

ジャカルタ近郊の建物建設におけるライムストーン置換による膨張性地盤の対策工法と効果確認実験

中島 均 浅香 美治 内山 伸 齋藤 亮 小森 崇
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (国際支店)

Countermeasure against Expansive Soil by Limestone Replacement and Experimental Effect Verification using Actual Expansive Soil Sampled in Indonesia

Hitoshi Nakashima, Yoshiharu Asaka, Noburu Uchiyama, Akira Saito and Takashi Komori

インドネシア・ジャカルタ近郊には膨張性地盤が広く分布しており、雨期には吸水膨張し、乾期には乾燥収縮する特性がある。このため、生産施設などの低層建物を建築するときには、床や基礎の設計に特別な配慮が必要となり、施工手間や工事費が大きくなる課題があった。膨張性地盤の対策工法は効果が高い方法は概してコスト高であり、対策コストの低減が求められていた。著者らは、床下の膨張性地盤のうち地表近傍のみをライムストーンで置換する工法について、実際の膨張性地盤を用いた室内小型模擬試験を行い、その効果を確認したので報告する。

The expansive soil is widely distributed around Jakarta, Indonesia, and has characteristics of water absorption and expansion in the rainy season and dry shrinkage in the dry season. For this reason, when constructing low-rise buildings such as production facilities, special consideration is required for the design of floors and foundations, and there is a problem that the construction labor and the construction cost are increased. The authors report on a method of replacing only the surface area of expansive ground under the floor with Limestone and verify the effect of the method by carrying out laboratory tests using expansive soils taken from the actual site.

1. はじめに

東南アジアやアフリカなどの乾燥地域には膨張性地盤が広く分布している。モンモリロナイトなどの膨張性鉱物を含んでいる膨張性地盤は、水と接触すると膨張する特性があり、雨期には吸水膨張し、乾期には乾燥収縮が起こる。このため膨張性地盤のうえに道路や建築物を建設するときには膨張性に対する特別な配慮が必要となり、施工手間や工事費の増加を引き起こす^{1)~3)}。

インドネシアのジャカルタ近郊もこのような地域であり、特に膨張性地盤上に生産施設などの低層建物を建設する場合には、建物が軽量であるため、膨張性地盤への対策が不可欠である。写真1～写真3は、対策を施さなかったために発生した床や犬走りの不具合を示している。例えば、建物入口の不陸、室内の段差、犬走りのひび割れなどである。

膨張性地盤の対策には様々な方法があり、対策の効果に応じて施工手間や工事費が増加する傾向

がある。例えば、生産施設に土間床を採用した場合、膨張性地盤の影響が床に及ばなくなる深度まで、膨張性のない良質土で置換することが望ましい。しかし、施工手間や工事費は置換する深度に応じて高くなる。このほか、対策効果が高い方法として構造床を採用し杭に膨張圧を負担させる方法もあるが、膨張性地盤を置換したうえで土間床を採用するよりも割高となる。このため、対策効果が高く、安価な対策工が望まれていた。

床下の膨張性地盤の置換にライムストーンを用いれば、良質土を用いるよりも施工コストを抑えられると考えた。良質土よりも狭い範囲の改良で対策効果が期待でき、材料費も安価であることが主な理由である。そこで、現地で採取した膨張性地盤から供試体を作製し、粒状体であるライムストーンをガラスビーズで模擬し、室内小型模擬実験により対策効果を確認した。

本報では、ジャカルタ近郊の複数の地点で行われた地盤調査データを用いて膨張性地盤の膨張特性を示したうえで、膨張性地盤をライムストーン

で置換する対策工法の効果を室内模擬試験で確認した結果を示す。

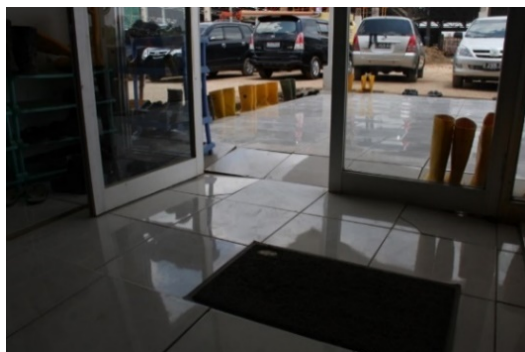


写真-1 膨張性地盤の影響による不陸



写真-2 膨張性地盤の影響による段差



写真-3 膨張性地盤の影響によるひび割れ

2. ジャカルタ近郊の膨張性地盤の性状

2.1 地盤調査地点の概要

インドネシアのジャカルタ近郊では広く膨張性地盤が存在するため、建築工事に先立つ地盤調査において、我が国で一般的に取得される物理特性や力学特性などの基本的な物性のみでなく、膨張性に関するデータが取得されることが多い。これらのデータを整理することで、ジャカルタ近郊の地盤の膨張性の概略を把握できる⁴⁾。

図-1 に示す 8 地点は、ジャカルタ中心部から東方に約 80km 圏内にある国道沿いの工業団地内に生

産施設が建設された場所で、事前の地盤調査において膨張性の指標が取得されている。すべての地点で地表近くの地盤は膨張性を示していた。代表的な粒度は図-2 に示すように、シルト質以下の細粒分で構成されており、粘土分含有率も 20～80% と高い。



図-1 ジャカルタ周辺の 8 つの調査地点

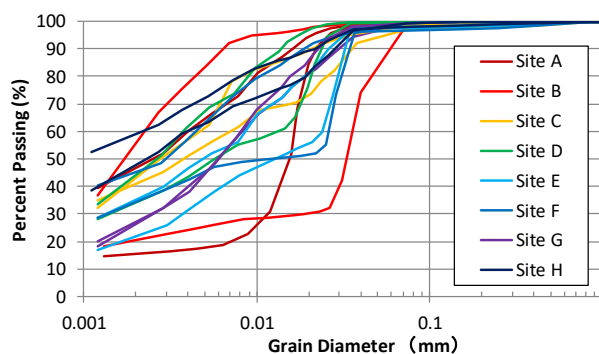


図-2 8 地点の代表的な粒度

2.2 膨張性試験の概要

地盤の膨張性を取得するための試験では、ボーリング孔においてオープンドライブサンプラーを用いて不攪乱サンプルを採取して用いた。採取した深度は概ね 5m 以浅である。地盤の膨張は水分量の増減により引き起こされるため、年間を通じて水分量の増減が少なくと考えられる深い深度では膨張性の影響が少ないからである。

膨張性試験は ASTM D4546-96 (Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, Method A) に準拠した。図-3 に試験手順を、図-4 に試験で得られる結果のイメージを示す。また、写真-4 は装置全景である。

採取した膨張性地盤のサンプルを直径 5cm、高さ 2cm の円筒形リング内に装填する(写真-5 参照)。試験は膨張過程と圧密過程を順に実施する。膨張過程では、円筒形リングを試験装置に装着し、わずかな荷重(7kPa)をかけた状態で水を張り、4 日間かけて高さの変化を計測する。供試体は吸水により高さ方向に膨張し、この高さ変化は 4 日間ではほぼ収束す

る。供試体の高さ増加分を初期の高さで除した値が膨張量である(図-4 参照)。次に圧密過程では、膨張が収束した供試体に対して、段階的に载荷を行うと供試体高さは初期の状態に戻っていくので、初期高さになったときの载荷圧を膨張圧とする(図-4 参照)。すなわち、同一の供試体を用いた一連の試験で膨張量(ほぼ無载荷状態)と膨張圧の2つの物性値が得られる。

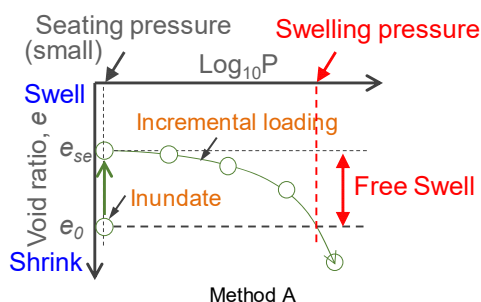


図-4 膨張性試験の結果イメージ



写真-4 膨張性試験の試験状況



写真-5 円筒形リングへの膨張性地盤の装填

2.3 膨張性地盤の膨張性

8つの地点で得られた膨張量と膨張圧を図-5に示す。それぞれの地点で、建物敷地の異なった位置の6~8本のボーリング孔が用いられた。それぞれのボーリング孔で深度5mまでに3か所程度(例えば50cm, 2m, 5m)でサンプルが取得された結果を示している。膨張量と膨張圧は同じ現象を、見方を変えて表現しているだけなので正の相関がある。膨張量の最大値は9%程度で、膨張圧の最大値は300 kPa程度であるが、サイトの違いによるバラツキが大きい。また、膨張量、膨張圧ともに最大値を示したサイトGの試験結果を深度毎に整理した図-6から、同一サイト内においても、取得する深度や位置によって膨張性に違いがあることがわかる。

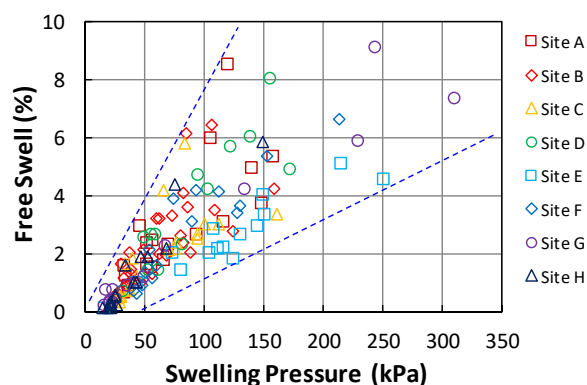


図-5 8地点の膨張性(膨張圧と膨張量)

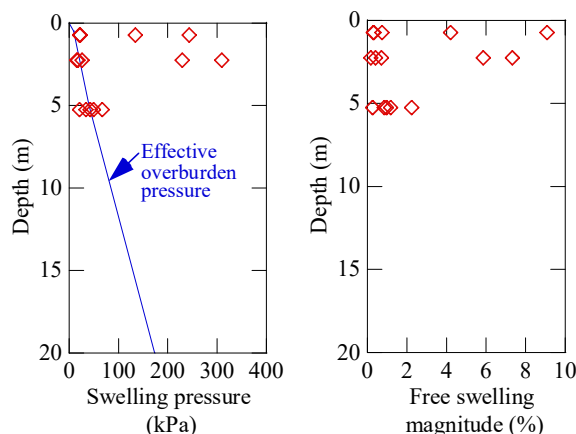


図-6 サイトGの膨張圧と膨張量

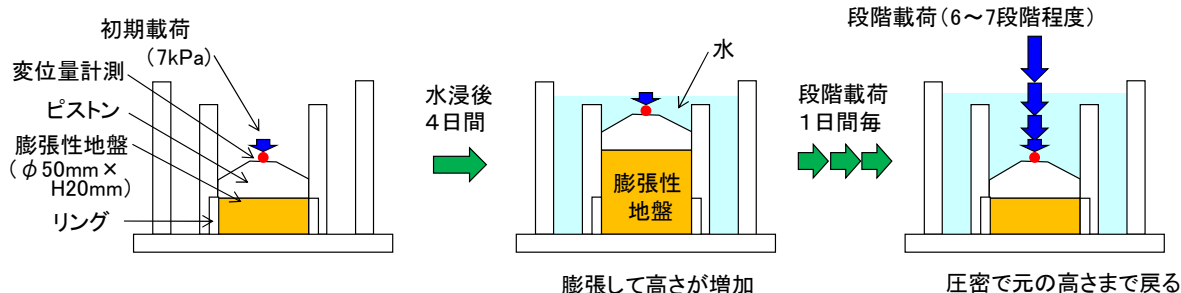


図-3 膨張性試験の試験手順

3. ライムストーンを用いた膨張性地盤対策工法

3.1 膨張性地盤の対策工法

ジャカルタでは膨張性地盤の対策工法として様々な方法が用いられている^{4)・6)}。

生産施設の床は特別な事情がない限り土間床が採用されることが多い。この場合、膨張性地盤に対応するためには、図-7に示すように床下の膨張性地盤を膨張性のない良質土に置換する必要がある。膨張性地盤は水分量の増減により膨張や収縮を引き起こすため、一般に水分変化があると考えられている深度 5m 程度までの膨張性地盤を置換することが望ましい。しかし、工期やコストとの兼ね合いもあり、通常は1~2m程度の置換にとどまることが多く、地盤の膨張性が高い場合には効果が低い。

一方、土間床よりもコスト高となるが、図-8に示すようなドロップパネル形式のフラットスラブなどの構造床を採用すれば、膨張性地盤の影響を床と固定されている杭が負担するため、土間床を採用する場合のように床下の膨張性地盤を改良しなくても一定の対策効果を得られる。しかし、地盤の膨張性が強い場合には床下の膨張性地盤を良質土で置換することや、図-9に示すように床下に膨張性地盤の影響を緩衝するための空間を設けるなどの対策が取られることもあり、さらなるコスト高を招く。

このように、対策の効果が高い方法は、概ねコスト高となる傾向があるため、施工に係るコストを低減しつつ、効果が高い膨張性地盤の対策工法が望まれていた。

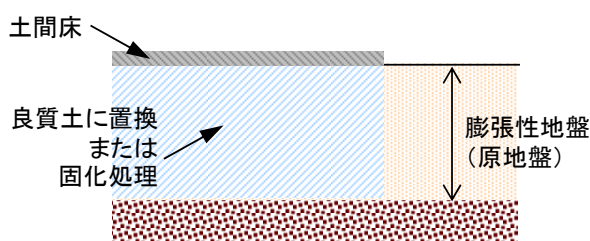


図-7 良質土に置換するの例

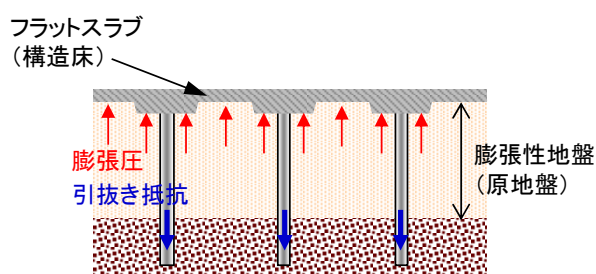


図-8 構造床の例

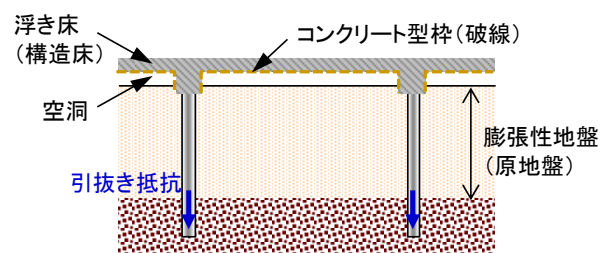


図-9 構造床と下部に空洞を設ける例

3.2 ライムストーンを用いた膨張性地盤対策工法

ジャカルタ近郊では、膨張性地盤の地表近傍をライムストーンで置換し、床への膨張性地盤の影響を低減する対策工法が用いられることがある。ライムストーンは写真-6~写真-7に示すように、比較的粒径が大きい粒状材料で、現地では安価であり入手しやすいため、道路の路盤材などに汎用的に利用されている。

通常の良い土で膨張性地盤を置換する場合には、地表から 5m 程度までを置換する必要があると言われているが、ライムストーンの場合には数 10cm~1m 程度を置換することで対策効果があると考えられ、置換範囲が狭いため施工も容易となる。

ライムストーンの膨張性地盤の抑制効果は、図-10に示すように、地盤が水を吸収することで起こる膨張が、粒状体であるライムストーンのすき間に貫入することで緩衝されると考えられる。このため、図-11に示すように、膨張性地盤の上部を置換する方法だけでなく、溝状に置換しても効果が期待できると考えられる。このため、膨張性が強い地盤を改良する場合には、上部置換と溝掘り置換を併用し、上部置換の部分を厚くすることなく、溝状に置換することで効果を期待できる。



写真-6 仮置きされたライムストーン



写真-7 敷き均したライムストーン

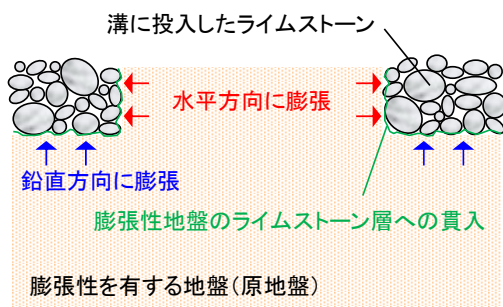


図-10 対策工法の効果のイメージ

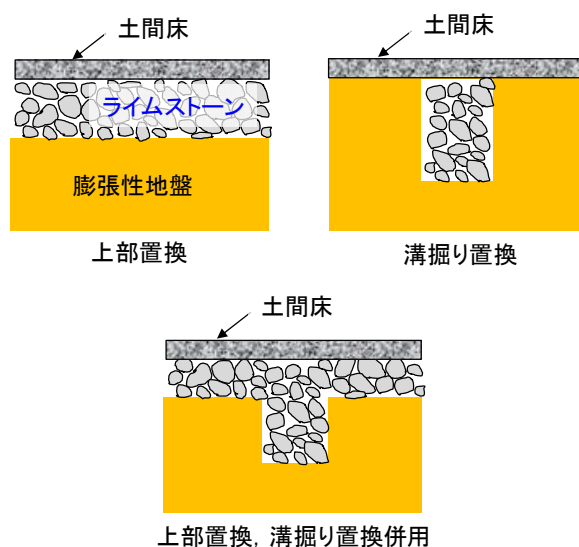


図-11 膨張性地盤の石灰石置換の概念

4. ライムストーンの効果確認実験

ライムストーン置換工法において、膨張性地盤の床への影響をライムストーンが低減する効果を確認するために、実際の膨張性地盤からサンプルを採取し、粒状体のライムストーンを同様な形態を示すガラスビーズで模擬した小型模擬実験を行った。

4.1 膨張性地盤の採取

膨張性地盤はサイト G(図-1 参照)から数 100m 程度離れた別のサイトで採取した。事前に行われた地盤調査の結果、50cm 程度の表土の下に膨張性地盤が存在していることがわかっていたため、重機で表土を剥いだのちに、50cm 以深から人力でブロック状のサンプルを採取した(写真-8 参照)。採取時期は雨期に入る直前の 10 月であり、採取したサンプルの含水比は 45~52%であった。サンプルの大きさは、同一のサンプルから複数の実験が実施できるように、亀裂等を含まずにできるだけ大きい 20~30cm 程度のブロックとした。



写真-8 膨張性地盤のサンプリング状況

4.2 上部置換を模擬した小型模擬実験

試験では膨張性地盤の上部にガラスビーズを設置した状態(図-12 参照)で、図-3 に示した ASTM D4546-96 Method A と同様な試験手順で膨張量と膨張圧を測定し、ガラスビーズで模擬したライムストーンの膨張抑制効果を確認した。具体的には、浸水により膨張性地盤を膨張させ膨張量を求め、その後段階载荷して膨張圧を求めた。

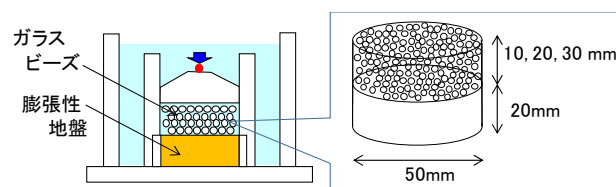


図-12 上部置換を模擬した試験の概要

実施した試験ケースを表-1 に示す。ライムストーンの粒径の効果や置換厚さの効果を把握するために、ガラスビーズの球径と設置厚さを3段階に変え、合計 9 ケースを実施した。また、対策を施さない場合の膨張性を確認し、対策の効果を明らかにするために、ガラスビーズを設置しない 9 ケースを併せて実施した。すべての試験(合計 18 ケース)に用いる膨張性地盤は、写真-9 に示すような 1 つのブロック状サンプルから採取した。

表-1 試験ケースとパラメータ

		ガラスビーズ球径		
		1mm	2mm	4mm
設置 厚さ	10mm	○	○	○
	20mm	○	○	○
	30mm	○	○	○



写真-9 試験に用いた膨張性地盤のサンプル

図-13～図-16にピストン上部に設置したダイヤルゲージで測定した浸水後の軸方向の変形量を示す。ガラスビーズを設置したケース（図-13～図-15）では、浸水後数時間は急激に膨張し、ほとんどのケースで6～12時間程度で膨張が収束した。ガラスビーズを設置しないケース（図-16）では、膨張は数日にかけて継続するが4日間の膨張過程でほぼ収束した。

図-13～図-15と図-16を比較すると、ガラスビーズを設置することで膨張量が小さく抑えられていることがわかる。また、図-13～図-15の3つのグラフを比較することで、ガラスビーズの球径が大きいほうが膨張量を抑えられることがわかる。それぞれのグラフでは、同じ球径であれば、設置厚さが厚いほうが、膨張量が抑えられることがわかる。

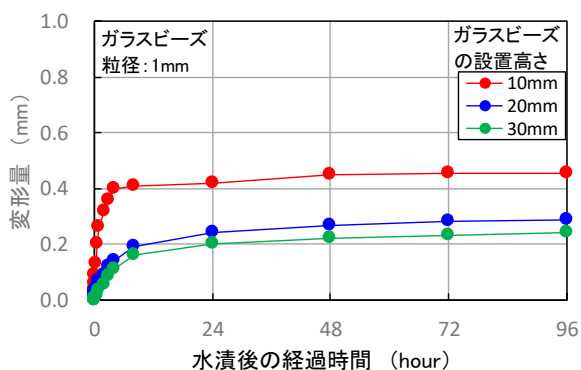


図-13 浸水後の膨張変形(ガラスビーズ: 1mm)

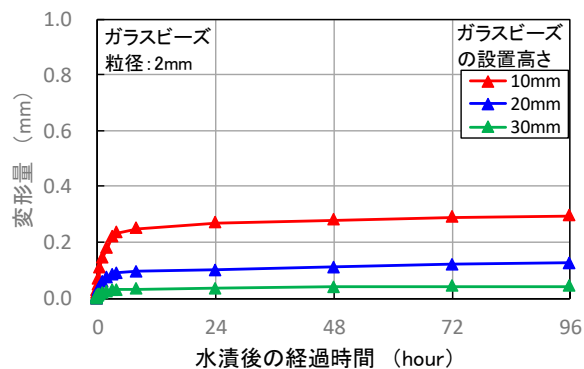


図-14 浸水後の膨張変形(ガラスビーズ: 2mm)

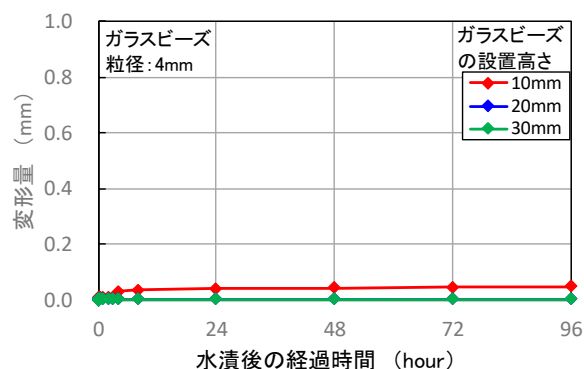


図-15 浸水後の膨張変形(ガラスビーズ: 4mm)

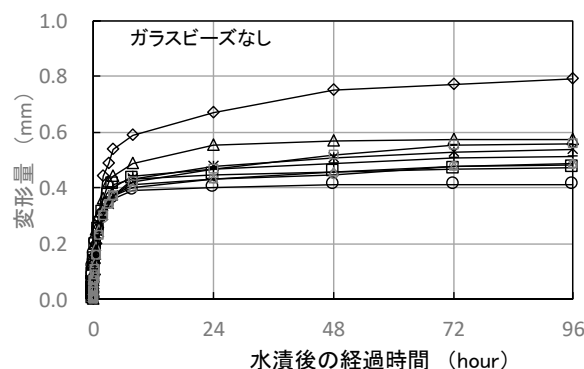


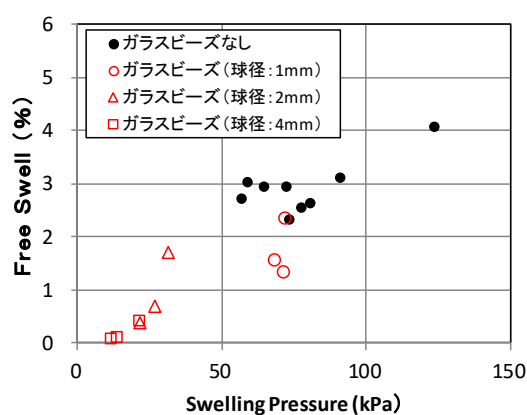
図-16 浸水後の膨張変形(ガラスビーズなし)

膨張量が収束したのちに、1日毎に段階的に行い、図-4に示すようなグラフを作成し、初期の供試体厚さに戻った時点の荷重圧を膨張圧とする。

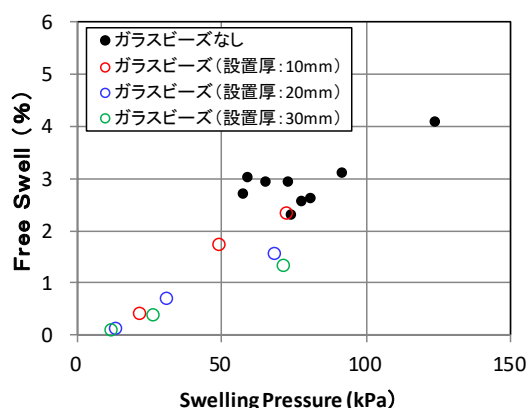
図-17は試験により得られた膨張量を縦軸に、膨張圧を横軸に示したものである。1つのプロットが1つの試験で得られた結果を示す。黒色の塗り潰しマークはガラスビーズを設置していない対策がない場合で、白抜きマークはガラスビーズで対策工を模擬した場合の膨張特性を示す。また、図-17(a)はガラスビーズの球径の効果を、図-17(b)は置換高さの効果を、それぞれ検討するためにマークを変えたグラフであり、同じ試験結果をプロットしている。

ガラスビーズなしのケースだけを見ると、使用した膨張性地盤の膨張特性は、膨張量で2.5～4.0%程度、膨張圧で55～125 kPa程度であることがわかる。これに対して対策工を模擬した試験で得られた値は、膨張量0～2.5%、膨張圧10～75 kPaとなっており、対策の効果を明確に確認できる。

また、図-17 (a)からガラスビーズの球径の違いが対策効果に与える影響を確認できる。球径が大きいほど、膨張量、膨張圧ともに明らかに小さい値を示しており、ライムストーン(粒状体)が大きいほど効果的であることがわかる。図-17 (b)は同じデータをガラスビーズ層の厚さで比較した。厚さが10mm、20mm、30mmと厚くなると膨張量、膨張圧ともに小さくなる傾向が認められるが、ガラスビーズの球径を大きくする効果ほど顕著ではない。



(a)ライムストーンの大きさの効果



(b)置換高さの効果

図-17 上部置換タイプの対策工法の効果

4.3 溝掘り置換を模擬した小型模型実験

溝掘り置換を模擬する試験は、図-18に示すように円盤状に成形した膨張性地盤の中央を溝状に取り除き、そこにガラスビーズを設置して行った。試

験方法は ASTM D4546-96 Method A と同様な方法で実施し、膨張量と膨張圧を求めた。

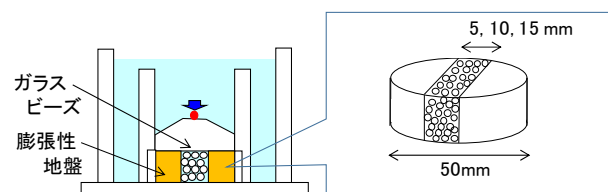


図-18 溝掘り置換を模擬した試験の概要

試験ケースを表-2に示す。ガラスビーズの球径を3段階(1mm, 2mm, 4mm)に変え、溝幅を3段階(5mm, 10mm, 15mm)に変えて、合計9ケースを実施した。また、ガラスビーズを設置しないケース、すなわち膨張性地盤のみの膨張性を測定した14ケースを併せて実施した。なお、上記の合計23ケースは、上部置換を模擬した試験に用いたものとは異なるが、同一のブロック状サンプルより採取した。写真-10にガラスビーズを溝状に設置した9ケースについて、試験前の状態を示す。

表-2 溝掘り置換の試験ケースとパラメータ

		ガラスビーズ球径		
		1mm	2mm	4mm
設置幅	5mm	○	○	○
	10mm	○	○	○
	15mm	○	○	○

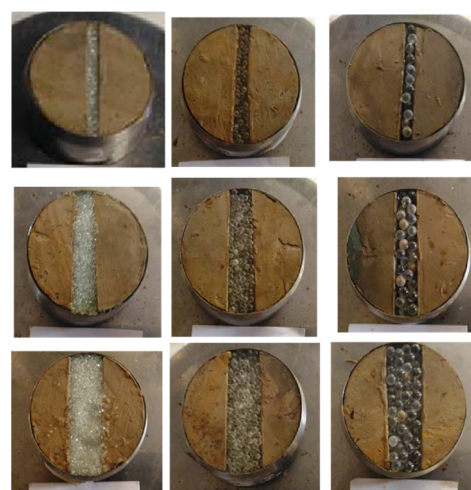
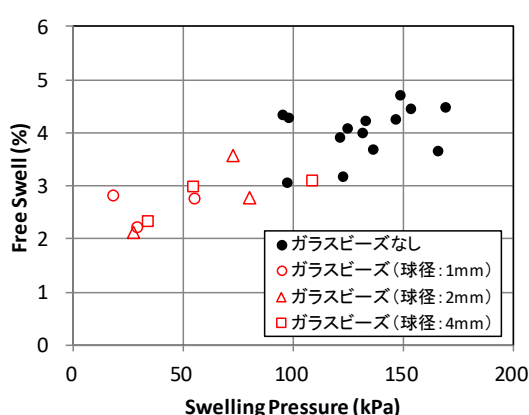


写真-10 ガラスビーズの設置状況
上から、溝幅：5mm, 10mm, 15mm
左から、球径：1mm, 2mm, 4mm

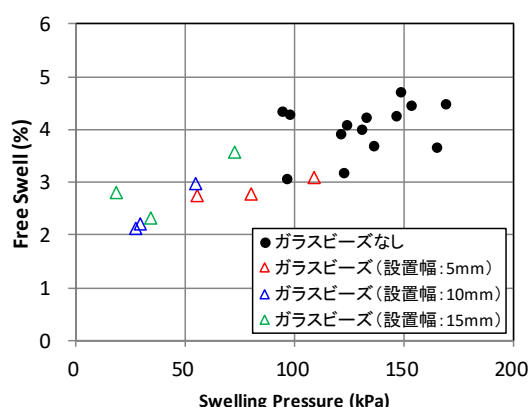
図-19に溝置換タイプの試験結果を示す。使用した膨張性地盤の膨張特性は、ガラスビーズを設置し

ないケースの結果から膨張量3～5%程度、膨張圧95～175 kPa程度であることがわかる。これに対してガラスビーズを設置した試験(図-19(a)および(b)参照)で得られた値は、膨張量2～3.5%、膨張圧20～110 kPaであり、上部置換の場合ほど顕著ではないが対策工の効果が確認できる。

図-19(a)ではガラスビーズの球径が大きい方が、図-19(b)からは溝幅が大きいほうが、対策効果が高い傾向が、わずかながら認められる。しかし、試験に使用している膨張性地盤の膨張性にもバラツキが多いため、ライム石の粒径や溝幅の効果を定量的に示すことは難しい。



(a) ライム石の大きさの効果



(b) 置換幅の効果

図-19 溝置換タイプの対策工法の膨張抑制効果

5. おわりに

インドネシアのジャカルタ近郊に広がる膨張性地盤の上に生産施設を建設する際の、床や基礎への膨張性地盤の影響を低減するための対策工法について、対策効果が大きく、施工手間や工事費が低減できる方法として、床下の膨張性地盤をライムストーンで置換する工法を考え、室内模擬試験により効果を確

認した。膨張性地盤の地表近傍のみを置換する場合と溝状に掘り込み置換する場合の2種類の形態において、粒状体のライムストーンをガラスビーズで模擬し、現位置から採取した実際の膨張性地盤に組み合わせて実験を行った結果、どちらの形態についても対策の効果を確認できた。地表近傍のみを置換する場合はライム石の粒径が大きいほど効果が高いことが明らかになった。また、置換を厚くすることによる対策効果も認められたが、ライム石の粒径の効果ほどは明らかでなかった。一方、溝状に置換する場合については、ライムストーンで設置することで、水平方向へ若干の膨張を許すことができ、鉛直方向の床への影響を低減することができることは確認できたものの、ライム石の粒径や置換幅の影響については実施した試験では明らかにできなかったため、今後の課題として実験ケースの追加などが望まれる。

謝辞

ジャカルタでの膨張性地盤のサンプル採取や地盤調査データの整理などでは、ジャカルタ営業所、大石哲士営業所長、山田学主査、西村由妃さん、Fariza Rachman さんに、大変お世話になりました。ここに謝意を示します。

<参考文献>

- 1) John D. Nelson and Debora J. Miller : Expansive soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley & Sons, 1997.
- 2) John D. Nelson, Kuo Chieh Chao, Daniel D. Overton, and Erik J. Nelson : Foundation Engineering for Expansive Soils, Wiley, 2015.
- 3) 西正晃, 八重樫光, 杉山誠 : インドネシアの膨潤性地盤に建つ生産施設の基礎地業, 基礎工, Vol.35, No.6, pp.98-100, 2007.
- 4) 中島均, 浅香美治, 齋藤亮 : インドネシア・ジャカルタ近郊の膨張土の性状, 第52回地盤工学研究発表会, pp.631-623, 2017.
- 5) 浅香美治, 中島均, 小森崇, 山田学 : ジャカルタ近郊の膨張性地盤に建つ生産施設の1階床のレベル計測, 基礎工, Vol.44, No.9, pp103-106, 2016.
- 6) 中島均, 浅香美治, 小森崇, 山田学 : インドネシアの膨張性地盤に建つ生産施設の1階床のレベル計測 その1～その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.557-562, 2017.
- 7) 中島均, 浅香美治, 小森崇, 山田学 : インドネシアの膨張性地盤に建つ生産施設の基礎・床形式と対策工の効果検討, 基礎工, Vol.46, No.10, pp60-63, 2018.