U.D.C. 614.8：550.34：625.54(794)

清水建設研究報告
第53号平成3年4月

1989年ロマ・プリエタ地震被害調査報告

——BART の地震被害と震後の対応——

田 蔵 隆
(技術研究所)

§1. はじめに

1989年10月17日午後5時4分頃，マグニチュード7.1の地震が米国カリフォルニア州サンタクルス山中で発生した．ロマ・プリエタ地震（Loma Prieta Earthquake）と名付けられたこの地震による被害は，地震直後から始まったテレビ放送により刻々と全世界に伝えられ，当初その報道映像から「世紀の大地震」がサンフランシスコ市ならびにオークランド市を襲い，両市が壊滅的な被害を受けたかのような印象を多くの人々に与えた．

とりわけ注目を集めたのは，州間高速道路880号線のサイプレス高架橋の崩壊とベイブリッジの落橋である．壊れるはずがないと思われていた近代土木構造物のこの2つの地震被害は，一般の人々を驚愕させた．しかし，被害の実態はきわめて局所的であり，多くの研究者ならびに技術者による精力的な被害調査により被害原因の特異性が明らかにされるに従い，ロマ・プリエタ地震は決して恐れられていたほどの大地震ではなく，むしろ中規模程度の地震であったという評価が一般的になってきている．

一方，橋梁や建物などの構造物そのものの被害だけに注目せず，都市防災の観点から，その被害がそこに住む人々の日常生活にどのような影響を与え，また都市の機能維持にどのような不都合をもたらしたかといった調査研究がロマ・プリエタ地震では広く行なわれ，貴重な教訓を多く提供してくれている[1)~4)]．

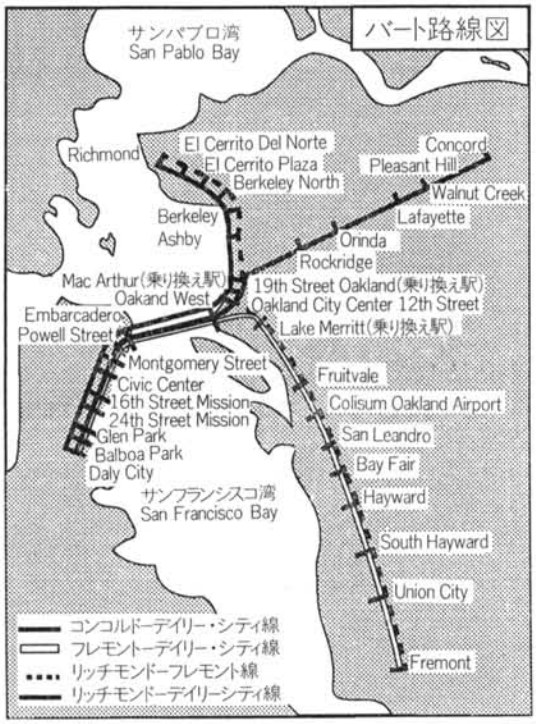
そのうちの一つとして，近代の都市機能がいかにその都市の交通システムに依存しているかが，大きくクローズアップされた．ベイブリッジの1径間の落下による1か月の通行閉鎖は，湾岸地域の交通システムに大きな影響を与えた．さらに，その交通システムの変化に伴ってフレックスタイムの大幅な導入，在宅勤務など，サンフランシスコ市における勤務者の就業形態にまでもその変革が余儀なくされた．また，BART（サンフランシスコ湾岸地区高速鉄道）は，ベイブリッジの代替の重要な交通機関として，車両の増加，24時間運転などにより震後の応急対応を図り，その社会的使命を果すことに努力した．

本文は，BART の震後の対応に関する調査結果について示したものであり，これまでの被害報告にはあまり触れられていないことを中心にまとめたものである．交通システムは，都市の機能を維持する重要なライフラインである．ライフラインの被害はシステムの被害であり，地震後そのシステムがどれだけ機能するかが問われることになる．BART の震後の対応は，BART が採り得た最大限のものであり，ベイブリッジの修復が遅れると，24時間運転などのサービスをこれ以上継続することは難しかったといわれている．今後の都市の交通システムの地震防災対策を考える上で，BART の震後の対応の過程に学べきことが多いと思われる．

§2. BART とは

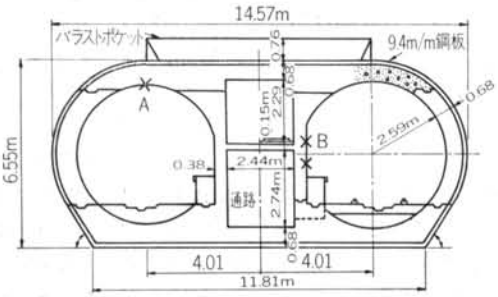
BART とはサンフランシスコ市とサンフランシスコ湾岸の都市を結ぶ高速鉄道であり，サンフランシスコ湾岸地区高速鉄道（The San Francisco Bay Area Rapid Transit）を略称したものである．混雑したサンフランシスコ市の都心を離れて近郊の衛星都市に移る人が増え，そのためにサンフランシスコ市に職場を持つ人々の朝夕の通勤ラッシュが年々激しくなり，BARTはその緩和ならびにパーキングエリア不足の解消を目的として建設されたものである．

1957年にカリフォルニア州の法令により BART 建設計画が打ち出され，1964年に建設が開始，1972年に一部が開業，1974年に現在の路線のすべてが開通した．BART の路線は図—1に示すように，サンフランシスコ市南西部のデイリーシティ（Daly City）から対岸のリッチモンド（Richmond），コンコード（Concord），フレモント（Fremont）を結ぶ3路線と，リッチモンドとフレ



図—1　BART の路線図

写真—1　BART の車両



図—2　BART 海底トンネルの断面図

モントを南北に走る路線の合計4系統がある．BART の全長は115㎞である．そのうちの37㎞は，RC の柱と梁で支持された高架鉄道であり，残りの40㎞が地上鉄道，38㎞が地下鉄道である．サンフランシスコ市と対岸のオークランド市，バークレイ市は海底トンネルで結ばれている．

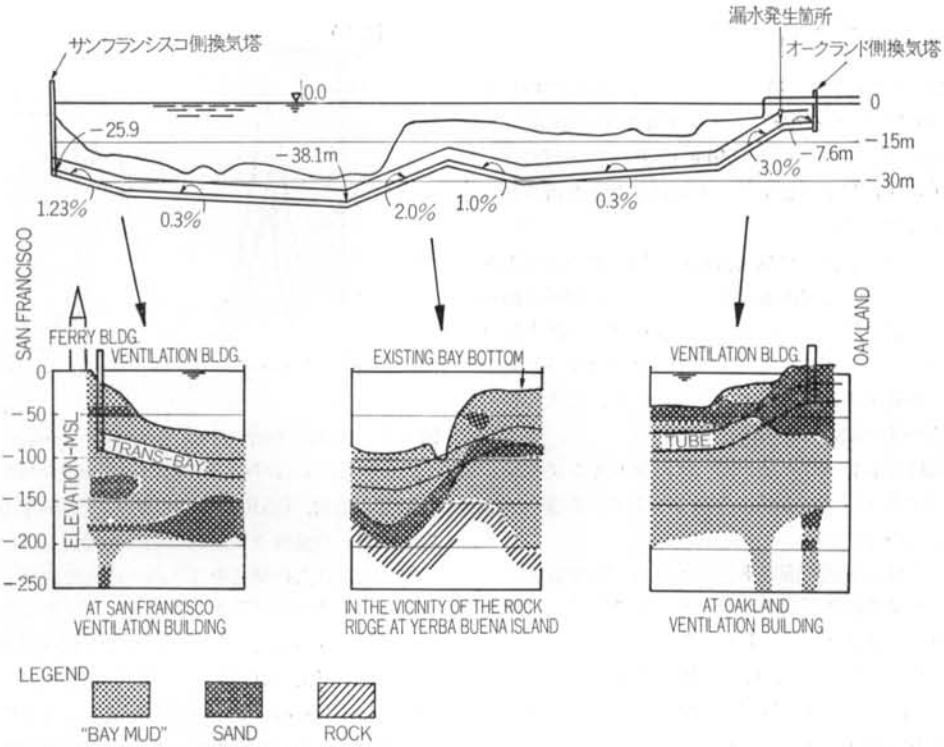
車両は**写真—1**に示すように斬新なデザインで市民から人気があり，またコンピュータによる無人運行システムが BART の自慢の一つになっている．全線が複線構造で，平均走行時速は 80 km/h である．駅の数は全部で34あり，ウィークデイの1日の平均乗客数は 218,000 人である．BARTは，鉄道も施設もすべて PG&E (Pacific Gas and Electric) 社の供給する電力によって稼動するシステムになっている．

§ 3.　BART 海底トンネルの概要

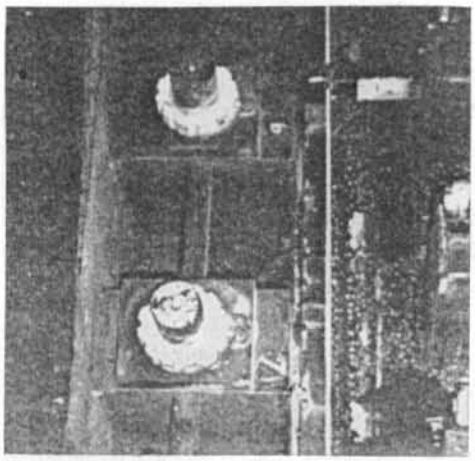
サンフランシスコ市とオークランド市間を結ぶ海底トンネルは沈埋トンネルであり，その長さは7㎞である．沈埋トンネルの断面は**図—2**に示すように，半径2.59m の円形断面の双設構造になっている．外周は 9.4㎜ の鋼板による楕円型の鋼殻構造で，鋼殻内のライニングは鉄筋コンクリート造である．

沈埋トンネルの建設に際しては十分な地質調査と土質試験[5]，ならびに耐震設計[6]が行なわれている．**図—3**は海底トンネル部の地質断面図を示したもので，海底トンネルが敷設されている地盤のほとんどはベイマッドと称されているシルト質粘土であり，一部砂質土の部分を通過しているところがある．ベイマッドに対する液状化試験の結果から，ベイマッドは強震時にも液状化する可能性はきわめて小さいことが明らかにされている[5]．

沈埋トンネルの耐震設計は1969年に Persons 社の T. R. Kuesel が行なったもので，沈埋トンネルを弾性床上の梁にモデル化し，トンネルの軸方向に正弦波が伝播するとして，その地盤変位を地盤ばねを介して入力する耐震解析法を提案しており[6]，BART 海底トンネルはこの方法で耐震設計されている．Kuesel の提案した方法は，わが国の石油パイプライン事業法における耐震設計規定などに採用されている．設計用地震動としては1906年のサンフランシスコ地震を考慮し，表層の軟弱層が薄い部分では水平方向 330 ガルの地震動，軟弱層の厚い部分では 500 ガルの地震動が想定されている．また，上下動に関する最大加速度は水平方向の 2/3 としている．用いた設計用スペクトルは，カリフォルニア工科大学のG. W.



図—3 BART 海底トンネルの縦断面と地質概要



写真—2 換気塔と沈埋トンネルの接合部に設置された可動性継手[7]

Housner 教授が BART の建設地点の地盤条件と地震活動を考慮して定めたものである．

換気塔と沈埋トンネルとの接合部は，多数のオイル・ダンパーを配置した可動性継手が設置されており（**写真—2**）[7]，トンネル軸方向10cm，軸直角水平方向10cm，軸直角鉛直方向5cmの相対変位が許容されるようになっている．

BART には，バークレーヒル付近のトンネルの部分でヘイワード断層と交差するところがあるが，大地震でこの断層は1.5〜3m 程度のずれを起こすと予想されており，トンネルのその部分では巻立ての強化などが行なわれており，さらに断層のクリープを小さくするような方策も採られている．

BART の地震防災対策としては，地震が発生した場合，駅に設置された強震計が地震動をキャッチし，100ガル以上の加速度でアラームが鳴り，警告を発すると同時に走行中の電車を自動停止させるようなシステムが採られている．特に，ヘイワード断層の活動によって地震が発生した場合のシナリオ[8]が作成されており，この場合 PG&E 社からの送電はイーストベイの所で停止し，電車は動かなくなると予測している．高架部を走っていた電車の乗客はレスキュー隊が来なければ，電車から降りて次の駅まで歩くことになる．地下鉄，トンネルあるいは海底トンネル内を走っていた電車の乗客も電車を降り，次の駅まで歩くことになる．そして，海底トンネル内に残された電車は，ディーゼル機関車を用いて移動させるとなっている．

§ 4. BART の地震被害

BARTに対する地震被害調査として，1989年12月11日に BART のオークランドオフィスの Public Affairs の Department Manager の Mike Healy 氏に面会した．M. Healy 氏に対するヒアリングの結果をまとめると，以下のようになる．

(a)オークランド側の換気塔付近の土被り部分を埋土とした海底トンネル部で漏水が発生した．漏水個所は**図—2**に示したAとBの2個所である．Aの部分の漏水量の方が多かったが，グラウトを注入することによって完全ではないが止水することができた．しかし，漏水はわずかであるがまだ続いている．

(b)換気塔とトンネルの接合部には，フレキシブルジョイントが設置されているが，そこで3/4インチ(約2cm)程度のずれが発生した．

(c)オークランド側の海底トンネルから，高架橋までのアプローチ部の高さが低く，短いスパンの橋梁で橋脚の桁座部分にクラックが発生した．沓は使用していない．桁をステージングで支え，桁座の補修工事を行なった[9]．

(d)地震後，BART 職員により全線を視察したが，上記以外の被害は見られなかった．

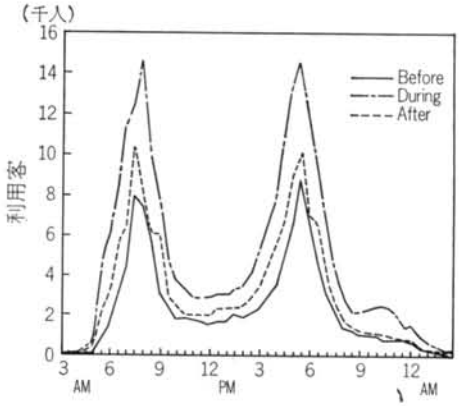
(e)復旧は17日午後9時半頃にバックアップが終了し，部分開通し，18日午前0時頃には運転を再開した．

(f)電気が供給停止の状態にあった20～30分の間は，ディーゼルによる非常用自家発電装置により電力を供給した．

(g)海底部を走っていた電車が地震により立ち往生し，車内がパニックの状態になったという報道があったが，このような事実は全くない．電車は一時停止したが，その後次の駅までゆっくり移動し，そこですべての乗客を降ろし，混乱はなかった．また，地震の際に海底部には3本の電車が走行していたが，オペレーターならびに乗客は地震に気付かなかったほどである．

§ 5. BART の震後の状況

ベイブリッジが不通になったため，BART はゴールデンゲイトブリッジと並んでサンフランシスコ湾岸地区に住む人々にとってきわめて重要な交通機関となった．18日午前0時頃の運行再開後，BART は終日運転を行なった．19日から22日までは通常運転を行ない，その後の23日からベイブリッジが開通する11月17日までは再度終日運転を行なっている．



図—4 BART 利用客の地震前，地震発生からベイブリッジ開通まで，およびベイブリッジ開通後の時間的変化

地震発生前，BART は218,000人(1989年の1日の平均乗客数）の乗客を349両の車両で輸送していたが，地震後345,000人の乗客を379両の車両で処理している．混雑率は1日の単純平均で50%アップとなることから，ラッシュアワーの時間帯はこれまでと比べて相当な混雑であったと考えられる．

10月23日からベイブリッジが開通するまで終日運転が行なわれたため，1日平均4.6両の車両が補修あるいは点検を受ける必要性が生じ，11月9日の時点で点検待ちの車両は157両となった．この車両数は地震前の約2倍であり，これらの点検待ち車両の置き場と，点検要員の不足が新たな問題になった．1両の車両の点検に要する日数は18日である．点検待ちの車両の増大に伴い，編成車両の縮小という問題も生じた．また，人手不足のため，12の駅が夜十分なサービスができない状況になった．

図—4は，BART 利用客の，地震発生前 (Before)，地震発生後からベイブリッジが開通するまでの期間 (During)，ならびにベイブリッジ開通後 (After) の利用状況の変化について見たものである．それぞれの期間で1日の平均利用者数は大きく変化しており，地震発生前は218,000人，地震発生後からベイブリッジが開通するまでの期間は357,000人(期間中の最高)，ベイブリッジ開通後は250,000人である．**図—4**より，地震発生前は朝のラッシュアワーの時間帯が6:30から9:00までの2時間30分であったものが，地震発生後からベイブリッジが開通するまでは5:30から9:30の4時間となり，ベイブリッジ開通後は6:00から9:30の3時間30分になっている．この変化は，地震発生前とベイブリッジ開通後で BART を利用する人が約22万人から25万人へと3万人増えており，ラッシュアワーの時の混雑が一層激しくなったため，その混雑を嫌って通勤の時間帯を変えたた

めと考えられる．また，地震発生前とベイブリッジ開通後で利用者数が増えた理由は，今回の地震被害によりベイブリッジを利用して通勤することを避けているためと思われる．

§6. BART の地震被害から得られた教訓

州間高速道路880号線サイプレス高架橋の崩壊，ベイブリッジの桁落ちは，土木構造物の耐震安全性に関して一般の人々に懐疑の念を抱かせるものであったが，軟弱地盤に建設された BART 沈埋トンネルには漏水の増加が見られたものの大きな被害は発生しなかった．今回以上に地震動が大きかった場合，BART 沈埋トンネルの被害はどうであっただろうかという質問に対する的確な解答は用意できないが，少なくとも十分な地盤調査と耐震設計を施した構造物は耐震的であるということは証明されたといえよう．

ところが，ベイブリッジの地震被害による交通遮断は，サンフランシスコ湾岸の重要な交通輸送機関という社会的使命をもった BART に予期していなかった幾つかの問題をもたらした．それは，利用者数の急増，終日運転の実施による駅員の過労，深夜作業のための要員確保，点検車両の増加による車両不足，点検作業員の不足などである．

これらに対処する方法としてはボランティアによる支援，同業他社からの協力，リタイアした人による援助などといったことが考えられるが，いずれもこのような問題の発生を想定した災害復旧のための事前検討ならびに協力体制の事前確立が重要であるということは論を待たない．

構造的に被害が発生しなくても，被害を受けた他の交通機関の代替としての役割を担う必要性が生じるという今回の BART の被害調査から得られた教訓は，都市の交通システムの地震防災という観点から貴重であるといえよう．

§7. おわりに

被害の発生した州間高速道路880号線サイプレス高架橋は1957年に建造されたもので，その設計震度は0.06であった．当時はこの設計震度で十分安全であると考えられていた．しかし，現時点においてこの値を支持する人は恐らく皆無であろう．このような変化は耐震工学の日進月歩の進展によるものであり，地震国ではもっと大きな設計震度を採用することが今や常識的になっている．

時代とともに，現在正しいと思われていることでも将来は陳腐化することもあり得るはずで，重要性の高い構造物は常に最新の技術水準に照らしてその耐震安全性を確認しておくことが重要である．

高架橋の地震被害は軟弱な地盤に集中したが，サンフランシスコ湾を横断する BART トンネルに大きな被害はなく，十分な地盤調査と耐震設計が施された構造物の耐震安全性が，少なくとも今回のような中規模の地震に対しては確かめられたといえよう．しかし，トンネルの一部で漏水の増加が見られたことなど，マグニチュード8クラスの大規模地震の発生に対して全く懸念すべき問題がないという訳ではない．

さて，今回の地震被害の中でベイブリッジの被害はかなり象徴的な取り扱いを受けた．被害が発生した E9 橋脚の東側のトラス橋がオークランド側に約14cm移動し，さらに北側にも約2cm移動した．そのため桁が12.7cmの長さの桁掛りから外れて落ちるといったことが起きた．

テレビや新聞はベイブリッジの被害があたかも大事故であったかのように報道した．しかし，ベイブリッジの設計が1930年初頭であったこと，また1スパンだけの落橋で，しかもわずか1か月で修復できたことになどを考え合わせるとこの被害は決して大きな被害ではなく，むしろ止むを得ない被害であったといった見方の方が工学的には正しいように思われる．

ベイブリッジの復旧は，移動した13連のトラス桁に生じた残留変位を1径間ずつジャッキを用いて地震前の位置まで戻し，落ちた桁を新しい桁に架け替えて復旧された．これはあくまでも応急復旧による措置であり，この復旧によりベイブリッジの病巣がすべて取り除かれたということにはならない．1906年のサンフランシスコ大地震と同規模の地震の発生が懸念されている中で，今後ベイブリッジがどのように耐震補強されるかが注目されるところである．

アメリカの土木構造物は，ベイブリッジや州間高速道路880号線に見られるように建設されてから相当の年月を経たものが多く，一部はいま老朽化の中にあるといえる．一方，日本は東京オリンピックを契機としてインフラ整備が始まり，現在まだ完熟の時期を迎えるには至っていない．いずれ日本もアメリカのような状況に直面するはずで，その場合補修あるいは補強といったことをいま以上に真剣に考えなければならないことになる．このことから今回の地震被害は，一面において補修あるいは補強の重要性を指摘したものであったともいえよう．

通常，補修，補強の予算は必要な費用よりかなり少ないことが多く，そのため補修，補強は必要なものの中からプライオリティを付けて行なうことになる．プライオリティを付けるということは，補強する必要性があると分かっていながらプライオリティの高いものから順番に徐々に補修を行なうことであり，この場合どのようにプライオリティを付けるかが問われることになる．

謝辞　1989年ロマ・プリエタ地震被害調査は，㈶地震予知総合研究振興会主催の地震被害調査団（団長：久保慶三郎東京大学名誉教授）に参加して行なったもので，調査期間は1989年12月9日から16日までの8日間である．

短い期間であったにもかかわらず効率のよい地震被害調査が行なえたのは，調査団副団長の東海大学浜田政則教授の指導力によるところが大きく，同教授に深甚なる謝意を表すものである．また，調査団の幹事としてNKK応用技術研究所の鈴木信久氏，佐藤工業㈱中央技術研究所吉田望博士，ならびに筆者がその任に当たったが，調査団結成の当初から報告書作成までの鈴木氏ならびに吉田氏の献身的な努力が調査活動のすべての支えになっており，両氏に深謝の意を表すものである．

調査団の総勢は28名であり，団長はじめ調査団の各位に謝意を表するものである．とりわけ，日本技術開発㈱土木本部地震防災室の佐伯光昭氏には，筆者が参画した調査班の班長としてI—880号線，BART などの被害調査の実施指導をお願いした．意義ある調査結果が得られたのは，同氏の緻密な調査計画ならびに積極的な調査活動によるもので，同氏に深い感謝の意を表するものである．

また，小田急電鉄㈱と都営地下鉄の車両点検，保有車両数などの調査において，小田急電鉄㈱地域開発部梶原俊秀氏，運輸部寺田孝氏，梅沢正一氏，東京都地下鉄建設㈱福本隆範氏，東京都交通局坂本龍夫氏にご協力を賜った．ここに，記して謝意を表するものである．

付録—1　小田急電鉄㈱と都営地下鉄の車両点検と保有車両数

参考のために，わが国の鉄道会社の車両点検ならびに保有車両数の一例として，小田急電鉄㈱と都営地下鉄について以下に示し，BART との比較を行なってみた．

●小田急電鉄㈱

小田急電鉄㈱の営業キロ数は120km で，BART の115kmとほぼ同じである．1日の平均乗客数は187万人で，BART の21.8万人の8.5倍である．車両総数は約900両（ロマンスカー185両を含む）で，点検車両の平均車両数40両を除けば利用可能な車両数は860両となり，BART の349両の2.5倍である．また，駅数は68駅でBART の34駅の2倍である．

車両点検は，3日に一度行なう点検(列車検査)，3か月に一度の点検（月検査），3年または走行距離40万km以下で行なう点検(重要部検査)，6年に一度行なう点検（全般検査）があり，それぞれの点検に要する時間は，約1時間，約1日，約15日，約15日である．

災害時対策の一つとして，小田急電鉄沿線に住んでいる職員の連絡先を示した非常事態召集名簿が作成されている．しかし，災害時における同業他社間の協力体制を取り決めたりしたものは特になく，また非常事態に小田急電鉄をリタイアした人に協力を求めるようなことは考えられていない．

●都営地下鉄

都営地下鉄の営業キロ数は64.3km で，BART の約半分である．1日の平均乗客数は136万人で BART の約6倍．車両総数は524両で，点検車両の平均58両を除くと466両となり，これは BART の1.3倍である．駅数は65駅で BART の2倍である．

車両点検は小田急電鉄の場合と同じで（鉄道運転規則で定められており，JR をはじめとして日本の鉄道会社はすべてこれに従っており，同一規則になっている），列車検査，月検査，重要部検査，全般検査のそれぞれの点検に要する時間は，約1時間，約1日，約30日，約30日である．

地震対策としては，運輸指令所に設置された地震計で震度5の加速度80ガル以上が感知された場合，すべての列車の走行を止め，全線係員が視察し，地震被害の有無を調べることになっている．また，BART と同様ディーゼルによる自家発電装置が完備されていて，送電が停止した場合でも数時間の電力供給が可能になっている．風水害，脱線事故などを含め非常時には係員が採るべき非常配備体制が決められており，年1回非常時総合訓練が行なわれている．しかし，小田急電鉄の場合と同様に災害発生時における他社との協力体制について特別な取り決めはなく，またリタイアした人やボランティアに応援を求めるといったことに関しては検討されていない．

営業キロ数，1日の平均乗客数などに関してBART，小田急電鉄，都営地下鉄を比較すると下表のようになる．

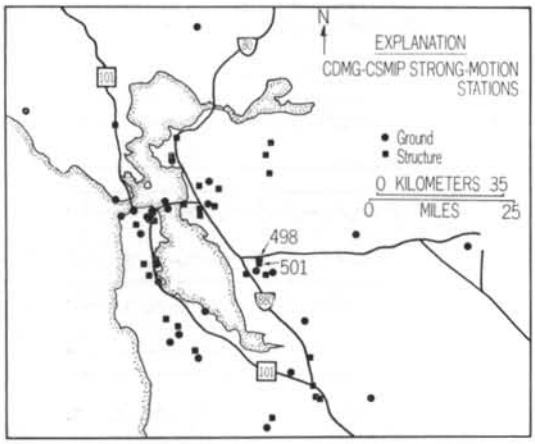
	BART	小田急電鉄	都営地下鉄
営業キロ数(km)	115	120	64
1日の平均乗客数(万人)	22	187	136
利用可能な車両数	349	860	524
駅数	34	68	65

付録—2　BART で観測されたロマ・プリエタ地震による強震記録

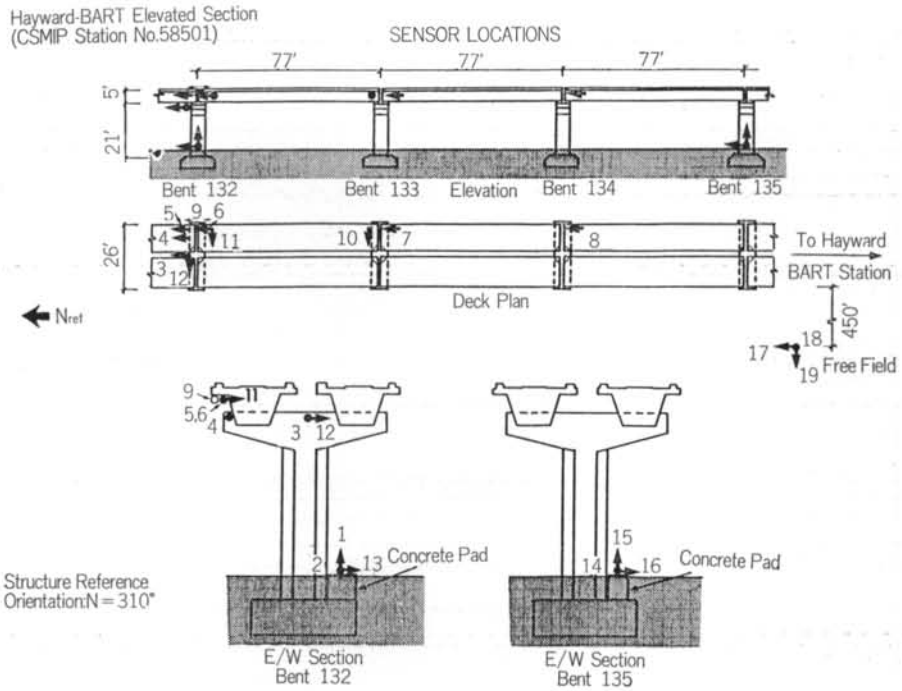
CDMG (California Department of Conservation, Division of Mines and Geology) は，CSMIP(California Strong Motion Instrument Program) という強震観測網により地震観測を行なっており，カリフォルニア州の合計93の地点に強震計を配置している[10]．

ヘイワード断層の活動によって BART に地震被害が発生する可能性があることが指摘されており，CSMIP の強震計が BART 施設のヘイワード断層付近の2箇所に設置されている．両地点は BART トンネルから30km ほど離れた地点であり，ロマ・プリエタ地震に対する震央距離は73km である．

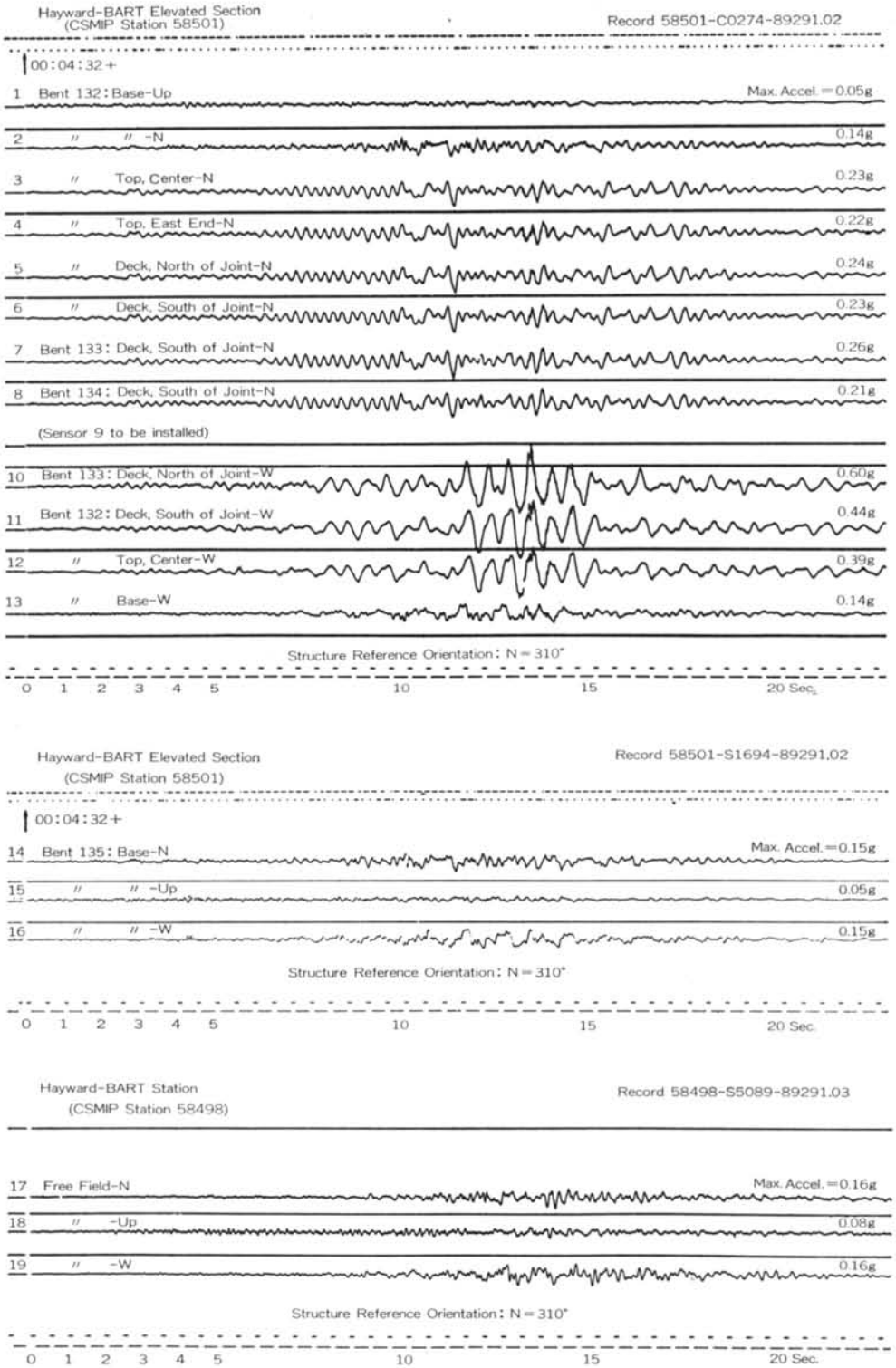
図—5 は，CSMIP の観測網について示したものであり，図中のコード番号 498 と 501 が BART の観測地点である．図—6 および図—7 は，BART における地震計配置および強震記録について示したものである．設置されている地震計は全部で19台で，チャンネル1～16の地震計は BART 高架橋に，チャンネル17～19 は自然地盤部に設置されている．チャンネル17および19の記録の最大値はともに0.16g である．橋脚基礎のフーチング部に設置された地震計チャンネル14および16，さらにチャンネル2および13の記録の最大値は0.14g あるいは0.15g であり，自然地盤部の最大値と大差はない．それに対し，チャンネル10の 133 橋脚の天端での橋軸直角方向の最大値は0.60g とかなり大きく，橋脚部での加速度増幅が著しいことが分かる．チャンネル10の記録波形を見ると，揺れが時刻8秒付近から大きくなっており約20秒間継続しているが，今回の地震で BART高架橋に大きな地震被害は発生していない．



図—5　CDMG の強震観測網 CSMIP(観測点 498および 501 は BART に設置された観測点)[10]



図—6　BART の観測点 501 の地震計配置[10]



図—7 BART の観測点501, 498における加速度記録[10)]

<参考文献>

1) "1989年ロマ・プリエタ地震被害調査報告" 地震予知総合研究振興会 (1990年4月)

2) Earthquake Engineering Research Institute : "Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report" Earthquake Spectra, Supplement to Vol. 6 (May 1990)

3) 土木学会耐震工学委員会編："ロマプリータ地震震害調査報告" 土木学会論文集 第422号 (1990年10月)

4) ロマ・プリータ地震東京都調査団編："いつか東京にも？" 東京都 (1990年2月)

5) E. G. Aisiks and I. W. Tarshansky : "Soil Studies for Seismic Design of San Francisco Transbay Tube (ASTM STP-450)" ASTM (1969)

6) T. R. Kuesel : "Earthquake Design Criteria for Subways" Journal of Structural Div., ASCE, Vol. 95, No. ST 6 (1969)

7) 土木学会トンネル工学委員会編："沈埋トンネル要覧" 土木学会 (1971年)

8) CDMG : "Earthquake Planning Scenario for a Magnitude 7.5 Earthquake on the Hayward Fault in San Francisco Bay Area" California Department of Conservation, Division of Mines and Geology Special Publication, 78(1987)

9) 土木学会耐震工学委員会編："土木学会ロマ・プリータ地震報告会資料" 土木学会 (1989年11月)

10) CSMIP : "Strong-Motion Records from Santa Cruz Mountains (Loma Prieta)" California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, California Earthquake of 17 October 1989 Report, OSMS 89-06 (1989)