

## 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

独立行政法人 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, 土屋久

### 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<sup>1)</sup>。

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とともに、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

模型地盤は表層固結層を有する2層地盤であり、使用した地盤材料は関東ロームである。下部層は最適含水比(103.5%)に調整したロームを147kPaで静的に締め固めて作製した、一軸圧縮強さ( $q_u$ )が60kPaを有する層厚12cmのローム層である。表層に配置した固結層は、軟弱な地盤の表層をセメント安定処理された状態を想定したものであり、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。表層材料の強度はロームとセメントの混合割合( $R_c$ )と含水比によって調整<sup>2)</sup>するとともに、表層厚( $H$ )をフーチング径( $D$ )に対して0.5, 1.0, 1.8に変化させて転倒挙動を比較した。なお、ローム層及び表層は土槽に試料の投入後、24時間静的に締め固めて養生して作製した。



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 転倒シミュレーションの実験条件と結果

	Cs1	Cs2 <sup>1)</sup>	Cs3	Cs4	Cs5	Cs6 <sup>1)</sup>
ジブ長(cm)	60	90	60	60	60	90
つり荷の質量(g)	1485	565	980	980	980	315
表層(セメント混合土)の一軸圧縮強さ( $q_u$ , kPa)	598	598	264	1400	598	598
表層厚(H)/アウトリガー径(D)	1.0	1.0	1.8	0.5	1.0	1.0
限界ジブ起伏角(度)	45	45	30	30	30	30
遠心加速度(g)	52	72	52	41	52	72
仮想転倒時のジブ起伏角(度)	60	57	53	47	47	60.5
仮想転倒時の機体傾斜角( $\theta_a$ )	5.9	-	10.8	9.4	5.1	-
静的安定限界( $\theta_s$ )	8.75	9.82	10.2	7.55	7.3	17.3
動的安定限界( $\theta_d$ )	0.98	1.12	1.21	0.61	0.6	3.5
逆解析による転倒限界( $\theta_c$ )	3.75	4.72	8.87	7.44	3.1	7.0
不安定係数 $F = \tan\theta_c / \tan\theta_a$	0.43	0.48	0.86	0.99	0.42	0.39

1) 転倒時にジブが容器に衝突した。

### 4. 遠心模型実験による転倒シミュレーション

クレーンの安定性は、アウトリガーの張り出し幅やジブ長とともに、静的に吊ることができるつり荷の質量(安定限界荷重)と、ジブの限界角度(限界ジブ起伏角)の関係によって左右される。本実験では、ジブ長が60cmと90cm、また限界ジブ起伏角が30度と45度で異なる安定条件において、表層固結地盤がめり込み破壊した場合のクレーンの不安定性を実験的に検証するとともに、同じクレーン条件において表層の厚さと強度の組合せが異なる地盤において発生する沈下挙動の違いがクレーンの転倒に及ぼす影響を調査した。

模型クレーンによる転倒シミュレーションは遠心載

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

荷装置に搭載して行った<sup>3)</sup>。遠心加速度を表1に示すレベルに上昇させて、アウトリガーフロートの接地圧を実機とほぼ同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）支点の接地圧を増加させる。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

表層の厚さと強度の組合せによって最大支持力がほぼ等しくなるよう作製した模型地盤におけるアウトリガーの荷重圧力-沈下関係について、変位制御による支持力試験結果と転倒実験時に計測された結果を比較して図1に示す。荷重はフロート径で除して荷重圧力 $P$ (kPa)で表し、沈下量 $S$ はフロート径 $D$ で除して無次元化して表す。表層の一軸圧縮強度 $(q_d)$ が約590kPaおよび $H/D=1.0$ である地盤(Cs1)の支持力試験結果(Cs1-a)は、 $S/D$ が約0.02において $P$ が約1750kPaのピークを示し、その後沈下とともに荷重圧力が約1300kPaに低下する挙動を示した。これは、堅い表層の影響によってピーク圧力が発揮されるが、表層が破壊した後は、下層のローム地盤によって荷重圧力を支持したことによると考えられる。転倒実験におけるアウトリガーの沈下挙動(Cs1-b)もCs1-aと同様に荷重初期における荷重沈下関係はほぼ同程度の勾配を示す。その後、 $S/D$ が約0.02において屈曲点を示し、曲線は水平を示して $S/D$ が増加しCs1-aと異なる傾向を示す。転倒実験における曲線が明確なピークを示さない理由として、荷重の荷重方法が支持力試験では変位増分が一定であるのに対して、転倒実験では応力制御的に働いたためと考えられる。強度が低い表層を厚く堆積させた地盤(Cs3)における支持力試験(Cs3-a)は、荷重荷重初期の曲線勾配は高いが、 $S/D$ が約0.02を上回ると荷重の増加割合は徐々に減少してゆるやかな曲線を描き、 $S/D$ が0.3以降は圧力増加が非常に小さくなる。また、転倒実験におけるアウトリガーの沈下挙動(Cs3-b)は同一荷重圧力に対する沈下量はCs3-aに比較して若干大きくなる傾向を示すものの、ほぼ類似したなめらかな曲線を描いて沈下する傾向を示した。比較するケースの中で最も堅い表層を薄く堆積させた地盤(Cs4)における支持力試験結果(Cs4-a)と転倒実験による結果(Cs4-b)は、Cs1とほぼ類似した荷重-沈下挙動を示すが、Cs4-aのピーク強度と残留強度の差はCs1-aに比べて小さく約200kPaである。

模型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を図2に示す。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と他端の反力がゼロとなった時の機体の傾斜角であり仮想転倒角 $(\theta_a)$ を示す。また印は、静的安定限界による機体傾斜角 $(\theta_s)$ <sup>1)</sup>であり、印は、動的安定限界による機体傾斜角 $(\theta_d)$ <sup>1)</sup>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た機体傾斜角 $(\theta_r)$ <sup>3)</sup>である。

Cs3とCs4の結果を比較すると、 $\theta_r$ は $\theta_s$ の近傍に位置し両者は静的限界付近で転倒したことが分かる。図2に示した両者の荷重-沈下挙動は異なるがCs4のピー

ク強度とその後の残留強度の差が少なかったためにアウトリガーの沈下は予想したほど急激な沈下とはならず、むしろ低い速度で沈下した。 $\theta_r$ と $\theta_s$ の比を取って表した不安定係数(F値)はそれぞれ0.86と0.99と1に近い値を示した。次に、地盤の表層厚と強度が等しい条件において、ジブ長とつり荷の重さが異なるクレーン条件で再現した転倒結果であるCs1、Cs2、Cs5、Cs6を比較して述べる。これら4ケースでは地盤のピーク強度と残留強度の差が大きく、比較する地盤条件の中で最も急激なアウトリガーの沈下が観察され、転倒時の $\theta_r$ は異なるもののF値は、0.4前後のほぼ一定した値を示した。これは、クレーンの転倒は異なる作業条件においても、ほぼ地盤の破壊沈下特性に影響されて不安定化することを示しており、支持地盤の不安定性によるクレーンの転倒は地盤の沈下特性に依存し、地盤に起因する危険性はクレーン条件によらずほぼ一定値を示すことが実験的に確かめられた。

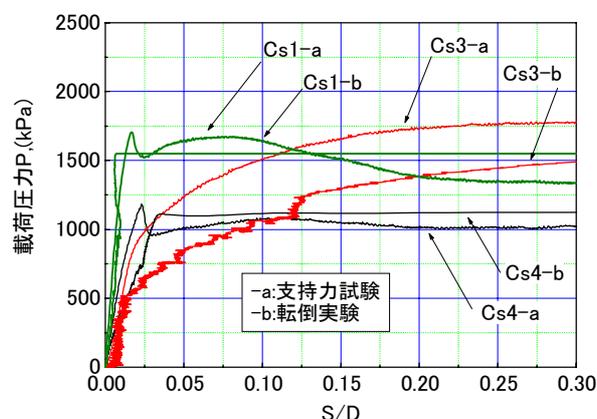


図1 2層地盤の荷重-沈下関係

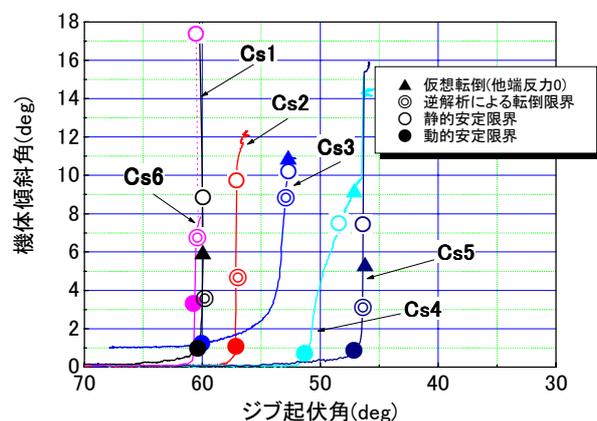


図2 ジブ起伏角と機体傾斜角の関係

### <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, 地盤工学学会第35研究発表会講演集, pp.1165~1166, 2000.
- 3) 玉手 聡, 堀井宣幸, 豊澤康男, 末政直晃, 片田敏行, 安部正邦: 基礎の急激な沈下による移動式クレーンの不安定性, 土木学会第55回年次学術講演会概要集第3部(B), pp.90~91, 2000.