

荷役機械と係留施設の動的相互作用を考慮した設計手法について

山本高士*・大里睦男**・及川勝朋***・大場昌幸****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 前 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

**** 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 建設管理官

小名浜港のケーブサイズ型船舶対応のバルク貨物岸壁をモデルとして、荷役機械と係留施設の動的相互作用を考慮し、両者の性能を整合的に満足する設計手法を検討した。

キーワード：直杭式棧橋，土留護岸，耐震照査，予備設計

1. はじめに

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(以下、技術基準)の改正(平成19年7月)により、技術基準対象施設に石油荷役機械以外の荷役機械が追加された。荷役機械は原則、厚生労働省が定める「クレーン構造規格」「クレーン等安全規則」に基づき設計される。すなわち、作業時(荷役荷重)、暴風時(設計風速55m/s及び60m/s)、地震時(設計震度0.20)といった外力作用に対し、荷役機械全体の安定性の照査(転倒や逸走防止)や部材応力の照査がされるため、荷役機械はある一定の水準で継続・変動状態の安定性を満足する。ただし、地震時の作用に関しては、統一的に設定された値であり、係留施設建設地点の地震動・地盤特性や係留施設の構造形式による影響は考慮されていない。

本稿では、係留施設と荷役機械双方の性能を整合的に満足させ、合理的な性能照査手法の構築を目標とし、小名浜港をモデルケースとして、ケーブサイズ型船舶対応のバルク貨物港湾施設を対象とした構造検討及び設計手法を検討した概要を報告する。

本検討の設計対象位置を図-1に示す。



図-1 設計対象位置図

2. 条件の設定

2.1 計画及び利用条件

設計対象とする施設の基本的な計画諸元を以下に示す。

- ・施設の位置付け：岸壁
- ・計画水深：D.L. -20m
- ・計画延長：L=370m
- ・計画天端：D.L. +3.5m
- ・対象船舶：ケーブサイズ (177,000 D.W.T) 及びポストパナマックス (91,500 D.W.T)
- ・荷役機械：バケット式橋型クレーンアンローダ (1,500t/hr 及び 3,000t/hr) 非免震・免震構造

2.2 地盤条件

図-2に示すように当該地点は一部区間を除き、泥岩層が浅い水深に分布している。泥岩層の強度は換算N値100~300、室内試験による一軸圧縮強度6~8MN/m²であり、軟岩I相当と区分される。

2.3 地震動

設計地震動(工学的基盤面入力地震動)を図-3に示す。また、工学的基盤面の地震動の加速度応答スペクトルを図-4に示す。

3. 構造検討

3.1 荷役機械の検討

(1) 基本寸法の設定

レールスパンは、荷役機械(3,000t/hr)の製作可能な最小幅でかつ製作コストが最小となる幅25mとした。係留施設の設置位置や係留施設の構造形式とクレーンの諸元についても検討したが、紙幅の関係で省略する。

(2) 荷役機械の安定性照査及び構造部材照査

クレーン構造規格(厚生労働省)に準じた検討方法により、概略的にクレーン諸元を検討した。

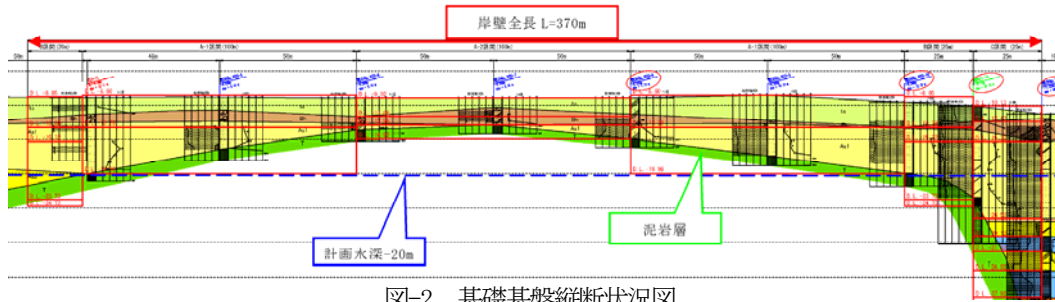


図-2 基礎基盤縦断状況図

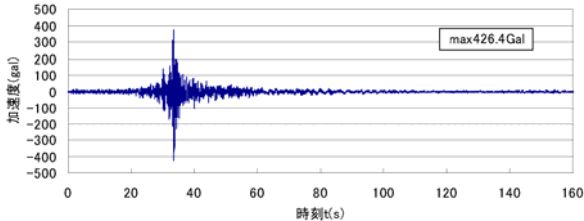


図-3 レベル1地震動波形

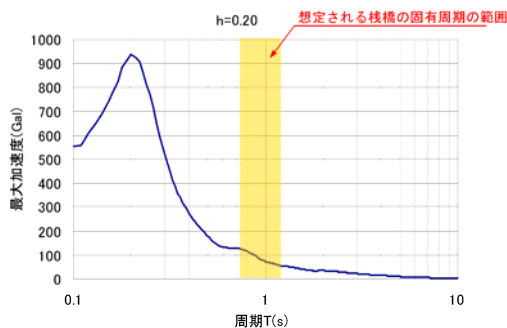


図-4 工学的基盤面の加速度応答スペクトル図

(3) 検討結果

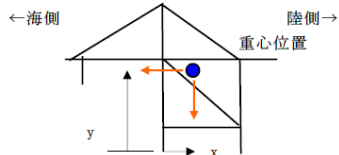
1) 重量及び重心位置

荷役機械の重量及び重心位置を表-1 に示す。

表-1 重量及び重心位置

能力	状態	重量 (t)	重心位置 (m)		浮き上がり限界 加速度(海← 陸) (Gal)*
			水平方向 x	鉛直方向 y	
1,500t/hr	作業時	1101	8.0	22.7	345
	休止時	976	12.7	24.6	506
3,000t/hr	作業時	2350	8.0	27.6	284
	休止時	2100	11.3	29.1	381

*脚の浮き上がり限界加速度： $M \times \alpha \times y \geq M \times g \times x$ より、 $\alpha \geq g \times x / y$



2) 固有周期

クレーン耐震設計指針 (JCAS-1101-2008) の概略計算による横方向の固有周期は以下のとおりである。

- 能力 1,500 t/hr : 約 2.0 秒
- 能力 3,000 t/hr : 約 1.5 秒

3) 輪荷重

荷役機械 (3,000t/hr) の輪荷重を表-2 に示す。

4) 荷役機械の減衰率

従来、コンテナクレーンの減衰率は3%程度が用いら

れていたが、実機コンテナクレーンの調査結果より、荷役機械の減衰率は0.3%程度であることが確認されているとの見解を参考にし、本検討では荷役機械の減衰率を0.3%とした。

表-2 荷役機械 (3,000t/hr) 輪荷重

区 分	アンローダ				備考	
	R1	R2	R3	R4		
コーナ No.						
1 橋車輪数	12	12	12	12		
1 作業時	垂直力 (V輪)	70.0	70.0	46.0	46.0	16m/s 相当風荷重
	水平力 レール直角方向 (V輪)	4.0	4.0	4.5	4.5	100% 負荷
	レール平行方向 (V輪)	93.5	93.5	57.5	57.5	
2 休止時	垂直力 (V輪)	92.5	92.5	93.0	93.0	55m/s 相当風荷重
	水平力 レール直角方向 (V輪)	6.0	6.0	25.5	25.5	無負荷
3 地震時	垂直力 (V輪)	97.5	97.5	67.5	67.5	地震係数 k=0.2
	水平力 レール直角方向 (V輪)	2.0	2.0	17.5	17.5	無負荷

3.2 係留施設の構造形式の抽出

当該地点は泥岩層が浅い水深に分布しているため、重力式構造とした場合、岩掘削が広範囲となる。そのため、栈橋構造である以下の2形式を対象とした。

- ①直杭式横栈橋
- ②ジャケット式栈橋

3.3 安定性の照査

係留施設の安定性については、以下の状態で照査を行った。

- ①永続状態
- ②変動状態 (レベル1地震動)

3.4 構造形式の選定

当該施設の地盤条件及び地震動条件では、長周期側の栈橋の方が作用地震力は小さくなり、結果的に経済面で有利な断面となることから、図-5 に示す「直杭式横栈橋」を選定した。

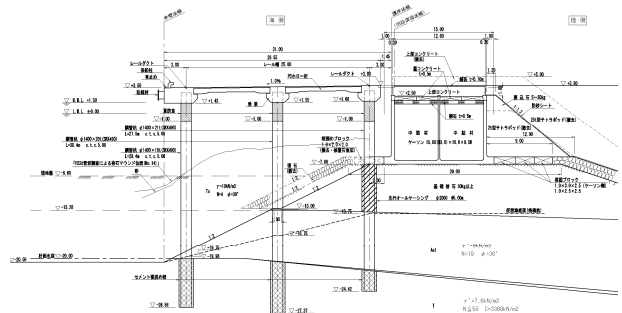


図-5 直杭式横栈橋

3.5 荷役機械と係留施設の動的相互作用の検証

荷役機械と係留施設の動的相互作用を考慮するために、それらを2質点系でモデル化し(図-6)、簡便な地震応答解析を実施した。

2質点解析結果を表-3に示す。荷役機械(3,000t/hr)の応答加速度は非免震で57Galとなった。

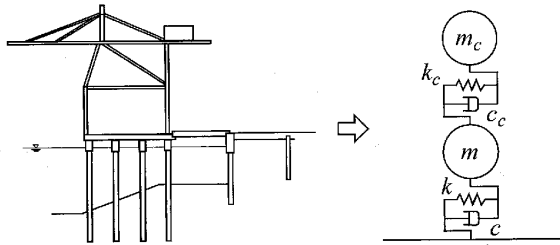


図-6 栈橋とクレーンのモデル化¹⁾

表-3 2質点解析結果

地震動	荷役機械	水平方向応答加速度最大値 (Gal)	
		荷役機械重心	栈橋上部工
レベル1	非免震 T=1.5s, h=0.3%	57	49

3.6 詳細法による安定性の照査

2次元 FEM による地震応答解析(解析コード: FLIP, ver. 7.1.9)を実施した(図-7)。荷役機械は図-8に示す簡易ラーメンとしてモデル化し、振動特性を反映した。

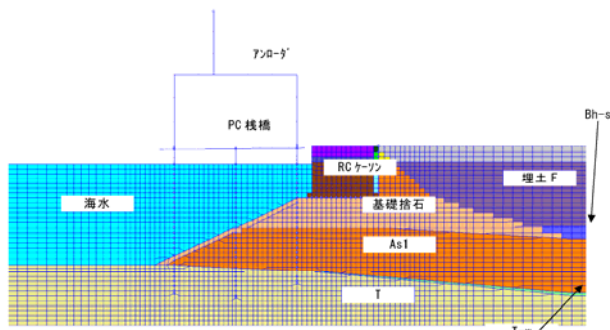


図-7 解析モデル図

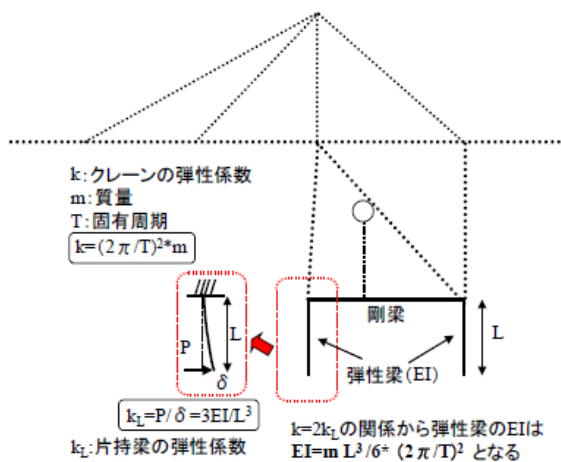


図-8 クレーンの簡易ラーメンモデル化²⁾

2次元 FEM による地震応答解析結果を表-4に示す。レベル1地震時の荷役機械の応答加速度は、非免震で

188Gal, 免震で 26Gal となり、この事例では、免震機能が十分に発揮されると想定される。ただし、非免震クレーンでも 200Gal 以下の応答となり、免震化の必要性は低いと判断される。

また、2質点系解析と2次元 FEM 解析とでは、栈橋及び荷役機械の応答に著しい差異が確認された。これは、2質点解析では、基礎マウンド高の半分までを地盤反力が期待できる有効高として見込むが、2次元 FEM による地震応答解析ではマウンド法面、天端までの全てをモデル化するため、杭の突出長が短くなり栈橋の固有周期が短周期になっている影響と考えられる。

このため、栈橋部の剛性を適切に評価できる「3.6 詳細法による安定性の照査」を推奨する。

表-4 2次元 FEM による地震応答解析結果

地震動	荷役機械	水平方向応答加速度最大値 (Gal)	
		荷役機械重心	栈橋上部工
レベル1	なし	—	170
	非免震	188	235
	免震	26	152

4. 設計手法の検討

前述の検討結果を踏まえ、次頁図-9に荷役機械を考慮した係留施設の地震時変動状態の設計フローを提案する。

5. 課題の抽出

- 本検討では、係留施設は出来るだけ長周期側となる柔な構造とした方が、当該地点のレベル1地震動特性に対して有利との一応の結論を得た。ただし、レベル2地震動のような想定外の外力作用に対して、係留施設や荷役機械がどの程度の構造安定性を担保できるかは不明である。施設の重要度や規模を鑑みると、保有する構造耐力の確認を行っておくことがより望ましい。
- 土木構造物である係留施設と機械製品である荷役機械を同時に設計することが望ましいが、現状では困難である。そのため、係留施設の設計者は、想定する荷役機械については、現状の技術水準においてクレーンメーカーが製造可能な荷役機械の諸元であることを確認しながら係留施設の設計をすることが重要である。
- 係留施設設計者は、荷役機械設計者へ以下に示す事項を引き渡し、荷役機械設計者は、荷役機械の設計・製造においてそれを確実に遵守されることが重要である。
 - ① 係留施設を設計する際に入力条件とした最大輪荷重、車輪ピッチ、最小接近距離等の荷重条件
 - ② 係留施設の地震応答解析に入力条件とした荷役機械全体重量、固有周期、減衰率等の振動特性条件
 - ③ 係留施設直上における地震時時刻歴応答加速度波形(法線直角、法線平行及び鉛直の3成分)
 - ④ 想定される海陸クレーン基礎の時刻歴応答相対変位量

6. 謝辞

本検討にあたり、検討委員会（委員長：清宮理・早稲田大学教授）の委員各位、仙台港湾空港技術調査事務所及び小名浜港湾事務所の関係者には、貴重なご意見・ご指導をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，2007. 7.
- 菅野高弘，塩崎禎郎：コンテナクレーンの地震時挙動に関する数値解析手法の検討，土木学会地震工学論文集，pp. 1270-1277，2007.

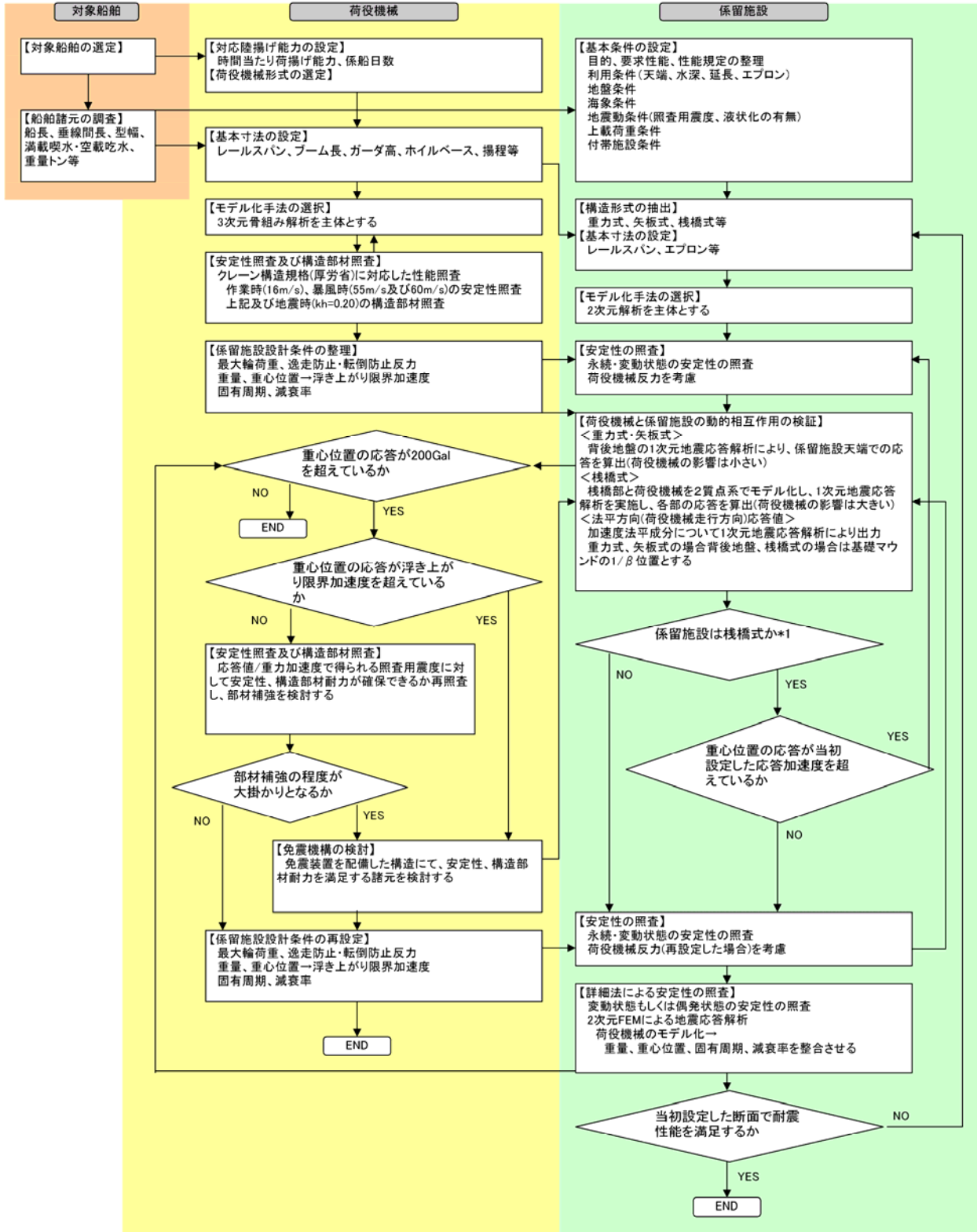


図-9 荷役機械を考慮した係留施設の設計フロー