

表層地盤減衰の周波数依存性 に関する統計的性質

栗田 哲史¹・佐藤 博²・足立 倫海³

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

E-mail:kurita@tepsco.co.jp

²フェロー 東京電力株式会社 (〒231-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

³正会員 東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

様々な立地条件に設置された鉛直アレイ地震観測システムのデータから求められた周波数依存減衰モデルを対象として、減衰モデルの統計的特性について検討した。はじめに、水平成層地盤で高密度に地震計が設置されている地点の鉛直アレイ観測記録から得られる減衰モデルの適切性に関する検討を実施した。周波数依存減衰モデルを用いた場合と、周波数非依存減衰モデルを用いた場合との比較を行い、周波数依存減衰モデルの方が、観測記録との適合性において適切なモデルであることを情報量基準によって定量的に示した。次に、関東甲信越地方を中心とした29地点の鉛直アレイ観測記録から同定された周波数依存減衰モデルを統計処理した。その結果、地形分類もしくはVs代表値によってグループ化された平均的な周波数依存減衰モデルが得られた。

Key Words : frequency dependent damping, identification, subsurface ground, statistical feature, vertical array observation system

1. はじめに

表層地盤の地震時挙動をシミュレーションする際に、特に重要なパラメータとなるのは地盤の剛性と減衰特性である。ここで、剛性については速度検層などで得られる地震波の伝播速度に関係づけられてある程度精度良く求めることができる。減衰については、ひずみに依存した減衰は動的変形試験などで求めることができる。しかし、ひずみが非常に小さい領域でも減衰は存在しており、その値を室内試験から求めることは難しい。また、そのようなひずみに依存しない減衰特性については、そのメカニズムなど未だに良くわかっていない面がある。しかし、以下に述べる通り観測記録の再現性から、現象面での減衰の周波数依存性が既往の文献で指摘されている。

表層地盤の減衰特性の周波数依存性に関する先駆的な研究として、野沢等¹⁾は鉛直アレイ観測記録の分析によって、定数型の減衰を用いたシミュレーション解析では高周波数側の減衰効果が過大評価になっていることを示し、周波数依存型の減衰モデルの導入を提案している。

また、安中等²⁾は周波数依存型の減衰モデルとひずみ依存型の減衰モデルの両者を表現するモデルを用いて、弱震動から強震動までの地盤震動を表現することを試み

ている。

小林等³⁾はKiK-netの深井戸の記録を用いて、S波の減衰定数が周波数依存性を示すことを示し、更に、高周波数側では一定値となるバイリニア型を呈するとしている。

一方、数値シミュレーションによる減衰の周波数依存性に関する検討も行われている。藤谷等⁴⁾、栗田等⁵⁾、Kurita *et al.*⁶⁾は、表層地盤の不均質性によって地震波の減衰が周波数依存性を示すことを二次元有限要素法を用いたシミュレーションによって示している。

ここまで概観してきた通り、そのメカニズムについては不明な点も多いが、表層地盤の減衰特性が周波数依存性を示すことは複数の研究成果によって示されている。

以上のような背景のもと、本研究では表層地盤の減衰の周波数依存性について、その特性を統計的な処理によって把握することを試みた。なお、本研究では十分にひずみが小さく、表層地盤の非線形性が表れていないデータを使用した。これは減衰のひずみ依存性の影響が混入するのを避けるためである。

はじめに、代表地点の鉛直アレイ観測記録から周波数依存型モデルと周波数非依存型モデルの2種類の減衰を同定し、情報量基準によってどちらのモデルが適切であるかの確認を行った。

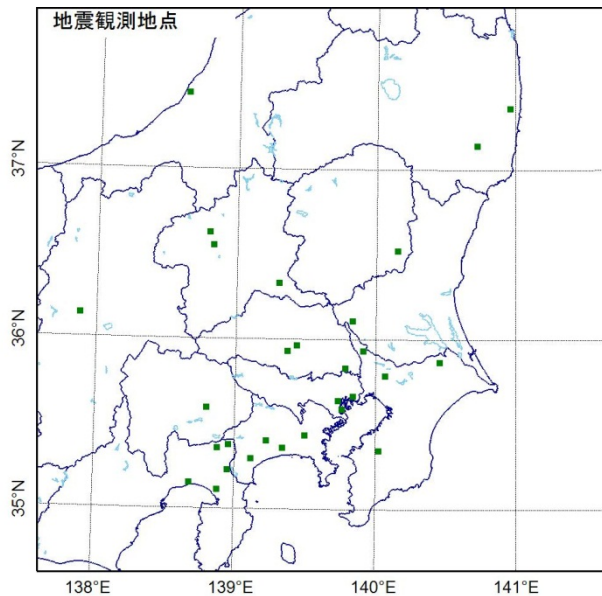


図-1 地震観測地点分布図

次に、関東甲信越地方を中心とした29地点で得られた観測データから表層地盤の周波数依存型減衰モデルを同定した。減衰モデルは観測地点ごとに大きく異なり、その特徴を掴むことは容易でない。そこで、地形情報やVs情報などで分類して、平均化処理を施すことによって見えてくる特徴について検討した。

2. 検討方法

(1) 減衰モデル

本研究では地盤の減衰が次式のようにひずみ依存の項と周波数依存の項との足し合わせで表現できるものとする。

$$h = h_0(\gamma) + h_1(f) \quad (1a)$$

$$h_1(f) = \alpha \cdot f^\beta \quad (1b)$$

ここで、 h : 解析用減衰定数、 $h_0(\gamma)$: ひずみ依存減衰、 $h_1(f)$: 周波数依存減衰、 γ : せん断ひずみ、 f : 周

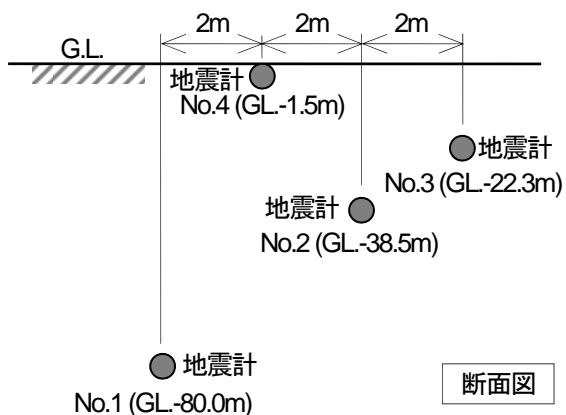


図-2 鉛直アレイ観測システムの概要

波数、 α : 周波数依存減衰の係数、 β : 周波数依存減衰のべき乗項、である。

(2) 検討の流れ

検討の流れは以下の通りである。①鉛直アレイ観測システムの水平2成分の弱震動記録を収集・整理。②地中地震計と地表地震計でそれぞれ計測されたS波主要動のフーリエスペクトル比から表層地盤のS波速度と減衰定数を同定（最適地盤モデルの同定）。ここで、減衰定数は全層一様で式(1b)の周波数依存型のモデルのみを使用。③得られた減衰モデルと各観測地点の微地形分類および表層地盤のS波速度との関係を統計的に整理。

(3) 対象地震観測地点

本研究で対象とした地震観測地点は、図-1に示す関東甲信越地方を中心とした29地点である。全地点で鉛直アレイ観測システムが設置されている。

3. 周波数依存減衰の同定

(1) 同定手法

最適地盤モデルの同定には、Heuristicsな最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) を用いた⁷⁾。GAに使用する適応度関数は式(2)の通り設定した。

$$J = \frac{1}{\sum_i \sum_{j=1}^{N_f} w_i(\omega_j) \left\{ \ln |R_i(\omega_j)| - \ln |H_i(\omega_j)| \right\}^2}, \quad (i \in A) \quad (2)$$

ここで、 $R_i(\omega_j)$: 観測記録のS波主要動フーリエスペクトル比、 $H_i(\omega_j)$: SH波の理論伝達関数、 $w_i(\omega_j)$: 重み係数、 N_f : 周波数領域における伝達関数のデータ数、 A : スペクトル比および伝達関数の組合せの集合、をそれぞれ表している。今回の検討では、重み係数は全て1.0としている。

表-1 GAの基本解析条件

項目	内容
個体数	500
線列長	12 bit
交叉率	0.5
世代数	50
突然変異率	0.1
淘汰の方法	ルーレット戦略
交叉の方法	一点交叉
突然変異の種類	ビット置換方式

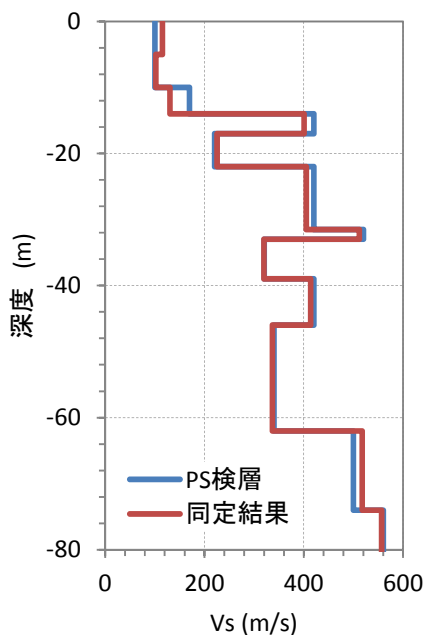


図-3 PS 検層結果と同定結果

基本的な解析の条件は表-1に示す通りである。GAによる解析は乱数の初期値を変えて複数回実施し、その中で最も適応度の高い個体を最適解としている。未知パラメータは表層地盤のS波速度 (Vs) と減衰定数である。また、水平2成分でフーリエスペクトル比の卓越周波数が異なる場合には、成分ごとに異なる最適地盤モデルを構築した。なお、ターゲットとして使用する観測記録のS波主要動フーリエスペクトル比には、0.2HzのParzen windowによって平滑化処理を施している。

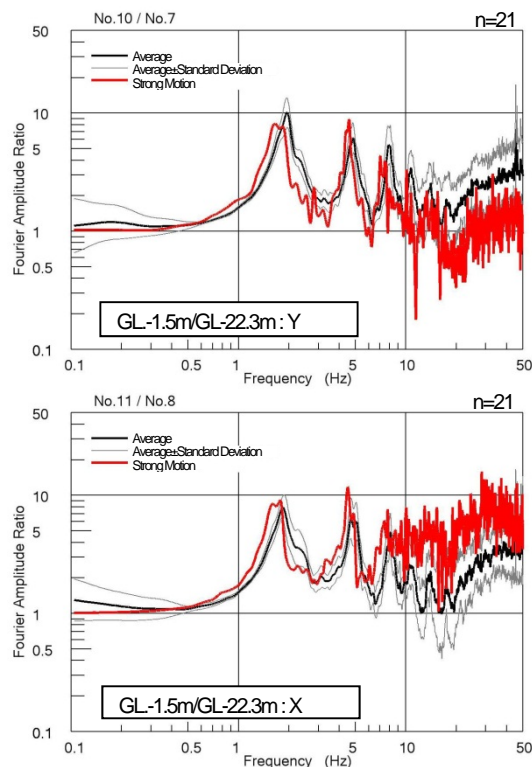


図-4 非線形性の表れているフーリエスペクトル比

(2) 鉛直アレイ観測システムとPS検層結果

ここでは、代表的な観測地点を例としてデータ処理と減衰モデルの同定方法を解説する。都内に位置する高密度な鉛直アレイ観測システムの概要を図-2に示す。同地点では図-3に示す通りPS検層の結果が得られており、この値を最適な地盤モデルを同定する際に使用する解の探索範囲設定の判断材料とした。

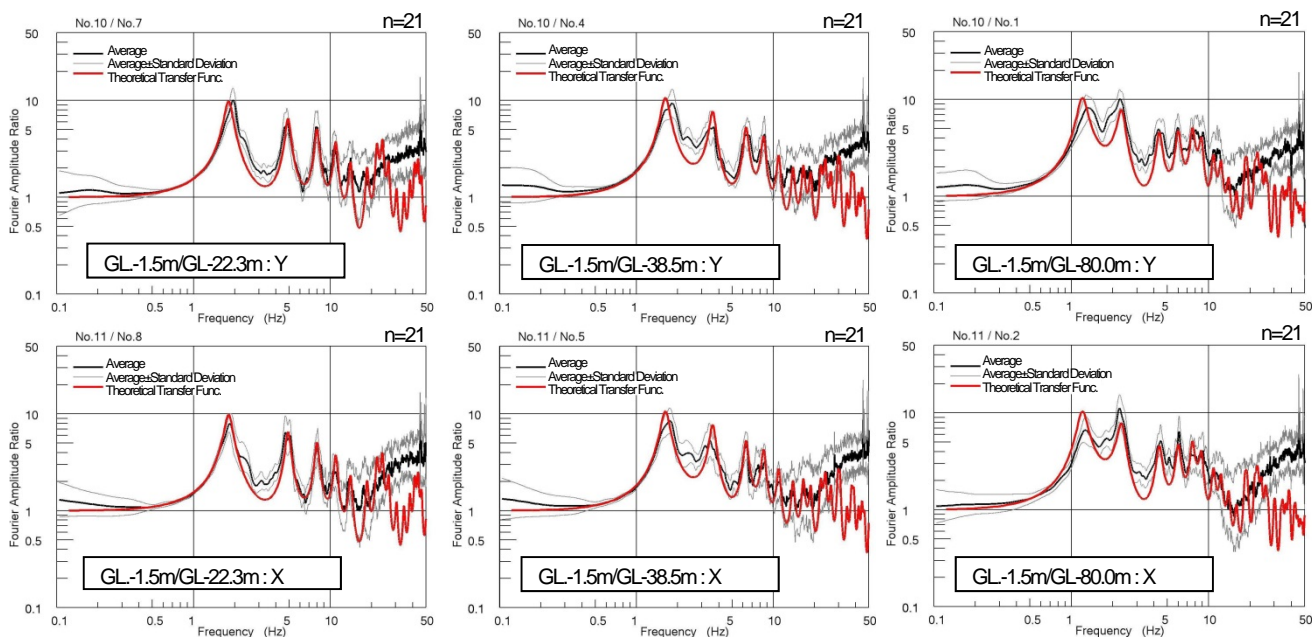


図-5 同定結果 (周波数依存減衰) と弱震動記録の平均フーリエスペクトル比との比較

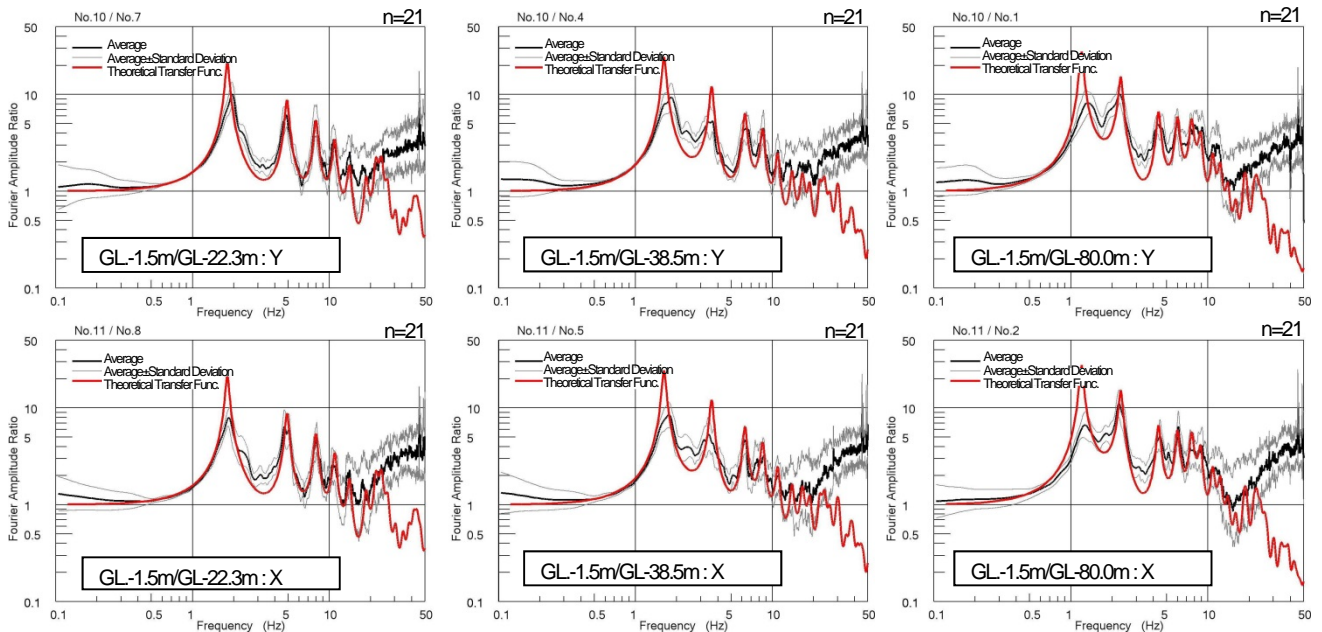


図-6 同定結果（周波数非依存減衰）と弱震動記録の平均フーリエスペクトル比との比較

(3) 弱震動記録の地盤物性値同定

先に示した地点を対象として弱震動用の地盤物性値を同定した結果について述べる。図4には、X方向の地表最大加速度が 112.6m/s^2 の強震動記録のフーリエスペクトル比と弱震動21記録の平均スペクトル比との比較を示す。図から明白な通り、強震記録は両成分共に地盤の非線形性によりピークが低周波数側に移動している。従って以降の検討では、同様の方法で非線形性の有無を確認した上で、地表の最大加速度が 100cm/s^2 未満の弱震動記録のみを取り扱っている。なお、同定の解析周波数帯は $0.5\text{Hz}\sim 15\text{Hz}$ とした。

図3に示す通り同定結果はPS検層結果から大きく変動はしておらず、微調整程度である。また、同定されたXY両成分共通の減衰モデルは

$$h_1 = 0.0908f^{-0.4815} \quad (3)$$

であり、明確な周波数依存性が認められる。

(4) 周波数依存減衰モデルの適切性評価

弱震動記録の同定結果（周波数依存減衰）から算定される理論伝達関数と弱震動記録の平均フーリエスペクトル比との比較を図5に示す。両者は良く一致している。特に、減衰との関係が深いピークの高さについては、低周波数側から高周波数側までほぼ一致している。

次に、周波数非依存減衰モデルを用いて弱震動用の地盤物性値を同定した結果を図6に示す。なお、Vsについては周波数依存型減衰モデルの場合と同値を用いており、減衰定数についてのみ再同定している。高周波数側については、両者は良く対応している。一方、低周波数側に

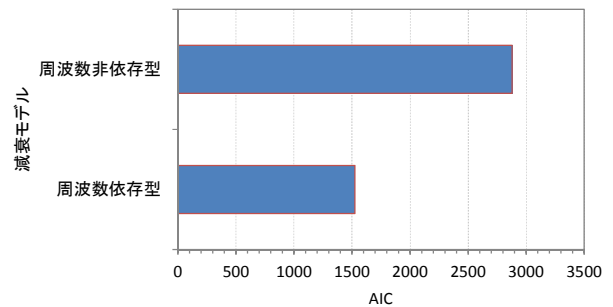


図-7 2種類の減衰モデルのAIC比較

については理論伝達関数が観測記録を上回っており、両者の間に乖離が生じている。

しかし、周波数依存型モデルの方が高い自由度を有するため、観測記録への当てはまりが良くなるのはある意味当然のことである。問題はこの当てはまりの良さが有意なものかどうかであり、ここでは統計的手法による確認を行った。図5および図6の結果より、統計学の情報量基準に基づいて、地盤の減衰モデルとして「周波数依存型」と「周波数非依存型」のどちらが適切であるのかを評価する。

情報量基準としては、一般に使用されることの多いAIC（赤池の情報量基準）⁸⁾を用いた。AICは式(4)で与えられ、モデルの当てはまりの悪さを表す量である。従って、AICが小さいほど、モデルとして適切である。また、AICは絶対評価値でないため値そのものは意味を持たず、比較するモデル間のAICの大小のみで良否が判断される相対評価である。

$$AIC = -2 \cdot MLL + 2 \cdot m \quad (4)$$

ここで、 MLL ：最大対数尤度、 m ：モデル・パラメ

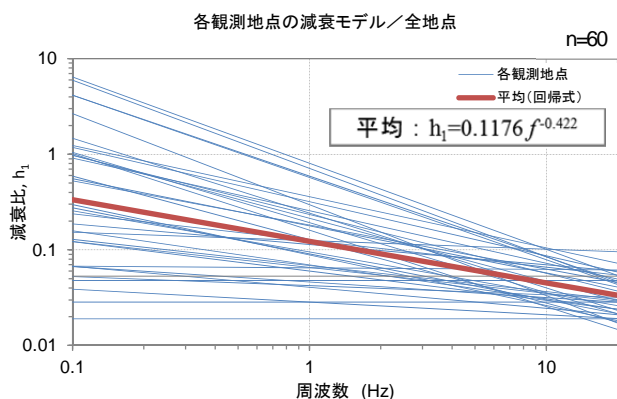
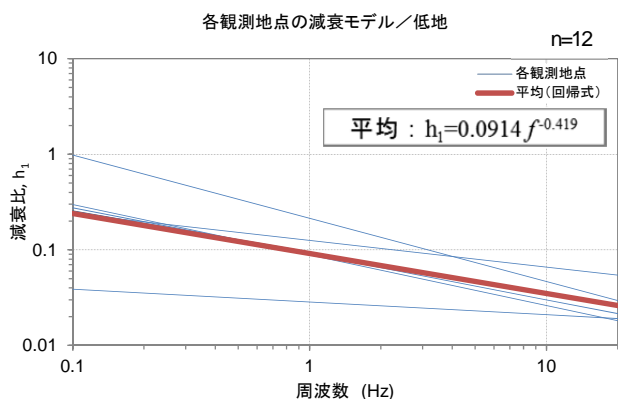
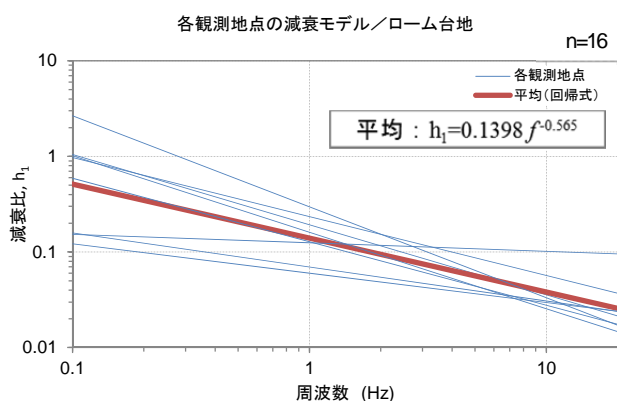


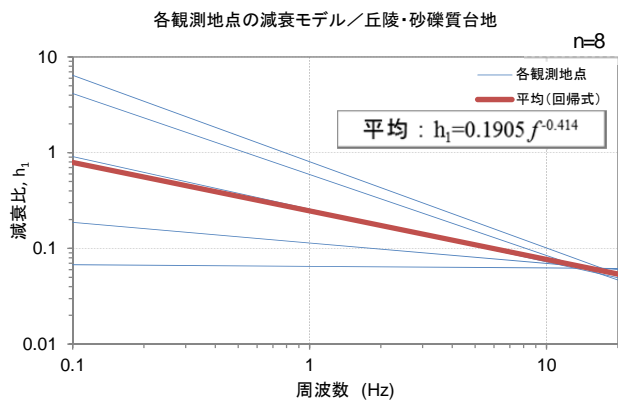
図-8 全地点の減衰モデル及び平均



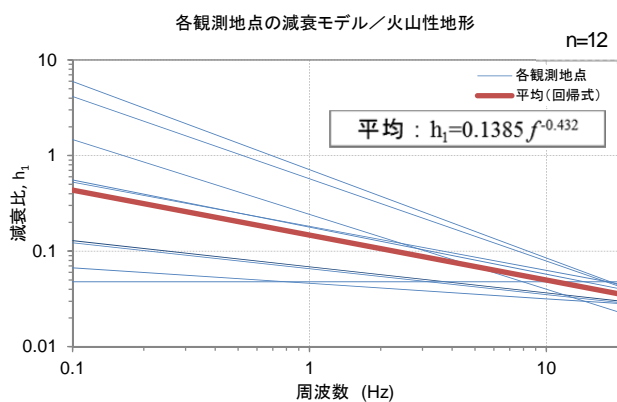
(3) 低地



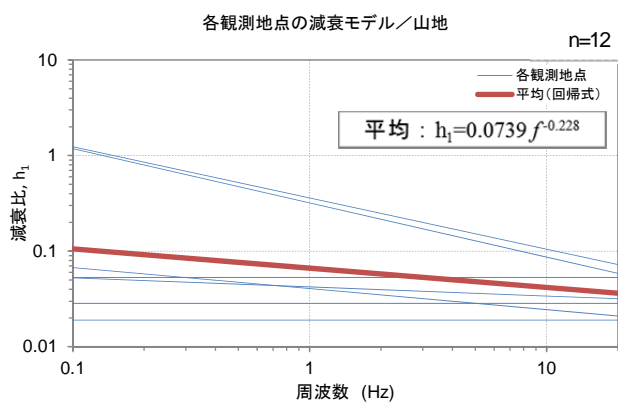
(1) ローム台地



(4) 丘陵・砂礫質台地



(2) 火山性地形



(5) 山地

図-9 微地形分類毎の平均モデル

ータ数，である。2種類の減衰モデルのAIC比較を図-7に示す。明確にAICが小さいことから，周波数依存型減衰の方がモデルとして適切であると言える。

4. 周波数依存減衰の統計的性質

(1) 全体的傾向

図-1に示した全29地点の鉛直アレイ観測システムのデータから同定された表層地盤の減衰モデルの全結果(全

60モデル)を図-8に示す。基本的には1地点につき2成分のモデルが存在するが，地点によっては複数の鉛直アレイ観測システムが組み立てられているなど条件は多少異なっている。図中には，全モデルの平均も示している。この結果から，減衰モデルが観測地点によって大きく異なり，全体的傾向として大きくばらつく傾向が認められる。また，殆どの地点において，表層地盤の減衰に周波数依存性が表れていることがわかる。一方，周波数依存性が認められない地点も少数であるものの存在している。

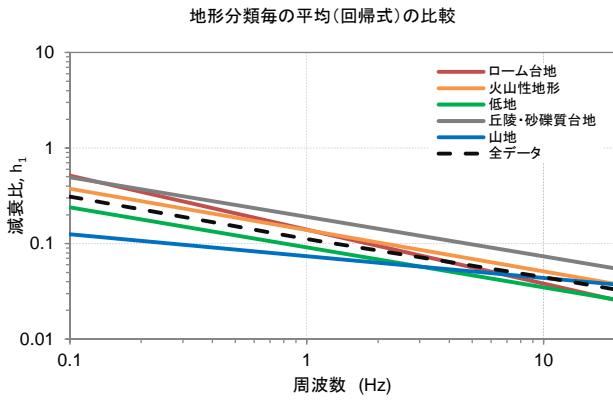


図-10 微地形分類毎の平均モデルの比較

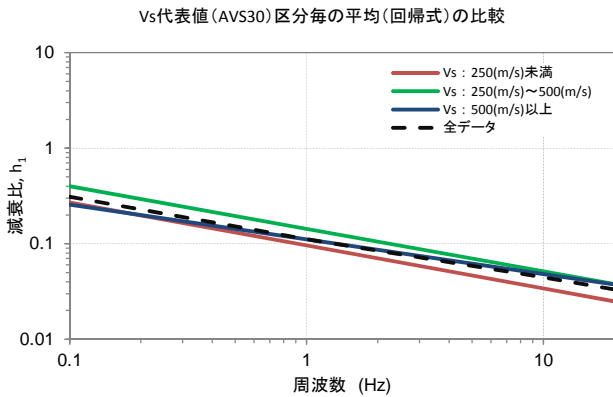


図-12 Vs代表値 (AVS30) 区分毎の平均モデルの比較

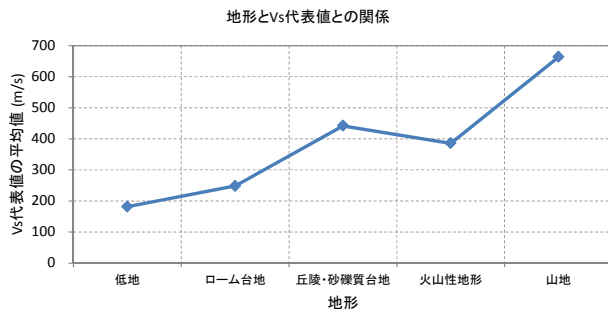
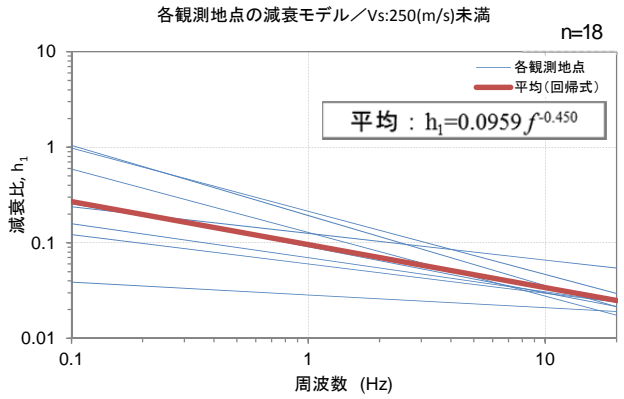


図-13 微地形分類と Vs 代表値との関係

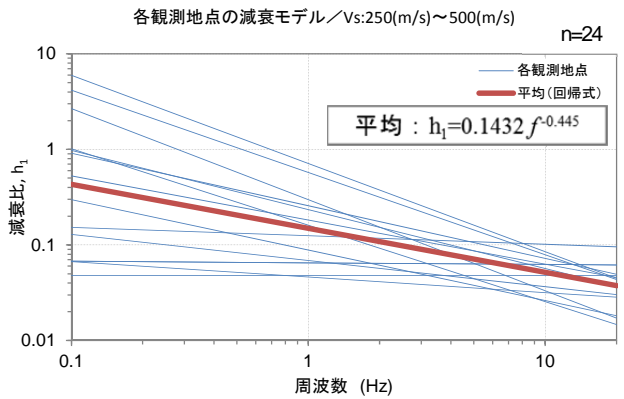
(2) 微地形分類に関する検討

表層地盤の周波数依存減衰のメカニズムについては、これまでに幾つかの研究^{4)~6)}が行われてきているが未だ不明な点が多く、地盤のどのような要因が減衰の周波数依存性と深く関連するのか現段階では解明しきれていない。そこで、ここでは試みとして地形分類との関係性に着目した。

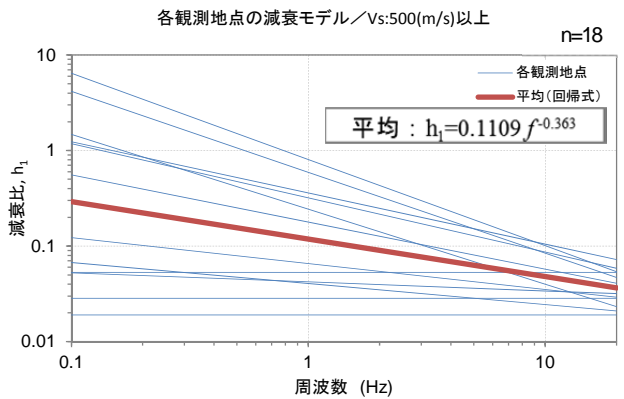
各観測地点の地形分類としては、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS) で使用されている微地形分類のメッシュデータを利用した。各観測地点が属するメッシュの微地形分類を求め、この分類ごとに減衰モデルを集めて平均化して、地形分類毎の傾向を



(1) Vs : 250m/s 未満



(2) Vs : 250m/s~500m/s



(3) Vs : 500m/s 以上

図-11 Vs代表値 (AVS30) 区分毎の平均モデル

調べた。

地形分類がローム台地のグループの減衰モデルを図-9(1)に示す。地形分類が火山性地形のグループの減衰モデルを図-9(2)に示す。ここで、火山性地形とは火山地、火山山麓地、火山性丘陵の総称として使用している。地形分類が低地のグループの減衰モデルを図-9(3)に示す。ここで、低地とは自然堤防、扇状地、埋立地、後背湿地の総称として用いている。地形分類が丘陵・砂礫質台地のグループの減衰モデルを図9(4)に示す。最後に、地形

分類が山地に属するグループの減衰モデルを図-9(5)に示す。各図には、グループ内の減衰モデルを平均した回帰式も併せて示している。

各地形分類の平均減衰モデルを図-10にまとめる。図より、丘陵・砂礫質台地の減衰が全周波数帯で大きく、山地の減衰が小さい傾向が見られる。低地、ローム台地、火山性地形は両者の中間程度である。また、ローム台地の傾きが最も大きく周波数依存性が顕著に表れている。一方、山地の周波数依存性は比較的弱いことが分かる。以上の通り、表層地盤の減衰は、観測地点が属する地形分類によってある程度特徴付けられることが分かった。

(3) Vs代表値に関する検討

ここでは、地震観測地点が属する地域メッシュのVs代表値であるAVS30と周波数依存減衰モデルとの関係を調べた。Vsの代表値は①250m/s未満のグループ、②250m/s～500m/sのグループ、③500m/s以上のグループの3グループに分類した。各Vs代表値グループの結果を図-11に示す。各図には、グループ内の減衰モデルを平均した回帰式も併せて示している。

Vs代表値 (AVS30) 区分毎の平均 (回帰式) の比較を図-12にまとめる。図より、Vs代表値が小さいグループの減衰は小さく、Vs代表値が中間グループの減衰は大きい。Vs代表値が最も大きいグループの減衰は両者の中間にある。地形分類によるグループ化の結果と比較して各グループ間の差異は小さいものの、周波数依存減衰とVs代表値との間には何らかの関係性が有るように見える。しかし、ここで図-13に示すように地形分類とVs代表値 (AVS30) との関係を調べてみた。すると、低地から山地までを平均標高の順に並べることによって、地形分類とVs代表値との間には相関性が有ることがわかる。従って、図-12に見えた周波数依存減衰とVs代表値との関係性は、先に検討した周波数依存減衰と地形分類との関係と同様のものをVs代表値を介して見ているだけということになる。

(4) グループ化の考察

以上の検討結果より、周波数依存減衰と地盤条件との関係性については、地形分類もしくはAVS30で特徴付けられることが分かった。

しかし、図-10と図-12を比較すると、Vs代表値でグループ化した場合の方が微地形分類でグループ化した場合と比べてグループ間の差異が小さい。従って、分類方法としては、微地形分類でグループ化した方が、グループごとの周波数依存減衰の特徴を良く反映しているものと思われる。即ち、微地形分類でグループ化した周波数依存減衰モデルの方が、サイトの特性をより明瞭に表現することができると言い換えることができる。

5. まとめ

立地条件の異なる複数の鉛直アレイ地震観測地点のデータから得られた周波数依存減衰モデルを統計処理して、その特性について検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。

- 水平成層地盤で高密度に地震計が設置されている地点を対象として、鉛直アレイ観測記録を用いて減衰モデルの適切性に関する検討を実施した。周波数依存減衰モデルを用いた場合と、周波数非依存減衰モデルを用いた場合との比較を行い、周波数依存減衰モデルの方が、観測記録との適合性において適切なモデルであることが情報量基準によって定量的に示された。
- 表層地盤の減衰モデルは、地点によって大きく異なることが分かった。全地点の平均は明確に周波数依存性を示しているが、ばらつきが非常に大きい。
- 関東甲信越地方を中心とした29地点の鉛直アレイ観測記録から同定された周波数依存減衰モデルを統計処理した。その結果、J-SHISの微地形分類もしくはAVS30によってグループ化された平均的な周波数依存減衰モデルが得られた。
- 微地形分類でグループ化した方が、周波数依存減衰のサイト特性をより明瞭に表現することができると思われる。

本研究の結果の適用法として、例えば、鉛直アレイ観測記録が行われていない地点に対しても、J-SHISの地形分類もしくはAVS30の値によって、平均的な周波数依存減衰モデルを与えることが可能になるものが考えられる。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS) で公開されている微地形区分データおよび30m平均S波速度データを使用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 野沢是幸, 大木晴雄, 安中正: 減衰の周波数依存性を考慮した1次元波動理論による増幅特性の解析方法, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp.109-112, 1987年.
- 2) 安中正, 都築富雄, 増田民夫, 嶋田昌義, 岡留孝一: 鉛直アレイ記録から推定した表層地盤の剛性率及び減衰定数のひずみ依存性, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.493-498, 1994年.
- 3) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明: 鉛直アレイ観測記録より得られるS波の減衰定数の周波数依存性に関する考察, 日本

地震工学論文集, 第 11 卷, 第 3 号, pp. 1-20, 2011.

- 4) 藤谷昌弘, 嶋田昌義, 望月直也, 栗田哲史, 都築富雄, 安中正: 速度構造に異方性揺らぎを有する地盤中の地震波の散乱減衰, 土木学会 49 回年次学術講演会 講演概要集, 第 I 部門, pp.1398-1399, 1994 年.
- 5) 栗田哲史, 都築富雄, 安中正, 嶋田昌義, 藤谷昌弘: 不均質地盤の相関特性と散乱減衰の周波数依存性との関係について, 第 23 回 地震工学研究発表会 講演概要, 土木学会, pp.45-48, 1995 年.
- 6) Kurita, T., Tsuzuki, T., Annaka, T., Shimada, M. and Fujitani M.: Scattering attenuation of seismic waves in inhomogeneous media, Paper No.720, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.*, 1996.
- 7) 栗田哲史: 遺伝的アルゴリズムの構造パラメータ同定問題への適用性に関する検討, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, Vol.54, No.7, pp.160-161, 1999 年.
- 8) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, pp.150-156, 1993 年.

STATISTICAL FEATURES ON THE FREQUENCY DEPENDENT DAMPING OF SUBSURFACE GROUND

Tetsushi KURITA, Hiroshi SATO and Tomomi ADACHI

In this study, statistical features of frequency dependent damping models of SH wave in the subsurface ground are investigated. The damping models are identified from the vertical array observation records installed in the various locational conditions sites.

We discussed the appropriateness of damping models estimated from the seismic ground motion data recorded from the dense vertical array observation system located in the typical horizontally-layered ground. The frequency dependent model and the frequency independent model are compared with reference to information criterion. Akaike's information criteria show that the frequency dependent damping model is adequate to explain the observation records.

Then, frequency dependent damping models of 29 sites identified from seismic observation data recorded by the vertical array observation system are analyzed statistically. It followed that average damping models grouped by the topographic classifications or the representative S wave velocities are obtained.