

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

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、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実施した各種の岩盤不連続面に対する動的一面せん断試験の結果より、岩盤不連続面の動的せん断変形特性について検討を行った。本論文では、岩盤不連続面の動的せん断変形特性を示すパラメータとして動的初期せん断剛性 $K_{si(d)}$ 、動的対角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ そして履歴減衰 h を定義した。さらに、これらの動的せん断変形特性について、応力依存性および載荷周波数依存性について検討している。

Key Words : dynamic loading test machine, rock discontinuity, dynamic shear test, dynamic initial shear stiffness, dynamic diagonal shear stiffness

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が古くより知られている。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^{1,2)}、岩盤基礎および岩盤構造物への適用性が示されている。

しかし、これらの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強度・変形特性の決定である。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^{3,4)}。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、動的載荷試験装置を開発した^{5,6,7)}。本報告では、この試験装置によって実施した各種の岩盤不連続面に対する動的一面せん断試験の結果より、岩盤不連続面の動的せん断変形特性について検討した結果について報告する。

2. 動的せん断変形特性

(1) 動的一面せん断試験

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

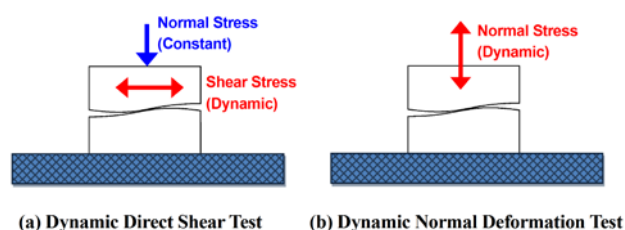
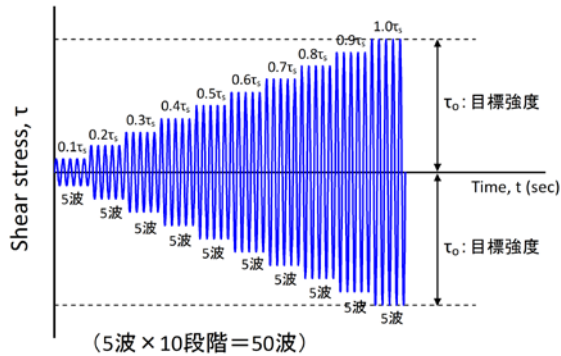


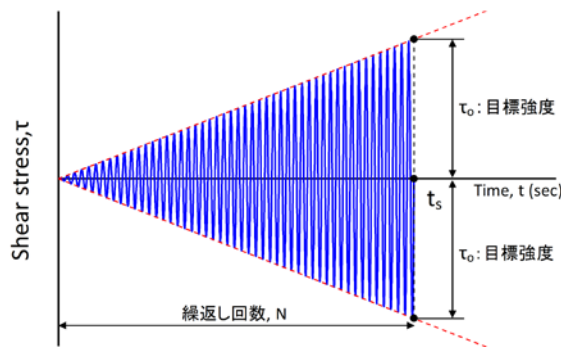
図-1 動的載荷試験の種類

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

として载荷する試験である．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われる．本研究では，図-2に示す段階振幅载荷試験と漸増振幅载荷試験を実施した⁷⁾．



(a) 段階振幅载荷試験のせん断応力波形



(b) 漸増振幅载荷試験のせん断応力波形

図-2 動的一面せん断試験の载荷波形

(2) 動的一面せん断試験における変形特性

a) 段階振幅载荷試験

図-3には，比較的表面粗さが大きく（目視によるJRC＝8～12）噛合せが非常に良好な(A)モルタル圧裂破壊面において実施した段階振幅载荷試験の結果を示す．载荷は5波10段階の計50波目に目標強度（静的強度）に達するよう行われ，载荷周波数は1.0 Hz，垂直応力は1.0 MPaである．

図-3(a)および図-3(b)のせん断ヒステリシスは，载荷当初はほぼ直線状の紡錘形を呈し，せん断応力振幅の増加とともにせん断剛性は徐々に低下してゆく．その後，徐々に逆S字型が顕著となり，せん断破壊が生じるまでは正および負の両側で対称形を呈する．負の側において1.5 τ sの5波目で著しい大変位を呈したため負の側の動的せん断破壊とし，正の側では1.6 τ sの1波目で著しい強度低下と大変位を呈したため正の側の動的せん断破壊とする．図-3(c)および図-3(d)のダイレイション曲線では，

当初より下向き凸状の円弧形状を呈し，载荷段階の進行とともに閉塞しながらより大きな円弧形状を呈する．

図-3(e)によると，载荷当初から4段階目（0.4 τ s）まではほぼ直線状の紡錘形を呈するが，その後，徐々に逆S字型の傾向が顕著となる．

b) 漸増振幅载荷試験

図-4には，比較的表面粗さが比較的大きく（目視によるJRC＝6～10）かつ噛合せはやや不良(C)な砂岩節理面における漸増振幅载荷試験の結果を示す．载荷は50波で目標強度（静的強度）に到達するよう行われ，载荷周波数は1.0 Hz，垂直応力は1.0 MPaである．

図-4(a)および図-4(b)のせん断ヒステリシスは，载荷当初はほぼ直線状の紡錘形を呈し，せん断応力振幅の増加とともにその対角せん断剛性は徐々に低下してゆく．その後，徐々に逆S字型が顕著となり，せん断破壊が生じるまでは正および負の両側で対称形を呈する．また，図-4(c)および図-4(d)のダイレイション曲線は，下向き凸状の山型形を呈する．

図-4(e)によると，载荷当初から45波目付近までは比較的高い剛性を呈するほぼ直線状の紡錘形を呈するが，その後，徐々にヒステリシスが大きくなり動的ピークせん断強さに至る．動的ピークせん断強さを発現する72波目以降は，ヒステリシスは逆S字型の傾向が顕著となる．

(3) 動的せん断変形パラメータの定義

動的せん断変形特性について検討するために，各種の動的せん断変形パラメータについて定義する．

図-5には，動的对角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ 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对角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ として定義する．動的对角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ は一般の地盤材料に対して実施されている繰返し変形試験（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)」⁸⁾）において定義されている等価ヤング率 E_{eq} と基本的には同等なものである．

動的对角せん断剛性 $K_{sd(d)}$ 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．

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

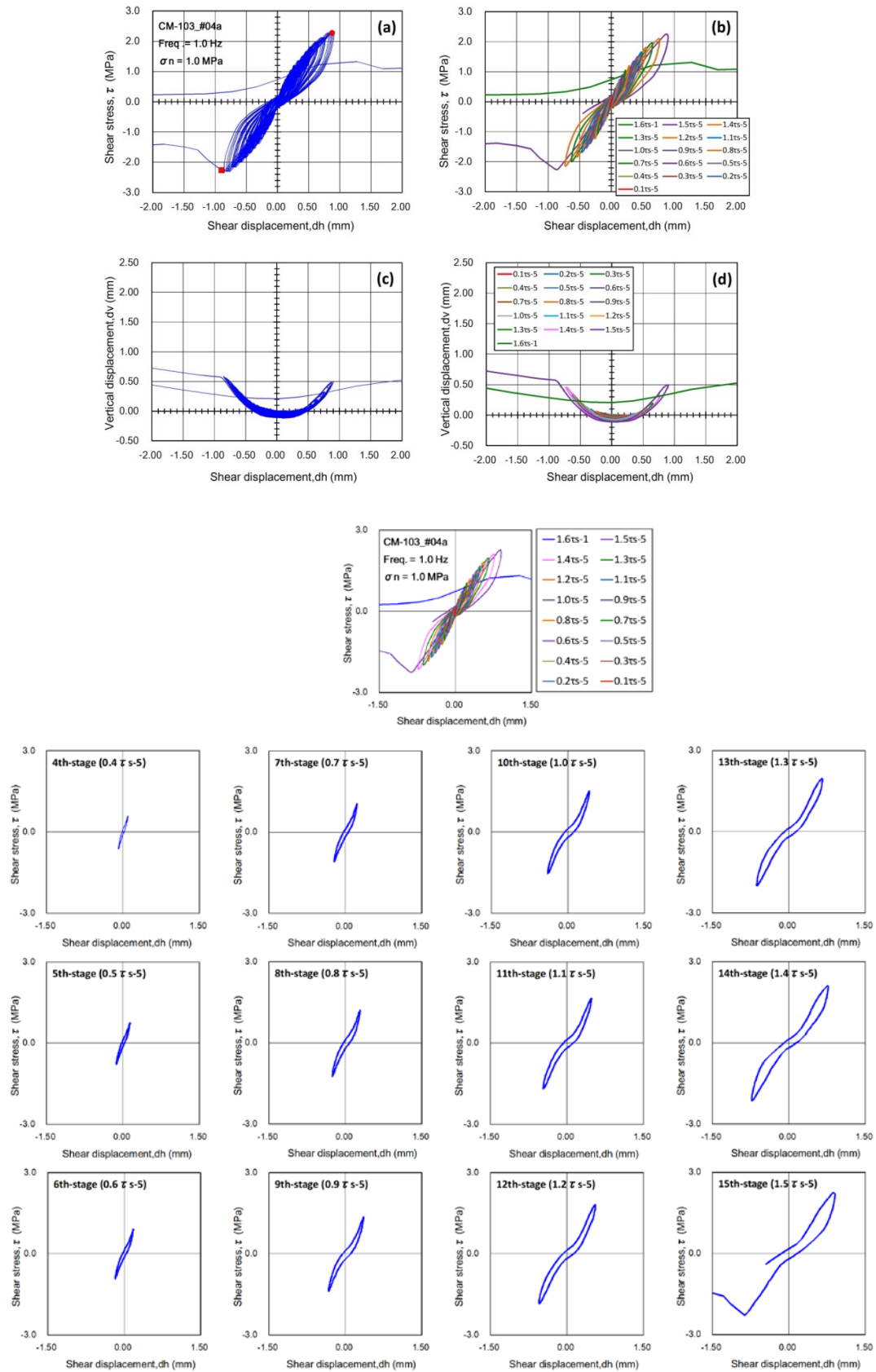
ここで，

$\Delta \tau$: せん断応力両振幅 (MPa)

Δdh : せん断変位両振幅 (mm)

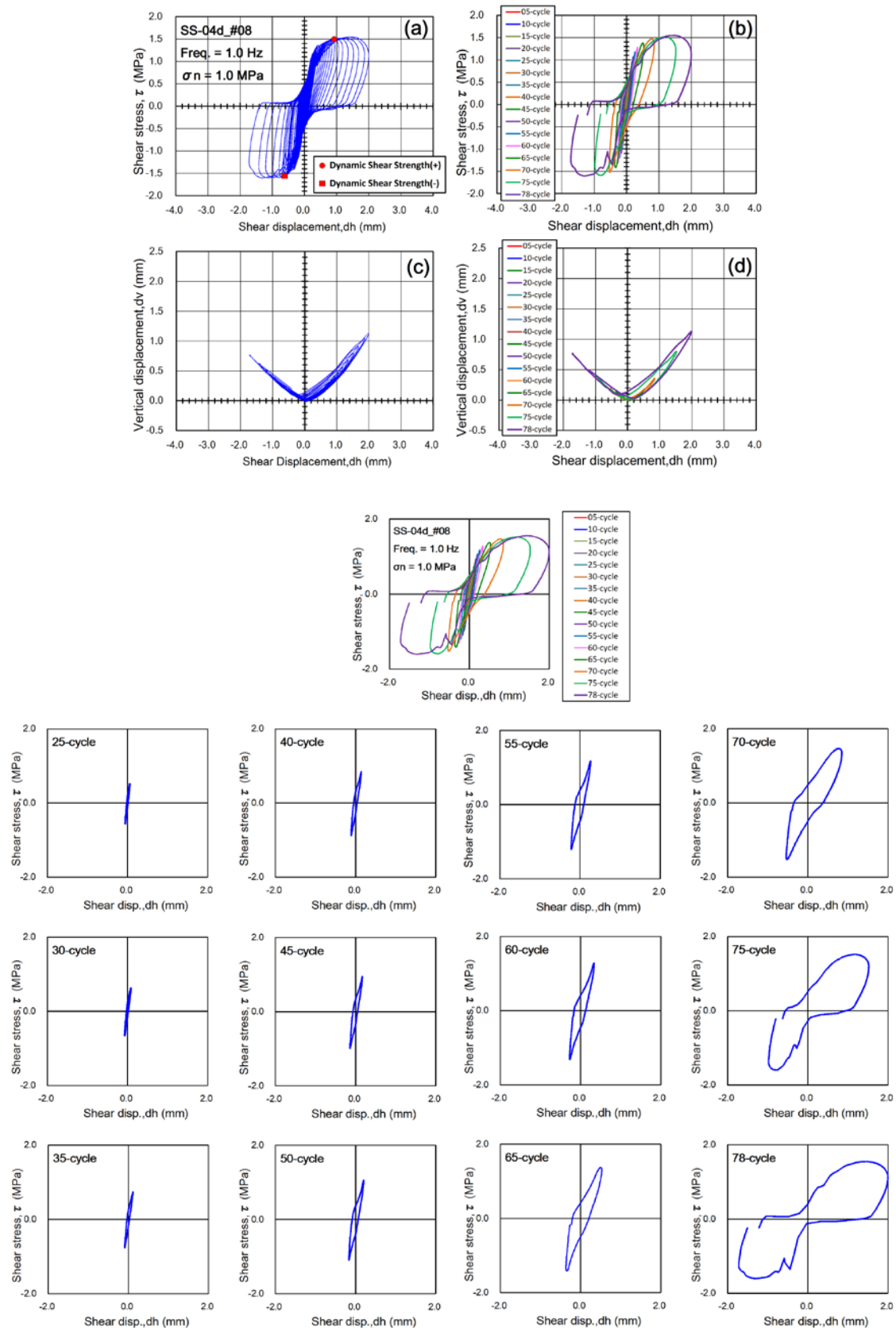
せん断ヒステリシスで囲まれた面積 ΔW を減衰エネルギーとして，履歴減衰 h を次式によって定義する．

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$



(e)せん断ヒステリシスの変化

図-3 段階振幅載荷試験におけるせん断ヒステリシスの変化
(モルタル圧破壊面, JRC=8~12, 周波数 1.0Hz, $\sigma_n=1.0$ MPa)



(e)せん断ヒステリシスの変化

図-4 漸増振幅載荷試験におけるせん断ヒステリシスの変化
(砂岩節理面, $\text{JRC}=6\sim 10$, 周波数 1.0 Hz , $\sigma_n=1.0 \text{ MPa}$)

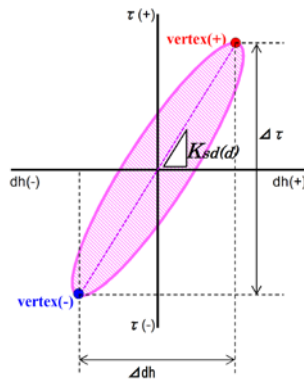


図-5 動的对角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ の定義

このとき、等価弾性エネルギー W は次式によって定義される。

$$W = \frac{1}{4} \Delta \tau \cdot \Delta dh \quad (3)$$

履歴減衰 h もやはり繰返し変形試験「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ものと同等である。

なお、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)－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（一面せん断試験および垂直剛性試験）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^3)として定義する。

図-6には、動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ について定義する。

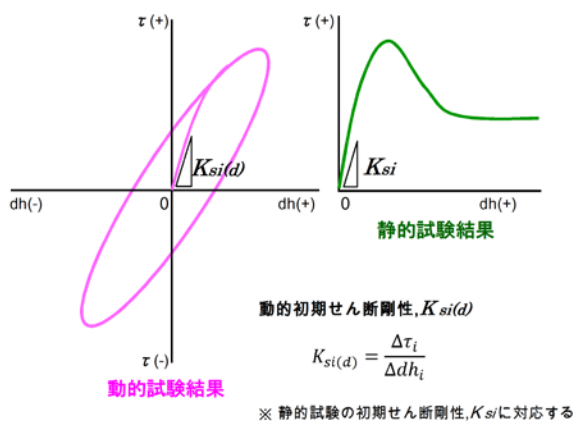


図-6 動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ の定義

段階振幅載荷試験において各載荷段階の初期の立ち上がりについて、図中に示すような動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ を次式によって定義する。これは厳密には初期接線せん断剛性であり、静的せん断試験における初期せん断

剛性 K_{si} に相当する。

$$K_{si(d)} = \frac{\Delta \tau_i}{\Delta dh_i} \quad (4)$$

ここで、

$\Delta \tau_i$: 初期の立ち上がり時のせん断応力増分 (MPa)

Δdh_i : 初期の立ち上がり時のせん断変位増分 (mm)

図-7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-7(a)は任意の載荷段階の第1波目のせん断ヒステリシスにおいて動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ を算定した例であり、載荷初期のせん断応力－せん断変位の関係より得られる初期接線剛性をもって動的初期せん断剛性を定義している。図-7(b)は動的对角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ を算定した例であり、図-5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(vertex)を結ぶ直線の勾配をもって動的对角せん断剛性を定義する。また、履歴減衰 h は、図-5に示すように第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。

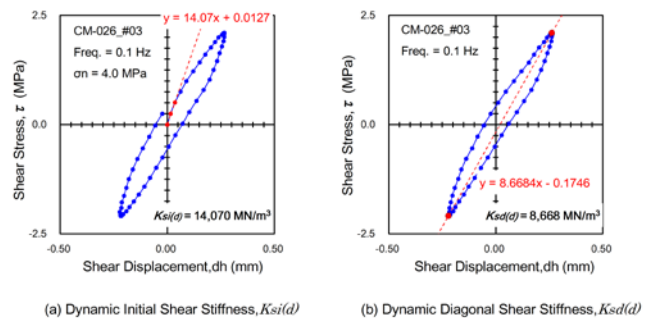


図-7 動的せん断変形パラメータの設定例

(4) 動的せん断変形パラメータの検討

図-8には、動的一面せん断試験結果のせん断ヒステリシスより算出した動的对角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ および動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ 、さらにせん断ヒステリシスより算定した履歴減衰 h のせん断変位両振幅(Δh)に対する変化についてプロットした。試験はモルタル圧裂破壊面を対象として実施した段階振幅載荷試験であり、載荷周波数1.0Hzとして垂直応力 $\sigma_n = 0.5\text{MPa}, 1.0\text{MPa}, 2.0\text{MPa}, 3.0\text{MPa}$ の各ケースについてまとめている。これによると、動的对角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ および動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ はせん断変位両振幅(Δh)（すなわち、せん断応力両振幅($\Delta \tau$)）の増加とともに、低下する傾向にある。

図-9には、同一垂直応力条件のもとで同一せん断応力振幅を異なる周波数で載荷させた時のせん断ヒステリシスを示す。これより、図-10には、動的对角せん断剛性と履歴減衰率の載荷周波数による変化についてまとめている。これによると、動的对角せん断剛性については周

波数依存性は認められないが、履歴減衰率は周波数の増加とともに減少する傾向が認められる。

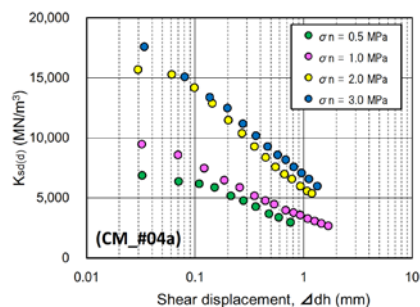


図-8 動的せん断剛性における応力依存性
(モルタル圧裂破壊面, JRC=8~12, 周波数1.0Hz)

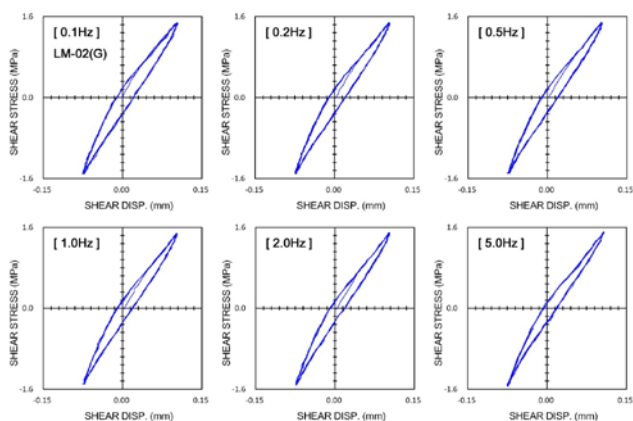


図-9 動的せん断変形における周波数依存性の検討
(石灰岩節理面, JRC=10~16, $\sigma_n=3.0\text{MPa}$)

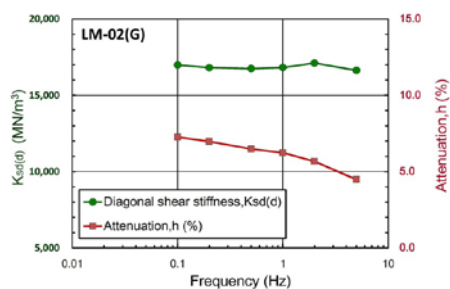


図-10 せん断変形特性における载荷周波数依存性

3. まとめ

- ◇ 岩盤不連続面の動的せん断変形特性を示すパラメータとして、動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ 、動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ そして履歴減衰 h について定義した。
- ◇ 動的初期せん断剛性 $K_{si}(d)$ および動的対角せん断剛性 $K_{sd}(d)$ については、せん断変位（せん断応力）依存性を確認した。また、履歴減衰 h については周波数依存性が確認された。

今後は、さまざまな種類の岩盤不連続面における動的一面せん断試験を実施し、動的物性に関するデータの蓄積を行う予定である。また、これまでに得られた動的物性より、不連続性岩盤の動的解析モデルの作成を進めている。

参考文献

- 1) Iwata, N., Sasaki, T., Sasaki, K., Yoshinaka, R. : Static and dynamic response analysis of rock mass considering joint distribution and its applicability, 12th ISRM Congress, Beijing, 2011.
- 2) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 岩盤の不連続性を考慮した大型構造物基礎の地震応答解析-東北地方太平洋沖地震を基本事例として, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 70, No. 1, pp. 16-32, 2014.
- 3) Jafari, M.K., Hosseini, K.A., Pellet, F., Boulon, M., Buzzi, O. : Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.23, pp.619-630, 2003.
- 4) 岡田哲実, 伊藤洋: 岩盤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.
- 5) 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.
- 6) 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载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.
- 7) 吉田淳, 吉中龍之進, 佐々木猛: 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, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 公益社団法人土木学会, 講演番号42, p.237-242, 2014.
- 8) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 「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)」, pp.750~767, 地盤工学会, 2009.

STUDY ON DYNAMIC SHEAR DEFORMABILITY BY DYNAMIC DIRECT SHEAR TESTS OF ROCK DISCONTINUITIES

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. In this study, a large number of dynamic direct shear tests for the rock discontinuities were conducted. In these test results, we defined the dynamic initial shear stiffness $K_{si}(d)$, dynamic diagonal shear stiffness $K_{sd}(d)$ and attenuation h of rock discontinuity which are parameters to become the deformability index. Furthermore, we examine the stress dependence and frequency dependence of dynamic shear deformability.