

地盤固化を利用した岸壁・護岸の液状化対策の合理化

鹿島建設(株)土木管理本部	正会員	○山田岳峰
鹿島建設(株)技術研究所	正会員	石井健嗣
鹿島建設(株)土木設計本部	正会員	鎗田哲也
鹿島建設(株)中部支店		水野直也
鹿島建設(株)中部支店	正会員	小倉一郎
ケミカルグラウト(株)技術本部		北山 真

1. はじめに

東日本大震災の教訓の一つとして、震災後の石油製品の供給の継続が挙げられる¹⁾。また、被災した施設の回復力の強化が、事業継続上の経営課題と意識されるようになった。そこで、2013年から資源エネルギー庁の「産業・エネルギー基盤強靱性確保事業」により製油所の施設の耐震評価²⁾が始まり、現在、危険物を取り扱う施設の安全性の確保、並びに石油製品の入出荷に必要な施設の地震対策が進められている。対策では、液状化や側方流動が懸念される地盤に立地する供用中の施設を対象とした液状化対策が求められることが多い。従って、地盤の対策は、対策効果が高く、施工性に優れる地盤固化の利用が有望である。

一方で、建設後長く利用された臨海地区の岸壁・護岸では、大規模な更新事業も行われるようになってきた。既存施設の構造を利用しながら、地震対策とともに、埠頭の利用再編に関連した増深や環境に配慮した対策の事例も出てきている。ここでも地盤固化が利用されている。これらの事業は、港湾の競争力強化や魅力向上等、今後の港湾施設の利用価値を高める取り組みであり、今後さらに同様な事業が増加することが予想される。

筆者らは、2011年の東日本大震災以降、地盤固化を利用した岸壁・護岸の合理的な液状化対策を研究してきた。地震対策とともに、既存施設の更新技術としても地盤固化が期待される。そこで、本稿では、筆者らが注目している地盤固化の最近の施工実績を紹介するとともに、地盤固化に関する筆者らの問題意識を整理する。その上で、合理的な液状化対策として、著者らがこれまでに取り組んできた低コスト化技術（「低置換率格子状固化」並びに「側方流動抑制壁」）の有効性を概説する。さらに、地震観測を併用しながら、これらの対策を段階的に進める地震対策の可能性と効果について考察する。

2. 注目される地盤固化の施工実績と課題

(1) 事例 1: 三河港埠頭再編改良事業

三河港埠頭再編改良事業の概要を、文献 3) を参考に紹介する。三河港湾事務所（国土交通省）が進める同事業は、港湾機能の強化を図り、大規模地震に対応できる耐震強化岸壁として、図-1 に示すような既設護岸を水深-12mの耐震岸壁（延長 260m）に整備するものである³⁾。事業箇所は、三河港神野西ふ頭地区で、7号岸壁第三バース（-12m岸壁）に隣接する護岸である。

本事業で採用されている固化改良式係船岸の考え方³⁾を図-2に示す。事業は、第三バース側から設計水深がそれぞれ-12m、-8m、-4mと順次浅くなる既存護岸の背面地盤を、鋼管矢板、鋼矢板の2種類がある既存の護岸構造のうち、鋼管矢板施工箇所については既設構造を利用し、根入れが不足する鋼矢板箇所は鋼矢板を新設した上で、背面地盤をブロック式で固化し、増深並びに耐震強化を図る³⁾。本事業は、固化改良体でクレーン荷重や背後地盤の土水圧等の外力を支持し、矢板には外力に抵抗する構造体ではなく主に浸食防止

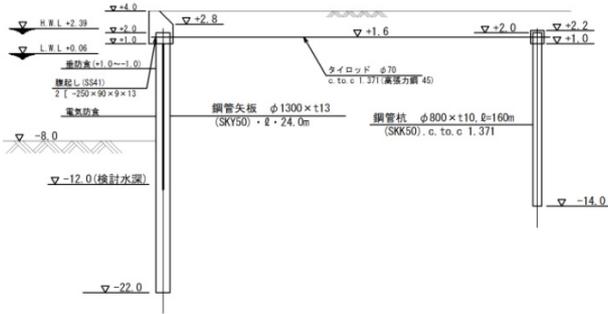


図-1 事例1: 既設構造物の概要 (-8m 護岸部) ³⁾

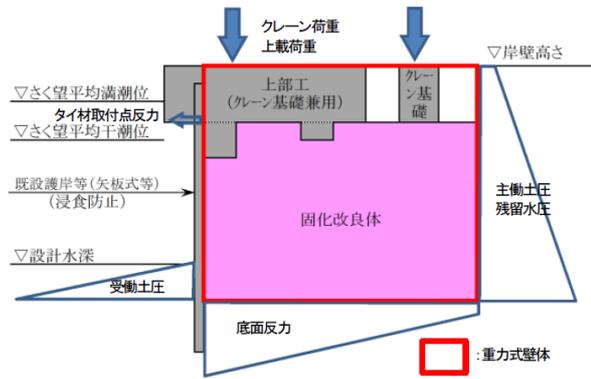


図-2 事例1: 対策工の概要、固化工改良式係船岸の考え方 ³⁾

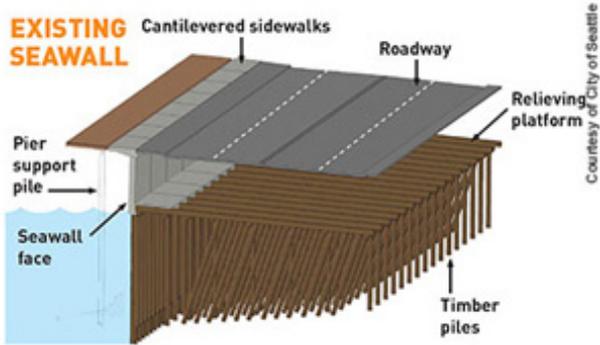


図-3 事例2: 既設岸壁の概要 ⁴⁾

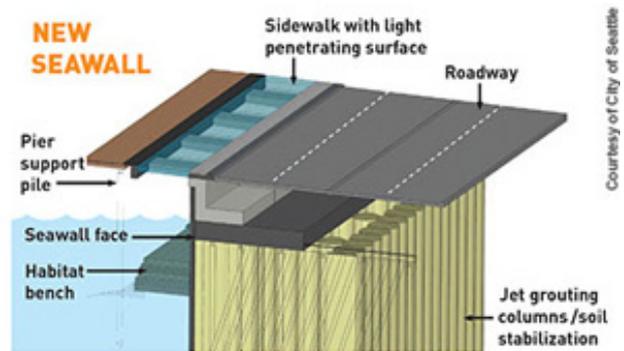


図-4 事例2: 対策工の概要 ⁴⁾

の機能を重視している点において、先進的な事例とみなし得る。レベル2地震動（海溝型地震動，活断層型地震動，M6.5直下型地震動）の他に，南海トラフの巨大地震を想定した，最大クラスの津波を生じさせる地震動に対しても安全性等が照査されている ³⁾。

(2) 事例2: シアトル・エリオット湾護岸の大規模更新事業

エリオット湾に面するシアトル市の中心市街地の護岸は，図-3に示すように木杭とコンクリート壁で構成された護岸で，建設後70年以上が経過し，土砂の吸出しによる路面の陥没や大規模地震による護岸の耐震安全性が課題となっていた。そこで，ウォーターフロント地域の再開発事業と一体で，現行の耐震基準に適合する護岸の大規模更新事業が進められており，既に一部の事業は完了している。

更新工事では，図-4に示すように，地盤改良として高圧噴射攪拌工法による格子状固化による改良の後，その上に上部構造が建設される。前出の三河港の事例と同様に，固化した地盤を支持構造物として，海側にはコンクリート製の化粧パネルが設置される。三河港の事例では，浸食防止のため海側に鋼管杭や鋼矢板といった構造を有しており，護岸の変形時には構造物としての効果も期待できると考えられるが，本事例では，このような構造が一切ないことが特筆される。本事例でも，シアトル周辺の巨大地震を含む様々な想定地震動を対象に設計照査が行われている。なお，更新した護岸の耐用年数は75年を想定している。

(3) 課題（地盤固化に関する筆者らの問題意識）

前述の事例は，既設の岸壁や護岸の耐震対策を兼ねた更新事業において，地盤固化を採用し，固化地盤を本設構造物として期待する先進的な実績である。当然ながら，固化地盤には，本設構造物に見合う品質（強度，均質性，出来形，耐久性等）の確保が要求される。厳しい沿岸環境下でも，地盤固化で当該の品質確保が

可能と評価された結果、施工性に優れる地盤固化が採用されたものと考えられる。その他にも、建築基礎の支持地盤として地盤固化が利用される事例がわが国で増加している。地盤固化の本設利用が進む液状化対策では、これまで以上に固化地盤の内外部の安定性に係る検討（図-5 参照）が必要になってきている。

一方、東日本大震災の後に、筆者らが、地盤固化を適用した構造物を対象に約 20 事例を調査した結果、設計の想定を上回る地震が作用した場合でも、構造物の被害が発生していなかった。従って、費用対効果を意識した合理的な対策の実現には、対策工の性能や耐震裕度を把握すること（性能評価技術）が重要である。特に地盤固化のコスト低減策として実績が多い格子状固化を合理的に行う場合には、最適な置換率の検討が鍵になる。しかしながら、埋立地盤は土質の種類や物性値のばらつきが大きく、さらに建設年代が古い岸壁や護岸は経年変化が進行している構造物も多い。そのため、計画・設計段階での十分な調査と耐震裕度の評価は、精度的にもコスト的にも限界があるのも事実である。そこで、この課題（対立）の解決策の一つとして、著者らは、遠心模型実験や事例解析等で妥当性が検証された対策工の採用と性能評価技術を用いた評価の他に、実サイトを対象とした地震観測等のモニタリングに注目している。

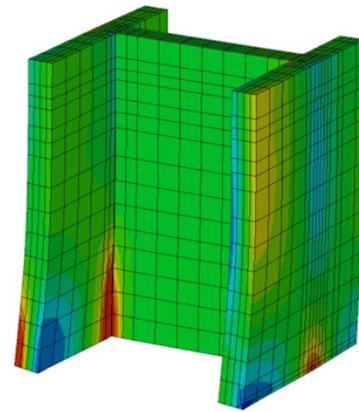


図-5 3次元液状化解析結果のイメージ
(非液状化層に根入れされた格子状固化の
固化地盤に発生する水平応力)

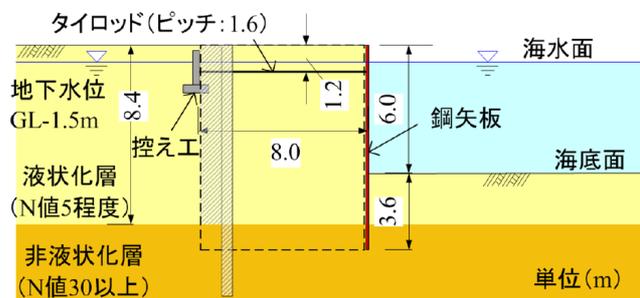
注) 赤色、青色の箇所が発生応力が大きい

3. 低コスト化技術と段階的な地震対策

(1) 低コスト化技術

筆者らはこれまで、岸壁・護岸の液状化対策として、従来よりも置換率を減らした低置換率格子状固化や側方流動抑制壁といった低コスト化技術の性能を、実験や数値解析で検証してきた。これらの技術の概要を表-1 に示す。検討結果の詳細は、関連文献 6)~9) を参照されたい。以下、低コスト化技術の効果の概要を述べる。

東京湾の鋼矢板式岸壁を模した -5m 岸壁（図-6）を対象にした遠心模型実験では、レベル 1 地震（港湾波、図-7 参照、以下同様）時に 1.3m、レベル 2 地震（南海トラフ波、図-7 参照、以下同様）時に 3.7m を超える変位が発生する岸壁の変位を、低置換率格子状固化（置換率は約 30%）の場合にはそれぞれ 0.2m、0.7m、側方流動抑制壁の場合には、それぞれ 0.6m、1.7m に抑制できた。対策のコストは、従来の格子状固化に対して、低置換率格子状固化で概ね 2/3、側方流動抑制壁で概ね 1/3 である。側方流動抑制壁は、



備考) 対策工設置箇所

□ : 低置換格子状固化の設置範囲

▨ : 側方流動抑制壁(地盤固化壁+H鋼)の設置範囲

図-6 実験で想定した岸壁と地盤

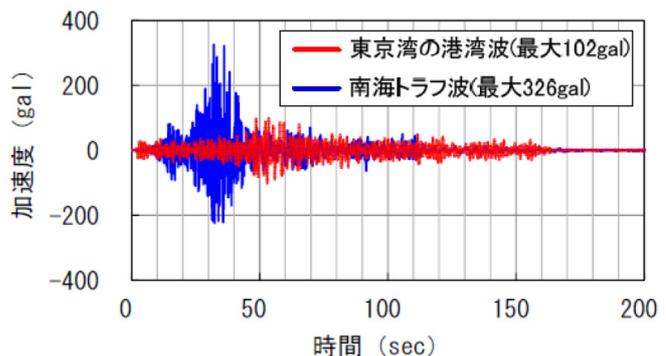


図-7 実験で想定した地震波

表-1 低コスト化技術の概要⁹⁾

工 法	低置換率格子状固化	側方流動抑制壁
工法の概要	<p>岸壁や護岸の液状化・側方流動対策として、背面地盤に格子状固化を造成する。サイトの特性を考慮した対策後の変形性能を評価することによって、従来の格子状固化よりも置換率を抑え(安価)、要求性能に応じた改良仕様で対策できる。</p> <p>工法イメージ(控え工付き鋼矢板式岸壁の場合) 水平変位 3.7m (対策無し) / 水平変位 0.7m (対策有り)</p>	<p>岸壁や護岸の背面地盤に施設の側方流動対策として、背面地盤に地盤固化壁とH鋼を組み合わせた側方流動抑制壁を設置する。背面地盤の水平変位の発生を抑制することができる。施工の際に、障害物がある場合には、側方抑制壁の一部を間引いて施工しても対策効果は低減しない。</p> <p>工法イメージ(控え工付き鋼矢板式岸壁の場合) 水平変位 3.7m (対策無し) / 水平変位 1.7m (対策有り)</p>
使用機械	<p>地盤固化工法(高圧噴射攪拌工法/機械攪拌工法等)から施工条件に応じて最適な工法を選択 ※例えば、ジェットクリート工法等を参照</p>	<p>地盤固化工法(高圧噴射攪拌工法/機械攪拌工法等)から施工条件に応じて最適な工法を選択 ※例えば、ジェットクリート工法等を参照</p> <p>その他に、H鋼建込み用の小型クレーン等</p>
概算施工単価(参考)	従来工法(置換率50%の格子状固化を想定)のコストの2/3	従来工法(置換率50%の格子状固化を想定)のコストの1/3

レベル2地震でも改良体は破壊しなかった。また、低置換率格子状固化は、レベル1地震では改良体は破壊せず、レベル2地震でも地盤改良の仕様の工夫等で破壊を抑止できることを確認している。従って、これらの工法は、コストを抑えた岸壁・護岸の防災・減災技術として期待できると考えている。

(2) 段階的な地震対策

既設の岸壁・護岸の液状化対策の実務では、これまで、精度、数量的に必ずしも十分とはいえない地盤や構造物の調査結果と、安全側になるように十分に配慮した設計検討結果に基づき、一度に最終系の対策を実施してきた。一方、筆者らが提案する段階的な地震対策は、地震観測等で構造物や周辺地盤の実際の応答を対策の事前・事後でモニタリングし、これを対策工の設計に映し、対策の合理化を図るとともに、観測期間中に耐震裕度を明確にしようとする提案である。

概念図を図-8に示す。仮に、観測期間中に大きな地震動が来襲すれば、応答を詳細に分析することができる。新技術を適用した場合には、実サ

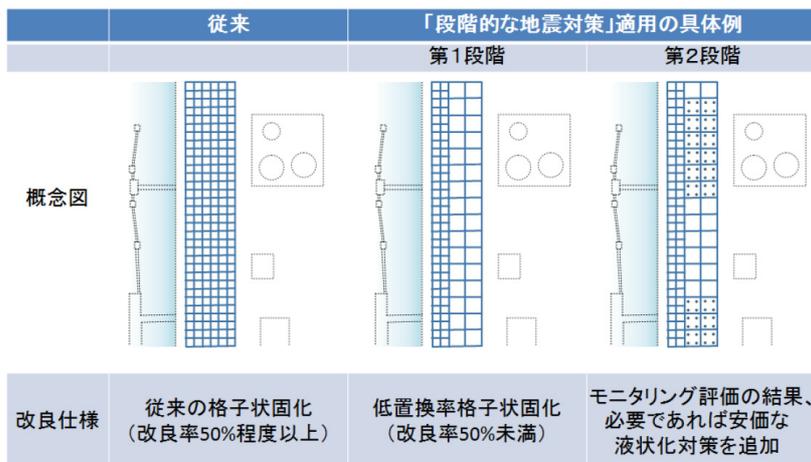


図-8 段階的な地震対策の概念図

注) 図は、ドルフィン等を有する産業施設の護岸の背面地盤に格子状固化を配置した場合をイメージ(平面図)

イトでその効果を検証できる。なお、新技術は、実験や解析等で有効性が裏付けされた技術であり、実サイトに適した技術であることが前提である。しかし、地震観測の結果、追加対策が必要と判断される場合には結果的にコスト増になることも予想される。そこで、以降、前述した鋼矢板式岸壁を対象に段階的地震対策と低置換率格子状固化を採用した場合の費用対効果について考察する。

地震観測は、表-2 に示すように、基盤、無対策地盤、対策地盤のそれぞれの箇所に最小限の計器を設置した場合を想定する。計測期間は3年とし、各地震の観測記録の統計処理と、計測期間中に2次元FEM液状化解析を1回実施することとする。検討の前提条件として、地震時の岸壁の水平変位を0.5m以下に抑え、固化体の内部安定性を確保することを要求性能として仮定する。

地盤固化は、狭隘な箇所の施工性に優れる高圧噴射攪拌工法を用いる。格子状固化の置換率は、従来通り60%程度の改良を行った場合、並びに低置換率固化では40%程度の改良と地震観測を行った場合、さらに後者では、地震観測の結果、追加対策として排水系の工法の採用が必要になった場合を想定する。

検討結果を表-3に示す。

筆者らの研究では、想定地震動がレベル1地震動の場合、低置換率格子状固化によって岸壁の変形量は0.2m程度に抑えられ要求性能を十分に満足する。岸壁の施工延長が500m、100mのとき、新技術のコスト比は、表-3を参照するとそれぞれ0.7、0.83となり、従来技術よりも3割から2割程度のコスト削減を期待できる。観測のコスト比は、工事費に対してそれぞれ0.03、0.16となる。このように、施工延長が長くなる程、新技術のコストメリットが大きいの。レベル2地震動（南海トラフ波）でも、必要に応じて、改良仕様の工夫や、排水工法等の補助工法を一部併用することで、要求性能を満足し、同様なコストメリットを期待できると考えている⁹⁾。

表-2 想定した地震観測機器

計器	数量	備考
3成分サーボ型 加速度計	3	地表面：2箇所 基盤：1箇所
間隙水圧計	2	液状化性地盤2箇所

表-3 対策工のコストの試算（鋼矢板式岸壁の場合）

岸壁施工延長 (m)	項目		コスト比		
	100	従来（置換率60%）		1.0	
新技術		低置換率 （置換率40%）	0.67	0.83	0.86
		観測	0.16		
		追加対策 （排水系）	0.03	0.03	
500	従来（置換率60%）		1.0		
	新技術	低置換率 （置換率40%）	0.67	0.7	0.73
		観測	0.03		
		追加対策 （排水系）	0.03	0.03	

4. まとめ

本稿では、地盤固化の最新の施工実績を紹介するとともに、地盤固化に関する筆者らの問題意識を整理した。その上で、合理的な地震対策として、著者らがこれまでに取り組んできた低コスト化技術（「低置換率格子状固化」並びに「側方流動抑制壁」）の有効性を概説した。さらに、地震観測を併用しながら、これらの対策を段階的に進める段階的な地震対策の可能性と効果について考察した。知見を以下に整理する。

- ・ 三河港埠頭再編改良事業とシアトル・エリオット湾護岸の大規模更新事業における岸壁・護岸の地震対策では、地盤固化が採用されており、鉛直支持力、土水圧等の地震外力を地盤改良体で抵抗すること、また地盤固化が本設利用される点が注目される。ブロック式改良の前者に対し、後者の事例ではさらに格子状固化の地盤改良を採用している。地震対策とともに、既存施設の更新技術としても、地盤固化を利用したこれらの施工実績が参考になる。
- ・ 施工性に優れる地盤固化の用途が広がっている。また、性能設計と施工技術の進歩により、合理的な対策が可能になってきている。客観性を確保するため、これまで以上に、地盤固化の品質と、固化地盤の内外部の安定性に係る検証と妥当性の確認が必要になってきている。これらを実現することで、合理

的な対策が可能になる。

- ・ 低置換率格子状固化や側方流動抑制壁は、低コストな岸壁・護岸の防災・減災技術として期待できる。地震観測等のモニタリングを行いながら、段階的に地震対策を進める段階的地震対策は、耐震裕度の評価や新技術の効果の実証に有効である。また、施工規模が大きくなる程、観測費用が総コストに占める割合は低減し、対策費を大幅に縮減できる可能性がある。
- ・ 鋼矢板式岸壁を対象に本稿で検討した条件では、低置換率格子状固化は、単独の利用、または想定地震動の規模が大きくなる場合には改良仕様の工夫や補助工法を組み合わせることで、従来技術よりコストを抑えて岸壁や護岸の変位を 0.5m 以下に抑制できる。地震観測を実施した場合でも、施工延長が概ね 100 m を超えると従来技術に比べて低コストとなり、施工延長 500 m の場合、3 割程度のコスト縮減が期待できる。

筆者らは、液状化対策として格子状固化が採用された大規模法面⁸⁾に対して、地震観測を開始している。当該事例は、対象構造物が岸壁・護岸ではないけれども、岸壁・護岸と同様に偏土圧を受ける条件は共通している。今後、地震観測記録を分析して、対策の有効性を実証する予定にしている。

参考文献

- 1) 石油連盟(2011): 東日本大震災における石油業界の対応と提言.
- 2) 資源エネルギー庁(2013): 製油所等の耐震性能等の評価の手引き.
- 3) 岩田尚晃・宮原祐二・山脇秀仁(2015): 既設構造物を考慮した～耐震強化岸壁の整備～, 国土交通省中部地方整備局, 平成 27 年度中部地方整備局管内事業研究発表会,
http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/2015kannai/pdf/15_innovation.pdf.
- 4) Wilcox K. (2013): The Seattle Department of Transportation will employ jet grouting in the replacement of a critical part of its transportation infrastructure,
<http://www.asce.org/magazine/20131217-jet-grouting-facilitates-seattle-seawall-replacement/>.
- 5) 産業施設の強靱化工法に関する研究会(2016): 臨海部産業施設の強靱化工法ガイドライン, 早稲田大学東京安全研究所, 産業施設防災技術調査会,
<http://idmc.or.jp/file/guideline1.pdf>.
- 6) 石井健嗣・小原隆志・北本幸義・藤崎勝利・山田岳峰・鎌田敏幸・北山真(2015): 岸壁・護岸を対象とした地盤固化による低コスト液状化対策技術の遠心模型実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-464, pp.927-928.
- 7) 石井健嗣・小原隆志・北本幸義・京川裕之・山田岳峰・鎌田敏幸・北山真(2016): 傾斜護岸を対象とした低コスト液状化対策技術に関する遠心模型実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-142, pp.283-284.
- 8) 山田岳峰・京川裕之・石井健嗣・鎗田哲也・北山真(2016): 既設岸壁・護岸の液状化対策を対象とした低コスト工法と段階的地震対策の提案, 土木学会第 36 回地震工学研究発表会, B23-984.
- 9) 山田岳峰・石井健嗣(2017): 既設岸壁・護岸の液状化対策を対象とした格子状固化と段階的な地震対策に関する考察, 土木学会第 7 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム.
- 10) 大石峻也・村上武志・前田宗宏・小原隆志・鬼木剛一・川西政雄・梅寺誠・香川浩司(2015): 鉱さい堆積場におけるレベル 2 地震時の液状化対策工の設計, 土木学会第 70 回年次学術講演会, VI-357, pp.713-714.