

# 飽和砂地盤上の直接基礎建物の地震時沈下挙動に関する研究

柴田 景太<sup>\*1</sup>・船原 英樹<sup>\*1</sup>・長尾 俊昌<sup>\*1</sup>

*Keywords : spread foundation, saturated sandy ground, compaction, settlement, dynamic centrifuge test*  
 直接基礎, 飽和砂地盤, 締固め, 沈下, 遠心振動実験

## 1. はじめに

地下水位以深に緩い砂層がある地盤では, 地震時に地盤の液状化による鉛直支持性能の低下や地盤沈下の恐れがあるため, 基礎構造に支持杭を採用する場合が多い。しかし, 計画する建物が中低層であれば, 地盤改良による液状化対策を施して直接基礎形式で合理的に設計できる場合がある。地盤改良としては, 地盤密度の増大により液状化に対する抵抗性を高める締固め工法が代表的な方法として挙げられる。締固めによる液状化対策を施す場合, 液状化層の全層厚について対策を施すのが一般的であるが, 対策効果は, 基礎底から離れた深い領域よりも基礎底に近い浅い領域の方が大きいと考えられる。よって, 深部に非改良地盤を残して, 基礎底に近い領域だけを締固めても十分に対策効果が得られる可能性があると考えられる(図-1)。ところが, 液状化対策が必要な領域を適切に評価する方法や, 深部の限定的な液状化の影響を評価する方法は, 未だ十分には確立されていな

い。

そこで本研究では, 液状化対策として締固め工法を採用した場合について, 遠心場における振動台実験を実施した。そして, 表層部のみを改良して深部に非改良層を残した場合に着目して, 表層の締固め層厚の違いが地震時における地盤の液状化程度や直接基礎建物の沈下挙動に与える影響を検討した。これまでに, 地下水位を地表面に設定し根入れを設けない条件で検討を実施してきている<sup>1)</sup>, 地下水位や根入れの違いが直接基礎建物の地震時挙動に対して与える影響については十分な知見が得られていない。そこで本検討では, 地下水位を地表面とせず地中に設定し, さらに根入れを設け, 地下水位や根入れの影響についても検討を行った。

## 2. 実験概要

実験ケースと, 各ケースにおける試験体の概要および主要な計測位置を図-2に示す。全ケースで, 土槽底面から基礎底面までの距離を統一しており, 地下水位・根入れ深さ・地盤の相対密度を実験パラメータとしている。検討項目は, 「地下水位の影響」・「根入れ深さの影響」・「締固め層厚の影響」で, それぞれの検討で用いるケースを表-1にまとめている。模型縮尺は, 1/50(遠心加速度: 50G)としており, 以下では実物換算した値のみ示す。

地盤は, 円形せん断土槽内に豊浦珪砂(最大間隙比: 0.980, 最小間隙比: 0.610)を空中落下させた後, シリコンオイル(動粘度: 50mm<sup>2</sup>/s)で飽和させて作製した。締固め改良を施した地盤は, 相対密度Dr=90%を目標に作製しており, 改良を施さない地盤は, 相対密度Dr=50%を目標に作製した。また, 地下水位を地中に設けたケース(ケース2~5)では, 土槽側面に設けた連通管の50G場での水位を地下水位としている。連通管の弁は, 遠心

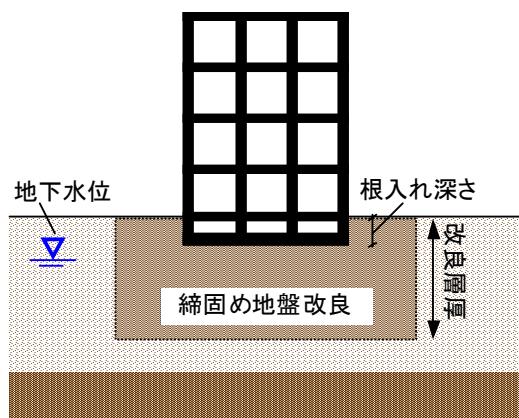


図-1 締固め改良地盤上に建つ直接基礎建物  
 Fig.1 Spread foundation building constructed on compacted ground

\*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

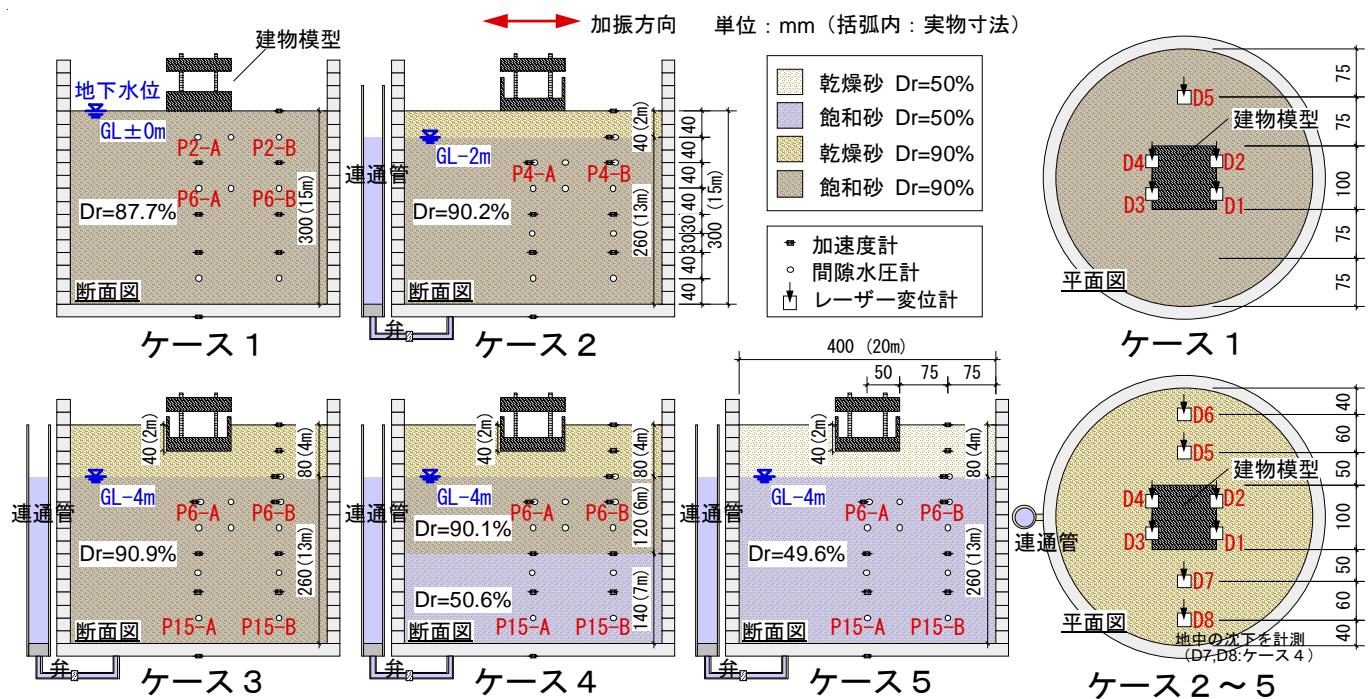


図-2 実験ケースごとの試験体と計測位置  
Fig.2 Test model and measurements of each case

加速度を増加させる段階では開いた状態としているが、加振を開始する直前に閉じてあり、加振時に土槽内のシリコンオイルが連通管へ流出しないようにしている。

建物模型は、上部構造と基礎で構成しており、基礎幅を $5m \times 5m$ 、平均接地圧を約 $60kN/m^2$ としている。また、基礎固定時の固有周期は約0.23秒である。

入力地震動には、加速度振幅を調整した臨海波(人工地震波)<sup>2)</sup>を用いた(図-3)。

### 3. 実験結果

まず、地下水位の影響と根入れの影響について述べた後、表層の締固め改良層厚の影響について述べる。

#### 3.1 地下水位の影響について

地下水位の影響を、地下水位以外の条件がほぼ同様であるケース1とケース2で比較する。ケース1は地下水位を地表面とした場合で、ケース2は地下水位をGL-2mとした場合である。

#### 過剰間隙水圧比

図-5に比較的基礎底に近い深度の過剰間隙水圧比の時刻歴を建物直下と建物周辺の地盤について示す。間隙水圧計の深度がケース1と2で異なるため、ケース2はGL-4mでの値を、ケース1は二深度(GL-2mとGL-6m)での値とその平均値(GL-4mに相当)を示している。また、過剰間隙水圧比は、過剰間隙水圧を三次元FEMによる自

表-1 検討項目と検討ケース

Table 1 Test items and test cases

検討項目	検討ケース
地下水位	ケース1, ケース2
根入れ深さ	ケース2, ケース3
締固め層厚	ケース3, ケース4, ケース5

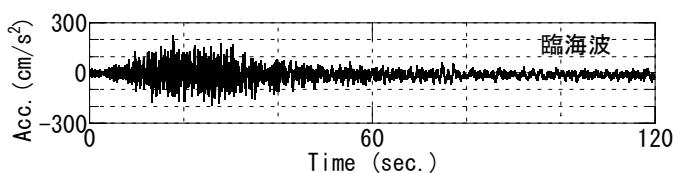


図-3 入力地震動

Fig.3 Input wave

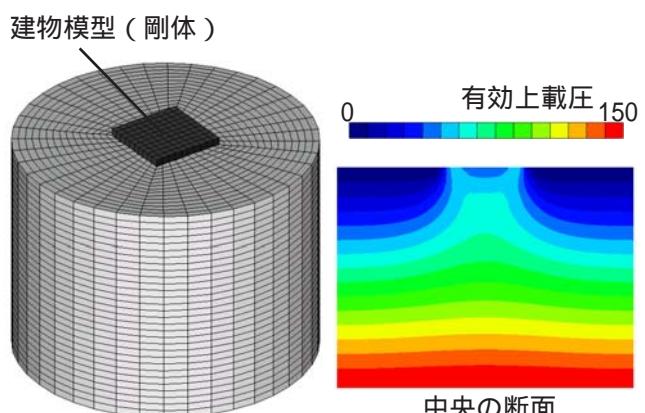


図-4 自重解析(ケース1)  
Fig.4 Self load analysis (Case1)

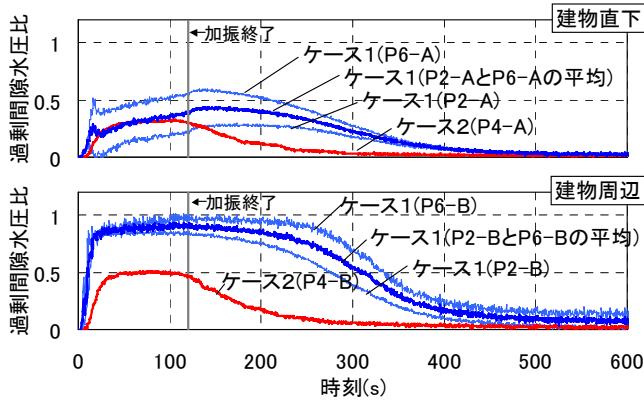


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴(ケース1,2)

Fig.5 Time histories of excess pore water pressure (Case1,2)

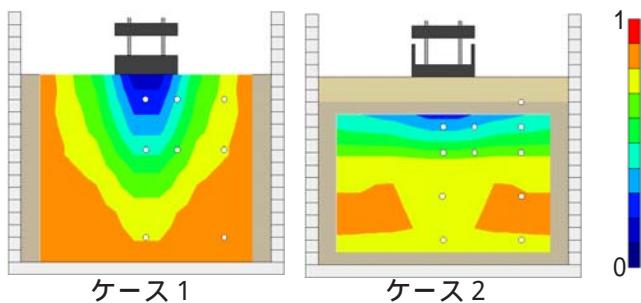


図-6 過剰間隙水圧比のコンター(ケース1,2)

Fig.6 Contours of excess pore water pressure (Case1,2)

重解析(図-4)から求めた有効上載圧で除して求めた。解析プログラムにはTDAP<sup>3)</sup>を使用した。地下水位を地中に設定したケース2よりも、地下水位を地表面としたケース1の方が、過剰間隙水圧比の上昇量が高く、水圧消散に要する時間が長くなっている。地下水位が深い場合、地下水位以浅の土粒子に浮力が働くため、有効上載圧が高くなるため、液状化に対する抵抗性が増加していることが考えられる。

図-6に時刻30秒における過剰間隙水圧比のコンターを示す。コンターは、間隙水圧計の測定値を基に描いている。両ケースとも、建物周辺の地盤よりも建物直下の地盤で過剰間隙水圧比が小さいことがわかる。特に、地下水位を地表面としたケース1で、その傾向が顕著である。ケース2よりもケース1の方が、建物直下と建物周辺の浅部の地盤における有効上載圧の差が大きいことが理由として考えられる。

#### 沈下量

図-7に建物模型(D1～D4の平均)および周辺地盤(ケース1はD5、ケース2はD5とD6の平均)の絶対沈下量と、周辺地盤に対する建物模型の相対沈下量をそれぞれ示す。地下水位を地表面としたケース1では、建物模型の絶対沈下量が15cm以上と大きく生じているのにに対して、地下水位が深いケース2では、沈下量が7cm程

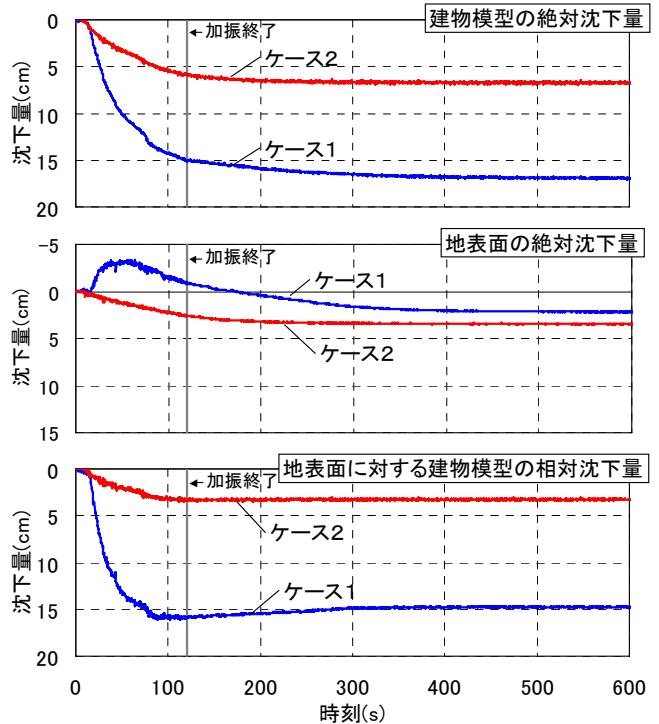


図-7 沈下量の時刻歴(ケース1,2)

Fig.7 Time histories of settlement (Case1,2)

度と小さい。ケース2では地下水位が深いため、過剰間隙水圧の上昇が抑制されたことや、基礎底面に接する地盤が飽和していないため、水圧上昇に伴う地盤剛性の低下の影響が小さかったことなどが理由として考えられる。次に地表面の絶対沈下量に着目すると、ケース1では加振とともに地表面が盛り上がる方向に変形しているが、ケース2では加振開始直後から沈下が生じている。ケース1では、基礎底面に接する地盤が飽和しているため、建物模型の地盤への潜り込みが大きくなり、建物直下の地盤が押しのけられた影響が大きくなっていると考えられる。一方、ケース2では、建物模型の地盤への潜り込みよりも水圧消散に伴う地盤収縮の影響が支配的であると考えられる。また、相対沈下量からも、ケース1では建物模型の地盤への潜り込みの影響が大きいことがわかる。ケース2のように、地盤に対する建物の相対沈下量が小さければ、建物の絶対沈下量が大きくて工学的に許容できる場合があるので、特に基礎底面に接する地盤は、液状化による極端な地盤の剛性低下が起こらないような条件とすることが望ましいと考えられる。

#### 3.2 根入れの影響について

根入れの有無の影響について、ケース2と3で比較検討する。ケース2と3で、基礎底から地下水位までの距離および基礎底から土槽底面までの距離を同一としているが、基礎底以浅の土層の有無が異なっている。

#### 過剰間隙水圧比

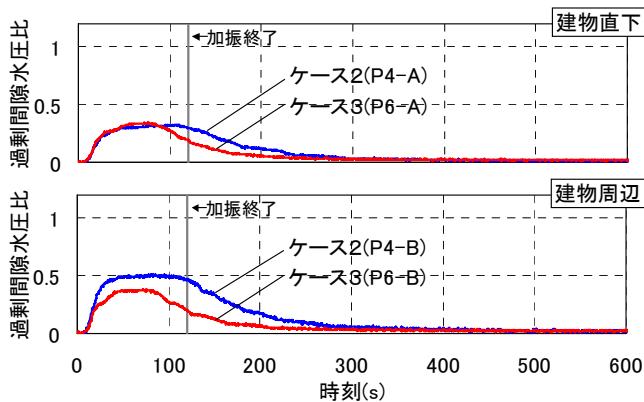


図 - 8 過剰間隙水圧比の時刻歴 ( ケース 2, 3 )  
Fig.8 Time histories of excess pore water pressure (Case2,3)

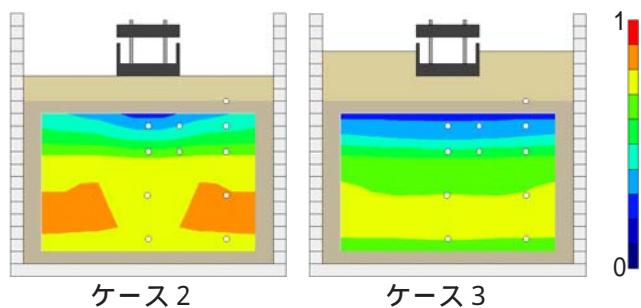


図 - 9 過剰間隙水圧比のコンター ( ケース 2, 3 )  
Fig.9 Contours of excess pore water pressure (Case2,3)

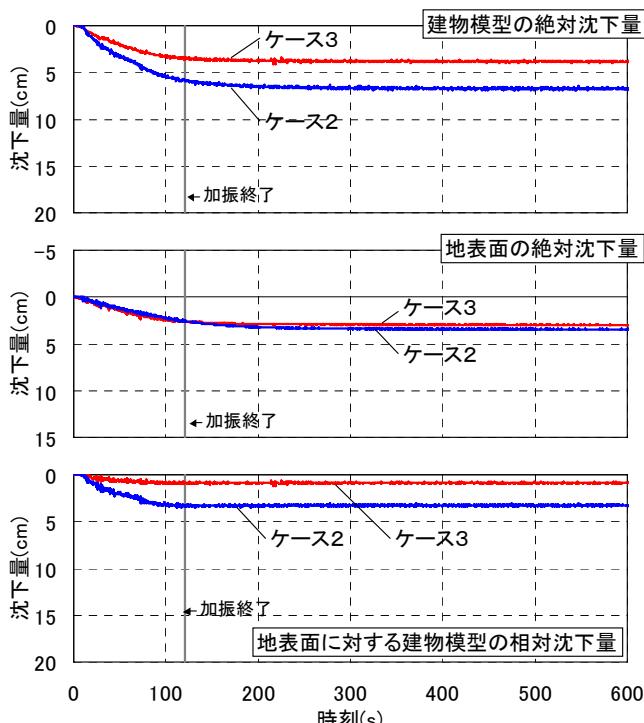


図 - 10 沈下量の時刻歴 ( ケース 2, 3 )  
Fig.9 Time histories of settlement (Case2,3)

図 - 8 に浅部 ( 基礎底 -4m ) の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。根入れを設けたケース 3 よりも根入れを設けていないケース 2 の方が、過剰間隙水圧比の上昇量が大きくなる傾向にある。

水圧消散に要する時間が長い傾向にある。ケース 3 では、地下水位以浅の飽和していない層がケース 2 よりも厚く、初期の有効上載圧が大きくなっているため、過剰間隙水圧比の上昇が抑制されたと考えられる。

図 - 9 に過剰間隙水圧比のコンターを示す。ケース 2 よりもケース 3 の方が、過剰間隙水圧比が全体的に小さいことがわかる。また、ケース 2 では、建物直下の地盤において建物周辺の地盤よりも過剰間隙水圧比の小さい領域が見受けられるが、ケース 3 では同深度の層の過剰間隙水圧比がほぼ同一の値となっている。ケース 3 よりもケース 2 の方が、建物直下と建物周辺の地盤で有効上載圧の差が大きいからであると考えられる。

#### 沈下量

図 - 10 に建物模型 ( D1 ~ D4 の平均 ) および周辺地盤 ( D5 と D6 の平均 ) の絶対沈下量と、周辺地盤に対する建物模型の相対沈下量をそれぞれ示す。建物模型の絶対沈下量は、根入れを設けた場合 ( ケース 3 ) より設けない場合 ( ケース 2 ) の方が大きく生じている。ケース 3 では、根入れによる押さえ効果が働いているため、沈下量が小さくなっていると考えられる。一方、地表面の絶対沈下量については、両ケースでほぼ同程度となった。過剰間隙水圧比の上昇量の差が比較的小しかったためと考えられる。また、ケース 3 では地表面に対する建物模型の相対沈下量がほとんど生じていないことがわかる。

#### 3.3 締固め層厚の影響について

地下水位を地中に設定し・根入れを設けた条件で、表層のみ締固め改良して深部に液状化層を残した場合の実験結果を、締固め改良しない場合や全層締固め改良した場合と比較して示す。

#### 過剰間隙水圧比

浅部 ( GL-6m ) と深部 ( GL-15m ) の過剰間隙水圧比の時刻歴を図 - 11 にそれぞれ示す。それぞれ、建物直下と建物周辺の地盤について示している。締固め改良を施している層 ( ケース 3 やケース 4 の浅部 ) では、改良を施していない層 ( ケース 4 の深部やケース 5 ) よりも過剰間隙水圧比の上昇が抑制されている。

ただし、非改良層を残したケース 4 の深部では、過剰間隙水圧比が 0.4 程度の状態が長く続いている。深部の非改良層からの水圧伝播の影響と考えられる。また、締固め改良していないケース 5 よりもケース 4 の方が消散までの時間が長くなっているが、ケース 4 の表層では密度が高いため、透水係数が小さくなっていることが原因であると考えられる。

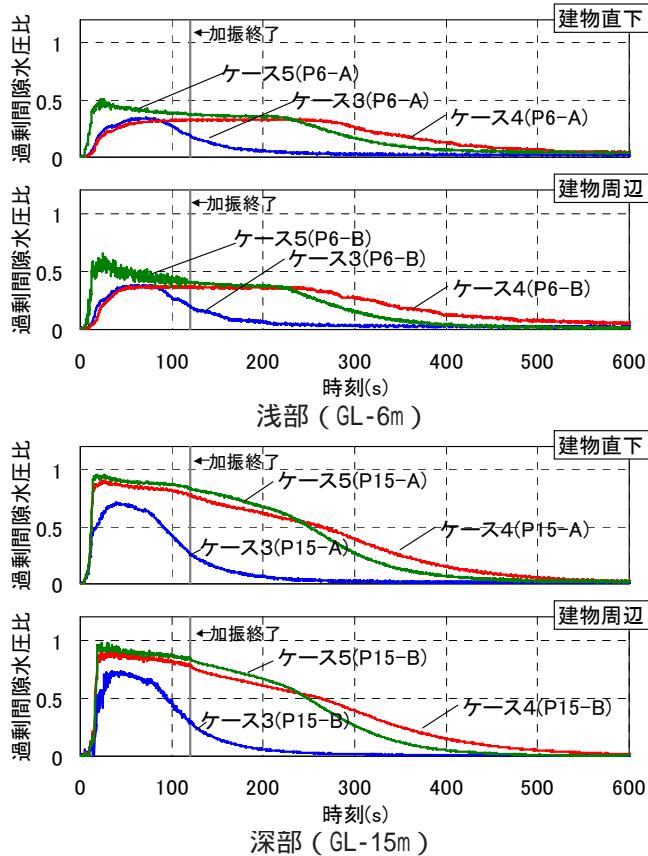


図 - 11 過剰間隙水圧比の時刻歴 (ケース 3, 4, 5)  
Fig.11 Time histories of excess pore water pressure (Case3,4,5)

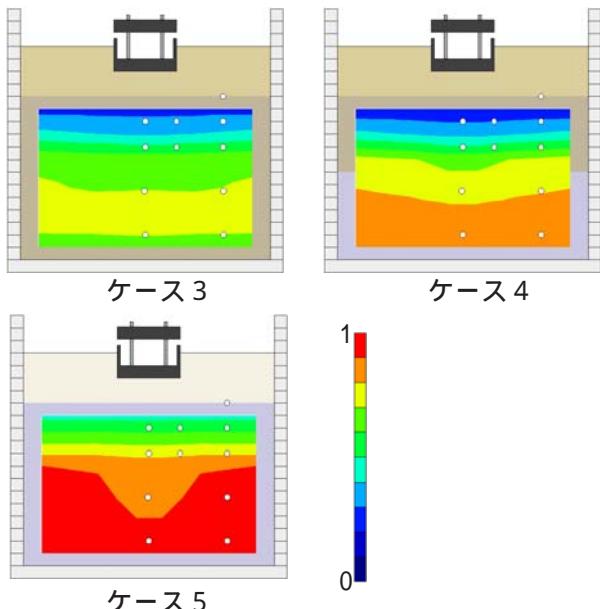


図 - 12 過剰間隙水圧比のコンター (ケース 3, 4, 5)  
Fig.12 Contours of excess pore water pressure (Case3,4,5)

次に、過剰間隙水圧比のコンターを図 - 12 に示す。浅部ではケース 3 とケース 4 で過剰間隙水圧比の上昇量が小さく、深部ではケース 4 とケース 5 で過剰間隙水圧比の上昇量が大きくなっている。図 - 11 の時刻歴と同様の傾向が見受けられる。

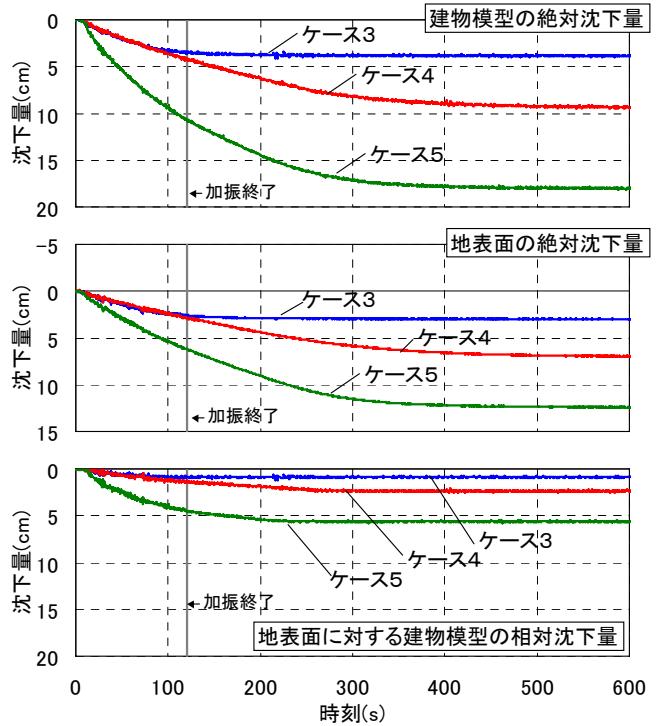


図 - 13 沈下量の時刻歴 (ケース 3, 4, 5)  
Fig.13 Time histories of settlement (Case3,4,5)

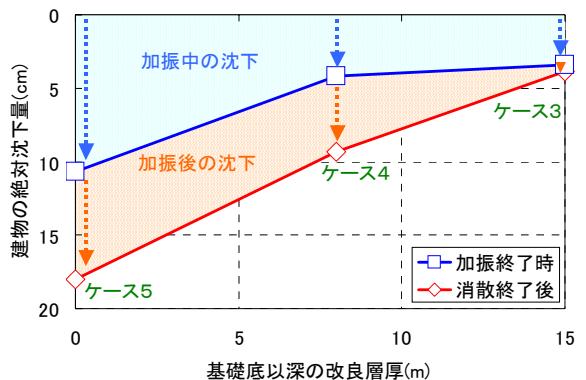


図 - 14 建物沈下量と締固め改良層厚の関係  
Fig.14 Building settlement and compacted layer thickness

### 沈下量

図 - 13 に建物模型 (D1 ~ D4 の平均) および周辺地盤 (D5 と D6 の平均) の絶対沈下量と、周辺地盤に対する建物模型の相対沈下量をそれぞれ示す。加振中 (0 ~ 120 秒) の各沈下量は、全層締固め改良したケース 3 と表層のみ締固め改良したケース 4 の二ケースが同程度となっており、締固め改良していないケース 5 のみが大きくなっている。しかし、ケース 4 では、加振終了後に沈下がケース 3 よりも大きく生じている。ケース 4 では、ケース 3 よりも深部の過剰間隙水圧比の上昇量が大きいため (図 - 11, 12)、非改良層における水圧消散に伴う地盤収縮の影響が表れていると考えられる。次に、地表面に対する建物模型の相対沈下量

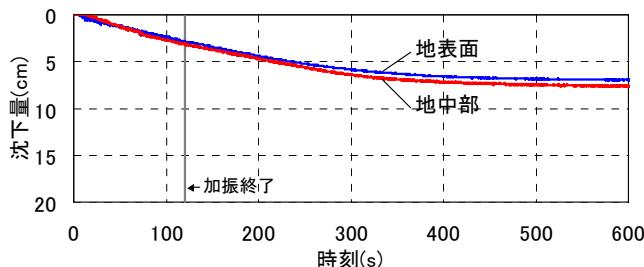


図-15 地表面と地中部の沈下量の時刻歴

Fig.15 Time histories of settlement of ground surface and underground section

に着目すると、全ケースとも建物模型の絶対沈下量と比較して小さいことがわかる。全ケースとも基礎底面に近い浅部において過剰間隙水圧比の上昇量が比較的小さい(図-11,12)ため、建物の地盤への潜り込みが小さくなっていると考えられる。

図-14に加振終了時と過剰間隙水圧の消散終了後(水圧がほぼ収束する時刻600秒)における建物模型の絶対沈下量と基礎底以深の締固め改良層厚の関係を示す。改良層厚の増加とともに沈下量が小さくなる傾向が見受けられる。また、全層締固め改良した場合(ケース3)では、加振終了時と消散終了後の沈下量の差が小さいが、非改良層がある場合(ケース4と5)では、その差が大きくなっている。改良層厚が厚くなるほど、加振終了後に生じる沈下が小さくなる傾向が見受けられる。

図-15にケース4(表層のみ締固め)の地表面と地中部(GL-10mの層境界)における沈下量の時刻歴を示す。両沈下量はほぼ同程度となっており、主に非改良層の圧縮により沈下が生じていることがわかる。地表面での沈下量よりも地中部での沈下量の方が大きい(時刻600秒で0.6cm程度)のは、建物模型が地盤に潜り込む沈下が生じた際に、周辺の地盤が盛り上がった影響が含まれているからであると考えられる。

#### 4. まとめ

飽和砂地盤上の直接基礎建物を対象とした遠心場における振動台実験を実施し、「地下水位の影響」・「根入れの影響」・「締固め層厚の影響」について検討した。得られた知見は以下の通りである。

##### 【地下水位の影響】

- 1) 地下水位が深い場合、有効上載圧の増加により過剰間隙水圧比の上昇が抑制される。
- 2) 地下水位が浅く基礎底面が飽和している場合、基礎底面に接する地盤において、水圧上昇による地盤剛性の低下が生じるため、建物の地盤への潜り込みが大きくなる。

##### 【根入れの影響】

- 3) 地下水位を基礎底以深とした条件で根入れを設けると、基礎周囲の地盤の押さえ効果により建物の地震時沈下量が小さくなる。

##### 【締固め層厚の影響】

- 4) 深部に非改良層を残して表層のみを締固め改良した場合、改良領域での過剰間隙水圧上昇は抑制されるが、過剰間隙水圧の継続時間は深部からの水圧伝播により長くなる。
- 5) 建物に生じる地震時沈下は、改良層厚が厚いほど小さくなるが、深部に非改良層を残す場合は、非改良層での過剰間隙水圧消散に伴う沈下の影響が相対的に大きくなるので、その評価が重要となる。

#### 参考文献

- 1) 船原英樹、柴田景太、長尾俊昌：表層を締固めた飽和砂地盤上の直接基礎建物を対象とした遠心振動実験、大成建設技術センター報、第41号、27-1-6、2008.11
- 2) 日本建築防災協会：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・検討のうち「動的設計用入力地震動の設定に関する検討」報告書、1992.3
- 3) TDAP 理論説明書、(株)アーケ情報システム