

## (12) ロマ・ブリエタ地震における硬質地盤の震動特性

大林組技術研究所 江尻譲嗣, 若松邦夫, 藤森健史,  
中山高明, 後藤洋三, 安井 譲

### 1. まえがき

1989年10月17日アメリカ西海岸に発生したロマ・ブリエタ地震では、震源から北西に約100km 近く離れたサンフランシスコやオークランドで250galを越える地盤の最大水平加速度が記録され、サイプレス高架橋等に代表される多くの被害が発生した。これらの地域に被害を引き起こした要因の1つとして、サンフランシスコ湾岸地域に厚く堆積するベイマッドと呼ばれる軟弱な粘性土層による地震動の増幅作用が指摘されている。著者等は、軟弱地盤の増幅作用の他に、サンフランシスコ湾岸地域に伝播した波動特性にも要因があるのではないかという観点から、軟弱な表層地盤の増幅作用の影響の少ない岩盤もしくはそれに近い硬質地盤上で観測された強震観測記録<sup>1, 2</sup>を用いてその特性を調査したので報告する。

### 2. 距離減衰の異方性

#### 距離減衰特性

まず、距離減衰の異方性を調査するために、図-1に示す要領で断層走行を中心と両側にそれぞれ30° 振ったラインで囲まれた挟角60° の扇形領域 (Zone A) とそれ以外の領域 (Zone B) に地域分けを行ない、それぞれの領域内に属する観測点での最大水平加速度記録 (水平2成分の内大きい方) を距離に関して整理した。図-2は、横軸に震央距離 $\Delta$ をとった時の最大水平加速度の距離減衰を示している。図中には、川島等<sup>3</sup>による第1種地盤の距離減衰式も示してある。●は、断層走行方向 (Zone A)、○は断層走行直交方向 (Zone B) の記録でありそれぞれのデータ数は31, 11 個である。

この図から明らかなように震央距離が40km以上では断層走行方向の最大水平加速度の距離減衰の方が断層走行直交方向のそれに比べて小さくなる。図-3には横軸の距離を地表面に投影された断層線への観測点からの最短距離  $d$  にした時の距離減衰を示す。  $d$  を用いることにより

距離減衰特性に断層の空間的広がりを取り入れたことになる。同図中には、Joyner and Boore<sup>4</sup>が提案した断層の広がり考慮した距離減衰式も示してある。距離  $d$  を用いると断層走行方向と直交方向の距離減衰特性の両者の差は  $\Delta$  の場合に比較して若干小さくなる。しかしながら60km以上の距離で断層走行方向の距離減衰が直交方向にくらべて小さいという傾向には変わりなく特に走行方向では

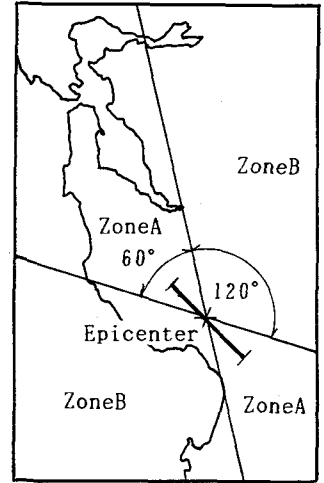


FIGURE 1. Zoning

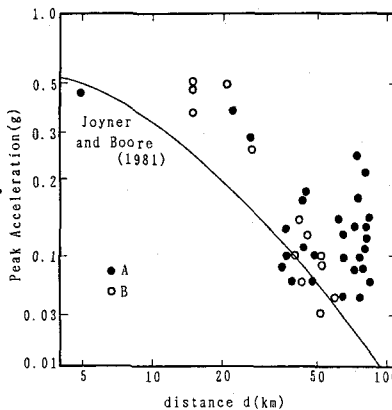


FIGURE 2.  
Recorded peak horizontal  
acceleration vs. distance  
 $\Delta$  from the epicenter

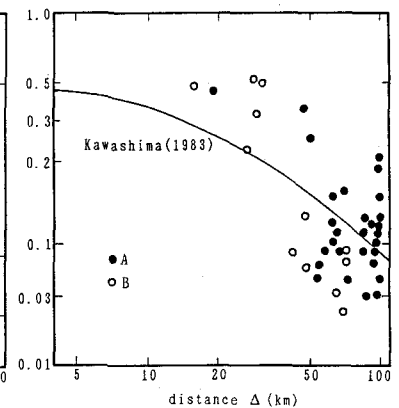


FIGURE 3.  
Recorded peak horizontal  
acceleration vs. distance  $d$   
from the fault rupture  
surface

距離減衰の平均値を示す Joyner and Boore 式による推定値を観測値が大きく超過しており、かつ同程度の距離における最大水平加速度値のばらつきもかなり大きなものとなっている。

図-4は、図-3の関係を平面的な地図上に描き直したものであり最大水平加速度の分布を等高線で表わしてある。実線は観測値、破線は Joyner and Boore 式による推定値である。

この図からもサンフランシスコ湾岸地域を含む断層走行方向の領域で距離減衰が断層走行直交方向に比べて小さいことが分かる。

#### 断層モデルによる解析

断層上のある一点から始まった断層破壊の進行が、破壊にともない発生する地震波の傳播方向と同一方向にそれを追いかけるように進むとその方向の波は重疊されて振幅が大きくなる。以上の様な効果を取り入れることにより前述の距離減衰の異方性が説明できるかどうかを確認するため断層モデルによる解析を実施した。Haskell<sup>5</sup>の断層モデルにより断層面上のせん断力が今回の地震と同じ様に中央から両側に開放されていく(bilateral)として生じるS波振幅を求めた。

計算は、振動数領域で行ない断層走行方向に傳播する波と直交方向に傳播する波の振幅比を求めた。振幅比は振動数の関数となるが今回の地震の強震観測記録の卓越振動数である1Hz 付近の値を平均的に読み取り観測値の加速度分布と比較した。断層は線震源モデルで長さ50kmとした。図-5にはS波速度Cと断層破壊の傳播速度Vとの比をパラメータとした解析結果を破線で示してある。V/C=0.7の時に図中の実線で示した観測値の分布と良い対応を示しておりこのV/C値はGeller<sup>6</sup>により報告されている地震の平均的な値と一致している。

### 3. 地盤震動特性

#### 地盤震動の主軸

地盤震動特性を調査するためにまず、岩盤もしくはそれに近い硬質地盤上で観測された強震記録を用いて地盤震動の主軸を求めた。主軸<sup>7</sup>は、水平2成分の加速度振幅の平均パワーの共分散が最大となる方向で定義し27個の強震観測記録について求めた。図-6から明らかなように震源からサンフランシスコ湾岸地域に向かう領域では、主軸が断層の走行に直交する方向に向く傾向が見られる。このことは、特定の波動が震源からサンフランシスコ湾岸地域に向かい傳播した可能性を示唆している。しかし、震源近傍とその南東の地域では主軸が必ずしも直交方向に向いておらず、特徴的な傾向は見られない。

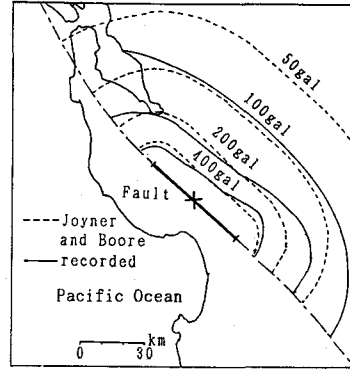


FIGURE 4. Recorded peak horizontal acceleration compared with the attenuation relationship by Joyner and Boore (1981) in plain distribution

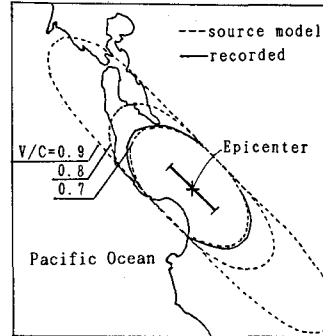


FIGURE 5. Distribution of amplitude as analyzed by a source model by varying the source parameter V/C

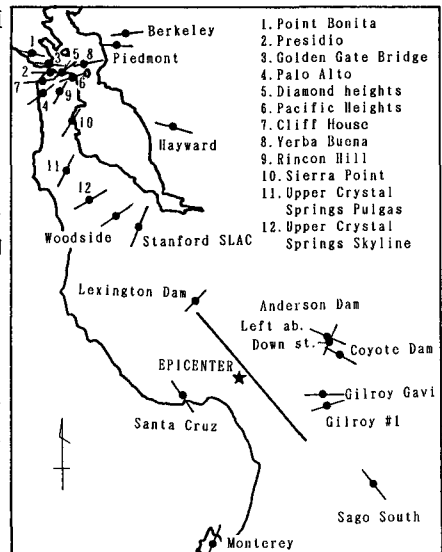


FIGURE 6. Distribution of the principal axes

### 非定常パワースペクトル

そこで、震源からサンフランシスコ湾岸地域に伝播した波動の種類を明らかにするために、その領域内の2地点で観測された強震記録の非定常パワースペクトル<sup>9</sup>を求めその分散性を調査した。

図-7にはLexington dam とS.F.Presidioで観測されたEW成分の非定常パワースペクトルを示す。同図から0.2~0.5Hz 付近のやや長周期では分散性は見られないが主要動部分で大きなパワーを持つ1Hz 付近の成分にわずかであるが分散性が認められることがわかる。

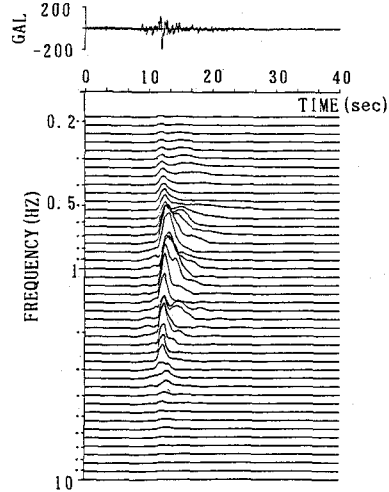
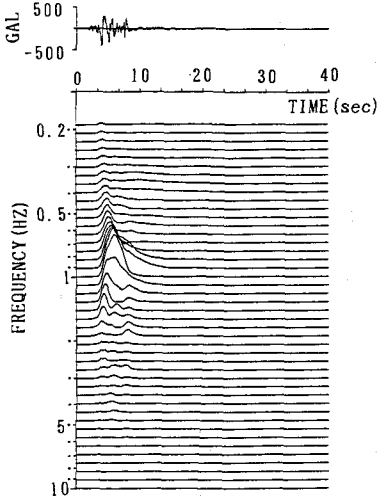


FIGURE 7(a). Evolutionary spectra of EW component recorded at the Lexington dam

FIGURE 7(b). Evolutionary spectra of EW component recorded at the S.F. Presidio

TABLE 1. Data of recording stations

Recording situations	Geology	Distance $\Delta$ (km)
LX--Lexington dam	slate and sandstone	20
UP--Upper crystal springs	sandstone	69
PR--S.F. Presidio	serpentine	105
PO--Point Bonita	sandstone	112

### 位相速度

つぎに、トリガータイムが公表されている表-1に示す4観測点の強震記録を用いて位相速度<sup>9</sup>の推定を試みた。解析には、観測された水平2成分の加速度波形を震源と観測点を結ぶ方向に直交する方向に合成した波形(Transverse)を用いた。図-8(a)は、震源に最も近い領域にあるLX-UPの記録から求めた分散曲線を示している。この領域では、位相速度の分散性はほとんど見られずその値はほぼ一定で5km/sec程度である。この値は、震源域における地殻のせん断波速度にほぼ一致していることからこの領域では主に実体波が伝播したと思われる。図-8(b)に示したUPとPRの記録から求めた分散曲線にはわずかに分散性が見られる。位相速度は1.2Hz 付近が他の振動数に比べて遅くなっており、その値は1~2km/sec程度である。図-8(c)に示したPRとPOの記録から求めた分散曲線では分散性が明瞭ではない。しかしながら、1Hz 付近での位相速度の値は2~3km/sec程度でありUPとPRの記録から求まる値にほぼ等しい。また、この位相速度は、杉戸等<sup>10</sup>が報告したLove波の理論分散曲線の内振動数域の対応から見ると1次モードの値に良く一致している。以上のことから震源からサンフランシスコ湾岸地域に伝播した波動の中にはLove波が含まれていたものと思われる。

#### 4. まとめ

- (1) 断層の走行線の延長方向にある領域では、最大水平加速度の距離減衰が他の領域に比べて小さい。
- (2) 断層の空間的広がりと動的な破壊過程が考慮された断層モデルによる解析により距離減衰の異方性は説明できる。観測値と最も対応の良いV/C値は、0.7で過去の研究で報告されている地震の平均値にほぼ等しい。
- (3) 震源からサンフランシスコ湾岸地域に向かう領域では地震動の主軸は、断層の走行に直交する方向に向く傾向が見られた。
- (4) 震源からサンフランシスコ湾岸地域に向かう領域では、震源から遠く離れると位相速度にわずかに分散性が見られた。サンフランシスコ市域においては強震観測記録の卓越振動数である1Hz付近での位相速度の値は、2~3km/sec程度であった。

#### 謝 辞

本研究をまとめるにあたり貴重な御助言を頂いた  
京都大学 杉戸真太先生に深謝の意を表します。

#### 〈参考文献〉

- 1) R. Maley et al.: "U. S. GEOLOGICAL SURVEY STRONG-MOTION RECORDS FROM THE NORTHERN CALIFORNIA (LOMA PRIETA) EARTHQUAKE OF OCTOBER 17, 1989", OPEN-FILE Report 89-568, 1989.
- 2) A. Shakal et al.: "CSMIP STRONG-MOTION RECORDS FROM THE SANTA CRUZ MOUNTAINS (LOMA PRIETA), CALIFORNIA EARTHQUAKE OF 17 OCTOBER 1989", Report No. OSMS 89-06, CDMG, 1989.
- 3) K. Kawashima, K. Aizawa and T. Takahashi: "Attenuation of Peak Ground Motion and Absolute Acceleration Response Spectra", Proc. of 8WCEE, San Francisco, U. S. A., 1984.
- 4) W. B. Joyner and D. M. Boore: "Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records including Records from the 1979 Imperial Valley California Earthquake", BSSA, Vol. 71, No. 6, 1981.
- 5) N. A. Haskell: "Total Energy and Spectral Density of Elastic Wave Radiation from Propagating Faults", BSSA, Vol. 54, No. 6, 1964.
- 6) R. J. Geller: "Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitude", BSSA, Vol. 66, No. 5, 1976.
- 7) 松島 豊: "水平地振動の特性の方向による変動", 日本建築学会論文報告集, No. 226, 1974
- 8) M. Sugito, H. Goto and F. Aikawa: "Simplified Separation Technique of Body and Surface Waves in Strong Motion", Proc. of JSCE, No. 350, 1984.
- 9) 土岐憲三: "強震加速度記録による位相速度の検出", 第4回日本地震工学シンポジウム, 1975.
- 10) 杉戸真太, A. S. Kiremeidjian, 納田勝: "Loma Prieta 地震における地震動に関する基礎的検討", 土木学会第45回年次学術講演会 I, 1990.

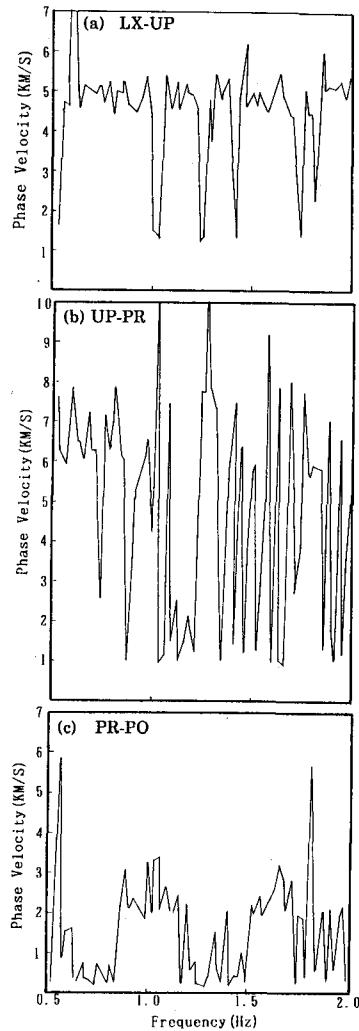


FIGURE 8. Dispersion curves from analysis of recorded accelerograms