

# 振動荷重を受ける場合のパイルド・ラフト基礎の変形特性に関する研究

## Uniaxial compression tests on unsaturated Masado under constant-degree-of-saturation and its modeling

西 遥輝<sup>1</sup>、長野兄裕<sup>2</sup>、Kheradi Hamayoon<sup>3</sup>、岩井 裕正<sup>2</sup>、張 鋒<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横河住金ブリッジ㈱

<sup>2</sup> 名古屋工業大学・大学院・工学研究科・社会工学専攻・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

<sup>3</sup> 構造物設計㈱

### 概 要

パイルド・ラフト基礎は先端支持杭基礎と異なり、べた基礎と摩擦杭が一体化した基礎構造物として用いられており、べた基礎底面の地盤抵抗力と摩擦杭の摩擦抵抗力の両方を考慮することで、設計の合理化を図ろうとする基礎形式である。実際にパイルド・ラフトは我が国においても建築分野にて数多くの適用実績がある。一方、土木分野での適用においては、沈下の問題が生じやすいことから比較的少ない。しかし、海外ではパイルド・ラフト基礎が土木分野において多く用いられており、鉄道軌道の基礎にも用いられている。しかしこの列車の振動によりパイルド・ラフト基礎が沈下する事例が報告されている。本稿では鉛直振動荷重を受けるパイルド・ラフト基礎の力学挙動、特に沈下特性に着目し、1g 場模型加振実験及び3次元動的FEM解析を実施した。その結果、1/50スケールでの模型実験において、鉛直振動荷重による基礎の最大沈下量が約2.3mmとなった。そのため、沈下対策が必要であることが分かった。また、FEM解析の結果では、実験値より大きい沈下が発生することもわかった。

キーワード：パイルド・ラフト基礎、列車振動荷重、模型加振実験、3次元 FEM 動的解析

### 1. はじめに

従来の杭基礎の設計では、基礎スラブ底面の地盤の抵抗力を考慮しないのが原則であるが、パイルド・ラフトは基礎底面の地盤の抵抗力を考慮することで、基礎設計の合理化を図ろうとするものである。実際に我が国においても建築分野で2000年建築基準法の改正において従来の仕様規定型から性能規定型への方向性が明確に示された。2001年には、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の改定がおこなわれ、従来の許容応力度設計法から、建物沈下量など変形評価を主体とする限界状態設計法に移行するとともに、べた基礎に沈下低減用の杭を併用したパイルド・ラフト基礎が新たな基礎形式として加えられた。その為、これまでに低層建物から超高層建物まで幅広い建物で挙動観測が行われ、設計法の妥当性の検証が実施されており、現在まで数多くの適用実績がある。その際、パイルド・ラフト基礎を採用することで従来の杭基礎を適用させた場合の設計と比較してコストが55%まで低減された場合もある。

一方で、土木分野ではパイルド・ラフト基礎の採用事例はほとんどない。現行の設計法においては杭基礎では基礎スラブ底面の地盤の抵抗力を無視し、鉛直荷重は杭のみで支持させるのが原則となっている。なぜこの様な方針と

なっているかは、杭の沈下と地盤の沈下が一致しないことにより、既設構造物でフーチング下部に空隙を生じる事例が報告されていることにあると考えられる。パイルド・ラフト基礎は先端支持杭基礎と異なり、べた基礎と摩擦杭が一体化した基礎構造物として用いられており、べた基礎底面の地盤抵抗力と摩擦杭の摩擦抵抗力の両方を考慮することで、設計の合理化を図ろうとする基礎形式である。しかし、土木分野での適用実績は、沈下の問題が生じやすいことからまだ少ない。一方、海外ではパイルド・ラフト基礎が土木分野において多く用いられており、鉄道軌道の基礎にも用いられている。しかしこの列車の振動によりパイルド・ラフト基礎が沈下する事例が報告されている。そこで本件では、鉛直振動荷重を受けるパイルド・ラフト基礎の力学挙動、特に沈下特性に着目し、1g 場模型加振実験及び3次元動的FEM解析を実施し、パイルド・ラフト基礎の沈下特性を実験と解析の両方から調べることにした。

### 2. 1g 模型加振実験概要

本実験ではパイルド・ラフトが上部工から鉛直振動荷重を受ける際の振動荷重を受ける時のパイルド・ラフトの力学挙動を検証した。

## 2.1 試験概要及び試験装置

試験概要図を図-1に示す。実験模型は幅1000mm、奥行715mm、高さ550mmの土槽内の中にパイルド・ラフト模型を設置・作製した。模型地盤には乾燥した豊浦砂を用いて相対密度を50～60%の中密な地盤を目標に、空中落下法（落下高さ70cm）により作製した（写真-1）。

写真-2に示すようにパイルド・ラフト模型は実構造物の1/50スケールを想定して作製した。モデル杭には直径 $D=20\text{mm}$ 、肉厚 $t=2\text{mm}$ のアルミパイプを使用し、杭先端をポリアミドキャップにより蓋をすることで、先端閉塞の仕様で支持力を発揮できるようにした。ラフト部は、幅260mm、奥行260mm、厚さ20mmの鋼材を使用した。

本実験でパイルド・ラフト模型に振動荷重を載荷する小型振動装置を写真-3に示すIMV社製m030/MA1である。小型振動装置の性能を以下に記す。また写真中に示す載荷板が上下に振動することで鉛直振動荷重を模型パイルド・ラフトに与えることができる。

- 加振加速度 : 500 m/s<sup>2</sup>
- 振動周波数範囲 : 5～3000 Hz
- 最大速度 : 1.6 m/s
- 最大変位 : 26mm

写真-4～6にパイルド・ラフト模型の設置状況と小型振動装置の据え置き手順を示す。写真-7に小型振動装置の全体像を示す。尚、載荷フレムのサイズ、曲げ剛性などの決定について、与える振動荷重の周波数範囲内で共振をさせないよう工夫した。

計測機器については圧電式加速度計、小型ロードセル、ひずみゲージおよびレーザ変位計を使用した。図-2に計測機器設置箇所を示す。加速度計は図-2の測点A及び測点Bに設置し2点により応答加速度を計測した。また加振中のモデル構造物の沈下量を計測するために加振中の沈下量を図-2の沈下量計測箇所にてレーザを当てることで計測した。

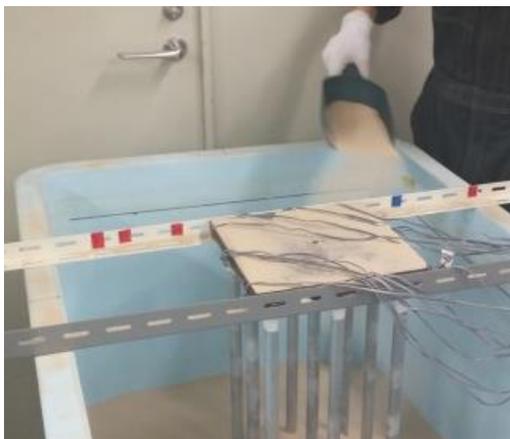


写真-1 基礎構造物設置後の砂地盤作成状況

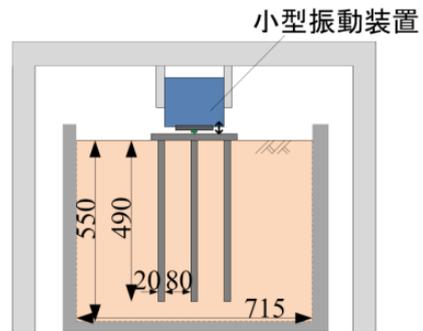


図-1 試験概要図 (単位: mm)



写真-2 パイルド・ラフト模型



写真-3 小型振動機



写真-4 ラフトと地盤を接触するための模型パイルド・ラフトの貫入



写真-5 杭貫入後の状況



写真-6 小型振動装置の設置



写真-7 小型振動装置の全体像

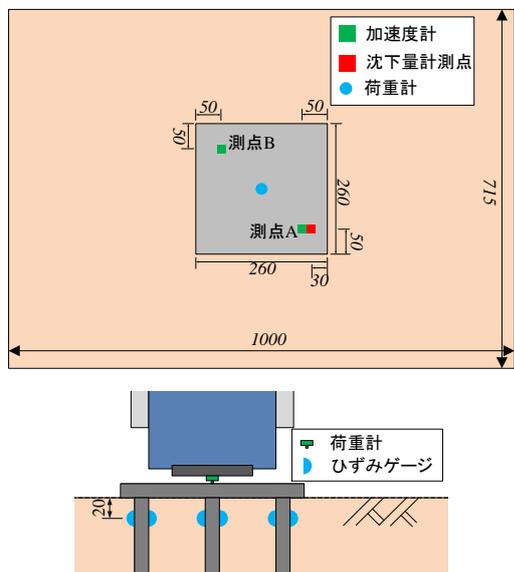


図-2 計測機器設置箇所

## 2.2 実験ケース

本実験の実験ケースを表-1に示す。加振条件は初期荷重300N、振幅300N、加振時間を10秒間、加振波を正弦波とした。振動荷重の周波数がパイルド・ラフトの沈下挙動に与える影響を検証する為に振動周波数を変えながら実施した。このような周波数を用いた理由として、模型が実構造物の1/50スケールを想定していること、地盤に伝わる振動の主働部の周波数が6Hz以下であることが挙げられる。もちろん実スケールで、列車がレールに与える振動荷重の周波数はいくらも高い(数10～数100Hz)が、枕木・バラスト等の減衰により、実際に地盤に与える振動の周波数はそれよりかなり低いことが知られている。

表-1 実験ケース

実験ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
周波数(Hz)	50	100	200	400

## 2.3 実験結果

各ケースの実験において計測されたラフトの応答加速度の加振全体時刻歴を図-3～図-6の左図に、拡大図を右図に示す。なお、正負は鉛直下向きを正とする。これらの結果より加振周波数が高周波になるにつれて、ラフトの応答加速度が増大し、特に400Hzではそれまでの周波数と比較して、極端に大きくなっていることが確認された。図-6の右図に着目すると分かる様にラフトの応答加速度の位相が振動荷重と異なっており、地盤とパイルド・ラフトの一体系の振動荷重による共振が発生し、基礎と周辺地盤の間に亀裂が生じ、応答振動がずれたと考えられる。

図-7に、各杭の杭頭部のひずみゲージで計測された軸力の総和で求められた各ケースの杭分担荷重を示す。全てのケースにおいて、振動の継続に従い杭分担荷重が減少していくことがわかる。また載荷荷重の振幅が300Nであるのに対して、杭分担荷重の振幅は全てのケースで300Nを超えている。これは、動的荷重により生じたラフトの慣性力の影響であると考えられる。

図-8に、各ケースの沈下時刻歴を比較したグラフを示す。この結果より50Hz、100Hzの低周波数加振のケースより200Hz、400Hzの高周波数加振の場合は沈下が大きくなることが確認されている。これは高周波の方が、一定の時間内に載荷回数が多いことが要因であると考えられる。

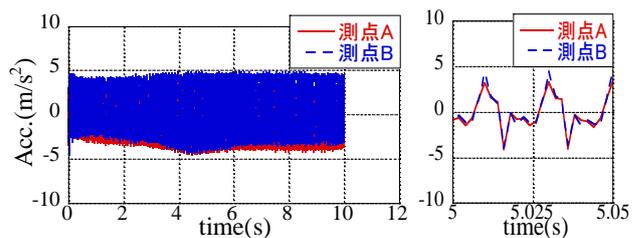


図-3 応答加速度 (50Hz)

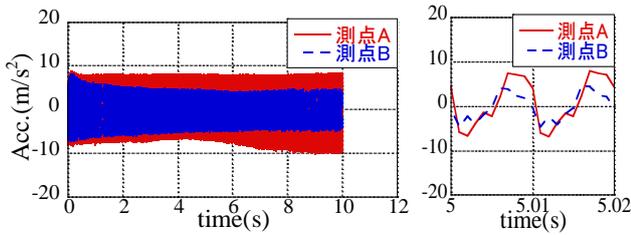


図-4 応答加速度(100Hz)

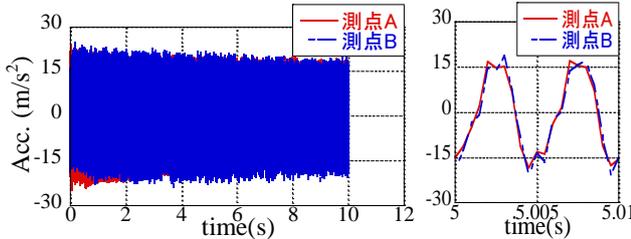


図-5 応答加速度(200Hz)

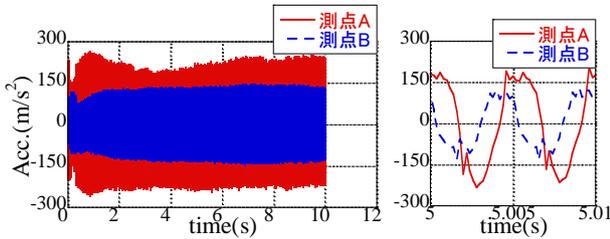


図-6 応答加速度(400Hz)

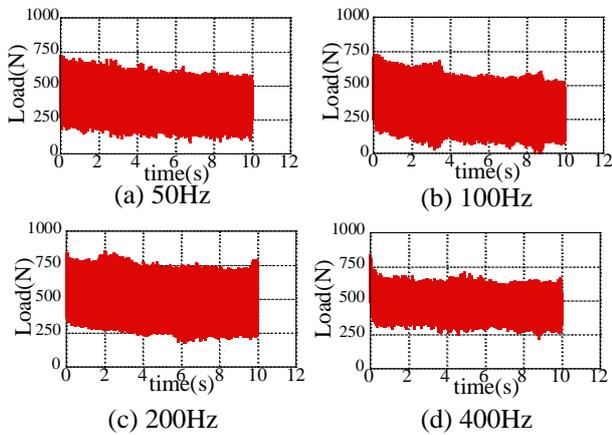


図-7 杭分担荷重

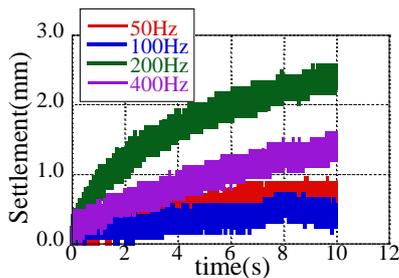


図-8 沈下時刻歴

### 3. 模型加振実験の数値解析

#### 3.1 解析概要

今回行った模型加振実験の数値解析を3次元動的FEMプログラム「DBLEAVES」<sup>1)</sup>を用いて実施した。土の構成モデルとして回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model<sup>2)</sup>を用いた。またラフト部は弾性材料、モデル杭は杭の体積を考慮する為にAFD-model<sup>3)</sup>を

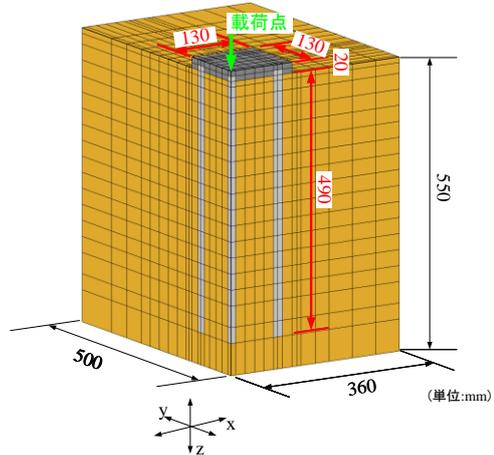


図-9 動的FEM解析メッシュ

表-2 境界条件

境界	固定方向
底面	x, y, z方向全方向固定
x軸方向側面	y方向固定
y軸方向側面	x方向固定

表-3 解析パラメータ

Parameter of Soil material		Value
Compression index	$\lambda$	0.05
Swelling index	$\kappa$	0.0064
Stress ratio at critical state	$R_f$	3.3
Void ratio ( $p'=98\text{kPa}$ on N.C.L.)	$N$	0.87
Poisson's ratio	$\nu$	0.3
Degradation parameter of over consolidation state	$m$	0.01
Degradation parameter of structure	$a$	0.5
Evolution parameter of anisotropy	$br$	1.5
Permeability	$k$	5.70E-04
Initial degree of structure	$R_{\theta}^*$	0.16
Initial degree of over consolidation ratio(OCR)	$1/R_{\theta}$	1.31+E03
Initial anisotropy	$\xi_{\theta}$	0.0

使用したビーム要素とコラム要素で構成されるハイブリッド要素<sup>4)</sup>とした。

数値解析に用いられる解析メッシュを図-9に示す。ここに、動的荷重および幾何学対称条件により、模型実験に使用した土槽の幅方向及び奥行方向を半断面とした4分の1断面を用いることとした。境界条件は表-2示すとおりである。荷重載荷は実験と同様に、点荷重として、図に示す位置で、実験で計測された荷重をそれぞれ載荷した。また解析ケースは実験と同様な4ケースである。地盤材料は実

験と同様に一般的な乾燥豊浦砂であり、そのパラメータも過去の研究で使われた豊浦砂のものを用いた。その値は表-3に示す。

### 3.2 解析結果

各ケースにおけるラフトの応答加速度の解析結果を図-10~13に示す。また実験結果も併せて載せており、解析結果と実験結果を比較した。これらの図より、100Hz振動荷重載荷時における応答加速度は解析結果が実験結果を再現できているが、それ以外の周波数では解析結果が過少あるいは過大に評価してしまうという結果になった。また実験で見られた振動荷重が高周波になるにつれてラフトの応答加速度が増大するという傾向は数値解析上では確認できず、振動周波数に依らず、応答加速度がほぼ一定である結果となった。このギャップを生じた理由として、解析ではラフトと地表間にジョイント要素を設けておらず、一方、実験においては剥離していた可能性が高く、これが主な要因と考えられる。

図-14に、各ケースの沈下測点Aにおける沈下時刻歴の解析結果と実験結果の比較を示す。これらの結果より全てのケースにおいて解析結果が実験結果を過大に評価していることが分かる。これは、本プログラムにおいて地盤モデルが微小変形を受ける際に変形を過大に評価しているという、すでに他の研究で報告されている問題に起因するものと考えられる。また実験結果で確認された加振の周波数が高くなるにつれて、沈下が増大していく傾向とは逆に、解析結果はその逆の傾向を示しており、この理由について今後検討していく必要がある。

図-15に、杭及びびラフトの荷重分担比率を示す。これらの結果より、全てのケースにおいて加振に伴い杭による荷重分担がラフトの分担へと移行していることが分かる。これは振動により地盤の杭への抵抗力が小さくなったことが考えられる。このことは図-16に示す鉛直変位のコンター図で見取れる。特に低周波振動載荷時、周辺地盤の沈下が大きくなり、杭への摩擦抵抗が極端に減少したことが原因と考えられる。

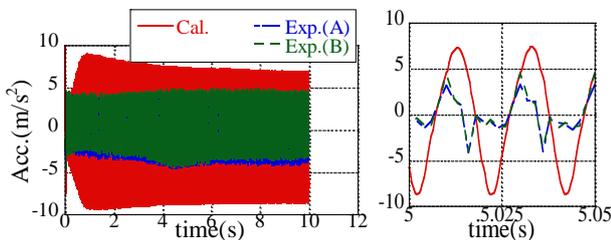


図-10 応答加速度比較 (50Hz)

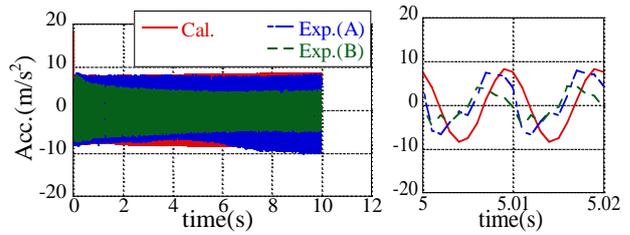


図-11 応答加速度比較 (100Hz)

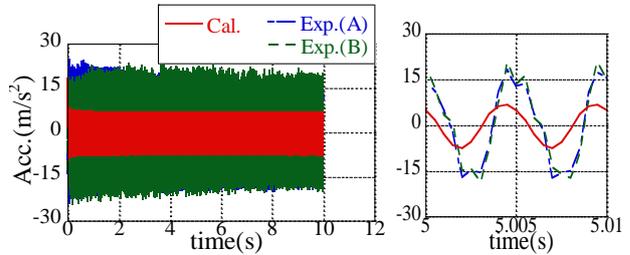


図-12 応答加速度比較 (200Hz)

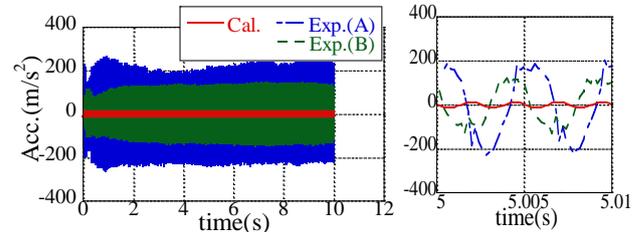


図-13 応答加速度比較 (400Hz)

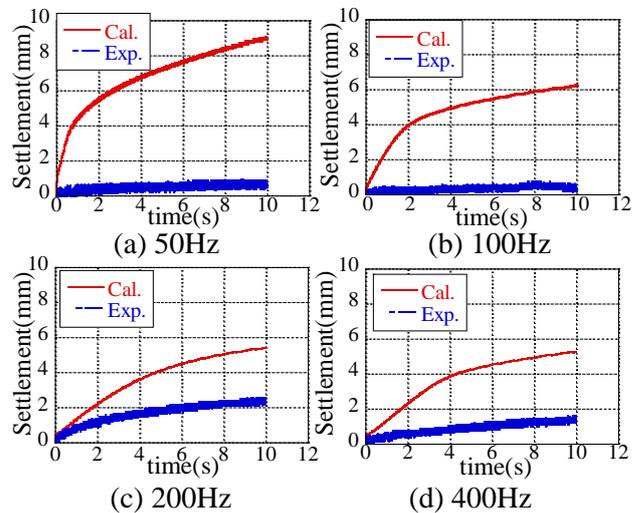


図-14 沈下測点Aにおける沈下時刻歴の比較

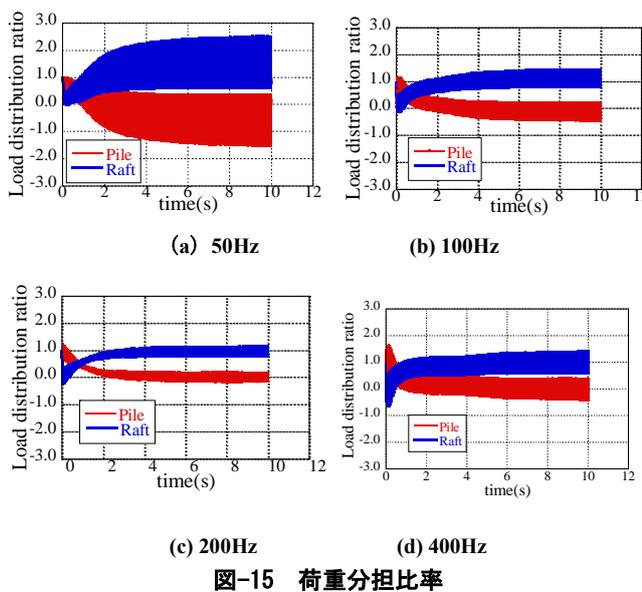


図-15 荷重分担比率

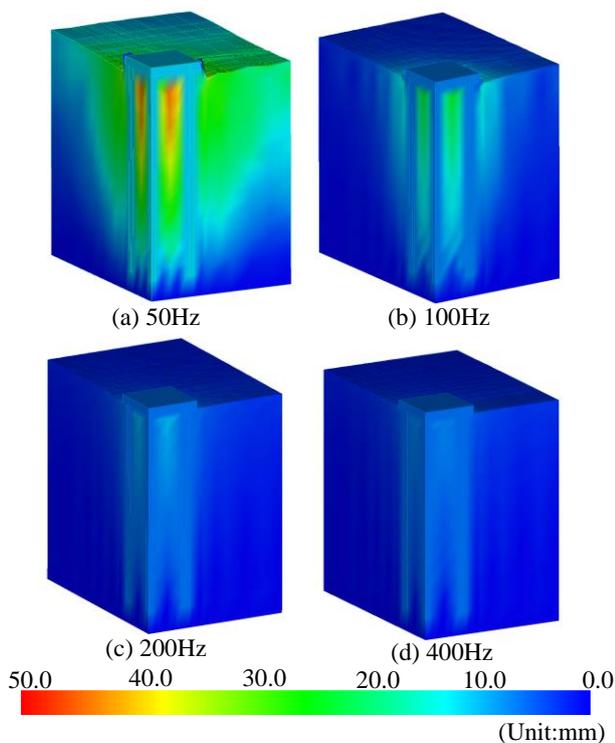


図-16 鉛直変位コンター図

#### 4. 結論

本研究では、列車振動による鉛直振動荷重を受ける際のパイルド・ラフトの力学挙動、特に沈下挙動に着目し 1g 振動模型実験及び 3 次元動的 FEM 解析を実施した。以下の結論が得られた。

- (1) 1/50 スケールでの模型実験において、基礎の最大沈下量が約 2.3mm となった。そのため、振動荷重を受けるパイルド・ラフト基礎には沈下対策を施さなければならないことが分かった。
- (2) FEM 解析の結果では、ラフトの最大応答加速度は振動荷重の周波数に依らずおよそ一定であり、これは

実験結果の高周波振動になるにつれて応答加速度が大きくなるという傾向とは異なる結果となった。これは、ラフトと地盤の間にジョイント要素を設けず、地盤・ラフトが一体となっていることが要因と考えられる。

- (3) 鉛直振動荷重による沈下量の解析結果は、実験結果よりかなり大きく、過大に評価していることがわかった。これは微小変形領域において地盤構成モデルが変形を過大に評価するという構成式の欠点に起因するものと考えられ、今後の課題となる。
- (4) FEM 解析の結果より周辺地盤の沈下大きい低周波振動荷重載荷時においてはラフトの沈下量も大きくなり、パイルド・ラフトの沈下は周辺地盤の影響を強く受けることが示唆された。
- (5) 振動荷重の継続載荷に伴い杭の周面摩擦による抵抗力は減少した。これは振動による杭周辺地盤の沈下が摩擦抵抗力の減少をもたらした結果と考えられる。その結果、荷重分担が杭分担からラフト分担へと移行していることがわかった。ただし、モデル実験においては杭先端にひずみゲージを貼っていないため、検証はできないが、今後の実験で検証していく。

#### 参考文献

- 1). Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007.
- 2). Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K. : Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.4, pp.635-648, 2007.
- 3). Zhang, F. and Kimura, M. : Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.3, pp.72-92, 2002.
- 4). Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T. : Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading Up to the Ultimate State, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 5, pp.1-17, 2000.