

# 浅層改良盤の変状確認のための遠心力载荷模型実験

近藤益央・宮武裕昭

## 1. はじめに

盛土等の軟弱地盤対策においてコスト削減を目的として、図-1に示すように深層混合処理工法と浅層混合処理工法を組み合わせる場合がある。深層混合処理工法と浅層混合処理工法を組み合わせる工法は、盛土荷重を浅層改良盤で受け、その荷重のほとんどを深層改良杭に分担させる。そのため、深層混合改良率の低改良率化によるコスト削減のみならず、深層改良杭と未改良地盤との沈下量の差により発生する不陸抑制でも大きな効果が期待できる。しかし、浅層改良体の厚さを薄くしたり、深層改良杭領域の改良率を低くしたりして組み合わせると、浅層改良盤の下部に引張り応力が発生したり、深層改良杭が浅層改良盤を突き抜ける押し抜きせん断（以下「パンチング」という。）が発生したりする。

本報告では浅層改良盤に発生する変状を確認するため、遠心力载荷模型実験を実施したので実験概要並びに損傷状況について紹介する。

## 2. 試験装置及び実験模型の概要

### 2.1 遠心力载荷試験装置

遠心力载荷実験装置は、遠心加速度を利用して小型縮小模型に実規模相当の自重応力を発生させ、模型実験を行う装置である。今回の実験では、土木研究所所有の遠心力载荷装置を用いて実施した。本装置はビーム型であり、2本のビームの先端に容器搭載面(プラットフォーム)が取り付けられている。プラットフォームの逆サイドにはカウンターウェイトが設置され、ビーム回転中の装置のバランスを保つようになっている。プラットフォームにおける回転半径は3.5mであり、最大140Gの遠心加速度をプラットフォームに搭載した模型容器に与えることが出来る。今回の実験では、50Gの遠心加速度場において行った。遠心力载荷装置の仕様を表-1に、全体の構造を写真-1に

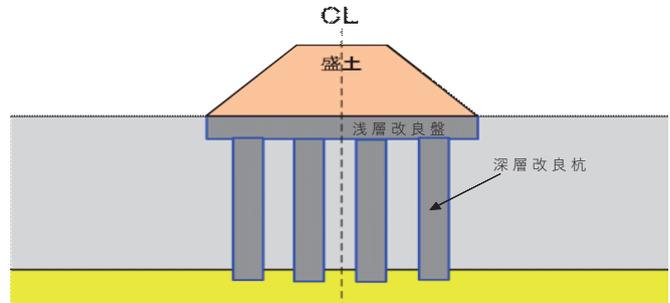


図-1 深層混合処理と浅層混合処理の組み合わせ

表-1 遠心力载荷試験装置の基本仕様

項目	仕様
最大载荷遠心力	140 G
有効回転半径	3.5m
最大掲載重量	1t
プラットフォーム寸法	W1.2m×L1.2m×H1.0m
計測システム	100ch



写真-1 使用した遠心力载荷試験装置

表-2 実験条件

実験ケース	深層混合改良率	浅層改良体強度
ケース1	18.7%	300kN/m <sup>2</sup>
ケース2	18.7%	200kN/m <sup>2</sup>
ケース3	8.7%	1,000kN/m <sup>2</sup>
ケース4	8.7%	300kN/m <sup>2</sup>

示す。

### 2.2 実験ケース及び実験模型

遠心力载荷模型実験は、4ケースを実施した。今回の実験では、浅層改良盤厚さは一般的に多く採用されている層厚1mとし、深層混合改良率は低改良率の18.7%と超低改良率の8.7%とした。こ

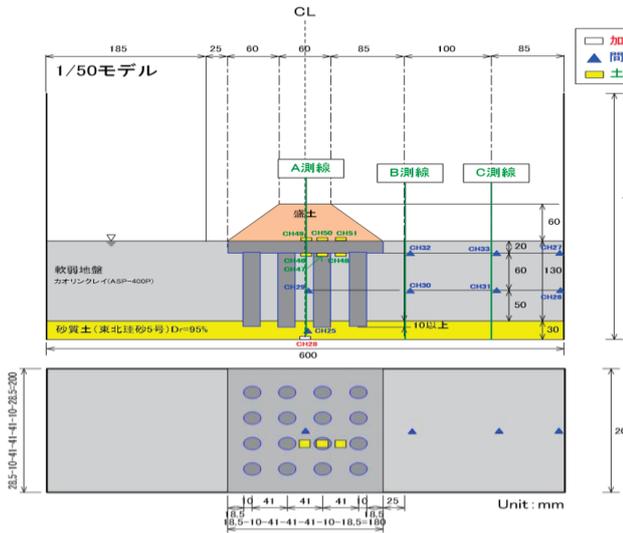


図-2 実験模型概要 (ケース1及び2)

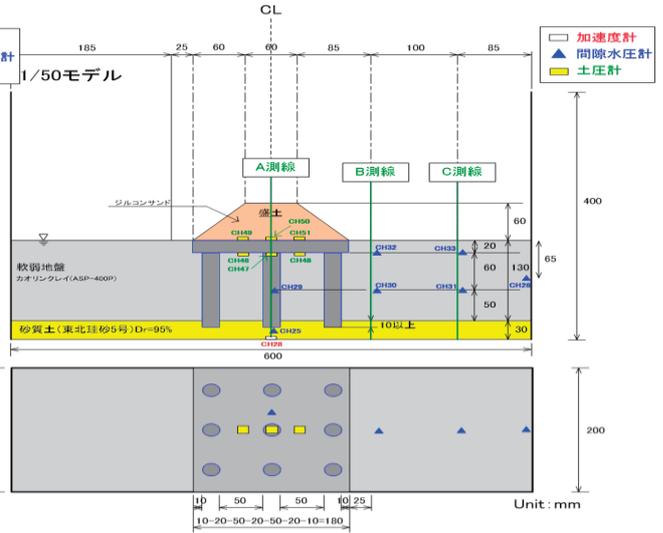


図-3 実験模型概要 (ケース3及び4)

これは、参考文献2)で実施した動的特性に関する遠心力荷重模型実験の模型諸元と合わせている。また、浅層改良盤の強度設定は、参考文献4)を用いてパンチングに対する照査により決定した。すなわち、ケース1及び3はパンチングに対する照査を満足し、ケース2及び4はパンチングに対する照査を満足しない条件とした。各ケースの深層混合改良率、浅層改良体強度を表-2 に、ケース1及び2の模型断面図を図-2、ケース3及び4の模型断面図を図-3に示す。

なお、共通の実験条件を表-3 に示す。

### 2.2.1 事前配合試験

目標添加率を決定することを目的として、ランダムに設定した添加率で作成した供試体で一軸圧縮試験を実施した。事前配合試験に用いる供試体は、地盤工学会基準「JGS 0821-2009 安定処理土の締固めをしない供試体作成方法」に準拠し、直径5cm、高さ10cmで作成した。養生期間は実験と同じ5日間とした。供試体から水分が蒸発しないようモールドを密封材で被覆し、温度(20±3)℃で静置し、気中養生した。作成した供試体の一軸圧縮強度試験は、地盤工学会基準「JIS A 1216 土の一軸圧縮試験方法」に準拠し、1試験あたり3供試体で実施した。図-4に事前配合試験結果を示す。セメント添加率と一軸圧縮強度 $q_u$ との関係は概ね直線的な比例関係にあることがわかる。図-4の関係から一軸圧縮強度 $q_u$ が300kN/m<sup>2</sup>、1,000kN/m<sup>2</sup>になる添加率を決定し、その添加率で作成した供試体の一軸圧縮強度 $q_u$ が目標強度に対して±10%の範囲内であるか確認す

表-3 実験条件並びに使用材料

項目	実験条件
模型縮尺	1/50
荷重遠心力	50G
盛土作成条件	サンドホッパーによる投下
盛土材	ジルコンサンド
軟弱地盤	カオリンクレイ ASP-400P
改良材 (添加材)	早強ポルトランドセメント

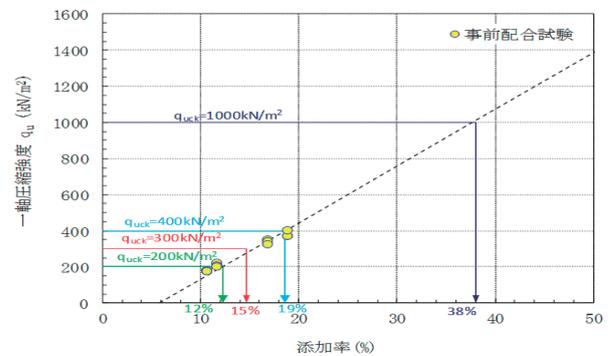


図-4 事前配合試験結果

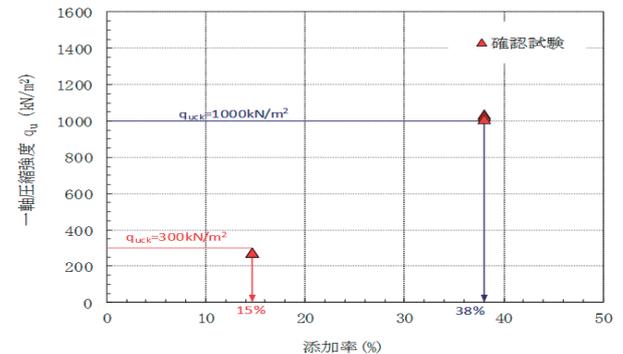


図-5 改良体の確認試験結果

る目的で確認試験を実施した。確認試験の結果を図-5に示す。事前配合試験で実施した配合率と大

表-4 実験結果一覧

実験ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
実験模型				
深層混合体の改良率(%)	18.7%	18.7%	8.7%	8.7%
深層改良体の一軸圧縮強度 $q_u$	計画値：1,000kN/m <sup>2</sup> 実測値：748.9kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：74.9%	計画値：1,000kN/m <sup>2</sup> 実測値：777.3kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：77.7%	計画値：1,000kN/m <sup>2</sup> 実測値：752.8kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：75.3%	計画値：1,000kN/m <sup>2</sup> 実測値：895.2kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：89.5%
浅層改良体の一軸圧縮強度 $q_u$	計画値：300kN/m <sup>2</sup> 実測値：212.1kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：70.7%	計画値：200kN/m <sup>2</sup> 実測値：144.5kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：72.3%	計画値：1,000kN/m <sup>2</sup> 実測値：752.8kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：75.3%	計画値：300kN/m <sup>2</sup> 実測値：223.5kN/m <sup>2</sup> 実測値/計画値：74.5%
クラック発生状況(写真)				
クラック発生状況(スケッチ)				
破壊形態	偏荷重による上部からの曲げ破壊	偏荷重による上部からの曲げ破壊	下部からの曲げ破壊	下部からの曲げ破壊 パンチング

大きく異なった目標一軸圧縮強度 $q_u$ が1,000kN/m<sup>2</sup>の場合も、目標一軸圧縮強度 $q_u$ に対して試験結果は1,009~1,035kN/m<sup>2</sup>であった。

### 2.2.2 実験地盤模型作成

地盤模型に使用するカオリンクレイを液性限界( $w_L=51.6\%$ )の約1.5倍( $w=77.4\%$ )になるように加水し、ソイルミキサーで十分に攪拌し、24時間程度経過したものを用いた。この攪拌から24時間程度経過したカオリンクレイを3回に分けて投入し、投入する毎にタッピングを行い、空気の除去を行った。土槽を地盤挙動実験設備にセットし、変位計、間隙水圧計を計測装置に接続した後に、50Gまで加速し、50G場で遠心圧密させる。急激に加速させると地盤が過圧密になるため、50Gまでの遠心力増加は10Gずつ増加させた。土槽を遠心力載荷試験装置から下ろし、表面水を撤去して、地盤を所定の高さ(地盤高さ16cm)になるように切削・整形する。ドリル(外径φ20mm)を挿入し、軟弱地盤と基盤の砂層を取り除き、管(外径φ20mm)に、目標強度となるよう配合したセメントスラリーを充填し、掘削された深層改良体部に挿入する。押し出し棒(外径φ15mm)でセメントスラリーを押し出しながら、

管を引き抜くことで掘削孔にセメントスラリーを注入した。その後、浅層改良体部に目標強度となるよう配合したセメントスラリーを打設した。

## 3. 遠心力載荷模型実験

盛土作成用のサンドホッパーを土槽に設置して、1G/分のスピード50Gまで増加させ、間隙水圧が安定するまで10分程度待ってから2.2.2の方法で作成した模型地盤にサンドホッパーから盛土材(ジリコンサンド)を落下させて盛土を作成した。遠心力載荷模型実験では、あらかじめ型枠内で締め固めた盛土模型を凍結させ、土槽内に設置した後に室温でゆっくりと融解させた後に遠心力を載荷する方法を用いることが多い。しかし、前述した方法では完成した盛土を浅層改良体上に遠心力載荷前から設置しているため、盛土構築過程における浅層改良盤の変状を確認することが出来ない。そのため、きれいな台形型の盛土模型は作成できないが、サンドホッパーによる落下方式を採用した。

### 3.1 浅層改良盤の破壊状況

表-4に示したようにケース3では当初の計画通りパンチングは確認されず、曲げ破壊のみが確認

された。浅層改良盤では深層改良杭間にあたる位置で浅層改良盤下面からのクラック(表-4のクラック①)が確認されるほか、深層改良杭上にあたる位置では浅層改良盤上面からのクラック(表-4のクラック②)が確認された。今回の実験ではサンドホッパーによる盛土作成の方法としたが、ジリコンサンド投下時の遠心力や回転風等の影響により浅層改良盤幅より法尻幅の方が大きくなったことや深層改良杭が浅層改良盤辺りより内側に位置していたことにより、片持ち梁状態の浅層改良盤端部に盛土荷重が作用して、上面からのクラックが発生したと考えられる。このような変状は表-4に示したようにケース1並びに2においても同様の現象が確認されている。

ケース2はパンチングによる照査を満足していないことから深層改良杭が浅層改良盤を押し抜くパンチングが発生すると考えていたが、実験ではパンチングは発生しなかった。ケース4はケース2同様にパンチングに対する照査を満足していなかったため、表-4に示したとおり深層改良杭の位置するところに円弧を描くようにクラックが発生しているのがわかる。

### 3.2 深層改良杭の破損状況

表-4に示すように深層改良杭の一軸圧縮強度はケース4を除けば750kN/m<sup>2</sup>前後で、一般的に深層混合処理工法で用いられる改良強度となっていた。盛土高さが全ケース共通であることから深層混合改良率が低いケース3及び4の方がケース1及び2と比べて、深層改良杭に作用する鉛直荷重は大きくなるが、今回の実験では深層改良杭の損傷小は全てのケースで確認できなかった。

## 4. まとめ

今回の実験では、下記のような知見が得られた。

- ・ パンチングによる破壊を想定したケース2と4ではケース4のみがパンチングによる破壊を確認した。ケース2でパンチングが発生しなかったのは未改良地盤の荷重分担が想定以上に大きいことが考えられる。
- ・ コスト縮減を目的として深層改良杭領域の改良率を極端に低くしたケース3及び4では浅層改良盤の下部から曲げ破壊によるクラックが発生した。

著者らのこれまでの研究(参考文献3)ではカ

オリンクレイの引張り強度と一軸圧縮強度との関係は、引張り強度は一軸圧縮強度の0.26倍であった。この場合、今回の実験のように浅層改良盤厚1mで曲げ破壊を発生させないためには、高強度の改良体が必要となり、改良土としては難しい。そのため、浅層改良盤下部にジオテキスタイル等の引張り補強材を挿入したり、浅層改良盤厚を2m以上と厚くしたりすることで、曲げ破壊に対する対処する必要があると考えられる。今回の実験で想定した超低改良率の深層混合処理杭と浅層改良体を組み合わせは、現在、研究をすすめている特殊な設定条件であるため、現在多く用いられている改良率の範囲では設計上問題になることはないと考えられる。

今回の実験により得られた知見から、今後は盛土の法尻位置と浅層改良盤の位置関係、さらには深層改良杭の配置によって発生する浅層改良盤上部からの曲げ破壊や深層改良杭間で発生する浅層改良盤下部からの曲げ破壊に対する照査方法の検討を進める必要がある。

### 参考文献

- 1) 宇梶 伸、宮武裕昭、近藤益央、井上玄己、平林学：浅層改良盤の曲げ耐力の評価に関する一考察、第71回年次学術講演会講演概要集、(公社)土木学会、2016.9
- 2) 橋本 聖、近藤益央、林 宏親、青木卓也、山梨高裕、宮武裕昭：複合型地盤改良の動的特性に関する遠心力載荷模型実験、第13回地盤改良シンポジウム講演概要集、(公社)日本材料学会、2018.10
- 3) 近藤益央、宮武裕昭、宮下千花、持田文弘、川原孝洋：固化材改良した土の一軸引張り強度に関する実験的検討、第13回地盤改良シンポジウム講演概要集、(公社)日本材料学会、2018.10
- 4) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第4版)、2012.10
- 5) ALiCC工法研究会：ALiCC工法マニュアル、鹿島出版会、2015.4

近藤益央



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 総括主任研究員  
Masuo KONDOH

宮武裕昭



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 上席研究員  
Hiroaki MIYATAKE