

論文 短期間地震観測で取得した小地震記録 によるサイト増幅特性の評価

田中 浩平¹・坂井 公俊²

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）
E-mail:tanaka.kohei.22@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）
E-mail:sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

鉄道構造物の設計時に使用する設計地震動の設定において、耐震設計上の基盤以深の深部地盤構造における地震動増幅特性（設計サイト増幅特性）を把握することが重要である。この評価には、一般的に常時微動観測もしくは地震観測を行う。このとき、地震観測による増幅特性の評価は信頼性が高いものの、観測に長期間を要することから、実施されることは稀であった。また、サイト増幅特性を評価するにあたってはスペクトルインバージョンのような実務的に適用が難しい手法を用いる必要があった。

本論文では、はじめに、サイト増幅特性を評価するにあたって、周辺地震観測点で既に評価されているサイト増幅特性を、評価地点と既評価地点のフリーエスペクトル比で補正する簡易法を提案する。更には著者らが独自に実施した地震観測記録から、通常評価に使用されるマグニチュード4.0程度の地震よりかなり小さい、マグニチュード2.0程度の小地震を用いてもサイト増幅特性を評価できることを示す。以上により、短期間の地震観測でも簡易な手法により信頼性の高いサイト増幅特性を評価できるようになる。

Key Words : site amplification, structural safety, train running safety, seismic observation

1. はじめに

平成 24 年鉄道構造物等設計標準・同解説（以下、耐震標準）¹⁾では、「6.4.4.1 一般」において、「L2 地震動は、強震動予測手法に基づき地点依存の地震動として算定する」とされている。ただし、詳細な検討を必要としない場合には、簡易な手法により L2 地震動を算定してもよい。耐震標準「6.4.4.1 一般」の解説において、詳細な検討が必要な場合として、下記の 2 点の場合が挙げられている。

- 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

建設地点がいずれかの場合に当てはまる場合には、L2 地震動の算定において詳細な検討が必要となる。具体的には、建設地点の地震増幅特性および対象震源域を特定した上で、強震動予測手法に基づき地点依存の地震動を設定する必要がある。

このとき②を確認するための検討では、工学的基盤以

深の深部地盤構造における地盤増幅特性（サイト増幅特性）を把握する必要がある（図-1）。この評価を行うにあたっては、常時微動観測や地震観測により建設地点の揺れやすさを評価することが一般的である²⁾。このとき、地震観測により評価されたサイト増幅特性は、評価結果の信頼性は高いが、常時微動観測を用いた場合に比べて観測に長期間を要する（半年～数年程度）と考えられており、実施されることは稀である。

また、サイト増幅特性を評価するにあたっては、スペクトルインバージョンによる方法が用いられる事が多い³⁾。しかし、この手法を実施する場合には、評価地点を含む複数の地震観測点で同時に得られた地震記録が必要になるため、地震観測が非常に大規模で煩雑となる。

そこで、本論文では、通常評価に使用される気象庁マグニチュードの下限 M_j 4.0 程度の地震⁴⁾よりかなり小さい、 M_j 2.0 までの小地震でもサイト増幅特性を評価できることを示す。これにより、比較的短期間の地震観測でも信頼性の高いサイト増幅特性を評価できる可能性があることを示す。また、スペクトルインバージョンでなく、あらかじめ全国の公的地震観測点において評価されたサイト増幅特性を補正することにより、1 地点の地震観測でも簡易にサイト増幅特性が評価できる手法を提案する。

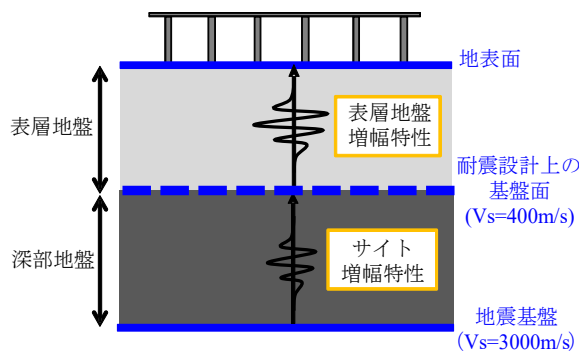


図-1 サイト増幅特性の定義

これにより、地震観測による信頼性の高い設計サイト増幅特性の評価が、より簡易に実施できるようになる。

本論文では、2章にて提案するサイト増幅特性の評価方法について説明する。続いて、3章では評価地点と実施した地震観測の概要について説明する。4章では、小地震記録に基づいてサイト増幅特性を評価した結果について説明し、提案する手法の妥当性を示す。5章では、サイト増幅特性の活用方事例を示すことで、サイト増幅特性の有効性を示す。

2. サイト増幅特性の評価手法

サイト増幅特性を評価するにあたっては、スペクトルインバージョンを実施することが一般的である³⁾。しかし、本検討では実務における活用に配慮し、サイト増幅特性が既に評価されているK-NET観測点⁴⁾を基準点として、これを補正することで評価地点のサイト増幅特性を評価することとした。サイト増幅特性の具体的な評価手順は以下の通りである(図-2)。

- ① 評価地点と基準 K-NET 観測点において同一地震で観測された地震記録のペアを整理する。
- ② 各地震記録に対してフーリエ振幅スペクトルを算定し、ペアごとにスペクトル比(評価地点/K-NET)を評価する。
- ③ このスペクトル比から、各地震記録の距離減衰の違いを考慮して、震源距離の逆数に応じた補正を行う。
- ④ ①～③の作業を全ての地震ペアに対して行い、全結果を平均したものを2観測点の補正係数とする。
- ⑤ この補正係数を K-NET 観測点のサイト増幅特性に乘じることによって、評価地点のサイト増幅特性を評価する。

フーリエ振幅スペクトルを評価する際に用いた波形は、S波を含む160秒間の波形とする。これは、サイト増幅特性に地震動の後続部に含まれる表面波の影響を考慮す

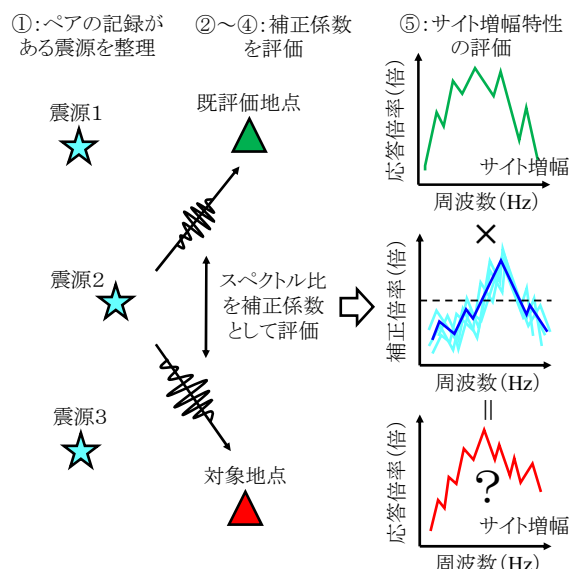


図-2 サイト増幅特性の評価手順
(図内丸数字は2章の手順に対応)

るためである。抽出した波形に対して、5%cosine テーパーを施した後に、0.05Hzのparzen-windowによるフィルタ処理を施したフーリエ振幅スペクトルを算出した。水平2成分に対して独立に評価されたスペクトルを、ベクトル和(2乗和平方根)したものを最終的なスペクトルとした。

3. 評価地点と地震観測の概要

図-3に示す盛岡県内陸部の評価地点に、P1、P2、P3の3つの地震観測点を設置し、1ヶ月程度の地震観測を実施した。3つの観測点は南北に並んでおり、P1～P2の離間距離は9.5km、P1～P3は19.1kmである。観測にはnanometrics社のTitan加速度計、白山工業製ロガーLS8800

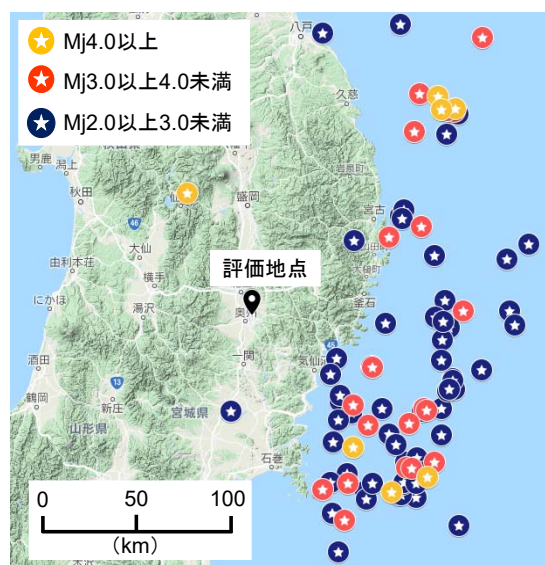


図-3 検討に用いたMj2.0以上の地震の震源位置、評価地点

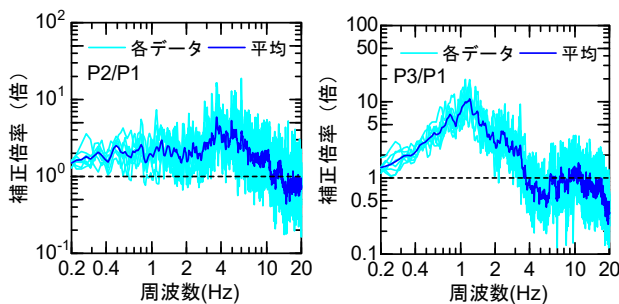


図4 P1を基準点とした場合のスペクトル比(Mj4.0以上の地震)

表-1 Mj4.0以上の対象地震

No.	発震日	時刻	緯度	経度	深さ(km)	Mj
1	2017/1/26	17:06	40.165	142.455	36.0	5.2
2	2017/1/28	22:40	39.760	140.767	151.0	5.0
3	2017/1/29	3:27	40.225	142.345	36.0	4.2
4	2017/2/6	11:27	38.528	141.810	50.0	4.1
5	2017/2/11	1:09	38.312	142.055	37.0	4.1
6	2017/2/11	6:05	37.177	141.718	41.0	5.4
7	2017/2/12	22:37	40.160	142.365	36.0	4.8

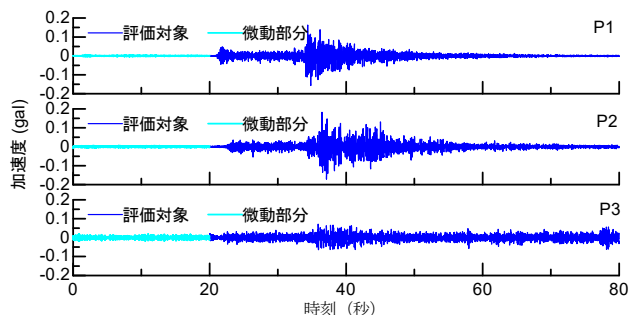
を使用した。

この期間に周辺で発生した Mj2.0 以上の地震を図-3 に示す。Mj 4.0 以上の地震については、その諸元を表-1 に示す。宮城県沖、三陸沖で発生した震源深さ 20~50km 程度の海溝型地震が大部分である。Mj4.0 以上の地震が 7 個、Mj2.0~4.0 の地震が 69 個、計 76 地震を対象とした。

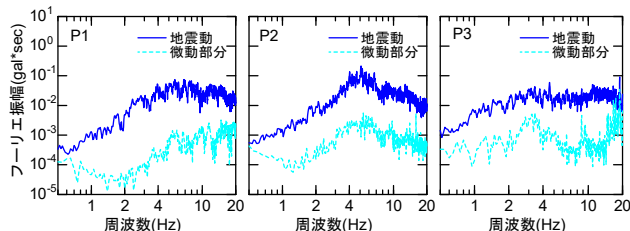
4. 小地震によるサイト増幅特性の評価結果

通常用いられる Mj4.0 以上の地震における補正係数の評価結果を図-4 に示す。P2 は 4Hz、P3 は 1Hz 付近にピークを有する地点である。この補正係数を、基準 K-NET 観測点のサイト増幅特性を乗じることで、P2、P3 地点のサイト増幅特性を評価することができる。なお、P2、P3 で基準とする K-NET 観測点が同じであるとすれば、図-4 の補正係数を正解値とした場合に、小地震の補正係数がこれに一致することを確認すれば良い。

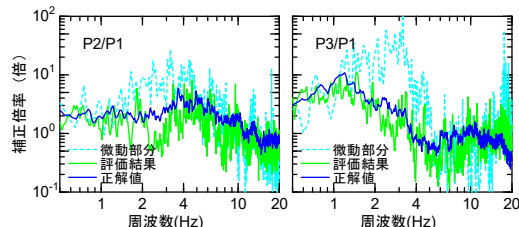
Mj4.0 より小さい地震において補正係数を評価した結果を図-5、6 に示す。図-5(a)は Mj3.0、震源距離 124km の地震動であるが、加速度が非常に小さいものの波形は視認できる。また、フーリエ振幅スペクトルも 0.5Hz 程度まで、良好な SN 比を確保できている(図-5(b))。評価された補正係数は正解値と概ね一致しており、適切に評価できていることが確認できる(図-5(c))。また、地震動到来以前の微動部分を用いて評価した補正係数は、地震動による評価結果とは大きく異なっていることから、地震動により適切な補正係数が評価されていることがわかる。図-6には Mj2.0、震源距離 117km の地震による結



(a) 加速度時刻歴波形 (NS 成分)

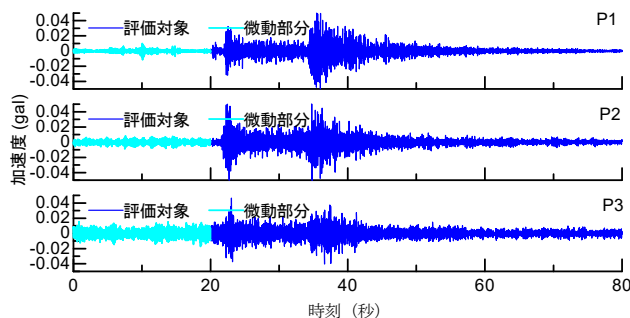


(b) フーリエ振幅スペクトル (水平 2 成分合成)

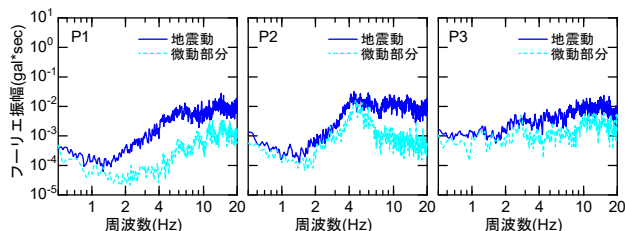


(c) スペクトル比 (補正係数)

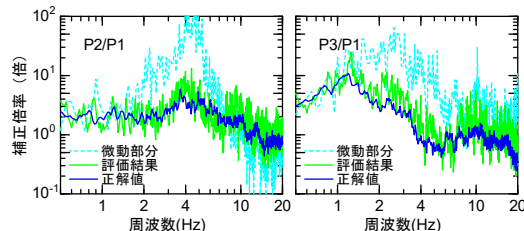
図-5 2017/1/27 0:58 Mj3.0 震源距離 124km



(a) 加速度時刻歴波形 (NS 成分)



(b) フーリエ振幅スペクトル (水平 2 成分合成)



(c) スペクトル比 (補正係数)

図-6 2017/1/24 23:24 Mj2.0 震源距離 117km

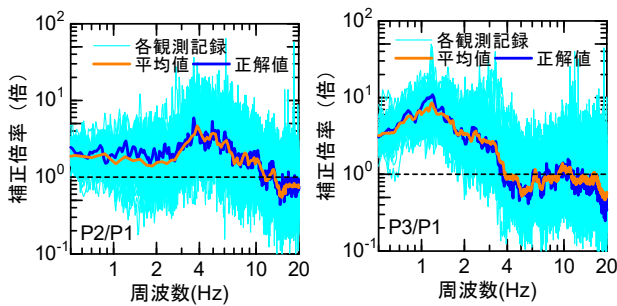


図-7 全記録での補正係数の平均

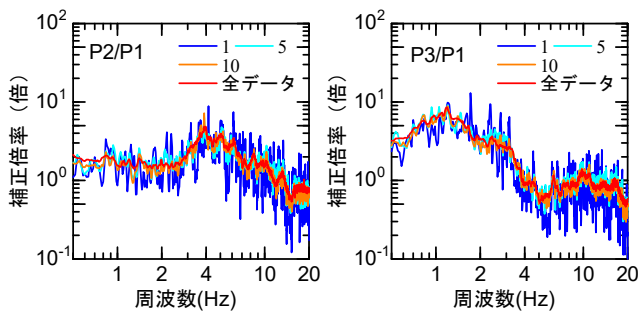


図-8 データ数と平均値の関係

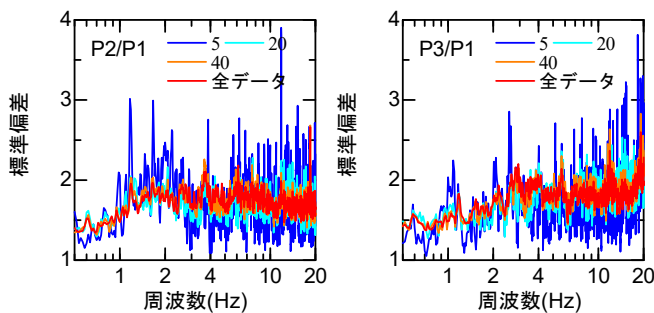


図-9 データ数と標準偏差の関係

果を示している。図-5 と比べて半分以下の振幅であるが、こちらの結果も補正係数は正解値と概ね一致していることが確認できる。しかしフーリエ振幅スペクトルでは、SN 比が確保できる周波数の下限が 2.0Hz 程度と高くなっており（フーリエ振幅スペクトルが反転する付近の周波数）、対象地点のノイズレベルに応じて、有効な周波数領域や検出できる地震規模の下限値が変化することがわかる。

図-7 に、全ての小地震で評価された補正係数の平均値と正解値を比較した。両者は広い周波数帯域で一致しており、小地震でも補正係数が問題なく評価できることが確認できる。ただし、評価結果のばらつきは、図-4 に示した Mj4.0 以上の地震に比べると大きくなる。

最終的に用いる補正係数は、複数地震の結果を統計処理した結果である。よって、実務上の利用を考えた場合には、どれだけの地震を観測すれば安定した統計量が得られるかが問題となる。そこで、平均値、標準偏差といった統計量と評価に用いた地震数の関係を整理した結果

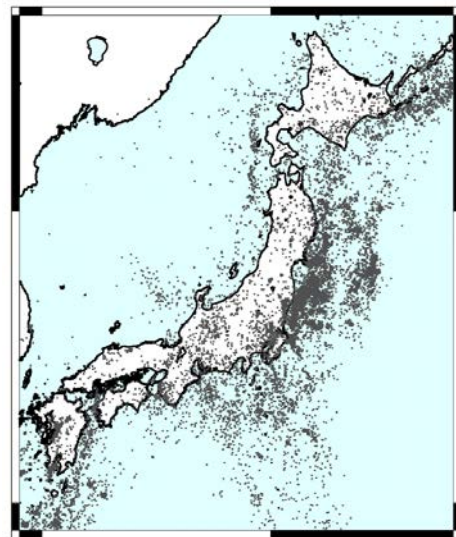


図-10 2017年に発生した Mj2.0以上の地震

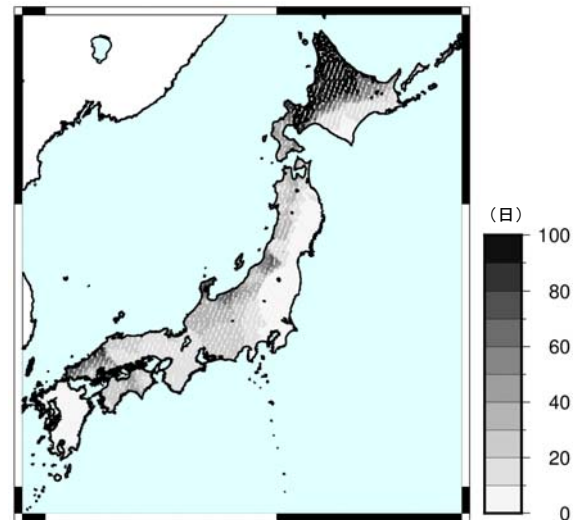


図-11 必要な記録を得るための観測期間

を図-8, 9 に示す。平均値を評価するにあたっては、10 個程度の結果を平均すると、正解値とほとんど同様の結果に収束することが確認できる。より安全側の補正係数を設定する場合には標準偏差が必要となるが、この場合には 40 個程度の記録を必要とする。しかし、標準偏差の値は地点ごとの違いが比較的小さいと考えられるため、全ての地点で同様の値を設定することもできる。

最後に、全国各地での補正係数を評価する場合に、必要な地震記録を得るために必要な期間を評価した。具体的には、本地点の検討結果から、Mj2.0、震源距離 120km 程度の地震までは評価に使用できるという前提条件で、2017 年 1 月 1 日を起点として、評価に使用できる地震を 10 個取得するまでに必要な期間を全国各地で評価した。このときの地震カタログは、気象庁一元化処理震源リストを用いた⁹⁾。評価に用いた地震の震源位置を図-10 に示す。関東地方から北海道にかけての太平洋側で非常に多くの地震が発生していることがわかる。また、

対象期間中に 2016 年熊本地震の余震が発生しているため、通常の期間と比べると九州地方内陸部の地震が多くなっている。

日本全国の各地点において、必要な記録を得るまでに要する日数を評価した結果を図-11 に示す。北海道北部や一部の日本海側の地域を除けば、90 日程度に必要な地震記録を取得できる。東北地方の太平洋側の地域では、20 日未満で取得できる地点も存在する。

以上の結果から、小地震を対象とすることで通常考えている半年から数年程度の地震観測より、かなりの短い期間でサイト増幅特性を評価できることが確認できた。なお本結果は、あくまで試算レベルであり、評価地点のノイズレベルや地盤増幅特性、カタログの起点日の選び方によって変化する可能性がある。

5. サイト増幅特性の活用事例

(1) 深部地盤における増幅特性の確認

サイト増幅特性を評価することの有効性を主張するために、サイト増幅特性の具体的な活用事例を紹介する。最も一般的な活用事例としては、1 章に述べた深部地盤構造における局所的な増幅の有無を確認することである。P1～P3 の観測点でサイト増幅特性を評価した結果を図-12 に示す。なお、このサイト増幅特性は図-1 に示す表層地盤増幅特性の影響を除去していない。

図には、全国の K-NET 観測点で評価したサイト増幅特性の平均、平均+標準偏差を併せて示している。これらは表層地盤増幅特性の影響を除去したものであるため、厳密な比較はできないが、P2 地点が 0.2～0.3 秒程度で非常に大きなサイト増幅特性を有していること、P3 地点は短周期のサイト増幅特性は小さいが 1 秒程度が大きくなっていることなどが確認できる。

(2) 地震動の即時推定における精度向上

地震が発生した直後に、路線上の地震動を即時推定する際の精度向上に、サイト増幅特性を活用できることを示す。現状評価では、最もシンプルな方法では、ある路線位置から最近傍の地震計で観測された地震動を、その位置の推定値とする。サイト増幅特性を用いる方法では、最近傍の地震計で観測された地震動に対して、評価地点と地震計位置のサイト増幅特性の比率（補正係数）を乗じることで補正を行ったものを推定値とする。

本論文で評価を行った P2、P3 地点において推定を行った結果を示す。ここでは、P1 を P2、P3 地点からの最近傍の地震計位置とする。P1 で観測された地震動にサイト増幅特性の比（図-7 に示した小地震の補正係数の平均値）を乗じることで、P2、P3 の地震動を推定した。

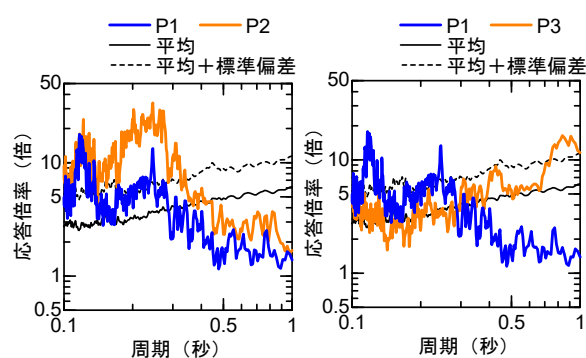


図-12 評価された設計サイト増幅特性

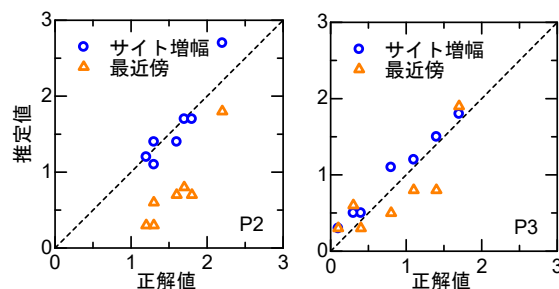


図-13 計測震度の推定結果

ここで、補正係数は地震動のフーリエ振幅スペクトルに乗じることとし、フーリエ位相スペクトルは P1 の観測記録をそのまま用いる。なお、推定値と比較することになる正解値は、P2、P3 で実際に観測された地震動である。

表-1 に示した以上の 7 つの地震に対して、上述の推定を行い、計測震度を比較した結果を図-13 に示す。P2、P3 のいずれの地点も最近傍地点のものに対して、サイト増幅特性による推定結果で、精度が向上していることがわかる。特に、P2 地点は図-12 に示すようにサイト増幅特性が P1 地点に比べて大きく異なるため、最近傍地点を用いた場合には、推定値が正解値に対して過小評価となる。サイト増幅特性による補正を行うことでこの誤差が大きく改善する。

以上のように、最近傍の地震計で地震動を推定する場合には、推定結果に監視区間の揺れやすさの変動を暗に考慮した安全側の判断が必要となる。しかし、路線上の要注意箇所において、本論文で示したような短期間の地震観測を事前に行い、サイト増幅特性を評価しておくことで、地震直後に精度の高い地震動の即時推定が可能となり、これを被害推定も活用できる。

6. まとめ

サイト増幅特性の評価にあたって、地震観測による信頼性の高い評価値を簡易に得るための手法を整備した。

具体的には、1 地点の地震観測からサイト増幅特性が既知の地点を補正することで、簡易にサイト増幅特性を評価する方法を提案した。そして、この手法が Mj2.0 程度の小地震でも適用できることを確認した。今後は、本結果をより一般的に展開するための高度化検討を行う。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の K-NET の強震記録を使用させていただきました。

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) 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究チーム：サイト増幅特性評価手法—松竹梅—，

https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn/research_jpn_2008/research_29/method_rev2.pdf, (2019/04/04 参照)

- 3) 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.
- 4) 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の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港研究所資料，No.1112，2005.
- 5) 防災科研 Hi-net ホームページ：気象庁一元化震源リスト，<http://www.hinet.bosai.go.jp/REGS/JMA/jmalist.php?LANG=ja>，(2019/04/04 参照)

(2019.4.5 受付)

EVALUATION OF SEISMIC AMPLIFICATION BASED ON SEISMIC OBSERVATIONS OF SMALL EARTHQUAKES

Kohei TANAKA and Kimitoshi SAKAI

When setting of the design ground motion for railway structures, it is necessary to evaluate the seismic amplification on deep subsurface structures which is deeper than the engineering bedrock. For this evaluation, either microtremor or seismic observation generally have done at the site. The amplification evaluated by the seismic observation is known to have a more high accuracy than microtremor, however, it is rare to conduct this observation because it takes a long period for the observation. And the evaluation method of amplification is so complicated for practical use. In this paper, we proposed the simplified evaluation method and moreover showed that the observation period will be able to shorten by using the small earthquakes about Mj2.0-4.0. From these improvements, it becomes easier to evaluate the amplification by seismic observations.