

杭の地震時鉛直支持力特性に関する模型実験

大塚雅裕¹・秋田直樹²・福井次郎³・喜多直之⁴

¹正会員 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
(〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 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 研究員

³正会員 工修 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 上席研究員

⁴正会員 工修 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 交流研究員

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きている。このような流れを受け、(社)地盤工学会において杭の鉛直載荷試験方法の基準改正が近々予定されており、この中で地震時の設計に対して有効な手段と考えられる鉛直交番載荷試験や急速載荷試験、衝撃載荷試験が新たに基準化される¹⁾。これらの基準化により動的な載荷試験データの蓄積が加速していくものと考えられる。

一方、現行の設計では本来動的挙動を対象とする耐震設計を行う場合も一般に静的な載荷試験から導かれる支持力特性値が使用されていることから、動的な載荷試験を実施した場合でも静的支持力特性に置き換えて評価するのが実状である。そこで、動的な載荷試験の結果(動的支持力特性)を直接動的設計に反映させる設計手法を確立するために、小型の模型杭を用いた各種載荷方法による鉛直載荷試験を実施した。

本稿では、試験結果の一部とそれに関する試算について報告する。

2. 研究の背景と目的

国内にスタナミック試験が導入されて以来、急速載荷試験の実施例や動的支持力特性のメカニズムの解明に関する研究成果が多数蓄積されてきた²⁾。これらの研究の中には、杭体や地盤の慣性抵抗、地盤のひずみ速度に依存する粘性抵抗、波動伝播に伴う逸散減衰、過剰間隙水圧の影響など鉛直支持力における動的特性について検討されているものもあるが、多くは主に急速載荷試験の結果の解釈を目的としており、実際の地震時の杭の挙動が推計できるまでに至っていない。

また、前述した杭の鉛直載荷試験方法基準の改正において杭の鉛直交番載荷試験方法が基準化されることになるが、現状では鉛直交番載荷試験の実施例が極めて少なく、地震時の繰返し荷重による履歴特性についても十分には分析がなされていない。

さらに、上記の2種類の試験方式の載荷速度は、地震時の荷重速度と異なるものであり、実際の地震時の

杭の挙動を再現するには課題が多い。

そこで本研究では、動的な繰返し鉛直荷重を受ける杭の支持力特性を明らかにすることと、これまでに行われている杭の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を開発することを目的として、同一地盤に設置した多数の模型杭に対し各種の載荷方法による載荷試験を行うこととした。

3. 実験の概要

実験土槽(幅 3.5m、奥行き 3.5m、深さ 3.0m)に模型杭を16本建て込み、各種載荷方法により載荷試験を行った。

使用した模型杭および地盤の諸元を図-1に示す。杭体には鋼に比べてヤング係数の小さい真鍮管を用いた。先端は閉塞している。杭径に対し杭長が大きく、周面抵抗力が鉛直支持力の大部分を占める試験条件となっている。

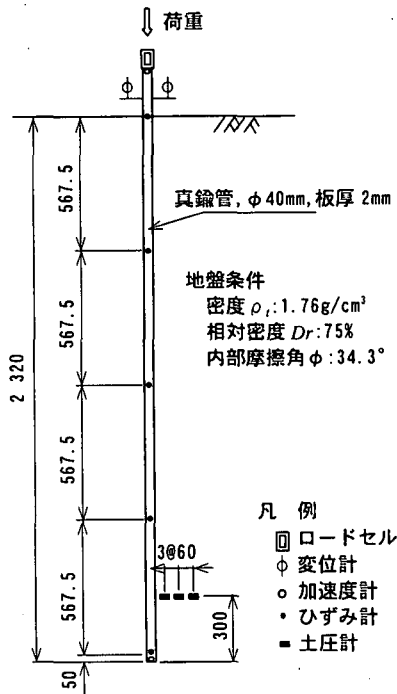


図-1 模型杭および計測機器の配置

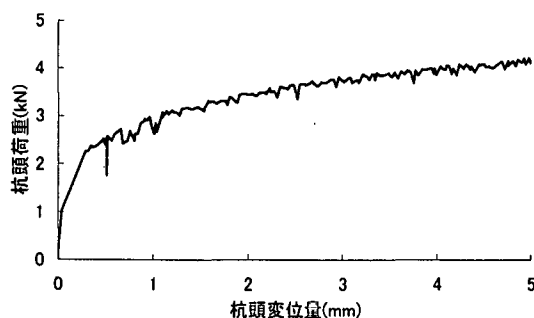


図-2 押し込み試験結果

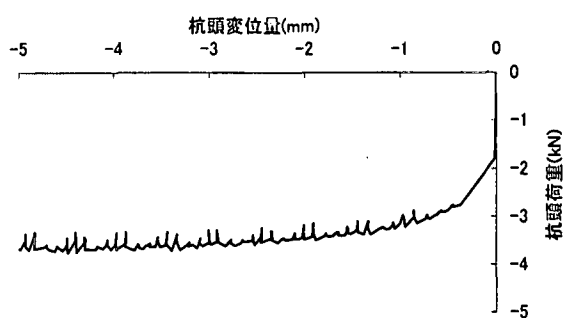
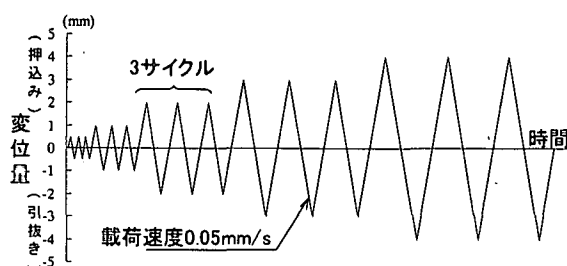


図-3 引抜き試験結果

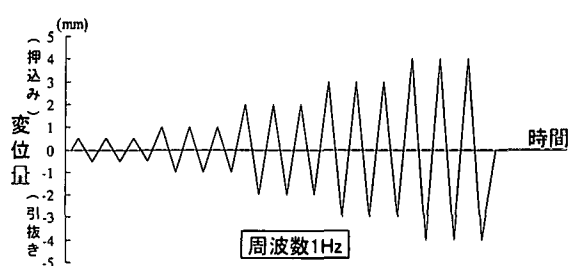
表-1 押し込み試験、引抜き試験の特性値

	押し込み試験	引抜き試験
降伏荷重 R_y	2.1kN [*]	—
極限荷重 R_u	4.0kN	-3.7kN
バネ定数 K_v	9.2kN/mm [*]	—

^{*}判定できないため類似のケースのデータを参考値として示す



(静的交番載荷)



(動的交番載荷)

図-4 交番載荷のイメージ

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(本稿では湿潤地盤の結果についてのみ紹介する)。地盤作成および杭設置は、保持材を使用してあらかじめ杭を建て込んだ後、相対密度を管理して層厚30cmずつをタンパ(人力)により突き固める方法で行った。

載荷の種類は、押し込み、引抜き、低速(一定速度)の正負交番載荷(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交番載荷(以下、「動的交番載荷」と呼ぶ)、急速載荷の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正負繰り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ことを主な目的としている。

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。

計測は、図-1に示すように杭頭の荷重および変位、杭体ひずみ5断面、杭頭および杭先端の加速度について行い、さらに静的交番、動的交番、急速載荷の3ケースについては杭先端から300mmの深さにおける杭周辺地盤の鉛直方向土圧変動についても行った。

4. 実験結果

鉛直支持力特性における各種の動的効果の要因を分析するため、前述した5種類の載荷方法による試験

を行ったが、本稿ではこのうち正負繰り返し荷重による支持力特性に関する結果を述べる。

(1) 押し込み、引抜き試験結果

押し込みおよび引抜き試験は載荷速度0.05mm/sで単調に変位を増大させる載荷とした。それぞれの荷重-変位量曲線を図-2および図-3に、試験から得られた特性値を表-1に示す。降伏荷重はlogP-logS法により算出し、極限荷重は杭頭変位量が杭径の10%に達した時の荷重とした。また、バネ定数は原点と降伏点を結んだ時の割線勾配として求めた。

模型の規模が小さいため、両試験とも非常に小さい変位領域で降伏に至っている。

ここで、両試験は単サイクルの載荷を行っているが、押し込み試験については多サイクルの載荷のデータも得られており、単サイクルの荷重-変位量曲線が多サイクルのそれを包絡する関係となっている。

なお、本稿では荷重、変位量などの符号は押し込みを正としている。

(2) 交番載荷試験結果

交番載荷試験は図-4に示すように速度が異なる2種類の載荷方法で行った。

a) 荷重-変位量曲線

図-5および図-6にそれぞれ静的交番載荷試験、動的交番載荷試験の荷重-変位量関係を押し込み、引抜き試験の結果とともに示す。

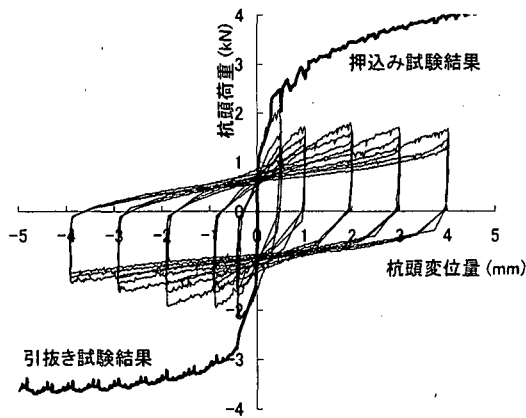


図-5 静的交番载荷試験の結果

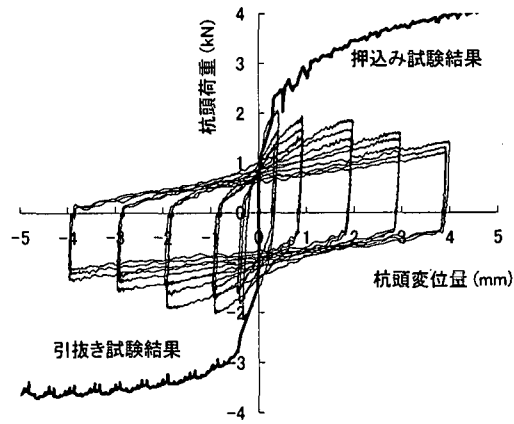


図-6 動的交番载荷試験の結果

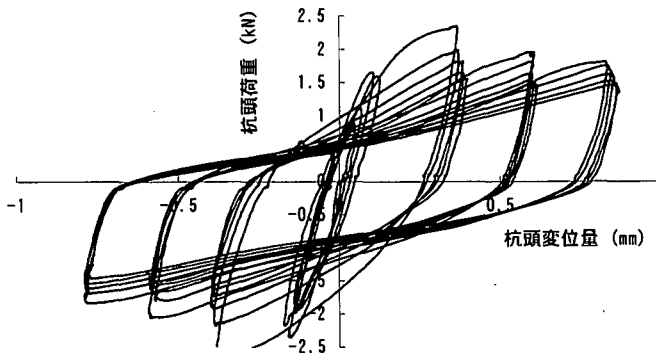


図-7 動的交番载荷試験②の結果

表-2 第1段階の杭頭バネ定数

サイクル	K_{vc} (kN/mm)
1	14.8
2	15.1
3	15.2
4	14.7
5	12.6
平均	14.5

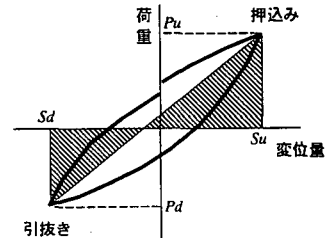


図-8 履歴曲線

静的交番载荷と動的交番载荷では载荷速度が大きく異なるが、履歴性状にそれほど顕著な差は見られない。

交番载荷の荷重-変位履歴の性状を見ると、サイクル数が増すにしたがい押し込み、引抜き試験の荷重-変位量曲線から乖離していく様子がうかがえる。この結果は、正負繰り返し荷重を受ける場合にこれまで押し込み試験や引抜き試験により求めていた極限支持力は確保できないことを示唆するものである。

b) 初期の鉛直バネ定数

図-5および図-6の試験ケースについては、最初のサイクルで塑性域に達しており、弾性域での繰返し载荷が行われていないため、別途実施した交番载荷試験のケース(動的交番载荷、振幅: ± 0.2 , ± 0.4 , ± 0.6 , ± 0.8 mm, 各振幅5サイクル, 以降「動的交番载荷試験②」と呼ぶ)について初期の鉛直バネ定数の評価を行った。このケースの荷重-変位量関係を図-7に示す。

ここでは等価線形化法による線形バネ定数を求めることとし、各サイクルにおける鉛直バネ定数 K_{vc} を式(1)により定義した。

$$K_{vc} = \frac{P_d - P_u}{S_d - S_u} \quad (1)$$

ここに、 P_d : 押し込み側の最大荷重

P_u : 引抜き側の最大荷重

S_d : P_d 時の変位量

S_u : P_u 時の変位量

試験の第1段階の各サイクルについて算出したバネ定数を表-2に示す。弾性域での繰返し荷重に対してバネ定数にはそれほど大きな変動が見られない。

K_{vc} の平均値は、押し込み、引抜き試験の結果で示した降伏時の割線勾配による K_v (表-1)と比較して1.6倍程度の値となっている。

c) 減衰定数

減衰定数も等価線形化法により評価するものとし、交番载荷試験の各サイクルにおける減衰定数 h_{vc} を式(2)により定義する。

$$h_{vc} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

ここに、 ΔW : 図-8の履歴曲線で囲まれる部分の面積

W : 図-8の斜線部の面積

動的交番载荷②における各段階の減衰定数(5サイクルの平均値)を表-3に示す。

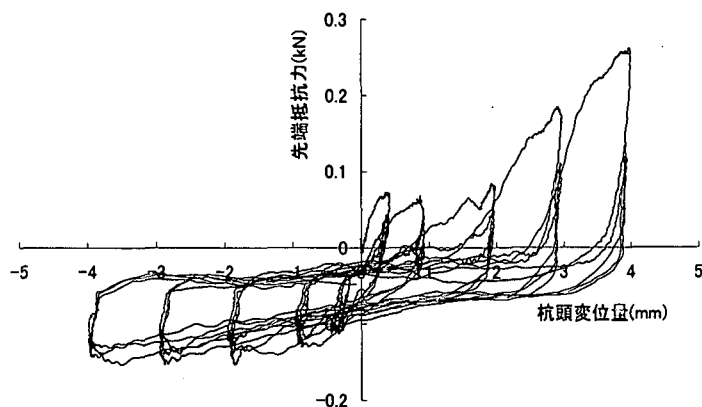


図-9 動的交番载荷における先端抵抗-変位量曲線

表-3 減衰定数(各段階の平均値)		
段階数	動的交番(その2)	備考
1	0.142	振幅 0.2mm
2	0.280	振幅 0.4mm
3	0.283	振幅 0.6mm
4	0.286	振幅 0.8mm

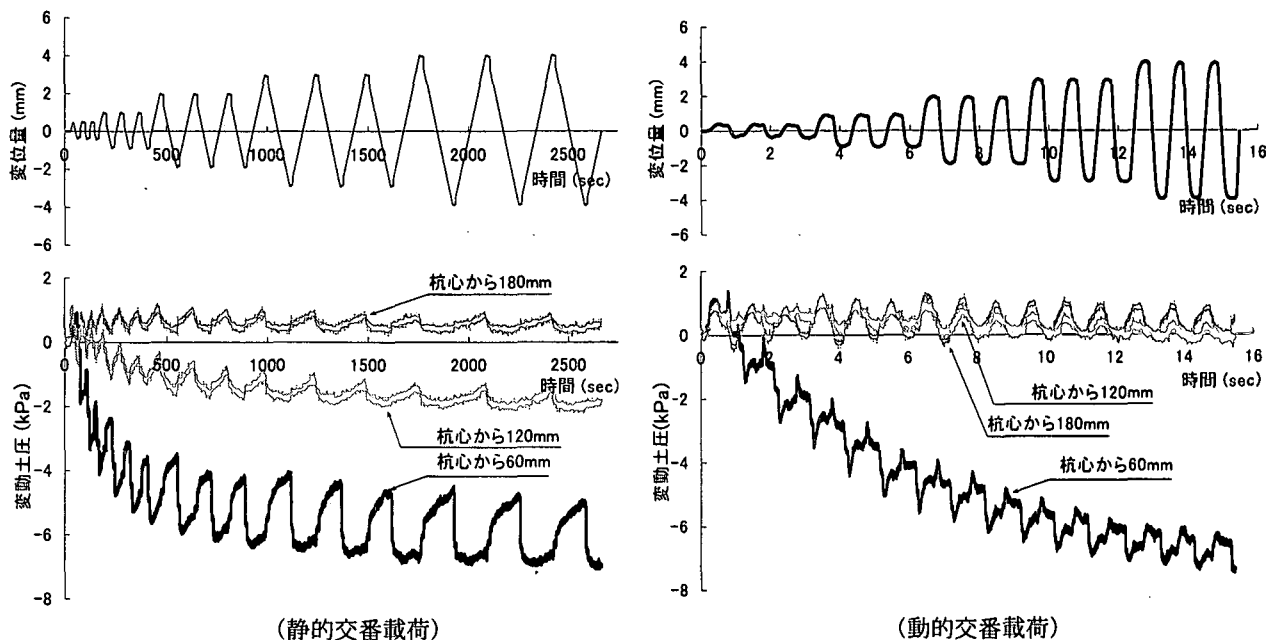


図-10 杭周辺の土圧変動

既往の载荷試験データについて分析した文献³⁾によれば、減衰定数は変位量とともに増大し、変位量が大きい領域での減衰定数として20~30%の値が示されているが、本実験でも変位量とともに減衰定数が増す傾向が見られ、その値は30%程度の値に収束している。道路橋⁴⁾では基礎本体あるいは基礎周辺の地盤に塑性化が生じる場合の基礎および周辺地盤における減衰を20%程度、鉄道橋⁵⁾については10~20%としているのに対しやや大きめの値となっている。

d) 杭~地盤系のモデル化

以上の結果を踏まえ、杭~地盤系のモデル化について考察する。

今回の交番载荷試験の結果(周面抵抗特性)は、動的解析の相互作用バネのモデルとして一般的に用いられるR-OモデルやH-Dモデルのように履歴曲線が想定した骨格曲線上のある点を目指すとしたものとは異なっており、サイクル数の増加に伴い骨格曲線の傾きが低減できるようなモデルが必要である。

杭先端の抵抗特性については、図-9(動的交番載

荷)に示すように一度与えられた変位より小さな変位の履歴においてほとんど抵抗力を発揮していないことから、引抜き時に抵抗を有しないスリップモデルを適用するのが妥当であると考えられる。

一方、静的解析に用いられる杭の軸方向抵抗特性として地盤または杭体から決まる杭の極限支持力を上限値としたパイリニアモデルが一般に用いられているが、押込み試験や引抜き試験により求められる極限荷重や鉛直バネ定数は繰り返し荷重を受ける杭の挙動の推計に適用できない場合があると思われる。

e) その他の動的効果に関する結果

図-10に静的および動的交番载荷試験における杭周辺の土圧変動の状況を変位の履歴とともに示す。杭が交番荷重を受けることで杭周辺地盤内の土圧は振幅を繰り返しながら低下していく傾向が見られ、土圧が低下する領域は静的交番载荷の方が広いことが分かる。

杭が一番近い計測点の土圧を比較してみると、静的交番载荷の方がサイクル数に対する土圧の低下が急

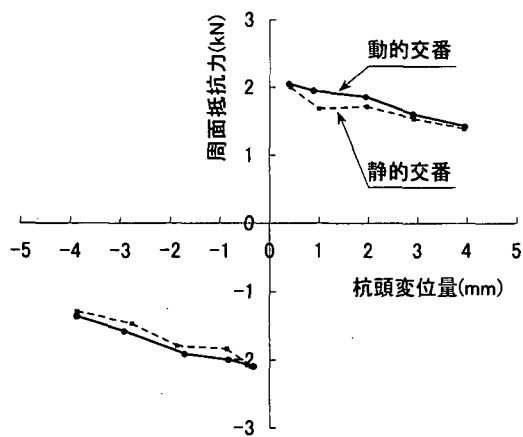


図-11 周面抵抗力の比較

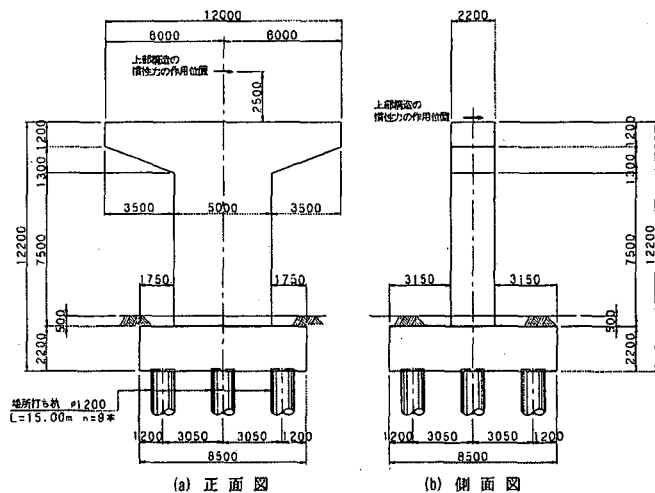


図-12 計算モデル

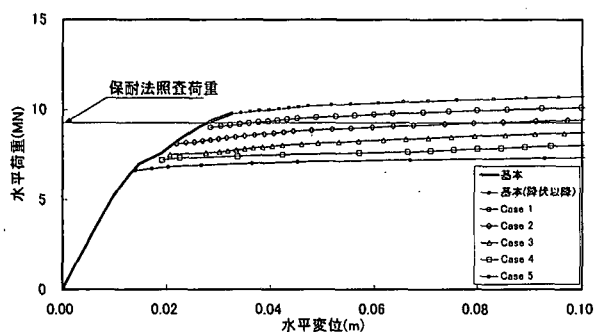


図-13 水平荷重-水平変位

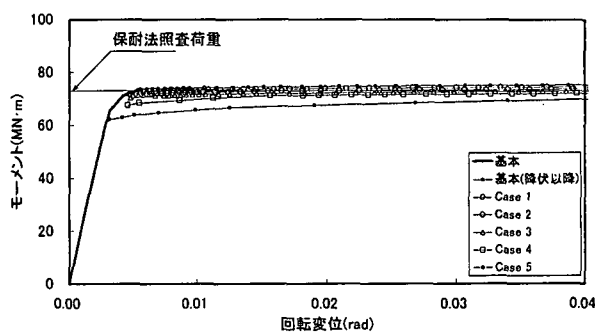


図-14 モーメント-回転変位関係

である様子が見られ、その後はほぼ同じ値に漸近していく。この差は両載荷方法の周面抵抗特性に影響を与えているものと考えられる。図-11 に静的および動的交番載荷の各段階の最大周面抵抗と変位の関係を示すが、第1段階では両載荷方法でほぼ同じ抵抗のピーク値に達しているのに対し、第2段階以降動的交番載荷の方が周面抵抗が大きくなり、徐々に両者の値が近づいて行くことが分かる。これは、土圧低下の程度の違いが拘束圧の差として周面抵抗の違いに現れたのではないかと考えられる。ただし、土圧が低下する現象については、繰返し荷重を受ける影響なのか先端地盤からの応力伝播などの影響なのか不明であり、今後詳細に分析するべき課題である。

その他に、各計測点の波形を比べてみると一番近い計測点の波形が他とは逆位相を示していることや、動的交番載荷では載荷速度に依存した波形の乱れ(慣性抵抗)が現れていることなど、いくつかの興味深いデータが得られており、合わせて検討していきたい。

5. 現行の設計モデルとの比較

前章において今回の実験結果を表現するモデルについて考察を行ったが、周面抵抗特性については実験結果が動的解析で用いられている一般的なモデルと異なる複雑な挙動を示したため、動的解析のモデルの構築についてはもう少し検討に時間を要する。ここでは、本実験結果から予想される一方向載荷試験およ

び交番載荷試験から評価される支持力特性の違いによる耐震性能への影響がどの程度のものかを把握するため、静的解析により簡単な感度分析を行うこととする。

文献⁹⁾の杭基礎の計算例(図-12、橋軸方向)をモデルに用い、支持力あるいは鉛直バネ定数を変化させて基礎系としての水平荷重-水平変位関係、モーメント-回転変位関係の骨格曲線を求めた。

a) 極限支持力の影響

極限支持力については、周面抵抗力を 0.9~0.5 倍 (Case 1~Case 5) として基礎系モデルへの影響を試算した。極限押込み支持力 7.2MN のうち、周面支持力は 3.9MN である。

図-13、図-14 に水平荷重-水平変位関係、モーメント-回転変位関係の骨格曲線を示す。また、表-4 には各ケースで基礎の降伏に達した時の水平荷重を示す。ここで、基礎の降伏とは前列杭の押込み支持力が極限值に達した状態である。

基礎の回転バネへの影響については Case 5 を除いてそれほど顕著な差は現れないが、水平抵抗の骨格曲線には極限支持力評価の差が大きく現れる。極限支持力を小さく評価することにより前列杭の支持力が極限に達する時期が早まり、基礎としての降伏が水平抵抗を急激に低下させることになる。

今回の計算では、基本ケースで保耐法の照査荷重(水平荷重 9.3MN)に対し基礎の降伏に至っていないのに対し、周面抵抗力を低減したいずれのケースにお

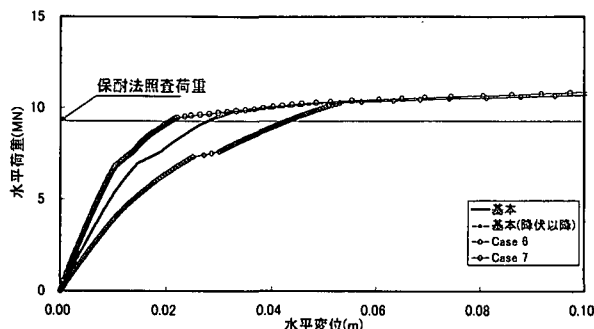


図-15 水平荷重－水平変位関係

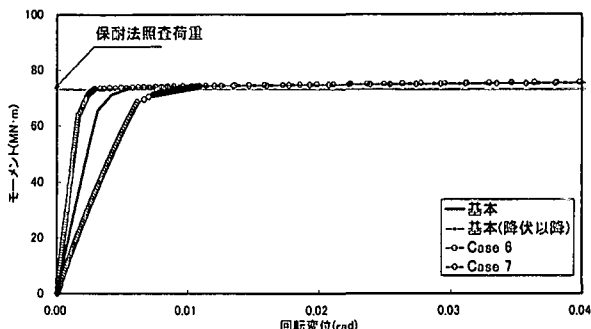


図-16 モーメント－回転変位関係

表-4 試算結果

ケース	杭の抵抗特性			降伏時水平荷重 (MN)
	杭頭バネ定数 (MN/m)	押込み支持力 上限値(MN)	引抜き支持力 上限値(MN)	
基 本	437.2	7.2	2.3	9.8 (1.00)
Case 1 (周面抵抗力×0.9)	437.2	6.8	2.3	9.0 (0.92)
Case 2 (周面抵抗力×0.8)	437.2	6.4	2.3	8.0 (0.82)
Case 3 (周面抵抗力×0.7)	437.2	6.0	2.3	7.4 (0.76)
Case 4 (周面抵抗力×0.6)	437.2	5.6	2.3	7.1 (0.73)
Case 5 (周面抵抗力×0.5)	437.2	5.3	2.0	6.5 (0.67)
Case 6 (鉛直バネ定数×2)	874.4	7.2	2.3	9.4 (0.97)
Case 7 (鉛直バネ定数×1/2)	218.6	7.2	2.3	10.3 (1.05)

いても降伏に達する結果となった。

b) 初期の鉛直バネの評価

初期の鉛直バネ定数を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－水平変位関係およびモーメント－回転変位関係の骨格曲線をそれぞれ図-15 および図-16 に示す。

鉛直バネ定数の設定は、基礎系の水平バネ、回転バネのいずれにも直接影響する。表-4に降伏時の水平荷重を示すが、鉛直バネを硬くすると基礎の降伏時の水平力が若干低下するものの、その程度は僅かと言える。なお、骨格曲線の初期勾配が橋梁全体系に与える影響については、別途検討が必要となる。

以上のように、特に極限支持力の評価が大規模地震時の設計に影響を与えることが確認された。今後、様々な条件下での支持力特性の評価に加え、適切なモデルの構築を進め、それらの影響を検証していく必要がある。

6. まとめ

模型杭を用いて載荷方法の異なる各種鉛直載荷試験を実施し、動的な鉛直支持力特性を調査した。従来極限支持力は押込み試験、引抜き試験の結果あるいはそれらの試験データより求めた支持力推定式から算出しているが、今回の模型試験では繰返し荷重を受ける杭の極限支持力が押込み試験や引抜き試験から得られるものより小さくなる結果が得られた。この傾向は、事例は少ないものの過去に実施された杭の鉛直交番載荷試験の結果からも伺える。

また、これまで道路橋の保耐法の設計において仮定していた杭の抵抗特性について極限支持力を低減し

た影響などを試算し、基礎の水平抵抗に大きく影響することが確認された。

今回の検討の結果はこれまでの耐震設計の考え方に影響を与えることも予想され、早急にモデルの提案が行えるよう研究を進めていく必要がある。今後、異なる条件での杭の挙動についても調査していき、適切なモデルの検討を行っていくこととしている。

なお、地震時の挙動の推計に非常に有効な手段となり得る鉛直交番載荷試験の実施例が非常に少ないのが実状であり、今後の実施例の増加が望まれる。

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) (社)地盤工学会 杭の急速載荷試験法研究委員会：杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性，1999.3.31
- 3) 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
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996.12
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編，1999.10
- 6) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3