

地盤応答特性を考慮した基盤地震動と 地表面地震動の変化関係について

王 海波¹・西村 昭彦²・室野 剛隆³

¹ 正会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

² フェロー会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³ 正会員 工修 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

地表面地震動は表層地盤の非線形応答特性に大きく影響されるため、工学基盤面で設計地震動を規定し、地盤応答解析により表層地盤を評価する方法が新しい耐震設計基準に取り入れられつつある。一方、従来の標準では、設計地震動が地表面で規定した経緯もあるので設計実務の便に供するために基盤面の設計地震動に基づき地盤種別毎に地表面地震動を設定した。さらに、各地盤種別での所要降伏震度スペクトルを規定した。しかし、基盤面の設計地震動は地域別特性または震源距離によって低減される。L2 地震動を受ける表層地盤は強い非線形を有するため、その低減係数をそのまま地表面地震動には適用できないと考える。本研究には L2 地震動に対して地表面地震動と基盤地震動の変化関係を考察し、所要降伏震度スペクトルの補正方法について検討した。

Key Words: Nonlinear response, Surface ground, Demanded strength spectra, Design seismic motion

1. はじめに

新しい鉄道構造物耐震設計標準では表層地盤の影響を評価するために設計地震動は耐震設計上の基盤面で規定する¹⁾。その基本特性は弾性加速度応答スペクトルおよび時刻歴波形で表わす。一方、従来の設計標準では、地震動は地表面で規定した経緯もあるので、設計実務の便に供するために新しい鉄道耐震設計標準では、基盤面の設計地震動に基づき、地盤種別 (G0~G7) 毎に地表面地震動すなわち弾性加速度応答スペクトルおよび時刻歴波形を設定した。また、その地表面地震動に基づく所要降伏震度スペクトル (図 1) も規定した。この所要降伏震度スペクトルを用いれば、一次の振動モードの卓越する単純な構造物に対して、その降伏震度と固有周期から構造物の応答塑性率が求められるので、設計者にとって便利な方法である²⁾。

しかし、所要降伏震度スペクトルは設計地震動の特性と構造物の非線形履歴特性を反映したものである³⁾ので、対象地震動、地盤種別および構造物の非線形履歴特性の組み合わせで事前に用意しなければならない。しかも、その数は膨大になる。ところで、基盤面の設計地震動は、震源の不明な場合地域別係数で、震源が特定できる場合震源距離によって低減される³⁾。L2 地震動を受ける表層地盤は強い非線形応答を示すため、基盤地震動の低減

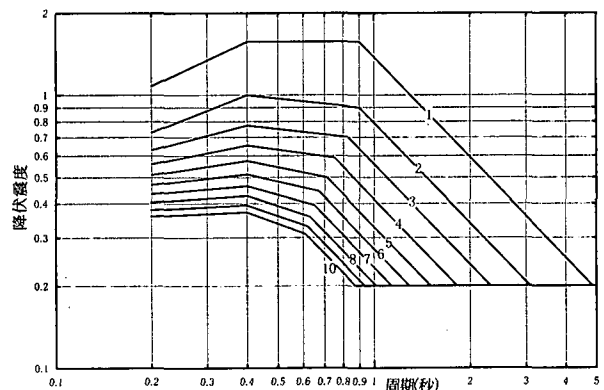


図1 設計降伏震度スペクトル (一例, G3 地盤)

率をそのまま地表面地震動には適用できないと考えられる。つまり、基盤面の入力地震動が小さくなると、表層地盤の剛性低下が少なくなり、履歴減衰も小さくなるため、その伝達特性は変化する。地表最大相対変位の低減は基盤面の低減より大きく、地表最大絶対加速度の低減が基盤面の低減より小さくなるのは一般的な傾向である。地盤調査に基づき地盤応答解析を行えば、表層地盤の特性がすべて考慮されるが、所要降伏震度スペクトルを用いて構造物の応答値を算定する場合、地盤応答解析を行わない場合が多いと考えられる。したがって、地盤の非線形応答特性を考慮した基盤面の設計地震動の低減率に対応する所要降伏震度スペクトルの修正方法が要求

される。

本研究では、地震観測記録と地盤応答解析から地表面地震動の特性を考察し、地盤応答解析の統計結果から地表面の所要降伏震度スペクトルの修正方法を提案した。

2. 地震記録からの考察

兵庫県南部地震では大量な観測記録が得られた。観測地点の柱状図など詳細な地盤調査資料がないが、ここでは、観測地点の地盤条件は道路橋のⅡ種地盤に相当するものを考察対象とした。さらに、地盤の非線形応答特性を考察するため、地震動レベルについては、最大加速度値 100gal 以上の記録を採用した。観測記録の一覧を表 1 に示している。基盤層に相当する位置の観測がないが、地表面地震動の大きい地点では基盤面の地震動も大きいと考えられる。したがって、最も大きい海洋気象台 NS 記録を基準として、地表面地震動の特性を論じる。表 1 には各観測地点の最大加速度および最大変位の比を示している。例外もあるが、入力地震動の低減に伴ない地表面の変位は加速度より大きく低減することが判る。

表 1 兵庫県南部地震の観測記録

記録名	最大加速度(gal)	最大変位(cm)	気象台 NS との比	
			加速度	変位
海洋気象台 NS	817.8	18.6		
四条畷供給所 EW	221.0	9.5	0.27	0.51
四条畷供給所 NS	256.5	10.2	0.31	0.55
京都供給所 NS	308.0	2.9	0.38	0.15
西京都変電所 EW	113.7	2.4	0.14	0.13
西京都変電所 NS	129.3	1.4	0.16	0.07
中之島供給所 EW	106.5	2.8	0.13	0.15
中之島供給所 NS	105.5	3.5	0.13	0.19
彦根 EW	146.9	2.5	0.18	0.13
彦根 NS	136.7	1.7	0.17	0.09
加古川 HA	143.6	1.5	0.17	0.08
加古川 HB	210.9	1.5	0.26	0.08
淀川堤防枚方 HA	293.3	2.9	0.36	0.15
淀川堤防枚方 HB	397.1	4.4	0.48	0.24

さらに、各地震記録の所要降伏震度スペクトルを計算し、海洋気象台 NS を基準とした降伏震度スペクトルの比を図 2 に示している。各観測地点の地盤条件の違いがあるが、短周期から長周期に向かって降伏震度の比が傾いているのは共通な特徴である。

震源特性が同じであるため、この傾きは各観測地点の表層地盤の非線形応答特性を反映したものである。つまり、大きな入力地震動の地表面地震動と比べると、小さい地震動での短周期成分が長周期成分より多い、地盤剛性の低下が小さい。これは最大加速度の比と最大変位の比で示した現象と一致する。

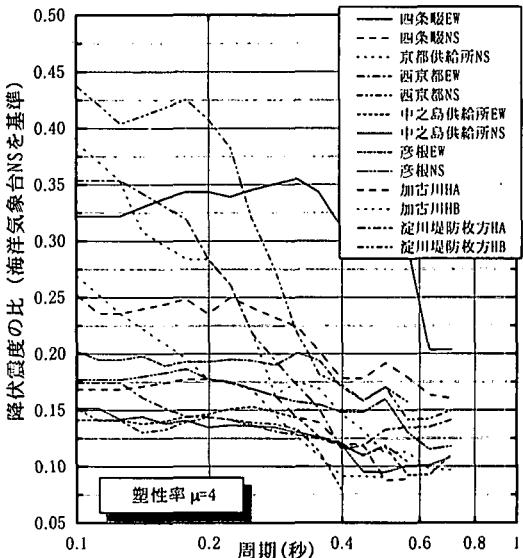


図 2 観測記録から見た地表面地震動特性

大阪ガスの四条畷供給所の観測記録においては、より長い周期では降伏震度スペクトルの比が大きくなる、または 1 を超える場合もある。これはその記録には表面波の影響が大きいと考えられる⁴⁾。

3. 解析による検討

地震観測から表層地盤の非線形応答の特徴が明確であるが、それに基づき定量的な関係を求めるのは困難である。したがって、以下には地盤の応答解析から、その関係を定量的に検討する。

地盤応答解析を省略して地表面の所要降伏震度スペクトルの修正法を提案するためには、工学基盤面の地震動レベルの変化による地表面の所要降伏震度スペクトルの一般的な変動傾向を明確にする必要がある。したがって、その傾向を把握するために、以下の検討には、同じ地盤種別に分類された多数の実地盤条件での解析結果の統計特性を用いた。

地盤条件を N 値から設定したため、地盤解析は一次元等価線形化法プログラム SHAKE を用いた。土質を粘性土と砂質土に区分し、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係は各土質について提案されている実験式を適用した。砂質土は岩崎・龍岡らの関係式⁵⁾を、粘性土は岩崎・常田らの関係式⁶⁾を用い、これらの特性が拘束圧に依存することから、深度毎に設定した。最大減衰比は、砂質土で 35%、粘性土で 20%を与え、深度によらず一定とした。

また、新しい鉄道耐震設計標準で規定した断層直上の地震動であるスペクトルⅡ³⁾を基本的な基盤地震動とした。所要降伏震度スペクトルの算定には Bilinear クラフ非線形履歴モデルを用いた。

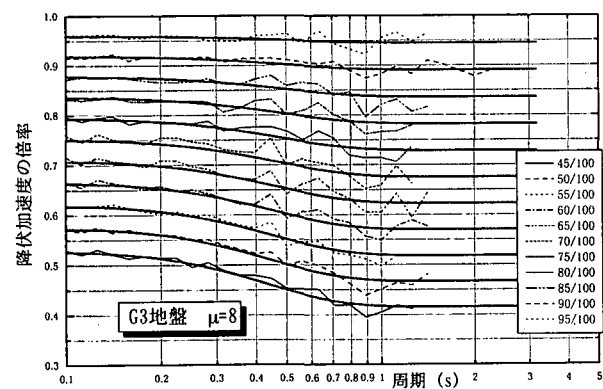
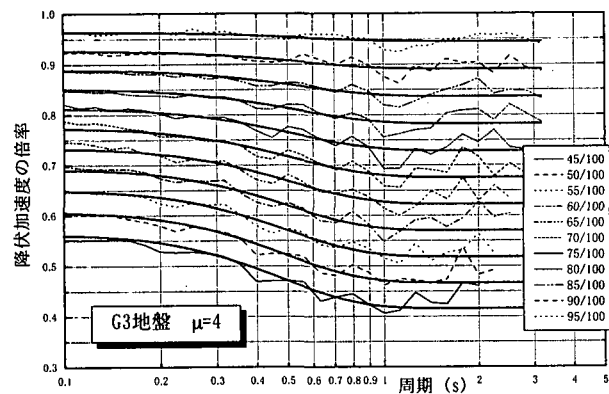
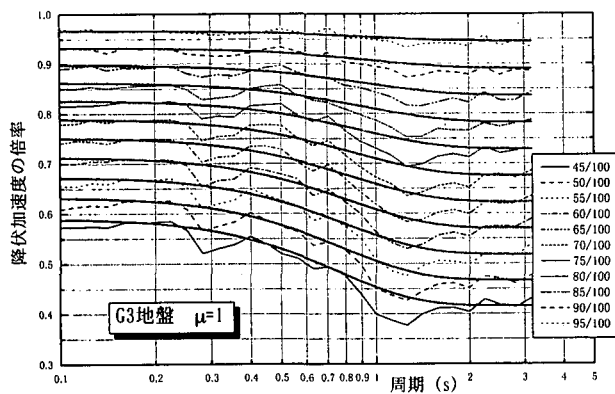


図 3 地表面地震動の降伏震度スペクトルの低減
G3 地盤，上： $\mu=1$ ，中： $\mu=4$ ，下： $\mu=8$

4. 解析結果の整理と修正法の提案

新しい鉄道耐震設計標準で地盤種別は G0～G7 の 8 種類に設定し，その中，G0 は岩盤で，G1 がせん断波速度 400m/s 以上の工学基盤である。G2～G7 地盤はその初期卓越周期によって区分され，周期が長いほど地盤が軟弱である。応答計算には各地盤種別毎に 10 種類程度の地盤を用いた。

工学基盤面の地震動レベルは基本的な基盤地震動（スペクトルⅡ）に低減係数を乗じて変化させる。地盤種別毎に同じ地震動レベルに対して，所要降伏震度スペクトルの統計値を算出し，この統計的な所要降伏震度スペクトルを低減のない地表面地震動の所要降伏震度スペクトルで正規化した値を地表面地震動の降伏震度スペクトル

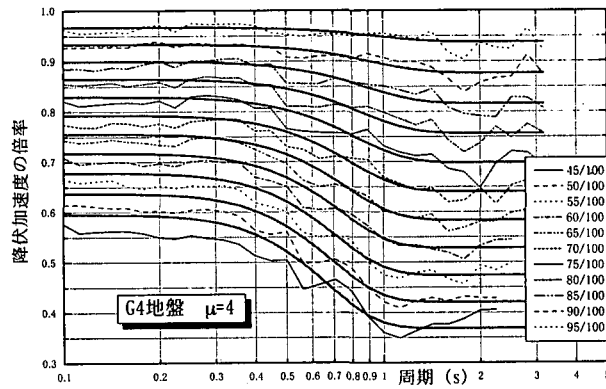
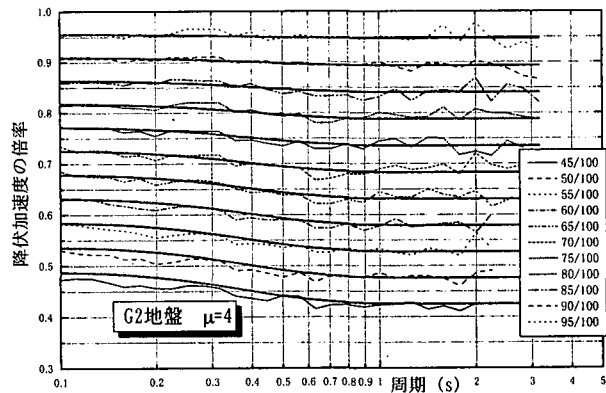


図 4 地表面地震動の降伏震度スペクトルの低減
 $\mu=4$ ，上：G2 地盤，下：G4 地盤

ルの倍率として定義した。

図 3 には G3 地盤の結果を応答塑性率別で示している。図中の凡例は基盤地震動の低減係数である。G3 地盤とはその固有周期が 0.25～0.5 秒のものを言う。図 4 には G2 地盤（0.25 秒以下）と G4 地盤（0.5～0.75 秒）の応答塑性率 4 の結果を示している。

この図から降伏震度スペクトルの倍率の変化傾向は，解析結果と観測結果がよく一致していることが分かる。短周期側に置いては基盤面での倍率より大きい値，長周期側はより小さい値を示している。基盤での地震動レベルが小さくなるほど，長短周期間の差は大きくなる。さらに，解析の結果から，この倍率の変化は地盤種別または応答塑性率によって変化することが分かった。地盤種別への依存性は，地盤が軟弱ほどその非線形の影響が大きいことを反映している。G2 地盤の変化傾向（図 4）から見ると，基盤面の倍率はそのまま地表面の降伏震度スペクトルに適用しても大きな誤差が生じないと思う。しかし，G4 地盤では基盤面での低減係数が 0.45 の場合，短周期側での倍率は 0.55 で，両者の差が 2 割程度もある。

応答塑性率によって地表面地震動の降伏震度スペクトルの倍率の変化は履歴減衰の効果と考えられる。塑性率が大きいほど長短周期間の差は小さくなる（図 3）。ただし，長周期側での変化が少ない。

以上の応答解析結果の分析に基づき地表面地震動の

降伏震度スペクトルの低減と基盤地震動の低減の関係を以下のような回帰式で表わすことができる。

G2地盤：

$$\alpha_y = \alpha^{1.07} - \left(\alpha^{1.07} - \alpha^{0.86+0.01\mu} \right) \times \exp \left\{ - \left[\left(\frac{5.0}{1.5+1/\mu} - 0.6\alpha + 0.5 \right) \times (T-0.1) \right]^{1.5} \right\} \quad (1)$$

G3地盤：

$$\alpha_y = \alpha^{1.1} - \left(\alpha^{1.1} - \alpha^{0.645+0.02\mu} \right) \times \exp \left\{ - \left[\left(\frac{3.3}{1.0+1/\mu} - 0.8\alpha + 0.15 \right) \times (T-0.1) \right]^{1.6} \right\} \quad (2)$$

G4地盤：

$$\alpha_y = \alpha^{1.25} - \left(\alpha^{1.25} - \alpha^{0.55+0.025\mu} \right) \times \exp \left\{ - \left[\left(\frac{2.2}{1.0+1/\mu} - 1.2\alpha + 0.5 \right) \times (T-0.1) \right]^{2.5} \right\} \quad (3)$$

G5地盤：

$$\alpha_y = \alpha^{1.15} - \left(\alpha^{1.15} - \alpha^{0.6+0.05\mu/3} \right) \times \exp \left\{ - \left[\left(\frac{1.3}{1.5+1/\mu} - 0.2\alpha + 0.1 \right) \times (T-0.1) \right]^{5.5} \right\} \quad (4)$$

$$0.1 \leq T \leq 3.0$$

ここで、 α_y は地表面地震動の降伏震度スペクトルの倍率、 α は基盤面地震動レベルの低減係数、 T は構造物の固有周期、 μ は応答塑性率である。

回帰式では基盤面地震動の低減係数の指数項が塑性率に依存すると依存しないの二つがある。依存しない項は基盤面での低減係数より小さい値になり、長周期側の下限値になる。依存する項は基盤面での低減係数より大きい値になり、短周期側の上限値になる。この上下限値は地表面最大絶対加速度および最大相対変位の倍率とほぼ対応している。地表面地震動の降伏震度スペクトルの倍率の上限値から下限値までは構造物の等価固有周期 T の指数関数で変化する。地盤によって、上下限値間の変化率、変化の開始点をこの指数関数で調整できる。

同じ地盤において、応答塑性率が小さいほど上限値から下限値になる周期区間が広がる（図 3）。地盤が悪いほど上限値から下限値への変化開始点が長周期側に寄る（図 4）。したがって、ここに示していない G6 と G7 地盤の変化開始点はすでに 2 秒以上になると推定られる、一般設計に注目する周期範囲には周期と依存しないと考えられる。

図 3 と図 4 には灰色線で提案式の値を示している。基本的に回帰式の倍率は解析結果より小さくならないようにしているが、長周期側では所要降伏震度の値が小さ

いため、解析計算結果ではその収束誤差の影響により倍率が乱れているので、見かけ上には提案式の値が小さくなった場合もある。ただし、式の周期範囲は長周期側で一律 3.0 秒にしているが、所要降伏震度が一定値の以下（一般に 0.2 程度、図 1）になると、構造物の品質を確保するため、その低減は行なわない。したがって、基盤地震動の低減係数が小さく応答塑性率が大きい場合、一秒以上の長周期範囲での低減は行なう必要がなくなる。

5. まとめ

兵庫県南部地震観測記録および地盤応答解析の結果から、地表面地震動の非線形応答特性を考察した。大きな地震動を受ける場合と比べると、小さい地震動を受ける地盤の地表面地震動は、表層地盤の非線形特性を反映して、短周期の成分が長周期成分より多くなる。したがって、耐震設計する際、基盤面の地震動の低減係数はそのまま地表面地震動に適用できないと考える。

実務設計者の便に供するために、地盤解析の結果に基づき、耐震設計上の基盤面での地震動レベルの変化によって地表面地震動の所要降伏震度スペクトルの低減の推定式を提案した。その式には、構造物の周期と塑性率および基盤面の地震動の低減係数を推定式の基本パラメータとしている。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案)、(財)鉄道総合技術研究所、平成 10 年 11 月
- 2) 室野、西村：所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定、鉄道総研報告、第 13 巻、第 2 号、1999 年
- 3) 王、西村、長縄：基盤入力地震動の考え方と応答スペクトルの設定、鉄道総研報告、第 13 巻、第 2 号、1999 年
- 4) 王、室野、西村：強震鉛直アレー観測と地盤応答解析、応用力学論文集、Vol.1、1998 年
- 5) 岩崎、龍岡ら：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ)ー広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性ー、土木研究所報告、第 153 号、1980 年
- 6) 岩崎、常田ら：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第 15 回土質工学研究発表会講演集、1980 年
- 7) 永妻、王ら：表層地盤の動的解析と地表設計地震動、鉄道総研報告、第 13 巻、第 2 号、1999 年
- 8) 王、室野、西村：大型せん断土槽振動台実験に基づき地盤応答解析手法の比較、第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集、1998 年
- 9) 西村、王：設計地震動および表層地盤の評価、鉄道総研報告、第 13 巻、第 2 号、1999 年