

# 柱状体基礎の地震時沈下特性と基礎底面に作用する傾斜荷重に着目したアルミ棒積層地盤中の模型水平載荷実験

磯部 祐輝<sup>1</sup>・吉田 広基<sup>1</sup>・西岡 英俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市・人間環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

<sup>2</sup>正会員 中央大学教授 理工学部 都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

## 1. はじめに

渡河橋梁等の比較的長スパンを有する橋梁の基礎には、ケーソン基礎等の柱状体基礎が使用されることが多い。柱状体基礎の根入れ深さは、経済性・施工性の観点から必要とされる全ての性能を確保できる範囲で極力浅く設計することが求められる。設計上考慮すべき地震作用が大きい我が国においては、橋梁基礎の構造諸元は主に地震時の性能によって決定するケースが多いと考えられる。しかしながら、死荷重が大きい長スパンの橋梁を支持する柱状体基礎では、地盤条件や構造条件によっては常時の鉛直支持力の安全率（すなわち極限支持力に対する鉛直死荷重の比率、以下、死荷重安全率 $F_{s,DL}$ ）の制限値（一般には $F_{s,DL} \geq 3.0$ ）に対する余裕が比較的小さいケースも生じ得る。特に比較的良好な地盤への、根入れが深く、地震時慣性力の大半を基礎の側面の水平抵抗が負担し、基礎底面の水平抵抗および回転抵抗による負担が小さいケースでは、根入れが浅いケースに比べて相対的に基礎底面の常時の死荷重安全率の余裕が小さくなる。このような死荷重安全率の余裕が小さい柱状体基礎では、地震時に底面地盤の塑性化が生じることで、橋脚の倒壊あるいは落橋に至るような大きな変形は生じずとも、地震後に残留沈下（およびそれに伴う残留傾斜）の被害が生じる懸念がある。

このような地震時の水平方向の慣性力の作用によって、底面地盤が塑性化して鉛直方向の残留沈下が発生するという問題は、新幹線等の高速鉄道や重要橋梁など、変位量の制限値が厳しい構造物において、地震後の早期の供用再開可否に関わる重要な問題と考えられる。しかしながら、これまでに実施され

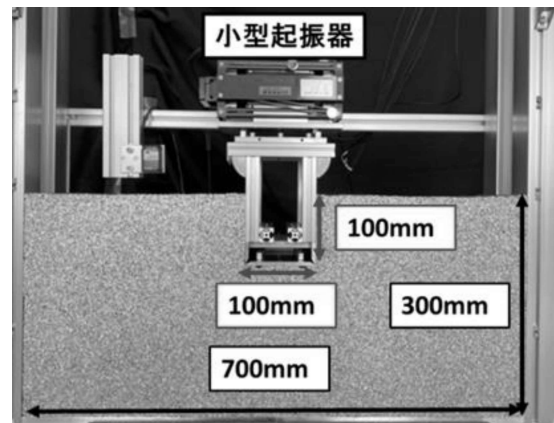


図-1 実験装置の外観 ( $D_f=100\text{mm}$ 時)

ている柱状体基礎の地震時に関する検討は、水平方向の慣性力に対する水平変位あるいは傾斜に着目したものが大半であり、特に水平力の作用に伴って生じる鉛直変位の問題を基礎底面での死荷重安全率の余裕度と組み合わせて検討した事例は直接基礎を対象とした事例<sup>2),3),4)</sup>に限られているのが現状である。

そこで本研究では、アルミ棒積層地盤中の死荷重安全率を変化させた柱状体基礎模型に対して、ワイヤーを用いた単調水平載荷実験と、小型起振器により地震時慣性力を模擬した動的水平載荷実験を実施し、周辺地盤の塑性化が基礎の沈下傾向に及ぼす影響について考察した。

## 2. 実験概要

### (1) 模型地盤

模型地盤には既往の研究で使用実績があるアルミ棒積層体を用いた<sup>5),6)</sup>。地盤材料には長さ150mmで、

直径3.0mm, 2.0mm, 1.5mmの3種類のアリミ棒を重量比1:1:1で混合したものを積み上げたアリミ棒積層体を用いた。アリミ棒積層体は幅700mm, 深さ300mmとし, 50mmを一層としてアリミ棒をまき出した後に, 小型バイブレータを用いて締め固めた。この作業の結果, 単位体積重量は22.0kN/m<sup>3</sup>, 内部摩擦角は31°程度となった。

## (2) 極限支持力の算定方法

主要なパラメータである死荷重安全率の算定に必要な極限支持力を求めるため, 同一のアリミ棒積層地盤において, 根入れ深さを断続的に変化させた直接基礎の鉛直載荷実験を別途実施した。根入れ深さ $D_f$ に応じた極限支持力 $q_u$ の関係を図-2に示す。

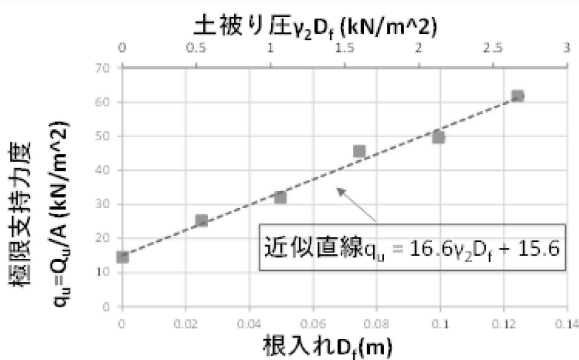


図-2 極限支持力と根入れ深さの関係

本研究では, 柱状体基礎の極限支持力の算定に, 式(1)に示すテルツァギの支持力公式を用いた。

$$q_u = \gamma \cdot D_f \cdot N_q + \gamma \cdot B \cdot \frac{1}{2} \cdot N_\gamma \quad (1)$$

ここで,  $q_u$ : 極限支持力,  $\gamma$ : 地盤の密度,  $D_f$ : 根入れ深さ,  $B$ : 基礎幅である。また, 支持力係数  $N_q$  は, 図-2 の近似直線の傾きから,  $N_\gamma$  は近似直線の切片からそれぞれ求めた。その結果,  $N_q=16.6$ ,  $N_\gamma=14.2$  となり, これらを用いて極限支持力を算定した。

## (3) 柱状体基礎模型

アリミフレームで橋脚部分を作製し, 基礎幅100mm, 奥行き150mmとした。なお, 単調載荷実験と動的載荷実験は同様の基礎模型を用いて実施した。基礎模型諸元は表-1に示す。

基礎模型の設置方法は, まず, 基礎底面の高さまでアリミ棒を積み上げて模型地盤を構築し, その上



図-3 柱状体基礎模型の外観

に基礎模型を設置した後に, 残り(すなわち基礎模型側面)の模型地盤を構築する方法とした。

表-1 柱状体基礎模型諸元

	単調載荷実験	動的載荷実験
模型質量(kg)	10.0	9.3
底面寸法(mm)	100×150	100×150
橋脚高さ(起振器含まず)(mm)	195	195

## (4) 実験方法および実験ケース

本実験では, 根入れ深さと基礎模型質量の両方を変化させた単調載荷実験と, 根入れ深さを一定として模型質量のみを変化させた動的載荷実験を実施した。

### a) 単調載荷実験

地震時慣性力を模擬した一方向単調載荷実験とした。模型の側部にワイヤーを取り付け, これを水平方向に一定速で引っ張ることで載荷し, ワイヤー基部に設置したロードセルで水平荷重を計測した。また, 基礎底面にはアリミ棒を貼り付けて凹凸形状とした幅100mmの剛な受圧板を, 2つの2方向ロードセル<sup>7)</sup>(設置中心間隔60mm)を介して剛結し, 基礎底面反力(鉛直荷重, せん断力及びモーメント)を直接計測した。載荷位置は, 基礎底面から385mmの高さとした。これは後述する動的載荷実験における水平力載荷高さと同一である。

変位の計測にはレーザー変位計を用いた。鉛直変位は基礎底面に1か所, 水平変位は基礎底面に1か所と載荷高さに1か所の計3か所で計測した。実験ケースは表-2に示す。根入れ深さ3段階に対して, 死荷重安全率が $F_{s,Dt} \approx 3, 5, 8$ 程度となるように鉄板を

柱状体基礎模型の躯体部分に追加することで模型質量を変化させた全6ケースとした。

表-2 単調載荷実験ケース

ケース名	模型質量 (kg)	根入れ深さ (mm)	死荷重安全率( $F_{s,DL}$ )
CaseS1	10.1	100	7.9
CaseS2	14.3	100	5.6
CaseS3	26.7	100	3.0
CaseS4	10.1	50	5.1
CaseS5	16.0	50	3.2
CaseS6	9.9	10	3.0

### b) 動的載荷実験

橋脚の天端部（基礎底面から高さ188mm）に2つの2方向ロードセル（設置中心間隔108mm）を介して小型起振器（サンエス社製，SSV-60S，可動部0.6kg，総質量6.1kg）を剛結し，基礎模型を加振することで水平方向の地震時慣性力を模擬した。加振条件は，模型の固有振動数よりも十分に長周期側となる3Hzで一定とした。1度の加振は5秒間とし，1加振ごとに入力加速度を大きくしていく段階加振方式とした。最大加振力は，Case1で39.2N，Case2で

65.2N，Case3で104.4N程度となっている。なお，基礎模型が倒れるまで加振を行った。また，単調載荷時と同様に2方向ロードセルから，起振器からの作用荷重，および基礎底面反力を直接計測した。

変位の計測には，基礎底面の鉛直方向と水平方向に1か所ずつ，地表面から60mm（橋脚天端部を模擬）の位置の水平方向に1か所の計3か所に設置したレーザー変位計を用いた。

実験ケースは，根入れ深さ100mmで一定とし，鉄板を追加することで死荷重安全率を変化させた全3ケース（表-3）とした。

表-3 動的載荷実験ケース

ケース名	模型質量 (kg)	$F_{s,DL}$
CaseD1	9.3	8.5
CaseD2	16.3	4.9
CaseD3	26.1	3.0

## 4. 単調載荷実験結果

### (1) 荷重変位関係

図-4に載荷水平力と，基礎の載荷点高さでの水平

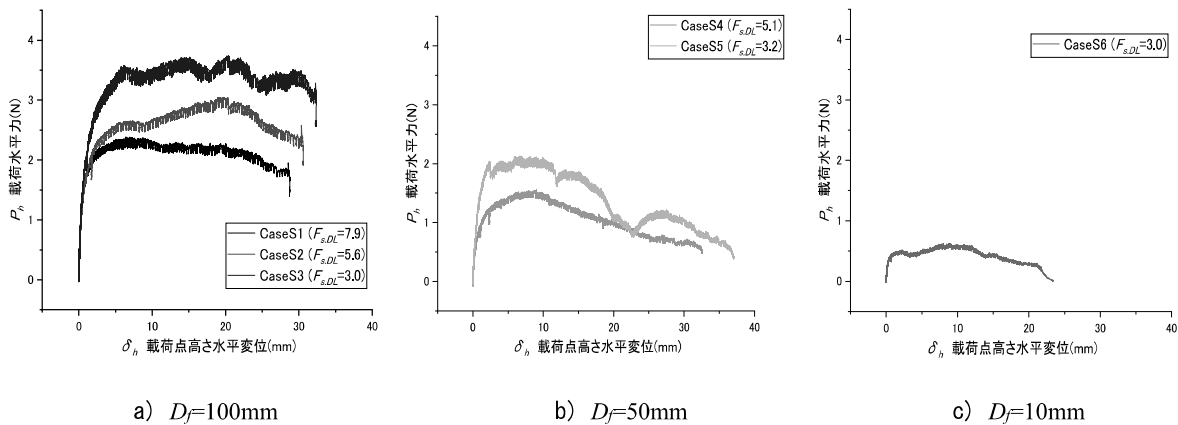


図-4 単調載荷実験荷重変位関係

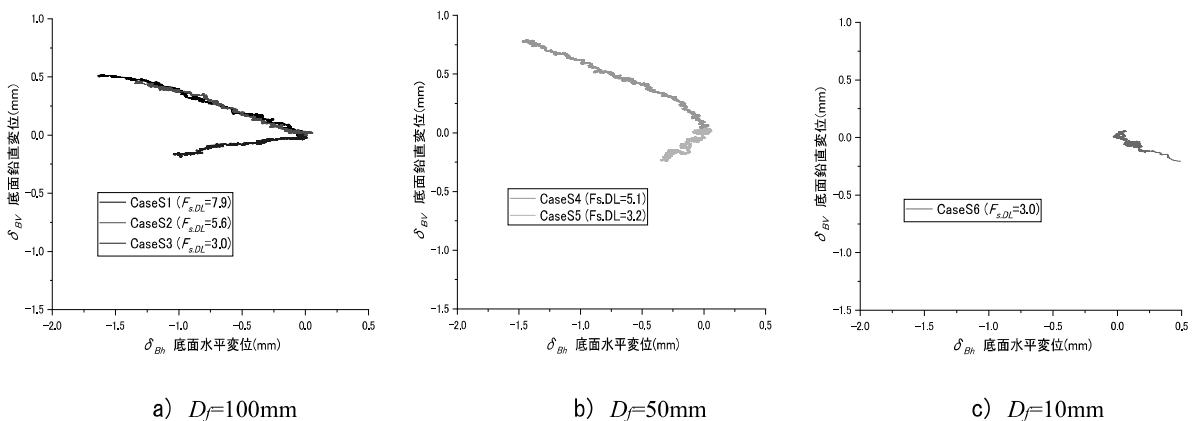


図-5 基礎底面の変位軌跡（単調載荷時）



図-6  $e_b/B$ -回転角関係

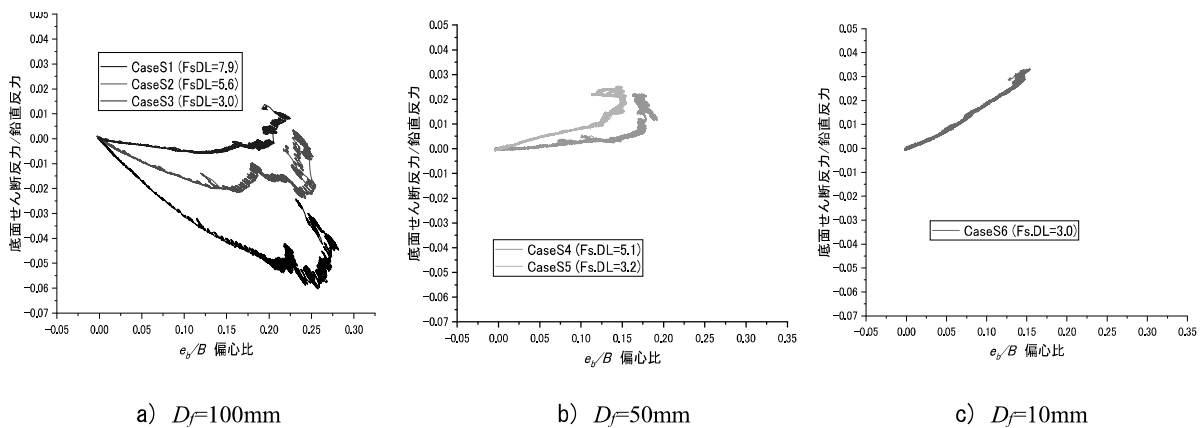


図-7 基礎底面せん断反力/鉛直反力-偏心比関係

変位の関係を示す。死荷重安全率は同一 ( $F_{s,DL} \div 3$ ) で根入れ深さが異なるケースを比較すると、根入れが長いほど大きな水平抵抗を発揮することが分かる。同様の根入れ深さで死荷重安全率が異なる3ケースを比較すると、死荷重安全率が大きい(模型自重が軽い)ケースのほうが、水平抵抗が小さくなっていることが分かる。

## (2) 基礎底面の変位軌跡

図-5に各ケースの基礎底面中心の水平変位 $\delta_{Bh}$ と鉛直変位 $\delta_{Bv}$ の関係、すなわち変位軌跡を示す。なお、水平変位の符号は載荷方向(前方向)が正、鉛直変位 $\delta_{Bv}$ の符号は沈下方向が負である。

水平変位に着目すると、 $D_f=10\text{mm}$ のケースでは、載荷方向に変位していくことが確認できる。一方で、常時の死荷重安全率 $F_{s,DL}$ に比較的余裕がある3ケースにおいては、載荷方向と逆方向に変位する結果となった。

鉛直変位に着目すると、 $F_{s,DL}=3.0$ のケースにおいて沈下傾向が確認され、 $F_{s,DL}$ が3より大きいケースでは沈下傾向は見られなかった。また、 $D_f=50\text{mm}$ 時は $D_f=100\text{mm}$ 時に比べ鉛直変位が卓越する傾向が見られた。

## (3) 基礎底面に作用する偏心と傾斜荷重

図-6に偏心比と基礎模型の回転角の関係を示す。なお、図中には、基礎底面端部の浮き上がりが発生する時点の偏心比 $e_b/B=1/6=0.166\dots$ を点線で示している。偏心比 $e_b/B$ は、基礎底面で測定された反力モーメント $M_b$ と鉛直反力 $V_b$ より、式(2)より算出した。

$$\frac{e_b}{B} = \frac{M_b}{B \cdot V_b} \quad (2)$$

同様の根入れ深さで死荷重安全率が異なる3ケースを比較すると、死荷重安全率が大きい(模型自重が軽い)ケースのほうが基礎の回転に伴って端部地盤の浮き上がりが早く生じていることが分かる。

図-7に基礎底面に作用するせん断反力/鉛直反力と偏心比の関係を示す。縦軸に着目すると、 $D_f=100\text{mm}$ 時は負の値を示し、基礎底面に作用するせん断反力が、 $D_f < 100\text{mm}$ ケースとは逆方向に作用することが確認された。また、 $S_b/V_b$ の絶対値は0.07程度以下になっているが、本地盤の内部摩擦角は $31^\circ$ 程度であり、底面は凹凸形状としていることから、底面の摩擦係数は0.6程度と推測でき、両者の

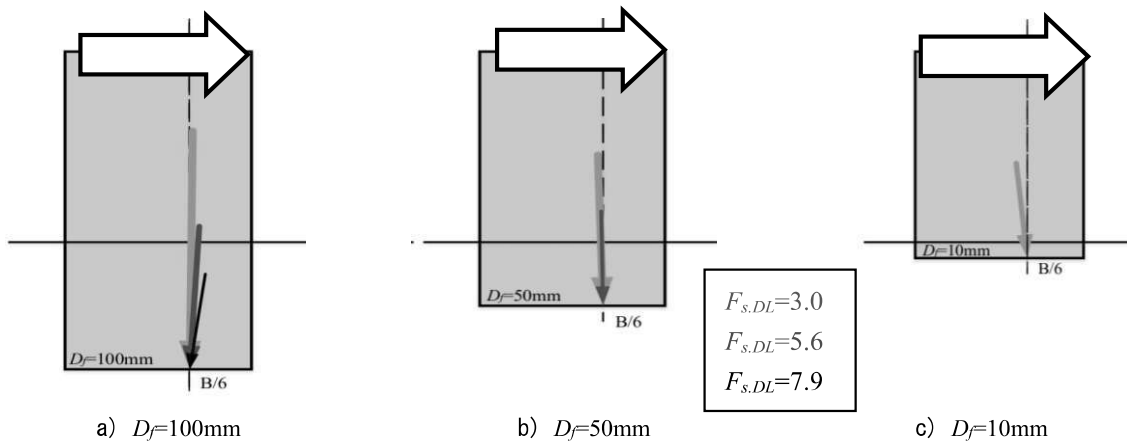
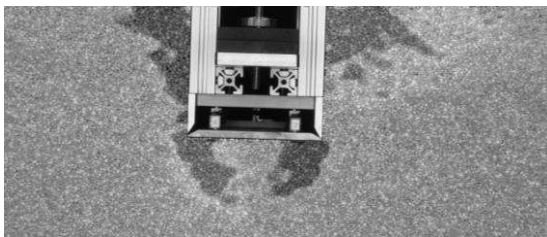


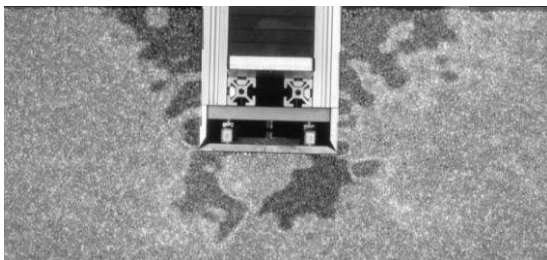
図-8  $eb/B=1/6$  時における基礎底面に作用する合力ベクトル (傾斜荷重)



a) CaseS1 ( $F_{s,DL}=7.9$ )



b) CaseS2 ( $F_{s,DL}=5.6$ )



c) CaseS3 ( $F_{s,DL}=3.0$ )

斜角)に着目すると、 $D_f=10\text{mm}$ 時は荷重方向(前方向)に向かって傾斜していることが分かる。また、根入れが深くなるにつれ、荷重の傾斜角が小さくなり、 $D_f=100\text{mm}$ 時には傾斜方向が反転し、荷重方向とは逆方向に傾斜することが分かった。また、同様の根入れ深さで $F_{s,DL}$ が変化することによる荷重の傾斜角への影響に着目すると、 $D_f=50\text{mm}$ では傾斜角に大きな変化は見られなかったが、 $D_f=100\text{mm}$ においては $F_{s,DL}$ が大きくなるにつれ傾斜角が荷重方向と逆側に大きくなる結果となった。

また、基礎底面周辺地盤の挙動を視覚的に把握するために、画像解析(デジタル画像相関法)によるひずみ測定を実施した。図-9に、 $D_f=100\text{mm}$ 時の死荷重安全率が異なる3ケース(CaseS1, CaseS2, CaseS3)における鉛直方向の垂直ひずみ(伸びひずみ) $\epsilon_y$ の分布を示す。なお、 $\epsilon_y$ が負の時地盤の圧縮傾向を示している。全ケースともに荷重側(前面側)の基礎底面端部直下地盤が圧縮されていることが分かる。また、模型質量が大きくなり $F_{s,DL}$ が小さくなると、地盤の圧縮領域が基礎中心方向に広がっていく傾向が見られた。

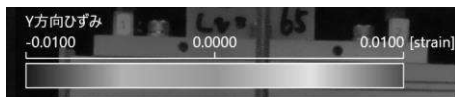


図-9 画像解析による鉛直方向ひずみ分布 (単調荷重  $D_f=100\text{mm}$  時)

比較から、本実験では基礎底面での滑動は生じていないと考えられる。柱状体基礎底面の回転挙動において、端部の浮き上がりが生じる偏心比 $eb/B$ が $1/6$ に達した時点における、基礎底面に作用する水平方向のせん断反力 $S_b$ と鉛直荷重 $V_b$ の合力ベクトル(すなわち傾斜荷重)を図-8に示す。傾斜荷重の方向(傾

## 5. 動的荷重実験結果

単調荷重実験の結果から、直接基礎と比べて根入れが深い柱状体基礎に特有の挙動である基礎底面の水平変位および傾斜荷重の方向が荷重方向と逆転している $D_f=100\text{mm}$ のケースを対象に、小型起振器を用いた動的荷重実験にて実施した。

### (1) 荷重変位関係

図-10に各ケースの水平方向の荷重変位関係として、起振器からの入力せん断力を模型自重で除して求めた水平震度 $k_h$ と地上部(地表から高さ $60\text{mm}$ )

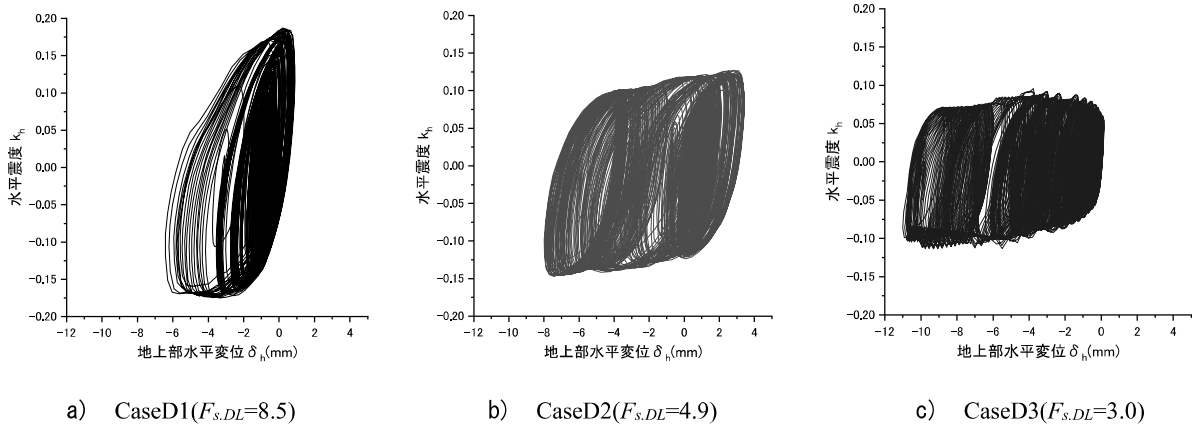


図-10 水平震度  $k_h$ -地上部水平変位  $\delta_h$  関係

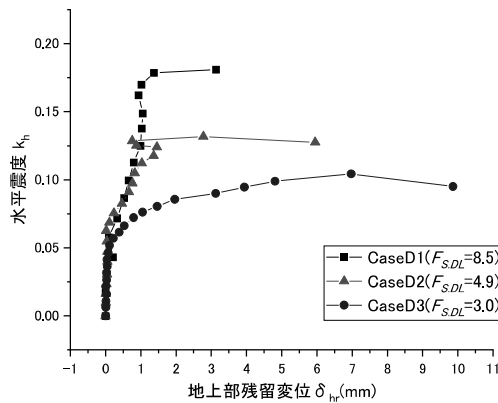


図-11  $k_h$ - $\delta_{hr}$  関係 (骨格曲線)

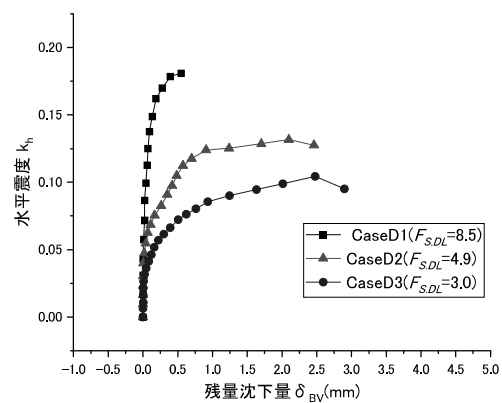


図-12  $k_h$ - $\delta_{Bv}$  関係 (骨格曲線)

の水平変位 $\delta_h$ の履歴曲線を示す。なお、水平震度 $k_h$ は、以下の式(3)により算定した。

$$k_h = \frac{S - \frac{M}{h}}{V} \quad (3)$$

ここで、 $S$ ：起振器からの入力せん断力、 $M$ ：起振器からの入力モーメント、 $h$ ：模型高さ（基礎底面から起振器基部ロードセル中心までの高さ、 $h=185\text{mm}$ ）、 $V$ ：模型自重（追加した錘と起振器を含む）である。各ケースとも、ある水平震度を上回ると一方向に水平変位が累積しており、基礎周辺地盤の抵抗が降伏していることが分かる。

また、これらの荷重変位関係の骨格曲線として、各加振段階毎の加振終了後の水平方向の残留変位 $\delta_{hr}$ と水平震度 $k_h$ の片振幅との関係を求め、各ケースで比較したものを図-11に、同様に求めた水平震度 $k_h$ と加振後の基礎底面鉛直変位 $\delta_{Bv}$ の関係を各ケースで比較したものを図-12に示す。図-11より、死荷重安

全率が大きいほど、その降伏震度が大きくなることが分かる。また、地上部水平変位は、死荷重安全率が下がるほど変位量が増加していくことが確認できた。

図-11、図-12のグラフを比較すると、死荷重安全率 $F_{s,DL}$ が小さいケース (CaseD3) では、鉛直変位の方が小さな水平震度の段階でも変位が生じ始めているのが分かる。しかし、死荷重安全率 $F_{s,DL}$ が大きいケース (CaseD1) では、その反対に大きな水平震度でも鉛直変位はほとんど生じていないのがわかる。これより死荷重安全率 $F_{s,DL}$ を大きくとった構造物は、特に鉛直方向の残留変位に対して、より高い抵抗特性を持っていることが分かる。

## (2) 基礎底面の変位軌跡

図-13に各ケースの基礎底面中心の水平変位 $\delta_{Bh}$ と鉛直変位 $\delta_{Bv}$ の関係、すなわち変位軌跡を示す。なお、鉛直変位 $\delta_{Bv}$ の符号は沈下方向が負である。模型質量が小さく死荷重安全率 $F_{s,DL}$ が大きいCaseD1では、ほとんど沈下傾向がみられず、回転中心が基礎底面よ

りも上方となるため、基礎全体の回転に伴って底面が水平方向に変位していることがわかる。一方、CaseD2、CaseD3では死荷重安全率が下がるほど、沈下傾向が主体的となった。

また、単調載荷時に沈下傾向が見られたのは死荷重安全率3.0のケースのみであったが、動的載荷ではすべてのケースで沈下傾向が確認された。

### (3) 基礎底面反力の偏心比と残留変位の関係

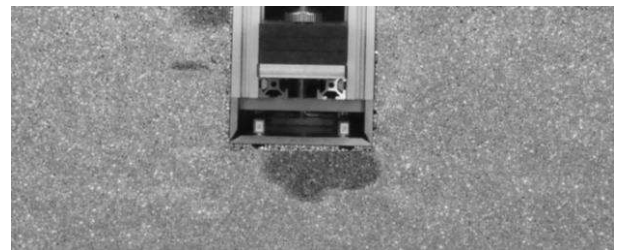
式(2)から算出された偏心比  $e_b/B$  に着目した考察を行う。図-14に各加振段階毎の  $e_b/B$  の片振幅と基礎底面中心の変位測定結果（回転角の片振幅 a）、回転角の残留値 b)および残留沈下量 c)）の関係を示す。なお、図中には、 $e_b/B=1/6=0.166\dots$ を点線で示している。

a)および b)より、基礎底面端部が浮き上がり始める  $e_b/B=1/6$  までは全ケースともほぼ同等の回転剛性で弾性的な挙動を示し、それ以降は死荷重安全率が小さい CaseD3 から順に降伏し、基礎底面地盤の端部の塑性化が生じていることがわかる。なお、死

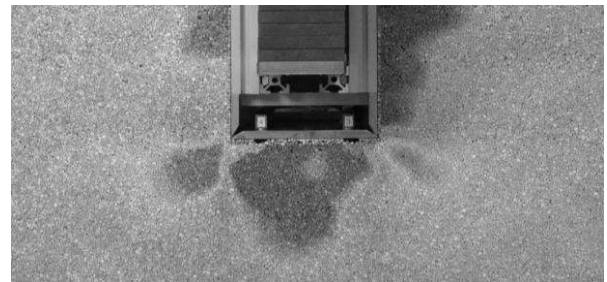
荷重安全率が大きい CaseD1, CaseD2 では、浮き上がり発生後に一旦回転剛性が上昇する傾向を示しているが、これは基礎側面での水平抵抗の負担が増加したためと考えられる。一方、c)より残留沈下量と



(a) CaseD1 ( $F_{s,DL}=8.5$ )



(b) CaseD2 ( $F_{s,DL}=4.9$ )



(c) CaseD3 ( $F_{s,DL}=3.0$ )

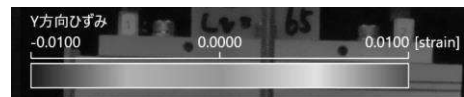


図-15 画像解析による鉛直方向ひずみ分布 (動的載荷時)

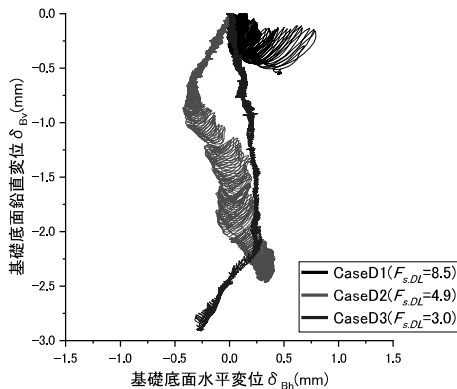
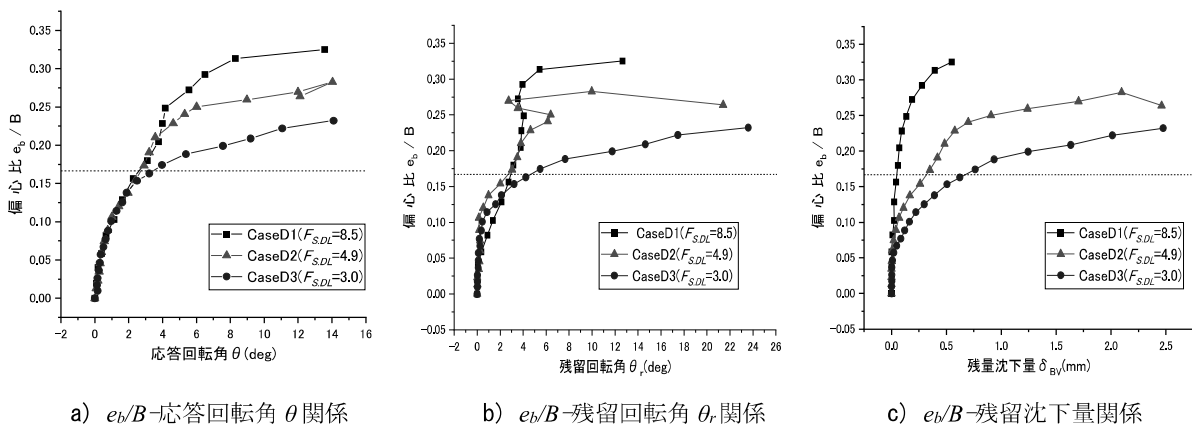


図-13 基礎底面の変位軌跡 (動的載荷時)



a)  $e_b/B$ -応答回転角  $\theta$  関係

b)  $e_b/B$ -残留回転角  $\theta_r$  関係

c)  $e_b/B$ -残留沈下量  $\delta_{Bv}$  関係

図-14 偏心比  $e_b/B$  と各指標の関係 (骨格曲線)

の関係を見ると、死荷重安全率が小さい CaseD2, CaseD3 では  $e_b/B=1/6$  よりも小さい段階から残留沈下の増加傾向を示している。すなわち、基礎底面端部での浮き上がりや塑性化が生じるよりも前から基礎底面中心直下の地盤の支持力が足りずに塑性化が生じ始めると考えられる。

また、 $e_b/B=1/6$  に達した加振段階終了時の地盤の挙動を視覚的に確認するため、単調載荷時と同様の方法でひずみ測定を実施した。図-15 に鉛直方向の垂直ひずみ（伸びひずみ） $\epsilon_y$  の分布を示す。これより死荷重安全率が低下するほど基礎直下地盤の鉛直方向の圧縮傾向が強くなり、基礎直下地盤の塑性化によって残留変位が生じたことが確認できた。また、単調載荷時に比べ、圧縮領域が基礎底面直下全体に広がる結果となった。

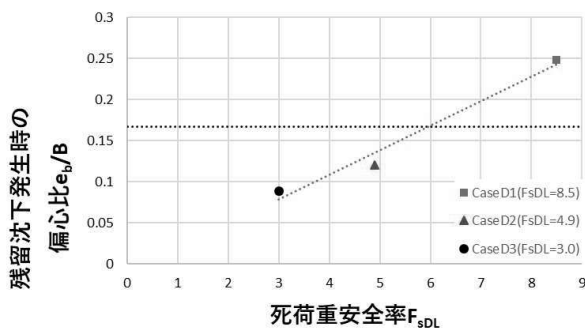


図-16 偏心比  $e_b/B$ -死荷重安全率  $F_{s,DL}$  関係

ここで、各ケースの死荷重安全率  $F_{s,DL}$  と残留沈下発生時（ここでは残留沈下量が 0.1mm を上回る時とした）の偏心比  $e_b/B$  の関係を図-16 に示す。これより基礎端部での浮き上がりが生じる  $e_b/B=1/6$  よりも前に、基礎中心直下の地盤の塑性化を起こさない十分な支持力を確保するためには死荷重安全率 6 程度が必要であることが示唆される。

## 6. おわりに

本研究では、地震時を想定した柱状体基礎の水平載荷実験を実施し、単調載荷実験からは主に基礎底面に作用する傾斜荷重について、小型起振器を用いた動的載荷実験からは偏心比と残留沈下量の関係に着目して考察した。

単調載荷実験より、根入れが深くなるにつれ、基礎底面に作用する傾斜荷重の方向は、載荷方向と逆方向に傾斜していくことが確認された。設計上は、一般的に柱状体基礎の底面反力特性を直接基礎と同

等としてモデル化されることが多いが、このような傾斜荷重の方向が逆転することによって、柱状体基礎が直接基礎とは異なる挙動を示す可能性も考えられる。ただし、本実験では基礎上部に起振器を設置しているため、重心が高い位置にあり、載荷位置が比較的高くなっている。そのため、基礎底面に作用する傾斜荷重の傾斜角がかなり小さくなっており、定量的な評価には至っていない。今後は、載荷点高さを低い位置に設定した実験を行い、傾斜荷重に対する考察も行っていく予定である。

動的載荷実験からは、一般に常時で必要とされる死荷重安全率3を確保していれば、底面端部地盤の塑性化が生じるのは浮き上がり開始以降となる（すなわち、少なくとも浮き上がり開始までは回転抵抗の降伏は生じない）ことが確認できた。ただし、死荷重安全率5程度を確保していても、端部の浮き上がり開始よりも先に基礎中心直下地盤が塑性化して残留沈下が生じることがわかった。このことは、復旧性の観点から地震後の残留沈下量の発生を許容しない設計を行いたい場合には、常時の死荷重安全率に対して十分な余裕を確保する必要があることを示唆している。今後は、根入れが50mmなどの浅いケースでの小型起振器実験を実施する予定である。

## 参考文献

- 1) 七澤利明, 河野哲也, 遠藤繁人, 河村淳, 藤村彰 : 柱状体基礎の設計計算モデルおよび安定照査方法に関する研究, 土木研究所資料第 4369 号, 2018.4
- 2) 笠原康平, 佐名川太亮, 中島卓哉 : 地震を受けた直接基礎の残留変形量の推定に関する研究, 第15回日本地震工学シンポジウム, pp.2600-2609, 201
- 3) 浅井 隆一, 白戸 真大, 野々村 佳哲, 福井 次郎 : 直接基礎の地震時残留変位に関する繰返し水平載荷実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 2004
- 4) 西村隆義, 西岡英俊, 神田政幸 : 分布地盤ばねモデルによる地震後の直接基礎の沈下量評価法 (特集 基礎構造物の設計技術), 鉄道総研報告, p.p 23-28, 2010
- 5) 杉本隆男, 玉野富雄 : 土留め工の力学的理論とその実証, 技報堂出版, pp.248-249, 2003
- 6) 尼田正男 : 土質工学における基礎の支持力実験装置への新しい試み—異形アルミ棒を地盤材料として—, 日本工業教育協会誌第40巻第2号, pp.23-27, 1992.3
- 7) 佐藤剛司, 龍岡文夫, 生原修, 山田真一 : ニ方向ロードセルの試作とその特性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, pp.285-286, 1983