天井クレーンの地震応答に関する一考察*

星 井 勤^{*1}, 小 林 博 栄^{*2}

A Study on Seismic Behavior of Travelling Overhead Cranes

Tsutomu HOSHII and Hiroe KOBAYASHI

The nonlinear dynamic analysis of travelling overhead cranes with Coulomb's friction between travelling wheels and rails is presented. The conventional method to estimate the maximum crane response by linear analysis and reduction due to the friction is not conservative in this study. The wheels repeat sliding and sticking on the rail depending on the response of the crane girder during the earthquake. The crane sliding displacement is not altered much by differences in the frictional force. The travelling buffers are required to have small spring constants and enough stroke to absorb the crane sliding displacement.

Key Words: Material Handling Equipment, Numerical Analysis, Overhead Travelling Crane, Seismic Nonlinear Analysis, Friction between Wheel and Rail

1. 緒 言

近年各種プラントの耐震対策の充実とあいまって、そこで使用される天井クレーンの耐震設計の確立が必要となっている。天井クレーンの地震時の応答が他の設備機器と相違する点は、図1に示すように、天井クレーンは建屋の走行レール上に車輪を介して設置されているため、建屋との接続は単に摩擦によっている点である。このため走行方向に車輪とレールのすべり摩擦以上の地震力が加わった場合、クレーンはレール上をすべり、建屋側の加速度は減少されて伝達される⁽¹⁾。

現行の耐震設計では、クレーンに加わる地震力の限界値を走行制動車輪のすべり摩擦力とする⁽²⁾か、または、修正震度法による地震力にすべり摩擦力に対応する低減率を表す、すべり補正係数を用いて⁽³⁾求めている。しかし、これらは線形の応答計算に車輪とすべりの非線形特性を簡略化してとりこんだものであり、す

べることによってあらたに生ずる設計的課題、とくに走行衝突緩衝器の容量の検討のための、すべり速度やすべり変位量を求めることはできない。

本研究においては、上記の観点から、地震時にすべりを生ずる天井クレーンの計算モデルを作成して、応答計算を行い、すべり挙動について調べた。従来、天井クレーンに関してこのような観点からの研究は見当たらず、実用設計への応用が期待される。

2. クレーンの計算モデルと運動方程式

2.1 計算モデル 天井クレーンの走行方向の地震時の応答を解析するため本研究に使用した計算モデルを図2に示す。吊荷の水平方向の固有振動数はワイヤロープで吊られているため、クレーン構造部分の固

図1 天井クレーンの主要構造

* 昭和62年3月14日 東北支部第22期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年9月26日。

*1 正員、石川島播磨重工業(株)運搬機械事業部 (〒135 東京都江東区豊洲2-1-1)。

*2 正員、石川島播磨重工業(株)原子力事業部 (〒235 横浜市磯子区新中原町1)。

表 1 すべり摩擦力の変動による天井クレーンの応答の変化

Coefficient of Friction between Rails and Wheels μ		Linear Model	0.65	0.4	0.2	0.1
Max. Friction Force between Rails and Wheels	F_s (MN)	3.3	1.56	0.96	0.48	0.24
	Ratio to Linear Model (%)	100	47	29	15	7
Max. Girder Displacement	$ U_2'_{\max} $ (cm)	8.1	4.6	3.2	2.3	1.6
	Ratio to Linear Model (%)	100	57	40	28	20
Max. Sliding Velocity $ \dot{U}_1 _{\max}$ (cm/s)		—	15	19	23	21
Max. Sliding Displacement $ U_1 _{\max}$ (cm)		—	1.0	3.2	4.3	3.5

図 4 入力地震波

図 5 ガーダの応答変位の計算例

ーンに伝達されるが、伝達力は F_s を超えることはできず、この場合すべりを生ずるモデルとした。図 3 に示す非線形ばねの特性は、完全弾塑性の構造材料の応力とひずみの関係に等しいことに着目し、計算には汎用構造解析プログラム MSC/NASTRAN の Newmark- β 法による数値積分による解法⁽⁵⁾を用いた。

3. 天井クレーンの応答計算

3.1 計算に使用した諸量 代表的な天井クレーンの数値を例にとり、次のように諸量を選定した。

$$m_o g = 2.0 \text{ MN}, \quad m_i g = 0.73 \text{ MN}$$

$$m_s g = 0.34 \text{ MN}, \quad L = 40 \text{ m}$$

$$k_g = 41 \text{ MN/m}, \quad \xi_g = 0.01$$

$$k_f = 10\,000 \text{ MN/m}$$

鉛直荷重 W はクレーンの吊荷 1.2 MN とクレーン重量の走行制動車輪への配分を考え、2.4 MN とした。摩擦係数 μ の値は、国内の指針案⁽³⁾の値の 0.65 とこれより小さい 0.4、0.2 および 0.1 について計算し、すべりを生じないとした線形計算の結果と比較した。

入力地震波は、天井クレーン設置用高さでの設計用の模擬地震波の一部を用いた。これを図 4 に示す。

3.2 計算結果と考察 上記の諸条件の設定および仮定に基づき、応答計算を行った。摩擦係数の値によりすべり摩擦力を変動させた場合の主要な計算結果

を表 1 に示す。図 5 にガーダの応答変位の計算例として摩擦係数が 0.1 の非線形計算の結果を示す。比較のために線形計算の応答もあわせて示してある。この図を見ても明らかなように、すべりを考えた計算値には、すべり摩擦力による変位応答の制限効果が現れている。線形計算の結果は、ガーダ系の 1 質点の応答に相当するため、応答変位の最大値は入力地震波に対するガーダ系の固有振動数での変位応答スペクトル値となる。この線形計算の最大値に対する、非線形計算における最大摩擦力の比率とガーダ最大応答値の比率を比較すると、表 1 に示すように後者のほうがどの摩擦係数の条件でも大きい。サドル質量を零とした非線形ばねを有する 1 自由度系の場合は、明らかに両者の比率は一致するため、この場合はサドルのすべり時の応答が影響していると考えられる。したがって、線形応答計算の応答値をすべり摩擦力に応じて低減させる最大変位応答値の推定法⁽³⁾は設計的に危険側となる可能性がある。

図 6 にサドル部分の応答速度計算例として、摩擦係数が 0.1 のときの結果を示す。 U_1 の速度は車輪とレールのすべり速度に相当するので、この図より車輪とレールは、図 5 に示すガーダの応答変位に応じて、固着とすべりを繰り返しているのがわかる。他のすべり摩擦力の場合を含めた最大すべり速度の計算値は表 1 に示

図6 サドル部分の応答速度の計算例 ($\mu=0.1$)

ように、最大すべり速度のすべり摩擦力の大きさによる変化は小さい。図6に示すように、最大すべり速度は入力地震波の最大速度と同程度の大きさである。

サドル部分のレール上でのすべり変位量を図7に示す。すべり摩擦力が小さいほど、すべりが起こる度数は多くなっている。しかし、すべり摩擦力が小さい条件でも、すべり速度は増加しないことと、その正負両方向の頻度がほぼ等しいことにより、すべり摩擦力の大きさが最大すべり変位量に与える影響は小さい。天井クレーンが走行衝突緩衝器の近くで地震力を受けた場合、この変位量を吸収できる十分な緩衝器を有することが必要である。本計算例での天井クレーンの緩衝器はばね式のものが多く、ばね定数は 20 kN/cm と小さく、ストロークも 12 cm 程度を有するため、本計算結果の範囲で考えれば、十分なストロークを有していると考えられる。また、ばね定数も小さいので緩衝器からのクレーンへの反力は車輪とレール間で伝達される地震力に比べて小さいので、すべり摩擦によるクレーンへの地震力の低減効果を損なうこともないと考えられる。速度効果を有する緩衝器の場合、すべり速度を考慮して検討できる。さらに詳細には、本解析のクレーン応答モデル緩衝器の要素を加えて応答計算が実施できる。

4. 結 論

天井クレーンの走行方向の地震応答について、線形

図7 車輪とレール間のすべり変位量

および走行車輪とレール間のすべりを考えた非線形の数値計算を行った結果、次の知見を得た。

(1) 車輪とレールのすべり摩擦力に対応して、ガード系の最大応答変位値は制限を受ける。応答スペクトルからの線形計算値に摩擦係数による低減率を用いた応答値と、非線形計算による応答値は異なる。本研究の計算例では後者のほうが大きい。

(2) 車輪とレールはガード系の応答の大きさに応じて、固着とすべりを繰り返す。すべりが起こる度数はすべり摩擦力を小さくすると多くなるが、すべり変位量のすべり摩擦力による変化は小さい。

(3) 車輪とレールのすべり変位量を用いて、走行衝突緩衝器の耐震性を考えた容量を検討できる。緩衝器はすべり変位量を十分吸収できるストロークを有するばね定数の小さなものが望ましい。

以上のようにすべりを考えた非線形計算によって、天井クレーンの地震時のすべり挙動を含む耐震安全性の検討に関する知見が得られることを示した。今後の課題として、摩擦係数の値を中心とした車輪とレールのすべり挙動の実験的研究があげられる。

最後に、入力地震波を提供していただいた(株)東芝、原子力システム設計部に感謝する。

文 献

- (1) Kos, M. and Ljubjana, *fördern und heben*, 30 (1980), Nr. 5, 458.
- (2) 港湾荷役機械化協会編, 港湾用クレーン耐震設計指針(案), (昭53), 2.
- (3) 日本クレーン協会編, クレーン耐震設計指針(案), クレーン, 23-3 (昭60), 6691.
- (4) 宮入, 潤滑, 16-12 (昭46), 893.
- (5) Joseph, J. A., *MSC/NASTRAN Application manual*, (1984), 2-14.