

浅層・深層併用型地盤改良技術の開発に関する研究①

研究予算：運営費交付金

研究期間：令和元～令和3

担当チーム：施工技術チーム

研究担当者：間瀬利明、近藤益央

【要旨】

軟弱地盤対策において、セメントなどの改良材を用いた地盤改良の果たす役割が大きくなり、地盤改良のコスト縮減、工期短縮のニーズが高まった。深層混合処理工法については攪拌性能の向上、供回りの防止により改良体強度が改善され、高強度化、低改良率化により、コスト縮減が図られてきている。地盤改良のコスト縮減や工期短縮のために低改良率化が進むと盛土等の土工構造物に大きな不同沈下が生じ、盛土等の土工構造物の安定性確保が困難となる場合がある。そのため、軟弱地盤対策を必要とする現場では様々な対策工法が提案され、深層混合処理工法と浅層混合処理工法やジオテキスタイル工法と組み合わせることで、不同沈下量の抑制を図っているものの、工学的判断に基づく照査方法が確立されないまま施工されている事例が多い。さらに、地震時の設計法が定まっていないため、地震時に盛土に大きなクラックや段差等が発生し、現状回復には長期の復旧期間と膨大な予算が必要となる場合がある。

本研究では、施工技術チーム、先端技術チーム、寒地地盤チームの3チームで分担して研究を行い、浅層混合処理工法と深層混合処理工法と組合せた地盤改良技術に関する基本的な設計法の考え方を検討し、設計で要求される性能を満足するための施工法について提案するものである。

キーワード：軟弱地盤対策、浅層改良、深層改良、設計、施工

1. はじめに

軟弱地盤対策において、セメントなどの改良材を用いた地盤改良の果たす役割が大きくなり、地盤改良のコスト縮減、工期短縮のニーズが高まっている。深層混合処理工法については攪拌性能の向上、供回りの防止により改良体強度が改善され、高強度化、低改良率化により、コスト縮減が図られてきている。地盤改良のコスト縮減や工期短縮のために低改良率化が進むと盛土等の土工構造物に大きな不同沈下が生じ、盛土等の土工構造物の安定性確保が困難となる場合がある。そのため、軟弱地盤対策を必要とする現場では様々な対策工法が提案され、深層混合処理工法と浅層混合処理工法やジオテキスタイル工法と組み合わせることで、不同沈下量の抑制を図っているものの、工学的判断に基づく照査方法が確立されないまま施工されている事例が多い。

本研究では、浅層混合処理工法と深層混合処理工法と組合せた地盤改良技術に関する基本的な設計法の考え方を提案するため、遠心力载荷試験装置を用いた模型実験を実施し改良体に生じる損傷形態と設計照査方法について検討した。また、設計で要求される性能を満足するための施工法について検討を行った。

2. 浅層改良体の設計法に関する検討

2.1 浅層改良体の要求性能に応じた照査項目および設計法に関する検討

地盤改良工法として用いられる浅層改良は、工事フィールドのトラフィックビリティを確保するために施工されることが多い。そのため工用機械やトラック等の走行に支障がない程度の改良が行われ、今後構築する構造物基礎としての地盤改良に用いられることは少ない。浅層混合処理工法と深層混合処理工法と組合



写真-1 遠心载荷実験装置

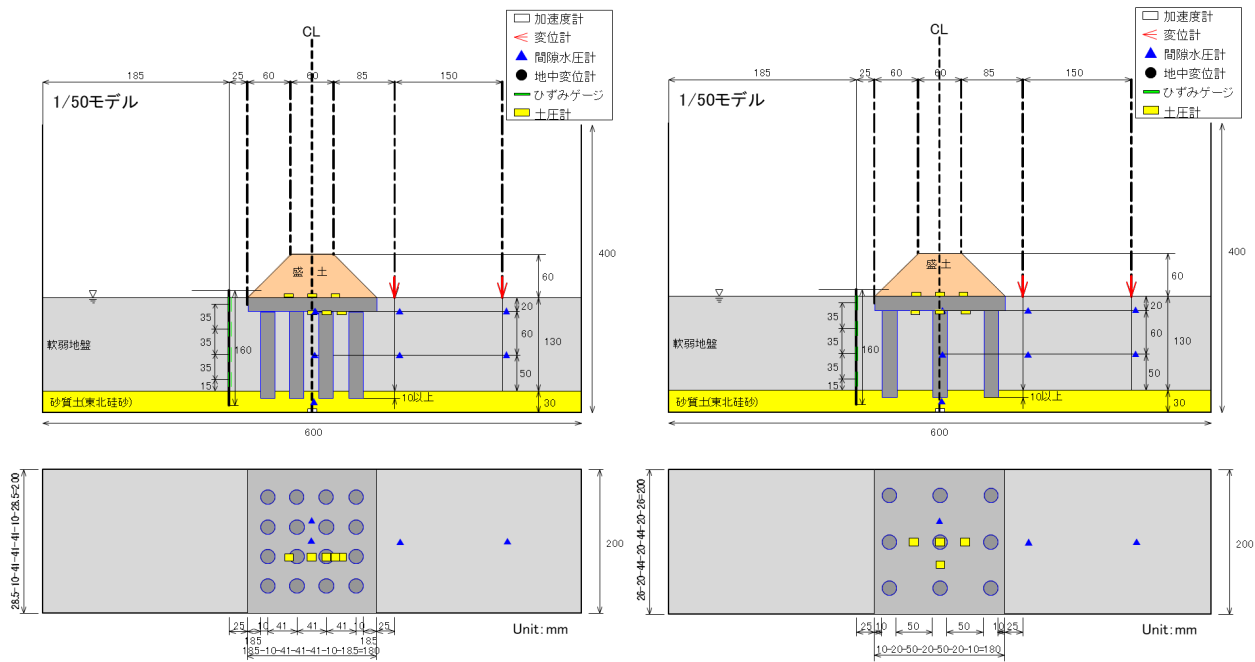


図-1 遠心载荷実験概要図（令和2年度）

せた地盤改良技術では、浅層改良体は盛土等の上部土工構造物の荷重を深層改良体に伝達する役割を有しており、常時においても地震時においても、その機能を保持することが求められる。

そこで、写真-1に示す遠心力载荷試験装置を用いて模型実験を実施し、浅層改良体に生じる損傷モードを確認し、設計法の検討を行った。遠心力载荷試験装置は、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。相似則の関係から通常重力場で縮小模型の実験を行うことが出来ないため、実大スケールで実験を行うと、費用と日数の関係から現実的でない。そのため、土工分野においては、縮小模型に遠心力を载荷した遠心力载荷模型実験が採用されている。今回の実験では模型縮尺を1/50とし、この模型に50Gの遠心力を载荷し、浅層改良体に生じる損傷の確認を行った。

平成30年度に実施した模型実験では、浅層改良体を深層改良杭が押し抜く押し抜きせん断（パンチング）と、深層改良杭間上の浅層改良体に作用するたわみ（曲げ）により起こる曲げ破壊が確認されている。実験で使用した諸元に対して、許容曲げ応力を一軸圧縮強度の比として求めた。平成30年度までに実施した研究成果では、許容曲げ応力は一軸圧縮強度の0.268倍であったことから、設計時に計算で求められる曲げ強度と比較して照査した。許容曲げ応力を一軸圧縮強度の0.268倍とした場合、押し抜きせん断、曲げ照査で照査する

と計算上では安全率が1.0を上回るが、実験では損傷が発生したことがあった。そこで、実験時に実施した割裂引張強度試験結果から許容曲げ応力を一軸圧縮強度の0.23倍として再計算すると、設計照査と実験結果が概ね一致した。そこで、設計照査方法の再確認を行うため、令和2年度に図-1に示す遠心模型実験を行い、設計照査方法の妥当性を再検討した。実験準備として、目標設計強度を満足するための配合試験を行い、割裂引張強度試験と一軸圧縮試験を行い、それぞれの強度比である0.21を用いて許容曲げ応力を計算し、各CASEの浅層改良体強度を決定した。盛土材料には2mm篩通した江戸崎砂（山砂）を用いた。江戸崎砂の土質工学的特性は、細粒分含有率 $F_c=15.9\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.693g/cm^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=14.1\%$ である。盛土は、木箱内に最適含水比付近の江戸崎砂を、締固め度 $D_c=90\%$ に締固めて作製した。作製後凍結させてから実験土槽内に運搬・静置し、一晚解凍させてから遠心力载荷実験に供した。一方軟弱地盤材料には、粉末のカオリクレイ（ASP-400）を用いたり。カオリンは、液性限界の1.5倍（含水比77.4%）で加水攪拌によりスラリー状にし、土槽に3層に分けて投入した。軟弱地盤は、遠心力場50Gで自重圧密させて作製した。支持層には、東北珪砂5号を用いて相対密度 $D_r=90\%$ 相当に締固めて作製した。飽和は水頭差により行い、間隙水には水道水を用いた。

セメント改良土には、カオリンに早強ポルトランド

セメントを加えて用いた。深層改良杭や浅層改良体は、注入ガンでスラリー状改良土材料を押し出して作製した。カオリンへの加水量は軟弱地盤と同じである。作製条件は湿潤養生日数 4 日、水セメント比 W/C=1.0、養生温度 20℃とした。目標一軸圧縮強度 q_u は、表-1 の照査結果から 100~1000kN/m² の範囲に設定し、推定される浅層改良体破壊形態に合わせて添加量を 7~45%の間に調整した。なお今回実験で深層改良杭の目標強度については、破壊しない十分な強度を有する 1000kN/m² になるようにした。遠心力載荷実験当日の改良体強度を確認するため、一軸圧縮試験と割裂引張試験をそれぞれ 3 供試体ずつ実施した。

軟弱地盤作製時は、毎分 1.0G で遠心力を 50G まで載荷させた。所定の遠心加速度に達した後約 7 時間を目安に自重圧密させた。この時の圧密状況は、沈下計により \sqrt{t} 時間軸上で圧密度 90%を確認している。載荷実験時には、50G に達してから地盤変形がほぼ定常状態となる 1 時間ほど圧密させた。載荷中は、地表面沈下計の他地盤内に設置した土圧計や間隙水圧計によ

り圧密状況をリアルタイムでモニターした。

2.1.1 実験結果

実施した遠心力載荷模型実験の結果を、表-1 に示す。同表には実験時に行った改良体の一軸圧縮強度の他、地盤変状図や照査結果について整理した。

実験結果の照査は、ALiCC 工法マニュアル(土木研究所)¹⁾²⁾に基づき行った。改良体の設計基準強度 q_{uckse} 等の入力項目には、実験値をそのまま用いた。各地盤の土質工学的特性は、過去の実験や土質試験結果を基に設定したものである。また曲げ応力度、せん断力応力度、支持力安全率は、それぞれ 1.0 とした。その他許容曲げ応力度係数 q_t/q_u は、割裂引張試験結果の平均値から算出した 0.214 を用いた。

曲げ安全率が 0.99 のケース 1 には、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、深層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。

押し抜きせん断 (パンチング)、曲げとも照査を満足

表-1 遠心力載荷模型実験結果 (令和 2 年度実験)


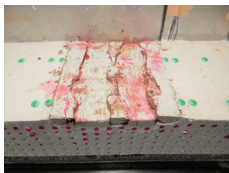

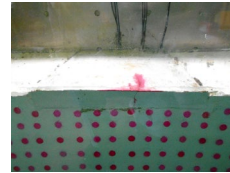
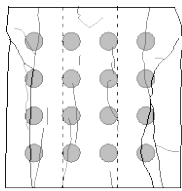
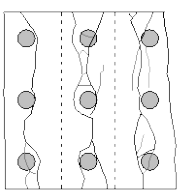
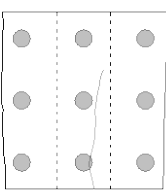
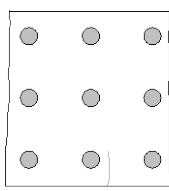
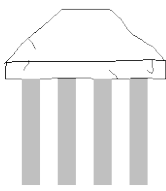
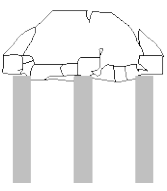
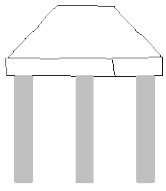
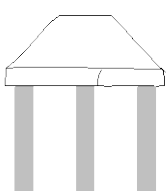
実験ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
実物換算改良体間隔 (m)	2.1	3.5	3.5	3.5
深層改良杭平面改良率	18.7%	6.4%	6.4%	6.4%
浅層改良体強度 q_u (kN/m ²)	85	191	679	947
深層改良杭強度 q_u (kN/m ²)	931	892	827	988
浅層改良体変状 (写真記録)				
浅層改良体変状 (平面)				
浅層改良体変状 (正面)				

表-2 遠心力载荷模型実験結果（令和2年度実験）

	浅層改良盤の一軸圧縮強度	浅層改良盤の許容曲げ強度	押し抜きせん断に対する安全率	曲げ破壊に対する安全率	実験結果
ケース1	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	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	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	947kN/m ²	227.3kN/m ² * (202.7kN/m ²)**	3.62	1.12* (1.00)**	損傷なし

*：浅層改良盤の許容曲げ強度を0.24×一軸圧縮強度として算出

**：浅層改良盤の許容曲げ強度を0.214×一軸圧縮強度として算出
(強度比0.214は、割裂引張試験結果の平均値から算出)

していないケース2では、浅層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。

浅層改良体強度が比較的大きなケース3では、曲げ安全率が1.0を下回るものの、軽微なクラックが発生しているだけで、改良体全体的には段差もなく健全な状態であった。つまりパンチング及び曲げに対する両照査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こと、浅層改良体強度が一般的な仕様である600kN/m²程度より大きいと曲げ破壊は軽微なもので、盛土や改良体の変状についても小さいことが分かった^{4),5)}。

浅層改良体強度が一般的な強度より強く、浅層改良盤の曲げ破壊の照査も満足するケース4では、小さなクラックは発生したが、浅層改良盤全域に至る損傷は発生しなかった。曲げ照査においても安全率が1.0であり、盛土や改良体にほとんど変状は確認されなかった。

2.2 高盛土に対する検証

令和2年度に実施した模型実験では盛土高さ3.0mに相当する遠心力载荷実験で設計照査法の妥当性について検証した。しかし、盛土高さが高いほど浅層改良体に作用する荷重が増加するので、令和3年度には図-2に示した盛土高さを8.0mとした遠心力载荷模型実

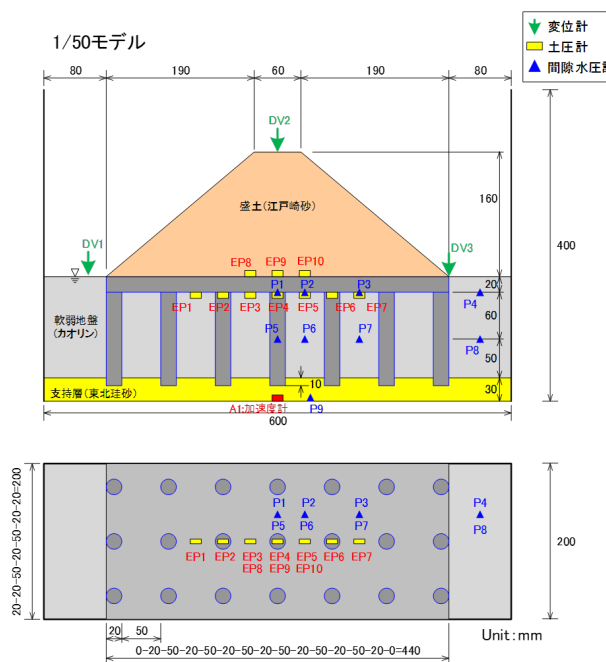


図-2 遠心载荷実験概要図（令和3年度）

験を実施した。実験に使用した材料は令和2年度に使用したのと同じ材料を使用した。ただし、盛土高さが高くなったため、盛土の安定性について円弧すべりによる検討を行った。その結果、盛土の締固め度Dcを令和2年度と同様に90%とすると安全率Fsがギリギリ1.0を超える程度で、実験中に盛土がすべり破壊する可能性があるため、締固め度Dcを95%に変更した。

2.2.1 実験結果

実施した遠心力载荷模型実験の結果を、表-3 に示す。同表には実験時に行った浅層改良体の一軸圧縮強度、割裂引張強度、深層改良杭の一軸圧縮強度の他、地盤変状図や照査結果について整理した。令和3年度のケー

ス1では、事前配合試験で確認したセメント添加量と一軸圧縮強度の予測式から外れる結果になり、実験時の一軸圧縮強度が目標とする強度を下回ってしまった。そのため、実験を進めながら事前配合試験時と実験時の強度差について検討を行ったが、ケース3では損傷

表-3 遠心力载荷模型実験結果 (R3 年度実験)

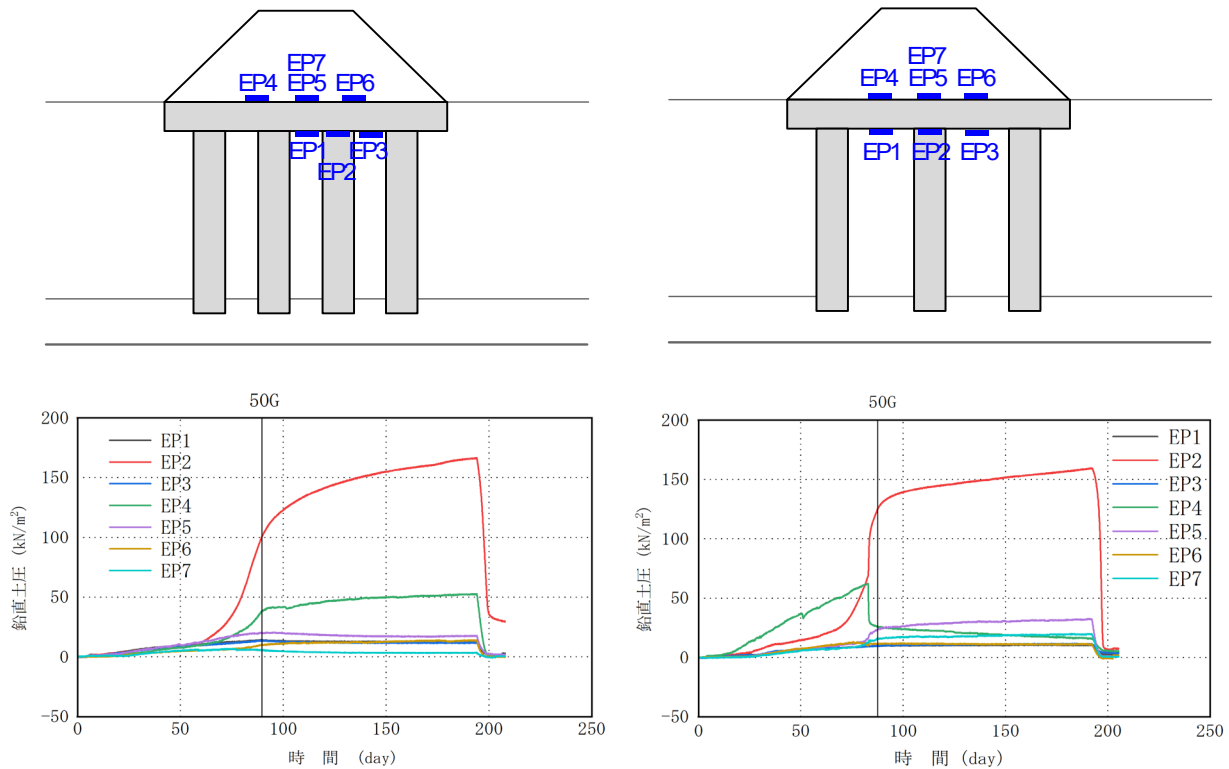
実験ケース	本実験ケース1	本実験ケース2	本実験ケース3	本実験ケース4
浅層改良体 改良強度 q_u (kN/m ²)	229.5	859.8	1269.7	2006.7
浅層改良体 割裂引張強度 q_t (kN/m ²)	50.5	222.0	191.8	379.0
深層改良杭 改良強度 q_u (kN/m ²)	1809.8	1614.0	1873.2	2070.3
仕舞書による 想定パターン	曲げ破壊/パンチング	曲げ破壊	損傷なし	損傷なし
破壊形態	曲げ破壊/パンチング	曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊
クラック 発生状況 (写真)				
クラック 発生状況 (スケッチ)				
備考	・盛土載荷中にクラックが発生した(目視)。 ・杭間のクラックを曲げ破壊、杭頭の破壊状況からパンチングを確認した。	・盛土載荷中にクラックが発生した(目視)。 ・盛土載荷中にクラック等の破壊が生じたと考えられる間隙水圧・土圧の変動を確認した。 ・杭間に生じたクラックから曲げ破壊と判断した。	・盛土載荷中にクラックが発生した(目視)。 ・盛土載荷中にクラック等の破壊が生じたと考えられる土圧の変動を確認した。 ・杭間に生じたクラックから曲げ破壊と判断した。	・盛土載荷中にクラックが発生した(目視)。 ・盛土載荷中にクラック等の破壊が生じたと考えられる間隙水圧・土圧の変動を確認した。 ・杭間に生じたクラックから曲げ破壊と判断した。

表-4

	浅層改良盤の 一軸圧縮強度	浅層改良盤の 許容曲げ強度	押し抜きせん断 に対する安全率	曲げ破壊に 対する安全率	実験結果
ケース1	229.5kN/m ²	50.5kN/m ² * (48.2kN/m ²)**	0.69	0.31* (0.30)**	曲げ破壊 パンチング
ケース2	859.8kN/m ²	222.0kN/m ² * (180.6kN/m ²)**	2.60	0.95* (0.76)**	曲げ破壊
ケース3	1,269.7kN/m ²	191.8kN/m ² * (249.5kN/m ²)**	3.84	0.76* (1.07)**	曲げ破壊
ケース4	2006.7kN/m ²	379.0kN/m ² * (421.4kN/m ²)**	6.06	1.46* (1.62)**	曲げ破壊

* : 許容曲げ強度として割裂引張強度試験結果を採用

** : 浅層改良盤の許容曲げ強度を $0.21 \times$ 一軸圧縮強度として算出
(強度比 0.21 は、過年度の割裂引張試験結果から算出)



(1) ケース 1(改良率 18.7%)

(2) ケース 3(改良率 6.4%)

図-3 遠心載荷実験による計測土圧 (令和 2 年度)

が発生しない強度設定としていたが、実験時の強度が低くなったことで曲げ破壊が生じた。そのため、ケース 4 では強度設定を更に高く変更して実験を行った。目標強度に達しない原因を検討として、練り混ぜ水の違いの影響、養生中の温度変化について検討したが、いずれも強度発現に大きな影響を及ぼすものではなかった。確認はとれていないが、練り混ぜ時間を一定にしていたので、事前配合試験時と実験時の練り混ぜ体積(量)の違いにより、同じセメント添加率であっても攪拌にバラつきが発生したと考えられる。

曲げ破壊に対する照査では、浅層改良盤の許容曲げ強度に割裂引張強度を用いると実験結果を概ね再現できることが分かった。

3. 深層改良体の設計法に関する検討

低改良率深層混合処理工法の設計法として ALiCC 工法があるが、ALiCC 工法マニュアルの適用範囲として改良体間隔は 2.5m 以下で、2.5~3.25m の場合には試験工事等で検討することとなっている。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場合があるためである。しかし、今回のように浅層改良を併用する場合には、盛土荷重は浅層改良盤を介

して、そのほとんどを深層改良体に伝達することが可能と考えられる。改良体間隔が広がると浅層改良盤にたわみが発生し、その場合には深層改良体間の未改良地盤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 2.5m 以上の改良体間隔は適用外となっているが、浅層改良盤を併用した場合に適用が可能か検討を行った。

令和 2 年度に実施した遠心力載荷模型実験で、深層改良体直上で浅層改良盤からの応力を土圧として計測したものを図-3 に示す。ケース 1 は改良率 18.7%、改良体間隔 2.1m と ALiCC 工法マニュアルの適用範囲内である。これに対してケース 3 は改良率 6.4%、改良体間隔 3.5m と ALiCC 工法マニュアルの適用範囲外となっている。同図に示した通り、深層改良体直上の土圧はケース 1、ケース 3 共に約 150kN/m²であり、大差がない結果となった。ケース 1、ケース 3 の計算上の深層改良体に作用する応力は、ケース 1 で 256kN/m²、ケース 3 で 319kN/m²であり、ケース 3 の場合には実験値が計算値の 1/2 以下となった。また、実験時に実測した深層改良体の一軸圧縮強度はケース 1 で 931kN/m²、ケース 3 で 827kN/m²と深層改良体に損傷が発生しないよう、安全率を高く設定したため、実験

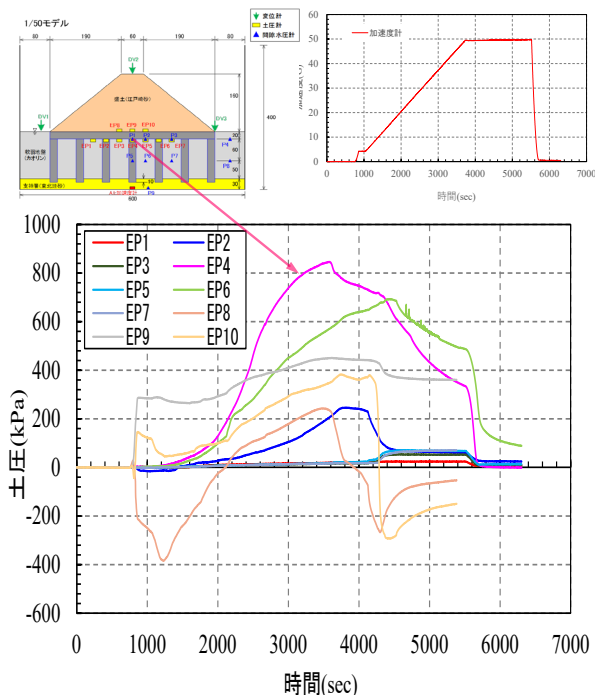


図4 遠心载荷実験による計測土圧（ケース2）

後に解体した模型では深層改良体の損傷は確認されなかった。

図4には盛土高さを8mとした令和3年度の実験結果を示す。遠心加速度が50Gに達する直前の3,500秒付近で浅層改良盤に曲げ破壊が発生し、深層改良体直上の応力(EP4)が低下し始めた。これは、浅層改良盤の曲げ破壊により、盛土荷重が深層改良体に伝達されていないことを示しているが、他の土圧計測箇所では土圧の上昇は確認されていないため、盛土荷重がどのように再分配されたかは確認できなかった。また、ALiCC工法マニュアルに基づいて深層改良体に作用する応力を計算すると約1,640kN/m²となった。図4に示した通り、実験で計測された最大応力は約850kN/m²であり、令和2年度に実施したケース3同様に、実測値は計算値の1/2程度となった。実験では遠心加速度が50Gに達する直前から土圧の低下が確認されているが、土圧の低下は50Gに達する直前であることから概ね最大土圧を示していると考えられる。また、実験時に実測した深層改良体の一軸圧縮強度は1,614kN/m²であった。計算値を若干下回っているものの、実測値の2倍近い強度であったため、実験後に解体した模型では深層改良体に損傷は確認できなかった。

以上から、ALiCC工法マニュアルに示されている適用範囲を超えた今回の実験ケースであっても、同マニュアルに示されている設計手法を用いることの可能性を見出した。

3.1 深層改良体の設計合理化に関する検討

深層改良体の設計法に関する検討で、ALiCC工法マニュアルの適用範囲外となっている改良体間隔2.5m以上の場合においても、浅層改良盤を併用した場合であれば同マニュアルに基づく設計の可能性を見出した。しかし、令和2年度に実施した盛土高さ3.0m、改良率6.4%、改良体間隔3.5mの場合、深層改良体に作用する応力に対する安全率を1.2とすれば、ケース3の場合に必要な計算上の設計基準強度は384kN/m²で、一般的に行われている深層改良工法の設計基準強度と比較しても、格段に高い強度は言えない。しかし、令和3年度に実施した盛土高さ8.0m、改良率6.4%、改良体間隔3.5mの場合、深層改良体に必要される計算上の設計基準強度は1,968kN/m²と、あまり現実的でない強度が必要となる。施工にあたっては、地盤の不確実性から、事前配合設計で求められた配合量を上回る量の改良剤を用いるのが一般的であり、目標一軸圧縮強度が設計基準強度の2~3倍になる。この場合、令和2年度に実施した盛土高さ3.0m、改良率6.4%、改良体間隔3.5mの場合でも目標一軸圧縮が700~1,000kN/m²となり、令和3年度に実施した盛土高さ8.0m、改良率6.4%、改良体間隔3.5mの場合は目標一軸圧縮が3,000~4,000kN/m²となってしまう。このような高強度の深層改良にあたっては混合するセメント量の増加に伴うコスト増や均質攪拌混合のための攪拌速度の低下等、超低改良率化によるメリットよりデメリットの方が多くなる可能性がある。なお、グラベルセメントコンパクションパイル工法(GCCP工法)は高強度の深層改良体の構築が可能であり、浅層改良併用型に適した工法であると考えられる。

4. 改良体の施工法の検討

浅層・深層併用型地盤改良に関する施工上の課題について、施工業者に対してヒアリング調査を実施した。ALiCC工法では深層改良体間の不陸段差解消を目的とした浅層改良併用型が多く施工されている。多くの場合、駐車場の沈下対策等で盛土等の上載荷重が小さい場合が多い。そのため、浅層改良盤厚さは1.0mの場合が多く、浅層改良盤厚さは1.0m以下の場合にはバックホウによる攪拌混合や自走式土質改良機によることが多い。浅層改良盤厚さが厚くなると、置換え工法やトレンチャー式攪拌機による改良が主流となることが分かった。

浅層・深層併用型地盤改良では深層改良体の頭部と浅層改良盤底部が均質な高さで一応に接していること

が求められる。深層改良体と浅層改良盤が均質な高さで一応に接していないと、深層改良体間隔が2倍、3倍に広がったことになり、設計時の条件が満足されないことになる。また、確実に深層改良体の頭部まで改良しようと浅層改良を深くすると、深層改良体に浅層改良機が当たり、深層改良体に曲げ応力を作用させたり、深層改良体頭部を損傷させたりする可能性がある。

また、攪拌にバラつきがあると浅層改良盤の強度にもバラつくことになる。改良対象地盤にも不確実性が存在しており、土質構成のバラつき、含水比のバラつきの存在があげられる。

このように抽出された課題を解決するためには、浅層改良における確実な攪拌混合により強度のバラつきを低くすることが求められる。確実な攪拌混合と強度のバラつきを小さくする工法としては、プラント型攪拌と転圧機による締固めを行う置換え工法があげられる。この場合、浅層改良の工事が増加するため、深層改良の工事費低減効果分を超える可能性がある。そのため、トレンチャー式攪拌機、バックホウによる攪拌混合、自走式土質改良機等による均質な改良施工について検討が必要となる。

5. マネジメントの概念を盛り込んだ設計・施工マニュアルの策定

達成目標①浅層改良体の設計法に関する検討、達成目標②深層改良体の設計法に関する検討、達成目標③改良体の施工法の検討を踏まえ、設計・施工マニュアルの検討を行った。低改良率深層混合処理工法であるALiCC工法は改良体配列を検討するための設計法であり、施工法については各深層混合処理工法に委ねている。そこで、達成目標毎にマニュアルで考慮すべき設計や施工の留意点を整理した。

達成目標①で検討した浅層改良体の設計法については、ALiCC工法マニュアルに基づく浅層改良体の照査方法を用いることの可能性を確認した。浅層改良体の照査項目としては、押し抜きせん断（パンチング）、曲げ照査の2項目である。

押し抜きせん断（パンチング）の照査については、ALiCC工法マニュアルに基づく方法で照査できることが実験で確認できた。

浅層改良体の曲げ強度については、過去の研究論文^{7),8),9)}で報告されている一軸圧縮強度から推定する方法より、コンクリートの割裂引張強度試験（JISA1113）により求めた割裂引張強度を用いるのが良いことが分かった。改良対象土の影響（強度発現率等）も含めて

強度評価でき、比較的容易に実施できる試験法でもある。曲げ照査に関しては、マニュアルに示している地盤係数法により浅層改良体を弾性床上梁として照査した。遠心力載荷模型実験では、弾性床上梁とした深層改良体間中心部に発生する曲げ応力によるクラックが確認されている。しかし実験ではこれに加えて、深層改良体直上部でもクラックが発生している。梁モデルで考えた場合、単純梁の曲げモーメントと片持ち梁の曲げモーメントは同じになるが、深層改良体上部では曲げモーメントだけではなく、押し抜きせん断応力も同時に作用しているため弱部となっている可能性がある。従って、曲げ応力に対する照査方法としては、有限要素法による解析等の検討も必要と考えられる。地盤係数法により簡易的に照査する場合には、安全係数を高くする等の考慮が必要と考えられる。

達成目標②で検討した深層改良体の設計法については、ALiCC工法マニュアル適用外である深層改良体間隔であっても、ALiCC工法マニュアルに基づく照査方法で設計が可能であることを確認した。しかし、深層改良体上の盛土荷重が大きい場合には、深層改良体1本あたりが分担する荷重が大きくなり、設計基準強度が1,000kN/m²以上になる場合もあり、このような場合には低改良率化による施工コストダウンを、配合セメント量の増加等による施工コストアップが上回る可能性がある。また、セメント配合量の増加により六価クロム溶出の可能性も高まることに注意する必要がある。

達成目標③で検討した改良体の施工法については、浅層改良盤の施工法について検討を行った。深層改良体の施工法については浅層改良併用に伴って注意すべき事項が変わるものではないため検討は行わなかった。ただし、各種施工機械のトラフィカビリティ確保を目的とする浅層改良を深層改良に先立って実施するのかが、深層改良後に浅層改良を実施するのかがよって若干異なる場合がある。浅層改良を先行する場合には、浅層改良盤を貫通する深層改良体を構築する必要がある。この場合には浅層改良体を貫通させることが出来る深層改良工法を選択する必要がある。また、排土処理が適切に行われない場合には、排土が浅層改良盤裏側（下側）に回り込み、浅層改良盤を持ち上げることになる等の留意事項が考えられる。深層改良を先行する場合には、深層改良体の頭部と浅層改良盤底部が均質な高さで様に接していることが求められ、深層改良体に浅層改良機が当たり、深層改良体に曲げ応力を作用させたり、深層改良体頭部を損傷させたりすることがないような施工上の注意事項があげられる。

6. まとめ

本研究で得られた成果は下記のとおりである。

- 1) 浅層改良体の設計法に関する検討を行い、パンチング及び曲げに対する両照査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ことが明らかになった。
- 2) 浅層改良体の一軸圧縮強度が一般的な仕様である 600 kN/m^2 程度より大きいと曲げ破壊は軽微なもので、盛土や改良体の変状についても小さいことが分かった。
- 3) 浅層改良盤の許容曲げ強度に割裂引張強度を用いると実験結果を概ね再現できることが分かった。
- 4) 深層改良体の設計法に関する検討を行い、ALiCC工法マニュアルに示されている適用範囲を超えた今回の実験ケースであっても、同マニュアルに示されている設計手法を用いることの可能性を見出した。
- 5) 令和3年度に実施した盛土高さ8.0m、改良率6.4%、改良体間隔3.5mの場合は目標一軸圧縮が3,000～4,000 kN/m^2 となってしまうため、超低改良率化によるメリットよりデメリットの方が多くなる可能性がある。
- 6) 改良体の施工法に関する検討を行い、浅層・深層併用型地盤改良では深層改良体の頭部と浅層改良盤底部が均質な高さで一様に接していることが求められることを確認した。
- 7) 確実に深層改良体の頭部まで改良しようと浅層改良を深くすると、深層改良体に浅層改良機が当たり、深層改良体に曲げ応力を作用させたり、深層改良体頭部を損傷させたりする可能性がある。
- 8) マネジメントの概念を盛り込んだ設計・施工案の策定について、確実な攪拌混合と強度のバラつきを小さくする工法としては、プラント型攪拌と転圧機による締固めを行う置換え工法があげられる。しかし、この場合には浅層改良の工事が増加するため、深層改良の工事費低減分を超える可能性がある。
- 9) 浅層改良盤を貫通する深層改良体を構築する必要がある。この場合には浅層改良体を貫通させることが出来る工法を選択する必要がある。
- 10) 排土処理が適切に行われなかった場合には、排土が浅層改良盤裏側（下側）に回り込み、浅層改良盤を持ち上げることになる等の留意事項が考えられる。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：地盤改良のための ALiCC 工法マニュアル、91p.、2007年1月
- 2) ALiCC 工法研究会：ALiCC 工法マニュアル、92p.、2015年4月
- 3) 近藤益央、宮武裕昭：浅層改良盤の変状確認遠心力模型実験、土木技術資料、Vol.61、pp.20-26、2019年8月
- 4) 近藤益央、間淵利明、村田健司：浅層改良と深層改良を併用した地盤改良について その1（併用型地盤改良概念と実験概要）、第34回日本道路会議、No.4044、2021年11月
- 5) 村田健司、近藤益央、間淵利明：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
- 6) 近藤益央、宮武裕昭：浅層改良盤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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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

RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUE COMBINED WITH SHALLOW LAYER IMPROVEMENT AND DEEP LAYER IMPROVEMENT

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Construction Technology Research Team,
Geology and Geotechnical Engineering
Research Group

Author: MABUCHI Toshiaki
KONDOH Masuo

Cement improvement is often used as a measure against soft ground. In the deep mixing method, the strength of the improved body is increased by improving the stirring performance, and the cost is reduced by lowering the improvement rate. If the improvement rate is set too low, large uneven settlement may occur in earthwork structures such as embankments. Therefore, it has been proposed to combine the deep layer improvement method and the shallow layer improvement method, or to combine the deep layer improvement method and the geotextile method, but there is no method for confirming safety.

In this research, we examined the concept of the basic design method for the ground improvement technique combined with the deep layer improvement method and the shallow layer improvement method. Then, it proposes a construction method necessary to satisfy the performance required by the design.

Keywords: Soft ground, Deep layer improvement method, Shallow layer improvement method, Design, Construction