

矢板式岸壁の耐震補強工事に関する報告

The Report about the Seismic Reinforcement Construction of the Sheet Pile Quaywall

畑 清隆* 中村 勉**
Kiyotaka Hata Tsutomu Nakamura
市川 督人**
Masato Ichikawa

要 約

茨城県神栖市にある昭和産業株式会社鹿島工場所有の矢板式岸壁は、大型船舶の往来が頻繁な重要港湾施設として使用されている。しかし、当該岸壁は構築後 30 年以上経過し、兵庫県南部地震後に検討されるようになった大規模地震に対する耐震性の有無に対して懸念があった。

本報文では、大規模地震を想定した当該岸壁の耐震診断結果に基づき実施した耐震補強工事に関して述べる。耐震診断の結果、当該岸壁への耐震補強法として浸透固化処理工法による液状化対策工を選定し、設計施工にて工事を実施した。本文では、耐震補強法の設計および液状化対策工の施工、効果確認に関して詳述する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 岸壁の耐震診断および補強設計
- § 3. 液状化対策工の施工
- § 4. 液状化対策工の効果確認
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

茨城県神栖市鹿島工業臨海地帯に位置する昭和産業株式会社鹿島工場は、敷地内に延長約 400 m の矢板式岸壁を所有しており、前面に大型栈橋を有する重要港湾施設として使用されている（写真一1, 2, 図一1 参照）。当該岸壁が構築されたのは昭和 47 年であり、供用後 30 年以上が経過している。近年、茨城県では南関東直下型地震（マグニチュード 7 級）の発生に対する切迫性が認められており、当該港湾施設の重要性を考慮した場合、大規模地震後の施設の継続的な使用の可否に対して懸念があった。

本報文は、この矢板式岸壁に対して大規模地震を想定して実施した耐震補強工事に関して報告するものである。本耐震補強工事では、まず現況岸壁に対する耐震診断を実施し、その結果、所要の耐震性能を有していないこと

を確認した。対策工として、岸壁背面の液状化対策工を提案し、設計施工を実施している。



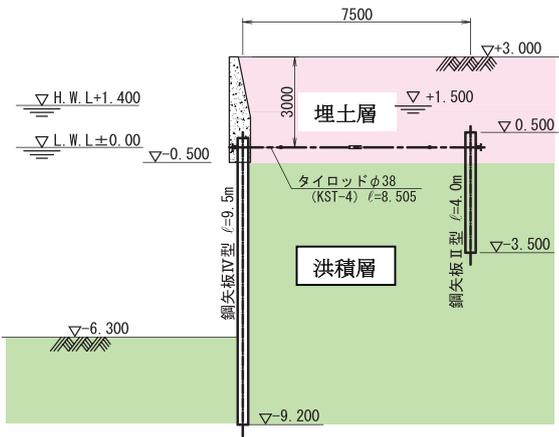
写真一1 矢板式岸壁



写真一2 岸壁前面の大型栈橋

* 関東土木（支）千葉（出）

** 土木設計部設計課



図一 現況矢板式岸壁標準断面図

《工事概要》

- ・工事件名：昭和産業(株)鹿島工場岸壁耐震補強工事
- ・発注者：昭和産業株式会社
- ・工事場所：茨城県神栖市東深芝6番地
昭和産業(株)鹿島工場内
- ・工事期間：平成21年1月6日～平成21年5月21日
- ・工事内容：液状化対策工（浸透固化処理工法）
施工本数 n=2812本
対象土量 V≒9470 m³
注入量 V≒3840 m³

§2. 岸壁の耐震診断および補強設計

2-1 設計方針

(1) 岸壁の保有すべき耐震性能

当該岸壁は、重要港湾施設として使用されているが、昭和47年に構築されたものであり、兵庫県南部地震（平成7年）以降に検討されるようになった大規模地震に対する耐震性の有無に対して懸念があった。大規模地震に対する港湾構造物の保有すべき耐震性能は、兵庫県南部地震を契機に（社）日本港湾協会により定められ、施設の重要度によっては大規模な地震（レベル2地震）に対する耐震性能の照査を要する（表一参照）。当該岸壁に対しては、企業先との協議の結果、耐震強化岸壁として保有すべき耐震性能を目標に、レベル1地震動に加えレベル2地震動を想定した耐震検討を実施することとした。

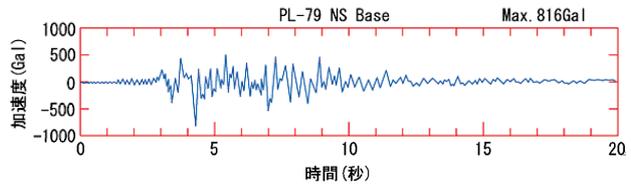
表一 設計で考慮する地震動と耐震性能

地震動レベル	地震動	耐震性能
レベル2 [耐震強化岸壁]	再現期間数百年以上のプレート内地震（内陸型地震）による地震動、あるいは陸地近傍で発生する大規模なプレート境界型地震（海洋型地震）	所期の機能の保持 ・被害が生じたとしても、軽微であり、地震直後に速やかに機能の回復が行える状態。
レベル1 [一般の岸壁]	再現期間75年地震動	施設の健全性を損なわない、 ・当初の耐震性を保持している状態。

(2) 地震動の設定

耐震検討で用いる想定地震動は、港湾の施設の技術上の基準・同解説（（社）日本港湾協会、平成11年）（以下、港湾基準）に準拠し、施設所在地の地域防災計画（茨城県）、既往の大規模地震記録などを考慮し、レベル2地震動に対して以下の地震動を設定した。

- ・地震規模：M7.2
- ・震源からの距離：X≒30km
- ・検討対象地における基盤最大加速度：α=440gal
(レベル1地震動の場合 α=250gal)
- ・地震種別：直下型地震
- ・基盤入射波形：ポートアイランド基盤入射波形
(図一参照) (PI-79 NS Base 2 E 波)

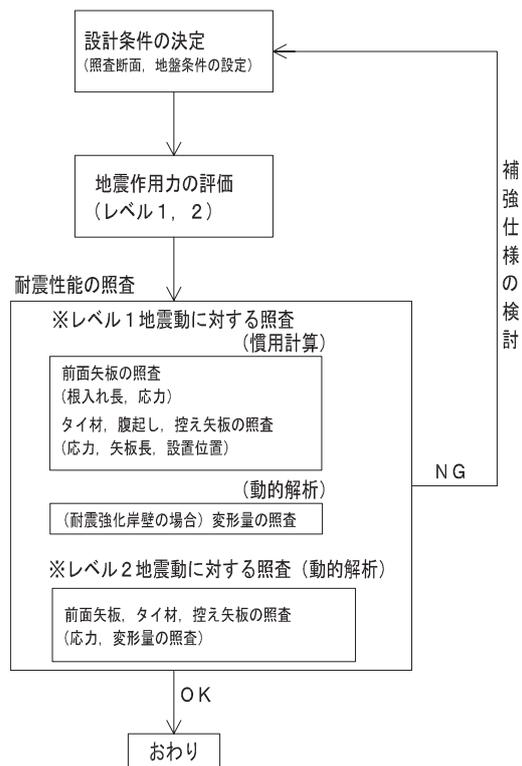


図二 ポートアイランド基盤入射波形 (PI-79 NS Base 2 E 波)

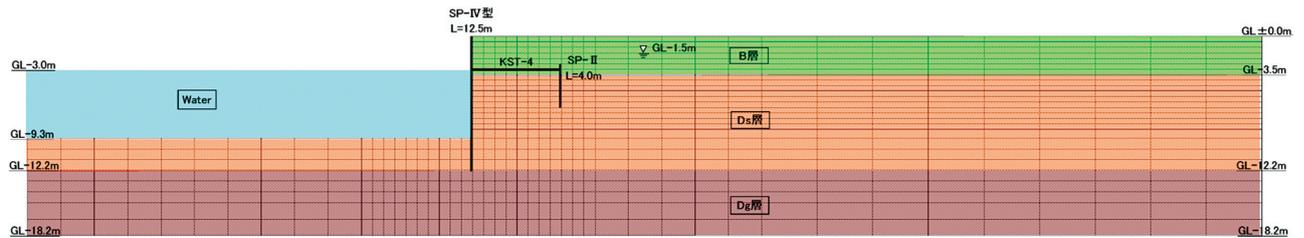
2-2 現況岸壁に対する耐震診断

(1) 検討手順

図一に当該岸壁の耐震性能照査の手順を示す。当該岸壁は、耐震強化岸壁として耐震性能照査を実施するため、以下の事項を照査した。



図三 岸壁の耐震性能照査の手順



図一4 解析モデル図

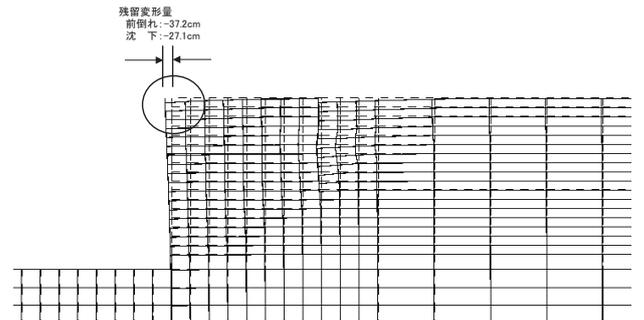
- ・レベル1地震（一般の岸壁で考慮する地震動）
耐震性能：施設の健全性を損なわない。
照査項目：震度法に基づく慣用計算手法により、地震時慣性力を考慮した各部材の安定長さ、応力度の照査を行う。耐震強化岸壁の場合、レベル1地震に対して動的有効応力解析による変形量照査を要する。
施設の健全性の確保が要求されるため、安全率を考慮した照査を行う。
- ・レベル2地震（耐震強化岸壁で考慮する地震動）
耐震性能：所期の機能を保持する。
照査項目：地盤および構造部材の非線形性を考慮した動的有効応力解析により、各部材の残留変形量、応力状態を照査を行う。
性能保持の観点から設ける限界値と対比することで、施設の損傷の程度、復旧の容易さを確認する。

(2) 二次元動的有効応力解析による耐震性能照査
レベル2地震に対する岸壁の耐震性能照査には、二次元動的有効応力解析プログラム「FLIP」（財）沿岸技術センターを用いた。二次元動的有効応力解析（以下、動的解析）では、地盤の動的せん断・変形特性や液状化特性などをパラメータとしたFEM解析モデルの基盤に、地震波形を入射することにより地盤や構造部材の動的な性状が把握できる。当該岸壁の地盤条件としては、以下の特徴があった（図一1参照）。

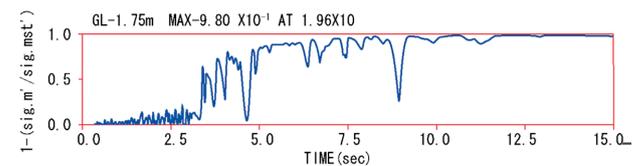
- ・切込み岸壁として構築されているため、GL3.5mの比較的浅い深度にN値25以上の洪積層が存在する。
 - ・洪積層の上部には、N値2の緩い砂層（埋土層）が3.5mあり、地下水位はこの砂層内に存在する。
- 耐震診断に先立って実施した地盤調査結果では、この砂層に関して地震時に液状化に至る可能性が高いことが確認されていた。

図一4に解析モデル図を、図一5に解析結果である現況岸壁の残留変形量を示す。

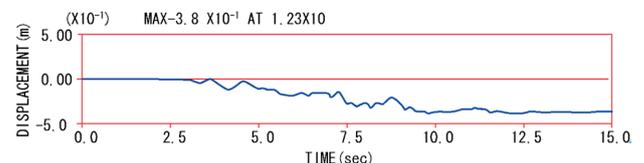
図一5より、現況岸壁では矢板の残留変形量が30cm以上発生することが確認された。ここで、港湾基準が提示する岸壁の被災変形量の目安値は、当該規模の矢板式岸壁の場合、供用制限値は20cm～30cmとされている。



図一5 現況岸壁の残留変形図



a) 液状化対象層における過剰間隙水圧比時刻歴



b) 岸壁天端における水平変位時刻歴

図一6 現況岸壁に対する時刻歴図

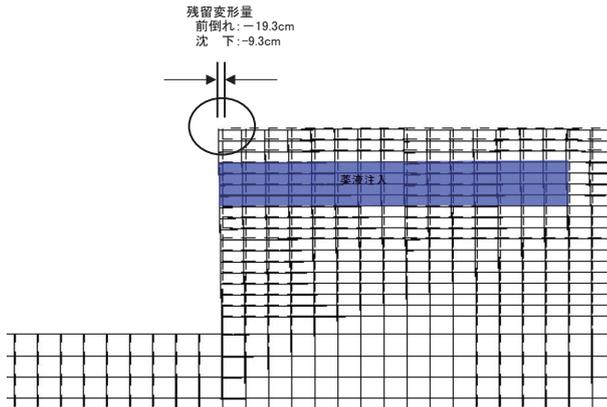
このことから、現況岸壁は耐震強化岸壁が保有すべき耐震性を有していないことが確認された。また、このような残留変形量が生じた主要因として、岸壁背面地盤の液状化発生に伴う側圧の増加が挙げられる。図一6に岸壁背面の液状化層の過剰間隙水圧比と、岸壁天端の水平変位量に関する時刻歴を示す。岸壁背面の液状化対象層は加震より約5秒で液状化に至り、これと同時に岸壁天端の変位量が増加し、大きな残留変形量を発生させている。このことより、当該岸壁に対する耐震補強としては岸壁背面の液状化層に対する液状化対策工の実施が最も有効であると判断した。

2-3 耐震補強仕様の検討

(1) 液状化対策工の検討

液状化対策工は、当該現場の状況を考慮して薬液注入

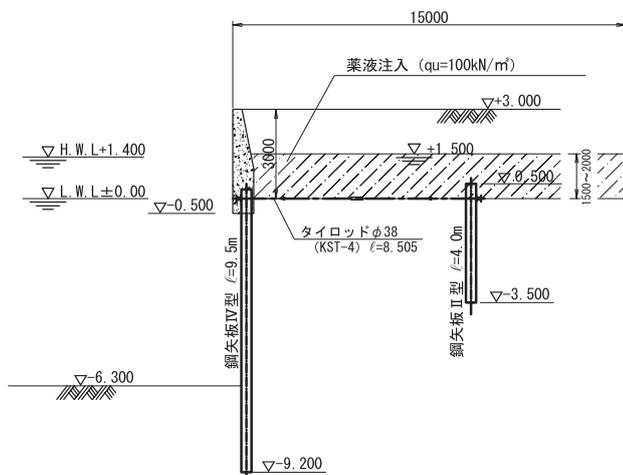
による固結工法を選定した。改良仕様に関しては、レベル2地震後に供用可能な損傷レベルに残留変形量を低減することを目的として、動的解析により検討を行った。図一七に液状化対策実施後の岸壁の残留変形図を示す。この結果、残留変形量は約19cmに低減され、これは港湾基準が示す供用可能値(0cm~20cm)を満足するものであった。また、この他に岸壁構造部材の応力状態や、レベル1地震時に対する健全性を確認し、提案した液状化対策工の妥当性を確認した。



図一七 液状化対策後における岸壁の残留変形図

《改良仕様の設定》

- ・改良厚：地下水面以下の液状化層 (h=1.5~2.0 m)
 - ・改良幅：岸壁の継続的供用を可能とする改良幅 (動的解析により, B=15.0 m)
 - ・改良強度：動的外力に対しての損傷が軽微で、岸壁の継続的供用を可能とする強度 (動的解析により, $q_u = 100 \text{ kN/m}^2$)
- (2) 耐震補強 (液状化対策工) のまとめ
以上の検討により提案した当該岸壁に対する耐震補強 (液状化対策工) を図一八に示す。



図一八 液状化対策工標準断面図

§3. 液状化対策工の施工

3-1 浸透固化処理工法の特徴

本工事では、液状化対策工として数千件の実績があり、最も信頼性の高い薬液注入工法であるダブルパッカー工法の原理を基に開発された浸透固化処理工法を採用した。

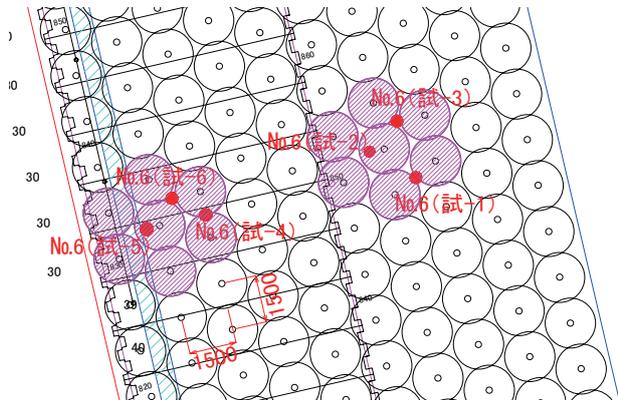
浸透固化処理工法は、以下の特徴がある。

- ・ 削孔ピッチが従来工法に比べて大きく、削孔本数が少なく済み、削孔費が割安で経済的である。
- ・ 砂質土においては土の骨格を壊すことなく注入材を土粒子間隙に浸透できる。
- ・ ボーリングマシンが作業可能な空間が確保できれば、狭い作業スペースでも施工できる。
- ・ 耐久性に優れた注入材を併用することにより、長期間に渡り安定した改良効果が得られる。

3-2 改良体の平面配置

実施工に先立ち、試験施工を実施し、一軸圧縮試験およびシリカ含有量試験にて効果確認を行った結果、縦横1.5mピッチの千鳥配列で施工することとした。

試験施工の改良体平面配置および供試体採取位置を図一九に示す。



図一九 試験施工平面図

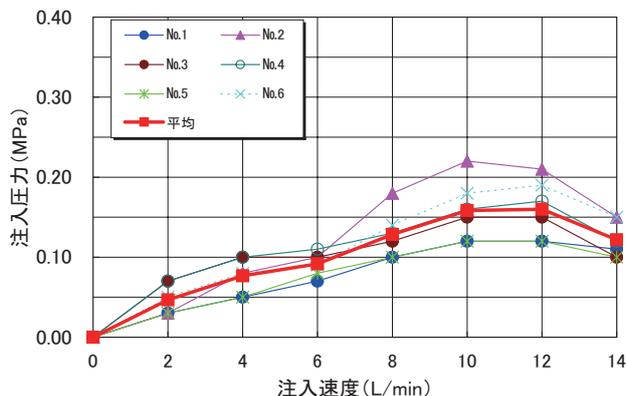
3-3 吐出量 (限界注入速度試験)

浸透固化処理工法で均一な改良体を造成するためには、適切な注入速度を決定することが重要である。適切な注入速度を求める試験として、本工事では、試験施工にて限界注入速度 (q_{cr}) 試験を実施している。

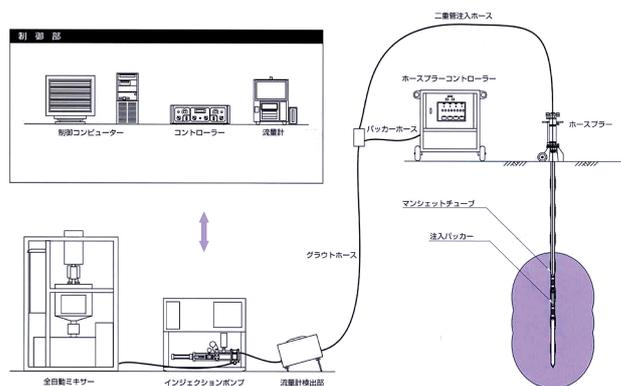
試験結果を図一十に示す。限界注入速度は、計6箇所の試験結果の平均値を基に10 L/minに決定した。

3-4 海洋汚染防止措置

浸透固化処理工法は、液状化が予想される砂質地盤に対して、溶液型の恒久薬液を、低圧力で浸透注入することにより、地盤を低強度固化し、液状化を防止する地盤改良工法である。粘性の小さい薬液を低圧浸透させるた



図一十 限界注入速度試験結果



図一十一 集中管理装置全体構成

め、地盤内で薬液が逸走することが想定され、海への流出が懸念された。そこで、海洋汚染防止として以下の対策を施した。

(1) 笠コンクリートクラック補修

矢板式岸壁笠コンクリートの劣化調査の結果、クラック幅≒0.3 mm～2.0 mm のひび割れの発生が確認された。今後の供用における構造物の耐久性の確保、ひび割れからの薬液の流出防止を目的として、0.1 mm～0.2 mm より大きいひび割れについては、クラック注入補修を実施した(写真一三参照)。材料の選定に当たっては、貫通ひび割れの発生も考慮し、中粘土を有する揺変性エポキシ樹脂を用いて補修をおこなった。薬液注入に先立ち、クラック注入補修を行うことで、笠コンクリートのひび割れからの薬液の流出防止措置につながった。

(2) 素掘側溝の設置

削孔時の排水や排泥、薬液の漏洩による地表面からの海への流出防止対策として、岸壁延長方向に素掘側溝を設置した。素掘側溝に集積した排水は、プラントタンクへポンプ圧送し、その後バキューム車にて吸出し、産業廃棄物として処理した。また、素掘側溝内に削孔・注入・排水に使用するホースを敷設し、そのスペースを有効活用した。このことは、企業先資材運搬業務に支障をきたさない施工が作業条件で求められたため、作業スペースの縮小化につながるとともに、ホースの配置・片付け作業の省力化になった。



写真一三 クラック補修



写真一四 集中管理装置

3-3 集中管理装置 (CCS) の導入

本工事では、計画に沿った注入をより確実にを行うために、集中管理装置 (CCS) を導入した。集中管理装置の特徴を以下に挙げる。

- ①最大 12 ラインの注入機器を 1 台のパソコンで集中管理・制御可能である
 - ②注入材の流量・注入速度・注入圧力を測定し、チャート紙に自動記録できる
 - ③流量・注入速度・注入圧力の制御を行うほか、注入日報・注入材料受け払い簿等の帳票も作成できる
- 当該工事では、集中管理装置を導入することにより、地

表面からの薬液の漏洩、地盤隆起も観測されず、設計注入量 3,835,383 L に対して計画通りの注入を実施することができた。注入装置は最大 20 ラインを稼働させ、昼夜間合わせた一日当りの平均実施注入量は、約 130,000 L/日(設計注入量 1,364 L/球×2,812 球、注入速度 10 L/min)であった。また、注入作業をコンピューターで集中管理することにより作業人員の削減・省力化につながった(写真一四、図一十一参照)。

3-5 周辺構造物の影響管理

本工法は、薬液を低圧力で注入するため、周辺構造物に与える変位などの影響がほとんどない工法であるが、影響の有無を確認するため、岸壁における光波測距器・レベル測定による変位監視を行った。注入順序は、浸透圧による岸壁への影響が小さくなるように、海側から陸側へとした。また、隣接した注入孔で同時に注入することがないように管理した。注入施工中および施工終了後、岸壁の変位は観測されず、周辺構造物に影響を与えることなく施工を完了した。

§ 4. 液状化対策工の効果確認

4-1 効果確認方法

液状化対策工の効果確認方法としては、「浸透固化処理工法マニュアル（改訂版）（財）沿岸技術研究センター」（以下、「浸透固化マニュアル」）に準拠することとした。「浸透固化マニュアル」では、一軸圧縮試験により評価することを原則としているが、礫や貝殻が混じった地盤のように、不攪乱資料の採取が難しく、一軸圧縮試験により適正な改良効果の確認が出来ない場合には、シリカ含有量試験により一軸圧縮強度を確認することが認められている。

本工事では、計7箇所の供試体について一軸圧縮試験により改良体効果を確認するが、一軸圧縮試験により得られた一軸圧縮強度が、設計基準強度 $q_u = 100 \text{ kN/m}^2$ を下回った場合には、シリカ含有量増加分より推定した一軸圧縮強度により評価することとした。なお、供試体採取位置は、改良地盤全体の平均値を算出できる位置として、改良体径の1/2の位置とした（図-12 参照）。

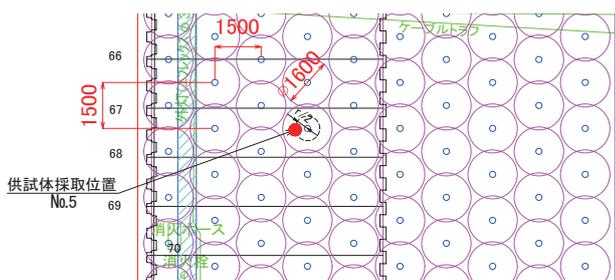


図-12 供試体採取位置図

4-2 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験結果一覧を表-2に示した。

計7箇所全ての供試体において、一軸圧縮試験により得られた一軸圧縮強度が設計基準強度 $q_u = 100 \text{ kN/m}^2$ を上回っていることから、液状化対策工が計画通り実施

されていると判断できる。

これは、液状化対策工を実施した土層が、埋土層のため、比較的均質な土質性状であり、薬液が均等に浸透されたこと、試験施工により適切な注入計画を立案し、実施できたこと、等による効果であると考えられる。

なお、本報文では割愛するが、シリカ含有量試験により推定した一軸圧縮強度はいずれも設計基準強度 $q_u = 100 \text{ kN/m}^2$ を上回っていた。

表-2 一軸圧縮試験結果

試験 No.	一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	平均一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)
No.1(1)	126	185
No.1(2)	149	
No.1(3)	280	
No.2(1)	137	144
No.2(2)	150	
No.2(3)	145	
No.3(1)	173	182
No.3(2)	147	
No.3(3)	225	
No.4(1)	184	263
No.4(2)	334	
No.4(3)	271	
No.5(1)	125	132
No.5(2)	126	
No.5(3)	144	
No.6(1)	221	228
No.6(2)	233	
No.6(3)	230	
公共用地(1)	129	154
公共用地(2)	230	
公共用地(3)	103	

§ 5. おわりに

本工事は、昭和産業(株)殿所有の矢板式岸壁に対して大規模地震を想定して実施した耐震補強工事であった。

本報文で紹介した岸壁背面の液状化対策工の他に、耐震補強を目的として、控え矢板前面に水平抵抗の増大を目的とした地盤改良工（単管高圧噴射攪拌工法）を、岸壁前面に水平抵抗の増大を目的とした捨石設置工を実施しており、舗装復旧を含めて平成 21 年 10 月に無事竣工している。

本工事での設計、施工、効果確認の手法が今後の同種工事の参考となれば幸いである。

謝辞. 本工事の施工にあたって、御指導・御協力をいただいた関係各位の皆様に深く感謝申し上げます。