

Loma Prieta地震記録に基づいた表層地盤の地震動増幅特性

鈴木 猛康*

田中 港*

Loma Prieta地震におけるFree Field上の74地点の強震記録を用い、表層地盤の地震動増幅特性について検討を行った。その結果、卓越振動数が1 Hz程度のいわゆる第Ⅲ種地盤の地震動増幅特性は地盤構成によって千差万別であり、経済的かつ合理的な耐震設計を行うためには、表層地盤の地盤構成および工学的基盤への入力地震動に応じた地盤の非線形性を十分考慮しなければならないことが示された。

キーワード：距離減衰、表層地盤、卓越振動、地震動増幅

1. はじめに

土木構造物の耐震設計では、応答スペクトル法が随所で採用されている。応答スペクトル法では、まず地盤をその卓越周期によって3つに分類し、地盤種別毎に応答スペクトルを設定している。道路橋示方書¹⁾によれば、周期 $T > 0.6$ 秒の地盤は第Ⅲ種地盤に分類されている。いわゆる表層地盤の多くは第Ⅲ種地盤に分類され、したがって耐震設計では同一の応答スペクトルを用いることになる。しかしながら、表層地盤の地盤構成は千差万別であり、卓越周期の同じ表層地盤でも地震動増幅特性は大きく異なるのが一般的である。とくに我国のように複雑な沖積地盤では、表層地盤構成の違いは、構造物の耐震性評価に大きく影響するので慎重に行う必要がある。

筆者らは、S波速度 $V_s = 600 \sim 700$ m/sec程度のいわゆる工学的基盤における地震動の距離減衰特性は、それほど大きくばらつかないと仮定し、Loma Prieta地震の強震記録を用いて表層地盤の地震動増幅特性について検討した²⁾。その結果、表層地盤の最大加速度にはある限界レベルが存在すること、第Ⅲ種地盤の卓越振動数領域で地震動の増幅倍率がピークとなるが、この振動数領域の増幅倍率は大きくばらつくことが定性的にわかった。本論文では、上記の問題点に対する1つのアプローチとして、最初に同じ卓越周期の地盤でも地震動の増幅特性に大きな相違があることを示し、次いでLoma Prieta地震の強震記録と新たに加わった強震観測サイトの地盤データを用いて、実際の表層地盤の地震動増幅の程度を地盤の卓越振動数をパラメータとして整理し、考察を行ったので報告する。

2. 地盤構成と周波数応答関数

図-1に示すような4つのタイプの表層地盤を考える。

タイプ1の地盤は表層厚が薄い軟弱な単一水平地盤であり、タイプ2は層厚の厚いやや硬めの単一水平地盤、タイプ3、タイプ4はどちらも4層構造であるが、それぞれS波速度構造が異なる水平成層地盤である。以上4タイプの表層地盤モデルは、Fig.1のタイプ3で示す物性値を有する同じ工学的基盤上にあり、(1)式の簡易式で与えられる卓越周期 T がすべて1.0秒(1 Hz)である。

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{4H_i}{V_{s,i}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $V_{s,i}$ は第 i 層のS波速度、 H_i は第 i 層の層厚であり、 N は表層地盤の土層数である。

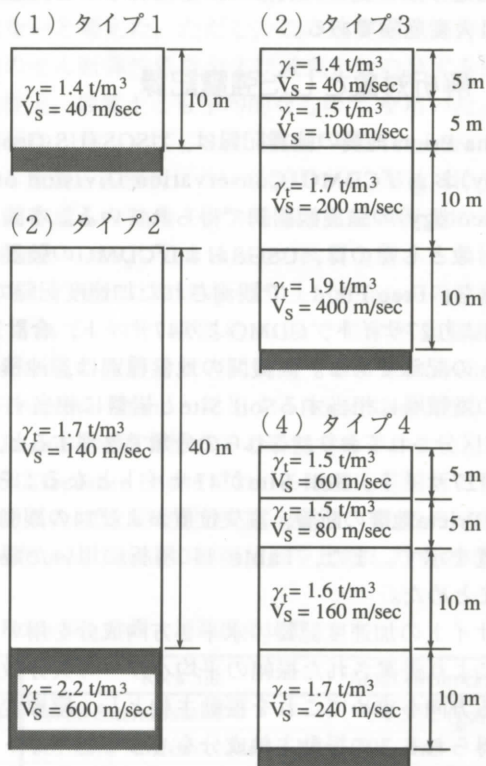


Fig.1 卓越周期 $T=1$ 秒の表層地盤モデル

*技術研究所 力学系研究開発部 土木グループ

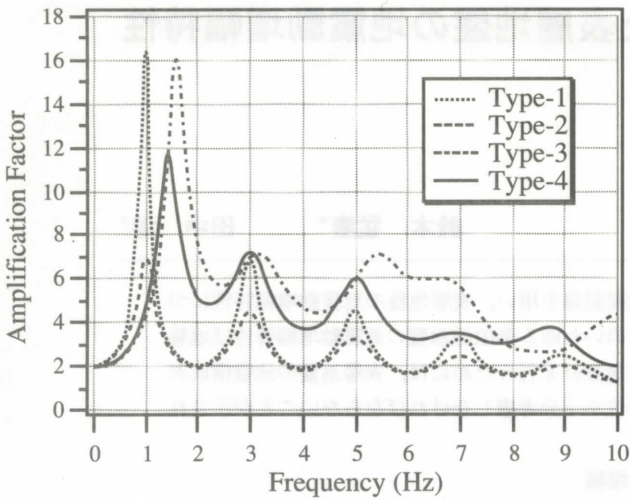


Fig.2 周波数応答関数の比較

基盤への振幅1の入射波に対する地表面での振幅，すなわち応答倍率を表す周波数応答関数を，重複反射理論を用いて各タイプの地盤モデルについて求め，Fig.2にプロットした。なお解析に用いたQ値は，周波数依存性を考慮せず，表層部ではすべての土層で10とし，基盤では20とした。(1)式は一般的に指摘されているように³⁾，多層地盤モデルでは重複反射理論に比べて卓越振動数を低く(周期を長く)算定している。また，応答倍率はこれから4モデルの基本せん断振動数で，7~17倍と大きくばらつくことがわかる。すなわち，表層地盤に関しては，現在の地盤分類程度で大別して，平均的な応答特性を与えるのは大変危険である。

3. 解析対象とした強震記録

Loma Prieta地震の強震記録は，USGS (US Geological Survey) およびCDMG (Conservation Division of Mine and Geology) の強震観測網で得られている。本論文で解析の対象としたのは，USGSおよびCDMGの強震記録⁴⁾のうち，Free Field上で観測された加速度記録であり，USGSより27サイト，CDMGより47サイト，合計74観測サイトの記録である。両機関の地盤種別は，沖積および洪積の堆積層に相当するSoil Siteと岩盤に相当するRock Siteに区分されており，これらの分類で整理すると，Rock Siteが27サイト，Soil Siteが47サイトとなる。Fig.3にLoma Prieta地震の断層，震央位置および74の観測サイトの位置を示す。また，Table 1に解析に用いた観測サイトをまとめた。

各サイトの加速度記録の水平2方向成分を用いて，松島⁶⁾により提案された振幅の平均パワーの共分散が最大となる方向を求めてこれを振動主軸とし，座標変換によって得られるこの振動主軸成分をもって各サイトの地震動を代表させることにする。振動主軸は江尻等⁷⁾の解析結果と同じく，断層の北に位置するSan Francisco周辺の

Table 1 強震観測サイトのリスト

Rock Site	d (km)	A (gal)
APEEL ARRAY STATION 9, CRYSTAL SPRINGS RES.	42.395	124.160
BEAR VALLEY STATION 7 - PINNACLES NATL MONUMENT	67.815	48.560
BERKELEY - LAWRENCE BERKELEY LAB	82.208	115.260
CALAVERAS ARRAY - CHERRY FLAT RESERVOIR	37.821	76.220
GILROY #1 - GAVILAN COLLEGE, WATER TANK	13.601	423.850
HAYWARD - CSUH STADIUM GROUNDS	56.049	84.260
LEXINGTON DAM	10.275	442.640
LEXINGTON DAM	10.275	521.580
LEXINGTON DAM	10.275	468.780
MARTINEZ VA HOSPITAL - BSMT	93.538	65.270
PALO ALTO VA HOSPITAL - BLDG 1, BASEMENT	28.498	344.610
PIEDMONT - PIEDMONT JR. HIGH GROUNDS	76.151	96.750
POINT BONITA	84.892	73.610
SAN FRANCISCO - CLIFF HOUSE	80.588	101.360
SAN FRANCISCO - DIAMOND HEIGHTS	73.280	105.670
SAN FRANCISCO - PACIFIC HEIGHTS	78.269	68.250
SAN FRANCISCO - PRESIDIO	79.519	191.310
SAN FRANCISCO - RINCON HILL	76.823	97.250
SAN FRANCISCO - TELEGRAPH HILL	78.546	89.920
SAN FRANCISCO FIRE STN #17, 1295 SHAFTER	70.335	102.240
SANTA CRUZ - UCSC/LICK LAB	13.180	484.900
SO. SAN FRANCISCO - SIERRA PT.	65.049	105.780
STANFORD UNIVERSITY - SLAC TEST LAB	32.451	274.400
UPPER CRYSTAL SPRINGS RES. - PULGAS	43.795	146.570
UPPER CRYSTAL SPRINGS RES. - SKYLINE	43.115	105.480
WOODSIDE - FIRE STATION	35.605	104.320
YERBA BUENA ISLAND	77.910	68.780
Soil Site	d (km)	A (gal)
AGNEW - AGNEWS STATE HOSPITAL	28.664	152.630
APEEL ARRAY #2, REDWOOD CITY	44.339	272.080
BEAR VALLEY STATION 10 - WEBB RESIDENCE	66.477	120.300
BEAR VALLEY STATION 12 - WILLIAMS RANCH	50.409	153.190
BEAR VALLEY STATION 5 - CALLENS RANCH	55.680	71.560
CALAVERAS ARRAY - DUBLIN FIRE STATION	62.790	75.740
CALAVERAS ARRAY - FREMONT, EMERSON CT.	43.948	182.970
CALAVERAS ARRAY - SUNOL FIRE STATION	51.781	89.940
CALAVERAS RESERVOIR - GND	39.924	113.550
CAPITOLA - FIRE STATION	9.307	528.930
CORRALITOS - EUREKA CANYON RD.	5.338	632.970
COYOTE LAKE DAM - DOWNSTREAM	26.380	180.220
COYOTE LAKE DAM - SOUTHWEST ABUTMENT	25.926	461.040
EMERYVILLE - 6363 CHRISTIE AVE, S GROUND SITE	79.729	241.180
FOSTER CITY - REDWOOD SHORES	46.807	286.520
FOSTER CITY, 355 MENHADEN CT.	47.880	89.110
FREMONT - MISSION SAN JOSE	43.649	133.700
GILROY - 2-STORY HIST COMMERCIAL BLDG.	15.924	274.150
GILROY - GAVILAN COLL., PHYS. SCI. BLDG.	13.924	361.020
GILROY #2 - HWY 101/BOLSA RD. MOTEL	15.316	394.580
GILROY #3 - GILROY SEWAGE PLANT	17.159	524.930
GILROY #4 - SAN YSIDRO SCHOOL	19.179	403.700
GILROY #6 - SAN YSIDRO	23.270	158.100
GILROY #7 - MANTELLI RANCH	27.552	315.150
HALLS VALLEY - GRANT PARK	35.283	108.710
HAYWARD - BART STATION	57.556	155.350
HAYWARD - MUIR SCHOOL	56.097	166.360
HOLLISTER - SOUTH STREET AND PINE DRIVE	29.053	362.820
HOLLISTER AIRPORT (DIFFERENTIAL ARRAY)	26.722	274.760
HOLLISTER CITY HALL ANNEX - BASEMENT	28.534	229.910
HOLLISTER, SAGO VAULT	29.250	59.190
LARKSPUR FERRY TERMINAL	96.915	134.740
LIVERMORE VA HOSPITAL, BLDG. 62 - BSMT.	58.612	51.000
MENLO PARK VA HOSPITAL - BLDG 137	36.189	265.340
OAKLAND - 2-STORY OFFICE BLDG.	75.005	243.310
OAKLAND - OUTER HARBOR WHARF	77.221	319.150
OLEMA - POINT REYES RANGER STATION	118.903	176.150
RICHMOND - CITY HALL PARKING LOT	90.600	141.940
SALINAS - JOHN AND WORK ST.	28.481	114.340
SAN FRANCISCO - 18-STORY COMMERCIAL BLDG	77.376	164.760
SAN FRANCISCO INT. AIRPORT	60.403	376.510
SAN FRANCISCO, TRANSAMERICA BLDG - BASEMENT	78.193	125.390
SARATOGA - ALOHA AVE.	11.575	459.710
STANFORD PARKING GARAGE, GRND LEVEL	32.729	320.460
SUNNYVALE - COLTON AVENUE	33.053	231.760
TREASURE ISLAND	79.877	148.810
U.C. BERKELEY, STRAWBERRY CANYON	81.391	75.070

d...断層最短距離 A...最大加速度

観測サイトでは断層の走行と直交する方向となり，一部を除けばほとんど地盤の不整形性に起因するような振動主軸の乱れは確認されなかった。

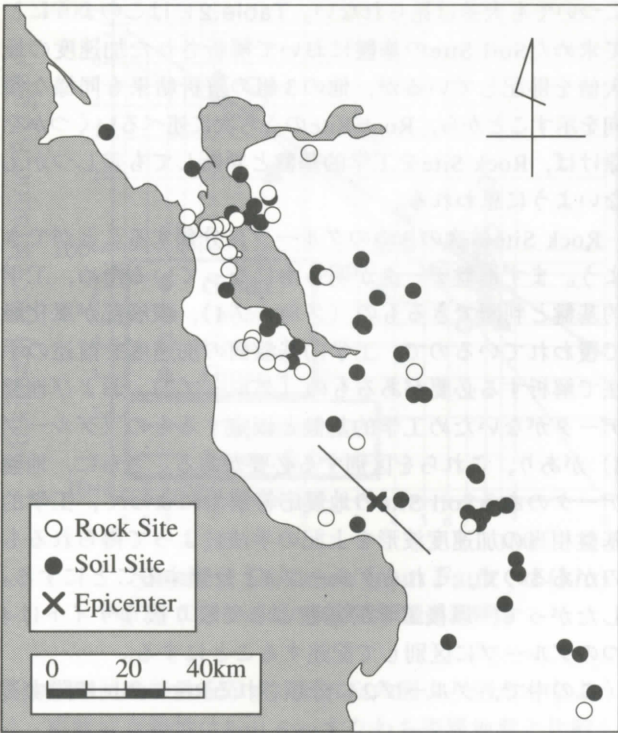


Fig.3 Loma Prieta地震の断層、震央と解析対象とした強震観測サイトの位置

4. 地震応答解析

USGSではいくつかの観測サイトでボーリング調査およびボーリング孔を利用したPS検層を実施している⁸⁾。この中でRock Siteに分類されているサイトのS波速度 V_s は、だいたい600～700 m/secであり、いわゆる工学的基盤に相当している。またLoma Prieta地震に関する日米共同研究により、さらに強震観測地点付近でPS検層が追加実施されており、33の強震観測サイトの地盤データとしてまとめられている⁹⁾。これらのデータの中でRock Siteに分類されているサイトのいくつかの表層部は、 $V_s=200$ m/sec程度あるいはそれ以下の風化層で覆われていることがわかった。

CaliforniaでRock Siteと分類されている観測サイトが、工学的基盤と見なせるか否かを検討するため、まずTable 1に示すサイトのうち、断層最短距離が比較的近いSoil SiteとRock Siteを4組選定した。これらをTable 2に示す。これらのSoil Siteでは、PS検層によって地盤構造が明らかにされているので地盤をモデル化し、観測より得られた加速度波形を地表から入射したときの工学的基盤上 ($V_s=$

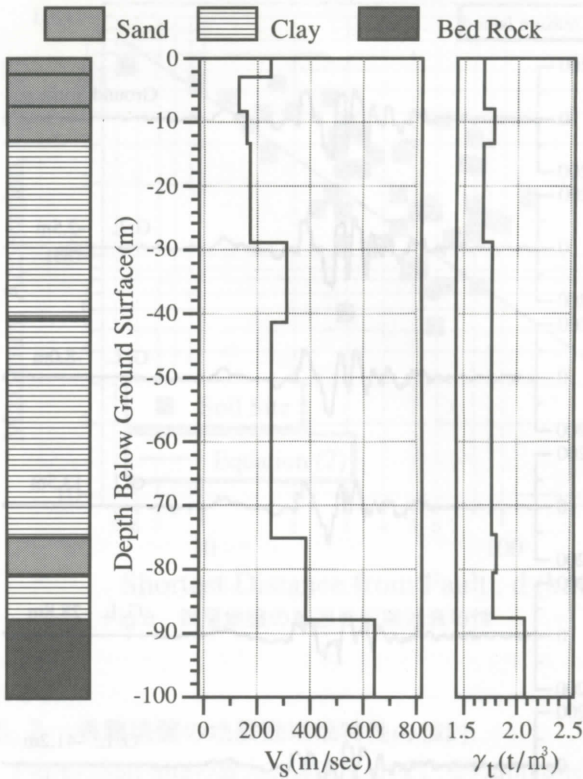


Fig.4 Treasure Islandの地盤モデル

600～700 m/sec)の加速度を、重複反射理論によって求めることができる。これと断層最短距離の近いRock Siteの観測波形とを比較し、両者の加速度波形がだいたい一致し、かつ最大加速度がほぼ等しいのであれば、Rock Siteの最大加速度を工学的基盤上の最大加速度と置き換えても問題はないと考えた。ただし、この地震応答解析に用いる地盤のせん断弾性係数および減衰定数のひずみ依存性は、粘性土、砂質土とも平均的なもの¹⁰⁾を用いた。

本解析の一例として、Soil SiteであるTreasure Islandにおける地震応答解析について説明する。Fig.4に文献8)に従って作成した地盤モデルを示す。この地盤の地表から約30 mまでは $V_s<200$ m/secの砂質土層あるいは粘性土層であり、それ以深は $V_s=250\sim400$ m/secの粘性土層で構成されていて、深度約90 mで工学的基盤相当のFranciscan層の砂岩・頁岩に到達する。なおFranciscan層は、Treasure Islandと対比するRock SiteであるYerba Buena Islandの地表を構成する岩盤である。

Fig.5はTreasure Islandにおける地震応答解析で各深度で解析された加速度時刻歴応答波形と、比較の対象であるYerba Buena Islandの観測波形を比較したものである。

Table.2 応答解析による工学的基盤の最大加速度と Rock Site の最大加速度の比較

Case	Soil Site	Amax (Surface)	Amax (Bedrock)	Rock Site	Amax (Bedrock)
1	Treasure Island	148.810 (gal)	66.986 (gal)	Yerba Buena Island	54.552 (gal)
2	San Francisco Int. Airport	376.510	111.128	So. San Francisco - Sierra Pt.	105.780
3	Oakland - Outer Harbor Wharf	319.150	112.732	Piedmont - Jr. High School	96.750
4	Stanford Parking Garage, G. L.	320.460	128.780	Woodside - Fire Station	104.320

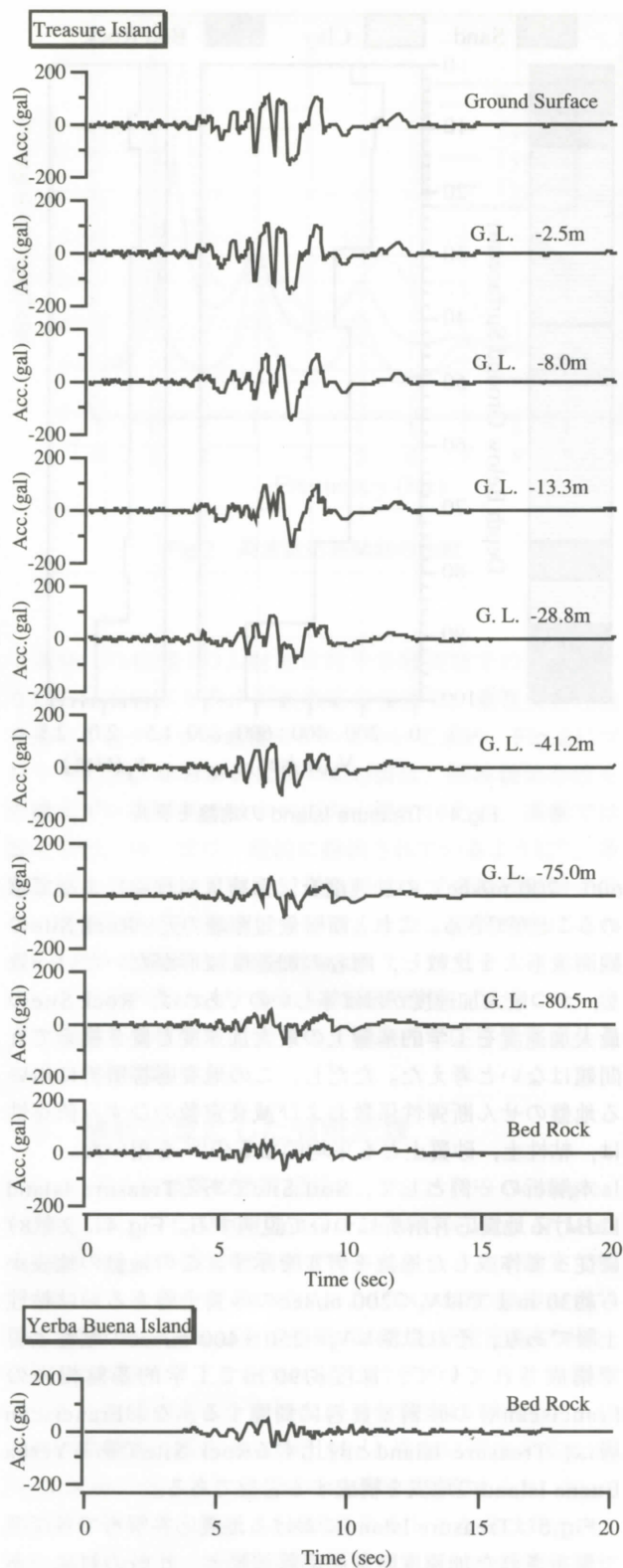


Fig.5 Soil Site の地震応答解析例

図中最上段に位置する波形は、Treasure Islandにおける観測波形であり、本解析の入力波形である。解析されたTreasure Islandの基盤における加速度波形（下から2段目）およびYerba Buena Islandで観測された加速度波形を比較すると、ぴったりとは一致しないまでも、ラフな地盤データと平均的なひずみ依存性曲線を用いた解析にしては、時刻歴応答特性に大きな相違はなく、また振幅

についても大差は見られない。Table.2にはこのようにして求めたSoil Siteの基盤において解析された加速度の最大値を併記しているが、他の3組の解析結果も同様な傾向を示すことから、Rock Siteのうち次に述べるいくつかを除けば、Rock Siteを工学的基盤と判断しても差しつかえないように思われる。

Rock Siteは次の3つのグループに分類することができよう。まず地盤データが明らかになっているため、工学的基盤と判断できるもの（グループ1）、表層部が風化層で覆われているので、工学的基盤面の加速度を前述の手法で解析する必要があるもの（グループ2）、および地盤データがないため工学的基盤と仮定するもの（グループ3）があり、これらを区別する必要がある。さらに、地盤データのあるSoil Siteの地震応答解析によって、工学的基盤相当の加速度波形を上記の手法によって得られるものがあるので、これをグループ4と分類することにする。したがって、以後工学的基盤として取り扱うサイトは4つのグループに区別して記述することにする。

この中で、グループ2に分類されるRock Siteに関する

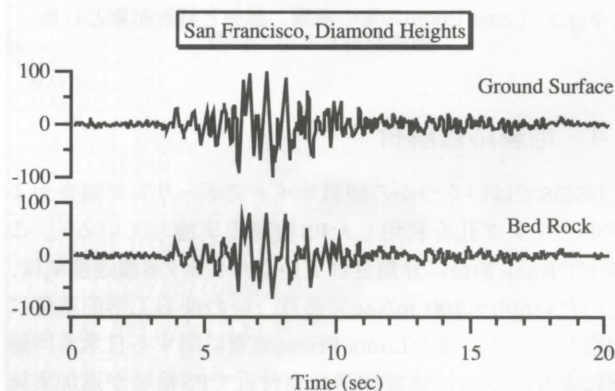


Fig.6 Rock Site の地震応答解析例

地震応答解析例を紹介する。Fig.6はRock Siteに分類されているSan Francisco, Diamond Heightsにおける地震応答解析例である。このサイトは、GL.-12 mまで $V_s=350$ m/sec程度の風化層で覆われている。図中上段が入力波として用いた地表における観測波形であり、下段が解析結果の工学的基盤における波形である。地表で見られる10 Hz前後の卓越振動が基盤では除去された波形となるため、最大値が基盤では約20 gal低減している。解析を実施した他のサイトでも、卓越振動数は異なるものの、ほぼ同様な結果となった。

5. 表層地盤の地震動増幅特性

5.1 工学的基盤の地震動距離減衰特性

工学的基盤のグループ1を◆、2を●、3を○、4を▲として、工学的基盤の地震動距離減衰特性を、横軸に断層最短距離、縦軸に最大加速度をとって描いたのがFig.7である。一方Fig.8には、同様にしてまとめたSoil Siteの地

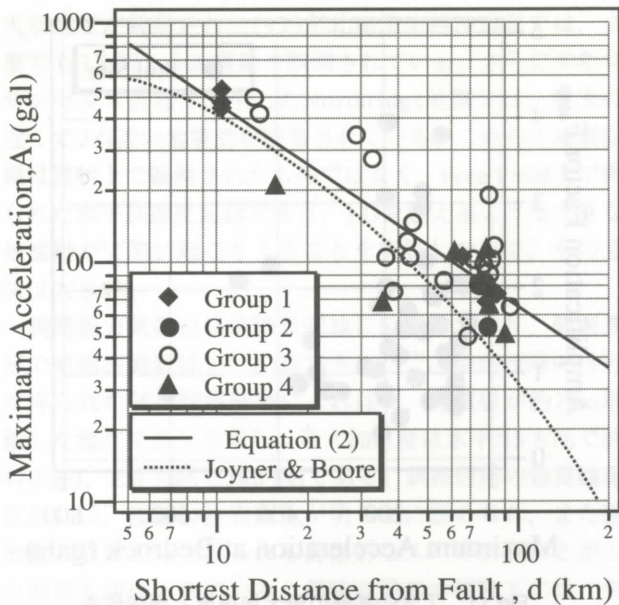


Fig.7 工学的基盤の加速度距離減衰特性

震動距離減衰特性を示す。これらの図より明らかなように、距離減衰特性はSoil Siteすなわち表層地盤と比較して、工学的基盤ではばらつきが小さく、Fig.7のデータを用いて工学的基盤の距離減衰特性を近似式で与えても、それほど大きな問題とはならないと判断される。

距離減衰式としてはいくつかタイプがあるが、Fig.7のプロットは直線的な分布を示しているの、ここでは両対数軸上で単純に直線近似することによって得られる次式を最小自乗法で求め、工学的基盤の最大加速度距離減衰式とした。

$$A_b(d) = 10^{(3.51 - 0.85 \log d)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $A_b(d)$ は断層最短距離 d (km)における工学的基盤の最大加速度(gal)である。Fig.7にはこのようにして設定した工学的基盤の加速度距離減衰に関する近似式と、アメリカでもっとも良く使われている減衰式であるJoyner & Boore式¹¹⁾を示している。Joyner & Boore式はLoma Prieta地震のマグニチュードである $M=7.1$ としたRock Site ($S=0$)の距離減衰式である。Loma Prieta地震の地震動距離減衰特性は、Joyner & Boore式よりも上に位置していることがわかる。

表層地盤についてはFig.8に示すように距離減衰特性のばらつきが大きい。また岩盤サイトの場合は一般に断層破壊のパターンの違いにより、ある震央距離より近い位置では必ずしも距離減衰が十分な精度で近似できない場合が少なくない¹²⁾。その点岩盤を伝播してきた地震動が適度に表層地盤で免震効果(表層地盤で地震動の高振動数成分が十分減衰した下降波が、工学的基盤において上昇波と足し合わせられ、その結果工学的基盤においては断層破壊のパターンを反映した地震動の波形が顕著ではなくなること)を受け、断層破壊の相違が消された工学的基盤では、距離減衰式や距離減衰を考慮した応答スペクトルが近似式によって表現できる可能性が高いと思わ

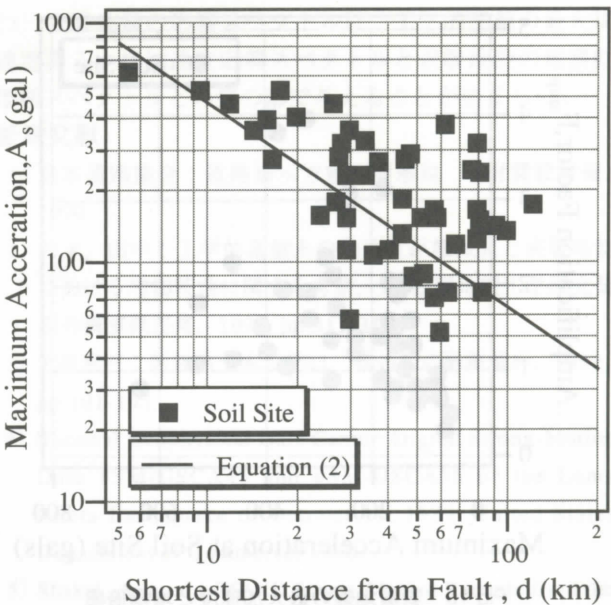


Fig.8 表層地盤の加速度距離減衰特性

れる。
5.2 表層地盤の地震動増幅特性の検討

Fig.8のSoil Siteの最大加速度 $A_s(d)$ を、そのSoil Siteの断層最短距離 d (km)における(3)式で与えられる工学的基盤の最大加速度で除した次式を、ここでは各Soil Siteにおける地震動増幅倍率と定義する。

$$F_{amp}(d) = A_s(d) / A_b(d) \dots\dots\dots (3)$$

解析対象としたSoil Site 47サイトは、観測地震波の最大振幅を示す領域で明らかに表層地盤の卓越振動が現われているサイトであり、各サイトの加速度波形についてスペクトル解析を実施し、その卓越振動数を求めている。

Fig.9は、(3)式による表層地盤の地震動増幅倍率を縦軸に、表層地盤の卓越振動数を横軸にとって、表層地盤の卓越振動数と増幅倍率の関係を示したものである。プロットは0.5~2.0 Hz程度の範囲に集中しており、Soil

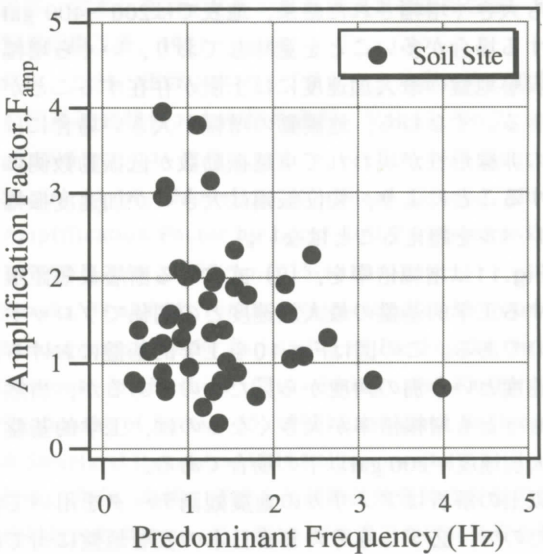


Fig.9 卓越振動数と増幅倍率

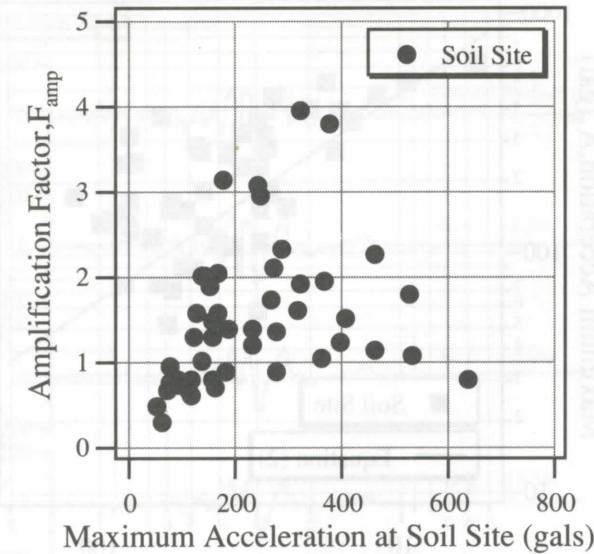


Fig.10 表層地盤の最大加速度と増幅倍率

Siteの8割近くが卓越周期 $T < 0.6$ 秒の第三種地盤に分類されることがわかる。増幅倍率がもっとも大きくなる時の卓越振動数は1 Hz前後であるが、この振動数領域における増幅倍率は0.3~4.0倍と広い範囲にばらついている。また、1.5Hzより卓越振動数の増加とともに増幅倍率は漸減しており、データ数は少ないが、3Hzを超えると増幅倍率は1前後の数値となっている。2章で述べたように、第三種地盤では表層地盤の土層構成により増幅倍率は大きく異なる。2章では線形の範囲内で4つのタイプの表層地盤の増幅倍率が大きくばらつくことを説明したが、震央距離が比較的短く入力地震動が大きい場合には、地盤の非線形性が顕著に現れると、最大加速度の比として定義する増幅倍率は当然1以下になることもある。Fig.9は、このような現象を具体的に示しているものと思われる。

Fig.10は表層地盤の加速度増幅倍率と最大加速度 $A_s(d)$ の関係をプロットしたものである。図は表層地盤でもっとも大きく増幅された結果、地表では200~400 galに到達するケースが多いことを意味しており、いくら増幅しても表層地盤の最大加速度には上限が存在することが推測できる。すなわち、地震動の増幅が大きい場合には、地盤の非線形性が現われて卓越振動数が低振動数側にシフトすることにより、変位振幅は大きいが加速度振幅はあるレベルを超えることはない。

Fig.11は増幅倍率を、(2)式による断層最短距離に相当する工学的基盤の最大加速度との関係でプロットしたものである。この図はFig.10を工学的基盤における最大加速度という別の角度から見たものであるが、当然ながらもっとも増幅倍率が大きくなるのは、工学的基盤での最大加速度が200 gal以下の場合である。

以上の解析はアメリカの地震観測データを用いて実施したので、必ずしもそのまま日本の表層地盤に当てはまるとは限らない。例えば、表層地盤の卓越振動数の分布

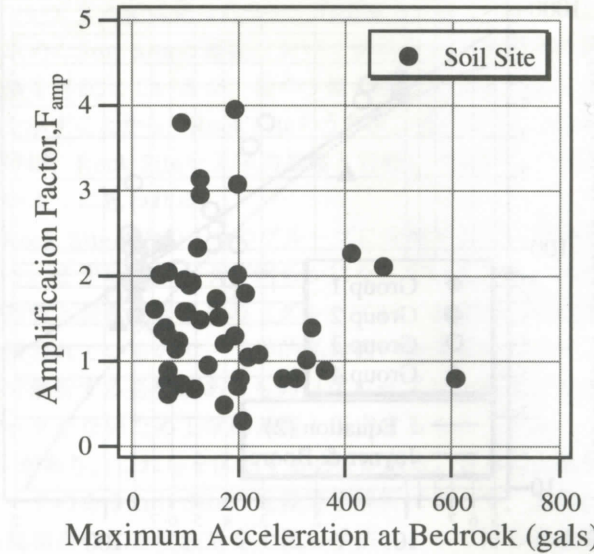


Fig.11 工学的基盤の最大加速度と増幅倍率

や増幅倍率の数値は、地域に応じて変わるものである。工学的基盤の最大加速度距離減衰式についても、断層破壊の形態や伝播経路によって異なるはずであるから、例えば土研型の式としたほうが良いかもしれない¹³⁾。しかし、Fig.9~11にまとめた表層地盤の地震動増幅に関する傾向あるいは特性は、地震が異なっても地域が異なっても変わるものではないであろう。

5.3 考察

Sugito et al.¹⁴⁾はLoma Prieta地震の強震記録を用いて、互いに震央距離の近い何組かのRock SiteとSoil Siteの最大加速度比を求め、これを地震動の増幅倍率として整理している。

$$A_s = \beta_{ma} A_r \dots\dots\dots (3)$$

ここで A_s は表層地盤の加速度、 A_r は岩盤の加速度であり、 β_{ma} は岩盤から表層地盤の地表への加速度のConversion Factorである。その結果、地盤の増幅率すなわち β_{ma} は A_r のレベルが低い領域では表層地盤が厚いほど大きい、加速度レベルが高くなると、増幅率は逆に小さくなることを見いだした。すなわち、地震動レベルがある程度以上となると、地盤の非線形性が顕著に現れるため、増幅倍率が岩盤の加速度レベルに応じてFig.11のようなピークをもつわけである。この考え方を延長すると、Fig.9の地盤の周波数依存性を考慮し、次式のような応答倍率を意味する関数 $F_{amp}(\omega, a_{max})$ で、表層地盤の応答スペクトルを定めることが可能となる。

$$A_s(\omega) = F_{amp}(\omega, a_{max}) A_b(\omega) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ω は円振動数、 a_{max} は工学的基盤の最大加速度である。上式の $A_s(\omega)$ は表層地盤の加速度応答スペクトルであり、 A_b は工学的基盤の加速度応答スペクトルである。 A_b は $A_b = a_{max}$ として距離減衰式を用いて求めてもよいが、工学的基盤における加速度応答スペクトルとして $A_b(\omega)$ の形で与えるのが望ましいだろう。

1993年釧路沖地震では、釧路地方気象台で922 galの最

大加速度が観測され、1993年北海道南西沖地震では、余震で1Gを超える地震動が観測されている。さらに本年ロサンゼルス近郊で発生したNorthridge地震では、震央の近くで2G近い地震動が観測されている。これらの地震記録は建物上で観測されたものではなく、Free Field上で得られた水平加速度記録であり、1Gを超えるような大きな地震動が実際に起こりうることを実証した上で、その意味は大きい。

釧路地方気象台は洪積丘陵地に位置しており、観測波形の卓越振動数は3～5 Hzであった¹⁵⁾。釧路西港の付近で得られた強震観測結果によれば¹⁶⁾、沖積層が約70m堆積した地点でありながら、最大加速度は水平NS方向で約470 gal、EW方向で340 galである。釧路西港の強震観測記録には、波形の長周期化が明らかに認められ、また砂地盤の液状化時に見られる典型的なスパイク状にとがった波形も確認されている。釧路西港の沖積層下には、気象台と同じ洪積ローム層が堆積しており、両観測点間の水平距離はわずか1 kmである。工学的基盤すなわち洪積ローム層への入射波の最大加速度は150～160 gal程度と推定され¹⁵⁾、またこの層においては206 galおよび262 galの最大加速度が観測されている¹⁶⁾。したがって、表層の非線形性が現われた結果、加速度は最大加速度値としては2倍程度にしか増幅しなかったということになる。

地震計の感度が向上して短周期の振動を観測できるようになったので、1Gを超えるような地震動が、今後観測されるケースが増えると思われるが、軟弱な表層地盤ではこれが増幅されて3Gあるいは4Gとなるのではなく、逆に最大加速度は400あるいは500 gal程度に減少すると考えるのが正しい。また釧路地方気象台のように、大きな加速度であっても、卓越振動数が高いと構造物に対してあまり大きな影響は与えないと考えられる。したがって、構造物の耐震設計では、(4)式のように工学的基盤における推定地震動と非線形性を考慮した表層地盤の増幅倍率の積の形で、応答スペクトルを与える必要があると判断される。

6. まとめ

Loma Prieta地震におけるFree Field上の74地点の強震記録を用い、表層地盤の地震動増幅特性について検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 工学的基盤の地震動距離減衰特性は表層地盤に対して比較的ばらつきが小さいため、地震動を距離減衰式を用いて最大加速度あるいは加速度応答スペクトルの形で与えても、大きな誤差とはならない。
- (2) 卓越振動数が1 Hz程度のいわゆる第Ⅲ種地盤の地震動増幅特性は、地盤構成によって千差万別であり、第Ⅲ種地盤における最大加速度には限界値が存在する。したがって、経済的かつ合理的な耐震設計を行うためには、表層地盤の地盤構成および工学的基盤への入力地震動に応じた地盤の非線形性を十分考慮しなければならない。

- (3) 表層地盤の応答スペクトルは、工学的基盤の最大加速度あるいは加速度応答スペクトルと表層地盤の地震動増幅スペクトルとの積の形で与えることが望ましい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1990
- 2) 鈴木，田中：工学的基盤上の加速度距離減衰と表層地盤における増幅特性に関する考察，第22回地震工学研究発表会講演概要集，1993，pp.311-314
- 3) 土岐憲三：新体系土木工学11 構造物の耐震解析，1982，pp.101-105
- 4) National Geophysical Data Center: Digital Strong-Motion Data #SM-USCA45 and #SM-USCA56 of the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, United States Department of Commerce, 1990
- 5) Shakal, A. et al.: CSMIP Strong-Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17, October, 1989, Report No.OSMS 89-06, 1989
- 6) 松島豊：水平地震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, pp.39-44
- 7) 江尻他：Loma Prieta地震における硬質地盤の震動特性，第21回地震工学研究発表会概要集，1990，pp.45-48
- 8) Gibbs, J. F. et al.: Seismic Velocities and Geological Logs from Borehole Measurements at Seven Strong-Motion Stations that Recorded the Loma Prieta Earthquake, USGS Open File Report No.92-287, 1992
- 9) BCS, CURRe: Investigations for Thirty-three Loma Prieta Earthquake Recording Site, UJLPE, 1993
- 10) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1982，pp.198-199
- 11) Joyner, W. D. and Boore, D. M.: Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Proc. of the Special Conference sponsored by ASCE, 1988, pp.43-102
- 12) 田村，鈴木，桑原：メキシコ地震震害調査報告書，昭和写真印刷工業，1991，pp.36
- 13) 常田，田村，相沢：ロマ・ブリェータ地震による地震動の距離減衰特性，土木技術資料，Vol.33, No.7, 1991，pp.56-61
- 14) Sugito et al.: Modeling Nonlinear Ground Motion Amplification Factor by Local Soil Parameters, Proc. 10WCEE, Vol. , 1992, pp.1015-1018
- 15) Suzuki, T. and M. Tanaka: Application of Microtremor Measurements to the Estimation of Earthquake Ground Motions in Kushiro City during the Kushiro-oki Earthquake of January 15, 1993, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994 (to be appeared)
- 16) 松永，井合，亀岡：平成5年釧路沖地震時の岸壁の液状化対策の効果について，第22回地震工学研究発表会概要集，1993，pp.399-402

Amplification Characteristics of Earthquake Motions of a Surface Soil Deposit Based on the Strong Motion Records of the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989

Takeyasu SUZUKI and Minato TANAKA

Summary

Using the strong motion data recorded at 74 sites on free fields during the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989, the amplification characteristics of earthquake ground motions of a surface soil deposit were examined. The results revealed that the amplification characteristics of earthquake motions of the so-called Ground Condition III, in which the predominant frequency is around 1 Hz, varied greatly depending on soil profiles. Accordingly, for economical and efficient earthquake-resistant designs, the soil profiles of a surface layer, as well as the non-linearity of the ground that varies depending on earthquake motions inputted into the bedrock, must be taken into due consideration.

Key words: attenuation, surface soil deposit, predominant frequency, amplification of earthquake motions