

長周期微動の観測による 1989 Loma Prieta 地震

被害地域の地盤震動特性

赤松 純平・藤田 雅之・亀田 弘行・
市川 信夫・南井良一郎

AMPLIFICATION OF LONG-PERIOD MICROTREMORS DUE TO SOIL DEPOSITS IN THE AREAS AFFECTED BY THE 1989 LOMA PRIETA EARTHQUAKE, CALIFORNIA

By *Junpei AKAMATSU, Masayuki FUJITA, Hiroyuki KAMEDA,*
Nobuo ICHIKAWA and Ryouichirou MINAI

Synopsis

Soil amplifications for long-period (1–10 s) microtremors were studied in three areas affected by the 1989 Loma Prieta Earthquake; Peninsula Cities, Santa Clara Valley and Santa Cruz City, California, where strong motion and aftershock records were obtained. Spectral ratios (ground site/rock site) obtained from simultaneous observations were discussed in terms of surface geology and configuration of bedrock. It was shown that long-period microtremor measurement is useful for microzoning an urban area.

1. は じ め に

米国サンフランシスコ州を襲った 1989 Loma Prieta 地震は高度に発達した都市の地震防災について看過できない問題を提起している。すなわち、都市には科学技術の発達段階により耐震安全性の異なる構造物が混在すること、都市が空間的により安全性の低い領域（造成地、埋立地）に拡大していること等により、耐震性の低い地域・構造物が選択的に被害を受け、都市機能全体に被害が波及するという、都市にはその発展に伴い不可避免的に新たな災害形態が生ずるという問題である。とくに、水道、電気、ガス、電話や交通網等のいわゆるライフライン系への被害とその相互連関作用は、震災復旧・支援活動の計画と実施に大きく関わっており¹⁾、この観点からの被害予測の研究の重要性を強く印象づけた。

防災研究所都市施設耐震システム研究センターは、都市地震防災の総合的研究の一貫として、米国地質調査所 (USGS) や EQE Engineering と協力して、(1) 長周期微動観測による地盤震動特性調査とこれによる地盤のマикроゾーニングの方法の研究、(2) 建築構造物の被害と復旧過程の調査、(3) ライフライン系の被害と相互連関・復旧活動等に関する調査研究を、サンフランシスコ湾岸地域、サンタクルツ市、ロスガトス等被害の集中した地域で実施した。これらの研究成果は都市耐震センター研究報告別冊第5-7号にまとめられている²⁻⁴⁾が、本論では(1)について概要を述べる。

被害予測の研究において地盤のマикроゾーニングは強震動予測の基礎資料として重要な研究課題である。とくに近年、固有周期の長い施設・構造物の建設要求が高まり、長周期の地盤震動特性の研究が緊急

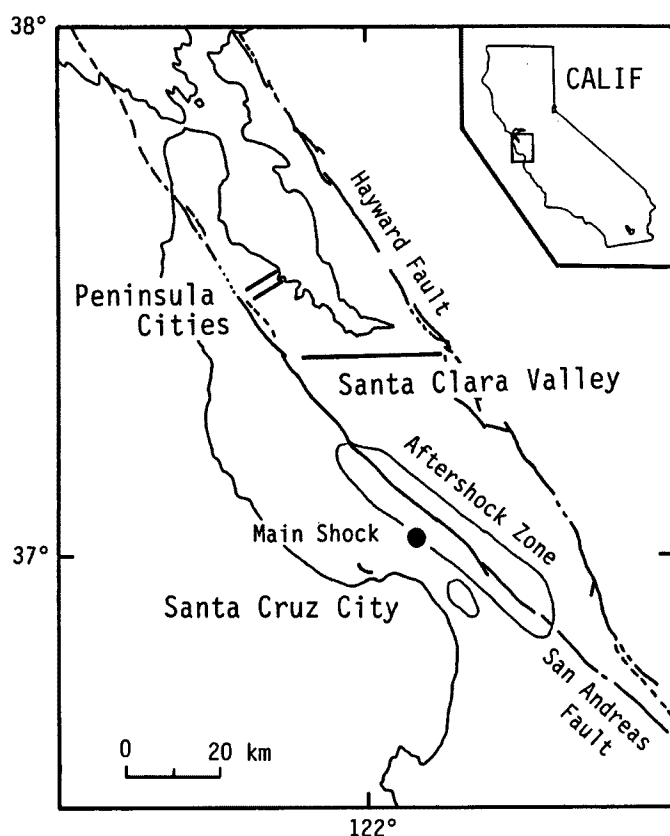


Fig. 1. Long-period microtremor study areas affected by the 1989 Loma Prieta Earthquake in California.

課題になっている。従来、京都盆地を対象に脈動を利用して地盤の長周期震動特性を評価し、これをマイクロゾーニングに適用する方法を検討してきた⁵⁾が、Loma Prieta地震では強震記録が数多く得られ、余震観測も多くの機関により実施されたことから、この方法による結果を地震記録や実被害と比較することにより、より確実度の高いものにすることが可能であると考えられる。特に、Loma Prieta地震強震記録では、湾岸地域の厚い沖積地盤や軟弱な埋立地で継続時間の長い大振幅の長周期成分が観測され、水平動成分では震央に対して直角方向よりも波線方向の振幅が大きく、また、湾の東側と西側で振幅が異なる等の、基盤岩の性質や表層地盤の影響と考えられる震動特性が報告されている⁶⁾。この様な強震特性と微動観測の結果を比較し、微動観測を強震動特性の予測に適用する上での問題点を考察することも重要である。

この様なことから、典型的な地質構造を有し、強震観測・余震観測の行われた湾岸地域の Peninsula Cities, Santa Clara Valley および震源域に近い太平洋岸の Santa Cruz City で1990年5～6月に長周期の微動の観測を実施した (Fig. 1)。

2. 観測と解析

2.1 観測場所

(1) Peninsula Cities

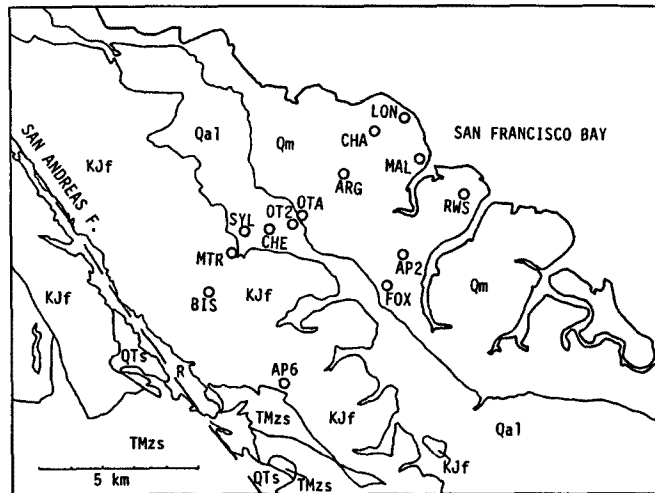


Fig. 2. Surface geology and site locations in Peninsula Cities. Notations of geology are ; KJf=Franciscan formation, TMzs=Tertiary Mesozoic sedimentary rocks, Qal=Quaternary alluvial deposits, and Qm=fill on baymud.

湾岸地域では、岩盤、沖積層、ベイマッド上の埋立地等の地質構造区分は概ね湾の長軸方向に並んでいる。これと直交して、半島中央部の San Mateo City から湾岸の Foster City に至る測線を設定し、14 点で観測した。地質区分⁷⁾と観測点の位置を Fig. 2 に、また、ボーリング資料による地質断面⁸⁾を Fig. 3 に示した。地質断面は観測測線の数キロメートル北側を示す。基盤岩（3 紀～中生代堆積岩）の深さは南西から北東にかけて次第に増加するが、北側の BIS-LON 測線と南側の AP 6-RWS 測線とは異なっていると思われる。すなわち、沖積地盤と埋立地の境界付近では、OTA と FOX の間で 50 ft であるが南側の AP 2 で 285 ft、また埋立地の海岸寄りでは、北側の LON 付近で 270 ft に対し南側の RWS 付近で 650 ft とやや深い⁹⁾。

岩盤上の BIS は基準観測点である。AP 6, AP 2, MAL, RWS は強震観測点³⁾であり、AP 2, FOX, MAL では USGS により余震観測が行われた³⁾。

Loma Prieta 地震による被害は、フォスター市はサンフランシスコ市より震源距離が小さいにもかかわらず、埋立地を含め被害が僅かであり、サンフランシスコ市マリーナ地区の埋立地で大きな被害が生じたことと対照的である。

(2) Santa Clara Valley

Fig. 4 に表層地質⁷⁾と観測点の位置を示す。観測は Santa Clara Valley を横断して、西側の Los Altos Hills から東側の Alum Rock に至る 6 点で行われた。西側の KIR を基準観測点に用いたが、KIR と地盤上の観測点が 10～25 km も離れているので、東側にも岩盤上の観測点 ARP を設置した。また、微動の時間的変化を調べるために、基準観測点 KIR において 24 時間の反復測定を実施した。

PAH, SNV, AGN, SJI の 4 点は強震観測点であり、SNV, AGN, SJI は厚い堆積層上に位置する。堆積層の厚さは詳しくは判っていないが、S 波速度 2500 ft/s 以上の層の深さは SNV と AGN 付近で 700 ft, SJI 付近で 500 ft と報告されている¹⁰⁾。

Loma Prieta 地震の記録では S 波に続いて長周期の震動が長く継続しており、厚い堆積層の影響が問題になっている⁶⁾。

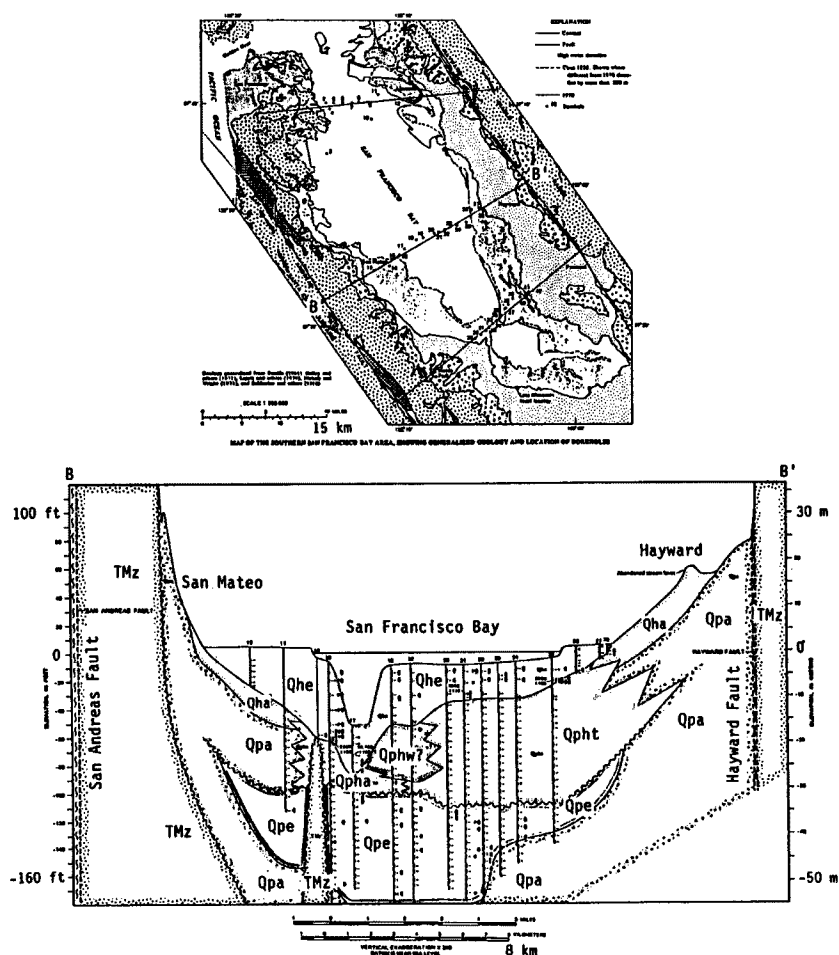


Fig. 3. Cross section of Peninsula Cities (after Atwater et al., 1977). Qhe=Holocene estuarine deposits, Qha=Holocene Alluvial deposits, Qpe=late Pleistocene estuarine deposits, Qpa=late Pleistocene Alluvial deposits, and TMz=Tertiary Mesozoic bedrock.

(3) Santa Cruz City

Fig. 5 に表層地質¹¹⁾と観測点の位置を示した。Santa Cruz City は San Lorenzo River の太平洋岸河口付近の氾濫原に位置している。沖積氾濫原は両岸のテラスと河口付近でせり上がる基盤岩に囲まれ、盆地様の構造を呈している。構造の平面的規模は先の湾岸地域の 1/10 以下である。測線は川を横断して、テラス、沖積層上の 18 点から成る。このうち、14 点は余震観測点¹²⁾である。変堆積岩上の LOE を基準観測点に用いた。また、川沿の沖積層上で建物と埋設管の被害が集中しており、被害の集中した原因を調べる目的で余震観測点以外の、CEW, PGM, FNT においては長周期だけでなく短周期の雑微動も計測した。

地下構造についての詳細な資料は入手されていないが、USGS の行った屈折法地震探査の報告¹²⁾から、P 波速度 3.0 km/s 以上の層の深さは、上位段丘面で 5 m 前後、下位段丘面で約 10 m、沖積地盤では 70 m 以上と堆定される。

USGS による余震観測¹²⁾では、基盤構造により 2 次的に生成したと考えられる波群が沖積地盤上で観測

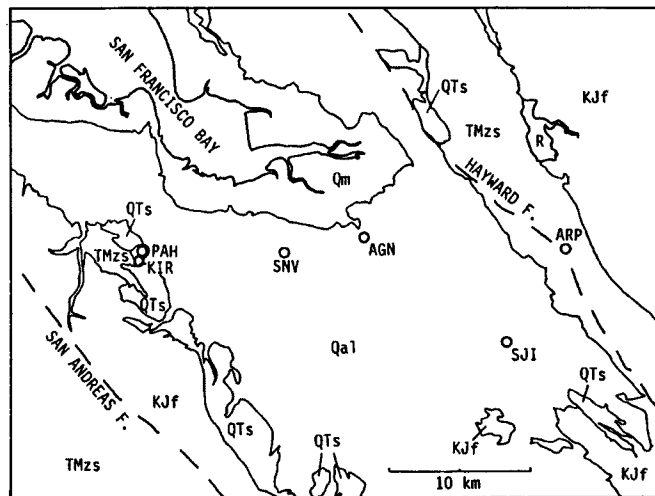


Fig. 4. Surface geology and site locations in Santa Clara Valley. Notations of geology are the same as those in Fig. 2.

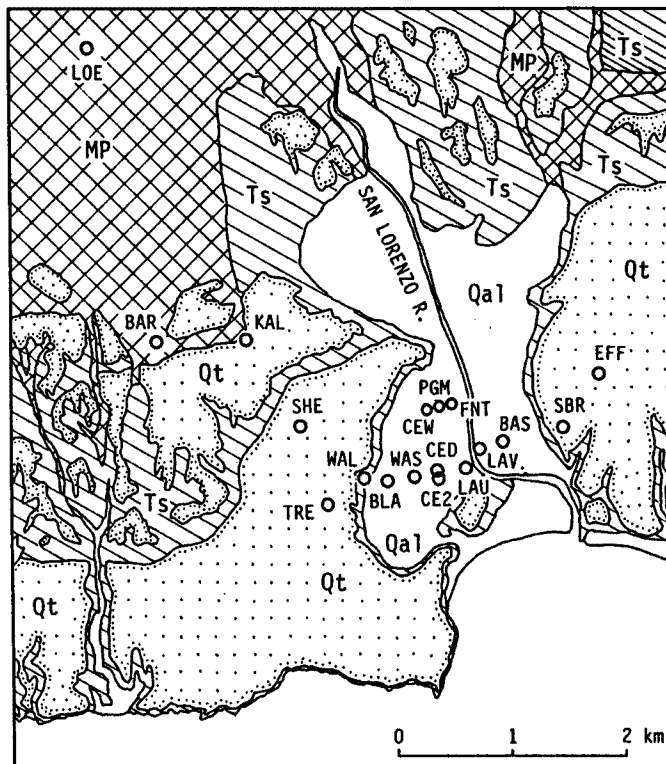


Fig. 5. Surface geology and site locations in Santa Cruz City. Surface geology: MP=Metasedimentary rocks and Marble, Qt=Marine terrace deposits, and Qa1=Alluvial deposits.

されている。

2.2 観測方法

観測対象地域における長周期の微動の震動源は、主として太平洋の波浪と考えられる。このことから、微動の周波数成分とその振幅は気象・海象条件により時間的に大きく変化することが予想された。対象地域に入射する微動源の周波数特性の影響を除くために、岩盤上の基準観測点と地盤上の移動観測点とで同時観測を実施し、スペクトル比（地盤/岩盤）により地盤による増幅作用を推定する。

換振器（3成分）は、基準観測点に固有周期1秒の速度計を、移動観測点に10秒の速度計（PELS）を用いた。観測は、人工的な雑微動の状態に応じて、遮断周波数1, 3, 10 Hzのローパスフィルターを通して高周波成分によるスケールアウトを防ぎ、14ビットのデジタルレコーダに50 p/sのサンプリングで収録する方法で、各地点とも11分間の記録を得た。

基準観測点は時計による1～2時間毎の自動記録を実施し、これに合わせて地盤上の観測点を移動して同時記録を得た。

移動観測点の換振器は歩道または車道の舗装上に設置し、段ボール箱と砂袋で覆って防風処置を施した。移動観測点の換振器は設置状態（傾斜）により周期が大きく変化する。各観測点で記録の前後に自由振動の記録を得て、換振器の周期を測定した。

岩盤上の基準観測点は雑微動の振幅レベルが低く、10 Hz ローパスフィルターの使用で長周期域まで（～10秒）のS/N比を十分高く得ることができた。

さらに、2組の観測器の特性検定と観測精度の見積のために、各基準観測点で両観測器による同時平行観測を実施した。

Table 1 に観測点の表層地質と解析に使用された記録の観測日時をまとめた。

2.3 解析方法

データ解析は次の手順で行った。

(1) 計器補正: 0.1–3.0 Hzの周波数域の地動速度波形の計算。これは、森井・西村によるZ変換を利用したフィルター¹³⁾と、西村によるZ変換を用いた換振器補正アルゴリズム¹⁴⁾により時間領域で行った。移動観測点の換振器の減衰定数は、シャント抵抗を固定した場合の周期と減衰定数の関係¹⁵⁾から求めた。

(2) 解析区間の選定: 11分間の記録から、短周期の雑微動（主として自動車）に乱されていない区間164秒を選んだ。

(3) 水平成分方向変換: 観測時水平成分は磁北を基準に得られている。京都盆地では基盤岩構造による水平成分地盤増幅特性の方向依存性が見出されている³⁾ことから、湾岸地域では湾の長軸方向とそれに直角方向の水平成分を合成した。

(4) 振幅比計算: 164秒間の地動速度波形からF.F.T.によりスペクトルを求め、その比（地盤/岩盤）ならびに周波数域毎の平均スペクトル比（振幅比）を計算した。この際、10%余弦ウィンドーと重み付き（25点三角）平滑化を行っている。

Fig. 6 に上記手順に従った解析例として、164秒間の地動速度波形、スペクトルおよびその比を示す。水平動成分は地質構造の走行に沿う方向（N 40° W）と直角方向（N 50° E）の成分である。埋立地（RWS）では、水平動成分に地盤の固有周期を反映した顕著なピークが見られる。

Fig. 7 はKIRで行った計器精度検定用の平行観測の結果である。波形と振幅スペクトルは良い一致を示しており、上記の方法により0.12～3.0 Hzの広い周波数範囲にわたって両システムの特性補正が精度良く行われていることが判る。異なった固有周期の換振器による比較であるが、この周波数範囲でスペクトル比が議論可能と考えられる。

Table. 1 Surface geology and observation time, at which simultaneous observations were made. In addition to these observations, repeated observations were carried out at LOE from 19:15 on May 31 to 09:15 on June 1 for investigating temporal variation of microtremors. * denotes strong motion site. # denotes observation for short period microtremors. Surface geologies are: KJf=Franciscan Formation, Qm=fill on bay mud, Qal=Quaternary alluvium, QTs=Quaternary Tertiary sedimentary rocks, TMzs=Tertiary and Mesozoic sedimentary rocks, MP=Meta-sedimentary rocks and Marble, Qt=Marine terrace deposits

Peninsula Cities					Santa Clara Valley					Santa Cruz City							
No.	Site Code	Geology	M	D	H M	No.	Site Code	Geology	M	D	H M	No.	Site Code	Geology	M	D	H M
1	B I S	KJf	5	23	17:00	1	K I R	QTs	5	31	17:30	1	LOE *	MP	5	17	11:45
2	FOX	Qm	5	24	10:00	2	ARP	TMzs	6	1	11:00	2	BAR *	MP	5	18	8:30
3	AP 2 *	Qm	5	24	11:15	3	S J I *	Qal	6	1	13:00	3	KAL *	Qt	5	18	9:30
4	RWS *	Qm	5	24	12:30	4	AGN *	Qal	6	1	15:30	4	SHE *	Qt	5	18	10:30
5	RWS *	Qm	5	24	12:35	5	SNV *	Qal	6	1	17:00	5	TRE *	Qt	5	18	11:30
6	ARG	Qm	5	24	15:00	6	PAH *	QTs	6	1	18:30	6	TRE *	Qt	5	18	13:00
7	CHA	Qm	5	24	16:01							7	WAL *	Qal	5	18	15:00
8	LON	Qm	5	24	17:00							8	BLA *	Qal	5	18	16:00
9	LON	Qm	5	24	17:23							9	WAS *	Qal	5	18	17:01
10	MAL *	Qm	5	24	18:20							10	CED *	Qal	5	18	18:00
11	MTR	KJf	5	25	10:30							11	LAU *	Qal	5	18	19:00
12	SYL	Qal	5	25	12:00							12	LAV *	Qal	5	18	20:00
13	CHE	Qal	5	25	14:00							13	CE 2 *	Qal	5	19	9:00
14	OT 2	Qal	5	25	15:00							14	BAS *	Qal	5	19	10:00
15	OTA	Qm	5	25	16:00							15	SBR *	Qt	5	19	11:00
16	AP 6 *	TMzs	5	25	17:30							16	EFF *	Qt	5	19	12:10
												17	CEW	Qal	5	19	15:00
												18	CEW #	Qal	5	19	15:11
												19	PGM	Qal	5	19	16:00
												20	PGM #	Qal	5	19	16:12
												21	FNT	Qal	5	19	17:00
												22	FNT #	Qal	5	19	17:11
												23	LOE *	MP	5	19	18:15

2.4 解析対象周波数範囲

微動の速度スペクトルを Fig. 6 の例で見ると、岩盤上では上下動成分、水平動成分共、周波数が高くなるに従い単調に減少し、1.5 Hz 以上で平坦になっている。地盤上では上下動成分は 0.7 Hz 付近から単調に増加するが、水平動成分は 0.3 Hz から増加し顕著なピークを伴っている。地盤上観測点は人工的な高周波雑微動の震動源に近いので、地盤/岩盤のスペクトル比から地盤による増幅特性を評価し得る周波数範囲を制限する必要がある。京都盆地における観測結果では人工的な雑微動は典型的な日周変化を示すことが明らかになっており¹⁶⁾、1 Hz 以上の高周波数域は長周期微動の解析対象から除外されている。

Fig. 8 に Santa Clara Valley の基準観測点 KIR における 24 時間反復測定によるスペクトルを重ねて示した。0.1 ~ 0.5 Hz 成分は 3 倍程度の、1 Hz 以上の高周波成分は周波数の増加とともに増大し、最大 30 倍程度の振幅変化を示す。低周波数域の変化は太平洋岸から伝播してくる脈動の振幅変化と考えられる。高周波数域の変化は人工的な雑微動の日周変化に対応する。これらのことから、1 Hz 以上の高周波数成分はスペクトル比によって地盤増幅特性を評価することは困難と思われる。ここでは、京都の場合と同様 1 Hz 以下の周波数帯域についてのスペクトル比を吟味する。

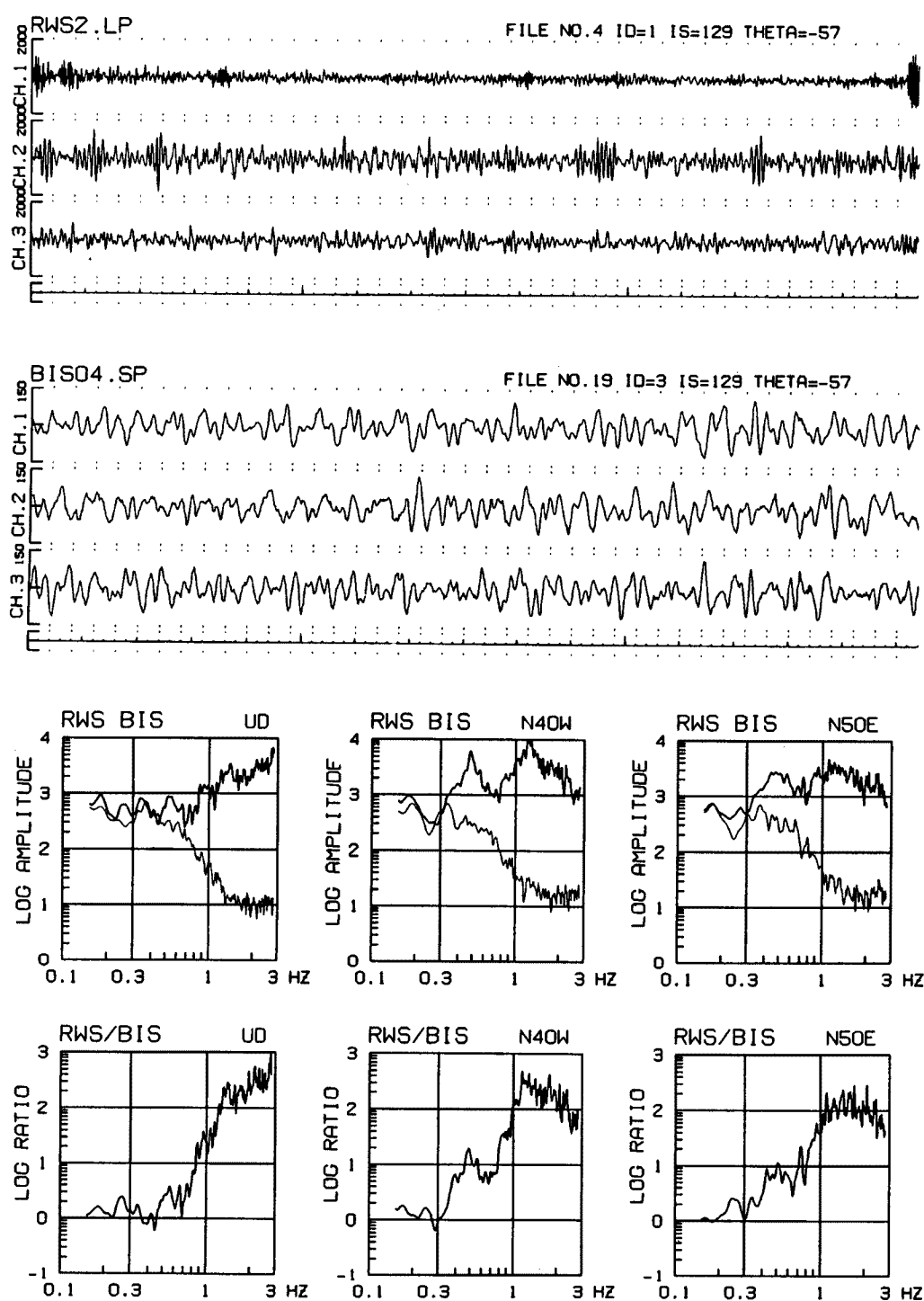


Fig. 6. An example of velocity seismograms of microtremors, velocity amplitude spectra and their ratios observed simultaneously at ground site (RWS) and reference rock site (BIS). Horizontal components are shown in the directions parallel (N40° W) and normal (N50° E) to general trend of geological division in the bay area.

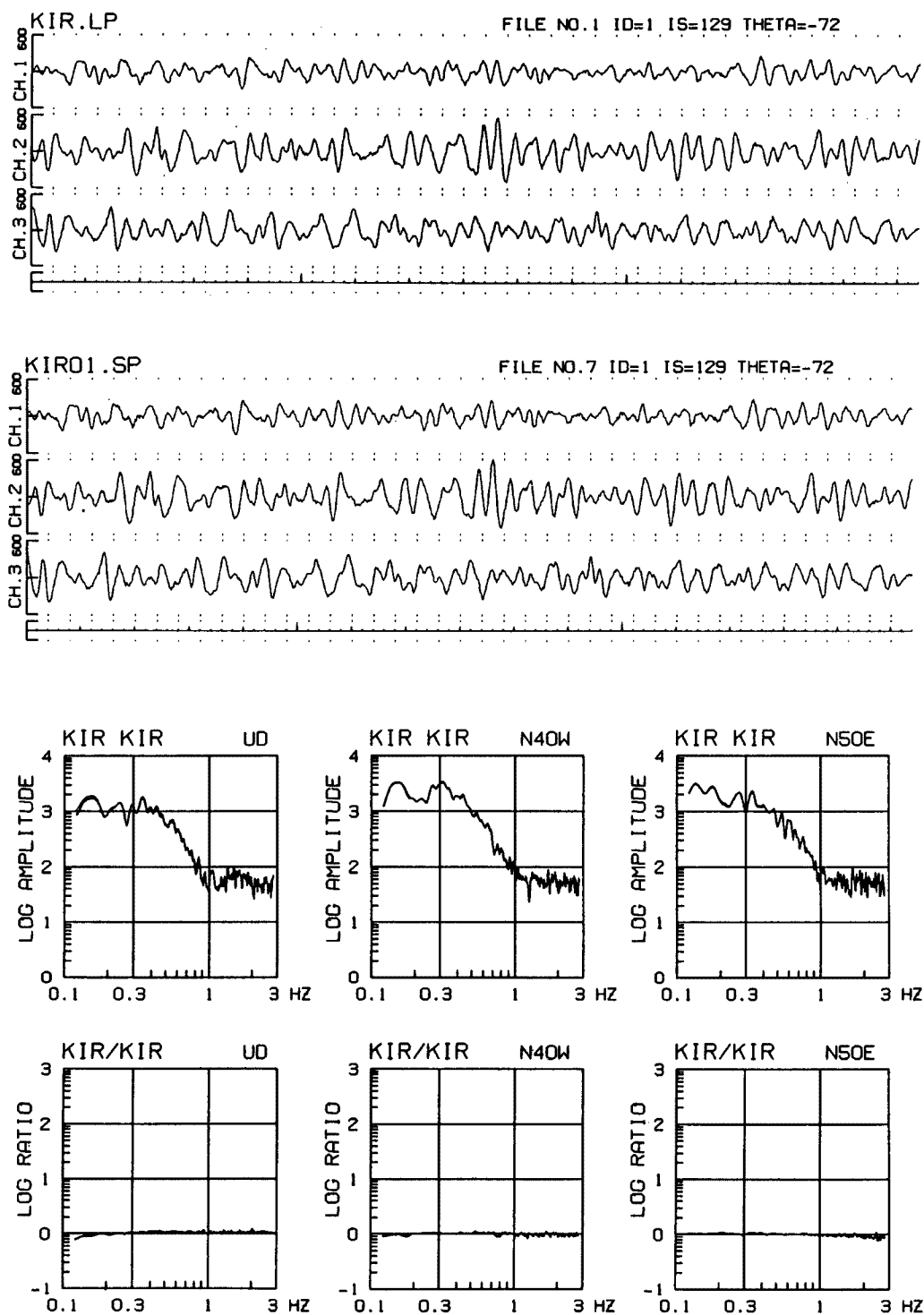


Fig.7. Comparison of velocity seismograms of microtremors, velocity amplitude spectra and spectral ratios obtained with different instruments at the same site. Note the same wave forms and spectra showing the accurate instrumental corrections.

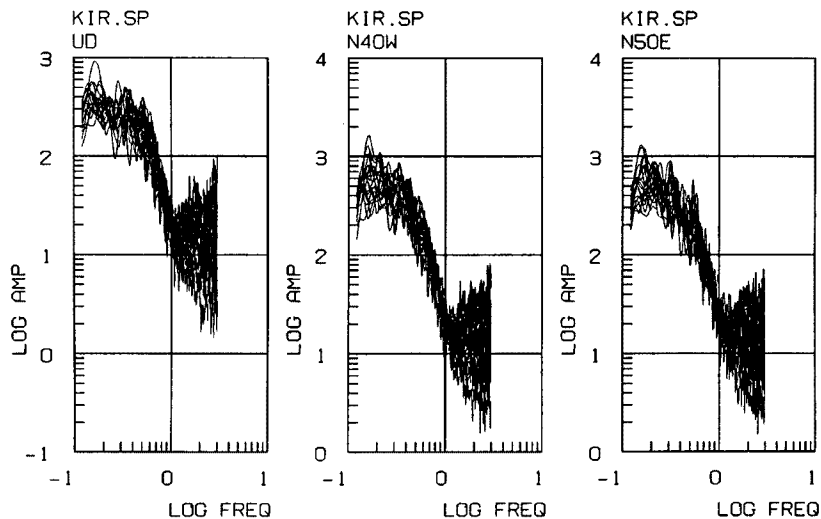


Fig. 8. Temporal variation of amplitude spectra of microseisms observed at reference rock site (KIR).

3. 地盤による増幅特性と地質構造

(1) Peninsula Cities

Fig. 9 に各観測点と基準観測点の速度スペクトルを山側から海側の順に並べて示す。水平動成分は地質構造の走行に平行な方向 (N 40° W) の成分のみを示した。

岩盤上 (AP 6, MTR) では 0.1 Hz ~ 3 Hz の全周波数域で基準観測点と同じ振幅特性を示す。

沖積地盤上 (SYL, CHE, OT 2) では 1 Hz 付近から振幅増加が見られる。

埋立地 (OTA ~ RWS) では振幅増加のはじまる周波数が海側ほど低周波数に移行している。振幅増加のはじまる周波数は各地点共上下動成分よりも水平動成分の方がより低い。上下動成分は 0.5 ~ 1 Hz から周波数と共に単調に増加しているが、水平動成分はピークを有している。人工的な雑微動の発生源における強さは水平動成分においても上下動成分と同様周波数と共に単調に増加すると考えられるので、水平動成分のピークは地盤の固有周期を反映したものであろう。この考えが正しいとすると、OTA における 1.7 Hz 付近の鈍いピークや FOX における 1.5 Hz のピークも、雑微動の卓越する周波数域であるが、地盤の固有周期に関係すると思われる。

Fig. 10 にピークの周波数 (f_{peak}) とスペクトルの増加の始まる周波数 (f_{rise}) との観測点による変化を並べて示した。山側から海側に移行するに従いこれらの周波数は系統的に低くなる。この傾向は Fig. 2 に示された基盤岩の深さと埋立地盤の厚さが次第に増加する構造変化に非常によく一致している。このことは、先の考えに基づいて地盤の固有周期が議論できることを示唆していると考えられる。また、ピークが顕著に観測されることから地層のインピーダンス比が大きいことが予想される。

Fig. 11 に周波数帯域毎の平均振幅比 (地盤/岩盤) を示す。各観測点の棒グラフはそれぞれ、上下動 (左)、地質構造に平行な水平動 (中)、これに直角な水平動 (右) の各成分である。沖積地盤 (SYL, CHE, OT 2) や埋め立ての浅い埋立地盤 (OTA, FOX) では 1 Hz 以下の低周波数域での振幅増加は殆ど見られない。埋め立てが深くなるに従い系統的に振幅増加が低周波数域に及び、増幅率は増加する。全

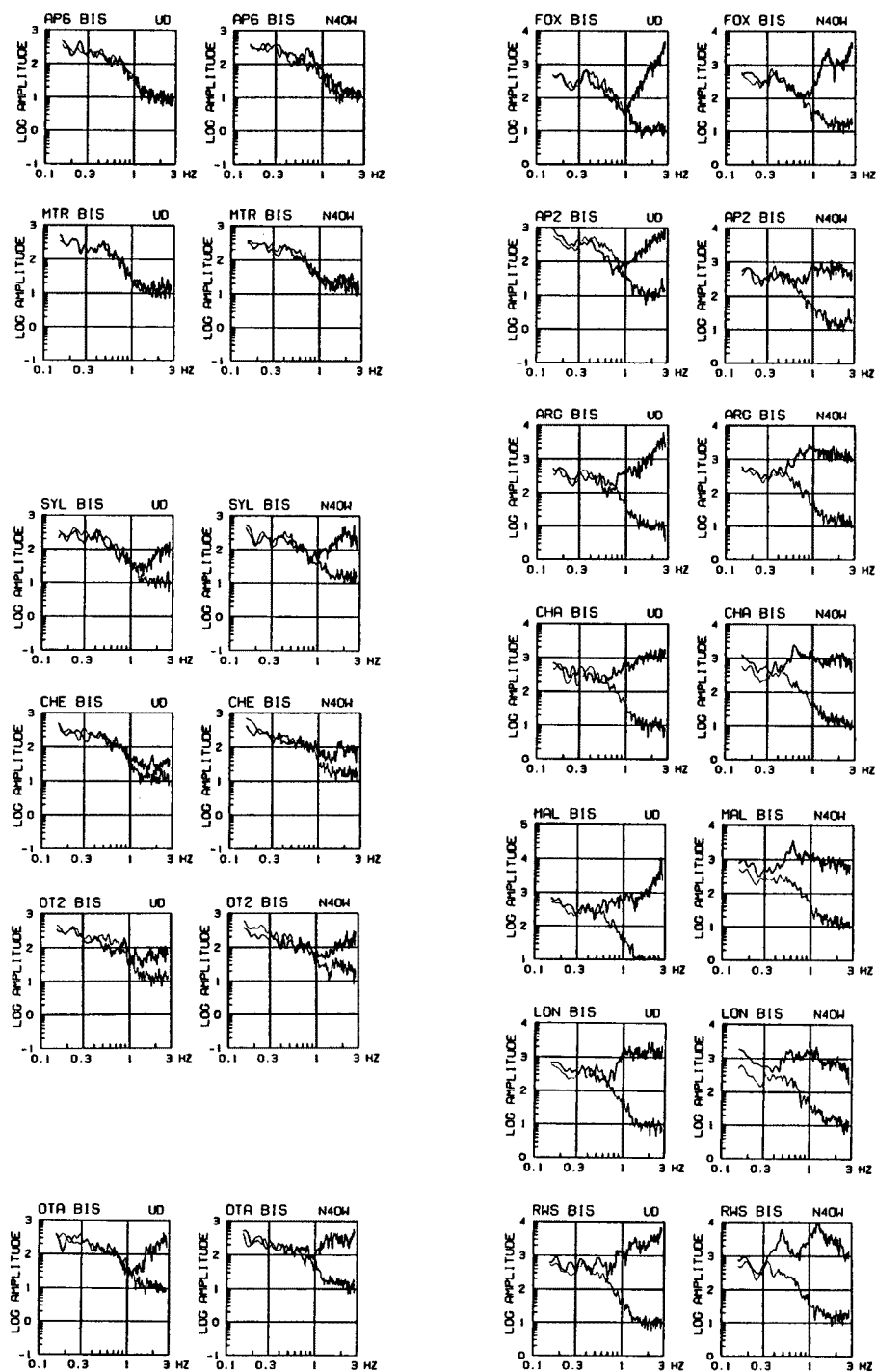


Fig.9. Amplitude spectra and their variation with site locations in Peninsula Cities. Vertical components and horizontal components in the direction parallel to the longitudinal axis of the bay ($N40^{\circ} W$) are shown.

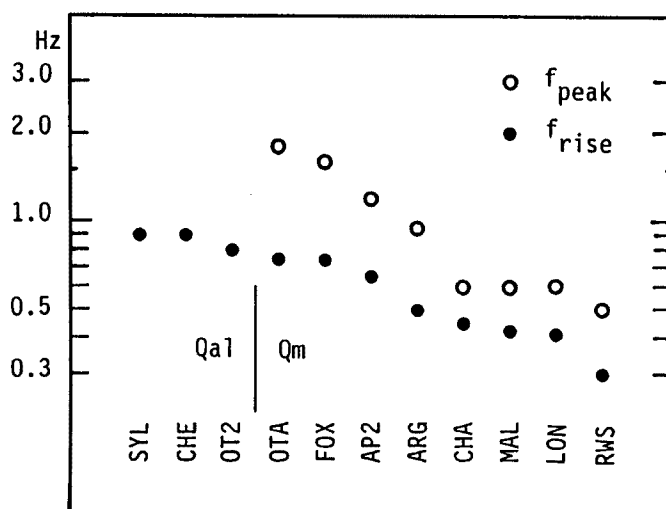


Fig. 10. Spatial variation of characteristic frequency for soil amplifications. f_{peak} =peak frequency of spectra at soil sites, f_{rise} =frequency at which amplification occurs.

体として海側ほど比の値は大きい、高周波に移行するほど比の値はより大きく、またより山側から増加し始めている。この振幅比の周波数特性と観測点による違いの系統的变化も、Fig. 2の地質構造に非常によく対応している。しかしながら、基盤岩の深さが同程度のLONとAP2 (275～280 ft)とで振幅比に大きな違いがあり、これは、埋め立ての深さの違いと共に、次に述べる水平動成分における方向依存性とも関連して、基盤岩の構造や地質構造の境界からの距離の違いを反映しているように思える。

Fig. 11では各観測点とも振幅比に、成分による違いが顕著に見られる。各点とも上下動成分よりも水平動成分の方が振幅比は大きい。これは、地盤上で広く観測される特徴であり、地層の速度比がP波よりもS波の方が大きいこと、従ってポアソン比が表層ほど大きいことによると考えられる。また、水平動成分では、例外(MAL: 0.5–1.0 Hz, LON: 0.35–1.0 Hz)はあるが全体として地質構造の走行に沿う方向のほうが直角方向よりも大きい。この傾向は低周波数域で顕著であり、低周波成分がより大規模な構造の不均質を反映していると考えられる。水平動成分の振幅増加の方位依存性は京都盆地においても観測されており⁵⁾、基盤岩の構造に関係すると考えられる。これについては、後で議論する。

(2) Santa Clara Valley

Fig. 12に速度スペクトルを示す。測線の東側の岩盤上(ARP)の振幅は上下動、水平動成分共0.2～0.3 Hzより高周波数域で西側の岩盤上(KIR, PAH)の振幅の1/8程度と小さい。このため図にはARPのスペクトルをも重ねて示した。地盤上の観測点ではピークは見られず、同時観測ではないがARPと比較して、広い周波数域で振幅が増加している。京都盆地では、盆地の幅の広い南部において振幅増加は広い周波数範囲で生じており顕著なピークを示さない¹⁶⁾。ここでも類似の特徴が観測され興味を持たれる。

Fig. 13に周波数帯毎の平均振幅を示した。左側の図は基準点KIRに対する比、中央はKIR/ARPの値を用いてARPに対する比に換算したもの、右側は次の仮定により想定した波動場に対する振幅比を示す。各点の棒グラフは左から上下、水平N40°W, N50°E方向の成分である。左側の図と中央の図との比較から、地盤サイト(SNV, AGN, SJI)の振幅増加率は、基準に用いる岩盤サイトの震動特性に強く

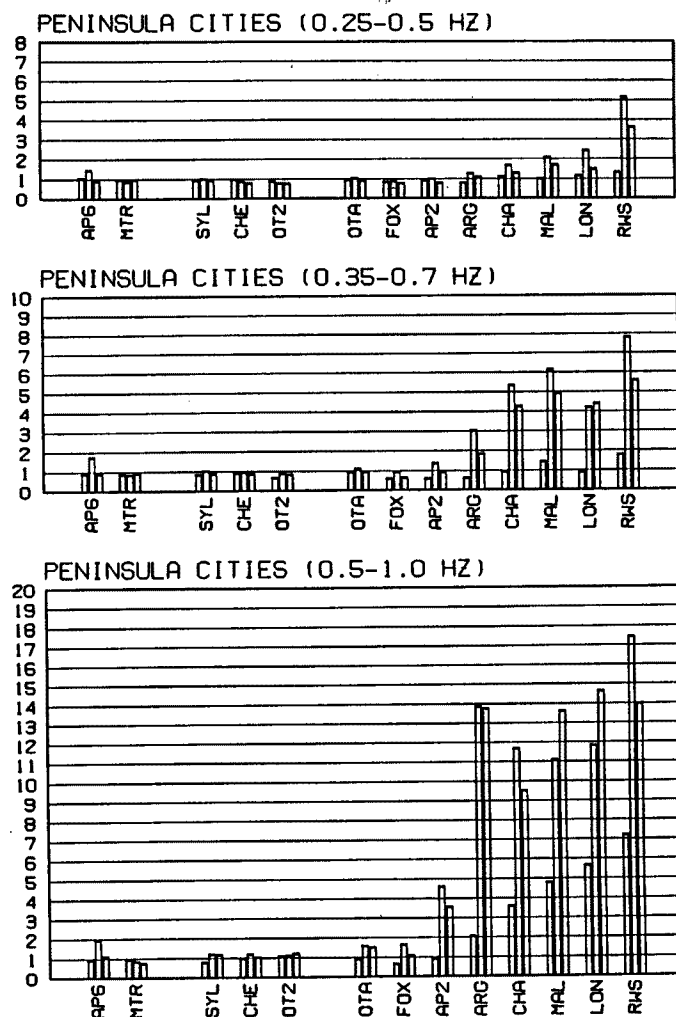


Fig. 11. Averaged spectral ratios for given frequency bands in Peninsula Cities. Left bar denotes UD component, and center and right bars denote horizontal components in the directions parallel ($N40^\circ W$) and normal ($N50^\circ E$) to the longitudinal axis of the bay, respectively.

依存することが判る。Loma Prieta 地震強震観測結果からも西側の岩盤サイトでは東側の岩盤サイトよりも大きい振幅が観測されており⁶⁾、ここでの微動の観測結果と同じ傾向を示している。

しかしながら、ここで観測している長周期の微動は太平洋岸で生起された脈動が伝播してきたものと考えられるので、30 km におよぶ測線上での波の距離減衰をも考慮する必要がある。ここでは、(1) 微動が太平洋岸に沿う線状震動源により生起し、(2) 平面表面波として $N50^\circ E$ 方向に伝播するあいだに、(3) $\exp(-ar)$ で表される距離減衰を受けると仮定して、KIR と ARP の同時観測記録から各周波数帯域毎の減衰係数 a を求めて、この様な波動場に対する振幅比を計算した (Fig. 13 右図)。

この場合、沖積地盤サイトの振幅比は水平動成分では 0.2 Hz 付近の低周波域から増加するが、0.5 ~ 1.0 Hz の高周波帯域でも高々 5 倍程度であり、Peninsula Cities の埋立地盤サイトに比べ増幅率は小さ

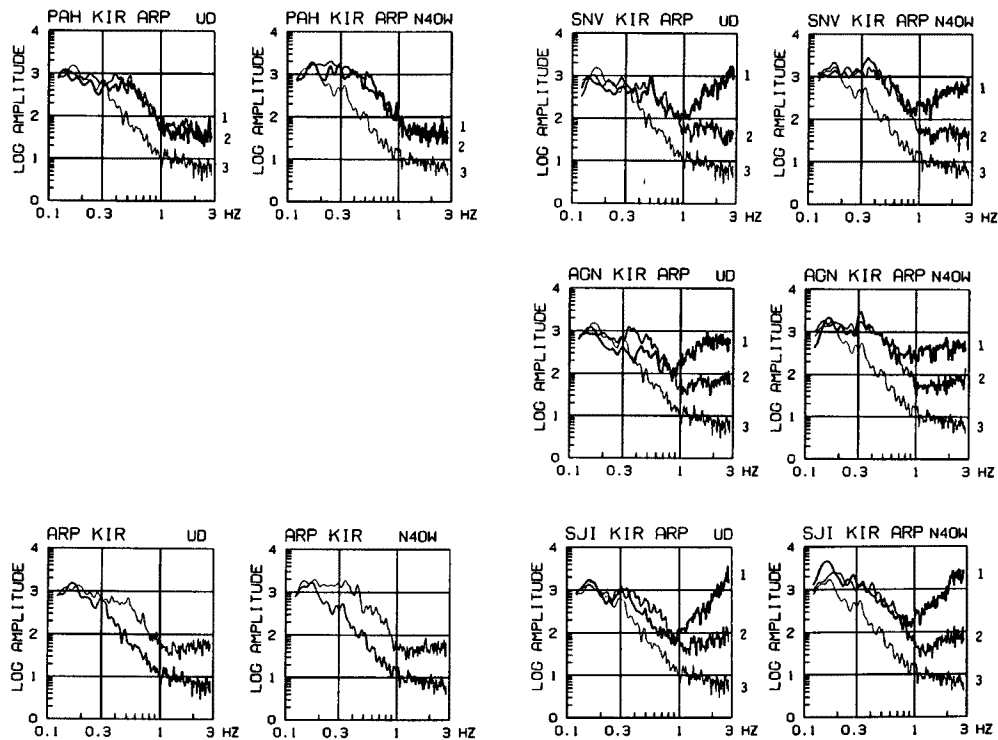


Fig. 12. Amplitude spectra and their variation with site locations in Santa Clara Valley. Vertical components and horizontal components in the direction parallel to the longitudinal axis of the bay (N40° W) are shown.
1: ground site, 2: KIR, 3: ARP.

い。Peninsula Citiesの結果と同様上下動成分に比べ、水平動成分の振幅増加が著しいが、水平動成分の振幅増加には方向依存性は見られない。このことも、京都盆地南部の盆地中央部で方向依存性が見られない⁵⁾ことに似た性質である。

強震観測結果から岩盤サイトにおける増幅特性に差異のあることが示唆されているから、**KIR**と**ARP**の振幅の違いを減衰のみに帰着する先の仮定は沖積地盤の増幅特性を過小評価している可能性が強い。Santa Clara Valleyの様に長い測線では基準観測点の選定に慎重を要する。

(3) Santa Cruz City

Fig. 14に速度スペクトルの例(UD, NS成分)を示す。左側の3例(**SHE**, **TRE**, **SBR**)は低位段丘面上の、右側の3例(**CE 2**, **LAU**, **LAV**)は沖積地盤上のサイトである。湾岸地域に比べ振幅増加は0.6~1 Hz以上の高周波数域から生じており、地盤構造の規模が小さいことに対応していると考えられる。なお、**Fig. 14**の例には次に述べるgust effectはほとんど無いと考えられる。

基準観測点**LOE**は南カリフォルニア大学サンタクルツ校の構内にあり、redwoodの巨木林の中に位置する。観測期間中やや強い風(~7 m/s)が吹き、水平動の長周期成分に明らかに風による影響(gust effect)と目される異常震動が記録される場合があった。上下動成分はこの様な異常震動は顕著ではない。**Figs. 7, 8**の例で明かな様に、岩盤サイトでは微動の振幅特性は上下動成分と水平動成分とではほぼ同じとみなせる。従って、ここでの水平動成分の地盤/岩盤の振幅比は、観測点**LOE**の上下動成分を基準に計算した。この結果を**Fig. 15**に示した。地質構造は湾岸地域に比べ複雑(**Fig. 5**)であり、地質の一般

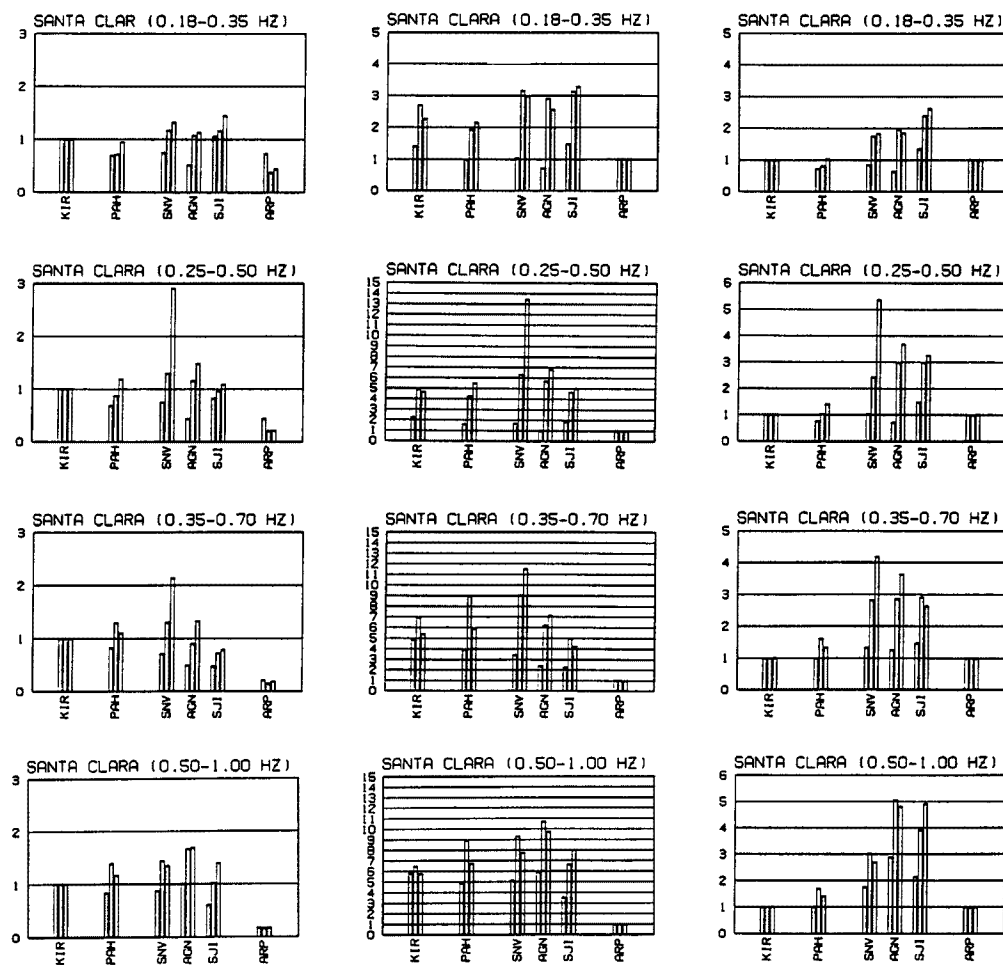


Fig. 13. Averaged spectral ratios for given frequency bands in Santa Clara Valley. Left bar denotes UD component, and center and right bars denote horizontal components in the directions parallel ($N40^\circ W$) and normal ($N50^\circ E$) to the longitudinal axis of the valley, respectively. Reference sites of left figures are KIR and those of central figures are ARP, respectively. In right figures, spectral ratios to assumed attenuating wave fields are shown.

的な走行方向を抽出することは困難であるので、水平動成分はNS、EW方向により吟味する。

先にも述べた (Fig. 14) ように振幅増加は0.5 Hz以下の低周波数域では見られず、0.5–1.0 Hzの高周波数域にのみ現れる。サイトにより振幅比は大きく変化しているが、CEDを除いて水平動成分の方が上下動成分より大きい。Table 2に0.5–1.0 Hz帯域の段丘面上および沖積地盤上の平均振幅比を示した。平均的には段丘面上のサイトよりも、沖積地盤上のサイトの方が大きい。振幅増加率の表層地質による違いは2.1節(3)に述べた速度構造の違いと対応しているようである。

なお、水平動成分の振幅比の計算にLOEの上下動成分を基準に用いたことによる誤差は、LOE水平動成分にgust effectの見られない記録を用いて、0.25–0.5 Hz帯域で $11 \pm 11\%$ 、0.5–1.0 Hz帯域で $2 \pm 14\%$ と見積られているのでTable 2に示された違いは有意なものと考えられる。

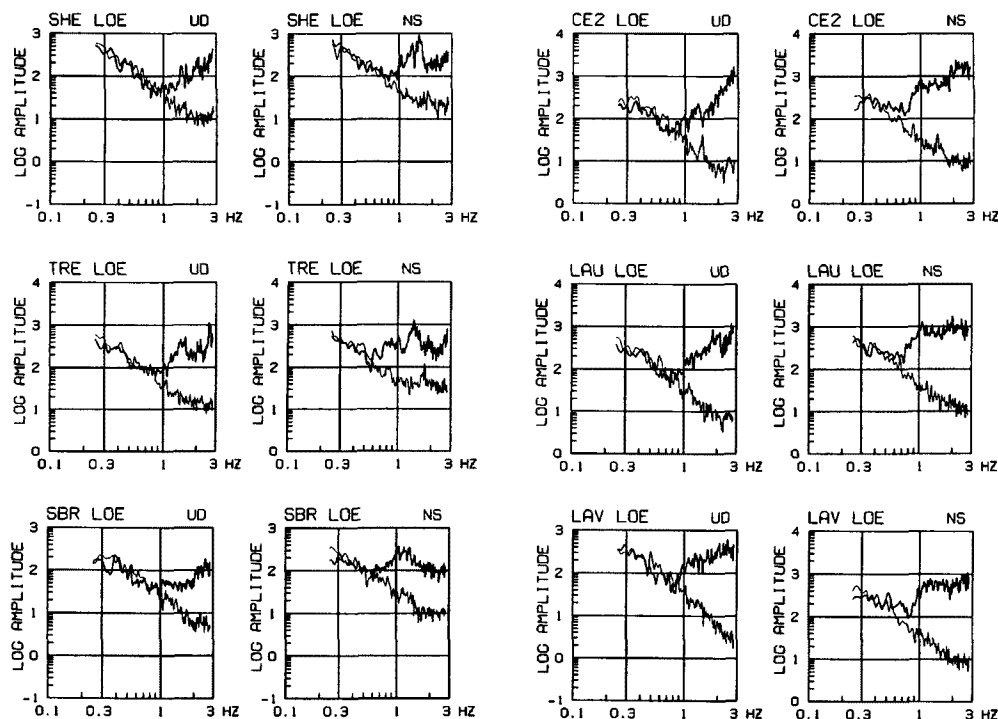


Fig. 14. Examples of amplitude spectra and their variation with site locations in Santa Cruz City. UD and NS components are shown.

4. 議論とまとめ

前節では、Loma Prieta地震の被害地域において、長周期微動の地盤による増幅作用が概ね表層地質の種類や物理的性質、また基盤岩の深さ等とよい相関を有することが示された。しかしながら、基盤岩の深さが同程度の地盤上において増幅率が大きく異なったり、増幅特性に水平方向の異方性がある等サイト直下の地下構造のみでは理解し難い特性が見出された。ここでは、これらの特性に若干の考察を加える。

短周期の微動の卓越周期はS波の多重反射を仮定して1/4波長則により説明されている。また、微動を表面波とする立場においても、構造のインピーダンス比が大きい場合はAiry相の周波数が1/4波長則で近似できる¹⁷⁾とされている。これらは、いずれも地下構造が平行成層構造で近似できる場合の議論であり、波長の長い長周期の微動に対してはこの様な仮定は困難であろう。

Drake (1980) は不規則な基盤構造を有する地盤に入射するLove波とRayleigh波の振幅分布をFEMにより計算した¹⁸⁾。彼の結果によると、基本モードの波の入射に対し、地盤側で高次モードの波が生成して伝播するため、モード間に干渉が起こり振幅が境界からの距離により変化する。このため、地盤上の震動特性は平行成層構造から予測されるものとは異なったものになる。この計算結果はここでの観測結果の説明に利用し得る。

水平成分における増幅率の異方性も、基盤構造における水平方向の変化の伝播表面波に対する影響と考えられる。すなわち、堆積地盤と岩盤との境界付近では、伝播する波の1波長内の弾性定数や基盤岩の深さ等の物理的性質が、境界に平行な方向と直角な方向とで大きく異なっており、これがeffectiveな物性

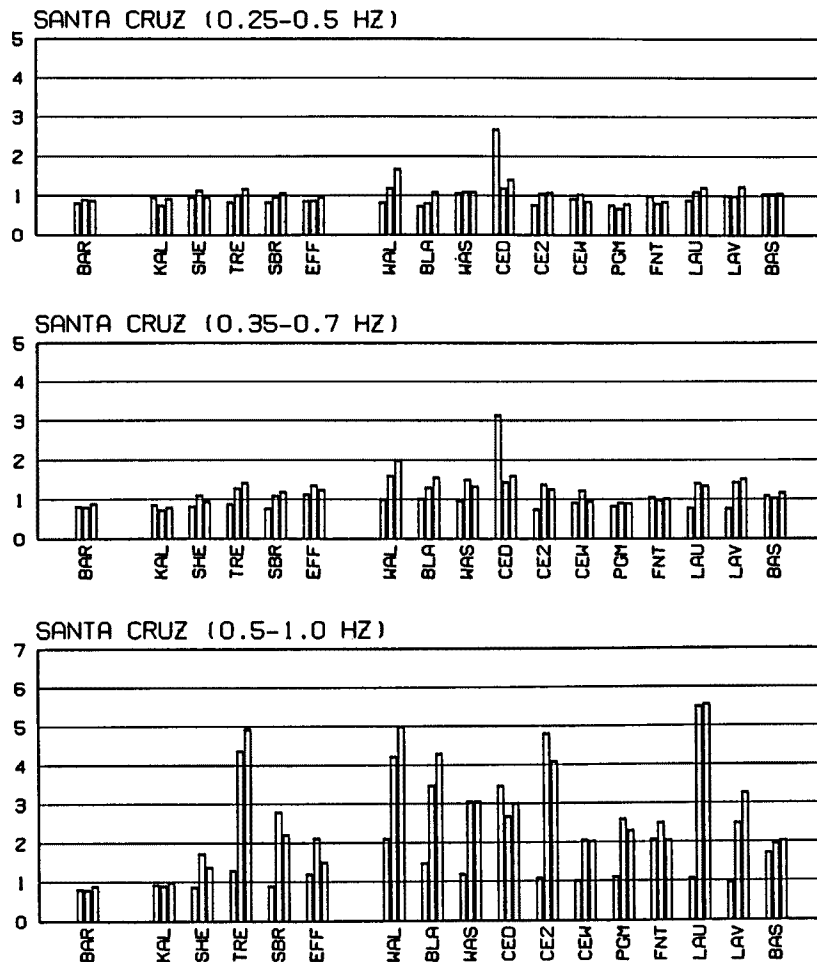


Fig. 15. Averaged spectral ratios for given frequency bands in Santa Cruz City. Left bar denotes UD component, and center and right bars denote horizontal components of NS and EW, respectively.

Table 2. Comparison of mean amplification factors for frequency range of 0.5–1.0 Hz between terrace sites and Alluvial sites in Santa Cruz City

Components	terrace	Alluvium
UD	1.03 ± 0.17	1.56 ± 0.72
NS	2.37 ± 1.17	3.20 ± 1.10
EW	2.19 ± 1.42	3.32 ± 1.18

に異方性を付与するため増幅特性の異方性を惹起したと推察される。

このような性質は基盤岩の3次元構造に支配されるため、地下構造が詳細に分かっていない地盤における震動特性推定とこれによる地盤マイクロゾーニングに長周期の微動観測が有効であることを示すものであろう。

最後に Loma Prieta 地震の被害地域における長周期微動観測結果について次の様にまとめることができる。

(1) 微動の同時観測に基づく地盤/岩盤のスペクトル比により、観測サイト固有の地盤による増幅特性を評価できる。

(2) 地盤による増幅の周波数特性は直下の基盤岩の深さと堆積地盤・人工地盤の物理的性質のみならず基盤岩の形状にも依存している。

- (3) 水平動成分の増幅率は上下動成分に比べて大きい。これは、堆積層の低い剛性率に関係する。
 - (4) 地盤の縁端部では水平成分の増幅率に地質構造区分の方向に関係する異方性が見られる。これは基盤岩の3次元構造に関係する。
 - (5) 岩盤サイトにおいて岩盤の地質年代に関係した振幅増加が示唆される。
- 本論では主に微動特性と地質構造との関係を述べた。同様の議論が文献19に述べられている。また、Loma Prieta 地震強震記録との比較については文献3, 20を参照されたい。

謝 辞

1章で述べたように、本研究はUSGSのM. Celebi, R. D. Borchardt 両博士との協同研究として行われた。観測、解析、解釈の全過程で密接な協力関係を保つことができた。両博士の努力に深く感謝する。基準観測点の設置と観測においてS. Guilhamet氏 (BIS), Stanford 大学 A. S. Kiremidjian 教授 (KIR), California 大学 Santa Cruz 校 Lick Observatory Electronics Lab. の T. P. Ricketts 氏 (LOE) の便宜を仰いだ。まだ、Princeton 大学篠塚正宣教授 (都市耐震センター客員教授) には計画の段階から御議論頂き、研究遂行が円滑に行くよう御助力頂いた。これらの方々に記して感謝する。

本研究は特定研究「長周期微動を用いた都市地盤の地震危険度評価法に関する研究」の一部として行われた。また、研究費の一部は科学研究費「都市地震防災のためのマイクロゾーニング技法の高精度化の研究」(一般(B), 課題番号01460170)に依った。

参 考 文 献

- 1) 亀田弘行編: 1989年ロマプリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究, 科研費突発災害研究成果, No. B-1-3, 1990.
- 2) 亀田弘行・高田至郎・岩井哲・能島暢呂・篠塚正宣: ロマ・プリエタ地震におけるSanta Cruz市の災害と対応/亀田弘行・岩井哲・北原昭男・能島暢呂: 建物および橋梁の被害調査, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第5号, 1991.
- 3) Akamatsu J., M. Fujita, H. Kameda, M. Celebi and R. D. Borchardt: Assessment of the Effects of Local Geology Using Long-Period Microtremors and the 1989 Loma Prieta Earthquakes Recordings, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第6号, 1991.
- 4) 亀田弘行・浅岡克彦・小川信行・能島暢呂: ロマ・プリエ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, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第7号, 1991.
- 5) Akamatsu, J., M. Fujita and K. Nishimura: Vibrational Characteristics of Microseisms and Their Application to Microzoning in a Sedimentary Basin, J. Phys. Earth, 39, 1991 (in press).
- 6) Borchardt, R. D. and G. Glassmoyer: On the Influence of Local Geologic Deposits and Crustal Structure on Ground Motions Generated by the Loma Prieta Earthquake in the San Francisco Bay Region, California, Bull. Seis. Soc. Am., 1991 (in press).
- 7) Borchardt, R. D., J. F. Gibbs and K. R. Lajoie: Maps Showing Maximum Earthquake Intensity Predicted in the Southern San Francisco Bay Region, California, for Large Earthquake on the San Andreas and Hayward Faults, U. S. Geological Survey, MAP MF-709, 1977.
- 8) Atwater, B. F., C. W. Hedel and E. J. Helly: Late Quaternary Dispositional History, Holocene Sea-Level Changes, and Vertical Crustal Movement, Southern San Francisco

- Bay, California, U. S. Geological Survey Professional Paper 1014, 1977.
- 9) Bishop, C. C. and J. W. Williams : Thickness of Alluvium, Santa Clara County, California, State of Calif., The Resources Agency, Dep. of Conservation, Special Report 97, 1974.
 - 10) Hensolt, W. H. and E. E. Brabb : Maps Showing Elevation of Bedrock and Implications for Design of Engineered Structures to Withstand Earthquake Shaking in San Mateo County, California, U. S. Geological Survey Open-File Report 90-496, 1990.
 - 11) Clark, J. C. : Geologic Map and Sections of the Felton-Santa Cruz Area, Santa Cruz County, California, USGS Professional Paper 1168, 1981.
 - 12) King, K., D. Carver, R. Williams, D. Worley, E. Cranswick and M. Meremonte : Santa Cruz Seismic Investigations Following the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake, U. S. Geological Survey Open-File Report, 90-307, 1990.
 - 13) 森井互・西村敬一：ライブラリ・プログラムの紹介 (71) —等間隔サンプルデータのフィルタリング—, 京都大学大型計算機センター広報, Vol. 19, No. 4, 1986, pp.312-318.
 - 14) 西村敬一：私信, 1990.
 - 15) Aki, K. and P. G. Richards : Quantitative Seismology Theory and Methods, W. E. Freeman and Company, Newyork, pp.506-509.
 - 16) Akamatsu, J. : Seismic Amplification by Soil Deposits Inferred from Vibrational Characteristics of Microseisms, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 34, 1984, pp. 105-127.
 - 17) Allam, A. and E. Shima : An Investigation into the Nature of Microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol. 45, 1967, pp. 43-59.
 - 18) Drake, L. A. : Love and Rayleigh Waves in an Irregular Soil Layer, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 70, 1980, pp. 571-582.
 - 19) Akamatsu, J., M. Fujita and H. Kameda : Long-Period (1-10 s) Microtremor Measurement in the Areas Affected by the 1989 Loma Prieta Earthquake, Proc. 4th Int'l Conf. on Seismic Zonation, Vol. II, 1991, pp. 393-400.
 - 20) Kameda, H., M. Celebi, R. D. Borchardt, J. Akamatsu and M. Fujita : Comparative Observation of Soil Amplification from Long-Period Microtremors and Earthquake Recordings for Seismic Microzonation, Proc. 4th Int'l Conf. on Seismic Zonation, Vol. III, 1991, pp. 375-382.