

実地震波載荷試験による岩盤不連続面の動的せん断特性の研究

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

筆者らは地震時の岩盤不連続面の動的物性を把握することを目的として、新たに動的載荷試験装置を開発した。本研究では、この動的載荷試験装置による実地震波載荷試験を実施し、これらの試験結果より岩盤不連続面のせん断応答特性についてまとめている。実地震波載荷試験は動的一面せん断試験において載荷応力波形として実際の地震波形を用いる試験であり、垂直応力一定条件のもとで実施した。石灰岩節理面を対象とした試験結果から、岩盤不連続面の実地震波載荷の応答は、載荷せん断応力波形および不連続面における依存性が高いことを確認した。これらの試験結果に基づいて、岩盤斜面のすべり面および地表面の断層について、実地震波によるせん断変位について検討した。

Key Words : Earthquake wave dynamic direct shear test, dynamic direct shear test, rock discontinuity average shear displacement, fault displacement

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の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は、近年、従来の地震応答解析手法と入力物性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の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。このような点を踏まえて、筆者らは、

岩盤不連続面を対象として図-1に示すような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な動的載荷試験装置を開発した^{5,6,7,8)}。

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ない。本研究では、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、その応答について研究した。

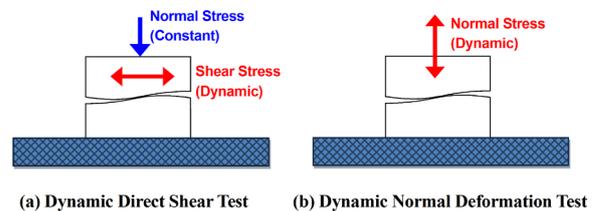


図-1 動的載荷試験の種類

2. 実地震波載荷試験の方法

実地震波形載荷試験は、前出図-1(a)の動的一面せん断試験において、載荷応力波として実際の地震波による不規則波を用いる試験である。試験は垂直応力一定条件

のもとで行い、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）をせん断荷重として載荷する（応力制御）。

本研究で使用した試験装置の特徴は、対象とする実地震波形の時間軸を変えずに載荷せん断応力波形として載荷させることにある。これまでも岩石コアによる繰返し三軸試験や人工岩盤不連続面に対する繰返し一面せん断試験などにおいて、地震波形による載荷が行われたことがある^{9,10}。しかし、これらの試験では、試験装置の性能の点から載荷地震波形の時間軸を5~10倍とすることが行われている。これに対して本試験装置では、実時間軸で地震波形を載荷させることが可能である。

図-2には、実地震波載荷試験の試験方法のフローを示す。基本的な試験方法は筆者らがこれまでに実施してきた動的一面せん断試験^{5,6,7,8,11}と同じものである。始めに、試験供試体を収納したせん断箱に所定の垂直応力を作用させる。続いて、実地震波せん断応力波形を載荷させる。このとき、所定の時間間隔で応力と変位の計測を行う。予定した実地震波せん断応力波形の載荷が完了するとともに試験を終了する。

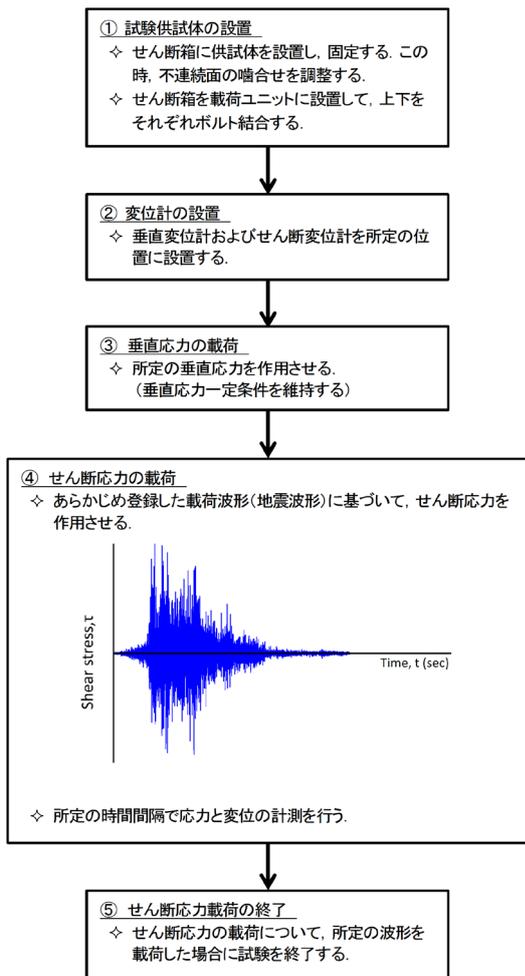


図-2 実地震波載荷試験における試験方法のフロー

本試験装置において登録する載荷波形は、0.01 sec間隔（10 msec間隔）の時刻歴データである。図-3には、目標とする載荷波形（青色）と載荷試験時にロードセルによって測定された実際の載荷波形（赤色）を対比している。図-3(a)は載荷波形全体を示し、図-3(b)は載荷波形の一部の時間軸を拡大して示している。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。これらについては、本試験装置が0.01sec間隔の載荷指示を完全には制御できていないことが要因と考えられる。

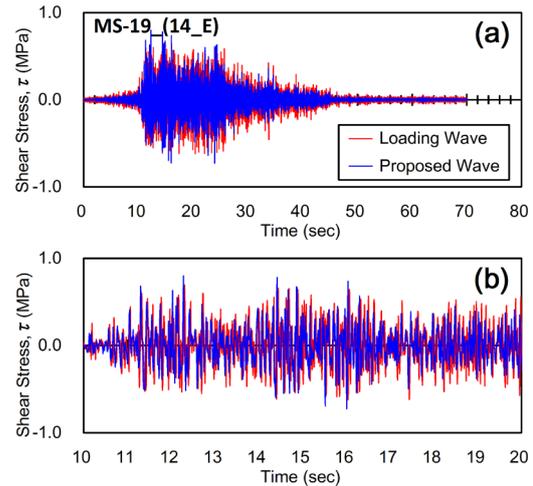


図-3 実地震波載荷波形の検証

図-4には、図-3の各々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。しかし、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較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。

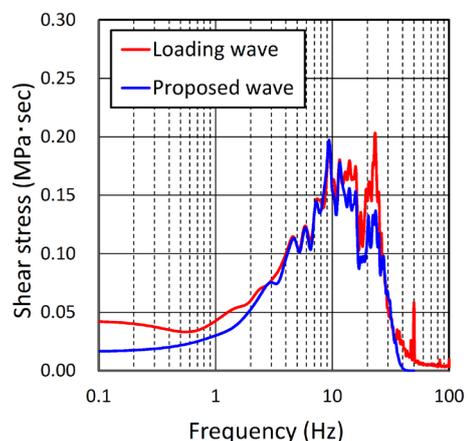
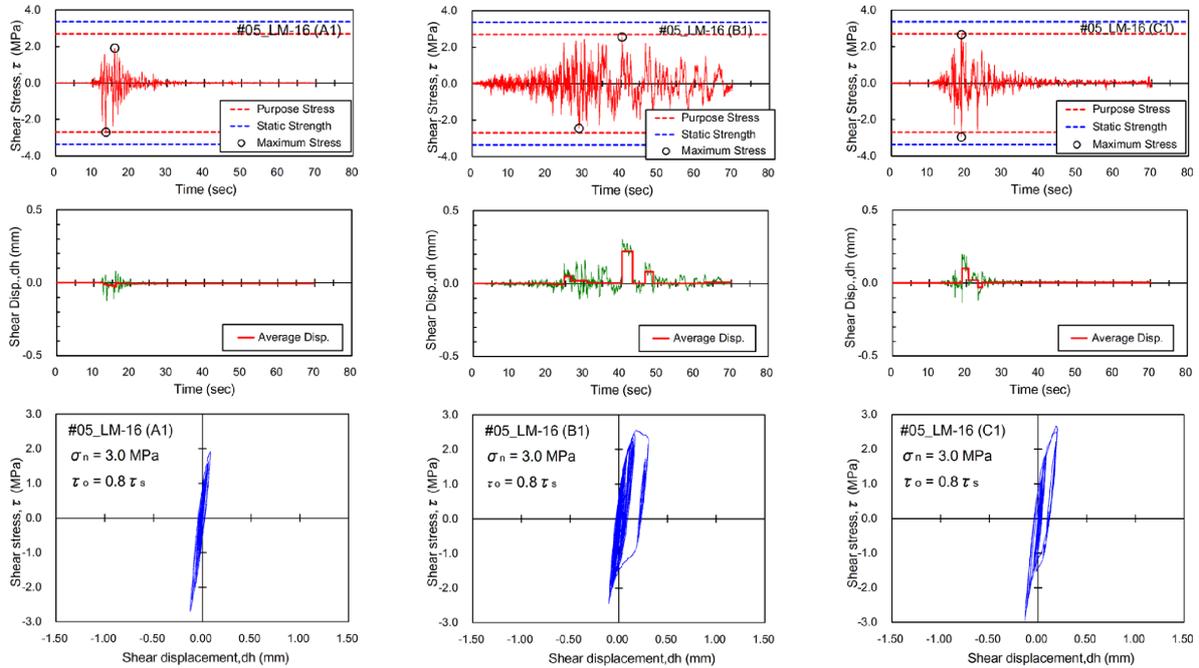


図-4 目標波形と実測載荷波形の対比

3. 実地震波載荷試験結果の検討

石灰岩節理面を対象とした実地震波載荷試験を実施した。試験は垂直応力 3.0MPa のもとで実施し、代表的な地震波形 3 種について実施した。図-5 は、試験結果を

示す。上段図-5(a)の結果は載荷せん断応力波形の最大値を $\tau_o = 0.8 \tau_s$ としたケースであり、下段図-5(b)の結果は載荷せん断応力波形の最大値を $\tau_o = 1.0 \tau_s$ としたケースである。これらの試験はすべて同一の供試体について実施したものであり、一連の試験に先立って使用する

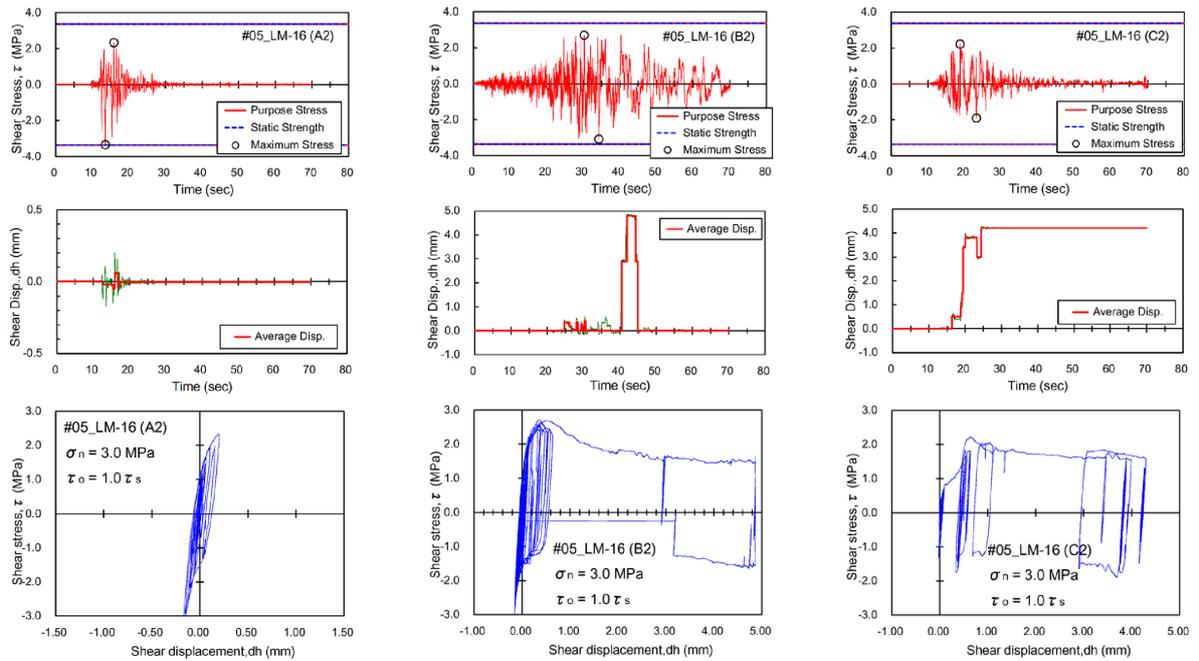


(a-1) A 波

(a-2) B 波

(a-3) C 波

(a) 最大せん断応力 $\tau_o = 0.8 \tau_s$



(b-1) A 波

(b-2) B 波

(b-3) C 波

(b) 最大せん断応力 $\tau_o = 1.0 \tau_s$

図-5 石灰岩節理面における実地震波載荷試験の結果（供試体：LM-16， $\phi 60$ コア， $\sigma_n = 3.0$ MPa）

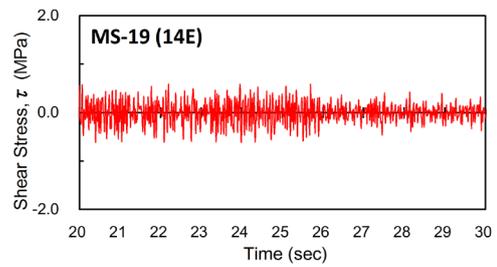
供試体について段階振幅载荷試験を実施し不連続面の状態を残留状態とした。この理由は、繰返し载荷によるせん断強さの変化（低下）を防止するとともに、試験結果から供試体ごとのばらつきをなくすためである。

各々の試験結果は、上段には载荷せん断応力の時刻歴波形図を示し、中段にはせん断変位の時刻歴波形図を示す。そして下段にはこれらの観測波形より作成したせん断ヒステリシスを示す。なお、上段の载荷せん断応力の時刻歴波形図には、目標せん断応力振幅 τ_0 と静的せん断強さ τ_s をそれぞれ破線によって示している。また、中段のせん断変位の時刻歴波形図には、上段の载荷せん断応力波形との比較によって判別した平均せん断変位 (Average shear displacement) を併記している。

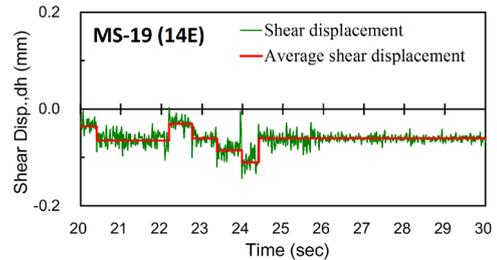
図-6には、平均せん断変位の例について示す。図-6(b)のせん断変位の時刻歴応答波形には、図-6(a)の载荷波形との比較により判別した平均せん断変位を併記している。平均せん断変位は、せん断変位波形の中立軸の正あるいは負の側への位相量として定義する。具体的には、目標载荷波形の中立軸との対比により決定する。平均せん断変位は、図-6(c)のせん断ヒステリシスにおいてはヒステリシスの平行移動として認識され、実地震载荷によるせん断破壊（すべり）を表すパラメータと考えられる。

図-5(a)の試験結果によると、平均せん断変位が生じているのは B 波と C 波である。これらの波形は比較的卓越周期が大きい波形であり、いずれのケースとも最終的な変位である残留変位はほぼ 0 となっている。これに対して A 波では、明瞭な平均せん断変位を生じることなく、図下段のせん断ヒステリシスもほぼ同一の直線上の軌跡を呈する。B 波および C 波のせん断ヒステリシスについてみると、いずれも正の側において平均せん断変位が卓越するものの、負の側での平均せん断変位はほとんど認められない。なお、せん断剛性はいずれの波形ともほぼ同じ傾向を示す。

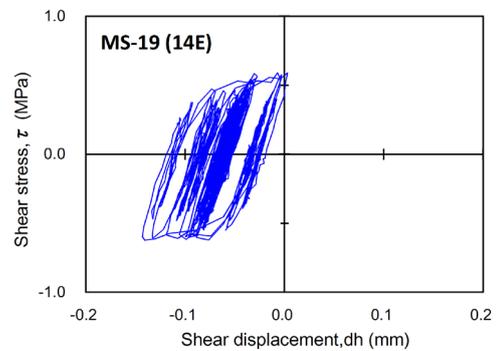
図-5(b)には、目標せん断応力 $\tau_0 = 1.0 \tau_s$ とした場合の結果を示す。これらの結果によると、 $\tau_0 = 0.8 \tau_s$ とした図-5(a)の結果に比べて、いずれの波形とも平均せん断変位の発現が大きくなっている。特に $\tau_0 = 0.8 \tau_s$ のケースにおいて平均せん断変位の発現が大きかった B 波と C 波においては、最大で 4.0mm を超える変位が生じている。ただし B 波については、40sec 以降に最大 4.8mm まで進行した平均せん断変位は、45sec には再び平均せん断変位 = 0mm 付近にまで戻る。これに対して C 波では、24sec 以降に最大 4.2mm まで進行した平均せん断変位は増減することなくそのまま残留変位として残る。これに対して A 波では、最大で正の側へ 0.06mm 程度の平均せん断変位を生じるものの、最終的な残留変位はほぼ 0mm となる。



(a) Shear stress wave



(b) Shear displacement



(c) Shear hysteresis

図-6 平均せん断変位の例

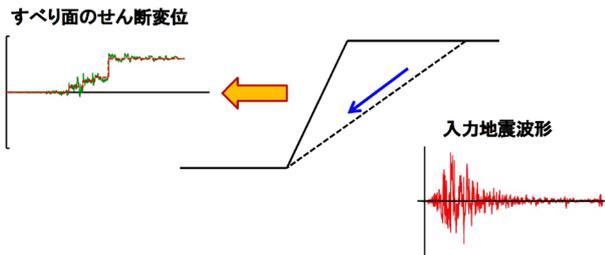
本研究では、ここで挙げた石灰岩節理面だけでなく、他の岩盤不連続面についても実地震波载荷試験を実施している。これらの試験結果より、以下の特徴が挙げられる：

- 石灰岩節理面における試験結果からもわかるように、平均せん断変位の大きさには载荷せん断応力波形との相関性が認められる。いずれの試験結果とも、B 波および C 波において平均せん断変位が大きく発現している。特に、B 波による応答は大きな平均せん断変位を呈している。これより、不連続面の実地震波载荷における応答には、载荷せん断応力波形における依存性が高いことがわかる。
- 同種の岩盤不連続面について実施した同一パターンのせん断応力波形の試験結果より、せん断ヒステリシスには強い相似性がみられた。これより、岩盤不連続面の実地震波载荷における応答では、供試体（不連続面）への依存性が高いことがわかる。

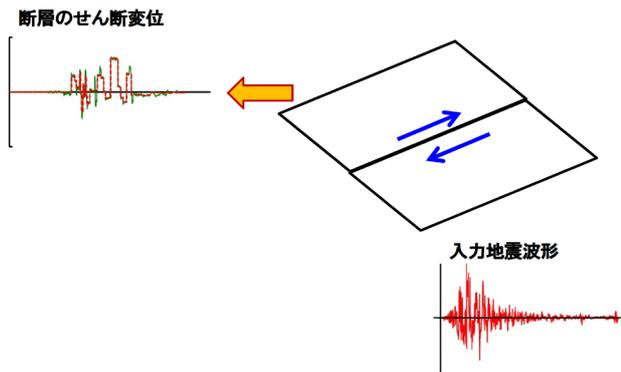
4. 岩盤不連続面の地震時の応答について

前節で実施した実地震波載荷試験の結果より、実岩盤における地震時の応答について考察する。図-7には、大スケールの岩盤不連続面の代表例について、地震時の応答の様子を概念的に示している。いずれのケースとも、実際の入力地震動は3次元的な振動であるが、この概念図では、2次元モデルとして表現している。

図-7(a)は、岩盤斜面内のすべり面（不連続面）について地震時の応答を概念的に示した図である。基盤より入力した地震波により、すべり面上に生じるせん断変位を時刻歴波形図として示す。斜面のすべり面では、図に示すようにすべり方向に初期せん断応力が作用していることから、正の側へのせん断変位のみが累積する。動的せん断強さを超えるせん断応力振幅が入力される毎に、波形に応じた平均せん断変位が累積してゆく。これは、盛土や斜面における地震時の累積変位を算出するニューマーク法に対比される。



(a) 岩盤斜面のすべり面における実地震波への応答



(b) 断層における実地震波への応答

図-7 実地震波による岩盤不連続面の応答の例

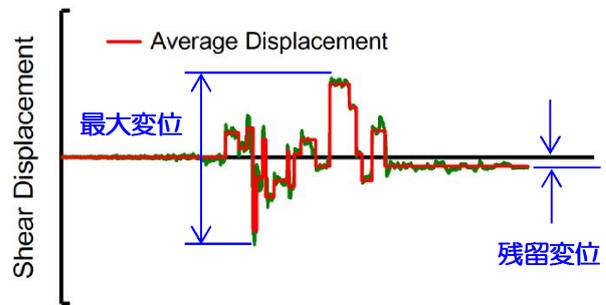
一方、図-7(b)は断層（あるいは活断層）について地震時の応答を概念的に示した図である。基盤より入力した地震波により、地表面に存在する断層のせん断変位を時刻歴波形図として示す。断層においては、基本的には斜面のような初期せん断応力は作用していないことから、

正および負の側への変位が生じている。そして、これらの変位が連続した後に、最終的にある変位に収束する。一般の地震動は、初期状態から増大して最大値を経た後に徐々に減少し、最終的には0となる。しかし、断層変位の場合、ある程度のせん断変位が残留変位として生じることがある。

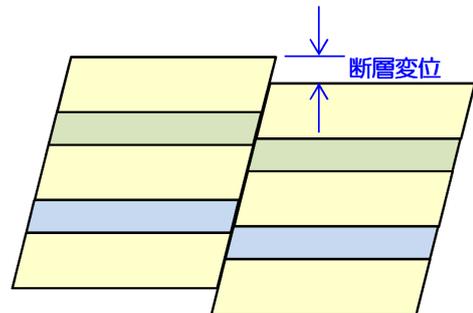
図-8には、断層におけるせん断変位について示す。図-8(a)は、図-7(b)にも示した断層におけるせん断変位の時刻歴波形図であり、正および負の側への変位が連続した後に最終的にある変位に収束する。本研究で実施した実地震波載荷試験では、この最終的な変位は残留変位として定義している。

図-8(b)には、一般の断層調査において断層変位として定義される変位を示す。一般の断層調査では、過去に変位を生じた断層あるいは破碎帯を対象として、現時点での変位を断層変位として定義する。ただし、この変位は図-8(a)に示すように実地震波載荷試験結果における残留変位に相当するものであり、地震時に生じる最大せん断変位は図-8(a)に示す最大変位である。

これより、断層（活断層）において過去にあるいは将来に想定される最大変位量は、一般に言われている断層変位（残留変位）よりは数倍も大きなものとなることがわかる。このような大きなせん断変位を正および負の側において何回も経験することにより、現場で観察されるような破碎部（破碎帯）が形成されることになる。



(a) 残留変位



(b) 断層変位

図-8 断層におけるせん断変位

5. まとめ

本研究では、岩盤不連続面を対象として実際の地震波形をもとにした実地震波載荷試験を行っている。これらの試験結果より、岩盤不連続面における実地震波載荷の応答特性について検討を行った。

- a) 初めに、実地震波載荷試験の方法について概説するとともに、その妥当性について検証した。目標とする載荷波形と載荷試験における計測載荷波形の比較より、若干の差異は見られるものの試験結果における影響は少ないものと判断できる。
- b) 石灰岩節理面および他の岩盤不連続面について実施した実地震波載荷試験の結果より、実地震波による岩盤不連続面のせん断応答特性についてまとめた。なお、せん断変位の時刻歴応答における中立軸の位相量を平均せん断変位(Average shear displacement)として定義し、実地震載荷によるせん断破壊(すべり)を表すパラメータとしている。
- c) 続いて、地震波形の特性による岩盤不連続面のせん断応答特性について検討することを目的として、代表的な地震波形3波について実地震波載荷試験を実施した。これらの結果より、不連続面の実地震波載荷における応答には、不連続面および載荷せん断応力波形における依存性が高いことを確認した。
- d) 実地震波載荷試験の結果より、実地震波が実際の岩盤不連続面に及ぼす影響として、岩盤斜面および断層(活断層)の応答について検討した。このうち断層(活断層)については、地震時に生じうるせん断変位量は、いわゆる断層変位(残留変位)よりは数倍も大きなオーダーとなることが想定された。

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) Boulon, M., Armand, G., Hoteit, N., Divoux, P. : Experimental investigations and modelling of shearing of calcite healed discontinuities of granodiorite under typical stresses, *Engineering Geology*, Vol. 64, pp. 117-133, 2002.
- 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.
- 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, (公社)土木学会, 講演番号 42, p. 237-242, 2014.
- 8) 吉田淳, 吉中龍之進, 佐々木猛: 岩盤不連続面の動的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, (公社)土木学会, 講演番号 7, p. 36-41, 2015.
- 9) 杉山弘泰, 五月女敦, 中村洋一: 三軸圧縮試験による火山角礫岩の動的強度特性, 土木学会第56回年次学術講演会, III-A067, pp. 134~135, 2001.
- 10) 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.
- 11) Yoshida, J. Yoshinaka, R. Sasaki, T. Osada, M. : Study on Dynamic Properties of Rock Discontinuity using Dynamic Direct Shear Test Machine., *2014 ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium, ERD2-2*, p. 768-777, 2014.

STUDY ON SEISMIC SHEAR CHARACTERISTIC OF ROCK DISCONTINUITIES BY USING EARTHQUAKE WAVE DIRECT SHEAR TESTS

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, we conducted earthquake wave dynamic direct shear tests by using this test machine, and investigated the dynamic shear response characteristic of rock discontinuities. These tests were used real earthquake waves. From test results using Limestone joints, we were recognized that the dynamic shear response characteristic are depend on rock discontinuities and loading shear stress waves and investigated the shear displacement for real earthquake waves, in regards to the failure plane of rock slopes and fault plane.