

設計入力地震動評価における位相特性の 補正方法に関する研究

長尾 毅¹・山田 雅行²・野津 厚³

¹国土交通省国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

²株式会社ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail: yamadams@newjec.co.jp

³独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

設計入力地震動を時刻歴波形として評価する際に、対象地点の強震記録が得られていないために、近傍のサイト増幅特性と対象地点の常時微動H/Vスペクトルをもとに対象地点のサイト増幅特性評価を行う場合について、近傍地点と対象地点の位相変化(位相特性)を合理的に評価する方法について検討を行った。

サイト増幅特性の補正方法として、強震記録及び常時微動記録を用いた3種類の補正方法を考慮し、位相特性について使用する観測記録及びその補正の有無、工学的基盤への引き戻し条件によって5種類のモデル化を組み合わせ、サイト増幅特性と位相特性の補正を行った工学的基盤相当の時刻歴波形の算定を行った。得られた時刻歴波形のエンベロープや最大加速度から、サイト増幅特性の補正方法によって変化はあるものの、近傍強震観測点の観測記録に対してサイト増幅特性の周波数の変化分を位相特性には補正を行わないものを用いても、十分に合理的な設計入力地震動であることが明らかになった。

Key Words : *Phase characteristic, site amplification factor, peak frequency, design earthquake ground motion, group delay time*

1. はじめに

構造物の設計入力地震動の設定にあたっては、震源特性、伝播経路特性、深部地下構造による地震動の増幅特性を考慮する必要があると指摘されている¹⁾²⁾。これら諸特性のうち、深層地盤による増幅特性については、単に地震基盤相当から地盤の1次元構造としての増幅を考慮するのでは不十分であり、設計入力地震動を合理的に評価する観点からは2～3次元構造としての、鉛直入射のみならず斜め入射を含んだ増幅特性を評価する必要がある。これらの点に関する研究事例も幾つかあるが³⁾⁴⁾、現状では3次元的地盤構造が地震基盤まで得られていて解析的な検討が可能な地点は限られていることから、深層地盤による増幅特性(以下、サイト増幅特性と記述)の評価のためには強震観測記録を用いたスペクトルインバージョン⁵⁾によることが現実的と考えられる。この手法による研究事例も幾つかあり⁶⁾⁷⁾⁸⁾、構造物の設計地震動の評価において実務でも用いられ始めている⁹⁾。

サイト増幅特性が得られていない地点でも、強震

観測が行われており、近傍のサイト増幅特性が得られている地点と同時記録が得られておれば、近傍地点のサイト増幅特性に同時記録のスペクトル比を乗ずることによって、サイト増幅特性を補正することができる(以下、「松補正」と呼ぶ)。

一方、サイト増幅特性が得られていない地点で、強震観測も行われていない地点のサイト増幅特性を評価するには、常時微動の活用が考えられる。常時微動観測記録より得られる指標として常時微動H/Vスペクトルの情報を地震動の増幅特性と関連付けて議論する研究が中村の研究¹⁰⁾を端緒として数多く行われている¹¹⁾¹²⁾。既往の研究には常時微動H/Vスペクトルを主に実体波の観点から議論するもの¹⁰⁾と主に表面波の観点から議論するもの¹³⁾が混在している状況であるが、常時微動H/Vスペクトルが地盤のS波速度構造に関係する何らかの情報を持っているという認識においては広く一致しているといえる。また、常時微動H/Vスペクトルと地震動増幅特性のピーク周波数の調和性についてはかなりの研究事例が蓄積されているほか、両者の倍率の相関に関する研究事例も多い。このような背景に鑑み、著者らは¹⁴⁾、

地震基盤から上の地盤の多次元効果等を含んだサイト増幅特性を対象に、特に両者の明瞭なピークの周波数および振幅に着目して、両者の相関について検討した。さらに、強震観測が行われていない地点のサイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法について提案を行った。

サイト増幅特性を用いて設計入力地震動を時刻歴波形として設定する場合、サイトにおける増幅時の位相変化(位相特性)を考慮しなければならない。強震観測が行われている場合、点震源とみなせる程度に規模が小さく、伝播中に位相変化が顕著でない程度に震源距離が小さい地震の観測記録の位相を、サイトの位相特性として用いることができる¹⁵⁾。しかしながら、サイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法を用いた場合には、当該地点における地震観測記録を用いることができないため、適切な位相特性を求めることが難しい。

澤田ら¹⁶⁾は、地震観測記録の群遅延時間を用いて、その位相特性が振幅スペクトルの特徴と良く対応することを指摘している。すなわち、常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の補正方法と同様の考え方で位相特性(群遅延時間)を補正できることを示唆しているものと考えられる。

そこで、本研究では、強震観測が行われていない地点のサイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定した場合の位相特性を合理的に評価する方法について検討を行った。

2. 常時微動を用いたサイト増幅特性の補正

(1) 常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の補正法

サイト増幅特性¹⁷⁾が既知のA地点から、サイト増幅特性が未知のB地点のサイト増幅特性を、A、B両地点の常時微動H/Vを介して算定する方法として、当初は2地点の常時微動H/Vのピーク振幅が同等とみなせる場合のみ、ピーク周波数を平行移動する方法を提案してきた¹⁸⁾。これは、A地点のサイト増幅特性を、着目するピークがB地点のH/Vスペクトルのピーク周波数と一致するように、対数軸上で平行移動するものである(以下、「竹補正」と呼ぶ)。

これに対して文献14)では、特定地域に限定したサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の相関を明らかにし、近傍のA、B両地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅が異なる場合に対して、A地点のサイト増幅特性を補正してB地点のサイト増幅特性を求める方法を提案している。補正方法は以下の通りである(以下、「新竹補正」と呼ぶ)。

- ① サイト増幅特性が既知のA地点のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルを、A地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数(f_A)が、サイト増

幅特性が未知のB地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数(f_B)に一致するように対数軸上で平行移動して補正する。これは、文献18)の方法と同じである。いま、A地点の補正前のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをそれぞれ $AMP_A(f)$ 、 $HV_A(f)$ とすると、補正後のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトル $AMP_A(f)'$ 、 $HV_A(f)'$ は次式で表すことができる。

$$\Delta f = f_B / f_A \quad (1)$$

$$AMP_A(f)' = AMP_A(f / \Delta f) \quad (2)$$

$$HV_A(f)' = HV_A(f / \Delta f) \quad (3)$$

- ② A、B両地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の違いがA、B両地点のサイト増幅特性の着目するピーク振幅の違いを反映している可能性が高いことから、サイト増幅特性が未知のB地点のサイト増幅特性 $AMP_B(f)$ は、平行移動したA地点のサイト増幅特性 $AMP_A(f)'$ に、A、B両地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の比($HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$)を乗じることによって算定する。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B^{peak} / HV_A^{peak}) \quad (f > f_0) \quad (4)$$

- ③ このように処理を行うと、低周波レベルがA、B地点で大きく異なってしまうことから、低周波レベルに対しては、常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の比($HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$)ではなく、常時微動H/Vスペクトルの周波数ごとの振幅比($HV_B(f) / HV_A(f)'$)を乗じる。②と③の境界は、ピーク周波数より高周波数側で、②による値が③による値をはじめて上回る周波数 f_0 とする。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B(f) / HV_A(f)') \quad (f \leq f_0) \quad (5)$$

(2) 常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の補正結果

図-1に、新竹補正を用いて2地点のサイト増幅特性の推定を行った結果を示す。釧路-G、相馬-Gは港湾地域強震観測網¹⁹⁾の観測地点を表す。HKD077、FKS001はK-NET²⁰⁾の観測地点を表す。図-1において、「A地点→B地点」の記述は、サイト増幅特性が既知の地点をA地点、サイト増幅特性が未知の地点をB地点とし、A地点のサイト増幅特性を、A、B両地点の常時微動H/Vスペクトルを用いて、前節の手順①～③に従って補正を行うことを意味している。図には、ここで既知と考えたA地点のサイト増幅特性を「補正前」、これをA、B両地点の常時微動H/Vスペクトルを用いて補正した結果(サイト増幅特性)を「補正結果」、未知と考えたB地点の実際のサイト増幅特性を「ターゲット」と示した。

構造物の耐震安定性を検討する上で重要な0.5～2Hzにおけるピーク周波数はよく一致しており、ピ

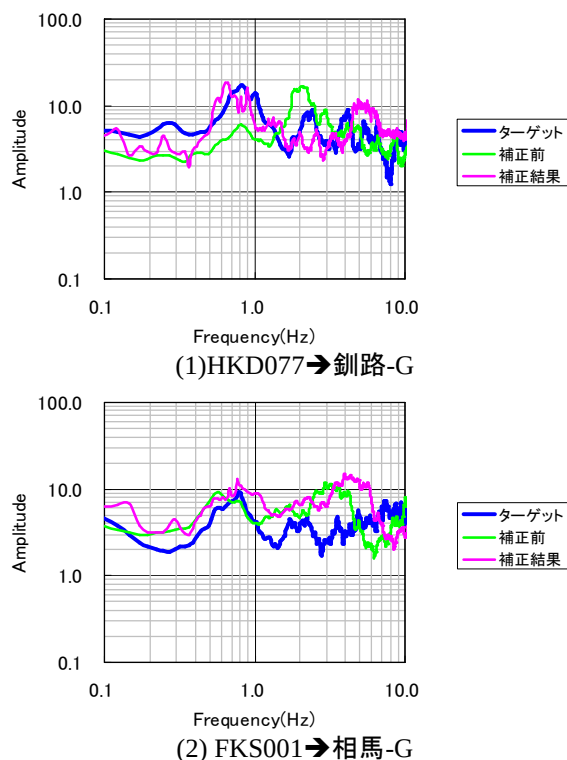


図-1 新竹補正によるサイト増幅特性の補正結果

ーク振幅についても概ね精度よく補正できていることがわかる。また、低周波側については概ね精度よく補正できていることがわかる。また、高周波側については同等または安全側の評価がなされていることがわかる。

3. 位相特性のモデル化

(1) 位相特性のモデル化手法

強震観測が行われていない地点のサイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法は、対象地点と近傍地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の違いを補正することに基づきものである。

位相特性の補正においても同様の考え方を適用する。サイト増幅特性を補正した対象地点と近傍地点のピーク周波数の違いを、群遅延時間のピークについても補正するというものである。実施には、位相特性に用いる地震観測記録の時間軸を伸縮させて、その位相波の振幅のピーク周波数とともに、位相(群遅延時間)のピーク周波数を変化させる。図-2に位相特性のモデル化のイメージ図を示す。

ここでは、合理的な位相特性のモデル化を検討するために、実際にはサイト増幅特性および位相特性が既知の地点を選定して検討を行った。表-1に示すように、振幅特性の設定として①～③の3種類、位相特性の設定として(a)～(e)の5種類を用いて検討した。①②③はそれぞれ松補正、新竹補正、竹補正に対応する。表-1に記述したB地点が対象地点であり、A地点とは近傍の強震観測地点である。これより、ケース①-(a)が松補正であり、位相特性の補正方法

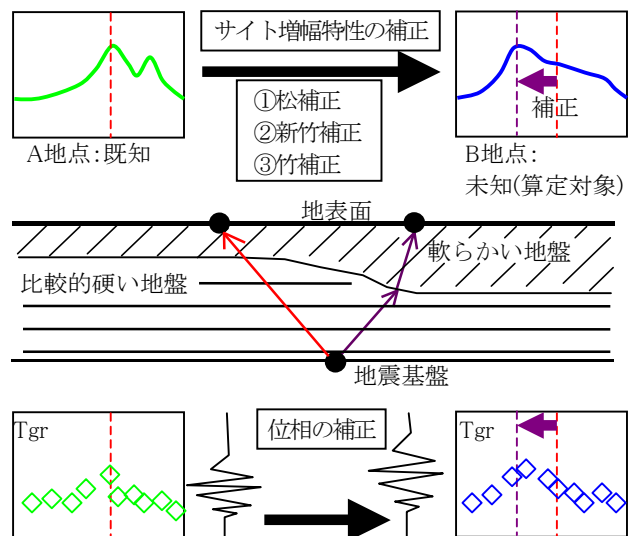


図-2 位相特性のモデル化のイメージ図

表-1 位相特性のモデル化

ケース		使用する観測記録		補正 ※	引き戻しの 地盤条件
①	(a)	B地点	個別に選定	無	B地点
	(b)	A地点	個別に選定	無	A地点
	(c)	A地点	個別に選定	有	B地点
	(d)	A地点	(a)と同一地震	無	A地点
	(e)	A地点	(a)と同一地震	有	B地点
②	(b)	A地点	個別に選定	無	A地点
	(c)	A地点	個別に選定	有	B地点
③	(b)	A地点	個別に選定	無	A地点
	(c)	A地点	個別に選定	有	B地点

※補正：位相波の時間軸を伸縮させて、位相(群遅延時間)のピーク周波数を変化させること。

の妥当性検証の際の参照用の補正ということになる。また、使用する観測記録のうち、「個別に選定」とはA地点で観測された地震記録の中から設計用地震動に適切な位相波を選定すること、「(a)と同一地震」とはケース①-(a)で選定されたB地点の地震波と同じ地震によるA地点での観測記録を位相波として用いることを指す。後述する釧路-Gと相馬-Gに対する補正に用いた各ケースの位相波の時刻歴波形を図-3に示す。

なお、設計入力地震動は工学的基盤($V_s=300\text{m/s}$ 相当)において設定するものとし、したがって、位相特性も地震基盤～工学的基盤相当のモデル化を行うものとする。

(2) 位相特性のモデル化の合理性評価

HKD077→釧路-G、FKS001→相馬-Gに対して、サイト増幅特性と位相特性のモデル化の組み合わせを変えて、位相特性のモデル化の合理性について検討を行った。その結果を、図-4、図-5に示す。図-4、図-5の一番上に示した①(松補正)-(a)は、B地点における強震観測に基づいてサイト増幅特性、位相特性ともに評価したものである。したがって、①-(a)と

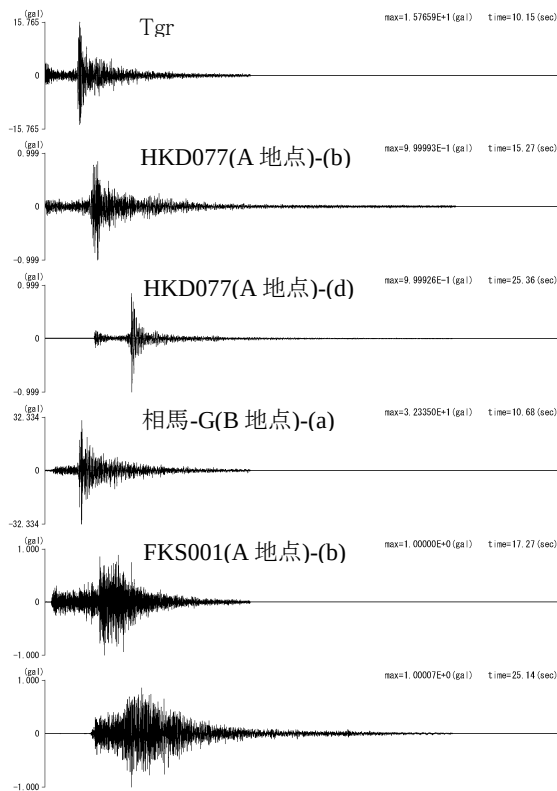


図-3 補正前の位相波の時刻歴波形

①-(b)～③-(c)を比較することによって、①-(b)～③-(c)の合理性の評価を行った。

図-4のHKD077→釧路-Gをみると、観測記録に対してサイト増幅特性の周波数の変化分を位相に関しても補正を行った(c)および(e)のケースは、①-(a)と全く異なったエンベロープを示している。一方、(b)、(d)のケースは①-(a)と似たエンベロープを示している。最大加速度については、③-(c)は①-(a)を下回っているが、その他は①-(a)より大きな値となっており、安全側の評価となっていることがわかる。

図-5のFKS001→相馬-Gの場合は、サイト増幅特性の補正前後の周波数変化が少ないため、補正を行わない(b)および(d)のケース、補正を行った(c)および(e)のケースともに、①-(a)のエンベロープと大きな違いは見られない。ただし、②-(b)～③-(c)に関しては新竹補正、竹補正によって、サイト増幅特性自体が大きい値となっているため、最大加速度については、いずれも①-(a)より大きい値となった。

4. 考察

前章の結果より、サイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法を用いた場合、設計入力地震動を設定する際に考慮しなければならないサイトにおける増幅時の位相変化は、必ずしもサイト増幅特性の周波数変化分を補正しなくても、概ね合理的な地震動が評価できることが示された。

本手法はサイト増幅特性の周波数変化分を補正す

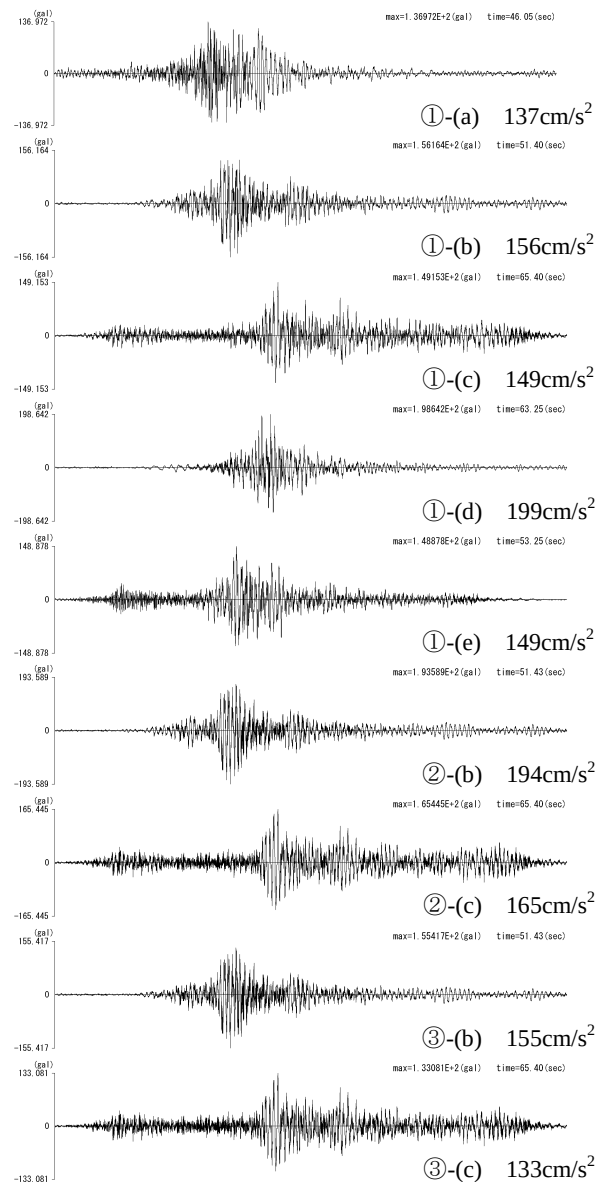


図-4 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅・位相特性の補正結果(HKD077→釧路-G)

るものであるため、群遅延時間、すなわち位相特性がサイト増幅特性、すなわち振幅特性の特徴と良く対応することが前提となる。図-6に位相波の群遅延時間の比較を示す。(1)HKD077→釧路-Gをみると、対象地点(B地点)の位相波(釧路-Gにおける観測記録)には、サイト増幅特性の0.8Hzのピーク周波数付近に群遅延時間のわずかなピークがかるうじて見てとれる。一方、近傍地点(A地点)の位相波(HKD077における観測記録)には、サイト増幅特性の2.0Hz付近のピーク周波数付近には群遅延時間のピークは区別できない。したがって、補正を行った位相波でもサイト増幅特性に対応するピークは判別できない。このことは、位相特性の補正を行うことが、合理的な地震動評価につながらないことの一因であると考えられる。逆に、サイト増幅特性に対応するピークを有する位相波が選定できれば、合理的な地震動評価が可能になることを示唆するとも考えられる。

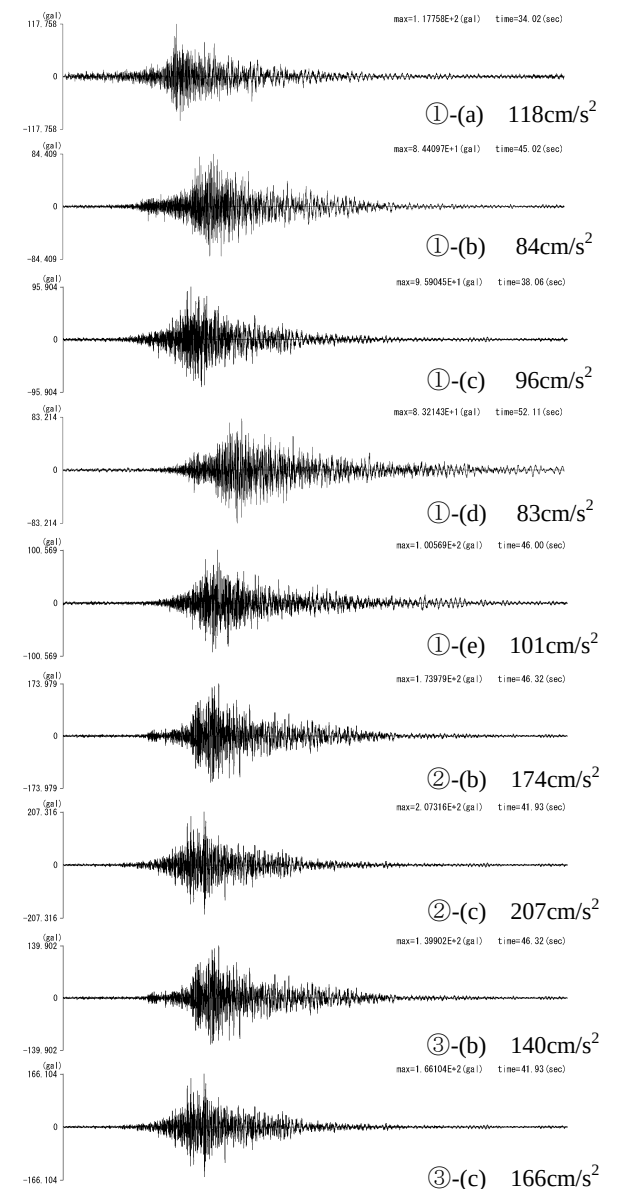


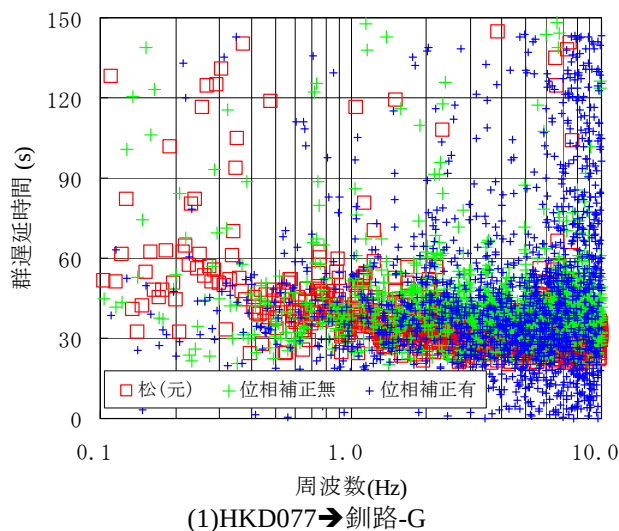
図-5 常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅・位相特性の補正結果(FKS001→相馬-G)

5. おわりに

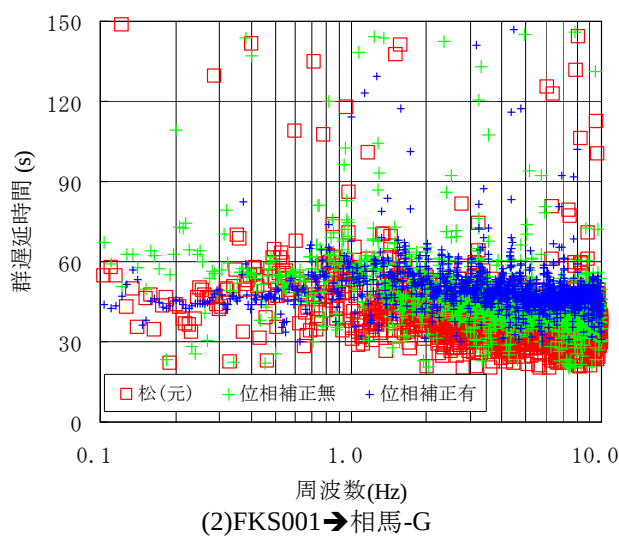
サイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法を用いた場合、設計入力地震動を設定する際に考慮しなければならないサイトにおける増幅時の位相変化(位相特性)を合理的に評価する方法について検討を行った。

サイト増幅特性の補正方法として、松補正、新竹補正、竹補正に対して、使用する観測記録、その観測記録の補正の有無、工学的基盤への引き戻し条件によって5つの位相特性のモデル化を組み合わせ、サイト増幅特性と位相特性の補正を行った工学的基盤相当の時刻歴波形の算定を行った。得られた時刻歴波形から、

- (1)観測記録の位相特性に対してサイト増幅特性の周波数の変化分を補正を行ったケースのエンベロープは、サイト増幅特性の補正方法にかかわ



(1)HKD077→釧路-G



(2)FKS001→相馬-G

図-6 群遅延時間の比較

らず、強震観測に基づいて算定した結果と大きく異なる場合があること

- (2)最大加速度については、サイト増幅特性の補正方法に依存するとともに、位相特性の補正にはさほど依存しないこと

が明らかになった。

以上から、サイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法を用いた場合、設計入力地震動を設定する際に考慮しなければならないサイトにおける増幅時の位相変化は、必ずしもサイト増幅特性の周波数変化分を補正しなくても、概ね合理的な地震動が評価できることがわかった。

なお、サイト増幅特性に対応するピークを有する位相波を選定した場合についてなど、さらに合理的な地震動評価を可能とする手法の検討については今後の課題と考えられる。

謝辞：K-NETの強震観測記録及び土質データについては独立行政法人防災科学技術研究所のホームペー

ジ(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)より入手しました。また、港湾地域強震観測のデータはホームページ(<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)より入手可能である。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－，2001.
- 2) 国土交通省港湾局監修，(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 3) 増井大輔，翠川三郎：工学的基盤での地震動にみられる深い地盤構造による増幅特性，土木学会論文集 A，Vol.62，No.2，pp.225-232，2006.
- 4) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：深い盆地構造におけるサイト増幅特性に対する入射角の影響に関する研究，構造工学論文集 Vol.54A，pp.247-255，2008.
- 5) 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 2，Vol.39，No.4 pp.579-593，1986.
- 6) 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，No.556，pp.15-24，2002.
- 7) 川瀬 博，松尾秀典：K-NET，KiK-net，JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応，日本地震工学会論文集，第 4 巻，第 4 号，pp.126-145，2004.
- 8) 莊司雄一，神山 眞：Small-Titan の観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定，土木学会論文集，No.703，I -59，pp.237-253，2002.
- 9) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801，I -73，pp.141-158，2005.
- 10) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告 Vol.2，No.4，pp.18-27，1988.
- 11) Bard, P-Y. : Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema, pp.1251-1279, 1999.
- 12) Kudo, K., Sawada, Y. and Horike, M. : Current studies in Japan on H/V and phase velocity dispersion of microtremors for site characterization, Proc. 13WCEE, Paper No.1144, 2004.
- 13) 時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集 No.439，pp.81-87，1992.
- 14) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集 Vol.56A，CD-ROM，2010.
- 15) 古和田明，田居優，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集，第 514 号，pp.97-104，1998.
- 16) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：強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，pp.915-920，1998.
- 17) 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，第 7 巻，第 2 号，pp.215-234，2007.
- 18) 長尾 毅，平松和也，平井俊之，野津 厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集，第 22 巻，pp.505-510，2006.
- 19) 野津 厚，若井 淳：港湾地域強震観測年報（2009），港湾空港技術研究所資料 No.1223，2010.
- 20) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.

A STUDY ON EVALUATION METHOD OF PHASE CHARACTERISTICS FOR INPUT DESIGN EARTHQUAKE GROUND MOTION

Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA and Atsushi NOZU

Authors proposed an estimation method of the site amplification factor for a site where earthquake records are not available by using microtremor H/V spectrum and the site amplification factor at a nearby site in the previous study. It is necessary to evaluate phase characteristics in addition to the site amplification factor for the evaluation of input design earthquake ground motion. This study discusses an evaluation method of phase characteristics for a site where earthquake records are not available considering the change in group delay time according to the change of peak frequency in the site amplification factor.正