

岩盤不連続面の動的一面せん断試験方法の提案

(その 2. 一定振幅載荷試験方法と実地震波載荷試験方法)

吉田 淳^{1*}・吉中龍之進²・佐々木猛¹

¹ サンコーコンサルタント株式会社 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

² 埼玉大学名誉教授 (〒331-0823 埼玉県さいたま市北区日進町1-278-5)

*E-mail : jun@suncoh.co.jp

筆者らは、地震波に対する岩盤不連続面の応答特性を把握することを目的として、動的一面せん断試験を実施することのできる動的載荷試験装置を開発した。さらに、この試験装置を用いて各種岩盤不連続面を対象とした動的一面せん断試験を数多く実施し、岩盤不連続面の動的せん断強度・変形特性について研究報告を行ってきた。本報告では、岩盤不連続面の動的一面せん断試験方法について提案している。

本報告(その2)では、一定振幅載荷試験方法および実地震波載荷試験方法についてまとめている。一定振幅載荷試験では、岩盤不連続面の動的せん断強度における疲労特性を得ることができる。実地震波載荷試験では、実際の地震動によって岩盤不連続面がどのような応答を生じるのかを得ることができる。

Key Words : Constant amplitude dynamic direct shear test, Earthquake wave dynamic direct shear test, rock discontinuity, dynamic shear strength, dynamic shear deformation

1. はじめに

層理面や節理面などの岩盤不連続面が多数存在する硬質岩盤については、近年、レベル2地震動などの大規模地震動を対象とした不連続性岩盤の地震応答解析による設計が行われてきている。これら不連続性岩盤を対象とした解析手法を用いた解析・設計において問題となるのが、解析用入力パラメータである岩盤不連続面の動的強度・変形特性の設定方法である。これらについては、岩石コアあるいは原位置岩盤などの静的試験のように過去に蓄積されたデータが豊富にあるわけではなく、また、専用の動的試験装置が一般に普及しているわけではない。特に、地震時を想定した岩盤不連続面の動的繰返し載荷試験については、海外および国内においていくつかの研究報告があるだけである。ただしこれらの研究報告についても、実際の地震動を想定した試験条件のものはほとんど見受けられない。

筆者らは、地震時の岩盤不連続面の応答特性を把握することを目的として、図-1に示す動的載荷試験装置を開発した^{1,2)}。さらに、この試験装置によって各種の岩盤不連続面を対象とした動的一面せん断試験を数多く実施している。これにより、岩盤不連続面の動的せん断強度・変形特性について研究報告を行ってきた^{3,4)}。本報

告では、これらの研究報告を行う際に筆者らが策定した岩盤不連続面の動的一面せん断試験方法について提案する。

本報告では、一定振幅載荷試験方法および実地震波載荷試験方法についてその方法と結果の整理についてまとめている。一定振幅載荷試験では、岩盤不連続面の動的せん断強度における疲労特性を得ることができる。さらに、実地震波載荷試験では、実際の地震動によって岩盤不連続面がどのような応答を生じるのかを得ることができる。

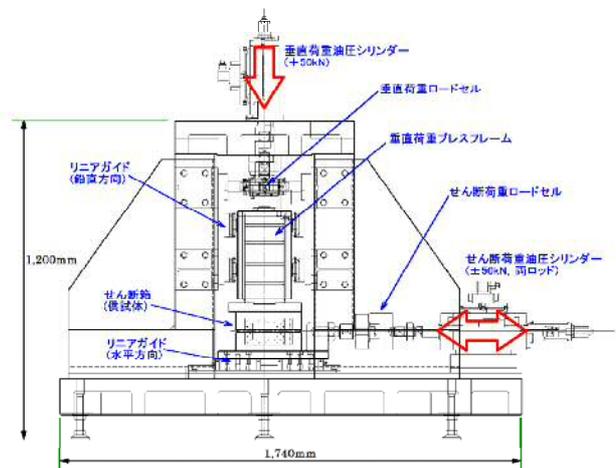


図-1 動的載荷試験装置の概要

2. 一定振幅載荷試験方法

(1) 試験方法

一定振幅載荷試験は垂直応力一定条件のもとで所定の目標せん断応力振幅, τ_0 を応力制御によって繰返し載荷する試験であり, 地盤工学会基準「岩石の疲労特性を求めするための繰返し非排水三軸圧縮試験方法 (JGS 2562-2012)」と同等のものである. 本試験では, 載荷波形の周波数は任意に設定し, 所定の繰返し回数 N あるいは破壊が生じるまでの回数の載荷を繰返す. 本試験方法の目的は, 目標せん断応力振幅について繰返し回数 N と変形特性 (せん断ヒステリシスの変化など) および破壊強度との関係を得ることにある. 図-2には一定振幅載荷試験の載荷波形を示す.

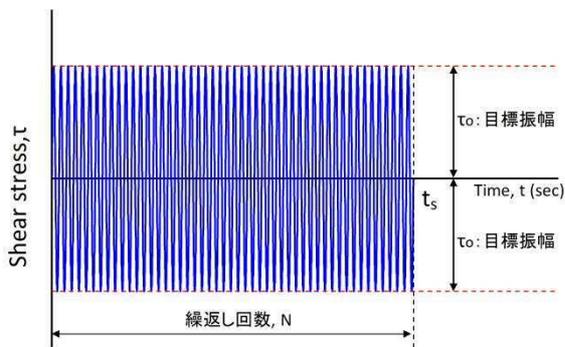


図-2 一定振幅載荷試験における載荷波形

(2) 試験結果

図-3には, 比較的表面が粗く (目視による $JRC=8\sim 12$) 噛合せの良いなモルタル圧裂破壊面について実施した一定振幅載荷試験結果の例を示す. 本試験では, 静的強度 τ_s の98%を目標強度 τ_0 として, 周波数を1.0Hzとした繰返し載荷を実施している (応力制御). 図-3(a)のせん断応力の時刻歴図によると, 170sec (170波目) 付近で主として正の側においてせん断応力は目標せん断応力振幅を発現できなくなり, その後, 負の側においても175sec (175波目) 付近を超えたあたりから目標せん断応力振幅を発現できなくなる. 図-3(b)のせん断変位の時刻歴図においても正の側において載荷当初よりわずかな増加が認められ, 175波目付近からは正および負の両側でせん断変位の急増が認められる.

図-4(a)のせん断ヒステリシスによると載荷当初より正の側においてせん断変位がわずかに増加し, 170波目付近より主として正の側においてせん断応力振幅の低下とせん断変位の増加が生じている. また, 図-4(b)のダイレイション曲線によると, 170波目付近まではダイレイション曲線はほぼ同じ経路を呈しながら, 徐々に閉塞してゆく. これは, モルタル供試体のように比較的表

面が軟質な試料において特徴的な傾向であり, 繰返し載荷によって表層が摩耗してゆくためと考えられる.

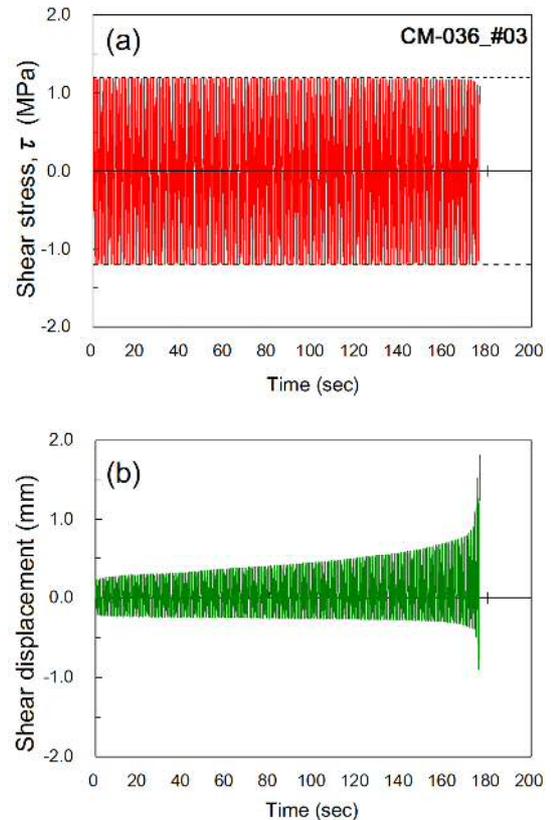


図-3 一定振幅載荷試験結果の例

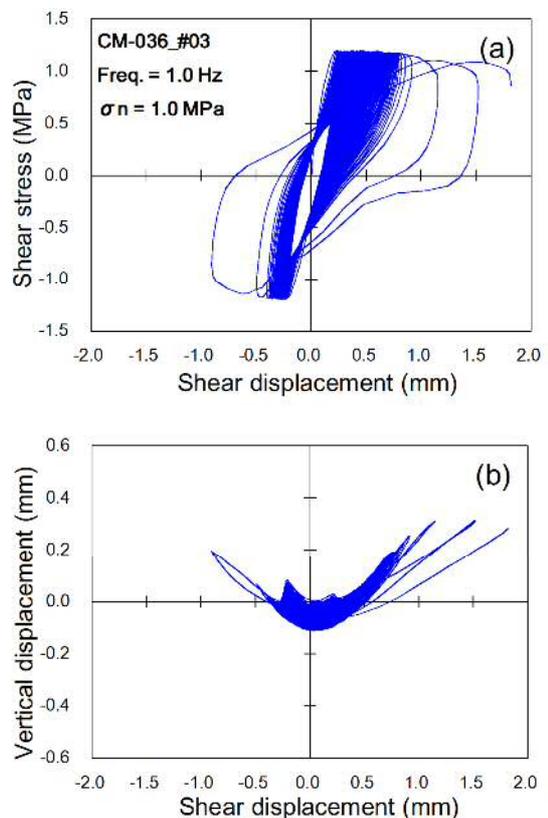


図-4 せん断ヒステリシスとダイレイション曲線

一定振幅載荷試験においては、せん断応力の低下およびせん断変位の増加をもって動的せん断破壊として定義することができる。これは、所定のせん断応力振幅による繰返し載荷すなわち疲労によってせん断強度が低下し、所定のせん断応力振幅を発現できなくなるとともにそれを達成しようとしてせん断変位が増大するためである。このことは、応力制御による繰返し載荷試験においても一般に見られる現象である。

(3) 動的せん断強さの定義

図-5には、動的せん断破壊が生じたと想定される175波目付近のせん断応力とせん断変位の時刻歴図を示す。図-5(a)のせん断応力の時刻歴図によると、正および負の両側において175波目以降にせん断応力が目標応力を達成できなくなり、176波目にせん断応力振幅が目標応力の95%を下回る。図-5(b)のせん断変位の時刻歴図によると、それと同時に正の側においてせん断変位が増加し175波目にせん断変位が1.0mmを超えている。これより、175波目をもって、一定振幅載荷試験における動的せん断破壊とする。

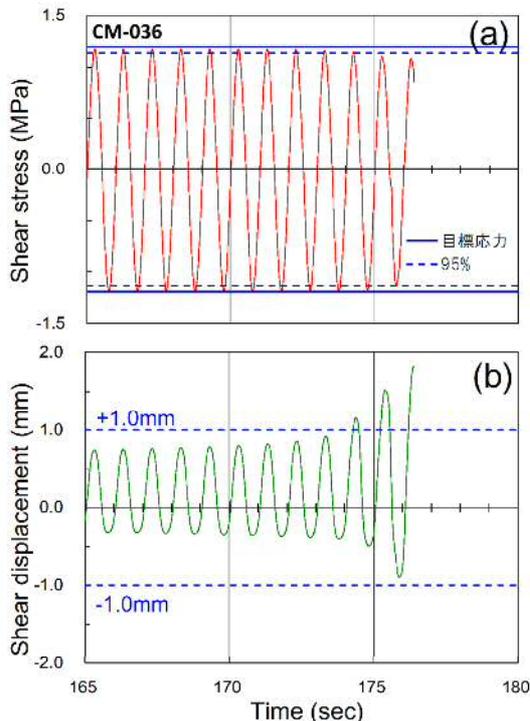


図-5 一定振幅載荷試験における動的せん断破壊の判定

一定振幅載荷試験における動的せん断破壊および動的ピークせん断強さを以下のように定義する。

[動的せん断強さ]

せん断応力が目標せん断応力振幅の95%の値を下回り、その後、連続的にせん断応力が低下してゆく場合、

あるいはせん断変位が±1.0mmを超えた時点をもってせん断破壊と定義する。

[動的せん断強さ]

動的せん断強さは、動的せん断破壊を発現した直前のせん断応力振幅の最大値とする。なお、動的せん断破壊および動的ピークせん断強さは、正の側および負の側の両方について定義する。一般に、一定振幅載荷試験では目標せん断応力振幅は既定値であり、破壊時の載荷回数が試験結果となる。

(4) 試験結果の整理

本試験方法は、これまでに岩石コア等を対象とした繰返し三軸試験において採用されてきた載荷方法の1つであり、疲労試験(fatigue test)とも呼ばれ、破壊を生じる時の繰返し回数(N)と応力振幅(S)との関係から疲労曲線(S-N曲線)を作成することもある。疲労試験の場合、載荷は供試体がせん断破壊を生じるまで繰り返す。図-6には、人工的に作成したモルタル圧裂破壊面におけるS-N曲線の例を示す。

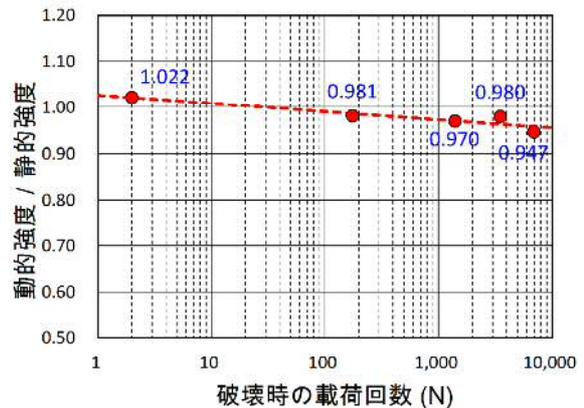


図-6 一定振幅載荷試験結果による疲労曲線の例

3. 実地震波載荷試験方法

(1) 試験方法

岩盤内の不連続面が地震時にどのような挙動(応答)を示すかは、これまでに実測あるいは実験された例はほとんどない。実地震波形載荷試験は、岩盤不連続面を有する供試体に対して実地震波相当の動的せん断荷重を載荷し、その応答を得る試験である。試験結果の利用方法としては、不連続面を考慮した不連続体解析(複合降伏モデルや個別要素法など)や岩盤すべり面を対象としたニューマーク法による安定性評価手法への適用が考えられる。さらには、地震時における既存の断層・破碎帯の挙動への応用も挙げられる。

実地震波形載荷試験は垂直応力一定条件のもとで行われ、事前に制御システムに登録した載荷波形（時刻歴の載荷応力波形：目標波形）をせん断荷重として載荷する。このとき、垂直応力およびせん断応力はいずれも応力制御（荷重制御）によって載荷する。図-7には、実地震波載荷試験における載荷波形の例を示す。

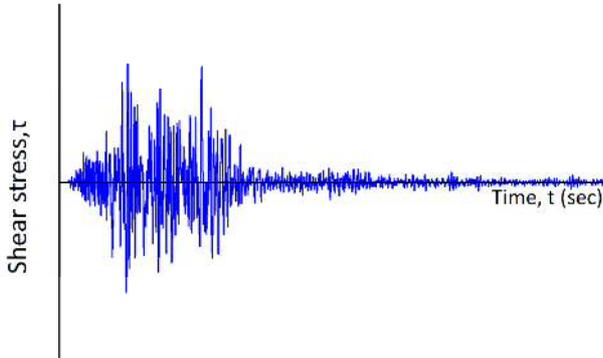


図-7 実地震波載荷試験における載荷波形の例

図-8には、目標とする載荷波形（青色）とロードセルによって測定された実際の載荷波形（赤色）を対比して示す。図-8(a)は載荷波形全体を示し、図-8(b)は載荷波形の一部を拡大して示す。これによると、全体的な波形の形状はほぼ相似形であるが、個々の振幅については若干の差異が見られる。

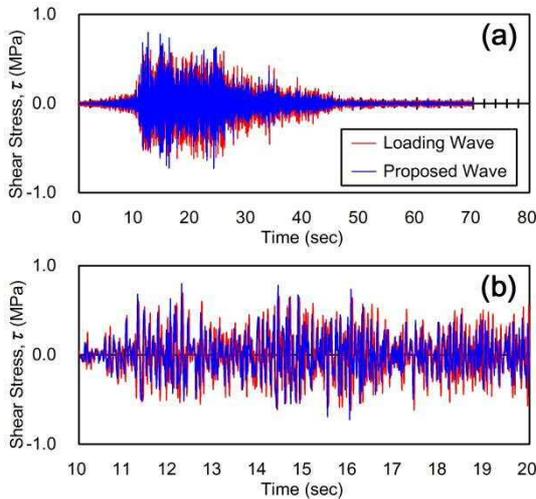


図-8 目標波形と実載荷波形の対比

図-9には、図-8の波形について作成したフーリエスペクトルを示す。これによると、およそ1.0Hzから10数Hzまでの範囲については、目標載荷波形と実測載荷波形のスペクトル分布はほぼ同じ大きさを示すことがわかる。なお、実測載荷波形では目標載荷波形に比べて10数Hz以上の高周波数成分が卓越する。これらの高周波数成分

は波形全体に比べて微小なものであり、試験結果おける影響は少ないものと判断している。

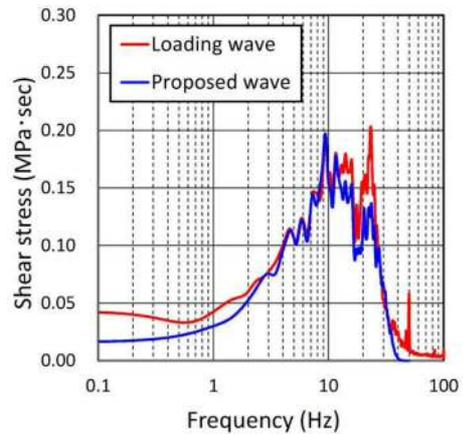


図-9 フーリエスペクトルによる目標波形と実載荷波形の対比

(2) 試験結果

図-10および図-11には、泥質岩層界面について実施した実地震波載荷試験の結果を示す。試験に使用した泥質岩層界面は、比較的平坦であり(目視によるJRC=4~8)、かつ噛合せもやや不良なものである。

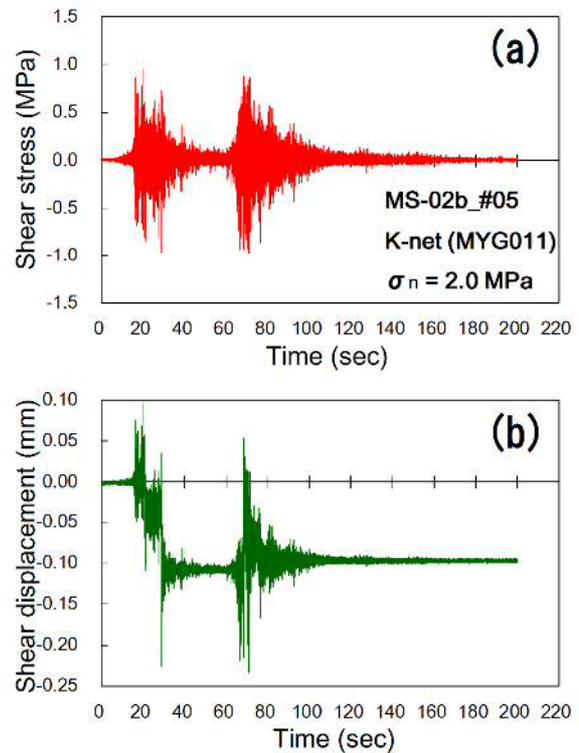


図-10 実地震波載荷試験結果の例

図-10(a)は実地震波形を模擬した載荷せん断応力波形であり、図-10(b)はせん断変位の応答時刻歴波形である。図-10(b)によると20sec付近で負の側への変位が生じ、その後も負の側での変形が継続して、最終的には負の側に

において0.1mmの残留変位が生じる。図-11(a)のせん断ヒステリシスによると、初期には直線状の紡錘形ヒステリシスを呈するが、21sec付近でそのヒステリシスが負の側へ平行移動してゆく。その後は負の側において紡錘形のヒステリシスを維持したままで変位を繰り返す。この傾向はせん断強度に比べて比較的大きなせん断载荷波形を受ける不連続面に共通した応答であり、正および負の両側において変位が進行するものもある。図-11(b)のダイレクション曲線も比較的凹凸の少ない様相を呈している。

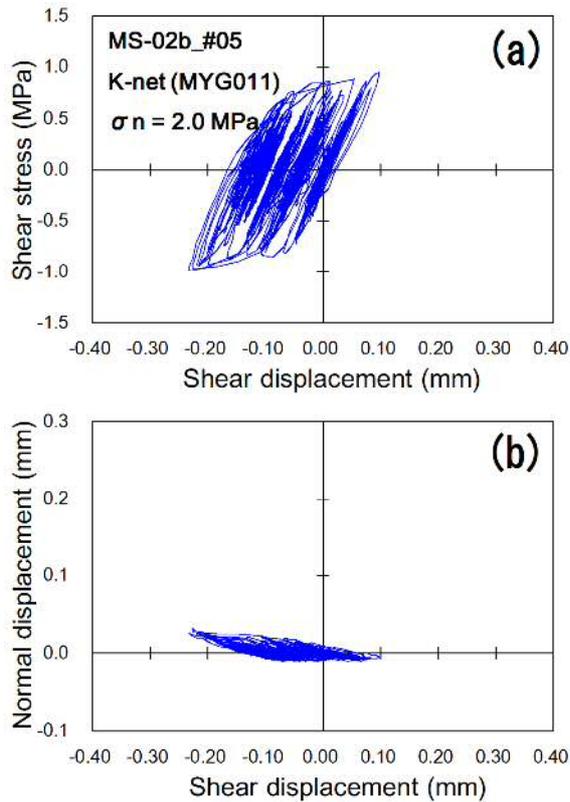


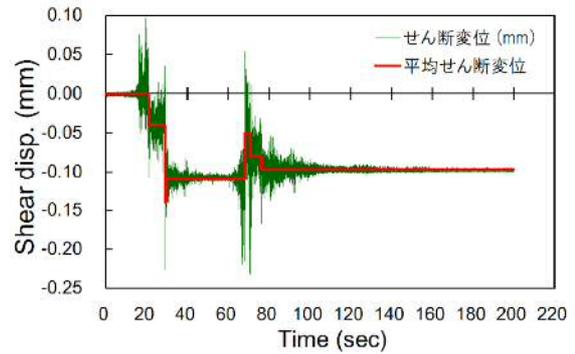
図-11 せん断ヒステリシスとダイレクション曲線

(3) 平均せん断変位の定義

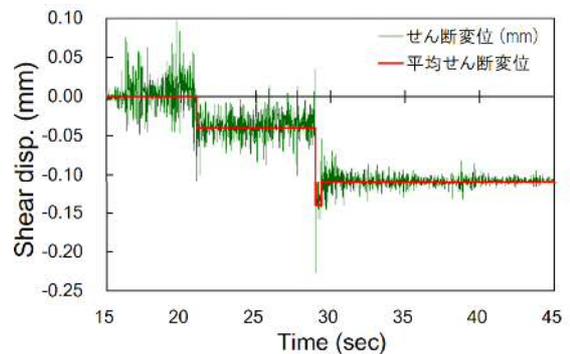
図-12(a)には図-10(b)のせん断変位時刻歴図を示すとともに、図-10(a)のせん断応力時刻歴図や図-11(a)のせん断ヒステリシスとの比較によって判定した平均せん断変位(Average shear displacement)をプロットしている。平均せん断変位はせん断変位波形の中立軸の正あるいは負の側への位相量として定義する。具体的には、目標载荷波形の中立軸との対比により決定する。平均せん断変位は、図-11(a)のせん断ヒステリシスにおいてはヒステリシスの平行移動として認識され、実地震载荷によるせん断破壊(すべり)を表すと考えられる。図-12(b)には、図-12(a)のせん断変位時刻歴図の一部を拡大表示する。

図-13には、平均せん断変位における最大変位振幅と残留変位を示す。最大変位振幅は平均せん断変位の正の

側と負の側の最大の振幅であり、各々の最大値より得られる。残留変位は载荷終了後に生じているせん断変位である。



(a) せん断変位時刻歴図



(b) 図(a)の一部を拡大表示

図-12 平均せん断変位

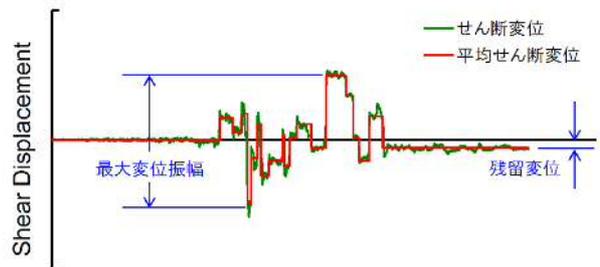


図-13 最大変位振幅と残留変位

(4) 地震波形による応答

図-14には、同一不連続面について異なる地震波形で実施した試験結果を示す。試験には泥質岩層理面を使用し、事前のせん断载荷によって残留状態とした不連続面を使用している。図-14(a)は地震波Aによる応答であり、初期に負の側で生じた平均せん断変位が後に正の側の平均せん断変位によって相殺される様子が見られる。最大変位振幅は0.52mmであるが、残留変位は0.05mmと非常に小さい。図-14(b)は地震波Cによる応答であり、全体を通じて正の側において変位が生じており、最大変位振幅は0.61mmそして残留変位は正の側において0.22mmと比較的大きい。

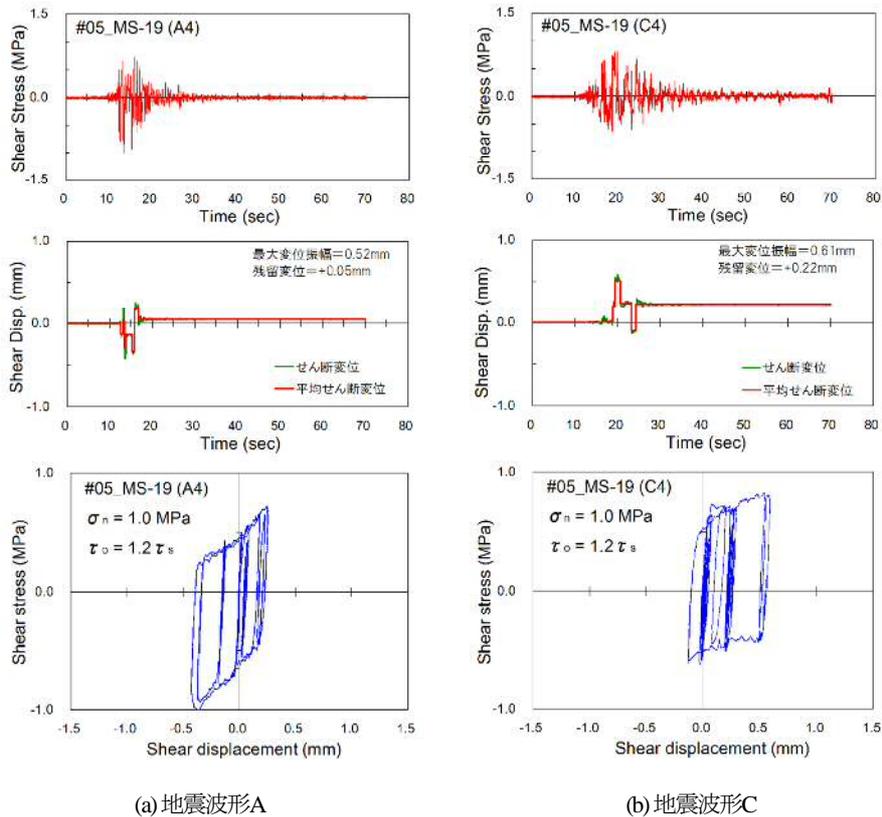


図-14 荷重地震波形による応答の違い

4. まとめ

本論文では、一定振幅荷重試験方法および実地震波荷重試験方法について述べるとともに、結果結果の整理についてまとめている。一定振幅荷重試験結果からは、岩盤不連続面の動的せん断強度における疲労特性を得ることができる。実地震波荷重試験では、実際の地震動によって岩盤不連続面がどのような応答変位を生じるのかを得ることができる。応答変位を表現するパラメータとして、平均せん断変位とそれから得られる最大変位振幅および残留変位が得られる。

参考文献

- 1) 吉田淳, 吉中龍之進, 坪田裕至, 岩苔和広, 中嶋正徳: 岩盤不連続面の動的試験装置の開発, 第13回岩の力学国内シンポジウム, 講演No.34, p.219-224, 2013.
- 2) 吉田淳, 吉中龍之進, 佐々木猛: 「報告・岩盤不連続面を対象とした動的繰返し荷重試験装置の開発と動的物性について」, 地盤工学会誌, Vol.61, No.10, p.18-21, 2013.
- 3) 吉田淳, 吉中龍之進, 佐々木猛: 岩盤不連続面の動的一面せん断試験による動的せん断変形特性の研究, 第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号7, (公社)土木学会岩盤力学委員会, 2015.01, p.36-41
- 4) Yoshida, J. Yoshinaka, R. Sasaki, T.: Study on dynamic shear strength and deformation characteristics of rock discontinuity., 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, RDS-FS-0079, 2019.05

SUGGESTION OF THE DYNAMIC DIRECT SHEAR TEST METHODS FOR THE ROCK DISCONTINUITY (PART 2. Constant amplitude dynamic direct shear test and Earthquake wave dynamic direct shear test)

Jun YOSHIDA, Ryunoshin YOSHINAKA, Takeshi SASAKI

The authors have developed a new dynamic load-testing machine. We conducted a large number of dynamic direct shear tests for rock discontinuities, then we investigated the dynamic shear strength and deformability of rock discontinuity. In this study, we proposed the dynamic direct shear test methods. In this paper (PART 2), we explain the methods and the results of Constant amplitude dynamic direct shear test and Earthquake wave dynamic direct shear test. Constant amplitude dynamic direct shear test can get fatigue properties in the dynamic shear strength of rock discontinuity. Earthquake wave dynamic direct shear test shows what kind of reply a rock discontinuity produces by real earthquake vibration.