

杭基礎の支持力および地盤ばねに与える載荷速度の影響

渡 邊 康 司 佐 原 守

Effect of Loading Rate on Bearing Capacity and Soil Spring of Pile Foundations

Koji Watanabe Mamoru Sahara

Abstract

The bearing capacity of piles is evaluated by using a static vertical loading test. However, the external forces that act on a pile are not only static loads but also dynamic loads such as earthquakes. In the case of a large earthquake, dynamic loads dominate the design considerations. Although the loading rate is known to depend on the soil behavior and the bearing capacity of a pile, there have been few studies, and quantitative evaluation methods on the bearing capacity of a pile that consider the loading rate have not yet been proposed. This study investigated the effects of the loading rate on sand behavior and the bearing capacity of a pile for pile seismic design. A series of triaxial compression tests and model loading tests under a centrifuge acceleration field where the loading rate was varied were conducted. The results suggest that the failure strength and deformation modulus of sand increase with increasing the loading rate. Moreover, the bearing capacity and coefficient of the sub-grade reaction were confirmed to have large values when the loading rate was high.

概 要

静的載荷試験に代表される杭の載荷試験は、一般的に、杭の支持力や地盤ばねを確認するために実施される。さらに、地盤材料の変形強度特性は、静的な一軸圧縮試験や三軸圧縮試験により把握される。しかしながら、杭に作用する外力は自重のような静的荷重のみではなく、地震のような動的荷重も作用することとなる。特に、大地震時の場合には、設計上考慮すべき動的荷重の作用比率が大きくなる。地盤材料の変形強度特性や杭の支持力および地盤ばねにおける載荷速度依存性は定性的に知られているものの、その研究事例は少なく、定量的な評価手法は提案されていない現状にある。本研究では、砂の変形強度特性および杭の支持力や地盤ばねに与える載荷速度の影響を検討することを目的として、載荷速度をパラメータとした一連の三軸圧縮試験および遠心模型実験を実施した。その結果、載荷速度が大きい場合に、砂の破壊強度および変形係数が大きくなることがわかった。さらに、杭の支持力および地盤ばねに関しても、載荷速度が大きい場合に増加することが確認された。したがって、載荷速度の影響を適切に評価することで、地震時における支持力や変形を合理的に評価でき、杭基礎設計を合理化できる可能性がある。

1. はじめに

杭基礎に代表される基礎構造物の支持力や地盤ばねは静的な載荷試験や要素試験により求められる。しかしながら、杭に作用する外力は自重のような静的荷重のみではなく、地震のような動的荷重も作用することとなる。特に、大地震時の場合には、設計上考慮すべき動的荷重の作用比率が大きくなる。Fig.1に、杭の載荷試験および要素試験に対する代表的な載荷速度の範囲を地震時における最大鉛直速度とともに示す。地震時における実測の鉛直方向における最大速度の範囲は、Table 1に示すように数十cm/sec程度である。一方で、地震時に上部構造物がロッキングモーションを生じた場合を想定すると、基礎に生じる最大速度は数十cm/sec程度と推測される。地震時における最大速度と杭基礎の設計に用いる載荷試験や要素試験の載荷速度を比較すると、対象とする載荷速度に大きな差異があることがわかる。これは、載荷速度を考慮した杭の支持力および地盤ばね、設計用の地盤定

数を算出する必要があることを示唆している。

地盤材料の挙動に与える載荷速度効果の模式図をFig.2に示す。Fig.2より、載荷速度の増加とともに、強度および変形係数が増加することが分かる。地盤材料の変形強度特性に与える載荷速度の影響に関する研究は、三軸圧縮試験を用いて実施され数例の研究事例がある。Casagrande and Shannon¹⁾は、低拘束圧下における密な乾燥砂供試体に対して載荷速度を変化させた三軸圧縮試験を実施し、載荷速度が大きい場合に、破壊時の最大主応力比も大きくなることを示した。Seed and Ludgren²⁾は、3種類の載荷速度を用いて、飽和砂に対する排水および非排水三軸圧縮試験を実施し、載荷速度が大きい場合に破壊強度が大きくなることを示している。さらに、Lee et al.³⁾は、載荷速度および拘束圧の異なる三軸圧縮試験を行ない、載荷速度効果に拘束圧の大きさが関連していることを指摘した。一方で、基礎の支持力や地盤ばねに与える載荷速度の影響は、さらに研究事例が少なく、近年までは安全代として無視されてきたのが現状である。

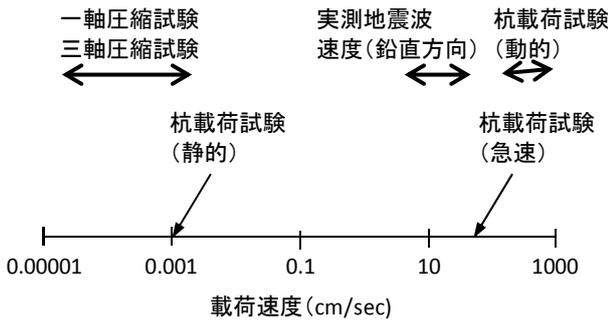


Fig. 1 杭の荷重試験および要素試験の荷重速度 Loading Rates of Pile Loading Tests and Element Tests

Table 1 実測による地震波の最大速度 Maximum Velocities Observed in Recent Earthquakes

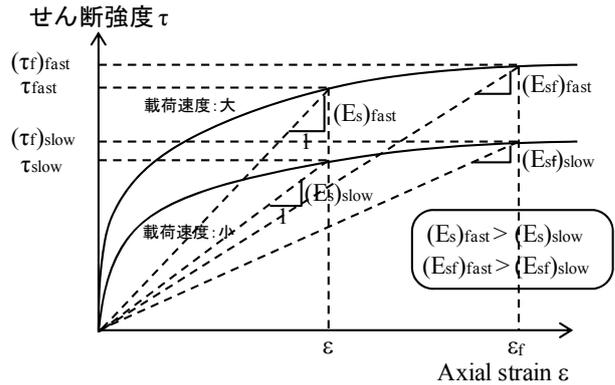
年	地震	観測点	最大速度 (cm/sec)	
			鉛直方向	水平方向
1995	兵庫県南部沖地震	神戸海洋気象台	51	110
1995	兵庫県南部沖地震	JR鷹取	40	90
2004	新潟県中越地震	小千谷	31	98

Vesic et al.⁴⁾, Senanayake⁵⁾, Konagai et al.⁶⁾ は、直接基礎に対して荷重速度を変化させた模型鉛直荷重試験を実施し、支持力や地盤反力係数に与える荷重速度の影響を検証した。その結果、Vesic et al.およびKonagai et al. は、荷重速度の小さい範囲で極限支持力は徐々に減少するが、荷重速度の大きい範囲では極限支持力が増加すると報告している。また、Senanayake⁵⁾ は、荷重速度の増加とともに、極限支持力および地盤反力係数ともに増加する傾向を得ている。次に、Huy et al.⁷⁾ は、加圧式土槽を用いて、荷重速度を変化させた模型鉛直荷重試験を杭模型型に対して実施した。その結果、先端支持力および周面摩擦力ともに荷重速度の増加に伴い、増加すると報告している。このように、地盤材料の変形強度特性や基礎の支持力に与える荷重速度の影響について概観してきたが、既往の研究事例は、荷重速度の制御やデータ計測が不十分なこと、詳細なメカニズムの解明がなされていないことなどが指摘できる。

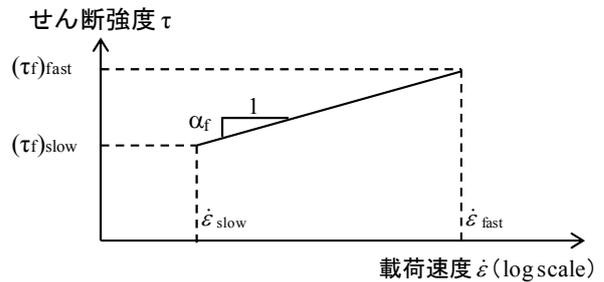
地盤材料の変形強度特性や杭の支持力および地盤反力係数における荷重速度依存性は定性的には知られているものの、その研究事例は少なく、定量的な評価手法は提案されていない現状にある。

本報では、地盤材料の変形強度特性および杭の支持力や地盤ばねに与える荷重速度の影響を確認するために実施した、一連の要素試験および遠心模型実験の結果について報告する。

2. 荷重速度を変化させた三軸圧縮試験



(a) せん断強度 vs. 軸ひずみ



(b) せん断強度 vs. 荷重速度

Fig. 2 地盤材料の荷重速度効果の模式図 General Trend of Loading Rate Effects on Soil Material

2.1 実験条件

本研究で最も重要なパラメータである荷重速度を正確に制御するために、2種類の三軸試験装置を用いた。その基本構成をFig.3に示す。荷重速度が小さい場合(0.0005, 0.005cm/sec)には電動ギア式の三軸試験装置を、荷重速度が大きい場合(0.05, 0.5, 5, 25cm/sec)には油圧式の三軸試験装置を用いた。測定は、荷重はロードセル、変位は差動トランス式変位計(LVDT)、間隙水圧は間隙水圧計を用いて実施した。排水は、供試体上下端で許し、間隙水圧の測定は供試体の下端で行なった。計測機器からの全ての信号は、アンプおよびフィルターを介して調整され、パソコンへ記録される。

排水試験時には、供試体の体積変化を伴うため、体積ひずみを測定する。標準的な荷重速度を用いた三軸圧縮試験では、体積変化の測定に差圧計を用いるのが一般的である。しかしながら、本研究で想定する地震時の挙動のように荷重速度が大きい場合には、差圧計による体積変化の測定は適切ではない。これは、荷重時間が非常に短いため計測が追いつかないこと、データに大きな乱れが生じることなどが理由として挙げられる。そこで、荷重速度が大きい場合にも、正確な体積変化の測定が可能な重量式体積変化計を用いた。これは、供試体から排出された間隙水の重量を直接測定することにより、上記の課題を解決した測定装置である。

三軸圧縮試験は、豊浦標準砂を用いて実施した。豊浦

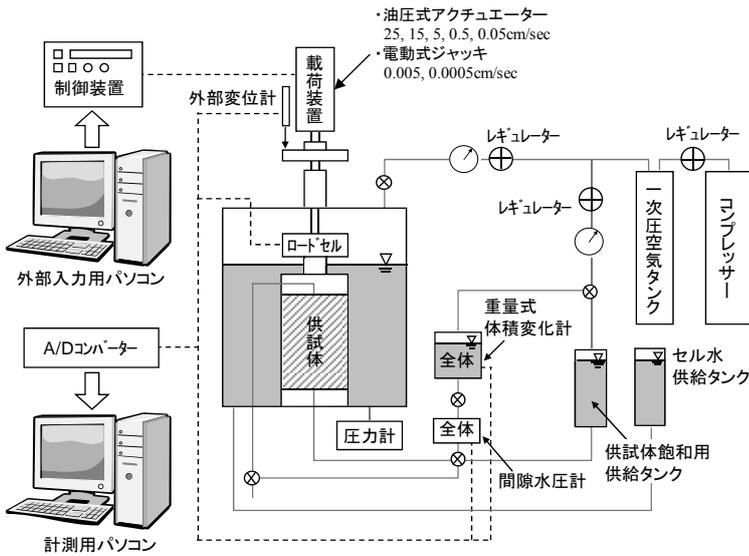


Fig. 3 三軸試験装置の基本構成
Basic Components of Triaxial Apparatus

砂の物理特性をTable 2に示す。

供試体は、目標相対密度 $D_r=80\%$ として、空中落下法により作成した。さらに、供試体は、背圧98kPaを作用させた状態で、 CO_2 法により飽和した。B値は、実験開始前の低拘束圧下で確認し、その最小値が0.95を確保することで、供試体の完全飽和とした。

三軸圧縮試験は、5シリーズ実施した。ここで、Series 1～Series 4は飽和砂供試体、Series 5は乾燥砂供試体に対する実験である。実験プログラムをTable 3にまとめて示す。三軸圧縮試験は、全てのシリーズで密な砂を対象として実施した。これは、杭先端の挙動を想定した場合、杭先端地盤はN値の大きい地盤となるためである。飽和砂に対する実験は、排水および非排水の両者に対して、拘束圧100および500 kPaの条件下で実施した。実地盤との対応を考えると、地下水位以深は飽和の排水・非排水条件に、地下水位以浅は乾燥の排気条件に対応することになる。ここで、‘排水’は実験中に排水ラインを開いた状態を保持することを意味しており、載荷速度によっては間隙水圧が発生するケースもある。したがって、この状態は、‘部分排水’を意味することとなる。

2.2 実験結果

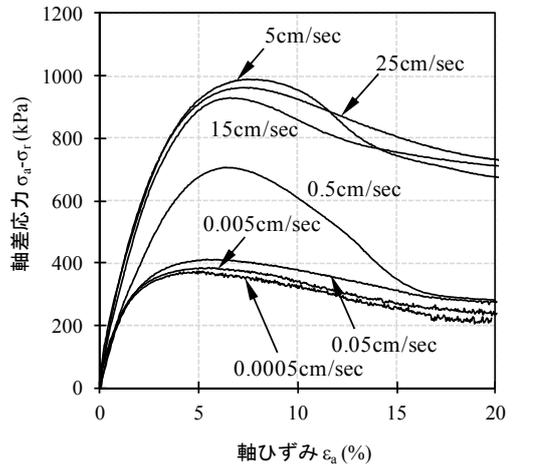
Fig.4(a), (b), (c)は、Series 1で実施した飽和砂に対する排水条件における実験結果で、それぞれ、軸差応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係、過剰間隙水圧-軸ひずみ関係を示す。Fig.4 (a)によれば、載荷速度が大きくなるにつれて、変形係数および破壊強度ともに、大きくなる傾向を示す。ここで、破壊強度は、軸差応力-軸ひずみ関係における最大強度として定義した。さらに、Fig.4(a)に示す軸差応力-軸ひずみ関係によれば、その軸差応力-軸ひずみ関係の傾向は、載荷速度5～25cm/secから得られた曲線群と載荷速度0.0005～0.05cm/secから得

Table 2 豊浦砂の物理特性
Physical Properties of Toyoura Sand

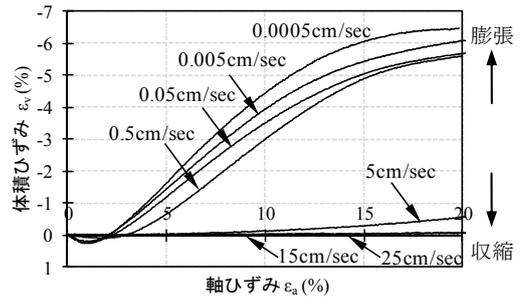
土粒子密度: G_s	2.645
平均粒径: D_{50} (mm)	0.19
30%粒径: D_{30} (mm)	0.16
有効粒径: D_{10} (mm)	0.14
均等係数: U_c	1.56
曲率係数: U_c'	0.95
最大間隙比: e_{max}	0.99
最小間隙比: e_{min}	0.62

Table 3 実験プログラム
Experiment Program

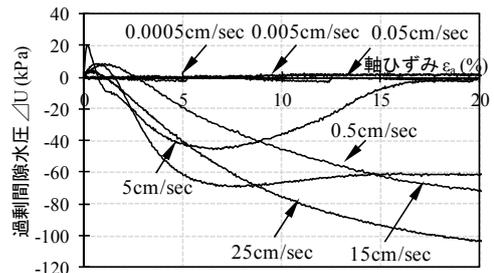
Series	飽和/乾燥	排水条件	拘束圧 (kPa)	載荷速度 (cm/sec)	目標相対密度 (%)
1	飽和	排水	100	0.0005, 0.005, 0.05, 15, 25	80
2			500		
3		100			
4		500			
5	乾燥	排気	100		



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係

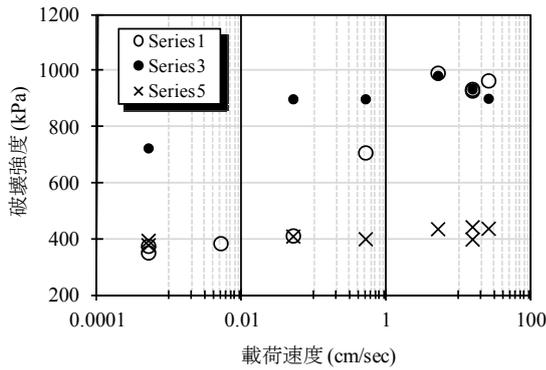


(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

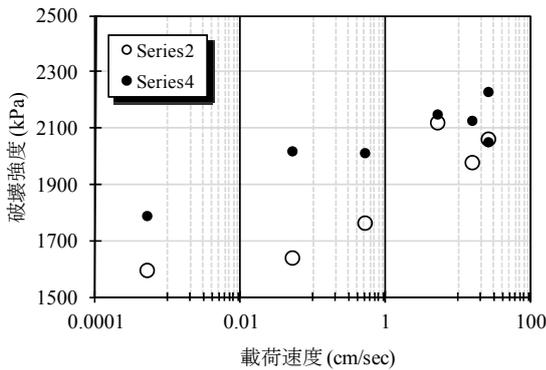


(c) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

Fig. 4 三軸圧縮試験結果
Results of Triaxial Compression Test (Series 1)



(a) 拘束圧100kPa (Series 1, 3, 5)



(b) 拘束圧500kPa (Series 2, 4)

Fig. 5 破壊強度-荷重速度関係

Relationships between Failure Strength and Loading Rate

られた曲線群の2つに大別され、荷重速度0.5cm/secから得られた曲線は両グループの間に存在する。Fig.4(b), (c)から、荷重速度が大きいグループは、排水条件での実験でありながら、荷重中にほとんど体積ひずみを生じておらず、過剰間隙水圧が生じており、非排水に近い挙動となっていたと判断される。一方で、荷重速度の小さいグループは、荷重中に体積ひずみを生じ、過剰間隙水圧の発生は確認されなかった。変形特性に与える荷重速度の影響は、Fig.4(b)に示すように、荷重速度が小さい場合に、大きな体積ひずみを生じる。逆に、荷重速度が大きい場合には体積ひずみは小さい。すなわち、荷重速度が大きい場合は、負の間隙水圧が発生して強度および変形係数が増大する。

破壊強度と荷重速度の関係をFig.5(a), (b)に示す。ここで、Fig.5(a)は拘束圧100kPaに対するシリーズを、Fig.5(b)は拘束圧500kPaに対するシリーズをまとめている。Fig.5(a)より、排水条件下における飽和砂(Series 1)の破壊強度は、荷重速度0.05cm/secから急激に増加し、荷重速度15cm/secにおいて非排水条件下における破壊強度とほぼ等しくなる。同様の傾向は、拘束圧の異なるSeries 2においても、観察された。砂の排水・非排水強度に影響を与える要因として、間隙水圧の消散、粘性の影響、慣性力の影響があげられる。本研究では、荷重速度一定の条件下で三軸圧縮試験を実施しているため慣性力の影響は無

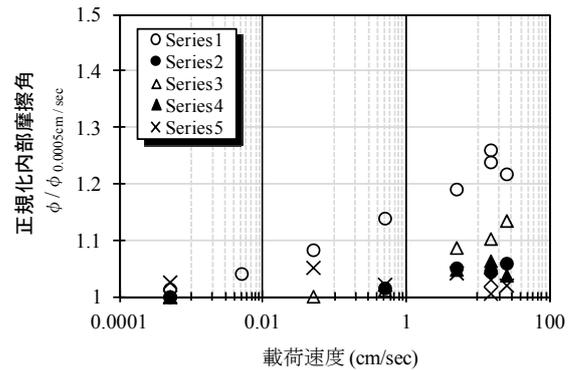


Fig. 6 正規化内部摩擦角-荷重速度関係

Relationships between Normalized Internal Friction Angle and Loading Rate

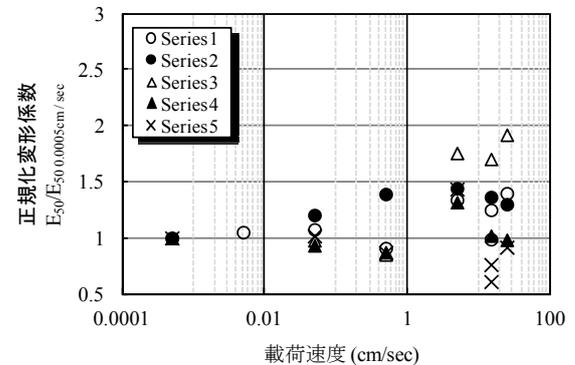


Fig. 7 正規化変形係数-荷重速度関係

Relationships between Normalized Deformation Modulus and Loading Rate

視できる。排水試験において荷重速度が大きい場合には、間隙水圧の消散の他に粘性の影響が加わるため、強度増加が大きくなる。一方で、非排水試験の場合は、粘性の影響のみとなり、排水強度より強度増加は小さくなる。さらに、乾燥砂においては間隙水が存在しないことから強度増加は飽和砂に比べて小さなものとなる。また、拘束圧の影響に着目すると、拘束圧が大きい場合に、荷重速度効果が小さくなる傾向が認められた。このように急激な破壊強度の増加は、主に、間隙水圧の発生・消散に起因すると考えられる。

最大応力比における内部摩擦角 ϕ は、(1)式により算出される。

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_a - \sigma_r}{\sigma_a + \sigma_r} \right)_{\max} \quad (1)$$

ここで、 σ_a, σ_r : 最大・最小主応力

最大応力比における内部摩擦角 ϕ を最小の荷重速度で得られた内部摩擦角 ϕ で正規化し、荷重速度との関係をFig.6に示した。Fig.6より、最小の荷重速度に対して、荷重速度25cm/secで得られた内部摩擦角 ϕ は、1.25倍程度大きな値となることがわかった。乾燥砂においても、5%程度の内部摩擦角の増加が確認された。

Fig.7は、内部摩擦角と同様に、各実験より得られた変形係数 E_{50} を最小の荷重速度で得られた変形係数 E_{50} によ

り正規化し、載荷速度との関係を示した。ここで、変形係数 E_{50} は、下式により算出される。

$$E_{50} = \frac{(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}}{2\varepsilon} \quad (2)$$

ここで、 $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ ：最大主応力差

ε ： $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}/2$ に対応するひずみ

Fig.7から、変形係数 E_{50} も、Series 5の乾燥砂条件での実験を除いて、載荷速度が大きくなるとともに、大きくなる傾向が認められた。

2.3 三軸圧縮試験のまとめ

本章では、砂の挙動に与える載荷速度の影響を把握するために、載荷速度を0.0005～25cm/secの範囲で変化させた三軸圧縮試験を実施し、その結果を報告した。以下に、主要な知見を示す。

- 1) 載荷速度が大きい場合に、破壊強度および変形係数ともに大きくなる傾向を示す。
- 2) 排水条件における軸差応力-軸ひずみ関係から、その挙動は大きく2つのグループに分けられる。載荷速度が5cm/secより大きい場合には非排水挙動を示す。一方で、載荷速度が0.05cm/secより小さい場合には、完全な排水挙動となる。
- 3) 非排水条件における強度増加は排水条件に比べて小さい。これは、非排水条件では、強度増加に影響を与える要因が粘性の影響のみとなるためである。さらに、乾燥砂では、間隙水が存在しないため強度増加は小さくなる。
- 4) 内部摩擦角および変形係数は、載荷速度の増加とともに大きくなる。載荷速度25cm/secにおける内部摩擦角および変形係数は、最小の載荷速度で得られた値に対して、それぞれ10～50%、30～150%増加する。

3. 遠心模型実験

3.1 実験装置および実験条件

杭の支持力や地盤反力係数に与える載荷速度の影響を遠心模型実験により検討した。用いた遠心模型実験装置をFig.8に示す。遠心模型実験装置は、ビーム式であり、両端に模型搭載用とカウンターウェイト搭載用の2つのプラットフォームを有する。回転軸からプラットフォームベースまでの距離である回転半径は2.45mである。遠心模型実験装置の仕様をTable 4にまとめて示す。

データの収録には、2つのタイプの信号伝達が用いられる。一つはスリップリングを介した手法であり、計測装置はジャンクションボックスを通してスリップリングに接続され、信号はアンプに伝達される。もう一方は、光学式のロータリージョイントを介した手法である。計測データは増幅され、A/D変換器によりデジタル信号に変換される。

Fig.9には、遠心模型実験概要を示す。鋼製土槽の寸法

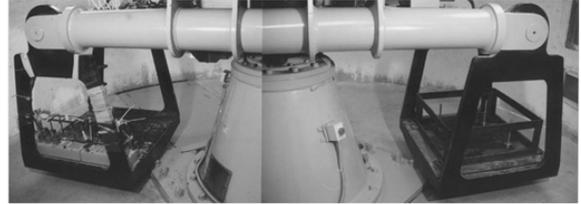
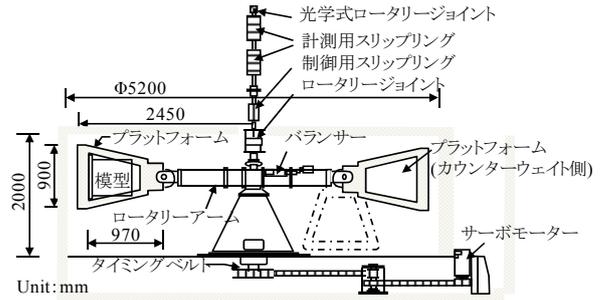
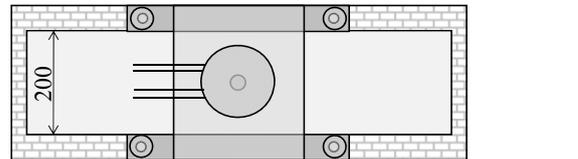


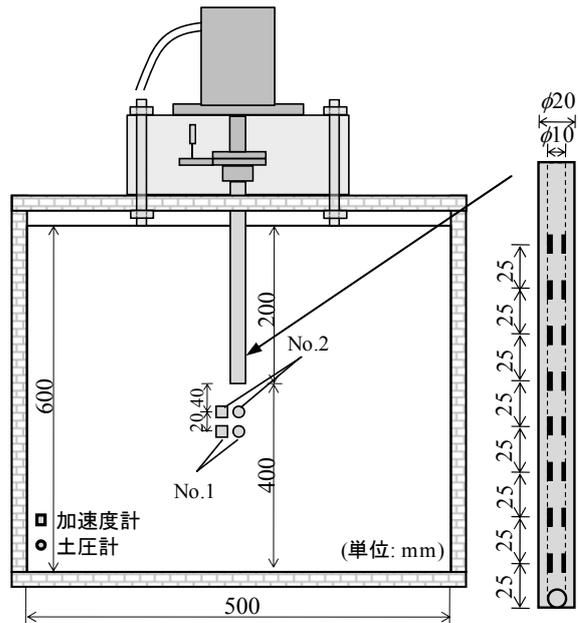
Fig. 8 遠心模型実験装置
Centrifuge Model Test Apparatus

Table 4 遠心模型実験装置の仕様
Specifications of Centrifuge Model Test Apparatus

有効半径	2.45	m
バケット寸法	幅	0.9
	奥行き	0.9
	高さ	0.97
能力	最大容量	50
	最大回転数	300



(a) 平面図



(b) 立面図

Fig. 9 遠心模型実験概要
Schematic View of Centrifuge Model Test

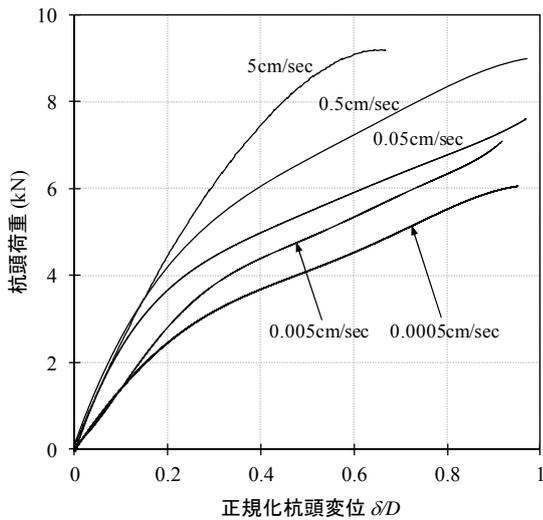


Fig. 10 杭頭荷重-正規化杭頭変位関係
Relationships between Load at Pile Head and Normalized Displacement at Pile Head

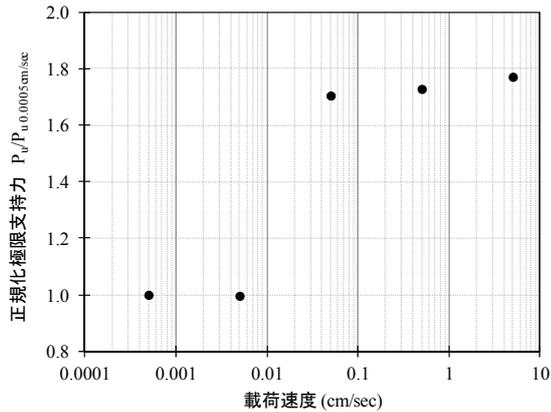


Fig. 11 正規化極限支持力-荷重速度関係
Relationships between Normalized Ultimate Bearing Capacity and Loading Rate

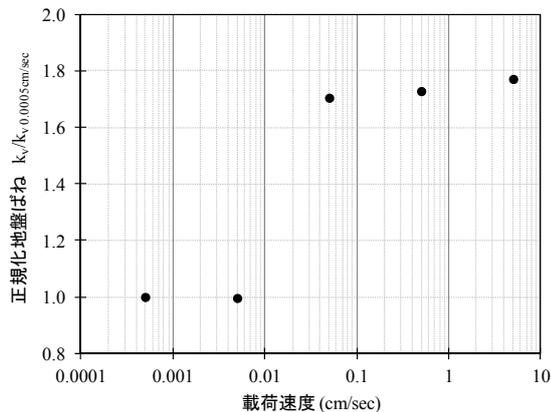


Fig. 12 正規化地盤ばね-荷重速度関係
Relationships between Normalized Coefficient of Subgrade Reaction and Loading Rate

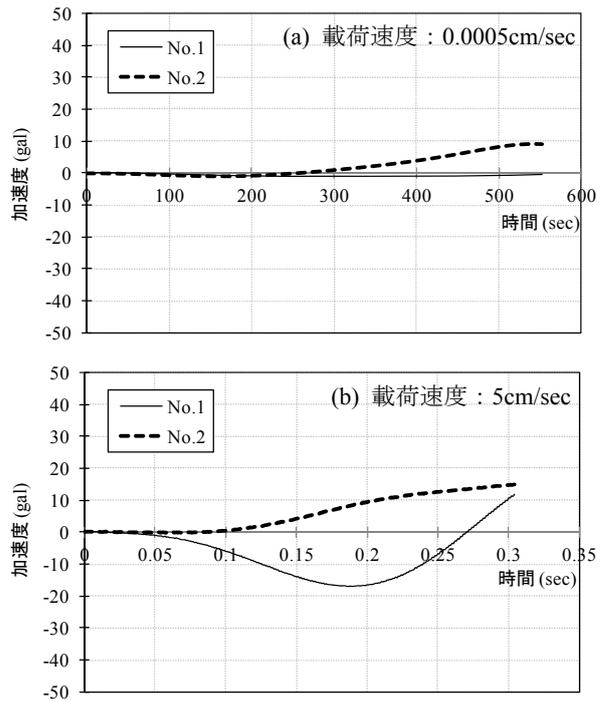


Fig. 13 地盤内加速度の時刻歴曲線
Time History Curves of Acceleration in Model Ground

は、幅 $B=500\text{mm}$ 、高さ $h=600\text{mm}$ 、奥行き $l=200\text{mm}$ である。模型杭は、杭径 20mm 、杭長 200mm 、肉厚 5mm の中空のステンレス製パイプである。模型杭表面は、滑らかである。模型杭内部には、荷重中の杭に生じるひずみを測定するためにひずみゲージを設置した。さらに、模型杭先端には杭先端に作用する抵抗力を直接測定するために、小型の土圧計を設置した。模型地盤内には、杭先端付近の土圧および加速度を確認するために、小型土圧計および小型加速度計を2深度に埋設した。鉛直荷重は、油圧式ジャッキで行ない、ジャッキと模型杭は剛接されている。用いた荷重速度は、 $0.0005\text{cm/sec} \sim 5\text{cm/sec}$ である。荷重速度の制御には、ファンクションジェネレーターを用いている。模型地盤は、豊浦砂を用いて空中落下法により作成し、目標相対密度 $D_r=80\%$ に調整した。ここで、豊浦砂の物理特性は、Table 2に示した通りである。全ての実験は、遠心加速度 $50G$ 場で乾燥砂地盤にて実施した。

3.2 実験結果

Fig.10に、杭頭部における荷重-変位関係を示す。ここで、杭頭変位は、実測による変位を杭径で正規化した値を示している。杭頭における最大荷重および剛性は、荷重速度の増加とともに増加する傾向が得られた。

杭頭部において得られた極限支持力を最小の荷重速度で得られた極限支持力で正規化した値と荷重速度の関係をFig.11に示す。ここで、極限支持力は、Fig.10に示した杭頭部における荷重-変位関係の変位量 $0.1D$ における荷重として定義した。Fig.11によると、極限支持力は、載

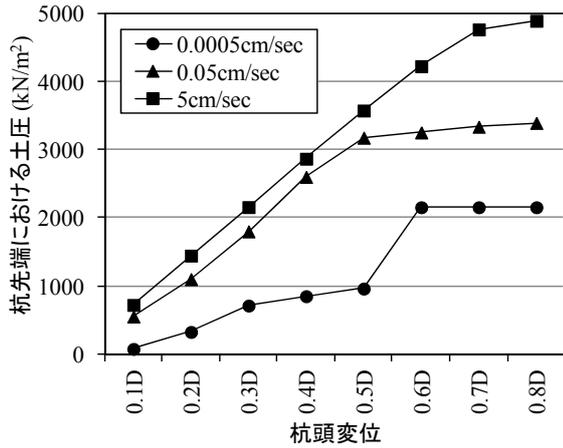


Fig. 14 杭先端土圧-杭頭変位関係
Relationships between Earth Pressure at Pile Tip and Displacement at Pile Head

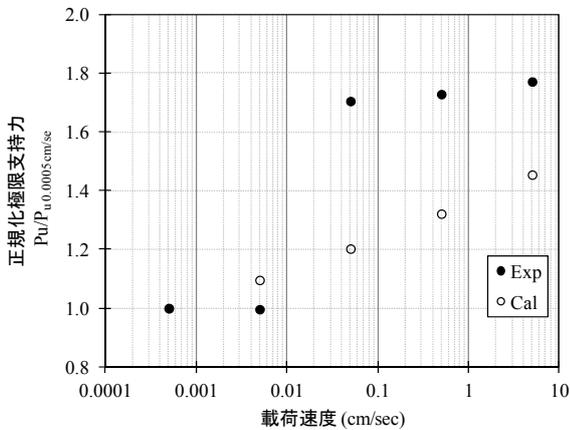


Fig. 16 極限支持力の比較
Comparison of Calculated Value and Experimental Value on Ultimate Bearing Capacity

荷速度が大きくなるにつれて大きな値を示すことがわかる。最小の荷速度における値と最大の荷速度における値を比較すると、極限支持力の増分は、80%程度である。Fig.12には、各実験における地盤ばねを算出し、最小の荷速度における地盤ばねで正規化し、荷速度との関係を示した。ここで、地盤ばねは、荷重-変位関係の初期勾配(変位レベル0.1D)として算出している。地盤ばねも、荷速度が大きい場合に大きな値を示しており、最小の荷速度における値と最大の荷速度における値を比較すると、その増分は80%程度である。

荷速度中の杭先端地盤における加速度の時刻歴変化を、Fig.13に示す。ここでは、荷速度0.0005および5cm/secの場合を示す。これらの図より、荷速度中において杭先端地盤で加速度はほとんど発生していないことが分かる。したがって、模型地盤に慣性力は生じておらず、支持力の増加した要因が慣性力の影響ではないと判断される。

Fig.14は、模型杭先端で直接測定した土圧と杭頭変位の関係である。Fig.14より、荷速度が大きい場合に、杭先端に作用する土圧も大きくなり、その値は荷速度5cm/secの場合で約5000kN/m²である。さらに、Fig.15には、

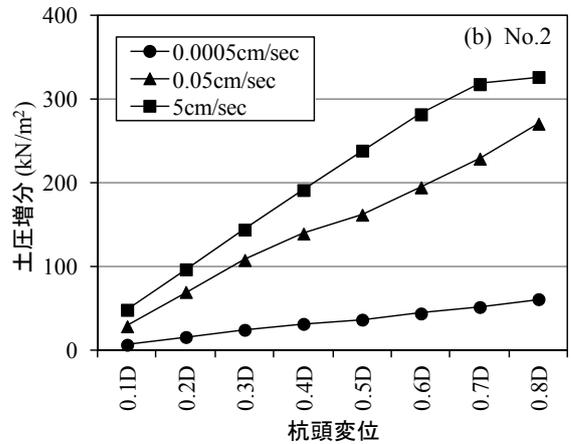
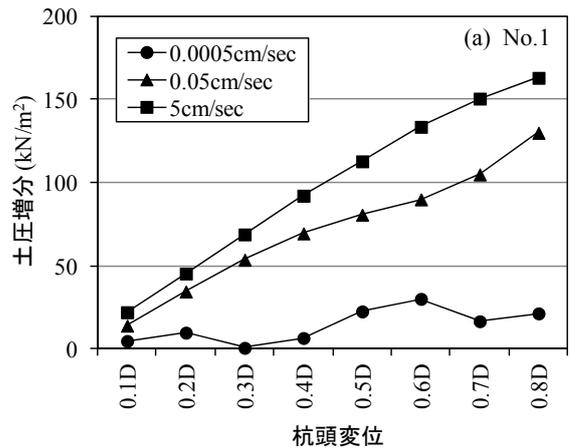


Fig. 15 杭先端における土圧増分-杭頭変位関係
Relationships between Increment of Earth Pressure in Model Ground and Displacement at Pile Head

加速度計と同一深度に設置した土圧計の計測値から算出した杭先端地盤の土圧増分と杭頭変位の関係を示す。No.1およびNo.2で、荷速度の増加とともに、土圧増分も大きくなる傾向を示す。これは、荷速度が大きい場合に杭先端地盤の応力の影響範囲が大きくなること、すなわち支持力機構が変化していることを示唆している。以上のことから、極限支持力の増加は、先端支持力に対する荷速度の効果が大きいものと推察される。その要因として、3章の三軸圧縮試験で示したように、杭先端地盤の破壊強度の増加に関係しているものと考えられる。また、杭先端地盤の土圧の増加にみられるように、杭先端地盤の応力の影響範囲の変化も支持力増加の要因として考えられる。

杭の支持力は、(3)~(5)式に示す支持力理論に基づき算出される。

$$Q = Q_s + Q_b \quad (3)$$

$$Q_b = A_b (cN_c S_c + \gamma DN_q S_q + \gamma BN_\gamma S_\gamma) \quad (4)$$

$$Q_s = A_s (K_0 \gamma z \tan \phi) \quad (5)$$

ここで、

N_c, N_q, N_γ : 支持力係数

$$N_c = (N_q - 1)$$

$$N_q = \exp(\pi \tan \phi) \tan^2(45 + \phi/2)$$

$$N_f = 2(N_q + 1) \tan \phi$$

S_c, S_q, S_γ : 形状係数, c : 粘着力(kN/m²)

γ : 単位体積重量(kN/m³), D : 杭の根入れ長(m)

B : 杭径(m), K_0 : 静止土圧係数 $K_0 = 1 - \sin \phi$

A_b, A_s : 杭先端および杭周囲の面積(m²)

ϕ : 地盤の内部摩擦角(deg.)

内部摩擦角の増加は、先端支持力および周面摩擦力の増加に反映される。支持力計算に際して、模型実験と同様の条件で得られた内部摩擦角の値を用いた。具体的に、Series 5の乾燥砂に対する三軸圧縮試験結果を用いた。前述のFig.6で示したように、Series 5において5%程度の内部摩擦角の増加が確認された。静的な載荷速度で得られた内部摩擦角に対して、増加率を考慮することで各載荷速度における内部摩擦角を算出した。極限支持力の計算値を正規化した値と載荷速度の関係をFig.16に示す。ここでは、模型実験結果も合わせて示している。Fig.16中の凡例‘Exp.’および‘Cal.’は、それぞれ実験値および計算値を示している。Fig.16から、正規化した極限支持力の計算値は、実験値を若干、下回っている。しかしながら、載荷速度の影響を考慮した要素試験を実施し、地盤の力学定数を推定することで、極限支持力に対する載荷速度の影響を反映することが可能となる。

3.3 遠心模型実験のまとめ

杭の支持力および地盤ばねに与える載荷速度の影響を把握するために、遠心場における杭の模型鉛直載荷試験により検討した。以下に、主要な結論を述べる。

- 1) 載荷速度が大きい場合に、極限支持力および地盤ばねが大きくなる傾向を示した。
- 2) 極限支持力および地盤ばねの増分は、両者ともに、80%程度である。
- 3) 載荷速度の影響を考慮した要素試験を実施し、地盤定数を評価することで、極限支持力の算定に載荷速度の影響を反映することが可能となる。

4. まとめ

本研究は、地盤材料の変形強度特性および杭の支持力および地盤ばねに与える載荷速度の影響を把握するために、一連の三軸圧縮試験および遠心場における模型実験を実施した。その結果、地盤材料の破壊強度および変形係数、杭の支持力および地盤ばねともに、載荷速度が大きい場合に大きくなることがわかった。さらに、想定す

る条件で実施した要素試験結果を用いて極限支持力算定することで、極限支持力に載荷速度の影響を反映することが可能となる。したがって、地盤材料のパラメータを適切に評価することで、地震時における支持力や変形を合理的に評価でき、杭基礎設計を合理化できる可能性があると考えられる。

謝辞

4章の遠心模型実験に関しては、東京工業大学に委託した研究成果の一部を取りまとめたものである。実験の遂行にあたり、東京工業大学の関栄氏には多大な協力を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Casagrande, A. et al.: Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soils under Dynamic Loads, Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 29-34, (1948)
- 2) Seed, H.B. et al.: Investigation of the Effect of Transient Loading on the Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand, Proceedings of American Society for Testing and Materials, 1288-1306, (1954)
- 3) Lee, K.L. et al.: Effect of Transient Loading on the Strength of Sand, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 239-247, (1969)
- 4) Vesic, A.S. et al.: An Experimental Study of Dynamic Bearing Capacity of Footing on Sand, Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 209-213, (1969)
- 5) Senanayake, K.S.: Effect of Loading Velocity on the Bearing Capacity and Stress Distribution in a Sandy Soil, Master Thesis, Tokyo Institute of Technology, (1973)
- 6) Konagai, K. et al.: An Experimental Study on the Loading Rate Effect on Bearing Capacity of Footing on Saturated Sand, Proceedings of the 9th Japan Earthquake Symposium, 307-312, (1994)
- 7) Huy, N.Q. et al.: Influence of Loading Rate on the Bearing Capacity of Piles in Sand, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2125-2128, (2005)