

III-11 基礎の地震時支持力特性の新しい評価方法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：基礎チーム

研究担当者：福井 次郎、大塚 雅裕、

秋田 直之、野々村佳哲

【要旨】

杭の地震時支持力特性を把握することおよび、従来の杭の静的載荷試験により得られる支持力特性から地震時の動的支持力を評価する方法を検討することを目的として、各種の載荷方法による模型杭の載荷実験を行った。また、実験で得られた支持力特性が杭基礎の耐力にどのように影響するかの解析的検討を行った。

その結果、一般的に行われている押込み試験により得られる周面抵抗力特性に対し、正負交番荷重を受ける杭の周面抵抗力は大きく低下することや、急速載荷試験より低い載荷速度においても比較的大きな動的抵抗力が発揮されるなどの特性が確認され、さらに前者の特性については基礎の耐力に大きく影響することがわかった。

キーワード：杭基礎、動的支持力特性、杭の鉛直載荷試験、正負交番載荷、速度効果

1. はじめに

現行の杭基礎の設計では、地震時の杭の鉛直支持力特性は押込み試験や引抜き試験などの静的な一方荷重による鉛直載荷試験の結果に基づいて評価されているが、地震時には荷重が正負繰返しであることや荷重速度を持つことより、それらの試験では評価されない動的な効果が表れると考えられる。しかし、地震時の杭の鉛直支持力特性は、基礎の動態観測データや地震時を再現した荷重による載荷試験例が無いことから、その実態が不明である。このため、最近実績が増えてきた動的な載荷試験を実施した場合でも設計では動的な効果を考慮せず、静的な支持力として評価される。

本課題は、地震時の杭の鉛直支持力特性を解明するとともに、各種載荷方法により実施されている載荷試験より得られる支持力特性から地震時の支持力特性を推定する方法を検討するものであり、同一の模型地盤内に複数の杭を配置して異なる載荷方法による鉛直載荷試験を実施し、得られる支持力特性の違いを調べた。また、実験により確認された支持力特性に対し、杭基礎の地震時荷重に対する設計への影響について解析的な検討を行った。

2. 研究方法

2.1 模型杭の鉛直載荷実験

従来の杭の載荷試験で得られた支持力特性から地震時の支持力特性を推定する方法を検討することを

目的として複数の異なる載荷方法による模型杭の鉛直載荷実験を実施した。

実験を行うにあたり、載荷方法による支持力特性の差異を確認するためには、同じ地盤条件で多くの載荷方法による載荷試験の実施が必要となる。そこでまず、実験土槽内に小型の模型杭を多数配置し、各種載荷方法による載荷試験を実施して、異なる載荷方法により得られる支持力特性の違いを調べた。次に、得られた特性のうち設計に大きな影響を与えらると思われるものについて、同一土槽内に大型の模型杭を数本配置して異種載荷方法による載荷試験を行い、より詳細なデータを収集するという手順で実験を行った。

2.1.1 小型模型杭の鉛直載荷実験

幅および奥行きが 3.5m、深さが 3.0m の土槽内に鹿島砂を使用して地盤を作成した。本実験は、各種載荷方法により得られる支持力特性の違いを調べるために、また、模型の規模が小さく、結果のばらつきが予想されることから、再現性を確認することも目的として、16 本数の模型杭を同一作成地盤内に設置して試験を行った（写真-2.1）。

地盤は、層厚 30cm 毎に人力による締め固めを行い、10 層を積み重ねて作成した（最上層は 20cm で全層厚 2.9m）。目標とする相対密度は 70%とした。

杭先端レベルまで地盤を作成した後、杭はあらかじめ保持材により固定し、その後に杭周辺の地盤を造成した。各杭は、杭間隔 70cm 以上を確保して配

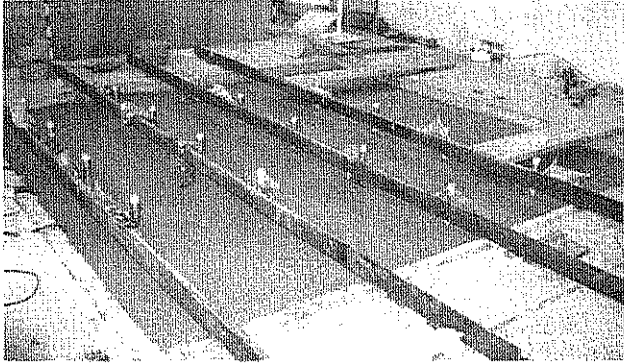


写真-2.1 模型杭配置状況

表-2.1 試験ケース

ケース	種類	載荷速度	制御方法
1-1	押し込み	0.05mm/s	35mmまで単調押し込み
1-2	引抜き	0.05mm/s	35mmまで単調引抜き
1-3	静的交番載荷1	0.05mm/s	3サイクル×6ステップ ±0.5, 1, 2, 3, 4, 8mm
1-4	静的交番載荷2	0.05mm/s	5サイクル×9ステップ ±0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4mm
1-5	動的交番載荷1	2~32mm/s (1Hz)	3サイクル×6ステップ ±0.5, 1, 2, 3, 4, 8mm
1-6	動的交番載荷2	2~20mm/s (1Hz)	5サイクル×10ステップ ±0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5mm
1-7	急速載荷	150mm/s	1サイクル×5ステップ 4, 8, 12, 16, 20mm

置した。

地盤材料は鹿島砂で、内部摩擦角は34.3度、粘着力は1.57kN/m²である。

模型杭には、径40mm、長さ2.5m(根入れ長2.32m)、肉厚2mmの真鍮管を使用した。杭の軸方向剛性EAは26,800kNである。杭先端は閉塞とした。

載荷は連続載荷方式を、制御方法は変位制御を基本とした。ここでいう連続載荷方式とは、荷重を保持せず荷重を連続的に載荷させる方式のことを言う。載荷の種類は表-2.1のとおりである。

計測項目は、全ての杭を対象に杭頭荷重、杭頭変位量、杭体ひずみ5断面(各断面2点)とし、急速載荷については杭頭および杭先端の加速度の計測も実施した。また、16本配置したうちの3本(静的交番、動的交番、急速載荷それぞれ1本ずつ)については、杭先端近傍の鉛直方向の土圧変動を計測した。図-2.1に計測機器の配置状況を示す。

2. 1. 2 大型模型杭の鉛直載荷実験

実験結果の詳細は3章で示すが、小型模型実験により確認された特性のうち、交番載荷による支持力特性が従来の載荷試験方法による特性とは異なる結果であったこと、比較的遅い載荷速度でも大きな抵抗力が確認されたことに着目して3種類の載荷方

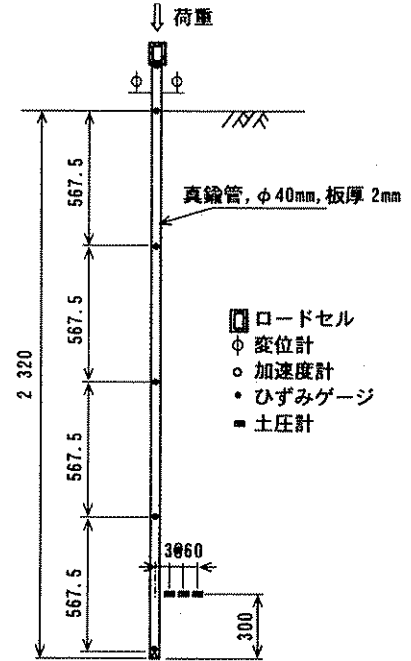


図-2.1 計測機器の配置

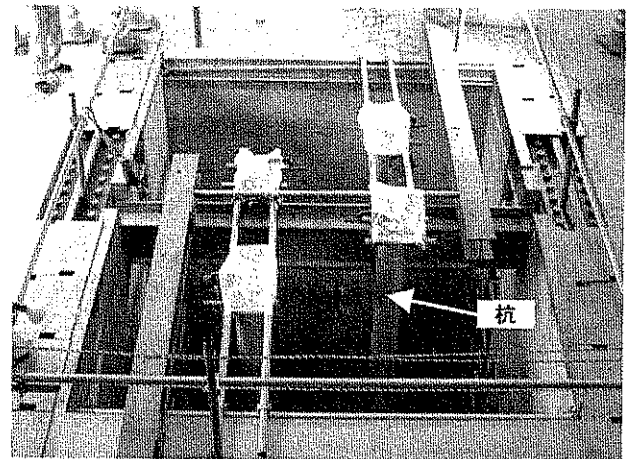


写真-2.2 大型模型実験に使用した土槽

法による大型模型杭の載荷実験を行った。

実験は、4本の大型模型杭(根入れ長8m)を幅4m、奥行き3m、深さ11mの土槽(写真-2.2)に設置して行った。

地盤材料には小型模型実験と同様に鹿島砂を使用し、地盤の作成についても層厚30cm毎に人力による締め固めを行う方法とした。目標とする相対密度を土槽底面から杭先端より上1層まで(下層部)は80%、それ以上(上層部)は40%とした。本地盤の三軸試験結果は表-2.2のとおりである。

杭先端レベルまで地盤を作成した後、杭が鉛直になるように杭頭保持材により固定し、その後に杭周

辺の地盤を造成した。各杭は、杭間隔 120cm 以上を確保して配置した。

模型杭には、径 200mm、長さ 8.5m (根入れ長 8m)、肉厚 5mm のアルミニウム管を使用した。杭の軸方向剛性は 214,000kN である。杭先端は鋼板により閉塞した。

荷重の種類と荷重方法は表-2.3 のとおりである。なお、本実験は小型模型実験により明らかとなった押込み荷重と交番荷重による支持力特性の違いを詳細に調べることを目的の一つとしており、交番荷重は静的に荷重している。両試験は荷重制御で開始し、変位が急増し始めた段階で変位制御に切り替えた。

急速荷重試験は、杭頭にクッション材を載せ、そこに重錘を落下させる方法により荷重を行った (写真-2.3)。クッション材にはウレタンゴムを使用し、クッション材の厚さにより荷重時間、また重錘の質量および落下高さにより荷重の大きさを調整した。表-2.3 に示した急速荷重における荷重エネルギーとは、重錘の重量と落下高さの積であり、重錘は質量 120kg および 300kg の 2 種類を使用した。

計測は、全ての杭を対象に杭頭荷重、杭頭変位量、杭体ひずみ 9 断面 (各断面 4 点)、鉛直方向の土圧について行った。急速荷重試験については、杭頭および杭先端の加速度も計測した。図-2.2 に計測機器の配置状況を示す。

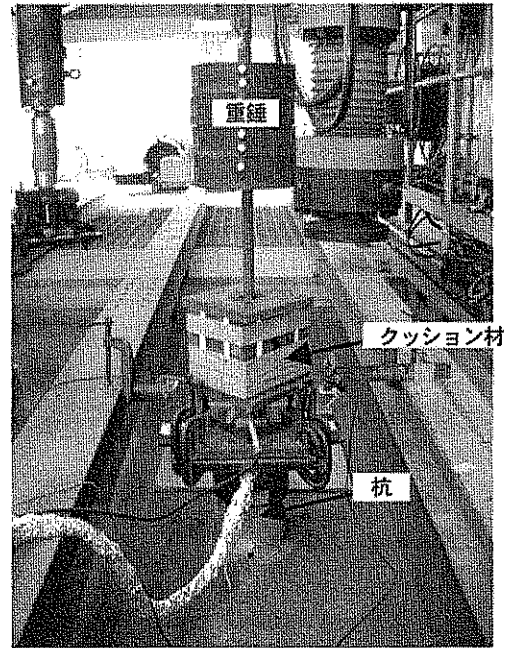


写真-2.3 急速荷重試験装置

表-2.2 三軸試験結果

	試験条件	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
上層部	CD	4.2	34.3
下層部	CD	3.6	37.5

表-2.3 荷重ケース一覧

ケース	荷重方法	荷重速度・時間	制御方法
2-1	押込み	荷重制御 : 4kN/min ^{*)} 変位制御 : 1mm/min ^{*)}	荷重 : 8、16、24、32、40kN (1 サイクル) 変位 : 5、10、15、20、40mm (1 サイクル)
2-2	静的交番荷重	荷重制御 : 4kN/min 変位制御 : 1mm/min	荷重 : ±8、16、24kN (1 サイクル) 変位 : ±5、10mm (1 サイクル) ±15、20mm (3 サイクル)
2-3	急速荷重	約 0.05sec.	エネルギー : 0.12、0.24、0.36、0.6、0.84kN・m (1 サイクル)、 1.2kN・m (2 サイクル)、 2.4kN・m (3 サイクル)

*) ケース 2-1 の速度は荷重時の速度であり、除荷時は荷重時の 2 倍の速度とした

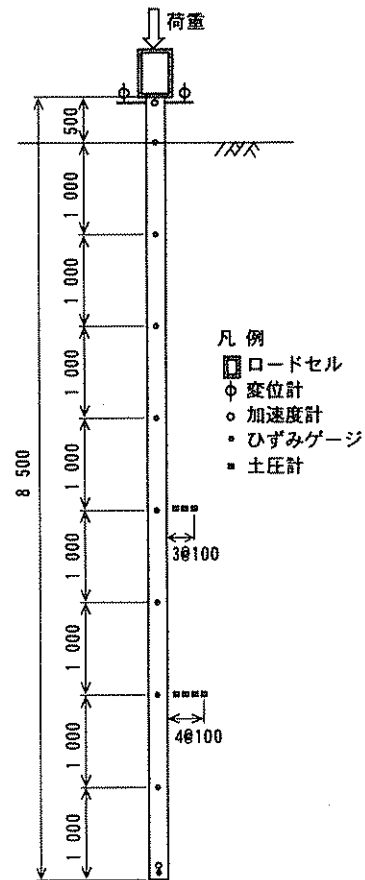


図-2.2 計測機器の配置

2. 2 大規模地震時の杭基礎耐力に関する解析

実験結果から明らかとなった、一方向荷重の載荷試験と交番載荷試験における1本の杭の支持力特性や杭頭ばね定数の相違が、杭基礎全体の耐震性能にどの程度影響するかの検討を行った。

道路橋の基礎の設計では、杭の軸方向抵抗特性に押し込み支持力および引抜き支持力に上限を持つ骨格曲線が用いられる¹⁾ (図-2.3 参照)。

ここでは、文献²⁾の杭基礎の計算例(図-2.4、橋軸方向)をモデルに用い、周面抵抗力あるいは鉛直ばね定数を変化させてプッシュオーバー解析により基礎の耐力への影響を評価した。

3. 研究結果

3. 1 模型杭の鉛直載荷実験結果

3. 1. 1 地震時の支持力特性

地震時の挙動を想定して周波数 1Hz で正負繰返し鉛直荷重を与えたケース 1-5 の杭頭荷重 P ~ 杭頭変位量 S 関係を図-3.1 に示す。また、同じ変位振幅で制御した静的な交番荷重によるケース 1-3 の P ~ S

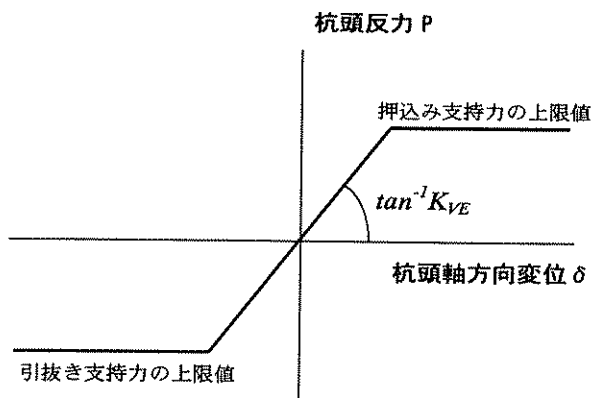


図-2.3 杭の軸方向抵抗特性

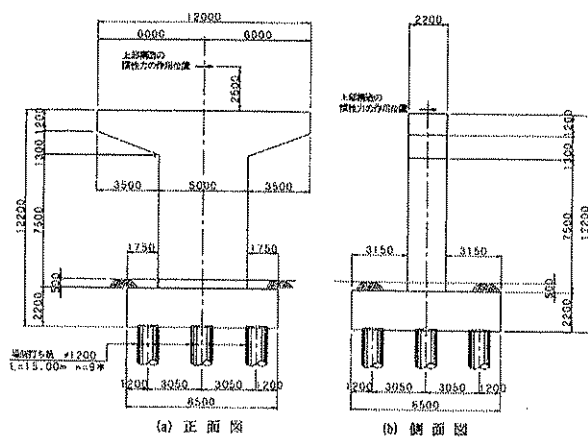


図-2.4 解析モデル

関係を図-3.2 に示す。両ケースの各サイクルにおける最大荷重に多少の差はあるものの、 P ~ S 関係の履歴性状に大きな差は見られない。したがって、地震時の支持力特性は静的な交番載荷試験により概ね確認できるものと思われる。

各サイクルの最大荷重の違いについては、3.1.5 で触れることにする。

3. 1. 2 周面抵抗力特性

図-3.3 に、大型模型実験で実施したケース 2-1 (押し込み) とケース 2-2 (交番載荷) の周面抵抗力 ~ 杭頭変位量の関係を示す。

押し込み試験では第 5 ステップで周面抵抗力が最大となった後、概ね 30kN の抵抗力で残留しているのに対し、交番載荷試験では押し込み側で 10~15kN の周面抵抗力が発揮されるのみで、押し込み試験の残留値の 1/2 程度となっている。押し込み試験の荷重は載荷・除荷の繰返しであるのに対し、交番載荷試験では押し込み・引抜きの繰返しであり、この載荷方法の

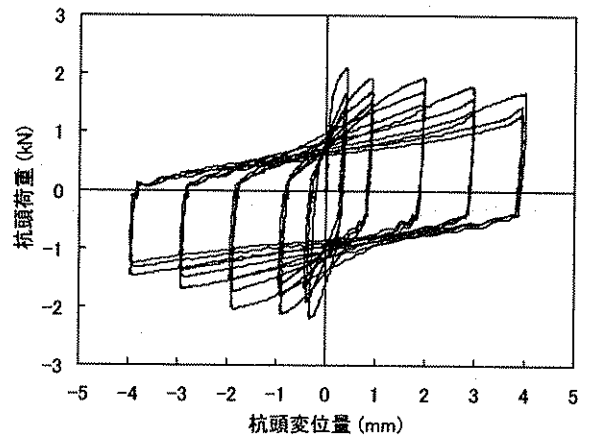


図-3.1 動的交番載荷の P ~ S 関係

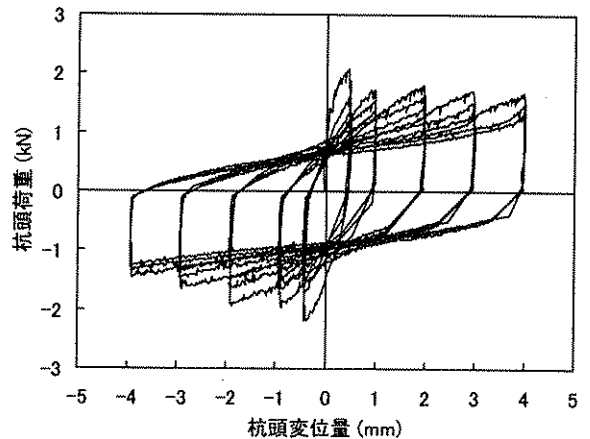


図-3.2 静的交番載荷の P ~ S 関係

違いが抵抗力に大きな差を与えていると言える。

図-3.4は、押し込み試験の最大周面抵抗力に対する降伏した後の各サイクルにおける特定の変位量時に発揮される周面抵抗力（押し込み側）の比の推移を示している。

図-2.3に示した支持力の上限值の中で評価されている周面抵抗力は一般に押し込み試験における最大周面抵抗力であるが、図-3.4では、交番载荷の周面抵抗力は押し込みの最大周面抵抗力に対し0.3程度にまで低下しており、この特性は大規模地震時に対する基礎の設計に大きく影響するものと予想される。

3. 1. 3 先端抵抗力特性

図-3.5にケース2-1およびケース2-2の先端抵抗力 P_p ～先端変位量 S_p の関係を示す。いずれのケースにおいても、除荷の状態に入って杭先端が上向きに変位した時に、先端地盤に一度生じた沈下量のほとんどが残留変位量として残るため、その後の繰返し载荷の過程でより大きな先端変位量が生じるまでは先端抵抗が期待できない特性となっている。

先端変位量が大きくなると、押し込みと交番载荷の先端抵抗力が乖離してくる。極限支持力を杭径の10%の変位量時の杭頭荷重で評価するとした場合、

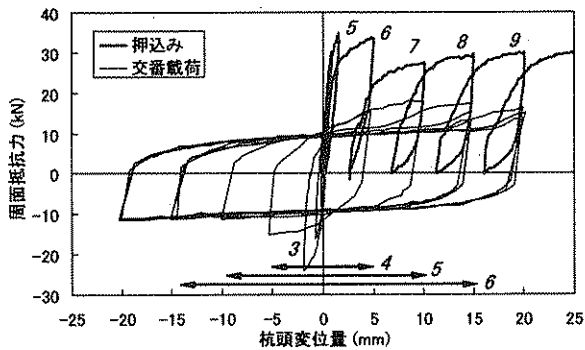


図-3.3 周面抵抗力特性の違い

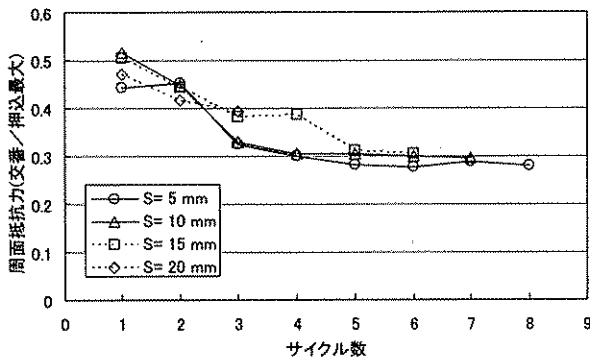


図-3.4 サイクル数と周面抵抗力の関係

先端変位量が20mmのところでは先端抵抗力に2割程度の差が生じている。この原因の1つとして、押し込みでは杭先端が常に地盤に接しているのに対し、交番载荷では杭先端が地盤から浮上り、地盤の拘束圧が局部的に解放されたことが考えられる。

3. 1. 4 杭頭ばね定数

図-3.6にケース2-1およびケース2-2における降伏に至るまでの杭頭ばね定数 K_v の推移を示す。押し込み試験のばね定数は、杭頭荷重 P ～杭頭変位量 S 関係において各サイクルの最大荷重点とゼロ荷重点を結んだ直線の勾配であり、図中の最後の点は $\log P$ - $\log S$ 法により判定した降伏点($P_y=36\text{kN}$)に対する勾配である。交番载荷試験のばね定数は、 P ～ S 関係において降伏に至るまでの各サイクルの最大荷重点および最小荷重点を結んだ直線の勾配である。降伏に至るまでの载荷は荷重制御により行っている関係で、横軸を杭頭荷重 P （交番载荷は押し込み荷重）として整理している。

図-3.6における交番载荷の3サイクル目（降伏したサイクル）のばね定数を降伏点におけるばね定数

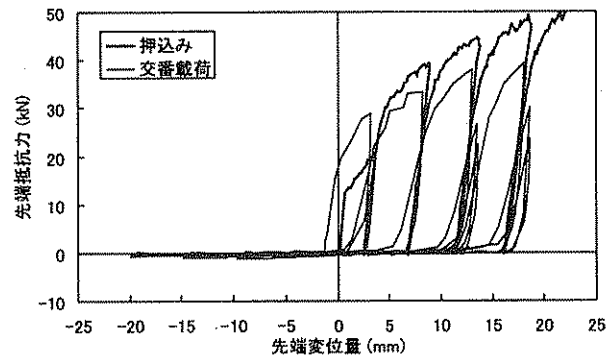


図-3.5 先端抵抗力特性

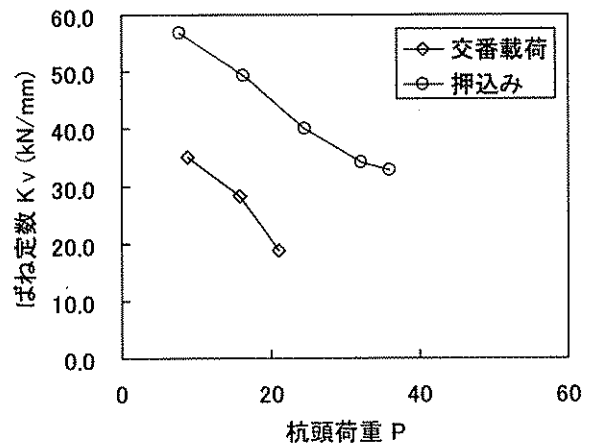


図-3.6 杭頭ばね定数

と評価するのは厳密ではないが、図に示した両試験の最後のサイクルのばね定数は、交番載荷が押込みの1/2程度となっている。これは、降伏時の杭の支持力はそのほとんどを周面抵抗力が負担していることからすれば、図-3.3で説明した残留値の比1/2に対応するものと考えられる。

3. 1. 5 軸方向抵抗力の速度効果

杭に動的な荷重を載荷した場合には、杭体を持つ速度に起因した動的な抵抗力が発揮されることが急速載荷試験の結果などから明らかとなっている³⁾。

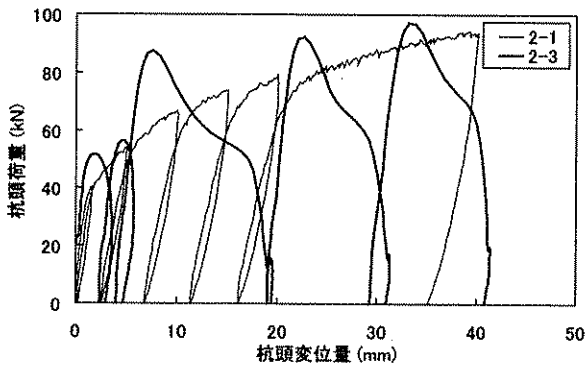


図-3.7 急速載荷の抵抗力特性

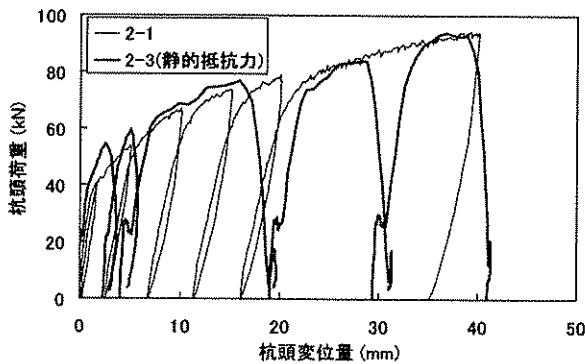


図-3.8 急速載荷試験の静的抵抗力推定曲線

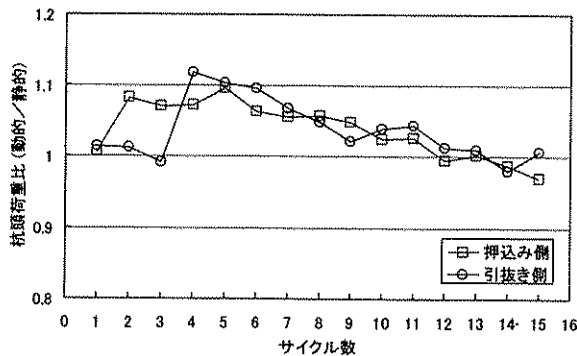


図-3.9 載荷速度の影響

図-3.7にはケース 2-1 およびケース 2-3 (急速載荷) の杭頭荷重～杭頭変位量関係 (2-1 は 5 サイクル目以降、2-3 は 6 サイクル目以降) を示す。ケース 2-3 (急速載荷) とケース 2-1 (押込み) の荷重変位関係は一致していない。そこでケース 2-3 の動的な荷重から、速度および加速度に起因する抵抗力を除いた静的抵抗力で比較することを試みた。静的抵抗力 R_w が簡易な 1 自由度モデルにより算出できるとすると、次式により与えられる。

$$R_w = P - ma - cv \quad (1)$$

ここに、 P 、 m 、 a 、 c 、 v はそれぞれ杭頭荷重、質量、杭体加速度、減衰定数および杭体速度である。

質量 m には杭体質量 120.9kg を与え、ケース 2-1 の杭頭荷重～変位量曲線と R_w 曲線が概ね一致するように減衰定数 c を変化させたところ、12,000kg/s のとき最も近づいた。そのときの杭頭荷重～杭頭変位量関係を図-3.8 に示す。また、ケース 2-3 の各サイクルの杭体最大速度は表-3.1 のとおりである。図-3.8 を見ると、杭体速度の大きいサイクル 8 以降ではケース 2-1 と 2-3 とではほぼ等しくなっているが、杭体速度の小さいサイクル 6、7 ではケース 2-3 の方が大きくなっている。

図-3.9 は、ケース 1-3 (静的交番載荷 1) とケース 1-5 (動的交番載荷 1) の各サイクルにおける杭頭荷重の違いを示したものである。縦軸の杭頭荷重比は、両交番試験の各サイクルにおける押込み側、引抜き側それぞれの最大荷重の比である。初期のサイクルにおいて押込み側と引抜き側で若干傾向に差があるが、いずれも初期の段階で動的交番載荷の方が 1 割程度大きな抵抗が発揮されている。

動的な抵抗力を式(1)によって考慮するとき、載荷速度が大きくなると動的抵抗力も大きくなると考えられる。しかし、ケース 1-5 では杭体速度がサイクルに応じて増加するのに対し、動的抵抗力が低下していく傾向がみられた。

このような傾向は、平成 9 年度に実施した実験⁴⁾

表-3.1 ケース 2-3 の最大速度

サイクル	最大速度 (m/s)
6	0.29
7	0.20
8	1.39
9	1.28
10	1.21

(杭径 216.3mm、杭長 4m の模型杭を用いた実験、以下、「H9 実験」と呼ぶ) でも表れている。載荷時間が 1 オーダー異なる 2 種類の急速載荷試験で、発揮された抵抗力にほとんど差がないという結果が得られている。

これらの実験結果について、押し込み試験の杭頭荷重と動的な載荷試験の杭頭荷重との差(降伏荷重で正規化)と、杭体速度との関係について整理したものが図-3.10 である。図中の Case5 および Case7 は、H9 実験において行った載荷時間がそれぞれ 1sec および 0.1sec の急速載荷の結果である。Case7 (速度低下後) とは、同ケースにおける杭体速度が低下した後に発揮されている抵抗力のプロットである。図中に示した直線は、H9 実験および大型模型実験における押し込み試験と急速載荷試験の結果から推定した減衰定数を降伏荷重で除した値を傾きに持つ線である。

杭体速度が 0.5m/s より大きい場合にはプロットした点が直線付近に分布しているのに対し、速度が 0.5m/s より小さい時にはプロットは直線より上にあり、式(1)に含まれる動的抵抗力 cv とは別の抵抗力が現れているのがわかる。

3.2 杭基礎耐力に関する解析結果

3.1.2 において、押し込み試験で確認される周面抵抗力に対し、交番載荷試験のそれは大きく下回ることを示した。また、3.1.4 において同様に交番載荷の杭頭ばね定数が押し込みのそれに対し 1/2 程度になることを示した。橋脚がロッキングし、杭に正負繰返しの鉛直荷重が作用する場合、これらの特性の相違が基礎の耐力に影響するものと予想され、特性値の評価と基礎の耐力評価の関係を試算した。

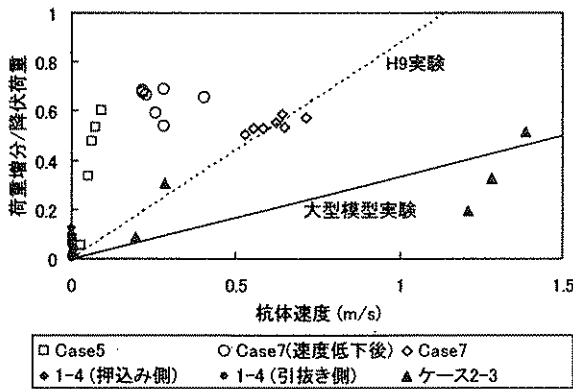


図-3.10 動的な抵抗力と杭体速度の関係

3.2.1 極限支持力の評価の影響

図-2.4 のモデルにおいて、周面抵抗力を 0.9~0.5 倍(Case 1~Case 5)に変化させて極限支持力を設定した場合の基礎の耐力への影響を試算した。当初の条件では、極限押し込み支持力 7.2MN のうち、周面支持力は 3.9MN である。

図-3.11 に水平荷重と慣性力作用位置での水平変位量の関係、図-3.12 にモーメントと回転変位量の関係を示す。回転抵抗については Case 5 を除いてそれほど顕著な差は現れないが、水平抵抗に対し極限支持力評価の差が大きく影響している。本計算例における設計条件では基礎の降伏を許容していないが、周面抵抗力を 1 割小さく評価することによりその条件を満足できない結果となった。

3.2.2 初期の鉛直ばねの評価の影響

初期の鉛直ばね定数を 2 倍(Case 6)したものと 1/2 倍(Case 7)したものについて、水平荷重~水平変位量関係およびモーメント~回転変位量の関係をそれぞれ図-3.13 および図-3.14 に示す。

鉛直ばね定数の設定は、基礎の耐力の低下につながるが、基礎系としての剛性(水平抵抗、回転抵抗のいずれも)に直接影響するのがわかる。

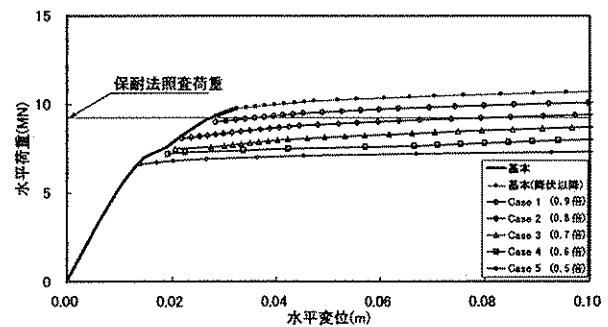


図-3.11 水平荷重-水平変位関係

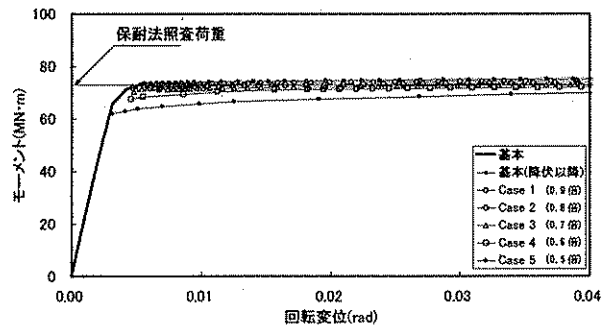


図-3.12 モーメント-回転変位量関係

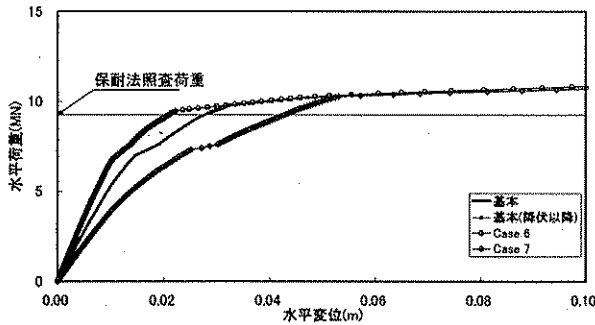


図-3.13 水平荷重-水平変位関係

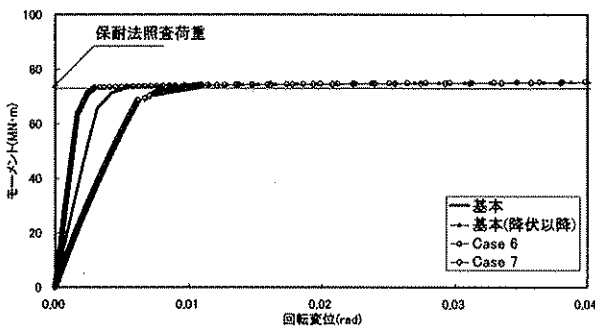


図-3.14 モーメント-回転変位関係

4. まとめ

本研究では、地震時の杭の鉛直支持力特性について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 従来、杭の周面抵抗力は、押込み試験などの1方向の荷重による試験方法により得られた特性値に基づき評価していたが、正負繰返し荷重を受ける場合には、発揮される抵抗力がそれを大きく下回る。また、これを受けて設計時に周面抵抗力を小さく評価することは、基礎の水平耐力の評価に大きく影響する。
- 2) 周面抵抗力と同様に、正負繰返し荷重を載荷する試験方法により得られた特性値で評価された杭頭ばね定数は、1方向の荷重が載荷される試験のそれを下回る。
- 3) 動的な荷重が作用する場合、従来は杭体の速度に依存する抵抗が付加されているものと評価していたが、本研究の実験結果において、速度に依存する動的抵抗とは異なり、かつ静的な載荷試験で確認されない抵抗力が発揮されることが確認された。

これまで、鉛直交番載荷試験が実施された例が少なく、押込み試験と交番載荷試験で得られる支持力特性の違いについてはほとんど検討されてこなかった。本研究において、砂地盤における模型実験により支持力特性の検討を行ったが、杭の施工法や地盤

の条件が変わった場合に得られる支持力特性の違いについて、まだ不明な点が多い。1)および2)に示した載荷方法により得られる支持力特性が異なる点については、実杭の鉛直交番載荷試験による検証が不可欠であり、今後、交番載荷試験のデータの蓄積および特性の分析を行っていく必要がある。

また、3)に示した杭体の速度に依存しない動的な抵抗力特性については、本研究においてそのメカニズムの解明にまで至らなかった。今後、メカニズムを明らかにするとともに、他の地盤条件についても発揮される支持力なのかを確認した上で、設計に取り込むための検討を継続する必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、2002.4
- 2) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- 3) (社)地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説—第一回改訂版—、2002.5
- 4) 建設省土木研究所：載荷速度を変化させた杭の鉛直載荷実験、土木研究所資料 3626 号、1999.3