

振動数および振幅を変化させた荷重試験による杭基礎模型の減衰評価 (その2 減衰の試算)

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○本山紘希 室野剛隆
(株)大林組 正会員 藤井達 藤森健史

1. はじめに 耐震設計等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地震応答への影響は大きい。構造物の相互作用により生じる減衰(逸散減衰や地盤の履歴減衰)は振動数依存性および振幅依存性を有し、モデル化が容易ではない。とりわけ、非線形性のある振幅領域において逸散減衰を評価するのは現象の理解・数値解析的な取扱いの両面で難しい問題である。ここでは、最終的に減衰のモデル化を行うことを念頭に、杭基礎と地盤の相互作用により生じる減衰特性を整理することを目的としている。本論文を含む一連の研究において、まず、実際に杭基礎模型を構築して動・静的荷重試験を実施した。荷重試験は剛土槽中の杭基礎模型を用いた試験になっており、厳密な意味で逸散減衰が得られるとは言い難いが、静的荷重試験を用いて評価できる履歴減衰を除いても、減衰効果が表れていることが確認でき、この減衰を広い意味で逸散減衰と解釈している。本研究では、杭基礎模型の動・静的荷重試験で得られたこの逸散減衰について評価することを試みた。なお、模型試験の詳細は、一連の研究における「その1 土槽実験」による(実験概要: 図1)。

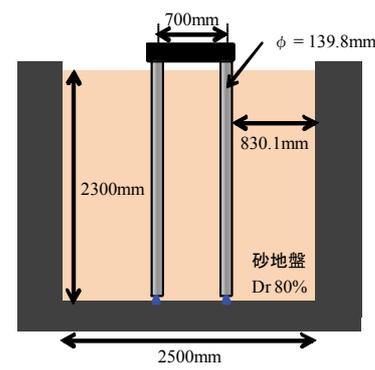


図1 模型実験の概要

2. 減衰評価手法 本研究では減衰評価手法として、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を考案し、使用している。

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

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

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荷重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られる杭頭の加速度・速度・変位応答であり、 $f(t)$ は杭頭に対する動的な荷重を示している。

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²⁾など。本手法は、時刻歴で減衰を評価するため、非線形の影響を直接考慮できる点が特徴となっている。

3. 荷重-変位関係の再整理 図2に目標変位を0.5mmとした場合の動的・静的試験の荷重-変位関係を示した。動的・静的荷重-変位関係で実際に得られる変位振幅に違いが生じている。また、詳細に荷重試験結果を見ると、一回の荷重の間でも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、履歴ループ形状の特性を整理することを考えた。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3に示す。図より振幅レベルに近い場合、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に近い静的な荷重-変位関係を設定できると考えられる。これにより、図2で示した静的荷重-変位関係を動的荷重における振幅に合わせて補正し、荷重-変位関係を

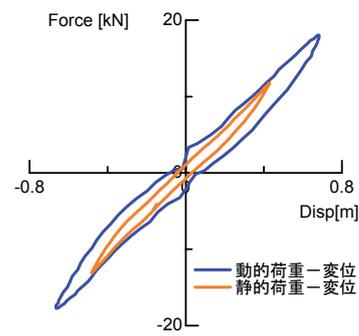


図2 荷重-変位関係の例
(荷重振動数: 5Hz
目標変位: 0.5mm)

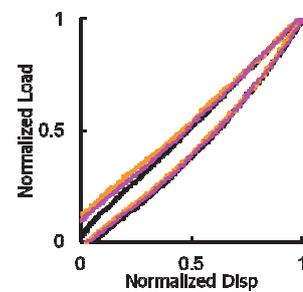


図3 正規化した静的荷重-変位関係
(目標変位 0.5mm)

キーワード 減衰, 逸散減衰, 地盤と杭の相互作用

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 耐震構造 TEL 042-573-7394

再整理した。また、同様の処理を載荷振動数 20Hz, 載荷目標振幅 2.0mm の試験についても実施した。結果を **図 4** 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。

4. 付加質量の考慮による動的荷重-変位関係

図 4 から分かるように、最大変位時(速度がゼロの時)の荷重が動的載荷時と静的載荷時に一致していない。特に、載荷振動数 20Hz, 載荷目標変位 2.0mm のケースでは不一致が顕著である。これは、式(2)における慣性力項 $(m+m')\ddot{x}$ が考慮されていないためである。そこで、最大変位時の荷重-変位関係が静的・動的で一致する $m+m'$ を算定する。**図 4** に示した2ケースについて $m+m'$ を算定した結果、載荷振動数 5Hz のケースでは $m+m'=1.2t$ とした時に荷重-変位関係が一致し、載荷振動数 20Hz のケースでは $m+m'=0.34t$ とした時に荷重-変位関係が一致した。慣性力項を考慮した場合の荷重-変位関係を **図 5** に示す。最大変位時の荷重が一致していることが分かる。なお、仮に基礎の質量 m をフーチングの質量のみであるとすると 0.058t であることから、付加質量 m' として考慮した地盤の体積を見積ることが可能である。Dr=80%の珪砂地盤の密度が $1.9t/m^3$ であるから、杭間隔(0.7m)程度の正方形の土柱の深さで整理すると、載荷振動数 5Hz, 載荷目標変位 0.5mm のケースでは 1.2m, 載荷振動数 20Hz, 載荷目標変位 2.0mm のケースでは 0.3m となる。

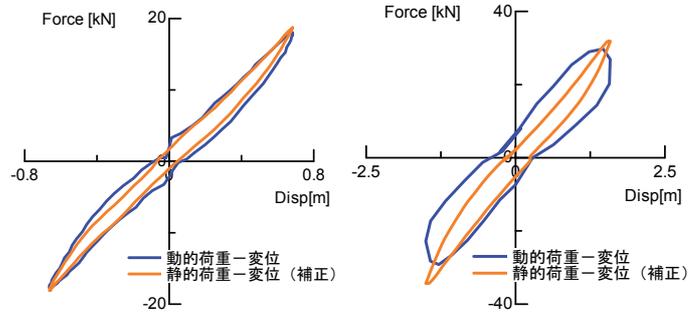
5. 減衰力および減衰係数の算定

図 5 で得られた荷重-変位関係を元に時刻歴の減衰力と減衰係数の算定を行う。2ケースの載荷について、1ループ分の減衰力・減衰係数の算定結果を **図 6**・**図 7** に示す。載荷振動数 5Hz では、算定された減衰係数は速度がゼロになる時刻の周辺や波形の変動が大きい時刻で値がばらつく結果となっているが、波形が落ち着いている部分では概ね一定値が得られている。載荷振動数 20Hz では、サンプリング振動数との兼ね合いと考えられるが、値に変動が見られる結果となった。載荷振動数 20Hz の場合については、より詳細な検討を要するが、ひとまず、算定した結果の速度が最大となる時刻での減衰係数をそれぞれ読み取ると、載荷振動数 5Hz, 載荷目標変位 0.5mm のケースで $c=37.3kN/(m/s)$, 載荷振動数 20Hz, 載荷目標変位 2.0mm のケースで $c=21.2kN/(m/s)$ として結果が得られた。

6. おわりに

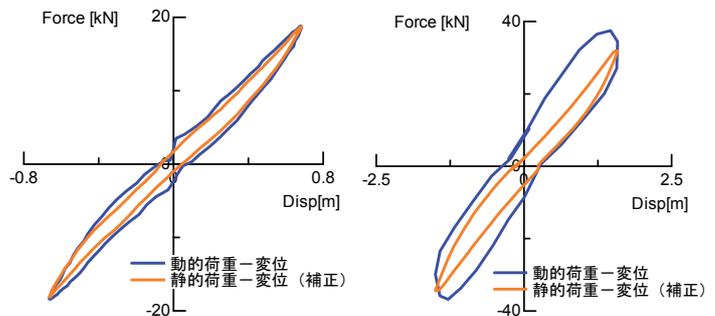
一連の研究により、杭基礎模型における水平方向の動・静的載荷試験による減衰量の算定を試みた。時刻歴のデータから時々刻々の減衰力・減衰係数を算定する手法により、模型実験における減衰力・減衰係数が算定できることを確認した。今後は、実フィールドにおける試験を実施し、逸散減衰についてより実現象に近い状況下での検討を実施する。

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) 小林，八尾：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.



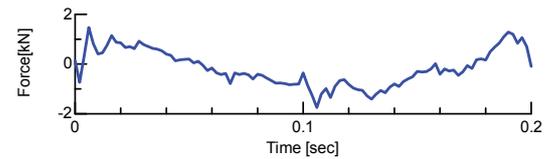
(a) 載荷振動数 5Hz, 目標変位 0.5mm (b) 載荷振動数 20Hz, 目標変位 2.0mm

図 4 補正した荷重-変位関係の例

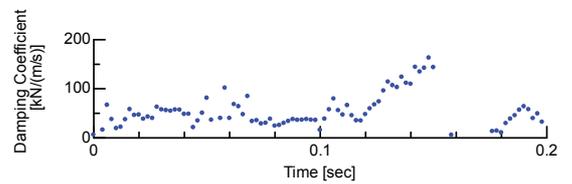


(a) 載荷振動数 5Hz, 目標変位 0.5mm (b) 載荷振動数 20Hz, 目標変位 2.0mm

図 5 慣性力項を考慮した荷重-変位関係の例



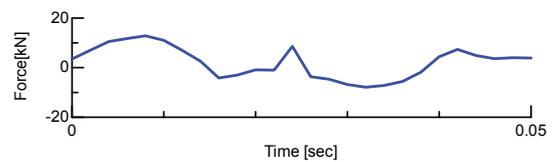
(a) 減衰力



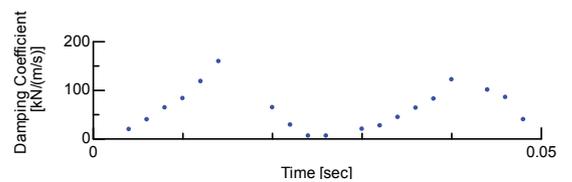
(b) 減衰係数

図 6 減衰力・減衰係数の算定結果

(載荷振動数：5Hz, 目標変位 0.5mm)



(a) 減衰力



(b) 減衰係数

図 7 減衰力・減衰係数の算定結果

(載荷振動数：20Hz, 目標変位 2.0mm)