遠心載荷実験における基礎の根入れ効果が杭頭水平力に 及ぼす影響と液状化層厚

－上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力の位相差－

EMBEDMENT EFFECTS OF FOOTING ON SHEAR FORCE AT PILE HEAD AND LIQUEFIED LAYER THICKNESS BASED ON CENTRIFUGE TESTS

－Phase difference between superstructure inertia and total earth thrust, sidewall friction－

田村 修次*

Shuji TAMURA

Embedment effects of a footing on shear force at pile heads were investigated based on dynamic centrifuge tests on a superstructure-footing model that is supported by 2x2 piles in either a thick liquefiable layer or a thin liquefiable layer cases. The following conclusions were reached: (1) the shear force increases due to the embedment effects consisting of total earth thrust and sidewall friction in the thick liquefiable layer case. In contrast, the shear force decreases due to the embedment effects in the thin liquefiable layer case; (2) the above difference in the embedment effects depend on the amplitudes of the soil and footing displacement.

Keywords: Earth pressure, Friction, Embedment effect, Footing, Pile, Liquefaction

土圧, 摩擦, 根入れ効果, 基礎部, 杭, 液状化

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、液状化地盤で杭基礎が多くの被害を受け、杭の被害事例に対し多くの検討がなされている^{例え(1), (2), (3)}。それより、基礎部に作用する土圧と摩擦力、すなわち基礎の根入れ効果が、杭応力に影響を及ぼすことが指摘されている。例えば、深江浜で被災した建物（S造3階建て）に対し、2次元FEM解析および応答変位法による検討が行われ、基礎部の受働抵抗によって、上部構造物慣性力の一部は杭頭に伝わらなかったと報告⁴⁾されている。一方、大型せん断土槽を用いた液状化地盤－杭－上部構造物系の振動台実験では、上部構造物慣性力と基礎部に作用する土圧合力は同位相になり、杭頭水平力が大きくなったと報告⁵⁾されている。

近年、液状化地盤における建築物の杭の設計法として、応答変位法が用いられている⁶⁾。応答変位法で液状化地盤における杭応力を適切に評価するためには、杭と地盤の相互作用力のみならず基礎部に作用する土圧と摩擦力の大きさ、さらに上部構造物慣性力と土圧合力・摩擦力の位相差を考慮する必要がある。

基礎の根入れ効果に関する研究は、1980年代に多く行われた^{例え(7), (8)}。1985年には「地震力に対する建築物基礎の設計指針⁹⁾」（日本建築

センター）」が示され、現在でも設計に用いられている。この設計指針では、上部構造物慣性力と土圧合力は逆位相とし、基礎周辺地盤の受働抵抗が上部構造物慣性力の一部を負担して杭頭水平力は減少する。また、数値解析から、基礎の根入れ効果が上部構造物の固有周期と地盤の固有周期の関係によって異なり、短周期建物では土圧合力と上部構造物慣性力が同位相になり、長周期建物では逆位相になることが指摘されている^{10)~12)}。基礎の根入れ効果は実験的にも検討され、シリコン地盤模型を用いた振動台実験から、長周期建物では杭頭水平力が上部構造物慣性力に比べて大幅に減少すること、短周期建物では基礎の根入れによる杭頭水平力の低減効果が小さいことが報告¹³⁾されている。また、大型せん断土槽を用いた振動台実験から、上部構造物慣性力と土圧合力の位相差は、上部構造物の固有周期、地盤の卓越周期のみならず、地盤変位と基礎部変位の影響を受けることが指摘されている⁵⁾。

以上のように、既往の杭の被害事例の分析、数値解析および振動台実験では、上部構造物慣性力と土圧合力が同位相のケースと逆位相のケースがある。しかし、液状化地盤において、上部構造物慣性力と土圧合力が同位相になるか、逆位相になるかを簡便に判断する手法

* 京都大学防災研究所 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.

図1 実験ケース

表1 実験モデルの諸元

	項目	模型スケール	実大スケール
上部構造	質量	1.0kg	64,000kg
	固有振動数	98Hz	2.45Hz
基礎部	質量	0.7kg	44,800kg
	寸法(L×B×H)	80mm×50mm×43mm	3.2m×2.0m×1.72m
杭	長さ	0.18mm	7.2m
	直径	6mm	240mm
	曲げ剛性	12.0 Nm ²	30.7 MNm ²

図2 実験モデル

は確立していない。それは、液状化地盤において、上部構造物慣性力と土圧合力が同位相になるケースと逆位相になるケースを実験等で再現し、そのメカニズムを検討した例が極めて少ないことに一因があると考えられる。

そこで本研究では、液状化層厚が厚く表層乾燥砂層が薄い地盤モデルおよび液状化層厚が薄く表層乾燥砂層が厚い地盤モデルで、杭-基礎部-上部構造物系の遠心載荷実験を行い、上部構造物慣性力、基礎根入れ部に作用する土圧合力・側面摩擦力と杭頭水平力の関係を検討する。さらに、液状化地盤において土圧合力・側面摩擦力が、杭頭水平力を増大させる側または減少させる側に作用する条件を検討する。

2. 実験概要

2.1 実験ケースおよび実験モデル

実験は、京都大学防災研究所の遠心載荷装置を用いて行った。遠心装置の半径は2.5mである。実験は全て40g場で行った。実験で用いたせん断土槽は、幅45cm(加振方向)、奥行15cm、高さ20cm(実物スケール：幅18m、奥行6m、高さ8m)である。地盤モデルは、図1に示すように2層とし、表層がトーヨーケイ砂2号($D_{50}=1.92\text{mm}$)で相対密度30%程度、下層がアルパニーケイ砂#48($D_{50}=0.29\text{mm}$)で相対密度45%程度である。Case 1ではケイ砂2号の層厚が4cm、アルパニーケイ砂の層厚が16cmである。一方、Case 2ではケイ砂2号の層厚が12cm、アルパニーケイ砂の層厚が8cmである。遠心力による地下水位の変動を考慮し、地下水位は表層と下層の境界よりも若干高く設定した。表層乾燥砂層として粒径の大きいケイ砂2号を用いたのは、サクシオンによる水の吸い上げを軽減するためである。間隙水は、粘性を水の約40倍に調整したメトロゾ溶液である。加速度計および過剰間隙水圧計を図1に示すように配置した。入力波は臨海波⁽⁴⁾の最大加速度を 180cm/s^2 (実大スケール)に調整したものをを用いた。

杭-基礎部-上部構造物の平面図および断面図を図2に、諸元を表1に示す。基礎部と上部構造物は真鍮製である。基礎部の大きさは幅80mm(加振方向)、奥行50mm、高さ43mmであり、質量は0.7kgである。

図3 上部構造物、基礎部および杭頭に作用する力(模式図)

土圧合力を直接計測するために、基礎部に超小型ロードセル(東京測器製)を主働面と受働面に取り付け、受圧板を3点で支持した。また、基礎部模型の表面は実際の基礎に比べて滑らかであることを考慮し、基礎部模型の周面には #800の紙やすりを取り付けている。上部構造物の質量は1.0kgであり、上部構造物と基礎部の応答加速度の伝達関数から算定した上部構造物の固有周波数は98Hzであった。杭模型は直径6mm、長さ18cm(実物スケール：直径24cm、長さ7.2m)、 $EI=12.0\text{Nm}^2$ の中密なステンレス棒4本で 2×2 の配置である。基礎部に底面プレートは無く、杭頭は基礎部の上面プレートに1.5D(D：杭直径)埋め込ませて剛結合し、杭端は土槽底面プレートに同様の方法で剛結合している。杭頭の2箇所曲げ歪を測定し、杭頭水平力(せん断力)の評価を可能としている。基礎部の内部は空洞で杭頭のひずみゲージは砂と接していないため、精度良く杭頭水平力の評価が可能である。以下、単位は実大スケールに換算して示す。

2.2 土圧合力および側面摩擦力の評価

図3に示すように、地震時には上部構造物に慣性力 F_{is} 、基礎部に慣性力 F_{if} 、基礎部右側の土圧 P_R 、基礎部左側の土圧 P_L 、側面摩擦力 P_{fs} および底面摩擦力 P_{fb} が作用する。基礎部を見かけ上押し引きする土圧合力 P_{et} は、基礎部の左右の土圧の差に相当し、次式で与えられる。

$$P_{et} = P_R - P_L \quad (1)$$

P_R と P_L は、基礎部模型に取り付けた受圧板とロードセルで計測した。 P_R と P_L は、まず1g場で初期値をゼロとし、遠心力場(40g)で静止土圧を計測した。その後、初期値をゼロとして加振を行った。したがって P_R と P_L は、「受働側(主働側)土圧-静止土圧」に対応する。地盤と基礎部の相対変位が十分大きくなると、 P_R (または P_L)は受働土圧に達する。このときの土圧合力は「受働土圧-主働土圧」となり、基礎部の受働抵抗⁽⁵⁾と一致する。側面摩擦力 P_{fs} は次式⁽⁶⁾で算定した。

$$P_{fs} = Q - P_{et} - F_{is} - F_{if} - P_{fb} \quad (2)$$

杭頭水平力 Q は杭頭の2点の曲げモーメントから、土圧合力 P_{et} は式(1)

から、上部構造物慣性力 F_{is} と基礎部慣性力 F_{if} は、それぞれの質量と加速度から算定できる。本実験では基礎部底面プレートがないため底面摩擦力 P_{fb} はゼロとみなす。

3. 実験結果

3.1 地盤と基礎部および上部構造物の応答

図4, 5に、振動台、地表面、基礎部、上部構造物の加速度、過剰間隙水圧比、基礎部変位および地盤変位を示す。基礎部変位および地盤変位は加速度をローカットフィルター(模型スケールで3Hz)を通した後、2階積分で算定した。基礎部変位および地盤変位は振動台と

図4 地盤、基礎部および上部構造物の応答 (Case 1)

図5 地盤、基礎部および上部構造物の応答 (Case 2)

図6 基礎部 - 上部構造物慣性力、杭頭水平力、土圧摩擦合力および地盤と基礎の相対変位 (Case 1)

図7 基礎部 - 上部構造物慣性力、杭頭水平力、土圧摩擦合力および地盤と基礎の相対変位 (Case 2)

の相対変位である。なお、地盤変位は、基礎部の左右における地表面およびG. L. -1.6m (基礎部底面レベル) にある4つの加速度計 (図1) の平均で評価している。Case 1では、加振開始後8秒程度から過剰間隙水圧が上昇し、20秒付近で液状化した。Case 2では、10秒付近から過剰間隙水圧が上昇し、15秒付近で間隙水圧比が0.9程度に達した。測定地点の間隙水圧比は1に達していないが、地表面の地盤変位 (22cm) から地盤全体のせん断ひずみは3%程度と推定され、飽和砂層は液状化したと思われる。入力加速度は、Case 1とCase 2でほぼ同じである。地表面加速度は、液状化とともに振幅が減少して長周期化する。この傾向はCase 1で顕著である。一方、Case 1の基礎部および上部構造物加速度は、Case 2のそれらに比べて短周期成分が卓越している。Case 1の基礎部の加速度波形は、地表面の加速度波形と異なることから、土槽底面から杭を介しての入力の影響を受けたと思われる。Case 2の基礎部の加速度波形は、地表面の加速度波形とほぼ同じである。これは、Case 2の杭の上部が非液状化層にあるため、杭の上部および基礎部が表層地盤に拘束されたためと考えられる。

3.2 基礎部-上部構造物慣性力と杭頭水平力および土圧摩擦合力

図6, 7 (a)-(d)に、基礎部と地盤変位の相対変位、土圧摩擦合力 (土圧合力と側面摩擦力の和)、杭頭水平力および基礎部-上部構造物慣性力 (基礎部慣性力と上部構造物慣性力の和) を示す。なお、土圧合力は式(1)、側面摩擦力は式(2)から算定した。液状化した20秒以降、Case 1の基礎部-上部構造物慣性力の振幅はCase 2のそれより小さい。一方、Case 1の杭頭水平力の振幅は、Case 2のそれより大きい。Case 1の杭頭水平力の最大値は382kN ($t=43.44s$) で、Case 2のそれ134kN ($t=17.89s$) の3倍程度である。Case 1の土圧摩擦合力の振幅は、Case 2のそれの概ね2倍程度である。これは、Case 1の相対変位がCase 2のそれより極めて大きいためと思われる。

土圧および側面摩擦力が杭頭水平力に及ぼす影響を検討するために、加振開始から15秒から60秒までの基礎部-上部構造物慣性力、杭頭水平力、土圧摩擦合力を図8, 9に示す。液状化層厚の大きいCase 1では、土圧摩擦合力が基礎部-上部構造物慣性力より大きい。基礎部-上部構造物慣性力は、土圧摩擦合力に比べて短周期成分が卓越して

図8 基礎部 - 上部構造物慣性力、杭頭水平力、土圧摩擦合力、基礎部慣性力、上部構造物慣性力、土圧合力および側面摩擦力 (Case 1)

図9 基礎部 - 上部構造物慣性力、杭頭水平力、土圧摩擦合力、基礎部慣性力、上部構造物慣性力、土圧合力および側面摩擦力 (Case 2)

いる。ただし、基礎部-上部構造物慣性力は、土圧摩擦合力と同位相の長周期成分を含むため、杭頭水平力のピークは土圧摩擦合力より概ね大きい。それに対し、液状化層厚の小さいCase 2では、土圧摩擦合力が基礎部-上部構造物慣性力より若干大きく、土圧摩擦合力と基礎部-上部構造物慣性力が逆位相になる傾向を示す。そのため、杭頭水平力は両者の差となり小さい。なお、両ケースともに、上部構造物慣性力と基礎部慣性力は同位相であり、土圧合力と側面摩擦力も同位相である。土圧合力の最大値は、Case 1で186kN($t=51.38s$)、Case 2で124kN($t=43.53s$)である。この時の受働側土圧に静止土圧をたして土圧係数を算定すると、Case 1で5.1、Case 2で3.6となる。一方、側面摩擦力の最大値は、Case 1で143kN($t=20.20s$)、Case 2で82kN($t=43.55s$)である。これらの値は、土圧合力最大値の77%(Case 1)、66%(Case 2)に相当する。本実験の基礎部模型の平面形が長方形(長辺:短辺=1.6:1)であることを考慮しても、側面摩擦力の影響は無視できない。本実験では基礎部側面の静止土圧を計測していないため、静止土圧係数を0.5と仮定すると摩擦係数 μ は2.51(Case 1)、1.44(Case 2)となる。また、静止土圧係数を0.8と仮定すると、摩擦係数 μ は1.57(Case 1)、0.9(Case 2)となる。側面摩擦力が既往の室内試験結果¹⁷⁾よりも大きい要因として、加振中における側圧の増加や砂粒子の寸法効果¹⁸⁾が考えられる。さらに、Case 1では、液状化にともなう地下水位の上昇によって表層乾燥砂下部が不飽和地盤的な挙動をした可能性も考えられる。側面摩擦力の大きい要因は、今後の検討としたい。

4. 土圧および側面摩擦力が杭頭水平力に及ぼす影響

4.1 上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力の位相差

地盤変位および基礎部変位を考慮して、上部構造物の固有周期、地盤の卓越周期から土圧合力と上部構造物慣性力の位相差を推定する手法は、田村ら⁵⁾によって提案されている。この手法は、下記の5つの前提条件からなる。

- 1) 上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも十分短い場合、地盤変位と上部構造物慣性力は同位相となる。
- 2) 上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも十分長い場合、地盤変位と上部構造物慣性力は逆位相となる。
- 3) 地盤変位と基礎部変位は同位相とする。
- 4) 地盤変位が基礎部変位より小さい場合、地盤変位と土圧合力は逆位相になる。
- 5) 地盤変位が基礎部変位より大きい場合、地盤変位と土圧合力は同位相になる。

本研究では図8、9の結果をふまえて、下記の前提条件を追加する。

- 6) 土圧合力と側面摩擦力は同位相である。

以上の前提条件から、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力の位相差は、上部構造物の固有周期(T_b)、地盤の卓越周期(T_g)、地盤変位(ΔS)および基礎部変位(ΔB)から、図10に示すように4タイプのメカニズムに分類できる。

(a) $T_b < T_g$ で $\Delta S > \Delta B$ の場合、地盤変位と上部構造物慣性力は同位相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦力は同位相である。したがって、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力は同位相になる(Type A)。

(b) $T_b > T_g$ で $\Delta S > \Delta B$ の場合、地盤変位と上部構造物慣性力は逆位

図10 上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力の位相

図11 地表面加速度のフーリエスペクトル

相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦力は同位相である。したがって、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力は逆位相になる(Type B)。

(c) $T_b < T_g$ で $\Delta S < \Delta B$ の場合、地盤変位と上部構造物慣性力は同位相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦力は逆位相である。したがって、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力は逆位相になる(Type C)。

(d) $T_b > T_g$ で $\Delta S < \Delta B$ の場合、地盤変位と上部構造物慣性力は逆位相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦力は逆位相である。したがって、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力は同位相になる(Type D)。

4.2 上部構造物慣性力と土圧摩擦合力の位相差のメカニズム

上部構造物慣性力と土圧摩擦合力の位相差のメカニズムを検討するため、図11に、加振開始から10-60秒における地表面加速度のフーリエスペクトルを示す。地盤の1次卓越周期はCase 1で3.13秒、Case 2で1.93秒である。基礎固定時の上部構造物の固有周期は0.41秒であり、Case 1、2ともに、上部構造物の固有周期は地盤の卓越周期より短い。図12に上部構造物慣性力と土圧摩擦合力の関係を示す。第1、3象限は上部構造物慣性力と土圧摩擦合力が同位相、第2、4象限は上部構造物慣性力と土圧摩擦合力が逆位相であることを示している。また、図中の黒の実線が「地盤変位(ΔS)と基礎部変位(ΔB)が同位相かつ地盤変位が基礎部変位より大きい状態($|\Delta S| > |\Delta B|$)」、グレーの実線が「地盤変位と基礎部変位が同位相かつ地盤変位が基礎部変位より小さい状態($|\Delta S| < |\Delta B|$)」、黒の点線が「地盤

図 12 上部構造物慣性力と土圧摩擦合力の関係 (t=15-60s)

変位と基礎部変位が逆位相の状態 ($\Delta S \cdot \Delta B < 0$)」を示す。Case 1の場合、土圧摩擦合力は、上部構造物慣性力と概ね同位相である。図中の「●」は杭頭水平力のピークのうち、その振幅が最大値の90%以上のものを示している。杭頭水平力振幅の大きいピークは、全て第1, 3象限に存在する。最大値に近い土圧摩擦合力が上部構造物慣性力と同位相で基礎部に作用したとき、杭頭水平力が大きくなることが分かる。杭頭水平力振幅の大きいピークでは、地盤変位は基礎部変位より大きい。上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも短いことを考慮すると、そのメカニズムは図10のType Aに対応する。なお、地盤変位が基礎部変位より大きいケースでも、第2, 4象限に上部構造物慣性力のピークが存在する。これは、上部構造物慣性力が、土圧摩擦合力と概ね同位相の長周期成分のみならず、土圧摩擦合力との相関が低い短周期成分をもつためと思われる (図8a)。

Case 2の場合、土圧摩擦合力は、上部構造物慣性力と概ね逆位相である。土圧摩擦合力のピークでは、地盤変位は基礎部変位より概ね小さい。上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも短いことを考慮すると、図10のType Cに相当し、上部構造物慣性力が土圧合力と逆位相であることが説明できる。杭頭水平力振幅の大きいピークは、2つに分類できる。t=32.95sの杭頭水平力振幅のピークは、土圧摩擦合力が最大値に近く、上部構造物慣性力が小さく、両者が逆位相の状態が発生している。地盤変位は基礎部変位より小さく、そのメカニズムは図10のType Cで説明できる。一方、t=16.50s, 17.89s(最大値), 20.37s, 43.31sの杭頭水平力振幅のピークは、土圧摩擦合力や上部構造物慣性力のピークと対応しない。土圧摩擦合力と上部構造物慣性力がピークからピークに変動中に、両者が同位相の状態に杭頭水平力は大きくなる。それらの杭頭水平力ピークのうち、t=20.37sのピークでは、地盤変位が基礎部変位より小さく、そのメカニズムは図10で説明できない。それ以外の杭頭水平力のピーク (t=16.50s, t=17.89s, t=43.31s) では、地盤変位が基礎部変位より大きく、そのメカニズムは図10のType Aで説明できる。以上から、Case 1, Case 2ともに杭頭水平力振幅の大きいピークにおける土圧摩擦合力と上部構造物慣性力の位相差は、地盤変位と基礎部変位の大小関係に概ね依存することが分かる。また、Case 1のように、土圧摩擦合力と上

部構造物慣性力が同位相の場合、土圧摩擦合力の大きい時に杭頭水平力が大きくなるのに対し、Case 2のように、土圧摩擦合力と上部構造物慣性力が逆位相の場合、土圧摩擦合力や上部構造物慣性力のピーク以外の時にも、杭頭水平力が大きくなることに注意が必要である。

4.3 液状化地盤における基礎の根入れ効果

液状化すると地盤の卓越周期は極めて長くなるため、一般的な中低層の建築物の場合、上部構造物の固有周期は地盤の卓越周期より短いと考えられる。そのため、基礎部に作用する土圧合力・側面摩擦合力が、杭頭水平力を増大させるか、減少させるかは地盤変位と基礎部変位の関係に依存すると考えられる。地盤変位が大きい場合、例えば、液状化層厚の厚いケース、液状化地盤が緩いケースでは、土圧合力・側面摩擦合力が杭頭水平力を増大させる可能性が高い。一方、液状化層厚が薄いケース、液状化地盤が密なケースなどは、土圧合力・側面摩擦合力が杭頭水平力を減少させる可能性があると考えられる。

5. 結論

液状化層厚が厚く表層乾燥砂層が薄い地盤モデルおよび液状化層厚が薄く表層乾燥砂層が厚い地盤モデルで、杭-基礎部-上部構造物系の遠心載荷実験を行い、基礎部に作用する土圧合力・側面摩擦合力が、杭頭水平力を増大させる側または減少させる側に作用する条件を検討し、以下の結果を得た。

- 1) 液状化層の厚い地盤モデルの場合、上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも短く、地盤変位は基礎部変位より概ね大きかった。これから、地盤変位と上部構造物慣性力は同位相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦合力は同位相になるため、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦合力は同位相になったと考えられる。
- 2) 液状化層の厚い地盤モデルでは、地盤変位が極めて大きく、基礎部に作用する土圧摩擦合力が大きい。大きい振幅の土圧摩擦合力が、上部構造物慣性力と同位相で基礎部に作用した時に、杭頭水平力は大きくなった。杭頭水平力の最大値は、液状化層の薄い地盤モデルにおけるその3倍程度であった。

- 3) 液状化層の薄い地盤モデルの場合、上部構造物の固有周期が地盤の卓越周期よりも短く、土圧摩擦合力のピークでは地盤変位は基礎部変位より概ね小さい。これから、土圧摩擦合力のピークでは地盤変位と上部構造物慣性力は同位相、地盤変位と土圧合力・側面摩擦力は逆位相となり、上部構造物慣性力と土圧合力・側面摩擦力は逆位相になったと考えられる。
- 4) 液状化層の薄い地盤モデルでは、地盤変位が比較的小さく、基礎部に作用する土圧摩擦合力は、液状化層の厚い地盤モデルの1/2程度であった。杭頭水平力の最大値は、土圧摩擦合力や上部構造物慣性力のピーク時ではなく、土圧摩擦合力と上部構造物慣性力がピークからピークに変動中に、両者が同位相の状態が発生した。
- 5) 液状化地盤では、地盤の卓越周期は極めて長い。そのため、液状化地盤において基礎部に作用する土圧合力・側面摩擦力が、杭頭水平力を増大させるか、減少させるかは、地盤変位と基礎部変位の大小関係に依存する可能性が高い。

謝辞

本研究の実験およびデータ整理に際し、元京都大学大学院生の今吉毅君および元京都大学学生の違口隆明君の協力を得た。記して感謝します。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書，1996. 7
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，建築編－4，建築基礎構造，1998
- 3) B T L委員会：兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する研究報告書，1998
- 4) Fujii, S., Iseimoto, N., Satou, Y., Kaneko, O., Funahara, H., Arai, T. and Tokimatsu, K. : Investigation and Analysis of a Pile Foundation Damaged by Liquefaction during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake, No. 2, pp. 179-192, 1998. 9
- 5) 田村修次，時松孝次，内田明彦，船原英樹，阿部秋男：大型せん断土槽を用いた液状化実験における基礎根入れ部に加わる土圧合力と構造物慣性力の関係，日本建築学会構造系論文集，No.559, pp.129-134, 2002. 9
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 7) 三浦賢治，伊藤幸爾郎，北川良和，杉村義広，水野二十一：地震時の基礎根入れ部土圧と杭応力に関する模型実験（その1 実験概要）日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.619-620, 1980
- 8) 杉村義広，平出務：基礎根入れによる水平力低減効果に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.2409-2410, 1984
- 9) 建設省住宅局建築指導課 監修：地震力に対する建築物の基礎の設計指針，日本建築センター，1984
- 10) 徐挺，杉村義広：単純化モデルによる地盤と構造物の地震時動的相互作用のメカニズムに関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.43B, pp.433-440, 1997. 3
- 11) 西村昭彦，室野剛隆，永妻真治：軟弱地盤における杭基礎の耐震設計法に関する実験的研究（その1～その3），第32回地盤工学研究発表会，Vol.1, pp.961-966, 1997
- 12) 小林勝巳，森伸一郎：基礎構造の耐震設計と相互作用を考慮した地震荷重，第5回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム，日本建築学会，pp.107-120, 1998. 5
- 13) 今岡克也，徳武茂隆，青山邦男，福和伸夫，飯場正紀，多賀直恒：シリコン地盤模型を用いた動的根入れ効果に関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2, pp.1653-1658, 1998. 11
- 14) 財団法人日本建築防災協会臨海部構造安全委員会：「臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討報告書」総集編，pp.8-11, 1992.3
- 15) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)，1990
- 16) Tamura, S., Imayoshi, T. and Sakamoto T: Earth pressure and sidewall friction acting on an embedded footing in dry sand based on centrifuge tests, Soils and Foundations, Japan Geotechnical Society, Vol. 47, No. 4, pp.811-819, 2007. 8
- 17) Uesugi, M. and Kishida H. : Influential factors of friction between steel and dry sands, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 2, pp.33-46, 1986
- 18) Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K. and Kimura, Y.: Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, Proc. IS-NAGOYA, pp.133-138, 1997

(2007年4月10日原稿受理，2007年12月7日採用決定)