

阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み— 地震による都市域地盤の崩壊と災害の巨大化

佐々恭二

1. はじめに

地すべり、斜面崩壊、液状化といった地盤崩壊現象は、地震だけでなく、降雨や融雪などによる地下水の変化や、地形変化などの要因で発生する。阪神震災では、人工構造物が大変な被害を受けたが、地盤崩壊災害の面では、幸運なことに記録的な渇水年に続く冬のもっとも降雨の少ない時期に発生したために、過去に発生した地震の規模と崩壊発生数をしらべた統計¹⁾や1994年に発生したほぼ同規模のカリフォルニア Northridge 地震の際の崩壊数の統計²⁾など、同程度の規模の世界の主要な地震時と比べると、地すべり・崩壊が発生した範囲も数もほぼ一桁少なかった。

しかし、それでも国土の3/4が山地で占められ、特に大都市周辺では、山地・傾斜地に住まざるを得ない状態であることから、今回の阪神・淡路大震災では都市域の地盤の崩壊による災害が多発し、西宮市仁川では地すべりとしては比較的小規模な地すべりによって、11戸34人が生き埋めで死亡するという大惨事が発生した。そこで、今回の阪神・淡路大震災での地盤崩壊災害をレビューするとともに、仁川地すべりにおいてなぜ災害が巨大化したのか、その原因について調査した結果を報告し、最後にこのような悲惨な地盤崩壊災害の危険のある斜面を判定する方法について述べる。

2. 地盤崩壊災害の分布とタイプ

2.1 地盤崩壊災害の分布

Fig. 1は、今回の地震で発生した地盤崩壊災害の分布を調べたものである。○印の地すべり・崩壊の分布は、ほぼ一辺30 m 程度以上のものを空中写真から判読し、一部は現地踏査で確認したもので、日本学術振興会の特別研究員として来日していたローマ大学の Gabriele Scarascia-Mugnozza が調べたものである。また、(×)印は、地質調査所のグループが踏査により調べた住宅地の地すべり³⁾で、移動距離が少なく、家屋が建ったままなので空中写真から判読できなかった住宅地密集地の地すべりである。(+)印は、国土地理院が調べた液状化の分布図をもとに250mメッシュの中に液状化発生地点があれば、それを一カ所と数えてプロットしたものである。淡路島については調査が行われていないので、含まれていない。(・)印は防災研究所地震予知研究センターで観測されインターネット上で公開されている余震の震央分布(自動決定)である。地すべり・斜面崩壊は、幅20 km までの狭い帯状に分布し、地震の余震分布とほぼ重なっている。本震の最大加速度は本震の中央からの距離と言うよりは、入倉によると帯状に分布する活断層あるいは断層破壊域からの距離に比例していたことがわかっている⁴⁾ので、この地すべり・斜面崩壊の分布は、斜面への最大加速度が、大きく影響していることが分かる。また、この図に地形を入れていないが、山手では地すべり・斜面崩壊、海岸では液状化、中間の平坦な丘陵地では(住宅地での)移動距離の小さな低速の地すべりが発生したことがわかる。

2.2 地盤崩壊災害のタイプ

地盤崩壊災害の中で、水平地盤の液状化は、構造物(特に港湾など海岸沿いの構造物)を破壊させ、大き

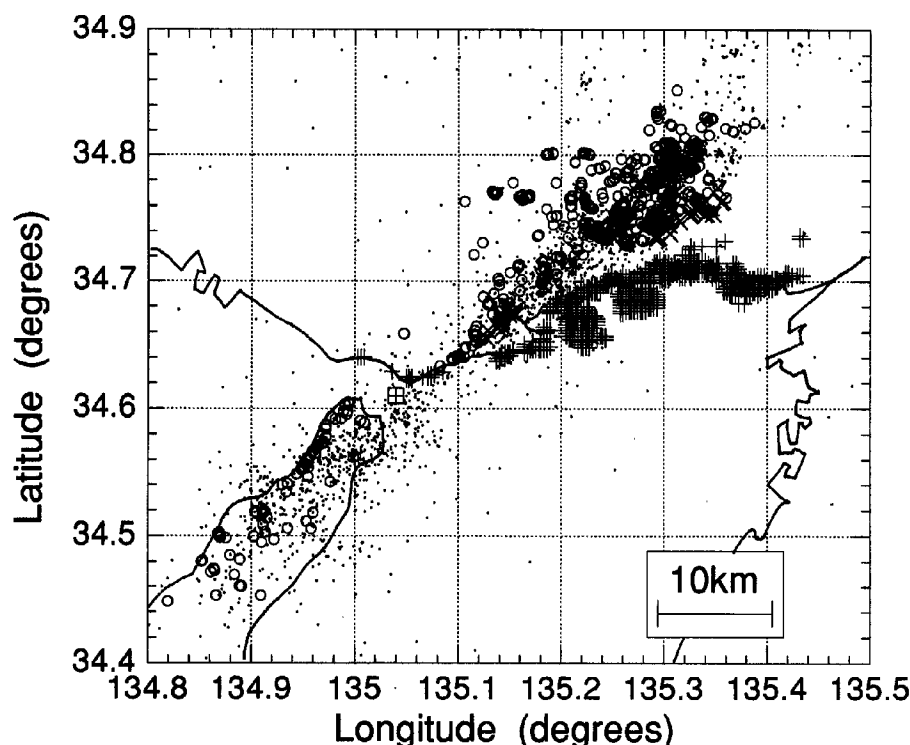


Fig. 1 Locations of ground failure hazards

Circles (○): Landslides by air-photo interpretation by Scarascia-Mugnozza

Crosses (x): Landslides in urban areas by Kamai et al

Plus signs (+): Liquefaction by the Geographical Institute, Japan

Small dots (·): Epicenters of aftershocks by the DPRI, Kyoto University

な経済的被害をもたらしたが、非可逆的な人命の損失を伴う災害は生じていない。死者を伴う地盤災害を引き起しうる水平移動量の大きな地盤崩壊の例、すなわち地すべり・斜面崩壊の代表的なものを次に紹介する。

(1) 高速長距離移動タイプ

渇水期の地震であったため大規模な地すべり、斜面崩壊は少なかったが、保水性の良い大阪層群の分布地帯では、比較的規模が大きく、移動速度・移動距離とも大きな地すべりが発生した。**Photo 1-A)**は、34人が生き埋めになった西宮市仁川地区の地すべりである。斜面の表層は乾燥してからであったが、地下6m以下は飽和されており、この滞水層内に地震の力でせん断破壊（ずれ）が生じ、このせん断変形「ずれ」によって大阪層群の花崗岩の粒子が破碎され、高い過剰間隙水圧が生じたものと推定される。このすべり面での著しい過剰間隙水圧の発生によって、後に述べる「すべり面液状化」、ないしはこれに近い強度低下が生じ、高速の地すべりが発生したものである。**Photo 1-B)**は、同じく大阪層群の地域で発生し、運動土塊がゴルフコースのグリーンの上に移動し、グリーンの下に飽和土層内にすべり面を形成しつつ、ブルドーザーか除雪車のように不飽和土層を抉りながら進行したものである。

(2) 高速短距離移動タイプ

阪神間には住宅が密集し、急崖に密接した所も開発されている。**Photo 2-A)**は断層崖の上の段丘堆積地域を開発した大規模な住宅団地の末端部の盛土部分の崩壊であり、移動距離は**Photo 1-A), B)**の地す

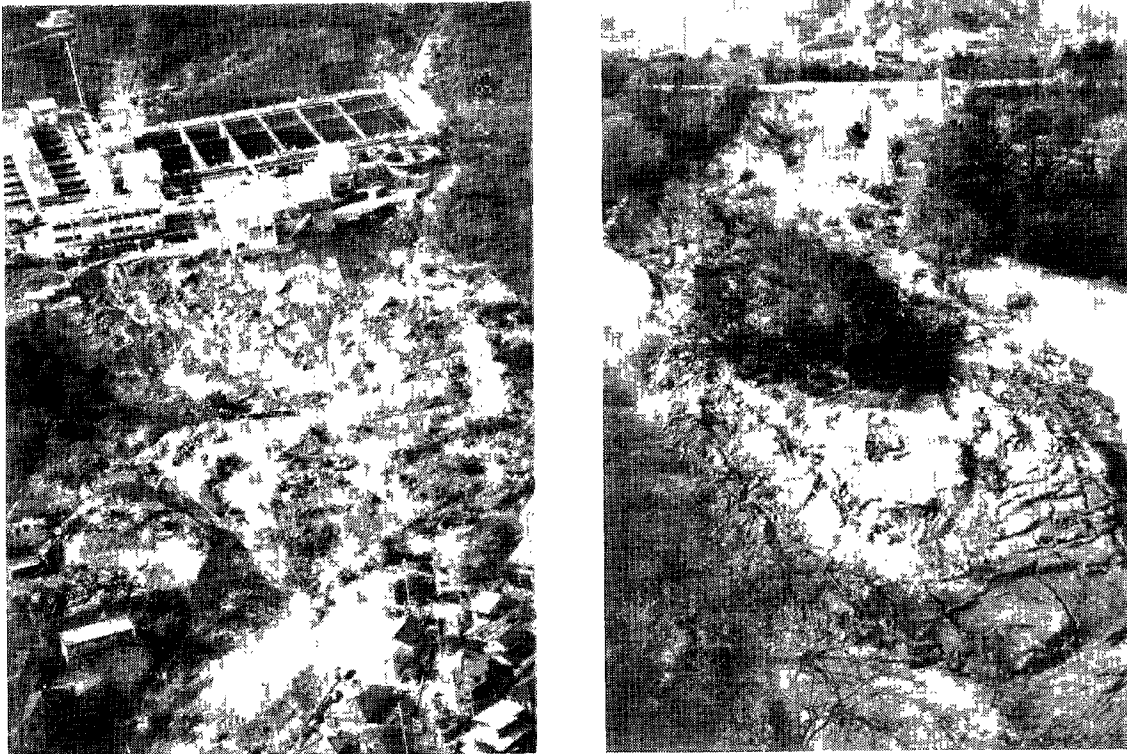


Photo 1 Long run-out rapid landslides

A (Left): Nikawa landslide in Nishinomiya city, Hyogo Prefecture (taken by K. Sassa on 21 January 1995)

B (Right): Takarazuka landslide in Takarazuka city, Hyogo Prefecture (by the Sankei Shim-bun)

べりほど大きくないが、移動速度が速いため人家3戸が全壊した。また、住宅団地の広い範囲にわたって地すべり性のクラックが現れたため、419世帯、1,359人に避難勧告が出された。現在、地すべり対策事業が行われている。**Photo 2-B**)は、住宅の擁壁の倒壊により、家が空に突き出している状態である。崩壊としては深さも規模も極めて小さいが、居住する人にとっては重大問題であり、都市域での地盤崩壊災害の特徴と問題点を示している。

(3) 低速長距離移動タイプ

Photo 3は、淡路島でみられた低速長距離移動タイプの地すべりの連続航空写真である。この地域の地質は、花崗岩の上に大阪層群の地層およびそこに発達した地すべり土塊が堆積している。**Photo 3**の左の写真は地震当日の地震後6時間経った時のものである。大阪層群の地域に見られる再活動型の地すべり地形が認められるが、詳細に検討しても地表には何の変化も出ていない。**Photo 3**の中央の写真は地震から2日経った時のものである。写真上部を横断する道路の中央部で道路が陥没し始めている。**Photo 3**の右の写真は地震から4日後の状況を示している。道路を上端とする地すべりが発生し、その地すべり土塊が斜面から完全に抜け出て、平坦な水田の上に移動している。この地すべりの場合、地震の加速度そのものにより引き起こされたものではなく、地震に伴う地殻の変形によって花崗岩の基岩内の地下水圧が上昇し、それが基岩の上に乗っている地すべり土塊に作用して、地すべりが発生したと思われる。一般に粘性土の地すべりは地震に強く、融雪や長雨などゆっくりした地下水供給でゆっくりと移動するが、この地すべりもそのタイ



Photo 2 Short moving rapid landslides

A (Left): A slope failure of embankment road in Kobe city, Hyogo Prefecture (taken by K. Sassa)

B (Right): Failure of retaining walls in Kobe city, Hyogo Prefecture (by the Hyogo Prefectural Government)

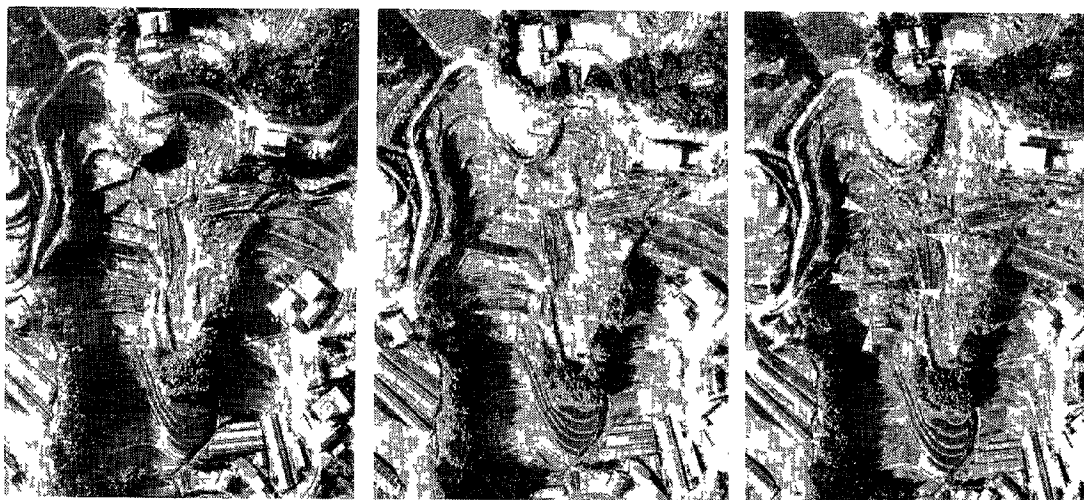


Photo 3 Slow and long moving Kotaki landslide (by the Asia Kosoku Co. Ltd.)

Left: About 6 hours later from the earthquake (17 January),

Center: 2 days later (19 January), Right: 4 days later (21 January)

ブである。地すべり跡には大阪層群（砂質土と粘性土の両方が混じっている）の粘性土が見られ、露出した花崗岩の亀裂からは地下水が噴き出しているのが観察された⁵⁾。

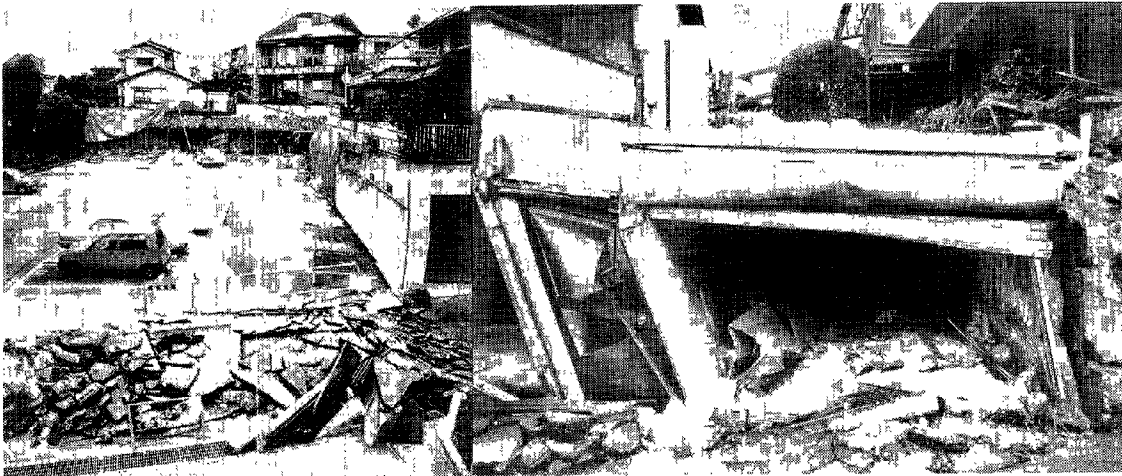


Photo 4 Short moving slow landslides in residential areas

A (Left): Side border of a slow landslide in a very gentle residential area in Ashiya city (by the Hyogo Prefectural Government)

B (Right): Deformed garage in the compressed zone of a slow landslide in Nishinomiya city (taken by K. Sassa)

(4) 低速短距離移動タイプ

今回の地震による地盤崩壊災害で特徴的なものの一つが、極めて緩やかな丘陵地に発達する住宅密集地帯で、地すべり変動が発生し多数の住宅が壊れたことである。その多くは、谷埋め盛土あるいは池を埋めた盛土部分かそれに隣接した地域であった。**Photo 4-A**は、芦屋市三条町の地すべり末端の圧縮亀裂である。この住宅地は谷埋め盛土の上に開発されたもので、幅約100 m、長さ200 mの部分が移動した。移動は低速で短距離なので、地すべり地内の住宅は建ったままではあったが、多くの場合、居住に耐えない状態になった。**Photo 4-B**は、同じく谷埋め盛土の住宅地である西宮市豊楽町の地すべり圧縮部のガレージの変形である。このような住宅地の地すべりが、**Fig. 1**の(×)印のものであり、まだ建っているので空中写真での判読は困難であるが、復旧も困難であり使用に耐えない。

3. 西宮市仁川地区地すべりとそのメカニズム

3.1 仁川地すべりの地質構造と地下水

Photo 5は、仁川地すべりの発生域の状況である。地すべり後の地下水のしみ出しによる崩土の二次的流動と水たまり(矢印の部分)が見られ、斜面内のすべり面以上の位置に地下水面が存在していたことを示している。災害発生直後より兵庫県砂防課、防災研究所によって現地調査、観測が実施されて来た。**Fig. 2**は、仁川地すべりの発生前の地形図に地すべり範囲、サンプル採取地点(S1)、調査ビット掘削地点(P1, P2)、ボーリング地点(B-n)などを書き込んだもの、**Fig. 3**にボーリング調査、測量に基づいて推定された仁川地すべりの中央地質断面A-A'、**Fig. 4**に災害発生後、ボーリング掘削し2月10日以降より観測を開始した地下水位観測結果を示す。

Fig. 3の断面図に見られるように、地すべりを起こした斜面土層の下部は花崗岩でその上に大阪層群が堆積している。この図では省略したが、大阪層群は、細かく見ると基底岩相(Ob)、砂質土層(OS1, OS2, OS3)、粘性土層(OC2)に分かれる。斜面上部と下部の一部には段丘堆積物(下位面と上位面)が挟まっている。そしてこの大阪層群の上に、大阪層群の材料の盛土と思われる二次堆積土層が存在し、今回の地す



Photo 5 The source area of Nikawa landslide (taken by K. Sassa on 21 January 1995)
A white arrow points the standing water on the secondarily moved debris due to flow-out of the ground water from the head scarp

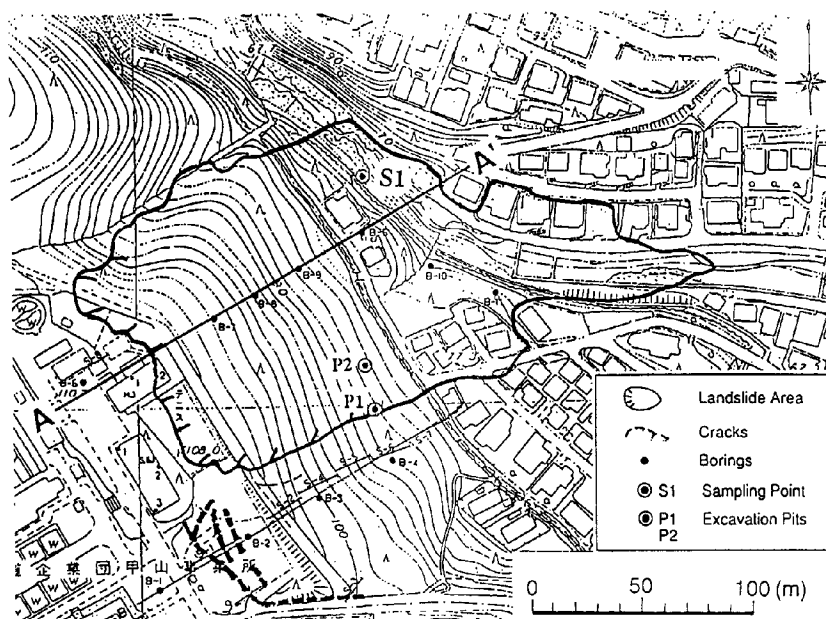


Fig. 2 Plan of the Nikawa landslide and locations of borings and the sampling point

べり面はこの二次堆積土層（盛土）内に形成されたと考えられる。崩壊時の地下水の位置は、崩壊後、直ちに掘削されたボーリング孔内の地下水位の連続観測によると（Fig. 4），地すべり発生域の上部平坦面でも，地すべり発生域の隣接斜面でも2～3月には6～7mの水位なので1月17日の地すべり発生時の地すべり斜面の地下水位も，ほぼこれに近い水位であったと思われる。

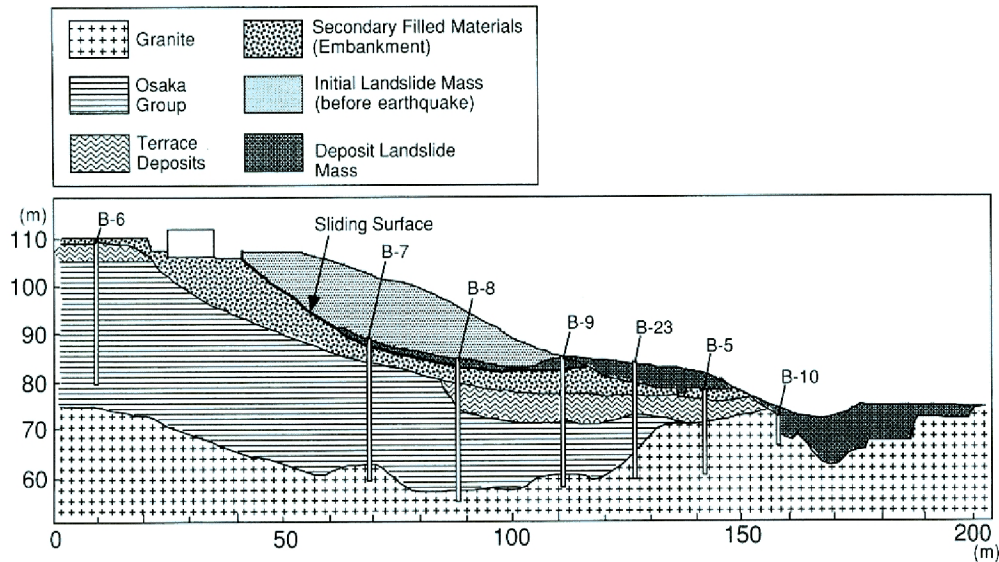


Fig. 3 Geological section along A-A' line of the Nikawa landslide

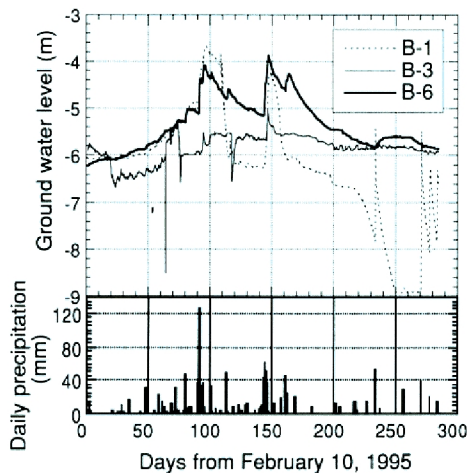


Fig. 4 Monitored ground water levels in borings around the landslide source area which were drilled soon after the landslide.

地すべり面となった土層からサンプルを採取するために斜面各部を回り、また地すべり発生域の2箇所で4.0-5.5 m のビットを掘削し土層の観察を行った。そして斜面下部で搜索のための掘削作業終了後、幅数十m にわたって露出していた地山と地すべり土塊の境界面の上、すなわち地すべり運動土塊の底部から、サンプルを採取した。Fig. 2内のS1点 が採取地点である。採取した青灰色の粘土混じりの砂質土 は、ボーリング結果、ビットの掘削などから判断して、この地すべりの大部分を占める材料であり、今回のすべりの原因 となったものと推定される。この土は空気に触れると酸化して 青灰色から褐色に容易に変化するので、地下水面以上では 褐色を呈していた。その粒度分布は、 $D_{10}=0.005$ mm, $D_{30}=0.05$ mm, $D_{50}=0.28$ mm, $D_{60}=0.60$ mm, $D_{80}=1.7$ mm, 均等係数 $U_c=120$ であり粒度分布の良い砂質土である。

3.2 すべり土層のせん断強度特性

仁川地すべりから採取した攪乱試料を用いて、地震時の斜面内のすべり面にかかる応力と破壊、そしてその後に続くすべり面の形成と運動を再現する目的で開発された繰返し載荷トルク制御リングせん断試験機(地震時地すべり再現試験機)⁶⁾⁷⁾を用いて試験を行った。この試験機を模式的に示したものが Fig. 5である。現地から採取した試料をドーナツ状の上下に二つに割れた容器に入れて、容器の上半分を固定し、下半分に斜面内の土層にかかるせん断力と地震力を作用させて、土層の破壊とそれに続くすべり面の形成と運動を再現するものであり、容器はせん断中も非排水状態に保たれ、かつ試料内に発生する過剰間隙水圧が、せん断面の上2 mm の所で計測されるようになっている。

今回用いた試験手順⁸⁾⁹⁾の概要は以下の通りである。バケツ内で試料を十分飽和させて繰返しした後、湛水させたせん断箱に入れ、正規圧密(テスト1)、過圧密比1.9(テスト2)で圧密し、圧密完了後、まず間隙圧係数($\Delta u/\Delta \sigma$)の測定を行った。試料の飽和度を表す($\Delta u/\Delta \sigma$)は物性試験の場合には、通常0.95以上に

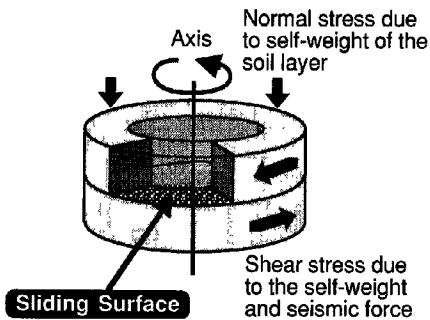


Fig. 5 Concept of the undrained cyclic loading ring shear test to reproduce the situation of sliding surface in the earthquake induced landslide

してから試験を行っているが、今回の試験は仁川地すべりにおける状態の再現なので、間隙圧係数 ($\Delta u/\Delta \sigma$) が低くても (0.35), これを上昇させるための特別な処置はとらなかった。この後、排水状態でせん断応力を増大させて地震前の斜面内の初期応力 (A_0 点) を与えた。過圧密比1.0~2.0の範囲で圧密した理由は、地すべり面が大阪層群の二次堆積物 (盛土など) 内に形成されたと推定され、自然の水位変動だけでは過圧密比が2.0を越えることはないだろうとの推定による。

過剰間隙水圧の発散後、試験機を非排水状態に切り替え、0.1 Hz のサインカーブでせん断応力増分を与えた。この際、いくらの地震力で破壊が生じるか不明なので、1サイクル毎に一定幅だけ振幅を増大させつつ与えた。Fig. 6-A) にテスト1の応力経路、Fig. 6-B) にテスト2の応力経路とサンプル中央でのせん断変位と速度の経時変化を示す。Fig. 6-A) の

試験では、せん断応力が载荷されると次第に正の間隙水圧が発生し、3サイクル目で破壊が生じ、破壊後、せん断が始まるとさらに急激に間隙水圧が増加するとともに、せん断抵抗力が著しく低下し、1.5 m 程度のせん断変位で定常状態に達した。この時のせん断抵抗力を初期の垂直応力で除することにより運動時の見かけの摩擦角を求めると、 8.5° になった。一方、破壊時の内部摩擦角を粘着力0として求めると図のように 27.2° になった。破壊後の急激な強度低下の過程も、概ね直線的に移動していることから、ほぼ遅れなしに過剰間隙水圧が測定できていると考えられる。Fig. 6-B) の試験では、過圧密の影響から、せん断応力増加時に負の間隙水圧が発生しており、せん断応力のみを载荷しているが、応力経路は右上がりになっている。負の間隙水圧が発生しているので、破壊に要する地震力は大きくなっている。また、破壊時の摩擦角も 31.0° と Fig. 6-A) の場合より高い値になった。破壊後は急激に間隙水圧が発生しせん断強度が低下しているが、間隙水圧測定の時間遅れのために、応力経路は破壊線から離れている。しかし、1.5 m 程度で定常状態になってからはほぼ破壊線の近くにある。破壊後の見かけの摩擦角はやはり 8.5° である。初期の過圧密比が異なる場合でも破壊後の見かけの摩擦角が同じになることは、この高い間隙水圧の発生原因が通常の液状化と異なることを示している。また、得られた数値 8.5° は、仁川地すべりの運動距離から逆算で得られる運動時の平均の見かけの摩擦角 $9.6^\circ \sim 11.4^\circ$ の高い運動性を実験的に裏付けるものである。

B) に示すせん断変位とせん断速度の経時変化をみると、破壊後にせん断速度が急上昇している様子が現れている。せん断速度は、30cm/sec でモーターの上限に達したため、それ以上は増大していない。この試験結果は、この土の飽和層が地震時に破壊すれば高速の地すべりが発生することを実験的に再現したものである。

4. 災害の巨大化の原因、「すべり面液状化」

仁川地区で発生した比較的小さな地すべりによる災害が、11戸の住人34人を死亡させる大災害にまで拡大した原因は、その斜面でせん断破壊が生じたこと (すなわち、地すべりが発生したこと) ではなく、破壊後、地すべり土塊が高速で長距離移動したことである。この高速移動の原因は、Fig. 6) において実験的に確かめられたように破壊後、せん断の進行に伴って高い過剰間隙水圧が発生し、定常状態では 8.5 度という低い見かけの摩擦角が発揮されたことによる。試験結果の応力経路を見ると、一見液状化現象のように見えるが、一般の液状化とは明らかに異なり、破壊後せん断変位の進行に伴って間隙水圧が上昇し、せん断変位が1 m 以上になって最終的な定常状態に達している。これはせん断面での粒子の破碎が原因となって試料の体積収縮が生じ、そのために過剰間隙水圧が発生したものと推定される。Photo 6 は、長距離運動地すべ

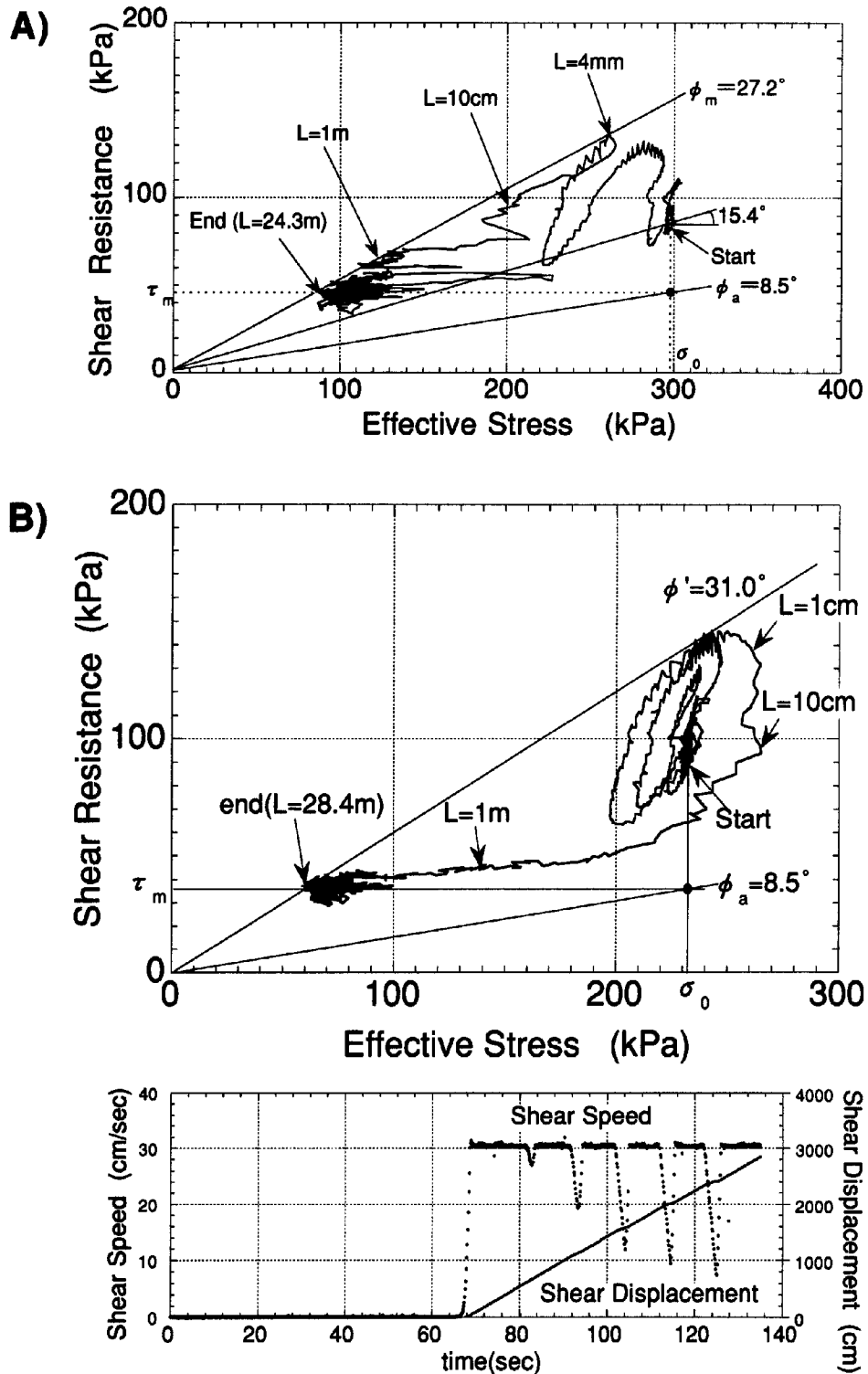


Fig. 6 Test results by the undrained cyclic loading ring shear test

 A) Stress path for the test of OCR=1.0, Pore pressure coefficient $\Delta u/\Delta \sigma=0.35$

 B) Stress path and shear velocity & displacement for the test of OCR=1.9, $\Delta u/\Delta \sigma=0.35$

 L: Shear displacement at the center of sample, ϕ_m : Effective friction angle during motion, ϕ_a : Apparent friction angle during motion

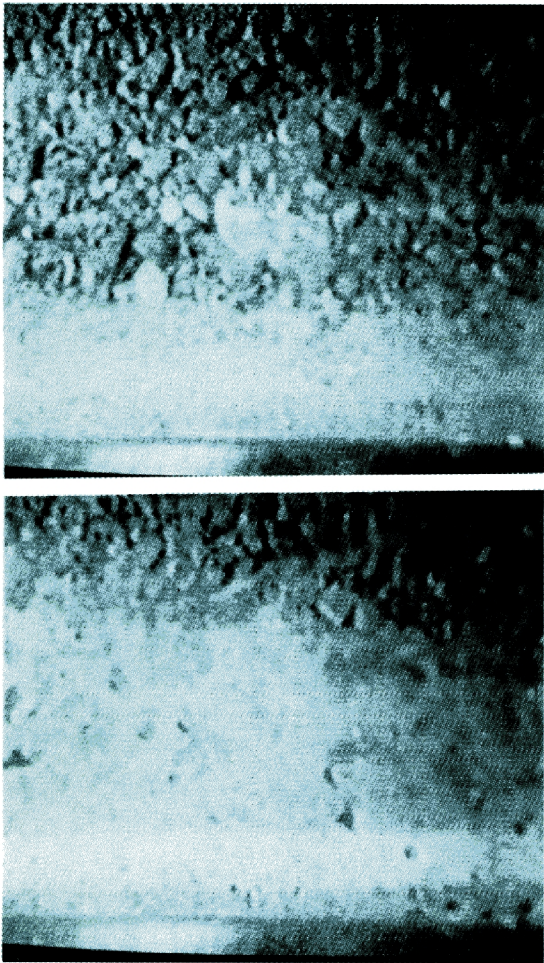


Photo 6 Dispersion of muddy water from the shear zone which was produced by grain crushing during shear (From BBC-TV Special Program: The Runaway Mountain) The bottom of screen shows the stainless steel edge of the shear box above the shear surface.
Sample: Terrace deposits taken from the moving area of the Frank Slide, Canada

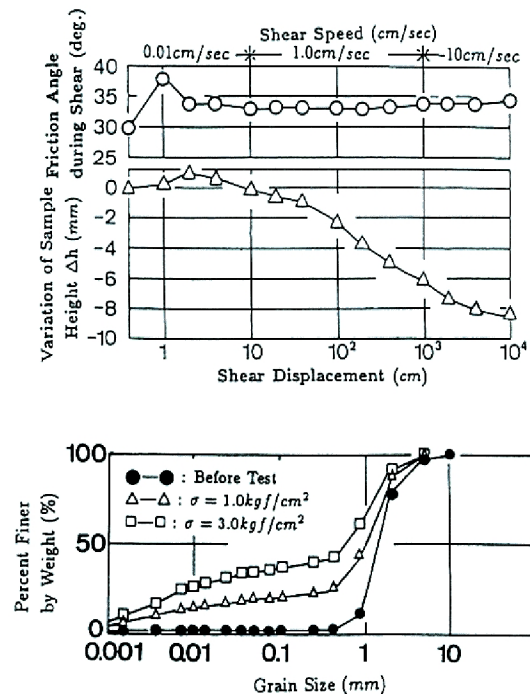


Fig. 7 Grain crushing in the sliding zone during the constant normal stress ring shear test for dry weathered granite sands (Fukuo-ka 1991)

A: Volume change and the variation of friction angle during shear ($\sigma = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$)
B: Grain size distribution before and after tests

Mountain」¹⁰⁾の2コマであり、用いた試験機のせん断箱の外壁の透明アクリルを通して、せん断面の粒子が破碎されて生成された泥水が拡散していく様子が撮影されている。画面の下の方端がせん断箱上箱のステンレスエッジで、上の画面では画面の下1/3に泥水が上昇してきており、下の画面では画面の3/4位まで泥水が拡散している様子がみられる。

非排水せん断の場合は、粒子破碎の進行により応力がある値まで低下すると定常状態に達し、それ以上粒子破碎は進行しなくなる。Fig. 7は大阪層群の材料であるマサ土(白川砂)のせん断に伴う粒子破碎を調べるために、乾燥状態で100 mまで長距離せん断した場合の体積変化と内部摩擦角の変化、及び試験前と試験後のせん断ゾーンから採取した試料の粒度分布である。せん断ゾーンでは著しい粒子破碎が生じていることが分かる。

Fig. 8は液状化とすべり面液状化の模式図と応力経路図を比較したものである。一般にいわれる液状化は、緩い砂の「構造」が壊れることにより体積収縮が生じ、著しく強度低下するものである。一方、すべり

りとして世界的に知られているカナダ国アルバータ州のフランク地すべりの長距離運動機構を調べるために、その運動域の段丘堆積物を非排水せん断したときの様子である。これは1995年11月に放映されたBBC-TVの科学番組Horizonの長距離運動地すべりに関する特別番組「The Runaway

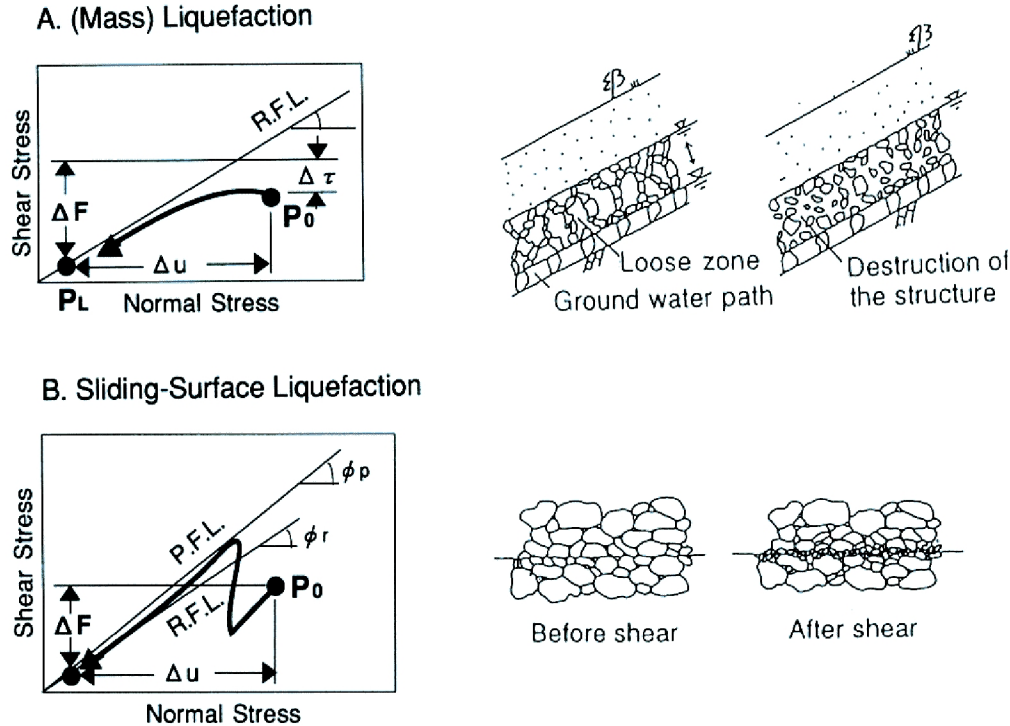


Fig. 8 Stress path and illustration of mass liquefaction (A) and the sliding-surface liquefaction (B)
R.F.L.: Residual failure line, P.F.L.: Peak failure line

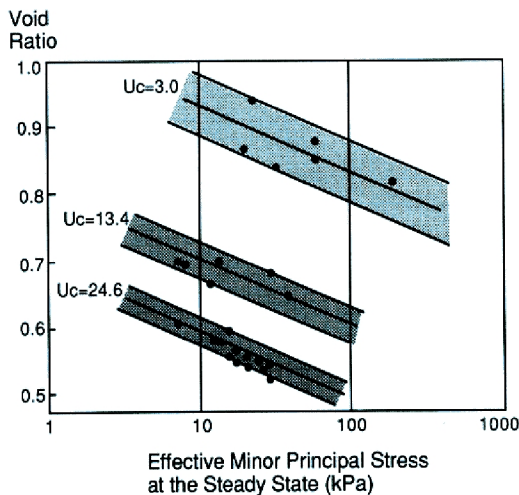


Fig. 9 Steady state lines for same type of sands with different uniformity coefficients and the same average diameter (Matos 1988)

面液化は、すべり面における「土粒子の破碎」によって体積収縮が生じ、過剰間隙水圧が発生するものである。**Fig. 8** の上の図が斜面土層内の粗な部分の液化化 (mass liquefaction) の模式図と非排水荷重制御三軸試験でみられる液化化の応力経路の模式図であり、破壊線に到達せずに強度低下が生じる。また **Fig. 8** の下の図が、仁川の土、御岳のパミスでの試験結果を参考に描いたすべり面液化化 (sliding-surface liquefaction) の模式図である¹¹⁾¹²⁾。すべり面液化化は土層内にすべりが生じることにより始まるので、応力経路は必ず破壊線に到達してから間隙水圧の増加が始まる。すべり面液化化は、せん断面での粒子破碎によるせん断ゾーンの体積収縮によって生じるが、定常状態 (Steady State) あるいは限界状態 (Critical State) の概念を用いた解釈も可能である。土が一定応力、一定体積で連続的に変形する定常状態 (Steady State) は、間隙比—有効応力の対数のグラフで直線になり、この定常状態線は砂の均等係数により異なる。そして均等係数が高いほど、定常状態線は低い位置に移行する¹³⁾。

Fig. 7 にマサ土 (白川砂) の排水リングせん断試験時の粒子破碎による粒度分布の変化を示したが、リングせん断試験によるせん断面での粒子破碎によって均等係数 (U_c) は、試験前の $U_c=1.6$ から、 $U_c=272$ ($\sigma=2.0 \text{ kgf/cm}^2$) と $U_c=614$ ($\sigma=3.0 \text{ kgf/cm}^2$) に大きく変わっている。**Fig. 9** は、非排水三軸圧縮

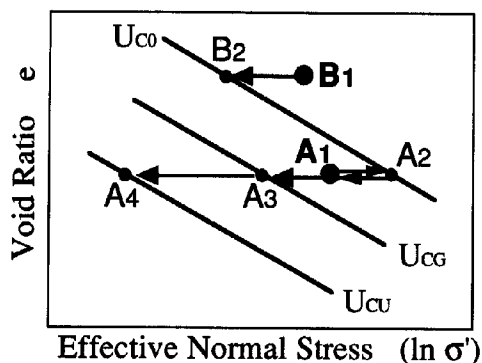


Fig. 10 Shifts of steady state line and the effective normal stress affected by grain crushing under the undrained shearing
 U_{co} : Uniformity coefficient of grains at the initial state. U_{cg} : Uniformity coefficient of grains during grain crushing. U_{cu} : Uniformity coefficient of grains at the ultimate state

試験により、平均粒径を同一に保ちつつ、試料の均等係数を変化させて定常状態線の変化を調べた Matos¹²⁾ の試験結果である。均等係数が大きくなるに従って定常状態線は下方へ移行している。

飽和非排水せん断状態では、せん断面での粒子破碎によって同一体積（間隙比）のまません断面の粒子の均等係数が増えるため、定常状態線は、Fig. 10に模式的に示すごとく初期の均等係数（ U_{co} ）の状態から、粒子破碎が進行中の U_{cg} の状態、そしてそれ以上、粒子破碎が進行しない最終的な定常状態である U_{cu} の状態へと移行していく。すなわち、せん断によって粒子破碎しない材料と応力レベルでは、非排水せん断を与えた場合、B1 から B2、A1 から A2 の応力変化で終わるが、すべり面の形成により粒子破碎が生じる材料と応力レベルでは、例えば、A1 → A2 → A3 → A4 と移行し、極めて小さな応力レベルで最終的な定常状態に達する。

5. 地震時地すべり危険斜面の判定

地震時の斜面安定解析において不安定と判断されても、仁川地すべりのように高速で長距離移動するとは限らない。地震力の作用によって土中の応力が破壊線を越える（破壊線以上の応力は加速度に消費されるので、より正確には応力が破壊線上にある）時間は瞬間的であり、破壊後に強度低下が生じない材料では、移動距離は極めて限られたものになる。今回の兵庫県南部地震でもクラックが入るのみでそれ以上移動しなかった地すべりは無数に見られた。岩の場合は水がなくても破壊後の強度低下が大きいので、今回のような渇水期の地震でも、規模は小さいが、落石や落石タイプの崩壊は極めて数多く発生した。しかし、土の場合は、間隙水圧以外の原因による強度低下の影響は少なく、すべり面での過剰間隙水圧の発生が生じない土では、破壊しても移動距離は極めて限られたものになる。

5.1 運動時の見かけの摩擦角の特性

地すべり発生後に高速長距離運動するかどうかは、運動時に発揮される見かけの摩擦角の値に依存する。Fig. 11は、張・佐々¹⁵⁾ がレス試料について、一定速度（0.05 cm/sec）、一定垂直応力（1.0 kgf/cm²）条件の下で行った非排水リングせん断試験の結果である。Fig. 11-A) の場合は、完全飽和の場合（間隙圧係数 $\Delta u / \Delta \sigma_v$ は0.93以上）について、過圧密比を1.0～3.0まで変えて試料を作成したので、初期間隙比は異なるが、定常状態ではいずれも同じ見かけの摩擦角を発揮した。この実験結果は、斜面内で多少風化度や密度が異なっても、基本的に同じ材料であれば、同じ運動時の見かけの摩擦角を発揮することになり、地すべりの危険性の判定にとって極めて実用性の高い知見である。Fig. 11-B) の場合は過圧密比1.0で、飽和度32.6%の場合である。飽和度が低いので、応力経路が破壊線に到達するまでは、間隙水圧は発生していない。しかし、破壊後はすべりゾーンでの著しい粒子破碎により、すべりゾーンでは飽和に達したと思われ、大きくはないが過剰間隙水圧が発生し、見かけの摩擦角は26.6度と、この土の摩擦角31.8度より少し小さくなっている。

豊浦標準砂は海岸の石英砂であり、すでに粒子破碎すべきものはすべて破碎されているため、通常の応力下では粒子破碎が生じにくいので、飽和していてもすべり面形成後の過剰間隙水圧発生とすべり面液状化現

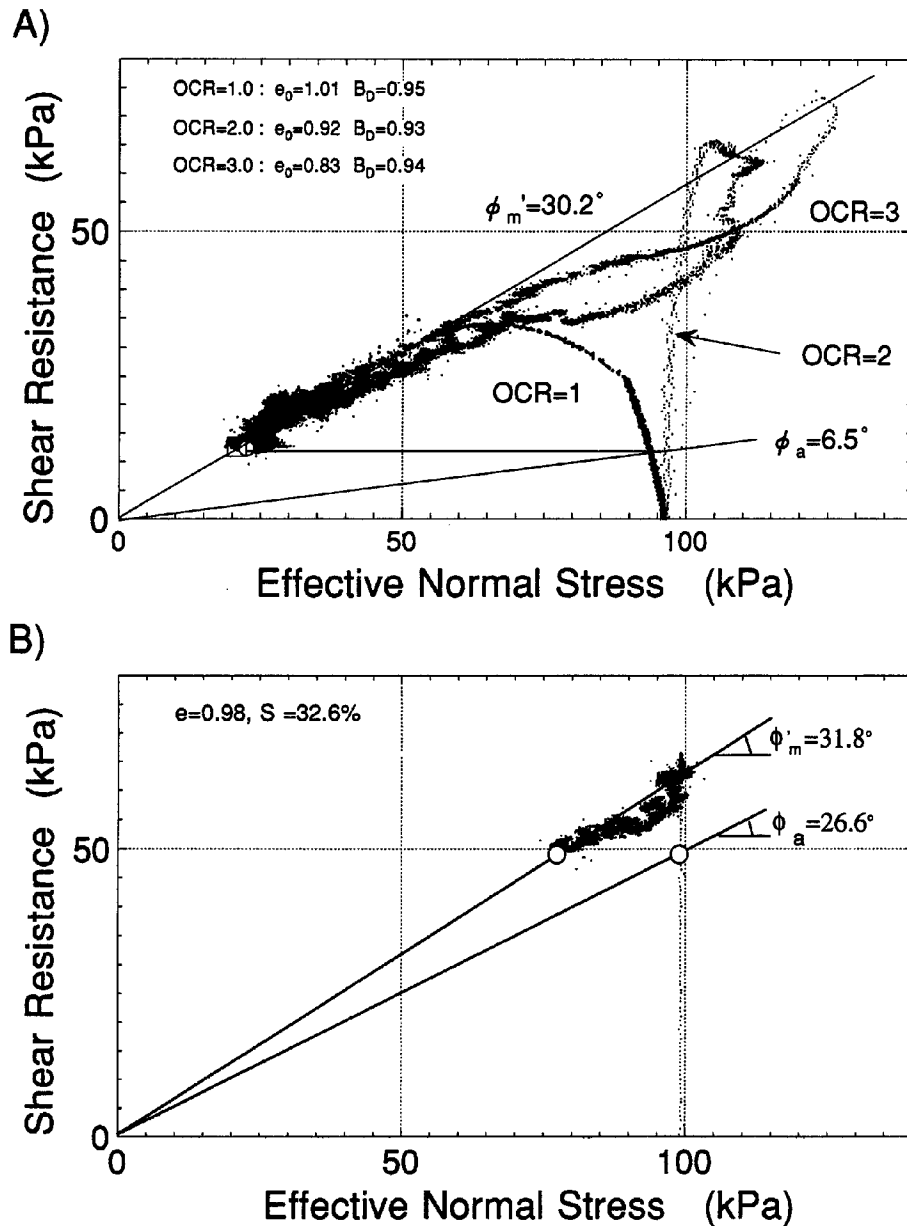


Fig. 11 Stress path of loess in the undrained constant speed ring shear tests
 A: Fully saturated loess in OCR=1.0, 2.0, 3.0
 B: Partially saturated loess ($S_r = 32.6\%$) in OCR=1.0

象は期待できない。Shoaei & Sassa は、飽和豊浦標準砂を用いて、載荷応力を一サイクル毎に増大させる形での非排水載荷リングせん断試験を行った^{16) 17)}。Fig. 12は、その応力経路とサンプル中央でのせん断変位の経時変化である。応力経路は十分に破壊線に到達しても負の過剰間隙水圧が発生して、破壊線上を上へ移動するのみであり、仁川の土で見られたような正の過剰間隙水圧は発生せず、応力が破壊線上にあるときのみ変位が生じ、破壊線から離れると停止し、全体として10サイクルの載荷で数 cm のみ移動する現象が現れた。

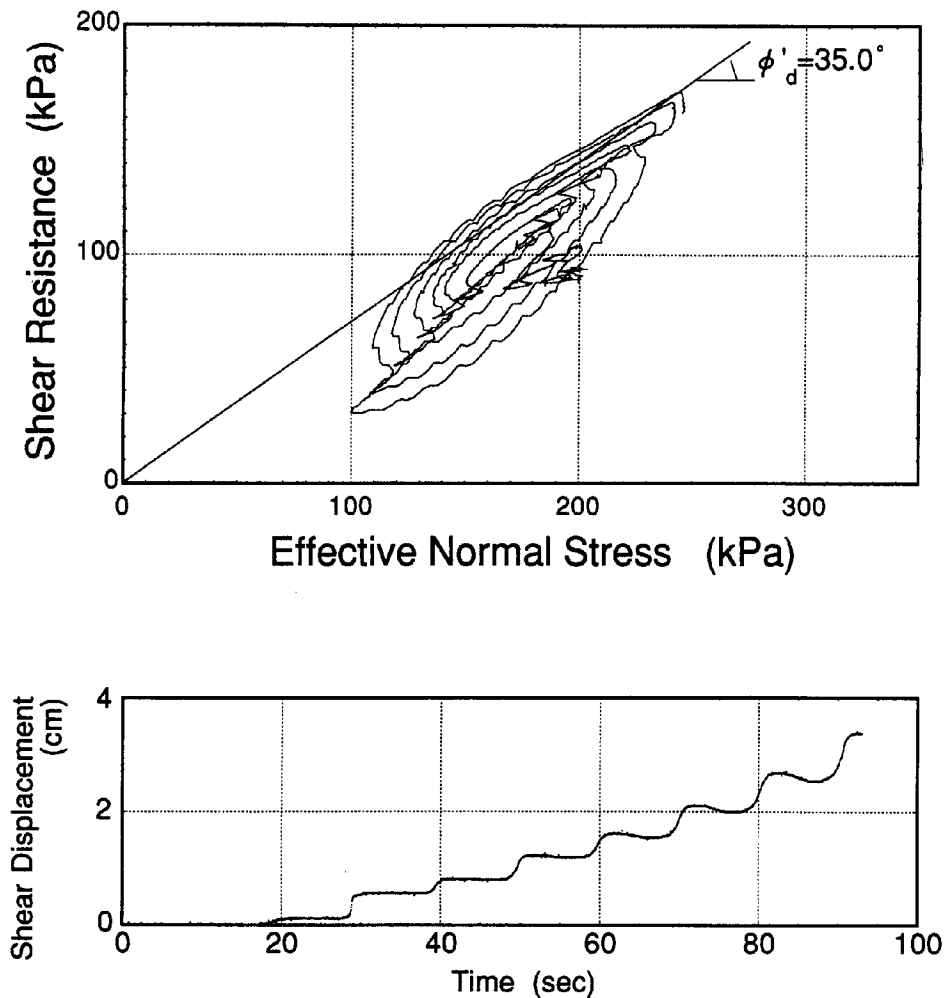


Fig. 12 Stress path and shear displacement in the cyclic loading test of the fully saturated Toyoura sands (Shoaei and Sassa, 1993), $\Delta u/\Delta \sigma = 0.97$

5.2 地震時危険斜面の条件

この試験結果からも分かるように、大きな地震力が働いても、土が完全飽和に近い状態でも、必ずしも危険な地すべりが発生するとは限らない。仁川地すべりが大災害に結びついたのは、斜面土層が破壊したからではなく、破壊後の間隙水圧増加のために運動時の見かけの摩擦角が小さくなり、高速かつ長距離の運動が生じたためである。このように考えると、地震時地すべり危険斜面として第一に挙げるものは、地震時に破壊するものではなく、地震時に長距離移動し得るものと考えてもいいのではないか。したがって、地震時に大きな災害が発生する危険斜面は、次の4条件を備えた斜面に絞ることができる。

- 1) 常時滞水層があるか、降雨によりすぐに滞水層が形成される斜面（地震と豪雨が重なる確率は少ない）
- 2) 花崗岩や火山性堆積物のようにせん断により粒子破碎が生じやすい土層からなる斜面（逆に粘土層や、すでにすべり面で粒子破碎が生じて粘土化した古い地すべり、豊浦標準砂のように粒子破碎が生じにくい土などは地震時には安全）
- 3) 斜面の傾斜角が斜面を構成する土の運動時の見かけの摩擦角よりかなり大きな斜面
- 4) 地すべり運動域に住宅が密集している斜面

上記1)の条件を満足する場所は、仁川地すべりの大阪層群のように渇水期にも「常時、帯水層がある場所」、あるいは比較的少ない雨でも表面水、地下水の集中により「頻繁に滞水する場所」が危険な斜面である。すなわち大阪層群のように保水性の高い土層、保水性は高くなくても人工的な谷埋め盛土斜面、0次谷など地表が凹地形をしている場所や基岩が凹地形をしている場所などがあげられる。滞水層の有無の正確な判定はボーリングによる地下水観測が必要であるが、斜面に密接した住宅地では、ボーリング調査と地下水観測孔の設置が、土砂災害を軽減するためには、是非必要である。2)の条件に該当する土は、すでにリングせん断試験で確認したものでは、大阪層群、マサ土、パミス、雲仙の火山性堆積物、段丘堆積物などであり、これらは日本の広い地域に分布している。したがって仁川のように地震時に大災害を引き起こす可能性のある斜面は全国に数多くあると思われる。

幸いにも、これまで都市域での地震はそれほど頻繁ではなく、都市周辺の傾斜地が大規模に開発され、人が住むようになった歴史も浅いことから都市周辺の傾斜地での地震による地すべり災害はあまり問題とならなかった。しかし、今後とも都市周辺に影響を及ぼす地震の恐れがあり、都市周辺での宅地開発は増加の一途なので、仁川地すべりと同種の災害が繰り返される可能性は極めて大きい。したがって、都市域での地震時危険斜面を特定し、その災害防止対策を実施することは極めて重要である。そして、我々には地震や台風の防止技術はないが、仁川地すべりやその10倍程度の地すべりの防止技術はすでに十分に確立されており、それほど広くない想定被害範囲から住宅を移動させることも可能なので、地震時地すべり災害の防止と軽減は、現実的な成果が、今期待できる研究課題であると言える。

謝 辞

災害直後から丘陵、山地における地盤崩壊災害の実体とその原因を調べるために、何度も現地調査を実施し、航空機からの視察、サンプル採取、ピットの掘削、ボーリング、測量他、兵庫県砂防課、アジア航測(株)、宝塚ゴルフ倶楽部の皆様に多大の協力を得たことに対し感謝の意を表します。また、本研究の調査、実験、取りまとめに全体にわたって協力を得た防災研究所・福岡浩助教授ほか、地すべりダイナミクス分野のスタッフと院生に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Keefer, D.K.: Landslides caused by earthquake, Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, 1984, pp. 406-421.
- 2) Harp, E. and R. Jibson: Inventory of landslides triggered by the 1994 Northridge, California Earthquake, USGS Open-File Report 95-213, 1995, 17 pages. (付図, 1: 50,000 and 1: 100,000の地すべり分布図2枚)
- 3) 釜井俊孝・鈴木清史・磯部一洋・山川和美・神保光昭・佐藤拓二: 兵庫県南部地震による都市域の斜面変動について, 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書, 地すべり学会, 1995, pp. 33-48.
- 4) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震による強震動, 月刊地球, 号外 No. 13, 1995, pp. 54-62.
- 5) 竹内篤雄・藤原常二・遠山茂行: 兵庫県南部地震に伴い淡路島津名町高滝で発生した地すべりの特徴について, 防災研究所「阪神・淡路大震災研究報告書」, 1996, pp. 236-249.
- 6) 佐々恭二: リングせん断型地震時地すべり再現試験機の試作研究, 平成5年度科学研究費補助金(試験研究B2)研究成果報告書(研究課題番号03556021), 1994, pp. 1-106.
- 7) Sassa, K.: Keynote Paper: Access to the Dynamics of Landslides During Earthquakes by a New Cyclic Loading Ring Shear Apparatus. 6th International Symposium on Landslides, "Landslides", Vol.

- 3, A.A. Balkema, 1995, pp. 1919-1939.
- 8) 佐々恭二・福岡 浩：西宮市仁川地すべりと地震時地すべりの発生予測，兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書，地すべり学会，1995，pp. 145-170.
- 9) 佐々恭二・福岡 浩：兵庫県南部地震で発生した高速運動地すべり，防災研究所「阪神・淡路大震災研究報告書」，1996，pp. 182-211.
- 10) BBC-TV: Horizon 特別番組 "The Runaway Mountain", Pioneer Productions, UK, 1995, (49分) .
- 11) Sassa, K., H. Fukuoka, G. Scarascia-Mugnozza and S. Evans: Rapid Landslides; Distribution, Initiation and Motion, Soils and Foundations, Special Issue, 1996, pp. 53-64.
- 12) Sassa, K.: Prediction of earthquake induced landslides, 7th International Symposium on Landslides, "Landslides", Senneset (ed.), Vol. 1, A.A. Balkema, 1996, pp. 115-132.
- 13) Dawson, R.F., N.R. Morgenstern and W.H. Gu: Liquefaction Flowslides in Western Canadian Coal Mine Waste Dumps, Phase II: Case Histories, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, SSC File Number XSG 42-00138 (608) , 1994, 112 pages.
- 14) Matos, M.M.: Mobility of Soil and Rock Avalanches. Ph.D. Thesis, Alberta University, 1988, 359 pages.
- 15) 張得宣・佐々恭二: レスの非排水せん断時に発揮される破壊後の見かけの摩擦角に関する研究，新砂防，第49巻第3号，1996，pp. 20-27.
- 16) 佐々恭二：リングせん断型地震時地すべり再現試験機の試作研究，平成5年度科学研究費補助金（試験研究（B2））研究成果報告書（研究課題番号03556021），1994，pp. 1-106.
- 17) Shoaie, Z. and K. Sassa: Basic Study on the Shear Behavior of Landslides During Earthquakes—Excess pore pressure generation in the undrained cyclic loading ring shear tests—, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 44, Part 1 (No. 378) , 1993, pp. 1-43.

Earthquake Induced Ground Failures and their Disaster Magnification Mechanism in the Metropolitan Area

By *Kyoji SASSA*

Synopsis

Distribution and types of ground failures due to the 1995. 1. 17 Hyogoken-Nanbu earthquake were firstly reviewed. A landslide ($1.1 - 1.2 \times 10^5 \text{m}^3$) in the Nikawa area, Nishinomiya city destroyed eleven houses and killed 34 persons. This landslide took place in a densely built-up residential area between Kobe and Osaka and it gave a shock to citizens who are forced to live near/in slopes in Japan. The mechanism of this landslide was investigated using a new cyclic loading ring shear apparatus which was developed in the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University to reproduce stress and motion in the sliding surface of earthquake induced landslides. This study revealed a new mechanism of rapid landslide, that is the 'Sliding Surface Liquefaction' caused by grain crushing along the sliding surface. The ground failure disaster was magnified by the rapid and long run-out motion of failed mass and the existence of densely built-up houses near/in slopes. Based on this study, the following four conditions for the identification of slopes causing catastrophic landslides during earthquakes were proposed;

- (1) slopes having a usually or often saturated layer
- (2) slopes consisting of soils subjected to grain crushing during shearing
- (3) Slopes having a much greater gradient than the apparent friction angle during motion of the soils
- (4) Existence of densely built-up houses within the landslide moving area.