

係留施設の性能照査におけるコンテナクレーン の簡易モデル化に関する研究

A SIMPLIFIED 3D MODELING OF CONTAINER CRANES FOR SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT OF QUAY WALLS

長尾毅¹・吉川慎一²・西尾岳裕²・福永勇介³・

宮田正史⁴・菅野高弘⁵・竹信正寛⁶

Takashi NAGAO, Shinichi YOSHIKAWA, Takahiro NISHIO, Yusuke FUKUNAGA,
Masafumi MIYATA, Takahiro SUGANO and Masahiro TAKENOBU

¹正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 国土交通省港湾局 技術企画課技術監理室 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

⁵正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (同上)

It is necessary to assess the seismic performance of container cranes against the level-two earthquake ground motion according to Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan revised in 2007. Two-dimensional earthquake response analysis is often used for the seismic performance assessment, however, two-dimensional analysis is not precise enough for the reproduction of complicated response of container cranes such as that after an uplift motion of the crane leg. The objective of this study is to establish a simplified three-dimensional crane model that reproduces the crane response with enough preciseness in view of practical design. Applicability of the proposed model is demonstrated by comparing the response of proposed model with that of detailed three-dimensional model.

Key Words : *Seismic Performance, Quay Wall, Container Crane, Level-two Earthquake Ground Motion, Seismic Isolation*

1. はじめに

平成19年の港湾の施設の技術上の基準¹⁾の改正に伴い、コンテナクレーンが港湾基準の対象施設に追加され、コンテナクレーンについても各種性能照査を行うことが必要となった。コンテナバースの係留施設のレベル2地震動に対する性能照査では、コンテナクレーンと係留施設の相互作用を考慮するため、係留施設とコンテナクレーンの双方をモデル化したクレーン一体型の2次元地震応答計算が一般的に行われる。その際、コンテナクレーンのモデル化については、固有周期が一致するようにクレーンの複雑な構造をラーメン構造に簡略化したモデルが採用されることが多い。検討条件によってはクレーンの脚の浮き上がりが生じる結果となるが、現状の港湾構造物の耐震性能照査で用いられることの多いFLIP²⁾などの一体型の解析においては浮き上がり後の挙動を確認できない。

対策として脚が浮き上がらないように諸元を変更することも考えられるものの、経済的に有利とならない可能性が高い。一方、複雑な構造のクレーンの

挙動を正確に再現することを標準とすることは現状では困難を伴う。

以上の背景のもと、本研究では係留施設の設計者がクレーンの挙動を簡易に評価するためのモデル化の方法について検討する。

2. 検討条件

(1) 入力地震動

図-1 に示す T 港のジャケット式栈橋上の非免震コンテナクレーン及び免震化した場合を想定したクレーンを対象に検討を行った。一体型の2次元地震応答計算をFLIPによって行い、図-2 に示すクレーン基礎位置の加速度応答3成分を算出し、これを入力条件とした。なお、クレーンの脚はジャケット式栈橋の上部工に設置されるレール上に搭載される形式となっており、ジャケット式栈橋の構造部材の諸元は、対象とする地震動に対して応答が弾性範囲内(各部材が全塑性に至らない)に収まるように設定されているものである。

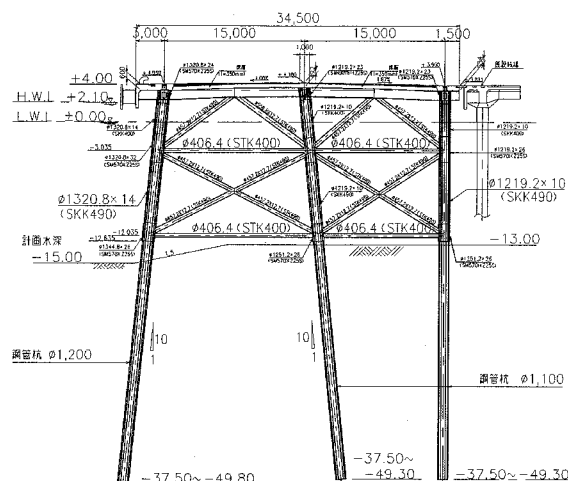


図-1 T 港係留施設標準断面図

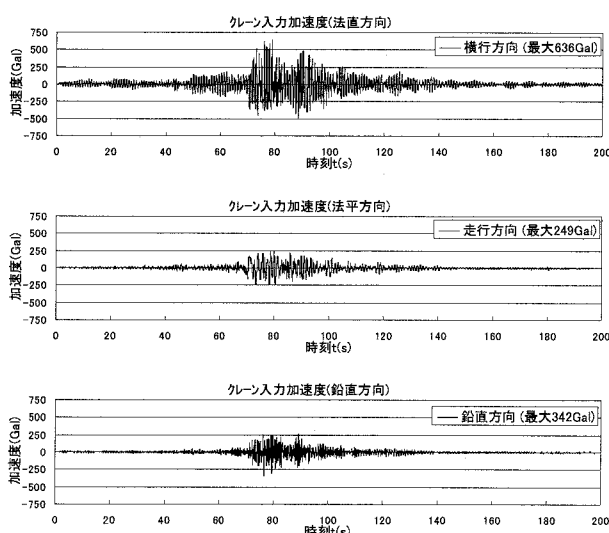


図-2 クレーン基礎位置の応答加速度

(2) コンテナクレーンのモデル化

レベル2地震動に対するコンテナクレーンの耐震性能照査は、3次元FEM解析を用いた照査が基本となる。これは、平成7年兵庫県南部地震以降、免震コンテナクレーンが導入されたが、その導入段階にあたっては、3次元有限要素法、振動台を用いたコンテナクレーン模型の加振試験および免震装置部分（バネ値や減衰ダンパー等）の性能確認試験などが実施され、3次元有限要素法により一定精度の再現解析が可能であることが既に確認されているためである（例えば菅野らの研究³⁾）。しかしながら、上記の兵庫県南部地震以降の各種検討は、各クレーンメーカーが各社固有の免震装置に対して独自に実施したものであり、一般に係留施設設計者が各種免震クレーンのモデル化の手法や再現性の確認を行うことは現状では困難である。

従って本研究では、各クレーンメーカーによる3次元FEMによる地震応答解析を行う上での一般的な検討方法やモデル化の要点、再現性の確認を踏まえた上で、「詳細モデル」として構築する手法について概説し、さらに詳細モデルを踏まえてある一定の

精度で再現性を確保し、係留施設設計者による取り扱いが容易な「簡易モデル」の構築を図ることとした。

a) 詳細モデルの構築手順

詳細モデルを構築する標準的な手順を図-3に示す。また、各段階において特に留意すべき事項を詳述する。解析コードは、MSC/NASTRANを想定した。本手順に準じ構築したT港クレーンを対象とした詳細モデルと部材名称を図-4に示す。

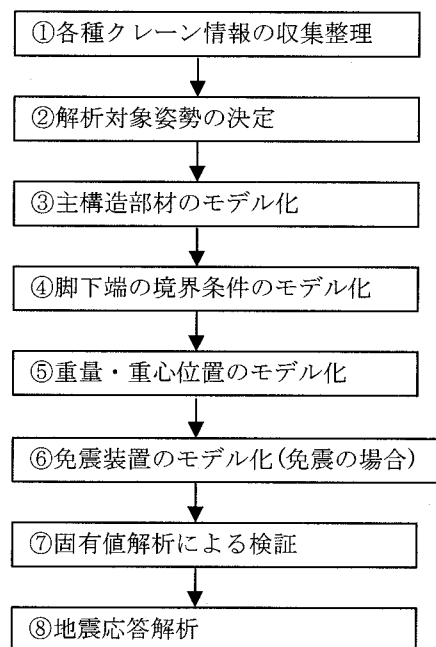


図-3 詳細モデルの構築手順

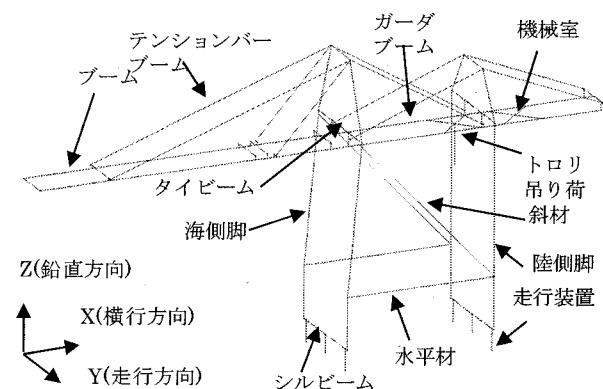


図-4 T 港クレーン詳細モデル

①コンテナクレーンの3次元FEMモデル化に必要な各種情報を以下に示す。なお、モデル化対象のクレーンは、クレーン構造規格⁴⁾に準じた部材設計が既になされており、レベル2地震動に対する性能照査段階であることを想定している。

- 1) 主要部材一般構造図
- 2) 部材強度計算書
- 3) 安定度計算書
- 4) 最大輪荷重計算書
- 5) 免震装置設計資料(免震クレーンの場合)

②解析対象姿勢は、クレーンの休止時（ブームアップ）と作業時（ブームダウン）に大別される。作業時を対象とする場合、特に吊り荷・トロリの位置がクレーン全体の重心位置に及ぼす影響が大きいいため、適切に設定する必要がある。吊り荷が最も海側寄りとなるアウトリーチ時が安全側の評価となるものの、例えば、緊急地震速報等を用いて、クレーンオペレータに地震速報を確実に伝達することにより、地震の主要動が来襲する前にクレーン運転室をコンテナクレーンの耐震設計上考えられる最も安全な位置もしくは所定の位置に戻すことができる場合には、その状態でのクレーン姿勢を解析対象として設定することが可能である。今回のモデル化においては、この考え方を踏まえてトロリを休止時位置まで移動させた状態を想定した。

③主要構造部材のモデル化では、構造部材の断面諸元をモデル化に反映する。部材分割数は2次モードまでの再現が可能な4分割以上を基本とする。

④脚下端の境界条件は、走行装置のモデル化と拘束条件に留意する。実機クレーンの走行装置の作動状況を反映して、脚下端の6自由度系（ $X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ）の拘束条件を設定する。横行方向は車輪のつばがレールにかかり固定される条件とした。鉛直方向は、脚の浮き上がり表現するための非線形ばね要素（NASTRAN 言語で GAP 要素）とし、圧縮側では走行方向にレールと車輪が接地している状態で摩擦力が作用する条件とする。摩擦力を超過する水平力が作用すると、レール面と車輪とのすべりが表現される。引張側は解析安定性に配慮し、クレーン構造部材より十分小さい軸剛性（ $1/1000$ 倍程度）のばねとする。なお、本モデルによる地震動の入力は、脚下端より連結した大質量点に時刻歴加速度を与える方法とした。

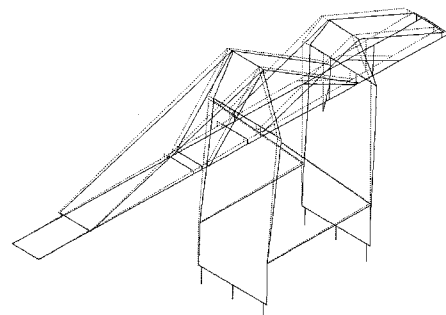
⑤重量・重心位置の設定は、脚の浮き上がりや固有値に影響が大きいいため、主要部材の密度を調整するなどの方法で、設計資料に示される重心位置とモデルとを合致させることが重要である。

⑥既往の免震クレーンの適用事例などを参考に、実機に適用可能な範囲のスペックで免震装置のバネ値、減衰係数を設定する。本検討では、水平型免震装置として各脚走行装置に水平バネ 1000kN/m 、減衰係数 $1200\text{kN}\cdot\text{s/m}$ を初期設定値とした。

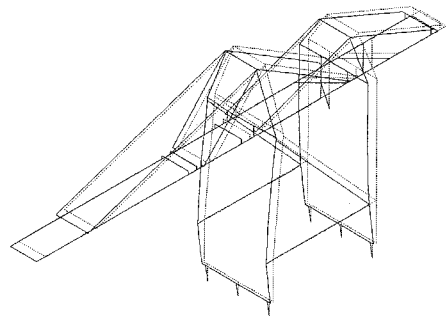
⑦固有値解析では、クレーン全体系の固有モードを確認し、特に長手方向部材であるブームの振動が全体系のモードへ影響が大きいため、主要な低次モードの絞り込みに留意する。なお、検討対象としたT港クレーンは、既往の研究⁵⁾より、実機クレーンにおけるポータブル地震計を用いた微動・振動計測、強震観測記録、3次元FEMモデルによる固有値解析による再現との比較より、モデルの妥当性が確認されている。なお、当研究では実機コンテナクレーン（非免震）の減衰率として3%程度である点も確認されたため、解析モデルも同様としている。

本検討の代表的な固有値解析結果として、非免震

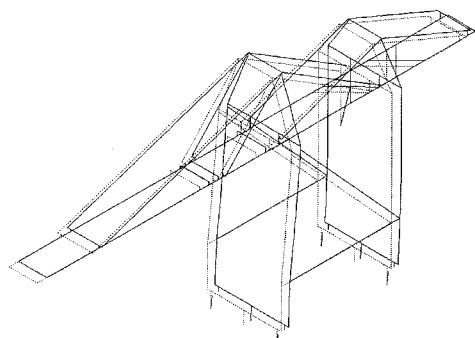
クレーンの低次モード図を図-5に、免震装置を導入した場合の低次モード図を図-6に示す。免震装置の効果で横行方向が大幅に長周期化されている状況がわかる。ここで、1次、2次は吊り荷が横行・走行方向に揺れるローカルモード、3次はブーム先端が走行方向に揺れるローカルモードであり、クレーン全体の挙動に有意ではないと判断した。



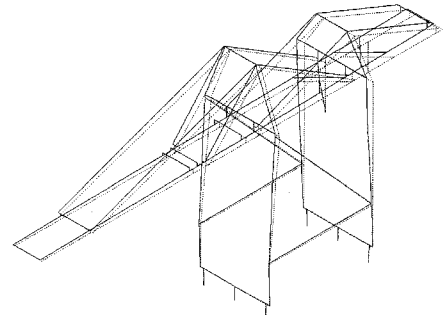
(a) 4次モード, $T=2.70\text{s}$, 走行方向1次



(b) 5次モード, $T=2.06\text{s}$, 横行方向1次
図-5 詳細モデル(非免震)固有値解析結果



(a) 4次モード, $T=3.64\text{s}$, 横行方向1次



(b) 5次モード, $T=2.76\text{s}$, 走行方向1次
図-6 詳細モデル(免震)固有値解析結果

b) 簡易モデルの構築手順

前述の詳細モデルの構築手順を踏まえた上で、簡略的な3次元モデルを作成するための手法を示す。

前項③主要部材のモデル化について、以下の点に留意して簡略化が可能である。

クレーン全体の剛度に影響が大きい脚部材、水平材、シルビーム、タイビーム、斜材、ブーム、ガータを主要部材とし、それ以外を2次部材として集中質量に変換する。なお、部材の断面諸元は、実機クレーンでは合理化の観点から部材端部・中央部で板厚などを変化させるが（詳細モデルではこれを反映）、断面積、断面二次モーメントを1本の部材内で部材長に対し平均化した代表値でモデル化してもクレーン全体の挙動には大きい影響はないことを確認した。

また、ブーム・ガーダは吊り上げ・吊り下ろしを行うカンチレバー部材であり、鉛直方向の剛性は高いが、走行方向の荷重に対して弱軸方向となる。このためテンションバーなど 2 次部材で補強されている。詳細モデルでのブームの走行方向への荷重・変位関係の検証より、概ねブームの走行方向曲げ剛性の 10 倍程度を入力値とすれば、極端にブームが走行方向に揺れるモードは生じず、詳細モデルに近い挙動となる点を確認した。

前述④脚下端の境界条件として、鉛直方向の非線形ばねを詳細モデルと同様にモデル化した。走行方向へのレール面でのすべりは、レール面と車輪との摩擦係数(=0.075)×クレーン死荷重分までの水平力が作用するまでは剛なばね(剛性勾配は変位1mmと設定)、それ以上の水平力では剛性ゼロとなる非線形ばねを与えた。

前述⑤にならい、モデルの全体重量と重心位置が実機クレーンと同等となるよう、モデル化した部材の密度等で調整した。

このような方法で簡易的に作成した T 港クレーンを対象とした 3 次元 FEM モデルを図-7 に示す。また、非免震クレーンの固有値解析結果を図-8 に、免震クレーンの固有値解析結果を図-9 に示す。簡易モデルでは吊り荷を下げるロープはモデル化していないため、詳細モデルの 1 次、2 次のローカルモードに相当するモードは生じず、1 次でブーム先端が走行方向に揺れるローカルモードが生じた。

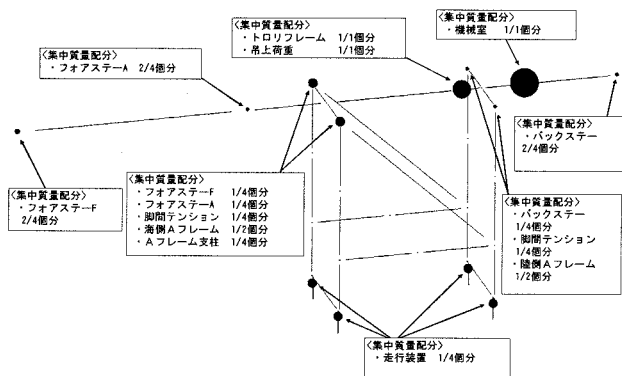
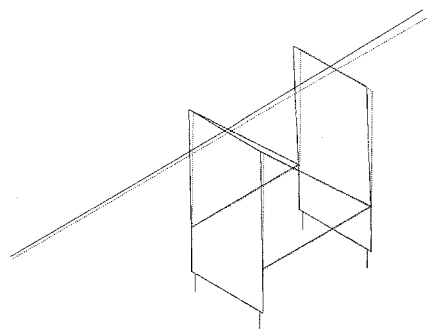
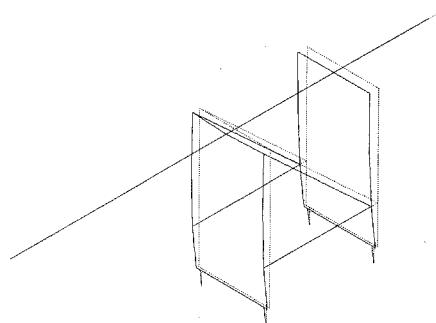


図-7 T 港クレーン簡易モデル

従って、詳細モデルとは相当する次数が異なっている点に留意されたい。詳細モデルと比較し固有値に若干のずれはあるが、クレーン全体の振動モードとしては一定の精度で再現可能と判断した。

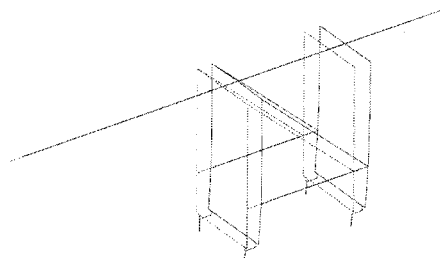


(a) 2次モード, $T=2.39\text{s}$, 走行方向1次

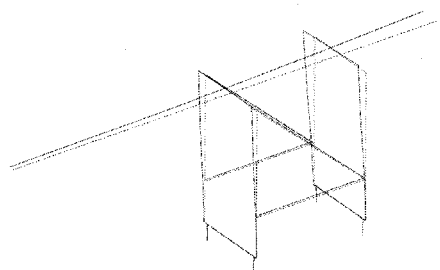


(b) 3次モード, $T=2.19s$, 横行方向1次

図-8 簡易モデル(非免震)固有値解析結果



(a) 2次モード, $T=3.91\text{s}$, 横行方向1次



(b) 3次モード, $T=2.58s$, 走行方向1次

図-9 簡易モデル(免震)固有値解析結果

(3) 性能規定値の設定

コンテナクレーンの耐震性能を照査するための性能既定値の設定例を表-1 に示す。各性能規定値の考え方を以下に示す。

脚の浮き上がり量許容限度は、車輪のつばの高さ

である 25mm 以内とした。

脚下端の反力は、係留施設の設計条件として隣接する施設のクレーンの実績などより設定された値であり、原則としてこれを超えてはならない。

主要部材の応力限界値は、クレーン構造規格に準じた照査方法とするが、許容値は降伏強度を基本とした。

免震装置に関する規定は、使用する免震装置のスペックに応じて決定することとなるが、ここでは既往実績のある免震装置のスペックを目標とした。

表-1 クレーンの性能規定値の設定例

照査項目	性能規定値
脚の浮上り	25mm(車輪のつばの高さ)
脚下端の反力 (8輪/脚)	・海側脚： 鉛直975kN/輪→7800kN/脚 水平109kN/輪→872kN/脚 ・陸側脚： 鉛直693kN/輪→5544kN/脚 水平74kN/輪→592kN/脚
主要構造部材の応力	・軸力・曲げ・せん断作用に対する 鋼部材の発生応力が降伏応力以内 (曲げ引張 $\sigma_{ta}=363\text{N/mm}^2$ ， 曲げ圧縮 $\sigma_{ca}=313\text{N/mm}^2$)
免震装置(水平型)	・免震装置の水平変位量 許容ストローク $\pm 30\text{cm}$

3. 詳細モデルと簡易モデルによる応答の比較

詳細モデルと簡易モデルの各種物理量の時刻歴を図-10(非免震クレーン)、図-11(免震クレーン)に描き、併せてそれらの最大応答値をまとめて表-2に示す。表-2におけるカッコ内の数値は、詳細モデルの値を 1.00 としたときの簡易モデルの値を示している。

(1) 非免震コンテナクレーン

両者のモデルで、重心位置変位量や部材応力についてはほぼ同等程度と考えられるが、脚下端の浮き上がり量、脚下端反力は大きく異なる値となった。簡易モデルの方が、ロッキング挙動により一旦脚が浮き上がると、着地した瞬間に剛性が高い支点部の圧縮ばねの影響で大きい反力が生じているものと考えられる。一方、詳細モデルの方は脚の浮き上がり量も僅かであり、このため脚下端反力も比較的小さな値にとどまっている。本ケースの場合、詳細モデルによる結果は、一部のパラメータで限界値に近いものの、表-1に示した性能規定値の範囲内にとどまっている。このため詳細モデルと簡易モデルでは判定が大きく異なる結果となる。

従って、本モデルにおいては脚の浮き上がりが生じるような非線形的な挙動が強くなる状況においては、詳細モデルによる検証が望ましい。

(2) 免震コンテナクレーン

表-2 非免震・免震クレーンの最大応答値の比較

	非免震		免震	
	詳細	簡易	詳細	簡易
重心位置 応答加速度 m/s^2	4.94 (1.00)	6.93 (1.40)	2.74 (1.00)	3.42 (1.25)
重心位置 応答変位 m	0.460 (1.00)	0.464 (1.01)	0.276 (1.00)	0.293 (1.06)
脚浮上り m	0.004 (1.00)	0.048 (12.00)	0.000 (1.00)	0.000 (1.00)
脚下端 鉛直反力 kN	5377 (1.00)	19794 (3.68)	4339 (1.00)	5739 (1.32)
水平材 曲げ応力 N/mm^2	引張	362 (1.00)	366 (1.01)	223 (1.00)
	圧縮	260 (1.00)	351 (1.35)	126 (1.00)
免震装置変位 m	- (-)	- (-)	0.109 (1.00)	0.108 (0.99)

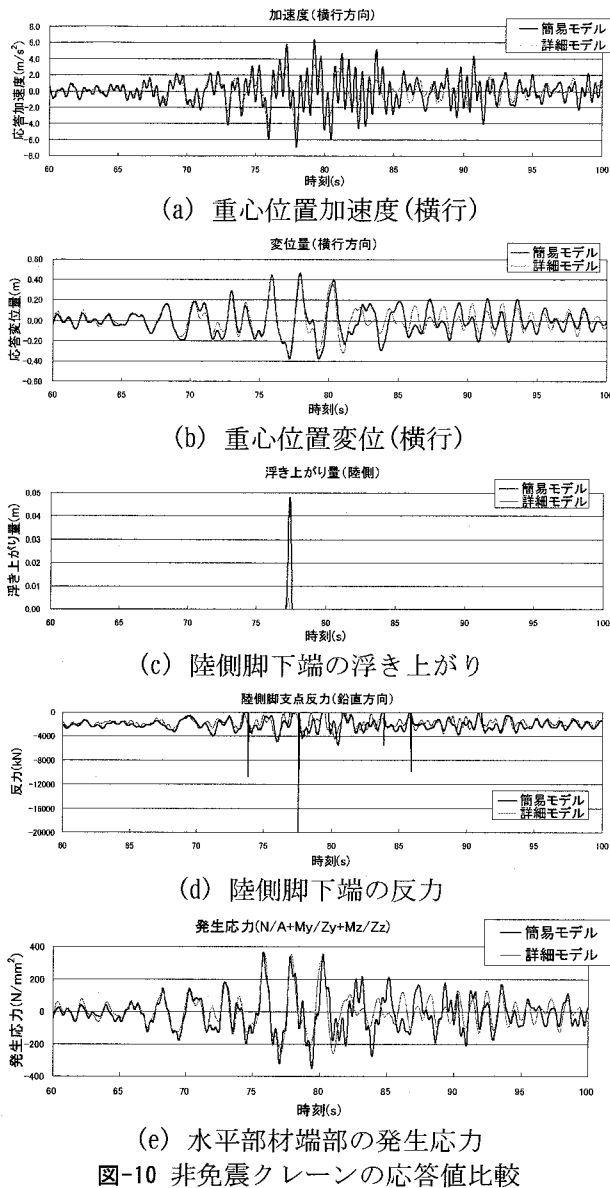
両者のモデルとも免震装置の効果で脚の浮き上がりは生じず、加速度が低減されている。重心位置変位量、免震装置変位や部材応力についてはほぼ同等程度と考えられる。脚下端反力は簡易モデルがやや大きい。非免震クレーンの挙動に比べると両者の差は小さい。

従って、本モデルにおいては脚の浮き上がりが生じない範囲の挙動では、簡易モデルでもある一定の精度での性能照査は可能と考えられる。

4. コンテナクレーンのモデル化手法の提案

前項までの検討結果を踏まえ、コンテナクレーンのモデル化手法として、例えば以下のような手順が考えられる。

- ① 係留施設の 2 次元動的解析 (クレーンは簡易ラーメンにてモデル化) より、クレーン重心位置での応答加速度から、静的な転倒の照査を行い、クレーン脚の浮き上がりが生じるレベルの応答か否かを判断する。
- ② 脚の浮き上がりが懸念される場合、簡易 3 次元 FEM モデルにてクレーンの応答解析を行い、部材応力や浮き上がりについて照査する。
- ③ 脚の浮き上がりが性能規定値を超過する場合、詳細 3 次元 FEM モデルにてクレーンの応答解析を実施する。なお、性能規定値を超過する割合が大きい場合は、当初より免震化を検討条件に含めるのが手戻りが少ない場合があると考えられる。
- ④ ②、③において免震クレーンでも性能規定値を満足しない場合、以下のような対策を検討する。
 - 1) 免震装置のスペックを増強する、走行装置を大型化するなど、現実的に製作が可能な範囲内で性能規定値を満足する諸元を検討する。
 - 2) 係留施設の設計への反映が可能な場合、クレーンの応答解析より得られた反力値に対して係留



施設の部材耐力が限界値以内に収まるよう、部材の補強を検討する。特に軸力の影響が大きい栈橋形式の場合は留意が必要である。

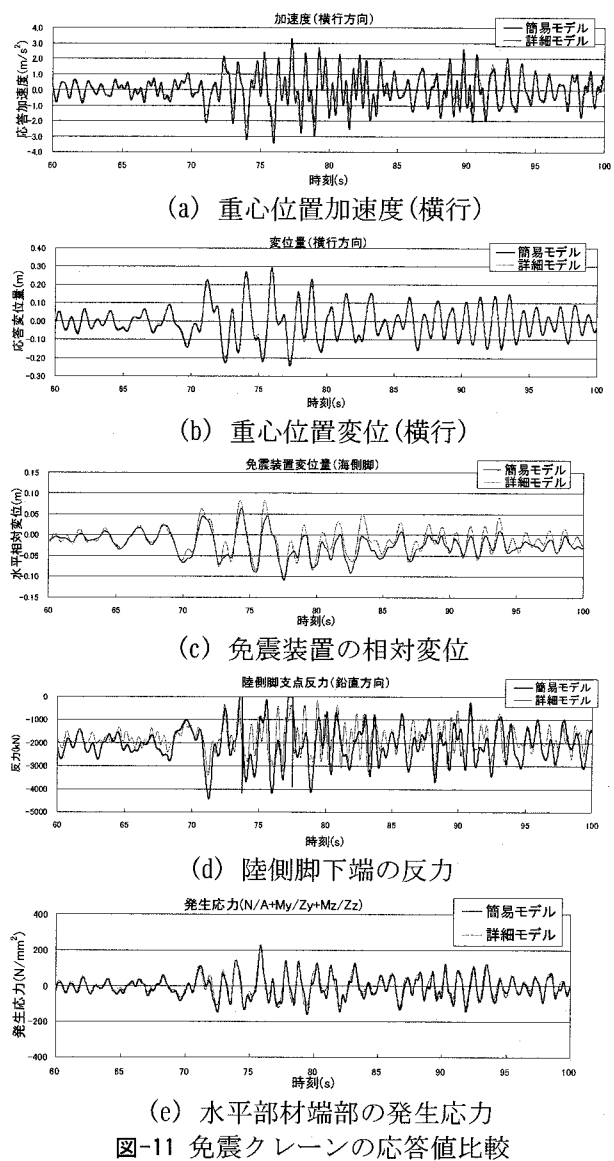
以上のような手順を係留施設の基本設計・細部設計段階に含めることで、係留施設とコンテナクレーン双方の耐震性能の確保が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、耐震強化施設上に配備されるコンテナクレーンを対象として、係留施設設計者側にも取り扱いが可能なクレーンの耐震性能照査の一手法について提案した。

本研究による主要な結論は以下の通りである。

①本研究で提案した簡易モデルは、脚の浮き上がりが生じるケースでは浮き上がり量、脚下端鉛直反力に関して詳細モデルとの乖離が大きかった。一方、脚の浮き上がりが生じないケースでは概ね詳細モデルと整合する結果が得られ、簡易モデルでもある一定の精度での性能照査は可能と考えられる。



②コンテナクレーンのモデル化手法について、設計実務への適用の観点から手順を提案した。

今後は、検討ケース数を増やして適用性を確認する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 3) 菅野高弘・芝草隆博・藤原潔・徳永耕一・槇本洋二・藤木友幸：コンテナクレーンの耐震性の向上に関する研究－免震コンテナクレーンの開発－、港湾空港技術研究所報告, Vol.42, No.2, 2003.6.
- 4) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課編：クレーン等構造規格の解説(改訂3版)、(社)日本クレーン協会、平成9年6月。
- 5) 宮田正史・竹信正寛・野津厚・菅野高弘・小濱英司・久保哲也：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究(その2)、国総研資料, No.515, 2009.5.