

地震時の地すべり面強度低下とこれを考慮した斜面安定性評価

熊崎 直樹^{1*}・鳥羽瀬 孝臣¹・柏柳 正之²・秦野 輝儀²・水橋 雄太郎²

¹電源開発株式会社 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²電源開発株式会社 水力エンジニアリング部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

*E-mail: naoki_kumazaki@jpower.co.jp

斜面安定性に関して、強い降雨や地震動がトリガーとなって地すべりなどの斜面破壊を引き起こすことが多い。そこで、強い地震動を受けた際の斜面安定性を評価することを目的に、斜面地山ですべり面を構成すると考えられる結晶片岩粒子から成る粘性土を対象に動的せん断強さを求めた。動的せん断強さは、調査横坑内で試料を採取し、三笠式一面せん断試験機を用いて、繰返し一面せん断試験を行った。試験結果から、せん断変位量及び繰返し回数に応じてせん断強さが低下することが分った。このような試験結果と、安定解析によって推定されるすべり面でのせん断歪みを組み合わせることにより、地震時のすべり安定性を評価した一例を示す。

Key Words : cyclic box shear test, slope stability evaluation

1. はじめに

地すべりなどの斜面破壊は、強い降雨や地震動がトリガーとなって引き起こされることが多い。強い地震動を受けた場合の斜面安定性を評価する際に、地震の繰返しせん断応力によって地すべり面のせん断強さが低下することが指摘されている(鶴飼ほか¹⁾)。

今回、調査対象とした斜面は三波川変成岩に属する緑色片岩からなり、片理構造が河川に向かって約30°で傾斜する流れ盤構造をなしている。また、空中写真や地表踏査によって地すべり地形が確認されている。一方、当該地域は東海・東南海・南海地震などが発生した場合、想定震度が6弱程度の地域に指定されており、大地震が斜面安定性に影響を及ぼす可能性がある。このようなことから、斜面地山内の地すべり面の性状および強度を把握する目的で、斜面中腹の既設水抜きトンネル内から地表に向かって地すべり面を横断するように調査横坑を掘削した(図-1、図-2)。横坑内において観察される地すべり面は約0.5~1.5mの幅があり、周囲の緑色片岩の片理構造に沿って分布し、礫、砂、シルト、粘土が混在した状態からなる。地すべり面は、礫を主体とする部分(以下、「破碎部」という)が大半を占めるが、破碎部とその上部岩盤および下部岩盤との境界付近では、比較的粘土やシルトの細粒分が多い部分(以下、「粘土部」とい

う)が厚さ数cm程度で層状に連続している(図-3)。地すべり面を対象として、試験枝坑内での原位置試験及び、調査横坑から採取した試料を用いて室内試験を実施した。本報告では、地すべり面の静的及び動的なせん断強さと安定解析によって推定される地すべり面でのせん断歪みを組み合わせることにより、地震時のすべり安定性を評価した一例を示す。

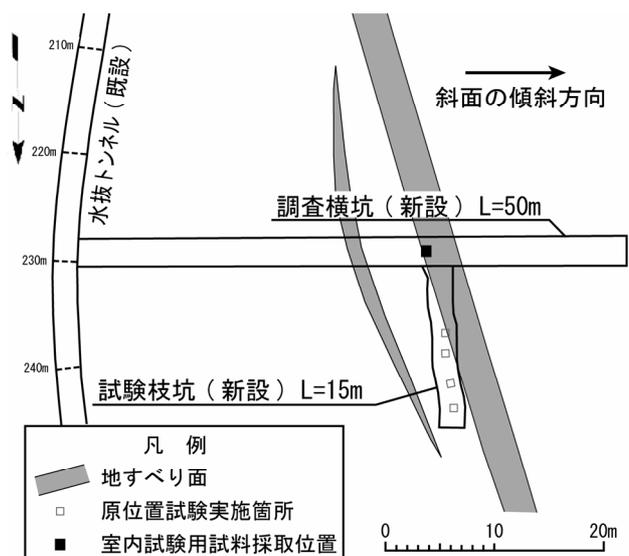


図-1 調査横坑位置図 (水平断面 EL.225m)

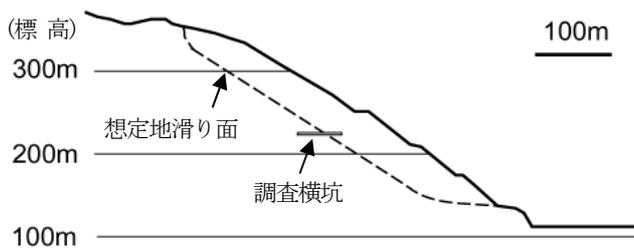


図-2 調査横坑位置図 (鉛直断面)



図-3 調査横坑内で確認された地すべり面の状況

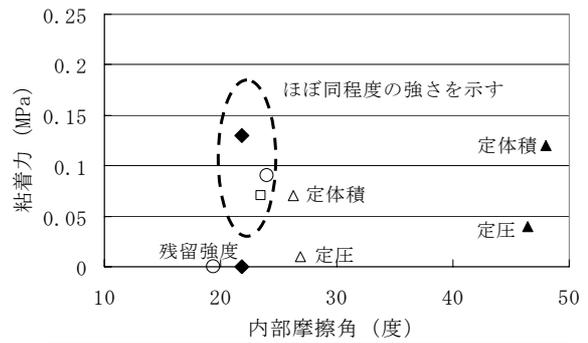
表-1 原位置試験及び室内試験の結果一覧

試験項目	試料状態	試験条件	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (度)	せん断強度 (直応力 1MPa時)	
原位置試験	ブロックせん断試験	不攪乱	0.13 (0)	21.8 (21.8)	0.53 (0.4)	
室内試験	中型一面せん断試験	不攪乱	定圧	0.07	23.5	0.51
	三笠式一面せん断試験	攪乱	定体積	0.07	26.3	0.57
		定圧	0.01	26.9	0.51	
	三笠式一面せん断試験	不攪乱	定体積	0.12	48.0	1.23
			定圧	0.04	46.4	1.08
リングせん断試験	攪乱	定圧	0.09 (0)	24.0 (19.4)	0.54 (0.35)	

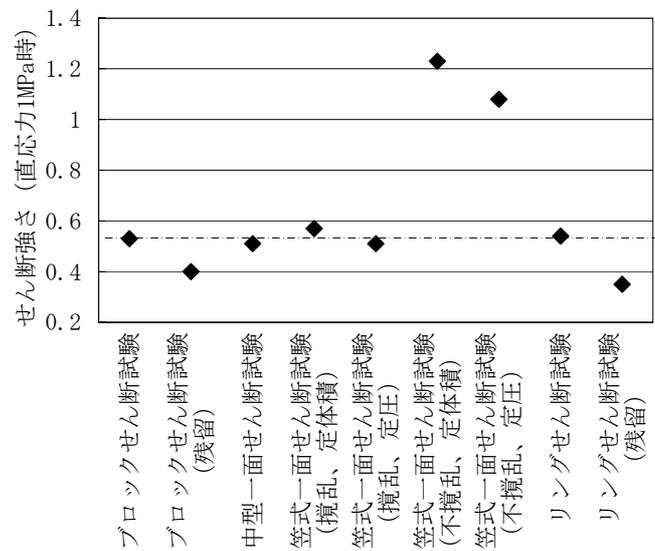
() は残留強度

2. 原位置試験及び室内試験

試験は、調査横坑（試験枝坑を含む）内の①「破砕部」を対象とした原位置試験（ブロックせん断試験）・室内試験（中型一面せん断試験）、②「粘土部」から採取した試料を用いた室内試験（三笠式一面せん断試験、リングせん断試験）を実施し、その結果を表-1及び図-4に示す。各試験で得られた強度定数（ c 、 ϕ ）を用いて、垂直応力1MPa時のせん断強さを推定すると概ね0.5～0.6MPa程度の範囲内で、ほぼ同等レベルであることが判る。今回、試験対象とした「破砕部」及び「粘土部」



(a) せん断試験結果



(b) せん断強さの比較

図-4 原位置試験及び室内試験の結果

は、いずれも粗粒分が50%以上を占める礫質土に分類される。「破砕部」で行った原位置ブロックせん断試験終了後のせん断破壊面の観察結果から、礫と礫の間の粘性土が選択的にせん断されていることが判明しており、原位置ブロックせん断試験で得られたせん断強さは、「破砕部」を構成する礫間の粘性土のせん断強さに強く支配されていると考えられる。したがって、礫分が多い供試体（原位置や不攪乱試料）であっても、礫分を除去した粘性土を主体とする供試体（攪乱試料）と同様のせん断強さを示すものと考えられる。一方、図-4に示すように、不攪乱試料を用いた三笠式一面せん断試験では、極端に強度（内部摩擦角）が大きくなる傾向を示した。これは、三笠式一面せん断試験は供試体寸法が直径6cm、高さ2cmであり（図-5）、比較的大きな礫が混入した不攪乱試料の適用は困難と考えられ、強度評価からは除外した（表-1の網掛け部分）。

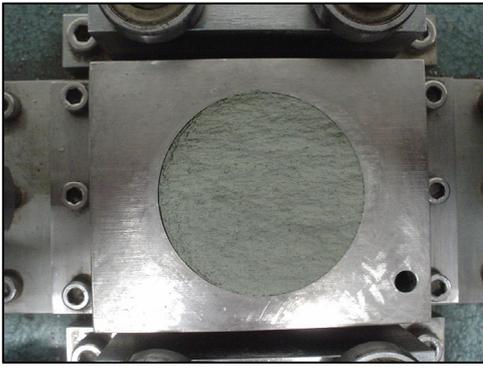


図-5 三笠式一面せん断試験用試料

表-2 設定強度パラメータ

設定強度	強度パラメータ	
	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (度)
原位置ブロックせん断試験 (ピーク強度)	0.13	21.8
原位置ブロックせん断試験 (残留強度)	0	21.8

3. 斜面安定性評価

斜面地山の地すべり面のせん断強さとして原位置ブロックせん断試験の結果(表-2)を採用し、地震時(東海・東南海・南海地震の発生を想定)の地すべり挙動の安定解析を行った結果、すべり面の安全率は図-6に示すとおりとなった。ピーク強度を採用した場合には、想定すべり面の安全率は概ね1.0以上で、地震波の変動に伴い瞬間的に1.0を下回ることがあるが、継続するものではない。残留強度を採用した場合には、想定すべり面の安全率は概ね1.0以下であり、斜面崩壊が発生する可能性が高くなる。すなわち、地震発生時の斜面安定性評価に関して、地すべり面のせん断強さを静的なピーク強度と残留強度のどちらを採用するかで評価が異なる結果となった。

4. 繰返し一面せん断試験

(1) 試験目的

静的なピーク強度や残留強度を用いた安定解析の結果から、地震時の斜面安定性を評価することは困難であった。そこで、地震時における地すべり面の動的せん断強さをより詳細に把握するため、鶴飼ほか¹⁾の方法に準じて、三笠式一面せん断試験機を用いた繰返し一面せん断試験を行うこととした。地震時の地すべり安定性評価に関して、今回採用した手順を図-7に示す。

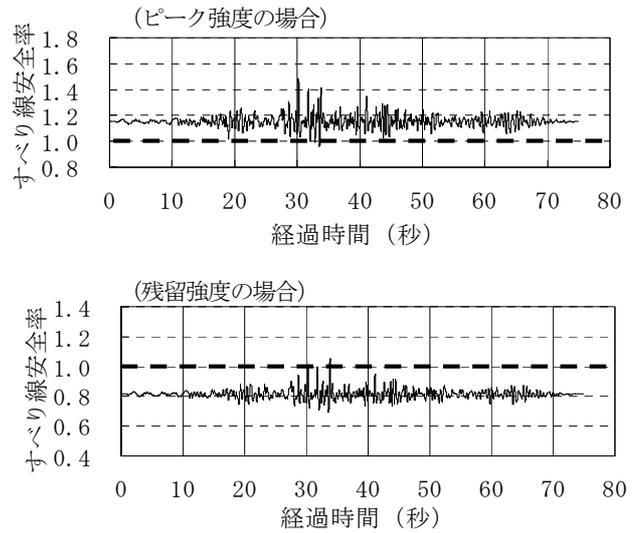


図-6 想定地震動による動的解析の結果

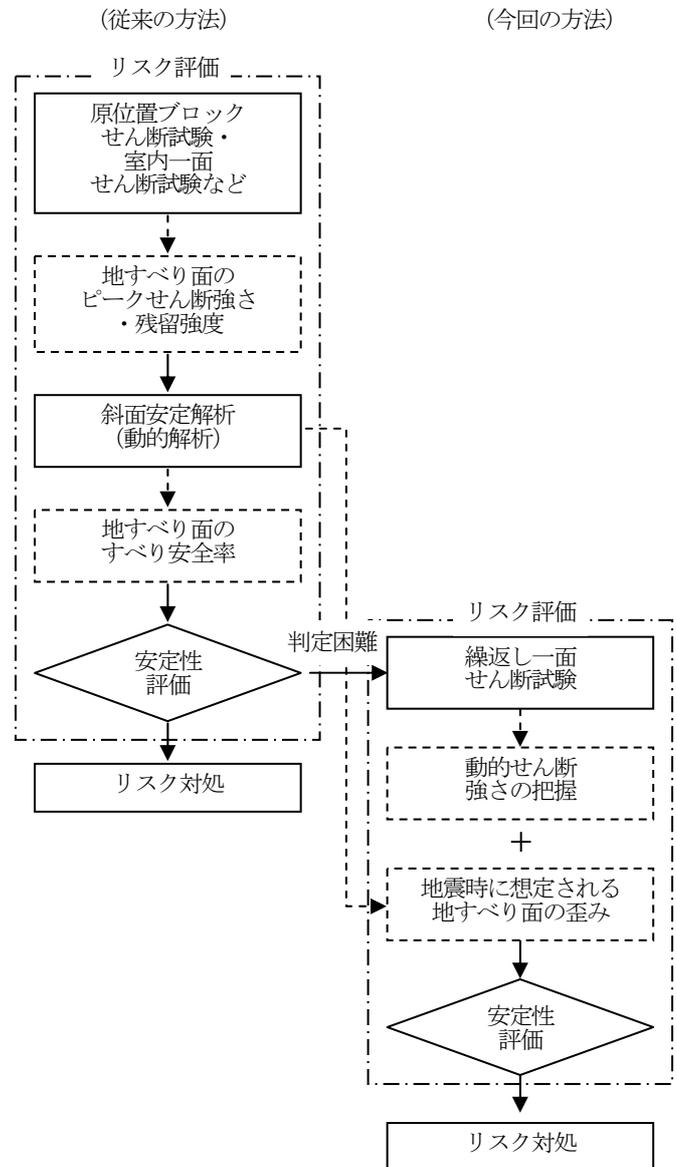


図-7 地震時の地すべり安定性評価に関して今回採用した手順

(2) 試験内容

攪乱試料を用いた一面せん断試験の結果が原位置ブロックせん断試験と概ね合致していることを前提として(図-4), 攪乱試料による繰返し一面せん断試験を行った。攪乱試料はふるい分けにより, 粒径0.85mm以上の粗粒分を取り除き粒度調整した供試体として作成した。所定の先行垂直応力に相当する垂直力を載荷し, 圧密度-時間曲線により1次圧密が終了して圧密速度が十分小さくなったことを確認したうえで, せん断力の載荷を開始した。先行垂直応力は, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2MPaとした。定体積条件ではせん断速度を0.2mm/min, 最大せん断変位を0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5mmとしてせん断載荷を行った。また, 定圧条件ではせん断速度を0.02mm/min, 最大せん断変位を2mmとしてせん断載荷を行った。繰返し回数はいずれも片振り10回とした。試験条件を表-3に示す。

(3) 試験結果

繰返し一面せん断試験(定体積条件)におけるせん断変位-せん断応力の関係の一例を図-8に示す。最大せん断変位を5mmとした場合の1回目のせん断応力に対する各回のせん断応力の割合と繰返し回数の関係を図-9に示す。各先行垂直応力において, 繰返し回数が増加するにしたがってせん断応力の割合が低下し, 繰返し回数10回で1回目のせん断応力の20~40%程度に概ね収束する傾向が認められた。また, 先行垂直応力が大きいほど, せん断応力の低下率が小さい。最大せん断変位を0.1mmとした場合には, 繰返し回数が増加するにしたがってせん断応力の割合が低下するが, その割合は90~100%程度であった(図-10)。すなわち, 最大せん断変位が大きいほど, 繰返しせん断載荷によりせん断応力が低下する割合が大きくなる傾向が認められる。定体積条件におけるこの現象は, 非排水条件下で交替的なせん断変位が作

表-3 繰返し一面せん断試験

No.	条件	最大せん断変位	含水比	目的
1	定体積	0.1mm	15%	定体積条件, 含水比15%一定。最大せん断変位を変化させて, せん断応力の低下率を調べる。
2	"	0.2mm	15%	
3	"	0.5mm	15%	
4	"	1mm	15%	
5	"	2mm	15%	
6	"	5mm	15%	
7	定圧	2mm	15%	最大せん断変位2mm, 含水比15%一定。定圧条件と定体積条件でのせん断応力の低下率の違いを調べる。
5	定体積	2mm	15%	

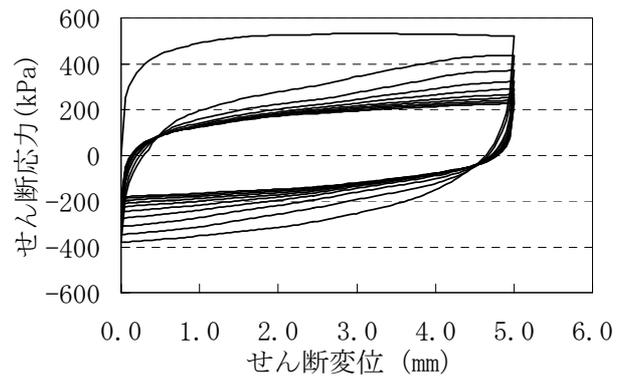


図-8 定体積繰返し一面せん断試験結果 (先行垂直応力1.2MPa, 最大せん断変位量5mm)

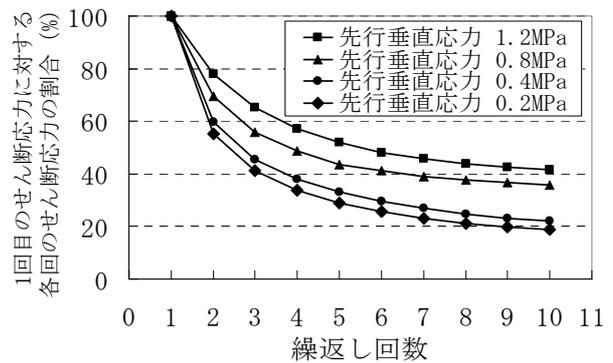


図-9 定体積繰返し一面せん断試験結果 (最大せん断変位量5mm)

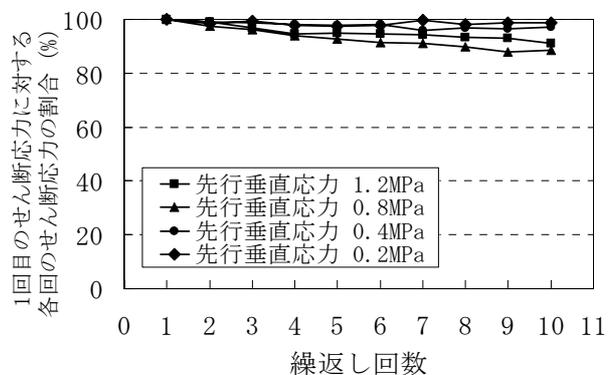


図-10 定体積繰返し一面せん断試験結果 (最大せん断変位量0.1mm)

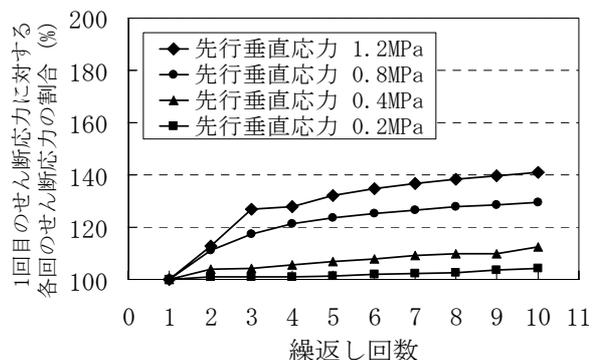


図-11 定圧繰返し一面せん断試験結果 (最大せん断変位量2mm)

用することにより、土粒子間のかみ合いのずれと間隙水圧の上昇が発生して有効応力が低減することによりせん断強さが減少したものと考えられる。

一方、繰返し一面せん断試験（定圧条件）では、繰返し回数が増加するにしたがって、せん断応力の割合がむしろ増加する傾向が認められる（図-11）。定圧条件におけるこの現象は、圧密・排水の促進により、土粒子同士のかみ合わせが大きくなり、せん断強さが増加したものと考えられる。

地震時における地すべり面は非排水状態で急速なせん断変位を受けると考えられるので、地震時の挙動は定体積条件での試験結果を採用することが妥当と考えられる。

5. 地震時想定歪みとの比較による斜面安定性評価

前項で述べたように、地震時の地すべり面の動的せん断強さはピーク強度よりも低下するが、その低下割合はせん断変位量に依存することがわかった。そこで、地震動によって地山の地すべり面に発生するせん断歪みを解析的に求め、それから換算されたせん断変位を与条件とした繰返し一面せん断試験を行って、せん断強さを得ることが望ましいと考えられる。

今回、地震動（東海・東南海・南海地震の発生を想定）を入力した安定解析で得られる地すべり面のせん断歪みは 5.0×10^{-4} 以下である。一方、繰返し一面せん断試験で与えたせん断変位を大島ほか²⁾の方法にしたがってせん断歪みに換算（ $\gamma = \delta / H$ 、 γ ：せん断歪み、 δ ：最大せん断変位、 H ：供試体高さ）し、1回目のせん断応力に対する各回のせん断応力の割合との関係を示すと図-12のようになる。図-12から分かることは、図-9及び図-10で述べたとおり、繰返し载荷を受けた場合には、繰返し回数が多いほど、また、せん断歪みが大きいほどせん断強さが小さくなるということである。今回の繰返し一面せん断試験における最も小さいせん断変位の条件

（ 0.1mm ）でのせん断歪みは 5.0×10^{-3} である。想定地震時の地すべり面のせん断歪みは 5.0×10^{-4} であり、今回の試験のせん断歪みよりも1オーダー小さく、想定される地震動を受けてもせん断強さはほとんど低下しないと考えられる。すなわち、今回の事例では地すべり面のせん断強さは想定地震時においてもほとんど低下せず、ピーク強度を採用しても差支えないと考えられる。

以上の検討過程を踏まえ、繰返し一面せん断試験によって得られるせん断歪みとせん断強さとの関係、及び、想定地震時における地すべり挙動の安定解析によるせん断歪みを組合わせて考慮することで、想定地震時の斜面安定性評価がよりの確に行えるものと考えられる。

6. まとめ

本論文における結論を以下に示す。

- 繰返し一面せん断試験（定体積条件）の結果、地震時の地すべり面のせん断強さは、ピーク強度よりも低下し、その低下割合はせん断変位量（せん断歪み）に依存する。
- 繰返し一面せん断試験によって得られるせん断歪みとせん断強さとの関係、及び、想定地震時における地すべり挙動の安定解析によるせん断歪みを組合わせて考慮することで、よりの確な斜面安定性評価が行えると考えられる。

7. 今後の課題

今回の繰返し一面せん断試験（定体積条件）では、繰返しせん断時に垂直応力の減少が認められるため、供試体内において過剰間隙水圧が発生し、せん断強さの低下を招いていると推定される。繰返しせん断時の間隙水圧の変化とせん断強さの低下との関係を確認することが必要と考えられ、現在、当該試料を用いた非排水繰返し三軸圧縮試験を実施中であり、別途報告することとしたい。

謝辞：繰返し一面せん断試験の試験方法や試験結果の解釈等において、群馬大学の鶴飼恵三教授、若井明彦准教授には有益なご助言を賜った。記して感謝いたします。

参考文献

- 鶴飼恵三、若井明彦、尾上篤男、樋口邦弘、黒田清一郎：繰返し一面せん断試験結果から推測される地震時斜面崩壊の機構、第45回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.207-210、2006。
- 大島昭彦、高田直俊、住武人、本郷隆夫：砂質土の繰返し定体積一面せん断試験と繰返し非排水三軸試験の比較、土木学会第53回年次学術講演会、1998。

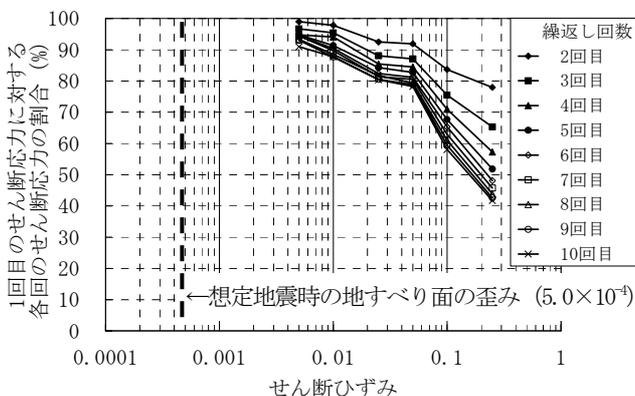


図-12 せん断応力割合とせん断歪みとの関係
(先行垂直応力 1.2MPa)

A CASE STUDY OF DECREASE IN SLIP SURFACE STRENGTH AND SLOPE STABILITY EVALUATION AT THE TIME OF EARTHQUAKE

Naoki KUMAZAKI, Takaomi TOBASE, Masayuki KASHIWAYANAGI,
Teruyoshi HATANO and Yuutarou MIZUHASHI

There are many cases that hard rain or earthquake causes slope failure such as landslide. We measured dynamic shear strength of the cohesive soil consisted of crystalline schist particles, using Mikasa direct share testing apparatus, and tried to evaluate the stability of slip surface in the slope against strong ground motion. As a result of the cyclic box shear test, it becomes clear that share strength of the cohesive soil decreases according to amount of shear displacement and repetition frequency. In this report, we propose a case study of a slope stability evaluation based on both the test results and the numerical analysis.