

タイトル	構造安定論に基づくクレーンと杭打機の転倒安定の数値解析
著者	當麻，庄司；Toma, Shouji；Chen, Wai Fah
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(25)：1-15
発行日	2025-09-30

研究論文

構造安定論に基づくクレーンと杭打機の転倒安定の数値解析

當 麻 庄 司* ・ Wai Fah Chen**

Numerical Study of Toppling Mechanisms of Crane and
Pile Driver Based on Structural Stability Theory

Shouji Toma* and Wai Fah Chen**

要 旨

クレーンや杭打機の転倒が多く起こっている背景には、その転倒メカニズムに構造不安定が関係していると思われる。従来の転倒安定評価法である転倒モーメント型に基づく場合、軟弱地盤の転倒メカニズムに十分対処できていないのではないかと。実際、多くの転倒事故には地盤崩壊のような地盤の剛性不足の痕跡がみられる。これには、単にクローラーやアウトリガーからの接地圧に対する地盤強度不足だけでなく、地盤の変形性能（剛性）の不足も関係していると思われる。構造安定論では、この必要な地盤剛性を考えるうえで重要な要素に荷重の高さがある。従来の転倒安定評価法では転倒モーメントが同じであれば安定性は同じであるとみなされてきたが、構造安定論による評価では極端な軟弱地盤の場合転倒モーメントがゼロでも転倒する可能性がある。転倒安定論による転倒問題の理論的研究はこれまで進められてきているが、ここではまずこれらの研究の概要および構造安定論の基本を述べる。そして、具体的な算定条件を設定して理論的な解析法に基づいた数値解析を実施し、荷重の高さを含めて転倒の起こる条件を検討する。それによって、クレーンや杭打機の転倒メカニズムをより深く理解することができ、事故の防止策を講じることができる。

キーワード：クレーンの転倒、杭打機の転倒、転倒メカニズム、構造安定論、転倒不安定、転倒安全、転倒安全基準

目 次

- | | |
|---------------------|--|
| 1. まえがき | 4.2 [1] 初期傾斜角 $\theta_0=0$ の場合 |
| 2. 構造安定論における安定基準 | 4.3 [2] $P=10$ tonf および $a=10$ m の場合 |
| 2.1 構造不安定の概要 | 4.4 [3] $P=5$ tonf および $a=20$ m の場合 |
| 2.2 現行の転倒安定評価法 | 4.5 [4] $L_B=40$ m および $a=10$ m の場合 |
| 2.3 構造安定論による安定評価法 | 4.6 [5] $L_B=40$ m および $\theta_0=5$ 度の場合 |
| 3. 構造安定論による安定評価の算定例 | 4.7 地盤剛性と転倒モーメントからの考察 |
| 3.1 算定条件の設定 | 5. 転倒のシナリオ |
| 3.2 安定計算の手順および算定例 | 6. あとがき |
| 4. 安定計算例の結果と考察 | 謝辞 |
| 4.1 構造安定性状の概要 | 参考文献 |

* 北海学園大学名誉教授、大起コンサルタント(株)
Professor Emeritus, Hokkai-Gakuen University / Taiki Consultant, Inc.

** ハワイ大学名誉教授
Professor Emeritus, University of Hawaii

1. まえがき

杭打機、クレーン、ジャッキ等重機類の転倒が繰り返されている。その背景には構造安定論的な不安定問題が関連しているのではないかと、この視点を基に研究が行われている^{1)~4)}。転倒問題は、“転倒モーメント型”と“構造不安定型”に分類できる⁴⁾。従来、クレーン等の転倒に対する安定設計は転倒モーメント型に基づいて行われてきたが、ここではそれとは異なる構造不安定型の安定算定法について論じる。あらゆる構造不安定問題は、荷重の作用する方向と変形方向が異なるため予測が難しく、転倒事故が起こると想定外として扱われ原因究明の盲点となっているように思われる。その根本は、軟弱地盤上にある重心の高い構造物は荷重が限界値を超えると“構造不安定”になり転倒することにある⁵⁾。構造不安定問題の典型である長柱座屈では曲げモーメントがゼロでも部材が曲がるように、転倒問題では転倒モーメントがゼロでも転倒する。転倒問題においては、重心の高さが弾性長柱座屈における部材長に相当し、支持地盤の剛性が柱部材の曲げ剛性に相当する。さらに、これまでの研究において静解析に加えて動的な慣性力が作用することでより転倒しやすくなることが示されている⁶⁾⁷⁾。

杭打機やクレーン等の重機類の転倒問題には、転倒モーメント、地盤強度および重心高さの3要素が深く関連していると考えられる。この内、従来の転倒モーメント型は安定性を転倒モーメント（荷重と作業半径）と地盤強度の2要素で考えるが、構造不安定型はこれらに加えて重心高さ（荷重高さ）を考慮する。構造不安定型によれば、転倒モーメントと地盤強度が同じであっても荷重高さが大きいほど転倒しやすくなることが指摘されている^{4)~7)}。さらに、移動中の揺動のように動的な慣性力が加わるとより転倒の危険性が増す⁸⁾。

よく経験することとして、ボート上で立ち上がると不安定性が増すが、その原因には転倒モーメントが増すだけでなく荷重の作用高さが大きくなることにもあると思われる。構造不安定の評価法は、海洋自己上昇式作業台（SEP）のように重心の高い浮体の転覆問題にも適用できるとして、従来の船舶算法による安定評価法との関連性が提示されている⁹⁾。本論文では、転倒事故原因の重要な要素である荷重（重心）高さについて、具体的な数値計算例を示して検討する。

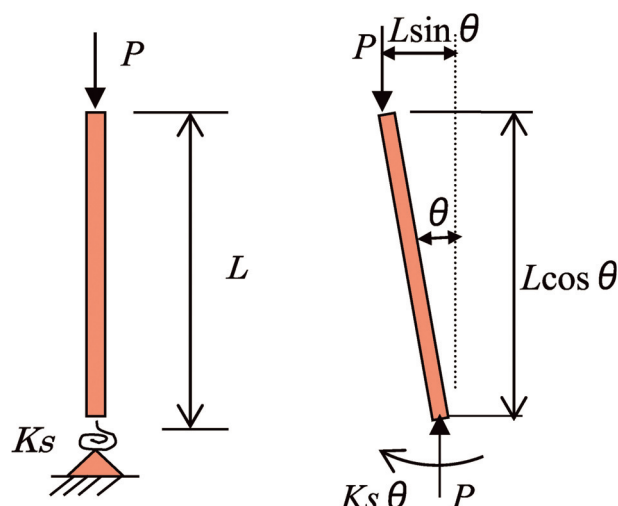


図1 剛体棒一回転ばね構造系¹⁰⁾

2. 構造安定論における安定基準

2.1 構造不安定の概要

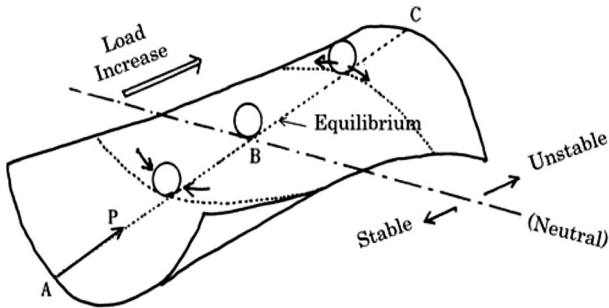
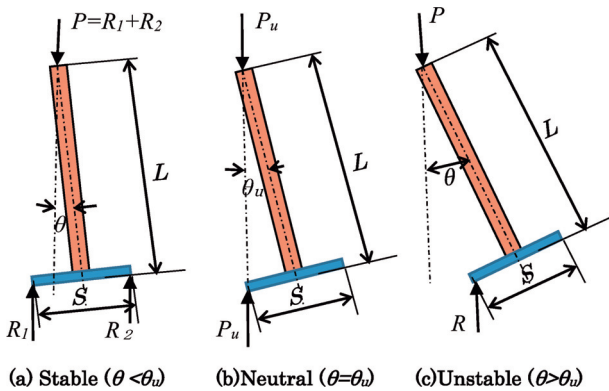
本論文では、軟弱地盤上に置かれたクレーンや杭打機は、図1に示す簡単な剛体棒一回転ばね系の構造モデルによって表すことができるとする¹⁰⁾。そして、簡単化のため偏心载荷はないとしている。図1の構造系は、次式で示す弾性限界荷重 P_{cr} をもっている¹⁰⁾。

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

ここに、 K_s = 支持地盤の回転ばね剛性、 L = 荷重高さ（部材長）

式(1)は長柱の弾性座屈荷重（オイラー荷重）に相当し、この限界荷重を超えると杭打機やクレーンは不安定になり転倒する。注目すべき点は、式(1)の成立する剛体棒は直立していることであり、したがって転倒モーメントはゼロである。この安定と不安定の境界値（限界荷重）は、図2に示す凹凸面境界の中立値で表される⁴⁾。安定の状態は図2の凹面上のボールあるいは図3(a)で表され、変位したボールは元の位置に戻る。一方、不安定な状態は凸面上のボールあるいは図3(c)で表され、変位したボールは必ず落ちる。すなわち、不安定な状態では変形は元に戻らない。構造不安定型の特徴は、図2の不安定域でボールが落ちるように途中で止めるのは難しく、変位が始まると一気に転倒まで進むことである。

転倒モーメント型による転倒の場合、中立値は図3(b)のように荷重と反力が鉛直線上に並んだ

図2 安定性曲面⁴⁾図3 安定・中立・不安定⁵⁾

時の状態を示し、この時の角度を安定限界角度（転倒角度）と定義する⁴⁾。それとともに、構造不安定型（座屈転倒型）では式(1)の限界荷重も中立値であり、転倒モーメントがゼロでもこれを超えると転倒する。転倒問題においてはこれら2つの中立値が関連し合っている。地盤が堅固な場合、図3 (b)の中立状態になるためにはクレーンの重心はもち上げられなければならない。一方、軟弱地盤を想定した図1の剛体棒－回転ばね構造系では、回転の中心は常に支持点にあると仮定し、転倒の形態が異なっているがその差は小さいとする。

転倒モーメント型では、支持地盤への最大接地圧とそれに抵抗する地盤強度の比較で安定性を考えるが、構造安定型ではそこに式(1)の回転ばね剛性 K_s で表わされる地盤の変形性能が関係している。今、この地盤の回転ばね剛性を一定とすれば限界荷重とその作用高さの関係は式(1)から反比例になっていることが分かり、それは図4のように表される⁴⁾。同図の例によれば、荷重を 400 kN 一定とすれば地盤回転ばね剛性 $K_s = 8000$ kNm/rad. に対して荷重高さ 20 m で転倒し、地盤剛性がそれより弱い $K_s = 2300$ kNm/rad. では荷重高さ 6 m で転倒する。また、地盤強度（回転ばね剛

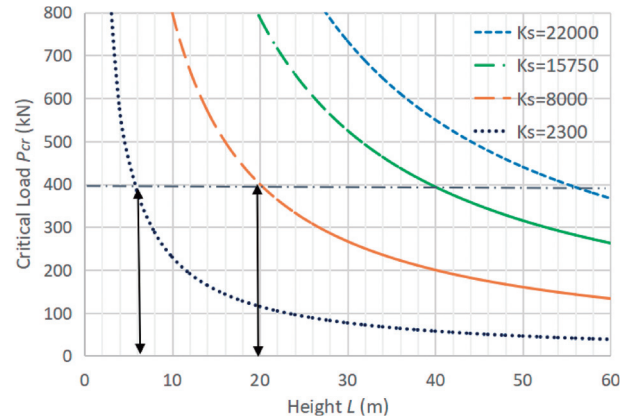
図4 限界荷重－高さ曲線⁴⁾

図5 クローラークレーンと杭打機

性) K_s を一定とすれば限界荷重（転倒荷重） P_{cr} は高さの増加に対して急激に低下する範囲が存在する。このように、転倒問題では荷重高さの影響が非常に大きいことが分かる。そして、その影響は式(1)で示す直立（転倒モーメントがゼロ）の場合だけでなく、後述するように初期傾斜がある一般的な作業状態（転倒モーメントがある）の場合にも及ぶことになる。

クレーン、杭打機、高所作業車あるいはジャッキ等の転倒には共通点が多いが、ここでは一応重心の高い図5に示すようなクローラークレーンや杭打機を検討の対象とする。構造安定論の原点にもなる図1の限界式(1)の有用性は、有限要素法⁵⁾や浮体を用いた実験⁶⁾でも検証されており、またこれらの構造不安定問題の詳細についてはこれまでの文献を参照されたい^{3)~7)}。なお、ここでの構造安定論において地盤は弾性体であるとし、地盤全体の剛性（変形性能）を式(1)にみられるように線形回転ばね剛性 K_s で表す。そして、ク

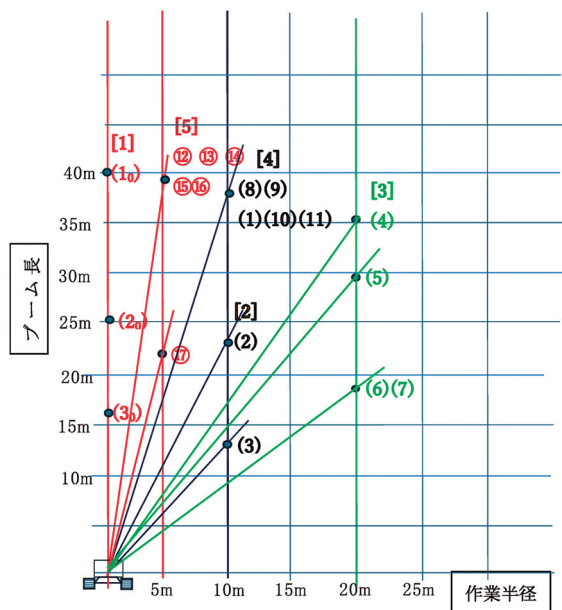


図6 作業範囲図と算定条件（SCX400）

レーンの機械部（全体）は剛体棒とみなす。

2.2 現行の転倒安定評価法

現行のクレーン等の安定基準は、基本的に図6に示す作業範囲図（ブーム長さ－作業半径関係図）および表1の定格総荷重表に基づいている¹²⁾。なお、これらの図表には後の計算例で扱う算定条件の番号が表示されている（詳しくは表2、3参照）。

図6作業範囲図および表1定格総荷重表の作成において、地盤は水平堅固であることを前提としている。したがって、ここでは地盤の変形を考慮していない。そのため、地盤強度が弱く地盤変形が生じる場合は地盤改良なり敷鉄板等による地盤強化が求められる¹¹⁾。そして、転倒事故が生じた場合の原因調査は最大作用接地圧と地盤強度の比較に重点が置かれる。この安定評価法は、構造安定論の中で転倒原因の分類として挙げられている内の“転倒モーメント型”に相当する⁴⁾⁸⁾。転倒モーメント型では、次式に示す転倒モーメント (Mt) が抵抗モーメント (Mr) を超えるかどうかで安定評価の基準となる（図3 (b)参照）。

$$Mt > Mr \quad (2)$$

転倒の判断は式(2)によるモーメントによる比較という形だけではなく、クローラーの最大接地圧と支持地盤力の比較でも行われる。現行評価法では荷重と作業半径が同じであれば、荷重の高さに

表1 定格総荷重表（SCX400）

作業半径 (m)	ブーム長さ(m)				
	16	22	25	34	40
4.0	4.2/32.65				
4.5	29.30				
5.0	25.00	5.3/22.85	⑩		
5.5	21.75	21.65	5.8/20		
6.0	19.20	19.10	19.05		
7.0	15.55	15.45	15.35	7.5/13.75	
8.0	13.00	12.90	12.80	12.60	8.6/10.4
9.0	11.10	11.00	10.95	10.70	10.25
10.0	(3) 9.7	9.55	(2) 9.5	9.25	(1) 9.15 (8)(9)(10)(11)
12.0	7.65	7.55	7.45	7.20	7.10
14.0	6.30	6.15	6.05	5.80	5.70
16.0	14.9/5.8	5.15	5.05	4.80	4.70
18.0		4.40	4.30	4.05	3.90
20.0		3.80	(6)(7) 3.7	(5) 3.45	(4) 3.3

備考:本表は“HITACHI SUMITOMO SCX400 HYDRAULIC CRAWLER CRANE Specifications”¹²⁾より抜粋。

関係なく（ブームの重量の違いを無視すれば）転倒モーメントは同じとなり、したがって最大接地圧も同じとなる。また、転倒モーメントが作用しない限り転倒は生じないことになるが、構造安定論では前節式(1)で述べたように地盤の軟弱性と荷重の高さ次第では転倒が生じる可能性があり、荷重高さが影響することに両者の大きな違いがある。

現行の転倒安定の評価法（転倒モーメント型）では、地盤を養生することにより堅固とみなしている。荷重高さが大きい場合、養生で必要十分に堅固にできなければ転倒につながる恐れがある。そのために、地盤の剛性は“移動式クレーン、杭打機等の支持地盤養生マニュアル”¹¹⁾によって敷鉄板や地盤改良の必要性を判断している。これに関連して、構造安定論では必要な地盤の回転ばね剛性（あるいは沈下量）によって判断することができる。後に算定例によってこれらの必要な値を明らかにする。

2.3 構造安定論による安定評価法

現行の転倒安定評価法である転倒モーメント型は、ある点に作用する最大接地圧に対する地盤耐力によって安定性を評価する。一方、構造安定型では支持地盤の剛性（変形性能）を回転ばね剛性によって表し、安定性評価に用いる。前述のように、その時の杭打機やクレーンの構造モデルは

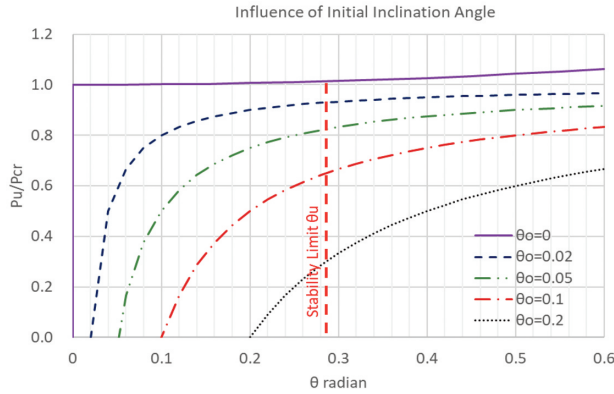
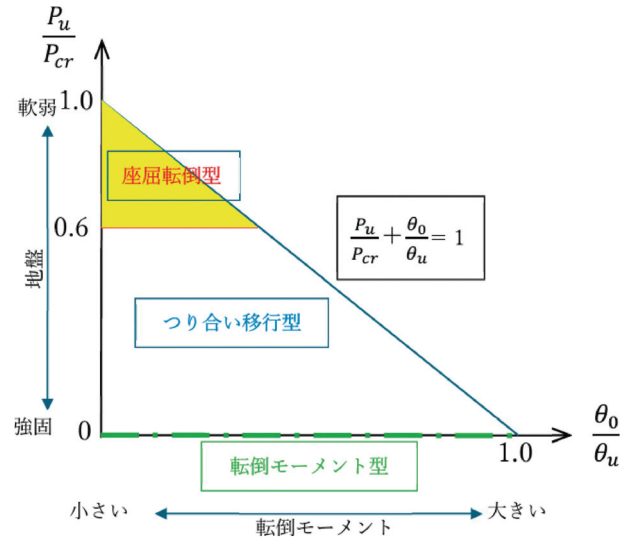
図7 荷重－変位角曲線⁷⁾

図1の剛体棒－回転ばね系で表されるとし、その限界荷重（転倒荷重）は式(1)で与えられた。同式から、荷重は大きさだけでなく高さ（ブーム長さ）が重要な要素であることが分かる。実際に、クレーン、杭打機、ジャッキあるいは高所作業車等の転倒事故は大抵荷重の作用点が高い場合に起こっていると思われ、このことは荷重の作用高さの重要性を示唆している。

図1の構造モデルを用いて荷重－変形曲線を求めると、図7のようになる⁴⁾。同図の縦軸の荷重は式(1)の限界荷重 P_{cr} で無次元化して表し、横軸の変位角度は弾性回転ばね剛性 K_s が一定として算定されている。図7には、例として図3(b)の安定限界角度（転倒角度） θ_u の位置を示している。横軸の θ_u は安定限界角の中立値を示し、この時の縦軸は転倒荷重の中立値を示している（図2の安定性局面を参照）。すなわち、変位曲線と安定限界角との交点が転倒荷重 P_u である。

これをみると、荷重－変位曲線は初期傾斜角 θ_0 の影響が大きいことが分かる。特に、荷重 $P/P_{cr} > 0.6$ になると、急速に変形が大きくなっている。これは、荷重 P が増大するためだけでなく荷重高さ L が大きくなると P_{cr} が小さくなり（式(1)参照）、その結果 P/P_{cr} が大きくなるため転倒しやすくなることを意味している。ここに、荷重高さが重要な役割を果たしている。クレーンや杭打機が作業する建設現場のような環境では地盤が完全に堅固ではありえなく、また地盤の K_s に対する不確定要素が多く安全性を確保するためには $P/P_{cr} < 0.6$ であることが望まれる⁸⁾。

構造安定論では、安定性評価は図8のように縦軸に荷重をとり横軸には傾斜角をとった安定性状況図によることになる⁸⁾。構造安定論による転倒安

図8 転倒安定基準図（静解析）⁸⁾

定の基準は、図8の斜線のように無次元化された転倒荷重 P_u/P_{cr} と初期傾斜角度 θ_0/θ_u の関係式として表され、次式(3)のようになる⁴⁾。この式(3)は、図7荷重－変位曲線における荷重と変位の交点（中立値）を示している。ただし、ここでは微小変位角の関係 $\sin\theta \approx \theta$ が成り立つとしていることに留意されたい。

$$\frac{P_u}{P_{cr}} + \frac{\theta_0}{\theta_u} = 1 \quad (3)$$

上式の第1項は構造安定論による座屈転倒型と呼ばれる限界値であり、第2項は現行の安定評価法による転倒モーメント型の限界値である。換言すれば、第1項は式(1)の転倒に対する寄与率であり、第2項は式(2)の寄与率である。そして、図8の斜線の内側にあれば転倒に対して安定であり、外側にあれば不安定を意味する。すなわち、式(3)（図8の斜線）は安定と不安定の境界値であり、それぞれ図2安定曲面上の中立値を示している。ここでは、縦軸にとった荷重の項において限界荷重 P_{cr} という形で荷重高さに深く関わっている（式(1)参照）。

図8に示すように、転倒問題は次のように分類される。縦軸の荷重が大きく転倒の支配的要因となる場合は“座屈転倒型”，縦軸の荷重が小さく地盤が堅固な転倒モーメントが支配的となる場合は“転倒モーメント型”，そしてそれらの中間が“つり合い移行型”である⁴⁾。式(3)は座屈転倒型（第1項）と転倒モーメント型（第2項）で線形の相反関係にあることを示し、縦軸の荷重項は地盤の性質を表し軟弱なほど大きくなり、一方横軸の傾

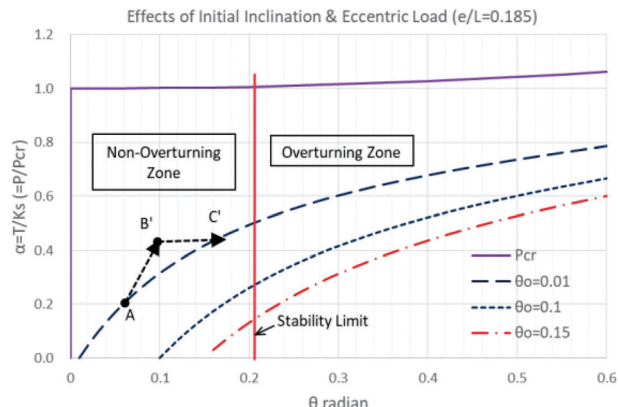
斜角項は転倒モーメントが抵抗モーメントに近いほど大きくなる。

従来の転倒安定評価（表1 定格総荷重表）は、図6の作業範囲図と吊り荷重の大きさから転倒モーメントを求め、クレーン重量による抵抗モーメントとの比較から行っている。この“転倒モーメント型”は、水平堅固な地盤を対象としていることから $P_{cr} = \infty$ であり図8の安定性状図では $P_u/P_{cr} = 0$ 、すなわち横軸線上で安定評価をしていることになる。しかし、実際の現場では $P_{cr} = \infty$ はありえず、何らかの軟弱性をもっていると考えられる。想定外の転倒事故の背景には、図8の縦軸（構造安定論）の影響があると考えられる。

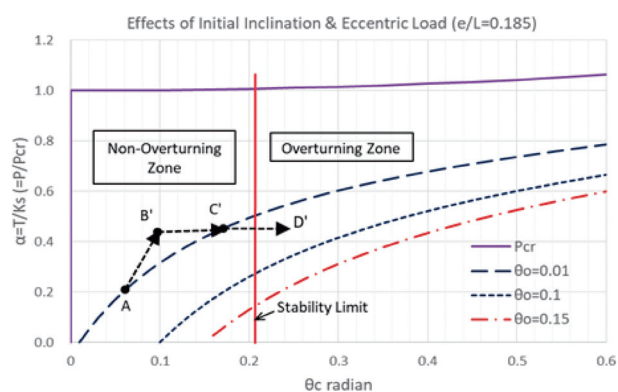
図9（あるいは図7）の荷重－変位角曲線は、荷重が十分な時間をもって静的に増加していく場合のつり合い状態を表している。荷重がある程度の速度をもって作用する場合は、図9の経路 $A \rightarrow B'$ の荷重－変位関係に示されるように斜め方向に移動すると考えられる⁷⁾。この時、変形状態 B' はつり合い曲線から外れたアンバランス状態になるためつり合い点 C へ移動しようとし、静解析ではつり合い点 C で停止する。一方、動解析では図9(b)に示すように慣性力が作用するため、変形が点 C では停止せず点 D' まで進むことになる。荷重の増加速度が大きい程 $A \rightarrow B'$ への角度が大きくなり、その分慣性力が大きくなる。このとき、これらの過程においてももし安定限界角を超えると、転倒する。これが“つり合い移行型”の転倒メカニズムである。図8の安定基準は静解析によるものであり、このように動解析による慣性力の影響を考慮するとさらに安定の範囲は、図10に示すようにかなり狭くなる⁸⁾。図10には、動解析とさらに安全率を考慮した安全域（Safety Zone）を示し、設計計画上の推奨としている。

実際の施工では、移動中や作業中の動的な揺動が避けられないと考えられ慣性力の影響は大きいと思われるが、ここでは理解を容易にするため静解析で考えることにする。静解析においては、分散する質量の分布を統合した重心（1次モーメント）で考えることができるが、動解析では慣性力（2次モーメント）が関係するため個々の質量分布を考えなければならない^{6) 7)}。

以上のように、クレーン等の転倒は式(2)や一部の接地圧だけで判断するのではなく、式(1)および(3)を用いたクローラーの接地面全体の変形性能（回転ばね剛性）による評価が合理的であると思



(a) 静解析



(b) 動解析

図9 静解析と動解析の変位移行比較⁷⁾

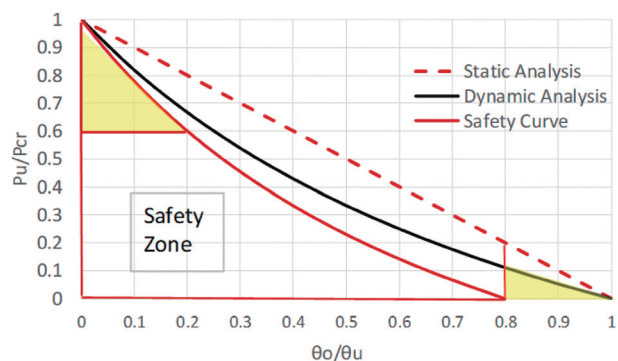


図10 転倒安定基準図（動解析）⁸⁾

われる。

3. 構造安定論による安定評価の算定例

3.1 算定条件の設定

本論文ではクローラークレーンを対象に、算定

例によってそれが安定するために必要な地盤剛性(変形性能あるいは回転ばね剛性)を求める。そして、そこに荷重高さの影響をみることを目的とする。以降に、その算定のために設定した条件を示す。

(1) 対象機種

日立住友重機械建機クレーン(株)製 クローラークレーン SCX400 40 t×3.7 m¹²⁾。

(2) 算定条件

- 作業方向は90度とする。(算定が簡単な真横方向とする。)
- 荷重は静的に吊り上げる。(動的な慣性力が作用しない。)

初期傾斜角度を設定し荷重を静的に吊り上げるにより、図8の転倒安定基準図(荷重-変位角関係)⁸⁾が適用できる。(カウンターウェイトは12.5 tonfであるが、本算定例では総重量以外には関与しない。)

- 図1の構造モデルを適用するため、支持点の回転中心とブームの起点は同じとし、クローラー中心間隔の中央点 $S/2 = 3.3 \text{ m}/2 = 1.65 \text{ m}$ にあるとする。実際には両点は異なると思われるが、本論文の目的は構造安定論による荷重高さの影響を検証することにあるため簡略化する。
- 作業半径、ブーム長さおよび吊り荷重は、以下の5つのグループに分けて検討する。(詳しくは図6 作業半径-ブーム長さ関係および表2, 3 計算結果を参照のこと。)

[1] 作業半径 $a=0$ (初期傾斜角 $\theta_0=0$)、吊り荷重 $P_u=10 \text{ tonf}$ の場合

直立の場合について、式(1)により荷重高さ(ブーム長さ)を変化させて限界荷重および必要地盤剛性を求める。この場合、転倒モーメントはゼロである。

[2] 作業半径 $a=10 \text{ m}$ 、吊り荷重 $P_u=10 \text{ tonf}$ の場合

初期傾斜角がある場合について、ブーム長さを変化させて限界荷重および必要地盤剛性を求める。この場合、吊り荷重による転倒モーメントは一定となる。

[3] 作業半径 $a=10 \text{ m}$ 、吊り荷重 $P_u=5 \text{ tonf}$ の場合

作業半径を[2]の2倍および吊り荷重を約1/2として、前項条件と比較する。

[4] 作業半径 $a=10 \text{ m}$ 、ブーム長さ $L_B=40 \text{ m}$ の

場合

作業半径とブーム長さを一定とし、荷重を変化させて必要地盤剛性を求める。

[5] 初期傾斜角5度、ブーム長さ $L_B=40 \text{ m}$ の場合

杭打機の作業時傾斜角5度を想定し、荷重の大きさを変化させる。

上記の条件グループ内で、さらにブーム長または荷重の条件を3, 4例設定する。それらの算定条件を図6 作業範囲図(ブーム長-作業半径図)内に示し、また算定結果を後述の表2に[1]~[4]および表3に[5]を示す。

3.2 安定計算の手順および算定例

本節では、これまで述べてきた構造安定論に基づいて、転倒安定評価法による算定の具体例について述べる。その目的は与えられた荷重、ブーム長および作業半径等の算定条件から転倒しないために必要な地盤の剛性(回転ばね剛性 K_s (tonf・m/rad)あるいは地盤反力係数 k_v (tonf/cm))を求めることにある。それらは、転倒するときの限界値(中立値)でもある(図2参照)。与えられた条件に対して、得られた中立値と実際の地盤の値との比較から安全性を評価できる。その手順と算定例は、下記の①~⑩の箇条書きに示すが、その時の幾何学的関係性については図11のとおりである。なお、下記の算定例は算定条件[2](1)(あるいは[4](10))について示し、その算定結果は表2に記述されている。

- ① 算定条件を設定する。: [2](1)吊り荷重 $P=10 \text{ tonf}$ 、作業半径 $a=10 \text{ m}$ 、ブーム長さ $L_B=40 \text{ m}$ (この時の初期傾斜角 $\theta_0=12.3$ 度は、住友重機械建機クレーン(株)のホームページ「クレーン接地圧シミュレーション」¹³⁾による。)
- ② 転倒荷重(総重量) $P_u(=W_t)=54.2 \text{ tonf}$ 、反力 $R_A=47.8 \text{ tonf}$ および $R_B=6.4 \text{ tonf}$ を求める:(これらの値は「クレーン接地圧シミュレーション」による。)
- ③ 転倒荷重(総重量) $P_u(=W_t)$ と反力 R_B から重心までの水平距離 g および支持点からの水平距離 e を算定する(図11参照): $g=S \cdot R_A/W_t=(3.3)(47.8)/54.2=2.910 \text{ m}$, $e=g-S/2=2.910-3.3/2=1.260 \text{ m}$ 。
- ④ 支持点からの水平距離 e と初期傾斜角 θ_0 から、回転中心と重心までのブーム長さ L を算定

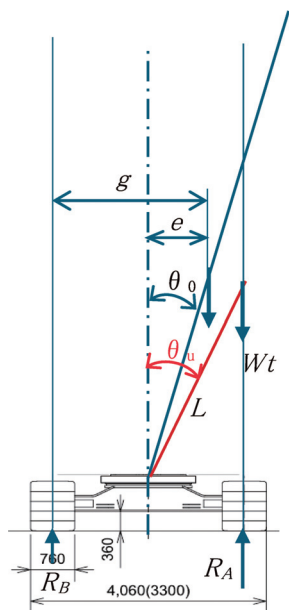
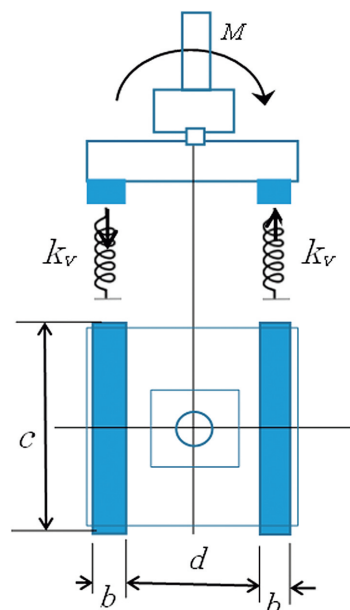


図 11 安定限界角の算定

図 12 支持反力係数 k_v ⁵⁾

する(図 11 参照). このブーム長さを構造系(図 1)の部材長にとる: $L = e / \sin \theta_0 = 1.260 / \sin 0.215 = 5.916 \text{ m}$.

- ⑤ 部材長 L と回転中心(クローラー間距離÷2)から転倒限界角 θ_u および θ_0/θ_u を求める(図 11 および図 3 (b) 参照). $\theta_u = \sin^{-1}(1.65/5.916) = 0.283 \text{ rad.}$, $\theta_0/\theta_u = 0.215/0.283 = 0.760$.

- ⑥ $P_u/P_{cr} = 1 - \theta_0/\theta_u$ (式(2)) から限界荷重(転倒荷重) P_{cr} (tonf) を算定する: $P_u/P_{cr} = 1 - 0.760 = 0.240$, $P_{cr} = 10/0.240 = 41.6 \text{ tonf}$.

- ⑦ 必要回転ばね剛性を算定する(式(1)参照): $K_s = P_{cr} \cdot L = 41.6 \times 5.916 = 246 \text{ tonf} \cdot \text{m/rad}$.

- ⑧ 回転ばね剛性(1 radian 当たり)のクローラーへの作用力を求める: $R_{AB} = K_s/S = 246/3.3 = 74.6 \text{ tonf/rad}$. クローラーから地盤への作用力は図 12 のように仮定して簡略化する.

- ⑨ 必要地盤反力係数および地盤沈下量を算定する: $k_v = R_{AB}/165 = 74.6/165 = 0.452 \text{ tonf/cm}$, $d = R_A/k_v = 47.8/0.452 = 105.8 \text{ cm}$ (ここに, 変換係数 $1 \text{ rad.} = 165 \text{ cm}$ は図 13 を参照).

- ⑩ この計算例の $P-\theta$ 曲線(荷重-変形曲線)は, $P = K_s(\theta - \theta_0)/(L_{cr} - \sin \theta)$ を用いて図 14 に示すように求められる⁴⁾.

このようにして求めた各算定結果は, 転倒時の値であることに留意されたい. すなわち, このときの荷重-変形曲線(図 14)は, 荷重 $P_u = 10 \text{ tonf}$ になると変形は転倒傾斜角(中立値) $\theta_u = 0.283$ に到達し, 転倒が起これと考えられ

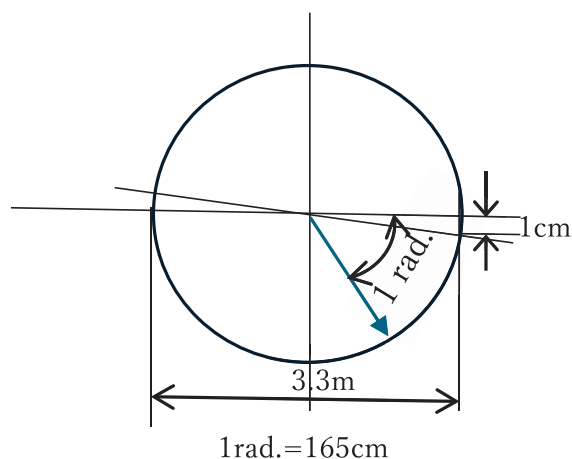


図 13 変換係数

る. そして, この状態は図 15 構造安定性状図において斜線上の点(1)で示される. なお, 上記の算定は吊荷重を 0 から P_u まで静的に増加するにつれて, ブームの傾斜角度 θ は徐々に大きくなる場合である. したがって, 変形角度 θ の大きさは $\theta_0 \sim \theta_u$ の値をとるが, このときもしブーム角度を初期傾斜 θ_0 のままに維持調整しながらゆっくりと(静的に)荷重増加すれば傾斜角は θ_0 から変化しないので, より安全な操作法となる.

参考:

- 1) この計算例の場合, 「クレーン接地圧シミュレーション」¹³⁾ によれば, 最大接地圧はクローラー後方 3.32 kgf/cm^2 で旋回方向は 157 度で

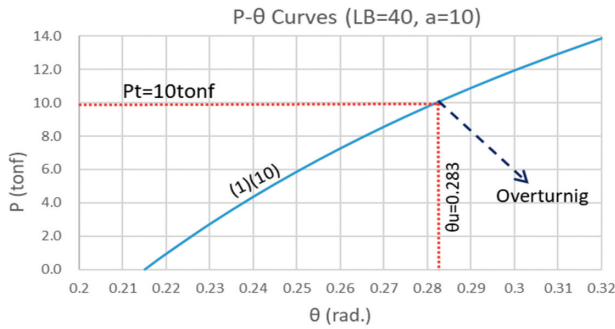


図 14 荷重－変形曲線

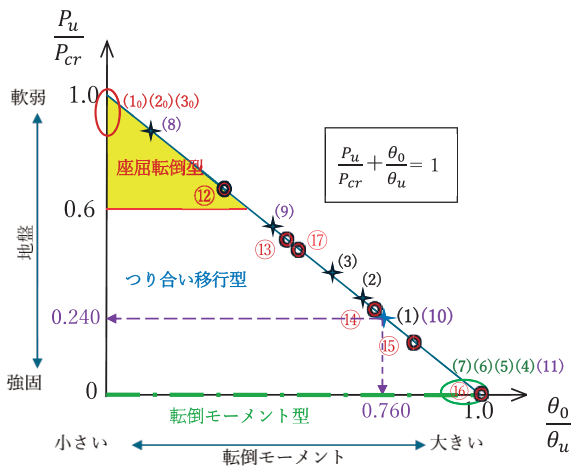


図 15 構造安定性図（静解析）

ある。

2) 平均接地圧は、総重量/クローラー面積＝
54,200 kgf/32,870 cm²＝1.65 kgf/cm²である。

4. 安定計算例の結果と考察

4.1 構造安定性状の概要

各算定条件に対して、前節の手順および計算例に従った算定結果を表 2 および表 3 に示す。また、図 15 は図 8 の構造安定性状図に、それぞれの安定性状の位置を示したものである。図 15 の構造安定性状図は、式(3)に示した第 1 項の荷重割合を縦軸に、第 2 項の転倒モーメント割合を横軸にとっている。したがって、これらの算定結果はそれぞれの条件下において、転倒するための中立値を示していることに留意されたい。その位置から、縦軸の地盤剛性に対する安全性 (γ ＝実際の地盤反力係数/必要地盤反力係数) あるいは横軸の転倒モーメントに対する安全性 (ν ＝ θ_0/θ_u) の性状を知ることができる。

先述のように、表 2 では算定条件を次の 4 つのグループに分けている：[1] 座屈転倒型の初期傾斜角 $\theta_0=0$ ($a=0$) の場合、[2] $P_u=10$ tonf, $a=10$ m の場合、[3] 転倒モーメント型の $P_u=5$ tonf,

表 2 算定結果（[1] [2] [3] [4]）

Row No.	Item	[1] $\theta_0=0, P_u=10t$			[2] $P_u=10t, a=10m$			[3] $P_u=5t, a=20m$				[4] $L_B=40m, a=10m$				Item
		(1a)	(2a)	(3a)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)=(1)	(11)	
(a)	Pt (tonf)	10	10	10	10	10	10	4.65	4.84	5.1	5	5	7.5	10	12.5	Pt (tonf)
(b)	L_B (m)	40	25	16	40	25	16	40	34	25	25	40	40	40	40	L_B (m)
(c)	a (m)	0	0	0	10	10	10	20	20	20	20	10	10	10	10	a (m)
(d)	θ_0 (deg.)	0	0	0	12.3	20	32.4	27.6	33.1	48.1	48.1	12.3	12.3	12.3	12.3	θ_0 (deg.)
(e)	θ_0 (rad.)	0	0	0	0.215	0.349	0.565	0.482	0.578	0.840	0.840	0.215	0.215	0.215	0.215	θ_0 (rad.)
(f)	Wt (tonf)	54.2	53.1	52.5	54.2	53.1	52.5	49.1	48.9	48.2	48.1	49.2	51.7	54.2	56.7	Wt (tonf)
(g)	R_A (tonf)	27.1	26.55	26.25	47.8	45.5	44.3	49	48.8	48.1	47.5	30.1	39	47.8	56.6	R_A (tonf)
(h)	R_B (tonf)	27.1	26.55	26.25	6.4	7.6	8.2	0.1	0.1	0.1	0.6	19.1	12.8	6.4	0.1	R_B (tonf)
(i)	max p (kgf/cm ²)	≈0.824	≈0.808	≈0.799	3.32	2.98	2.82	5.69	5.69	5.43	5.01	1.3	2.09	3.32	6.24	max p (kgf/cm ²)
(j)	Mt (tonfm)	0	0	0	68.3	67.5	59.6	80.7	80.3	79.2	77.4	17.8	43.4	68.3	93.2	Mt (tonfm)
(k)	現行基準 定格総荷重: P_{ue} (tonf)	-	-	-	9.15	9.5	9.7	3.3	3.45	3.7	3.7	9.15				現行基準 定格総荷重: P_{ue} (tonf)
(l)	g (m)	1.65	1.65	1.65	2.910	2.828	2.785	3.293	3.293	3.293	3.259	2.019	2.489	2.910	3.294	g (m)
(m)	e (m)	0	0	0	1.260	1.178	1.135	1.643	1.643	1.643	1.609	0.369	0.839	1.260	1.644	e (m)
(n)	$L = e / \sin \theta_0$ (m)	40	25	16	5.916	3.443	2.117	3.547	3.009	2.208	2.162	1.732	3.940	5.916	7.718	$L = e / \sin \theta_0$ (m)
(o)	θ_u (rad.)	0.041	0.066	0.103	0.283	0.4997	0.893	0.484	0.580	0.844	0.868	1.262	0.432	0.283	0.215	θ_u (rad.)
(p)	θ_0 / θ_u	0	0	0	0.760	0.699	0.633	0.996	0.995	0.994	0.967	0.170	0.497	0.760	0.996	θ_0 / θ_u
(q)	$P_u/P_{cr}=1-\theta_0/\theta_u$	1	1	1	0.240	0.301	0.367	0.0044	0.0046	0.0055	0.0334	0.830	0.503	0.240	0.004	$P_u/P_{cr}=1-\theta_0/\theta_u$
(r)	P_{cr} (tonf)	10	10	10	225.4	176.1	143.0	11105	10592	8739	1441	59.3	102.7	225.4	15826.3	P_{cr} (tonf)
(s)	$K_u = P_{cr} L$ (tonfm/rad.)	400	250	160	1333	606	303	39387	31871	19293	3115	103	405	1333	122148	$K_u = P_{cr} L$ (tonfm/rad.)
(t)	kv (tonf/cm)	0.73	0.46	0.29	2.45	1.11	0.56	72.34	58.53	35.43	5.72	0.19	0.74	2.45	224.33	kv (tonf/cm)
(u)	d (cm)	36.9	57.8	89.3	19.5	40.9	79.7	0.7	0.8	1.4	8.3	159.7	52.5	19.5	0.3	d (cm)

注記: (1) (a)～(e)は計算条件、(f)～(k)の各値は住友重機械建機クレーン(株)の「クレーン接地圧シミュレーション(SCX400)」による。

(2) (p)～(u)は転倒時の値である。

(3) 最大接地圧(max p)は最大値となる旋回方向の場合であり、台形か三角形の分布形をとる。

(4) 算定条件[1]の P_{ue} は他のケースと異なり荷重 P_u と同じ値とした参考値である。

(5) 上記の定格総荷重は転倒荷重の78%以内を示す。

表3 算定結果〔5〕

Item	〔5〕 $L_B=40\text{m}$, $\theta_0=5\text{度}$					$L_B=22\text{m}$
	〔12〕	〔13〕	〔14〕	〔15〕	〔16〕	〔17〕
Pt (tonf)	15	20	25	30	35	35
L_B (m)	40	40	40	40	40	22
a (m)	5	5	5	5	5	5
θ_0 (deg.)	5	5	5	5	5	13
θ_0 (rad.)	0.0873	0.0873	0.0873	0.0873	0.0873	0.2269
Wt (tonf)	59.3	64.3	69.3	74.3	79	77.9
R_A (tonf)	39.5	49.5	59.5	69.5	79	60.5
R_B (tonf)	19.8	14.8	9.8	4.8	0	17.4
max p (kgf/cm ²)	1.85	2.71	3.87	5.66	8.83	3.33
Mt (tonf-m)	32.5	57.2	82	106.8	130.3	71.1
現行基準 定格総荷重: P_{st} (tonf)	枠外（記載なし）					5.3/ 22.85
g (m)	2.198	2.540	2.833	3.087	3.300	2.563
e (m)	0.548	0.890	1.183	1.437	1.650	0.913
$L = e/\sin \theta_0$ (m)	6.289	10.217	13.577	16.486	18.932	4.058
θ_u (rad.)	0.265	0.162	0.122	0.100	0.087	0.419
θ_0/θ_u	0.329	0.538	0.716	0.870	1.000	0.542
$P_u/P_{cr}=1-\theta_0/\theta_u$	0.671	0.462	0.284	0.130	0.000	0.458
P_{cr} (tonf)	88.3	139.2	244.3	573.5	∞	170.0
$K_s = P_{cr} L$ (tonf-m/rad.)	556	1422	3317	9454	∞	690
kv (tonf/cm)	1.02	2.61	6.09	17.36	∞	1.27
d (cm)	38.7	19.0	9.8	4.0	0.0	47.7

$a=20\text{ m}$ の場合、および〔4〕つり合い移行型の $L_B=40\text{ m}$, $a=10\text{ m}$ の場合、である。そして、これらの諸条件に対して、転倒しないために必要な回転ばね剛性 K_s （または必要地盤剛性 k_v ）を求めている。表2には、現行の安定評価法と比較するために最大接地圧と定格総荷重を示す。これらの値は直接的に比較できるものではないが、両者の考え方の違いをみることができる。

表3には、初期傾斜角度が小さい場合を想定した算定条件〔5〕 $L_B=40\text{ m}$, $\theta_0=5\text{ 度}$ についての算定結果を示している。〔5〕の場合の転倒性状は、図15から分かる通り〔4〕と同様に座屈転倒型から転倒モーメント型まで幅が広い。なお、これらの算定においてブームの旋回方向は全て90度（真横方向）であることに留意されたい。

以下、それぞれの算定条件について考察する。

4.2 〔1〕初期傾斜角 $\theta_0=0$ の場合 （ケース：(1)₀, (2)₀, (3)₀）

ここでの初期傾斜角がゼロというのはブームが直立している場合であり、図6作業範囲図でみればそれぞれの位置は支持点の真上にある。そして、ブーム長（吊り荷重の高さ）を(1)₀ $L_B=40\text{ m}$, (2)₀ 25 m および(3)₀ 16 m と変えて、構造安定論

における必要回転ばね剛性 K_s （あるいは必要地盤反力係数 k_v ）の変化をみている。ここでは、吊り荷重を一定 ($P=10\text{ tonf}$) にとり、前章の手順にかかわらず簡単化のためその他の機械部重心は不明のため近似的に支持点にあるとみなす。その他の算定ケースでは、吊り荷重と機械重量を含めた総荷重の重心で荷重高さ（部材長）を求めている。

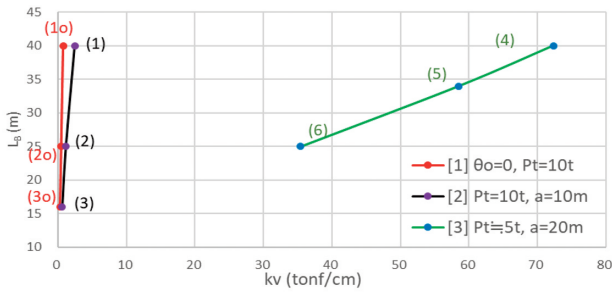
ここでは、総重量 W_t はブーム長の違う分だけ増減し、左右クローラーの反力 R_A および R_B は傾斜角がゼロなので2等分されている。このようにその他の算定ケースと異なっていることから、表2の〔1〕の計算結果は一応の参考値として示す。

各算定ケースについて、図6作業範囲図（ブーム長－作業半径図）に算定条件の位置を示し、また図15安定性状図では構造不安定型の転倒が起こることを示している。すなわち、〔1〕初期傾斜角 $\theta_0=0$ （転倒モーメント=0）であるため全て縦軸上の頂点 $P_u/P_{cr}=1$ に位置することになり、この場合は構造安定論の“完全な”座屈転倒型に分類される転倒が起こることが分かる。このように、座屈転倒型はクレーンや杭打機が直立状態でも起こり、非常に軟弱な地盤における転倒である。

表2の(1)₀, (2)₀ および(3)₀ について比較すると、現行評価法では最大接地圧（(i)行 max p）にあまり違いがみられないが、構造安定論ではブーム長さ（荷重高さ）が大きいほど必要な回転ばね剛性 K_s （あるいは地盤反力係数 k_v ）が大きくなることが分かる。これは、荷重の高さが大きいほど安定性が低下するため、転倒を防ぐためには大きい回転ばね剛性（大きい地盤剛性）が必要になることを表している。

4.3 〔2〕 $P=10\text{ tonf}$ および $a=10\text{ m}$ の場合 （ケース：(1), (2), (3)）

ここでは、荷重 $P=10\text{ tonf}$ とブーム長 (1) 40 m , (2) 25 m および(3) 16 m を前節〔1〕と同じにとり、作業半径を $a=10\text{ m}$ と変化させている。図6の作業範囲図（ブーム長さ－作業半径図）に、それぞれの条件位置を示している¹²⁾。また、図16に地盤反力係数 k_v について、前節の参考値〔1〕および後節の〔3〕との比較を示す。地盤反力係数 k_v は回転ばね剛性 K_s と比例関係にあるため、図16は回転ばね剛性の比較でもある。荷重条件〔2〕と参考値〔1〕の k_v は小さいが、転倒条件に近い〔3〕とは大きな差がある。ここで、図16に示すい

図 16 L_B - k_v 曲線 ([2] と [3] の比較)

ずれのケースも荷重高さが大きい程大きな地盤剛性が必要であることが分かる。

算定条件 [2] の各算定ケース(1)(2)(3)は荷重と作業半径が同じであるため、ブーム重量による相違を除くと転倒モーメント (M_t) と最大接地圧 ($max p$) に大きな違いはない (ただし、最大接地圧を求める時のブームの旋回方向は接地圧が最大となる場合であることに注意されたい)。現行基準では、この最大接地圧に地盤が耐えられるように安定評価をしているため算定条件の各ケース間では大きな違いはなく、定格総荷重も表 1 の青字で示すように 9.15~9.7 tonf とほぼ同等である (これに対し、本算定条件では $P_u = 10$ tonf と若干大きい)。しかし、図 16 に示す必要な支持地盤反力係数 k_v は算定条件(1)と(3)の間では約 4 倍の違いがある。すなわち、現行基準では [2] の各算定条件に対して転倒安全性に違いはないが、構造安定論では大きな違いがある。その原因として、初期傾斜角 θ_0 が異なることにある。これらの点に関しては、後に 4.7 節において再度考察する。

また、図 15 の安定性状図 (構造安定論) にそれぞれ転倒する時の性状として斜線上にその位置を示しているが、ケース(1)(2)(3)の間で若干の差がある。これらの斜線上の位置は“つり合い移行型”⁴⁾の転倒とみなされる。例として、ケース(1)では第 1 項の荷重割合が 0.240 に対し、第 2 項の傾斜角項の方が 0.760 と大きいことが読み取れる。この場合、転倒モーメントだけで転倒安定が決まるのではなく、構造不安定の影響がかなり大きいことを示している。

4.4 [3] $P \div 5$ tonf および $a=20$ m の場合 (ケース : (4), (5), (6), (7))

ここでは、前項 [2] と比較するため作業半径を

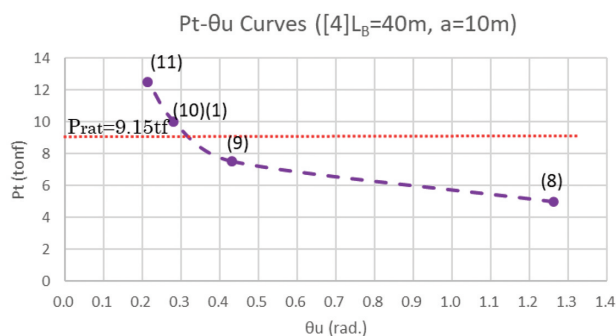
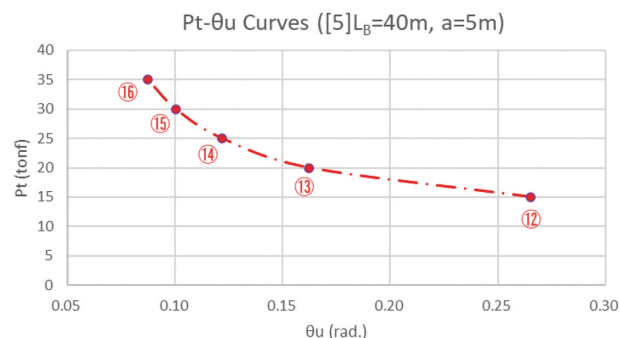
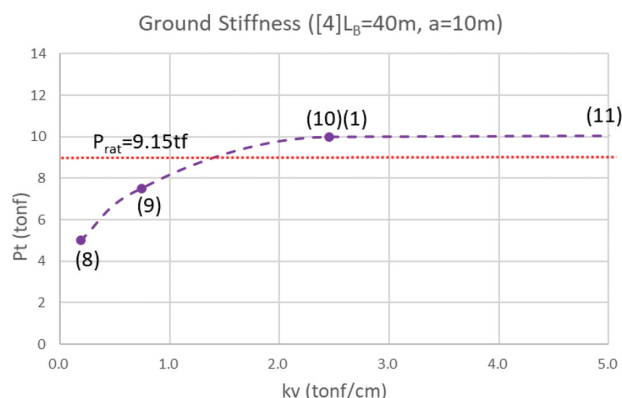
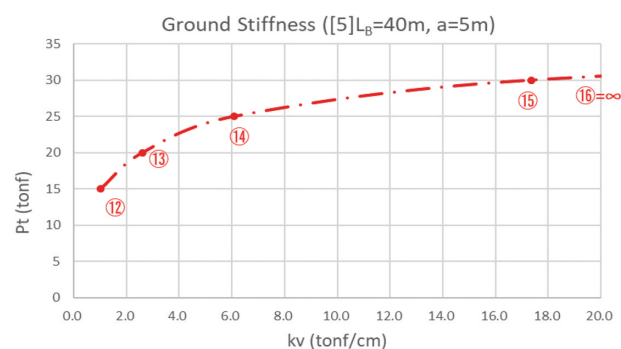
2 倍の $a=20$ m と大きくし、その代わりに荷重を半分近くの約 5 tonf とした場合を検討する。その算定条件の位置を図 6 作業範囲図 (ブーム長さ-作業半径図) でみると、作業半径が [2] よりも大きくなっているため、初期傾斜角が大きくなっている。この時の荷重約 5 tonf は、定格総荷重約 3.5 tonf (参考 : 表 1 の定格総荷重は転倒荷重の 78% 以内とされており、これによると転倒荷重 $\div 3.5/0.78 = 4.5$ tonf となる¹²⁾) に比べて大きい。すなわち、この算定では転倒モーメント (M_t) が抵抗モーメント (M_r) を超えている可能性があり、以下はその場合の考察である。

構造安定論の図 15 安定性状図でみると、前項に比較して $\theta_0/\theta_u \div 1.0$ 近くに位置して転倒モーメント型になっている (表 2 (p) 行参照)。すなわち、これらのケースは初期傾斜角度 θ_0 が大きくほぼ安定限界角度 θ_u に等しくなっているため転倒までの余裕がなく、必要な地盤剛性 K_s は前項までとは桁の違う大きさになっている (表 2 (s) 行参照)。特に、ケース(6)と(7)を比較するとわずかな荷重の増減で必要地盤剛性 (表 2 (s) あるいは (t) 行参照) が大きく異なることが分かる。これは、横軸の θ_0/θ_u が 1.0 に近づくほど縦軸の P_{cr} が無限大に近づくことから、指数関数的に大きな相違が出てくる。

この種の転倒は、堅固な地盤上で転倒モーメントが抵抗モーメントを超えることによるものであり、“転倒モーメント型”⁴⁾として従来の安定法で評価されている。したがって、“転倒モーメント型”の転倒は、構造安定論の図 15 安定性状図では横軸上で安定評価されるものである。転倒モーメント (M_t) が抵抗モーメント (M_r) に近い場合非常に大きな地盤剛性が要求されるが、現実の地盤は完全に堅固でないためわずかな剛性不足が転倒につながる可能性がある。

4.5 [4] $L_B=40$ m および $a=10$ m の場合 (ケース : (8), (9), (10), (11))

ここでは、つり合い移行型の転倒事故が起こりやすい (と考えられる) [2] (1) のケースと比較するため、ブーム長さ $L_B=40$ m と作業半径 $a=10$ m (初期傾斜角度 $\theta_0=12.3$ 度) を同じにとり、荷重を $P=5, 7.5, 10$ および 12.5 tonf と変化させている。これらの条件を図 6 作業範囲図で示せば、全て(1)と同じ点にあることが分かる。そのた

図 17 $P_u - \theta_u$ 曲線 ([4])図 19 $P_u - \theta_u$ 曲線 ([5])図 18 $P_u - k_v$ 曲線 ([4])図 20 $P_u - k_v$ 曲線 ([5])

め、表 1 から分かるように全て同じ定格総荷重 9.15 tonf となっている¹²⁾。一方、表 2 の算定結果はそれぞれの異なる荷重条件に対して、転倒する時の地盤剛性であることに留意されたい。

図 17 に転倒荷重 P_u とその時の転倒傾斜角 θ_u の関係を示す。荷重が小さいケース(8)の場合、その時の転倒傾斜角 θ_u は大きく転倒に余裕があり(式(3)の第 2 項が小さい)、荷重が大きくなるに従い θ_u は小さくなる(式(3)の第 2 項が大きくなる)。特に、荷重がケース(9) 7.5 tonf を超えると θ_u は非常に小さくなり、本機種 (SCX400) のように定格総荷重が 9.15 tonf の場合わずかな荷重の違いで安定性が大きく異なる。

同様のことは、図 18 の転倒荷重と必要地盤反力係数の関係からも見ることができる。ケース(10)のように、転倒荷重 ($P_u = 10$ tonf) が定格総荷重 ($P_{nom} = 9.15$ tonf) をわずかに超える近辺では必要地盤剛性 k_v が急速に高まり、転倒荷重が大きく定格総荷重を超えるケース(11) ($P_u = 12.5$ tonf) では無限大近くの地盤剛性が要求される。ちなみに、定格総荷重は転倒荷重の 78%をとっているこ

とからこの時の転倒荷重を求めると $P_u = 9.15 / 0.78 = 11.7$ tonf となる¹²⁾。このように、転倒荷重近くでは少しの荷重増加により突然に転倒が起こり得ることが分かる。

4.6 [5] $L_B = 40$ m および $\theta_0 = 5$ 度の場合 (ケース：(12), (13), (14), (15), (16), (17))

ここでは、杭打機のように初期傾斜角が小さい 5 度およびブーム長 40 m と長い場合を想定し、その算定結果を表 3 に示す。ただし、算定条件 [5] の場合はこれまでの算定条件よりは初期傾斜角が小さいため転倒荷重が非常に大きな値となり、またカウンターウェイトによる後方への不安定から表 1 のクレーン (SCX400) の定格総荷重には枠外として記載がない¹²⁾。

転倒荷重と転倒傾斜角あるいは必要地盤反力係数との関係をそれぞれ図 19 および図 20 に示す。転倒性状は図 15 に示すように、算定条件 [4] と同様に座屈転倒型に近いケース⑫から転倒モーメント型⑯まで幅広く分布している。したがって、

転倒荷重と転倒傾斜角あるいは必要地盤反力係数との関係が算定条件 [4]（図 17, 図 18）とよく似た性状にあることが分かる。これらの図では、荷重の範囲によって必要な転倒傾斜角や地盤反力係数の変化率が異なっている。この変化率の大きい範囲では、予測の間違いにより事故が起こりやすいといえる。

構造安定性状図の図 15 静解析と図 10 動解析の比較から解るように、ケース⑫～⑮のつり合い移行型では動解析により転倒条件が厳しくなる範囲にある。動的な慣性力が生じる移動中や旋回中に転倒が起こりやすいのは、このような背景が要因の一つと考えられる。

なお、ケース⑰は参考のためブーム長が短い（初期傾斜角が異なる）場合を示す。

4.7 地盤剛性と転倒モーメントからの考察

ここでは、表 2 に示した転倒モーメント M_t （(j)行）の大きさから、現行の安定評価法と構造安定論の比較を考えてみる。図 21 に構造安定論の転倒モーメント－地盤反力係数 ($M_t - k_v$) 曲線を、図 22 に現行安定評価法の転倒モーメント－最大接地圧 ($M_t - \max p$) 曲線を示す。図 22 に示す近似曲線は算定結果をよく近似していることが分かる（ただし、各算定条件の内 [5] の荷重が過大の部分を除いている）。これは、最大接地圧は転倒モーメントから求めるため、当然の結果であるといえる。

一方、図 21 の $M_t - k_v$ 曲線の場合横軸 k_v が対数目盛になっており、転倒モーメントが同等でも必要な地盤剛性が大きく異なっている。例えば、同図中の [4] (8)座屈転倒型から(11)転倒モーメント型のように幅の広い転倒性状をもつ場合（図 15 参照）、図 22 では最大接地圧 $\max p$ の最大値と最小値の差は数倍であるのに対し、図 21 の地盤剛性 k_v の差は数十倍となっている。また、[3] (4)～(7)の場合、転倒モーメントの大きさはほぼ同じなので図 22 の最大接地圧 $\max p$ は大きく変わらないが、図 21 の必要地盤剛性 k_v は大きく異なる。すなわち、転倒しないために必要な最大接地圧の違いよりも必要な地盤剛性の違いの方がはるかに大きい。これと同様のことが、他のケースにもいえる。

以上の検討結果から、転倒安定を単に転倒モーメントや接地圧（地盤耐力）のみから判断するの

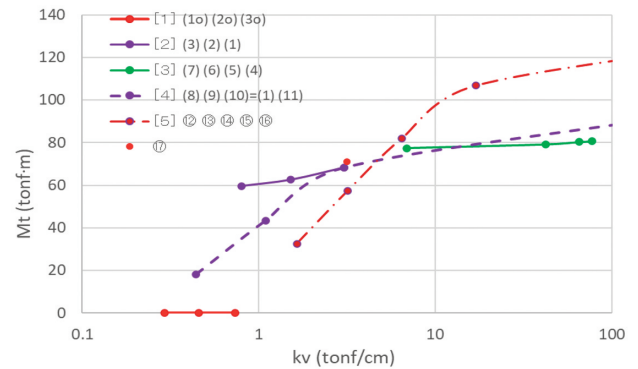


図 21 $M_t - k_v$ 曲線

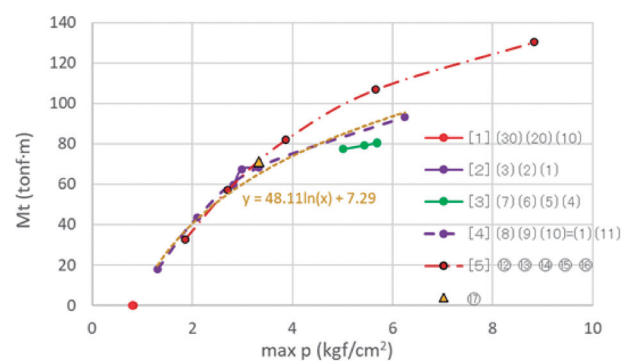


図 22 $M_t - \max p$ 曲線

は危険であり、構造安定論による地盤剛性（変形性能）の影響を考慮する必要があると思われる。そこには荷重の高さも大きく影響していると思われる。実際の地盤剛性には想定外のことが起こりやすく、少しのきっかけ（トリガー）により転倒に至る可能性がある。

5. 転倒のシナリオ

クレーン等の転倒事故は、オペレーターにとっては想定外として起こると考えられる。そして、地盤の軟弱性による転倒は、移動中あるいは吊り荷重の増大中に生じることが多い。これまでの構造安定論を考慮した検討結果から、想定外としての転倒のシナリオを次の 2 つに分けて考察する。

(1) 荷重の増大による転倒

荷重の増大は吊り上げ中や旋回中の遠心力等によって生じると考えられる。そのとき、操作が十分ゆっくりであれば静荷重として考えることができるが、変化の速度が早ければ動的効果の慣性力を考えなければならない（図 9 参照）。先の算定

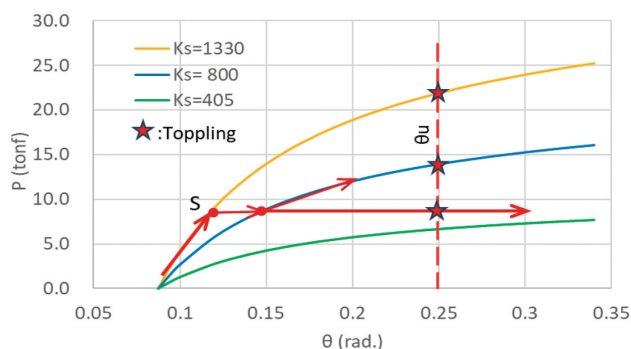


図 23 軟弱地盤での転倒のシナリオ

例 [3] でみたように実荷重が転倒荷重に近い場合、少しの慣性力により必要な地盤剛性が非常に大きくなり転倒の恐れがある。

(2) 軟弱地盤への移動による転倒

移動時の転倒の想定として、十分に堅固な地盤から軟弱地盤に移動した状況の例を図 23 の荷重－変形曲線に示す。同図において、例えば十分な地盤強度をもつ $K_s=1330 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ で移動中に、吊り荷重 8 tonf（点 S）において想定外の軟弱地盤の $K_s=800 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ に遭遇したとする。そのとき、荷重－変形曲線は図 23 の青色曲線に移って転倒傾斜角に到達することになる。さらに、より軟弱な地盤である $K_s=405 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ に移る場合は急速に転倒傾斜角に達する。このとき、急な変化による動的な慣性力を考慮するとさらに転倒しやすくなる。

6. あとがき

本論文は、繰り返されているクレーンや杭打機の転倒事故を防止するためには構造安定論の観点が必要であるとの考えに基づいて、従来の安定評価法を補足するものである。従来の安定評価法で行われている転倒モーメントと抵抗モーメントの比較や作用接地圧と地盤耐力の比較だけでは、転倒安全を保つには不十分であると思われる。構造安定論では、最大接地圧に対する地盤の強度不足だけではなく変形性能不足によっても転倒は起こることが指摘されており⁴⁾、ここではその影響を算定例によって示した。構造不安定とは転倒モーメントがゼロでも転倒することであり、そこでは従来転倒問題で重要視されてこなかった荷重高さが深く関連している。本論文では、そのことを示

すため多くの具体的な算定例により明らかにした。その結果をまとめると以下の通りになる。

- (1) 転倒事故は、重心高さが大きい場合に起こりやすい。
- (2) クレーンや杭打機の安定評価に用いる作業範囲図（地上高さ－作業半径図）と定格総荷重表は、転倒モーメント型の転倒に対する安全性を示しているため重心高さ（荷重高さ）の要素を考慮していない。
- (3) 構造安定論による安定評価法によれば、重心高さが大きくなるとより大きな地盤剛性（変形性能）が必要になる。

今後の課題としては、本論文では構造安定型転倒メカニズムの説明を容易にするためブームの旋回方向を 90 度に設定して検討したが、斜め方向を含めた全方向に対する回転ばね剛性 K_s の検討が必要である。また、簡単な剛体棒－回転ばね系の構造モデルを適用したことや入手可能な公開データに基づいているため重心の算定やブームの起点と支持点を同一とみなしたこと等、実態とは異なる簡略化が行われている。しかし、本論文の目的は従来の安定評価法にはない構造安定論による荷重高さの影響を明らかにすることであり、このような簡略化は受容されるものと考えられる。

今後、より精確なデータに基づいた解析や地盤工学者による回転ばね剛性と支持地盤との関係の解明によって、信頼性の高い安全基準を作成することができる。さらに、ここで示した数値解析を実験で検証することや動的解析を取り入れた転倒安全性の検討も必須である。そして、構造安定論による転倒メカニズムをより詳しく理解することによって転倒事故を減らすことができるものと期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、住友重機械建機クレーン株式会社のホームページに掲載されている「クレーン接地圧シミュレーション」および算定例の対象機種としたクロウラークレーン SCX400 のデータを使用させていただきました。ここに、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 当麻庄司：移動式クレーン等の転倒事故原因に関する

- る一考察，平成 13 年度土木学会北海道支部論文報告集第 58 号，土木学会北海道支部，平成 14 年 2 月。
- 2) 當麻庄司：ジャッキや杭打機の転倒原因についてー構造安定問題の観点からー，土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会，平成 28 年度，2016 年 9 月。
- 3) 當麻庄司：ジャッキの転倒による橋桁落下事故の原因分析，安全工学 Vol.60, No.5 (2021)，安全工学会誌，2021 年，10 月。
- 4) 當麻庄司：杭打機の軟弱地盤における転倒メカニズムの解析，工学研究（北海学園大学大学院工学研究科紀要）第 22 号（2022），令和 5 年度，2022 年 9 月。
- 5) Shouji Toma, Wai Fah Chen: Some Aspects of Overturning Mechanisms of Pile Driving Machine on Soft Foundation, American Journal of Civil Engineering, Sicience Publishing Group, 12/28/'22, 10.11648/j. ajce. 20221006.13.
- 6) 當麻庄司，世戸憲治：杭打機やクレーンの軟弱地盤における転倒の動解析，工学研究（北海学園大学大学院工学研究科紀要）第 23 号（2023），令和 5 年度，2023 年 9 月。
- 7) 當麻庄司，世戸憲治：軟弱地盤における杭打機等の転倒挙動に関する静解析と動解析の比較検討，北海学園大学工学部研究報告第 51 号，2024 年 1 月。
- 8) 當麻庄司，Wai Fah Chen：構造安定論による杭打機やクレーン等の転倒安全基準の検討，土木学会北海道支部年次技術研究発表会，土木学会北海道支部，令和 5 年度，2024 年 2 月。
- 9) 當麻庄司：自己上昇式作業台の浮体安定性に対する構造安定論の適用性，工学研究（北海学園大学大学院工学研究科紀要）第 24 号（2024），令和 6 年度，2024 年 9 月。
- 10) Chen, W.F. and E.M. Liu: Structural Stability: Theory and Implementation, Chapter 1 General Principles, Elsevier, 1987.
- 11) 社団法人日本建設機械化協会：移動式クレーン，杭打機等の支持地盤養生マニュアル第 2 版，平成 12 年 3 月。
- 12) 日立住友重機械建機クレーン(株)：Specifications, Hydraulic Crawler Crane, SCX400.
- 13) 住友重機械建機クレーン(株)：ホームページ，クレーン接地圧シミュレーション。
- 14) 厚生省告示第 150 号：車両系建設機械構造規格第 3 条，昭和 47 年 12 月 4 日。