

2001 年 1 月 13 日エルサルバドル地震調査報告

小長井一男¹, ヨルゲン・ヨハンソン¹, パオラ・マヨルカ¹, 山本哲朗²,
 宮島昌克³, 渦岡良介⁴, ネルソン・プリード⁵, フレディ・デュラン⁶,
 佐々恭二⁷, 福岡浩⁷

Kazuo KONAGAI¹, Jörgen JOHANSSON¹, Paola MAYORCA¹, Tetsuro YAMAMOTO²,
 Masakatsu MIYAJIMA³, Ryosuke UZUOKA⁴, Nelson E. PULIDO⁵, Freddy C DURAN⁶,
 Kyoji SASSA⁷ and Hiroshi FUKUOKA⁷

- ¹ 東京大学生産技術研究所
² 山口大学工学部社会建設工学科
³ 金沢大学工学部土木建設工学科
⁴ 東北大学大学院工学研究科
⁵ 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター
⁶ 京都大学大学院工学系研究科
⁷ 京都大学防災研究所

2001年1月13日、中米のエルサルバドル共和国沖約50kmの太平洋を震源とするマグニチュードMw7.6の地震が発生した。2001年3月時点での国家緊急委員会（COEN）による被災統計では、死者944名、倒壊した家屋約10万8千棟に達している。この地震では、火山性堆積土が分布している地域において、多くの斜面崩壊や地すべりが発生し、様々な被害が発生した。特に、ヌエバサンサルバドルで発生したラスコリナスの地すべりは住宅地を襲い、死者500名以上に達する大惨事となった。ここでは、ラスコリナスで行った現地調査および国内での室内土質試験の結果を中心として、地すべり被害について報告する。また、ライフライン施設や建築物の被害調査結果についても、その概要を報告する。

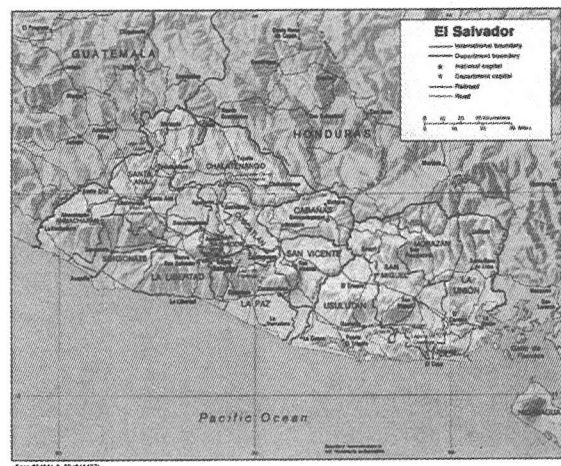
1. はじめに

現地時間 2001 年 1 月 13 日午前 11 時 33 分、中米のエルサルバドル共和国沖約 50km の太平洋を震源とするマグニチュード Mw7.6 の地震が発生した。2001 年 3 月時点での国家緊急委員会（COEN）による被災統計では、死者 944 名、負傷者 5565 名、倒壊した家屋約 10 万 8 千棟に達している。首都サンサルバドル西部のヌエバサンサルバドル（別名：サンタテクラ、ヌエバはスペイン語で「新」）では大規模な地すべりが住宅地を襲い、ここだけで死者 500 名以上の大惨事となった。また、本調査の対象ではないが、ちょうど 1 ヶ月後の 2 月 13 日には首都サンサルバドルから東に約 30km の内陸部において、マグニチュード Mw6.5 の地震が発生した。この地震に対する COEN による被災統計では死者 315 名、倒壊した家屋約 4 万 1 千棟に達している。

土木学会・地震工学委員会では 1 月 19 日に調査団派遣を決定し、小長井一男（東京大学生産技術研究所）を団長とする 8 名の調査団（著者のはじめの 8 名）を組織した。現地調査期間は 2 月 1 日～6 日であり、1 月 13 日の地震に対し、1) 強震動記録、2) 斜面崩壊・地すべり、3) ライフライン施設（道路、電気など）、4) 建物の被害について現地調査を行った。また、調査に先立ち、夜間観測画像(DMSP)を用いた早期被災地推定システムによる情報¹⁾も参考にした。本報告は調査結果の概要であり、これらの調査結果の詳細については、報告書²⁾を参照されたい。

2. エルサルバドル共和国

エルサルバドル共和国（以下、エルサルバドル）は面積 21,040km²（九州の約半分）、総人口約 590 万人（1997）、14 県からなっており、日本と同様に地震の多い火山国である。人口は首都サンサルバドル、西部のサンタアナおよび東部のサンミゲールに集中している（図-1³⁾参照）。首都サンサルバドルは西のサンサルバドル火山、東のイルボンゴ湖に挟まれた標高約 700m に位置している。人口は 100 万人を越えており、現在も人口増加に伴い、住宅地は

図-1 エルサルバドル共和国³⁾

郊外へ拡大している。公用語はスペイン語、宗教は伝統的にカトリックであり、小さな町にも教会がみられる。1992年に約12年続いた内戦が終結した後、国情は比較的安定している。主な産業はコーヒー、砂糖などの農業であり、国民一人あたりの国民総生産は2,068ドル（1998、日本の約1/15）である。日本はアメリカ合衆国に次ぐ第二の経済援助国となっており、エルサルバドル国際空港など日本の建設会社の施工による施設もみられる。

3. 地震・強震動

エルサルバドルを含む中美地域のテクトニクス⁴⁾を図-2に示す。太平洋側ココスプレートは南西から北東方向へ、エルサルバドルの位置するカリブプレートの下へ沈み込んでおり、その速度は年間92mmである。ココスプレートには活火山帯がみられ、エルサルバドルの中央を縦断している。このため、エルサルバドルの地震活動は非常に活発であり、ココスプレートの沈み込みにより、海岸から20～30km沖の太平洋で発生する海洋型地震と、活火山帯で発生する深度10km以下の浅い内陸型地震が頻繁に発生している。最近では、1982年に太平洋、深度80kmを震源とするマグニチュード7.0の海洋型地震、1986年にサンサルバドル、深度8kmを震源とするマグニチュード5.4の内陸型地震が発生しており、1986年の地震では約1500人の死者が発生している。

1月13日の地震(Mw7.6)は、沈み込むココスプレート内で発生した海洋型地震である。図-3に示すように地質調査所(CIG)による震源はエルサルバドル沖約50km、深さは約40kmである。図-3中の菊池・山中のメカニズム解⁵⁾に示すように、ほぼ純粋な正断層型(北東南西張力)であり、断層面は南西方向に33度傾斜している。断層面(図-3中央下の棒)は長さ約70km、幅約50kmであり、CIGによる余震分布(図-3中の●)を含んでいる。また、図-3には2月13日の地震(Mw6.5)の震源およびメカニズム解⁶⁾も示している。この地震は上盤側のカリブプレート内で発生したものであり、震源はサンサルバドルの西30kmに位置し、深さは約8kmである。断層は右横ずれ断層であり、余震分布(図-3中の●)は東西30kmの長さに及んでいる。地震の規模はさほど大きくないものの、内陸部の直下型地震であり、震源近くのサンヴィセンテでは住宅倒壊などの被害が発生した。前述のようにエルサルバドルでは太平洋を震源とする海洋型地震と活火山帯を震源とする内陸型地震が発生しているが、今回のように規模の比較的大きな二つのタイプの地震がわずか1ヶ月の間に発生した記録はない。海洋型地震と内陸型地震には複雑な関係があると考えられるが、内陸部の直下型地震は大きな被害をもたらすことから、今後、活断層調査を進める必要がある。

エルサルバドルでは、中央アメリカ大学(UCA)、CIG、電力会社(Geotérmica Salvadoreña)の3つの機関による強震観測が行われている。1月13日の地震でUCAによって観測された加速度波形⁷⁾のNS成分の一覧を図-4に示す。図において、サンサルバドルの南西約30kmに位置する太平洋岸のラリベルタッド(Li)で最大加速度1,109Galが、ヌエバサンサルバドル(Te)で最大加速度486Galが観測されている。また、これらの両地点の加速度応答スペクトルを図-5に示す。海洋型地震であるが、比較的振幅の大きい主要動は10～15秒程度であり、0.2～0.3秒の比較的高周波成分が卓越している。また、最大速度はいずれの地

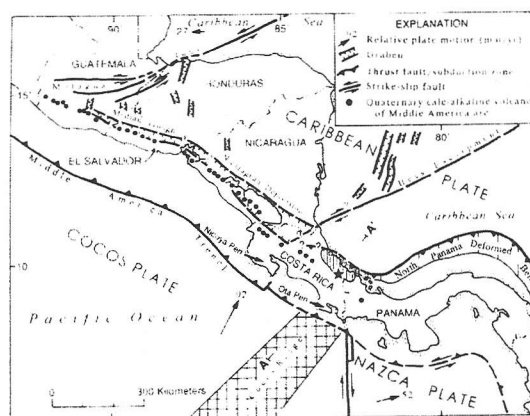


図-2 テクトニクス⁴⁾

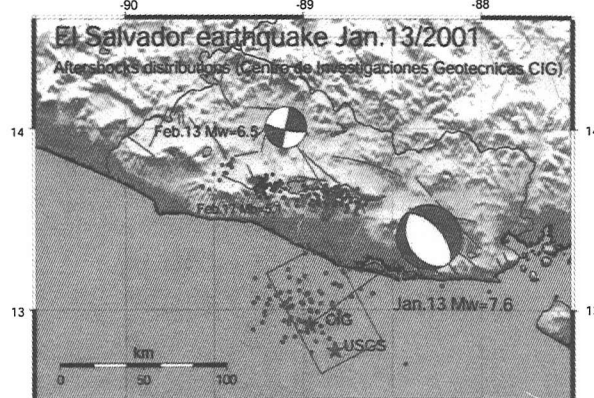


図-3 震源位置とメカニズム解^{5),6)}

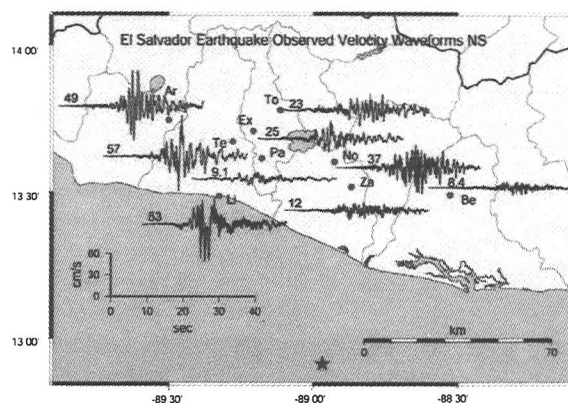


図-4 加速度記録⁷⁾

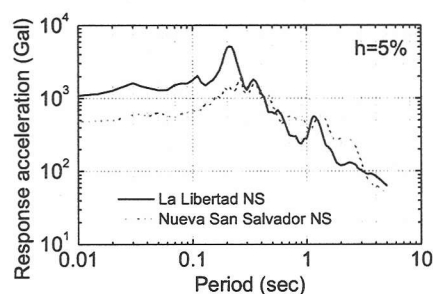


図-5 加速度応答スペクトル

点でも50kine程度となっている。広帯域強震動シミュレーションの結果より、両地点において比較的大きな加速度が発生した原因の一つとして、観測点でのローカルな地盤条件の影響が考えられる。

4. 地形・地質

エルサルバドルは活火山帯が東西方向に横断しており、起伏に富んだ地形となっている。エルサルバドル全土の地質図⁸⁾を図-6に示す。太平洋に注ぐレンパ川の流域などに沖積平野(図-6中の)が広がる他は、ほとんどが山地であり、玄武岩、安山岩などの火山岩(図-6中の■、■)、火山碎屑物や火砕岩(図-6中の)が広く分布している。

5. 斜面崩壊・地すべり

(1) 被害の分布

表-1に示すCOENによる被災統計⁹⁾ではエルサルバドル全土で大小合わせて445箇所で斜面崩壊・地すべりが発生している。これらの位置や規模は政府の環境資源省によって図-6中の■に示すようなGISデータベース¹⁰⁾としてまとめられている。地質と比較すると、斜面崩壊・地すべりは火山碎屑物が堆積した地域で多く発生している。これらの斜面崩壊・地すべりのうち、大きな社会的被害を与えたものとして、500名以上の死者を出したヌエバサンサルバドルのラスコリナス、パンアメリカンハイウェイを寸断したサンビセンテなどがあるが、以下ではヌエバサンサルバドルでのラスコリナスの地すべりについて述べる。

(2) ラスコリナス

a) 地すべり全体の状況

ヌエバサンサルバドルは首都サンサルバドルの西隣、標高920mに位置する住宅地である。この町の南端に位置するラスコリナス(コリナスはスペイン語で「丘」)で大規模な地すべりが発生した。ラスコリナス周辺の地形図と地すべりが発生した地点を図-7に示す。崩壊した山の標高は1085mであり、表層付近は火山礫凝灰岩、その下には軽石層などの火山碎屑物がみられる。崩壊範囲は山頂付近で幅約100m、斜面のり先まで480m、最終到達点までは750mにも及ぶ。西側から撮影した崩壊現場の全景を写真-1に示す。この崩壊土砂により、組積造住宅などが破壊された。崩壊した土砂や住宅は既に撤去されており、写真-1で白くみえるのは消毒用の薬剤である。

レーザー測距計を用いて測量した崩壊後の3次元形状を図-8に示す。図-7の原地形と比較した結果、この崩壊は次のような形態で発生したと考えられる。主な崩壊は山頂付近のゾーン1で発生し、崩壊した土が30度程度の急

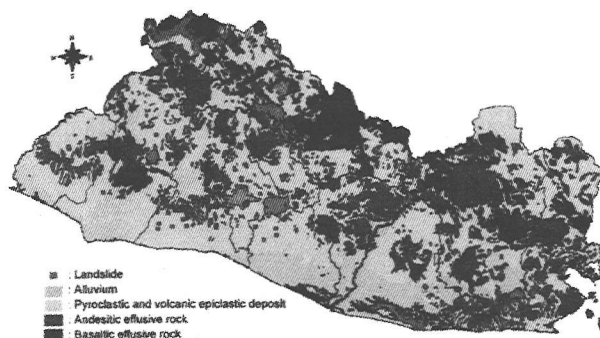


図-6 地質と斜面崩壊・地すべり箇所(環境資源省)^{8),10)}

表-1 被害統計⁹⁾

Prefecture	Death	Injured	Damaged public buildings	Damaged houses	Collapsed houses	Buried houses	Landslide
La Libertad	685	2183	48	14558	15723	687	20
La Paz	44	147	272	25076	17996	0	75
Sonsonate	48	1295	38	17773	10501	0	82
Santa Ana	47	327	5	13925	4823	0	27
Cuscatlán	20	43	47	4762	4282	0	17
Usulután	27	786	335	30716	29293	0	38
San Salvador	24	391	76	12836	10372	0	133
San Miguel	19	43	23	10624	2902	0	26
San Vicente	29	81	40	17292	5218	0	4
La Unión	1	8	98	2136	268	0	1
Ahuachapán	0	247	60	18540	6553	0	12
Cabañas	0	7	31	1153	309	0	4
Morazán	0	3	35	94	5	0	1
Chalatenango	0	4	47	307	16	1	5
TOTAL	944	5565	1155	169692	108261	688	445

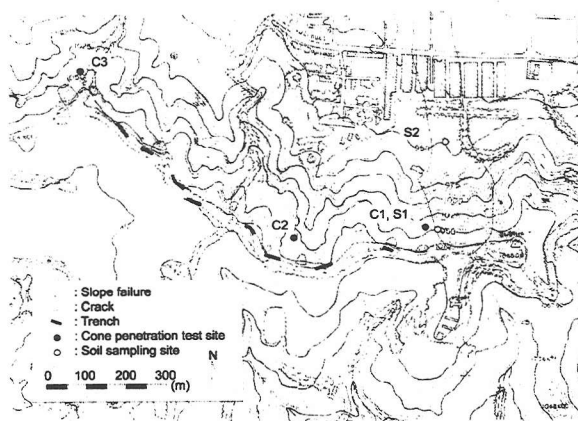


図-7 ラスコリナスの地形と斜面崩壊・地すべり地点

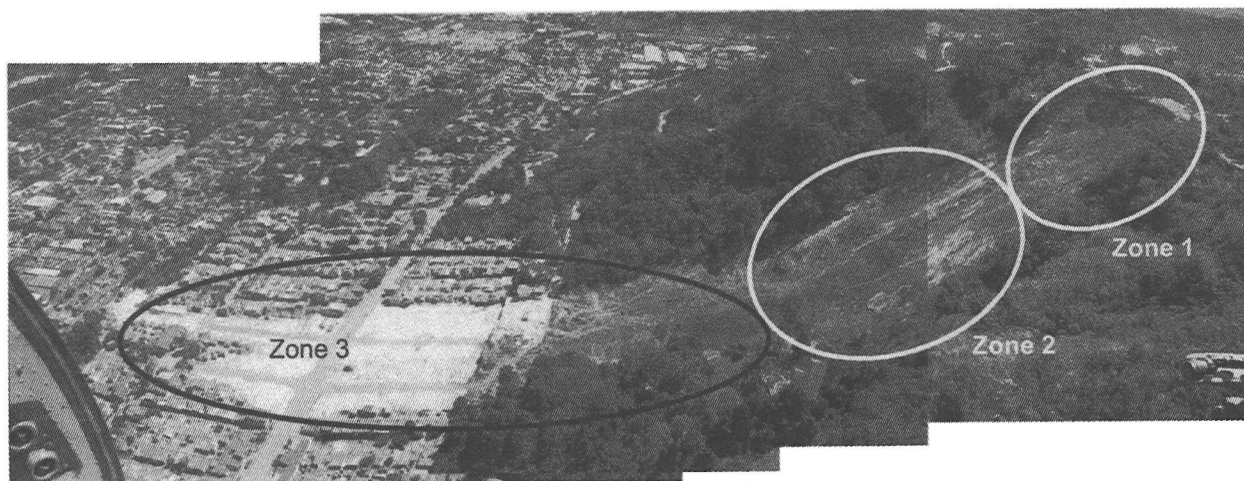


写真-1 ラスコリナスの崩壊後の全景

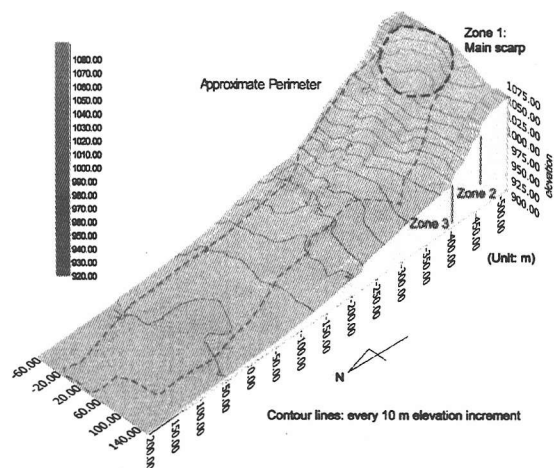


図-8 ラスコリナスの崩壊後の地形

勾配のゾーン2をすべり落ち、ゾーン3の斜面を削り取り、その先の住宅地まで到達したと考えられる。崩壊土量は約20万 m^3 である。

b) 各ゾーンの状況

ゾーン1を山頂の東側からみた様子を写真-2に示す。崩壊高さは約13mであり、天端の崩落境界線は円弧状である。地表から2m程度は10~25cm厚の火山礫凝灰岩が層状に重なっている。すべり面の下部の白色部は軽石層であり、指でつぶせるほど、その粒子はもろいものである。その上部の黒っぽくみえる部分は湿潤状態にある。地震直後の写真と比較すると、この領域は狭くなっており、徐々に乾燥しているものと考えられる。なお、ゾーン1の下部では山頂の地表付近から流下してきたブロック状の火山礫凝灰岩や山頂にあったブロック塀などがみられた。また、山頂の崩壊斜面の背面では、図-7に示すように多数のクラックがみられた。崩壊面法線方向22mにわたり累積したクラック幅は1.25mに達し、ひずみに換算すると約5%となる。

ゾーン2では写真-3に示すような白色の薄い固結した泥膜が原地盤の植物などを覆っているところのみられた。原地盤の植生が残っていることから、この部分では図-8に示したように原地盤の崩壊は生じていないことがわかる。1月13以降、地震後雨は降っていないにも関わらず、表面を観察すると水が流れたような後がみられ、崩壊直後は水分を多く含んでいたと考えられる。この土はゾーン1で崩壊した軽石層が斜面をすべり落ちる過程でへばりついていたと考えられる。

ゾーン3において、崩壊土や住宅は既に撤去されているが、なぎ倒された周辺の木々、破壊された乗用車、流木が入り込んだ住宅など、崩壊土の破壊力を物語る痕跡が多くみられた。また、周辺の木々や住宅の壁に泥しぶきが多数みられ、すそ野付近の木々には高さは6~8mの泥膜がみられた。崩壊土の東側にあり倒壊を逃れた住宅の壁には高さ4.5m程度の泥しぶきがみられ(写真-4)、泥しぶきの角度から崩壊土の速度を推測すると約5m/sとなる。これらより、崩壊土は相当量の水分を含んでいたことがわかる。

c) 原位試験

崩壊面の西側(図-7のC1地点)で簡易動的コーン貫入試験を実施した結果を他の地点(図-7中のC2、C3地点)の結果とともに図-9に示す。グラフの横軸は標準貫入試験のN値に換算した値を示している。C1地点において深度2.5m付近にみられる非常に緩い層が前述の軽石層(白い層)に対応している。

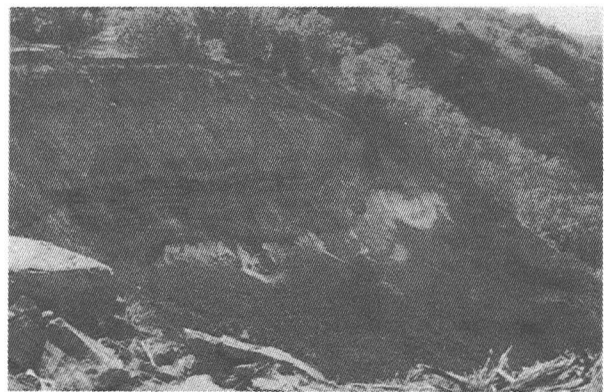


写真-2 ゾーン1 (ラスコリナス)



写真-3 ゾーン2 (ラスコリナス)

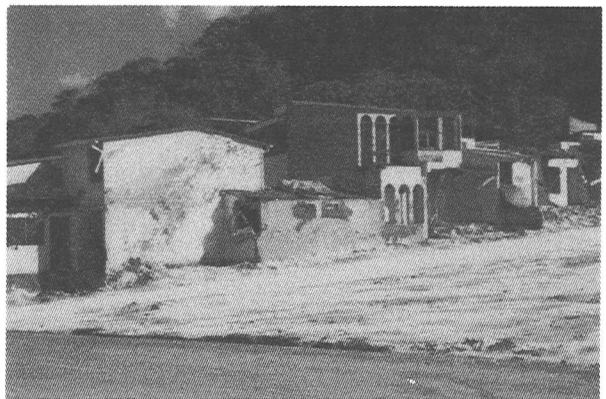


写真-4 ゾーン3 (ラスコリナス)

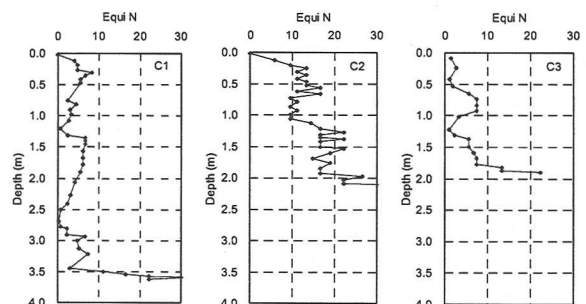


図-9 簡易動的コーン貫入試験結果

d) 室内土質試験

ゾーン1の軽石層(図-7のS1地点)でサンプリングした試料を用いて、物理試験、三軸圧縮試験、液状化試験、リングせん断試験を行った。軽石の土粒子比重は2.3~2.4、

平均粒径は0.7~0.9mm, 均等係数は4~5である。相対密度50%程度に調整した試料の液状化強度(繰返し回数20回で両振幅ひずみ5%に達するときのせん断応力比)は飽和状態で0.22, 含水比40%の不飽和状態で0.30であった。

地すべり再現用のリングせん断試験器¹¹⁾による軽石の残留強度の測定結果を図-10に示す。試験は2種類の飽和度(A:100%, B:81%)を対象として, 斜面勾配20度として初期応力状態まで圧密した後, 非排水条件下でせん断トルクを作用させた。飽和度100%の場合(図中のA), 有効応力がほとんどゼロの液状化状態となり, 残留強度も非常に小さくなる。飽和度81%の場合(図中のB), 液状化には至らないものの, 有効応力の減少がみられ, 初期せん断応力を下回る残留強度となっている。このときのみかけの摩擦角12.7度はゾーン1~3での平均的な勾配13度に概ね対応している。このように, 飽和度の増加に伴い, せん断面での軽石の残留強度は低下する。これによって, 地すべり土の移動距離も長くなると考えられ, ゾーン3での広範囲な被害につながったものと考えられる。また, 試験後, せん断面で採取した試料の光学顕微鏡およびSEMによる観察を行った結果, 粒子破碎による細粒化が確認できた。ゾーン2でみられた白色の薄い泥膜は, すべり面で粒子破碎した軽石の一部と考えられる。

e) 常時微動測定

ヌエバサンサルバドルでは図-4に示したように約500Galの加速度記録が観測されているが, 山頂付近はさらに大きな加速度が作用していた可能性もある。そこで, 山頂とすそ野で常時微動測定を行い, 地震応答に与える地形効果を検討した。山頂で観測した微動のフーリエスペクトルをすそ野で観測した値で除したスペクトル比を検討した結果, 東西, 南北, 上下動のいずれの成分についても, 周期1秒付近に大きなピークがみられ, この周期成分が山頂では増幅される可能性があることがわかった。増幅された加速度による山頂付近の土塊の慣性力が軟弱な軽石層の動的強度を上回ったことにより, 崩壊が発生したと推測される。

ヌエバサンサルバドル南側の斜面では図-7に示すようにラスコリナスの他にも小規模な崩壊や多数のクラックがみられ, 図-9の簡易動的コーン貫入試験の結果でもNo.3地点には軟弱な層があることから, さらなる崩壊の危険があると考えられる。このため, 調査時点では斜面のり先から約300m以内の住民は避難しており, 山頂ではクラックへの雨水浸透防止対策がなされていた。継続的な観測と, 地すべり対策工が必要になる。

6. ライフライン施設施設の被害

道路被害は斜面崩壊によるものが多く, 主要道路の一つである中米を縦断するパンアメリカンハイウェイも斜面崩壊による被害を受けた。写真-5はサンビセンテにおいて, 約30万 m^3 の崩壊土砂により寸断されたパンアメリカンハイウェイの様子である。調査時点では崩壊した土砂を取り除く復旧工事中であった。パンアメリカンハイウェイについては, ヌエバサンサルバドルの西, ロスチョロス周辺でも5カ所で斜面崩壊が発生し, 約7kmにわたって片側車線規制されていた。このほか, ヌエバサンサルバドルの南西に位置する山村コマサグアへ向かう地方道も路肩崩壊などによる被害を受けた。また, 東部の山岳部の町ベルリンへ通じる道路も岩石崩壊による被害を受けた。

道路橋について, 落橋などの致命的な被害は確認されて

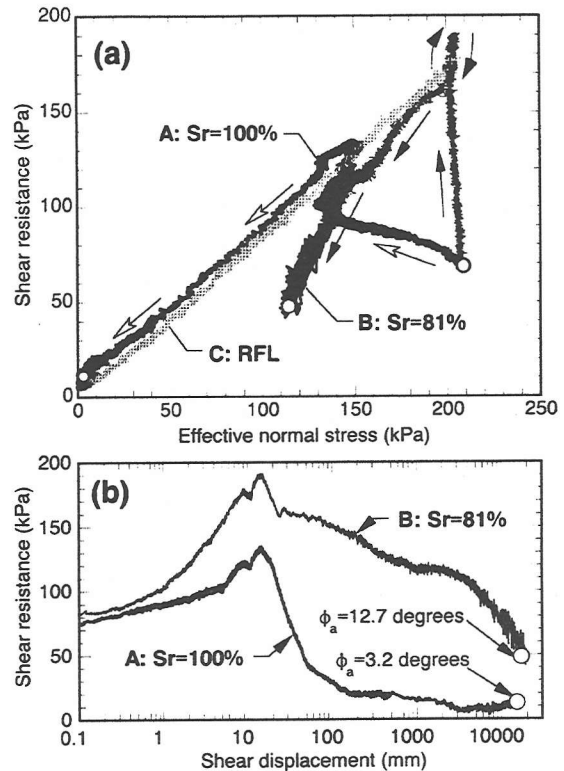


図-10 リングせん断試験結果
(a)有効応力経路, (b)せん断応力~せん断変位関係

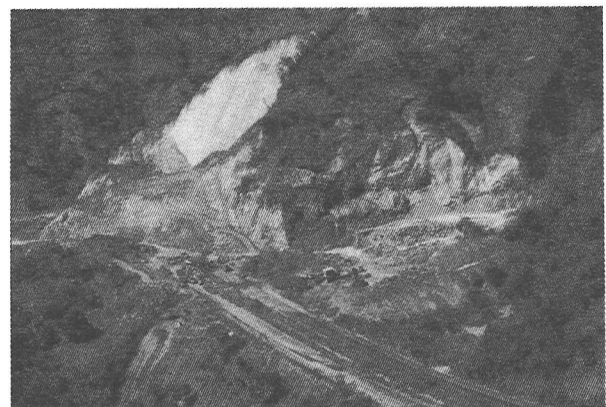


写真-5 Pan-American Highway の被害 (サンビセンテ)

いないが, リトラルハイウェイ(太平洋岸に近い主要動)において, 強震動により道路橋の橋桁が損傷した箇所がみられた。また, リトラルハイウェイにはいくつかトンネルがあるが被害は確認されていない。

鉄道は利用者の減少により, 施設は残っているものの利用されていない。レンパ川に架かるリトラルハイウェイのサンマルコス橋のすぐ北側に旧鉄道橋がある。旧鉄道橋は簡易舗装され, 現在は道路橋として利用されている。サンマルコス橋では, 取付盛土が数cm沈下したが調査時には復旧作業が終了していた。一方, 旧鉄道橋では写真-6に示すように右岸側の橋桁の一つが落橋する被害が発生した。周辺には液状化による噴砂, クラックが多数みられた。確認できるクラックについて, その幅を計測・累積した結果は約1.3mであり, ひずみは約3%であった。基礎地盤の川側への側方移動により, 橋脚が移動し, 桁掛かりを失った桁が落下したと考えられる。その他, 液状化による被害として河川堤防の沈下などの被害が確認されている。

送変電施設は各地で被害を受けている。変電所の電気設備が地震動による被害を受け、補修が行われていた。また、送電鉄塔が基礎近傍の斜面崩壊により傾斜するなどの被害がみられた。ラスコリナスでも建設中の送電鉄塔の基礎が斜面崩壊により移動し、鉄塔が傾斜する被害がみられた。

港湾施設、ダム、上下水道、電話通信施設については、大きな被害は確認されていない。サンサルバドル国際空港では、滑走路や誘導路でクラックが生じ、RC柱の軽微な被害がみられたが、地震の2日後には正常運用された。

7. 建物の被害

住宅は2階建てまでの低層建物が多く、その構造はアドベ、無補強のレンガ積み、バハレケ(木製フレーム+土壁)、RCフレームにより補強されたレンガ積みなどである。コマサグアなどラリベルタッド県の山村、サンアゴスティンなどのウスルタン県の山村では無補強のレンガ積み住宅(写真-7 参照)やバハレケ(写真-8 参照)の被害が多くみられた。基礎の不足、梁の不足、壁と屋根の接合部の不具合などが主な原因と考えられる。また、典型的なバハレケの応答特性を把握するために行った常時微動測定の結果、屋根の応答が地表に対して増幅率が大きくなるのは周期0.1~0.25秒であった。図-5に示したように今回の地震動の卓越周期が0.2~0.3秒であり、バハレケの被害を大きくした一因と考えられる。今後、住宅の建築基準の整備と住民の防災教育が必要である。

その一方で、RCフレームによって補強されたレンガ積み住宅の被害は少ない。サンサルバドル、サンミゲルなどの大都市で多くみられるRC造建物の被害率は低く、被害を受けた建物の多くは1986年の地震でも被害を受け、十分な補修がなされていないものであった。

謝辞

エルサルバドル日本大使湯沢三郎氏には調査用ヘリコプターの手配など調査全般に対してご支援頂いた。Geotérmica SalvadoreñaのゼネラルマネージャーJose Antonio Rodriguez氏による調査初日のブリーフィングは、調査を進める上で貴重なものであった。また同 Salvador Handel氏、Jose Antonio Rivas氏には調査にご同行いただき、様々な面でご支援頂いた。エルサルバドル政府の環境資源省、建設省、住宅省からは被害に関する資料をご提供頂いた。地質調査所(CIG)、中央アメリカ大学(UCA)から地震記録などの情報をご提供頂いた。ここに記して、調査にご協力いただいた方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター
<http://www.edm.bosai.go.jp/Salvador2001/dmsp.html>
- 2) 土木学会地震工学委員会: The January 13, 2001 Earthquake occurred off the Coast of El Salvador, Investigation of Damage to Civil Engineering Structures, Buildings and Dwellings, CD-ROM, 2001.
- 3) http://www.lib.utexas.edu/Libs/PCL/Map_collection/americas/ElSalvador.jpg
- 4) Plafker, G. and Ward, S.N.: Backarc thrust faulting and tectonic uplift along the Caribbean Sea coast during the April 22, 1991



写真-6 レンパ川の橋梁被害



写真-7 レンガ積み住宅の被害 (サンアゴスティン)

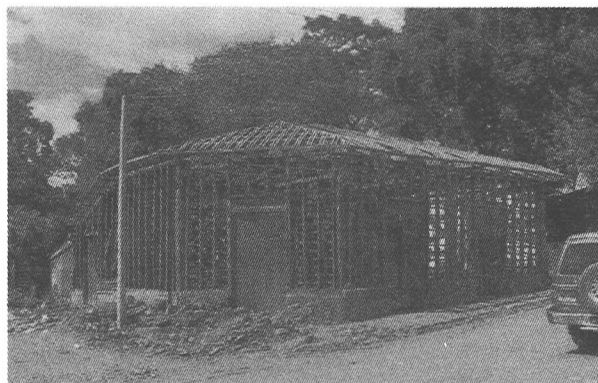


写真-8 バハレケの被害 (サンアゴスティン)

Costa Rica earthquake, Tectonics, Vol.11, pp.709-718, 1992.

- 5) 菊池, 山中: E I C 地震学ノート, No.97 Jan.14, '01,
http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/010113.html
- 6) 菊池, 山中: E I C 地震学ノート, No.99 Feb.14, '01,
http://wwwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/010213.html
- 7) Universidad CentroAmericana: UCA (2001) Strong-motion data from the January-February 2001 earthquakes in El Salvador, 2001.
- 8) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Coleccion de CD's, Medio Ambiente 2000.
- 9) Comité de Emergencia Nacional: <http://www.coen.gob.sv/Final130101.htm>, 2001
- 10) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Landslide GIS data, 2001.
- 11) Sassa, K.: Mechanism of flows in granular soils, GeoEng2000, Invited paper, 2000.