

兵庫県南部地震とLoma Prieta地震の表層地盤の増幅特性の比較

(株)熊谷組 鈴木 猛康*

(株)熊谷組 田中 港*

(株)熊谷組 吉谷 進治**

1995年兵庫県南部地震の際観測された強震観測記録のデジタルデータおよび最大値データを用いて、表層地盤の地震動増幅特性を整理した。この結果を、1989年Loma Prieta地震について以前筆者等が同様に実施して得た結果を再度整理し直して比較し、2つの地震による表層地盤の増幅特性について考察した。その結果、増幅倍率をもっとも大きくなるときの卓越振動数は1.5Hz以下で、この周波数領域の増幅倍率の値は広い範囲にばらつくこと、また増幅倍率をもっとも大きくなるときの地表加速度は400gal以下で、このときの基盤（硬質地盤）の最大加速度は100gal以下のときであること等、2つの地震で共通した知見が得られた。

1. はじめに

1995年1月17日兵庫県南部地震では、気象庁、関西地震観測協議会、運輸省、神戸市、関西電力、大阪ガス等の各機関よりデジタルデータが公開されるとともに、官民含め多くの機関が実施している強震観測網より得られた加速度最大値が公表された^{1),2)}。我国では、海溝型地震による震源距離の比較的大きな地震動記録は蓄積されつつあるが、内陸型地震による地震動記録で、マグニチュードが7を超えるような地震動記録はこれまで得られていない。したがって、この地震により得られた地震動データは、我国で今後も発生することが予想される内陸型地震に対する地震動評価にとって極めて貴重である。

鈴木等^{3),4)}は、1989年Loma Prieta地震の強震記録を用い、米国でRock Siteと分類されているS波速度600m/sec程度の地盤を工学的基盤と仮定し、この基盤の地震動に対するSoil Siteでの地震動の比を以て表層地盤における地震動の増幅倍率を定義し、表層地盤の増幅特性を整理した。その結果、卓越周期が0.6secよりも長い第三種地盤では、もっとも大きな増幅倍率を与えるが、第三種地盤でも地盤構造や地震動強度によっては増幅倍率が1以下となる場合があり、表層地盤の増幅特性は多種多様であることが示された。

本論文では、兵庫県南部地震の強震記録を用いて上記と同様な解析を実施し、表層地盤の増幅特性を検討している。得られた解析結果を、兵庫県南部地震とモーメントマグニチュードがほぼ同じである

Loma Prieta地震の強震記録を用いた解析結果との比較したところ、表層地盤の地震動増幅特性について共通した有意な結果が得られたので報告するものである。

2. 地震動の距離減衰特性

(1) 兵庫県南部地震の強震観測データと地盤分類

本解析で用いる強震観測データは、各機関より公表されたデジタルデータと最大加速度値である。すべての強震観測サイトのデジタルデータが入手できれば、解析結果の信頼性が高まるであろうが、デジタルデータが与えられている強震観測サイト数は限られているので、距離減衰の近似については最大加速度値のみのデータも取り混ぜて解析に用いることにした。

本論文ではまず、これらの強震観測サイトを硬質地盤と軟質地盤に分類した。ここで定義する硬質地盤とは、ポーリングデータや地質分類図から岩盤あるいは洪積地盤と判断されたサイト、軟質地盤とは沖積地盤と判断されたサイトのことであり、必ずしも厳密な分類ではないが、この2分類がそれぞれ基盤と表層地盤を代表すると仮定した。

(2) 地震動の方向性

Loma Prieta地震の際は、地震断層を中心とした楕円の接線方向に、地震動の震動主軸が分布する傾向が確認された^{4),5)}。直下型地震である兵庫県南部地震は、地震断層が地表面上に現れる点では、米国カリフォルニアのSan Andreas断層あるいはその枝断層の活動と類似しており、従来我国で使われてきた震央距離や震源距離よりも地震断層からの距離減衰を取り扱う断層最短距離で地震動の距離減衰特性を整理した方が、ばらつきが小さくなることが予想される。

キーワード：兵庫県南部地震、Loma Prieta地震、強震記録、表層地盤、増幅特性

* 技術研究所土木系研究開発部、0298-47-7502

** 大阪支店北大阪営業所、06-843-4544

そこで、デジタルデータの水平2成分を用いて、松島の方法⁶⁾を適用して地震動の震動主軸を解析した。解析の結果、明瞭な震動主軸が確認されたもののみ、地図上にプロットしたのが図-1である。図-1には延長40kmの直線と仮定した地震断層を示しているが、地震動の震動主軸は神戸海洋気象台、神戸大学、ポートアイランド等断層のごく近傍では断層線とほぼ直交する方向に形成されているが、断層からある程度離れると、断層延長方向では断層線に直交する方向に、断層線の北西方向および南東方向では断層線に平行する方向に形成されており、断層線を中心として描いた楕円の接線方向と震動主軸がほぼ一致することがわかる。これは断層から放射状に地震動が伝播したことを示唆しており、したがって地震動の距離減衰特性を整理する際、本論文では断層からの最短距離を指標として用いることとした。

(3) 地震動の距離減衰特性

図-2に兵庫県南部地震の硬質地盤および軟質地盤の強震記録の水平最大加速度246成分を断層最短距離を横軸にしてプロットした。図中にはJoyner&Booreの距離減衰式に $M_w=6.9$ を代入した場合の距離減衰曲線を示しているが、以外にJoyner&Boore式が良い近似を与えていることがわかる。兵庫県南部地震の最大加速度の距離減衰特性については、他の距離減衰式でも良い近似を与えることが報告されている⁸⁾。本論文では距離減衰式の提案を主題とするものではないが、以下の解析において硬質地盤の最大加速度距離減衰式を適用する必要がある。この場合、本地震の地震動距離減衰特性のばらつきが比較的少ないことは、近似によって信頼性の高い距離減衰式が与えられることを意味する。なお以下では、次式の形の距離減衰式を適用することにする。

$$\log(a_g) = -\alpha \log(d) - \beta d + \gamma \quad (1)$$

ここで、 a_g は硬質地盤の最大加速度(gal)、 d は断層最短距離(km)であり、 α 、 β 、 γ は係数である。

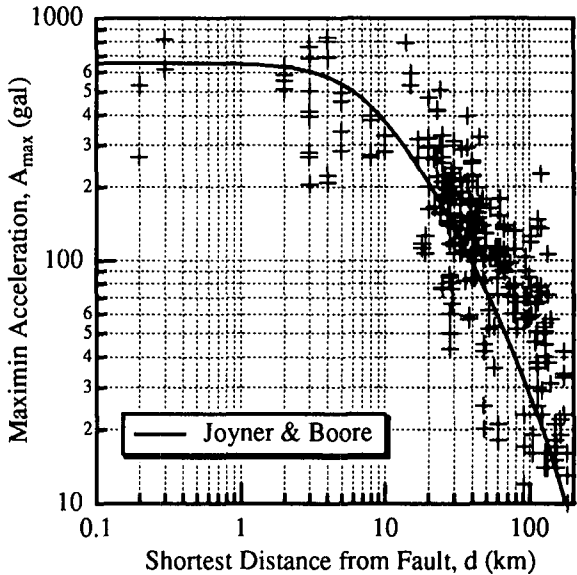


図-2 最大加速度の距離減衰特性とJoyner&Boore式

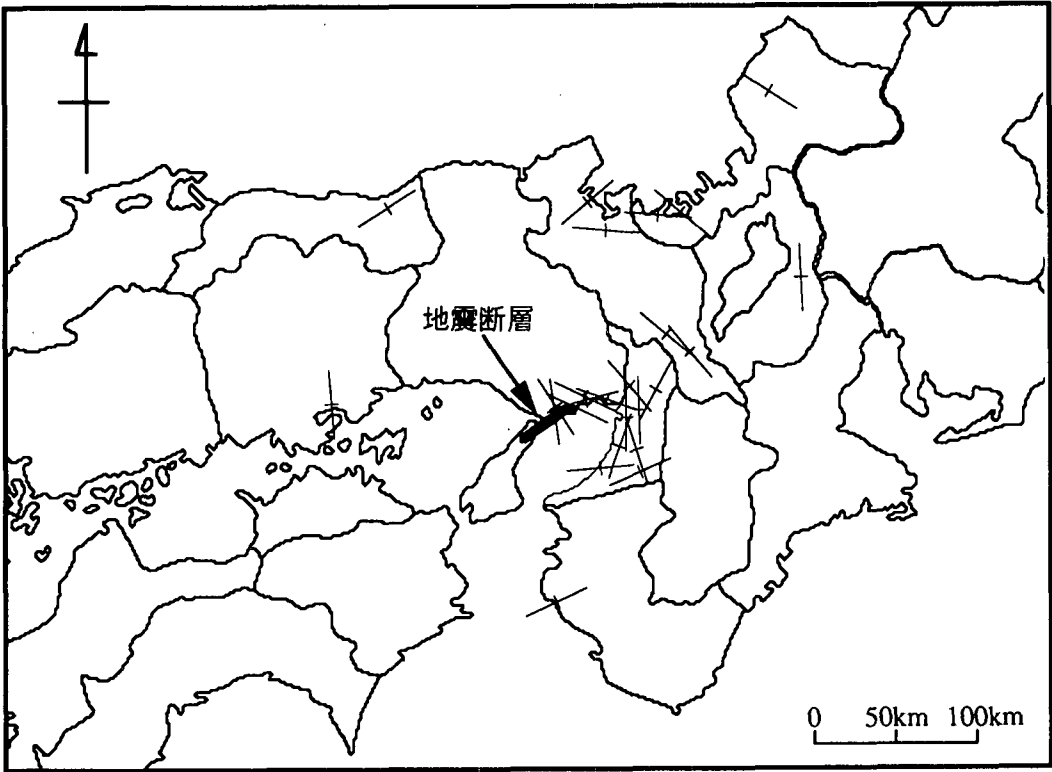


図-1 兵庫県南部地震の地震動震動主軸の分布

3. 表層地盤の地震動増幅特性

(1) 硬質地盤の距離減衰特性

硬質地盤の水平最大加速度83成分の距離減衰特性を図-3にまとめた。図中にはこれらのデータを、(1)式の形で回帰して求めた(2)式で示す距離減衰式の曲線を重ね描きしている。

$$\log(a_b) = -0.089672 \log(d) - 0.012722d + 2.6948 \quad (2)$$

距離減衰式は、 $d = 30\text{km}$ より急激に最大加速度が低下する曲線であり、とくに $d > 100\text{km}$ で最大加速度データのばらつきが大きく、この範囲の硬質地盤の最大加速度を過小評価している恐れはあるが、(2)式は全般的にプロットの良い近似となっている。

(2) 地震動増幅倍率

表層地盤における地震動増幅倍率は、軟質地盤の最大加速度 A_s を、(2)式の距離減衰式に各軟質地盤サイトの断層最短距離 d を与えたときに得られる硬質地盤の最大加速度 A_b で除し、(3)式で与える増幅倍率 $F_{amp}(d)$ を定義することによって代表させることにした。

$$F_{amp}(d) = \frac{A_s(d)}{A_b(d)} \quad (3)$$

上式は、筆者らがLoma Prieta地震の強震記録より増幅倍率を解析する際に用いた表層地盤の地震動増幅倍率の定義式であり、Loma Prieta地震の結果と後ほど比較するため、同じ増幅倍率の定義式を用いることにする。

図-4にデジタルデータの得られた軟質地盤の最大加速度距離減衰特性をまとめた。図中には硬質地盤の距離減衰式も重ね描きした。図-3と比較して距離減衰式がプロットの下方に位置しており、何点かを除けば表層地盤の地震動増幅倍率はほとんど1以上であることがわかる。

4. Loma Prieta地震の強震記録

(1) 硬質地盤の距離減衰特性

Loma Prieta地震の際は、米国でRock Siteに分類され、なおかつ $V_s = 600 \sim 700\text{m/sec}$ 以上の岩盤をRock Siteとし、これより軟らかな地盤をSoil Siteとして、(3)式の増幅倍率を算定した。このとき、文献(3)ではRock Siteの距離減衰式をJoyner&Boore型とし、一方文献(4)では両対数グラフ上で直線回帰を行って距離減衰式を与えた。

兵庫県南部地震とLoma Prieta地震の地震動増幅特性の比較を行う場合は、両地震の地盤分類、距離減衰式、データ整理方法を統一しておく必要がある。地盤分類については、米国と我国との地盤の相違か

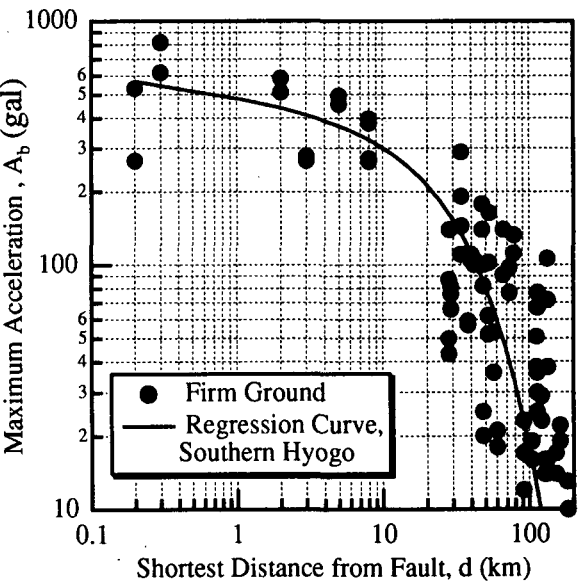


図-3 硬質地盤の最大加速度距離減衰特性

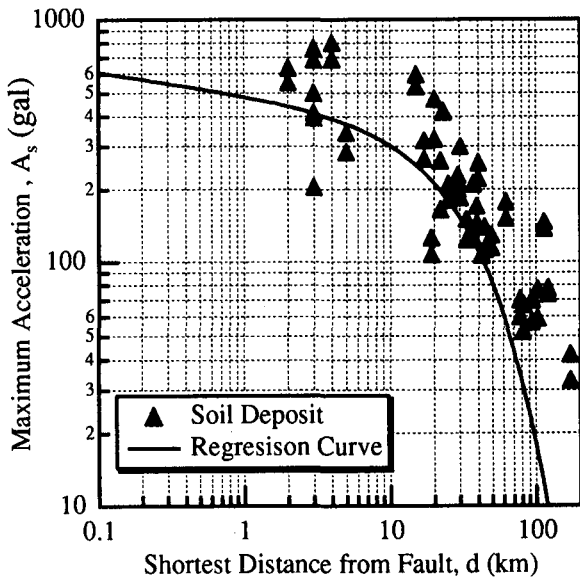


図-4 軟質地盤の最大加速度距離減衰特性

ら、米国の場合我国のように洪積、沖積で区別するのは難しい。Loma Prieta地震の場合はRock Siteを $V_s = 600\text{m/sec}$ 以上としたことを考えると、兵庫県南部地震の硬質地盤より岩盤に近いように思われるが、兵庫県南部地震でも硬質地盤と分類したサイトには岩盤サイトが含まれており、またLoma Prieta地震ではRock Siteの分類となってもかなり厚く風化層で覆われている場合があり、両者ともある程度広い範囲に分布している点では同様と見做しても構わないと思われる。

Loma Prieta地震では、水平2成分の加速度記録より震動主軸方向の加速度波形を求め、この最大値を以て A_s ならびに A_b を決定したが、兵庫県南部地震では、デジタルデータ以外に最大加速度値のみ公開されたデータも用いているため、必ずしもすべての観測サイトで震動主軸の決定ができず、そのため各観

測サイトにつき水平2成分の最大加速度値が用いている。したがって、距離減衰式は兵庫県南部地震の方が小さい加速度を評価しているはずである。

図-5にLoma Prieta地震のRock Site(硬質地盤)における最大加速度の距離減衰特性をプロットした。図中には(1)式の形で回帰を行って求めた回帰曲線も合わせて示した。図-2と比較すると明らかなように、図-5のデータには、 $d = 10\text{km}$ 以内の断層からごく近距離のサイトが含まれておらず、 $d = 30 \sim 100\text{km}$ の断層最短距離にデータが片寄っている。したがって、図中に示した回帰曲線を、硬質地盤の距離減衰式として採用するのは危険である。比較する2地震のモーメントマグニチュードがほぼ等しく、またLoma Prieta地震では震動主軸方向のデータであることを考慮してこれらのデータを図-2上に重ねてプロットした図-6を見れば、兵庫県南部地震のデータと大きな相違が認められないため、Loma Prieta地震のRock Siteの距離減衰式として(2)式を代用する方が適当と判断した。したがって、Loma Prieta地震の地震動増幅倍率を求める際は、(3)式の分母に図-5から得られる回帰式ではなく(2)式を適用する。

(2) 表層地盤の増幅特性

図-7にSoil Site(軟質地盤)の最大加速度距離減衰特性を示す。図中には兵庫県南部地震の硬質地盤の距離減衰式も合わせて示している。兵庫県南部地震の図-4と同様、ほとんどのプロットは兵庫県南部地震の硬質地盤の距離減衰式の上方に分布しており、断層最短距離が大きいほど、地震動増幅倍率が大きくなることが予想される。

5. 地震動増幅特性の比較

(1) 表層地盤の最大加速度と増幅倍率

図-8に兵庫県南部地震の軟質地盤ならびにLoma Prieta地震のSoil Siteを表層地盤として、表層地盤の加速度増幅倍率と最大加速度 $A_s(d)$ の関係をまとめた。 A_s が400galまではプロットのばらつきは少なく、2倍前後の増幅倍率であるが、 A_s が400galより小さくなると次第にプロットのばらつきが大きくなり、また増幅倍率の最大値が大きくなっていることがわかる。このような現象は、基盤への入力地震動が大きくなると地盤の非線形性が顕著に現われ、卓越振動数が低振動数側にシフトするとともに、変位振幅は大きくなっても加速度振幅は無限に増大するわけではなく、表層地盤の最大加速度にはある上限値が存在することが推測できる。もちろん表層地盤構造によっては、増幅倍率が急激に変化する加速度の限界値が400galを大きく超える場合もあるであろ

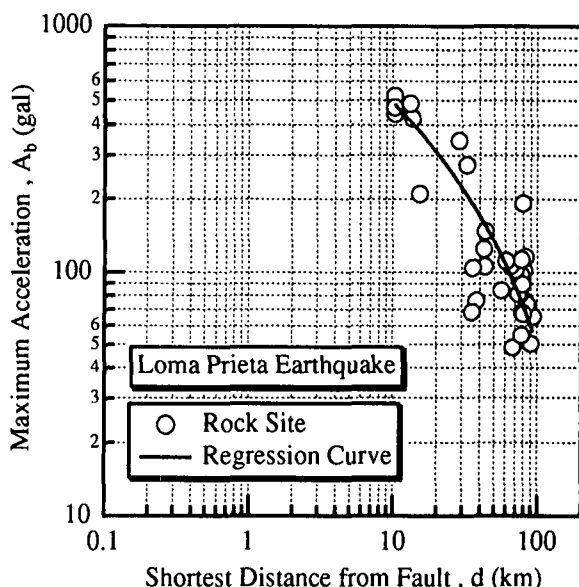


図-5 Loma Prieta地震におけるRock Siteの最大加速度距離減衰特性

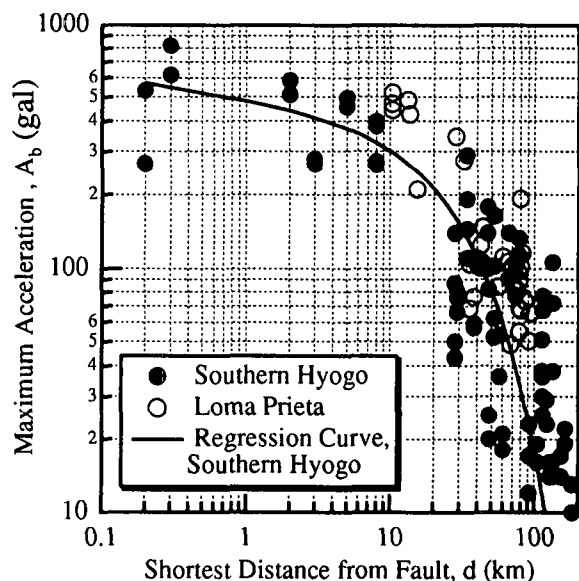


図-6 2地震の最大加速度距離減衰特性の比較

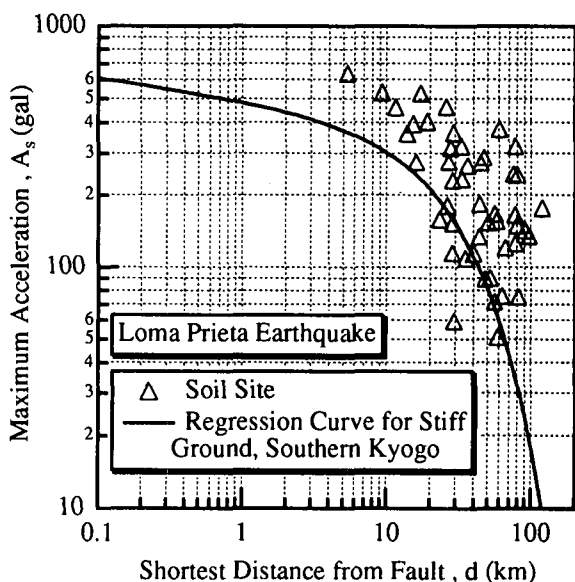


図-7 Soil Siteの加速度距離減衰特性(Loma Prieta)

う。

増幅倍率の最大値は21倍であり、15倍を超えるサイトが3ケースあったが、これらは(2)式による硬質地盤の距離減衰式でばらつきの大きい断層最短距離の領域に位置するため、これらの絶対値はさほど厳密な意味を持たない。したがって、図のプロットの分布性状を明瞭にすることを優先し、3ケースの増幅倍率は15倍に固定して、図-8ならびに以下の図-9、図-10にはプロットすることにした。

図-8のプロットの傾向は両地震で一致しており、大きな相違は認められないが、Loma Prieta地震では $A_s = 200 \sim 400 \text{ gal}$ で比較的大きな増幅倍率を示すプロットが4ケース認められる。これらは米国Californiaと我国の関西地区との地盤の相違に起因していると考えられる。

(2) 工学的基盤の最大加速度と増幅倍率

図-9に兵庫県南部地震の硬質地盤ならびにLoma Prieta地震のRock Siteをまとめて工学的基盤として、表層地盤の加速度増幅倍率と工学的基盤の最大加速度 $A_b(d)$ の関係をまとめた。図-8と比較してばらつきが少なく、両地震で一致した明瞭な傾向が認められる。すなわち、基盤の入力加速度が100gal以上では2倍前後の増幅倍率でとどまっているが、100galよりも小さな入力があった場合には増幅倍率は大きく、またばらつきも増大する。これは基盤の最大加速度が100galを超えると、表層地盤の非線形性が顕著に現れることを意味しているものと理解される。

(3) 卓越振動数と増幅倍率

次に表層地盤の卓越振動数と最大加速度増幅倍率の関係を調べてみる。図-10は表層地盤に分類される観測サイトの中で、さらにデジタルデータあるいはスペクトルや波形から卓越振動数が既知であるサイトを対象に、縦軸を増幅倍率、横軸を表層地盤の卓越振動数としてプロットしたものである。プロットは0.5~2.0Hz程度の範囲に集中しており、表層地盤の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。増幅倍率をもっとも大きくなる時の卓越振動数は1Hz前後であるが、この振動数領域における増幅倍率は非常に広い範囲にばらついている。また、1.5Hz程度より卓越振動数が高くなる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に近い数値となっている。

卓越振動数が0.3~0.7Hzの振動数領域での増幅倍率で、多くのデータが1~2倍に分布している。また増幅倍率が1を下回るデータがいくつか認められる。このように低い卓越振動数の領域に増幅倍率の小さ

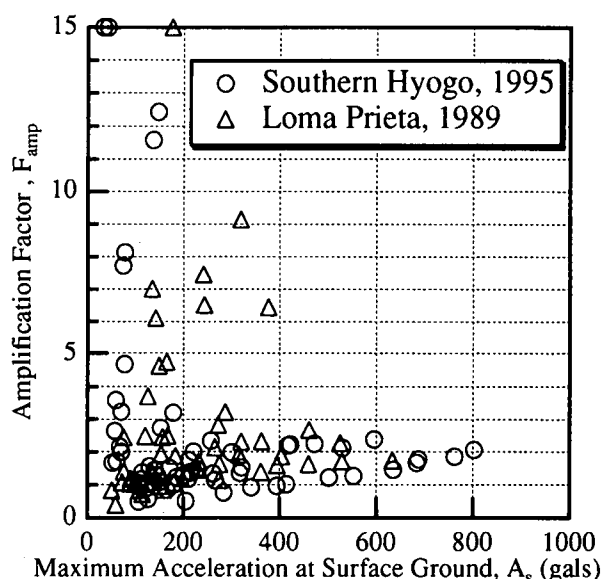


図-8 表層地盤の最大加速度 A_s と増幅倍率 F_{amp}

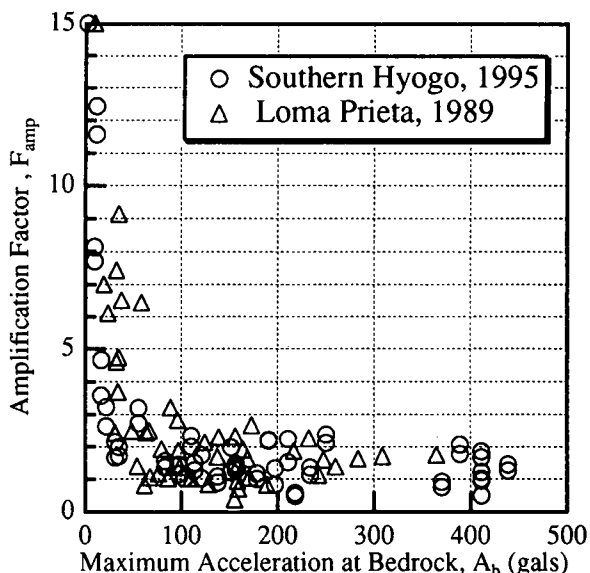


図-9 工学的基盤の最大加速度 A_b と増幅倍率 F_{amp}

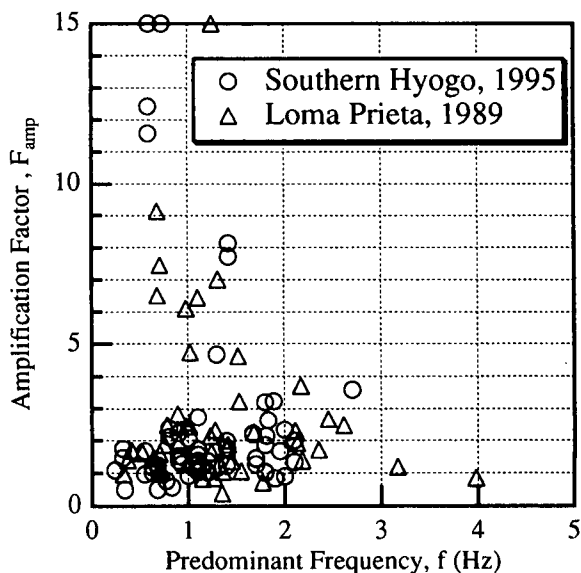


図-10 表層地盤の卓越振動数 f と増幅倍率 F_{amp}

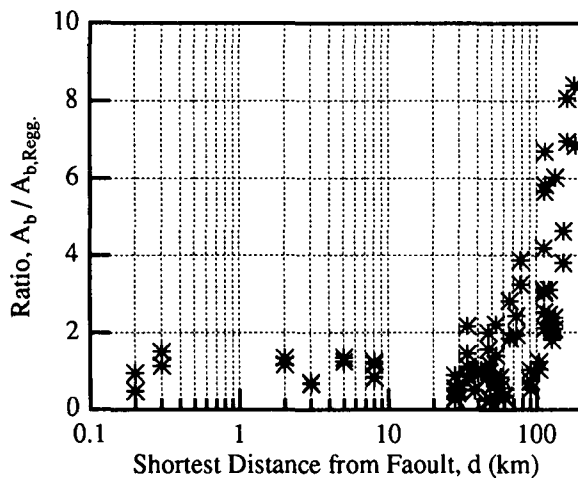


図-11 $A_b(d)/A_{b,Regg.}(d)$ による(2)式適用の妥当性

なデータが集中した理由の1つには、大きな入力があったために非線形性が顕著となり、卓越振動数が低振動数側へシフトしたことがあげられる。本論文で用いている卓越振動数の算定は、あくまでも強震観測のデジタルデータのスペクトルと波形より行っているため、PS検層等から求められる現地盤の卓越振動数と比較すれば、低振動数側へシフトしているはずであるので、このことを配慮して図-10を評価する必要がある。

図-11には、図-3における硬質地盤の最大加速度距離減衰に関する(2)式による回帰式の妥当性を検討するため、回帰式と観測値との比を(4)式で求め、断層最短距離との関係でプロットした。

$$Ratio = \frac{A_b(d)}{A_{b,Regg.}(d)} \quad (4)$$

ここで、 $A_{b,Regg.}(d)$ は(3)式に各硬質地盤の強震観測サイトの断層最短距離 d (km)を代入したときの加速度を、 $A_b(d)$ は観測値を意味している。図のように、回帰式と観測値との比は、断層最短距離が100km以内であれば1前後であり、この範囲では回帰式は適用可能と判断できる。断層最短距離が100kmを超えると、比は急激に増大するため、(2)式を用いた場合、

増幅倍率を過大に評価することになるが、図-4と図-7に示すとおり、表層地盤のサイトでこの断層最短距離にあるものは少なく、したがって表層地盤の増幅特性としてまとめた図-8～図-10は、絶対値には多少問題があるものの、表層地盤の増幅特性を代表しているものと考えられる。

6. まとめ

本論文で得られた知見を以下にまとめた。

- 1) 表層地盤の増幅倍率をもっとも大きくなるときの卓越振動数は1.5Hz以下であるが、この振動数領域の増幅倍率は広い範囲にバラつく。この傾向は、兵庫県南部地震とLoma Prieta地震で共通して見られ、表層地盤の非線形性によるものと判断された。
- 2) 表層地盤の増幅倍率が大きくなるのは地表加速度が約400gal以下のときであり、また硬質地盤(基盤)の加速度で100gal以下の場合が多い。このことは、基盤への地震入力が100galを超えると表層地盤の非線形挙動が顕著に現れることを意味し、とくに第三種地盤では加速度にある上限値が存在することを示唆している。

最後に貴重な強震観測記録を公開された関係諸氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 強震観測事業連絡会議：強震速報，1995年1月17日平成7年兵庫県南部地震，No.46，科学技術庁防災科学研究所，1995.2
- 2) 中村豊：1995年 兵庫県南部地震の地震動記録波形分析，JR地震速報，No.23c，鉄道総合技術研究所ユレダス推進部，1995.2
- 3) 鈴木猛康，田中港：工学適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，pp.311-314，1993
- 4) 鈴木猛康，田中港：Loma Prieta地震記録に基づいた表層地盤の地震動増幅特性，熊谷組技術研究報告，No.53，pp.19-26，1994.10
- 5) 江尻譲嗣他：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，pp.45-48，1990
- 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，pp.39-44，1974
- 7) Joyner, W. D. and Boore, D. M.: Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, *Earthq. Eng. Struc. Dyn.*, Proc. of the Special Conference sponsored by ASCE, pp.43-102, 1988
- 8) 入倉孝次郎：兵庫県南部地震の強震動と被害，土質工学会・阪神大震災報告会講演概要集，pp.11-21，平成7年5月

COMPARISON OF SOIL AMPLIFICATION CHARACTERISTICS DUE TO THE SOUTHERN HYOGO AND THE LOMA PRIETA EARTHQUAKES

Takeyasu SUZUKI, Minato TANAKA and Shinji YOSHITAMNI

Using strong motion data during the Southern Hyogo earthquake of 1995, acceleration amplification factors from bedrock through ground surface for soft soil deposits are calculated. The results are compared with those during the Loma Prieta earthquake of 1989. Then, the following common results in the two earthquakes are given: (1) the largest amplification factors ranges where the predominant frequencies of soil deposits are less than 1.5 Hz; (2) large amplification is given when surface acceleration is less than 400 gal; and (3) the large amplification is given when input acceleration to bedrock is less than 100 gal.