

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

菅野高弘¹ 塩崎禎郎²¹ (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: sugano@pari.go.jp

²JFE技研(株) (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)

E-mail: y-shiozaki@jfe-rd.co.jp

コンテナクレーンの耐震検討で用いる数値解析手法としては、3次元骨組モデルを用いたFEM解析で対応することができるが、岸壁の設計では、2次元骨組モデルや、より簡易なラーメンモデルや質点系モデルが求められている。そこで、本研究では1/15縮尺のコンテナクレーンの模型振動実験を実施し、耐震検討用の数値解析手法に関して、モデル化手法とその適用性について考察した。その結果、2次元骨組モデル、ラーメンモデル、質点系モデルでコンテナクレーンの地震時挙動を再現できることがわかった。

Key Words : Container Crane, Shaking table test, Numerical method

1. はじめに

コンテナバースの耐震設計においては、コンテナクレーンによる地震時荷重(輪荷重)が支配的になるケースが多く、岸壁の動的相互作用を念頭に置いた検討が必要である。コンテナクレーンの耐震検討で用いる数値解析手法としては、3次元骨組モデルに対するFEM解析で対応することができるが、岸壁との動的相互作用に対する設計検討では、2次元骨組モデルや、より簡易なラーメンモデル、質点系モデルが求められている。そこで、本研究では1/15縮尺のコンテナクレーンの模型振動実験を実施し、耐震検討用の数値解析手法に関して、モデル化手法と、その適用性について考察した。なお、コンテナクレーンは、近年、設置されるケースが増えてきている免震装置付きの構造に対しても検討を行った。

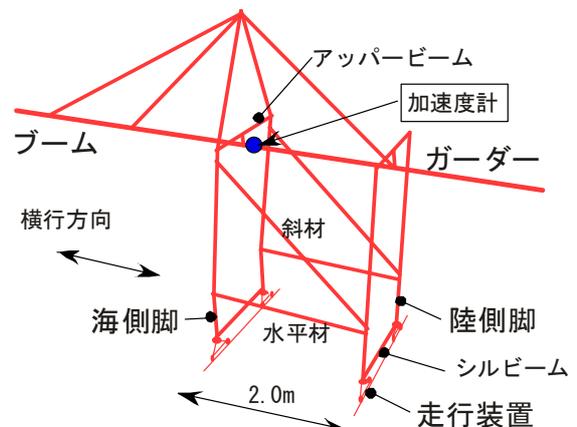
2. コンテナクレーンの模型振動実験

(1) 実験概要

実験対象としたコンテナクレーンは、レールズパン30m、重量約10MNで、表-1に示す相似則¹⁾に即して1/15縮尺でモデル化した。模型は、市販の角形鋼管および鋼管を用い、重量調整用の錘を配置して製作した。部材および錘は、重心位置と固有周期を合わせることを念頭において選定した。

表-1 適用相似則

物理量	実機/模型	縮尺比
長さ	λ	15.00
時間	$\lambda^{1/2}$	3.87
加速度	1	1.00
重量	λ^3	3375
曲げ剛性	λ^5	759375



質量 水平型免震装置付き : 315kg
 ロッキング型免震装置付き : 312kg

図-1 コンテナクレーン模型の鳥瞰図

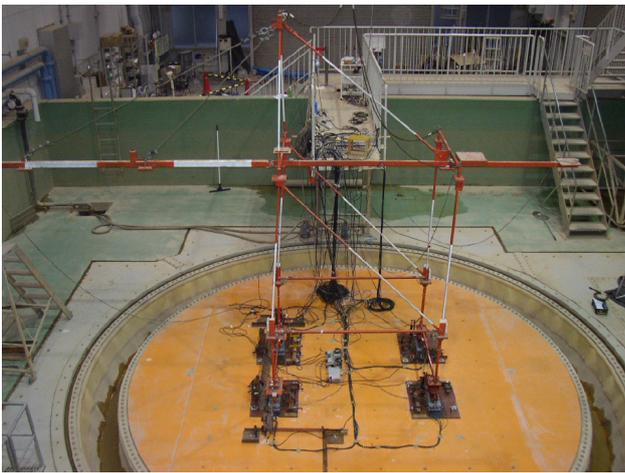


写真-1 コンテナクレーン模型（震動台への設置状況）

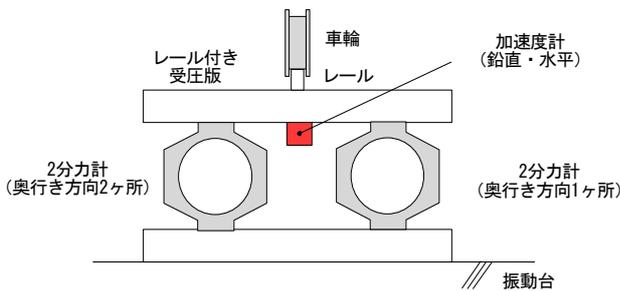


図-2 輪荷重の測定方法

模型の鳥瞰図を図-1に、震動台に設置した状態の写真を写真-1に示す。走行装置の車輪の数は実機では一脚あたり8輪であるが、模型では簡略化のため、両端の2輪でモデル化している。免震装置は、走行装置4カ所に横行方向のスライド機構と積層ゴムによる復元力機構で構成されている「水平型免震装置」と、陸側走行装置2カ所に鉛直方向のガイドと鉛直方向のバネを取り付けた「ロッキング型免震装置²⁾」の2種類に対して実験を行った。また、実機では免震装置は、減衰機構（ダンパーなど）が取り付けられているが、今回の実験では簡略化のため省略した（水平型免震装置のスライド機構とロッキング免震装置の鉛直ガイドで、摩擦などによる減衰は生じている）。

今回の実験では、コンテナクレーン模型の動的挙動だけでなく、レール側に作用する輪荷重の測定を実施した。測定方法は、図-2に示すようにレール付きの受圧版と震動台の間に2分力計を3個配置して、鉛直方向と水平方向の荷重を算定する方法を採用した。レール付き受圧版の慣性力は、受圧版に取り付けた加速度計から算定して荷重から差し引いた。

入力地震動は、水平型免震装置に対しては図-3に示す波形Aを、ロッキング型免震装置に対しては、波形Bを用いた。

(2) 実験結果

a) 水平型免震装置に対する実験結果

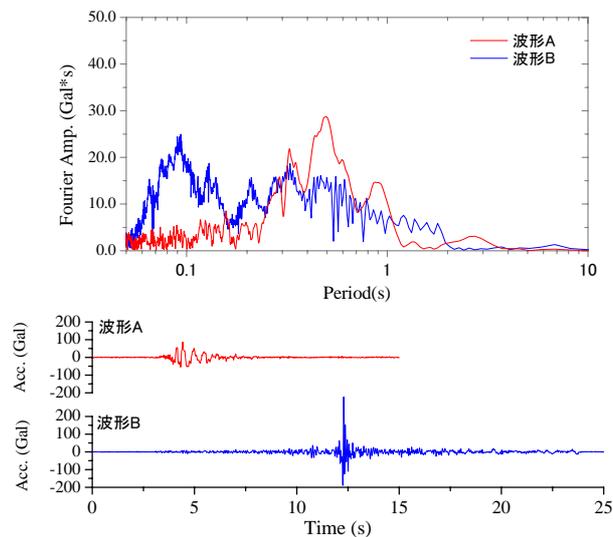


図-3 模型実験で用いた入力地震動

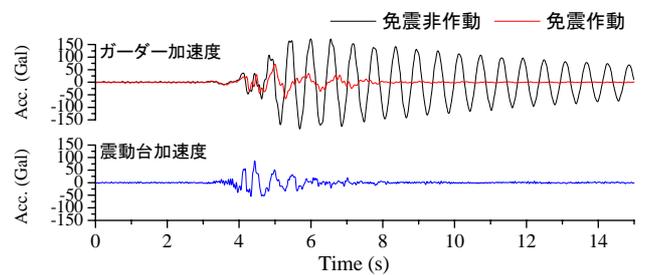


図-4 ガーダーの加速度時刻歴（水平型免震装置）

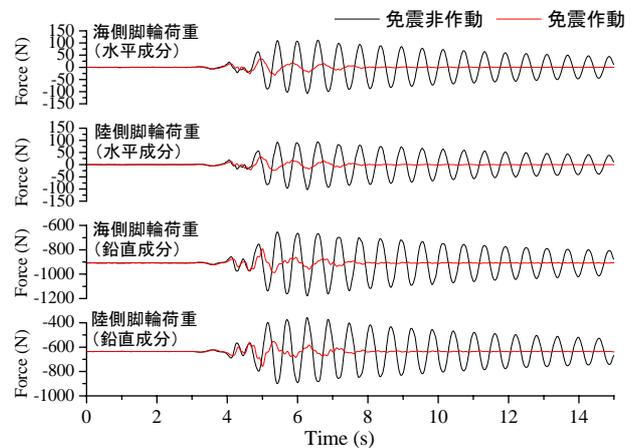


図-5 輪荷重の時刻歴（水平型免震装置）

免震装置非作動時と作動時に対する実験のガーダー一部の加速度時刻歴を図-4に示す。水平型免震装置によって横行方向の固有周期が非作動時の0.59秒から0.92秒へ長周期化され、波形Aのフーリエスペクトルのピークから外れるため、ガーダー部の加速度応答が小さくなっている。図-5は、輪荷重の水平成分と鉛直成分の海側脚・陸側脚の2本分の平均値の時刻歴である（鉛直成分では自重を加算、以降も同様の整理とした）。これらの波形から、免震作動時には、クレーンの加速度応答が小さくなるため、輪荷重の水平成分、鉛直成分も低減さ

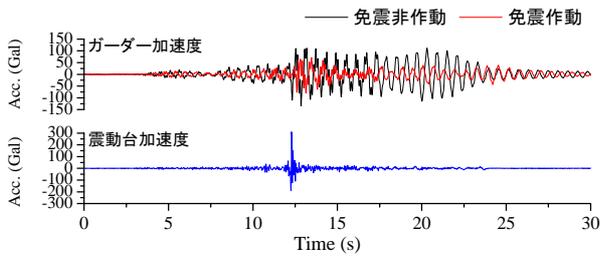


図-6 ガーダーの加速度時刻歴
(ロッキング型免震装置)

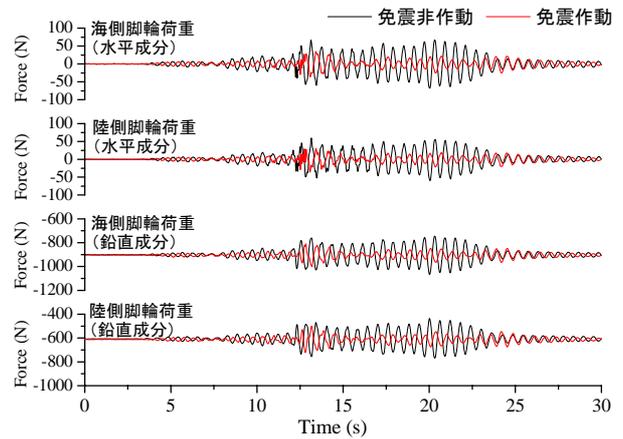


図-7 輪荷重の時刻歴 (ロッキング型免震装置)

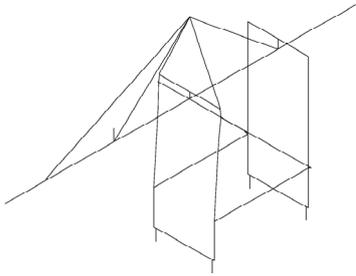
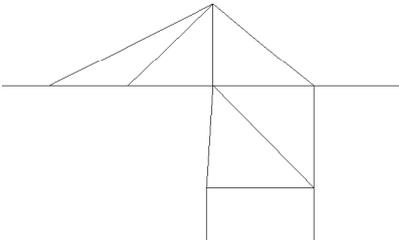
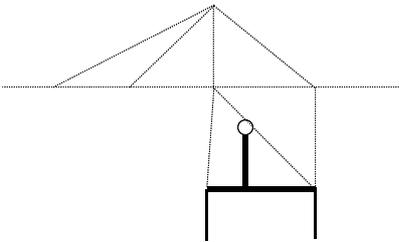
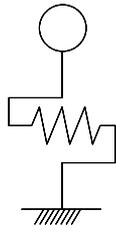
3次元骨組モデル	2次元骨組モデル
<ul style="list-style-type: none"> ・ 模型を3次元骨組でモデル化. ・ 梁要素は, 模型で用いた鋼材の諸元を反映. ・ 重りは節点集中質量でモデル化. 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3次元骨組を2次元に置き換え. ・ ブームを支えるアッパービームは水平・鉛直方向バネと回転バネに置換. ・ 走行装置上部のシルビームは回転バネに置換. 
ラーメンモデル	1質点モデル
<ul style="list-style-type: none"> ・ 重心位置に節点集中質量を配置. ・ 脚部は無質量の弾性梁. 梁の剛性は固有周期が一致するように設定. ・ 水平梁と節点集中質量を結ぶ梁は剛梁とする. 	<ul style="list-style-type: none"> ・ バネ定数は固有周期から算定. 

図-8 数値解析モデルの概要

れていることが確認できた. すなわち, 免震装置付きコンテナクレーンは, 岸壁の設計時の外力(輪荷重)を低減できることがわかる.

b) ロッキング型免震装置に対する実験結果

免震装置非作動時と作動時に対する実験のガーダー部の加速度時刻歴を図-6に示す. ロッキング型免震装置によってガーダー部の加速度応答が小さくなっていることがわかる. 図-7は, 輪荷重の水平成分と鉛直成分の時刻歴である. これらの波形から, 免震作動時には, 輪荷重が低減されることが確認できた.

3. 数値解析手法の検討

模型振動実験を数値解析でシミュレートを試みた. 解析手法は, a)3次元骨組モデル, b)2次元骨組モデル, c)ラーメンモデル, d)1質点モデル, の4種類とした. モデルの概要を図-8に示す.

(1) 水平型免震装置—免震非作動時の検討—

水平型免震装置付きのコンテナクレーン模型で, 免震装置を作動させない状態の実験ケースに対する検討結果を以下に示す.

a) 3次元骨組モデル

3次元骨組モデルでは, 梁要素は, 模型で用いた

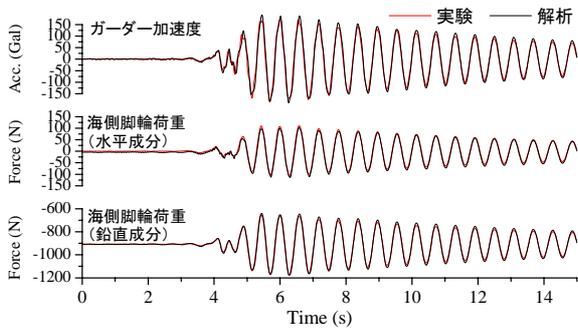


図-9 実験と解析の比較-水平型免震装置非作動-(3次元骨組モデル)

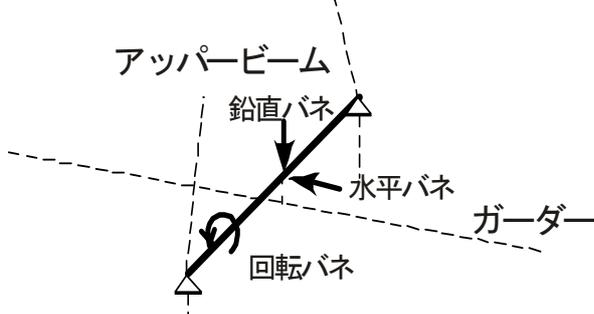


図-10 アッパービームの置き換え方法

鋼材の諸元を用い、模型に取り付けた錘は、節点集中質量で表現した。減衰は、ガーダーの加速度時刻歴の自由振動部分から $h=1\%$ の値を読みとり、レーレー減衰 ($C=\alpha M+\beta K$, C :減衰行列, M :質量行列, K :剛性行列, α, β :係数) で与えた。横行方向の1次と2次の固有周期に対して $h=1\%$ になるように、 $\alpha=0.162$, $\beta=0.000449$ の値を用いた。

解析結果として、ガーダー加速度と、海側脚輪荷重(水平成分)、海側脚輪荷重(鉛直成分)の時刻歴を実験結果と併せて図-9に示す。これらの波形から、両者は完全に一致していることがわかる。

b) 2次元骨組モデル

2次元骨組モデルは、3次元骨組モデルを2次元平面に投影したモデルである。その際、奥行き方向の部材の効果はバネ要素でモデル化した。ガーダーを支えるアッパービームは、図-10に示すように両端ピンの単純梁の中央にガーダー部から集中荷重が作用する場合の変位と荷重の関係から水平バネ、鉛直バネに置き換え、ねじり剛性を回転バネでモデル化した。また、走行装置上部のシルビームは、部材のねじり剛性を回転バネに置き換えている。減衰は、3次元モデルと同様に $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-11に示す。入力地震動の主要動が終わる8秒くらいまでは、実験と解析の時刻歴波形が一致していることがわかる。以降、自由振動部分では若干位相のズレが生じているが、これは3次元骨組モデルの固有周期0.589秒に対して、2次元

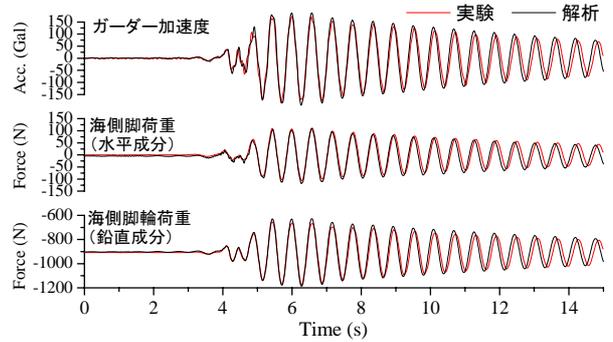


図-11 実験と解析の比較-水平型免震装置非作動-(2次元骨組モデル)

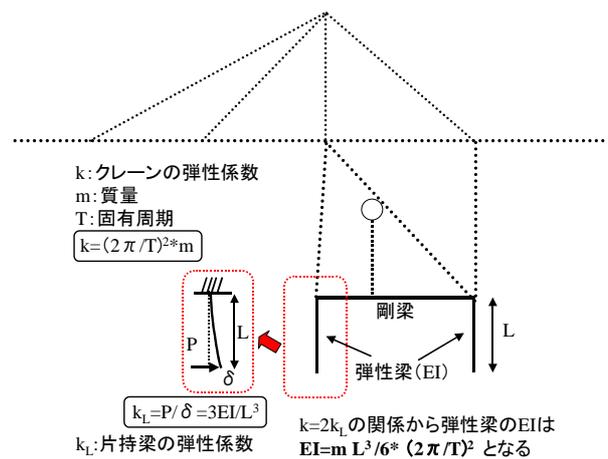


図-12 ラーメンモデルへの置き換え方法

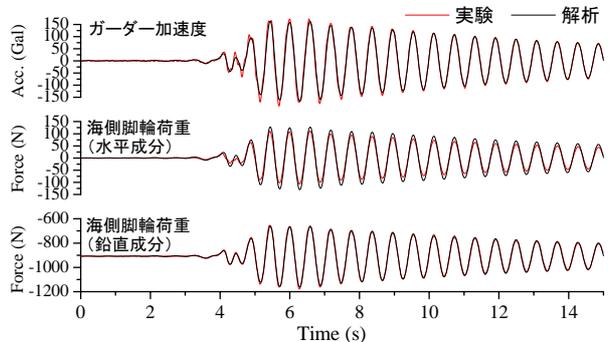


図-13 実験と解析の比較-水平型免震装置非作動-(ラーメンモデル)

骨組モデルは0.583秒であったことが影響している。

c) ラーメンモデル

ラーメンモデルへの置き換えは、模型の重心位置に節点集中質量を配置し、海側脚と陸側脚を無質量の弾性梁、水平桁および水平桁と節点集中質量を結ぶ部材を無質量の剛梁でモデル化した。弾性梁の剛性は、図-12に示すように水平桁から下方に向かう方持梁として、クレーンの固有周期0.589秒を再現できるように設定した ($EI=5.91\text{kN}\cdot\text{m}^2$)。

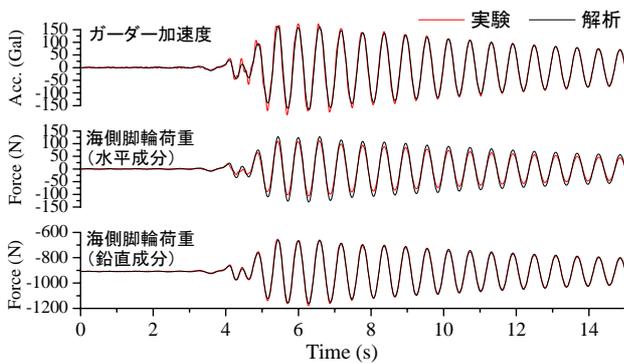


図-14 実験と解析の比較 -水平型免震装置非作動- (1質点モデル)

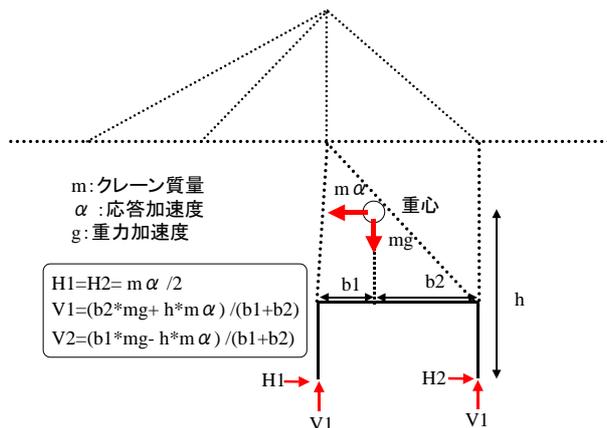


図-15 1質点モデルから輪荷重を求める方法

減衰は、3次元モデルと同様に $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-13に示す。加速度時刻歴は、実験ではガーダーの値、解析は節点集中質量の加速度であるが両者は良好に一致している。脚の輪荷重のも完全に一致していることがわかる。

d) 1質点モデル

1質点モデルは、コンテナクレーン全体を1つの質点に置き換え、固有周期を再現するバネと結んでモデル化している。減衰は、 $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-14に示す。加速度時刻歴は、実験ではガーダーの値、解析は質点の加速度であるが両者は良好に一致している。脚の輪荷重の算定は図-15に示す方法で求めた。1質点解析から求めた輪荷重の時刻歴波形も実験結果と完全に一致していることがわかる。

(2) 水平型免震装置—免震作動時の検討—

実験で用いた水平型免震装置は、スライド機構と積層ゴムによる復元力機構で構成されている。免震機構作動時に対する数値解析結果を以下に示す。

a) 3次元骨組モデル

免震装置は、バネ要素とダンパー要素でモデル化した。バネ定数は、免震装置を作動させた状態におけるクレーンの固有周期に合うように設定し、(1カ所あたり 5.29kN/m)、ダンパー要素の減衰係

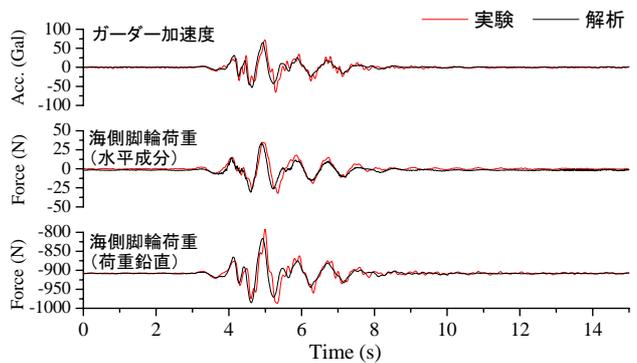


図-16 実験と解析の比較 -水平型免震装置作動- (3次元骨組モデル)

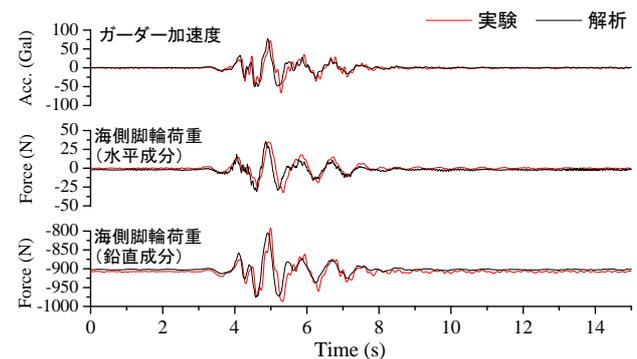


図-17 実験と解析の比較-水平型免震装置作動- (2次元骨組モデル)

数は、加振終了直後の自由振動の減衰波形から設定した(1カ所あたり $c=0.49\text{kN}\cdot\text{s/m}$)。また、コンテナクレーン本体の減衰として、免震装置非作動時と同じ $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-16に示す。時刻歴波形は、最大応答付近で若干の位相のズレが見られるが、波形が減衰していく様子を良好に再現できていることがわかる。

b) 2次元骨組モデル

2次元骨組モデルでは、3次元モデルで用いたバネ要素とダンパー要素を、1カ所あたり2脚分を考慮するため2倍した。減衰は、 $h=1\%$ のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-17に示す。実験と解析は概ね一致し、3次元骨組モデルと同様な傾向を示す結果となった。

c) ラーメンモデル

ラーメンモデルは、2次元骨組モデルと同様にバネ要素、ダンパー要素を設置したModel-Aと、弾性梁の剛性とレーレー減衰を調整したModel-Bについて検討した(図-18参照)。Model-Aでは、弾性梁の剛性は免震非作動時と同じ値を用い、バネ要素とダンパー要素は1カ所あたり2脚分の値を用いた。減衰は、 $h=1\%$ のレーレー減衰を与えた。

Model-Aに対する解析結果を図-19に示す。実験と解析は概ね一致していることがわかる。

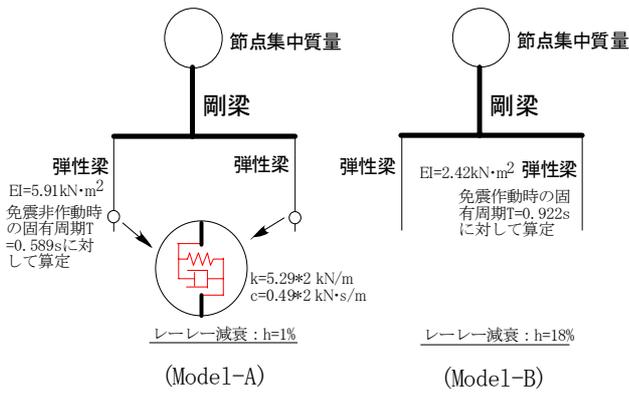


図-18 ラーメンモデルにおける水平型免震装置のモデル化の方法

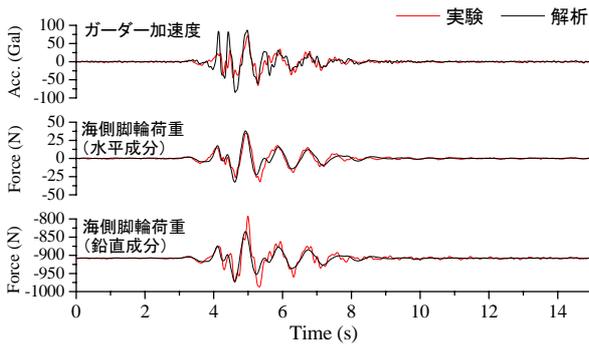


図-19 実験と解析の比較 -水平型免震装置作動- (ラーメンモデル (Model-A))

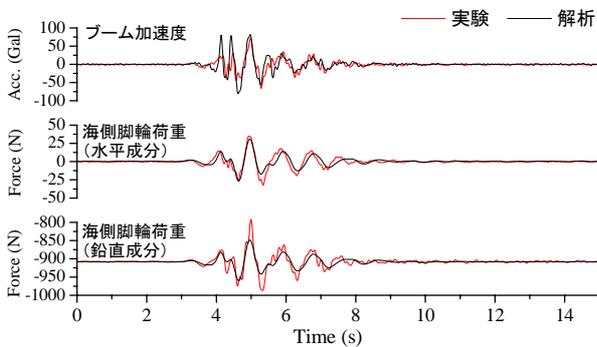


図-20 実験と解析の比較 -水平型免震装置作動- (ラーメンモデル (Model-B))

Model-Bは、弾性梁の剛性を、免震装置非作動時と同様に固有周期から決定し ($EI=2.42\text{kN}\cdot\text{m}^2$)、減衰は、加振後の自由振動波形から読みとった $h=18\%$ をレーレー減衰で与えた。

解析結果を図-20に示す。実験と解析の一致の度合いは、バネ要素とダンパー要素を用いたモデルと同程度であることがわかる。したがって、バネ要素やダンパー要素を用いない簡易なラーメンモデルでも免震装置作動時の解析がおこなえることがわかった。

d) 1質点モデル

1質点モデルは、図-21に示すようにダンパー要素 (4本分) を用いたModel-Cと、ダンパーの効果をレーレー減衰に置き換えたModel-Dについて解析

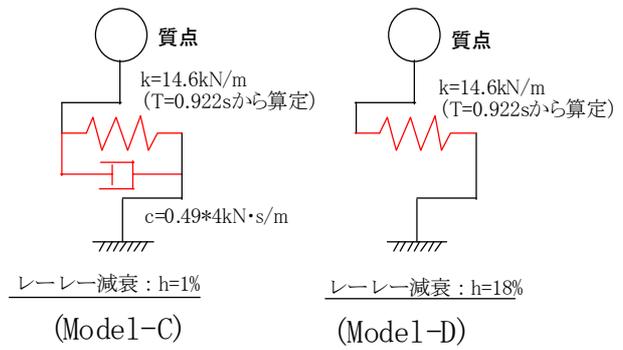


図-21 1質点モデルにおける水平型免震装置のモデル化の方法

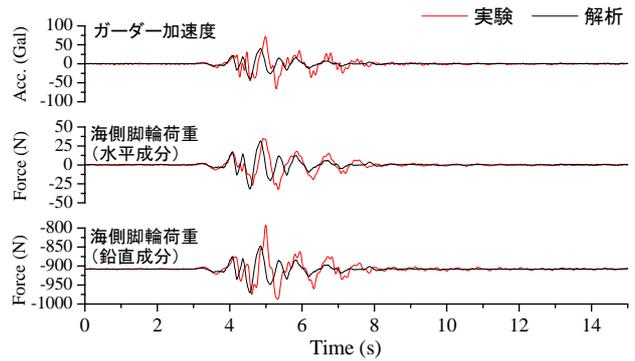


図-22 実験と解析の比較 -水平型免震装置作動- (1質点モデル (Model-C))

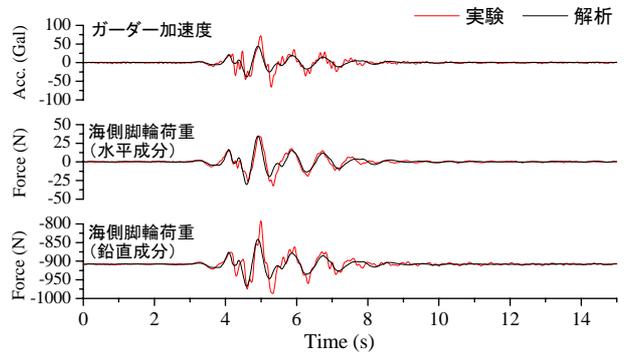


図-23 実験と解析の比較 -水平型免震装置作動- (1質点モデル (Model-D))

を行った。なお、バネ定数は、免震作動時の固有周期 $T=0.922$ 秒から算定した。

Model-Cの解析結果を図-22に示す。実験と比べ、解析の方が応答が小さく、位相もずれている。1質点に、直接、免震装置のダンパー要素を取り付けて解析すると、減衰が効き過ぎる結果となった。

Model-Dでは、ラーメンモデルで用いた $h=18\%$ の減衰を用いた。解析結果を図-23に示す。ダンパー要素を用いたケースに比べて、模型全体の減衰特性を再現できているため波形の一致の程度が改善されていることがわかる。

(3) ロッキング型免震装置 - 免震非作動時の検討 -

ここでは、免震非作動の検討であるため、免震

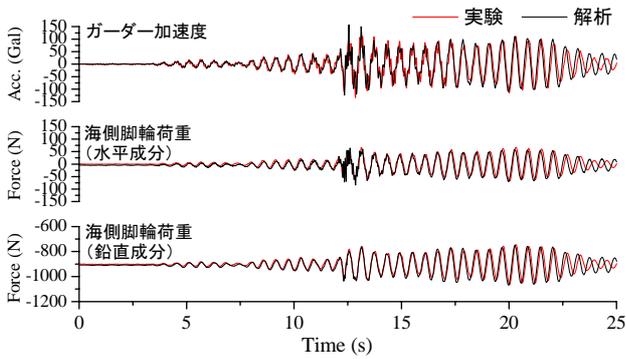


図-24 実験と解析の比較-ロッキング型免震装置非作動-
(3次元骨組モデル)

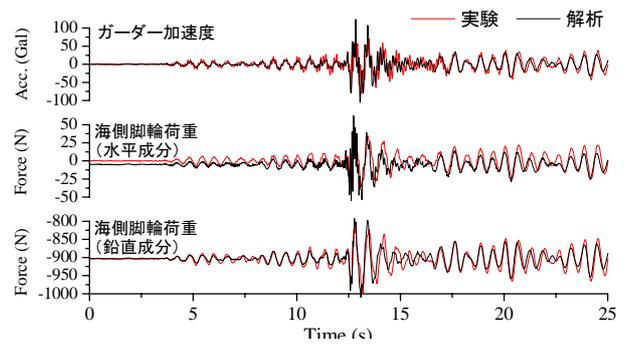


図-26 実験と解析の比較-ロッキング型免震装置作動-
(2次元骨組モデル)

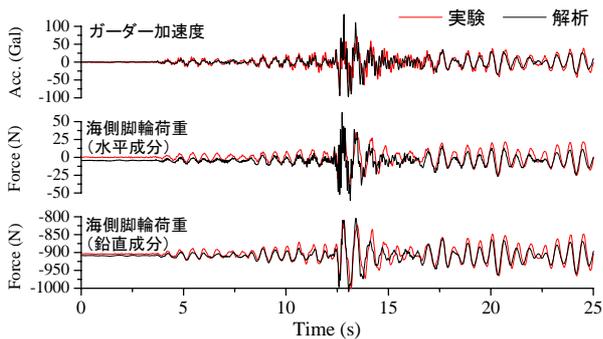


図-25 実験と解析の比較-ロッキング型免震装置作動-
(3次元骨組モデル)

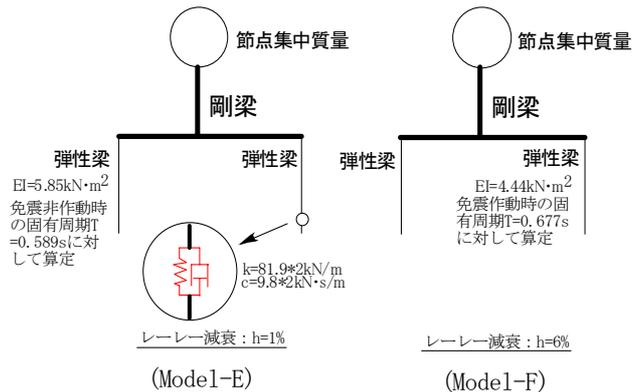


図-27 ラーメンモデルにおけるロッキング型免震装置の
モデル化の方法

装置部分の質量と入力地震動が異なる以外は、(1)で示した水平型免震装置のモデルと一緒にある。したがって、3次元骨組モデルに対する検討結果だけ示す(図-24参照)。水平型免震装置のケースと同様、実験を解析でシミュレートできていることがわかる。

(4) ロッキング型免震装置－免震作動時の検討－

a) 3次元骨組モデル

ロッキング型免震装置は、鉛直方向のバネ要素とダンパー要素でモデル化した。バネ定数は、実際に用いたバネの値(1カ所あたり89.1kN/m)を用い、ダンパー要素の減衰係数は、加振終了直後の自由振動の減衰波形から設定した(1カ所あたり $c=9.8\text{kN}\cdot\text{s/m}$)。また、コンテナクレーン本体の減衰として、免震装置非作動時と同じ $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-25に示す。最大応答付近で解析の方が大きな値となっているが、良好に再現できている。

b) 2次元骨組モデル

2次元骨組モデルでは、3次元モデルで用いたバネ要素とダンパー要素を、1カ所あたり2脚分を考慮するため2倍した。減衰は、 $h=1\%$ 相当のレーレー減衰を与えた。

解析結果を図-26に示す。実験と解析は概ね一致し、3次元骨組モデルと同様な傾向を示す結果となった。

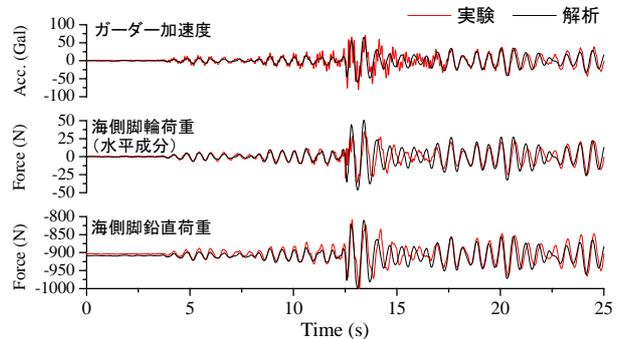


図-28 実験と解析の比較-ロッキング型免震装置作動-
(ラーメンモデル (Model-E))

c) ラーメンモデル

ラーメンモデルは、2次元骨組モデルと同様にバネ要素、ダンパー要素を設置したModel-Eと、弾性梁の剛性と減衰を調整によるModel-Fについて検討した(図-27参照)。

Model-Eの弾性梁の剛性は、免震非作動時の固有周期から算定している。レーレー減衰は $h=1\%$ とした。解析結果を図-28に示す。実験と解析は概ね一致していることがわかる。

Model-Fでは、弾性梁の剛性を、固有周期から算定し、減衰は、加振後の自由振動波形から読みとった $h=6\%$ をレーレー減衰で与えた。解析結果を図-29に示す。実験と解析の一致の度合いは、Model-Eと遜色無いことがわかる。したがって、

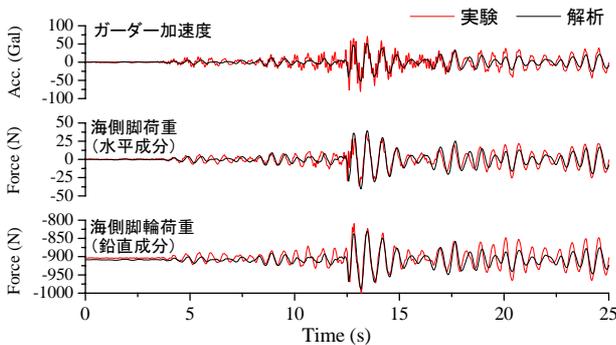


図-29 実験と解析の比較-ロック型免震装置作動-
(ラーメンモデル (Model-F))

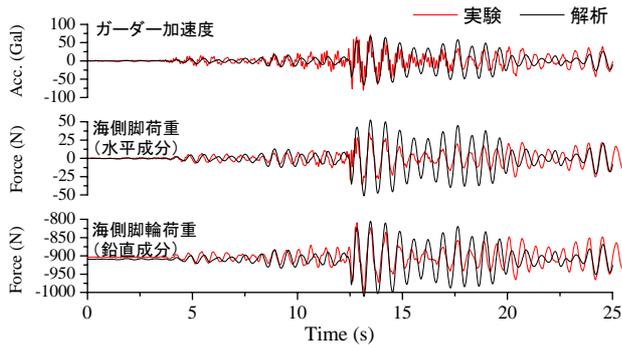


図-30 実験と解析の比較-ロック型免震装置作動-
(1質点モデル)

ロック型免震装置に対しても、バネ要素やダンパー要素を用いない簡易なラーメンモデルでも免震装置作動時の解析がおこなえることがわかった。

d) 1質点モデル

1質点モデルは、固有周期を合わせたバネと、ダンパーの効果をレーレー減衰に置き換えるモデルとした。減衰定数は、ラーメンモデルと同じ値 ($h=6\%$)を用いた。

解析結果を図-30に示す。加速度波形は概ね一致しているが、輪荷重に関しては加速度応答が大きくなる12.5秒くらいから、振幅が過大な評価となっている。これは、1質点モデルでは、ロック型振動の影響を正確に評価できていないことに起因しているものと考えられる。

4. 結論

本研究では1/15縮尺のコンテナクレーンの模型振動実験を実施し、耐震検討用の数値解析手法に関して、モデル化手法の検討とその適用性について考察した。今回の検討で得られた結論を以下に示す。

- 1) 実験模型を忠実に再現することで、3次元骨組モデルで実験結果を再現できる。
- 2) 3次元骨組モデルを、2次元骨組モデル、ラーメンモデル、質点系モデルに置き換えることが可能である。モデル化においては模型の固有周期と減衰特性を合わせることが重要である。
- 3) 上記手法は、免震装置付きのコンテナクレーンの解析にも適用可能である。

なお、本研究はH17年度の港湾空港技術研究所とJFE技研の共同研究「巨大地震に対応した耐震強化コンテナバースに関する共同研究」の一部として実施したものである。

謝辞：本研究で用いたコンテナクレーン模型の設計・製作はJFEエンジニアリング重工部村野健一氏に依頼した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 江頭隆善ほか: 大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験, 港湾技術研究所報告, 第38巻第2号, pp.475-492, 1999.
- 2) 村野健一, 吉田和夫, 塩崎禎郎, 菅野高弘, コンテナクレーン用ロック型免震装置の模型実験と岸壁への影響, 日本機械学会論文集, 2004

(2007. 6. 29受付)