

杭基礎模型の水平載荷試験による 減衰の振幅依存性に関する基礎的検討

日野篤志¹・本山紘希²・室野剛隆³・藤井達⁴・藤森健史⁴

¹正会員（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工修（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 工博（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

⁴正会員（株）大林組 技術研究所 地盤技術研究部
（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

1. はじめに

耐震設計等を行う場合には、地震時における構造物の応答を適切に評価する必要がある。構造物の応答を評価するには、時刻歴応答解析などの動的解析が用いられることが一般的である。この動的解析では、減衰の設定が重要な課題の一つとなる。動的解析に考慮すべき減衰には、部材による減衰や地盤と構造物の相互作用によって生じる減衰（逸散減衰や地盤の履歴減衰）などがある。本論文では、後者の減衰について検討を行ったものである。

地盤と構造物の相互作用による減衰は、振幅依存特性や振動数依存特性の影響を強く受けることが知られている。しかし、これらの特性を定量的に評価し、動的解析を行うことは容易ではない。そのため鉄道構造物の設計¹⁾における減衰の設定は、慣例にならって、剛性比例減衰やレーリー減衰を用いて動的解析を行うことが多い。

そこで、本論文では数値解析における減衰の設定手法の高度化のため、まず、減衰の評価手法を検討することを目的に杭基礎模型による水平載荷試験を行った。ここでは、特に逸散減衰を対象とすることを考えている。載荷試験は、杭基礎模型を固定土槽中に製作し、振幅と振動数の異なる動的および静的な水平方向の載荷試験を実施した。また、著者らのグループでは、動的な荷重－変位関係と静的な荷重－変位関係から減衰を評価する手法を提案しており²⁾、その手法を用いて、減衰の評価を試みた。また、

ここで試算した減衰を振動数および振幅との関係を整理し、考察を行った。

2. 杭基礎模型を用いた水平載荷試験

(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。図-1 に試験の状況を示す。

a) 試験体

図-3 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、杭表面から土槽壁までの距離は、830.1mm である。杭表面に砂を塗布し、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。図-2 に地盤作成前の杭の設定状況を示す。

b) 地盤

平面が 2500×2500mm の RC 剛土槽に 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 D_r は 80% である。

c) 計測器配置

図-3 に計測器配置を示す。水平載荷方向の加速度計(MAFCH)をフーチング上の中心位置に、鉛直方



図-1 試験体の状況



図-2 地盤作成前の試験杭の状況

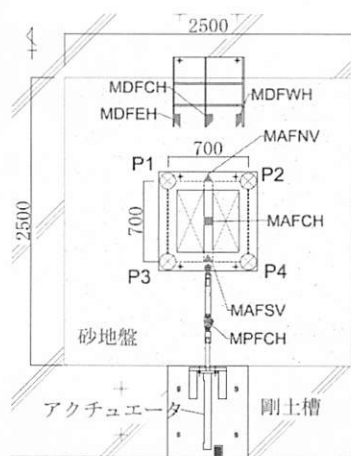
向の加速度計(MAFSV, MAFNV)をフーチング上の載荷方向両端に1つずつ設置した。また、レーザー変位計3台(MDFCH, MDFEH, MDFWH)を載荷方向に、ロードセル(MPFCH)をアクチュエータと試験体の接続部分に、ひずみゲージを杭に設置した。さらに、地中加速度計を、深さ300mmにおいて、P1杭とP3杭の間(MAGIH), P3杭面(MAGPH), P3杭と土槽壁の間(MAGOH)に設置した。なお、計測時のサンプリングは500Hzとした。

d) 載荷方法・載荷ケース

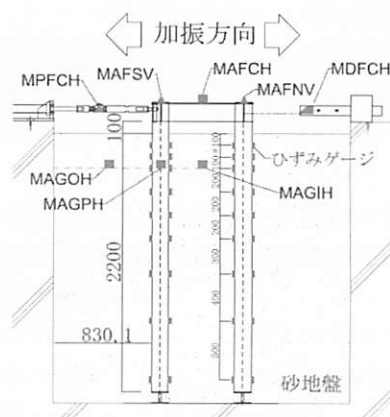
載荷はアクチュエータにより、変位制御で実施した。目標最大変位に応じた動的載荷(正弦波加振)と静的載荷(正負交番載荷)を行った。目標最大変位は、0.5mm, 1.0mm, 4.0mmの3ケースとした。ただし、本論文では0.5mm, 4.0mmの2ケースについて整理を行い、減衰係数の算定を行った。なお、4.0mmのケースはアクチュエータの性能の都合上、載荷時の最大変位は1.5~2.5mm程度の値となったため、本論文では2.0mmというケース名で扱う。動的載荷の加振振動数は、5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hzの4ケースとした。動的載荷における加振波形例を図-4に示す。

(2) 実験結果

実験より得られた応答の例として、図-5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-6に目標最大変位0.5mm, 加振振動数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サイクル分を抽出したものである。いずれの波形についても12Hzのローパスフィルター処理を行ったものである。なお、フィルター処理は、その他の加振においても、加振振動数の1.2倍の振動数によるローパスフィルタをかけることとした。図-6には、5ループ分の荷重-変位関係を示す。変位がゼ



(a) 平面図



(b) 断面図

図-3 試験体と計測器配置

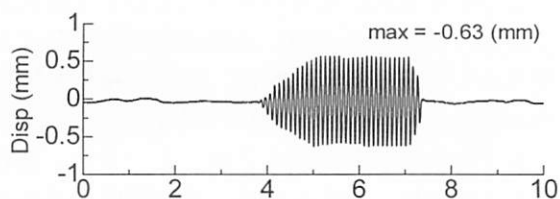


図-4 加振波形例 (0.5mm, 10Hz)

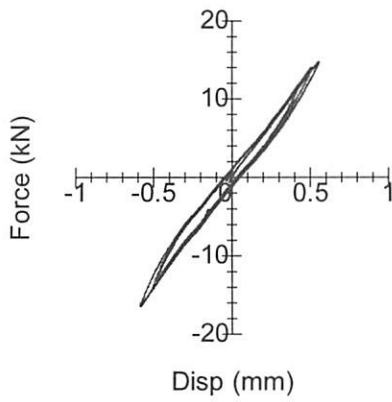
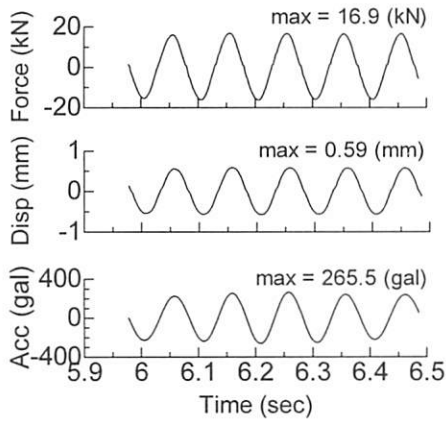
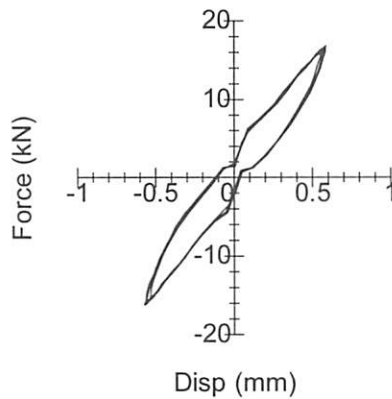


図-5 静的荷重－変位関係 (0.5mm)



(a) 時刻歴波形 (載荷力, 変位, 加速度)



(b) 荷重－変位関係

図-6 動的結果 (0.5mm, 10Hz)

ロ付近で荷重－変位関係にくびれが生じているが、杭と地盤との間の剥離の影響であると考察している。また、下記で詳細に検討を行うが、動的な荷重－変位関係は、図-5に示す静的な荷重－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。

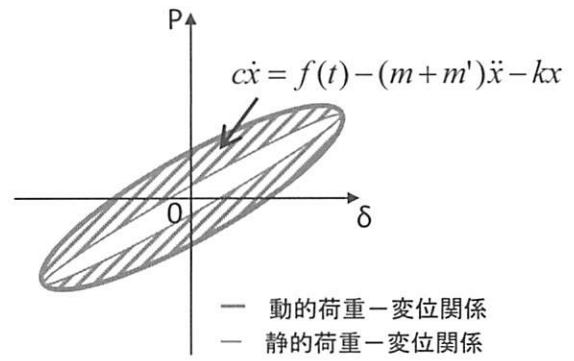
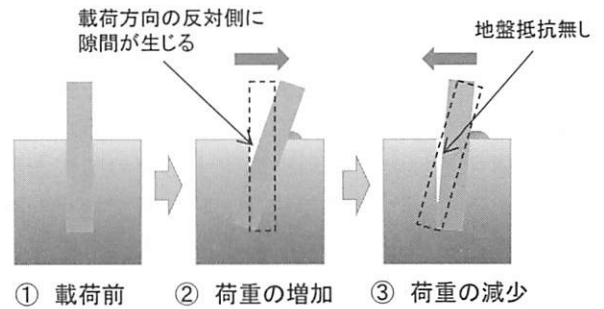
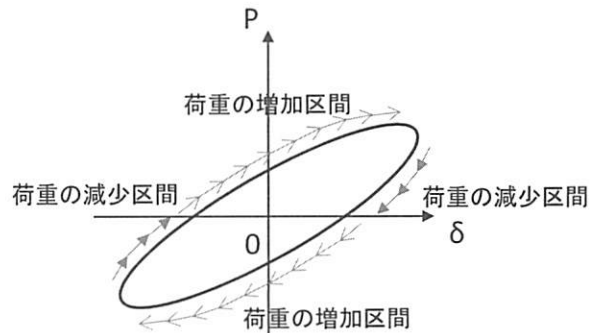


図-7 減衰力算定の概念図



(a) 載荷時の杭と地盤の挙動



(b) 減衰力算定のためのゾーニング

図-8 減衰力算定のための状態分割

3. 減衰の評価手法

本研究では減衰評価手法として、図-7 に示す概念図に沿って直接的に動的な荷重－変位関係と静的な荷重－変位関係の差により減衰を評価することを考えた。具体的には式(1)に示す付加質量を考慮した運動方程式を設定し、これを変形した式(2)によって減衰力を算定する手法とした。

$$(m+m')\ddot{x}+c\dot{x}+kx=f(t) \quad (1)$$

$$c\dot{x}=f(t)-(m+m')\ddot{x}-kx \quad (2)$$

ここで、 m, m', c, k はそれぞれ質量、付加質量、減衰係数、剛性を表している。この剛性は静的荷重試験により得られる剛性であり、復元力項 kx は静的荷重試験で得られる載荷力で置き換えられる。また、 $\ddot{x}, \dot{x}, x$ は動的荷重試験により得た加速度・速度・変位応答であり、 $f(t)$ は杭頭に対する動的な載荷力を示している。この方法は、最大変位時（速度がゼロの時）の荷重が動的荷重時と静的荷重時に一致しない場合に、式(2)における慣性力項 $(m+m')\ddot{x}$ の付加質量 m' を変更することで動的と静的の荷重を一致させて処理を行うものである。

既往の研究では逸散減衰の評価において弾性波動論に基づいた手法によるのが一般的であるが、非線形を考慮する場合、等価線形化する等の工夫を行う必要があった³⁾など。本手法は、時刻歴で減衰を評価するため、非線形の影響をある程度直接考慮できる点が特徴となっている。

なお、本手法のように杭の非線形性を考慮した減衰の評価を行う場合には、杭と地盤の挙動について注意する必要がある。杭と周辺地盤の状態は図-8 に示すように、載荷前は杭と地盤は一体化しており隙間は生じていない。しかし、載荷が始まると載荷方向前面側に土は隆起し背面には空隙が生じる。次に載荷が目標とする変位に到達した後に反対方向の変位への載荷が始まると杭は前の載荷で生じた空隙が前面側となり、載荷方向に対する地盤抵抗は期待できない状態となる⁴⁾。そのため、今回の検討では、図-8 のように荷重の増加区間と減少区間に分類して減衰力の算定を行った。

4. 減衰係数の算定

(1) 荷重－変位関係の再整理

図-5 および図-6 の目標変位を 0.5mm とした場合の動的・静的試験の荷重－変位関係では、実際に得られる変位振幅に違いが生じている。また、詳細に載荷試験結果を見ると、一回の載荷の間でも 1 ループごとに変位振幅に違いが出ている。これはアクチュエータの性能上やむを得ない結果であるが、動的荷重－変位関係と静的荷重－変位関係の差を計算する上で不都合である。そこで、静的荷重試験結果を補正することを考え、最大変位および最大荷重で正規化した荷重－変位関係を算定し、履歴ループ形状

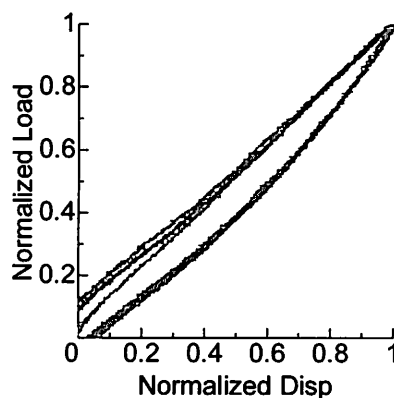


図-9 正規化した静的荷重－変位関係
(目標変位 0.5mm)

の特性を整理することを考えた。目標変位 0.5mm の静的荷重における正方向の半ループ（3 ケース分）について重ねた結果を図-9 に示す。図より振幅レベルが近い場合、静的荷重－変位関係の形状は等しく、相似的に拡大・縮小することによって振幅レベルが近い静的な荷重－変位関係を設定できると考えられる。これにより、図-5 および図-6 で示した静的荷重－変位関係を動的荷重試験から得られる杭頭の振幅に合わせて補正し、荷重－変位関係を再整理した。また、同様の処理を載荷振動数 5Hz および 20Hz、振幅 2.0mm の同振動数の試験ケースについても実施した。結果を図-10 に示す。これにより、振幅レベルの同じ動的荷重－変位関係と静的荷重－変位関係が得られた。

(2) 減衰力および減衰係数の算定結果

図-10 の静的荷重より各載荷試験に対して復元力項 kx を設定し、式(2)を用いて各時間刻みごとの減衰係数の算出を行う。なお、式(2)は、最終的に速度で除して減衰係数を算出する形になっている。載荷試験の速度は、時々刻々と変化しており、変位が最大となる時刻の周辺では速度は 0 に近づく値となり、算出される減衰係数の値は不安定な値となる。そのため、減衰係数の算定には、変位が最大値の 90% 以上になる範囲を速度が小さくなり減衰係数の算定結果が不安定となる区間として、算定の対象外としたその上で、加振振動数が同じ場合は、付加質量が一定と仮定し、減衰係数を算定している。付加質量と減衰係数の決定においては、得られる減衰係数の時刻歴でのばらつき（ここでは、変動係数）が最小になるような付加質量を選定し、減衰係数はその際に得られる時々刻々の減衰係数の平均値とした。また、図-8 に示したように、ループ全体で上記の処

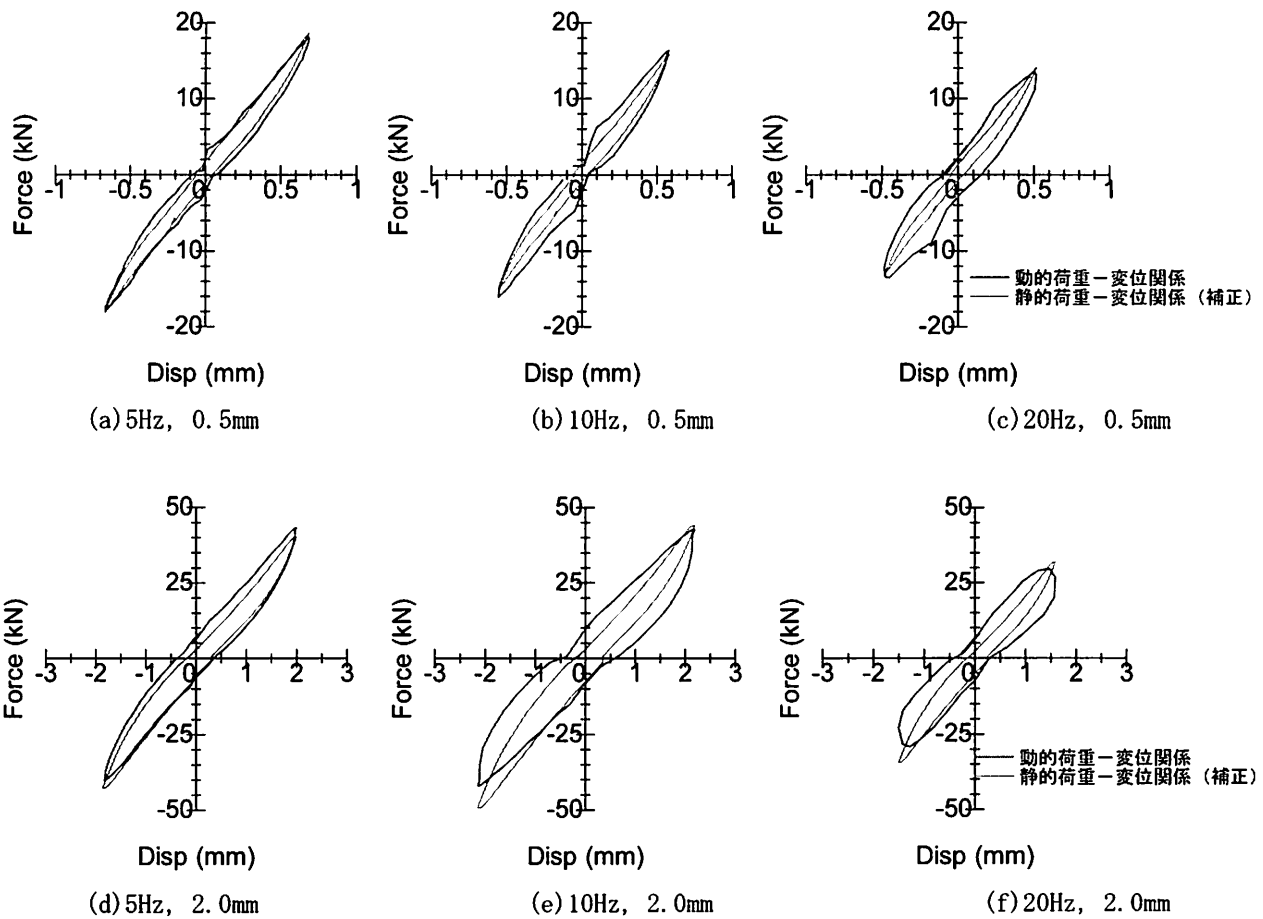


図-10 補正した荷重-変位関係の例

理をした場合に加えて、荷重が増加している状態での処理、荷重が減少している状態での処理を実施した。

算定結果の例として振幅 0.5mm と 2mm の 2 ケースで加振振動数が 5Hz, 10Hz, 20Hz の 3 ケース合わせて 6 ケースの減衰係数の算定結果を図-11 に示し、求めた減衰係数の平均値 C と変動係数 $C.V$ を併せて示す。いずれのケースも加振の状態が落ち着いた時間から 5 サイクル分の波形を抽出し算出を行っている。

例えば、5Hz, 0.5mm の結果 (図-11(a)) を見てみると全体で算出した減衰係数が 79.4kN/(m/s)であるのに対して、荷重の増加区間では 94.8 kN/(m/s)、減少区間では 64.0 kN/(m/s)となっている。変動係数は全体で 0.54、増加区間および減少区間で 0.28 となっており、この結果における減衰係数の値は比較的ばらつきの小さい値であることがわかる。

次に、10Hz, 0.5mm の結果 (図-11(b))、20Hz, 0.5mm の結果 (図-11(c)) では変動係数の値は 1.0 をいずれも下回っており、ばらつきは比較的小さい。

また、2.0mm のケースは、0.5mm の結果と比較して、全体的に変動係数の値が大きくなっている。中でも、5Hz, 2.0mm の結果は、変動係数が 5 という

値になっており、今回の検討方法では評価が困難であると考えざるを得ない。ただし、今回の検討では、目標変位が大きいケースにおいてアクチュエータによる载荷で目標変位を達成できず、正弦波加振を実現できていないことが確認されている。その場合には、図-12 に示すような上限値で荷重を保持するような载荷となる。それを減衰の評価手法に取り入れるために図-12 のようなフィルター処理を行ったが、このフィルター処理により計測データを歪めてしまった可能性が考えられる。上記のような場合についての減衰の評価・考察については、今後の課題としたい。

(3) 付加質量の考慮による動的荷重-変位関係

本論文では、付加質量は減衰係数の変動係数が最も小さくなる時の値としている。そこで、変動係数が最小となる時の付加質量の値を式(2)における慣性力項 $(m+m')\ddot{x}$ として考慮した場合の動的と静的の荷重変位関係について確認を行った。

例として目標変位 0.5mm、加振振動数 10Hz のケースを用いるが、このケースの場合、付加質量の値は減衰を全体で評価した場合と荷重の増加時で評価した場合で $m'=0.1t$ となった。荷重の減少時には

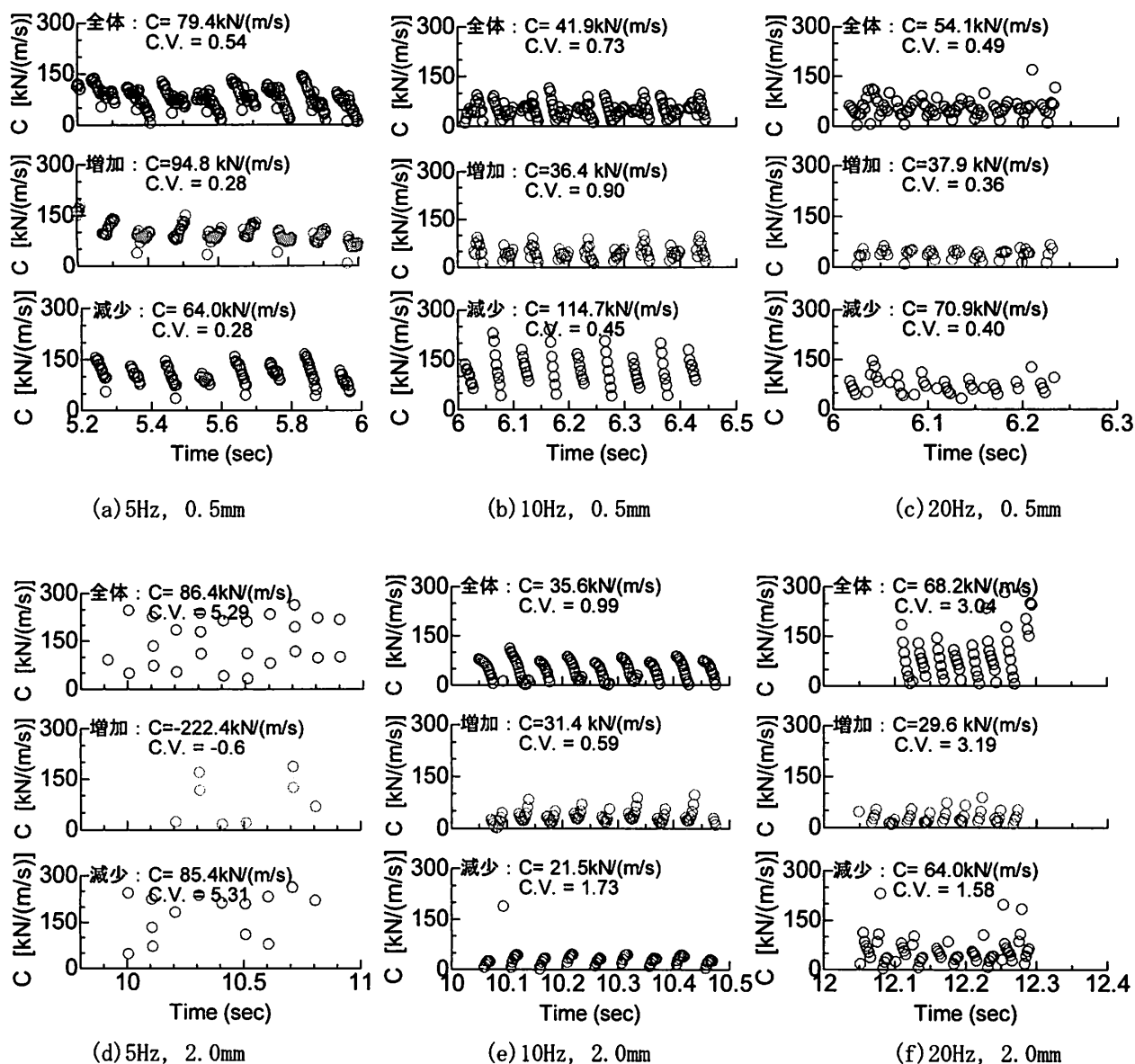


図-11 区間ごとの減衰定数の算定例

$m'=1.2t$ となった。この値を用いて動的と静的の荷重-変位関係を比較を行った結果を図-13 に示す。この結果より、いずれの場合も m' を付加質量とした設定した場合には、動的と静的の最大変位時の荷重は良く一致していることがわかった。

(4) 振動数依存性の整理

杭基礎模型における水平方向の動・静的載荷試験による減衰量の算定を試みた。時刻歴のデータから時々刻々の減衰力・減衰係数を算定する手法により、模型実験における減衰力・減衰係数が算定できることを確認し、図-14に示す加振振動数と最大変位時の割線剛性の関係、図-15に示す加振振動数と減衰係数の関係が得られた。割線剛性は振動数が高くなるほど減少する傾向が見られるとともに、変位が大き

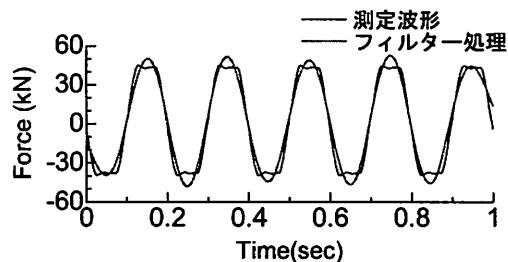
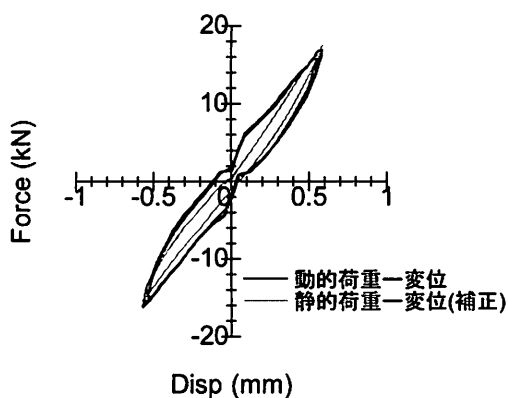
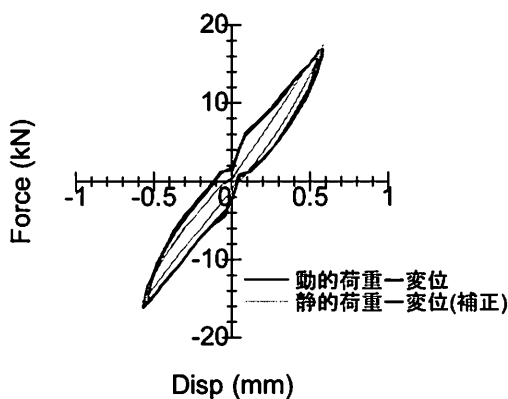


図-12 フィルター処理結果の例

場合にも減少する傾向が見られた。減衰係数に関しては、現状、傾向が見られるほどのデータとなっていないが、振幅が変化しても減衰の増減の傾向は類似していると考えられる。今後、より詳細な検討の実施により、明らかにすることとしたい。



(a) 全体, 荷重増加時 ($m'=0.1t$)



(b) 荷重減少時 ($m'=1.2t$)

図-13 慣性力項を考慮した荷重-変位関係の例
(目標変位 0.5mm, 加振振動数 10Hz)

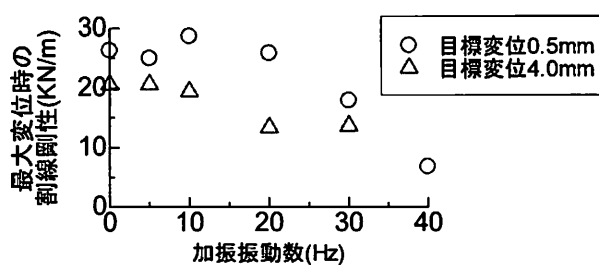
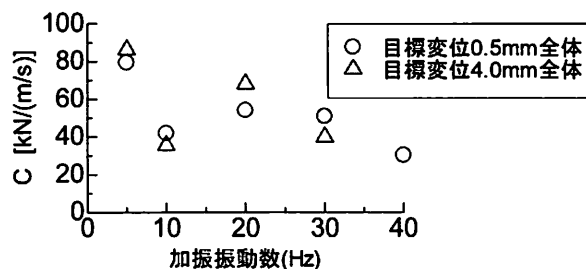
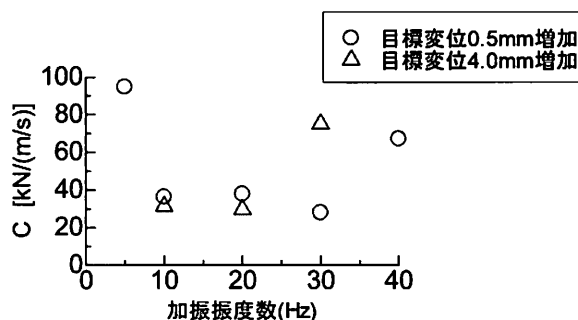


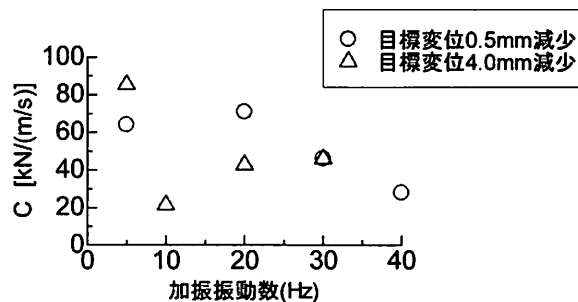
図-14 加振振動数と変位最大時の割線剛性の関係



(a) 全体



(b) 荷重増加区間



(c) 荷重減少区間

図-15 加振振動数と減衰係数の関係

5. おわりに

ここでは、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。

- ・ 運動方程式に付加質量を考慮することで、減衰の算定を行う提案手法により、杭基礎模型における減衰の試算を行った
- ・ 減衰評価の際に、得られる時刻歴の減衰係数のばらつき（変動係数）が最小となるように付加質量を選択することで、一貫した手法により減衰の算定が可能であることを示した
- ・ 特に振幅が小さい領域では、得られる減衰係数のばらつきも小さいため、手法がある程度有効であることを示すことができた

- ・ 手法の適用にあたっては、荷重の増加区間と減少区間を分けて検討することで得られる減衰係数のばらつきをより低減できることがわかった

今後は、振幅の大きい場合にもより精度よく適用できるよう手法を改良するとともに、他の手法によ

る減衰係数との比較により本手法の妥当性について確認を行う。なお、本試験は固定土槽を用いた試験であり、厳密には逸散減衰を扱えないことから、今後、実フィールドでの試験による検討も予定している。

謝辞

本研究の一部には国土交通省からの補助金を利用しました。記して感謝の意を示します。

参考文献

- 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），2012.9
- 2) 室野剛隆，本山紘希，藤井達，藤森健史：杭基礎模型に対する水平方向の動・静的載荷試験による減衰量の評価（その3 減衰量の試算），第50回地盤工学研究発表会，投稿中
- 3) 小林恒一，八尾眞太郎：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，1993.2
- 4) 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（基礎構造物），2012.1