

兵庫県南部地震によるコンテナクレーンの被災状況と地震時の応答について

田中祐人*¹、阿比留久徳*²、渡邊英一*³、長井正嗣*⁴
松井五郎*⁵、倉石謙司*⁶、丸山繁久*⁷、近江宗作*⁸

兵庫県南部地震により、埋立地盤である神戸市のポートアイランドや六甲アイランドでは、コンテナクレーンが著しい被害を受け、それらの中には倒壊するものもあった。

ここではまず、クレーンの損傷部位や被災程度の分類など、クレーンの被災状況を報告する。次に、クレーン脚部を強制変位させて、クレーンの股裂き状態を想定した弾塑性解析の結果を述べる。さらに、レール位置に地震波を入力して、ロッキング振動を想定したクレーンの地震応答解析の結果を説明する。最後にこれらの結果より、クレーンが被災したメカニズムの検討結果を述べる。

1. はじめに

兵庫県南部地震により、埋立地盤である神戸市のポートアイランドや六甲アイランドでは、コンテナ岸壁やコンテナクレーンが著しい被害を被った。この原因は、直下型地震による水平・上下方向の強震動やそれに伴うコンテナ岸壁の変位、さらに海・陸側のクレーンレール基礎の違いなど、種々の要因が考えられる。土木学会によって実施された調査¹⁾によると、岸壁の移動により岸壁側のクレーン脚部が水平方向の強制変位を受け、板要素が局部座屈して全体に変形した、と報告している。

ここではまず、クレーンの損傷部位や被災程度の分類など、クレーンの被災状況を報告する。この状況から被災原因を大まかに推定し、その原因と被災量の相関関係を検討する。次に、クレーンだけに着目し、簡易なモデルで被災原因を想定した弾塑性解

析や地震応答解析を実施する。最後に、これらの解析結果と被災形態を比較し、想定した被災原因が実際の原因として妥当であるかを検討する。

2. コンテナクレーンの被災状況

(1) コンテナ岸壁の構造とその被災形態

神戸港のコンテナ岸壁は摩耶埠頭を除き、そのほとんどがケーソンを用いた重力式岸壁である。図-1にその一例として、ポートアイランドのコンテナ岸壁の断面図を示す。重力式岸壁の場合、クレーンの海側レールはケーソン上の上部工に設置されている。一方、陸側レールは、この図のように埋立土の一部を地盤改良した基礎の場合と、鋼管杭による基礎の場合がある。

被災後はケーソンが海側に傾斜すると共に、最大6m程度海側にはらみだしており（六甲アイランド）、ケーソンの天端は最大で2m程度沈下している（六甲アイランド）。このようにケーソンが海側に変位したため、ケーソン背後の地盤は追随できず、陥没や亀裂が生じた。地盤改良による陸側レール基礎は周辺地盤と同様に沈下したが、鋼管杭による基礎は周辺地盤に比べ沈下量が小さく、クレーンの軌道桁下に空隙ができた。

(2) 被災時のクレーン配置とその被災形態

図-2に被災時のクレーン配置状況を、表-1に被災形態による分類を示す²⁾。神戸港には全部で55基のクレーンがあり、その内訳はレールスパン16~20m

キーワード：コンテナクレーン、弾塑性解析、
地震応答解析

*¹ 運輸省港湾技術研究所構造部、TEL:0468-44-5029

*² 三菱重工(株)広島研究所、TEL:082-294-3626

*³ 京都大学工学部、TEL:075-753-5077

*⁴ 長岡技術科学大学建設系、TEL:0258-46-6000

*⁵ (株)日建技術コンサルタント、TEL:06-744-7258

*⁶ 清水建設(株)土木本部設計第一部、TEL:03-5441-0597

*⁷ 住友重機械工業(株)搬送物流システム事業部、TEL:03-5488-8375

*⁸ 川鉄マシナリー(株)技術部、TEL:086-447-4634

級の中型クレーンが29基、スーパークレーンと呼ばれるレールスパン30m級の大型クレーンが26基である。また、六甲アイランドには25基、ポートアイランドには22基、摩耶埠頭には8基あった。

表-1は被災直後における調査結果であるが、この表から脚部への影響が若干みられるレベルⅡが22基、脚部への影響が顕著なレベルⅢが30基であり、被災形態としては脚部への影響が主であることがわかる。レベルⅢには、その脚が局部座屈したクレーンが分類されている。その後の詳細調査において、レベルⅡに分類されていたクレーンを吊り上げたところ、被災直後は脚スパンが広がっていたが、脚が弾性変形しているだけで、脚スパンが元に戻ったものも数基あった。

(3) 損傷部位からみた被災原因の推定

レベルⅢに分類したクレーンの損傷部位を整理すると、以下のように被災メカニズムや原因を推定できる。

①図-3に示すように、岸壁が水平変位したことにより、レールスパンが広がった。そのため、横行方向面内（レール直角方向）において脚が外側に広げられ（股裂き）、脚や水平材が集まる格点部近辺に座屈痕が生じた。

②強震動によりクレーンがロッキング振動を始め、一脚が浮き上がった時に、残りの3脚に大きな断面力が作用する。図-4に示すように、接地側の2脚には内側に閉じる反力が、浮き上がり側の接地している一脚には外側に開く反力が作用し、座屈痕が残る。

(4) 推定した被災原因の相関分析

神戸港埠頭公社が所有するポートアイランドおよび六甲アイランドのクレーン37基について、推定した被災原因の相関分析を行った。

レール方向別（上段）およびレール基礎別（下段）で分類した岸壁変位率とレールスパン拡大率の関係を図-5に示す。ここで、岸壁変位率とは岸壁水平変位量を岸壁水深で割ったものであり、レールスパン拡大率とはレールスパン拡大量をレールスパンで割ったものである。これらの図より、①岸壁変位率とレールスパン拡大率は、低いものの正の相関がある。②最大加速度の大きかった東西のレール方向が、南

北方向よりもレールスパン拡大率が大きかった。③レールの基礎によるレールスパン拡大率の相違は顕著ではない。

図-6に、レール方向別（上段）および脚スパン別（下段）で分類したレールスパン拡大率と脚スパン拡大率の関係を示す。ここで、脚スパン拡大率とは、横行方向における脚スパンの平均拡大量を脚スパンで割ったものである。これらの図より、④レールスパン拡大率と脚スパン拡大率に、正の相関があるクレーン群（脚スパンの拡大率が0%以上）と相関がほとんど見られないクレーン群（脚スパンの拡大率が-4~0%）がある。⑤相関があるクレーン群には、30m級のクレーンが多い。また、相関がほとんど見られないクレーン群には、16m級のクレーンが多い。

3. 解析による被災原因の検討

(1) クレーンの弾塑性解析

a) 解析方法

神戸港で被災したクレーンに類似した剛脚（客にピン構造が無く、一体で連続している）を参照し、3次元の解析モデルでクレーンの股裂き状態を想定した静的な弾塑性解析を行った。解析は、脚部を水平で且つ外側に強制変位させ、材料の降伏や部位の局部座屈と股開き量との関係を求めた。

b) 解析結果

図-7に、クレーン脚部の強制変位量とその反力の関係を示す。強制変位量が $\delta x=70\text{cm}$ 程で脚に局部座屈が発生し、変位が進につれて他の部位にも局部座屈が発生する。強制変位量が $\delta x=80\text{cm}$ になると脚が完全塑性域に達し、反力が増加しなくなる。これらの強制変位量は、脚スパンの約2~3%に相当する。

(2) クレーンの地震応答解析

a) 解析方法

地震動によるクレーンの応答特性やロッキングなどの動的挙動を検討するため、図-8に示す3次元の弾性解析モデルを作成し、脚の浮き上がりも考慮した地震応答解析を実施した。

このモデル作成には、神戸港で被災したクレーンに類似したクレーンを参照した。このクレーンは元々海側が揺脚（格点部直下の脚に、横行方向のみ回

転を許すピン構造がある)であったが、解析上不安定になるため、その揺脚が剛脚の本程度の曲げ剛性を持つものとした。この修正によって、クレーンの固有周期は $T=2.95\text{sec}$ から 2.79sec になった。

地震動にはポートアイランドの地表(KP+04)で観測された3成分の地震波を用い、クレーン脚基部に同時に入力した(横行:NS、走行:EW、上下:UD)。この解析で用いた自由地盤の地表上での観測地震加速度は、実際にクレーンに入力されるケーソンやレール基礎での応答加速度よりも小さいと考えられるが³⁾、解析を簡略化するためポートアイランドの地表観測波を用いた。

脚部の拘束条件は、まずクレーンの応答特性を調べるため、脚部をピンで拘束した。この状態で入力地震動を徐々に大きくし(段階加振)、四脚のうち最初に脚が浮き上がる(引き抜き力が自重と一致する)時刻での部材応力を求めた。

次に、神戸港で被災したクレーンを想定し、走行方向(レール方向:Y軸)のクレーン脚部は、半分の車輪にブレーキがかかっていたと仮定し、 $\mu=0.2$ 程度の摩擦係数を考慮した剛塑性並進バネをつけた。一方、横行方向(レール直角方向:X軸)は車輪フランジで拘束されているため、クレーン脚基部を固定した。上下方向(Z軸)に関しては、クレーンのロッキングによる脚部の浮き上がりを解析できるように、浮き上がりに対しては自由であるが、沈下に対しては剛な非線形並進バネをつけた。また、休止時に使用する逸走防止装置などのストッパーは考慮していない。

b)解析結果

図-9に、脚部をピンで拘束したクレーンが浮き上がろうとする(引き抜き力が自重と一致する)時刻において、格点部近辺に作用する最大圧縮応力(自重解析と地震応答解析による応力の和)、ならびにそれが許容応力に対する比を示す。この格点部近辺は大きな断面力が作用することもあり、SM490YAの鋼板を使用している。許容応力比についてはクレーン構造規格⁴⁾を参照し、地震時の許容応力に表-2の値を用いた。この図からわかるように、陸脚、水平材ならびに斜材が集まる陸側の格点部近辺に大きな応力が集中しているものの、許容応力を越えてはいない。

次に脚の浮き上がりを考慮した解析で、クレーン脚部における上下方向の反力時刻歴(圧縮:負、引張:正)を図-10に示す。時刻 $t=0\text{sec}$ における各脚の反力は自重によるものである。また、図-11にクレーン脚部における上下方向の変位時刻歴(浮き上がり:正、沈下:負)を示す。図-10の海脚L2では、 $t=7\text{sec}$ で反力が $R_{L2}=0\text{tf}$ になり、 $t=8\text{sec}$ で反力が衝撃的に大きくなっている($R_{L2}=695\text{tf}$)。これは、図-11の海脚L2に示すように、反力が $R_{L2}=0\text{tf}$ になると脚が浮き上がり始め、最大で $\delta_z=5.7\text{cm}$ 浮き上がった後、着地しているためである。その後、陸脚L4も同様に $\delta_z=3.5\text{cm}$ 程度浮き上がり、衝撃的に着地したことがわかる。またこれらの反力ならびに変位時刻歴から、 $t=7\sim 10\text{sec}$ にかけて大きな断面力が作用しており、脚の対角線上に卓越したロッキング振動が起きていることがわかる。

図-12に、クレーンが $t=7\text{sec}$ 以後にロッキング振動する際、格点部近辺に作用する最大応力(自重解析と地震応答解析による応力の和)を示す。この解析では、陸側の格点部近辺において内側フランジの応力が、クレーン構造規格の材料降伏点を3~12%程超えているところがあり、局部座屈が生じた可能性が考えられる。

図-12において許容応力比が最も大きい陸脚L3節点A($\sigma/\sigma_s=1.48$)の軸応力と曲げ応力の時刻歴を図-13に示す。この脚は走行方向軸周り、つまり横行方向面内の曲げ応力が卓越していることがわかる。

4. 解析結果と被災形態との比較

(1)クレーンの弾塑性解析

図-6に示したレールスパン拡大率と脚スパン拡大率に相関があるクレーン群(脚スパン拡大率が0%以上)では、その大半に股裂きを受けたような座屈痕が格点部近辺に残っていた。一方、クレーンの股裂きを想定した弾塑性解析の結果によると(図-7参照)、強制変位量が脚スパンの2%程度で格点部近辺に局部座屈が発生し、塑性ヒンジ化することがわかった。

上記の結果を総合すると被災形態をほぼ説明することができ、これらのクレーン群は股裂きが主原因で被災した可能性が高いと想定される。但し、これらのクレーン群においても、レール近傍にクレーン

の車輪がバウンドした痕跡が残っており、ロッキング振動の影響もあると考えられる。

(2) クレーンの地震応答解析

図-6に示したレールスパン拡大率と脚スパン拡大率に相関がないクレーン群（脚スパン拡大率が4～0%）では、すべてのクレーンにおいて脚を内側に閉じた際に生ずるような座屈痕が残っていた。クレーンによっては座屈痕が残っている脚数が異なり、四脚とも残っているクレーンもあった。一方、クレーンのロッキング振動を想定した地震応答解析によると（図-12参照）、横行面内の陸脚格点部近辺において、内側フランジの応力が材料降伏点を3～12%越えおり、脚の内側フランジで局部座屈が生じた可能性があることがわかる。

上記の結果を総合すると、四脚とも座屈したクレーンを除外すれば、被災形態をほぼ説明することができ、これらのクレーン群はロッキング振動により被災した可能性が高いと想定される。

5. おわりに

現在、クレーンの耐震設計は震度法⁴⁾（水平震度 $K_h=0.2$ ）で行われており、部材の大半は耐風設計によって決定されるといわれている。したがって、部材には $K_h=0.2$ 以上の耐力があったものの、兵庫県南部地震ではこれをはるかに上回る加速度がクレーンに入力し、大きな被害をもたらした。また、レールスパンが大幅に拡大するなど、クレーンの設計時に

は想定していない状況が生じた。ここでは、クレーンの股裂きおよびロッキング振動が主要被災原因であると想定して解析を実施し、それらの結果でほぼクレーンの被災メカニズムを説明できるのではないかと考えている。

今後建設が進む耐震性強化岸壁では、岸壁や背後地盤の耐震性が向上し、兵庫県南部地震レベルの地震が起こると、クレーンに入力する加速度が今回の地震よりも大きくなることが想定される。そのため、岸壁のみならずクレーンの耐震性についても検討を進めて行かなければならない。

なお、本文は土木学会鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会第7WGにおける活動の一環として執筆したものである。ここでの検討結果が、クレーンの耐震性向上の一助になれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 土木学会：港湾・空港・河川グループ調査報告、阪神大震災震害調査 緊急報告会資料、pp.73～83、1995年2月。
- 2) 港湾荷役機械設備耐震設計調査研究委員会：兵庫県南部地震による神戸港コンテナクレーンの被害、港湾荷役、Vol.40, No.2, pp.203～208、1995年3月。
- 3) 田中、稲富、飯塚：兵庫県南部地震によるコンテナ岸壁とガントリークレーンの地震応答解析、第23回地震工学研究発表会講演概要、pp.213～216、1995年7月。
- 4) 日本クレーン協会：クレーン構造規格、クレーン等各構造規格の解説、pp.7～10、1993年5月。

Damages and Structural Characteristics of Container Cranes due to the Great Hanshin Earthquake

Sachito Tanaka, Hisanori Abiru, Eiichi Watanabe, Masatsugu Nagai
Goro Matsui, Kenji Kuraishi, Shigehisa Maruyama, Sosaku Omi

Container cranes in the port of Kobe were much damaged due to the Great Hanshin Earthquake. The object of this paper is to introduce a state of the damages, such as a classification of the damages and damaged members of them. Moreover, this paper investigates primary causes of the damages by an elasto plastic analysis and a seismic response analysis. Finally, the causes and mechanism of the damages to cranes are discussed.

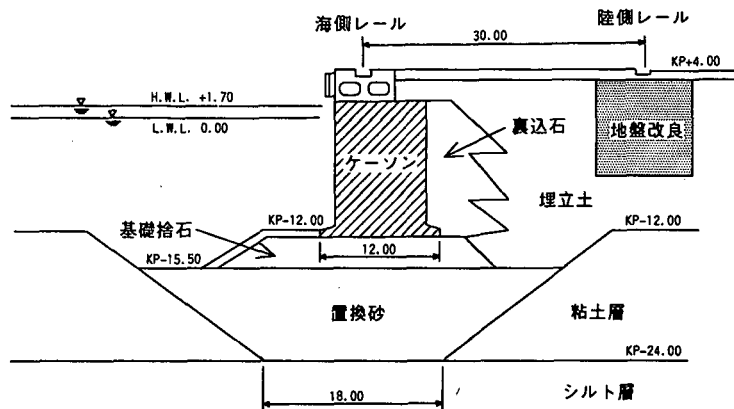


図-1 重力式コンテナ岸壁の断面図

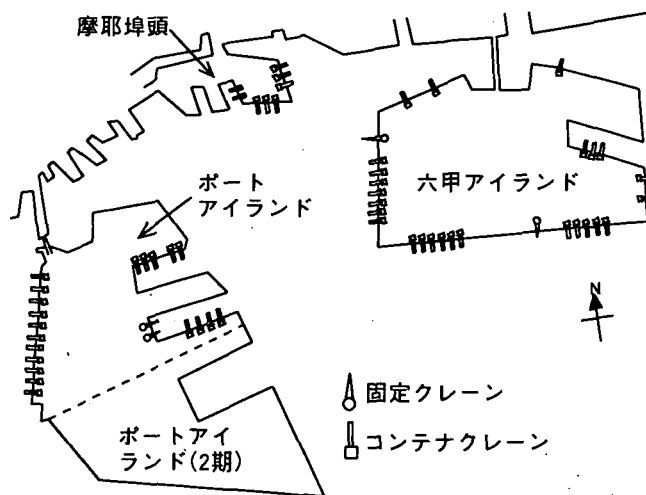


図-2 神戸港における被災時のクレーン配置

表-1 クレーンの被災形態による分類

	脚スパン30m		脚スパン16~20m級			合計
	R	I	R	I	摩耶	
I	0	0	0	0	0	0
II	4	0	1	11	6	22
III	14	7	4	4	1	30
IV	0	0	0	0	1	1
V	1	0	0	0	0	1
不明	-	-	1	-	-	1
合計	19	7	6	15	8	55

備考 I：脱輪しているものの脚部などへの影響が見られない、II：脚部への影響が若干見られる、III：脚部への影響が顕著、IV：ガーダーが損傷、V：全壊。

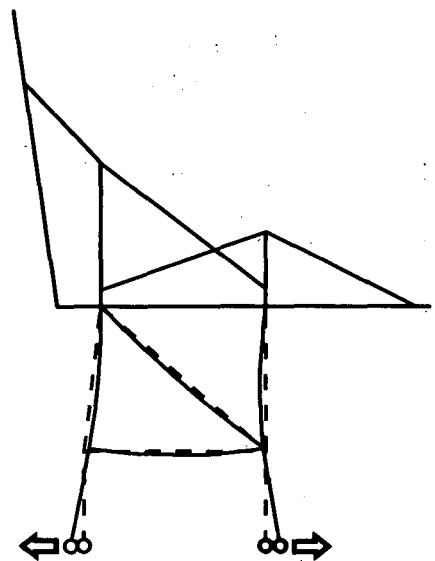


図-3 岸壁の変位によるクレーンの股裂き

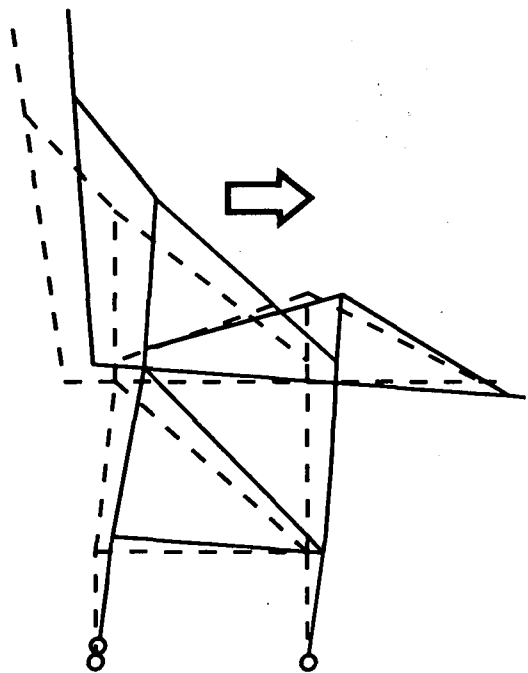


図-4 強震動によるクレーンのロッキング振動

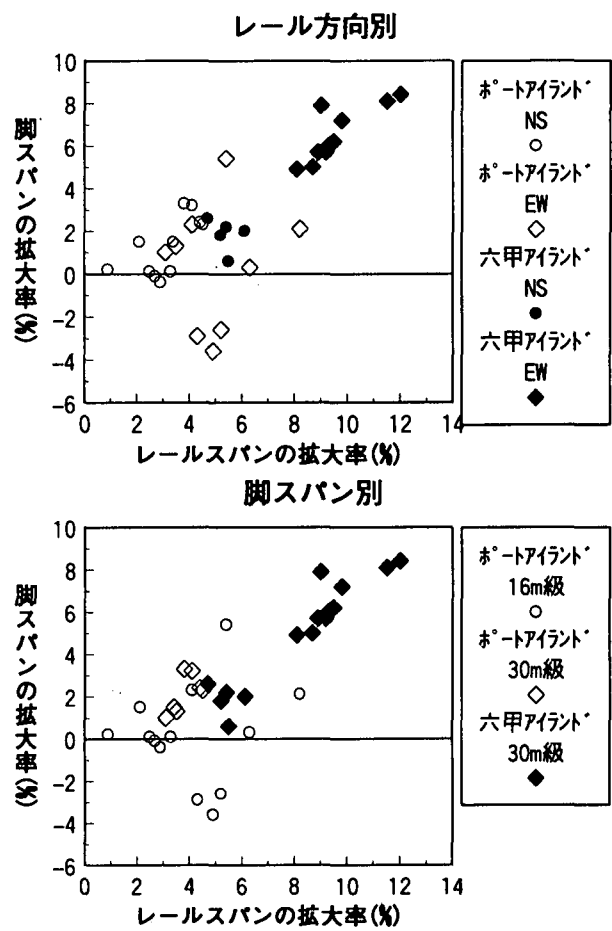


図-6 レールスパンの拡大率と脚スパンの拡大率

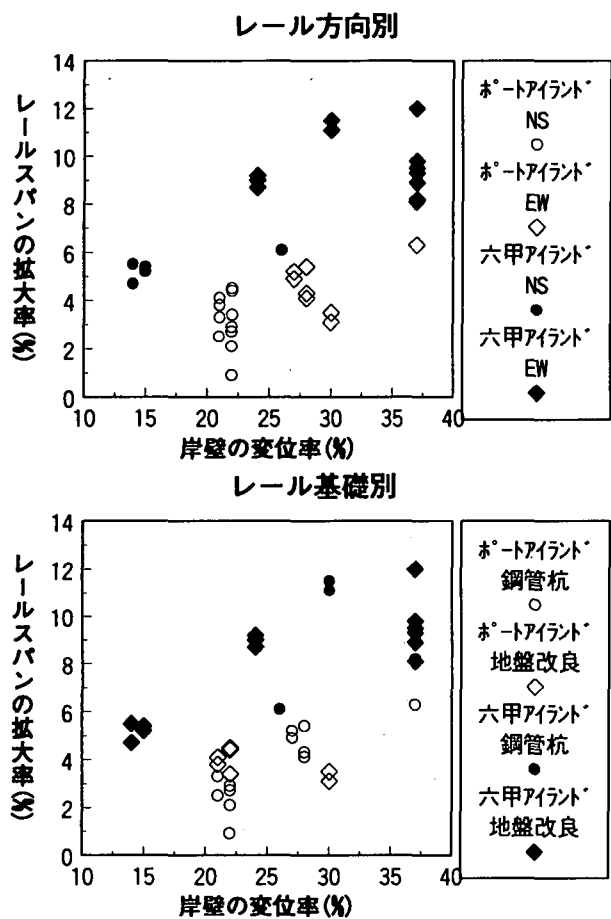


図-5 岸壁の変位率とレールスパンの拡大率

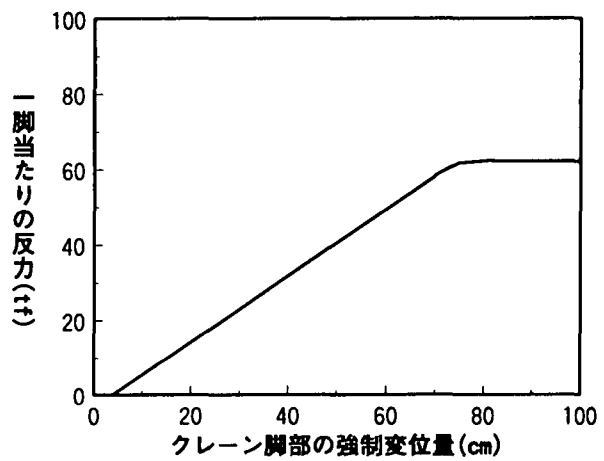


図-7 荷重変形曲線

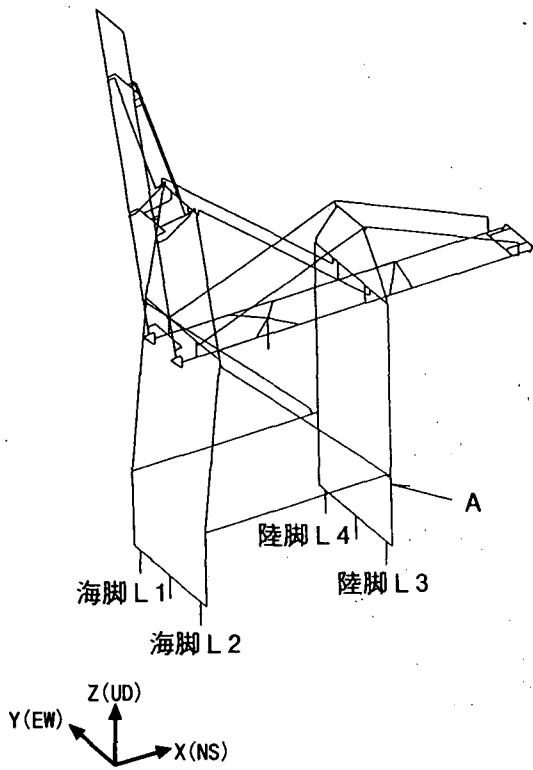


図-8 地震応答解析に用いた解析モデル

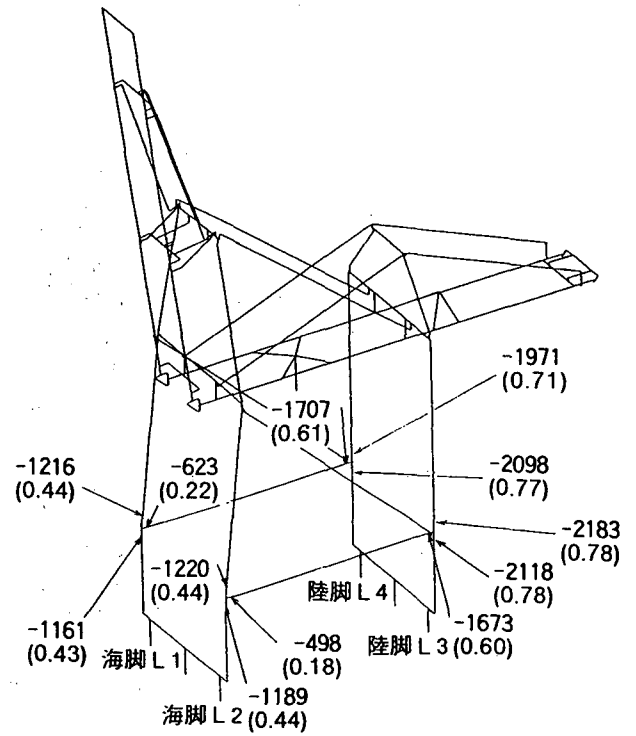


図-9 段階加振法における浮き上がり開始時の最大作用応力 (単位: kgf/cm^2 、括弧内は許容応力比)

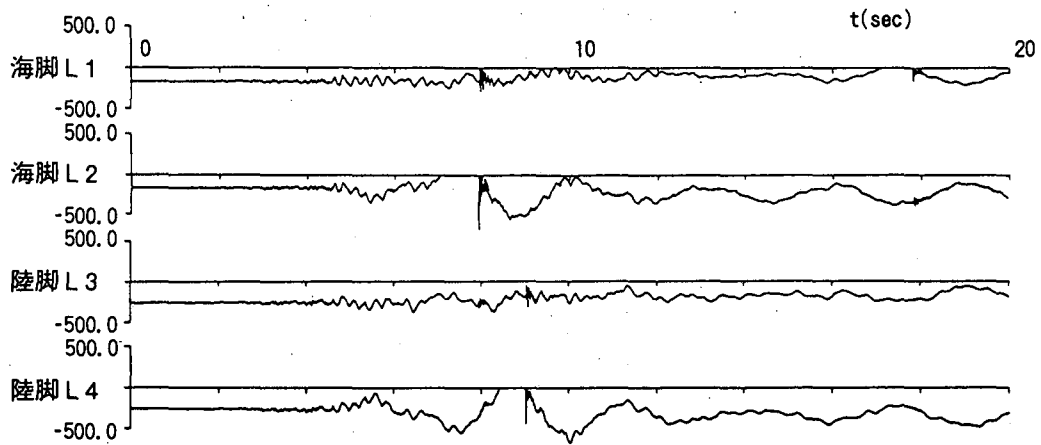


図-10 クレーン脚部の反力時刻歴 (単位: tf、引張が正、圧縮が負)

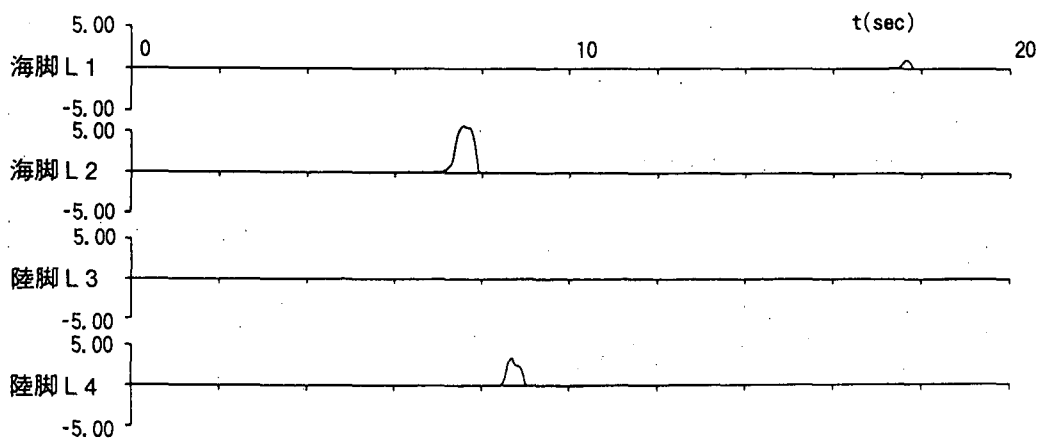


図-11 クレーン脚部の変位時刻歴 (単位: cm、浮き上がりが正、沈下が負)

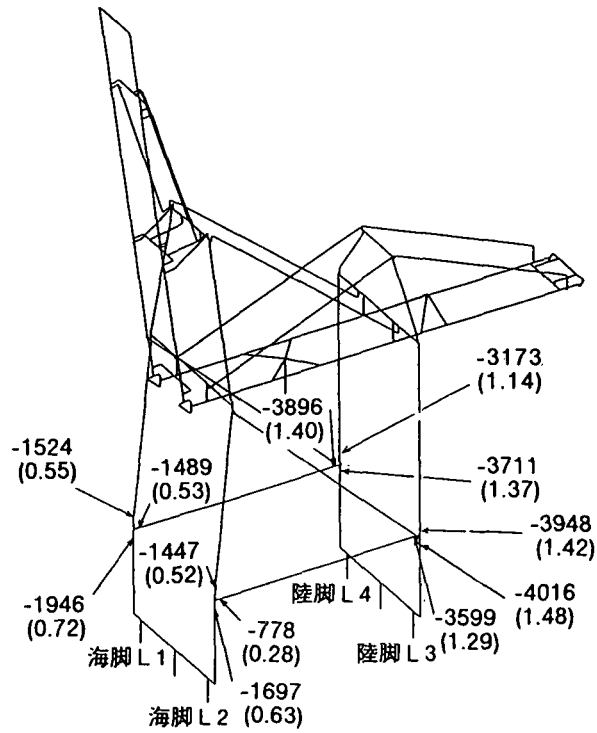


図-12 ロッキング開始後の最大作用応力 (単位: kgf/cm²、括弧内は許容応力比)

表-2 クレーン構造規格⁴⁾による地震時の許容応力

		SM490YA	
		t ≤ 16	16 < t ≤ 40
引張強さ		5000	
降伏点		3700	3600
許容 応力	軸・曲げ引張	3207	3120
	軸・曲げ圧縮	2788	2713

備考 t: 板厚(mm)、単位: kgf/cm²。

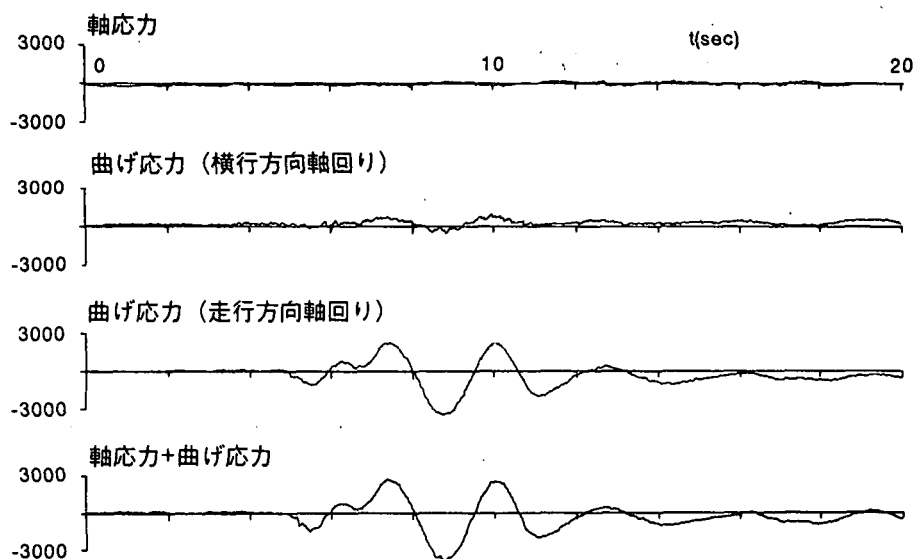


図-13 節点Aにおけるロッキング開始後の軸応力と曲げ応力の時刻歴 (単位: kgf/cm²)