

支持地盤の沈下による移動式クレーンの時刻歴転倒シミュレーション

独立行政法人産業安全研究所 正会員 玉手 聡
 武蔵工業大学工学部 正会員 末政直晃, 片田敏行

1. はじめに

ホイールクレーンやトラッククレーンなどの移動式クレーンはアウトリガーによって作業中の機体を安定させる。しかし、アウトリガーが支持地盤に沈下することによる転倒災害が多く発生している¹⁾。筆者らはこれまでに、支持地盤の沈下特性が移動式クレーンの転倒に与える影響を解明することを目的として、理論解析による静的安定限界と動的安定限界の検討、ならびに 1/20 スケールのクレーン模型による遠心模型実験を行った²⁾。その結果、移動式クレーンの安定性は地盤の沈下特性に強く影響を受けるとともに、その転倒限界は地盤が降伏した後の沈下性状に依存することが明らかになった。本研究では、実験的に観察された支持地盤の沈下によるクレーンの転倒挙動を数値計算によって再現し、実験結果との比較と移動式クレーンの不安定性の確認を行ったので、その結果を報告する。

2. 解析手法

本解析はアウトリガーが地盤に沈下することによる転倒を再現するための2次元モデルによる時刻歴シミュレーションである。検討する転倒過程は図1の通りである。ジブ起伏角が減少することによって転倒モーメントが増加する()。これにより、ジブ側(前方側)アウトリガーの荷重は増加して沈下が発生し()、クレーンは不安定化する()。

アウトリガーの沈下に応答して動揺するクレーンは前後のいずれかのアウトリガーを支点とする回転運動と仮定した。地盤 - クレーン系が有するエネルギーとして、運動エネルギー、ポテンシャルエネルギー、散逸エネルギーを考慮した。ポテンシャルエネルギーは、クレーンの位置エネルギーと地盤のひずみエネルギーから構成され、散逸エネルギーは土の粘性によって散逸するエネルギーを考慮した。クレーンは位置エネルギーが最小となるように運動すると考え、各エネルギーをラグランジェの運動方程式に代入し、任意の時刻 t_i における式(1)の運動方程式を導いた。

$$[M_i] \ddot{u}(t_i) + [C_i] \dot{u}(t_i) + [K_i] u(t_i) + \{R_i\} = 0 \quad (1)$$

ここで、 u, \dot{u}, \ddot{u} はそれぞれ回転支点のアウトリガーに関する機体傾斜角、角速度および角加速度であり、 M_i, C_i, K_i, R_i はそれぞれ質量係数、粘性係数、地盤反力係数、クレーンの転倒モーメントである。時刻歴運動はニューマークのβ法によって計算し、時間間隔 Δt ごとに繰り返し計算して求めた。ここで、 M_i, C_i, K_i, R_i の各係数は、クレーンのジブ起伏角が減少することによるクレーン形態の変化や転倒モーメントの増大によるアウトリガーの沈下量が運動条件に与える影響を考慮するために、計算ステップごとに再計算して更新した。

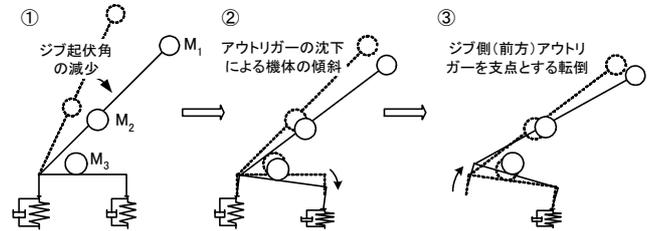


図1 解析的に再現を試みた転倒過程

3. 計算条件

計算に用いる地盤の荷重 - 沈下関係は、地盤条件に応じて双曲線モデル(式(2))とバイリニアモデル(式(3)と式(4))によって近似した。除荷時と再載荷時の関係は、式(3)を両モデルに使用した。

$$p = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon c_1 K_0} + \frac{1}{c_2 p_{\max}}} \quad (2)$$

$$p = c_1 K_0 \epsilon \quad (0 \leq p < p_y) \quad (3)$$

$$p = c_2 K_y (\epsilon - \epsilon_y) + p_y \quad (p \geq p_y) \quad (4)$$

ここで、 p はアウトリガーフロートにおける載荷圧力、 $\epsilon (=S/D)$ はフロート径(D)で正規化したアウトリガーの沈下量、 K_0 は荷重沈下関係の初期接線勾配、 p_{\max} は p の最大値、 c_1 と c_2 は補正係数、 p_y は降伏荷重、 ϵ_y は降伏時の沈下量、 K_y は降伏後の荷重沈下勾配である。

図2は異なる地盤条件で実施された遠心模型実験においてクレーンが転倒した際に観測されたアウトリガーの沈下挙動と、これを双曲線モデルとバイリニアモデルによって近似した結果を比較して示す。例示する2ケースの地盤は何れもローム地盤の表層にセメント混合ロームを有する表層固結地盤である。Case1は下層に一軸圧縮強度(q)が60kPaのローム層を層厚12cm有し、表層には q が600kPaの固結層を層厚(H)3cm有する。

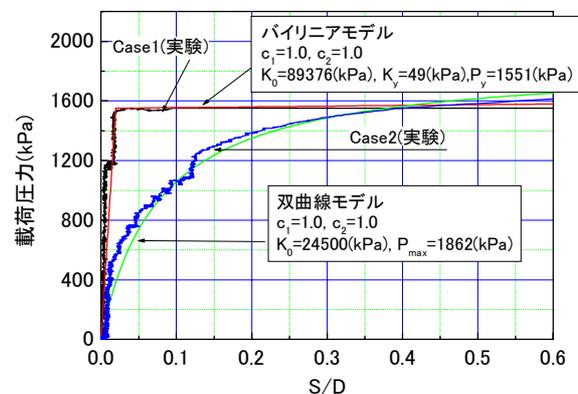


図2 アウトリガーの荷重沈下関係に関する実験結果とモデルによる近似の比較

Keywords ; 移動式クレーン, 転倒事故, アウトリガー (基礎) の沈下, 数値シミュレーション

〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 Tel 0424(91)4512, Fax 0424(91)7846

アウトリガーフロート径(D)に対する相対厚(H/D)は 1.0 である。一方、Case2 は同じ下層の表層に q が 260kPa の固結層を有し、その層厚は $H/D=1.8$ である。両者の荷重沈下挙動は大きく異なるが、極限支持力はほぼ類似した値を示す。Case1 は固い表層の影響により脆弱的な沈下挙動を示した。荷重沈下曲線は降伏点で屈曲した後、荷重はほとんど増加せずに沈下量が増加する傾向を示した。バイリニアモデルはこの実験結果にほぼ一致させて近似することができた。Case2 は载荷初期における荷重の増加割合が高いが、沈下量の増加に伴って荷重増分は緩やかに減少し最大値に漸近する傾向を示した。双曲線モデルもこの挙動にほぼ一致させて近似することができた。また、ダンピング係数(C_i)は転倒実験で得られた沈下 - 時間関係から機体傾斜角、角速度、角加速度を求め、運動方程式に直接代入して計算した。その結果、 C_i は地盤反力係数 K_i に対して約 1/500 の比例関係が見られたため、両地盤モデルに対してこの関係を計算に使用した。

4. 計算結果と考察

数値計算は遠心模型実験において観測された転倒挙動を検証するために、この実験過程を再現して実施された。クレーンのつり荷重量はジブ起伏角が 30 度における静的安定限界荷重とした。初期ジブ起伏角は 70 度に設定し、前後のアウトリガーに作用する荷重を平衡させた。この初期状態を維持して重力加速度は 1g から実験時の加速度(50g)まで連続的に増加させて、クレーンの自重を増大させた。所定の重力加速度に到達後、ジブ起伏角を減少させて転倒モーメントを増加させ、転倒を再現した。計算はクレーンが静的転倒限界あるいは運動的転倒限界に至った時点で終了させた。

図3はCase1の数値計算におけるアウトリガー反力の推移を示す。前側と後ろ側アウトリガーの載荷圧力は、重力加速度の増加によってそれぞれ 1070kPa および 950kPa まで上昇させた。次に、計算回数 1.32×10^7 付近から、ジブ起伏角を減少させたことにより転倒モーメントが発生し、前側アウトリガーの接地圧は増加し、後ろ側アウトリガーの接地圧は減少した。計算は、前側アウトリガーの載荷圧力が 1700kPa を上回った付近で終了し、この時にクレーンは転倒条件に至った。

図4はクレーンが転倒に至る際の機体傾斜角とジブ起伏角の関係について実験結果を点線で示し、数値計算結果を実線で示す。機体傾斜角はアウトリガーの張り出し幅に対する沈下量の関係から求めた。図中に示す印は転倒支点に対して他端支線の反力がゼロとなった時を示し、この時の機体傾斜角を仮想転倒角(θ_a)と呼ぶ。印は静的安定限界時の機体傾斜角であり、静的転倒角(θ_s)²⁾と呼ぶ。印は動的安定限界による動的転倒角(θ_d)²⁾である。印は実験時におけるアウトリガーの沈下 - 時間関係から機体の転倒挙動を逆解析して求めた運動的転倒角(θ_r)²⁾である。そして、数値計算より求めた安定限界は解析的転倒角(θ_N)とし、²⁾で示した。

Case1 に関する転倒挙動について、実験結果と計算結果を比較する。両者の転倒挙動は良く一致した傾向を示しており、ジブ起伏角が約 60 度の時に機体傾斜角が急増して転倒に至った。ジブ起伏角 60 度における θ_s は

約 8.8 度であるが、転倒に必要なエネルギーは機体傾斜角が 3.8 度(θ_r)の時に備わったと考えられる。これは、地盤の急激な沈下によって発生した運動エネルギーによるものと考えられ、他端反力がゼロとなった 5.9 度よりも早い時点である。 θ_N は 3.9 度であり θ_r にほぼ一致し、数値計算による転倒挙動の再現と転倒限界の推定ができた。一方、Case2 ではジブ起伏角の減少に伴って機体は徐々に傾斜する傾向を示した。 θ_r は約 8.9 度であり、 θ_s および θ_a の比較的近傍に位置する。転倒挙動は解析結果と実験結果がほぼ一致する傾向を示したが、 θ_N は 6.8 度となり転倒限界を若干過小に評価した。これは転倒に必要な運動エネルギーが、実験結果に比べて早期に備わったことを意味し、計算に用いたダンピング係数が小さかったことによると思われる。

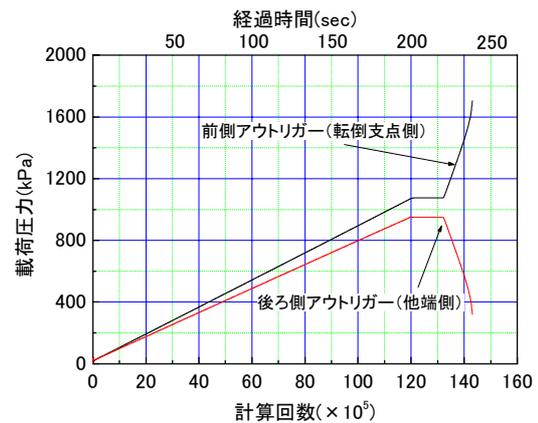


図3 数値計算におけるアウトリガーの載荷圧力(Case1)

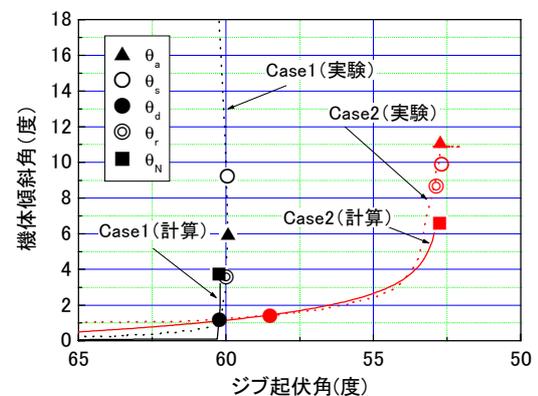


図4 実験と数値解析による転倒挙動の比較

5. 結論

地盤の荷重沈下関係を双曲線モデルとバイリニアモデルによって近似し、数値計算による転倒シミュレーションを行った。その結果、転倒挙動は計算結果と実験結果がほぼ一致し、計算による挙動の推定がある程度可能なことがわかった。一方、安定限界については、地盤のダンピング係数がクレーンの傾斜角速度を左右し、解析的安定限界の算出に影響することがわかった。

<参考文献>

- 1)玉手 聡, 堀井宣幸, 豊澤康男, 末政直晃, 片田敏行, 高野裕亮: 支持地盤の不安定性が移動式クレーンの転倒に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.596 / -43, pp.163 ~ 174, 1998.
- 2)玉手 聡, 堀井宣幸, 豊澤康男, 末政直晃, 片田敏行, 土屋法久: 表層固結地盤の破壊沈下特性の違いが移動式クレーンの転倒に与える影響, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集第 6 部門, pp.654 ~ 655, 2000.