

1989年10月17日

ロマ プリータ (LOMA PRIETA) 地震

調査報告書

(社内技術資料)



基礎地盤コンサルタンツ株式会社

本社 (TEL 03-263-3611)

技術センター (TEL 03-727-6158)

仙台支社 (TEL 022-291-4191)

1989年10月17日

ロマ プリータ (LOMA PRIETA) 地震

調査報告書

基礎地盤コンサルタンツ株式会社

目 次

	頁
まえがき	1
1. 地震の概要	2
1. 1 地震の諸元	2
1. 2 周辺の地震活動	4
1. 3 地震加速度	6
1. 4 被害の概要	10
2. 地盤の概要	12
2. 1 サンフランシスコ湾岸地域(Bay Area)	12
2. 2 ベイマッド	14
2. 3 埋立地盤	16
3. 地震による地盤の変状	18
3. 1 液状化	18
3. 2 斜面崩壊	28
4. サンフランシスコ湾岸地域の被害	30
4. 1 マリーナ地区	30
4. 2 I-880号線高架道路	36
4. 3 I-480号線高架道路	42
4. 4 ベイブリッジ	46
5. 震源周辺地域の被害	48
5. 1 サンタクルーズ市街	48
5. 2 1号線高架橋	52
5. 3 モスランディングの道路盛土	56
5. 4 モスランディングの海洋研究所	57
あとがき	60
引用・参考文献リスト	62

まえがき

1989年10月17日17時4分に、サンフランシスコ湾岸の諸地域を中心に被害地震が発生した。震源地にある山の名前にちなんでロマプリータ地震と命名された。いち早く報道された国道880号線の崩壊に大きな衝撃を受け、一時はサンフランシスコ壊滅と感ずるほどであった。

しかし、その後、状況が明らかになるにつれ、幸いにも被害は局部的であることが分り、また、死者も地震発生直後の予測より大幅に少なかったことは不幸中の幸いではあった。一方、電気、ガスの途絶あるいはそれに伴いクレジットカードが使用できなくなるなど、高度に発達した都市の脆さも露呈し、社会的な面での影響も注目された。

日本からも多くの調査団が派遣され、調査結果の一部は速報として報告されている。特に、11月22日に土木学会耐震工学委員会が開催した報告会は時期を得、また、広い分野を網羅していて、極めて有益であった。

当社では、これに先立ち、日本を11月15日出発、同20日帰国の日程で調査チームが派遣され、地盤条件との関連に注目して地震被害を調査した。

この報告書はその結果を取りまとめたものである。

1990年1月

1. 地震の概要

1. 1 地震の諸元

1989年10月17日午後5時4分（日本時間 10月18日午前9時4分）カリフォルニア州サンタクルーズ市の北東約16kmを震源とするM7.1の地震が発生した。この地震はロマプリータ（Loma Prieta）地震と命名された。地震の諸元は次のとおりである。

発震時 ：10月18日0時4分2.0秒（グリニッジ標準時）

マグニチュード：Ms = 7.1（NEISによる）

震源 ：北緯37.037度，西経121.833度 深さ18km（USGSによる）²¹⁾

図1-1はUSGS（米国地質調査所）による本震の位置および余震分布である。余震域はサンアンドレアス（San Andreas）断層に沿って長さ約50kmにおよび、深さは約20kmまでに分布している。サンアンドレアス断層近傍で発生する地震は震源が浅く、深さ15km以深では大地震はまず起きないとされていたが（図1-2 a）、今回の地震の震源はそれに比べてやや深かった（図1-2 b）。

地震後の測量によれば、横ずれ1.8m，縦ずれ1.2～1.3mの断層モデルが観測結果を最もよく説明するといわれている²⁴⁾。サンアンドレアス断層で発生する地震は横ずれが卓越したものが多かったのに対して今回の地震は縦ずれ成分が大きく従来の地震と異なっている（図1-3）。

この地震の規模は「浦河沖地震」（1982）と同じ規模であり、わが国に大きな被害をもたらした「関東地震（1923年，M7.9）」、「新潟地震（1964年，M7.5）」、「宮城県沖地震（1978年，M7.4）」、「日本海中部地震（1983年，M7.7）」などより小さい。今回の地震のエネルギーはこの地域の最大被害地震であるサンフランシスコ地震（1906年，M8.3）の30分の1以下であり、地震規模としては中程度といえよう。

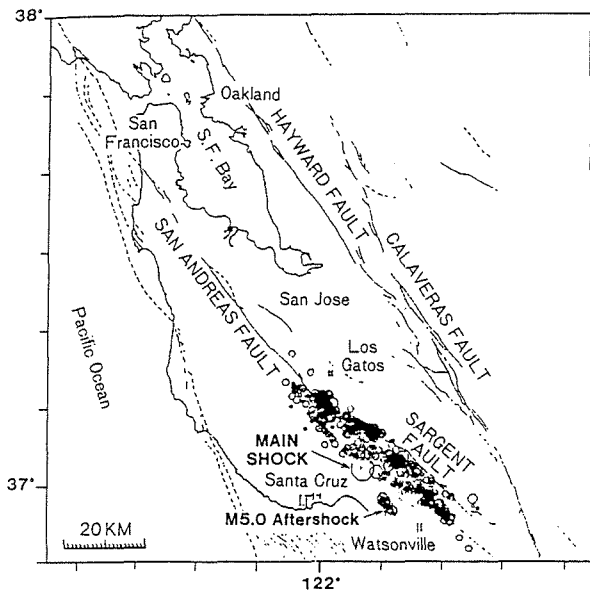


図1-1 震源位置および余震分布²¹⁾

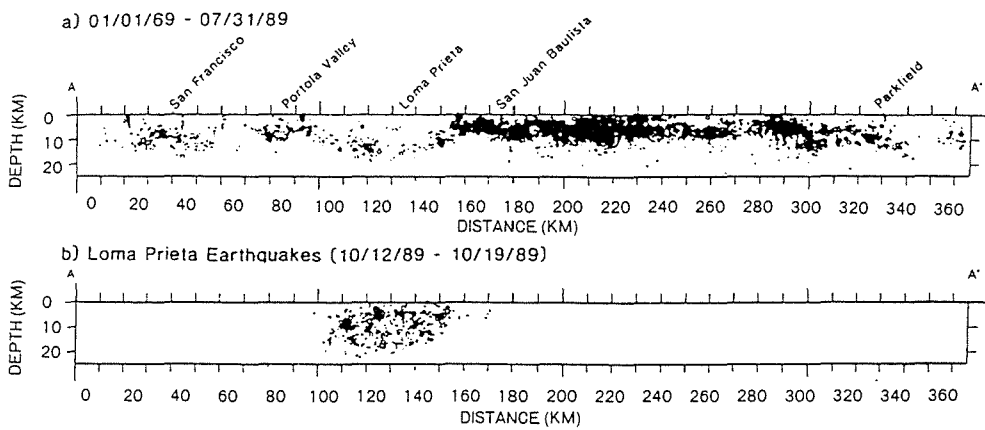


図1-2 震源深さの分布²¹⁾

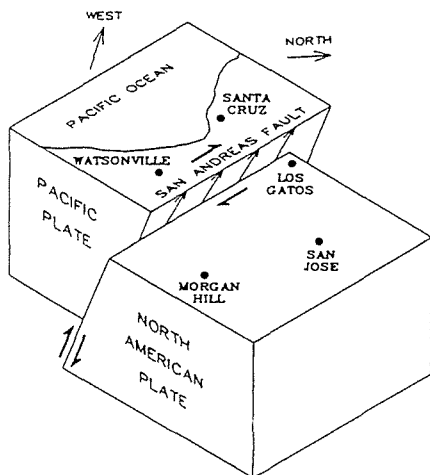


図1-3 地震断層のメカニズム²¹⁾

1. 2 周辺の地震活動

地震が起きた米国西海岸は環太平洋地震帯に属し、地球上で最も地震活動の活発な地域の一つである（図1-4）。この地域の地震活動を特徴づけるのはカリフォルニア州を縦横に走っている数多くの断層であり、その中でも西海岸に沿って延々千数百キロにわたって延びるサンアンドレアス断層は最も大規模な断層である。この地域もわが国と同様にプレートの境界に位置しているが、日本海溝のように一方のプレートが他方のプレートに潜り込むのではなく、プレートどうしが水平にすれ違っている。そのためサンアンドレアス断層は水平ずれ成分が卓越している。

サンフランシスコ湾岸地域における過去の主要地震はほとんどこれらの断層周辺で発生している（図1-5）¹⁰⁾。

サンフランシスコ湾周辺で発生した地震のうち最大の被害をもたらしたのは1906年のサンフランシスコ地震（M8.3）である。この地震では地震断層が地表に表れた部分だけで約400kmあり、断層の両側のくい違いの大きさは上下方向には最大で1mぐらいであったのに対して、水平方向は最大6m（21ft）近くに達した。

この地震で少なくとも700人が死亡し、物的損害はおよそ5億ドルに達した。損害のおよそ8割は地震後に発生した火災によるもので、地震の直接被害よりも火災などの間接被害が多かった点では関東地震と共通している。

図1-6に示すようにカリフォルニア州の太平洋沿岸地域で2018年までに大地震が発生する確率が予測されていたが、今回の震源地付近の地震発生確率は約30%であり、地震予知の関心は100%発生すると言われているパークフィールド（Parkfield）方面に向けられていたようである²¹⁾。

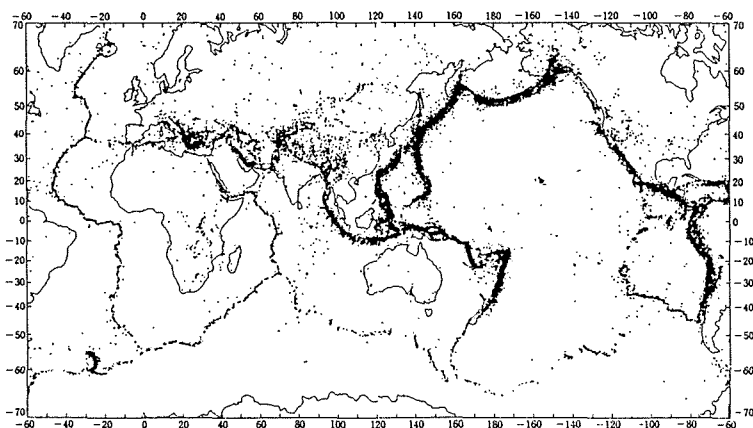
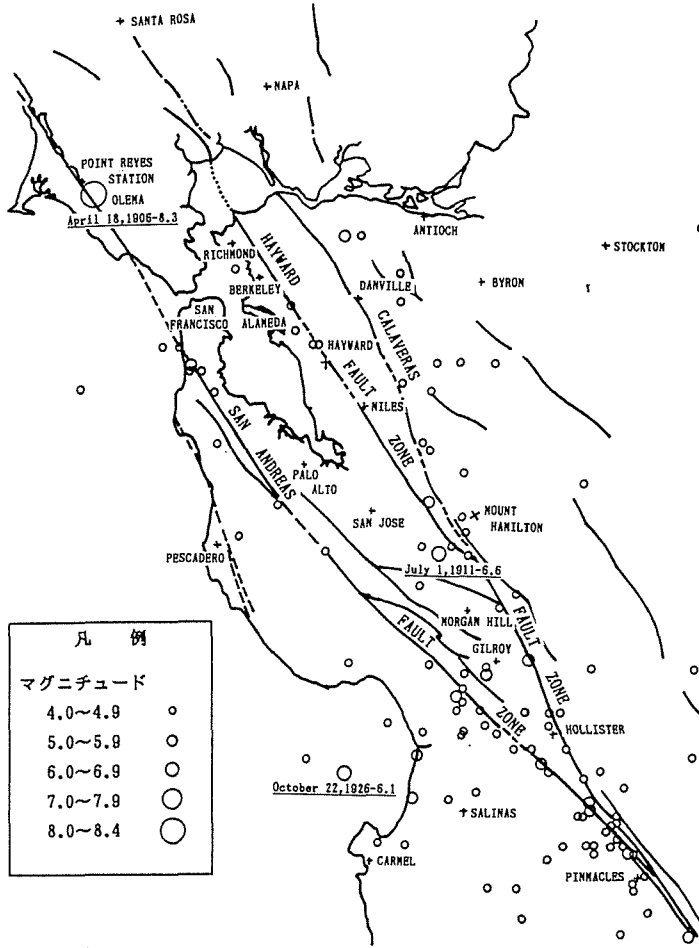


図1-4 世界の地震分布²³⁾



凡 例	
マグニチュード	
4.0~4.9	○
5.0~5.9	○
6.0~6.9	○
7.0~7.9	○
8.0~8.4	○

図1-5 湾岸地域の断層と地震分布 10)

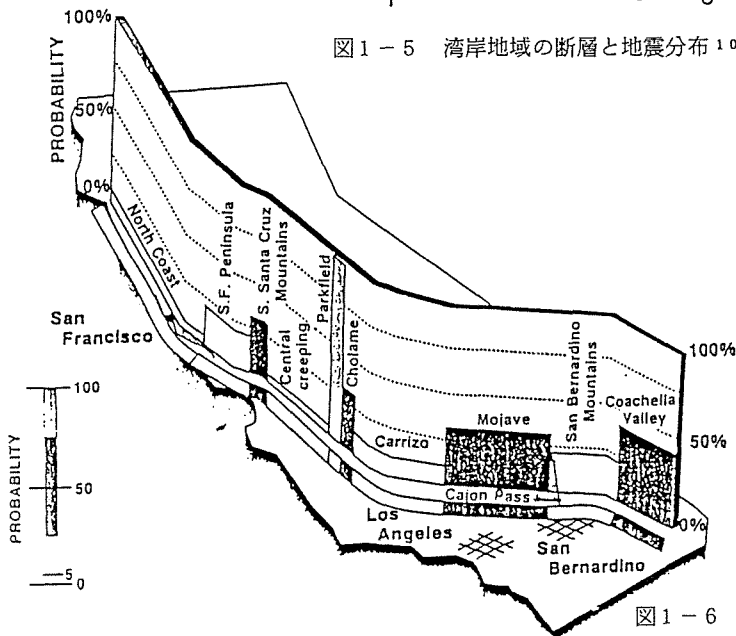


図1-6 西海岸における今後30年間 21)
の地震の発生確率 (USGS資料)

1. 3 地震加速度

米国の中でも最も地震の活発なカリフォルニア州ではサンアンドレアス断層周辺を中心として多くの地震観測網がある。今回の地震でも多くの強震記録が得られ、CSMIP(California Strong Motion Instrumentation Program)⁸⁾とUSGS⁹⁾によって公表されている。

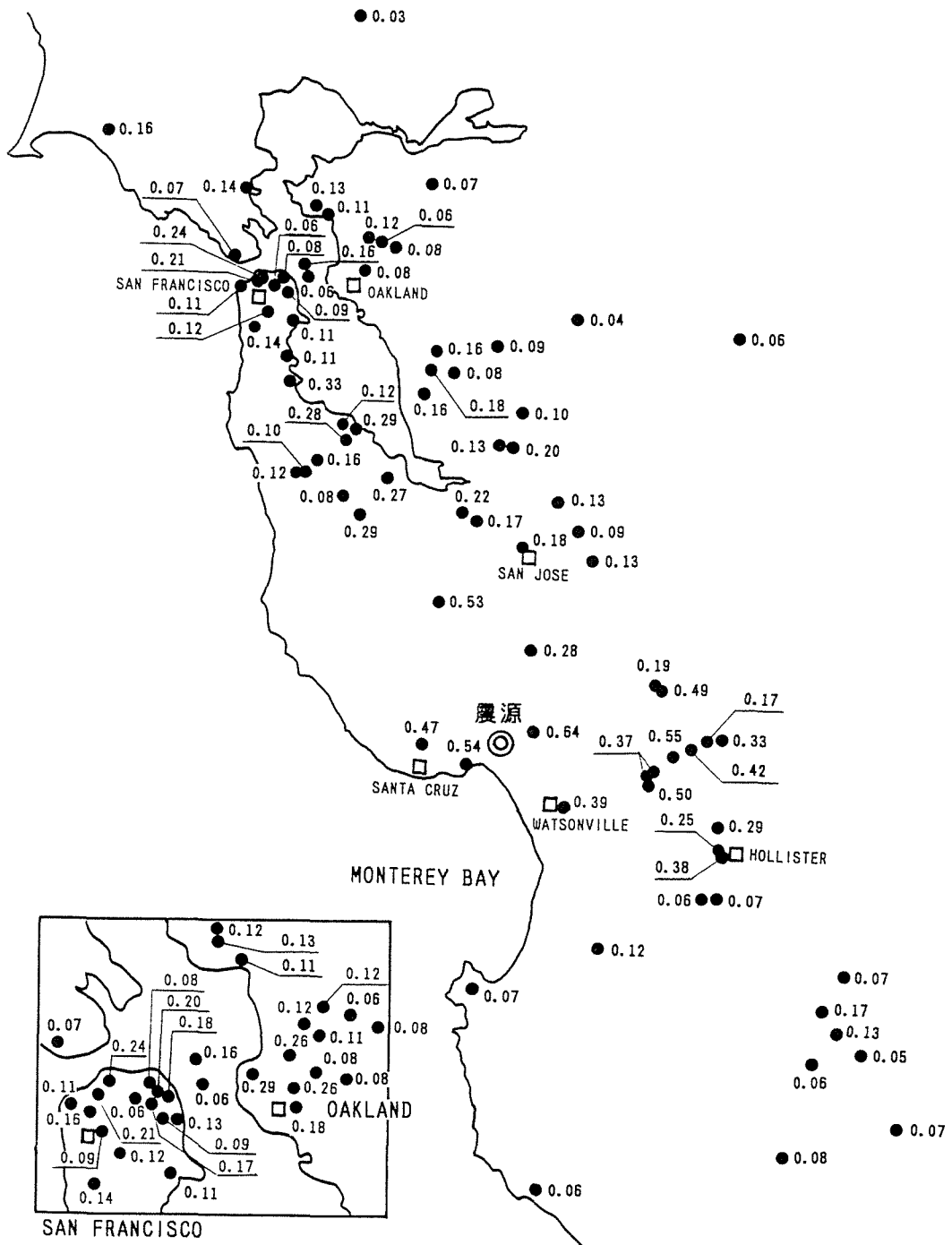
CSMIPでは93地点(地盤上53地点、構造物40地点)、USGSでは38地点(地盤上21地点、構造物17地点)において地震記録が得られている。図1-7には地盤上の地震観測地点と水平最大加速度値(水平2成分の大きい方の値)の分布を、図1-8には構造物下部の記録も含めた地表最大加速度と震央距離の関係を示す。

最も大きな加速度が観測された地点は震央から7kmのコラリトス(Corralitos)でその加速度値は0.64G(約640gal)に達した。図1-9に示した同地点の加速度波形から主要動の継続時間は8~10秒であることがわかる。

その他、震源地付近の加速度値としてはキャピトーラ(Capitola, 距離9km)で0.54G、サンタクルーズ(Santa Cruz, 距離16km)で0.47G、ワトソンビル(Watsonville, 距離18km)で0.39Gなどが大きなものである。

サンフランシスコ市内の10箇所の地点で得られている地表最大加速度は0.09G~0.21Gである。0.21Gという加速度は今回の地震で顕著な被害があったマリーナ(Marina)地区の南西約2.5kmにあるプレシディオ(Presidio)で観測されたものである。一方、サンフランシスコとオークランドの間に隣接して横たわる2つの島、すなわち砂岩からなるイエバ ブエナ(Yerba Buena)島と人工島であるトレジャー(Treasure)島の両方で得られた最大加速度値はそれぞれ0.06G、0.16Gであった。トレジャー島は図1-10に示すように約12mの厚さに砂を埋め立てて造成された島で、この地震で液状化が発生している。

オークランドでは崩壊したI-880号線高架道路の約2km西、東および北方に観測点があり、地表最大加速度はそれぞれ0.29G、0.26Gおよび0.26Gである。この地域の地表最大加速度は震源からほぼ同じ距離にあるサンフランシスコの観測地点に比べてかなり大きく、地盤条件の差が地震の応答に大きな影響を及ぼしていると考えられる。図1-11はサンフランシスコ湾地域の観測地点(震央距離で35~110km程度)の地表最大加速度を地点の地盤条件別にプロットしたものである。硬質地盤(岩盤または洪積地盤)に比べて沖積地盤が全般的に大きな加速度になっており、特に埋立地盤の加速度値が大きいことが注目される。



※図中の加速度値は水平2成分の大きな方(単位G)

図1-7 地表最大加速度の分布 (CSMIP, USGSによる)^{8) 9)}

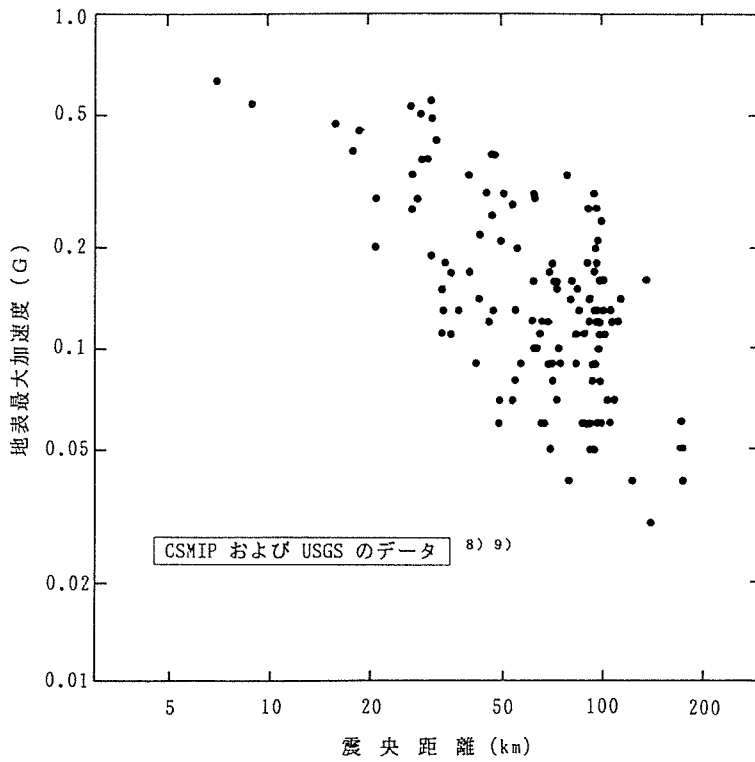


図1-8 地表最大加速度と震央距離の関係

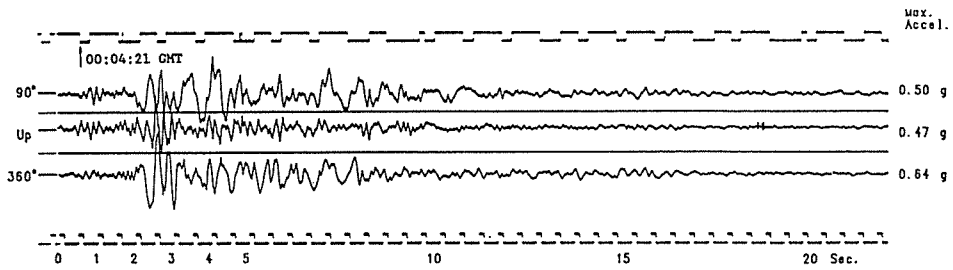


図1-9 Corralitosにおける強震記録⁸⁾

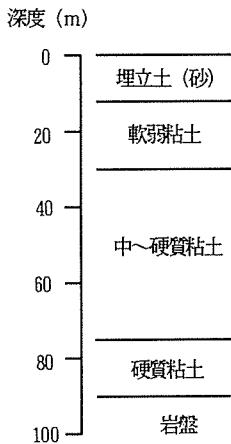


図1-10 トレジャーアイランドの地層構成概略図¹⁰⁾

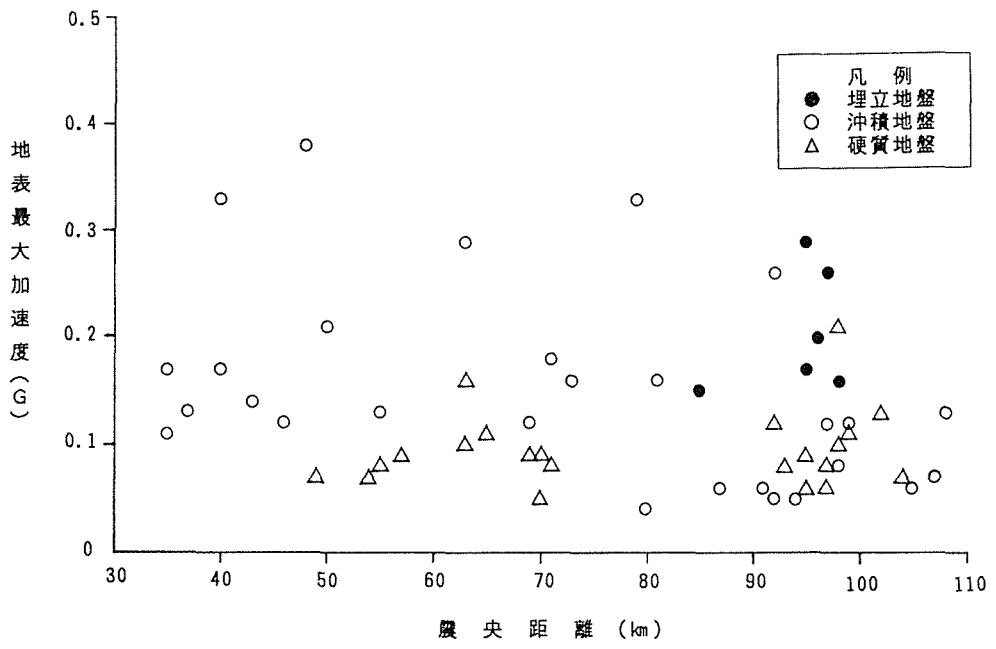


図1-11 地盤別の地表最大加速度と震央距離の関係

1. 4 被害の概要

ロマプリータ地震による被害は震源地を中心として広範に及んでいるが、特にサンフランシスコ、オークランド地域に被害が集中している。地震による直接の被害額は65～100億ドルに上るだろうといわれている。表1-1は郡毎の被害をまとめたものである。

表1-1 地震被害一覧表

郡	死者 (人)	負傷者 (人)	被害額 (億ドル)	全壊建築物 (戸)	被害建築物 (戸)
アラメダ	39	349	15	29	3411
モントレー	1	20	0.5-1.0	45	144
サンタクララ	5	650以上	6.5	71以上	104884
サンタクルーズ	6	600	10	580	3290
サンフランシスコ	13	282	20	350以上	不明

UCB資料を元に作成¹⁾

アラメダ郡の死者はI-880号線高架道路の崩壊によるものであり、復旧費は2億ドルに上る見込みである。

主な土木・建築構造物の被害を記述すると次のようになる。

- ・オークランドではI-880号線（通称 ニミツ フリーウェイ）の2層構造の高架道路2階部分が崩壊し、車が床版の間に挟まれて多数の死傷者がでた。サンフランシスコでも同じ構造のI-480号線（通称 エンバ ガー ロ フリーウェイ）、I-280号線の柱と床版の接続部に亀裂が生じた。
- ・マリーナ地区では広範な液状化と地震動のため多くの建物が倒壊し、ガス管破損による火災も発生した。
- ・ベイブリッジの橋桁の一部がはずれて落下し、通行不能となった。
- ・オークランド空港滑走路、アラメダ海軍基地、オークランド港などで液状化が発生し、亀裂・陥没・沈下・水平移動などの地盤変状が起こった。
- ・震源地付近の山岳地帯では崖崩れ、落石などで道路が閉鎖された。
- ・サンタクルーズでは地震動のため主にレンガ造の古い建物が崩壊した。
- ・モスランディング(Moss Landing)のカリフォルニア州海洋研究所の建物が液状化による地盤の滑りのため全壊した。

図1-12には主な被害の種類と位置を示す。

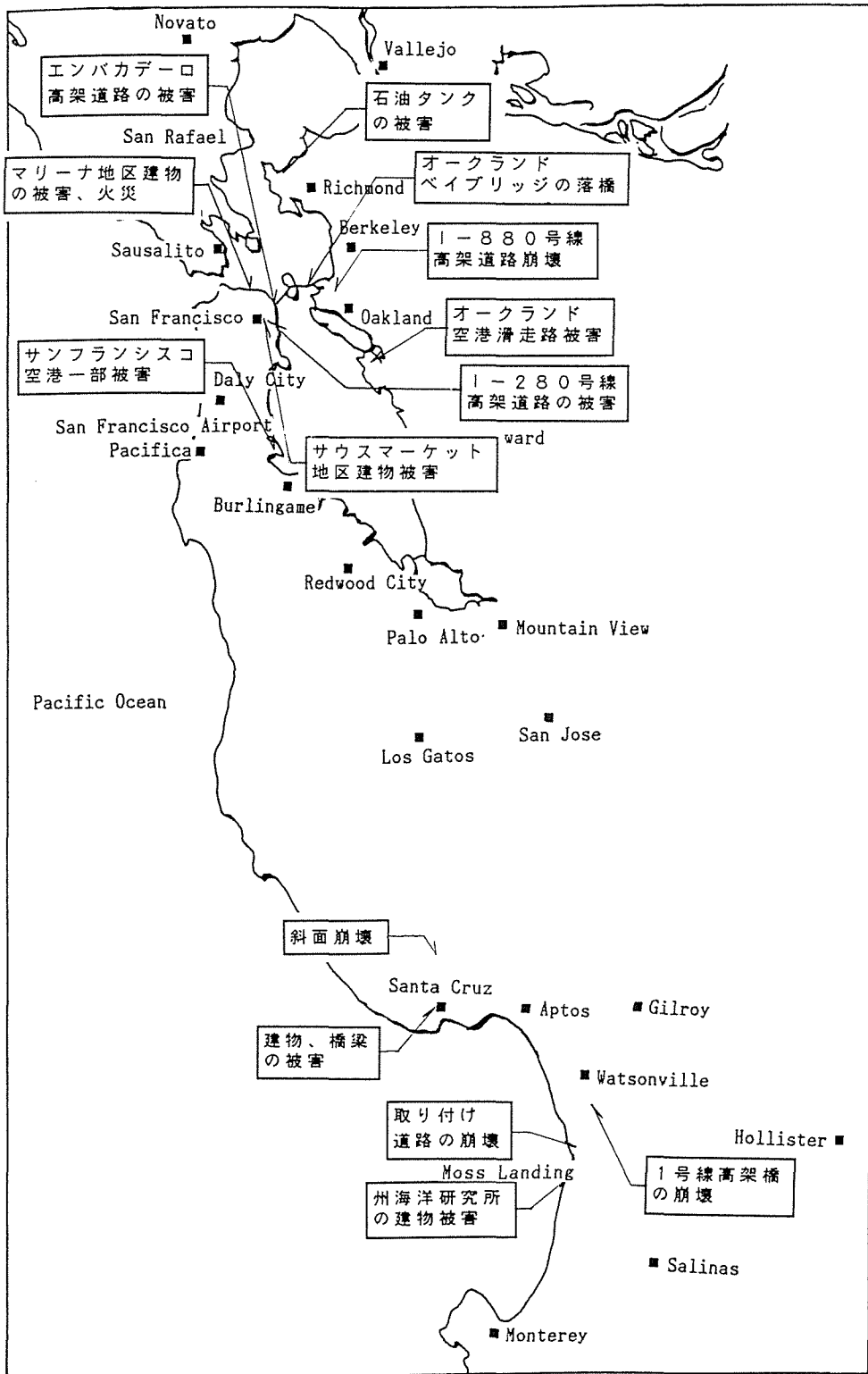


図1-12 主な被害地点位置図

2. 地盤の概要

2. 1 サンフランシスコ湾岸地域 (Bay Area)

この地域には、サンフランシスコ湾を囲んで、沖積層で覆われた平野 (Flat Land) が広く分布している。その西側には、太平洋岸沿いに今回の地震の震源域を含む山岳地帯が南北に走っており、東側も同様な山岳地帯となっている。

この地域では、間氷期の海進の時期にはほぼ現在のサンフランシスコ湾の範囲が海水で覆われて河川による土砂の堆積が行われ、氷河期の海退の時期にはこの部分はすべて陸地となり、大きな溪谷を形成していて、それが浸食されていた。、この繰返しの間に、サンフランシスコ湾には過圧密の粘性土層が生まれた。

現在のサンフランシスコ湾ができたのは1～2万年前で、以降、沿岸部には氷河期にできた谷を埋める形で沖積地盤が形成された。この時、海岸に面した所では粘性土が堆積した。いわゆるベイマッド (Bay mud) で、支持力などで常に問題となり、湾岸沿いの埋立地盤とともにこの地域の地盤を特徴づけている。

なお、同じ時期に、南方の山岳地帯から風で運ばれて来る砂によっても沖積平野が形成され、サンフランシスコ市も多くの部分がこれによる砂地盤で構成されている。この砂地盤は通常の構造物の支持層として十分期待できる。この時、後背湿地も形成されており、マリーナ地区はその例である。

図2-1にこの地域の地質の概要を、また、表2-1にサンフランシスコ湾沿岸部の地盤の地層構成の例を示す。

表2-1 サンフランシスコ湾岸地盤の地層構成の例 (R. Seedによる)

地 点	土 質	層厚 (フィート)	備 考
マーケットストリート南側	緩い埋立砂	25-30	(Vs=80m/sec)
	新期ベイマッド	0-100	正規圧密
	古期ベイマッド	200	
ベイブリッジ 東側	埋立砂	20	
	新期ベイマッド	?	
	古期ベイマッド	下限深度は海面下 -300ft以上。 確認されていない。	
西側	埋立土	?	
	新期ベイマッド	70	
	古期ベイマッド	海面下-300ftまで	
オークランド (沿岸部)	埋立土	10-25	
	新期ベイマッド	0-20	
	古期ベイマッド	100-400	

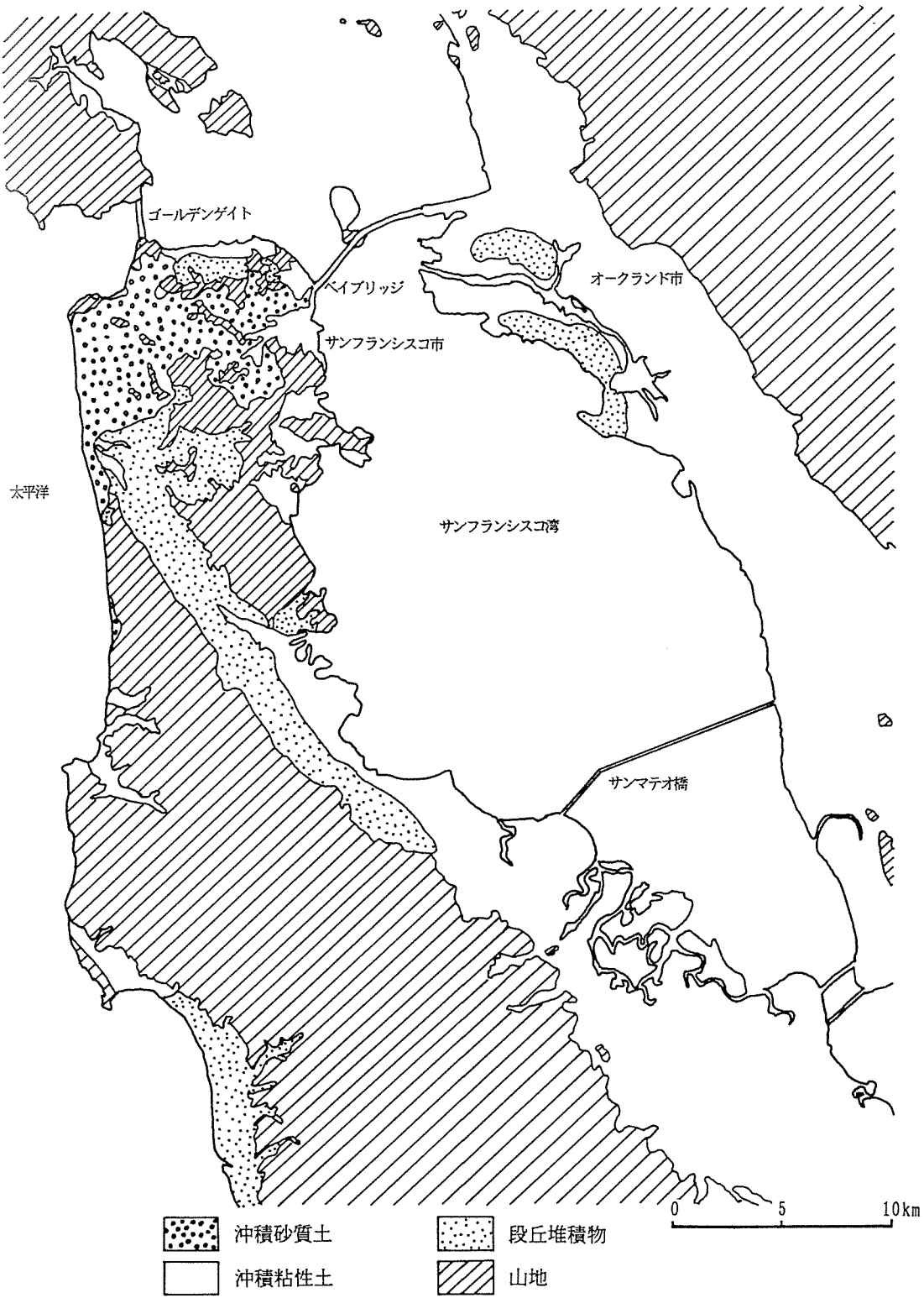


図2-1 サンフランシスコ湾岸地域の地質¹⁶⁾

2. 2 ベイマッド

このような経過をたどったため、サンフランシスコ湾の沿岸にはベイマッドと呼ばれる粘土層で覆われている所が多い。この粘土層は下位にある過圧密の古期ベイマッド(Older Bay mud)とその上位にある 新期ベイマッド(Younger Bay mud)に大別されている。

古期ベイマッドは湾の全域に分布し、杭、ケーソンなどの支持層としても利用される安定した粘土層である。厚いところでは100メートル以上の厚さがある。

新期ベイマッドは湾岸のほとんどのに分布している。極めて軟弱であるため、建設工事の際には常に問題になっているが、埋め立てられ、盛土に覆われている所も多い。極く弱命のものはマーシュ(MARSH, 沼地)と呼ばれ、湾の南部沿岸に多い。

ベイマッドの土性の概略を表2-2に、また、その分布をサンフランシスコの地質とともに図2-2に示す。

表2-2 ベイマッドの土性概略¹⁰⁾

ベイマッドの種別	古期ベイマッド	新期ベイマッド	
		やや圧密	未圧密
湿潤密度(g/cm ³)	2.10	1.75	1.55
含水比(%)	40 以下	約 40	40 以上
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	0.5 - 1.95	0.5	0.1
せん断波速度(m/sec)	180-300	90 - 130	
最大層厚(m)	100m 以上	40m	
支持地盤としての評価	良 杭など可能 過度な集中 荷重不可	可 杭など不可 幅広基礎	不良 杭が自沈

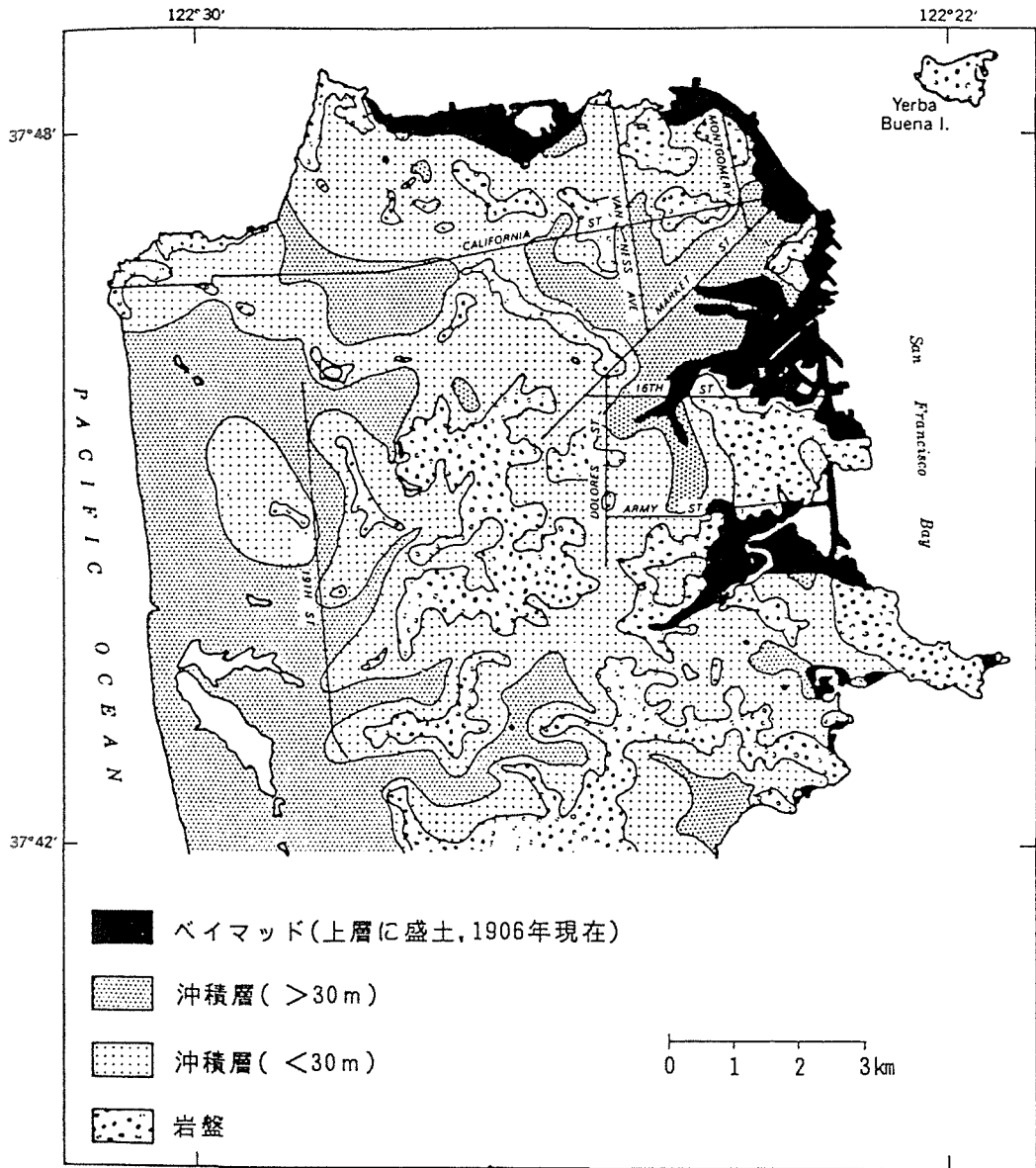


図 2 - 2 サンフランシスコ市の地質⁵⁾

2. 3 埋立地盤

サンフランシスコ市をはじめ、この地域の都市はベイマッドを覆い、湾を埋立てながら発展してきた。図2-3に1850年頃と現在の海岸線の位置を示す。

サンフランシスコ市では、1800年代にはすでに埋立てが始められており、有名な1906年の大地震でも大きな被害を受けている。本格的な埋立が行われるようになったのはその後であるが、現在は市の湾岸部の殆んどが埋立地となっている。図2-3において、サンマテオ橋以北で1850年頃と現在の海岸線に挟まれている部分は埋立地と考えてよい。サンマテオ橋以南では原地形と埋立地とが混在するが、南部にゆくほど埋立地は少なくなっている。埋立てには浚渫砂や山砂が用いられたが、建設残土の類も利用されている。

サンフランシスコ市の中心街を例にし、このような埋立ての経過を図2-4および図2-5に示す。埋立てにより軟弱なベイマッドが海側に押し出されている。

サンフランシスコ市周辺ではマリーナ地区、サウスオブマーケット地区、トレジャー島、サンフランシスコ空港など、また、対岸のオークランド市周辺では、オークランド港および空港、アラメダの海軍基地などの埋立地が液状化した。

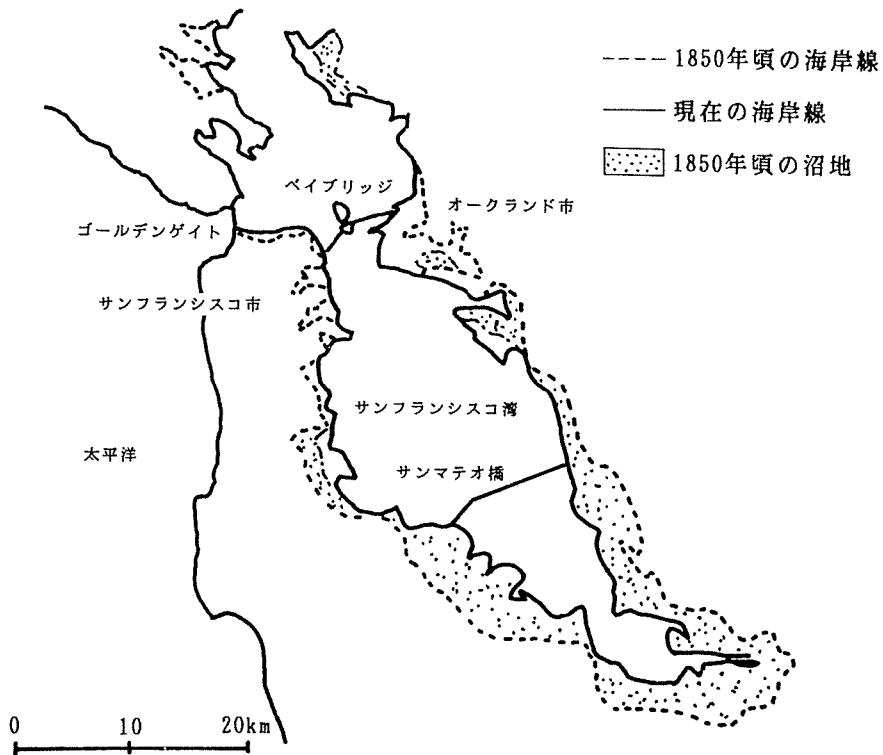


図2-3 サンフランシスコ湾の海岸線の変化¹¹⁾

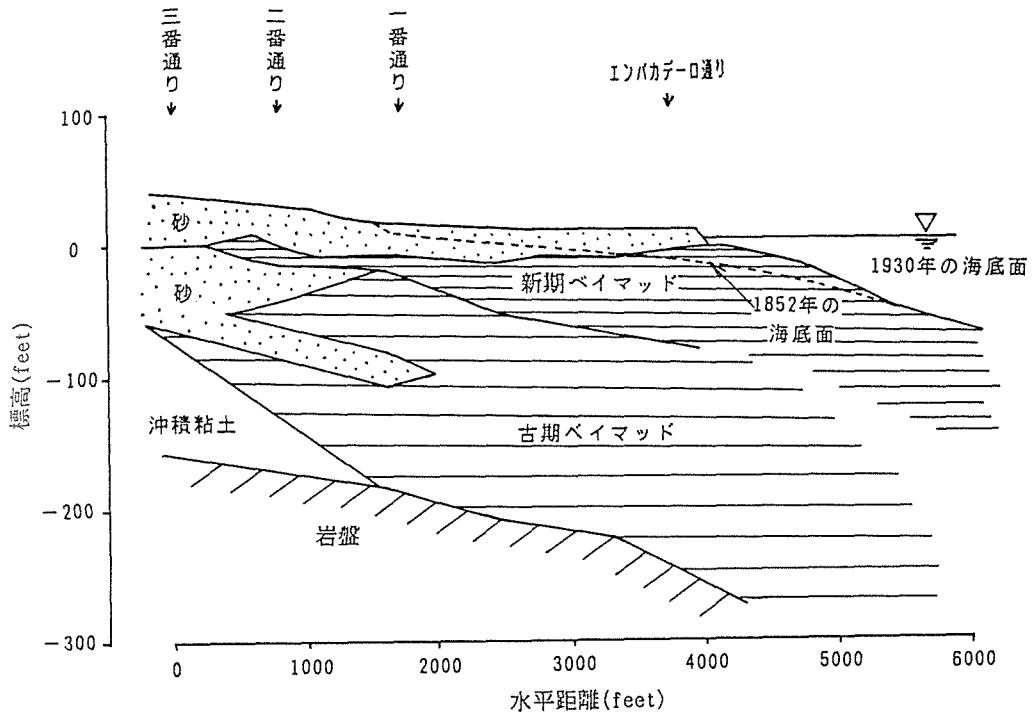


図2-4 埋立て経過例-1 (マーケット通り沿い)²²⁾

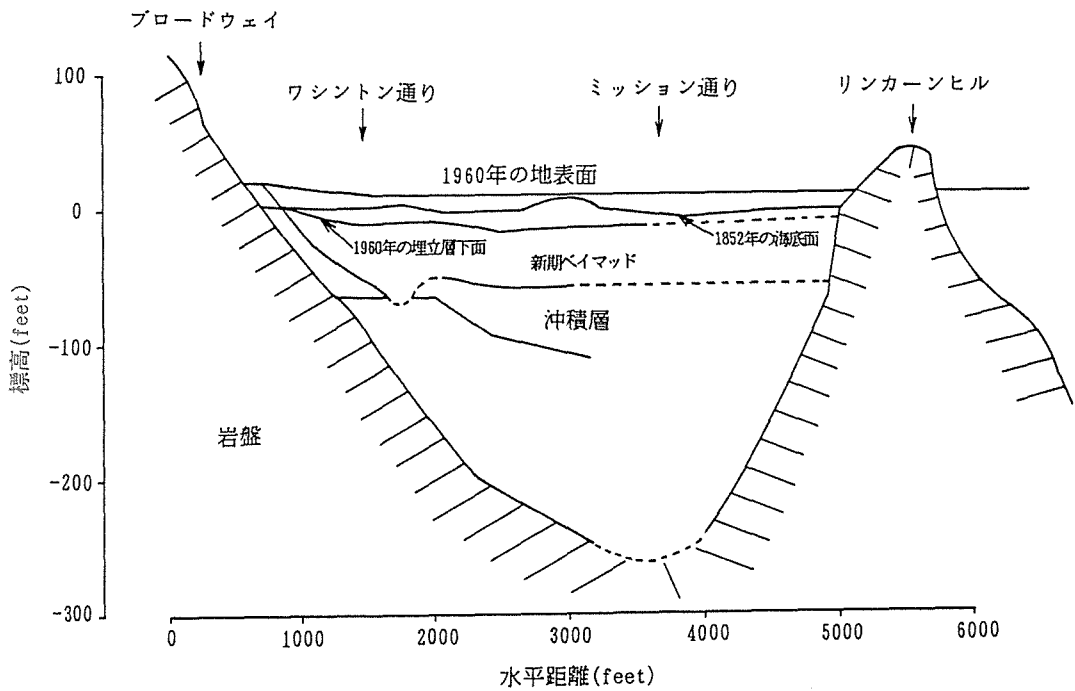


図2-5 埋立て経過例-2 (リンカーンヒル〜ブロードウェイ間, マーケット通りに直角方向)¹⁰⁾

3. 地震による地盤の変状

3. 1 液状化

(1) 液状化発生地点の分布

今回の地震により、多くの地点で地盤の液状化が発生した。いくつかの機関によりこの地点が調べられているが、それらのうち、カリフォルニア大学バークレイ校のレイモンド・シード(Raymond B. Seed)助教授により調べられたもの¹⁾が全域をほぼくまなくカバーしていると考えられるため、これを図3-1に示しておく。なお、シード助教授は1年前に亡くなられた有名な H. B. Seed 教授の御子息で、バークレー校を訪れた際、父親と同様になめらかな口調で2時間にわたり詳しく説明をしていただいた。

さて、図3-1を見てわかるように、液状化地点を大別すると、

- ① サンフランシスコ湾の沿岸の地域
 - ② サンタクルーズからモンテレーにかけての海岸および河川沿いの地域
- に大別される。前者ではサンフランシスコ湾の主に埋立地で液状化が発生しており、後者では太平洋の海岸沿いの砂丘および砂丘の背後地や河川沿いの三角州、氾濫平野といった自然堆積地盤で液状化が発生している。この地域では1906年にマグニチュード8.3の地震が襲い、後述するようにサンフランシスコ市内の埋立地などで液状化が生じた。シード助教授の話では、さらにサンフランシスコ湾南部の沖積低地でも液状化が発生したとのことであった。これに対し、今回はここでは液状化が発生しなかったのは、地震規模が小さかったことや、液状化し易い砂地盤が少なかったことによると考えられている。

図3-1に番号を示した各地点における構造物の被害状況を示すと表3-1となる。サンフランシスコのマリーナ地区やサウスオブマーケット地区などでは、写真3-1、3-2に示すように家屋が液状化により沈下したり破損した。オークランドやアラメダの空港では滑走路に被害が生じた。また、サンタクルーズやモスランディングでは、堤防や道路、建物が液状化により被害を受けた。このように液状化による被害がいくつか発生したが、例えば新潟地震や日本海中部地震に比較すると、その被害の程度は大きくはなかった。これは、地震の規模が小さくて液状化した地区に限られていたことや、その地区にあまり多くの構造物がなかったこと、永久変位などの激しい地盤変状が生じなかったことなどの理由によるものであろう。

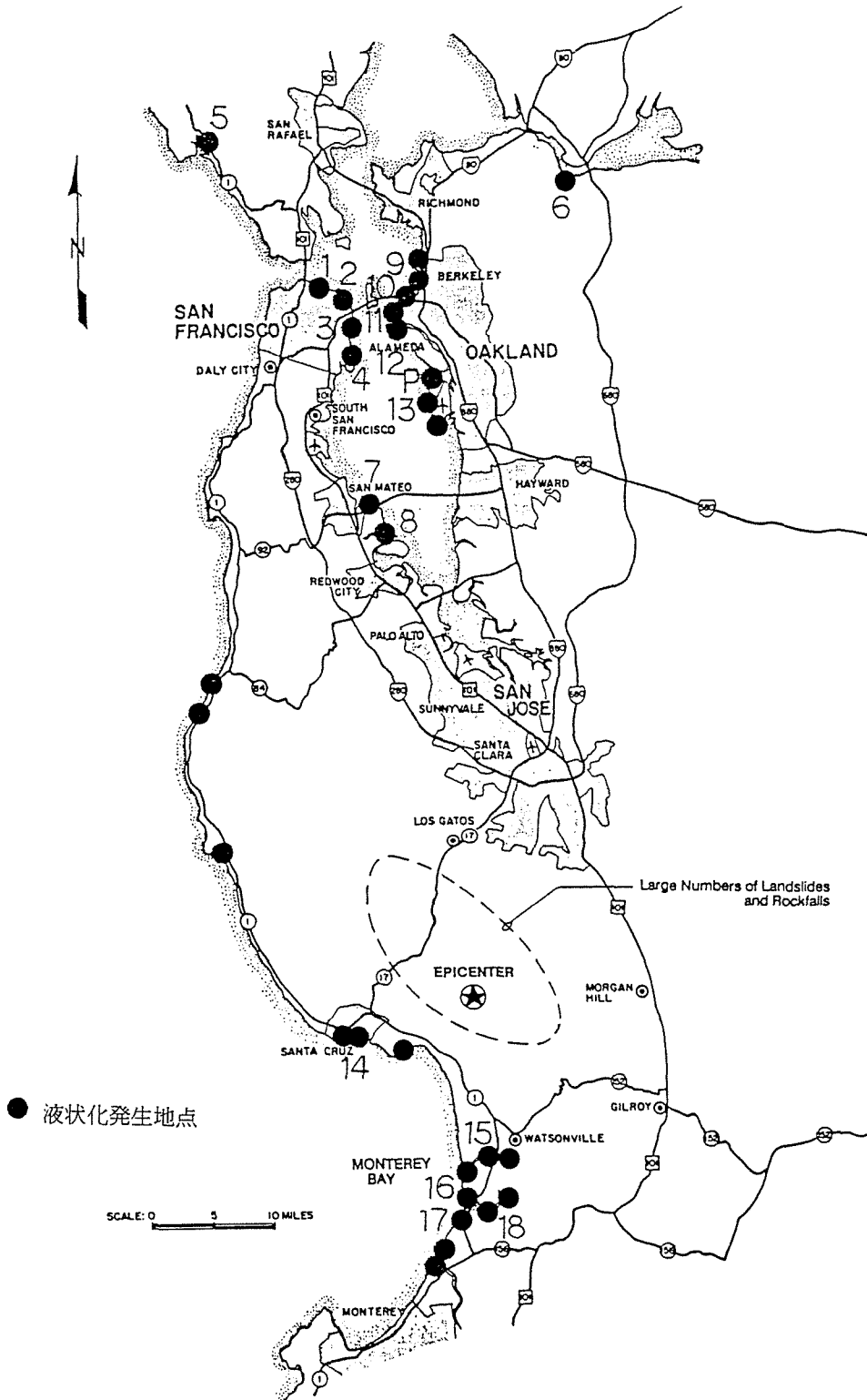


図3-1 液状化発生地点の分布¹⁾

表3-1 液状化発生地点と被害状況

地点番号	地名	微地形	液状化による構造物の被害
1	サンフランシスコ、マリナーナ地区	埋立地	家屋の沈下・破損、埋設管の破損、地盤の沈下・亀裂
2	サンフランシスコ、エンバカデーロ地区	埋立地	道路の沈下・亀裂
3	サンフランシスコ、サウスオブマーケット地区	埋立地	家屋の沈下・破損、道路の沈下・亀裂
4	サンフランシスコ、ミッシュンクリーク地区	埋立地	家屋の沈下・破損、道路の沈下・亀裂
5	サンフランシスコ、ボリナス	潟湖の岸	湖岸の側方移動
6	マルティネッツ	湾の岸	
7	フォスターシティ付近	埋立地	側方移動
8	サンフランシスコ空港	埋立地*	
9	オークランド、エメリービル	埋立地*	道路の亀裂
10	オークランド、ベイブリッジ取付け盛土	盛土	沈下、側方はらみ出し
11	オークランド港	埋立地*	ヤードの沈下・側方移動、クレーンの傾斜
12	アラメダ海軍基地の空港	埋立地*	滑走路の沈下・側方移動
13	オークランド国際空港	埋立地*	滑走路の沈下・側方移動
14	サンタクルーズ	三角州*	家屋の被害、河川堤防の沈下・亀裂
15	ワトソンビル、パハロ川沿い	氾濫平野*	河岸のクラック
16	モスランディング、道路	砂丘間低地での盛土	側方はらみ出し
17	モスランディング海洋研究所	砂丘	建物の分断
18	モスランディング発電所	埋立地*	

* 既報告書に述べられていなく、推定したもの

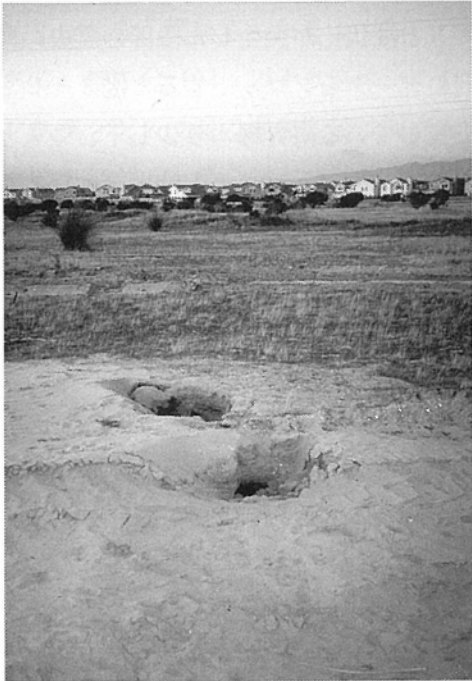


写真3-1

アラメダ地区での噴砂の例



写真3-2

マリーナ地区での液状化に
起因した建物の沈下

(2) 液状化発生限界距離

栗林、龍岡らは明治以降100年間のわが国の地震によって発生した液状化地点を震害記録から調べ、地震のマグニチュードと液状化が発生した限界の震央距離の関係を調べている³⁾。この関係図に今回のデータをプロットすると図3-2となる。これからわかるように、栗林らが提案している限界線より少し下、つまり、遠くまで液状化発生地点が及んでいる。図にはまた千葉県東方沖地震、日本海中部地震でのデータも示したが、千葉県東方沖地震の際にも下に位置している。これらは、埋立地では特に液状化し易いことを物語っているか、または、液状化地点の調査方法が栗林らの文献に基づく方法より精度が良くなってきているためか、いずれかの理由によるものと考えられる。

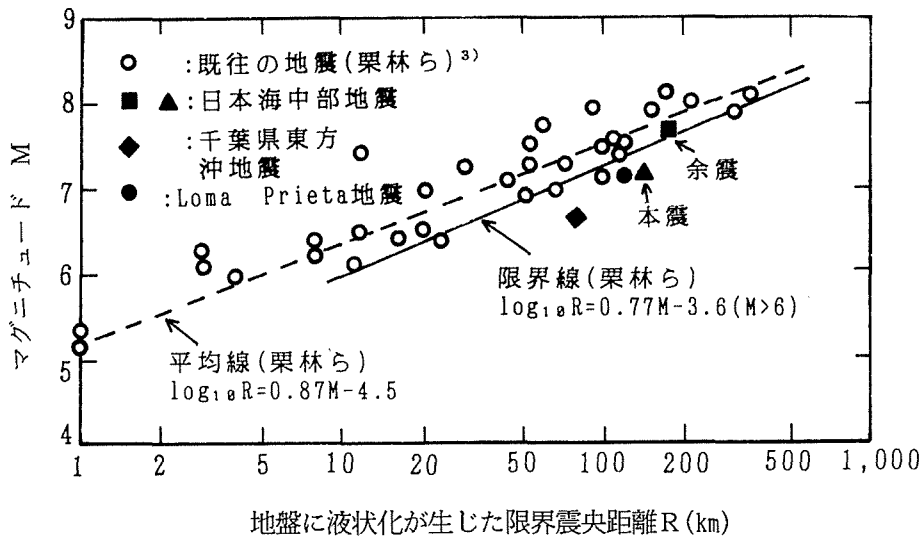


図3-2 液状化が生じた限界震央距離とマグニチュードの関係

(3) 液状化した砂の特性

液状化した地点のうち、筆者達が訪れ採取した噴砂の粒径加積曲線を示すと図3-3となる。図からわかるように、これらはいずれも細砂～中砂のきれいな砂である。細粒分(74 μ 以下含有率)FCもほとんどが15%程度以下と少ない。サンフランシスコ湾の埋立地では海底を浚渫した砂などで埋立てが行われているようであるが、千葉県東方沖地震によって液状化した東京湾の埋立土に比べて、細粒分も少なく、きれいな砂であると言えよう。

サンフランシスコのマリーナ地区で採取された砂を緩詰め状態でモールドに詰め、振動三軸試験装置にて室内液状化試験を行ってみた。その結果を図3-4に示す。不攪乱試料ではないため、このような試験結果では原地盤の真の液状化強度を求めることが出来ない。そこで、わが国において比較実験によく用いられる豊浦標準砂を用い、同じ詰め方で供試体を作成し、液状化試験を行ってみた。この結果も図3-4に示すが、両結果を比較してみるとほぼ同様であることがわかる。したがって、サンフランシスコで液状化した砂は、わが国においてきれいな砂で埋立てた地盤の砂と液状化のし易さが同程度であると推論することができよう。

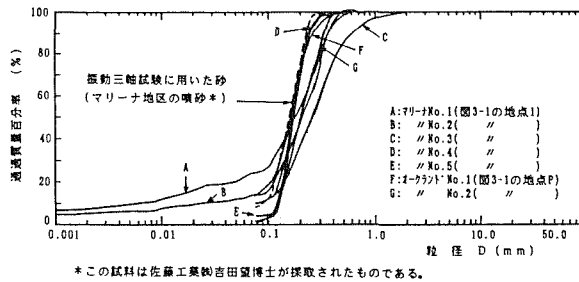


図3-3 採取した噴砂の粒度特性

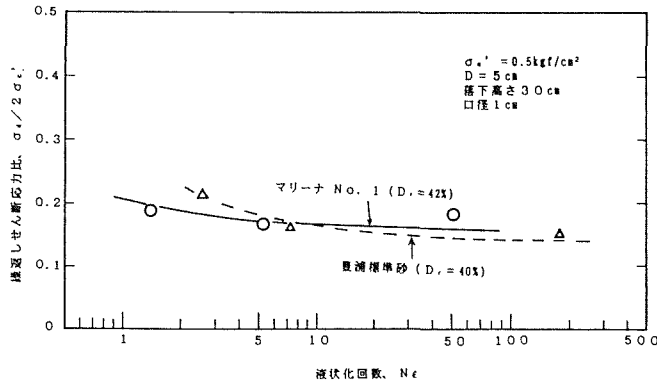


図3-4 マリーナ地区の噴砂の液状化試験結果

(4) 既往の液状化予測図との比較

今回液状化が発生した範囲内では、将来の地震に対する液状化予測図がすでいくつか作成されていた。また、1906年に発生した地震の際の液状化発生状況も調べられていた。これらと今回の液状化発生地点を比べてみることにする。

図3-5はヤウド(Youd)ら⁵⁾がサンフランシスコ湾周辺について行った液状化予測地図である。ここでは、まず表層の地質図に従ってゾーニングが行われている。さらにボーリング資料を収集し、シードの方法で液状化判定を行い、各ゾーンで液状化が発生する地点の割合を求め、各ゾーンでの液状化の可能性の評価を行っている。図にみられるようにサンフランシスコ湾沿岸のベイマッドが堆積している地域のうち、きれいな砂が堆積している地区では液状化の可能性が高いと予測されている。今回の液状化発生地点と比較すると、大局的にはよく合っていると見えよう。ただし、きれいな砂が堆積している所はどこかといった、もっと詳しい予測図が実務的には必要であろう。

図3-6はワトソンビルやモスランディング付近について作成された液状化予測図⁶⁾である。ここでは氾濫平野や砂浜、砂丘で液状化し易い堆積物がある所や過去の液状化による液状化履歴がある所を、特に液状化の可能性が高いと判断している。1906年のサンフランシスコ地震級の大きさの地震に対して予測しているが、中規模の地震に対しても液状化し易いと予測されている。この図ではパハロ川沿いや海岸部が特に可能性が高いと予測されている。今回の地震でもこれらの地区で液状化が発生しており、かなり精度よく予測されていると言えよう。また、モスランディングの海洋研究所や道路盛土の崩壊地付近では1906年の地震でも液状化が発生しており、今回の地震で再液状化が生じたと言えよう。

この他、サンタクルーズについても予測された地図をシード助教授に見せてもらい、かつ予測と実際の液状化発生地点とがよく合った話を聞かされたが、これについてはいずれ公表されるとのことであった。

さて、1906年のサンフランシスコ地震の際の液状化地点についてはいくつか調査が行われ、モスランディング付近では図3-6のように示されているが、この他、サンフランシスコ市内についても詳細に調査が行われている¹⁹⁾。図3-7は主に液状化により地盤変状が生じ構造物の被害が大きかった地区⁷⁾を示している。

マリナー、フットオブマーケット、サウスオブマーケット、ミッションクリークの各地区では今回と同様の範囲で被害が発生していたことがわかる。ただし、

図3-8に示すようにサウスオブマーケット地区では最大で1.8mの水平変位や1.5mの沈下が生じ、また、ミッションクリーク地区では最大で2.4mの水平変位や1.5mの沈下が生じている。これに比べて今回の地盤変状の方が程度は軽かったが、その主な原因は地震動の大きさの違いによるものであろう。なお、図3-7には埋立地の範囲も示してあるが、地盤変状の大きかった所は埋立地に限られていたことがよくわかる。

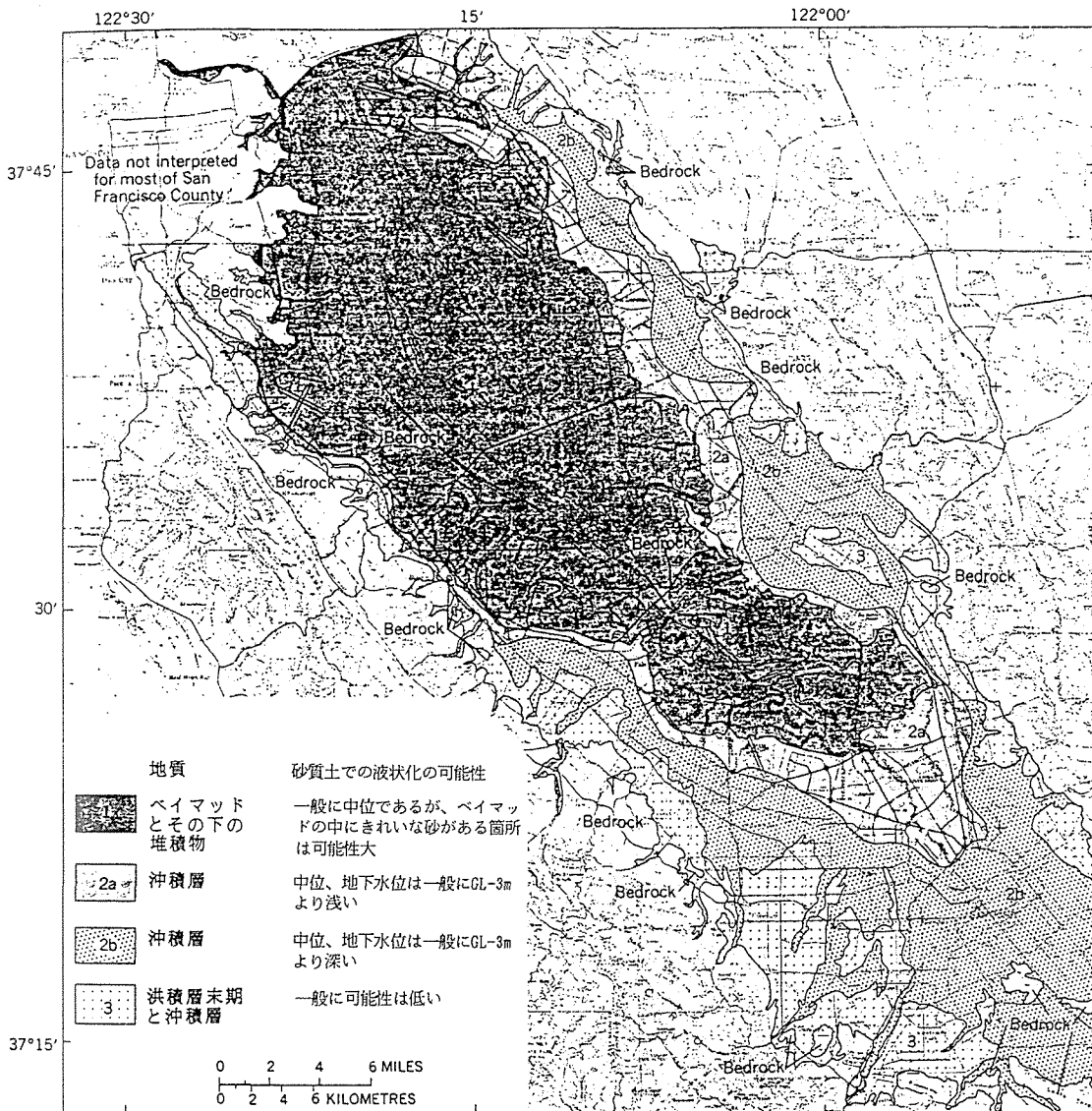


図3-5 サンフランシスコ湾周辺の液状化予測図⁵⁾

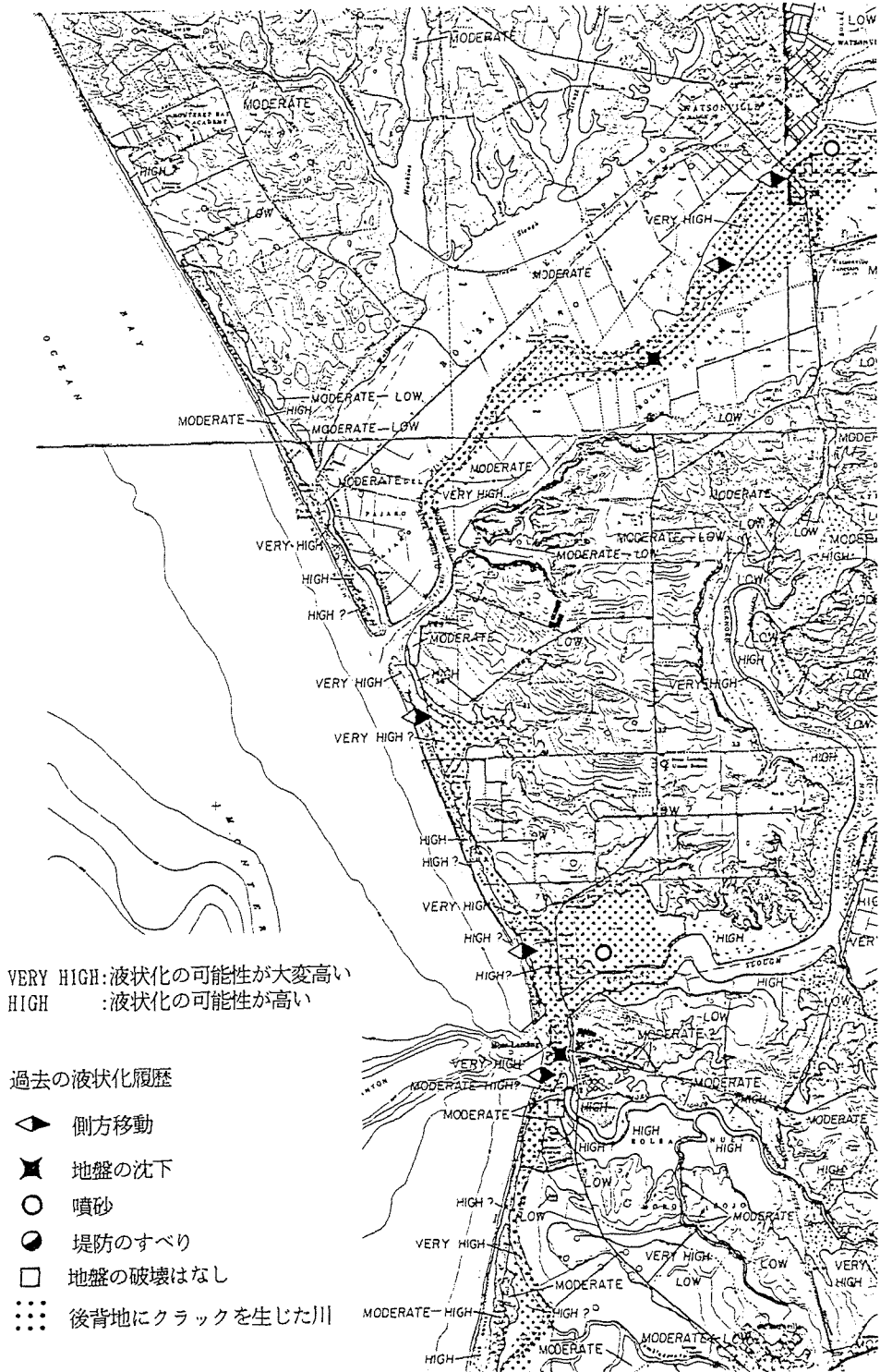


図3-6 ワトソンビル、モスランディング付近の液状化予測図⁶⁾

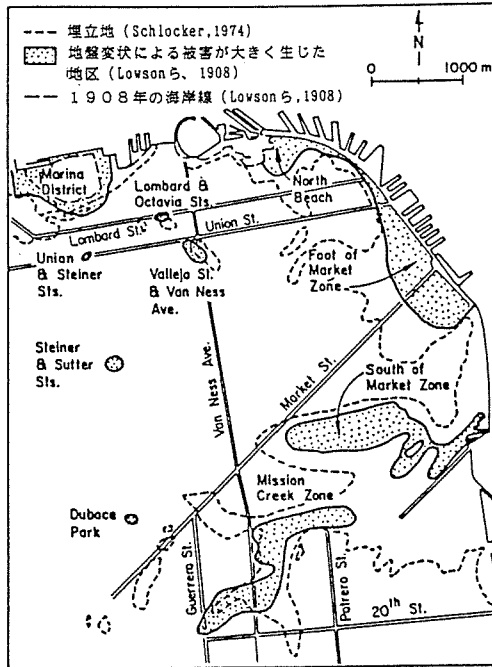


図3-7 サンフランシスコにおいて1906年の地震で地盤変状が生じた地区⁷⁾

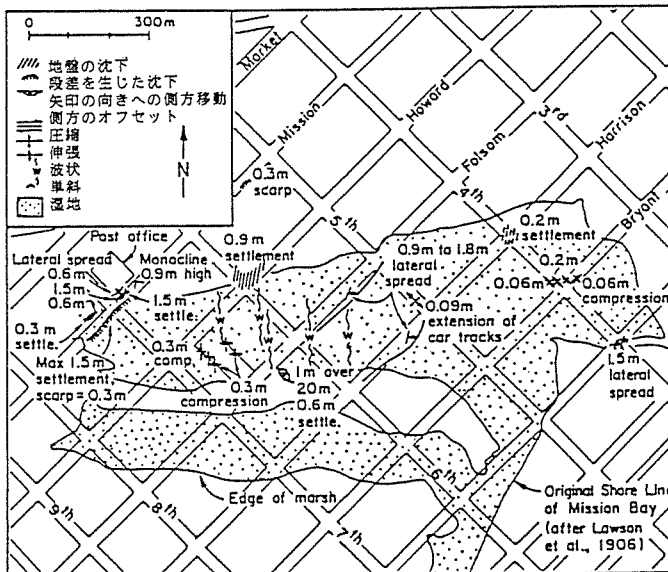


図3-8 サウスマーケット地区において1906年の地震で発生した地盤変状⁷⁾

3. 2 斜面崩壊

液状化以外の地盤変状として、斜面崩壊が多く発生した。筆者らはサンタクルーズからサンフランシスコへ戻る際、17号線沿いにいくつか復旧している箇所を通ったが、あいにくと日没後で写真は撮れなかった。また、その他調査に出かける時間もなかったため、シード助教授からお聞きした話を以下にまとめてみることにする。

シード助教授らの調査による斜面崩壊地点の分布¹⁾を示すと図3-9となる。崩壊は震央付近のサンタクルーズ山地で主に発生した。その数は500~1000箇所にも及んでいる。ただし、ほとんどは厚さ3~7m程度以下の浅い表層のみのすべりまたは落石であった。道路の盛土部の沈下やクラックの発生もあった。このように規模は小さかったものの、発生箇所数は多く、17号線などを交通不能にしてしまった。この地区では例年冬の雨期に崩壊が多く発生するが、特にこの地震により発生したクラックなどで、今冬にさらに多くの斜面崩壊が発生することが懸念されている。

4. サンフランシスコ湾岸地域の被害

4. 1 マリーナ地区

(1) 地形・地質および液状化特性

サンフランシスコ北部の海岸部にあるマリーナ地区は1900年代始めに造成された埋立地盤上の住宅地である。図4-1でわかるように、この地区は砂州で仕切られた湿地を浚渫の細砂で埋立てており、埋立土の厚さは最大12m程度であるといわれている。埋立土は第3章で述べたように細粒分含有率が15%以下の比較的美丽な細～中砂である。マリーナ地区のうち埋設管や建物の被害が著しかった地域は埋立地盤に位置している。一方、砂州・砂丘の砂は一般的には締まっており、今回の地震でもこれらの卓越する地域では被害は小さかった。

マリーナ地区の北側を東西に走るマリーナ通りに沿う土質断面⁷⁾は図4-2に示すとおりである。ブロードリック(Broderick)通りより西側は埋土層が薄く、その下には海浜性の締まった砂が堆積している。東側はN値10回以下の砂からなる埋土層が最大10mの厚さで堆積しており、その下には沖積粘性土(ベイマッド)がある。この付近の地下水位は大体2～3m付近にある。

この地区では広範囲に液状化が生じたが、前述の土層断面図を用いて液状化がどの程度の深さまで起こったのかを検討してみた。

地盤物性値は噴砂の粒度特性や土質名などから表4-1に示すような値を用いた。地震加速度はマリーナ地区の南西2.5kmにあるプレシディオ(Presidio)での観測値0.21Gを参考に0.25Gとした。

また液状化判定は「道路橋示方書」の方法に従った。

図4-3に示す判定結果より液状化した地層は深さ約3～9mの緩い細砂層と考えられるが、隣接するシルト質細砂の埋土層の F_v 値も1.0付近を示しており、地盤物性値や地震加速度の不確かさを考慮するとこの地層も液状化した可能性がある。

表4-1 液状化判定のための地盤物性

土質	密度(t/m ³)	平均粒径(mm)
埋土(細砂)	2.0	0.2
埋土(シルト質砂)	1.95	0.07
海浜堆積物	2.0	0.2
ベイマッド	1.6	0.005

地下水位が浅い場合は上記の値より0.2引いた値を用いる

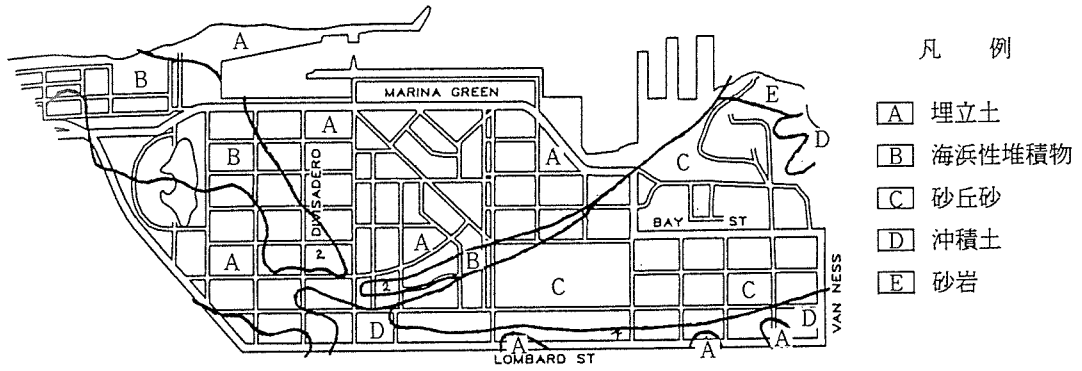


図4-1 マリーナ地区の土質区分²⁵⁾

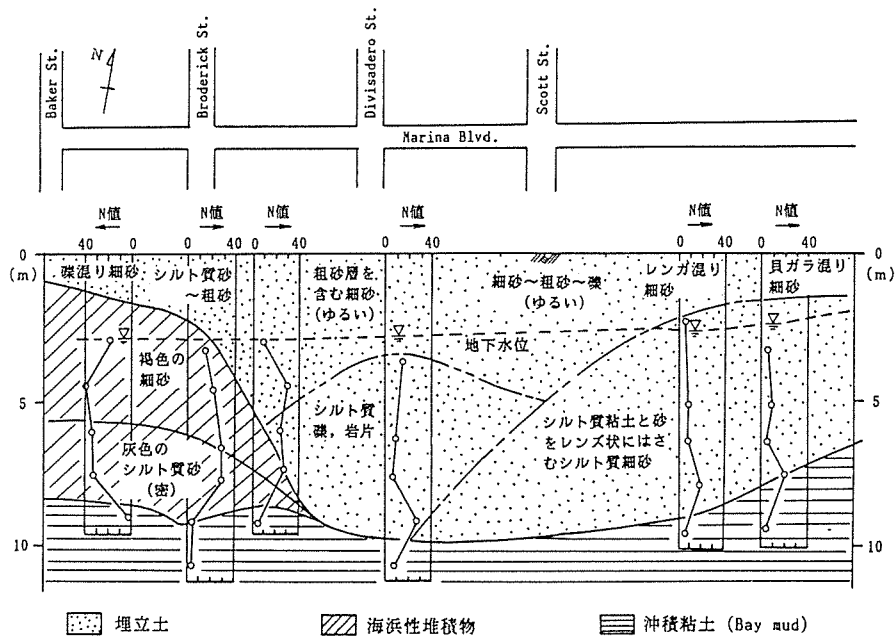


図4-2 東西方向の土層断面図⁷⁾

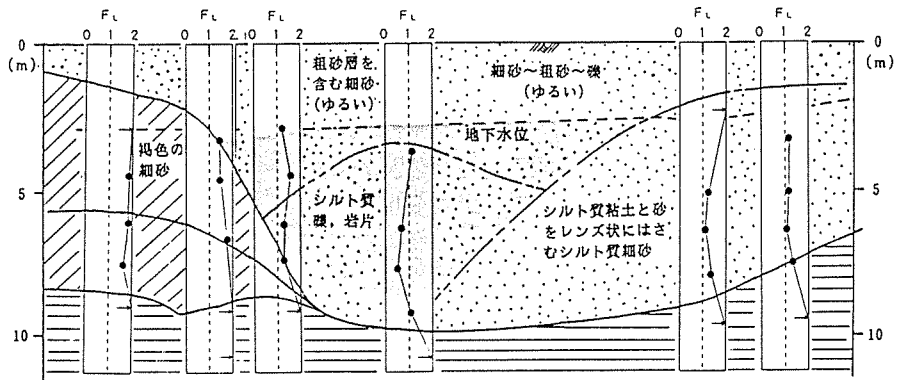


図4-3 液状化層の推定

推定液状化層
地表最大加速度 250gal

(2) 被害状況

マリーナ地区は § 1.3 で述べたように最大加速度200galを上回る地震動とそれによる液状化のため、家屋、道路およびガス・水道などのライフラインを中心として多大の損害を被った。UCBのシード助教授の調査ではマリーナ地区のほぼ西半分で液状化発生を示す噴砂や地盤の亀裂・沈下などが見られた(図4-4)。

マリーナ地区の建物は写真4-1に示すようにほとんど3~4階建ての木造住宅とアパートである。この地区の建物被害の特徴の一つは被害を受けた建物が角地に集中していることである(写真4-2)。この地区の建物どうしの間隔は全くないか、開いていても僅かである(写真4-3)。このためブロックの中の建物は隣接する建物に拘束されて被害が少なかったと考えられている。一方、角地の建物の多くは1階がガレージのアパートになっており、1階部分の構造が耐震上脆弱であった上に隣接建物の拘束効果もなかったため、1階部分に大きな永久せん断ひずみが生じたり、倒壊したりした(写真4-4)。

液状化の影響は建物の沈下、道路の沈下・亀裂、埋設管の破損などに現れている(写真4-5、写真4-6)。地盤の沈下量は10cm程度、建物の地盤に対する相対沈下量も10~15cm程度ということである。建物の不同沈下による傾斜も見られた(写真4-7)。建物の基礎は直接基礎で、基礎には鉄筋が入っていないということであった。

道路では舗装に多くの亀裂が入り、特に管や地中構造物が埋まっていると思われる所で、亀裂が多くあったように見受けられた(写真4-8)。

日本海中部地震(1983)や新潟地震(1964)でみられた液状化地盤の大規模な水平移動は路面や護岸の状況を観察をした限りでは見られなかった。

筆者らが現地を観察し、資料を検討した結果ではマリーナ地区の建物の被害は埋立地盤上の直接基礎の建物が大きな地震動を受け、脆弱な1階部分が破壊または大きな永久せん断変形を起こしたことによると考えられる。

地震動が大きくなった原因としては、①緩い埋立地盤であったこと、②液状化により地盤の剛性が低下したこと、③不均一な液状化のため地盤の動きが場所によって異なったこと、などが考えられるがどのような原因で大きな地震動が生じたのか、米国やわが国における今後の調査・検討結果を期待したい。

埋設管や道路の被害および建物の沈下などの地盤変状に伴う被害は埋立地盤の液状化によって地盤が破壊したことが原因とみてよいだろう。過去の地震でも地盤が液状化すると地中構造物や道路の被害が多くなることはよく知られている。

サンフランシスコ湾

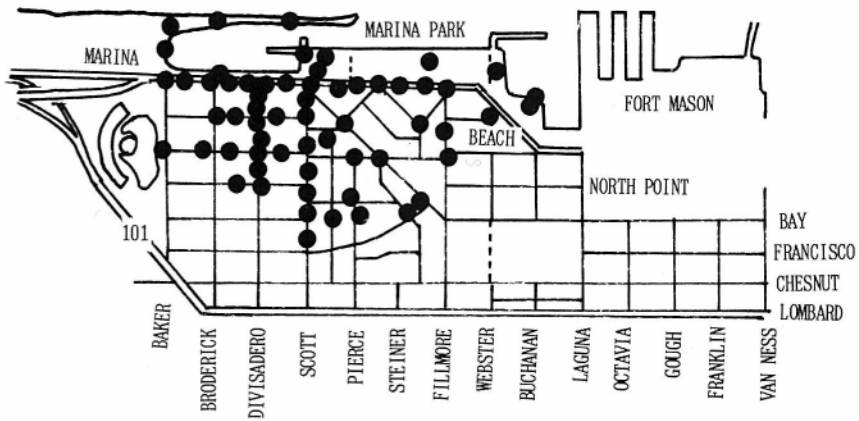


図4-4 マリーナ地区の液状化
地点 (UCB資料による)



写真4-1

マリーナ地区の建物



写真4-2

角地における建物の被害



写真4-3

密接して建っている家屋



写真4-4

大きくせん断変形した建物

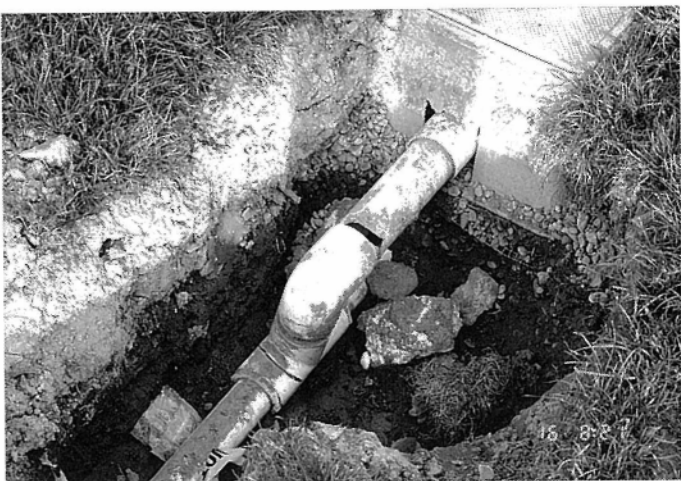


写真4-5

塩ビパイプの破損



写真4-6

道路の亀裂



写真4-7

不同沈下による建物の傾斜



写真4-8

埋設管の上に発生した亀裂

4. 2 I-880号線高架道路

インターステート880号線 (I-880) は通称ニミッツフリーウェイと呼ばれ、サンフランシスコ湾東岸を走る主要路線である。崩壊した場所はオークランド市街地の西約1kmのサイプレス(Cypress)通りに沿った区間で、18番通りから34番通りにわたる約1.3kmの高架道路区間である(図4-5)。この道路は1955~1957年にかけて建設された。その当時の設計基準であるAASHO (The American Association of State Highway Officials, 1953)には耐震規定は無かった。

被害地域は図4-6に示すようにベイマッドの上に砂を埋め立てた地盤²⁶⁾である。高架道路の崩壊区間が埋立区域にはほぼ一致していることは興味深い。

崩壊した高架道路は2層構造の4車線道路(幅15.6m)であり、上部が南行、下部が北行になっている(図4-7)。道路の構造は基本的には図4-8に示す4タイプに大別される。これらのタイプは柱脚の数およびピンの数・位置によって区分されている。最も被害の多かった構造形式はB-1タイプで、上部の架構が下部の架構とピンで接合されているものである。柱脚の下部は独立フーチングで、その下には9~35本の杭が打設されている。杭頭とフーチングの接合部はピン構造となっている。杭長は場所によって大きく変化する。すなわち20番通り以南の平均杭長は約4.5m、以北の平均杭長は約15mである。特に20番通り南側のNo. 71柱脚の杭長は6.3m、北側のNo. 72柱脚では15.3mと杭の長さが急変する。すなわち図4-6に示したように、この付近は埋立地盤と沖積地盤の境目にあたるため、このように支持層の深さが急激に変化しているものと考えられる。

この杭長急変部付近から高架道路の崩壊が始まっているのは地盤条件と被害の間に密接な関係があることを示していると考えられる。

高架道路の被害状況を写真4-9~写真4-14に示す。最も大きな被害はピン構造となっている上部と下部の架構の接合部が破壊して、上部の柱脚が下部の柱脚からはずれ、そのため上部道路の桁が下部道路の上に落下したものである。上部道路の落下に至らないものでも、多かれ少なかれ接合部に被害が生じていた。破壊の様式を模式的に示すと図4-9のようになる。

被害地点は常時から地盤沈下があった場所ということであるが、柱脚基礎地盤で10cm程度の沈下は見られたものの、大規模な地盤の変状は一見したところではなかったようである。250gal以上の地震動と耐震性を考慮していなかった構造上の欠陥のため、そのような崩壊が起こったのではないかと考えられる。

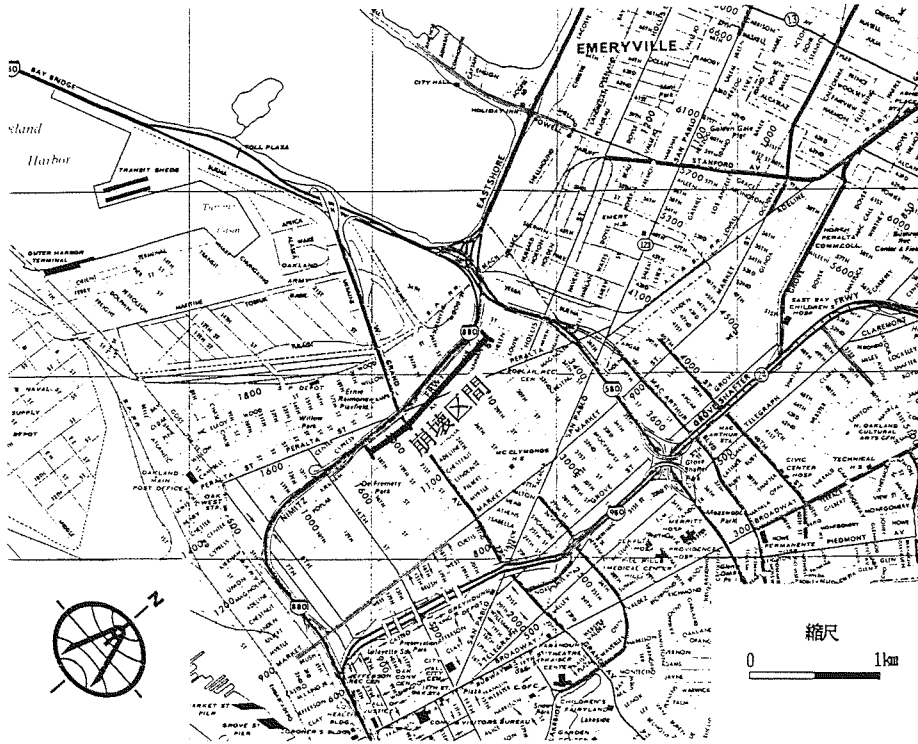


図4-5 I-880号線崩壊地点位置図



凡 例

Qm : ベイマッド、通常、埋立土
 によって覆われている

Qal : 沖積土

図4-6 被害地点付近の地質状況²⁶⁾

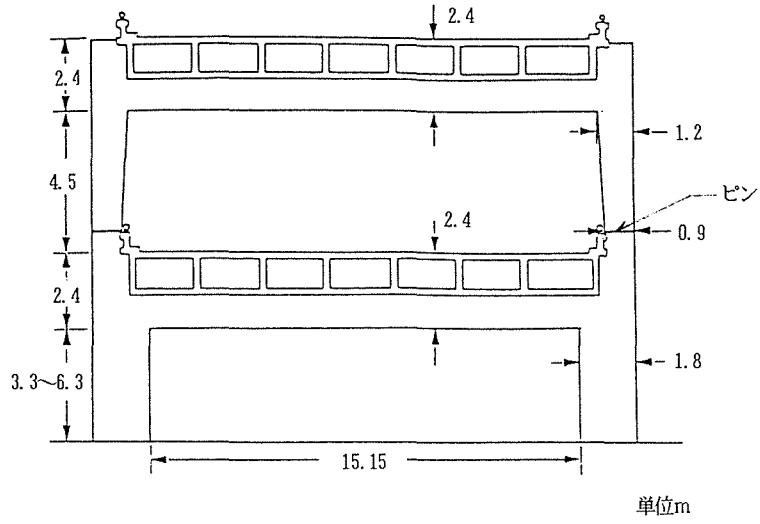


図4-7 I-808高架道路の標準断面¹³⁾

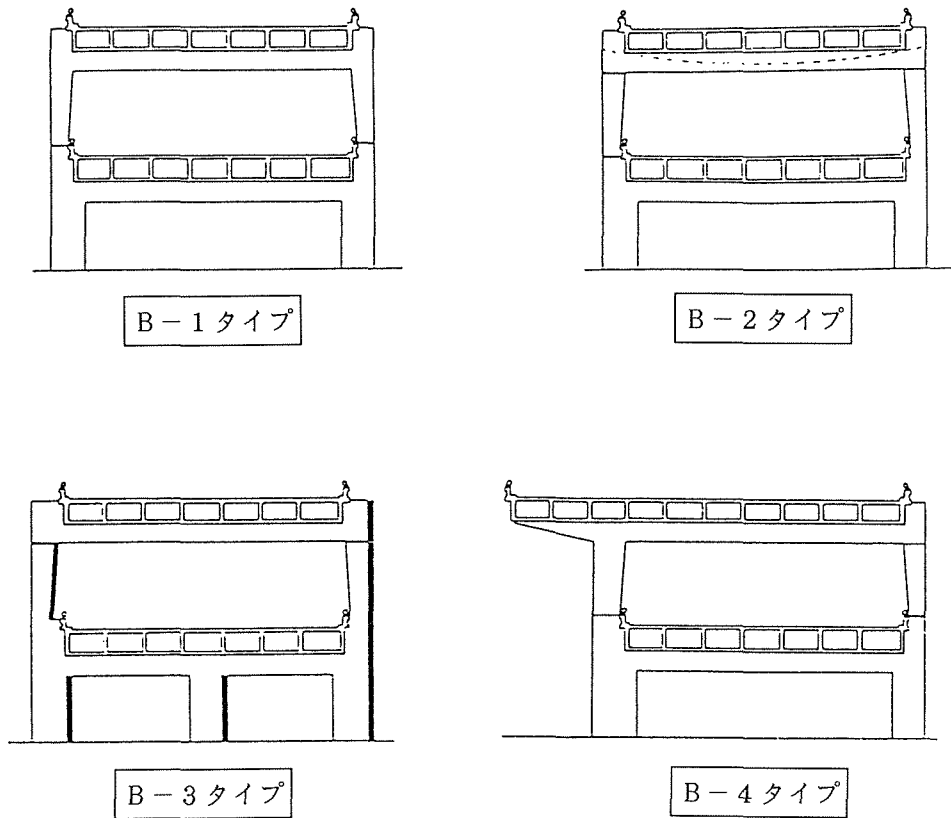


図4-8 I-808高架道路のタイプ¹³⁾

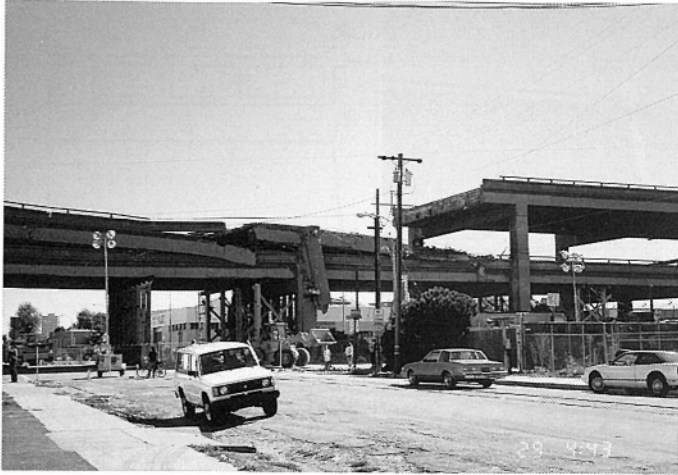


写真4-9

サイプレス高架道路の被害(1)
18番通り付近

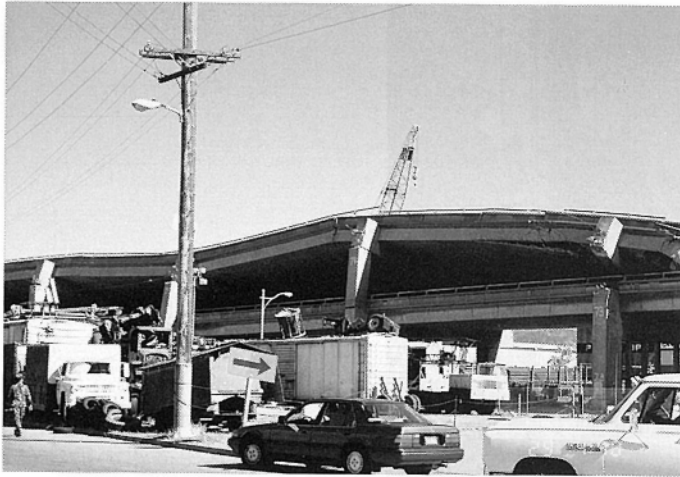


写真4-10

サイプレス高架道路の被害(2)
20番通り付近



写真4-11

サイプレス高架道路の被害(3)



写真4-12

サイプレス高架道路の被害(4)
ピンジョイント部の破壊状況



写真4-13

サイプレス高架道路の被害(5)



写真4-14

取り壊し中のサイプレス
高架道路

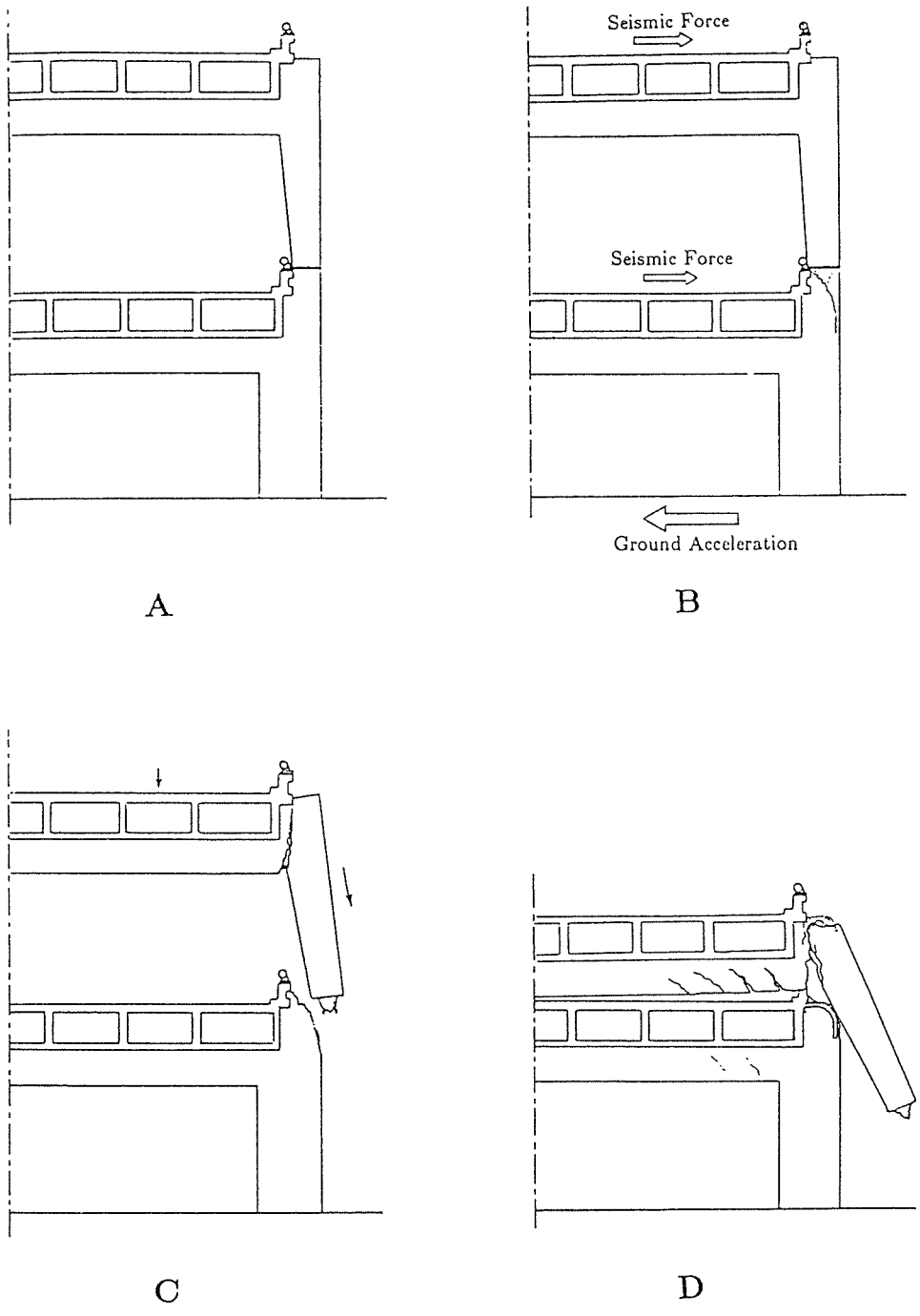


図4-9 I-808号線高架道路の崩壊パターン 13)

4. 3 I-480号線高架道路

インターステート480号線（通称エンバカデーロ フリーウェイ）はサンフランシスコ市東岸のエンバカデーロ (Embarcadero) 地区からサウスオブマーケット (South of Market) 地区にのびる道路で、前述のサイプレス高架道路 (I-880) と同じ2層構造である (図4-10)。柱脚は杭で支持されている。

この地域はフットオブマーケット (Foot of Market) 地区と呼ばれ、昔、入江であったところを1850年代から1900年にかけて埋め立ててつくられた (図4-11)。

マーケット通りに沿う土層断面図を図4-12に示す。埋立土層は最も厚い所で12.5mあるが、平均すると6m程度の厚さである。埋立土は緩い細砂または割石が混じったシルト質砂からなり、その下にはシルト質粘土からなるベイマッドが堆積している。地下水位はエンバカデーロ付近で約2.4mである。

1906年のサンフランシスコ地震では、この地域で地盤の沈下、亀裂などの変状がみられた (図4-13)。

エンバカデーロフリーウェイでは写真4-15、写真4-16に示すように2層構造の下部の桁と下部の柱脚の接合部にせん断亀裂が入る被害が生じた。柱脚の下の地面は舗装されていたが、写真4-17、写真4-18に示すように亀裂や地盤沈下が見られた。また柱脚の根元付近で噴砂がみられ (写真4-19)、この地区で液状化が発生したことを示している。

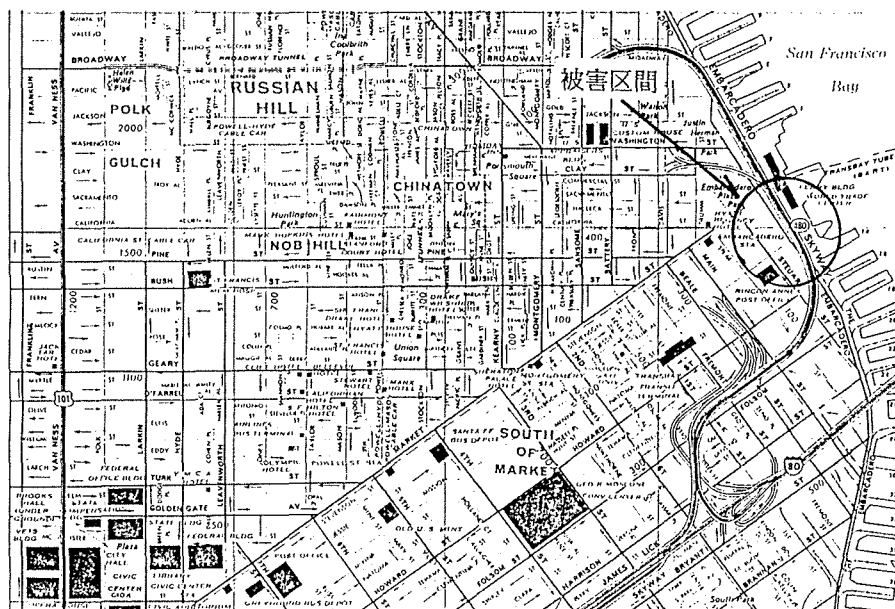


図4-10 I-480号線 (エンバカデーロ フリーウェイ) 被害地点位置図

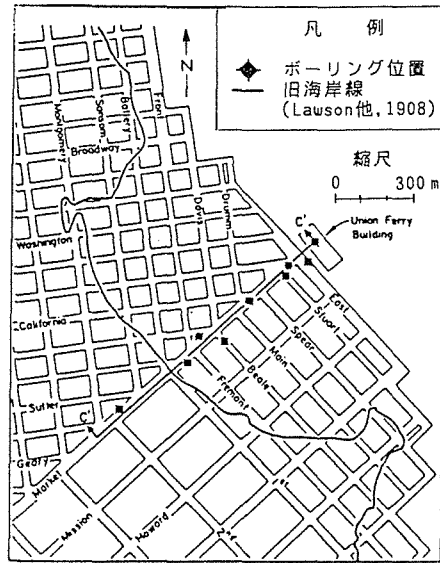


図4-11 フットオブマーケット地区の埋立範囲⁷⁾

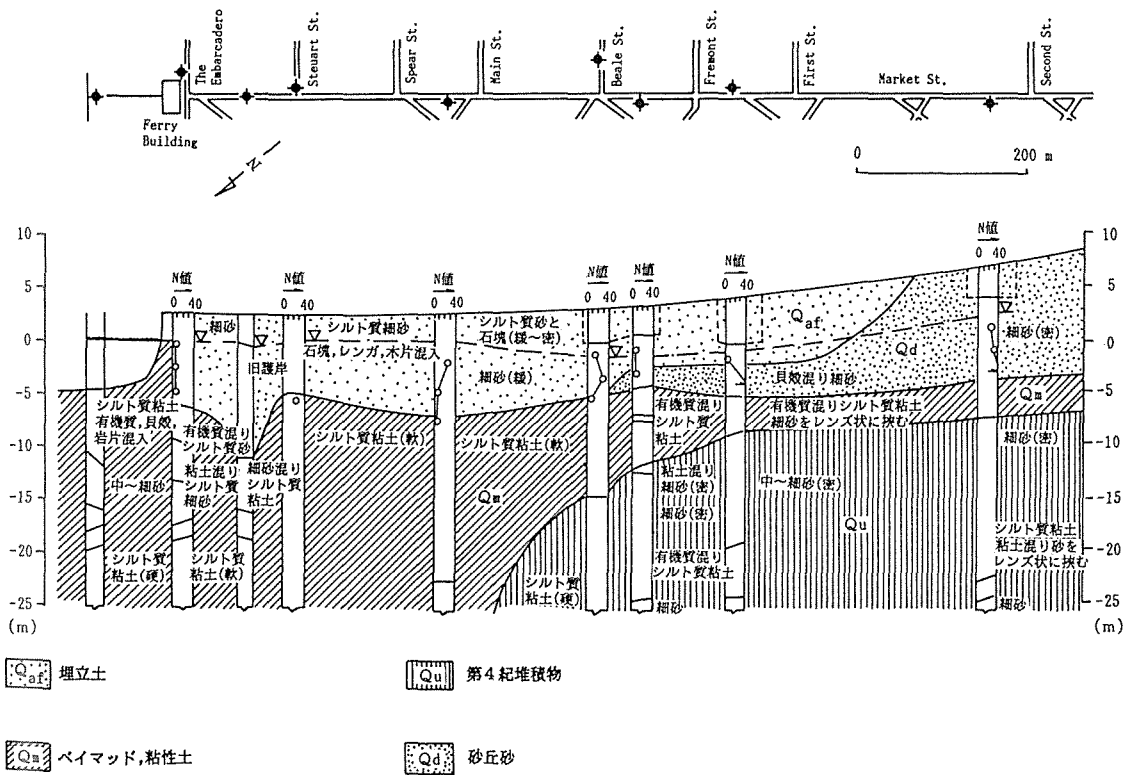


図4-12 マーケット通り沿いの土層断面図⁷⁾

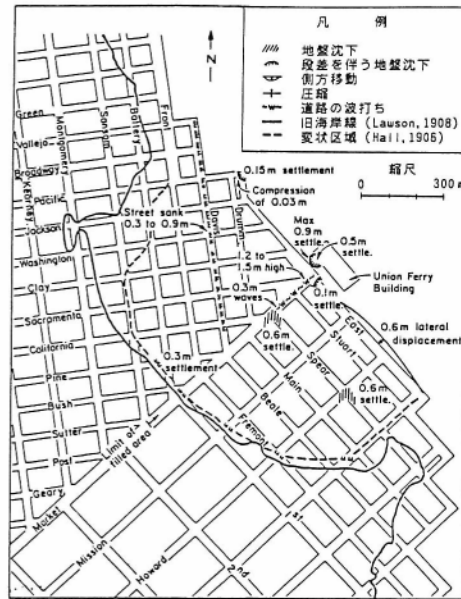


図4-13 1906サンフランシスコ地震の際の地盤変状の種類と範囲⁷⁾



写真4-15

エンバカデーロ高架道路の被害(1)
柱脚の接合部に発生した亀裂



写真4-16

エンバカデーロ高架道路の被害(2)
柱脚に発生した亀裂のため角材で
応急処置



写真4-17

エンバカデーロ高架道路の被害(3)
高架道路下の地盤に発生した亀裂



写真4-18

エンバカデーロ高架道路の被害(4)
地盤の沈下に伴って生じた亀裂



写真4-19

エンバカデーロ高架道路の被害(5)
柱脚の根元から噴いたと思われる砂

4. 4 ベイブリッジ

サンフランシスコオークランドベイブリッジは1930年代半ばに建設されたサンフランシスコとオークランドを結ぶ長さ13.4kmの2層構造の鋼橋である（図4-14）。橋の中間にあるイエバ・ブエナ（Yerba Buena）島の西側は吊橋、東側はトラスとなっている（図4-15）。

ベイブリッジでは図4-15に示したオークランド側のE-9橋脚上の長さ15mの桁がはずれ、走行中の車が転落し、1名の死者をだした他、水道本管の破損、電力・通信ケーブルの切断の被害があった。

E-9橋脚の東側のトラスが東側（オークランド側）に相対的に変位（最大18cm、残留変位12cm）したため、フリーであったE-9橋脚上の桁の西端部分がはずれて落下した（図4-16）。E-9橋脚の両側のトラスを結ぶ長さ15mの桁の東側はピンで結合されていたが、西側（サンフランシスコ側）は長さ7.5cmの受け台に桁がのっているだけで、変位を拘束する措置はされていなかった。

桁の落下は桁の受け台が地震による変位に対して十分な長さを有していなかったことと、落下防止の措置がとられていなかったことが主原因と考えられる。

E-9橋脚部に18cmの相対変位が生じた原因は、①橋の構造上の違いに起因する振動特性の差異、②E-9橋脚東側のトラス部が2.74%の勾配で下っている影響、③E-9橋脚のやや西側よりベイマッドが厚くなっていることによる地盤の振動特性の差異（図4-15参照）、などが考えられる。

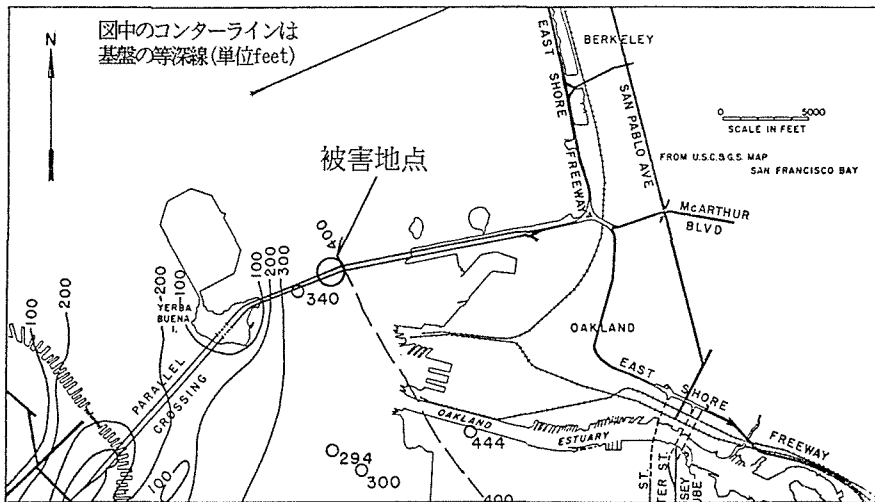


図4-14 ベイブリッジ被害地点位置図 12)

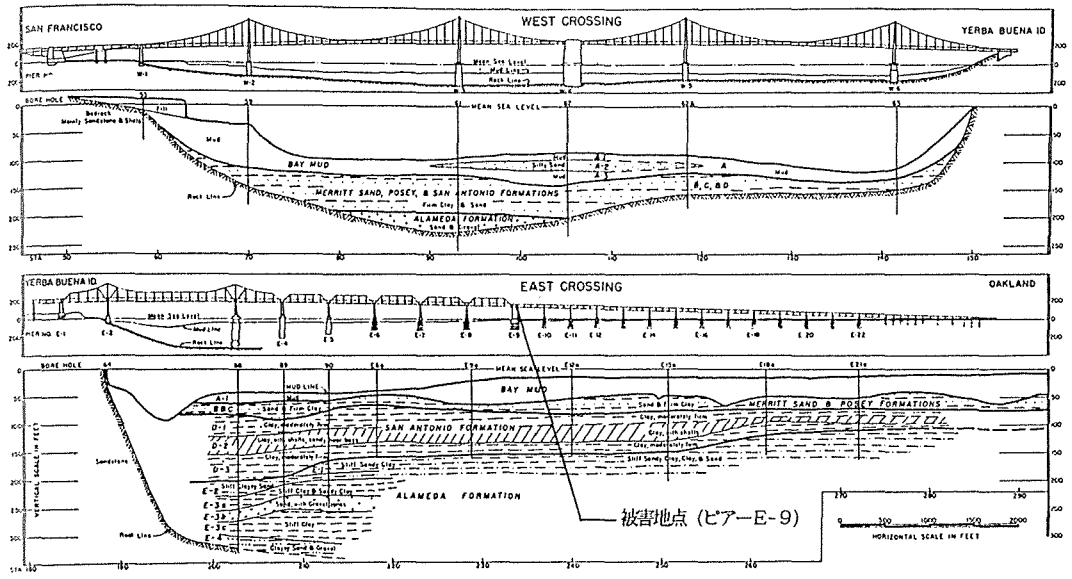


図4-15 橋の構造および基礎地盤の状況¹⁾²⁾

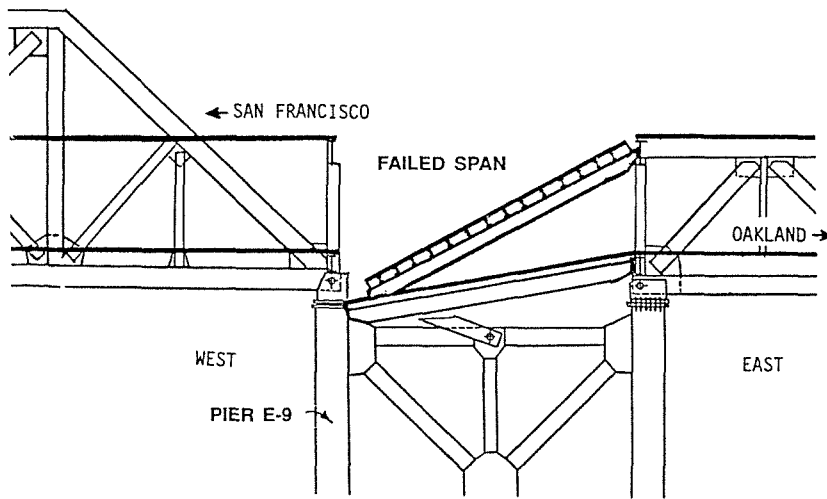


図4-16 被害状況図 (ベイブリッジ)¹⁾

5. 震源周辺地域の被害

5. 1 サンタクルーズ市街

サンタクルーズ市はサンローレンゾ(San Lorenzo)川が太平洋に注ぐ所に発達した町である。東西約5km、南北約3km程度の広さを持つ。海岸付近に小さな丘があるため、サンローレンゾ川はそこで流れをさえぎられ、東側を迂回して太平洋に注いでいる。

UCBのシード助教授の調査によると、図5-1に示すように、川沿いおよび海岸で液状化や道路の被害が生じた。写真5-1は図中Rの地点から海岸方向に撮った写真である。道路や家屋の復旧を行っていたが、これは液状化に関係したものと推察される。この地点ではサンローレンゾ川に架っている橋が写真5-2、写真5-3に示すように破損し、少し沈下していた。原因は定かではないが、橋脚も壊れており、液状化に起因した被害ではないかと考えられる。さらに、この付近の堤防はクラックや沈下が生じたとのことで、写真5-4にみられるようにすでに土を盛って仮復旧が行われていた。

このように、川沿いを中心に液状化が発生し、それによる被害が出たものの、あまり大きな被害ではなく、むしろ、図5-1にハッチで囲んだ地区の被害の方が大きかった。この地区はパシフィックガーデンモール(Pacific Garden Mall)と呼ばれる古い建物が並ぶ商店街である。地盤の条件は明らかではないが、サンローレンゾ川の後背湿地に盛土がなされた所で軟弱な地盤ではなかったかと推察される。

この地区では、写真5-5に示すように、壁が大きく崩れていた。サンタクルーズではこの地区だけ数階建ての建物があったが、これらは古い建物が多かった。構造もレンガ造りや木造のものが多く、震動に弱かったものと考えられる。サンタクルーズは震央から約16kmの近さにあり、地表最大加速度も0.6G近い値が記録されている。したがって、このように強い地震動のために、古くて耐震性に劣る建物が崩壊したのと考えられる。さらに、前述したように軟弱な地盤による地震動の増幅も加担したのかもしれない。

その他、図5-1の地点Bの3階建てのホテルの被害状況(取り壊し中)を写真5-6に示す。ホテル前の道路では液状化に起因したと思われる亀裂や沈下も生じていたが、このホテル自体の破壊状況からすると振動で壊れたのではないかと考えられる。写真5-7は被害のひどかった商店街の北側に位置する時計台である。地震が発生した5時4分をさしたまま針は止まっていた。

上記のように市内での被害は一部に限られ、地震動が大きかった割には被害は大きくなかった。

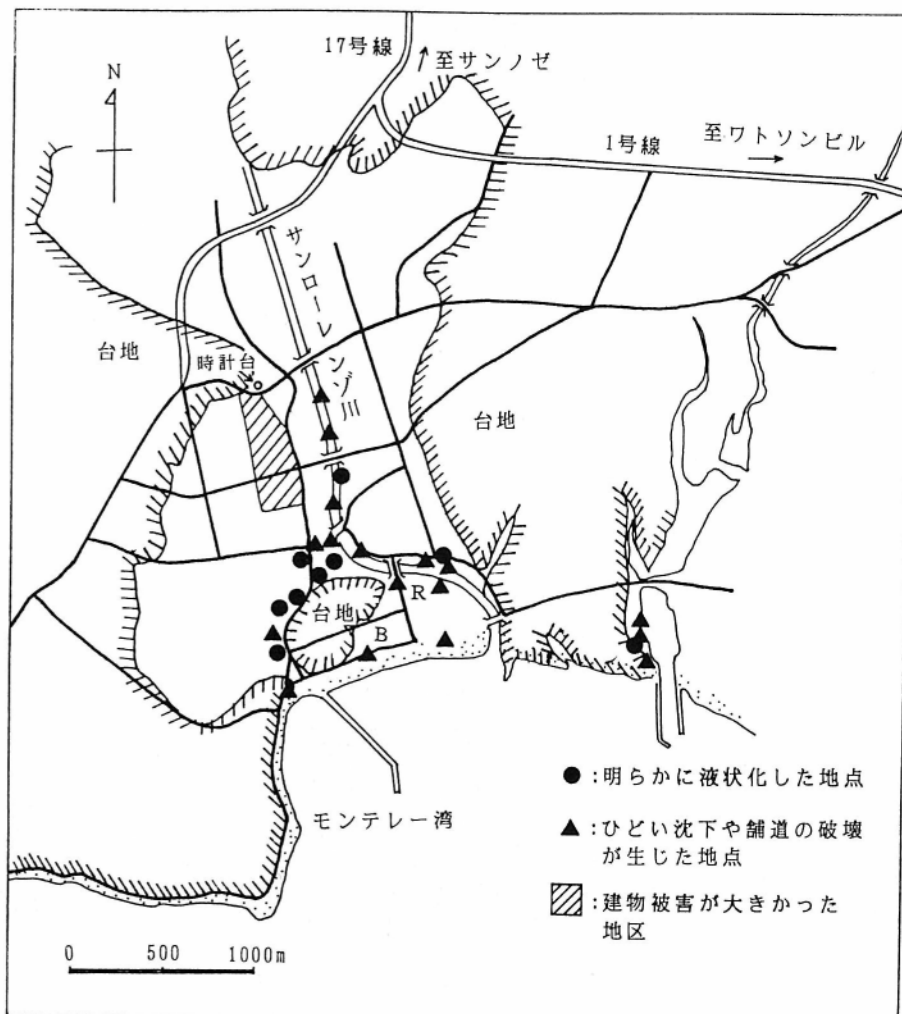


図5-1 サンタクルーズの液状化発生地点¹⁾と建物の被害が集中した地区



写真5-1

道路(地点R)の復旧状況

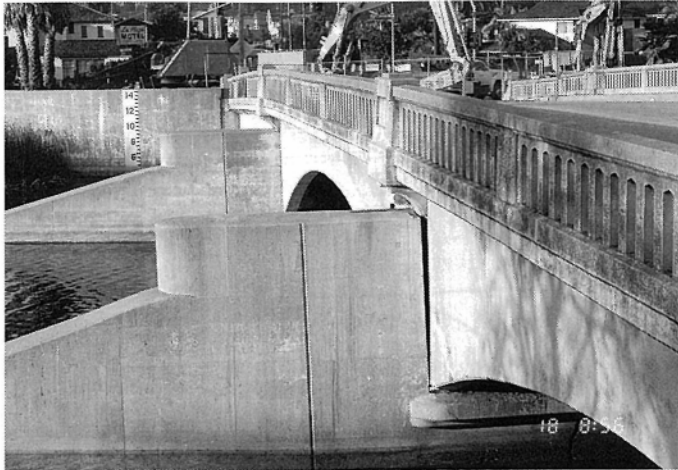


写真5-2

サンローレンゾ川に架かっている橋(地点R)の被害(その1)

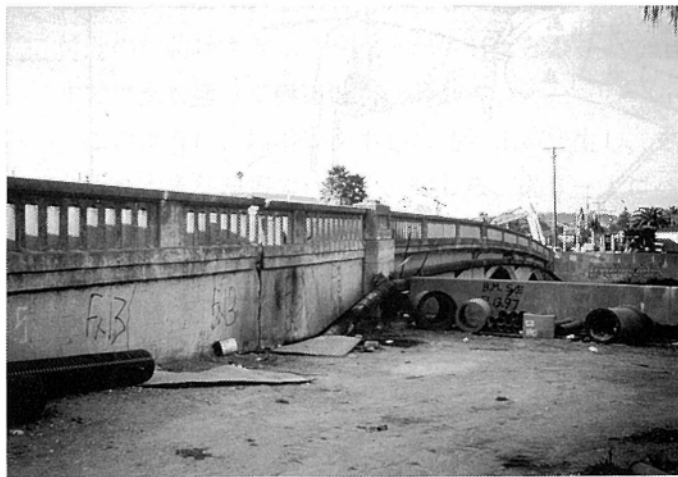


写真5-3

サンローレンゾ川に架かっている橋(地点R)の被害(その2)



写真5-4

河川堤防の復旧状況



写真5-5

商店街の被害



写真5-6

ホテル(地点B)の
被害状況(取り壊し中)



写真5-7

5時4分で止まっている時計台

5. 2 1号線高架橋

サンタクルーズからモスランディングに向かって走る1号線道路のうち、図5-2に示すようにワトソンビル市街地のはずれで、高架橋(Struve Slough Bridge)が落橋した。ここは1号線が台地部からパハロ(Pajaro)川の低地に下りる手前にある小さな低湿地である。写真5-8にみられるように両側は台地をカットして道路が造られ、この低湿地を通る約250mの区間が橋梁となっている。

上・下線で別の橋となっているが、南に向かう橋梁が約100mにわたって完全に落橋し、北に向かう橋梁も完全に落橋する寸前で止まっていた。

写真5-9は落橋した橋梁で床版を突き破って出てきた橋脚を示す。写真5-10は反対車線を見たところであるが、橋軸直角方向に4本ずつ配置されたRCの橋脚(直径30cm程度)が、まちまちな方向に傾いていた。橋脚の頭は写真5-11にみられるように破断してずれていたが、橋脚自体は折れてはいなかった。

橋脚の基礎の型式や根入れ深さについては不明であるが、湿地の上に木製のマットを置き、その上に砂を敷いて場所打ち杭を施工したということである。¹⁵⁾

地表面には草が生い茂っており、十分な観察は行えなかったが、見たところ噴砂は見当らず、液状化した様子はなかった。したがってここはピートや粘土からなる軟弱地盤ではないかと推察される。ただし、地盤に関するデータは入手していないので明らかなことは言えない。近くのワトソンビル市街地でも大きな加速度が記録されており(水平最大加速度 0.39G)、軟弱地盤であることも加わって、地震時に大きく揺れたことが一つの原因と考えられよう。また、構造自体にも問題があったのかもしれない。

余談であるが、写真5-12は、通りがかりの人の話では地震直後にちょうど走ってきたパトカーが落橋のためジャンプして着地した跡であるということである。

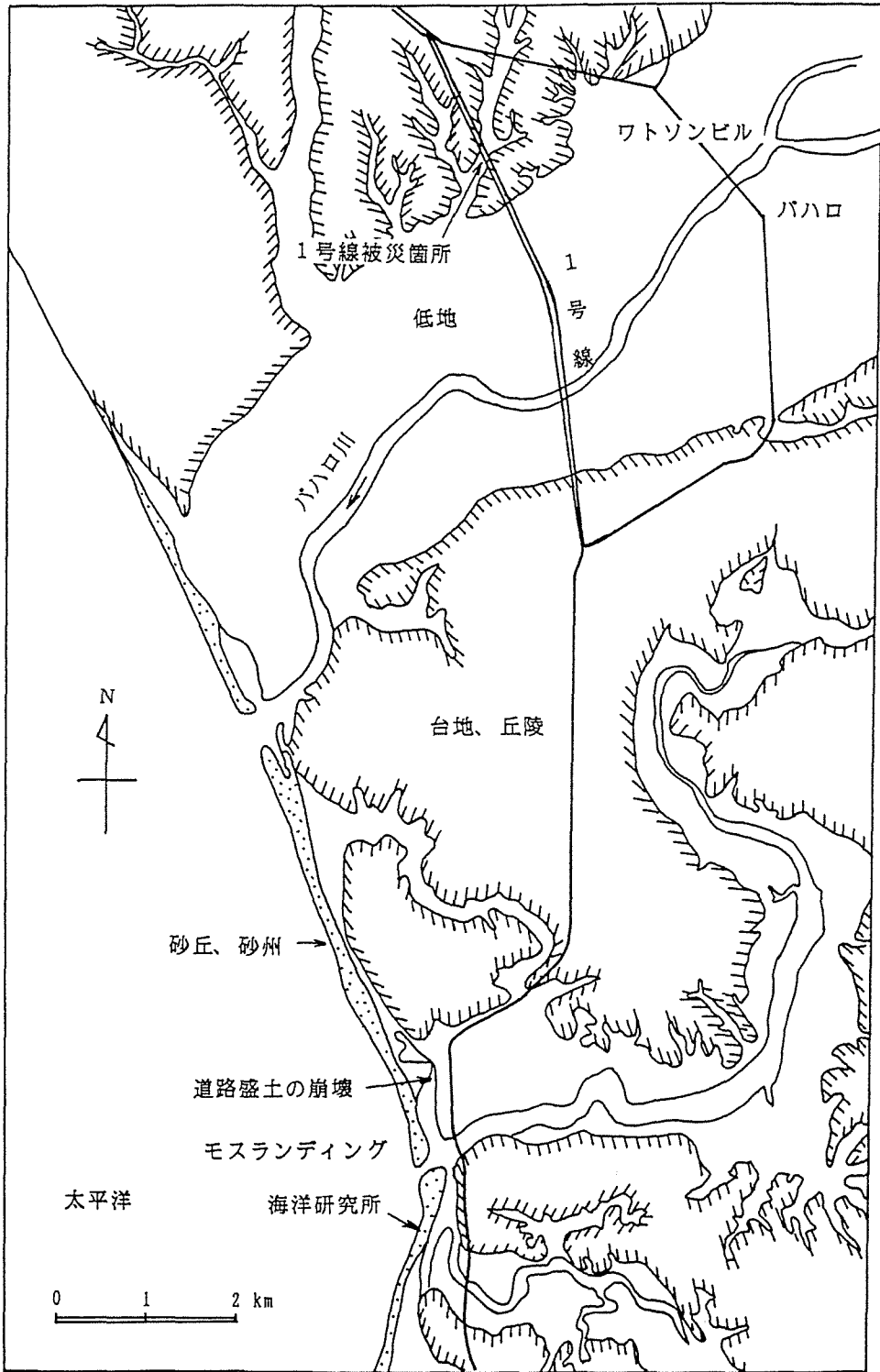


図5-2 ワトソンビル、モスランディング付近の概略地質と被害発生地点

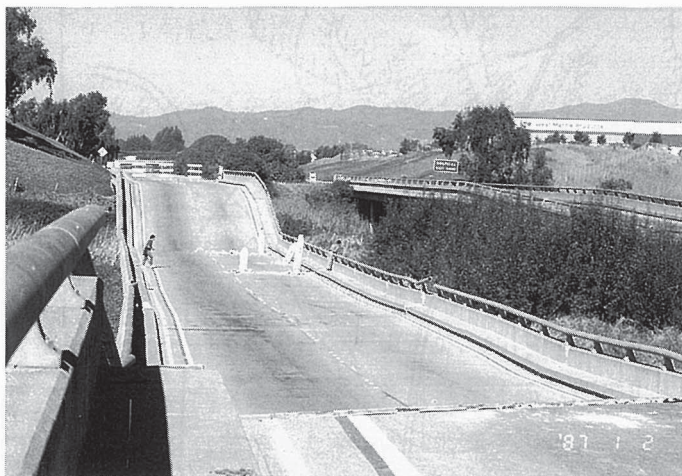


写真 5 - 8

1号線高架橋の被害状況

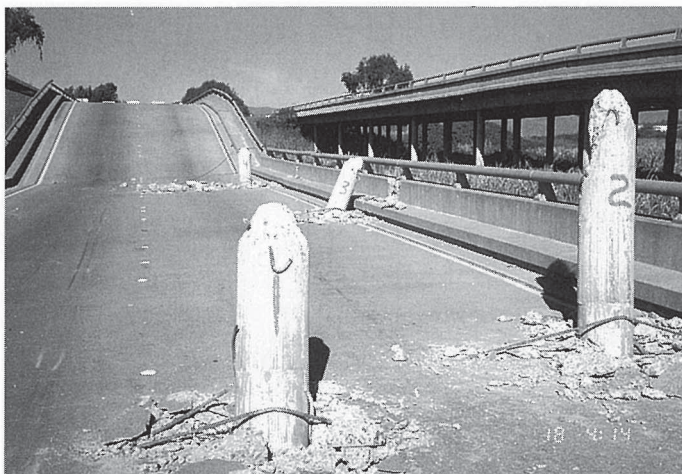


写真 5 - 9

落橋により突き出た橋脚



写真 5 - 10

落橋寸前で止まった反対車線の橋桁と橋脚の状況

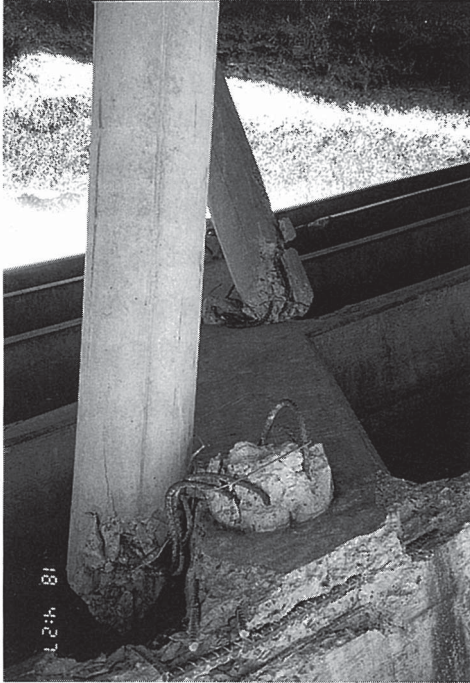


写真5-11

橋脚の頭部における破壊状況



写真5-12

落橋直後に走ってきた車が
ジャンプして着地した跡

5. 3 モスランディングの道路盛土

ワトソンビル周辺では前述の1号線高架橋以外に、市街地でいくつかの建物が被害を受けていた。また、§ 3. 1 で前述したようにパハロ川沿いに液状化が発生し、クラックも生じたとのことであった。筆者達はこれらを見てまわる時間がなかったので、これらの被害については省略させていただきたい。

ワトソンビルから南へ下り、モスランディングにはいる手前で、写真5-13に示すように道路盛土が崩壊していた。ここは1号線から直角に分かれて海岸へ向かう小さな道路であり、砂丘背後の低地（入江）を横切る箇所で被害が発生していた。写真5-14に崩壊した面を示すが、盛土はきれいな中砂（砂丘性の砂と考えられる）で造られており、盛土（または原地盤も含めて）が液状化したために崩壊が発生したものと考えられる。この被害状況は日本海中部地震（1983）の際の八郎潟干拓堤防へ入る五明光橋の取り付け盛土の崩壊によく似ていた。



写真5-13

砂丘へ向かう道路盛土の崩壊



写真5-14

盛土に用いられている
きれいな中砂

5. 4 モスランディングの海洋研究所

さらに南に少し下った所にカリフォルニア州の海洋研究所があるが、ここも液状化により被害を受けた。図5-2にその位置を示すが、研究所は小さな砂丘の上に位置している。木造平屋（一部2階建て）の建物が太平洋と湾の間に多少砂丘を平らに切り取って建てられている（写真5-15）。この建物が、図5-3に概念図を示したように、湾の方向に向かうすべりにより強制的に引き裂かれた恰好の被害を受けていた。写真5-16～5-19にその被害状況を示す。引き裂かれた量は1.5m位ではないかとの研究所の人の話であった。

地盤の条件は不明であるが、周囲に噴砂も見られ、液状化が発生し、それともなって地盤のすべりも生じたものと考えられる。

この地点は1906年のサンフランシスコ地震の際にも大きな被害を受けており、その時は建屋が海の方に落ちたとのことであった。また、太平洋側の沖合で海底地すべりも発生したとのこと、ソナーを使って調査が行われていた。なお、海底面の勾配は1度程度と緩いということであった。

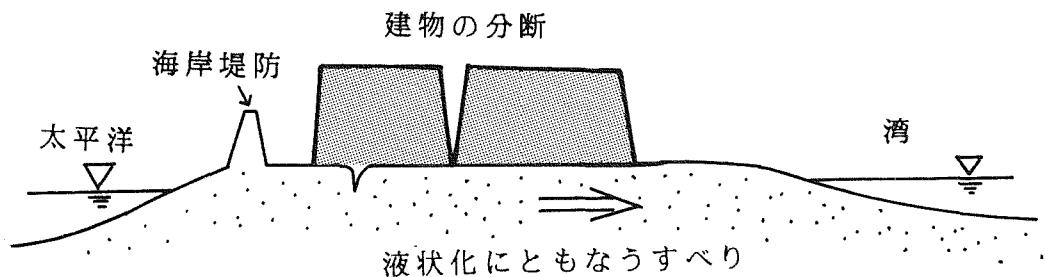


図5-3 モスランディングの海洋研究所の被害状況



写真5-15

湾の方から見たカリフォルニア州海洋研究所の建物

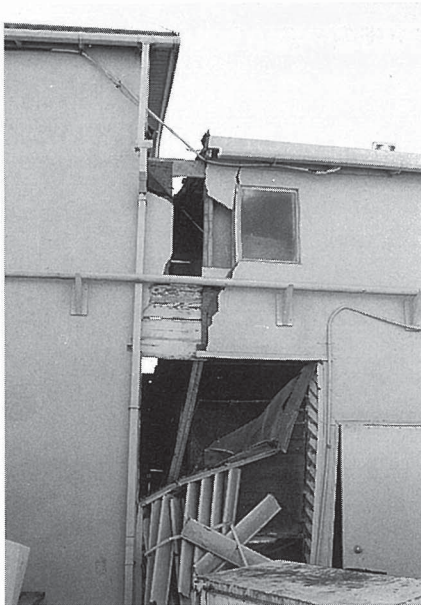


写真5-16

分断された研究所の建物



写真5-17

地盤のすべりで傾いた建物

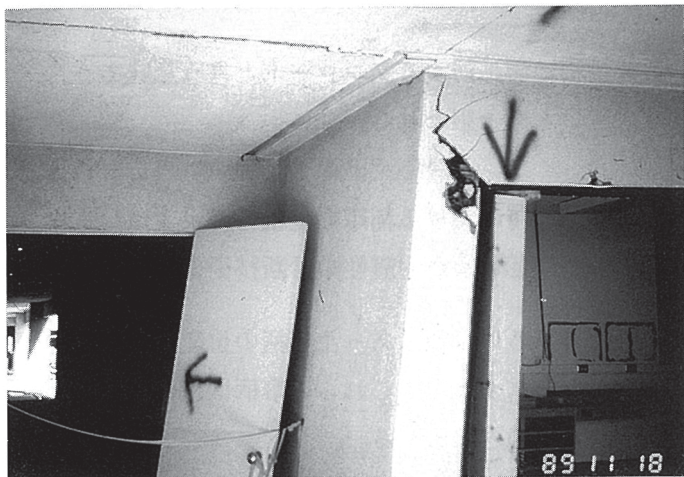


写真5-18

引き裂かれたため傾いた壁



写真5-19

裂け目が生じた床

あとがき

ロマプリータ地震は、結論的に言えば、それほど大きな地震ではなかったし、また、'被災すべきものが被災した' という意味で、現在の耐震設計法を揺るがすほどのものはなかった。

しかし、将来予想されている大規模地震に対するプレロードと言う意味で、今後の耐震工学にもたらす影響は大きいものと思われる。

特に、

- 1) ライフラインに限らず、地震時における都市機能維持の重要性
- 2) 耐震性の低い既設構造物への対応および耐震性の診断技術の必要性

など、これまで耐震技術者の視野の外あるいは隅にあった事柄の重要性が明らかになったことで、今後課題を残したと言えよう。これらの事柄は、今後時間が経てば経つほど、ますます重要になるものと思われる。

また、現在の耐震設計法における地盤の扱いについても、

- 1) 埋立地の液状化のし易さと耐震設計における地盤の液状化の重要性
- 2) 現行の地盤振動の予測手法の再吟味の必要性
- 3) 海底地すべりなど海底地盤の地震時の挙動の研究の必要性

など再認識すべき点あるいは今後の課題が指摘、提起された。

被災建物の診断における行政側の迅速かつ統制のとれた対応や速報の発行など技術情報に対するオープンで素早い対応が印象に残った。

この度の調査では、九州工業大学安田進助教授に終始多大なご協力を頂いた。

現地では、一足先に現地入りされていた東京大学石原研而教授と一日ご一緒させて頂き、教えられることが多かった。また、カリフォルニア大学バークレイ校にライスマー教授およびシード助教授を訪問し、貴重な話しを伺い、資料を頂いた。Earthquake Engineering Technology 社の宇高氏には、ご多忙中の所、2日間にわたって現地を案内して頂いた。

ちょうどメキシコで開催されていた国際会議に出席中の当社仙台支社田上氏は、地震発生の直後に現地入りし、生々しい状況を速報にまとめていた。

これらの方々はもとより、多くの方々にご協力いただいた。末筆ながら記して感謝の意を表します。

最後ではありますが、今回の地震で災害に遭われたの方々に対して一日も早く立ち直られますようお祈りいたします。

調査チームメンバーおよび調査日程

メンバー	技術センター	土谷 尚
	技術部地震防災室	森本 巖

日程（現地時間）

11月15日(日本時間)	成田空港発
11月15日	サンフランシスコ空港着
	マリーナ地区調査（民家、アパート破損）
11月16日	カリフォルニア大学バークレイ校訪問
	国道880号線調査（高架橋ダブルデッキ区間落橋）
	オークランド市中心部調査（ビル小規模破損）
	アラメダ地区調査（宅造地液状化）
	（終日、石原先生に御一緒頂いた）
11月17日	ワトソンビル地区調査（国道1号線落橋）
	モンテレイ地区調査（後背湿地、道路陥没）
	（海洋研究所、建物破損）
11月18日	マリーナ地区再度調査
	エンバカデーロ地区国道480号線調査（高架橋ダブルデッキ区間損傷）
	サウスオブマーケット地区調査（建物破損）
11月19日	サンフランシスコ空港発
11月20日(日本時間)	成田空港着

引用・参考文献リスト

1. Seed, R. B. et al : Preliminary Report and Engineering Aspects of October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake, EERC-89/14, 1989
2. Seed, H. B. and Sun, J. I. : Implications of Site Effects in the Mexico City Earthquake of Sept. 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California, EERC-89/03, 1989
3. 栗林栄一・龍岡文夫 : Brief Review of Liquefaction during Earthquake in Japan, 土質工学論文報告集, Vol. 15, No. 4, pp81~92, 1975
5. Borcherdt, R. D. (Editor) : Studies for Seismic Zonation of the San Francisco Bay Region, Geological Survey Professional Paper 941-A, pp. A68~A74, 1975
6. Dupre W. R. and Tinsley III : Maps Showing Geology and Liquefaction Potential of Northern Monterey and Southern Santa Cruz Counties, California, Miscellaneous Field Studies Map MF-1199 by USGS, 1980
7. Lane, P. L. : Liquefaction Hazard and Their Effects on Buried Pipelines, A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University, 1987
8. Shakal, A. et al : CSMIP Strong Motion Records from The Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake OF 17 October 1989, California Department of Conservation Division of Mines and Geology Office of Strong Motion Studies REPORT OSMS 89-06, 1989
9. Maley, R. et al : 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, 1989
10. Goldman H. B. (Editor) : Geological and Engineering Aspects of San Francisco Bay Fill, California Division of Mines and Geology Special Report 97, 1969
11. Helly E. J., Lajoie K. R., Spangle W. E., Blair M. L. : Flatland deposit of the San Francisco Bay Region, California - their geology and engineering properties, and their importance to compressive planning, Geological Survey Professional Paper 943, 1979

12. Trask P.D., and Rolston J.W. : Engineering Geology of San Francisco Bay, California, Buletin of the Geological Society of America, Vol.62, pp1079-1110, 1951
13. 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-89/16, 1989
14. Dames & Moore : The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, A Special Report, 1989
15. EQE Engineering : The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, A Quick Look Report, 1989
16. Jenkins O.P. : Geological Map of California - San Francisco Sheet -, State of California, Department of Natural resorce, 1961
17. 磯山龍二 : サンフランシスコ地震 土木構造物の被害, 土木施工 30巻12号 1989
18. 吉田望 : 1989年 Loma Prieta地震 調査報告書, 佐藤工業(株), 1989
19. Youd, T.L. and Hoose, S.N. : Liquefaction During 1906 San Francisco Earthquake, ASCE Vol.102 GT-5, 1976
20. 田上裕 : 1989年10月17日 LOMA PRIETA 地震(サンフランシスコ)の被害状況 速報, 基礎地盤コンサルタンツ(株)技術資料、1989
21. USGS : October 17, Loma Prieta Earthquake, 1989.10.21
22. Lee, C.H. : Building Foundation in San Francisco, ASCE No.253, 1953
23. 国立天文台編 : 理科年表 机上版, 1989
24. 佐竹健治 : ロマプリータ地震情報, 地震学会ニューズレター, Vol.1, No.3 pp7~9, 1989
25. Lawson, A.C. et al : The California Earthquake of April 18, 1906, Reoprt of the California State Earthquake Investigation, Carnegie Institute, Washinton, D.C., 1908
26. Borchardt, R.D., Gibbs, J.F. and Lajoie, K.R. : Maps Showing Maximum Earthquake Intensity Predicted in the Southern San Francisco Bay Region, California, for Large Earthquakes on the San Andreas and Hayward Faults - sheet 3 Generalized Geologic Map -, Miscellaneous Field Studies Map MF-709, USGS, 1975

