

鉄道構造物における設計地震動の 時刻歴波形の設定に関する検討

坂井 公俊¹・室野 剛隆²

¹正会員 工修 (公財) 鉄道総合技術研究所 耐震構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 (公財) 鉄道総合技術研究所 耐震構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

現在の鉄道構造物の地震時安全性を照査する際の地震動(L2地震動)としては、内陸活断層による地震(スペクトルII)と海溝型地震(スペクトルI)という特性の異なる2つの地震動を考慮している¹⁾。これらL2地震動の弾性加速度応答スペクトルは、1995年兵庫県南部地震以前の観測記録を補正し、統計的に処理することで、設定されている²⁾。その後2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震等の複数の大規模地震が発生しており、近年の活発な地震活動の結果を踏まえてL2地震動弾性加速度応答スペクトルの見直しが行われている³⁾。これは多数の地震観測記録を標準的なL2地震動の想定レベル(スペクトルII: Mw=7.0の内陸活断層による地震が直下で発生した場合、スペクトルI: Mw=8.0の海溝型地震が60km離れた地点で発生した場合)に補正を行い、これらを非超過確率90%で包絡するように設定したものである(図-1)。

このL2地震動に対して構造物に要求される性能としては、地震によって構造物全体が崩壊しない、もしくは早期に機能が回復できる、という性能である¹⁾。つまりL2地震においては、構造物の応答は非線形領域に及ぶことが前提であり、この場合弾性加速度応答スペクトルだけでなく時刻歴波形が必要となる。L2地震動の時刻歴波形としては、弾性加速度応答が図-1に適合するような振幅、位相の組合せとなっている必要がある。ところが同一の弾性加速度応答を示す振幅、位相の組合せは多数存在すると考えられ、この組合せの中から構造物の設計にとって適切な波形を選択する必要がある。特に地震動の位相特性は構造物の非線形応答に大きな影響を与える

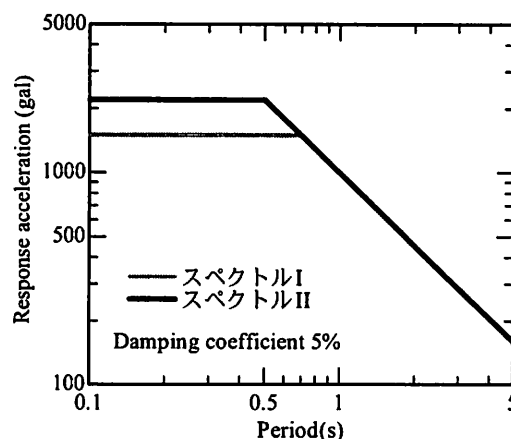


図-1 設定した弾性加速度応答スペクトル³⁾

ことが知られており、筆者らは位相の震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮した位相スペクトル算定手法の提案を行っている⁴⁾。そこで本検討では、L2地震動の弾性加速度応答スペクトルに適合し、かつ構造物の非線形応答量を適切かつ安全側に算定することが可能な時刻歴波形を作成することを目的とする。

なお今回の対象とする地盤条件としては、耐震設計上の基盤面¹⁾(工学的基盤面、 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の連続地層)である。

2. 時刻歴波形の作成

図-1の弾性加速度応答スペクトル³⁾に適合し、かつ筆者らが提案している位相スペクトル算定手法⁴⁾を用いて、対象とする地震規模、震源距離、地盤条件の中で起こりうる時刻歴波形を多数作成する。これらの地震動群の中から構造物の非線形応答量とし

て適切な1波を抽出し、これを設計地震動の時刻歴波形として選択する。時刻歴波形の作成は以下の条件、手順に従って実施する。

(1) 位相のモデル化⁴⁾

ここでは、震源、伝播経路特性、サイト特性を考慮した位相スペクトル算定手法について概略的に述べる。まず地震動 $O(t)$ は、震源特性 $S(t)$ 、伝播経路特性 $P(t)$ 、サイト特性 $L(t)$ の積によって表現出来る。この時、そのフーリエ変換は式(1)のように表わされる⁵⁾。

$$O(\omega) = S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot L(\omega) \cdot \exp\{i(\phi^S(\omega) + \phi^P(\omega) + \phi^L(\omega))\} \quad (1)$$

ここで、 $S(\omega)$ 、 $P(\omega)$ 、 $L(\omega)$ はそれぞれ震源特性、伝播経路特性、サイト特性のフーリエ振幅、 $\phi^S(\omega)$ 、 $\phi^P(\omega)$ 、 $\phi^L(\omega)$ は各特性のフーリエ位相である。つまり、地震動位相 $\phi^O(\omega)$ は各特性の位相の線形和で表現される。さらに地震動の群遅延時間 $t_{gr}^O(\omega)$ は位相の微分であるためこの線形関係はそのまま保存され以下のように表現することが出来る。

$$t_{gr}^O(\omega) = t_{gr}^S(\omega) + t_{gr}^P(\omega) + t_{gr}^L(\omega) \quad (2)$$

この群遅延時間 $t_{gr}^O(\omega)$ が各振動数ごとに正規分布に従うとした時、群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^O(\omega)$ 、標準偏差 $\sigma_{igr}^O(\omega)$ についても次式のように震源、伝播経路、サイトの各特性に分離される。

$$\begin{aligned} \mu_{igr}^O(\omega) &= \mu_{igr}^S(\omega) + \mu_{igr}^P(\omega) + \mu_{igr}^L(\omega) \\ (\sigma_{igr}^O(\omega))^2 &= (\sigma_{igr}^S(\omega))^2 + (\sigma_{igr}^P(\omega))^2 + (\sigma_{igr}^L(\omega))^2 \end{aligned} \quad (3)$$

このうち震源項 $\mu_{igr}^S(\omega)$ 、 $\sigma_{igr}^S(\omega)$ については、断層の破壊過程に従ったインパルス列の重ね合わせで表現する⁶⁾。伝播経路、サイト特性については観測記録に基づいた群遅延時間の推定式を提案している。位相モデル化の詳細については、文献⁴⁾を参照されたい。

(2) 震源特性の設定

位相の震源特性は、断層の破壊過程と対象地点の位置関係によって大きく変化するものと考えられる。そこで今回は図-2（スペクトルII）、図-3（スペクトルI）に示すような複数の断層の破壊過程と観測点を設定した。

スペクトルIIでは観測点を断層の周りに8地点配置（Site A~H）し、6パターンのアスペリティ、破壊開始点の位置（Case 1~6）を設定し、計 $8 \times 6 = 48$ パターンについて震源特性の評価を行った。断層は傾斜角90度とし、断層上面を地表面から深さ3kmの位置に設定した。その他巨視的震源特性および微視的震

源特性については、過去の内陸活断層による地震をもとに提案されている手法^{7,8)}に基づき設定している。アスペリティは2つ設定し、破壊開始点付近に大きなアスペリティ1と、それより上部にサイズの小さなアスペリティ2を配置した。破壊は破壊開始点より同心円状に2.8km/sで広がり、アスペリティ内の破壊は全体の破壊開始点に最も近いコーナーから同心円状に進行するものとした。また今回の位相モデル化は、断層タイプ、震源からの放射特性等は無視しているため、断層設定の際にこれらの条件は考慮していない。

スペクトルIでは図-3のように90km×100kmの震源域が傾斜角18°で陸地に向かって沈み込むような状況を想定し、アスペリティのサイズ、配置として2ケースを設定した。これは過去に発生したM8級の地震である2003年十勝沖地震における特性化震源モデル⁹⁾を基本として設定したものである。観測点は陸地側に21地点（Site A~U）配置し、計 $2 \times 21 = 42$ パターンの震源特性を評価した。断層の破壊伝播等については、スペクトルIIの場合と同様の条件で設定している。

以上の条件設定により得られた結果は想定しうる震源特性の全条件を網羅しているものではないが、震源域の設定に対してある程度広がりを持った観測点の設定をしていることから、断層傾斜と観測点の位置関係や断層の破壊伝播効果のある程度網羅的に検討出来ていると考えている。

震源特性評価の例として、スペクトルIIにおけるCase4、Case5において算定されたインパルス列算定結果をまとめて図-4に示す。この結果から、本手法によって破壊の指向性を適切に表現できていることが分かる。例えばSite CではCase4のアスペリティ1は破壊が向かってくる方向、Case 5では破壊が遠ざかる方向に位置している。その影響を受けて、Case 4では継続時間が短く、Case 5では継続時間が長くなっている。また、Case 5のSite AやSite Dはアスペリティ1、2ともに破壊が向かってくる方向に位置しているため、インパルス列としても一つにまとまった形状をしていることが分かる。こういった影響を受けて、最終的に得られる時刻歴波形の継続時間や波形の形状等が変化することが期待される。さらにスペクトルIにおけるインパルス列評価の例を図-5に示すが、断層サイズの違いによって、スペクトルIIにおける結果と比較してインパルス継続時間が長くなっていることが分かる。これにより、地震規模が大きくなることによる地震動継続時間の増大を適切に表現出来ていることが期待される。

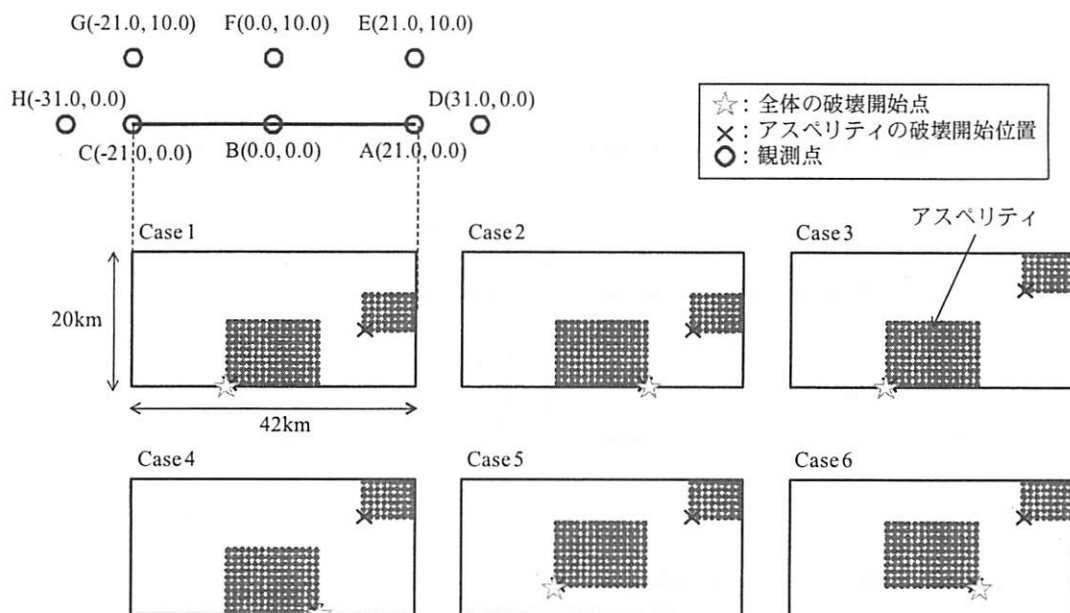


図-2 観測点、断層の破壊開始点、アスペリティ位置の配置 (スペクトルII)

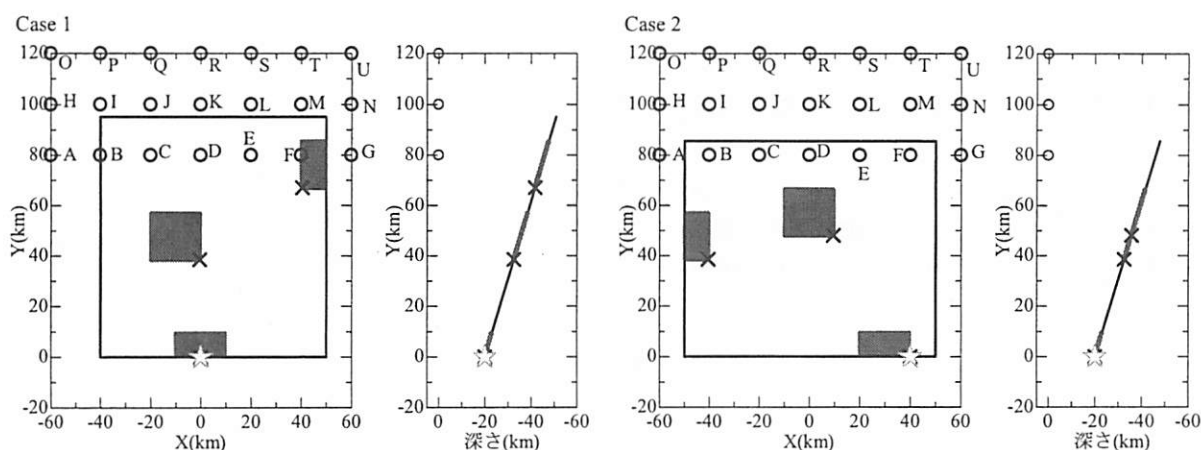


図-3 観測点、断層の破壊開始点、アスペリティ位置の配置 (スペクトルI)

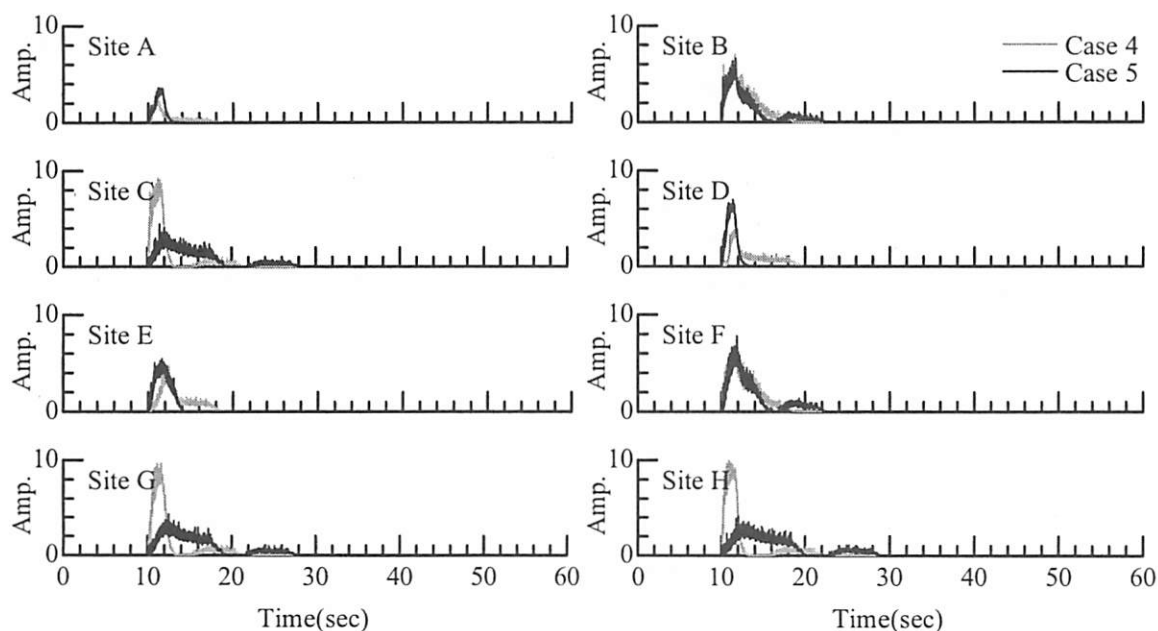


図-4 位相の震源特性評価の例 (スペクトルII)

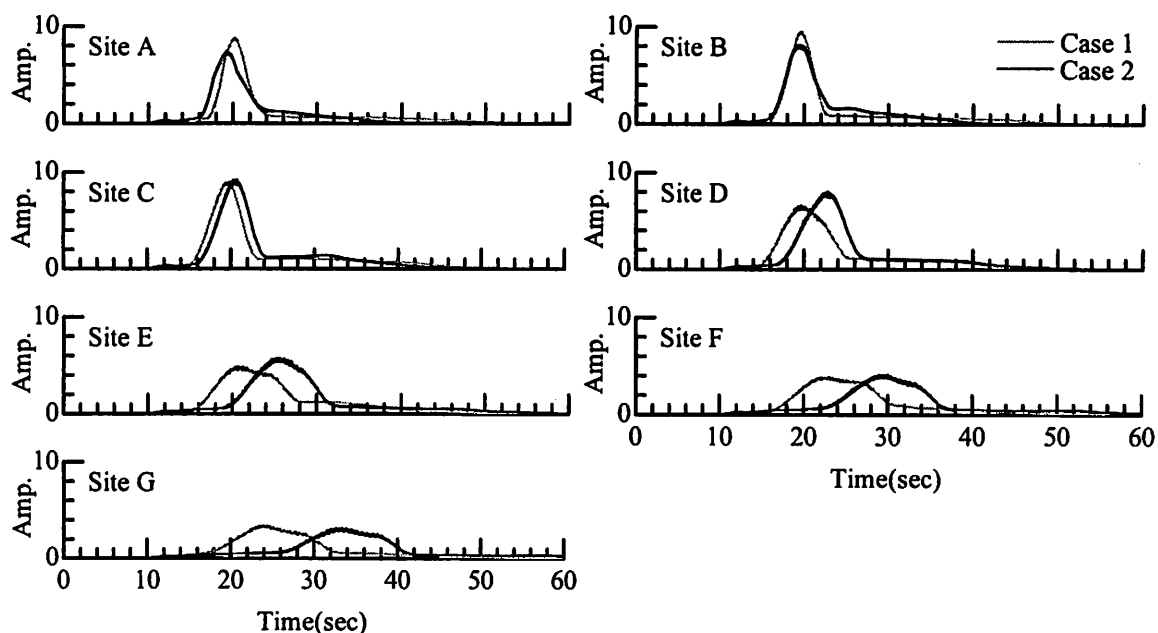


図-5 位相の震源特性評価の例 (スペクトルI)

(3) 伝播経路特性、サイト特性の設定と地震動合成の条件

伝播経路特性は次式で表わされるように、平均値 $\mu_{igr}^p(\omega)$ 、標準偏差 $\sigma_{igr}^p(\omega)$ とともに震源距離 R の2乗に比例すると仮定した上で、各振動数毎の回帰係数 $\beta_1(\omega), \beta_2(\omega)$ を評価している⁴⁾。

$$\begin{aligned}\mu_{igr}^p(\omega) &= \beta_1(\omega) \cdot R^2 \\ \sigma_{igr}^p(\omega) &= \beta_2(\omega) \cdot R^2\end{aligned}\quad (4)$$

この震源距離 R については、L2地震動の弾性加速度応答スペクトル設定時に想定している震源距離 (スペクトルII: 3km, スペクトルI: 60km) を用いて評価した。ここでスペクトルIIは、Mw=7.0の地震が直下で発生した場合を想定しているが、今回の計算における震源距離は3kmに設定している。これは地表面数kmには地震を発生させにくい領域があるとされており^{例えば10)}、地表に断層面が現れている場合でも、この範囲では応力降下がほとんど発生していないことが指摘されていることを加味したものである。

サイト特性については、以下のように設定した。著者らの研究⁴⁾ではサイト特性の群遅延時間は次式のように対象地盤のせん断弾性波速度と関連付けてモデル化している。

$$\begin{aligned}\mu_{igr}^L(\omega) &= \gamma_1(\omega) \cdot (3000 - V_s)^2 \\ \sigma_{igr}^L(\omega) &= \gamma_2(\omega) \cdot (3000 - V_s)^2\end{aligned}\quad (5)$$

ここで V_s は観測地点直下地盤のせん断弾性波速度 (m/s) , $\gamma_1(\omega), \gamma_2(\omega)$ は回帰係数である。式(5)に

おいて群遅延時間のサイト特性は、せん断弾性波速度が3km/sとなるような岩盤 (地震基盤) 上においてはゼロとなるように設定しており、それよりも軟弱な地盤では対象地点直下の地盤 V_s によって変化するように設定している。これは観測記録に基づき設定したものであるが、式(5)は大きなバラツキを持っていることが分かっている。これは実際のサイト特性とは、地震基盤から対象地点の間に存在する堆積構造の影響を表現したものであり、対象地点直下の地盤特性だけで決定されるものではないためであると考えられる。そこで今回は式(5)の $\mu_{igr}^L(\omega)$ と $\sigma_{igr}^L(\omega)$ を1.0倍~0.1倍まで0.1刻みで10通りの変化をさせることで、位相サイト特性の不確定性の影響を検討することとした。また設定した $\mu_{igr}^L(\omega)$ と $\sigma_{igr}^L(\omega)$ となる正規分布に従った群遅延時間を発生させる際には、各条件ごとに10通りの初期乱数を設定した。

最終的に発生させた群遅延時間は、スペクトルIIでは4800ケース (震源特性6ケース×観測点8ケース×サイト特性のバラツキ10ケース×サイト特性の初期乱数10ケース)、スペクトルIでは4200ケース (震源特性2ケース×観測点21ケース×サイト特性のバラツキ10ケース×サイト特性の初期乱数10ケース) である。

以上の流れに従うことで、各ケースごとの位相特性 $\phi^o(\omega)$ が設定された。続いて振幅特性は図-1の弾性加速度応答スペクトルにフィッティングさせることで与えることとした。フィッティングの方法としては、フーリエ振幅スペクトルは非減衰の速度応答スペクトルと概ね一致するという関係¹¹⁾を用いて初期のフーリエ振幅スペクトル $A_0(\omega)$ を設定し、繰り

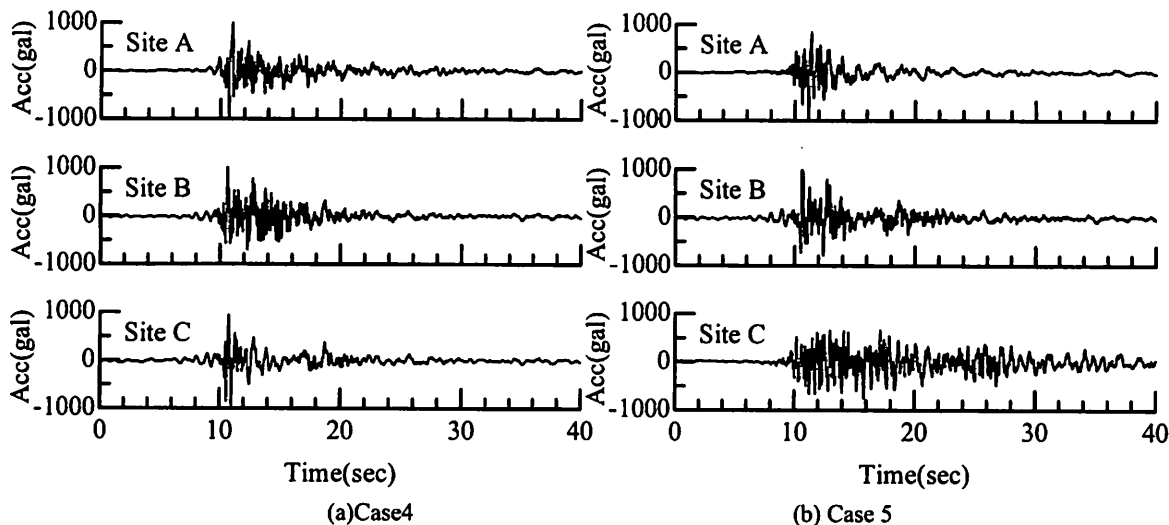


図-6 震源特性の違いによる波形形状の変化の例（スペクトルII，サイト特性0.1倍）

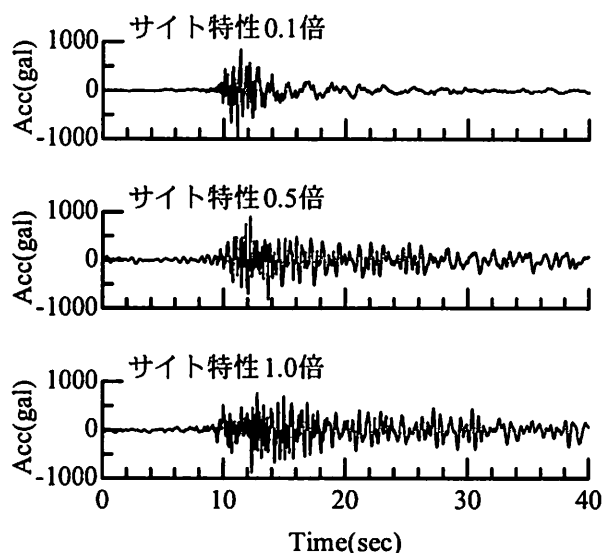


図-7 サイト特性の違いによる波形形状の変化の例（スペクトルII，Case 5，Site A）

返し計算により振幅を調整することで、目標応答スペクトルに適合させた¹²⁾。得られた時刻歴波形の例を図-6（震源特性の影響）、図-7（サイト特性の影響）に示す。これらの結果より、各特性の影響を受けて波形の最大加速度や継続時間が大きく変化していることが分かる。

3. 設計地震動として用いる時刻歴波形の選択

前節で設定された多数の時刻歴波形は全て図-1に示す弾性加速度応答スペクトルに一致した地震動波形である。つまり弾性加速度応答スペクトルを基準として設計地震動を選択した場合に、いずれも選択される可能性のある地震動である。ところが構造物の設計を念頭に置いた場合、非線形領域に踏み込ん

だ応答についても適切に把握する必要がある。そこで、作成された地震動波形群に対して構造物の非線形応答量を算定し、ある一定の安全性を確保した波形を設計地震動として抽出することとした。構造物の非線形応答量算定手法としては、所要降伏震度スペクトルを用いることとした。この所要降伏震度スペクトルは非線形応答スペクトル¹³⁾の一種であり、構造物の応答塑性率ごとに固有周期と降伏震度との関係を図化したものである¹⁴⁾。この所要降伏震度スペクトルを用いることで、ある周期、降伏震度を有する構造物の応答塑性率を簡便に求めることが可能である。ここで言う応答塑性率とは、最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で除したものである。所要降伏震度スペクトル作成条件として、骨格はバイリニアモデル、履歴はクラフモデル¹⁵⁾とする。第1勾配に対する第2勾配の比は0.05、除荷時の剛性低下指数は0.2とし、減衰定数 h は $0.04/T$ ($0.10 \leq h \leq 0.20$)とした。これらの条件は鉄道用RC構造物の設計時に用いられている所要降伏震度スペクトル作成条件と同一である¹⁾。

上記条件に基づいて前節で作成した全ての時刻歴波形に対して所要降伏震度スペクトルを算定し、まとめたものを図-8（スペクトルII）、図-9（スペクトルI）に示す。なお計算する応答塑性率 μ としては、1（弾性）、2、4、8の4種類とした。これらの結果より、各結果は大きくばらついていることが分かる。例えば図-8 (c)において、周期0.5秒、 $\mu=4$ の構造物を設計する場合に構造物に要求される降伏震度は0.30~0.60と大きく変化している。またここで、目標とした弾性加速度応答スペクトル（図-1）にフィッティングさせる際の制約条件としては、誤差5%以内としており、目標スペクトルと良好に一致していることは確認済みである¹⁶⁾。よって、選択する位相

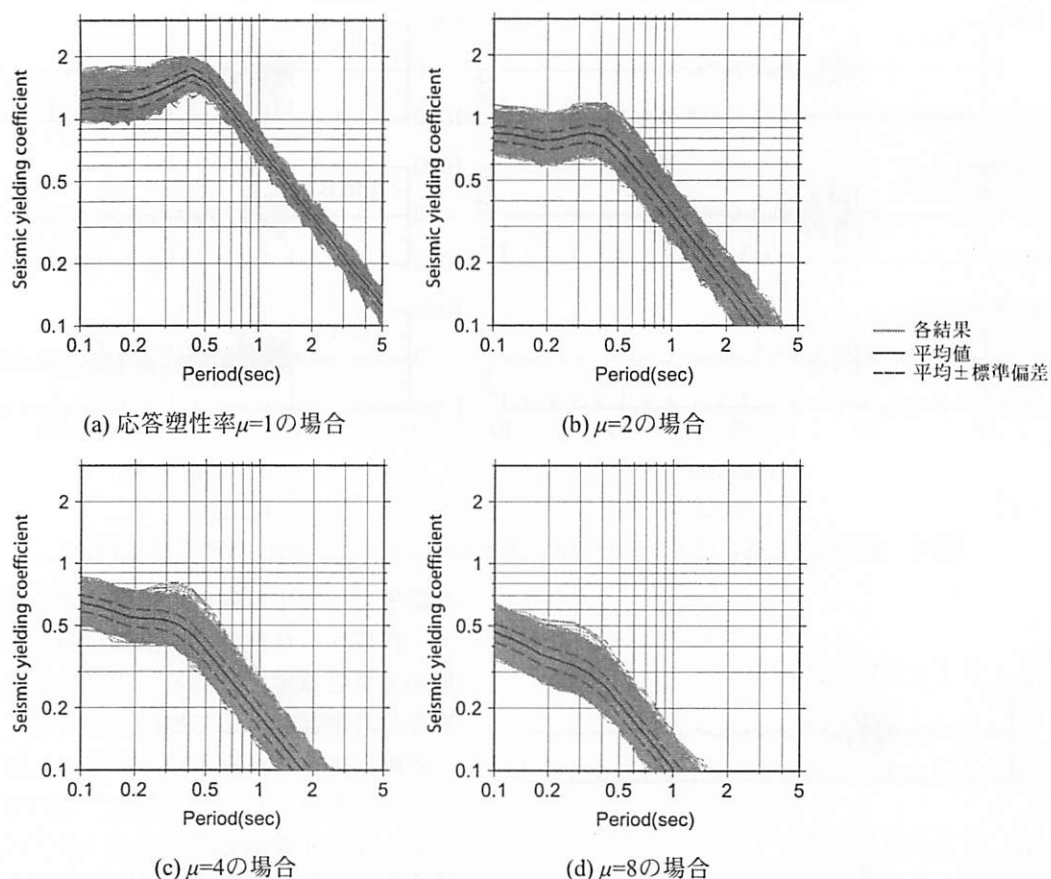


図-8 所要降伏震度スペクトル算定結果（スペクトルII）

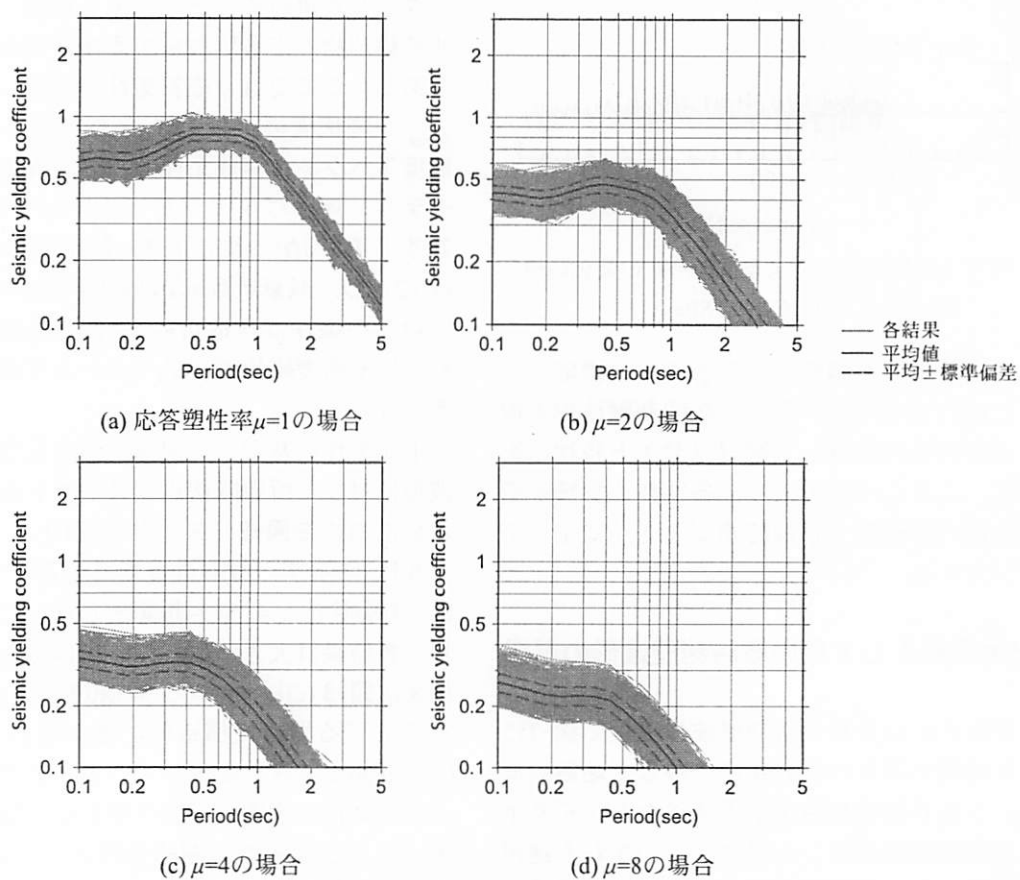
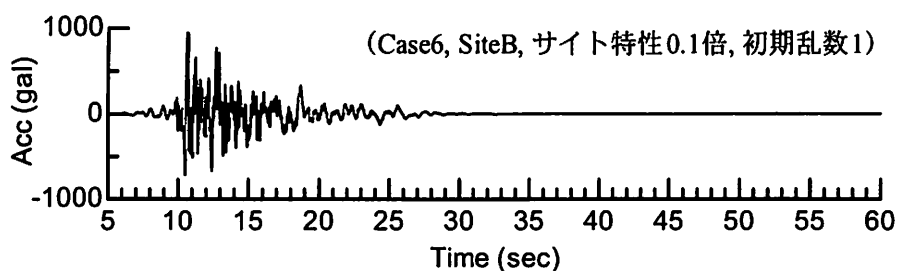
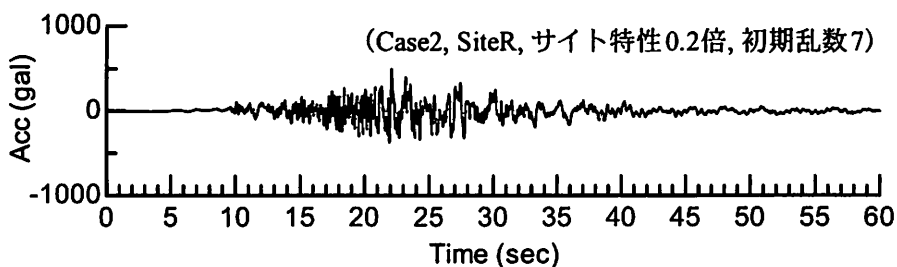


図-9 所要降伏震度スペクトル算定結果（スペクトルI）

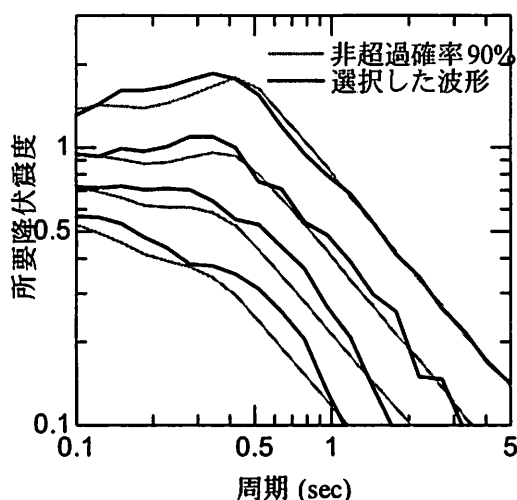


(a) スペクトルII

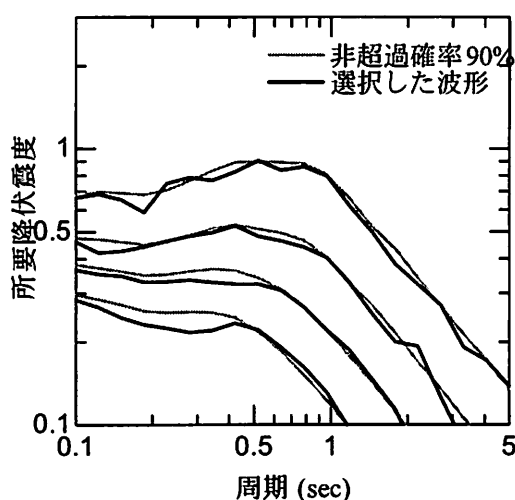


(b) スペクトルI

図-10 選択された時刻歴波形



(a) スペクトルII



(b) スペクトルI

図-11 選択された波形の所要降伏震度スペクトル

($\mu=1, 2, 4, 8$)

特性、減衰特性の違いによって、構造物の非線形応答にバラツキが生じていることが分かる。

ここで、構造物の設計地震動を考えた場合、弾性応答のみならず非線形応答に対してもある程度の安全余裕度を有した地震動となっていることが望ましい。この安全余裕度としては、弾性加速度応答スペクトルを設定する際には、想定される地震動を非超過確率 90%で包絡するような地震動を設定している²³⁾。そこで構造物の非線形応答量としても、図-8、図-9の所要降伏震度スペクトルを各応答塑性率、各周期において非超過確率90%で包絡するような時刻歴波形を抽出することで、ある程度の安全性を担保することが出来るものと考えた。

この条件に基づいて抽出された時刻歴波形とその波形の所要降伏震度スペクトルを図-10、図-11に示す。図-11より抽出された波形の所要降伏震度スペクトルは、概ね全周期帯域において非超過確率90%のスペクトルを包絡しており、図-10の時刻歴波形を用いることで非線形応答としても安全側の設計を行うことが可能であると考えられる。

また今回選択されたスペクトルIIの時刻歴波形はCase6のSiteBによる結果であり、アスぺリティによる破壊が進行する方向に位置していることが分かる。さらにサイト特性のバラツキは0.1倍とした場合であり、いずれも既往の検討¹⁶⁾において構造物の非線形応答量が大きくなる傾向がある地点における結果

となっている。スペクトルIにおいてもCase2のSiteRは破壊伝播効果の影響が大きい地点、サイト特性も0.2倍とそれぞれ $I_{gr}^o(\omega)$ の振動数毎の変化が小さくなる傾向が強い位相特性が選択されている。

さらに本手法においては、スペクトルIIとスペクトルIを比較すると、震源特性、伝播経路特性ともにスペクトルIIの方が $\mu_{igr}(\omega)$ 、 $\sigma_{igr}(\omega)$ の値が小さくなるは明白であり、非線形応答量が大きくなる傾向の位相を用いていると言える。弾性加速度応答スペクトル(図-1)は全周期帯においてスペクトルIIの方が大きくなっているため、位相、振幅ともにスペクトルIIの方が非線形応答量が大きくなる地震動を設定していることになる。つまり繰り返し応答による損傷の累積を無視した場合には、スペクトルIIの方が必ず損傷程度が大きくなる地震動となっていると言える。これは図-11の(a)≧(b)となっていることから確認される。

4. まとめ

本検討では鉄道構造物の耐震設計で用いるL2地震動の時刻歴波形について検討を行った。具体的には、L2地震動で想定している地震規模に基づき設定された弾性加速度に一致し、かつ想定される範囲内の位相特性を有する時刻歴波形を多数作成した。得られた地震動群の中から構造物の非線形応答量としてある一定超過確率を満足(非超過確率90%)を満足するような時刻歴波形を抽出した。最終的に選択された時刻歴波形を用いて設計を行うことで、同一弾性加速度応答スペクトルを有する地震動に対してもある程度の安全余裕度を有する設計が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999。
- 2) 王海波，西村昭彦，長縄卓夫：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，Vol. 13，No. 2，pp. 11-18，1999。
- 3) 坂井公俊，室野剛隆，澤田純男：地震基盤深度を考慮したレベル2地震動の簡易評価，第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.317-322，2009。
- 4) 室野剛隆，川西智浩，坂井公俊：位相のインバージョンに基づく地震波形合成法，鉄道総研報告，Vol.23，No.12，pp.5-10，2009。
- 5) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.915-920，1998。
- 6) 佐藤忠信，室野剛隆，西村昭彦：震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.201-213，1999。
- 7) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法－，京都大学防災研究所年報，47A，2004。
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」)，http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf，2008。
- 9) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書 分冊2，2005。
- 10) 武村雅之：日本列島における地殻内地震スケリング則－地震断層の影響および、地震被害との関連－，地震第2輯，Vol. 51，No. 2，pp. 211-228，1999。
- 11) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994。
- 12) 荒川直士，川島一彦，相沢興：応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形，土木技術資料，第26巻，第7号，1984年。
- 13) Veletsos, A. S., N. M. Newmark and C. V. Chelapati : Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motions, Proc. of 3th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Vol. II, pp. 663-680, 1965。
- 14) 西村昭彦，室野剛隆，齋藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用，地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，Vol. 3，pp.43-48，1999。
- 15) Clough, R. W. and S. B. Johnston : Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 第2回日本地震工学シンポジウム梗概集，pp.227-232，1966。
- 16) 坂井公俊，室野剛隆：位相の不確実性が構造物応答に及ぼす影響に関する基礎的検討，第13回日本地震工学シンポジウム講演論文集，pp.3276-3283，2010。