

地震観測記録に基づく耐震設計上注意を要する 箇所の抽出方法

坂井 公俊¹・室野 剛隆¹

¹正会員 （公財）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）

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、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）が用いられる場合がほとんどである。しかしながら H24 年度に設計標準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(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発生する地点では当然ながら標準応答スペクトルでは十分とは言えない。

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するような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に、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)については、地点毎の地震観測が必要であり、従来の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するのか、といった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)}なども実施されており、これらの成果を活用することで、地震動の増幅の大きな地域をある程度抽出することも可能である。そしてこの結果を参考にすることで、耐震設計上注意を要するかどうかの判断を実施できると考えられる。

そこで本検討では、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（これをサイト増幅特性と定義する）を算定する。続いて全国の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、提案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し、得られた結果を概観することで、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地域を抽出する。

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

標準応答スペクトルは、主に過去の観測記録に基づいて評価されている²⁾。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、距離に補正を行い、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、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サイト増幅特性は、日本全国のサイト増幅特性の平均値+標準偏差に相当する」と仮定して検討を進める。また実際に日本全国の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、地震観測点における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。

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評価出来るようになり、各地点のサイト増幅特性とこれを比較することで、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サイト増幅特性を算定し、この結果に基づいて標準地震動で想定しているサイト増幅特性を評価する。

(2) 全国観測点の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⁵⁾。ただし、本検討で定義しているサイト増幅特性は、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、対象地盤層が異なる。そこで、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⁵⁾によって地震増幅特性が評価されている地点のうち、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^{5),8)-10)}に基づき次式に示すよ

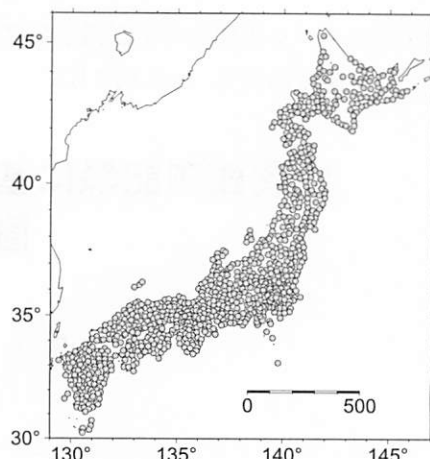


図-1 検討を行う観測点の分布

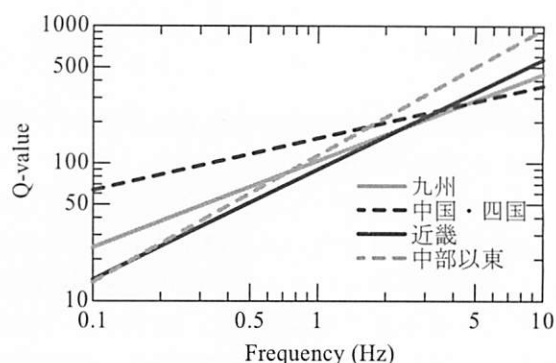


図-2 使用したQ値

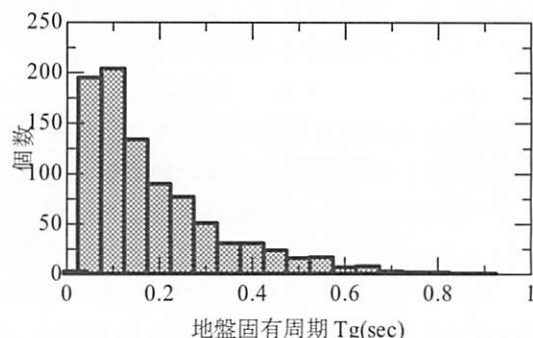


図-3 表層地盤の固有周期Tgの分布

うに地域ごとに異なるQ値を設定した(図-2)。

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

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々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、解放基盤として扱う。こ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。

続いて各地点の地震基盤面～地表までの地震増幅特性⁵⁾を表層地盤の伝達関数で除することで、各地点のサイト増幅特性を算定した。得られた結果の一例を図-4に示すが、K-NET小泊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正規分布に従うと仮定した上で、全地点のサイト増幅特性の平均値、標準偏差を算定した。得られた結果を図-5に示す。この結果より、全国の平均的なサイト増幅特性は、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-5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、サイト増幅特性を全て含んだ形で評価を行っている。そのため今回提示した閾値が、標準地震動のサイト増幅特性に対応していること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サイト増幅特性を図-5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サイト増幅特性をまとめて図-6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

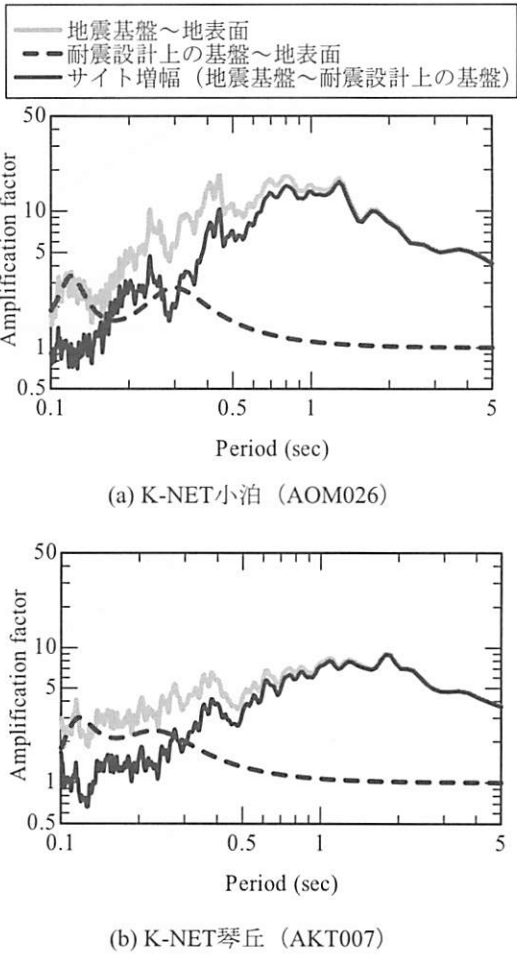


図-4 サイト増幅特性の評価例

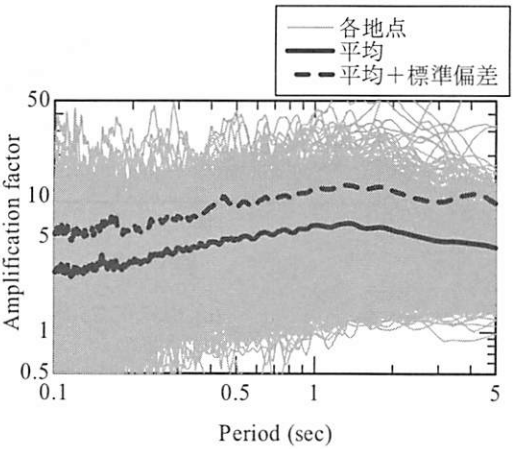
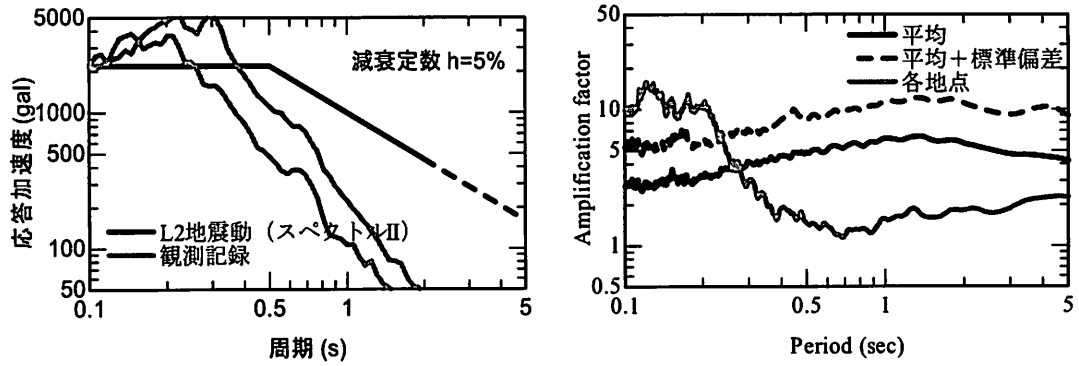
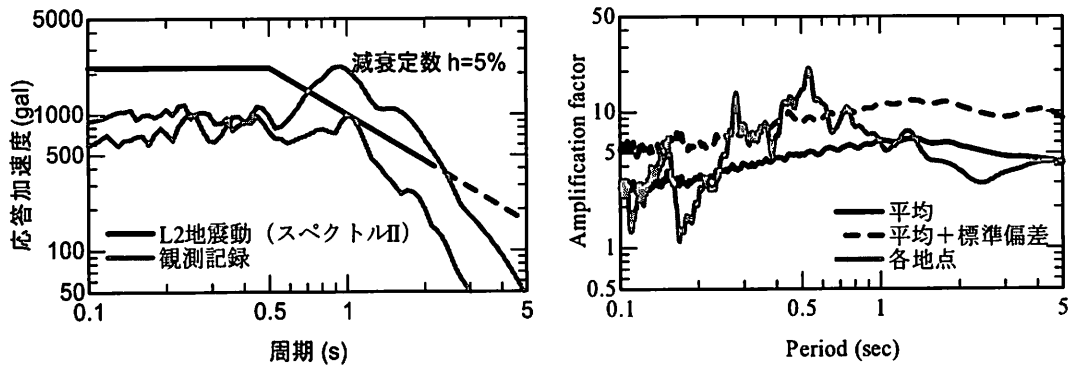


図-5 サイト増幅特性の平均、標準偏差

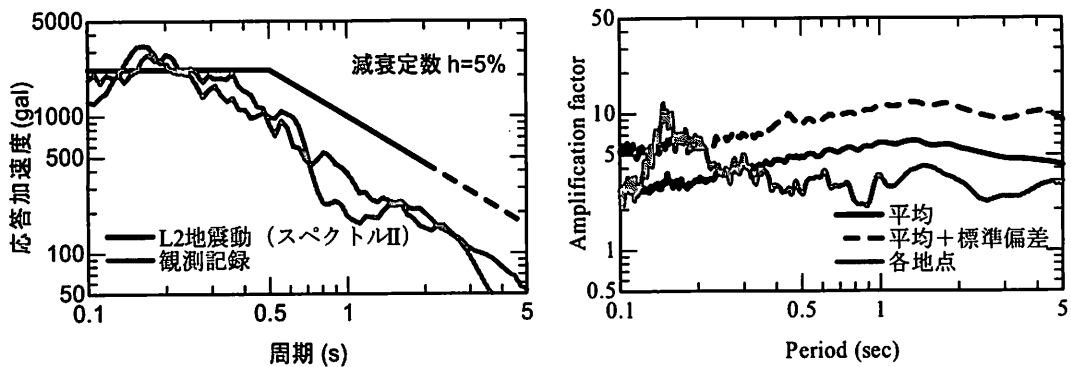
体的には、K-NET牡鹿、K-NET富来では周期0.3秒以下においてサイト増幅が全国の平均+標準偏差を上回っている。観測された記録を見ると、短周期成分において標準L2地震動を上回っていることが分かる。一方で、周期の比較的長い領域で大きなサイト増幅を示しているK-NET穴水、K-NET柏崎では、これと同等かそれよりも長周期成分において、標準L2地震動を上回る記録が観測されている。他の比較的大きな記録が観測された地点においてもこれと同様



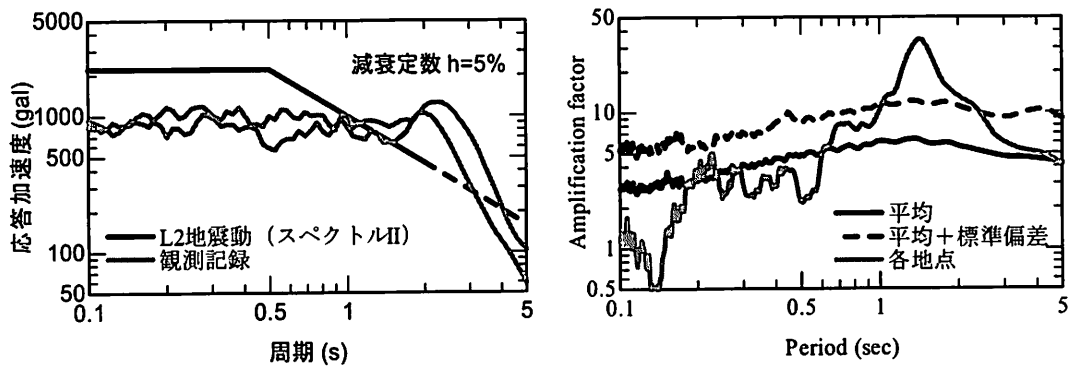
(a) 2003/05/26 宮城県北部地震 (K-NET 牡鹿 (MYG011))



(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-6 標準 L2 地震動を上回る記録が観測された地点のサイト増幅特性
(左: 応答スペクトル, 右: サイト増幅特性)

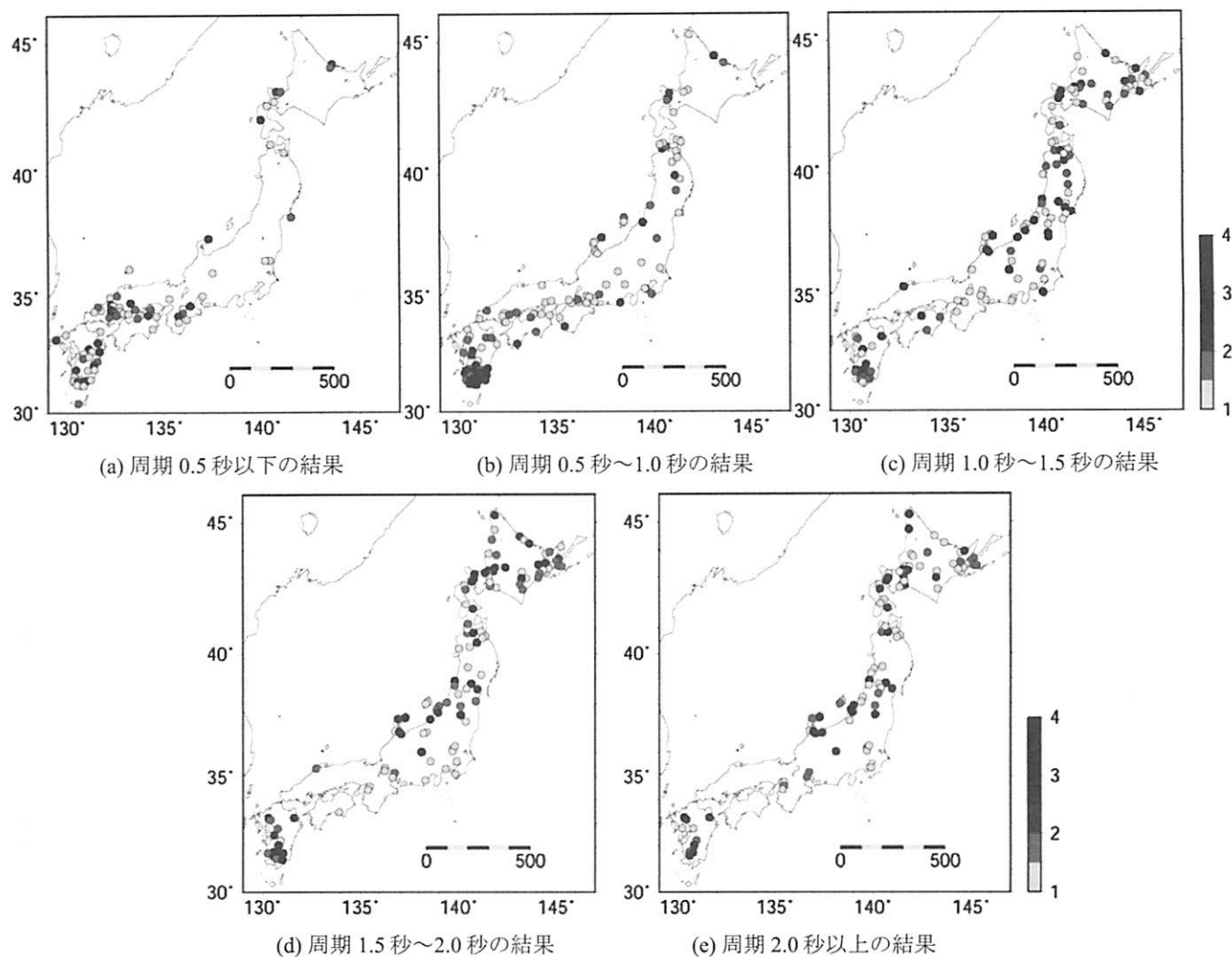


図-7 サイト増幅特性の大きな地点

(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)

の傾向があることを確認しており，図-5の平均+標準偏差の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

続いて，各地点のサイト増幅特性を図-5 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する。ただし，前章での検討でも明かなように，サイト増幅の周期特性は応答スペクトルの周期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った。得られた結果を図-7 に示す。ただし，この図には地震増幅が図-5 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-8 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¹¹⁾も記載している。

これらの結果を見ると，サイト増幅特性の大きな

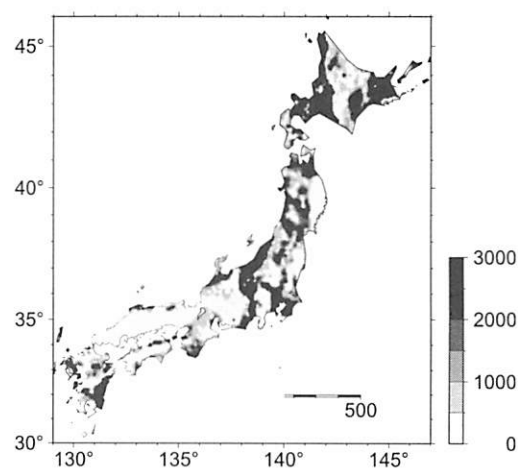


図-8 全国の地震基盤深度 (m)

地域には地域性がみられる。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-8 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、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、周辺観測点のサイト増幅、周辺の深部構造の変化から、地点のサイト増幅がどの程度が大きくなるのかを事前にある程度予測することは可能であると考えられ、今回の結果は、沿線における調査実施箇所の決定に有用な情報となる。

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、本手法により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、比較的簡易に地点毎の地震特性を加味した上での、要注意箇所を抽出することが可能となる。

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、GMT¹²⁾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，巽蒼樹：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) 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.
- 12) Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS, Trans. AGU*, Vol.79, p.579, 1998.