧縮試験から得られる圧縮強さを比較して、「動的強度」と「静的強度」の関係を考察することが一般的な結果の利用となるであろう。同様の観点から、各種の岩石及びシーム・断層材料を対象として、単調载荷と多段階繰返し载荷の試験で得られた強度を比較した事例をまとめた結果¹⁾を示す（図-4）。多段階繰返し载荷の試験条件については、基準化された試験条件と同様に、「静的強度」を基本に5段階（応力増分が「静的強度」の1/5）、繰返し回数10回、周波数0.1~1.0 Hzの条件が多い。波形については、サイン波が多いが、地震波を用いているものもある。結果的に得られる「動的強度/静的強度」は、岩石では1~1.5程度が多く、シーム・断層材料では1.0~2.5と範囲が広い。いずれにしても、「動的強度」が「静的強度」を上回る例が圧倒的に多い。

JGS 2562「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」では、繰返し軸差応力の振幅を

論 説

No.	岩種	試験法	拘束圧 (MPa)	静的 歪み速度 (%/min)	動的				
					波形	段階 ¹⁾	繰返し 回数	周波数 (Hz)	破壊 定義
R-1	片麻岩	三軸CU	0.2	0.1	正弦波	5	10	1	最大値
R-2	花崗岩	三軸CU	0.2	0.1	正弦波	5	10	1	最大値
R-3a	砂岩A	三軸CU	0.5	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-3b					地震波	Δq^2 13%	1	5倍	最大値
R-4	砂岩B	三軸CU	0.5	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-5a	砂岩C	三軸CU	0.34,0.45,0.53	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-5b					地震波	不明	1	5倍	最大値
R-6a	泥岩	三軸CU	0.5,0.57,0.65	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-6b					地震波	不明	1	5倍	最大値
R-7a	凝灰岩A	三軸CU	0.5,1.0	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-7b					地震波	Δq^2 12%	1	5倍	最大値
R-8	凝灰岩B	三軸CU	0.69	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-9a	凝灰岩C	三軸CU	0.41,0.5,0.58	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-9b					地震波	不明	1	5倍	最大値
R-10	凝灰岩(礫有)	三軸CU	0.69	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-11a	火山礫凝灰岩	三軸CU	0.49,0.98	不明	正弦波	Δq^2 0.59MPa	10	0.5	最大値
R-11b					地震波	Δq^2 0.49MPa	1	5倍	最大値
R-12	凝灰角礫岩	三軸CU	0.49,0.98	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
R-13	片岩	三軸CU	0.5	0.1	正弦波	5	10	0.5	最大値
F-1	シームA	単純せん断	0.59	0.1	正弦波	5	10	0.5	最大値
F-2	シームB	三軸CU	0.59	不明	正弦波	Δq^2 0.15MPa	10	0.5	最大値
F-3	断層内物質A	単純せん断	1.0	0.1	正弦波	5	10	1	最大値
F-4a	断層内物質B	三軸CU	0.20,0.39 1.18,2.35	不明	正弦波	5	10	0.2	最大値
F-4b					地震波	不明	1	0.2相当	最大値
F-5	断層内物質C	単純せん断	0.69	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
F-6	断層内物質D	単純せん断	0.69	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値
F-7	断層内物質E	三軸CU	0.69	不明	正弦波	5	10	0.5	最大値

*1: 静的強度に対する分割数, *2: Δq は, 1段階当たりの軸差応力の増分

図-4 「動的強度/静的強度」の比較¹⁾

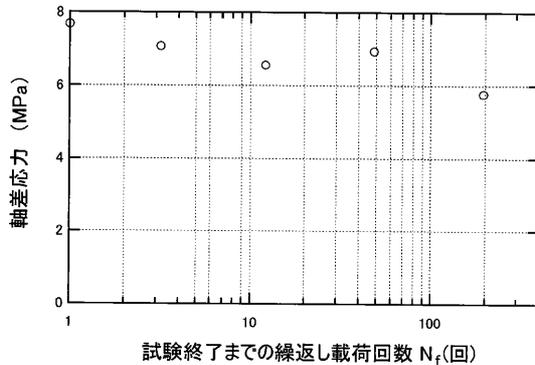
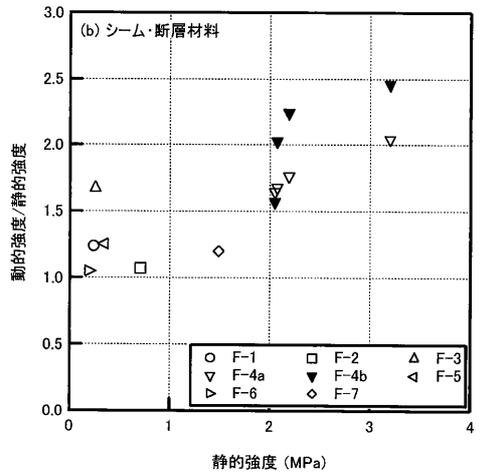
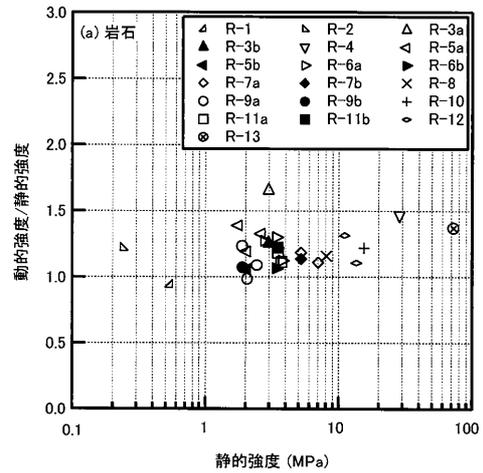


図-5 JGS 2562に示された疲労特性の例

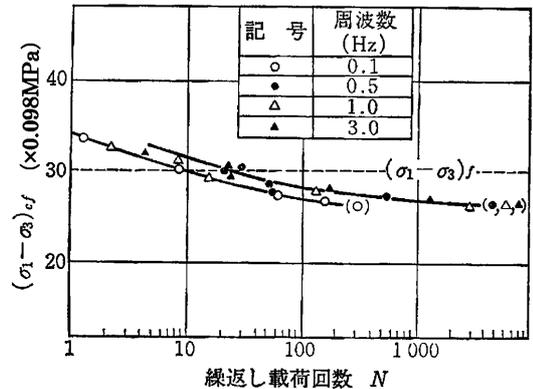


図-6 疲労特性における周波数依存性²⁾

縦軸に、試験終了までの繰返し回数 N_f (回) の対数を横軸にとって図示する (図-5)。この関係が試験で求める疲労特性である。同様の観点から、軟岩である新第三紀の泥岩を対象としたサイン波の繰返し荷重での圧密非排水三軸試験の例²⁾を示す (図-6)。同一条件のもとで実施した荷重周波数0.1 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz が示されている。これによると、荷重周波数0.1 Hz の場合は、他の結果に比べて同じ繰返し荷重回数に対する軸差応力は若干小さいが、荷重周波数0.5~3.0 Hz の範囲では、荷重周波数の影響は小さいことが分かる。なお、破壊を生じた N 回目の軸差応力を1回目の強度 (繰返

し軸差応力) で除して求まる応力比についてまとめた結果では、応力比については明確な周波数依存性は示さないことが同論文中に記載されている。

5. 試験結果の工学的利用

基準化された二つの試験方法による試験結果を関連付けた研究例を紹介する¹⁾。この研究では、任意波形で発揮される「動的強度」を評価するために以下のような数理モデルを提案している。それは、①繰返し回数(疲労)の効果、②荷重速度(荷重周波数)の効果、の二つを考

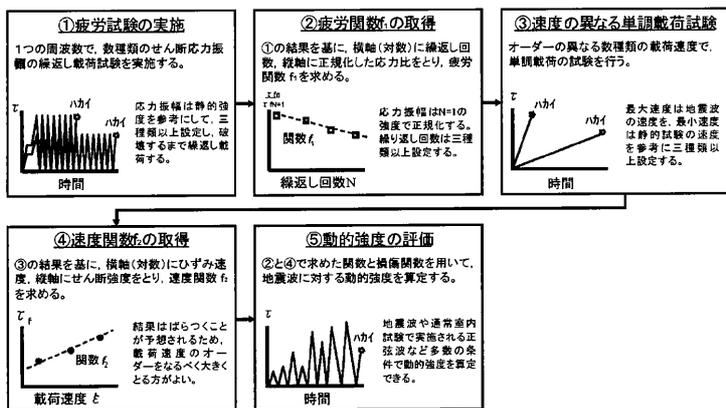


図-7 任意波形に対する「動的強度」の評価法¹⁾

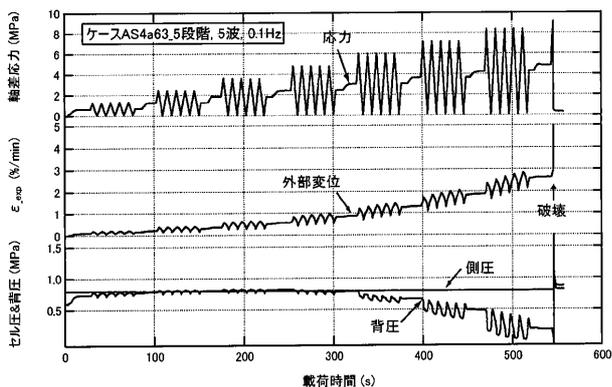


図-8 人工砂岩の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験の一例¹⁾

慮し、これに線形累積損傷則を適用して、規則波や不規則波載荷の効果を評価するものである。提案した数理モデルを用いることにより、以下の手順で「動的強度」を求めることができる(図-7)。

①代表する周波数で、数種類の軸差応力振幅の繰返し載荷による三軸圧縮試験を行う。軸差応力振幅は破壊するまで一定とする。これは基準化されたJGS 2562と同様である。

②上記の①の結果を元に、横軸に繰返し回数(対数)、縦軸に正規化した応力比をとり、疲労関数 f_1 を求める。(論文中ではある関数が示されているが、「動的強度」の算定において、関数の形は限定されない。)

③オーダーの異なる数種類の載荷速度で、単調載荷の試験を行う。載荷速度の範囲は、①の載荷周波数を網羅するように設定する。

④上記の③の結果を元に、横軸にひずみ速度(対数)、縦軸に圧縮強さをとり、速度関数 f_2 を求める。(論文中ではある関数が示されているが、「動的強度」の算定において、関数の形は限定されない。)

⑤上記の②、④で求めた関数 f_1 と f_2 、破壊に至るまでの損傷の影響をモデル化した損傷関数 f_3 を用いて様々な規則波及び不規則波(地震波)で「動的強度」を求める。また必要があれば、「静的強度」と比較する。

上記の方法の検証として、人工砂岩を用いた多段階繰返し非排水三軸圧縮試験(図-8)、凝灰岩を用いた多

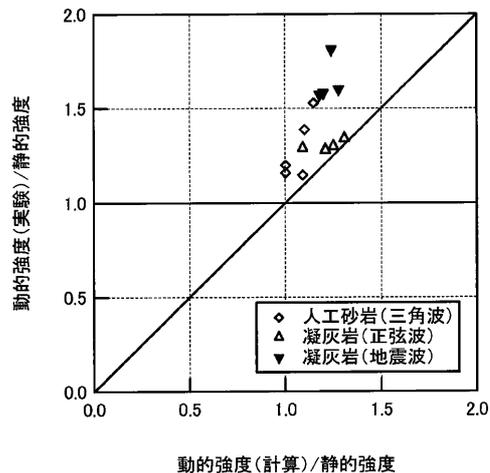


図-9 「動的強度」の実験結果と計算結果の比較¹⁾

段階繰返し一面せん断試験を行い、試験と上記の計算から得られた「動的強度」を比較している。その結果(図-9)、数理モデルを用いて計算した「動的強度」は、実験から得られた「動的強度」と比較してやや小さな値となったが、規則波や不規則波による「動的強度」を概ね評価できたことが示されている。

これにより、基準化されたJGS 2562「岩石の疲労特性を求めるための繰返し非排水三軸圧縮試験方法」とオーダーの異なる載荷速度で単調載荷の三軸圧縮試験を実施することにより、基準化されたJGS 2561「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法」の結果を評価することも可能であり、そればかりでなく、任意の不規則波による「動的強度」の評価が可能であることが示されている。

本研究以外に、破碎帯を構成する材料を模擬する人工供試体を用いて、基準化された二つの試験方法による試験結果を関連付けた研究例³⁾も見られる。

6. おわりに

東北地方太平洋沖地震を経験し、設計用地震動が増大し、解析手法も従来の静的解析から動的解析に移行している。動的解析に inputs する岩盤の力学物性の合理的な設定方法についても、本基準を契機に再検討されるべきと考えられる。今後の研究の進展に期待したい。

参考文献

- 岡田哲実・伊藤 洋：軟岩の動的強度評価法の室内試験による検証，電力中央研究所研究報告，No. N09029，2010。
- 西 好一・江刺靖行：泥岩の力学的特性に関する研究(その4)振動荷重下における強度—変形特性，電力中央研究所研究報告，No. 382014，1982。
- 大熊信之：原子力における岩石・岩盤物性評価手法の高度化に関する研究，九州電力㈱社内研究報告，No. 10048，2010。

(原稿受理 2013.7.1)