

杭基礎の載荷実験による 地盤の非線形を考慮した逸散減衰評価

日野 篤志* 本山 紘希* 室野 剛隆**

Estimation of Radiation Damping Considering Nonlinearity of Ground Based on a Pile Foundation Experiment

Atsushi HINO Hiroki MOTOYAMA Yoshitaka MURONO

In order to calculate the radiation damping value by taking the non-linearity of the ground into account, a method to calculate the value of the damping from moment to moment was proposed by using the relationship between the dynamic load-displacement and static load-displacement. To estimate the radiation damping value by using the proposed method, the dynamic and static experiments with model pile foundations were conducted through horizontal loading. The experiments adopted the frequency and the amplitude as the parameters. As a result, it was go and out that the relationship among the amplitude, frequency as well as the damping coefficient can be evaluated from moment to moment.

キーワード：耐震設計，杭基礎，逸散減衰，水平載荷試験，非線形

1. はじめに

高架橋や橋りょう等の耐震設計において構造物の地震時の応答を評価する際には数値解析的な評価が行われることが多い。鉄道構造物の耐震設計においては、構造物の非線形化の影響を考慮することから、時刻歴の動的解析法により地震応答を算定することが推奨されている¹⁾。動的解析法において減衰の設定が地震応答に与える影響は大きく、この内、杭基礎等を有する高架橋や橋りょうでは、地盤と構造物の相互作用により生じる逸散減衰の影響が大きいことが知られている。既往の研究では、弾性波動論に基づいた手法により減衰が評価されることが多く、そのため線形範囲での議論に留まっている。しかし、大規模地震時には、構造物周辺の地盤は非線形化するためこの影響を考慮する必要がある。非線形性の影響については、等価線形的な扱いによる検討が一般的であり、非線形性を考慮した状況における時々刻々の減衰の評価事例は少ない。等価線形的に非線形性を扱う場合には、履歴減衰と逸散減衰の分離に困難があり、ある程度の制約を受けた検討になることは否めない^{2) 3)}など。このような状況にあるため、時刻歴の動的解析における減衰の設定は未解明なことが多く、通常は慣例的に、数値解析上の扱いが簡便な剛性比例型減衰やレーリー型減衰が用いられることが多い⁴⁾。

これらを踏まえ、本研究では、杭基礎模型の動的およ

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 鉄道地震工学研究センター

び静的な水平載荷試験を行い、それらの荷重-変位関係の差分から減衰力を抽出する方法を開発した。次に、この手法を用いて減衰力を求め、その非線形性の評価を行った。

2. 杭基礎模型を用いた水平載荷試験

2.1 実験概要

固定土槽中に製作した模型の概要および実施した載荷試験の概要を次に示す。

(a) 試験体

図1に試験体の平面図と断面図を示す。杭径139.8mm、厚さ4.5mmの鋼管杭を4本用い、杭芯間距離を700mmとした。これは、杭径の5倍程度の杭間隔とすることで、群杭の効果を可能な限り低減することを考慮している。杭頭は鋼材にて剛接合した。杭の地中長は2200mmで、杭表面から土槽側壁までの距離は、830.1mmである。杭表面には砂を塗布し、砂地盤との摩擦力を確保した。また、杭先端と土槽底をD13の鉄筋で繋ぎピン支持とした。

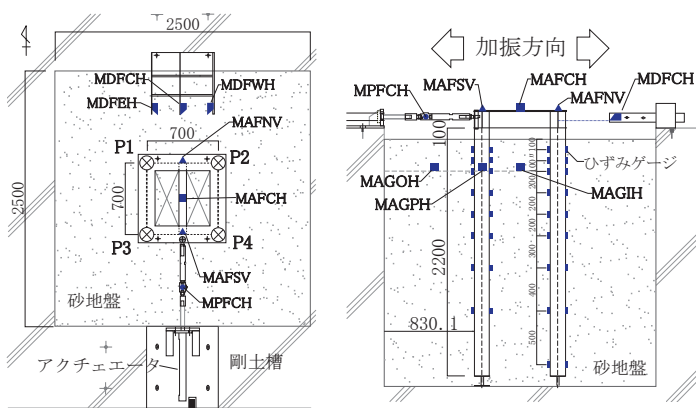
(b) 地盤

平面が2500×2500mmのRC固定土槽に6号珪砂により乾燥砂地盤を作成した。深さは2300mm、相対密度Drは80%である。なお、固定土槽の場合、地盤のせん断変形は限られた範囲のみとなってしまう、地震時の地盤の挙動とは異なるといった問題点はある。

(c) 計測器配置

図1に計測器配置を示す。水平載荷方向の加速度計

特集：地震防災・耐震技術



(a) 平面図 (b) 断面図 (単位：mm)

図1 試験体と計測器配置

(MAFCH) をフーチング上の中心位置に、鉛直方向の加速度計 (MAFSV, MAFNV) をフーチング上の荷重方向両端に1つずつ設置した。また、レーザー変位計3台 (MDFCH, MDFEH, MDFWH) を荷重方向に、ロードセル (MPFCH) をアクチュエータと試験体の接続部分に、ひずみゲージを杭に設置した。なお、計測時のサンプリングは500Hzとした。

(d) 荷重方法・荷重ケース

荷重はアクチュエータにより、変位制御で実施した。目標最大変位に応じた動的荷重 (正弦波を使用) と静的荷重 (正負交番荷重) を行った。目標最大変位は、0.5mm, 1.0mm, 2.0mm の3ケースとした。動的荷重の加振振動数は、5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz の4ケースとした。

2.2 実験結果

実験より得られた応答の例として、図2に目標最大変位0.5mmのケースの静的試験の荷重-変位関係、図3(a)には、目標最大変位0.5mm、荷重振動数10Hzのケースにおける、フーチング加速度・変位・ロードセル荷重の時刻歴波形を示す。ここで示す時刻歴波形は、加振開始後6秒程度経過し、波形が落ち着いた状態から5サイクル分の値を抽出したものである。また、いずれの波形についても12Hzのローパスフィルタ処理を行った。図3(b)には、5ループ分の荷重-変位関係を示す。変位がゼロ付近で荷重-変位関係にくびれが生じているが、これは杭と地盤との間に剥離が発生したためである。この地盤の剥離については目視でも確認することができた。また、動的な荷重-変位関係は、図2の静的な荷重-変位関係と比較して、ループの面積が大きくなっていることが分かる。

3. 減衰の評価手法

提案する手法は、動的荷重により得られた荷重-変位関係と静的荷重により得られた荷重-変位関係の差から

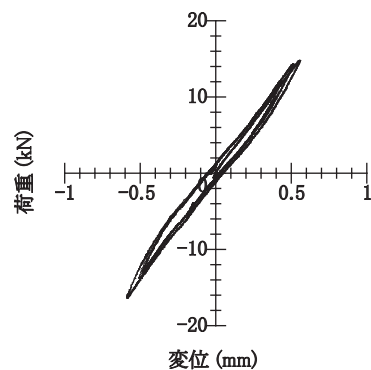
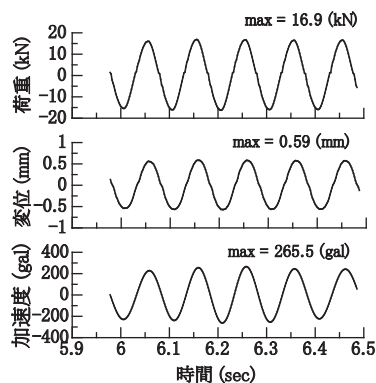
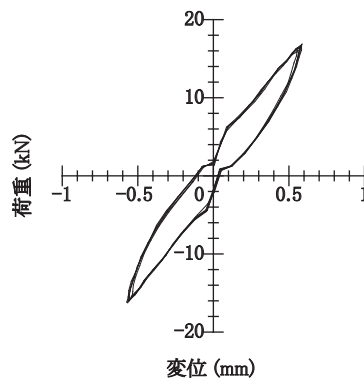


図2 静的荷重-変位関係 (0.5mm)



(a) 時刻歴波形 (荷重力, 変位, 加速度)



(b) 荷重-変位関係

図3 動的結果 (0.5mm, 10Hz)

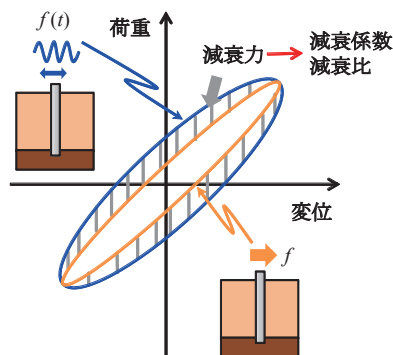


図4 減衰算定のイメージ

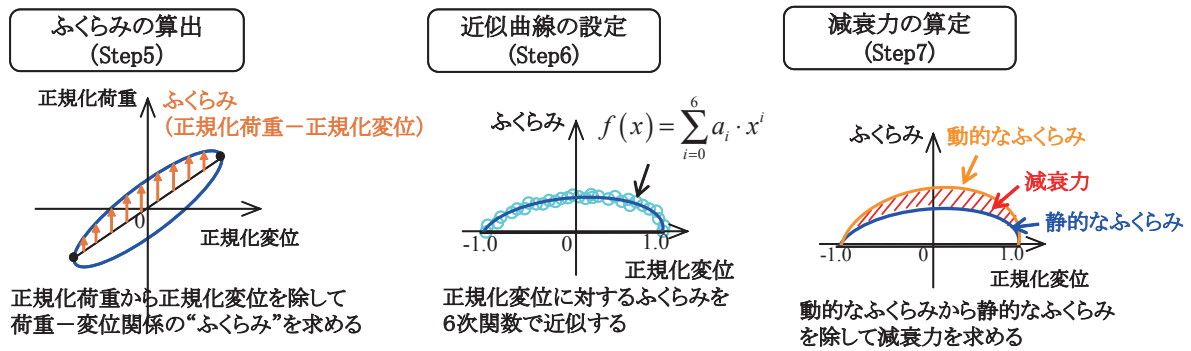


図5 ふくらみを用いた減衰算定手法

減衰を算定するものである^{5) 6)}。減衰の算定手法のイメージを図4に示す。杭基礎の杭頭荷重に対する挙動が1自由度系のモデル化で表現できるとすると、図のように動的載荷から得られる荷重-変位関係と、静的載荷から得られる荷重-変位関係の差が減衰力と考えられる。

具体的には、下記の式(1)で表される1自由度系の運動方程式を変形した式(2)により減衰力(減衰係数(c)×速度(x))の形で評価する。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \tag{1}$$

$$c\dot{x} = f(t) - m\ddot{x} - kx \tag{2}$$

ここで、 \ddot{x}, \dot{x}, x はそれぞれ杭頭の加速度応答、速度応答、変位応答を表す。また、 m は杭の質量を k は剛性を表し、 $f(t)$ は杭頭に与える動的荷重である。復元力 kx は静的載荷における荷重として直接算定する。各時刻において、式(2)に加速度応答、速度応答、変位を代入することで、時々刻々の減衰力が評価でき、これを速度で除することで減衰係数が算定できる。

この手法を用いることで、試験結果から時々刻々と減衰力の算出を行うことができる。ただし、図2や図3の結果からもわかるように、試験結果は正負非対称な結果となっており、上記のような理論的な式を用いて減衰の算出を行う場合には、試験結果に対して適切な処理を行う必要がある。そこで、以下の手順で試験結果を補間したうえで減衰の算定を行った。

Step1: フィルター処理をした荷重と変位の応答波形から、1サイクル分の荷重と変位のデータを抽出し、荷重-変位関係を作成する

Step2: 荷重-変位関係の中心位置を補正する

Step3: 正側と負側のループの形状の差異を除くため、縦軸(荷重)を軸として対称に正側ループを反転させて正負対称な荷重-変位関係を作成する

Step4: Step3で得られた荷重-変位関係を最大変位時の荷重と変位で正規化する

Step5: 正規化した荷重-変位関係において変位ごとのループのふくらみ(定義については後述する)を求める

Step6: 横軸(変位)を軸として正側半ループ分の変位-ふくらみの関係をプロットし、正規化変位が-1および1となる点でふくらみの値が0となる条件のもとに6次の近似式で回帰式を作成する

Step7: 動的なふくらみの値から静的なふくらみの値を差し引いて正規化変位に対応した正規化減衰力の値を求める

Step8: Step4で用いた静的試験の最大荷重をふくらみの差分から求めた正規化減衰力に乗じて減衰力とする

上記で求めたふくらみとは変位最大時の割線剛性に対するループのふくらみのことを示している。本手順におけるふくらみから減衰力の算定手順の概要を図5に示す。

これらの一連の流れから減衰力と速度の関係を評価すると、ふくらみという形で試験ケースごとの荷重-変位関係の特性を表現したうえで減衰力と速度の関係について評価することが可能となる。

4. 減衰係数の算定

ここでは、3章の評価手法を用いて実際に減衰の値について算出を行った。

4.1 荷重-変位関係の再整理

3章で示した減衰の算定手法では、載荷試験結果より1サイクル分の荷重-変位関係の値を抽出して減衰力の算出を行うため、試験結果における1サイクルごとのばらつきが大きく異なる場合には、手法の適用が困難となる。

そこで、試験結果について数ループ分の結果を抜き出し差がないことを確認することとした。図2に示した静的試験結果の荷重変位関係の重ね合わせでは、最大時の荷重と変位に多少のばらつきは見られるものの、その傾

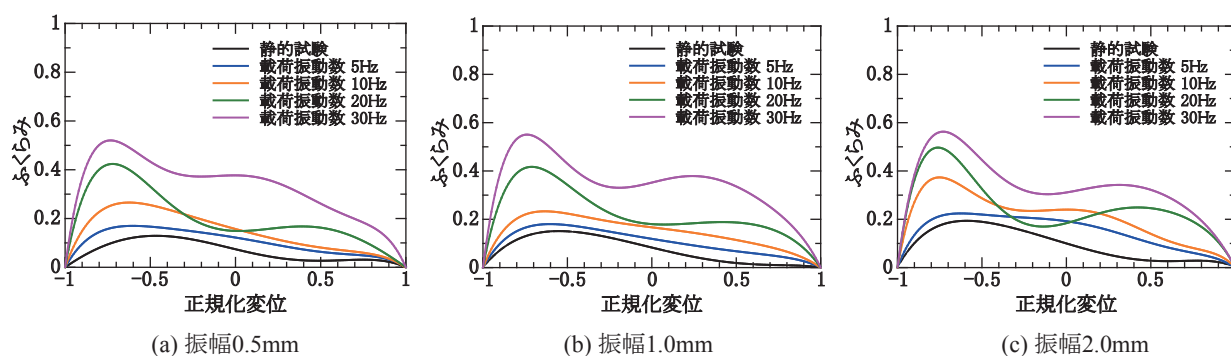


図6 振幅ごとのふくらみの算出結果

向は似ており、サイクルごとのばらつきは小さいと判断できる。また、図3 (b) に示す動的試験の結果では、5サイクル分の結果を重ね描いた荷重-変位関係の値は概ね一致しており、1サイクルごとのばらつきは小さいことが伺える。また、図3 (a) の波形からも同様の傾向は確認できる。

これらの結果より、載荷試験のループごとのばらつきは小さいことを確認した。その結果、1波を抽出して減衰を評価した場合においてもその減衰の値は各ケースの試験結果の値として扱うことができる。

4.2 ふくらみの算出および多項式近似

各ケースの試験結果について、3章のStep1からStep4までの手順に沿って試験結果を整理した。次に、Step5の正規化した荷重-変位関係からふくらみの値について算出を行い、Step6の6次関数の近似曲線を用いて表現までを行った。試験ケースごとのふくらみの値を振幅ごとに整理した結果を図6に示す。なお、ふくらみの算出は、正側半ループ分の値を取り出して行っているため、正規化変位が-1～0までの区間は荷重-変位関係において最大荷重から除荷されて原点に戻るまでの状態、正規化変位が0～1までの間は原点から最大荷重に向かう状態を示している。

図6のふくらみの形状より、静的なふくらみの形状はいずれの結果においても、正規化変位が-1から0に向かう段階で最大値をとり正規化変位が1に向かうにつれてふくらみの値は減少する傾向にある。動的なふくらみは、振動数が低い結果については静的と同様の傾向を示すものの、振動数が高くなると正規化変位が-1から0の間でふくらみが大きくなり、正規化変位が0付近でくびれて正規化変位が1に近づくとふくらみの値が再度大きくなるという傾向が見られた。また、いずれの振幅においても振動数が大きくなるとふくらみの値は大きくなる傾向がみられた。

4.3 減衰力-速度関係の算出

Step7として静的と動的な載荷試験結果より求めた2つのふくらみの関数の差分から減衰力の算出を行った。次に、Step8として算出した正規化減衰力に静的な荷重変位関係の補正に用いた最大荷重を乗じて減衰力とした。

試験結果ごとに求めた速度-減衰力の関係を試験の加振振動数で整理して、振幅依存性について確認を行ったものを図7に、振幅ごとに整理して振動数依存性について確認を行った結果を図8に示す。

図7および図8では、速度最大付近で減衰力の値が一度低下する傾向が見られた。中には最大値付近で輪を描くような結果となったものもあった。これは、速度最大時つまり変位が0のときの現象であり、図3 (b) からわかるように本試験においては杭頭付近の地盤が剥離することによって変位が原点付近において荷重-変位関係はくびれている。この影響が出たため、速度最大付近において減衰力の値は低下しているものと考えられる。

また、図7では(c)の結果や(d)の結果においては速度-減衰力のループの形状が似ていることが分かる。また、図8の(a)や(b)においてもループの形状は同様の傾向を示していることが分かる。これらの結果より振幅や振動数によってループの形状は変わらないことを確認した。

4.4 減衰係数の評価

図7や図8で示した速度-減衰力関係においてループの傾きが減衰係数Cとなるため、この傾きから減衰係数について評価を行うこととした。

傾きから減衰係数Cを評価する場合にはさまざまな方法が考えられ、その評価方法によって異なった減衰係数の値を得ることができる。例えば、時刻歴に減衰力を速度で除して割線剛性として減衰係数Cを求める場合には、その値が時々刻々と変化することとなる。そこで、本論文では減衰係数Cの値を評価することを主眼とするのではなく、振動数や振幅が異なった場合に減衰係数Cの値がどのように変化するかを調べることを主眼として評価を行った。本論文で用いた減衰係数Cの評価

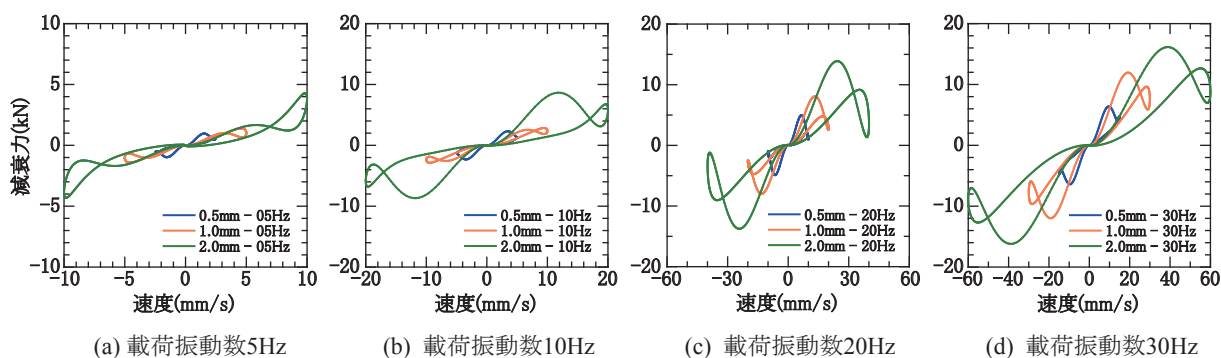


図7 減衰力-速度関係（振幅依存の確認）

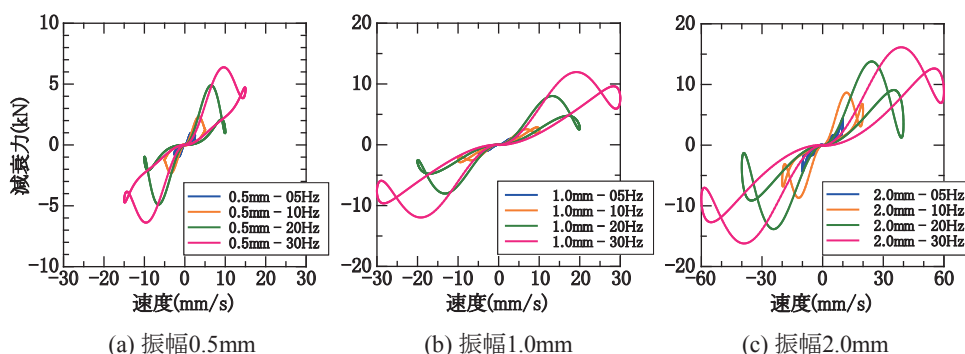


図8 減衰力-速度関係（振動数依存の確認）

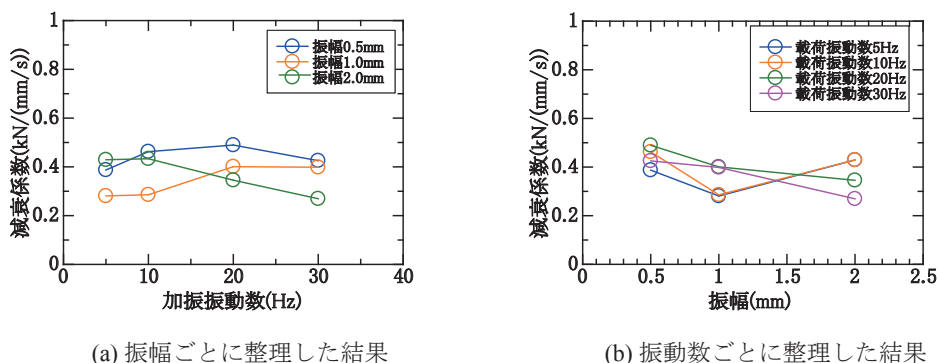


図9 試験ごとの正規化時の減衰係数 C

には、1例として各ループの最大速度と最大減衰力から求めた減衰係数 C を用いることとした。

各試験結果について、最大速度と最大減衰力から減衰係数の値の算出を行った。算出した減衰係数の値を試験ケースの加振振動数と振幅ごとに整理した結果を図9に示す。その結果加振振動数で整理した図9 (b) の結果において振幅が大きくなると若干ではあるものの減衰係数の値が低下する傾向が見られた。また、図9 (a) の振動数依存の確認を目的として整理した結果については、本検討では明確な傾向は確認できなかった。

また、4.3節の結果にもあるように速度-減衰係数の関係は振幅および载荷振動数が異なる試験結果であって

も同様の形状を示す傾向が確認されている。そこで、各ループについて速度と減衰力の最大値で正規化させた速度-減衰力関係を作成した。正規化を行ったループの例を図10に示す。この結果から、ループの形状は概ね一致していることが分かる。

これらの結果より、前述した減衰係数の振幅依存性や振動数依存性についてはループの形状が同様であるため、他の点（例えば、正規化速度が1.0となる点）で減衰係数の値を評価した場合においても、同様の傾向となる。したがって、正規化に用いた速度と減衰力の値から求めた減衰係数の傾向は、各試験ケースから得られた全体の傾向として評価することができる。

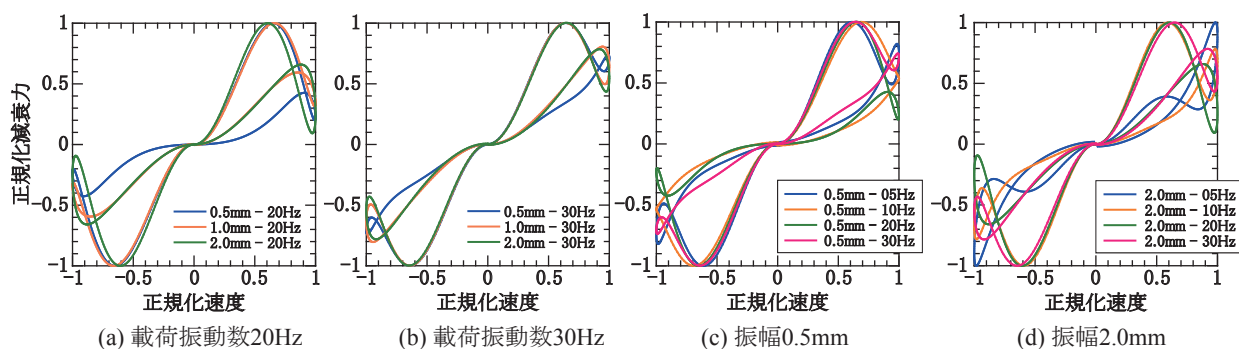


図 10 正規化減衰力-正規化速度関係

5. おわりに

ここでは、固定土槽中の杭基礎模型を用いた載荷試験を実施し、動的・静的の荷重-変位関係から減衰を評価することを試みた。また、試験において振幅や振動数を変化させて載荷を行うことで、振幅や振動数の依存性に関する考察を試みた。これらに対する知見を次に示す。

- ・ 試験結果の荷重-変位関係から減衰の算定を行った
- ・ 速度-減衰力関係について載荷振動数や振幅ごとに整理を行った
- ・ 減衰力の値は、杭と地盤の間に剥離が生じると低下することを確認した
- ・ 本試験結果においては、正規化した速度-減衰力の関係は、振幅や加振振動数によらず同様の傾向を示すことを確認した
- ・ 各試験ケースの最大速度と最大減衰力から求めた減衰係数の値は、振幅に応じて減少する傾向を示し、加振振動数に対しては明確な傾向は確認できなかった

今回の検討では、固定土槽中の模型杭に対して杭頭位置を加振した試験結果から減衰係数の値を評価しており、その結果は杭周辺地盤の非線形性によるものと考えられる。固定土槽で実施した本検討結果では、振幅に

じて減衰係数が小さくなった。これらの結果より、周辺地盤の非線形化が進むと逸散減衰の値は小さくなるという傾向を確認した。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総研編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012
- 2) 小林恒一，八尾真太郎：地盤の非線形性を考慮した水平方向における群杭の杭頭複素剛性の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 444 号，pp.43-51，1993.2
- 3) 齊藤正人，渡邊啓行：滑りと剥離の境界非線形性が杭基礎の動的インピーダンスに及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 No.766/ I-68，pp.263-275，2004. 7
- 4) 矢田部浩，運上茂樹：非線形動的解析に用いる粘性減衰のモデル化と非減衰振動系の復元力モデルに関する一考察，第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2005
- 5) 本山紘希，室野剛隆：3次元 FEM を用いた杭基礎の逸散減衰評価手法に関する基礎的検討，第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2015
- 6) 日野篤志，本山紘希，室野剛隆，藤井達，藤森健史：杭基礎模型の水平載荷試験による減衰の振幅依存特性に関する基礎的検討，第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2015