

ひずみレベルに応じた杭基礎の 逸散減衰の実験的検討

日野 篤志¹・本山 紘希²・室野 剛隆³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:hino.atushi.44@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:motoyama.hiroki.27@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

地震時における構造物の応答の評価には、動的解析を用いるのが一般的である。動的解析では、減衰の設定が重要であり、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る減衰（逸散減衰や地盤の履歴減衰）などがある。このうち逸散減衰は、振幅や振動数に依存することが知られているが、その特性を定量的に評価できていないのが現状である。

そこで、時々刻々と減衰の影響を評価することが可能な手法を提案し、FEM解析による基礎的な検討と杭基礎模型による水平載荷試験を行った。載荷試験は、振幅と振動数をパラメータとして動的と静的な試験を実施し、動的と静的の荷重変位関係の差分より直接的に減衰係数の値の算出を行った。この手法を用いることで、時々刻々とひずみレベルに応じた振幅および振動数と減衰係数の関係について評価を行った。

Key Words : radiation damping, nonlinearity of strain, pile foundation, horizontal loading tests

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のが標準的である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い²⁾が、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減衰（逸散減衰および周辺地盤の履歴減衰）の影響が大きいことが知られている。一方、これらの減衰は、周波数依存性や振幅依存性の影響を受けることも知られており、現象としても非常に複雑なものである。既往の研究では、弾性波動論に基づいた手法により減衰を評価するため、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²³⁾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容易ではなく、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、時刻歴の減衰の評価手法の提案を行い、その手法について、FEMによる線形解析により単杭を考慮した場合について基礎的な検討を行い、適用性の検証を行った後に杭基礎模型を用いた水平載荷試験による減衰の試算を行った。

FEM解析では杭頭加振を行い、それにより得られる入力と応答の関係から減衰（逸散減衰）を算定することを試みる。ここで、FEM解析を用いる理由は、直接的に任意の地盤構成則が扱えるため、今後の展開として、非線形への展開が容易であると考えられるためである。次に、杭基礎模型による水平載荷試験を行い、減衰の値の試算を行った。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。その結果より提案手法により、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。

本論文では、まず、提案手法の説明を行い、FEM解

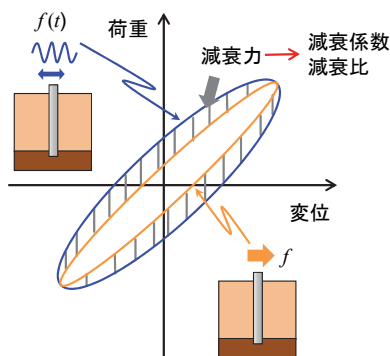


図-1 減衰算定のイメージ

析の対象とする杭基礎および地盤についてのモデル化や対象領域の設定方法を説明する。モデル化した杭基礎において杭頭加振を行い、ここで提案する手法で、減衰の試算例を示す。その次に、杭基礎の載荷試験について説明を行い、杭頭加振において載荷振動数を変化させ、振動数、振幅ごとの減衰の試算を試みた。

2. 減衰の評価手法

提案する手法は、動的載荷により得られた荷重－変位関係と静的載荷により得られた荷重－変位関係の差から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-1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（ $\dot{x}$ ））の形で評価する。

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

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

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。

3. FEM解析を用いた提案手法の検証

(1) 検証に用いる解析概要

基礎的な検討として、可能な限り単純化した対象にお

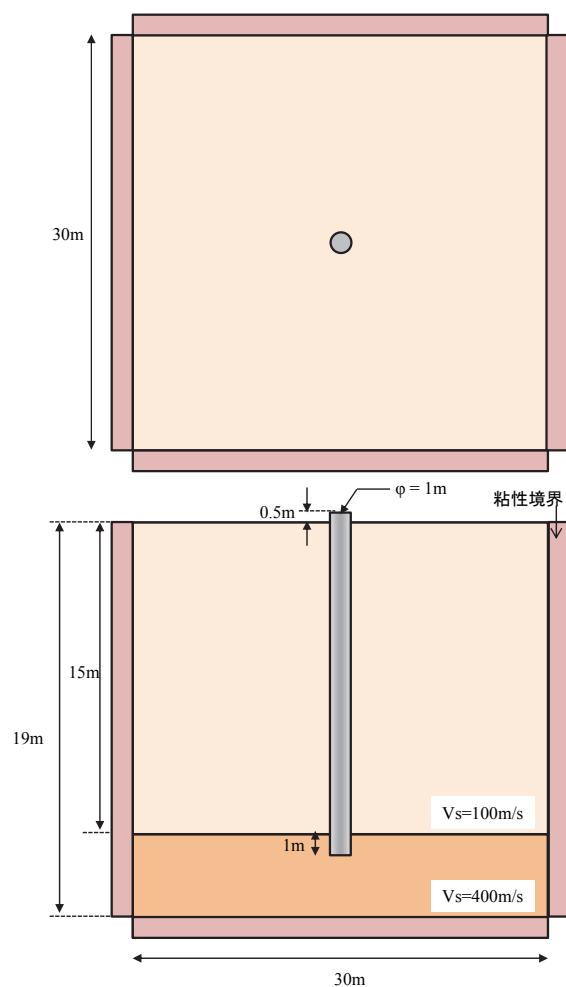


図-2 検討対象の概要

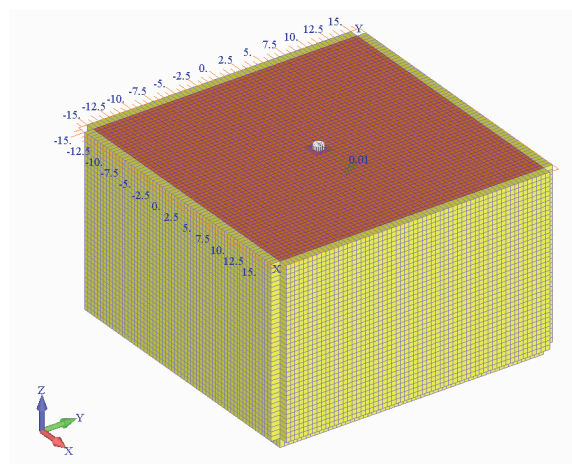


図-3 解析モデル

いて逸散減衰の影響のみを扱うことを考える。上述のように、検討には3次元のFEM解析を用いる。具体的な検討対象として、基盤層と単一物性の表層からなる地層構成を想定し、杭も一本杭の場合を検討することとした。地盤の非線形性や杭・地盤の剥離等の影響も考慮しない。検討対象の概要を図-2に示す。表層地盤は $V_s=100\text{m/s}$ 、基盤層は $V_s=400\text{m/s}$ とし、杭径は 1m とした。表層地盤は

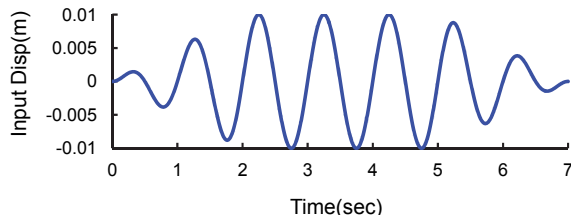
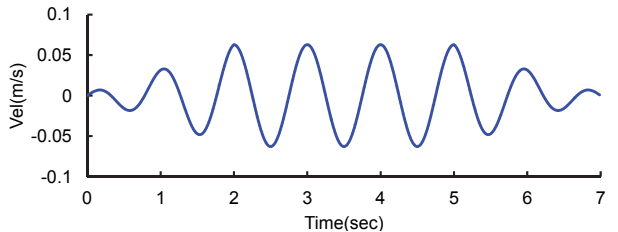
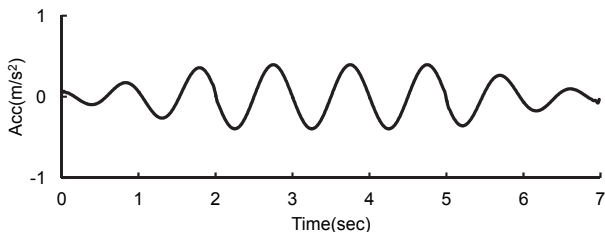


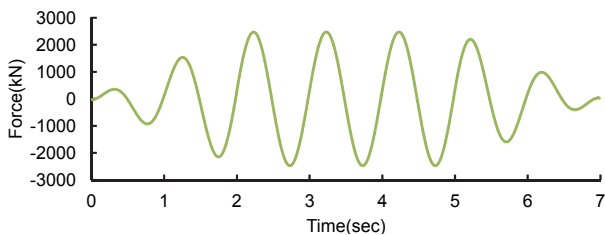
図-4 入力波の例 (1Hz の場合)



(a) 速度



(b) 加速度



(c) 載荷力

図-5 1Hz のサイン波を入力した場合の応答

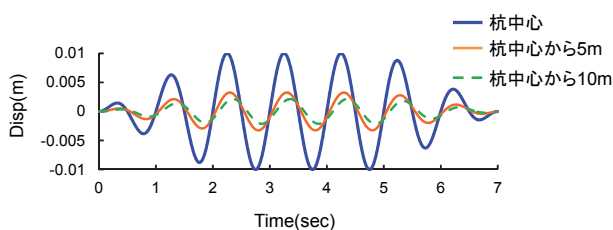
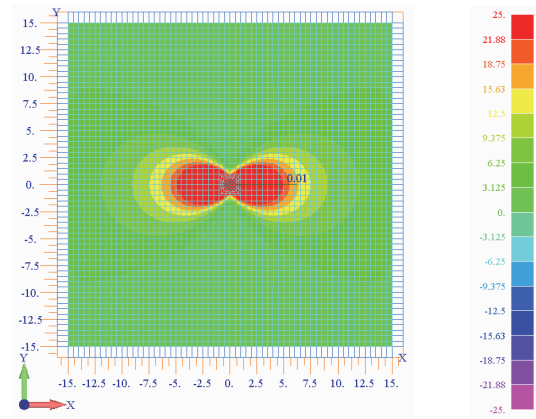


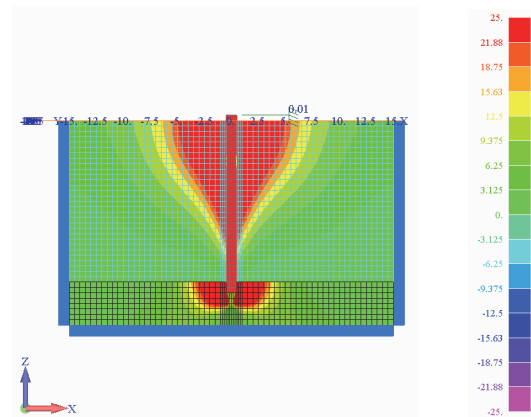
図-6 地表面における変位波形の伝播

層厚15mとし、杭は基盤層に1m根入れさせている。これに対して、地盤および杭をソリッド要素によりモデル化する。なお、別途固有値解析により算定した結果、地盤の固有振動数は1.404Hzであった。

ここで、逸散減衰を扱うため、境界での反射波の影響を可能な限り抑える必要がある。これには、底面および側方の境界を粘性境界とすることに加えて、十分に広い領域をモデル化することが必要である。また、提案手法では、静的載荷の結果も使用するが、領域が狭いと境界の



(a) 地表面



(b) 杭位置の断面

図-7 最大応力コンター図 (σ_{xx})

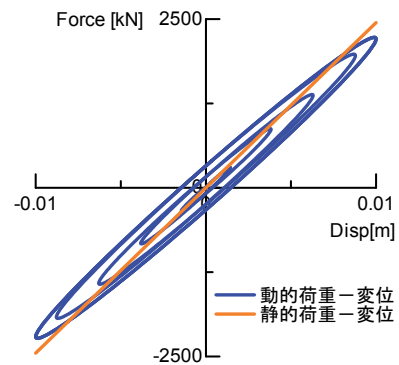


図-8 静的および動的荷重-変位関係

影響で杭の支持力が過大に発揮される可能性がある。そこで、解析領域については静的に杭を水平方向に載荷した時に、境界の影響が十分に小さくなるような値を設定する必要があり、別途検討⁹⁾を行い、図-2のような解析領域30m×30mを設定した。

(2) 解析概要

杭頭に対して変位境界条件としてサイン波を与え、杭への載荷力と杭および周辺地盤の応答を評価する。入力したサイン波の例を図-4に示すが、サイン波の開始 (お

よび終了)の2波にテーパーをつけており、サイン波による入力の実質3波分としている。解析においては、入力するサイン波の振動数をパラメータとして複数ケースの解析を実施した。なお、後述のように、杭の慣性力の影響が存在すると、検討が複雑になることが想定されるため、仮想的に杭の質量をゼロとして解析を行うこととした。

(3) 解析結果の概要

1Hzのサイン波を入力した場合の杭の速度応答、加速度応答、杭への載荷力の時刻歴波形を図-5に示す。また、地表面の変位の伝播として、杭中心から5mの地点と10mの地点での変位応答波形を示す(図-6)。図には、杭中心の波形(入力)も参考として示しているが、波形が伝播していくとともに振幅が低減していく様子や位相がずれていく様子が分かる。波形に干渉した形跡が見られないことから、境界からの反射波の影響が小さいことも分かる。また、最大応力コンター(杭の載荷方向の直応力 σ_{xx})を図-7に示す。杭の変形に合わせて、地盤内に応力が発生している状況が分かる。

(4) 減衰の算定例

図-5で示した波形から荷重-変位関係を整理し、静的な荷重-変位関係と合わせてプロットしたものを図-8に示す。線形解析であるため、静的荷重-変位関係は直線で得られている。ここで注意すべき点は、最大変位時(速度がゼロの時)に動的荷重-変位関係と静的荷重-変位関係が一致していない点である。この載荷履歴から直接式(2)の手法で減衰力を算定し、速度波形で除すると、減衰係数が振動して一定値として算定できない。ここでは、この動的荷重-変位関係と静的荷重-変位関係の最大変形時の不一致を、周辺地盤の影響により生じる付加質量(m')の影響と解釈し、式(1)を補正し、式(3)として検討を行うこととした。

$$(m + m')\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (3)$$

これに対応する減衰力の算定式は、 $m=0$ も考慮すると、次式で表される。

$$c\dot{x} = f(t) - m'\ddot{x} - kx \quad (4)$$

荷重として付加質量に加速度を乗じたものを本検討における慣性力項とし、新しく動的な荷重 $f(t) - m'\ddot{x}$ として定義すると、図-9に示すように最大変形時に動的荷重-変位関係と静的荷重-変位関係を一致させることが可能になる。式(4)により減衰力を算定し、得られた減衰力を速度で除することにより減衰係数を算定した。入力波のテーパー部分(最初と最後の2波)を除いた結果を図-10に示す。速度がゼロの時刻で結果に変動が見られる部分があるが、減衰係数がほぼ一定値として得られて

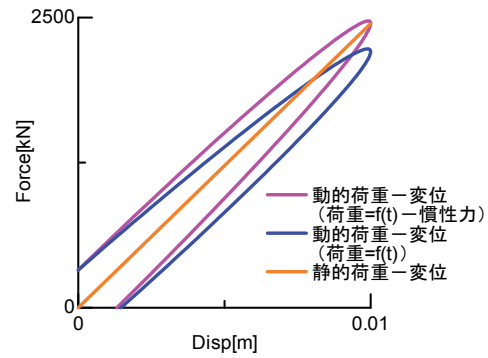
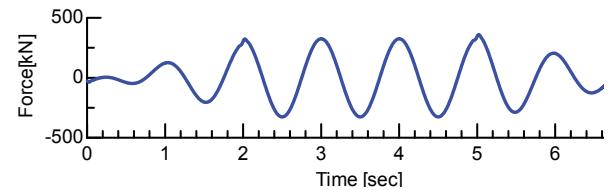
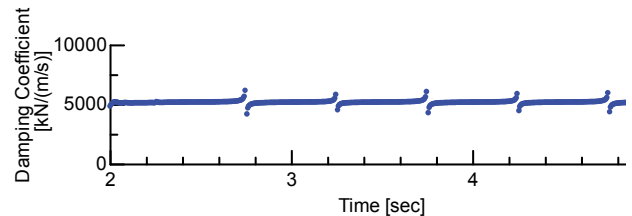


図-10 動的荷重-変位関係の補正



(a) 減衰力



(b) 減衰係数

図-11 減衰力および減衰係数の算定

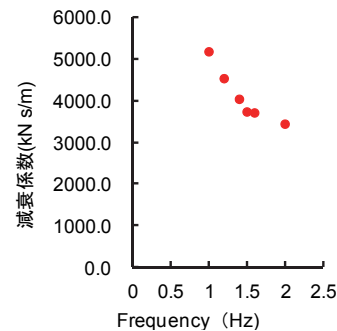


図-12 振動数ごとの減衰の算定

いる。値は $c=5180\text{kN/(m/s)}$ となっている。なお、この時の付加質量は $m'=618\text{ t}$ となった。得られた減衰係数と運動方程式上の質量(この場合付加質量のみ)から算定される減衰比は $h=21.1\%$ となった。

なお、振動数を変化させた場合の結果を図-11に示す。この結果より振動数依存特性についても評価可能であることを確認した。

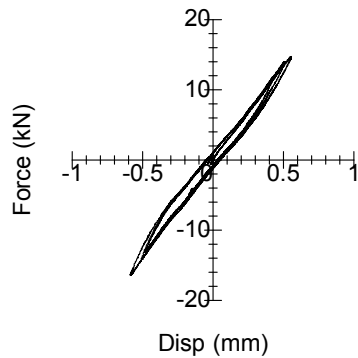


図-16 静的荷重－変位関係 (0.5mm)

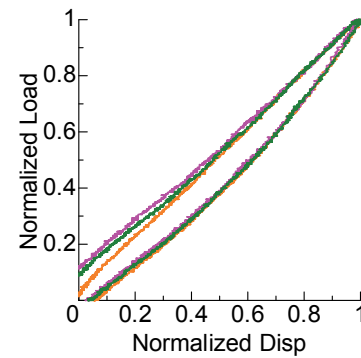
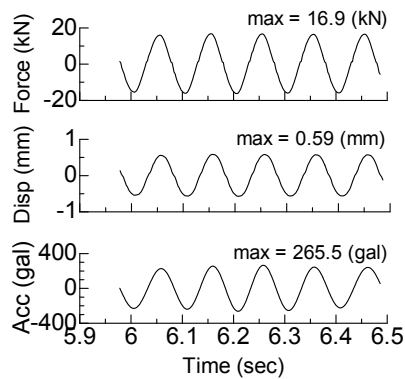
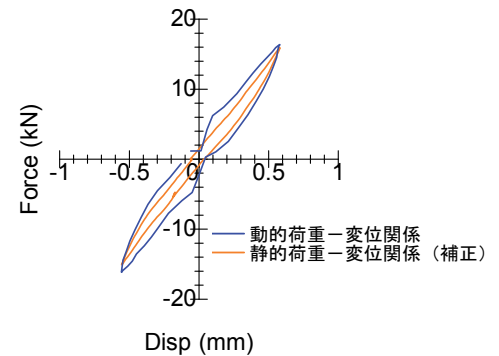


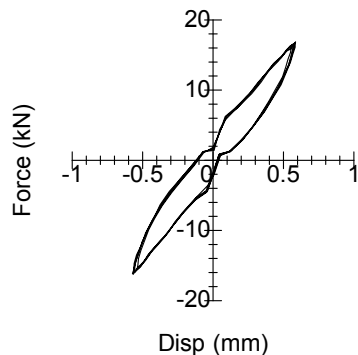
図-18 正規化した静的荷重－変位関係
(目標変位 0.5mm)



(a)時刻歴波形 (载荷力, 変位, 加速度)

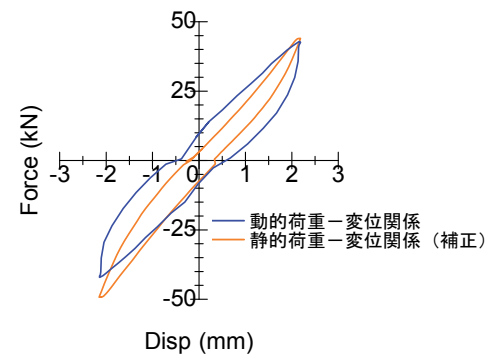


(a) 10Hz, 0.5mm



(b) 荷重－変位関係

図-17 動的結果 (0.5mm, 10Hz)



(b) 10Hz, 2.0mm

図-19 補正した荷重－変位関係の例

お, 計測時のサンプリングは 500Hz とした.

(5) 载荷方法・载荷ケース

载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载荷 (正弦波加振) と静的载荷 (正負交番载荷) 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, 载荷時の最大変位は 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. 動的载荷の加振振動数は, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz の 4 ケースとした. 動的载荷における入力に加振波形の例を図-15 に示す.

5. 载荷試験結果と減衰の算定結果

(1) 試験結果

実験より得られた応答の例として, 図-16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-17(a)に目標最大変位0.5mm, 加振振動数10Hzのケースに

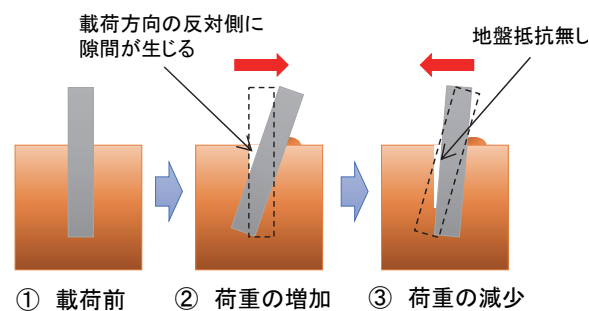
おける、フーチング加速度・変位・ロードセル荷重の時刻歴波形を示す。ここで示す時刻歴波形は、加振開始後6秒程度経過し、波形が落ち着いた状態から5サイクル分を抽出したものである。いずれの波形についても12Hzのローパスフィルタ処理を行ったものである。なお、フィルタ処理は、その他の加振においても、加振振動数の1.2倍の振動数によるローパスフィルタをかけることとした。図-17(b)には、5ループ分の荷重－変位関係を示す。変位がゼロ付近で荷重－変位関係にくびれが生じているが、杭と地盤との間の剥離の影響であると考察している。また、下記で詳細に検討を行うが、動的な荷重－変位関係は、図-16の静的な荷重－変位関係と比較して、ループの面積が大きくなっていることが分かる。

(2) 荷重－変位関係の再整理

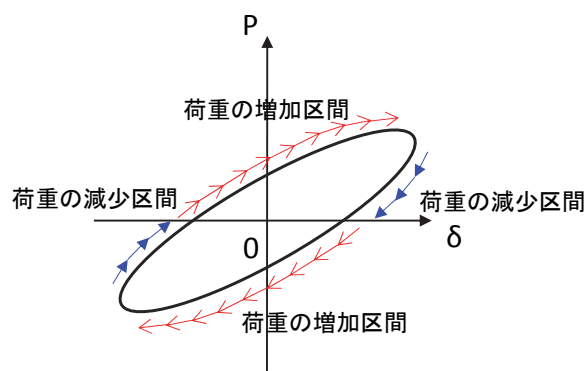
図-16 および図-17 の目標変位を 0.5mm とした場合の動的・静的試験の荷重－変位関係では、実際に得られる変位振幅に違いが生じている。また、詳細に載荷試験結果を見ると、一回の載荷の間でも1ループごとに変位振幅に違いが出ている。これはアクチュエータの性能上やむを得ない結果であるが、動的荷重－変位関係と静的荷重－変位関係の差を計算する上で不都合である。そこで、3章同様に静的載荷試験結果を補正することを考え、最大変位および最大荷重で正規化した荷重－変位関係を算定し、履歴ループ形状の特性を整理することを考えた。目標変位 0.5mm の静的載荷における正方向の半ループ（3ケース分）について重ねた結果を図-18 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-16 および図-17 で示した静的荷重－変位関係を動的載荷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。結果の例を図-19 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。

(3) 載荷試験から減衰を試算する際の留意点

本手法のように杭と地盤の相互作用ばね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。そこで、杭基礎模型の載荷試験結果から減衰の算定を行う場合には、杭と地盤が接する面の振動特性を考慮して減衰の算定を行う。杭と周辺地盤の状態は図-20(a)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



(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-20 減衰力算定のための状態分割

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⁷⁾。このような状態を同一の評価で行うことは微小な変形を扱う本検討では望ましくないため、今回の検討では、図-20(b)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) 減衰力および減衰係数の算定結果

図-19 の補正した静的荷重より各載荷試験に対して提案式における復元力項 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

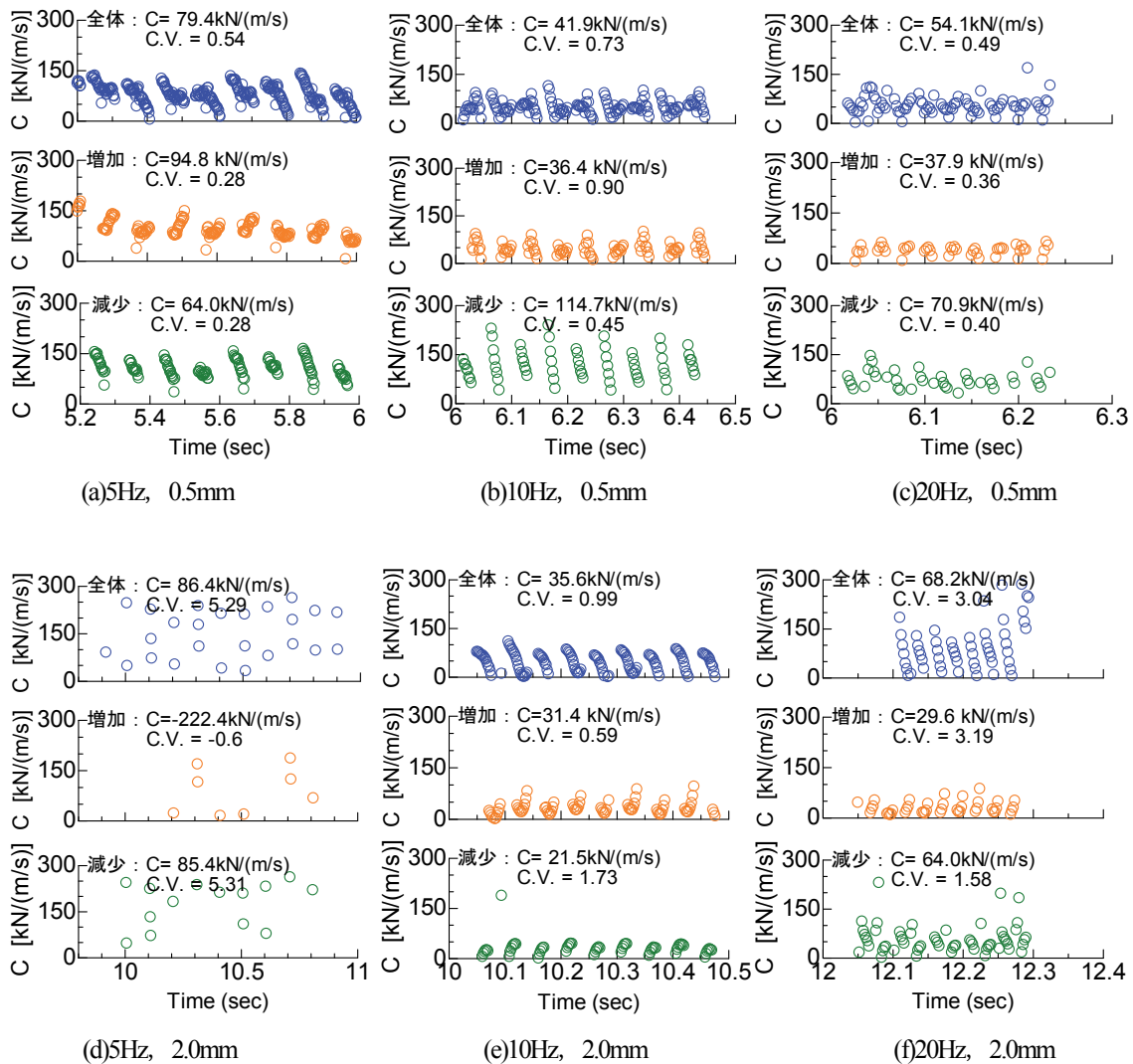


図-21 区間ごとの減衰定数の算定例

た。また、図-20 に示したように、ループ全体で上記の処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-21 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-21 (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-21 (b))、20Hz, 0.5mm の結果 (図-21 (c)) では変動係数の値は 1.0 をい

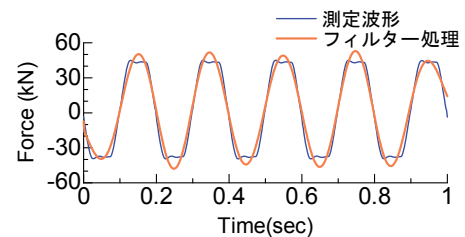
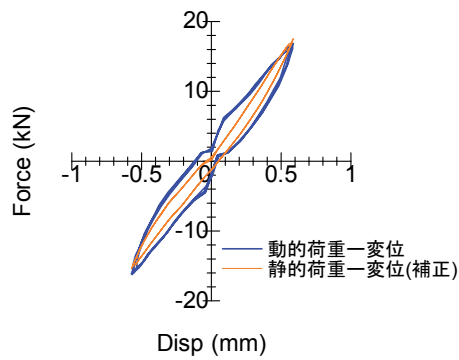
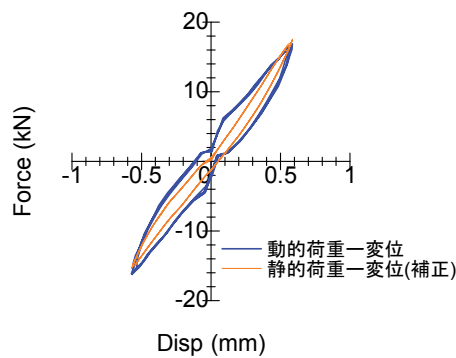


図-22 フィルター処理結果の例

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-22 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-22 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



(a)全体, 荷重増加時 ($m'=0.1t$)



(b)荷重減少時 ($m'=1.2t$)

図-23 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)

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。

(5) 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とき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 $m'=1.2t$ 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-23 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

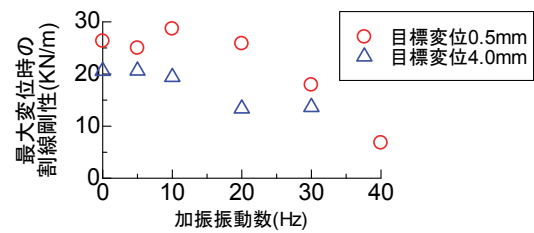
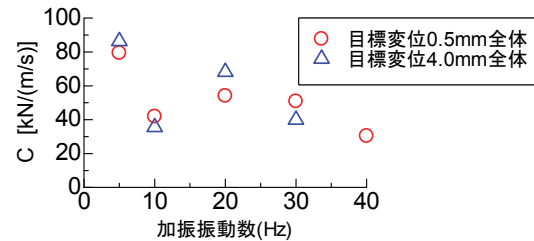
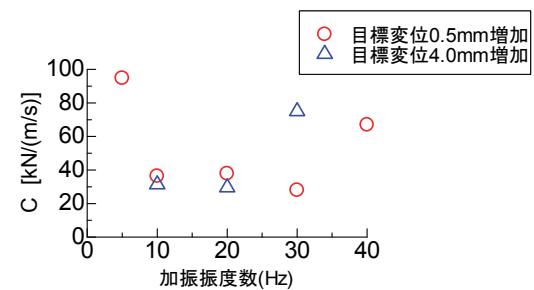


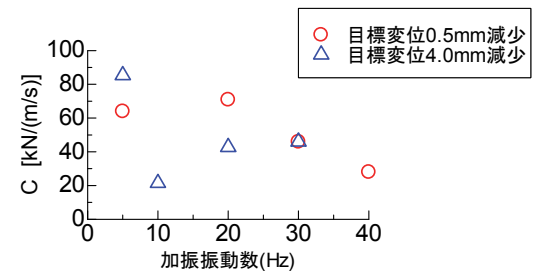
図-24 加振振動数と変位最大時の割線剛性の関係



(a)全体



(b)荷重増加区間



(c)荷重減少区間

図-25 加振振動数と減衰係数の関係

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-24に示す加振振動数と最大変位時の割線剛性の関係、図-25に示す加振振動数と減衰係数の関係が得られた。図-24から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、変位が大きい場合にも減少する傾向が見られた。図-25の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。

7. おわりに

本研究では、地盤の非線形の影響を考慮することを前提に、時々刻々の減衰を評価可能な手法について3次元FEM解析を行い手法の検証を行った後に、杭基礎モデルの減衰の試算を行った。

提案手法を用いて載荷試験結果から減衰を算定した結果、次の4つの考察が得られた。

- ① 杭基礎の減衰の評価手法として、周辺地盤の影響を付加質量として考慮する手法を提案し、本手法による減衰の試算を実施し、手法のある程度の有効性を確認した
- ② 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
- ③ 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
- ④ 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：本研究の一部は国土交通省補助金を受けて実施した。ここに記して、謝意を示す。

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.
- 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：杭基礎モデル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.
- 7) 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.

Experimental Study on Strain Dependency of Radiation Damping of a Pile Foundation

Atsushi HINO, Hiroki MOTOYAMA and Yoshitaka MURONO

The dynamic analysis has been widely adopted to evaluate the response of the structure during an earthquake. For precise simulations, it is essential to determine the damping characters, including the material damping, hysteretic damping and the radiation damping due to the interaction between a pile foundation and a soil. It is generally understood that the radiation damping depends on the strain and frequency of the soil. However, only a few researches are available to evaluate its characteristics quantitatively.

Therefore, the nonlinear behavior of the radiation damping of the pile foundation was investigated by both horizontal loading tests and the FEM analysis, in which the new evaluation method to estimate the radiation damping was proposed. In the proposed method, the same sinusoidal displacements were applied statically and dynamically to the top of the pile foundation. The radiation damping coefficient was then directly evaluated from the difference of their force-displacement hysteresis. Through series of experiments and simulations, nonlinear characteristics of the radiation damping as functions of strain and loading frequency were clarified.