

軟弱地盤上の腹付け盛土に対する 安定性の高い対策工の提案

工藤 敦弘* 渡辺 健治** 島田 貴文**
佐藤 武斗** 森川 嘉之*** 高橋 英紀#

Proposal of High-stability Countermeasures Against Construction of Widening of Embankments on Soft Ground

Atsuhiko KUDO Kenji WATANABE Takafumi SHIMADA
Taketo SATO Yoshiyuki MORIKAWA Hidenori TAKAHASHI

The improvement rate of the countermeasures adopted in constructing the second track on the embankment on soft ground is determined empirically due to unknown factors such as deformation properties of soft ground. In this study, centrifuge model tests were performed to grasp deformation properties of soft ground for such construction case mentioned above and to propose a high-stability countermeasure. Based on the test result, we have proposed a new countermeasure having high horizontal support performance, which combine the deep mixing wall type ground improvement and cement-mixed gravel. The proposed method having the same improvement rate as deep mixing has been confirmed able to reduce deformation of the embankment and the surrounding ground. Furthermore, we have proposed a design method of the proposed countermeasure and shown that the design method makes possible to determine improvement rate to meet the required performance and the ground condition.

キーワード：軟弱地盤，腹付け盛土，壁式改良，セメント改良礫土スラブ，遠心模型実験

1. はじめに

鉄道では、長期間供用された単線盛土の複線化工事等で腹付け盛土を施工する事例が多い。軟弱地盤上の盛土に対して腹付け盛土を施工する場合、盛土全体の安定性の低下のほか、軟弱地盤の圧密沈下やせん断変形に伴う既設盛土の変形、さらには腹付け盛土前面地盤の隆起等が懸念される。また、腹付け盛土と既設盛土の境界は、水みち等の弱点になり易く、地震時には腹付け盛土が弱点箇所として被災する事例も多い。

このような変状を抑制するために地盤改良などの軟弱地盤対策を施す必要がある。この場合、鉄道盛土として供用されている既設盛土下の軟弱地盤に対策工を施工することは容易ではないため、対策は腹付け盛土施工範囲下に限定される。

既往の対策事例としては、腹付け盛土を施工する部分（既設盛土のり尻部）において、杭形式の地盤改良体を離散的に造成する杭式改良を行うことが多い（図1参照）¹⁾。この場合、地盤改良体は鉛直荷重だけでなく、腹付け盛土による水平荷重を受けるが、このような偏荷重を

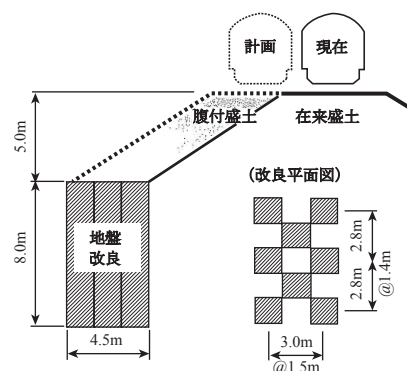


図1 鉄道複線化工事における腹付け盛土施工に伴う地盤改良事例¹⁾

受ける地盤改良体には、全体安定としての滑動変位と改良体のせん断破壊だけでなく、改良体の曲げ破壊や改良体自身の転倒等の破壊モードが複合的に発生する可能性があると考えられているが、それらの挙動や対策工の効果については十分に解明されていない。そのため、実務設計においては対策工（地盤改良）の改良率を定量的に決定することができない問題がある。

そこで本研究では、深層混合処理工法等の固結工法を適用するような軟弱地盤を対象に、模型実験により腹付け盛土を施工した場合の盛土体および軟弱地盤の挙動の評価と既往の対策工の効果を検証した。また、模型実験結果から、合理的な対策工を提案し、設計手法の構築と試設計を実施した。

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
（現 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社）
** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
*** 港湾空港技術研究所 地盤改良研究チーム
港湾空港技術研究所 動土質研究チーム

特集：構造物技術

2. 軟弱地盤上での腹付け盛土施工の影響と既往の対策工効果

模型実験で軟弱地盤や盛土体の変形挙動の評価および対策工の検証を行うためには、軟弱地盤の圧密過程をできる限り実現象と合わせる必要がある。実現象での軟弱地盤の圧密過程は数年～数十年のオーダーで進行するため、本研究では、模型地盤に遠心加速度を作用させて自重を増加させた状態で実験を行う遠心模型実験によって腹付け盛土の施工を模擬した。また、軟弱地盤上の腹付け盛土においては地震時の被害が多かったことを勘案し、L1地震動を想定した加振実験を実施した。ここでは腹付け盛土施工試験についての詳細を示す。加振実験についての詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

2.1 実験条件

2.1.1 実験模型概要

図2に実験模型の概要図を示す。遠心模型実験は最大50G場で実施するため、模型は実際の寸法の1/50で作製している。なお、本研究における各図表には遠心模型実験における模型寸法に合わせて実物換算(50倍)した値を示しており、以降は実物換算値で整理して記す。

軟弱地盤は排水層の上にカオリン粘土で作製した。既設盛土は、鉄道盛土として標準的な高さである6.0m程度を想定し、腹付け盛土は、長年供用されている既設盛土に比して良質で単位体積重量の大きい盛土材料が使用される場合が多いため、それを勘案して既設盛土に対して乾燥単位体積重量が大きい盛土材料を用いた。

既往の対策工として、一般的に用いられている杭式改良と、杭式改良と地山補強材を併用した対策工の対策工効果を検証した。杭式改良は既設盛土のり尻端部から3.0mの範囲に改良率が30%程度となるように杭径1.0mの柱状体を配置(線路直角方向に1.5m間隔で2列、線路方向に1.7m間隔)し、地山補強材は直径250mmの全ネジを水平間隔2.0mで2段(上段:長さ5.0m, 下段:長さ7.5m)配置した。

2.1.2 実験条件

遠心模型実験は、国立研究開発法人 港湾空港技術研究所が所有する遠心模型実験装置 Mark II³⁾で実施した。

遠心模型実験では、遠心载荷を2回に分け、遠心加速度を最大50Gまで段階的に上昇させた。実験手順については、「①遠心場における既設盛土の自重圧密試験(遠心载荷1回目)」により既設盛土下の軟弱地盤の圧密を促進させたあと、一旦重力場(1G場)に戻し、その後「②遠心場における腹付け盛土の施工試験(遠心载荷2回目)」を実施した。なお、図2(b)と図2(c)の既往の対策工を模擬した実験では、①の試験後に重力場(1G場)で対策工を施工した。

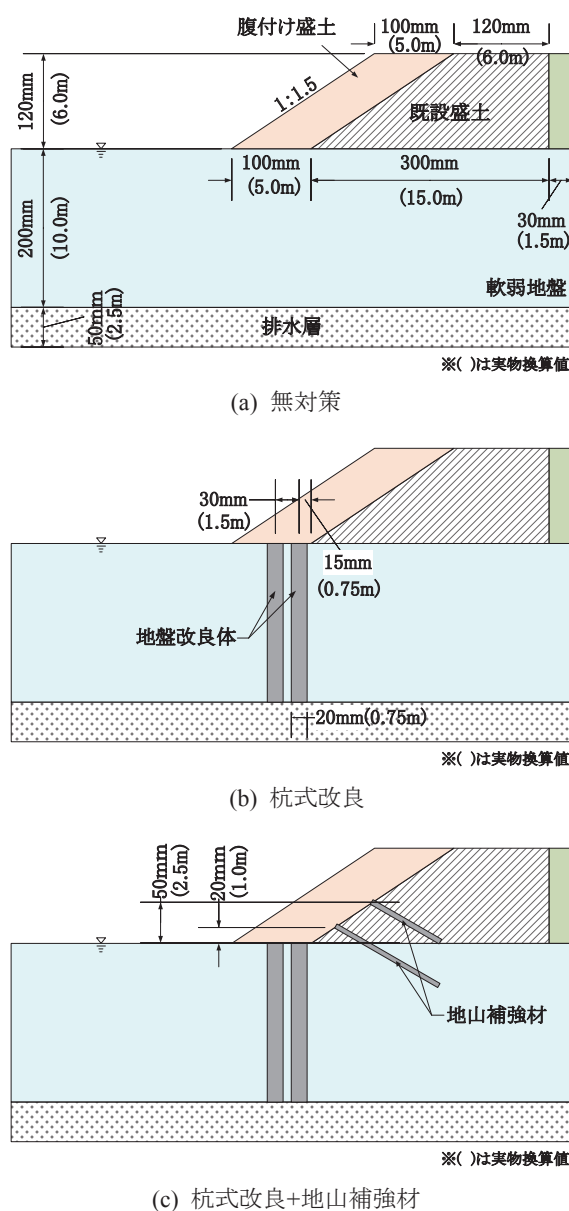


図2 実験模型概要図

計測は、腹付け盛土施工時の変形(即時変形)およびその後の圧密過程で生じる変形(圧密変形)に伴う軟弱地盤中の間隙水圧、既設盛土および地盤の変位、土圧等について行った。また、画像解析によって実験模型内に設置した標点の2次元変位量を計測した。

実験模型および実験条件の詳細は参考文献^{2) 4) 5)}を参照されたい。

2.2 実験結果

2.2.1 腹付け盛土施工による盛土体および軟弱地盤の挙動の検証

図3に腹付け盛土施工時の模型の変形状況を、表1に画像解析により算出した軟弱地盤の代表箇所の変位量を示す。図3から、腹付け盛土を含めた盛土直下の軟弱地

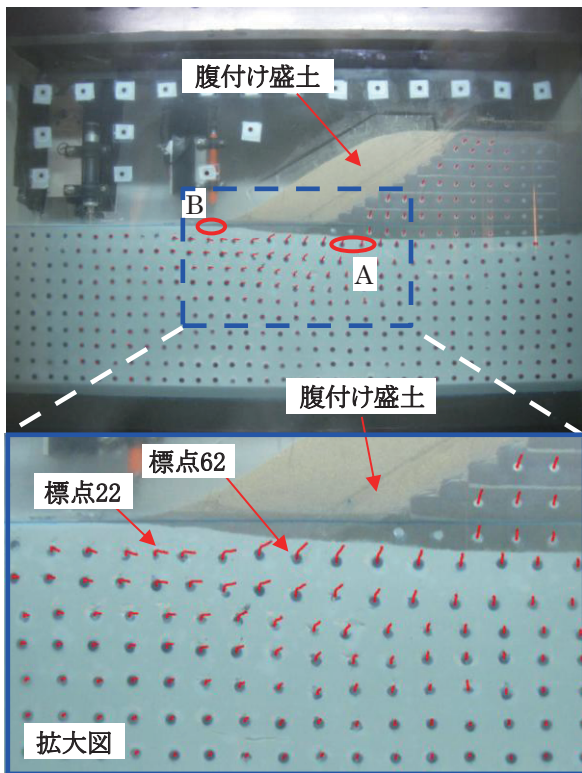


図3 腹付け盛土施工時の変形状況（無対策）

表1 腹付け盛土施工に伴う軟弱地盤の変位量の実寸換算値

a) 腹付け盛土直下（標点62）の変位量（単位：mm）

	即時変形	圧密変形	合計値
水平変位	-238.5	-40.5	-279.0
鉛直変位	230.0	190.0	420.0

b) 腹付け盛土のり尻（標点22）の変位量（単位：mm）

	即時変形	圧密変形	合計値
水平変位	-277.5	-42.0	-319.5
鉛直変位	-71.5	117.0	45.5

*水平変位は右向きが正、鉛直変位は下向きが正

盤は、腹付け盛土の施工によって弓なり状に変形し、特に上載荷重が大きい既設盛土のり尻（図3中のA）付近で変位量が大きく、腹付け盛土前面の軟弱地盤表層部（図3中のB）においては135mm程度の隆起が確認された。

図3および表1 a) から、腹付け盛土直下の軟弱地盤（図3中の標点62）は、腹付け盛土施工に伴う即時変形で鉛直方向に230mm程度沈下し、水平方向に238.5mm程度押し出されるような変位が確認された。また、その後の圧密変形での変位量を加算した累積変位量では、鉛直方向に420.0mm程度沈下し、水平方向に279.0mm程度押し出されている結果が得られた。これらの結果から、軟

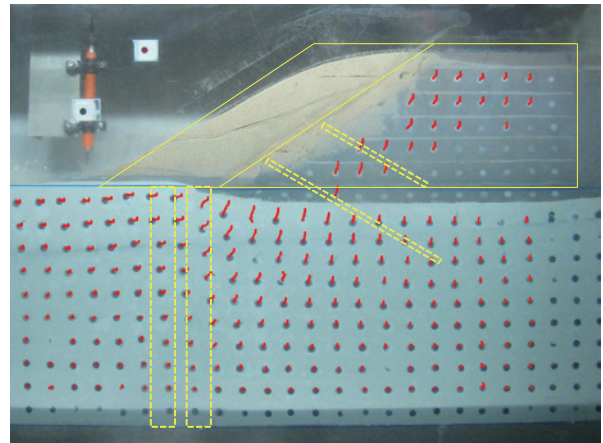


図4 腹付け盛土による圧密完了後の模型の変形状況（杭式改良+地山補強材）

弱地盤上で腹付け盛土を施工する際の対策工には、腹付け盛土荷重による鉛直変位を抑制するだけでなく、水平変位に対しても抑制する必要があることが確認された。

また、腹付け盛土のり尻付近の軟弱地盤（図3中の標点22）においても、腹付け盛土直下の軟弱地盤と同様の水平変位を示すことを確認した（表1 b) 参照）が、鉛直方向の変位については即時変形で71.5mm程度隆起する現象が見られた。その後の圧密変形における鉛直方向の変位を加算した累積変位量が45.5mm程度の沈下であり、腹付け盛土直下の標点62より小さいことから、鉛直方向の変形を抑制することを目的とした軟弱地盤対策を行う場合には、できるだけ既設盛土のり尻に近い領域で行う方が効果的であることがわかった。

その他、既設盛土天端においては約50.0mm程度沈下し、その後の圧密変形でさらに約65.0mm程度沈下していることから、腹付け盛土の施工に伴い既設盛土が連れ込み沈下することが確認された。

2.2.2 既往の対策工による対策効果の検証

図4に既往の対策工として実施した杭式改良と地山補強材を併用した工法における腹付け盛土による圧密完了後の模型の変形状況を示す。

無対策の場合と既往の対策工を施工した場合での変形状況を比較してみると、地山補強材により既設盛土部の変形量を若干低減できているものの、顕著な効果は確認できなかった。また、杭式改良と地山補強材を併用した実験における実験終了後の模型解体の様子を図5に示す。図から明らかなように地盤改良体が傾斜している。これは、離散的に配置された地盤改良体に対して腹付け盛土のような偏荷重が作用する場合、軟弱地盤の側方移動に対する効果が限定的であったためである。

以上のことから、腹付け盛土施工に伴う周辺地盤の変形を低減するためには、軟弱地盤の側方移動に対する高い抵抗力が必要な事がわかる。

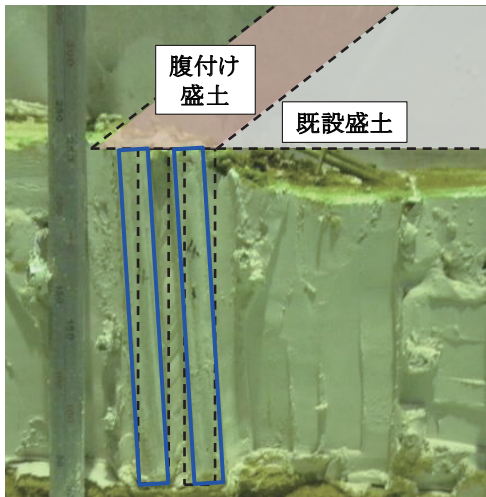


図5 実験後の地盤改良体の変位状況
(模型解体時、杭式改良+地山補強材)

3. 壁式改良とセメント改良礫土スラブを併用した提案工法による対策効果の検証

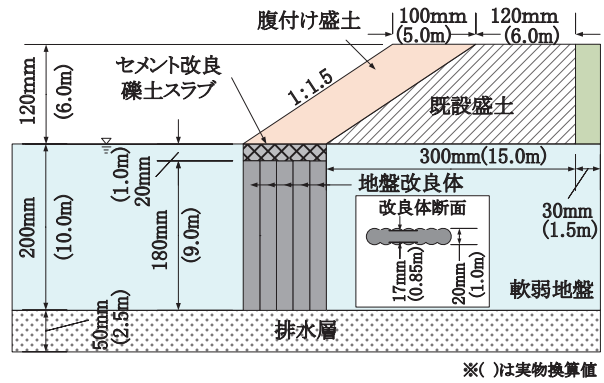
3.1 提案工法の概要および実験条件

既往の対策工の実験結果から、腹付け盛土施工に伴う地盤の変形挙動は水平方向に卓越していること、離散的に配置された杭式改良は水平方向の支持性能が限定的であることが確認された。そのため、杭式改良と同等の改良率で水平方向の支持性能を向上させるためには、離散的な配置ではなく、地盤改良体の曲げ抵抗を高めることが可能な改良形式が必要であることがわかった。

水平方向の支持性能に優れている対策工として、杭形式の地盤改良体を、互いにラップまたは接するように配置し、対策範囲全面を改良するブロック式改良等が挙げられるが、これらの工法を線路延長に渡って施工する場合、工費が高くなる場合が多く現実的ではない。そこで、本研究では図6に示すように、地盤改良体を柱列状に配置して壁形式とした壁式改良を用いることで水平方向の支持性能を高めることとした。

しかしながら、壁式改良の改良率を杭式改良と同等にした場合、地盤改良体の間隔が杭式改良に比べて広くなるため、地盤改良体の間に施工される腹付け盛土が線路延長に渡って不同沈下する可能性がある。そこで、粒度調整碎石をセメント安定処理した材料と面状補強材（ジオテキスタイル）で構成されるセメント改良礫土スラブを地盤改良体上に設置することで、地盤改良体間の腹付け盛土の不同沈下を抑制することとした。セメント改良礫土スラブは軟弱地盤や液状化地盤上での盛土構築に採用されており、詳細は参考文献⁶⁾を参照されたい。

軟弱地盤、既設盛土および腹付け盛土の作製方法や盛土材料、実験条件は無対策や既往の対策工の実験と同一である。壁式改良は、直方体の改良体（幅0.85m、奥行



※()は実物換算値

図6 提案工法の概要図

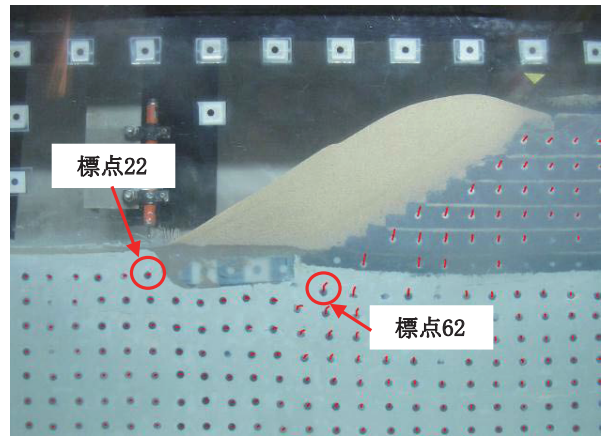


図7 腹付け盛土施工時の変形状況（提案工法）

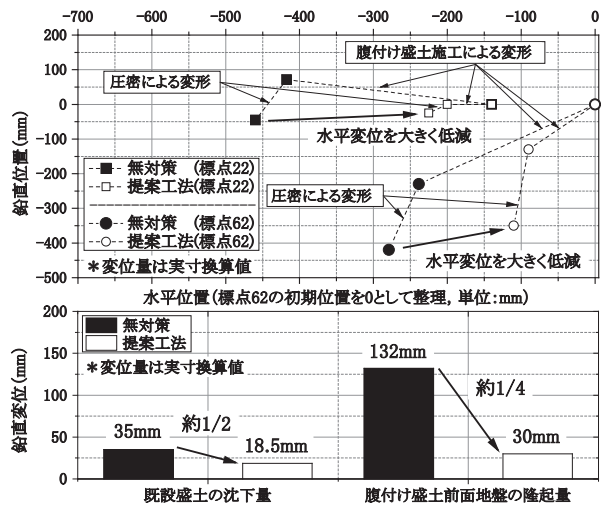


図8 腹付け盛土施工に伴う軟弱地盤の変位量の実寸換算値（上段：標点，下段：変位計）

き3.3m間隔)を用い、腹付け盛土施工範囲(5.0m)における改良率が従来工法(杭式改良)の一般的な改良率である30%と同等以下になるように設置した。また、セメント改良礫土スラブは実施工を勘案し、2mmふるい通過試料にセメントを添加したセメント改良礫土にポリエステル系の面状補強材模型を2枚敷設して作製した。

3.2 提案工法による対策工効果の検証

図7に腹付け盛土施工時の模型の変形状況を、図8に既設盛土天端の変位量と図7内に示す標点の2次元変位量を画像解析から算出した結果と、既設盛土天端の沈下量および腹付け盛土前面地盤の隆起量を変位計で計測した結果を示す。

標点の変位量に着目すると、腹付け盛土下の標点62では、無対策時と比較すると提案工法では鉛直変位の低減効果は限定的であるものの、水平変位は約1/2に低減された。それに対して腹付け盛土前面地盤の標点22では、無対策と比較すると水平変位が約1/4、鉛直変位が約1/2に低減された。このことから、本提案工法は水平方向の支持性能に優れた工法であることが確認された。

また、腹付け盛土施工時の変形量を無対策の場合と比較すると、既設盛土天端の沈下量は約1/2に抑制されており、さらに、腹付け盛土前面地盤の隆起量は約1/4に抑制されていることから、提案工法による既設盛土の変形抑制効果が確認された。なお、提案工法の場合、実験終了後の模型解体時においても、改良体の転倒や改良体間の軟弱地盤の中抜けは確認できなかった。

4. 提案工法の設計手法の検討と試算結果

4.1 提案工法の設計手法

遠心模型実験から、本提案工法は壁式改良上のセメント改良礫土スラブが腹付け盛土荷重を壁式改良に有効に伝達し、地盤改良体と地盤改良体間の未改良地盤が一体となって鉛直・水平作用および円弧すべりによるせん断破壊に抵抗していることを確認した。

本提案工法の設計フローを図9に示す。前述した抵抗メカニズムを踏まえて、本提案工法の設計では、セメント改良礫土スラブが腹付け盛土荷重に対して破壊しないこと、地盤改良体と未改良地盤からなる複合地盤が一体となって複合地盤の安定（鉛直支持、滑動、転倒）および円弧すべりの照査を満足することを照査することとした。なお、複合地盤とみなす条件（前提条件）は、地盤改良体間における未改良地盤の中抜け（抜け出し）が生じないことを照査することとした。

また、遠心模型実験においては、腹付け盛土の偏荷重によって、地盤改良体底面端部に大きな地盤反力（以下、端趾圧）が作用することを確認したため、地盤改良体の照査においては支持地盤が破壊されないことを前提に端趾圧に対する照査を実施することとした。

図10に本提案工法における複合地盤へ作用する土圧分布の模式図を示す。腹付け盛土施工前の状態では、既設盛土荷重による軟弱地盤の圧密が十分に進行していること、対策工が既設盛土の尻付近に構築され、既設盛土荷重が複合地盤に与える影響が少ないことを条件に、腹

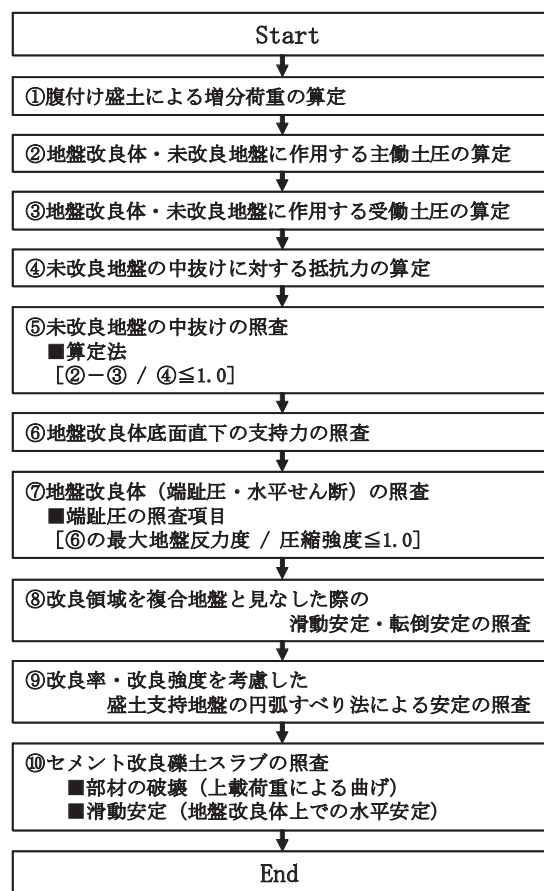


図9 提案工法の設計フロー

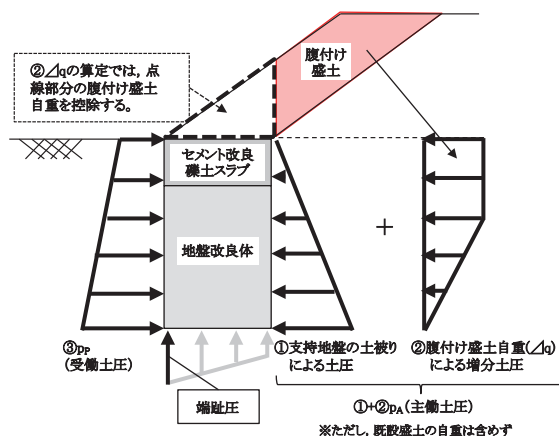


図10 複合地盤に作用する土圧分布

付け盛土荷重のみを上載荷重として考慮する。本提案工法の設計手法に関する詳細は参考文献⁷⁾を参照されたい。

4.2 提案工法の試算

実施工を想定した試算設計を、盛りこぼし盛土による腹付け盛土と盛土補強土擁壁による腹付け盛土に対して実施した。盛土高さについては6.0mで、盛土支持地盤は層厚10.0mのN=2程度の軟弱地盤とした。図11に試算の検討モデルを示す。試算の結果、提案工法の改良

特集：構造物技術

率は盛りこぼし盛土の場合で 30.0%，盛土補強土擁壁の場合は改良率 32.7% と両試算ともに従来工法と同等の改良率で安定および部材，円弧すべりの照査を満足する結果となった。なお，両試算における提案工法の改良率，改良強度については，改良率が「セメント改良礫土スラブの部材の破壊（地震時以外）」で決定し，改良強度が「端趾圧（L1 地震時）」で決定している。

これらの結果から，本提案工法の場合，偏荷重に対して明確な性能を持った改良地盤を合理的に構築することが可能となり，さらに今までは不可能であった要求性能や地盤条件に応じた改良率の決定ができることがわかる。

5. まとめ

軟弱地盤上の腹付け盛土施工に対する安定性の高い対策工の提案を目的に遠心模型実験を実施し，水平方向の支持性能の高い新しい対策工を提案した。さらに，遠心模型実験の結果を踏まえた提案工法の設計手法の検討および試算を実施した。

以下に，得られた知見について述べる。

- (1) 杭式改良を対策工として模擬した遠心模型実験より，地盤改良体に偏荷重が作用する場合，水平作用によって改良体が傾斜する可能性があることを確認した。このことから，軟弱地盤上で腹付け盛土を施工する際の対策工には，高い水平方向の支持性能が必要であることが分かった。
- (2) 高い水平方向の支持性能を有する地盤改良工法として，壁式改良とセメント改良礫土スラブを併用する工法を提案した。実験の結果，提案工法は地盤の水平変位量を 1/4 に，盛土体の沈下量を 1/2 に低減可能であることが確認され，さらにセメント改良礫土スラブの効果により，地盤改良体間における盛土の不同変位が抑制されることを確認した。
- (3) 提案工法の設計法を提案し，実際の腹付け盛土施工による偏荷重を想定した提案工法の試算を行った。これにより提案工法による改良率を定量的に算定できるようになった。

これらの結果から，本提案工法は軟弱地盤上の腹付け盛土施工において有効な対策工になり得ると考える。

文 献

- 1) 山田孝弘，西本英二，藤本清克：山陰本線（京都～園部間）複線化工事，土と基礎，55-4，2007
- 2) 工藤敦弘，渡辺健治，佐藤武斗，小島謙一，森川嘉之，高橋英紀：腹付け盛土の施工による軟弱粘性土地盤の変形特

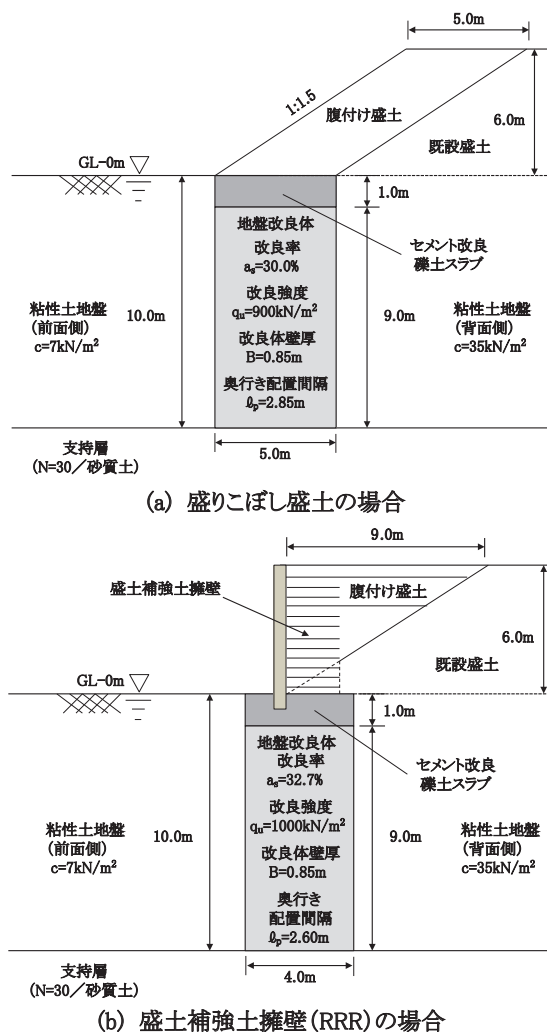


図 11 試算検討モデル

性に関する実験的検討，第 59 回地盤工学シンポジウム，2014

- 3) 北詰昌樹：新遠心模型実験装置の開発と研究への適用，港湾技術研究所資料，No.812，1995
- 4) 田村幸彦，森誠二，工藤敦弘，渡辺健治，野中隆博，小島謙一，森川嘉之，高橋英紀：腹付け盛土施工を模擬した遠心模型実験における軟弱粘性土地盤の作製方法，第 49 回地盤工学研究発表会，2014
- 5) 工藤敦弘，渡辺健治，野中隆博，小島謙一，森川嘉之，高橋英紀，森誠二：軟弱地盤上における腹付け盛土施工時の対策工効果の検討，第 49 回地盤工学研究発表会，2014
- 6) 渡辺健治：セメント改良礫土を用いた軟弱地盤上への盛土構築方法，土木施工，Vol.50，No.7，pp.17-21，2009
- 7) 島田貴文，渡辺健治，工藤敦弘，佐藤武斗，森川嘉之，高橋英紀：軟弱地盤上の腹付け盛土施工における対策工の試算，第 50 回地盤工学研究発表会，2015