

フロアクライミングクレーンの耐震性能向上手法の一検討

吉見 雅行

正会員 工博 (独)産業安全研究所 機械システム安全研究グループ
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

1. はじめに

フロアクライミングクレーン（図1）は中・高層建物の工事に使用されるクレーンであり、自力でフロアクライミングすることを特徴とする。通常、構造物上部の梁にマスト基部を固定して使用される。クレーンが固定された梁に大きな荷重が作用することから、使用範囲は鉄骨造建物の建設工事に限られてきたが、近年、RC造やSRC造にも使用可能なものが開発されている。建物の外部にクレーンを設置する必要がなく、建物密集地には有利であるため、ますます建設工事に広く使用されると考える。

1995年の兵庫県南部地震（17階屋上設置の12mマストクレーンがマスト根元から折れ、落下¹⁾）や、2002年3月31日の台湾地震（51階に設置のクレーン落下）では、フロアクライミングクレーンが大被害を受ける事例がみられた。建物とクレーンが共振したためであると推定されている。

フロアクライミングクレーンの耐震要求性能は、クレーン等構造規格²⁾によって規定されており、震度法（旧震度法）で静的水平震度0.2である。設計時には地震荷重のほかに吊り荷重等の動荷重に対する照査もされるため、実際の耐震性能は0.2よりも大きく水平震度換算で0.3程度となっている。建築規格³⁾では、構造物の最上階に設置される構造物には最低でも水平震度1.0の耐震性能が要求されることと比較すると、フロアクライミングクレーンの耐震性能は小さい。しかし、クレーンは仮設物であるため、要求耐震性能を1.0程度に引き上げるには議論が必要であろう。また、うまく共振を避けることができれば、設計震度をさほど増大させる必要はないとも考えられる。

本研究は、フロアクライミングクレーンの地震時の共振を避けるための、簡易な対策を示すことを目的とする。対象は中規模地震とする。

2. フロアクライミングクレーンの構造

フロアクライミングクレーンは、マスト、旋回体、ジブで構成される。マストは旋回体、ジブの重量を支え、モーメントに耐える部分である。4-6mの部材を継ぎ足して構成されており、必要に応じて長さを調整できる。マスト基部で全てのモーメントを支える自立式に限ると、マスト高は最大で36m程度である。マスト上部には旋回体に取り付けられている。旋回体上には、運転席、ジブ、巻上げ装置等が取り付けられている。ジブは根元がピン支持、先端がケーブル支持されており、支持ケーブルの巻き動作で起伏する。

旋回体とマストの取付部は開口部となっている。この開口部のおかげで、旋回体を設置したままマストを追加したり、旋回体をマスト伝いに下降させることができる。フロアクライミングは、1) 昇降装置下部を建物に固定し、マスト基部の固定をはずす。2) 昇降装置でマストを引き上げ、マスト基部を再び建物に固定する。3) 昇降装置の固定をはずし、マスト伝いに旋回体を上昇させる、ことにより実現される。

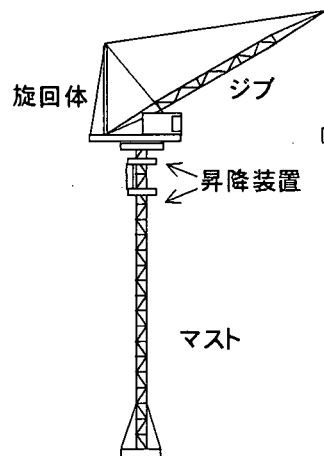


図1 フロアクライミングクレーン概略図

自立クライミングクレーンは、基部が固定され、上部に質量が集中している。既往の研究⁴⁾⁵⁾によると固有周期は、マスト高12mで1秒、24mで2.38秒、36mで3.13秒となっている。固有周期はジブの姿勢によって変化するが、この変化量は小さい。クレーンの吊上げ能力によって上部構造の大きさが異なるため単純に前記の値を固有周期の代表値とすることはできないが、フロアクライミングクレーンの1次固有周期は、1秒から3秒程度であると考えられる。

3. 1 自由度系応答に基づく共振回避策の検討

(1) はじめに

構造物の建設時には、構造物が高くなってゆき、それに応じて構造物の固有周期が変化する。建設工事中は同一のクレーンを用いるとすると、完成時の建物固有周期が大きい構造物の建設途中では、クレーンと構造物の固有周期が近接する状態になることが考えられる。そこで、フロアクライミングクレーンのマスト高さは可変で、特別な装置を使わなくても構造を変えることができる特性を利用し、構造物の特性に合わせて、適切にマスト高さを変えて共振を回避する方策を考える。

中規模地震時には構造物は弾性範囲にとどまっているとする。このときクレーンの応答も弾性範囲で考察する。フロアクライミングクレーンは基部をボルトで固定する方式のため、塑性域まで考慮することは難しいからである。

クレーンの質量はせいぜい数十トンである。建設途上であることを考慮しても、フロアクライミングクレーンを設置するような構造物に比べて軽い。そこで、クレーンと構造物との相互作用は無視し、クレーンの固定位置における構造物の地震応答が、クレーンに入力するものとする。

中・高層ビルに代表される一般的な建築構造物の減衰は小さいので、地震応答は構造物の1次固有周期の調和振動に近いものと期待される。そこで、過渡応答を考慮せずに、クレーン基部の加速度入力は調和振動であると仮定し、

$$\ddot{y} = ae^{i(\omega t + \phi)} \quad (1)$$

とおく。ここで ω 、 a は構造物の固有円振動数および調和振動の加速度振幅である。なお、地震時の振幅 a は、設計用加速度応答スペクトルと一致すると考える。

クレーンは1自由度系とし、固有円振動数を ω_0

とおく。クレーンの加速度応答の最大値は、

$$A_a = aH(\omega/\omega_0) \quad (2)$$

となる。ただし、

$$H(\omega/\omega_0) = \frac{\sqrt{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}}{\sqrt{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} \quad (3)$$

である。

(2) マスト高さの調整

クレーンのマスト高さを調節してクレーンの固有周期を変更する。対策の前後では、旋回体等の上部構造は不変で、マスト高さ(L)のみが変化する。マストの質量は無視し、上部構造は質量 W の質点とする。回転剛性は考慮しない。このとき、クレーンの応答は基部固定の片持ち梁と考えられ、マストのバネ定数 k は、

$$k(L) = \frac{3EI}{L^3} \quad (4)$$

クレーンの固有周期は、

$$T(L) = 2\pi\sqrt{\frac{WL^3}{3EI}} \quad (5)$$

となる。クレーンの固有周期は $L^{3/2}$ に比例する。

マスト高さを α 倍にする。このとき固有円振動数

$$\text{natural freq.} = \omega_0, \alpha^{-3/2}\omega_0 \quad (6)$$

のどちらかを選択することになる。

マスト高さの変更前と後とで、基部せん断力が等しくなる周波数は、

$$A_a(\omega, \omega_0)W = A_a(\omega, \alpha^{-3/2}\omega_0)W \quad (7)$$

より、

$$\omega_{eq_v} = \omega_0\sqrt{\frac{2}{1+\alpha^3}} \quad (8)$$

また、基部転倒モーメントが等しくなる周波数は、

$$A_a(\omega, \omega_0)LW = A_a(\omega, \alpha^{-3/2}\omega_0)\alpha LW \quad (9)$$

より、

$$\omega_{eq_M} = \omega_0\sqrt{\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (1+\alpha)^2(1+\alpha^2)}}{\alpha(1+\alpha)(1+\alpha^2)}} \quad (10)$$

となる。ただし、周波数を求める過程で減衰は考慮していない。

構造物の固有振動数が ω_{eq_v} 、 ω_{eq_M} となったと

きにマスト高さを α 倍にすれば、それぞれ、基部せん断力、基部転倒モーメントを最小にすることができる。

また、対策の効果は、対策前後の固有周波数の比が大きいほど（対策後の固有周波数の方が大きいとき）有効である。

4. 多自由度系応答に基づく検討

(1) 問題の設定

建物の建設過程を考える。完成時の固有周期が大きい建物として、60階建ての超高層建物を考える。建物の階数と固有周期との関係がおよそ $T=0.06N \sim 0.08N$ で与えられることを考慮し、完成時の固有周期を4秒とする。建物完成時の最上層と最下層との剛性比は10、床質量は全層について一定とする。せん断建物モデルに基づいて8次モードまで考慮し、減衰定数はすべてのモードに対し0.02の一定値とする。このとき、3階から60階までの建設途中の各段階で、構造物最上部にクレーンを設置するものとして、クレーンの地震応答を計算する。想定する建物の建設済みの階数と固有周期（1次～3次）との関係を図2に示す。各層の建設完了時の層の剛性や床の質量は全体の完成時と同じと仮定している。

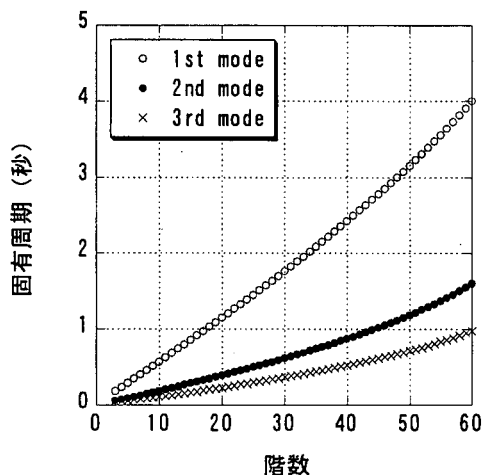


図2 建設済み階数と固有周期との関係

入力地震動は、中規模地震を対象とし、道路橋示方書の第1種地盤の水平震度スペクトルを目標スペクトルとして作成した。このとき、位相はランダムとし、地震規模の影響は、地震動継続時間として取り込んだ。また地盤構造は考慮せず、露頭解放基盤上に構造物が載っているものとしている。

クレーンは、上部構造の質量36トン、固有周期はマスト高さ36mのとき3秒になるものとする。このクレーンの固有周期を0.5秒刻みに1.0から3.0秒

表1 マスト高さと固有周期

固有周期 T_c (秒)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
高さ比 α	0.48	0.63	0.76	0.89	1.0
マスト高さ αL (m)	17.3	22.7	27.5	31.9	36.0

まで変化させるものとする。表1にこれらの固有周期を達成するためのマスト高さを示す。クレーンは質量が無視できる片持ち梁の上に質点が載った1自由度系であると仮定している。

(2) 高層建物の建設途中のクレーン地震応答

構造物の応答およびクレーンの応答は、地震動によって異なる。図3に建設途中の構造物の最上部に設置したクレーンの最大基部転倒モーメントと建物の階数との関係を示す。このとき使用した地震加速度波形を図4に示す。建物の固有周期がクレーンの固有周期と近接すると共振していることがわかる。クレーンでの作業性も考慮し、基本的に36mのマスト高さで作業することを考える。建物と36mクレーンとは45～50階で共振するが、これを回避するために、建物の階数が30～40階の段階で、マストを低く

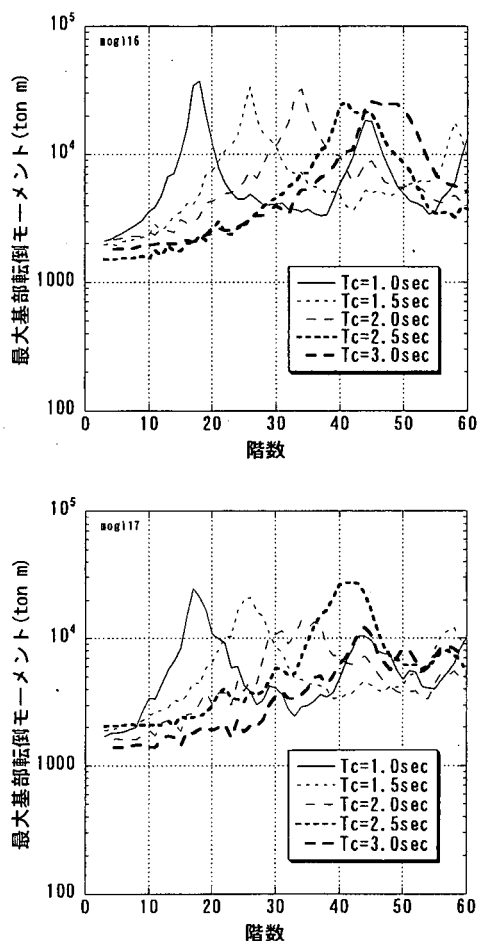


図3 最大基部転倒モーメントと階数との関係

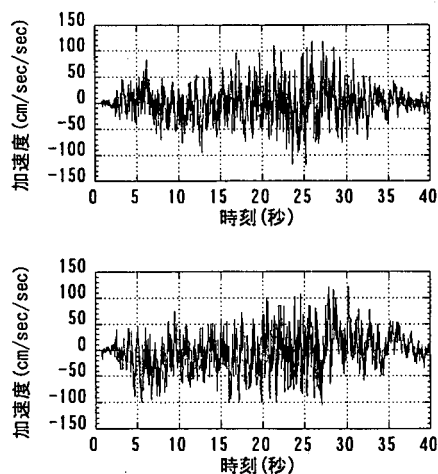


図4 図3の計算に用いた地震動加速度波形

する必要がある。図3から、33～35階時にクレーンの固有周期を1.5秒にするのが良いことがわかる。53階を超すと固有周期1.5秒のクレーンは建物の2次モードと共振し始めるので、固有周期を大きくする必要がある。クレーンの固有周期を替える際には、建物の高次モードの影響も適切に考慮する必要があるといえる。

(3) 共振回避策

基部転倒モーメントが小さく抑えられるように共振を回避する策について検討する。式(10)の逆数をとると、対策前と対策後とで、基部転倒モーメントが等しくなる固有周期は、

$$T_{eq_M} = T_0 \sqrt{\frac{\alpha(1+\alpha)(1+\alpha^2)}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (1+\alpha)^2(1+\alpha^2)}}} \quad (11)$$

である。表1に示した α について T_{eq_M} および対応する階数 N_{eq_M} を表2に示す。この N_{eq_M} は、図3で基部転倒モーメントが逆転する階数とよく対応しており、マスト高さを減らす共振回避策をとる階数を与える指標として利用できる。

1自由度系の考察では、対策前後の固有周期比が大きいほど、共振回避策の効果は大きいが、

表2 共振回避策をとるべきタイミング

α	0.48	0.63	0.76	0.89
T_{eq_M} (秒)	1.90	2.2	2.48	2.76
階数 N_{eq_M}	31	36	42	45

多自由度系では、高次モードとの共振が問題となり、そうとはいえない。一般の建物では、2次モード固有周期は、1次モード固有周期のおよそ1/3である。クレーンの固有周期を1/3以下にしてしまうと、2次モードによる共振が問題になり、共振回避策として有用でなくなる。したがって、対策時の固有周期は、2次モードが問題にならない程度の固有周期に抑える必要がある。

5. まとめ

フロアクライミングクレーンの共振回避策について理論的、解析的に検討した。高層建築の建築途上で、フロアクライミングクレーンの固有周期が、建築物の固有周期と近接してしまう。そこで、当該クレーンの特徴を利用して、マスト高さを建設途上で変更することにより、共振を回避する。

本稿では、マスト高さを調整するべき階数を理論的に示し、その有効性を多自由度系せん断建物モデルを用いて示した。

参考文献

- 1) 日本クレーン協会, 阪神・淡路大震災のクレーン等への影響に関する調査研究, 1997
- 2) 労働省告示, クレーン構造規格, 1995
- 3) 建設省住宅局建築指導課, 建築設備耐震設計・施工指針1997年版, 日本建築センター, 1997
- 4) 高梨成次ら, 実機建設用タワークレーンの振動特性, 産業安全研究所特別研究報告, pp.17-25, 2000
- 5) 大嶋勝利ら, タワークレーン模型の振動実験, 産業安全研究所特別研究報告, pp. 27-32, 2000