

遠心模型実験装置の活用事例 Application of ODAYASHI's Centrifuge

大林組遠心模型実験グループ Centrifuge Group
URL <http://techs.obayashi.co.jp>

1. はじめに

遠心模型実験は、地盤や構造物を対象とした縮尺模型実験として力学的な相似則が明確で、実地盤での挙動を忠実に再現する高精度な模型実験手法である¹⁾。

大林組技術研究所では、1995年兵庫県南部地震での地震被害を契機に耐震技術の更なる向上を目的として1999年にダイナミクス研究センターを建設すると共に大型遠心模型実験装置を、1)大型模型の搭載、2)高精度な遠心場の再現と計測、3)兵庫県南部地震を上回る大きな地震動の再現、のコンセプトのもとに導入した。

遠心模型実験は相似則が明確なため、設計方法や工法の確認における信頼性は高く、今後の性能設計や技術提案型の発注形式に対応する利用が期待されている。

この報告では、遠心模型実験装置の概要、実験の適用対象とともに、液状化、構造物の耐震性などの動的实验や軟弱地盤の盛土や掘削問題などの静的実験などいくつかの活用事例を紹介する。

2. 実験装置

2.1 遠心模型実験装置の概要

Photo 1に実験装置全景を示す。装置は、回転アーム、駆動装置、アーム内に設置した計測および映像収録装置により構成される。

Table 1に装置の主な性能を示す。回転アームには静的バケットと振動台バケットを装備し、実験目的に応じ効率良く実験を行うことができる。静的バケットは広い搭載面積と大きな搭載容量(700ton・g)を特徴とし、多目的な用途に使用できる。振動台バケットは遠心場で地震入力を模擬できる振動台を常時搭載し、加振精度を向上させるため着座機構を有している。回転アーム上部には自動バランス装置を有し、液状化や斜面の崩壊実験など、実験中に生じる重心位置の変化で生じる重量バランスの変動に対応できる。

2.2 振動台

振動台バケットに常時搭載している水平一方向加振の遠心振動台(Fig. 1)は、支持機構・テーブル・油圧機構・アクチュエータ・振動検出器で構成され、その主な性能はTable 2の通りである。支持機構に採用している積層ゴム方式は、一般的なボールベアリング式に比べ線形性が優れ、微小な加振(模型の初期状態把握に使用)から大加振(破壊実験に使用)まで一様な特性を発揮できる。振動台搭載質量 3ton までの大

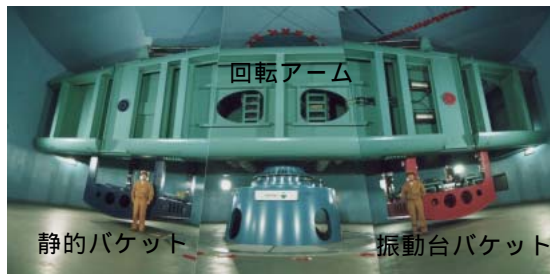


Photo 1 遠心模型実験装置全景
Centrifuge Facility

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

項目	仕様	他機能力比
回転半径	7.01m	1.0
搭載容量	700 ton* <i>g</i>	1.4
搭載質量	7 ton	1.4
搭載面積	2.2m × 2.2m	1.2

備考 : 大林組性能 / 国内既存最大装置性能

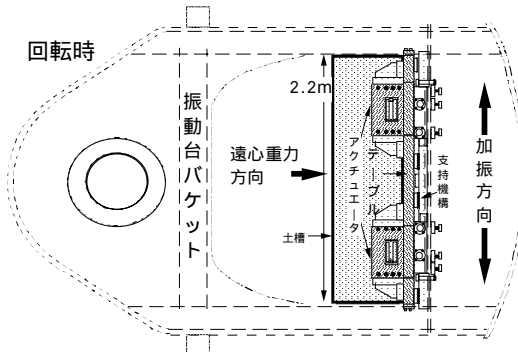


Fig. 1 遠心振動台 (遠心加振時の状態)
Centrifuge Shaking Table

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

項目	仕様	他機能力比
振動台搭載質量	3 ton	2.1
振動台面積	2.2m × 1.07m	1.4
最大加速度	50,000cm/s ² (50 <i>g</i>)	1.2
最大速度	90cm/s (kine)	1.0
最大変位	5mm	1.0
最大加振推力	1,176kN(120tonf)	3.0

備考 : 大林組性能 / 国内既存最大装置性能

型模型の加振が可能である。また、最大加振推力 1,176kN (120tonf)から得られる最大加速度は 50*g* で

Table 4 遠心模型実験の適用対象
Subjects of Application using Centrifuge

目的	分野	構造物, 対策工法
1) 現象, 自然災害の把握	地震時挙動(液状化, 側方流動) 地盤の安定性評価 施工に伴う地盤変形挙動	液状化地盤 軟弱地盤(盛土, 掘削) 自然地山(切土)
2) 設計法, 設計計算法, 解析法の検証	耐震設計手法の検証 液状化地盤と構造物 地盤構造物動的相互作用 数値解析法の検証 各種対策工の評価・検証 地盤の終局状態と設計評価式の検証	液状化対策, 耐震補強 軟弱地盤対策(沈下, 変状, 掘削) 土構造物(盛土, 補強土, ダム) 切土・斜面安定対策 基礎構造物(群杭・連壁・ケーソン) 港湾・河川構造物 地下空洞(トンネル, シールド, 地下構造物)
3) 環境問題への対応	地下水流れの把握と対策工評価 汚染土壌水の拡散問題 発破・爆破問題	広域地下水環境, 地下水流動障害対策 地盤汚染拡散, 土壌汚染対策工 振動(交通振動, 発破・機掘削などに伴う振動)
4) 高重力場の提供	旋回試験 加速試験	各種製品の強度確認 高重力下での製品作動確認

Table 3 遠心模型実験における相似則
Similarity Rule

項目	相似則
寸法	1 / N
応力	1
ひずみ	1
圧密・透水時間	1 / N ²
振動数	1 / N

1/N 模型を用い, N g 場の遠心実験を想定

あり, 遠心重力 50g 場で 980Gal, 30g 場で 1630Gal と, 兵庫県南部地震における工学的基盤上地震波を上回る波形の入力が可能である。また, 制御振動数範囲は 20 ~ 400Hz であり, 振動波形としてランダム波, 定常波など多様な波形入力に対応できる。

3 . 相似則と適用対象

3.1 相似則

遠心模型実験における主な模型相似則を Table 3 に示す。幾何的縮尺 1/N の模型を, 遠心重力 Ng で実験を行うと実物と同じ応力場, ひずみ場を再現することが最も大きな特徴である。透水, 圧密問題など長時間に及ぶ挙動を 1/N² 経過時間へ短縮される。ただし, 遠心重力を大きくした場合, 加力や加振力も大きくなる。

3.2 適用対象

Table 4 に, 建設分野を中心とする遠心模型実験装置の適用対象を示した。地盤構造物の挙動把握に始まり, 設計手法や施工方法の照査まで広い範囲に活用が可能である。また最近では地盤汚染問題など広域な地盤環境問題²⁾に関わる問題への適用も多いに期待されている。

4 . 活用事例

4.1 地盤の液状化と側方流動に伴う杭基礎の挙動評価³⁾

4.1.1 目的 この実験は地盤の液状化の再現と側方流動によって杭に作用する側方流動外力評価を目的に, 遠心振動実験により液状化発生から側方流動に至る一連の過程における杭の挙動を調べたものである。

4.1.2 実験概要 遠心重力 30g 場において, 地表面が傾斜した飽和模型地盤(表面勾配 10%, 実地盤換算平面 30m × 30m × 深さ 7.5m)を加振して液状化, 側方流動を発生させた。地盤側方流動によって杭に作用する側方流動力を明確化するために, 模型地盤の地表面傾斜方向と加振方向は直交方向とした(Photo 2)。

加振中は高速度ビデオカメラ(1/500 秒/1 コマ)を用いた画像解析により地表面の計測用ターゲットの動き(Photo 3)を計測した。Ng 場での遠心実験では 1g 場と比較して時間が 1/N となるため, 高速度ビデオカメラによる画像収録は事象理解の上で大きな利点となる。なお, 模型杭はステンレス製中空パイプ(外径 20mm, 肉厚 0.5mm)で, 杭の曲げモーメント分布から杭に作用する外力を推定するため, 側方流動方向に対し上下方向 6 断面にひずみゲージを配置している。

4.1.3 実験結果 実験結果を Fig. 2 に示す。激しく液状化する緩い地盤は側方流動時に地表面に近いほど杭に大きな力を及ぼす流体的な挙動を示す一方, 密度が高い地盤では過剰間隙水圧比が 1 に達しても剛性を保ち, かつ地盤深部ほど杭に大きな力が作用することがわかった。現在設計に取り入れられている杭基礎等に作用する側方流動による外力は静止土圧分布を仮定しているのに対し, この実験では地盤密度によ



Photo 2 側方流動実験の地盤模型
Model Ground on the Centrifuge
Shaking Table



Photo 3 地表面変位ターゲット
Measurement Targets on
the Model Surface

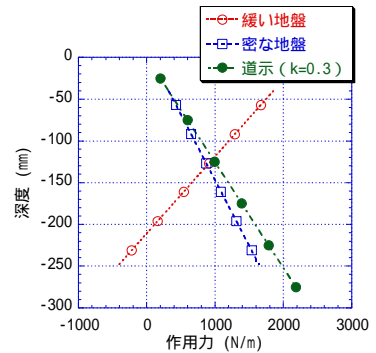


Fig.2 杭に作用する力の深度分布
Distribution of External Force Acting
on the Pile through out Sand Deposit

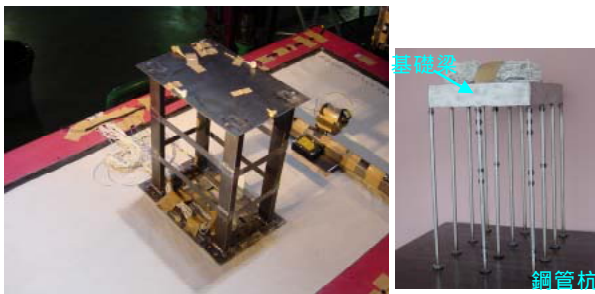


Photo 4 群杭基礎形式の建築模型
Superstructure with Pile Group Foundation



Photo 5 複合基礎
Composite Foundation



Photo 6 杭併用直接基礎
Piled Raft Foundations

て土圧的な分布だけでなく、流体的な分布を示すことが示唆された。

4.2 建築基礎の加振実験⁴⁾

4.2.1 実験概要 建築分野では、設計指針の改定に伴いより高度な耐震設計法が要求される傾向にあるなかで、大地震時の各種杭基礎の挙動解明、検証データの確保等について未だ不十分な状況にある。これらのデータを得ることは地震観測も含めて容易ではないが、遠心実験によれば、大地震を再現できる上に地盤も含めた構造物全体のモデル化も可能となる。この利点を生かし、阪神大震災と同等以上（地表面応答スペクトル 300cm/s 以上）の入力地震動で各種建築杭基礎の遠心振動実験を行った。

4.2.2 実験結果 Photo 4 は、群杭基礎形式の一般建築構造物(10階建 3×4 本杭)模型である。構造物全体と、平面 100×50m 深さ 27.5m の地盤領域をモデル化している。実験とその結果の詳細は文献 4) 本報 pp.31 ~ 36 を参照頂きたい。

Photo 5 は、地中連壁と杭の複合基礎構造に関する実験である。基礎構造以外の条件は上記群杭実験と同じであり、地中壁面と地盤間のせん断応力、せん断ひずみを直接計測し、地中連壁のせん断力負担状況等を検討した。建築基準法の損傷限界と安全限界地震波を入力した結果、主に、地中壁近傍地盤の非線形性により、入力レベル増加に比べて、地中壁負担せん断力増加の割合は小さくなるという傾向を確認した。

Photo 6 は、直接基礎と摩擦杭基礎を併用する杭併用直接基礎(パイルドラフト基礎)に関する実験である。

比較のため支持杭模型も同時に設置した。第 2 種地盤、鋼管杭(スパン 6m、長さ 15m、500mm)という条件で、杭の水平荷重分担率は数パーセント程度であり、地震が大きくなるに連れてその分担率はやや増加するという結果を得た。

4.3 軟弱地盤における盛土変形挙動と対策^{5),6)}

4.3.1 実験概要 軟弱地盤上の盛土に伴う地盤変状予測手法の精度や変状防止対策効果について検証した。

実験準備は、1)粘性土模型地盤の作製(予備圧密)、2)遠心重力場(50g 場)における正規圧密地盤の作製(自重圧密)、3)盛土、地盤改良対策工の追加、4)遠心重力における盛土荷重に伴う粘性土地盤の変形挙動計測、の手順で進めた。Photo 7 は、盛土作製装置を用いて遠心力場で盛土造成を模擬した模型状況である。圧密終了は、沈下や間隙水圧の進捗状況をモニターで確認し、圧密時間は 8 時間程度で、遠心相似則より実時間に換算すると約 2 年間の圧密実験を行ったことに相当する。

4.3.2 実験結果 Fig. 3 は追加盛土造成による地中の変位(軌跡)を示したもので、追加盛土荷重によって、新たな沈下および水平変位が発生している状況が、明らかになった。Fig.4 は、対策工の効果を検証した例として、深層混合処理工法を法尻に施工した場合の地表面沈下分布を示したものである。未改良の場合には、盛土の法先で伴下がり沈下が観測されたのに対して、改良体を施工すると法先の沈下が抑制でき、改良体柱壁構築による縁切り効果が確認できた。

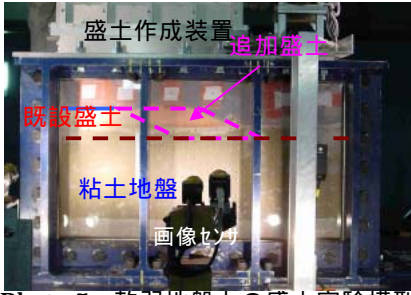


Photo 7 軟弱地盤上の盛土実験模型
Model Ground with Filling

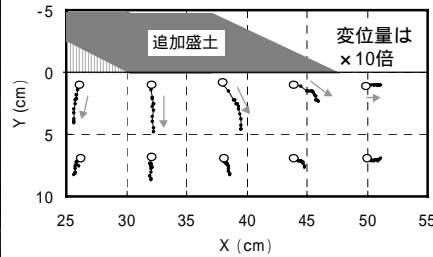


Fig. 3 追加盛土時の地盤変位軌跡
Ground Displacement during Filling

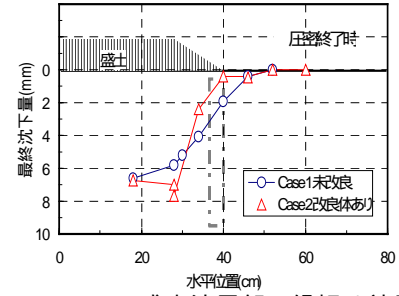


Fig. 4 盛土法尻部の縁切り効果
Effect of the Counter Measure

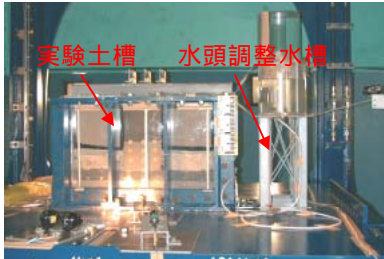


Photo 8 盤ぶくれ実験装置
Experimental Setup on Heaving

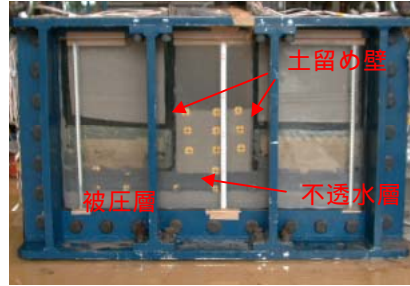


Photo 9 盤ぶくれ模型地盤
Model Ground of Heaving

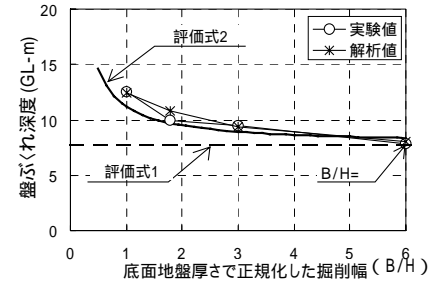


Fig. 5 盤ぶくれ深度と掘削幅の関係
Depth of Heaving

4.4 掘削工事における盤ぶくれ挙動と設計検証⁷⁾

4.4.1 目的 盤ぶくれ(掘削時に揚圧力によって掘削底面が破壊する現象)の照査方法には、盤ぶくれ抵抗要素として掘削底面地盤の自重に遮水壁の摩擦抵抗力と不透水層のせん断抵抗力を加える方法があるが、この方法は現場計測や実験等の実証には基づいてはいない。そこで掘削幅をパラメータにした遠心実験を行い、摩擦・せん断抵抗を考慮した盤ぶくれ照査法の妥当性を検証した。

4.4.2 実験概要 被圧層、不透水層、上部層の3層から成る模型地盤をあらかじめ掘削しておき(実物換算掘削深度=17.5m)、遠心重力70g場で掘削面内の水位低下により掘削を模擬し盤ぶくれさせた(Photo 8,9)。

4.4.3 実験結果 Fig. 5 に盤ぶくれが生じた掘削深度と掘削幅の関係を示す。掘削幅が小さいほど盤ぶくれ深度は深い。図中には盤ぶくれに対する抵抗として掘削面内の地盤(水を含む)の重量だけを見込む評価法(評価式1)と、自重に加え底面地盤と遮水壁の摩擦抵抗力および不透水層地盤のせん断抵抗力を見込む評価式(評価式2)による盤ぶくれ限界深度を示してある。実験結果は、評価式2とよい対応を示しており、遮水壁の摩擦抵抗力および不透水層のせん断抵抗力が盤ぶくれに対する抵抗力に寄与していることが明らかとなった。

5. おわりに

遠心模型実験の活用は、広範囲に適用可能で、この

報告で示した適用事例のほか多くの実験プロジェクトが進行中である。今後も、性能設計への対応、新たな工法開発の一助として適用展開を図っていきたい。

なお、この活用事例紹介は、大林組遠心模型実験グループのうち、高橋真一、伊藤政人、藤森健史、森拓雄、樋口俊一、松田隆で取り纏めたことを最後に記す。

参考文献

- 1) たとえば、木村猛，日下部治：講座「遠心模型実験」，土と基礎，Vol.35，No.11，pp.67～74（1987）
- 2) R.Phillips et al.：Physical Modeling in Geotechnics，ICPMG'02，BALKEMA，（2002）
- 3) 樋口俊一，三浦房紀，松田隆：側方流動地盤中の短杭基礎に関する遠心模型実験，第56回土木学会年次学術講演会，pp.236～237（2001）
- 4) 藤森健史，若松邦夫：大型遠心せん断土槽実験による群杭の強震時応力特性，日本建築学会大会，pp.313～314（2002）
- 5) 森拓雄，高橋真一，鳥井原誠：軟弱地盤上の盛土幅を模擬した遠心模型実験，第37回地盤工学研究発表会，pp.1305～1306（2002）
- 6) 森拓雄，野津光夫，他：深層混合処理工法による低盛土の変位抑制(縁切り)対策の遠心実験，第57回土木学会年次学術講演会，pp.115～118（2002）
- 7) 足立幸郎，伊藤政人，佐藤峰生：掘削時の盤ぶくれ挙動に関する遠心模型実験，第36回地盤工学研究発表会，pp.1823～1824（2001）