

基礎の急激な沈下による移動式クレーンの不安定性

労働省産業安全研究所 正会員 ○玉手 聡, 堀井宣幸, 豊澤康男
武蔵工業大学 工学部 正会員 末政直晃, 片田敏行, 安部正邦

1. はじめに

つり荷運搬機械の移動式クレーンは、アウトリガー(基礎)と呼ばれる安定装置を使用して作業を行う。しかし、地耐力不足のためにアウトリガーが沈下して、クレーンが転倒する災害が多く発生している¹⁾。

このような支持地盤の不安定要因に伴う移動式クレーンの転倒を検討する場合、地盤降伏後の沈下挙動の違いが転倒に及ぼす影響、言い換えると地盤沈下に応答して動揺するクレーンの動態挙動を解明することは、転倒防止対策において配慮すべき地盤の状態や調査範囲と調査方法に有益な情報をもたらす。しかし、アウトリガーの沈下に伴うクレーンの転倒は、ジブ長、ジブ起伏角やアウトリガー張り出し幅等の作業条件に依存する。さらに、アウトリガーの沈下挙動も転倒に大きく影響を及ぼすため、地盤-クレーン系の転倒メカニズムは複雑となる。そこで筆者らは、模型クレーンによって実験的に転倒を再現して、転倒挙動の解明と転倒に及ぼす地盤条件の影響を調査している。本報告では、急激な沈下特性を示す表層固結地盤において、ジブ長の違いとジブ起伏角の違いが転倒に与える影響について実験的に調査した結果を述べる。

2. 実験装置

実験に使用した模型クレーン(写真1,右)は、吊り上げ能力が20トン級のホイールクレーンの約1/20スケールである。アウトリガーは模型の4隅に20cm間隔で配置される。接地圧を地盤に伝達するアウトリガーフロートは直径が3cmであり、これに作用する荷重は小型ロードセルで測定する。またフロートの沈下量はワイヤー式変位計によって測定する。つり荷はジブの先端にワイヤーを介して吊り下げ、定格出力AC100Wのサーボモーターによって昇降される。ジブ起伏角はジブ支点に取り付けた角度センサーにより検出される。クレーンの転倒は、ジブ起伏角を減少させることにより、転倒モーメントが増加して再現される。模型クレーンは実験容器(写真1,左)に装填し、遠心装置に搭載して実験を行う。実験容器は、遠心装置の回転に伴って発生する風の影響を防止するために、模型と土槽全体を覆う構造となっている。

3. 模型地盤の条件

実験に使用した地盤材料は関東ロームである。静的に締め固めによる関東ロームの一軸圧縮強さ(q_u)は、締め固め圧力(P_c)が196kPa以下の範囲では、ほぼ比例して増加し、強度増加率(q_u/P_c)は0.41である。模型地盤は、縦36cm、横36cm、深さ21cmの土槽に作製した。模型地盤は表層固結した2層地盤であり、下部層に層厚12cmのローム層を有し、上部の表層に層厚3cmの固結層を有する。これは軟弱な地盤の表層が固結した状態を想

定したものである。ロームは最適含水比(103.5%)に調整した後に、地盤層厚が約4cm毎に静的に締め固めて作製した。締め固め圧力は147kPaであり、締め固め時間は各層1時間である。表層の固結層は、関東ロームに超速乾セメントを混合した材料(以下、セメント混合ロームという)によって再現した。ロームとセメントの混合割合(Rc)は50%とし、その混合割合に対して強度がほぼ最大となるように加水して含水比を調整した。セメント混合ロームの一軸圧縮強さは約588kPaであり、ロームの一軸圧縮強度に比べて約9倍の強度を示した²⁾。なお、表層試料の投入後、地盤は24時間静的に締め固めて養生した。また、フーチング径(D)に対する表層厚(H)はH/D=1の条件であり、これまでに行った実験から、同条件では降伏後にアウトリガーが急激に沈下することを確認された³⁾。



写真1 実験容器に装填した模型クレーン(左)及びアウトリガーが地盤にめり込んで転倒した模型の様子(右)

表1 クレーン模型の実験条件と結果

実験名称	Case 1 ¹⁾	Case 2	Case 3	Case 4 ²⁾
地盤構成	表層固結			
固結表層厚/フーチング径	1.0			
遠心加速度(g)	45	52	49	72
ジブ長(cm)	40	60	60	90
つり荷の質量(g)	2550	980	980	315
初期ジブ起伏角(deg)	72	75	75	70
限界ジブ起伏角(deg)	30			
転倒時ジブ起伏角(deg), θ_a	56.2	46.5	54.0	60.5
最大傾斜角速度(度/sec)	14.7	40.9	48.5	29.8
転倒時の機体傾斜角(度)	5.1	5.2	8.0	-
静的安定限界角度(deg), θ_s	11.0	7.4	10.8	17.3
動的安定限界角度(deg), θ_d	1.5	0.6	1.4	3.5
逆解析による安定限界角度(deg), θ_r	6.6	3.1	4.8	7.0
運動的不安定係数(実験値) $F=\tan(\theta_r)/\tan(\theta_s)$	0.6	0.42	0.44	0.39

1)転倒時にアウトリガーが破損した。2)ジブが容器に衝突した。

Keywords ; 移動式クレーン, アウトリガー(基礎)の沈下, 転倒シミュレーション, 遠心模型実験

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

4. 遠心模型実験による転倒シミュレーション

模型クレーンによる転倒シミュレーションは遠心载荷装置に搭載して行った。実験方法は、まずクレーン機体の作業条件(アウトリガーの張り出し幅、ジブ長等)を決定し、静的に吊ることができるジブの限界角度(限界ジブ起伏角)とつり荷の質量(安定限界荷重)の関係を決定する。次に4つのアウトリガーに作用する荷重が平衡するようにジブ角度を増加させる。この状態を転倒再現前における、クレーンの初期状態とする。次に、遠心加速度を上昇させて、アウトリガーフロートの接地圧を任意のレベルに増加させる。そして、ジブ角度を減少させて転倒モーメントを発生させることにより、転倒(つり荷側)支点の接地圧が増加する。支点接地圧が降伏点を越える時のジブ起伏角とつり荷質量の関係は、遠心加速度を増減することによって任意に設定できる。表1に転倒実験の条件と結果等を記す。

5. 実験結果と考察

図1はアウトリガーの荷重と沈下の関係を示す(Case 3)。载荷荷重はフロートの面積で除し、沈下量はフロートの直径で除してそれぞれ表した。黒線はつり荷(転倒支点)側となるアウトリガー、赤線はつり荷の他端側アウトリガーの曲線である。アウトリガーの载荷圧力は遠心力の増加に伴って载荷圧力が増加し、○印で示す接地圧レベルに到達させる。この時の沈下量は微小であり($S/D=0 \sim 0.01$)、初期勾配の曲線上にある。その後、加速度レベルを一定に維持した状態で遠隔操作してジブ起伏角を減少させ、転倒モーメントを増加させる。これにより転倒支点の接地圧力は増加し、曲線勾配は急激に減少して沈下割合が急増する。一方、他端側の曲線は転倒モーメントの増加に伴って、荷重は減少する。ここで他端の接地圧がゼロとなった時(他端反力ゼロ)を仮想転倒と定義した。

図2は模型クレーンが転倒に至るまでの機体傾斜角とジブ起伏角の関係を示す。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▲印は仮想転倒点を示す。また、○印は静的釣り合いから求めた静的安定限界であり、●印はアウトリガーの沈下を自由落下と仮定して求めた動的安定限界である。印は実験によって得られたアウトリガーの沈下記録からクレーンの運動を逆解析して求めた転倒条件である(表1参照)。比較する4つの実験ケースは、Case1はジブ長が40cmであり、Case4は90cmである。Case2とCase3の両者は60cmであるが、転倒時のジブ起伏角はそれぞれ47度と54度であった。

初めにジブ長が60cmで等しく、転倒時のジブ起伏角(θ_a)が異なるCase2とCase3を比較する。ジブ起伏角は、初期状態である約75度からほぼ一定速度で減少する。Case2はジブ起伏角が約47度の時に機体傾斜角5.2度で転倒した(▲印)。一方、Case3はジブ起伏角が約54度の時に機体傾斜角8度で転倒しており、ジブ起伏角はCase2に比べて約7度大きく、機体傾斜角は約3度大きい。両者のつり荷質量は等しいが、 θ_a は異なる。そのため、転倒時の静的な不安定性もCase2とCase3は異なる。すなわち、Case3転倒時の機体傾斜角8度に対して、静的安定限界(θ_s)は約10.8度であり、2.8度の余裕がある

状態で転倒した。また、動的転倒限界(θ_d)は1.4度であり、早い段階で機体が転倒条件を満たす可能性を示した。しかし、逆解析による転倒条件(θ_r 、印)は4.8度であり、 θ_d と θ_a のほぼ中間で運動学的な転倒条件を満たしたことが解った。 θ_s に対する θ_r を運動学的不安定化係数(F)として算出すると、0.44である。Case2についても同様の検討を行うと、転倒時の θ_a が小さいため、 θ_s および θ_d は減少し θ_r も小さい。しかし相対的に比較したFは0.42であり、ほぼ等しい。一方、Case1は模型クレーンの転倒中に転倒支点のアウトリガーが折損したため、仮想転倒点は不明確である。また、ジブ長が90cmであるCase4は転倒に伴ってジブが実験容器の壁面に衝突して転倒運動が途中で停止したため、仮想転倒が得られなかった。しかし、逆解析して求めた転倒条件(印)は、機体傾斜角がCase2及び3に比べて小さくなっている。比較する4つの実験ケースからは、転倒時のジブ起伏角が増加するに従って、運動学的に転倒に必要な機体傾斜角は増加傾向を示すが、静的安定限界に対して比較した運動学的不安定係数は、ほぼ一致する傾向が見られた。

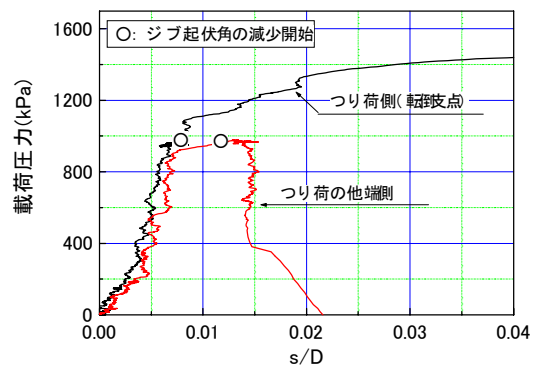


図1 表層固結地盤(H/D=1)の荷重-沈下関係(Case 3)

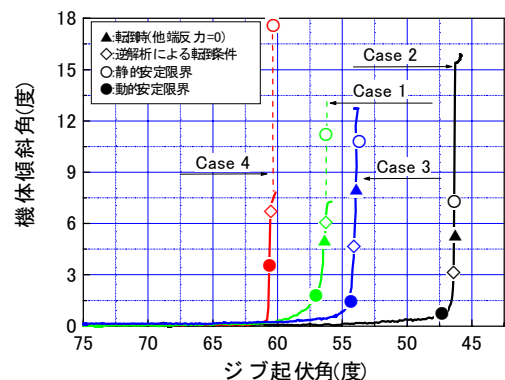


図2 ジブ起伏角と機体傾斜角の関係

<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,安部正邦: セメント混合ロームの一軸圧縮強さに及ぼす含水比の影響,地盤工学会第35研究発表会講演集,投稿中,2000.
- 3)玉手 聡,堀井宣幸,豊澤康男,末政直晃,片田敏行,呉屋佳俊: 基礎の沈下による移動式クレーンの転倒シミュレーション,土木学会第54回年次学術講演会概要集第3部(A), pp.916~917,1999.