# 地震後の降雨による斜面崩壊発生機構に関する実験・解析的検討 -地震応答解析によるせん断強度低下率の算定-

神戸大学大学院工学研究科	学生員	〇竹内	信
(財)建設工学研究所	正会員	沖村	孝
神戸大学自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター	正会員	鳥居	宣之
(株)奥村組(元神戸大学大学院自然科学研究科)	正会員	谷本	育水

## 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)発生直後から約10ヶ月の間に,降雨量は平年並にも関わらず多数の斜面崩壊が発生したことが報告されている<sup>1)</sup>.このような地震後の降雨によって斜面崩壊が多発する事例は他地域においても報告されており<sup>2)</sup>,地震・降雨の多い日本においては今後もこのような地震後の降雨による斜面崩壊での二次災害が生じる可能性が高く,地震後の降雨による斜面崩壊メカニズムの解明は防災・減災対策を行う上で極めて重要であると考えられる.そこで本報では,地震動の影響による斜面のせん断強度低下の傾向を,実験によって得られた累積損失エネルギーWとせん断強度比 τ/τ<sub>0</sub>の関係と地震動応答解析 (FLAC)から求めた.

# 2. 実験内容

地震動が土のせん断強度に及ぼす影響に着目し、六甲山系のすべり面上のまさ土を模擬した石こう混じりまさ 土供試体を用いて繰返し一面せん断試験を行った.具体的には、地震動を受けていない状態を想定して繰返し荷 重を与えずに定圧せん断を行う静的試験と、地震動を受けた状態を想定してせん断を行う前に繰返し荷重を加え た後に定圧せん断を行う動的試験の2種類の定圧せん断試験を行った.なお、繰返し荷重の違いによる影響を検 討するため、振幅は0.01mmと0.03mmの2種類、載荷回数も数種類変化させて実験を行った.また、振幅や載荷 回数の異なる繰返し荷重を比較するための共通の指標が必要となるため、本実験では、風間ら<sup>例えば3)</sup>が砂の液状化 評価に用いている累積損失エネルギーWを繰返し荷重の評価の指標として用いた.累積損失エネルギーとは、繰

返し荷重載荷過程に得られる応力-ひずみループの総面積 である.ここで,静的試験のせん断強度  $\tau_0$ と,各動的試験 のせん断強度  $\tau$ の比較のため, $\tau/\tau_0$ をせん断強度比と定義し, 本実験によって得られた累積損失エネルギーW とせん断強 度比  $\tau/\tau_0$ の関係を図 - 1 に示す.図 - 1 より,累積損失エネ ルギーが大きくなるに従って,せん断強度は低下すること がわかる.また,その関係は,y = a/(1 + x/b) + cで近似 できた.この関係式を用いて,地震動によるせん断強度の 低下量を解析によって求める.

### 3. 解析条件

解析対象斜面は,既往の研究<sup>4),5)</sup>で使用された五助橋地区 における兵庫県南部地震後の降雨による崩壊斜面(site1, site2, site3)と非崩壊斜面(site4, site5)である.入力地震 動は,解析測線を含みかつ五助橋断層に直行する縦断面モ デルを対象とした地震応答解析により,各測線に入力する 地震動波形を求めている<sup>4),5)</sup>.この地震動応答解析における 入力波形は,神戸大学工学部で観測された加速度波形を,



図-1 累積損失エネルギー*Wと* せん断強度比 *て* / *て* ₀の関係

表-1 表土層ならびに基岩の入力物性値

$\geq$	/	単位体積重量 $\gamma_t (kN/m^3)$	せん断波速度 <sub>V_s</sub> (m/s)	ポアソン比 v	初期せん 断弾性係数 G <sub>0</sub> (MPa)	最小減衰定数 (レイリー減衰) <sup>ζ<sub>min</sub></sup>
表土層	site1	14.41	116	0.39	19.60	0.05
	site2	14.41	116	0.39	19.60	0.05
	site3	14.41	122	0.39	21.60	0.05
	site4	14.41	143	0.39	30.40	0.05
	site5	14.41	115	0.39	19.60	0.05
基	ult	22.54	500	0.19	575.26	0.05

キーワード 地震後の降雨,斜面崩壊,せん断強度,繰返し一面せん断試験,地震応答解析 連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 TEL:078-803-6431 FAX:078-803-6431 五助橋断層直交方向にベクトル変換したものを用いている.また、入力物性値についても既往<sup>4),5)</sup>の研究を参考に 決定している(**表-1**参照).せん断剛性率、減衰定数のひずみ依存性については、既存の試料<sup>6)</sup>の値を参考に表 土層は Hardin モデル、基岩は Sigmoidal モデルによって再現した.また、初期減衰を補完するために、レイリー減 衰(周波数依存性)を使用した.境界条件は、free-field境界条件を使用した.free-field境界条件は、解析対象モ デルの側方に設定することで、側方に無限大に大きなモデルと同じ状態を再現でき、モデル側方での反射波の影 響を削除することができる.

#### 4. 解析結果と考察

地震応答解析によって得られた表土層最下部における要 素全てのせん断応力ーせん断ひずみ関係を出力して累積損 失エネルギーWを求め、実験によって得られた累積損失エ ネルギーWとせん断強度比 τ/τωの低下の関係式に適用する. ここで、解析対象斜面の土質条件を考慮するため、本研究 の解析対象地と同じ五助橋地区で採取した供試体を用いて 行われている大西<sup>7)</sup>の現場一面せん断試験の結果を参考に, 関係式を変更して適用することとした.具体的には、大西 の実験における不撹乱試料のせん断強度 τω と完全撹乱試料 のせん断強度  $\tau$  の比の最低値 0.71 を  $\tau/\tau_0$ の最低値とし,関 係式を算出した. それによって得られた関係式  $\tau/\tau_0 =$ 0.29/(1+W/0.0075)+0.71から、表土層と基岩境界の地 震動によるせん断強度低下を算出した.そして、せん断強 度の低下率  $\alpha < \epsilon \alpha = 1 - \tau/\tau_0$  と定義し、要素全ての低下率 αを求めた. 崩壊斜面の算定例として site1 の表土層最下部 における低下率 α を図-2 に、非崩壊斜面の算定例として site4の表土層最下部における低下率 α を図-3 に示す.まず



崩壊斜面については, sitel では,表土層厚の厚い遷急点及び遷急点下部において低下率 a が 0.12~0.17,斜面下部 では低下率 α が 0.17~0.2 を示している. それに対し, 斜面上部において低下率 α は 0.00~0.06 を示している. site2 では、斜面頂部、斜面下部において低下率 aが 0.17~0.23 を示し、斜面肩より下方にかけての低下率は 0.00~0.12 であった. site3 では,斜面頂部,斜面下部において低下率 α が 0.23~0.29 を示した.一方,非崩壊斜面について は, site4 では,低下率aは大部分において $0.00 \sim 0.06$ と site1 $\sim$ site3 より小さい値を示している.また, site5 でも, site4 同様に低下率 a は site1~site3 より小さい値を示した.以上から, 地震後の降雨で崩壊した斜面 (site1, site2, site3)と非崩壊斜面(site4, site5)を比較すると、地震後の降雨で崩壊した斜面の方がせん断強度の低下率 a が大 きいことがわかる,このことは,地震後の降雨による斜面崩壊発生の有無に大きく関係していると思われる. <参考文献>1)沖村孝ら:地震後の降雨により発生した斜面崩壊メカニズムの一考察,建設工学研究所論文報告集, Vol.40-B, pp.97-114, 1998. 2) 堀田紀文ら: 集集地震後の降雨で発生した崩壊に対する地震の影響について-台湾大 学渓頭実験林における長期林道補修記録を用いた検討-,新砂防, Vol.58, No.1, pp.3-13, 2005. 3)風間基樹ら:地 盤に入力された累積損失エネルギーの評価方法と液状化予測への適用,土木学会論文集, No.631, pp.161-177, 1999. 4)永井久徳:六甲山系における地震後の降雨を起因とする斜面崩壊メカニズムに関する研究,神戸大学大学院修士 論文, pp.39-65, 2001. 5) 杦本和彦: 地形形状ならびに表土層厚が影響を及ぼす地震応答特性を用いた斜面崩壊危 険度評価,神戸大学大学院修士論文,pp.19-48,2003.6)沖村孝ら:宅地地盤に発生した地盤変状被害の原因-地 震応答解析による解析-,神戸大学都市安全研究センター報告, Vol.2, pp.1-17, 1998. 7)大西哲史:地震動が土 の強度特性に及ぼした影響に着目した地震後の降雨による斜面崩壊発生機構,神戸大学大学院修士論文, pp.8-21, 2003.