

耐震設計上注意を要する地点の 簡易抽出法に関する検討

坂井 公俊¹・室野 剛隆²・川野 有祐³

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

E-mail: ksakai@rtri.or.jp

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

E-mail: muroono@rtri.or.jp

³正会員 ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: y-kawano@jrseg.co.jp

鉄道構造物の地震時安全性照査のための地震動としては、L2地震動の標準応答スペクトルが一般的に用いられている。ただし、大規模震源域の近傍や、地震動の著しい増幅が想定される箇所については、耐震設計上注意を要する箇所と判定され、強震動予測手法によってL2地震動を設定する必要がある。しかしながら地震増幅の大小を判断するための明確な指標が存在しないという問題があった。

本検討では、近年の高密度地震観測データや、全国の地震観測点における地震増幅特性の評価結果を活用することで、地震動の著しい増幅が想定される箇所を抽出する手法について検討を行った。さらに過去に発生した地震観測記録について提案した手法を適用し、妥当性の確認を行った。提案した手法を用いることで、地点毎の地震特性を加味した上での、要注意箇所を比較的簡易に抽出することが可能となる。

Key Words : seismic design, site amplification factor, engineering bedrock, site-specific strong ground motion prediction

1. はじめに

通常の鉄道構造物の地震時安全性評価を行う際には、ほとんどの場合でL2地震動の標準応答スペクトル(スペクトルI, スペクトルII)が用いられる。しかしながらH24年度に耐震設計標準¹⁾が改訂となり、これらの標準応答スペクトルの適用範囲が明確化されることとなった。具体的には、以下の2つの条件のうち、いずれかに該当する地域では、耐震設計上注意を要する箇所と判定され、標準L2地震動をそのまま用いることは出来ず、基本的には強震動予測手法によってL2地震動を設定する必要がある。

①モーメントマグニチュード $M_w=7.0$ よりも大きな震源域が建設地点近傍に確認される場合

②耐震設計上の基盤面より深い地盤構造の影響によって地震動の著しい増幅が想定される場合

上記のうち①については、標準応答スペクトルの想定規模が、スペクトルIでは $M_w=8.0$ の海溝型地震が距離60km程度の距離で発生した場合、スペクトルIIでは $M_w=7.0$ の内陸活断層による地震が直下で発生した場合

を想定して設定されたものである²⁾ため、これを上回る地震が近傍で発生する地点では標準応答スペクトルを上回る地震動となる可能性が高く、これをそのまま設計地震動として用いることは出来ない。

また、②については、標準応答スペクトルは次章で述べるように既往の観測記録に基づき設定されており、全国の地震増幅特性をある程度包含した上での地震動となっていることが想定される。しかしながら、極端に大きな地震増幅が想定されるような地点においては、標準応答スペクトルで想定している地震と同規模の地震が発生した場合であっても、標準応答スペクトルを上回る地震動となる可能性があり、これに対応する必要がある。

このうち、①に該当する地点を特定するには、既往の地震調査結果^{例えば³⁾}等を参考にすることで、ある程度容易に実施することが出来る。しかしながら②に示される判定を実施するためには、地点毎の地震観測等を実施する必要がある。従来設計技術者にとってはこれまでの設計手続きとは異なる作業を要求することになる。また、地震増幅がどの程度の大きさになると、注意を要すると判定されるのかという客観的な指標は存在しない。

一方、近年の高密度地震観測^(例えば4)ならびに活発な地震活動の結果得られた膨大な地震観測記録を活用して、全国の地震観測点における地震増幅特性の評価^{5,6)}が実施されている。これらの成果を活用することで、地震増幅の大きな地域を大まかに抽出することや、耐震設計上注意を要するかどうかの判断のための指標を設定することも可能であると考えられる。

そこで本検討では、上記②に該当するかどうかを判定するための指標について検討を行う。さらに全国を概観した場合に、耐震設計上注意を要すると判定される可能性の高い地域の抽出を行うことで、鉄道構造物の設計地震動を設定する際の有益な基礎資料を整理することを目的とする。

具体的な検討手順としては、まず全国の地震観測点における地震増幅（地震基盤面～地表面）評価結果と各地点毎のボーリング調査結果を用いて、各地点における地震基盤面～耐震設計上の基盤面までの地震増幅（これを基盤サイト増幅特性と定義する）を算定する。続いて全国の基盤サイト増幅特性から、耐震設計上注意を要する箇所を判定するための指標の提案を行う。さらに過去に発生した地震観測記録のうち、標準応答スペクトルを上回るような非常に大きな記録が得られた地点において提案した手法を適用することで、手法の妥当性の確認を行う。最後に提案手法を全国地震観測点に適用することで、鉄道構造物の設計時に注意を要する地点と判定される可能性の高いエリアについて整理する。

なお、鉄道構造物の設計地震動は耐震設計上の基盤面（ $V_s=400\text{m/s}$ 程度の地盤上面）において評価されているため、本論文において対象とするサイト増幅は耐震設計上の基盤面よりも深い地盤による増幅である点に注意を要する。

2. 耐震設計上注意を要する箇所の抽出方法

(1) 基本的な考え方

L2地震動の標準応答スペクトル（スペクトルI, スペクトルII）は、主に過去の観測記録に基づいて評価されている⁷⁾。具体的には、①近年発生した比較的規模の大きな観測記録を収集し、②各記録を標準L2地震動で想定している地震規模、距離、地盤条件への補正を行い、③各記録の弾性加速度応答スペクトルを非超過確率90%で包絡するスペクトルを基本に設定している。そのため、地震動の震源特性、伝播経路特性、基盤サイト増幅特性としては、全国の平均的な特性よりもある程度安全側の値が設定されていると考えることが出来る。

そこで本検討では、「標準地震動として想定している基盤サイト増幅特性は、日本全国の基盤サイト増幅特性の平均値＋標準偏差に相当する」と考えて検討を進める

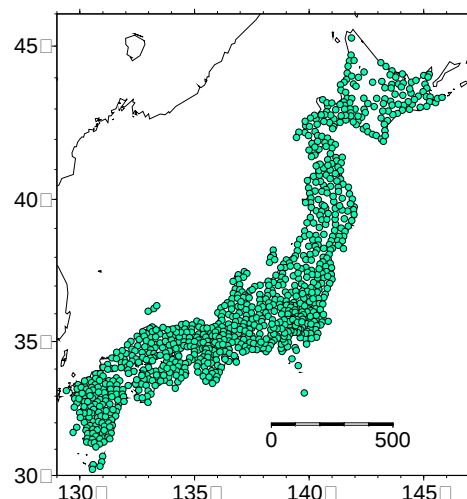


図-1 検討を行う観測点の分布

こととする。また実際に日本全国の基盤サイト増幅特性の平均値、標準偏差を算定することは不可能であるため、現時点で実施されている地震観測点における基盤サイト増幅特性の平均、分布が日本全国の結果を代表していると考えることとする。上記の仮定は多くの不確定要素を有しているが、このような判断によって評価された結果が、過去の観測記録から見て概ね妥当な結果となっていることは次章において確認を行う。

このように考えることで、標準L2地震動で想定しているサイト増幅を定量的に評価出来るようになり、各地点の基盤サイト増幅特性とこれを比較することで、耐震設計上注意を要するかどうかを簡易に判定することが可能となる。そこで以降ではまず全国観測点の基盤サイト増幅特性を算定し、この結果に基づいて標準L2地震動で想定している基盤サイト増幅特性を評価する。

(2) 全国地震観測点の基盤サイト増幅特性の評価

日本全国の地震観測点においては、膨大な地震観測記録を用いたスペクトルインバージョン⁷⁾により、各地点毎に地表面までの地震増幅特性が評価されている⁹⁾。ただし、本検討で定義している基盤サイト増幅特性は、地震基盤面～耐震設計上の基盤面までの地震増幅であるため、対象地盤層が異なっており、この結果をそのまま利用することが出来ない。そこで、浅層地盤のボーリング調査結果に基づいて耐震設計上の基盤面から地表までの地震増幅特性を評価し、これを除することで、各地点の基盤サイト増幅特性を算定する。

対象とする地点は、既往の研究⁹⁾によって地震増幅特性が評価されている地点のうち、耐震設計上の基盤面までのボーリング情報が公開されている926地点とする（図-1）。地盤物性値のうち、層厚、せん断弾性波速度、単位体積重量は全てボーリングの情報をそのまま用いる。減衰定数は、既往の成果^{9,10)}に基づき次式に示すように地域ごとに異なるQ値を周波数依存を考慮した形で設定

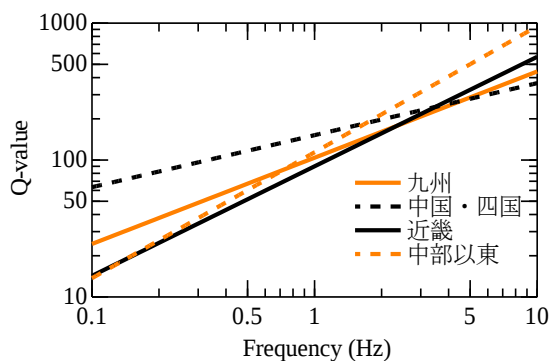


図-2 使用したQ値

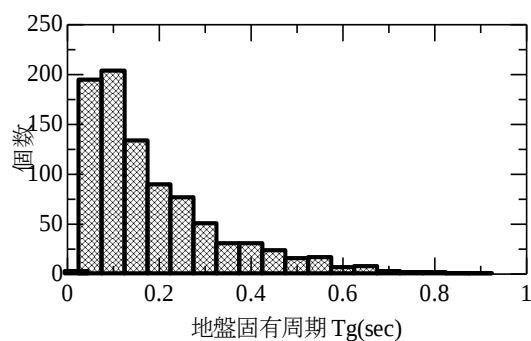


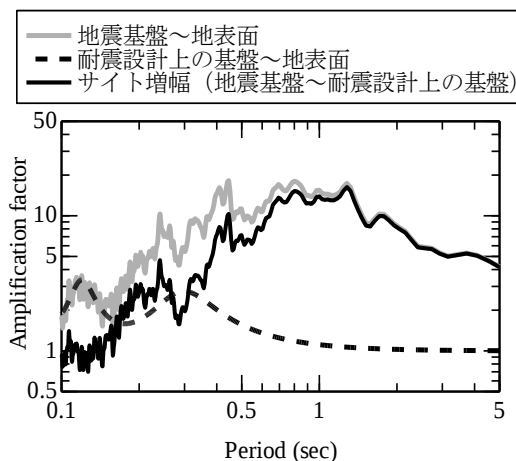
図-3 表層地盤の固有周期Tgの分布

した (図-2) .

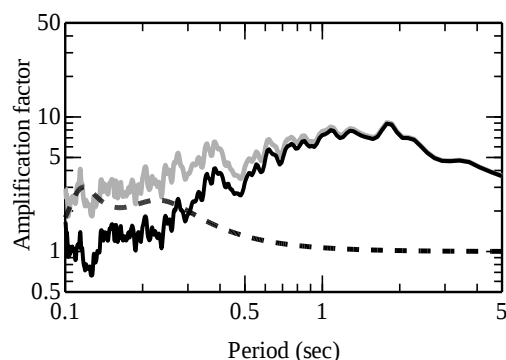
九州地方	: $Q = 104 \times f^{0.63}$
中国・四国地方	: $Q = 152 \times f^{0.38}$
近畿地方	: $Q = 90 \times f^{0.80}$
中部地方以東	: $Q = 114 \times f^{0.92}$

また耐震設計上の基盤面の位置は、各ボーリング調査結果に対して個別に目視により判定した。さらに地震動を設定する際の基盤条件としては、L2地震動を設定する際の定義と同様に解放基盤として扱う。以上の条件に基づき評価した表層地盤構造を対象に、理論伝達関数を各地点毎に算定した。その結果得られた1次固有周期の分布を図-3に示す。ほとんどのデータが固有周期0.5秒以下となっており、鉄道構造物の地盤種別によるG3地盤（普通地盤）よりも良好な地盤となっている。これは全国約67,000点程度の地盤ボーリングデータを整理し、各地点の固有周期を算定した結果¹¹⁾と同様の傾向を示しており、今回検討を行う926地点の地盤が全国的に見て偏ったデータではないことが確認できる。

続いて各地点の地震基盤面～地表までの地震増幅特性⁹⁾を表層地盤の伝達関数で除することで、各地点の基盤サイト増幅特性を算定した。なお対象とする周期帯域は、地震基盤面～地表までの地震増幅の評価時に対象とした周期帯域と同様に0.1～5秒とした。一般的な鉄道高架橋の等価固有周期はせいぜい0.3～1秒程度であるので、今回の対象周期によって有効な周期帯域は確保されている。



(a) K-NET小泊 (AOM026)



(b) K-NET琴丘 (AKT007)

図-4 基盤サイト増幅特性の評価例

得られた結果の一例を図-4に示すが、K-NET小泊 (AOM026) のように表層地盤の地震増幅を除去することで、高振動数のピークが見えにくくなっている地点もある。一方で図-3にもあるように、表層地盤の高次モードを含む増幅は主に0.5秒程度よりも短周期側に集中しており、それよりも長周期成分においては表層地盤の影響は非常に小さいことも見て取れる。

(3) 標準地震動で想定する基盤サイト増幅特性の評価

前節において評価された各地点の基盤サイト増幅特性が日本全国のサイト増幅を代表しており、かつサイト増幅の分布が周期毎に対数正規分布に従うと仮定した上で、全地点の基盤サイト増幅特性の平均値、標準偏差を算定した。なお、周期帯域によっては分布形が複雑な場合もあるものの、大まかな傾向は対数正規分布によって表現されるということは確認済である (図-5)。最終的に得られた全国の平均的なサイト増幅特性を図-6に示す。この結果より、各地点の基盤サイト増幅特性は大きくばらつくものの、全国の平均的な基盤サイト増幅特性は周期毎に大きく変化するものではなく、概ね3.0～6.0程度の値を示している。また、平均+標準偏差の値は5.0～10.0程度となっている。

本検討においては、図-6の平均+標準偏差のスペクトルを耐震設計上注意を要するかどうかの閾値として設定し、対象地点の基盤サイト増幅特性がこれよりも大きい場合には、詳細な検討が必要であると判定することとする。

3. 提案手法の妥当性の確認

標準地震動を設定した際には、各観測記録の震源特性、伝播経路特性、基盤サイト増幅特性が全て混在した形でスペクトルの評価を行っている。そのため今回提示した閾値が、標準地震動の基盤サイト増幅特性に対応しているかどうかを直接確認することは不可能である。そこで本章では、過去に標準L2地震動を上回る記録が観測された地点における基盤サイト増幅特性を図-6のスペクトルと比較することで、提案する手法によってこれまで分かっている要注意箇所を適切に抽出できることを確認する。

標準L2地震動を上回る記録と各観測点における基盤サイト増幅特性をまとめて図-7に示す。なお、それぞれの観測記録は地表面位置での記録をそのまま表示しているため、表層地盤の非線形挙動の影響も含まれている。これらの図より、標準L2地震動を上回る地点の基盤サイト増幅特性は、応答が大きくなる周期帯域周辺で非常に大きくなっていることが分かる。具体的には、K-NET 牡鹿、K-NET 富来では周期0.3秒以下においてサイト増幅が全国の平均+標準偏差を上回っている。観測された記録を見ると、短周期成分において標準L2地震動を上回っていることが分かる。一方で、周期の比較的長い領域で大きなサイト増幅を示しているK-NET 穴水、K-NET 柏崎では、これと同等かそれよりも長周期成分において、標準L2地震動を上回る記録が観測されている。他の比較的大きな記録が観測された地点においてもこれと同様の傾向があることを確認しており、図-6の平均+標準偏差の基盤サイト増幅特性を基準とした詳細検討要否の簡易判定は妥当な結果を与えることが確認された。

4. 全国観測点を対象とした提案手法の適用

ここでは、各観測点を対象に提案手法を適用し、日本全国を概観した場合に設計上注意を要する箇所の大まかな傾向について考察を行う。具体的には図-1の各地点で個別に評価された基盤サイト増幅特性を図-6の平均+標準偏差のスペクトルと比較することで、増幅の大きな地域を抽出した。ただし、前章での検討でも明らかにように、サイト増幅の周期特性は応答スペクトルの卓越周期の特性と明確な関係があるため、周期帯を複数に分割して比較を行う。得られた結果を図-8に示す。ただ

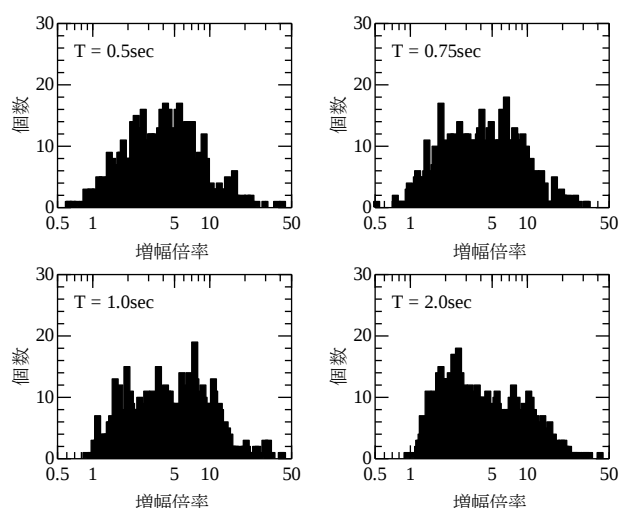


図-5 周期毎の基盤サイト増幅の分布

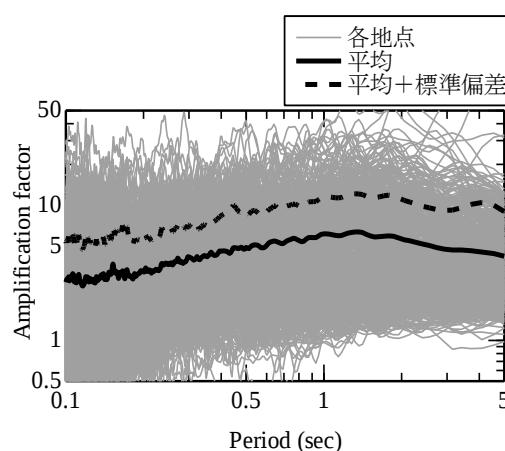
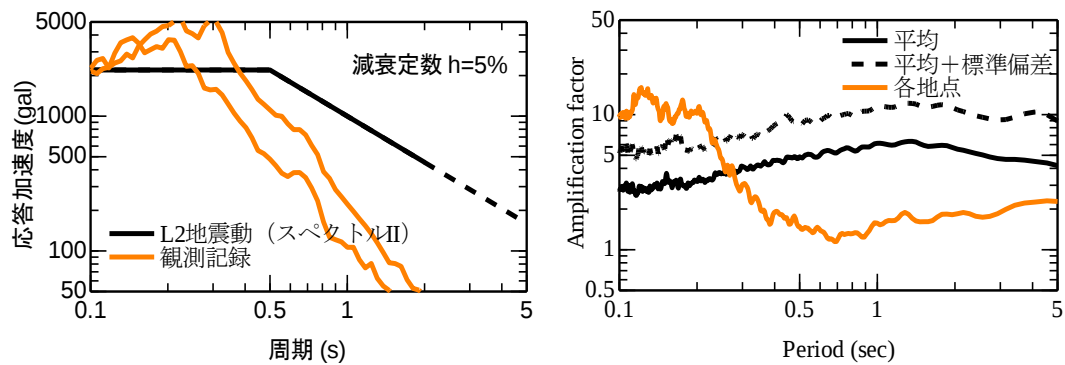


図-6 基盤サイト増幅特性の平均、標準偏差

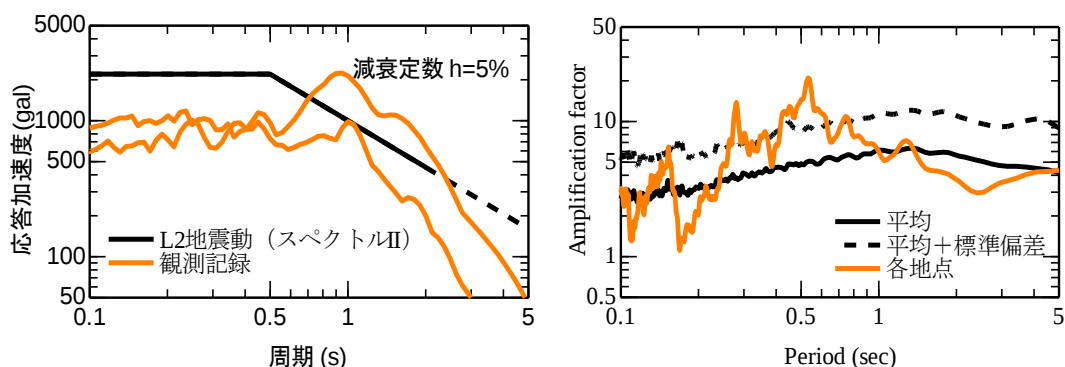
し、この図には地震増幅が図-6のスペクトルよりも大きな地点のみを表示しており、かつ平均に対して標準偏差の何倍大きな増幅を示しているのかを図示した。また、図-9には全国の地震基盤（ $V_s=3000\text{m/s}$ 程度の岩盤層）までの深さ分布¹²⁾も記載している。

これらの結果を見ると、基盤サイト増幅特性の大きな地域には周期毎に地域性がみられる。まず、九州南部のカルデラにおいては、以前から指摘されているような長周期成分だけでなく、周期0.5秒以下の短周期においても相対的に大きな増幅を示している。また、周期2秒以上の増幅が大きな地域は、九州南部を除くと東日本に多く見られ、図-9における地震基盤の比較的深い地域と概ね対応していることが分かる。これとは逆に周期0.5秒以下の短周期の増幅が大きな地域は西日本に集中しており、かつ地震基盤の浅い地域に対応している。

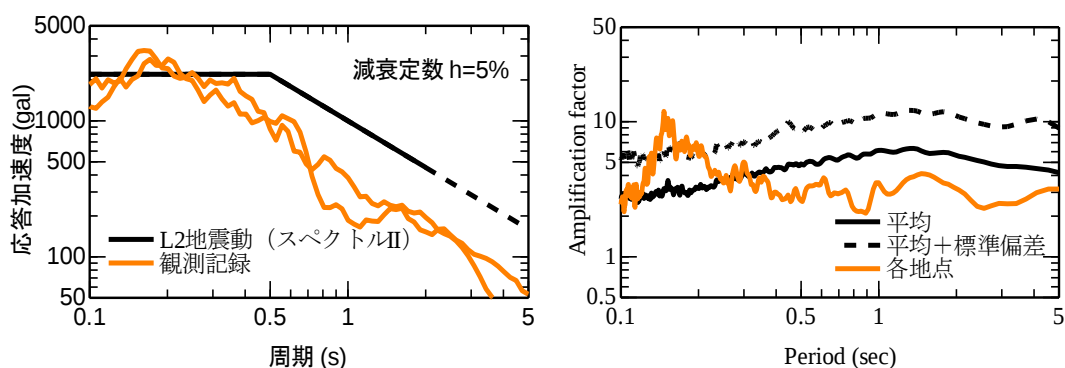
このように、基盤サイト増幅特性は地点の深部構造と調和的な傾向となっている。そのため、周辺観測点の基盤サイト増幅と、その観測点から対象地点までの深部構造の変化を整理することで、対象地点のサイト増幅としてどの周期帯域が大きくなる可能性があるのかを事前に



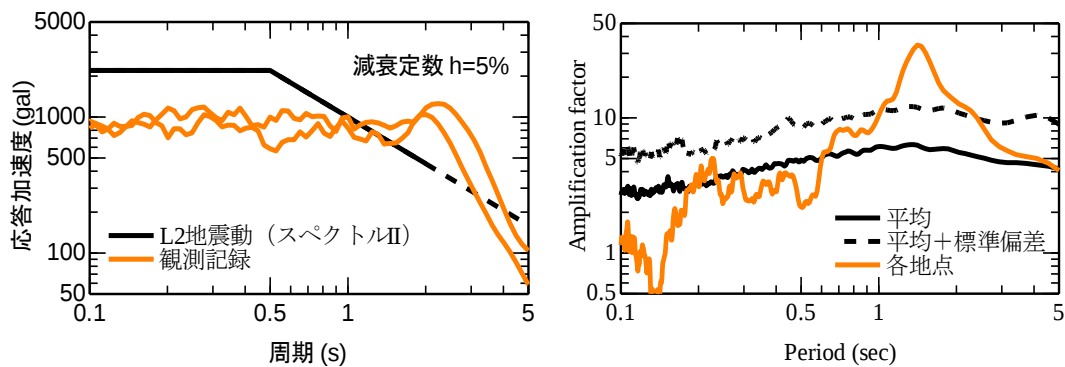
(a) 2003/05/26 宮城県北部地震 (K-NET 牡鹿 (MYG011))



(b) 2007/03/25 能登半島地震 (K-NET 穴水 (ISK005))



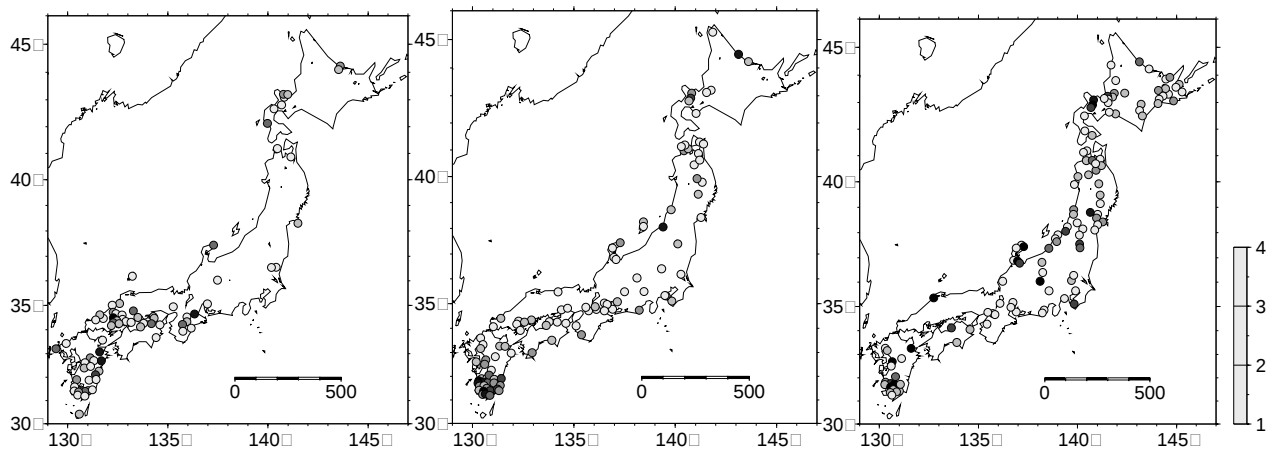
(c) 2007/03/25 能登半島地震 (K-NET 富来 (ISK006))



(d) 2007/07/16 新潟県中越沖地震 (K-NET 柏崎 (NIG018))

図-7 標準L2地震動を上回る記録が観測された地点の基盤サイト増幅特性

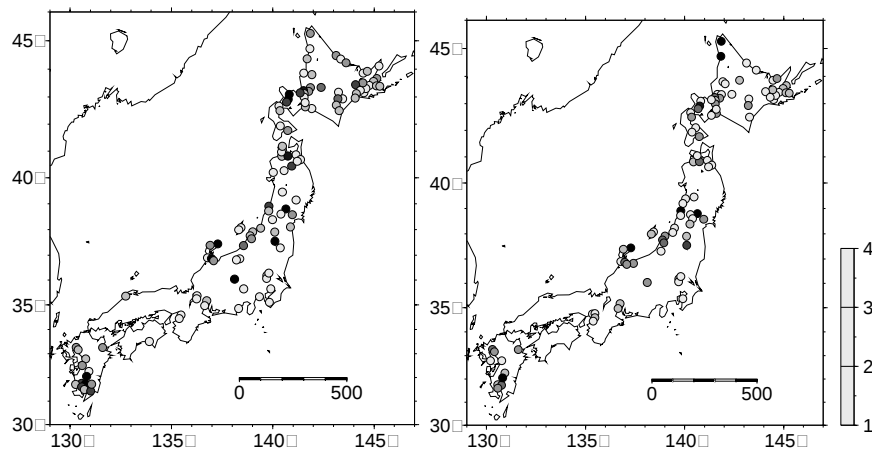
(左：応答スペクトル，右：基盤サイト増幅特性)



(a) 周期 0.5 秒以下の結果

(b) 周期 0.5 秒～10 秒の結果

(c) 周期 1.0 秒～1.5 秒の結果



(d) 周期 1.5 秒～2.0 秒の結果

(e) 周期 2.0 秒以上の結果

図-8 基盤サイト増幅特性の大きな地点

(平均+ α ×標準偏差の α を表記, 図-5 のスペクトルを上回る地点のみ表示)

5. まとめ

本検討では、鉄道構造物の耐震設計を行う場合に、注意を要する地点を抽出する手法について検討を行った。今回提案した手法は、地点の基盤サイト増幅特性と閾値となるスペクトルとを比較するという単純な手続きのみであるが、過去に観測された応答の大きな地点を適切に抽出することができることを確認している。また、全国を概観した場合に注意を要する地点と判定される可能性の高い地域の抽出も行った。提案した手法を用いることで、地点毎の地震特性を加味した上での、要注意箇所を比較的簡易に抽出することが可能となり、このような地点での強震動予測をより一層推進することに繋がることが期待される。

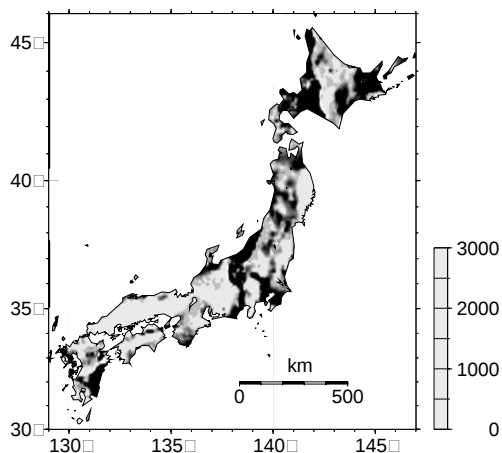


図-9 全国の地震基盤深度 (m)

ある程度予測することが可能である。今回示した結果は、鉄道構造物のような線状施設における調査実施箇所を選定する際の基礎的な資料として活用できると考えられる。

謝辞： 検討では、防災科学技術研究所のK-NETの観測記録、ボーリング情報を使用させていただきました。一部の図の作成には、GMT¹³⁾を用いました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (公財) 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，2012.
- 2) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉：近年の地震記録に基づいたL2地震動の考え方とその設定方法，鉄道総研報告，第25巻，第9号，pp.5-12，2011.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2010年版，2010.
- 4) 防災科学技術研究所 強震観測網（K-NET，KiK-net），
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 5) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等における基盤サイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005.
- 6) 野津厚，長尾毅，山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点における基盤サイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，Vol.7，No.2，pp.215-234，2007.
- 7) 岩田知孝・入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震第2輯，第39巻，pp.579-593，1986.
- 8) 加藤研一：K-NET強震記録に基づく1997年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地震増幅特性評価，日本建築学会構造系論文集，第543号，pp.61-68，2001.
- 9) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp.15-24，2002.
- 10) Petukhin, A., K. Irikura, S. Ohmi, and T. Kagawa : Estimation of Q-Values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.1498-1515, 2003.
- 11) 加藤尚，坂井公俊，室野剛隆：地形区分を用いた表層地盤の固有周期の簡易推定，第47回地盤工学研究発表会発表会講演集，2012.
- 12) 藤原広行，他：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第337号，2009.
- 13) Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS, Trans. AGU*, Vol.79, p.579, 1998.

A SIMPLE EXTRACTION METHOD OF THE SITE WHICH REQUIRES SPECIAL CARE ON SEISMIC DESIGN

Kimitoshi SAKAI, Yoshitaka MURONO and Yusuke KAWANO

As a design earthquake to check the seismic safety of a railway structure, the standard response spectrum of L2 earthquakes is generally used. In contrast, in the site which is located near large-scale source regions and/or where an earthquake motion is assumed to be significantly amplified, special care is required on the seismic design and L2 earthquake motions must be evaluated by site-specific prediction methods of strong ground motions. However, there has been a problem that clear indices for judging the magnitude of earthquake amplification do not exist. In this research, we have examined a technique to extract the points where earthquake motions are assumed to be significantly amplified by using high-density earthquake observation records in recent years and evaluation results of the amplification characteristics of earthquakes at seismic stations across the country. The validity of the proposed method is confirmed by applying the method to the past earthquake records. By using the propose method, the site requiring special attention can be easily extracted considering the amplification characteristics on every site.