

耐震設計入力地震動レベルに関する一考察

王 海波¹・西村 昭彦²

¹ 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

² 正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

耐震設計には適切な入力地震動の設定は最も重要なことである。実観測記録には震源特性以外、震動の伝播経路、観測地点の地盤および地形条件等の影響が含まれ、分散性が大きく、そのままでは耐震設計に規定されない。そこで、工学基盤面での地震動を規定し、建設地点の地盤と地形条件を用いて、表面の地震動を推定して、入力地震動の精度の向上を期待できる。設計に用いる基盤地震動の設定するための資料を得るべく、本研究では、兵庫県南部地震および近年海外の地震で得られた工学基盤面上の記録を用いて、断層近傍工学的地盤上の最大地震動レベルを統計的に考察した。この地震動を用いて、推定した地表面の地震動と観測波の比較より、設定した工学的基盤面の地震動レベルの妥当性はさらに検討が必要である。

Key Words: Input seismic motion, response spectra, seismic fault, irregular topography

1. はじめに

耐震設計には適切な入力地震動の設定は最も重要なことである。特に、兵庫県南部地震のようなレベル2地震動は、一定地点に対して再現期間は約千年のオーダーで、経済性を考えると、建造物の耐震設計には弾塑性設計法を導入せざるをえない。部材の動的損傷過程を量的に取り扱うことも可能な現代の構造解析技術においては、設計に用いる入力地震動の信頼性の向上が不可欠のことである。活断層や伝播経路の地盤構造のパラメータを用い、発震機構を断層のくい違い運動により表現し、地震動波形を合成する方法が、現実的な手法として、地震動予測に用いられるようになりつつある¹⁰⁾。しかし、震源パラメータの設定は困難な課題である。断層面上の破壊強度の分布、破壊開始点の設定等未解決の問題は残っている。したがって、この様な多数の不確定要素の影響を考慮した時、地震動の設定は、震源断層近傍で記録された既往の地震記録を統計的な解析を行うことにより、推定することが現実的であると考えられる。この統計的な解析より推定した地震動の精度は蓄積された強震記録の数に左右される。

本研究では、兵庫県南部地震を含む近年日本および海外で観測された断層近傍の強震記録を利用して、

工学地盤面での最大地震動レベルを考察した。

2. 地表地震動の影響要素

地表地震動の強さに影響を及ぼす要因として、地震の震源特性、地震動の伝播経路特性、地盤または地形の増幅特性などが挙げられる。場所によって、地震動特性はかなり異なり、その地点の表層地盤特性と不整形性が顕著に影響することが知られている。

理想的に、この地盤と地形の影響を受けず、水平層状硬質な岩盤 ($V_s = 3.0\text{km/s}$ 程度) の地震地盤の上面における地震動を震源と伝播経路特性を適切に考慮して規定し、これに表層地盤と不整形による増幅を解析して、地表における入力地震動を予測すべきである。しかし、地震基盤において得られた観測記録はなお少ないのが現状である。したがって、表層地盤と不整形の解析の現状と地盤調査のコスト面から、工学的基盤面 ($V_s = 300\text{m/s}$ 以上の連続地盤の上面) で地震動を与える方が現実的である^{1,10)}。したがって、ここでは工学的基盤面の地震動を考察の対象にする。

兵庫県南部地震の記録では、断層に近い範囲内、工学的基盤面の表面の記録以外、地中での記録も工学的基盤面の表面の記録と見なした。理論上で、地

中の地震動は上層地盤の影響を含めて、観測地点の地盤定数を用いて引き戻し解析から、2E 成分を求めるのがよいと考えられるが、地盤定数、非線形特性の設定、解析手法等の精度の制約で、引き戻した結果は元観測波より 2E 成分に近いとは言えない。そこで、工学基盤の剛性は十分であれば、表層の影

響を受けにくいと考え、本検討では地中観測記録をそのまま用いることとした。

3. 参考する地震記録

表 1には兵庫県南部、Coyote Lake、Loma Prieta、

表 1 工学的基盤での観測地震記録

番号	地震名	記録名	最大加速度(gal)		緯度	経度	等価震源距離	断層最短距離	観測位置	地盤条件
			NS	EW						
1	兵庫県南部地震	ポートアイランド	679.8	302.6	34.670	135.208	11.64	3.24	GL-83	Vs=450m/s
2		高砂発電所	86.0	109.3	34.753	134.783	32.75	27.08	GL-100	Vs=460m/s
3		関電総合技術研究所	293.9	319.8	34.743	135.442	34.57	24.65	GL-97.0	Vs=455m/s
4		六甲(神戸大学)	272.0	306.5	34.725	135.240	14.99	6.90	GL-9.5	Vs=590m/s 上 Vs=240m/s 厚 0.5m
5		猪名川	185.3	200.4	34.836	135.427	38.03	25.03	GL-30	Vs=780m/s
6		東神戸大橋	445.9	425.3	34.707	135.296	20.00	12.38	GL-33	-45m までも N 値 18 程度砂質土
7		宝塚	683.6	600.9	34.809	135.344	29.93	16.88	GL0.0	N 値 63 以上、表層N値 5 約 1.5m
8		新神戸変電所	510.7	584.2	34.731	135.250	16.52	7.53	GL0.0	Vs=300m/s 上 Vs=200m/s 厚 4m
9	Coyote Lake	San Ysidro	314.6	408.8	37.026	121.484		1.0	GL0.0	Rock
10	Loma Prieta	Santa Cruz UCSC	433.1	401.5	37.00	122.06	12.24	13.40	GL0.0	Limestone
11		Gilroy#1-Gavilan Coll.	426.6	433.6	36.973	121.572	19.15	9.7	GL0.0	Franciscan Sandstone
12	Landers	Joshua Tree fire station	268.3	278.4	34.131	116.314	16.90	10.79	GL0.0	Shallow alluvium over granite bedrock
13	Northridge	Tarzana Cedar Hill Nursery	970.7	1744.5	34.160	118.534	21.82	17.5	GL0.0	Thin alluvium over siltstone
14		Pacoima Kagel Canyon	424.2	295.2	34.288	118.375	13.77	9.26	GL0.0	Rock

Landers および Northridge 地震での工学的地盤上と地中の加速記録を示している。全部記録の観測地点から断層との最短距離は最大 27km 以内である。

に示している。

4. 統計処理

表 1に示すように、ここに採用した記録は、工学的基盤面上と見なした地中でのものである。それより弱い表層地盤の増幅特性の影響は少ないと見られる。しかし、図 2の加速度応答スペクトルから見る

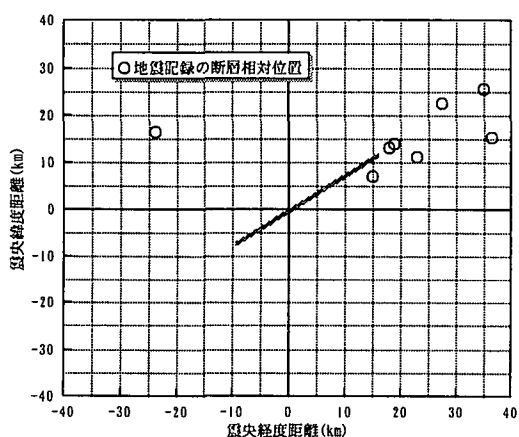


図 1 兵庫県南部地震記録の断層相対位置

兵庫県南部地震の記録地点と断層の相対位置を図 1に示し、全ての記録の加速度応答スペクトルを図 2

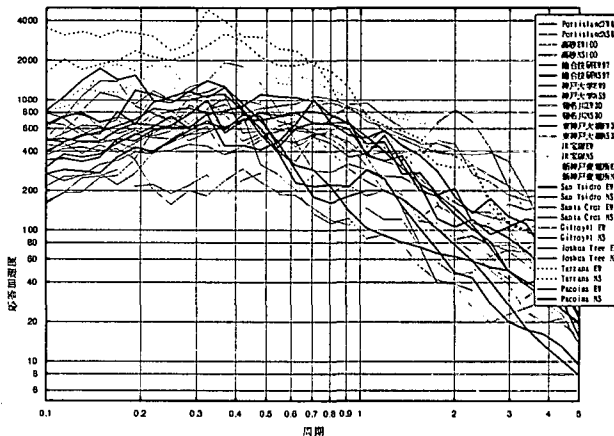


図 2 観測記録の加速度応答スペクトル

と、その分散幅はまだ大きいである。この分散は地震の震源特性以外、震源距離と地形の影響と考えられる。

(1) 地形の影響

以上の記録の中で、地形の影響が顕著であることを判明した記録の応答スペクトルを図 2 に点線で示した。短周期側で大きかった Northridge の Tarzana の記録について、後藤と江尻⁵⁾ が解析した。その結果によると、観測地点の地形増幅は最大 3 倍になる。

一方、兵庫県南部地震の新神戸変電所の記録は周期 1.7s で 2000gal、3s で 1000gal の応答を示した。地形増幅率が判明していないが、観測地点の地形はかなり複雑である⁴⁾。

兵庫県南部地震の JR 宝塚観測地点は、断層から約 17km 以上離れているにも関わらず、2000gal の加速度応答スペクトルを示した。その地点近傍の他の観測より非常に大きい。観測地点は河川堤防から約 200m しか離れていなかった⁴⁾。

地形の不整形の影響が大きいと考えられる、以上三個所の 6 成分の記録は統計処理対象から除いた。

一方、釧路沖地震の釧路記録も大きな地形の影響が含まれる⁶⁾。良質地盤でも不整形の影響は地震動を設定する際に十分な配慮が必要である。

(2) 距離の補正

地震動の伝播経路の影響は深層地盤構造と Q 値等に影響される。しかし、これらの値の調査あるいは推定は簡単なことではない。ここでは、単に震源からの直線距離に対しての補正を行った。

距離に対しての補正は距離減衰式が使われる。これまで多数の研究者がいろいろな距離減衰式を提案したが、その精度は地震データと距離の取り方によって大きく異なる。とくに、断層近傍では、断層破壊面の広がりや断層面内の破壊変位量(くい違い量)分布に影響される。そして、破壊面の広がりを考慮し、断層近傍にも適用出来るような、断層最短距離を用いた距離減衰式が最近主流になってきた(例えば、福島式⁸⁾)。

一方、大野ら⁹⁾ は地震破壊のエネルギー観点から、等価震源距離を用いる距離減衰式(式(1))を提案した。

$$\log S(T) = a(T)M - \log X_{eq} - b(T)X_{eq} + c(T) + \Delta s(T) \quad (1)$$

ただし

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2 X_i^{-2}}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (2)$$

ここで、

M は地震規模マグニチュード

X_{eq} は等価震源距離

T は構造周期

N は断層面の分割数

d_i は分割した小面積 i のくい違い量

X_i は小面積 i から観測地点間の距離

$a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $c(T)$ と $\Delta s(T)$ は周期依存係数

式(1)の予測値は兵庫県南部地震の観測値の統計平均とほぼ一致する。表 1 中の等価震源距離は式(2)から求めた値である。各地震の断層データは、他の研究結果を参考した⁷⁾。

等価震源距離減衰式(1)の減衰特性を用いて、表 1 に網掛けで示した地点の観測記録の加速度応答スペクトルを等価震源距離 12km までに補正した(図 3 を参照)。

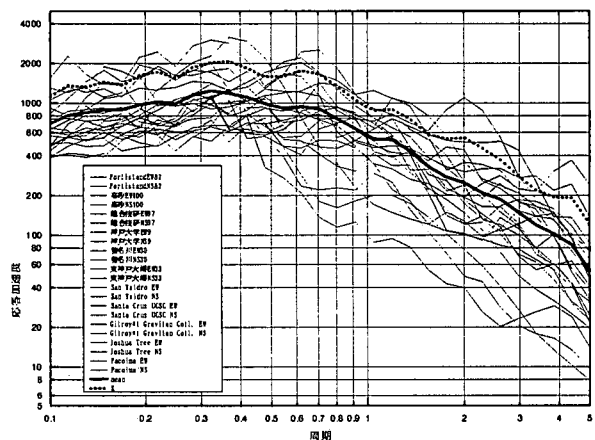


図 3 等価震源距離 12km までに補正した
加速度応答スペクトル

断層近傍の等価震源距離の値は、断層の広がり効果を包含するため、断層最短距離が小さくても、一定値になる。図 4 には兵庫県南部地震に相当する長さ 40km、深さ 15km の鉛直断層面に対する等価震源距離と断層位置の関係を示す。等価震源距離は等高線で示した。断層の地表中央位置は原点とし、くい違い量は一様分布とした。

この例では等価震源距離の最小値は約 10.4km で

ある。したがって、ここに採用した 12km の値は震源断層面に十分近傍であることが分かる。

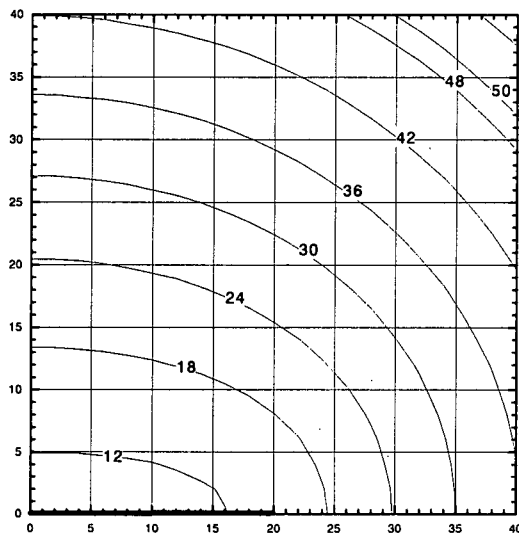


図 4 等価震源距離と断層位置

5. 考察

図 3を見ると、補正された加速度応答スペクトル(全部 22 成分)の分散は小さくなった。周期 1.0s 以下で応答スペクトルが 2000gal を超えたのは兵庫県南部地震の関電総合技術研究所の観測値と Loma Prieta 地震の Gilroy#1-Gavilan Coll.観測値だけである。周期 1.5s 以上で応答スペクトルが大きかったのは兵庫県南部地震の東神戸大橋の記録だけである。

表 1の地盤条件から、東神戸大橋の観測位置の地盤条件は工学的地盤の条件を満足しないことが分かった。表層地盤が液状化して、その長周期の震動が地中に伝わったと考えられる。

全体に見ると、兵庫県南部地震の記録は 1.0s 前後の成分が大きい、米国カリフォルニアの記録は 0.3s 前後が大きい。この違いは断層の破壊など震源特性の影響を考えられる。

補正された加速度応答スペクトルの統計平均値も図 3に示している。周期 0.1s では約 700gal で、0.2s から 0.5s までは約 1000gal である。最大値は 0.35s 前後で約 1200gal である。図の中の点線は平均値プラス 1.3 σ の値である。各周期での地震動の確率分布を正規分布と仮定すると、点線の値は 90%の非超過確率に相当する。最大の値は 0.3s 前後で約 2000gal であるが、0.2s から 0.7s までの平均を見ると約 1600gal である。それ以後、ほぼ一定勾配で小さくなり、1.0s には約 1000gal の応答がある。

6. まとめ

兵庫県南部地震を含む近年日本および海外で観測された断層近傍の強震記録を利用して、工学地盤面での最大地震動レベルを考察した。

観測記録の選択より、弱い表層地盤と不整形の増幅の影響を回避し、等価震源距離を用いた距離減衰式から観測記録の加速度応答スペクトルを震源断層面近傍までに補正した。

全部 22 成分の観測記録の統計解析結果は以下になる。

- 1) 平均の最大値は 0.35s 前後で約 1200gal で、0.2s から 0.5s までは約 1000gal である。
- 2) 90%非超過確率に相当する値は 0.2s から 0.7s までの約 1600gal で、1.0s には約 1000gal である。

今後、この工学基盤地震動の妥当性については、地盤条件を用いて解析推定した地表面の地震動と実観測波の比較より、さらに検討すると考えている。

参考文献

- 1) 新設建造物の当面の耐震設計に関する参考資料、平成 8 年 3 月、(財)鉄道総合技術研究所
- 2) 1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)、1996 年 3 月、JR 地震情報 No.23d、(財)鉄道総合技術研究所
- 3) 土木建造物における加速度強震記録(No.21)、平成 7 年 6 月、土木研究所彙報 第 64 号 Vol.64
- 4) 阪神 淡路大震災調査報告書(資料編 Vol.1) 平成 8 年 10 月 社団法人 地盤工学会、阪神大震災調査委員会
- 5) 後藤洋三、江尻譲嗣:ノースリッチ地震 Tarzana 強震観測点における地盤の増幅特性、軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム、平成 6 年 10 月
- 6) 釧路市における一斉微動観測、軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム(委員会報告)平成 6 年 10 月
- 7) Preliminary report on the principal geotechnical aspects of the January 17,1994 Northridge Earthquake, EERC Report No.UCB/EERC-94/08
- 8) 福島美光:地震波の発生 伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測、1994 年 3 月、ORI 研究報告 93-07、清水建設
- 9) 大野晋、高橋克也:米国カリフォルニア州強震観測記録を用いた地震動スペクトル評価、1994 年、第 9 回日本地震工学シンポジウム
- 10) 土木建造物の耐震基準等に関する「第二次提言」、平成 8 年 1 月 10 日、社団法人土木学会