

鉄道施設における耐震基準の レベル2地震動への対応

西村 昭彦¹ 王 海波²

¹フェロー会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 工博 (株)テス (〒186-0002 国立市東 1-4-15 国立K Tビル8 F)

兵庫県南部地震の経験から、鉄道構造物の新しい耐震設計法は次のように定めた。設計地震動はレベル1, 2の2タイプを考慮し、設計基盤で設定する。そして、表層地盤の応答計算を行って設定した地表面地震動を用いて構造物の挙動を動的解析により算定する。構造物はその重要度に応じて耐震性能を設定し、構造物の地震時挙動がこの性能以内に収まることを照査する。また、レベル2地震動には、活断層によって引き起こされる内陸型地震と海洋型地震の2つを考慮することとした。本論文は鉄道構造物の耐震設計の概要と設計に用いるレベル2地震動の考え方について述べたものである。

Key Words : design seismic motion, interplate earthquake, inland earthquake, lever 2 seismic motion

1 はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震により鉄道施設においても構造物の崩壊を含む大被害が生じ、耐震設計法の見直しの必要性を認識させた。この地震を受け、地震直後に運輸省に設置された鉄道施設耐震構造検討委員会(委員長:松本嘉司東京理科大教授)で検討を重ね、平成8年7月「新しい耐震設計基準のあり方に関する基本的な考え方」が発表された。この考え方に基づき「耐震基準検討小委員会」(委員長:濱田政則早稲田大学教授)で2年間の審議を重ねた結果「鉄道構造物等設計標準同解説、耐震設計」(以下耐震設計標準という)がまとめられ、その本文は平成10年12月に運輸省から関係各機関に通達された。

ここでは耐震設計法の考え方と、レベル2地震動の考え方について述べる。

2 新しい耐震設計の考え方

兵庫県南部地震の経験から、耐震設計にあたっては、内陸型地震動によって発生する大きな加速度を考慮すること、部材の安全性評価において、破壊モードを考慮すること、応答値の算定にあたっては、表層地盤の動的性質を考慮する必要があることが分かった¹⁾。また、地震動が飛躍的に大きくなること、さらにその地震の再現期間が数百年以上の長期にわたることを考慮すると、構造物の設計においては部材および基礎の持つ変形性能(耐

震性能)を評価し、損傷は許容するが崩壊しないことを基本とするのが合理的であることも容易に推定される。

そこで鉄道構造物の耐震設計は、損傷制御の観点から目標とする構造物の損傷程度(耐震性能)を定め、基盤で設定した地震動を用いて、表層地盤の応答計算を行い、その地震動を構造物に入力して応答を求め、それに基づいて耐震性能を照査することを基本とした。

設計上考慮する地震動は構造物の供用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動(L1地震動)、と陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸直下型地震による地震動のように供用期間中に発生する確率が低いが大規模な地震動(L2地震動)の2つとした。

これに対する構造物の耐震性能は部材の損傷と基礎の安定を考慮して、地震後に必要となる補修や補強の程度から3つの性能を定め、その性能を満たすことを照査することとした。構造物にどの耐震性能を付与するかは構造物の重要度を考慮して決定する。

この耐震性能の照査に必要な構造物の応答値の算定は、動的解析を主体としたが、構造物の種類によっては静的解析法も用いられるようにした。この考え方に基づいた橋梁および高架橋の耐震設計の手順を図1に示す。

なお、この図に示してあるように、設計法としては土質調査に基づいて地盤種別を選定し、その地盤毎に設定した地震動を用いて算定した所要降伏震度スペクトルを使用して構造物の応答値を算定できる簡易な設計法

(非線形スペクトル法)と地盤および構造物の時刻歴動的解析を行う詳細な設計法(時刻歴動的解析法)がある。一般には、非線形スペクトル法を用いてよいが、後述するように挙動が1自由度系で表現できない構造物については詳細な方法を採用するのがよい。

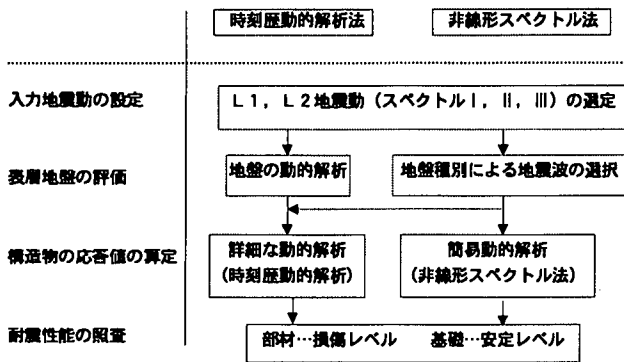


図 1 耐震設計の手順

3 基盤地震動の設定手順

日本付近での地震はプレート境界で発生するタイプとプレートの中で発生するタイプに大別される。日本付近では太平洋プレートが西方に、フィリピン海プレートが北西方向に運動しており、それぞれ日本列島の下に沈込んでいる。沈込みに伴って日本列島が乗っているプレートも引きずり込まれ、プレート境界にはひずみが蓄積される。ひずみが限界に達すると断層を境にプレートがずれ動き地震が発生する。これはプレート境界(海洋型)地震と呼ばれている。太平洋沿岸沖合に発生するマグニチュード8(M8)クラスの巨大地震のほとんどはこのタイプである。同一地域において大地震は数十年~200年程度の間隔で繰り返し発生する。図2には近年発生した海洋型地震を示している。

一方、プレート内部でもひずみが蓄積され地震が発生する。これはプレート内地震と呼ばれ、内陸で発生する浅い地震(内陸型地震)はこのタイプに属する。M7を超える地震の場合、断層が地表面に現れることが多い。兵庫県南部地震のように都市の近くで発生した場合には大きな被害をもたらす。このような地震を直下型地震と呼ぶことがある。一般に内陸型地震はM7、あるいはそれ以下で、プレート境界地震に比べれば規模は小さい。しかし、1891年の濃尾地震のようにM8クラスの巨大な内陸型地震もありうる。内陸型地震の震源になる活断層が活動する間隔は活発なもので千年に1回程度と言われている。活動度が低いものは、数千年~数万年の間隔があくこともある。

しかし、歴史地震を見れば、過去においてM7以上

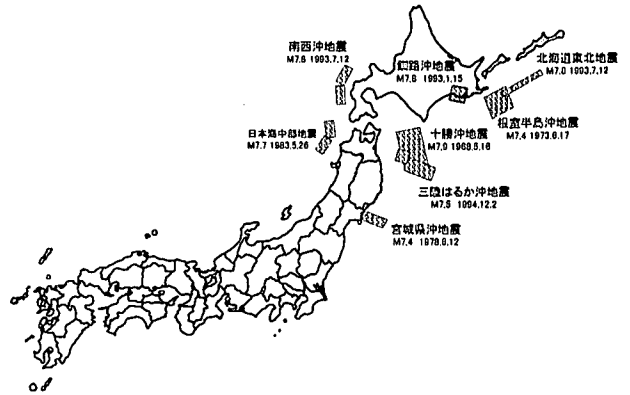


図 2 近年発生した海洋型地震の震源断層位置

の内陸型地震により大きな被害を生じた例が少なくない。さらに、全国のどこかでという観点に立てば、この内陸活断層地震も看過できない発生確率を持つと考えられる。

したがって、従来の耐震設計で考えている海洋型地震に加えて、内陸の活断層破壊に起因する断層近傍の地震動の影響を耐震設計に取り入れることが必要である²⁾。

本来、耐震設計で考慮すべき危険断層による地震動の再現期間等のリスク指標と適合した形で地震動が設定できれば理想的である。兵庫県南部地震以来、活断層の調査が活発に行われているが、活断層は過去の地震と明確に結びつけることが難しい場合が多い。現段階では、内陸活断層による地震の再現期間等の予測精度は、耐震設計の基礎とするにはなお不十分なことが多い。したがって、構造物の供用期間内に確実に活動しないと判断できる以外の活断層は地震動の設定に考慮することとした。

地震動は、建設地点近傍の内陸活断層の情報に基づいて、歴史地震活動、および海洋型地震動等の総合的な分析を行なって定めるべきである。なお、地震動は基盤で設定することとした。

耐震設計で考慮するレベル2地震動は図1に示すようにスペクトルI, II, IIIの3種類を考慮し、それから危険と考えられるものを選択することとした。図3にはその設定手順を示している。

スペクトルIはM8クラスの海洋型地震による地震動を主な対象として、地表断層を伴わないため発見しにくい内陸断層によるM6.5クラス以下の地震による地震動も総合的に考慮して定めたもので、耐震設計では最低限考慮すべき地震動である。

スペクトルIIは過去の内陸型地震での観測記録により統計解析を用いて求めた内陸断層直上の地震動である。

また、近年、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。その方法から設定した地震動はスペクトルIIIと定義した。

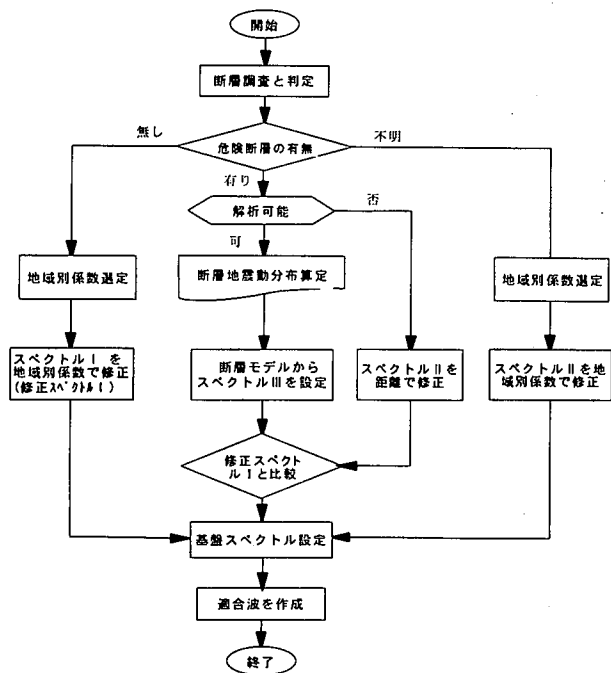


図 3 基盤地震動の設定手順

これらのスペクトルは断層の有無および断層と構造物の建設地点の距離等によって選択するが、厚い堆積層に覆われているため活断層が存在している可能性はあってもその確認が困難な地域、首都圏の地下のように3プレート境界が集まって複雑な地体構造となっている地域などは、断層の不明地域と区分することとした。この地域では直下にスペクトルIIレベルの地震動の発生することが考えられるので、地震活動性を反映する地域別係数を用いて修正したスペクトルIIを設計地震動とすることとした。

スペクトルIとスペクトルIIの特性値および地域別係数の設定を次に述べる。

4 観測記録から定めた断層近傍の地震動

活断層モデルから地震動を設定するには、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がなお残っている。したがって、多数の不確定要素の影響を考慮したとき、地震動の設定は、震源断層近傍で観測された既往の地震記録の統計解析を行うことにより、推定する方法が現実的であると考えられる。

ここでは、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用いて、基盤地震動レベルを考察し、作成したスペクトルIIを示す。

4.1 断層近傍の地震観測記録

表 1には兵庫県南部(1995,M7.2), Coyote Lake(1979,

M5.9), Loma Prieta(1989, M7.1), Landers(1992, M7.5)およびNorthridge(1994, M6.7)各地震での工学的地盤上又は地中の観測記録を示している。すべて記録は観測地点と震源断層との最短距離が最大 27km 以内で、最大加速度が 100gal 以上である。観測位置の地盤条件も工学的基盤(ここでは $V_s=400\text{m/s}$ 以上の地盤とした)の条件を満足した。その加速度応答スペクトルを図 4に示している。

兵庫県南部地震の記録では、地中で観測した基盤面の記録が殆どである。地中の地震動は上層地盤の反射波の影響を含んでいるので、観測地点の地盤定数を用いての引き戻し解析から、上昇波(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成分に近いとはいいがたい。そこで、東神戸大橋観測点以外は、観測位置地盤の V_s は 450m/s 程度以上(表 1)であることから、基盤の剛性は十分であり、表層の影響を受けにくいと考え、本検討では地中の観測記録をそのまま用いることとした。

これらの観測地震動は、加速度応答スペクトルで短周期側において 200gal から 3000gal 程度の幅を有し、長周期側においては数 10gal から 1000gal 程度を有する。その分散は以下の三つが原因と考えられる。

- 1) 地震震源特性
- 2) 地震動の伝播経路特性
- 3) 地形の影響

Northridge 地震の Tarzana の記録¹⁰⁾、兵庫県南部地震の新神戸変電所の記録⁴⁾と JR 宝塚の記録(図 4の点線)は、地形の影響が顕著であることが判明しており、統計処理対象から除いた。

地震動の伝播経路の影響は深層地盤構造とQ値等に支配される。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ため、ここでは、震源距離による分散に対して補正を行い、それ以外の分散は震源特性によるものとしてそのままにした。

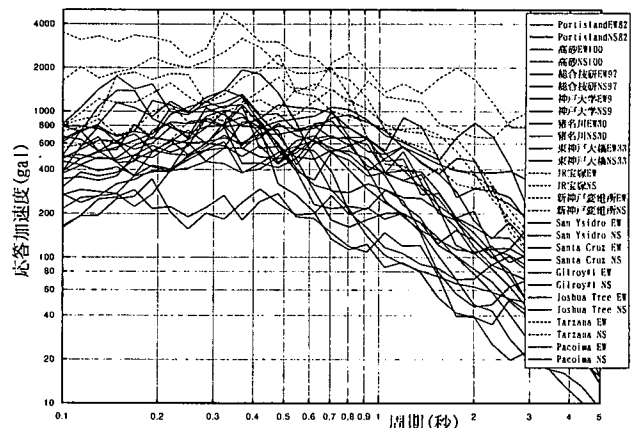


図 4 断層近傍の地震観測記録の加速度応答スペクトル

表 1 内陸型地震の観測記録

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	18.01	12.19	GL0.0	Limestone
11		Gilroy#1-Gavilan Coll.	426.6	433.6	36.973	121.572	26.56	12.21	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.	34.160	118.534	20.63	17.87	GL0.0	Thin alluvium over siltstone
14		Pacoima Kagel Canyon	424.2	295.2	34.288	118.375	18.73	8.98	GL0.0	Rock

4.2 距離による地震動の補正

観測地震動を断層からの距離に応じて地震動を低減するには距離減衰式が使われる。これを使用して観測地震動を等位置での値に補正することとした。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、福島提案式⁷⁾は次のようである。

$$\log S(T) = a_1(T)M_w^2 - a_2(T)M_w + b(T) \cdot R - \log(R + 0.025 \times 10^{0.42M_w}) + \sum c_j(T)I_j \quad (1)$$

一方、大野⁸⁾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を提案した。

$$\log S(T) = a(T)M_w - \log X_{eq} - b(T)X_{eq} + c(T) + \Delta s(T) \quad (2)$$

ただし
$$X_{eq}^{-2} = \sum_{i=1}^N d_i^2 X_i^{-2} / \sum_{i=1}^N d_i^2$$

ここに、 M_w はモーメントマグニチュード、 R は断層最短距離、 X_{eq} は等価距離、 N は小断層面の数、 d_i と X_i は各小断層面での食い違い量と小断層面からの距離である。

表 1には各観測地点と震源断層との断層最短距離と等価震源距離も示している。その計算に用いた震源断層モデルは文献¹⁶⁾に示している。

内陸活断層の断層面は鉛直に近い場合が多い、また地殻の厚みによって、鉛直方向の範囲が 15~20km 程度であり、地震規模が大きくなるとともに、破壊面は水平方向に広がるが、影響範囲は断層から数 10km と考えられる。また、断層破壊面が大きくなるとともに地震の影響範囲が広がる一方、地震エネルギーの分散により、断層近傍の地震動の強度は、一定値になる傾向がある。

したがって、ここでは、断層直上の地震動に着目するため、震源距離のみに対して補正を行なった。用いた観測記録の地震規模を考えて、等価距離 12km を目標補正距離とした¹⁶⁾。補正した観測記録の加速度応答スペクトルを図 5に示す。この結果、全体的に修正したスペクトルは値が大きくなったが、総合技研と Loma Prieta 地震の Gilroy-Gavilan Coll.の記録が 2000gal 超えた以外、上限は 2000 gal 程度である。短周期側においては分散が小さくなったが、長周期側においては改善が小さい。これは、長周期成分の特性は地震震源特性と深層構造特性に支配されるためと考えられる。

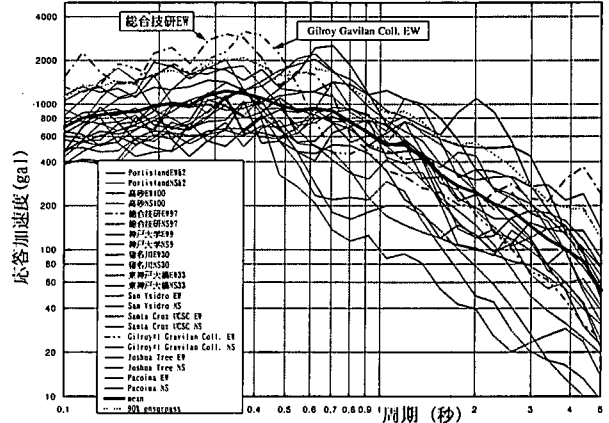


図5 等価距離減衰式 12km までに補正した加速度応答スペクトル

図 6は兵庫県南部地震と米国の地震の統計値の比較である。これから、短周期側約 0.45s まで、両国の統計値はよく一致する。また、データ数が多くなると統計値が滑らかになる傾向が見られる。0.5s より長周期側では兵庫県南部地震の方が大きかったことが判った。この差は長周期側の分散にも影響している。

同様の手法で、断層最短距離を用いて各観測記録の加速度応答スペクトルを 2km まで補正した¹⁶⁾。一般に、地

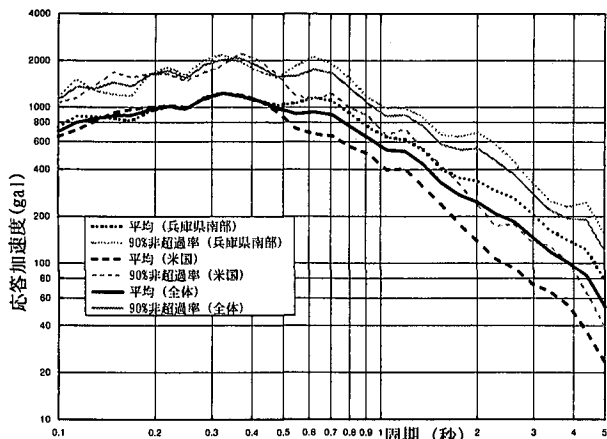


図6 兵庫県南部と米国地震動記録の統計結果の比較

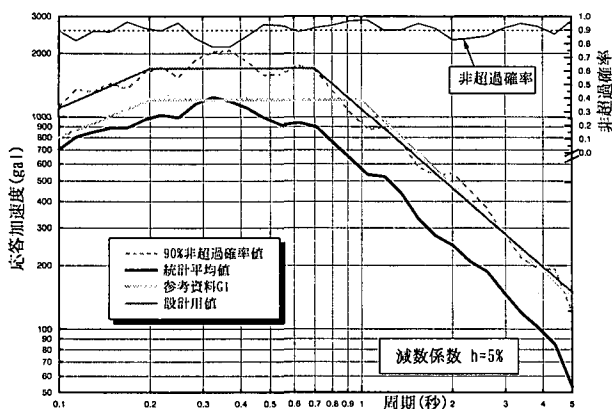


図7 断層直上の地震動

震断層は地表に到達しても、地表から2km程度の範囲にはエネルギーを持っていないと考えられるので、断層最短距離2kmの値は断層の真上の位置と見られる。両方法の統計結果はよく一致してが、紙面の都合で図は省略した¹⁶⁾。

4.3 統計解析による断層直上の地震動

地震動の複雑さとも言えるが、補正した統計値には相当の分散がある。採用した観測記録の数と将来発生する地震を考えると、最大値を包絡した地震動より、ある非超過確率を持つ最大地震動を定義する方が自然現象として客観的に評価できると考え、スペクトルを設定した。

鉄道構造物に対して非超過確率の設定を行う場合、以下のことを考慮する必要がある。

- 1) 鉄道は人を運送する機関であり、その施設の安全性は人命と関わる。
- 2) 鉄道施設では、一個所の破壊は全区間に影響をもたらす、普通は、迂回道はない。他の施設、例えば、水道の場合、network systemの配置によって、一個所の破壊は全体の影響を最小限に押えられる。
- 3) この解析では、用いた地震記録の数が少ないので、統計結果の信頼性はなお不十分と考える。

したがって、十分高い非超過確率が望ましいが、現在の設計計算の精度を考慮して、90%程度の非超過確率が妥当ではないかと考えた。

統計値の各周期での確率分布を正規分布であると仮定すれば、一定非超過確率の値が設定できる。

図5に点線で示しているのは90%非超過確率の値である。最大値は0.3s前後で約2000galであるが、総合技研とLoma Prieta地震のGilroy Gavilan Coll.の記録の影響が大きいと考えられる。

これから設計地震動を定める場合、設計上の便宜のため、加速度スペクトルを対数座標系で3本の直線で規定するとした。図7には、統計結果の90%非超過確率を目標として近似した断層直上の地震動スペクトルIIを示す。この値は

- 1) 0.1sで1100gal
- 2) 0.2s~0.7sまで1700gal
- 3) 5.0sで154gal

となる。

このスペクトルは断層直上であり、実設計においては、建設地点と断層との距離によって地震強度を低減させるので(図3)全体として過大評価にならないと考えている。図7にはスペクトルIIに対する非超過確率を示している。全体の平均は90%で、0.3sから0.4sの間は最小78%になった。これは、総合技研とGilroy Gavilan Coll.の記録の影響が大きい、所要降伏地震動スペクトルで検討した結果、構造物の安全性に大きな影響がないことから、上記の値とした。

5 海洋型地震による地震動

海洋型地震について、従来の設計体系には、標準的地盤における弾性応答で1Gの設計地震動を考慮する形で扱われている。内陸型地震動と統一的に評価するために、海洋型地震動を対象とするスペクトルIも実観測記録から同様な統計解析によって定めることとした。

近年日本近傍で発生したマグニチュード7.4以上の主な地震を図2に示す。鉄道総研で収集した100gal以上の水平成分の観測記録は約100成分である。その震源距離の分布を図8に示す、大部分の観測の震源距離は100~200km範囲にある。

5.1 海洋型地震の観測記録

距離補正の信頼範囲と表層地盤の影響を考慮して、統計解析に用いる観測記録は以下の条件を満足するように選択した。

- 1) 等価震源距離と断層最短距離は200km以内
- 2) フーリエスペクトル上顕著なピークがない
- 3) 観測地点の地盤条件は良好である

用いた全27成分を表2に、加速度応答スペクトルを

表2 統計解析に用いた海洋型地震観測記録一覧

地震名	記録番号	観測地点	緯度	経度	震央距離 (km)	等価震源距離 (km)	断層最短距離 (km)	地盤条件	観測場所	強震計種類	観測方向
十勝沖地震	4	八戸	40.55	141.483	179.4	130	88.6	II	GL	SMAC	NS,EW
根室半島沖	2	大楽毛橋	43.0083	144.271	136.9	163.7	109.7	II	GL	SMAC-B2	LG
宮城県沖地震	1	開北橋	38.445	141.313	81.6	70.2	56.5	I	GL	SMAC-B2	LG,TR
	2	大船渡防地	39.00	141.733	101.7	86.8	71.6	II	GL	SMAC	N41W,E41N
日本海中部地震	5	上島崎	42.1014	140.563	231	190.8	144.5	I	GL	SMAC-Q	LG,TR
釧路沖地震	4	蒲河	42.158	142.781	151.6	174.4	149.1	II	GL	気象台87型	NS,EW
	6	花咲港	43.2800	145.589	109.4	156.4	131.3	I	GL	ERS-C	N20E,E20S
	7	十勝港	42.2889	143.324	106.5	141.7	121.8	II	GL	ERS-C	NS,EW
	11	広尾橋	42.2792	143.319	107.5	142.4	122.4	I	GL	SMAC-Q	LG,TR
	14	大楽毛橋	43.0083	144.271	19.8	105.2	100.1	II	GL	SMAC-B2	LG,TR
北海道南西沖地震	3	室蘭港	42.3167	140.967	153.3	149.0	129.3	II	GL	ERS-C	NS,EW
	5	上島崎	42.1014	140.563	124.6	120.1	91.4	I	GL	SMAC-Q	LG,TR
北海道東方沖地震	3	花咲港	43.2800	145.589	168.4	123	58.5	I	GL	ERS-C	N20E,E20S

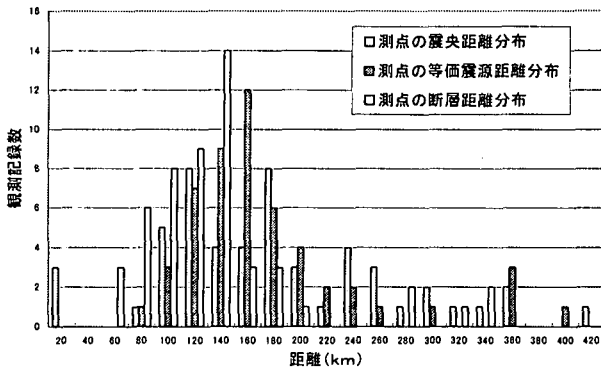


図8 観測地点の震源距離分布

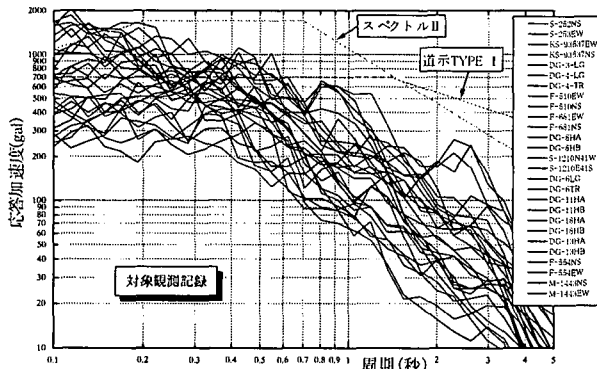


図9 対象観測記録の加速度応答スペクトル

図9に示している。

5.2 観測記録の補正

これらの観測記録に対してスペクトルIIと同様等価震源距離減衰式(式2)と断層最短距離式(式1)を用いて震源距離の補正を行なった。さらに、震源と離れた位置での地震動の評価となるため、地震規模の影響の補正も必要と考え行った。

二つ距離の取り方による低減特性の比較を図10に示している。観測地点の断層震源距離の統計値に基づく、断層最短距離の基準値は20km、等価震源距離の基準値

は50kmにした。平均的な地震規模 M_w は7.8にした。採用する観測記録の震源距離範囲において両式の低減傾

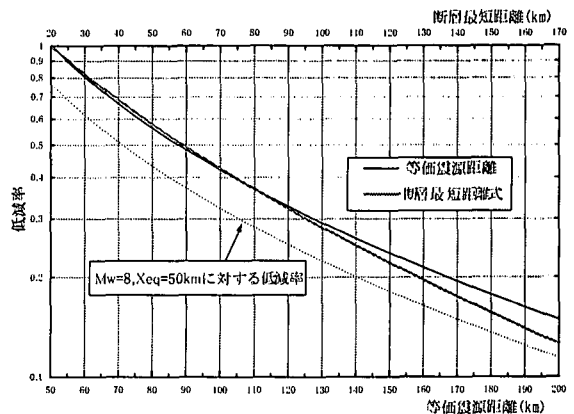


図10 距離減衰式の低減傾向の比較 (周期1秒)

向がほぼ一致していることが分かった。

ただし、地震規模に対する見掛け感度は両式の差が現れる。断層最短距離式(式1)から、最短距離20kmにおける M_w が7.8と8.0の場合、差が殆どないのに対して、等価震源距離50kmにおける M_w が7.8と8.0の比は0.767倍になる。

以上の差は距離の取り方によるものと考えられる。断層の長さ L と地震モーメント M_0 の関係、または、地震規模マグニチュード M_w と M_0 の関係は以下の経験式で与えられる¹⁷⁾。

$$\log M_0 = 2.619 \log L + 22.445 \quad (3)$$

$$M_w = (\log M_0 - 16.1) / 1.5 \quad (4)$$

よって M_w と断層の長さ L の関係は以下になる。

$$\log L = (M_w - 4.23) / 1.746 \quad (5)$$

M_w が8と7.8の断層長さは約144kmと110kmになる。断層の幅は長さの0.5倍とすれば、断層面に対して最小等価震源距離は34.9kmと27.2kmになる。つまり、断層最短距離が同じ地点にしても、地震規模が大き

くなるとともに等価震源距離の値も大きくなる。 M_w が 8 の場合、 M_w が 7.8 で等価震源距離 50km と同じ地震動となる等価震源距離は 62.5km である。

一方、断層最短距離を用いた場合、観測地点の地震動が近い断層面に支配され、100km も超えた断層サイズの変動の影響が小さいので、断層最短距離の値が同じであれば、地震動が同じになると考えられる。

上記の差を斟酌して、表 3 に示す補正の目標距離と目標地震規模に対して観測記録の加速度応答スペクトルの補正を行なった。その際、マグニチュードが 8.0 以上の地震の記録は、地震規模をそのままにした。また、プレート境界の震源断層面は陸側に向かって沈み込むので、各地震の震源距離の補正下限値を断層下端での値とした。例えば、釧路沖地震では、断層下端に対して最小断層最短距離が 103km である。

補正結果は元観測値より応答スペクトルのレベルが大きくなったが、分散幅の改善が少ない。これは震源断層モデルの精度に大きく影響されると考える^{13), 14), 15)}。本検討では、震源断層距離を算定する際、断層面上の食違い量の分布は全て一様と仮定した。

図 11 に距離補正結果の統計値の比較を示している。

断層最短距離を用いた場合、地震規模の影響が少ないことが図から分かる。一方、等価震源距離を用いた場合、地震規模 M_w を 8.0 に補正した結果は地震規模補正がない場合より、応答スペクトルの全体が大きくなった。

これは等価震源距離の取り方により、同じ等価震源距離の値に対して地震規模が大きいほど大きな地震動になることが推定される。周期に対する影響はあまりない。

図 11 から、 M_w 8.0 地震で等価震源距離 80km に補正した応答スペクトルが同じ地震規模、断層最短距離 30km に補正した応答スペクトルより大きいことが分かった。その統計値の分散が断層最短距離 30km で補正した結果より若干小さくなっている。このレベルの地震動は断層最短距離 20km 程度のものと相当すると考えられる。一般的な海洋型地震の断層面の深さを考えると、この距離は断層縁部の直上とも言える。関東、東海地方においては海洋型地震でも直下に起ると考えられるが、それ以外の地方は、発震断層の縁部の直上地表はかなり震源に近い位置となる。

表3 補正する目標距離と地震規模

	断層最短距離		等価震源距離	
	目標距離 (km)	地震規模 (M_w)	目標距離 (km)	地震規模 (M_w)
Case1	30	—	50	—
Case2	50	—	80	—
Case3	80	—	100	—
Case4	30	8.0	50	8.0
Case5	50	8.0	80	8.0
Case6	80	8.0	100	8.0

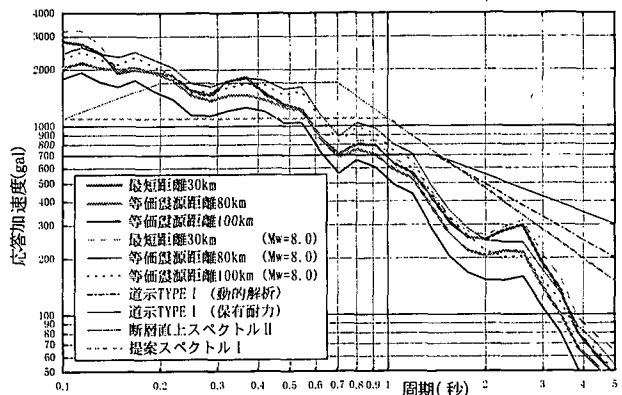


図11 補正結果の統計値の比較

長周期側において、そのレベルはスペクトルIIより小さい、傾きはスペクトルIIとほぼ一致している。しかし、短周期側では大きな値を示している。これは、観測地点の地形等の影響を考えられるが、海洋型の震源特性も反映していると考えられる。

これらから設計スペクトルを M_w 8.0 と等価震源距離 80km を目標とした補正值に基づいて、従来の海洋型設計地震動を勘案して設定することとした。スペクトルIは 0.1~1.0 秒では 1100gal、5.0 秒では 154gal ように設定した (図 11 に破線で示す)。設計上の便宜で、長周期側のレベルはスペクトルIIと一致した。スペクトルIは 0.65 秒より長周期側において補正した観測値を包絡できるが、それより短い周期においては小さくなっている。ただし、図 9 に示した元観測値をほぼ包絡している。一般に、短周期地震動は内部減衰により速く低減し、それに対応する変位量も小さいので、設計上において、過小評価にはならないと考えている。

また、式(5)と式(2)を用いて、断層が地表に現われない $M6.5$ 以下、震源深さ 10km 程度の地震動の加速度スペクトルを推定できる。設定したスペクトルIは、最小地域別係数(0.7)を掛けても、その地震動を包絡できる。

6 地震動の地域特性

地震動の地域特性は地域別係数で区分する。地域別係数は全国の地震危険度の相対レベルを表わすので、地震危険度解析²¹⁾によって設定した。

6.1 地震危険度解析手法

地震危険度解析については、これまでにさまざまな手法が提案されている。しかし、歴史地震データについては 100 年程度しか信頼できるデータが無いことから、活動周期の長い内陸地震動を対象として考えた場合には不十分であると考えられる。ここでは、佐藤らの手法を用いて歴史地震データおよび活断層データそれぞれに基づき

危険度解析を行なった。

なお、解析には等価距離減衰式を用いた²¹⁾。

歴史地震についてはそれぞれの地震をデータ採用期間内に1回の発生確率を有する地震と考えて算出する。活断層については、過去の地震で断層長さ L と地震モーメント M_0 の回帰式(3)に示す関係で断層の長さから将来発生する地震の地震モーメント量を推定する。さらに、断層面上の平均食い違い量 D と地震モーメント M_0 (式6)の関係および活断層の年間平均変位量により地震発生確率を算出する。

$$M_0 = \mu DS \quad (6)$$

ここで、 μ は地盤剛性、 D は断層面上の平均食い違い量、 S は断層面積である。

6.2 解析に採用したデータ

6.2.1 歴史地震データ

歴史地震データの採用にあたっては、一般的なものとして以下に示す片山の区分¹⁹⁾が挙げられる。

- $5.5 \leq M < 6.1$ 1926年以降
- $6.1 \leq M < 7.5$ 1985年以降
- $7.5 \leq M$ 1600年以降

これは、1926年以降は気象庁カタログに含まれる期間、1885年以降は地震の計器観測業務が開始された以降、1600年以降は江戸幕府による中央集権が開始された以降地震被害に関する記録が残りやすくなってからのものであることから、それぞれ期間のデータの信頼度を考慮して設定されたものである。

しかし、今回の検討では北海道等についても検討対象とすることから、江戸時代を含めるとデータが不均質性となると考え、以下の区分により採用することとした。

- $5.5 \leq M < 6.0$ 1926~1996年
- $6.0 \leq M$ 1885~1996年

1926年以降については気象庁カタログ、1885~1925年については宇津カタログ²⁰⁾等を用いることとした。

地震データには、震源深さ100km以上の深発地震について、実際に家屋の崩壊や道路の損壊などの小被害以上を生じたものは2例だけであることから、それらを解析データから削除した。

6.2.2 活断層データ

活断層データについては、解析に用いるに当たり出典が明らかでなおかつ確実度が高いものを採用しようと考え、「新編日本の活断層」¹²⁾に記載されているもので確実度がIおよびIIのものを解析対象とした。各断層の活動度に対しては次に示す平均変位量を与えた亀田ら¹⁸⁾の分類を用いた。

- 活動度 A : 3.3m/1000年
- 活動度 B : 0.32m/1000年

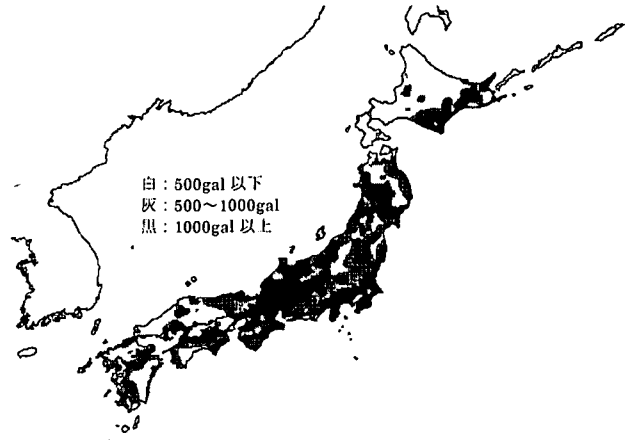


図 12 危険度解析により 1000 年の期待値分布図

活動度 C : 0.053m/1000年

6.3 全国における応答加速度期待値

全国の応答加速度期待値の相対レベルが周期の依存性が小さいため、固有周期 0.5s を固定し、日本全国に対して 5km ピッチで危険度解析を行なった。すべての解析結果には再現期間の違いによる全体的な傾向の違いが少ない。図 12 に 1000 年の期待値の分布図を示す。

6.4 地域別係数の設定

再現期間 50, 100, 1000 年についての危険度解析の結果に基づいて全国の地域別係数を 3 段階に区分した。各地域での係数の設定に当たって以下の項目を考慮した。

1) 段階の基準値(gal)は以下により区分する。

- 再現期間 50 年 : 200 以下, 200~400, 400 以上
- 再現期間 100 年 : 300 以下, 300~500, 500 以上
- 再現期間 1000 年 : 500 以下, 500~1000, 1000 以上

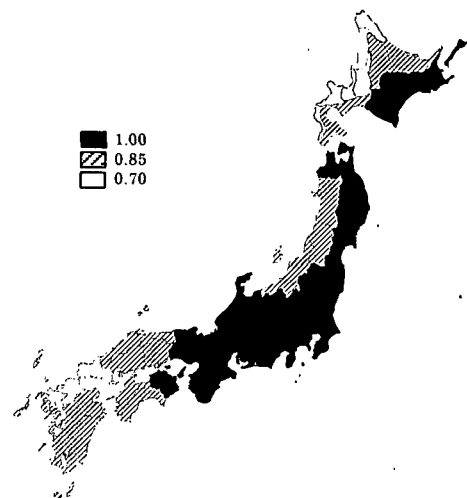


図 13 地域別係数

- 2) 3つの再現期間で危険度の高いものを判定値とする。
- 3) 歴史地震において東北太平洋側の地震については距

離によって減衰しにくいことを考える。

- 4) 地域別係数 1.0 に該当する地域に隣接する地域の係数は 0.85 とする。
- 5) 現行標準とのキャリブレーションを考え、各再現期間での解析結果で全て高い期待値となっている地域を除く、現行で 1.0 の地域の下限値を 0.85、0.70 の地域の上限値を 0.85 とする。

図 13には解析の結果定めた全国の地域別係数を示している。

7 おわりに

耐震設計に用いるレベル2基盤入力地震動として、建設地点近傍の内陸活断層の情報に基づいて、内陸型地震および海洋型地震動等を考慮した設定方法を提案した。

M8クラスの海洋型地震による地震動を主な対象にしたスペクトルⅠと内陸活断層による地震動を対象にしたスペクトルⅡの特性値はそれぞれの地震観測記録の統計解析に基づき、工学的判断を加えて設定した。さらに、歴史地震と活断層データを用いた地震危険度解析に基づき地域別係数を三段階に区分した。

地震は今後も発生し、観測データも得られるであろう。また、断層のデータに基づく地震動の推定も精度が上がると考えられる。耐震設計にはこれらの成果を取り入れることが必要と考えている。

謝辞

本研究を行うにあたっては、多数の研究機関から地震観測データを頂きました。ここに記して感謝の意を表わします。

また、指導いただいた京都大学佐藤忠信教授をはじめ地震動設定にご意見をいただいた耐震基準検討小委員会地震動WGの皆様には感謝いたします。

さらに地震危険度解析ではJR東海旅客鉄道株式会社の長縄卓夫氏にお世話になりました。併せてお礼申し上げます。

文献

- 1) 西村昭彦：「構造物の耐震」，鉄道総研報告，Vol.10, No.3, 1996.3
- 2) 土木構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
- 3) 新設構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
- 4) 阪神・淡路大震災調査報告書（資料編），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) 理論地震動研究会：地震動—その合成と波形処理，鹿島出版社，1994年
- 6) 日本建築学会：地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み，1983年
- 7) 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

- 8) 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
- 9) 後藤洋三，江尻諫嗣：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
- 10) Preliminary report on the principal geotechnical aspects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake, EERC Report No. UCB/EERC-94/08
- 11) 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
- 12) 活断層研究会編：〔新編日本の活断層—分布図と資料〕東京大学出版，1991
- 13) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版社，1989年
- 14) 中村雅基ら：平成5年（1993年）釧路沖地震の地震活動について，験震時報 第58巻，1994年
- 15) 長 郁夫ら：1994年北海道東方沖地震（MJMA=8.1）のCMT解：広帯域強震計データを用いたインバージョン，地震 第2輯，第48巻，1995年
- 16) 王海波，室野剛隆，西村昭彦：実観測記録に基づく内陸断層近傍地震動の評価，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム，1997年11月
- 17) 土岐・佐藤・清野・藤村：歴史地震データと活断層データに基づく近畿地方の地震危険度解析，京都大学防災研究所年報第34号B-2，1991年
- 18) 亀田弘行・奥村俊彦：活断層データを組み合わせた地震危険度解析，土木学会論文集362号I-4，1985年10月
- 19) Katayama, T: Seismic risk analysis in terms of acceleration response spectra, Proc. 2nd US-National Conference on Earthquake Engineering, 1979
- 20) 宇津得治：日本付近のM6.0以上の地震および被害の表：1885年～1980年，東大震研彙報，Vol.57, 1982
- 21) 長縄卓夫，王海波，西村昭彦，鈴木一成：活断層データおよび歴史地震データによる地震危険度解析，第10回日本地震工学シンポジウム，1998年12月