

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

TDAPⅢ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 TDAPⅢ

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一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TDAPⅢ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、TDAPⅢ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、TDAPⅢ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¹⁾。それらの転倒メカニズムについて、先に剛体一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²⁾³⁾。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。

* 北海学園大学名誉教授，Professor Emeritus, Hokkai-Gakuen University,

* 大起コンサルタント(株), Taiki Consultant, Inc.

** JIPテクノサイエンス(株)札幌テクノセンタ

** 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²⁾³⁾。

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²⁾³⁾

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なになる。

$$Ks(\theta - \theta_0) - P(L \sin \theta + e \cos \theta) = 0 \quad (1)$$

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、 θ =変位角、 θ_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

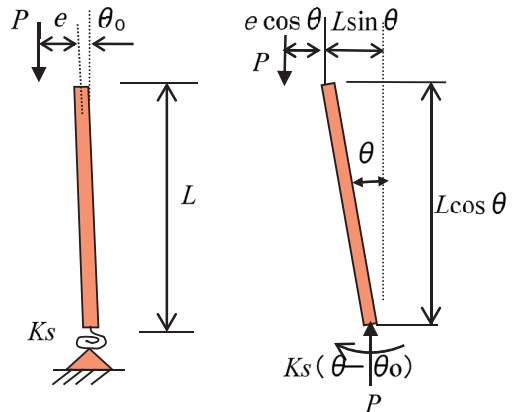


図1 杭打機の構造モデル

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．

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

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） P_{cr} が得られる．

$$P_{cr} = Ks/L \quad (3)$$

式（２）を転倒荷重（式（３））で無次元化すると，次のようになる．

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{\theta - \theta_0}{\sin \theta + e \cos \theta / L} \quad (4)$$

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．

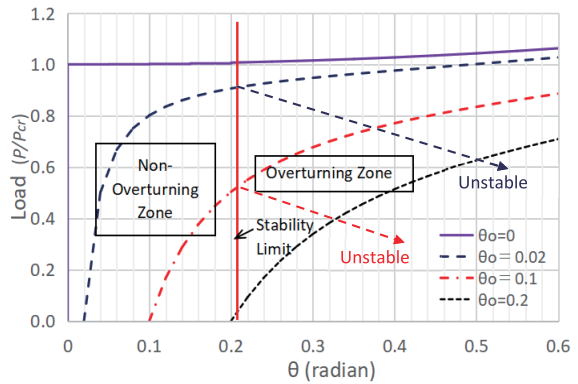


図２ 荷重－変位角曲線（初期傾斜がある場合）

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（ $\theta_u = 0.21$ （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（ P_u ）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．

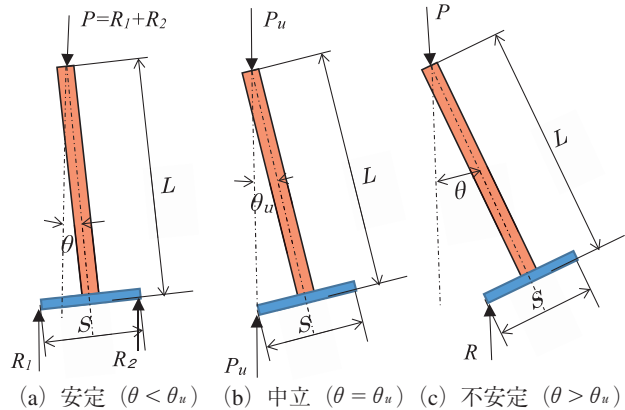


図３ 杭打機の安定と不安定

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 P_{cr} と限界高さ L の関係を異なる地盤の回転ばね剛性 K_s に対してプロットすると、図４ようになる。同図をみると、回転ばね剛性 K_s が大きくなるにしたがって P_{cr} - 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。

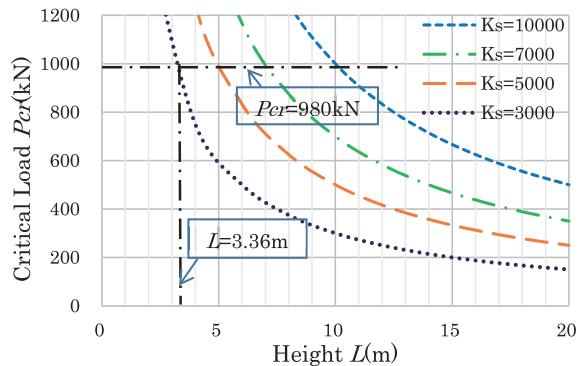


図４ 転倒荷重－限界高さ関係

3. TDAPⅢ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⁹⁾を参考に次のようにとる。

$$P = 980 \text{ kN}, L = 3.36 \text{ m} \quad (\text{式 (3) より } K_s = P_{cr} \cdot L = 3293 \text{ kNm})$$

（図４の転倒荷重－限界高さ曲線には、転倒荷重 $P = 980 \text{ kN}$ に対する限界高さ $L = 3.36 \text{ m}$ 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 $= 10\text{m}^4$ ，

断面積 $= 1\text{m}^2$

材料の性質：ヤング係数 $= 2 \times 10^8 \text{kN/m}^2$ ，せん断弾性係数 $= 7.7 \times 10^7 \text{kN/m}^2$

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．

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 $L = 3.36\text{m}$ 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） $P_{cr} = K_s/L$ 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 $N = 1000$

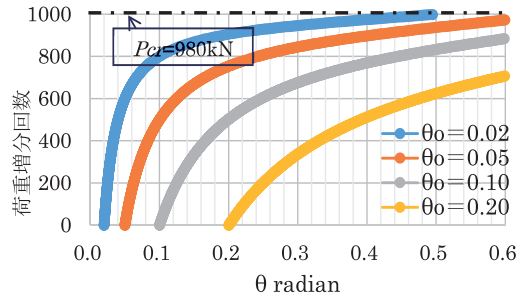


図 5 TDAP 計算結果 1
($K_s = 3293\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 980\text{kN}$)

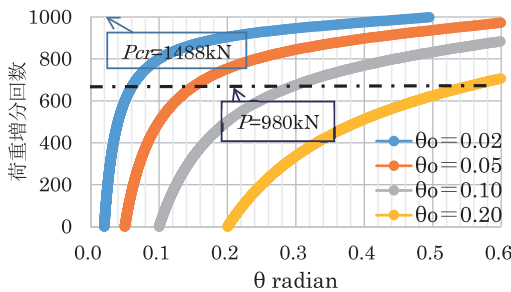


図 6 TDAP 計算結果 2
($K_s = 5000\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 1488\text{kN}$)

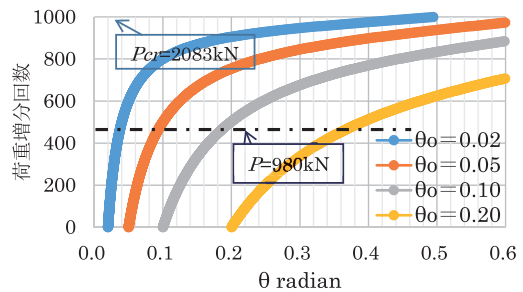


図 7 TDAP 計算結果 3
($K_s = 7000\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 2083\text{kN}$)

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 P_{cr} に等しく，結果的に縦軸は無次元化荷重 P/P_{cr} 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/P_{cr} と変位角 θ の関係曲線は，式（4）から分かるように回転ばね剛性 K_s 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，TDAPⅢ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²³⁾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 $P = 980\text{kN}$ 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 $P = 980\text{kN}$ 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 $P = 980\text{kN}$ 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 P_{cr} ）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 $P = 980\text{kN}$ 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 P_{cr} 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 $P = 980\text{kN}$ 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 P_{cr} 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

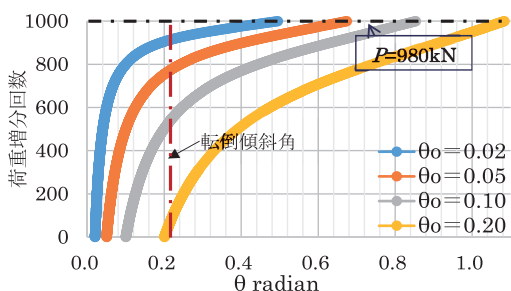


図8 TDAP計算結果4
($K_s = 3293\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 980\text{kN}$)

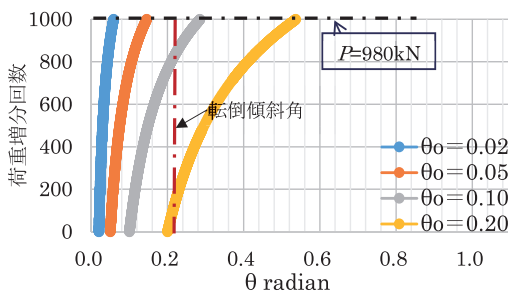


図9 TDAP計算結果5
($K_s = 5000\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 1488\text{kN}$)

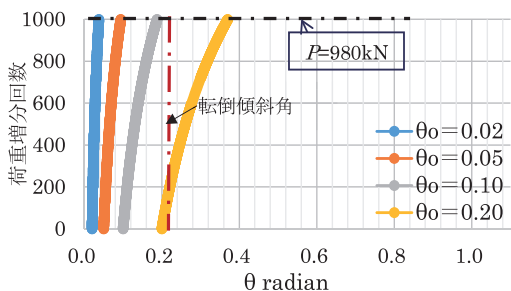


図10 TDAP計算結果6
($K_s = 7000\text{kNm/rad}$, $P_{cr} = 2083\text{kN}$)

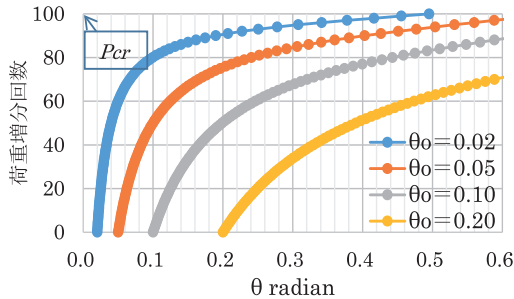


図11 (a) TDAP計算結果 7
($N = 100$, $\theta < 0.6$)

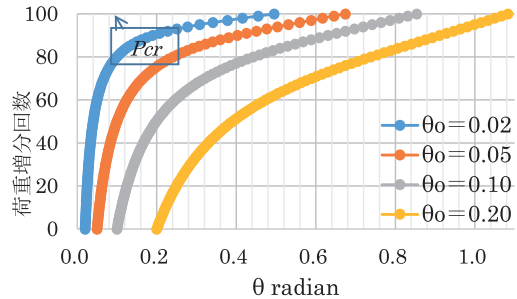


図11 (b) TDAP計算結果 8
($N = 100$, $\theta < 1.1$)

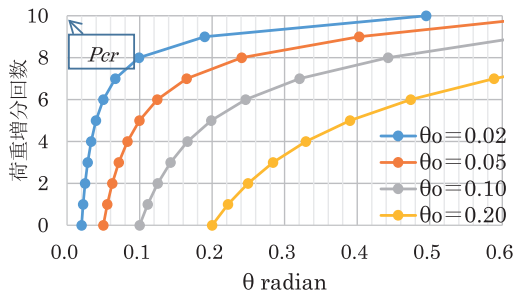


図12 (a) TDAP計算結果 9
($N = 10$, $\theta < 0.6$)

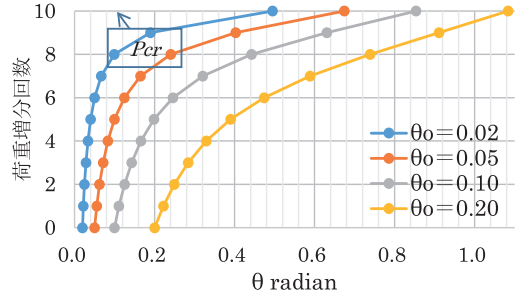


図12 (b) TDAP計算結果10
($N = 10$, $\theta < 1.1$)

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 K_s (地盤強度) に対応した転倒荷重 $P_{cr} = 980\text{kN}$ 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 P_{cr} までの変形をみるため横軸の変位角の範囲が $\theta < 1.1$ 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して荷重－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⁴⁾．

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{\theta}{\sin \theta} \quad (5)$$

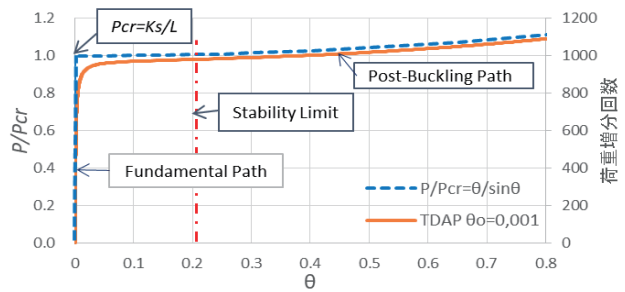


図13 TDAP計算結果11
($P_{cr} = 980\text{kN}$, $\theta_0 = 0.001$, $K_s = 3293\text{kNm/rad}$, $N = 1200$)

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²⁾³⁾．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， $P/P_{cr} = 1.0$ までは $\theta = 0$ （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⁴⁾．

次に，TDAPⅢを用いて杭打機の転倒荷重 $P_{cr} = 980\text{kN}$ 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 $P = 1200\text{kN}$ として荷重－傾斜角曲線を求めると，図13の実線に示ようになる．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 $P = 980\text{kN}$ に相当する．左側の座標軸では $P/P_{cr} = 1.0$ が $P = 980\text{kN}$ 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 $P/P_{cr} = 1.0$ 付近を除いて両者はよく一致している． $P/P_{cr} = 1.0$ 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

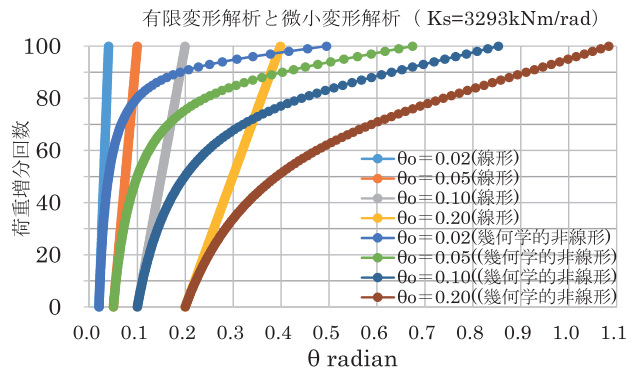


図14 TDAP計算結果12（有限変位解析と微小変位解析）

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²⁾³⁾の検証をコンピュータ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TDAPⅢの適用性を検討した．

TDAPⅢのようなコンピュータ構造解析は，つり合い式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，コンピュータ構造解析により詳細な解析を行うことができる．ここでは，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．

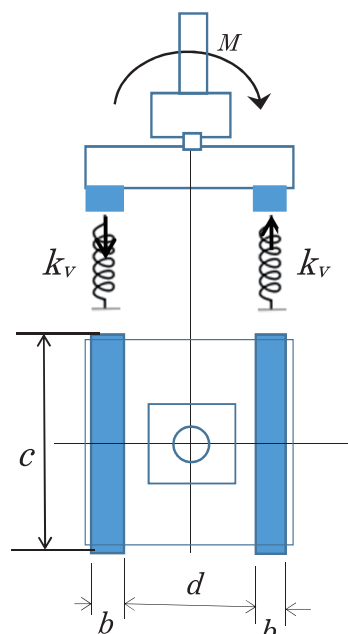


図15 履帯の地盤ばね支持

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.