

第6章 免震コンテナクレーンの効果

第1節 免震機構の概要

1-1 コンテナクレーンの免震の考え方

前章までコンテナクレーンの脚の浮き上がりを考慮した設計法について述べてきた。しかし、一方で今回の模型実験ではレールの設置部分や基礎については必ずしも厳密に現実の状況が再現できてはいないことから、脚の浮き上がり後の脱輪に伴う応答加速度の変化や基礎に与える反力については未だ未解明の部分が残されている。前章までの設計の手順に従って検討した結果、脚が浮き上がると判定された場合には、種々の対策が考え得る。しかし、その場合の主たる対策として脚の浮き上がりを許容して、その影響に耐えうるコンテナクレーンを設計する事も考えられるが、上記のような状況を考慮した上で最も有効で確実な対策は、免震機構等を採用して脚の浮き上がりそのものを防止する方策であると考えられる。本研究では、脚の浮き上がりは重心位置での最大応答加速度を指標として評価できるという基本的な考え方にに基づき、免震機構によって重心位置での最大応答加速度を低減することにより、脚の浮き上がりを防止するという方法を選定した。

免震対策はこれまで建築分野などで実用化され、開発が進んでいる¹⁾。コンテナクレーンの免震対策としてもこれまで種々のアイデアが提案されている²⁾が、本研究では基礎側での対策は経済的に大きな課題があることから、クレーン本体側での対策を検討の対象とし、クレーンに伝達される地震力の減少を図るため、クレーンの脚部において免震対策を行うものとした。

また、免震機構としては摩擦型の免震機構を採用した。免震機構が常時作動していると、コンテナクレーンのやや長周期の揺れにより、通常の稼働時にはスプ

レッダーの操作に対する悪影響や乗務員の船酔い等の問題が発生する可能性がある。従って、コンテナクレーンの免震機構は、設計対象地震動の過大な地震力の伝達を減少させるとともに、通常の作業時には固定されている必要がある。コンテナクレーンにおける免震機構の基本的考え方を図-6. 1. 1に示す。免震機構は固有周期を長周期化することにより、クレーンの応答加速度を低減する(図中 A → B) が、その一方で応答変位は増大する (A' → B')。そこでさらに減衰機能を向上させることにより、応答変位を低減させる (B' → D') ことが必要である。また、この結果、常時でも過大な変位が抑えられた、クレーンの使用状態に適した特性 (A - A') を有し、大規模地震時には免震機構の効果で過大な応答加速度と応答変位を低減することが可能となる。摩擦型の免震機構は通常時の固定機能を兼ねられ、機構も単純であることから今回の検討に用いるものとした。

本章では模型実験等により、コンテナクレーンの脚の浮き上がり対策として、この摩擦型免震機構を有する免震コンテナクレーンの有効性を検証することとした。

1-2 摩擦型免震機構の概要

摩擦型免震装置の応答特性の考え方を以下に示す。

まずクレーンを剛体と仮定し、免震機構部の 1 自由度だけを考えてモデル³⁾(図-6. 1. 2参照) について応答を検討した。免震機構としては、実機レベルで以下の条件とした。

摩擦係数 : $\mu = 0.1$

固有周期 : $T = 2\pi\sqrt{m/k} = 4.0$ (s)

減衰定数 : $h = c/2\sqrt{m \cdot k} = 0.025$

入力地震動 : 3 m/s^2 、1 Hz (正弦波)

なお、摩擦についてはクーロン摩擦を仮定し、静止摩擦力以上の水平力が作用

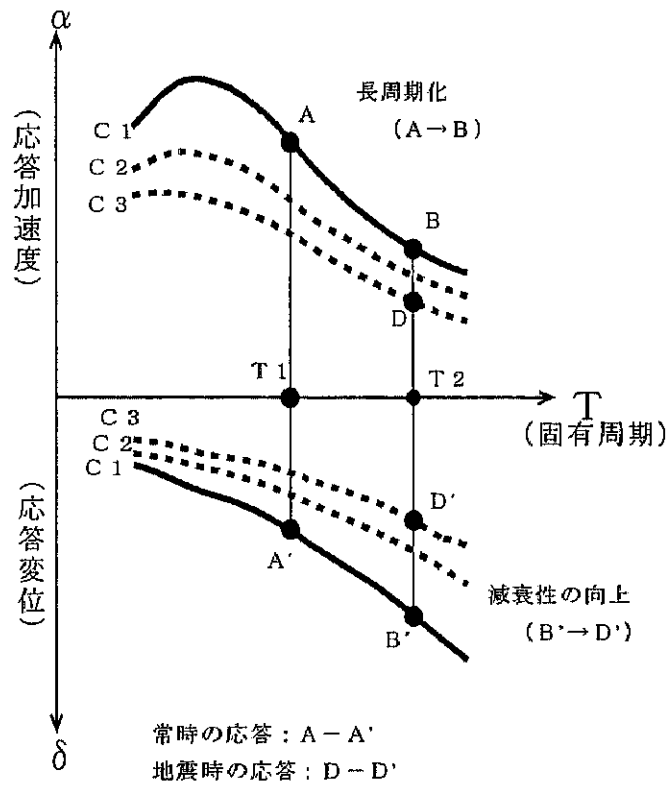


図-6. 1. 1 免震機構による応答の変化

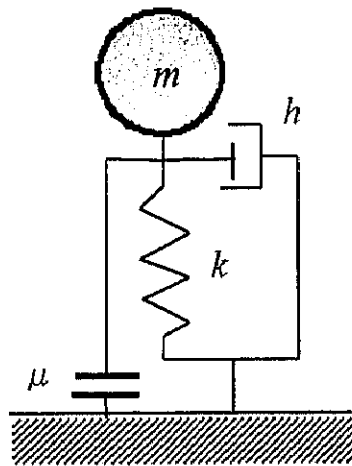


図-6. 1. 2 摩擦免震機構の簡略モデル

した場合に滑り出すという非線形解析を実施した。解析結果を図-6. 1. 3、図-6. 1. 4に示す。

図-6. 1. 3のとおり、応答加速度は摩擦係数に相当する加速度（ここでは 0.98 m/s^2 ）で滑りが生じ、頭打ちの特性をもつ矩形波となっている。滑りが生じた後、応答加速度が漸増しているが、これはばねの変形によるものと考えられる。また、摩擦係数がかかなり大きいため、ばねと質量から計算される固有周期で応答するわけではなく、入力波形と同じ周期で振動する。

上記の検討ではクレーンを剛体と見なしているが、実機のクレーンは厳密には剛体ではなく、現実には固有周期が2秒程度の柔な構造である。したがって、上記の検討でクレーンを剛体とみなすことは正確ではない。しかし、クレーンの固有周期の約2秒より十分柔らかい免震装置を用いれば、発生する応答加速度や相対変位はクレーンを剛体と仮定した条件から推定することができると考えられる。また、図-6. 1. 4の結果から、免震機構部の水平相対変位は、当初15 cm程度有り、その後も定常的に10 cm以上の変位が予測されるため、この変位に対する対応を検討する必要がある。

摩擦免震機構系の応答スペクトルを図-6. 1. 5、図-6. 1. 6に示す。図-6. 1. 5より、摩擦係数が小さい場合、応答スペクトルは線形に近い特性を示している。すなわち、系は短周期での応答加速度が大きく、長周期の応答加速度は小さいという、固有周期に依存する特性を持っていることがわかる。一方、摩擦係数が大きい場合には、小さい場合に比較して固有周期にあまり依存しない特性を有している。今回の模型実験では、第5章までの結果から重心位置の加速度が 3.0 m/s^2 程度で脚の浮き上がりが発生する事がわかっているので、応答加速度として、 2.5 m/s^2 以下を設計条件とすると、免震機構の固有周期としては図-6. 1. 5から約3秒程度を目安とすればよいことがわかる。

一方、変位については、図-6. 1. 6より摩擦係数が大きいほど小さくなる。しかしながら、摩擦係数を大きくすれば小さな地震には免震の効果がないことに

なり、また、地震後の残留変位も大きくなる。したがって、実機における免震機構の諸元や通常時の固定機構の解除レベルも考慮し、今回の実験では摩擦係数については0.1程度を目標とすることとした。

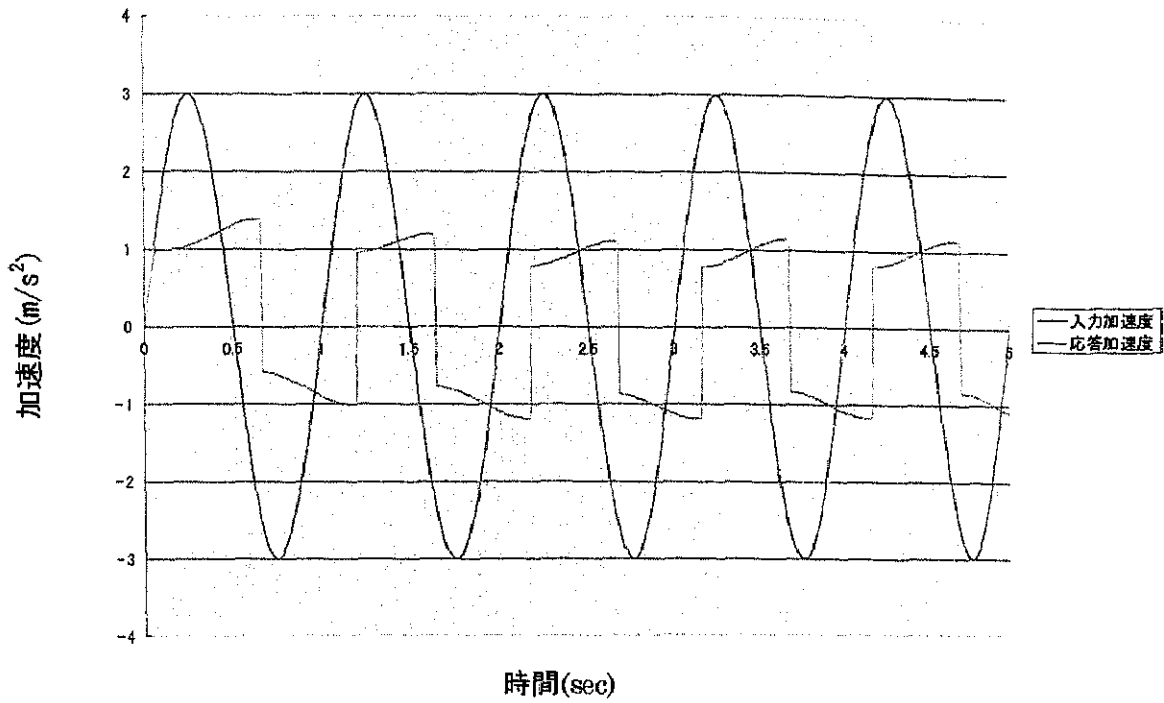


図-6. 1. 3 摩擦1自由度系の応答加速度

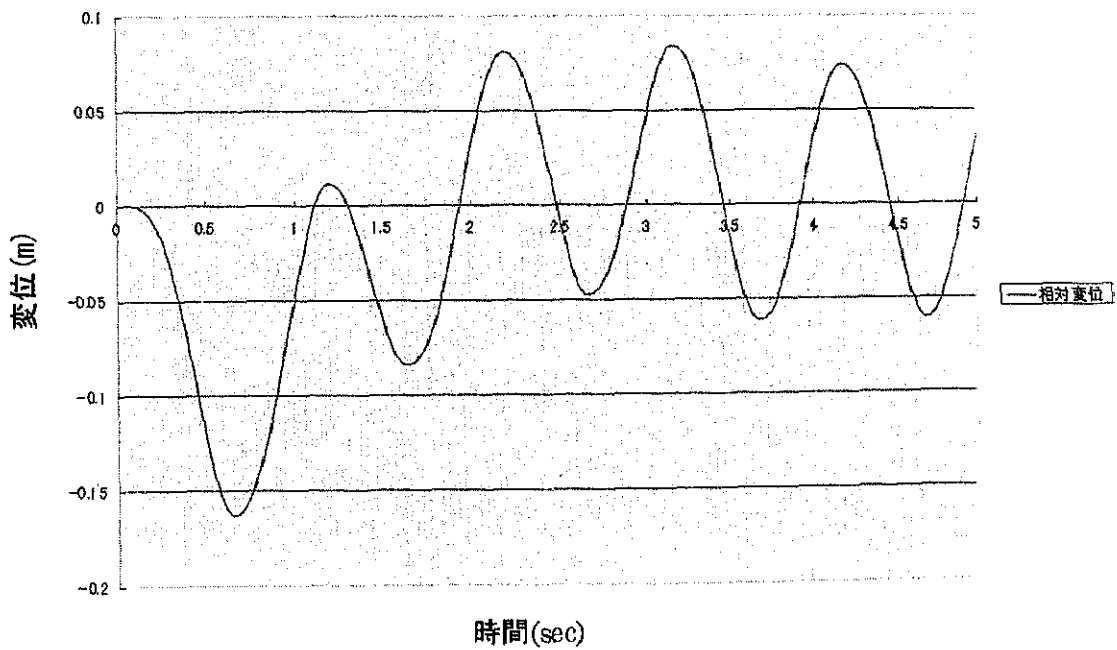


図-6. 1. 4 摩擦1自由度系の相対変位

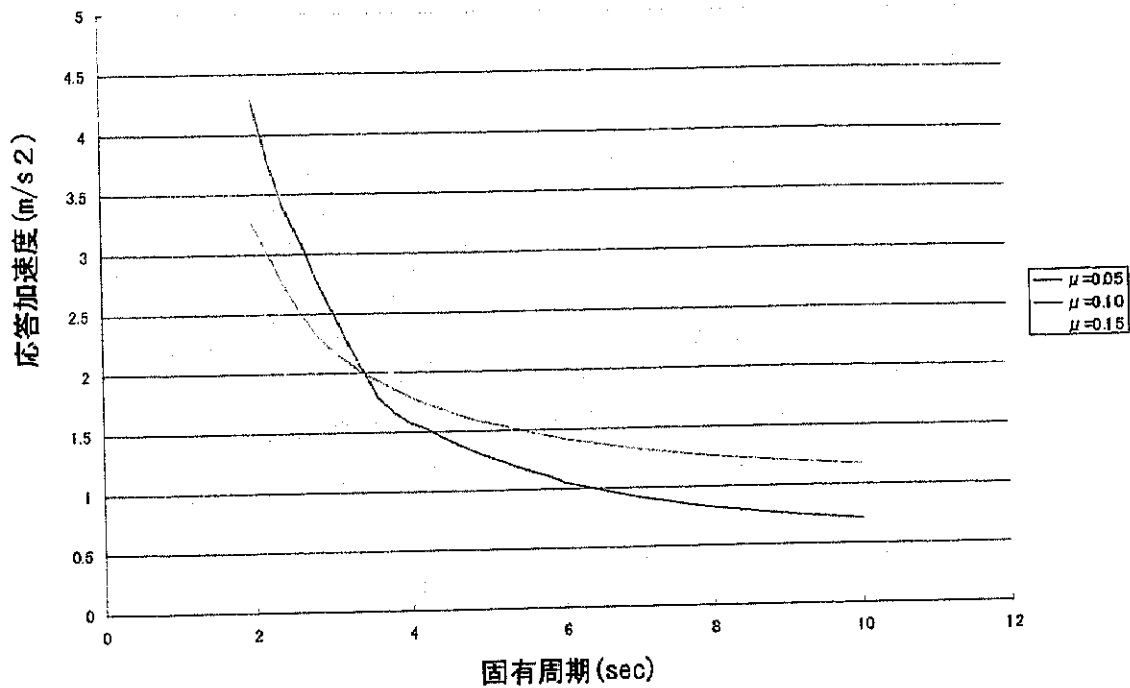


図-6. 1. 5 摩擦系加速度応答スペクトル(PI波)

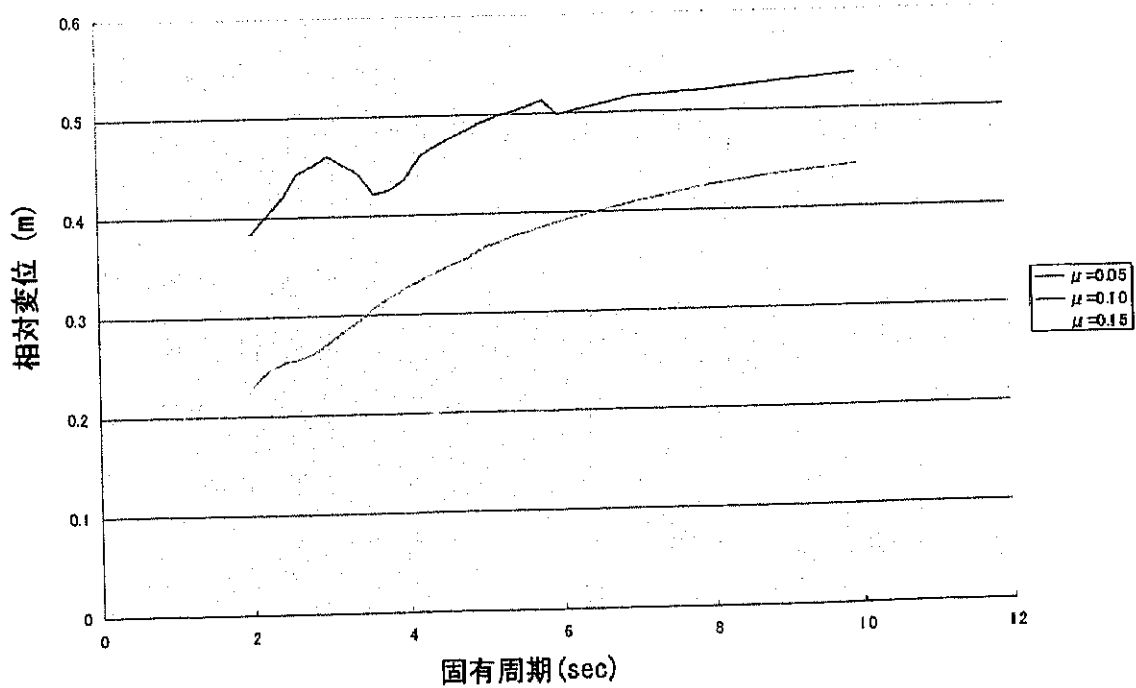


図-6. 1. 6 摩擦系変位応答スペクトル(PI波)

第2節 免震クレーンの模型実験

2-1 実験の概要

(1) 模型の概要

免震機構の実験に用いる模型は、第5章までの実験に用いた模型の各脚に図-6.2.1(a)に示した免震装置模型を設置したものをを用いた。

本研究では、摩擦型免震機構の模型として、前節での検討結果に対応した軸受けを選定して用いた。また、摩擦減衰機構に市販品を適用することを条件としたため、主要な部品としては固体潤滑剤埋込型軸受（オイレス#500SP）⁴⁾を採用した。模型ではこの軸受と車軸（脚本体と車輪）との間において、横行方向の相対変位に対して摩擦が働くように設置した。また、軸受部分の摩擦係数が予測よりも小さく、減衰が小さい場合には、変位が過大になることにより免震機構が十分効果を発揮しない恐れがあり、また車輪部分を破壊する恐れがあったことから、念のため高減衰ゴムを併用した。車輪に設置した免震装置模型の概要を写真-6.2.1に示す。また、参考に高減衰ゴムの荷重-変位曲線を図-6.2.1(b)に示す。なお、摩擦係数は実測の結果0.05～0.1程度の値であり、当初の目標値を概ね満足しているものと考えられる。

元の模型の脚先端部を切断し、車輪直上部に新たに免震装置を取り付けたため、模型の重量、固有振動数等については再計測している。従って、厳密には第5章までの模型と本章での模型は異なるものであり、データを相互に比較することは適切ではない。そのため、免震装置に固定装置を設置し、免震機構が有効である場合と無効である場合とを比較することにより、免震機構の効果を検討することとした。新しい模型の重量等の諸元の変更値を表-6.2.1に示す。

(2) 実験ケース

免震機構によるコンテナクレーンの最大応答加速度のレベル、および脚の浮き

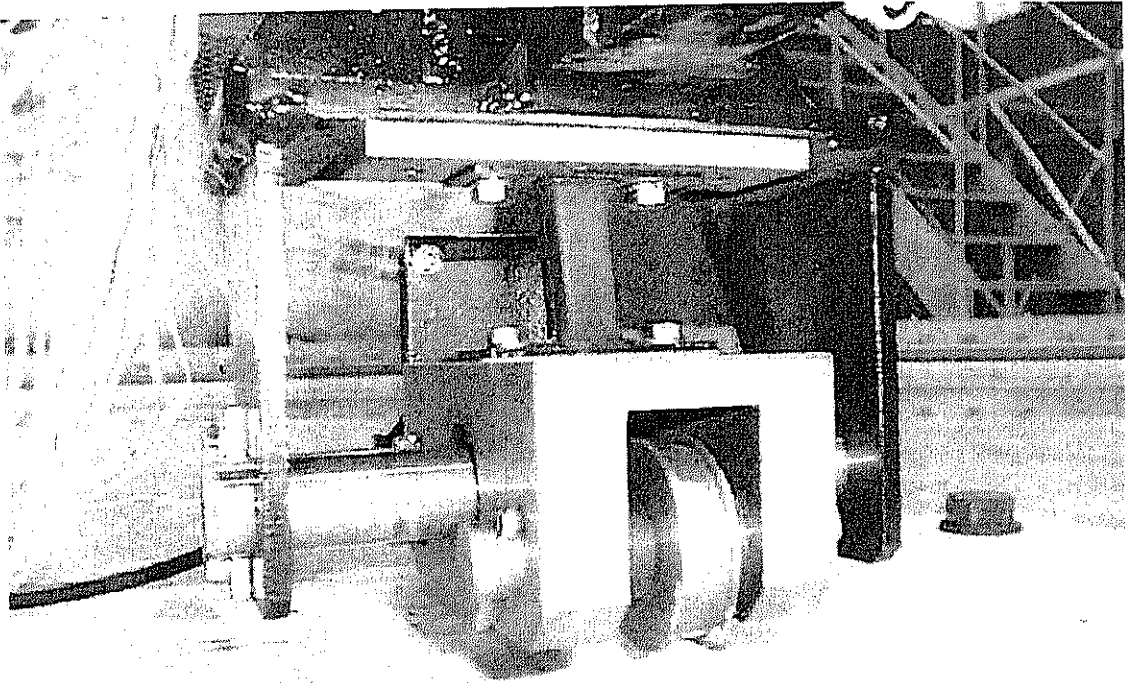


写真-6. 2. 1 摩擦型免震装置

縮尺 0.3:1

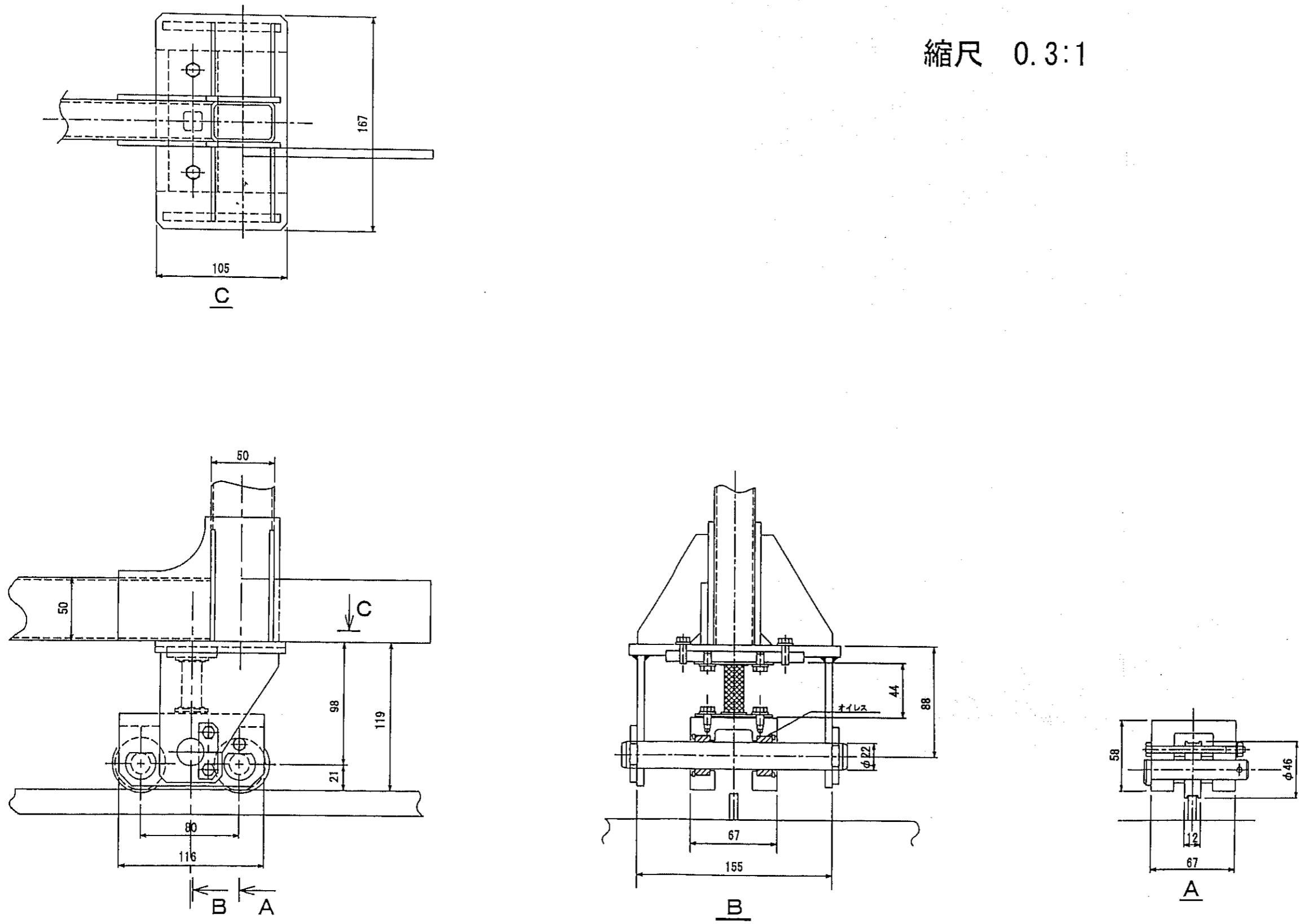


図-6. 2. 1(a) 免震装置概略図

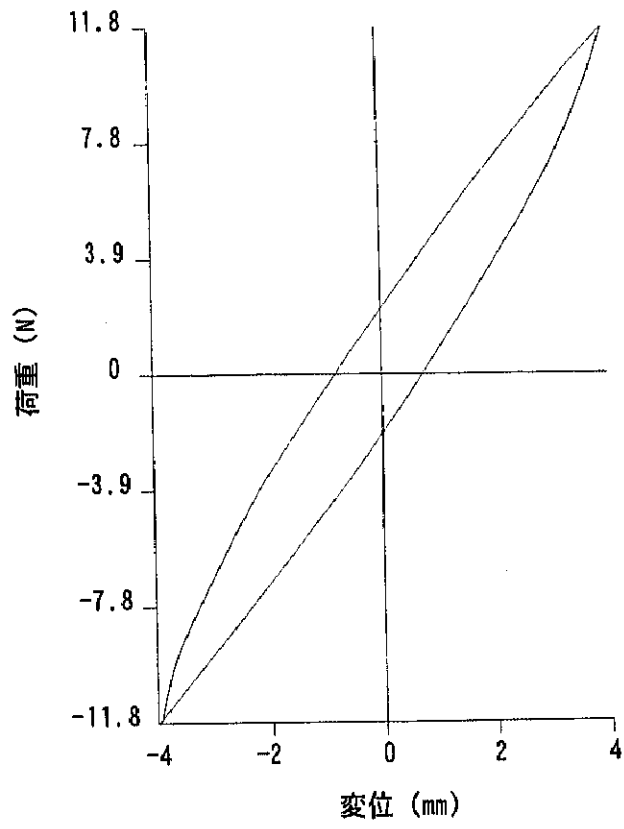


図-6. 2. 1 (b) 高減衰ゴムの荷重-変位曲線

上がりの抑制効果を確認するため、八戸波を入力地震動として、入力最大加速度を順次上げていき、第3章の改良前の模型実験で脚の浮き上がりを生じたケース以上まで入力最大加速度のレベルを上げて実験を実施した。実験ケースを表-6.2.2に示す。また、脚部の免震装置を不作動とした状態で脚が浮き上がるまで加振し、その後免震装置を作動状態にして同様の計測を行った。同様にPI波についても実験を行った。

表-6.2.1 免震クレーン模型の諸元の変更値

	改 良 前	改 良 後 (非免震時)
重 量	3100.7 N	3290.4 N
固有振動数	2.2 Hz	2.1 Hz
減衰定数	0.32 %	0.45 %

表-6.2.2 免震機構実験の入力波

入 力 波	加 速 度 (Gal)	備 考
八 戸 波	実測値 × (1.0 ~ 5.0) 実測最大加速度 170Gal	S-252NS Base
P I 波	実測値 × (0.2 ~ 0.8) 実測最大加速度 570Gal	PI-NS

2-2 実験結果

2-2-1 部材の曲げモーメント及び軸力

(1) 脚の曲げモーメント

図-6.2.2~6.2.5に脚の曲げモーメントの計測結果を示す。図-6.2.2は、八戸波を入力波として用いた場合の海側脚のケース、図-6.2.3は、八

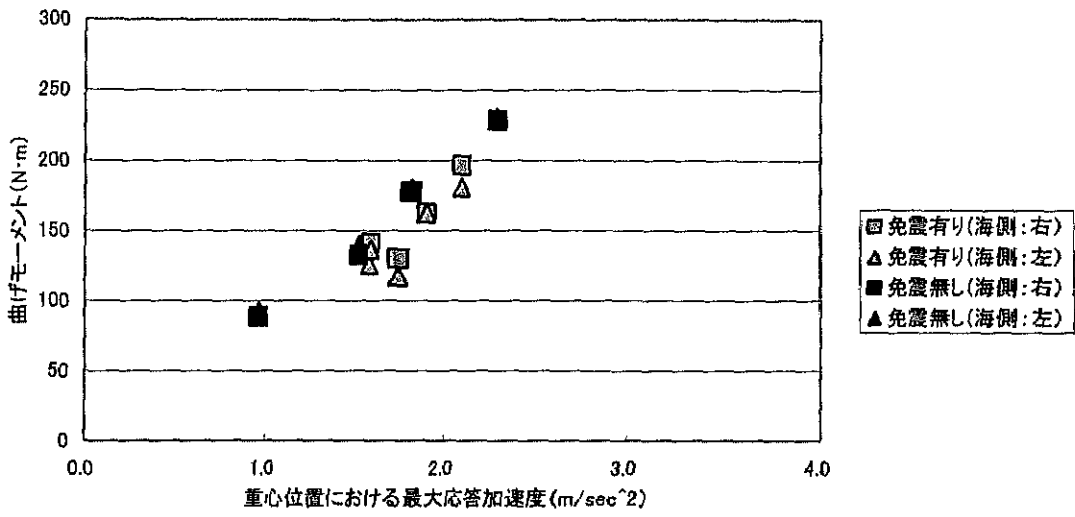


図-6. 2. 2 (海側2脚)脚部部材の曲げモーメント(地震波:八戸波)

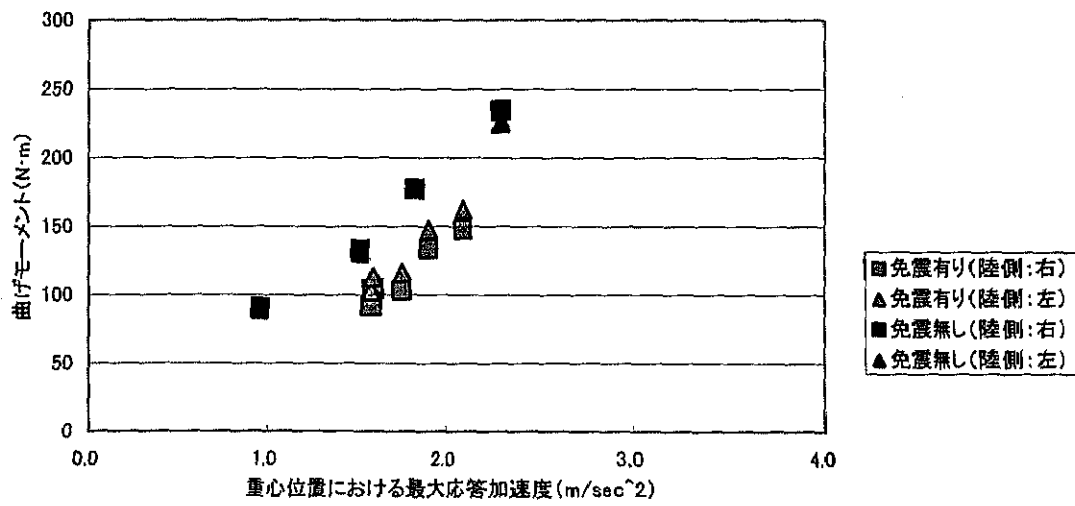


図-6. 2. 3 (陸側2脚)脚部部材の曲げモーメント(地震波:八戸波)

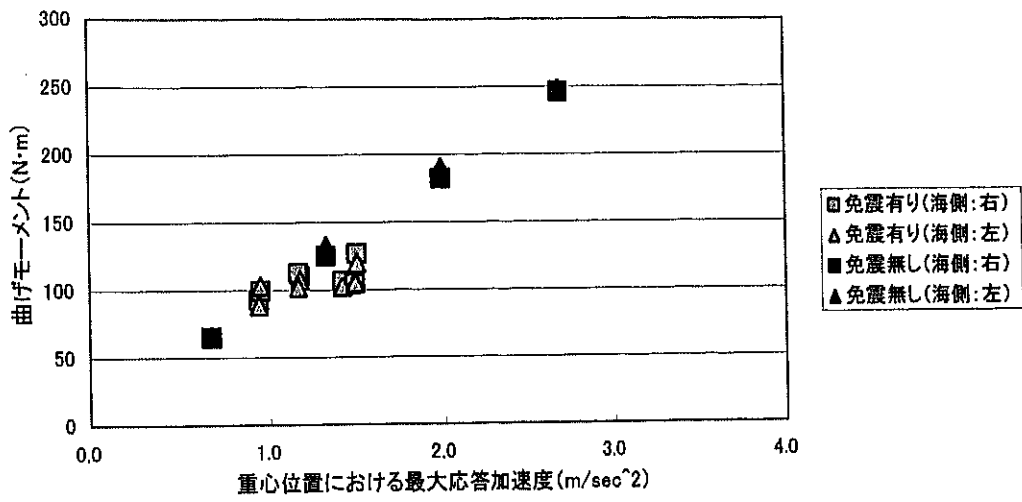


図-6. 2. 4 (海側2脚)脚部部材の曲げモーメント(地震波:PI波)

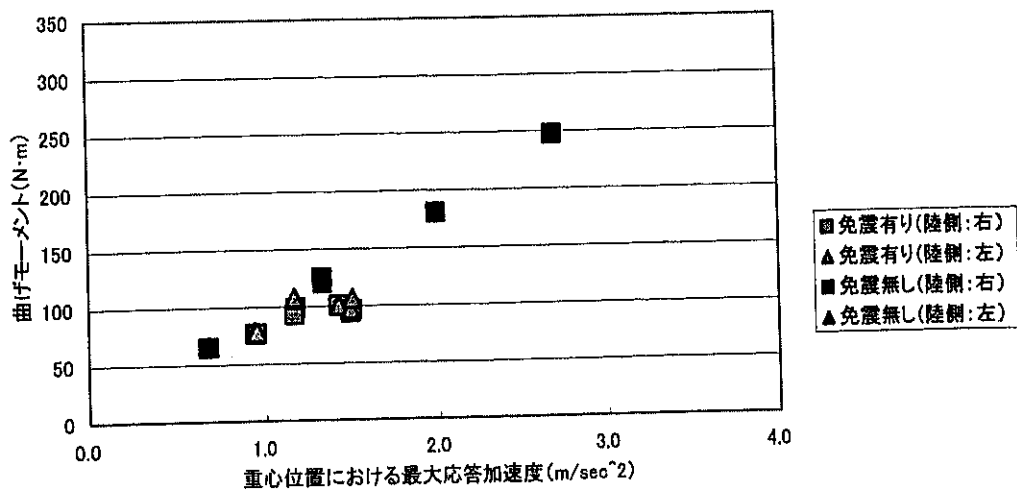


図-6. 2. 5 (陸側2脚)脚部部材の曲げモーメント(地震波:PI波)

戸波を用いた場合の陸側脚のケースを示している。どの場合も免震なしのケースでは、脚の浮き上がりが生じる直前までのデータを示している。免震なしのケースでは、海側脚・陸側脚によらず最大応答加速度の増加に伴い、曲げモーメントも単調に増加している。一方、免震機構を作動させた免震有りのケースでは、ほぼ同様の傾向が見られるが、免震なしのケースに比較すると同じレベルの最大応答加速度に対して、やや小さな値を示している。特に陸側脚における値の差が顕著に見られる。これは、入力の最大加速度等の実験条件が異なることと、免震装置が実際に作動している場合には、脚部に水平変位が生じるため、曲げモーメントが低めに抑えられているものと考えられる。

図-6. 2. 4は、P I波を入力波として用いた場合の海側脚のケース、図-6. 2. 5は、P I波を用いた場合の陸側脚のケースを示している。P I波を用いた場合でも八戸波の結果とほぼ同様であるが、免震有りの実験ケースでの最大応答加速度の値が免震なしのケースに比較して小さいが、これは実験ケースがないためである。

(2) 水平材の曲げモーメント

図-6. 2. 6~6. 2. 9に水平材の曲げモーメントの計測結果を示す。図-6. 2. 6は、八戸波を入力波として用いた場合の海側脚近傍のケース、図-6. 2. 7は、八戸波を用いた場合の陸側脚近傍のケースを示している。また、図-6. 2. 8は、P I波を用いた場合の海側脚近傍のケース、図-6. 2. 9はP I波を用いた場合の陸側脚近傍のケースを示している。どのケースでも脚の曲げモーメントと同様に、最大応答加速度の増加に伴って曲げモーメントも単調に増加し、また免震有りのケースでは免震なしのケースに比較してやや小さな値を示すという傾向が見られた。

(3) 脚の軸力

図-6. 2. 10~図-6. 2. 13に脚の軸力の計測結果を示す。図-6. 2. 10は、八戸波を入力波として用いた場合の海側脚のケースを、図-6. 2. 11は八戸波を

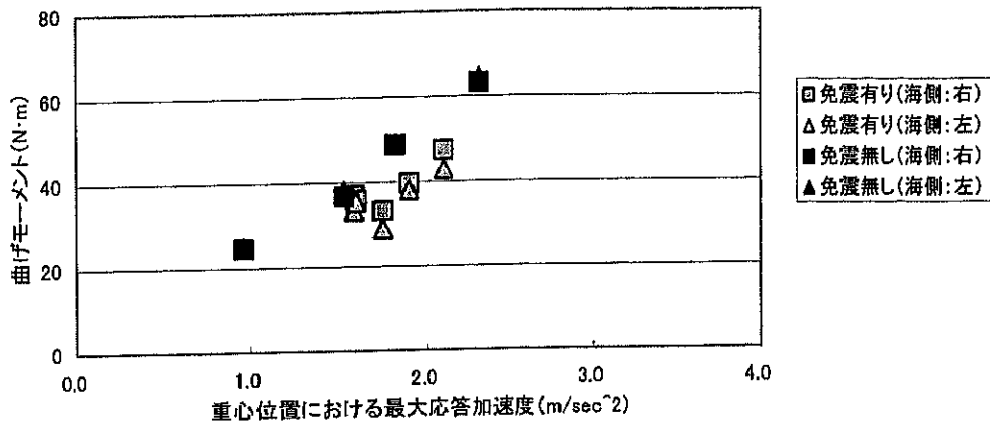


図-6. 2. 6 (海側2脚)水平部材の曲げモーメント(地震波:八戸波)

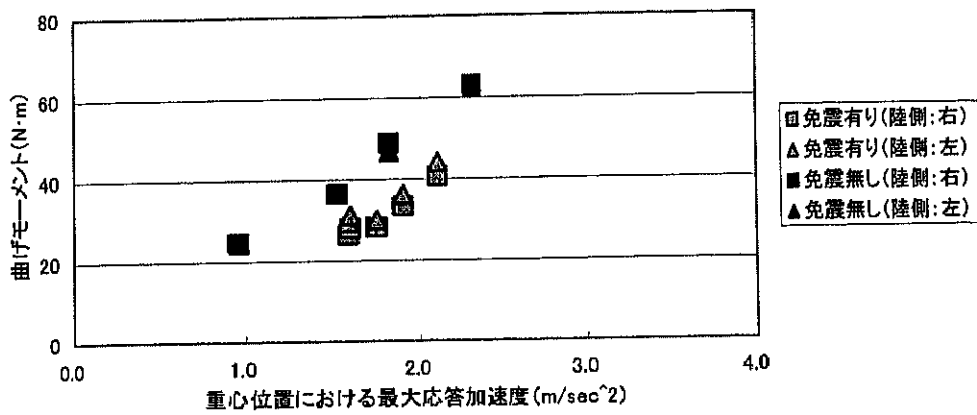


図-6. 2. 7 (陸側2脚)水平部材の曲げモーメント(地震波:八戸波)

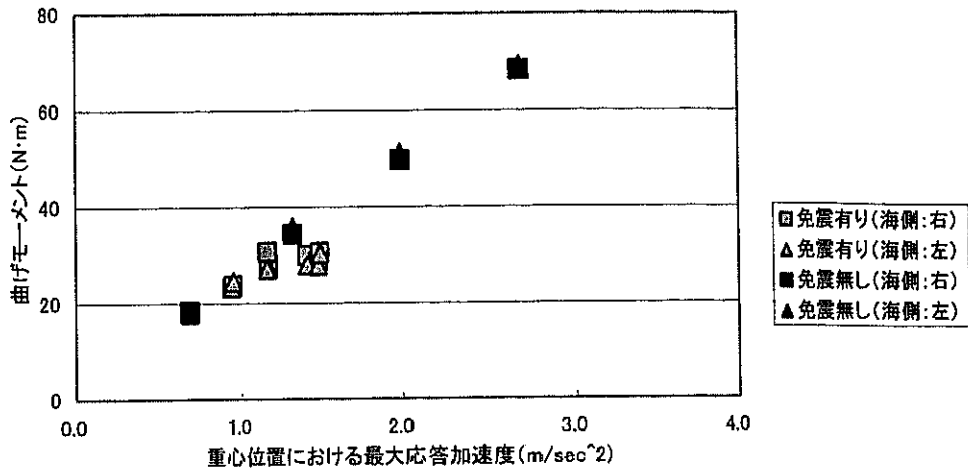


図-6.2.8 (海側2脚)水平部材の曲げモーメント(地震波:神戸PI波)

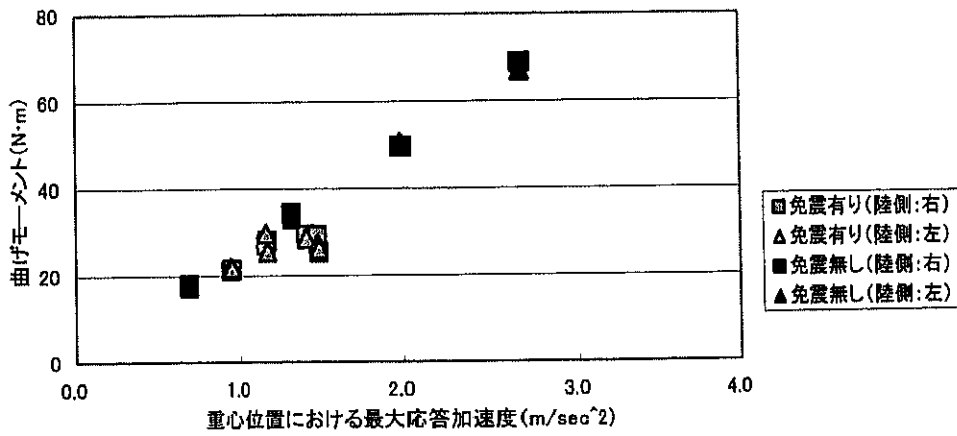


図-6.2.9 (陸側2脚)水平部材の曲げモーメント(地震波:神戸PI波)

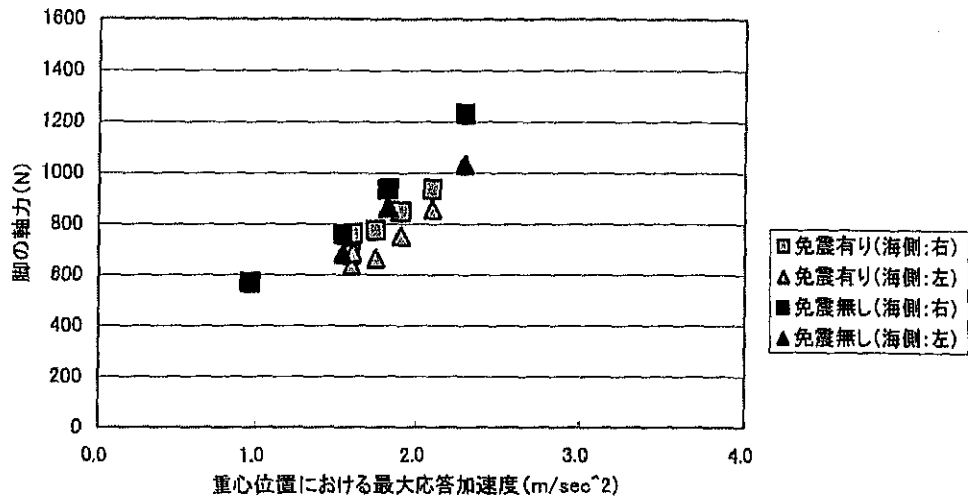


図-6. 2. 10 (海側2脚)脚部材の軸力(地震波:八戸波)

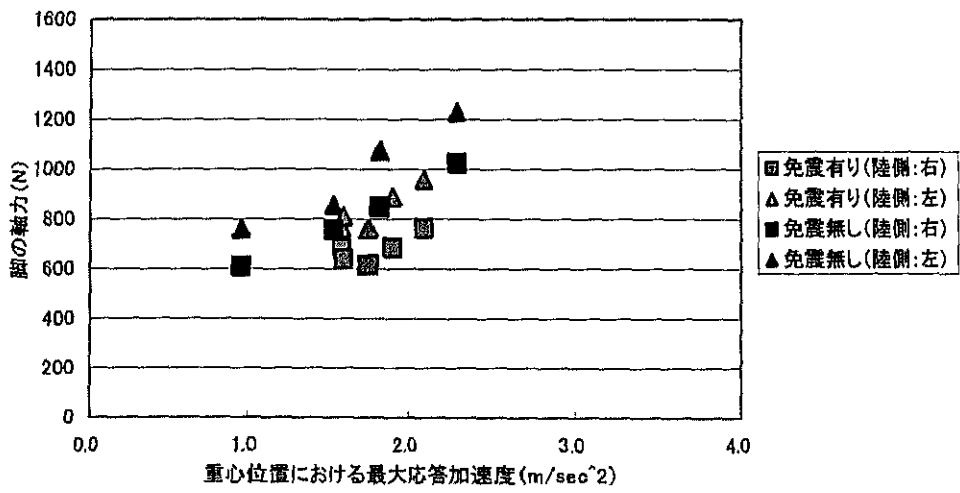


図-6. 2. 11 (陸側2脚)脚部材の軸力(地震波:八戸波)

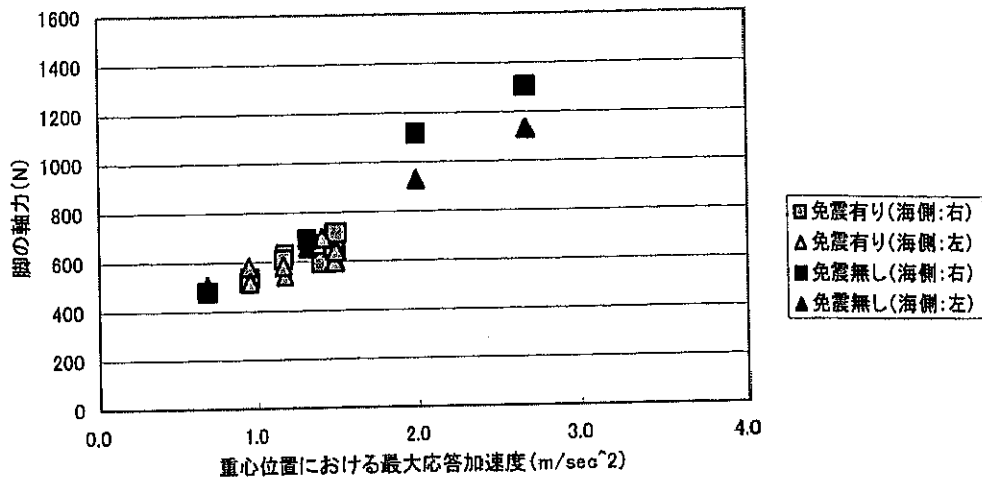


図-6. 2. 12 (海側2脚)脚部材の軸力(地震波:神戸PI波)

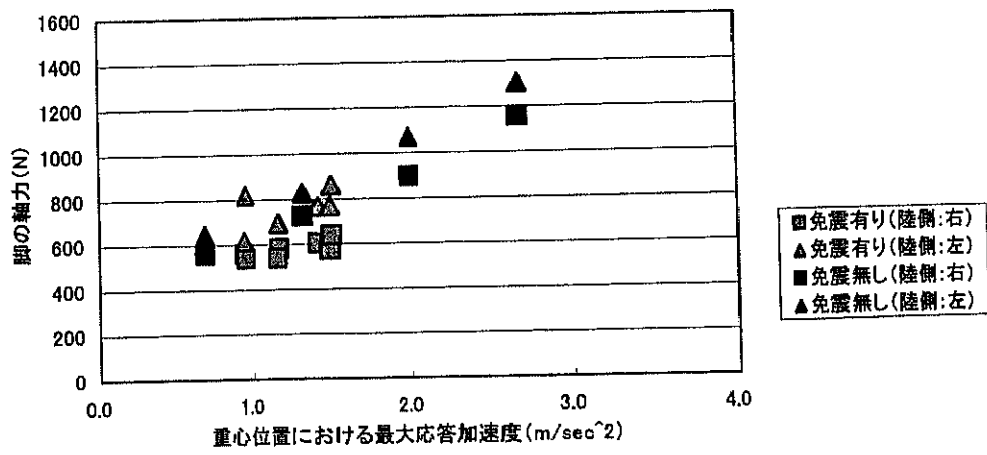


図-6. 2. 13 (陸側2脚)脚部材の軸力(地震波:神戸PI波)

用いた場合の陸側脚のケースを示す。また、図-6. 2. 12は、P I波を用いた場合の海側脚のケースを、図-6. 2. 13は、P I波を用いた場合の陸側脚のケースを示す。図-6. 2. 10、図-6. 2. 11では、海側脚では右側脚が左側脚よりも大きな値を示し、陸側脚では逆に左側脚が大きな値を示している。これはP I波の結果でも同様のことが言え、このように左右の値が異なるのは、模型にやや捻れを生じていたことによるのではないかと考えられる。その他の全体的な傾向は曲げモーメントの傾向と同様であるといえる。

以上の結果から、同じレベルの応答加速度に対しては、免震機構が作動した場合は、免震が作動していない場合と同等かやや小さなモーメント等が部材に作用することがわかった。従って、最大応答加速度を指標とすれば、免震機構の作動の有無に係わらず、最大応答が小さくなれば当然部材の設計は楽になるといえる。

2-2-2 応答加速度

(1) 最大応答加速度

八戸波を入力波とした場合の最大入力加速度に対応した重心位置での最大応答加速度の計測値を図-6. 2. 14に示す。図に示すとおり、脚部の免震装置を不作動とした場合の実験では入力最大加速度が 3.0 m/s^2 程度弱で脚の浮き上がりを生じて脱輪した。しかし、その後免震装置を作動させて、さらに入力の最大加速度を増加させたところ、入力最大加速度が 10.0 m/s^2 まで増加しても重心位置の最大応答加速度は、 2.0 m/s^2 程度までしか増加せず、脚の浮き上がりも生じなかった。また、図-6. 2. 15にはP I波を入力波として用いた場合の結果を示す。P I波を用いた場合でも、八戸波と同様の結果が見られた。また、八戸波の結果とP I波の結果を比較すると、免震機構有りの場合には同じレベルの入力最大加速度に対しては、ほぼ同レベルの最大応答加速度を示していることがわかる。こ

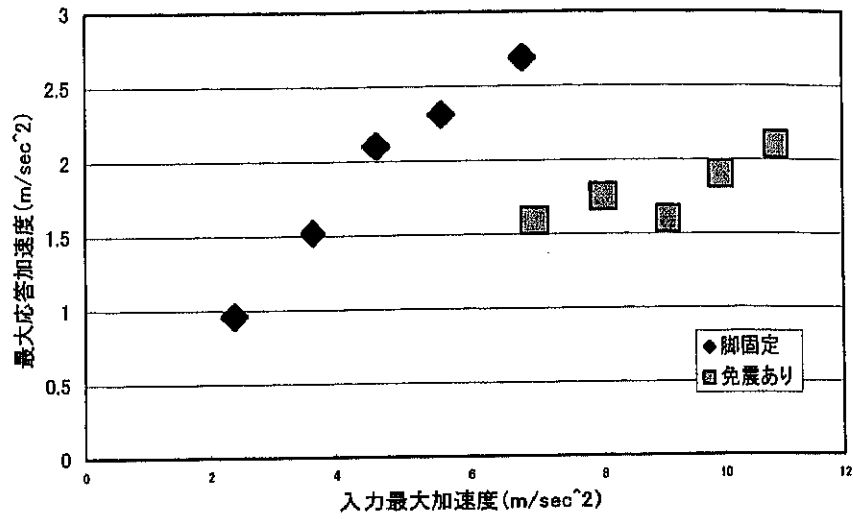


図-6. 2. 14 最大応答加速度(八戸波)

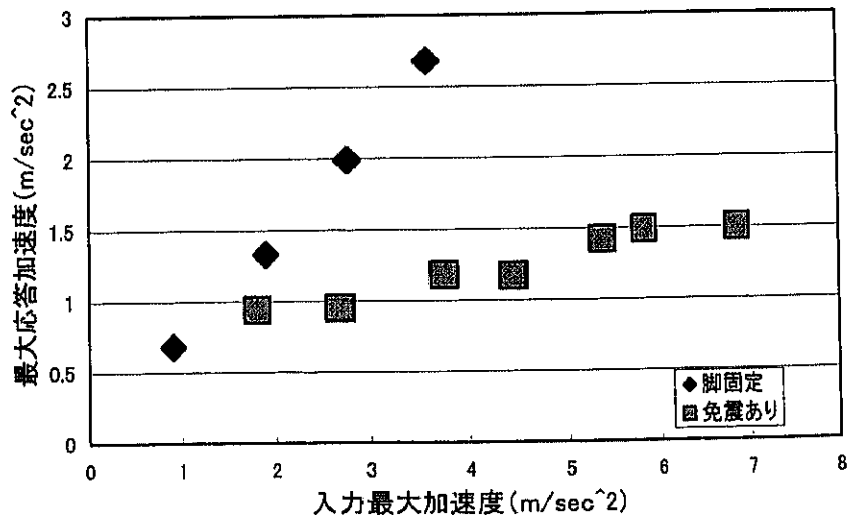


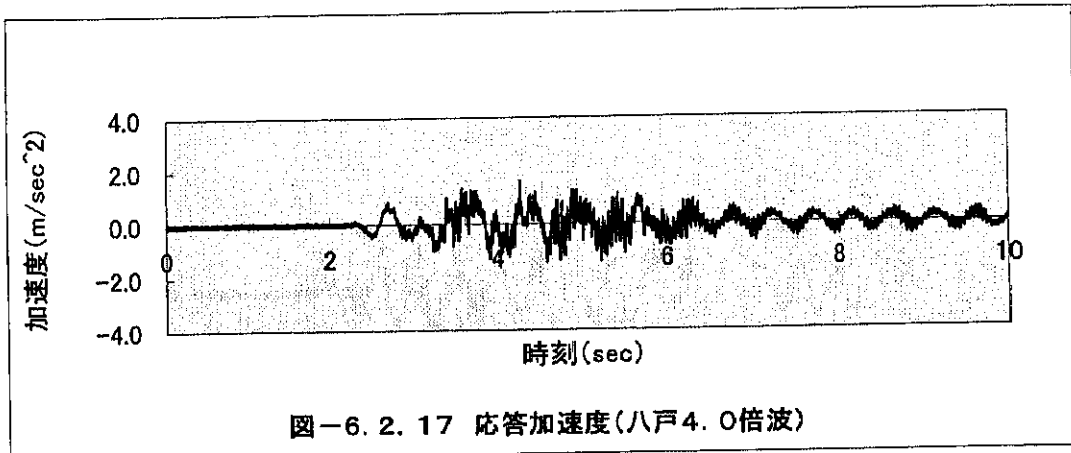
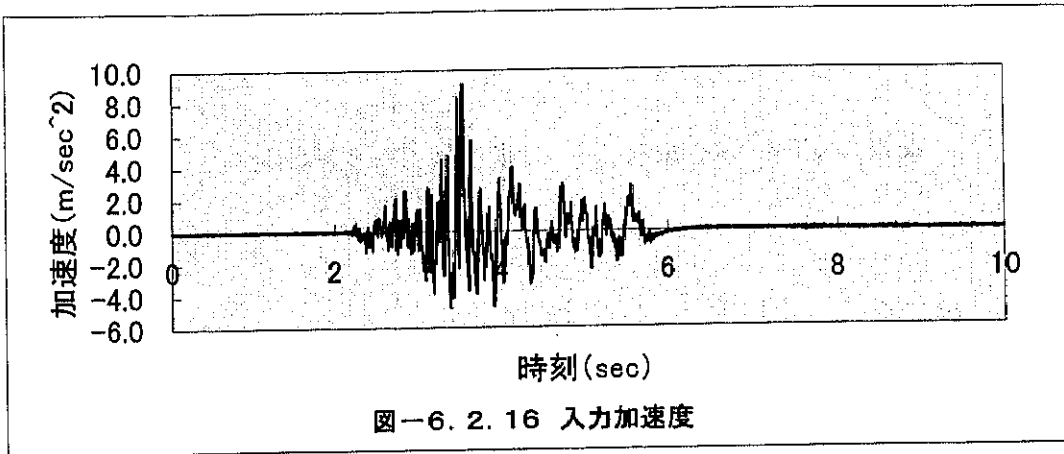
図-6. 2. 15 最大応答加速度(神戸PI波)

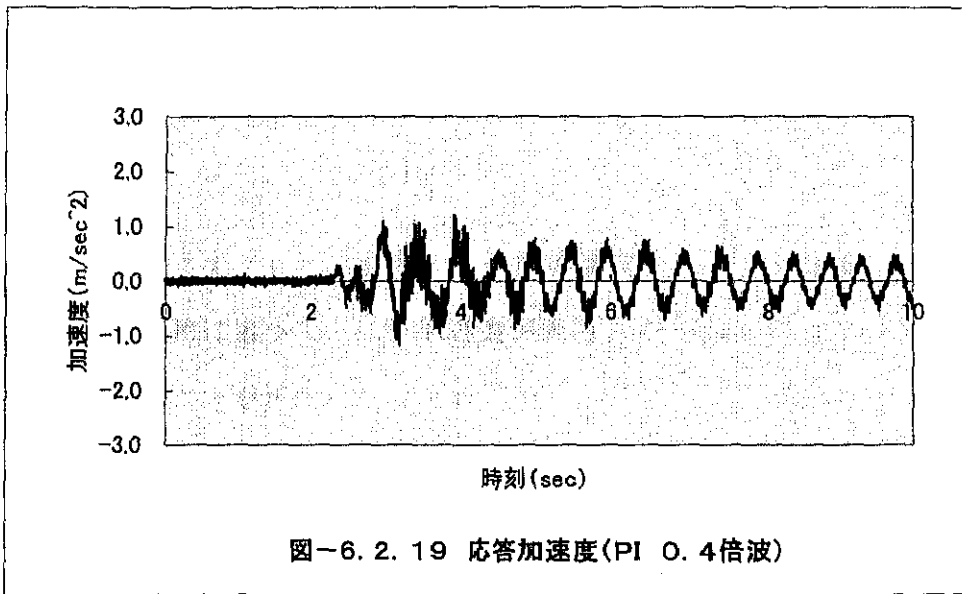
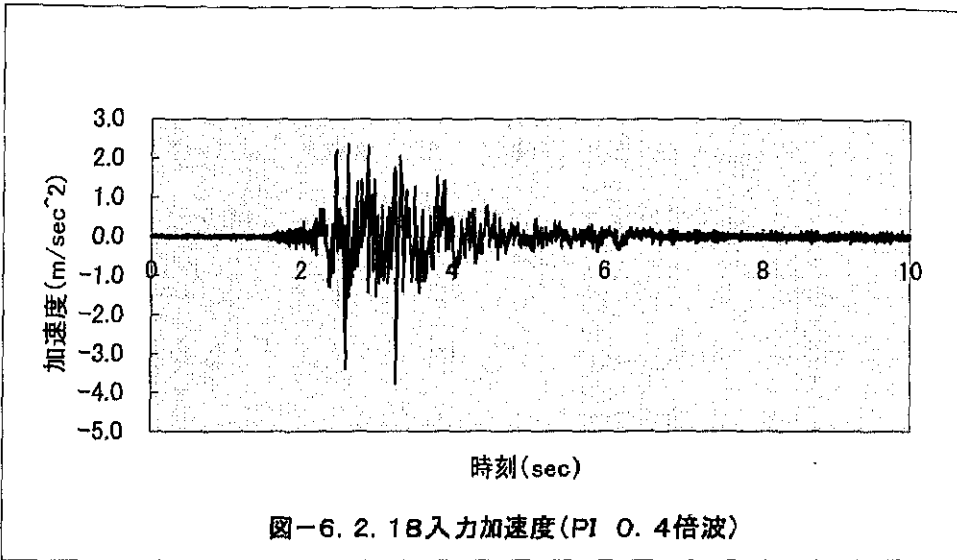
これは、第1節で検討したように、免震機構によって応答の最大値がカットされること、及び応答の特性が免震機構にある程度支配されていることによると考えられる。従って、免震機構の応答特性を十分把握していれば、免震なしの場合と同様に地震時の挙動をかなり正確に予測し、設計に反映することが可能であると考えられる。

この結果から、当初の設計どおり、クレーンの重心位置での最大応答加速度は 2.5m/s^2 以下の応答加速度に抑えられ、摩擦型免震機構が設計どおりの効果を発揮していることが確認された。また、改良後の模型についても、改良前の実験と同様に 3.0 m/s^2 前後の応答加速度で脚の浮き上がりが発生するとすれば、免震装置の作動により応答加速度は脚の浮き上がりの限界となる加速度より小さく抑えられ、結果として脚の浮き上がりを防止することが出来たと言える。従って今回の免震装置は、脚の浮き上がり対策として有効に機能したと言える。

(2) 時刻歴

免震装置を作動した場合の入力加速度と応答加速度の時刻歴を図-6. 2. 16～図-6. 2. 19に示す。この図を見ても応答加速度は 2.0m/s^2 以下に抑えられていることがわかる。また、このとき脚の鉛直変位には際だった変化は見られなかった。応答波形の主たる周期は概ね2秒程度であるが、特に八戸波の計測結果では不規則な波形が顕著に見られる。免震装置が作動しなければ、第3章で示したように、クレーンの固有周期に対応して主たる応答が発生するが、免震装置が作動している場合には、図-6. 1. 3に示したように、入力波形の周期に対応した振動が発生するものと予測される。しかし、地震波を入力した場合には、加速度に応じて免震装置が不規則に作動するため、このような波形を生じたものと考えられる。図-6. 2. 16及び図-6. 2. 17の八戸波の場合には、かなり大きな加速度が入力された時間帯で不規則な波形がより顕著に見られている。





第3節 免震機構の効果

以上の結果から、今回の摩擦減衰型免震機構を有する免震コンテナクレーンは、レベル2地震動の発生時において脚の浮き上がりを防止する効果があることが確認された。今後、レベル2地震動を設計対象地震動とするコンテナクレーンの設計においては、この免震クレーンが脚の浮き上がり対策の有力な選択肢となりうるものと考えられる。

また今回の実験の場合、コンテナクレーンに用いる摩擦型免震機構の設計に当たって、コンテナクレーンを1自由度系のモデルでモデル化し、その結果求められた加速度と変位のスペクトルから摩擦係数を選定することにより、免震機構の必要性能を求める方法を用い、実験によって設計された免震機構が想定どおりの働きをしたことが確認できた。但し、実機のクレーンで免震機構の採用を検討する場合には、今回のような模型実験を行いその効果を確認することが必要であると考えられる。

また、免震コンテナクレーンの部材設計が耐震設計によって決定される場合には、免震装置の採用によって、応答加速度が軽減される効果により、より経済的な部材設計を行うことが可能になると考えられる。従って、従来のコンテナクレーンに比べて免震装置の追加分だけ費用は上昇するが、全体としては上記の費用軽減効果も考慮することが可能になると考えられる。

なお、今回の検討では、摩擦減衰型免震機構を採用したが、その目的は免震機構によってコンテナクレーンの脚の浮き上がりを防止することが可能であることを確認することであり、同様の効果を有するものであれば、この形式にこだわらず異なる形式の免震機構を採用することは可能である。

【第6章：参考文献】

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993年12月
- 2) (社) 港湾荷役機械化協会：コンテナクレーン耐震設計のための手引き、平成10年2月
- 3) 柏崎昭宏他：3次元すべり型免震床システムの開発、石川島播磨技報第35巻第6号、平成7年11月
- 4) オイレス工業株式会社：<http://www.netscape.or.jp/oiles/>