

# 岩盤不連続面の動的・せん断試験方法の提案

## (その 1. 段階振幅載荷試験方法と漸増振幅載荷試験方法)

吉田 淳<sup>1\*</sup>・吉中龍之進<sup>2</sup>・佐々木猛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 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・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・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、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・せん断試験方法について提案している。本報告(その1)では、段階振幅載荷試験方法および漸増振幅載荷試験方法についてまとめている。いずれの試験方法も、所定の垂直応力における岩盤不連続面の動的せん断強度を得るとともに、せん断変形に対する動的せん断剛性と履歴減衰を算出することができる。

**Key Words :** Multi-stage amplitude dynamic direct shear test, Increase amplitude dynamic direct shear test, rock discontinuity, dynamic shear strength, dynamic shear deformation

### 1. はじめに

硬質岩盤には、層理面や節理面などの岩盤不連続面が多数存在し、岩盤の強度・変形特性に大きな影響を与えている。近年では、レベル2地震動などの大規模地震動を対象として、不連続性岩盤の地震応答解析による設計も行われてきている。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・設計で問題となるのが、解析用入力パラメータとな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、図-1に示す動的載荷試験装置を開発した<sup>1,2)</sup>。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・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<sup>3)</sup>。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・せん断試験方法について提案する。

本報告では、段階振幅載荷試験方法および漸増振幅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。いずれの試験方法も、所定の垂直応力における岩盤不連続面の動的せん断強度を得るとともに、せん断変形に対する動的せん断剛性と履歴減衰を算出することができる。



図-1 動的載荷試験装置・全景

## 2. 動的一面せん断試験

動的一面せん断試験は、不連続面に対して所定の垂直応力  $\sigma_n$  を保持した状態で、せん断応力  $\tau$  を所定の波形として載荷する試験である（図-2参照）。なお、せん断応力波形は正および負の両振幅とし、所定の周波数の正弦波形を基本とする。試験は、垂直応力およびせん断応力とも応力制御によって行う。

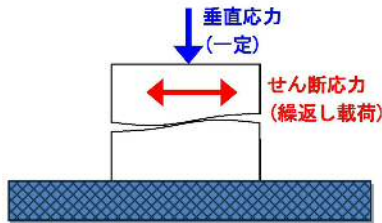


図-2 動的一面せん断試験の概要

これらの試験は基本的には同じ手順によるものであり、繰返しせん断応力の載荷方法のみが異なる。図-3には、動的一面せん断試験のフローを示す。試験におけるパラメータは、載荷波形（載荷方法）、目標強度（応力振幅）、繰返し回数そして載荷周波数である。なお、本試験で実施する動的一面せん断試験はすべて室内乾燥状態の供試体を用いて実施している。

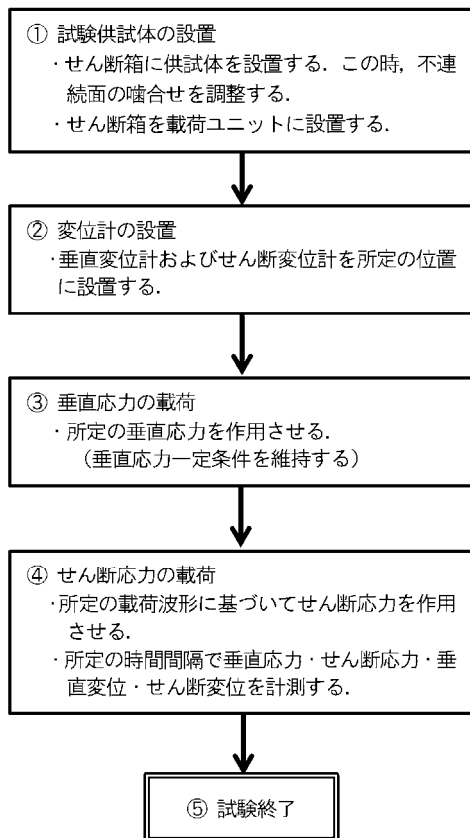


図-3 動的一面せん断試験のフロー

## 3. 段階振幅載荷試験方法

### (1) 試験方法

岩盤不連続面の段階振幅動的直接せん断試験 (Multi-stage amplitude dynamic direct shear test) すなわち段階振幅載荷試験は、岩盤不連続面を対象とした一面せん断試験であり、垂直応力一定条件のもとで所定のせん断応力波形を応力制御によって段階的に載荷する。図-4には、段階振幅載荷試験における載荷波形の例を示す。この試験方法は、地盤工学会基準「岩石の多段階繰返し非排水三軸圧縮試験方法 (JGS 2561-2012)」と同じものである。

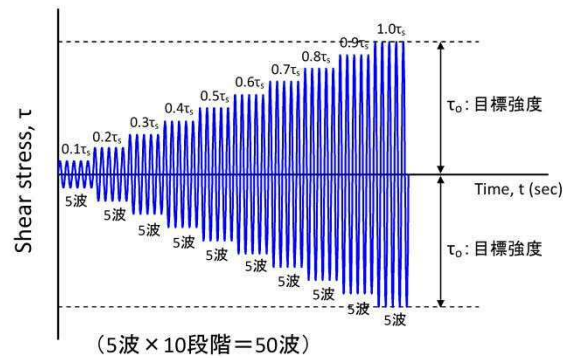


図-4 段階振幅載荷試験における載荷波形

試験は垂直応力  $\sigma_n$  を一定に維持した状態で、所定のせん断応力振幅  $S$  と所定の載荷周波数  $F$  を有する繰返しせん断応力波（正弦波）を1段階5波ずつ載荷し、順次、せん断応力振幅  $S$  を増加させてゆく。本試験では、図-4に示すように、1段階5波の繰返し載荷を10段階載荷することによって目標強度  $\tau_0$  に到達するよう計画している。一般には、目標強度  $\tau_0$  は静的せん断強度  $\tau_s$  とする。すなわち、1段階目のせん断応力振幅を  $S=0.1\tau_s$  として、以降、段階ごとに  $S=0.2\tau_s, 0.3\tau_s, 0.4\tau_s, 0.5\tau_s \dots$  と増加させてゆく。

繰返し載荷中のせん断変位の増加とともに所定の応力振幅が発現できなくなった場合、あるいはせん断変位が急激に増加した場合に、試験を終了する。

### (2) 試験結果

図-5には、自然の不連続面である石灰岩節理面について実施した段階振幅載荷試験の結果を示す。試験に使用した石灰岩節理面は、表面粗さが比較的粗く（目視JRC=10~16）、噛み合わせもやや良好なものである。図-5(a)のせん断応力時刻歴図によると、目標強度（静的せん断強度）を超えて12段階において正および負の両側でせん断応力の低下が生じている。図-5(b)のせん断変位時刻歴図によると、せん断応力の低下とともにせん断変位の急増が認められる。

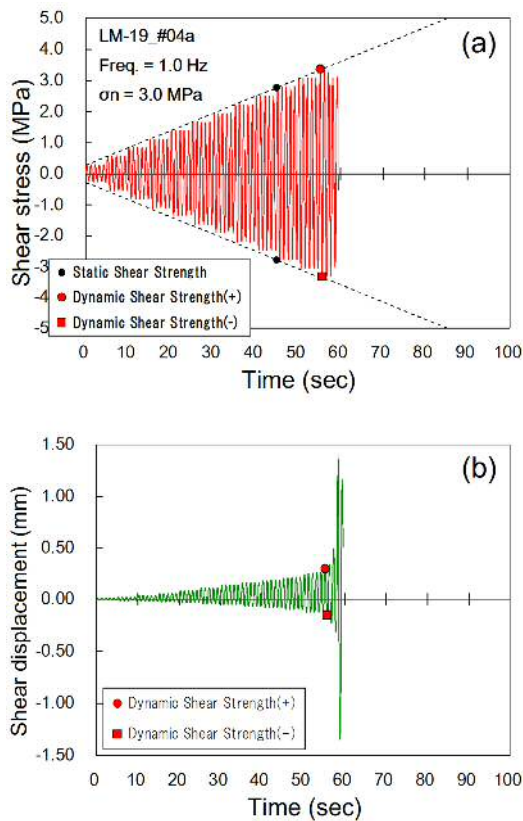


図-5 段階振幅載荷試験結果の例（石灰岩節理面）

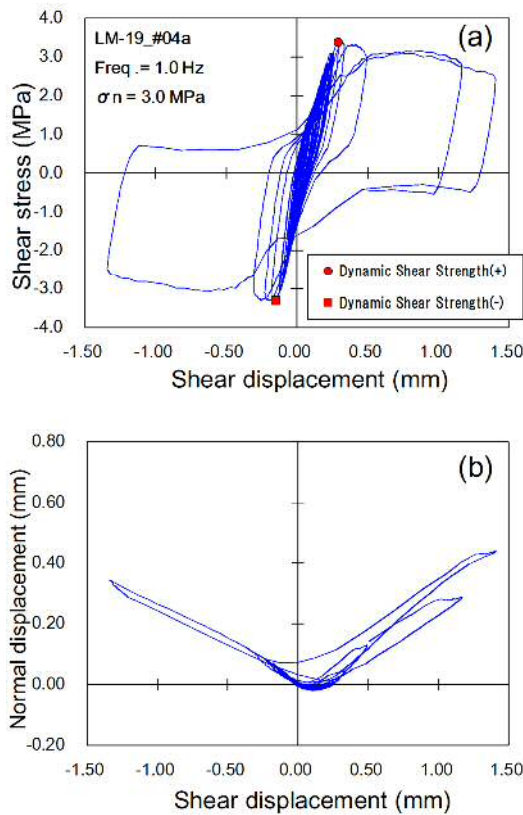


図-6 セン断ヒステリシスとダイレイション曲線

図-6には、せん断ヒステリシスとダイレイション曲線を示す。図-6(a)によると、せん断ヒステリシスは載荷

当初から10段階付近まではほぼ直線上の紡錘形を呈し、11段階よりわずかに逆S字型のヒステリシスを呈する。その後、せん断応力が所定の値を発現できなくなった12段階では、逆S字型の平行四辺形のヒステリシスを呈する。なお、このヒステリシスの形状は、静的繰返しせん断試験における大変位のヒステリシスに類似する。図-6(b)によると、ダイレイション曲線はほぼ左右対称の凹形状を呈する。

### (3) 動的せん断強さの定義

図-7には、動的せん断破壊が生じたと想定される12段階目付近のせん断応力とせん断変位の時刻歴図を示す。これらによると、12段階の1波目からせん断変位が増加を始め、4波目には正および負の両側においてせん断変位が基準変位1.0mmを超えている。同時にせん断応力振幅は目標応力の95%を下回る。これより、正および負の両側とも12段階の4波目をもって動的せん断破壊と判定する。さらに、正の側では12段階の1波目をもって動的ピークせん断強さ、 $\tau_{p(d)}$ とし、負の側でも12段階の1波目をもって動的ピークせん断強さ、 $\tau_{p(d)}$ とする。

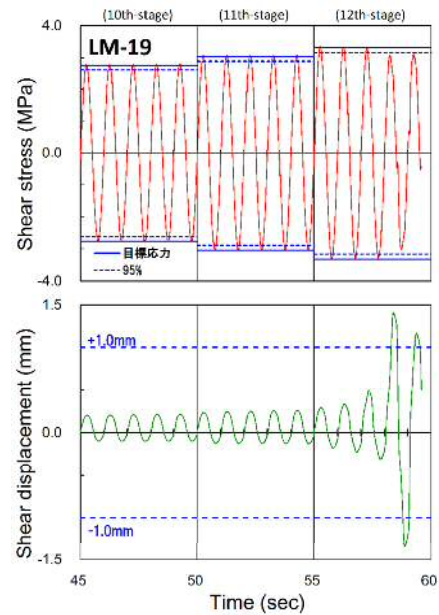


図-7 段階振幅載荷試験における動的せん断破壊の判定

上記の動的せん断破壊の定義においては、せん断変位の基準値を $\pm 1.0\text{mm}$ としている。この定義は、筆者らが過去に実施した室内静的一面せん断試験の結果に基づいている。

図-8には、花崗岩試料において人工的に作成した圧裂破壊面の中型～大型供試体（せん断面積 $400\text{cm}^2$ から $9,600\text{cm}^2$ まで）を対象とした室内一面せん断試験におけるピークせん断変位をまとめている。なお、図中には、



ボーリングコア試料における花崗岩節理面について実施した試験結果（せん断面積26.4cm<sup>2</sup>）およびモルタル圧裂破壊面の結果（せん断面積100cm<sup>2</sup>）も併せて示している。これらより、ほとんどの試験結果においてピークせん断変位は1.0mm以下に分布している。これより、本試験で対象としているボーリングコア・サイズの供試体についてはおおむね1.0mm以下に分布するものと推定される。本研究では、せん断破壊の基準値としてせん断変位1.0mmを採用する。

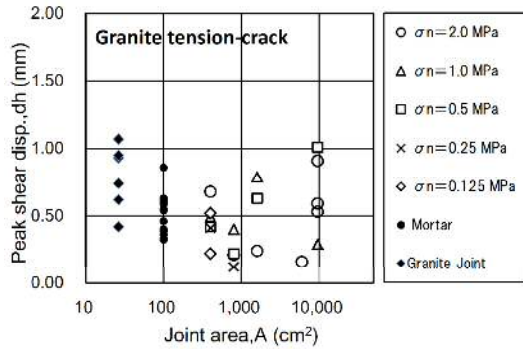


図-8 室内静的一面せん断試験におけるピークせん断変位  
(文献<sup>4)</sup>に修正加筆)

これらの検討より、段階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。

#### [動的せん断破壊]

各載荷段階においてせん断応力が目標せん断応力振幅の95%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動的せん断破壊と定義する。

#### [動的ピークせん断強さ]

動的ピークせん断強さは、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。段階振幅載荷試験の場合、各段階の目標せん断応力振幅となることが多い。なお、動的せん断破壊および動的ピークせん断強さは、原則として正の側および負の側の両方について定義できる。

### (4) 動的せん断変形特性の定義

図-9には、動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ および履歴減衰率 $h$ について定義する。図中に示すように、せん断ヒステリシスの正および負の頂点(vertex)を結ぶ直線をもって動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ として定義する。動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ は個々のせん断ヒステリシスについて定義するせん断剛性であり、次式によって定義する。

$$K_{sd(d)} = \frac{\Delta \tau}{\Delta dh} \quad (\text{MPa/mm}) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \tau$ ：せん断応力両振幅 (MPa)

$\Delta dh$ ：せん断変位両振幅 (mm)

動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ および履歴減衰 $h$ は、一般の地盤材料に対して実施されている地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法 (JGS 0542-2009)」において定義されている等価ヤング率 $E_{eq}$ および履歴減衰 $h$ と基本的には同等なものである。

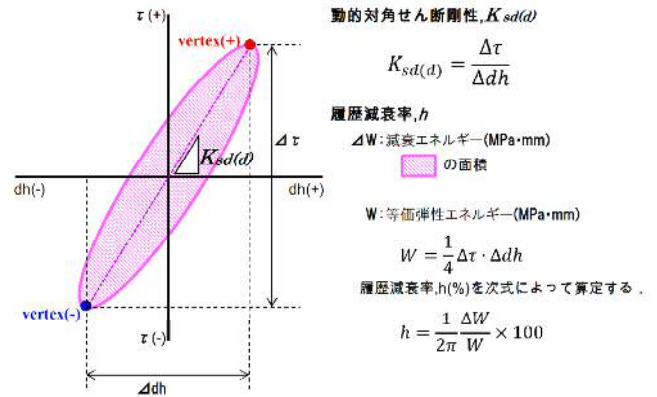


図-9 動的せん断変形パラメータの定義

一般的にコア試料を対象とした三軸圧縮試験などでは軸差応力(MPa)一軸ひずみ関係において変形係数(MPa)を定義している。しかし、岩盤不連続面の物性試験では、不連続面に作用する応力(MPa)と変位(mm)についてデータ整理することが一般的である。このため、せん断剛性 $K_s$ および垂直剛性 $K_n$ ともに応力(MPa)と変位(mm)における変化率(MPa/mmあるいはMN/m<sup>3</sup>)として定義する。

図-10には、実際の動的繰返し載荷試験における動的せん断変形パラメータの算定例を示す。図-9に示したようにせん断ヒステリシスの正の頂点(vertex)および負の頂点を結ぶ直線の勾配をもって動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ を定義する。また、履歴減衰 $h$ は、第2波目以降の閉じたせん断ヒステリシスのループの面積を算定することによって得られる。

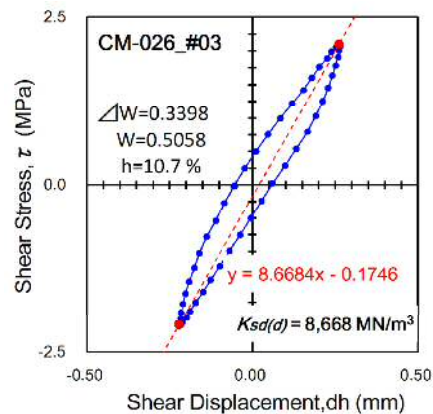


図-10 動的せん断変形パラメータの算定例

#### 4. 漸増振幅載荷試験方法

##### (1) 試験方法

岩盤不連続面の漸増振幅動的直接せん断試験 (Increase amplitude dynamic direct shear test) すなわち漸増振幅載荷試験は、岩盤不連続面を対象とした一面せん断試験であり、垂直応力一定条件のもとで所定のせん断応力波形（正弦波）を応力制御によって連続的に漸次増加させる載荷試験である。図-11には、漸増振幅載荷試験における載荷波形の例を示す。載荷は、所定の回数（あるいは所定の時間）で目標強度である静的せん断強さ  $\tau_s$  に到達するように設定する。

本試験では、段階振幅載荷試験と整合させるため、目標強度に到達するまでの載荷回数 $N$ を50回（波）としている。実際には、動的せん断破壊に至るまでの載荷を行うことから、50波を上回る載荷を行うことがある。漸増振幅載荷試験は応力の増分が連続的であることから、安定した変形を再現することができる。これより、筆者らは動的せん断試験の方法として、この試験方法を推奨している。

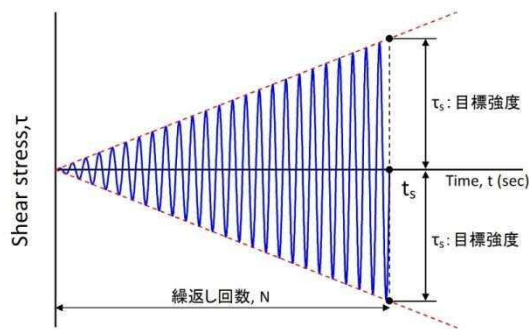


図-11 漸増振幅載荷試験における載荷波形

##### (2) 試験結果

図-12には、自然の不連続面である石灰岩節理面について実施した漸増振幅載荷試験の結果を示す。試験に使用した石灰岩節理面は、表面粗さは比較的滑らかであり（目視JRC=6~8）、噛み合は非常に良好なものである。図-12(a)のせん断応力時刻歴図によると、目標強度（静的せん断強度）を超えて68波目において正および負の両側でせん断応力の低下が生じている。図-12(b)のせん断変位時刻歴図によると、せん断応力の低下とともにせん断変位の急増が認められる。

図-13には、せん断ヒステリシスとダイレイション曲線を示す。図-13(a)によると、せん断ヒステリシスは載荷当初から66波目付近まではほぼ直線上の紡錘形を呈するが、67波目の負の側でせん断変位が増幅し、以降は逆S字型の平行四辺形のヒステリシスを呈する。図-13(b)のダイレイション曲線によると、66波目付近まではほぼ

左右対称の小さな凹状型を呈するが、以降は大きなS字型を呈する。

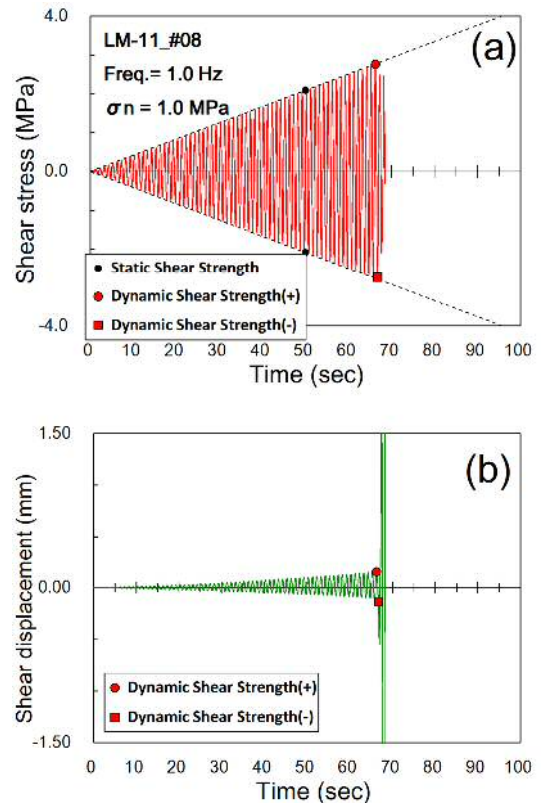


図-12 漸増振幅載荷試験結果の例

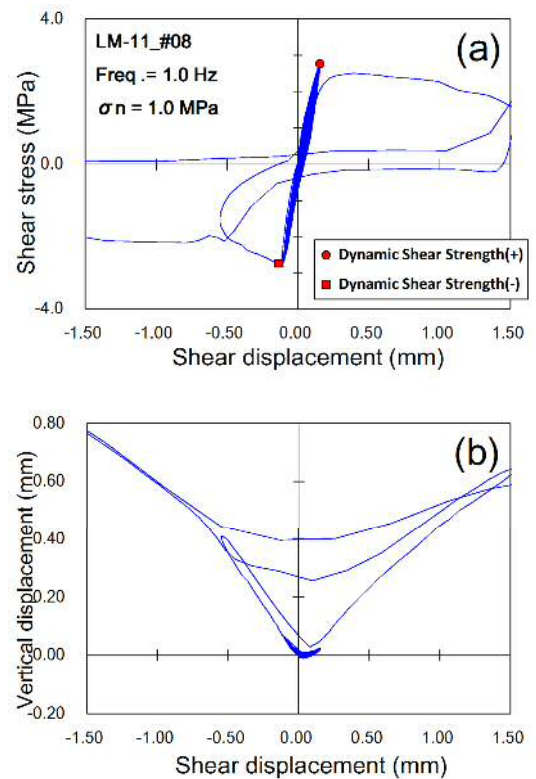


図-13 せん断ヒステリシスとダイレイション曲線

### (3) 動的せん断強さの定義

図-14には、動的せん断破壊が生じたと想定される68波目付近のせん断応力とせん断変位の時刻歴図を示す。これらによると、67波目からせん断変位が増加し、68波目には正と負の両側でせん断変位が基準変位1.0mmを超える。同時にせん断応力振幅は目標応力の95%を下回る。これより、正および負の両側とも68波目をもって動的せん断破壊と判定する。さらに、正の側では67波目をもって動的ピークせん断強さ、 $\tau_{p(d)}$ とし、負の側でも67波目をもって動的ピークせん断強さ、 $\tau_{p(d)}$ とする。

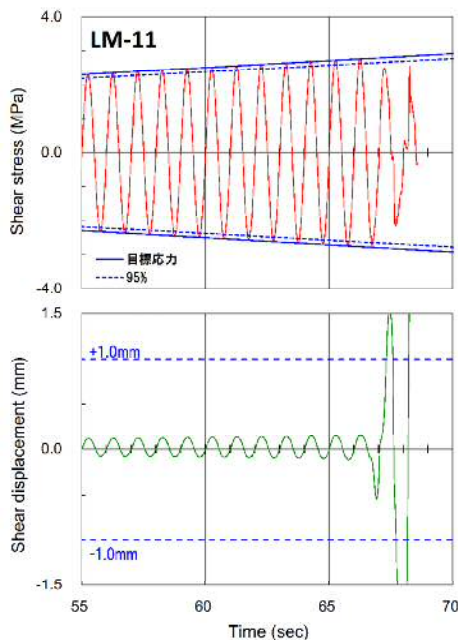


図-14 漸増振幅載荷試験における動的せん断破壊の判定

これより、漸増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。

〔動的せん断破壊〕

各載荷波形においてせん断応力が目標せん断応力振幅の95%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 $\pm 1.0\text{mm}$ を超えた時点をもって動的せん断破壊と定義する。

〔動的ピークせん断強さ〕

動的ピークせん断強さは、動的せん断破壊を発生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、原則として正の側および負の側の両方について定義できる。

### (4) 動的せん断変形特性の定義

せん断ヒステリシスにおける動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ および履歴減衰率 $h$ の定義については、段階振幅載荷試験と同じとする。

## 5. まとめ

本論文では、段階振幅載荷試験方法および漸増振幅載荷試験方法について述べるとともに、試験結果の整理についてまとめている。いずれの試験方法も、所定の垂直応力における岩盤不連続面の動的せん断強度を得るとともに、せん断変形に対する動的せん断剛性 $K_{sd(d)}$ と履歴減衰 $h$ を算出することができる。

## 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載荷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) 吉田淳: 岩盤不連続面の力学評価と応用に関する基礎的研究, 埼玉大学大学院理工学研究科(博士後期課程)学位論文, 1992.3

## SUGGESTION OF THE DYNAMIC DIRECT SHEAR TEST METHODS FOR THE ROCK DISCONTINUITY (PART 1. Multi-stage amplitude dynamic direct shear test and Increase amplitude dynamic direct shear test)

Jun YOSHIDA, Ryunoshin YOSHINAKA, Takeshi SASAKI

The authors have developed a new dynamic load-testing machine, for the purpose of investigating the response to the earthquake motion of rock discontinuities. We conducted a large number of dynamic direct shear tests for rock discontinuities, then we investigated the dynamic shear strength and dynamic deformability of rock discontinuity. In this study, we proposed the dynamic direct shear test methods for rock discontinuities. In this paper (PART 1), we explain the methods and the results of Multi-stage amplitude dynamic direct shear test and Increase amplitude dynamic direct shear test. Both test methods give the dynamic shear strength and the dynamic shear stiffness of rock discontinuity.