

係留施設設計段階におけるコンテナクレーンの 基本諸元の簡易的な決定方法

竹信 正寛

¹港湾空港技術研究所 地盤・構造部 耐震構造研究チーム（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

1995年に発生した兵庫県南部地震によって生じたコンテナクレーンの損壊を契機に、その耐震化について検討が進められるようになったが、係留施設の設計段階において、設置するコンテナクレーンの諸元を決定することは一般的に困難である。一方、コンテナクレーンの動的挙動を全く考慮しないまま係留施設の設計を実施した場合、耐震性能が不足する可能性があるため、係留施設の設計段階において、コンテナクレーンに課されるべき最低限の条件を把握しておく必要がある。本稿においては、上記条件を簡便に算定できる方法について紹介し、その適用性について述べる。

キーワード コンテナクレーン，1質点モデル，地震応答解析，耐震設計

1. はじめに

平成19年に改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾においては、係留施設の耐震性のみではなく、コンテナクレーンに代表される荷役施設の耐震性についても確保する旨が明記されている。

しかし、従来コンテナクレーンの設計および耐震照査は、係留施設が完成した後に実施されることが一般的であり、また係留施設と荷役施設の設計者が専門とする分野が異なっている（例えば土木分野と機械分野）ことから、係留施設の設計段階において、当該施設に設置するコンテナクレーンの諸元を決定することは困難であることが多い。

一方、近年の研究により、地震動の最大加速度のみならず、周波数成分が各種構造物の応答に大きな影響を与えることが知られており、仮に係留施設の完成後に、従来用いられてきた水平荷重 k_h を与える考え方（震度法）でコンテナクレーンを設計した場合、最悪のケースとして、係留施設上の地震動の卓越周期とほぼ等しい固有周期を持つコンテナクレーンが設置されてしまう恐れがある。

このため、係留施設の設計段階でコンテナクレーンに要求すべき基本的な性質をある程度絞り込んでおくことが出来れば、設計上の手戻りを軽減することが見込まれる。

さて、地震応答解析の一番単純な例として質点モデルを挙げるができるが、このシンプルなモデルを用いて実際のコンテナクレーンの地震時性質が再現可能であれば、上記に示した基本的要求性能は比較的容易に算定

することができる。本稿においては、コンテナクレーンに対する模型振動台実験結果および、その解析結果の比較を用いて、1質点モデルの適用性について述べ、設計への応用例について紹介する。

2. コンテナクレーンの浮き上がり加速度の推定

(1) 模型振動台実験

実際のクレーンの動的挙動を把握するためには、実機を用いて実験を実施することが最も確実であるが、そのような実験は事実上不可能であるため、模型振動台実験を用いてその挙動を確認することとした。本検討における実験模型は、実機におけるコンテナクレーンの1/15縮尺としたものを用いた。適用される相似則は表-1に示すものを用いた。実スケールにおける挙動を実験値より推測する際は、理論上実験で得られた値を表-1に示した縮尺比倍すればよい。

表-1 模型実験に対する適用相似則

物理量	実機/模型	縮尺比
長さ		15.00
時間	1/2	3.87
加速度	1	1.00
重量	3	3375
曲げ剛性	5	759375

本実験で対象としたコンテナクレーンは、レールスパン30m、重量約10000kN相当のものである。写真-1に実験に用いた模型および振動台の全景を、図-1に実験に用いた模型の概略図ならびに各種計測器の取り付け位置



写真-1 クレーン模型および振動台全景

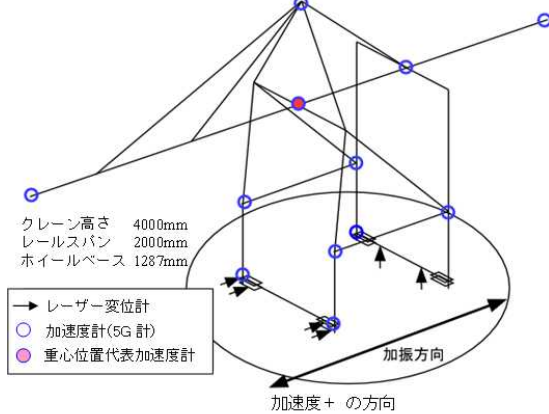


図-1 各種計測器取り付け位置および代表スペック

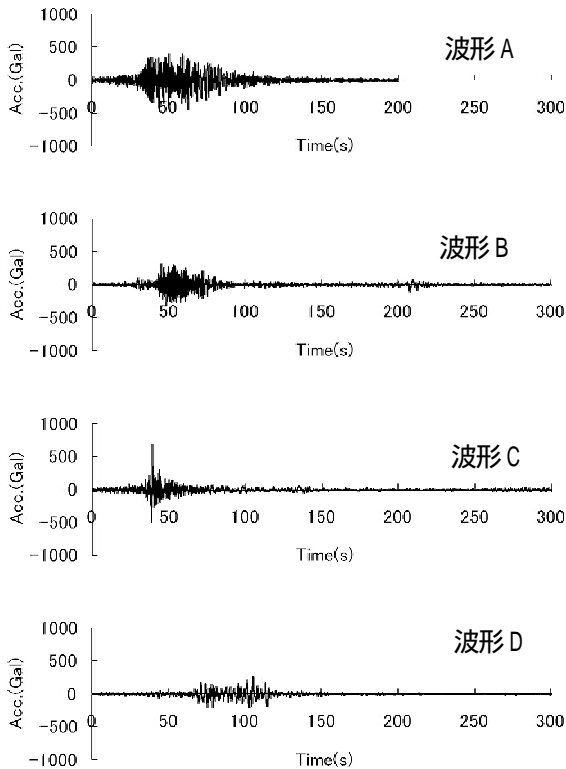


図-2 入力波形の加速度時刻歴

を示す．図に示すように，クレーン模型には，加速度計ならびに脚部の浮き上がり現象が生じたか否かを判定するための変位計を設置した．

実験に用いた入力地震動は各地の港湾において検討されているレベル2地震動である．各種波形の時刻歴を図-2にそれぞれ示す．それぞれのグラフの時間軸は実スケールのものであるため，実験では表-1の相似則を適用し，図-2の時間軸を $1/15^{(1/2)}$ $1/3.87$ 倍に縮めた波形を振動台に入力した．なお，地震動の入力方向として，クレーン横行方向，走行方向，および鉛直方向1成分の計3成分が存在するが，本検討においては，そのうち最もコンテナクレーンの挙動に支配的であると考えられる，クレーン横行方向に対してのみ波形を入力した．

(2) クレーンの浮き上がり現象に関する考察

兵庫県南部地震の際にコンテナクレーンが損壊，倒壊したメカニズムの大きな要因の一つとして，コンテナクレーンに地震動が入力された際の慣性力の作用によりロッキング現象を起こし，脚部が浮き上がった結果，浮き上がった脚と反対側に位置する脚の荷重が大幅に増加することによって座屈が発生したためであると考えられている2)．つまり，コンテナクレーンの設計に際して，どの条件でコンテナクレーンの浮き上がりが生じるのか，という点について検討しておくことは非常に重要である．

図-3は，横軸に入力加速度の最大値，縦軸にコンテナクレーンの重心位置加速度の最大値を示し，コンテナクレーンの浮き上がり現象ないし脱輪が生じたか否かについて整理したものである．なお，図-4中に本実験に用いたクレーン模型の重心位置を星印により示した．

図のように，重心位置はクレーン模型の構造部材が位置する点ではなく，構造部材から離れた位置に存在しており，正確な重心位置に加速度計を設置することはでき

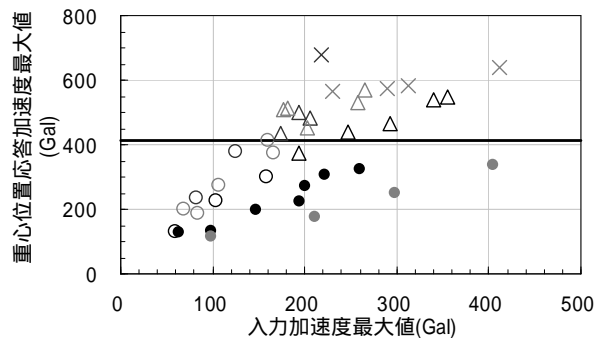


図-3 重心位置加速度によるクレーン脚の浮き上がり評価

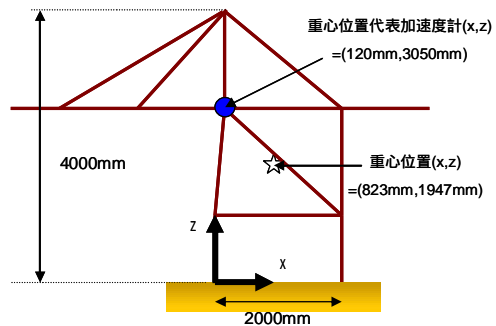


図-4 実験に用いたクレーン模型の重心位置

ない。このため、以下では同図中に黒丸に示した地点に設置した加速度記録を、便宜的に「重心位置加速度」として評価した。

図-3中の脱輪判定基準に関しては以下のような判定基準を用いた。

- ×：クレーン脚部の脱輪が目視によって観察できる
- ：クレーンの脱輪は生じていないが、クレーン脚部に取り付けた鉛直変位計の時刻歴より、クレーン脚部の浮き上がりが生じているものと判断できる
- △：目視および変位計時刻歴からもクレーンは安定しているものと判断できる

図に示すように、入力地震動の加速度レベルの大小問わず、クレーン重心位置加速度が、ある一定の加速度を超過した場合にクレーンの脱輪現象ないし脚部の浮き上がりが起こると判断してよいと考えられる。

ここで、仮に海側へ慣性力が作用する際の重心位置加速度を $-$ （浮き上がり限界加速度と定義する）とした場合の、クレーン脱輪現象については以下の図-5を用いて次のように説明することができる。

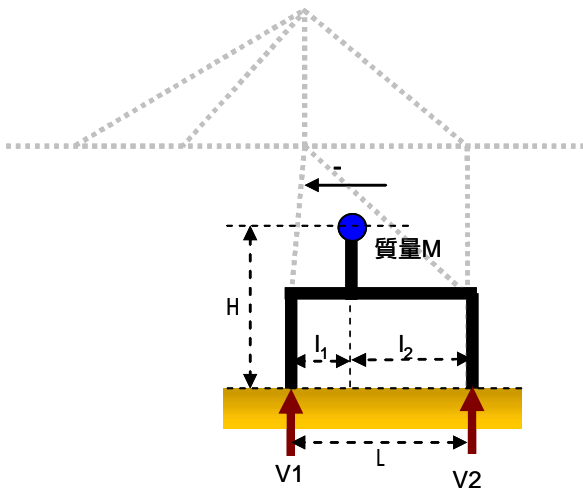


図-5 脚部浮き上がり加速度に関する説明図

陸側クレーン脚部における反力を V_2 とすると、海側クレーン脚部まわりのモーメントの釣り合いより、下式が成立する。

$$L \cdot V_2 + H \cdot M \cdot (-\alpha) - l_1 \cdot M \cdot g = 0 \quad (1)$$

ここで、脚部が浮き上がる際には $V_2 = 0$ であるので、浮き上がり加速度は、(1)式で $V_2 = 0$ と置き、

$$(-\alpha) = \frac{l_1}{H} g \quad (2)$$

と表現される。従って、上述した静的なモーメントの釣り合いに基づく浮き上がり加速度は、クレーン重心位置の脚部からの高さおよび海側クレーンからの水平距離のみによって決定されることになる。

図-3中には(2)式で求められる浮き上がり限界加速度についても記載しているが、図に示すように、概ねこの

限界加速度を境界線として脚部浮き上がりの有無が明瞭に分かれていることがわかる。

3. 1質点モデルの適用性

(1) 解析に用いた物理量

前節に示したように、コンテナクレーンの浮き上がりまたは脱輪現象の発生の有無については、コンテナクレーンの重心位置の加速度応答が重要である。この加速度応答が、簡便な1質点モデルを用いて再現できるのであれば、浮き上がり加速度の算定は非常に容易である。

本節では、コンテナクレーンの重心位置の加速度・変位等の動的特性が1質点モデルを用いて再現できるか否かについて、前節の実験結果を基に検証することとした。

地震動によって強制変位を与えられた場合の1質点減衰系に関する微分方程式は、一般的に次式で与えられる。

$$M(\ddot{x} + \ddot{y}) + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (3)$$

ここに、 M ：質点質量($N \cdot s^2/cm$) C ：減衰係数($N \cdot s/cm$) K ：全体剛性(N/cm) x ：質点の地表面に対する相対変位(cm) y ：地震動による地表面の変位(cm)、である。

減衰係数 C に関しては、減衰定数 h および固有円振動数 $(= (K/M))$ を用いると、

$$M(\ddot{x} + \ddot{y}) + 2h\omega\dot{x} + Kx = 0 \quad (4)$$

と表すことができるため、質点質量 M ・質点剛性 K ・減衰定数 h の3つのパラメーターを与えるのみで質点解析の実行が可能である。パラメーター決定にあたり、実験時に測定可能であった M 以外のものについては、前節の実験結果を参考として、下記のように決定した。

a) コンテナクレーンの全体剛性 K

コンテナクレーンの系全体の剛性 K に関しては、クレーンに使用されている各部材の剛性等より求めることも可能であるが、ここでは前節に掲げた実験結果より、重心位置加速度における加速度応答スペクトルからクレーン固有周期を読み取り、その値を用いてコンテナクレーンの剛性 K を算出する方法を用いた。

なお、固有周期と全体剛性の関係は次の式で表すことができる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W/g}{K}} \quad (5)$$

ただし、 T ：クレーン固有周期(sec)、 W ：クレーン重量(N)、 K ：クレーン全体剛性(N/cm)、 g ：重力加速度(Gal)、である。

b) 減衰定数

減衰定数 h については、実験に使用した模型を振動台に設置し、強制変位を与えて自由振動させた際の模型重

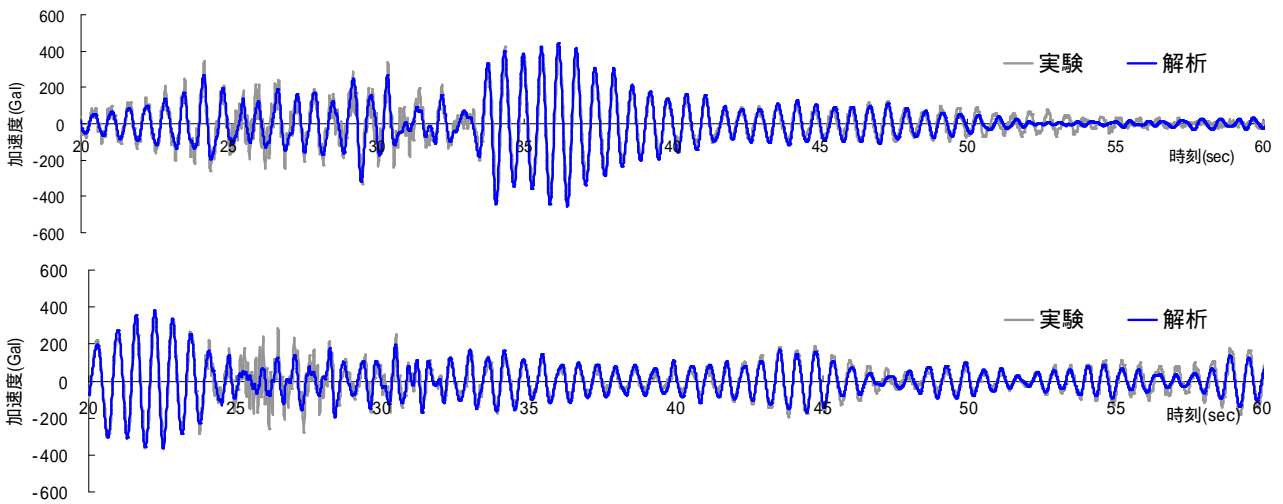


図 - 6 コンテナクレーン模型重心位置における実験で得られた加速度時刻歴およびその解析結果の比較
(上段：入力波形 = 波形A 下段：入力波形 = 波形B)

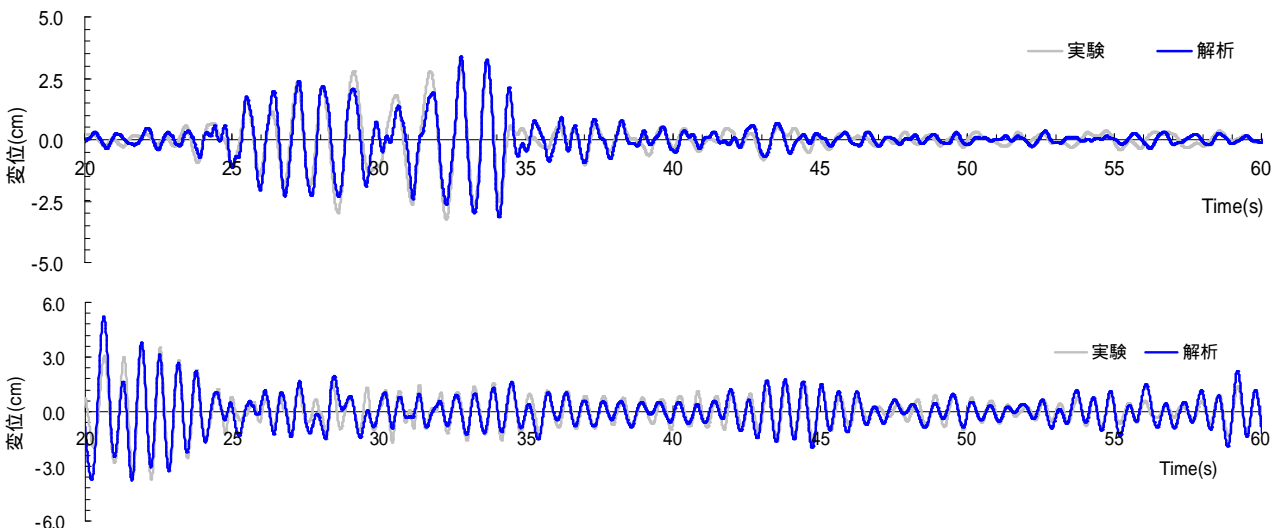


図 - 7 コンテナクレーン模型重心位置における実験で得られた変位時刻歴およびその解析結果の比較
(上段：入力波形 = 波形A 下段：入力波形 = 波形B)

心位置の加速度記録を対数減衰則を用いて算定した。表 - 2に解析に用いたパラメーターをまとめて示す。

表 - 2 1質点解析に用いた入力パラメーター

クレーン重量 (N)	クレーン剛性 (N/cm)	減衰定数 (%)	固有周期 (sec)
3,087	322.7	1.6	0.6

(2) 解析結果

図 - 6は、波形AおよびBを入力した場合の、重心位置加速度に関して、1質点モデルを用いた解析結果および実験結果を比較したものである。図のように、実験結果と解析結果はほぼ同一の加速度波形として表現されている。

また、図 - 7は変位時刻歴を同様に図示したものであるが、図のように、変位に関しても加速度波形に関する解析結果と同様に、ほぼ実験値と整合性がとれている。

ることがわかる。なお、重心位置の相対変位は直接的には計測できないため、実験で得られた重心位置加速度波形を2回積分したものを「重心位置相対変位」とした。

このように、コンテナクレーンの浮き上がり現象を把握するために必要な重心位置加速度等については、簡便な1質点系モデルで再現可能であり、後述するように、コンテナクレーンの設計初期検討時における条件の絞り込みに対する方法としては、1質点モデルは十分に適用可能であると考えられる。

4. 質点系解析を実設計に用いる方法

上記の検討により、コンテナクレーンの基本的な動的特性は、1質点モデルで再現できることが確認された。この結果より、加速度応答スペクトル等を用いて動的特性を考慮したコンテナクレーンの設計条件を設定することが可能である。なお、以下にその方法を例示す。

るが、係留施設の設計が有限要素法等によって実施されていることを想定している。

また、浮き上がり加速度に関しては、既往のコンテナクレーンに関する調査結果より、概ね300-400Gal程度であるとされている³⁾。

- ・有限要素法により、コンテナクレーンレール位置の加速度時刻暦を算定し、得られた加速度時刻暦を用いて、1質点系モデルを用いた解析を行って加速度応答スペクトルを描く。
- ・あらかじめ浮き上がり加速度を設定し、条件以上の加速度応答が生じる場合は、その固有周期を有するようなコンテナクレーンの作製は不可能である。(加速度応答に関する絞り込み)

図-8はある地点におけるコンテナクレーンレール位置における加速度応答スペクトルを示したものである。図のように、固有周期3.5sec以下の固有周期については、浮き上がり加速度を大幅に超えており、少なくとも設置するコンテナクレーンの固有周期をこの範囲に設定すべきではないことがわかる。一般的なコンテナクレーンの横行方向に関する固有周期は、約2.0sec程度であることが知られており、仮にこの周期付近における加速度応答が大幅に浮き上がり加速度を超えている場合には、コンテナクレーンに対して免震装置を導入するなど、何らかの対策が必要である。

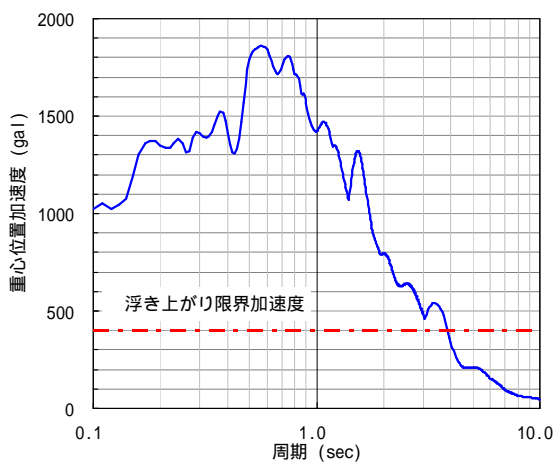


図-8 浮き上がり加速度と加速度応答スペクトル

免震対策をコンテナクレーンに施した場合、コンテナクレーンの重心位置における加速度応答は軽減され、また固有周期の長周期化を図ることが可能である。一方、長周期化によりクレーンの応答変位が過大となり、免震装置の仕様にも依るが、免震装置の許容変位を超過する恐れもある。

このため、係留施設上に設置するコンテナクレーンの基本仕様を決定する際には、加速度応答スペクトルおよび変位応答スペクトルの両方について検討を行い、どちらの要件も満足する仕様(ここでは固有周期や減

衰定数)を検討する必要がある。

上述した方法により、コンテナクレーンが有すべき固有周期が算定できれば、その固有周期を満足する重量 M および減衰定数 h の組み合わせを図-9のように数通り準備し、係留施設の設計段階で、コンテナクレーンに関する基本的設計条件としてそれらの値をクレーンメーカー側へ提示することにより、手戻りのない合理的な設計を行うことが期待できる。

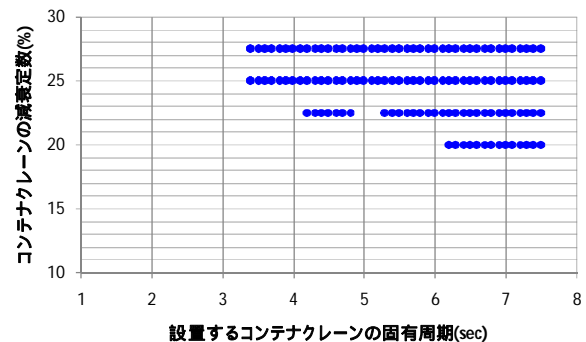


図-9 設置すべきコンテナクレーンの固有周期と減衰定数の組み合わせ(例)

5. 今後の課題

上記の設計初期における、コンテナクレーンの設計条件の絞り込みとして大変有効であると考えられるが、設計地震動の長継続・長継続化により、コンテナクレーンに要求する性能の絞り込みを行う際に、応答加速度、応答変位のいずれの条件も満たすことの出来ないケースがある。解析上、設定する減衰定数を大きくすることによって解が得られる場合もあるが、実際には、コンテナクレーンの構造部材の減衰定数を大きく変化させることは困難であるため、免震装置に設置するダンパーの特性を高減衰のものに換えるといった対策が必要となる。例として、変位が過大になった際に減衰特性を変化させるアクティブダンパー、エネルギー吸収特性の大きい粘弾性ダンパー等の採用が考えられる。

しかしながら、これらのダンパーが実機コンテナクレーンに搭載された際の挙動については未だ不明な点が多く、これらの免震装置の特性についても今後十分に把握しておく必要性がある。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、平成19年7月
- 2) 港湾施設被害検討委員会編：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察、港湾技研資料、No.813、1995.9.
- 3) 宮田正史ら：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究(その2)、国総研資料、2009.3.