表層地盤の周波数依存型減衰の上限値に関する分析

東京電力パワーグリッド(株)　正会員　○杉本　剛康　　正会員　中村　直樹
東京電力ホールディングス(株)　正会員　田邉　成
東電設計(株)　正会員　栗田　哲史

１．はじめに

地盤の減衰定数は地震動の応答値に直接的に影響を与えるため，地震応答解析においてその評価は重要である．減衰定数の設定方法は，土質試料を用いた動的変形特性試験等の室内試験による方法や，鉛直アレー観測記録に基づくスペクトル比の逆解析（以下，同定とする）による方法などがある．観測記録の再現性の観点から周波数依存型減衰モデルが複数の文献で提案されている．例えば，野沢ら [1]は鉛直アレー観測記録の分析から，周波数依存型減衰モデルの導入を提案し，栗田ら [2]は関東甲信越地方を中心とした 29 地点で得られた観測記録から表層地盤の周波数依存型減衰モデルを同定している．しかし，これらの研究で提案されている周波数依存型減衰モデルは外挿領域となる一次固有周波数より低周波数側で減衰値は非常に大きくなることがあり，上限値を慎重に考えるべきである．そこで本研究では，周波数依存型減衰モデルに上限値を設定することで，現実的な減衰モデルの設定を行った．設定にあたっては,前述の 29 地点の鉛直アレー観測記録とそれに基づく同定結果 [2]を用いた．

２．分析データの概要

本研究では，**図-1** に示した関東甲信越地方を中心に当社が所有する 29 地点の鉛直アレーによる地震観測記録を対象とした．各観測地点の工学的基盤レベルに設置した地中地震計深度と，表層部の平均 Vs および地中部（基盤）の Vs を**表-1** に示した．この全 29 地点の鉛直アレー観測記録から同定された表層地盤の減衰モデルの全結果（60 モデル）を**図-2** に示した．基本的には，1 地点につき 2 成分の減衰モデルが存在するが，複数の鉛直アレー観測システムが組まれている地点があるなど，地点毎に条件の違いがある．また，全地点の減衰モデルは(1)式で表されるものとした．

$$h_1(f)=\alpha\cdot f^{\beta} \qquad (1)$$

ここで，$h_1(f)$：周波数依存型減衰，f：周波数，α,β：周波数依存型減衰の係数とべき乗項である．

３．周波数依存型減衰の上限値

図-2 に示した減衰モデルでは，ほとんどの地点で周波数依存性が確認できた．しかし，減衰定数は地点間のバラツキが大きく，さらに低周波数側では減衰定数が 1.0 を超え，現実的ではないものもある．そこで，低周波数側の減衰定数が妥当な値となるよう考察を行う．

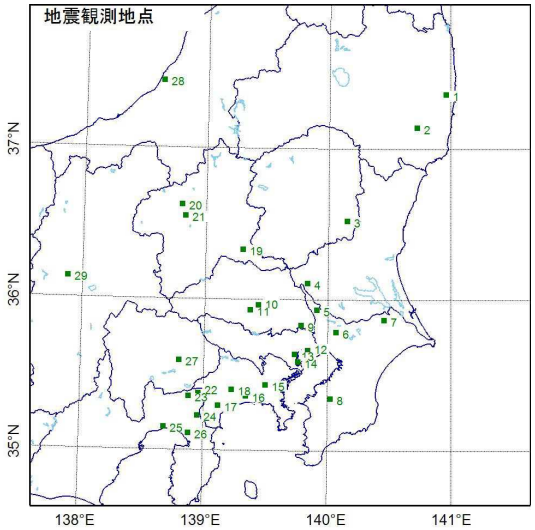

図-1　地震観測地点分布図

表-1　各観測地点の地中地震観測計深度と Vs

番号	地中地震計深度(m)	Vs(m/s) 表層	Vs(m/s) 基盤	番号	地中地震計深度(m)	Vs(m/s) 表層	Vs(m/s) 基盤
1	-15.0 / -15.0※	238/294※	600/500※	16	-44.0	219	400
2	-40.0	299	1430	17	-30.0	262	510
3	-20.4	203	730	18	-45.85	271	570
4	-46.5	249	470	19	-17.24	136	470
5	-54.5	250	380	20	-148.0	247	680
6	-42.15	250	400	21	-21.0	229	380
7	-18.0	222	500	22	-28.0	229	685
8	-30.0	393	650	23	-22.0	247	430
9	-40.0	201	315	24	-39.0	214	960
10	-70.0	167	340	25	-70.5	257	1130
11	-50.0	279	540	26	-30.0	135	620
12	-70.0	158	310	27	-42.0	423	1200
13	-17.1, -35.5, -40.0	203	295	28	-14.0, -28.0, -34.0, -50.0	120	960
14	-22.3, -38.5, -80.0	236	500				
15	-50.0	212	600	29	-20.0	134	520

※同一敷地内に 2 箇所の鉛直アレー観測システムが存在

キーワード　周波数依存型減衰，地盤の一次固有周波数，地震観測記録，等価線形化法
連　絡　先　〒108-0023　東京都港区芝浦 4-19-1　東京電力パワーグリッド株式会社工務部送変電建設センター
TEL：03-6374-1256

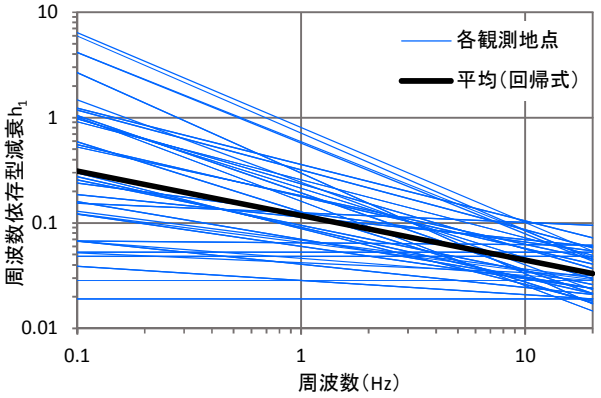

図-2 全地点の減衰モデルおよび平均

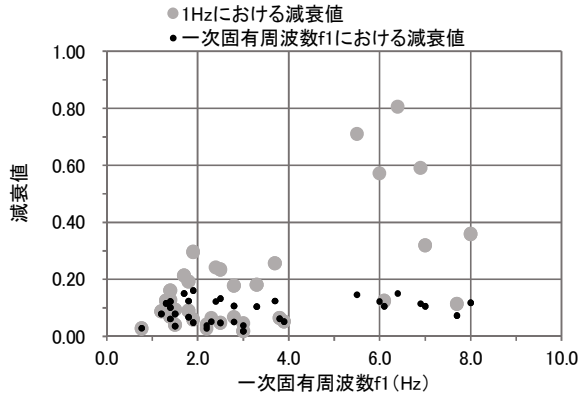

図-3 一次固有周波数と周波数依存型減衰の上限値

(1) 1Hz での設定

まず, 佐藤ら [3]を参考にして, 1Hz における減衰値を確認したところ, (1)式より各地点の 1Hz における減衰値は係数 α となる. 鉛直アレー観測記録から得られるフーリエスペクトル比(地表/地中)の一次固有周波数 f_1 を横軸に, グラフ化したものを**図-3** に示す. 全体的に地点によるバラツキが大きく, 0.2 以上の減衰値を示すモデルが 17 あり, 最大は 0.807 となった. これは地盤の減衰値としてはかなり大きく, 等価線形化法による地震応答値を過小に評価する可能性がある.

(2) フーリエスペクトル比の一次固有周波数での設定

佐藤ら [4] は一次固有周波数よりも低周波数側では信頼性の観点から周波数依存型減衰を取り扱っていない. ここで, 一次固有周波数 f_1 は, 地中地震計深度 H および表層の平均 Vs と概ね(2)式の関係があり, 走時が小さいほど一次固有周波数は高周波数となることが知られている.

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{Vs}{4H} \qquad (2)$$

図-4 には, 横軸に各地点の H と Vs から(2)式により計算した f_1, 縦軸に同定で得られた f_1 をプロットした. **図-4** より(2)式による関係があることが確認でき, 鉛直アレー観測装置の設置状況に依存していると考えられる.

f_1 よりも低周波数側では, 同定において外挿領域となるため, 周波数依存型減衰モデルの信頼性も低いと考えられる. **図-3** には, 各地点の f_1 における減衰値を示す. まず, f_1 に着目すると, 地点によって大きなバラツキがある. これは地点によって地中地震計深度 H や表層部の平均 Vs が異なるためである. 次に, 各地点の(1)式に f_1 を代入した一次固有周波数における減衰値を見ると, 最大値は 0.161 で, 1Hz における減衰値と比べて現実的な値になっている. これより, 鉛直アレー観測記録

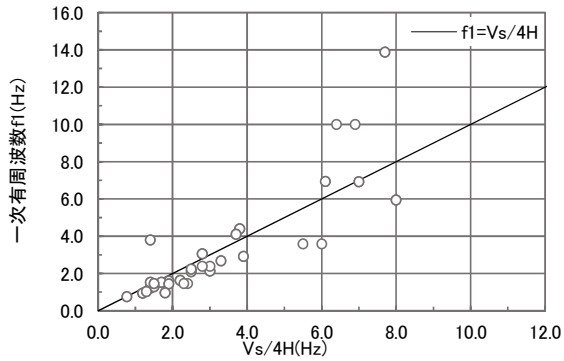

図-4 Vs/4H で計算した f_1 と同定で得られた f_1

から求められた表層地盤の減衰値は 0.2 以下に収まることが分かる. また, 1地点を除き, 一次固有周波数は 1Hz を上回っていることから, 前述の1Hzにおける減衰値は外挿領域の減衰値を設定しており, 過大に評価する傾向にあったと考えられる.

鉛直アレー観測記録の同定で得られる周波数依存型減衰は, 低周波数側での減衰値の扱いに課題があった. 今回提案したように, フーリエスペクトル比の一次固有周波数における減衰値を上限値にすることで, 過大な減衰を回避することができる. 今後は表層地盤の応答解析に適用するなどして, その妥当性を検証する必要がある.

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地震の増幅特性の解析方法, 第 19 回地震工学研究発表会講演梗概, pp.109-112, 1987

2)栗田哲史, 佐藤博, 足立倫海:表層地盤減衰の周波数依存性に関する統計的性質, 土木学会論文集, A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻),I_13-I_20,2015

3) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明:表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集第 462 号, pp.79-89, 1994

4) 佐藤浩章, 金谷守, 大鳥靖樹:減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案-岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価-, 日本建築学会構造系論文集第 604 号, pp.55-62, 2006