# HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

タイトル	TDAP による杭打機等の転倒安定の検討
著者	當麻, 庄司; TOMA, Shouji; 星野, 淳一; HOSHINO, Jun - ichi
引用	北海学園大学工学部研究報告(50): 1-9
発行日	2023-01-13

## TDAPIIによる杭打機等の転倒安定の検討

## 當麻庄司\*・星野淳一\*\*

#### A Study of Overturning Stability of Pile Driving Machines, etc. by TDAP II

#### Shouji Toma\* and Jun-ichi Hoshino\*\*

#### 要 旨

杭打機やクレーンの転倒事故が多く発生している.その転倒メカニズムについて,先に 筆者らにより構造安定論に基づいた解析的検討が剛体-回転ばね系の構造モデルを用いて 行われている.本論文では同じ構造モデルに対し,コンピューター構造解析を適用して先 の解析結果との比較を行い,解析的検討の妥当性を検証する.ソフトウェアにTDAPIIを 用い有限変位解析を行った結果,両者の解析結果はよく一致し,先の解析解の妥当性が確 認された.また,TDAPIIを用いて回転ばね剛性の影響や固有値解析等の観点からの解析 を実施し,杭打機等の転倒問題への適用性について検討を行った.その結果,TDAPIIは 杭打機の転倒解析に幅広く適用できることが判明した.今後,さらに実際の事故防止を検 討するためには,地盤の非線形性や3次元解析を含めたより詳細な解析を行う必要がある が,その際にはここで検討した結果が生かされるものである.

Key words: 杭打機の転倒, クレーンの転倒, コンピューター構造解析, 初期不整の影響, 転倒メカニズム

## 1. はじめに

近年,杭打機やクレーンの転倒事故が多く起こっている<sup>1)</sup>.それらの転倒メカニズムについて,先に剛体-回転ばね系の構造モデルを用いて解析的に検討されている<sup>233</sup>.そこでは,転倒のメカニズムとして次の3つが挙げられている.

<sup>\*</sup> 北海学園大学名誉教授, Professor Emeritus, Hokkai-Gakuen University,

<sup>\*</sup> 大起コンサルタント(株), Taiki Consultant, Inc.

<sup>\*\*</sup> JIPテクノサイエンス(株)札幌テクノセンタ

<sup>\*\*</sup> Sapporo Techno Center, JIP Techno Science Corporation

- (1) 転倒モーメント型
- (2) 構造安定型
- (3) つり合い移行型

上記の(1)転倒モーメント型は、転倒モーメントが抵抗モーメントよりも大きくなると転 倒するというものであり、従来はこれを転倒事故の主な原因として調査が行われてきた. (2)構造安定型は、柱の座屈と同様に杭打機等の重量が限界荷重を超えると転倒モーメント が作用していなくても転倒する場合のメカニズムである.そして、(3)つり合い移行型は、 軟弱地盤において初期傾斜等の不整があると(2)の転倒荷重が低下することによる転倒メカ ニズムである.これら3つの転倒メカニズムはそれぞれ独立して存在するのではなく、互いに 関連し合っている.なお、これらの転倒メカニズムの詳細については参考文献を参照された い<sup>2)3)</sup>.

本論文では、これらの文献で検討された構造安定論に基づく解析結果に、コンピューター構 造解析を適用して検証することを目的とする.ソフトウェアとしてはTDAPIII(3次元非線形 時刻歴応答解析プログラム)を用い、有限変位静的解析を実施する.また、TDAPIIIにより固 有値の近似解析を含め、種々の観点から解析手法や転倒挙動の検討を行う.

### 2. 構造安定解析<sup>233</sup>

#### 2.1 構造モデルとつり合い式4)

杭打機等の荷重と変形の関係については、先の論文で詳述されているので、ここではその概 要のみを記述する.解析に当たっての構造モデルは図1に示すように、杭打機やクレーンの本 体は剛性が十分大きいとして剛体と仮定し、地盤の上に回転ばねで接続されているとする.構 造モデル(図1)の右図において、力のつり合いを考えると次式のようになる.

 $Ks (\theta - \theta o) - P (L \sin \theta + e \cos \theta) = 0$ (1)

ここに, Ks = 回転ばね剛性(線形), P = 荷重(杭打機の自重), L = 荷重(重心)の $高さ, <math>\theta = 変位角, \theta_0 = 初期傾斜角, e = 荷$ 重の偏芯距離

式(1)の第1項は復元モーメントであ り,第2項は転倒モーメントである.式 (1)において,第1項の復元モーメントは 変位角の増大に対して線形の仮定が導入され



2

ており、制限なく増大することに留意する必要がある.式(1)から、荷重-変位角関係式は 次のように求められる.

$$P = \frac{Ks \left(\theta - \theta_0\right)}{L \sin \theta + e \cos \theta} \tag{2}$$

式(2)から、初期不整(初期傾斜と偏芯荷重)がなく、また変位傾斜角を微小( $\theta \approx 0$ )と仮定すると、次式のように転倒荷重(固有値)*Pcr*が得られる.

1.2

1.0

(*P/Pcr*) 9.0

> Poad 0.4

0.2

0.0

0

図2

Non

Overturning Zone

0.1

$$Pcr = Ks/L \tag{3}$$

Overturning Zone

0.3

 $\theta$  (radian)

荷重-変位角曲線(初期傾斜がある場合)

Unstable

0.4

Stability

Limit/

0.2

Unstable

- θο=0

--00 = 0.02

----θο=0.1 ----θο=0.2

0.6

0.5

式(2)を転倒荷重(式(3))で 無次元化すると,次のようになる.

$$\frac{P}{Pcr} = \frac{\theta - \theta_0}{\sin \theta + e \cos \theta / L} \qquad (4)$$

式(4)から,初期傾斜が変化する 場合(偏芯はなし)の荷重-変位角の つり合い関係をプロットすると,図2 に示すようになる.初期傾斜角がある と,荷重-変位角曲線は大きく低下す ることが分かる.

#### 2.2 転倒荷重への初期傾斜の影響

図2中に示す縦線は、仮に設定し た杭打機が転倒する転倒傾斜角 (θ<sub>u</sub> = 0.21 (12度))を示してお り、前述の3つの転倒メカニズムの 内(1)転倒モーメント型から求め られる(図3(b)参照).変位角 がこの転倒傾斜角よりも大きけれ ば、転倒モーメントが抵抗モーメン トよりも大きくなり(不安定, unstable),杭打機は転倒する.この不



安定域では、図2に示すようにつり合い曲線は右下がりになる.したがって、図2の荷重-変 位角曲線と転倒変位角の交点が転倒荷重(Pu)を示している.このことから、初期傾斜の影 響により転倒荷重は大きく低下し、転倒しやすくなることが分かる. 軟弱地盤における転倒事故や模型転倒実験の観察によれば、杭打機の転倒は当初ゆっくりと した傾斜角の増加から始まる.これは、軟弱地盤における(3)つり合い移行型の転倒メカニ ズムによって説明できるが、図2に示すように傾斜角の増加は転倒傾斜角を超えると急に速く なると考えられる.

図3に杭打機の傾斜角の区分を示す.転倒傾斜角(図3(b)中立,Stability Limit)を境に 安定(図3(a))と不安定(図3(c))に分かれる.同図において,力のつり合いを考える と,安定の場合つり合い式(1)は成り立つが,不安定の場合は第1項の復元モーメントが第 2項の転倒モーメントより小さくなり,成立しない.つり合い式(1)が成立するためには荷 重(杭打機の重量) Pが小さくならざるを得ず,このことは図2における右下がりのつり合い 曲線(不安定)で表される.

#### 2.3 転倒荷重と限界高さの関係

転倒荷重式(3)を用いて,転倒荷重 Pcrと限界高さLの関係を異なる地盤の 回転ばね剛性Ksに対してプロットする と,図4のようになる.同図をみると, 回転ばね剛性Ksが大きくなるにした がってPcr-L曲線は右上に寄り,転倒荷 重や限界高さが大きくなることが分か る.ここで留意すべき点は荷重高さの影 響であり,荷重高さが大きくなると転倒



荷重の低下が大きく,特に軟弱地盤になるとその傾向が顕著である.杭打機の転倒安定問題に は,荷重高さの影響を考慮する必要があると思われる.

#### 3. TDAP II による構造解析

#### 3.1 基本データ

TDAPⅢによるコンピューター構造解析は,前節の図1に示した構造モデルに対して行い, インプットデータは文献<sup>5</sup>を参考に次のようにとる.

P = 980kN, L = 3.36m (式 (3) よりKs = Pcr·L = 3293kNm)

(図4の転倒荷重-限界高さ曲線には,転倒荷重P=980kNに対する限界高さL=3.36mが示されている.)

また、コンピューター構造解析に当たっての基本事項は、以下のとおりである.

構造解析プログラムと解析法:TDAPⅢによる静的有限変位解析 部材要素:幾何学的非線形要素(有限変位解析),断面2次モーメント=10m<sup>4</sup>,

断面積=1 $m^2$ 

材料の性質:ヤング係数=2×10<sup>8</sup>kN/m<sup>2</sup>. せん断弾性係数=7.7×10<sup>7</sup>kN/m<sup>2</sup>

ここでは、部材の断面性能は仮定した剛体に近づけるため、十分大きな値をとっている.

#### 3.2 解析結果および考察

TDAPⅢによる解析の結果を図5~図14(TDAP計算結果1~12)に示す. これらの解析の 観点を以下に整理する.

(1) 解析解との比較(TDAP計算結果1, 2, 3)

- (2)回転ばね剛性(地盤)の影響(TDAP計算結果4,5,6,一定荷重の場合)
- (3) 荷重増分回数の影響(TDAP計算結果1,7,9あるいは4,8,10)
- (4) 転倒荷重(固有値)の算定(TDAP計算結果11)
- (5) 有限変位解析と微小変形解析の比較(TDAP計算結果12)

上記の各項目について、以下に考察する.

(1)解析解との比較(図5,6,7)

ここでは、式(4)から得られる図2の解析解とTDAPⅢによる計算結果を比較する。

1000

800

Ω

0.0

Pcr=980kN

0.1

図 5

0.2

0.3

θ radian

TDAP計算結果1

(Ks = 3293 kNm/rad, Pcr = 980 kN)

0.4

TDAPⅢの解析結果を**図5**, 6 および7 に示 す. これらの各図は、荷重高さL=3.36mを 一定とし、異なる回転ばね剛性(地盤強度) に対する荷重-変位角曲線(つり合い状態) を示す.この時、最大荷重は各回転ばね剛性 に対して、式(3) Pcr = Ks/Lから求めた転 倒荷重をとっている. そして、縦軸はその転 倒荷重(最大荷重)を荷重増分回数N = 1000



 $\theta_0 = 0.02$ 

 $\theta_0 = 0.05$  $\theta_0 = 0.10$ 

 $\theta_0 = 0.20$ 

0.6

0.5

に分割している.したがって,縦軸の最大値N = 1000は各転倒荷重*Pcr*に等しく,結果的に縦 軸は無次元化荷重*P*/*Pcr*となっている.

図5~7をみると、縦軸の荷重(あるいは回転ばね剛性)が変化しても各曲線が同じである ことが分かる.無次元化荷重P/Pcrと変位角の関係曲線は、式(4)から分かるように回転 ばね剛性Ksの大きさには関係なく一定である.また、ここで注目すべき点は、TDAPIIによる 計算結果(図5~7)はすべて図2の解析解と一致していることである.前節で示した式 (4)の解析解が、解析手法の異なるコンピューター構造解析の結果と一致することは、文献 で提案された解析解<sup>203)</sup>の妥当性が確認されたことになる.

今,基本データとしている荷重P = 980kNの位置を参考のためこれらの図中に示している. それらを各図で比較してみると、回転ばね剛性が大きくなると荷重P = 980kNに対する変位角 は小さくなることが分かる.

(2)回転ばね剛性(地盤)の影響(図8,9,10,一定荷重の場合)

図8,9および10は、杭打機の重量P=980kNを常に一定として縦軸の最大値(N=1000) にとり、異なる回転ばね剛性(したがって、異なる転倒荷重Pcr)に対してTDAPIII解析を 行った計算結果を示す、縦軸は、荷重の最大値P=980kNに対する荷重増分を1/1000として いる、ここで、地盤の回転ばね剛性が大きくなることは、転倒荷重Pcrが大きくなることを意 味している、結果的に、図8~9はそれぞれ図5~7の縦軸を最大値P=980kNに伸長したも

のに等しいことになる.図8は,縦軸の最大 荷重=転倒荷重*Pcr*になっているので,先の 図5と同一である.

図8,9および10中の縦線は仮に設定した 転倒傾斜角を示しているが,前述(図2)の ように変位角がこれを越えると転倒する.こ のことから,この縦線と荷重-変位角曲線と の交点が各初期傾斜角に対する転倒荷重であ







る.初期傾斜角が大きいと、転倒荷重の低下が顕著であることが分かる.**図8**(あるいは**図** 5)の場合は、縦軸の最大値が回転ばね剛性*Ks*(地盤強度)に対応した転倒荷重*Pcr* = 980kN にとられているので、初期傾斜角がゼロでも転倒する.

(3)荷重増分回数の影響(図5,11 (a),12 (a),あるいは8,11 (b),12 (b))

ここでは、TDAPⅢの有限変位解析における荷重増分回数Nの違いによる影響を検討する. 図5、11(a)および12(a)は、それぞれ縦軸にとった荷重増分回数(N=1000,100,10)の 違いによる荷重-変位角曲線の比較を示している.この場合、荷重と回転ばね剛性は常に同じ にとっている.これらの結果をみると、解析結果に差異は生じていないことが分かる.このこ とは、つり合い式(2)と同様の解析がTDAPⅢでも行われていることでもある.式(2)に おいて、荷重と変位角の関係は荷重増分に関わらず相対関係にあり、荷重が決まれば変形角が 求められ、またその逆もいえる.なお、図11(b)および12(b)は、転倒荷重*Pcr*までの変形 をみるため横軸の変位角の範囲がθ<1.1と大きくとられているが、それぞれ図11(a)および 12(a)と同じ結果となっている.

#### (4) 転倒荷重(固有値)の算定(図13)

TDAPⅢの有限変位解析を用いて、柱の弾性座屈荷重(固有値)を近似的に求めることがで きる.同様に、ここでは柱の弾性座屈荷重に相当する杭打機の転倒荷重を求める.そのために は、初期不整を十分に小さくとって荷重-変形曲線を求めることになる. 杭打機の転倒荷重(固有値)は式 (3)で与えられている.一方,座 屈後の荷重-変位角のつり合い関係 式は,式(4)から初期不整をゼロ ( $\theta_0 = 0, e = 0$ )と置いて,次のよ うに求められる<sup>4</sup>.

 $\frac{P}{Pcr} = \frac{\theta}{\sin \theta}$ 



 $(Pcr = 980 \text{kN}, \theta_0 = 0.001, Ks = 3293 \text{kNm/rad}, N = 1200)$ 

式(3)と(5)の解析解を用いて、座屈前および座屈後の荷重-変位角関係を図示する と、図13の点線のようになる<sup>233</sup>.このとき、荷重の座標軸は同図の左側縦軸にとっている。同 図においてつり合い関係は、 $P/Pcr = 1.0 \pm ct d = 0$  (Fundamental Path)であり、座屈後 (Post-Buckling Path)は変位角がほぼ水平に変化し、わずかに増大する。この座屈後挙動は、 柱の座屈においても同様にみられる<sup>4</sup>.

(5)

次に、TDAPIIIを用いて杭打機の転倒荷重*Pcr* = 980kNを算定する. そのために、微小な初 期傾斜角 $\theta_0$  = 0.001を仮定し、荷重の最大値*P* = 1200kNとして荷重一傾斜角曲線を求めると、 **図13**の実線に示すようになる. このとき、TDAPIIIの荷重は同図右側の縦軸に示すが、最大荷 重1200kNに対する最大荷重増分回数を1200回にとっているので、N = 980に対応する荷重が *P* = 980kNに相当する. 左側の座標軸では*P*/*Pcr* = 1.0が*P* = 980kNに相当するので、これより わずかに下にくることになる. **図13**の比較から分かるとおり、固有値である*P*/*Pcr* = 1.0付近を 除いて両者はよく一致している. *P*/*Pcr* = 1.0付近の相違は、TDAPIIIが近似解であるための必 然的な誤差であり、TDAPIIIの計算において初期たわみをさらに小さくとれば、両者はより近 づくことになる.

#### (5) 有限変位解析と微小変位解析(図14)

TDAPⅢを用いて有限変位解析(2次解析)と微小変位解析(1次解析)を実施し、その比

較を図14に示す.微小変位解析では 荷重と変位が線形関係にあるのに対 し,有限変位解析ではこれまでみて きたように曲線となり,当然のこと ながら両者の間には大きな相違がみ られる.

前述の3つの転倒メカニズムの 内,(1)転倒モーメント型の転倒 条件は"転倒モーメント>抵抗モー



メント"であり,基本的に1次解析に基づいていると考えら れる.軟弱地盤における構造安定問題においては初期傾斜や 偏芯荷重等の初期不整は不可避であり,これらの影響を含め た2次解析に基づく構造安定を検討しなければならないと思 われる.

## 4. まとめ

本論文は、杭打機やクレーンの転倒メカニズムについて、 先に提案されている構造安定論に基づく解析解<sup>2)3)</sup>の検証をコ ンピューター構造解析により行った、構造解析用ソフトウェ アにTDAPIIIを用いて解析解との比較を行った結果、両者は よく一致することが確認された.また、TDAPIIIによる解析 を種々の観点から実施し、杭打機の転倒安定に関わるTDAP IIIの適用性を検討した.



TDAPIIのようなコンピューター構造解析は、つり合い式 図15 履帯の地盤ばね支持 から得られる解析解よりも実用的であり、より幅広い観点からの解析が可能であると思われ る.実際の事故防止を検討するためには、図15に示すように履帯の支持力を鉛直地盤ばねに置 き換えることができれば、コンピューター構造解析により詳細な解析を行うことができる.そ こでは、3次元解析や地盤の非線形性を鉛直地盤ばね剛性に反映した解析を行うことも可能で ある.これらの要素を含めて、今後杭打機やクレーンの転倒安定問題をより詳細に検討できる ものと思われるが、その際にはここでの解析結果が生かされるものと期待される.

#### 参考文献

- 1) 日経コンストラクション:建設事故,重大災害70例に学ぶ再発防止策,重機災害,転倒,日経BP,2000.
- 2) 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,第22号,北海学園大学工学研究 科,2022年9月.
- 3) Toma S. and Chen W.F.: Overturning Mechanisms of Jacks, Cranes and Pile Driving Machines, Structural Engineering International (SEI), Taylor & Francis Online, 29 July, 2022.
- 4) Chen W.F. and Lui E.M.: Structural Stability, Theory and Implementation, Chapter 1 General Principles, Elsevier, 1987.
- 5) 玉手聡, 堀智仁: 杭打ち機械における転倒事例の一考察, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 6-237, 2008.