

構造物基礎岩盤の疲労特性に関する研究

鈴木 健一郎 丸山 誠
鳥井原 誠

Fatigue Properties of Rock Mass for Structure Foundation

Kenichirou Suzuki Makoto Maruyama
Makoto Toriihara

Abstract

A Multipurpose Testing Machine for Rock Mass (MTRM) that can independently control the principal stress is introduced for evaluating the behavior of jointed rock masses. The authors have used this machine to evaluate the static strength and deformation properties of the rock mass. In this study, we aimed at evaluating the fatigue properties of a jointed rock block, and then subjected 50 cm cubics of the jointed rock to triaxial cyclic loading tests. The results showed that the fatigue strength could be described by an S-N curve. The drop in fatigue strength for saturated rock blocks was less than that for naturally saturated rocks, which was a different result in case of rock. Regarding the deformation properties, cyclic plasticity was observed as for a soil material. It was thus demonstrated that joints in the rock block also dominated the fatigue deformation properties.

概 要

亀裂を多数含んだ岩盤は、それら亀裂の相互作用により複雑な挙動をする。亀裂性岩盤の挙動を把握するために三主応力制御の可能な岩盤多機能試験装置を導入し、亀裂性岩盤ブロックの強度、変形特性を明らかにした。この研究では、基礎岩盤の疲労特性を評価することを目的として、岩盤多機能試験装置を用いた繰返しせん断試験により、亀裂を多く含んだC₄級の50cm立方の岩盤ブロックの繰返しせん断特性を調べた。試験結果から、亀裂性岩盤においても疲労強度特性はS-N線図で表され、それは岩石試験結果とほぼ同様の傾向を示した。しかし、湿潤状態での強度低下は自然状態でのそれより小さい結果となった。変形特性では、繰返しせん断に伴い、土質材料でみられるような締固りが起る。これは、疲労変形特性においても亀裂の存在が変形特性を支配し、繰返し塑性を起すことを意味する。

1. はじめに

亀裂を多数含んだ岩盤は、それら亀裂の相互作用により複雑な挙動をする。岩盤構造物の合理的な設計法を確立することを目的とした場合、これら亀裂性岩盤の強度や変形特性を精度よく把握することがその第一歩となる。筆者らは、三主応力制御の可能な岩盤多機能試験装置を導入し、大型の亀裂性岩盤ブロックを原位置より採取し、その強度、変形特性を明らかにしてきた^{1)~5)}。

この研究では、静的強度、変形特性の既知である亀裂性岩盤を対象に、繰返し荷重が作用する場合の安定性評価を目的に、三軸繰返しせん断試験により当該岩盤の疲労強度特性と疲労変形特性を調べた。

岩盤の疲労特性に影響を与える要因としては次の7項目が挙げられ、亀裂を含まない岩石の疲労試験からいくつもの知見が得られている。

(1) 載荷速度(周波数)の影響 岩石においては、繰返し載荷速度が遅くなると一般に疲労強度は低下する。

しかし、周波数に対応したひずみ速度で無次元化することで疲労強度は周波数依存性を示さないことが報告されている⁶⁾。

(2) 荷重レベルの影響 硬岩の場合、静的強度の55%~60%の繰返し荷重の範囲では完全弾性体として扱える。花崗岩の場合85%以下の範囲では完全弾性体であるとの報告もある。

(3) 繰返し回数の影響 一般に繰返し回数が増えれば疲労強度は低下する。その傾向はS-N線図により評価できる。S-N線図とは、縦軸に載荷最大応力と破壊強度の比Sを取り、横軸には繰返し回数Nの対数を取ってSを変化させた場合の破壊までの繰返し回数をプロットするものである。このS-N線図はここで述べている他の要因の影響を受けて変化する。

(4) 拘束圧の影響 拘束を受けた岩石の疲労強度は、拘束を受けないその強度(一軸圧縮強さ)に比べて大きくなる。また、静的強度と疲労強度の比をとっても、拘束圧を受ける岩石の方が大きい値を示す。

(5) 岩種・岩盤等級の影響 新鮮花崗岩と風化花崗岩の一軸疲労試験から繰返し回数に伴う強度低減はほぼ一致することが示されている。また、風化花崗岩の場合は、破壊時のひずみ量は載荷速度に依存しないとしている⁷⁾。

(6) 含水状態の影響 岩石の飽和状態の疲労強度はS-N線図で表現され、疲労強度の低下は約50%と、乾燥状態のそれ(60%)より低い⁶⁾。

(7) 応力径路および振幅の影響 応力振幅が岩石の疲労強度に与える影響は、最大載荷応力の影響と比較すると小さい。岩石の疲労試験において、応力径路を考慮した例は見当たらない。一方、土質材料では、圧縮伸長の繰返しが行われ、圧縮側の片振りの試験結果との比較がなされている。しかし、排水状態ではどちらの場合も、材料は絞固まる結果となっている。

初めに述べたように、これらの疲労特性に関する研究成果はいずれも岩石供試体を対象としたもので、亀裂性の岩盤に関しての研究例はない。そこで、この研究では、深礎基礎の実規模実験の現場より採取した亀裂性の岩盤ブロックを用いて、三軸繰返しせん断試験を実施し、岩盤において上述の疲労特性に与える影響について考察した。最後に当該岩盤の疲労特性を把握し、基礎岩盤の疲労強度を推定した。また、繰返しに伴う変形特性の変化から基礎の合理的な設計法についての留意点についても述べる。

2. 岩盤ブロックせん断試験

2.1 岩盤多機能試験装置

岩盤多機能試験装置は、鉛直荷重10MN、水平荷重2方向にそれぞれ5MNの容量で、三方向独立に荷重および変位制御が可能である。この研究では、3方向独立に正弦波を負荷することが可能である。供試体は、500mm×500mm×500mmを標準とし、700mm×700mm×700mmの供試体も試験可能である(詳細は文献3)を参照)。

この試験装置は、圧盤を通じて供試体を加圧している関係上、圧盤と供試体間の摩擦力を完全に除去することは不可能であるが、これをできるだけ小さくする必要がある。ここでは、赤井ら⁹⁾の実験を参考に減摩剤としてシリコングリースを塗布した薄くて柔らかいテフロンシート(厚さ0.1mm)を用いて摩擦を減じた。

2.2 岩盤ブロック供試体

ブロック試料は、愛知県春日井市内津峠の採石場で実施された送電用鉄塔基礎の実規模水平載荷実験サイトより採取した。対象とした岩盤は、美濃帯中古生層の砂岩主体のC₁級岩盤である。砂岩部はホルンフェルス化により一軸強度が200MPa以上と非常に硬いが、間隔50mm程度のランダムに分布する亀裂付近は熱水変質している。PS検層によるP波速度は1.5km/sec程度である⁸⁾。

このような試料から一辺500mmのブロック供試体を作成した。ブロック供試体への成形の際に生じた表面の凹

凸および小ブロックの抜け落ち部等は、石膏を用いてキャッピングし、面の精度を確保した。ブロック供試体の一例をFig.1に示した。今回用いたブロック供試体は、砂岩と頁岩が複雑に入り交じった地質構造をしており、さらに上述したように砂岩部でもホルンフェルス化された部分(暗灰色の部分)は非常に硬く、次いで熱水変質を受けた亀裂周辺部(灰色の部分)がやや硬く、ホルンフェルス化されていない部分(薄茶色の部分)はそれよりは脆いものである。さらに、茶褐色に変質した部分と頁岩部、また粘土化した部分があり、それらを明確に区分するのは難しい。

2.2 試験方法

試験条件をまとめるとTable 1のようである。

(1) 供試体の含水状況

供試体の含水状況は、N1からN3の3供試体が、自然状態、S1およびS2が湿潤状態である。自然状態の供試体は試料採取時から成形後試験まで工業用パラフィルムによりコーティングすることで自然状態を保った。また、湿潤状態供試体は、上下面より真空脱気を24時間行い、4段階で真空を解除する方法を1サイクルとして、それを3回から4回実施した状態のものである。これらの飽和度はB値では40%から50%である。

(2) 試験条件

N1からN3の3供試体については、圧密排水条件、S1およびS2については、圧密非排水条件で間隙水圧を計測した。背圧は100 kN/m²である。

(3) 側方向応力(拘束圧)

N1供試体の拘束圧は、X軸とY軸の側方向応力(σ_2 と σ_3)を等方で、100 kN/m²一定、N2およびS1供試体の拘束圧は200 kN/m²一定の軸圧片振り試験である。N3供試体では、最小拘束圧が100 kN/m²となるように側方向応力の繰返しを行った。S2供試体は、最小拘束圧が200 kN/m²とな



Fig.1 ブロック供試体の例(N1供試体)
Example of Block Specimen (N1 specimen)

る両振り繰返しせん断試験である。

(4) 載荷条件(応力経路)

応力経路は、Fig.2に示す3種類を考えた。通常、岩石の繰返し載荷では、側方向応力 σ_3 ($= \sigma_2$) を一定に保ち、 σ_1 を載荷して軸差応力を変動させる方法が取られる (Fig.2の経路a)。N1, N2, およびS1供試体の載荷条件がそれである。一方、経路bは、最大主応力 σ_1 を固定し、側方向応力 (X方向応力およびY方向応力) の除荷により軸差応力を変動させる方法であり、N3供試体の載荷条件とした。等方応力条件下で、等しい軸差応力変動を圧縮方向と伸長方向に加えると、供試体の軸と45度傾いた面上にせん断応力の方向が完全に反転する繰返し応力状態が生じる。S2供試体ではこの完全両振り条件とした (Fig.2の経路c)。

(5) 応力比

破壊時軸差応力に対する、与えた軸差応力変動の最大値を応力比とした。破壊軸差応力は、ここでは静的三軸試験結果を用いた。静的三軸圧縮試験の軸差応力載荷速度はひずみ制御で0.5mm/minであり、後述する繰返し載荷試験の速度の1/10~1/20程度である。

(6) 繰返し回数

同一条件で繰返し載荷を行う場合、3000回をもって破壊しないものは非破壊とした。

また、荷重条件を変化させるものについては、1000回の繰返しでの挙動を確認し、条件を変化させた後、さらに1000回の繰返しを行い、非破壊の場合、3条件について合計3000回の繰返しを実施した。湿潤状態のものはそれぞれ半分の500回の繰返しとした。

繰返し波形は正弦波を用いた。 σ_1 を繰返す場合は、正の正弦波、 σ_3 を変動させる場合は、負の正弦波により、第1波の立ち上がりを軸差応力の増加方向として統一した。

(8) 載荷速度(周波数)

自然状態の供試体については、周期80秒の正弦波、湿潤状態の試験においては、制御の関係から周期を160秒の正弦波とした。

これらの載荷速度は、静的三軸試験の載荷速度の10倍から40倍となり、同程度の一軸圧縮強さを有する岩石の強度の速度依存性からは、10%程度の強度増加が推定される。

(9) 計測項目

計測項目は以下の通りである。

X, Y, Z方向荷重 (X, Y方向5MNロードセル, Z方向10MNロードセル)

X, Y, Z方向アクチュエータストローク(高感度変位計; 感度0.001mm)

X, Y, Z方向載荷板変位 (X, Y方向各2面それぞれ4点, Z方向1面4点の計20点) (高感度変位計; 感度0.001mm)

間隙水圧(間隙水圧計上下各1点; 1MPa)

3. 結果および考察

Table 1 試験条件一覧

List of Testing Condition

供試体 No.	含水状態	試験条件	拘束圧 kN/m ²	載荷条件	応力比	繰返し回数
				応力経路		
N1	自然	CD	100	軸方向片振り a	60, 75, 90	各1000
N2	自然	CD	200	軸方向片振り a	84	3000
N3	自然	CD	100	側方向片振り b	91, 94, 100	各1000
S1	湿潤	CU	200	軸方向片振り a	60, 70, 80, 98, 155	各500
S2	湿潤	CU	200	両振り c	60, 70, 80	各500

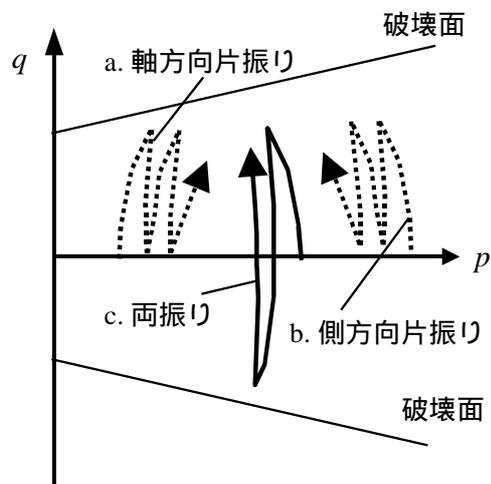


Fig. 2 繰返し載荷の応力経路
Stress Paths of Cyclic Loading on p-q Plane

3.1 変形特性

繰返しせん断試験の全過程におけるX, Y, およびZ方向ひずみと体積ひずみの進展状況をFig.3に示す。図の実線の幅は繰返し振幅に対応するひずみの変動量を示している。図より明らかなように第1破壊応力比60% (図中step1) の繰返し載荷でもひずみが漸増しており、弾性挙動ではなく、繰返し塑性が進行していることがわかる。応力比を増加させた (step2, step3) 直後のひずみは、前の載荷の履歴を受けて小さい。これらの傾向は低応力レベルでの亀裂の変形に依存するものと考えられる。また、体積膨張時には、側方のひずみに異方性がみられる。

各段階における軸差応力 - ひずみ関係のヒステリシスループから等価弾性係数と等価減衰定数を求め、繰返し回数に対してプロットしたのがFig.4である。変形係数の意味から、繰返し初期の段階で岩盤は締固められ、その後せん断応力が破壊状態に近づくると低下する傾向が見られる。N1の場合は、初めの応力比での繰返し載荷の後、等価弾性係数は増加した値を保持してその後わずかに減少

する。一方、N3の場合は、载荷初期から大きな値で、応力比を変化させた第2、第3ステップでは初期の値よりも小さくなっている。この違いは、拘束圧と応力経路が考えられる。

減衰定数については、N1およびN2では0.1、N3では0.2程度でほぼ一定となるが、破壊前に増加する。

締固まりがどの程度進行するかを調べたのが、Fig.5である。図は各ひずみの累積を繰返し回数に対してプロットしたもので、体積収縮（負）は圧縮方向の繰返し応力の载荷ではおよそ2%程度であり、破壊に至る場合には膨張側（正）に転じる。一方、N3のケースでは収縮が大きい傾向を示した。

次に、湿潤状態の岩盤における変形特性の繰返し载荷に伴う変化と体積ひずみの変化について述べる。Fig.6は繰返し回数に対する等価弾性係数と減衰定数の変化を表したものである。自然状態に比べて等価弾性係数は大きく、増加は小さい。減衰定数は0.1から0.2に収束し、破壊に伴い増加する。Fig.7のひずみの増加傾向は自然状態のものと同様である。両振り試験(S2)では、全方向のひずみが増加するため体積ひずみは短調増加傾向にある。これは、軸方向および側方向からの圧縮により比較的等方的に入っている亀裂を閉塞させるためである。一方、片振り試験(S1)では側方への変位増加が進行することに

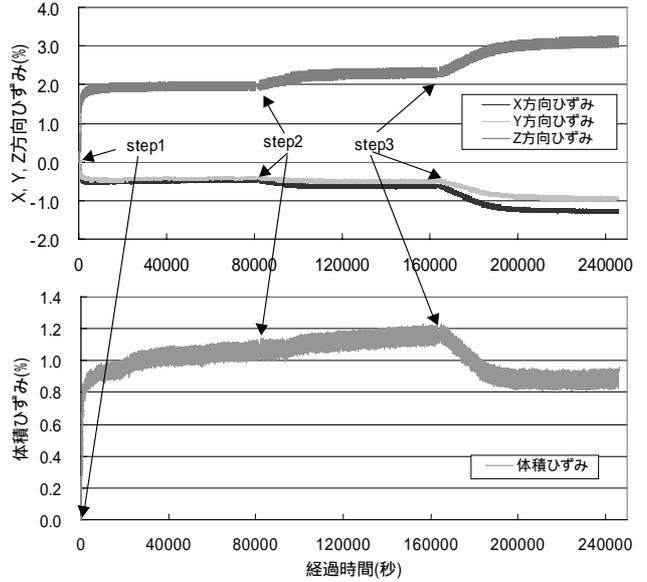


Fig.3 N1供試体の時間 - 変位関係（上）
と時間 - 体積ひずみ関係（下）
Elapsed Time vs. X, Y, Z Strain
and Volumetric Strain of N1 Specimen

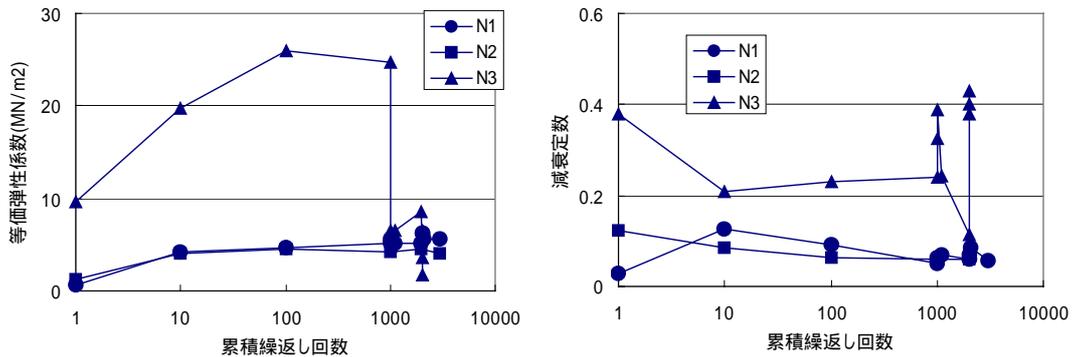


Fig.4 自然状態供試体の繰返し回数と等価弾性係数，減衰定数の関係
Equivalent Elastic Modulus and Damping Ratio of Naturally Saturated Specimens
vs. Number of Loading Cycle

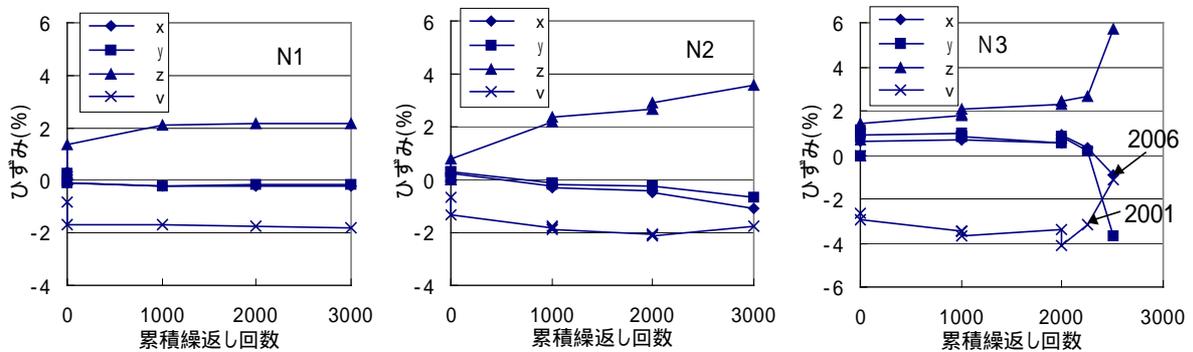


Fig.5 自然乾燥状態供試体の繰返し回数と累積ひずみの関係
Cumulative Strains of Naturally Saturated Specimens vs. Number of Loading Cycle

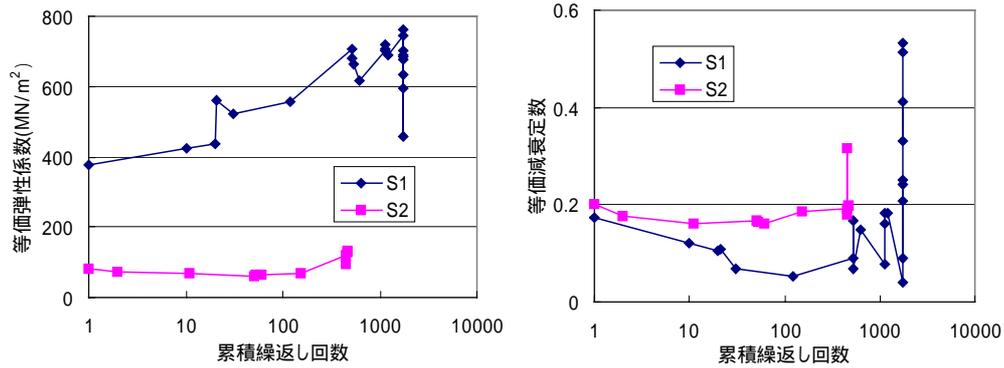


Fig.6 湿潤状態供試体の等価弾性係数と減衰定数の変化
Equivalent Elastic Modulus and Damping Ratios of Saturated Specimens
vs. Number of Loading Cycle

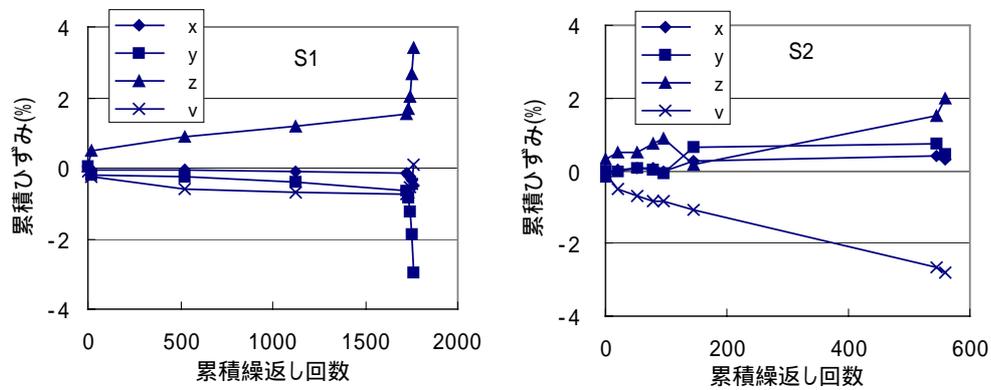


Fig.7 湿潤状態供試体の繰返し回数と累積ひずみの関係
Cumulative Strains of Saturated Specimens vs. Number of Loading Cycle

より全体として体積膨張が起る。

間隙水圧挙動の例(S2)をFig.8に示す。間隙水圧は、岩盤ブロックの締固まり、すなわち体積収縮を反映して増加する。

3.2 強度特性

疲労強度特性を調べるためにFig.3の曲線のピークを連ねた曲線をクリープ曲線と仮定し、破壊ひずみが一定であるという岩石の疲労特性に基づき、軸方向ひずみの3%到達をもって破壊を定義し、そこに達する繰返し回数を推定した。曲線の近似は、遅延スペクトルの形状からVoigtモデルを2個含む流体型のモデルを用いた。

結果をFig.9に示す。図中にプロットされているのは、自然状態の供試体の結果であり、湿潤状態の供試体の場合は軸ひずみ3%の条件では非破壊であった。応力比Sと繰返し回数Nの関係は

$$S=1.0607-0.0532\log N \quad (1)$$

と近似される。近似曲線の応力比が1回の载荷において静的強度より大きな値で破壊する結果となっていることは、载荷速度の影響を反映しているもので、前述の静的強度の110%となることとほぼ一致する。また、同程度の強度

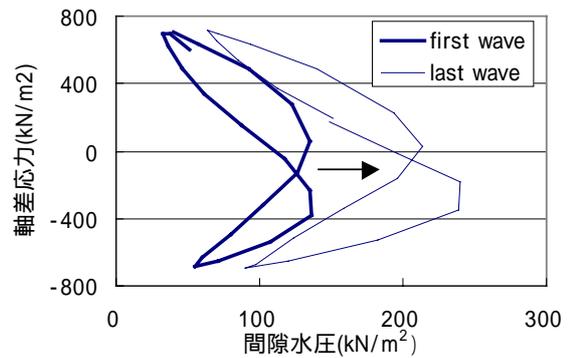


Fig.8 軸差応力 間隙水圧関係
Differential Stress vs. Pore Pressure

を有する花崗岩の三軸繰返し試験において得られているもの⁶⁾とほぼ一致することは興味深い。この近似式からの予測では80%以下の破壊応力比に対しては、100,000回でも非破壊であることが推定された。

3.3 基礎岩盤設計時の疲労特性からの留意点

亀裂性岩盤の繰返し試験を実施して、その特性として、

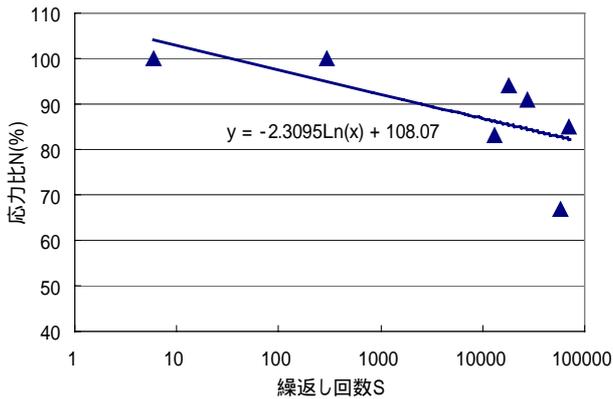


Fig.9 軸方向ひずみ3%到達を破壊とした場合のS-N曲線

S-N Curve in Case of Failure as 3% Axial Strain

繰返しを受ける基礎において考慮しなければならない点は以下のようにまとめられる。

(1) S-N曲線から、2000回程度の繰返し荷重に対しては、岩盤の静的強度の90%、その1/10の200回程度の繰返し荷重が見込まれる場合には、95%までを疲労強度として見込むことが可能であることが推定された。

(2) 変形に関しては、繰返し荷重の作用で静的強度の60%の応力比を作用させても不可逆な体積収縮を起こす。この変形は亀裂およびその介在物の存在によるものである。

(3) 湿潤状態の岩盤の非排水条件での繰返しせん断試験から、岩石中にまで十分な飽和が進んでいなくとも、地下水の存在は、亀裂挟在物がある場合には、一般に乾燥状態より不可逆な体積収縮が起きやすくするか、亀裂面に沿った滑りを引き起こしやすくする。したがって、地下水の存在には十分な考慮をすることが必要となる。

4. まとめ

亀裂性の岩盤ブロックを採取し、繰返しせん断試験を様々な条件により実施し、以下のような知見を得た。

- ・亀裂性岩盤においても疲労特性はS-N線図で表され、それは岩石試験結果とほぼ同様の傾向を示した。しかし、含水状態の影響は、岩石の場合と異なり、湿潤状態の方が強度低下が小さいことが示された。

- ・大型岩盤ブロックに乾燥および湿潤状態でせん断応力を繰返し作用させると、岩盤は次第に絞固まり、体積収縮する。亀裂の存在のため低荷重レベルでこの繰返し塑性は進行する。

- ・非排水試験時の間隙水圧の応答は、連続的な変形によりブロックが繰返しにより絞固まり、間隙水圧は体積変化を反映して増加する。

これらの結果は、静的変形特性だけでなく、疲労変形特性においても亀裂が支配的であることを意味しており、基礎の合理的な設計においては、岩盤としてその特性を捉えることが重要であることを示唆するものである。

謝辞

この研究は、東京電力株式会社 送変電技術センターより受託した内容のものである。試料のご提供および試験に関する熱心なご議論を頂いた、田邊 成マネージャーおよび松尾 敏主任に感謝する。

参考文献

- 1) 鈴木健一郎, 松尾 敏, 堀井秀樹, 平間 邦興: 亀裂性岩盤の大型ブロック室内せん断試験(その1 - 破壊基準), 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, - A271, (2000)
- 2) 松尾 敏, 鈴木健一郎, 堀井秀樹, 高橋秀明: 亀裂性岩盤の大型ブロック室内せん断試験(その2 - 変形特性), 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, - A272, (2000)
- 3) 鈴木健一郎, 丸山 誠: き裂性岩盤の力学特性の評価に関する研究 - 岩盤多機能試験装置を用いた岩盤ブロックのせん断試験 -, 大林組技術研究所報, No.62, (2001)
- 4) 松尾 敏, 鈴木健一郎, 丸山 誠, 鳥井原 誠: 亀裂性岩盤の大型岩盤ブロック室内繰返しせん断試験, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, (2002)
- 5) 鈴木健一郎, 並木和人, 丸山 誠, 鳥井原 誠: 亀裂性岩盤の二軸圧縮試験における強度・変形特性, 第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, (2002)
- 6) 石塚与志雄, 安部 透, 児玉淳一: 繰返し荷重を受ける花崗岩の疲労特性に関する研究, 清水建設研究報告, Vol.50, pp.45 - 53, (1989)
- 7) 鈴木健一郎, 桑原 徹, 平間邦興: 花崗岩の疲労特性に及ぼす風化度と周波数の影響, 第25回土質工学研究発表会, pp. 1073 - 1074, (1992)
- 8) 赤井浩一, 森 寛昭: 組合わせ圧縮応力下における和泉砂岩の破壊機構に関する研究, 土木学会論文集第147号, pp.11-24, (1967)
- 9) 池田誠太: ニュース「斜面上深礎基礎の実規模水平支持力実験」, 土と基礎, p41, (2000)