

基盤 複合的地盤改良技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（基盤研究費）

研究期間：平 18～平 23

担当チーム：地質・地盤研究グループ（施工）

研究担当者：大下武志、小橋秀俊、堤祥一、
澤松俊寿、磯祥明

【要旨】

近年、軟弱地盤上の高盛土の基礎として、深層混合処理工法が盛んに用いられ、浮式や低改良化による経済的な地盤改良工法が提案されている。しかしながら、家屋などの近接地域では、側方流動や引き込み沈下に伴う周辺地盤への影響が起きることが懸念され、通常は盛土法尻部を全面的に改良する深層混合処理工法が採用されるのが一般的であるが、改良率は 60～80%と高くなり、高コストであることが問題となっており、そのため、当チームでは民間 13 社と「側方流動対策としての地盤改良技術に関する共同研究」を立ち上げ、経済性と周辺地盤への影響の抑制を両立できる地盤改良工法「コラムリンク工法」（以後 CL 工法）の開発を行った。ここでは、工法の概要と開発に伴う実験、解析による成果、熊本・宇土道路にて実施された試験施工の成果、並びに設計・施工マニュアルの概要について報告を行う。

キーワード：深層混合処理工法、側方流動、周辺地盤、新技術

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、軟弱地盤上の高盛土の基礎として、深層混合処理工法が盛んに用いられ、浮式や低改良化による経済的な地盤改良工法が提案されている。しかしながら、家屋などの近接地域では、側方流動や引き込み沈下に伴う周辺地盤への影響が起きることが懸念され、通常は盛土法尻部を全面的に改良する深層混合処理工法が採用されるのが一般的である。

しかしながら、改良率が 60～80%と高くなり、高コストであることが問題となっており、そのため、当チームでは民間 13 社と共同研究を立ち上げ、経済性と周辺地盤への影響の抑制を両立できる CL 工法の開発を行った。

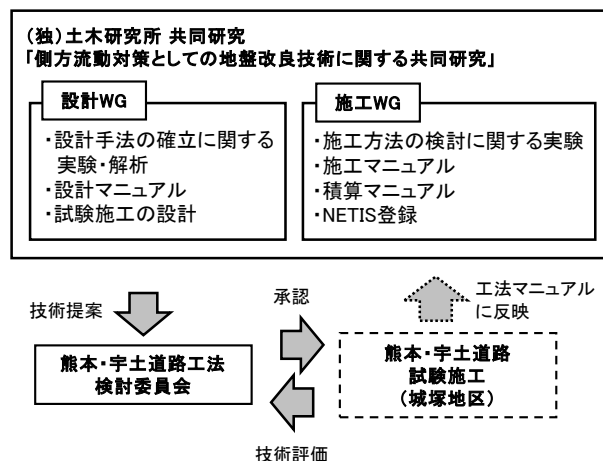


図 1-1 研究体制と研究の流れ

1.2 研究体制について

CL 工法の開発は、研究担当者を、まず工法の力学的メカニズムの解明とその設計手法の検討を行うグループ（設計 WG）と、具体的な施工方法の検討を行うグループ（施工 WG）に分けて、（独）土木研究所の支援の基で、それぞれのグループが実験・解析等による検討を行う形で開発を行った。また得られた成果を基に、熊本・宇土道路工法検討委員会（九州大学：落合委員長）に技術提案を行い、承認を受ける形で熊本・宇土道路（城塚地区）の試験施工を実施し、動態観測により結果の評価を行った。（図 1-1）

1.3 研究の範囲

コラムリンク工法を開発するにあたり、実施した研究の範囲を下記に示す。

- (1) 各種実験・解析によるコラムリンク工法の検討
 - i) 設計モデルの構築
 - ①粘土地盤を対象としたコラムリンク工法の遠心模型実験
 - ②粘土地盤を対象としたコラムリンク工法の 2D、3D の FEM 解析
 - ③液状化地盤を対象とした遠心模型実験

- ii) 施工方法の検討
 - ① 芯材挿入試験
 - ② その他の試験
- (2) 試験施工によるコラムリンク工法の検討
 - i) 動態観測
 - ii) 繋ぎ材の引張試験
 - iii) 2D-FEM、3D-FEM 解析のシミュレーションとの比較
- (3) 設計マニュアルの作成
 - i) 簡易設計モデル
 - ii) 2D-FEM を用いた設計モデル

2. コラムリンク工法の概要

本研究にて新たに開発した、コラムリンク工法の構造の概要を図 2-1 に示す。コラムリンク工法は、これまで別々に用いられてきた杭状の改良体と壁状の改良体を併用し、それらを機能的に配置することで、軟弱地盤の沈下、側方流動の抑制を図っている。

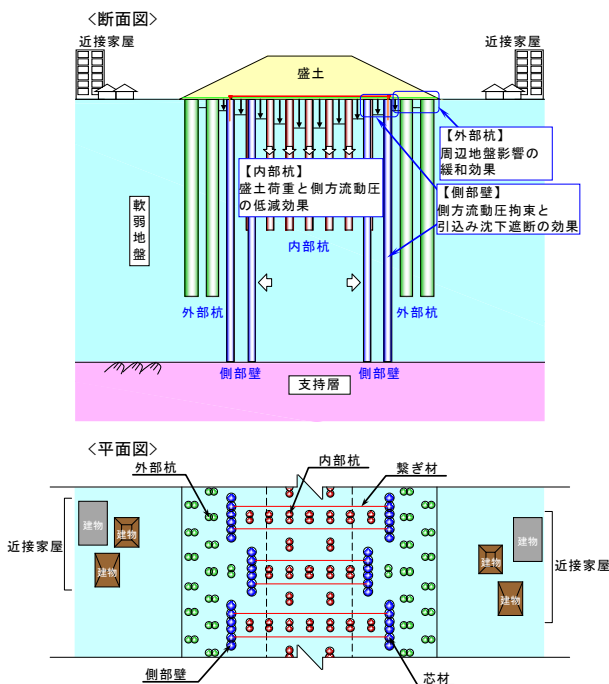


図 2-1 コラムリンク工法の概要図

コラムリンク工法は、その機能別に、盛土天端下に配置する「内部杭」、法肩下に配置する「側部壁」、法面下に配置する「外部杭」の 3 部材から構成され、必要に応じて、側部壁頭部を連結する「繋ぎ材」、やジオテキスタイル等の使用を行う。各部材の機能・役割については下記の通りである。

- ① 内部杭：盛土天端下に配する改良柱体。盛土荷重を地盤深部に伝達し、主に盛土の沈下抑制に寄与する。
- ② 側部壁：盛土法肩下に配する壁状改良柱体。盛土荷重を深部に伝達すると共に、壁内外の地盤の側方流動を遮断し、盛土の沈下・側方流動の抑制に寄与する。また、地下水流動阻害防止の観点から、盛土奥行方向に連続とせず、互い違いに配置することを基本とする。
- ③ 外部杭：盛土法面下に配する杭状柱体。盛土法面下の沈下を抑制し、周辺地盤の影響を緩和する。
- ④ 繋ぎ材：側部壁に挿入した H 鋼などの芯材を PC 鋼より線などにより連結したもの。側部壁頭部の傾斜により、遮断効果の低下が懸念される場合に使用する。また、中間砂層の液状化による影響が考慮される場合においても使用する。

また、改良杭間の距離が大きく、不動沈下が懸念される場合には、ジオテキスタイルや浅層処理工による付帯工を行う。

3. 各種実験・解析によるコラムリンク工法の検討

3.1 設計モデル構築のための検討

3.1.1 粘土地盤を対象としたコラムリンク工法の遠心模型実験

(1) 実験の背景

試験施工や解析を実施する前段階として、「コラムリンク工法の力学挙動を示し、どのようなモデル化が望ましいか」を把握することが求められる。そこで、層厚の深い粘土地盤に対する遠心模型実験を実施し、周辺地盤への変形抑制に与える影響の把握と、通常低改良率工法との比較による経済性の検討、地盤挙動モデルの確認、コラムリンク工法の構造の検討を行った。

(2) 実験の概要

実験の概要図を図 3-1 に、実験のケースを表 3-1 に示す。有明粘土を想定した地盤強度（地表面のせん断強度 $C_u : 9.6 \text{ kPa}$ ）に対し、過剰間隙水圧の消散を確認後、サンドホッパーにて 7m 相当の盛土荷重を急速載荷し、実大換算で約 1 年間、荷重を維持し、周辺地盤の水平変位量、沈下量の評価を行った。実験ケースは無対策 (Case 1 1)、低改良率 (浮式-Case 2 2)、内部杭の長さを変化させたコラムリンク工法 (Case 3 3～5 5) で比較する形で実施した。

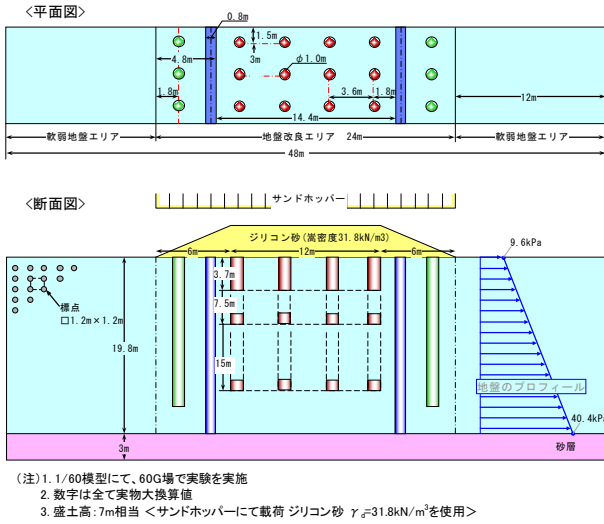


図 3-1 遠心模型実験の概要図

表 3-1 実験のケース

Case	改良杭径 (m)	改良率 (%)	改良体積比	改良杭長 (m)	改良壁長 (m)	改良形式
Case1	-	-	-	-	-	無対策
Case2	1.0	11	1.00	15	-	低改良率(浮)
Case3	1.0	13	1.40	15	20	コラムリンク工法
Case4	1.0	13	1.18	7.5	20	コラムリンク工法(内部杭/2)
Case5	1.0	13	1.07	3.7	20	コラムリンク工法(内部杭/4)

(3) 実験の結果

①側部壁への荷重集中の様子を確認

コラムリンク工法の実験後の様子を図 3-2 に示す。これより、側部壁の内側にて弧状に沈下が発生する様子を確認できた。これは側部壁に盛土荷重が集中することで、側部壁周辺に作用する荷重が大幅に低減されているものと考えられる。

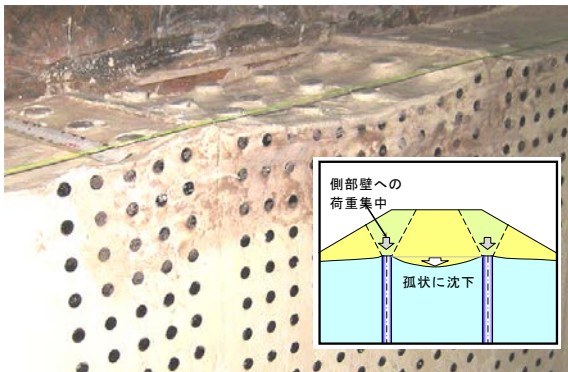
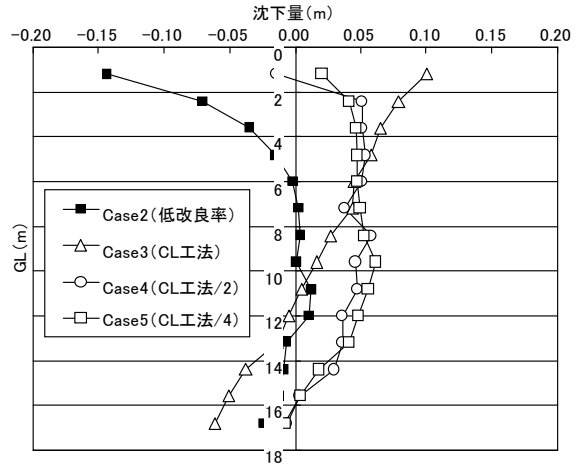


図 3-2 実験後の側部壁内部での弧状沈下の発生状況

②評点の移動量による各 Case の評価

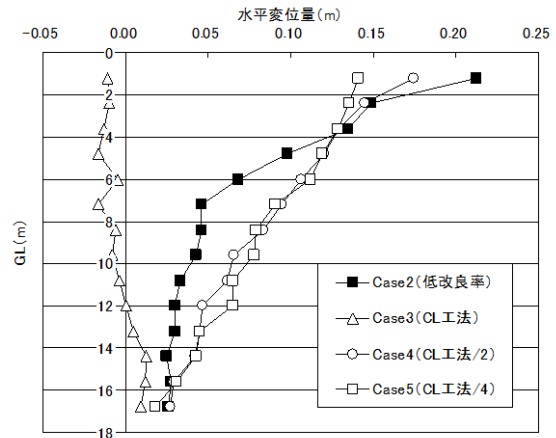
実験結果の評価は、軟弱地盤に設置した標点（縦横

1.4m pitch) に対する動画解析を行い、各 Case にて結果の比較を行った。各 Case の盛土法尻部における沈下量並びに水平変位量を図 3-3、図 3-4 に示す。(Case1 はすべり破壊により省略) これより、内部杭を短くした Case4、5 においても、Case2 と比較して、水平変位量では同等、沈下量ではそれ以上の性能を有することが分かった。



* Case1(無対策)はすべり破壊により省略
 * プラス: 沈下、マイナス: 隆起

図 3-3 盛土法尻部での沈下量



* Case1(無対策)はすべり破壊により省略
 * プラス: 盛土外側、マイナス: 盛土内側

図 3-4 盛土法尻部での水平変位量

③コンター図による解析

コンター図を作成し、側部壁が地盤の挙動に与える影響の把握を行った。Case2 と Case5 の沈下量のコンター図を図 3-5、3-6 に、水平変位量のコンター図を図 3-7、3-8 に示す。結果、Case5 は Case2 と比較して、内部杭が短い分、盛土中央部の沈下量は大きいものの、沈下の広がり側部壁の内側に納まっていること。水平変位量につ

いては、ピーク位置は側部壁の内側GL - 4m 付近の位置で、Case2 と異なり、水平変位量の影響範囲については、Case2 よりも大きいことを確認することができた。

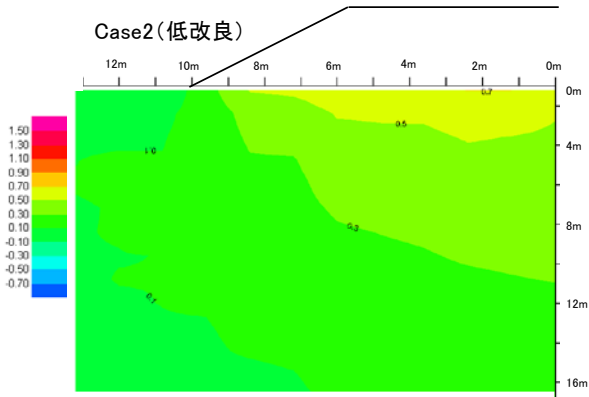


図 3-5 沈下量のコンター (Case2)

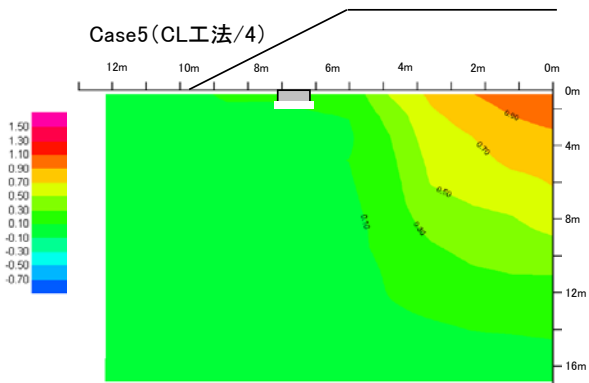


図 3-6 沈下量のコンター (Case5)

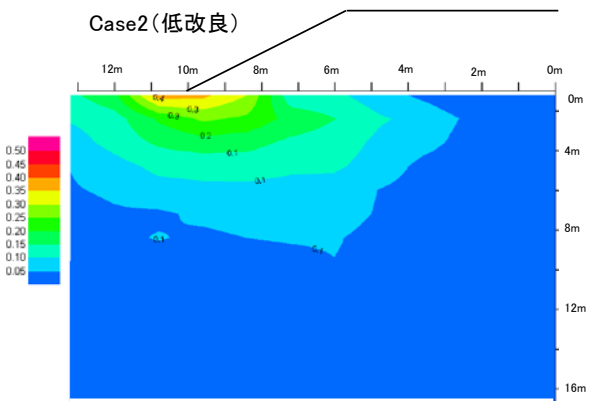


図 3-7 水平変位量のコンター (Case2)

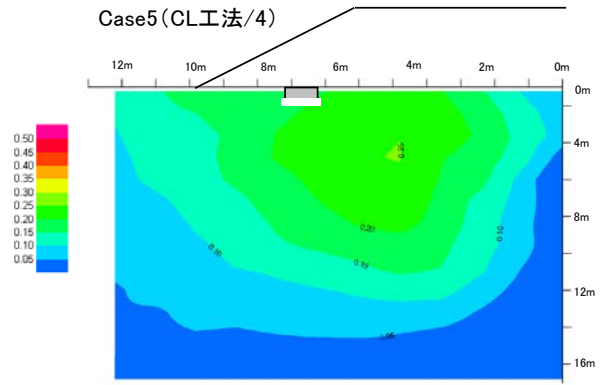


図 3-8 水平変位量のコンター (Case5)

④想定される力学モデル

実験より想定される力学挙動のモデルを図 3-9 に示す。従来の力学挙動と大きく異なる点は、側部壁による側方向への拘束効果により、側部壁の内側においては、一次元圧密による沈下に近く、その分全体の沈下量を抑えられていることである。内部杭と側部杭の長さを設計することで、側部壁の内側に作用する盛土荷重や、周辺地盤に及ぼす影響をコントロールできるものと考え、コラムリンク工法的设计モデルに反映することができるものと考えられる。

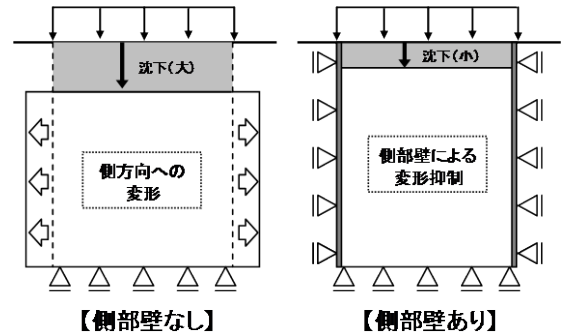


図 3-9 コラムリンク工法の力学モデル

(4) 実験のまとめ

- 今回の遠心模型実験の結果を下記にまとめる。
- コラムリンク工法は、側部壁への荷重集中により、杭間地盤への盛土荷重の低減効果を期待できる。
- 側部壁があることで、盛土天端部の変位による盛土法尻部への影響を抑制していることが確認できた。これより、側部壁の内側の変形は、一次元圧密による沈下に近く、その分全体の沈下量を抑えられることが期待できる。

3.1.2 粘土地盤を対象としたコラムリンク工法の2D、3DのFEM解析

(1) 解析の目的と概要

実務にて解析検討による設計を行うにあたり、コラムリンク工法は3次元断面であるため、本来であれば3次元のFEM解析を行うことが望ましい。(2次元では壁と杭の区別がつかないため)しかしながら、3次元のFEM解析はソフトが高額であるだけでなく、使えるコンサル等も限られており、技術の普及を考える場合、一般的に普及している2次元のFEM解析により設計検討できるような手法を開発することが望ましい。

そこで、2D-FEM解析の有効性を把握するために、遠心模型実験結果と比較検討を行うとともに、3D-FEM解析では、遠心実験では補完できない外部杭の長さの検討などの追加の構造の検討を行った。

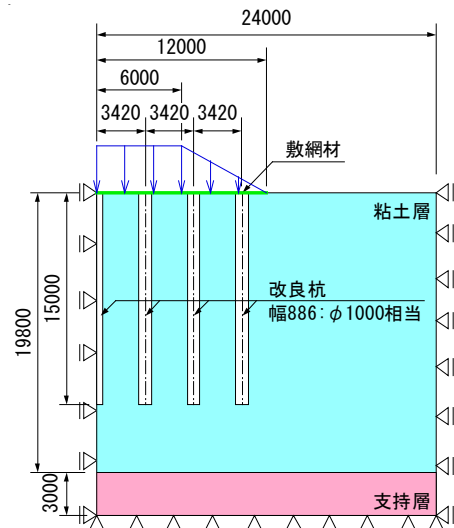


図3-11 低改良率（浮式）の解析モデル

(2) 2D-FEM解析と遠心模型実験の変位量の比較

i) 解析モデル

2D-FEM解析では、遠心模型実験と地盤作成、載荷手順をあわせて、コラムリンク工法のケース(図3-10)と低改良率(浮式)のケース(図3-11)を比較する形で、対称性を考慮した実換算寸法の半断面モデルを用いた。

カオリン粘土には修正Cam-Clayモデルを適用し、模型地盤の準備にあたっての履歴を考慮の上、盛土載荷時の応力状態、過圧密比を初期条件として設定した。盛土は実験相当分(盛土中央で約100kPa)を分布荷重に換算し、実験での載荷時間を実換算した日にちで立ち上げて、そのまま放置した。なお、解析領域下端・側部は、実験条件に準じて非排水境界を設定している。

また、改良壁と改良杭との区別については、奥行き方向の改良率分、改良杭のヤング係数を低減させる形でモデル化を行った。

今回の解析にて用いた物性値を表3-2に示す。

表3-2 解析に用いた物性値

分類	適用モデル	単位体積重量 γ kN/m ³	透水係数 k_x, k_y cm/sec
粘土	修正Cam-Clay	16.37	1.0×10^{-6}
分類	圧縮指数 C_c	限界応力比 M	ポアソン比 ν
粘土	0.632	0.93	0.35

分類	適用モデル	単位体積重量 γ kN/m ³	透水係数 k_x, k_y cm/sec	ポアソン比 ν
支持層	Mohr-Coulomb	19	1.0×10^{-3}	0.25
改良壁	Mohr-Coulomb	17.47	1.0×10^{-10}	0.2
改良杭	Mohr-Coulomb	17.47	1.0×10^{-7}	0.2
分類	ヤング係数 E kN/m ²	粘着力 c' kN/m ²	内部摩擦角 ϕ' deg.	
支持層	56,000	5	30	
改良壁	320,000	500	0	
改良杭	$320,000 \times \alpha$	500	0	

注1) α : 奥行き方向の改良率
(改良率に応じて改良杭のヤング係数を低減)

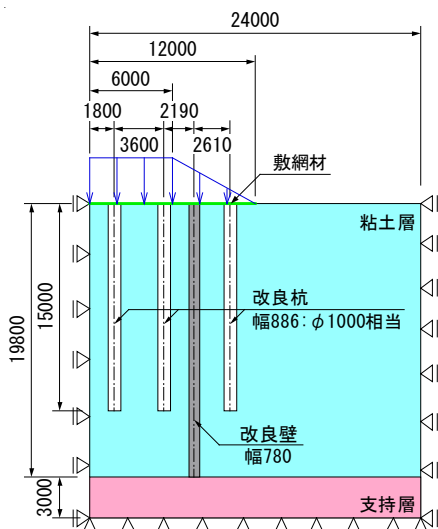


図3-10 コラムリンク工法の解析モデル

ii) 解析結果

図3-12にコラムリンク工法の解析で得られた変位コンター図を示す。遠心模型実験の結果と同様に、側部壁を境に盛土直下での変位が卓越する傾向にあり、盛土周辺の変位抑制を意図した効果が確認できた。

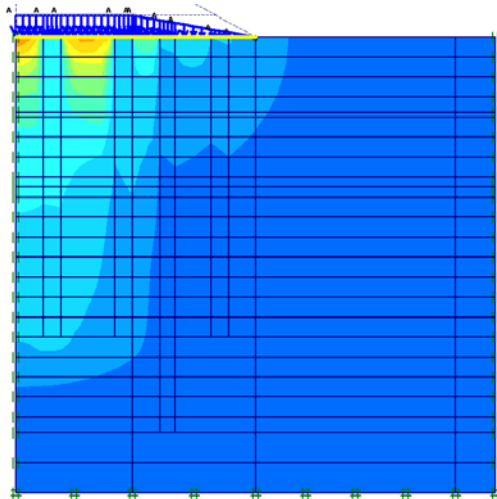


図3-12 コラムリンク工法の解析による変位コンター図

続いて図3-13に、遠心模型実験終了段階での地表面沈下量分布を示す。両ケースで、盛土直下の鉛直変位については実験値に近い分布が得られた。しかしながら、低改良率ケースの法尻付近に見られた隆起が、解析では再現されていない。これは、盛土の急速荷重に伴う粘土のせん断変形であるため、圧密モデルの解析では、うまく整合取れなかったものと考えられる。

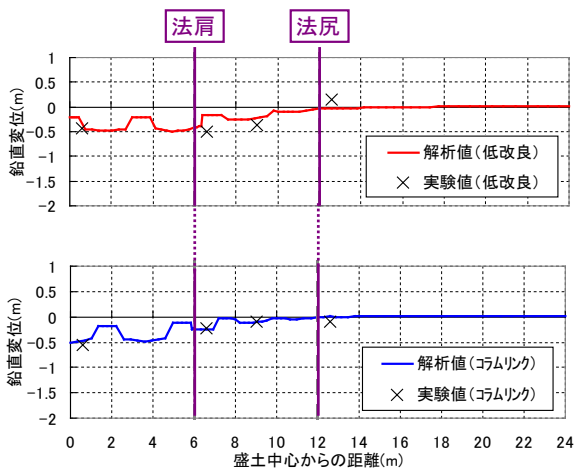


図3-13 地表面鉛直変位の実験値との比較結果
(上：低改良率、下：コラムリンク)

iii) まとめ

遠心模型実験結果と比較を行った結果、遠心実験で生じた挙動を概ね再現できていることを確認することができた。急速荷重に伴う、粘土のせん断変形については若干の課題が残るものの、①遠心実験では、実験の都合上、

急速荷重を行っているが、実施工では緩速施工が前提であり、せん断変形は小さくなること。②軟弱地盤上の盛土では、圧密変形が圧倒的に卓越し、せん断変形が全体の変形に及ぼす影響は小さいことから、設計検討の手段としては十分な仕様を満たしていることを確認することができた。

(3) 3D-FEM 解析によるコラムリンク工法の構造の検討

i) 解析モデル

3D-FEM 解析では、内部杭と外部杭を互いに变化させることで、内部杭と外部杭が周辺地盤に及ぼす影響の把握を行った。Case1における解析モデルを図3-14に示す。解析ソフトには3D-FEM 解析コードMuDIANを用いている。地盤条件や適用モデルは前述した2D-解析と同じものを用い、荷重条件は、盛土荷重を70日間行い、その後30年放置した状態で比較検討を行った。コラムリンク工法の改良率は10%と18%パターンで行い、低改良率(等間隔の杭状改良)の改良率13%との比較は、線形を補完する形で実施している。

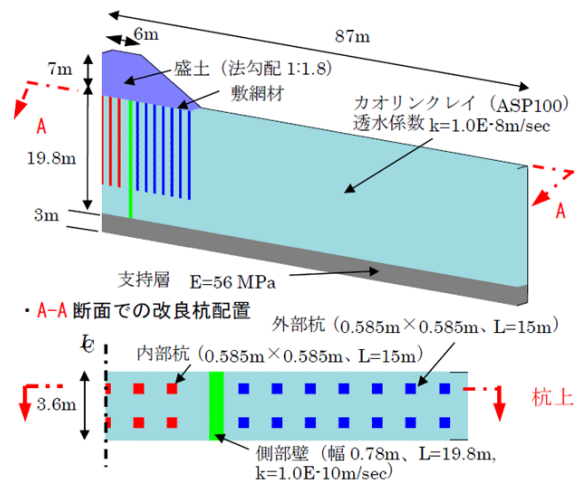


図3-14 3D-FEM 解析の解析モデル(Case 1)

ii) 解析結果

表3-3にコラムリンク工法の実験ケース(検討断面)と解析結果を示す。図3-15はCL工法と杭状改良工法で、改良土量と盛土天端沈下量の比較を示している。内部杭長を短くした時の盛土天端沈下量の増加割合は、外部杭長を短くした時よりも大きいことから、盛土沈下抑止には内部杭の効果が大きく、外部杭の盛土沈下抑止効果は小さいことが分る。

図3-16と図3-17には改良土量と周辺地盤変位量の関係を示す。内部杭長を短くした時の方が、外部杭

長を短くした時よりも少ない改良土量の変化で周辺地盤変位量が増加している。このことから内部杭を長くして盛土沈下量を減らすと、周辺地盤変位抑止効果も大きくなるのが分かる。また外部杭長を15mから10mに短くした時に比べて、外部杭長を10mから5mに短くした時に発生する周辺地盤変位量の増加割合が大きいことから、周辺地盤の変位を抑止するためには、一定長さの外部杭が必要で、外部杭には周辺地盤変位抑止の役割があることが分かった。法尻10m地点での鉛直変位量を4mmに抑えるための必要改良土量は、CL工法の方が杭状改良工法よりも46m³少なくできることから、CL工法の周辺地盤変位抑止効果は杭状改良工法よりも優れていると言える

表 3-3 3D 解析の実験ケースと解析結果

	CASE-0(未改良)	CASE-1(CL工法)	CASE-2(CL工法)
杭配置断面図			
赤色：内部杭 緑色：側部壁 青色：外部杭			
盛土高さ	7.0 m	7.0 m	7.0 m
内部杭長	—	15.0m	10.0m
外部杭長	—	15.0m	15.0m
側部壁長	—	19.8 m	19.8 m
盛土沈下量竣工後(70日後)	933 mm	147 mm	165 mm
盛土沈下量最終(30年後)	2227 mm	167 mm	196 mm
のり尻10m位置での鉛直変位	408 mm	1.3 mm	3.9 mm
のり尻10m位置での水平変位	678 mm	5.9 mm	13.1 mm
改良土量	—	153.1 m ³	144.6 m ³

	CASE-3(CL工法)	CASE-4(CL工法)	CASE-5(CL工法)
杭配置断面図			
赤色：内部杭 緑色：側部壁 青色：外部杭			
盛土高さ	7.0 m	7.0 m	7.0 m
内部杭長	5.0m	15.0m	15.0m
外部杭長	15.0m	10.0 m	5.0m
側部壁長	19.8 m	19.8 m	19.8 m
盛土沈下量竣工後(70日後)	185 mm	151 mm	158 mm
盛土沈下量最終(30年後)	216 mm	180 mm	190 mm
のり尻10m位置での鉛直変位	4.6 mm	3.1 mm	7.4 mm
のり尻10m位置での水平変位	16.8 mm	10.9 mm	28.2 mm
改良土量	136.0 m ³	129.2 m ³	105.2 m ³

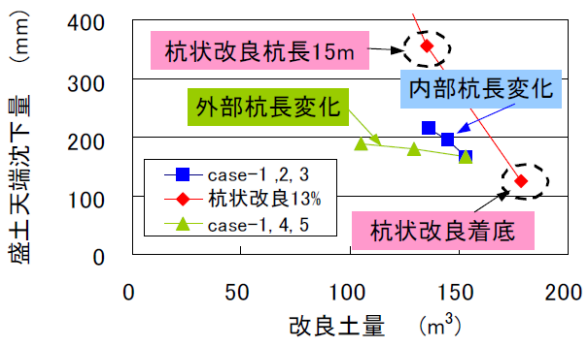


図 3-15 改良土量と盛土天端沈下量の関係

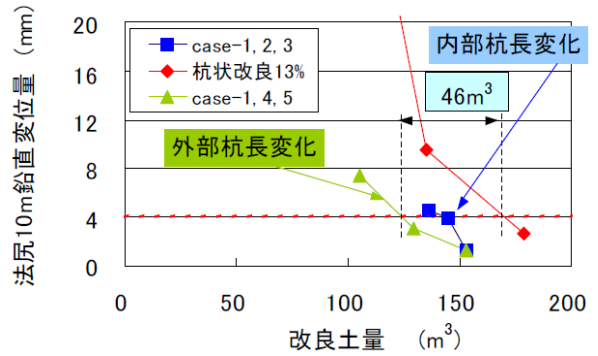


図 3-16 改良土量と周辺地盤の鉛直変位量の関係

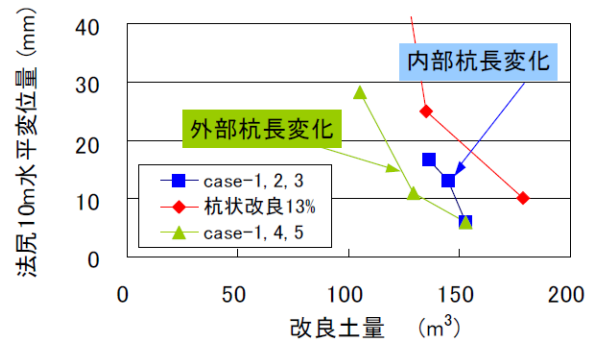


図 3-17 改良土量と周辺地盤の水平変位量の関係

iii) まとめ

3次元解析の結果、内部杭は盛土沈下と周辺地盤変位抑止の両方に効果があり、外部杭は周辺地盤変位抑止に効果があることが分かった。また、遠心模型実験と同様に、コラムリンク工法の周辺地盤変位抑止効果は、杭状改良工法よりも大きいことを確認することができた。

(4) 解析結果のまとめ

遠心模型実験を受け、2次元、3次元のFEM解析を実施した結果、①2次元解析を用いても、奥行き方向の改良率分、剛性を低下させる方法を用いることで、十分な設計検算が可能であること。②3次元解析により、内部杭・外部杭の影響の度合いと、低改良率(浮式)工法に対するコラムリンク工法の優位性を確認することができた。

3.1.3 液状化地盤を対象とした遠心模型実験

(1) 実験の背景

コラムリンク工法は基本的には、軟弱地盤上の盛土等の構築に伴う、周辺地盤への影響抑制を主な目的として開発された工法である(図 3-18)。しかしながら、軟弱地盤層には緩い砂層も含まれているケースが多数であり、近年では、地震時において液状化が懸念される層が介在

する場合においても、盛土の崩壊や盛土の変形抑制効果を有する工法に対するニーズが高まりつつある。

そこで、コラムリンク工法（以後「CL工法」）が地盤の液状化に対し、十分な変位抑制効果を有するかどうかを確認するための遠心模型実験を実施した。

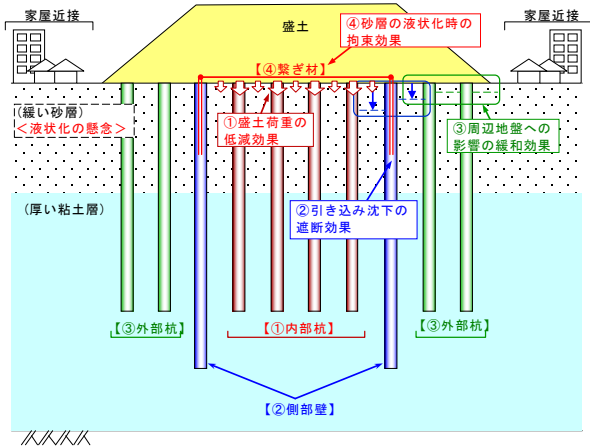
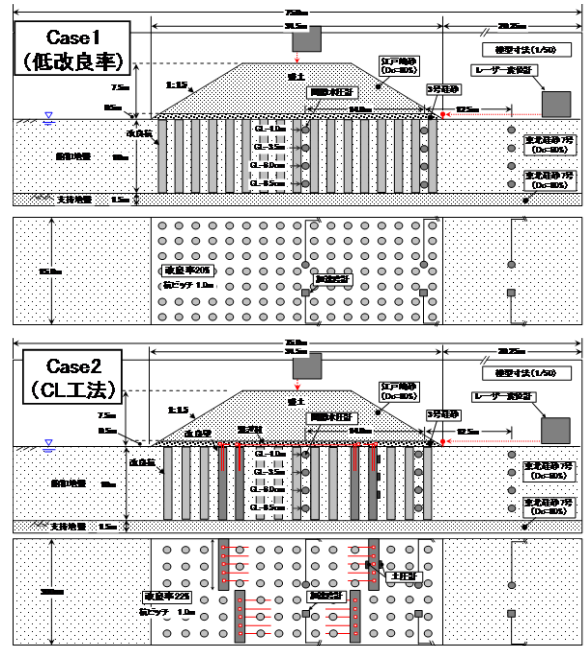


図3-18 液状化に伴う盛土の変形抑制効果の概念

(1) 実験の概要

遠心模型実験は、CL工法の液状化に伴う変位抑制効果を確認するために、改良率を同程度（約20%）に揃えた低改良率の深層混合処理工法（以後「低改良率」）と比較する形で実施した。実験の概要図を図3-19に示す。飽和した砂層の厚さは10m、盛土高7.5m（0.5mは遠心立ち上げ時の自沈防止のため、3号珪砂を敷設）とし、加震波は、最大振幅25G（500gal）とした神戸波を用いた。加震波の波形図を図3-20に示す。計測機器として、間隙水圧計、加速度計、土圧計（CL工法：側部壁）を深さGL-1.0m、-3.5m、-6.0m、-8.5mの位置に設置し、レーザー変位計により盛土中央の沈下量と盛土法尻部の水平変位量の計測を実施した。



* 数値は全て実大換算 * 改良土強度: 約1.0MPa

図3-19 液状化に関する遠心模型実験の概要図

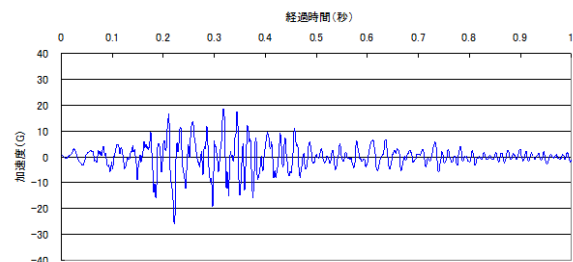


図3-20 加震波の波形（神戸波-最大振幅25G（500gal））

表3-4 実験ケース

Case	名称	改良率 (%)	改良長 (m)	盛土高 (m)
Case1	低改良率の深層混合処理工法	20	10	7
Case2	コラムリンク工法	22		

* 改良体強度: 1.0MPa
 * 盛土材: D_c=90% (江戸崎砂)、
 * 飽和地盤: D_c=60% (東北珪砂7号)
 * 支持地盤: D_c=90% (東北珪砂D_c=90%)

(3) 実験結果

①実験後の盛土と改良杭の破断状況

低改良率とCL工法の実験後の様子と、杭の破断状況を図3-21に示す。これより、低改良率では、盛土も改良杭も大きく破壊しているのに対し、CL工法では、盛土の天端の形状は維持され(①)、かつ内部杭の破断は発生していない(②)ことを確認することができた。これより、側

部壁と繋ぎ材による拘束効果により、液状化による盛土の流動を押さえられていることが分かる。

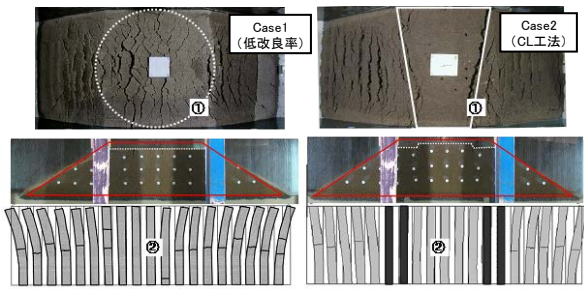


図 3-21 実験後の盛土と改良杭の状況

②実験データの分析

コラムリンク工法における加速度計と間隙水圧計、土圧計の結果を図 3-22～図 3-23 に、レーザー変位計の比較結果を図 3-24 に示す。これよりいえる事を下記にまとめる。

<加速度計>

液状化地盤部と盛土中央・法尻部にて、加速度計の減衰に違いが見られた。盛土中央・法尻部はある程度の減衰に留まり、改良杭を通して盛土に加速度が伝わっている様子が分かる。低改良率でも同様の傾向を示した。

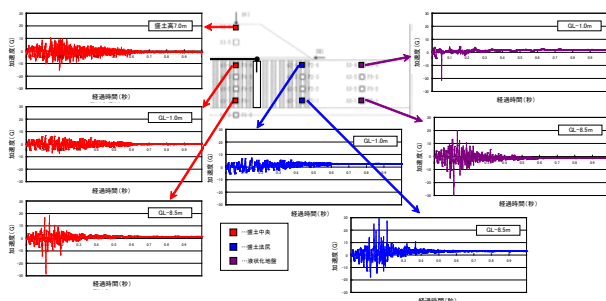


図 3-22 加速度計の経時変化 (コラムリンク工法)

<間隙水圧計>

低改良率、コラムリンク工法ともに、盛土中央、盛土法尻、液状化地盤にて大きな差を見ることができなかった。

<土圧計>

土圧計の内側と外側の値を比較した結果、差は若干の水圧の増加分に留まり、側方流動圧は側部壁に作用していないことが分かった。

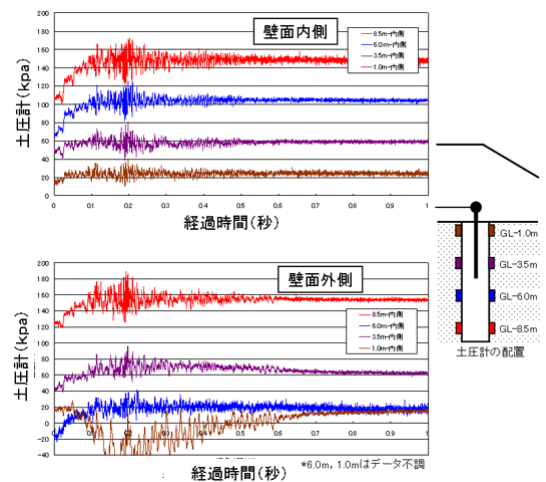


図 3-23 土圧計の経時変化 (コラムリンク工法)

<変位計>

図 3-21 でも確認した通り CL 工法は微量の沈下に留まっており、液状化に伴う配列沈下しか生じていないものと考えられる。

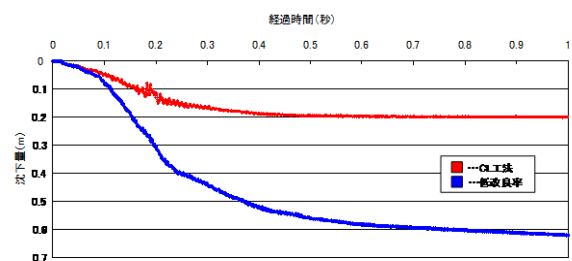


図 3-24 盛土天端の沈下量

これら一連の結果より、液状化時の盛土荷重は、ほぼ杭に集中的に作用していること。繋ぎ材による簡易的な拘束でも、液状化による変位抑制に十分な効果を有することが分かった。コラムリンク工法の液状化時における荷重モデルを図 3-25 にまとめる。

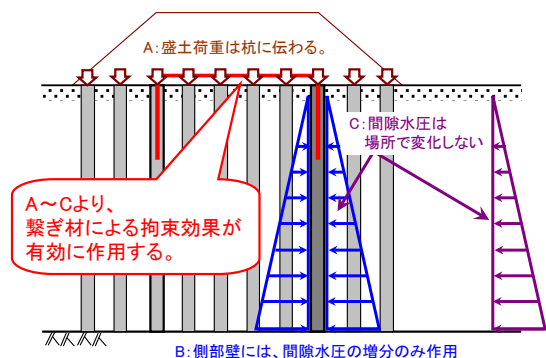


図 3-25 コラムリンク工法の液状化時の力学モデル

(4) 実験のまとめ

今回の遠心模型実験の結果を下記にまとめる。

- 液状化時の盛土荷重は杭に集中しており、液状化地盤には盛土荷重が作用していないこと。
- そのため、繋ぎ材による側部壁の拘束でも、液状化時の水平変位抑制に十分な効果を有すること。
- さらに、盛土法尻部にも改良壁を設置し、繋ぎ材による拘束を行えば、盛土全体の液状化変位抑制に繋がることを期待される。(図3-26)

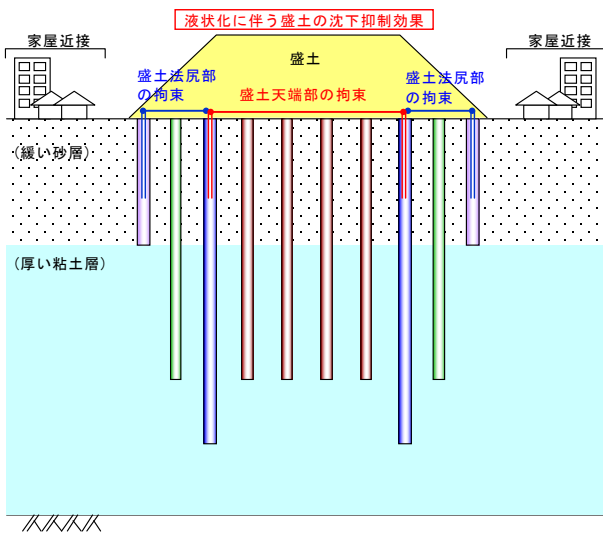


図3-26 コラムリンク工法の液状化対策としての活用案

3. 2 施工方法の検討

3.2.1 芯材挿入試験

(1) 実験の背景

深層混合処理工法により作成される改良杭H鋼 (H200相当) を想定した芯材を挿入し、杭頭を連結するにあたり、下記の点が施工上の懸念事項として上げられる。

- ①改良杭の施工に約1時間以上かかることを考慮すると、セメント混合開始から2時間以内に芯材 (H200鋼) の挿入を終了する必要があること。
- ②芯材を挿入する過程で、改良杭の摩擦強度が急速に高まり、芯材の挿入が不可能になる可能性が考えられること。
- ③そのため、どの程度の建設機材 (クレーンの規模、モンケン重量、バイプロ規格等) が必要となるか検討する必要があること。

これらの問題点を確認するために、流動化処理土を地盤改良杭に見立てて、各コーン試験値、ペーン試験値に

おいて、芯材挿入の試験を実施し、芯材に作用する摩擦力の計測を実施し、芯材挿入の可否の判断、建設機材のスペックの検討を行った。(図3-27)

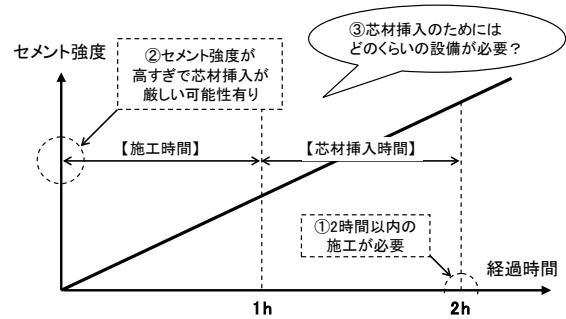


図3-27 改良杭にH鋼を挿入する際の懸念事項

(2) 実験の概要

本実験は、野外ピット (幅4m×奥行8m×深さ5m) にて、ボイド管 (φ1000) を設置し、地盤改良杭に見立てた流動化処理土を流し込んだ。その後、H200を吊り上げて、自重挿入を行い、自重挿入が不可能になった時点で、押し込み器具 (モンケン、バイプロハンマー) を用いて、H200を最後まで挿入を行った。

また自重挿入が困難な場合は、2m深さまで挿入し (倒壊防止のため)、目標とするせん断強度に到達した時点で、押し込み器具 (モンケン、バイプロハンマー) を用いて試験を行った。

計測は0.5mずつ挿入するごとに、吊具に設けた荷重計の減少値を読むことで、力の釣合い状態の把握を行った。試験の概要の平面図を図3-28に、概要の断面図を図3-29に実験ケースを表3-5に示す。

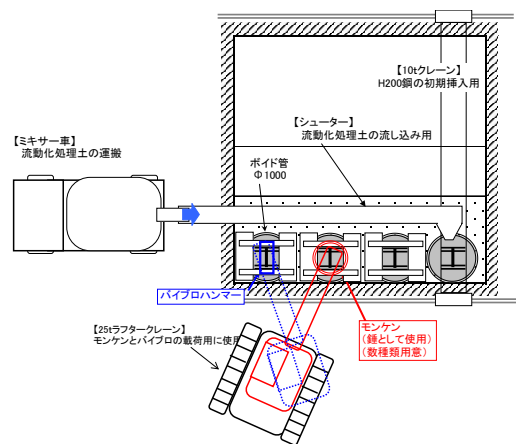


図3-28 芯材挿入実験の概要の平面図

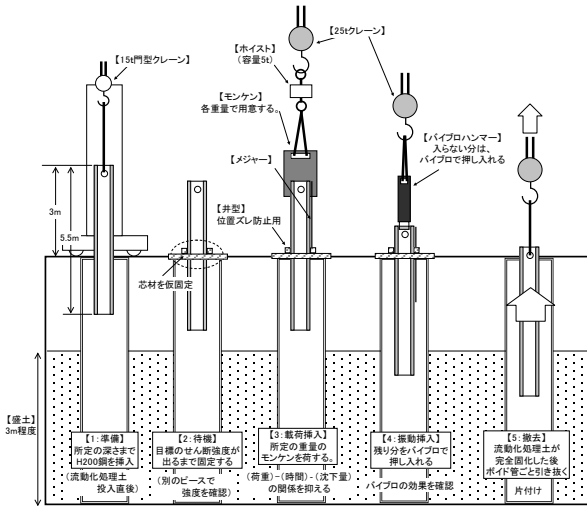


図 3-29 芯材挿入実験の概要の断面図

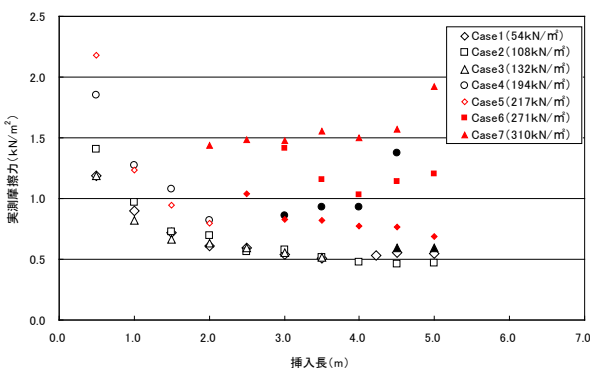
表 3-5 実験ケース

Case	ベーン試験値 (kN/m^2)	コーン試験値 (kN/m^2)	自重挿入	モンケン 挿入	パイプロ 挿入
Case1	14.55	54	○	-	-
Case2	-	108	○	-	-
Case3	-	132	○	1.7t	-
Case4	-	194	○	1.7t	-
Case5	-	217	○	1.7t	-
Case6	-	271	-	1.7t	-
Case7	-	310	-	1.7t	-
Case8	-	697	-	5.3t	○

*ベーン試験はCase2以降は計測不可(計測対象範囲外)
*Case8の地盤は前日に流動化処理土を流し込み作成

(3) 実験の結果

コーン試験値と実測摩擦力、挿入長の関係を図 3-30 に示す。これよりいえる事を下記にまとめる。



*塗りつぶしはモンケン載荷

*Case8は摩擦力が飛び抜けて大きいためグラフでは省力した。

図 3-30 コーン試験値-挿入長-実測摩擦力の関係

○実測の摩擦力は当初想定していたせん断強度と比較して、かなり小さい摩擦力しか作用しておらず、ベーン

試験の値の10分の1以下であった。

○実測の摩擦力は、挿入初期は若干硬目（地表面部は外気温の影響を受けるためと推測）であるものの、挿入するに従い一定の値に収束し、吊り上げ荷重値がゼロになった時点でH鋼の挿入は停止する傾向を示した。

○コーン試験値が 100 kN/m^2 以下であれば、H200 鋼は自重による挿入が可能（ただし、5.0m挿入の場合）であり、モンケン (1.7 t) を錘として使用すれば、人が乗れる目安となるコーン試験値 300 kN/m^2 でも挿入可能であることが分かった。

○パイプロを用いれば、かなりの硬さ（コーン試験値 700 kN/m^2 以上）でも挿入することが可能であることを確認できた。

(4) 実験のまとめ

挿入試験の全体のまとめと今後の課題を下記に示す。

○改良土の初期摩擦力は、想定していたよりかなり低いことが分かった。これより、H200 鋼の挿入に要する機材のスペックは、コーン試験値 300 kN/m^2 以内で5m挿入程度であれば、BH ベースのクレーン機（容量3t程度）と錘で十分に施工可能であると考えられる。

○試験は流動化処理土を改良杭に見立てたため、本試験結果を正当に評価するには、実際の現場において、改良杭強度の時間ごとの立ち上がり計測し、本試験の結果と照らし合わせて、芯材挿入の可否の判断を行う必要があるものと考えられる。

3.2.2 その他の試験

その他の試験として、芯材挿入に時間がかかってしまう場合を想定した、固化遅延剤による配合試験、改良土の曲げ強度の把握を目的とした改良土の曲げ載荷試験を実施した。具体的な数値結果については省略するが、コラムリンク工法を現場普及させる際におけるバックデータをして活用することを考えている。

4. 試験施工によるコラムリンク工法の検討

コラムリンク工法の実験・解析での検討結果を基に、熊本・宇土道路工法検討委員会に技術提案を行い、委員会の了承を得た上で、熊本・宇土道路の一部区間（城塚地区）にて、試験施工を実施し、コラムリンク工法の評価を行った。ここでは、動態観測結果と、引張試験、解析との整合性等について報告を行う。

4.1 試験施工の概要

試験施工の概要を下記にまとめる。

- 【工事名】 熊本57号城塚地区改良工事
- 【工事場所】 熊本県宇土市笹原町地先
- 【発注者】 国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所
- 【工期】 平成21年9月19日～平成22年3月30日



図4-1 熊本・宇土道路の場所

表4-1 試験施工における変位の制限値

対象構築物	道路	周辺地盤			
		道路本体	建築物	用排水路	田畑
種類	残置沈下	全沈下量	相対沈下量	変形角	全沈下量
制限時期	供用開始後	施工開始後	同左	同左	施工開始後
制限位置	盛土部	のり反から10m	同左	同左	のり反から4m
沈下制限値δ	≦30mm	≦20mm	≦10mm	≦0.3×10 ⁻³	≦100mm
水平変位制限値φ	≦100mm	≦20mm	—	—	≦100mm
制限ランク	Cランク	Aランク	—	—	Bランク
備考	供用開始 施工開始から2年後	—	—	—	制限位置は用地境界

注) 水平変位制限値は、沈下の制限値と同一とする。

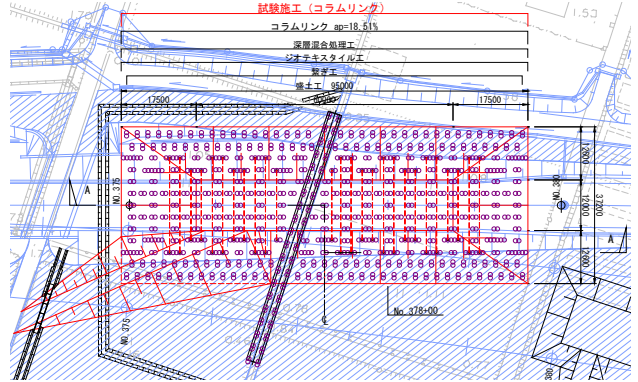


図4-3 試験施工の全体平面図

コラムリンク工法の試験施工現場は、約40mの非常に厚い軟弱地盤層が堆積し、盛土の圧密沈下に伴う引き込み沈下により、周辺地盤への影響が懸念された。

しかしながら、コラムリンク工法を用いることで、低改良率に関わらず、周辺地盤への影響をほぼ完全に抑制できることを確認することができた。

現場の地盤条件、要求性能、一連の工事図面(平面・断面)、その他仕様を、図4-2～4-6、表4-1～4-2に示す。

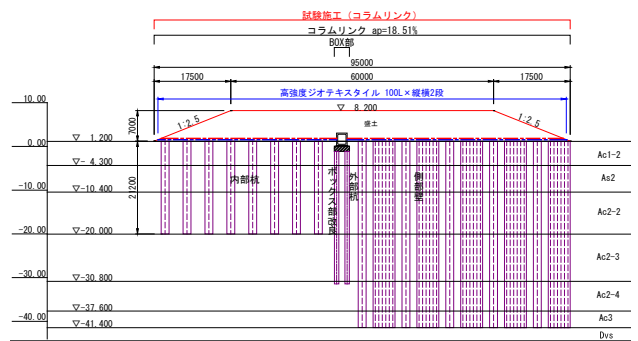


図4-4 試験施工の縦断面図

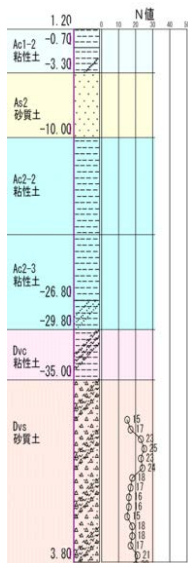


図4-2 試験施工現場における地盤条件

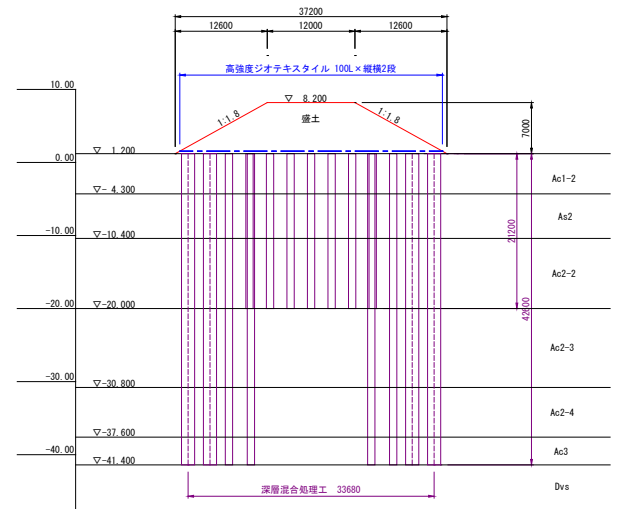


図4-5 試験施工の標準断面図

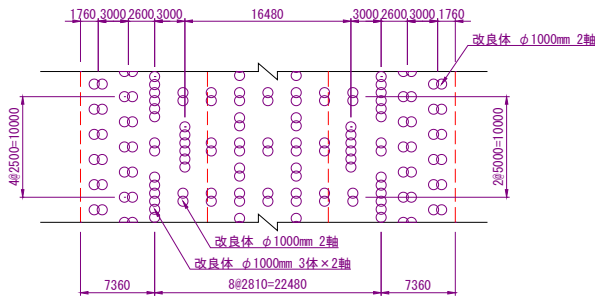


図 4-6 試験施工の標準平面図 (杭配置図)

表 4-2 試験施工での試験一覧

項目	仕様	備考
内部杭	φ1000 2軸 CDM、L=21.2m×16本 V=508.8m ³ 改良強度 $q_{ult}=1.0\text{MN/m}^2$	改良率 6.53%
側部壁	φ1000 6軸 CDM、L=39.2m×4本 V=674.2m ³ 改良強度 $q_{ult}=1.0\text{MN/m}^2$	改良率 4.72%
外部杭	φ1000 2軸 CDM、L=39.2m×18本 V=1058.4m ³ 改良強度 $q_{ult}=1.0\text{MN/m}^2$	改良率 7.26%
コラムリンク改良体	合計 V=2241.4m ³	全体改良率 18.51%
芯材	H型鋼材 (H-200×200×8×12)、@2.4m L=3.3m (挿入長 3.0m)	【仮設】
繋ぎ材	アンボンド PC 鋼より線 φ15.2mm、@2.4m L=19.0m、13.0m、設計荷重 Td=130kN/本 許容荷重 Ta=157kN/本 台座+くさび定着式	【仮設】
敷網材	高強度帯状ジオンセティック 2 方向 (横断: パラリンク 100L、縦断: パラリンク 100L)	【仮設】

4. 2 動態観測

(1) 計測項目

動態観測は、沈下板・層別沈下計・地中変位計・鉛直土圧計・改良体ひずみ計・地下水圧計・間隙水圧計・盛土下伸縮計・繋ぎ材張力計の 9 項目を対象にして実施した。図 4-7、図 4-8 に計測機器の配置図を示す。

上記計測の内、工法の評価を行う上で重要となる、沈下板～地下水圧計までの動態観測結果を示す。

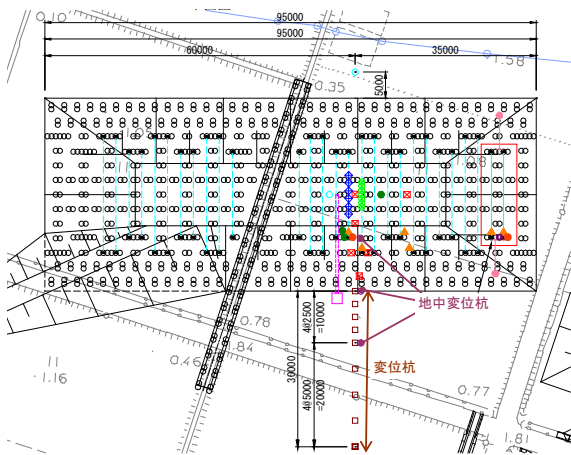


図 4-7 動態観測の計測機器の平面配置図

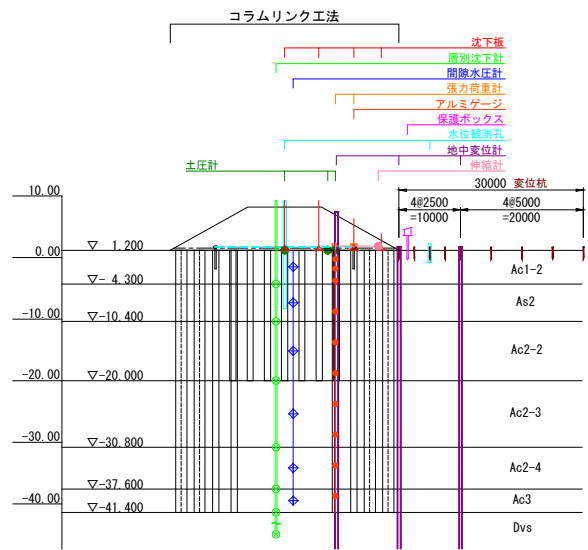


図 4-8 動態観測の計測機器の断面配置図

(2) 動態観測結果

① 沈下量

コラムリンク工法の盛土沈下の中央部と周辺地盤の沈下の経時変化を図 4-9 に示す。2012 年 12 月時点の盛土完了後 $t=15$ ヶ月での沈下量 S は、中央部で $S=19.6\text{cm}$ 、のり戻直下とのり戻から 10m 距離で $S=4.0\text{cm}$ 、30m 距離で $S=2.0\text{cm}$ であり、施工中に仮設用工事道路が、計測地点の近傍に設置された影響が出ているものの、盛土の沈下と周辺地盤の沈下はほぼ収束状態にあることが確認された。これより、周辺地盤の影響抑制対策をして非常に有効な工法であることを確認することができた。

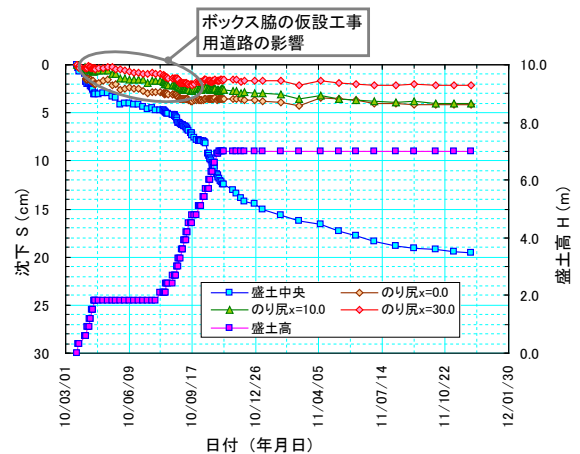


図 4-9 コラムリンク工法の盛土中央と周辺の沈下量

次に、当該近傍地で実施した無対策地盤(盛土高

H=6.2m, 3.0m)での試験施工結果を含めて比較した盛土高—沈下関係を中央部とのり尻部で図 4-10、図 4-11 に示す。

これより、無対策地盤中央部沈下 S は、H=6.2m で S=156cm、H=3.0m で S=88cm となり、まだ2次圧密が継続する状況である。結果、コラムリンク工法の沈下量は同一盛土高換算で無対策地盤に比べて約 1/10 に低減できており、コラムリンク工法の効果が明確に見られた。

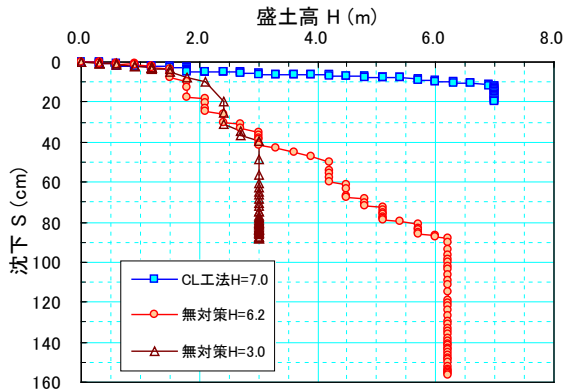


図 4-10 盛土中央部の沈下の比較

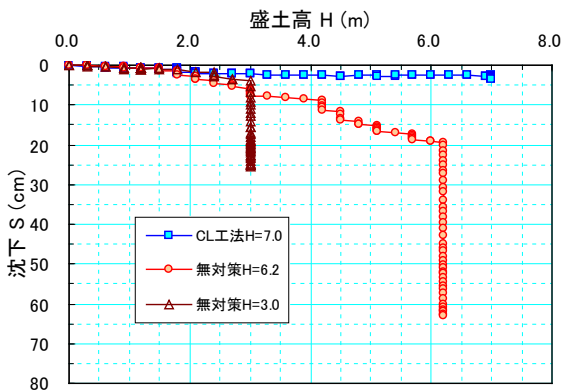


図 4-11 盛土法尻部の沈下の比較

図 4-12 に、コラムリンク工法と無対策地盤の盛土完了後 t=0, 4 ヶ月の層別沈下を含めた盛土中央部沈下の深度分布を示す。

これより、無対策 H=6.2m では深度 GL-40m 以浅から沈下傾向が見られ、無対策 H=3.0m では深度 GL-5.0m 以浅から急激な沈下傾向が見られる。コラムリンク工法では粘土層③に相当する深度 GL-20.0~30.0m 範囲で沈下がやや増加する傾向が見られるが、内部杭による沈下低減効果と側部壁による沈下拘束効果により、深度方向の沈下

成分が有効に抑制されていることが分かった。

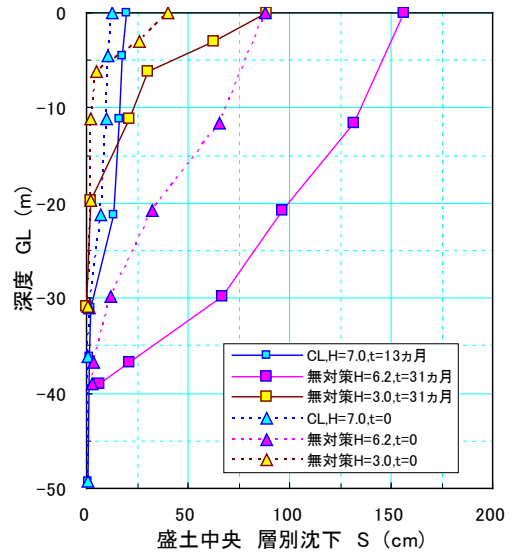


図 4-12 盛土中央部の層別沈下の比較

②水平変位量

図 4-13 に、図 4-12 と同様に整理したのり尻水平変位を示す。無対策の水平変位は t=0 から t=29 ヶ月で大きく進行するのが分かった。一方、CL 工法では水平変位の増加傾向は極めて小さく、変位抑制効果が良好であることが分かる。

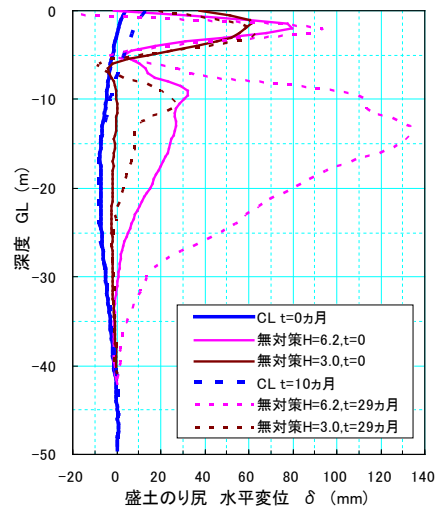


図 4-13 盛土法尻の水平変位量の比較

③側部壁への鉛直応力

図 4-14 には、CL 工法側部壁での改良体深度方向の鉛直応力分布を示す。側部壁の鉛直応力は、深度 z=0m が鉛直土圧計、それ以深がチェックボーリングによる改良体

の平均変形係数 $E=450\text{MN/m}^2$ を用いて、改良体ひずみ計の値から応力に換算したものである。側部壁鉛直応力の最大値は、改良体天端部と内部壁下端 $\text{GL}-20.0\text{m}$ 付近がほぼ同様な値で、 $\sigma_z=350\text{kN/m}^2$ 程度が生じており、これは設計値の約 $1/2$ 程度であった。

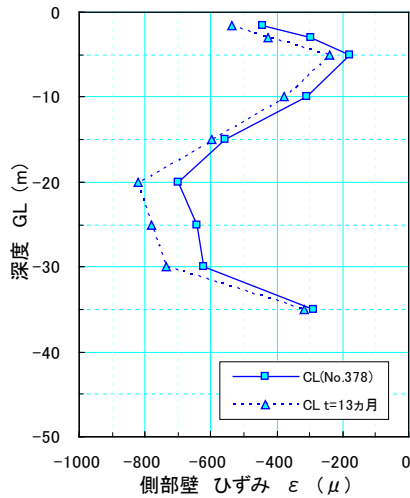


図4-14 側部壁に作用する鉛直応力

③地下水位

試験施工盛土の中心部と盛土外部での地下水位挙動を図4-15に示す。両者の傾向は、ほぼ同様なものとなって敏感に反応しており、コラムリンク工法で、側部壁を千鳥配置にすることにより、地下水遮断が発生しないこと確認することができた。

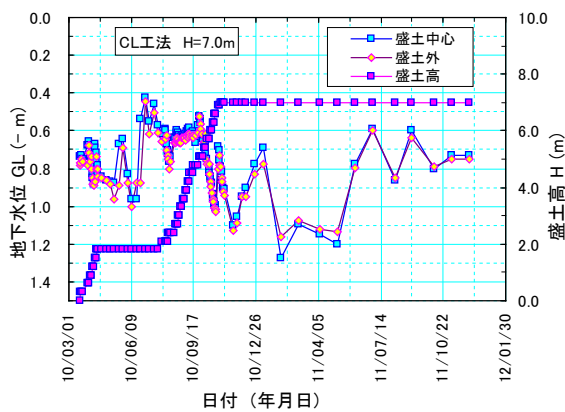


図4-15 盛土内外の地下水位挙動の結果

(3) 動態観測結果のまとめ

コラムリンク工法の実施工規模の試験施工を行い、継続して動態観測を実施した結果、本工法が低改良で経済

性が高い状態で、盛土中央部の沈下量を低減しつつ、周辺地盤の与える影響を確実に抑制できることが確認することができた。

4. 3 繋ぎ材の引張試験

(1) 試験の背景

コラムリンク工法の側部壁の繋ぎ材は、盛土荷重によって生じる側部壁頭部開き方向の水平変位をより強く拘束するために設置するものである。事前の解析等による検討により H 鋼の改良杭への挿入長は 3m としたものの（それ以上の長さは大きな効果が見込めないことを事前検討により確認）、「実際には、どの程度の張力の発生が予測され、繋ぎ材はどの程度の耐久性を有するか」実大試験にて把握し、今後の設計に反映させる必要があるものと考えている。しかしながら、小規模な模型実験では正確な値を把握することはできないため、試験施工現場にて、影響のない場所にて、側部壁に挿入した H 鋼と繋ぎ材に対する引張試験を実施することとした。

(2) 繋ぎ材の仕様

繋ぎ材の構造と仕様を表4-3～4-5に示す。繋ぎ材は設置のために、一度緊張は行うものの、設置後は除荷を行い、待ち受けにより荷重が作用する構造としている。

表4-3 H200 鋼の仕様

材種	寸法	質量 (kg/m)	断面係数 (cm ³)	断面積 (cm ²)	荷重P (kN/本)
H200	200×200×8×12 長さL3280	49.9	472	63.53	200
突出長L (m)	モーメントM (kN・m)	曲げ応力 σ (N/mm ²)	許容応力 σ _a (N/mm ²)		
0.35	70	148.3	210		

表4-4 繋ぎ材 (アンボンドPC 鋼より線) の仕様

材種	単位質量 (g/m)	断面積 A (mm ²)	最大緊張力 T _{max} (kN)	許容引張力 T _a (kN)
φ15.2	1,101	138.7	202	157
降伏荷重 T _y (kN)	引張荷重 T _u (kN)	引張剛性 EA (kN)		
>222	>261	27,000		

表 4-5 緊張荷重と理論伸び

適用	材種	緊張荷重 T_{max} (kN)	自由長 L_f (m)	剛性 (kN/m)	理論伸び δ (mm)
水平載荷試験	$\phi 15.2$	200	16.48	1638	122
【参考】本設	$\phi 15.2$	70	16.48	1638	43
	$\phi 15.2$	70	22.48	1201	58

*くさび定着後にシム材を取外し、緊張力を零に解放する。

(3) 引張試験の概要

載荷試験の概要等を図 4-16～図 4-17 に、載荷試験の仕様と計測項目を表 4-6～4-7 に示す。試験は多サイクルの載荷試験とし、設計荷重となる 200 kN を目標として、20 kN ずつ引張載荷していくものとする。

表 4-6 引張試験の仕様

項目	仕様内容
計画最大荷重	200kN
載荷方法	多サイクル試験 (最小荷重 $T_{min}=20kN$)
荷重段階	10段階載荷
	(0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200kN)
荷重保持時間	新規
	履歴内
荷重速度	10kN/分
計測頻度	1回/分
荷重負荷装置	200kNジャッキ (最大荷重能力相当)

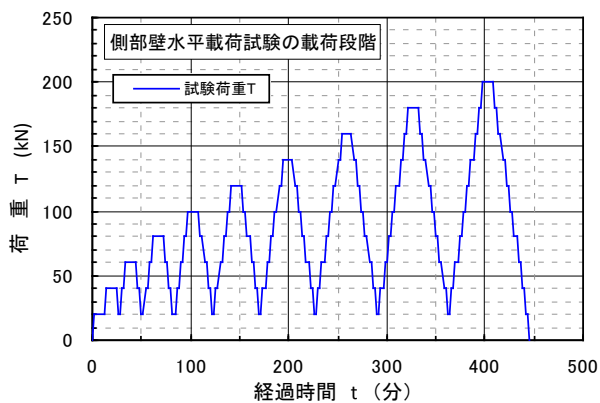


図 4-16 引張試験の試験サイクル

表 4-7 引張試験の計測項目

計測項目	計測器	数量
繋ぎ材引張力	センターホール型荷重計	2箇所
ジャッキ頭部変位	変位計	2箇所
改良体頭部変位	伸縮計	2箇所

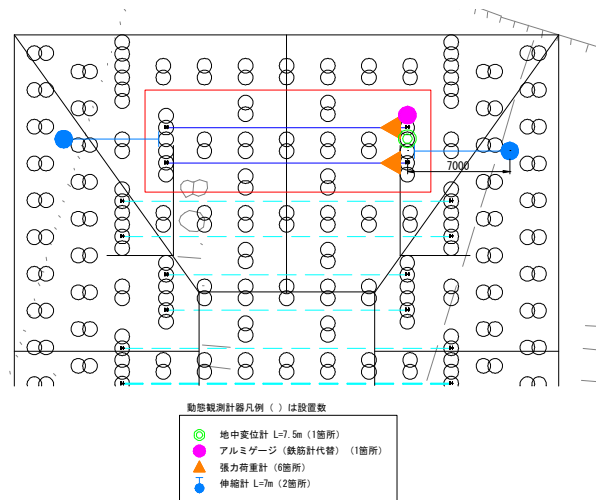


図 4-17 引張試験における計測機器の配置

また、繋ぎ材が切断された際の安全対策として、鞘管(塩ビ管)と、抑え土のうを設置して実施した。

(4) 引張試験の結果とまとめ

引張試験の結果を図 4-18 に示す。これより、約 180 kN にて側部壁にクラックが発生する(図 4-19)形で、降伏状態に到達することを確認できた。これより、H200 鋼材とアンボンド PC 鋼より線(耐張力 200 kN)の仕様で充分に対応可能であることが分かった。

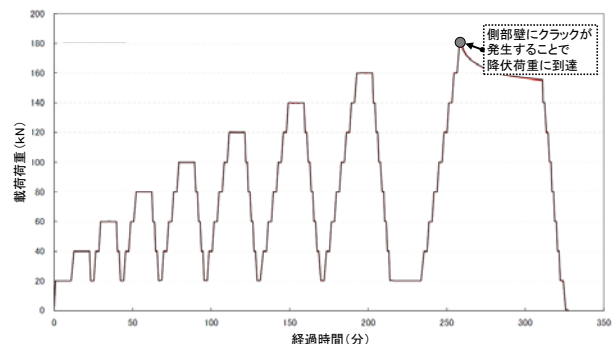


図 4-18 引張試験の結果

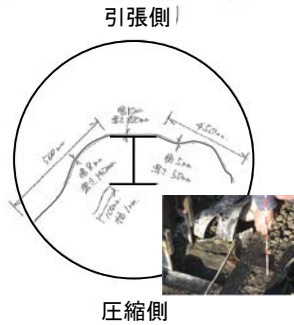


図 4-19 側部壁に発生したクラックの様子

また、試験工現場で作用している張力は60 kN程度であり、約3倍の安全率を有し、張力の伸びも頭打ちであることから(図 4-20)、繋ぎ材については、現状の仕様にて問題がないことを、計測データとの比較からも確認できた。

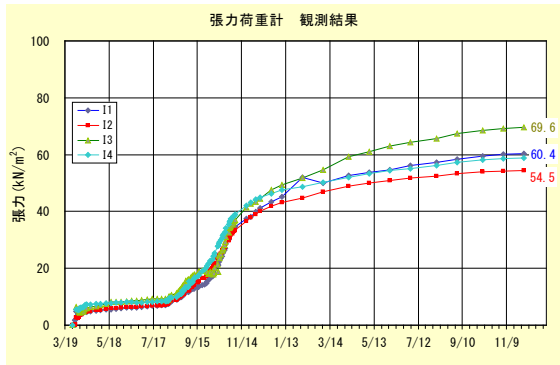


図 4-20 試験施工にて作用している張力

4. 4 2D-FEM、3D-FEM 解析のシミュレーションとの比較

(1) 解析の概要

試験施工での動態観測結果との整合性を確認するために、試験施工の地盤条件に合わせる形で、2D-FEM、3D-FEM 解析を実施した。2D-解析における解析モデルを図 4-21 に、3D-FEM の解析モデルを図 4-22 に示す。また、解析に用いた地盤パラメータを表 4-8 に示す。

表 4-8 解析に用いた地盤パラメータ

地層	構成式	単位体積重量 kN/m ³	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)	変形係数 E (kN/m ²)	圧密降伏応力 p ₀ (kN/m ²)	透水係数 (cm/sec)	改良杭変形係数 E (MN/m ²)
盛土	CASE1 : 弾性 CASE2 : Mohr-Coulomb	19.0	5	35	28,000	—	—	—
Ac1-2	開口・太田	14.6	10	0	1,720	36.8	1.30E-06	1088
As2	弾性	18.7	—	—	4,000	—	1.00E-03	1795
Ac2-2	開口・太田	14.3	36.3+0.6Z	0	6,380	148.1	3.00E-07	1440
Ac2-3	開口・太田	15.1	-115.8+6.05Z	0	7,130	178.5	2.30E-07	1339
Dvc	開口・太田	15.8	55	—	6,510	215.7	1.40E-09	1175
Dvs	弾性	19.0	—	—	70,000	—	1.00E-03	1795

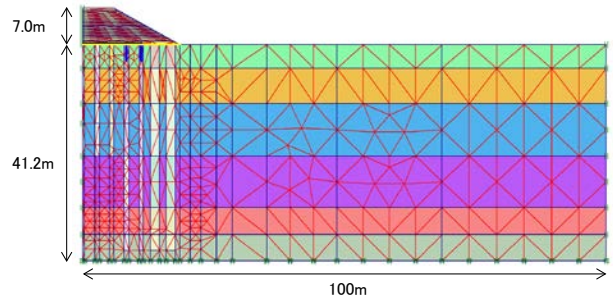


図 4-21 2D-FEM 解析の解析モデル (試験施工)

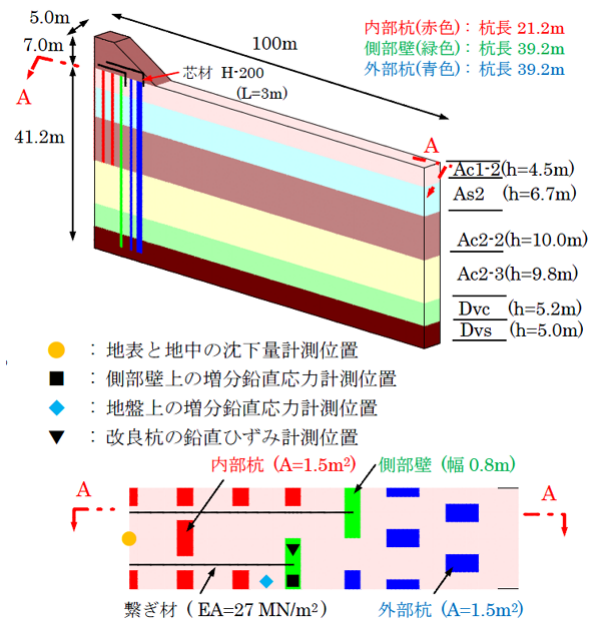


図 4-22 3D-FEM 解析の解析モデル (試験施工)

(2) 2D-FEM 解析の結果

2D-FEM 解析による、盛土中央部の地表面沈下量の比較結果を図 4-23 に示す。後述する 3D-FEM 解析を先行して実施しているため、3D-FEM 解析の結果も示している。これより、奥行き方向の改良率分、改良杭の剛性を低減させる方法により解析を行うことで、動態観測の沈下挙動をかなりの精度で再現できることが分かった。

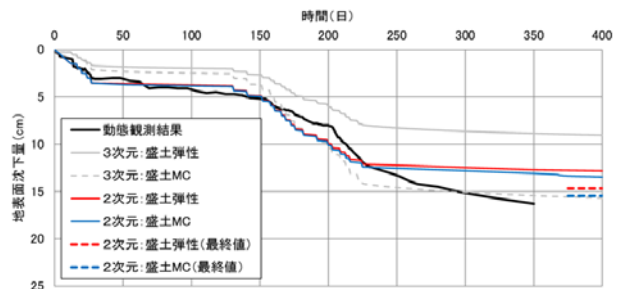


図 4-23 盛土中央部の地表面沈下量の比較 (2D 解析)

続いて、地表面沈下量の分布の比較結果を図4-24に示す。これより、盛土法尻より遠方については、2次元によるFEM解析結果(最終値)と3次元による解析結果が、ほぼ一致しており、3次元と比較して遜色ない解析結果になっていることが確認できた。動態観測データの結果とうまく合わない点については、近傍に工用盛土が作られ、工用盛土による引き込み沈下の影響を強く受けているためだと推測される。

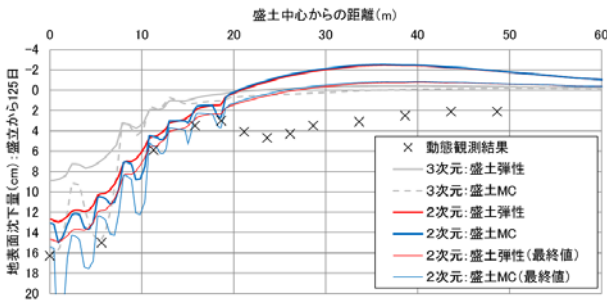


図4-24 地表面沈下量の分布の比較 (2D 解析)

(3) 3D-FEM 解析の結果

3D-FEM 解析では、盛土の構成モデルについて、弾性体としたモデル (Case 1) と弾塑性体とした Mohr-Coulomb モデル (Case2) に分けて解析を実施している。

図4-25に盛土中央地表面の沈下量を比較した結果を示す。解析では盛立て完了時点で2年後時点の約85%の沈下が発生し、2年後に沈下が収束状態にある。動態観測でも解析と同様に圧密による盛土の沈下量は小さく圧密進行スピードも速い。盛立て完了125日後で沈下量は収束傾向を示し、コラムリンク工法は盛土の沈下抑止効果が高いことが分かった。

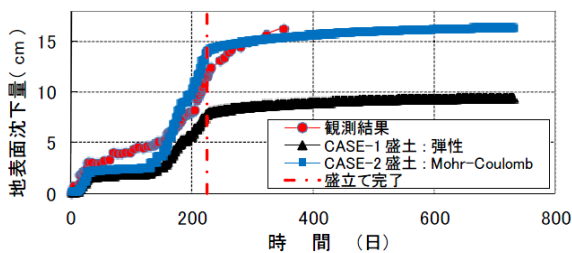


図4-25 盛土中央部の地表面沈下量の比較 (3D 解析)

地表面沈下量の比較図を図4-26に示す。これより、盛土中心付近では解析と動態観測の対応は良い。周辺地盤では、盛土立ち上げ時に設けられた工用道路の影響により、動態観測の沈下量が大きく発生しているが、解析

での周辺地盤沈下量は小さく、コラムリンク工法の周辺地盤変位抑止効果が優れていることが分かる。

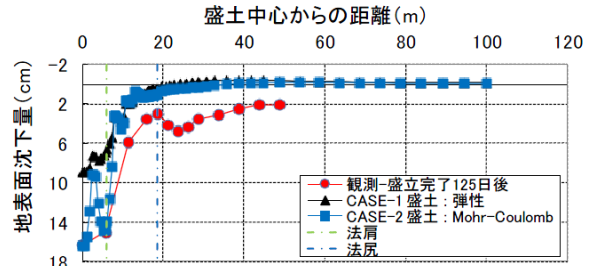


図4-26 地表面沈下量の分布の比較 (3D 解析)

次に、側部壁上と側部壁近傍地盤上での鉛直土圧増分を比較した。(図4-27) 動態観測では盛土高さ1.8mまで側部壁上と地盤上で同じ程度の鉛直土圧増分が発生しているが、解析で地盤上に発生する鉛直土圧増分は小さい傾向が有り、CASE-1の方がその傾向が強い。しかしながら、盛土の進行に伴って側部壁に土圧が集中する傾向を解析で表せており、CASE-2の方が動態観測と良い対応を示している。

最後に、図4-28にCASE-2の内部杭部・側部壁・外部杭部の各深度での鉛直荷重増分(2年後時点)を盛土総荷重に対する比率を示す。内部杭部の鉛直荷重増分が地中での応力分配で側部壁に分配されるため、内部杭下端深度での増分荷重が減少し、側部壁の鉛直ひずみピークが内部杭下端深度付近に表れる。また周辺地盤への応力分散でも内部杭下の圧密層に作用する鉛直荷重が低減されることが、盛土沈下と周辺地盤変位抑止に効果を発揮しているものと考えられる。

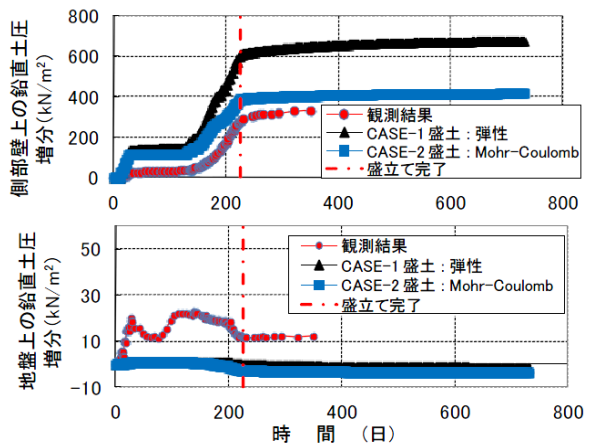


図4-27 側部壁と地盤上の鉛直土圧の増分の比較

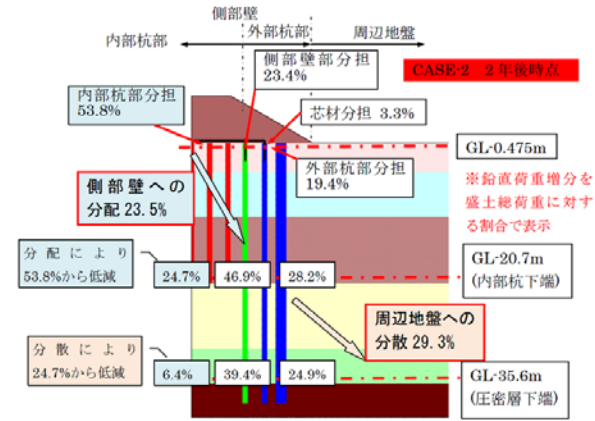


図 4-28 盛土荷重の地中各深度での分布状況

(4) 解析の結果のまとめ

2D-FEM 解析、3D-FEM 解析ともに、試験施工の動態観測結果に近い値を取り、適切にシミュレートできることが確認できた。これより、2次元、3次元のFEM解析による、コラムリンク工法の良い設計が期待される。

4. 5 試験施工結果のまとめ

今回の試験施工の結果を下記にまとめる。

- 具体的な施工方法について、既存技術の範囲内で可能であり、施工上の技術的な問題はないことが確認できた。
- 繋ぎ材の引張試験を実施し、降伏荷重の確認を行い、実際に作用する張力との間に十分な余力があることを確認できた。
- 動態観測により、周辺地盤への影響を十分に抑制し、要求された性能を満足することが確認できた。
- 2次元、3次元解析との比較を行い、解析にて、実際の挙動を十分にシミュレーションできることを確認できた。

5. 設計マニュアルの作成

5. 1 設計マニュアルの概要

一連の実験・解析の結果と試験施工での評価を踏まえ、コラムリンク工法の設計マニュアルの作成を行い、つた。他にも施工マニュアル、積算マニュアルを別途作成しているものの、研究的な要素には乏しいため、ここでは、設計マニュアルを取り上げて、その概要の報告を行うこととする。

設計マニュアルを記述するにあたり、実務では工法の検討等を行う計画段階から、工法決定後の詳細設計まで段階を得て、設計仕様を具体化するため、コストの概算

試算や他工法との比較検討に用いる簡易的な設計方法と、詳細設計に用いる 2D-FEM 解析等による詳細な設計方法について、マニュアルに用意する必要があると考え、作成するに至った。

5. 2 簡易設計モデル

(1) 簡易設計モデルの概要

実験・解析による事象を検討した結果、地盤や各改良杭、改良壁が互いに連携して挙動する複合バネモデルとしてモデル化し、マトリクスによる計算を行い、各場所の沈下量を算出する方法が、簡易計算手法として最も適切であるとの結論を得た。

簡易設計の概念図を図 5-1 に、簡易バネのモデル図を図 5-2 に示す。

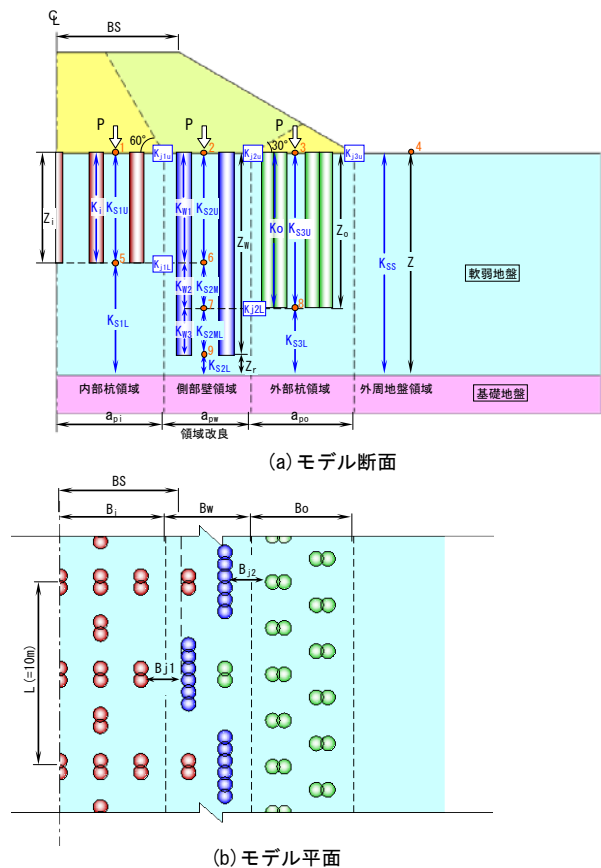


図 5-1 簡易設計の概念図

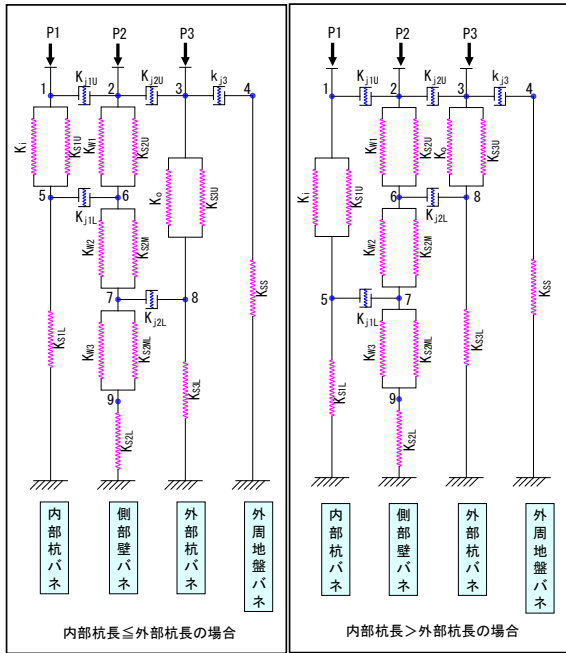


図5-2 簡易バネのモデル図

(2) 試験施工の観測データと簡易モデルとの比較

簡易バネによる設計方法が、実際の地盤の挙動をどの程度再現可能であるか確認するため、試験施工現場の動態観測結果との比較検討を行った。

深度分布で示した盛土中心部の沈下量の比較結果を図5-3に、盛土の地表面沈下量を図5-4に示す。これより、盛土中心部の沈下量と、盛土法尻内側の沈下量は、観測データとの整合が良いこと分かる。また、盛土周辺の沈下については、盛土法尻部の外周バネしか設定していないため、盛土法尻外の沈下量の設計については、無理があることが分かる。しかしながら、工法検討の計画段階としての仕様は十分に満たしているものと考えている。

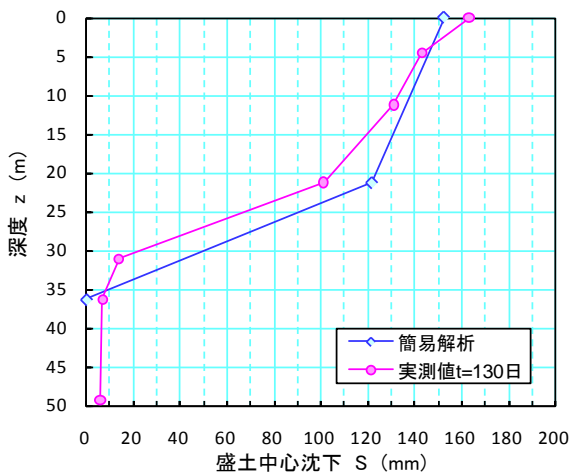


図5-3 盛土中心部の沈下量の比較結果

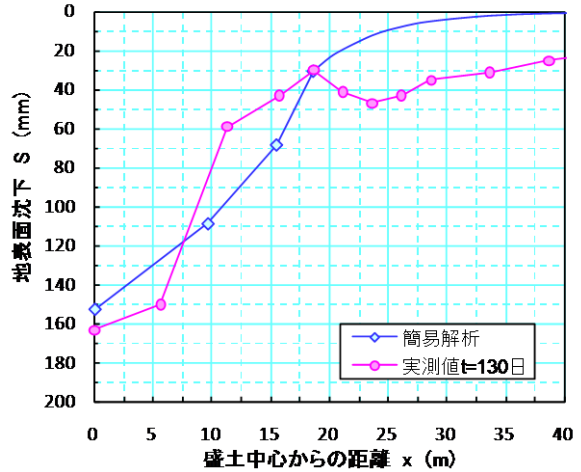


図5-4 盛土の地表面沈下量の比較結果

5.3 2D-FEM を用いた設計モデル

(1) 2D-FEM の設計モデルの概要

2D-FEM により設計を行う際、最も問題となる点が「壁と杭の区別をどのようにモデル化するか」であるが、各種検討を実施した結果、奥行き方向の改良率分、改良杭の剛性を低下させて、モデル化する方法が最も良いとの結論を得た。

また、解析の検討手順についても、無作為にメッシュやパラメータを振って解析を行うことは、非常に非効率で時間がかかるため、解析の手順についてもマニュアル化することとした。図5-5に2D-FEM 解析の検討手順を示す。

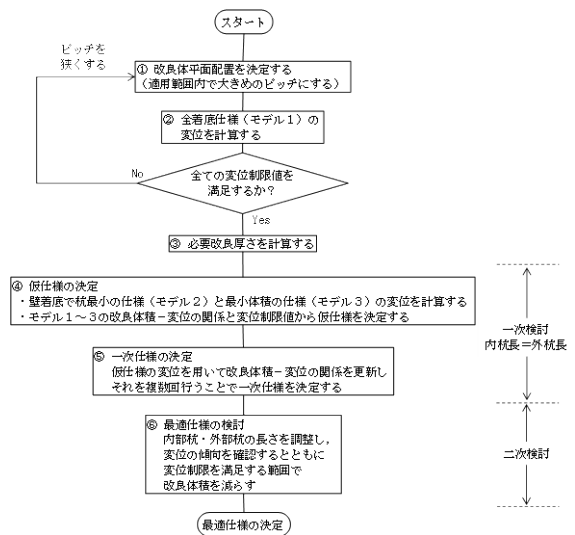


図5-5 2D-FEM 解析の検討手順

(2) 2D-FEM 解析の手順について

2D-FEM 解析の検討の手順を下記に示す。

- ① 簡易設計の結果を参照として、改良杭の平面配置を定める。
- ② 改良杭、改良壁を全て着底させて、解析を実施し、改良体積が最大となる仕様（モデルⅠ）を設定する。
（全ての制限値の条件をクリアしない場合は、平面の改良率を上げ、余裕がありすぎる場合は平面の改良率を下げて、再検討を行う。）
- ③ 改良杭、改良壁を同じ長さで順次短くしていき、盛土中央部の沈下制限値を満足する改良長さを求め、改良体積が最小となる仕様（モデルⅡ）を設定する。
- ④ モデル②の仕様から側部壁のみ着底させて、解析を行う（モデルⅢ）
- ⑤ モデルⅠ～Ⅲを制限値（沈下量、水平変位など）と改良体積のグラフ上にプロットし、制限値と交点以上となる改良体積を求め、仮仕様とする。（図5-6）
- ⑥ 仮仕様をベースに内部杭、外部杭、側部壁の改良長を適時割り振ることで、最適仕様を決定する。

- コラムリンク工法の試験施工とそれに関連する実験の検討により、周辺地盤への影響抑制効果を確認するとともに、具体的な施工方法と施工時の留意点等を確認することができた。
- 実験・解析による検討結果、試験施工の実績を踏まえ、コラムリンク工法の設計マニュアル、施工マニュアル、積算マニュアルの作成を行った。
- これまでの研究成果を取りまとめ、NETIS 登録を行った。（正式な申請は平成4月以降に行い、有効期間は5年） 今後はコラムリンク工法のコンソーシアムを立ち上げ、技術の発展と普及に向けて活動する予定である。

参考文献

- 1) 堤 祥一、小橋 秀俊、澤松 俊寿：コラムリンク工法の遠心模型実験による検討、第65回土木学会年次講演会、Ⅲ-504、2010
- 2) 松井 秀岳、石井 裕泰、堀越 研一、堤 祥一、川崎 廣貴、津國 正一：コラムリンク工法の遠心模型実験に対する二次元FEM解析、第65回土木学会年次講演会、Ⅲ-505、2010
- 3) 津國 正一、堤 祥一、川崎 廣貴、堀越 研一：コラムリンク工法と杭状改良工法の周辺地盤変位抑止効果の比較、第65回土木学会年次講演会、Ⅲ-505、2010
- 4) 堤 祥一、小橋 秀俊、石井 裕泰、津國 正一：コラムリンク工法の液状化による変位抑制効果確認のための遠心模型実験、第66回土木学会年次講演会、Ⅲ-029、2011
- 5) (独)土木研究所：土木研究所共同研究資料 側方流動対策としての地盤改良技術に関する共同研究(平成20年、21年業務報告書)、2010年
- 6) 新川 直利、堤 祥一、川原 実、川崎 廣貴：熊本・宇土道路における側方流動対策としてのコラムリンク工法の試験施工、第65回土木学会年次講演会、Ⅲ-503、2010
- 7) 国土交通省 九州地方整備局 道路部 道路工事課 福岡国道事務所：有明海沿岸道路 軟弱地盤対策 技術基準(案)、2003年7月
- 8) 川崎 廣貴、樋口 尚弘、堤 祥一、新川 直利：熊本宇土道路に用いたコラムリンク工法の試験施工動態観測挙動、第66回土木学会年次講演会、Ⅲ-026、2011
- 9) 津國 正一、樋口 尚弘、堤 正一、川崎 廣貴：熊本宇土道路でのコラムリンク工法試験施工シミュレーション、第66回土木学会年次講演会、Ⅲ-028、2011
- 10) (独)土木研究所：コラムリンク工法設計・施工・積算マニュアル 2011年
- 11) SHOICHI TSUTSUMI, HIDEYOSHI KHASHI:RESEARCH DEVELOPMENT OF DEEP MIXING

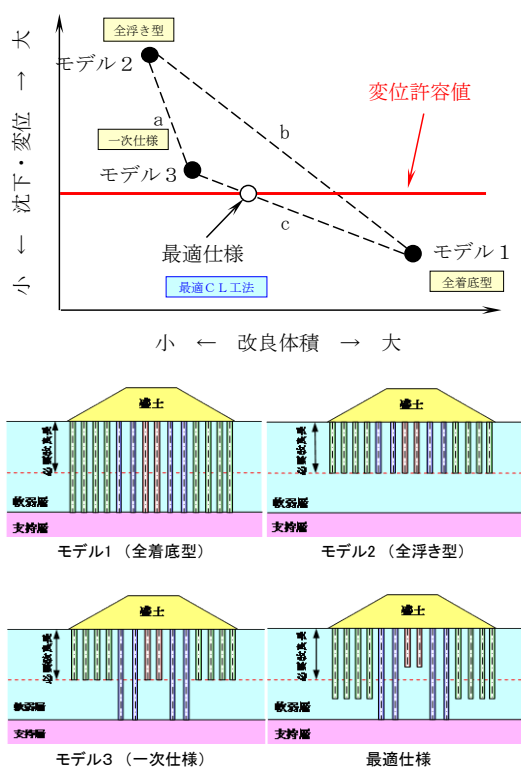


図5-6 2D-FEM解析の手順のイメージ

6. 今後の課題とまとめ

本研究のまとめと今後の課題を下記に示す。

- 遠心模型実験や2次元・3次元解析を行い、コラムリンク工法の力学挙動とメカニズム、改良杭と改良壁の最適な配置構造を明らかにすることができた。

- MEHD, International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), 2011 (投稿中)
- 12) S Tsutsumi, T Sawanatsu, Y Iso, T Oshita : Centrifuge model experiment of new improvement type in deep mixing method with steel tied by cable for lateral flow, P0049, Deep Mixing 2009 (Okinawa Symposium International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, 2009)
- 13) Hidetake MATSUI, Hiroyasu ISHII and Kenichi HORIKOSHI : Hybrid Application of Deep Mixing Columns Combined with Walls as a Soft Ground Improvement Method Under Embankments (国際地盤工学会一投稿中)
- 14) (独)土木研究所 : 土木研究所共同研究資料 側方流動対策としての地盤改良技術に関する共同研究(平成 19 年業務報告書)、2008 年

A STUDY ON ABOUTTHE COMPOSITE SOIL IMPROVEMENT SOIL TECHNOLOGY

Abstract : Many types of deep mixing methods were proposed for cost reduction. However, in case of the high embankment and rapidly construction, it is difficult to stop to the lateral flow and compression failureground sinkage of improved soft ground. cement columns, bearing failure of soft groConstruction technology team started the joint research with 13 construction companies to develop new deep mixing method which can solve these problems. In this research, wWe conduct the report about the result of centrifuge experiment and 2D,3D-FEM analysis, observation after construction. As research conclusion, we develop the design and construction, cost management manual.

Key words :New deep mixing method, centrifuge model experiment, 2D3D-FEM analysis,
Test field construction, observation after construction