

部分固化方式による軟弱地盤対策工法の設計と施工

Design and Construction of Jet and Mix for Partial Solidification (JAMPS)
as a Soft Ground Improvement Method

鎌田 克郎 (かまた かつろう)

都市基盤整備公団神奈川地域支社
横浜中央都市整備事務所 工事課長

岩田 充功 (いわた みつなり)

鹿島建設(株)土木設計本部プロジェクト設計部 設計部長

林 寛 (はやし ひろし)

鹿島建設(株)技術研究所環境技術研究部 上席研究員

富士田 道夫 (ふじた みちお)

鹿島建設(株)横浜支店 MM21工事事務所 所長

1. はじめに

大都市周辺臨海部の埋立て地盤には、圧密による沈下と地震時の液状化が懸念される軟弱地盤が多く存在する。このような地盤に構造物を構築する場合には、これらに対する対策が必要となることが多く、工期が短くて確実な工法として軟弱地盤全体を固化する工法が挙げられる。しかしながら、同工法は、改良土量が膨大で対策に要するコストが高くなることから、効果が確実で、かつ、低コストな固化工法の開発が求められてきており、今回、部分固化方式を用いた軟弱地盤対策工法「JAMPS工法 (Jet and Mix for Partial Solidification Method)」を開発した。JAMPS工法は、高圧噴射併用機械攪拌工法施工機械を用いて、地中に水平固化盤と鉛直固化壁を組合せて構築することにより、地震時の液状化対策と軟弱地盤の沈下・支持力対策を、部分固化方式で行う工法であり、以下の施工・品質上の利点を有する。

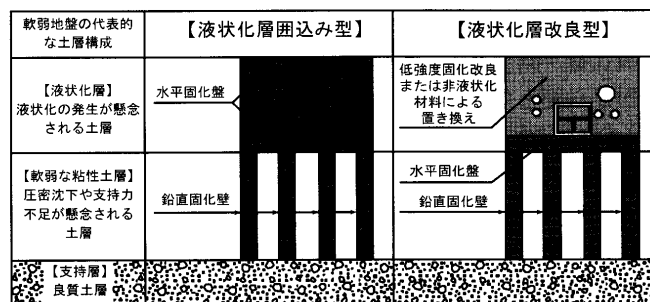
- ① 沈下・支持力・液状化対策のための改良体の造成を一度に大断面で行えるため、工期を短縮できる。
- ② 高圧噴射と機械式攪拌の併用により、先行した改良体に後続の改良体が高圧噴射攪拌で接合されるため、完全に一体化した改良体を造成することができる。

本稿では以下、本工法の概要と設計法を紹介する。

2. JAMPS工法の概要

JAMPS工法の改良体構造形式には、図一1に示すように、『液状化層囲込み型』と『液状化層改良型』の二つの構造形式がある。『液状化層囲込み型』は、液状化の発生が懸念される土層（以下、液状化層）を改良体で囲込み、地震時に地盤に発生するせん断変形を拘束することにより、液状化の発生を抑制するものである。

一方、『液状化層改良型』は、液状化層全体を液状化が発生しない強度を有するように改良するものである。また、いずれの構造形式においても、鉛直固化壁を支持層まで構築することにより、沈下や支持力に対する安全性を確保することができる。



図一1 JAMPS工法の改良体構造形式

3. 設計法の概要¹⁾

3.1 設計の基本方針

JAMPS工法の設計では、対策の対象とする構造物が、常時および地震時において所要の安定性を確保できるよう、改良範囲（改良深さ、改良幅）や改良仕様（改良体形式、改良体強度等）を設定する。

3.2 設計手順

設計では、はじめに、液状化層を改良体で囲込む『液状化層囲込み型』と、液状化層全体を低強度で改良する『液状化層改良型』の二つの改良体構造形式の中から、対象とする構造物の条件や、施工条件を勘案し、適切な改良形式を選択する。次に、液状化が発生しないよう液状化層の改良仕様を決定する。そして、圧密沈下や支持力不足が懸念される軟弱な粘性土層に対する改良仕様を設定し、液状化層の改良体も含めた改良体全体系の外部安定検討および内部安定検討を実施して、最終的な改良仕様を決定する。

以下、液状化に対する検討方法と、外部安定および内部安定に対する検討方法の概要を述べる。

3.3 液状化に対する検討

液状化対策として『液状化層囲込み型』を用いた場合の液状化抑制効果は、動的遠心模型実験と有効応力解析を実施して確認している²⁾。

動的遠心模型実験の実験模型を図一2に示す。間隙流体はシリコンオイル（粘性50 cP）を用いており、改良体は、ソイルセメント（試験時の一軸圧縮強さ q_u

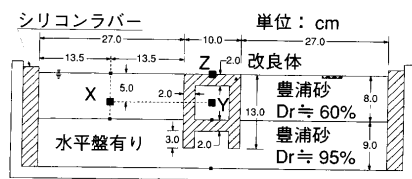
論文

鋼製土槽を最大振幅 98.1 m/s^2 に調整した八戸基盤波EW成分で加振した。同図X, Y, Z箇所における実験結果(応答値)を図—3に示す。図には有効応力解析結果も併記する。同図から、周辺地盤が液状化しているにもかかわらず、固化壁で囲まれた地盤は、最大過剰間隙水圧比が約0.4と液状化していないこと、および、実験結果と解析結果が良く一致し解析方法が妥当なことが確認できる。当解析方法を用いて、図—4に示すように、標準的な改良仕様(固化体強度 $q_u=3 \text{ MN/m}^2$ 程度、固化壁厚さ $2.3\sim 3.1 \text{ m}$ 上面水平固化盤厚さ 1 m)で、改良地盤の液状化を抑制する(過剰間隙水圧比0.5未満に抑える)ためのノモグラムを作成している。同図から、液状化を抑制するための標準的な固化壁ピッチの設定が可能であり、地震時の外部安定・内部安定の検討を経た上で最終的な改良仕様を決定することができる。なお、改良仕様が異なる場合には別途液状化抑制効果に関する検討が必要となる。

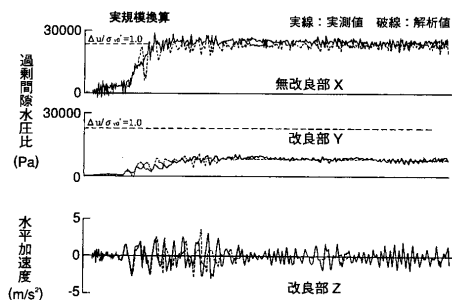
『液状化層改良型』の場合には、液状化が発生しないような強度まで全面的に改良する仕様を決定する。

3.4 地震時の外部安定および内部安定に対する検討

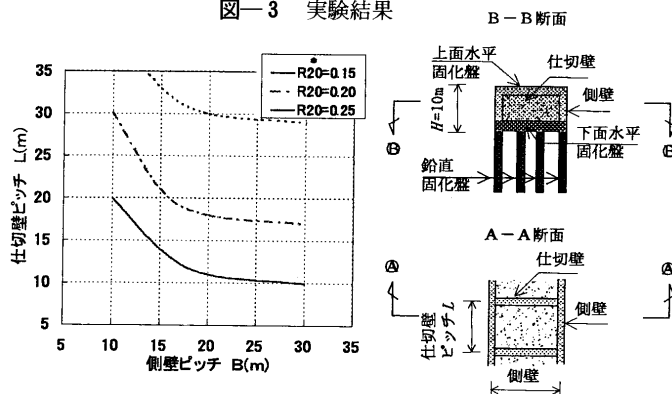
JAMPS改良体の地震時における安定性評価では、対策の対象となる構造物の安定性が損なわれない局所的な



図—2 動的遠心模型実験モデル図



図—3 実験結果



* R20(液状化強度): 繰返し回数20回で液状化に至る繰返し応力振幅比

図—4 設計用ノモグラム

(『液状化層囲込み型』の場合)

破壊であれば、改良体の損傷を許容するものとしている。このため、JAMPS改良体の安定性評価は、改良体の損傷レベルを評価することができる等価震度法等に基づくFEM系静的非線形解析手法によることを基本としている。以下に、安定性評価手法についての基本的な考え方を述べる。

(1) 等価震度法に基づく地震力評価について

JAMPS改良体の地震時の挙動は周辺地盤の変形に支配され、改良体に生じる応力や変位は、地盤と改良体の相互作用の結果として定まる。このような相互作用を評価する解析手法としては、改良体と周辺地盤を適切にモデル化した動的解析法(全応力, 有効応力)が最も解析精度が高いが、解析に必要なデータが多く、解析が複雑になる。このため、地盤条件が比較的単純で、特に詳細な検討を必要としない場合には、等価震度法等に基づく静的FEM解析によってよいものとしている。

当解析法は、一次元地震応答解析を実施し改良体上下端位置での相対変位が最大となる時刻における地盤変位を再現するように震度を設定して、これをFEMモデルに静的に作用させ、改良体の応力や変位を算出する手法である。

等価震度法における荷重モデルの例を図—5に示す*。

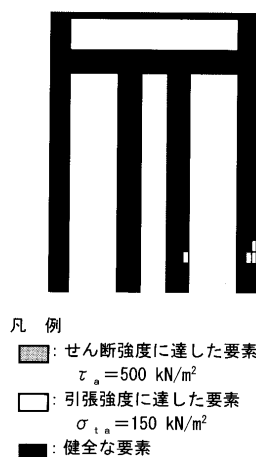
*: ここで、液状化層以浅の非液状化層の改良体への作用土圧は、通常の震度法とは土圧の作用方法が異なる。当該モデルの場合、このような土圧作用方法を想定(図中、改良体に向かって水平慣性力が作用する側の地盤に地震時主働土圧を、改良体とは反対方向に水平慣性力が作用する側の地盤に地震時主働土圧を想定)したのは、地盤と改良体の剛性の違いにより、動的応答解析によれば、改良体に向かって水平慣性力が作用する側では改良体が地盤に押され、改良体とは反対方向に水平慣性力が作用する側では改良体が地盤と離れる方向に変形することが予想されるためである。このような状況下にある地震時土圧の挙動は未だ確認されておらず、現時点では確定することが困難であるが、ここに示す土圧作用位置を想定することにより、通常的作用方法より設計上安全側の値が得られる。

(2) 非線形解析について

JAMPS改良体の安定性評価においては、表—1の設計目標水準に示すように、改良体の局所的な損傷を許容するものとした。これは、対象とする構造物に要求される設計地震動に対して、JAMPS改良体の各部材を弾性

地震力の方向

表 1 JAMPS 改良体設計目標水準



図—6 非線形 FEM 解析結果の例
 (改良体要素応力コンター図,
 ポートアイランド基盤波形
 $2E = 500 \text{ Gal}$ 入力)

的な応答の範囲に留めようとする、改良仕様が著しく大きくなることを考慮したものである。

したがって、安定性評価においては、改良体の非線形性を考慮した FEM 解析を行う必要がある。非線形 FEM 解析では、改良体強度を設定して、これを超過した要素—引張り破壊またはせん断破壊した要素—については、応力の再配分を行うとともに、剛性低下を考慮した解析を行う。これにより、改良体の損傷レベルを考慮した合理的な安定性評価が可能となる。非線形 FEM による解析例を図—6 に示す。

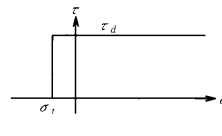
4. 施工法の概要³⁾と施工例

4.1 施工法の概要

JAMPS 工法に用いる施工機械としては、隣接する改良体の一体化や品質の向上を図るために、機械式攪拌(中央部)と高圧噴射式攪拌(外周部)を複合した二軸タイプのものを採用している。機械式攪拌と高圧噴射式攪拌を併用することで、先行して造成された改良体に後続する改良体が常に高圧噴射攪拌で接合されるため、設計図面どおりに確実に一体化した改良体を造成することができる。施工方式の概要図を図—7 に、噴射・攪拌状況を写真—1 に示す。

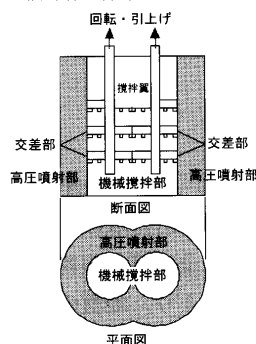
4.2 施工例

横浜みなとみらい21中央地区の地盤改良工事において、JAMPS 工法が採用された。当工事において、改良体品質確認試験を実施した結果、所定の改良体厚が確保されていること、機械攪拌改良部、高圧噴射改良部は同等の強度を有しており、改良体は完全に一体化していることが確認できた⁴⁾。

	外部安定 (支持力, 滑動)		内部安定(引張り, せん断)	
	支持力	滑動	*1) 安定性評価基準	安定性評価に用いる改良体破壊規準
中規模地震動 (レベル1地震動)	$F_s = 1.5$	$F_s = 1.0$	・改良体にせん断破壊する箇所が存在せず、引張り破壊した箇所が存在してもその箇所でも改良体が完全に分離しないことを確認する。 [地震後においても、JAMPS 改良体の補強なしで、常時および地震時における対象構造物の安定性に対して十分機能する状態。]	室内配合強度に対する安全率を $F_s = 3.0$ として求めた改良体の設計基準強度に基づき、改良体破壊規準を設定する。
大規模地震動 (レベル2地震動)	$F_s = 1.0$	$F_s = 1.0$	・改良体にせん断破壊、引張り破壊した箇所が存在しても改良体の支持機能、液状化抑制機能に致命的な損傷がないことを確認する。 [地震後においても、JAMPS 改良体の補強なしで、対象構造物の常時における安定性に対しては機能する状態。*2)]	 設計基準強度に基づく破壊規準

*1) 許容する改良体の損傷レベルについては、対象とする構造物の設計目標水準、地震後に JAMPS 改良体を補強する場合の難易度などを考慮して技術者が判断するものとする。

*2) 大規模地震を受けた JAMPS 改良体が次の地震に対してどの程度機能するかについては、改良体の健全度調査等を実施して技術者が判断するものとする。



図—7 改良体の施工方式



写真—1 噴射・攪拌状況

5. おわりに

部分固化による軟弱地盤対策工法 (JAMPS 工法) の概要を設計法を中心に紹介した。従来の部分固化工法の場合、改良体の品質上の問題から設計上改良体を地盤として取り扱うか構造体として取り扱うかあいまいであった。本工法では、高品質な改良体を造成できることから、改良体を構造体として改良地盤を地盤～構造系として整合のとれた設計法を構築した。したがって、本工法は広範囲な構造物の軟弱地盤対策として検討することができる。