

## 29. 地盤破壊を考慮したクレーン車の 転倒に関するモデル実験

愛媛大学：\*深川 良一・室 達朗  
前田道路(株)：谷上 公一

### 1. はじめに

筆者らは既に地盤破壊を考慮した場合のクレーン車の転倒条件あるいは転倒に対するアラームシステムについて報告してきた<sup>1)2)</sup>。本論文では、モデルクレーン車を用いた一連の転倒実験を行い、転倒に対するアラームシステムの有効性を実験的に検討した。

### 2. アラームシステム構築のための地盤支持力特性の評価および危険度の定義

地盤破壊を考慮した転倒に対するアラームシステムを構築するためには地盤の支持力特性をある程度予測しなければならない。ここではその概要および危険度の定義などについて述べるが、詳細は既発表論文<sup>1)</sup>を参照されたい。

アウトリガー載荷板における載荷圧力～変位関係を推定するため、宇都ら<sup>3)</sup>の提案している次式のような指数分布型曲線を採用した。

$$p = p_{max} \{1 - \exp(-s/\delta_s)\} \quad (1)$$

ここに、 $p$ : 載荷圧力、 $p_{max}$ : 極限支持力、 $s$ : 変位、 $\delta_s$ : 形状係数である。(1)式の1例を図-1に示す。(1)式に基づいて残差平方和SSRを定義すると次式ようになる。

$$SSR = \sum [p_i - p_{max} \{1 - \exp(-s_i/\delta_s)\}]^2 \quad (2)$$

上式のSSRを最小とするように $p_{max}$ 、 $\delta_s$ を決定する方法は非線形最小2乗法となるが、Newton法<sup>4)</sup>を用いて求めることができる。式中 $n$ は演算に用いるデータ組数である。また、載荷圧力～変位関係において降伏支持力 $p_y$ のときの変位 $s$ が $\delta_s$ であるから、(1)式より次式が成り立つ。

$$p_y = p_{max} \{1 - \exp(-1)\} = 0.632 p_{max} \quad (3)$$

地盤破壊危険度 $D$ は載荷途中の各時点での載荷圧力と(3)式より推定される降伏支持力との比率とする。よって、 $k$ 組目のサンプリングデータが得られたときの地盤破壊危険度 $D(k)$ の定義は次式となる。

$$D(k) = p(k)/p_y(k) \quad (4)$$

この場合 $k+1 \sim k$ 組のデータを繰返し計算に用いる。またアラームシステムについては後述するが、以上の $D(k)$ の値に応じてアラームが発せられることになる。

非線形最小2乗法の演算は、具体的には以下のような要領で実施した。まず、各アウトリガーにおける載荷圧力～変位データの $(p_1, s_1) \sim (p_{10}, s_{10})$ の載荷

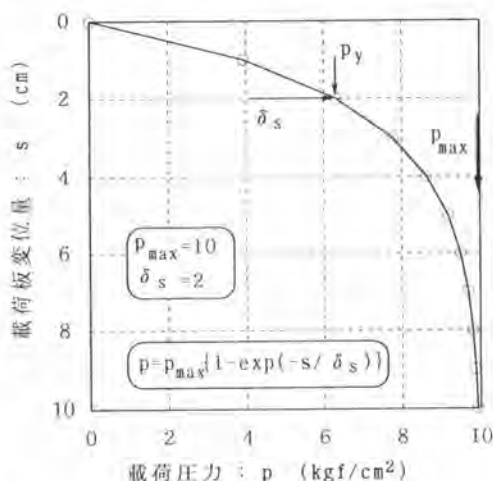


図-1 指数分布型曲線の1例  
( $1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kN/m}^2$ )

初期の10個のサンプリングデータを(2)式にあてはめ、 $p_{max}$ 、 $\delta_s$ の初期推定値 $x_0$ 、 $y_0$ を設定して反復計算し、 $p_{max}(10)$ 、 $\delta_s(10)$ を推定する。勿論データ組数は任意に設定することができる。ただし、多すぎるとリアルタイム性が損なわれ、少なすぎると収束性が悪化する。ここでは10組を採用しているが、データ組数は計算機の能力に依存する。さて、次に $p_{max}(10)$ 、 $\delta_s(10)$ を初期推定値として $(p_2, s_2) \sim (p_{11}, s_{11})$ の10個のデータを反復計算し、 $p_{max}(11)$ 、 $\delta_s(11)$ を推定する。以下 $(p_3, s_3) \sim (p_{12}, s_{12})$ 、 $\dots$ 、 $(p_{n-9}, s_{n-9}) \sim (p_n, s_n)$ とデータ10個ずつ反復計算し、順に $p_{max}$ 、 $\delta_s$ を推定していく。载荷圧力～変位関係の推定には $p_{max}$ 、 $\delta_s$ の初期推定値 $x_0$ 、 $y_0$ が必要であるから、ここではとりあえず事前に実施した平板载荷試験より得られた $p_{max}$ 、 $\delta_s$ を概略値として採用した。収束判定条件は、 $f(x, y) = \partial SSR / \partial x$ 、 $g(x, y) = \partial SSR / \partial y$ とすると、 $|f(x_n, y_n)| < 0.01$ 、 $|g(x_n, y_n)| < 0.01$ である。この収束条件を満たさない場合は、反復計算回数が20回を越えた時点で繰り返し計算を打ち切り、次のタイムステップでの収束計算に移行させた。

### 3. 砂質土盤におけるモデルクレーン車の転倒実験

#### (1) モデルクレーン車の概要

モデルクレーン車は次のような諸元で製作した(図-2参照)。吊り荷重量 $W$ =可変、旋回体重量 $W_1=16.2\text{N}(1650\text{gf})$ 、カウンタウエイト重量 $W_2=5.4\text{N}(550\text{gf})$ 、キャリア重量 $W_3=97.0\text{N}(9900\text{gf})$ 、ブーム重量 $W_4=27.0\text{N}(2750\text{gf})$ 、ブーム長さ $L$ =可変、旋回中心から旋回体重心までの距離 $l_1=2.0\text{cm}$ 、旋回中心からカウンタウエイト重心までの距離 $l_2=2.0\text{cm}$ 、旋回中心からキャリア重心までの距離 $l_3=3.0\text{cm}$ 、アウトリガー張り出し幅 $r_1=28.0\text{cm}$ 、旋回中心から前アウトリガーまでの距離 $r_2=24.0\text{cm}$ 、旋回中心から後アウトリガーまでの距離 $r_3=39.0\text{cm}$ 、ブーム角度 $\alpha$ =可変、旋回体回転角度 $\theta$ =可変である。モデルクレーン車の概略図は図-3に示す。油圧シリンダは最大耐圧 $3.5\text{MN/m}^2(35.7\text{kgf/cm}^2)$ のもの、油圧ポンプは最大圧力 $686\text{kN/m}^2(7\text{kgf/cm}^2)$ のものを使用した。

#### (2) 実験方法

モデルクレーン車の転倒実験は豊浦標準砂から成るモデル砂地盤上で行なった。上槽は一辺120cmの正方形で、標準砂は

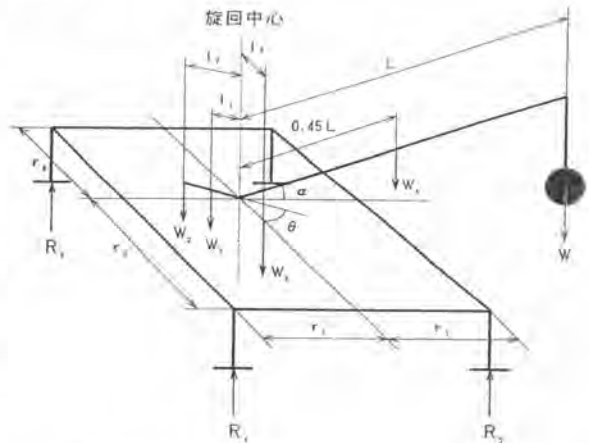


図-2 モデルクレーン車に作用する力と作用点

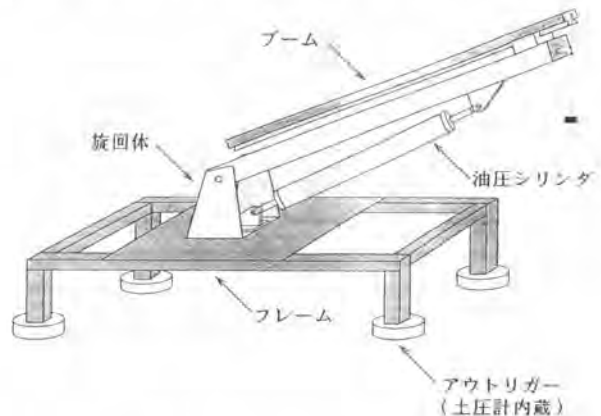


図-3 モデルクレーン車の概略

約15cmの深さで敷き詰めた。アウトリガー下部載荷板の直径5cmに対し土槽深さは約3倍の15cmであるので、すべり面は土槽底とほぼ干渉しないと判断できる。標準砂の比重は2.56、気乾状態の試料の含水比 $w$ は平均0.32%、試験地盤の平均相対密度は約60%であった。コーンペネトロメータを用いてモデル地盤の均一性を予め確認している。

モデルクレーン車の3箇所のアウトリガー載荷板には土圧計を組み込んだ。また、その内2個のアウトリガーにはストローク30mmの変位計を取り付けた。データのサンプリング間隔は約2秒とした。上方から見た各計器の設置位置と旋回体角度 $\theta$ でのブーム位置を図-4に示す。

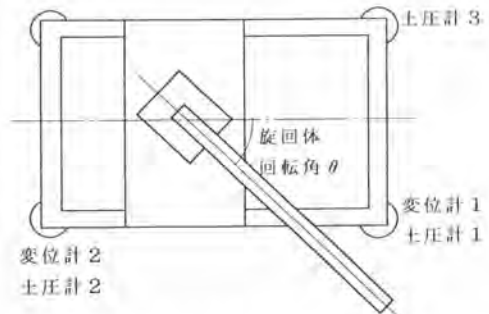


図-4 各計器の設置位置と旋回体回転角

まず、表面の均された砂地盤上にモデルクレーン車を水平に静かに設置した。モデルクレーン車は旋回体の向きにより重心位置が変化するため各アウトリガーにおける沈下量は一定ではないが、平均3mm前後沈下した。本報告で述べる載荷板変位量は、こうして沈下した初期状態を基準状態（即ち0）とした。ブーム初期仰角は、吊り荷と土槽壁との干渉を防ぐため $45^\circ$ の一定角度とし、以後の全ての実験において一定とした。また、ブーム長さも83cm（最長）で一定である。

次にモデルクレーン車を転倒させ、警報システムを作動させる実験を行なった。載荷方法は約0.2kgの重りを載荷時間間隔一定の10秒で順に載せていく方法をとった。転倒に至るまでのデータで収束計算させるため、旋回体角度は実際に転倒した $\theta = 70^\circ, 90^\circ$ で行なった。

### (3) アラームシステム

アラームシステムは変位計1と土圧計1、変位計2と土圧計2（図-4参照）を設置しているそれぞれのアウトリガーにおいて独立して危険度を判断する2系統の収束計算を行うものとした。アラームシステムのプログラムのフローチャートを図-5に示す。データ数が10個以上であれば収

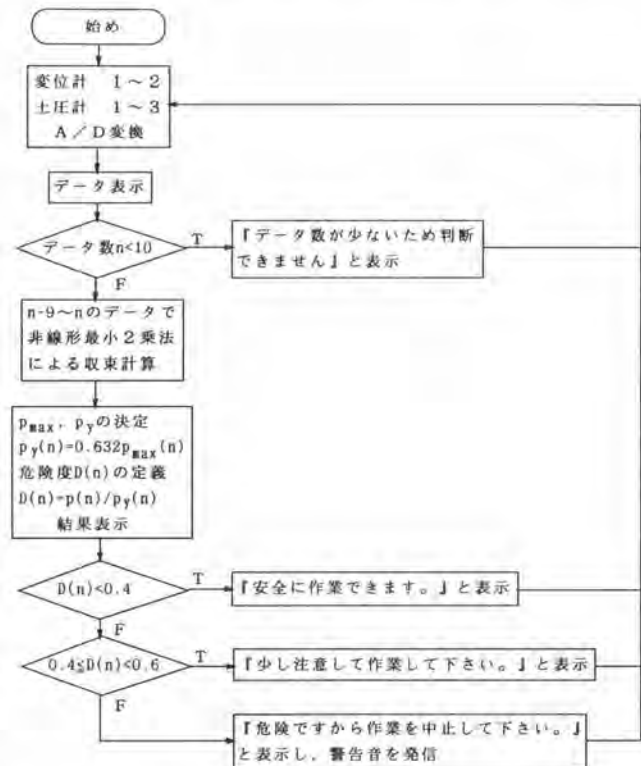


図-5 アラームシステムのフローチャート

束計算を行い、各アウトリガー別に危険度を判断し、危険度の程度により対応するコメントがパソコンのスクリーンに表示されるようにした。もちろん、どちらか一方のアウトリガーで危険側の条件を満たすようであれば危険側の判断として処理されるようにしてある。また、各コメントにあわせてスクリーン上のカラーも青、黄、赤と変化させ、視覚的にも危険度を伝える工夫をこらした。特に危険度Dが0.6を超えると警告音も発信されるようにした。システム作動中のパソコンスクリーンの表示例を図-6に示す。

#### (4) 実験結果と考察

旋回体角度 $\theta=70^\circ$ における予測された危険度と載荷圧力の関係を図-7に示す。グラフより危険度が1を越えた時点で転倒していることから、ほぼ正しい予測ができたといえる。旋回体角度 $\theta=70^\circ$ における予測された危険度と変位の関係を図-8に示す。変位が1cm付近ですでに土圧計2における危険度が0.7を超えており、しかも段階的に変位が進行しているため危険性が高いといえる。旋回体角度 $\theta=70^\circ$ における予測された極限支持力と荷重の関係を図-9に示す。土圧計1,2の双方の結果からいえることは極限支持力がおよそ $196\text{kN/m}^2$  ( $2\text{kgf/cm}^2$ )に収束計算されていることである。載荷圧力の増大に連れ推定される $P_{max}$ の値がほぼ一定位置に収束してくることがわかる。旋回体角度 $\theta=70^\circ$ における予測された形状係数と載荷圧力の関係を図-10に示す。グラフから形状係数についても2cm前後に収束することがわかる。

旋回体角度 $\theta=90^\circ$ における予測された危険度と載荷圧力の関係を図-11に示す。大まかな傾向は $\theta=70^\circ$ の場合と同様である。 $\theta=90^\circ$ であっても若干重心位置が土圧計2側に偏っているため、土圧計2の方で沈下がより速く生じていることがわかる。予測された極限支持力と載荷圧力の関係を図-12に

INPUT FILE NAME ? 45-40		DATE	TIME	COUNT
初期推定値(P1, Si) ? 1.2, 0.5		1994-02-09	14:25	134
CHANNEL	DATA	Pmax	$\delta s$	D
変位計 No.1	0.86 cm	2.28	2.48	0.62
変位計 No.2	0.67 cm	? 2.58	? 2.20	? 0.48
土圧計 No.1	0.986 kgf/cm <sup>2</sup>	< SAFETY INDICATOR >  危険ですから作業を中止して下さい。		
土圧計 No.2	0.821 kgf/cm <sup>2</sup>			
土圧計 No.3	0.574 kgf/cm <sup>2</sup>			

図-6 アラームシステムのパソコンスクリーン上表示例

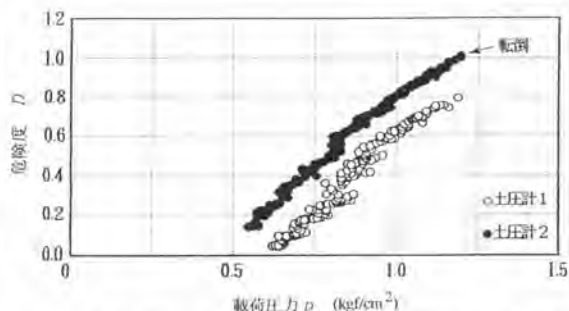


図-7  $\theta=70^\circ$ における危険度と載荷圧力の関係  
( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kN/m}^2$ )

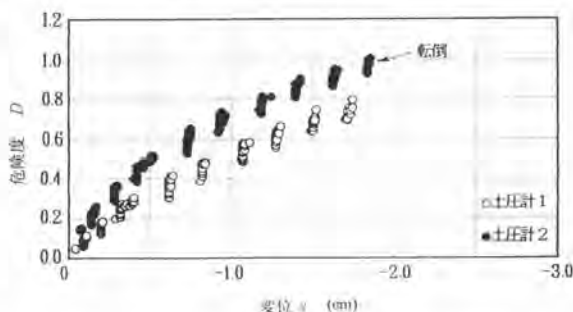


図-8  $\theta=70^\circ$ における危険度と変位の関係

示す。これも $\theta=70^\circ$ の場合とほぼ同様の値に収束した。地盤の初期状態はいずれの実験でも同様であるので以上の結果は妥当なものである。いずれにしろ $\theta=90^\circ$ の場合もほぼ適切に危険度の表示がなされ、危険度が1を越えた時点でモデルクレーン車の転倒が発生した。以上の結果は本報告で提案したアラームシステムの妥当性を示すものであると判断できる。

本研究で行ってきた载荷圧力～変位関係推定によるアラームシステムは、地盤の種類、状態あるいはブームの操作などにより式(1)で表現しきれないような荷重～変位関係が現れたとき誤作動の原因となりえる。例えばブームの $\alpha$ 、 $\theta$ を相対的に速い速度でしかも同時に変化させるような場合である。ただし、こうした例は吊り荷荷重が比較的小さい場合、つまり転倒にいたらない場合が多いと判断できるから、本報告で提案したアラームシステムが有効に作動できるような場合も多いと考えられる。勿論地盤が堅固な場合のクレーン車に作用するモーメントの釣合に基づく転倒条件も合わせて考慮しなければならないから、現行のモーメントリミッタ等の安全装置などと併せて本アラームシステムが運用されることが望ましい。

#### 4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) アウトリガー载荷板直下での载荷圧力～変位関係から地盤破壊をリアルタイムに予測できるアラームシステムを作成した。このシステムは、モデルクレーン車の転倒に対し、危険度に応じて適切な警報を発することができた。また危険度とクレーン車の転倒とは良好な対応関係を示した。
- (2) 本論文で提案したアラームシステムはその適用性に関してさらに検討を重ねる必要があるが、現在

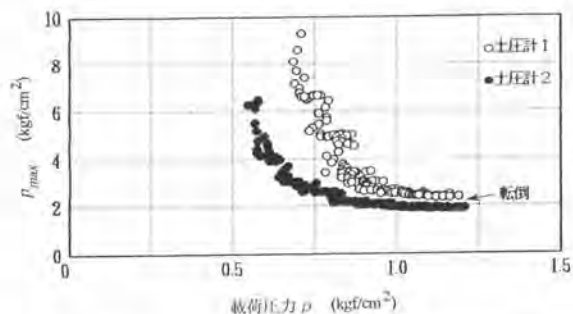


図-9  $\theta=70^\circ$ における極限支持力と载荷圧力の関係  
( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kN/m}^2$ )

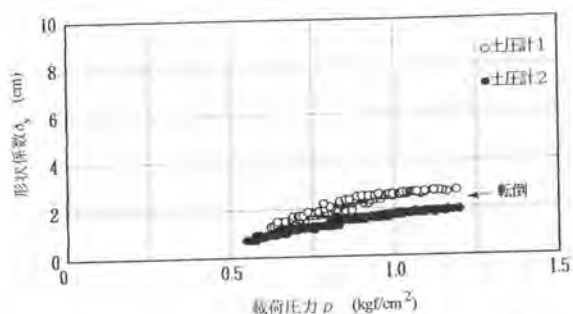


図-10  $\theta=70^\circ$ における形状係数と载荷圧力の関係  
( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kN/m}^2$ )

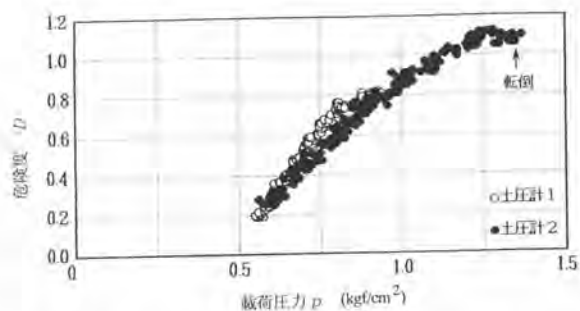


図-11  $\theta=90^\circ$ における危険度と载荷圧力の関係  
( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kN/m}^2$ )

クレーン車に装備されている演算機能付きモーメントリミッタ等のシステムと併せて運用できればさらに安全性を高めることができる。

### 5. 参考文献

1) Fukagawa, R. and Muro, T.: Alarm system to prevent the overturning of truck cranes considering possible ground failure, Proc. of the 11th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction, Brighton, U.K., pp.27-34, 1994.

2) 深川良一・室達朗・加藤祐理・森田悠紀

雄；地盤破壊を考慮したクレーン車の転倒条件解析、土木学会論文報告集（投稿中）

3) 宇都一馬・冬木衛・桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法、基礎工、1982年9月号、pp.21～30、1982.

4) T.R.マッカーラ著、三浦 功、田尾陽一共訳：計算機のための数値計算法概論、サイエンス社、pp.55～79、1986.

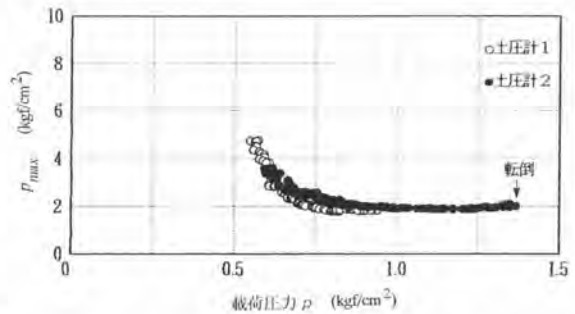


図-12  $\theta=90^\circ$  における極限支持力と載荷圧力の関係  
( $1\text{kgf/cm}^2=98\text{kN/m}^2$ )