

— 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. 都市型災害としてみたロマプリータ地震

片山恒雄 (Tuneo KATAYAMA)*

(1) 最初の印象

外国で起こった災害は、われわれが直後の報道から想像したこと、その後徐々に明らかになったことがずいぶん食い違っていることが多い。1989年ロマプリータ地震も、そんな例の1つである。

地震は、10月17日午後5時4分(日本時間18日午前9時4分)を少しまわった頃に発生した。当日の日本のテレビや夕刊が伝えたニュースのほとんどは、サンフランシスコ湾口にあるサンフランシスコとオークランドの両市を中心とした被害ばかりであった。刻々と送られてくるテレビを見ていれば当然そうなのだろうが、「都市化地域を大地震が襲った」「こんな被害が起こっていなければおかしい」とでもいった思い込みがあったような気がする。

「米国・西海岸の第2の都市で、国際観光都市でもあるサンフランシスコはパニックに包まれた」「市内中心部のビジネス街ではビル火災が発生、黒煙が空をおおった」「停電のため、サンフランシスコの地下鉄が約15分停車し、トンネル内で立ち往生した列車から、乗客が一斉に逃げ出し、パニック状態となった」実際には、これらのほとんどは誤報に近い。

翌19日の朝刊の記事はさらにセンセーショナルだった。「怒る大地、シスコ戦りつ」「巨大都市、混乱の極、闇の中、盗みや破壊」「無惨な街、市民生活マヒ、車社会に警鐘」「被害拡大、死者271人以上」「押しつぶされ

る車の列」「一夜明けた18日朝現在、高速道路の崩壊をはじめ建物の倒壊などによる死者は270人以上、負傷者は約600人をこす大惨事となった」

ロマプリータ地震の震央は2つあったともいえる¹⁾。その1つはテレビを中心とするメディアがつくりだした震央であり、サンフランシスコ市マリナー地区、ベイブリッジ、880号線サイプレス高架橋を結んでできる三角形の地域であった。

地震から2日たった現地時間19日の様子を知らせる20日の日本の新聞はかなり冷静さを取り戻している。「(サンフランシスコ19日)会社や学校、商店がほとんど閉まり、開いている食品店やスーパーマーケットには長い列ができてはいたが、街はパニックどころか落ち着いているといえる(東京新聞)」。それと同時に、都市型震災として、巨大都市東京への教訓は何だったかといった記事が増えている。「恐怖!! 地震の液状化現象、(東京湾岸は)埋め立て地中心に25%が危険地域」「都市機能『その時』『その後』『電脳』ダウンのシスコ」「シスコ地震3日目、情報社会休眠」

そして、近代都市が地震の被害にあったのだから、コンピューターや情報がらみの影響が大きかったに違いないという姿勢のレポートも目立ち始める。「アメリカの場合、コンピューターの中枢機能の地域分散が図られているが、日本では心臓部が東京だけに集まっているため、万一大地震が起こった場合、地方の端末まで全身マヒに陥る」という専門家のコメントや、「地震から3日目を迎えても、サンフランシスコ市内の中心部では停電が続く、コンピューターが動かず、ホテルや旅行の予約ができなくなる事態が続出。電話回線もパンク状態に追い込まれた。……中心街にある金融機関の大半も営業を停止

* 東京大学生産技術研究所教授

したままで」といった記事が典型的である。

(2) 実際の被害²⁾

ロマプリータ地震の地震学上の震央は、サンフランシスコから100キロ近くも南のサンタクルス山中である。長さ40キロの断層がほぼ中央から2方向に破壊したため、M7.1という規模の割には強い地震動が続いた時間は15秒程度と短かったが、震央の近くでは0.6gという大きな最大加速度を記録したところもある。

多少なりとも被害を受けた地域は約8000km²にわたり、最終的には、サンフランシスコ湾岸地域の10の郡が大統領により特別災害地域に指定された。

震央地域では斜面崩壊や住家倒壊などの従来型被害が多発した。華々しい被害こそ「メディアがつくった」震央地域で目立ったが、震災が地域や個人に与えた影響は、「地震学的」震央に近い地域のほうがずっと大きかった。サンタクルス郡の被害額約10億ドルは湾口地区の被害額40億ドルに比べれば小さいが、被害を吸収する能力は湾口地区の方が圧倒的に大きい。

応急的な対応はサンフランシスコ市ではおよそ2日間で終わり、10月20日には停電も解消、市内のほとんどの地区の活動は平常に戻った。しかし、震央に近い中小の市町では、地震後3日目になってもまだ組織的な復旧活動が始まっていないところも多かったのである。

サンフランシスコ、オークランド両市の大部分の構造物は、0.05gをこえる程度の地震動を受けたにすぎない。これは被害が起こり始めるぎりぎりのレベルであり、破壊的な揺れとはいえない。地震後の報道は、「サンフランシスコ壊滅」という印象を与えたが、実際には大被害を受けた地域はきわめて限られていた。構造物の被害を考える限り、湾口地域は地震の影響を最小で切り抜けたといえる。

大きくみれば、ロマプリータ地震は決して“The Big One”ではなく、“The Almost Big One”，またはせいぜい“The Little Big One”とでもいうべき地震だった²⁾。しかし、命をなくした人、すべてを失った人にとっては、“The Big One”だったのである。

地震による死者は62人（このうち41人は880号線サイプレス区間の2階建て高架橋の崩壊による）、負傷者3757人、倒産または休業に追い込まれた企業367社、家を失った人は1万2000から1万3000に達したが、この6割程度は震央に近いサンタクルス郡の被災者と思われる。総被害額は70億ドル以上と推定されており、100億ドルに達するという見通しもある。これらの数字には、雇用機会の損失による被害、企業の休業等に伴う被害などの間接被害は含まれていない。

都市型震災としてのロマプリータ地震はどうだったか。近代都市における交通ネットワークと電気的重要性、

震災時の防災関連機関の活動、特に情報伝達の重要性、災害時のマスコミのあり方など問題はいくつか出ている。しかし、今回の地震はそのほんの一部をかいまみせたにすぎない。

地震の影響を最も深刻に被ったのは、道路ネットワークであった。880号線サイプレス区間の2階建て高架橋の崩壊とバイブリッジの1径間の落下が特に大きな注目を集めたが、継手や支承部などが破損する等の軽微な被害を受けた橋は80をこえ、10橋が応急支保工を必要とし、構造物被害が大きい10橋は閉鎖を余儀なくされた。これにより複雑に都市化した「車社会」の地震に対する脆さははっきりと示されたのである。

サンフランシスコ湾岸地域には地震防災に関係する機関も多く、地震対策が最も進んでいるところと考えられていた。ロマプリータ地震の被害は地域的に限られていたし、二次被害も起こらなかった。それにもかかわらず、結果的に湾岸地域の災害対策機能を極限近くまで引き出すことになった。各機関はそれぞれの人的・物的資源をぎりぎりまで使わなければならず、もう少し大きな災害だったらどうなっただろうかと感じさせることとなった。この意味で、ロマプリータ地震が残した社会経済的・政策的な教訓の中には深刻にとらえるべきものがあった。

(3) 被災地域におけるラジオ放送³⁾

地震後、広い範囲にわたって停電したため、被災地区の人たちはしばらくテレビを見ることができず、ラジオ放送がほとんど唯一の情報源となった。サンフランシスコ湾岸地域には50局近くものラジオ局があるという。その中でKCBS局（CBS系）はKNBR局（NBC系）、KGO局（ABC系）とともに湾岸地域の3大AM放送局である。ここでは、地震直後から約2時間にわたるKCBS局の放送内容を追うことにより、被災地域でラジオ放送が果たした役割の一例を調べてみる。もちろん、KCBS局という1つのラジオ局の放送だけからすべてがわかるわけではない。しかし、KCBS-AM局は湾岸地域においてただ1つニュース報道のみを行う放送局であり、その報道は湾岸地域の人たちに大きな影響を与えたと思われる。

a) 球場からスタジオへ

KCBSはニュースタイムを放送中で、約30分後に始まるワールドシリーズ第3戦を中継するため、キャンドルスティック球場①（図一1参照、以下同じ）の様子を伝えていた。アナウンサーと解説者の3人は、「強い地震を感じた」「報告が入り次第知らせる」といつているが、大きな被害を伴う地震が起こったとは考えていない。「試合後にジャイアンツの選手のインタビューを予定している」「地震の方が大丈夫なら9時半まで聴取者の電話を



図一 放送に出てくる湾岸地域の地図（図中の番号は本文中の番号と一致している。「科学朝日」1990年7月1日号より）

受け付ける」とか話し、「KCBS ニュース、5時7分です」といったところでスタジオ放送への切り替えのため約1分間電波が中断する。

女性キャスター（ジャン・ブラック）の「KCBS ニュース、5時8分です」という声でスタジオからの放送が始まった。地震発生から3分半である。

KCBS 報道部の正社員は35～40人、市内で取材中の人、帰宅中の人、すでに家にいた人とさまざまだったが、結果的にはほとんどの人がその夜のうちに会社へ来たという。本局スタジオは、マーケット通りの北の端、サンフランシスコ湾に面するエンバカデーロ地区の41階高層ビルの32階にある（地図の●）。大きく揺れたうえ停電となったため、スタジオ内は大混乱、スタジオを代え、自家発電装置によって放送を始めた。

「大きな地震なので、ワールドシリーズの中継はしない」「ニュースラインに何人かがつながっている」といって、ジャンはまず、女性プロデューサーを呼び出す。この人は、「アルパニー②にいるが、横揺れが10秒から15秒ほど続いた」と、きわめて冷静にレポートする。電話は次にサンフランシスコ市内で③交通事故を取材中

の記者につながる。「揺れは激しかった。何回か地震は経験しているが、こんなのは初めて」といったあたりで、電話が切れる。3人目の KCBS の記者は、サンフランシスコ市南部④の自宅で地震にあった。「とにかくすごい地震だった。最低30秒から45秒続いたと思う。赤ん坊を抱えてドアの下に行った。近所の人みんな外へ出てきている」。これら3人のレポートからは、家が倒れたり、けが人が出ているという感じはない。

4人目に初めて聴取者⑤からの電話を取り上げる。2、3分も揺れ続けたような気がしたというが、被害があったという感じはまったくない。

「とても怖かった。オークランド市ダウントウン⑥の5階建てビルの3階にいるが、引出しはとび出す、棚からものが落ちる、机の上のテープが床に散らばる。とにかく怖かった。カリフォルニア大学のパークレー校に地震の規模を聞きに行く」。KCBS のアラメダ郡の局長である。ビルが大被害を受けたという雰囲気はない。

地震発生からおよそ8分、球場とスタジオを入れて7か所の情報が入ったが、どこも壊滅という印象ではない。

b) バートが止まった、震央は南？

地震発生から約8分半、バート（湾岸地域高速鉄道＝Bay Area Rapid Transit : BART）のコントロール・センターからニュースラインに電話が入った。「バートは全線が止まっている。乗客が降りられるように電車を最寄りの駅へ動かそうとしている。湾の下に1編成の電車がある。オークランドの中心部を除いて、システム全体で停電している。補助バッテリーで電車を動かそうとしている。1時間のうちにバートに乗ろうとしている人は、しばらく待つて欲しい」。構造物事故は小さなものが1件だけ、電源さえ戻れば運行を再開できそうなことなどが伝えられたところで、「あっ、ちょっと待つて……動いています！ よし、電車が動き出しました。動いているのが（表示盤に）見えます。湾の下には1編成しか電車はありませんので、まもなく外に出せると思います」というニュースが飛び込んでくる。駅が混乱しているので、少なくとも30分は乗りに来ないで欲しいとはいうものの、職員の話し方は大災害という印象は与えない。「野球中継が戻ったら、それでも聴いてください」といった調子である。

「こういうときには、州の緊急対策局と連絡をとることになっているのでは、地震のマグニチュードについてなにか聞いていませんか」というキャスターの問いかけに対して、「まだ調べていません。ちょっと待つてください」。

地震発生から約11分、サンタクララ郡局⑦の記者からサンフランシスコより南の最初のレポートが入る。「まだまわりの状況はわからない。ちょうど12階のエレベーター

ターに乗ろうとしていた。ドアはまだ開いたままだ。電気は切れるし、揺れがあまり激しいので、みんな死ぬかと思った」「サイレンがあちこちから聞こえる。1階まで降りて来たが、建物には被害がないようだ。とても信じられない。本当に死ぬほど怖かったのに……」

続いて、「サン・ラファエル⑧はひどく揺れたが大丈夫そう」「キャストロ・パレー⑨では電気も電話も働いている。建造物の被害もないようだ」「(州都) サクラメント⑩ではブラインドやドアがガタガタした程度」という3本の報告を受ける。パートに乗っていた記者が、「パニックは起こらなかった。特に、地震が起こったという放送があってからは、乗客はとても冷静だった」とマッカーサー駅⑪からレポートしてきたのに対し、KCBS局のあるビルのすぐ外から、「地震のとき多少のパニックがあった。余震を恐れた人たちが20人ほど閉店した銀行のビルに逃げ込もうとしたが入れないでいる」と伝える。

「キャンドルスティック球場の観客は4万5000人ぐらい、試合開始に向かって観客が増えているところだった。選手たちはグラウンド内でうろろろしており、停電のため観客にはなんの情報も伝えられていない」といったやりとりの最中に、球場のアナウンサーが「余震があった」といい、その数秒後にジャンが「スタジオでも余震を感じた」という。「地震については素人だが、震央はここより南だ」

地震のとき自動車を運転していたアラメダ市⑫の女性と、サンフランシスコ市の少し南、コルマ⑬のスーパーで買い物中だった女性のレポートが続く。2人ともKCBSのスタッフである。アラメダ市では揺れは激しかったが大被害はない、またスーパーは商品が床にめっちゃめちゃに散らばりひどく混乱した。しかし、建物が倒れたといった状況にはなっていないようだ。

すでに地震発生から22~3分経過したが、まだ地震の大きさも震源の位置もわかっていない。

c) 被害報告が入り始めた

ヘリコプターからのレポートが入った。「パークレー⑭でかなり大規模な火事が起きている。交通も混乱しているようだから、近づかないように」。はっきりした地震被害の最初の報告である。

サンタクララ郡⑮の鉄道の駅から、「被害を調べるために鉄道が止まっている。町中は大混乱のようだ。建物が倒れてはこりが舞い上がり、火事と間違えるほどだった。停電のためコンピューターが動かず、乗車券が発券できない」という報告が来た。被害は南にいくほどひどいらしい。

「停電が続いており、試合ができる状態ではない。地震のときは、中継車もトラックもグラグラ揺れ、多数の

観客が顔色を変えてゲートから逃げだしてきた」と球場から伝えてくる。

オークランド市のダウンタウンにある市内で一番高いビルの23階から、聴取者が電話してきた。「地震後数分して、サンフランシスコ市内の数か所から、煙が立ちのぼるのが見えた。地震で倒れた建物の砂ぼこりかもしれない。いまも4,5か所ほど、煙が見える。2か所は比較的大きく、特にベイブリッジのほうのは、かなりひどい火災のようだ」

地震発生から約30分経った。地震に備えて用意してあった録音テープが初めて流される。「地震時の緊急安全メッセージです。停電になったら、懐中電灯しか使わないように。電気をつけたり消したりすると、洩れているガスに引火することがあります。マッチ、ライター、ローソクは使ってはいけません。詳しい情報は電話帳の最初に出ています。ラジオをつけたままにして、これからの情報に注意してください」

このような緊急放送用メッセージは、地震発生直後の10分間に対して6種類用意されていた。それまで半時間にわたる現場からの生々しいレポートに対していかにも間が抜けた感じは拭えない。

d) 高速道路の崩壊

5時35分、ヘリコプターから、最悪の被害が飛び込んでくる。「(インターステート880号線の)サイプレス区間の2階建て高速道路⑯がめっちゃめちゃに壊れている。驚くべき光景だ。壊れた区間の上には20台から25台の自動車が見える。高速道路の上段が下段の上に崩れ落ちたようで、その間に何台の車が挟まっているかは見当がつかない。緊急車両が数台は見えるが、周辺はひどい交通渋滞で、救援の車は容易に現場に近づけそうもない」。スタジオとのやりとりは3分ほど続くが、「最悪の被害ですね」というジャンの声も興奮の色を隠せない。

ゴールデン・ゲート橋の少し北のミル・パレー⑰から、「自動車を運転していたが、地震には気づかなかった。FMラジオが『地震です』と切って切れた。電柱のトランスが7つ8つ青白い火を吹いているのが見えた」という冷静なレポートが入る。

スタジオから「州の緊急対策局の発表によれば、マグニチュード6.9、震央はホリスター⑱」。地震発生からこれこれ35分経っている。

フェアフィールド⑲からの報告では、たいした被害は起こっていないようだ。電話がサクラメントにある州の緊急対策局とつながる。「パークレー校の発表によると、サンベニート郡で建物が相当ひどい被害を受けているようだ。電話が殺到してどうしようもない」。キャスターの「サイプレス高架橋が崩れ落ちたことを知っているか」という問いに対して、「そっちの方が情報は多いのでは

ないか。救援はアラメダ郡とオークランド市の問題だ。聴取者の皆さん、不要な電話はかけないように」と、ぶっきらぼうな答えが返ってくる。緊急対応の中心となるべき部局、それも地震の直接の影響を受けていないところでさえ、役に立つ情報はほとんどもっていない。

マルチネス⑳では、家具が倒れたり、壁に多少のクラックが入った程度の被害らしい。

「ワールド・シリーズ第3戦は取りやめになるだろう。球場はほとんど空になった。ホームベースの後ろにパトカーが止まっている。沿岸警備隊の大型ヘリが飛んでいるのが見える」

スタジオから「サンフランシスコ市の消防局職員は、非番の人たちも含めて、全員消防署に集まって欲しい」というアナウンス。地震発生から約45分、市の公的なメッセージとしては、これが最初である。

ヘリコプターから、「トレジャー島㉑の上空にいる。ベイブリッジの2階部分が30ftほど1階に落ちている。(サンフランシスコに向かう)2階にはほとんど車がない。(オークランドに向かう)1階の車は動きがとれずにいる」というニュースが伝えられる。

ダブリン㉒ではたいした被害は起こっていないようだ。ソノマ郡の西の方㉓の聴取者によれば、「けが人が出たという話は聞かない」

どうやらサンフランシスコ、オークランド両市より北では、たいした被害は起こっていないようだ。

地震発生から約50分、被害が大きいというサンベニート郡の郡庁と連絡がつく。ほとんど情報は集まっていないようだ。「死者の報告はない。わかっているけが人は1人。ガスや水道はかなり被害を受けているもよう」

サンフランシスコ市庁舎にいた記者に電話がつながら。「地震のとき悲鳴をあげた人も多く、パニックに近い状況だった。市庁舎の建物そのものの被害はそれほどでもない。地震とともに停電になった。建物の外は、壁のしっくいや外装が落ちてほこりがもうもうと立っていた。通りの電話はどれも、なかなかつながらなかった。ビルの壁などの軽い被害はあるが、ひどい被害は見当たらない。信号は全部消えている。交差点はどれも混雑しているが、市民は驚くほど礼儀正しい」

e) 地震発生から1時間

約1時間の放送の後、発電機の燃料パイプが詰まったため、再び20分近く放送が中断した。6時19分頃、KCBS局が入っているビルの非常用発電機に切り替えて放送が再開された。

「市内でレンガ造りのビルの壁が崩壊し、下敷になって死者が出たもよう」「ベイブリッジのオークランド側料金所付近数百メートルにわたって舗装がめちやめちやに壊れている。30cmくらいの割れ目ができ、20センチ

以上の段差が生じている」。そしてやっとマリナーナ地区㉔からの報告が入る。「ベイ通り沿いで建物が炎上中。3,4階の建物がいくつか崩壊し、車が倒れた建物の下敷になっている。道路に割れ目が走り、地域一帯にガスの臭いが立ちこめている。ひどい被害だ」。続いてスタジオから、「現在のところ、マグニチュード7.0、震央はサンタクルスの東北約10マイル㉕」と報告される。

地震が発生してから約1時間半、880号線の崩壊、ベイブリッジの落下、マリナーナ地区の火災と建物倒壊という、サンフランシスコ、オークランド両市での3つの大被害が出そろった。震央に近い南部地域の被害はほとんどわかっていないが、湾口付近の被害の全容がほぼ明らかになった。

f) 増える生活情報

地震から1時間半たつと、被害報告だけでなく生活情報がだんだん増えてくる。

「PG & E社(パシフィック・ガス・アンド・エレクトリック社)のガスや電気がストップしている。不要不急の電話は使わない」「サンフランシスコ国際空港は閉鎖されている。壊れたガラスの破片や倒れた機器などで、管制塔は足の踏み場もない。停電のため、バッテリーを使って管制業務を続けているが、到着便はすべてよその空港へ回している。滑走路に異常はないが、空港は少なくとも今日中は閉鎖」「PG & E社のアラメダ、コントラコスタ両郡の需要家80万のうち16万が停電中。職員はオークランドの事務所に出社して欲しい。ガスよりも電気の方が深刻な影響を受けているが、明朝までには復旧できる見通し。ガスも電気も使えるところは使ってよい。ガスの臭いがしないかぎり、元栓は閉めないように。元栓を閉めると復旧に時間がかかる」「(州の緊急対策局から)州としては必要な援助をする用意がある。サンベニート郡の被害がひどいらしい。混乱のためか、まだ援助の要請は来ていない。州の国防軍が召集された」「マリナーナ地区の火災は延焼中。大混乱が続いている。水はなく、電話もきわめてつながりにくい。どこもかしこもカメラマンでいっぱいだ」「安全確認のためサン・マテオ橋は閉鎖中、ゴールデン・ゲート橋は通行できる」。

午後6時45分頃、「交通渋滞がひどい。暗くなって周りがよく見えなくなった」

交通に関係した情報も増える。「サンフランシスコとオークランドの間にフェリー・サービスが行われている」「パートは点検車両だけを走らせている。点検に1時間から1時間半かかる見込み。オークランド側では代替バスのサービスをしている」「ベイブリッジは数日間通行不能となろう」「(パシフィック・ベル社から)電話を使わないように。はずれた電話器を元に戻さないと復旧が遅れる。電話帳の初めに、地震のときの心得がま

とめてある。余震があるかもしれないので、切り取って持っているが便利。電話システムは基本的に働いているが、使用量が異常に増えているので、かかりにくい場合がある。受話器をとってから発信音が聞こえるまで、しばらく時間がかかるだけ」

地震の発生からおよそ2時間たった。

「キャンドルスティック球場は真っ暗になってきた。球場内はからっぽになったが、6万人以上の観客のほとんどはまだ球場の周辺から動けない。ひどい交通渋滞だ」「マリナー地区の四つ角の1軒は燃えつきた。両隣へ延焼中。消防車5台が消火作業中」「交通信号が消えている。聴取者は家にいて欲しい」「死傷者についても、救援活動についても、まだ正式なレポートはない」

7時14分、地震が起きてから2時間10分たった。「赤十字がマリナー中学校に避難所を設営している。今夜家に帰れない人がサンフランシスコ市内におよそ26万人いると思われる。これらの人たちに食べ物を提供する救護所をいくつかほかの場所にもつくる予定」

KCBS局は、このような災害放送を10月21日(土)の午前5時までCM抜きで84時間にわたり放送し続けた。

g) 震災時のラジオ放送

廣井脩⁴⁾は、「災害が起こったとき、被災地に向けての情報はラジオが適しているだろう。テレビはむしろ被災地の外に向けて情報を発信するメディアだ」といっている。今度の場合、電話の基本システムが壊れなかった、その程度の地震だった。しかし、携帯電話1つを持ってあちこちに散っている記者がもつ機動性の高さは特に印象深い。

「パークレーの火災」「2階建て高速道路の崩壊」「ベイブリッジの落下」という大きな災害はヘリコプターからレポートされている。そしてこれらの絵が繰り返しテレビで報道されたのである。一方ラジオの場合には、1人の記者と1つの携帯電話、1人の聴取者と1つの受話器から入ってくる、ごく身のまわりの状況の積み重ねが、災害の全容を徐々にではあるが確実につくりあげていく。KCBSの放送内容は、むしろ「たいした被害ではない」という報告の方が多い。ロマプリータ地震の場合、そうした中から、情報を送る側と放送を聴く側が、「怖かった」「すごかった」という気持を共有しながら、決して壊滅的な地震ではないという、被害の全体像をかたちづくっていったのである。

KCBS局の放送には聴取者からの情報がずいぶん入っているような気がする。ところが、聴取者には30秒くらいしか話させておらず、記者には2,3分はしゃべらせている。また、1回のレポートには1つの情報、ひどい被害の報告の後には短い無被害または軽被害の報

告というパターンには、かなり意図的なものを感じる。

災害報道では、記者や聴取者からのレポートをつないでゆくアンカーパーソン、この場合はアンカーウーマンの責任は大きい。東京などに比べれば密度が低く、わかりやすい都市構造ということもあるのだろうが、自局のサービスエリアを熟知しているようすがうかがわれる。しかも、次々と飛び込んでくる新しい情報にきわめて的確に、科学的に対応しながら、「私も怖かった」という人間性を感じさせるコメントをさりげなく入れるなど、キャスターの知性とパーソナリティーの大切さを感じないわけにはいかなかった。

(4) 情報社会の震災

a) 緊急対策にかかわる情報

ロマプリータ地震は、既存の防災計画や応急対策計画がどの程度有効かを測るよい機会を与えたと考えられている。

サンフランシスコ市では、地震が起こってすぐ警察・消防・救急指令システムのコンピュータが、オーバーロードと停電のため機能しなくなった。したがって、部局間が連絡を取り合った総合的な緊急対応はほとんどなされていない。今回の地震は、個々の部局がそれぞれ独立に最善を尽くすことで対応可能なレベルだったということもできよう。

マリナー地区でも、警察と消防の協力はあったが、建築局や土木局と警察の調整活動はほとんどなかった。ライフラインの復旧に優先度を与える必要がある場合などにおいては、特に関係部局間の情報連絡が不足して困ったようである。

自治体の緊急対応においては、平常時から災害対策を専門に考える部局の問題と災害時に実際に緊急対策本部を設置するスペースの問題がある。

サンフランシスコ、オークランド両市とも、常置の部局としてOES(=Office of Emergency Services)があるが、職員の数サンフランシスコ市で2人、オークランド市で3人である。一方、緊急対策本部(EOC=Emergency Operations Center)については、サンフランシスコ市では消防指令センター内の可能なスペースを使って設置されることになっている。今回の地震では、市庁舎の近くの消防署内の、いつもは署員の仮眠室に使われている20畳くらいのスペースがEOCとなった。オークランド市では、消防指令センターの2階をEOCに当てることになって必要な設備を設置中であった。いずれにせよ両市ともEOCの専用スペースはもっていなかった。

サンフランシスコ市のEOCは、先に述べた理由できわめて限られたスペースしかなかったため、市の各部局の代表がそこに詰めるのは物理的に不可能であったう

え、消防局の業務のじゃまにもなった。消防も警察も独自のヘリコプターをもっておらず、EOCの情報源は主としてテレビおよびラジオであった（これはサンフランシスコ市に限らなかったようだ）。

EOCは、十分なスペースと情報ネットワーク、それに自前の電源をもつ必要がある。きちんとした指令・管理組織図を用意しておき、EOCに集まるべき必要最小限の代表者を明確しておかなければならない。また、EOCはマスコミや住民と直接対応する機関ではないことを、十分認識しておくべきであろう。EOCは緊急対策の作戦本部であるにもかかわらず、マスコミ対応に多くの時間を割かざるを得ない状況になったようである。

ロマプリータ地震は、カリフォルニア州の一部に影響を及ぼした「局所的な災害」であった。したがって、緊急対応の責任は、あくまでも郡の範囲にあった。カリフォルニア州内の災害に対する緊急対応は、州のOES（サクラメント）、州を6つのブロックに分けた地区のOES（Regional Office of Emergency Services）、そして各郡・市町のOESという階層構造で行われる。今度の地震の被災地域の大部分は、同一のブロックに属していたにもかかわらず、この階層構造を通して情報の交換がなされた。防災関係機関の人の中には、これが非能率であったという意見もある。

このことも影響しているのか、KCBSのラジオ放送からもわかるように、地震の発生後1時間半たっても、州のOESにはどこからも救援の要請が来ていない。災害救援の中心となるべき機関は、今後は要請を待っているだけでは不十分であり、「トラックが何台用意できる」「医師が何人派遣できる」「エンジニアが何人いる」といった情報を積極的に提供するような、セールスマン的な姿勢をもつことが必要という反省の声が聞かれた。

b) 交通および救急医療にかかわる情報

地震直後の交通や救急医療では、情報の問題が最も大切になる。今回の震災の場合、停電に加えて緊急対応の手続きが十分考えられていなかったことが、大きな課題として指摘されている。

道路や橋の交通規制においても、情報の混乱が報告されている。たとえば、ベイブリッジの1径間が落下したことは、応急対策にかかわった人たちのごく一部しか知っておらず、現場で実際に交通規制に当たった人たちには十分な情報が伝わっていなかったという。その結果、地震発生後30分にわたって、自動車は落下したベイブリッジへ向かい続けた。

ベイブリッジの南でサンフランシスコ湾をわたるサン・マテオ橋とさらに南のダンバートン橋の交通規制にも混乱があった。サン・マテオ橋は地震直後に閉鎖されたが、安全点検の結果、5時間後に通行が許可された。

その後、保守点検のグループがいくつかのボルトが緩んでいることを発見したため、さらに12時間後、すでに何千台もの自動車が通過した後で、再び閉鎖された。しかしこの際、橋の安全性について技術者の意見が一致せず、サクラメントにいた責任技術者が、現場を見ることなしに再度通行可能と判断している。ダンバートン橋は、橋の上を簡単にパトロールしただけで、エンジニアのきちんとした点検のないまま24時間にわたり交通に供され、その後いったん閉鎖されている。

救急医療に関連しても、情報にかかわる問題がいくつか浮かび上がっている。たとえば、①救急要請を受け付ける機関が統一されていなかったために混乱があった、②サンフランシスコ市は49台の救急車をもっていたが、コンピューターがダウンしたためそれらの動きを管理することができなかった、③周波数が違うため、協定に基づいて援助にやってきた救急車と無線連絡ができなかった、④どの病院が使えるかという情報が集まらなかった、救急車もどこへ運ぶべきかを病院と連絡できなかった、⑤要請に応じて出動した救急車が現場に着いてみると不必要ということが多かった、などである。

これらの緊急対応の混乱は、どれも比較的単純な原因で起こっており、「複雑化した情報社会」の問題といえるのは、「コンピューターのダウン」程度しかない。かなりの部分は、災害前に「災害発生時の手続き」を取り決めておくことで解決できたと思われる。

c) 企業における情報

コンピューターによるデータ処理は、現在では多くの企業の死命を制するまでになっているが、特に金融業ではその重要性が高い。データ処理施設の被害は、ほとんど停電による。パシフィック証券取引所は地震の翌日電気なしで立会いを始めた。取引はローソクの灯のもとで行われた¹⁾。

ファースト・ネーションワイド銀行でも、地震後に停電、コンピューターのダウン、データ処理の停止が発生した²⁾。地震後すぐに、①地震発生時に処理中だったデータの整合性の確認、②送信中または受信中のデータが正確だったかどうかの問い合わせ、③東岸の管理センターに状況報告および支援要請を行うための音声通信の確保、が行われた。いつもならカリフォルニアで行われる業務のかなりの部分が、東岸のニュージャージーで取り扱われた。結果的には、失われたデータはなく、地震発生翌朝には全国のすべての支店でデータのアップデートを終わった。サンフランシスコ市の南にあるデーリーシティのデータセンターは3時間半にわたる停電の影響を受けた。センター内の会議場スペースが地震発生時の緊急対策本部室として機能できるように準備されていた。直接の影響を受けた顧客は、停電した地域の支店お

よび ATM を使っている人たちだけだった。

データ処理センターの被害の実態は、アメリカの研究者にとっても不明のところが多いようである。これは、大きな被害があっても公表したくないという企業の姿勢が強いためである。しかし、これから情報化がますます進展することを考えると、数少ない実際の経験を共有することはきわめて重要と思われる。これまでも指摘されていたことではあるが、ある種の機器は完全に固定するより、キャスターにより適度に動けるようにしておいた方がよいという見方もある。また、コンピューター本体や重要な周辺機器の耐震性よりも、テープやカートリッジ用のラック、ファイル・キャビネット、本棚、事務機などの家具の転倒のほうが、業務の再開に大きな影響を及ぼしている場合も多い。

今回の地震では、湾岸地域の電話システムは基本的に壊れなかった。もちろん、使用量が異常に増えたため、つながりにくいという状況は発生した。一般的にいって、ふつうの家庭用電話および携帯用電話がそれなりに機能したのに対し、複雑な交換機能をもつ大きな組織の電話の方に問題が多かった。特に停電が起こった地域にあって非常用電源をもたない機関の PBX (Private Branch Exchange) の機能停止の影響は大きく、その機関内のすべての内線・外線がつながらなくなった。また、何か所にも分かれて事務所や工場をもつ大企業などで、4桁または5桁の番号を使って企業内の呼び出しが直接できるシステムをもっていたところでは、電話局で交換が行われるため、電話局の混雑の影響を受けてなかなか回線がつかないという問題があった。災害時に内部での情報交換が重要な機関では、内線が全電話システムの混乱に巻き込まれてしまうという事態はきわめて好ましくないことといえよう。

(5) 社会経済的インパクト

a) 経済的な影響

サンフランシスコの連邦準備銀行の1989年11月の報告によれば、湾岸地域は1年に1250億ドル相当のものやサービスを生み出しており、これはカリフォルニア州の1/4、全米の3%に当たる。被害総額は70億ドルから100億ドルに達すると思われるが、さらに増える可能性がある。

産業施設の被害は一般には軽微であったが、非構造的な被害により生産活動が続けられなかった例が報告されている。大企業の中には、最高で5000万ドルに達する被害があったと報告しているところもある。被害は湾岸地域の総資産の1%程度と試算されている。

PG & E社の経済アナリストも、総被害額は地域の総資産に比べてきわめて小さく、地震後12か月の収入減は地域の総生産額の1%以下、地震被害によって仕

事を失う人は地域の総雇用数約300万の0.数%にすぎないものと推定している。また、1990年度には、連邦政府から約30億ドル、州政府から約10億ドルが復旧のための財源として投入されるものと思われ、地域経済、特に建設業には大きな刺激を与えることになろう。

すでに述べたように、産業界で最もひどい影響を受けたのは小企業であった。全米の15%から20%を占めるコンピューター企業は地震後1日か2日で通常業務に戻っている。

サンタクルスの場合、商業活動の中心地区が被害を受け、250の企業と2000人の就業者が影響を受けており、中心地区の30%は再建設が必要となっている。サンフランシスコ市のサウス・マーケット地区では、200から300の小企業が倒産または一時的休業に追い込まれている。

小企業の倒産に加えて、交通システムの途絶、住家の被害は、低所得者や高齢者に特に大きな影響を及ぼした。

地震発生から3週間後の時点で、州の雇用開発局が湾岸8郡の数値として発表したところによれば、地震後の1989年10月23日の週に「初めて完全失業」と申請した人の数1万3423は前年同時期の64%増であった。地域別にみると、サンタクルス郡では317%の増加を示した。しかし、湾岸地域全体には、約300万の雇用があるとみられており、巨視的にはそれほど大きな影響を及ぼすものとはなっていない。

b) 社会一般に対する影響

道路ネットワークの被害、特にベイブリッジが1か月にわたって閉鎖されたため、湾岸地域の交通体系は大きな影響を受けた。10月23日、パートはラッシュ時の車両を増やすとともに、24時間運行を開始した。11月初旬の段階で、パートは1日に平均34万5000人の乗客を運んだが、これは地震前に対して58%も多い。

交通体系の変化に応じて、特にサンフランシスコ市での就業の形態が変化した。約3000人が市内で働く大企業では、フレックスタイムを大幅に取り入れるとともに、湾の東岸に住む社員のためにバスをチャーターしてパートの駅まで運んだ。カリフォルニア大学サンフランシスコ校は、職員1万1000人（うち、東岸から通っている人1600人）に対して、通常の1週5日、1日8時間勤務を4日10時間、または週末勤務に変えることを勧めた。

地震を機会に一段と注目を浴びようになったのが、telecommuting、すなわちパソコンやFAXを使った在宅勤務である。地震の前から、このような動きはあり、たとえばパシフィック・ベル社では、2万人の事務職の約5%が1週間に少なくとも1日はtelecommutingを実施していたと推定されているが、地震後この数は大幅

に増えたもようである。

(6) 都市型震災への教訓

震災のような広域災害をいくつかのキーワードだけでまとめるのは難しい。都市震災の観点から思い切って主観的にいうならば、「情報」「交通」「電気」「成熟社会におけるメンテナンス」の4点を挙げることができよう。

「ロマプリータ地震は Lucky Earthquake だった」という声がある。地震の規模の割に継続時間が短かった。(サンフランシスコやオークランドでは)地震動の強さも構造物に広く被害を及ぼすレベルには至らなかった。暗くなるまでに2時間ほど余裕があった。延焼火災が1件ですんだ。電話システムが基本的に生き残った。8月に大がかりな州レベルの震災訓練を実施したばかりだった。9月21日にサンフランシスコ地区に480人、ロサンゼルス地区に350人を集めて、建物の被災度判定の講習会を開いていた。これらの人たちが地震後にプロのボランティアとして大活躍した。さらに、ワールド・シリーズ第3戦をテレビでみるために多くの人が早めに帰宅しており、オフィスや道路にはいつもの夕方のようにたくさんの方がいなかった。

したがって、先に挙げたキーワードのいずれもが、その潜在的な問題の大きさをかいまみせたにすぎない。都市化の進んだ地域の構造物は、ほとんど無被害ですんでいる。地震直後の緊急対策は必ずしも十分な調整のもとで行われたとは考えられないが、「それでもなんとかあった」のである。サンフランシスコ市の中心部では丸2日にわたる停電が続いたが、コンピューター等の機能停止による波及被害は最小限にとどまった。

しかし、州・郡・市町の間の情報連絡はうまくいったとはいえ、被害情報もなかなか集まらなかった。湾岸地域は震災に対する備えが十分に進んでいるものと考えられていた。それにもかかわらず、あの程度の地震で緊急対策能力をほとんど最大限近く引き出さなければならなかったところに、大きな問題が残った。

今度の地震は、都市化した地域がいかに交通システムに依存しているかをあらためて認識させることになった。まさに湾岸地域のライフラインともいべきベイブリッジの落下は、地震後約1か月にわたって地域の活動に大きな影響を与えた。そして再開後も多数の人たちの通勤や勤務形態に長期的な変化を与えているように思われる。

ベイブリッジの落下よりも社会的にずっと大きなインパクトを及ぼしたのは、880号線サイプレス区間の2階建て高速道路の崩壊であろう。これは単にエンジニアリングの問題をこえた議論を巻き起こしている。危険な高速道路をそのままにしておかざるを得ない環境をつくりだしたこと自体が悪かったという反省である。税金を安

くし、政府を小さくし、社会資本への投資を切り詰める方向に向かいすぎた。「15秒間で湾岸地域の物理的なインフラストラクチャーに起こったことは、今後15年間にアメリカの社会的インフラストラクチャーに起こるかもしれない¹⁾」という反省である。実際、アメリカ土木学会のジョン・A・フォウト会長は、「建造物の維持・補修といった地味な仕事は、選挙民に受けず、政治家も情熱を向けない。だからアメリカでは、公共事業予算の伸びは、スローにしか進んでいない」といつている²⁾。

南関東地域に代表されるように、わが国の大規模な都市化地域はいずれも地震の危険にさらされており、そこに想定される地震動の強さは、ロマプリータ地震によるサンフランシスコ、オークランド両市の揺れよりも強い。軟弱な地盤、液状化のおそれのある地盤も広い。都市の規模が大きいだけに社会基盤施設の絶対量は大きく、しかもそれらの質は悪い。道路・水道・オープンスペースなど災害時にわれわれの命に直接関係する施設の整備は遅れている。ロマプリータ地震の被害が、当初メディアが伝えたほど大きくなかったことは確かであろうが、われわれが謙虚に学ぶべき教訓はまだ残されているはずである。

(7) あとがき

この報告は、主として以下の4つの資料・情報に、かなり著者の主観を加えてまとめたものである。第1の資料は地震直後のわが国の新聞である。第2の資料は参考文献2)であり、特に第10章 Urban Planning および第11章 Socioeconomic Impacts and Emergency Response の部分は広く参照・引用させていただいた。第3の資料は KCBS・AM 放送局の地震後約2時間にわたる放送テープである。このテープをもとにまとめた参考文献3)を圧縮したものに、参考文献3)には書かれていない部分を加えて「(3)被災地域におけるラジオ放送」とした。第4の資料は、著者が「ロマプリータ地震東京都調査団」の一員として被災地に行ったときに、たくさんの方々から直接聞いた話と受けた印象である(この調査団の報告が参考文献4)である)。報告全体をまとめるにあたっては、著者個人としての考え・印象に重点を置いた。当然、著者の理解不足による思い違いがあちこちにあると思われる。

したがって、この報告の内容は、多くの関係者の努力に基づくものであり、ここに深甚なる謝意を表する。

2. ロマプリータ地震による橋梁の被害

2.1 ロマプリータ地震による橋梁の被災とその特性

川島一彦 (Kazuhiko KAWASHIMA)*
 藤野陽三 (Yozo FUJINO)*²
 家村浩和 (Hirokazu IEMURA)*³
 後藤洋三 (Yozo GOTO)*⁴

(1) はじめに

アメリカのカリフォルニア州サンフランシスコ湾沿岸地域を襲った1989年10月17日のロマプリータ地震は、サンフランシスコ市およびオークランド市を中心に、総額約80億ドル(1兆2千億円)といわれる甚大な被害を生じさせた。ロマプリータ地震の特徴の1つは、オークランド市内のサイプレス高架橋やサンフランシスコ・オークランド・ベイブリッジのように、道路橋の被害が著しかった点である。

本節では、ロマプリータ地震による道路橋の被災特性とこれより推定される振動特性を、主要な橋について耐震設計上の背景とも合わせて示すこととする。

(2) 橋梁被害の概要

カリフォルニア州交通局によれば、被害総額約80億ドルのうち、22.5%に相当する18億ドル(2600億円)が道路施設の被害といわれている。道路施設の被害としては、落石、崩土、沿道斜面の崩壊等多岐にわたるが、今回の地震では、橋梁の被害が最も著しかった。

カリフォルニア州交通局によると、被災地域内には約1500橋の州管理の橋とほぼ同数の郡および市管理の橋があった。このうち、サンフランシスコ・オークランド・ベイブリッジ(州際道路80号線)、サイプレス地区の2層式高架橋(州際道路880号線)、ストラブスルー橋(州道1号線)の3橋が落橋、9橋が地震後に全面通行止めを伴う大きな損傷、13橋が中程度の損傷、65橋が軽微な損傷を受けたといわれている⁹⁾。図-2は、落橋した3橋および大きな損傷を受けた9橋の位置を示したものであり、北はMartinez市から、南はWatsonville市に至る広範囲な地域に被害が生じている。

図-2は、落橋した3橋および大きな損傷を受けた9橋の位置を示したものであり、北はMartinez市から、南はWatsonville市に至る広範囲な地域に被害が生じている。

(3) アメリカにおける橋梁の耐震設計および耐震補強

a) 橋梁の耐震設計

アメリカでは、1906年のサンフランシスコ大地震を経験した後、1933年のロングビーチ地震を契機として構造物の設計に地震の影響を考慮するようになった。道路橋に対する耐震設計の重要性は1971年のサンフェルナンド地震に至るまでは本格的な地震の洗礼を受けていなかった等の理由から、必ずしも十分に理解されてはいなかった^{6),10),13)}。アメリカにおいては、道路橋の設計は一般にAASHTOの標準示方書によって行われるが、この中に地震力の規定が初めて取り入れられたのは1961年になってからである。これは、後述する1943年版のカリフォルニア州の基準を取り入れる

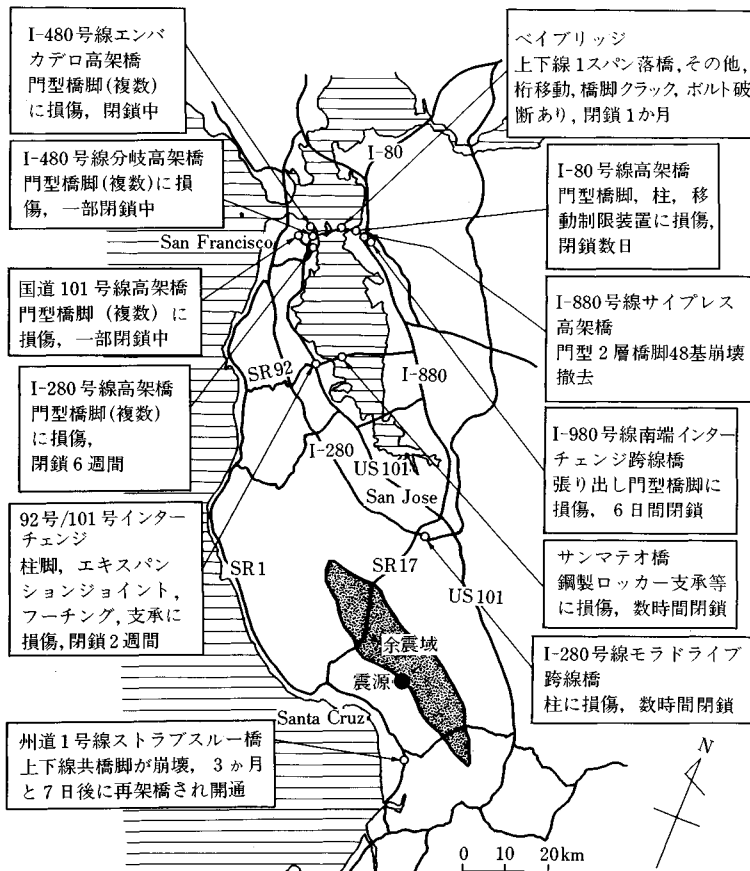


図-2 被災地域の概要と主要な被害橋の位置

*1 建設省土木研究所耐震研究室長
 *2 東京大学工学部土木工学科教授
 *3 京都大学工学部土木工学科助教授
 *4 (株)大林組技術研究所第5研究室長

形で制定されたものである。

カリフォルニア州では、耐震設計に関する規定は常にAASHTOもしくはAASHTOに先がけて独自に定められ

てきた。これは、カリフォルニア州が全米の中で最も地震の影響が大きいという経緯によるものである。カリフォルニア州で、橋の設計に地震の影響を考慮することを求めた最初の規定は1940年に出されている。ここでは、設計地震力の大きさは設計者の判断によるものとし、具体的な数値は示されていない。ただし、これはあくまでも基準として示された最初の規定ということであり、これ以前に耐震設計が全くされていないというわけではない。たとえば、1936年竣工のベイブリッジの設計には水平震度0.075(0.1という説もある)が考慮されている。しかし、ベイブリッジのような特別な橋は別として、一般の橋では、基準に示されていない事項が設計に反映されることはまれであったと考えられる。

1943年に入ると、カリフォルニア州では設計震度 C として以下の値を規定した。

$$C = \begin{cases} 0.02 : \text{地耐力が } 40 \text{ tf/m}^2 \text{ 以上で直接基礎} \\ 0.04 : \text{地耐力が } 40 \text{ tf/m}^2 \text{ 以下で直接基礎} \\ 0.06 : \text{杭基礎} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

この基準は、1965年まで使用され、今回の地震で大きな被害を生じたサイプレス高架橋、ストラプスルー橋等ほとんどの橋は、この基準によるものである。設計震度は最大でも0.06と小さく、このため、ほとんどの橋は常時の荷重で設計が決まり、事実上耐震設計になっていなかったといえることができる。

1965年に入ると、カリフォルニア州は、設計地震力 EQ を次のように与えた。

$$EQ = KCD \geq 0.02 D \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 K : 構造物のじん性に応じた補正係数

$$K = \begin{cases} 1.33 : \text{下部構造の縦横比が } 2.5 \text{ 以下} \\ 1.0 : \text{一柱式橋脚等の細長い下部構造} \\ 0.67 : \text{ラーメン橋脚等} \end{cases}$$

C : 固有周期に応じた水平で

$$C = \frac{0.05}{T^{1/3}} \leq 0.10 \dots\dots\dots (4)$$

D : 死荷重

式(3)では、 KC が設計震度を表わすと考えてよいが、固有周期が0.125秒以上となると、固有周期に応じて設計震度は低減させているのが特徴で、このため、固有周期が0.5秒程度のごく一般的な橋では、設計震度は0.04 ($K=0.67$)~0.08 ($K=1.33$)となる。

一方、1971年2月にサンフェルナンド地震 ($M 6.6$) が発生し、道路橋に大被害を受けたのを契機に、カリフォルニア州では1971年3月にそれまでの設計地震力(式(3)の係数 C) を2~2.5倍に割り増すとともに、従来のように建築物の耐震設計を準用した形ではなく、道路橋の振動特性を取り入れた抜本的な耐震設計法の改訂

にのりだした。この結果、1973年にカリフォルニア州独自の新しい耐震設計基準がまとめられ、1974年2月から設計に取り入れられた。

1973年版の耐震設計法の特徴は、設計地震力を大幅に割り増すとともに、橋脚のじん性を高めるために帯鉄筋を増したり、落橋防止装置を導入した点である。

解析手法としては、下部構造の剛性がほぼ様な場合には等価静的荷重法(わが国の震度法に相当)、複雑な橋では動的解析法(応答スペクトル法)によるものとし、等価静的荷重法では設計地震力 EQ を次のように与えている。

$$EQ = CFW \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 F : 構造系別補正係数(1.0 : 一柱式橋脚, 0.8 : ラーメン橋脚), C : 合成応答係数で、基盤の最大加速度 A , 基盤までの沖積層の厚さ、橋の固有周期に応じて、たとえば図-3のように与えられる。

なお、この1973年版のカリフォルニア州の耐震基準は、1975年にAASHTOに編入されている。さらに、1981年には、連邦道路局の委託を受けた応用技術協会(Applied Technical Council)によってATC-6とよばれる報告書がまとめられ、これは、1983年に道路橋耐震設計ガイド指針としてAASHTOに取り入れられている。したがって、現在、AASHTOには、1975年版のカリフォルニア州の耐震基準によった計算法とATC-6によった耐震計算法の2つがあり、どちらの計算法を採用するかは州の判断に委ねられている。

以上のように、カリフォルニア州では1971年サンフェルナンド地震をはさんで耐震設計法が抜本的に改訂変化している。たとえば、図-3には1971年以前の基準(式(3)), 1971年サンフェルナンド地震直後の暫定基準、

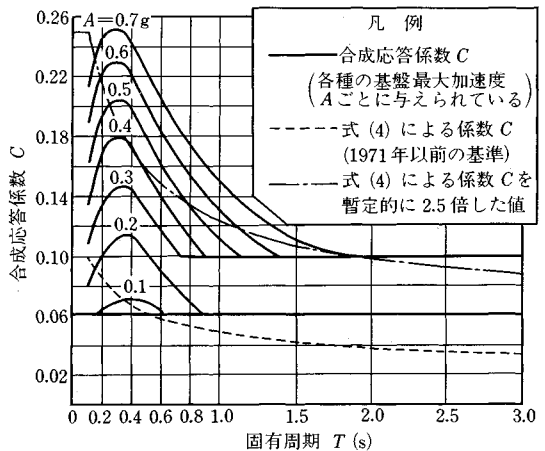


図-3 カリフォルニア州において道路橋の耐震設計に用いられてきた設計水平震度の比較(基盤までの沖積層の厚さが3.3~24mの場合)

1973年以後の新基準（式（5））を比較してある。橋の固有周期を0.6秒とすれば、設計震度は以下のように大きく異なる。

1971年以前	0.06
1971年～1973年	0.12～0.15
1973年以後	0.2

後述するように、今回のロマプリータ地震では、大きな被害を生じた橋には1973年以後の新基準で設計された橋は含まれていない。

b) 橋梁の耐震補強

1971年サンフェルナンド地震によって生じた大被害により耐震設計法の不十分さが明らかとなったカリフォルニア州では、耐震設計法の抜本的な改訂を行うと同時に、1971年以前に建設した橋の耐震補強をサンフェルナンド地震直後から開始した。カリフォルニア州がサンフェルナンド地震から学んだ教訓は、

- ① 落橋原因の大部分は、継手部において桁のかかり長が短く、桁の移動を防止する有効な方策を欠いたことにある、
- ② 橋脚の被害も大きかったが、これに対しては設計地震力を大きくするだけでは、粘りのない破壊形態を促すばかりで、耐震性の向上を図れないのではないか、

という2点に集約される。前者は、わが国固有の落橋防止装置の有効性を認めたもので、後者はアメリカ固有の橋脚およびフーチングの配筋法に密接にからんだ反省である。

カリフォルニア州内には、州管理のほか、都市町村管理を合わせると2万5000橋以上の道路橋があり、これらを一度に耐震補強することはできないため、表一に示す3段階に分けて、計画的に耐震補強を進めていた。

第1段階では、落橋防止装置の設置を図るもので、1971年にスタートし、1987年までに54百万ドルを投入

表一 カリフォルニア州交通局の耐震補強プログラム

段階	期間	目的	対象橋数	費用
第1段階	1971年サンフェルナンド地震以後～1987年度	継手部の連結性（落橋防止構造）の確保	1261橋	54百万ドル（77億円）
第2段階	1990～1993年度	1本柱RC橋脚の靱性の向上	約1200橋が要対策と判定されている。89会計年度は25橋の耐震補強を実施予定とされていた。	64百万ドル（90億円）
第3段階	将来	RCラーメン橋脚の靱性の向上	未定	未定

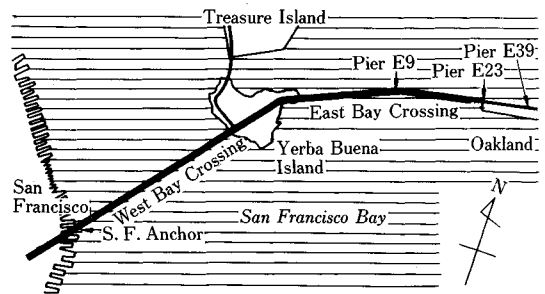
して1261橋に対する対策を終えている。対策費を1橋当たりの平均にすると約4万ドル（約600万円）になる。第2段階は、不静定次数の低い1本柱RC橋脚の耐震補強で、1990年から4か年計画で耐震補強をスタートしようとした矢先に今回の地震が発生したことになる。第3段階は、ラーメン橋脚の耐震補強で、第2段階と並行させて実施予定とされていた。

カリフォルニア州のフリーウェイの建設は、1938年から開始され、1988年現在で1万5160マイルが整備されている。フリーウェイの建設は1960年代がピークで、この時代には年平均約1000マイル・レーン建設された。しかし、1970年代に入ると、これが約500マイル・レーンとなり、さらに、1980年代には約20マイル・レーンと急速に低下した。したがって、1971年のサンフェルナンド地震以後耐震設計法が抜本的に改訂された段階では、すでに全体の約2/3のフリーウェイは建設されていたことになり、これが現在カリフォルニア州が抱える課題となっている。

(4) 主要な橋梁の被災特性および振動特性

a) バイブリッジ（州際道路880号線）

San Francisco-Oakland Bay Bridge, 通称バイブリッジは、図一4に示すようにサンフランシスコとオークランドを結ぶ全長13.3kmの橋梁群で、ベイエリアの幹線交通網の一部を形成している。同橋はアメリカ橋梁界の黄金時代である1930年代（1936年）に完成し、すでに50年余りの供用実績を有す。中間にあるYerba Buena島の西側はMoisseffの設計による2連の吊橋（センタースパンはともに704m）よりなり、東側は図一5、写真一1に示すようにトラス橋群よりなる。トラス橋部は、オークランドに向けて2.74%の下り勾配となっている。同橋の建設当時には、前章に記したように橋梁に対する一般的な耐震設計基準はなかったが、設計基本震度として0.075（0.1という説もある）を設計に用いたといわれている⁶⁾。構造的にはダブルデッキ構造であり、当初は下路デッキの一部に軌道を配し電車を通していたが、1958年に撤去され、以後上路、下路デッキともに自動車専用となっている。



図一4 バイブリッジの位置⁶⁾

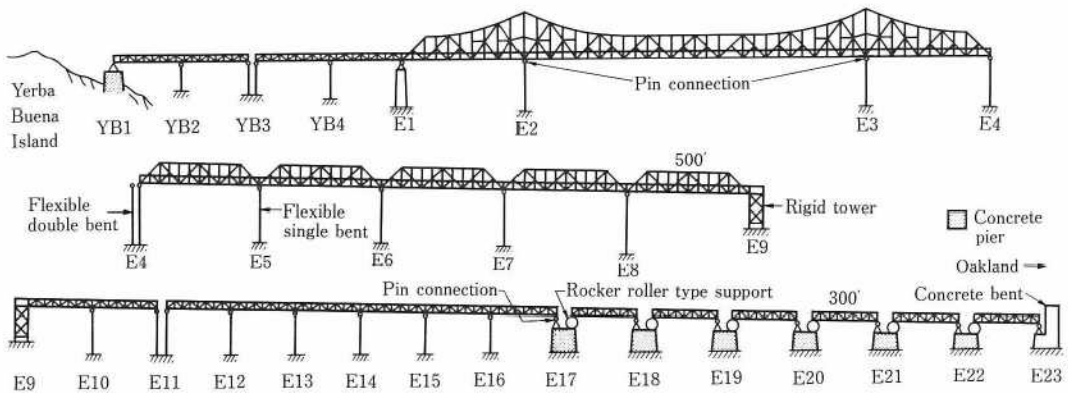


図-5 オークランド側のトラス部⁶⁾

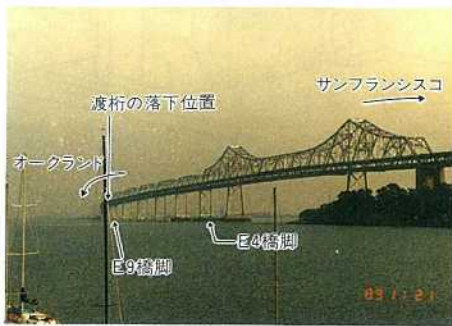


写真-1 オークランド側のトラス橋部

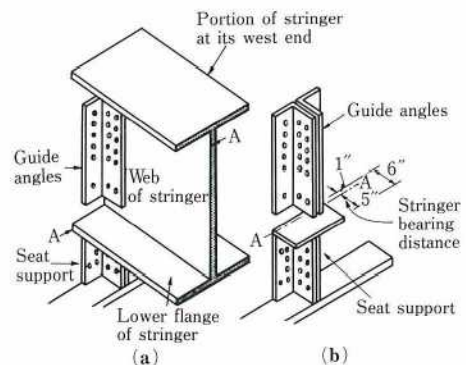


図-7 渡し桁の桁受けの構造⁶⁾

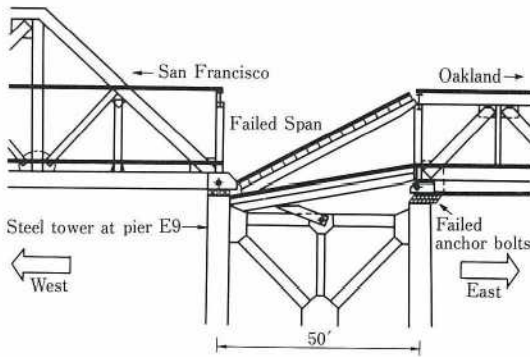


図-6 E9橋脚の渡し桁の落下⁶⁾

示すようにE9上の約15mの渡し桁が2つとも長さ15cmの桁受け(図-7)を踏みはずして落下した。写真-2に示すすべての痕跡をみると、E9~E11上のトラス桁が橋軸方向だけでなく、橋軸直角方向(3cm程度)にもすべっており、この方向の振動も大きかったと推測される。写真-3に破断したボルトを示す。ボルトのせん断強度等からの試算によると、この桁には少なくとも0.22g程度の地震力が作用したとのことである⁶⁾。

なお、通行中の自動車3台が桁の落下に巻き込まれ、運転者1名が死亡した。また、1日20万台以上の交通量があるベイブリッジが使用できなくなり、1か月後の開通まで代替道路や代替交通手段の確保が大きな社会問題となった。

修復にあたっては、まず、渡し桁を撤去し、トラスをジャッキにより元の位置まで引き戻し、ハイテンボルトにより再び固定した。次に鋼I桁10本を渡し、写真-4に示すようにその上にプレキャスト床板をおき、さらにその隙間にはコンクリートを流し込み、新しい上路桁、下路桁を完成させた。なお、桁受けは以前のよりも少し長い20cmとしている。工事費用は約3億円といわれている。地震からちょうど1か月後の11月17日に開通

今回の地震において、二連の吊橋部には何ら損傷はなかったが、トラス橋部は渡し桁の落下をはじめ種々の損傷を受けた^{6)~8)}。

① E9橋脚上での渡し桁の落下

E9~E11上の2連のトラス(各スパン88.4m)の水平地震力はすべてE9橋脚で負担される構造になっている。桁をE9橋脚に固定するアンカーボルト(1in径)40本が地震力のためにすべてせん断破壊し、そのため、トラス桁がオークランド側へ少なくとも18cm程度動いた(残留すべり量は約12cm)。その結果、図-6に



写真-2 E9上のトラス桁支柱のすべった痕跡



写真-3 せん断破壊したE9上のボルト (1 in 径)



写真-4 復旧工事中の渡し桁 (E9 橋脚上)

した。

② その他の損傷

1つはE17のRC橋脚基部の曲げ損傷である。橋脚つけ根の四隅においてコンクリートが剝離し、鉄筋が座屈するなどの被害が生じている。図-8に示すように、E11～E17上のトラス桁(全長530m)の水平地震力は、E11～E16の鋼橋脚の剛性が低くE17に集中する構造になっているために、この被害が生じたと考えられている。1990年9月現在、修復はされていないが、CALTRANSは鋼板巻立による補強を計画しているとのことである⁶⁾。

もう1つは、E18～E22橋脚にあるピン支承上における、トラスとベースプレートを固定するアンカーボルト(1 in 径)のせん断破壊である。120本すべてがせん

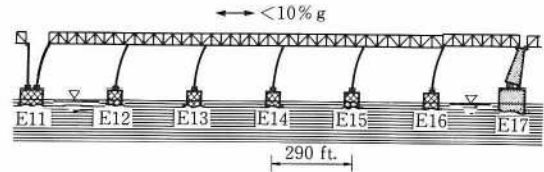
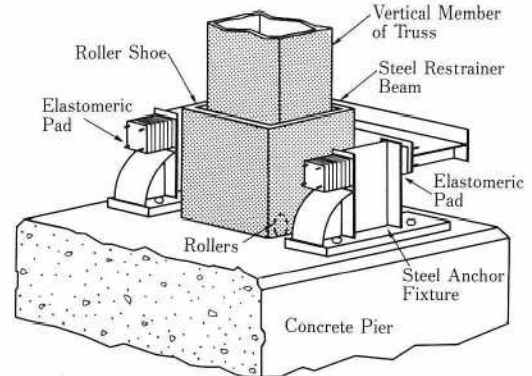
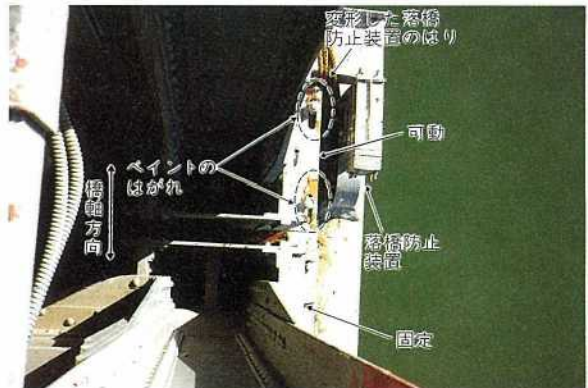
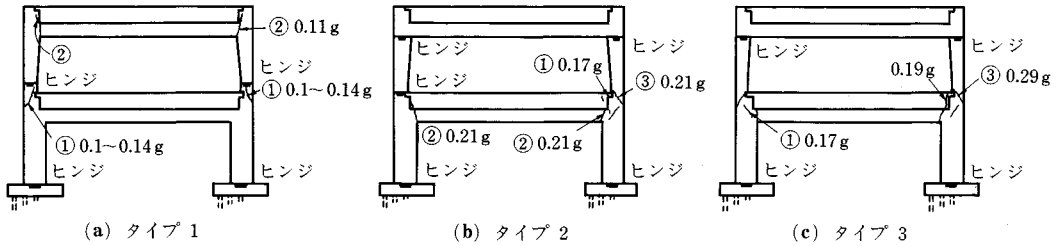
図-8 E11～E17間のトラス桁の動きとE17ベDESTAL橋脚の損傷⁸⁾図-9 E17～E22に1976年に設置された落橋防止装置⁶⁾

写真-5 トラス桁の衝突により変形した落橋防止装置 (E20 橋脚南側、衝突のため、塗装も一部はがれている。UCパークレイ校のAstaneh教授による)

断破壊し、橋軸方向に橋桁のすべりが生じた。その量は20 cmを越えたといわれている。地震後の残留すべり量は桁により異なるが、0.3～6 cm程度である。ただし、橋桁がオークランド側にすべり落ちるのを防ぐために、E17～E22上の可動支承上には1976年に図-9に示す落橋防止装置(restrainer)が設置されていた。地震によりストッパーのほりにトラス桁が衝突し変形したり(写真-5)、落橋防止装置を固定するボルトの一部が切れるなどの損傷がでているが、この装置により桁の落下を免れることができた。ここも地震後ジャッキで桁を元



図一〇 サイプレス高架橋のヒンジ位置によるタイプ種別

(○内の数値およびその後の加速度は、UC サンディエゴ校の Priestley 教授による損傷の生じる順番と、その位置が最大耐力に達する水平加速度を表わす⁹⁾、タイプ1 橋脚が最も耐力が小さく、0.1~0.14g でヒンジ部分が破壊する

の位置に戻し、ハイテンボルトで再び固定された。なお、E23 上のピン支承のボルトは破断しなかった。

このほかにも、E23 橋脚の東側の桁 (E23~E24) において、上路デッキを E23 橋脚に固定するリベットがせん断破壊し、桁のすべりが生じた。この構造は E9 上の渡し桁に似ているものである。すべったものの、幸い 2.5 cm の余裕を残して桁受けに渡し桁がとどまっており落下は免れたが、危うく E9 の渡し桁と同じ状況が生じる場所であった。地震後、E9 のと同様に桁受けは長いものに取り替えられたとのことである。

以上のように、今回のベイブリッジの被害は E9~E23 間にあるトラス桁の支承のボルトの破壊とそれに伴う桁のすべりによって生じたものである。修復策として、ボルトをハイテンボルトにすべて変えて桁を再び固定化する方法が講じられた。しかし、今回のボルトの破壊はヒューズのような役割を果たした。すなわち、仮に破壊しなかったとするとさらに大きい地震力が橋脚に作用し、被害が橋脚に及びより複雑で深刻な被害が生じたのではないかという見方もある。この意味において、ハイテンボルトを用いた復旧策が次の大地震に対して有効な方法であるか否かについては疑問が投げかけられている。ベイブリッジの地震時の挙動、今回の復旧策の評価、今後の耐震補強策については、総合的に調査・研究が行われる予定といわれている。

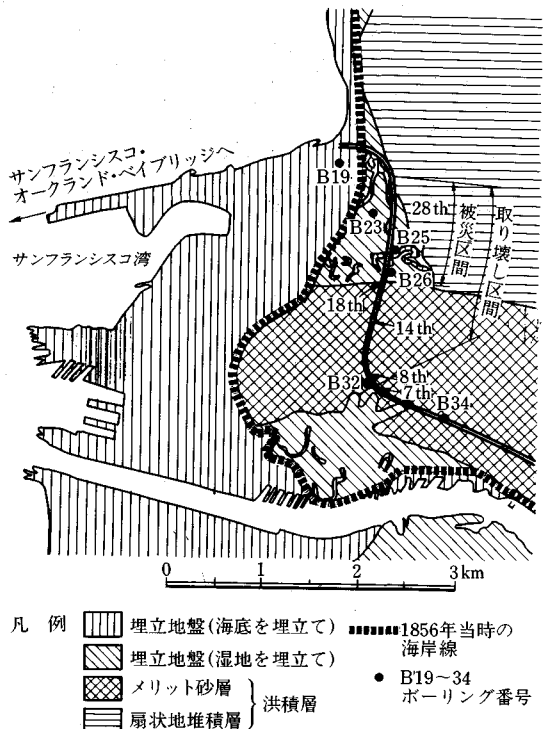
b) サイプレス高架橋 (州際道路 880 号線)

サイプレス高架橋は、オークランド市内を通る I-880 号線のサイプレス通り上に設けられている延長約 2 km の 2 層式コンクリート橋である。本橋は 1953 年に設計震度 0.06 を考慮して設計され、1957 年に完成した。スパン約 24 m の 3 径間連続鉄筋コンクリート多重箱桁橋から構成されており、桁の両端はかけ違い構造で接続されている。かけ違い部には、前述した第 1 段階の耐震補強の一環として、PC ケーブルを用いた桁間連結装置が設けられていた。

橋脚は鉄筋コンクリート構造で、柱にはヒンジが設け

られている。ヒンジの位置を分類すると図一〇に示すように 3 タイプに大別される。タイプ 1 が一般に用いられている構造で、タイプ 2 および 3 は、ランプ部、斜橋部、将来の拡幅予定部のように横ばりが長い箇所に採用されていた。タイプ 2 および 3 では、上層の横ばりはアンボンド PC 鋼棒を用いた PC 構造となっている。

下部構造は抗基礎で、橋脚とフーチングはヒンジで接続されている。周辺の表層地盤条件は図一〇に示すとおりであり、1856 年当時には後背湿地であった箇所を埋め立てた地盤から、よく締まった洪積世の砂層(メリット砂層とよばれている)の地盤へと、地盤条件が変化する区間を通過している。埋立て区間では、軟弱なシルト



図一〇 サイプレス高架橋周辺の地盤条件^{10), 12)}

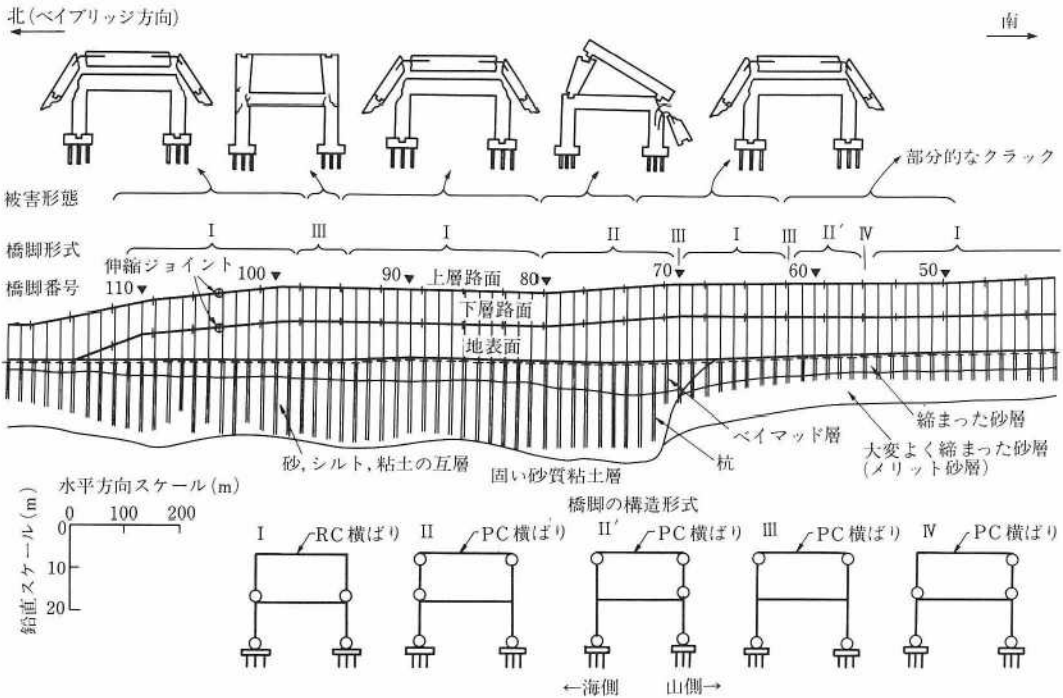


図-12 サイプレス高架橋の破壊形態と地盤条件^{14), 15)}



写真-6 サイプレス高架橋の被害状況 (32 番通り付近の崩壊状況で、右側が I-80 号線とのインターチェンジとなる。完全に上層の桁が下層の桁まで崩壊している。CALTRANS による)



写真-7 タイプ1橋脚の被災状況 (上層の柱の下端にあるピンジ部とベDESTALの破壊により、上層の桁が完全に落下した。CALTRANS による)

～粘土が最も厚い箇所約 20 m あり、サイプレス高架橋は全長約 2 km にわたって損傷を受け地震後取り壊して撤去されたが、このうち、上層の桁が完全に落下したのは I-80 号線のインターチェンジ部から 18 番通りとの交差点までの約 1.2 km の区間であり、この区間は図-11 に示すように埋立て区間とほぼ一致している。

図-12 は、被災形態とともに、地盤条件、杭先端の深度を示したものである^{14), 15)}。典型的な被害は写真-6～8 に示すように、上層の桁が下層まで完全に落下したものである。図-13 は崩壊のメカニズムを示したもので、損傷としては、まず、地震力の作用により上層の橋

脚を支持するピンジの下の部分 (ベDESTAL) が水平荷重に耐えきれずせん断破壊を起こしたと考えられる。これと同時に、上層の横ばりと柱の隅角部に入った曲げびびわれが進展して割裂破壊を起こし、最終的に上層の桁が落下したと考えられる。詳細は今後の検討に待たれるが、現在考えられているタイプ1橋脚の被害要因を挙げると以下ようになる。

- ① 設計震度が 0.06 であったのに対して、周辺地盤上では 0.27 g 程度の加速度が生じており、橋の増幅作用を考慮すると、設計地震力をはるかに上回る地震力が作用した。
- ② 柱にピンジを多数設けたために、不静定次数が低



写真-8 タイプ2橋脚の被災状況（上端に設けられたヒンジが破壊し、落下した上層の柱、柱下端の鉄筋でかろうじてつながっている。上層の横ばり部ではアンボンドPC鋼棒が抜け出しているのがわかる。CALTRANSによる）

く余剰耐力が発揮されにくい構造系であった。

③ 上層の柱を支えるヒンジ部は図-14(a)のように下層の横ばり上のペDESTALによって支持されているが、ペDESTAL部分の配筋が上記①の設計地震力が小さいことを反映して、横ばり部に比較すると極端に少ない。したがって、ヒンジ部分に横方向力が作用すると容易にせん断ひびわれが生じ、これが、下層の柱の最外縁の軸方向鉄筋に達すると、ここで軸方向鉄筋をひき剥がすような破壊に移行しやすい。さらに、このような破壊を防止するために下層の柱の上端において軸方向鉄筋を拘束

するように配置されているコの字状の押え鉄筋の定着長が短く、ヒンジ部分の余剰耐力が発揮されにくい配筋となっていた。

④ 上層横ばりの下側に配筋されている鉄筋の大部分は途中定着され、柱に定着されている下側鉄筋量は全体の約1/4と少ない。また、図-14(b)に示すように、横ばりの隅角部においてはハンチが設けられておらず、さらに、横ばりから柱に達する下側鉄筋は柱に曲げ下げて定着されておらず、まっすぐ横に伸ばしたままとまっていて、定着長も短い。このため、隅角部に曲げモーメントが作用し、曲げひびわれが横ばりの下側鉄筋に達すると、ここで付着破壊が生じ、はりの下側鉄筋は容易に柱から抜け出す。このため、隅角部で柱が足を開くように外側に向かって開き、上層桁の落下を招いた。

本橋は、サイプレス通り全域にわたって取り壊され、現在平面道路として供用されている。

c) サンフランシスコ市内のコンクリート高架橋

サンフランシスコ市内には、倒壊には至らなかったが、高架橋の被害が4地区で生じている。まず、州道480号線のエンバカデロ高架橋はサイプレス高架橋とよく似た構造で、ほぼ同時期に建設された延長約1kmの2層式コンクリート橋であるが、図-15に示すようにマーケット通りから南東へ約500mの区間において写真-9および写真-10に示すような損傷を受けた。

本橋は、サイプレス高架橋とよく似ているが、構造的

には次の点が異なっている。まず、サイプレス高架橋では図-10に示したタイプ1のヒンジが多用されていたのに対して、本橋ではタイプ3が最も多い。タイプ2は一部使用されているものの、タイプ1は使用されていない。また、タイプ2のように上層の柱の下端にヒンジが設けられている場合にも、その位置は写真-9に示したように下層の横ばりの上端とほぼ同じレベルとなっており、ペDESTAL部分が破壊したサイプレス高架橋のような損傷が起りにくい構造となっている。さらに、図-13に示したように、サイプレス高架橋では上層の柱の断面が上から下になるほど絞られていたのに対して、本橋では断面の太さは変化していない。柱の断面をサイプレス高架橋のように変化させると、常時の段階から自重が作用すること

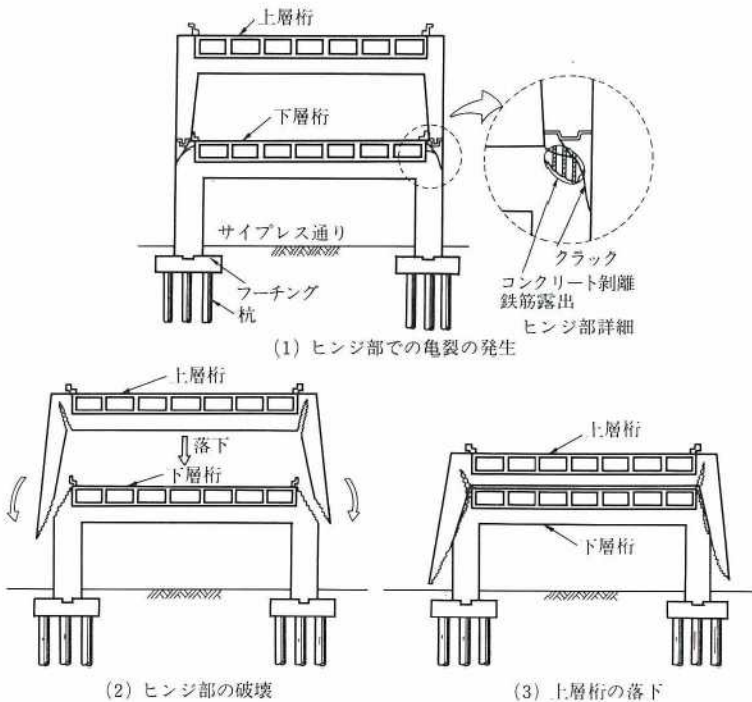
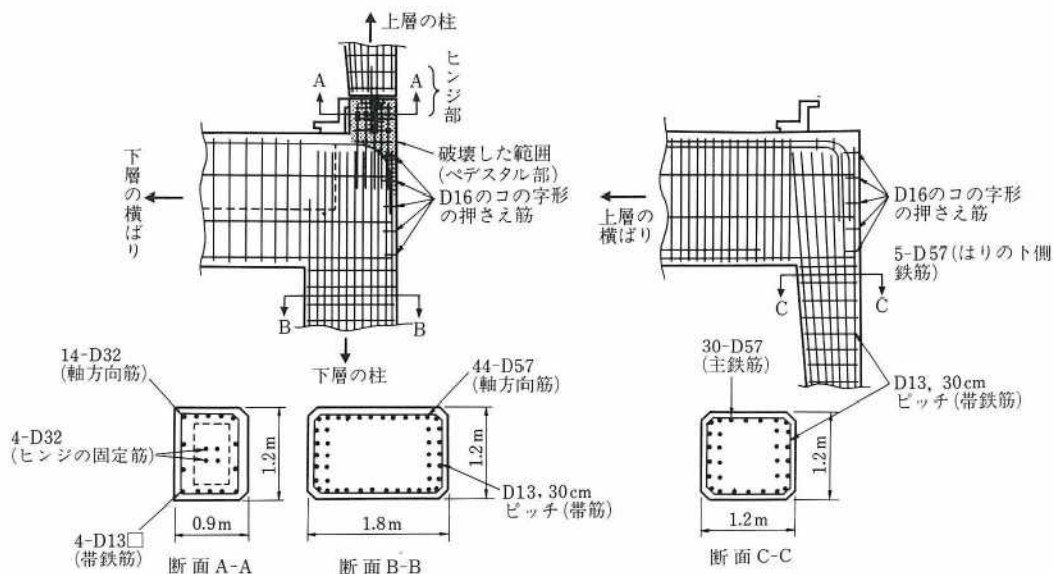


図-13 サイプレス高架橋（タイプ1）の崩壊メカニズム



(a) 上層の柱下端のヒンジ部と下層の横ばり, 下層の柱部分 (b) 上層の横ばりと柱の隅角部

図-14 サイプレス高架橋のヒンジ部および隅角部の構造評価⁹⁾

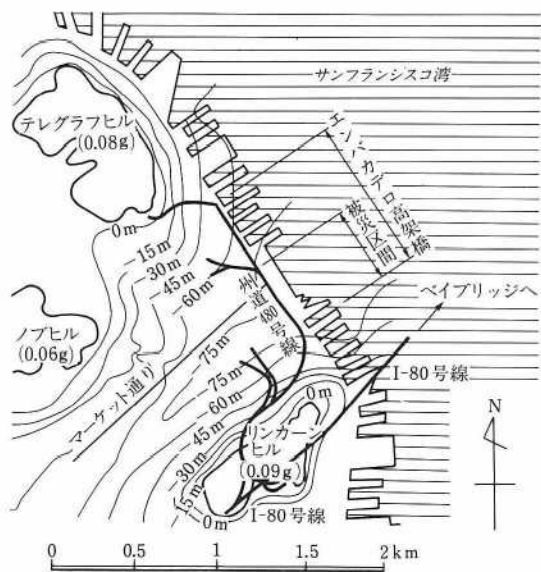


図-15 エンバカデロ高架橋の被害位置と岩盤までの等深度分布 (() 内は, 実測された最大加速度)¹²⁾

により上層のヒンジには外向きの水平力が作用することになる。したがって、本橋のように柱の断面を変化させない方が耐震的には有利となる。以上のような点がサイプレス高架橋との違いであり、こうした点がサイプレス高架橋のような崩壊を免れた要因と考えられる。

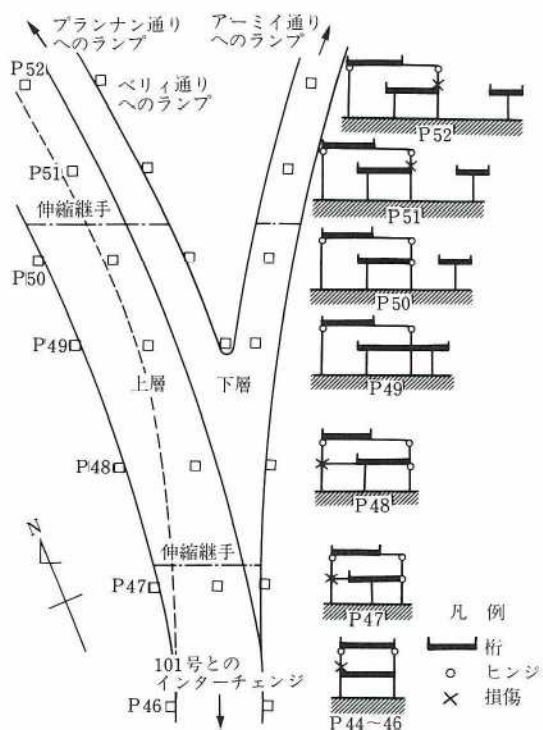
なお、図-15には、地表面から岩盤までの等深線も示している。これによれば、被害のあった区間は、岩盤までの深さが最も深く75m以上となる区間とほぼ一致



写真-9 下層の横ばり位置に生じた橋脚の損傷 (エンバカデロ高架橋, 上層の柱の上端にヒンジがある。図-10のタイプ3橋脚)



写真-10 写真-9のクローズアップ (主鉄筋が露出し、コンクリートの剝離した部分以外にも、大きく斜めひび割れが発生している)



図—16 I-280号線セルビイ通りの高架橋の構造概要¹⁰⁾

している。図—15中のテレグラフヒル、ノブヒルおよびリンカーンヒルは、ともに岩盤の露出した丘陵地である。強震観測記録によれば、これらの地点では最大加速度は0.06～0.09gであった¹⁶⁾。したがって、地盤による増幅作用を考慮すると、被害地点では少なくとも0.2g程度の最大加速度は生じていたのではないかと推定される。

I-280号線では、図—2に示した2地区（ともに、1960年代の建設）で被害を受けた。これら2地区の特徴は、本線とランプが分岐したりランプどうしが交差したりする非常に複雑な構造系であるということである^{10), 12)}。たとえば、セルビイ通りの高架橋は図—16のような構造をしており、橋脚の高さ、剛性、横ばりの長さ、ヒンジの位置等が橋脚ごとに大きく違っている。写真—11～13は代表的な被害を示したものであり、上層の柱の上端に設けられたヒンジから縦方向に入ったクラック、下層の横ばり付近でせん断破壊した柱、上層の横ばりと柱のラーメン隅角部に入った曲げひびわれ、等さまざまである。これらは、入り組んだ構造系に伴い、地震時に橋が複雑な振動をしたことに起因すると考えられる。

次に、サンフランシスコ市内のUS 101号線でも、2層式コンクリート高架橋に被害を生じた。構造的には、エンバカデロ高架橋と類似しており、1960年代に建設



写真—11 下層の横ばり付近でせん断破壊した橋脚（I-280号線セルビイ通りの高架橋、写真—9に示したエンバカデロ高架橋の損傷と似ているが、損傷の位置が少し高くなっている）



写真—12 上層の柱の上端に設けられたヒンジ部から縦方向に入ったひびわれ（I-280号線セルビイ通りの高架橋）



写真—13 上層の横ばりと柱のラーメン隅角部に入ったひびわれ（I-880号線ミッションクリーク付近の高架橋）

されたものである。I-280号線の高架橋と同じくランプの分岐部や斜橋等、構造的に複雑な箇所に被害を受けているのが特徴である。

d) ストラプスルー橋（州道1号線）

本橋は、ワトソンヒルの西約5km、震源から南へ約30kmに位置するRC桁橋である。落橋に伴い4本の柱がRC床版を突き破るという珍しい被害形態を示した。



写真-14 ストラブスルー橋の被災状況



写真-15 RC柱頭部の破損と移動

南行、北行道路がそれぞれ独立であり、写真-14に示すように南行の中央部が落橋、北行は落橋こそ免れたもののRCパイルベント橋脚が大きな被害を受けて桁が沈下した。

橋長は232mで、途中3か所のゲルバーヒンジによって接続された21径間連続桁橋である。建設時期は1971年以前で小さな地震力で設計されていたと推定される。桁はパイルベントにより支持され、図-17に示すように約11m間隔に設けられた横桁に径38cmのRC柱が20mm径6本の鉄筋の曲げ上げによりアンカーされていた。各柱の基礎は一種のレイモンド杭で、コンクリートを掘削孔の中で突き固めて作る場所打ちの無筋杭といわれている。

架橋地点はPEAT状の湿地帯であり、震源から近いこともあって大きな地震力が作用したものと推定される。



写真-16 桁の移動を示す杭周辺の地盤の空隙

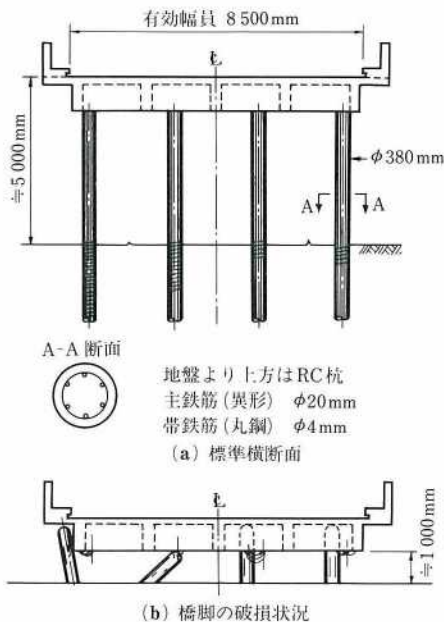
そのため、RC柱の柱頭が容易に曲げ破壊し、ダメージの大きなものは柱頭が割れてペンシル状となり、写真-15に示すように元の位置から大きくずれた。さらにダメージが進行するとアンカー筋が抜け出して柱は横桁からはずれ、一部の柱は落下してきた床版を突き破って路面上に突出し、残りの大部分は地中で折れたものと推定され、写真-16にみられるような大きな変形を起こして桁の下に倒れ込んでいる。

e) その他の橋の被害

ベイブリッジの南、10数マイルに湾をまたぐサンマテオ (San Mateo-Hayward) 橋がある。この橋は、船を通すためにクリアランスをとった高橋脚鋼トラス橋部と、水面をうように走る多径間コンクリート橋部よりなる。

詳しいことは不明であるが鋼トラス部のロッカーベアリングに損傷が生じ、またコンクリート橋部ではピアに軽微なクラックが入ったといわれている。地震後は検査のため2時間閉鎖され、翌日再び3時間閉鎖し再検査を行ったとのことである。ベイブリッジが被害のため閉鎖されたが、この橋の被害が少なく、地震後も供用できたことはベイエリアの交通路の確保という意味において幸いであった。

ゴールデンゲート (Golden Gate) 橋 (1937年完成) は地震後ただちに検査されたが、全く被害は生じておら

図-17 ストラブスルー橋の断面とRCパイルベント橋脚^{10),12)}

ず、地震後も閉鎖されていない。

オークランド市内には鋼製高架橋があるが、これらについてはアンカーボルトの変形などは報告されているが大きな被害はなかった。

f) シェラポイント橋

シェラポイント橋は、サンフランシスコ南方約15 km にあり、免震化による耐震補強が行われた橋であることから、免震効果が注目された。ただし、今回の地震では被害は生じていない。

シェラポイント橋は、写真-17に示すように高速道路101号線が鉄道と地方道を渡るための跨線橋である。斜度の強い10スパンの単純桁橋で、全長は約188 m、幅員は約36 mである。コンクリート床版は鋼製の単純桁で支持され、単純桁はコンクリート製の円柱橋脚上に渡された鋼製の横主桁に支持される構造になっている。床版は各横主桁の上で縁切りされ橋台との間は伸縮ジョイントとなっているが、遊間ほとんどない。単純桁どうしは落橋防止装置で結ばれている。架橋地点は砂岩が露頭しており、各円柱橋脚と橋台は独立した直接基礎で支持されている。

この橋は1955年に設計水平震度0.15で設計され、1957年に竣工した。その後、CALTRANSは設計地震力の見直しを行い、この橋には0.6 gを適用することとした。そのため、橋脚の耐力を4倍近く引き上げることが必要になり、じん性も不足していた。このため、1985年に橋脚上の鋼製支承を鉛入り積層ゴム支承に取り替え、免震橋に改造した。橋脚を補強する構法に比べ鉄道や道路を遮断する必要がなく、経済的に、かつ大幅に性能を改善できたといわれている。免震後の目標固有周期は1.76秒、鉛棒の降伏レベルは支持荷重の5%とされ、0.6 gの地動加速度に対して積層ゴムの応答変位は18 cm程度、床版の最大応答加速度は0.20 g程度で、橋脚はすべて弾性範囲内に収まるように設計された。

図-18にシェラポイント橋の構造特性と強震計の位置を示す。2本の橋脚（A橋脚およびB橋脚）とその上の横主桁で観測が行われており、きれいな強震記録が得



写真-17 シェラポイント橋

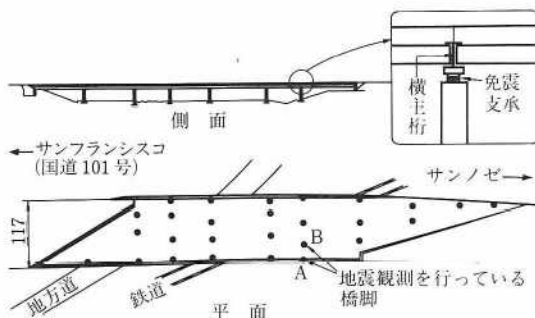


図-18 シェラポイント橋の構造および測点の位置

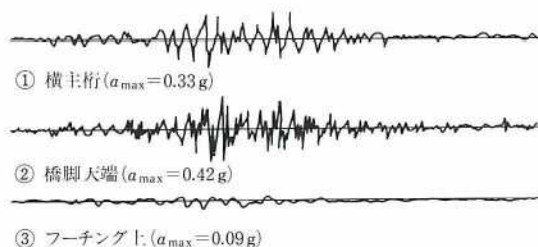


図-19 A橋脚上で観測された橋軸方向の加速度波形¹⁶⁾

られている。図-19は今回観測された、フーチング上、橋脚天端、横主桁の3点における橋軸方向の加速度波形を示したものである¹⁶⁾。横主桁の最大応答は0.33 gと橋脚天端の0.42 gよりわずかに低減している程度でそれほど顕著な免震効果は認められない。図-20は横主桁と橋脚頂部の加速度から計算した伝達関数である。振動数が高くなると、増幅率が多少小さくなるが、5 Hzに大きな増幅があり、全体として免震効果は大きくない。

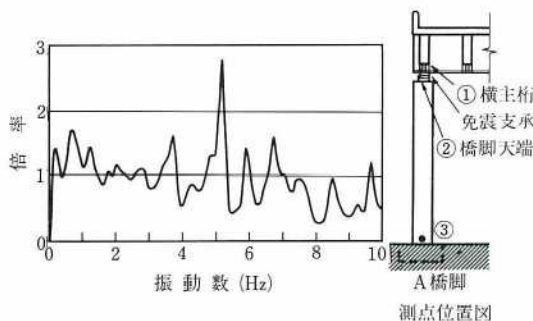


図-20 橋脚天端（3点）に対する横主桁（1点）の加速度応答の伝達関数（A橋脚の橋軸方向応答）¹⁵⁾

表-2 シェラポイント橋における最大加速度¹⁶⁾

観測位置		橋軸方向	橋軸直角方向	上下方向
A橋脚	横主桁	0.33	0.22	0.11
	橋脚天端	0.42	0.23	-
B橋脚	横主桁	0.32	0.20	0.09
	橋脚天端	0.35	0.21	-
フーチング上		0.09	0.05	0.03

(単位: g)

表一2は、B橋脚や橋軸方向以外の成分も含めて、免震効果を最大加速度に注目して示したものである。

このようにそれほど大きな免震効果が認められなかった原因としては、免震効果が発揮されるほど地震力が大きくなかったと同時に、床版が両側の橋台でほぼ拘束されていたこと、橋脚がフレキシブルであったこと等が挙げられる。

床版と橋台の間に十分な遊間が設けられなかったのは、工事コストと工事中の交通規制に問題があったためであり、遊間がなくても橋軸直角方向には免震機能が発揮されること、橋軸方向についても橋台が損傷する程度の大きな地震力が作用した場合には免震機能が発揮され、落橋等の致命的な崩壊は回避できるというのが基本的な考え方であったようである¹⁷⁾。

(5) 橋梁の耐震化に向けた地震後のカリフォルニア州の取組み

地震による道路橋の被害原因を検討するため、カリフォルニア州ではカリフォルニア工科大学 Housner 名誉教授を委員長とする調査委員会 (California Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake) を設けた。この調査委員会の報告書は、平成2年5月に参考文献6)の形で取りまとめられている。ここで調査されたのは以下の6項目である。

- ① なぜ、サイプレス高架橋およびベイブリッジは落橋したか？
- ② これらの被害をあらかじめ予測できたか？
- ③ どの程度正確に橋の損傷を予測できるか？
- ④ カリフォルニア州における橋の耐震補強のスケジュールや手法は、構造特性や耐震性に関する知識を正しく用いたものであったか？
- ⑤ 今回の地震経験をもとに、カリフォルニア州はフリーウェイの橋や構造物に対する耐震設計および耐震補強プログラムをどのように見直すべきか？
- ⑥ カリフォルニア州のフリーウェイは地震に対して安全か？

これによれば、サイプレス高架橋、ベイブリッジについては、両橋とも当時の技術基準に準拠して設計・施工されており、維持を含めて欠陥は認められないとしたうえで、建設当時の耐震技術が未熟であったことを指摘している。

興味深いのは、個々の技術的な指摘もさることながら、耐震性に目を向けるための仕組みが不十分であったとの認識から、耐震安全性の確保は、道路施設の設計、施工上最も重要な事項であることを州としてはっきりと認識するとともに、最終的にはすべての交通施設が地震に対して安全であり、重要な構造物は地震後も機能を維持できるようにする必要性があることを勧告している点であ

る。

これは、従来カリフォルニア州においては(アメリカではといってもよいかもしいない)、地震対策の重要性については、橋梁等の個々の施設の設計基準の中に示されているだけで、カリフォルニア州交通局の施策の中には取り入れられていないためである。交通渋滞の緩和と予算上の制約は、カリフォルニア州交通局の抱える大きな問題となっており、これが過去20年間にわたり耐震性の確保に対して十分な対策を実施することを妨げてきたといわれている。したがって、発生頻度は低いが一度発生すると大きな被害を生じる地震に対する安全性の確保は、継続的に生じる交通渋滞の緩和に対する要求とは別の観点からとらえ、耐震性の確保を、州の施策の1つとして明確に位置付けることの重要性を指摘している。

これを受けて、平成2年6月に、カリフォルニア州は、D-86-90とよばれる通達を出している。ここでは、交通施設の建設プロジェクトおよび交通施設や公的建築物を含むすべての州の構造物の設計および施工に対する予算、人員等の配分を決めるに際しては、耐震安全性に十分な優先度を与えるように考慮することは、カリフォルニア州の方針であるとしたうえで、

- ① 州管理のすべての交通施設が地震時に崩壊しないように、また、重要な交通施設は地震後も機能を維持できるようにするための詳細なアクションプランを作成する、
- ② 交通局が耐震安全性に関する政策、基準、実務的な技術等を策定したり、複雑な構造物に対する施工や補強設計の耐震安全性を確認するに際して、外部の専門家の助言を得ることのできる公的な手続きを確立する、
- ③ 重要な交通施設が地震に対してどの程度被害を受ける可能性があるかを広範囲に評価するための地震工学に関する基礎的研究や個別の問題に応じた研究プログラム、および、交通施設の地震時挙動を測定するための強震計を設置するプログラムに、高い優先度を与える、

としている。これらの詳細については、現時点ではわからないが、今回の地震を契機としてカリフォルニア州では、橋梁を中心とする道路施設の耐震化対策に本格的に乗り出すものと考えられる。

(6) ま と め

以上、ロマプリータ地震による橋梁被害の概要を示した。被害の詳細な解析はこれからの段階であるが、被災状況からみて、今回の地震による橋梁被害の特徴は以下のようにまとめられる。

- ① 落橋をはじめとする重大な被害を生じた主因は、

それらの橋がいずれも1971年以前の旧耐震設計基準に準拠していたために、現在のカリフォルニア州の耐震設計基準からみると設計地震力が小さく、耐震設計上の構造細目が十分ではなかった点にあると考えられる。カリフォルニア州における橋の耐震設計法は、1971年サンフェルナンド地震を境に抜本的に変化しており、1973年以降は、設計地震力を大きく上げるとともに、橋脚の粘りを向上させ、さらに、落橋防止装置の設置等、耐震設計上の構造細目も重視されている。今回の地震では、1973年以降の耐震基準に準拠して設計された橋で、大きな被害を生じたものはなかった。

② 橋梁被害の多くは、埋立て地盤、湿原（有機質土）のような軟質な地盤上で生じている。これは、このような地盤では、地震動の増幅が大きかったためと考えられる。また、橋梁周辺で液状化による噴砂の堆積した箇所もあったが、橋脚周辺の地盤にクラックが入った程度であった。今回の地震では、液状化や地盤の不等沈下が主因となった橋梁の被害は認められない。

③ 1971年以前の旧耐震基準で設計された橋に対しては、1971年サンフェルナンド地震以後落橋防止装置（桁間連結装置）を設置するとともに、RC橋脚の耐震補強が実施されつつあった。今回の被災地域内には、落橋防止装置が設置されていたために、著しい被害を免れた橋が多数存在しており、橋脚等に致命的な損傷が生じない範囲では桁間連結装置の有効性が改めて認識された。

謝 辞：本報告の多くは、ロマプリータ地震政府調査団および文部省調査団による現地調査によるものである。被災調査に際しては、カリフォルニア州交通局をはじめとする数多くの日米の関係機関および関係者に変なお世話になった。これらを1つ1つ示すことは紙面の関係でできないが、ここに記して厚くお礼申し上げる次第である。

2.2 ロマプリータ地震によるサイプレス高架橋の被災特性の検討

後藤洋三 (Yozo GoTO)*1
 家村浩和 (Hirokazu IEMURA)*2
 川島一彦 (Kazuhiko KAWASHIMA)*3
 藤野陽三 (Yozo FUJINO)*4

(1) はじめに

サイプレス高架橋の被災は41名の生命を奪うとともにサンフランシスコ湾岸高速道路網の一隅を切断して大きな経済的損失をもたらしたが、わが国においても、都市型道路施設被災のインパクトの大きさと、48橋脚が

連続して崩壊し延長1.2kmが落橋するに至った構造上の問題点に、大きな関心が寄せられている。

アメリカにおいては、サンフランシスコ市内の各所に類似の高架橋が存在し、部分的な被害を被っているものも多いことから、原因の究明と耐震補強法の開発が急務であり、サイプレス高架橋の落橋しなかった部分を利用した実橋の載荷試験をはじめ、各種の調査、研究が精力的に行われている。

そこで本文は、上述の載荷試験の結果とわが国で実施された数値解析例に沿ってサイプレス高架橋の被災特性を定量的に考察するとともに、わが国の現行の耐震基準による同一条件での試設計から、サイプレス高架橋の耐震強度が現在のわが国の耐震設計の視点からどのようにとらえられるかを示すこととする。

(2) 実橋の強制振動および水平力載荷実験による耐震性の検討

CALTRANS (California Department of Transportation) とUCB (University of California at Berkeley) は、サイプレス高架橋の被災原因の追及と、残された同形式高架橋の補強方法の検討のため、起振器による強制振動実験および水平力載荷実験を実施した^{18)~21)}。本章では、それらの結果の概要を紹介するとともに、若干の考察を加える。

a) 実験対象の高架橋

振動および載荷実験には、オークランド市の第13~14番目通りにあるNo.45~47橋柱に支えられた2スパンの高架橋が採用された。この高架橋は、崩壊したサイプレス高架橋のすぐ南に位置している。地震による被害としては、若干のクラックが入った程度で、元の高架橋の強度特性を検討するうえで最適と判断された。高架橋の形式は、いずれも上層部横桁がRC構造、上層部ラーメンの下端でヒンジを採用したタイプ1(図-26)である。地震後の材料試験で、コンクリート強度は500kgf/cm²、鉄筋の降伏強度は3400kgf/cm²であったことが確認されている。また構造体の全重量は約2750tfである。

b) 強制振動実験

元の高架橋の振動特性を検討するため、写真-18に示した回転型起振器による橋軸方向の強制振動実験が行

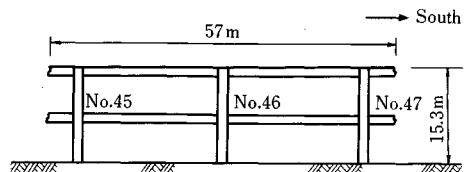


図-21 振動および載荷実験に用いたサイプレスRC高架橋の一部

*1 (株)大林組技術研究所第5研究室長
 *2 京都大学工学部土木工学科助教授
 *3 建設省土木研究所耐震研究室長
 *4 東京大学工学部土木工学科教授

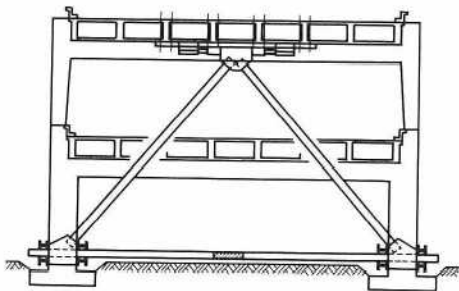


写真一八 強制振動実験に用いられた回転型起振器
(京都大学工学部 竹脇 出氏提供)

われた。起振機は上層の桁上に設置され最大加振力は約3tfである。その結果、1次および2次の固有振動数は、2.5 Hzおよび6.5 Hz、減衰定数は2~3%であることがわかった。全断面有効としたフレームモデルの固有振動数の計算値が2.8 Hzと7.1 Hzであるから、ひびわれなどの影響により剛性が若干低下しているものと考えられる。減衰定数が2~3%と予想以上に低いが、これは上層部の振動エネルギーがヒンジ構造のため下層部や基礎部に伝達されず、したがって有効に消散しない結果であると考えられる。軟弱地盤の振動の継続時間は硬質地盤のそれより長く、低減特性の構造物は応答倍率が増大して共振的な挙動を示すことになる。サイプレス高架橋の崩壊の原因の1つであったと考えられる。

c) 元の高架橋の載荷実験

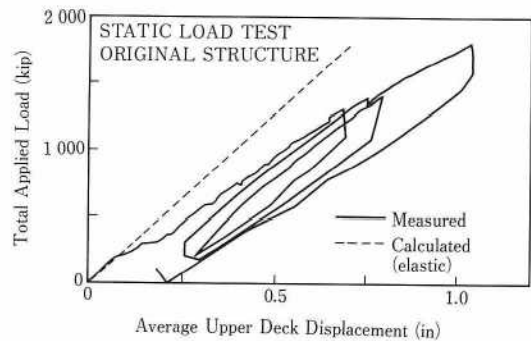
元のRC高架橋の耐震力を検出するため、No.45~47の各橋柱に、図一22および写真一19に示したA型の橋軸直角方向水平力載荷装置が設置された。水平載荷能力の合計は2000tfである。上層桁部の橋軸直角方向平均変位と全復元力の関係が図一23に示されている。載荷経路としては片振幅の繰返し漸増変位が採用された。全荷重が700tf(1400kips)になった時点でヒンジ部直



図一22 A型水平力載荷装置 (S. Mahins¹⁹⁾による)



写真一十九 A型加力装置と試験補強されたNo.45および46のRC柱 (京都大学工学部 竹脇 出氏提供)

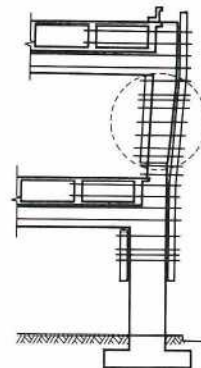


図一23 初期の水平力載荷実験 (S. Mahinら¹⁹⁾による)

下の受台にせん断クラックが発生したので、荷重を下げ、崩壊を防ぐための部分補強が施された。この時点の水平力は、全重量の約25%に相当するから、建設時の設計震度0.06は十分に満足していたものと考えられる。

d) 高架橋の試験補強工法と再載荷実験

図一23に示した初期載荷実験後、No.45~47の各橋柱の補強工事が実施された。補強工法の有効性を検討するために、各橋脚で異なった工法が採用されたが、その概要は次のとおりである。No.45の橋脚では、図一24および写真一19に示すように、橋脚の両面にHビームを配し、それらをタイロッドで締め付ける方法を採用した。No.46の橋脚では、鋼製パイプとタイロッドで柱



図一24 No.45 RC柱の試験補強工法 (S. Mahinら¹⁹⁾による)



写真-20 試験補強された No. 47 の RC 柱
(京都大学工学部 竹脇 出氏提供)

部のせん断補強を行うとともに、ヒンジ部直下の柱のせん断補強を、断面斜め方向に埋め込んだテンションロッドにより行っている。No. 47 の橋脚では、写真-20 に示すように、鋼板を柱およびヒンジ部に巻きつける方法を採用している。

図-25 には、図-23 と同様に上層部桁変位と全復元力の関係を、試験補強後の実験について示してある。耐力も約 1870 tf 程度まで増加しているとともに、塑性域での復元力の低下がなく、変形性能に富んだものになっている。No. 45~47 の各橋柱に採用された補強工法の効果の程度については、現在鋭意検討中とのことである。いずれにしても、既存の構造物の強度と変形性能の両者を高めるための補強工法には、かなりの工夫が必要である。

(3) 地震応答解析による被災特性の検討

すでに多くの調査報告が指摘しているように、延長約 2 km のサイプレス高架橋の被災分布は、地盤条件と橋脚の構造形式によって異なっていた。すなわち、北側の

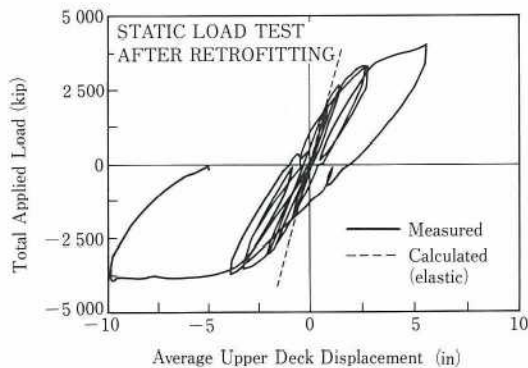


図-25 試験補強後の水平力載荷実験 (S. Mahin ら¹⁹⁾による)

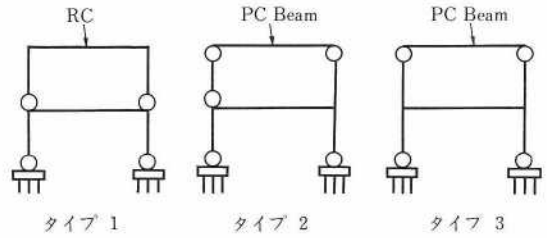


図-26 橋脚の構造形式

地盤の軟らかいところにある高架橋は 1 スパンを例外的に残して落橋したのに対して、南側の締まった砂丘地盤にある高架橋は、北側から入り込んだ約 150 m を除いて、落橋を免れた。

また、図-26 の概念図に示した構造形式でみると、北側ではタイプ 1 とタイプ 2 はすべて崩壊したが、タイプ 3 のうちの 2 基は大破しながらも桁を支持し続けた。また北側から南側に入り込んだ崩壊はタイプ 1 からタイプ 3 に変わったところで止まっていた。

したがって、本章では文献(22)に報告された数値解析例を紹介しながら、地盤ならびに橋脚の応答特性と被災特性の関係を考察する。

a) 地盤の地震応答

サイプレス地区から約 2 km 離れた軟弱地盤上で最大 0.28 g の加速度が記録されているが、サイプレス地区の北側と南側で地震動が具体的にどれほど異なっていた

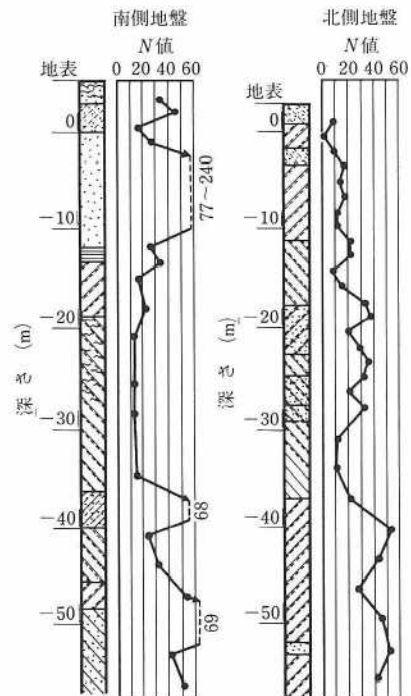


図-27 サイプレス地区の土質柱状図²²⁾

か明らかでない。そのため、南側と北側の地盤をそれぞれ代表する2種の地盤モデルを設定し、一次元の重複反射理論による解析が行われた。

この解析では、地盤の材料非線形性は弱非線形域の応答に適用できる等価線形化法によって考慮している。これは、基盤から入射される地震波の振幅を後述するように34 galとしたため、地盤に大きなひずみが生じないと予想したことによる。

① 地盤条件と入力地震波

図-27は地震後にCALTRANSが実施したボーリングデータをもとに作成した南側と北側の代表地盤の土質柱状図である。南北の最も顕著な違いは地表から16.5 mまでの間で、北側は約2 mから6 mが軟弱なベイマッドになっているのに対し、南側は約4.5 mから16.5 mが大変よく締まったシルト質砂層になっている。それ以深は、南北ともにシルトを主とする堆積層が複雑な層序で続いており、南側では地表から155 mに、北側では172 mに基盤岩が現われる。表-3に、文献23)、24)ならびにN値を参考に設定されたせん断波速度を示す。十分な情報がない深さ55 mから基盤岩までは、拘束圧の1/4乗に比例してS波速度が増加すると仮定された。

基盤から入射する地震波には、本橋から約7 km離れ、基盤岩と同一の層が露頭していると考えられるイェルバブエナ島で観測された記録のEW成分(0.067 g)を、入射波解析の理論に従って1/2とした波が用いられた。

② 解析結果

基盤岩と地表の間の微小振幅時の伝達関数を図-28に示す。1次の卓越周期は0.66~0.68 Hzで、そのピークの伝達率は南北ほぼ同じであるが、高次ピークの伝達率は北側の方が大きい。大町らは現地でも常時微動を測定し卓越周期が0.7 Hz付近にあることを報告しており²⁵⁾、

解析の1次卓越周期とほぼ一致した結果となっている。

図-29は地震応答解析から得られた波形を示している。北側は最大加速度が238 galに達しているのに対し、南側は164 galにとどまっている。

b) 地盤と橋脚基礎の相互作用の解析

① 解析方法

図-27に示されるように北側と南側の地盤は表層付近で著しく異なっており、北と南で基礎に作用する地盤のばねや有効入力地震動、地盤への分散減衰特性が大きく異なっている可能性がある。そこで、三次元の非軸対

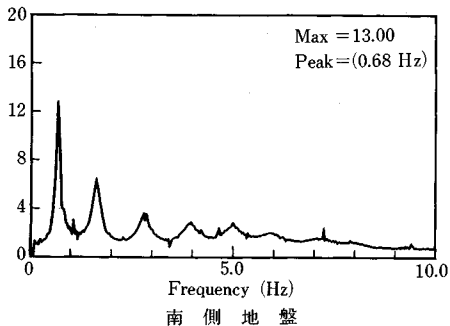
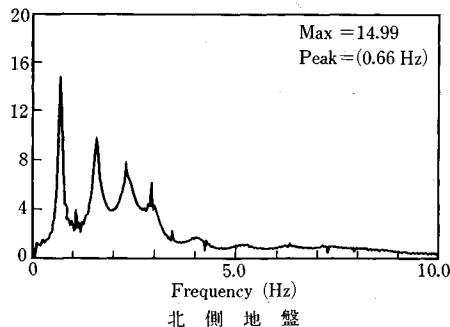


図-28 基盤岩と地表間の伝達関数(微小振幅時)

表-3 地盤のせん断波速度設定値と等価線形化解析によるせん断剛性、せん断ひずみ

南側地盤				
層数	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	収束時せん断剛性 (t/m ²)	最大せん断ひずみ* (×10 ⁻⁴)
1	4.4	200	5 300	1.28
2	2.9	250	6 900	2.53
3	9.2	350	14 600	2.32
4	2.3	300	17 400	2.74
5	6.0	250	12 000	4.63
6	14.0	250	11 900	5.87
7	16.0	350	19 700	3.77
8	20.0	425	33 700	2.47
9	20.0	455	39 700	2.63
10	20.0	480	43 500	2.90
11	20.0	505	48 900	2.63
12	28.2	525	53 400	2.47
基盤	—	1 400	—	—

* 等価線形化解析終了時の値

北側地盤				
層数	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	収束時せん断剛性 (t/m ²)	最大せん断ひずみ* (×10 ⁻⁴)
1	2.1	150	2 500	1.90
2	4.2	80	600	27.38
3	7.6	220	9 100	3.07
4	6.7	250	11 700	3.50
5	9.8	300	10 900	5.00
6	5.0	250	12 000	5.36
7	16.0	350	23 600	2.99
8	20.0	425	33 300	2.29
9	20.0	455	40 800	2.22
10	20.0	480	44 400	2.61
11	20.0	505	48 900	2.60
12	20.0	525	53 600	2.34
13	22.3	540	56 500	2.46
基盤	—	1 400	—	—

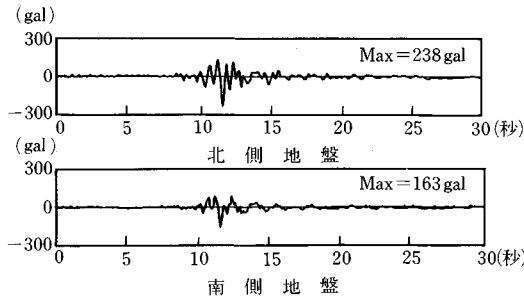


図-29 地表面の応答波形²²⁾

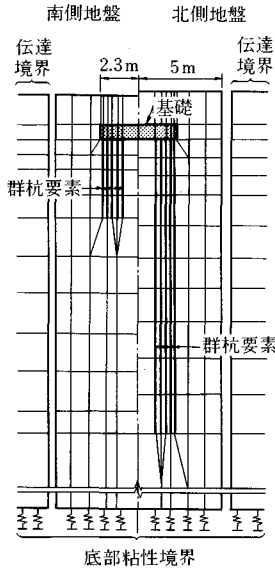


図-30 地盤と橋脚基礎の相互作用解析モデル²²⁾

称振動が解析できる回転体有限要素法を用いて基礎と地盤の相互作用が解析された。解析はフーチング1基ごとに行い、群杭は同心円で区切ったグループごとに等価の変形性能を有する円筒体にモデル化された。図-30に要素分割図を示す。

強震時を対象とした解析であるので、地盤定数には等価線形解析から得られた等価剛性と等価減衰が使用された。なお、CALTRANSは現地のフーチングについて水平載荷試験を行っているが、結果は未発表である。

② 解析結果

相互作用ばねと有効地震波は橋脚の柱がヒンジ結合されているフーチングの上面で評価することとし、正弦波加振力を作用させて相互作用ばねを求めている。

タイプ1橋脚の1フーチング当たりの静的なばねは北側で750 tf/cm、南側で2300 tf/cmとなっている。ばねの振動数依存性は北側の方が顕著で、橋脚の1次固有振動数域では500 tf/cmまで低下する。一方、1次固有振動数域に注目するかがり、有効入力地震動と逸散減衰の

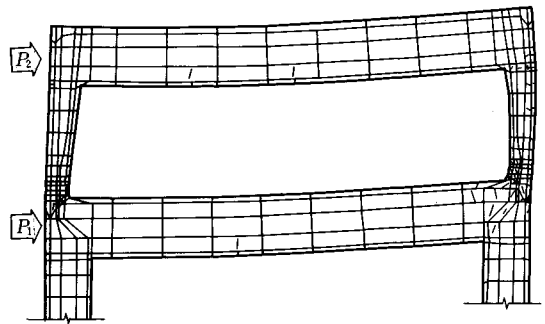


図-31 タイプ1橋脚のひびわれ図²²⁾

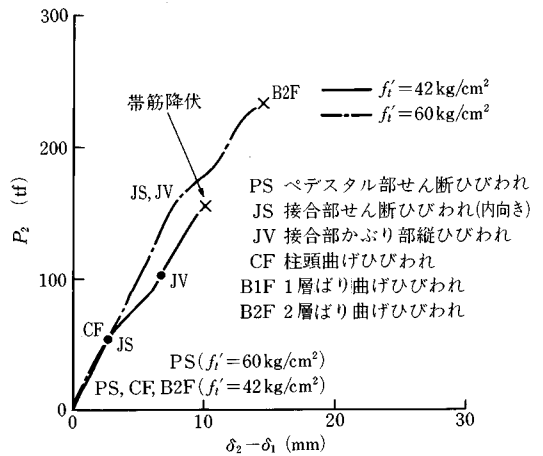


図-32 層せん断力-層間変位 (タイプ1上層)²²⁾

影響は小さい結果となっている。

c) 橋脚のFEM非線形解析

① 解析方法

橋脚の破壊に至る挙動と荷重-変形関係を解析的に明らかにするため、汎用非線形解析プログラムにコンクリート構成則を組み込んだ解析が行われた。コンクリートは二次元平面応力のソリッド要素で、鉄筋ははり要素またはトラス要素でモデル化され、問題となるヒンジ部はシャーキー、ジベル筋、帯筋に至るまで詳細にモデル化された。材料定数は現地から採集された試料の試験結果に基づき決定されている。

② 解析結果

タイプ1については、自重解析の段階ですでに上層ラーメン下端のヒンジ部の受台に、外向きのせん断力による斜めひびわれが入る結果となっている。自重解析後に水平力を載荷した結果が図-31である。ひびわれゾーンがヒンジの下部全域に広がっていることがわかる。

図-32はタイプ1橋脚に関する層せん断力-層間変位の解析結果である。自重下で上層を支える受台部にせん断ひびわれが発生し、水平力載荷に伴い上層柱頭部、上

層柱下部と下層ばりの接合部、上下層ばりの順でひびわれが入る。そして、ヒンジ受台から下層の柱はり接合部の曲折筋にかけてせん断ひびわれが成長し、同部の帯筋が降伏した後、解が不安定となる。実際の帯筋はコの字形で閉じていなかったため、この段階では抜け出して拘束力を失い、上層柱下部が外にすべり落ちるようなせん断破壊が生じたと考えられる。一方、一般部の柱はり主筋は下層ばりの一部を除いて降伏まで至っていない。

現地調査の結果から、上層横ばりと柱頭の接合部の内側からの割裂が報告されている。解析では上層横ばり下部左端はひびわれ寸前であり、実際には下主筋は柱側に不十分な定着長さ（20φ程度）で埋め込まれていたため、上述したせん断破壊に連動してこの部分の鉄筋が付着切れを起こし、ひびわれが急成長したと考えられる。

図-33はタイプ3橋脚に関する層せん断力-層間変位図である。水平荷重の作用に対し下層ばりの下筋、同上筋、下層中間柱の主筋の順に降伏し、最後に上層柱基部の主筋が降伏する。変形は中間柱が降伏してから大きくなりだし、上層柱部が降伏すると急激に大きくなる。終局荷重はタイプ1とほぼ同じであるが、曲げ破壊であるため変形状は全く異なることが示される。

a) 橋脚の非線形地震応答解析

① 解析方法

1スパンの橋脚を図-34に示すせん断形3質点系にモデル化した解析が行われた。上層と下層の復元力特性には、3)の解析で得られたせん断力-層間変位関係をマルチニア系のスケルトンカーブで近似したものが用いられた。すなわち、タイプ3の上、下層とタイプ1の下層については曲げによる破壊が先行することから、履歴ルールはエネルギー吸収が見込める武田モデルとし、タイプ1の上層についてはせん断による破壊であることが

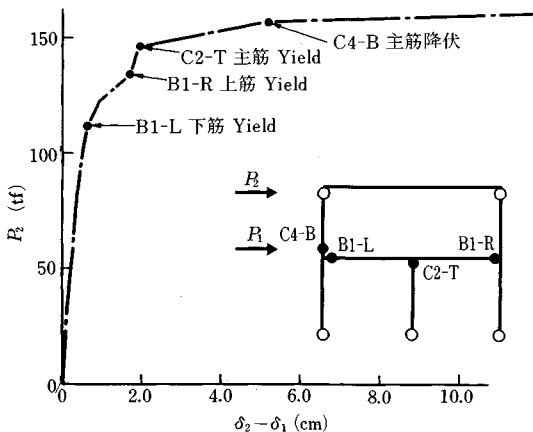


図-33 層せん断力-層間変位 (タイプ3上層)²²⁾

ら、履歴ルールはエネルギー吸収の小さい原点指向型モデルとされた。地盤と基礎の相互作用ばねには2)の解析から求められた値が用いられ、減衰はコンクリート構造体の減衰を3%とし、これに逸散減衰の効果をひずみエネルギー比例法で加算して用いている。

地震波には2)の解析で得られた有効地震波が用いられた。

② 解析結果

南側地盤上のタイプ1橋脚の微小振幅時の1次固有周期は0.39秒と計算されており、b)で紹介した実測結果と一致している。

時刻歴応答が図-35である。また、それぞれの層に

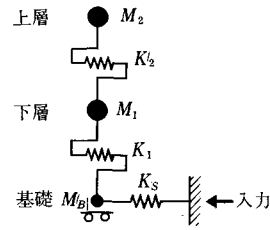
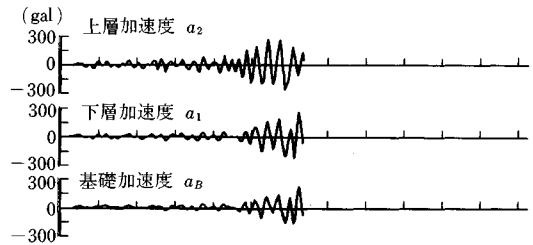
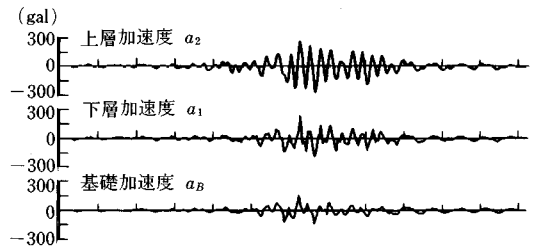


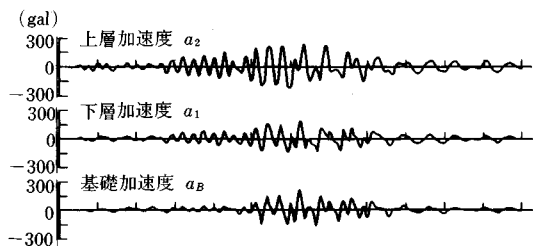
図-34 動的解析モデル



タイプ1 北側地盤



タイプ1 南側地盤



タイプ3 北側地盤

図-35 時刻歴応答波形²²⁾

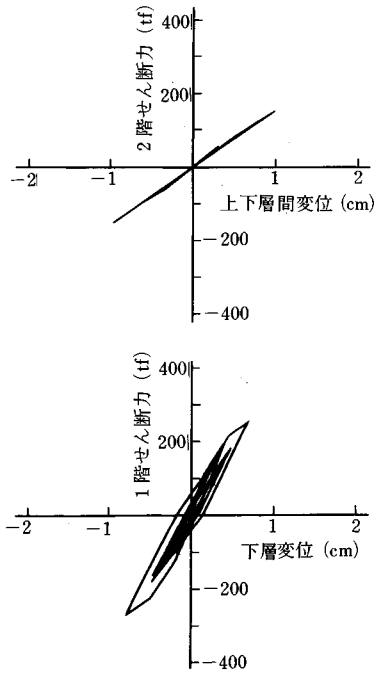


図-36 タイプ1南側地盤応答履歴

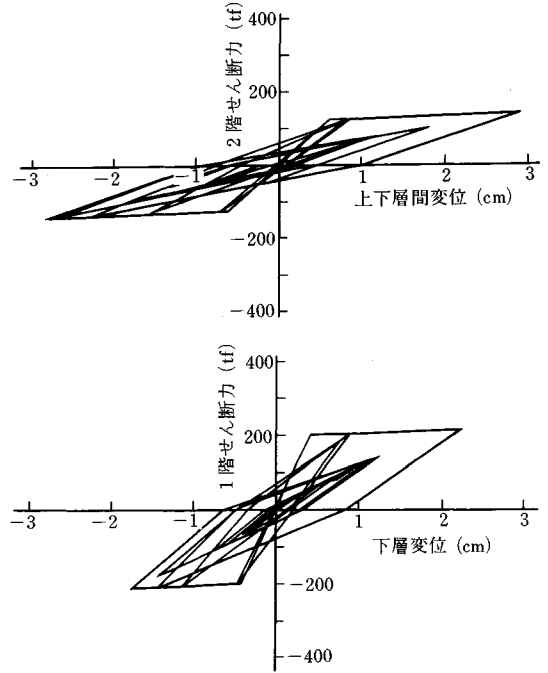


図-38 タイプ3北側地盤応答履歴²²⁾

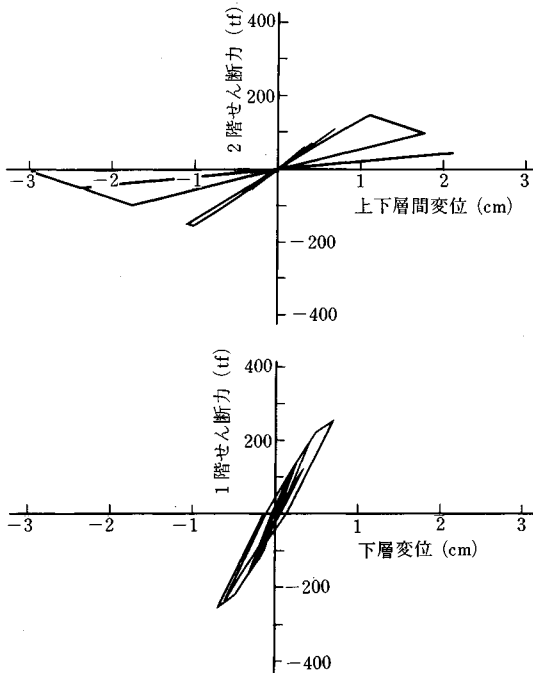


図-37 タイプ1北側地盤応答履歴²²⁾

おける層せん断力-変形関係の履歴カーブが図-36から図-38である。北側地盤のタイプ1橋脚は、入力地震波がピークに達した直後に計算の続行が不可能となっている。一方、南側地盤のタイプ1橋脚は、下層に剛性の

低下が認められるが崩壊に至っていない。ただし、上層の層間最大変位は1 cmに達している、崩壊まで余裕のない状態であったことが示される。

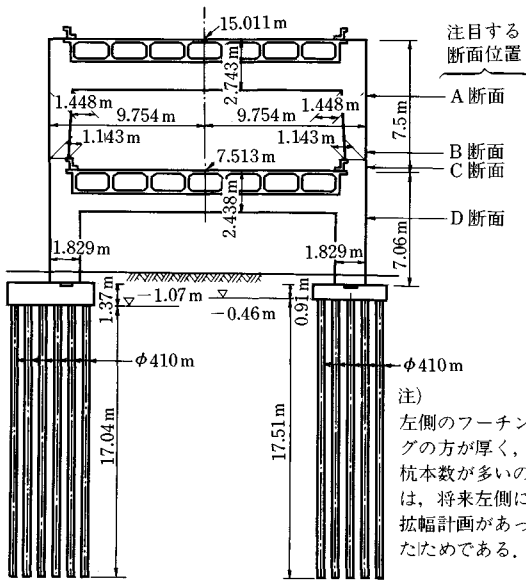
タイプ3の橋脚は北側地盤にありながら崩壊に至っていない。ただし、上層の層間最大変位が3 cmに達しており、大きなひびわれを発生しながらも崩壊を免れた実際の状況によく対応した結果となっている。

(4) わが国の耐震基準による同一条件での試設計

a) 解析対象橋脚の特性

サイプレス高架橋は、アメリカにおいてまだ十分な耐震設計法が整備される以前に、設計水平震度0.06という小さい地震力を勘案して設計された橋であり、この橋がロマプリータ地震で被害を受けたこと自体は上述の解析でも明らかなように、ある意味で当然のことである。カリフォルニア州では1973年に耐震設計法を抜本的に改訂しており、現在ではカリフォルニア州においてもこのような橋が設計されることはない。しかし、仮にこの地点に現在のわが国の耐震設計法で設計された橋があるとすればどのような橋となるかを知ることは、ロマプリータ地震の被害とは一体何であったかを現在のわが国の耐震設計の視点からとらえるためにはよい判断材料になるであろう。このような観点から、サイプレス高架橋をわが国の現在の道路橋示方書²⁸⁾によって試設計してみた²⁷⁾。

サイプレス高架橋は、ヒンジの位置や横ばりの補強法



図一39 解析対象とする橋脚の構造（橋脚番号 81）

等によっていろいろなタイプに分けられるが、ここで解析対象としたのは、今回の地震で最も被害の著しかったタイプ1（図一26）の形式である。

図一39は、解析対象とした橋脚の構造を示したものである。このタイプの橋脚では、上述した載荷試験例と解析例から明らかになったように上層ラーメンの下端にあるヒンジ部（断面B、図一39参照）と、これを支持する下端ラーメンの横ばり上に設けられた受台（断面C、図一39参照）の損傷が落橋に大きく関係したと考えられている。

断面Bには、直径57mmの太径の鉄筋が30本配置され、鉄筋比は5.5%に達する。これに対して、帯鉄筋としては直径13mmの鉄筋が30cmピッチに配されているだけで、帯鉄筋比は0.078%に過ぎない。これは、上層のラーメンの隅角部（断面A）に生じる曲げモー

メントで決まった鉄筋をそのまま断面Bまで伸ばしているためである。ここに、柱の断面寸法は、断面Aでは1.22m×1.45mであるのに対して、断面Bでは1.22m×1.14mと31cmもしぼっている。しかも、上層ラーメンは死荷重によっていわば足が開く形になっているため、常時柱に大きなせん断力が作用することになる。これが、地震時の耐力を弱める方向に作用していたと考えられる。

一方、上層ラーメンを支持する断面Cは、断面Bと同じ寸法であるにもかかわらず、主鉄筋としては直径32mmの鉄筋が14本（鉄筋比0.81%）と、断面Bに比較すると極端に少ない。これは、設計水平震度が0.06と極端に少なく、受台の高さが低いため、設計上は大きな断面力が生じないためである。

b) 橋脚の動的耐力の推定

対象橋脚の試設計をする前に、これがわが国の道路橋の耐震規定からみてどの程度の耐力を有しているかを検討するために、道路橋示方書V耐震設計編²³⁾に示される「RC橋脚の地震時保有水平力の照査」によって橋脚の耐力を推定することとした。ただし、ここでは、終局時の動的耐力を求めることが目的であるから、曲げ破壊がせん断破壊に先行する場合には地震時保有水平耐力ではなく、終局水平耐力 P_U にアーム長を乗じた値を曲げ耐力とみなすこととする。

主要な断面に対して道路橋示方書によって計算した終局耐力（曲げ耐力 M_U およびせん断耐力 P_S ）を示すと表一4のようなになる。表一4中には、仮に橋に1gの加速度が水平方向に作用したとした場合に生じる断面力（曲げモーメント M_Q およびせん断力 P_Q ）および、死荷重によって橋脚に生じる断面力（曲げモーメント M_D およびせん断力 P_D ）が示されている。橋脚の動的耐力から死荷重によって生じる断面力を差し引いた値が橋脚が有している地震に対して抵抗できる動的耐力であるから、これを1gの加速度が水平方向に作用した場合に生

表一4 橋脚の動的耐力と破壊が生じる水平震度

橋脚タイプ	照査断面位置	自重による断面力		重力に相当する慣性力が作用した場合の断面力		道路橋示方書V耐震設計編による耐力		破壊が生じる水平震度	
		曲げモーメント M_D (tf·m)	せん断力 P_D (tf)	曲げモーメント M_Q (tf·m)	せん断力 P_Q (tf)	曲げ耐力 M_U (tf·m)	せん断耐力 P_S (tf)	曲げ破壊	せん断破壊
タイプ1 橋脚	A断面	275	67.9	1233	296	1580	96.8	1.06	0.1
	B断面	0	67.3	0	307	1090	73.7	—	0.02
	C断面	54	78.7	219	317	324	89.4	1.23	0.03
	D断面	392	84.8	2989	635	2965	125.2	0.86	0.06

注) 1. —は、破壊が生じる水平震度が十分大きいことを示す。

2. 耐力は、以下のようにして求めた値である。

曲げ耐力：耐震設計編5.4.2に規定される鉄筋コンクリート橋脚の終局水平耐力×アーム長

せん断耐力：耐震設計編5.4.3に規定される鉄筋コンクリート橋脚のせん断耐力

じる断面力で割ることにより、橋脚が崩壊するであろう水平震度 k_h を推定することができる。すなわち、

$$k_h = (M_o - M_b) / M_q \dots\dots\dots (1)$$

もしくは、

$$k_h = (P_s - P_b) / P_q \dots\dots\dots (2)$$

式(1)は曲げにより破壊する場合の、また、式(2)はせん断で破壊する場合の水平震度を表わすから、両者のうちの小さい方の値が実際には重要となる。このようにして、主要な断面ごとに破壊の生じ始める水平震度を求めた結果が表-4の最も右の欄である。これによれば、曲げに対してはいずれの断面もかなり余裕があり、橋脚の耐力はいずれもせん断で決まる。

図-40は、このようにして求めた破壊が生じ始める水平震度を主要断面について示したものである。ヒンジ位置で破壊が生じる水平震度が最も小さく、0.02(断面B)~0.03(断面C)に過ぎない。設計において照査に用いる耐力推定式を用いているため、動的耐力が小さめに算定され、このため、式(2)による破壊の生じ始める水平震度が小さめに求められているが、いずれにしてもヒンジ位置ではせん断に対する余裕が非常に小さいといえよう。

c) 道路橋示方書²⁸⁾に基づく試設計

基本的な橋梁計画として、わが国で2層式橋脚を設計するとすれば、一般にはヒンジを設けないと考えられる。このため、ヒンジを設けずに剛結構造とした場合(以下、剛結構造とよぶ)と、サイプレス高架橋に合わせて同じ位置にヒンジを設けた場合(以下、ヒンジ構造とよぶ)

の2種類を想定することとした。

試設計では、上部構造の重量、幅員、橋脚高さ以外は、わが国の道路橋示方書によることとし、道路橋示方書に規定がないものについては、慣例的な設計に従うこととした。サイプレス高架橋では、柱とはりとの接合部にハンチが設けられていないが、わが国ではこのような箇所

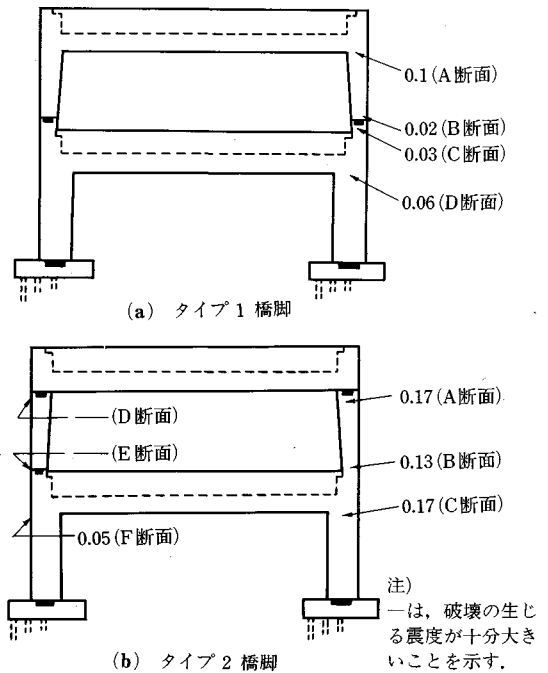


図-40 計算上破壊の生じる水平震度

表-5 主要な設計条件

項 目		数 値	
コンクリートの許容応力度	圧 縮 応 力 度	曲げ圧縮応力度	80 kgf/cm ²
		軸圧縮応力度	65 kgf/cm ²
	せん断 応 力 度	コンクリートのみでせん断力を負担する場合 (τ_{a1})	3.9 kgf/cm ²
		斜引張鉄筋と協同して負担する場合 (τ_{a2})	17 kgf/cm ²
	押抜きせん断応力度 (τ_{a3})	9 kgf/cm ²	
鉄筋の許容応力度	引 張 応 力 度	荷重の組合せに衝突荷重あるいは地震の影響を含まない場合	一般の部材 1 800 kgf/cm ² 水中あるいは地中水位以下に設ける部材 1 600 kgf/cm ²
		荷重の組合せに衝突荷重あるいは地震の影響を含む場合の許容応力度の基本値	1 800 kgf/cm ²
		鉄筋の重ね継手長あるいは密着長を算出する場合	1 800 kgf/cm ²
	圧 縮 応 力 度	1 800 kgf/cm ²	
許容応力度の割増し係数	主荷重+主荷重に相当する特殊荷重+温度変化の影響(鉄筋コンクリート構造)		1.15
	活荷重および衝突以外の主荷重+地震の影響(鉄筋コンクリート構造)		1.5
弾性係数と単位重量	弾 性 係 数	コンクリート	2.5×10^5 kgf/cm ²
		ヤング係数比 n	15
	単 位 重 量	鉄筋コンクリート	2.5 tf/m ³
		アスファルト	2.3 tf/m ³
そ の 他	温度変化の影響		$\pm 10^\circ\text{C}$
	乾燥収縮		-15°C
	コンクリートの線膨張係数		10^{-5}°C

には一般にハンチを設けるので、試設計ではこれを見込むものとした。なお、ごく簡単な試設計ということであるので、あまり細かく断面決定をせず、柱の断面は50 cm ピッチで変化させて最終値を求めることとした。

主要な設計条件は表—5 に示すとおりである。また、設計水平震度 k_h は、道路橋示方書に基づいて次式により求めた。

$$k_h = c_2 \cdot c_G \cdot c_I \cdot c_T \cdot k_{h0} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 c_2 ：地域別補正係数

c_G ：地盤別補正係数

c_I ：重要度別補正係数

c_T ：固有周期別補正係数

k_{h0} ：標準設計水平震度(0.2)である。

ここでは、 $c_2 = c_I = 1.0$ とし、道路橋示方書 V 耐震設計編による固有周期算定法によるこの橋の固有周期が 0.49 秒となることから、 $c_T = 1.25$ 、また、地盤種別を仮に II 種とみなして $c_G = 1.0$ とし、設計水平震度 k_h を 0.25 とした。なお、地盤種別に関しては、基盤の位置

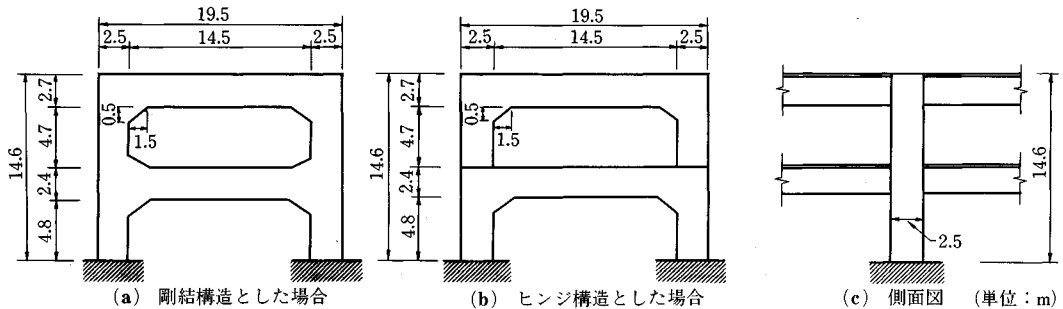
によって III 種地盤と判定される可能性もある。この場合には、設計水平震度 k_h は 0.3 となる。

試設計に考慮した荷重の組合せは、以下のとおりである。

- ① 死荷重 (D)
- ② 橋軸直角方向の地震力 (EQ1)
- ③ 橋軸方向の地震力 (EQ2)
- ④ 死荷重 (D)+地震力 (EQ1)
- ⑤ 死荷重 (D)+温度変化 (+10°C)
- ⑥ 死荷重 (D)+温度変化 (-10°C)+乾燥収縮 (-15°C)

以上のようにして定めた断面が図—41 である。ヒンジ構造を仮定した場合には、おそらくメナーゼヒンジを使用することになると思われるが、まともに計算すると直径 51 mm の鉄筋を 36 本配置しなければならない。脚柱の断面は 2.5 m × 2.5 m であり、主鉄筋のほかに D51 を 36 本配置することはできないほどの鉄筋量となる。

主要点における断面寸法および鉄筋量を比較すると表



図—41 わが国の耐震設計法により試設計した断面

表—6 主要点における断面寸法および鉄筋量の比較

照査断面位置	項目	サイプレス高架橋	わが国の道路橋示方書による試設計	
			剛結構造	ヒンジ構造
A 断面	断面寸法	1.22m × 1.45m	2.5m × 2.5m	2.5m × 2.5m
	軸方向鉄筋量	766 cm ²	707 cm ²	347 cm ²
	軸方向鉄筋比	4.3%	1.1%	0.56%
	帯鉄筋量	2.53 cm ² etc 30cm	11.46 cm ² etc 15cm	11.46 cm ² etc 15cm
B 断面	断面寸法	1.22m × 1.14m	2.5m × 2.5m	2.5m × 2.5m
	軸方向鉄筋量	766 cm ²	707 cm ²	347 cm ²
	軸方向鉄筋比	5.5%	1.1%	0.56%
	帯鉄筋量	2.53 cm ² etc 30cm	11.46 cm ² etc 15cm	11.46 cm ² etc 15cm
C 断面	断面寸法	1.22m × 1.14m	—	2.5m × 2.5m
	軸方向鉄筋量	68 cm ²	—	347 cm ²
	軸方向鉄筋比	0.49%	—	0.56%
	帯鉄筋量	2.53 cm ² etc 20cm	—	11.46 cm ² etc 15cm
D 断面	断面寸法	1.22m × 1.83m	2.5m × 2.5m	2.5m × 2.5m
	軸方向鉄筋量	1 123 cm ²	707 cm ²	571 cm ²
	軸方向鉄筋比	5.03%	1.1%	0.91%
	帯鉄筋量	2.53 cm ² etc 30cm	11.46 cm ² etc 15cm	11.46 cm ² etc 15cm

注) 断面寸法は、面外寸法、面内寸法の順で示している。

—6) となる。これによれば、上層の橋脚下端 (B 断面) におけるコンクリート断面および軸方向鉄筋量は、サイプレス高架橋では $1.22 \text{ m} \times 1.44 \text{ m}$ で 766 cm^2 (軸方向鉄筋比 5.5%) であるのに対して、剛結構造を仮定した試設計では $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ で 706 cm^2 (軸方向鉄筋比 1.1%)、ヒンジ構造を仮定した試設計では $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ で 347 cm^2 (軸方向鉄筋比 0.56%) となる。したがってヒンジ構造を仮定した場合には、コンクリート断面面積では 4.5 倍、軸方向鉄筋断面面積では 0.45 倍になる。また、帯鉄筋は、原設計の実に 9 倍もの量が配置されることになる。

(5) おわりに

本文は、ロマプリータ地震によるサイプレス高架橋の被害原因を、アメリカで実施された実橋の振動・載荷試験、わが国で実施されている解析や現行の耐震基準による同一条件での試設計などから、より定量的かつ実証的な検討を加えたものである。得られた結論を簡単に述べると次のようである。

① 高架橋上層部ラーメン下端にヒンジを有するタイプ 1 橋脚の 1, 2 次の固有振動数は、それぞれ 2.5, 6.5 Hz で、減衰定数は 2~3% であることが振動試験により判明した。低減衰構造であるため、継続時間の長い軟弱地盤での地震動により、共振的な応答を示したものと考えられる。

② タイプ 1 の実験の載荷試験から、ヒンジ部直下の受台 (橋脚) 部のせん断亀裂が、主破壊モードであると確認された。試験補強された同高架橋の最大耐力は、2.1 倍となり、変形性能も大きく増大した。

③ 地盤の地震応答解析の結果、サイプレス地区北側の軟弱地盤の最大応答加速度は、よく締まったシルト層砂層を有する南側地盤のその約 1.5 倍となった。北側地盤における高架橋崩壊の主原因の 1 つは、入力地震動の大きさである。

④ 高架橋の非線形 FEM 解析から、タイプ 1 橋脚は、載荷試験結果と同様に、粘りのきわめて乏しいせん断破壊型の履歴復元力特性を有するのに対し、上層部橋脚上端にヒンジを有するタイプ 3 橋脚は、変形性能が大きい曲げ破壊型の履歴復元力特性を有することが明らかとなった。両タイプの終局荷重がほぼ同じであるにもかかわらず、タイプ 1 は落橋し、タイプ 3 は落橋しない結果となったのは、上記の理由による。

⑤ わが国の現行の耐震基準²⁸⁾による同一条件での試設計と比較すると、サイプレス高架橋の橋脚は、コンクリート断面面積が 0.22 倍、軸方向鉄筋量は 2.2 倍、帯鉄筋量が 0.11 倍の構造となっており、こうした構造に伴うせん断強度の不足と粘りのなさが今回の大被害の原因である。

本文をとりまとめた強い印象は、サイプレス高架橋が建設されてより現在までの約 30 年間にみられる地震工学の大きな発展である。建設当時の技術者は、地盤条件や構造設計上の細部の差が、それほどまでに大きな影響を有するとは、全く予測不可能であったであろう。地震動の計測、構造体の試験法や数値解析法の最近の発展には目を見張るものがあるが、われわれ技術者は、抜け落ちのない構造設計を今後とも目指さなければならない。

なお本文で用いた試験や解析の結果は、参考文献から引用させて頂いたものが多く、関係各位のご討議、ご協力に感謝申し上げる次第である。

3. 道路・鉄道網への影響

亀田 弘行 (Hiroyuki KAMEDA)*1
 長谷川金二 (Kinji HASEGAWA)*2
 谷内田昌熙 (Masaki YACHIDA)*3

(1) はじめに

ロマプリータ地震では、道路橋が大きな被害を受けたため、湾岸地域の交通事情に大きな影響が出た。中でもサンフランシスコ湾の東西を結ぶ橋梁群の中核をなすベイブリッジ (San Francisco-Oakland Bay Bridge) が E9 橋脚の渡り桁の落橋によって使用不能に陥ったことにより、この地域一帯の道路交通の事情が一変した。これにより、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: 湾岸地域高速鉄道) のみとなり、ベイブリッジが閉鎖された 10 月 17 日からの約 1 か月間、BART の乗客が急増した。

ベイブリッジの閉鎖は通常ではとうてい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の交通事情にも影響が及んだ。こうした影響がもつ意義については、交通工学的視点はもちろん、人文・社会的観点からも検討が加えられるべきであろうし、その結果を大都市圏の交通施設の建設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。

このような認識のもとに、以下では、地震の前後における道路交通と BART の状況を中心に、ロマプリータ地震が交通システムに与えた影響を報告するが、道路橋の被害に関する構造工学的側面は 2. で詳しく述べられるのでここでは割愛する。

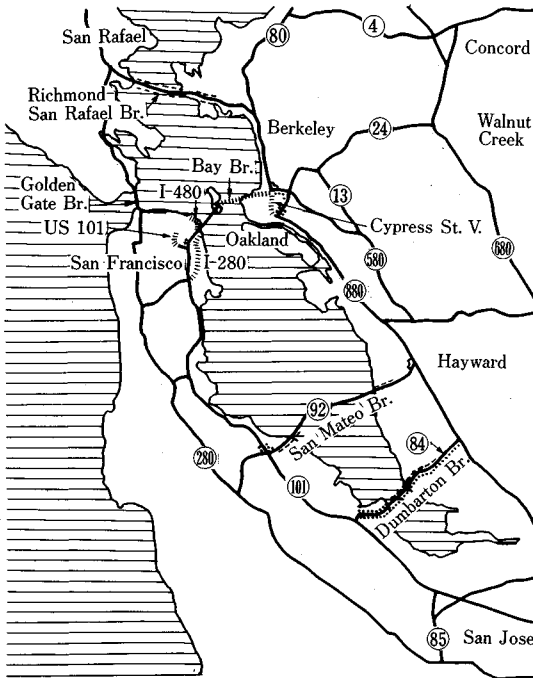
(2) 道路交通システムへの影響

a) 湾岸地域の高速道路網の概況

地震後 3 週間を経過した 11 月 8 日現在の湾岸地域の

*1 京都大学防災研究所教授
 *2 建設省土木研究所主任研究員
 *3 日本鉄道建設公団設計室長

高速道路網の状況を示したのが図—42である。都市活動が最も活発なサンフランシスコ市とオークランド市を比較すると、オークランドでは市街地の環状高速道路をもち、外部との連絡ルートにもすべて接続されていて、全米の各都市で一般的にみられる高速道路網の形態が整備されていたのに対し、サンフランシスコ市へは、北・東・南の3方向からの高速道路のアクセスはあるが、市



— HOV lane
 Auxiliary lane/thru lane
 ■■■■■ Highway closed due to earthquake damage

図—42 サンフランシスコ湾岸地域の高速道路網とロマプリータ地震の影響

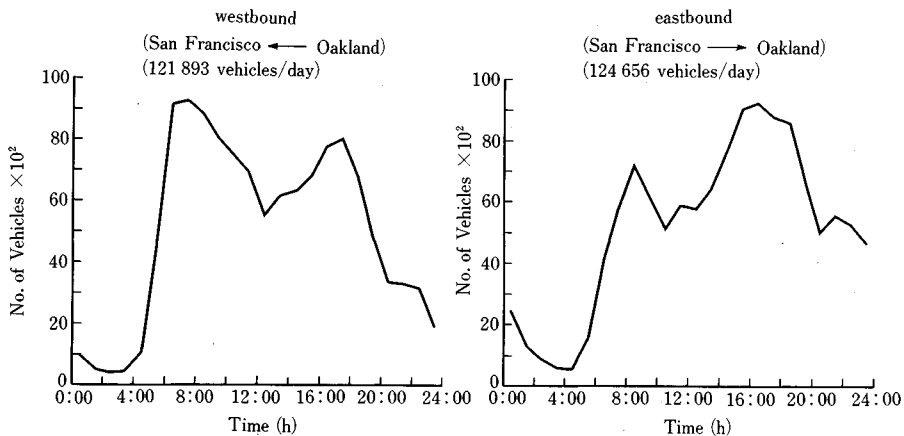
内交通は平面街路に頼っている。これは、1950年代に、都市内高速道路の建設を進めるか BART を建設するかを選択において、住民投票により BART が選ばれたことと関係している。

b) バイブリッジの閉鎖と迂回ルートの対策

図—42において、高速道路の不通箇所が太い点線で示されている。この中で最も影響が大きかったのがバイブリッジの不通である。図—43に、地震の1年前の1988年10月における、バイブリッジの平均的な時間交通量を示した。朝のラッシュ時には西行（オークランド→サンフランシスコ）が、夕方のラッシュ時には逆向きの交通が高いピークを示す。1日の通行台数は両方向合わせて約25万台である。表—7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平均交通量を示した。この表から、バイブリッジの交通量が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バイブリッジが通行不能となった影響は広範囲に及び、図—42や表—7中のバイブリッジ以外の橋梁の負担が当然増大した。カリフォルニア州交通局 (Caltrans) では、バ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、具体的には図—42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 (乗用車による乗合通勤) が対象となる。

バイブリッジは地震後1か月の11月17日に開通し、迂回ルートへの負担は基本的に解消した。その工法等に



図—43 平常時のバイブリッジの交通量 (1988年10月)

表一七 サンフランシスコ湾を横断する橋梁における週日の平均交通量

Name of Bridge	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.

については2.を参照されたい。

(3) サンフランシスコ市、オークランド市におけるフリーウェイの復旧問題

ベイブリッジの復旧は比較的迅速に行われたが、それは、この路線の重要性以外にも、交通体系への影響の大きさに比較して、構造的被害の内容が、構造系全体に及ぶような致命的なものではなかったことにもよる。一方、サンフランシスコ市とオークランド市では、高速道路のRC高架橋の被害により、現在も不通箇所があり、その影響が地域の自動車交通に影響を与えている。

図-44はサンフランシスコ市およびオークランド市のフリーウェイにおける1990年8月現在の通行止区間を示したものである。サンフランシスコ市ではUS 101およびI-280の一部区間、エンパカデロ・フリーウェイの全区間、オークランド市ではI-880の高架橋崩壊区間で依然として通行止が続いている。

以下、1990年8月までの情報に基づいて、これら区間の復旧問題の現状を報告する。

a) US 101 および I-280

US 101は、図-44に示したようにサンフランシスコ市の南から市内に入り、北のゴールデンゲート橋へ続く

道路であり、市内の一部区間では平面道路となっている。この道路では図-45に示すように、北行きがFell St. からGolden Gate Ave. まで、南行きがTurk St. からOak St. までが通行止となっており、Franklin St. への出口も閉鎖されている。このため、北行きではSouth Van Ness Ave. への出口で高架道路を降り、Van Ness Ave. (US 101) へ抜けるルート、および南行きではその逆のルートが迂回路として示されている。しかし、通行止区間の直前に位置するFell St. への出口における交通量も地震前に比べて多くなっており、Fell St. 付近では排気ガス、交通騒音の増加、交通事故の多発など、地域住民の生活に影響を与えている。

I-280は、図-44のサンフランシスコ市の南から市内に入り、US 101と交差した後、市内の東側を走る道路である。I-280ではUS 101との交差点から北へ約2kmの25th Streetまでの区間が通行止となっており、6th St. への出口も閉鎖されている。この通行止区間を地震前には1日約8万7000台の車両が通過していたが、通行止によりサンフランシスコの南からI-280を通して市

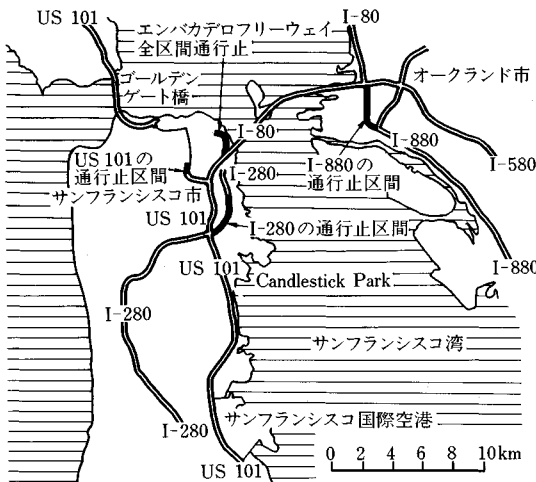


図-44 フリーウェイの通行止区間 (1990年8月現在)

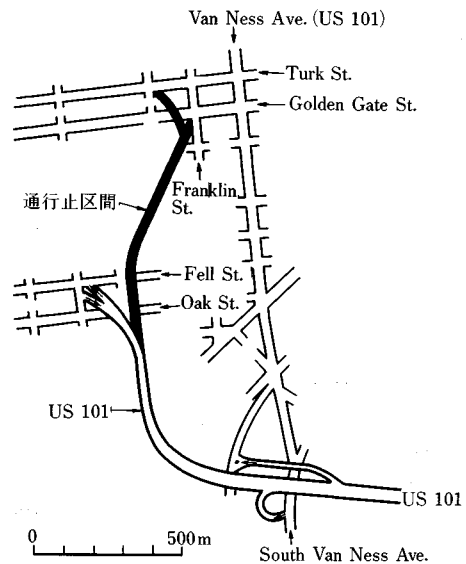


図-45 US 101の通行止区間 (1990年8月現在)

内に入っていた車両の多くが US 101 に流入することとなった。このため、午前の通勤時間帯には、US 101 では交差部より南へ約 3 km の Candlestick Park まで、またさらに南へ約 10 km のサンフランシスコ国際空港まで渋滞の列が伸びることもある。

この US 101 および I-280 の通行止区間については、高架道路の鉄筋コンクリート橋脚に鋼板を巻立てる構造を採用して、州交通局により復旧工事が進められている。一時、US 101 では 1990 年末までに、I-280 では 10 月下旬頃までに復旧が終わり、通行止区間が開通するという報道もあったが、復旧工法の構造的な検討をさらに行う必要から、US 101 では 1991 年 4 月頃に、I-280 では 1991 年の 3 月あるいは 4 月頃に開通が延期された。

b) エンバカデロ・フリーウェイ

エンバカデロ・フリーウェイは図-44 に示したように、ベイブリッジのたもとで I-80 と分岐し、サンフランシスコ湾沿いに北へ走り、Broadway まで続く高架道路である。このフリーウェイでは I-80 との接続ランプ部を含めて、全線にわたり通行止となっている。この道路は I-80 と市内の北東部を結んでおり、地震前には 1 日約 6 万台の車両が通過し、サンフランシスコの主要な観光および商業地域であるチャイナタウン、フィッシャーマンズワーフ、ノースビーチへの連絡路としての役割も有していた。

この道路の復旧としては、当初州交通局は US 101 および I-280 と同様に既存の高架道路を補修・補強し、10 月末までに開通させることを計画していた。これに対して、Agnos サンフランシスコ市長はウォーターフロントの開発と関連して、一部の区間を全面的に取り壊し、新たに地下道路として復旧するという計画を主張している。

図-46 は市長の計画を示したものである。この計画は、Spear St. から先を取り壊し、地下道路として Mission St. と Howard St. の間で地下に入り、フェリービルディングの前を地下で通過した後、Washington St. の東側で再び地上に出てくるというものであり、既存の高架道路に比べて約 15 % 程度、交通容量が減少する。この地下道路の建設には少なくとも 4 年の工期が必要とされており、建設中には北行きとして Main St. から Drumm St. への一方通行道路、南行きとしては Davis St. から Bede St. への一方通行道路を迂回路として使うこととしている。

この市長の計画に対して、チャイナタウン、フィッシャーマンズワーフ地区の商店主などは、エンバカデロ・フリーウェイが長期間にわたり使用できず、地区の経済活動に悪影響を与えると、反対しているが、同地区への迂回路を示した地図の配布、迂回路を示す標識

の設置などを行い、これらの地区への経済的影響をできるだけ軽減するための諸策が施されている。

また、I-80 とエンバカデロ・フリーウェイとの接続ランプ部も復旧が必要とされているが、既存のランプを補修することによる復旧には、同様のランプを新たに建設するに要する工費の 40 % 近くが必要であることがわかり、その他の復旧工事ではその割合が平均して 20 % にとどまっていることなどから、州交通局ではこのランプを取り壊し、新たに建設するという方向で検討が行われている。

このような状況のなかで、市長の計画に反対していたチャイナタウンの一部が賛成側に回るなど、全体としてはエンバカデロ・フリーウェイの取り壊し、再建設の可能性が大きくなっている。ただし、市長の計画には工費として約 1 億 3 500 万ドルが必要とされており、予算を確保するために市長は連邦政府に積極的な働きかけを行っているが、一方向だけを地下道路とし、もう一方向は平面道路とする案、暫定的に平面道路とする案、民間の資金を導入して建設する案なども検討されている。

c) I-880 Cypress St. 区間

I-880 は、図-44 に示したように I-80 から分岐し、オークランド市の西側を通り、サンフランシスコ湾に沿って南下する道路であり、I-80 との分岐部から Market St. までの約 3 km にわたる区間が完全に取り壊されている。この道路の復旧に関してはさらに西側を走る新ルート案、他のフリーウェイを拡充する案、地震前と同じルートで再建設する案などが検討されており、1990 年 11 月に公聴会が開催される予定である。

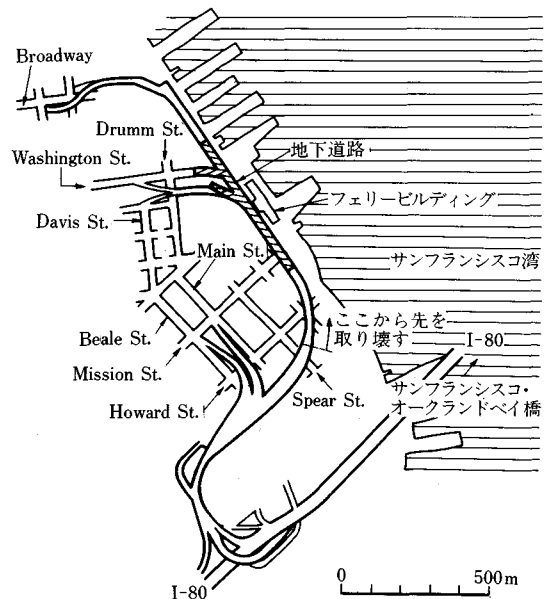


図-46 エンバカデロ・フリーウェイの復旧構想

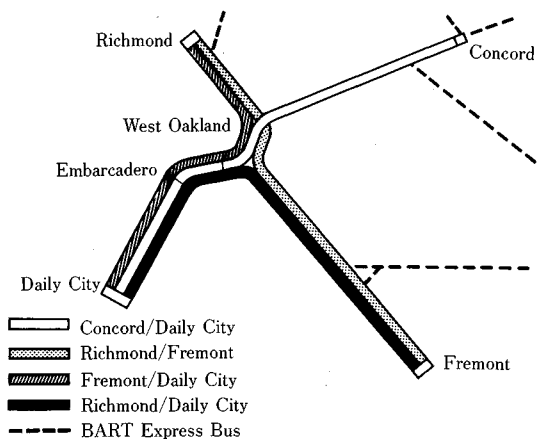


図-47 BART 路線図

(4) BART (湾岸地域高速鉄道) への影響

a) BART の概要

BART (湾岸地域高速鉄道) は、1964 年に建設が始まり 1972 年に第 1 期区間が開通し、1976 年に 4 路線 34 駅の全区間が開業した。図-47 に示すようにサンフランシスコ湾の海底をくぐり、サンフランシスコ市と対岸のオークランド市その他の周辺都市を結ぶ重要な鉄道である。路線は、Daily City, Richmond, Concord, Fremont の 4 か所を起終点とし、全線複線構造で、Daily City~Richmond, Daily City~Concord, Daily City~Fremont, Richmond~Fremont の 4 系統の運行が行われている。営業キロ 115 km の鉄道とフィーダーサービスを行うバス路線を有している。

構造種別の内訳は、開削またはシールド工法による地下トンネル区間 31 km, 高架 37 km, 地平 40 km とサンフランシスコ湾を横断する沈埋トンネル部 7 km からなる。湾内のトンネル部は、図-48 のような断面で沈埋工法により施工された。外周は鋼板で巻かれ、ライニン

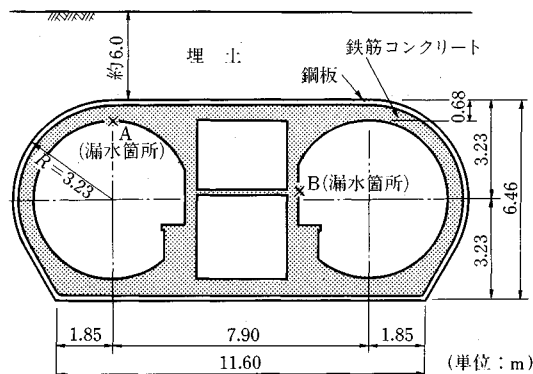


図-48 BART 沈埋トンネル (トランスベィ・チューブ) の断面

グは鉄筋コンクリートできており、中央部に保守作業坑がある。トンネル部の平面図および縦断の略図は、図-49 のとおりであるが、地質はほとんどシルト質粘土であり、一部砂質のところを通っている。

b) 地震発生直後の状況と緊急処置

10月17日5:04 p.m. に地震発生後、8か所の地震計のうち Concord と Walnut Creek の 2 か所を除く 6 か所の地震計が警報を發し、レベルⅢの地震対応計画が発動された。地震発生時には 44 列車が運行中 (湾内トンネル内には 2 列車) であったが、中央指令室は直ちに全列車を停止させ、最低 5 分間はその場に停止しているように命じた。

BART の電力は PG & E より受電しているが、地震により発生したサンフランシスコ一帯の停電は BART にも及んだ。しかしオークランド側の停電は免れたのでオークランド側から全線に給電し、最徐行運転で最寄り駅まで運転し乗客を降ろすことができた。幸いにもほとんどの職員が帰宅直前であったため、直ちに点検チームが編成され、線路と構造物の緊急点検が行われた。点検にはヘリコプター、列車、自動車、徒歩などを用い、橋梁の被害、軟弱地盤区間での地盤変状、高速道路との立体交差部の被害などの調査を行った。

調査の結果、列車の運行に直接支障する被害はほとんどないことが判明し、同日午後 11:00~翌日午前 1:00 までに応急運行を再開した。

c) 構造物被害の概要

BART の構造物の被害は以下に述べるようにごく軽微で、わずかな補修で運転を再開できた。これにより、ベイブリッジ閉鎖中の湾横断交通の主力の役を担うことができた。

1) 湾内トンネル区間

沈埋トンネルの両端にある換気塔とトンネルとは耐震上可動継手となっており、オークランド側で長手方向に 0.75 in の変位があったが、これは被害とはみなされていない (許容限度: 長手方向 ±3.25 in, 上下左右 ±6 in)。またオークランド側へのアプローチ区間で、土被り部分を埋土で施工した箇所の図-48 の A, B 部分から漏水が生じた。漏水量は A 部分の方が多く、地震発生の翌日グラウトを行いほとんど止まったが、その後若干の漏水が継続した。この部分は湾の下ではなく、上部埋土内のポケットウォーターがコンクリートのクラックを水みちとして出てきたと考えられる。

2) アプローチ部高架橋

オークランド側へトンネルを出てから高架橋へのアプローチ部の橋脚が低く短スパン (12 m) の橋梁部分の橋脚桁座に一部クラックが生じ、写真-21 のような仮受けで補強して運行を行った。

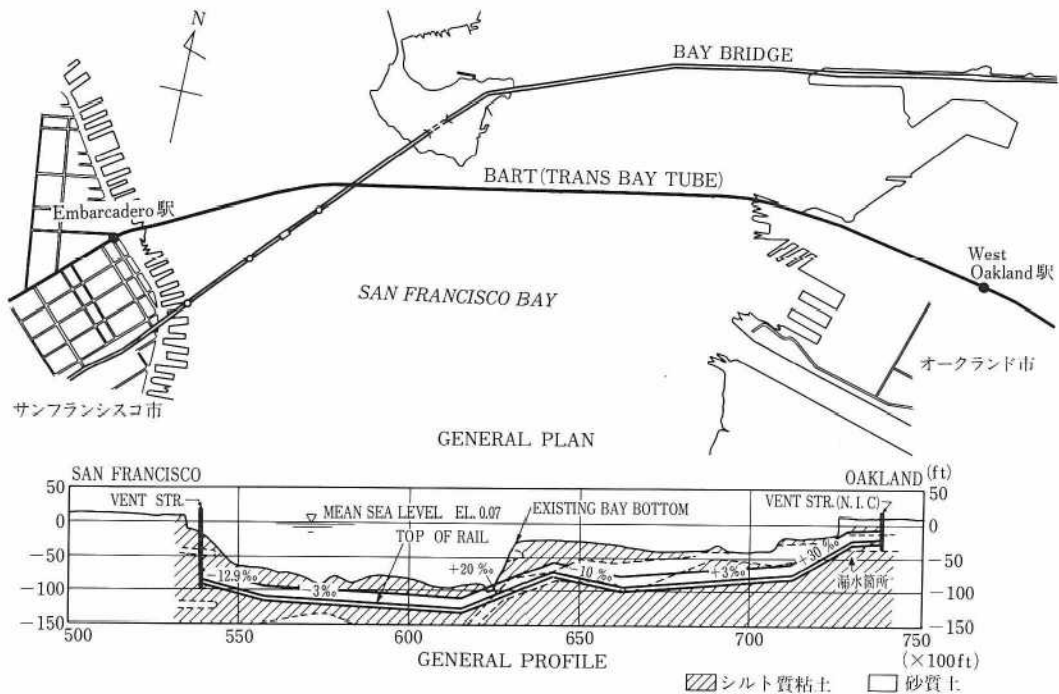


図-49 BARTの湾横断ルートと縦断面図

3) ゲルバー桁

桁にはゲルバー桁が多く用いられており、地震によりかけ違い部の継目が開いたものがあった。状況に応じてグラウト等で補修された。

d) 地震に対する BART の安全管理

1) 耐震設計について

構造物の設計震度は、地質により 0.5 g (soft soil) および 0.33 g (bed rock) を採用している。耐震設計にあたっては、トンネルは地震による地盤変位に対して軸方向、せん断方向の変位について動的解析を行っている。また、橋梁の水平変位量については最大 1 in の変位規制を行っている。今回の地震による構造物の被害はきわめて小さく、耐震設計と施工は十分満足すべき成果をあげたと評価されている。なお、これらの被害の補修費は 200 万ドル程度と推定されている。また列車の運行その他を制御するコンピューターシステムにも全く被害はなかった。

2) 列車の運行制御

地震時の対応についてはかなり詳細なマニュアルが作成されている。すなわち、8 駅 (Daily City, Embarcadero, Fremont, Bay Fair, Rockridge, El Cerito del Norte, Walnut Creek, および Concord) 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、地震が発生すると、運転士からの情報、地震計からの警報の状況、その他線



写真-21 オークランド側高架橋へのアプローチ部の被害

路構造物の被害の有無に関連するあらゆる情報を判断して、地震の影響が軽微な方から順に定められている。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。

(5) 道路および BART における交通量への影響

地震によるフリーウェイ構造物の被害、とりわけベイブリッジの閉鎖は湾岸地域の交通の流れと利用者の選択モードに大きな影響を与えた。特に、道路交通量と BART の乗客数の間には強い相互作用が働いて、大きな変動があった。その詳細はなお今後の分析に待つところが多いが、これまでに得られたデータにより、その概要を報告する。

a) 道路交通への影響

サンフランシスコ湾を横断する橋梁のうち最も南にある Dumbarton 橋 (図-42 参照) については、図-50 に示すように、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、ベイブリッジ閉鎖の影響が顕著に現われている。同図に示されている時間帯のみの西行と東行交通量の総計は、地震前の 2 万 9 800 台に対し、11 月 2 日が 4 万 4 700 台と 1.5 倍に増えている。1 日交通量でみると、表-7 より地震前で 4 万 1 500 台/日であるから、これを単純に 1.5 倍すると、約 6 万 2 000 台/日となり、ベイブリッジの閉鎖中、Dumbarton 橋はこの程度の交通を負擔したものと考えられる。

最も南に位置する Dumbarton 橋でこの影響であるから、よりベイブリッジに近い他の 2 ルート (San Mateo 橋、および Richmond-San Rafael 橋—Golden Gate 橋) では、さらに大きな影響があったと推察される。

さらに、図-50 を詳細に観察すると、交通の方向や時間帯によって地震の影響の程度が異なっていることがわかる。すなわち、影響が最も大きいのが朝の西行、最も小さいのが夕方の西行となっている。東行は西行と逆の傾向を示すが、影響の程度の差は西行ほどは大きくない。これより、ベイブリッジからの移行交通といっても、その分配のされ方は単純ではないと考えられる。今後他の橋梁についても詳しく調べる必要がある。

最後に、表-7 (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、次に述べる BART の乗客数の変化との関連で再度考察する。1989 年 12 月現在み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。

b) BART の地震後の運行と乗客数の推移

地震が発生した 10 月 17 日午後 5 時 4 分といった運行を停止した BART は、構造物の点検を深夜 0 時頃まで行った後、翌 18 日の午前 1 時頃に運行が可能となり、18 日午前 10 時頃には平常運転に戻った。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。

これらの状況のもとで、BART の乗客数は劇的に変化した。まず、図-51 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 の乗客数の推移を表-8 に示した。同表では、乗客総数のほかに、内訳のわか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、表-8 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

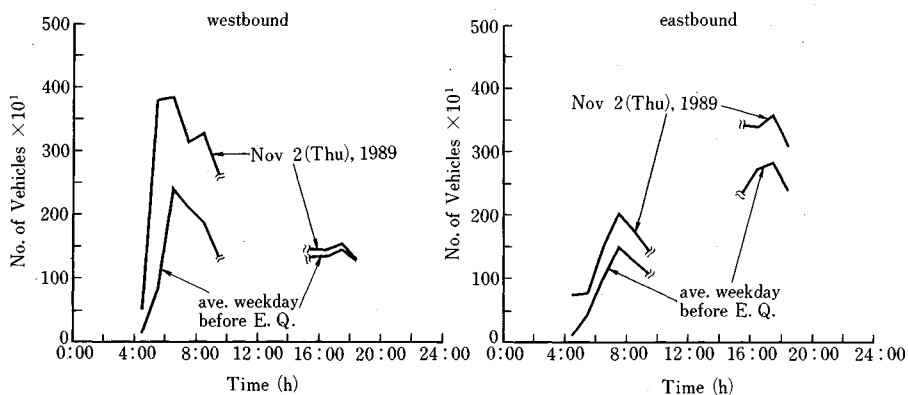
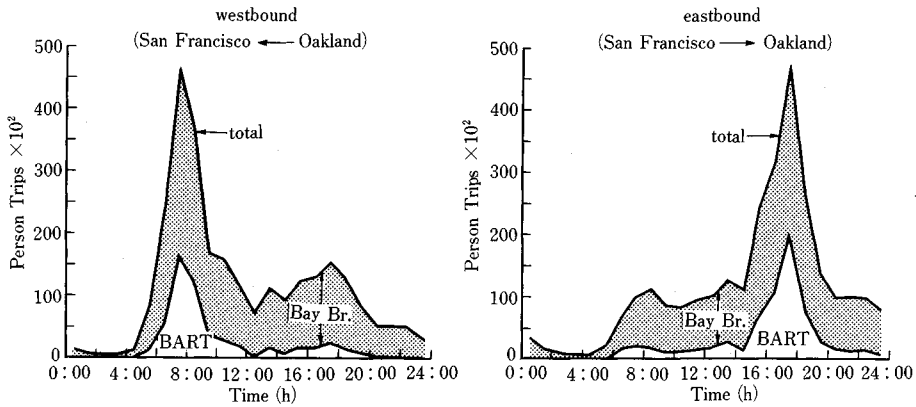


図-50 Dumbarton 橋における地震前後の交通量の変化 (4 AM-10 AM, 3 PM-7 PM)



図—51 平常時におけるベイブリッジとBAPT利用の湾横断のパーソントリップ (1988年秋)

地震からの復旧が進み、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らかである。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、ようやく地震前の水準に回復したにとどまっているのに比べ、このこと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要負荷のうち、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3万2800人は、表—7でみた、ベイブリッジ再開後の車両減3万5000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にとど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。表—7, 8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、表—7

表—8 地震前後の週日におけるBARTの乗客数

	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)

におけるベイブリッジ再開後の3万5000台減は約6万2000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、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、についてはいましばらく全体の推移をみる必要があるであろう。

（6） むすび—日本の大都市圏交通との関連

以上、ロマプリータ地震がサンフランシスコ湾岸地域の交通システムに与えた影響について、道路交通とBARTを対象として考察した。その内容から、今後の日本の大都市圏における交通システムの地震対策に参考となる事項を探ってみたい。

日米比較の観点からは、アメリカは何とんでも自動車王国であり、高速道路網の整備水準は日本の比ではない。図—42でみたように、サンフランシスコ半島にも湾の東岸にも2本の高規格の高速道路（片側3~5車線）が走り、湾を横断する橋梁ルートが4系統あって、非常

に冗長性が高いネットワークを形成している。そのために、ベイブリッジの閉鎖という極端な悪条件のもとでも、湾岸地域全体の道路交通が破局には至らなかったといえよう。

これに対し、日本の大都市圏の高速道路網は、その交通容量に対して、アメリカと比べてぎりぎりの条件下で運用されていると考えるべきであろう。すなわち、路線の一部が使用不能に陥った場合の影響は、はるかに深刻なものとなろう。幸い、日本の高速道路構造物の耐震性は、設計地震力の差のみでなく、建設年代などに由来するムラが少ないという点で、アメリカより信頼性が高いと考えられる。しかし、使用条件の厳しさを考えると、所要安全性（または許容リスク）という観点からは、これはむしろ当然のことといえるかもしれない。交通ライフラインの視点からは、たった1か所の閉鎖で路線全体の機能を喪失させないよう、各種構造物の耐震信頼性のバランスを確保するための検証が今後必要とされる。

次に、自動車王国のアメリカで、今回の地震により、BART という都市系鉄道システムの有用性が再認識されたことの意義は大きいと考えられる。特に、トランスベイ・チューブの沈埋トンネルやシールドトンネルの地震時挙動が万全であったことは、近年同種の構造で多くの都市鉄道を建設してきたわが国にとっても意義深い事実であろう。しかしながら、わが国の大都市圏における鉄道への依存度はアメリカよりはるかに高く、かつ高密度である。このことは、BART とほとんど等しい路線延長をもつ大阪市営高速鉄道が、BART の約10倍の240万人/日という乗客を運んでいる、という事実にも現われている。高度にシステム化された装置である鉄道の地震時におけるシステム信頼度を高めておくことは、わが国の都市地震防災上重要である。わが国の鉄道技術関係者の努力によるこの面での蓄積は大きい。都市全体の耐震安全性との関連で、今後も十分な取り組みが必要であろう。

謝辞：本文の内容は、執筆者がそれぞれ被害調査等の折に主としてカルフォルニア州交通局 (Caltrans) および BART 本部から得た資料に基づいてとりまとめたものである。これらの機関の関係各位に御礼申上げる。

4. ライフライン施設の被害と復旧

亀田弘行 (Hiroyuki KAMEDA)*¹
 高田至郎 (Shiro TAKADA)*²
 森 吉昭 (Yoshiaki MORI)*³
 根岸七洋 (Shichihiro NEGISHI)*⁴
 谷口 元 (Hajime TANIGUCHI)*⁵
 福田寛允 (Hiromitsu FUKUDA)*⁶
 八木高司 (Koji YAGI)*⁷

(1) まえがき

本章では電力・ガス・上水道・下水道・電話の各ライフラインシステムについてシステムの概要、被害・復旧の状況について述べるとともに、被害の特徴および今後の地震災害軽減対策への教訓について取りまとめる。米国では1971年のサンフェルナンド地震の際に都市施設が多大の災害を受け、それ以降ライフラインの耐震検討が本格的に取り組みられるところとなり、ライフライン施設の地震対策も進められてきた。今回の地震はサンフェルナンド地震以降、初めて大都市サンフランシスコが地震の洗礼を受けたことになるが、やはりライフラインへの影響は少なくなかった。ここでは、ライフラインの各分野についての被害状況も述べ、また、執筆担当者が寄り集まって今回の地震とライフラインシステムの動向特徴について意見を交換した結果もまとめた節に記述している。

なお、都市ライフラインとして重要な役割をもつ交通システムについては、別途3.で扱われているので参照されたい。

(2) 電力施設

a) サンフランシスコ周辺の電力需給の概要

サンフランシスコ市およびその周辺に電力を供給しているのは、PG & E 社 (Pacific Gas and Electric Company) である。同社は電力、ガスを供給する私営電気事業者で、表-9のとおりアメリカの私営電力会社の上位10社のうちの1つである³⁰⁾。

供給区域はカリフォルニア州の北部から中央部の約24万640km² (日本の面積の約2/3) に及び、供給区域内人口は約1150万人、1989年(1月~12月)の需要家契約口数は411万口、最大電力需要は1万7623MW、総発電電力量は941.55億kWhとなっている。

送配電設備は、50万V、23万V、11.5万V、6万Vの送電線および1万2千Vを中心とする配電設備で構成されており、一般家庭には標準として120Vおよび

*1 京都大学防災研究所教授
 *2 神戸大学工学部土木工学科助教授
 *3 東京電力(株)工務部
 *4 東京ガス(株)供給センター
 *5 東京都水道局
 *6 東京都下水道局
 *7 NTT 筑波フィールド技術開発センター

表—9 私営電力会社トップテン (1987年)

会社名 (本店所在州)	販売電力量 億kWh	会社名 (本店所在州)	販売収入 (百万ドル)	内電気 (%)
① サザン・カンパニー (ジョージア)	1 313.4	1. パシフィック・ガス & エレクトリック (カリフォルニア)	7 186	71.4
② アメリカン・エレクトリックパワー (オハイオ)	982.1	② サザン・カンパニー (ジョージア)	7 010	99.2
③ テキサス・ユーティリティ (テキサス)	777.7	3. コモンウェルス・エジソン (イリノイ)	5 673	100.0
4. コモンウェルス・エジソン (イリノイ)	674.9	4. サザン・カリフォルニア・エジソン (カリフォルニア)	5 494	99.9
5. パシフィック・ガス & エレクトリック (カリフォルニア)	665.6	5. コンソリデイトッド・エジソン (ニューヨーク)	5 094	82.2
6. サザン・カリフォルニア・エジソン (カリフォルニア)	655.6	⑥ アメリカン・エレクトリックパワー (オハイオ)	4 785	98.0
7. デューク・パワー (ノース・カロライナ)	647.5	7. FPLグループ (フロリダ)	4 439	94.6
⑧ ミドル・サウス・ユーティリティ (ルイジアナ)	576.3	8. パブリック・サービス・エンタープライズ (ニュージャージー)	4 211	70.3
9. FPLグループ (フロリダ)	565.9	⑨ テキサス・ユーティリティ (テキサス)	4 083	100.0
10. ヒューストン・インダストリーズ (テキサス)	559.1	10. デューク・パワー (ノース・カロライナ)	3 706	99.5

240 V で供給している。

表—10 に PG & E 社の電力設備の概要を示す³¹⁾。

サンフランシスコ周辺の電力系統は、図—52 のとおりである。

震央から 27 km 南にはモスランディング火力発電所があり、メトカーフ変電所、テスラ変電所と 500 kV 送電線で連係されているが、この地方は全体に 23 万 V 送電線により送電されている。

最大需要地であるサンフランシスコ市に対する電力供給は、南のサンマテオ変電所から 23 万 V 地中線および 11 万 V 架空線によりマーチン変電所を経由して、ダウンタウンに位置するエンパカデロ変電所に送電して実施されている。ゴールデンゲート橋やベイブリッジにパワーケーブルを添架して、北側からも電力供給できるような系統構成とはなっておらず、したがってサンマテオ変電所がサンフランシスコに対する唯一の電源変電所であった。なお、マーチン変電所の 2 次系である 11 万 kV 系にはハンターズポイント、ポトレロ両火力および

ユナイテッドコーゲン社の自家発電火力が並列されている。

b) 電力施設の被害状況

1) 発電設備

モスランディング火力発電所 (震央距離 27 km) で、唯一運転中であった 6 号機 (75 万 kW) が地震により被災し停止した。被害は、ボイラーの配管、燃焼室内のチューブの損傷、空気予熱器本体の若干の位置ずれ、低圧タービンスラスト軸受および給水タンクの破損等であった。

ポトレロ発電所では、3 号機 (217 MW) が系統から離脱したとき、ボイラーの蒸気逃がし弁が正常に動作せず一気に蒸気がぬけてしまった。

ディアプロキャニオン原子力発電所 (震央距離 224 km) では地震発生時、1 号機 (PWR 1 124 MW) は燃料取出しのため停止中であり、2 号機 (PWR 1 130 MW) は 100 % 出力で運転中であったが特に異常はなく運転を継続している。

2) 変電設備

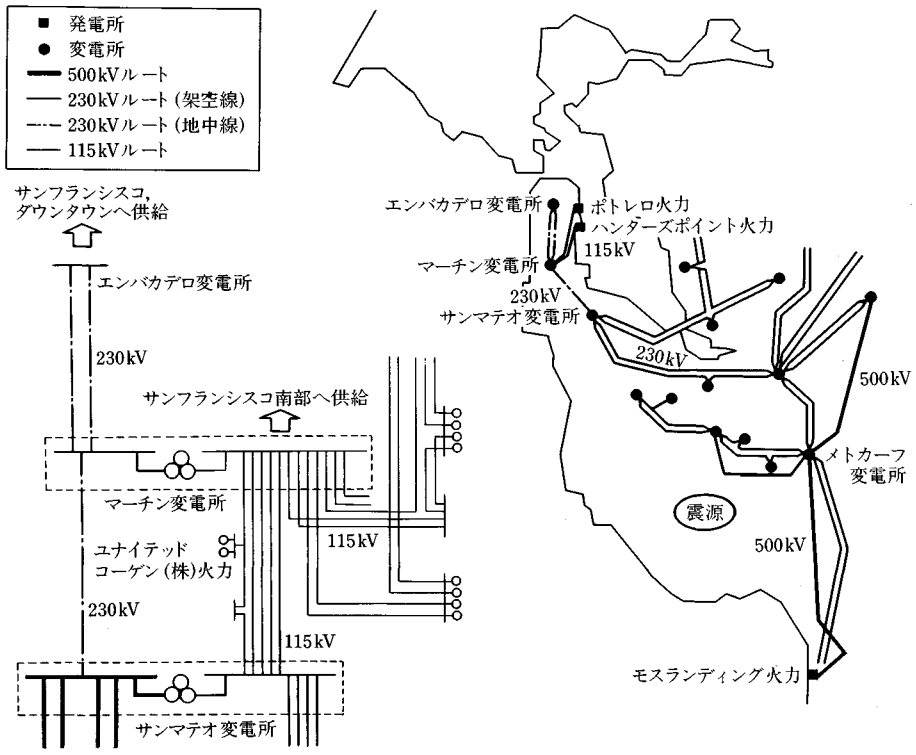
モスランディング発電所構内の変電設備の 50 万 V 機器のうち、遮断器、避雷器などの多くが被害を受け使用不能となった。

遮断器は、5 台のうち 4 台が損壊したが、いずれも遮断部が碍子の上にある、重心の高い碍子型 (図—53(a)) のもので、被害を受けなかった 1 台は、重心の低いタンク型 (図—53(b)) であった³²⁾。

メトカーフ変電所 (震央距離 25 km) においても 50 万 V 遮断器 4 台のうち 3 台が倒壊するとともに 50 万 V

表—10 PG & E 社の電力設備

			規模
需 要	最大電力 (MW)		17 623
	総発電電力量 (百万 kWh)		94 155
発電設備	水 力 (MW)		3 895
	火 力 (MW)		8 995
	原 子 力 (MW)		2 160
	そ の 他 (MW)		8 194
	計		23 244
需要家口数 (口)			4 110 000



〔火力発電所〕

所名	出力(kW)	台数	種別
モスランディング	2 060 000	7	蒸気タービン7台
ハンタースポイント	426 000	4	蒸気タービン3台 ガスタービン1台
ポトレロ	368 000	4	蒸気タービン3台 ガスタービン1台

〔変電所, 変電設備〕

所名	電圧(kV)	出力(kW)
モスランディング (屋外変電設備)	500, 230, 115	不明
メトカーフ	500/230, 230/115	約1 400 000
サンマテオ	230/115, 115/60	約 750 000
エンバカデロ	230/34.5, 34.5/12	約 580 000

図—52 震源地およびサンフランシスコ周辺の電力施設とその系統

変圧器の一部で本体と冷却器の接合部が損傷し、油漏れが発生した。

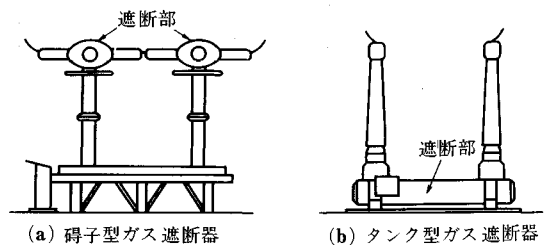
また、サンフランシスコへの電力供給のかなめになっているサンマテオ変電所（震央距離 70 km）では、23 万 V の遮断器 4 台が倒壊し、23 万 V 変圧器 1 台に油漏れが発生した。

3) 送配電設備

地中送電、架空送電とも特に被害はなかった模様である。配電設備については、柱上変圧器が落下したり、油漏れしたものがあつたほか、電柱の倒壊、傾斜および地中配電用の変圧器のブッシングに若干被害があつたが、特に大きな影響は与えなかつた³⁹⁾。これらの被害は、マリナー地区、ワトソンビル、サンタクルスの3地域に限られている。

4) 停電

サンフランシスコ、サンタクルズ、ワトソンビル、ロスガトスおよびオークランドなどの需要家約 140 万件が



図—53 遮断器の構造概要

停電した。

サンフランシスコの中心部の停電は 2 日間にわたり、中小電話会社の回線ダウンや、ビル電話の通話不能、コンピュータの使用不能など都市機能の一部がマヒした。

復旧の中心的役割を果たす市や、治安維持のための警察、救急活動に必要な病院は自家発電装置をもっていたが、救急医療に必要な一部の医療機器が自家発電の電力で間に合わなくなり、医療活動に支障をきたした病院も

あった。

また、炊事設備に電気を使っている多くの家庭や、現金預入払出機の停止、スーパー、ガソリンスタンドの閉店、交通機関の一部停止、交通信号の停止に伴う渋滞などにより市民生活にも影響がでた。

c) 復旧

地震発生後の1時間後にはPG & E本社内に災害対策本部が設置された。本部は、被害状況の把握と対策を策定する対策委員会(委員長:配電担当副社長)と復旧作業を指揮・総括する実施委員会(委員長:工務担当副社長)で構成された。電気・ガス施設の復旧にはPG & E社と、他の電気・ガス会社からの応援者をあわせて、作業員7800人(カリフォルニアエネルギー委員会発表による)が対応した。第一線機関であるサンフランシスコ配電庁では、電気、ガス両方の緊急対策室が協力して復旧を行ったが、終業時間直後の地震発生であったため、職員の確保は容易で、営業、料金など日頃は復旧作業に直接関係のない人たちも復旧作業の一部を助けた。

モスランディング火力発電所では、23万Vおよび11万5000Vに接続されている2号機を19日に、4、5号機を20日にそれぞれ運転を再開した。被害を受けた6号機は、被害箇所の修理に1か月の期間を要し、11月18日復旧を完了して運転を再開した。給水加熱蒸気の確保が必要となったポトレロ火力発電所では、米海軍のフリゲート艦の支援を受け、蒸気の補給を行って2日後の10月19日夕刻に運転を再開した。地震直後の応急送電のため、メトカーフ、サンマテオ両変電所においては、被害を受けた遮断器をバイパスし、予備の変圧器に接続

変更するなどの仮配線作業を行い2日後の10月19日に送電を再開した。復旧に必要な大型の資機材の緊急輸送は米空軍の支援によった。

復旧は順調に進み、停電は、48時間後には2万6000件(1.9%弱)を残すのみとなり、週末までにはサンフランシスコのマリーナ地区などの建物損傷がはなはだしい地区を除いて、ほぼ平常に復旧し、特に大きな混乱は生じなかった。停電の解消状況を表-11にまとめた。

d) 日本との比較

① 今回停電の発生したサンフランシスコへの電力供給ルートは、南のサンマテオ変電所からのルートのみで、事故時に切替えのできない系統であったことが停電発生の一原因となっている。これに対しわが国では首都圏の電力供給は、50万V、27.5万Vの架空設備を外輪系統とし、都心に向かって地中設備により、複数のループ化したネットワークを構成して行われており、二重三重にバックアップされている。

② 被害を受けたモスランディング火力発電所や、メトカーフ変電所、サンマテオ変電所の変電機器は、絶縁を高めるため長い碍子を用いた重心の高い形式となっている。これらの施設は、1967~68年あるいはそれ以前に建設された古い型のもので、1971年のサンフェルナンド地震の教訓が十分生かされていなかったものと推測される。一方低重心タンク型遮断器は被害を免れていることから、適切な耐震設計がきわめて有効であることを示すものと考えられる。これに対し、首都圏に配置されている基幹変電設備は、関東大地震級に耐えられるよう設計されており、さらに1978年宮城県沖地震、1983年

表-11 停電の解消状況

日時	停電と復旧状況			
10月17日 17時04分	地震発生に伴い、マリン郡からサンフランシスコ、オークランド、サンホセ、サンタクルス、ホリスターに至る地域の140万件の需要家が停電。			
10月18日 18時00分	サンフランシスコの120000件を含む463000件が停電中。 サンフランシスコの大半の住宅地、サンマテオ郡の大半、サンフランシスコ湾東岸部の地域への電力供給が復旧。			
10月19日 6時00分	(停電状況) サンフランシスコ	56000件		
	湾南岸地区	39000件		
	湾東岸地区	1000件	合計	96000件
10月19日 17時30分	(停電状況) サンフランシスコ	8000件	(マリーナ地区)	
	湾南岸地区	18000件	合計	26000件
	湾東岸地区は平常の供給			
10月20日 17時00分	(停電状況) サンフランシスコ	2500件	(マリーナ地区)	
	湾南岸地区	2700件	合計	5200件
10月22日 14時30分	(停電状況) サンフランシスコ	2500件	(マリーナ地区)	
	湾南岸地区	50件	合計	2550件
	マリーナ地区の未供給は、ほとんどが破壊された家屋である。			
10月23日 10時00分	供給可能な家屋のすべての需要家に対して、実質上電気の供給は復旧した。			

神奈川県西部地震、1987年千葉県東方沖地震などで得られた教訓をもとに50万V遮断器はすべて重心の低いタンク型とするとともに、変圧器ブッシングの短縮、27.5万V遮断器類への耐震補強ステイ設置を実施している。

③ 災害発生後、PG & E社はただちに自社職員を総動員するとともに、周辺の電力会社の応援も受け、さらに大型資機材の輸送や火力発電所への蒸気補給に、軍の援助を受けるなど復旧活動は迅速に行われた。

首都圏に電気を供給している東京電力(株)では、社員および請負工事会社作業員の緊急確保、ならびに他電力会社との応援体制が整備されており、復旧資機材の輸送については、状況に応じて陸、空、海路のいずれからでも手配できる計画となっている。これらについては具体的に東海や南関東地震の発生を想定し、復旧訓練を実施するとともにさらに対策の充実をはかっている。

以上から、わが国では今回程度の地震に対しては、大規模な電力設備の被害は発生しないであろうと考えられるが、今後とも発生が予想される大規模地震に対して、設備の耐震性の確保と、適切な保守管理を推進していくことが肝要と考えられる。

(3) 都市ガス施設

a) ガスの供給施設の概要

今回の被災地域は、電力・ガスの私营公益事業会社のPG & E社(Pacific Gas and Electric Company)の供給区域内であった。PG & E社の供給区域はカリフォルニア州北部から中央部の約24万km²に及び供給区域内の人口は約1100万人、ガスの需要件数は約320万件であり、ガス事業としては全米第2位の規模である。

供給ガスはすべて天然ガスであり、3つの主要な供給源で供給されている。およそ40%は北のカナダから40%は南のエルパソ天然ガスから、そして残りがPG & E社の区域内にある現地産の天然ガスとなっている。

天然ガスは、輸送圧力10~70kg/cm²の高圧導管で輸送され、その総延長は約8500kmとなっている(図-54)。

ガスの供給方式は2つに大別される。全体の95%の地域では、中圧(約4.2kg/cm²)で各需要家に供給され、個別に取り付けられた整圧器(ハウスレギュレーター)で減圧する方式である。一方、サンフランシスコ市、オークランド市の一部市街地では、地区の整圧器(地区ガバナ)で減圧し、低圧(約0.33kg/cm²)で各需要家に供給する方式となっている。

導管材質は高圧導管はすべて鋼管、本支管は大口徑には鋼管、小口径にはポリエチレン管が主として使用されているが、低圧管の多くは埋設年代の古い(1930年代)鋳鉄管が使用されている。また供給管(引込み管)はお

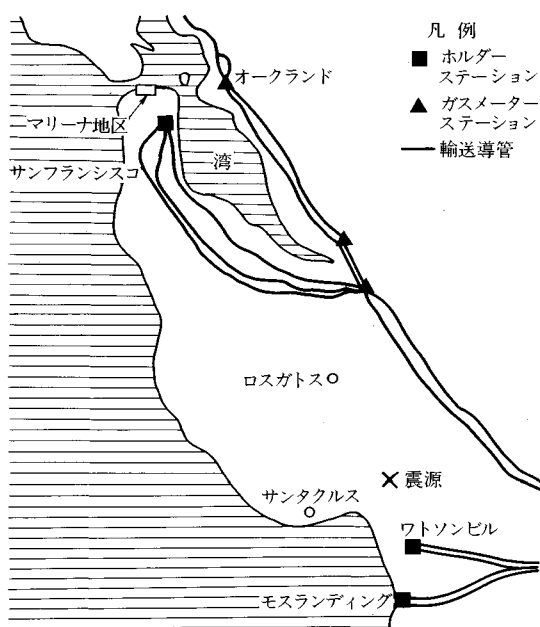


図-54 PG & E社のガス輸送導管等の主要施設

よそ250万本となっている。

b) ガス施設の被害状況

ガスの受入施設や輸送導管には被害は発生していない。震源に近いワトソンビル、サンタクルズ、ロスガトスの3市とサンフランシスコ市内の軟弱な埋立地にガス本管と引込み管の被害が集中的に発生し、地震発生後2週間で、1094件のガスの漏洩が発見された。被害の大部分は地割れ箇所や、建物が土台からずれたところなど、きわめて局部的な箇所に発生した。大口徑の被害は、サンタクルズで250φ、オークランドで500φの2か所だけであったが、いずれも、地盤変動を大きく受けた地下通路を上越する配管系の溶接部に生じたものであった。

小口径の被害の大部分は古い鋳鉄管で発生していて、軟弱地盤では亀裂、損傷もかなりみられたが、継手部における微少漏れが主要なものであった。鋼管では大口徑2か所を含む12か所の損傷が確認されたが、いずれも酸素アセチレンガス溶接部であり、溶接不良が直接の原因となったものと推定される。それ以外の鋼管、ポリエチレン管の被害は皆無であった。

c) ガスの供給停止

地震による導管の被害が集中したために、PG & E社が供給を停止した地区は3か所であり、影響した需要家は約6100件であった。

ワトソンビルでは、大きな地盤変動が生じ、低圧導管と引込み管が多数被害を受けたため、地震発生1時間後には、3か所の整圧所のバルブを閉鎖し、ガスの供給を

停止した。影響需要家はおよそ 500 件であった。

ロスガトスでは、地震後の漏洩調査により、多くの漏洩を発見したため、地震発生の翌日、2 か所のバルブを閉鎖し、およそ 500 件の需要家のガス供給を停止した。

サンフランシスコでは、マリナー地区の低圧導管が、液化化のために最も集中的に被害を受けた。この地域では火災が発生し、消火栓が破損して延焼の危険があることおよび、ガス漏れの臭気が充満していることなどから、消防当局が PG & E 社に対し、供給停止を要請した。PG & E 社は、この要請を受け、ガス本管のバルブを遮断することとし、ただちに操作に入った。13 か所のバルブの遮断を完了したのは発災後約 5 時間経過した夜の 10 時頃であった。このバルブ遮断によって、地区内約 5 000 件のガスの供給は完全に停止した。これ以外に需要家自らが元栓を閉めたためにガスの供給が一時的に停止したのは 15 万 6 000 件に及んだ。このガスの使用再開は安全確認を要するため、専門的な技能を必要とするものである（日本では需要家自ら再使用ができる）ため、PG & E 社では他のガス事業者を含め約 1 000 名の要員を投入し 10 日間を費やすこととなった。

d) 復旧活動

地震発生のおよそ 1 時間後には、PG & E 社内に非常対策本部（EOC=Emergency Operation Center）が設置された。

E. O. C の役割は、電気およびガスの供給施設の被害状況を把握すること、被災地域間の応援の指示や他社への応援要請、復旧資機材など復旧作業全般の指揮と復旧状況の把握を行うことである。また、メディアによる公衆とのコミュニケーションや供給停止した需要家への対応方法の決定なども本部の責任で行われた。国や州との連絡など、このような非常事態に対して、社としての統一のとれた対応をはかるうえで、E. O. C の活動はきわめて有効なものであった。これには、あらかじめ組織と任務が明確に規定されており、それぞれの任務を果たすためのマニュアル類も、整備されていたこと、また、日頃から、実戦的な非常対策訓練が行われていたことが役に立った。

需要家が自ら閉めたガスの元栓の開栓のため、南カリフォルニアガス社をはじめとする 7 ガス事業者から約 400 名の応援を受け、最盛期には、1 日 1 100 人ももの要員を投入し供給再開にあたり、10 日間ですべての需要家の供給を再開した。需要家の約 50 % が停止した地域の営業所ではグリッド法（焼き網の意味）が採られた。サービスマン達はある地域のグリッドを割り当てられ、営業所全体をブロックごとに再点検していった。検針員は、あらかじめブロックを調査することにより、供給管のバルブの位置にマークし、需要家に復旧作業の日時を

表—12 供給停止需要家の推移

月 日	復旧数	復旧累計	使用停止残数	使用停止総数
10/18(水)	不明	不明	69 000	69 000
10/19(木)	28 704	28 704	70 000	98 704
10/20(金)	14 590	43 294	57 552	100 846
10/21(土)	15 345	58 639	82 820	141 459
10/22(日)	33 433	92 072	49 996	142 068
10/23(月)	29 999	122 071	24 390	146 461
10/24(火)	16 390	138 461	11 806	150 267
10/25(水)	8 416	146 877	4 000	150 877
10/26(木)	6 597	153 474	1 424	154 898
10/27(金)	2 881	156 355	0	156 355

注) サンフランシスコ市マリナー地区の供給停止数[5 100 件は含まない。

教えた。この作業の結果、最初の訪問で 99 % ガスを復旧することができた。

バルブ遮断し、ガス供給を停止したマリナー地区の復旧は 10 月 24 日から本格的に開始された。PG & E 社全体から工事におよそ 400 人が集められ、12 時間交替で精力的に取り組んだ。

復旧方法は、地区内の全長 16 km のガス導管をすべて入れ替える方法がとられた。この地域内は埋設年代の比較的古い鑄鉄管による低圧供給方式がとられていたが、既設 100 mm 鑄鉄管の中に 50 mm のポリエチレンを挿入する、いわゆるインサレーション工法を採用し、供給圧力は、およそ 4 kg/cm² の中圧供給方式に変更することとした。

当初復旧にはおよそ 4 か月を必要とする旨を公表したが、社員の献身的努力と組織的な対応により発生後約 1 か月、11 月 17 日にはこの地区の需要家、安全に供給できる建物にはすべてガスの供給を再開することができた。

他の供給停止地区ワトソンビル、ロスガトスでもほぼ同様の復旧方法がとられ、それぞれ 11 月 5 日、11 月 14 日にすべての復旧作業を完了した。

e) ま と め

今回の地震によるガス施設の被害は比較的軽微なものであった。被害は軟弱地盤に集中して発生したが高級溶接鋼管や PE 管の耐震の優位性が明らかになった。

需要家自らガスの元栓を閉め、15 万余件のガス供給が停止したためこの復旧に 10 日間を要したが、ほとんどの家庭で大型給湯器を使用しているため、再使用点火の際に専門家の対応を必要とするためであり、日本の事情との相違が明らかとなった。

日本のガス事業者は、地震時の影響を最小限にとどめることを目的として、地震情報収集や導管網のブロック化などシステムとしての地震対策を推進してきているが、こうした施策がこの種の地震に対して、有効に機能するものと思われる。

(4) 水道——余裕のある水道施設

a) 水道事業の概要

サンフランシスコ湾を取り巻く湾岸地帯の人口はおよそ600万人である。この地域の約半分の人口280万人を対象とする水道事業体は、SFCC水道（サンフランシスコ市・郡水道）とEBMUD水道（サンフランシスコ湾東岸広域上下水道事業体）である。SFCC水道はサンフランシスコ市（人口70万）のほか、サンフランシスコ半島とその一帯の31事業体（給水人口100万）、合計170万人に1日96万³の水を供給している。一方、EBMUD水道は、湾東岸のオークランド市、パークレー市を中心とする、20市15コミュニティ（給水人口110万）に、1日83万³の水を供給している。

両水道ともカリフォルニア州の背骨といわれるシエラネバダ山脈の雪解け水を主な水源としており、水質が良好なため、通常は塩素滅菌のみで給水している。SFCC水道、EBMUD水道の概要、施設規模など主要事項を表-13に示す。

b) SFCC水道（サンフランシスコ市・郡水道）

1) 施設の概要

SFCC水道は、1857年にサンフランシスコ市に給水するため設立された。

主要水源は、シエラネバダ山脈の雪解け水を集めたヘッチヘッチ水系の水であり、給水量の90%はこの水系に依存している。ヨセミテ国立公園の中には、ヘッチヘッチ貯水池とエリノア貯水池が、また、これに隣接してロイド貯水池があり、これら貯水池の総貯水量は約8億1000万³にも及んでいる。

貯水池から放流された水は、トンネルと管路で約240km自然流下し、サンフランシスコ半島の中央部に位置するクリスタルスプリングス貯水池に到着する。この系統の供給可能量は151万4000³/日、水質が非常に良好なため、塩素滅菌のみで給水している。

このほか、サンマテオ郡ほか2郡の地区水源があり、これを2つの浄水場で処理した後、ヘッチヘッチ水系の水と合わせて1日平均96万³の水をサンフランシスコ市へ給水するほか、31の事業体に分水している。そのうち40%（約38万³）がサンフランシスコ市の

人口約70万人に給水される。市内には口径50~1500mmまでの送・配水管が1995km布設されている。

SFCC水道施設の概要図を図-55に示す。

サンフランシスコ市の地形は起伏に富んでおり、海岸地域のゼロメートル地帯から標高274mの地域まで広がっている。このため給水システムは複雑で、自然流下方式を基本に給水区域を20の区域に分割し、給水圧力2.8~6.3kgf/cm²の確保を図っている。標高40mから242mの間に11の配水池が戦略的に配置され、万一の事故に備えて、1つの配水区域に複数の配水池から補給できるシステムになっている。

さらに、市内にある配水池の総貯水容量は156万³に達し市内の1日平均配水量の4日分を貯えているなど、安定給水への配慮が払われている。

サンフランシスコ市は、市の水道施設に付属する消火栓等の消防設備のほか特別な消防専用水利を3つ所有している。これは1906年サンフランシスコ地震の火災で多数の人命と家屋を失った教訓をもとにつくられたものである。第一の施設はAWSS (Auxiliary Water Supply System) とよばれる消防専用の高圧水供給システムである。市内を見下ろすツインピーク（標高270mの丘）に2つの貯水池を設け、この高度差を利用するとともに、海水を高圧ポンプで加圧し、市内に約200km布設した管路により高圧の消防用水利として使用する。第二の施設は、地下貯水槽で市内の主要交差点の下に合計151か所配置してあり、AWSSなどがうまく働かない場合に防火水槽として使用する。第三の施設は、PWSS (Portable Water Supply System) とよばれる設備で、サンフランシスコ市消防局が近年開発した5in (12.5cm) の消防ホースを連結し給水する移動式給水システムである。このシステムの概略図を図-56に示す³⁵⁾。

したがって、サンフランシスコ市には災害時に備えて4つの消防用水利が備えてあった。

1906年の地震被害を教訓として建設されたAWSSであったが、市内の1か所で口径300mmのパイプが破裂し、貯水タンクの水が流出したため使用不能となった。しかし、マリーナ地区で発生した火災に対して、PWSSがバックアップ機能を果たして、火災の延焼を防止することができた。

このように徹底したバックアップシステムの考えをもっているサンフランシスコ市の消防システムは、地震防災システムとして参考となるものである。

2) 被害と影響

水道施設全体の被害金額は、約4億5000万円(300万ドル)、このうちサンフランシスコ市内の被害金額は約3億円(200万ドル)である。

表-13 主要事項

項目	単位	東京都	SFCC	EBMUD
創設年次	年	1898	1857	1923
給水人口	万人	1105	170	110
給水区域面積	平方キロ	1130	648	821
浄水場施設能力	万キロ/日	663	-	194
配水池容量	万トン	126	156	330
配水管延長	キロ	20433	1995	6015
一日平均配水量	万トン	469	96	83

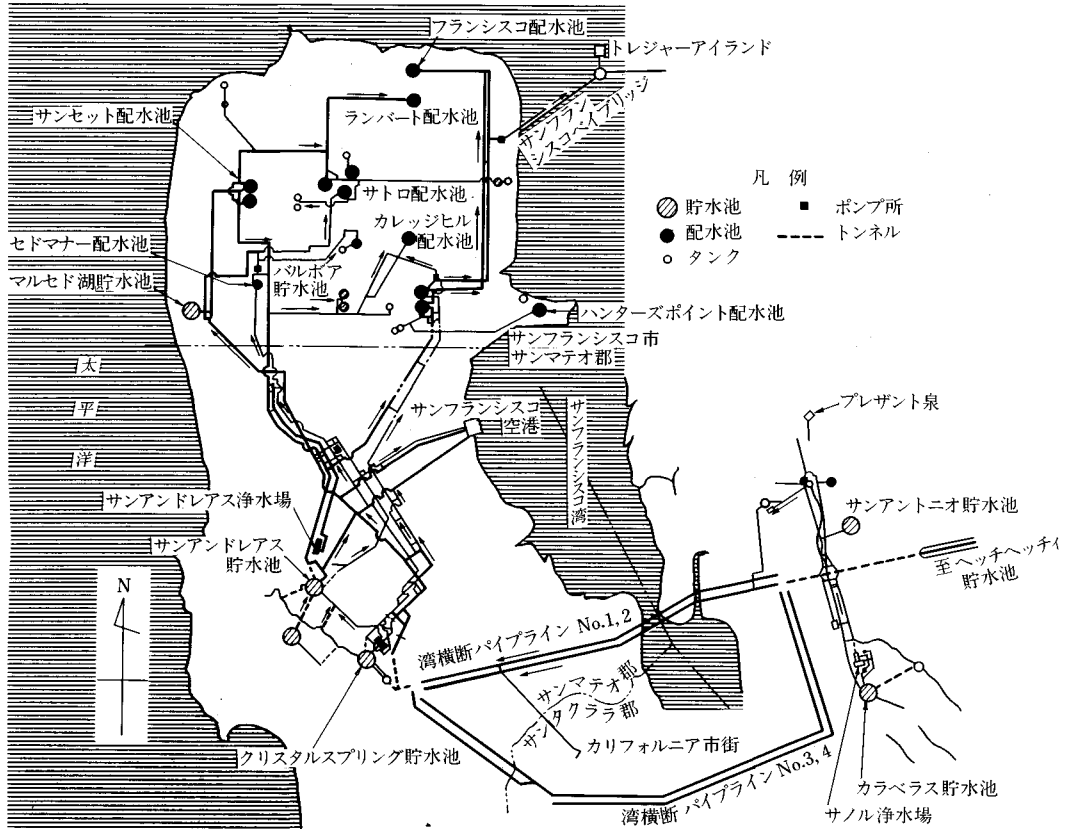


図-55 SFCC 水道概要図

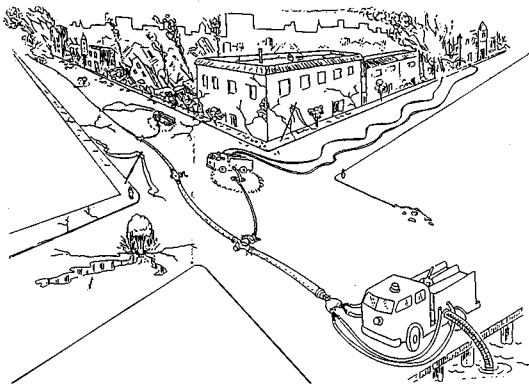


図-56 移動式給水システム (PWSS) 概略図

ど被害がなかったが、給・配水管の被害が市内の3つの地区、マリーナ地区、サウスマーケット地区、イスライス・クリーク地区で発生した。これら3つの地区はいずれも昔入江であったところを人工的に埋立てた地区である。被害状況は、口径150mmの管を主に、口径100～350mmの配水管が100か所と給水管45か所とが折損・抜出しなどの被害を受けた。このうち配水管の被害は、マリーナ地区で66か所、サウスマーケット地区20か所、イスライス・クリーク地区5か所、その他の地区で9か所であり、被害はマリーナ地区に集中した。

図-57に、マリーナ地区の被害分布図を示す。被害は給・配水管いずれも管路の分岐する箇所が多く発生しており、被害を受けた配水管のほとんどは、1930年代に布設された強度的にも弱い鑄鉄管であり、継手もソケット継手とよばれる麻と鉛とで止水する継手であった。

また、漏水による道路の陥没や舗装のもち上がりなど道路への影響はあったが、家屋への浸水、水質汚染などは起こらなかった。

なお、マリーナ地区において火災が1件発生したが、

水源、導・送水、浄水施設における被害は軽微であり、貯水施設でクリスタルスプリングスダムに3mm程度のクラックが数か所生じたほか、クリスタルスプリングス貯水池に至るパイプラインの空気弁の故障と1か所のポンプ所でサーキットブレーカーが故障し一時運転を停止した程度であった。

一方、配水施設のうち、ポンプ所、配水池にはほとん

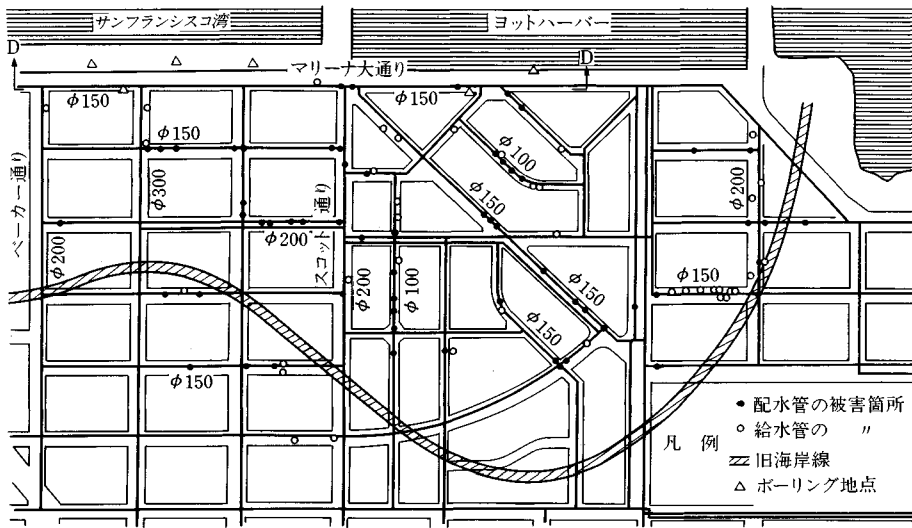


図-57 マリナー地区の被害分布図

この地区内では 66 か所で配水管が破損したため、火災現場付近の消火栓は圧力が著しく低下し、使用不能となった。また、マリナー地区の周辺でも水圧が低下するなどの影響がでた。その後、マリナー地区周辺のバルブを締めこの地区を切り離したため、周辺地区への給水の影響はほとんどなくなった。

3) 復旧

発災後ただちに市の災害対策本部に責任者を派遣するとともに、最も被害状況のひどいマリナー地区内の中学校校庭にトレーラーハウスを選び込み現地対策本部を設置した。発災後 2 時間以内には職員の 75 % が参集し、被害状況・水質調査を行うとともに復旧活動を開始した。

マリナー地区においては、管の破損件数が多いうえに住宅の被害がひどかったこと、ガス管の破損によるガス漏れ、停電などの影響を受け、水道管の応急復旧が完了するまでに 4 日間を要した。この間、全職員が 24 時間ほとんど不眠不休で復旧作業にあたり、なかには 48 時間連続して作業にあたった職員もいた。

その他の地区については、配水管の被害も少なく、消火栓間を消防ホースで連絡して給水するなどの処置を採ったため給水への影響は少なく、発災翌日の 10 月 18 日夕方には復旧を完了した。

情報連絡については、発災後、市街電話は通話可能であったが、話し中が多くほとんど使用できない状態であった。また、専用電話は数が少なく、無線についても複数の場所で同時に交信ができないため情報連絡には時間がかかり不便であった。今回の災害時に非常に役立ったのはセルラホン（携帯電話）であった。当局所有のものだけでは不足したが、企業、個人からの提供があり、

復旧活動を含め情報連絡に非常に役立った。

c) EBMUD 水道（サンフランシスコ湾東岸広域上下水道事業体）

1) 施設の概要

広域公共事業法が 1921 年に州の議会を通過し、これを受けて、1923 年にアラメダ郡とコントラコスタ郡との住民による投票の結果、この地域に上水道を普及するための EBMUD が設立された。

給水区域は図-58 に示すとおり、アラメダ郡とコントラコスタ郡とにまたがり、オークランド市とバークレー市を取り囲むサンフランシスコ湾東岸地域の 20 市と 15 コミュニティである。給水区域は 821 km² に及び、1 日平均 83 万 m³ の上水を約 110 万の人々に供給している。

シェラネバダ山脈の麓に貯水量 2 億 5 900 万 m³ を誇るバルディーダムを建設し、このダムから放流された水は、管路で約 150 km 自然流下し、湾東岸の丘陵地帯に到着する。この地域には 5 つの貯水池があり、総貯水量は 1 億 9 140 万 m³ になる。また、これらの貯水池の水を処理するため、オリング浄水場など 7 か所の浄水場があり、総施設能力は日量 194 万 m³ である。

浄水場で処理された水を需要者に供給するための給水システムは、口径 50～1 500 mm の送・配水管 6 015 km、ポンプ所 120 か所と、総貯水量 330 万 m³ に達する 166 か所の配水池から構成されている。この配水池容量は、1 日平均配水量の 4 日分に相当する。

給水区域が海岸部のゼロメートル地帯から標高 442 m の丘陵部まで広い範囲にわたるので、給水区域を 125 のブロックに分割し、2.8～9.1 kgf/cm² の給水圧力を確保している。また、配水方式は地形を利用した図-59

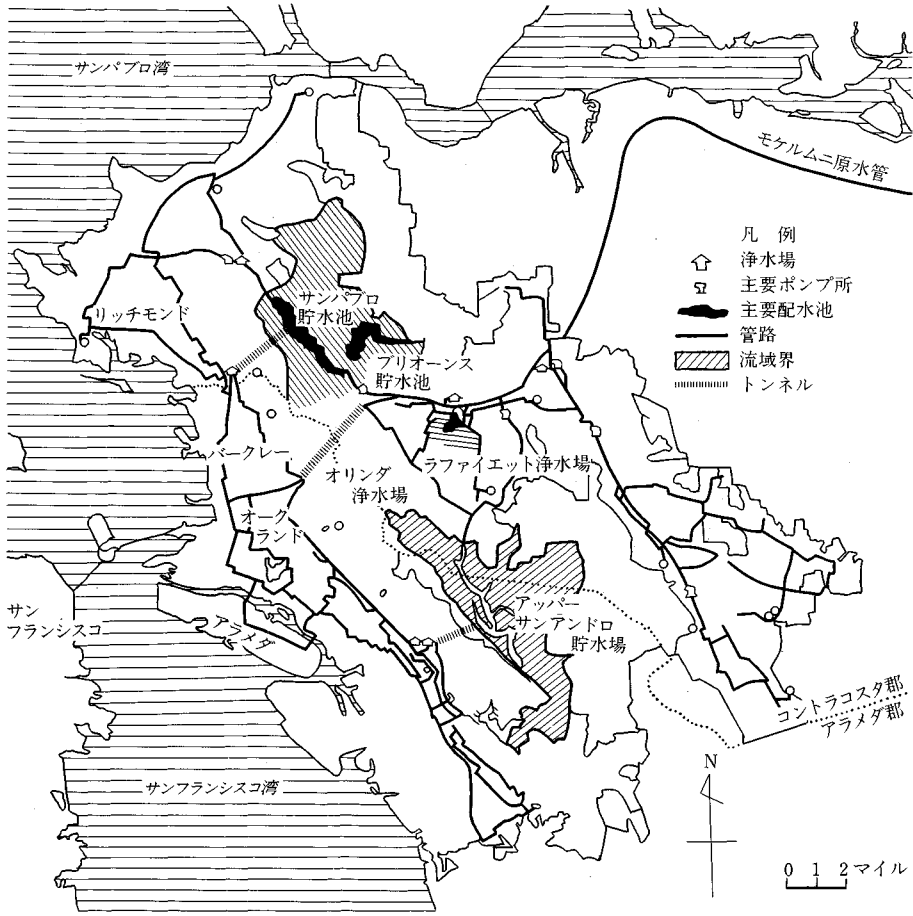


図-58 EBMUD 水道概要図

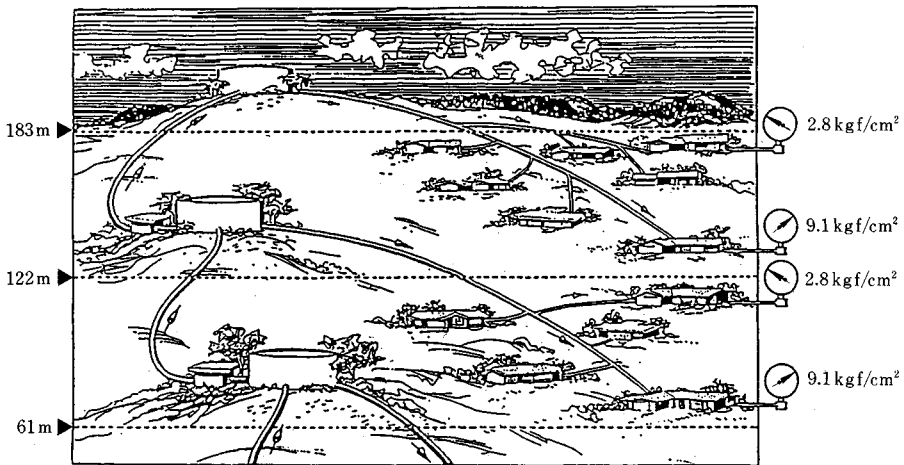


図-59 EBMUD 水道配水システム概略図

のような方式を採り入れ、配水量の 60 % は自然流下により配水される。

2) 被害と影響

水道施設全体の被害金額は約 3 億円 (200 万ドル) であり、ほとんどが管の復旧費であった。水源施設であるダムと貯水池には、特に大きな被害はなかった。導水施

設における最も大きな被害は、サンパブロ貯水池からソプラランテ浄水場に原水を送る口径1500mmのコンクリート巻鋼管2か所が接合部（溶接）で長さ90cmにわたり亀裂・漏水したものであったが、浸水などの二次災害はなかった。緊急断水して復旧せざるを得ず、ソプラランテ浄水場を停止したが、他の系統から補給したため断水には至らなかった。この復旧には3日間を要した。

その他、アッパーサンリアンドロ貯水池から浄水場に原水を送る口径900mmの鋼管が漏水したが、漏水量が比較的少なかったため、後日計画的に断水して修理した。また、一部の浄水場では、フロキュレータやバルブなどに故障を生じたが、浄水場の機能に支障はなかった。

図-60に示すとおり、配水管の被害は142か所で発生した。これら被害のほとんどはアラメダ市、オークランド市とパークレー市の湾岸地域の低地で発生しており、サンフランシスコ市のマリナー地区と同じように、もともと湾岸の入江や浅瀬、沼地であったところを埋立てた地域である。

配水管における最も大きな被害は、オークランド市の湾岸近くで発生した口径500mmの铸铁管の破損であ

り、約4万m³の水が流出したが、二次災害はなかった。

給水に最も大きな影響を及ぼしたのは、口径1500mmの送水管の亀裂事故である。この事故によって施設能力日量23万m³のソプラランテ浄水場が停止したため、給水区域内の配水池とオランダ浄水場からの補給とによって対応せざるを得なくなった。復旧が長引けば供給量が不足することから、復旧は昼夜兼行で行われ3日目に完了したが、この間、コントラコスタ郡北西部のサンパブロ市をはじめ、6市で節水を余儀なくされた。また、停電のため施設能力日量18万m³のラファイエット浄水場が停止したが、時間が比較的短かったこととオランダ浄水場の系統に切替えを行ったことにより、給水に大きな影響はなかった。

その他、一部のポンプ圧送地区において、ガス漏れ点検のため電気が供給できず、48時間断水したが、大きな混乱はなかった。

3) 復旧

発災と同時に、OP/NETシステム（貯水池から配水管までの施設・設備の状況を監視・運転するシステム）および電話、無線、マイクロ回線などを集中管理してい

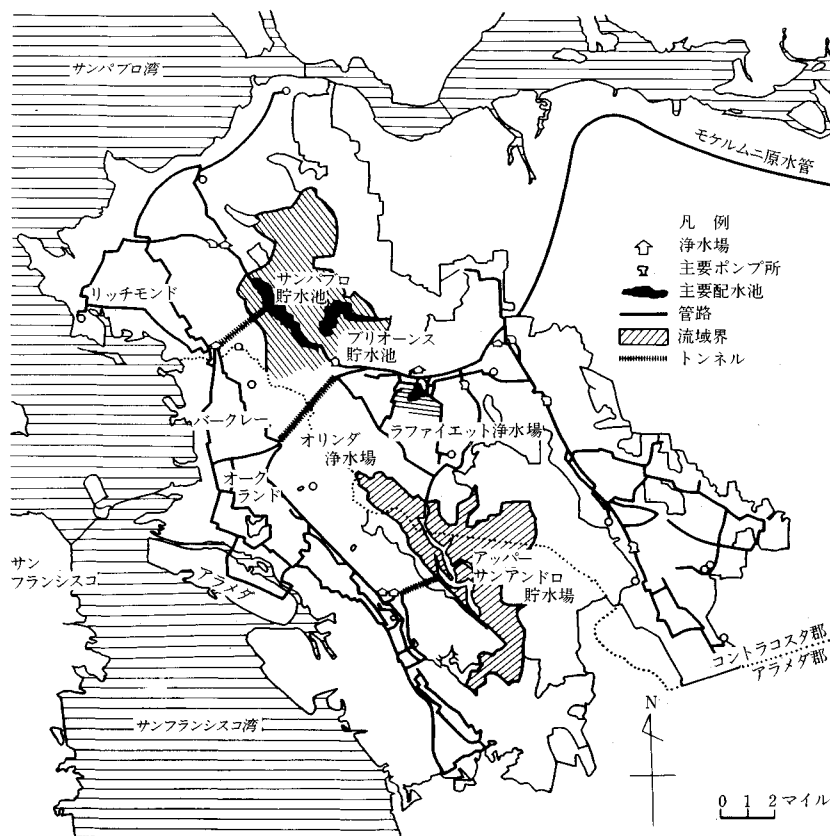


図-60 EBMUD 水道管路被害状況図

る OCC (オークランド・コントロール・センター) に災害対策本部を設置した。しかし、OCC は新本庁舎を建設していた関係で補助電源設備をもたない仮設建物で稼働していたため、発災と同時に停電し、OP/NET の機能は停止した。一方、OCC の下には 5 つの ACC (地域コントロール・センター) があるが、このうち 4 か所は停電もなく正常に機能した。このため、OCC に補助電源が設置され正常な機能を発揮するまでの 6 時間は、全地域の施設の運転状況、管路被害と影響などの情報収集と対策の伝達には専用電話、マイクロ回線、セルラホーンを使った。

被害状況の調査と復旧活動は、発災後 2 時間以内に参集した職員により開始された。また、発災後 5 時間以内には、全職員の 75 % がそれぞれの職場に参集した。

情報収集に関して、EBMUD ではマイクロ回線のほかに、セルラホーンを 30 台保有していたが、発災後、会社、民間人からセルラホーン提供の申し出があり、全体で百台以上が使用でき、迅速な復旧活動を行ううえで大いに役立った。

d) 教訓となる事項

SFCC 水道、EBMUD 水道はともに水源、貯水、浄水、配水施設全般にわたり、二重化や予備施設をもつなど余裕をもった施設である。特に、配水施設に関しては、地域的特性を生かして、自然流下方式を基本にしているうえ、配水池貯水量も 2~4 日分を貯えており、停電などの事故時にも強い水道施設である。今回の地震で、サンフランシスコ市では 2 日間近く停電したにもかかわらず給水に大きな支障がなかったのも、この辺に理由があると考えられる。

管路の被害は、SFCC 水道、EBMUD 水道の両方とも地盤の悪い地域に集中しており、しかも、年数の経過した铸铁管の被害が多い。SFCC 水道の場合、被害管路のほとんどが 1930 年代の铸铁管であり、また、このような管路が市内に 80 % 程度残っている。

情報管理としての EBMUD 水道の OP/NET システムは、今回の地震被害による施設の運転停止、管路の被害による系統切替えなど水道システム全体の調整に大変有効であった。

最後に、今回のロマプリータ地震の貴重な体験を今後の対策に生かすため、特に重要な項目を以下に整理する。

① ライフラインといわれる電気、ガス、水道、交通について、それぞれ個別の安全性ではなく、ライフライン全体としての安全性を確保すること。

② 情報連絡用設備、特に無線設備の充実。

③ 自然流下の可能な施設の活用。

④ 復旧資材の分散確保、また、資材運搬と輸送ルート、渋滞対策の検討。

⑤ 職員および民間人を含めた復旧体制の確立と定期的訓練の実施。

⑥ 災害復旧における資材調達、復旧活動等の実践的訓練の実施。

⑦ 日頃からの施設の維持管理と更新。

(5) 下水道

a) 被害の概要

湾岸地域には、市町村や下水道組合が運営する 50 以上の下水道がある。アメリカ土木学会とセントラル・コントラコスタ衛生組合が集計した被害状況速報^{39),40)}を、震央からの距離により表-14 に要約した。震災の影響がすぐに確認される下水や処理水の圧送管、処理施設の被害は報告されているが、自然流下式管渠の被害は十分に把握されていない。

地区内の他の公共施設の被害と同様に、下水道施設の被害は地理的にランダムである。単に震央からの距離で被害の程度を測るのは難しい(図-61)。

下水道施設はそれぞれの時代の設計基準によって設計され、建設されている。近年の耐震設計法で設計した施設は、被害を免れている。また、都市の規模により、施設の大きさやその構成が多様である。さらに、下水道施設が建設されている地盤の条件は、被害の規模を複雑にしている。埋立地や河川の軟弱地盤地帯での被害の報告が多い理由は、主要な施設である幹線管渠、ポンプ所、処理場が、必然的にそのような条件の悪い場所に立地しているためであろう。

地震による下水道施設の被害は次のように分類される。

① 施設の破損による機能停止

地震による下水道施設の直接的な被害である。

管渠施設では、汚水の圧送管の破損が多く報告されている。これはポンプ所からの送水停止が容易に監視できたためである。

処理施設では汚泥消化タンクの蓋が、中に入っている汚泥の横揺れにより破損した。沈殿池の流出トラフやスクラム止めも水の波立ちによる被害を受けている。アメリカでは多くの処理場で消化タンクに可動式の鋼製蓋を使用しているが、日本ではほとんど使用されていない構造である。

② 電力等の供給停止による機能停止

他のライフライン被害の影響による間接的な被害である。

停電によるポンプ所と処理場の機能の停止により、生下水が海域に直接放流された。地震発生直後のラジオ放送では、市民に水洗トイレを極力使用しないよう呼びかけていた。

地震が発生したときの、各市の被害状況と対応は次の

表-14 下水道施設被害状況

都市・郡名 (処理規模, 建設年次)	震央からの距離 (km)	被害内容 (復旧までの時間)	電力, 通信事情	災害対策計画 被害金額
スコットバレー (0.4万m ³ /日, 1985)	8	圧送管が河川横断部で破損(24時間) 20-60cm圧送管が破損(2日)	処理場の停電68時間したが、処理場、ポンプ所に発電機を装備済み	8か月前に対策委員会、うまく機能した。
サンタクルズ市 (6万m ³ /日, 1965, 76, 89)	19	処理場内の圧送管、塩素室構造物にひび液状化により最初沈殿池流出渠の打ち継目が破断(1日)	停電1日、自家発電で対応、電話は15時間不通。	市の災害対策の中で優先順位低く、訓練した職員がいなかった。
サンタクルズ郡 (管渠のみ保有)		圧力管(2万m ³ /日)が河川横断部で破断、応急処理により太平洋へ3000m ³ をバイパス	ポンプ所の停電30-35時間、郡の電力も2時間停電	被害金額15万ドル
ワトソンビル・ホリスター(1985)	25	軟弱地盤地帯で陶管の離脱、鋼管製の処理水放流管は溶接継手が破損、処理場は耐震設計がなされ、被害なし		災害対策の中で優先順位低く、機能せず
サンノゼ	30	損害なし		
サニーベール (11万m ³ /日)	35	汚泥消化タンクの蓋がはずれた		
パロアルト (15万m ³ /日, 1938, 72, 86)	45	沈殿池のカバー、スクラム止めが破損	自家発電完備、毎月負荷運転、市のラジオ放送網	災害対策計画による訓練をしている。
南ベイサイド (9万m ³ /日)	50	沈殿池のスクラム止めの破損 83と165cm圧送管の水漏れ		災害対策手順書機能被害10-20万ドル
フレモント (13万m ³ /日)	55	沈殿池のバフフル板の破損(2日) 消化槽の直径30cmの鑄鉄管にひび	自家発電完備、毎週負荷運転、市・下水専用ラジオをもつ。	
ウィルブラエ	60	沈殿池汚泥かき寄せ機のスプロケット	小口径水道管の破裂 SF市にいた場長に連絡	被害1-2万ドル
ハーフムーンベイ (0.8万m ³ /日)	60	被害状況不明		災害対策計画を地震発生後に策定
サンマテオ	64	多段焼却炉の中心軸、レンガに被害 塩素混和池のバフフル板の破損	ガス管の破損	災害対策機能せず被害50万ドル
カーメルバレー	70		サージ電圧のためにモーターが停止、発電機配備	
EBMUD (31万m ³ /日)	90	純酸素活性汚泥法が混乱、工場排水の流入によりpH11.5、消化タンクの蓋が破損	電力の供給12時間後に25%、1日後に復旧	被害63万ドル
サンフランシスコ (101万m ³ /日)	90	雨天時下水の貯留設備を用いて越流水を貯留、165cm圧送管にひび(3日)	ポンプ所で2日間停電	
サクラメント	160	消化タンクの蓋が傾き、ドラフトチューブが破損		

ようである。震央から90km圏のサンフランシスコ市・郡とサンフランシスコ湾東岸広域上下水道事業体については項を改めて述べる。

1) スコットバレー

震央に最も近い処理場は、震央の8km西側にある、処理能力4000m³/日の長時間曝気施設である。市の下水道部長は次のように当時を振り返っている。

“構造物にわずかなクラックが入り、屋根のモルタルがいくらか剝離して落下した程度で、十分に耐えた。処

理場への電力の供給は68時間途絶えたが、バックアップ用の発電機が施設の運転を維持した。二次処理水は、サンタクルズ市と共有している海中放流管へ揚水できた。サンタ・ロレンツォ川の横断部分では、90cmの堤防に亀裂が生じ、圧送管が破断した。応急処置は、圧送管を運転したまま、24時間以内に完了した。

管路の被害を調査するのはとても難しい。TVカメラを用いて延長83kmの下水管の調査をする予定である。とりあえず、舗装に大きなクラックが入った地域から調

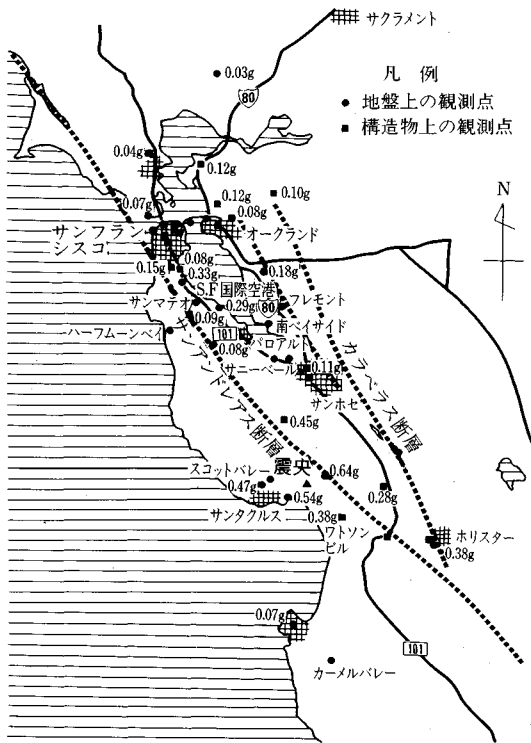


図-61 調査都市の位置（カリフォルニア州鉱山地質局作成の地図を使用した）

べていく。すべての地区を調べるのに、2 か月にかかるであろう”。

2) サンマテオ

処理場はサンフランシスコ国際空港のちょうど南に位置しており、震央から北西 64 km にある。市では、被害額が 50 万ドルになるものと見積っている。多段焼却炉は最も大きな被害を受けた。焼却炉の中心軸は 60 cm 以上も前後に揺れて、壁面の耐火レンガを相当傷めた。被害額は、中心軸とレンガの積替えに 20 万ドル、さらに暫定的な汚泥の運搬と処分費に 20 万ドルを必要とする。

塩素接触タンクでは、地下水によるガス管の破損と、水の横揺れのためにグラスファイバーのパツフルが破損した。これらの事態は、地震発生後の数時間あるいは数日後に明らかになった。災害対策計画を策定していたけれども、このような偶発的な事態には機能しなかった。

3) サクラメント

同市の施設は、震央から 160 km 離れている。消化汚泥が 60 cm も波うったために、8 基の消化タンクのうち 4 基の浮遊式カバーが、およそ 1.2 m 傾いた。ガス攪拌装置のドラフトチューブも損害を受けた。

b) サンフランシスコ市・郡

1) 事業の概要⁴¹⁾

現在の下・排水管理のマスタープランは、1971 年に市が作成し、1977 年に建設を始めたものであり、古い合流式下水道施設の更新と雨天時下水の越流水対策を同時に進めている。

クリーン・ウォーター・エンタプライズ (CWE) と市の水質保全局 (BWPC) が協調して、最大の対費用効果でサンフランシスコ湾と太平洋を保全する事業を行う。CWE は新しい下水道施設の計画・設計・建設を行い、それらの施設の維持管理は市の BWPC が担当する。

処理人口 75 万人 (夜間人口)
25 万人 (昼間流入人口)

下水量 40.5 万 m^3 /日

幹線・貯留管 容量 47 万 m^3

幹線 19.2 km, 容量 76 万 m^3

処理場施設容量

サウスイースト処理場

二次処理

32.2 万 m^3 /日 (晴天日)

79.5 万 m^3 /日 (雨天日)

ノースポイント処理場

一次処理, 雨天日だけ運転

53.0 万 m^3 /日 (ピーク)

リッチモンドサンセット処理場

二次処理, 18.9 万 m^3 /日

ポンプ所 22 か所

2) 地震被害⁴²⁾

BWPC が作成した地震被害報告書によれば、下水道施設の被害は軽微であった。これは、市内の主要な管渠、処理場施設が 1977 年から更新され、その耐震性が考慮されているためと思われる (図-62)。

サンフランシスコ市と郡の下水道被害の中で修理に最も手のかかったものは、2 つの大口径吐き口である。それらは、内径 2.1 m と 2.4 m のいずれも杭基礎の上に敷設されている管渠で、円周方向のクラックが認められた。また、サウスイースト処理場へ下水を圧送する直径 1.65 m の圧送管にひびが入ったが、市の作業員は 24 時間態勢で復旧作業を完了した。

樹と人孔の枠の周辺の舗装が、相当被害を受けた。また、本管への取り付け部分が外れた枝管もいくつかあった。しかし、それらの破損箇所は、テレビカメラ探査により確認する必要がある。

停電のために、生下水が湾岸のノースポイント処理場と 3 か所の吐き口から直接放流され、ベイショアから金門橋までの区間が遊泳が禁止となった⁴³⁾。BWPC は、直接放流量を最小限に抑えるために、雨天時下水の流量

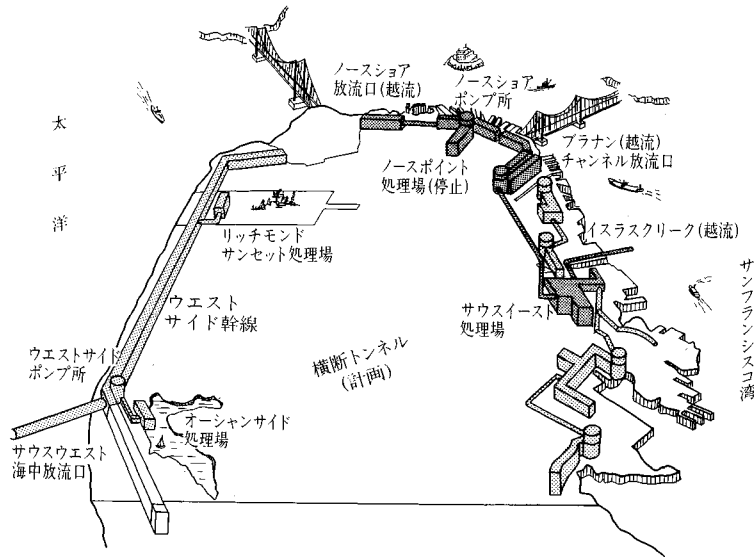


図-62 サンフランシスコ下水道系統図

調節のために建設された下水幹線と貯留管を有効に働かせ、主要施設が復旧するまで下水を貯留した。SF市のノースショアポンプ所では2日間停電していた。

マリナー地区の下水道施設は、杭基礎が使用されていたため大きな被害はなかったが、停電によりポンプが稼働せず下水が一部海に流出した。

マリナー地区を横切る直径2mの下水管⁴⁴⁾は、液状化発生時の過剰間隙水圧を逸散させるために管の下部および側面に砕石を敷き、上部はすべて砕石で埋め戻していた。この結果、下水管より海側では地盤が0.5から1m水平移動したが、下水管敷設部では液状化現象が発生しなかった。したがって、陸側の地盤はあたかもその部分にせき止められる形となり、移動現象は起きなかった。

c) EBMUD 下水道 (サンフランシスコ湾東岸広域上下水道事業体)

1) 事業の概要⁴⁵⁾

EBMUD は、オークランド、パークレー等の下水道を管理する衛生組合で、大きな人的被害を出したベイブリッジと I-880 号線の交差点の近くに処理場 (第一処理区、図-63) をもっている。

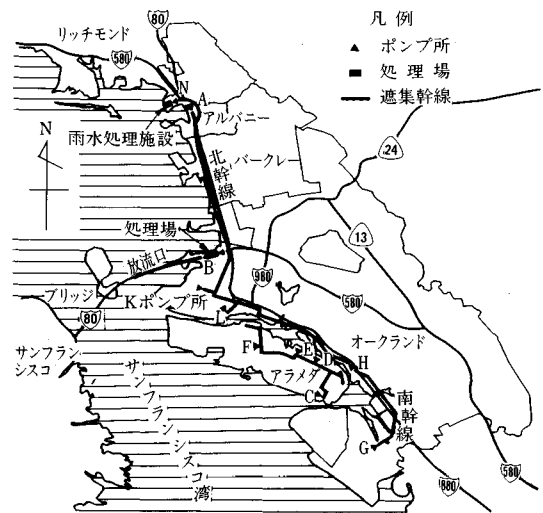


図-63 EBMUD 下水道系統図

2) 地震被害

下水道施設の被害は軽微で、被害総額は63万ドル(約9500万円)と見積られている。その中で、大きな比率を占めているものは、遮集管渠のTV調査を含めた管渠の点検と汚泥消化タンクの修理である。表-15に、被害の内容とその修理方法をまとめた⁴⁵⁾。

EBMUDの第一処理区でも停電した。PG & Eからの電力の供給は、12時間後に通常の25%であったが、24時間後には完全に復旧した。この間、職員が配線をバイパスしてポンプ所と二次処理施設への電力の供給を確保した。その努力にもかかわらず、地震発生から6時間以内に、7万6000m³の生下水がサンフランシスコ湾

処理人口	56万7000人(夜間人口) 2万人(昼間流入人口)
遮集幹線管渠	35km
枝線管渠	2880km(市町村所有)
下水量	31万m ³ /日
処理場	1か所 二次処理 純酸素活性汚泥法
ポンプ所	12か所

表—15 EBMUD 下水道施設被害状況

施設	被害内容	原因	修理方法	被害金額 (万ドル)
遮集幹線	内部のコンクリートにわずかにひびわれ、継手のずれ。	埋設管が曲がり、腐食で劣化していたコンクリートがひびわれた。	設計中、内壁面にはエポキシグラウトとライニング併用して修理。	27
ポンプ所 (K)	別館の不等沈下。	締め固め不良地盤の不等沈下、付属の建物は本館よりも深い基礎。	高圧地中グラウトによる地盤の強化建物間に可撓管を設ける。	5
道路舗装	舗装の沈下とひびわれ (排水不良)。	締め固め不良地盤の不等沈下。	不良箇所の撤去、基盤の厚さを追加し、表層のグレードアップをする。	5
汚泥消化タンク	タンクの蓋が回転防止装置のガイドから離脱した。	浮遊式の蓋が汚泥のスロッシングにより 15~45cm 傾いた。	蓋の修理、消化タンクを運転しながらガイドを修理する。(防爆方法の検討が必要)	24
場内埋設水道管	管の破裂	締め固め不良地盤の不等沈下。	管の修理、管廊への移設。	

に放流された⁴⁴⁾。

停電によるもう 1 つの問題は、排水区域内にある工場によるものである。ある工場でアルカリ剤のタンクが破損し、約 76 m³ のアルカリ剤が下水道に排出された。その結果、流入下水の pH が 11.5 に上昇した。高 pH と無酸素状態のために、一時処理場の純酸素活性汚泥法の施設は混乱に陥った⁴⁵⁾。

d) 結論

地震による下水道施設への直接的な影響は小さかった。I-880 号線のすぐ隣にある EBMUD の処理場や K ポンプ所においても、またサンフランシスコのエンバカデロの近くにある 2 つのポンプ所においても、重大な被害は生じなかった。

しかし、停電の波及効果の大きさに着目すべきである。ポンプ所と処理場では耐震性を備えた自家発電施設が必要である。しかも、非常時に機能するように、定期的に負荷運転をしないとよい。EBMUD では、消化ガス発電施設をもっていたが、耐震性が十分でなかったために地震時に機能しなかった。しかし、このことは消化ガス発電施設の有用性を再確認させるものである。

地震発生時における災害対策の準備も忘れてはならない。今回の地震は、職員の一部がまだ職場にいるうちに発生したために迅速な対応ができた。ロマプリータ地震の経験から次の教訓が得られた。

① 下水道の災害対策は低い優先順位を与えられる傾向にあるが、災害復旧計画をつくり、日頃から職員全員を訓練する。

② 電話回線の不通に備えて、無線設備をもつ。緊急連絡体制の強化を図る。

③ 主要施設において、復旧用資材を確保しておく。

(6) 電気通信

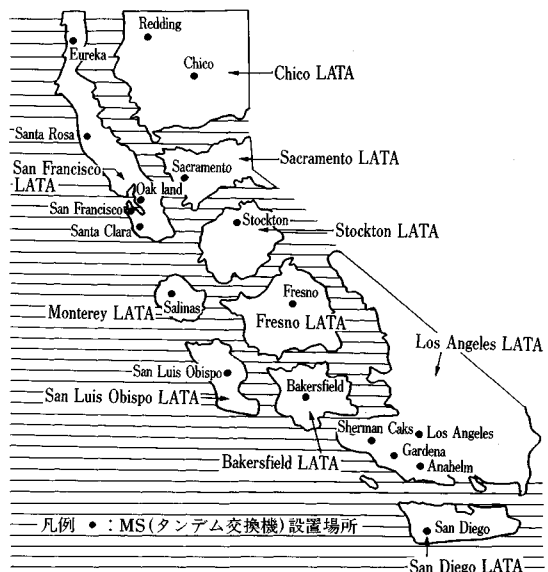
a) サンフランシスコ地区の電気通信サービス

1) 電話サービス

サンフランシスコ地区の市内系接続 (LATA (Local Access and Transport Area) 内接続) は、ほとんど Pacific Bell 社がサービス提供しており、長距離系接続 (LATA 間接続) は、AT & T, MCI, US スプリント社等の IEC (Inter Exchange Carrier), また国際系接続は、AT & T, MCI, US スプリント社がそれぞれサービス提供している。カリフォルニア州の LATA 構成を図—64 に示す。

2) 自動車電話サービス

サンフランシスコ地区の自動車電話サービスは、Pacific Bell 社系列の Pacific Telesis Cellular 社および GTE 社がサービスを提供している。



図—64 カリフォルニア州の LATA 構成

b) 電気通信設備の被害および復旧状況

今回の地震による電気通信施設への被害は、通信網全体に重大な影響を及ぼすような被害はなく、被害を受けた通信施設は、ほとんど代替施設等に切り替えられた。

今回の地震による電気通信施設の主な被害箇所および被災状況は、図-65に示すように、震源より約90 km離れたサンフランシスコ、オークランドに多く発生している。

以下に具体的な個々の被害状況および復旧状況を示す。

1) 通信局舎および鉄塔

① オークランド フランクリン局 (15階建て、1947年築、1965、1972年築)

本局舎は、Pacific Bell, AT & Tが使用しており、(i) 1階の耐震壁および柱の破損、(ii) 局舎内部の外装材および内壁のひびわれ破損、(iii) 天井の落下 (15階事務室)、(iv) エレベータガイド離脱、および衛生配管等の損傷、(v) 屋上冷却塔の損壊 (傾斜)、等の被害が生じ、全面修復に約1年かかる (写真-22)。

② ホリスター局、サンタクルス局、ワトソンビル局、アプトス局 (Pacific Bell)

壁等に補修が必要な程度のひびわれが生じた。

③ 自動車電話用アンテナの故障

Pactel Mobile Service (ペイエリアで10万加入) は60のアンテナのうち7か所が故障したが、翌朝までに修復できた。また、GTE Mobilenetでは80アンテナ



写真-22

のうち2か所 (サンタクルス地区) が故障した。

2) 局内設備

① オークランド フランクリン局 (Pacific Bell, AT & T)

1960年代の伝送機器のケーブルラック、上部補強等に被害が生じ、約6000回線が使用不可能となったが、古いアナログ設備であったため、大きな問題にはならなかった。ケーブルラックが多ケーブルで荷重オーバーになっていたこと、全体的にプレースが少なく剛性が不足していたことが原因であり、多くの機器が傾き、ケーブルが垂れ下がった (写真-23)。

• 一部の古いタイプのバッテリーラックで、著しいセルの移動、液のあふれ、つなぎ板の座屈、セルのクラック等が生じたが、停電はしなかった。

• 15階のRNCC (Regional Network Control Center) の机上装置 (CRT, モデム等) の落下、フィルム保管キャビネット等の転倒、資料の散乱、天井の落下等が生じ、RNCC機能をデンパーに切り替えた。

② サンフランシスコ プッシュ/パイン局 (Pacific Bell社)

停電中の18日早朝、非常用発電機の冷却水トラブルにより、約3時間交換機能が停止した。ビジネス顧客が

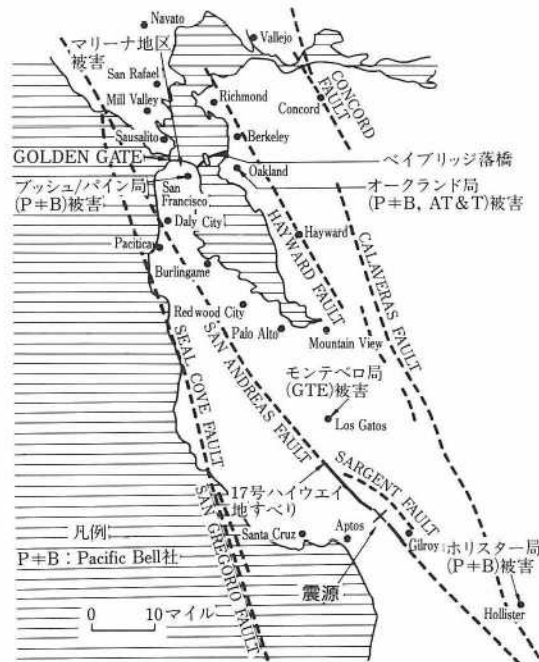


図-65 電気通信施設の被害箇所等

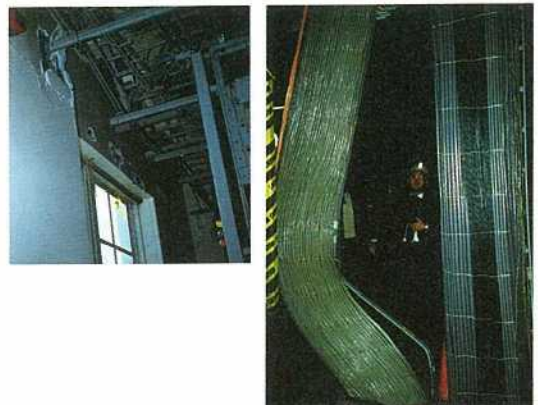


写真-23

ほとんどを占める地域であったが、早朝には、サービスを回復できたため、大きな問題にはならなかった。

③ ホリスター局 (Pacific Bell 社)

新鋭デジタル交換機 EOESS は無被害であったが、停電中の 18 日朝、非常用発電機の故障 (人為的原因の模様) により、約 3 時間の交換機能停止が生じた。

④ ロスガトス モンテペロ局 (GTE 社)

非常用発電機の燃料タンクの破損、および交換機のドラム装置の破損により、地震発生後約 6 時間の交換機能停止を生じた。

3) 局外設備

① マリーナ地区

・架空設備

電柱はすべて軽い木柱であったためか、日本海中部地震等にみられたような地盤の液状化による倒壊・沈下等の被害はなかった。しかし、引込み線の弛度の小さなものは、宮城県沖地震等の場合と同様に、建物取付け部分で切断したり、引留め具が抜けたりした被害が発生していた。

・地下設備

地下設備については、1930~1940 年代に建設された古い管路 (内径 $\phi 100$ mm 陶管)・マンホール (下床版、側壁は無筋) に被害はかなりあったが、通信に影響を及ぼすケーブルの被害はなかった。これは、マンホール・ハンドホール内のケーブル接続点においてケーブル余長が大きくとられていたことなどによるものと考えられる。

なお、最近の設計仕様の地下構造物については目立った被害はなかった。

② 17 号ハイウェイ脇の斜面崩壊に伴う被害

サンタクルズの 17 号線脇で斜面崩壊が発生し、道路沿いに埋設していたケーブルが被害を受けたが、マイクロ回線に切り替えられ大事には至らなかった。

③ ベイブリッジ落橋に伴う被害

ベイブリッジには、橋桁の落下した上部デッキの側方に光ファイバークーブルを収容した管路が添架されていた。しかし、橋梁のジョイント部で大きな余長を (50 ft = 約 15 m) をとっていたため、管路は破壊されたがケーブルは無事であった。

4) トラヒック状況

サンフランシスコ湾岸地域の加入数は 330 万加入あり、これらの電話に対して地震発生直後 (17 日午後 5 時) より問い合わせ等が殺到し、通信施設の処理能力を越えたため、トラヒック規制をした。規制は 17 日、18 日、19 日の 3 日間実施され 20 日以降は解除された。

トラヒック規制は、被災地からの発信呼を被災地への着信呼に対して優先させる方法が徹底して実施され、発

信は規制されなかった。発呼してからダイヤルトーンが出るまで約 1~2 分程度を要した場合もあったが、待てば発信可能であり、長距離接続、国際接続もおおむね通話可能であった。

これは、被災地の住居者から遠地にいる家族親友、救済者 (ボランティア) 等へ 1 call で安否の連絡をとらせ、そこから多数の親戚、知人等へ連絡を取ることににより、着信輻輳を回避するためである。このような社会的通念は小学校の頃から教育され、スムーズにアメリカ国民に受け入れられており、実際に着信トラヒックは平常時の 7 倍程度であり、日本の数十倍とは、格段の差があった。今回もテレビ等のマスコミを通してこの考え方がいち早く報道され、社会に受け入れられたことも、早期にトラヒックが平常復帰した大きな要因と考えられる。

なお、政府および全米の安全保障機関、消防、病院等の公共機関、および公衆電話を公共事業サービス (Social Service) と位置付けており、これらの機関等の通信は優先的に確保された。

c) 耐震対策実施状況

1) 非常用代替ルートの確保

基幹伝送路 (クリティカルパス) は、図-66 に示すように、1:1 のバックアップ構成としており、即座に切替えが可能である。

2) 耐震設計

Pacific Bell 社では通信設備、通信局舎の耐震設計は、NTT と同様の震度 V~VI の耐震設計を実施しており、以下に具体的な耐震設計状況を示す。

① 局内設備

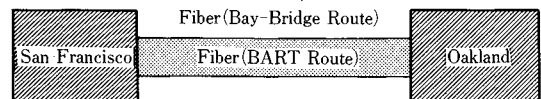
バルコアの NEBS (Network Equipment Building System Generic Equipment Requirements) に基づき耐震設計を行っており、NTT の耐震設計レベルとはほぼ同程度である。なお、前述の被災を受けた設備は、NEBS 以前の古い耐震設計の設備であった。

② 局外設備

ケーブルの地下布設方法として、接続点ごとにかなりのゆとりをもたせ、地震による張力吸収を行っている。前述のベイブリッジの落橋に対しても有効であり、ケーブル切断が回避できた。

③ 局舎

UBC (Uniform Building Code) に基づき耐震設計を



BART Route: San Francisco~Oakland間の海底鉄道のトンネル内に敷設

図-66 基幹伝送路のバックアップ構成例

行っており、地域係数をベイエリアは最大の Zone 4 とし、また、重要度係数を電話局は 1.5 としている。これらの値をとった場合、耐震設計レベルは日本の建築基準法の耐震レベルと同程度となる。なお、後述する最も被害を受けたオークランド フランクリン局舎は、耐震レベルの低い旧規準に基づき設計されており、また、地震の力を 1 階の耐震壁等に集中させて、建物全体に影響を及ぼさない考え方で設計されていた。

3) 停電対策

商用電源停電対策として、蓄電池のバックアップ時間を 2~4 時間とし、全局ヘンジン発電機の配備を実施している。

4) 早期復旧対策

被災した場合の早期復旧を行うため、以下の対策を実施している。

- ① 非常用可搬形交換機、非常用応急復旧用マイクロウェーブ機器、移動用地球局装置等の配備、
- ② 交換機等の製造ベンダと災害時における代替交換機等を確保する契約の締結、
- ③ 災害訓練の定期的実施、など

今回の地震による早期復旧対応は 8 月 3 日に実施した災害訓練 (M 7.5 でハイワード断層で発生した地震がベイエリアを直撃という想定) が役立った (Pacific Bell 社)。

d) 今回の地震被災の教訓

Pacific Bell 社では、通信設備、局舎の耐震設計は NTT と同様の震度 V~VI で耐震設計を実施していた。この中で局内設備については、災害対策未実施の古い設備が被害を受けており、Pacific Bell 社でも設備取付け補強の強化をしようと計画している矢先であった。古い設備についても長期にわたりサービスに供する設備は、手を抜いてはならないことを、改めて肝に銘ずる必要がある。また、バックアップ電源の故障によりサービスを中断しており、日頃から異常時に備えた点検の重要性が

クローズアップされた。

局外設備については、ハンドホール・マンホール・管路などの土木構造物の被害はあったもののケーブルのゆとりにより、ケーブル切断等の被害が回避できており、ケーブル余長を確保することが耐震対策上、有効であることが明らかとなった。また、マリナ地区の補強筋の入っていないハンドホールや老朽管路等の設備が地震により被害を受けたことから、こうした老朽設備の補強、更改が急務であることが改めてクローズアップされた。

また、Pacific Bell 社においては、ECC (Emergency Control Center) において災害時の情報が一元的に収集され社内外対応が即決で処理可能な体制であったことや、災害演習も EOC (Emergency Operation Center) を組織化して定期的に企画実施されており実戦に即した状態で演習されていたことなども参考となった。

(7) まとめ

a) ライフライン施設の構造的被害特徴

表-16 に各ライフラインシステムをノード施設とライン施設に分類して構造的被害の概要を示した。詳細は各節に記述されているので参照されたい。概してノード施設には被害が少ないがノード施設に付随している機器類に被害がみられるのが特徴である。特に更新のなされていない古い機器類の被害が目立っている。幹線ラインは被害が皆無に近い。システムの中核となる施設であるので耐震的に十分な配慮がなされていることが被害を少なくしている要因である。一方、支線ラインの被害はきわめて多い。面的に施設が広がっており、古くから使用されている施設も多いこと、耐震的配慮はほとんどされていないこと、地盤破壊の影響を直接に受けやすいこと、などが被害を多くしている原因である。さらに、支線ラインでは需要家に隣接している施設であるのでビルや家屋の倒壊が支線ラインの被害をもたらしている場合も多い。これらの被害の特徴は従来の地震被害の際にも指摘されてきた事項である。ただ、ビル・家屋の被害や倒壊

表-16 ライフラインシステムの構造的被害状況

施設	システム	電力	ガス	上水道	下水道	電話
ノード施設		△ 発電設備 △ 変電設備	○ 製造設備 ○ 貯蔵設備 ○ 制圧施設	○ 水源 ○ 浄水場 △ 給水所	△ 処理場 △ ポンプ所	△ 局舎建物 △ 交換機器類 ○ 鉄塔
	ライン施設	○ 送電線 ○ 鉄塔	○ 高压ライン △ ガス本管	○ 導水管 ○ 送水管	△ 圧送管	○ ケーブル
	支線	△ 地中配電線 △ 架空配電線 △ 電柱	× 引込み管 × メーター	× 配水管 × 給水管 × メーター	× 管路	△ マンホール × 管路 × 引込み線 ○ 電柱

○:ほとんど被害なし, △: 若干の被害あり, ×: かなりの被害あり.

がその場所へのライフラインサービスの停止をもたらすだけでなく周辺需要家へのサービスに影響をもたらしている場合があり、今後の地震対策に考慮すべき点である。たとえば、サンタクルズ市パシフィックモールにおける電力・電話引込み線がいくつかの建物に固定されて地域に配線されていた場合などである。構造被害の特徴は次のようにまとめられる。

- ① 液状化による地盤破壊の影響が大きい。
- ② 古い設備が被害を受けている。
- ③ ノード設備における機器類が損傷を受けている。
- ④ ライン設備における端末ラインが被害を受けている。
- ⑤ 耐震対策を施した設備に被害はほとんどない。

b) ライフライン施設の機能停止

表一17にはサンフランシスコ市、マリーナ地区、サンタクルズ市におけるライフラインサービス停止の期間を示している。マリーナ地区を除くサンフランシスコ市域ではその日の夜遅くから翌日にかけて電力が回復しているが、ガス・水道については特に供給停止は生じなかった。電話については機能停止に至る被害はなかったが、翌日昼過ぎまで輻輳状態が続いている。サンタクルズ市域では電力停止の影響を直接受けて、水道・ガスが2~3日停止している。通常、電力・電話はネットワーク切替えによって数時間のうちに回復し、水道・ガスの回復には長時間を要するが、本地震ではサンフランシスコ半島への電力供給の幹線ルートが多重化されてい

表一17 ライフラインシステムのサービス停止の期間

地域	システム	電力	ガス	上水道	下水道	電話
サンフランシスコ市域 (マリーナ地区を除く)		2日	0	0	0	0
マリーナ地区		6日	1か月	4日	2日	1日
サンタクルズ市域		2日	1~2日	3~4日	0	0

かったために電力の回復がかなり遅いのが特徴である。電力回復の遅延が他のライフラインにも少なからずの影響を与えたといえる。

c) ライフラインシステム相互の影響

表一18の列は機能停止を生じたライフラインシステム、行には影響を被ったライフラインシステムを示し、相互の影響内容をマトリックスの要素で示した。表より電力の機能停止および電話の輻輳が他のライフラインシステムに多大の影響を与えたことが知られる。電力停止のバックアップとして各ライフラインでは発電機・バッテリーを一般に有しているが、それでも緊急時に十分作動しなかったなどの理由により電力停止の影響は大きかった。電話通信機能のバックアップとして専用回線・優先電話・無線・セルラホン(携帯用無線電話)などが活用されたが、電話輻輳状態のライフラインシステムに与える影響は大である。相互影響として、ガスの漏洩が予想される地域には爆発・火災の危険のため、すでに回復している電力を供給できず復旧が遅れた場合があり参考とすべき事項である。また、電力停止のために浄水施設が停止し、原水のままの水道水を煮沸して飲むように指示されたが、ガスの供給が停止されていたので問題となったケースもある。以上のほか、5.では電力の鉄道システム(BART)への影響、道路システムと鉄道システムの相互影響が指摘される。

d) 復旧体制と情報の収集・伝達

表一19には災害復旧の体制と災害情報の収集・伝達手段について一覧にしている。基本的には各市の災害対策本部と連携をとりながら独自の対策本部を設けて復旧活動に当たっている。各ライフラインのシステムごとにはコントロールセンターがあり、周波数・ガス圧・水量・水圧などの変化によって被災状況の概略を把握するとともに、現地と公衆電話・専用回線・マイクロ回線な

表一18 ロマプリータ地震にみるライフラインシステム相互の影響

影響を与えるシステム	電力	ガス	上水道	下水道	電話
電力	—	火災危険により復旧作業が遅延	特になし	特になし	情報収集・伝達、復旧作業に影響
ガス	電力停止の要請	—	特になし	特になし	情報収集・伝達、復旧作業に影響
上水道	<ul style="list-style-type: none"> • ポンプ施設等の運転停止 • コンピュータシステムの機能停止 • 原水のまま給水 	<ul style="list-style-type: none"> • 復旧作業に支障 • 原水の煮沸不能 	—	特になし	情報収集・伝達、復旧作業に影響
下水道	<ul style="list-style-type: none"> • 処理施設等の運転停止 	特になし	特になし	—	情報収集・伝達、復旧作業に影響
電話	<ul style="list-style-type: none"> • ビル電話の通信不能 • ユーザー側コンピューターシステムの機能停止 	特になし	特になし	特になし	—

表一19 各ライフラインシステムの復旧体制と情報収集・伝達手段

システム	電力	ガス	上水道	下水道
復旧体制	1時間後にPG&E本社内にEOC* 設置		SFCC: マリナ地区に現地対策本部 EBMUD: OCC*,ACC* が機能	EBMUD: OCC*,ACC* が機能 その他の都市は下水道表-14参照
情報収集・伝達手段	社内保安電話 公衆回線 衛星通信		OP/NET* 専用回線, マイクロ回線, セルラホン	市のラジオ放送利用

*各ライフラインの節を参照のこと。

どの通信手段によって連絡をとり、被災状況の把握・復旧の指示を行っている。

e) 教訓と今後の課題

以上述べてきた事項の多くは、わが国における地震時にも経験され、その対策も進んでいるものも多いが、ここに改めてロマプリータ地震によるライフライン系の被害・復旧から得られる教訓と課題をとりまとめると以下のとおりである。

① 液状化を受けてもマリナ地区の下水道管のように耐震対策を施した施設には被害は少なかった。特に地盤状況の良くない地域ではきめ細かい耐震対策が望まれる。

② 更新のなされていない古い設備の被害が目立った。ライフライン施設の維持・管理を十分に行うとともに、古い施設の設備更新を着実に行う必要がある。

③ 各ライフライン施設とも電力供給停止の影響を少なからず受けた。発電設備・バッテリーなどのバックアップを確実に準備するとともに、供給停止の状況を把握するために関連電力事業者との専用回線などを充実することが肝要である。

④ 地震直後の電話輻状状態により各ライフラインの被災状況の把握、情報の収集・伝達に支障を来した。優先電話・専用回線・マイクロ回線・携帯用無線などを充実して情報伝達手段を確保する必要がある。

⑤ ネットワークとして冗長性の少ないサンフランシスコ半島の電力系統では通常よりも復旧に時間を要した。供給源の適切配置とシステムの冗長性が重要である。

⑥ 復旧作業にかかわる動員・資機材の調達など日常からの実戦的訓練が大切である。また、公共事業者の復旧作業に民間企業の協力を得る体制や、ボランティアの援助を受け入れる体制を検討すべきである。

⑦ 今回の地震では、地震動強度・被害状況などの情

報がオープンにされてライフラインの復旧に役立った。地震直後に種々の情報の共有が可能なように日常から体制を作っておくべきである。

⑧ 被害状況の誇張や誤情報が地震直後にマスコミから流されて復旧作業を遅らせたケースがある。日頃からマスコミとの連携を密にして復旧作業をバックアップしてもらい必要がある。

5. ロマプリータ地震港湾・空港被害報告

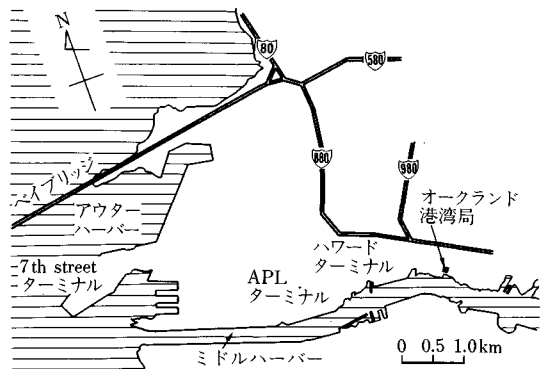
稲富隆昌 (Takamasa INATOMI)*
小長井一男 (Kazuo KONAGAI)**
風間基樹 (Motoki KAZAMA)**

本章では、ロマプリータ地震で影響を受けた主な港湾、空港施設について、政府調査団の調査結果¹⁰⁾をもとに、その挙動、被害等をまとめたものである。調査した港湾は、オークランド港、サンフランシスコ港およびサンタクルス港、空港はオークランド空港とサンフランシスコ空港である。港湾・空港の地盤の地震動としては、オークランド港で0.29g、サンフランシスコ空港で0.33gが記録された⁴⁶⁾。なお、この報告は、被害状況、地震応答等の現象を記述したものであり、解析は含んでいない。

(1) 港湾施設の被害

a) オークランド港

オークランド港(図一67)は、サンフランシスコ市の対岸に位置する。地震被害は、7th Street ターミナル、アメリカン・プレジデント・ライン・ターミナル(APLターミナル)、ハワード・ターミナル、アウトター・ハーバー・ターミナル、等で発生した。被害としては、埋立て地のコンテナヤードの沈下、クラック、段差等の地盤に関するものが主で、岸壁やコンテナクレーン等、構造本体に被害が生じたのは、7th Street ターミナルのみであった。7th Street ターミナルは、港湾荷役が不能となっ

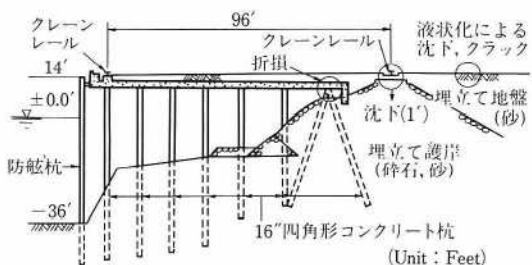


図一67 オークランド港

*1 運輸省港湾技術研究所構造部構造振動研究室長

*2 東京大学生産技術研究所助教授

*3 運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官



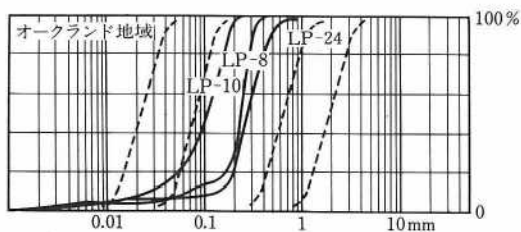
図—68 7th Street ターミナルの岸壁の標準断面図

たため、閉鎖された。オークランド港の0.29gは、アウターハーバーで記録された⁴⁶⁾。

1) 7th Street ターミナル (バース 35~38, 40)

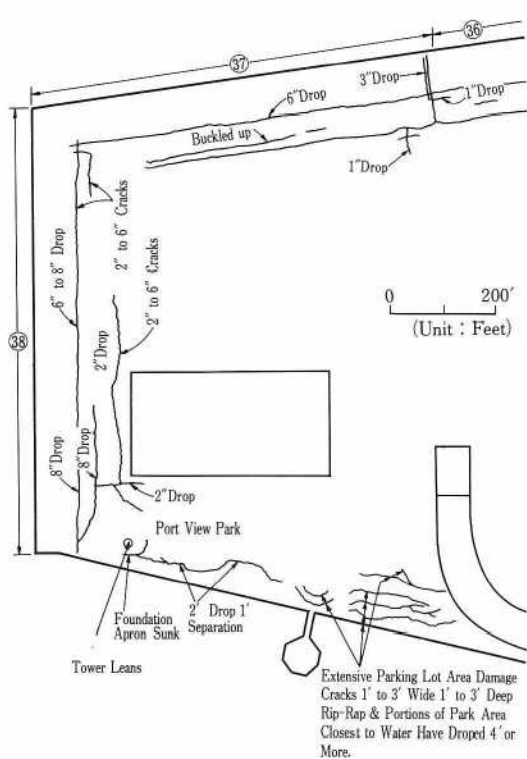
ターミナルは、1965~72年に建設された。岸壁は杭式栈橋で、図—68に標準断面図を示す。杭は、16 in 四角形コンクリート杭である。埋立てには、サンフランシスコとオークランドを結ぶ地下鉄 BART を建設する際に生じた浚渫土砂と掘削土砂を使用した。埋立て地盤の土質データは入手できなかったが、政府調査団に同行した地方公共団体調査チームが調査したバース 37 の埋立て砂の粒度分布 (LP-24) を図—69 に示す⁴⁷⁾。図には、港湾の施設の技術上の基準⁴⁸⁾に示されている液状化の可能性がある粒度範囲も点線で示した。オークランド港の砂は、特に液状化の可能性の高い範囲にあることがわかる。栈橋は、盛土の斜面に建設されているが、盛土斜面は埋立て地盤の地表面まで達しているため、わが国でよくみられる栈橋背後の土留め護岸はない。コンテナクレーンは、バース 35~37 に設置されている。クレーンのレール幅は、96 ft (29.3 m) で、海側のレールは栈橋の海側最前列の杭上に設置してあるが、陸側は盛土上に設置されており、レールの基礎はバタ基礎で、基礎杭は用いられていない。

バース 35~37 の被害は、図—68 に示したように栈橋の斜杭の頭部が一部破壊したこと、さらに埋立て地盤が液状化によって沈下したことである。地盤沈下により、バタ基礎であったコンテナクレーンの陸側基礎が約 1ft



LP-8 } オークランド空港滑走路
LP-10 }
LP-24 オークランド港 7th Street ターミナル

図—69 噴砂の粒度分布



図—70 7th Street ターミナルの被害

(30.5 cm) 沈下した。その結果、コンテナクレーンは、走行不能となり、ターミナルは閉鎖された。

図—70 は、オークランド港湾局が調査した 7th Street ターミナルの先端部の被害状況図である。図には、バース 36, 37 の他に、コンテナクレーンが設置されていないバース 38 と公園の被害状況も示されている。被害はクラック、段差等であり、段差、クラックの多くは、岸壁あるいは護岸法線に平行であった。バース 36~38 の海側に近い段差、クラックの線は、図—68 に示した栈橋上部工の陸側端に沿って走っている。9 月号巻頭写真—15 は、バース 37 の栈橋の被害状況を示したもので、



写真—24 7th Street ターミナルの液状化 (バース 37)

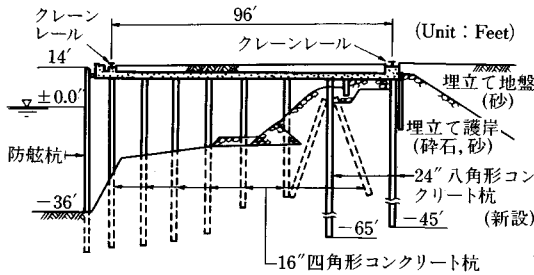


図-71 7th Street ターミナルの復旧断面図

実施中の復旧工事もみられる。棧橋の舗装面にクラック、段差をみることができる。左側に前述の棧橋上部工の陸側端に沿って発生したクラックと段差がみえる。写真-24は、棧橋の背後のターミナルに発生した液状化による噴砂である。

復旧工事では、図-71に示すように、棧橋の上部工を陸側クレーンレールまで伸ばし、陸側のレール下部の基礎を杭基礎に、また被災を受けた斜杭の結合部を除去し、代わりに直杭を打設した。新しい杭は、いずれも幅が24 inの八角形断面のプレストレストコンクリート杭である。

今回の地震で、埋立て地盤は液状化によって沈下などの被害を受けたが、オークランド港湾局によると、復旧工事に際して、特に地盤改良等の液状化対策は実施しないとのことである。対策を行わない理由として、液状化による被害としては、埋立て地盤の沈下、クラック等の地盤災害のみで、ほとんどのターミナルは機能を損なわなかったこと、地盤沈下等の地盤被害は応急復旧で対処できること、液状化対策に先行投資するには費用が膨大であること、などをあげていた。

2) APL ターミナル (バース 60~63)

APL ターミナルは、バース 60~63の4バースの岸壁をもっているが、被害が生じたのは主としてバース 60, 61であった。その岸壁の標準断面を図-72に示す。岸壁はコンクリート杭式棧橋で、岸壁には、レール幅が100 ft (30.5 m)のコンテナクレーンが設置されている。陸側クレーンレールは、棧橋から独立した斜杭基礎で支持されている。バース 60, 61は、1971年に旧護岸の前面海域を埋め立てて建設された。図-73は、埋立て地

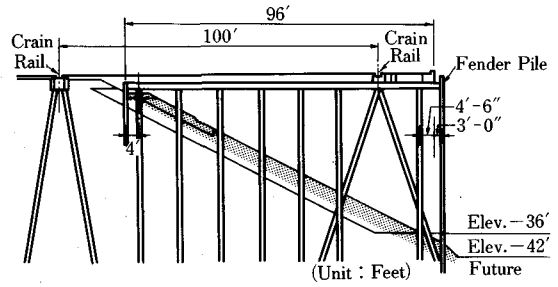


図-72 APL ターミナルの岸壁の標準断面図

盤の断面の例である。図中には、埋立て前のベイマッドおよび砂地盤の状況も示した。図から判断すると、ベイマッドを完全に浚渫しないで埋め立てた部分がある。棧橋が建設された護岸の斜面勾配は1:2で、その斜面は、碎石や被覆石で覆われている。なお、埋立て地盤に対して、液状化対策は行っていない。

APL ターミナルの被害は、コンテナヤードの沈下、クラック、陥没のみで、棧橋およびコンテナクレーンには被害はなかった。図-74は、オークランド港湾局が調査したバース 60, 61のクラック、沈下、陥没状況で、主として埋立て地で発生している。外側のクラックは、旧護岸と新しい埋立て地との境界に生じたものである。なお、隣接するバース 62のヤードの一部にもクラック等が発生していたが、これはバース 60, 61の建設当時、すでに稼働していたバース 62の一部に、この埋立て工事がかかったためであろう。

写真-25は、陸側クレーンのレール付近を示したものである。レールの左側のコンテナヤードが沈下しているのがわかる。コンテナヤードには、液状化による噴砂と陥没が観察されたが、オークランド港湾局によると、陥没の一部は、地震の際、裏込め土砂が埋立て護岸から吸い出された結果、発生した可能性があるとのことであった。

3) ハワードターミナル (バース 67~69)

ハワードターミナルの岸壁は、1981年に建設されたコンクリート杭式棧橋である。ハワードターミナルも、前述のAPL ターミナルと同様に、既存の岸壁の前面を埋め立てて建設されたものである。図-75には、旧岸壁と新岸壁を示してあるが、埋め立てた海域には、フィ

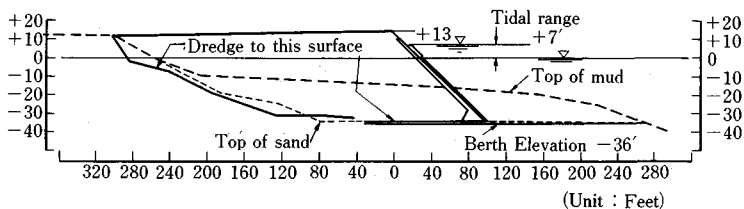


図-73 APL ターミナルの埋立て地盤の断面図

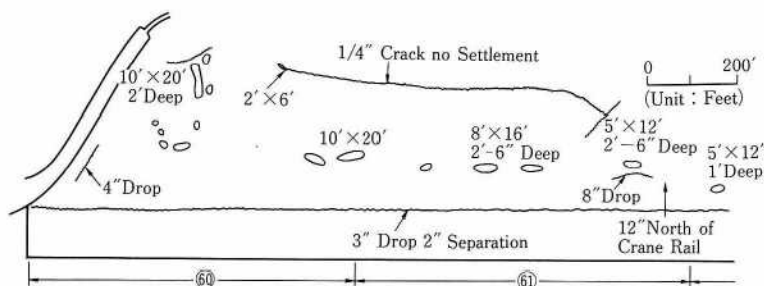


図-74 APLターミナルの被害

写真-25 APLターミナルの棧橋の背後地盤の沈下
(オークランド港湾局提供)

ンガータイプの棧橋があった。ターミナルの東端の岸壁は、既存の棧橋をそのまま利用している。図-76は、埋立て地盤の標準断面の例である。前述のAPLターミナルと同様に、一部ベイマッドが残っている。埋立ては砕石による埋立て護岸を築造してから行われていたことがわかる。棧橋は、前述のAPLターミナルの棧橋と同様な形式で、棧橋本体の杭は、幅が24 inの八角形コンクリート杭、コンテナクレーンの陸側基礎は、16 in四角形のコンクリート杭の組み杭構造となっている。

棧橋とコンテナクレーンに被害は生じなかった。図-77は、オークランド港湾局が調査したパース68, 69の被害状況である。主たる被害は、棧橋背後のコンテナヤードの沈下、クラック等である。クラックは、棧橋背後、陸側クレーンレール基礎の周辺、およびAPLターミナルと同様に、旧岸壁と新しい埋立て地との境界に沿って発生していることがわかる。

写真-26は、埋立て地盤にある陸側コンテナクレー

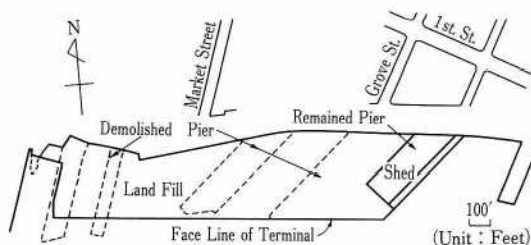


図-75 ハワードターミナルの埋立て区域

ンのレール周辺の地震直後の被害状況である。レール周辺の舗装が散乱しているが、これは杭基礎と埋立て地盤の挙動が大きく異なったためと推定される。また、レールは杭基礎にあったため沈下を免れたが、レールの周囲の埋立て地盤は沈下していることがわかる。このようにコンテナクレーンのレールの基礎が杭基礎であったため、7th Streetターミナルの場合と異なり、コンテナクレーンは地震による被害もなく、地震後も正常に稼働していた。なお、旧岸壁付近には液状化による噴砂もみられた。コンテナヤードが沈下した理由は、埋立て地盤の液状化現象、および図-76にも示した埋立て地盤の下のベイマッドの影響が考えられる。

4) マトソンターミナル

マトソンターミナルは、7th Streetターミナルと接し、その建設時期は、7th Streetターミナルとほとんど同じである。岸壁はコンクリート式棧橋である。コンテナクレーンのレール幅は、前述までのターミナルのそれより小さく、34 ft (10.4 m) で、クレーンレールは棧橋上にあった。被害は、コンテナヤードに比較的大きな陥没が発生したことである。写真-27は、パース32付近に発

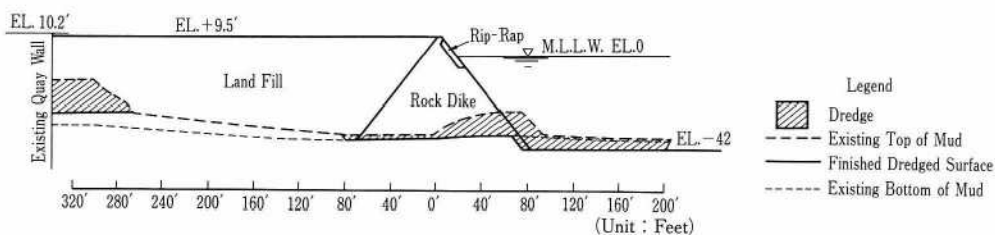
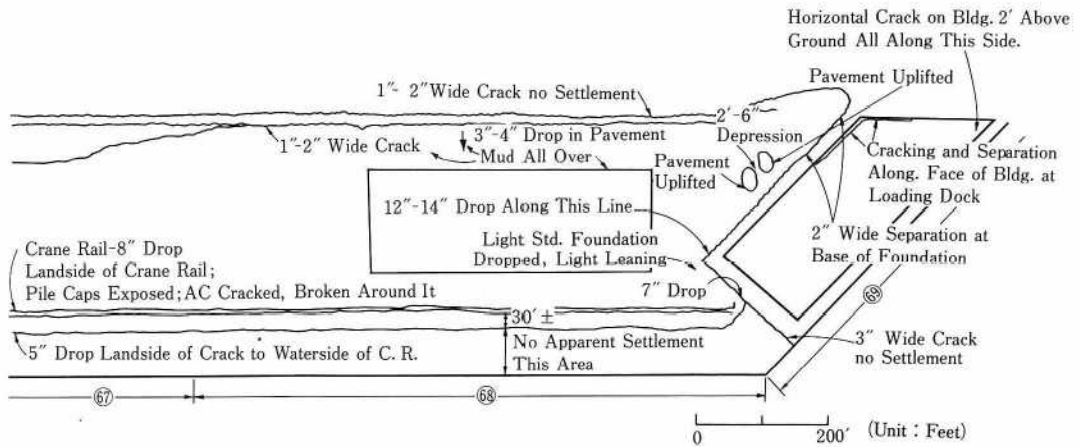


図-76 ハワードターミナルの埋立て地盤の断面図



図一七七 ハワードターミナルの被害



写真一26 ハワードターミナルの陸側のクレーンレール周辺の舗装被害と地盤沈下 (オークランド港湾局提供)



写真一28 Port View Parkの陥没、クラック (オークランド港湾局提供)



写真一27 マトソンターミナルの陥没 (オークランド港湾局提供)

生じた陥没を示したもので、陥没の深さは深いところで5 ft (1.5 m)、幅は40 ft (12.2 m) もあった。また、ヤードの一部においては、シルトおよび砂が吹き出していた。この下には、サンフランシスコとオークランドを結ぶ地下鉄BARTが走っている。

5) Port View Park

Port View Park は、図一七〇に示したように、7th Street ターミナルの先端部にある公園である。被害は、

図一七〇に示したとおりで、クラック、沈下などであった。写真一28 は、その被害状況を示したものである。なお、公園は、全体が海側へ滑っているようであった。前述のように7th Street ターミナルでは液状化が発生していることから、本公園の地盤変状も液状化によって生じたものと考えられる。

b) サンフランシスコ港

サンフランシスコ港は、図一七八に示すようにサンフランシスコ湾側の7.5マイル (12 km) の海岸線に沿って展開している。港湾は、19世紀半ばから埋め立てられた地盤に築造されている。ポートオーソリティーのある1896年に建設されたフェリービルディングは、1906年4月18日に発生したマグニチュード8.3のサンフランシスコ大地震に耐えた古い建築物である。ビル屋上のタワーの内壁には、サンフランシスコ大地震後に記された1906年10月6日の文字があった。

同港の埠頭の多くは突堤式で、構造様式は、木あるいはコンクリートの杭式栈橋である。今回の地震では、これら栈橋に被害は生じなかった。

被害は、フィッシャーマンズワーフに隣接している第

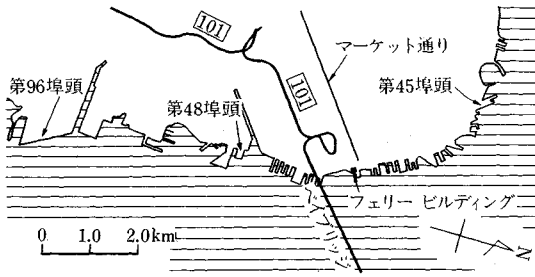


図-78 サンフランシスコ港

45埠頭（1926年建設）、第48埠頭（1929年建設）および第96埠頭（1969年建設）の3つの埠頭で発生したが、その主たる被害は埋立て地盤の沈下であった。さらに、第45、48埠頭の場合は、上屋が栈橋と埋立て地盤にまたがって建設されていたため、埋立て地盤の沈下によって、二次被害として、上屋の壁および床にクラック、段差等が生じた。

1) 第45埠頭の被害

第45埠頭は、図-79に示されるように突堤式埠頭で、上屋が4棟（A～D）建設されている。図-80は、埠頭の標準断面図である。この2つの図から、埠頭は、周囲が杭式栈橋、中心部が埋立て地盤（図-79の実線で囲まれた部分）であることがわかる。したがって、上屋は、

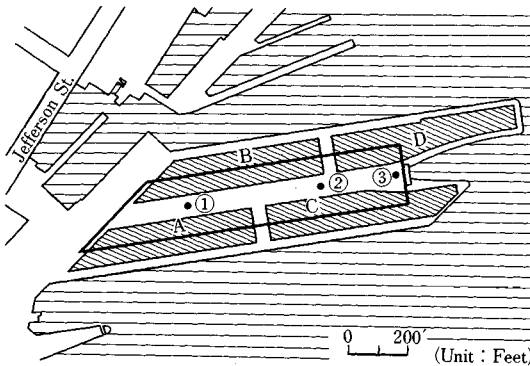


図-79 第45埠頭の平面図

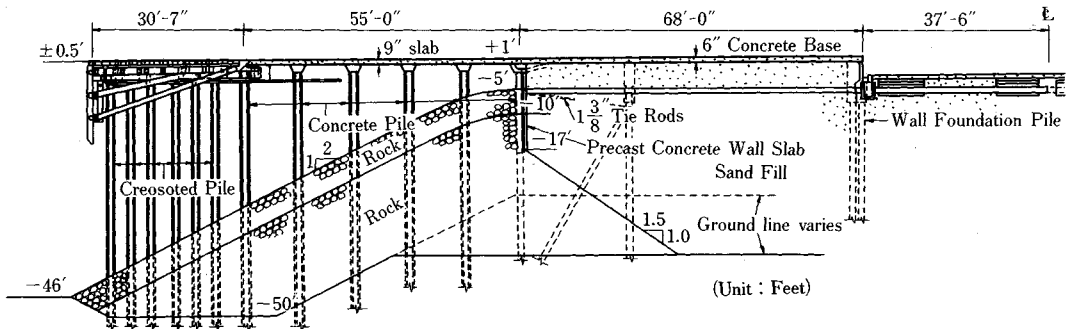


図-80 第45埠頭の標準断面図

コンクリート杭式栈橋と埋立て地盤にまたがって建設されている。なお、図-79の数字①～③は、土質調査を実施した地点の番号である。

図-81は、図-79に示した埋立て地盤の基部①、中心部②、先端部分③のボーリングデータ（1983年調査）である。埠頭の基部の埋土は、表層が中くらいに締まった砂、深くなるとシルト質砂、締まった砂と変化している。一方、埠頭の中心部から先端部は、表層から緩い細砂となっている。

栈橋の杭は、コンクリート杭とクレオソートで防腐された木杭である。栈橋の背後にある埋立て地盤の土留めは、控え組み杭式プレキャストコンクリート板矢板である。埋立て地盤内の上屋の基礎は、杭基礎である。

今回の地震で、被害が大きかったのは埠頭先端部分にある上屋Cで、埋立て地盤部の床が最大8 in（約20 cm）沈下し、栈橋部の床との間にクラック、段差等が生じた。写真-29は、埋立て地盤にある上屋の支柱周辺を示したものである。支柱は杭で支持されていたため沈下していないが、そのまわりの床は沈下しているのがわかる。写真の右側には、栈橋と埋立て地盤の間に生じた段差が上屋の奥へ続いているのがみえる。このように埋立て地盤が沈下した理由は、図-81に示した土質データでは十分とはいえないが、緩い埋立て砂が液状化したためと考えられる。上屋の周辺には、液状化の噴砂が観察された。なお、前述のように、栈橋本体には被害はなかった。

2) 第48埠頭の被害

第48埠頭は、第45埠頭と同様に突堤式埠頭であるが、構造は第45埠頭と異なり、すべてコンクリート杭式栈橋である。幅369 ft（112 m）、奥行き610 ft（186 m）の埠頭には、上屋が2棟建設されていたが、上屋の一部約29 ft（8.8 m）は、栈橋の背後地盤に建設されていた。図-82は、栈橋の陸側近く断面図である。栈橋背後の原地盤はベイマッドで、その上面は、栈橋の天端から5～8 ft（1.5～2.4 m）下にある。したがって、栈橋の背後地盤は埋立て地盤で、埋立ては栈橋に土留め板を設置

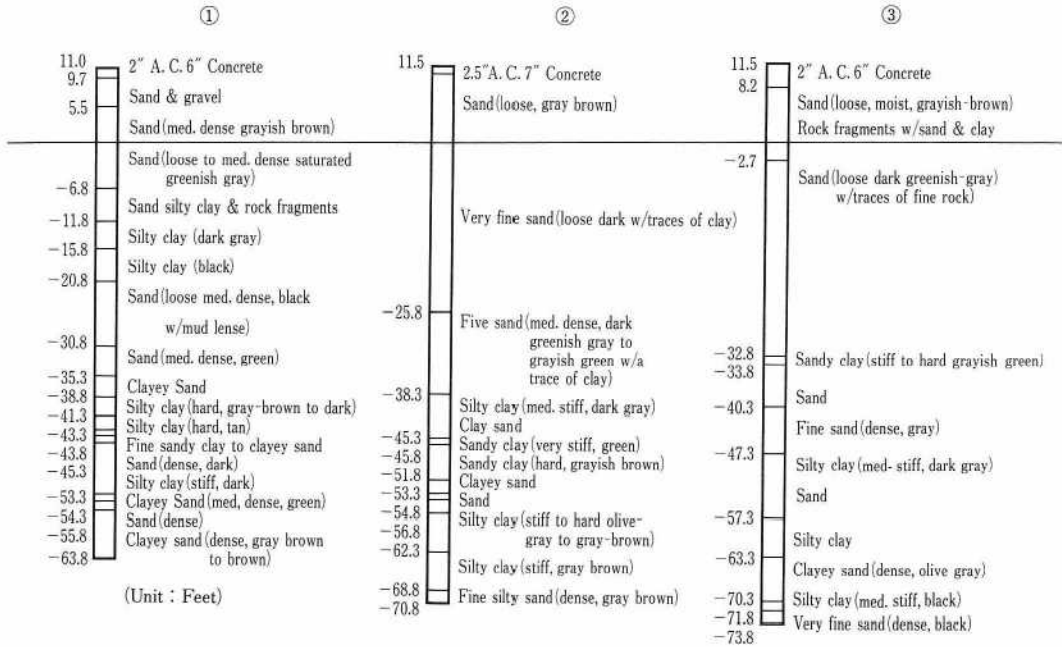


図-81 第45埠頭の土質

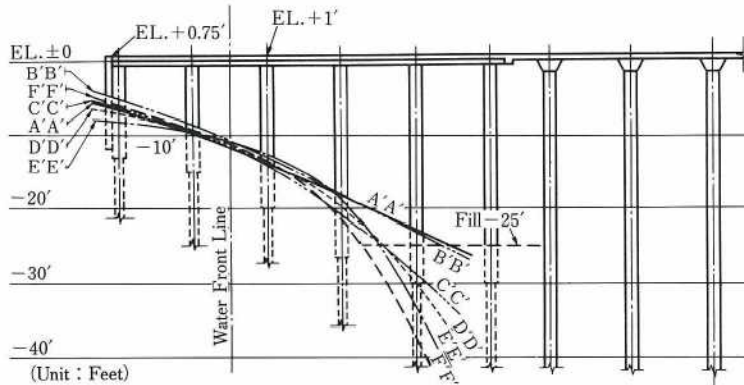


図-82 第48埠頭の栈橋背後の断面図



写真-29 第45埠頭の上屋の床の沈下, 段差

してから行われている。埋立て地盤上の上屋の床はコンクリート板構造で、埋立て地盤上に直接設置されていた。また、上屋の壁は、一定間隔に打設された杭基礎および

鉄筋コンクリートばりで支持されていた。ただし、はりと杭基礎は剛結しておらず、鉄筋のみで連結されていた。

今回の地震では、栈橋本体に被害は生じなかったが、栈橋の背後地盤が沈下したため、地盤上の上屋に被害が生じた。上屋の被害は、壁のクラックと上屋入口部の床の沈下であった。上屋の壁にクラックが生じた理由は、壁を支持するコンクリートばりが、杭基礎と剛結されていなかったため、埋立て地盤が沈下したことによって、はりが沈下し、その結果、壁にクラックが生じたと説明される。写真-30は、上屋内の床の沈下で、手前が埋立て地盤、奥は栈橋である。埋立て地盤と栈橋の段差は、25 cm 程度であった。この段差に対して、すでにアスファルトで斜路を作り、貨物の搬入、搬出を行っていた。写



写真—30 第48埠頭の上屋の床の沈下



写真—31 第48埠頭の上屋の壁のクラックと埋立て地盤の沈下

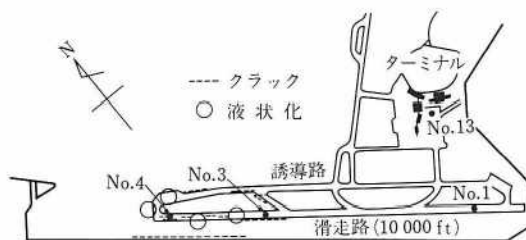


写真—32 サンタクルズ港の矢板式護岸の上部工のクラック、前傾

真—31は、上屋の壁の亀裂および埋立て地盤の沈下を示したもので、写真の奥が棧橋である。

c) サンタクルズ港

サンタクルズ港は、震源から南西約16kmの太平洋に面したヨットハーバーで、1964年に建設されている。被害は鋼矢板式護岸に発生した。護岸は、今回調査した港湾施設の中で、土圧を受ける唯一の構造物であった。護岸の断面等の詳細は不明であるが、控え工は斜め控えタイロッド形式である。被害状況を写真—32に示すが、



図—83 オークランド空港

被害形態は、わが国の地震被害でもみられるコンクリート上部工の亀裂と前傾であった。タイロッドが切断された様子はなかった。係留施設である杭式棧橋には、被害はなかった。

(2) 空港施設の被害

a) オークランド空港

オークランド空港は、オークランド港の南西約15km、サンフランシスコ湾に面して建設されている。滑走路は、図—83に示すように一本で、その長さは1万ft(3048m)である。地震被害は主として、滑走路および空港の外周堤防に発生した。また、軽微ではあるが、ターミナルと出発ロビーの連絡通路の支柱にも被害が生じた。なお、ターミナル、管制塔の建物に被害はなかった。

空港建設は、1960年代の埋立て地盤造成に始まっている。埋立て土砂は、サンフランシスコ湾の浚渫土砂である。埋立て地盤の下には、厚さ8~18ft(2.4~5.5m)のベイマッドがあり、ベイマッドの下は、比較的密な粘土質砂および固い砂質あるいはシルト質粘土が続いている。埋立て地盤の土質調査が、1973年に、空港の14か所で行われている。図—84は調査結果の一例で、被害が発生した滑走路の北西端の土質である。土質調査によると、埋立て地盤の厚さは10~15ft(3~4.6m)、埋立て材料はシルト分を含まない細砂で、地下水より浅い部分が密な砂層、地下水位より深い部分が緩い砂層となっている。地下水位は、舗装表面から5~9ft(1.5~2.7m)下で比較的浅い。埋立て地盤の砂層の緩い、あるいは密な状態を重錘の落下試験(わが国の標準貫入試験とほぼ同じものである)で評価している。試験では、重量140ポンド(63.5kgf)の重錘を30in(76.2cm)自由落下させ、直径2in(5.1cm)のサンプラーロッドを1ft(30.5cm)沈下させるに必要な打撃数(N値に対応する)を調べている。試験結果によると、打撃数は緩い砂層で6回、中くらいに密な砂層で18回、密な砂層で26回以上であった。地下水位より高い埋立て地盤が密となっているのは、地盤造成時に締固めを行ったためである。以上の打撃数をN値とみなすと、地下水位より深いところは、きわめて緩い地盤であったことが推定され

Depth, Ft.	Blows/Ft.	Runway (No.4)	DESCRIPTION
Surface Elevation : 7.5 ft			
4.5" Asphalt Concrete 3.5" Cement Treated Base (Damaged) 7" Aggregate Base			
26			GRAY-BROWN DENSE MEDIUM-FINE SAND, MOIST
5			MEDIUM DENSE TO LOOSE SAND, WET
10			
15			SOFT GRAY SILTY CLAY (BAY MUD)
			Bottom of Hole

図-84 オークランド空港の土質（滑走路北西端）

る。土質データには、粒度分布はなかったが、政府調査団に同行した地方公共団体チームが滑走路に噴き出した液状化の噴砂の粒度を調べた⁴⁷⁾。その結果を図-69の粒度分布（LP-8, 10）で示すが、埋立て土砂は、粒径が揃った細粒砂で、液状化の可能性が大きい砂であったことがわかる。滑走路およびエプロンの舗装はアスファルトコンクリート舗装で、路床等を含めた厚さは、13～15 in（33～38 cm）程度であった。

一番被害が大きかった区域は、図-83に示す滑走路の西側部分とそれに続く誘導路である。同区域には大規模な液状化現象がみられ、舗装には大きなクラック、沈下、段差等が生じた。9月号巻頭写真-17は、滑走路の割れ目から噴き出した液状化の噴砂である。人物の大きさと比較すると、液状化の規模の大きさがわかる。また、噴砂の流紋が滑走路の舗装にはっきりと残っている。写真-33は、滑走路のすぐ脇の未舗装地の噴砂で、液状化の噴砂口の様子わかる。地震1か月後において、このような噴砂が観察できたのは、飛行場という特殊性と、地震後、幸いにも雨が降らなかったためである。

滑走路の被害としては、地盤の液状化の他に、舗装の被害がある。写真-34は、滑走路に発生したクラック、陥没、段差である。クラックの多くは、滑走路の長手方向あるいは短手方向に発生していた。

図-69の粒度分布から判断すると、地盤の地震動が大きければ液状化の可能性はある。一方、図示していな



写真-33 オークランド空港の滑走路脇の噴砂



写真-34 オークランド空港の滑走路のクラックと陥没

いが、被害が生じなかった滑走路の残りの部分とエプロンの土質データも図-84とほぼ同じであった。しかし、液状化は滑走路の北西側に集中していた。この理由として、空港事務所は、埋立てはターミナルおよび滑走路の南東側部分から始めたが、予算の関係で北西側の地盤の締固めが十分に行えなかったことをあげている。なお、被害が発生した滑走路の北西側は、滑走路を延長したところである。

被害調査によると、液状化の発生していない滑走路、エプロンには、顕著なクラック、段差等は生じていなかった。今後、滑走路等の地震被害を防ぐには、地盤の液状化対策が重要であると考えられる。

空港閉鎖は12時間後に解除されたが、滑走路北西側（約3000 ft）は閉鎖された。

b) サンフランシスコ空港

サンフランシスコ空港は、サンフランシスコ市の南約18 kmのサンフランシスコ湾に面して建設されている。

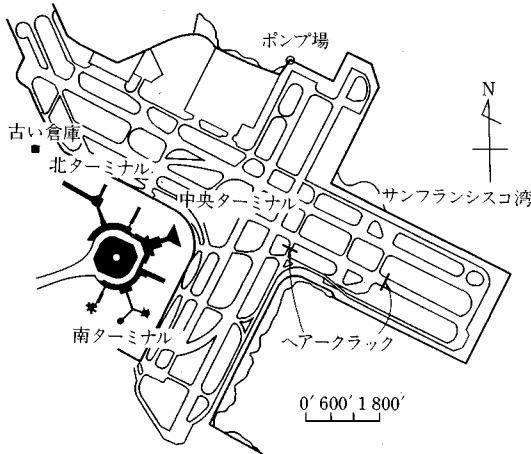


図-85 サンフランシスコ空港

図-85 に空港の平面図を示す。強震観測記録によると、サンフランシスコ空港の最大加速度は、0.33gであった。空港の被害は、ターミナル、管制塔の天井板の落下、スプリンクラーの破損等、非構造部材の被害で、建物本体の被害、および滑走路、エプロンには被害はなかった。また、液状化の発生も報告されていない。

滑走路、誘導路、エプロンの土質資料は入手できなかったが、滑走路の周辺にある貨物ビル、格納庫、ターミナルビル等を建設する際に調査した土質資料は入手できた。図-85の空港平面図に示す南ターミナルとサンフランシスコ湾に面するポンプ場の土質データを示す。南ターミナルとポンプ場は、1948年頃に埋め立てられた比較的古い埋立て地に建設されているが、滑走路、エプロンも、この時期までには、ほとんど完成しているため、滑走路とエプロンの土層も、ここに例として示した土層とほぼ同じであると考えられる。

Depth (Feet) EL. +6.5	Description and Remarks					Penetration Resistance (lb/in ²)
	Description & Remarks	SYM	Color	Consistency	Type	
2	Fill, SILTY SAND, fine grained with fine to coarse grained gravels and cobbles		brown	medium dense	SM/ML	3
4						
6				medium dense		
8						
10						
10	Direct shear test at 11 feet $c=400$ psf $\phi=35^\circ$					10
12					14	
14					15	
16					18	
18					15	
20						
22	SILTY CLAY, high plasticity, organic, with shell fragments between 21 and 23 feet (Young Bay Mud)		dark gray	Soft	CH	4
24						
26						
28						
28	Unconfined compressive Strength = 448 psf (at 24 ft.)					4
30						
32						
34						
36						
38						
40						

図-87 サンフランシスコ空港の土質 (ポンプ場)

図-86 は、南ターミナルの地盤図 (1960年調査) である。埋立て地盤の厚さは、約10ft (3m) である。埋立て地盤より下は、ベイマッド、砂層等が約 (一) 90ft (27.4m) にある岩盤まで続いている。なお、埋め土 (Fill) は、シルトあるいは粘土質砂である。図-87は、サンフランシスコ湾に面したポンプ場の深度40ft (12.2m) までの土質 (1980年調査) である。本デー

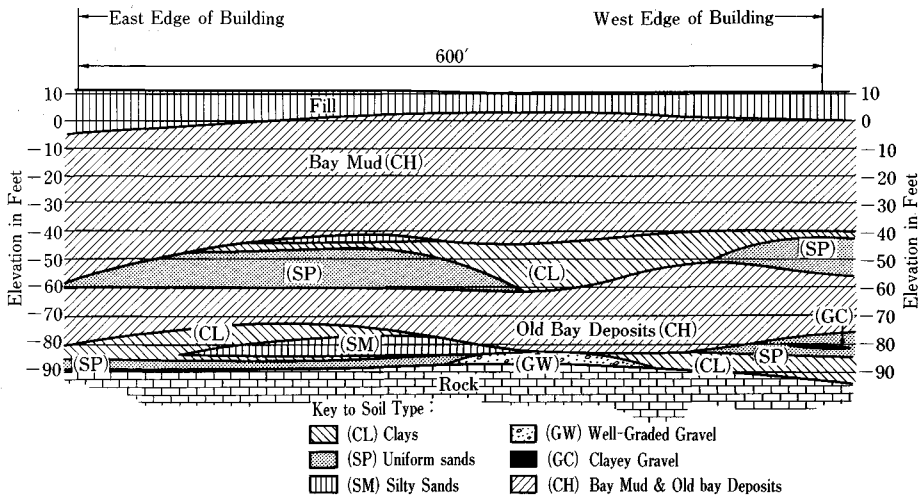


図-86 サンフランシスコ空港の地盤図 (南ターミナル)

タは、今回取得できた土質データの中で最もサンフランシスコ湾寄りのデータである。地表面の標高は、6.5 ft である。地下水位は調査されていない。ベイマッド上の埋立て地盤の厚さは、約 21 ft (6.4 m) で、シルト質砂である。地表面から 11 ft (3.4 m) の深さの埋土は、粘着力と内部摩擦角をもつ。なお、埋立て地盤の層厚は、ターミナルの地区より厚くなっている。ベイマッドは、その強度を増加させながら、図示していないが約 85 ft (25.9 m) の深さまで続き、それ以下は、非常に締まった砂層となっていた。空港事務所によると、滑走路、エプロン地区の埋立て地盤の締固めは、十分に行っているとのことである。

空港の被害は、ターミナル、コントロールタワーおよび貨物ビル等の建物被害が主で、滑走路、誘導道路等の被害は、ヘアークラック程度できわめて小さなものであった。滑走路のヘアークラックは、図—85 に示す場所で発生したが、この位置は 1974 年に延長した滑走路の境目付近である。また、貨物ビルは非常に古いもので、柱がせん断破壊を起こし、使用不能となった。調査時点には、すでに取り壊され、撤去されていた。

サンフランシスコ空港では、液状化は報告されていない。限られた土質データからではあるが、空港の埋立て土砂はシルト質砂で、かつ締固めが十分に行われていたためと考えられる。なお、ガス、燃料用パイプライン等の地下埋設構造物にも、被害は生じなかったと報告されている。

ターミナルの被害は、北および中央ターミナルで発生したが、その被害は建物本体ではなく、天井板の落下、スプリンクラーのパイプ破損、モニターテレビの落下など、非構造部材の被害であった。ターミナルの基礎は杭基礎で、杭は支持層まで打設してあった。なお、構造様式の異なる南ターミナルに被害はなかった。調査時点においては、すでに北および中央ターミナルの天井板は、完全に除去されていた。写真—35 は、その天井を撮影したものである。両ターミナルの床のカーペットもスプリンクラーからの漏水、および天井からのほこり等で汚染されたため、すでに撤去されていた。

なお、貨物ビルの被災時の様子は、空港事務所のビデオフィルムから知ることができた。写真—36 は、貨物ビルの被害状況で、2 階部分の柱がせん断破壊を起こしている。その結果、窓枠が押しつぶされている。被害の原因としては、柱の主鉄筋が少なかったこと、帯鉄筋がほとんどなかったことが考えられる。

地震によって、空港では 2 万 3 000 人が避難した。また、地震後の後片付けは、1 500 人（航空会社 1 000 人、空港関係者 500 人）によって行われた。

コントロールタワーでも、天井板の落下、窓ガラスの



写真—35 サンフランシスコ空港ターミナルの調査時の天井



写真—36 サンフランシスコ空港の被災時の貨物ビル
(空港事務所提供)

破損およびコンピュータターミナルの転倒被害が生じたが、その機能は、地震後、発電機、バッテリー予備電源でバックアップされた。

空港閉鎖は 13 時間後に解除されたが、航空機の離着着は、管制塔の復旧に合わせて、地震翌日 (18 日 (水)) が通常の 50 %、19 日 (木) が 70 %、20 日 (金) からは 100 % の完全運航となった。

(3) ま と め

ロマプリータ地震は、港湾・空港に被害をもたらしたが、被害調査を通じて、今後、次のような調査、検討が必要と考えられる。

① サンフランシスコ湾岸地域の港湾・空港は、ベイマッド上の埋立て地盤に建設されている。これら施設の被害の主なものは、埋立て地盤の液状化による地盤災害であった。幸いにも、液状化による地盤変状が、港湾・空港の施設本体に致命的な被害は与えなかった。今後は、埋立て地盤の液状化対策、および液状化と施設被害の関連に関する調査が重要である。

② ①で述べたように地盤に液状化が発生しても港

湾・空港の施設本体に致命的な被害はなかった。港湾の棧橋、空港のターミナル等の建物は、いずれも基礎が杭であった。わが国でも、杭式棧橋の地震被災例は過去にない。今後、耐震的な構造物と考えられる杭式構造物の地震時応答、および地盤の液状化と杭基礎の地震時応答に関する調査も重要と考える。

③ 液状化が発生していない滑走路、エプロンには、顕著なクラック、段差等は生じなかった。今後、滑走路等の地震被害を防ぐには、地盤の液状化対策が重要であると考えられる。

謝 辞：ロマプリータ地震の現地調査に際して、数多くの日・米の関係機関および関係者の方々に大変お世話になった。日本においては、国土庁防災局震災対策課、運輸省運輸政策局技術安全課、同環境課、港湾局建設課、同防災課、航空局飛行場部建設課、福岡市港湾局、大阪市港湾局、オークランド港東京事務所、サンフランシスコ港東京事務所、また、現地においては、サンフランシスコ総領事館、国際観光振興会サンフランシスコ観光宣伝事務所、日本航空サンフランシスコ空港事務所、オークランド港湾局、サンフランシスコ港湾局、サンフランシスコ空港事務所、カリフォルニア大学バークレー校、スタンフォード大学の皆様にご協力をいただき、所期の目的を果たすことができました。ここに、関係機関および関係者に対して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) "The Quake of '89", Chronicle Books・San Francisco, 1989.
- 2) "Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report", Earthquake Spectra, Supplement to Volume 6, Earthquake Engineering Research Institute, May 1990.
- 3) 片山恒雄：市民たちは、怖さを語りあい、安心感も共有していった、科学朝日、第50巻、第7号、1990年7月。
- 4) 「いつか東京にも?」、ロマ・プリータ地震東京都調査団、1990年2月。
- 5) AERA, 1989年10月31日号、朝日新聞社。
- 6) The Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake: Competing against Time, May 1990.
- 7) Lew, H. S. (Editor): Performance of Structures during the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1990, NIST Special Publication 778, National Institute of Standards and Technology, U. S. Department of Commerce, January 1990.
- 8) Astaneh, A. : Analysis of Damages to the Bay Bridge Caused by the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, Proc. 6th U. S.-Japan Bridge Workshop, Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, May 1990.
- 9) Priestley, N., Seible, F. and Chai, Y. H. : Collapse of the Cypress Viaduct, Report to CALTRANS, University of California, San Diego, November 1989.
- 10) ロマプリータ地震政府調査団 (団長：岩崎敏男)：ロマプリータ地震政府調査団報告書、平成2年1月 (国土庁防災局監修：1989 サンフランシスコ湾岸地震の記録、ぎょうせい、平成2年3月)。
- 11) 文部省科学研究費突発災害研究成果重点領域「自然災害」総合研究班 (代表：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等の被害に関する調査研究、平成2年3月。
- 12) 岩崎敏男・川島一彦・伊藤義則・秋元泰輔・辰巳正明：米国ロマプリータ地震調査速報、土木技術資料、Vol. 32-2, 平成2年2月。
- 13) 川島一彦・岩崎敏男：米国における道路橋の耐震設計とその変遷、および、：米国における既設道路橋の耐震補強プログラム、橋梁と基礎、平成2年3月。
- 14) 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、平成元年11月。
- 15) ロマプリータ地震被害調査報告書、(株)大林組技術研究所、平成2年4月。
- 16) Shakal, A. *et al.* : CSMIP Strong Motion Records from the Santa Cruz Mountains, California Earthquake of October 17, 1989, Report OSMS 89-6, CDMG, November 1989.
- 17) Buckle, I. : Recent Progress in Base Isolation for Bridges in U. S., Proc. 6th U. S.-Japan Bridge Workshop, Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, Nevada, U. S. A., May 1990.
- 18) Mahin, S., Moehle, J. and Roy, S. : Static Load Test of the I-880 Cypress Viaduct-Retrofit Phase, Preliminary Letter Report, Dec., 1989.
- 19) Moehle, J. and Mahin, S. : Implication of Nondestructive and Destructive Test on the Cypress Street Viaduct Structure, Preliminary Letter Report May 1990.
- 20) The Report to Governor George Deukmejian from the Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake, —Competing against Time—, May 1990.
- 21) Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report, Earthquake Spectra, Supplement to Volume 6, May 1990.
- 22) 後藤洋三・江戸宏彰・大内 一・松田 隆：地盤と高架橋の応答シミュレーション解析、土と基礎、No. 394, 1990年11月。
- 23) Seed, H. B. and Sun, J. I. : Implication 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, UCB/EERC-89/03, March 1989.
- 24) Helley, E., Lajoie, K. R., Spangle, W. E. and Blair, M. L., : Flatland Deposits of the San Francisco Bay Region, California—their geology and engineering properties, and their importance to comprehensive planning, USGS Geological Survey Professional Paper 943.
- 25) Ohmachi, T., Nakamura, Y. and Toshinawa, T. : Ground Motion Characteristics in the San Francisco Bay Area Detected by Microtremor Measurements—A Preliminary Assessment—, Tokyo Institute of Technology.

- gy No.800104, November 30, 1989.
- 26) Nims, D.K., Miranda, E., Aiken, I.D., Whittaker, A.S. and Bertero, V.U. : Collapse of the Cypress Street Viaduct as a Result of the Loma Prieta Earthquake, UCB/EERC-89/16, November 1989.
 - 27) 川島一彦・秋元泰輔・矢部正明：ロマ・プリータ地震による被災橋脚の試設計による検討，土木学会第45回年次学術講演会，平成2年9月。
 - 28) 日本道路協会：道路橋示方書，I～V編，平成2年2月。
 - 29) Priestly, M.J.N., Seible, F. and Chai, Y.H. : Collapse of the Cypress Viaduct, Report to CALTRANS, University of California San Diego, November 1989.
 - 30) (社)海外電力調査会：海外諸国の電気事業第一編，p.74，1988年12月。
 - 31) Pacific Gas And Electric Company 1989 Annual Report.
 - 32) 東京都総務局災害対策部企画課：ロマプリータ地震東京都調査団報告，pp.121～127，1990年2月。
 - 33) 国土庁防災局：1989 サンフランシスコ湾岸地震（ロマプリータ地震）の記録。
 - 34) 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。
 - 35) 亀田弘行：1989年ロマ・プリータ地震による被害と問題点，京都大学防災研究所年報，第33号A。
 - 36) City and Country of San Francisco : Biennial Report, Public Utilities Commission (1984～1986).
 - 37) EBMUD : All About East Bay Municipal Utility District.
 - 38) EBMUD : Water System Operating Report.
 - 39) Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE : Loma Prieta Earthquake, October 17, 1989 ; Performance of Water and Sewage Lifeline.
 - 40) Bert Michalczyk *et al.* : Earthquake does not stop wastewater treatment, 1989.12.5.
 - 41) City and County of San Francisco : Clean Water Enterprise ; Five Year Report.
 - 42) BWPC, San Francisco : Earthquake Damage Assessment.
 - 43) San Francisco Examiner, 1989.10.21.
 - 44) Austin, D.I. *et al.* : The October 17, 1989 ; Loma Prieta Earthquake.
 - 45) EBMUD : Operating Report ; Wastewater Department, Special District No.1, Summary of Earthquake Damage and Cost, Repration of the Infrastructure, 1990.6.8.
 - 46) CSMIP Strong-Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October 1989, Report OSMS 89-06, California Department of Conservation, Division of Mine and Geology, Office of Strong Motion Studies, 1989.
 - 47) 楡井 久：地質学的観点からみたロマ・プリータ地震とサン・フランシスコ，シンポジウム人工改変と地質環境ならびにトピックスロマプリータ地震の特徴と被害報告，日本地質学会関東支部，pp.5～22，1990。
 - 48) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，改訂版（上巻），日本港湾協会，p.204，平成元年。
(1990.0.0・受付)
-