

1989年ロマ・プリエタ地震による被害と問題点

亀 田 弘 行

1. 緒 論

本文は、1989年10月17日、米国カリフォルニア州で発生したロマ・プリエタ地震 ($M_s=7.1$) による被害について地震の特徴、被害の様相、そこから汲みとるべき今後の教訓などをとりまとめたものである。

この地震は、アメリカ西部の地震エネルギーの主たる発生源であるサン・アンドレアス断層の久々の活動であったことで地震学関係者の注目を集めたばかりでなく、サンフランシスコ湾岸地域 (San Francisco Bay Area: 以下ベイ・エリアと呼ぶ) 大都市圏に大きな被害をもたらしたことにより、都市地震防災に関わる研究者、技術者、行政担当者の強い関心と呼んだ。しかも、典型的な都市震害であるライフライン施設の構造的被害や機能障害、建築物の被害が、震源域から北へ 90 km 以上も離れたサンフランシスコ市やオークランド市で発生したこと、それがこの地域に広く分布するベイ・マッド (Bay mud) と呼ばれる軟弱地盤と深くかわり、日本の地震被害で多く見られる地盤震害の様相が強いことから、わが国の地震防災上多くの教訓を含む可能性が高いことが強く認識された。

筆者は、文部省科学研究費 (突発災害) による研究代表者として、地震発生から2週間余後の1989年11月3日から同12日の間、現地被害調査を行う機会を得た。また、1990年1月17日~21日にかけて、再度現地を訪ねて若干の追加調査を行った。これらの活動の結果は、すでに調査団の総合報告書¹⁾や筆者の速報記事²⁾などで報告した。

米国では、地震工学に関わる主な機関による調査が精力的に行われ、地震から半年後の1990年3月頃までにそれぞれ報告書が刊行された^{3)~8)}。また、この地震にはわが国の各方面から強い関心が寄せられ、日本からも多くの組織や研究者による現地調査が行われて、それらの報告書も逐次刊行されている^{9)~17)}。

本文では、文献1), 2)を基礎にしつつ、その後の調査で得た資料も加えて、ロマ・プリエタ地震とその被害に関する筆者の見解をとりまとめようとするものである。都市地震防災上この地震が意味するところは広い範囲に及んでおり、それらのすべてを論ずることは筆者の能力を超えるものであるから、本文では、筆者が直接調査した事項を中心に、その中でも特に重要と考えるものに絞って論じることとしたい。

また、上に掲げた多くの報告書が刊行されて以降、個々の被害の状況について、より詳細な検討を行った第二段階の報告が、米国の研究者から発表されつつある。中には文献1)で述べられたこととは若干内容を異にする場合もある。本文執筆の段階で得られているこれらの情報も、できるだけ盛り込むこととする。

これによって、個々の項目については特徴のある記述を行えると考えているが、一方ロマ・プリエタ地震の全体像としてはある程度部分的で偏ったものとならざるを得ない。この地震の総合的な議論については、多くの執筆者の手になる文部省突発災害報告書¹⁾をぜひ御一読頂きたい。

2. 地震・地震動の概要

2.1 地震の概要

ロマ・プリエタ地震は、1989年10月17日午後5時4分15秒 (現地時間: Pacific daylight time) に発生した。震源はサンタクルズ市の北東約 16 km の北緯 37.037度、西経 121.883度、深さ 18.5 km である (Fig. 1)。また、Fig. 1 に示したような余震分布から、本震ではサンアンドレアス断層が長さ約 35 km にわた

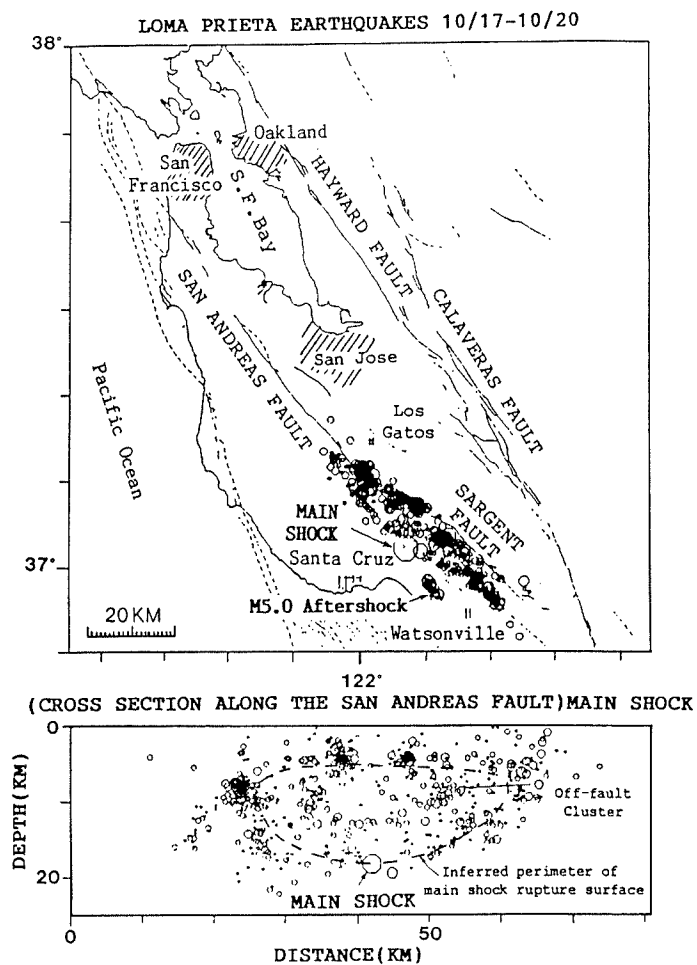


Fig. 1. Main shock and aftershocks of the Loma Prieta Earthquake⁵⁾.

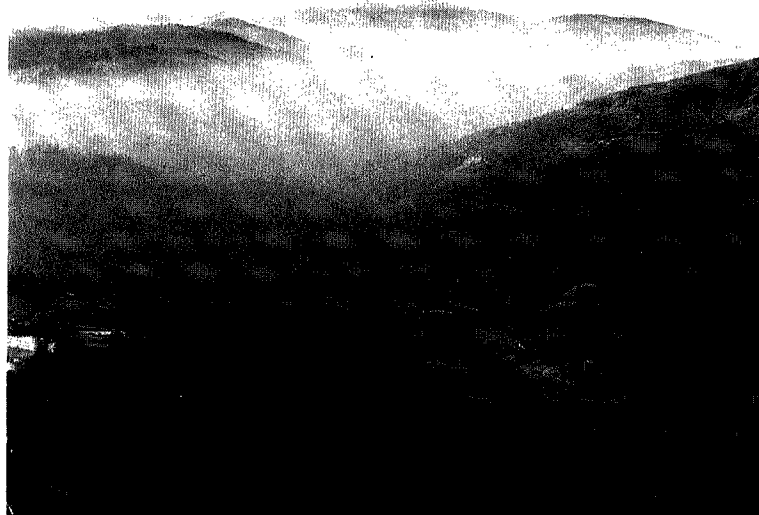


Photo. 1. An aerial view of the valley along the San Andreas Fault, looked northward from a location near Mt. Loma Prieta.

り、深さ 6~18 km の範囲で破壊したと考えられている。規模は表面波マグニチュードで 7.1 であり、地震モーメントは 2.2×10^{26} dyne·cm と推定されている。くい違いモデルとして、右横ずれ 1.6 ± 0.2 m、逆縦ずれ（傾斜 70° ） 1.1 ± 0.5 m の変位が考えられている（USGS の D. Ederhart-Phillips による）。

震源はベイ・エリアの南限を画するサンタクルズ山脈と呼ばれる山岳地帯にある（Photo 1）。この地点でサンアンドレアス断層が北に向かって左に屈曲するため、断層両側の地殻の衝突によって、サンアンドレアス断層の中では特異な存在である山脈の形成が行われたと説明されており¹⁸⁾、縦ずれ変位が生じた理由とも考えられている。今回の地震の名は、この山脈の主峰ロマ・プリエタ山（1,137 m）に因んで決められたものである。

2.2 地震動の概要

ロマ・プリエタ地震が発生した地域では、USGS (US Geological Survey) と CDMG (California Division of Mines and Geology) によって広範な強震観測が行われている。それらの速報^{19),20)}をもとに、観測点の位置と測定最大加速度を整理したのが Table 1 である²⁾。この表では、観測点を北から南に向かって並べてあり、大略サンアンドレアス断層に沿って南下する順序となっている。震源域に近い No. 36~41 では $0.37\text{ g} \sim 0.64\text{ g}$ という水平加速度を記録するとともに、鉛直加速度が $0.31\text{ g} \sim 0.66\text{ g}$ と大きな値を示していることが注目される。Photo 2 は、地震断層から数 km の Watsonville 郊外にある St. Francis 教会に付属する墓地における墓石の状況を示したもので、転倒したもの以外に大きく水平にずれている墓石があることが鉛直動の大きさを物語ると考えられる。

Table 1 の No. 4~20 の距離 70~100 km の範囲では、震源からの距離と最大加速度との関係は単純ではない。これは、地盤条件の影響が大きいことで、特にベイ・エリアの湾岸に分布する Bay mud からなる軟弱層上の埋立地での地震動が大きく、岩盤に対する増幅度は 5 倍に達する場合がある。軟弱地盤により地震動が大きな増幅を受けることは、わが国では関東地震をはじめ、十勝沖地震や宮城県沖地震など多くの都市型震災で経験してきたところである。ロマ・プリエタ地震が同様の傾向を強く示したことは、1985年のメキシコ市の震災と同様、わが国の地震工学関係者の注目を集めることとなった。

これらの強震記録は順次データファイル化され、一部利用が可能になりつつある。また、筆者が直接接触した範囲では、地盤の増幅特性の詳細（周期帯域別、方位別の特性、波動論的特性など）については



Photo. 2. Tomb stones dislocated and/or turned-over during the Loma Prieta Earthquake (St. Francis Cemetery near Watsonville; photographed on 11/5/89).

Table 1. Peak accelerations recorded during the Loma Prieta Earthquake²⁾ (free field motions and ground floor or basement of buildings; arranged from Refs. 19) and 20)).

No.	Station Name	N. Lat	W. Long	Dist* (km)	Max. Acceleration		Note
					Horizontal	Vertical	
1	Martinez-VA Hospital Basement	37.993	122.115	109	0.07 g	0.03 g	USGS
2	Larkspur-Ferry Terminal	37.946	122.508	115	0.14 g	0.06 g	USGS
3	Richmond Bulk Mail-2501 Rydin Road	37.884	122.302	101	0.11 g	0.04 g	USGS
4	Berkely, U.C.-Strawberry Cyn.	37.87	122.24	98	0.08 g	0.02 g	USGS
5	Berkely, U.C.-Haviland Hall Basement	37.87	122.26	99	0.06 g	0.02 g	USGS
6	Berkely-2168 Shattuck Ave. Basement, East Basement, West	37.87	122.27	99	0.11 g 0.10 g	0.02 g 0.03 g	USGS USGS
7	Emeryville-6363 Christie Ave. Ground Site South	37.844	122.295	97	0.26 g	0.06 g	USGS
8	San Francisco-Golden Gate Bridge	37.806	122.472	100	0.24 g	0.06 g	USGS
9	San Francisco-600 Montgomery St. Basement	37.80	122.40	97	0.12 g	0.05 g	USGS
10	San Francisco-575 Market St. Basement	37.79	122.40	96	0.11 g	0.06 g	USGS
11	San Francisco-VA Hospital Basement	37.783	122.504	100	0.16 g	0.05 g	USGS
12	San Francisco-1295 Shafter St.	37.728	122.385	89	0.11 g	0.05 g	USGS
13	San Francisco State U.-Thornton Hall Ground Site	37.724	122.475	93	0.14 g	0.04 g	USGS
14	Calaveras Array-Dublin Fire Station	37.709	121.932	75	0.09 g	0.03 g	USGS
15	Hayward City Hall-Ground Site North Ground Site South	37.679	122.082	74	0.06 g 0.10 g	0.02 g 0.03 g	USGS USGS
16	So. S.F.-4-story Hospital Basement	37.660	122.439	93	0.15 g	0.08 g	CDMG
17	APEEL Array Station 2E-Hayward, Muir School	37.66	122.08	72	0.16 g	0.06 g	USGS
18	Hayward-Muir School	37.657	122.082	77	0.18 g	0.10 g	CDMG
19	Livermore-VA Hospital, Bldg. 62 Basement	37.625	121.762	67	0.06 g	0.03 g	USGS
20	San Francisco-Intl. Airport	37.622	122.398	87	0.33 g	0.05 g	CDMG
21	Calaveras Array-Sunol Fire Station	37.597	121.880	63	0.10 g	0.03 g	USGS
22	Forster City-Menhaden Court	37.555	122.248	66	0.12 g	0.09 g	USGS
23	Foster City-Redwood Shores	37.542	122.213	70	0.29 g	0.11 g	CDMG
24	Fremont-Emerson Court	37.535	121.929	56	0.20 g	0.07 g	USGS
25	APEEL Array Station 2-Redwood City	37.52	122.25	63	0.28 g	0.08 g	USGS
26	APEEL Array Station 9-Crystal Springs Res.	37.47	122.32	62	0.12 g	0.06 g	USGS
27	Menlo Park-VA Hospital, Bldg. 37 Ground Site	37.468	122.157	54	0.27 g	0.11 g	USGS
28	Calaveras Array-Calaveras Reservoir S.	37.452	121.807	47	0.13 g	0.07 g	USGS
29	Stanford University-SLAG Test Lab.	37.419	122.205	51	0.29 g	0.10 g	USGS
30	Sunnyvale-Colton Avenue	37.402	122.024	43	0.22 g	0.10 g	USGS
31	Palo Alto-VA Hospital, Bldg. 1 Basement	37.40	122.14	47	0.38 g	0.20 g	USGS
32	Calaveras Array-Cherry Flat Reservoir	37.396	121.756	42	0.09 g	0.06 g	USGS
33	San Jose-Santa Clara Co. Bldg. Basement	37.353	121.903	40	0.11 g	0.10 g	CDMG
34	San Jose Interchange, 101/2850/680-Abutment	37.340	121.851	34	0.18 g	0.08 g	USGS
35	Anderson Dam-Downstream (alluvium) -Left Abutment (rock)	37.166	121.628	27	0.26 g 0.08 g	0.17 g 0.05 g	USGS USGS
36	Corralitos	37.046	121.803	5	0.64 g	0.47 g	CDMG
37	Gilroy #3	36.987	121.536	24	0.55 g	0.38 g	CDMG
38	Gilroy #2	36.982	121.556	22	0.37 g	0.31 g	CDMG
39	Capitola	36.974	121.952	14	0.54 g	0.60 g	CDMG
40	Gilroy #1	36.973	121.572	21	0.50 g	0.22 g	CDMG
41	Watsonville-Telephone Bldg. Basement	36.909	121.756	11	0.39 g	0.66 g	CDMG
42	Hollister Airport-Differential Array	36.888	121.413	45	0.29 g	0.16 g	USGS
43	San Juan Bautista-101 Overpass Basement	36.862	121.578	25	0.15 g	0.10 g	CDMG
44	Hollister City Hall-Basement	36.851	121.402	47	0.25 g	0.22 g	USGS
45	Hollister-Warehouse FF	36.848	121.397	40	0.38 g	0.20 g	CDMG
46	Hollister-SAGO Vault	36.765	121.446	49	0.06 g	0.05 g	USGS
47	Bear Valley Station 5-Callens Ranch	36.673	121.195	73	0.07 g	0.04 g	USGS
48	Bear Valley Station 12-Williams Ranch	36.658	121.249	70	0.17 g	0.10 g	USGS
49	Bear Valley Station 10-Webb Residence	36.532	121.143	86	0.13 g	0.05 g	USGS
50	Bear Valley Station 7-Pinnacles Nat'l Mon.	36.483	121.180	88	0.06 g	0.03 g	USGS

* USGS data are based on the epicenter of the main shock, and CDMG data, on the approximate center of the aftershock zone.

USGS の R. D. Borchardt 博士，建物の強震記録の解析は USGS の M. Celebi 博士らにより，また強震記録が持つ工学的特性（弾性・非弾性応答スペクトル，エネルギースペクトルなど）については University of California, Berkeley の V. V. Bertero 教授らにより解析が行われており，いずれその成果が発表されるはずである。

3. 地震被害の概要

3.1 震度分布

Fig. 2 に，USGS⁵⁾ から公表された MM 震度階（modified Mercalli intensity）による震度分布を示した。Fig. 3 には，参考のため MM 震度階とわが国の気象庁震度階（JMA intensity）との概略の対応を示した。Fig. 2 において，ローマ数字は等高線内の震度レベルを，アラビア数字は実際に震度評価が行われた地点を示す。

この結果によると，震源域の MM 震度は VIII（気象庁震度 V に相当）で，かなりの範囲にわたって大

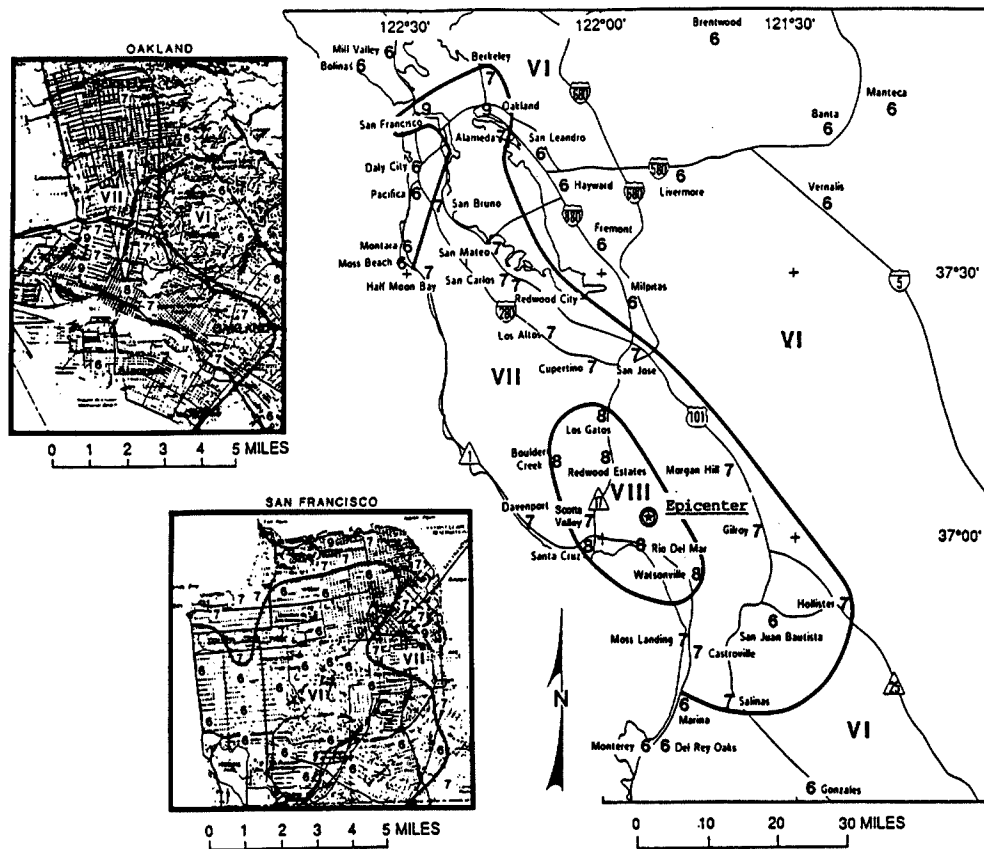


Fig. 2. Preliminary isoseismal map (in modified Mercalli Intensity) of the area affected by the Oct. 17, 1989 Loma Prieta Earthquake⁵⁾.

JMA	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	
MM	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

Fig. 3. Comparison of JMA and MM intensity scales.

きな被害を出した。一方、サンフランシスコ市やオークランド市は大略 MM 震度 VII (気象庁震度 IV の高い方に相当) の領域に入っているが、Fig. 2 の拡大図にあるように、局所的に MM 震度 IX (気象庁震度 VI に相当) が記録されている。これは、サンフランシスコ市では北部のマリナ地区 (Marina District) と東部のマーケット南地区 (South of Market District) における建物の大被害を、オークランド市では I 880 高速道路のサイプレス通り高架橋の崩壊を反映するものである。

震度階は被害分布から決定されるものであるから、その地点での地震動の強さのみでなく、地盤の安定性や構造物の耐震強度によっても結果が異なる。従って、上記の震度分布の意味するところは、単に自然現象としての地震動のみでなく、そこにある構造物に関わる工学的な要素を多分に含む奥の深い問題となることは勿論である。

3.2 地震被害の特徴

ロマ・プリエタ地震による被害を、外力条件から以下のように2つに分けて考えるのがわかり易い。

(1) 震源域における強い地震動による被害

震源域近傍できわめて大きい地盤加速度が観測されていることは Table 1 でみたとおりである。これにより、震源域を囲む山岳地域一帯では広い範囲で斜面崩壊が発生し、道路が各所で寸断された。この付近には大都市がないため目立たないが、ほぼ断層線に沿う Summit Road では、住宅建築などの構造物も大きな被害を受けた。

(2) 軟弱地盤による地震動の著しい増幅・液状化等地盤条件による震害の発生・拡大

ロマ・プリエタ地震は中規模の地震であったが、震源域から 100 km 離れたサンフランシスコやオークランドで大きな被害が出た事が、当初は驚きを持って迎えられた。しかし、被害の詳細が明らかになるに従い、湾岸地域特有の軟弱な堆積層 (Bay mud) 上の埋立地で特に地震動の増幅率が高く、震害はこのような地域に集中していることがわかってきた。中でも、耐震構造上問題がある構造物のみが大被害を受けていることから、湾岸地域での被害は、地盤条件と構造条件の双方に問題があるような、いわば弱いリンク (weak link) が顕在化したものと考えられる。また、典型的な地盤震害である液状化現象も、こうした軟弱地盤上の埋立地のうち、海砂により水締め工法で造成された場所が多発し、道路、空港、および地下埋設管に依存するライフライン系に被害を与えた。

震源域から 10~20 km の範囲内にあるサンタクルズやワトソンビルなどの中小都市では、上に述べた2つの要因が重なって作用している面が見られるが、これらの都市でも河口または河川流域の軟弱地盤において、地震動増幅と液状化の影響が顕著であった。

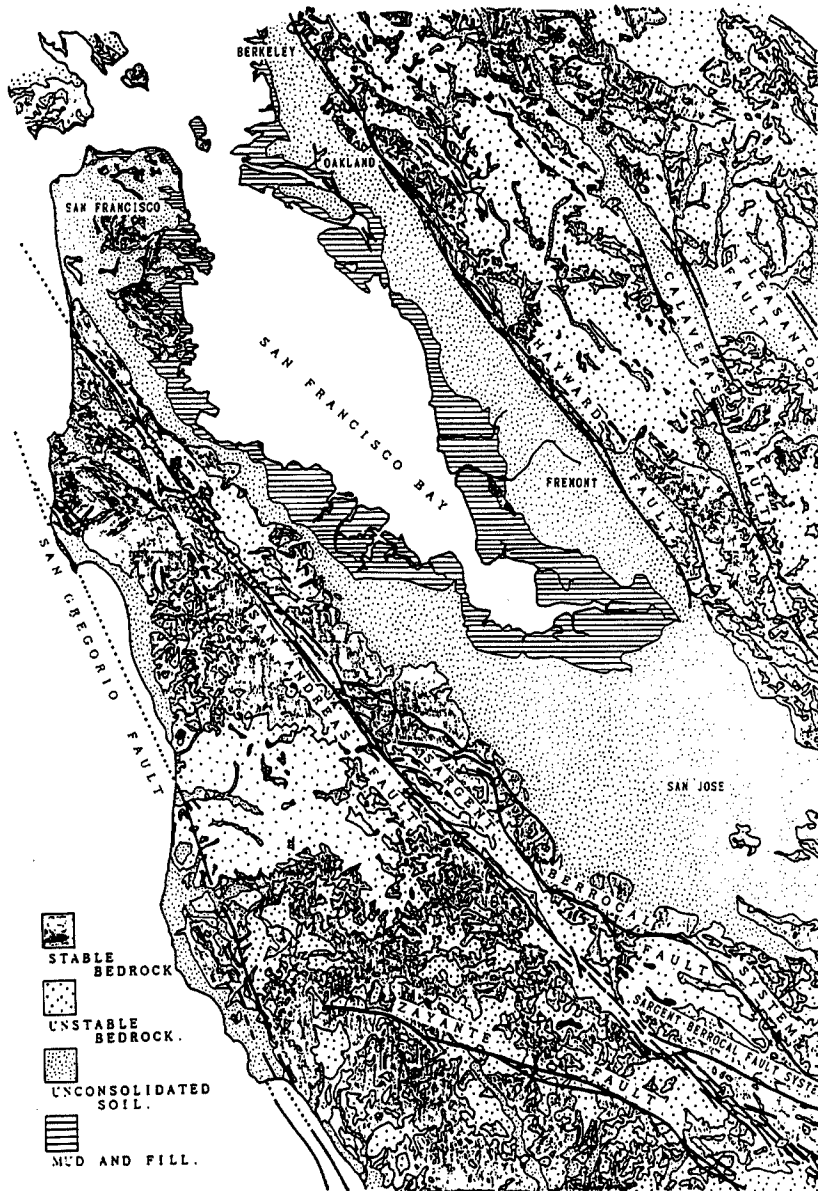
震害が広い地域に及んでおり、特に湾岸地域は人口600万人に近い大都市圏であるから、被害の詳細はなお、今後明かにされるものも多いと考えられる。しかし一方では、最近の耐震工学の成果を十分に取り入れて設計・施工された建物や橋梁、機器などは、大部分が十分な耐震性能を発揮したことも指摘しておく必要があろう。

これらの震害による被害額は、まだ最終的な数値としては発表されていないが、EERI による速報⁴⁾では、56億ドル (約8,500億円) と報告され、最終的には70億ドル (約1兆円) に達するとする予測もある。これらは、1978年宮城県沖地震による被害総額の2,700億円、1983年日本海中部地震による被害総額の1,600億円 (いずれも地震当時の評価額のまま) をはるかに上回るものである。

死者は I 880 高架橋の崩壊による39名を含め64名に上り、負傷者は3,000名を超えた。

4. 斜面崩壊・地盤の液状化

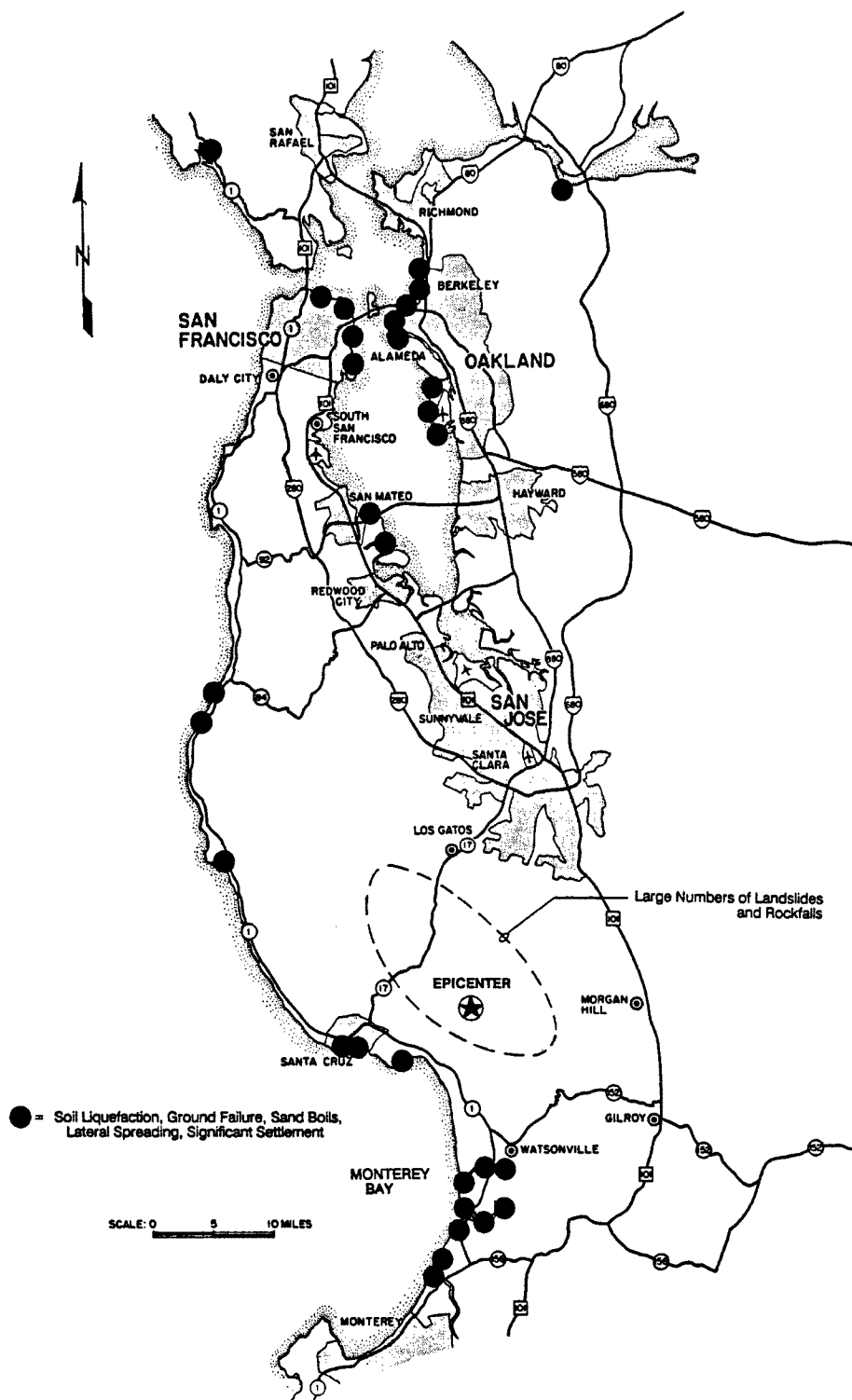
Fig. 4 は、震源域とベイ・エリアを含む一帯の地質分布を示したもので、USGS の資料から構成したものを文献²¹⁾から引用した。また、Fig. 5 は、地盤破壊が生じた場所を示したものである³⁾。両者を比較す


 Fig. 4. Geology and active faults in the San Francisco Bay Area²¹⁾.

ると、震源域の山岳地帯における広範な斜面崩壊と、ベイ・エリア北部の海岸に沿う軟弱地盤上の埋立地における液状化、側方流動、沈下が顕著であることがわかる。また、Fig. 5 の Santa Cruz や Watsonville 周辺の地盤破壊も、河口付近の軟弱な堆積層上で発生したものである。これらの成因については、文献²¹⁾で詳述され、さらに有効応力解析による液状化過程の解析結果も示されているので参照されたい。ここでは、その後得られた情報を含め、若干の補足をしておく。

(1) 地震後の斜面崩壊の進行

まず、ロマ・ブリエタ地震では震源域で多数の斜面崩壊が発生したが (Photo 3)、その多くはすでに修復を終えている。むしろ、今後の問題としては、地震によって安定性が低下した斜面において、雨期に入る冬期に滑り面を活性化させる危険が指摘されていた²¹⁾。このような原因によるとみられる崩壊が、サンフランシスコからゴールデンゲート橋を渡ってさらに北方の、震源から 100 km 以上離れたカリフォルニア州道 1 号線の Muir Beach 付近で発生し、海面から 60 m の高さを通る同路線の舗装面には Photo 4 のようなき

Fig. 5. Geotechnical effects of the Loma Prieta Earthquake³⁾.

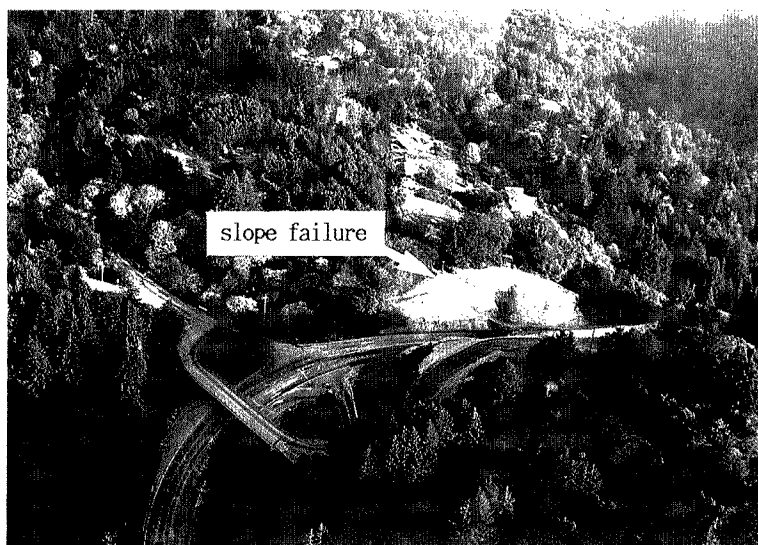


Photo. 3. Slope failure on Hwy. 17 near Summit Road (photographed on 11/11/89).



Photo. 4. Section of Hwy. 1 affected by slope failure near Muir Beach²²⁾.

れつが入り、この区間は1990年1月に閉鎖された。報道によれば²²⁾、地這りによる沈下量は1990年1月のみで3フィート、同5月までで15フィートに及んでおり、現在も対策がカリフォルニア州交通局で検討中であり、崩土の処理、復旧工法を選択などで、解決すべき問題が多いようである。

(2) 液状化対策の効果

ベイ・エリアにおける液状化現象は、サンフランシスコのマリナ地区とマーケット南地区、対岸のオークランド市周辺など、ベイ・エリア北部にあるベイ・マッド上の埋立地で多発しており (Photo 5)、海底での噴砂を観察する珍しい機会もあった (Photo 6)。一方、Fig. 3 に見るように、ベイ・マッドは南部ベイ・エリアにも広く分布しており、サンフランシスコ空港や Foster 市のような埋立地が造成されているが、これらの地域では、震源により近いにも拘らず、大規模な液状化は起っていない。この点に関しては、埋立工法との関連で詳細な比較検討を行うことの重要性を指摘したが²³⁾、カリフォルニア大学バークレー校の Geotechnical Group による最近の報告²⁴⁾と、同報告の主著者である R. B. Seed 教授のコメントから、以下



Photo. 5. Sand boils and cracks of runway due to soil liquefaction at Oakland International Airport (photographed on 11/11/89).



Photo. 6. Sand boils on the sea bed near Oakland (photographed on 11/11/89).

のように、埋立工法の発達の歴史が反映されていると見られる。

まず、ベイ・エリア北部の埋め立ては、主として1850～1920年代に行われたものであり、海砂を用いた水締め工法によっている。そのため、細粒分が多く締固め度も低い液状化し易い地盤が形成されたと考えられる。これに対し、ベイ・エリア南部の埋め立てはトラクターが導入された1930年代以降に行われたもので、材料にも粘着力の高い山土が用いられ、さらに、転圧・締固めにより、液状化しにくい地盤になっていると判断される。また、東岸のオークランド市付近で多くの液状化例が報告されているが、その中で1970年代以降に開発された Emeryville や Bay Farm Island の造成地では、周辺部で液状化が発生したのみで、パイロフロートーションにより締固めが行われた造成地内部は健全であったと報告されている²⁴⁾。

以上のように、地震直後には液状化地点に向けられていた関心が、液状化しなかった地点との比較、液状化対策工法の有効性の検証の方向に議論が進んでおり、今後さらに工学的に総合的な評価が行われるものと考えられる。

最後に、Seed 教授の、「埋立地における液状化対策工法の有効性は確認されたと考えられる。Good practice により液状化の被害は防止できる。従って new construction については心配は少ないが、古い地盤の retrofit は今後の問題である。」というコメントを付加しておく。

5. 建築物の被害と補修・補強の効果

建築物の被害については文献²⁵⁾で詳しく論じられているし、また筆者の専門とも異なるので深く立入ることはできないが、筆者の目に触れた範囲で、被害を受けた建築物の補修の状況と、古い建物の耐震補強の効果に若干言及する。

5.1 被害を受けた建物の補修

(1) マリナ地区の木造アパート

サンフランシスコ市のマリナ地区では、軟弱地盤による地震動の増幅と場所により液状化による基礎の沈下によって建築物に大きな被害が出たが、中でもこの地区に多く存在する **Photo 7** に示すような3～4階建の木造アパートの大部分が大被害を受けた。これらのアパートの多くは1920年代の米国のモータリゼー



Photo. 7. Failure of a wooden apartment building in Marina District of San Francisco (photographed on 11/10/89).



Photo. 8. Failure of soft first storey of an apartment building in Marina District (photographed on 11/10/89).

ションの時代に建てられたもので、1階をガレージにするため大きな空間とし、**Photo 8** の例からもわかるように、細い木柱で上部階を支持するのみで、耐震的な工法は皆無といってよいほど見られない。すなわち、典型的な soft first story の状態になっており、このようなアパート約10棟は1階が完全に崩壊して地震後取り壊された。

Photo 7, 8 の建物も、倒壊しなかったのが不思議なほどの構造であるが、玄関のフレームやわずかな壁によって、かろうじて生き残ったものと考えられる。これら倒壊・撤去を免れた建物は、1990年5月現在補修が進行中であったが、その進捗度は建物によってかなり差があり、経済負担の大きさを感じさせた。**Photo 9, 10** に、補修中のアパートの状況を示した。**Photo 9** は、**Photo 7** と同じ建物の地震から7カ月後の状態である。**Photo 10** は典型的な補修工法を示した例で、独立であったフーチング基礎を地中梁で連結するこ



Photo. 9. Apartment building (same as the one in Photo. 7) under repair works (photographed on 5/13/90).

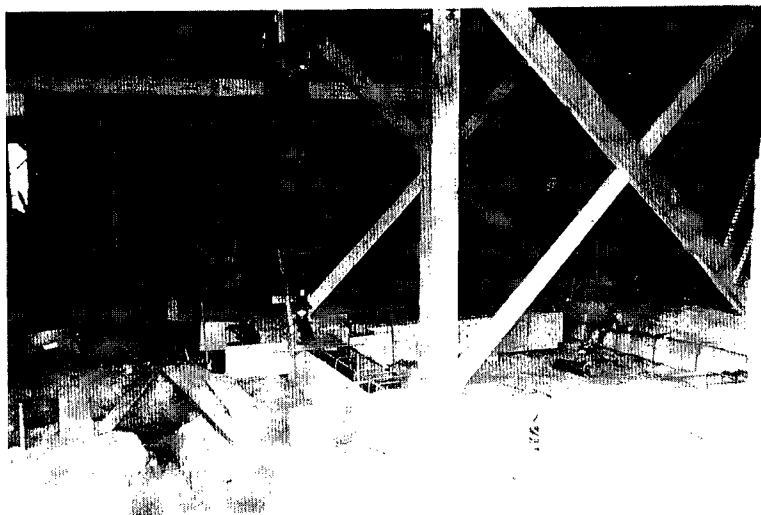


Photo. 10. Typical repair method with foundation tie-beams and braced wood frames (photographed on 5/13/90).

と、1階部分に新たに補強用フレームを加え、ブレースで水平強度を与えるようにしている。

なおマリナ地区の建物被害は、当初は1906年の大地震以後に造成された埋立地に集中し、特に液状化の影響が大きいと受け取られていたが、その後の USGS による調査²⁶⁾によれば、Fig. 6 に示すように、建物被害は他の埋立地や自然地盤の領域に広がっている。これより、液状化の影響はあったであろうが、それより地震動による動的効果の方が大きかったであろうとされている。

(2) Santa Cruz 市における補修例

サンタクルズ市では、中心部のショッピングモール (Pacific Garden Mall) で多くの建物が被害を受けた。この地区は、18世紀のメキシコ統治時代に Mission (カトリック教会の伝道所で、街道に沿って一定距離で配置され、宿駅の役割も果していた) が置かれた丘の麓に開かれた古い街で、100年以上前に建てられ、1906年のサンフランシスコ地震にも耐えた古い無補強レンガ造の建物が残っていた。

この地区の被害は、範囲は狭いが壊滅的と言ってよく、多くの被災建物は取り壊され、空地と化してお

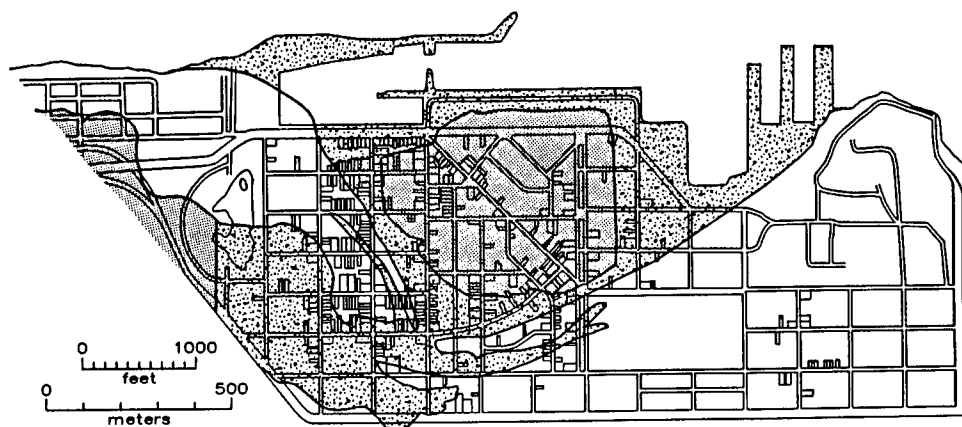


Fig. 6. Ground type and red and yellow tagged structures in the Merina District²⁶⁾.

り、徹去を免れた建物も、補修法さえ決まっていないものも多い。従って、1990年5月現在、Pacific Garden Mall のダウンタウンとしての機能も半身付随の有様であるが、一部商店は営業を始めており、また Pavillion と称する仮設テントで営業している商店もある。このような状態のダウンタウンで、地震被害の補修が進んでいる建物のうち、被害が軽微であったものと重度であったものの2例を以下に示そう。

Photo 11 は、1889年に完成した無補強レンガ造の Leonard Building で、重度の被害を受けたが、補修と耐震補強によって、今後の使用に耐えたと判断された。そのため、建物の外壁の内側に、**Photo 12** に示すような木製フレーム（15 cm×15 cm の柱と幅 15 cm 高さ 30 cm の梁：オレゴン州産の #1 Douglas fir）を組み、鋼製のプレースを入れ、これを地下階から2階まで3段に積み上げる工法がとられている。

次に、**Photo 13** は、構造的に大被害を受けたため取り壊され、外壁のみを保存している銀行の建物である。地震により被害を受けた建物を補修して再使用するか徹去するかについては、安全性と経済性以外に建



Photo. 11. Leonard Building in Santa Cruz damaged by the Loma Prieta Earthquake.

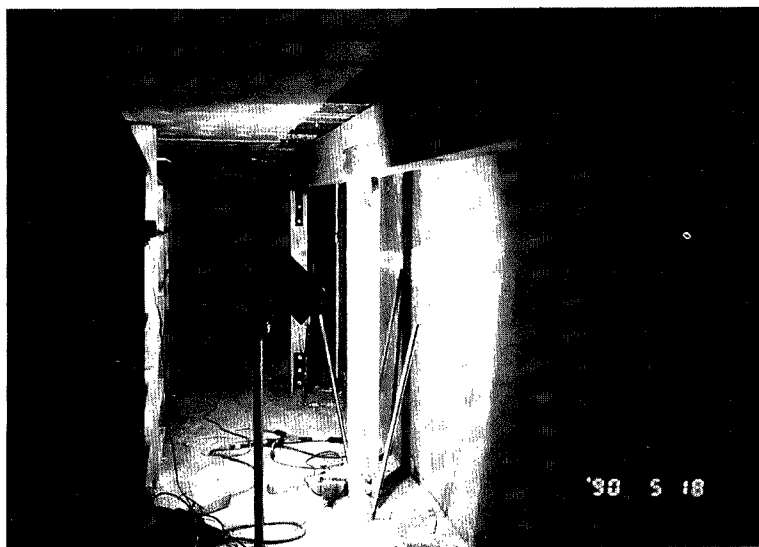


Photo. 12. Repair and retrofit works for Leonard Building (photographed on 5/18/90).

物の歴史的価値も合わせて議論されているようで、この建物の扱いは、その典型的な例と言える。こうした判断には Santa Cruz Historical Society の影響が大きいとのことであった。

5.2 マーケット南地区の耐震補強された建物

サンフランシスコ市のマーケット南地区は、マリナ地区と同様に19世紀後半以降に入江を埋立てて造成された軟弱地盤上にあり、ロマ・プリエタ地震により、無補強レンガ造、鉄骨レンガ造の建物が大きな被害を受けた。一方、この地区では、1980年代に入って、無補強レンガ造建物の耐震補強が行われている。Photo 14 は、この地区にある Golden Gate University のブックストアの建物（4階建）で、ブレース付きの鉄骨枠組により耐震補強されており、地震後も支障なく営業された。これに対し、Photo 15 は、すぐ隣にある同大学の本館（RC 5階建）の1階柱頭の曲げ損傷で、ブックストアが無被害であったのと比べて対照的であった。Photo 14 のような耐震補強が行われた建物は、良好な耐震性能を発揮したものが多かったようであるが、中には被害を受けた例もあり、既存構造物の補強の困難さを物語っている³⁾。これら補強済の建物のロマ・プリエタ地震の際の挙動を詳しく解明することは、今後の既存建物の耐震補強にとって重要な課題であろうと考えられる。

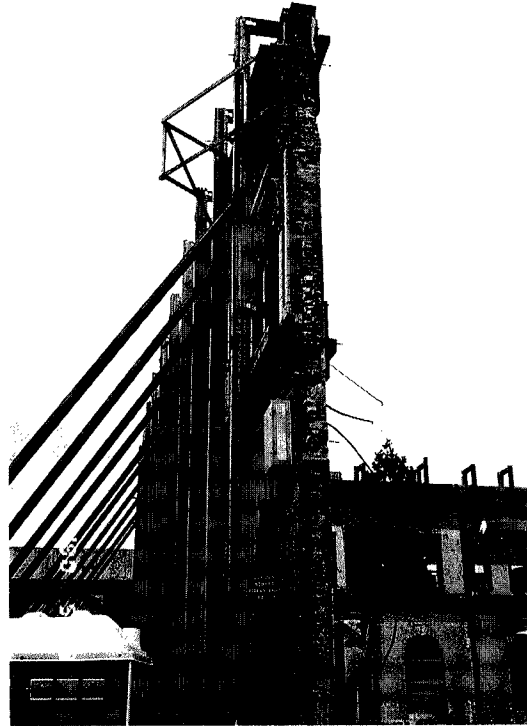


Photo. 13. A bank building in Santa Cruz. It has been demolished, but its exterior walls are to be used in reconstruction.

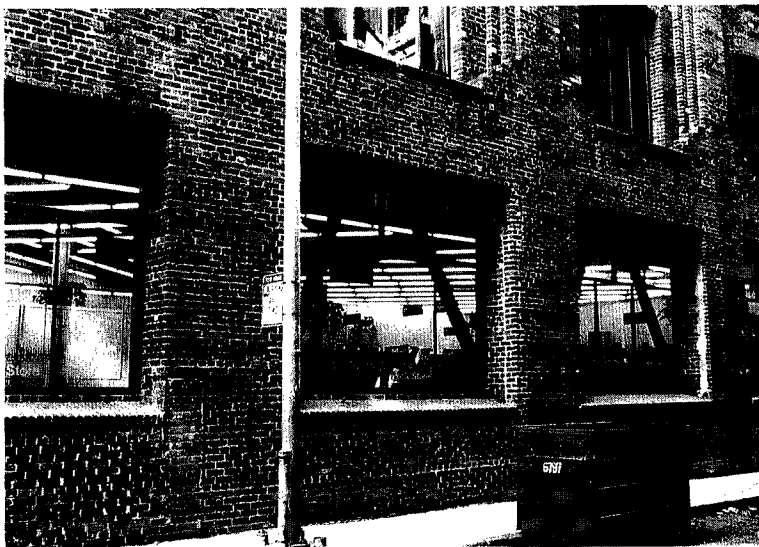


Photo. 14. Retrofitted unreinforced masonry building in South-of-Market District of San Francisco (Golden Gate University Book Store).

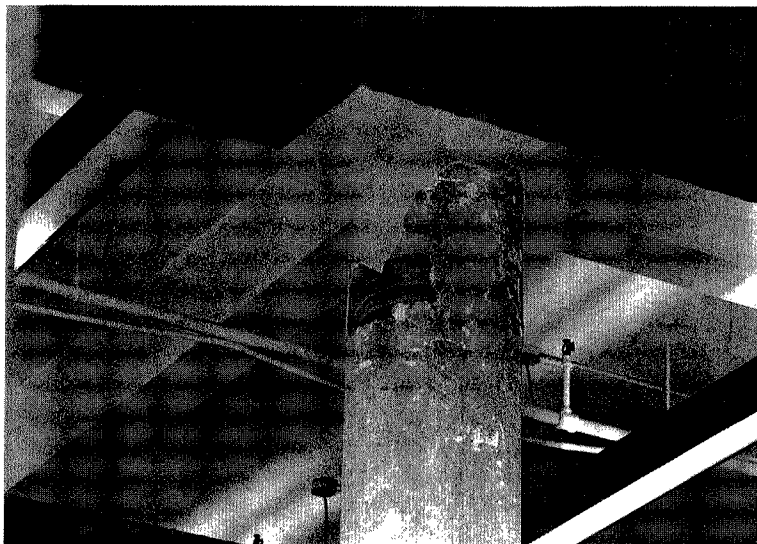


Photo. 15. Bending damage of an RC column.

6. 主要な橋梁被害と対策

ロマ・ブリエタ地震の影響を受けた地域にある1,500の橋梁のうち、96件について何らかの被害があった。地震後の補修と復旧の速度は様々で、被害の程度と路線の重要さ、復旧に要する時間と費用など、多くの要素を考慮しながら、優先順位について困難な判断が行われたようで、決定に当たったカリフォルニア州交通局 (California Department of Transportation: Caltrans) の苦労が思われる。

橋梁被害全般については別の報告に譲り^{12),27)}、ここでは落橋に至った3件の被害の概要と地震後の経過を報告する。

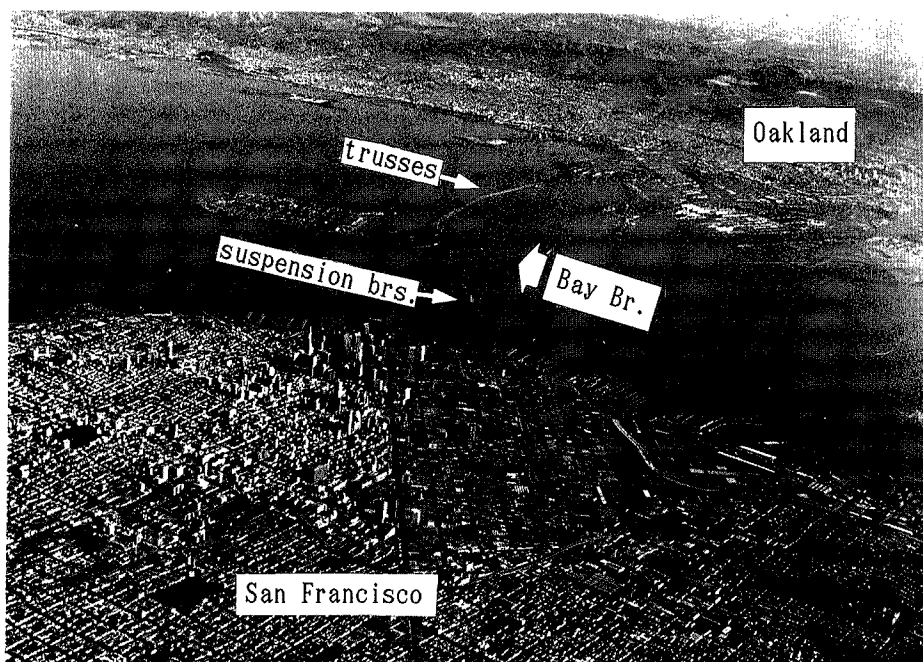


Photo. 16. General view of the San Francisco-Oakland Bay Bridge.

6.1 バイブリッジ

サンフランシスコと対岸のオークランドを結ぶバイブリッジ (San Francisco—Oakland Bay Bridge; Photo 16) は、ベイ・エリアの道路交通網の要をなす橋梁で、ダブルデッキ（上下各5車線）を1日20万台を超える車両が通行している。この橋梁は1936年に開通したもので、すでに54年を経過している。中間地点にある Yerba Buena 島を境にして、サンフランシスコ側は2連の吊橋（センタースパンはいずれも 693 m, サイドスパン 348~374 m), オークランド側はトラス橋となっている。

Fig. 7 に、バイブリッジのルートに沿う地盤構造を示した。同図には、基礎構造とコンクリート製の橋脚・橋台までが示してあり、この上に鋼製のタワー、バント、および上部構造が架設されている。同図のサンフランシスコ側では吊橋の基礎はすべて岩盤に達しており、深いものは水面下 75 m に及ぶ。これに対し、オークランド側では地盤ははるかに軟弱で、粘土か粘土混りの砂地盤が深く堆積しており、岩盤に支持

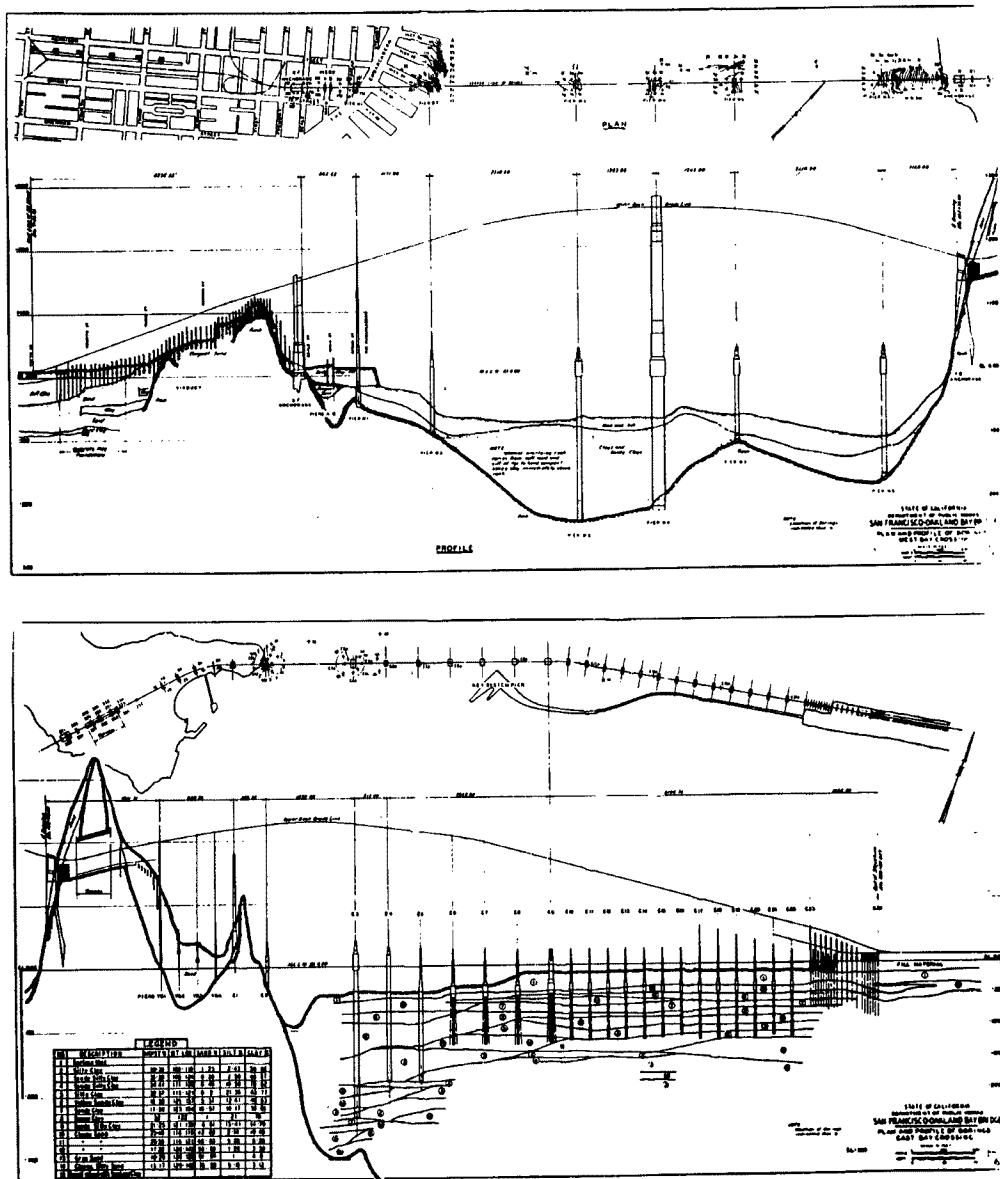


Fig. 7. Soil conditions along the Bay Bridge.

を得ることができないため、構造物をできるだけ軽量化して橋脚への鉛直荷重を軽減するため、多スパンのトラス橋とし、**Photo 17** のようなフレキシブルな鋼製ベントを多用したものと考えられる。

ベイブリッジが建設された時代には、米国では橋梁の耐震設計基準はまだなかったが、この橋梁の設計では水平震度 0.1 で耐震性の照査が行われている。ここにも米国の橋梁建設の一つの黄金時代であったこの時代の技術者の意気込みを感じる。

ロマ・プリエタ地震では、ベイブリッジの吊橋部には何らの損傷も無かったが、オークランド側のトラス部は複雑な動的特性により種々の損傷を受けた。それらを、カリフォルニア大学バークレー校からの報告^{(28), (29)}、および同大学 Astaneh 教授のコメントをもとに報告する。

(1) 橋脚 E9 の渡り桁の落橋

ベイブリッジのトラス部は全部で26スパンからなり、そのうち海上部の22スパンが、オークランドに向かって E1～E23 と番号を打った橋脚で支持されている。道路橋の機能に最も大きな影響を与える被害は橋



Photo. 17. Truss sections of the Oakland side of Bay Bridge.



Photo. 18. One-inch anchor bolt sheared off on Pier E9 of Bay Bridge (photographed at UC Berkeley, Prof. A. Astaneh's Lab.).

脚 E9 で発生した (Fig. 8 参照)。E10, E11 上の鋼製ベントは橋軸方向の剛性が低いため、この 2 スパンの上部構造の水平地震力はすべて E9 への固定部で負担することとなり、このカ所の 40 本のアンカーボルト (径 1 インチ：Photo 18) がすべてせん断破壊した。そのため、2 スパンのトラスがオークランド側へ少くとも 18 cm 移動したため、E9 上の長さ 15 m の渡り桁 (上部・下部とも) が、15 cm の桁受けを踏みはずして落下した。地震後当初は、E9 からオークランド側までの 14 スパンが一斉に移動したように報ぜられたこともあったが、橋軸方向の水平地震力の伝達は、Fig. 8 のように E11 で遮断されているから、E9 での被害に影響したのは E9～E11 の 2 スパンの部分のみである。

E9 での落橋により、ベイ・ブリッジのオークランド側は使用不能となった。同橋の重要性から、その早期復旧に全力が注がれ、補修はトラスを元の位置にジャッキで戻し、アンカーボルトはハイテン鋼製に強化して固定した後、Photo 19 のように、鋼 I 桁を渡した上にプレキャスト床版を設置し、その隙間を現場打コンクリートで埋める工法で実施され、地震後丁度 1 カ月の 11 月 17 日に開通した。

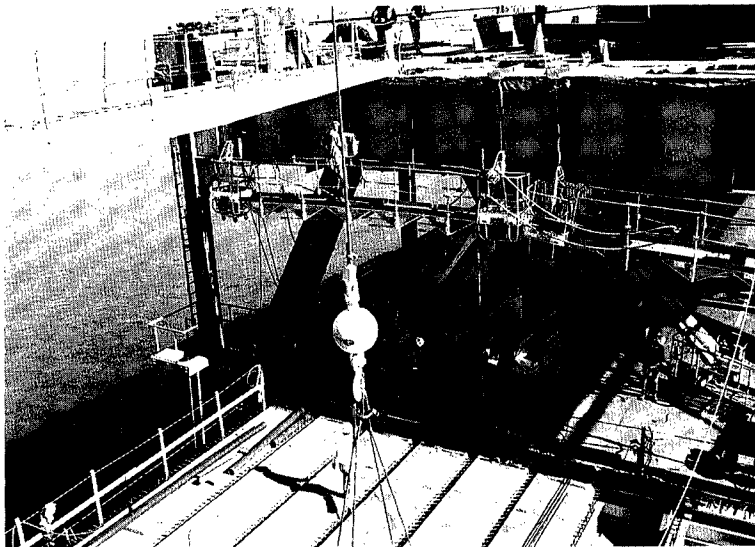


Photo. 19. Repair works on Pier E9 of Bay Bridge (photographed on 11/7/89).

(2) RC 橋脚 E17 の曲げ損傷

橋脚 E11～E16 は剛性が低いベント式構造が続き、E17～E22 は剛性が高い RC のペDESTAL 式橋脚となる。この境界にある E17 橋脚のペDESTAL 基部が曲げ損傷を示した。この被害は、Fig. 9 のように、E11 から E17 までの 6 スパンのトラスの地震力が E17 に集中したためと考えられている。

(3) 橋脚 E17～E23 のアンカーボルトの折損と落橋防止装置の変形

橋脚 E17～E23 の間は Fig. 10 のように 6 スパンの単純支持トラス (東端で固定支承、西端で移動支承) となっているが、固定支承のアンカーボルト (径 2 インチ) の大部分 (6 スパンの総計 144 本のうち 5 スパンの 120 本) がせん断破壊した。これにより、トラス 5 連が橋軸方向に無拘束の状態となったが、1971 年のサンフェルナンド地震後に設置された落橋防止装置 (restrainer) がストッパーとなって落橋を免れた。

落橋防止装置は、Fig. 11 のように移動支承を囲むように設置され、トラスが下りこう配の東側 (オークランド方向) へ移動するのを防ぐようになっている。Photo 20 は橋脚 E20 における落橋防止装置の状況で、ストッパーの梁がトラスの衝突により塑性変形を起している。これにより、落橋防止装置は、トラスがさらに東側に移動するのを防止するという機能を十分に発揮したと考えられる。移動したトラスはすべてジャッキにより元の位置に戻され、ハイテン鋼に強化したアンカーボルトで固定された。

以上、ベイ・ブリッジの状況を述べたが、一応の復旧は終わったものの、トラス部が示した複雑な挙動は、

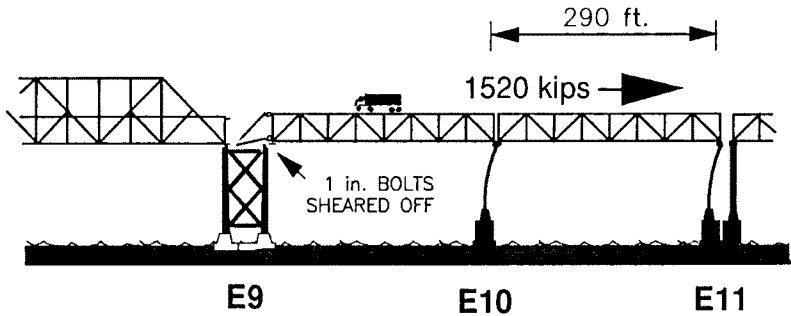


Fig. 8. Collapse of upper and lower decks of Bay Bridge (piers E9 to E11 segment)²⁸⁾.

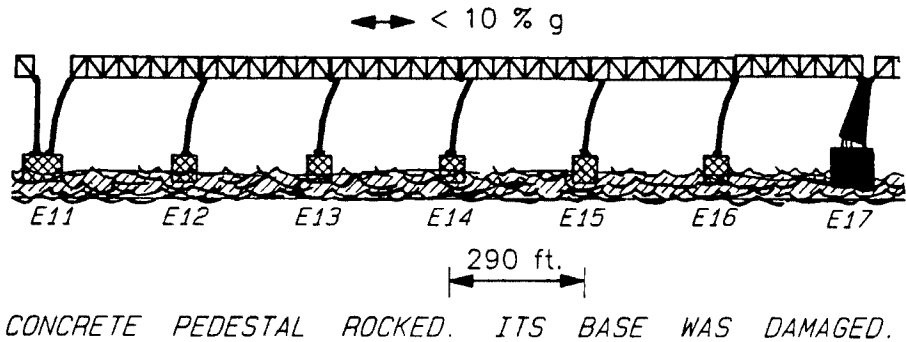


Fig. 9. Probable behavior of segment E11-E17 of Bay Bridge²⁹⁾.

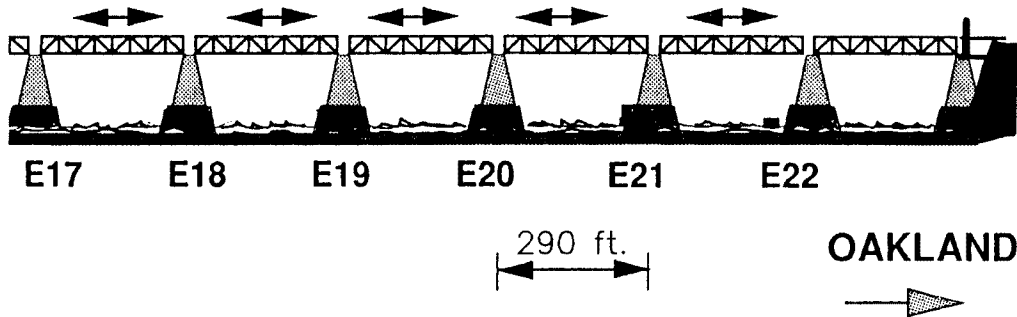


Fig. 10. Damage to single-span trusses (piers E17 to E22). (Trusses in five spans moved longitudinally)²⁸⁾.

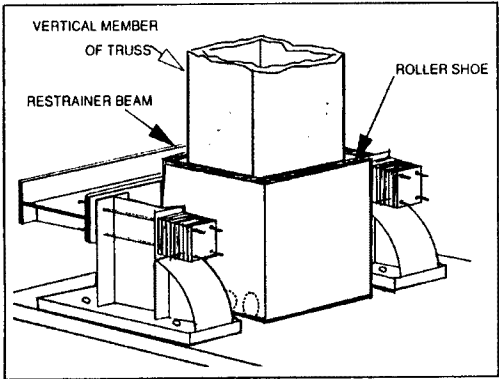


Fig. 11. Seismic restrainer in Bay Bridge²⁸⁾.



Photo. 20. Deformed restrainer on Pier 20 of Bay Bridge (photograph by A. Astaneh).

この橋梁の耐震補強をさらに詳細に検討する必要があることを示した。カリフォルニア大学バークレー校では、Caltrans からの委託により 3 年計画で総合的な研究を行うことになっている。そこでは地盤と構造物を含む全体系（トラス部・吊橋部とも）の 3 次元多点入力立体地震応答解析と、橋梁系の振動台実験を実施して、ベイブリッジ全体を耐震工学的に近代化する方策を提言することになる筈である。

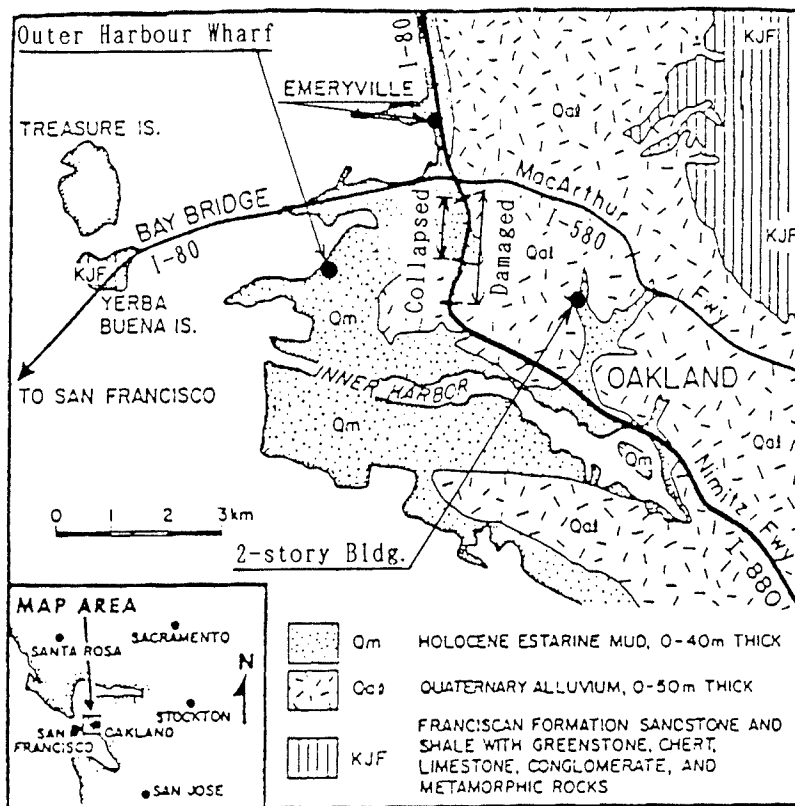


Fig. 12. Locations of the Cypress Street Viaduct (modified by Fujino et al.²⁷⁾ from EERI Report⁴⁾).

6.2 I 880 Cypress 通りのダブルデッキ高架橋

ベイブリッジの東端からオークランド市中心部へ向かって南下する州際高速道路 (Interstate Highway) I 880 号が Cypress 通りと並行する区間 (Fig. 12) はダブルデッキ構造となっており、主たる構造は Fig. 13 のような 3 種類のタイプからなる³⁰⁾。この構造は1953の AASHTO の設計基準で設計され、1955年から1957年にかけて建設された。当時の技術水準から、不静定次数を低くするために上層柱の基部をヒンジにしたり (type I), さらに上部デッキを橋軸直角方向にポストテンションの PC 構造としたため、クリープの影響を避けるために柱頭部をヒンジにしたり (type III), 静定構造とするため一方の柱は上下をヒンジにする (type II) など、現代から見るとかなり特殊な構造となっている。設計震度は 0.06 で、サンフェルナンド地震 (1971) 以後大幅に引上げられる以前の基準である。

この構造は、Fig. 12 の “Damaged” と記された約 2 km の区間に建設されているが、そのうち特に同図で “Collapsed” と記された 1 km 余の区間では、Photo 21~23 のように、大部分の上層桁が落下し、ここで39名のドライバーの命が失われるという大惨事となった。その破壊モードは、type I では Photo 21 のよ

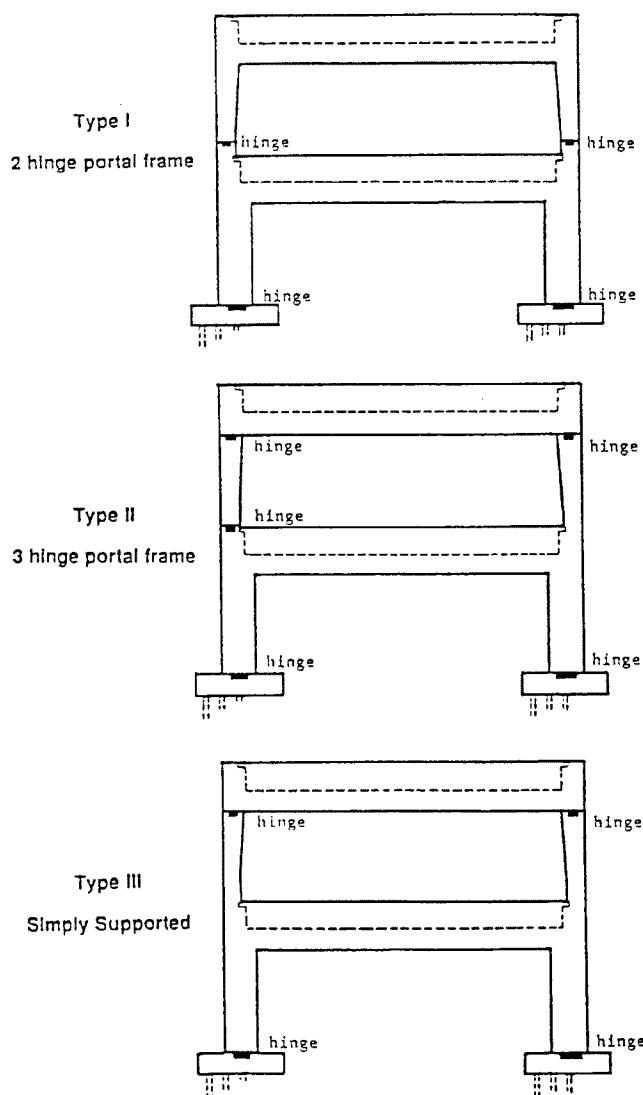


Fig. 13. Typical structural types of the Cypress Street Viaduct³⁰⁾.

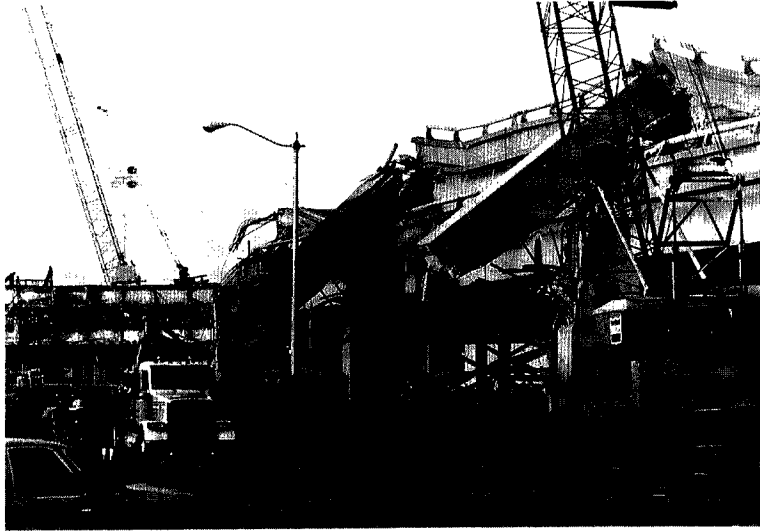


Photo. 21. Collapsed I 880 Cypress St. Viaduct-I (Type I; photographed on 11/4/89).

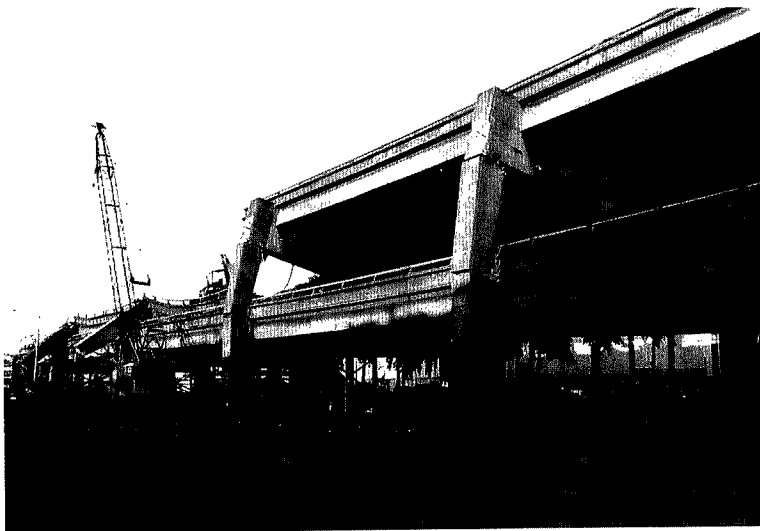


Photo. 22. Collapsed I 880 Cypress St. Viaduct-II (Type II in foreground and Type II in fargound; photographed on 11/4/89).

うに、上層柱下端のヒンジの破壊により、上部桁の重量で柱がハの字形に開く形となり、type II では **Photo 22** の近景のようにカンティレバーの柱（写真の向う側）の曲げ破壊により上部桁の片側が落下するか、落下の衝激が強い場合は上下ヒンジ側でも下ヒンジ部のせん断破壊により、**Photo 23** のように上部桁が完全に落下する結果となった。

破壊の原因は、①**Fig. 12** の“Collapsed” 区間がベイ・マッドの軟弱層上を通過する場所と一致していることから、この区間で特に地震動が大きかったと考えられること、および②**Fig. 14** に示した配筋図からわかるように、ヒンジ部のコンクリートのせん断補強が不十分で斜めひびわれが容易に発生し、③また上層隅角部での主鉄筋の定着不足と不十分なせん断補強のため、曲げモーメントの伝達が十分に行われなかったためとされる³⁾。

こうした点を実験的に検証するため、1989年12月に、Caltrans と UC Berkeley によって、被害を免れた type I の高架橋 2 スパンを用いて動特性を調べるための起振機実験と、構造物の強度を調べるための水平加



Photo. 23. Collapsed I 880 Cypress St. Viaduct-III (Type II; photographed on 11/4/89).

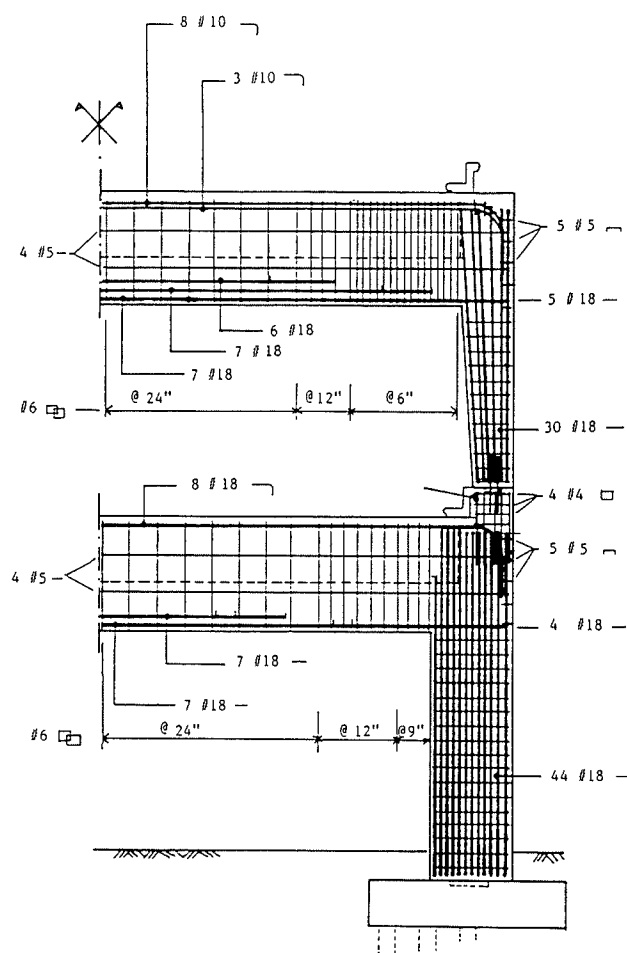
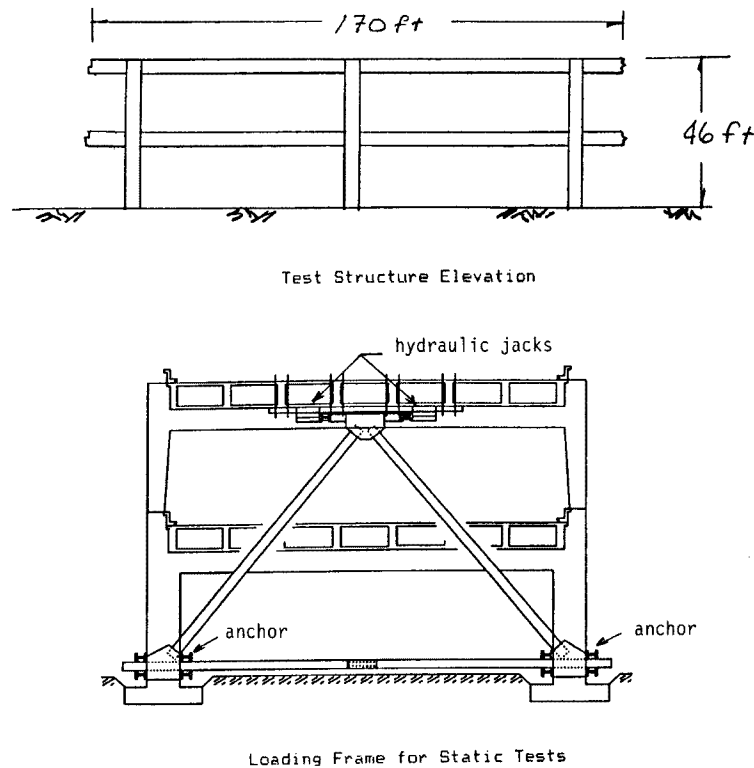


Fig. 14. Reinforcement layout for bent Type I⁽³⁰⁾.


 Fig. 15. Testing of the Cypress Street Viaduct³¹⁾.

力試験が行われた³¹⁾。静的試験では、Fig. 15 のような載荷装置が用いられた。

静的試験により、ヒンジ部に斜めひびわれが発生した時点での荷重から、地震動は $0.3g$ が必要と算出されており³¹⁾ 軟弱地盤による地震動の増幅と構造特性が重なって、この区間のみで破局的な被害となったことが説明される。

UC Berkeley においては、Caltrans と共同でさらに研究を続行し、ラーメン式 RC 高架橋の全体系の動的解析、FEM 解析による細部の評価、実験による検証などを通して、高架橋の設計法、耐震補強法と優先順位の決定法などについて提言をまとめとて行く方針 (Bertero 教授, Mahin 教授のコメント) とのことである。これは、サンフランシスコ側の 2 層構造の高架橋 (多くはロマ・プリエタ地震で損傷を受け、不通のままになっている) の取扱いに関する決定にも影響を及ぼす筈である。

I 880 のダブルデッキ高架橋は現在はずべて撤去されて、Cypress 通りに沿う敷地は平らなオープンスペースとなっている。この区間の再建法はまだ決まっておらず、Bertero 教授によれば、地域分断を避けて、オークランド港の方へ迂回するコースが真陰に検討されているとのことである。

6.3 州道 1 号線の Struve Slough 橋

ロマ・プリエタ地震の震源から 10 km 程度の距離にある Watsonville の郊外で、州道 1 号線が湿地帯を渡る場所に架かる Struve Slough 橋の破壊は、Photo 24 のような特異な破壊モードで人目を引いた。この橋梁は、19組 (南行) および 20組 (北行) のパイルベントで 3 連の連続桁を支えており、杭の頂部は桁の床組を構成する横桁に直接埋込まれていた。

ロマ・プリエタ地震により、湿地帯の軟弱地盤に根入れされた RC 杭が大きく動いた形跡があり (Photo 25)、これにより、杭頭の桁への固定部で曲げ→せん断の進行性の破壊が発生し、杭が横桁からはずれた南行の中央の桁が落下すると同時に、杭が床版を貫くという異様な破壊となった。これにより桁も曲げ破壊を

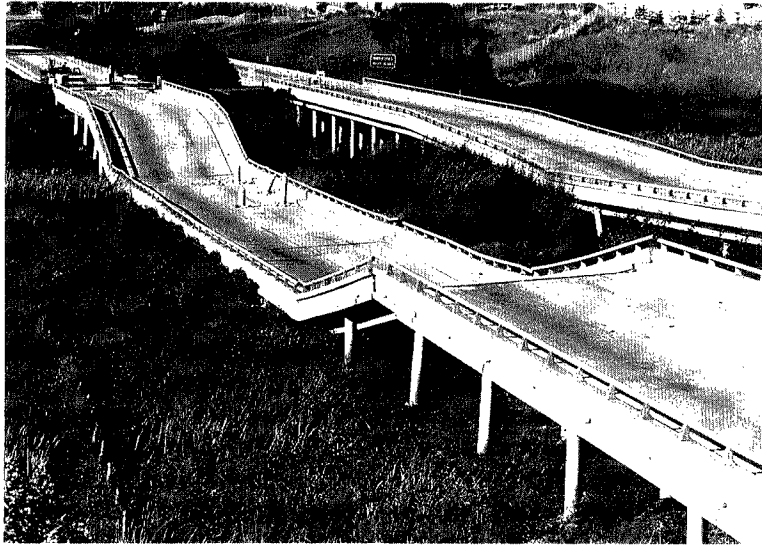


Photo. 24. Collapsed Struve Slough Bridge of Hwy. 1 near Watsonville (photographed on 11/5/89).



Photo. 25. Dislocation of a pile bent of Struve Slough Bridge (photographed on 11/5/89).

起こし、恰もコンクリートの破壊モードの事例集の観を呈するに至った。

この橋梁も1989年12月には完全に撤去され、その後に **Photo 26** のような新しい Struve Slough 橋が1990年4月に開通した。新橋の構造は、旧橋よりさら簡単で、60 cm 径の鋼管（スパイラル鋼管や約 1.5 m 長の鋼管を現場溶接したものなど、いくつかの種類が使われている）を打込み、このパイルベントの上を、約 45 cm の厚さのスラブが全長にわたって連続構造で施工されている。早期開通を目指して急速施工が可能な工法をとったものと思われる。設計図を入手していないので詳細はわからないが、杭頭の定着をどうしたのか、次の地震時には、今度は床版の被害につながらないか等、気になる部分も多い構造である。



Photo. 26. Reconstructed Struve Slough Bridge (photographed on 5/16/90).

7. 交通システムへの影響

本章では、都市ライフラインシステムの一つとしての交通システムにロマ・プリエタ地震が与えた影響を述べる。ライフラインシステムは交通システム以外に水道・ガス・電力などの供給施設、下水道などの処理施設、電話・コンピュータネットワークなどの通信施設と、多くの施設で構成されるが、それらの被害全般については文献(32)に譲ることとする。ここで特に交通システムのみを取り上げる理由は次のとおりである。

7.1 ベイ・ブリッジの閉鎖がもたらしたもの

ロマ・プリエタ地震では、道路橋の被害により、ベイ・エリアの交通事情に大きな影響が出た。中でも、6.1で述べたベイ・ブリッジの1カ月にわたる閉鎖はこの地域の道路交通の事情を一変させた。またこの間、サンフランシスコとオークランドを直結する大量交通機関は BART (Bay Area Rapid Transit) のみとなり、ベイ・ブリッジの閉鎖中は BART の乗客が急増した。

ベイ・ブリッジの閉鎖は、通常では到底実施不可能な壮大な社会的実験となったようであり、ベイ・ブリッジの復旧後にもなお影響が及んだ。こうした影響が持つ意義については、交通工学的視点は勿論、人文・社会的観点からも検討が加えられるべきであるし、その結果を大都市圏の交通施設の整備における耐震工学的評価にフィードバックすることも重要であろう。

このような問題については、わが国でも関心がありながら、実際のデータもほとんど無く、未知の領域であった。今回の地震は、この分野の研究を進める契機となる十分なインパクトを持つと考えられる。

以上のような認識のもとで、以下本章ではロマ・プリエタ地震がベイ・エリアの交通システムに与えた影響の概要を報告する。より詳しくは、文献(32)の交通システムの項を参照願いたい。また、この問題は広がりが大きく、なお実態を把握していない部分も多い。現在もなお調査を続行中であることを付言しておく。

7.2 道路交通システムへの影響

(1) ベイ・ブリッジの閉鎖と迂回ルートへの影響

Fig. 16 に、地震後3週間を経た11月8日現在のベイ・エリアの高速道路網の状況を示した。太い点線が不通カ所を示すが、この中で最も影響が大きかったのが、言うまでもなくベイ・ブリッジの閉鎖である。

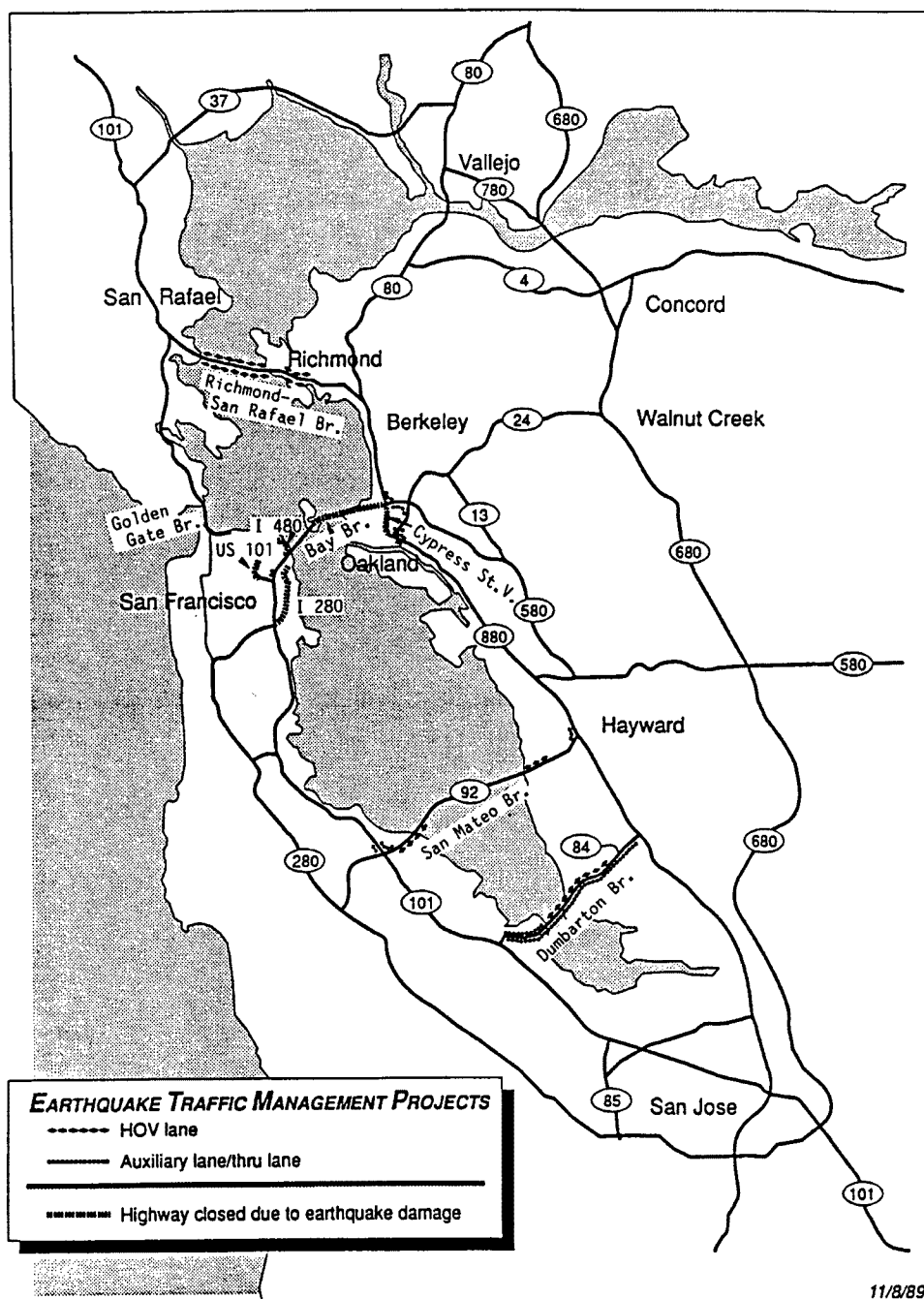


Fig. 16. Bay Area freeway network and its post-earthquake management (source: Caltrans).

Table 2 の(1)欄に、サンフランシスコ湾を横断する橋梁群における地震前の週日の平均交通量を示した。ベイブリッジの1日交通量24万台は他の橋梁より圧倒的に多く、同橋が占める重要性がよくわかる。

このような状況下でベイブリッジが通行不能となったことの影響は広範囲に及び、Fig. 16 や Table 1 中のベイブリッジ以外の橋梁の負担が当然増大した。その中で、Fig. 17 に示すように、Dumbarton 橋については、地震前の平日の平均とベイブリッジが閉鎖中の11月2日の、朝夕ラッシュ時の時間交通量がわかっていて、これによれば、いずれの場合も11月2日の交通量が地震前より多く、ベイブリッジの閉鎖の影響が顕

Table 2. Average weekday traffic through cross-bay bridges.

Name of Br.	Traffic volume (vehicles/day)			
	(1) before quake	(2) after quake	(3)=(2)-(1)	(4)=(3)/(1)
Bay Bridge	243,000	208,000	-35,000	-14%
Richmond-San Rafael	44,000	46,000	+2,000	+5%
San Mateo	65,000	67,000	+2,000	+3%
Dumbarton	41,500	59,000	+17,500	+42%
Golden Gate	123,700	116,700	-7,000	-6%
total	517,200	496,700	-20,500	-4%

Original data extracted from The SF Chronicle, 12/18/89

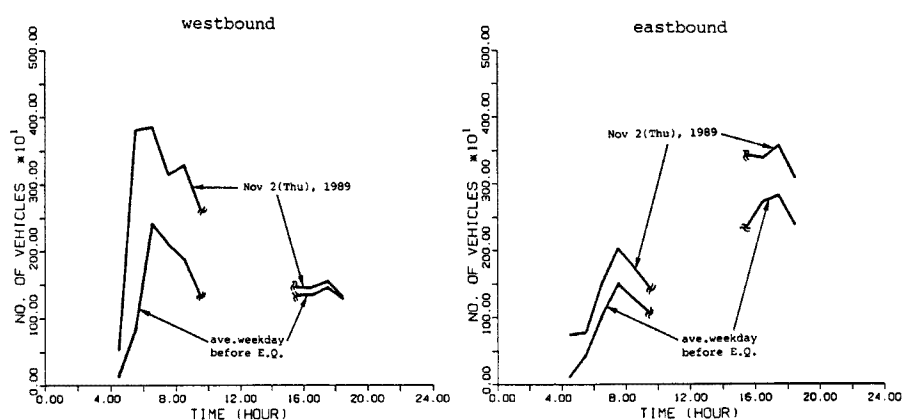


Fig. 17. Traffic through Dumbarton Bridge before and after the quake (4 AM-10 AM, 3 PM-7 PM).

著に現れている。Table 2 との比較で単純計算すれば、ベイブリッジの閉鎖中、Dumbarton 橋は、地震前の1.5倍の62,000台/日程度の交通を負担したと推定される。

Dumbarton 橋よりさらにベイブリッジ近い他の2ルート (San Mateo 橋、および Richmond-San Rafael 橋—Golden Gate 橋) では、一層大きな影響があったと推察される。今後さらに詳しく調査を行いたい。

(2) 地震後の対策とベイブリッジ再開後の交通情況

こうした状況下で、カリフォルニア州交通局 (Caltrans) では、ベイブリッジの復旧を急ぐとともに、特に混雑が激しくなると考えられる高速道路の区間やインターチェンジ付近、具体的には Fig. 16 に示した箇所、臨時の車線を増設して、増大する交通負荷を少しでも緩和するための努力が払われた。臨時の車線は2種類ある。1つは HOV (high occupancy vehicle) 用、他は一般交通用の補助車線 (auxiliary lane) や直通車線 (thru lane) である。HOV 用車線は、多人数が乗車した車両を優先通行させるもので、路線バスとカープール (乗車用による乗合通勤) が対象となる。

ベイブリッジは地震後1カ月の11月17日に開通し、迂回ルートへの負担は解消したが、他にも不通ヶ所の影響が依然として続いている。特に、南からサンフランシスコ市に入る US 101 と I 280 の2つのルートでは、市の中心部に交通を分配していた枝線の多くのが不通のままのため、ベイブリッジの開通後も、この部分がネックとなって、朝の混雑が激しい状態が続いている。また、オークランド市内の I 880 の Cypress 高架橋の崩壊により、同市の環状高速道路の一部が欠如した状態となったため、この地域の通過交通への影響が続いている。

最後に、Table 2(2)には、ベイブリッジ開通後の各橋梁の交通量を示し、地震前との差および増減の割合をそれぞれ同表(3)、(4)に示した。この中で、ベイブリッジにおける交通量の減少と Dumbarton 橋での増加が顕著である。特にベイブリッジでの量的な減少が目立つ。ベイブリッジでの交通量の変化は、次の述べる BART の乗客数の変化との関連で再度考察する。1989年12月現在見られたこれらの道路交通事情の変化をもたらした要因を分析し、今後の推移を追跡することは、重要な研究課題と考えられる。

7.3 BART (湾岸地域高速鉄道) への影響

(1) BART の概要と地震直後の状況

BART の路線は、Fig. 18 のように、サンフランシスコ湾を横断する沈埋トンネルからなる Trans-Bay Tube を要として、ベイエリアの両岸に広がっている。鉄道の営業距離は 115 km で、いくつかの駅のへのフィーダーサービスを行うバス路線も営業されている。鉄道路線は1972年に第1期区間が開通し、現在の4路線34駅が開通したのは1976年である。

路線構造物は地下トンネル、高架、地平からなるが、最も重要な役割を担うのが、湾横断部の Trans-Bay Tube で、世界で初めて本格的に耐震設計された沈埋トンネルとして、ロマ・プリエタ地震における構造的挙動がどうであったか、日本の技術者からも大いに注目された。これら構造物の挙動は文献(32)で述べてあるので参照されたい。要約すれば、構造物に小さな変状・被害は少々あったが、大きな問題となるものではなかった。特に、Trans-Bay Tube は十分な耐震性能を発揮した。

BART では、地震時の対応についてかなり詳細なマニュアルが作成されている。すなわち、Fig. 18 で*印をつけた8駅に BART 専用の強震加速度計が設置されており、0.1 g 以上の地震動で警報を発する。中央指令室では、地震計からの警報以外に、運転士からの情報、その他構造物被害に関連するあらゆる情報を

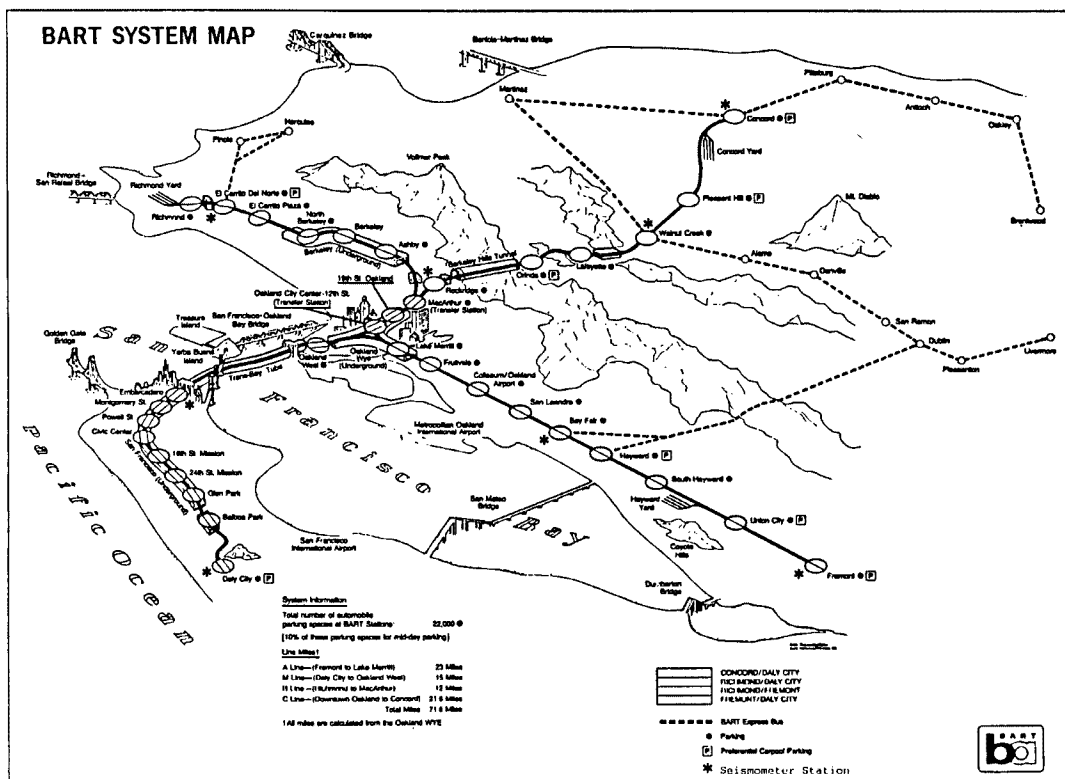


Fig. 18. BART system map (source: BART Office).

判断して、地震時対応計画Ⅰ、Ⅱ、Ⅲのいずれかを発動する。これらのレベルにより、列車の移動、軌道の点検、乗客の誘導、き電停止の適否の判断などに関する入念さが異なる。

ロマ・ブリエタ地震では、8カ所の地震計のうち、Concord と Walnut Creek を除く6カ所で警報が発せられ、地震の影響が最も大きい場合に適用される地震時対応計画Ⅲが発動された。その詳細についても文献32)を参照頂くこととして、簡単な経過のみを記すと、地震発生とともに一旦運行を停止したBARTは、構造物の点検を深夜まで行った後、翌10月18日午前1時頃（地震から約8時間後）に運行が可能となり、同日午前10時頃には平常運転に戻った。

(2) 地震後の運行と乗客数の推移

地震翌日の10月18日に平常運転に戻ったBARTは、週明けの10月23日からは、平常のサービス時間が6:00~0:00であるのに対し、ベイブリッジの閉鎖による交通支障を補うため、深夜も毎時1本程度の列車を運行する終日運転を行い、これをベイブリッジが再開された11月17日まで続けた。このサービスを夜の鳥ふくろうになぞらえて、“Owl Service”と呼んだ。ベイブリッジの再開後はOwl Serviceは廃止されたが、なお始発を1時間早める“Early Bird Service”が実施され、1990年1月現在なお続行中であった。

これらの状況のもとで、BARTの乗客数は劇的に変化した。まず、Fig. 19に、地震より1年前の1988年10月の週日におけるサンフランシスコ〜オークランド間のパーソン・トリップの時間変動を示した。同図には、ベイブリッジとBARTの分担も示されている。これより、朝はオークランドからサンフランシスコへ、夕方は逆向きの大きな通勤の人の流れが存在し、この両地域間の一方的な流れは特にBARTにおいて著しいことがわかる。

地震前のこれらの状況を含めて、地震前後におけるBARTの乗客数の推移をTable 2に示した。同表では、乗客総数の他に、内訳の判るものについては湾横断(Transbay)、西岸域内(Westbay)、および東岸域内(Eastbay)の乗客数に分けて示してある。同表の注2)と、(1)、(2)欄のTransbayの項より、地震前の湾横断のパーソン・トリップは約54万人で、うち43万人をベイブリッジが、11万人をBARTが分担していた。以下、この認識のもとに、Table 2により、BARTの乗客の推移を考察する。

まず、乗客総数を見ると、地震によりベイブリッジが閉鎖されていた(3)、(4)の期間の乗客数が際立って多くなっていることがわかる。この傾向は、地域全体で地震から復旧が進み、都市活動が再び活発になった後半の時期（すなわち(4)の期間）で特に著しく、この時期の乗客数は地震前の1.54倍となっている。また、最大乗客数は、ベイブリッジが開通する前日の11月16日に記録されている。

次に、乗客の移動地域別にみると、上に述べた変化は主として湾横断の乗客増によることが明かである。すなわち、湾横断の乗客数は地震直後から増え始め、(4)の期間では地震前の2.11倍という著しい増加となっている。西岸域内や東岸域内の乗客数が地震直後の(3)の期間では地震前より減少し、(4)の期間でもようやく

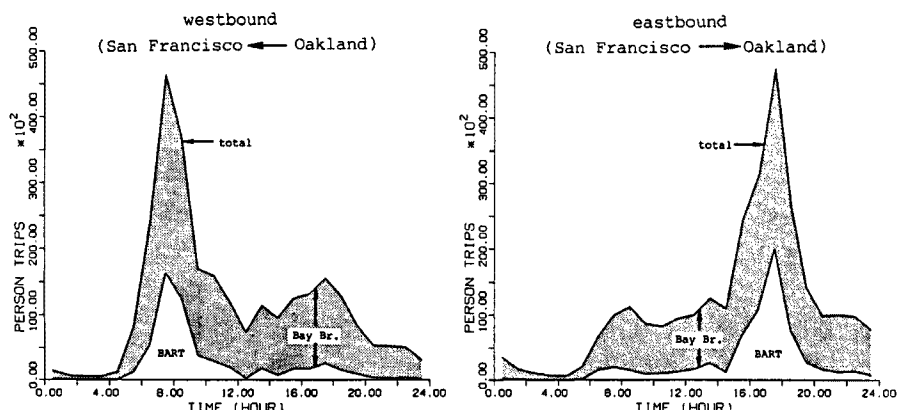


Fig. 19. Cross-bay traffic through Bay Bridge and BART under normal condition (fall, 1988).

Table 3. Weekday BART ridership.

	Date	Total	Transbay	Westbay	Eastbay
(1)	Oct. '88	210,115	114,569	—	—
(2)	Oct. '89, pre-quake	225,648	105,780	61,491	58,377
Earthquake: 10/17					
(3)	Oct. '89, post-quake	276,750	173,491	53,193	50,066
(4)	Nov. '89, Br. closed	347,122	223,610	66,012	57,500
Bay Bridge reopened: 11/17					
(5)	Nov. '89, Br. open	257,500	138,590	63,646	55,264
(6)	12/4-12/8	251,270	—	—	—
proportion: (4)/(2)		1.54	2.11	1.07	0.98

Note: 1) Record total = 357,135 on 11/16/89
 2) Total transbay person trips in Oct. '88 = 544,896
 (Share of the Bay Bridge = 430,327)

地震前の水準に回復したに留まっているのに比べ、この事は特に目立った特徴である。湾横断の乗客における(4)欄と(2)欄の差である約12万人は、注2)の平常時のベイブリッジのパーソン・トリップの28%に相当する。これより、ベイブリッジの閉鎖による人の交通の需用負荷のうち、BART が約30%を負担したと考えることができよう。

さらに、ベイブリッジが再開した11月17日以降の(5)、(6)の期間においても乗客数は地震前より10%増と、かなり高い水準を維持していることが注目される。これを(5)の期間について移動地域別にみると、この差は、湾横断の乗客が(2)の期間と比較して1.31倍という高水準を維持していることによる。両者の差をとって得られる32,800人は、Table 2 で見た、ベイブリッジ再開後の車両減35,000台に迫るものであり、ベイブリッジから BART に移行した人の流れの一部が、ベイブリッジの再開後も BART に留まっていることをうかがわせる。これは BART の利便性・快適性が見直されたことによると理解されているようであるが、詳しくみると2つの数字の間にはなお開きがある。Table 2, 3 の数値より、ベイブリッジを通過する車両が1台につき1.77人を運んでいることを用いると、Table 2 におけるベイブリッジ再開後の35,000台減は約62,000人に相当するから、これらを合わせると、湾横断の人の流れは全体で約3万人も減少した計算になる。こうした状況は報道でも論じられており³³⁾、その理由として一部企業のサンフランシスコ市からの脱出、在宅勤務の増加などが挙げられている。これらの事情が一時的なものか、ある種の社会的変化が起こったのか、についてはいま暫く全体の推移を見ることが必要であろう。

8. サンフランシスコ消防用水道システムとマリナ地区の火災

サンフランシスコ市は、独特の消防用水道システムを持つ。このことはあまり広く知られていないようであるが、その設計思想には学ぶべきものが多いと考えられるので、本章でこのシステムをとり上げて考察を行いたい。システムは、1910年代に完成した高圧補助水道システム (AWSS: Auxiliary Water Supply System; 一般の都市水道の MWSS: Municipal Water Supply System と区別してこう呼ばれる) と、1983年に開発された可搬型給水システム (PWSS: Portable Water Supply System) からなる。

ロマ・ブリエタ地震により発生した火災 (特にマリナ地区で7戸を全焼した火災) に対し、このシステムも耐震性について種々の課題を残したのであるが、しかしもしサンフランシスコがこの消防用水道システム

を持たなければ、消火活動ははるかに遅れたことは明かであり、やはりその存在意義は大きいというべきである。

サンフランシスコの消防用水道システムについては、文部省の報告書の中で小林³⁴⁾がその歴史的背景を含めて詳しく論じているのでぜひ御一読願いたい。数年前からこのシステムに関心を抱いていた筆者にとっても、ロマ・ブリエタ地震における挙動がどうであったかは大変気になることであったので、筆者としても関連する情報の収集に努めた。以下、その結果に基づき、筆者なりにこの世界に例のない施設の概要と、ロマ・ブリエタ地震の際の挙動を報告する。

8.1 消防用水道システム建設の経過

1906年のサンフランシスコ地震は、地震防災に関する強い関心を喚起したが、その具体的対策は構造物の本格的な耐震強化には向かわなかった。カリフォルニア州で耐震設計が行われるようになったのは今から30～40年前の1950年代以降のこととなる²⁵⁾。代って登場したのが、消防専用的高圧補助水道システム(AWSS: Auxiliary Water Supply System)の建設で、通常の都市水道システム(MWSS: Municipal Water Supply System)とは全く別個に、構造的にも機能的にも消防目的のために格段に強化された独立の水道システムを建設することであった。建物の耐震化よりこのような方策が選ばれた理由としては、耐震工学が未発達であった当時の技術的背景が考えられるが、1906年の地震による大火災の被害がいかに大きかったかを物語るものでもあろう。サンフランシスコ地震を語るとき、現在もしばしば“1906 San Francisco Earthquake and Fire”という表現が用いられることにもこの事情が表れている。

19世紀後半から米国で本格的な大都市が発達するに伴い、都市火災が頻発し、それはしばしば大火となって、防火対策が大きな社会的関心事となった。大火対策として十分な消防用水を確保するため、20世紀初頭にはニューヨーク、フィラデルフィア、ボルチモアなどで、消防専用的高圧水道が設置され、サンフランシスコについてもこのようなシステムの建設が提案されていた。

1906年の地震火災は、サンフランシスコの消防専用水道建設の実施に大きなはずみとなったが、巨大な建設投資を要するこのプロジェクトの推進に大きな役割を果たしたのが、この地震による財政負担の大きさから、火災リスクの低減の必要を痛感した保険会社グループであったことは興味深い³⁴⁾。こうして、AWSSは1913～1914年にかけて、ダウンタウンを中心とする第1期工事が完成、1936年には西側の住宅地へ拡張する第2期が完成、さらに1970年代にも拡張工事が行われ、現在も南部の工業地域へ向けて拡張中である。

1983年には、AWSSの機能を強化するため、AWSSの消火栓に接続して、地上に自由に給水ネットワークを組むことができる可搬型給水システム(PWSS: Portable Water Supply System)が開発された。後に述べるように、ロマ・ブリエタ地震によるマリナ地区の火災では、このPWSSがバックアップ機能を果たして、大火に拡大するのを未然に防いだ。

上記のように、消防用高圧水道システムは米国の他のいくつかの都市でも建設されたが、それらは時代とともに廃止される方向に向かって行った³⁵⁾。ひとりサンフランシスコのみがこのシステムを維持し、拡張と改良を重ねて現在に至っており、今では他に例を見ないシステムを作り上げて、消防活動の絶大な拠りどころとなっている。

8.2 AWSS・PWSSの施設

(1) AWSS

高圧補助水道システム(AWSS)は以下のような施設からなる。

(a) バイブライন・ネットワーク

AWSSは、次に述べるような、高規格の管路により配水するシステムとなっており、現在の管路延長は129 mile (206 km)に達する。ネットワークは、Fig. 20のように、マーケット通りの南北のダウンタウンを特に密に覆い、西部の住宅地や南部の工業地域に広がっている。

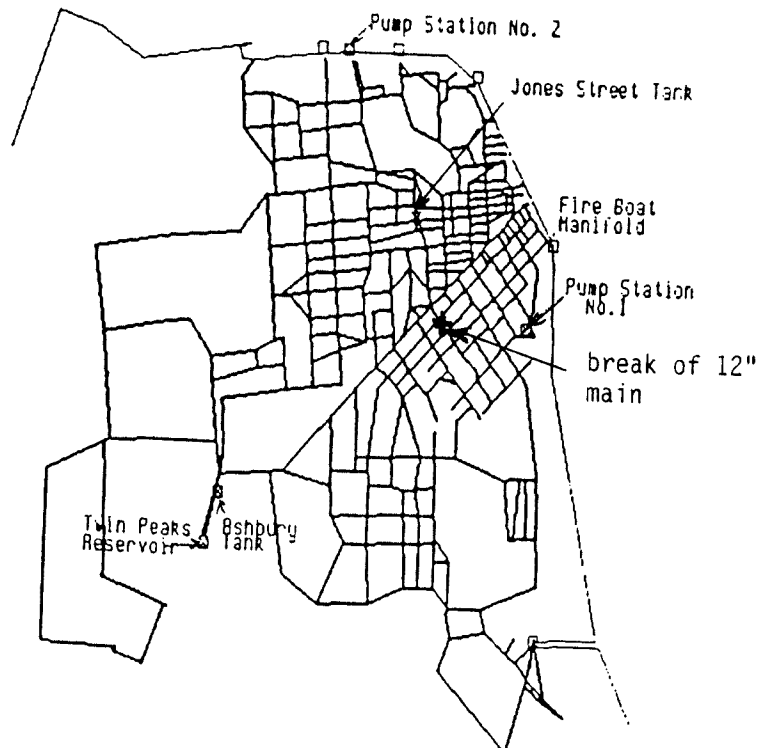


Fig. 20. Pipeline network of the San Francisco Auxiliary Water Supply System (AWSS)³⁵⁾.

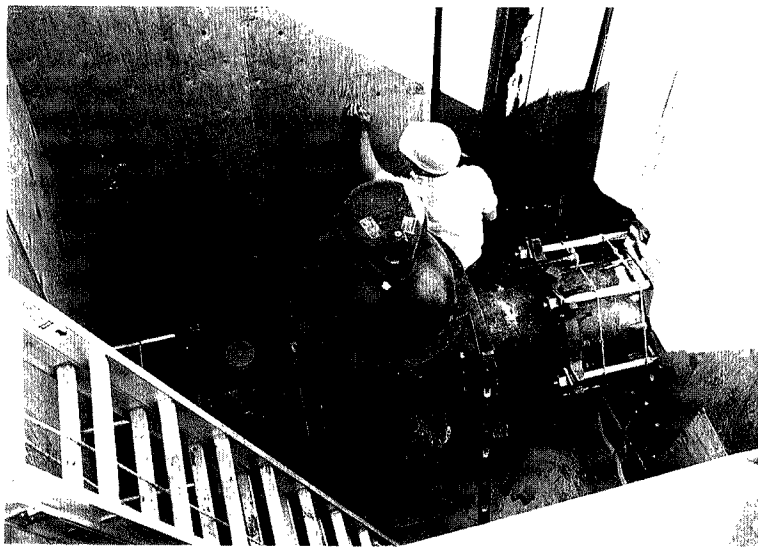


Photo. 27. Construction of extended section of San Francisco Auxiliary Water Supply System (AWSS).

Photo 27 に、現在サンフランシスコ南部で拡張工事中の AWSS の管路を示した。古くからある管路には 12 inch (30 cm) 径、肉厚 1 inch (25 mm) の鋳鉄管が用いられているが、現在新設に用いられているのは 12 inch 径、肉厚 0.625 inch (15.7 mm) のダクタイル鋳鉄管である。写真に示したように、継手は管路の新旧を問わず強固なタイロッドで緊結されている。これにより、328 psi (約 23 kgf/cm²) に水撃作用 (ウォーターハンマー) が重なった高圧に耐える構造となっている。さらに、埋設深さを通常の地盤で 5 m と

し、良好な地盤でも 3m, 軟弱地盤では 7m と、通常の埋設管よりかなり深部に設置することによって、管の防護を図っている。

Photo 28 に、AWSS のパイプラインに接続された消火栓（手前）と、都市水道（MWSS）の消火栓（向う側）が並んでいるところを示した。両者の規格の違いがよくわかる。

(b) 貯水池と貯水タンク

サンフランシスコの最大標高地点である Twin Peaks に1000万ガロンの貯水池を有し、ここからの配水により 2カ所の貯水タンク（Ashbury Tank: 75万ガロン、および Jones St. Tank: 50万ガロン）で圧力を調整して、それぞれ標高に従って設定された高区、低区に配水している。

(c) ポンプステーション

海岸の 2カ所にポンプステーションを持ち、水量が不足した場合にここから海水を圧送して貯水タンクに供給することができる。消防専用であるから緊急時に海水を用いることが可能な訳であり、このようなバックアップ設備を持つことが AWSS の大きな特徴である。ポンプステーションの能力は、それぞれ毎分 10,000ガロン（圧力 300 psi）である。元は蒸気機関であったが、現在はディーゼルエンジンで駆動される。

(d) 消防艇フェニックス

サンフランシスコ市は、ウォーターフロントや船舶の消防用の消防艇フェニックス（Phoenix）号を有するが、海岸にホースの接続口（manifold）が設置されており、これにより、フェニックス号から AWSS に海水を送ることができる。フェニックス号の送水能力は毎分 9,600ガロン（圧力 150 psi）である。

(e) 貯水槽

サンフランシスコ市全体で151基の地下貯水槽（容量75,000ガロン）を有する。それらは AWSS とは構造的に切り離されており、AWSS のバックアップの機能を持つ。これらの貯水槽は街路の交差点に設置されており、その外縁に沿ってレンガがはめ込まれて、場所を容易に確認できるようにしてある（**Photo 29**）。

(2) PWSS

PWSS の設備一式は、ホーステンダーと呼ばれるトラック（**Photo 30**）に装備されて、必要な現場に急行できるようになっている。ホーステンダーには延長5,000フィートまでの大口径（5 inch）の AWSS 規格のホースが搭載されている。これと **Photo 31** の示したようなジャクションユニット（可搬型消火栓：Portable Hydrant と呼ばれている）を組み合わせることにより、**Fig. 21** のように、地上に自由に配管ネット



Photo. 28. AWSS hydrant (right) and MWSS hydrant (left).

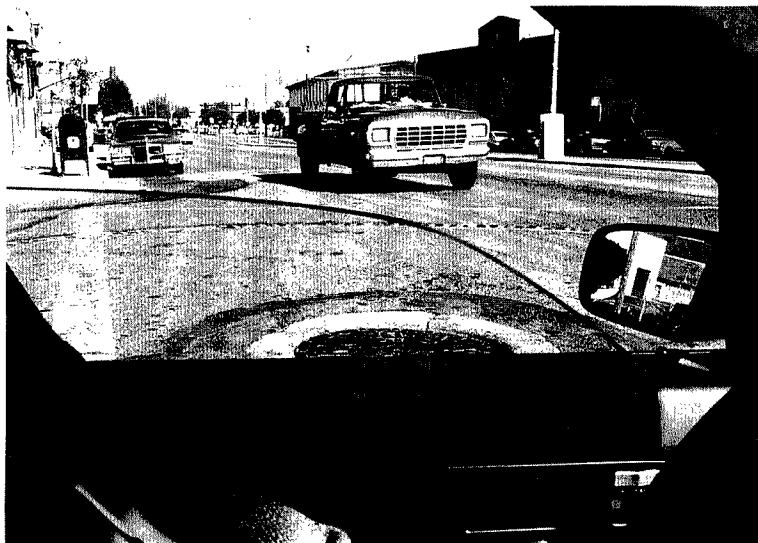


Photo. 29. A San Francisco street intersection showing the manhole and edge bricks of a cistern.



Photo. 30. Hose Tender of San Francisco Fire Department equipped with Portable Water Supply System (PWSS).

ワークを組むことができる。ポータブルハイドラントにはバルブが設けられているため、高圧を掛けたまま次々に新しいネットワークを組むことができる。

これらの設備一式を運搬するホーステンダーには固定式の高圧放水銃が備えられ、直接消火活動を行うことができる。

8.3 ロマ・ブリエタ地震時の AWSS・PWSS の挙動とマリナ地区の火災

ロマ・ブリエタ地震の際の AWSS の挙動と、それに伴う消火活動の概要を述べる。以下の記述は、Scawthorn and Blackburn³⁵⁾ による詳細な報告と、同文献の著者の一人である Blackburn 氏の直接のコメントに基づくものである。種々の事象や活動の時刻が述べられるが、地震直後の混乱した状況の中で、必ず

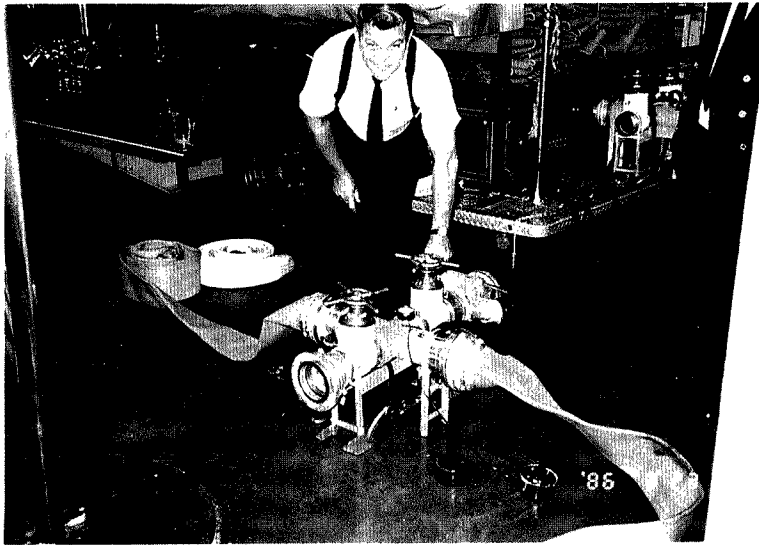


Photo 31. Portable Hydrant (set on the floor) and Hose Tender (behind): with Chief F. Blackburn, developer of PWSS.

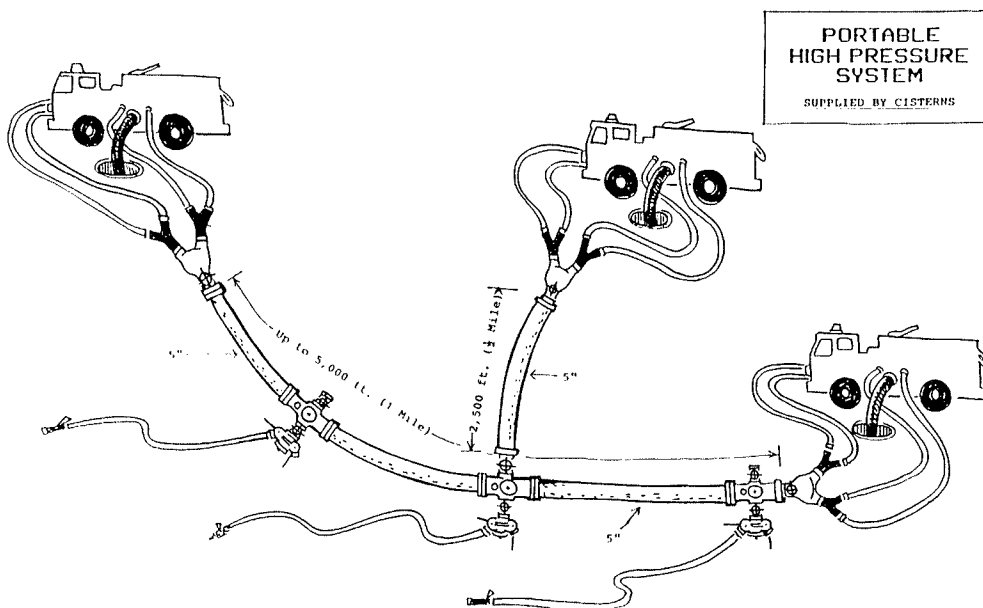


Fig. 21. Schematic illustration of the San Francisco Portable Water Supply System (PWSS).

しも正確な時刻が把握されているわけではないので、あくまで概略の展開を示すものと考えて頂きたい。

10月17日午後5時4分ロマ・プリエタ地震が発生。この地震により、マーケット南地区の1カ所で (Fig. 20 参照) で AWSS の 12 inch 本管が破壊した (Photo 32)。これにより、マリナ地区を含む AWSS 低区に配水する Jones St. の貯水タンクの水が失われ、高压配水を維持できない状態となった。

地震に続き、サンフランシスコ市北部のマリナ地区では倒壊した建物（主として木造アパート建物：5.1 (1)参照）からの出火により火災が発生、5時30～50分には消防隊が現場に到着したが、MWSS はマリナ地区での配水管の破壊により、AWSS は上記の本管破壊により、使用不能であった。この状況により、消防艇と PWSS の出動が要請され、6時30分頃には消防艇フェニックスがマリナ地区に接岸し、ホーステン



Photo. 32. Failure of a twelve-inch main for AWSS in South-of-Market District (photographed on 11/8/89).

ダー 2 台が現場に到着、フェニックスと PWSS が接続された。7 時頃から、フェニックスから送られる十分な海水を用いて、ホーステnderによる消火作業が始まり、約30分後には鎮火に至った。この火災により 7 戸が焼失した。

一方、AWSS の機能回復のための努力が続けられたが、管路の破壊カ所を特定し、その部分をバルブ操作で遮断したのが午後 7 時30分頃であり、午後 8 時からポンプステーションを起動して Johbs St. の貯水タンクに海水を送り、午後10時には AWSS の圧力が完全に回復した。

8.4 ライフライン系としての AWSS の挙動と問題点

(1) ロマ・ブリエタ地震時の AWSS の挙動に関する評価

1906年の地震を教訓として建設された AWSS にとって、今回のロマ・ブリエタ地震はその真価を発揮する最大の機会となったのであるが、ただ1カ所の本管の破壊により、マリナ地区の火災の急場に間に合わなかったのは誠に皮肉な結果である。しかしながら、この問題はもう少し掘り下げて議論することにより、AWSS の意義を再度確認し、我々にとっても有用な地震防災上の教訓を得ることができると考える。以下このような観点から、若干の考察を行う。

まず、今回の地震火災の経過を考えるに当り、AWSS のみを切り離して評価するのは適切とは言えないであろう。マリナ地区での消火活動の最後の決め手となったのは PWSS であるが、この PWSS の開発は、AWSS の延長線上で、その機能を強化するために行われたことに注目すべきである。すなわち、AWSS の存在が無ければ、PWSS もまた存在したかどうか疑問なのであって、この観点からすれば、AWSS の概念は PWSS の活躍によって生かされたと考えることもできるのである。すなわち、サンフランシスコの消防システムが持つ総合的な柔軟性が発揮されたものとして評価するべきであろう。

しかしながら、システムの主要施設である AWSS が正常に機能することが最も重要な要請であることは当然であり、その点で、ロマ・ブリエタ地震時の AWSS の挙動が大きな技術課題を残したことに変わりはない。まして、今回のマリナ地区の火災がこの程度の災害で収まったことにはいくつかの幸運が重なっている。特に、マリナ地区が海岸に近く、火災現場が消防艇フェニックスと PWSS によって到達可能な距離にあったことと、火災発生当時の気象条件が無風といってよい状況で、火災の拡大防止で重要な「時間との勝負」が強風下の場合と比べてはるかにゆるやかであったことが決定的であった。従って、これらの幸運な条

件が1つでも欠ければ、災害はより大きくなったであろうし、逆に AWSS が正常に機能し続けておれば、災害はさらに軽微なもので収まっていたであろうと考えられる。

このような認識に立ち、以下 AWSS に関する技術的問題を、主としてライフライン地震工学の観点から考察したい。それは、6.1で論じたベイブリッジの場合と同様、今世紀前半に建設されたこのシステムを耐震工学的に近代化する議論であり、これによって AWSS が本来的に持つ機能の意義を再確認することができ、また都市地震防災全体を論ずるうえでの参考にもなると考えるものである。

(2) 技術的課題

AWSS は、都市水道と比較して、管路の構造的規格や埋設深さなどの点ではるかに耐震的に設計・施工されたものである。しかし、これとても地震時に絶対安全であることを前提とはしておらず、万一管路が破壊した場合には、破壊カ所をネットワークから除外して水圧低下を防ぐことができるよう、要所に遮断弁が設けられている。すなわち、ライフライン地震工学におけるネットワークのブロック化の考えがすでに入られている。しかも、1906年の地震で水道管路の被害が多かったマーケット南地区に、特に入念に遮断弁が配置されている。

今回の AWSS の管路破壊は、まさにこの要注意とされた地区で起こったもので、その意味では、あらかじめその発生を想定しうるものであった。また、管路破壊カ所のバルブ操作による遮断も定められた手順で行われ、その後はポンプステーションからの海水で AWSS 全体の機能を回復している。これら一連の経過は、緊急時の AWSS のオペレーションのシナリオに含まれていたものであり、その限りでは、現代のライフライン地震工学の観点からみても、優れた機能を備えたシステムと言うべきである。

唯一最大の問題は、管路破壊カ所の遮断に2時間半という長時間を要したことである。そのために、マリナ地区の火災に関しては、AWSS は時間との競争に敗れることとなった。このように時間を費したのは、破壊を特定するのに手間取ったためとされており³⁵⁾、地下埋設管路の地震被害に共通の困難さがここでも現れたとみるべきであろう。

このように考えると、AWSS の地震時挙動とその制御に関する問題点は明かであろう。システムの状態を常に監視し、管路破壊が発生すれば、直ちにその場所を特定して、破壊した区間を遠隔操作によって遮断しうるような、制御システムを整備することである。それは、水圧センサー、地震計などの計測機器、計測値を時々刻々伝送するデータ通信装置、計測値を解析するとともに状況の診断と必要な措置を指示するデータ処理システム、およびネットワークの再調整を自動的に行う制御装置などから構成されるであろう。このような緊急制御システムは、現在では工業プラントではごく通常のものとなっているし、広域ネットワークを構成するライフライン系でも普及しつつあるもので、基本的な技術的障害は無いと考えられる。

ライフライン系が地震被害を受けた場合に速かな復旧を行うことは、都市地震防災上の重要課題で、そのために被害の早期検知のためのモニタリングシステムの重要性が最近議論されつつあるが、地震と同時に発生する火災に対処しなければならない AWSS のようなシステムでは、この問題は特に重要である。

AWSS が近代的な緊急制御システムを整備することの重要性は文献³⁴⁾、³⁵⁾でも述べられているが、以上の所論より、筆者もこの事を強く感ずるものである。こうした施策が早急に実施され、次の地震に際しては、AWSS がその万全の機能を発揮することを希うものである。またそれにより、徹底したバックアップとリダンダンシーの思想で整備されてきたサンフランシスコの消防システムが地震防災システムの一つの模範として実証されることを期待するものである。

9. む す び

ロマ・プリエタ地震の被害につき、筆者が直接調査を行った範囲で特に重要と考える項目に的を絞って論じてきた。緒論でも述べたように、この地震が持つ都市地震防災上の意味は多岐にわたるもので、筆者1人の力でそれらを網羅することは到底不可能である。その意味で、本文はロマ・プリエタ地震による被害の全

貌を伝えるものには程遠いが、一方では、文献1)の文部省報告書を、その後に得た知見も取入れながら補完する意味も含め執筆した。ロマ・プリエタ地震がもたらした教訓については、文献23)にも筆者の見解をとりまとめたので参照頂ければ幸である。

筆者が所属する防災研究所都市施設耐震システム研究センターでは、ロマ・プリエタ地震がベイ・エリアを中心とする都市圏にもたらした影響を重視し、都市地震防災の観点から、調査研究を続けている。それらについては、いずれ当センターから種々の形で報告できるものと考えている。

謝 辞

筆者がロマ・プリエタ地震に関わったのは、文部省の突発災害調査の研究代表者を命ぜられたことを契機としており、その折の経験が基本となって、現在も進行中の活動に繋がっている。突発災害調査の際に御世話になった多くの方々の御名前は報告書¹⁾に記載しているのでここで改めて挙げることはしないが、良い機会を与えて頂き、また多くの実りある討論行うことができたことに、改めて謝意を表したい。

本稿をまとめるに際しては、1990年5月1日～6月2日の間米国に滞在した折に収集した資料と情報をできる限り盛込むよう心懸けた。この期間の前半は、カリフォルニア大学バークレー校に滞在したもので、これは、同大学の旧友 A. Der-Kiureghian 教授の招きによる。この間、同大学の A. Astoneh, V. V. Bertero, B. A. Bolt, J. Kelly, J. Lysmer, S. A. Mahin, R. B. Seed 各教授からは、ロマ・プリエタ地震の影響について直接お話を伺う機会を得た。また、EQE Engineering 副社長 C. Scawthorn 博士からは、いつも変らぬ御協力を得た。滞米の後半は、都市施設耐震システム研究センターのスタッフと共に調査活動を行った。その間も米国の多数の方々の御世話になったが、特に USGS の M. Celebi, R. D. Borchardt 博士からは、本文の内容に関連する種々の情報を提供して頂いた。さらに、本文中ベイブリッジに関する新しい情報は、バークレーにおいて東京大学工学部の藤野陽三氏と共に A. Astoneh 博士の研究室を訪問して得たものである。これら関係各位に厚く御礼申上げる次第である。

最後に、この記事に最新の情報を盛込むため、防災研究所出版図書委員会には、締切日をかなり過ぎてから原稿を提出する無理なお願を受入れて頂いた。お陰で現時点で可能な限りの内容とすることができたことに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 1989年ロマプリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する研究、文部省科学研究費突発災害研究成果、No. B-1-3 (研究代表者：亀田弘行)、重点領域「自然災害」総合研究班、1990. 3.
- 2) 亀田弘行：1989年ロマ・プリエ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, 1989. 11, pp. 1-6.
- 3) Astoneh, A., Bertero, V. V., Bolt, B. A., Mahin, S. A., Moehle, J. P., and Seed, R. B., "Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake," University of California, Berkeley, Report No. UCB/EERC- 89/14, October 1989.
- 4) Earthquake Engineering Research Institute (EERI), "Loma Prieta Earthquake, October 17, 1989, Preliminary Reconnaissance Report," November 1989.
- 5) Plafker, G., and Galloway, J. P. (editors), "Lessons Learned from the Loma Prieta, California Earthquake of October 17, 1989," U.S. Geological Survey Circular 1045.
- 6) Lew, H. S. (editor), "Performance of Structures During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989," NIST Special Publication 778, National Institute of Standards and Technology, January 1990.
- 7) EQE Engineering, "The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, a Quick Look Report."

- 8) Dames & Moore, "The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake," a Special Report by Dames & Moore.
- 9) 国土庁防災局（監修）：1989サンフランシスコ湾岸地震（ロマプリータ地震）の記録，ぎょうせい，1990. 3.
- 10) 東京都：いつか東京にも？，ロマ・プリータ地震東京都調査団報告，1990. 2.
- 11) 鹿島建設株式会社：1989年10月サンフランシスコ地震（The Loma Prieta, California）被害調査報告書，1989. 11.
- 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. 11.
- 13) 佐竹健治・川藤 均・阿部勝征：特集ロマプリータ地震（M=7.1），地震学会ニュースレター，No. 3，1989. 11.
- 14) 大崎総合研究所：1989年サンフランシスコ地震（The Loma Prieta, California Earthquake of October 17, 1989）被害調査報告，1989. 10.
- 15) 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. 1.
- 16) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社：1989年10月17日ロマプリータ（LOMA PRIETA）地震調査報告書，1990. 1.
- 17) 損害保険料率算定会ロマ・プリエタ地震損保調査団：LOMA PRIETA 地震調査報告（1989.10.17サンフランシスコ地震），1990. 3.
- 18) 安藤雅孝・杉戸真太：震源・地震動，文献1）（文部省突発災害報告書），pp. 11-58.
- 19) USGS, "U.S. Geological Survey Strong-Motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989," Open-File Report 89-568, October 1989.
- 20) CDMG, "Second Quick Report on CSMIP Strong-Motion Records from the October 17, 1989 Earthquake in the Santa Cruz Mountains," October 25, 1989.
- 21) 柳沢栄司・佐藤忠信・森伸一郎：地盤震害，文献1）（文部省突発災害報告書），pp. 59-106.
- 22) The San Francisco Examiner, May 20, 1990.
- 23) 亀田弘行：ロマ・プリエタ地震に学ぶもの，文献1）（文部省突発災害報告書），pp. 339-346.
- 24) Seed, R. B., et.al., "Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake," University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-90/05, April 1990.
- 25) 南 忠夫・大井謙一・中埜良昭・林 正司・北原昭男・山本昌士：建築物，文献1）（文部省突発災害報告書），pp. 107-162.
- 26) U.S. Geological Survey, "Effects of the Loma Prieta Earthquake on the Marina District, San Francisco, California," USGS Open-File Report 90-253, April 1990.
- 27) 藤野陽三・篠 泉・小長井一男：土木構造物の被害—橋梁を中心として，文献1）（文部省突発災害報告書），pp. 163-216.
- 28) "Loma Prieta Earthquake, October 17, 1989," Earthquake Engineering Research Center News, Vol. 12, No. 2, University of California at Berkeley, May 1990, pp. 1-7.
- 29) Astaneh, A., "Analysis of Damage to the Bay Bridge Caused by the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989," 6th U.S. — Japan Bridge Engineering Workshop, Lake Tahoe, Nevada, May 7 and 8, 1990.
- 30) Caltrans 資料.
- 31) Moehle, J. P., and Mahin, S. A., "Implications of Nondestructive and Destructive Tests on the Cypress Street Viaduct Structure," 6th U.S. — Japan Bridge Engineering Workshop, Lake Tahoe, Nevada, May 7 and 8, 1990.
- 32) 亀田弘行・山崎文雄・高田至郎・田崎篤郎・八木高司：ライフライン系の被害，文献1）（文部省突発

- 災害報告書), pp. 217-270.
- 33) "Puzzling Drop in Commuters Between S.F. and East Bay," The San Francisco Chronicle, December 18, 1989.
- 34) 小林正美: サンフランシスコ市の地震火災とその都市の安全設計の歴史, 文献1) (文部省突発災害報告書), pp. 271-300.
- 35) Scawthorn, C., and Blackburn, F., "Performance of the San Francisco Auxiliary and Portable Water Supply Systems in the 17 October 1989 Loma Prieta Earthquake, Proceedings of the Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, May 1990.

EFFECTS OF THE 1989 LOMA PRIETA EARTHQUAKE

By *Hiroyuki KAMEDA*

Synopsis

The effects of the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989 are reviewed. Description is made on the basis of information updated as of May 1990. The paper is complete in itself, but it has been intended to supplement the reconnaissance report edited by the author*, which is more comprehensive in its coverage.

After the seismological aspects are outlined and general characteristics of the earthquake disaster are described, several specific topics are presented that are deemed important among the various features of the effects of the Loma Prieta Earthquake on infrastructures in its epicentral region and the San Francisco Bay Area. They are: slope failure and soil liquefaction, repair and retrofit of damaged and/or existing buildings, collapsed bridges including Bay Bridge, I 880 Cypress Street Viaduct and Struve Slough Bridge, impact on the transportation system of the Bay Area, and finally the performance of the San Francisco fire fighting system, particularly that of AWSS and PWSS.

* Kameda, H. (editor), "Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989 Reconnaissance Report," Natural Disasters Report supported by the Japanese Ministry of Education, Science and Culture, Japanese Group for the Study of Natural Disaster Science, No. B-1-3, March 1990.