

移動式クレーン等の転倒事故原因に関する一考察

A Study on the Causes of Overturning Accident of Movable Cranes

北海学園大学工学部 ○フェロー 当麻庄司 (Shouji Toma)

1. 序論

移動式クレーンや杭打ち機の転倒事故が、かなりの頻度で起こっていることが新聞等で報じられている。クレーンや杭打ち機は長いジブをもつ構造物であり、これが転倒するとジブが家屋を押しつぶしたりして、人身事故をも引き起こすことが多い。転倒事故を起こさないための方策は種々とられているものと思われるが、それでも事故は起こっている。移動式クレーンの転倒は作業中が多いが、杭打ち機は移動中に多いようである。

その他の転倒事故として、建設中の構造物を仮支えているジャッキの転倒がある。ジャッキの場合は、大きな荷重を支えるため転倒すると大事故につながる可能性が大きい。ここでは支持基盤（受け台）の強度が重要になる。

これらはいずれも転倒事故として、共通の問題であると言える。転倒事故の原因として、一般的に考えられるのは、(1) 転倒モーメントが抵抗モーメントを上回った、(2) 地盤（受け台）の支持力が不足していた、である。この内、転倒モーメントが大きすぎて転倒するのは原因として非常に単純であり、理解もやさしい。地盤の支持力不足による転倒は、アウトリガーのフロート等が地盤にめり込んだために起こるものであるが、地盤の支持力に不確実な要素が多いため、転倒の予測に難しい部分がある。

しかし、本研究では上記 2 つの原因の他に、(3) 構造不安定による転倒、が考えられるとしてこれについて述べる。これは転倒問題を構造安定の固有値問題として捉えるもので、これまであまり検討されてこなかった新しいアプローチである。

2. 転倒事故原因の分析

(1) 転倒不安定

当然ながら、転倒モーメントが抵抗モーメントより大きくなれば構造物は転倒する。転倒モーメントを生じさせるためには、偏心荷重あるいは水平荷重を必要とする。クレーンの場合、ジブ長さとしり荷重重との積で転倒モーメントが生じ、それが自重による抵抗モーメントよりも大きくなれば転倒する。クレーンではこのような事故が起こらないように、ある安全率をもった定格荷重が定められており、オペレーターはその性能範囲を超えないように操作している限り、この原因による事故は起こらない。

(2) 地盤不安定

移動式クレーンは作業中機体を安定させるために、アウトリガーを張り出して自重による抵抗モーメントを大きくする。しかし、一方ではアウトリガーのフロートに

大きな地盤支持力を要求することとなり、これが不足するとアウトリガーフロートは地盤にのめり込みクレーンは転倒する。このとき、要求される地盤支持力は、フロートの接地面積と転倒モーメントの関係から容易に求められる。したがって、地盤の支持力さえ不足しなければこの種の転倒は起こらない。玉手ら^{1)~3)}は、この支持地盤の影響を沈下によるクレーンの動的な挙動を考慮しながら、解析的および実験的に研究している。

(3) 構造不安定

これまで転倒事故は、一般に転倒モーメントが作用する場合にのみ起こると考えられてきた。すなわち、荷重が理想的に真上から偏心なく作用すれば、転倒モーメントは生じないので上記 2 つの原因からは転倒は起こらないことになる。また、荷重が比較的小さければあるいは支持の接地面積が大きければ支持力不足も生じず、転倒は起こらない。しかし、構造安定の固有値問題は、このような場合でも転倒は起こり得ることを示唆している。

たとえば、1993年に起きた広島新交通システムの橋桁落下事故⁴⁾の場合は、橋桁を支えていた受け台の H 形鋼の組み方を平行重ねで高く積んだため、長柱座屈となって転倒したとされている。このような長柱座屈は構造不安定の一般的なケースとして、比較的解明しやすい。しかし、1997年に起きた千歳ジャンクションの手延べ桁落下事故⁴⁾のような場合、長柱座屈によるとは考え難く、また転倒を起こすような水平力が働いたとも考え難い。したがってこのケースの場合、次に述べるような剛体 - バネ系の不安定現象の可能性が高いのではないかとと思われる。以下、この種の転倒について述べる。

3. 剛体 - バネ系の構造不安定

軸方向に荷重を受ける構造物が比較的剛で支持地盤が軟弱な場合、図 - 1 に示すような簡単な剛体 - 回転バネ

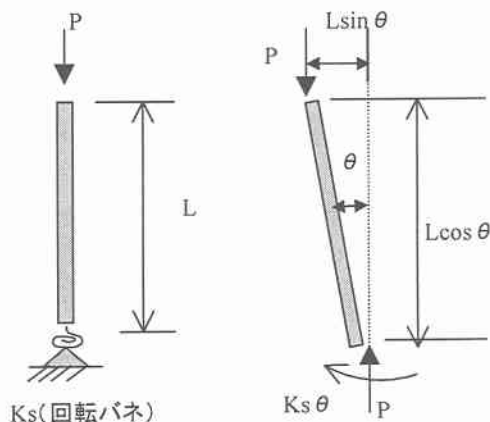


図-1 剛体 - バネ系の構造モデル

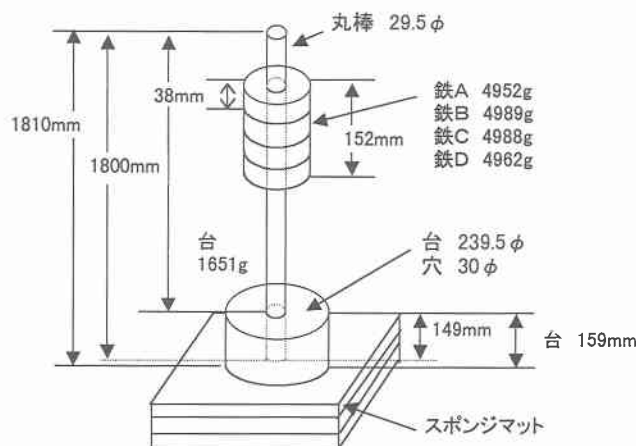


図-2 実験模型図

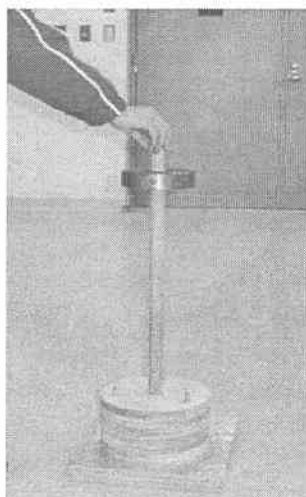


図-3 転倒実験状況

系の構造モデルに置き換えられる。このような系が不安定となる固有値は、角度 θ が小さい場合次式で与えられる⁵⁾。

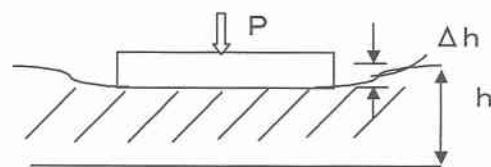
$$P_{cr} = \frac{K_s}{L} \quad (1)$$

ここに、 P_{cr} =座屈荷重、 K_s =回転バネ定数、 L =バネから荷重までの高さ

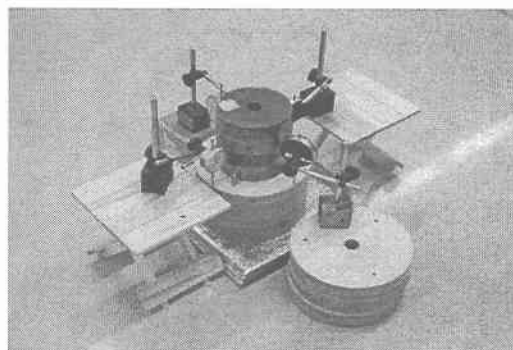
ここでは、構造体であるクレーン、杭打ち機あるいはジャッキを剛体として扱う。そして、それを支持する地盤（受け台）が回転バネに置換される。

上式は地盤（受け台）の支持力が弱いほど、また荷重の作用位置が高いほど転倒しやすくなることを表している。したがって、クローラーをもつ杭打ち機のように接地面積が大きく十分な地盤の支持力があっても、比較的荷重の作用点が高い場合は注意を要する。もちろん、荷重点が高ければ少しの傾斜でも転倒モーメントが大きくなることもあるが、上式はその点だけではないことを物語っている。

また、ジャッキのように大きな荷重を支持する場合、その受け台がよほど剛でない限り支持点で回転性が生じ、たとえ転倒モーメントが働かなくてもこのような剛体-バネ系の構造となって転倒が生じ得る。



(a) 沈下量計測



(b) 計測状況（スポンジマット）

図-4 回転バネ定数の計測 (①沈下量計測)

4. 転倒実験

4. 1 転倒実験の概要

式(1)で表される固有値を確認するための転倒実験を行った。支持地盤としてスポンジマットとスプリングマットの2種類を用い、フーティング基礎に木製の円形板（ $\phi 240\text{mm}$ ）を重ねて用いた。このフーティング基礎の中心に木製丸棒（ $\phi 30\text{mm}$ ）を差し込み、これに沿って鉄製の重り（1個約5kgf）を移動させて荷重高さを調整した。荷重用の重りは4個用いた。

図-2に実験の装置図、また図-3に実験状況を示す。スポンジマットは厚さ（枚数）を3枚、6枚および9枚の3通りに変えて回転バネ定数を変化させ、重りの位置を転倒するまで上げてその高さを計測した。

4. 2 回転バネ定数

回転バネ定数は、この円形フーティング基礎を用いた次の2つの計測結果から求めた。

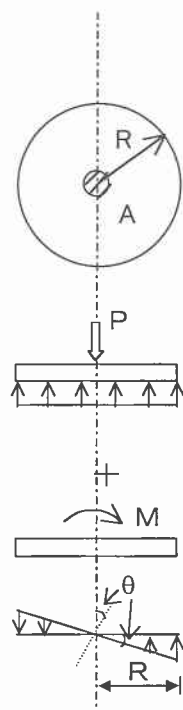
①マットへの鉛直載荷計測（沈下量計測）

マットの上に重りを載せ、そのときの沈下量を計測して次式により回転バネ定数を求める。

$$K_s = \frac{PI}{\Delta h A} \quad (2)$$

ここに、 P =重りの重量、 Δh =沈下量、 A =フーティングの底面積、 I =フーティングの断面2次モーメント

図-4(a)に計測の説明図を、また図-4(b)にスポンジマット3枚を用いたときの状況写真を示す。沈下量は計測4点の平均値をとった。計測結果の1例としてスプリングマットを用いたときの荷重-沈下量曲線を図-6(a)に示すが、これを見ると剛性はほぼ線形とみなすことができる。



(a) 傾斜計測



(b) 計測状況 (スプリングマット)

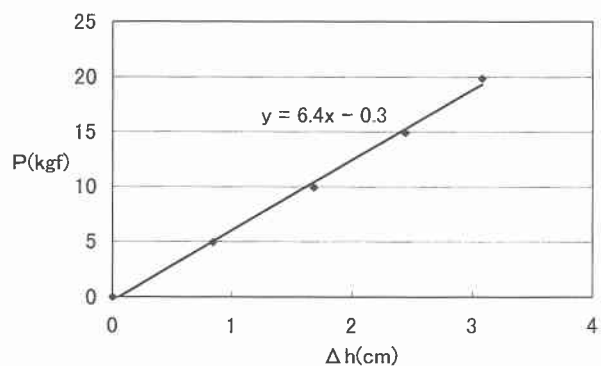
図 - 5 回転バネ定数の計測 (②傾斜計測)

②モーメント傾斜計測

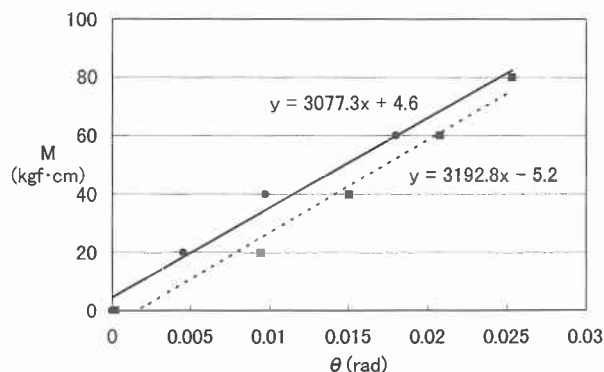
ここでは、重りを載せた状態で水平力を作用させてモーメントを与え、そのときの回転角を計測して次式により回転バネ定数を求める。

$$K_s = \frac{M}{\theta} \quad (3)$$

図 - 5(a)に計測の説明図を、また図 - 5(b)にスプリングマットを用いたときの状況写真を示す。水平力はバネばかりを引張って与えた。計測結果の1例としてスポンジマット9枚のときの荷重 - 沈下量曲線を図 - 6(b)に示すが、実線は荷重を増加していくとき、点線は荷重を減少させていくときの結果である。多少増加時と減少時では差があるが、これはスポンジ内の空気が逃げるのに少し時間を要するためである。しかし、その差は小さく、剛性はほぼ線形とみなすことができる。後の検討には全



(a) 沈下量計測結果 (スプリングマット)



(b) 傾斜計測結果 (スポンジマット9枚)

図 - 6 バネ定数計測結果 (円形フーティング, φ240)

計測値の平均勾配を用いた。

4. 3 実験結果

図 - 7 に、スポンジマットの厚さと重りの大きさおよび高さについての実験結果を示す。図中の理論値は、上記の2つの実験から求めた回転バネ定数を用いて、式(1)より求めたものである。このとき、木製のフーティングおよび丸棒の重量は無視した。これを見ると、マット厚さ3枚の場合は回転バネ定数が大きくなってそこに含む誤差も大きくなり、理論値と実験値にかなり差が生じている。しかし、他のケースについては、ほぼ両者は一致している。

スポンジマットの場合、スポンジ内の空気が逃げるのに時間を要し、そのため剛性が時間とともに少し変化する。それが実験結果のばらつきの原因となっている。そこで、基盤をスプリングマットに変えた場合の実験を行い、その結果を図 - 7 に示すが同図に見る通り理論値と実験値はよく一致している。

また、木製フーティングを正方形 (120 x 120mm) にした場合の実験も行ったが、その結果を図 - 8 に示す。このときの回転バネ定数は、沈下量測定により求めている。これを見ると、スプリングマット以外は比較的よく一致している。スプリングマットの場合、フーティングのサイズが小さくなって沈下量が大きくなり、スプリングを覆う表面布の張力が影響を与え、誤差の原因となったものである。

さらに、ここでは示していないが、円形木製フーティングの直径を小さくした追加実験も行った。その実験結果は、フーティングの底面積が小さくなったために多少

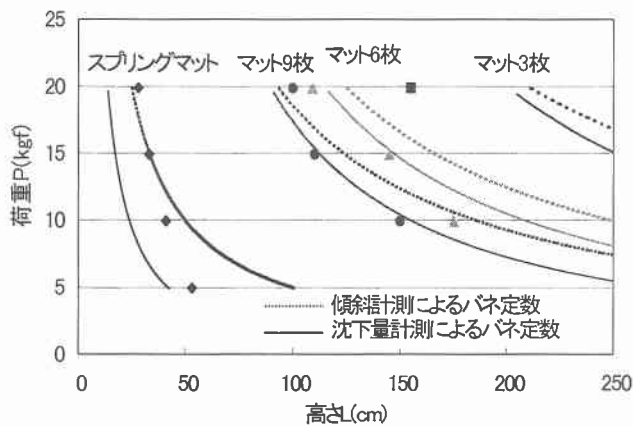


図 - 7 転倒実験結果（円形フーティング，φ240）

誤差が大きくなるものの、同様な結果が得られた。これらの一連の実験結果により、ほぼ実験値と理論値は一致したことが確認され、転倒は構造安定の理論通りに生じることが実証されたと言える。

5. まとめ

移動式クレーン、杭打ち機あるいはジャッキ等の転倒事故が多く起こっているが、ここではその原因として、これまであまり検討されてこなかった構造安定における固有値問題のアプローチが考えられることを提唱した。これは、荷重の張り出しや水平力による転倒モーメントが作用しない場合でも、転倒が起こり得ることを立証したものである。特に、荷重の作用点が高い杭打ち機や荷重の大きいジャッキの場合に、この種の転倒が起こりやすい。過去の転倒事故においてはこの視点からの検討が欠けていたと思われ、本研究が今後の転倒事故原因の究明に役立ち、この種の事故がなくなることを期待する。

謝辞：本研究で行った実験は、北海学園大学工学部土木工学科の卒業研究として実施された。ここに、それに携

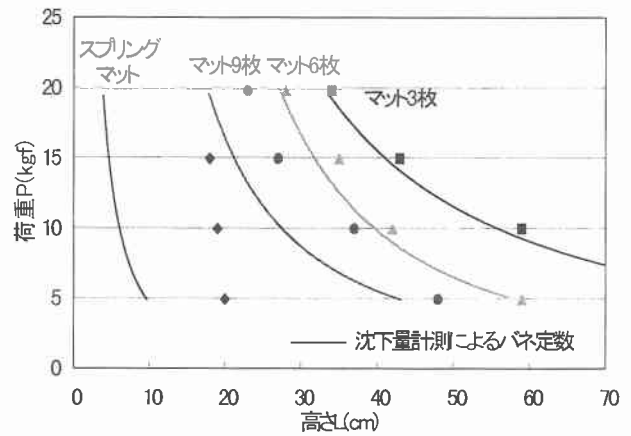


図 - 8 転倒実験結果（正方形フーティング，120 x 120）

わった菊池紀宏（平成 11 年度）、江本啓二、西 健志（平成 12 年度）の諸君に深く謝意を表します。

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 / III - 43, 1998.6.
- 2) 玉手 聡，堀井宣幸，豊澤康男，末政直晃，片田敏行，高野裕亮：支持地盤のめり込み破壊による移動式クレーン転倒メカニズムの実験的解析，安全工学，Vol.40, No.3, 2001.
- 3) 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及ぼす影響，土木学会第 56 回年次学術講演会，平成 13 年 10 月.
- 4) 建設事故，重大災害 70 例に学ぶ再発防止策，日経コンストラクション編，2000 年 4 月.
- 5) 土木学会：座屈設計ガイドライン，技報堂，1987 年 10 月.