

動的物性試験による岩盤不連続面の 動的せん断強度・変形特性

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 岩盤工学研究所（〒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、実地震波に対する不連続面の応答を把握することを目的として、動的載荷試験装置を開発した。本報告では、この試験装置によって得られた岩盤不連続面の動的強度・変形特性について報告する。

岩盤不連続面の動的一面せん断試験として、コアの試験に用いられてきた段階振幅載荷試験および筆者らが提案する漸増振幅載荷試験の2試験を実施している。試験試料は、ボーリングコアより採取した石灰岩節理面および泥質岩層理面およびモルタル材料によって人工的に作成した不連続面である。一連の試験結果より、動的せん断破壊および動的ピークせん断強さ $\tau_p(d)$ を定義している。また、動的せん断変形特性として、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ などのパラメータを定義している。

Key Words : Dynamic Loading Test Machine, rock discontinuity, dynamic shear test, dynamic shear strength, dynamic shear deformability

1. はじめに

硬質の岩盤には層理面や節理面などの岩盤不連続面が多数分布し、岩盤の強度・変形特性に大きな影響を与えることは古くから知られている。2011年東北地方太平洋沖地震の発生を契機として、岩盤を基礎とする各種の重要構造物や長大岩盤斜面などについても地震応答解析による設計の精度が求められている。これら不連続性岩盤を対象とした解析手法については、近年、従来の地震応答解析手法の問題点が指摘されるとともに新しい手法の提案が行われ、岩盤基礎および岩盤構造物への適用性が示されている¹⁾。

しかし、これらの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となる岩盤不連続面の動的強度・変形特性である。これらについては、岩石コアや原位置岩盤における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下で実施されたものはほとんど見受けられない。

筆者らは、実地震波に対する不連続面の応答を把握す

ることを目的として、正負の載荷（いわゆる両振幅）を実施できるような動的載荷試験装置を開発した²⁾。本研究では、この動的試験装置を用いた各種動的試験を行い、地震時における岩盤不連続面の動的物性を評価するための基礎資料を得た。本報告では、岩盤不連続面を対象とした動的せん断試験によって得られた岩盤不連続面の動的せん断強度・変形特性について報告する。

2. 動的せん断試験

(1) 試験方法

本試験で使用した動的載荷試験装置²⁾は、図-1に示す動的一面せん断試験および動的垂直剛性試験の実施が可能である。本試験では、このうち動的一面せん断試験について報告する。

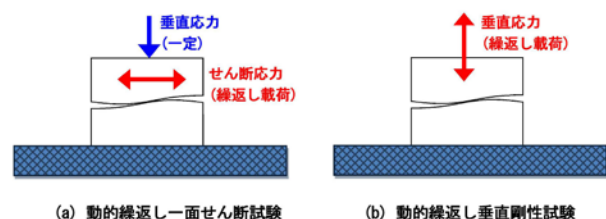


図-1 動的載荷試験の種類

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 σ_n を保持した状態で、せん断応力 τ を所定の波形として載荷する試験である。なお、せん断応力波形は正および負のいわゆる両振幅とし、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われる。本研究では、段階振幅載荷試験と筆者らの提案する漸増振幅載荷試験を実施している。

a) 段階振幅載荷試験

段階振幅載荷試験は、現在、(社)地盤工学会において作成中である試験基準(案)「岩石の多段階繰返し三軸圧縮試験方法」³⁾で推奨されている試験方法である。

段階振幅載荷試験は、垂直応力一定条件のもとで所定のせん断応力波形を載荷する試験であり、1段階N回(波)の繰返し載荷をせん断応力振幅を増加させながらM段階実施する。本試験では、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、目標強度である静的せん断強さ τ_s に到達するよう計画している。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 $0.2\tau_s$, $0.3\tau_s$, $0.4\tau_s$, $0.5\tau_s$ ・・・と増加させてゆく。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、10段階を上回る載荷を行うことがほとんどである。図-2には段階振幅載荷試験の載荷波形を示す。

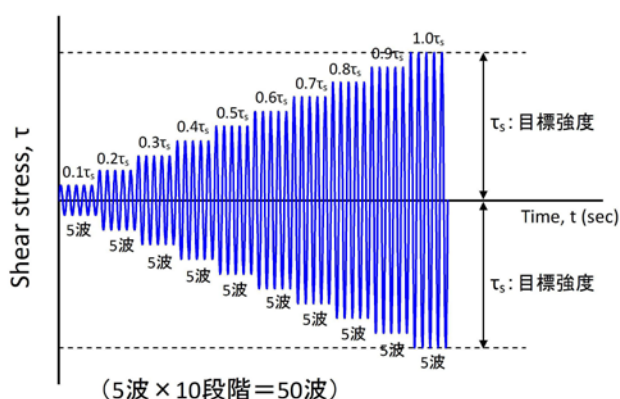


図-2 段階振幅載荷試験における載荷波形[5波10段階]

b) 漸増振幅載荷試験

漸増振幅載荷は、垂直応力一定条件のもとで所定のせん断応力波形を載荷する試験であり、せん断応力振幅を連続的に漸次増加させる載荷試験である。図-3には漸増振幅載荷試験概念図を示す。載荷は、所定の回数(あるいは所定の時間)で目標強度 τ_s (一般には静的せん断強さ) に到達するよう計画している。

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。

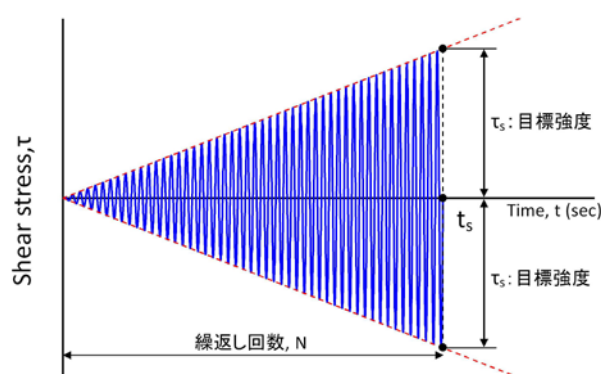


図-3 漸増振幅載荷試験における載荷波形

(2) 試験供試体

本試験では、数種類の岩盤不連続面(節理面および層理面)およびモルタルによる人工不連続面(圧裂破壊面および平坦面)を使用した。

岩盤不連続面は、秩父中古生層の石灰岩節理面と泥質岩層理面であり、掘削孔径116mmおよび86mmのボーリングにおいて採取されたコア試料を対象とした。それぞれの断面積はおよそ 75cm^2 および 35cm^2 である。写真-1には、岩盤不連続面による試験試料を示す。

自然の岩盤不連続面は試料採取に費用と時間がかかること、および均一な性状の試料をある程度の数量確保することが困難であることから、強度および変形特性の比較試験にはモルタルによる人工不連続面(圧裂破壊面および平坦面)を使用した。



写真-1 岩盤不連続面の試験供試体(泥質岩層理面)

(3) 試験結果

図-4には、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、比較的表面粗さが顕著であり(目視によるJRC=10~16)かつ噛合せもやや良好なものである。載荷波形は周波数1.0 Hzの正弦波であり、1段階を5波として10段階目で目標強度に達するよう計画した。

図-4(a)によると、目標強度 τ_s (静的せん断強さ) を超えて12段階目(1.2 τ_s)において正および負の両側でせん断応力が所定の応力振幅(図中破線)を発生できなくなり、同時にせん断変位が急増したため(図-4(c) 参照) 終了とした。図-4(b)の垂直応力の時刻歴図によると、载荷当初は垂直応力にほとんど変動は見られなかったものの、11段階目を超えたあたりから変動が急増している。これらの傾向は、表面が粗く比較的噛合せの良好な不連続面に共通にみられるものである。

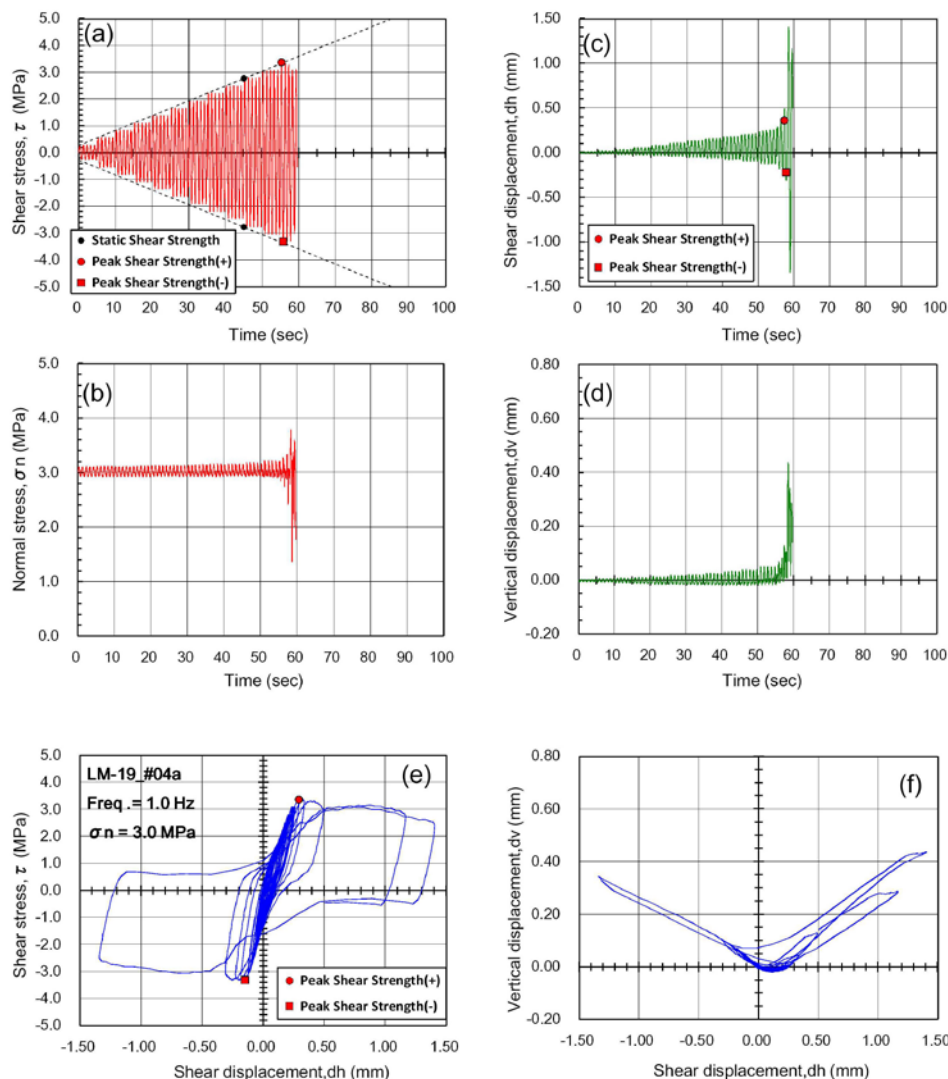


図-4 段階振幅载荷試験結果の例(石灰岩節理面, 载荷周波数 1.0Hz, 垂直応力 3.0MPa)

3. 動的せん断強度・変形特性

(1) 動的せん断強さの定義

前出の地盤工学会基準「岩石の多段階繰り返し三軸圧縮試験方法」³⁾では、多段階繰り返し载荷による三軸圧縮強さとして、「軸差応力を維持できず、軸差応力が

図-4(e)のせん断応力-せん断変位関係によると、せん断ヒステリシスは载荷当初から10段階目付近まではほぼ直線上の紡錘形を呈し、11段階目よりわずかに逆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生できなくなった12段階目では、逆S字型の平行四辺形のヒステリシスを呈する。図-4(f)の垂直変位-せん断変位関係によると、ダイレイション曲線はほぼ左右対称の凹状型を呈する。

増加しなくなるまで、もしくは軸ひずみが15%に達するときをもって破壊と定義する」としている。本研究では、動的せん断試験における動的せん断破壊の定義として、目標せん断応力振幅に対して载荷せん断応力が著しく低下するか、あるいはせん断変位が著しく増加する場合とする。すなわち、「各载荷波形について、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を上回った時点をもって動的载荷におけるせん断破壊と定義する。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、正の側および負の側の両方について定義する。」

図-5には、漸増振幅载荷試験結果の例を示し、図-6に

は同試験による応力比 R_s の時刻歴図を示す。応力比 R_s とは、载荷波形ごとの正および負のピーク値を目標せん断応力振幅によって除した値であり、この値が0.95を下回った時点でせん断応力の発現が達成できなくなったものと評価する。なお、動的せん断破壊および動的ピークせん断強さは本論文で初めて定義するものであり、応力比の基準0.95およびせん断変位の基準1.0mmについては本研究で実施した各種試験結果より設定した値である。

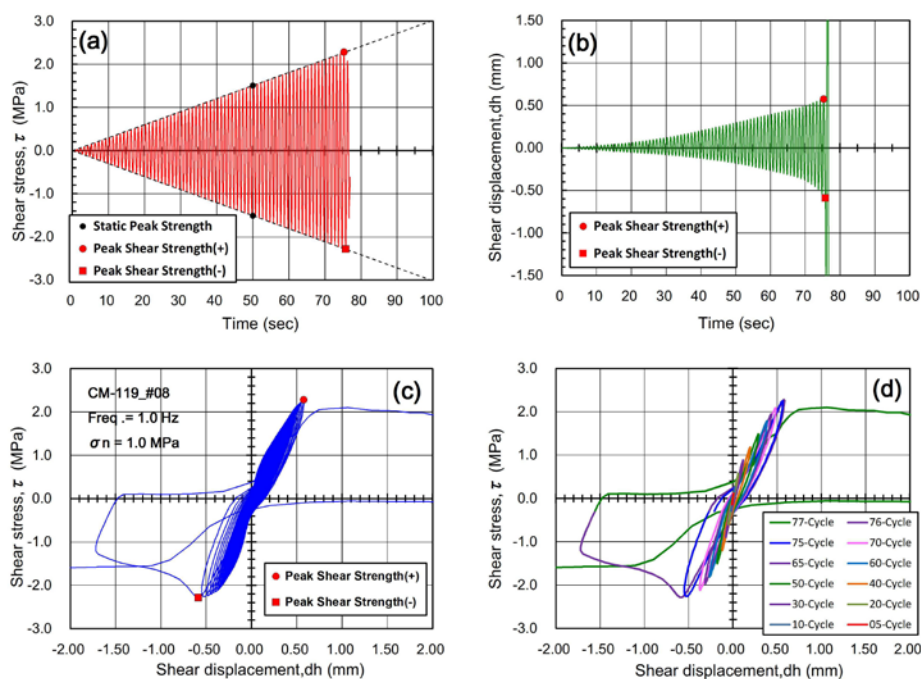


図-5 漸増振幅载荷試験結果の例（モルタル圧裂破壊面，载荷周波数 1.0Hz，垂直応力 1.0MPa）

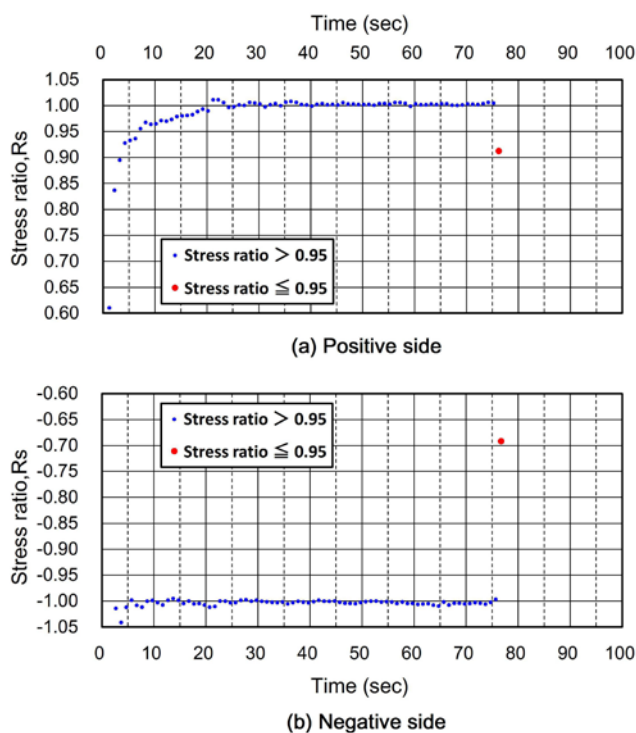


図-6 漸増振幅载荷試験における応力比の時刻歴図（モルタル圧裂破壊面）

図-5および図-6より、正の側では77波目において強度低下を生じ応力比 R_s が0.95を下回るとともに、せん断変位も1.0mmを超えることから、この時点をもって正の側の動的せん断破壊とする。動的ピークせん断強さは76波目のせん断応力振幅とする。負の側でも77波目において強度低下を生じ応力比 R_s が0.95を下回るものの、せん断変位は76波目において1.0mmを超えている。これより、76波目をもって負の側の動的せん断破壊とする。動的ピークせん断強さは動的せん断破壊の直前のピークせん断応力値（76波目のせん断応力振幅）とする。

(2) 動的せん断強度特性

図-7には、石灰岩節理面（ $\phi 60$ コア）について実施した段階振幅載荷試験および漸増振幅載荷試験の結果を示す。図-7(a)は段階振幅載荷試験の結果であり、正および負

の動的ピークせん断強さ $\tau_{p(d)}$ を○と□でプロットしている。また、図中の太実線はこれらピーク強さの線形近似であり、いわゆる破壊包絡線である。さらに、図中の破線は静的一面せん断試験によって得られた静的せん断強さの線形近似である。これより、ばらつきはあるものの動的強度は静的強度を上回る結果が得られている。図-7(b)は漸増振幅載荷試験の結果であり、同様の結果が得られている。なお、図-7(c)は段階振幅載荷試験および漸増振幅載荷試験の破壊包絡線をまとめて図示したものであり、両者の間に明瞭な差異は認められない。

図-8には、泥質岩層理面（ $\phi 60$ コア）について実施した同様の試験結果を示す。これより、泥質岩層理面についても段階振幅載荷試験および漸増振幅載荷試験の結果に明瞭な差異は認められない。

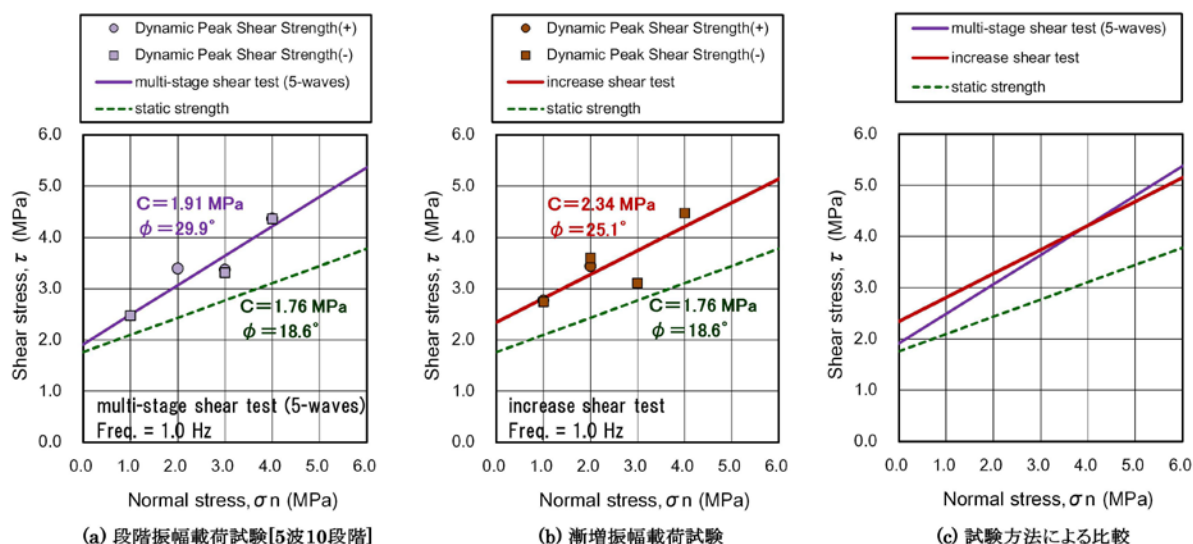


図-7 各種試験方法による破壊包絡線（石灰岩節理面（ $\phi 60$ ），载荷周波数 1.0Hz）

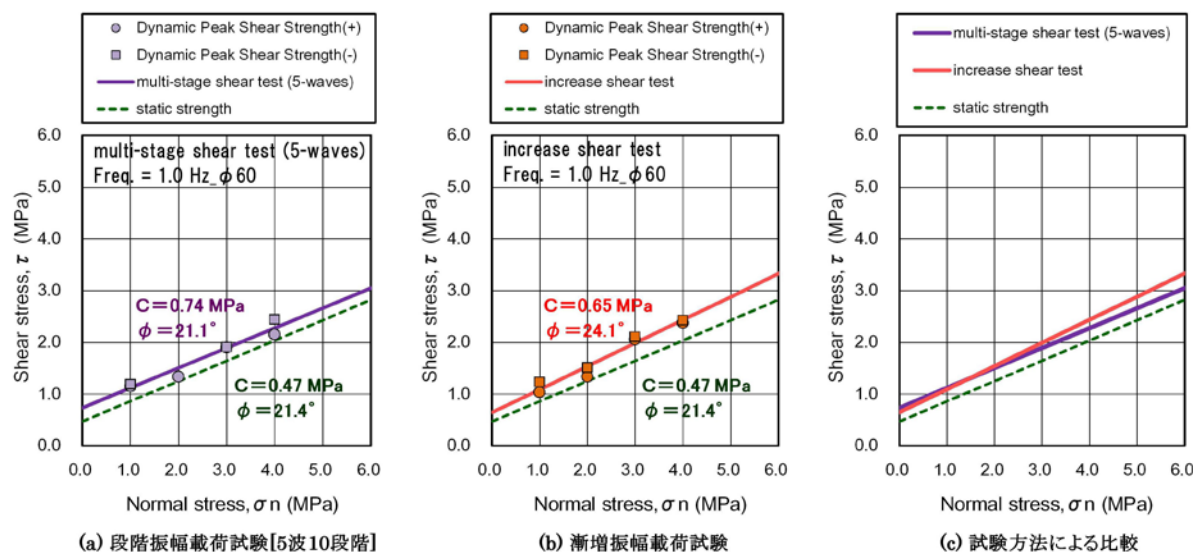


図-8 各種試験方法による破壊包絡線（泥質岩層理面（ $\phi 60$ ），载荷周波数 1.0Hz）

(3) 動的せん断変形特性

せん断ヒステリシスについて、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ および履歴減衰率 h を図-9に定義する。

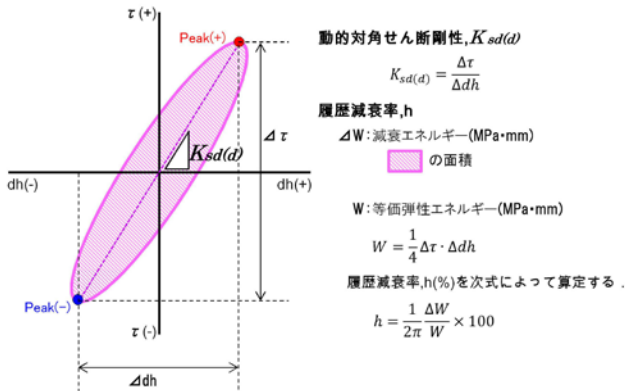


図-9 動的対角せん断剛性と履歴減衰率

図-10は漸増振幅載荷試験によるせん断ヒステリシスにおいて、載荷波形の正および負のピーク値を5波ごとにプロットしたものである（骨格曲線）。

図-11には、図-10の骨格曲線より算出した動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ をせん断変位両振幅(Δdh)に対してプロットしている。図によると、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ はせん断変位両振幅(Δdh)（すなわち、せん断応力両振幅($\Delta \tau$)）の増加とともに低下する傾向があり、せん断応力依存性が認められる。

4. まとめ

本報告では、段階振幅載荷試験および漸増振幅載荷試験の結果をもとにして、動的せん断破壊および動的ピークせん断強さ $\tau_p(d)$ の定義について提案している。これにより、岩盤不連続面の動的せん断強度が静的せん断強度を上回るという結果を得ている。さらに、動的せん断変形特性を示すパラメータとして、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ および履歴減衰率 h を定義している。これより、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ はせん断応力振幅に対する依存性のあることを報告している。

今後は、様々な岩種での動的せん断試験を行ない、岩盤不連続面の動的物性に関するデータの蓄積を行ってゆく予定である。

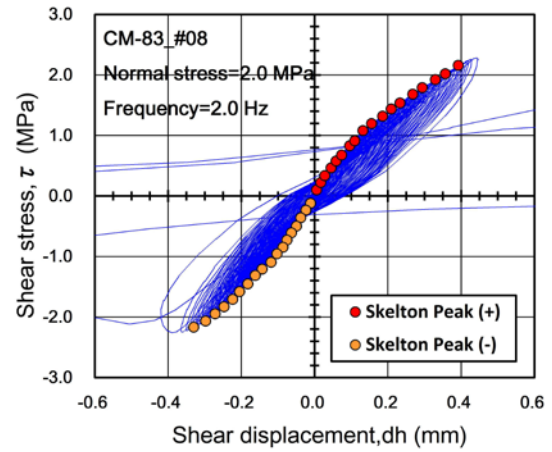


図-10 ヒステリシスにおけるピーク値

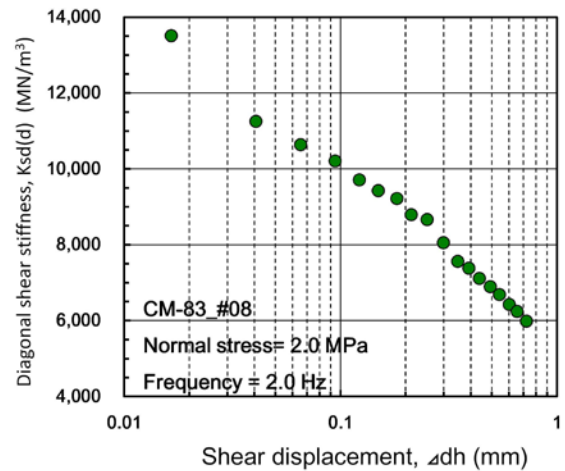


図-11 動的対角せん断剛性のせん断応力依存性

参考文献

- 1) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木 猛: 大型構造物基礎地盤の地震挙動における複合降伏モデルの適用性, 土木学会論文集, Vol.68, No.3, 2012, p.451-465,
- 2) 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, 2013.01, p.219-224
- 3) 地盤工学会: 地盤工学会誌, Vol.60, No.7, ser.No.654, 2012.07, pp.32~33 (試験基準(案)の公示)

STUDY ON DYNAMIC SHEAR STRENGTH AND DEFORMABILITY OF ROCK DISCONTINUITY USING DYNAMIC LOADING TEST MACHINE

Jun YOSHIDA, Ryunoshin YOSHINAKA and Takeshi SASAKI

The authors developed the Dynamic Loading Test Machine, for the purpose of investigation of response to earthquake vibration of rock discontinuity. In this paper, we report dynamic shear strength and dynamic shear deformability of rock discontinuity by dynamic shear test.

Dynamic shear tests were performed by multi-stage amplitude dynamic shear test and increase amplitude dynamic shear test. Test specimens are Limestone joints and Mudstone bedding plane of natural discontinuity, and artificial discontinuities made of mortar. By consideration of these tests results, we defined the dynamic peak shear strength, $\tau_p(d)$ and the dynamic diagonal shear stiffness, $K_{sd}(d)$.