

(49) 1995年兵庫県南部地震における最大地動（最大加速度、最大速度、最大変位）のアテニュエーション特性

東北工業大学 正員 ○神山 眞
々 正員 松川忠司

1 はじめに

1995年兵庫県南部地震は戦後最大の被害をもたらした。このような甚大な被害をもたらした要因としてJMAマグニチュードで7.2というかなりの規模の地震が大都市直下で生じたことがあげられる。一方、この地震により地震断層の近傍も含めて貴重な強震記録が数多く取得された。近年、日本およびその周辺で生じた被害地震の多くが海洋性のプレート間地震であり、震源近傍の強震動情報が皆無に等しい状況下で地震断層の近傍で強震記録が得られたことは強震動特性の解明という観点から特筆すべきことである。もとより、地震被害の原因追究は地震動の分析が必須であり、今後これらの強震記録について多くの研究者により種々の観点から解析がすすめられると考えられる。筆者らも独自の観点から解析をすすめているが、ここでは強震動の最も代表的なパラメータである最大振幅値のアテニュエーション特性について予備的な解析結果を述べる。

2 取得された強震記録と最大振幅値

今回の地震では震源近傍に観測点を持つ気象庁と関西地震観測協議会によりデジタル強震記録がいち早く公開された。これらの記録は気象庁によるものが87型強震計で得られた加速度記録、関西地震観測協議会によるそれが長周期速度計で得られた速度記録と異なるものの地震断層近傍の記録を含む極めて貴重なものである。その他、JR、運輸省、大坂ガスなどによりアナログ波形もしくは最大加速度値が公表されている。最大加速度のアテニュエーションに限った検討ではそれらの公表されている最大値を含めることもできるが、精度保障の観点から、ここでは筆者らが現在得ているデジタル記録を主に最大値のアテニュエーション特性を検討する。ただし、JRの記録のうち、JR総研が波形処理して最大加速度とともに最大速度、最大変位を公表している地震断層近傍の最大値¹⁾も含めることにする。ここで、最大値のアテニュエーション特性に用いた記録をまとめると以下の通りである。

- 気象庁（神戸海洋気象台、大阪、岡山、彦根、福井、舞鶴、鳥取の観測所）
- 関西地震観測協議会（神戸大、阿倍野、弥栄、福島、森河内、堺、忠岡、千早）
- JR（鷹取、西明石、新大阪SS、新大阪CTC、宝塚、加古川）

上記のように、関西地震観測協議会の記録のうち振幅が飽和している神戸本山と尼崎の記録はここでは除外している。上記の観測点のうち震源に比較的近い観測点と余震分布から推定された地震断層の地表投影線の位置関係を図1に示す。図1のように、ここでの観測点は震源に対して比較的種々の方位にばらついていることがわかる。

強震記録の最大値では従来、最大加速度が主に注目されてきた。しかし、今回の兵庫県南部地震を含めて最近の被害地震の経験から最大加速度のみならず最大速度、最大変位も考慮した総合的な最大値アテニュエーション特性が必要と考えられる。そこで、筆者らがデジタル記録を得ている強震記録について数値計算により加速度、速度、変位記録を求め、それらの記録の最大値のアテニュエーション特性を検討した。

上述のように、気象庁の原記録が加速度記録、関西地震観測協議会のそれが速度記録であるが、ここでは原記録に対して周波数領域で微分、積分を行ない、加速度、速度、変位記録を求めた。その際、通過対域0.1~2.5 Hzの両端にコサインテーパを付したバンドパスフィルターで濾波した。このような数値計算による加速度、速度、変位記録の例を図2に示す。図2は神戸海洋気象台のNS成分の例である。このように求められる記録から最大値を読み取り、最大加速度、最大速度、最大変位を各記録に対して算定した。これらの最大値は成分毎に求められるが、ここでは水平成分のみを対象にアテニュエーション特性を検討する。なお、水平成分の最大値はその方位により変動するが、ここでは原記録の成分をそのまま用いて、直交する2水平成分を別個のデータとし

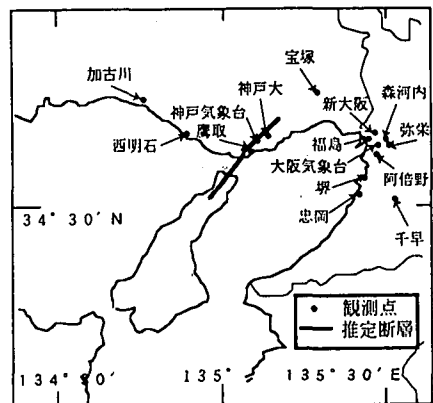


図1 推定地震断層と観測点の分布図

て取り扱う。

最大地動のアテニュエーションを検討する際、震源からの距離をいかに測定するかが問題になるが、ここでは地震断層の破壊過程をより良く考慮できるように、従来から多用される震源距離や震央距離に代わり震源断層と観測点の最短距離を用いた。図1を参照して各観測点と地震断層との最短距離も求め、これをパラメータに最大加速度、最大速度、最大変位のアテニュエーションをプロットしたのが図3、4、5である(実線、点線については後述される)。これらの図から程度の差こそあれ、最大加速度、最大速度、最大変位のいずれも地震断層に近くなるにつれ振幅が一定値に漸近する傾向がみられる。

3 最大地動の半経験的アテニュエーションモデル

図3、4、5に示す最大地動のアテニュエーション特性を過去の地震によるそれと比較するため既往のアテニュエーション予測式を用いて考察する。これまで最大地動のアテニュエーション予測式は非常に多く提案されている。しかし、震源断層からの最短距離をパラメータとして最大加速度、最大速度、最大変位のアテニュエーションを総合的に与える予測式はほとんど提案されていない。一方、筆者らはこれら三つの最大地動を対象に震源断層を考慮した半経験的予測式を発表している²⁾。ここでは、この予測式の距離パラメータを最短距離に変換する方法を述べるとともに、この変換式により図3、4、5の最大地動のアテニュエーションを考察する。

Kamiyama et al.²⁾ は一般に多用される簡単な距離パラメータの震源距離を用いて、これに地震断層理論の知見を結びつけ、最大加速度、最大速度、最大変位に関する半経験的アテニュエーションモデルを提案している。このモデルは震源距離方向に円形地震断層面(中心が震源)が存在し、かつこの断層面上で最大地動は一定値を示すものと仮定している。彼らはこのモデルを日本で得られた357個の水平成分の強震記録(82地震、33観測点)に適用して次のようなアテニュエーション式を求めている。

$$a_{\max}(i, M, r) = 518.9 \times AMP_i(a) \quad \text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M}) \quad (1)$$

$$a_{\max}(i, M, r) = 547.6 \times 10^{0.358M} \times r^{-1.64} \times AMP_i(a) \quad \text{for } (r > 10^{0.014+0.218M}) \quad (2)$$

$$v_{\max}(i, M, r) = 2.879 \times 10^{0.153M} \times AMP_i(v) \quad \text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M}) \quad (3)$$

$$v_{\max}(i, M, r) = 3.036 \times 10^{0.511M} \times r^{-1.64} \times AMP_i(v) \quad \text{for } (r > 10^{0.014+0.218M}) \quad (4)$$

$$d_{\max}(i, M, r) = 0.189 \times 10^{0.236M} \times AMP_i(d) \quad \text{for } (r \leq 10^{0.014+0.218M}) \quad (5)$$

$$d_{\max}(i, M, r) = 0.200 \times 10^{0.594M} \times r^{-1.64} \times AMP_i(d) \quad \text{for } (r > 10^{0.014+0.218M}) \quad (6)$$

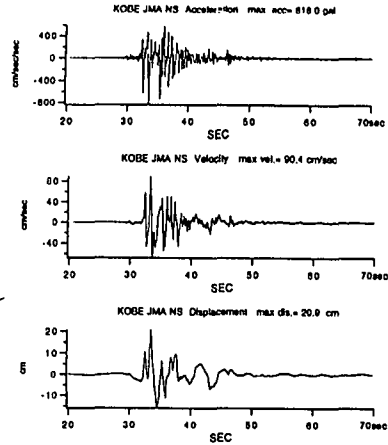


図2 神戸海洋気象台における加速度、速度変位記録(NS成分)

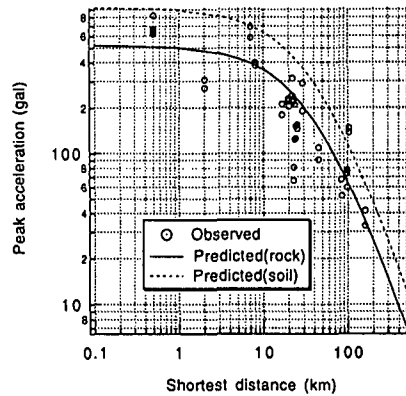


図3 最大加速度のアテニュエーション

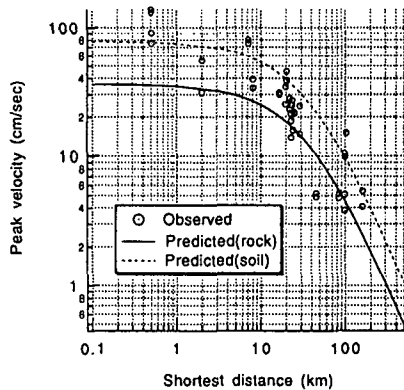


図4 最大速度のアテニュエーション

ここに、 a_{max} 、 v_{max} 、 d_{max} はそれぞれ最大加速度 (gal)、最大速度 (cm/sec)、最大変位 (cm)、 M =JMAマグニチュード、 r =震源距離 (km)、 i =観測点識別番号、 AMP_i =観測点による増幅率。

式(1)～(6)の AMP_i はKamiyama et al.²⁾が解析対象とした33観測点について求められているが、それをまとめたのが表1である。これらの観測点毎の増幅率は地盤構造と一定の相関があることが明らかにされている³⁾。

式(1)～(6)の妥当性はロマプリータ地震などの諸外国での最近の地震動観測データに基づき示されているが、ここではこのモデルの仮定と解析に用いているデータとの関係から式の適用範囲について改めて議論を試みる。図6はこのモデルで仮定している円形断層と観測点との関係を模式的に断面図として示したものである。図6に示すように、このモデルは観測点と震源を結ぶ方向が断層面と一致することを仮定している。この仮定は地震断層が低角のdip angleを有し、かつ観測点が断層から一定程度離れていれば(例えば、図6の点線で示される程度)、成立すると考えられる。逆に、dip angleの大きい地震断層や震源距離の小さい観測点ではこの仮定は成立しないことになる。従って、このモデルはこのような基本仮定にマッチするデータに適用される必要がある。一方、Kamiyama et al.²⁾が解析に用いた357個の強震記録は大半が日本近辺の海洋型地震による震源距離の比較的大きい条件によるものである。ところが、日本近辺の海洋型地震は低角逆断層の特性をもつものが多いことが知られている。この知見を考慮すれば、Kamiyama et al.²⁾の用いたデータはその基本仮定を定性的に満足していると考えられる。しかし、以上のような仮定を用いているので、式(1)～(6)の厳密な意味での適用は仮定にマッチする観測点データに限られることになる。そこで、任意の観測点条件に適用可能なように観測点と地震断層面との最短距離を導入する。いま、最大地動パラメータは観測点と断層面との成す見込み角には関係なく、観測点と断層面との最短距離のみによってその距離減衰が支配されると仮定する。このような付加的な仮定を設けると、式(1)～(6)の震源距離 r を断層の特性長を考慮して観測点と断層面との最短距離 R で置き換えれば、このように置換された式は任意の観測点のデータに適用できることになる。この場合の震源距離 r は最短距離 R で次のように置換される。

$$r = R + 10^{0.014+0.218M} \quad (7)$$

結局、観測点と断層面との最短距離 R を用いた任意の地震条件に適用可能なアテニュエーション式は次のように与えられる。

$$\dot{a}_{max}(i, M, R) = 547.6 \times 10^{0.358M} \times (R + 10^{0.014+0.218M})^{-1.64} \times AMP_i(a) \quad (8)$$

$$v_{max}(i, M, R) = 3.036 \times 10^{0.511M} \times (R + 10^{0.014+0.218M})^{-1.64} \times AMP_i(v) \quad (9)$$

$$d_{max}(i, M, R) = 0.200 \times 10^{0.594M} \times (R + 10^{0.014+0.218M})^{-1.64} \times AMP_i(d) \quad (10)$$

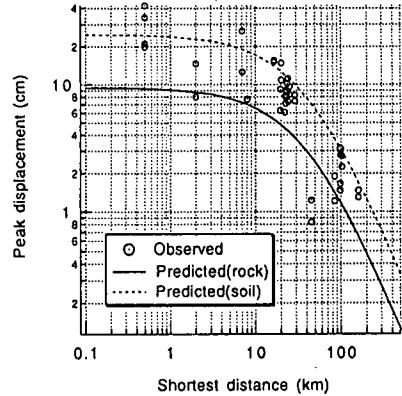


図5 最大変位のアテニュエーション

表1 観測点による増幅率

No	SITE NAME	AMPLIFICATION FACTOR, AMP		
		AMP(a)	AMP(v)	AMP(d)
1	KUSHIRO	2.46	3.21	3.51
2	CHIYOKA	2.03	2.36	3.13
3	ITAKACHI	2.02	1.60	2.35
4	IIKOKIMAN	0.99	0.61	0.79
5	SIJIN ISHIKARI	3.90	6.66	7.41
6	TOMAKOMAI	2.11	2.14	2.76
7	MURIKAN	2.91	2.44	2.59
8	AUMORI	1.92	3.67	4.95
9	UACHTINOHE	1.25	1.61	2.38
10	MAZAKI	1.27	1.30	4.06
11	MITYAKO	2.44	1.39	1.46
12	OFUNATO	1.56	1.19	1.59
13	SHIOGAMA	2.44	3.46	2.30
14	TAIRA	1.74	2.43	3.03
15	SHIMTONE	1.27	2.37	2.54
16	KASHIMA JIMU	1.56	2.75	2.75
17	KASHIMA PWR	1.39	2.35	1.95
18	TONB PSD	1.14	2.70	5.87
19	ONIGAWA	1.24	2.70	6.13
20	CHIBA	1.64	2.45	4.29
21	YAMASHITA JIEN	1.19	1.73	1.78
22	KANNONZAKI	2.11	1.80	1.86
23	OGHAI C	0.21	0.35	0.37
24	KINUKAWA	0.37	0.33	0.35
25	ITAJIMA	3.49	2.70	2.56
26	IKOSUJIMA	1.16	1.33	1.21
27	SOMA	2.71	1.54	1.30
28	SHINAGAWA	1.69	2.71	2.17
29	ONAHAMA JI	1.86	1.36	2.00
30	ARITA	1.44	2.00	2.81
31	CHIBA S	1.46	2.62	2.38
32	ITITACHI NAKA	2.13	1.35	0.51
33	KASHIMA ZUKAN	1.61	1.64	1.78
Average		1.778	2.149	2.630
Standard deviation		0.778	1.149	1.930

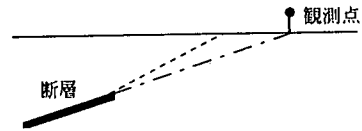


図6 断層と観測点の模式図

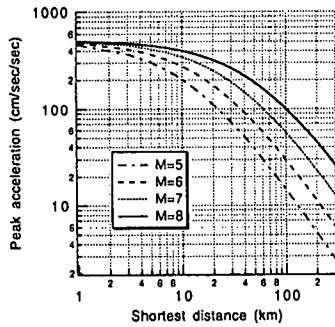


図7 最大加速度のアテニュエーション予測 (基盤)

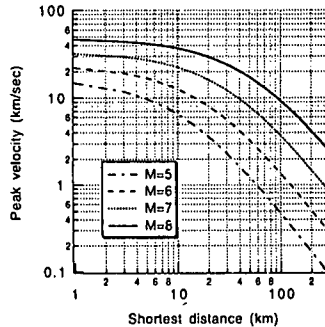


図8 最大速度のアテニュエーション予測 (基盤)

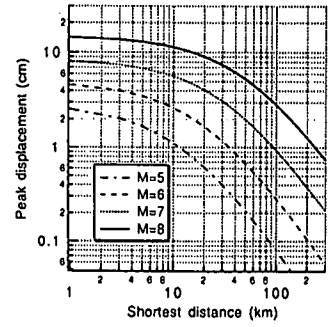


図9 最大変位のアテニュエーション予測 (基盤)

図7～9は式(8)～(10)の最短距離による最大加速度、最大速度、最大変位のアテニュエーションを代表的な地震マグニチュードについてプロットしたものである。これらは $AMP_i(a,v,d)=1$ として基盤の値として示している。これらの図から、地震断層に近づくにつれ最大加速度は地震規模に関わらず一定値に漸近すること、最大速度、最大変位は地震規模に応じて一定値に漸近することがわかる。

4 兵庫県南部地震の最大地動アテニュエーションと予測式との比較

地震マグニチュードと地震断層からの最短距離による最大加速度、最大速度、最大変位のアテニュエーション予測式が式(8)～(10)に与えられたので、これらの式に兵庫県南部地震のマグニチュード7.2を適用して各観測点の最大地動を求めた。なお、式(8)～(10)で明らかのように最大地動の算定には各観測点の地盤条件により決まる AMP の値が必要であるが、現在のところ各観測点の詳細な地盤構造は明らかでないので、ここでは観測点による増幅率を考慮しない基盤($AMP_i(a,v,d)=1$)の場合と表1に示した AMP_i の平均値を考慮した場合について求めた。ここで、表1の AMP_i の平均値は表面層を有する観測点の平均的な増幅率に相当すると考えられる。これらの基盤および平均的な表面層を有する観測点での最大地動予測値はそれぞれRockおよびSoilのラベルを付して実線、点線として図2、3、4に実測値と比較される形で示されている。図2～4から最大加速度については実測値と予測値の間のバラツキが目立つものの、おおむね予測値は最大加速度、最大速度、最大変位のいずれにおいても実測値の分布を比較的良く説明できることがわかる。これらの比較で基盤(Rock)での予測値が実測の下限を与えている傾向がみられる。特に、最大速度、最大変位の比較においてこの傾向が著しい。また、Soilとして予測されている平均的な表面層をもつ観測点での予測値も観測点毎の地盤構造のバラツキがあることを考慮すると実測値の分布と調和している。その被害の程度から兵庫県南部地震の強震動の異常な強さが指摘されてきたが、過去の強震記録データに基づき半経験的に導かれたここでの予測式による値が実測値と調和していることを考慮すると、少なくとも最大加速度、最大速度、最大変位の面からは兵庫県南部地震はその地震規模に応じた平均的な地動と結論づけてよいと考えられる。

5 むすび

兵庫県南部地震の最大地動アテニュエーション特性がKamiyama et al.²⁾の半経験的アテニュエーションモデルによる予測値と比較される形で考察された。ここでは地震断層からの最短距離をパラメータとして最大地動のアテニュエーションを整理して、Kamiyama et al.²⁾のアテニュエーション予測式を最短距離パラメータにより定式化し直すとともに、その定式化による予測値が実測値と比較された。その結果、予測値は実測の最大地動をよく説明できることがわかった。この比較結果から、少なくとも最大加速度、最大速度、最大変位の大きさに関しては兵庫県南部地震はその地震規模に応じた平均的な最大地動を与えた地震と捉えることができる。

(謝辞)

本研究では関西地震観測協議会(代表:土岐憲三京都大学教授)、気象庁より提供された強震記録を利用させていただきました。利用に際して、ご便宜いただきました関係各位にお礼申し上げます。

(参考文献) 1) 中村他: J R 地震情報 No.23b (1995) 2) Kamiyama et al: 土木学会論文集No.483, p. 29~39 (1994) 3) 神山: 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム論文集、土質工学会、(1994)