

— 委員会報告  
Committee Report

# 委員会報告

## ロマプリータ地震震害調査報告

Reconnaissance Report on the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989

耐震工学委員会

By the Earthquake Engineering Committee

### 1. 地盤の震動と被害

#### 1.1 液状化による被害について

柳沢栄司 (Eiji YANAGISAWA)\*1

安田 進 (Susumu YASUDA)\*2

森伸一郎 (Shinichiro MORI)\*3

#### (1) はしがき

ロマプリータ (Loma Prieta) 地震に際し、サンフランシスコ (San Francisco) 市およびその南部の都市等では、建物や構造物にかなりの地震被害が発生し、市民生活は大きな影響を受けた。これらの被害の多くは、震央からの距離が約 50 km 以内で地震の影響が著しく大きかった地域に集中しているが、震央からやや離れたサンフランシスコ湾岸の都市にも大きな被害が発生した。これらの被害の中には明らかに砂地盤の液状化現象に起因するものがあり、地盤の液状化による都市の地震動災害が改めて問題にされた。すなわち、液状化による地震被害は、サンタクルス (Santa Cruz) 市およびモスランディング (Moss Landing) など震央に近い地域ばかりでなく、震央から比較的遠いサンフランシスコ湾の北部沿岸の埋立地においても局所的に発生し、ウォーターフロントの液状化災害として注目を浴びた。この地震の特徴である地震動の距離減衰の小さいことが液状化現象の発生状況にも現われており、近接した場所であっても地盤条件の違いにより液状化被害の程度に著しい差異がみられるなど、局所的な地盤条件の影響が大きな問題として取り上げられた。

この報告は、ロマプリータ地震における液状化災害の調査結果の概要を述べ、現地で採取した液状化した砂に関する若干の土質工学的な考察と地盤の地震応答解析結果について述べるものである。

#### (2) 液状化による被害の概要

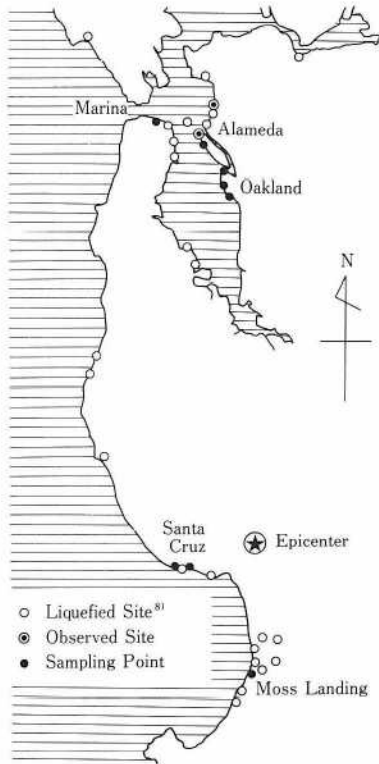
飽和した砂地盤における液状化現象により、建物、橋梁、河川堤防等をはじめさまざまな構造物に被害が発生した。液状化による顕著な被害は、サンタクルス市の中心部と海岸付近の一部およびモスランディング等で認められたほか、サンフランシスコ市あるいはオークランド (Oakland) 市などの湾岸地域でもみられた。図-1は、R. B. Seed らによる液状化被害の発生地点の分布とこの調査における噴砂の採取地点を示したものである。

震源に近いサンタクルス市では、市の中心部のサンロレンゾ川 (San Lorenzo River) 沿いの数ブロックの建物が全壊あるいは半壊の被害を受けた。また、ソクエル通り (Soquel Ave.) に通じる3径間連続 RC アーチ橋では橋梁の取付け部分の擁壁が液状化のためにはらみ出して変形し、擁壁の目地に 10 cm ほどの間隙があき、裏込めが約 30 cm ほど沈下している。このため盛土に大きな亀裂が入り、取付け部分の高欄には段差が生じているのが写真-1に示されている。この橋の橋台付近の地盤には大きな亀裂と噴砂があることから、これらの被害が液状化によるものであることが知られる。この橋梁のアーチの支点部分にクラックが認められたが、この支点の橋脚付近の地盤にも液状化の痕跡が認められた。これより下流の河口部に作られたサンロレンゾ川沿いの河川堤防および堤防上に作られた兼用道路は、液状化現象により大きな変形や沈下などの被害を受けている。写真-2は、この河川堤防の初害状況を示したものであるが、

\*1 東北大学工学部土木工学科教授

\*2 九州工業大学工学部設計生産工学科助教授

\*3 飛鳥建設技術開発部



図一 液状化地点の分布<sup>8)</sup>と試料採取地点



写真一 橋梁裏込めの沈下

堤頂には深く大きな、堤軸方向の亀裂が多数発生し、堤体が沈下して横方向に広がるなどしたため応急復旧工事を行っている様子が見られる。また、堤体のり尻の地盤には亀裂や噴砂の痕跡が連続しているのがわかり、これらの被害が液状化によることを裏付けている。さらに下流の河口部に位置するビーチフラット公園 (Beach Flat Park) では遊園地内に噴砂現象がみられ、ジェットコースターの基礎等が若干変位するなどの被害が発生した。また、付近の駐車場においてもアスファルト舗装に大きな亀裂が入り、噴砂が数多く認められた。

最も典型的な液状化被害は、ワトソンヴィル (Wat-



写真二 サンタクルスの河川堤防の被害



写真三 モスランディングの道路被害



写真四 モスランディングの道路の変形・沈下と噴砂

sonville) の南約 10 km の海岸に位置するモスランディングの道路盛土で生じていた、軟弱な粘土層上に作られた砂の盛土が液状化により破壊した状態が写真三に示されている。ここでは砂の盛土が最大で約 1 m ほど沈下し、横方向に広がる被害がでている。ここでもり尻に大量の噴砂が認められるとともに、リップラップの玉石が沈下して噴砂に埋もれているさまが写真四にみられる。この付近には火力発電所があるが、この構内でも液状化が発生し、変電施設に被害が生じて運転に影響が生じたことが報告されている。

サンフランシスコ市内では、マリーナ (Marina) 地区を始めミッションクリーク (Mission Creek) 地区、マーケット南 (South of Market) 地区、フートオブマー



写真-5 マリーナ地区における建物の被害



写真-6 マリーナ地区での噴砂の採取

ケット (Foot of Market) 地区などで液状化に起因する建物被害が発生した。これらの地域は、海浜部あるいは沼沢地を埋め立てた人工地盤であり、1906年のサンフランシスコ地震においても被害を受けた地域である。写真-5は、マリーナ地区における建物被害の一例を示したものであるが、Beach St. と Divisadero St. の角の4階建ての住宅の被害を示したものである。1階部分が破壊し倒壊寸前の状態にあり、応急の筋かいで補強しているのがみられるが、振動による被害に加えて地盤の液状化の影響も考えられる。写真-6は、この地区における被害家屋付近の噴砂を示したもので、Marina Blvd. と Cervantes Blvd. の角の2階建ての家屋の例である。後述する土質試験はこうにしてサンプリングした噴砂の試料について行っている。この地区では、水道管、ガス管、消火栓など地中埋設管にも被害が発生し、消火活動や住民の安全にかなりの影響を与えたが、これらの埋設管の被害の多くが液状化によることは破損箇所の噴砂などから確かめられている。

サンフランシスコ市の中心部のほとんどは、沖積層上に発達し、一部はフランシスカン層の硬い岩盤地域にあるが、沿岸に発達した市街地はベイマッド上に砂で盛土したものが多く、強震記録の得られているテレグラフヒル



写真-7 アラメダのワシントン公園の液状化



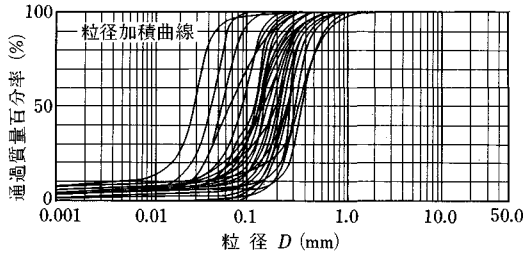
写真-8 石油タンク基礎での液状化

ル (Telegraph Hill) やリンコンヒル (Lincon Hill) は、フランシスカン層の砂岩層であり、ゴールデンゲート橋 (Golden Gate Bridge) の管理建屋は同じ層の頁岩層に基礎を置いている。マリーナ (Marina) からチャイナベイスン (China basin) に至る海岸線は、基本的にはベイマッドの上に砂丘砂を投入し、埋立てにより造成した地域が多い。砂丘の砂は一般に粒度が均等であるので、地下水位が高い地点で十分に締め固めずに盛土をすると液状化が発生する危険性がある。特にマリーナ地区は、1916年の国際博覧会 (Panama Pacific International Exposition) のために初めて浚渫により埋立てが行われたとされている<sup>9)</sup>。その他の地域ではダンプ工法が用いられている。しかし、実際には埋立てはかなり無計画にさまざまな材料を用いて行われ、砂丘砂のほかに碎石や岩屑、レンガや建設廃材、まれには火災後の廃棄物まで投入されたという。

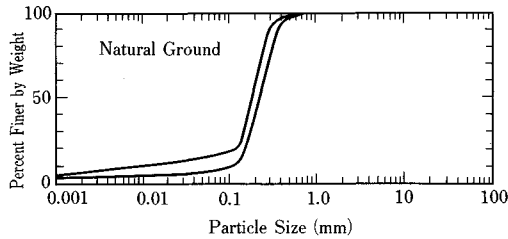
対岸のオークランド市においてもオークランド空港、アラメダ (Alameda) 地区、アメリカ海軍航空基地、コンテナ埠頭さらにはリッチモンド (Richmond) にかけて液状化による被害が発生している。また、オークランド空港では滑走路をはじめ敷地内にかなり大規模な液状化による噴砂が観察された。空港に隣接するリッガブルレイスゴルフコース (Lew Galbraith Golf Course) にも広範囲に噴砂の痕跡が認められた。写真-7はアラメダのワシントン公園 (Washington Park, Alameda) の

表一 噴砂の土質試験結果

Place	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	$D_{50}$ (mm)	$U_c$	$G_s$	$D_r(\%)$	$R_t$
Alameda	2.9	91.8	5.0	0.024	2.8	2.68	92	0.12
Oakland Airport	91.9	4.7	2.0	0.22	2.7	2.70		
Oakland Golf Course	81.3	11.3	7.0	0.2	13.5	2.69		
Oakland Washington Park	94.5	4.5	1.0	0.16	1.9	2.68	56.1	0.105
Moss Landing	98.9	1.1	0.0	0.3	1.9	2.76	60.0	0.145
Santa Cruz Beach Park	97.2	2.8	0.0	0.2	1.7	2.69	51.0	0.13
Santa Cruz Twin Lake Park	98.9	0.8	0.0	0.38	2.0	2.73		
Marina Beach	90.4	5.6	4.0	0.38	1.7	2.69		



図一 液状化した砂の粒径加積曲線



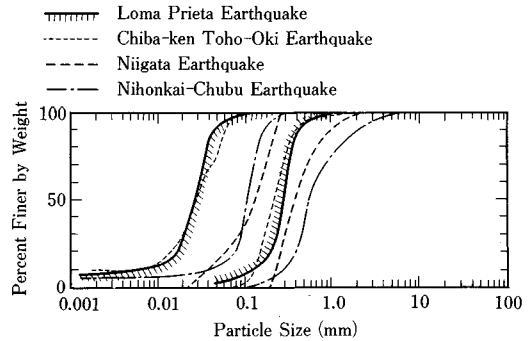
図一 地山の砂の粒度曲線

噴砂の状況を示したものである。この噴砂はほとんどシルトであり、後に述べるように数少ないシルトの液状化例となったところである。

これらのいずれの地点においても、軟弱な粘土層の上に緩い砂地盤を構築した場合に大きな被害を受けている。このことはわが国においては過去の大地震に際してすでにいくたびも経験した事実であり、わが国の液状化被害との類似性およびその差異を明確に知ることが非常に重要なことである。

### (3) 噴砂の土質試験結果

現地にて採取した噴砂の土質試験結果の一例を表一に示した。液状化地点は海岸埋立地が多く、比重および粒度は同じ地域であればほぼ同程度の値を示す。噴砂の粒度についてみれば、細粒分含有率  $FC$  は 4.2~97.2% と広範囲に分布しているのに対し、粘土分含有率  $PC$  は 0~7% でどの試料についても少なく、均等係数  $U_c$  が 1.7~13.5 と小さいのが特徴的である。アラメダで採取した試料はシルトに分類されるが、このような細粒分



図一 他の地震における噴砂との比較

のみの噴砂は比較的まれであるが、千葉県東方沖地震に際して東京湾の埋立地において認められたことがある。

図一には、得られた噴砂のすべての粒度曲線を示した。噴砂の全体的な粒度の範囲は、液状化の可能性の高い粒度範囲にあり、従来からの知見によく合致している。図一には、マリナー地区 (Marina District) およびサウスオブマーケット地区 (South of Market) で採取した地山の土の粒度曲線を示した。地山の粒度曲線は、アラメダ (Alameda) 以外の噴砂の粒度曲線と類似しており、特にマリナー地区の噴砂の粒度とは良く一致している。このことは、埋立て地盤の砂の特性を噴砂の試験結果から類推することの根拠になるものと思われる。

図一には、ロマプリータ地震の噴砂の範囲を 1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震<sup>22)</sup>および 1987 年千葉県東方沖地震<sup>23)</sup>のものとともに示した。新潟地震および日本海中部地震と比較すると、ロマプリータ地震の噴砂は、全試料の粒度曲線についてみれば細粒側に片寄っているが、アラメダにおけるシルトの噴砂の例を除けば、ほとんどがこの両者の地震に包括されるようである。千葉県東方沖地震の粒度範囲は、さらに細粒側に片寄るが、アラメダにおける埋立地の噴砂を入れた粒度範囲は、これにほぼ一致している。千葉県東方沖地震では、東京湾埋立地において多くの噴砂が確認されたが、その粒度は細粒分が多い割に粘土分含有率が少ないものが多く、また、このような粒度の噴砂は液状化強度が低いこ

- Loma Prieta Earthquake
- Chiba-ken Toho-Oki Earthquake
- △ Tokachi-Oki Earthquake
- Nihonkai-Chubu Earthquake
- ▲ Yasuda
- Yanagisawa

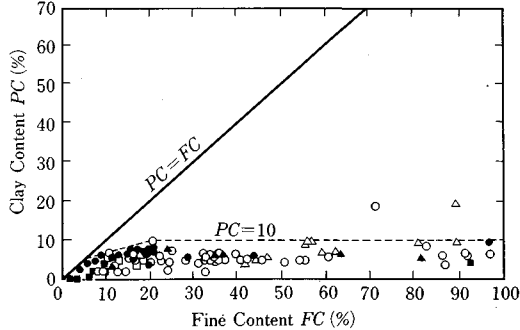


図-5 液状化した砂の細粒分含有率

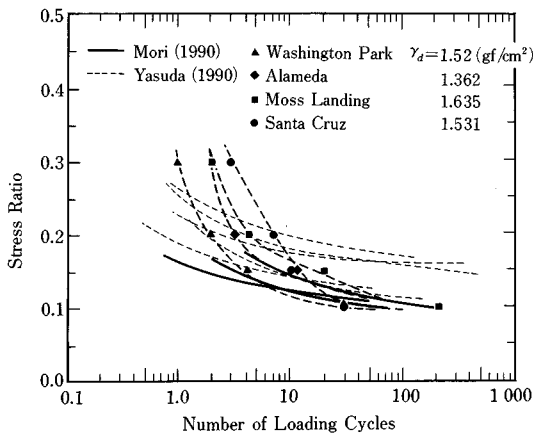


図-6 再構成した噴砂の液状化強度曲線

とが報告されている<sup>24)</sup>。ロマプリータ地震でも、埋立地で多く液状化が発生しており、その粒度が類似しているという点が興味深い。

噴砂の細粒分含有率  $FC$  と粘土分含有率  $PC$  の関係を示したものが図-5である。この図には1987年千葉県東方沖地震<sup>19)</sup>、1968年十勝沖地震および1983年日本海中部地震<sup>22)</sup>のそれぞれの噴砂のものも同時に示した。細粒分含有率は広く分布しているが、どれも粘土分含有率は少なく図中の点線の範囲にほぼ入る。ここで、細粒分含有率の多いものは、ロマプリータ、千葉県東方沖地震および十勝沖地震によるものである。十勝沖地震による噴砂も報告によればサンドポンプにより海岸を埋め立てたものである。このように、噴砂の粒度が細粒分含有率が多い割に粘土分含有率が少ないのは、海岸埋立の特徴といえる。また、このように細粒分含有率が多い場合でも、また、粘土分含有率が少ない低塑性のシルトでも液状化を起こすことが、この地震においても確かめられた。図-6は、噴砂を再構成した供試体の液状化強度を示したものである。この中で破線の値は、等方圧密状

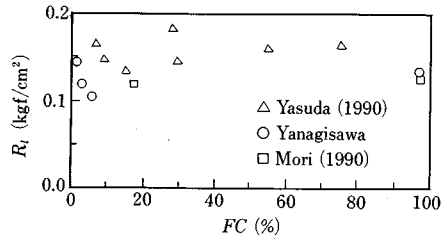


図-7 再構成した噴砂の液状化強度と細粒分含有率との関係

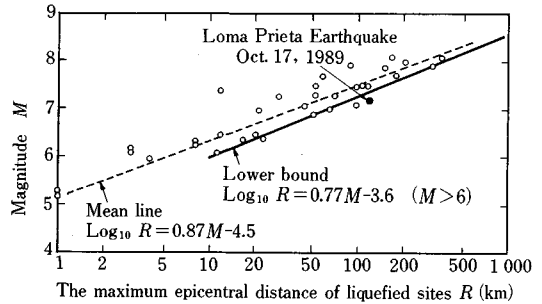


図-8 最大震央距離とマグニチュードとの関係

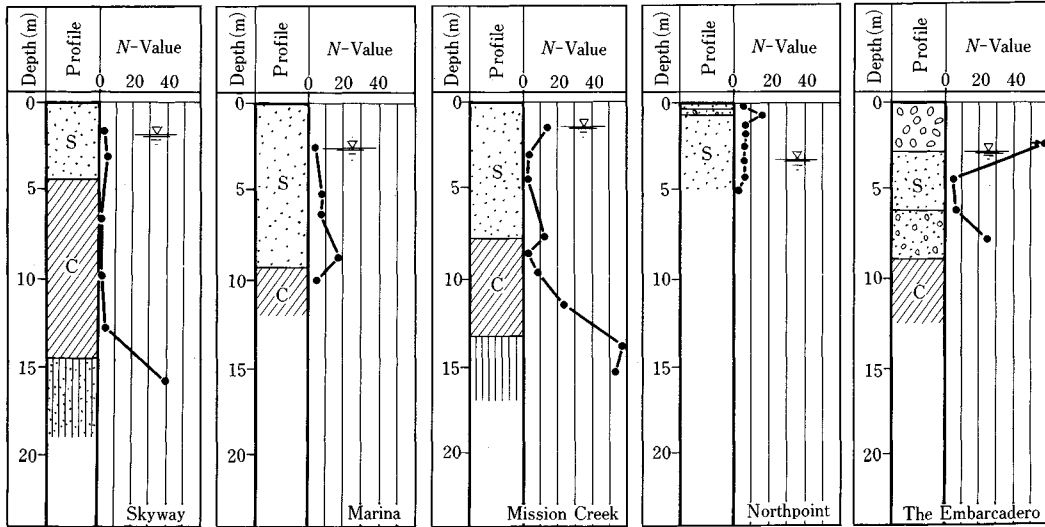
態での単純せん断によるものであり、他の試験は通常の動的三軸試験の値である。試験を実施した機関により、砂の詰め方、密度、試験方法が異なるため個々の値にはやや差があるが、全体的には標準砂と同じかやや高めの値を示している。

図-7には、繰返し数20回における液状化強度  $R_i$  と細粒分含有率との関係が示されている。ただし、白丸の値は非排水単純せん断試験を等方圧状態で行ったものであり、他の値は三軸非排水せん断によるものである。一般に、砂の液状化強度  $R_i$  は、 $FC$  の増加とともに増大するとされているが、この地震の噴砂では  $FC$  の増加による  $R_i$  の変化はあまり明瞭には認められなかった。

#### (4) 砂地盤の液状化解析

##### a) 簡易判定法による解析

このたびの地震の地動加速度は、従来の地震と異なり距離が離れた地点でもかなり大きな加速度が記録され、距離減衰が従来に比べると小さいことが指摘されている。前節で述べた液状化地点のうちで最大震央距離を、従来のマグニチュード ( $M$ ) と震央距離 ( $R$ ) の関係にプロットしてみると、図-8のようになる。この点は従来の液状化の下限値からはずれ、マグニチュードの割には液状化の発生した範囲が広いことが知られる。図-9には、液状化が確認された地点近傍の既存の資料によるボーリング柱状図を示した。Skywayは、80号線の下で4th St. と5th St. との間のHarrison St. とBryant St. のブロックである。Marinaは、Marina Blvd. とPierce St. の交差点であり、Mission CreekはMission St. と18th St. の角である。Northpointは、Northpoint St. とMason St. の交差点、また、The Embar



図—9 代表的な液状化地点の土質柱状図 (S : Sand, C : Clay)

表—2 簡易判定法による液状化の可能性

Embarcadero			Marina			Mission			Northpoint			Skyway		
$\alpha_{max}=130 \text{ gal}$			$\alpha_{max}=145 \text{ gal}$			$\alpha_{max}=120 \text{ gal}$			$\alpha_{max}=140 \text{ gal}$			$\alpha_{max}=180 \text{ gal}$		
Depth	N	$F_l$	Depth	N	$F_l$	Depth	N	$F_l$	Depth	N	$F_l$	Depth	N	$F_l$
4.5	5	0.98	2.5	3	0.99	1.5	14	2.12	3.2	6	1.17	1.5	4	0.99
6.2	7	0.93	5.2	9	0.91	3.0	3	0.91	4.2	6	1.01	3.0	5	0.71
7.8	25	1.22	6.4	8	0.81	4.4	3	0.78	5.0	3	0.79			
			8.8	19	0.93	7.5	12	0.94						

cadero は Embarcadero St. と Folsom St. の交差点に位置している。すでに述べたように、地盤の構成は岩盤の上に砂礫層があり、さらにベイマッドそして砂質の盛土あるいは砂礫層が上位に載ることが多い。これら5地点では液状化による被害が報告されているので、道路橋示方書による簡易液状化判定を行ってみた。ただし、計算に用いた砂の単位体積重量は  $1.9 \text{ tf/m}^3$ 、礫のそれは  $2.0 \text{ tf/m}^3$ 、粘土については  $1.8 \text{ tf/m}^3$  である。なお、砂の平均粒径  $D_{50}$  はマリーナ地区の値をとり  $0.16 \text{ mm}$  と仮定した。柱状図にある砂層の大部分で  $F_l$  が1より小さくなるような地表面の最大加速度の概略値を計算で求めてみた。この結果によれば、地表面の最大加速度は表—2に示すように各地点で異なるが、およそ  $120 \text{ gal}$  から  $180 \text{ gal}$  で液状化が発生し、構造物に影響を及ぼす可能性があることを示している。この値は、トレジャー島 (Treasure Island) の  $0.16 \text{ g}$  や エマリーヴィル (Emeryville) の  $0.26 \text{ g}$  などの実測値からみて、不合理な値ではない。

b) 重複反射理論による一次元応答解析

現在、地盤調査が被害箇所のいくつかの地点で行われつつあるが、結果が公表されていないので、地盤条件や速度構造あるいは動的物性についてのパラメーターの決

表—3 仮定した地盤構造

No.	Soil Type	Depth(m)	N	$\gamma$	$V_s$	$h$
1	Artificial Fill	0	3	1.9	100	0.05
2	Fine to Coarse Sand	1	5	1.9	120	0.05
3	Artificial Fill	3	8	1.9	135	0.05
4	Fine Silty Sand	8	20	1.9	190	0.05
5	Bay Mud and Clay Medium Stiff~Stiff	10	7	1.7	170	0.05
6	Apparent Base Layer Stiff Clay	33	33	1.8	350	0.02

定が困難であった。このため、解析に際してはきわめて概略的な推定値を採用することとし、また地震波についても離散化された公式の波形記録ではなく、強震記録波形をデジタイザーで読み取ったものを使用して、予備的な地震応答解析を試みた。解析の対象とした地点は、液状化被害が著しかったマリーナ地区 (Marina District) である。この地区の地盤構造は複雑で深部が不明であるが、海岸線の変遷を考えると埋没盆地状地形であることが想像される。基盤面が盆地状の不整形性を有すると、表層地盤の応答は水平成層地盤のそれとかなり異なることはよく知られているが、ここでは大略の傾向をみるために一次元重複反射理論により解析を行ってみた。

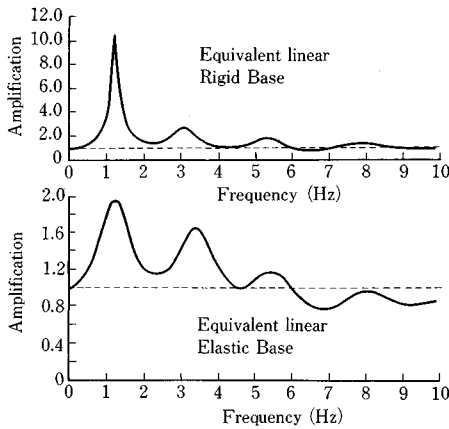


図-10 マリーナ地区の理論応答曲線

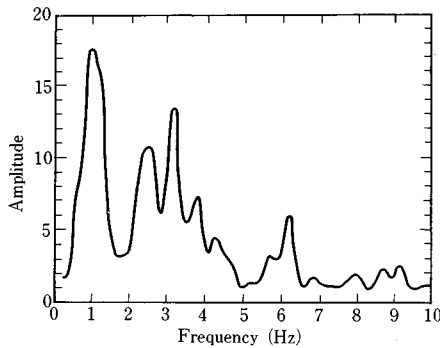


図-11 余震観測から得られたマリーナ地区のフーリエスペクトル

マリーナ地区については、マリーナ通り (Marina Blvd.) に沿って東西方向の断面についてボーリング結果が文献4)に報告されている。マリーナ通りとディヴィサデロ通り (Divisadero St.) の交差点付近は、今回最も液状化による噴砂や各種被害が多かった範囲のほぼ中央に位置するので、このボーリング柱状図を参考にして表-3に示すような地盤構造を仮定した。地盤定数は、土質種別と標準貫入試験結果をもとにして推定により定めた。特に重要となるせん断波速度  $V_s$  については、 $N$  値と  $V_s$  との回帰式；

$$V_s = 100 N^{1/3} \text{ (粘土)} \quad V_s = 80 N^{1/3} \text{ (砂)}$$

より計算される値の約8割を目安とした。なお、減衰定数は33m以下を2%、表層部は一律5%とした。なお、解析に際しては、33m以下を半無限の剛基盤と仮定した場合と弾性基盤と仮定した場合の2種類について、それぞれ線形応答と等価線形応答を求めてみた。

図-10に等価線形解析モデルによる伝達関数を、また、図-11に余震観測によるリンコンヒル (Rincon Hill) に対するマリーナ地区のスペクトルを示す。両者

表-4 地表面の最大加速度

Case	Input Accel. Record	Input $A_{max}$	Response $A_{max}$	Amplif. Factor
Linear Elast. Rigid Base	Telegraph Hill NS	58.8	178.3	3.0
	Telegraph Hill EW	78.4	107.0	1.4
	Rincon Hill NS	78.4	171.2	2.2
	Rincon Hill EW	88.2	121.2	1.4
	Average	76.0	144.4	2.0
Equiv. Lin. Rigid Base	Telegraph Hill NS	58.8	181.2	3.1
	Telegraph Hill EW	78.4	119.7	1.5
	Rincon Hill NS	78.4	146.8	1.9
	Rincon Hill EW	88.2	121.6	1.4
	Average	76.0	142.3	2.0
Linear Elast. Elastic Base	Telegraph Hill NS	58.8	82.0	1.4
	Telegraph Hill EW	78.4	87.6	1.1
	Rincon Hill NS	78.4	97.3	1.2
	Rincon Hill EW	88.2	104.7	1.2
	Average	76.0	92.9	1.2
Equiv. Lin. Elastic Base	Telegraph Hill NS	58.8	107.8	1.8
	Telegraph Hill EW	78.4	94.9	1.2
	Rincon Hill NS	78.4	91.2	1.2
	Rincon Hill EW	88.2	82.2	0.9
	Average	76.0	94.0	1.3

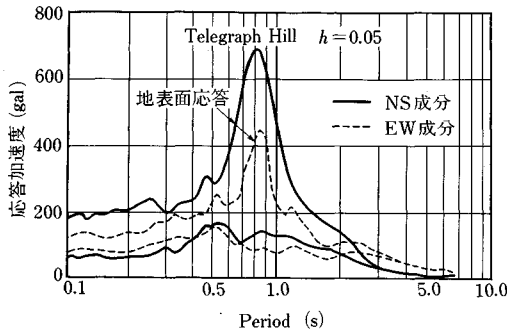
を比較すると、地盤の一次振動数は両者とも1 Hz前後であり、また、3 Hz前後の卓越振動数も両者にみられ、関連づけることができる。しかし、2~2.5 Hzにみられる観測結果の卓越振動数は、この地盤モデルで考えたとき一次元重複反射理論では説明が難しい。これは、盆地状の二次元的な振動特性を考慮する必要性を示唆しているものと考えられる。また、線形解析と等価線形解析の結果を比較すると、表層10mの剛性低下は2~5割程度であり、GL-6m~8mでその割合は最も大きい。その結果として、線形では1.25 Hzであった一次固有振動数が、等価線形では地震波の種類によっても異なるが、おおむね1.19 Hzに変化している。

表-4に各モデル各ケースの応答結果である地表面最大加速度を示す。線形解析では、剛基盤を仮定した場合で170~178 gal平均で144 gal、弾性基盤を仮定した場合で82~105 gal平均で93 galの応答加速度が得られた。また、砂層の剛性低下の影響を調べるために行った等価線形解析の結果では、剛基盤を仮定した場合で120~181 gal平均で142 gal、弾性基盤を仮定した場合で82~108 gal平均で94 galの応答加速度が得られた。剛性低下の影響は、おおむね最大加速度が大きくなる傾向に働くようであるが、その影響は大きくはない。これらのことを併せ考えると、通常行われている弾性基盤を用いた一次元応答解析では、応答値を過小に評価している可能性があることが考えられる。基盤の位置を深く仮定すれば最大加速度が大きくなり、数値を単に合わせることは可能であるが、他の地点の応答解析例でも同様に



表—5 有効応力解析に用いた地盤構造

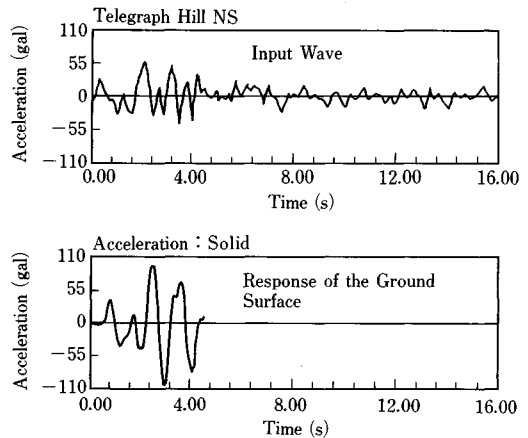
Depth (m)	Soil Type	Bulk Mod. (kgf/cm)	Shear Modulus	$q/p$ at Failure	$q/p$ at PTL	Unit Wght.	Dilatancy Para.			Perm. (cm/s)	Elem.
							D1	D2	D3		
2.5	Sand	20 000	350	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	10	1
7.0	Sand	20 000	350	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	10	3
9.0	Sand	20 000	400	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	10	1
24.0	Sand	25 000	500	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	5	5
26.0	Sand	29 000	800	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	10	1
30.0	Clay	30 000	1 000	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	0.1	2
36.0	Sand	30 000	1 000	1.3	1.1	1.8	30	20	0.050	10	3



図—12 地表面での応答スペクトル

応答値がやや小さいという結果が得られていることは<sup>8)</sup>注目すべきである。表—4の中でテレグラフヒル (Telegraph Hill) およびリンコンヒルの両者で、EW成分に比べてNS成分を入力したときの方が増幅倍率が大きいことが知られるが、これも注目すべき傾向である。

図—12は、テレグラフヒル波を入力したときの線形解析の場合の地表面の応答加速度の加速度応答スペクトルを示したものであるが、地盤の一次固有振動数に相当する0.8秒付近に著しいピークがみられ、NS方向が大きい傾向が確かめられる。リンコンヒルの場合には、二次固有周期に相当する0.3秒付近にもピークが認められた。実際には、表層の飽和砂層では地震時のせん断ひずみと間隙水圧の上昇により相当の剛性低下が見込まれること、また、ベイマッドも沖積の海成粘性土であるので地震時のせん断ひずみによる剛性低下が見込まれることなどから、最大加速度が大きい剛基盤の場合の応答値の方が、弾性基盤の場合より現象をよりよく表わしているものと考えられる。したがって、地表面では110~180 gal平均で140~150 gal程度の加速度で揺れたものと考えられる。この値は前節で液状化の簡易判定に用いた145 galとほぼ一致するものである。深さ8mでのせん断応力 $\tau$ は0.135~0.248 kgf/cm<sup>2</sup>であり、有効上載圧 $\sigma_v$ が0.92 kgf/cm<sup>2</sup>であるので、除して得られるせん断応力比は0.146~0.270である。地震波入力におけるせん断応力時刻歴の不規則性を等価な規則波として換算するための有効係数を0.7と考えると、 $L$ は0.102~



図—13 入力波形と地表面の応答加速度

0.189となる。これまで得られている細粒分を含む噴砂の液状化実験値によれば、液状化強度 $R_{20}$ は $K_0$ 状態に換算するとおよそ0.11~0.13程度であるので、 $F_t=0.6\sim 1.2$ 程度となる。この結果は、実際の液状化の状況とよく対応しているものと考えられる。

### c) 有効応力法による一次元応答解析

次に、一次元有限要素法による有効応力解析について述べる。ここでいう有効応力法とは、Zienkiewiczの方法に基づいて土粒子と水の2相系を考え、直接積分法によって土粒子と水それぞれの応答を求め、土の非線形特性を有効応力で評価して、液状化現象を時間領域で解析しようとするものである。マリーナ地区の土質柱状図を参考にして表—5のような土層断面を仮定した。この有効応力解析は、処女載荷については等方硬化型の降伏関数を仮定し、その内側に繰返し載荷についての移動硬化型の降伏関数を考える、2降伏曲面モデルによっている。構成則については、文献19)に詳述しているので、ここでは省略する。入力波はテレグラフヒルで観測された強震記録を露頭岩盤の記録と仮定し、最大加速度を1/2にして基盤入力波とした。

図—13は、入力波形および計算によって求めた地表面での加速度応答を示したものである。4.5秒後には表面近くの砂層が液状化して破壊したため、応答計算は継続できず停止した。この応答波形において地表面での最

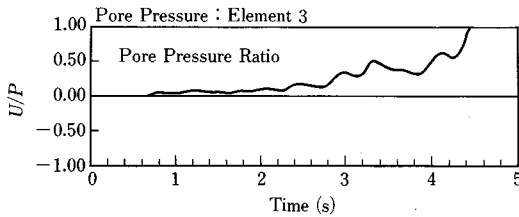


図-14 要素での間隙水圧の上昇

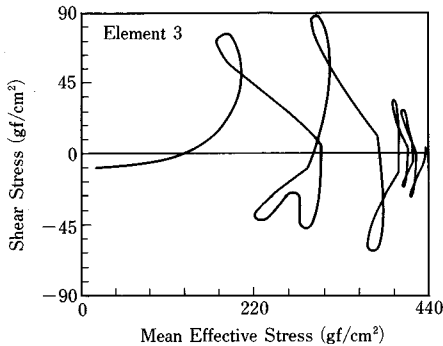


図-15 要素の有効応力経路

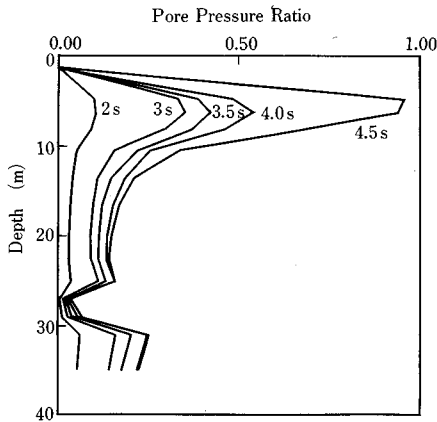


図-16 地盤内の間隙水圧分布の変化

大加速度は 104 gal であり、簡易判別法による地表面の最大加速度の 145 gal よりかなり小さいが、SHAKE による解析で得られた値の下限値に近い値を与えている。

図-14 は、地表面下 4~5.5 m の要素における間隙圧比の時刻歴を示したものであるが、間隙水圧比は 4.5 秒付近で 1 となり、有効応力が 0 となって液状化が発生していることになる。有効応力経路でみると、図-15 に示すように、地震の応答につれて次第に有効応力が減少し、有効応力経路が急速に原点に向かって進んでゆき、原点付近で計算が停止している様子が明瞭にみられる。有効応力経路において変相線を越えたあたりのヒステリシスループがあまりよく表現されていないようであるが、これは構成則のなかのダイレイタンシー特性を規定するパ

ラメーターの仮定にやや問題があるためと思われる。計算で求められた最大のせん断ひずみは、 $5 \times 10^{-3}$  程度であり、液状化したときのひずみとしては少し小さい。図-16 は、地下水面下の過剰間隙水圧分布の時間変化を示したものである。4.5 秒後には、上部の砂層では液状化に近い状態に達している様子がみられる。このように、非常におおまかな仮定で有効応力解析を行ったが、ある程度マリーナ地区の液状化現象を再現することができた。しかし、地表面加速度の応答値が比較的小さいことは、重複反射理論による解析と同様である。これらの差異は、解析方法自体の誤差と与えている物性の誤差の両方が関連していると考えられる。詳細な液状化解析を行うためには、正確な地盤条件と、構成則を修正できるような動的物性や土質試験結果が必要であり、このためにはより精度の高い地盤調査が行われることが望まれる。

(5) まとめ

ロマプリータ地震において、液状化現象に関連していくつかの新しい重要な問題点が指摘された。1 つは、この地震による距離減衰特性が通常予測されるものとかかなり異なり、遠距離での加速度が大きい地点が多いことである。この傾向は、従来の応答解析手法では予測できない程度の差であり、局所的な地盤条件の違いによる増幅度の差異や表面波が影響しているものとして理解されている。本報告の重複反射理論による解析および非線形応答解析でも、応答値はやや小さめの値を得ている。したがって、従来の解析方法の一部、たとえば土の減衰特性などの見直しが必要とされる可能性もある。サンフランシスコ湾岸地域北部では、軟弱地盤による地震の増幅がかなり大きく、液状化による被害も発生したが、液状化地点での強震記録と付近の岩盤の露頭での記録が同時に得られたことは特筆に値することである。入力地震波と液状化した地盤の応答波形が同時に得られているので、地盤の非線形応答解析あるいは液状化解析プログラムの検証が可能になるからである。また、採取した噴砂の中に従来の報告では例の少ないシルトのみの試料があることが判明したが、このような粒度の噴砂はわが国の千葉県東方沖地震でも東京湾の埋立地で認められている。

このように、ロマプリータ地震の液状化被害は、わが国のウォーターフロント開発にとっては貴重な教訓であり、この地震動の特性を解明することができれば、液状化に対する合理的で、かつ、より良い対策方法が考案できるものと思われる。

本研究の遂行にあたり、さまざまなご助力を戴いた京都大学防災研究所 亀田弘行教授に心からの謝意を表するとともに、現地調査に際して貴重な資料を提供して頂き、また、助言を戴いた J. Lysmer 教授および R.B. Seed 教授にも謝意を表する。

1.2 強震動特性について

杉戸真太 (Masata SUGITO)\*1  
 大町達夫 (Tatsuo OHMACHI)\*2

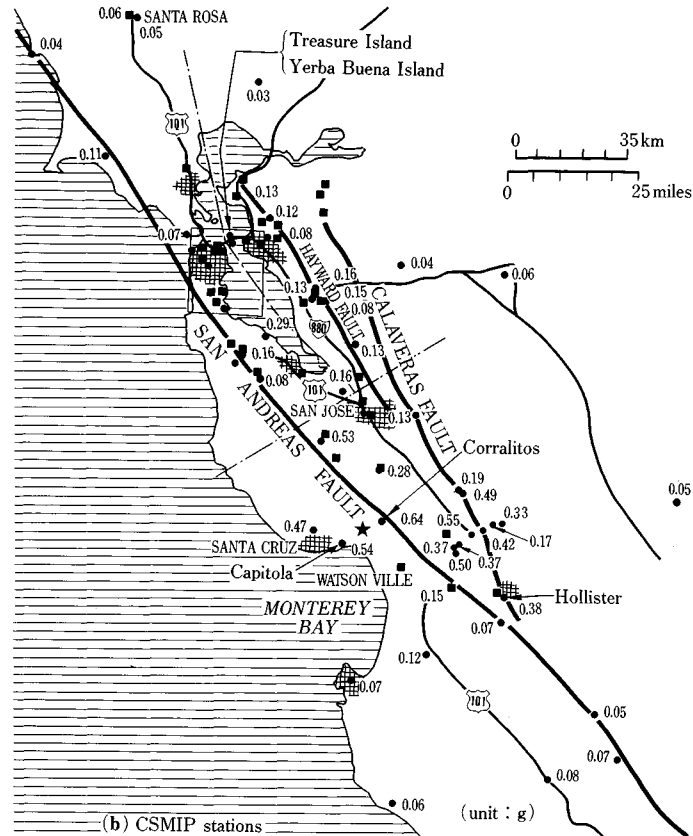
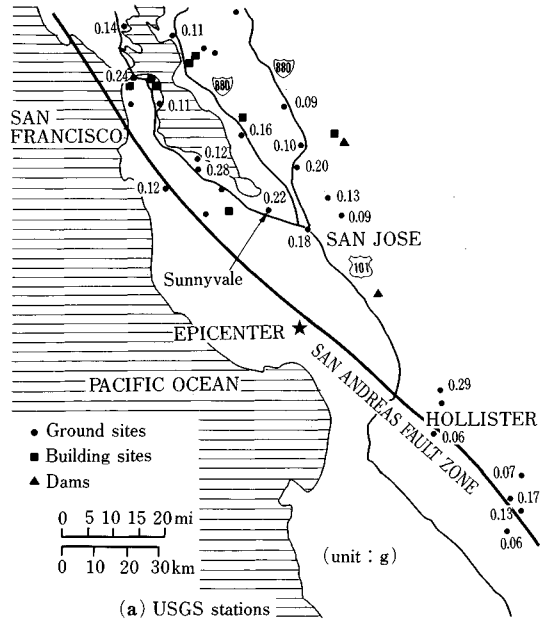
(1) 序

近年、地震が発生するたびに強震記録が蓄積されてきている。これらは、いまだ解明されていない部分が多い短周期地震動の工学的特性を、少しずつではあるがわれわれに教えてくれる貴重なデータである。今回の地震で得られた強震記録の特徴は以下の3点に要約される。

- ① 1つの地震で70地点以上の地盤上での記録が得られたこと。
- ② 震央域での大きな記録が得られたこと。
- ③ 局所的な地盤の影響を大きく受けた記録が多数得られたこと。

上記①は、短周期地震動の強度の距離減衰や地震動の主軸方向と、断層の広がりや走行との関係を検討するのに有効である。②は、断層近傍での強震記録がこれまでにあまり得られておらず、特に数秒以下の短周期の震源スペクトルを知るうえで貴重である。③は、定性的にはよく知られている地震動の局所的な地盤条件による影響の度合を、定量的に検討するために有効である。特に今回のデータでは、近傍の岩盤上での記録との比較を行うことにより、短周期地震動の堆積地盤での非線形増幅特性を検討することができるため、きわめて貴重な記録が得られたことになる。

本報告は、地震動の記録に含まれるさまざまな工学的情報のうちでも、今回の記録に特徴的な上記の3点に的を絞って議論するものである。Fig. 17に、記録の得られた強震観測地点の位置と地盤上での最大加速度（水平2成分のうち大きい方）の値を示した。これらは、アメリカ地質調査所（USGS：United States Geological Survey）の観測網における38地点<sup>34)</sup>、カリフォルニア州鉱山地質局（CDMG：California Department of Conservation, Division of Mines and Geology）の観測網における93地点<sup>35)</sup>を合わせた合計131地点である。なお、本報で解析した記録の得られた地点名も同図に記した。USGSの記録は震央距離で $\Delta=27\sim 115$  kmの範囲



図—17 強震観測地点と地盤最大加速度（水平2成分のうち大きい方）

\*1 京都大学工学部交通土木工学教室助手  
 \*2 東京工業大学総合理工学研究科教授

で得られているのに対し、CDMG の記録は  $\Delta$  = ごく近傍 ~ 175 km の範囲で得られており記録数も多い。これらの記録の中には、中・高層ビルでの多点同時記録が 14 地点含まれており、貴重な地震応答記録として今後詳細な解析がなされるものと期待される。

以下、(2) では、地震動の距離減衰特性、震動軸、一般的なスペクトル特性等について述べ、(3) では、今回の地震で特に注目された軟弱地盤での地震動の増幅特性について述べる。さらに(4) では、これらの検討結果をもとに、

強震動記録と関連する情報から得られた知見を示すとともに、強震動予測の分野での今後の検討すべき課題について著者らの意見をまとめる。

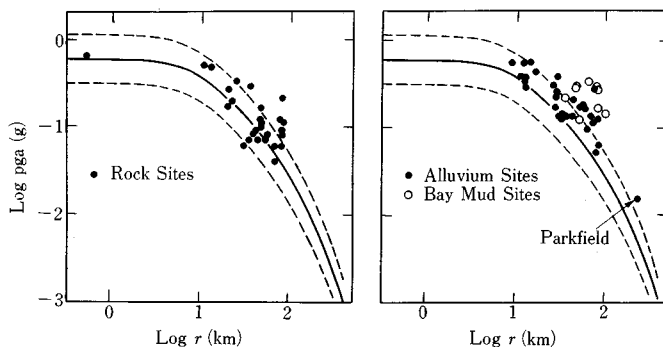
(2) 地震動の距離減衰とスペクトル特性

本節では、地震動強度の距離減衰特性、震動軸と、非正常性を含めたスペクトル特性について示す。

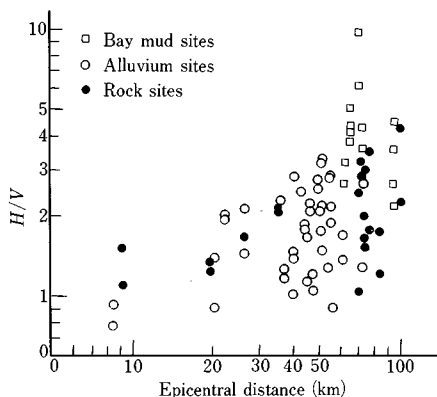
a) 地震動の距離減衰特性

地震動の距離減衰は、大まかにいえば波動が拡散することによる減衰と伝搬する媒質内での内部減衰による効果が加わったものと考えることができる。近年、地域によって後者の減衰特性が異なることが指摘されるようになってきており、この減衰特性とその地域の seismic activity との関連も議論され始めている<sup>39)</sup>。今回のように 1 つの地震で多数の記録が得られた場合に、同一地震による距離減衰特性を、従来のデータに基づく平均的な距離減衰式と比較することは興味深い。Fig. 18 は、地盤上で観測された最大加速度の水平成分のうち大きい方を岩盤上、沖積地盤上、Bay mud 上のものに分けて、断層の地表への投影までの最短距離との関係を示したものである<sup>37)</sup>。図中の実線は、Joyner and Boore<sup>38)</sup> によるアメリカの加速度記録に基づく距離減衰式である。堆積層による地震動の増幅、特に Bay mud を有する地盤での大きな増幅がはっきりしている。観測点における Bay mud の層厚は、数 m から厚いところで 20 m 程度となっている<sup>39)</sup>。また、Fig. 18(a) の結果では、この地域特有の減衰特性はみられず、平均的なものとなっている。

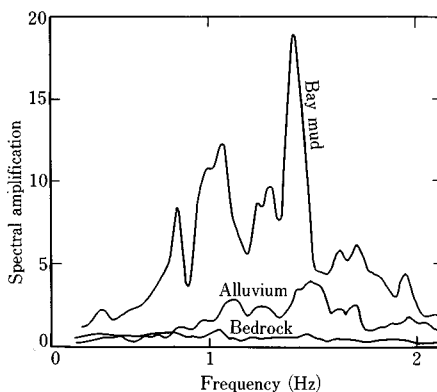
Fig. 19 は、上下成分に対する水平成分の最大加速度の比を震央距離に対して示したものである。図中●印は堅固な地盤、○印は沖積地盤、さらに□印は Bay mud を有する地盤を表わしている。一般に、距離とともに  $H/V$  の値は平均的にやや大きくなる傾向にある。 $H/V$  の変動は堅固な地盤と沖積地盤とで大きな差はないようにみられるが、Bay mud を有する地盤では水平動



図一八 最大加速度の距離減衰と Joyner and Boore の式<sup>38)</sup>との比較 (文献 37) より)



図一十九 上下動に対する水平地動の比と震央距離との関係



図一二十 ネバダ州での地下核実験の際に記録された増幅特性<sup>40)</sup>

のみが著しく増幅されていることがわかる。この Bay mud 地盤特有の水平成分の著しい増幅は、Nevada 州で行われた地下核実験の際に San Francisco 湾岸で計測された記録の比較にも現われている<sup>40)</sup>。それを、Fig. 20 に示す。同図はきわめて小さいひずみレベルでの地盤震動の特性を表わしていることに注意する必要があるが、

通常の沖積地盤と比べて Bay mud 地盤は明らかに大きな増幅特性を有していることがわかる。

b) 地震動の主軸特性<sup>41)</sup>

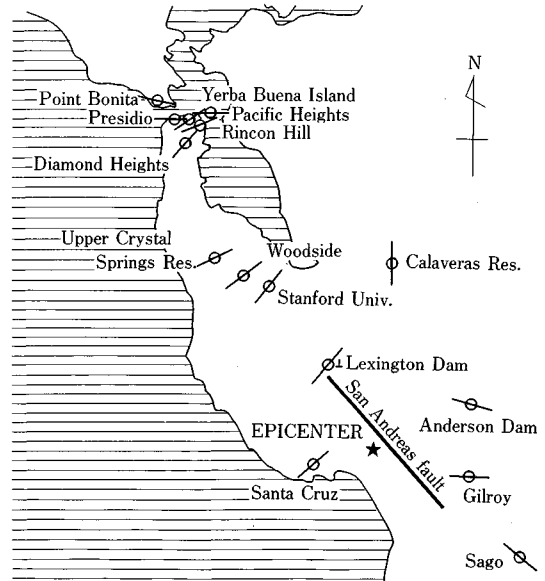
中山・後藤・江尻<sup>41)</sup>は、岩盤もしくはそれに近い堅固な地盤での 15 組の水平成分記録を用いて震動主軸の方向を算出している。これを、Fig. 21 に示した。これに加え、個々の記録のスペクトル特性の検討と、記録波形に絶対時刻が記されているデータに基づく地震波の伝播速度の算定を行っている。これらの解析から、断層から北方ではその主軸はほぼ断層直方向となっており、卓越振動数は 1 Hz 程度、この振動数成分の位相速度は約 3 km/s と報告している<sup>41)</sup>。

c) 地震動のスペクトル特性

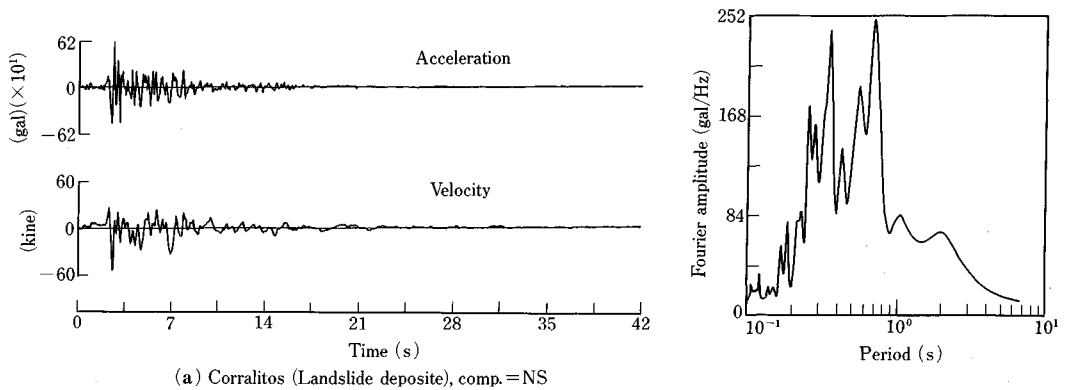
地盤震動のスペクトル特性や振動数ごとの非定常性をみることにより、局所的な地盤条件の影響や地震波の散乱現象、表面波の有無を知ることができる。ここでは、震源近傍と震源の北方および南方でのスペクトル特性、非定常特性についての概要を示す。

Fig. 22 に、震源近傍の 2 地点での地震動記録 (NS 成分) の一例を示した。これらは、加速度、速度波形と、加速度フーリエスペクトルより成る。Fig. 22 (a) は、断層を地表面に投影したところまでの距離がわずか数

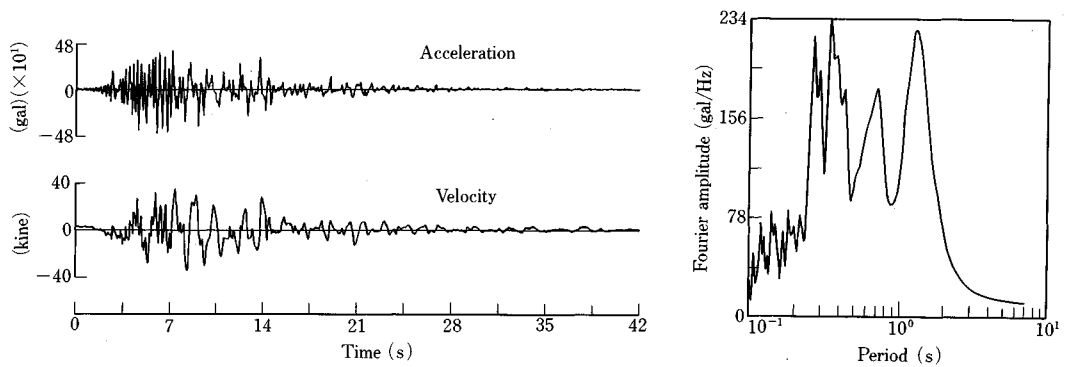
100 m 程度の位置にある Corralitos (Landslide deposit) での記録、Fig. 22(b) は、断層から約 15 km 南西



図—21 地盤震動の主軸特性<sup>41)</sup>



(a) Corralitos (Landslide deposit), comp. = NS



(b) Capitola (Alluvial deposit), comp. = NS

図—22 断層近傍での強震記録(CSMIP<sup>35)</sup>)

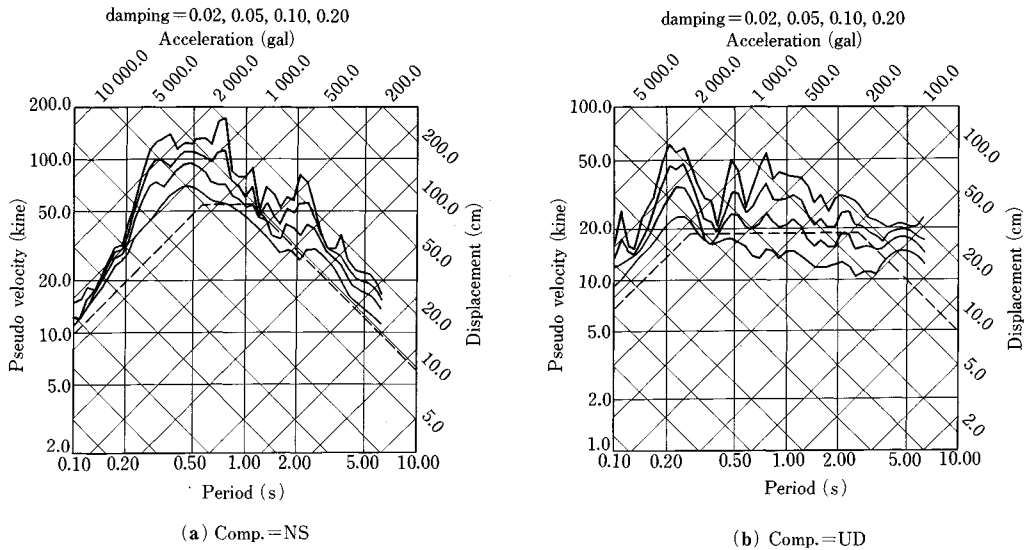


図-23 Corralitos 地点での記録から求めた応答スペクトル

の Capitola (alluvium site) での記録である。両者に共通して 0.75 秒と 0.3 秒前後の強いスペクトル特性があるのに加えて、(b) の Capitola では、約 1.3 秒の成分の強い増幅がみられる。両地点での上下動は、Corralitos で 0.43 g (g は重力加速度)、Capitola で 0.50 g であり、震源近傍での大きな上下動を示している。さて、Fig. 22(a) の時刻歴波形から、強震部の継続時間は 10 秒弱程度となっている。このことより、断層の主破壊時間はただだか 10 秒間程度とみられる。一方、地震後の調査により、地震断層近くで土中に半ば埋没していた石が跳んだことが報告されている<sup>42)</sup>。これによれば、跳躍した石が発見されたのは震央から北西に約 10 km 離れたスカイランドリッジ地点であり、震源に近いロマプリータ山付近では発見されなかった。また、この付近で 20~30 cm 移動した石について計算した地面の加速度は、2~3g (g は重力加速度) になるとも報告されている。跳躍した石や周辺地盤の特性などは記述されていないが、石の跳躍現象と地盤震動との関係を簡単に検討するため、ごく震源近傍の Corralitos における強震記録を使って、地震応答スペクトルを検討してみた。その結果を Fig. 23 に示す。これによれば、地震動の最大加速度は 0.43~0.62 g であるが、減衰定数 5% に対する応答加速度は、数分の 1 秒以下の短周期領域で、上下動、水平動とも 1g を上回り、2g に達する周期範囲もある。これらのことは、スカイランドリッジ地点での地震動が 1g 以下の加速度でも、石は 2~3g の加速度を得て土中から飛び出すことが十分に可能であることを示唆している<sup>43)</sup>。

次に震源の北方、San Andreas 断層の東側での記録

について示す。Fig. 24 に、震源の北東約 40 km の Sunnyvale (alluvium site)、Fig. 25 に、さらに北方 80~90 km の San Francisco 市 (岩盤) での加速度波形と非正常スペクトル<sup>44)</sup>を示す。Fig. 24 の非正常スペクトル ((b) は正規化スペクトル) をみると、0.3 Hz すなわち 3 秒前後の成分が時間軸で 13 秒あたりから大きな分散性を示していることがわかる。同図には、表面波の簡易分離法<sup>45)</sup>における試算的な分離パラメーター ( $f_{at}$ ,  $f_{au}$ ,  $t_a$ ) を示した。一方、Fig. 25 では、表面波特有の分散性や強い非正常性はみられない。このことは、後出の San Francisco 近傍の他の地点でも同様であり、大きな被害をもたらした San Francisco~Oakland 周辺での地盤震動の主要部は主に鉛直下方からの S 波の増幅や地盤の液状化によるものと推察される。

震源より南方での記録の例として、Fig. 26 に南東約 60 km の Hollister での加速度波形と非正常スペクトルを示した。この地点でも Fig. 24 の Sunnyvale と同様に

表-6 Loma Prieta 地震断層東側地域における地盤構造モデル<sup>46)</sup>

Thickness (km)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	S-Vel. (km/s)	P-Vel. (km/s)
0.50	2.00	1.93	3.34
0.50	2.00	2.44	4.23
2.00	2.00	2.89	5.01
2.00	2.50	3.25	5.63
2.00	2.50	3.40	5.89
2.00	2.50	3.60	6.24
4.00	2.50	3.61	6.26
5.00	2.50	3.64	6.30
7.00	2.50	3.86	6.69
	2.80	4.62	8.00

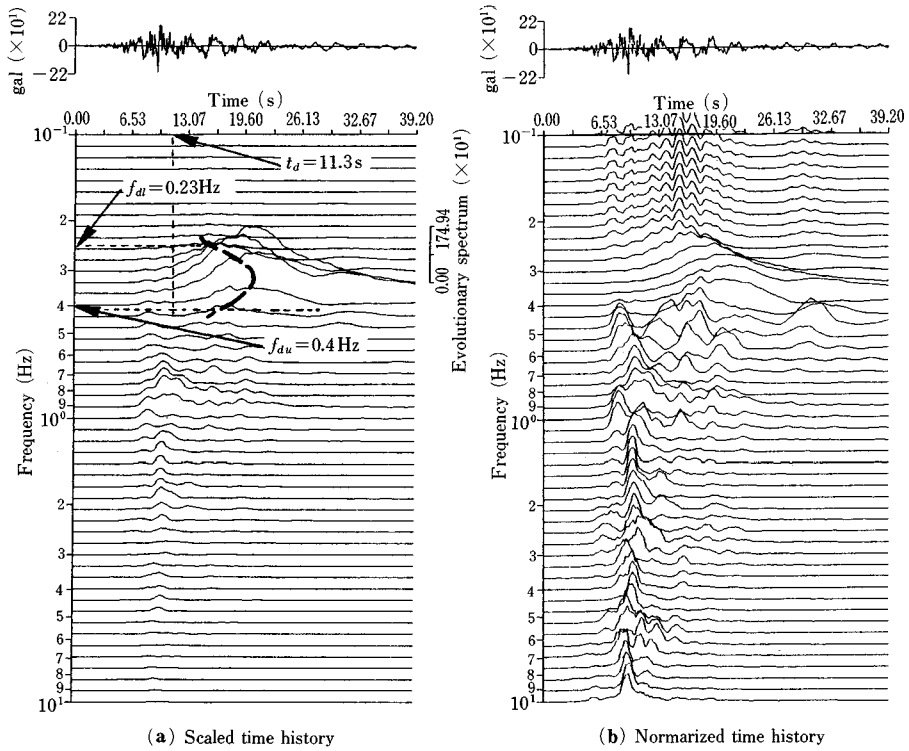


図-24 非定常スペクトル (Sunnyvale, Colton Ave., NS成分)

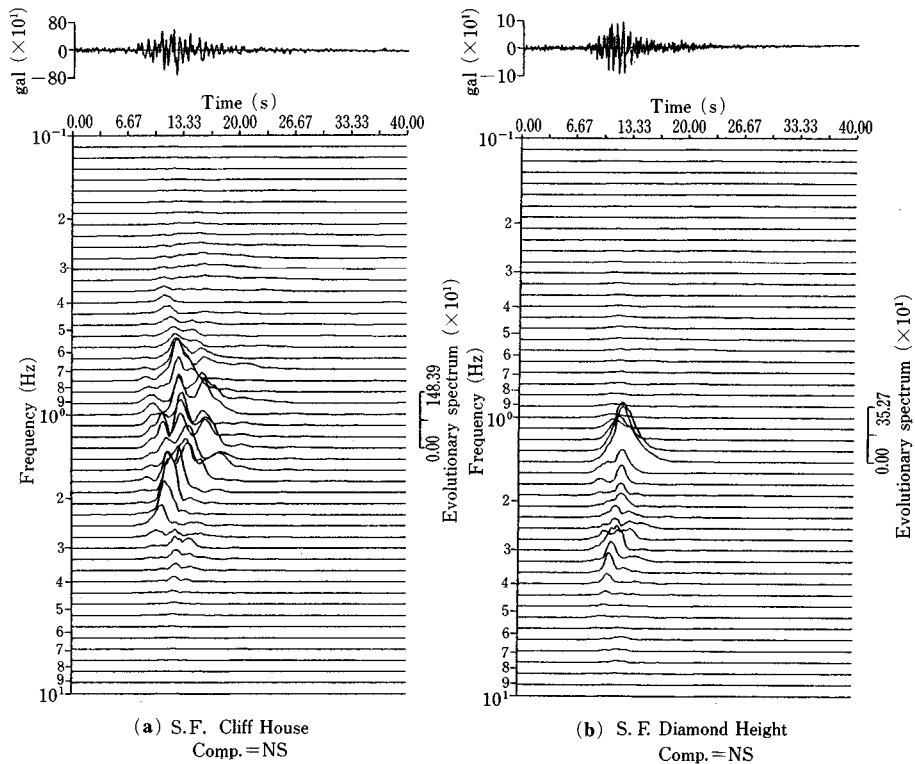
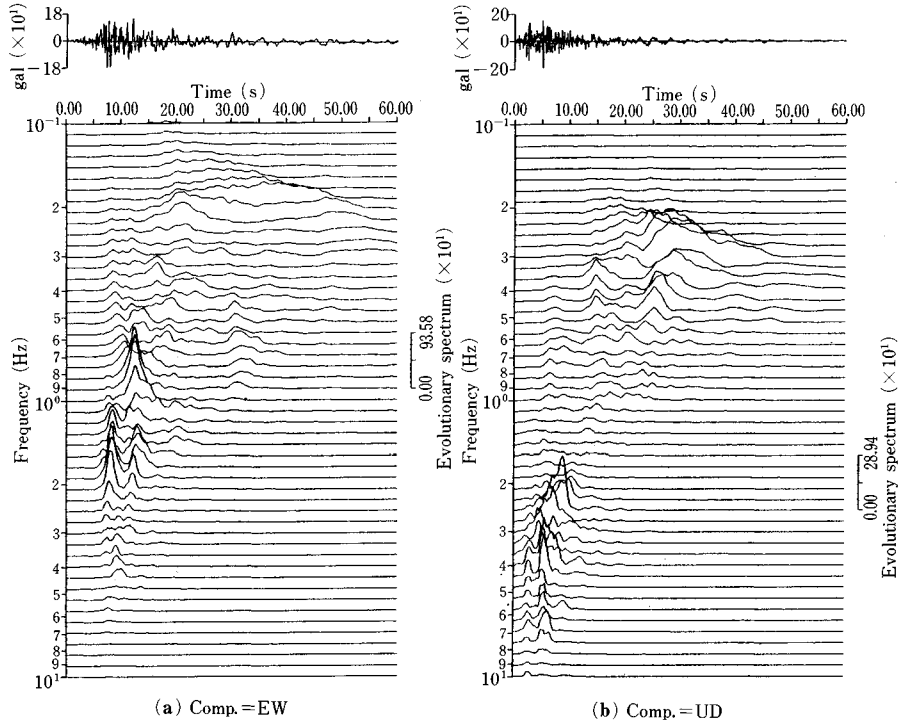
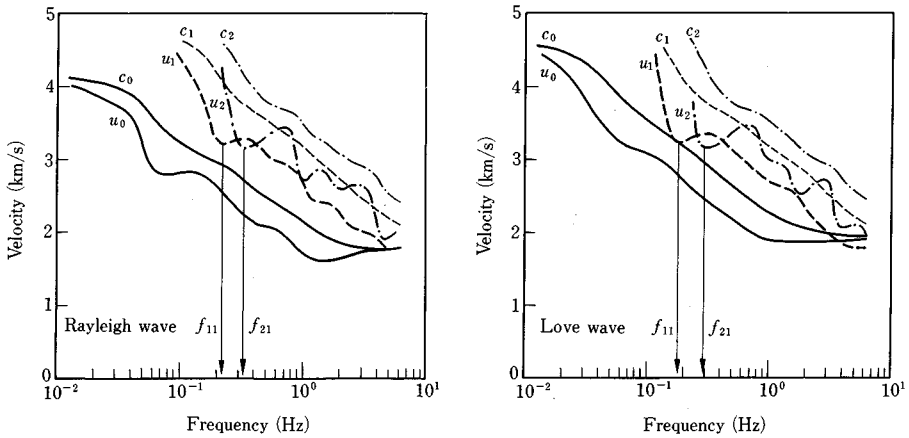


図-25 非定常スペクトル (サンフランシスコ市内の2地点)



図一26 非定常スペクトル (Hollister)



図一27 表面波の分散曲線

3秒前後の表面波とみられる成分が記録の後半で卓越していることがわかる。Table 6は、Klein<sup>6)</sup>によってまとめられた、今回の断層の東側での深層のP波の速度構造をもとにして、著者らが設定した地層モデルである。これから地表面下25kmの最深部を基盤として算出される、Rayleigh波とLove波の分散曲線をFig. 27に示した。Fig. 27において、 $c$ は位相速度を、 $u$ は群速度を表わし、添字の数字はモードを表わしている。Fig. 24, 26にみられた表面波の卓越する振動数は、

Fig. 27におけるRayleigh波、Love波の卓越振動数( $f_{11}$ ,  $f_{21}$ )に対応しているようにみられる。これらは、その振動数からみて地表面下数km以下の範囲で励起される表面波と考えられる。また、Fig. 26(b)にみられるように上下動の非定常スペクトルの対応する振動数の分散性をも考慮すれば、主としてRayleigh波が励起されているものと考えられるが、詳細については粒子軌跡と断層との方向性などについてさらに検討すべきことが残されている。なお、周期約3秒の表面波成分は、さら



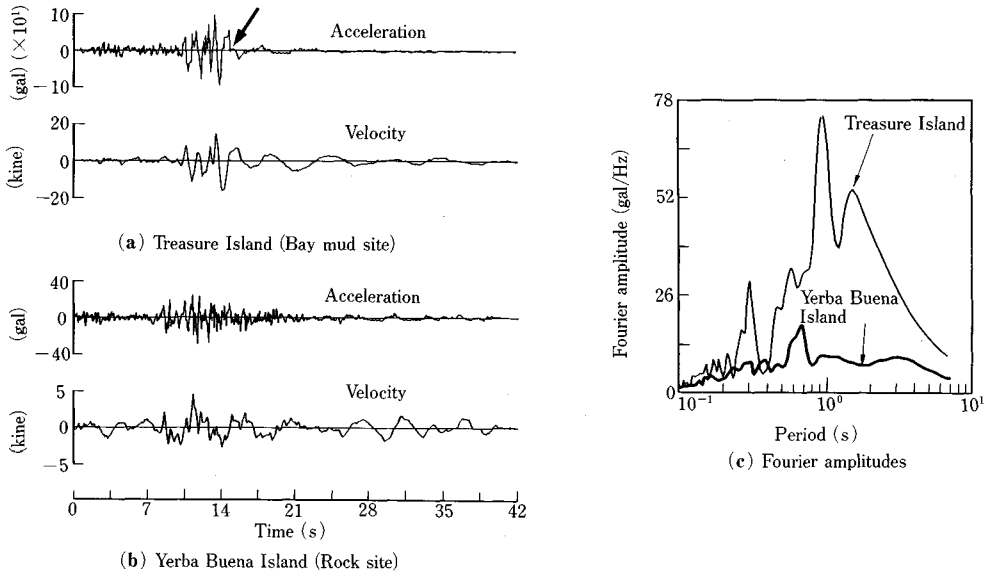


図-28 強震記録とフーリエスペクトルの比較 (Treasure IslandとYerba Buena Island)

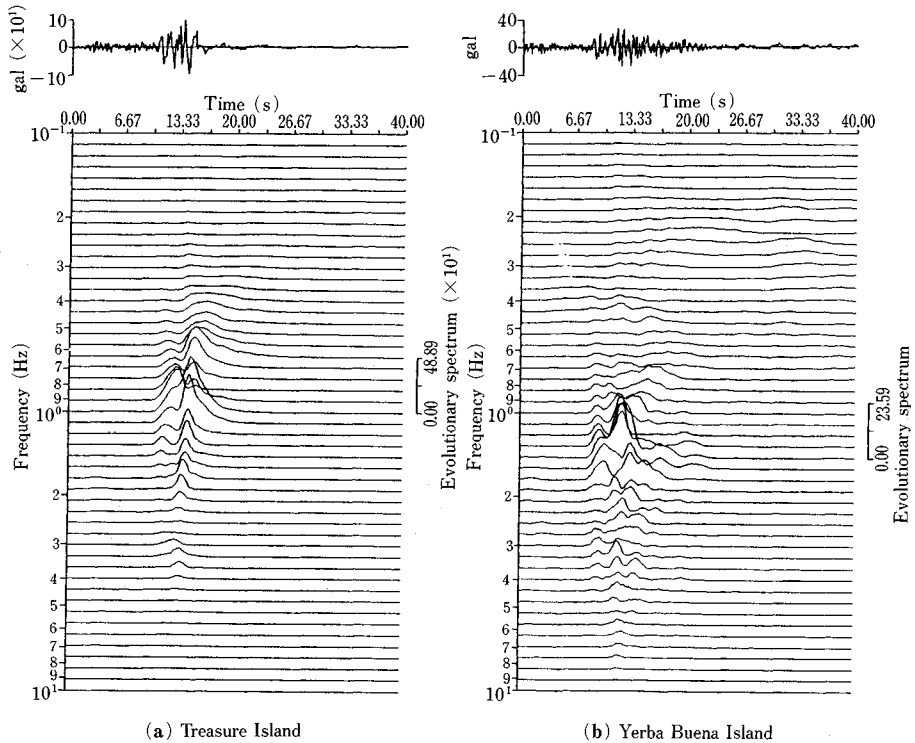


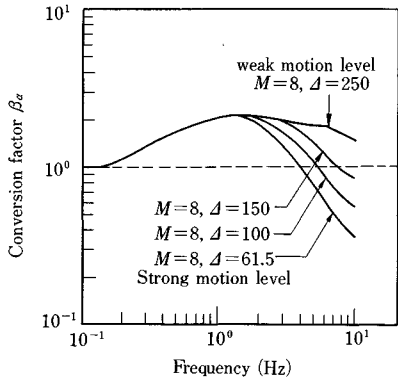
図-29 非定常スペクトル (Treasure IslandとYerba Buena Island)

に南方170 kmのParkfieldでの記録にも含まれている<sup>47)</sup>。

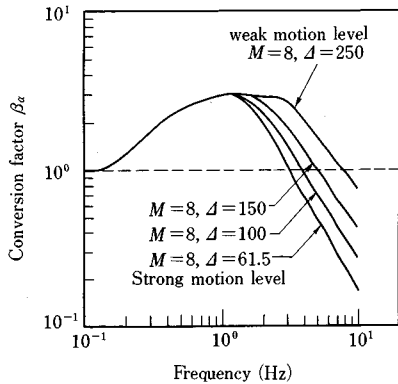
(3) 軟弱地盤での地震動の増幅特性

一般に、軟弱な地盤では、短周期地震動はその基盤への入力レベルが大きくなると土の非線形性が影響して増

幅の程度が減少することが、過去の事例や数値解析例から指摘されている。これは、振幅が同じであれば周期が短いほど波長は短く、対応するひずみ振幅が大きくなることと関連している。地震動の最大加速度は通常数Hz程度の短周期成分に依存することから、基盤への入力加



(a)  $S_n=0.2, d_p=50\text{m}$   
(ordinary alluvial ground)



(b)  $S_n=0.6, d_p=150\text{m}$   
(very soft ground)

図—30 基盤と堆積地盤上におけるスペクトル強度の変換係数<sup>49)</sup>

速度が大きくなるとその対応するひずみ振幅が大きくなり、せん断剛性が低下し、減衰が大きくなる。その結果、基盤と地表でのこのような短周期成分の増幅率は、入力レベルが小さいときと比べて低くなり、地表でのスペクトル特性が増幅率の低下しにくい長周期側へ移行する。ところが今回の強震記録では、地盤が軟弱でも最大加速度の増幅率は低くなく、むしろ軟弱なほど大きくなる傾向にある。しかしこれをもって、これまでの SHAKE<sup>48)</sup> に代表される地盤応答解析手法の可否を判断することはできない。今回の地震による軟弱地盤での最大加速度の顕著な増幅に関する検討を以下に示す。

Fig. 28 に、震源より約 80 km 北北東の Yerba Buena Island (岩盤) とその約 1.5 km 北の Treasure Island (Bay mud 上の埋立て地盤) での加速度・速度波形とフーリエスペクトルを示した。両地点は震源までの距離と比べてきわめて近接しており、両波形の違いは主に岩盤上数 10 m の軟弱層の影響と考えられる。両者のスペ

クトル特性を比較すると、0.3 秒前後で 1 つの増幅がみられるが、注目すべきことは、1 秒前後以上の周期で地震動が大きく増幅していることである。Fig. 29 に示すこの周期帯の両成分の非正常スペクトルに顕著な分散性がないことから、Treasure Island での周期 1 秒前後の大きなスペクトル値は主に直下からの S 波の増幅によるものと推察される。Fig. 30 は、工学的基盤 (S 波速度で 600~700 m/s 程度の基盤) から表層地盤への地震動スペクトル強度の増幅率のモデル<sup>49)</sup> を示したものである。これは、与えられた工学的基盤レベルでのスペクトル強度に対し、2 つの簡単な地盤パラメーターから表層地盤でのスペクトル強度を推定するものであり、地盤の応答解析を行わずしかも入力強度に応じた非線形性の影響を考慮するところに特徴がある。このモデルは SHAKE に代表される等価線形化手法を用いて、さまざまな地盤モデルと入力レベルに対するシミュレーション地震動に基づいて得られたものである。同図 (a) は一般的な沖積地盤、(b) は軟弱地盤の例であり、 $M, \Delta$  の組合せが入力地震動のレベルの違いを示している。基盤への入力地震動強度により増幅係数が特に高振動数領域で異なることを表わしている。これによれば、1 Hz 程度以下の低振動数域では、非線形性の影響はほとんどなく軟弱な地盤ほど常に増幅率が大きいことがわかる。ただし、これらの関係は、考慮する表層厚とそこでのせん断波速度および入力波のレベル、言い換えれば、表層内での波数と振幅レベルで決まるものである。Fig. 30 は、通常あり得る程度の入力レベル (基盤で 500 gal 程度まで) と数十~百数十 m 程度の表層厚での解析結果から得られたものである。さて、Fig. 28(c) をみるとまず 0.3 秒程度以下の短周期領域では大きな増幅はみられず、地盤の非線形性の影響が現われているものと考えられる。また、地盤の卓越周期と考えられる 1 秒前後で大きく増幅している。一方、3~5 秒以上の長周期の領域でも Treasure Island では増幅されている。これは Fig. 30(b) の軟弱地盤モデルのこの周期領域での増幅率の値よりも 2 倍程度以上に大きな値を示している。極端に軟弱でしかも非常に深い堆積地盤の場合は別として、数 10 m 程度の層でのこのような長周期の S 波の重複反射による増幅は対応する波長からも考えにくいことであり、たとえば砂地盤の液状化のように地盤の震動特性を極端に変化させることが生じた可能性が大きい。実際 Fig. 28(a) の矢印のところで加速度波形が大きく変化し、それ以降では周期数秒の成分が急に卓越していることから、Treasure Island での周期数秒以上の大きな地震動成分は、地盤の液状化による可能性が大きい。ただし、レベルは小さいがこの周期領域での非正常スペクトルの分散性も認められるため、結論は詳細な地盤資料

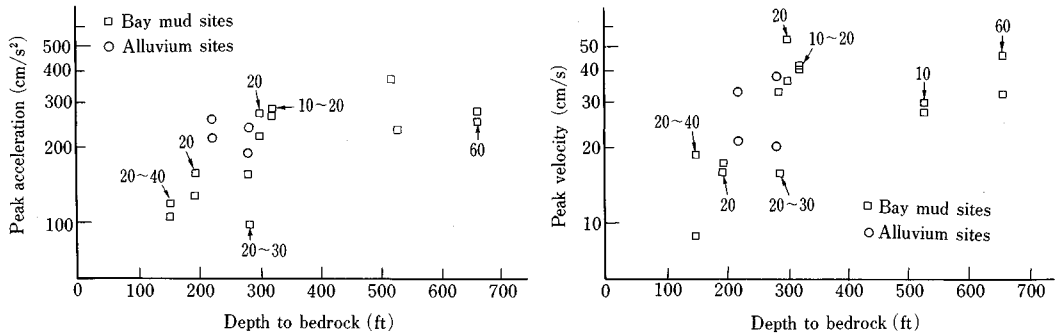


図-31 基盤までの深さと最大加速度、速度との関係（スタンフォード大学 Kiremidjian, Shah 教授との共同研究による）

の解析を行ったうえで出すべきであろう。

Fig. 30 の地震動増幅率のモデルは、 $N$  値分布から計算される地盤の軟弱さの指標  $S_n$  と基盤までの深さ  $d_p$  により算出される。シミュレーション地震動により得られたこのようなモデルが、今回得られた実データにどの程度適合するかを検討することはきわめて重要であるが、一般に強震観測点でのボーリングデータはないため、ここでは基盤までの深さ<sup>39)</sup>と最大加速度、速度との関係を示すにとどめる。Fig. 31 に、これらの関係を示した。図中の□印は、Bay mud の堆積層を有する地点を表わしており、添字の数字は Bay mud の層厚分布図<sup>39)</sup>から読み取った層厚の概略値（単位：ft）である。震央距離は、 $\Delta = 50 \sim 100$  km の範囲のデータであり、距離の影響をしのいで堆積層厚に地震動強度が影響されていることがわかる。特に最大速度では、0~300 ft の範囲で基盤深さに大きく依存し、それ以上深くなると増幅率が頭打ちになる傾向があるようにみられる。現在、USGS と CDMG の関係者が中心となって強震観測地点のボーリング調査を進めており、非線形性の影響を含む地震動増幅に関する上記の議論が定量的に行えるようになるものと期待される。

#### (4) まとめ

今回の地震では強震記録が断層近傍も含めて広範囲で多量に、かつ系統的に得られた。限られた解析ではあるが、これらの強震記録に対するいくつかの解析結果から、次の結論が導かれる。

① 最大加速度値は、岩盤上と比較すると全般に軟弱地盤上で明らかに大きい。今回観測された最大加速度値を、従来得られている距離減衰式と比較すると、岩盤部では両者はほぼ良好な一致を示しているが、沖積地盤や Bay mud 上での観測地点では観測値の方がかなり大きい。これらの地盤の増幅特性を正確に把握することが、今回の地震被害との関連性を検討するうえでもきわめて重要である。

② 水平成分の最大加速度と鉛直成分の最大加速度の比を計算すると、Bay mud 上ではこの比の値が3以上で、岩盤や沖積地盤での観測値よりも明らかに大きい。この意味で、Bay mud では水平動が特に増幅される傾向が強いことが指摘できる。

③ 震源付近で観測された地震記録の主要動の継続時間から、断層の主破壊時間はたかだか10秒間と推察されている。また、震源近傍で土中の石が跳んだことが報告されているが、記録された上下動の最大加速度は0.5g程度である。石の跳躍が、必ずしも重力加速度を上回る大きな上下動を意味するものではないことが示されたといえる。

④ 今回の地震被害と直接的な関連性はないが、Sunnyvale の強震記録には明らかに表面波が認められる。しかし、そこで観測された表面波がどのように発達し、減衰したかは今のところ不明である。これを解明するためには、今後、三次元的な地盤構造が明らかにされる必要がある。

⑤ Treasure Island の強震記録には、液状化によるものと思われる波形の急変が認められる。すなわち、急変部では加速度振幅が激減していることに加えて、それまで1秒であった卓越周期が2秒ないし3秒へ急激に伸びている。また、液状化前の周期1秒の成分は軟弱地盤の固有周期と思われるが増幅倍率は7倍もあるなど、この観測記録は、軟弱地盤の振動解析手法の妥当性を検討するために最適の資料といえる。

⑥ 地盤に発生するひずみと振動周期との関係から、軟弱地盤の非線形応答は比較的短周期の震動成分で顕著に現われると考えられる。しかし、地盤の動ひずみは、震動の周期や振幅だけでなく、地盤の層厚や剛性、振動モードなどにも依存するので、地盤の非線形地震応答は上記の⑤と関連させて今後検討すべき重要課題である。

謝辞：地震後10か月たった1990年8月現在、USGS から2回に分けて20地点、CDMG から3回に

分けて48地点での強震記録が公表されている。今回の記録の解析にあたっては、これら2つの機関における強震記録のデータ処理の担当者や、地震動解析、地盤調査に携わるスタッフから迅速なデータ提供や地盤に関する貴重な情報を得た。また、スタンフォード大のスタッフからも有益な情報を得た。個人名をすべて挙げることはできないが、これらの機関の方々に深謝の意を表する次第である。さらに、本報のとりまとめにあたり、鉄道総合技術研究所 中村 豊博士から有益なご助言を頂いた。

あとがき：この原稿をほぼ書き終えた段階で、今回の地震動と地盤特性に関連するEERCからの報告書<sup>50)</sup>を手にした。地盤震動に関する示唆に富む考察が多い。その中で、Treasure IslandとYerba Buena Islandの記録の比較における解釈は、本報告におけるものと同様である。文献50)では、Treasure Islandの堆積層厚を85.5mとしてSHAKEによる計算値と実データを比較しており、興味深い。

1.3 常時微動により推定した地盤震動特性と地震被害の関係

中村 豊 (Yutaka NAKAMURA)\*<sup>1</sup>  
 大町達夫 (Tatsuo OHMACHI)\*<sup>2</sup>  
 年縄 巧 (Takumi TOSHINAWA)\*<sup>3</sup>

(1) はじめに

1989年10月17日のロマプリータ(Loma Prieta:以下LPと略す)地震は約100km離れたサンフランシスコ(以下SFと略す)市周辺で大きな被害をもたらした。調査により、被害は地質年代の新しい地盤、特に近年になってからの埋立て地盤に集中していることがわかった。これらの被災地域の多くは1906年のSF地震でも被害を受けている。LP地震で記録された強震データは表層地盤の大きな増幅作用を示唆しており、表層地盤の震動特性、特に埋立て地盤の震動特性がLP地震の被害に重要な役割を果たしているものと考えられる。そこで、SF湾岸の被災地周辺の地盤震動特性を常時微動を用いて推定し、被害との対応を検討した。この常時微動測定<sup>51)</sup>は、SF市を中心に、2層式高架橋が崩壊したオークランド市、震源域に近いサンノゼ市やサンタクルス市などの地表面上で行ったほか、カリフォルニア州鉱山地質局(California Division of Mine and Geology:以下CDMGと略す)の強震観測点の1つでも実施した。地盤震動特性は常時微動の水平と上下の比スペクトル<sup>52)</sup>により推定し、表層地盤の卓越振動数だけでなく、増幅倍率も議論の対象としている。

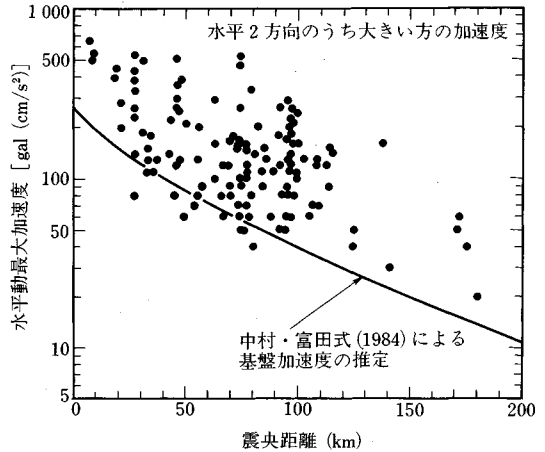


図-32 LP地震による地盤の水平動最大加速度と震央距離の関係

ここでは、LP地震では表層地盤の増幅が大きかったことを実測データを用いて示したうえで、常時微動に基づいて推定した表層地盤の震動特性について被害状況と絡めながら説明する。

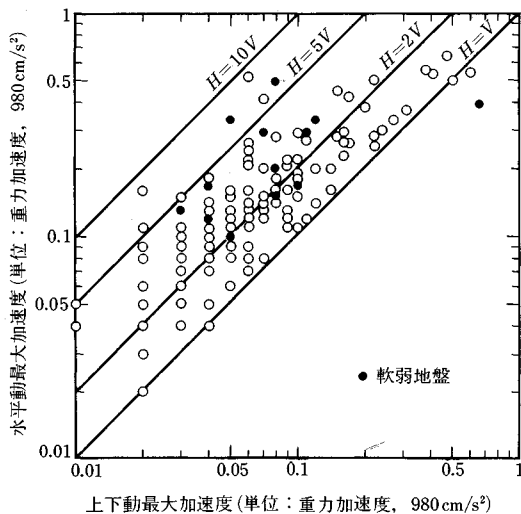
(2) LP地震の地盤震動加速度の減衰と増幅

図-32はLP地震の際に観測された各地の水平最大加速度(水平2方向の加速度のうち大きい方)を震央距離に対して示したものである<sup>53)</sup>。観測値はアメリカ地質調査所(U.S. Geological Survey:以下USGSと略す)とCDMGによる地表での観測ないしはそれに相当するものを示している。図中の実線は、新幹線沿線での強震観測から導かれた中村・富田式(1984)<sup>54)</sup>によって推定した基盤の水平最大加速度である。これによれば、観測値は推定値を下限としておおむね推定値の10倍前後までばらついている。これらのばらつきは、これまでに検証した日本国内の強震データと同様な傾向であり、表層地盤の増幅特性を示していると考えられる。

次節以降では、この表層地盤の地震動特性を地表面の常時微動に基づいて推定した結果について述べる。ただし、常時微動により推定される地盤の震動特性は、線形範囲内のものであるので、非線形性の影響については別途調査する必要がある。試みに、今回の地震の記録を使って非線形性の影響ではないかと思われる現象を示す。

堅固な地盤ほど上下動と水平動の最大加速度が同程度になる傾向があり、水平動Hと上下動Vの最大加速度比H/Vは増幅倍率と関連しているとみられる<sup>52)</sup>。図-33はLP地震の地盤上の観測最大加速度値についてVとHの関係をみたものである。観測値の一部ではあるが、CDMGの資料<sup>60)</sup>に基づいて埋立て地盤など軟弱地盤を●印で示した。これによると、H/Vの値が1を下回るものは震源域以外にはなく、H/Vは1~10倍の範

\*1 (財)鉄道総合技術研究所地震防災研究室長  
 \*2 東京工業大学総合理工学研究科教授  
 \*3 東京工業大学総合理工学研究科助手



図—33 LP地震による地盤の上下動最大加速度と水平最大加速度の比較

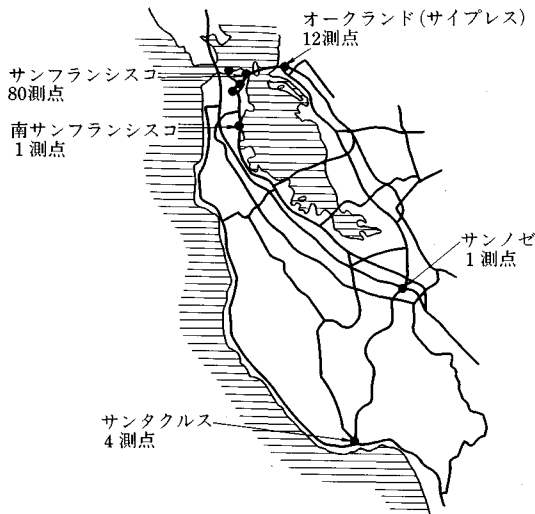
囲にばらついている。これは上記の推定基盤加速度に対する観測水平加速度が10倍程度までのばらつきをもっていることに対応しているものと思われる。また、 $V$ の値が大きくなれば次第に $H/V$ が1倍付近に収束する傾向を示している。この結果、水平最大加速度はほぼ $500\sim 600\text{ cm/s}^2$ で頭打ちになっている。これは入力の大さきに対する表層地盤の非線形特性を表わしている可能性がある。

### (3) 常時微動の測定について

測定は現地時間で10月21日～26日にわたり朝から夜にかけて被害調査と並行して行った。従来の常時微動測定のように深夜の静かな時間帯を選んで測定を行うようなことはしていない。また、センサーはおおむねアスファルト舗装面（一部コンクリート）の上に設置している。

測定調査の対象とした都市はSF市をはじめ、被災した高速道路880号線サイプレス高架橋（オークランド市）近辺、震源地域のサンタクルス市、サンノゼ市などである。特にSF市内については、マリーナ地区、マーケット通り南側地区、ミッションクリーク地区およびサイプレス高架橋に類似した高架橋（かなりの被害はあるが、落橋には至っていない）があるエンパカデロ地区について集中的に測点を配置して測定を行った。このとき、被災地のみならずその周辺についても測定するように留意した。また、CDMGの強震観測点の1つ南SF市の4階建て病院の地下室（強震計近傍）と4階の天井につけられた強震計直下の床面で測定したほか、宿泊したホテルなど4棟の建物の常時微動を測定した。

地盤の常時微動を測定した地域を図—34に示す。測



図—34 地盤の常時微動測定地域

表—7 測定装置 PIC 87 の概要

増幅部	チャンネル数	6ch.
	ゲイン	0～120db
A/D部	振動数範囲	0.18～200Hz
	フィルター	5/10/20 Hz(LP)
演算部	変換精度、速度	12bit, 24 $\mu$ s
	チャンネル数	16ch.
センサ	16bit CPU	$\mu$ PD 70216
	液晶表示	640×400 dot
諸元	固有振動数	0.8 Hz相当3成分, 2セット
	重量	14kg(本体)
	寸法	56×330×196mm

定したのは地盤98測点、建物5測点である。CDMGの強震観測点では地盤と建物を測定しているため、測定地点数は合計で102地点となる。各測点で水平2方向および上下の3方向を同時に測定した。近くを車などが通っていない比較的静かなときをねらって、約41秒間（4096サンプル）の測定を3回ずつ行った。

使用した常時微動の測定装置は、鉄道総研で開発したPIC 87<sup>55)</sup>である。主な仕様を表—7に示す。今回の測定では、交通振動の影響を避けるため、10 Hzのローパスフィルターをかけており、付属のセンサーとアンプなどを合わせた総合的な測定周波数範囲は0.8～10 Hzとなっている。ただし、各方向成分のセンサー特性やアンプ特性は揃えられており、後述する比スペクトルにおいては、少なくとも0.3～30 Hzの範囲を検討の対象にすることができる。

各測点における微動のフーリエスペクトルは、記録した波形から外乱の少ない静かな部分約10秒間（1024サンプル）を3個取り出し、それぞれのフーリエスペクトル

表—8 常時微動による各測点の卓越振動数と増幅倍率

測定地点	測定月日	卓越振動数 $F_p$	増幅倍率 $A_p$	被害程度
マリナー地区地盤(サンフランシスコ市)				
G5~G17, Y1~Y7	89/10/24			
BY1, BY2, Green	10/22, 24	0.8~1.2Hz	5.5~11.2倍	大被害
G1~G4, G18, G19	10/24	1.9~2.2Hz	4.6~ 6.6倍	中被害
G20~G28(丘陵部)	10/24, 25	>2.5Hz	2.5~ 5.0倍	被害なし
マーケット通り南側地区地盤(サンフランシスコ市)				
G1~G8, G12~G16	10/22	0.8~2.3Hz	3.6~ 8.1倍	大中被害
G9~G11	10/22	1.5~2.8Hz	2.2~ 4.6倍	被害なし
G17(丘), G19, G20	10/22, 23	1.9~2.5Hz	2.6~ 5.4	被害なし
G21~G23	10/23	1.5~2.5Hz	4.1~ 7.3倍	中被害
G24	10/23	1.6Hz	19.4倍	大被害
G18(域外:邦人町)	10/23	3.1Hz	8.3倍	近くの歩道橋軽被害
エンバカデロ高架橋下地盤(サンフランシスコ市)				
G1~G18/ HT方向	10/22	0.7~1.5Hz	9.0~16.3倍	中被害
(B72~B83)HL方向		0.7~1.6Hz	4.0~11.0倍	
サイプレス高架橋下地盤(オークランド市)				
B87~B73/HT方向	10/23	0.6~1.0Hz	3.7~6.2倍	大被害:崩壊
HL方向		0.6~0.9Hz	2.8~4.5倍	
B62, B61/ HT方向	10/23	0.7Hz	3.7, 2.7倍	中被害
HL方向		0.7Hz	4.4, 3.0倍	
Base		0.8Hz	3.6倍	付近の建物は無被害
Ent		1.0Hz	7.9倍	レンガ造建物大被害
サンタクルス市被災地周辺				
G1~G3	10/26	1.2~2.1Hz	5.4~8.4倍	大被害
G4	10/26	1.1Hz	7.0倍	川沿液状化多発地域
サンノゼ市(サンベドロ-サンタクララ)				
G1	10/26	0.8Hz	1.8倍	被害なし
CDMG 強震観測点4階建て病院(南サンフランシスコ市)				
B1F NS方向	10/25	1.7Hz	3.9倍	被害なし
EW方向		1.8Hz	5.2倍	

ルを平均して推定した。平均化前のフーリエスペクトルはハニングウィンドウを5回掛けて平滑化した。平均する前の平滑化フーリエスペクトルを用いて水平と上下の比スペクトルを求め、3個の比スペクトルを平均して震動特性を推定した。地表面常時微動の水平と上下の比スペクトルで表層地盤の震動特性を推定する方法<sup>52)</sup>は、次の2つの経験的事実に基づいている。①基盤では常時微動の特性は水平方向と上下方向とで類似している。②表層地盤により水平方向成分が大きく増幅されるが、この帯域では上下方向成分はあまり増幅されない。このため、地表面の上下動成分は、基盤の上下動成分に類似しており、さらに基盤の水平動成分のよい近似となっている。この手法は首都圏のJR沿線の震動特性調査にも使われ、その妥当性は検証済みである<sup>56)</sup>。交通振動や波浪などレイリー波が卓越する周波数領域では比スペクトルは相対的に小さくなる。したがって、比スペクトルから推定される震動特性は、結果的に交通振動や波浪の影響が低減されたものになっている。詳しくは文献52)を参照されたい。

(4) 測定結果と地震被害

a) 測定結果の概要

今回の常時微動観測により推定された各地域の表層地盤の卓越振動数とその増幅倍率の概要を表—8に示す。表には各測点周辺の被害程度も示しているが、推定増幅倍率との相関が認められ、推定倍率が大きいほど被害程度が大きくなる傾向が認められる。以下、各地区について詳述する。

b) 各地区での測定結果と地震被害の対比

1) マリナー地区

ここは1906年のSF地震のときは大部分が海であり、入江を土砂や地震により焼損した家屋などで埋め立てて造成したところである。このため強い地震動により、地盤が液状化して道路の陥没・隆起や建物の傾斜・倒壊を引き起こしたと考えられている。ここでは、この造成地盤の震動特性を把握するため、海岸線に直交する測線(ピアス通り測線)と海岸線に平行な測線(ビーチ通り測線)を設定して、比較的稠密に測定した。

なお、ニューカマー(以下NCと略す)高校の校庭

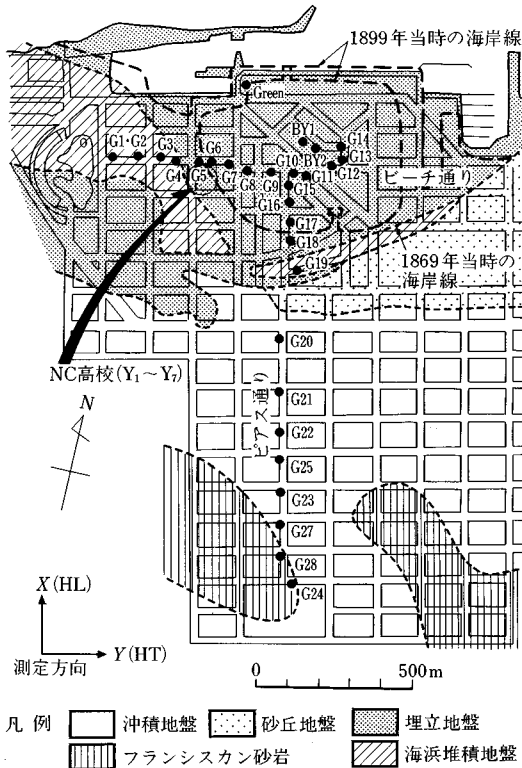


図-35 マリーナ地区の常時微動測点分布

が液状化によると思われる変状を呈していたので、この校庭だけで7測点を配して2測点ずつ同時に測定した。

マリーナ地区における測点配置を図-35に示す。水平の測定方向は海岸線に平行なものをY (HT:ピアス通りに直交) 方向とし、これと直交するものをX (HL) 方向とした。図中には旧海岸線や表層地質の分布<sup>57)</sup>などを示しているが、1899年および1869年当時の海岸線はNC高校の校庭を横切っていることがわかる。

#### ① ピアス通り測線

図-36は、マリーナ地区での測定のうち、海岸線から山の上までの測点のY方向の常時微動波形を順に並べて示したものである。これによると、埋立て地区とそのほかの地区が明瞭に分かれている。すなわち、埋立て地区は比較的低い振動数が卓越し、山の手は高い振動数成分が卓越している。なお、Green測点や山の手測点では1秒より長い周期の震動も認められるが、これはSFが半島の先端部に位置していることから波浪に起因する脈動の影響であろうと思われる。

常時微動波形のフーリエスペクトルを順に並べたものが図-37である。これを見ても、左側の埋立て地区と右側の山の手地区とでは明らかに周波数特性が異なっていることがわかる。埋立て地区をさらに詳細にみると、Green~G10の測点はそれぞれスペクトル形状が異なっ

ているが、G15~G19の測点は3Hz弱が卓越し、互いに類似したスペクトル形状となっている。

図-38は推定された表層地盤の震動特性曲線を、順に並べて示したものである。実線はY方向で、点線がX方向を表す。これを見ると、フーリエスペクトルでは著しく特性が異なるGreen測点もBY1やG10、G15などの測点と類似した特性を示す。また、フーリエスペクトルでは明瞭ではないが、震動特性曲線ではGreen測点からG19測点に向かって徐々に卓越振動数が高くなる傾向が明らかである。これは軟弱な表層の厚さが漸減している様子を示しており、ピアス測線に沿った地形縦断面図に岩盤表面<sup>58)</sup>を描き入れて示した図-39によって確認できる。

山の手はおおむね良好な地盤であるが、G27測点の増幅特性は付近に堆積層が存在していることをうかがわせる。G24やG25測点の特性は、日本国内の岩盤上での測定結果と類似しており、すぐ下に岩盤があるものと思われる。これは図-39とも矛盾しない。

図-40は、これらの特性曲線で最も卓越する振動数とそのときの推定増幅倍率をGreen測点からの距離に対して示したものである。これによると、Green測点からG24測点にいくにつれて卓越振動数は0.8Hzから10Hz以上まで増加し、増幅倍率は10倍程度から2~3倍程度に減少している。その変化は、旧入江の境界部分(G17とG18の間)で著しい。また、被害が大きかった地域では、卓越振動数は1Hz前後で、増幅倍率は5倍を超えている。

#### ② ビーチ通り測線

この測線上の測点はすべて軟弱な堆積地盤が埋立て地盤に属しており、常時微動波形も互いによく類似していた。

図-41は推定された地盤震動特性から増幅倍率が最も大きい卓越振動数とその増幅倍率を読み取り、測点G1からの測線に沿った距離に対して示したものである。これによると、G3測点付近(1.2Hz)から卓越振動数が次第に低下し、G6測点付近で0.8HzとなりG13付近まではほぼ0.8Hzで安定している。増幅倍率は東にいくにつれて大きくなっていることがわかる。特にG11やBY2の増幅倍率は大きい。これらの測点は振動により家屋が大きく損傷したところや液状化に伴う噴砂孔の近くにある。なお、図-35には旧海岸線を描いているが、それによれば、1869年当時の海岸線はG4測点付近を、また、1899年の海岸線はG5測点付近を、いずれもほぼ北西-南東に通過しているものと推定される。ビーチ通りのG1~G4測点以外の測点群は旧海岸線の外側(旧入江の中)にあると考えられ、比較的大きな増幅倍率や低い卓越振動数はこのためと推測される。

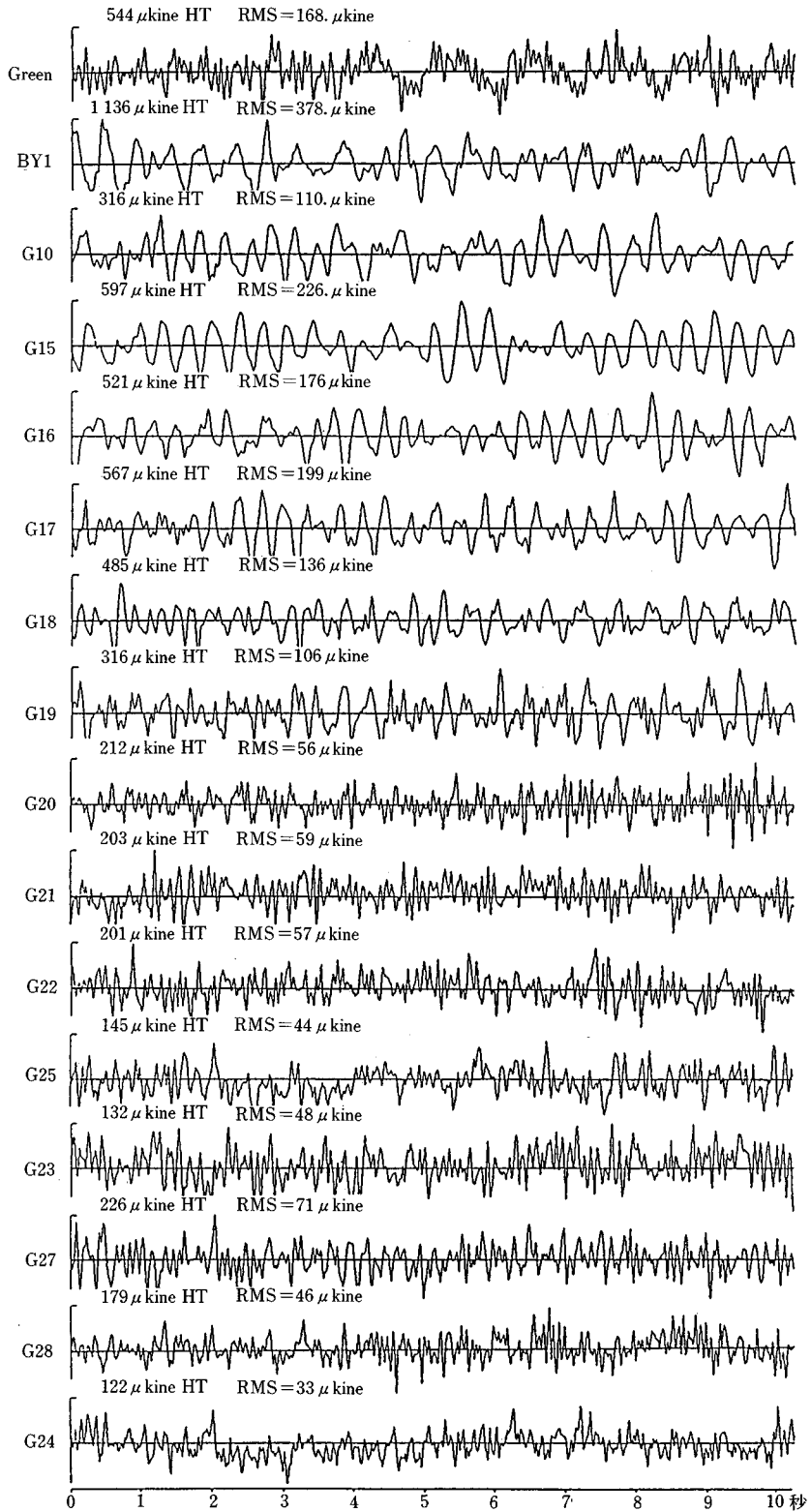


図-36 ピアス通り測線の Y 方向常時微動波形例 (図中の数字は最大振幅と平均振幅 RMS を示す)



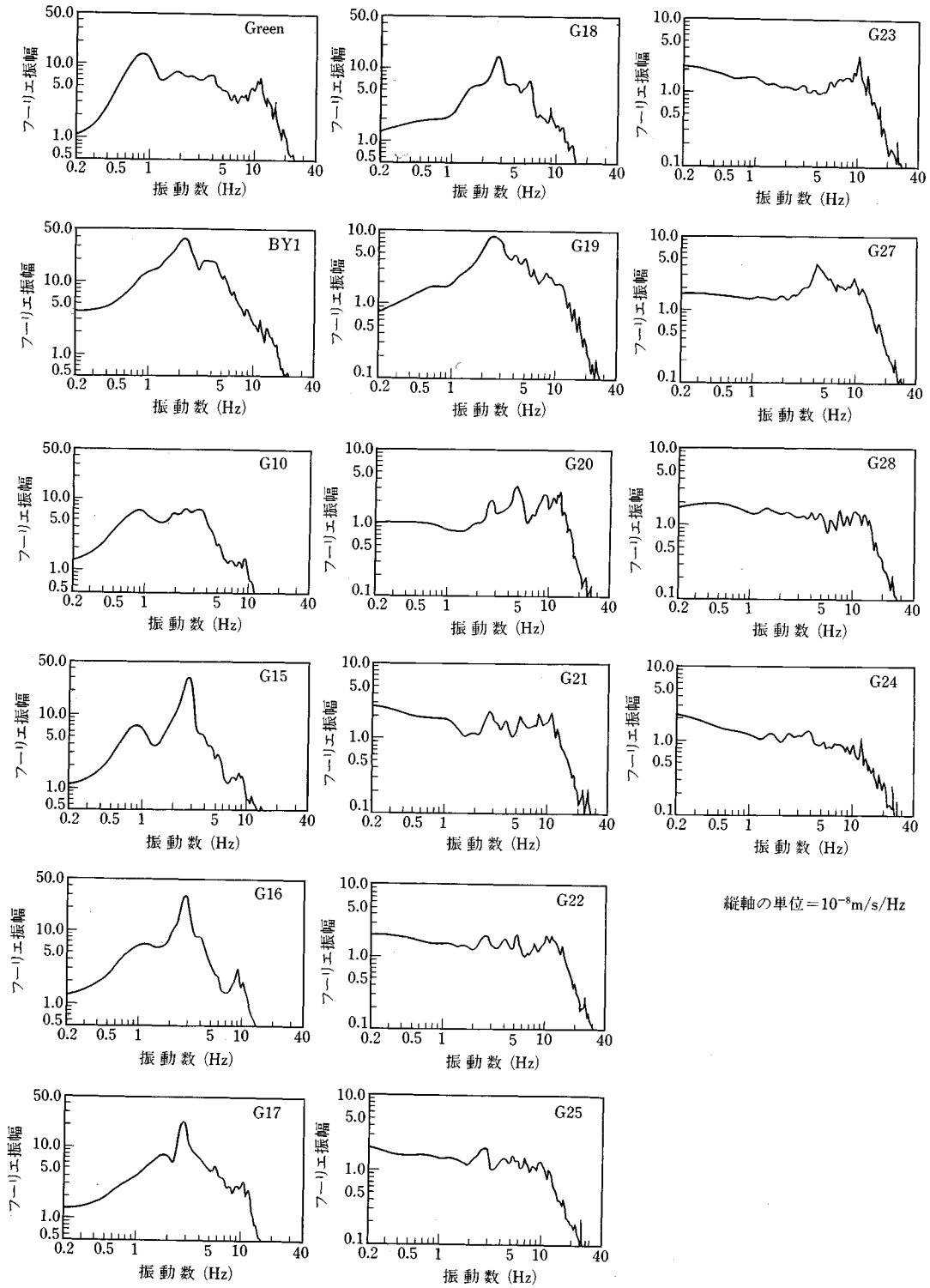


図-37 ピアス通り測線の常時微動 (HT 方向) のフーリエスペクトル

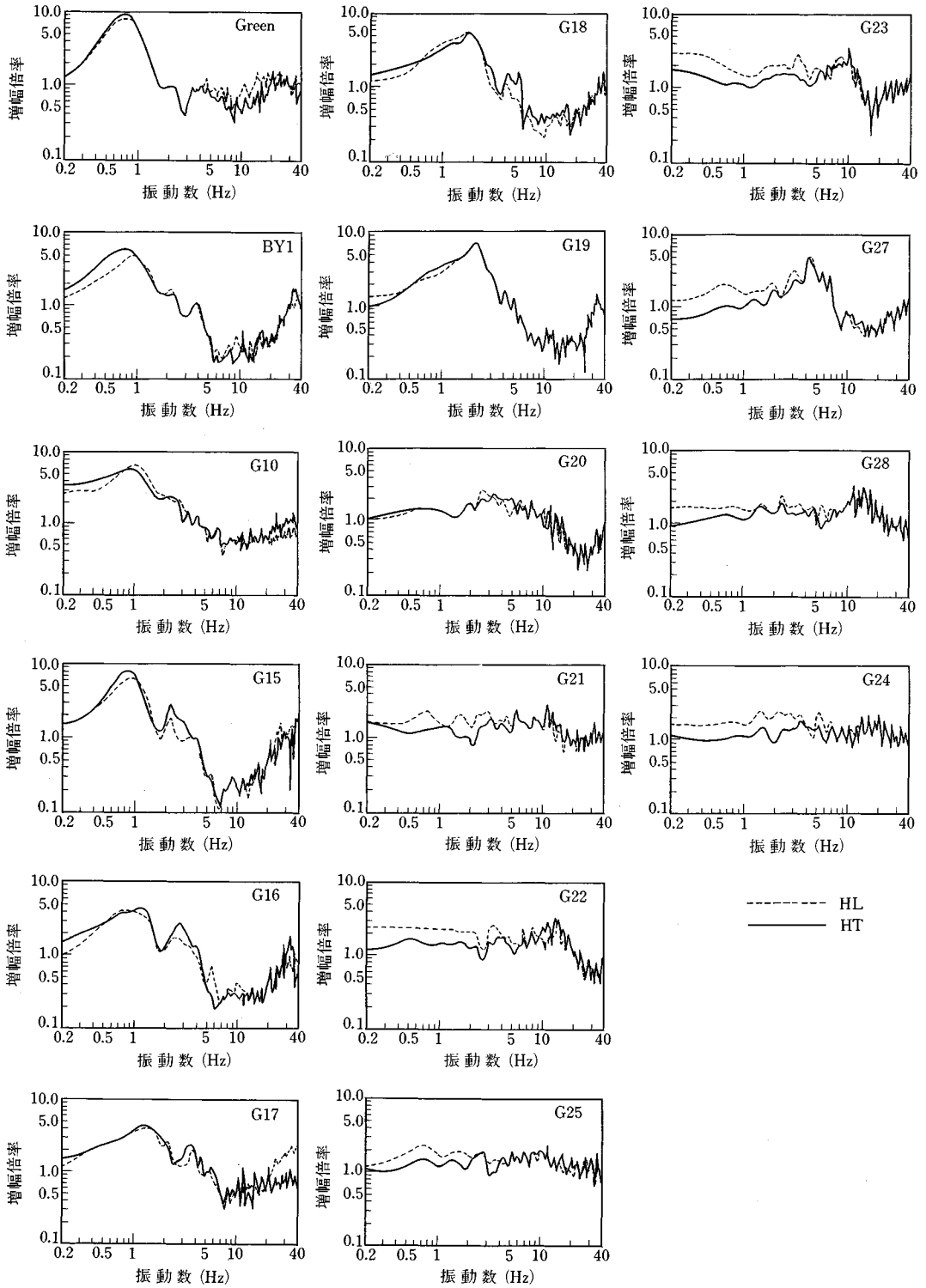


図-38 ピアス通り測線の推定地震動特性

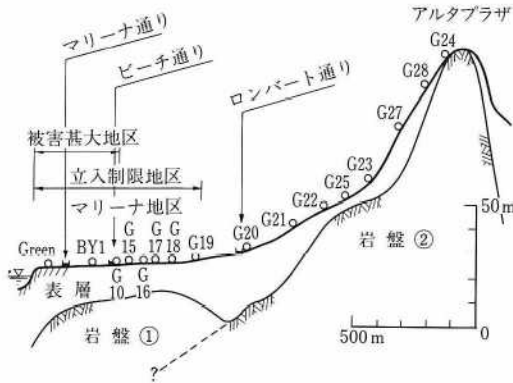


図-39 ピアス通り測線沿いの地形縦断面

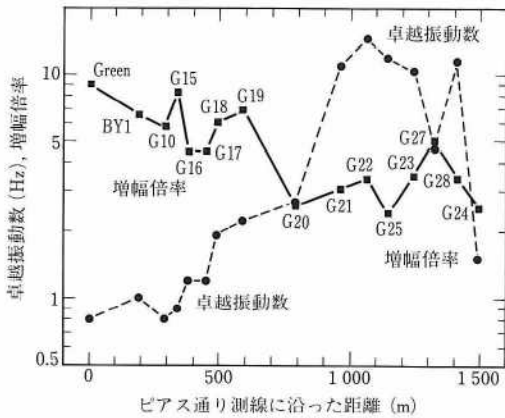


図-40 ピアス通り測線に沿った表層地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

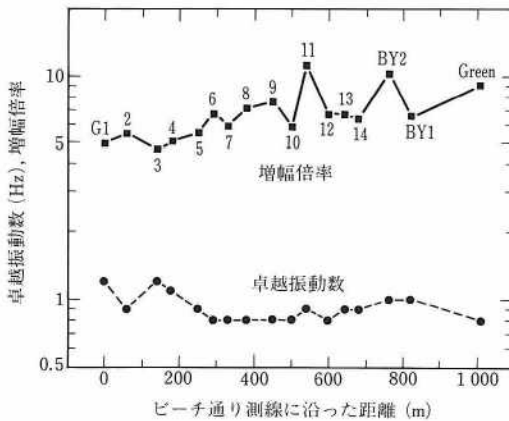


図-41 ビーチ通り測線に沿った表層地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

③ ニューカマー高校の校庭

この校庭はアスファルト舗装されている。舗装の破壊状況を写真-9に示す。また、舗装の破壊状況と測点配



(a) ずれが生じた部分



(b) 押し合って盛り上がっている部分

写真-9 ニューカマー高校のアスファルト舗装された校庭の変状

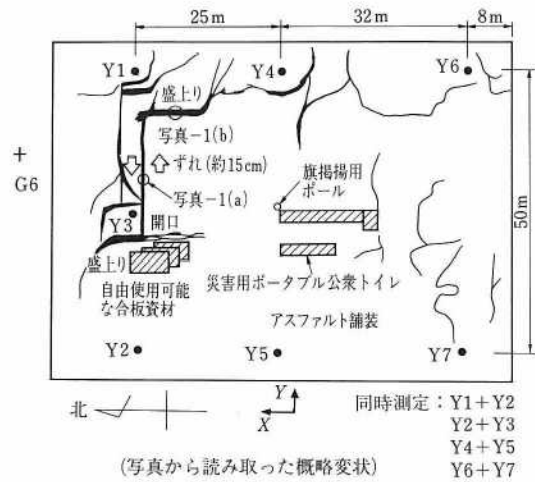


図-42 ニューカマー高校校庭の変状

置を図-42に示す。顕著な破壊は校庭の北側の東西に伸びたひびわれであり、ひびわれは左ずれの状態になっている。このひびわれのずれの量は約15cmで、20m程度続き、その両端はこれにほぼ直交する5~10mのひびわれにつながっている。これら両端のひびわれではその両側が押し合ってアスファルト舗装部分が浮き上がっている。これらのひびわれは連続して、校庭の北東端を北西-南東に横切っており、1899年当時の海岸線と整合している。より古い1869年の海岸線はこの校庭

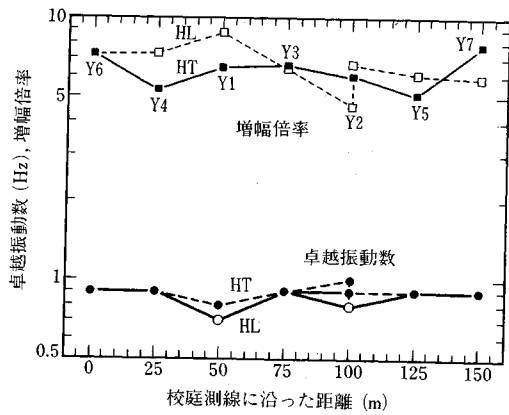


図-43 ニューカーマー高校校庭の表層地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

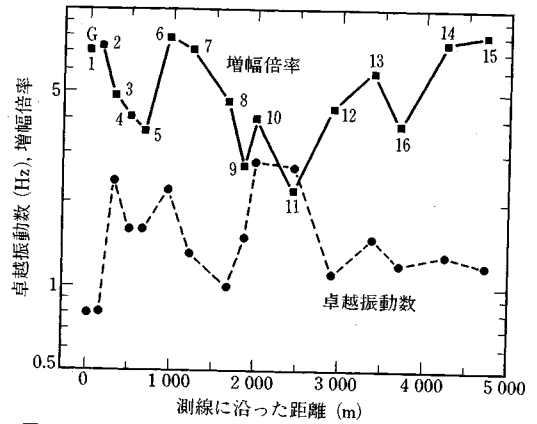


図-45 マーケット通り南側地区の卓越振動数と増幅倍率の変化

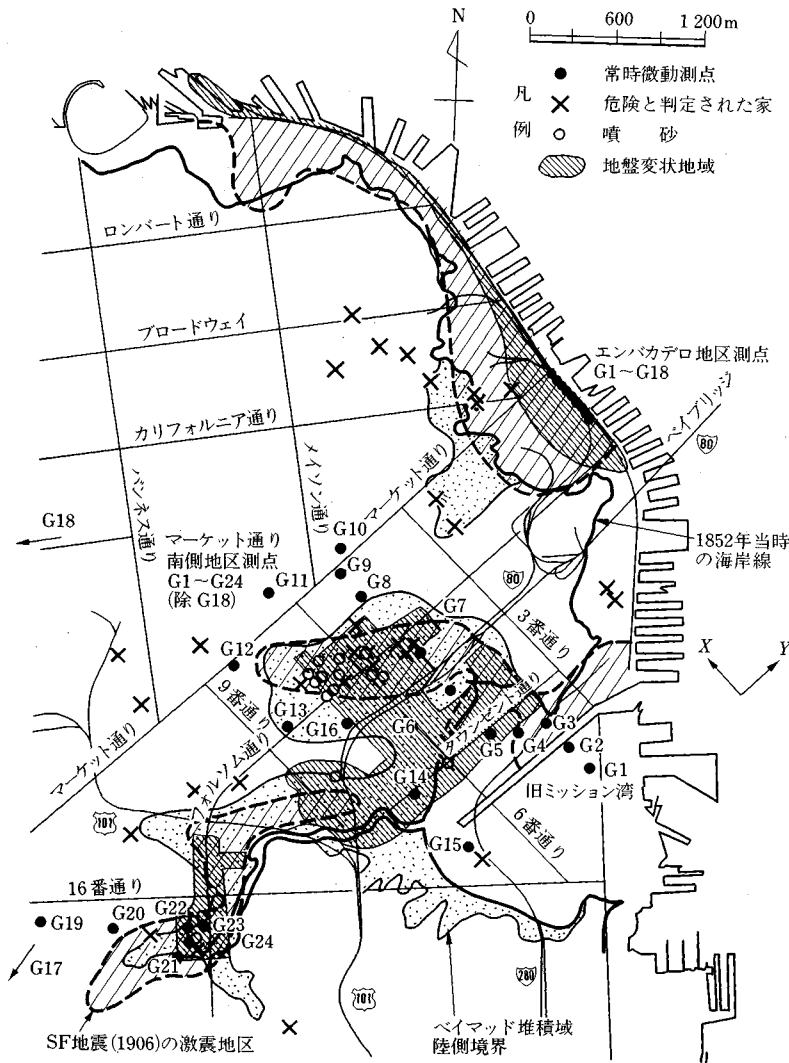


図-44 マーケット通り南側地区の常時微動測点と被害や地盤の状況<sup>61)</sup>

表一9 マーケット通り南側地区（G1～G16 測点）の地盤特性と被害状況

測点	地盤状況	推定振動特性		測点周辺での被害状況等
		卓越振動数	増幅倍率	
G1 G2	埋立地盤	0.8Hz 0.8	7.0倍 7.3	地震被害を受けるような施設なし。
G3 G4 G5	埋立地盤	2.4 1.6 1.6	4.8 4.1 3.6	測点は地盤変状発生領域の境界付近にあたるが、測点付近には被害なし。
G6 G7	旧湿地帯	2.2 1.3	7.8 7.1	1906年 SF 地震や今回の地震でかなりの被害発生。特に G7 の周辺では多くの被害が発生。
G8	旧湿地帯縁	1.0	4.6	測点付近の被害は少ない。
G9 G10 G11	自然地盤	1.5 2.8 2.7	2.7 4.0 2.2	測点付近に被害なし。
G12 G13	自然地盤 旧湿地帯	1.1 1.5	4.4 5.9	測点付近に大きな被害なし。
G16	旧湿地帯	1.2	3.8	測点付近に被害なし。
G14	旧湿地帯	1.3	7.6	G5 との中間でレンガ造建物の上部外壁が剝離して落下し、5 人死亡。
G15	埋立地盤	1.2	8.1	付近に危険と判定された建物あり。

の南西端を北西—南東に横切っている。つまり、この校庭の大部分は約120年前にはまだ海の底であり、約90年前においてもその一部（北東部分）は入江の中にあつて陸地としては存在していなかった。なお、校庭北側の歩道（G6 測点の近く）にはぶつかり合つて盛り上がっている敷石があつた。

図一43は、常時微動測定結果から推定される卓越振動数とそのときの増幅倍率を、Y6 測点から左回りに測つた距離に対して示したものである。これによれば、校庭での表層地盤の卓越振動数は0.7～1.0 Hzで、そのときの増幅倍率は5～9倍程度と推定される。約90年前まで海であつたY1 測点の卓越振動数は最も低く、増幅倍率は最も大きい。Y1 測点周辺で地盤は大きく震動し、剛性低下などを引き起こした結果、上に述べたような変状が生じたものと想像される。校庭北側の道路上のG5、G6 測点と比較すると、卓越振動数は同程度であるが、増幅倍率はやや大きめになっている。

## 2) マーケット通り南側地区

この地区の地盤は古くからの埋立てにより次第に造成されたものであり、旧湿地帯や旧海岸線付近で被害が出ている。被害地域は1906年のSF地震の被害地域と一致するところが多い。こうした地盤の震動特性を把握するため、2つの地域に測点を配置した。いずれも良好と思われる地盤を含んでいる。測定方向はマーケット通りに平行な方向（Y方向）とこれに直交する方向（X方向）および上下方向の3方向である。図一44に測点の分布と周辺の地盤や地震被害の状況<sup>61)</sup>を示す。

## ① G1～G16 測点（マーケット通り南側地区）

図一45は推定した震動特性から読み取つた卓越振動数とその増幅倍率を測線に沿つた距離に対して示したものである。G3～G5の測点はカリフォルニア鉄道の車両基地から伝播してきたと思われる振動（約6.4 Hz）のため、精度が落ちてきている可能性がある。

LP地震やSF地震で被害を受けた湿地帯にある測点G7では、低い卓越振動数、大きな増幅倍率になっている。これに匹敵する卓越振動数・増幅倍率になるのは、G1、G2、G14およびG15の各測点である。G14とG5測点の中間付近では、レンガ造建物の上部の外壁が剝離して落下し、その下敷になつて5人が死亡している。また、G15測点の近くには危険と判定された建物がある。残りのG1、G2測点には被害を受けるような施設がない。

各測点の卓越振動数と増幅倍率を地盤状況や周辺の被害状況と対比して表一9に示す。これによると、旧湿地帯では、卓越振動数が低く増幅倍率が大きくなる傾向が認められ、被害はこうしたところで発生している。

## ② G17～G24 測点（ミッションクリーク地区）

図一46に推定した各測点の地盤震動特性をG17 測点（Noe Hill：岩盤）から順に並べて示す。これによると、傾斜した建物の前のG24 測点で20倍近くの増幅になっているのをはじめ、被害の著しかった地域周辺のG22～G24 測点で大きな増幅倍率（6.5倍～20倍）になっている。この被害が大きかった地域は旧湿地帯と重なっている。G17 測点は堅固な地盤のためか特に卓越するも

のではないが、G19～G21 測点は2～3 Hz が卓越している。これに対して、被害地点近傍のG22～G24 測点では、1.6 Hz 程度が卓越している。このように、旧湿地帯では卓越振動数が低下し、増幅倍率が大きくなる傾向が顕著である。

3) サイプレス高架橋とエンバカデロ高架橋の周辺地盤

① サイプレス高架橋周辺地盤

LP 地震で最も衝撃的な被害は、高速道路 880 号線のサイプレス高架橋（2 層式）の被害である。この高架橋周辺の地盤震動特性を推定するために、合計 12 か所（高架橋に沿っては 10 か所）で常時微動を測定した。その測点配置は図-47 に示すとおりである。これには被災状況<sup>62)</sup>も示した。高架橋沿いの測点には崩壊していない部分も 2 か所含めている。

図-48 は測定された常時微動波形の一例（橋軸直交

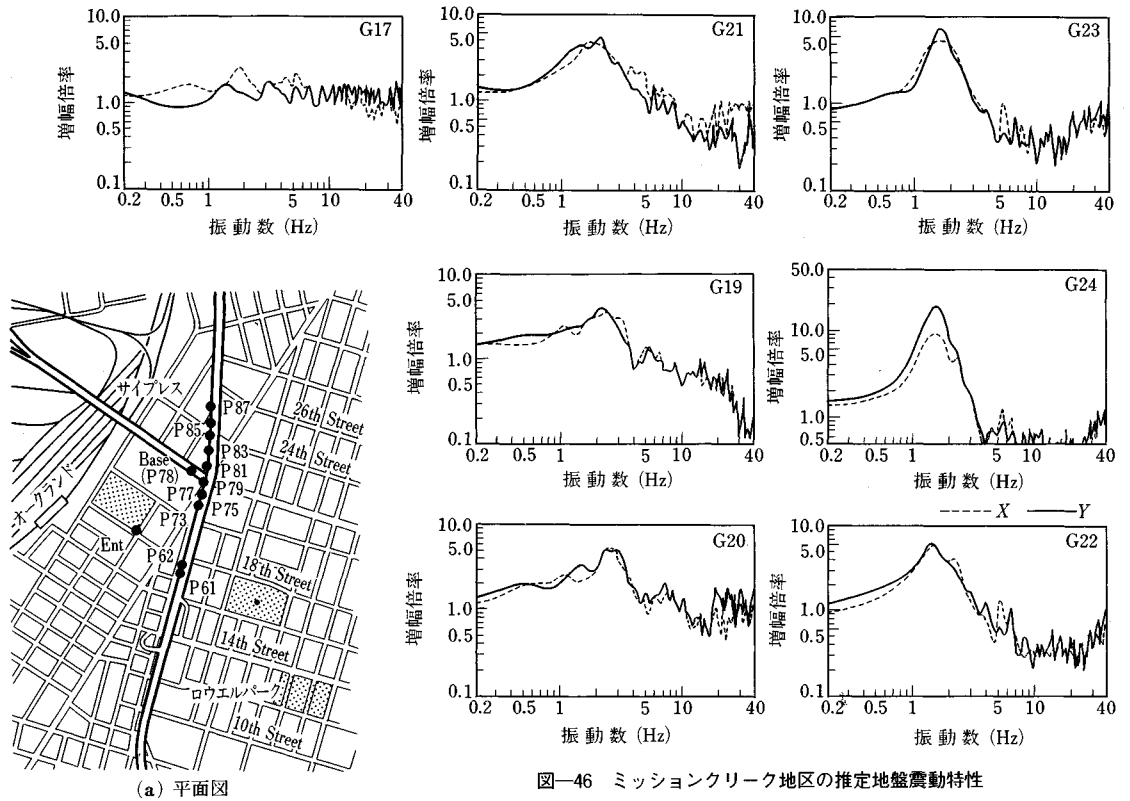
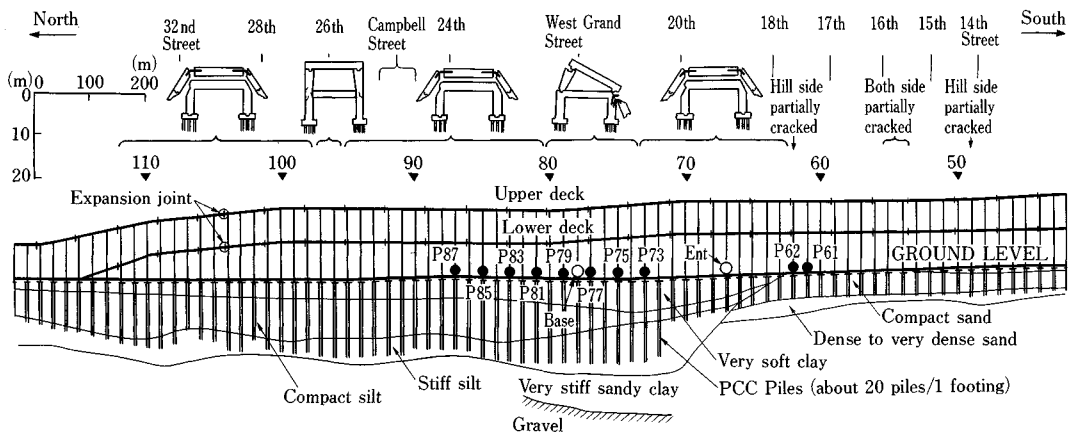


図-46 ミッションクリーク地区の推定地盤震動特性



(b) 縦断面図と被害状況<sup>62)</sup>

図-47 サイプレス高架橋周辺地盤の常時微動測点

方向)である。どの地点の常時微動波形も図示した波形と類似しており、おおむね2~3 Hzの震動が卓越している。

図-49は推定震動特性から読み取った最も卓越する振動数とその増幅倍率の変化を測線に沿って示したものである。白抜きと黒塗りの記号は、それぞれ、高架橋の橋軸(HL)方向と橋軸直交(HT)方向を示している。これによると、最も卓越する振動数は0.6~1 Hzである。地盤条件が類似しているエメリビル(サイプレスの北方約1.6 km)での強震記録<sup>59)</sup>によると、0.6 Hz程度の震動が卓越しており、常時微動による推定結果と整合する。

増幅倍率はHTの方がやや大きいもののHLと大きな差はない。卓越振動数はP73からP79にかけて漸減し、表層地盤が次第に厚くなっていることを示唆している。また、P79からP87にかけてはHLとHTとで卓越振動数や増幅倍率が異なっている。

崩壊していないP62やP61近傍では、増幅倍率は被害地点のそれに比べてやや小さくなっている。HT方向

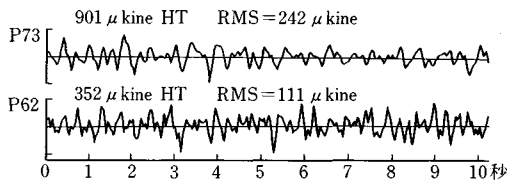


図-48 サイプレス高架橋周辺地盤の常時微動波形例

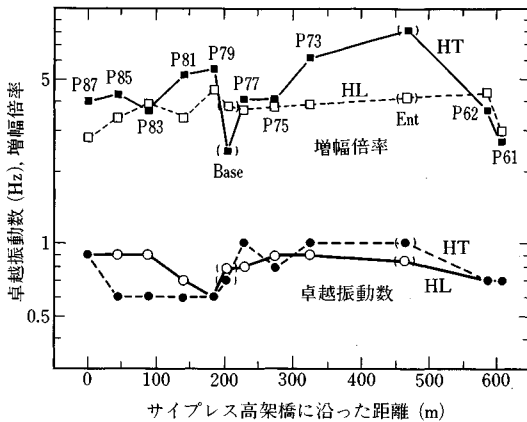


図-49 サイプレス高架橋周辺地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

の増幅倍率の変化や被害状況を勘案すれば、測定しなかったP73~P62の間で増幅倍率のピーク(最大10倍程度)があったものと推測される。

② エンバカデロ高架橋周辺地盤

エンバカデロ高架橋はサイプレス高架橋と類似の構造をもった高架橋であるが、落橋に至るような大きな被害は受けていない。そこでサイプレス地区との比較のためにエンバカデロ高架下地盤でも常時微動を測定した。海岸線の至近距離であるため、微妙な変化があることを考慮して、原則的に高架橋の両側の地盤で常時微動を同時に測定することとした。測点名称は連続番号で付番したが、高架橋の脚番号や通りとの対比は表-10に示すとおりである。これには被害の状況も示した。図-50は測点の分布を示したもので、参考のため埋立て前の旧海岸線も示している。

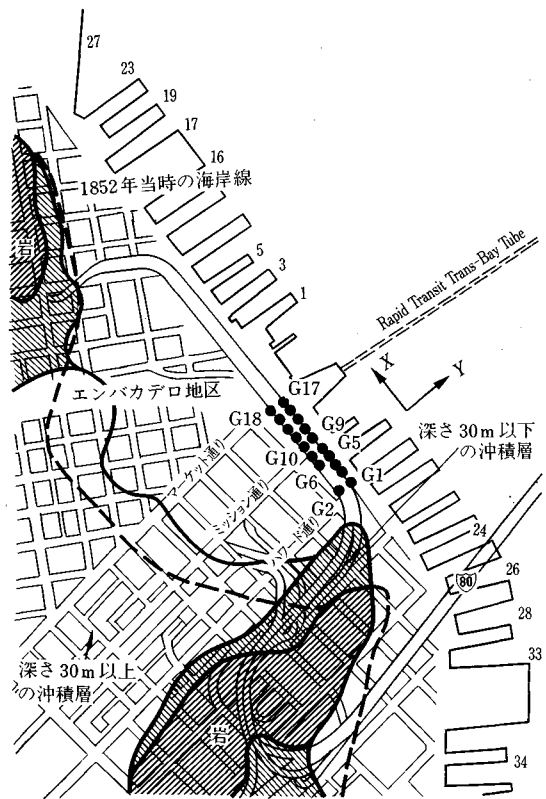


図-50 エンバカデロ高架橋周辺の常時微動測点

表-10 測点番号と高架橋脚番号の対比

陸側測点	G2			G6	G8	G10	G12	G14	G16	G18
海側測点	G1	G3	G4	G5	G7	G9	G11	G13	G15	G17
対応脚番	P72	P74	P76	P77	P78	P79	P80	P81	P82	P83
被害	桁にわずかなクラック	なし	なし	なし	脚部に 大被害	脚部に 大被害	なし	なし	なし	なし
	↑				↑					↑
	ハワード通り				ミッション通り					マーケット通り

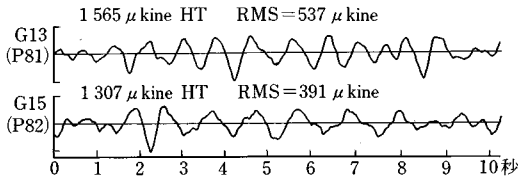


図-51 エンバカデロ高架橋周辺地盤の常時微動波形例

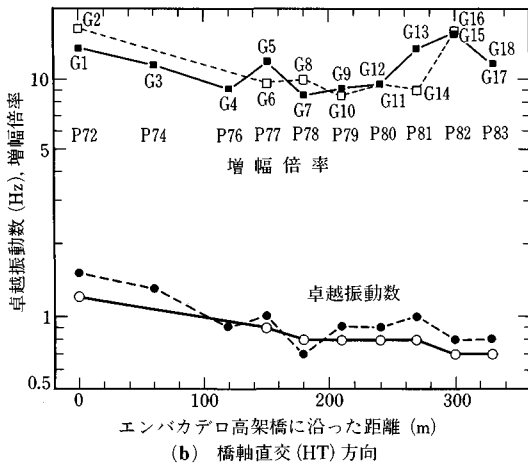
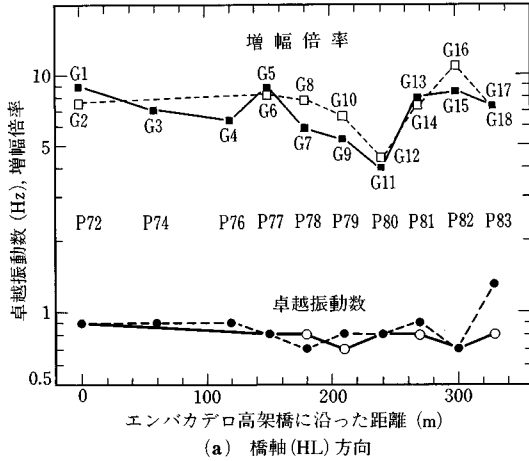


図-52 エンバカデロ高架橋周辺地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

図-51に海側橋脚付近の地盤における橋軸直交 (HT) 方向の常時微動波形を例示する。これまでの常時微動波形と異なり、1秒近くの周期で大きく震動している。

図-52は地盤の推定震動特性から最も卓越する振動数とそのときの増幅倍率を、方向別、海陸別に読み取り橋脚位置に対応させて示したものである。これによれば、陸側測点のデータ (白抜き) が変動の少ないきれいな傾向を示しているのに対して、海側測点のデータ (黒塗り) は全体としては陸側と同様な傾向を示すものの変動がやや大きくなっている。全体としては、ハワード通りから

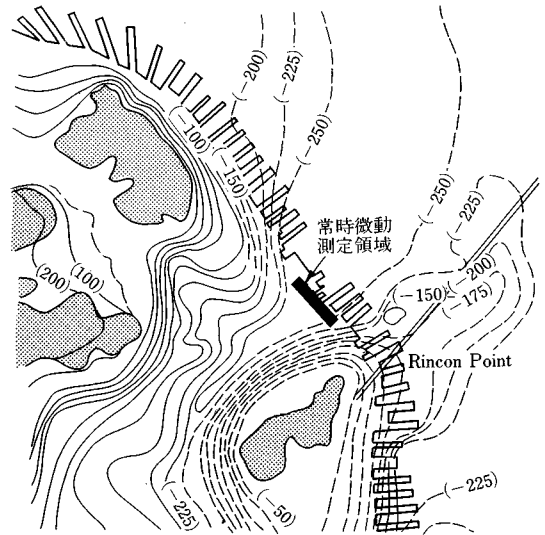


図-53 エンバカデロ高架橋周辺の岩盤表面の等高線<sup>58)</sup>

マーケット通りに向かって1.5 Hzから0.7 Hzに卓越振動数が漸減しており、表層が次第に厚くなっていることを示唆している。これは岩盤表面の標高<sup>59)</sup>を示した図-53から推測される層厚傾向と矛盾しない。

HT方向の震動の増幅倍率は10倍前後であり、HL方向の7倍前後に比べて1.6倍ほど大きく、海岸線に直交する方向の震動が増幅されやすいことを示している。測点が岸壁近くにあることを反映したものであろう。

橋脚に被害を受けたP78やP79付近で、表層地盤の卓越振動数や増幅倍率が大きく変化することはなく、高架橋に作用した地震動はこの辺りではほぼ一様であったと推測される。これらの橋脚下の地盤は地割れや沈下などの変状が認められ、地盤全体が海側に移動したと思われる形跡がある。したがって、P78やP79の被害は、地震動がこの付近だけで特に大きかったためというよりはむしろ、基礎地盤が変状したことやP77とP78を境に高架橋の構造形式が異なることに起因するものと思われる。ちなみに、P77までの橋桁は橋幅両端と中間の3本の橋脚で支持されているが、P78以降は橋幅両端の2本のみで支持されている。また、P78は他に比べて若干太い。

③ 両高架橋周辺地盤の地震動特性の比較

崩壊したサイプレス高架橋周辺の地盤と、クラックや剝離などかなりの被害を受けたものの落橋には至っていないエンバカデロ高架橋周辺の地盤を比較する。最も卓越する振動数についてみると、エンバカデロが0.7~1.5 Hz、サイプレスが0.6~1.0 Hzであり、エンバカデロの方がやや高いものいずれも0.8 Hz前後で同程度といえる。最大増幅倍率はサイプレスが4倍前後なのに



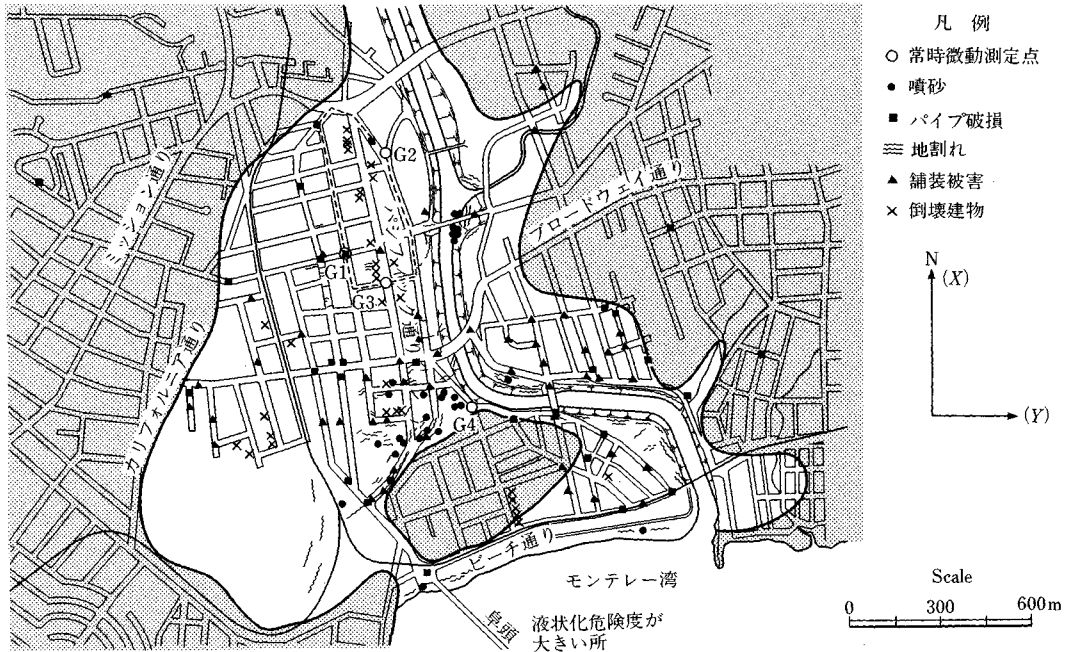


図-54 サンタクルス周辺の常時微動測点と被害状況<sup>61)</sup>

対し、エンパカデロでは10倍前後とサイプレスの2倍以上大きくなっている。このことから、高架橋に作用した地震動の大きさはサイプレスよりエンパカデロの方が大きかったものと推測される。

したがって、いずれの地点においても大きな地震力が作用したのは間違いがないが、両高架橋の被害の違いは、地震動の大きさの違いよりもむしろ設計条件の相違や補強の有無など構造体の相違に起因するものと考えられる。

4) その他の地域における常時微動測定の結果

① サンタクルス

ここでは、被災地の周辺3か所 (G1~G3) とサンロレンソ川沿いのローレル通り付近 (G4) の合計4か所で常時微動を測定した。G4付近では液状化が多発している。図-54に測点の位置を、被害地域などの情報<sup>61)</sup>とともに示す。これによると、いずれの測点近傍にも、埋設パイプの破損や液状化、建物の倒壊などの被害が認められる。

図-55は地盤震動特性の推定結果から卓越振動数と増幅倍率を読み取って測点位置に対応して示したものである。これによると、おおむね1~2 Hzの卓越振動数で増幅倍率は5~8倍と推定され、SF市周辺の被害地域におけるものと類似している。また、海岸に近い測点ほど卓越振動数が低くなっており、表層地盤が海岸に近いほど厚くなっていることを示唆している。

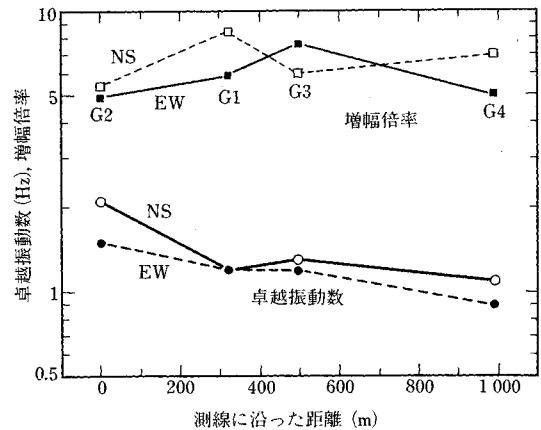


図-55 サンタクルス被害地域周辺地盤の卓越振動数と増幅倍率の変化

② サンノゼ

本市内では、軽微な被害は散見されるものの倒壊などの被害は見受けられなかった。サンベドロ通りとサンタクララ通りの交差点付近で常時微動を測定した。測定点の周辺では被災した様子は全くなかった。

地盤の震動特性は図-56のように推定される。これによると、0.6~1.3 Hzおよび2, 3 Hz付近で増幅倍率がやや持ち上がっているが、その値は1.8倍程度と小さい。

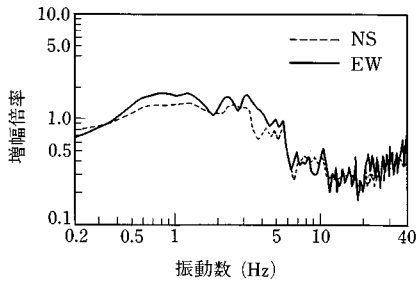


図-56 サンノゼ市内の地盤震動特性の推定例

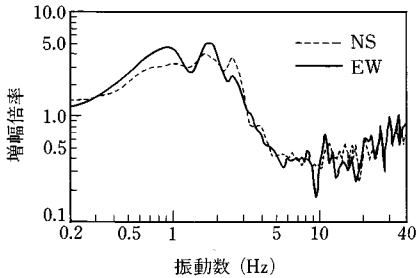


図-57 CDMG 強震観測点：南 SF 市 4 階建て病院地下室の推定地盤震動特性

③ 南 SF 市 4 階建て病院

ここは CDMG による強震観測地点である。今回の地震により地下室で観測された強震記録によると、最大水平加速度は、東西方向で 0.15 g (147 cm/s<sup>2</sup>) であり、その卓越振動数は 2 Hz 弱である。

図-57 は地下室で測定した常時微動により推定した地盤震動特性であるが、東西方向では 2 Hz 弱で 5 倍の増幅倍率となっている。この地点の震央距離は 85 km であるから、中村・富田式 (1984) により、基盤加速度は 48 cm/s<sup>2</sup> と推定される。これに単純に増幅倍率をかけて、地下室の最大加速度は 240 cm/s<sup>2</sup> と推定される。実測値 147 cm/s<sup>2</sup> と比べて大きめであるが、簡易推定値であることを考慮する必要がある。なお、本地点周辺には被害はなかった。

(5) ま と め

LP 地震では表層地盤で震動が大きく増幅されている。これが、やや離れた SF 市周辺にまで大きな被害をもたらした主な原因と考えられる。そこで、被災地周辺の表層地盤の震動特性を常時微動によって推定するとともに、推定結果を被害状況や地盤状況と比較する検討などを行った。これらの検討の結果は次のようにまとめられる。

① LP 地震の観測最大加速度は日本の強震観測データとも調和的であり、最大 10 倍前後の表層地盤による増幅があったものと推測される。また、上下動加速度が大きくなるほど水平動加速度が相対的に小さくなる傾向が認められ、水平動に非線形性の影響が現われているこ

とがうかがわれる。

② 常時微動により推定された地盤の卓越振動数は、表層地盤が厚いほど、また、埋立て時期が新しいほど、低くなる傾向が認められる。

③ 常時微動により推定された地盤の増幅倍率は、旧湿地帯や埋立て地域で大きくなる傾向が認められる。

④ 今回の地震により被害を受けた地域では、推定卓越振動数が 1 Hz 前後で、推定増幅倍率は 5 倍を超えている。

⑤ 崩壊したサイプレス高架橋周辺の地盤の卓越振動数は 0.6~1.0 Hz と推定され、近傍での強震観測波形の卓越振動数と一致している。崩壊に至らなかったエンバカデロ高架橋周辺地盤の卓越振動数は 0.7~1.5 Hz と推定され、サイプレス高架橋周辺の地盤と大きな違いはない。しかし、増幅倍率については、エンバカデロ周辺が 10 倍程度とサイプレス周辺の 4 倍程度に比べて 2 倍以上に大きくなっており、エンバカデロ高架橋の方により大きな地震動が作用したと考えられる。このため、両高架橋の被害の相違は補強の有無や構造特性の違いに起因するものと推測される。

⑥ 全般的にみて、今回の地震被害は地盤変状に伴うものが多く、常時微動により推定された表層地盤の卓越振動数が低いほど、また、その増幅倍率が大きいほど被害程度が大きくなる傾向が認められる。

謝 辞：今回の地震に関連する調査や分析にあたって、次の方々をはじめさまざまな方々にお世話になりました。ここに深甚の謝意を表します。東京工業大学 野村卓史、佐藤工業(株) 吉田 望、東海大学 浜田政則、EQE エンジニアリング Kent M. David, Charles Scawthorn, Peter I. Yanev, USGS Mehmet Celebi, CDMG Brian E. Tucker.

2. 地震時における斜面崩壊

佐藤忠信 (Tadanobu SATO)\*1

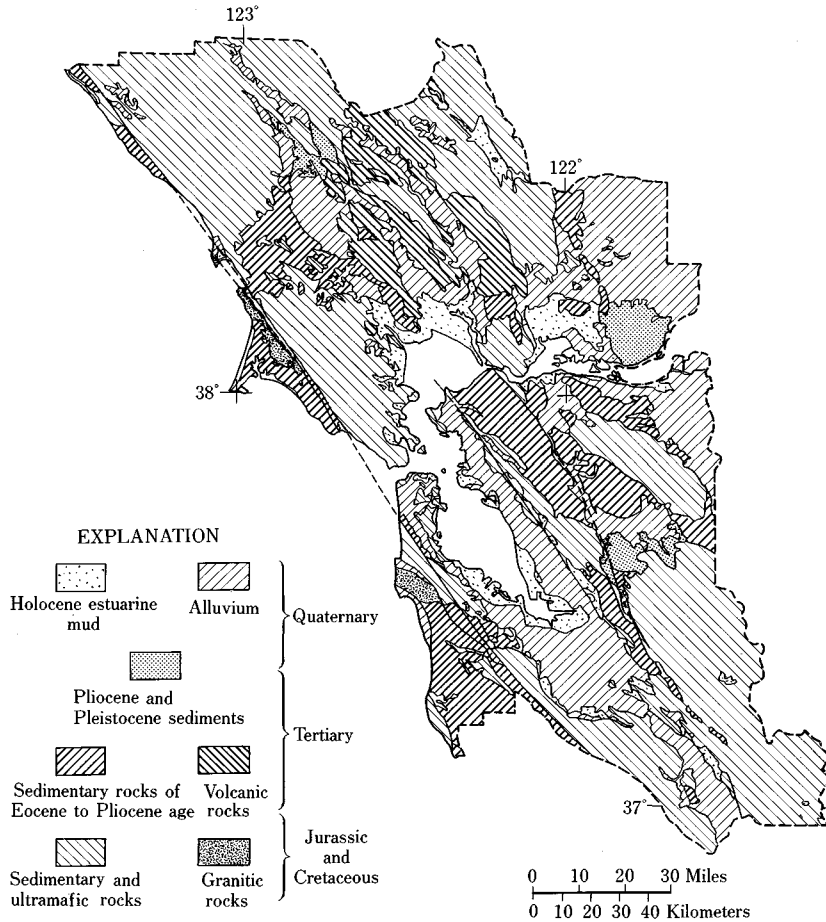
北浦 勝 (Masaru KITAURA)\*2

(1) ま え が き

1989 年 10 月 17 日午後 5 時 4 分 (現地時間) に、サンタクルス市の北東 10 km, サンフランシスコ市の南西約 100 km, 北緯 37.037 度, 西経 21.883 度, 深さ 18 km を震源とするマグニチュード 7.1 のロマブリータ地震が発生した<sup>63)</sup>。この地域には 1906 年にも大きな地震が発生しており、歴史的に新しい近代都市でありながら、地震の資料が詳細に残っているとこで 2 度の地震被害を受けた例は比較的少ないので、今後各種の比較検討が行われるものと考えられる。有感領域はおよそ 100 万

\*1 京都大学防災研究所助教授

\*2 金沢大学工学部土木建設工学科教授



図—58 サンフランシスコ湾岸の地質分類図

方 km であり、ネバダ州のレノ、ラスベガス、カリフォルニア州のロサンゼルスにおよんでおり、死者数は 62 名、負傷者数は 3757 名であり、家屋損失者は 1 万 2000 人であった<sup>64)</sup>。被害額は 1 兆円 (70 億ドル) を超えるといわれ、アメリカにおける自然災害による被害額としては最大級のものであるとされている。

10 月 24～30 日にかけて、金沢大学の北浦・池本、神戸大学の高田ならびに京都大学の杉戸 (スタンフォード大学より現地参加)・佐藤からなる 5 人のグループで被災地に入った。事前の打ち合わせで、なるべく早い時期に被災地に入り、復旧作業が始まる前に広く視覚的 (写真、ビデオ) に被害の把握と調査を行うことをこの調査の主な目的とした。調査した地域はサンフランシスコ・マリナーナ地区、I-880 号線、17 号線、1 号線、サンタクルス市内、ワトソンビル地区、ロマプリータ地域、ロスガトス市内である。

今回の地震被害の第 1 の特徴は、典型的な都市型地震災害の様相を示したことであり、電力・ガス・上下水道

等の供給網の機能障害、電話やコンピュータに代表される情報機能の混乱など、ライフライン施設に大きな被害を生じた。第 2 の特徴は、埋立て地盤や軟弱地盤地域において地震動が大きく増幅されて、耐震的に脆弱な構造物に被害が集中したこと、地盤の液状化現象が広範囲に発生し、地盤変状に基づく構造物の被害も各所にみられたことである。第 3 の特徴は、斜面崩壊や地割れが各所で発生し、特に震源域では斜面崩壊のために各所で道路が閉鎖されたことである。斜面崩壊についてはあまり注目されなかったが、かなりの被害を生じた。

被害の詳細についてはグループでまとめたので<sup>65)</sup>、ここでは、まず、本地震による地盤震動の特性を概説した後、解析的に求められる最大加速度の期待値と観測値との比較検討を行う。さらに、地盤変状の概要について述べた後、地震時における斜面崩壊によって道路が不通になることが多いので、道路被害の概要を述べ、最後に斜面崩壊について解説する。

(2) 断層破壊過程を考慮した最大加速度の推定

統計解析に基づいたマグニチュード  $M$  と震央距離  $\Delta$  に関する地盤種別ごとの既存の最大加速度アテニュエーション則だけでは、ばらつきの大きい実際の最大地動の現象をとらえられないとの考えから、断層の破壊過程を考慮し、小地震の震源スペクトルから大地震のパワースペクトルを計算して最大地動の期待値を推定する方法を開発してきた<sup>66)</sup>。そして、種々の断層パラメーターの変化が最大加速度のアテニュエーション特性に及ぼす影響を明確にし、特に断層近傍での最大加速度が頭打ちとなり、その頭打ち現象に対応する震央距離がたかだか断層の長さ程度であることを示した。さらに、地震基盤から入射する地震波動の表層地盤による増幅特性および各地域ごとの  $Q$  値を考慮することにより、これまでの日本周辺で発生した歴史地震について最大加速度分布を再現した<sup>67)</sup>。この方法を用いて、1989年ロマプリータ地震に対して、震源域での地盤震動の強度がどの程度再現できるかについて検討を加えた。

震源特性としては USGS<sup>64)</sup> が発表しているデータを用い、ストライク  $N50^\circ W$ 、ディープ  $70^\circ$ 、断層長さ 37 km、断層の幅 18 km とし、断層の破壊開始点を断層底辺の中央とし、同心円上に破壊速度 3.1 km/s でほぼ一様に破壊が進行するものとした。基盤岩の S 波速度は 3.4 km/s とした。対象地域を縦 18、横 23、合計 414 個の網目で覆い、網目の各交差点上での地質条件を図-58 より読み取り増幅度を決定し、地震基盤における入射波の最大加速度の期待値を各交差点上で計算し、それに増幅度を乗ずることにより地表面での最大加速度の期待値を 414 の交差点で求めた。図-59 はこの値を用いて最大加速度の等高線を描いたものである。これより、震源域においては 400 gal 以上の地動加速度の発生したことが解析的にも求められることがわかる。これは気象庁震度 VII 以上に相当する。図-60 は各交差点上で求められた最大加速度と震央距離との関係を示したものである。震央距離が 10 km のあたりで最大加速度として 500 gal 程度の値がみられる。全体的な傾向としては震央距離に反比例のアテニュエーション特性になっているが、断層の広がりやを考慮しているため、断層近傍では最大加速度が上限を有していることがわかる。図-61 は観測された最大加速度と解析的に求めた最大加速度との関係を示したものである。図中実線で囲まれた 7 点は Bay mud 上にある観測点のデータであり、Bay mud の増幅特性が十分に評価されていないので、計算値は観測値よりかなり小さな値になっている。基盤岩上での増幅度を 2.0 と定義し、各観測点の基盤岩上での最大加速度の期待値を求め、この値で観測値を除いて増幅率を計算し、震央距離に対して示したのが図-62 である。Bay mud 上の観測点の増

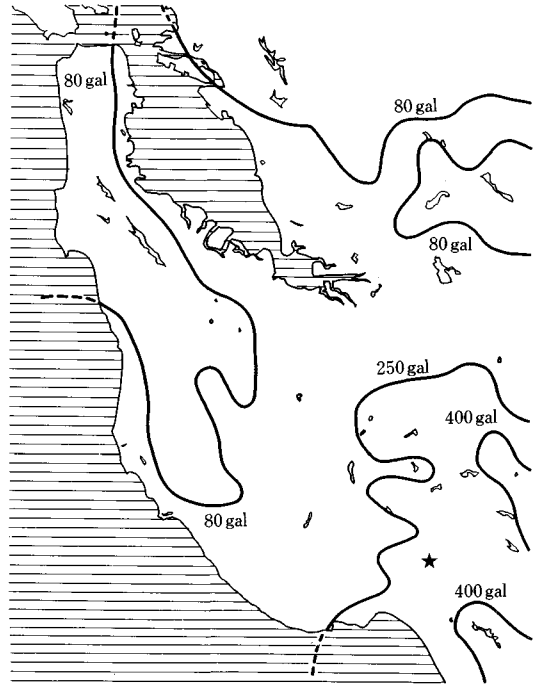


図-59 最大加速度の期待値分布

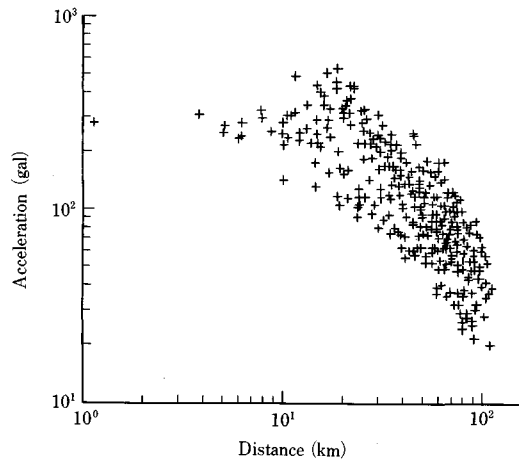
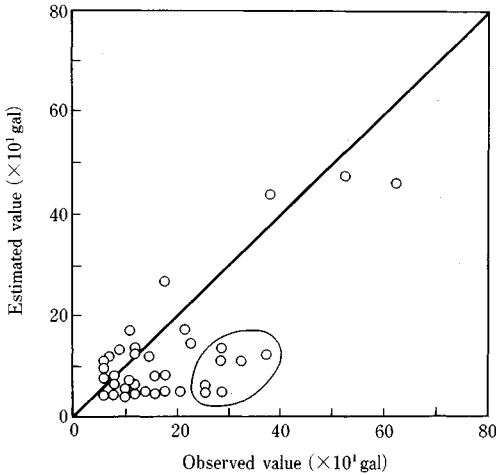


図-60 解析的に求めた地表面最大加速度のアテニュエーション

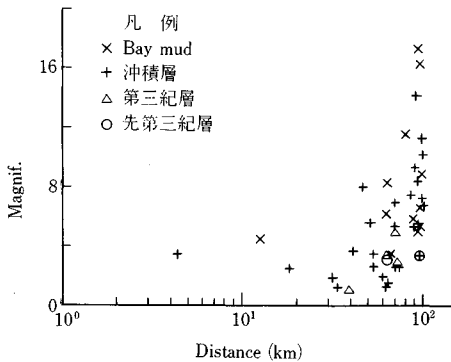
幅率は 4 から 17 倍程度の範囲にあることが明らかである。増幅率にかなりの差があることは、堆積層厚の違いのみならず地盤構造の不整形性に起因すると考えられる。

(3) 地盤変状

液状化に基づく地盤変状はサンフランシスコ湾岸の埋立地で広く発生したが、斜面崩壊に直接関係したものはなかったため、断層運動に基づいた地盤変状について解説する。今回の地震発生域でのサンアンドレアス断層の



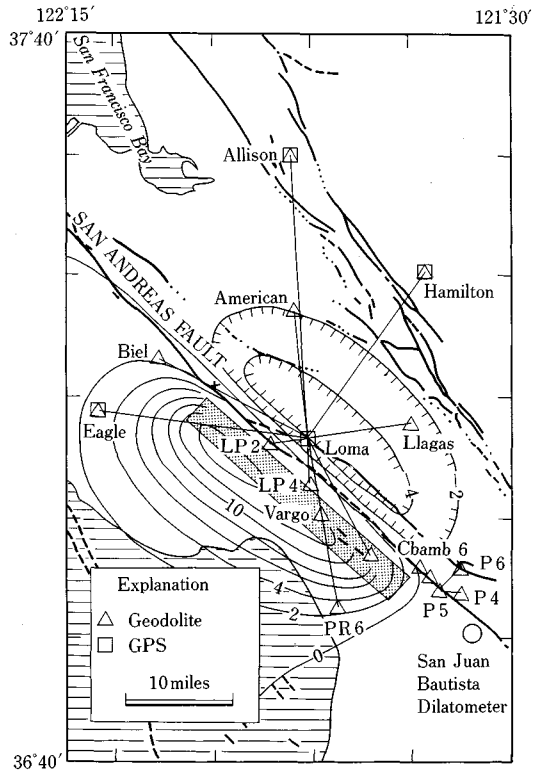
図一61 計算値と観測値の比較 (実線で囲まれた点は Bay Mud 上にあり増幅特性が極端に異なる)



図一62 観測最大加速度の増幅率と震央距離との関係

動きについては、アメリカ地質調査所が1980年よりロマプリータ (Loma Prieta) を基準点としてジェオドライトによる地殻変動の観測を行っている。地震発生直後における11本のジェオドライト測線の距離変化、地球観測衛星を利用した汎地球測位システムによる4地点間の相対変化に基づいて大局的な地表面の隆起と沈下を求めたのが図一63である<sup>64)</sup>。図中の網掛けの部分断層面を水平面へ投影したものであり、西南ブロックの最大隆起は約45cmであり、東北ブロックの最大沈下は約15cmとなっている。図中の等高線は2in (約5cm) 間隔で入っている。

サンアンドレアス断層沿いに発生する今回程度の規模の地震では、これまで0.9~1.8mの右横ずれが観察されてきた。しかし今回の地震では、サンアンドレアス断層に発生した40kmの破壊面に沿って、地表面には右横ずれ断層の形跡はみられなかったといわれている。図一64は今回の地震によって発生した地割れの分布図である<sup>64)</sup>。地割れの方向は北西であり、17号線の東南部



図一63 地震断層の運動に伴う大局的な地表面の隆起と沈下<sup>64)</sup>

に延びる Summit Road 沿いの上盤側に分布している。この地割れは引張り性の左横ずれクラックであり、およそ長さ8km、幅2.5kmの範囲にわたって分布している。こうしたクラックの左ずれ量は多くて75cm、縦ずれ量は60cmであった。Skyland Ridge 領域でのクラックは引張り性で左横ずれであった。変動量は Summit Road 沿いのクラックよりも少なかった。Summit Road 沿いのクラックは尾根に平行であったが、Skylandのクラックは尾根を斜めに横切るものが多かった。

この地域のクラックの多くは既存の崖や窪地に沿って発生しており、Summit Road に沿った尾根の地形はこうした断層運動によるクラックや地滑りの結果として構成されていることがわかる。

Summit Road における大きなクラックは北西に延びる尾根に沿って発生している。尾根は比較的軟らかい第3紀の堆積岩から成っており、クラックは層理に沿って発生し、弱い頁岩の部分に集中している。サンアンドレアス断層の西南ブロックの隆起はブロックの表面近くに引張り性の亀裂と拡大運動を引き起こした。強震動のために尾根の峰は斜面が谷方向に動くことにより水平方向に拡大した。

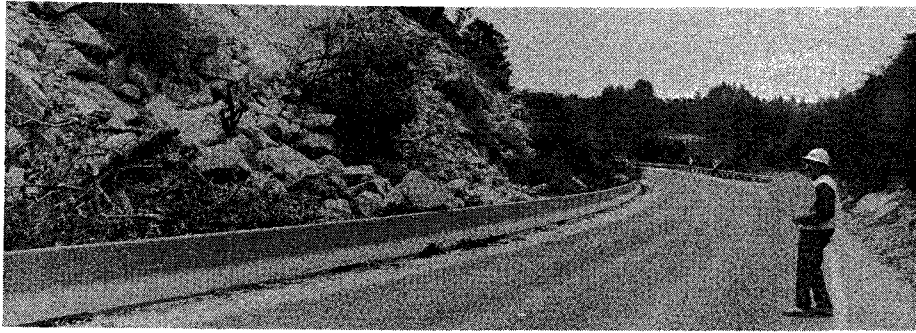


写真-10 サンタクルス山岳地帯における岩石崩壊

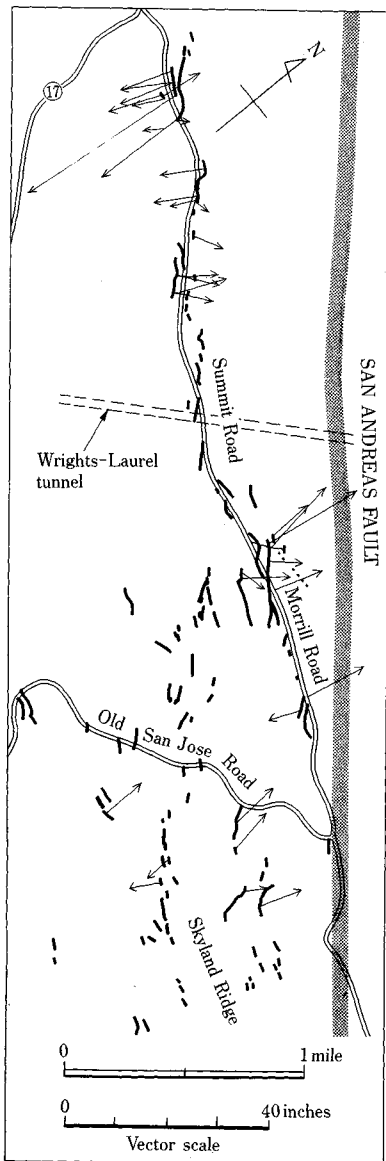


図-64 地震による地割れの分布図<sup>64)</sup>

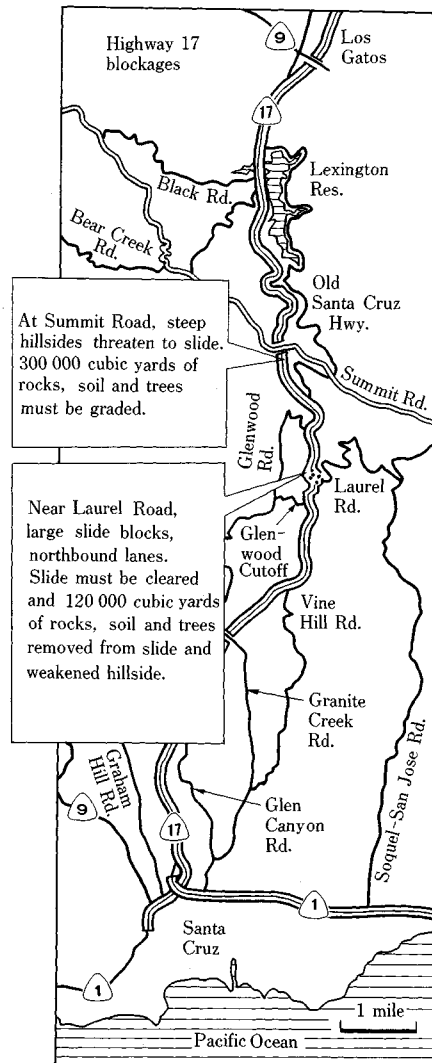


図-65 17号線沿いの土砂崩れによる道路の閉鎖地点<sup>65)</sup>

#### (4) 道路の被害

地震発生後5日たった時点での新聞報道<sup>68)</sup>による主要道路の不通箇所は11か所であった。その主な要因は橋梁、高架橋の被害と道路斜面の崩壊によるものであり、その内容は以下のものであった。① Martinez-Benicia 橋の被害でトラックの通行が両方向とも閉鎖、② Cypress 地点における I-880 号線の上部デッキの崩壊により、Gilman Avenue (Berkeley) から I-980 号線 (Oakland) までが閉鎖、③ Bay 橋の構造被害による通行止、④ Embarcadero 高速道路が Clay Street から I-80 号線まで閉鎖、⑤ I-280 号線が U. S. 101 号線から Sixth Street まで閉鎖、⑥ 92 号線が U. S. 101 号線をまたぐ地点で、101 号線の北行きが土砂崩壊で通行止、⑦ 9 号線が San Lorenzo 川橋の構造被害のため Ben Lomond で通行止、⑧ 17 号線が Scotts 谷をまたいでいる Granite Crech 道から 9 号線まで、斜面崩壊のため通行止、⑨ Struve-Slough 橋の崩壊のため 1 号線が閉鎖、⑩ 129 号線が Aromas 道との交差点で通行止、⑪ 25 号線が U. S. 101 号線との交差点から 15 マイル間岩崩れのため通行止。以上の 11 件のうち⑥、⑧、⑪が斜面崩壊に関連したものである。写真—10 は目撃できた斜面崩壊の大規模なもので、17 号線を通行止にしたもので、第三紀の砂岩から成っているものであった。新聞の報道<sup>69)</sup>によれば 17 号線を通行止にしたこの土砂崩れ (図—65 参照) は 23 万 m<sup>3</sup> にも及ぶものであったとされている。この道路はサンタクルスとサンフランシスコ湾岸とを結ぶ幹線であり、1 日当たり数万人の通勤者に利用されていた。

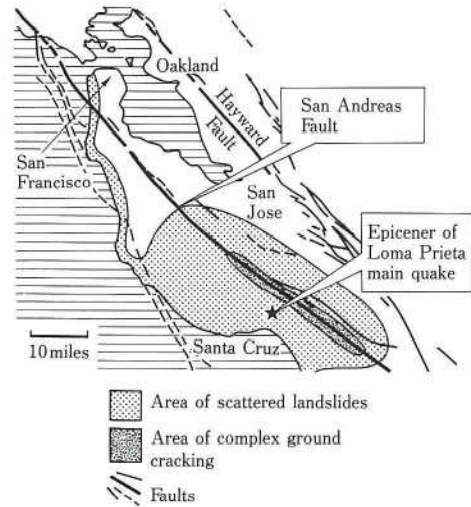
このほかに地方道の被害はかなりあったと考えられるが、現在入手できている新聞<sup>70)</sup>によれば、震源域近傍のサンタクルス郡での道路と橋梁の通行止は、Rodeo Gulch, Eureka Canyon, Bean Creek, East Criff Drive, Santa Cruz ヨットハーバー橋, Moss Landing 橋であった。このうち道路の通行止のすべては切り取り斜面の崩壊に基づくものであった。写真—11 は Summit Road 沿いにみられた典型的な斜面崩壊の一例である。

#### (5) 斜面崩壊

断層破壊領域に近いサンタクルス山岳域では地滑り、岩石崩壊が多数発生した。図—66 は地滑りと地割れが発生した地域の概略を示したものである<sup>71)</sup>。カリフォルニア大学パークレー校の報告書<sup>72)</sup>によれば 500~1 000 か所の地滑りが発生し、調査が継続されているとのことである。アメリカ地質調査所が今回の地震に基づく地滑り・斜面崩壊の報告書を作成中で、この報告書が出版される頃には入手可能になっているはずである。地滑りが発生した地域は 1 万 4 000 km<sup>2</sup> におよび、サンフランシスコ湾岸地域、サンタクルスからモントレー湾岸地域に



写真—11 サミット道路沿いの典型的な斜面崩壊



図—66 地滑りと地割れの発生地域

集中した。地滑りによる家屋や公共施設の被害は少なく見積っても数十億円にのぼるといわれている。道路の被害のところでも述べたように、地滑りによってサンタクルス山岳地域の道路が寸断され、救助活動に支障を来した。

地滑りの多く発生した地域は震源域の近傍であり、サンタクルス山岳地域の傾斜の急な、険しい山林地帯である。この地域における年平均降雨量は実質 1 500 mm であり、冬の雨期における地滑りの発生が顕著であった。ロマプリータ地震の発生する前の 2 年間は降雨量が少なかったこともあって、地震の起こった時期が乾期（5 か月間の総雨量は 50 mm）の終わりであったにもかかわらず、地滑りが多くの場所で発生した。

地震によって引き起こされた地滑りは、いろいろな種類の地盤の側方変動や斜面下方への移動を伴っていた。最もよくみられたものは落石、岩盤と土塊の滑りであった。ほとんどのものは 3 m 以下の浅い滑りであり、急斜面を高速で滑り落ち玉石と細粒土の混合堆積物を構成した (写真—11 参照)。ほとんどの堆積は 80 m<sup>3</sup> 以下の



写真-12 サンタクルス山岳地帯の頂上近くに現われた地滑りの頂点部分

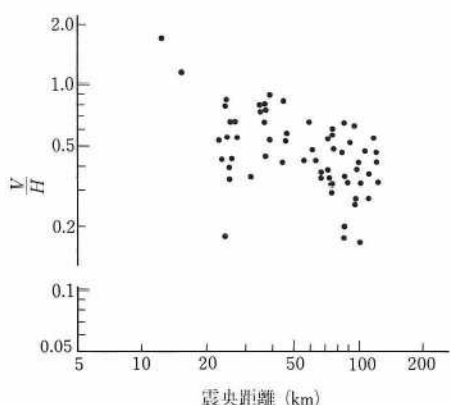


図-67 観測された地震動の水平動成分に対する上下動成分の比

ものであるが、中には800から8000 m<sup>3</sup>の規模のものもあった。道路の切土部分、垂直に近い断崖や海断崖の部分に露出している風化の進んだ結合強度の弱いあるいは破碎されている岩がこうした地滑りの原因となった。

数百か所で深い(3 mから30 m)地盤ブロックの移動がみられ、円弧滑りによる陥没やブロック滑りによる水平移動が発生した。地震による地盤ブロックの移動は数 cm から数十 cm であり、道路、住宅地や自然地盤にクラックや滑落崖を生じさせた。写真-12にその一例を示した。これは Summit road 沿いにみられた地滑りの頂点部分である。地震動の強い地域では造成盛土に陥没を生じ、これが道路を分断した。地震後10日間はぐずついた天候で、150 mmの総降雨量があり、いくつかの陥没部分と地滑りブロックでは新規または継続的な変状が発生する兆候を示した。在来の地滑りブロックならびにクラックの発生によって脆弱になった斜面は冬の雨によって崩壊に至る可能性があるといわれている。発見

された最大のブロック滑りは、Laurelに近いサンタクルス山岳地域にあり、75 haの広がりをもっており、地滑り域には数十軒の家屋が存在している。

斜面の地震時における安定性に大きな影響を及ぼすものとして、地震動の上下動成分がある。図-67は水平成分に対する上下成分の比を震央距離に対して示したものである。震源域ではこの比が2倍程度になっており、かなり大きな上下動を受けたので、斜面崩壊が助長されたと考えられる。

これらのほかに、土石流が1件、液状化に基づく地盤変状が多数発生したことが報告されている。

### (6) 斜面崩壊の危険度

以上が、今回の地震による斜面崩壊の概略であるが、サンフランシスコ沿岸では、開発が進むにつれて丘陵部や山腹斜面が利用されるようになってきたため、地震のみならず集中豪雨による地滑りの危険性が指摘されていた。この地域の1968~1969年の雨期における地滑りの被害は35億円であり、1972~1973年のそれは15億円であった。こうした地滑りの被害を最小限にとどめるために、アメリカ地質調査所が1979年に、この地域の地滑り危険度地図<sup>7)</sup>を出版している。これは地形図から斜面勾配を読み取り、それを0~3°、3~8.5°、8.5°以上の3段階に分けた地図、地滑り堆積物図ならびに地表と基盤岩地質図の3種類を重ね合わせ、斜面の安定度を5段階に分類した地図である。これによれば、今回の地震が発生した地域は、危険度図の南部境界上にあり、不安定斜面と判定された領域がかなり広範囲に分布している。

こうした観点から、冬の雨期の雨によって大規模な斜面崩壊の発生する可能性を指摘している研究者(Prof. Gary Griggs, カリフォルニア大学サンタクルス校)もいる。80 haにおよぶ地域の地滑りの可能性を述べ、Schulties と Redwood Logde 道路沿いにはかなり大規模な地滑りの兆しがあること、サンタクルス郡境の Villa del Monteh 副分水界に沿って地割れが走っていることなどから、冬季の雨が過去の深い滑り面を活性化させるおそれがあることを警告している。

## 3. 地震断層と地震予知

安藤雅孝 (Masataka ANDO)\*1

伯野元彦 (Motohiko HAKUNO)\*2

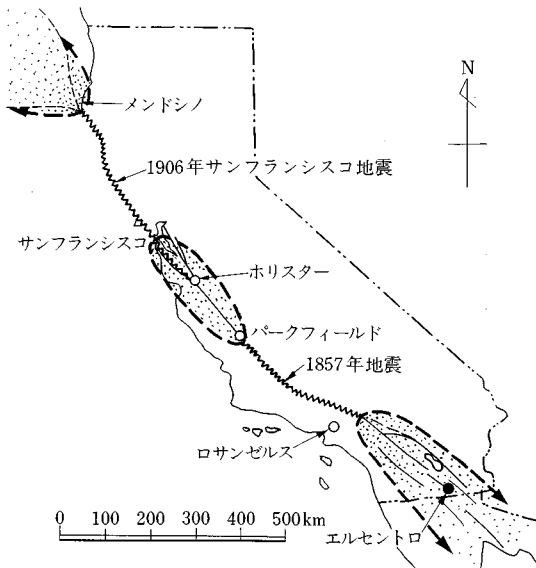
### (1) はじめに

ロマブリータ地震は、世界で最も高密度に地震観測網がはりめぐらされた中部カルフォルニアに起きた。この地震は、震源過程や地震予知の研究へ貴重なデータをも

\*1 京都大学防災研究所教授

\*2 東京大学地震研究所教授





図—68 サンアンドレアス断層の4つの区分 [1906年大地震域と1857年大地震域(波線)ではひずみエネルギーは大地震( $M=7.5\sim 8$ )によってのみ解消され、普段は静穏なところである。砂目の部分は、中小の地震が頻繁に起こり、クリープ(断層に沿ってゆっくりすべる)現象がみられる。Allen (1968)<sup>75)</sup>による。]

たらずはである。アメリカ地質調査所をはじめとする地震学的な面からの研究は、アメリカ地球物理学連合の Geophysical Research Letter (1990年7月, 8月号) にまとめられている。この小論では、これらの33の論文を中心に、“次の地震”についての最近の話題も含めて、ロマプリータ地震について解説する。

## (2) サンアンドレアス断層

ロマプリータ地震は、サンアンドレアス断層上に久しぶりに起きた地震であった。サンアンドレアス断層は、北米プレートと太平洋プレートの境界にあたり、カリフォルニア州の海岸1200kmを走りメキシコに至る。断層の両側の岩盤は、最近100万年の平均で50mm/yの速度ですれていく<sup>74)</sup>。現在の動きは宇宙電波を利用したVLBI(超長基線干渉計)や人工衛星の電波を利用したGPS(地球測位システム)により測定されている。サンアンドレアス断層のずれ速度は、日本列島では最も活動的な中央構造線の10倍、普通の活断層ならば100倍に達する。サンアンドレアス断層がいかに活動的な断層であるかが理解できる。ただし“ずれ速度”は、ある期間の平均をとったものであるから、必ずしも1年間にずれる量を表わしたものではないことを注意しておきたい。

サンアンドレアス断層は、大きく分けて4つに区分される<sup>75)</sup>。北から順に、1906年地震域、中央カリフォル

ニア活動域、1857年地震域、南カリフォルニア活動域と名付けておく(図—68)。これら4つの区間の地震の起こり方について、以下に説明をする。

### a) 1906年地震域

サンアンドレアス断層を有名にした1906年サンフランシスコ地震の震源域である。この地震の断層は、メンドシノ岬から南へ450km、ロマプリータ地震の震源域まで伸びていた(図—68)。最初の破壊点は金門橋の付近であったとの研究もある。サンフランシスコ地震の断層は、内陸の地震断層のうちで最長であった。ちなみに、1990年7月16日のフィリピン地震の断層の長さは150kmである。サンフランシスコ地震の前後に行われた精密三角測量から土地の変形の様子が求められ、それをもとに有名な「弾性反発説」が提出された<sup>76)</sup>。地震前にゆっくりためられたひずみエネルギーが一挙に放出される、これが地震である、との考えであった。地震のメカニズムを言い尽くした先駆的な考えであった。ただし、大多数の地震学者が認めるまでに60年を要した。

### b) 中央カリフォルニア活動域

サンフランシスコから南の300kmの区間は常時地震活動が活発である。ここには、1906年地震の南の部分やロマプリータ地震も含まれる。ホルスターからパークフィールドにかけてはクリープも生じる。クリープは地震を引き起こさずに断層に沿ってずるずる動く現象で、世界でも珍しい。クリープ地域には、小さな地震が数多く起こり、微小地震の震央で真っ黒に塗りつぶされているのが常である。微小地震の起こり方はクリープを見つける手がかりになる。サンフランシスコ湾の東側には、ハイワード断層やカラベラス断層が走る。ハイワード断層上にはクリープが起きる。クリープ領域では、クリープですべる量が、地震を起こしながらすべる量より大きい。これに対し、大地震域は、通常は微小地震の起きない地震活動の低いところにあたる。100~200年に1回の割合で起こる大地震ですべりを一挙に完結させる。

### c) 1857年地震域

1906年地震のような大地震が起きるもう1つの区間である。パークフィールドから南へロサンゼルス付近まで達する(図—68)。最近の地震は1857年に起きたもので、この地震の証拠としては、断層に沿う小谷のずれなどが挙げられ、これらは現在でも観察できる。この地震による最大のずれは、カリゾ平野で発見された11mである。このずれは、陸上でみつけられた地震断層による最大のずれの量と考えられる。この断層を横切って行われた発掘調査から、過去1400年間に10回地震が起きたことが明らかになった<sup>77)</sup>。

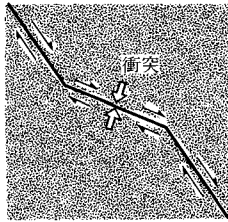
### d) 南カリフォルニア活動域

1858年地震断層の南端からメキシコにかけて、並行

して走る3本の断層に分かれる。ここには中規模の地震が頻繁に起こる。有名な1944年エルセントロ地震(図一68)もその1つである。この地域には中小の地震と微小地震だけが起り、クリープや大地震が起きたとの記録はない。

e) ロマプリータ地域

サンフランシスコの南80 km付近に、低い山々が北北西—南南東に並ぶ所がある。ここはサンタクルス山脈とよばれている。サンノゼ市からサンタクルス市へ向かうハイウェイ17号線がこの山脈を横切る。サンアンド



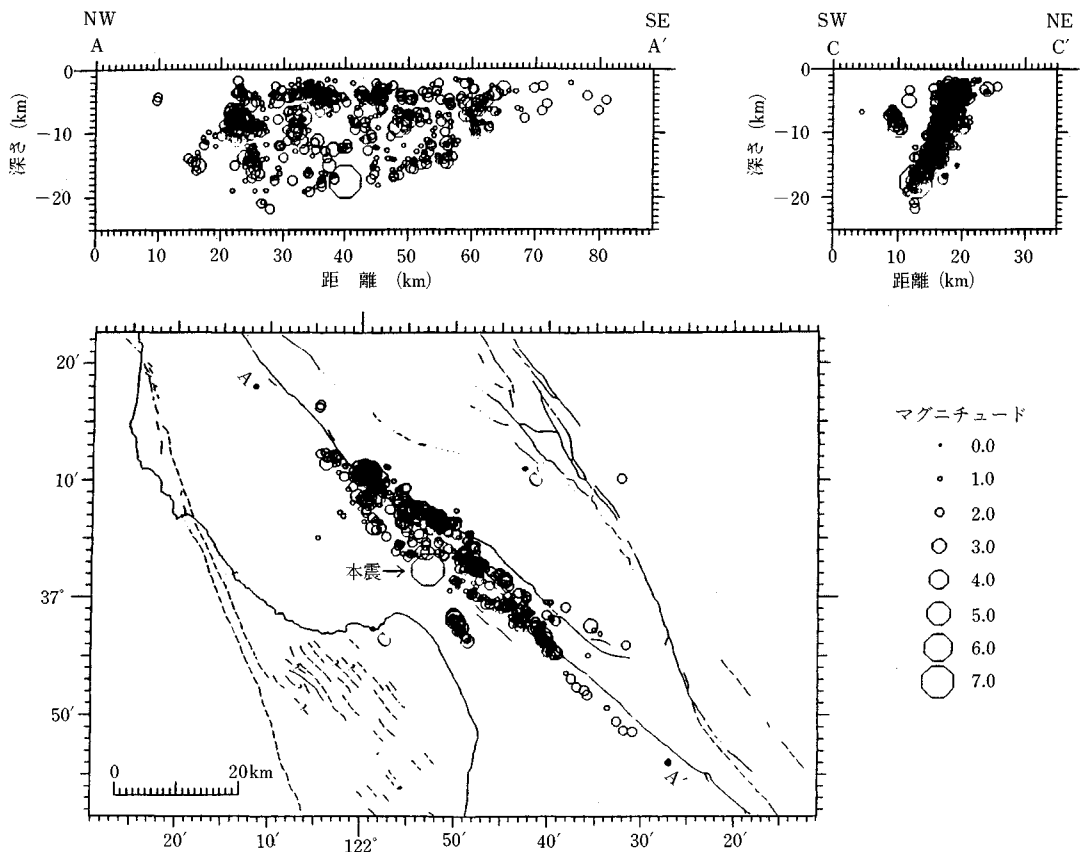
図一69 ロマプリータ地域のサンアンドレアス断層の模式図  
(断層のゆるい曲がりにより、断層の両側の岩盤が“衝突”する。衝突部分にサンタクルス山脈ができた。)

レアス断層をサンフランシスコから南へ追っていくと、サンタクルス山脈に沿って緩やかに西へ曲がる。ここがロマプリータ地震の震源地である。サンアンドレアス断層沿いに山がそびえるのは、北部地域ではここだけである。山ができたのはロマプリータ地震の発生とは密接な関係がある。断層の両側の岩盤が、断層に平行に動けば、物質の収支はゼロであるから、地殻は変形しない。しかし、断層が曲がっていると、地震の際のずれは断層に直行する成分をもつ。これにより、地面は盛り上がりたり、沈んだりする。ロマプリータ地域では衝突する成分をもつから(図一69)。地殻は盛り上がりくる。これは、ヒマラヤ山脈のでき方に似ている。この衝突が、ロマプリータ地震生成のエネルギーのもとになっている。まっすぐに伸びる区間のサンアンドレアス断層とは違い、ロマプリータ地域はやや異質なことが起きている。

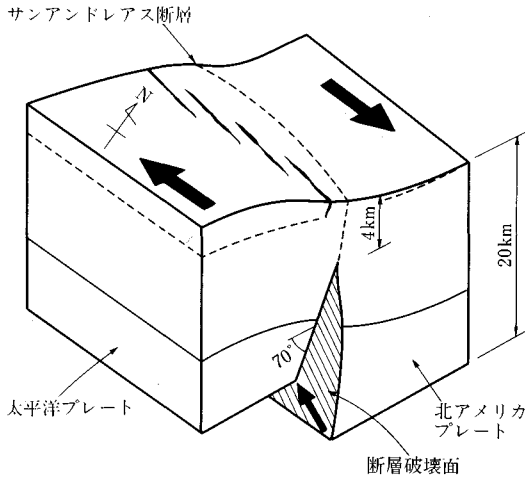
(3) 震源過程

a) 断層モデル

余震分布は本震の断層の広がりを与える。ただし、時間とともに余震の領域が広がることもあるので、本震後、短期間の余震分布をもって本震の断層とすることが多



図一70 平面図と断面図(A-A'およびC-C')でみた本震後12日間の余震分布<sup>78)</sup>

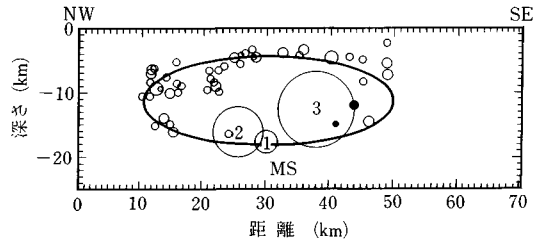


図一七1 ロマプリータ地震の断層を表わす模式図 (U.S. Geological Survey による) (断層はやや南西に傾いており、頭部は地表に達しなかった。断層の直上の地表には開口性割れ目が分布していた。断層は北東ブロックが、南東ブロックに対し滑り込みつつ右にずれるように動いた。)

い。アメリカ地質調査所は、地震後直ちに余震分布を公表した。その後、精度を上げて余震分布の様子が調べられたが、本質的な変化はなかった。図一七〇は、本震発生後12日間の余震分布<sup>77)</sup>である。本震直後の余震分布は本震の断層の広がりを表わす。この図から、断層の長さは40 km、深さが18 kmと推定される。注目されるのは、断層が65°の傾斜角をもつことである。サンアンドレアス断層上の地震断層は垂直なものも多く、ロマプリータ地震は例外的な断層である。断層がこのような傾斜している原因は、前述のように断層が屈曲しているため、断層を挟んで圧縮力が働き(図一六九)、逆断層が形成されたためと考えられる<sup>78)~80)</sup>。図一七1はこの断層モデルを模式的に表わしたものである。

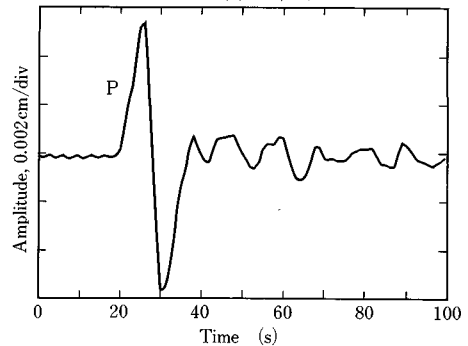
ロマプリータ地震の震源過程については、すでに10の論文つまり10のモデルが提出されている。用いられた地震波の周期や種類、解析手法は異なるが、結果は良く似ている。1つの地震の震源の解析結果がこれだけ似ていたのも珍しい。ロマプリータ地震の震源過程が単純であったためであろう。これらの震源パラメーターを平均すると以下ようになる。

断層の長さ	35 km
幅	15 km
傾斜	67°
断層面上のずれ	2.2 m
地震モーメント	$2.6 \times 10^{26}$ dyn·cm
応力降下	50 bar
$M_w$	6.9

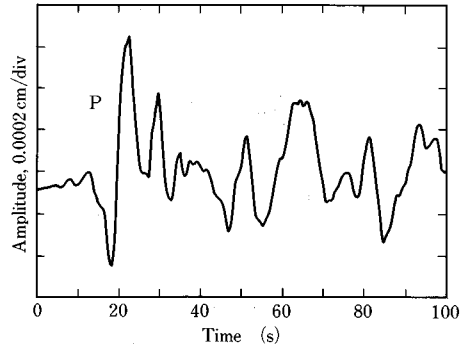


図一七2 断層面上のサブイベント(1, 2, 3)と本震後3時間半以内の余震(小丸)の位置 [サブイベントの円の大きさが、それぞれの地震モーメントに比例する。本震直後の余震は、サブイベントの部分には起きていない。Choy and Boatwright (1990)<sup>83)</sup>による。]

HRV ロマプリータ地震 10/18/1989



HRV アルメニア地震 12/7/1988



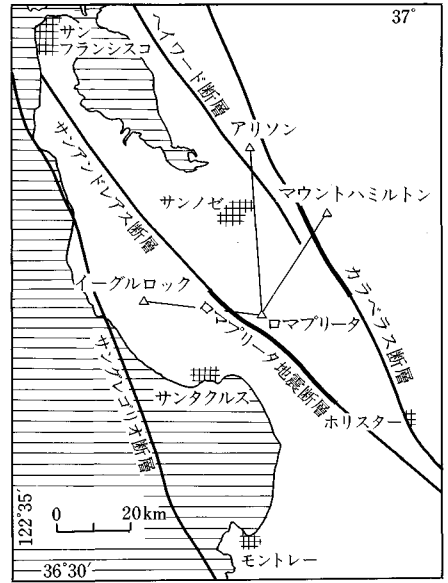
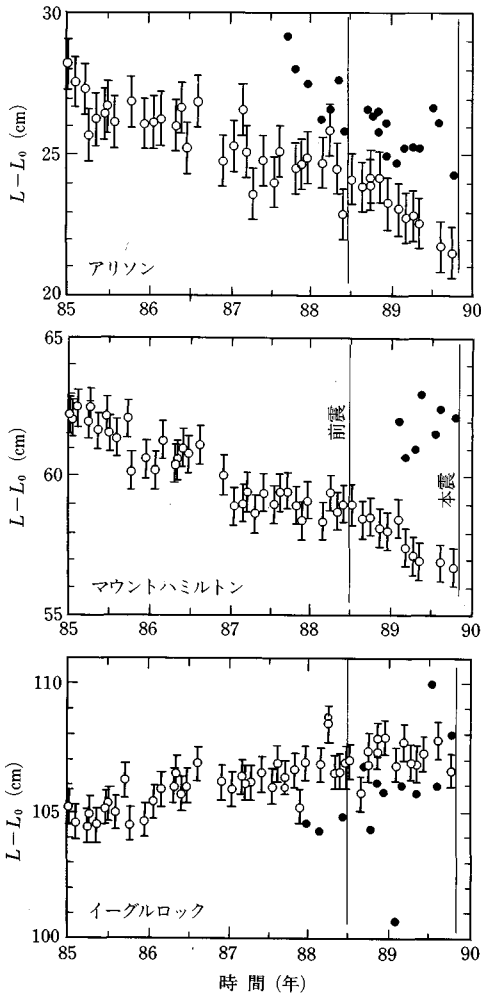
図一七3 ロマプリータ地震とアルメニア地震の超高性能地震計(STS)により記録されたP波の波形(HRV, ハーバード大学観測点)<sup>79)</sup>(ロマプリータ地震の波形がきわめて単純であるのが特徴。)

$M_s$  7.2

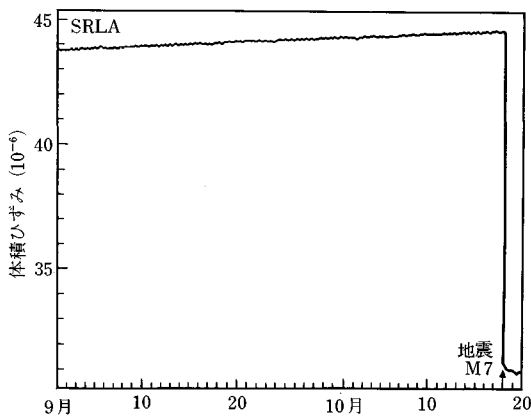
破壊継続時間 8 s

#### b) 破壊の伝播

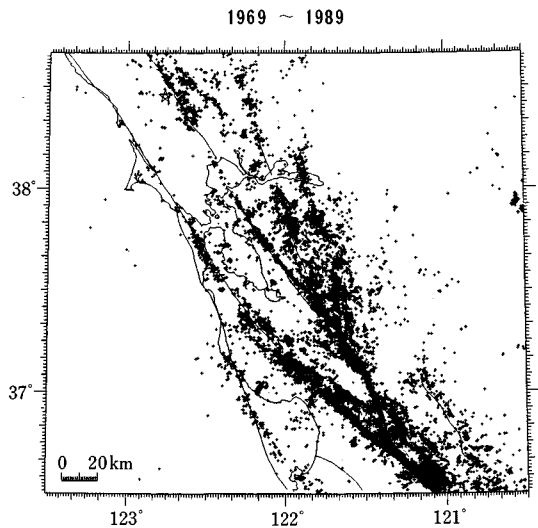
破壊の広がり方は一般に複雑である。進んだり止まったり、強くなったり弱くなったり、破壊は不連続な動きを繰り返す。このような震源における不連続的な動きは、短周期強震動の源となる。最近、このような複雑な破壊の伝播の研究が盛んに行われており、断層の破壊に閉



図一74 ロマプリータ地域のジオドライトによる精密距離測定<sup>88)</sup> [ロマプリータ山脈とアリソン、ハミルトン山、イーグルロックの間では毎月観測が行われていた。左図は3測線の距離変化。M=5.0地震(前震?)の頃に距離変化のトレンドが変わった。]



図一75 ロマプリータ地震断層から50 kmの地点の体積ひずみ計の記録 [小さなリップルは地球潮汐によるもので、これを越える異常変化はみられない。一番右の大きな変化が地震時の変化である。M. Johnstone (U.S. Geological Survey)<sup>89)</sup>による。]



図一76 中部カリフォルニアの地震活動(1969~1989年) (1906年地震の断層の部分には、現在は微小地震がほとんど起きない。)

する理解を飛躍的に高めた<sup>82)</sup>。

Choy and Boatwright<sup>83)</sup>は、この地震の中に4つの小破壊（サブイベント）を認めた。サブイベント1（最初の破壊）は小さく、サブイベント2が一番大きく、3, 4はやや小さい。図—72にサブイベントの位置と大きさが示されている。円の大きさは放出した地震モーメントに比例する。サブイベントに関しては、他の研究も似たような結果を与えている<sup>84)</sup>。

断層面上のサブイベントの位置には、大きな余震が発生していない<sup>85)</sup>（図—72）。大きな余震はサブイベントから離れた断層の縁に分布している。このように、本震の断層上で大きな破壊の起きたところに余震が発生しない例は、ほかの地震でも認められている。余震は本震の割れ残しに起こるのかもしれない。余震の原因を考えるうえで興味深い。

ロマプリータ地震の余震の走時を用いて、断層の周りの速度構造の三次元トモグラフィが求められた<sup>84)</sup>。速度の大きい部分が7 kmより深い断層の周りに、速度の小さい部分が7 kmより浅い上盤側に分布する。初期破壊やサブイベントは速度の大きい部分に起きている。これから次のような説明ができる。まず、小さな破壊が断層面上の堅い部分に発生し、そこが壊れ大きなサブイベントを誘発し、横方向と上方に進み、“柔らかい”断層上部に入り込んで止まった。後述のように、ロマプリータ地震の断層は、サンアンドレアス断層の地震にしては珍しく地表に現われなかった（図—71）。この柔らかい構造が破壊の進展を吸収し、断層が地表に現われるのを抑えたのかもしれない。

ロマプリータ地震は4つのサブイベントを伴ったが、それでも他の大地震と比べれば破壊過程は単純である。1989年12月のアメリカ地球物理学連合の大会には、“複雑な破壊過程”のモデルがいくつか提出されたが、その後多くは引込まれた。破壊過程が単純なため手がかりを失ってしまったのかもしれない。図—73はハーバード大の観測点（HRV）で記録されたロマプリータ地震とアルメニア地震（1988年12月7日）のP波の波形である。この2つの地震のマグニチュードは同じであるが、波形は大きく異なる<sup>79)</sup>。ロマプリータ地震の破壊継続時間は6～10秒に過ぎないが、アルメニア地震の場合は60秒近い。ロマプリータ地震の破壊が両方向に進む破壊であることを考慮しても、違いはあまりにも大きい。ロマプリータ地震の震源過程は長周期表面波（周期100～300秒）を用いても調べられたが、上記の実体波の結果にきわめて近い<sup>79), 85)–87)</sup>。

単純な震源過程の原因は、断層面上の強度などの性質が一様なためかもしれない。サンアンドレアス断層は、内陸型活動層に比べ地震の繰返し間隔が短いため、断層

面上の凹凸やひっかかりは急速に失われていくのかもしれない。

#### c) 地表に現われた割れ目

地震断層の真上のサミット道路6 kmにわたって割れ目群が現われた<sup>79)</sup>。割れ目は長いものは1 kmに達し、人が入れるほどの大きさに広がった。これらの割れ目は、サンアンドレアス断層にほぼ平行で、左ずれ成分ももっていた。同じような割れ目が同じような場所に、1906年サンフランシスコ地震の際にも現われた。断層生成に伴う二次的応力場により生成されたとも解釈されているが（図—71）、もしかしたら、大規模な低角度な斜面崩壊の一部をみているのかもしれない。いずれにしても、地震断層には直接関係はなさそうである。

### (4) 前兆現象と予知

#### a) 地殻変動にみる前兆

地殻変動観測のための辺長測量は、カリフォルニア州中央部で最も頻繁に行われている。1950年後半までは三角測量が主であったが、ジオジメーターが1950年代後半に導入され、1970年代にはジオドライト（Geodolite）とよばれる精度の高いレーザー測距儀に代えられた。現在は、GPSがとってかわろうとしている。ロマプリータ震源域では、ロマプリータ山（ロマプリータ天文台）を基点として10測線で精密距離測定が行われていた。これらの測線のうち、アリソン、ハミルトン、イーグルロックとロマプリータの間の測量は毎月行われ、変化が刻明に追われていた。サンアンドレアス断層には右ずれのせん断応力が働いているから、アリソンとハミルトンとの距離は短縮し、イーグルロックとの距離は伸びるはずであるが、これは実際のデータでもそうになっている（図—74左）。記録をよくみると、伸びまたは縮みの速度が1988年6月頃にわずかであるが変化している<sup>89)</sup>。ちょうどその頃にすぐ近くで地震（1988年6月27日、 $M=5.0$ ）が起きている。ここでは珍しい地震であることから、なんらかの変化が地殻内で始まった可能性もある。もし、地下深部においてクリープが加速されたならば、図—74に示されるような変化が期待でき、より浅い断層を動かす可能性も高くなる。

#### b) 前兆が検出されない例

地殻のひずみ状態を理解するには、地殻変動の精密連続観測が不可欠である。残念ながら、連続観測機器は断層の周りには1台も置かれていなかった。一番近い連続観測機器は、震央から南西50 kmの地点（サンワンヴァティスタ）の体積ひずみであった。地震前50日間の部分を引き伸ばした記録が図—75に示されている<sup>89)</sup>。記録中の小さなリップルは地球潮汐によるひずみで、大きさは $10^{-8}$ のオーダーである。図の右の大きなステップが地震時の変化で、 $1 \times 10^{-5}$ の体積ひずみ変化に相当す

る。この記録中には、リップルの  $10^{-8}$  のひずみを超える意味のある“異常変化”はみられない。これらの精密な測定からも、前兆現象はみつけることができなかった。地震予知の難しさを感じさせる一例である。もっとも、観測点が断層から離れ過ぎたために微小な変化が検出できなかった、との意見もある。ロマプリータ地域は、地震予知の重点地域ではなかったため、多くの計器は、地震発生の高確率と考えられていたパークフィールド<sup>90)</sup>へ移されていた。もし、震源域に連続観測機器が設置されていたら、前兆現象がとらえられていたかもしれない。その意味では、予測は裏切られたことになる。

c) 地震活動の変化

図-76 では、サンフランシスコ湾地域の地震活動である<sup>91)</sup>微小地震が断層に沿って線状に並ぶのが読み取れる。図-78(a) は、ロマプリータ地震の前と後とに分けてプロットしたサンアンドレアス断層に沿う微小地震活動の断面図(図-77のA-A')である<sup>92)</sup>。上段の図は、本震前20年間、中段は本震直後、下段は上の2つを加えたものである。本震前20年間では、ロマプリータ地域は地震活動は低く、むしろ南の部分の地震活動が高い。注目されるのは、ロマプリータ地震の断層の周りを縁取

るように微小地震が並んでいることである。ロマプリータ地震は、この空白部分を埋めるように起きた。ロマプリータ地震域に、1988年6月に  $M=5.0$ 、1989年8月に  $M=5.2$  の地震が起きているのも注目される。前震であったのかもしれない。

d) ロマプリータ地震の予知

「1906年サンフランシスコ地震断層の南端部に、近い

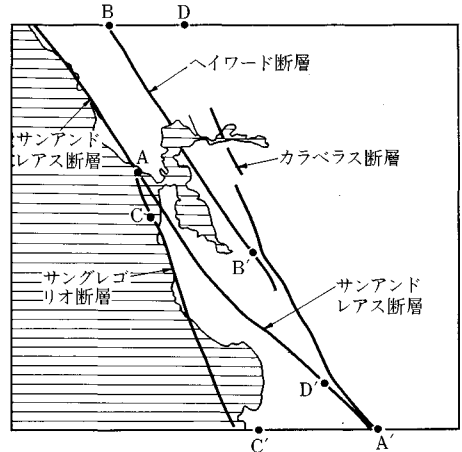


図-77 中部カリフォルニアの活断層分布図

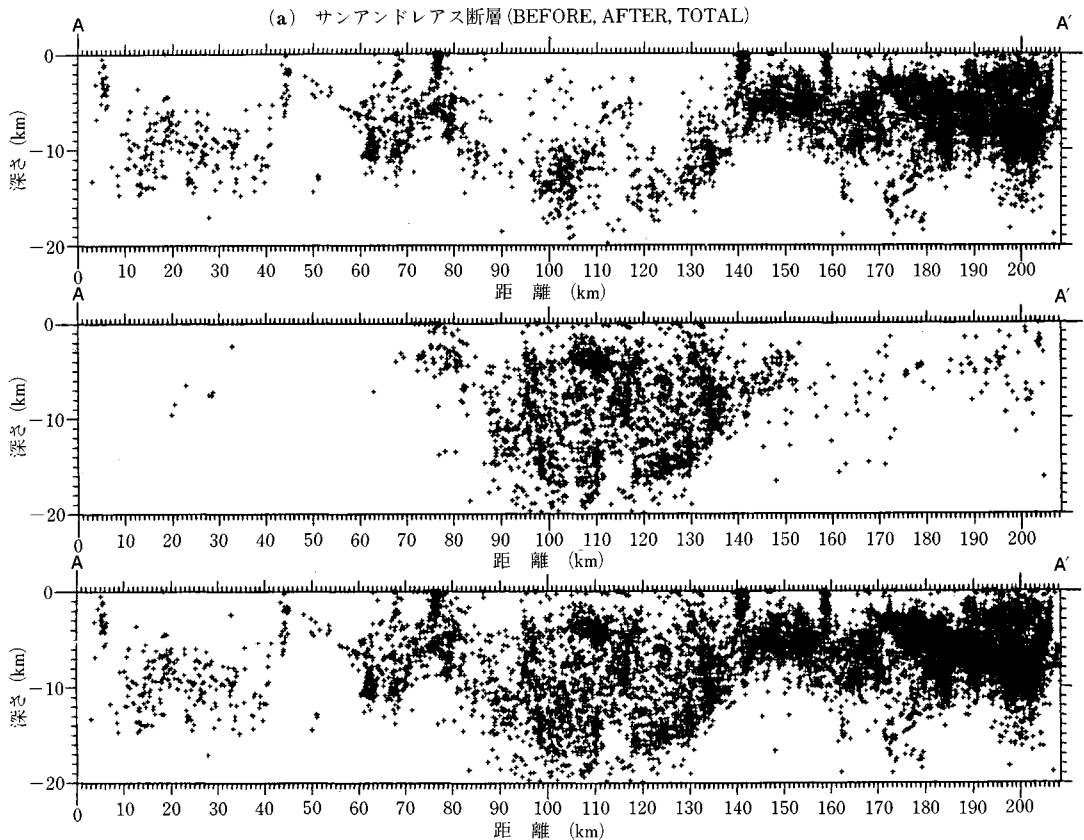
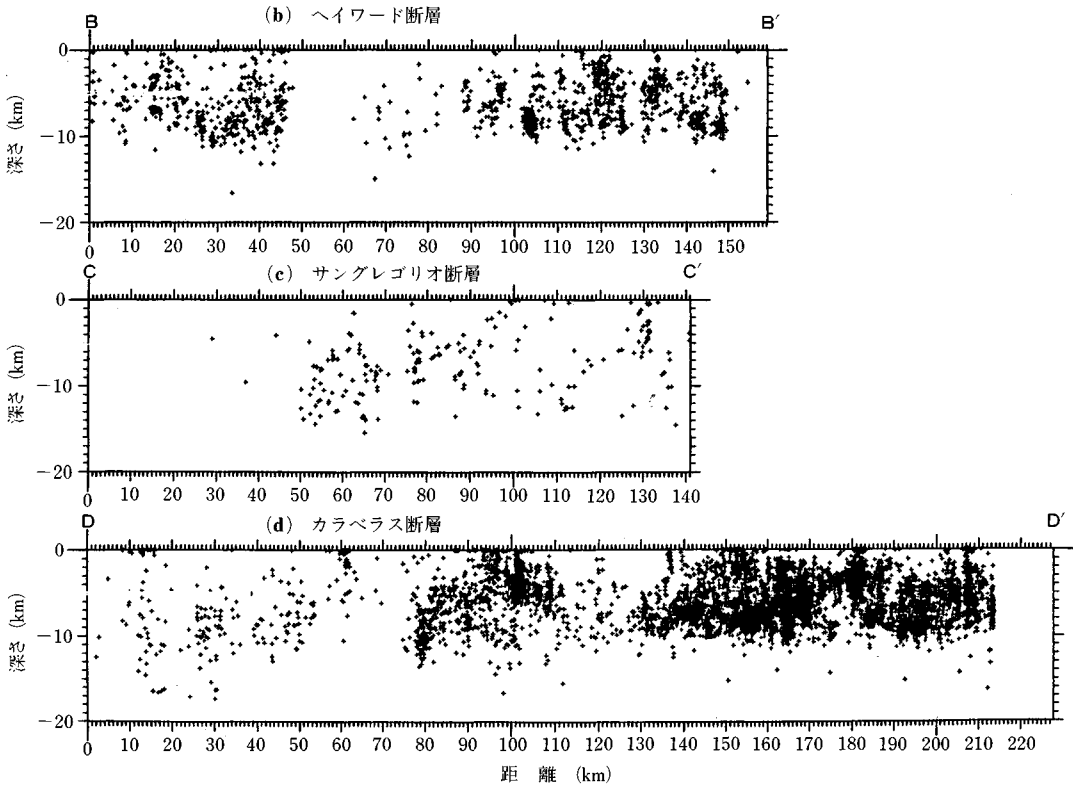


図-78 (つづく)



図一七 地震活動の断面図 [図一七の A-A' (サンアンドレアス断層), B-B' (ヘイワード断層), C-C' (サングレゴリオ断層), D-D' (コンコルド断層) に沿う地震活動の断面図. (a) 上段：地震前 20 年間；中段：地震直後；下段：全期間. ロマプリータ地震の断層の縁に沿って、地震前から地震が起きていた。本震はこの部分を埋めた。(b), (c), (d) の図中にも、微小地震により縁取りされているところや、ギャップも数か所みられ、(a) の例から考え、次の地震の候補地ともいえる.]

将来、地震が発生する確率が高い」とする説はいくつかあった<sup>92), 93)</sup>。これらの説は、1906 年地震の断層上のすべりは小さかった、つまり割れ切っていないとの考えに基づいている。この割れ残しに、地震後 92 年間のひずみ加わり、「破壊寸前の状態にある」とも説明されていた。“Working Group on California Earthquake Prediction”<sup>90)</sup> は、ロマプリータ地域の向こう 30 年間の地震発生率を 30% と与えた。しかし、1906 年地震の際に十分にエネルギーを放出したとの有力な反論<sup>94)</sup>もあったため、推定の信頼性レベルは最低の C と下げた。いずれにしても、発生確率の高いところに地震が起きた。地震の繰返し間隔がサンアンドレアス断層のように短いと、この程度の予測は可能である。

#### (5) 予想される次の地震

ロマプリータ地震以後の、地震発生確率の見直しが、“National Earthquake Prediction Council”により進められている。ロマプリータ地震の周りの地震発生確率が大幅に上がることは間違いない。つまり、ロマプリータ地震断層の周辺に大地震が起こる可能性が高いとみて

よい。候補地としては、1800 年代の地震の起こり方からヘイワード断層<sup>91), 93)</sup>とロマプリータ地震のすぐ北の部分<sup>91)</sup>が挙げられている。

ヘイワード断層がまず候補地に挙げられたのは、歴史地震の起こり方からの推測によっている。図一七の 4 枚の図は、サンフランシスコ湾地域の 150 年間の地震活動をまとめたものである。4 枚の図を通して、サンアンドレアス断層とヘイワード断層では、一方に地震が起きると他方にも短期間のうちに地震が起きることが読み取れる。2つの断層の間には、応力の変化を伝えあう機構があるらしい。1906 年サンフランシスコ地震前にも、ロマプリータ地震前にも、ヘイワード断層は活動的であった。特に注目されるのは、1865 年にロマプリータ地震と同じ位置に、 $M=7.0$ の地震が起こり ((b) 図)、1868 年にヘイワード断層上に  $M=6.8$ の地震が起きたことであろう。1865 年地震は、ロマプリータ地震とほぼ同じところに起きた。ヘイワード断層を次の地震の位置と考えるのもそれほど無理ではない。

断層の縁に沿って微小地震が並んでいるかどうか、

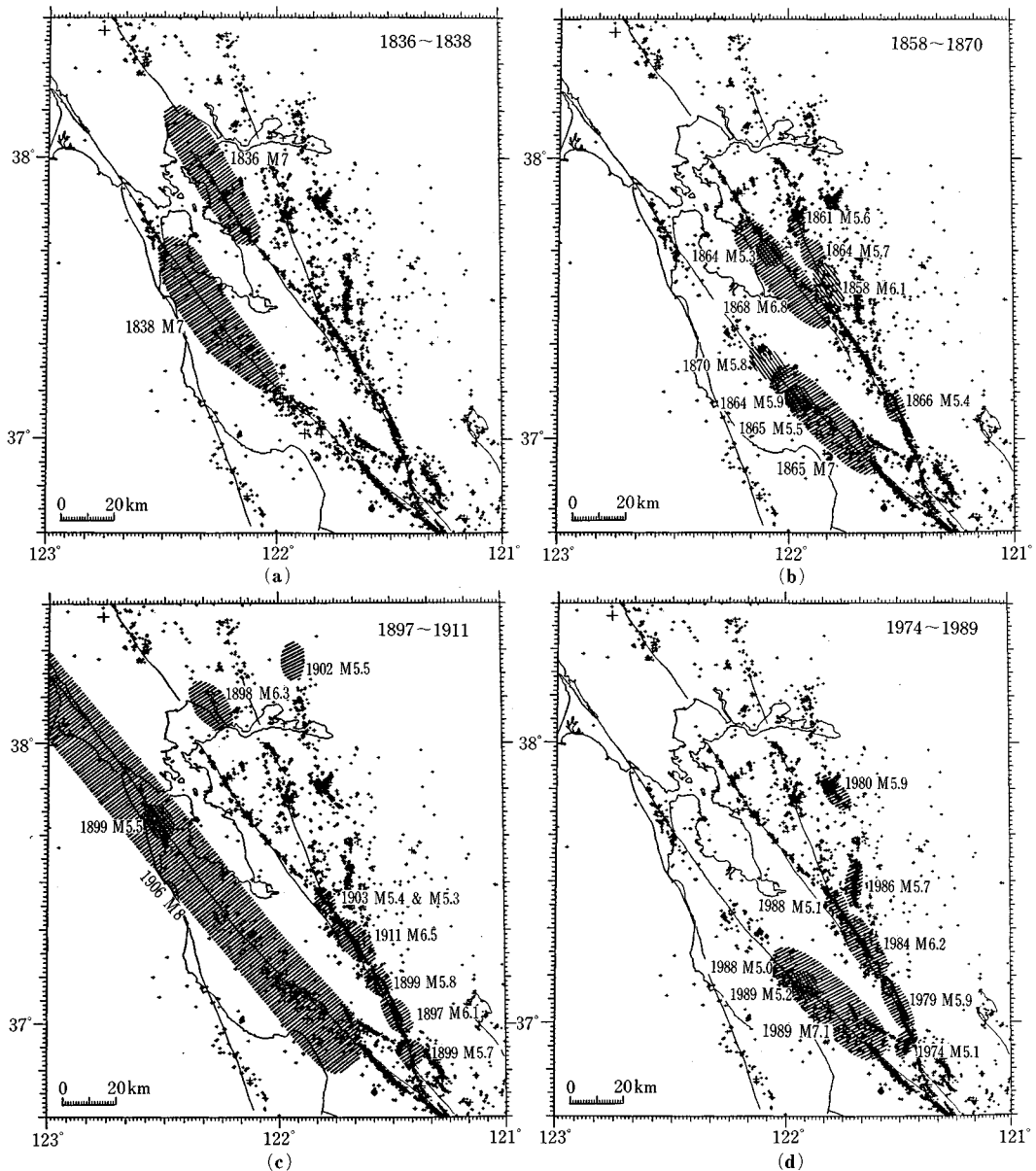


図-79 サンアンドレアス断層、ハイワード断層、カラベラス断層上の1800年、1900年代の地震活動 [斜線の部分は推定された地震の断層の位置。サンアンドレアス断層とハイワード断層の間で地震活動が“連動”しているのが注目される。1865年の  $M=7$  の地震はロマプリータ地震とほぼ同じ位置に起きた。3年後の1868年にハイワード断層上に  $M=6.8$  の地震が起きている。この地震発生の組合せから、ハイワード断層上に地震が予測されている (図-78(b) の地震がまばらな部分).]

予測の鍵となる。ロマプリータ地震からの類推である。ロマプリータ地震の周辺の断層を調べると、候補地はいくつかある。特に、ハイワード断層がそうである。上記の歴史地震から予測されたところと、“縁取り地震分布”の位置とは、奇妙に一致する。多くのアメリカの地震学者が、ハイワード断層を候補地として挙げている根拠で

もある。

いずれにしても、次に起こる地震は、ロマプリータ地震よりさらにサンフランシスコ市やオークランド市に近くなる。実際に地震が起これば、1989年地震よりさらに大きな被害が予想されよう。



## (6) ま と め

ロマプリータ地震はサンアンドレアス断層上の地震にしては珍しく断層面が65°に傾斜し、大きな逆断層成分をもった。これは、ロマプリータ付近でサンアンドレアス断層が水平に緩く曲がっているために生じたものと考えられる。破壊過程はきわめて単純で、周期1秒から数百秒までの実体波や表面波を用いた研究が同じような解析結果を与えた。サンフランシスコ湾地域の予想される次の地震は、ハイワード断層上か、ロマプリータ地震のすぐ北のサンアンドレアス断層上と考えられている。1800年代と同じように地震が繰り返されるなら、次の地震は10年以内に起こることになる。

断層面上の破壊震源過程が単純なロマプリータ地震ですら、100 kmも離れたサンフランシスコやオークランドに大きな被害を与えた。もし、アルメニア地震のような震源過程の地震がサンフランシスコやオークランドのもっと近くで起きたならば、はるかに大きな被害が予想される<sup>79)</sup>。このような予測も防災対策上必要なものと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) Seismic Safety and Land-Use Planning; Selected Examples from the San Francisco Bay Region, California; Geological Survey Professional Paper 941-B, 1979.
- 2) Flatland Deposits—Their Geology and Engineering Properties and Their Importance to Comprehensive Planning; Selected Examples from the San Francisco Bay Region, California; Geological Survey Professional Paper 943, 1979.
- 3) Trask, P. D. and Polston, J. W. : Engineering Geology of San Francisco Bay, California, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 62, pp. 1079~1109, 1951.
- 4) 地震予知総合研究振興会：地盤形状と地中構造物の地震被害に関する研究，調査研究報告書 第二分冊，1988.
- 5) Nims, D. K., Miranda, E., Aiken, I. D., Whittaker, A. S. and Bertero, V. V. : Collapse of the Cypress Street Viaduct as a Result of the Loma Prieta Earthquake : EERC Report No. UCB/EERC-89/16.
- 6) Celebi, M. : Strong Motion Data from Ground Stations and Instrumented Structures during the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989 ( $M_s=7.1$ ), USGS.
- 7) Loma Prieta Earthquake October 17, 1989, Preliminary Reconnaissance Report of EERI.
- 8) Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspect of the October, 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake : EERC Report No. UCB/EERC-89/14, 1989.
- 9) Clough, G. W. and Chameau, J. L. : A Study of the Behavior of the San Francisco Waterfront Fills under Seismic Loading, Report No. 35, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, 1979.
- 10) U. S. Geological Survey Strong-Motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989 : Geological Survey Open-File Report 89-568, USGS, 1989.
- 11) Idriss, I. M. : Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice, Special Publications of the 11 th Intern. Conf. on SMFE, pp. 255~320, 1985.
- 12) 家村浩和・亀井正博・丸山忠明・後藤洋三・大内 一：ロマプリータ地震(1989.10.17)による橋梁被害の調査概要，1989年11月。
- 13) 1989年10月17日サンフランシスコ地震(The Loma Prieta)被害調査報告書，鹿島建設，1989年11月。
- 14) 磯山龍二：1989年10月17日Loma Prieta地震の被害一現地調査速報，地震防災論文集，pp. 121~137，日本技術開発，1989年12月。
- 15) 1989年Loma Prieta地震調査報告書(速報)，佐藤工業，1989年10月。
- 16) 亀田弘行：1989年ロマプリータ地震によるサンフランシスコ湾岸地域および周辺の被害について，地震工学振興会ニュース，No. 109, pp. 1~6, 1989.
- 17) 守屋喜久夫：1989年10月17日サンフランシスコ湾岸を襲ったロマプリータ地震，日本大学理工学部応用地質研究室，1989年11月。
- 18) 北浦 勝・池本敏和・佐藤忠信・杉戸真太・高田至郎：Loma Prieta地震(1989.10.17)被害調査報告，1990年1月。
- 19) 森・池田・滝本・長谷川：1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂のコンシステンシー特性，第24回土質工学研究発表会講演概要集，1989.6.
- 20) Seed, H. B. and Idriss, I. M. : Analysis of Soil Liquefaction; Niigata Earthquake, J. of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM3, 1967.
- 21) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会：1983年日本海中部地震震害調査報告書，1986.10.
- 22) 応用地質調査事務所：1983年5月26日日本海中部地震被害調査報告，1984.1.
- 23) 森・滝本・長谷川：1987年12月17日千葉県東方沖地震における液状化調査，第23回土質工学研究発表会講演概要集，1988.6.
- 24) 沼田・森・太田・境野・滝本：1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性(細粒分含有率の差異の実験的検討)，第20回地震工学研究発表会，1989.7.
- 25) 土質工学会震害調査委員会：1968年十勝沖地震による地盤震害調査概報，土と基礎，Vol. 16, No. 9, 1968.9.
- 26) Youd, T. L. and Hoose, S. N. : Liquefaction During 1906 San Francisco Earthquake, Proc. of ASCE, Vol. 102, No. GT5, pp. 425~439, 1976.
- 27) Yanagisawa, E., Ohmiya, H. and Shimizu, T. : Seismic Response of Pore Water Pressure in Surface Sand Layer, Soil Dynamics and Liquefaction, pp. 221~230, 1987.
- 28) Yanagisawa, E. and Tobita, Y. : Description of Cyclic Deformation Behavior of Sand by an Anisotropic Hardening Model, Micromechanics of Granular Materials,

- Elsevier, pp.175~182, 1988.
- 29) Yanagisawa, E. and Sugano, T. : Measurement of Seismic Induced Pore Pressure, Proc. of 12th Intern. Conf. on SMFE, Vol.3 pp.2023~2027, 1989.
  - 30) 柳沢栄司 : ロマプリータ地震の被害とその教訓, 実務者のための土質・基礎に関する諸問題講習会講演資料, pp.57~77, 1990.
  - 31) 安田 進・吉田 望・森本 巖・田上 裕・宮本孝行 : ロマプリータ地震により液状化した土の特性, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.851~852, 1990.
  - 32) 沼田淳紀・森伸一郎・太田直之 : 1989年ロマ・プリータ地震で生じた噴砂の液状化特性, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.692~693, 1990.
  - 33) 柳沢栄司・森伸一郎 : 1989年ロマ・プリータ地震で生じた液状化現象について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.688~689, 1990.
  - 34) U.S. Geological Survey : Strong Motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989.
  - 35) CSMIP : Strong Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta) California Earthquake of October 17, 1989. California Department of Conservation. Division of Mines and Geology. Report OSMS 89-06, 1989.
  - 36) Akamatsu, J. : Seismic Zoning and Seismic Ground Motion in the Southern Parts of Kyoto, Southwest Japan, Bull. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.36, I-42, 1986.
  - 37) EERI Geoscience Reconnaissance Team : Geoscience Investigation of the Earthquake of October 17, 1989 Near the Summit of Loma Prieta in the Southern Santa Cruz Mountains, Nov. 1989.
  - 38) Joyner, W.D. and Boore, D.M. : Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion, Proc. ASCE, pp.43~102, 1988.
  - 39) Goldman, H.B. : Geologic and Engineering Aspect of San Francisco Bay Fill, CDMG Special Report 97, 1969.
  - 40) Helley, E.J. and Lajoie, K.R. : Flatland Deposits of the San Francisco Bay Region, California, Geological Survey Professional Paper 943, 1979.
  - 41) 中山高明・後藤洋三・江尻譲司 : ロマ・プリータ地震における地盤震動の波動特性に関する考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, I-497, 1990.
  - 42) 梅田康弘・Rymer, M.J. : ロマ・プリータ地震で飛び上がった石の調査, 地震学会講演予稿集, No.1, E31-05, 1990.
  - 43) 翠川三郎・竹田尚史・年縄 巧・大町達夫 : 1984年長野県西部地震での石の跳躍から推定した震源域の地震動強さ, 地震, 2-41, pp.381~388, 1988.
  - 44) 亀田弘行 : 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.55~62, 1978.
  - 45) Sugito, M., Goto, H. and Aikawa, F. : Simplified Separation Technique of Body and Surface Waves in Strong Motion Accelerograms, Proc. JSCE, SE/EE, Vol.1, No.2, pp.71~76, 1984.
  - 46) Klein, F. : Travel Time Table for Central California, Computer File, Personal Communication, Feb. 1990.
  - 47) Kameda, H., Sugito, M., Isenberg, J. and Richardson, E. : Analysis of Strong Motion Array Record at Parkfield Pipeline Experiment Site in the 1989 Loma Prieta Earthquake, 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, Dec. 1990.
  - 48) Schnabel, R.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. : SHAKE A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC, 72-12, 1972.
  - 49) 杉戸真太・亀田弘行・後藤尚男・広瀬憲司 : 工学的基盤と沖・洪積地盤の地震動の変換係数, 京都大学防災年報, 第29号B-2, pp.41~58, 1986年.
  - 50) Seed, R.B., *et al.* : Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, Report No. UCB/EERC 90-05, 1990.
  - 51) Ohmachi, T., Nakamura, Y. and Toshinawa, T. : Ground Motion Characteristics in the San Francisco Bay Area Detected by Microtremor Measurements, Nov. 1989.
  - 52) 中村 豊 : 常時微動に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, No.4, 1988.4.
  - 53) Boore, D.M., Seekins, L. and Joyner, W.B. : Peak Accelerations from the 17 October 1989 Loma Prieta Earthquake, Seismological Research Letters, Vol.60, No.4, October-December, 1989.
  - 54) 中村 豊・富田健司 : 最大地震動加速度の推定式, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集 I-393, 1984.
  - 55) 中村 豊 : 総合地震防災システムのための常時微動を用いた鉄道沿線地盤および構造物の震動特性調査, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集 I-468, 1988.
  - 56) 中村 豊 : 地表面における常時微動の水平/上下スペクトル比と表層地盤特性の関係, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集 I-427, 1989.
  - 57) Plafker and Galloway, eds. : Lessons Learned from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989, U.S. Geological Survey Circular 1045.
  - 58) Jullus Schlocker : Bedrock-Surface Map of the San Francisco North Quadrangle, California, USGS, 1961.
  - 59) Maley, R. *et al.* : U.S. Geological Survey Strong-Motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989, USGS OPEN-FILE REPORT 89-568, 1989.
  - 60) Shakal, A. *et al.* : CSMIP Strong-Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta).
  - 61) Seed, R.B. *et al.* : Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, April 1990.
  - 62) ロマプリータ地震被害調査報告書, (株)大林組研究所, 1990年4月.
  - 63) Preliminary Report on the Seismological and Engineer-

- ing Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- 64) Lessons Learned from the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989, U.S. Geological Survey California 1045.
- 65) Loma Prieta 地震 (1989.10.17) 被害調査報告, 金沢・京都・神戸大学調査グループ(北浦・池本・佐藤・杉戸・高田), 1990年1月.
- 66) Sato, T. and Kiyono, J. : Attenuation Peak Ground Motion Taking into Account the Fault Extent, Proc. of 7th JEES, pp.541~546, 1986.
- 67) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・斉藤太嘉志：断層破壊過程の影響を考慮した地震動のアテニュエーション特性, 第23回土質工学研究発表会, pp.805~808, 1988.
- 68) 10月22日発行のSan Francisco Examiner紙.
- 69) 10月21日発行のSan Jose Mercury News紙.
- 70) 10月19日発行のSan Jose Mercury News紙.
- 71) 10月25日発行のSan Jose Mercury News紙.
- 72) Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- 73) Relative Slope Stability and Land-use Planning, Selected Examples from the San Francisco Bay Region, California, Geological Survey Professional Paper 944, U.S. Geological Survey.
- 74) Minster, J.B. and Jordan, T.H. : Present-day plate motions, J. Geophys. Res., 83, pp.5331~5354, 1980.
- 75) Allen, C.R. : The tectonic environments of seismicity active and inactive areas along the San Andreas fault system, Proc. Conference on Geol. Problems of San Andreas Fault System, edited by W.R. Dickinson and A. Grantz, Stanford Univ., California, pp.70~82, 1968.
- 76) Lawson, C. (Chairman) : The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Vol.2, 641 pp., Carnegie Institute of Washington, Washington, D.C., 1908.
- 77) Sieh, K., Stuiver, M. and Brillinger, D. : A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault in southern California, J. Geophys. Res., 94, pp.603~623, 1989.
- 78) U.S. Geological Staff, The Loma Prieta, California, Earthquake : An anticipated event, Science, Vol.247, pp.288~293, 1990.
- 79) Kanamori, H. and Satake, K. : Broadband study of the 1989 Loma Prieta earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1179~1182, 1990.
- 80) Dietz, L.D. and Ellsworth, W.L. : The October 17, 1989, Loma Prieta, California, earthquake and its aftershocks : Geometry of the sequence from high-resolution locations, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1417~1420, 1990.
- 81) Seeber, L. and Armbruster, J.G. : Fault kinematics in the 1989 Loma Prieta rupture area during 20 years before that event, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1425~1428, 1990.
- 82) Kikuchi, M. and Fukao, Y. : Iterative deconvolution of complex body waves from great earthquakes—Tokachi-Oki earthquake of 1968, Phys. Earth Planet. Interiors, 37, pp.235~248, 1985.
- 83) Choy, G.L. and Boatwright, J. : Source characteristics of the Loma Prieta, California, earthquake of October 18, 1989 from global digital seismic data, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1183~1186, 1990.
- 84) Lees, J.M. : Tomographic P-wave velocity images of the Loma Prieta earthquake asperity, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1433~1436, 1990.
- 85) Ruff, L.J. and Tichelaar, B.W. : Moment tensor rate functions for the Loma Prieta earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1187~1190, 1990.
- 86) Romanowicz, B. and Lyon-Caen, H. : The Loma Prieta earthquake of October 18, 1989 : Results of teleseismic mantle and body wave inversion, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1191~1194, 1990.
- 87) Zhang, J. and Lay, T. : Source parameters of the 1989 Loma Prieta earthquake determined from long-period Rayleigh waves, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1195~1198, 1990.
- 88) Lisowski, M., Prescott, W.H., Savage, J.C. and Svarc, J.L. : A possible geodetic anomaly observed prior to the Loma Prieta, California, earthquake, Geophys. Res. Lett., Vol.17, pp.1211~1214, 1990.
- 89) Jonstone, M.J. : A manuscript on geomagnetic changes, U.S. Geological Survey, 1989.
- 90) The Working Group on California Earthquake Probabilities : Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 88-398, pp.62, 1988.
- 91) Oppenheimer, D.H. : Array studies of seismicity, National Earthquake Hazards Reduction Program, Summaries of Technical Reports, Vol.30, pp.215~222, 1990.
- 92) Scholz, C.H. : The Black Mountain asperity : seismic hazard of the southern San Francisco peninsula, California, Geophys. Res. Lett., Vol.12, pp.717~719, 1985.
- 93) Lindah, A.G. : Parkfield seismicity project, National Earthquake Hazards Reduction Program, Summaries of Technical Reports, Vol.30, pp.346~350, 1990.
- 94) Thatcher, W. and Lisowski, M. : Long-term seismic potential of the San Andreas fault southeast of San Francisco, J. Geophys. Res., Vol.92, pp.4771~4784, 1987.