

Valle de la Estrella (コスタリカ) 地震による被害

吉田 望*, 渡辺 啓行**, 安田 進***

1. はじめに

1991年4月22日、コスタリカの山岳地帯を震源とするマグニチュードMs=7.4の地震が発生した。震央から30km以内では人がほとんど住んでいないことから、地震による死者はコスタリカで58人¹⁾(内40人は斜面崩壊, 1人は建物倒壊, 3人はタンク火災によるもの²⁾)と少なかったが、山岳地帯で広範囲にわたり斜面崩壊が発生し、またカリブ海に面した地域で大規模な液状化が発生する等の被害を生じた。被害総額は300万ドルと推定され³⁾、これはコスタリカのGNPの2%に相当する。

筆者らは、ICE(コスタリカ電力・通信会社, 研究所)の協力を得て6月24日から1週間にわたり被害状況を調査した。ここでは被害の概要を紹介する。な

お、この地震では、隣国のパナマにも被害が発生しているが、これに関してはほとんど情報が得られていないことから、本報ではふれていない。

2. コスタリカの概要

コスタリカは、中米にある、東をカリブ海、西を太平洋に面した、面積51,000km²(九州よりやや広い)の国である。地形的には、北に北部平野、東にカリブ海低地、南西に南西部平野があり、これらに囲まれ中央高原がある。液状化の発生したカリブ海低地は南北に細く伸びる熱帯雨林地帯で、要港Limonから内陸部に走る道路・鉄道沿線はバナナやカカオ、ゴム等が栽培されている。中央高原は北部では3000m級の火山が連なっており、さらに南部にも中央山脈が連なってい



図-1 地震および地震動の概要

* 佐藤工業株式会社中央技術研究所, ** 埼玉大学工学部, *** 九州工業大学工学部

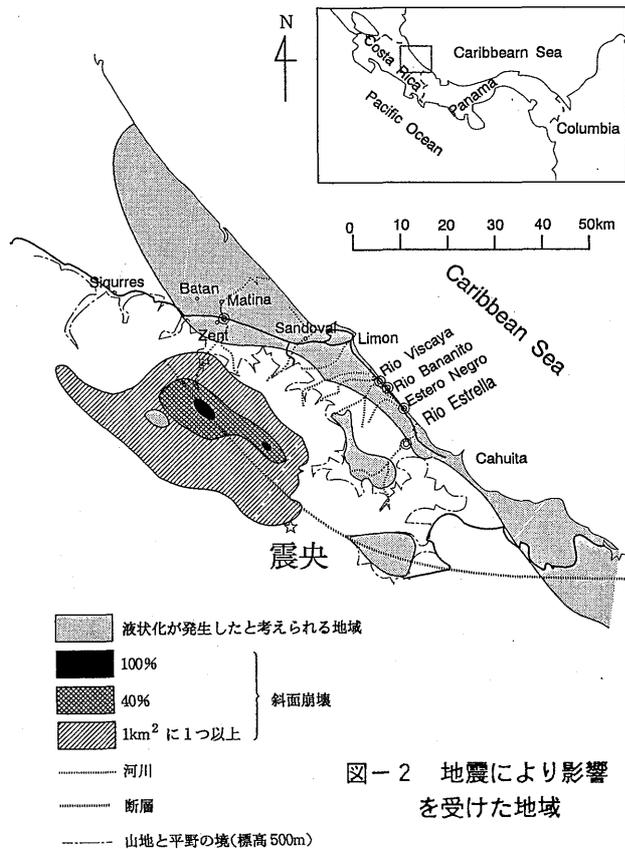


写真-1 地盤の隆起により干上がった海岸。写真の白い部分はもとは海底であったが、地盤の隆起により陸地となった。なお、このようにして増えた陸地はコスタリカ政府の所有となるとの事であった。

して最大2m程度の隆起が観測されている(写真-1)。また、カリブ海岸では津波の発生も報告されている。

UCR(コスタリカ大学)とICEでは、独自の地震観測網をもっており、この地震により20以上の強震記録が得られている¹⁾⁴⁾。震央に一番近いのは震央距離(Δ)70kmのSiquirresのダム建設サイトの記録で、東西方向の水平最大加速度は0.77gとなっている(これには疑問を持つ意見もある)。図-3に記録波形を示す。地震計は厚さ約9.5mの崩積層($V_p=1.9\text{km/s}$) (その下は玄武岩)の上の木造建物内部に設置されている。周辺では土間床に若干の亀裂が見られるもののほとんど被害は生じていない。震央距離が近い記録が得られていないのは、この地域が地震活動の小さい地域であり、他の地域に重点的に観測網が設置されていたためである。

図-1に修正メルカリ震度による震度分布を示す。等震度線は断層方向に長く伸びており、断層に沿った方向で震度が強いことがわかる。また、震度Ⅹの地域は断層に沿っていくつかに分かれており、地形・地質の違いの影響を大きく受けていると考えられる。

Δ=70kmの地点では、バナナを積んで走っていた大型トラックが地震動のために転倒している。また、筆者らは、地震時にΔ=45kmの地点で67人乗りのバスを運転していた運転手から、バス(当時50人乗車)が横方向にすべったため停車したがほとんど転倒しそうなぐらい激しいロッキングと車体が浮き上がるぐらいの上下動を経験したとの話を聞いている。

4. 斜面崩壊

斜面崩壊は、図-2に示すように、震央の北側に広範囲に生じている。図の斜面崩壊率は、ICEのMora氏

る。首都San Joseは中央高原の中央部に位置する。カリブ海低地や中央高原では貿易風の影響から降雨量は多く、Limonで年間4000mm、地域によっては6000mmに達するところもある。

3. 地震および地震動

コスタリカからパナマにわたる地域は、Caribbean, South American, Cocos, Nazcaの4つのプレートが動く、複雑な地質構造をしており、地震の多発地帯となっている。この地震の諸元は次のようである。

震央 : 北緯 9° 36.88' 西経 83° 9.48'

深さ : 約20km

時刻 : 1991.4.22日 15:57分 (Local time)

マグニチュード : $M_s=7.4$, $M_L=6.6$

強震観測の結果から、この地震は少なくとも4つのmultiple shockであったと考えられている。震央は内陸部であるが、地震に伴う断層は地表には現れなかった。この地域はこれまで地震の発生の少なかった地域であり、その意味で今回の地震の発生は予想外であった。図-1に地震および地震動の概略を、図-2に地震により被害を受けた地域を示す。

図-2に示すように、地震に伴い、Limonを中心と

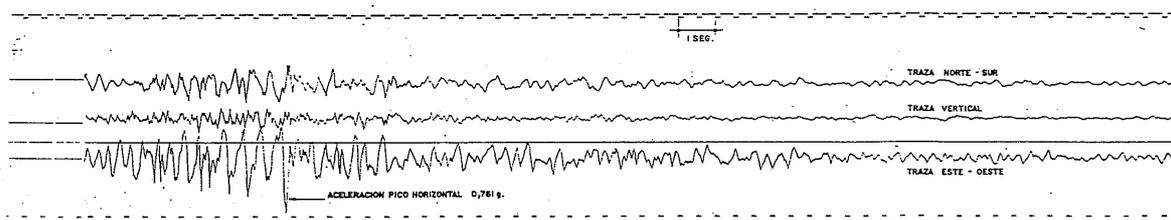


図-3 Sequirresダム建設サイトの記録波形

が地震前後の航空写真から推定したものである。特に中心部では斜面崩壊率100%と、その被害程度も著しい(写真-2参照)。斜面崩壊の多くは厚さ2~10mの表層すべりであるが、深層すべりも数例報告されている。雨期に入ったこともあり、地震後2ヶ月を経過した時点でも流された土砂のため周辺の河川やカリブ海岸は濁り、海岸には多数の材木が打ち上げられている。また、山岳地帯は多雨地帯であることから、降雨によりさらに多くの斜面崩壊が発生しており、これに付いても追跡調査が行われている。

5. 液状化による被害

液状化は図-2に示すように、海岸に沿って広範囲で発生した。また、断層付近でも液状化の発生があったとされている。以下、いくつかの液状化被害を示す。なお、図の液状化範囲は、Mora氏が調査したいくつかの液状化地点から推定されたものである。この地域では一般に人口は少なく、また、低地全体にバナナやココナツが生い茂っているため、航空写真などによっても液状化地点の特定は困難である。

Limonから北西に延びる海岸では、海岸に沿って後背湿地が形成されており、その内陸側に自然のものを改築した運河が流れているが、この部分で液状化が発生したようで、標高2~3mの砂州の頂上付近から内陸部に向けての地盤の側方流動(永久変位)が多くの地点で観察された。海岸に沿った道路やその周辺でも海岸と平行な亀裂が多く発生していた。写真-3は、途中石油探査の深層ボーリングを行うために100m角程度の敷地に約1.5mの盛土をした場所であるが、すぐ内陸側にある沼地に向かって大規模な側方流動を生じ、幅数十cmの亀裂が幾つも入っていた。

同様な現象は、Limonから南東に延びる海岸でも同様に生じていた。筆者らが調査したPacuare川からEstrella川までの範囲ではほとんどの地域で液状化が発生しており、カリブ海に面した海岸はパナマの北方も含め同様な状況と推定される。



写真-2 斜面崩壊。ここではほとんど全域で斜面崩壊が発生し、山は禿山となってしまった。

液状化は、河川に沿った地域でも観察された。筆者等の調査した範囲では、河川にはほとんど護岸が見られなかった。このため、液状化に伴い地盤の河心方向への側方流動が見られた。これにより橋梁の落橋もあったが、これに付いては次項で述べる。

さらに、道路に沿った地域でも液状化の発生を確認している。これに付いても次項で述べる。

このように液状化の発生は広範囲にわたったが、一方では人口が非常に少ないことから、建物被害などは少なかったようである。なお、Limon市中心部では、1~2mの表層粘土層の下にはサンゴ成の硬い地盤があるとのことで、筆者らの調査範囲では液状化に伴う建物被害は見られなかった。

6. 道路および橋梁

首都San JoseからLimonに至り、さらに海岸に沿って南に走る幹線道路は、道路が平野部に入ったところから長さ35kmにわたり、被害率100%に近い被害を受けていた。Limonまでの部分では道路は1~5mの盛土(砂や礫)をして作られており、その周辺にはバナナ園が広がっている。地盤はシルト質砂で地下水位は0.5m程度と推定されている。ここでは、道路は50cm以上沈下し、また、道路中央には大きな亀裂が入る(写真-4)等、かなり側方にも広がっていた。周



写真-3 盛土の側方流動に伴う亀裂。

辺のパナナ園では噴砂も多く発生しており、液状化に伴い盛土下部の地盤が破壊したための被害と考えられる。

Limonから南では先に述べた後背湿地の頂上付近に道路が作られているため、液状化に伴う側方流動により沈下や海岸と平行の亀裂が発生する等の被害が生じていた。

カリブ海には幾つもの中小河川が流れ込んでいるが、そのほとんどの橋で、液状化にともなう被害が発生していた。被害は、先ず取付道路の沈下であり、さらに、地盤の側方流動に伴い、橋台の移動、沈下である。このために落橋した橋も3橋あった。落橋した橋の位置は図-2に示されている。写真-5はその内の一つで、Estero Negro川に架かる橋である。この橋は2スパンの鉄筋コンクリート橋であるが、右岸側の川岸が河心に向けてすべったため、コンクリート製の橋台が押し出され、橋桁を押ししたために落橋したと推定される。橋台は約12°傾いていた。他の橋の落橋状況も同様のものであった。すなわち、落橋の原因は液状化に伴う側方流動により橋台が移動、沈下したためである。

地震動によると考えられる落橋もあった。写真-6に被害状況を示すが、Estrella川に架かる長さ150mの2スパントラス橋(図-4)では、両方の橋桁とも落下している。写真の左側の橋桁は、中央の橋台からはずれたように落下している。これに対して右側の橋桁は、図-4に模式図を示すように、橋台には接合しているものの、はりの接合部で破断したため落下している。川岸の橋台には大きな被害は見られなかった。また、右岸側の橋台を見るとトラス橋は両端の2箇所橋台にボルト接合され、各接合部ともそれぞれボルト2本しか使われていないようであった。すなわち、接



写真-4 道路中央に生じた亀裂。道路は1~5mの盛土により作られている。盛土下部の液状化により盛土が広がるように破壊したためと考えられる。



写真-5 Estero Negro川に架かる橋の落橋。液状化に伴う地盤の側方流動により橋台が移動し、橋桁を押ししたために落橋した。

合部の水平力に対する耐力はきわめて小さいものと推定され、これが落橋の原因になったと考えられる。

7. 建物被害

海岸地帯では住居は高床式木造が一般的である。すなわち、構造的には地上から立てた長さ1m程度の木製の柱列(最近ではコンクリートブロックで囲む例もあ

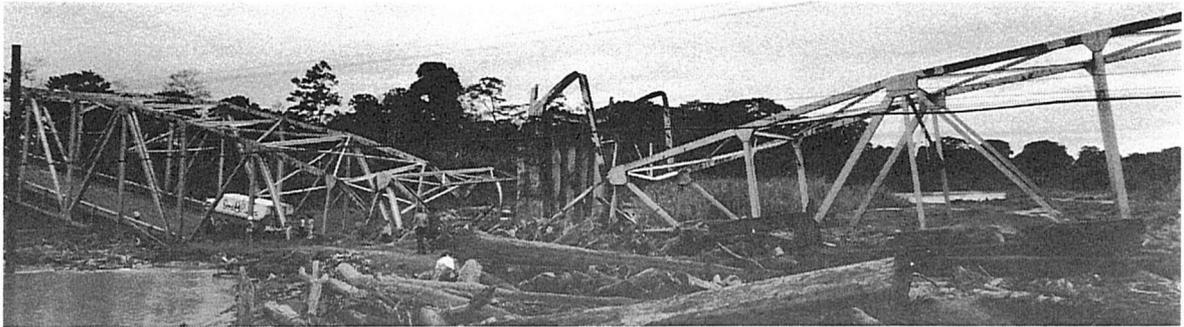


写真-6 Estrella川に架かる橋の落橋。左側の橋桁は中央の橋台からはずれている。一方、右側の橋桁は桁の途中が破断して落橋した。

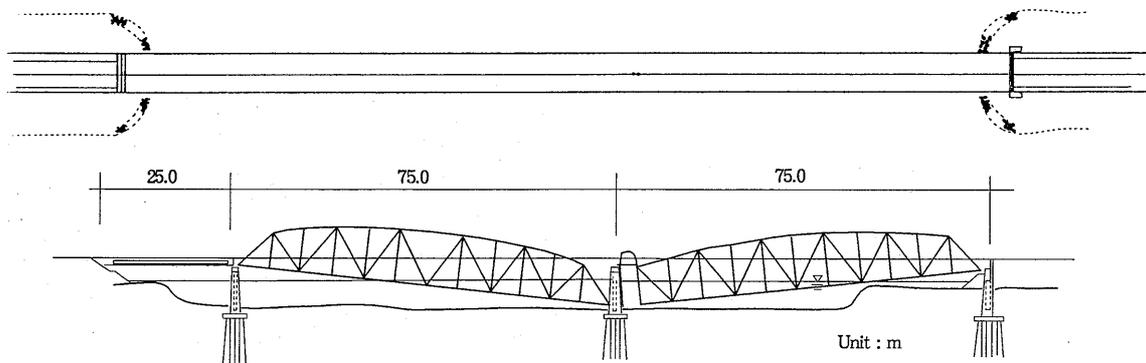


図-4 Estrella川に架るトラス橋

る)の基礎の上に建物を置いたような形になっており、柱列には特に水平力に耐えるような斜材は用いられておらず、水平力に対しきわめて弱い構造である(写真-7)。地震によりこのタイプの建物にはかなりの被害が出た様子であるが詳細は不明である。また、カリブ海に面した液状化地域に建てられていた建物では、地盤の側方流動や亀裂によっても被害を受けている。

Limon市では2棟の鉄筋コンクリート建物が崩壊している。写真-8に示すLas Olasホテルは、海岸に建つ4階建RC建物で、1階の柱脚まで海水につかるような設計となっており、2階は見晴らし台3、4階が寝室となっている。このような構造から、1階は壁が全くない構造となっていたが、中央部で階段室のためにブロックで囲ったところに長さ1m程度の短柱があり、これがせん断破壊をしたために上部が落下し、破壊した。破壊した柱を見たところ、鉄筋は塩害によりかなり錆びていた。

写真-9に示すLimon International Hotelは3階建RC建物であるが、1階部分が完全に崩壊していた。破壊がひどいため、明確な被害原因は不明であるが、



写真-7 木造家屋の被害。木造家屋は高床式となっている。床下の柱には特に水平力に抗する部材がなく、地震に弱い構造となっている。



写真-8 Las Olas Hotelの崩壊。



写真-9 Limon International Hotelの崩壊

被害程度の観察や聞き込みから、次のように推定される。すなわち、この建物は角地に建てられており、道路に面した部分にはほとんど壁のない構造であり、剛心と重心がかなり偏心していたため、地震にともないねじられ柱が破壊したものと考えられる。また、柱には排水のためと考えられるパイプが2本通っており、これが水平耐力を弱くしたのかもしれない。

8. その他の被害

SandovalではICEの石油貯槽タンクの被害があった。ここでは、タンク下部に一般に象の足といわれる座屈が生じ、石油が漏れている。また、火災が発生し3日間燃え続けた(写真-10)。

Batanでは写真-11に見られるようにトラス上に置いた給水用のタンクの落下があった。

Zentでは、マット基礎形式の送電鉄塔が1塔傾いた。周辺のパナナ園では液状化が発生していた。

9. おわりに

1990年のフィリピン・ルソン島地震の時もそうであったが、河川に護岸がない場合には、液状化に伴う地盤の側方流動はいわば当たり前の現象であり、大きな地震動を受ければ必ず生じると考えられる。このような地域では今後側方流動による落橋を防止することが重要な課題となろう。

斜面崩壊に伴う被害にも大きなものがある。中米地域では自然災害による被害の内斜面崩壊に起因するものは26%にも達しているそうである。地震に伴う斜面崩壊もその後の降雨によりさらに拡大している。

このような被害に対し、日本の技術を生かした援助をするべきと考える。



写真-10 石油貯槽タンクの被害。左上のタンクは火災により消失した。また、下部のタンクでは石油が漏れ、防液堤にたまっている。

木造家屋にも問題がある。先に述べたように、一般の木造家屋は耐震的といえるようなものではない。イラン・マンジール地震や、フィリピン・ルソン島地震の時にもやはり一般の住居は耐震的でなく、崩壊したものも多かった。このような発展途上国の住居に関しては耐震的に強くしなさいとだけ言っても経済的な理由から実現されない。安価な補強法の提案が必要とされる。

謝辞 今回の調査は、地震発生後に東京大学・石原研而教授が現地と連絡を取られたのを機に実現したものである。現地ではICEのMora氏のおかげで多くの情報、資料を入手できると共に、短期間の間に非常に効率的な調査をすることができた。また、コスタリカ大学のSantana教授や Ministry of Public Works and TransportationのPaniagua氏には貴重なデータを頂いた。さらに、現地では多くの方にお世話頂いた。ここに感謝いたします。

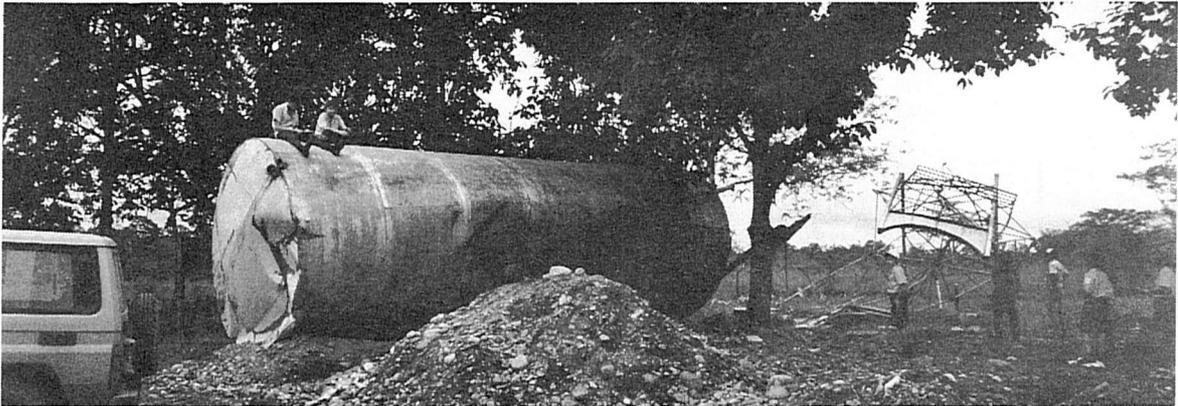


写真-11 給水用のタンクの落下

参考文献

- 1) Laboratorio de Ingenieria Sismica de la Universidad de Costa Rica, Segundo Reporte Preliminar Registros de Aceleraciones del Sismo del 22 de Abril de 1991, May 1991
- 2) Mora 博士による
- 3) The April 22, 1991 Valle de la Estrella Costa Rica Earthquake, a Quick Report, EQE Engineering, May 1991
- 4) Alvaro Climent M., Sismo del 22 de Abril Reporte Preliminar de Aceleraciones, Departamento de Geologia, ICE, 1991