

◆ 土質及び基礎特集 ◆

杭の地震時鉛直支持力特性に関する実験

大塚雅裕* 福井次郎** 秋田直樹*** 喜多直之****

1. はじめに

近年、杭の鉛直載荷試験方法の多様化が進み、動的な載荷試験の実施例も増えている。近々改正される(社)地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法」ではこの様な背景を受け、従来の押し込み試験、引抜き試験の2つの静的載荷試験法に加えて新たに先端載荷試験、鉛直交番載荷試験、急速載荷試験および衝撃載荷試験の4つの方法が基準化される予定である¹⁾。また試験方法に応じた支持力特性の解釈法に関する研究成果も多数蓄積されてきており、基礎設計技術の高度化につながるものと期待される。

しかし、杭の地震時の動的な挙動についてはまだ十分には解明されておらず、静的な載荷試験から得られた特性値をそのまま耐震設計に用いているのが実状であり、動的な載荷試験を行った場合でも、その結果から静的な特性を導いて設計に用いている。

そこで、筆者らは動的な繰返し軸方向荷重を受ける杭の支持力特性を明らかにし、動的な載荷試験で得られた特性を直接動的設計に適用できるモデルの開発を行うとともに、これまで一般に行われてきた静的載荷試験の結果から精度良く地震時の動的挙動を推計する方法を開発することを目的として研究を行ってきた。これまでに模型杭を用いた各種載荷方法による鉛直載荷実験を実施しており、その結果を報告する。

2. 実験 I

2.1 実験概要

幅 800mm、奥行 800mm、深さ 1,200mm の土槽に径 40mm、長さ 850mm の杭 1 本を設置し、鉛直載荷実験を行った。図-1 に地盤条件、杭諸元および計測項目等を示す。

地盤は実験ケース毎に作成した。地盤材料には乾燥珪砂を用い、杭をジャッキにぶら下げた状態で砂を土槽に投入し、バイブレータにより締め固

めた。十分な周面抵抗力が発揮されるように杭材には鋼に比べヤング係数の小さい真鍮管を使用し、杭周面には地盤材料と同じ珪砂を接着した。また、地盤上に鉄板を敷設し、2.5kPa の上載圧を加えた。

載荷の種類は、単調押し込み、単調引抜き、静的と考えられる低速度(一定速度)の正負繰返し載荷(以下、「静的交番載荷」と呼ぶ)、地震時を想定して周波数を一定とした正負繰返し載荷(以下、「動的交番載荷」と呼ぶ)および急速載荷(杭体中を伝わるひずみの波動の影響が無視できる動的な載荷)の5種類である。押し込みおよび引抜きは従来一般に行われている載荷方法であり、これらを基本にして、主として正負繰返し荷重に対する支持力特性の分析を2種類の交番載荷の結果により、載荷速度に依存する動的効果の分析を急速載荷の結果により行うものである。実験ケースを表-1 に示す。

載荷は全て連続載荷方式(荷重を保持せずに連続的に荷重増加させる載荷方式)とし、急速載



図-1 実験 I のケース

表-1 実験ケース

ケース	種類	制御方法
I-1	単調押し込み	載荷速度 0.05mm/s
I-2	単調押し込み	載荷速度 0.05mm/s
I-3	静的交番載荷	載荷速度 0.05mm/s 初期変位 0.75mm、3サイクル、 6ステップ(±0.5, 1, 2, 3, 4, 8mm)
I-4	動的交番載荷	周波数 1Hz、その他はI-3と同様
I-5	急速載荷	押し込みの極限荷重の 80% 最大載荷速度 164mm/s
I-5'	急速載荷	押し込みの極限荷重の 40, 80% 最大載荷速度 284mm/s

Experiments on Vertical Bearing Capacity of Piles during Earthquakes

荷では荷重を、その他の載荷方法では変位を制御した。交番載荷に関しては、死荷重状態を想定して単調押し込みおよび引抜き時の極限荷重の中間値が振幅の中心となるように初期変位を与えた。

2.2 実験結果の概要

図-2に各載荷方法による杭頭荷重-杭頭変位量関係を示す。なお、本稿では荷重、変位量とも押し込み側の符号を正としている。

2.2.1 単調押し込みおよび引抜き

単調押し込みおよび引抜きの極限荷重は、それぞれ477N、-194Nである。ここで、極限荷重とは、荷重-変位量曲線が変位量軸にほぼ平行になる時の荷重とするが、押し込み側については杭頭変位量が杭径の10%に達したときの荷重とした。

両載荷ともに初期の段階で明瞭な折れ点が見られる。これは、杭が剛体として挙動し、ほぼ同時に

全ての周面摩擦が切れてしまったためと考えられる。なお、この折れ点以降も周面抵抗力が増加していくのがこの地盤の特徴である。

2.2.2 交番載荷

交番載荷(ケースI-3およびI-4)について、押し込み側は第3ステップまではケースI-1の曲線を下回る履歴となっているが、各ステップにおいてサイクル数が進むごとに押し込み側の抵抗力は増加し、4ステップ目以降はI-1の曲線を超えて大きな抵抗力が発揮されている。この理由として、杭引抜き時に杭先端部の浮上り部分に周面の砂が流れ込んだ状態で繰り返し荷重を受け、先端地盤が締め固められ、先端抵抗力が増加したことが考えられる。

一方、引抜き側についてはケースI-2の曲線と大きく異なった履歴を示す。2ステップ目以降、各サイクルの最大引抜き荷重は徐々に低下していく傾向が見られ、ケースI-2の残留引抜き力(極限荷重以降の引抜き力)よりも小さくなっている。

交番載荷の押し込み側と引抜き側の差は先端抵抗力の非対称性(引抜き側に抵抗しない)だけではなく、周面抵抗力の履歴特性にも依存している。図-3にケースI-1、2および3の周面抵抗力-変位量関係を示す。ここで、周面抵抗力は、杭先端付近で計測したひずみから求めた軸力を杭先端抵抗力とし、これを杭頭荷重から差し引いて求めている。交番載荷の押し込み側は単調押し込みとほぼ同等の周面抵抗力が発揮されているのに対し、引抜き側は交番載荷と単調引抜きで抵抗特性が異なる。これは、繰り返し荷重を受けて杭近傍の地盤が乱されても、押し込み側では杭近傍の地盤が下方に移動し圧縮変形することにより周面せん断抵抗力が回復するのに対し、引抜き側では杭近傍の地盤が上方に移動しても圧縮変形せず、周面せん断抵抗力が回復しないためと考えられる。このような特性は後述する実験IIの地表面付近の周面抵抗においても確認されている。

載荷速度の影響については、それほど顕著な差

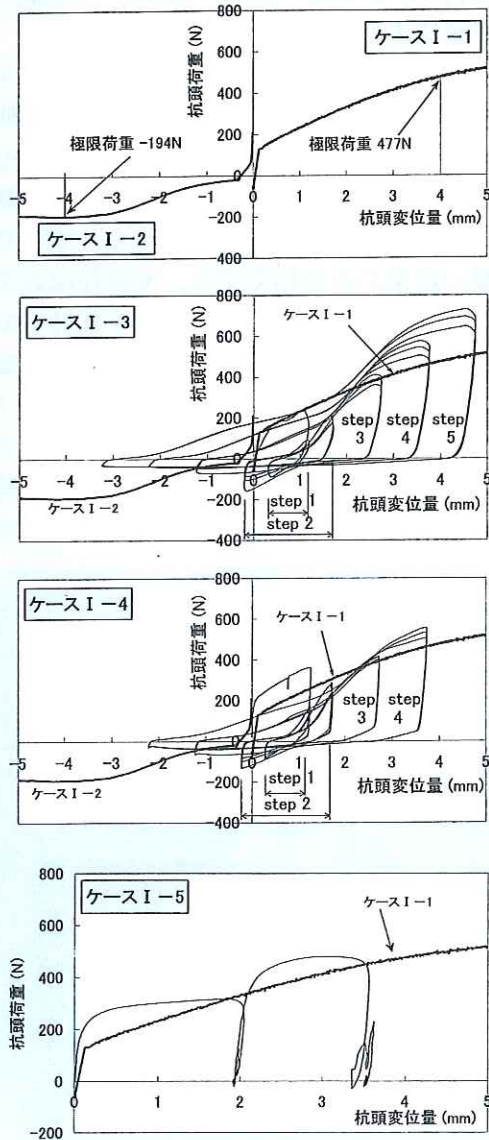


図-2 杭頭荷重-杭頭変位量関係 (実験 I)

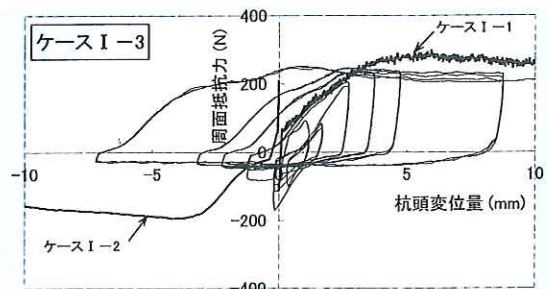


図-3 周面抵抗力特性 (ケース I-3)

が見られない。ケース I-3 と I-4 とでは初期の荷重状態の若干の差により、最初のサイクルの曲線に差があるものの、その後のサイクルではほぼ同じ履歴性状を示している。押し込み荷重、引抜き荷重それぞれの除荷時の勾配が若干異なる点やケース I-4 で押し込み荷重の除荷時に先端軸力が残留する点など多少の違いが現れているが、履歴特性を評価するにあたり顕著な差であるとは言い難い。

2.2.3 急速載荷

急速載荷では、載荷速度や加速度に依存する抵抗力が発揮されるため、ケース I-5 では図-2 に示すようにケース I-1 よりも大きな抵抗力が発揮されている。

急速載荷試験で確認される動的支持力特性として、載荷速度に依存する減衰抵抗と杭体および地盤の持つ慣性抵抗がある。載荷速度や加速度が支持力特性に与える影響を分析するため、第 1 サイクルの杭の挙動を 1 質点系の剛体振動と仮定し、式 (1) でモデル化して検討を行った。

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

ここで、 m は質量であるが、杭体の質量の他に地盤の持つ加速度に依存する抵抗を付加質量として考慮している。 c および $f(x)$ はそれぞれ地盤の減衰係数および静的な抵抗力、 $p(t)$ は杭頭荷重の時刻歴である。

静的な抵抗力 $f(x)$ には押し込み試験から推定したバイリニア型の特性を与えた。その上で c を適切に設定することで、概ね杭の挙動 (変位、速度および加速度) が再現できた。上記解析の結果得られた m 、 c 、 $f(x)$ に対し式 (2) により算出される減衰定数 h を図-4 に示す。

$$h = c / (2\sqrt{mk}) \quad (2)$$

ここに、 $k = f(x)/x$

図-4 にはケース I-5 よりも載荷速度が大きい急速載荷を行ったケース (I-5') および、ケース I-3

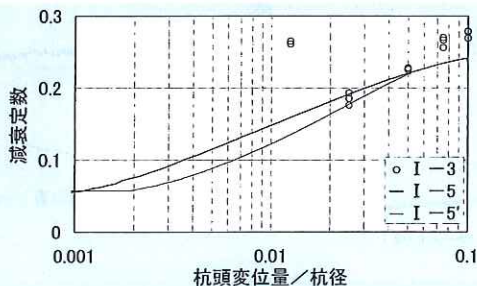


図-4 減衰定数

に対し等価線形化法による等価減衰定数 (算出方法は 3.2.2 参照) を求めた結果も示す。値に若干ばらつきがあるものの、減衰定数は載荷方法にそれほど依存していないようである。すなわち、急速載荷試験の結果を分析することで、地震時の履歴減衰 (等価粘性減衰) が予測できる可能性があるということである。これについては、後述する実験 II の結果の分析を含め今後詳細に検討する予定である。

3. 実験 II

実験 I ではひずみ計測点が少なかったために周面抵抗力特性が十分分析できなかったなどの理由から、模型規模や地盤条件、ひずみ計測点数等を変更して再度同様の実験を行った。

3.1 実験概要

幅 3.5m、奥行き 3.5m、深さ 3.0m の実験土槽に模型杭 16 本を建て込み、実験 I と同様に各種載荷方法により単杭の載荷実験を行った。

使用した模型杭および地盤の諸元等を図-5 に示す。本実験では実験 I で行った杭表面や上載圧の処理を行っていない。地盤材料には鹿島砂を使用し、湿潤状態および飽和状態の 2 種類の地盤で実験を行った。なお、紙面の都合から、本報では湿潤地盤の結果のみを紹介する。地盤作成および杭設置は、あらかじめ建て込んだ杭を保持材で固定した後、相対密度を管理して層厚 300mm 毎にタンパ (人力) により砂を突き固める方法とした。

載荷の種類は、実験 I と同じである。表-2 に実験ケースの一覧を示す。載荷は全て連続載荷方式とし、基本的に変位制御で行った。また、実験の

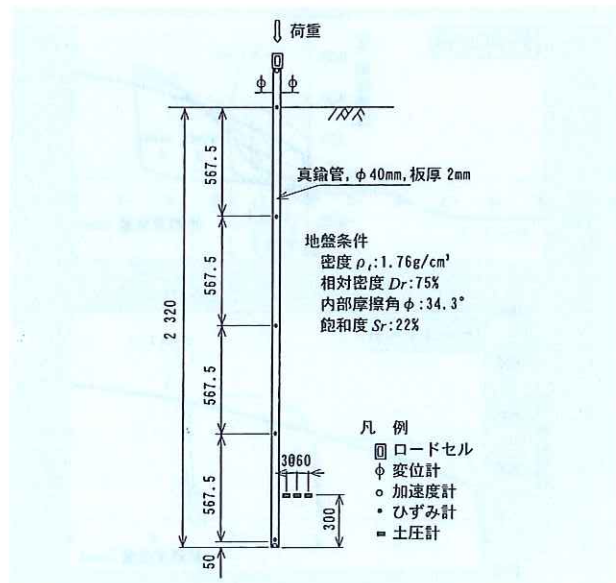


図-5 実験 II の概要

表-2 実験ケース

ケース	種類	制御方法
II-1	単調、多サイクル押込み	載荷速度 0.05mm/s
II-2	単調引抜き	載荷速度 0.05mm/s
II-3	静的交番載荷	載荷速度 0.05mm/s 3サイクル、6ステップ(±0.5, 1, 2, 3, 4, 8mm)
II-3'	静的交番載荷	載荷速度 0.05mm/s 3サイクル、9ステップ(±0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4mm)
II-4	動的交番載荷	周波数 1Hz、その他はII-3と同様
II-4'	動的交番載荷	周波数 1Hz、その他はII-3'と同様
II-5	急速載荷	載荷速度 150mm/s 6ステップ(4, 8, 12, 16, 20mm)

再現性を確認するため、載荷の種類毎に複数本の載荷を行った。

計測は、図-5に示すように杭頭の荷重および変位、杭体ひずみ、杭頭および杭先端の加速度の他に、ケースII-3、II-4およびII-5については杭周辺地盤の鉛直方向土圧変動について行った。

3.2 実験結果の概要

図-6に各載荷方法による杭頭荷重-杭頭変位量関係を示す。

3.2.1 単調押込みおよび引抜き

ケースII-1およびII-2の極限荷重はそれぞれ4.0kN、-3.7kNである。ケースII-1には載荷の途中で除荷載荷を繰り返すケース(多サイクル載荷)も参考に示している。単調載荷と多サイクル載荷による特性に顕著な差が見られないため、以降の検討では単調載荷のみを用いた。

3.2.2 交番載荷

本実験(ケースII-3、II-4)では、実験Iとは異なり、引抜き側の抵抗と同様の特性が押込み側にも見られた。サイクル数が増すにつれて押込み側および引抜き側の抵抗力はそれぞれケースII-1、II-2の曲線から乖離していく様子が見られる。これは、一方向載荷により求めていたこれまでの極限支持力では、実際の地震時に正負繰り返し荷重を受ける場合には過大評価する可能性があることを示唆している。なお、本実験は杭長-杭径比が非常に大きく、周面抵抗力の特性は図-6の履歴曲線とほぼ一致する。

また、先端抵抗力特性については、図-7にケースII-4の先端抵抗力-杭頭変位量関係を示すが、各ステップの2サイクル目以降はほとんど先端抵抗が発揮されておらず、実験Iのようにサイクルが増すにつれて先端抵抗力が増大する傾向は見ら

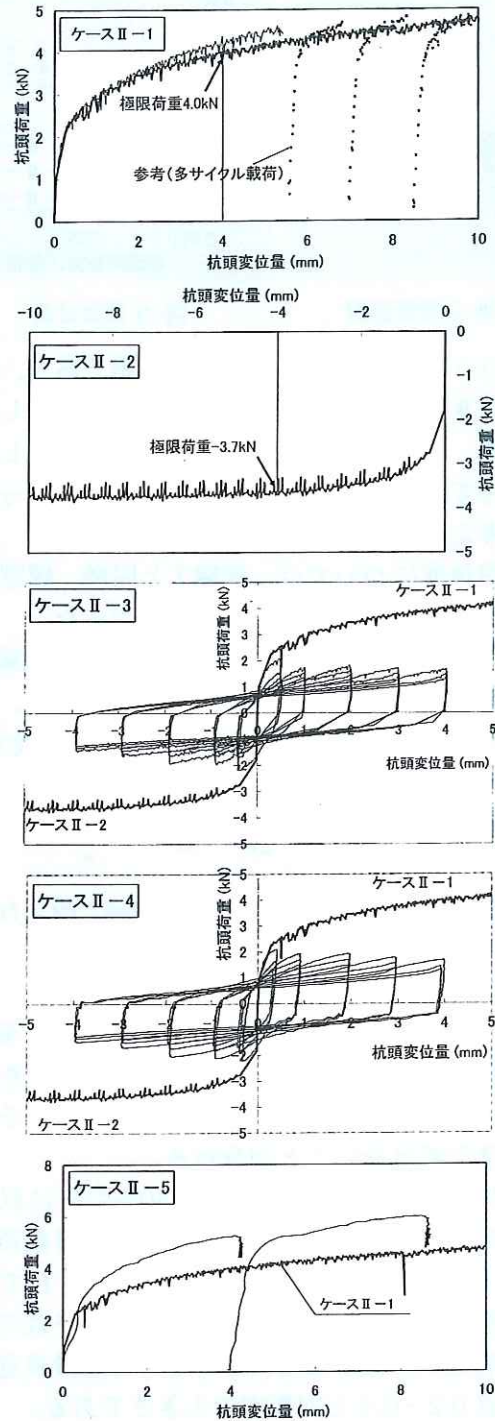


図-6 杭頭荷重-杭頭変位量関係(実験II)

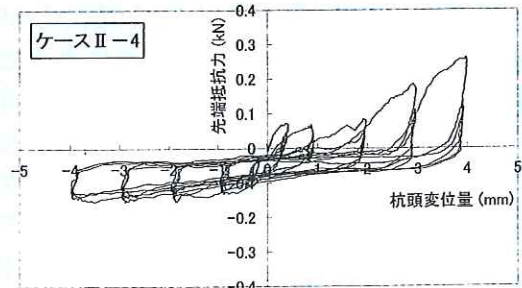


図-7 先端抵抗力-変位量関係

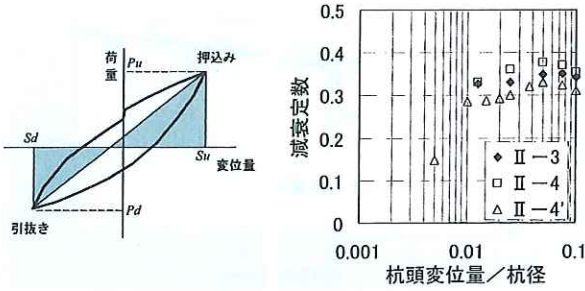


図-8 履歴曲線

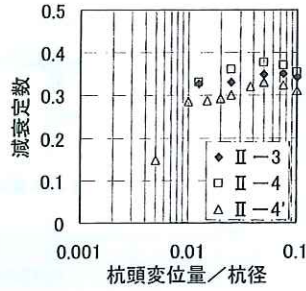


図-9 減衰定数

れない。本実験では地盤が湿潤状態であり、杭先端が浮き上がった状態でも孔壁がほぼ安定していたため、先端への砂の流入が少なく繰り返し载荷によって地盤が締め固められることがなかったものと考えられる。

载荷速度については、実験 I と同様、履歴性状にそれほど影響を与えない結果となった。

ここで、交番载荷の各サイクルにおける減衰定数を等価線形化法により求め比較を行った。各サイクルの減衰定数 h_c を式 (3) のように定義する。

$$h_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (3)$$

ここに、 ΔW : 図-8 の履歴曲線で囲まれる部分の面積

W : 図-8 の着色部の面積

ケース II-3、II-4 および II-4' について求めた減衰定数と杭頭変位量-杭径比との関係を図-9 に示す。この図からも動的交番と静的交番にそれほど有意な差はないことが分かる。

変位量の増大に応じて 30~40% の値に収束する傾向が伺える。この値は、既往の交番载荷試験データについて分析した文献²⁾ に示されている 30% 前後の値や、道路橋示方書³⁾ で示されている基礎構造が非線形域に入る場合の等価減衰定数の参考値 0.2~0.4 と同程度の大きさである。

3.2.3 急速载荷

図-6 に示す荷重-変位量関係を見ると、実験 I と同様にケース II-1 を上回る抵抗力が発揮されている。しかし、実験データによると、変位量が 3~4mm、7~8mm の領域では载荷初期 (0~3mm、4~7mm) に比べ杭体の速度や加速度は大きく低下しており、この領域におけるケース II-1 との差が生じている原因は解明できていない。実験 I の時より杭が複雑に挙動しているものと思われ、このケースの結果の詳細についてはさらに分析および検討を進めた上で別の機会に

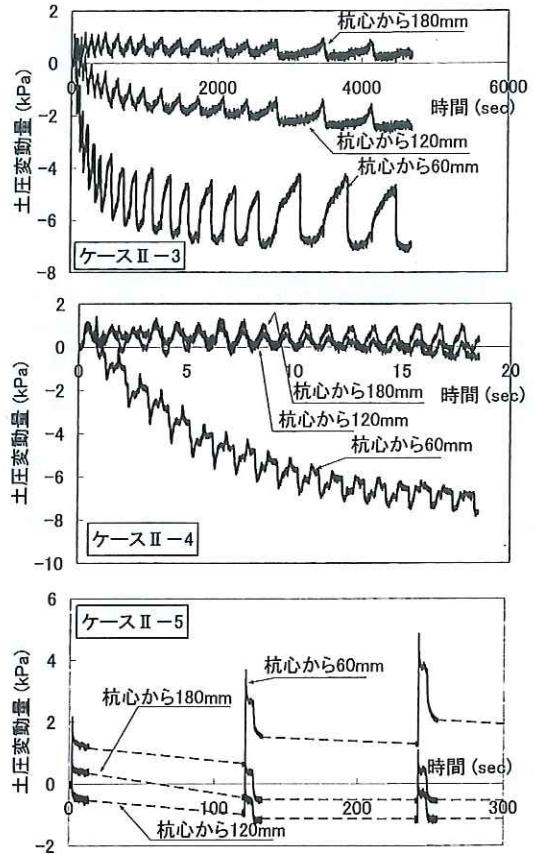


図-10 杭周辺地盤の土圧変動

報告したい。

3.2.4 载荷方法の違いによる土圧変動の差

図-10 に各ケースの土圧変動量を示す。

急速载荷では杭から最も近い計測点の土圧が载荷とともに上昇しているのに対し交番载荷の両ケースでは逆に低下している。これは、一方向の载荷ではサイクルに応じて抵抗力が低下しないのに対し、交番载荷のサイクルが進むにつれて抵抗力が低下する現象に対応している。

その他の計測点については各载荷方法により傾向が異なっており、载荷速度が土圧変動の影響範囲に関係している可能性がある。

4. 結果のまとめ

4.1 各種载荷方式による支持力特性の違い

これまでの実験結果から载荷方法による特性を以下のように整理した。

(1) 一方向载荷と交番载荷

単調 (多サイクル) 押し込み、単調引抜きによる一方向载荷と押し込み・引抜きの交番载荷では抵抗力の保持という面で大きな差が現れた。実際に载荷試験を行うにあたって、地震時の杭の挙動に近い载荷を行わないと、想定する条件で

の支持力特性が得られない可能性がある。

(2) 静的載荷と動的載荷

速度の異なる2種類の交番載荷において、結果に顕著な差が現れなかった。その原因の1つとして粘性土地盤に比べ砂質土地盤では載荷速度に依存する抵抗が小さいことが挙げられる。実際の載荷試験においても、粘性の小さい地盤条件の場合には、地震時の杭の挙動を静的な交番載荷試験で比較的精度よく推計できるのではないかと考えられる。

(3) 急速載荷

実験Ⅰの急速載荷の結果について分析して得られた減衰定数は、交番載荷の等価減衰定数と比較的よく一致した。実験Ⅱについては、結果に解明できない点がある。さらに詳細な分析を行い、これを解明した上で、急速載荷試験および交番載荷試験から得られる減衰特性の関連について検証していきたいと考えている。

4.2 地震時支持力特性

地震時の杭の挙動に近い動的交番載荷実験の結果から、地震時の鉛直支持力に関する以下の特性が確認された。

(1) 実験Ⅱでは、サイクルを重ねるごとに周面抵抗力が徐々に低下した。これは、動的解析で水平方向の相互作用バネとしてよく用いられるHardin-Drnevich (H-D) モデル(図-11 参照)のように履歴曲線が想定した骨格曲線に向かうとしたモデルでは表現できない特性であり、

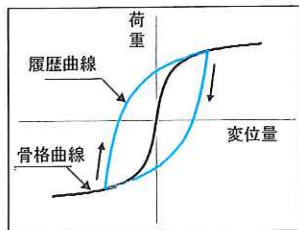


図-11 H-D モデル

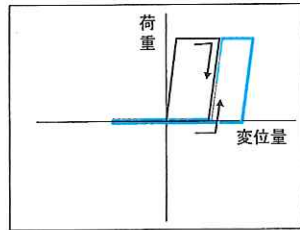


図-12 スリップ型モデル

新しいモデルを検討する必要がある。

(2) 図-7に示した先端支持力特性については、乾燥砂地盤の場合を除いて一度与えられた変位より小さな変位領域においてほとんど抵抗力が発揮されず、引抜き時に抵抗を有しないスリップ型モデル(図-12参照)で表現できると考えられる。

5. おわりに

地震時の杭の動的鉛直支持力特性を把握し、動的解析のためのモデル化を検討するため、模型杭を用いた各種載荷方式による載荷実験を実施した。その結果、杭の周面抵抗力特性について、従来動的解析において一般的に用いられていたモデルでは表現できない挙動が確認された。また、載荷方法(載荷速度)による周辺地盤内の土圧分布の違いなども確認され、各種方法の載荷試験から得られる支持力特性の違いを評価する1つの材料になるものと思われる。

今回、これまでの実験結果の概要を紹介したが、今後、基礎の地震時挙動を適切に表現できるモデルを構築し基礎の設計への影響を検討するとともに、実際に行われている各種載荷試験の結果から精度良く地震時挙動を推計する方法の検討を進めていく予定である。

最後に、実験Ⅰの実施にあたり京都大学大学院の木村亮助教授には多くの助言をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会(基準部):地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法」の改正案について,土と基礎, pp.67-84, 1999.12
- 2) 矢島淳二、鈴木康嗣、斎藤正人:杭の鉛直交番載荷試験による鉛直履歴特性の評価,第36回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1551-1552, 2001.6
- 3) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12

大塚雅裕*



独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎
チーム主任研究員
Masahiro OHTSUKA

福井次郎**



同 構造物研究グループ
基礎チーム上席研究員
Jiro FUKUI

秋田直樹***



国土交通省関東地方整備
局長野国道工事事務所工
務課設計係
(前 構造物研究グルー
プ基礎チーム研究員)
Naoki AKITA

喜多直之****



同 構造物研究グループ
基礎チーム交流研究員
Naoyuki KITA