

小名浜港大水深バルクターミナルの構造検討

青田 徹*・白井 博己**・荒川 圭***・吉川 慎一****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 前任建設管理官

**** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ 港湾・空港チーム マネージャー

小名浜港東港地区に計画される大水深バルクターミナルについて、大型荷役機械、耐震強化岸壁、複雑な地盤条件等を考慮して、その構造を検討した。また、既設防波堤ケーソンを背後土留護岸として利用するための改良方策を検討した。

キーワード：ケーブサイズ、石炭用アンローダ、栈橋構造、土留護岸、耐震照査

1. はじめに

重要港湾・小名浜港は、周辺に石炭火力発電所が多数立地しており、発電された電気は主に関東・東北地方に送電されている。小名浜港は、これら電力会社が扱う石炭等のエネルギー供給港湾としての機能を担っている。このような背景から、平成 23 年 5 月に「国際バルク戦略港湾」(石炭)の一つに指定され、将来にわたりますますその役割が重視されている。

平成 23 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震により、小名浜港も甚大な地震・津波被害を被った。地域の要請に応え、安定的かつ継続的なエネルギー供給を図り、耐震性に優れ、ケーブサイズ石炭バルク船(175,000DWT)に対応可能な係留施設として、東港地区に岸壁(-20m)(耐震)施設が港湾計画に位置づけられた。図-1 に施設計画位置を示す。

本稿では、小名浜港の同施設を対象として構造検討を実施し、耐震性・経済性・施工性に優れた最適構造形式を選定した業務について、主要な内容を紹介するものである。

2. 構造検討における課題

本業務において主な技術的課題となった事項を以下に示す。これらの課題の解決を図りつつ、当該施設に最適な構造形式を選定する必要があった。

(1) 大水深・大型荷役機械への対応と耐震性能の設定
国内でも類似例が少ない計画水深 20m、施設延長 380m のバルク対応岸壁に必要な要求性能と性能規定の設定、荷役機械の設定などが必要であった。

(2) 係留施設全体としての耐震性の確保

当該地点の地盤は、工学的基盤である泥岩層の出現深度が岸壁延長 380m の中で標高-15m(中央部)~-25m(延長両端部)と縦断方向に変化していた。

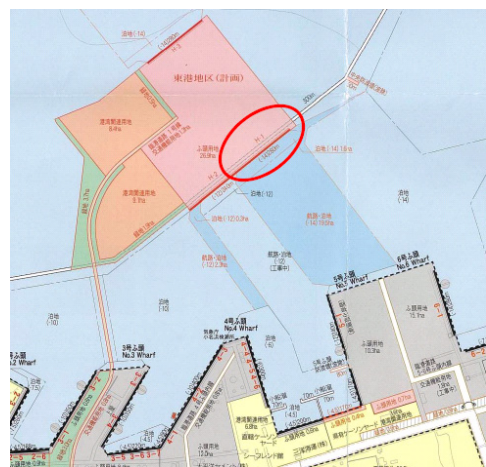


図-1 岸壁の計画位置図

泥岩層から現海底面-10~-15m までは沖積砂層(平均 N 値 19)であり、レベル 2 地震動の作用時に液状化すると予測された。既往の検討より、杭打設時に支障となる既設防波堤捨石マウンドが干渉せず、計画水深が確保できるように岸壁法線位置が計画された(既設ケーソンから 45m 前出し)。しかしながら、地盤の液状化により土留護岸の変形が栈橋本体へも影響する点が懸念された。

さらに、大型荷役機械が搭載された栈橋は、栈橋構造と荷役機械の固有周期が近い場合、地震時に共振を生じるなど相互に影響を与える。これを適切に評価して施設全体の耐震性を担保する必要があった。

(3) 泥岩層への杭の定着方法

大型アンローダの作業時反力、異常波浪時の床版下面に作用する揚圧力に対して、杭の地盤支持力の確保が必要であった。前述のように杭の根入れは泥岩層で確保せざるを得ない条件であり、先行オールケーシング削孔後砂置換では周面摩擦の確保ができない。

(4) 劣化の著しい既設ケーソンの転用

築造後 40 年が経過した防波堤ケーソンを土留護岸として転用し、今後 50 年間、耐震強化施設の一部として

供用する計画である。経年劣化と 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響により、ケーソン本体は全長にわたり 0.7～2.0m の沈下、先行して一部施工済みの裏込石は全長 40cm 程度の沈下が生じており、設計時想定 of ケーソン天端高までの裏込石築造が困難で、完成後の土圧軽減効果が不足する。干満帯、飛沫帯における側壁天端のひび割れや錆汁の発生は顕著であったが、ケーソンの水中部材は健全であった。

また、中詰土圧・水圧に対して、ケーソン側壁部材は使用限界状態の曲げひび割れの限界値を満足しないことが判明した。このため、長期耐久性において課題がある。

3. 要求性能・性能規定の設定と設計条件

3.1 性能規定の設定について

大型バルク船対応かつ耐震強化施設（特定・幹線貨物輸送の岸壁と同等）として、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（以下、「技術基準」という）に則り、要求性能と性能規定値を設定した。

性能規定値を設定するにあたり、施設利用者（船社・荷役業者）や荷役機械製造者にヒアリングを実施し反映した。さらに、耐震性能照査結果をふまえた上で性能規定値の確認を行った。性能規定の設定を表-1 に示す。

表-1 性能規定値の設定結果

性能規定項目	当初設定規定値	耐震性能照査後
船舶の接岸・係留	法線の出入り±50cm 最大水平変位 100cm	水平変位 4～24cm (接岸・係留可能)
荷役機械の供用	脚部相対変位 30cm 転倒しないこと	相対変位なし・転倒しない(利用可能)
荷捌き地の供用	最大水平変位 70cm 程度 背後段差 30cm 程度	水平変位 80cm 弱、段差 20cm 程度(復旧可能)

() 内はヒアリング結果を示す。

耐震性能照査の結果、栈橋構造は残留水平変形量が 2～24cm と小さく、法線の蛇行は軽微なため船舶の着岸・係留に大きな問題はない。荷役機械についてもレール調整構造をあらかじめ内蔵しておくことで、地震後直ぐに復旧の対応が可能である。ただし、局所的な損傷が避けられない可能性が高いため、事前に交換用レールをストックしておくべきなどの意見があった。

土留護岸は水平残留変形量 80～40cm と大きい、ケーソン背後の段差は 20cm 程度であり、敷き砕石・敷き鉄板程度の工事のため被災後 3 日以内の復旧が可能である。また、栈橋部から土留護岸への渡橋部分は岸壁全長で 3 箇所（1 箇所当たり幅員 11.6m）であり、護岸側渡橋支承部は遊間長を設けて、土留護岸による反力が栈橋に伝達しない構造とした。

3.2 設計対象地震動について

レベル 2 地震動は M6.5 直下型地震、福島県沖地震（海洋型）に加え、港湾空港技術研究所より公開された当該地点における 2011 年東北地方太平洋沖地震の事後推定波¹⁾を検討対象とした。

3.3 荷役機械・船舶条件について

(1) 荷役機械の設定

2,000t/hr の荷揚げ能力を有するアンローダを対象とした。荷役機械製造業者へのヒアリングを通じ、「クレーン構造規格」（厚生労働省告示）に準じた概略検討と既往実績をふまえ、基本諸元を決定した。作業時全体質量 1,750t、レールスパン 25m、ホイールベース 20m である。また、免震装置は従来のコンテナクレーンの適用事例と同等程度を考慮し、固有周期 4.0 秒、減衰率 20% と設定し、耐震設計上のモデル化に反映した。表-2 に栈橋構造の永続・変動状態の照査に使用した輪荷重条件を示す。

表-2 アンローダ輪荷重

区 分			アンローダ				備 考	
コーナNo.			R1	R2	R3	R4		
1隅車輪数			12	12	12	12		
1	作業時	垂直力 (KN/輪)		505.2		343.4		16m/s相当風荷重 100%負荷
		レール直角方向 (KN/輪)		29.4		34.3		
		レール平行報告 (KN/レール)		711.2		436.5		
2	休止時	垂直力 (KN/輪)		725.9		735.8		55m/s相当風荷重 無負荷
		レール直角方向 (KN/輪)		54.0		225.6		
3	地震時	垂直力 (KN/輪)		696.5		573.9		地震係数 k=0.2 海側: 作業時 陸側: 休止時
		レール直角方向 (KN/輪)		14.7		127.5		

(2) 船舶による作用

175,000DWT 級バルク船の船長、吃水等の諸条件は船社へのヒアリングにより具体的な値を用いた。付帯施設の検討の結果、防舷材は接岸反力 2,500kN のものを栈橋 1 ブロック（奥行き 38m）あたりに 2 基、係船曲柱は 1,000kN 型を 1 基配置することとした。

4. 耐震性能の照査と各栈橋構造の特性

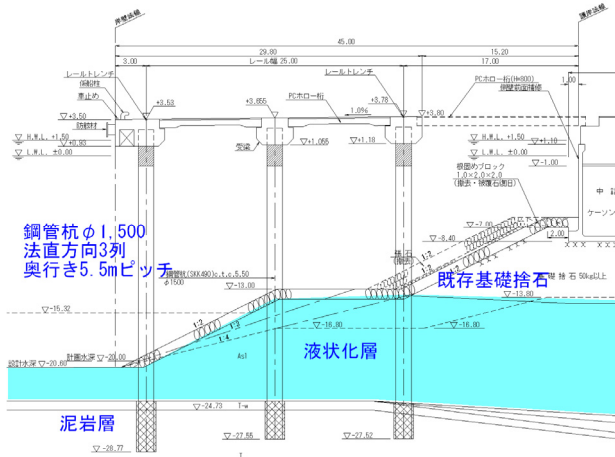
図-2 に耐震性能照査を実施し、比較検討を行った栈橋構造の代表例として PC 栈橋構造、ジャケット式栈橋構造の標準断面を示す。

4.1 耐震設計上の特徴

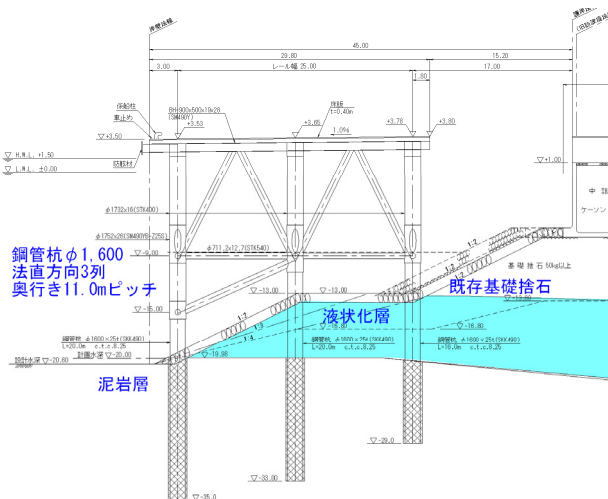
構造形式の抽出において、栈橋構造毎の特徴を整理した。PC 栈橋は上部工の一部を PC 桁に置き換えて軽量化を図ることで杭本数を減じる構造であり、RC 直杭式栈橋と比べて上下部工の剛性が低く、たわみやすいため固有周期が長い特徴がある。一方、ジャケット式栈橋は下部工と上部工の主桁を鋼製の骨組みとすることで全体の剛性が高く、短周期寄りの構造であり、大水深・耐震岸壁への適用事例が多い。RC 栈橋は杭本数が多いため、両者の中間的な挙動となる。これらの比較により、安定性照査を実施する構造は PC 栈橋、ジャケット式栈橋、

RC 直杭式栈橋とした。

また、栈橋構造と荷役機械との相互作用に配慮し、免震装置付きアンローダをモデル化することとした。さらに、後述する土留護岸の改良方法によっては栈橋の耐震性にも影響を与える。この点を考慮して検討を実施した。



(a) PC 栈橋 (液状化層が最も厚い工区の断面)



(b) ジャケット式栈橋 (液状化層厚が平均的な工区)

図-2 岸壁の比較構造断面図

4.2 レベル2地震動に対する地震応答解析

(1) 耐震性能照査の手順と解析結果

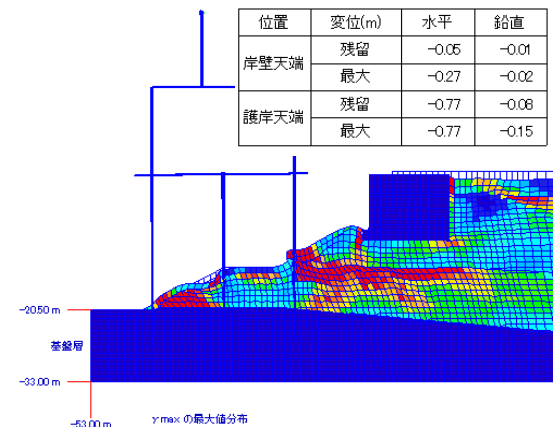
前述の設計条件をふまえ、永続状態・変動状態に対する静的な安定性照査を実施し、各構造形式の初期断面を設定した。レベル2地震動に関する偶発状態の照査は、地震応答解析によるものとし、港湾・海岸構造物の設計に豊富な適用事例がある FLIP を用いた。栈橋に搭載されるアンローダは、全体質量及び固有周期を合わせた簡易なラーメンモデルとして反映した。

解析結果の一例として、2011 年東北地方太平洋沖地震推定波による PC 栈橋の照査結果を図-3 に示す。

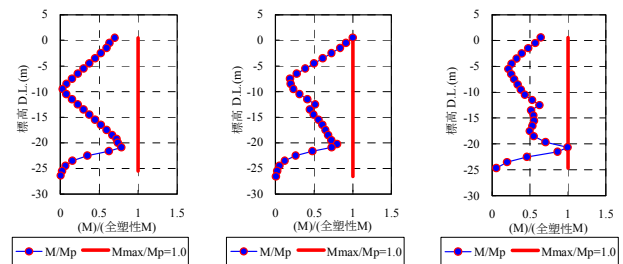
沖積砂層の液状化の影響により土留護岸は 80cm 程度海側に移動し、陸側杭を押し出すような挙動であったが、栈橋本体との離隔があるため岸壁自体の変位は最大

27cm、残留 5cm と小さくなった。ただし、初期設定断面は、泥岩層と液状化する沖積砂質土層との境界付近で杭土中部に塑性ヒンジが発生した。

砂地盤の液状化対策を行う場合は、既存防波堤の基礎捨石が支障となり、高圧噴射式固化改良など非常に高価なものとなる。このため、繰り返し解析により必要な杭の肉厚を確保することとした。特に液状化層が厚い岸壁延長端部の区間では、最大 38mm の厚肉鋼管が必要となったが、港湾施設に納入実績がある製作可能な範囲内で収まった。



(a) 変形・ひずみ分布図



(b) 杭の最大断面力分布図

図-3 レベル2地震動の地震応答解析結果

一方、ジャケット式栈橋の場合、下部工の剛性が高く杭本数を最小限としたため泥岩層への根入長が長い。このため、土留の変形を抑止するように作用し、杭のピッチやジャケットの剛性を上げるほどに栈橋に発生する断面力も増加し、不経済な断面となった。

以上の結果から、当該地点の条件では PC 栈橋のように変形しやすい構造が適すると判断した。

(2) 荷役機械設計者への申し送り事項の整理

永続・変動状態の安定性照査に用いた輪荷重条件、アンローダの安定性を確保できる免震装置のスペック、アンローダの地震応答解析用入力地震動波形 (栈橋先端の応答値) などを、アンローダ製作者への申し送り事項として整理した。これをアンローダ設計段階の初期条件へ反映することで、係留施設と荷役機械相互の耐震性能の整合を図るものとした。

