論文　粘性ダンパーによる地震応答の減衰効果に及ぼす構造物と地盤の相互作用の影響

本村　一成[*1]・鎌田　光昭[*2]・塩原　等[*3]

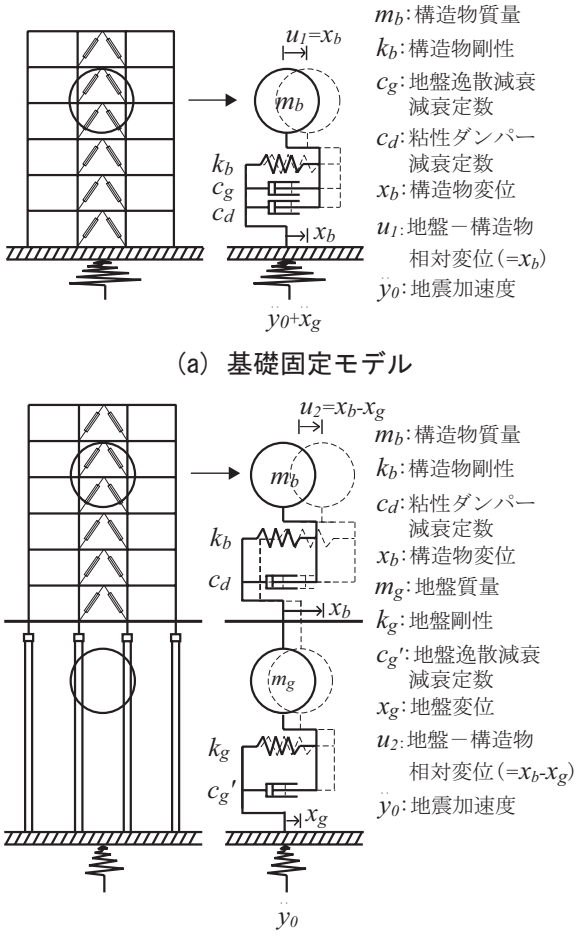
要旨：構造物と地盤の相互作用が，粘性減衰装置を有する制震(振)構造物において，地震応答の低減性能に及ぼす影響を調べるために，地盤と構造物を簡単な 2 質点系モデルとして理想化し，自由振動解析と地震応答解析を行った。鉄筋コンクリート造構造物など短周期の構造物では，地盤と構造物の相互作用により，粘性ダンパーを増やしたことによる応答低減が見られない場合があることがわかった。今後，より詳細な現象のモデル化を検討する必要がある。

キーワード：粘性ダンパー，地盤と構造物の相互作用，模擬地震波，地震応答解析

1.　はじめに

近年，超高層建物や耐震補強を中心として制震(振)構造が広く普及しつつある [1)]。また，剛性の高いコンクリート構造物にもエネルギー吸収機構として制震(振)装置を採用する例が増えてきている。これらの制震(振)構造に利用されている減衰機構の中で粘性ダンパーに関する研究も数多く行われ [2) など]，実構造物の設計に応用されてきている。しかし，ダンパー量の設計の際，一般に地盤と構造物の相互作用は考慮されず，基礎固定で解析が行われ，減衰効果を推定している。

本研究では，粘性ダンパーを有する構造物において，構造物と地盤の相互作用が粘性ダンパーの地震応答の減衰効果に及ぼす影響を調べるために，基礎固定の 1 質点系モデルと地盤と構造物をモデル化した簡単な 2 質点系モデルの自由振動解析と地震応答解析を行い，減衰効果を比較検討し，基礎固定による地震応答解析の問題点を検討する。



(a) 基礎固定モデル

(b) 地盤−構造物モデル

図－1　解析モデル

2.　解析モデル

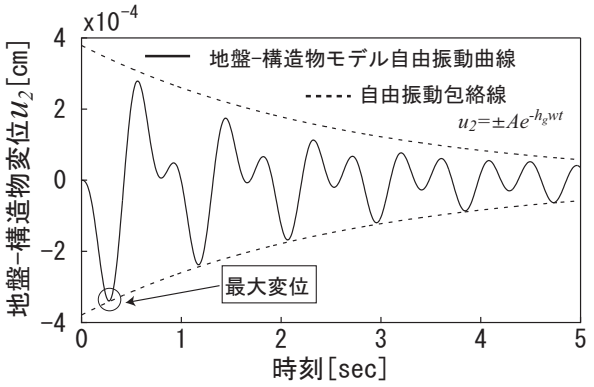
解析対象は，**図－1(a)**に示す基礎固定の 1 質点系モデル(以下，基礎固定モデル)と，**図－1(b)**に示す地盤と構造物の相互作用を考慮した簡単

*1 東京大学大学院　工学系研究科修士課程　(正会員)
*2 宗教法人創価学会　本部職員
*3 東京大学大学院助教授　工博　(正会員)

な 2 質点系モデル(以下，地盤－構造物モデル)である。

基礎固定モデルでは，構造物の減衰は地盤の逸散減衰を想定した減衰定数 h_g を 0.03 と設定した。

地盤－構造物モデルでは，すべて地盤固有周期を 0.8 秒とし，構造物と地盤の質量比 m_b：m_g に関しては、地盤質量について検討した研究や資料がないため、1：5，1：10 と大胆な仮定をした。減衰に関しては，上部構造物の減衰は，地盤の逸散減衰によって生ずるものと仮定して，上部構造物内部の減衰はゼロとし，自由振動解析により見かけ上，上部構造に h_g=0.03 の減衰が生じるよう，地盤の減衰定数 h_g'を定めた。減衰定数 h_g'は，上部構造物質点の固有周期を 0.5 秒として 2 質点の両方に 1[cm/sec^2]の加速度を 0.01 秒間加えた際の，地盤と構造物の相対変位 u_2 の自由振動の包絡線が h_g=0.03 の 1 質点のものと同等になるように求めた。この包絡線は，地盤－構造物モデルの減衰自由振動の変位曲線の最大値と半周期ごとのピーク値の 1 点を通り，5 秒間のすべてのピーク値を超えない関数として求めた（**図－2**）。以上の方法により，質量比 m_b：m_g が 1：5，1：10 の地盤質点減衰定数 h_g'は，それぞれ 0.129，0.498 と算定された。検討するパラメータを減らすため、地盤の減衰定数 h_g'は上部構造特性が変化しても、上記の値を固定して用いた。**図－2** は，構造物と地盤の質量比 1：5，構造物固有周期 0.5[sec]とした場合の地盤－構造物モデル自由振動曲線と自由振動包絡線の例を示したものである。



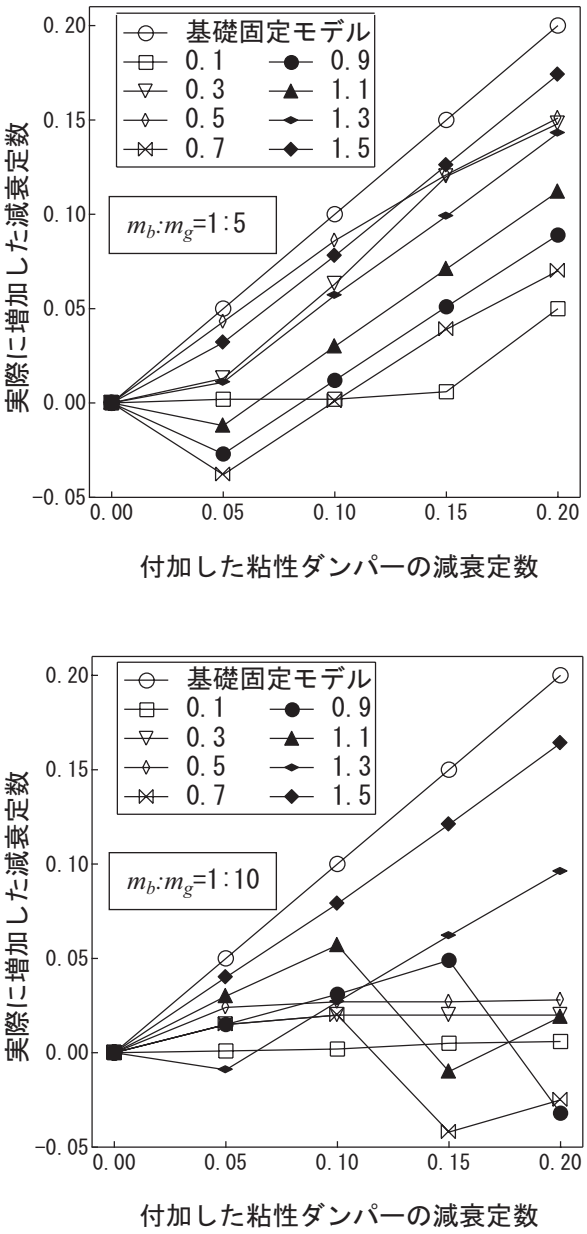
図－2　地盤質点の減衰定数 h_g'の決定方法

粘性減衰ダンパーを設置する場合は，構造物質点に粘性ダンパーの減衰定数 h_d として, 0.05, 0.10，0.15，0.20 を付加していくものとした。

3．自由振動解析

自由振動時の上部構造物の変位応答の時刻歴のピークの減衰により(a)基礎固定モデルと(b)地盤－構造物モデルの減衰効果を比較する。

自由振動解析では，基礎固定モデルと地盤－構造物モデルの基盤下に 1[cm/s^2]の加速度を 0.02 秒間与え自由振動させた。構造物の固有周期は 0.1 秒から 0.2 秒刻みで 1.5 秒まで変化させ



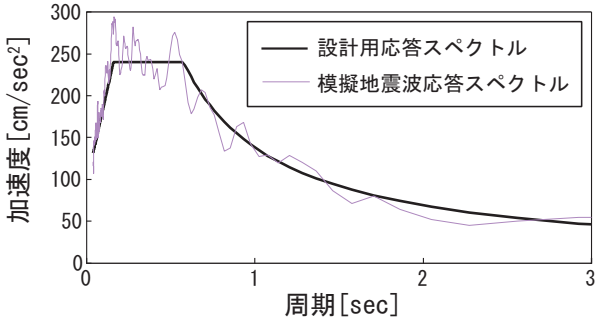
図－3　自由振動解析結果

た。粘性減衰ダンパーの減衰定数と**図－2** に示す減衰自由振動の包絡線の減衰定数で評価した地盤－構造物モデルの減衰の関係を**図－3** に示す。

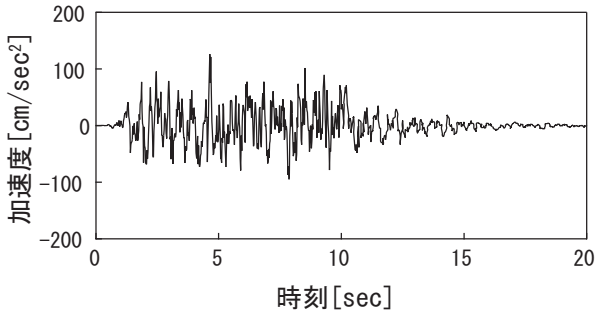
質量比 m_b：m_g が 1：5，1：10 のどちらの場合も，上部構造物の固有周期が地盤の固有周期 1.0 秒を越える長周期になるほど，基礎固定モデルの減衰効果に近づく。しかし，0.3 秒程度の短周期になると粘性ダンパーの減衰効果が基礎固定モデルで得られるほど大きくない。なお，0.8 秒付近の周期では減衰定数が小さいが，これは，地盤と構造物の固有周期が近いため変位が突然小さくなる振動性状が現れ，**図－2** に示す包絡線ではうまく評価できなかったものと考えられる。また，5 秒間の振動曲線を減衰定数で評価する方法では，長周期の振動曲線の場合，精度よく振動曲線を包絡することができるが，短周期になると精度が悪くなり，減衰効果を過小評価している可能性がある。

4． 地震応答解析

入力する地震波は，**図－4** の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波[4),5)]である。位相特性は一様乱数とし，時刻歴包絡関数は Jennings 型とした。模擬地震波の加速度応答スペクトルを**図－4** に，加速度時刻歴を**図－5** に示す。

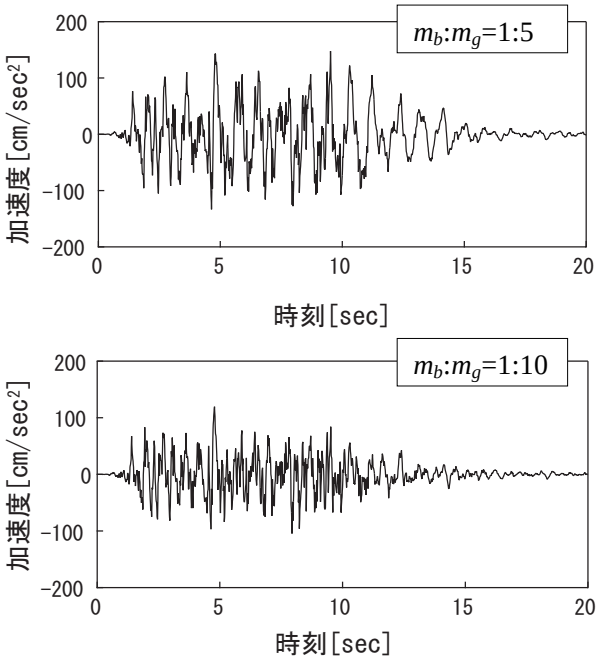


図－4　加速度応答スペクトル



図－5　模擬地震動時刻歴加速度

作成した模擬地震波の入力方法は，基礎固定モデルでは，構造物質点の固有周期を 0.5 秒とした粘性減衰ダンパーを付加しない地盤－構造物モデルの地盤質点下から模擬地震波を入力した際の地盤質点の応答加速度に模擬地震波の加速度を加えて入力加速度とした。一方，地盤－構造物モデルでは，地盤質点下から模擬地震動をそのまま入力するものとした。基礎固定モデルに入力した加速度を**図－6** に示す。



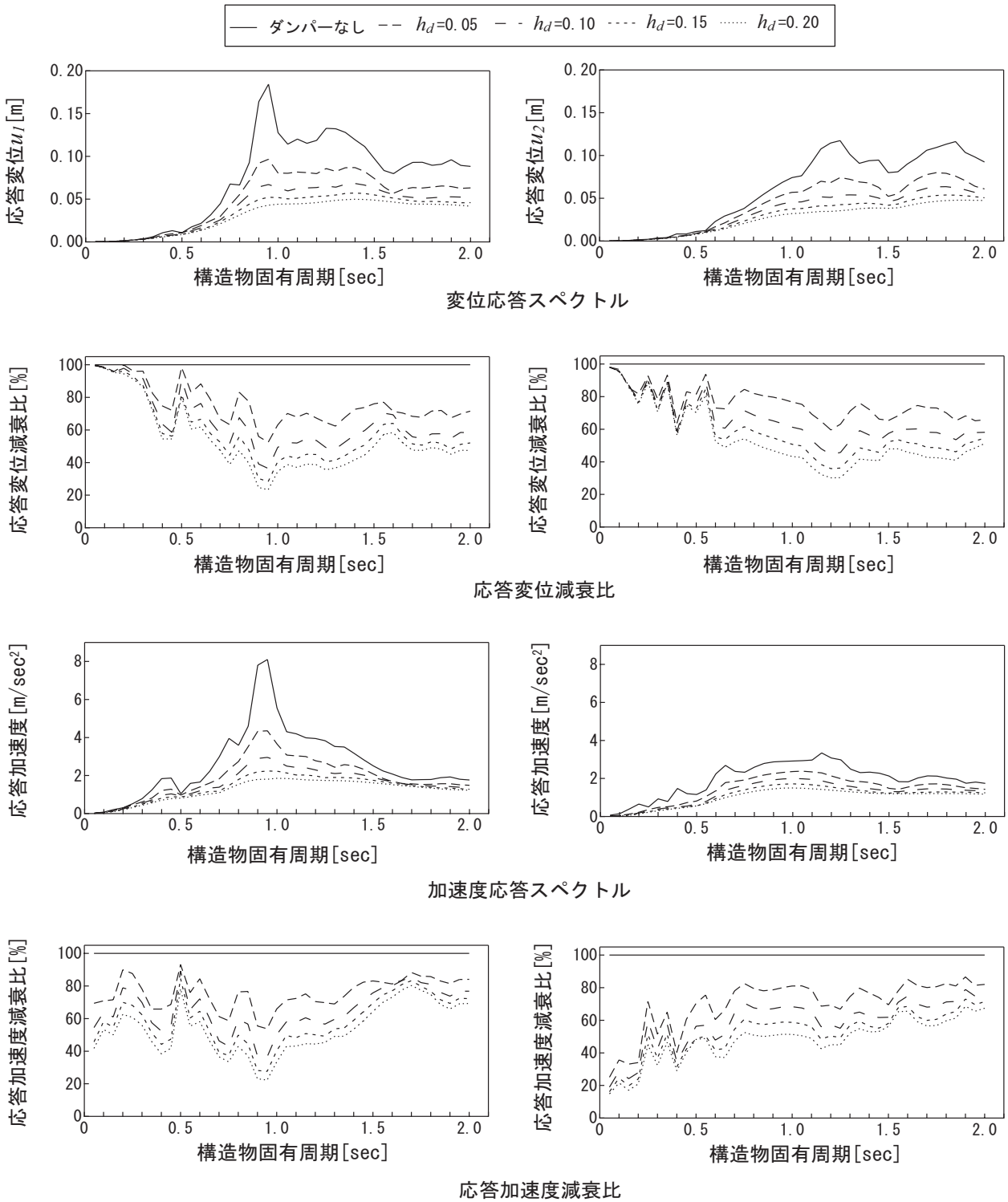
図－6　基礎固定モデル入力加速度

4.1　変位・加速度応答スペクトル

地盤と構造物の固有周期が近い場合，及び，構造物の固有周期が短周期の場合，自由振動では減衰効果の比較が難しいため，地震波入力による最大応答評価により(a)基礎固定モデルと(b)地盤－構造物モデルの比較をする。

応答減衰比は，粘性減衰ダンパーなしの場合の最大応答値に対する粘性減衰ダンパーを付加した場合の最大応答値の比と定義する。

構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：5 の各モデルの変位・加速度応答スペクトルと減衰比を



(a) 基礎固定モデル　　(b) 地盤-構造物モデル

図－7　変位・加速度応答スペクトル，応答減衰比

図－7 に示す。各スペクトルの構造物周期は，0.05 秒刻みで 0.05 秒から 2.0 秒の範囲を対象とした。

構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：5 の場合の地盤－構造物モデルの応答変位は，構造物の固有周期が 0.7 秒以下の短周期では基礎固定モデルの応答変位とあまり変化がなく，0.8 秒から 1.2 秒の範囲では小さく，長周期ではあまり変化が見られなかった。応答変位減衰比においては，付加した粘性ダンパーの減衰定数 h_d が

0.05 の場合，基礎固定モデルと地盤－構造物モデルの応答変位減衰比はほぼ同様の傾向が見られたが，粘性ダンパーの減衰定数 h_d を 0.10, 0.15, 0.20 と増やすにつれて，構造物の固有周期が 0.6 秒以下の短周期では，地盤－構造物モデルの応答変位減衰比は，基礎固定モデルに比べて変化がなく，応答低減効果が小さかった。これは、地盤に比べ、構造物の周期が短く、構造物の振動周期が伸びたためと考えられる。構造物のそのほかの固有周期では，どちらのモデルにおいてもほぼ同様の傾向が見られた。

構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：5 の場合の地盤－構造物モデルの応答加速度では，応答変位と同様に，短周期では基礎固定モデルの応答加速度とあまり変化がなく，0.8 秒から 1.2 秒の固有周期では，小さくなる傾向が見られた。応答加速度減衰比では，応答変位減衰比ほどではないが，地盤－構造物モデルにおいて粘性ダンパーの粘性ダンパーの減衰定数 h_d を増やしても，基礎固定モデルと比べて変化が見られず，応答低減効果が小さかった。

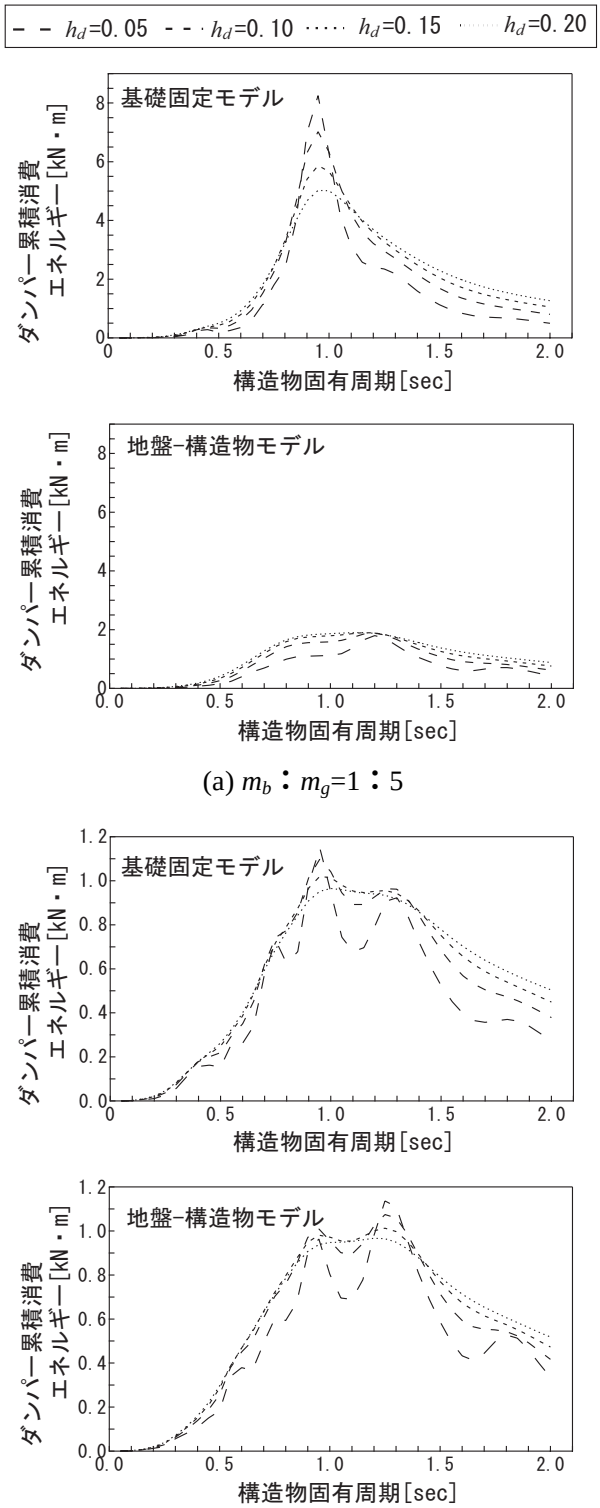
構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：10 の場合では，地盤－構造物モデルの応答変位・応答加速度と応答減衰比の傾向は，基礎固定モデルの応答変位・応答加速度と応答減衰比の傾向に近づき、応答減衰比においては短周期での違いが見られなかった。

4.2　累積消費エネルギー

同じ入力地震動に対して構造物へのエネルギー入力は一定と考える説[6]もあるので，ここでは，累積消費エネルギーについて，(a)基礎固定モデルと(b)地盤－構造物モデルの比較・検討を行う。

両モデルの振動方程式にそれぞれの質点の応答速度を乗じ，時間積分し，20 秒間の粘性ダンパーの累積消費エネルギーを算出した。構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：5，1：10 の各モデルの粘性ダンパーの累積消費エネルギーを**図－8** に示す。累積消費エネルギーは応答スペクトルと同様に構造物固有周期は，0.05 秒刻みで 0.05 秒から 2.0 秒の範囲を対象とした。

構造物と地盤の質量比 m_b:m_g が 1:5 の場合，地盤－構造物モデルの粘性ダンパーの累積エネルギーは，構造物の固有周期 0.7 秒以下の周期



(a) m_b：m_g=1：5

(b) m_b：m_g=1：10

図－8　粘性ダンパーの累積消費エネルギー

では基礎固定モデルと同様ダンパー量を増やすと累積消費エネルギーの増加する傾向が見られたが, 0.8 秒から 1.2 秒の周期ではダンパー量を増やすと累積消費エネルギーが減少するという現象が見られた。一方，構造物と地盤の質量比 m_b：m_g が 1：10 の場合，1：5 の場合よりも，地盤－構造物モデルの粘性ダンパーの累積消費エネルギーの傾向が，基礎固定モデルの傾向に近づき，粘性ダンパーの量を増やすと累積消費エネルギーが減少するという現象が両モデルにおいて見られた。

5. 結論

本研究では，構造物と地盤の相互作用が，粘性ダンパーの地震応答の減衰効果に及ぼす影響を調べるために，基礎固定とした 1 質点系モデルと地盤－構造物の相互作用を考慮した簡単な 2 質点系モデルを対象に，自由振動解析と模擬地震波を用いた地震応答解析を行い，以下の知見を得た。

(1) 自由振動解析において，地盤と構造物の相互作用を考慮した場合，構造物固有周期が長周期になるほど，基礎固定とした場合の粘性ダンパーによる減衰効果に近づいたが，構造物固有周期が短周期と地盤の固有周期 0.8 秒付近では，基礎固定モデルに比べて粘性ダンパーによる減衰効果が小さくなる傾向が見られた。

(2) 地震動に対する変位・加速度応答解析において，構造物の固有周期が短周期では，構造物と地盤の質量比によって，基礎固定とするものより地盤と構造物の相互作用を考慮したほうが粘性ダンパーによる応答低減効果が小さい場合があることがわかった。

(3) 粘性ダンパーの累積消費エネルギーにおいて，基礎固定では，ダンパー量を増加させても累積消費エネルギーが増加しない現象が起きたが，地盤と構造物の相互作用を考慮した場合においても，構造物と地盤の質量比によっては，その傾向が見られた。

今後の課題として，構造物と地盤の質量比のより実現象に近い仮定や上部構造物の違いによる地盤特性の変化を検討するとともに，構造物のモデル化については，弾塑性モデル・多質点系モデルへ拡張し, 地盤のモデル化については, 地盤の非線形性を表せるよう地盤履歴特性に適切なモデルを用い, また, 相互作用については, S-R モデルを用いるなど，より詳細な現象のモデル化を検討する必要がある。

[謝辞]本論文を作成するにあたり，東京大学大学院工学系研究科博士課程　高橋典之氏に研究全般にわたり助言を戴きました。また，同修士課程　辛勇雨氏には，模擬地震波作成にあたり御協力戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1）勘坂幸弘，橋本康則，秋山猛，山中昌之，佐野剛志，八木貞樹：並列型粘性・履歴ダンパーを有する超高層ビルの設計事例，パッシブ制振構造シンポジウム 2002, pp89-96, 2002,12

2）和泉信之，竹中啓之，千葉脩，阿世賀宏：制振デバイス付き RC 造骨組の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集, vol.24，No 2，pp1057-1062，2002,6

3）鎌田光昭：ダンパーによる減衰と地盤の逸散減衰の関係についての研究，東京大学卒業論文，2001.12,

4）大崎順彦著：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994

5）理論地震動研究会編著：地震動　その合成と波形処理，鹿島出版会，1994

6）秋山宏著：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999