

高耐震性新型基礎に関する基礎的研究

武田 篤史 樋口 俊一
伊藤 政人 大内 一

A Preliminary Study on Proposed High Seismic Performance Foundation

Atsushi Takeda Shunichi Higuchi
Masato Ito Hajime Ohuchi

Abstract

A new type of arrow-shaped piled foundation is proposed. The seismic performance of this foundation is improved by separating piles resisting lateral load from those resisting vertical load. This foundation is composed of oblique piles resisting seismic lateral load and vertical piles resisting vertical dead load. It is expected to have high stiffness and good energy absorption against seismic load, because the bearing mechanisms of the oblique piles results from side friction between the piles and the ground. Static lateral loading tests in a centrifugal gravity field as well as non-linear frame analyses were carried out to compare the performance of this new foundation with that of ordinary pile foundations.

概要

常時鉛直荷重に抵抗する機構と地震時水平荷重に抵抗する機構を別々の構造とし、耐震性が高く、大地震後にもほとんど修復の必要がない矢印型の新型基礎構造を考案した。本構造は、常時鉛直荷重を負担する鉛直杭と、地震時水平荷重を負担する斜杭によって構成される。地震時に水平荷重を負担する斜杭に発生する断面力は主として軸力であり、その反力は主として斜杭の周面摩擦力で地盤に伝達される。そのため、地震時水平荷重に対し、主として杭部材の曲げ剛性と杭前面の水平地盤反力で抵抗する通常の杭基礎に比して、剛性が高く、エネルギー吸収性能が良いことが期待される。本報は、本基礎構造の成立性検証の目的で行った遠心場における静的水平載荷実験の結果と解析について示すものである。

1. はじめに

通常用いられる杭基礎や、ケーソン基礎は、単独の構造によって、常時鉛直荷重と地震時水平荷重を支持するように設計される。しかし、これらは、常時鉛直荷重の支持に対しては合理的であるものの、地震時水平荷重に対しては必ずしも最適な形状とは言えない。すなわち一般に周辺地盤の受働抵抗と基礎自身の曲げによって抵抗するため、断面が大きくなる傾向にある。

そこで、著者らは常時鉛直荷重に抵抗する基礎と地震時水平荷重に抵抗する基礎が別々に、それぞれが効率よく作用力に抵抗する構造を考案した。これはそれぞれ軸力と周面摩擦力および先端支持力で抵抗するもので、結果的に無筋化や小規模化を図りながら、一方で高剛性、高減衰性、大地震後の無修復性を実現しようとするものである。

本論文では、この高耐震性新型基礎について特徴を示し、力学的成立性検証のために行った遠心場静的水平載荷試験の結果と解析について示す。

2. 新型基礎の特徴と地震時耐荷機構

本基礎構造は、Fig.1に示す様に、壁状の斜杭と無筋の鉛直杭によって、構成される構造である。

地震時水平荷重は斜杭のみによって分担させるが、その抵抗機構をFig.2に示す。通常杭基礎の場合、杭の前面地盤で支持し、杭体には主に曲げモーメントとせん断力が作用する。一方、本構造は、斜杭の周面摩擦および先端で支持し、杭体に生じる断面力は軸力が支配的となる。一般に通常杭基礎のような構造よりも本構造のように周

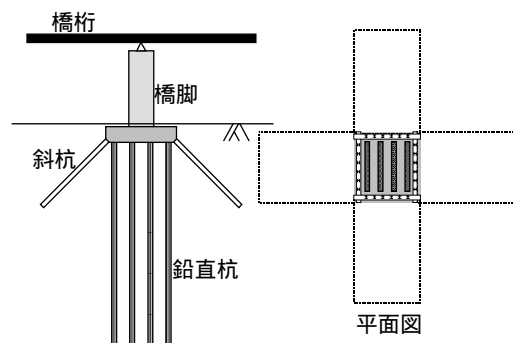


Fig. 1 新型基礎構造図
High Seismic Performance New Type Foundation

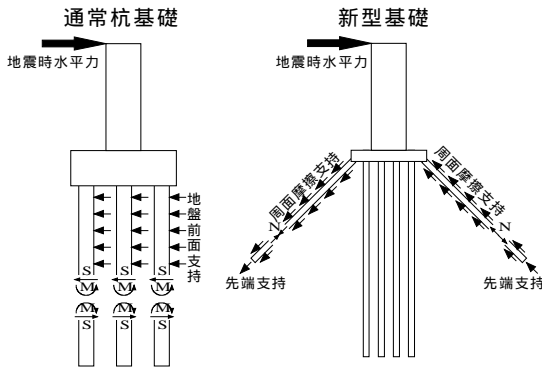


Fig. 2 新型基礎と通常杭基礎の地震時耐荷機構
Seismic Action of Ordinary Pile Foundation and New Type Foundation

面摩擦や軸力を利用したほうが高い剛性が期待される。

斜杭は、圧縮および引張を负担できるものであればよい。そのため、種々の材料が考えられる。例えば、鋼管や鉄筋コンクリートがあげられるが、芯材として鋼材を用いればソイルセメントによる構築も考えられる。この時、ソイルセメントは断面力を負担する構造体ではなく、鋼材の力を地盤に伝達する媒体としての考え方もありうる。

以上が提案する新型基礎の特徴であるが、その構造形式は支持地盤条件によって変わりうる。

斜杭先端の支持力が期待できる場合は、押し込み時の支持能力が引き抜き時の支持能力より大きくなる。そこで、例えば、先端支持能力の半分程度の常時荷重が斜杭に入っていれば、斜杭は地震時に押し込み側と引き抜き側で同様の支持性能となる。そのため、斜杭が常時鉛直荷重と地震時水平荷重の両方を支持する設計が可能となり、鉛直杭を省くことも出来る。

一方、斜杭の先端支持力がほとんど期待できない場合は、斜杭の支持能力が押し込みと引き抜きで大きくは変わらないため、鉛直杭が必要となる。これは、斜杭で鉛直力を支持した場合、押し込み側と引き抜き側の斜杭耐力がアンバランスとなるためである。ここで、鉛直杭は、常時鉛直荷重=圧縮軸力のみを保持できればよいので、補強材は不要となり、沈下に問題がなければ、ソイルセメント等の地盤改良工法の使用も考えられる。なお、この際は斜杭に常時荷重が入らないようにするため、斜杭は上部構造設置後にフーチングと結合することになる。

3. 試設計

橋梁基礎を対象に本構造と通常杭基礎の試設計を行った。参考図書には現行道路橋示方書¹⁾を用い、許容応力度設計とした。

設計条件と試設計結果をFig.3,4と、Table.1に示す。

地盤は、鉛直杭を必要とする場合（粘性土地盤）と鉛直杭が不要である場合（砂質土地盤）の2通りとした。

本構造の材料には、斜杭、鉛直杭ともソイルセメント

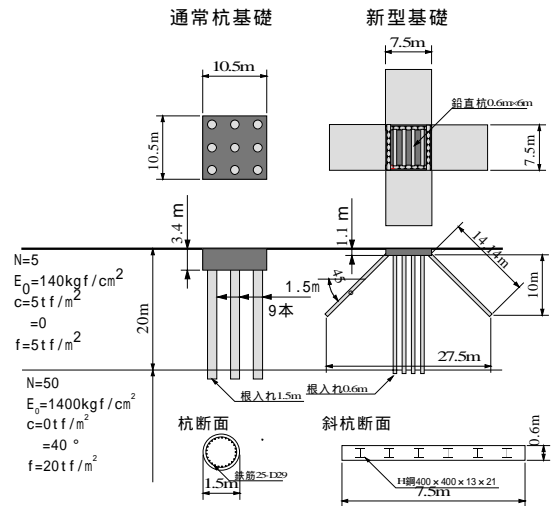


Fig. 3 地盤条件と試設計結果（粘性土地盤）
Soil Profile and Result of Trial Design(Cray Ground)

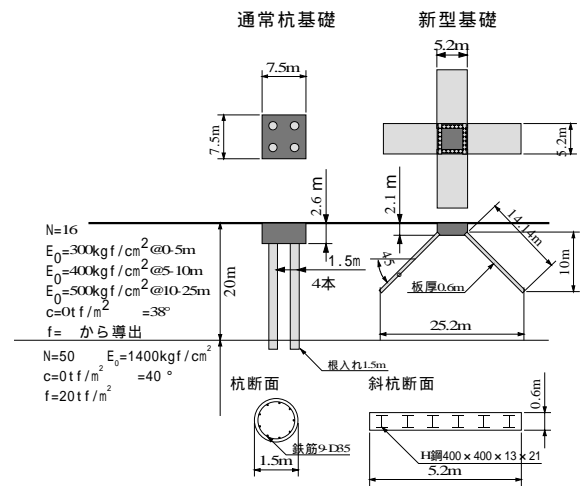


Fig. 4 地盤条件と試設計結果（砂質土地盤）
Soil Profile and Result of Trial Design(Sandy Ground)

を仮定した。

本構造の設計計算に当たって、地震時水平荷重は、フーチング上に水平力と曲げモーメントとして入力し、フーチングを梁とみなした場合の反力を、斜杭頭部に作用させた。この際、フーチングの慣性力は考慮していない。橋軸方向と橋軸直角方向の計4つの斜杭のうち、作用水平力と直交方向の斜杭の抵抗は考慮しない。斜杭反力は、周面摩擦力および先端支持力とすることとし、斜杭の寸法を決めた。最大摩擦応力度や最大先端支持力、安全率等は場所打ち杭に従った。斜杭の断面力は、全て芯材であるH鋼によって負担するものと仮定した。つまり、ソイルセメントは鋼材の力を地盤に伝える媒体と考え、その作用応力は考慮しない。H鋼の本数は、現実的な配置を考慮して、400×400×13×21のH鋼6本を基本に、許容応力度を満足していることを確認した。斜杭の長さとは幅はTRD工法を想定した施工上の制約から、それぞれ14.1m、

Table 1 地盤条件と試設計結果
Soil Profile and Result of Trial Design

			粘性土地盤	砂質土地盤
設計条件	基礎深さ	(m)	20	20
	基礎までのN値		5	16
	橋脚高さ	(m)	4.2	10
	常時鉛直荷重	(tf)	3760	900
	設計震度		0.2	0.2
通常杭基礎	杭径	(m)	1.5	1.5
	杭長	(m)	21.5	21.5
	杭本数		9	4
	フーチング断面	(m×m)	10.5×10.5	7.5×7.5
	フーチング厚さ	(m)	3.4	2.6
新型基礎	斜杭幅	(m)	7.5	5.2
	斜杭長	(m)	14.14	14.14
	斜杭角度		45°	45°
	鉛直杭本数	(m)	4	-
	鉛直杭断面	(m×m)	6×0.6	-
	鉛直杭長さ	(m)	20.6	-
	フーチング断面	(m×m)	7.5×7.5	5.2×5.2
フーチング厚さ	(m)	1.1	2.1	

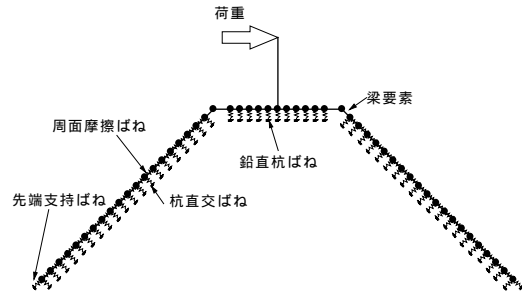


Fig. 5 骨組み解析モデル
Frame Analytical Model

静的解析は破壊過程の把握を目的とし、橋脚天端位置に荷重を一方方向に載荷した。

動的解析は、新型基礎と通常杭基礎の耐震性能比較を目的とした。入力地震動には、Elcentro地震波を最大加速度600galに拡大したものをを用いた。マスは、橋脚天端にのみ集中質量として置換した。なお、フーチングの質量は解析に考慮していないが、フーチングを考慮した場合は、フーチングの大きい通常杭基礎の方がより大きな地震力を受けることになる。

0.6mとした。

鉛直杭は、周面摩擦力および先端支持で常時鉛直荷重のみ支持することとし、その支持力の算定は場所打ち杭に従った。

比較対象とする通常杭基礎の設計は、道路橋示方書に従い、常時鉛直荷重および、地震時水平力に対して許容応力度設計を行った。

フーチングは両構造とも、無筋コンクリートのせん断耐力より厚さを決めた。

4. 新型基礎の耐震性能

4.1 非線形解析

試設計した上記2ケースについて、それぞれ通常杭基礎と新型基礎の耐震性能を比較する目的で非線形骨組解析を行った。モデルはFig.5に示すような梁要素とバネ要素を用いたものとし、静的解析と動的解析を行った。各種バネの剛性と上限値は、道路橋示方書¹⁾の場所打ち杭に従い決定した。摩擦バネの剛性は記述がないため、降伏変位を通常用いられる中で比較の大きい11cmと仮定した。斜杭の直交ばねは、角度を考慮して圧縮と引張の上限値についてそれぞれ補正を行った。また、粘性土地盤の場合は、フーチングのロッキングに抵抗する鉛直杭ばねを設け、鉛直杭自体と支持基盤の直列バネとして剛性を決め、上限値は常時荷重分を考慮して評価した。

水平力に対する挙動に着目しているため、鉛直杭の挙動は無視している。鉛直杭は無筋構造であり、地震時水平荷重に起因する曲げやせん断には抵抗しないためである。なお、本構造の変形はフーチングのロッキングが支配的である。そのため、鉛直杭がフーチングに剛結されている場合には、ひび割れが貫通しても過大なフーチングとの相対水平変位を生じることがなく、地震後にひび割れは閉じ、常時鉛直荷重に対する支持機能を失うことはないと考えられる。

4.2 解析結果(粘性土地盤を対象とした場合)

新型基礎と杭基礎の荷重 - 変位関係をFig.6に示す。新型基礎は杭基礎に比し、最大耐力は6割程度であるが、高い初期剛性を有していることがわかる。

それぞれの破壊過程は

新型基礎：a)斜杭周面摩擦降伏開始、b)斜杭周面摩擦全降伏、c)斜杭先端支持降伏、d)斜杭前面地盤降伏開始、e)フーチング浮上り開始

杭基礎：A)圧縮側・中側杭頭ひび割れ、B)圧縮側周面摩擦降伏、C)引張側杭頭ひび割れ、D)引張側中間部ひび割れ、E)杭頭降伏、F)引張側浮上り、G)中間部降伏、H)圧縮側先端支持降伏、I)中側周面摩擦全降伏、J)引張側周面摩擦全降伏、K)杭頭前面地盤降伏開始

となる。ここに、a)~e)およびA)~K)の事象を図中に示している。このことより通常杭基礎の非線形挙動はそれ自身の損傷によるが、新型基礎では、主に周面の摩擦抵抗により決まっていることがわかる。つまり、大地震後通常杭基礎は補修や作り直しが必要となるが、新型基礎では基礎躯体について補修等の必要はないと考えられる。

Fig.7に地震応答解析の結果を示す。

固有周期は、新型基礎0.41秒、杭基礎0.51秒であった。天端での最大応答変位は新型基礎が9.6cm、杭基礎が16.9cmであった。これは、新型基礎は剛性が高いこと、エネルギー吸収を摩擦で行っているため履歴減衰が大きいことなどが理由であると考えられる。

天端での残留変位は新型基礎は0.5cm、杭基礎が7.5cmであった。また、最大応答変位レベルから推測すると、新型基礎は構造体の損傷が全くないが、杭基礎は、各杭がそれぞれ2箇所降伏している。

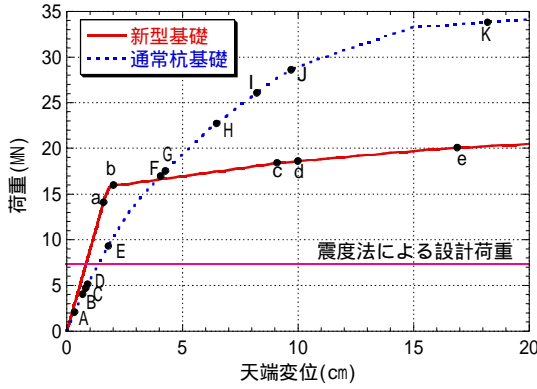


Fig. 6 静的解析結果 (粘性土地盤)
Result of Static Analysis (Cray Ground)

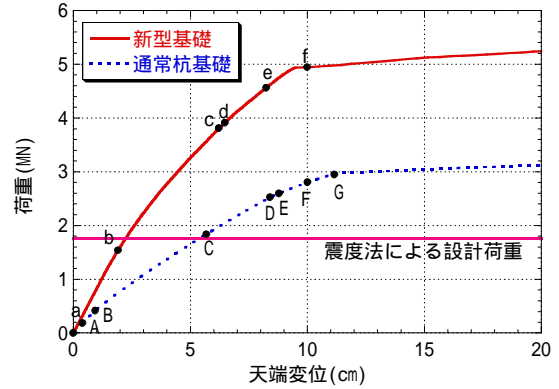


Fig. 8 静的解析結果 (砂質地盤)
Result of Static Analysis (Sandy Ground)

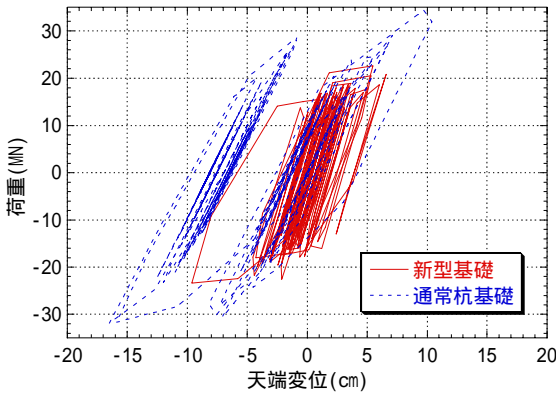


Fig. 7 動的解析結果 (粘性土地盤)
Result of Seismic Analysis (Cray Ground)

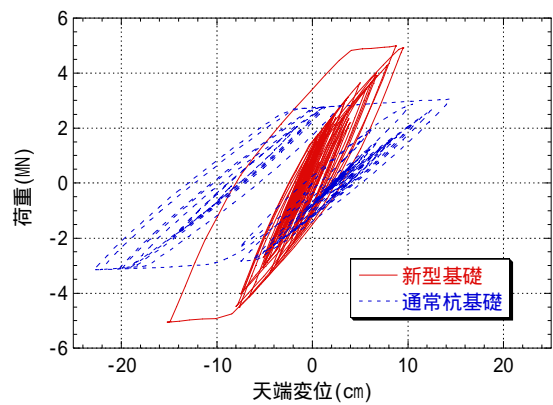


Fig. 9 動的解析結果 (砂質地盤)
Result of Seismic Analysis (Sandy Ground)

4.3 解析結果(砂質地盤を対象とした場合)

新型基礎と杭基礎の荷重変位曲線をFig.8に示す。新型基礎は杭基礎に比し、最大耐力は1.6倍程度あり、さらに高い初期剛性を有していることがわかる。それぞれの破壊過程は

新型基礎：a)斜杭前面地盤降伏開始(常時荷重による)，b)引張側斜杭先端浮上り，c)圧縮側斜杭先端支持降伏，d)圧縮側斜杭摩擦降伏開始，e)引張側斜杭摩擦降伏開始，f)斜杭周面摩擦全降伏

杭基礎：A)杭頭前面地盤降伏開始，B)杭頭ひび割れ，C)圧縮側周面摩擦降伏，D)圧縮側先端支持降伏，E)引張側杭頭降伏，F)圧縮側杭頭降伏，G)圧縮側周面摩擦全降伏となった。ここに，a)~f)およびA)~G)は，前記と同様である。このことより，粘性土地盤を対象とした場合の同様のことがわかる。

Fig.9に地震応答解析の結果を示す。

固有周期は，新型基礎0.63秒，杭基礎0.87秒であった。天端での最大応答変位は新型基礎が14.9cm，杭基礎が22.6cmであった。これは，新型基礎が耐力が大きいだけでなく，剛性が高いこと，エネルギー吸収を摩擦で行っているため履歴減衰が大きいことなどが理由であると考えられる。

天端での残留変位は新型基礎は0.72cm，杭基礎が3.4cmであった。粘性土地盤の時と同様に，最大応答変位レベルから推測すると，新型基礎は構造体の損傷が全くないが，杭基礎は，各杭が降伏している。

5. 遠心模型実験

前記解析的検討を踏まえ，新型基礎の構造的成立性を確認する目的で，遠心重力25Gにおける遠心模型実験を行った。試験体は，前述の試設計のうち砂質地盤の場合とした。実験は，杭の周面摩擦特性を把握する引抜き実験(周面摩擦試験)と，新型基礎および杭基礎の水平載荷実験を行った。

地盤は，気乾状態の岐阜砂を用い，空中落下により作成した。地盤の相対密度は50%程度とした。なお，この時の地盤性状を三軸圧縮試験結果より確認し，その結果を用いて3.の試設計対象地盤としたため，模型地盤の地盤性状は，Fig.4に示す地盤性状と同様である。

5.1 周面摩擦実験

本構造の耐荷機構は周面摩擦によるところが大きい。そこで，水平載荷実験に先立って，本実験に用いる杭と同様の条件の場合の周面摩擦特性を調べる目的で，遠心場における周面摩擦実験を行った。

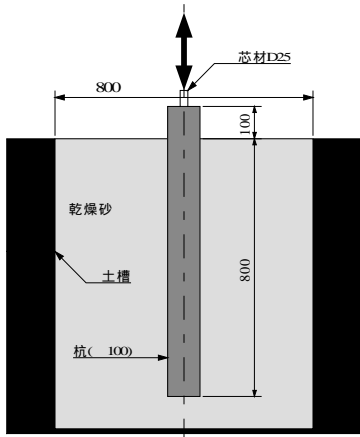


Fig. 10 周面摩擦試験
Friction Test of Pile Model

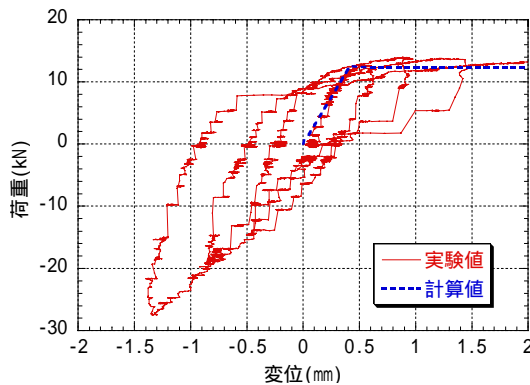


Fig. 11 周面摩擦試験結果
Friction Characteristic

5.1.1 実験方法 Fig.10に示すように、直径100mmの柱体表面を後述する水平載荷実験と同様に、地盤に用いた砂を糊付けし、地盤中に設置した。柱体材料にはモルタルにカオリンを混入し作成した模擬ソイルセメント(10N/mm²~14N/mm²程度)を用いた。遠心加速度は水平載荷実験と同様の25gとした。加力は0.4mmを基準に正負繰り返した。

5.1.2 結果 Fig.11に結果を示す。正側が引抜き、負側が押し込みである。ここで、計算値とは4.の解析に用いた周面摩擦の値である。

実験値と計算値は、引抜き側においては非常に良く合っている。引抜き側は、周面摩擦のみによって抵抗するため、新型構造の主たる抵抗機構である周面摩擦特性に関してはほぼ予想通りであった。

5.2 水平載荷実験

本構造の構造的成立性を確認する目的で、遠心場における水平加力試験を行った。

5.2.1 実験方法と実験ケース Fig.12に示すように土槽中に非線形材料より作成された基礎、鋼製のフーチング・橋脚の各モデルを設置し、橋脚の天端に静的に水平荷重を繰り返して載荷した。試験体は3.で行った砂質土地盤の

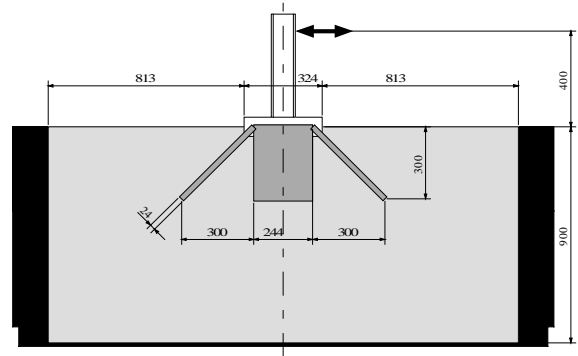


Fig. 12 水平載荷実験
Lateral Loading Test

Table 2 相似則
Similarity Rule

	1G場	25G場
重力	1	25
長さ	1	1/25
面積	1	(1/25) ²
応力	1	1
力	1	(1/25) ²
密度	1	1

Table 3 実験ケース
Test Case

名称	構造
case-N4	新型基礎(斜杭4枚)
case-N2	新型基礎(斜杭2枚)
case-P	通常杭基礎

際の試設計結果を相似則に沿って1/25スケールとした。なお、ここで用いた相似則をTable2に示す。

実験ケースは、Table3に示す3種類とした。

case-N4は本構造の2方向性を考慮した場合の形状であり、4方向に壁状の斜杭が出ている。斜杭は、幅244mm、長さ424mm、厚さ24mm、俯角45°とし、芯材として10mm、厚さ1mmの鋼管を5本挿入した。材料にはモルタルにカオリンを混入し作成した模擬ソイルセメント(軸圧縮強度10N/mm²~14N/mm²程度)を用いた。

case-N2は本構造のうち、主として抵抗する荷重方向に出ている2枚の壁状の斜杭のみとした場合であり、4.で行った解析と対応する。

case-Pは通常杭基礎の模型とした。杭は50、長さ760mmとし、主筋にD4鉄筋を2本用いたほかせん断破壊を防止するためにD4のスパイラル筋を配置した。マトリクスには高流動モルタルを用いた。

5.2.2 実験結果 Fig.13~Fig.15にそれぞれの結果を解析結果と共に示す。解析は4.で行なった解析について、相似則を適用し、試験体の大きさにあわせたものである。ただし、荷重直角方向の斜杭については、ソイルセメント壁体の部材特性が不明であること、断面力が面内せん断とねじりの複合であり抵抗機構が複雑であるこ

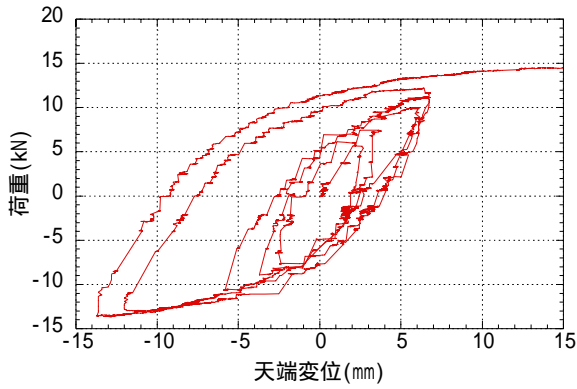


Fig. 13 case-N4の荷重変位関係
Relation between Load and Displacement(case-N4)

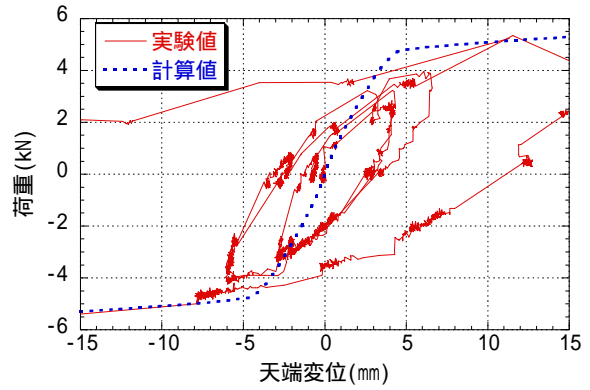


Fig. 15 case-Pの荷重変位関係
Relation between Load and Displacement(case-P)

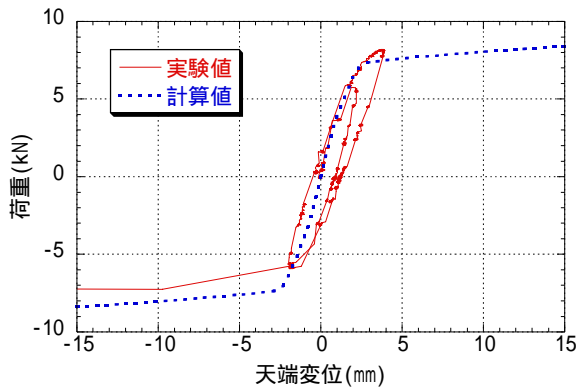


Fig. 14 case-N2の荷重変位関係
Relation between Load and Displacement(case-N2)

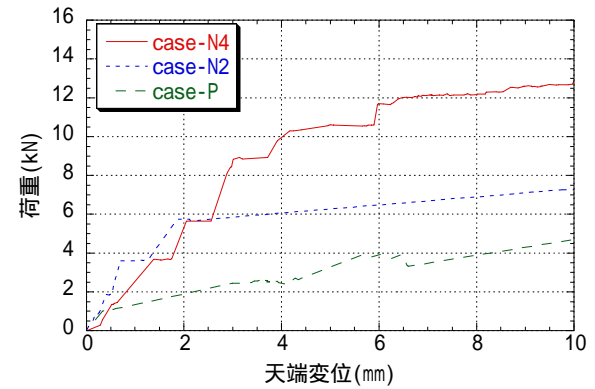


Fig. 16 荷重 - 変位関係のスケルトンカーブ
Comparison of Load Displacement Envelope

と、等の理由から解析に考慮していないため、case-N4は実験値のみを示している。

case-N2は、実験値と解析値はよく合っている。換言すれば、想定した抵抗機構が確認できたと言える。

case-Pは、概ね解析にあっているものの、荷重 変位関係の折れ点が解析より丸みを帯びている。これは、解析においては、杭直交ばねをバイリニアで仮定しているためと思われる。

Fig. 16に、3 ケースの荷重 - 変位関係のスケルトンカーブを示す。

case-N4とcase-N2の比較により、荷重直角方向の斜杭の効果が分かる。case-N4はcase-N2の降伏点（部材としての荷重変位関係の折れ点）程度まではほぼ同様の挙動を示しているが、case-N2で得られた降伏点を超えてもほぼ同様の剛性を保持し、1.5倍程度の耐力を有している。

case-N2とcase-Pの比較により、本構造の通常杭基礎に対する性能がわかる。本構造の弾性剛性は通常杭基礎の3倍程度であり、4. 解析で示した構造性能の差が現れている。

6. まとめと課題

高耐震性を実現させる新型基礎構造を考案し、試設計

を行った後、その構造成立性を確認するため非線形骨組解析および遠心模型実験を行なった。以下にその結果を要約する。

1) 実験に先立ち、試設計を行った。その結果に対して、非線形骨組解析を実施し、通常杭基礎との性能比較を行った。その結果、本構造は、周面摩擦と軸力抵抗機構により、高剛性であること、大地震後にも杭体の損傷が小さいこと、地震応答変位および残留変位が小さくなる可能性を示した。

2) 縮尺模型を用い、遠心実験を行った結果、上記解析モデルによる解析結果とほぼ一致し、構造的成立性が確認できた。

しかしながら、荷重直角方向斜杭の寄与については十分分析できていない。また、今回の模型はソイルモルタルの使用を前提としており、本体構造への適用性や工法成立性などが今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編，（1996）