

第5章 コンテナクレーンの新耐震設計法について

第1節 脚の浮き上がりを考慮した設計の必要性

ここまでレベル2地震動等の大規模地震時におけるコンテナクレーンの挙動について、模型実験、簡易モデル及びFEMにより検討してきた。その結果、レベル2地震動が発生した場合には、コンテナクレーンに脚の浮き上がりが発生する可能性があることを確認した。特に模型実験においては、現実に関定の条件の下で脚の浮き上がりが生じることを確認した。一方、これまでのコンテナクレーンの耐震設計では、脚が浮き上がることを想定しておらず、詳細な解析を行う場合でも暗黙の中に脚が基礎のレールと固定された条件で実施されていた。本研究では、静的載荷実験を脚が固定された条件と、脚が自由な条件とで実施し、部材への影響を比較するとともに、動的加振実験により脚の浮き上がりを再現し、その際の加速度、部材力等の計測結果について検討した。

1-1 静的載荷実験による検討

まず、水平力の作用方向を海側からと陸側からとの2種類のケースで比較した。第3章の実験結果では、海側からの浮き上がり実験で脚の浮き上がりを再現できてはいないものの、同一水平力レベルでは脚及び水平材に発生する曲げモーメント、脚に発生する軸力は、水平力の作用方向の別に係わらずほぼ同レベルであった(図-3.2.9~3.2.14参照、うち図-3.2.9を図-5.1.1に再掲)。実機のクレーンでは、走行方向から見た場合に主たる構造部材、特に上部構造は左右(海陸側)対称の形状ではなく、またそれぞれに重心位置が異なるため、水平力のレベルと部材力との関係は異なると予想される。特に水平材は上部構造のトラス構造の一部を構成しているが、結果から見るとその影響は小さかった。この実験結果からは今回対象としたようなコンテナクレーンであって、また門型の脚

構造を有する場合、重心位置に作用する水平力に対しては、その方向性に対する応答の差異は顕著なものではないと考えられる。さらにこのことは、コンテナクレーンの挙動が主として重心位置の加速度（水平力）と脚の特性によって表現する事が可能であるということを示している。

また、次に脚の支持条件を自由な条件とレールに固定した条件とで部材に発生するモーメント及び軸力を比較した（図-3. 2. 16～3. 2. 21参照）。第3章の実験結果では、脚が自由な条件下での実験において脚が浮き上がるまでの曲げモーメント、軸力はどちらの結果も大きな差はなかった。但し、脚の曲げモーメントは全てのケースで脚固定条件のほうがやや小さい値を示している（図-3. 2. 16を図-5. 1. 2に再掲）。これは脚をレールに固定するための治具と脚との取り付け部分が脚のモーメント長を短くする作用を果たしたためと考えられる。今回の実験においては、脚が浮き上がらないよう、クレーンをレールに固定する際、クレーンのシルビーム上に延ばしたアームの先とレールとを固定金具により固定した。図-5. 1. 3に脚部の固定位置を示す。A点が車輪先端、B点が固定位置、C点が歪ゲージ位置、D点が脚部上端としている。脚が自由な場合は、車輪先端（A点）を支点とした曲げモーメントを測定しているが、脚を固定した場合は、固定した点（B点）が支点となり、B点からの曲げモーメントを測定していることになる。よって、固定した実験結果の曲げモーメントについて、脚で $\overline{AC/BC} = 1.19$ 倍、水平材で $\overline{AD/BD} = 1.13$ 倍の補正が必要である。この補正を行えば、脚の固定条件に係わらず、脚および水平材の曲げモーメント、脚の軸力はほぼ同程度となる。しかし、脚が固定された条件では脚がレールから離れることはないため、脚の浮き上がりによるモーメントや軸力の激しい変化は発生しなかった。これらの結果から、レベル2地震動により脚の浮き上がりが予想されるような条件下では、脚が固定された条件で設計することは不適切であることがわかった。特に脚に作用する曲げモーメントが浮き上がり後に大きく異なる値となることは、部材設計において十分考慮しなければならないことであると言える。また、逆に脚の

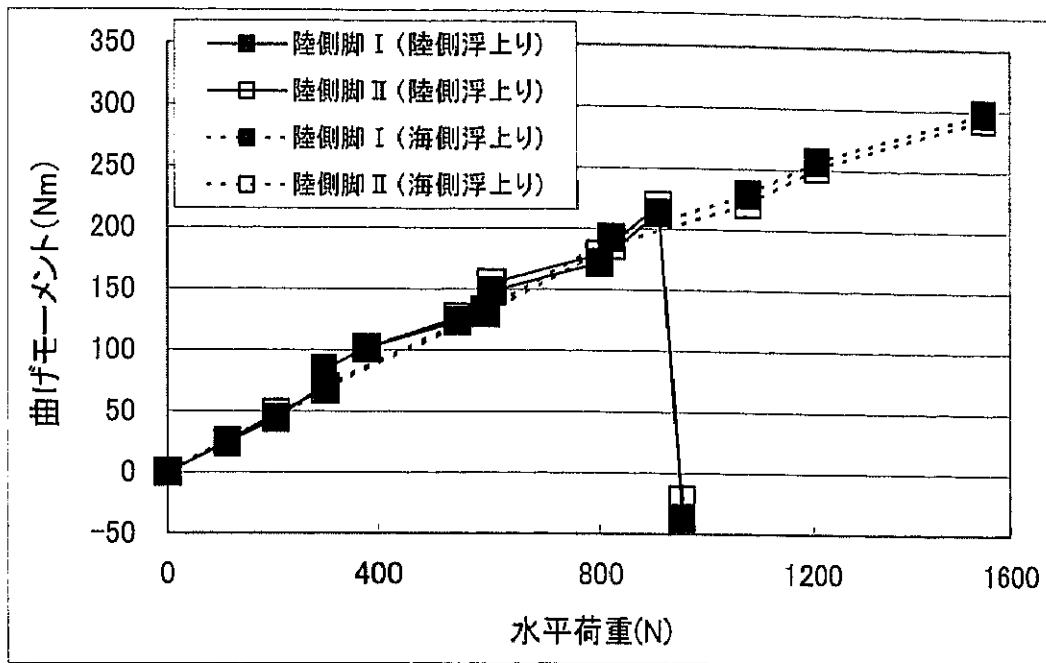


図-5. 1. 1 水平力の作用方向による比較(図-3. 2. 9再掲)

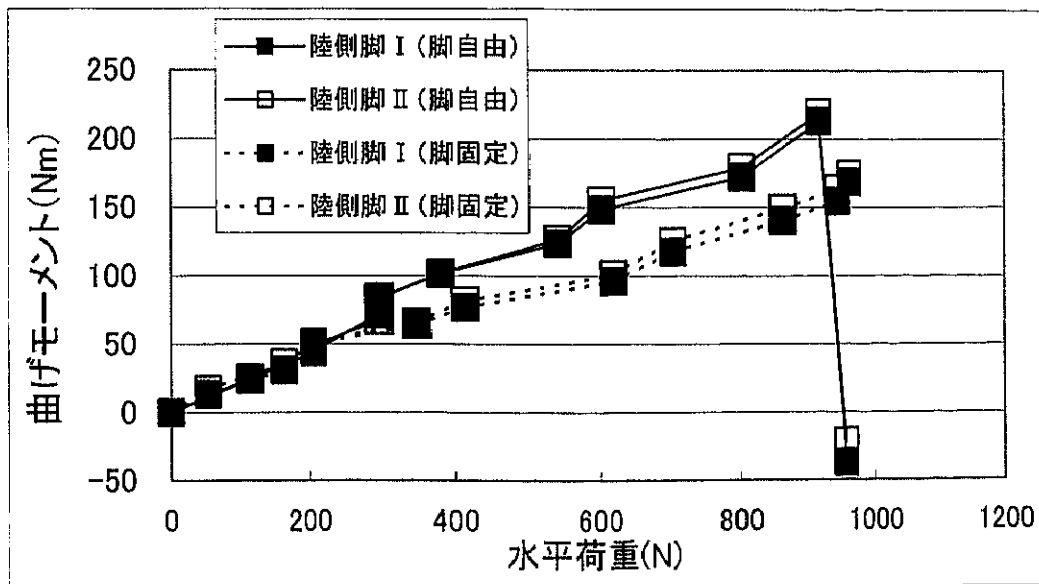


図-5. 1. 2 脚の支持条件による比較(図-3. 2. 16再掲)

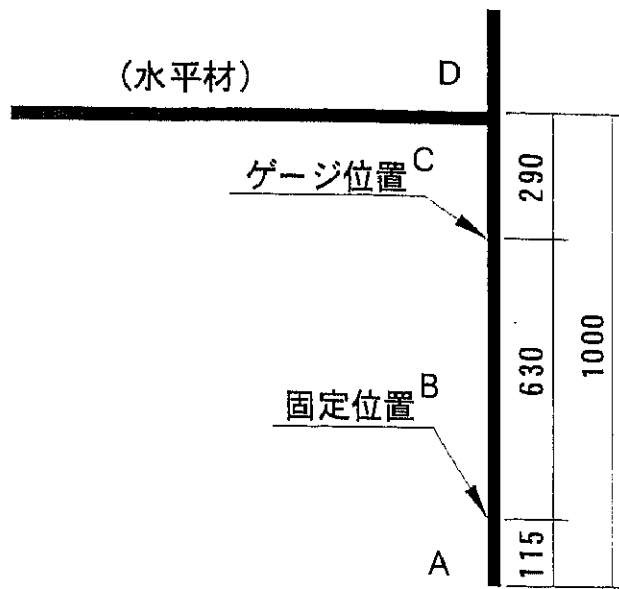


図-5. 1. 3 脚の固定によるモーメントの補正

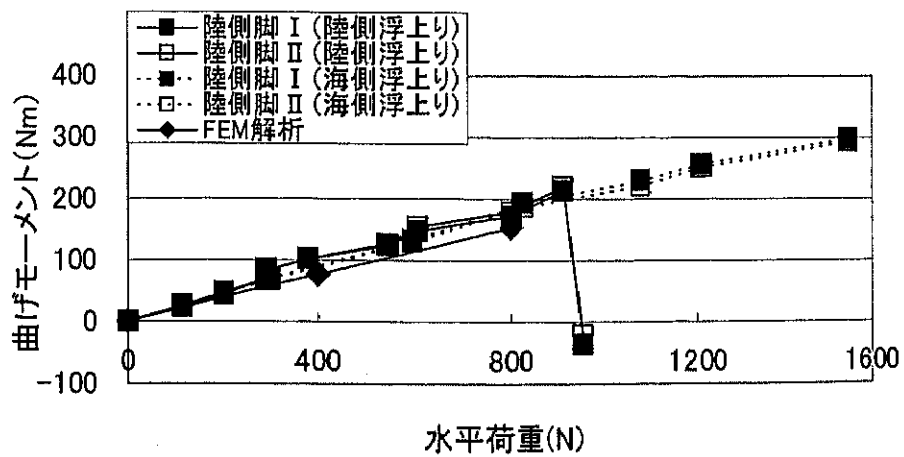


図-5. 1. 4 実験結果とFEMの曲げモーメントの比較

浮き上がりが生じる時点以前の挙動を検討する目的であれば、脚を固定した条件で検討することもある程度は可能であると言え、このように限定した目的であれば脚の支持構造は厳密にモデル化する必要はないと考えられる。

また、静的載荷実験の結果の妥当性を検証するため、静的な FEM 解析を実施して、発生する曲げモーメントを比較した。陸側からの浮き上がり実験における陸側脚の曲げモーメントを比較した結果を図-5. 1. 4に示す。解析結果と実験結果は概ね一致しており、静的載荷実験の結果は概ね妥当なものであったと考えられる。しかし、全体的傾向としては実験結果よりも解析結果がやや小さめの値となっている。この原因としては、実験において傾斜角度に敏感であったため計測誤差があった可能性があること、模型の製作上部材間の継ぎ手や組立上の継ぎ手などが、水平材と脚の接合部付近及びその上部に集中し、これらの複雑な形状の影響が出た可能性があること、及び走行装置部分の形状については解析上全く考慮できないことなどが考えられる。但し、今回の静的実験の目的は、重心位置での応答加速度（水平荷重）がクレーンの変形特性の代表値となりうるかどうかを検討すること、及び動的な条件と静的な条件下での挙動の差を検討することを主としていたこと、並びに模型の製作に当たっては振動性状の再現を第一に考えたことから、比較の結果曲げモーメントはやや大きめではあるものの、その目的に照らして概ね妥当なレベルであったと考えられる。

1-2 動的加振実験による検討

正弦波及び八戸波を用いた動的加振実験と一連の静的載荷実験における部材の曲げモーメント及び軸力を比較した（図-3. 2. 22～3. 2. 29参照）。実験結果を見ると、若干のばらつきはあるものの脚及び水平材の曲げモーメントは、同一荷重 P_0 （加速度）レベルに対してどの結果もほぼ同程度または静的載荷実験による値がやや小さめの値を示している。また、脚の浮き上がりが発生する以前には荷重 P_0 の増加に対するモーメントの増加傾向も同様の結果となっている。

従って、脚等の曲げ変形に着目した場合にはクレーンの挙動は静的に取り扱った場合でも妥当な結果を得ていると言える（図-3. 2. 22を図-5. 1. 5に再掲）。また、脚が浮き上がる場合の水平荷重 P_0 もそれぞれのケースで比較しても同レベルであり、脚の浮き上がりは動的な検討を行わないでも、静的に検討することが可能であると考えられる。この結果は、脚の浮き上がりの判定条件を考える上で、非常に重要な結果である。また、動的加振実験の曲げモーメント等の計測結果は、水平荷重が約 650 N 以上の範囲で、それまでの傾向から見るとやや小さめの値となる傾向が見られる。脚の浮き上がりが発生するまでは、線形な状態であることから、実験で見られたこの現象は、計算モデルには乗らない模型実験又は実機に特有の現象であると考えられる。その原因として、最も考えられるのは車輪部分のガタツキ及び滑りである。全てのケースにおいて確認はできないが、PI 0.3 倍波では実際にガタツキが発生していたと考えられる計測結果もある。また、その他にも実験においては空気減衰等の影響も考えられ、これらの原因で曲げモーメント等の値がやや低く計測される結果となったと考えられる。

また、水平荷重 P_0 が同一レベルの曲げモーメントの値を脚と水平材とで比較すると、脚の値が水平材の値の 3 ~ 4 倍になっている。横行方向の荷重の作用に対して、静的にも動的にも脚の曲げ変形が支配的であることを示している。

同様に軸力についても動的加振実験と静的載荷実験とで比較を行った（図-3. 2. 30~3. 2. 33参照）。軸力では正弦波と八戸波では同一加速度のレベルで同程度の軸力の値を示すが、静的載荷実験の値は特に海側脚でこれらの動的加振実験の結果よりも低い値を示している。

一方、今回の一連の実験で大きな歪みが発生したのは脚においてであり、その最大の歪みは約 600 μ であった。模型の部材には STK400、STKR400 を使用しており、その降伏点は 245N/mm²（歪みレベルで約 1190 μ ）である。これらの値から部材における歪みの計測位置を考慮しても、今回の実験中、部材の歪みは塑性化するレベルには至っていなかったと考えられる。また、静的載荷実験と動的加振

実験の曲げモーメントの結果はほぼ同程度の値であったことから、歪みレベルも双方の実験でほぼ同じレベルの値であったと考えられる。また、実機での歪みレベルは部材設計の問題であり、現状のクレーンの設計においても部材の塑性化は許容しない設計が原則とされていることから、本論文では設計上は部材を塑性化させないことを前提として検討するものと考えた。

今回の実験では、実際の地震波を用いて脚の浮き上がりを確認した。従って、レベル2地震動が発生した場合には、現実のクレーンでも脚の浮き上がりが発生する可能性が高いと考えられ、耐震設計においても、脚の浮き上がりを何らかの形で考慮する必要があると言える。脚の浮き上がりそのものは過去に金山¹⁾らが実験で確認しているが、金山らの実験では各部材の挙動まで踏み込んだ議論を行わず、また浮き上がりのレベルを設計でどう評価するかは検討していないため、今回の実験では部材レベルから脚の浮き上がりまでの挙動を追跡している。条件の違うそれぞれのケースにおいて、軸力はやや異なるものの、曲げモーメントのレベルでは脚の浮き上がりまでに至る部材の曲げ変形に係わる挙動は同様であること、水平荷重 P_0 が逐次増加（ほぼ単調増加）していった結果、脚が浮き上がる場合の水平荷重 P_0 （加速度）はほぼ等しいことから、脚の浮き上がりは重心位置の水平荷重 P_0 又は最大応答加速度によって表現することが可能であると考えられる。

一方、加速度の時刻歴を見る（図-3. 2. 34~3. 2. 37参照）と、脚の浮き上がりが生じないレベルでの応答は、主としてクレーンの2次モード（横行方向）に相当すると考えられる振動（固有値解析では周波数 2.19Hz）が比較的規則的に発生している。また応答に含まれる比較的高周波の成分は、2次モード以外の高次のモードによる振動成分と考えられる（図-3. 2. 36を図-5. 1. 6に再掲）。脚の浮き上がり現象は、これまでの静的載荷実験からもクレーンに作用する水平方向の荷重に対して、クレーンが脚の曲げ変形を主なモードとする挙動を呈した結果として生起される現象であると考えられる。脚の浮き上がりが応答加速度の

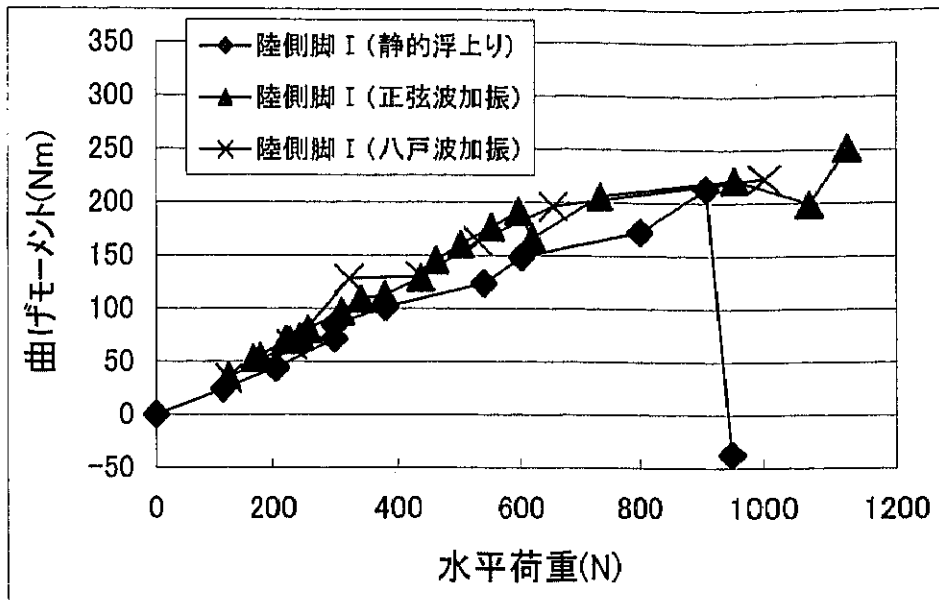


図-5. 1. 5 動的な条件と静的な条件の比較(図-3. 2. 22再掲)

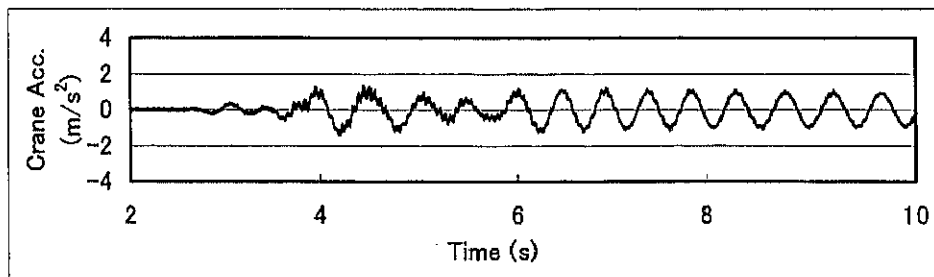


図-5. 1. 6 応答加速度の時刻歴(八戸2倍波:図-3. 2. 36再掲)

最大値で評価できると仮定すると、その値は横行方向の脚の曲げ変形に起因するものでなければならず、その他の脚の曲げ変形に寄与しない成分の影響が大きい場合には、最大応答加速度は過大評価になるおそれがある。しかし、実際には応答加速度にはこれらの成分が含まれているため、結果として得られた応答加速度は十分慎重に検討する必要がある。これは前述した動的加振実験と静的載荷実験において動的加振実験の結果が大きめの値となる一つの要因であると考えられる。

また、検討は港湾施設の耐震設計で最も一般的な八戸波を用いたが、大船渡波、ポートアイランド (PI) 波とも比較を行った (図-3. 2. 38~3. 2. 59参照)。クレーン模型の固有振動数は実測から 2.19 Hz であり、第 3 章の図-3. 1. 8 の各地震波のフーリエスペクトルを見ると、八戸波はクレーンの固有振動数に近い成分が大きく、クレーンが影響を受けやすい地震動であると言える。また、大船渡波は逆に固有振動数周辺の成分は八戸波ほど大きくないため、クレーンへの影響は八戸波ほど大きくないと予想される。PI 波はその中間的な性質を持つと考えられる。PI 波の実験結果を見ると、概ね八戸波の場合と同様の結果を得ている。脚の浮き上がりに至る曲げモーメント・軸力の変化、最大応答加速度の変化、及び脚の浮き上がりを生じる最大応答加速度などは八戸波の結果とほぼ同様である。但し、クレーンの 2 次モードに起因すると考えられる振動の他に八戸波で見られた高周波の成分は、PI 波ではあまり明確には見られなかった。一方大船渡波の実験結果では、同レベルの最大応答加速度の出た 4 倍波でも脚の浮き上がりを生じなかった (図-3. 2. 37、3. 2. 52、3. 2. 55を図-5. 1. 7に再掲)。また、高周波の成分は逆にかなり明確に観測された。大船渡波を入力しても脚の浮き上がりを生じなかった理由としては、この高周波成分の影響が考えられる。それぞれの地震動に対する応答加速度のフーリエ解析を行った結果を図-5. 1. 8に示す。2.19 Hz にクレーンの 2 次モードによるスペクトルの最大のピークがある。図は比較が簡単なように、それぞれの地震波に対してこのピーク値が概ね等

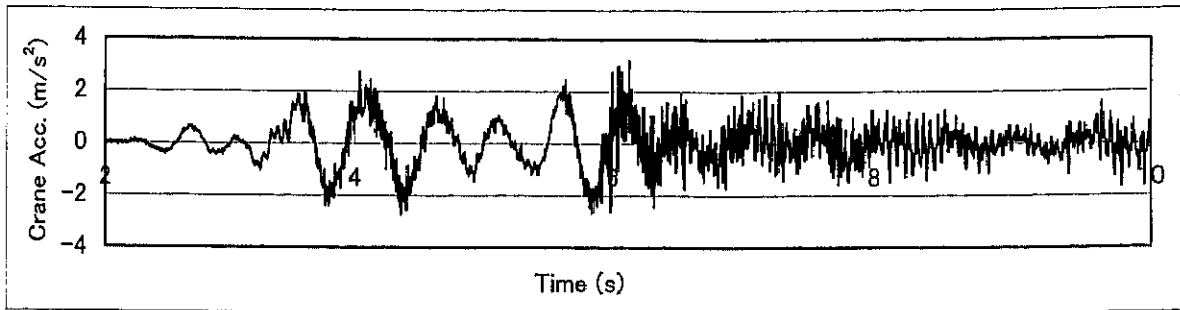


図-5. 1. 7(a) 重心位置の応答加速度(八戸3. 5倍波:図-3. 2. 37再掲)

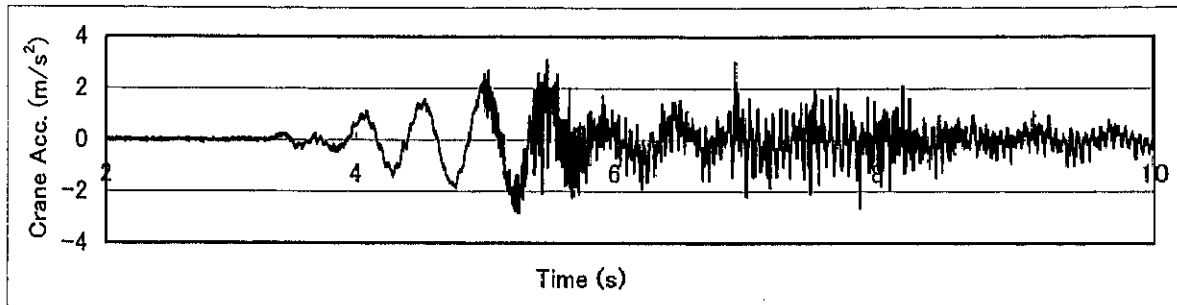


図-5. 1. 7(b) 重心位置の応答加速度(PI 0. 4倍波:図-3. 2. 55再掲)

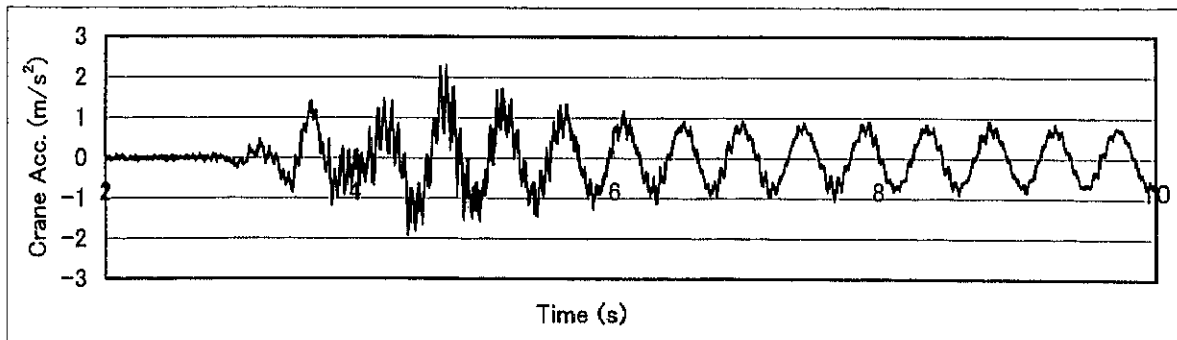


図-5. 1. 7(c) 重心位置の応答加速度(大船渡4倍波:図-3. 2. 52再掲)

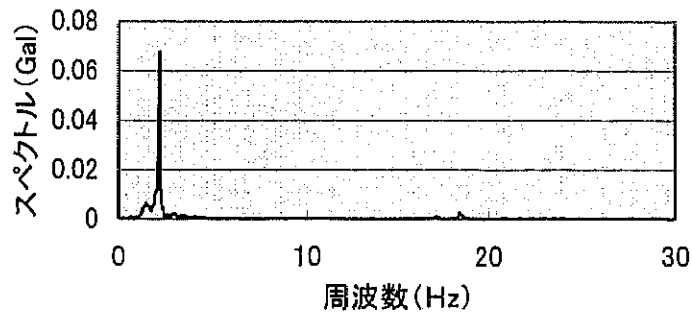


図-5. 1. 8(a) 応答加速度スペクトル(八戸波)

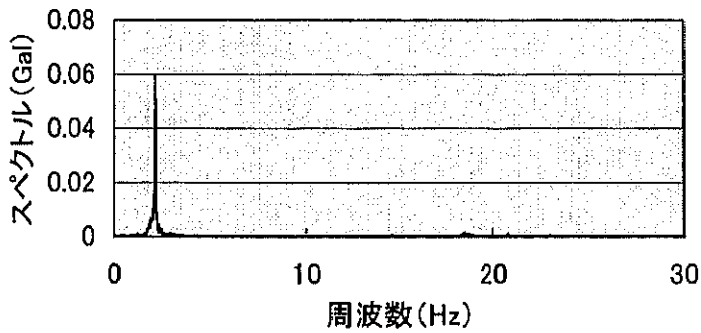


図-5. 1. 8(b) 応答加速度スペクトル(PI波)

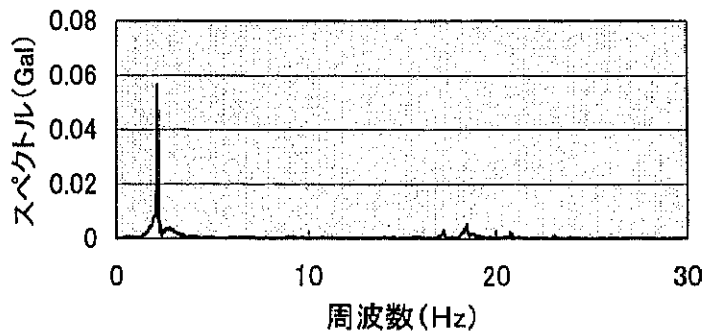
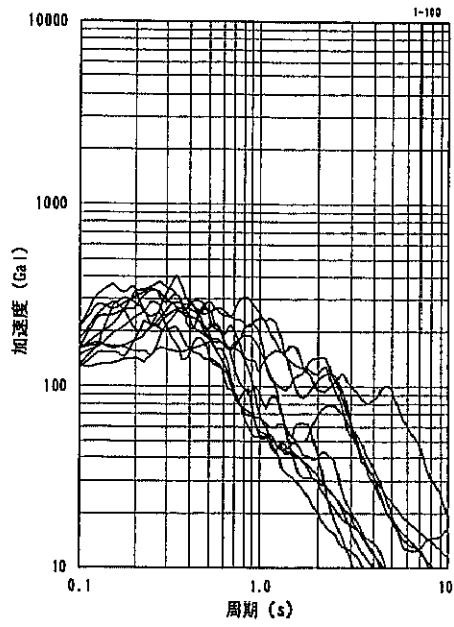


図-5. 1. 8(c) 応答加速度スペクトル(大船渡波)

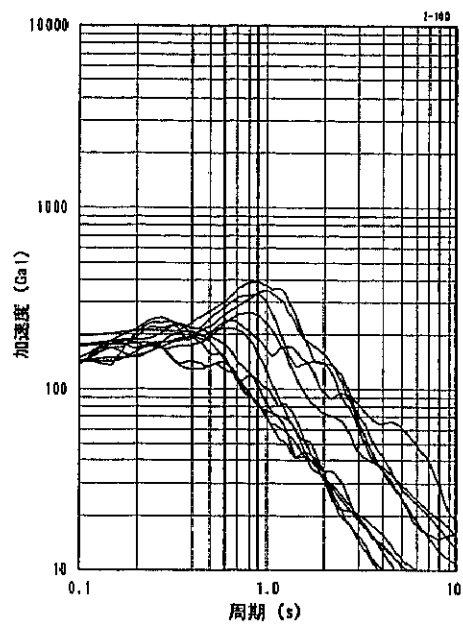
しい値となるような入力の最大加速度を選んでいる。その結果、18 Hz 付近に第2のピークがあることがわかった。これは、今回の模型では、表-3. 1. 2の固有モードのうち第11次モードに相当し、ブームを撓らせながら上下に振るモードに当たり、脚の曲げ変形には大きな影響のないモードである。この振動成分が実験結果に見られた高周波成分であると推定できる。各地震波で、この第2のスペクトルのピーク値と、2次モードのピーク値の比率を求めると、約9.5%（大船渡波）、4%（八戸波）、2%（P I波）程度であり、八戸波、P I波では小さいが、大船渡波では10%近い比率となっている。大船渡波ではこの影響で浮き上がりが生じなかったのではないかと考えられる。以上のことから、各地震波による浮き上がりに対する影響には若干の違いはあるものの、八戸波、P I波についてはほぼ同様の評価が可能であること、また大船渡波については、浮き上がりの際の最大応答加速度の評価としては安全側の結果となるが、浮き上がりの判定を行うためには振動モードのより詳細な検討が必要であると考えられる。

今回の検討に用いた地震波には、基盤波を使用している。一方、現実のコンテナクレーンは地表面に設置されており、厳密には個々の設置地点で地表面波に対して検討が行われるべきである。しかし、そのためには具体的な地盤構造に対する地盤応答解析が必要であり、その解析は設置地点の地盤の特性に大きく左右される可能性がある。そのため、今回の検討では、地盤の影響を避けるため基盤波を用いたものである。

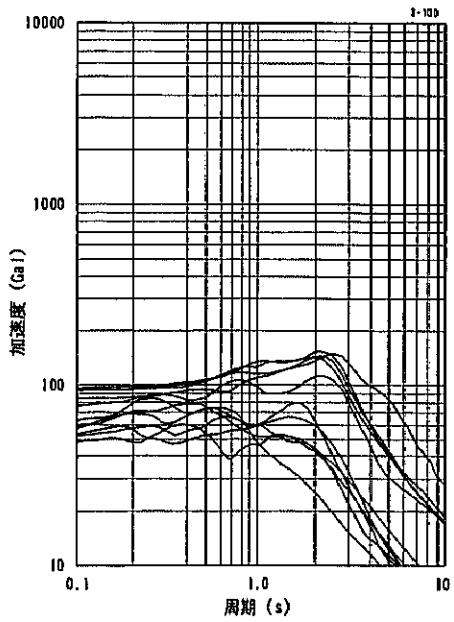
一方、これまで港湾地域における一般的な入力地震動の特性についての研究も進められている。図-5. 1. 9は、横田ら²⁾による栈橋を例とした地盤種別の加速度応答スペクトルの算定結果である。八戸波、大船渡波を含む11波の地震波に対して、入力最大加速度100gal、地盤の条件を表-5. 1. 1とした場合の加速度応答スペクトルを算定したものである。今回のようなオーバーパナマックス級コンテナ船を対象としたコンテナターミナルは、現在東京湾等の三大湾地域を中心として整備が進められており、その場合には地盤は概ね図-5. 1. 9のⅢ種地



(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤

図-5. 1. 9 地盤種別加速度応答スペクトル (栈橋)

盤と考えられる。この図から全体的な傾向を見ると、三種地盤の場合には、周期の短い波はあまり増幅されないが、クレーンの固有周期（約2秒）近傍では幾分値が大きく、具体的な検討に当たっては地盤の特性を十分考慮することが必要であると言える。

表-5. 1. 1 地盤条件

地盤種別	地盤の固有周期	減衰定数
I種地盤	0.11s	0.1
II種地盤	0.33s	0.2
III種地盤	1.08s	0.3

1-3 脚の浮き上がりの判定条件

以上の静的載荷実験及び動的加振実験の結果から、脚の浮き上がりが重心位置の最大応答加速度に依存しているのではないかと推定できるが、式(3.31)に示す静的なモーメントの釣り合いから求めた算定式の結果、静的載荷実験の結果及び動的加振実験の結果から浮き上がりを生じたケースの水平荷重及び最大応答加速度を表-5. 1. 2に示す。

表-5. 1. 2 浮き上がり限界荷重

検討ケース	算定式 ¹⁾	静的実験	八戸波	P I 波	大船渡波 ²⁾
水平荷重(N)	1058	954	1003	968	(1078)
最大応答加速度 (m/s ²)	3.3	3.0	3.2	3.1	(3.4)

注1) 算定式は式(3.31)

注2) 大船渡波では脚の浮き上がりは生じていない。

これらの数値は大船渡波を除いて全て算定式の 1.01 ~ 0.94 倍の範囲に収まっており、本論文で提案している算定式が、脚の浮き上がりの一つの基準になりうることを示していると考えられる。

但し、全ての実験は入力及び応答加速度の値に対して離散的に実施しており、連続的にスイープ実験を行っているわけではなく、真の浮き上がり時の応答加速度は表の値よりも幾分小さな値である可能性もある。しかし、応答の時刻歴をみると、大きな値を示すのは極めて瞬時的であり、全体としては浮き上がり前と同レベルの応答にとどまっている。また、脚の浮き上がり現象は、クレーン全体系に大きな加速度が作用することによって、通常の4脚よりも少ない脚で全体を支えることにより、不安定になり、系の持つ固有周期が長周期化することによって、過大な水平力を逃がしている現象であるとも考えられる。

また、前項で述べたとおり、応答加速度波形はクレーンの2次モード以外の成分も含んだ値であるので、この振動成分による影響について以下に検討を行う。表-5. 1. 2に示すように、設計に用いるそれぞれの地震波に対する結果では、脚の浮き上がり時の応答加速度が異なっている。実験結果の応答波形を検討すると、各地震波で最も大きく異なるのが、前述した約 18Hz 付近の振動成分の振幅であることが観測される。これは固有値解析から見ると脚の変形に大きく影響しない上部構造の振動モードであり、脚の曲げ変形が浮き上がりの重要な要因と考えると、重心位置の変動にとって雑音成分となり得るモードである。また、スペクトル解析から見ると約 2Hz の第1のピークに次ぐ第2のピークとなっており、全体の中でも影響の大きいモードであると推測される。また、実験結果からこの振動成分が大きいほど脚の浮き上がり時の加速度も大きいことが観測されている。八戸 3.5 倍波の応答加速度の結果について 18Hz を中心にこの振動成分の影響を除去 (16 ~ 20Hz バンドブロック処理) した結果を図-5. 1. 10に示す。最大応答加速度は処理前の 3.2m/s^2 から 3.1m/s^2 に低下した。各地震波について同様の処理をした結果の一覧を表-5. 1. 3に示す。

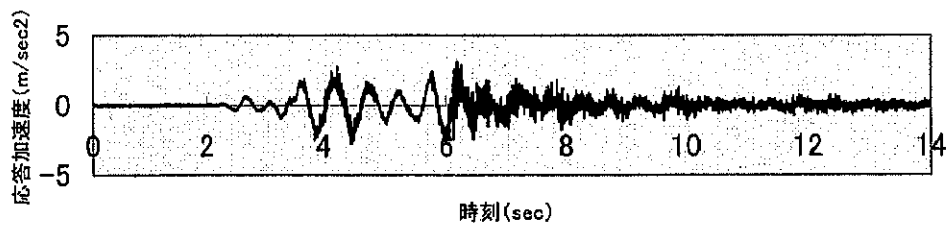


図-5. 1. 10 重心位置の応答加速度
(八戸3.5倍波:16-20Hzバンドブロック)

表-5. 1. 3 バンドブロック処理後の脚の浮き上がり限界加速度

地震波	八戸波	P I 波	(大船渡波)
実験結果	3.2	3.1	(3.4)
バンドブロック処理後 (16 ~ 20Hz)	3.1	3.1	(2.6)

注) 大船渡波は浮き上がりを生じていない。単位は m/s^2

結果を見ると、バンドブロック処理後は八戸波及びP I 波についてはともに $3.1m/s^2$ となり、また脚の浮き上がりを生じなかった大船渡波については $2.6m/s^2$ となっており、実験で十分な応答加速度の値が出ていながら脚が浮き上がらなかった結果を説明できると考えられる。これらの結果は静的な実験との比較においても妥当なレベルとなっている。従って上部構造に起因する 18Hz 付近の振動成分の影響を除去した $3.0 \sim 3.1m/s^2$ が今回のクレーンにおける脚の浮き上がり限界であると考えられる。この値は、式 (3. 31) により検討する場合と比較すると約 1 割小さい値である。これは、算定式が、クレーンを剛体と考え、脚の曲げ変形に伴う重心位置の変位を考慮していないこと、及び地震波の動的な影響を考慮していないことなどが主な原因と考えられる。また、この算定式によらずクレーンの構造を再現し、静的解析を実施して浮き上がり限界を算出することも考え得るが、簡易な静的解析では現実に部材の存在しない重心位置の加速度を検討することは困難であり、また解析の実用性にも問題がある。従って、静的な実験結果も考慮し、設計に用いる浮き上がり限界荷重 $W_{CR,d}$ は、安全率 γ_s を用いて式 (5. 1) のように表すことが適切であると考えた。

$$W_{CR,d} = W_{CR} / \gamma_s \quad (5. 1)$$

$W_{CR,d}$: 浮き上がり限界荷重の設計用値

W_{CR} : 浮き上がり限界荷重 (= P_{s2} ; 式 (3. 31))

γ_s : 安全率

この場合の γ は、表-5.1.2、5.1.3の値を考慮して、1.1を暫定値として置くものとする。

第2節 解析モデルの適用性

2-1 簡易モデルの適用性

前節までの検討結果から、脚の浮き上がりを生じる時点までは、脚が自由であるか固定されているかの脚の支持条件の違いは、クレーン全体の応答に差がないことがわかっている。また、水平荷重の作用方向の違いによる応答にも差がみられないことから、脚の浮き上がりを生じる時点までは、目的によっては脚の支持構造を厳密にモデル化する必要はなく、また、走行方向からみた左右の非対称性等の詳細な形状についても厳密にモデル化する必要のないことがわかった。また、脚の浮き上がりを含むクレーンの地震時の挙動は、重心位置の最大応答加速度を指標として検討することが可能であることが知られた。これらの検討結果から、本研究でその適用性を検討している1質点系モデルによる簡易解析は、地震時のクレーンの挙動を検討するためのモデルとして十分適切なモデルであると考えられる。また、実験結果では全てのケースで、水平荷重の増大に対して、最大応答加速度は概ね単調増加の傾向を示している。また、正弦波実験では、脚が浮き上がったケースでも最大加速度の値がよく一致していることから、1質点系モデルは脚の浮き上がりそのものの発生の確認や、その後の挙動の再現はできないが、クレーンの重心位置の最大応答加速度が、脚の浮き上がりを生じる加速度に到達するかどうかは推定できるものと考えられる。

簡易モデルの最大の利点は、現象が簡略化されているため、理論的にも明快で、かつ解を求めるための労力が格段に小さいことが挙げられる。第4章でも述べたように、基本方程式とその解は一般的な教科書に記載されており、プログラミングも容易である。そのため、設計実務者にとって大きな負担になることは考えられない。

その上で第4章の検討結果から簡易モデルの適用性を検討すると、簡易モデル

は、そもそも簡略化によって部材レベルの検討は不可能であること、脚の浮き上がりの発生や以後の挙動を再現できないこと、クレーンの2次モード以外の他のモードの影響を考慮できないこと、及び最大応答加速度を大きめに算出することから、部材耐力の照査や詳細設計に直接適用したり、脚の浮き上がりを最終的に判断する手法としては不向きである。しかし、クレーンの固有周期等の特性を明確に反映できること、応答波形などの挙動については比較的よく再現できること、及び最大応答加速度も大きめとはいえ全体的な傾向はよく一致していることから、与えられた設計条件で脚の浮き上がりの可能性の有無を安全側に検討することにより、脚の浮き上がりの再現を含む詳細な解析を実施しなくてもよい範囲を示すという意味でのスクリーニング的な「一次判定」にであれば利用することが可能であると考えられる。一方実験結果と比較すると、簡易モデルによる最大応答加速度の算定値は、脚の浮き上がりが生じるレベルでは、八戸波が概ね1.2倍、P I波が概ね1.5倍程度の値となっており、やや過大に評価している。これは、2次モード以外の振動成分をモデルでは表現できないことが原因の一つとして挙げられる。特にP I波では、図-4. 1. 9に示すように応答波形に高周波成分が顕著に現れた以降に簡易モデルの最大応答値を算出しており、この影響があったものと考えられる。また、模型実験では車輪とレールとの間のガタツキなどが観測されており、この影響や模型の3次元性によりエネルギーが散逸していることも十分考えられる。また、模型の減衰定数がこのような応答加速度の値にどの程度の影響を与えるかについて、八戸3.5倍波を用いて検討した結果を図-5. 2. 1に示す。図の値は、減衰定数が0.32%の最大応答加速度の計算結果を1.0とした場合の各減衰定数に対する計算結果の比である。図からは、減衰定数が2.5%になったとしても最大応答加速度の値は1割程度しか小さくならないことがわかり、減衰定数の値に誤差があったとしてもモデル上はこの程度の影響しかないことがわかる。これらの影響を考慮すると、今回中心として検討してきた八戸波における1.2倍という値は、機械設計としてはやや過大だが、脚の浮き上がりとい

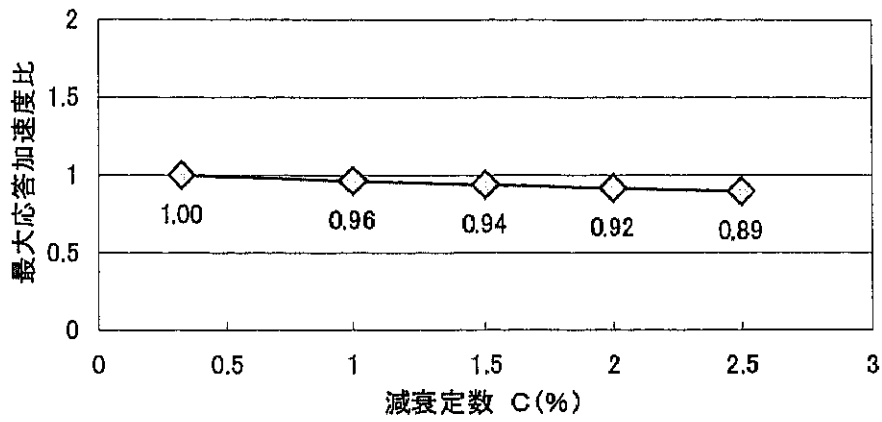


図-5. 2. 1 減衰定数の影響

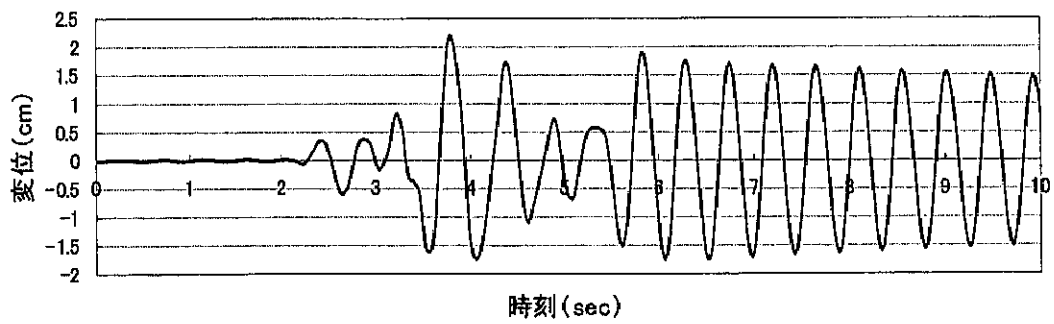


図-5. 2. 2 1質点系モデルによる変位応答

う、不確定要素の高い現象が発生する可能性の一次判定にであれば適用は十分可能ではないかと考えられる。また、P I波については 1.5 倍という値となるが、計算値にはこのレベルの余裕があることを前提にし、地震波の特性に応じて検討することが必要である。

また、八戸 3.5 倍波を入力した場合の簡易モデルの水平応答変位の計算結果を図-5. 2. 2に示す。簡易モデルの応答変位は、実機では重心位置の変位と考えることができるが、図-5. 2. 2を見ると変位の最大応答値は約 2.2cm を示している。一方、同様の条件で実施した FEM 解析の結果は最大約 2.6cm であり、比較するとやや小さめの値となっている。簡易モデルの場合には脚の細部等の条件や各部材の剛性等の関係を厳密には再現できないことから、このような差を生じたものと考えられる。また、変位は基本設計では必要としないが、簡易モデルではそもそも詳細設計で必要となる各部材の変位等は計算することが出来ないことから、簡易モデルは設計上応答加速度の検討のみに使用することとした。

また、簡易モデルの質量の入力値として、全質量ではなく 2 次モードに対する有効質量を用いるという方法が考えられる。但し、今回の簡易モデルでは固有周期の実測値を入力する方法を採っているため、質量の値を変えると計算上それに伴ってバネ定数を変更することになり、結果として応答加速度の出力は全質量を入力した値と変化しない。また、有効質量を算出するためにはクレーン毎に固有値解析を実施することが必要となるため、設計手順をより簡単にするために入力については全質量のままとしている。

なお、脚の浮き上がりや脱輪、滑りを伴う挙動の検討を目的とした場合には、さらに詳細な解析が必要である。

2-2 FEM解析の適用性

第 4 章では、FEM 解析の代表的な解析ツールとして、MSC/NASTRAN を用いて

実験結果と比較した。この MSC/NASTRAN は、既にコンテナクレーンの挙動の動的解析に数多くの実績があり、通常の設計における適用性については、問題がないものと考えられる。従って、本節では八戸波に対して特に脚の浮き上がりという非線形性の強い挙動を再現できるか、その際のクレーンの加速度応答の適切な評価が可能かどうかを中心に検討を加えた。

実験結果と解析結果を比較すると、脚の浮き上がりの指標として考えられる最大応答加速度に関しては、八戸波、PI 波ともに解析結果がやや大きめの値を示している。このことは脚の浮き上がりを評価する上ではやや安全側に働く。また、重心位置での加速度の応答波形は概ね一致しており、クレーンの 2 次モードの挙動の傾向をよく表現していると考えられる。また、脚の浮き上がりについても、変位の絶対量については課題が残るものの、浮き上がりの発生とその時点については概ね表現できたことから、実用上判定手法として使用可能であると考えられる。以上のことから簡易モデルによるよりもさらに詳細な検討が必要な場合には十分適用が可能なツールであると考えられる。

今回のコンテナクレーンの脚の浮き上がりのような非線形性の強い挙動に対しては、FEM 解析、特に GAP 要素を用いるような解析が必要であるが、その解析に使用できるソフトウェアは、依然として高価であり、またシミュレーションモデルの作成に多くの時間と労力を費やすため、設計実務者にとっては大きな負担であることは事実である。また、詳細な検討が可能なソフトウェアであればあるほど、使いこなすまでには使用者が高度に熟練する必要があり、この面でも設計実務者にとって負担となる。しかし、今回使用した MSC/NASTRAN のようなソフトウェアは、市場で流通し入手が容易であることに加え、多くの実績を持っており、信頼性が高い。また、簡易モデルとは異なり、脚の浮き上がりの判定に影響する各振動モードの特性の分析などにより、貴重な情報が設計者にもたらされる。また、部材設計にも適用が可能であり、その利用価値は極めて高いと考えられる。従って、脚の浮き上がりが懸念される場合、あるいは判断が微妙な場合には、仮

に設計実務者の負担が大きいとしても、このような FEM による検討が必要であると考えられる。

第3節 設計の手順案

従来のコンテナクレーンの基本設計は、与えられた設計条件に対して概略設計を行い、その結果に対して部材の耐力を照査することでその安定性が確認されてきた。

今回の模型実験及び解析により、平成7年兵庫県南部地震以降新たに設計条件の一つとなったレベル2地震動に対しては、脚の浮き上がりというコンテナクレーンの設計としてはこれまで想定していなかった新たな現象が起こることが確認され、コンテナクレーンの地震時の安定性に大きな影響を及ぼすことがわかった。この脚の浮き上りを考慮するためには、GAP要素を用いたMSC/NASTRAN等の脚の浮き上りを考慮できる非線形過渡応答解析による検討が有望であるが、本研究ではその有効性について検証し、十分適用が可能であるとの結論に達した。しかし、全ての場合に脚の浮き上りを考慮できる非線形過渡応答解析を行うことは、多くの費用と労力を必要とするため、現場での実務上大きな問題がある。そこで本研究では脚の浮き上がりだけを簡易に判定できる簡易モデルを提案し、その有効性について検証した。以下に、簡易モデルを用いることにより設計実務者の負担を軽減し、非線形応答解析を実施すべきケースを極力限定した、脚の浮き上りを考慮した新たなコンテナクレーンの耐震設計法を提案する。

その設計のフローを図-5.3.1に示す。

(1) 設計震度の設定

本研究で検討の対象とした脚スパン30m級のコンテナクレーンは、大型コンテナ船の本船が寄港するような大型のコンテナターミナルに設置される。これらのうちいわゆる中枢国際港湾等では、「港湾における大規模地震対策施設整備の基本方針」（平成8年12月、運輸省港湾局）³¹で係留施設が耐震強化施設に指定され、設計対象地震動としてはレベル2地震動を採用することが定められてい

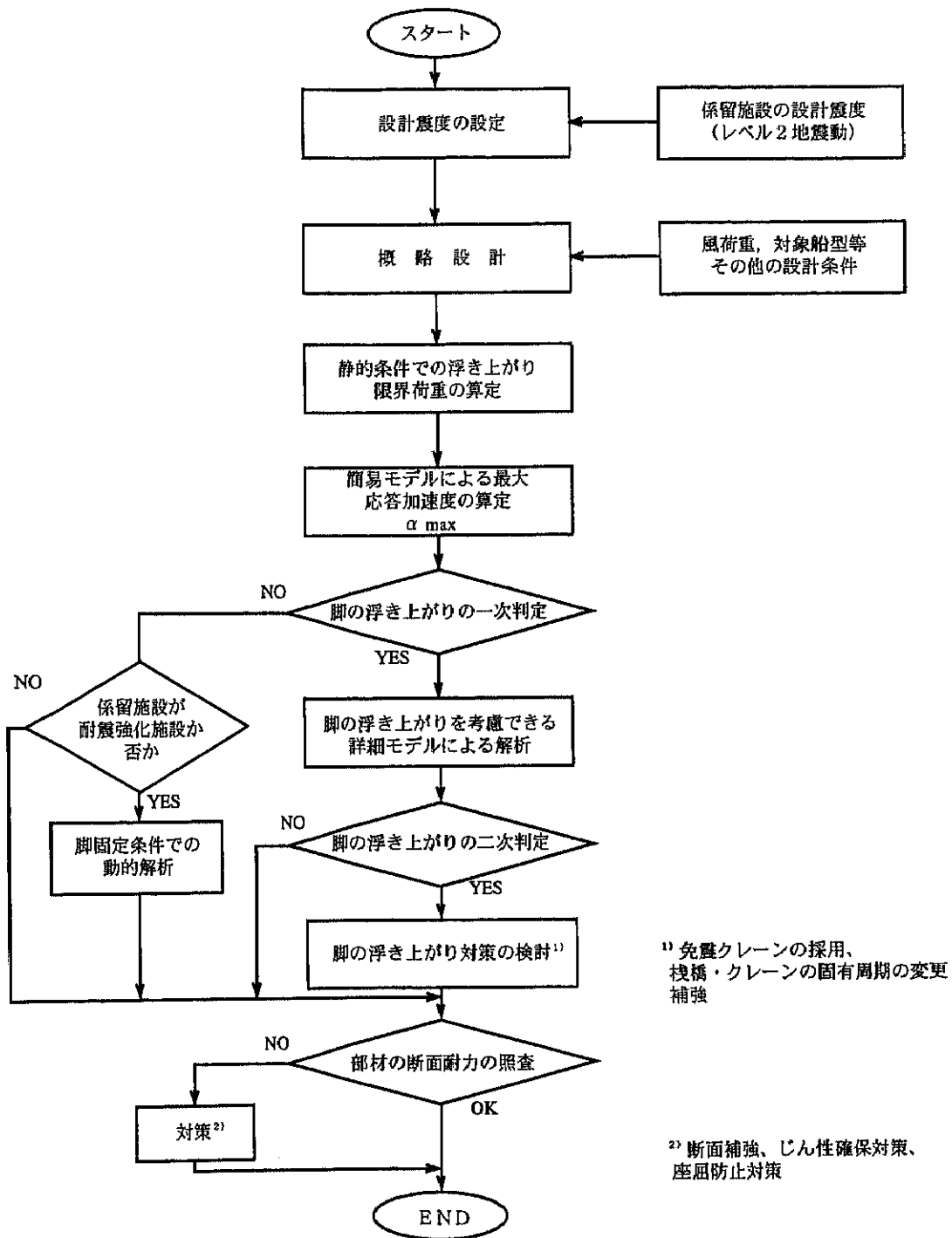


図-5. 3. 1 脚の浮き上がりを考慮した基本設計フロー

る。これは、大規模地震の発生後においても国際物流や国民生活に大きな影響を及ぼすことのないよう定められたものであり、その意味から必然的にコンテナクレーンも同様の耐震性を持つことが求められることとなる。従って、このようなコンテナクレーンの設計対象地震動としては、係留施設の設計条件として定められたレベル2地震動を採用する必要がある。

(2) 概略設計

設計対象地震動と共に、その他の風などの気象条件、対象船舶等の利用条件等の他の設計条件が管理者から示された後に、基本的なクレーンの諸元を求めるために概略設計を行う。これまでは、クレーン構造規格により設計震度が定められていたため、ほとんどの場合クレーンの主要な諸元は風荷重により決定されることが多かった。しかし、設計対象地震動をレベル2地震動とすると、係留施設の設計震度は0.25以上となることから、今後は地震力によって諸元が決定される場合もでてくるものと予想される。

一方、設計対象地震動がレベル2地震動でない場合であっても、脚の浮き上がりを生じる可能性が全くないわけではない。しかし、レベル2地震動を設計対象地震動とする耐震強化施設でなければ、特別な場合を除いて係留施設の設計に際して動的解析を行うこととはなっていないことから、相互の設計体系の整合性を図るため、脚の浮き上がりを設計上考慮する必要があるのは、設計対象地震動がレベル2地震動の場合のみに限定している。

また、レベル2地震動を採用した場合であっても、風荷重によって主要な諸元が決定されるケースも出てくると想定されるが、この場合であっても脚の浮き上がりを生じる可能性があるため、以下の設計手順は必要であることに留意する必要がある。

(3) 脚の浮き上がりの一次判定

概略設計の結果、コンテナクレーンの諸元が設定され、クレーンの重量、脚の構造、重心位置等が算定されるため、式(3.31)より静的条件での脚の浮き上がり限界荷重 $W_{CR,d}$ が算定される。

また、クレーンの重量、固有周期等簡易モデルの検討に必要な数値が算定できる。固有周期の算定法は、「クレーン耐震設計指針（（社）日本クレーン協会；平成元年5月）」⁴⁾等の方法がある。また、減衰定数は、概略設計の結果のみでは算定できないが、「クレーン耐震設計指針（（社）日本クレーン協会；平成元年5月）」⁵⁾や過去の設計の事例等を参考に設定することとする。これらの条件を用いて、設計対象地震動に対するクレーンの最大応答加速度 α_{MAX} を、簡易モデルにより推定する。この結果から、地震波の特性を考慮しつつ浮き上がりの一次判定を式(5.2)により行う。

$$m \alpha_{MAX} \geq W_{CR,d} \quad (5.2)$$

一次判定の結果、脚が浮き上がると判定された場合には、脚の浮き上がりを考慮できる非線形過渡応答解析により詳細な検討を行う必要がある。一次判定の結果脚が浮き上がらない場合には、この詳細な検討を行う必要はない。但し、通常レベル2地震動を設計対象地震動としている場合には、クレーンを上載している係留施設は耐震強化施設であるため、動的解析は実施する必要があるが、その場合でもGAP要素等の脚の浮き上がりを考慮するためのモデルを組む必要はない。また、民間の施設等で動的解析を必ずしも実施する必要のない施設では、従来の設計法で断面耐力の照査を行えばよい。

(4) 脚の浮き上がりの二次判定

一次判定で脚が浮き上がると判定された場合であっても、簡易モデルの精度上厳密には脚が浮き上がらないケースもある程度含まれている。これらのケースも含めて、脚の浮き上がりを考慮した解析手法で詳細な検討をする必要がある。脚

の浮き上がりを考慮するためには GAP 要素等を用いた非線形過渡応答解析を実施する必要がある。本研究では従来よりクレーン等の解析に実績のある MSC/NASTRAN について検討した結果、十分適用が可能であるとの結論を得ていることから、これを用いて検討できるものとするが、他の解析ツールであっても、実験等で同様の信頼性が確認されれば使用することは可能である。入力地震動となるレベル 2 地震動の波形はそれぞれの施設によって八戸波、ポートアイランド波、大船渡波が用いられる。これまでの検討結果では大船渡波が設計対象地震動の場合、解析の結果重心位置の加速度が浮き上がり限界荷重（最大応答加速度）に達する場合であっても脚の浮き上がりを生じない可能性もあるため、解析結果の検討に当たっては、今回のモデルでの 2 次モードにあたる振動モードの影響について、詳細に検討を行う必要がある。

この詳細モデルによる検討の結果、やはり脚が浮き上がることが確認された場合には、何らかの浮き上がり対策を講じる必要がある。

一方、詳細モデルによる検討の結果、脚が浮き上がらないとの結果がでた場合には、検討の結果得られた部材力等により、断面耐力の照査を行うことになる。

（５）脚の浮き上がり対策

脚の浮き上がり対策としては大きく分けて次の二つの方法があると考えられる。

①クレーン又は係留施設の固有周期等の動的振動特性を変更し、クレーンに発生する応答加速度を減じることにより、脚の浮き上がりの発生をおさえる。

②浮き上がりを許容し、浮き上がり後のクレーンの挙動（例えば、海側脚の曲げ変形、陸側脚の再着地など）に耐え得るような部材の補強を行う。

①の場合のうち、係留施設の動的特性を変更する方法については、例えば直杭

式横棧橋を斜め組杭式横棧橋に形式変更し、固有周期を短くする方法がある。これはコンテナクレーンの固有周期が概ね 2s 以上であるのに対して、棧橋の固有周期はもともと 0.4 ~ 0.7s 程度である⁶⁾ため、この周期をさらに短くすることにより応答加速度を低減しようとするものである。しかし、大型コンテナターミナルでの係留施設の延長は 350m/B もあり、すべての延長にわたって対策を講じることは管理者にとって財政上大きな負担になる。一方、コンテナクレーンの動的特性を変更する方法としては、これまで様々な方法が提案されている⁷⁾が、きわめて有望と考えられる対策の一つに免震クレーンがある。これはコンテナクレーンの 4 本の脚に免震機構を備えることにより、基礎から伝達される地震動からコンテナクレーンを免震化しようとするものである。免震の機構はすでに建築分野等では多くの実績があり、その理論とシステム、及びその効果はほぼ確立された技術となっている。免震機構を備えたコンテナクレーンは、第 6 章において模型実験等で検討した結果から、脚の浮き上がりに対する有効性が確認されており、脚の浮き上がり対策として確実な手法であると言える。

また②の脚の浮き上がりを許容した設計については、脚の浮き上がりによるコンテナクレーンに作用する外力を算定し、その力に耐え得るように部材の設計を行うものである。外力が正確に算定されれば、断面耐力の照査と必要な補強の検討は従来の設計法で十分対応が可能である。しかし、脚が一旦浮き上がることになると、その後の挙動や浮き上がった脚の再着地時の衝撃力の影響等については、必ずしも全てが解明されているわけではない。今回の実験では係留施設のエプロンの材質や表面の状況まで相似則を満足しているわけではないため、脚の浮き上がり後の挙動については、実験結果から定量的にその影響を把握することはできなかった。しかし、脚の浮き上がりを許容して設計を行う場合には、脚の浮き上がり後の再着地等に伴って、走行装置を含む脚部分に激しい衝撃力が作用するおそれがあるため、その対策についても十分検討しておく必要があり、今後の課題の一つであると言える。

(6) 断面耐力の照査

それぞれの解析の結果、部材力が算定されるが、この結果から断面耐力の照査を行う。当初の概略設計の断面で耐力が不足している場合には、断面の補強等を行い、安全率を確保する。補強方法としては、様々な方法があるが、部材の重要性や状況により適切な方法を選択すればよい。

以上が前節までの検討結果をもとに提案する設計法である。これにより、レベル2地震動等の大規模地震時にあっても、係留施設と同様に大きな被災を受けることなく短時間でコンテナターミナルが供用可能となる、安全性の高いコンテナクレーンを、経済的にも実務的にも無理なく設計することができると考えられる。

なお、脚が浮き上がると想定して概略設計した例によると、従来の設計震度0.2の場合と比較して、鋼材の量が約1割増しになったという例がある⁸⁾。具体的には脚上部等において補剛材により補強する部分の範囲が広がるなどの影響があるが、これはコンテナクレーン全体の費用に比較すると数%程度である。従って、今回提案した脚の浮き上がりを考慮した設計を採用しても、コンテナクレーンの経済性に極端な影響を与えることはないものと考えられる。

【第5章：参考文献】

- 1) 金山維史他：大地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がり挙動評価、日本機械学会論文集C編、64巻618号、1998.2
- 2) 横田 弘他：鋼管杭式横棧橋の耐震設計法に関する考察、構造工学論文集Vol.44A、1998.3
- 3) 運輸省港湾局：港湾における大規模地震対策施設整備の基本方針、平成8年12月
- 4) 日本クレーン協会：クレーン耐震設計指針、平成元年5月
- 5) 参考文献4)
- 6) 参考文献2)
- 7) (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
- 8) 参考文献7)