

遠心模型実験装置の活用事例（その2） Application of OBAYASHI's Centrifuge (Part 2)

高田 祐希 Yuki Takada
加藤 一紀 Ikki Kato
梅原 由貴 Yuki Umehara
高橋 真一 Shinichi Takahashi

1. はじめに

遠心模型実験は、地盤や構造物の縮尺模型に遠心重力を作用させることで、実地盤・実構造物の挙動を忠実に再現する高精度な模型実験手法である。大林組技術研究所では、1999年にダイナミクス研究センター（現：ダイナミクス実験棟）を建設する際に遠心模型実験装置を導入した¹⁾。実物と模型間の力学的な相似則が明確であり実験手法への信頼性が高い利点を活かし、導入初期には地震被害等の各種現象のメカニズム解明に主眼を置いた実験が多く実施された。

一方で近年は、巨大地震をはじめとする自然災害リスクの増大に対して安全・安心な社会を構築することや生産性向上への適応等といった、より広範なニーズへの対応が求められている。こうした社会的背景から、多様なニーズに対応すべく、解析技術の高度化や現場適用技術の開発に貢献するための実験事例が増えてきている。

以上を踏まえ本報では、文献1)に続く「その2」として遠心模型実験装置の活用事例について紹介する。

2. 実験装置

Photo 1 に実験装置全景を、Table 1 に装置の主な性能を示す。回転アーム先端には静的バケットと動的バケットを備え、回転アームの回転に伴って両バケットが振りあがり、バケット内に遠心重力が作用する機構である。

静的バケットは広い搭載面積と大きな搭載容量（700ton・G）を有することが特長で、斜面の安定検討や油圧ジャッキによる静的載荷実験等に使用する。

動的バケットは遠心場で縮尺模型を1方向加振できる振動台を有しており、地震による液状化や斜面崩壊、またその対策工法の検討に使用できる。

振動台の主な性能をTable 2に示す。特筆すべきは、最大加振推力であり、国内の他施設の最大クラスと比較して2倍以上の大きさを有している。これにより、詳細な構造物模型を加振することや、対策有無のケースを同時に加振して対策の効果を評価することが可能になる。2018年には遠心振動台の制御振動数範囲を10~400Hz、それに伴い最大変位を10mmに拡張し、東北地方太平洋沖地震で発生した長周期地震動や今後発生が予測されている南海トラフ巨大地震に対応可能となった。

計測システムは、2021年にシステムを更新し、最大



Photo 1 遠心模型実験装置全景
Centrifuge Facility

Table 1 遠心模型実験装置の性能
Performance of Centrifuge

項目	仕様
回転半径	7.01 m
搭載容量	700 ton・G
搭載質量	7,000 kg
搭載面積	2.2m×2.2m

Table 2 遠心振動台の性能
Performance of Centrifuge Shaking Table

項目	仕様
振動台搭載質量	3,000 kg
振動台面積	2.2m × 1.07m
最大加速度	50,000 cm/s ²
最大速度	90 cm/s
最大変位	10 mm
最大加振推力	1,176 kN
振動台制御振動数範囲	10~400 Hz

計測チャンネル数を64ch→96chと拡張し、規模の大きな実験に対応できるよう性能を向上させた。また、無線LANの強化により、従来よりも大容量の計測データ（100,000データ/ch以上）を精度よく安定して回収することも可能となった。

遠心回転中の映像については、バケットに設置した小型耐Gカメラや高速度カメラで撮影した映像を、無線LANにより伝送する。試験体に設置した標的を画像解析することで、地震前～地震後にかけての変形量や変形モード等を把握することが可能である。

3. 解析技術高度化のための活用事例

本章では、解析技術高度化を目的に実施した遠心模型実験の事例を紹介する。高精度な解析技術の開発には詳細なデータ取得が欠かせない。一例として、大規模な遠心模型実験装置であるからこそ実現可能な、地盤と構造物の相互作用に着目した実験事例を以下に示す。

3.1 断層変位を考慮した構造物の土圧特性評価

本実験は、断層変位を受ける地中構造物に作用する外力の評価を目的として実施した。近年、活断層地震に起因する地盤変状による構造物の被害事例があり、断層変位を考慮した実験・解析事例の蓄積が求められている。

Fig. 1 に断層変位の荷重機構を示す²⁾。片側の床版(可動床)が油圧ジャッキによりせりあがる機構を設け、遠心場で断層変位を再現できるようにした。

Photo 2 には地中に埋め戻したボックスカルバートに対して断層変位を与えた実験の様子を示す。遠心重力 50G を与えた状態で油圧ジャッキを作動させ、ボックスカルバートに対して斜め 30 度の断層変位を与えた。予めカルバートに設置した土圧計やひずみゲージの応答を整理することで、断層変位に伴う作用土圧と変形モードを明らかにした。

3.2 RC 構造物の損傷と地盤液化化との連成挙動評価

本実験は、地盤の液化化と構造物の非線形性を同時に考慮した解析手法の妥当性検証を目的として実施した³⁾。

Photo 3 に実験模型を示す。液化化地盤中にフーチングを有した RC 造の杭基礎模型を設置した試験体を作製し、遠心重力 25G を与えた状態で振動実験を実施した。杭基礎模型は、Fig. 2 に示すような、上部工と RC 造の杭基礎により構成され、縮小する際に鉄筋径やコンクリートの最大骨材寸法についても実物の 1/25 に縮小した。

振動実験の結果、地盤には液化化が発生し、杭基礎模型には杭主筋の降伏や損傷が生じた。最終的な杭基礎模型の損傷は Fig. 2 (左側) のように曲げひび割れが杭頭や杭先端近傍に多数観察された。本実験の杭基礎模型の挙動を、大林組開発の FINAL-GEO^{®4)}により解析した結果を Fig. 2 (右側) に示す⁵⁾。概ねひび割れの傾向は再現できており、解析の妥当性が示された。

4. 現場適用技術の開発における活用事例

4.1 レジリエンス向上のための技術

本節では、既設構造物(護岸や盛土)の地震に対するレジリエンス向上のための技術開発事例を紹介する。実物大実験が困難な臨海部や斜面における対策工法の定量的効果の検証に寄与した事例である。

4.1.1 液化化側方流動抑止杭 側方流動抑止杭工法は、護岸背後の地盤に間隔を設けた杭を千鳥状に配置することにより、液化化に伴う側方流動による地盤変状を

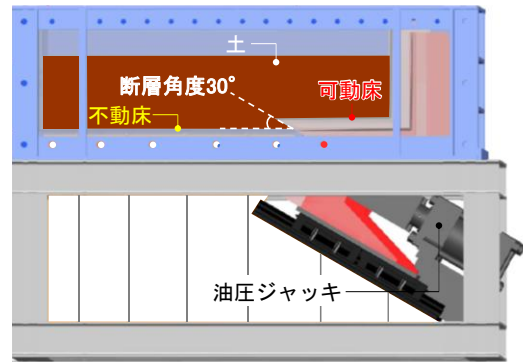


Fig. 1 断層変位の荷重機構
Mechanism of Fault Displacement

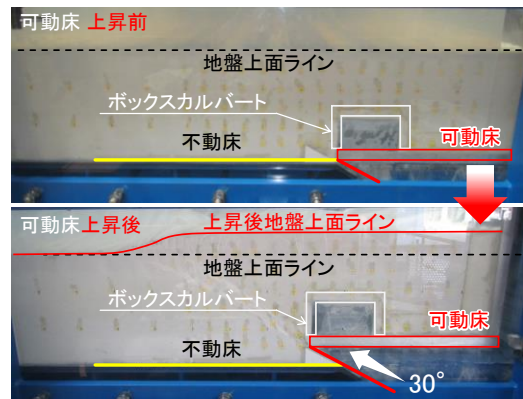


Photo 2 断層変位荷重による地中構造物の変形の様子
Underground Structure Subjected to Fault Displacement



Photo 3 RC 造杭基礎実験模型
Specimen of RC Pile Foundation

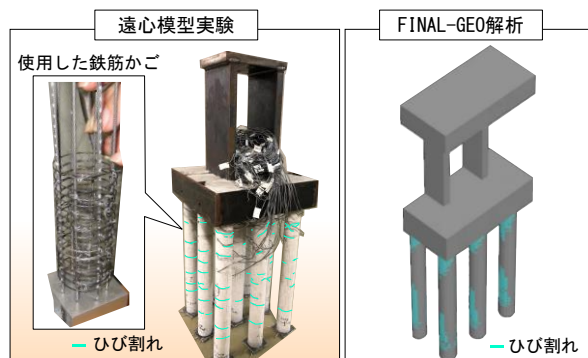


Fig. 2 杭の損傷 (左側: 実験, 右側: 解析)
Damage of RC Pile Foundation

軽減する工法である⁹⁾。その概念図を Fig. 3 に示す。抑止杭を設置することで、護岸背後の既設構造物(例えば、臨海部コンビナート等)を液状化による側方流動から防護することが可能となる。特長として、鋼管矢板のように杭を連続打設しないため、経済性や施工性が向上する点が挙げられる。

4.1.2 2 段タイ材地下施工法 2 段タイ材地下施工法は、既存鋼矢板式岸壁を機能拡張するための補強工法であり、増設タイ材を設置して矢板式岸壁に生じる曲げモーメントを低減させる工法である。特長として、岸壁を供用しながらの施工が可能である点が挙げられる⁷⁾。

実験概要を Photo 4 に示す。奥行き方向に 2 分割した剛土槽を使用し、2 段タイ材補強の有無による 2 ケースの実験を同時に実施し、その効果を検証した。その結果、矢板式岸壁に作用する最大曲げモーメントを 5 割程度低減でき、補強工法の有用性を示すことができた。

4.1.3 ハイスpek ネイリング工法 ハイスpek ネイリング工法⁸⁾は、切土法面や土留め壁等に対する補強土工法である。特殊な袋体を装着した芯材を地山に挿入し、袋体にグラウト材を加圧注入することで地山との定着を図り、法面等の変形を抑制する⁸⁾。

本工法開発にあたり、法面や土留め壁にネイリング工法を適用した際の対策効果や変形挙動を遠心模型実験で検証し、設計手法の検討を行った。Photo 5 に、ネイリング工法を適用した法面の耐震性能に関する実験例を示す。

4.2 生産性向上のための技術

本節では労働人口が減少する我が国において、建設分野の施工性や生産性向上を主眼に開発した工法の検証事例を紹介する。

4.2.1 斜め土留め工法 斜め土留め工法は、通常は直立である土留め壁を、3~10° 傾斜させる工法である。直立土留めと比較すると壁にかかる土圧を低減できることから、掘削空間内部の支保工を省略し、施工性を向上させることができる⁹⁾。

Photo 6 に実験概要を示す。深さ 10m の掘削プロセスを再現し、土留め壁に作用する土圧や変位を計測した。斜め土留めでは、直立土留めに比べて土圧や変形が減少することを確認した。

4.2.2 井戸式真空圧密「BOLVAC」工法 BOLVAC は、真空井戸を利用して軟弱粘性土地盤から揚水しながら負圧をかけることで、粘性土地盤の沈下を促進させ、強度増加を図る工法である¹⁰⁾。通常のシート式やキャップ式真空圧密工法と比べて大きな荷重をかけることができるため、沈下促進効果が大きい。

Photo 7 に実験概要を示す。電磁弁を通じた制御により、遠心重力 50G で粘性土地盤模型に負圧を作用させ、真空圧密を再現した。層厚が大きい粘性土地盤に対しても本工法で沈下促進・強度増加できることを確認した。

4.2.3 シートパイル基礎 シートパイル基礎は、仮設土留めに使用する鋼矢板を、直接基礎のフーチングと

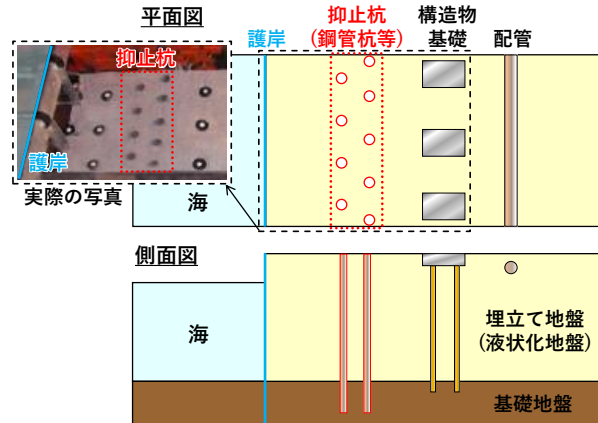


Fig. 3 液状化側方流動抑止杭工法の概要
Outline of Deterrent Pile Method

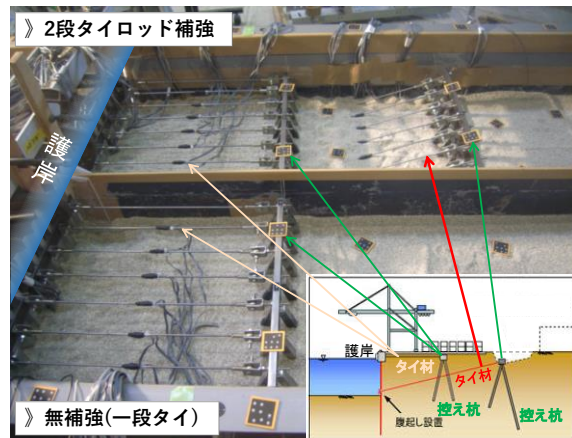


Photo 4 2 段タイ材地下施工法の実験
Experiment of Dual Anchored Sheet Pile Wall Method

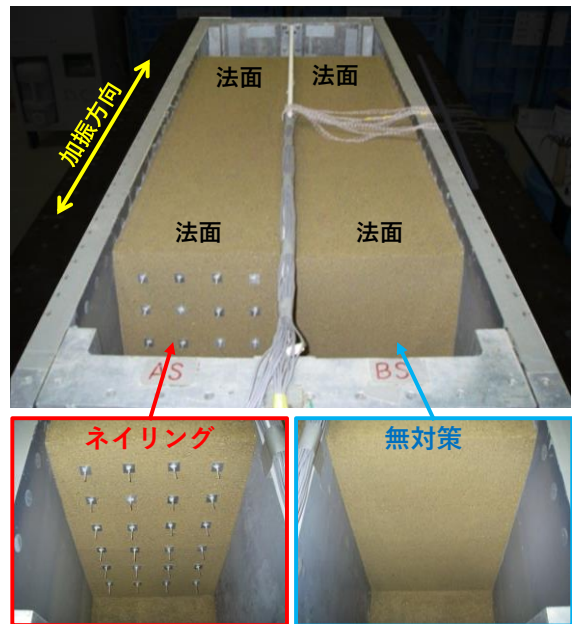


Photo 5 ネイリング工法の実験
Experiment of Soil Nailing Method

接合させる基礎工法である。工期短縮やコスト削減を図ることができる¹¹⁾。

Photo 8 に実験概要を示す。シートパイルは曲げ剛性を実物と相似の関係にすることでモデル化し、可能な限り実物に近づけた。遠心重力 50G を与えた状態で加振実験を行うことで、従来の直接基礎よりも応答変位を抑制することや高い耐震性を有することが明らかになった。

5. まとめと今後の展望

本報では、解析技術高度化及び現場適用技術開発のための遠心模型実験装置の活用事例を紹介した。今後は、地震と降雨の複合災害への対応といった新しい試みも取り入れつつ、引き続き新工法の開発等に活用していく予定である。

参考文献

- 1) 大林組：遠心模型実験装置の活用事例，大林組技術研究所報，No. 66，pp. 121-124，2003.1
- 2) 樋口，加藤，佐藤，伊藤，佐藤：逆断層変位を受ける箱型地中構造物に作用する土圧特性に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73，No. 4，pp. I_19-I_31，2017.9
- 3) 樋口，堤内，大塚，伊藤，江尻：RC 造杭基礎構造物の遠心模型振動実験，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 68，No. 4，pp. I_642-I_651，2012.7
- 4) 米澤，穴吹，江尻：大規模・高速化非線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」，大林組技術研究所報，No. 75，2011.12
- 5) 伊藤，佐々木，樋口：液状化地盤にある RC 造杭基礎の遠心力模型振動実験の三次元有効応力解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 75，No. 4，pp. I_101-I_108，2019.9
- 6) 樋口：液状化側方流動抑止杭工法，大林組技術研究所報，No. 76，2012.12
- 7) 中村，佐藤，菊池，菅野，森川，星野，三城：矢板岸壁における「2 段タイ材地下施工法」の耐震・増深補強効果について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 68，No. 4，pp. I_907-I_919，2012.7
- 8) 山本，稲川，鳥井原：「ハイスペックネイリング工法」を用いた土留め工の開発，大林組技術研究所報，No. 71，2007.12
- 9) 前田，嶋田，高橋，杉江，古関：斜め自立土留め設計法の開発，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 77，No. 1，pp. 1-17，2021.1
- 10) 梅原，高橋，山田：遠心模型実験による井戸式真空圧密工法「BOLVAC®工法」の効果検証，大林組技術研究所報，No. 86，2022.12

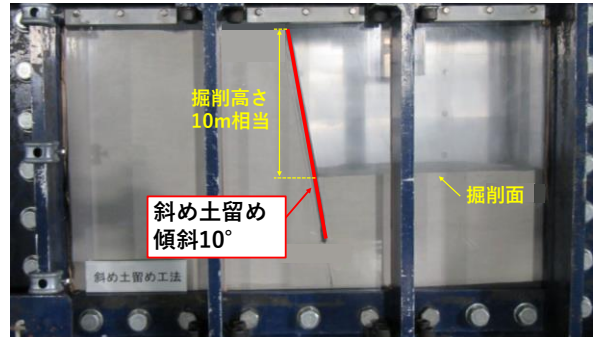


Photo 6 斜め土留め工法の実験
Experiment of Inclined-braceless Excavation Support

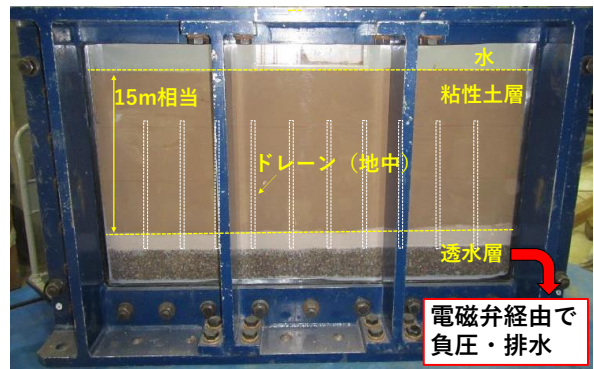


Photo 7 BOLVAC 工法の実験
Experiment of Bottom Loaded Vacuum Consolidation Method

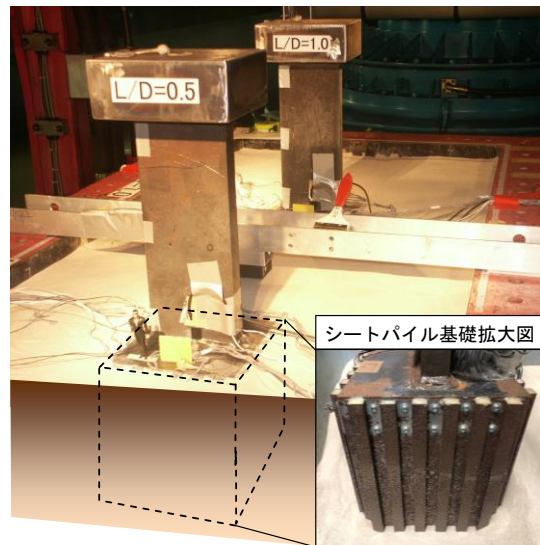


Photo 8 シートパイル基礎の実験
Experiment of Sheet Pile Foundation

- 11) 樋口，田中，神田，西岡：シートパイル基礎の耐震性能に関する実験的研究，土木学会論文集 A，Vol. 64，No. 4，pp. 665-677，2008.11