Loma Prieta地震にみられる強震動の性質

著者	木下 繁夫
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	89
ページ	1-25
発行年	1990-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002827/

550.34

Loma Prieta地震にみられる強震動の性質

木下繁夫*

国立防災科学技術センター

Strong-motion characteristics in Bay area, California during the Loma Prieta Earthquake.

By

Shigeo Kinoshita*

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Many strong motion records were obtained in Bay area, California during the Loma Prieta Earthquake, October 17, 1989. Using these data, we investigated the characteristics of strong-motion at five areas : (1) Santa Cruz mountains, (2) Santa Cruz, (3) Hollister and Watsonville, (4) Marina district, San Fransisco, and (5) Oakland. Also, we showed the relations between the characteristics of strong-motion and some kinds of earthquake disasters.

Key Words : Loma Prieta earthguake. Strong motion

キーワード : ロマ プリータ地震. 強震動

1. はじめに

パシフィク・デイ・タイムで1989年10月17日17時04分15.24秒，Loma Prieta，スペイン語で暗い丘を意味するSanta Cruz山脈中の小村をほぼ震央としてMs＝7.1の地震が発生し，北California地域を強震した。我が国の新聞用語を用いれば，直下型地震の範疇に入るであろうこの地震では，地震被害額が米国史上最大のものになった。

* 第3研究部

地震発生とともに，政府調査団を始め，数多くの我が国調査団が訪米し，実地調査を行った（建築研究振興協会，1989；鹿島建設株式会社，1989；大崎総合研究所，1989；佐藤工業株式会社，1989等）。地震工学の歴史が，地震被害から多くの教訓を得て進歩してきたことを考えれば，これらの調査結果がいずれ地震工学の様々な分野の発展に寄与することが期待される。実地調査において，被害地域の地震動特性を知るには，強震計の記録が適している。今回の地震においても，CDMG（California Department of Conservation, Division of Mines and Geology）やUSGS（U.S. Geological Survey）により数多くの強震記録が得られた。

国立防災科学技術センターでは，地盤震害に関する研究と強震動特性に関する研究とが現在プロジェクト研究として進行中である。今回のLoma Prieta地震で得られた強震記録は，我々のプロジェクトの性質から見ても興味あるものである。そこで，本小文では，我が国の実情に照らしながら，Loma Prieta地震で得られた強震動の性質について，地震被害の概略も含めながら報告する。

2. 地震概要

USGS（1989b）による震源は以下のとおりである。

(1) origin time　$17^h04^m15.24^s$（Pacific day time）
(2) epicenter
　　latitude　37°02′N
　　longitude　121°53′W
(3) depth　18.5 km
(4) magnitude(Ms)　7.1
(5) strike　N50°W±8°
(6) dip　70°±10°south-west
(7) direction of slip on the dipping plane 130°±15°

図1にLoma Prieta地震の余震分布を，図2に断層運動の模型図を示す。いずれもUSGS（1989b）によるものである。

今回の地震の最大の特徴は断層運動そのものにある。全長1200kmに及ぶSam Andreas Fault zoneで発生する規模の大きい地震は，通常，vertical strike-slip型の右横ズレ断層によるものである。San Andreas Fault zoneを境に太平洋側のPacific Plateが北側へ，大陸側のNorth American Plateが南側へ相対的にズレることにより地震が発生する。ところが，Santa Cruz Mountainsを震央とするLoma Prieta地震は，基本的には右横ズレ型であるが，Pacific PlateがNorth American Plate上へ持ち上がる逆断層型であった。しかも，図2で示すように，垂直方向のすべり量（4.3 feet）が横方向のすべり量（6.2 feet）と比較してもかなり大きなものであった。また，震源の深さも18.5 kmと，これまでのSan Andreas Fault zoneの地震では最も深いものであった（通常は12km以浅と言われる）。

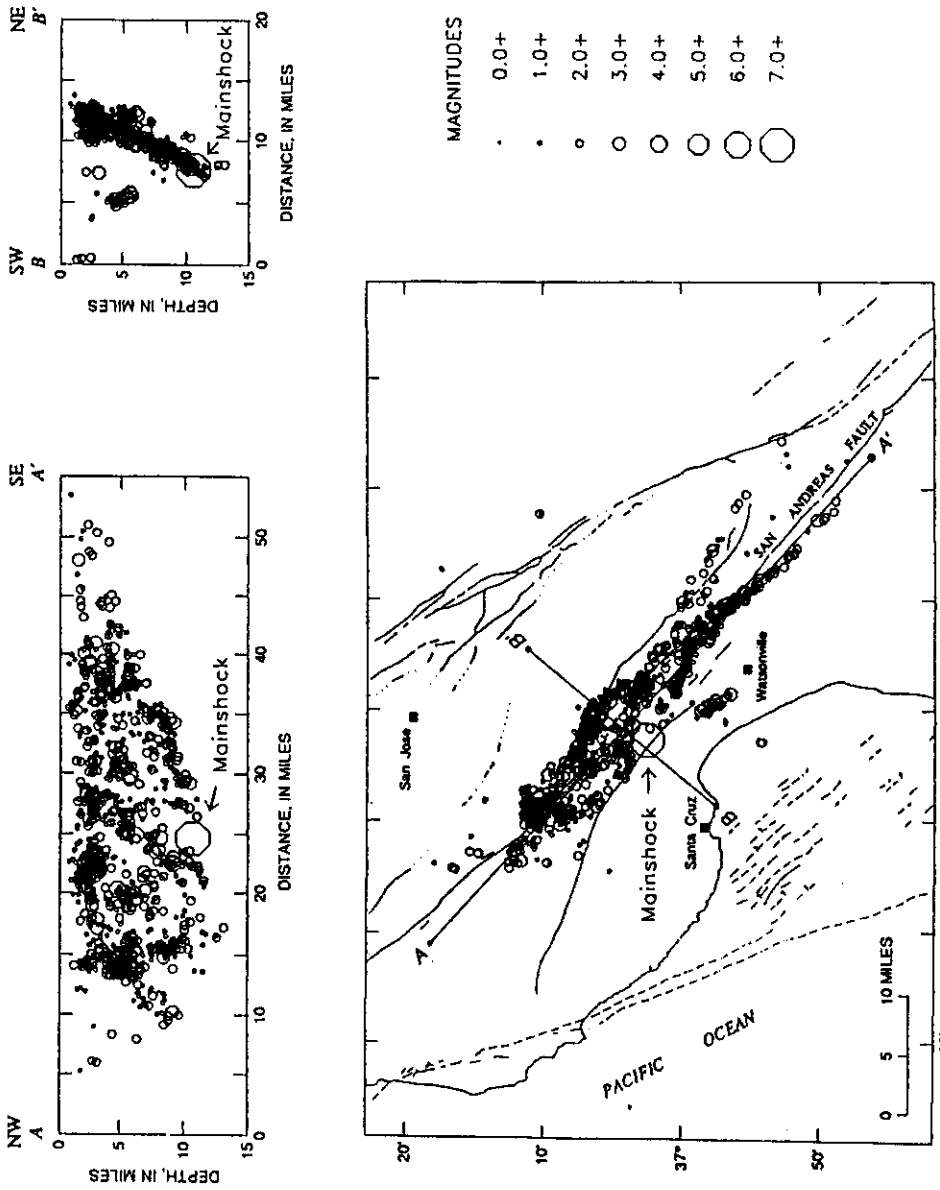


図1　Loma Prieta地震の余震分布（USGS, 1989b）
Fig.1　Spatial distribution of aftershocks of Loma Prieta earthquake (USGS, 1989b).

図1の余震分布は，Loma Prieta地震がバイラテラルに破壊したことを示すとともに，逆断層型であったため，地表面にプロットした余震がSan Andreas Faultを中心に，北側のSargent Faultから南側のZayante Faultまで拡がっている（図3）。破壊の開始場所はSargent Faultとも言われるが，まさに，San Andrens Fault zoneの地震を描いている。

このように，従来型と異なる断層運動ゆえか，USGSの震源に関する発表は1度変更されている。まず，Msは当初6.9であったが，その後7.1と約2倍のエネルギーを持つ規模に変更された。また，震央もLoma Prietaの小村から南西側へ3 km移動した。さらに，地震の深さは地表まで断層運動の軌跡を現わさず，調査に当った地質学者を悩ませていた。すなわち，彼らは，Ms＝7.1であるから，40km程度の断層破断長と1～2m程度の右横ズレを予想したが，これを示すような地表の亀裂等は見出し得なかった。Loma Prietaの小村に出現した幅1.2m，深さ4.5m，長さ2,250mの亀裂も地震断層とは直接関係なく，2次的な地割れであると断定されている。

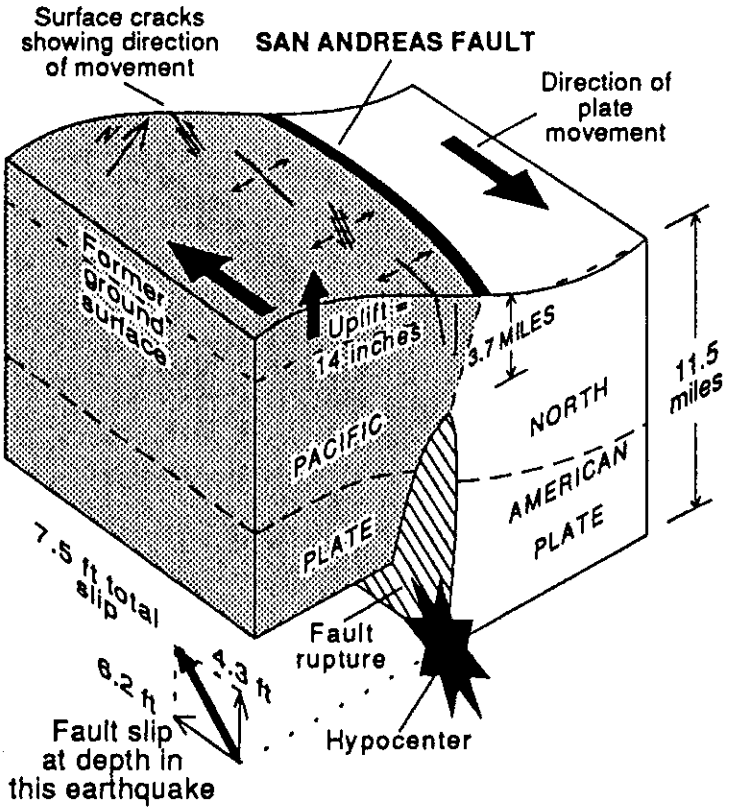


図2　Loma Prieta地震におけるSan Andreas断層の推定運動を示す模型図（USGS，1989b）

Fig.2　Schematic diagram showing infeered motion on San Andreas fault during Loma Prieta earthquake.

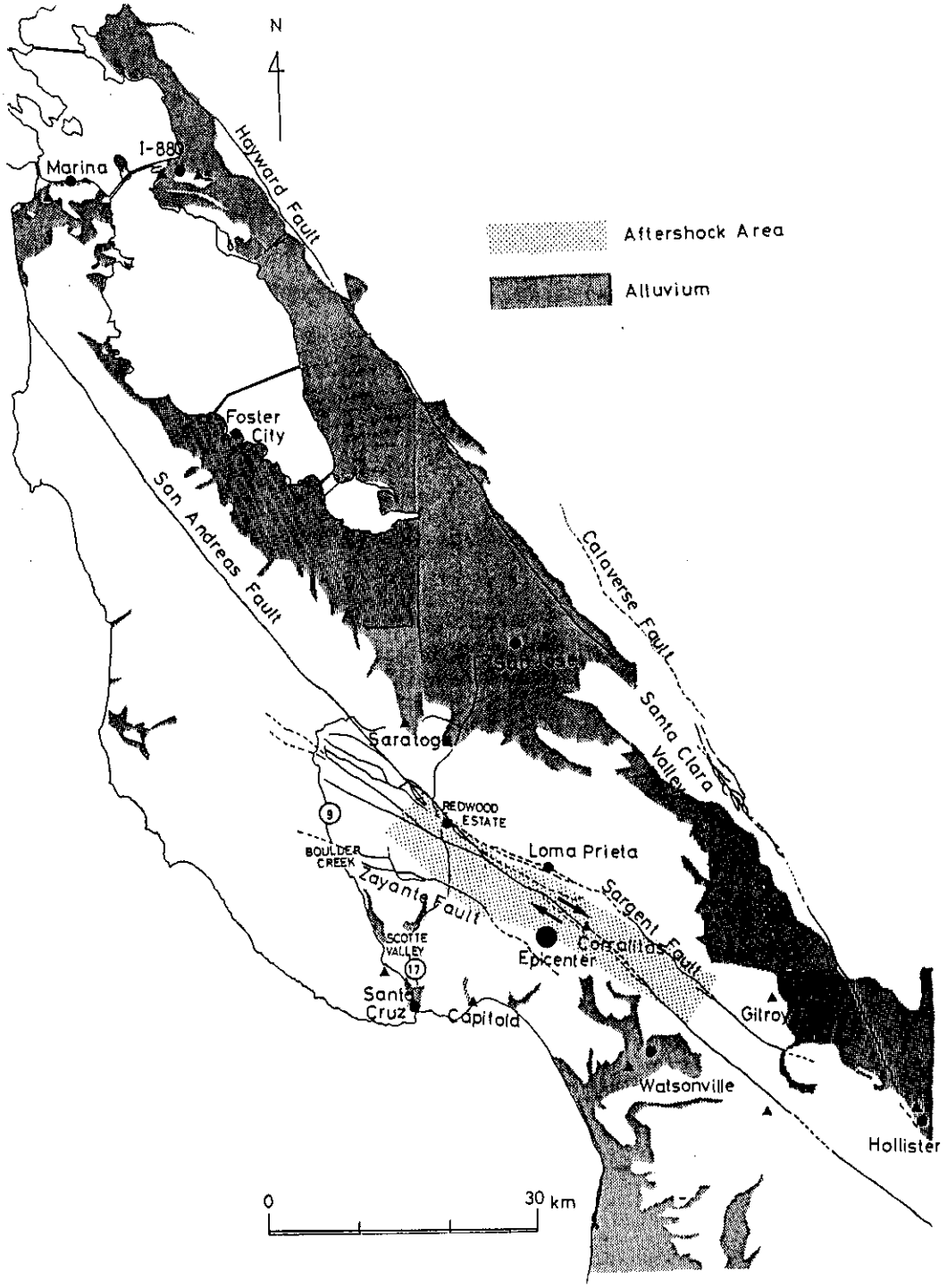


図3　Bay areaと余震域
Fig.3　Bay area and aftershock zone

3. 強震動の特徴

3.1 Santa Cruz Mountains

北西－南東に走るSan Andreas Faultに沿う地域であり，分岐したZayante FaultとSargent Faultの間に余震が集中してrupture areaを構成している（図3）。余震域の平面的な拡がりは長さ40km，幅5kmである。2.で述べた断層運動は，収集された強震記録に1つの特徴を示している。それは，比較的浅い逆断層型地震の上側プレート上で観測された上下動加速度の最大値が極端に大きいことである。CDMGの強震速報（1989a, b)によれば，（最大上下加速度）／（最大水平加速度）が，Pacific Plate側で0.40／0.47(Santa Cruz)，0.60／0.54(Capitora)及び0.66／0.39(Watosonville)のように，ほぼ水平最大加速度かそれ以上の値を示している。実際の地震被害に関する報告も，幅5kmのSan Andreas Fault zoneを除けば，Pacific Plate側であるSanta Cruz側に集中している。浅い逆断層型地震で，上側プレート上での被害が大きくなるだろうということは，我が国でも東海地震に関連して論じられた記憶があるが，Loma Prieta地震はこれを少なからず実証している。ただし，強震動特性と地震被害は地表地質に依存するため，その影響も加味する必要がある。SaratogaからBoulder Creek，Scotte ValleyをSanta CruzへRt. 9沿いの地質は，Santa Cruz側が軟らかい粘板岩質で，Saratoga側が硬いチャート岩質のようにみえた。

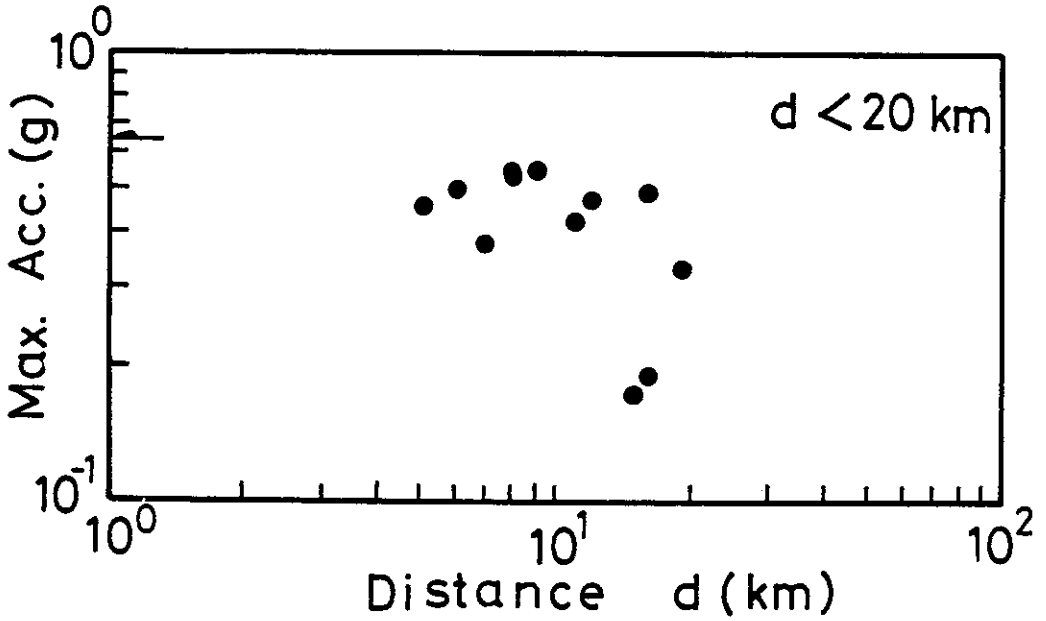


図4　最大水平加速度と余震域からの最短距離dの関係
Fig.4　Peak horizontal accelerations plotted as a function of closest distanced from recording station to surface projection of fault(shown in Fig.3).

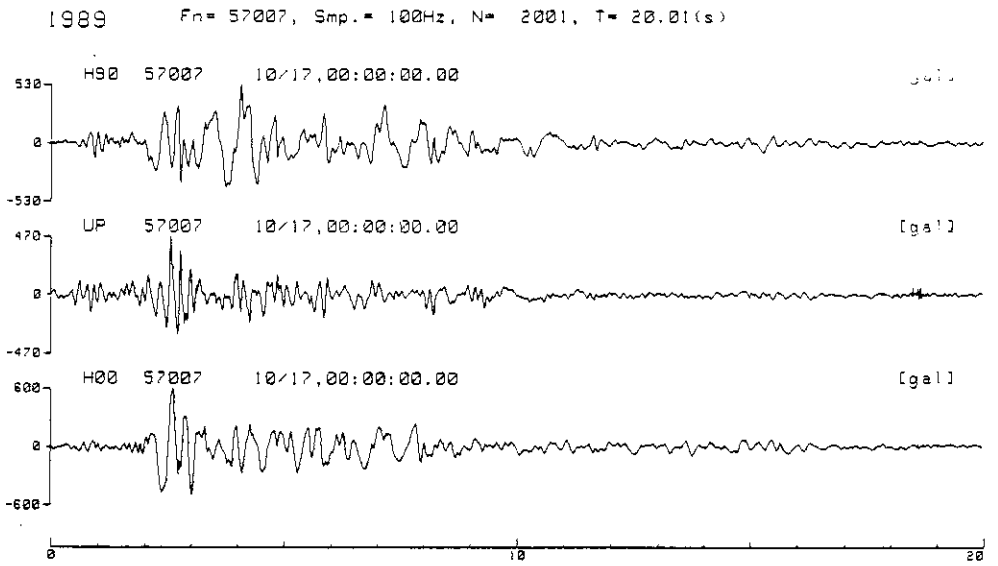


図５－１　加速度記録（Corralitos）
Fig.5－1　Accelerograms (Corralitos)

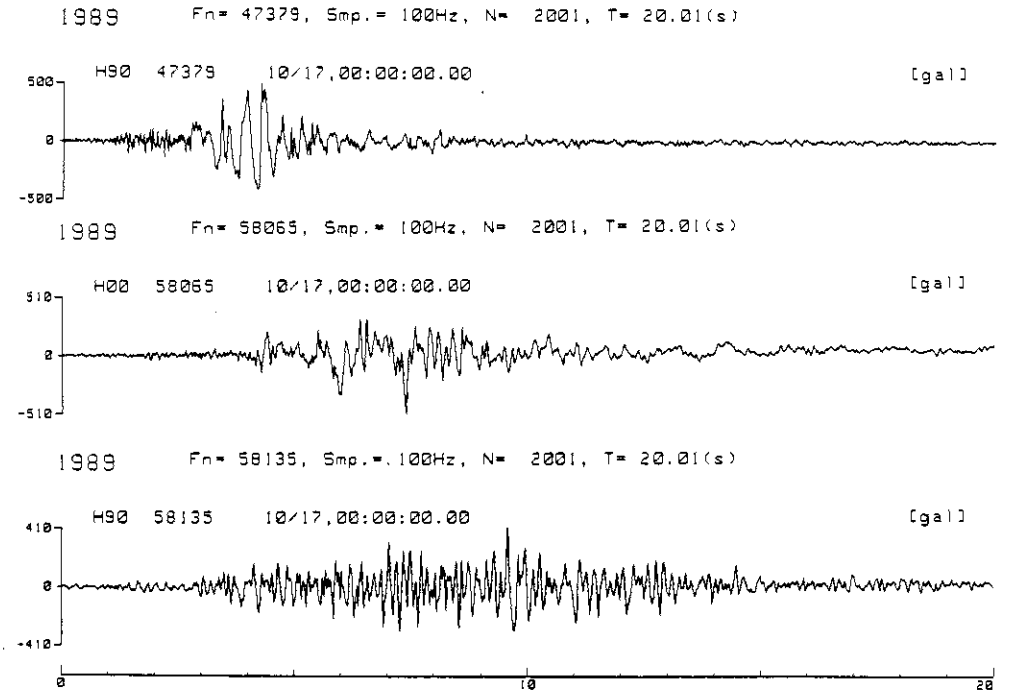


図５－２　加速度記録（上：Gilroy #1, 中：Saratoga, 下：Santa Cruz）
Fig.5－2　Accelerograms (Top: Gilroy #1, Center: Saratoga, and Bottom: Santa Cruz)

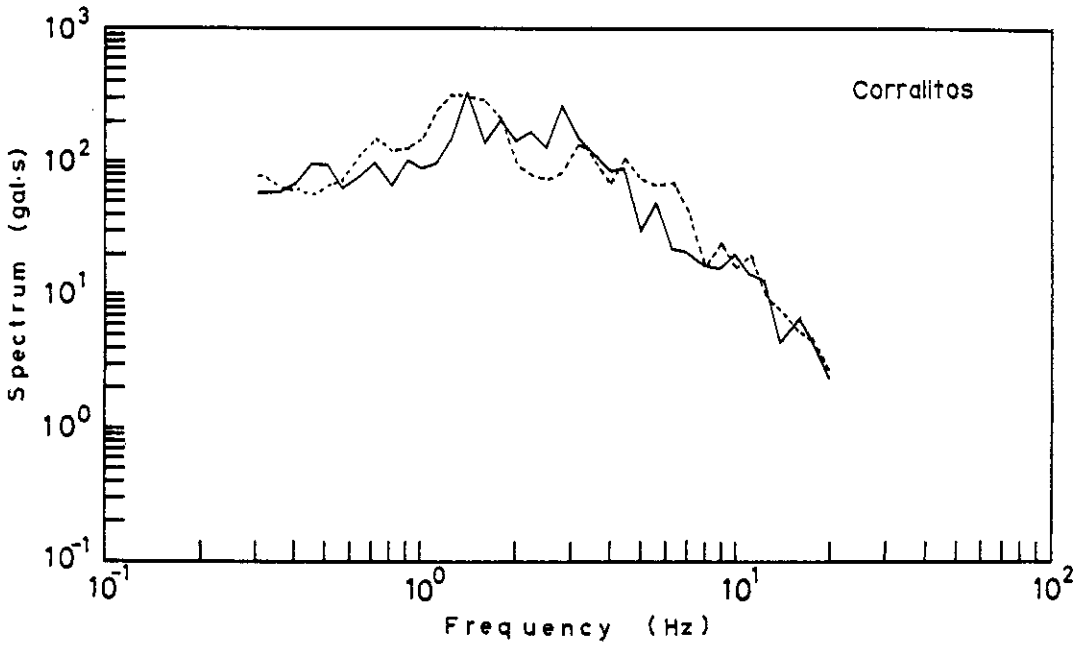


図6－1　非減衰速度応答スペクトル（Corralitos）
Fig.6－1　Zero-damped velocity response spectra (Corralitos)

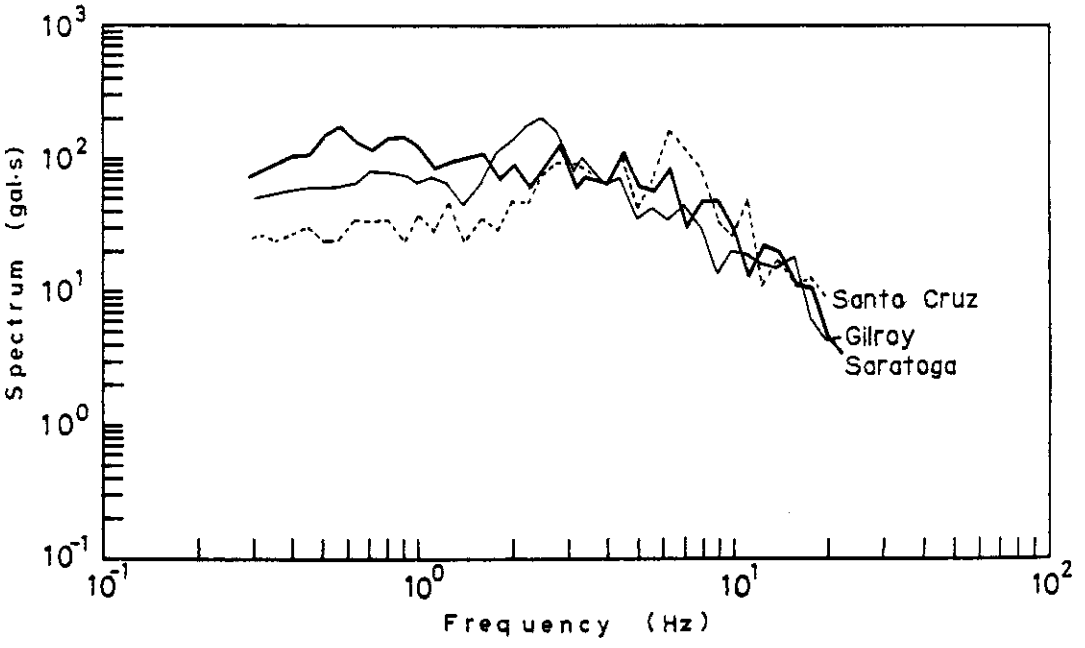


図6－2　非減衰速度応答スペクトル（Gilroy＃1，Saratoga及びSanta Cruz）
Fig.6－2　Zero-damped velocity response spectra (Gilroy＃1, Saratoga and Santa Cruz).

さて，この地域の震度を評価するため，最大加速度の震源域近傍での距離減衰についてみてみよう。CDMG及びUSGSの強震記録に基づいて作成した最大水平加速度の距離減衰は図4となる。距離d（km）は，図3の余震域地表部分からの最短距離である。震源域での最大水平加速度がd＜1kmから一定値に近づくことは良く知られた事実であり，Ms～7の地震では0.7g程度になるとされている（Campbell，1985）。図4では，d＜10kmで0.5～0.6gとなり，San Andreas Faultに最も近いcorralitosでは0.64gとなっている。いずれにしても，震源域では平均して0.5～0.7g程度の最大水平加速度で，その震度はJMA震度階Ⅶ程度となろう。なお，100km程度までの距離減衰は，rock siteの最大水平加速度に対して，Joyner and Boore(1988)の経験式と一致する（USGS，1989b）。また，最大水平速度は，San Andreas Faultに沿ってSalatoga，Corralitos及びGilroy(#1)で，各々，41，59及び40cm／sである。したがって，震源域では平均して50～60cm／sであったと思われる。

地震動の周波数特性についてみてみよう。図5は，Corralitos，Saratoga，Gilroy（＃1）及びSanta Cruzの水平成分記録である。観測点下の地質は，Gilroy（＃1）及びSanta CruzがPre-Tertiary，CorralitosがTertiary及びSaratogaがAlluviumとされている。各水平成分記録の非減衰速度応答スペクトルを図6に示す。基盤上のスペクトルであるGilroy（＃1）とSanta Cruzの結果では，Gilroy（＃1）で2.5Hz，Santa Cruzで3～8Hzにスペクトルの不自然な持ち上がりが見られるが，全体としては素直な形状である。Saratogaの波形及びスペクトルは，Alluvium上のもの（CDMG，1989c）とは思えない結果である。見掛け上岩盤上で期待されるような結果である。Corralitosの結果も含めて考えれば，震源域内の基盤スペクトルは，0.5～7Hzの範囲で平均して80～100gal・Sの平坦レベルに達したであろう。

3.2 Santa Cruz

Santa Cruzは余震域の南約20kmに位置し，San Lorentz川のporousな堆積土上に発達した町である（図3及び図7）。Santa Cruzでの地震被害はSan Lorentz川及びその旧河川敷における液状化に伴う被害とPacific Garden Mallにおける構造物の被害である。Pacific Garden Mallの被害は特に激しく地震発生後1カ月して筆者等が訪れた時も立ち入り禁止となっていた（写真1）。この地域で目立つ被害は，連棟式に建てられたレンガ造り構造物の被害である（写真2）。しかしながら，構造物基礎部分に地変はなく，液状化の影響が及んでいるとは考えられなかった。したがって，Pacific Garden Mallの被害は，軟弱地盤による地震動増幅によって生じたと考えるのが妥当であろう。

地震後，建築研究振興協会（1989）の調査団がPacific Garden Mallに接する地点で行った常時微動の観測では2秒近い卓越振動を記録している。これは，表層軟弱地盤層が相

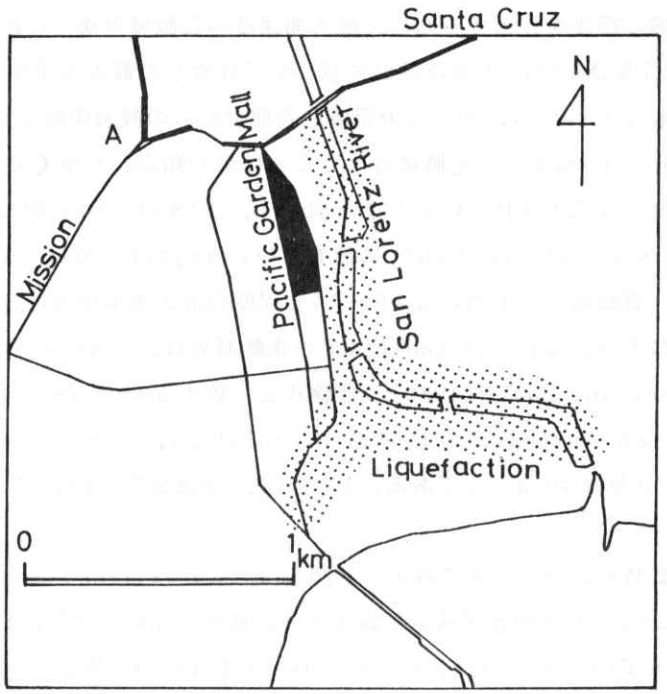


図7　Santa Cruzの被害地域
Fig.7　Area damaged in Santa Cruz.

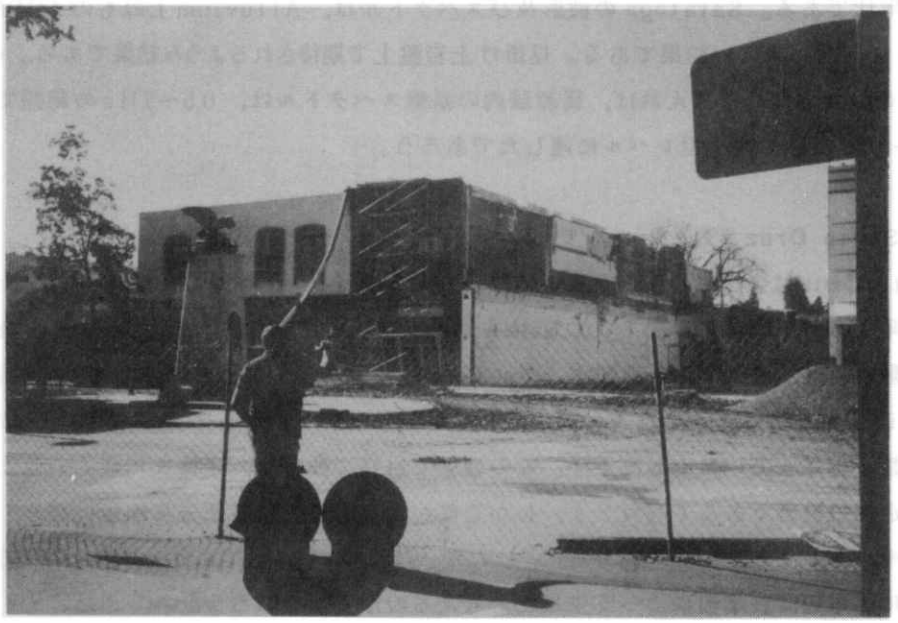


写真1　Santa Cruz
Photo 1　Santa Cruz



写真2　Santa Cruz
Photo 2　Santa Cruz

当厚い（S波速度100m／sで層厚25m）か，地層が軟らかい（S波速度が小さい）かである。しかしながら，Pacific Garden Mallの北側はSanta Cruz Mountainsにつながる丘陵地帯（写真3）であり，Mission St.とRt. 17が交わるA点（図7）では粘板岩質の地層が壁状に露出している（写真4）。A点とPacific Garden Mallとは1km以内の距離である。これらのことは，Pacific Garden Mallを含むSan Lorentz川流域が典型的な谷地型地形であることを示唆している。全体的に見れば，図3に示すように，Santa Cruz自体が谷地型地形を持つ地質構造上にあると言えよう。

この地域には，CDMGやUSGSの強震計が設置されていない（図3の強震計は，UC Santa Cruzに設置されたもので，Pre-Tertiary上である）。しかしながら，Santa Cruz東側のCapitolaの強震記録（図8）は，図3からも判るように，谷地型地形上の震動を知るのに適している。図8に示された波形は明らかにインピーダンスの大きさが著しく異なる基盤－沖積地盤構成における地表地震動を示している。沖積層厚にもよるが，Capitolaの水平成分記録の非減衰速度応答スペクトル（図9）は0.8～3Hzで200gal・sを超えている。図9に見られる3つのピークは，図8の波形からも読み取れる。すなわち，スペクトル・ピークは高周波側から低周波側へ時間とともに移り，見掛け上逆分散している。通常このようなスペクトル・パターンは，地盤が弾性域から非弾性域へ移るにつれて生じるが，現段階では断定できない。

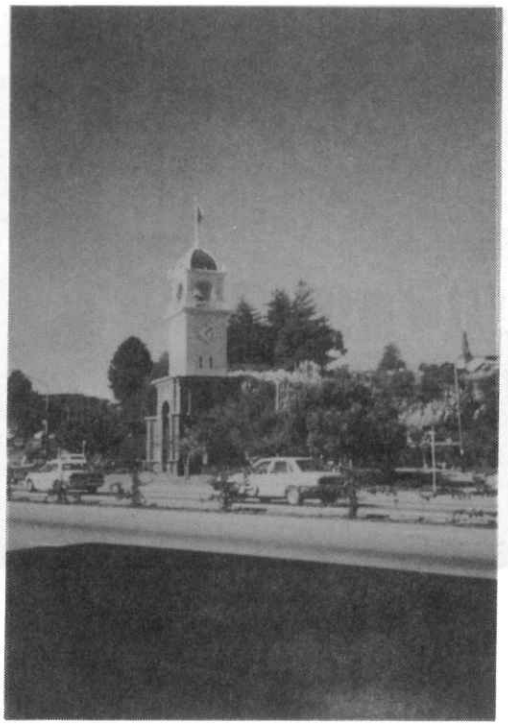


写真3　Santa Cruz
Photo 3　Santa Cruz

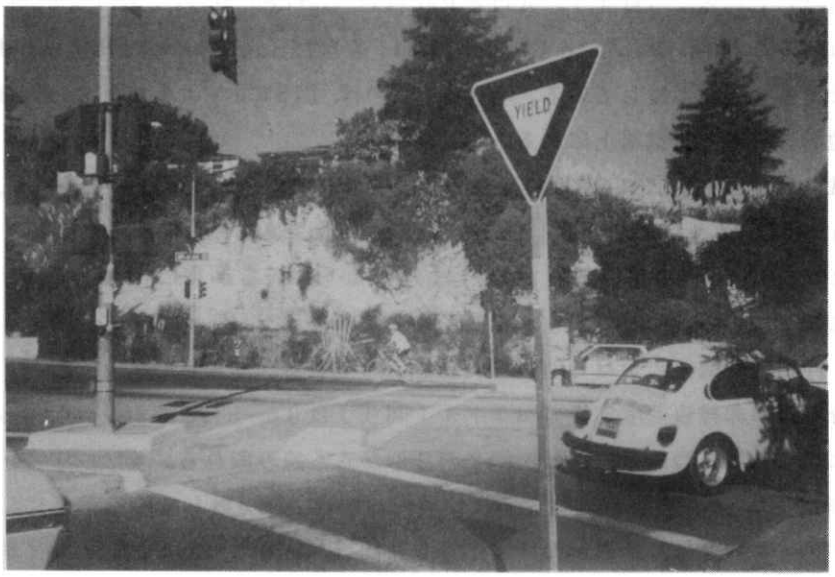


写真4　Santa Cruz
Photo 4　Santa Cruz

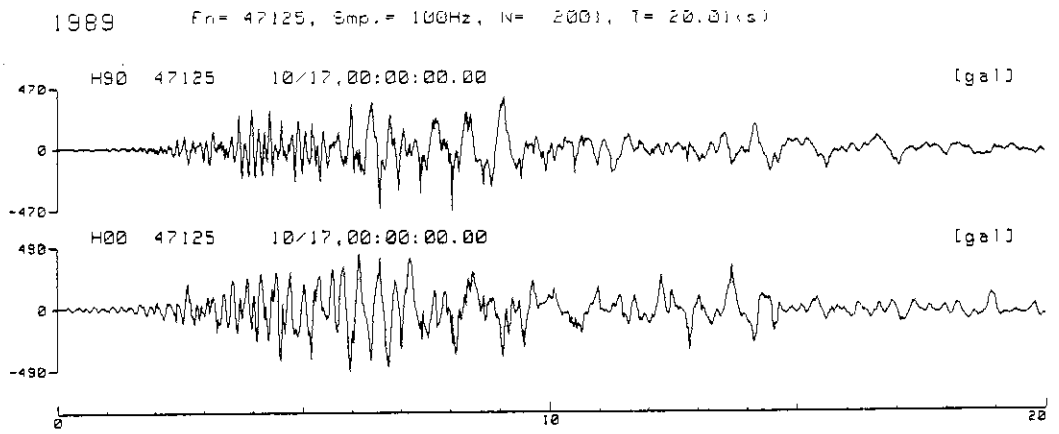


図８　加速度記録（Capitora）
Fig.8　Accelerograms (Capitora).

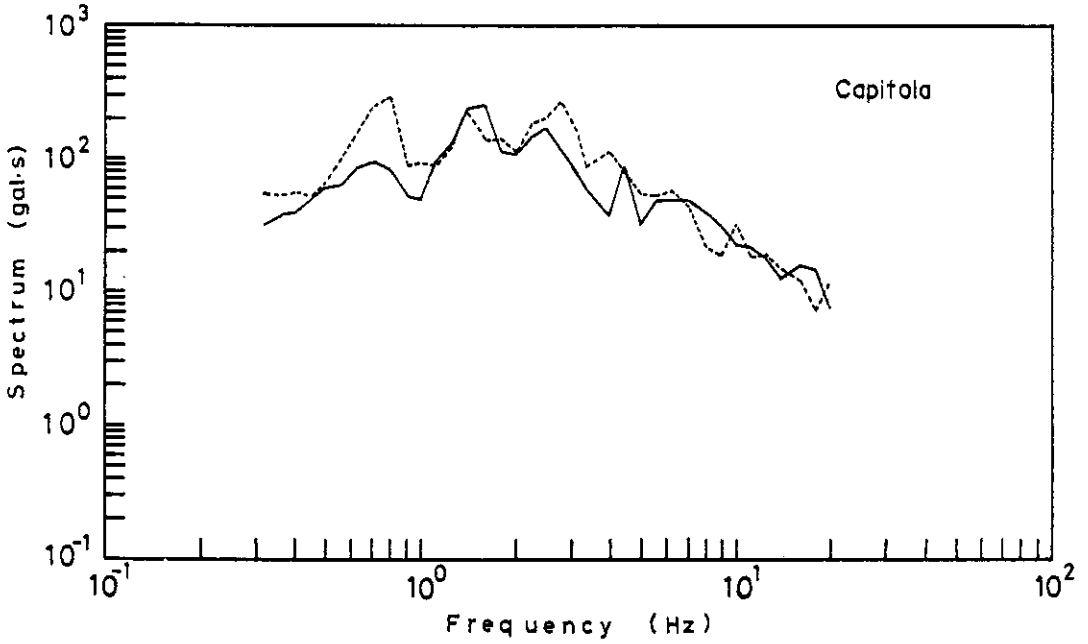


図９　非減衰速度応答スペクトル（Capitora）
Fig.9　Zero-damped velocity response spectra (Capitora).

3.3　Hollister とWatsonuille

HollisterとWatsonuilleはいずれも沖積平野に発達した町である（図3）。特に，HollisterはSan Andreas FaultがSan Fransisco側のSan Andreas FaultとOakland側のCalaveras Fault-Hayward Faultに分岐する地域にあり，地質条件を考慮すれば，地震危険度の非常に高いところである（The World's Earthquake Capitalの呼称がある）。

Hollister付近における強震記録はUSGSの報告に3地点，CDMGの報告に1地点ある。このうち，1地点はSan Andreas Fault南側のMesozoic granitic rocks地帯にあり，沖積地帯にある他の3地点とは異なっている。震源域からはいずれも30km程度の距離であり，Hollisterの沖積地質帯における基盤からの増幅度を知るのに都合が良い。すなわち，水平成分の最大値は，granitic rocks地帯で0.06g，沖積地帯で0.25，0.29及び0.38gであり，およそ5～6倍の増幅度である。この値は，我が国の関東平野の標準的な値とほぼ等しい。

Hollisterの沖積地帯における強震動の特性をCDMGの記録からみてみよう。図10に観測記録を，図11に水平成分記録の非減衰速度応答スペクトルを示す。図11に見られるように，1Hzを中心に0.5～2.0Hzでスペクトルが卓越し，沖積層厚数10mに相当する表層地盤の振動性状を示している。これは，沖積地帯にある他の2地点においても同様である。さて，0.5～2.0Hzの帯域が卓越し，0.38gの最大加速度であるこの水平成分は，最大速度62cm／s及び最大変位30cmに及んでいる（CDMG，1989d）。また，直達S波の後7～8秒後からRayleigh波的後続波が出現し，4～5秒の周期で卓越している。

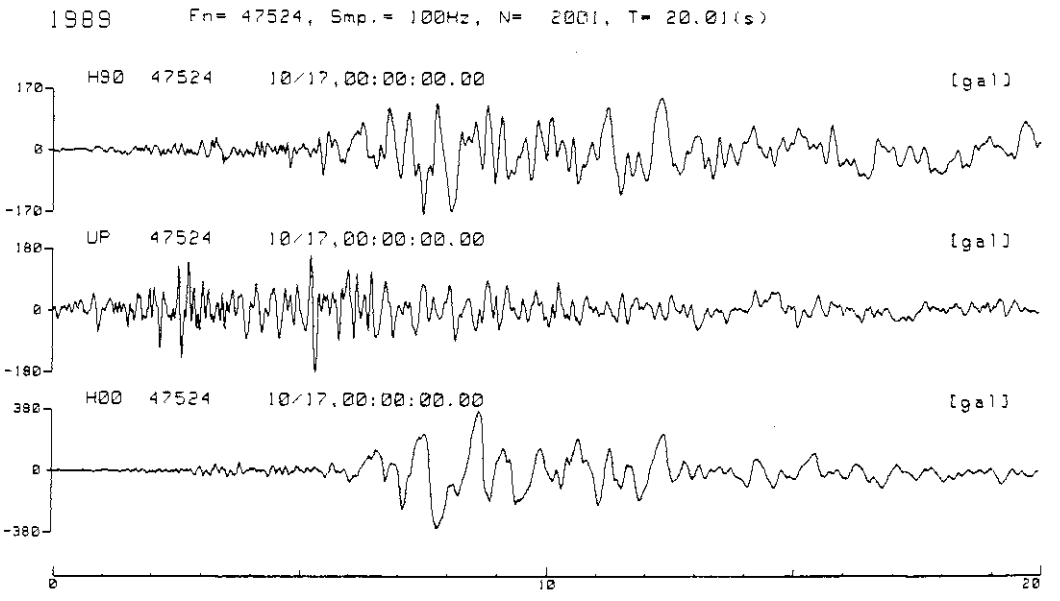


図10　加速度記録（Hollister）
Fig.10　Accelerograms(Hollister)

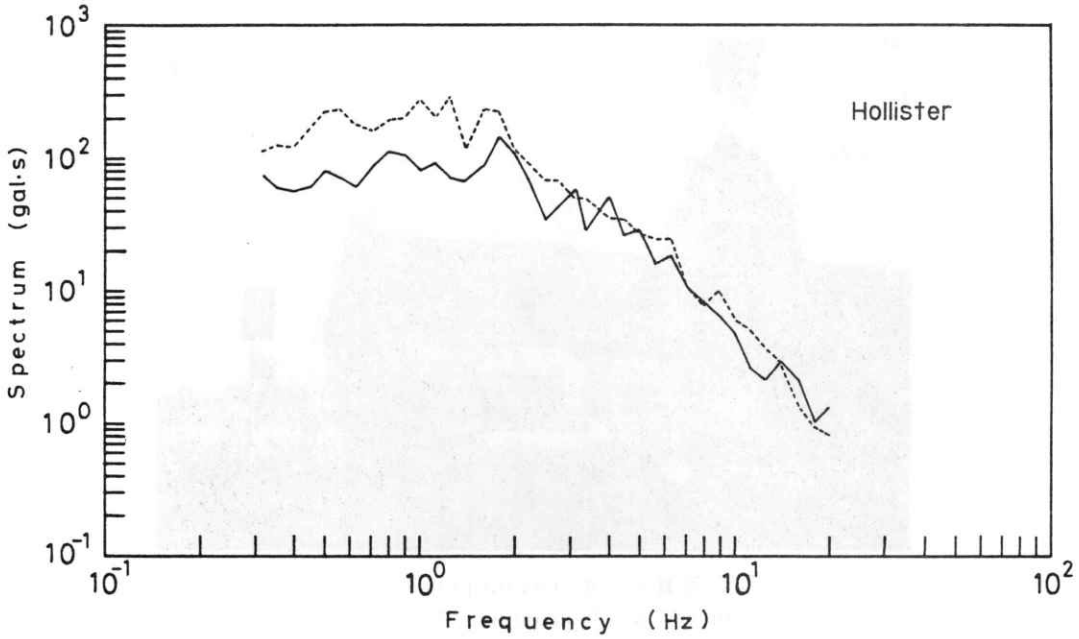


図 11　非減衰速度応答スペクトル（Hollister）
Fig 11　Zero-damped velocity response spectra (Hollister)

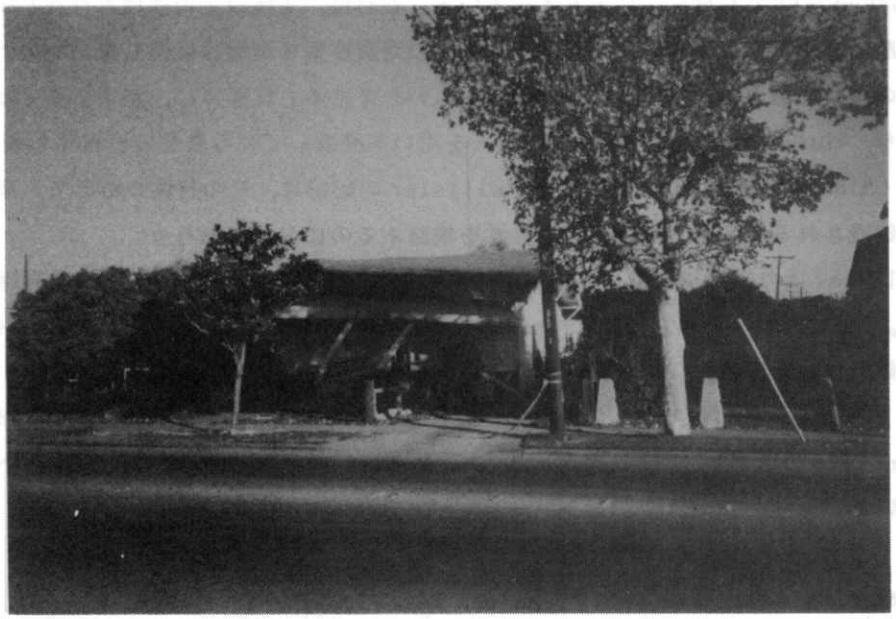


写真 5　Hollister
Photo 5　Hollister

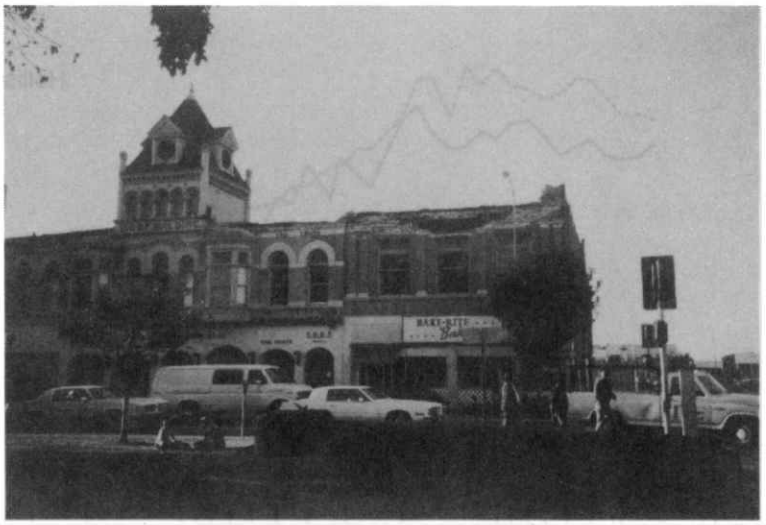


写真6　Watosonville
Photo 6　Watosonville

Hollisterでの強震動特性は，我が国の常識からみればかなりのものである。しかしながら，実際の被害はJ. C. Penneyビル屋根の崩壊が例外で，40棟以上の平屋家屋で生じた基礎からのrocked off（写真5）にとどまっている。これは，4階以上の建物も存在しないという農村部である事情によるものであろう。米国の地震被害に地盤は関係しないといわれる由縁はこのへんにあるのかも知れない。国土が広いのである。実際には，被害の多くは地盤災害であり，Hollisterではスプリンクラーを用いて灌漑している農地の液状化も報告されている（USGS，1989d）。CDMGのHollisterの記録は，その特性からみて，東京湾臨海部に建設されるであろう構造物の耐震性を検討するのに有用であろう。

Hollisterより震源域に近いWastonvilleはHollister同様に沖積地帯に発達した町である。Hollisterより大きいWatsonvilleのdown townの被害の多くは，1900年代初めに建設された補強のないレンガ造りの建物（写真6）である。この町では，Pajaro riverが流出する海岸側で多くの液状化が報告されている（Astaneh et al.，1989）。Watsonvilleの強震特性はHollisterのそれと似ているが，上下動で0.66gという値を出している。

3.4　Marina district（San Fransisco）

Marina districtは，1906年San Fransisco大地震の後，San Fransiscoの復興を祝して行われた万国博のために潟を埋立てた臨海部である。それが今回の地震で大被害地となったのは歴史の皮肉と言えよう。

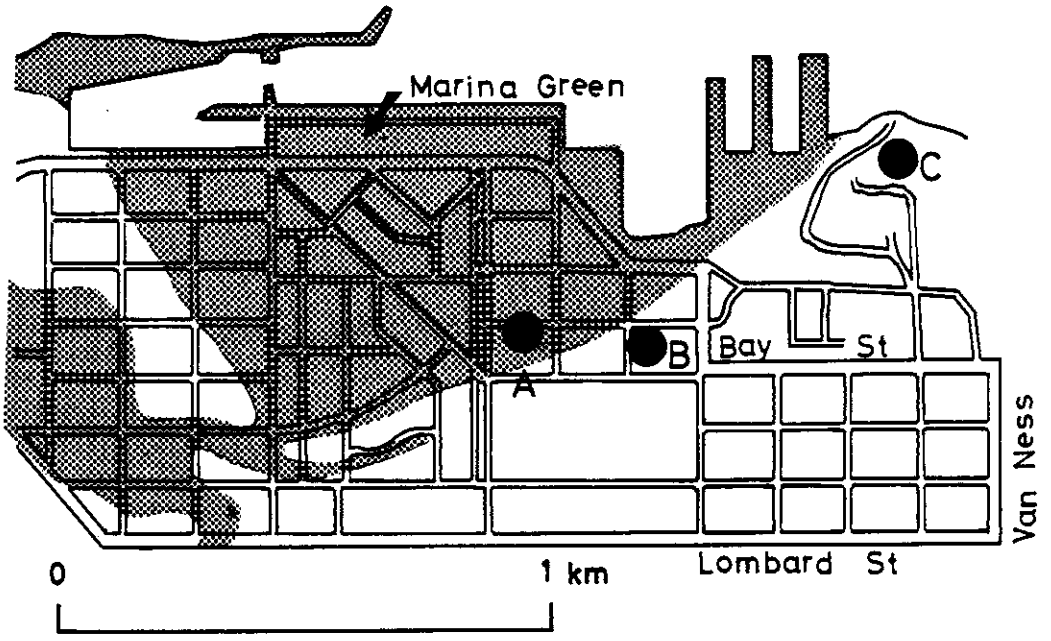


図 12　Marina地区と埋立部分
Fig.12　Artificial filled area in Marina district.

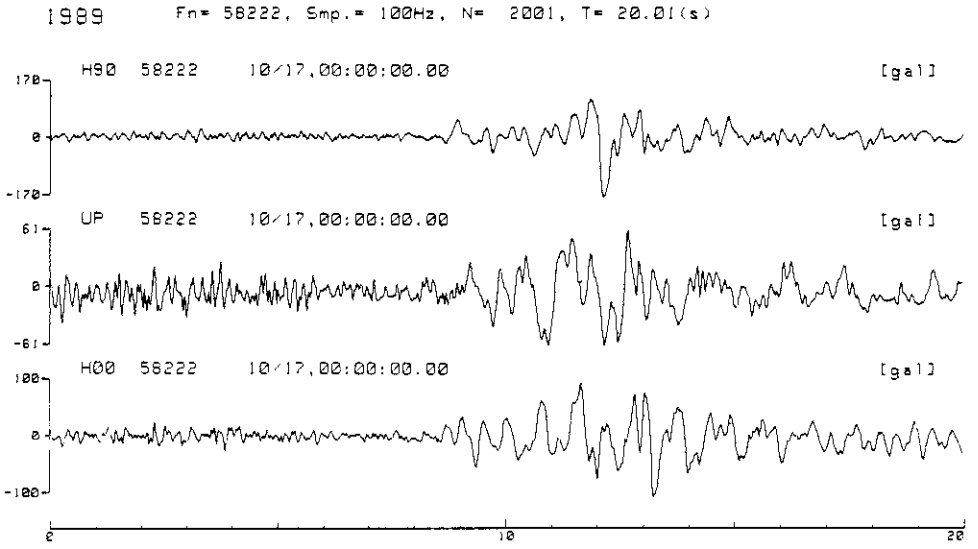


図 13　加速度記録（Presidio）
Fig.13　Accelerograms (Presidio)

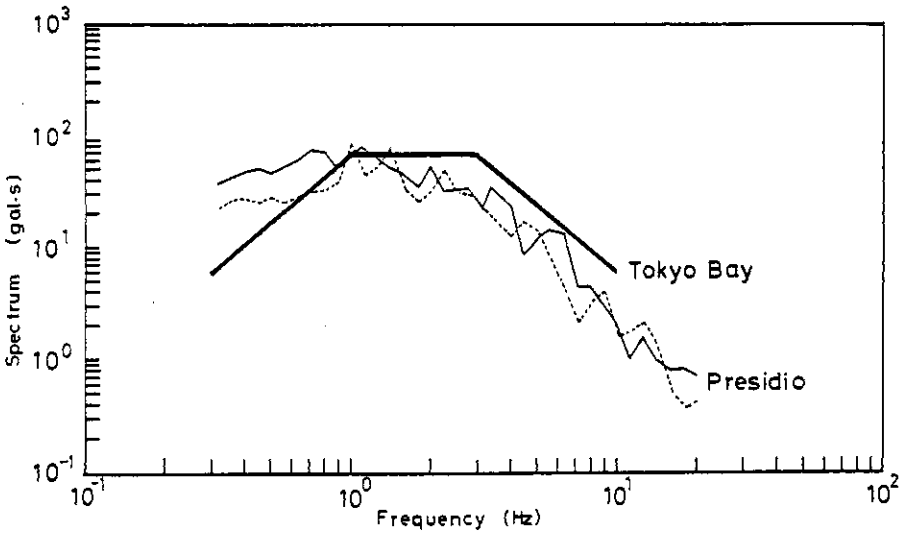


図14 非減衰速度応答スペクトル（Presidio）
Fig.14 Zero-damped velocity response spectra (Presidio).

San Fransiscoには，数多くの強震計が設置されていたが，直接Marina districtに設置されたものはなかった。Marina districtと周辺で強震計が設置されているTelegraph Hill，Pacific Height及びRincon Hillとは地質的に全く異なるため，これらの記録からMarina districtの震動を見積るのは困難である。しかしながら，Marina districtの強震動を見積るのに興味ある結果がUSGSの余震観測から得られている（USGS，1989b)。USGSでは，地震直後Marina districtの3地点（図12のA，B及びC地点）で余震観測を行っている。その結果によれば，埋立地点（A点）での地震動は，この地域の基盤であるFranciscanのsandstone上の地点（C点）での地震動とは全く異なるが，dune sands上の地点（B点）での地震動とほぼ同様であった。このことは，Marina districtの南西約2.5kmにあるdune sands上の観測点Presidioの強震記録がMarina districの強震動を知るのに利用できることを示唆している。CDMGのPresidioの記録波形と水平成分記録の非減衰速度応答スペクトルを，各々，図13及び図14に示す。水平成分のスペクトルは1Hz近傍にピークを持ち，我が国の東京低地で見られるような典型的な軟弱地盤によるスペクトル・パターンを示している。建築研究振興協会の調査団がMarina Greenで行った常時微動観測でも，この地域の卓越周期は1.2秒であった（建築研究振興協会，1989）。したがって，Presidioの記録からMarina districtの強震動を予測するのは無理な話ではない。

Marina districtの地震被害の多くは地盤の液状化に関連している。そこで，埋立部の液状化をもたらした地震動の性質を最大速度値とスペクトル・レベルからみてみよう。我が国の実情とも比較するため，千葉県東方沖地震（1987）における東京湾埋立部の液状化レベルに



写真7　Marina district, San Fransisco
Photo 7　Marina district, San Fransisco



写真8　Marina district, San Fransisco
Photo 8　Marina district, San Fransisco

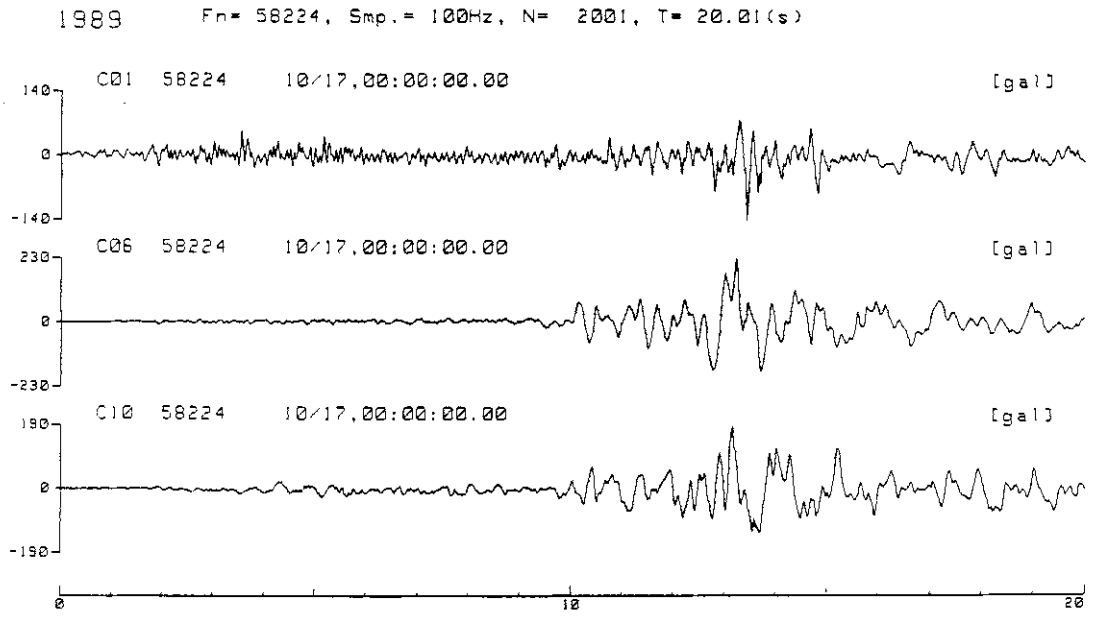


図 15　加速度記録（Oakland －2-story office bldg.）
Fig. 15　Accelerograms (Oakland－2-story office bldg.)

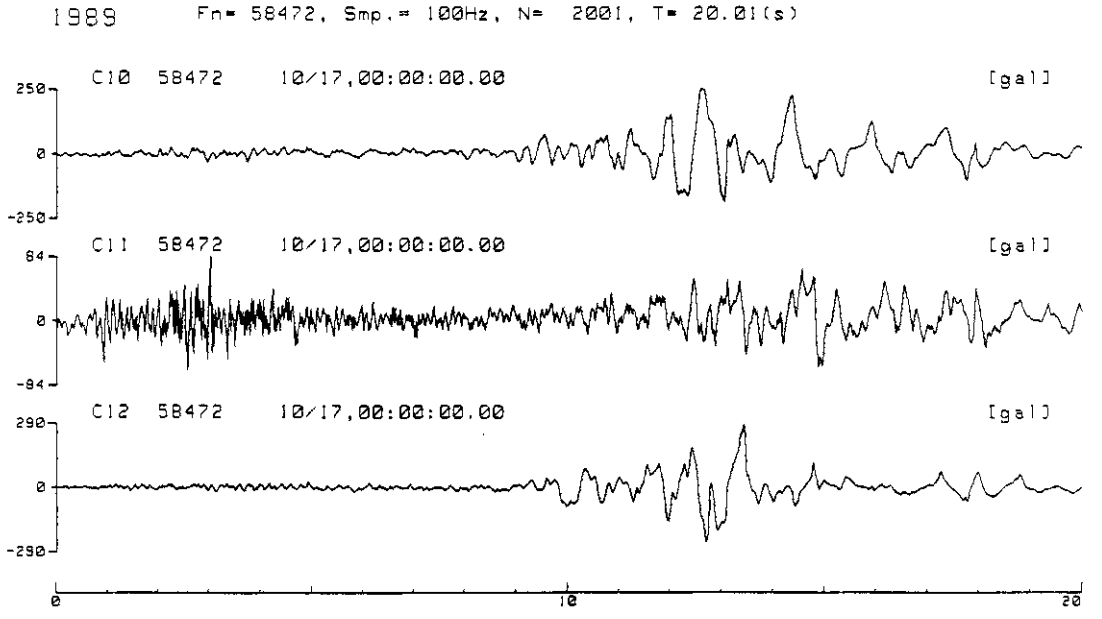


図 16　加速度記録（Oakland －Outer harbor wharf）
Fig. 16　Accelerograms (Oakland－Outer harbor wharf).

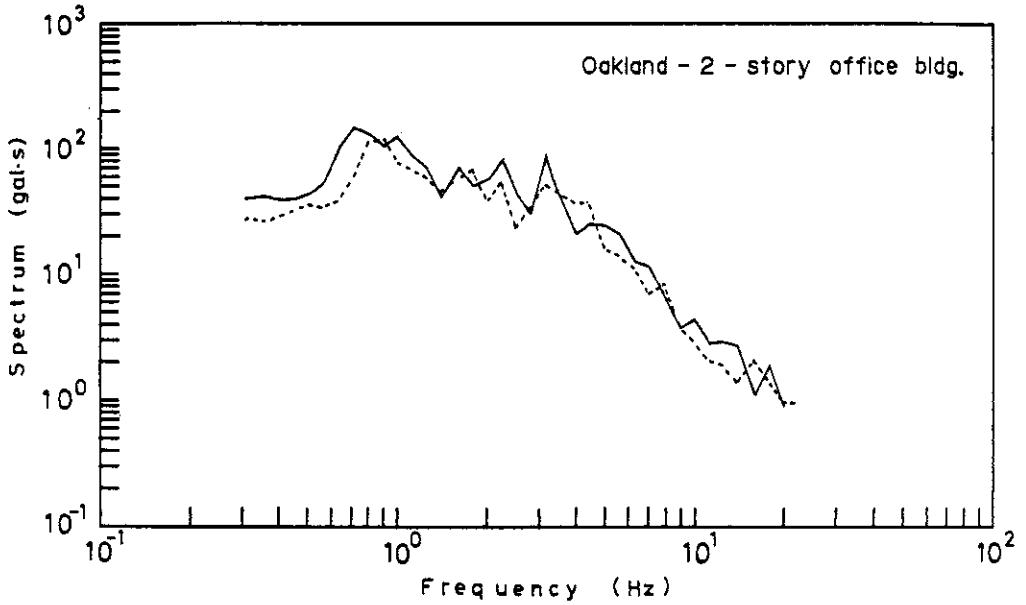


図 17　非減衰速度応答スペクトル（Oakland-2-story office bldg.）
Fig.17　Zero-damped velocity response spectra (Oakland-2-story office bldg.).

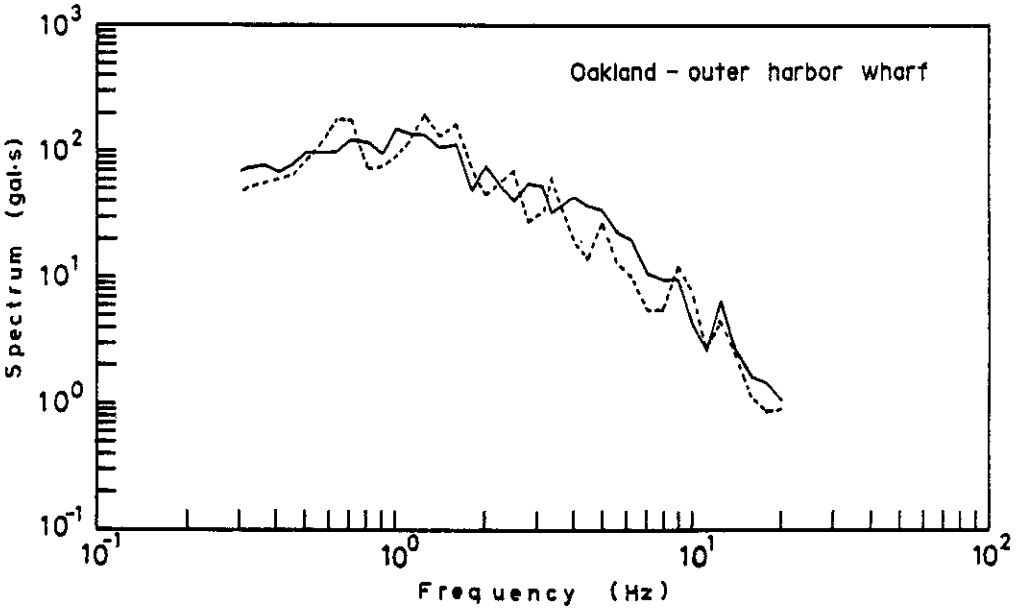


図 18　非減衰速度応答スペクトル（Oakland-Outer harber wharf）
Fig.18　Zero-damped velocity response spectra (Oakland-Outer harbar wharf).



写真9　I－880 freeway，Oakland.
Photo 9　I－880 freeway，Oakland.

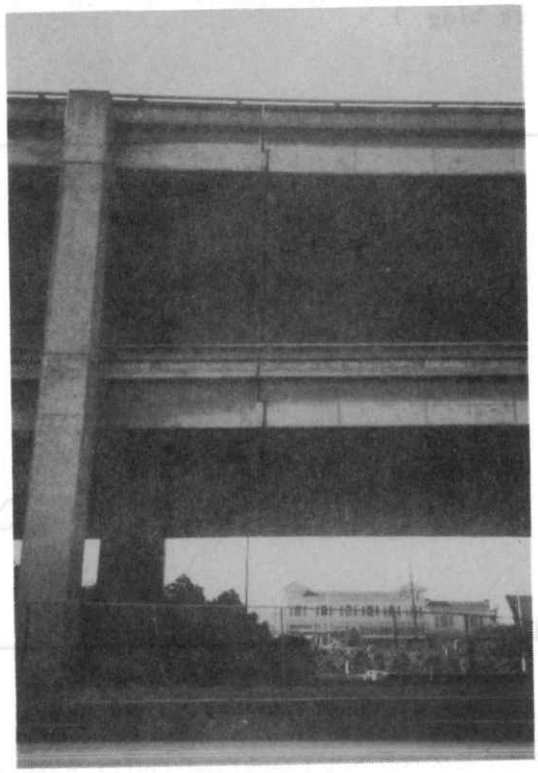


写真10　I－880 freeway，Oakland.
Photo 10　I－880 freeway，Oakland.

基づいて述べよう。東京湾埋立部を液状化せしめる最大速度値は15㎝／ｓ以上であった。Presidioの最大速度値は，水平2成分について33及び13㎝／ｓである。ちなみに，Bay areaで液状化した地域の近くに設置されていた2地点（Oakland－Outer Harbor Wharf及びTreasure Island）の強震計が示した最大速度値はいずれも30㎝／ｓを超えている。最大速度に関して言えば，我が国の例と比較しても十分に埋立砂層を液状化せしめる大きさであったと言える。スペクトル・レベルについて言えば，図14のような結果である。東京湾埋立部の液状化レベルと比較して，Presidio の記録は低周波側で大きく，高周波側で小さいものとなっているが，3Hz以下で70gal・ｓのレベルを超えている部分は十分ある。結局，Marina districtは，1987年千葉県東方沖地震で東京湾埋立砂層を液状化させた規準強震動と比較した場合，これを超える強震動で揺すられたことを示している。

Marina districtにおける被害は，地層の液状化に帰因する地変（写真７）と建物の構造的弱さによるもの（写真８）とがある。Marina districtにおける建物は連棟式であり，かつ，１階が車庫形式の弱構造である。このため，自由端に当る角地の建物の１階部分が圧壊される被害が多かった。

3.5 Oakland

今回の地震で最も注目を浴びた被害は，死者41人を出したOaklandのＩ－880 freewayの崩壊であろう。この地域では，ほぼ南北に崩壊したＩ－880 freeawayの直線部分から東西約2.5kmに位置するOakland WharfとLake Merritt districtの2カ所でCDMGの強震記録が得られている。図15及び図16にその波形を示す。対応する水平記録の非減衰応答スペクトルが図17及び図18である。

この地域の地質条件は，Marina district同様にbay mud層がかなり厚い地域である。これは図17及図18のスペクトル・ピークが0.7～0.8Hzにあり，かつ，単峰性に近い形状を示していることから明らかである。また，建築研究振興協会の調査団が行った常時微動の観測でも，卓越振動数が崩壊現場付近で0.8Hz程度であったと報告されている（建築研究振興協会，1989）。

Ｉ－880 freeway付近に直接的な地変はなく，南西側の地域で，Merritt Sandsという更新世の地層（Pleistoceneera formation）上に盛土した砂層が液状化している（Alameda Naval Air StationやOakland Air Portでの液状化）。また，Ｉ－880 freewayの崩壊部付近で著しい構造的被害を出した建物もない（ただし，使用禁止の命令書が出た家はあった）。したがって，Ｉ－880 freewayの崩壊は，地震動による構造破壊として考え得ることである。崩壊にいたらしめた構造的な原因は，本小文の範囲外であるが，現状で知見した2点についてのみ述べておこう。1つは，上下の道路間にある支柱の接続がピン接続であったことである。たぶん予測以上の強震動が加わったため，支柱の4本の鉄筋のピン

がはずれるように崩壊が始まったとされている。崩壊したdouble-decker freeway部分と崩壊までいたらなかった部分とを写真9と10に示す。他の1つは，1970年代に行われたroadbedの各slab間のsteel cablesによる補強である。この補強に用いられた teel cablesのため，各slabはdomino effectsを引き起こして次々に崩れ大規模な崩壊に至ったものと考えられることである。roadbedの各slabがsteel cablesで固着結合されていたことは，各slab単位ではなく，全roadbedが1つのunitのように地震力を受け，低い共振周波数下で支柱に同時に大きな加力を与えたであろうし，ねじれ運動（twisting motion）の影響もあったろうと判断される。

そこで，I−880 freewayの崩壊部を含む2kmの直線区間に作用した地震力を推定してみよう。崩壊した長軸（南北）方向について考えよう。S波主要動部の伝播速度は3.5〜4.0km／s程度としよう。また，堆積地盤の影響により，地表面での見掛け速度は，基盤での入射角を45°と仮定すれば，伝播速度の$\sqrt{2}$倍となる。したがって，4.9〜5.7km／s程度の見掛け速度が地表面で得られよう。地表での卓越周波数が0.7〜0.8Hzであるから，長軸方向と伝播方向が同じだとすれば，6.1〜8.1kmの波長の強震波が作用したことになる。I−880 freeway直線部の長さ約2kmは，この強震波の0.25〜0.32波長である。当然のことながら最悪条件は0.5波長である。しかしながら，0.3波長程度となれば，軸直角方向へも逆位相の力が作用するから，かなりの曲げ振動も生じるであろう。さらに，これらはコヒーレントな波が作用した場合である。実際は，変位波形でみても観測された2地点間（点間4.5km）でコヒーレントな波はS波立ち上がりから5秒程度までであり，最大加速度部の1秒後程度までである。その後の相関は著しく落ち，地表層の多重反射により無相関な地震力へと移行している。次に，地震力の強さについてみてみよう。2観測地点でのEW方向はほぼ同じで0.25g程度である（最大速度30cm／s，最大変位7〜8cm程度）。NS方向は軟弱なBay側の方が大きいが，平均するとEW方向とほぼ同じである。I−880 freewayの崩壊はdouble deckerの上部であり，2階部分の支柱基礎に作用する加速度は，0.25gの数倍となろう。

4. まとめ

今回の地震では，Bay Area Earthquakeという見出しを多くの現地新聞が用いていた。Bay Areaの被害が著しかったことを強調する意味を含んでいると思われる。Bay Areaの被害は，元来軟弱なBay mud地域を埋立拡張したことによるためである。Marina districtは，一世紀前には湿地帯であった。1906年のSan Fransisco地震の後，開発業者はBay floorからの未処理mudを用いて埋立を行ったと言う。1915年にSan Fransiscoで行われたPan-American Expositionまでに，Marina districtはSan Fransisco近郊の高級住宅地になっていたと言う。Bay Areaの埋立はその後も続行された。San Fransisco側のみではなく，対岸のOakland側でも多くの埋立地が液状化した。また，Richmondではタンクから油が流出し，ダムで油を塞き止めている。

Bay Areaの南東側にFoster Cityという所がある。Bayに突き出た埋立地域で，大地震に際して必ず沈下するだろうと言われている所である。しかしながら，今回の地震では液状化は元

より，何の地変も生じなかった。ここは，1950年代後半に，18×10^{6} yard ^{3} の埋立を行っているが，乾燥状態で圧密された埋土を振動と加圧でさらに締め固める方法が採られている。

上記のような事情は，我が国の戦後における東京湾岸の開発に似ている。先の1987年千葉県東方沖地震では，昭和40年代にMarina districtと同様な埋立地域で液状化現象が見られた。今回の調査からも，埋立地盤を液状化させる地震動（特性）のレベルが，徐々にではあるが，判ってきた。Bay Areaと比較して，東京湾岸は機能的にも人口的にも密集度の高い地域である。Foster Cityの例等も考慮しながらも，東京湾岸の開発限界を知る必要があると言えよう。

参　考　文　献

1) A.Astaneh, V.V.Vertero, B.A.Bolt, S.A.Mahin, J.P.Moehle and R.B.Seed, (1989) : Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of the October 17, 1989 Santa Cruz (Loma Prieta) Earthquake, Report № UCB/EERC-89/14, College of Engineering, University of California at Barkley pp51.
2) K.W.Campbell, (1985): Strong Motion Attenuation Relations : A Ten Year Perspective, Earthquake Spectra, Vol.1, №4, p759-804.
3) CDMG, (1989a) : Quick Report on CSMIP Strong Motion Records from the October 17, 1989 Earthquake in the Santa Cruz Mountains, pp16.
4) CDMG, (1989b) : Second Quick Report on CSMIP Strong Motion Records from the October 17, 1989. Earthquake in the Santa Cruz Mountains, pp16.
5) CDMG, (1989c) : CSMIP Strong-motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October 1989, pp195.
6) CDMG, (1989d) : Plots of the Processed Data for the Interim Set of 14 Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989.
7) W.B. Joyner and D.M. Boore, (1988) : Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion : Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Park City, June 27-30, American Society Civil Engineers, №43, pp102.
8) 鹿島建設株式会社，(1989)：1989年10月17日サンフランシスコ地震（The Loma Prieta, California）被害調査報告書，pp165.
9) 建築研究振興協会，(1989)：1989年10月Loma Prieta,地震災害調査報告書，pp94.
10) 大崎総合研究所，(1989)：1989サンフランシスコ地震（Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989）被害調査報告書，pp84.
11) 佐藤工業株式会社，(1989)：1989年Loma Prieta，地震調査報告書（速報），pp53.
12) U.S.G.S., (1989a) : USGS Strong-motion Records from the Northern California (Loma Prieta) Earthquake of October 17, 1989, Open-file Report 89-568, pp85.
13) U.S.G.S., (1989b) : Lessons Learned from the Loma Prieta, California Earthquake of October 17, 1989, Circular 1045, pp49.

（1990年2月2日　原稿受理）