

強震記録から見た震源近傍での硬質地盤上 における地震動 ーレベル2地震動の共通基準ー

武村雅之¹・大野 晋²・高橋克也³

¹正会員 理博 鹿島小堀研究室 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30 KIビル)

²非会員 工修 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³非会員 工博 鹿島技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

活断層を考慮した入力地震動評価を行う場合、地表地震断層を生じないような比較的規模の小さい地震の取り扱いが問題となる。我が国の内陸地殻内地震を調査すると、気象庁マグニチュード M_J が6.5以下の地震に関しては、殆ど地表地震断層が現れていない。このことは、活断層の存在が知られていない地域でも $M_J=6.5$ 程度の地震を想定する必要があることを示している。このような地震は、実体がつかめず地震学的にも地震動を評価することがむずかしい。そこで、近年、震源近傍の比較的硬い地盤上で得られた強震記録をもとに地震動レベルを評価した。その結果、減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルにおいて、最大加速度値450gal、加速度応答値1200gal、速度応答値100cm/s、変位応答値20cmで、記録のほぼ全てを包絡できることが分った。

Key Words: Level 2 design spectrum, Strong motion records, Rock site, Active fault

1. まえがき

兵庫県南部地震後、活断層を考慮した入力地震動評価の重要性が指摘されている¹⁾。その際、地表地震断層を生じないような比較的規模の小さい地震の取り扱いが問題となる。武村²⁾によれば、我が国での内陸地殻内地震を調査すると、気象庁マグニチュード M_J が6.5以下の地震に関しては、殆ど地表地震断層が現れないこと、逆に M_J が6.8以上の地震については、殆どの地震が地表地震断層を伴っていることが指摘されている。同時に、 M_J が6.6と6.7の地震は極端に発生数が少ないことも指摘され、それらの現象を統一的に解釈する内陸地殻内地震のスケーリング則が議論されている。

つまり、これらの結果に従えば、活断層の存在が知られていない地域でも $M_J=6.5$ (より安全側の立場に立てば $M_J=6.7$)の地震を想定する必要がある、想定された地震による地震動は、全国どこでも起こる可能性が否定できないと言う意味から、レベル2地震動の共通基準のもとになるべきものと考えられる。しかしながら、これらの地震は、起こるか起こらないか分からない実体のないものである。現状、実体のない地震に対し、起こり得る地震動の範囲を解析的に想定することは、極めて困難な問題である³⁾。一方、近年の強震観測網の展開は、様々な規模の地震に対して震源近傍での地震動を観測している。これらの経験は、上記の問題を考える場合、有力な根拠を与えるものと思われる。

2. データ

検討対象としたデータを表-1に示す。これらは、米国カリフォルニア州ならびに我が国における強震記録である。硬質地盤上の地震動を評価するために、未固結層が10m未満で、その下に"Rock"が存在すると指摘されている観測点を選んだ。この分類はOhno et al.⁴⁾のPre-Quaternaryに対応するが、未固結層が存在する地点が多く、厳密な意味では第三紀以前の地盤には対応しない。また記録のスペクトル特性から、明らかに未固結層の共振によって特定の短周期成分が卓越する観測点は除いた。なおFukushima and Tanaka⁵⁾は、最大加速度の距離減衰式において、マグニチュード6.5から7クラスの地震では、断層からの最短距離 X_{sh} が20km以内で、最大加速度値に頭打ちが生じると指摘している。その指摘に従って X_{sh} が20km以内の記録を対象とした。表には参考のために等価震源距離 X_{eq} ⁴⁾も示されている。当該記録が確認できなかった場合でも調査対象とした地震の全てを表に掲載した。

観測記録は武村²⁾による結果を踏まえ地震規模別に $a: 5.8 \leq M_J \leq 6.5$ 、 $b: 6.5 < M_J \leq 6.7$ 、とそれ以上に分け、さらにそれ以上を $b: 6.8 \leq M_J \leq 7.3$ 、 $c: 7.4 \leq M_J$ とし、合計3つのグループに分けた。カリフォルニア州の地震に対しては M_J が評価されていないため、モーメントマグニチュード M_w から武村⁶⁾の内陸地殻内地震に対する地震モーメントと気象庁マグニチュードとの経験的關係を用いて M_J を評価した。それぞれのグループに対応する M_w は $a: 5.6 \leq M_w \leq 6.2$ 、 $b: 6.3 \leq M_w \leq 6.8$ 、 $c: 6.9 \leq M_w$ である。今回のデータ中の米国の

表-1 硬質地盤の記録リスト a: $MJ \leq 6.5$ or $6.7 (Mw \leq 6.2$ or $6.3)$

Earthquake Name	Mw	MJ	Mech.	S.F.	Site Name (Station Code)	Xsh (km)	Xeq (km)	Geology	Amax (FP, FN, V) (gal)
1966 Parkfield	6.2	6.5	Strike	Yes	Cholame Shandon Temblor (TBL)	13	23	Thin Sand and Silt / Siltstone	244, 377, 154
1978 Santa Barbara	5.8	6.0	Dip	No	UCSB Goleta Free Field (UCSB)	13	16	Shallow Alluv. over Rock(Shale)	29, 30, 14
					Santa Barbara Court House (SBC)	11	13	Dense Sand	186, 230, 77
1979 Coyote Lake	5.8	6.0	Strike	No	San Martin Coyote Creek (CLA)	6	9	Clay / Mudstone	134, 246, 102 * 1) (120, 198, 109)
					Girloy #1(G1)	13	16	Sandstone	119, 100, 63
					Girloy #6 (G6)	5	9	Sandstone	301, 446, 149
1984 Morgan Hill	6.2	6.5	Strike	No	San Martin Coyote Creek (CLA)	1	9	Clay / Mudstone	1073, 825, 396 * 1) (685, 552, 319)
					Girloy #1(G1)	12	24	Sandstone	94, 65, 91
					Girloy #6 (G6)	6	20	Sandstone	321, 239, 413
					Anderson Dam Downstream (ADD)	3	9	Gravelly Sandy Loam (Vs 400-500 m/s)	269, 446, 181
1986 North Palm Springs	6.1	6.4	Oblique	No					
1987 Whittier Narrows	6.0	6.3	Dip	No	Caltech Athenaeum (CA)	17	18	Sand / Gravelly Sand	110, 177, 139
					Los Angeles, 4407 Jasper St. (JASP)	15	18	Pliocene sedimentary Rock	326, 194, 109
1991 Sierra Madre	5.6	5.8	Dip	No	Cogswell Dam Right Abutment (CDRA)	10	12	Weathered Granitic Rock	322, 298, 314
					Mt. Wilson-Caltec Seismic Station (CSS)	10	12	Quartz Diorite	240, 240, 265
1997 Kagoshima-ken NW (March 26)		6.5	Strike	No					
1997 Kagoshima-ken NW (May 13)		6.3	Strike	No					
1997 Yamauchi-ken		6.3	Strike	No					
1998 Iwate-ken Hokubu		6.1	Dip	Yes					

* 1) 1989 Loma Prieta地震に対しAbutmentとDownstreamの同時記録があり、スペクトル比を用いてDownstream相当の記録にする。
かっこ内は修正値。地盤調査結果によれば表層約8mで泥岩になるが、深度30mでもVs=300m/sとかなり速度が遅く、図-2では除外。

b: $6.8 \leq MJ \leq 7.3 (6.4 \leq Mw \leq 6.8)$

Earthquake Name	Mw	MJ	Mech.	S.F.	Site Name (Station Code)	Xsh (km)	Xeq (km)	Geology	Amax (FP, FN, V) (gal)
1971 San Fernand	6.6	7.1	Dip	Yes	Pacoima Dam-Upper Left Abutment (PD)	4	8	Highly Jointed Diorite Gneiss	768, 1460, 701 * 1) (229, 471, 168)
					Griffith Park Observatory (GPO)	15	25	Granodiorite (0-5m weathered)	160, 186, 132
1983 Coalinga	6.4	6.8	Dip	No					
1987 Superstition Hills	6.6	7.1	Strike	Yes	Superstition Mt. (SM)	5	11	Granite	984, 767, 704 * 2) (324, 192, 133)
1994 Northridge	6.7	7.2	Dip	No	Pacoima Dam-Upper Left Abutment (PD)	7	21	Highly Jointed Diorite Gneiss	1437, 1349, 1205 * 3)
					Pacoima Dam- Downstream (PDD)	7	21	Highly Jointed Diorite Gneiss	240, 489, 180
					Pacoima-Kagel Canyon (PKC)	8	22	Sandstone	232, 516, 177
					Sylmar Converter Station East (SCSE)	5	15	Silty Clay(10m)/ Rock	734, 469, 413
					USC Station No.13 (UC13)	17	24	Upper Miocene Marine	402, 390, 335
					USC Station No.14 (UC14)	18	26	Middle Miocene Marine	463, 592, 300
					USC Station No.15 (UC15)	20	26	Upper Jurassic Marine	194, 205, 156
					USC Station No.56 (UC56)	5	17	Upper Pliocene Nonmarine Deposits	322, 406, 287
					USC Station No.61 (UC61)	19	34	Mesozoic Granitic Rocks	133, 284, 192
					Sepulveda Canyon Soilwav Building (SCSB)	20	26	Hard Rock	290, 387, 155
1995 Hyogo-ken Nanbu		7.2	Strike	Yes	Kobe Univ.	1.2	19	Granite	261, 320, 429

* 1) 1994 Loma Prieta地震に対しAbutmentとDownstreamの同時記録があり、スペクトル比を用いてDownstream相当の記録にする。

* 2) 本震の観測点は山頂にあり、麓と山上の余震に対する観測記録のスペクトル比を用いて、麓相当の記録にする。

* 3) Downstreamの記録があるので図-2では除く

$$c: 7.4 \leq M_J \quad (6.9 \leq M_w)$$

Earthquake Name	Mw	MJ	Mech.	S.F.	Site Name (Station Code)	Xsh (km)	Xeq (km)	Geology	Amax (FP,FN,V) (gal)
1940 Imperial Valley	7.0	7.6	Strike	Yes					
1952 Kern County	7.5	8.2	Dip	Yes					
1989 Loma Prieta	7.0	7.6	Oblique	No	Coyote Lake Dam SW Abutment (CLA)	19	34	Clay / Mudstone	442, 184, 80 * 1)
					Coyote Lake Dam SW Downstream (CLD)	20	34	Clay / Mudstone	184, 158, 95
					Corralitos (COR)	2	17	Landslide deposit / Sandstone	507, 471, 442
					Girloy #1 (G1)	9	30	Sandstone	426, 425, 207
					Girloy #6 (G6)	18	37	Sandstone	176, 161, 101
					Lexington Dam Left Abutment (LXD)	5	20	Slate and Sandstone	385, 444, 139
					Santa Cruz Lick Observatory (SCO)	18	23	Thin Soil / Limestone	497, 419, 361
1992 Petrolia	7.0	7.6	Dip	No	Cape Mendocino (CM)	7	11	Sandstone	1403, 1245, 739
					Bunker Hill FAA (BHF)	9	14	Vs 360-750 m/s	146, 136, 67
					Centerville Beach, Naval Facility (CBNF)	11	18	Vs 360-750 m/s	440, 302, 123
					Fortuna Fire Station	18	28	Vs 360-750 m/s	307, 293, 76
					Loleta Fire Station (LFS)	20	30	Vs 360-750 m/s	268, 264, 126
1992 Landers	7.3	8.0	Strike	Yes					

* 1) Downstreamの記録があるので図-2では除く

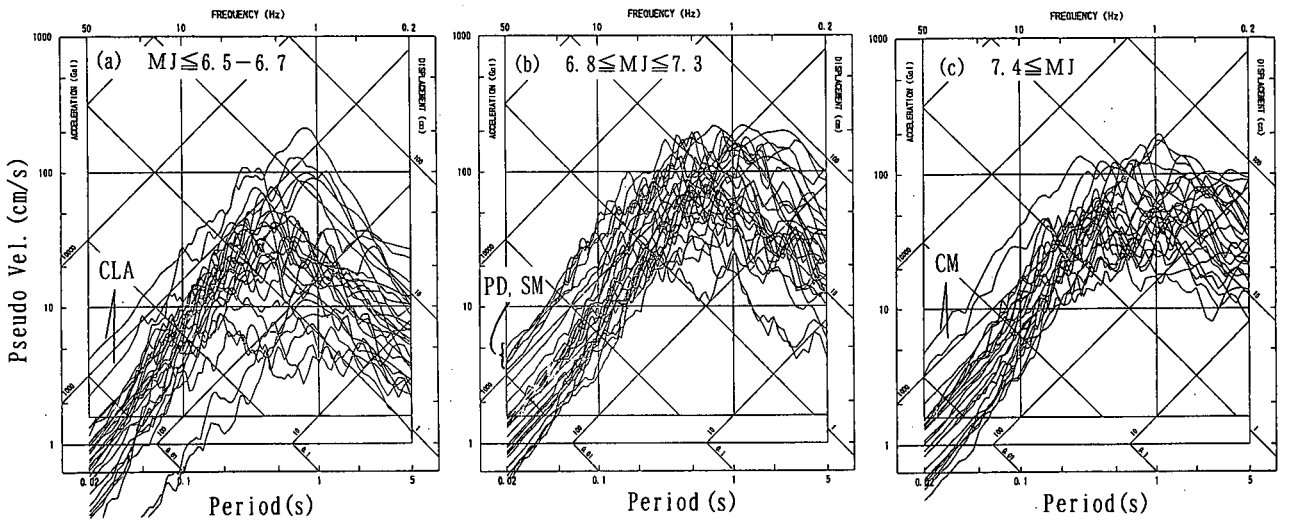


図-1 観測された水平動スペクトルの重ね書き(減衰定数5%の疑似速度応答スペクトル)

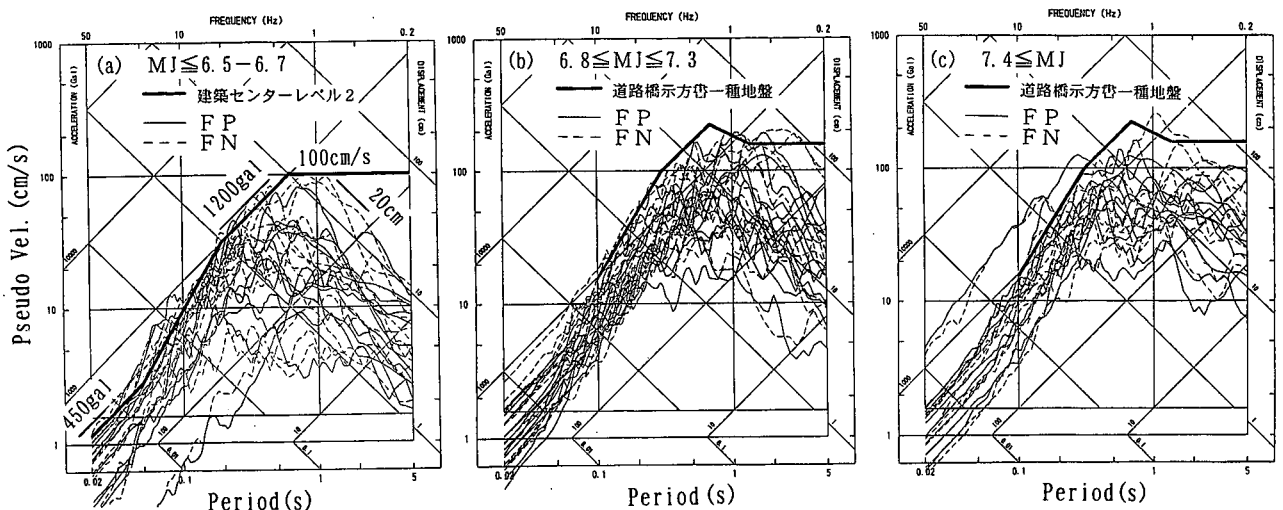


図-2 FP (実線), FN (点線) 方向成分の水平動スペクトル(一部地点の値を修正: 本文参照)

地震においても $M_J=6.6$ と 6.7 に対応する $M_w=6.3$ の地震は含まれていない。表には地表地震断層(S.F.)を伴ったかどうかを示した。日本のデータほど明確ではないが、 $M_w \leq 6.2$ では地表地震断層を伴ったものが少なく、 $M_w \geq 6.4$ では多くなる傾向が指摘できる。

3. 解析結果

図-1に水平動に関する減衰定数5%の疑似速度応答スペクトル(加速度応答スペクトルを ω で割ったもの)の重ね書きを示す。成分は観測されたままである。表-1に示す最大加速度値から分かるようにグループaでは1984年Morgan Hill地震のCLA、bでは1971年San Fernando地震および1994年Northridge地震のPD、1987年Superstition Hills地震のSM、cの1992年Petrrolia地震のCMで1Gないしそれ以上の記録が得られている表中のFP、FNはそれぞれ断層走向と平行方向および直交方向に合成した成分の最大加速度値、Vは上下動の値である。これらの記録は図-1のスペクトルで見ても他の記録に比べ、飛び離れて大きく、観測サイトの特殊な条件を伺わせる。この内CLAおよびPDは観測点位置が、ダムのAbutment、SMは山の頂上と、地形的に地震動が大きくなる要素がある。CLAは1989年Loma Prieta地震の際にダムのDownstream(CLD)でも記録が同時に得られており、またPDは1994年Northridge地震の際に同様にDownstream(PDD)で記録が得られている。またSMでは余震観測により山の麓で同時観測記録が得られている。これらの記録のフーリエスペクトル比を用いて、より地形の影響を受けにくいと思われるDownstreamや山麓相当の記録に波形を修正した。表-1の最大加速度値で、かつこの値は修正値である。CLA地点は修正後(CLD相当)もかなり大きい値を示す。

地盤調査結果⁷⁾によると、CLAにおいて“Rock”は地下約10mで現れるが、30mでもS波速度は $V_s=300\text{m/s}$ とかなり遅い。元々の観測記録を積分して速度最大値を求めると 80cm/s にも達し、表層のS波速度との比よりTokimatsu et al.⁸⁾の関係により地盤の有効ひずみ γ_e を大雑把に推定すると $\gamma_e > 0.1$ となる。このことは、この記録が、表層で相当の地盤の非線形性の影響を受け、硬質地盤上の記録の特性からかけ離れている可能性を示唆している。このため図-2での重ね書きからはCLAの記録は除外することにした。

図-2には、修正したスペクトルを用いて、FP、FN成分を区別しスペクトルをまとめた。グループaには日本建築センターの工学的基盤でのレベル2地震動⁹⁾も示す。同地震動はグループaをほぼ包絡することが分かる。厳密には最大加速度値で 450gal 、加速度応答値で 1200gal 、速度応答値で 100cm/s 、変位応答値で 20cm で、全てのスペクトルがほぼ包絡される。速度応答値 100cm/s は1秒前後の狭い領域に限られ、より長周期側では急激にスペクトルレベルが減少する。レベル2の共通基準を考える場合に参考となる結果である。

これに対しグループbでは、グループaに比べ、最大加速度応答値ならびに最大速度応答値が有意に増加する傾向が見られるが、さらに地震規模が大きいグループcとの差はそれほどでもない。武村²⁾が $M_J=6.5-6.8$ を境に指摘する内陸地殻内地震の震源特性の違

いが地震動に反映している可能性がある。

グループb、cでは道路橋示方書¹⁰⁾の1種地盤に対するタイプIとIIの地震動の大きい方に一致するスペクトルが示されている。これらは観測記録のスペクトルをほぼ包絡する。活断層データ等をもとに地震を想定し、サイト毎に入力地震動を評価するという立場からすれば、以上の結果は、道路橋示方書のスペクトルを全国共通に使った場合、地震動を相当過大に評価する地点が多く出現することを示唆するものである。

4. まとめ

米国カリフォルニア州ならびに我が国の強震記録を調査し、震源近傍での硬質地盤における地震動レベルを検討した。その結果、地表地震断層が現れ難い M_J が $6.5-6.7$ 以下の地震に対しては、減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルにおいて、最大加速度値 450gal 、加速度応答値 1200gal 、速度応答値 100cm/s 、変位応答値 20cm で、記録のほぼ全てを包絡できることが分かった。地震規模 M_J がそれ以上になると、比較的長周期領域を中心に地震動のレベルが上がり、 $M_J=6.5-6.8$ を境に震源特性が変化する²⁾影響が地震動の性質にも反映している可能性が大きい。

参考文献

- 1) 土木学会, 1999, 第3次提言提言: 3章 耐震設計に用いるレベル2地震動。
- 2) 武村雅之, 1998, 日本列島における地殻内地震のスケリング則—地震断層の影響および地震被害との関係, 地震, 51, 211-228。
- 3) 武村雅之, 1997, 震度VIIの予測に向けて: 活断層・地下構造・地震被害に関する調査結果の利用, 第25回地盤震動シンポジウム, 69-86。
- 4) Ohno, S., M. Takemura, M. Niwa, and K. Takahashi, 1996, Intensity of strong ground motion on Pre-Quaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, J. Phys. Earth, 44, 623-648。
- 5) Fukushima, Y. and T. Tanaka, 1990, A new attenuation relation for peak ground acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 757-783。
- 6) 武村雅之, 1990, 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震, 43, 257-265。
- 7) Fumal, T. E., J. F. Gibbs, and E. F. Roth, 1987, Near-surface geology and seismic-wave velocities at six strong-motion stations near Gilroy, California, U. S. Geological Survey Bulletin 1639, 81-88。
- 8) Tokimatsu, K., S. Midorikawa and Y. Yoshimi, 1989, Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proc. Twelfth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, 2015-2018。
- 9) 建設省建築研究所・(財)日本建築センター, 1992, 設計入力地震動作成技術指針(案)。
- 10) (社)日本道路協会, 1996, 道路橋示方書・同解説V耐震設計編。