

基礎底面地盤が塑性化する柱状体基礎の 地震時残留沈下量に着目した実験的研究

Experimental study on seismic residual settlement of columnar foundation with plasticization of bottom ground

21N3100004J 磯部 祐輝 (基礎・地下構造研究室)
Yuki ISOBE / Foundation and Underground Structure Lab.

Key Words : columnar foundation, seismic residual settlement, horizontal loading test

1. はじめに

地盤抵抗に大きく影響する柱状体基礎の構造諸元は平面寸法（基礎幅 B ）と根入れ長 L である。近年の施工技術の向上により、比較的強固な支持層内に深く沈設させて、平面寸法を小さくする設計が可能となっている。すなわち柱状体基礎は、設計段階での構造諸元、特に根入れ深さと基礎幅の比（以下、根入れ比 L/B ）の設定の自由度が高い基礎である。根入れ比 L/B の大きさによって、常時の鉛直支持力の安全率（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_{sDL} と記す）には違いが生じ、常時の限界値（ $F_{sDL}=3.0$ 程度）に近いケースも生じ得ると考えられる。このような場合、地震後に残留沈下量が発生する可能性もあり、地震後の使用性や修復性に大きく影響すると考えられる。

しかしながら、地震時の底面地盤の塑性化に伴う累積的な沈下挙動に関する観点での研究としては、直接基礎を対象とした検討は行われているものの¹⁾、柱状体基礎を対象とした研究はほとんど実施されていない。

そこで本研究では、根入れのある柱状体基礎の地震後の残留沈下量に着目し、アルミ棒積層体で地盤を模擬した模型水平載荷実験を実施した。

2. 実験概要

(1) 模型地盤および橋脚模型

図-1に使用した実験装置を示す。模型地盤には、中密な砂の2次元モデルに相当するアルミ棒積層体²⁾を用いた。地盤材料には長さ150mm、直径3.0mm、2.0mm、1.5mmの3種類のアルミ棒を重量比1:1:1で混合したものを用いた。これらを厚さ50mmずつ撒き出し、1層毎に小型バイブレーターで締め固めることで地盤を作製した。この作業の結果、単位体積重量は約21.8kN/m³であり、傾斜法により計測した安息角は約31度となった。

橋脚模型は基礎幅 $B=100$ mm、奥行150mmで、柱状体基礎から橋柱部までを一体として、アルミフレームで作製した。橋柱部の上端には、載荷装置（後述する小型起振器）を2つの2方向ロードセル（設置中心間隔108mm）を介して設置した。また、橋脚模型の基礎底面にはア

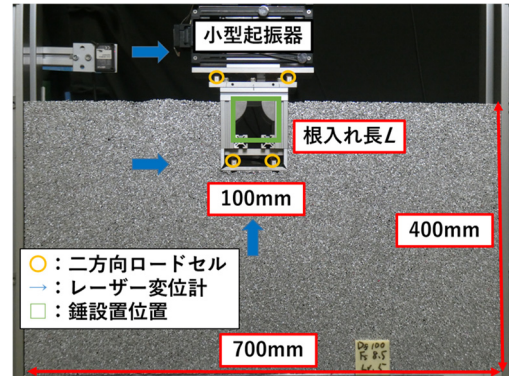


図-1 実験装置の概要

ルミ棒を接着して凹凸形状とした剛な受圧板を2つの2方向ロードセル（設置中心間隔60mm）を介して剛結した。なお、基礎の側面は平滑であり、周面支持力は小さく、死荷重の大半は基礎底面で負担されている。

橋脚模型の変位は、基礎底面の鉛直方向と水平方向に1か所ずつ、地表面から上方に90mm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により計測した。

(2) 載荷方法

本実験では、載荷装置の拘束によって基礎の沈下が抑制されることが無いよう、地震時慣性力に相当する水平力を橋脚模型天端に設置した小型起振器（サンエス社製、SSV-60S、可動部質量0.6kg、総質量6.1kg）によって与えることとした。加振条件は、3Hzでの正弦波加振（1度の加振は5秒間、15波）で、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、各ケースにおいて橋脚模型が転倒するか、起振器の最大出力値（可動部の入力加速度で4.0m/s²）に達するまで加振を行った。

(3) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。65mm、100mm、150mm、200mmの根入れ長に対して、橋脚模型の中空部分に錘を追加することで模型重量を調整し、死荷重安全率 F_{sDL} を変化させた全13ケースとした。ここで、死荷重安全率

表-1 実験ケース

ケース名	根入れ長 L	根入れ比 L/B	模型重量 W	死荷重安全率 F_{sDL}
Case65-3.1	65mm	0.65	188.6N	3.1
Case65-5.4			107.3N	5.4
Case100-3.1	100mm	1.0	247.2N	3.1
Case100-5.0			152.3N	5.0
Case100-7.1			108.1N	7.1
Case100-8.5			90.4N	8.5
Case150-3.1	150mm	1.5	333.8N	3.1
Case150-4.9			208.3N	4.9
Case150-7.2			143.3N	7.2
Case150-8.2			126.2N	8.2
Case200-3.1	200mm	2.0	419.7N	3.1
Case200-5.0			257.0N	5.0
Case200-8.2			157.8N	8.2

$F_{sDL}=W/Q_u$ を算定する際の極限支持力 Q_u は、内部摩擦角等から支持力式で推定した値ではなく、同一の方法で作製したアルミ棒積層体模型地盤において実施した、根入れ長 L を変化させた直接基礎（基礎幅 $B=100\text{mm}$ も同一）の鉛直載荷実験結果（図-2）から算定した。また、模型死荷重 W は、模型本体重量の他に追加した錘と起振器の重量を含む値である。

なお、実際の橋脚であれば、死荷重の違いは主に桁重量の違いによって生じると考えられるため、より詳細にモデル化するためには、模型死荷重を変化させるための錘は桁重心高さに相当する位置に配置するのが望ましい。しかしながら本実験では起振器との取り合い等の事情を優先したため、死荷重の重心高さについては死荷重が大きくなるほど（すなわち、死荷重安全率 F_{sDL} が小さいケースほど）実構造物よりも低い位置になるというモデル化誤差を有している。ただし、本実験は振動台実験ではなく、起振器自体が載荷装置として橋脚模型天端に直接外力を与える機構としているため、これらの錘自体に生じる慣性力の影響は相対的に小さく、定性的な傾向を検討する上では大きな影響は及ぼさないと考えている。

3. 実験結果および考察

(1) 水平震度と残留沈下量の関係

各加振段階毎の水平震度 k_h の片振幅と残留沈下量 δ_{bv} の関係を骨格曲線として図-3に示す。なお、片振幅は各加振段階での最大値と最小値の差の1/2とし、水平震度 k_h は、以下の式(1)により算出した。

$$k_h = \frac{S + \frac{M}{h}}{W} \quad (1)$$

ここで、 S : 2方向ロードセルで計測した起振器からの入力せん断力（右向きを正）、 M : 2方向ロードセルで

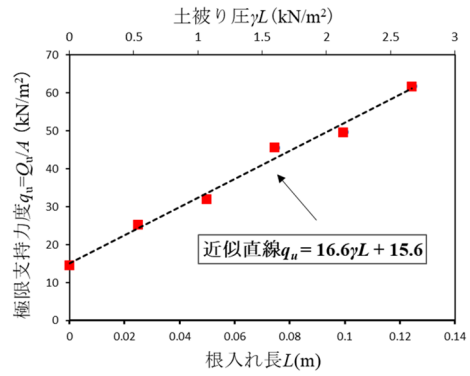


図-2 アルミ棒積層模型地盤における直接基礎の極限支持力度と根入れ長の関係

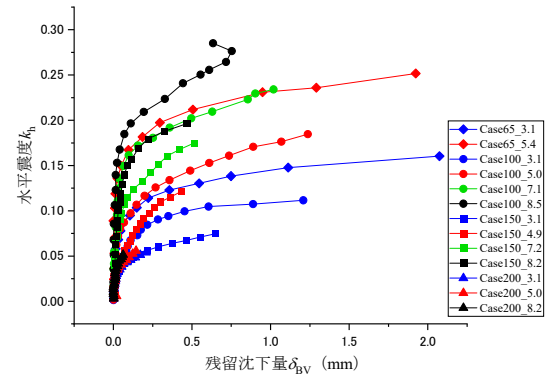


図-3 水平震度 k_h -残留沈下量 δ_{bv} 関係

計測した起振器からの入力モーメント（時計回りを正）、 h : 模型高さ（基礎底面から起振器基部の2方向ロードセル中心までの高さ）、 W : 模型自重である。

図-3より、死荷重安全率 F_{sDL} が小さいケースでは、より小さい水平震度で残留沈下量が生じていることが分かる。また、同程度の F_{sDL} の場合、根入れが深いケース($L=150\text{mm}$, 200mm)の方がより小さい水平震度で残留沈下量が累積的に増加する傾向が確認された。

(2) 基礎底面反力の偏心比と残留沈下量の関係

根入れを有する柱状体基礎の地震時水平力に対する地盤抵抗は、主に側面の水平抵抗と底面のせん断および回転抵抗で分担される。これらのうち、死荷重の大半を負担する底面での地盤抵抗は残留沈下量と関係が深いと考えられる。そこで、底面に作用する鉛直荷重の偏心比に着目した考察を行う。偏心比 e_b/B は、基礎底面に設置した2方向ロードセルにより計測した反力（反力モーメント M_b 、鉛直反力 V_b ）を用いて、以下の式(2)により算出した。

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

図-4 に基礎底面反力の偏心比 e_b/B と残留沈下量 δ_{bv} の関係を示す。水平震度との関係と同様に、死荷重安全

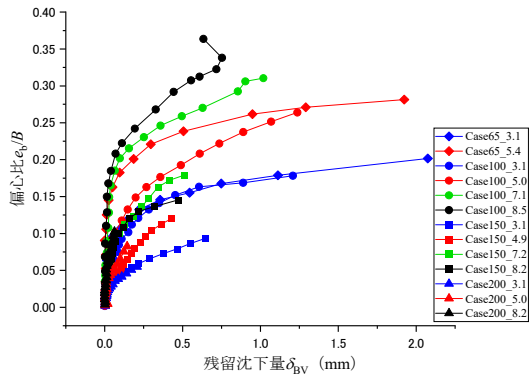


図4 偏心率 e_v/B -残留沈下量 δ_{BV} 関係

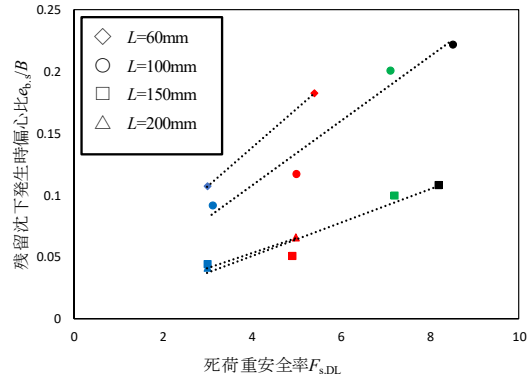
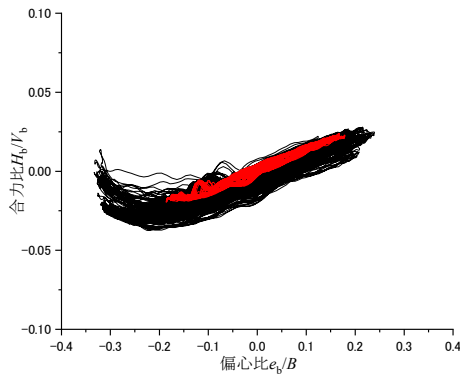
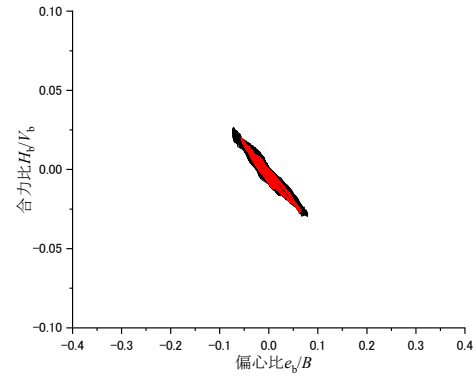


図5 残留沈下発生限界偏心率 e_{bs}/B と死荷重安全率 F_{sDL} の関係



a) Case65-5.4



b) Case200-5.0

図6 底面反力の合力比-偏心率関係

F_{sDL} が小さいケースほど、より小さな偏心率で残留沈下量が増加し始める傾向を示し、同程度の F_{sDL} の場合では、根入れが深い方がより小さな偏心率で残留沈下量が増加し始めることが分かる。

図-5に各ケースの死荷重安全率 F_{sDL} と残留沈下量 δ_{BV} が発生する限界状態に達する偏心率（以下、 e_{bs}/B と表記）の関係を示す。すなわち図-5において、ある地震作用に対する基礎底面反力の偏心率が、残留沈下発生限界偏心率 e_{bs}/B を下回っていれば、残留沈下が発生する可能性は低いと判断できる。ここで e_{bs}/B の値は、図-4から残留沈下量が増加し始める 0.1mm を超過した時点の偏心率とした。Case200-8.2 に関しては、側面および底面の地盤抵抗を上回るだけの十分な加振力を与えることが出来ておらず、残留沈下量が 0.1mm に達していないため、ここでは除外している。図-5より、 e_{bs}/B の値は F_{sDL} が小さくなるほど小さくなっており、残留沈下を抑制したければ基礎底面に作用する荷重の偏心率が小さくなるように設計する必要があることが分かる。また、同程度の F_{sDL} であっても根入れが深い（根入れ比が大きい）方が、荷重の偏心率をより小さく設計する必要がある結果となった。

(3) 基礎底面に作用する荷重の合力比と偏心率の関係

根入れ長の違いによる基礎底面に作用するせん断反力が残留沈下挙動に及ぼす影響について考察するため、偏心率に対する底面反力の合力比（底面で計測したせん断反力 H_v /鉛直反力 V_6 ）の関係を図-6に示す。なお、根入れ深さの大小による違いを比較するため、 $F_{sDL}=5.0$ 程度の $L=65\text{mm}$ 、 200mm の2ケースにおいて、残留沈下発生時の加振段階での履歴曲線を赤く示している。根入れが浅い場合 (Case65-5.4)、履歴曲線の勾配は正となっており、地上部の水平力と同じ方向のせん断力が底面に作用していることが分かる。一方で根入れが深い場合 (Case200-5.0)、基礎側面の地盤抵抗が大きくなり、底面で負担するモーメントが減少するため、偏心率の振幅は小さくなっている。また、履歴曲線の勾配は負側に大きくなっており、地表面付近の水平力とは逆方向に比較的大きなせん断力が発生し、基礎底面に作用する合力の傾斜方向が逆転する傾向を示している。

基礎底面に作用する合力の傾斜が載荷方向と逆方向になることが周辺地盤に与える影響を視覚的に確認するため、画像解析による地盤の水平変位分布に関する考察を行う。比較的確かにすべり線が確認できた

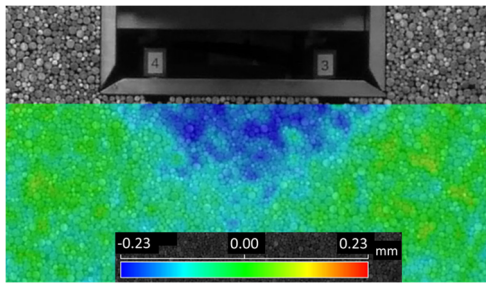


図-7 基礎底面周辺の地盤の水平変位分布
(Case150-8.5, 右向きが正)

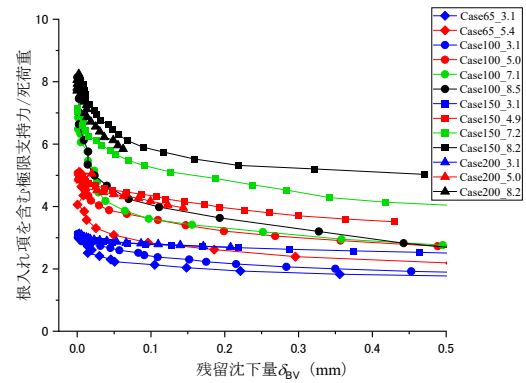
Case150-8.5 (最大加速度 4.0m/s^2 , 荷点において変位 0mm 地点から右方向最大変位時)の結果を図-7に示す。基礎底面を半径とする円弧状のすべり線が見られ、著者が行った単調荷重実験からも同様の傾向が確認されている³⁾。Terzaghiの支持力公式では、地盤のすべり線は受働領域まで広がり土被り圧が作用するとされているが、根入れが深い基礎では、底面付近の地盤のすべり線は基礎底面内で小さく発生するため、作用する土被り圧は小さくなると思われる。

(4) 鉛直支持力の安全率と残留沈下量に関する考察

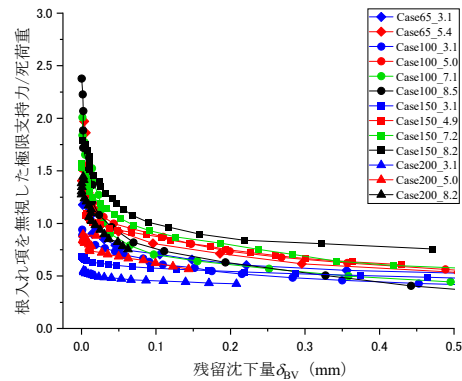
常時の死荷重安全率 F_{SDL} ではなく、Meyerhofが提案した方法に倣って低減を行った極限支持力に着目した考察を行う。低減には低減係数および有効幅を用いて、図-2における根入れ項および自重項を算定した。詳しい低減方法に関しては文献4)を参照されたい。図-8に、偏心・傾斜を考慮した極限支持力を模型死荷重で除した値と、 0.5mm までに拡大した残留沈下量の関係を示す。なお、土被り圧の影響を比較するために、根入れ項を含む場合a)と含まない場合b)の2パターンを示す。図-8のa)より、全ケースにおいて加振段階が進み、ある値まで極限支持力が下がると、残留沈下量が増加していく傾向が見られたが、その値はケースにより様々であった。また、 $F_{SDL}=3.1$ のケースでは加振開始後すぐに残留沈下量が増加していく傾向が見られた。一方で、土被り圧を考慮していないb)に着目すると、安全率が1.0を下回ると、どのケースでも残留沈下量が累積的に増加する傾向が見られた。また、初期段階での安全率が1.0を下回っているケースでは加振開始後すぐに残留沈下が発生することが確認された。なお、根入れが深い場合、基礎端部の浮き上がりが生じていないケースもあり、実際には多少の土被り圧が作用していると考えられる。そのため、根入れ項を無視したb)の安全率を1.0以上確保していれば、少なくとも残留沈下は抑制できると考えられる。

5. おわりに

柱状体基礎の地震時残留沈下量は、根入れが深い



a) 根入れ項を含む場合



b) 根入れ項を含まない場合

図-8 偏心・傾斜を考慮した極限支持力/死荷重と
残留沈下量の関係

(根入れ比が大きい)ほど、より小さい偏心比で発生する傾向が確認された。これは、基礎底面に作用するせん断力が作用力と逆方向に作用することで、周辺地盤の破壊面は基礎底面内で小さく発生するため、土被り圧が小さくなることが影響していると考えられる。これらの現象は、死荷重安全率 F_{SDL} ではなくMeyerhofの偏心・傾斜荷重の低減を考慮したうえで、根入れ項を無視した安全率を用いることで概ね合理的に説明できた。

参考文献

- 1) 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, 鉄道総研報告, Vol.24, No.7, pp.23-28, 2010.
- 2) 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) 磯部祐輝, 吉田広基, 西岡英俊: 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荷重実験, 土木学会第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.45-52, 2022.
- 4) 2003 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 丸善, pp.149-151, 2012.