

新潟港における耐震強化岸壁の設計について

橋本 正夫¹・尾山 康弘¹

¹新潟港湾空港技術調査事務所 設計室（〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778）

新潟港（東港地区）にて整備中の国際海上コンテナターミナルは、水深-12mの耐震強化施設として位置づけられている。現地は比較的N値の高い砂質地盤であるが、レベル2地震動による偶発状態では液状化の発生が予想される。本論文では、凍結サンプリングによる液状化試験結果を踏まえた2次元有効応力解析により岸壁の変形特性に関わる性能照査を行い、地盤の液状化に対応した構造断面を検討した結果について報告する。

キーワード 耐震強化岸壁、液状化、鋼管矢板式係船岸、地盤改良

1. はじめに

日本海側で唯一の中核国際港湾である新潟港では、北陸地域経済のグローバル化に伴うコンテナ量の増加に対応できず、入港船舶が沖合で待機する「沖待ち」が課題となっている。このため、効率的な荷役機能の確保と入港船舶の安定航行を図り、地域産業の国際競争力と地域住民の生活安定に資する国際海上コンテナターミナルの整備拡充が要請されている。このような中、新潟港（東港地区）西ふ頭において岸壁（-12m）が2バース計画され、うち1バースについては、大規模地震が発生した場合においても必要な物流機能を維持できるよう、耐震強化岸壁として位置づけられた。

本文では、写真-1に示す新潟港（東港地区）の耐震強化岸壁（-12m）について、レベル2地震動に関する偶発状態に保有すべき性能を適切に設定したうえで、2次元有効応力解析（以下、FLIP解析）により岸壁の性能照査を行い、構造断面を検討した結果について報告する。

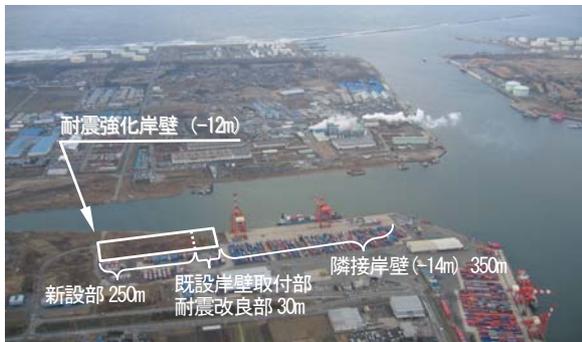


写真-1 新潟港（東港地区）

2. 耐震強化岸壁の概要

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災では、通常の

岸壁や荷役機械等の港湾施設の被災により荷役機能がストップしたため、緊急物資・支援者等の海上輸送は滞り、また、経済活動への影響は被災地周辺のみならず、国内外へも及んだ。一方、耐震性能を高めた施設では損傷の程度が小さく、被災直後から避難者や緊急物資等の輸送が開始され、被災地の救援活動やその後の復旧・復興に大きな役割を果たしたことから、耐震強化施設の重要性は広く認識されることとなった。

港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、港湾基準）では、レベル2地震動の作用後に必要とされる機能及びこの機能を発揮するまでの期間に応じて、耐震強化施設を特定（緊急物資輸送対応）、特定（幹線貨物輸送対応）、標準（緊急物資輸送対応）に分類している。

3. 設計条件

(1) 設計対象区間

設計対象区間は供用中の隣接岸壁（控え直杭式鋼管矢板構造、-14m、非耐震構造）との連続バースであり、写真-1に示す通り、新設部250mと既設岸壁取付部耐震改良部30m（以下、改良部）から構成される。岸壁の構造形式はコスト・施工性を考慮して次のように決定した。新設部は栈橋式や重力式との検討を踏まえ、床掘量が少なく、陸上施工を主体とする「控え組杭式鋼管矢板構造」とし、改良部は既設構造物の耐震性能照査を行った上で、隣接岸壁との境界部の被災シナリオを踏まえ「固化改良工法」とした。

(2) 要求性能と性能規定値

本岸壁は、特定（幹線貨物輸送対応）の耐震強化施設に位置づけられ、以下の性能が求められる。

a) 要求性能

永続・変動状態における要求性能は、安全性・使用性である。自重・土圧・レベル1地震動等の作用力による損傷等が岸壁の機能を損なわず、継続して使用できる事であり、港湾基準の部分係数を用いた照査を行う。

偶発状態における要求性能は修復性である。レベル2地震動による損傷等が、軽微な修復により船舶の利用及び幹線貨物の荷役機能の回復に影響を及ぼさない事であり、FLIP解析による応力・変形量等の照査を行う。

b) 性能規定値の設定

偶発状態における性能規定値は、港湾基準・既往事例・文献などを参考に、表-1の通り設定した。

表-1 偶発状態における性能既定値及び設計状態に関する設定

| 矢板式係船岸 | |
|------------|--------------------------|
| 照査項目 | 標準的な限界値の指標 |
| 法線の変形 | 残留変形量の限界値 100cm |
| 矢板の降伏 | 設計降伏応力度 |
| タイ材の破断 | 設計破断強度 |
| 控え工の全塑性 | 設計断面耐力 (全塑性モーメント) |
| 控え工に作用する軸力 | 地盤の破壊に基づく抵抗力 (押し込み、引き抜き) |
| 上部工 | 設計断面耐力 (終局限界状態) |

固化改良工法 (重力式係船岸)

| 照査項目 | 標準的な限界値の指標 |
|-------|-----------------|
| 法線の変形 | 残留変形量の限界値 100cm |

(3) 対象地震動

a) レベル1地震動

図-1の地震波形を用いて、工学的基盤から一次元の地震応答解析を実施し、地盤及び構造物の周期特性や許容変形量を考慮して照査用震度を算定した。

b) レベル2地震動

施設の照査に使用する波形は、M6.5直下型地震とした。

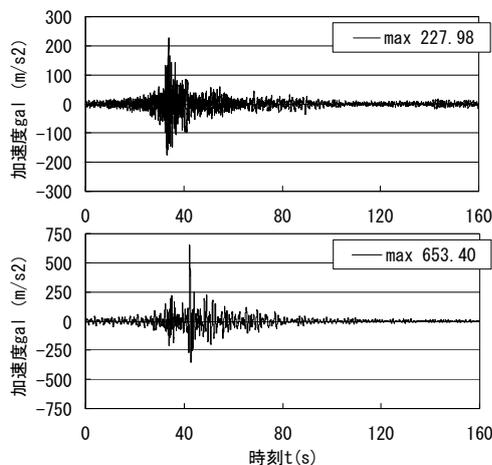


図-1 レベル1 (上) レベル2 (下) 時刻歴加速度波形

(4) 土質条件

原地盤から-40m付近まではN値が15~50の良質な沖積

砂質土層となっている。その下は中間土を含む沖積粘性土層と砂質土層の互層となっており、-90m付近から下は洪積粘性土層と砂質土層の互層となっている。表-2に設計条件の抜粋を示す。

表-2 設計条件抜粋

| 施設区分 | 耐震強化施設 特定 (幹線貨物輸送対応) |
|-------|---------------------------|
| 区間延長 | 新設部 250m + 既設岸壁取付部 30m |
| 対象船舶 | コンテナ船 30,000DWT |
| 照査用震度 | レベル1 : 0.19 (控え組杭式矢板) |
| | レベル1 : 0.21 (地盤改良 (固化改良)) |
| | レベル2 : 0.25 (控え組杭式矢板) |
| 荷役機械 | コンテナクレーン (40t吊) |

4. 液状化に関する評価

当該地盤では、図-2に示すAsd層、As1層の液状化発生が懸念され、チューブサンプリングによる繰返し非排水三軸試験 (以下液状化試験) を実施した。この結果は、図-3 (文献¹⁾より) に示す換算N値と液状化強度比の関係とほぼ整合する結果であり、対象地盤の換算N値を踏まえ、採取した試料の乱れが影響していると判断した。

このため、凍結サンプリングによる液状化試験を実施することで、より精度よく地盤の液状化強度特性を把握でき、経済的な設計となる可能性が考えられた。

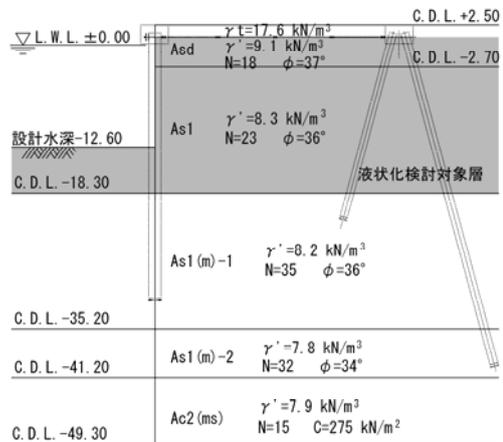


図-2 液状化検討対象層

(1) 対象土層の原位置試験とサンプリング試料の状況

表-3に、As1層の各サンプリングによる液状化試験結果と、サンプリング位置の原地盤の特徴を整理した。採取した試料は全て細粒分含有率Fcが10%以下である。各サンプリング試料の特徴を比較すると、チューブサンプリングは、原地盤のN値が凍結サンプリングより大きいものに対して、間隙比が大きくなっている。また、チューブサンプリングの液状化試験から得られる初期せん断剛性Go2は、原位置で測定したせん断波速度Vsから求めた初期せん断剛性Go1との対比で0.7程度であるのに対し、凍結サンプリングの試料は0.9以上を示すものがみられた。以上よりチューブサンプリング試料は乱れている可能性が高いと判断された。

表-3 As1層の各種試験結果

| 試料番号 | 原位置地盤の特徴 | | | 採取試料の物理特性 | | | 繰返し三軸試験 | | | | |
|--------|--|----|--|---|--------------|--------------------|----------------------------|---|---------|---------------------|---------------------|
| | 有効上載圧 σ_v' (kN/m ²) | N値 | (N ₁) ₇₈ ^{※1)} | 初期せん断剛性 Go1 ^{※2)} (MN/m ²) | 細粒分含有率 Fc(%) | 間隙比 e _o | 拘束圧条件 (kN/m ²) | 初期せん断剛性 Go2 ^{※3)} (MN/m ²) | Go2/Go1 | 液状化強度比 (DA5%, N=15) | 液状化強度比 (DA5%, N=20) |
| チューブ-1 | 119.9 | 29 | 25.6 | 61.8 | 5.2 | 1.003 | 108.0 | 44.9 | 0.73 | 0.18 | 0.18 |
| 凍結-1 | 111.7 | 22 | 20.3 | 67.4 | 2.3 | 0.956 | 110.0 | 48.5 | 0.72 | 0.44 | 0.39 |
| 凍結-2 | 124.1 | 17 | 14.7 | | 1.2 | 0.922 | 110.0 | 52.9 | 0.78 | 0.42 | 0.38 |
| 凍結-3 | 136.6 | 26 | 21.1 | | 2.4 | 0.878 | 140.0 | 62.0 | 0.92 | 0.39 | 0.38 |
| 凍結-4 | 149.0 | 26 | 19.9 | | 4.1 | 0.878 | 140.0 | 62.2 | 0.92 | 0.43 | 0.40 |
| 凍結-5 | 159.4 | 24 | 17.5 | | 2.4 | 0.875 | 140.0 | 65.3 | 0.97 | 0.59 | 0.56 |

※1) (N₁)₇₈: 実測したN値に土被り応力とロッド長さに関する補正を行った値。(N₁)₇₈ = 167 × N / (σ_v' + 69)

※2) Go1: 原位置で実施したPS検層で得られたVsから推定したせん断剛性

※3) Go2: 同位置の試料で変形特性を求めするための繰返し三軸試験より得られる初期せん断剛性

(2) サンプリグによる液状化試験結果の比較

表-3に示す試験結果を図-3に加筆したところ、原地盤の換算N値((N₁)₇₈)が15~20程度であることから、既往の文献では、凍結サンプリグの液状化強度比はチューブサンプリグの1.2~1.5倍程度期待されるのに対し、今回の試験では2倍以上の液状化強度比が得られた。

以上より、先に述べた間隙比や初期せん断剛性の比較などから、チューブサンプリグの乱れの影響が考えられたため、本設計においては、信頼性の高い凍結サンプリグの液状化試験結果を採用することとした。

を下回るのに対し、凍結サンプリグでは1.3以上の値となった。粒度及びN値を用いた判定も含めて総合的に判断した結果、レベル1地震時には液状化は発生しないと判断することができ、液状化対策工の必要性の判断に関わる有意な差がみられた。

表-4 液状化安全率 F_L 値による液状化判定(レベル1地震時)

| 土層 | 試料番号 | F _L 値 |
|-----|--------|------------------|
| As1 | チューブ-1 | 0.67 |
| As1 | 凍結-1 | 1.37 |
| | 凍結-2 | 1.39 |
| | 凍結-3 | 1.48 |
| | 凍結-4 | 1.67 |
| | 凍結-5 | 2.53 |

※ F_L: 1.0を下回ると液状化すると予測・判定する

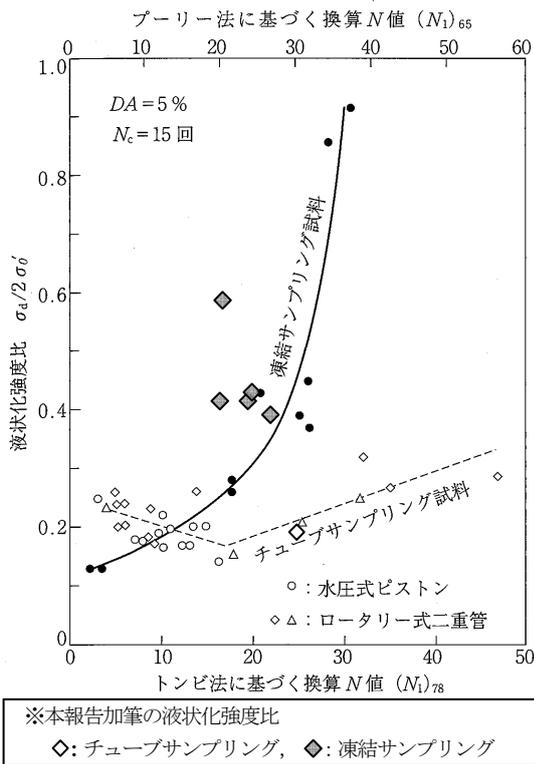


図-3 凍結サンプリグとチューブサンプリグにより得られた試料の液状化強度比の比較¹⁾

(3) 液状化に関する評価

表-4にこれらの液状化試験結果を用いた液状化安全率 F_L によるレベル1地震時の液状化判定結果を示す。チューブサンプリグによる試験結果ではAs1層のF_L値が1.0

また、港湾の耐震施設設計においては、2次元有効応力解析により、レベル2地震時の岸壁の性能照査を実施することが標準とされている。このため、液状化強度の小さいチューブサンプリグの試験結果を用いて解析を行った場合、As1層が早期に液状化を起こすなど、地震時の岸壁の変形量に大きな影響を与え、対策工が大掛かりになることが予想された。

5. 構造断面の照査

偶発状態での液状化への対策としては、地盤改良により地盤強度を高める方法や、断面諸元の増大を図る方法があり、本岸壁では既設構造物の有無やコスト・施工性を考慮して構造を決定した。また、詳細は省くが、レベル2地震動作用後に法線の変形や沈下が想定される舗装版・クレーンレールの修復性についても考慮し、1週間程度で復旧可能な構造となるよう検討した。

(1) 新設部(控え組杭式鋼管矢板構造)

図-5に偶発状態対応の新設部標準断面図と照査結果を示す。

永続・変動状態で設定した断面にレベル2地震動を作用させたFLIP解析を行ったところ、特に、液状化層の境

界付近で鋼材への応力集中が見られ、全ての部材で性能規定値を満足しなかった。

偶発状態の構造安定性を確保するための対策は、固化改良工法よりも安価となる鋼材の増強によることとした。

さらに、控え杭については、偶発状態で地盤強度が低下するAsd層及びAsl層の周面摩擦を期待せず、杭長を長くすることにより、液状化対象層以深の支持層で押込・引抜支持力を確保した。

表-5に示す部材の変更を行ったFLIP解析による照査では、法線の残留変形は70cmとなり、各部材の性能規定値も満足する結果となった。

表-5 偶発状態における部材諸元の変化

| | 鋼管矢板 | 控え押込杭 | 控え引抜杭 |
|---------|-----------|----------|-------------------|
| 永続・変動状態 | φ900×t13 | φ600×t11 | φ600×t10 |
| 偶発状態 | φ1500×t24 | φ900×t13 | φ1000×t18, 13, 10 |

(2) 改良部 (固化改良工法)

図-6に偶発状態対応の改良部標準断面図と照査結果を示す。

改良部は、隣接する供用中の既設岸壁 (-14m) に悪影響を及ぼさないように配慮しつつ、新設部と同等の耐震性能を確保する必要がある。そこで、改良部の現況断面についてレベル2地震動を作用させたFLIP解析を行ったところ、法線の水平変位は3m以上、鋼管矢板の降伏や控え杭の全塑性が生じ、耐震性能は確保出来ない結果となった。また、既設岸壁との境界に小口部を設けない場合、既設岸壁側への取付部土砂流出や既設岸壁の被災の影響を受けることで、本岸壁の稼働に支障をきたすため、耐震性の高い小口部を設けることとした。

以上を踏まえ、既設のタイ材や鋼管矢板に損傷を与えず、硬質地盤に対応できる工法にて液状化層を固化改良し、重力式構造として耐震性を確保することとした。改良強度は内部に発生する破壊応力以上に設定し、既設構造物近接部は交差噴流式高圧噴射攪拌工法、タイ材下の標準部は交差噴流式複合攪拌工法を採用した。

FLIP解析による照査では、法線の残留変形は50cm程度となり、偶発状態の性能規定値を満足する結果となった。

6. まとめ

北陸地方整備局管内初となる新港湾基準での耐震強化岸壁の設計を行った。耐震性能照査にはFLIP解析を用い、レベル2地震動に関する偶発状態の要求性能を満たす構造断面を選定した。本施設の地盤は比較的N値が大きいため、一般的な地盤改良等による液状化対策工の適用が難しく、対策費用が高価となる。このため、凍結サンプリングによる液状化試験結果を用いることで信頼性の高い液状化強度特性を把握でき、経済的で現地条件に即した岸壁構造断面の設計が可能となった。

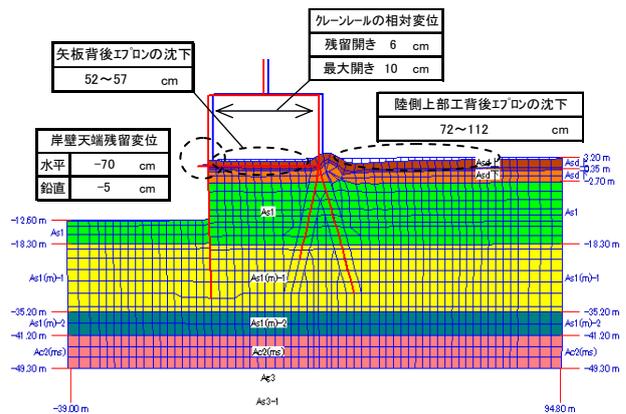
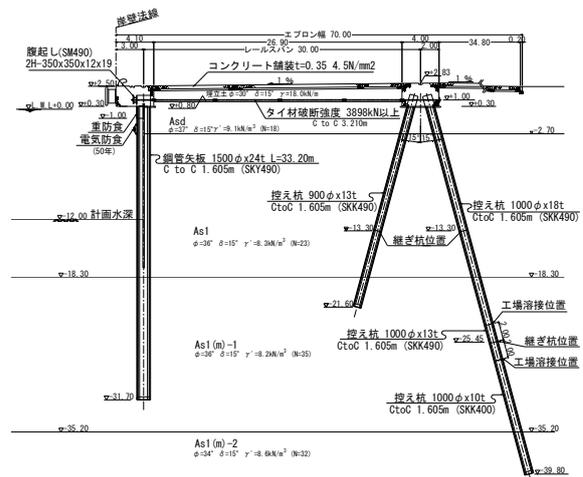


図-5 新設部の標準断面図と FLIP 解析結果

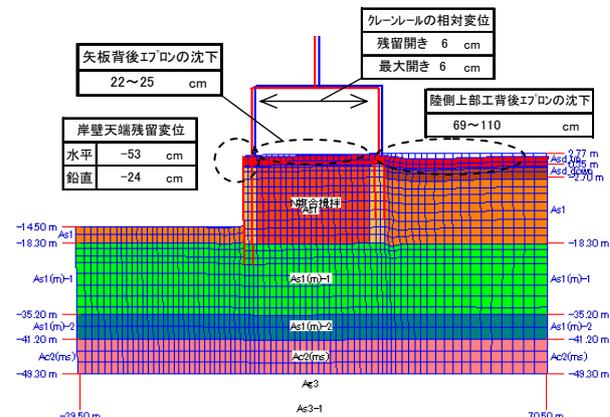
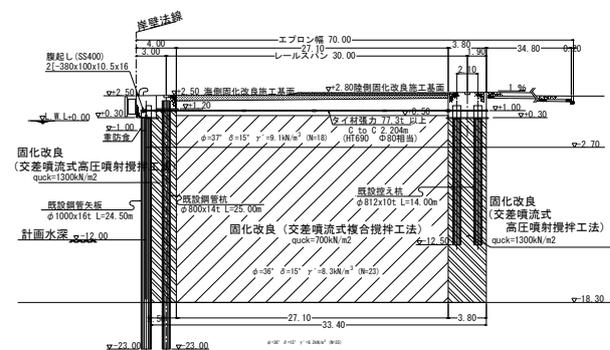


図-6 改良部の標準断面図と FLIP 解析結果

参考文献 1) 吉見吉昭：砂の乱さない資料の液状化抵抗～N値～相対密度関係，土と基礎，Vol.42-4，pp.63～67，1994