

第4章 数値解析による検討

第1節 簡易モデルによる解析

1-1 簡易モデルの概要

前出の(社)港湾荷役機械化協会が提案している「コンテナクレーン耐震設計の手引き」¹⁾の中で、宮田ら²⁾は解析的手法によって、棧橋とクレーンの動的相互作用に伴う挙動を2質点系モデルで表現することを提案している。しかしながら、2質点系モデルについて、実際に実験等を行って再現性を検証したことはない。また、このモデルはコンテナクレーンが1質点の振動単位として挙動する事を前提に構成されているが、これも未検証のままである。

一方、第3章の今回の実験結果を見ると、静的載荷実験における脚の曲げモーメントは、各ケースとも水平材の曲げモーメントに比較してかなり大きな値を示しており、脚の曲げ変形がクレーンの全体の挙動をかなり支配していると推測できる。また、クレーンは走行方向から見ると海側と陸側とは非対称な構造であるが、陸側からの浮き上がり実験と海側からの浮き上がり実験における脚部の曲げモーメントの比較では同じ水平力に対しては同程度の値を示しており、上部構造の違いは脚部の挙動に大きな影響を与えないことがわかる。これらの実験結果に併せ、コンテナクレーンは第2章第4節 コンテナクレーンの構造特性 で述べたようなトラスの上部構造とラーメンの下部構造となっていることなども考慮し、本研究では簡易解析のモデルとして1質点系モデルを採用することとした。もともと従来より、土木・建築分野では一般的に応答スペクトルを用い、その構造物等の振動特性についての基本的な検討が行われており、今回のように1質点系モデルをクレーンの挙動に直接適用しようとする事は、その延長線上にあるものとも言える。適用性の検討の詳細については第5章に後述する。

本節ではコンテナクレーンについて、模型実験により得られたデータにより、

簡易な1質点系モデルで表現するというモデル化の妥当性及びその適用性について検証した。

想定した1質点系モデルの概念図を図-4.1.1に示す。加振方向は水平1方向で、入力地震動は脚下端部（レール位置）に入力され、クレーンは水平1方向のみに振動する。これは今回の実験に先だって実施した固有値解析で、2次モード（x方向）の刺激係数が最も大きかった（表-3.1.2参照）こと、及び模型実験の結果においてもこのモードの振動が卓越していることが観測されたことによる。質点にはクレーンの質量を与えてバネとダッシュポットで基礎（レール）と結合している。コンテナクレーンの応答はクレーン重心位置の応答を求めることに相当する。この場合は減衰を受ける強制振動であり、1質点系の振動方程式は、一般的に式（4.1）のように表される³⁾（式（4.1）中の変数については、図-4.1.2参照）。

$$m \ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X) = 0 \quad (4.1)$$

ここに

m : クレーンの質量 (kg)

x : クレーン重心位置の絶対変位 (m)

X : レール基礎変位 (m)

c : 減衰係数 (kgf·s/m)

k : バネ定数 (kgf/m)

ここで式（4.1）において、 x 、 X をそれぞれ式（4.2）、（4.3）のようにおくと、応答倍率は、式（4.4）のようになり、クレーン重心の加速度応答は式（4.5）のように表せる。

$$x = \sum_{j=1}^{\infty} b_j e^{i\omega_j t} \quad (4.2)$$

$$X = \sum_{j=1}^{\infty} a_j e^{i\omega_j t} \quad (4.3)$$

$$b_j = \frac{k + i\omega_j c}{k + i\omega_j c - \omega_j^2 m} a_j \quad (4.4)$$

$$\ddot{x} = - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{k + i\omega_j c}{k + i\omega_j c - \omega_j^2 m} a_j \omega_j^2 m e^{i\omega_j t} \quad (4.5)$$

a_j : クレーン重心位置での変位応答振幅

b_j : 入力地震動の変位振幅

ω_j : 円振動数 (rad / s)

1 質点系モデルでは、 $\ddot{X}(t)$ に入力地震動を与えて、式 (4.5) から数値解析により解が得られる。式 (4.1) 及びその解は一般的な振動学の教科書に記載されており、その解析も設計実務者にとって大きな負担を強いるようなものではない。従って、実務上からも簡易モデルとしての要件を満たしていると言える。

また、このモデルにおいてはクレーンの脚の浮き上がりや脱輪、滑動等は考慮できない。従って、この1質点系モデルは、地震時のコンテナクレーンの全ての挙動を忠実に再現するのではなく、脚が浮き上がるまでの挙動をあくまで概略把握することを目的として検討する。解析に用いるモデルのバネ定数及び減衰定数はクレーン模型の実測値（固有周期0.45s、減衰定数0.32%）から与えている。

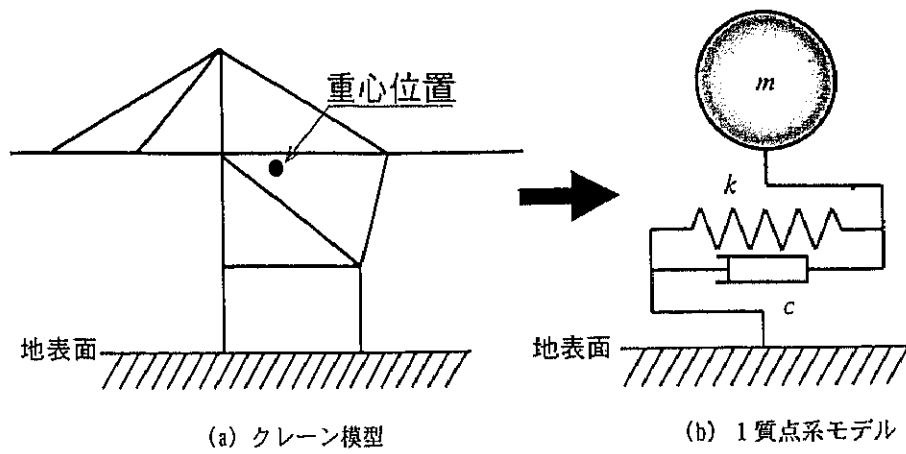


図-4. 1. 1 簡易モデル概念図

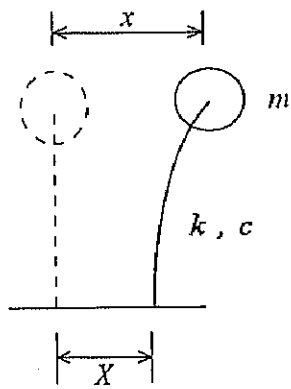


図-4. 1. 2 1質点系モデルの変数

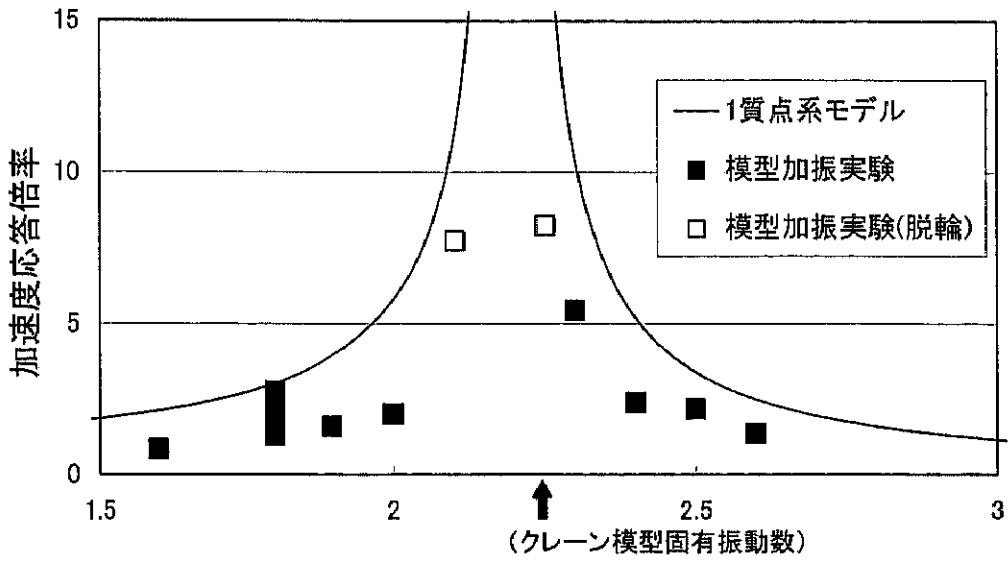
1-2 簡易モデルの検討結果

1-2-1 正弦波による検討

簡易モデルにおいて、クレーンの応答を調べるために入力波として正弦波を用い、周期を変えて検討を行った。

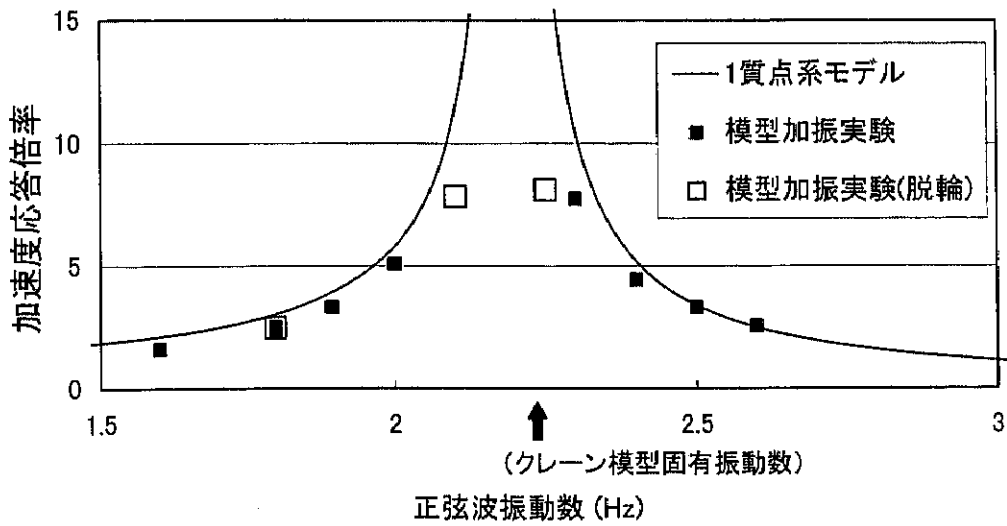
正弦波入力に対する模型実験及び簡易モデルによるクレーンの重心位置（実験では加速度計設置位置）での最大加速度応答倍率を図-4. 1. 3(a)に示す。但し、固有周期（共振点）付近の周波数については、加速度の応答倍率が計算上150倍程度になり、模型を破壊する等の危険があるため、実験は実施しなかった。図中の実線は簡易モデルの計算結果を、プロットした点は実験結果を示している。簡易モデルの計算結果は全て実験値より大きい加速度応答倍率となり、若干過大評価になるとも考えられるが、入力波に対するクレーン最大加速度応答の傾向はほぼ一致している。また今回使用したクレーン模型はその応答がきわめて敏感で、前述のように特に正弦波入力に対して計算上共振点付近で応答倍率が急激に大きくなることがあらかじめ予想された。この正弦波実験ではモデルの周波数応答特性を検証することが主たる目的であり、しかもクレーンの共振点付近での応答特性が重要な意味を持つことから、危険を避けつつ、かつ可能な範囲で共振点近くでの実験を実施する必要があったため、入力波の最大振幅として極めて小さな値（20 Gal）を用いた。その結果、今回使用した振動台の有する高周波の雑音成分が結果に影響を及ぼしている恐れがあったことから、5 Hzローパスフィルターを用いて、この入出力の高周波成分を除去することを試みた。その結果を図-4. 1. 3 (b)に示す。この結果では、応答倍率は実験とほぼ一致しており、実験においては脚の浮き上がりが観測されたケースがあったが、脚が浮き上がった場合でも簡易モデルによる応答倍率は再現性を有していることがわかる。

また、正弦波を入力した場合のクレーン重心位置での加速度の時刻歴応答の比較を図-4. 1. 4に示す。解析値と実験値とを比較すると、脚の鉛直変位が顕著



正弦波振動数 (Hz)

(a) 解析値と計測値の比較



正弦波振動数 (Hz)

(b) 5Hzローパスフィルター処理後

図-4. 1. 3 正弦波周期と加速度応答倍率

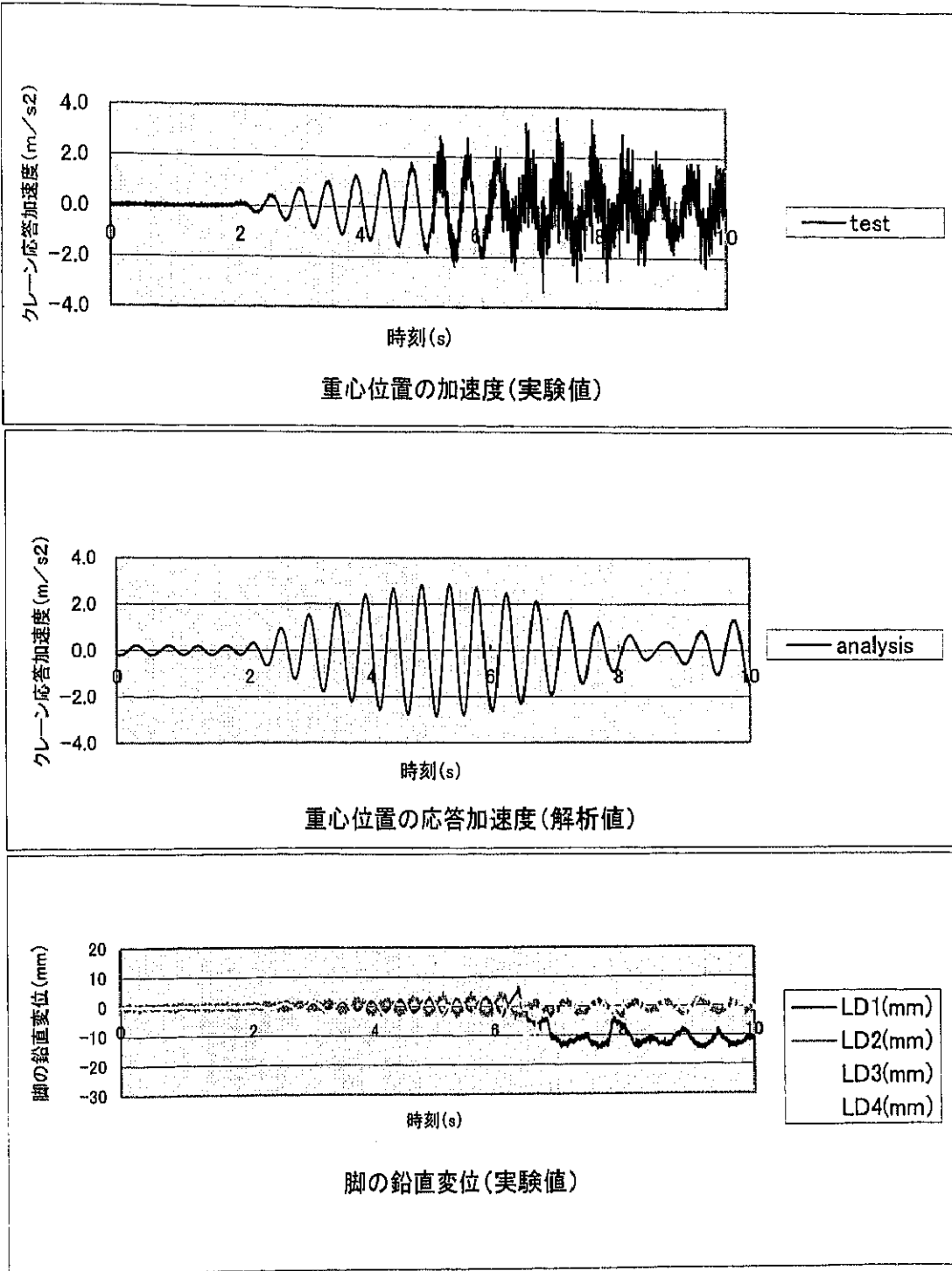


図-4.1.4 簡易モデルの解析結果(正弦波)

になる時点までの応答加速度の波形については、ほぼ一致しているが、前述したとおり応答の振幅については、解析値が大きな値を示している。

1-2-2 地震波による検討

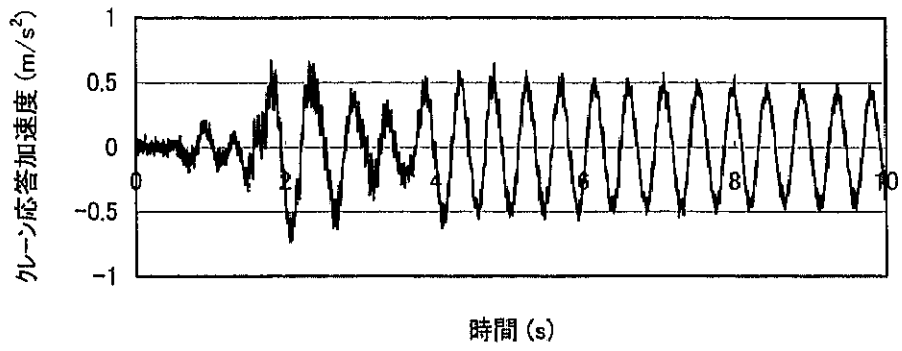
次に地震波について比較した結果を図-4. 1. 5～図-4. 1. 7に示す。図-4. 1. 5は、実験で脚の浮き上がりを生じなかったケース（八戸波NS成分 最大加速度 1.0 倍）である。簡易モデル計算に使用した入力波は、振動台で観測された加速度波形を用いた。応答波形については実験結果と解析結果は比較的よく一致している。また、最大応答加速度は実験では 0.8 m/s^2 、計算からは 1.0 m/s^2 であり、やや計算値が大きいという結果が得られた。その理由としては、簡易モデル計算ではクレーン車輪とレールとの滑り、脚の浮き上がり等が表現できないこと、また、簡易モデルでは入力された地震波のエネルギー全てが1方向に作用するのに対して、実験ではクレーン横行方向以外にも走行方向や上下方向に分散されることなどが考えられる。

同様に大船渡波、PI波で脚の浮き上がらないケースについての解析結果を示す。図-4. 1. 6は大船渡波、図-4. 1. 7はPI 0.3 倍波の結果である。いずれも八戸波と同様に応答波形についてはよく一致していると言える。また、最大応答倍率については、大船渡波の結果は高周波成分の影響を含めればよく一致しているが、この影響を考慮すると解析結果がやや大きめの値を示している。PI波については、八戸波と同様に実験結果が 2.6 m/s^2 であるのに対して、解析結果は 3.2 m/s^2 と、解析結果がやや大きめの値を示した。

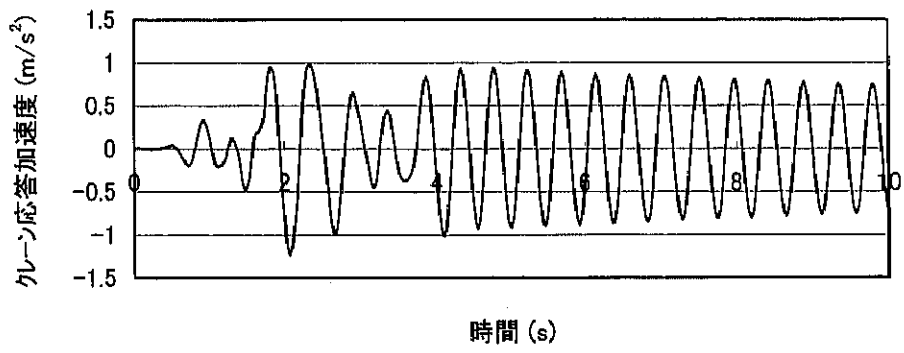
図-4. 1. 8には八戸3. 5 倍波に対する比較検討結果を示す。前述したように八戸波による実験では実験で脚の浮き上がりが生じている。また、図-4. 1. 9にはPI 0.4 倍波の結果を示す。どちらも脚の浮き上がり前までの応答波形はよく一致している。しかし、浮き上がり後は実験値が高周波成分を多く含む波形を示しているのに対して、解析結果は全く異なる結果となっている。また、応答

の振幅を見ると、解析値がやや大きめの値を示している。また、八戸波の結果と P I 波の結果で大きな差異は見られなかった。

ここまでの結果を見ると、重心位置の最大応答加速度については、各周波数毎に対応した値は、簡易モデルの計算値がやや大きめに出る。クレーンの固有周期との相対的な関係では、その傾向はよく一致する。加速度の時刻歴応答を見ると、最大値はやや大きいですが、応答波形はよく一致していると言える。但し、脚の浮き上がり後の挙動については、応答波形は実験値が高周波成分を多く含みながら異なる波形を示している。このことから、簡易モデルはクレーンの挙動はよく表現できるものの、最大応答加速度は大きめに算出する。また、脚の浮き上がり及びその後の挙動を再現することはできないことがわかる。

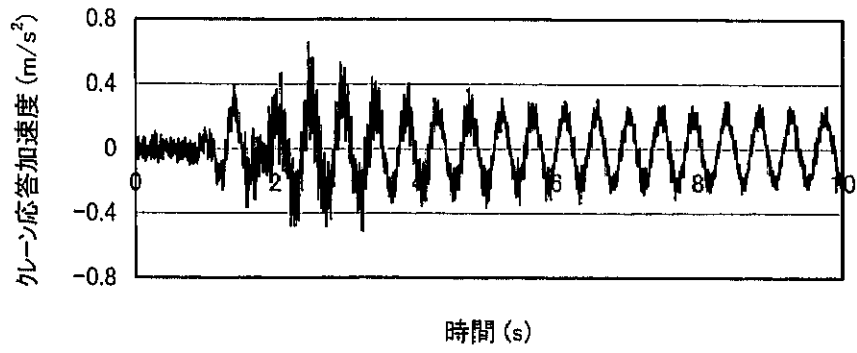


(a) 実験結果

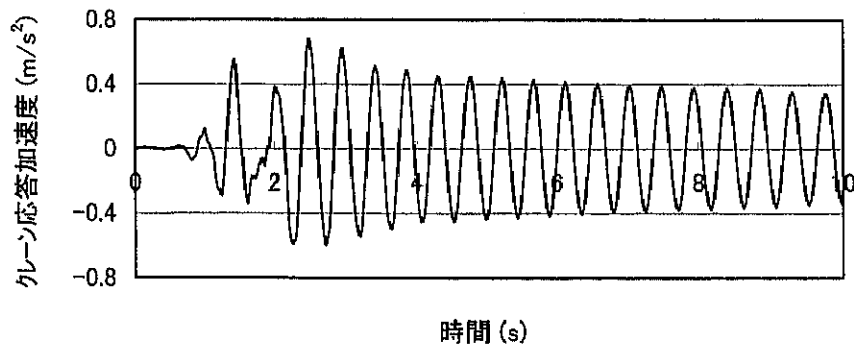


(b) 簡易モデル

図-4. 1. 5 加速度時刻歴応答(八戸波)

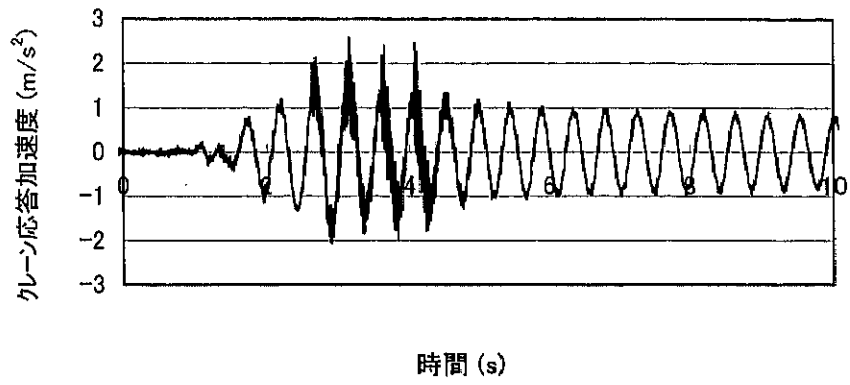


(a) 実験結果

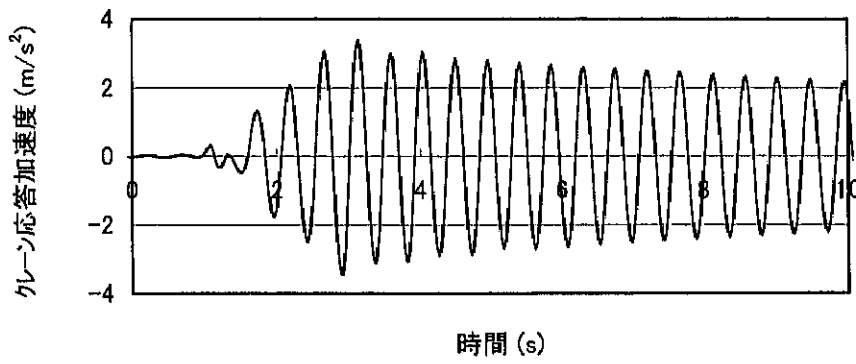


(b) 簡易モデル

図-4. 1. 6 加速度時刻歴応答(大船渡波)



(a) 実験結果



(b) 簡易モデル

図-4. 1. 7 加速度時刻歴応答 (PI 0.3倍波)

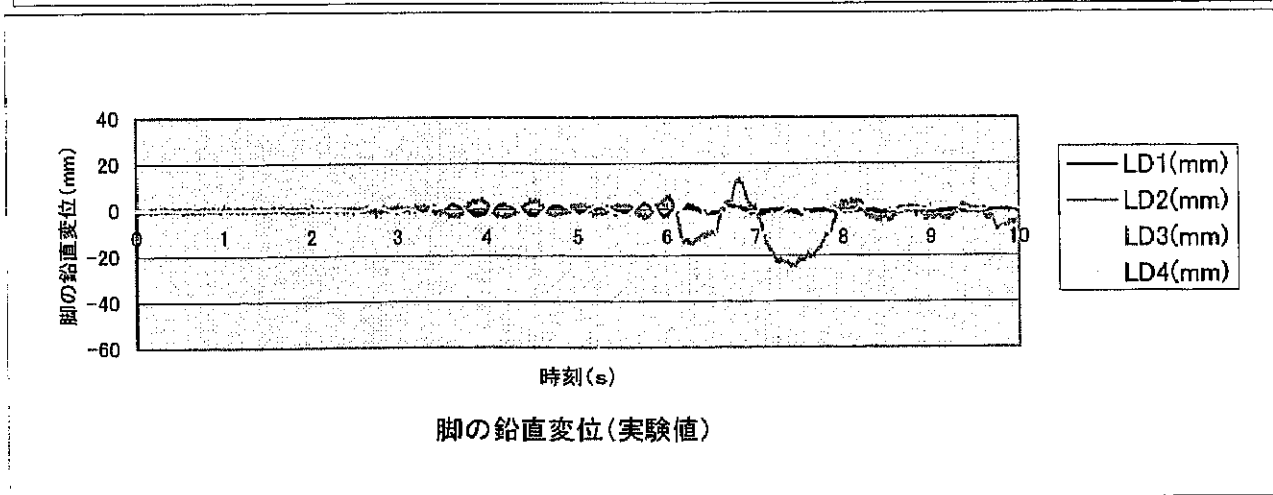
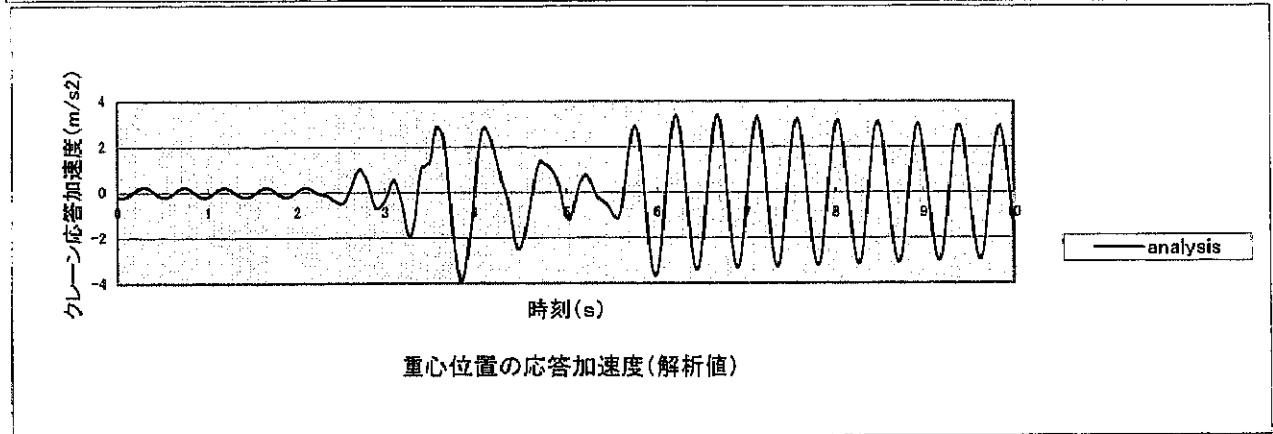
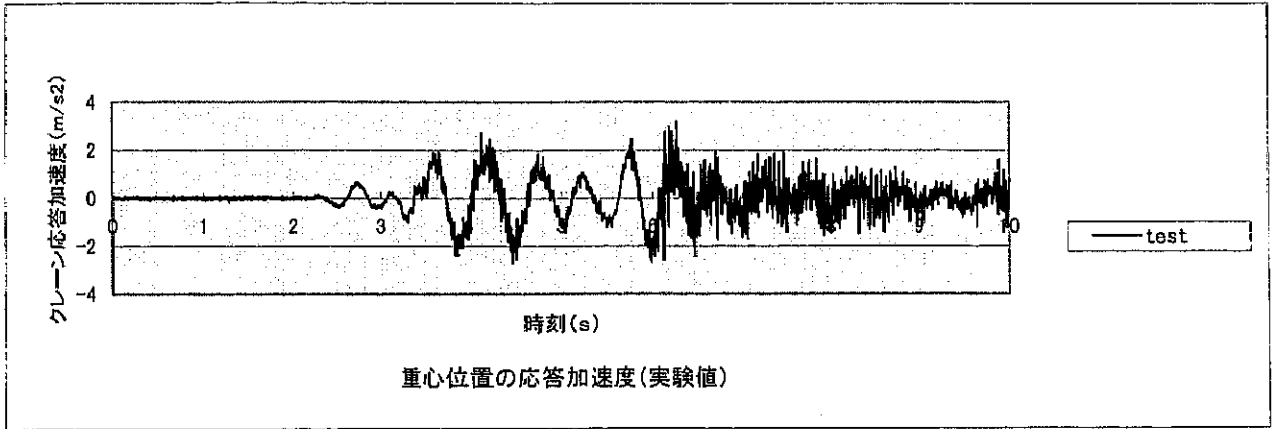


図-4. 1. 8 簡易モデルの解析結果(八戸3.5倍波)

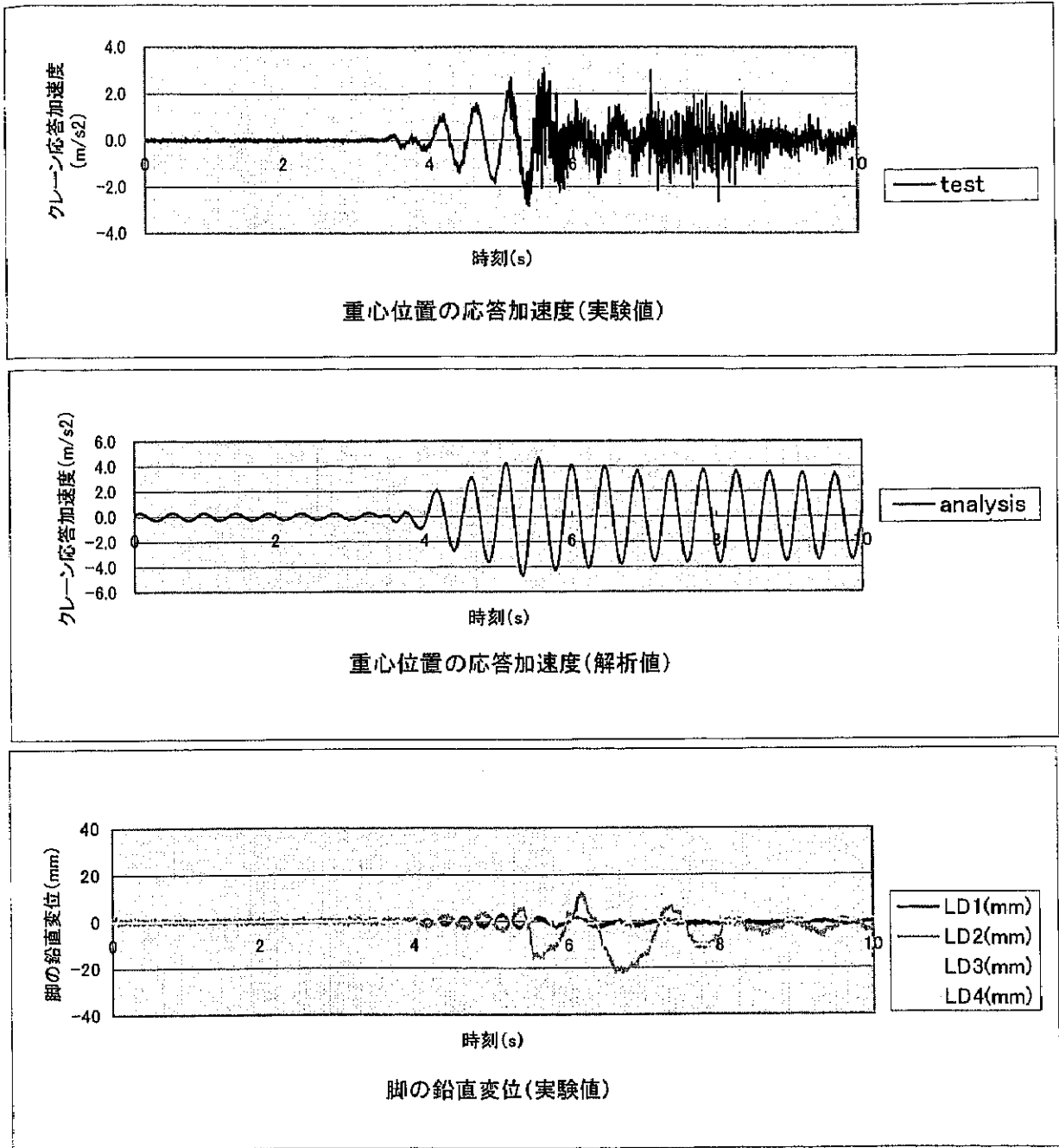


図-4. 1. 9 簡易モデルの解析結果 (PI 0.4倍波)

第2節 FEMによる解析

2-1 クレーンのモデル化

本章では有限要素法（汎用 FEM コード MSC/NASTRAN）⁴⁾による非線形過渡応答解析について、模型実験の結果より再現性を検証することとした。この MSC/NASTRAN は、荷役機械の設計では比較的良好に用いられているソフトウェアである。今回の研究の目的はコンテナクレーンの設計法の提案にあることから、そのソフトウェア・モデルは設計の現場で使用するために、市販の汎用ソフトウェアとして流通していることも重要な要素である⁵⁾。MSC/NASTRAN も近年幅広い分野で使用されてきており、またダウンサイジングの影響を受けて、PC 上で動くようにもなってきている⁶⁾。しかし、これまで荷役機械の設計分野で脚の浮き上がりという極めて非線形性の強い挙動に関しては十分適用されて来なかったことから、本章でその適用性について検討するものである。

MSC/NASTRAN では、計算法として直接過渡応答解析を行っており、構造物の応答は直接数値積分を用いて算出される⁷⁾。また、今回は積分の時間刻みとして、模型実験でのデータサンプリング間隔を用いた。

図-4. 2. 1に、コンテナクレーンの FEM モデルを示す。実験に用いたモデルは第3章で示したように、実機のクレーンの主たる構造部材をモデル化したものである。実機のクレーンでは、この他にトロリーやその動力部、昇降機、ワイヤー等多くの付属的な構造・部品が設置されているが、これらの構造は全体の力学的な特性に大きな影響を与えないと考え、モデル化を行っている。解析モデルについても同様であり、本研究でのモデルは、模型実験で用いたクレーンを対象とし、主に梁要素を用いて3次元のクレーンをモデル化した。また、本モデルでは、クレーン脚の浮き上がり、滑動および車輪のフランジによる拘束を表現できるよう、脚下端部に gap 要素を使用している。この gap 要素は、接触時と非接触時で大き

く異なる軸方向バネ定数を表現（図-4.2.2参照）し、さらに接触時の摩擦についても考慮できる。今回の解析では、接触時の軸方向バネ定数 K_a としては、剛体を表現する数値（ $K_a = 1.0 \times 10^7$ ）を用い、また非接触時の軸方向バネ定数 K_b は、十分小さな値であればよいが、解の安定性により定めた数値（ $K_b = 1.0 \times 10^{-7}$ ）を用いた。なお、車輪のフランジによる拘束は、脚の浮き上がり量がフランジの深さである 20 mm（実機レベル）を越えるまで働くようにした。また、車輪とレールの摩擦係数については、走行直角方向は、レールによる拘束を表現するため 1.0 と大きい値を用い、走行方向は車輪とレール間の摩擦係数を 0.1 と仮定した。ただし、設計上半数の車輪は制動されないとすることから、入力摩擦係数は 0.05 としている⁸⁾。模型実験においては、過大な地震動が入力された場合には、車輪とレールの接触部分でのガタツキや脚の浮き上がりなどが観測されたことから、上記のような特性を持つ Gap 要素のような取り扱いが必要である。なお、要素の非線形性は図-4.2.2のように考慮されている⁹⁾。

MSC/NASTRAN は、脚の浮き上がりを伴わない通常地震時の応答解析ではこれまで実績があり、また金山ら¹⁰⁾はポートアイランド波を用いて脚の浮き上がりに伴う変位、及び応答加速度の評価については適用可能であるという研究成果を発表している。

本研究では港湾における設計法としての汎用性を確保するため、今回の実験結果により脚の浮き上がりの再現性を確認するとともに、ポートアイランド波に加え、港湾施設の設計に多く用いられる八戸波でも脚の浮き上がりを評価することが可能か、重心位置での応答加速度について再現性があるかに着目して検討を行った。入力波としては模型加振実験において脱輪を起こした地震波を用い、また加振方向は模型実験と同様にX方向（クレーン横行方向）とした。

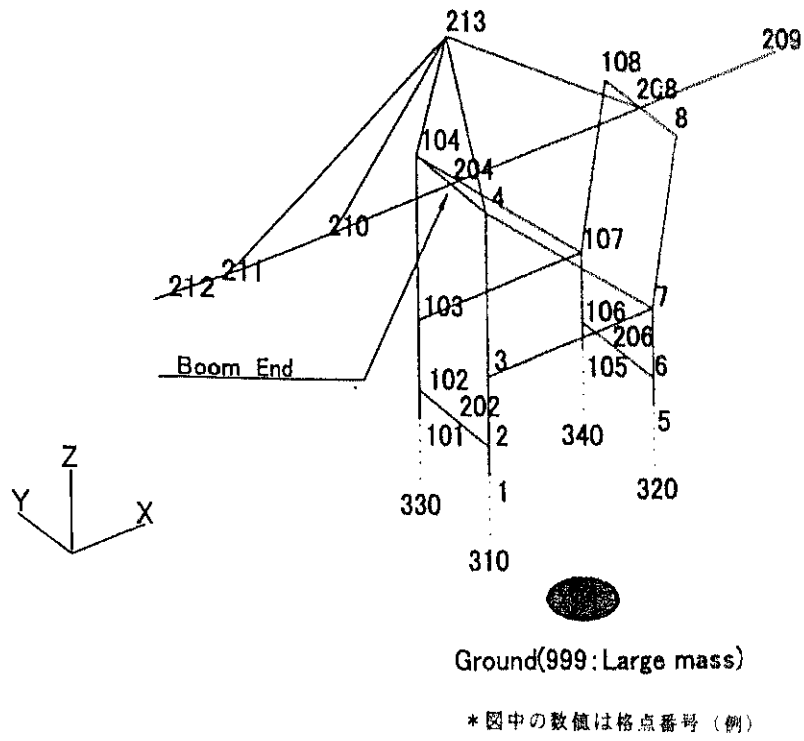


図-4. 2. 1 FEMモデル概要図

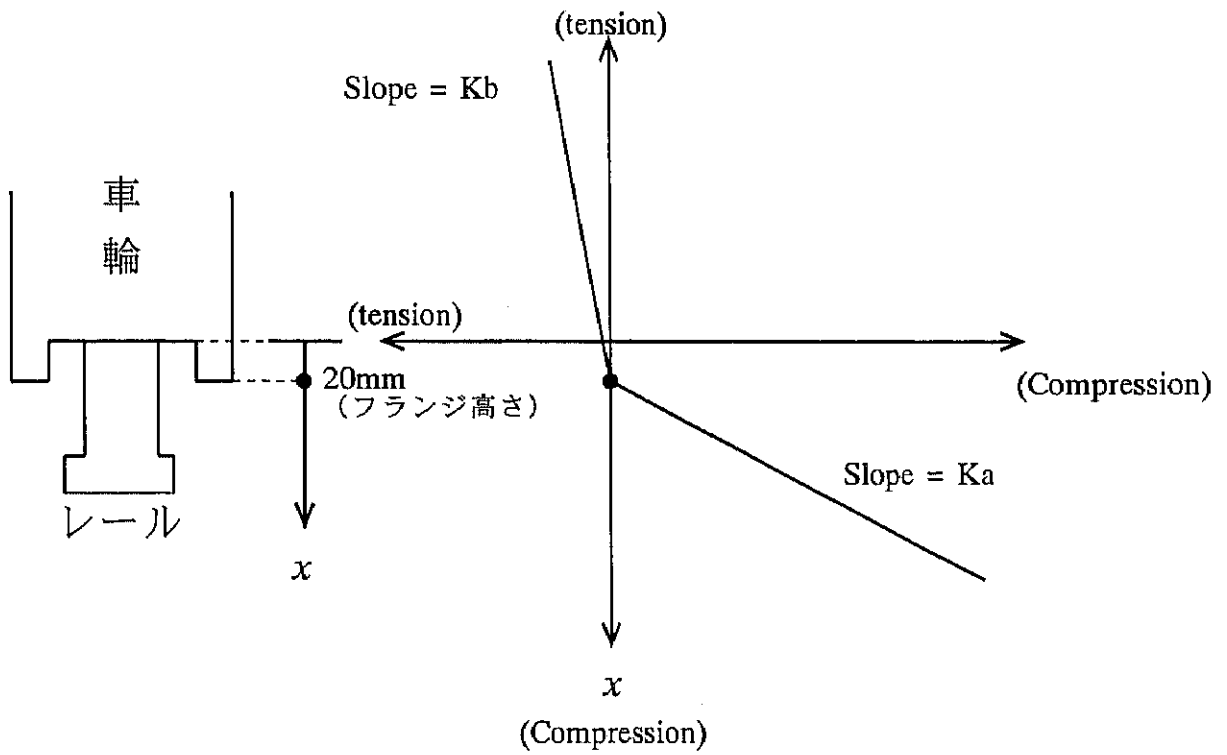


図-4. 2. 2(a) Gap要素によるフランジの拘束

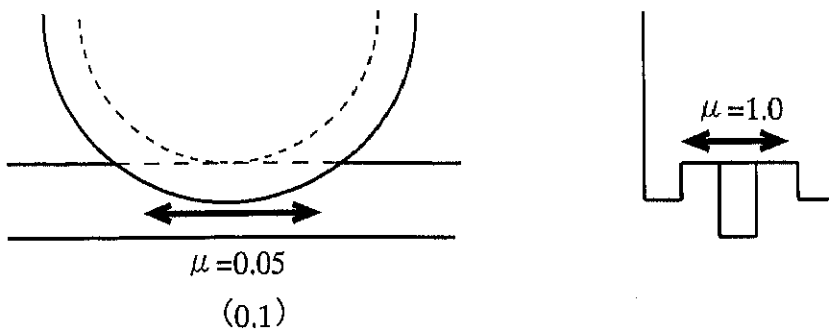


図-4. 2. 2(b) 摩擦係数

2-2 FEMモデルの検討結果

図-4.2.3～図-4.2.4に入力加速度及び実験結果と解析結果のクレーン重心位置の応答加速度の時刻歴（模型スケール）を示す。図-4.2.3は、八戸3.5倍波、図-4.2.4はPI 0.4倍波の結果を示す。実験結果と解析結果を比較すると、加速度レベルは若干解析結果が大きく出ているものの、実験結果の高周波成分を除けば応答波形は実験結果と解析結果でよく一致している。従って、脚の浮き上がりに大きな影響があるクレーンの2次モードについては、十分再現性があるといえる。このことから、脚の浮き上がりを伴うケースでも振動性状については、詳細モデルで比較的よく再現できると考えられる。

また、脚の浮き上がり現象については、八戸波の解析結果では図-4.2.3において約3.7秒の時点で脱輪が発生している。実験結果でもほぼ同時刻から顕著な鉛直変位が発生しており、脚の浮き上がりの発生についてはほぼ再現できている。但し、浮き上がりの定量的な値や脱輪の変位量等については確認が出来なかったため、この点については今後の課題である。ポートアイランド波についても図-4.2.4において約5秒の時点で脚の顕著な鉛直変位が発生しており、これも実験結果と一致している。

以上の結果より、今回の解析に用いたGap要素とそのパラメータを用いた場合には、FEMにより脚の浮き上がりを再現することが出来ることを確認した。また、少なくともポートアイランド波及び八戸波については適用が可能であり、ある程度の汎用性を持つものと言える。また、重心位置での加速度についてはやや大きめの値を算出するものの、応答波形の再現性は良好であることを確認した。

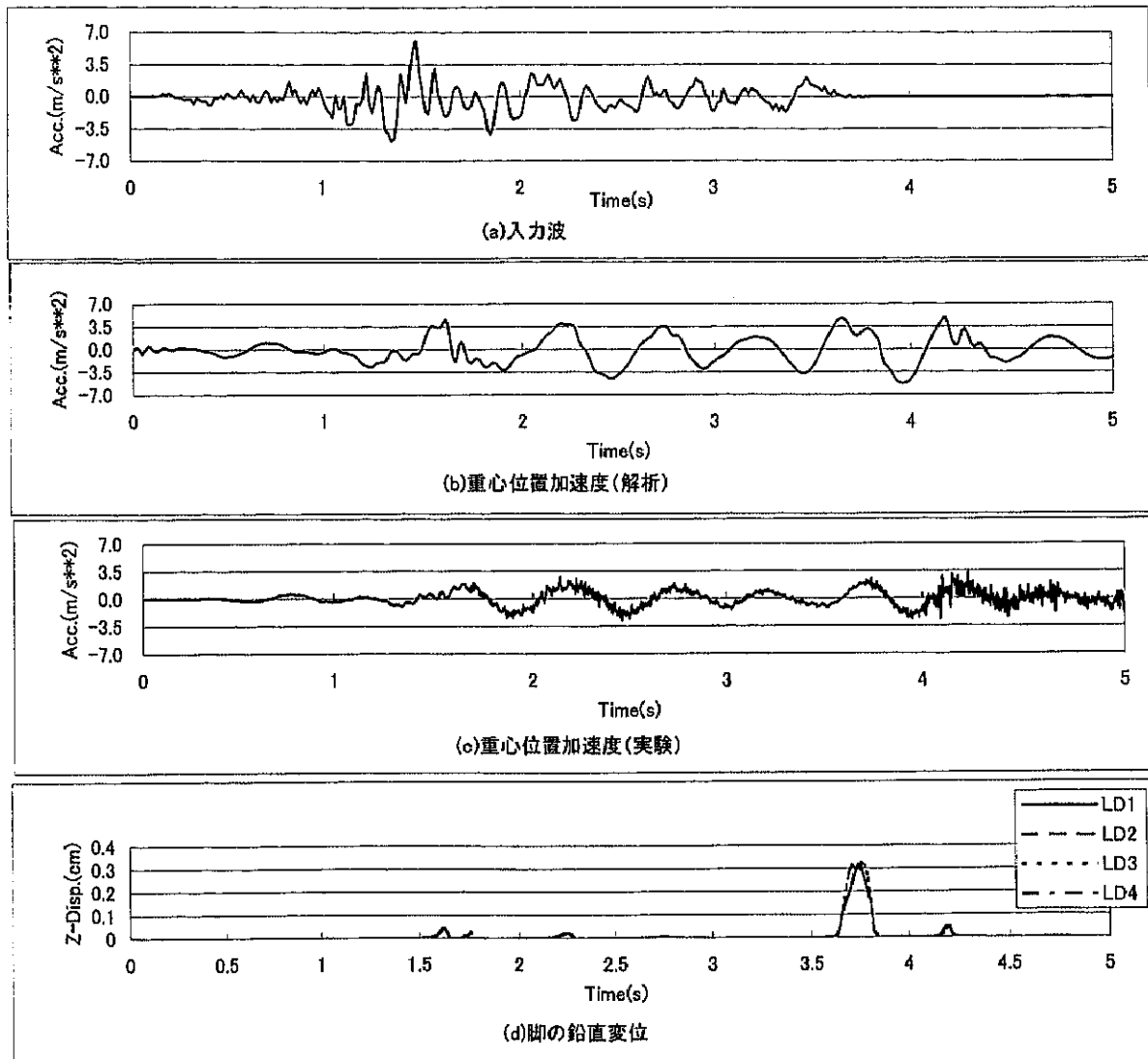


図-4. 2. 3 実験結果と解析結果の比較(八戸3. 5倍波)

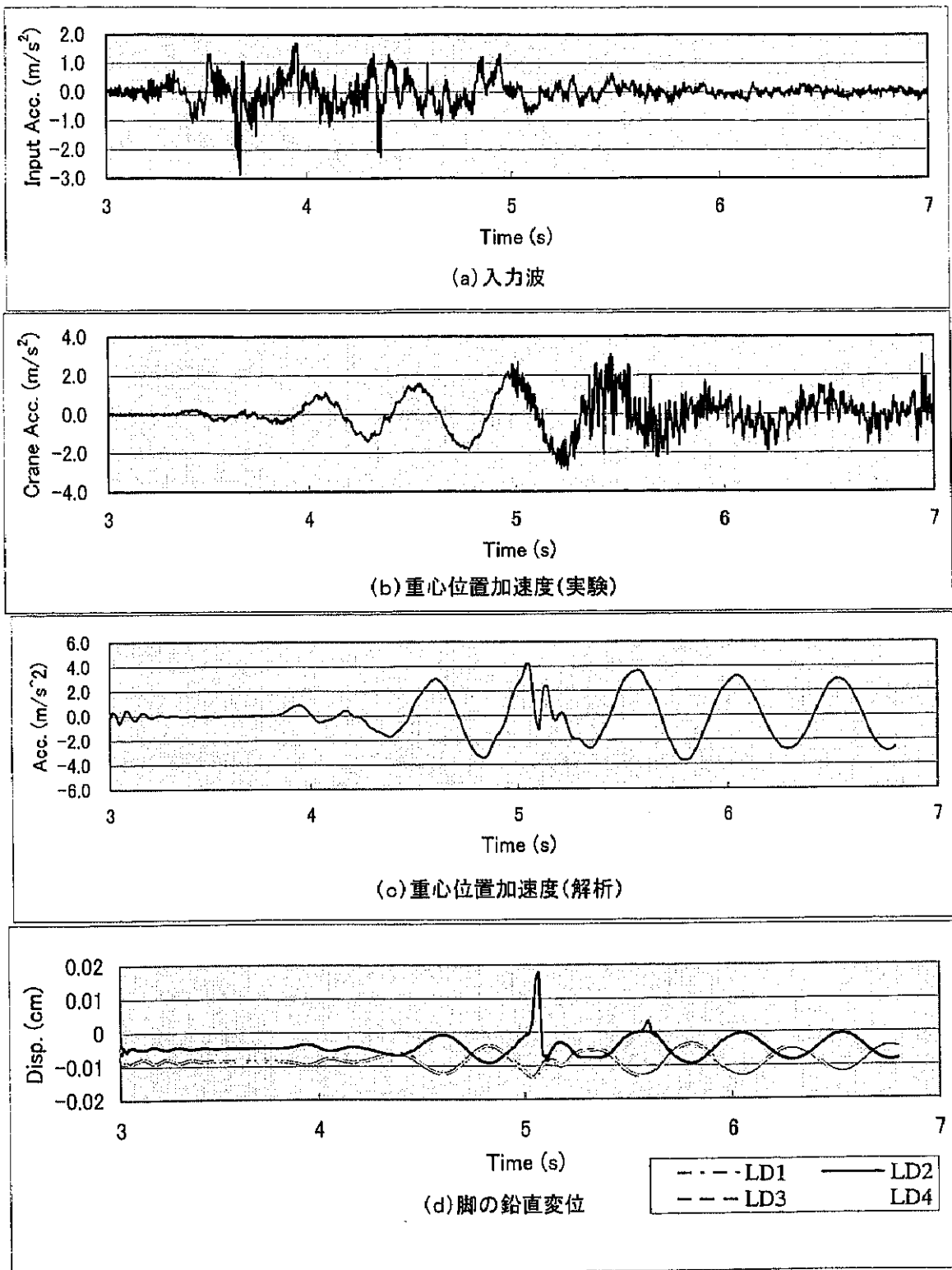


図-4. 2. 4 解析結果と実験結果の比較(PI 0.4 倍波)

【第4章：参考文献】

- 1) (社) 港湾荷役機械化協会：コンテナクレーン耐震設計の手引き、平成10年2月
- 2) 宮田正史他：直杭式栈橋とコンテナクレーンの地震時相互作用に関する研究、1998. 11
- 3) (社) 土木学会：構造力学公式集、昭和61年6月
- 4) 日本エムエスシー株式会社：MSC/NASTRAN ユーザーズガイド基礎動解析 (V68)、平成6年12月
- 5) 鈴木克之：設計のツール、土木学会誌 Vol.85 2000年8月号
- 6) 参考文献5)
- 7) 参考文献4)
- 8) 金山他：浮き上がり特性を考慮した過大地震時のコンテナクレーン挙動解析、日本機械学会機械力学計測制御講演論文集 (Vol.B)、1996.8
- 9) 日本エムスシー株式会社：MSC/NASTRAN ユーザーズガイド非線形解析ハンドブック、1994.7
- 10) 金山他：大規模地震時のクレーンの浮き上がり挙動について、日本造船学会誌第832号、平成10年10月