

深層・浅層併用型地盤改良における改良体の変形特性

近藤益央・間瀬利明

1. はじめに

道路盛土等の土工工事区間には軟弱地盤が存在していることがあり、工事の実施にあたっては、軟弱地盤対策を必要とする場合が多い。地盤改良は圧密促進工法と固結工法に大別され、固結工法ではコスト縮減や工期短縮を目的として、地盤改良対象範囲に対して、改良する面積（体積）を少なくする低改良率化が行われることがある。この場合、軟弱地盤の改良部と未改良部とで圧密沈下量が異なることから深層改良杭（以下「改良杭」という。）直上と未改良部上の盛土で大きな不同沈下が生じることがある。

本稿では、この低改良率地盤改良で不同沈下対策として有効とされる図-1に示した深層混合処理と浅層混合処理とを組合せた深層・浅層併用型地盤改良の破壊形態を明らかにするために遠心力載荷模型実験を実施し、浅層改良体（以下「改良体」という。）及び改良杭の変形特性について検討を行ったので報告する。

2. 地盤改良の課題

2.1 圧密工法と固結工法

地盤改良には、工期は長くなるが比較的安価なサンドコンパクション工法やペーパードレーン工法等の圧密促進工法と、工期が短縮できるが工費が高くなる固結工法がある。固結工法は工期短縮だけでなく、盛土周辺地盤の変形抑制が期待出来たり、供用後の沈下量を小さくすることが出来たりするメリットがある。その一方で、セメントペーストや粉体を混合処理するため、圧密促進工法と比べて工費が高くなるのが最大のデメリットでもある。

2.2 固結工法における低改良率化

固結工法のうち深層混合処理では、図-2(b)のように改良杭間隔を広げて、平面改良率を下げる

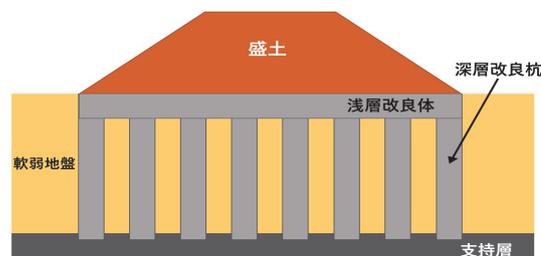


図-1 深層・浅層併用型地盤改良

ことでコスト縮減を目指す場合がある。深層混合処理を低改良率化することでコスト縮減しながら盛土安定を確保する方法の一つとして、土木研究所と民間企業3社とて共同開発した低改良率セメントコラム(ALiCC)工法¹⁾等（以下「ALiCC工法」という。）がある。低改良率地盤改良の一つであるALiCC工法では、盛土内に発生するアーチ効果による荷重配分を簡便な方法で計算でき、改良柱径0.6~1.3m、改良柱中心間隔1.0~2.5mを適用範囲とし、浅層改良やジオテキスタイルを併用することもできる。深層混合処理では図-2(a)に示した接円改良が基本的であるが、改良杭の構築本数を減らすことで工数を減らし、地盤改良のコスト縮減、工期短縮するため、図-2(b)に示した深層混合処理の低改良率化（平面改良率19.6%）したALiCC工法や、図-2(c)に示した深層混合処理の大口徑化（改良径5m、平面改良率100%）したSUPERJET工法等が採用されることが多い。例えば、地盤改良範囲が15m×11mの場合、図-2(a)に示した改良杭径が標準的な1mで接円改良すると、165本の改良杭を構築する必要がある。図-2(b)に示したように改良杭間隔を1mとした低改良率化した場合には48本に、図-2(c)に示したように改良径を5mに大口徑化した場合には21本と構築本数を大幅に減らすことが可能である。大口徑化して図-2(a)と同じように接円改良とした場合、図-2(d)に示したように一つ一つの未改良部が大きな面積になる。この場合、改良杭部と未改良部での圧密沈下量が異なることから、盛土天端部で不同沈下が発生する。これを解消す

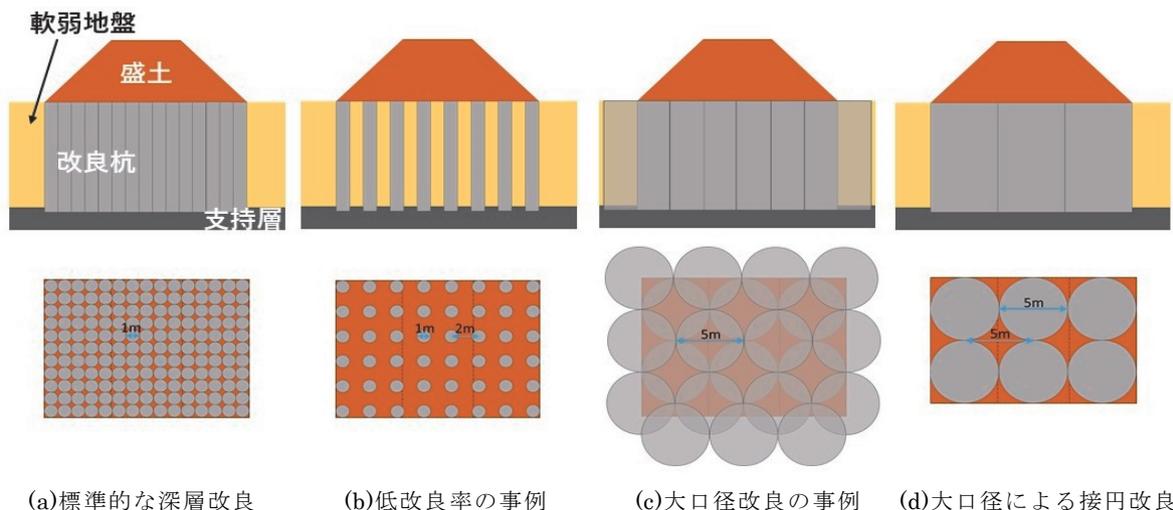


図-2 深層混合処理改良の事例

るため、図-2(c)に示したように改良対象範囲をはみ出した改良やオーバーラッピングと呼ばれる重複した改良を行って未改良部をなくすか、小さくする必要があります。この場合、単純に施工本数の減少分がコスト縮減に繋がらないこともある。

深層混合処理を低改良率化することでコスト縮減しながら盛土安定を確保する方法の一つとして、土木研究所と民間企業3社とで共同開発したALiCC工法がある。ALiCC工法の詳細は別報¹⁾を参照されたい。

深層混合処理の低改良率化が極端に進む（改良杭間隔が広がりすぎると、沈下量や改良杭に作用する応力の計算が複雑になるため、低改良率化は改良杭中心間隔を2.5m以内とするのが一般的である。

2.3 深層・浅層併用型地盤改良

図-1に示した深層混合処理と浅層混合処理と組合せた深層・浅層併用型地盤改良では、改良体が盛土等の上部構造物の荷重を改良杭に伝達する役割を担う。従来、浅層混合処理が単独で施工される場合は、工事現場での工事車両の走行のしやすさ（トラフィカビリティ）を確保するために行われることが多く、仮設構造的な位置付けである。そのため工事用機械やトラック等の走行に支障がない程度の低強度の改良が行われ、改良体を構造物基礎として扱うことは少ない。それに対して深層混合処理は、構築される盛土等の上部構造物を改良杭と地盤の周辺摩擦力で上部荷重を支持したり、支持層に直接的に上部荷重を伝達したりすることにより、杭基礎のような役割を担っている。

深層・浅層併用型地盤改良では深層混合処理の低改良率化だけでなく、盛土の不同沈下抑制の効果も期待できる。そのため、改良杭は盛土荷重が作用しても圧縮破壊しないこと、改良体は改良杭上での押し抜きせん断破壊や改良杭間で曲げ破壊が発生しないように設計する必要がある。そのため遠心力載荷模型実験を実施し、改良体と改良杭の変形特性・破壊形態を確認した。

3. 遠心力載荷模型実験

深層・浅層併用型地盤改良での改良体と改良杭の変形特性を確認する目的で、改良杭中心間隔が2.5mを超える低改良率（以下「極低改良率」という。）での遠心力載荷実験を実施し、改良体及び改良杭に生じる損傷モードを確認した。遠心力載荷実験装置は、遠心加速度を利用して縮小模型に実規模相当の自重応力を発生させて模型実験を行う装置である。土を主材料とした模型実験では、通常の重力場で相似則を満足させた縮小模型の実験を行うことが出来ない。相似則を満足出来ないと地中の応力状態を再現できず、地中の応力状態を評価するためには実大スケールで実験を行う必要がある。その場合、膨大な費用と日数を要することとなり現実的でない。そのため、地盤工学分野においては、縮小模型に遠心力を載荷した遠心力載荷模型実験を採用することが多い。さらに、時間も模型の縮尺率と同様に短縮されることから、短時間の実験でも長期間の変形を確認できる。今回の実験では模型縮尺を1/50とし、この模型に50Gの遠心力を載荷し、改良体及び改良杭の変形（損傷）確認を行った。

3.1 許容せん断応力度と許容曲げ応力度の設定方法

押し抜きせん断と曲げ破壊に対する照査で重要となるのが、改良体の許容せん断応力度 τ_a と改良体の許容曲げ応力度 σ_{base} である。ここでいう許容せん断応力度とは設計上用いるせん断応力度の上限値であり、許容曲げ応力度とは設計上用いる曲げ応力度の上限値をいう。改良体の許容せん断応力度 τ_a は「セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第5版）」²⁾に基づいて、改良体設計一軸圧縮強度 q_{uck} の1/2とした。許容曲げ応力 σ_{base} については以下の既往成果を参考に、改良体の一軸圧縮強度である設計一軸圧縮強度 q_{uck} の比として検討を行った。鉄筋等で補強されていないセメント改良土の場合、許容引張強度と許容曲げ応力度は同じなので、許容引張強度と一軸圧縮強度との関係を検討した。著者らが実施した研究成果⁶⁾では、粘性土の引張強度は一軸圧縮強度の0.268倍であった。古関らの研究³⁾ではセメント改良土の引張強度は一軸圧縮強度の0.05~0.2倍程度、伊藤らの研究⁴⁾ではセメント改良土の引張強度は一軸圧縮強度の0.1倍程度、安藤らの研究⁵⁾ではセメント改良土の引張強度は一軸圧縮強度の0.3倍程度とバラつきが大きい。著者らが実施した粘性土の引張強度と一軸圧縮強度との関係⁶⁾は、他の研究者が実施したバラつきの範囲内であったことから許容曲げ応力 σ_{base} を改良体の設計一軸圧縮強度 q_{uck} の0.268倍として過去の実験結果と比較することとした。許容曲げ応力 σ_{base} を一軸圧縮強度 q_{uck} の0.268倍とした場合、平成29年度に実施した実験結果⁷⁾及び平成30年度に実施した実験⁸⁾でも、せん断、曲げ共に安全率が

1.0を上回っていても損傷が発生した。そこで、コンクリート分野では引張強度を求める試験方法として、コンクリート標準示方書において割裂引張試験（JIS A 1113）により算出することを原則としていることから、実験時に実施した割裂引張強度を許容曲げ応力 σ_{base} として再計算すると、改良体の変形形態が実験結果と概ね一致した。割裂引張試験は一軸圧縮強度試験と同様に、容易に試験を実施することが出来るので、実験模型の強度設定に割裂引張強度を用いて、許容曲げ応力との比較を行い、実験模型の変形形態を想定して供試体強度を決定することとした。

3.2 実験模型

各実験ケースで想定した変形（損傷）を確認するため、図-3に示す縮小模型による遠心力载荷模型実験⁸⁾を行った。ケース1はALiCC工法の下限值に近い深層改良率18.7%で改良体の曲げ破壊の安全率を1.0程度としたケース、ケース2~4は深層改良率を6.47%とし改良体の曲げ破壊の安全率を0.3~1.0程度に変化させ、様々な損傷形態が再現できるようにケース設定した。今回の遠心力载荷模型実験では、改良体の厚さは実物換算で1.0mの20mmとした。これは、浅層改良工法で施工に使用される攪拌機の能力で、改良深さが1mを超える施工機械が少ないためである。実験に先立ち、設計一軸圧縮強度を満足するための配合試験を行い、割裂引張試験と一軸圧縮試験を行った。

盛土材料には2mm 篩通した江戸崎砂を用いた。砂の工学的特性は、細粒分含有率 $F_c=15.9\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.693\text{g/cm}^3$ 、最適含水比

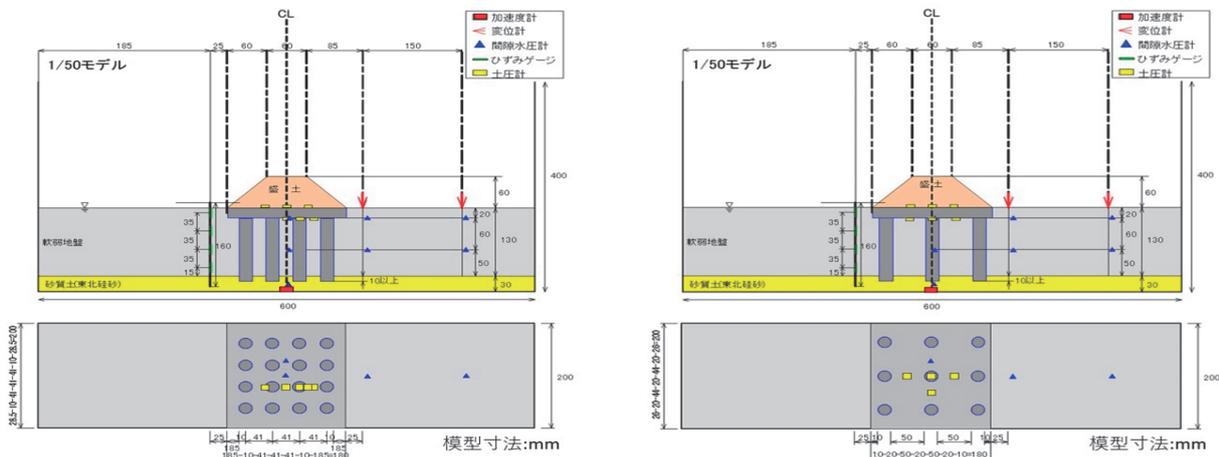


図-3 遠心力载荷模型実験概要図

$w_{opt}=14.1\%$ である。盛土模型は、軟弱地盤模型上では突き固めて作製することが出来ないため、木箱内に最適含水比付近の江戸崎砂を締め度 $D_c=90\%$ になるように締め固めて作製した。作製後模型の形状をたもったまま軟弱地盤模型上に設置させるため、冷凍庫で凍結させてから実験土槽内に運搬・静置し、一晩かけて解凍させてから遠心力荷重模型実験を実施した。改良体の設計一軸圧縮強度 q_u は、想定する改良体の破壊形態になるように $100\sim 1,000\text{kN/m}^2$ の範囲で強度を決定した。改良杭の設計一軸圧縮強度 q_u は、ALiCC工法の計算方法で圧縮破壊しない $1,000\text{kN/m}^2$ とした。

遠心力荷重模型実験の実施日には、改良体及び改良杭の強度を確認するため改良体については一軸圧縮強度試験と割裂引張試験を、改良杭については一軸圧縮強度試験をそれぞれ3供試体ずつ実施した。

3.3 実験模型の強度設定

過去に実施した遠心力荷重模型実験⁷⁾では、改良体を改良杭が押し抜く破壊である押し抜きせん断（パンチング）と、改良杭間上の改良体に生じるたわみ（曲げ）により起こる曲げ破壊が確認されている。押し抜きせん断に対する設計は、図-4に示すように盛土荷重による未改良部に作用する鉛直応力 P_{soil} と未改良部の長期支持力 q_a との差分力により、改良体に押し抜きせん断が発生するかどうかを判定している^{1,2)}。すなわち、改良体に生じるせん断応力度 τ_{se} が改良体の許容せん断応力度 τ_a より小さくなるように設計する。この時用いられる極限設計法は、沈下量や複合地盤（改良部と未改良部が混在する地盤）のせん断抵抗力を考慮せず、簡易的に地盤に働く荷重と地盤の許容支持力とのバランスから改良強度と改良厚さを求める手法である。せん断応力、曲げ応力及び沈下量を同時に解析できる地盤係数法、有限要素法や多層弾性理論は、極限設計法に比べて計算が複雑となることから、浅層混合処理の設計では極限設計法が用いられている。改良体の曲げ破壊に対する照査では、図-5のように盛土荷重により発生する改良体の曲げ応力度 σ_{bse} が改良体の許容曲げ応力度 σ_{base} より小さくなるように、構造力学の弾性床上梁とした地盤係数法により設計する¹⁾。

3.4 改良体の変形特性

図-3に示した遠心力荷重模型実験の結果として、

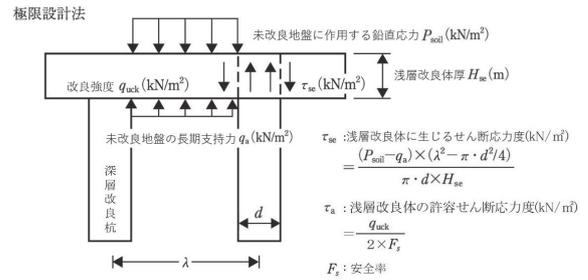


図-4 押し抜く押し抜きせん断に対する照査¹⁾

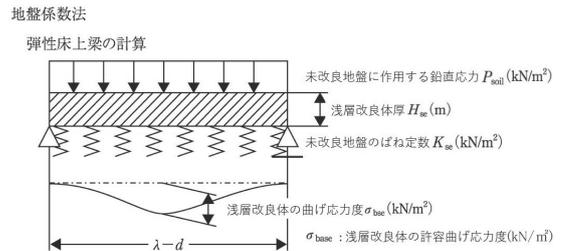


図-5 曲げ破壊に対する照査¹⁾

表-1に改良体変状、表-2に実験模型の強度と安全率を記した実験結果を示す。

実験結果で示した安全率は、ALiCC工法マニュアル¹⁾に記載されている方法で設定した。改良体の一軸圧縮強度 q_{uckse} 等は実験計画時の目標値ではなく、実験日に試験を行った実測値とした。各地盤の地盤工学的特性は、過去の実験や土質試験結果から得られた値を用いた。

図-5により算出される改良体に発生する曲げ応力度 σ_{bse} と、割裂引張強度を許容曲げ応力度 σ_{base} として求めた曲げ安全率が0.99のケース1では、表-1に示すように曲げ破壊が見られた。ただし開口幅が大きなクラックが見られる所は、改良杭の支えがなく片持ち梁状態の改良体外縁のみであり、改良杭が配置されている中央部は軽微であった。

ケース2では押し抜きせん断（パンチング）、曲げともに安全率が1.0を下回っており、改良体全体に渡って大きな破壊が見られた。これらの破壊は、遠心加速度が所定の50Gになる以前から確認されている。

改良体の一軸圧縮強度が 600kN/m^2 を超えるケース3では、曲げ安全率が1.0を下回る（安全率0.76）ものの、軽微なクラックが発生しているだけで、盛土天端や改良体には段差もなく、ほぼ健全な状態であった。ケース2のように押し抜きせん断の安全率1.0を満足していないと、盛土荷重により軟弱地盤の圧密が進行し大きな破壊に至る。

表-1 遠心力載荷模型による浅層改良体変状

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
実物換算改良杭間隔 (m)	2.1	3.5	3.5	3.5
深層改良杭 平面改良率(%)	18.7	6.4	6.4	6.4
浅層改良体変状 (写真記録)				
浅層改良体変状 (平面スケッチ)				
浅層改良体変状 (正面スケッチ)				

表-2 遠心力載荷模型実験結果

	深層改良杭の一軸圧縮強度	浅層改良体の一軸圧縮強度	浅層改良体の許容曲げ強度	押し抜きせん断の安全率	曲げ破壊の安全率	実験結果 (員傷形)
ケース1	931kN/m ²	85kN/m ²	20.4kN/m ² (18.2kN/m ²)**	4.05	1.09* (0.99)**	曲げ破壊
ケース2	892kN/m ²	194kN/m ²	46.6kN/m ² (41.5kN/m ²)**	0.73	0.37* (0.33)**	曲げ破壊 パンチング
ケース3	827kN/m ²	679kN/m ²	163.0kN/m ² (145.3kN/m ²)**	2.60	0.86* (0.76)**	曲げ破壊
ケース4	988kN/m ²	947kN/m ²	227.3kN/m ² (202.7kN/m ²)**	3.62	1.12* (1.00)**	損傷なし

* : 浅層改良体の許容曲げ強度を一軸圧縮強度の0.24倍として算出
 ** : 浅層改良体の許容曲げ強度を割裂引張試験結果である割裂引張強度を採用

改良体の一軸圧縮強度を947kN/m²としたケース4では、改良体の曲げ安全率は1.0となり、小さなクラックは発生したものの、そのクラックも改良体を貫通するものではなく、盛土や改良体にほとんど変状は確認されなかった。

遠心力載荷模型実験では、盛土模型に大きなクラックや沈下が発生していないケース3及び4でも、改良体には軽微なクラックが発生していることを確認した。ケース3や4のように改良体を貫通したり、複数のクラックが発生したりするものでなければ、盛土には変状が発生しなかった。また、実験では改良体の厚さを1.0mとしたが、高強度の改良体が必要となり、現場施工条件としては厳しいものとなった。押し抜きせん断（パンチング）や曲げの条件を満足させるためには、改良体の厚さを1.0mとした場合には改良体の高強度化が必要となり、改良体の設計強度を一般的な600 kN/m²以下とした場合には改良体厚さを厚くする必要がある。現場施工を考えると、改良体強度を上げて改良体の変形を抑制するより、施工法が限定されたり、工程数が増加したりするとしても、改良体厚さを増加させる方が合理的と考える。

3.5 改良杭の変形特性

低改良率深層混合処理工法の1つであるALiCC工法では、改良杭間隔の上限値を2.5m以下としている。ただし、改良杭間隔が2.5mを超えて



写真-1 改良杭（第1列）の変状状況



写真-2 改良杭（第2列）の変状状況



写真-3 改良杭（第3列）の変状状況

3.25m以下の場合には、試験工事等で十分な検討・確認することとされている。これは、改良体間隔が広がると盛土材のアーチ効果が期待できない可能性があるためである。しかし、深層・浅層併用型地盤改良のように浅層改良を併用する場合には、盛土荷重は改良体を介して、そのほとんどを改良杭に伝達すると考えられる。改良杭間隔が広がると改良体にたわみが発生し、その場合には改良杭間の未改良部にも盛土荷重が作用する場合もある。そこで、ALiCC工法マニュアルでは改良杭間隔が2.5mを超えるものは適用外となっているが、深層・浅層併用型とした場合の適用の可能性を、図-3に示した模型を用いて実施した遠心力載荷模型実験で改良杭の検討を行った。

ALiCC工法マニュアルに基づいて計算したケース1、ケース3の改良杭に作用する圧縮応力は、ケース1が256kN/m²、ケース3が319kN/m²であった。また、実験時に実測した改良杭の一軸圧縮強度はケース1で931kN/m²、ケース3で827kN/m²で、計算で求められた圧縮応力より実験時に実測した改良杭の一軸圧縮強度の方が大きかったので、実験後に解体した模型では写真-1～3に示すように、改良杭の損傷は確認されなかった。盛土高さを8mとした遠心力載荷模型実験も実施した。この時、実験時に実測した改良杭の一軸圧縮強度は1,614kN/m²で、ALiCC工法マニュアルに基づいて計算した改良杭に作用する圧縮応力1,640kN/m²と若干小さかったが、実験後に解体した模型では改良杭に損傷はなかった。

実験ケースの諸元設定には、既存のALiCC工法設計法を用いたが、想定した改良体の変形(破壊)モードと実験結果は良く一致した。このことから、既存のALiCC工法設計法でも極低改良率の深層・浅層併用型地盤改良に適用できる可能性を確認した。

4. まとめ

本報告では、深層・浅層併用型地盤改良における改良体及び改良杭の変形(損傷)状況を紹介した。地盤改良は地中で行われているため、盛土等の上部構造物に大きな損傷がなければ、開削して改良体の変形(損傷)状況を確認することはない。改良体の変形(損傷)すると、盛土等を撤去して修復する必要があるため、盛土に変状や沈下を発生させるような改良体の変形を発生しないようにすることが重要である。

今回の実験では、以下の知見が得られた。

- ・遠心力载荷模型実験では、盛土に大きなクラックや沈下が発生しなかった場合でも、改良体には軽微なクラックが発生していることがあった。
- ・パンチングの安全率が2.5を超えていると押し抜きせん断が発生しない状態であり、曲げ安全率1.0を大きく下回ることはない。この場合には、改良体のたわみにより発生する軟弱地盤の圧密進行の影響は小さく、曲げ破壊は軽微であることを実験で確認した。
- ・改良杭の変形については実験では確認できなかったことから、ALiCC工法の設計法を用いて改良率6.4%までの極低改良率での深層・浅層併用型地盤改良の可能性が示された。

今回検討した深層・浅層併用型地盤改良は、深層改良の低改良率化で問題となる盛土や堤体の不同沈下に対して、極低改良率の改良杭に改良体を組み合わせることで、盛土や堤体の不同沈下が解消できることから、沈下対策の地盤改良として有効な技術であると思われる。

また、従来の浅層改良はトラフィカビリティ確保のための仮設構造物として扱われており、盛土や堤防の施工時における建設機械や工事車両の走行性・安定性しか考慮していなかった。しかし、深層・浅層併用型地盤改良では改良体を恒久的な構造物として取り扱い設計する。改良体がない場合には、盛土荷重による想定すべり線は改良杭を

すり抜ける深いすべり線となるが、十分な強度を有する改良体がある場合には盛土内で発生するすべり線のみとなる。そのため、従前は考慮されていた改良体が持つすべり安定等の機能・性能に関する仕様を適切に評価することにより、深層・浅層併用型地盤改良が沈下対策としての機能や経済性にも効率的な工法となる可能性があると考えられる。その際、極低改良率の深層・浅層併用型地盤改良の設計においては、既存のALiCC工法設計方法が適用できると考えられる。

参考文献

- 1) ALiCC 工法研究会：ALiCC 工法マニュアル、92p.、2015年4月
- 2) (一社)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5版)、484p.、2021年10月
- 3) 古関潤一、佐藤剛司：セメント改良土の引張強度特性、東京大学生産技術研究所、生産研究 53 巻 11・12 号、2001年11月
- 4) 伊藤正巳、菅野航太、大河内保彦：セメント改良土における引張強度の推定に関する一考察、第 71 回土木学会年次学術講演会、VI-653、pp.1305~1306、2016年9月
- 5) 安藤嘉哉、並河努：セメント改良土の一軸引張試験、第 50 回地盤工学研究発表会、pp.661~662、2015年9月
- 6) 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論文集、pp.255~260、2018年10月
- 7) 近藤益央、宮武裕昭：改良体の変状に関する実験的検討、第 14 回地盤改良シンポジウム論文集、pp.83~88、2020年12月
- 8) 村田健司、近藤益央、間瀬利明：浅層改良と深層改良を併用した地盤改良について その 2 (遠心力载荷模型実験結果)、第 34 回日本道路会議、No.4045、2021年11月

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 特任研究員
KONDOH Masuo

間瀬利明



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
MABUCHI Toshiaki