

タイトル	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
著者	當麻, 庄司; 世戸, 憲治; TOMA, Shouji; SETO, Kenji
引用	北海学園大学工学部研究報告(51): 1-14
発行日	2024-01-12

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

當 麻 庄 司*・世 戸 憲 治**

Comparisons of Static and Dynamic Analyses on Overturning Behaviors of Pile Driving Machines, etc., on Soft Ground

Shouji TOMA* and Kenji SETO**

要 旨

杭打機、クレーン、高所作業車、ジャッキ等重心の高い重機類の転倒には、構造安定問題が関係していると考えられる。構造不安定による転倒事故は、荷重の方向と変形の方向が異なるため予測し難く、事故を繰り返す背景（素因）になっていると思われる。そこでは、静的な変形だけではなく、動的な慣性力が影響してより転倒の危険性が增大する。構造不安定による慣性力が作用するため、変位傾斜角が転倒安定角を超えて一気に転倒に至りやすく、想定外として大惨事になることがある。

転倒に至る誘因として、予期しなかった軟弱地盤への移動、荷重の大きさや高さの増大、地盤傾斜の増大、等が考えられる。本論文は、これらの誘因に対して、構造安定という素因の観点から静解析と動解析を比較しながら、その挙動の解明を試みる。そして、杭打機等の重機類の転倒メカニズムをより精確に把握し、事故を防止するための基礎資料を提供する。

Key words : 杭打機の転倒, クレーンの転倒, ジャッキの転倒, 転倒の動解析, 静解析と動解析の比較, 転倒安全, 転倒メカニズム

目 次

- | | |
|-------------------------|------------------------------------|
| 1. まえがき | 4.1 瞬間的に移動した場合 |
| 2. 構造モデルと支配方程式 | 4.2 徐々に移動した場合 |
| 2.1 構造モデル | 5. 傾斜地へ移動した場合の転倒挙動 |
| 2.2 静解析のつり合い式 | 5.1 瞬間的に移動した場合 |
| 2.3 動解析の運動方程式とその解 | 5.2 徐々に移動した場合 |
| 3. 荷重-変位角関係における転倒挙動 | 6. 転倒安全性の評価について |
| 3.1 瞬間的に移動した場合 | 7. 初期角速度 $\omega_0 \neq 0$ の影響について |
| 3.2 徐々に移動した場合 | 8. 回転ばね剛性の評価について |
| 4. 回転ばね剛性-変位角関係における転倒挙動 | 9. あとがき |
| | 参考文献 |

* 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.

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

1. まえがき

これまで、杭打機、クレーン、高所作業車、ジャッキ等重心の高い重機類の転倒には、構造安定問題が関係していることが著者らにより提唱されてきた^{1~8)}。当然ながら、これらの転倒には地盤の支持力不足が根底にあることは間違いないが、同様な転倒事故が繰り返されている背景には、素因としてそれに関連した想定に近い構造不安定問題があると思われる。また、最近では動的な慣性力がより転倒の危険性を高めていることが指摘されている⁹⁾¹⁰⁾。

不安定に陥る誘因としては、荷重が大きくなる、ブームを伸長する（重心の高さが大きくなる）、軟弱地盤に移動する、傾斜地へ移動する、等々が考えられる。本論文では、このような杭打機が不安定状態に陥る様々な誘因に対して、素因である構造安定の観点から静解析と動解析を用いて転倒のメカニズムを比較考察する。動解析においては慣性力が影響するため、静解析では問題にならなかった時間的な要素が関係してくる。不安定要因の発生時間が十分に長ければ、静解析を適用できる。しかし、重機類の事故のように移動中に起こる場合、動解析が必要である。動解析では不安定に陥る時間の長さによって、慣性力の大きさが異なってくる。ここでは、その慣性力によって静解析結果よりも変位傾斜角が増幅され、転倒の危険性が増すことを示す。このように、本論文は静解析と動解析による転倒挙動の違いを比較しながら、転倒のメカニズムを解明することによって事故を防止するための基礎資料を提供する。

2. 構造モデルと支配方程式

2.1 構造モデル⁵⁾¹⁰⁾

本論文では、杭打機の構造安定問題を静解析と動解析によって比較検討するため、まず両解析の概要を述べる。図1に静解析と動解析の構造モデルを示す。両解析とも、柱は剛体と仮定する。図1(a)の静解析における P は杭打機全体の重量(kN)であり、作用点はその重心高さ L である。また、図中に初期傾斜角 θ_0 、回転ばね剛性 Ks および荷重の偏心量 e を示す。一方、図1(b)の動解析においては、集中質量の杭打機本体 M_0 (kg)と杭打上端のオーガー M_I (kg)、そして分布質量のブーム m (kg/m)に分類し、それぞれの作用点を想定する。動解析では2次モーメントが関係してくるため、このように3つに分類する必要がある。ここで、静解析と動解析ではそれぞれ重量と質量に単位が異なることに注意されたい。なお、ジャッキの転倒の場合、構造モデルは上載荷重の1質点になるため、図1(a)の構造モデルが静解析と動解析の両方に適用することができる⁴⁾。基本的に杭打機の動解析よりも簡単になるので本論文では省略するが、後述するように動的な慣性力の影響が杭打機よりも大きいため転倒しやすくなる。

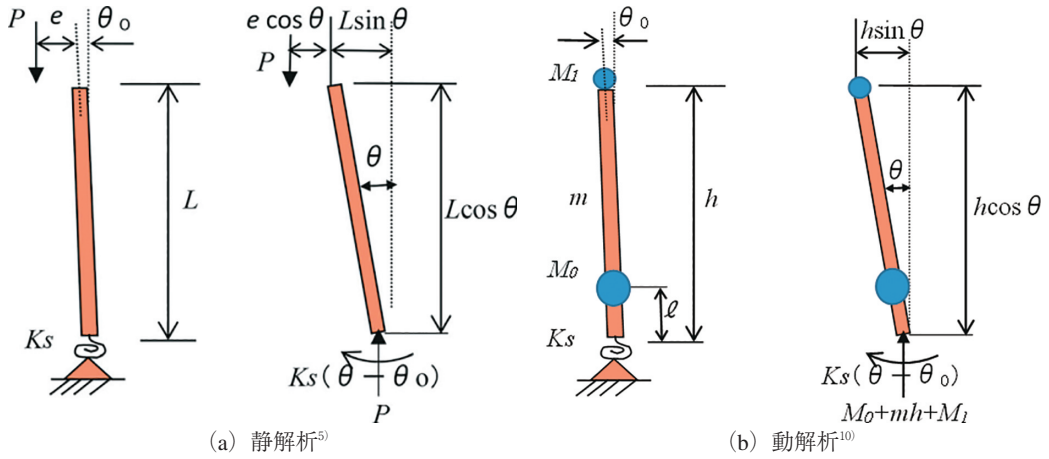


図1 構造モデル

2.2 静解析のつり合い式⁵⁾⁷⁾

静解析において、荷重－変位角関係を求める支配方程式（復元モーメントと転倒モーメントのつり合い式）は図1 (a) の構造モデルから次のように導かれる。

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

上式から荷重－変位角関係は次のようになる。

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

ここに、 P_{cr} は弾性転倒（座屈）荷重であり、次式で与えられる。

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

式（2）から、初期傾斜角 θ_0 を変化させた場合の荷重－変位角曲線を求めると、図2に示すようになる。また、図3はある諸元をもつ杭打機に対する回転ばね剛性 Ks と変位角 θ の関係を式（1）から求めたものである。これらの図から、初期傾斜角によって変位角は大きくなり、また転倒しやすくなることがわかる。

図2および3は、つり合い式（1）から求められた曲線であり、この曲線上にあれば杭打機はつり合い状態にあることを示している。もし、杭打機が何らかの原因によりアンバランス状態になってこの曲線の左側にくれば、式（1）において転倒モーメントが復元モーメントよりも大きくなり、つり合い状態に戻るために右側のつり合い曲線上に移動しようとする。反対に、もしつり合い曲線よりも右側にくれば復元モーメントの方が大きくなり、左側に移動してつり合い曲線上に移動しようとする。

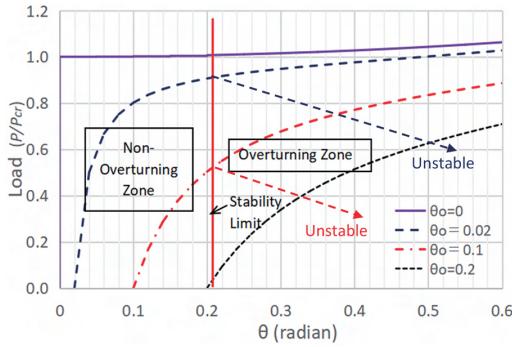


図2 荷重-変位角曲線（静解析）

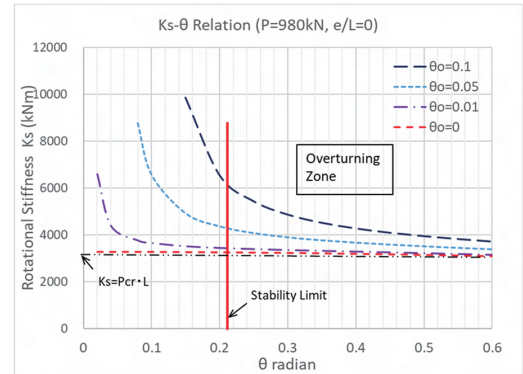


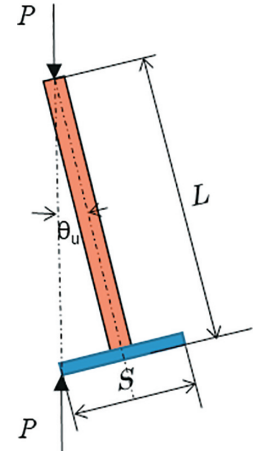
図3 回転ばね剛性-変位角曲線（静解析）

図2および3に示す転倒傾斜角 θ_u は、図4に表されるように復元力が消失する転倒傾斜角として定義され、次式で表される。

$$\theta_u = \tan^{-1} \frac{S}{2L} \quad (4)$$

ここに、 S =履帯の間隔、 L =全体重心の高さ

式(4)は荷重の分布や大きさには関係なく、杭打ち機の重心と寸法で決まることに留意されたい。杭打ち機の傾斜角が転倒傾斜角 θ_u を超えると、図2に示すように荷重-変位角曲線は右下がり、すなわち不安定になる。なお、ここでは簡単のため偏芯荷重は考慮していない。

図4 転倒傾斜角 θ_u

2.3 動解析の運動方程式とその解

動解析においては、杭打ち機の変位挙動を表す支配方程式として、図1(b)に示す構造モデルから次のような運動方程式が導かれる⁹⁾¹⁰⁾。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + r \frac{d\theta}{dt} - T \sin\theta + K_s(\theta - \theta_0) = 0 \quad (5)$$

ここに、第1項は慣性力モーメント、第2項は減衰力モーメント、第3項は転倒モーメントとして第4項は復元モーメントである。各質量の慣性モーメント I (2次モーメント)および各重量の T (1次モーメント)は次のように求められる。

$$I = \left(M_1 + \frac{1}{3} m h \right) h^2 + M_0 \ell^2 \quad (6)$$

$$T = \left(M_1 + \frac{1}{2} m h \right) g h + M_0 g \ell \quad (7)$$

ここに、 g = 重力の加速度

全体重心の高さ L 、全体重量 P および1次モーメント T の関係は、 $L = T/P$ で与えられる。ここで、重心の高さ L が大きくなると、静解析の弾性転倒荷重 P_{cr} (式(3))が小さくなる。この結果は、**図2**に示すように変位角を大きくし転倒傾斜角 θ_u (式(4))を小さくして、転倒しやすくなることに留意する必要がある。一方、動解析においては、重心高さが大きくなると運動方程式(5)における慣性力が2次モーメント(式(6))として増大するため、静解析の1次モーメント(式(7))よりも影響が大きい。

次に、式(5)において減衰力をゼロ(減衰係数 $\gamma = 0$)として解くと、次のような変位応答式が得られる。

$$\theta(t) = \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t) + (\theta_0 - \theta_c) \cos(\omega t) + \theta_c \quad (8)$$

上式は、初期角速度 $\omega_0 = 0$ の場合次のようになる。

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_c) \cos(\omega t) + \theta_c \quad (9)$$

ここに、振動の傾斜角速度 ω および中心傾斜角 θ_c は次のように表される。

$$\omega = \sqrt{\frac{K_s - T}{I}}, \quad \theta_c = \frac{\theta_0}{1 - \alpha} (> \theta_0) \quad (10)$$

また、パラメーター $\alpha = T/K_s = P/P_{cr}$ である。

以降、動解析では減衰力と初期角速度を考慮せず、式(9)を用いて検討する。式(9)は振動の中心を θ_c として、片振幅 $(\theta_0 - \theta_c)$ とする自由振動を表している。

今、式(9)から例としてある諸元をもつ杭打機の変位傾斜角-時間曲線を求めると、**図5**に示すようになる⁹⁾¹⁰⁾。この例では、振動の初期条件を初期傾斜角 $\theta_{t=0} = \theta_0$ としているが、変位角が振動の中心 θ_c を少し超えた約 $t = 3.8$ 秒のところで転倒傾斜角 θ_u に到達して転倒する。

次に、変位傾斜角と時間の関係式(9)から、それぞれ変位角速度と変位角加速度の式を求めると次のようになる。

$$\text{変位角速度} : \frac{d\theta}{dt} = (\theta_c - \theta_0) \omega \sin \omega t \quad (11)$$

$$\text{変位角加速度} : \frac{d^2\theta}{dt^2} = (\theta_c - \theta_0) \omega^2 \cos \omega t \quad (12)$$

上式から変位角速度と変位角加速度をプロットすると、**図6**に示すようになる。**図5**と**6**からわかるように、変位角速度は初期条件時($t = 0$)のゼロからスタートし、変位角が振動の中心にある時(約3.2秒)で最大となり、変位角の最大時にゼロになる。この例では、**図6**をみると転倒時の約3.8秒辺りでまだ変位角速度が大きいことがわかる。このことは、静解析では

振動の中心 θ_c で静止するとされているのに対して、大きな相違がある。変位の傾斜角、角速度および角加速度はそれぞれ微分・積分の関係にあることが、**図5**、**6**に示された各曲線の接線角をみるとわかる。

次に、式(9)を用いて、初期条件として初期傾斜角 $\theta_{t=0} = \theta_0$ とした場合の荷重-振動中心角曲線を求めると、**図7**のようになる。同図は、静解析における**図2**と同じであるが、ここでの横軸の変位角は振動の中心 θ_c を表している。同図には、それを中心にした全振幅($\theta_{min} - \theta_{max}$)または片振幅($\theta_0 - \theta_c$)の例を示している。前述のように、動解析における振動の中心は振動角速度が最大の点であり、これが静解析においてはつり合いの停止点になることは大きな相違がある。また、初期傾斜角 $\theta_0 = 0.05$ および 0.1 を比較すると、初期傾斜角が大きいと振幅も大きくなることがわかる。

次に、ある諸元をもつ杭打機について、動解析結果の回転ばね剛性-変位角曲線を示すと**図8**のようになる。同図には、初期傾斜角 $\theta_0 = 0.05$ および 0.01 の場合の振幅比較を示すが、**図7**と同様に初期傾斜角が大きいと振幅も大きくなることがわかる。**図7**および**8**に示す自由振動は減衰をゼロとした場合であり、減衰力を考慮すると振動幅は小さくなる。減衰力が非常に大きい場合(過減衰)は振動しないでつり合い状態に戻る可能性もあるが、杭打機のような重

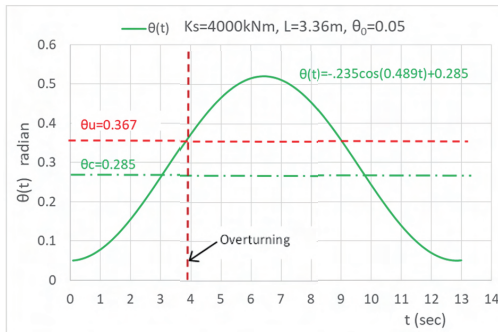


図5 変位角の振動挙動

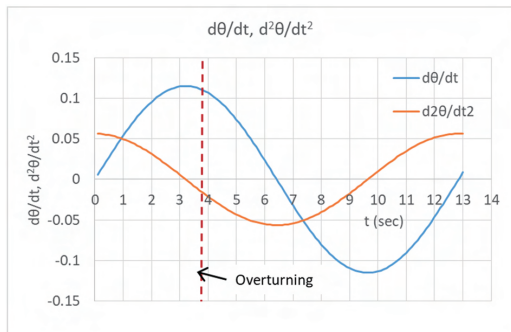


図6 角速度と角加速度の振動挙動

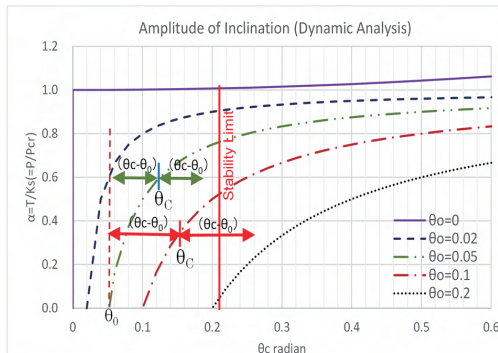


図7 荷重-変位角曲線(動解析)

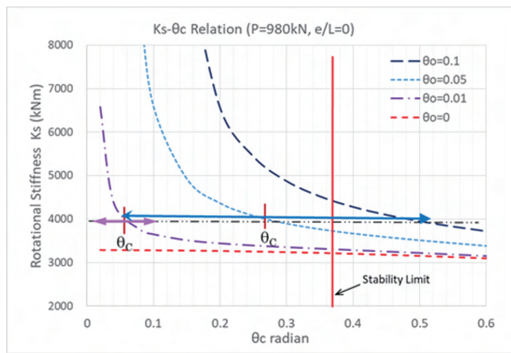


図8 回転ばね剛性-変位角曲線(動解析)

機類がゆっくりと傾斜振動する場合、一般的に減衰力は小さいと思われる。

過去の事故例では、傾斜し始めた杭打機を立て直そうとして転倒モーメントを減少させる方向に杭打機を転回させたが、結局転倒したことが報告されている¹¹⁾。その理由として、慣性モーメントの方が転倒モーメントの減少よりも大きかったことが考えられる。隠れた支持力不足の場所に移動したような場合、いったん重機が傾斜し始めると容易に元に戻せないのはこのためと考えられ、軟弱地盤に対する警戒は慎重に行われる必要がある。また、クレーンやジャッキの荷重を大きくしていく場合も同様に、いったん傾き始めると慣性力により元に戻せなくなる恐れがある。次に、その変化の過程における時間的な影響について考察する。

3. 荷重－変位角関係における転倒挙動

3.1 瞬間的に移動した場合

杭打機等の転倒は、作業中に荷重が大きくなる、重心が上がる、軟弱地盤へ移動する等の不釣り合い状態になったときに発生すると考えられる。これらの原因は、いずれも杭打機の転倒に直接繋がる誘因とみなすことができ、その結果 $\alpha = P/P_c$ が大きくなり構造不安定に陥ることが転倒の背景にある素因と考えることができる³⁾。以降、荷重－変位角関係の静解析と動解析から、転倒挙動について比較検討する。

図9に、式(2)から求めた静解析による荷重－変位角曲線の例を示す⁵⁾。縦軸の荷重が増大することによりつり合いの点Aから不釣り合い点B'に移動するとき、もしこれが瞬間的(非常に短い時間)に行われたとするとAから真上のB'に移動することになる。そして、再度つり合いの点C'に向かう途中で転倒傾斜角を超えると転倒する。この転倒メカニズムを“つり合い移行型”と呼んでいる⁵⁾。

同様の挙動を図10の動解析¹⁰⁾で考察すると、B'の状態を初期条件として式(9)で表される自由振動が始まる。この場合、横軸は振動の中心 θ_c なので図9のようにつり合い点C'では停止せず、慣性力でさらに変位角はD'まで増大する。その途中で転倒変位角を超えれば転倒す

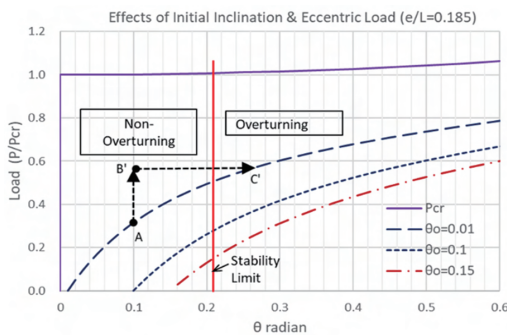


図9 瞬間的に移動した場合の転倒挙動(静解析)

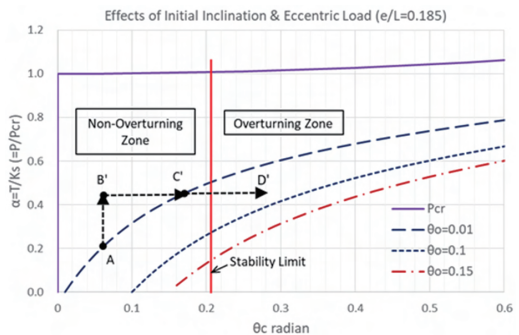


図10 瞬間的に移動した場合の転倒挙動(動解析)

動解析によれば、**図6**で示したように振動の中心である点C'で変位角速度が最大になり、静解析では変位角の停止点であることと大きな違いがある。そして、点C'から変位角速度は徐々に減少し、折り返し点D'で再びゼロになる。このように、動解析によれば転倒の危険性は大きく増すことがわかる。

3.2 徐々に移動した場合

前節では、つり合い状態Aから不つり合い状態B'への移行は瞬時的（非常に短い時間）に行われると仮定した。もし、この移行が十分ゆっくり行われるのであれば、変位角はつり合い曲線に沿って静的に移動することになる。現実の場合、ある程度の時間をもって行われると思われるので、変位角の変化はこの両者の中間に位置するはずである。この動きを模式的に考えると、**図11**に示すようにAからB'への変化はある程度の変位角の増大を伴い、斜め右上方向となる。そして、一時停止した不つり合い点B'からつり合い点C'へと向かうと考えられ、静解析においてはつり合い点C'で停止する。

動解析の場合、前節でみたのと同様に点B'を初期条件とする振動現象となって、変位角はつり合い点C'（振動の中心であり変位角速度が最大の点）を超え、振動の折り返し点D'まで増大する。その挙動は**図12**に示すようになり、瞬時的に移動した場合（**図10**）と比較すると最大傾斜角D'の位置は小さくなっている。すなわち、動解析によれば、瞬時的に移動した方が徐々に移動するよりも振幅が大きく、最大傾斜角も大きくなることがわかる。換言すれば、荷重を急速に大きくする場合は徐々に大きくするよりも転倒に結び付きやすいといえる。

また、より軟弱な地盤に移動した場合、点B'の位置はより上方に移動することになり、振幅が大きくなって、転倒しやすくなる。結論として、荷重や地盤の支持力が変化する場合、変化の割合が大きい程、あるいは変化の時間が短い程慣性力が大きくなり、転倒が起こりやすくなる。同様な考察を、さらに次の回転ばね剛性-変位角関係でみることにする。

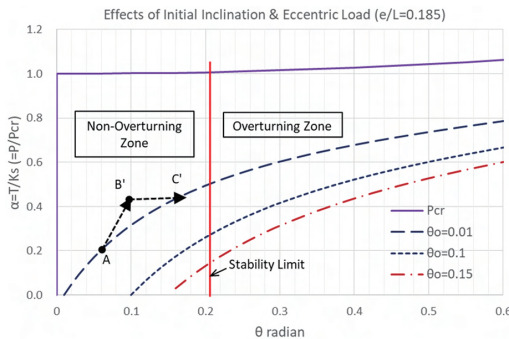


図11 徐々に移動した場合の転倒挙動（静解析）

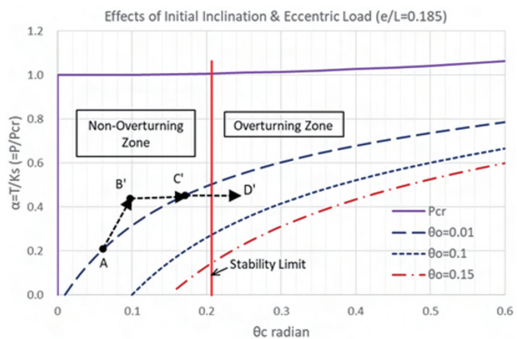


図12 徐々に移動した場合の転倒挙動（動解析）

4. 回転ばね剛性－変位角関係における転倒挙動

4.1 瞬間的に移動した場合

荷重－変位角関係において、軟弱地盤に移動した場合の挙動は前節でみた。ここでは、回転ばね剛性－変位角関係において、ある諸元をもつ杭打機が軟弱地盤に移動した場合を考察する。軟弱地盤に移動することは回転ばね剛性が小さくなることであり、それが瞬間的（非常に短い時間）に行われるとすれば、**図13**に示すようにつり合い点Aから真下の点BあるいはB'点に移動することになる。**図13**の静解析では、それらの不釣り合い点からつり合い点（停止点）CあるいはC'に戻ろうとするとときに転倒傾斜角を超えると転倒することになる⁵⁾。

一方、動解析では**図14**に示すようにBあるいはB'を初期条件とする自由振動となり、慣性力によってつり合い点（振動の中心点であり変位角速度の最大点）CあるいはC'を超えて変位は増大する¹⁰⁾。動解析では、変位角の停止点DあるいはD'が傾斜安定角を超えないことが転倒しない条件となる。**図13**と**14**の着色部は転倒する範囲を示すが、動解析では静解析に比べてその範囲が広がっている。ここでも、動解析によれば転倒傾斜角を超えて転倒しやすくなることがわかる。

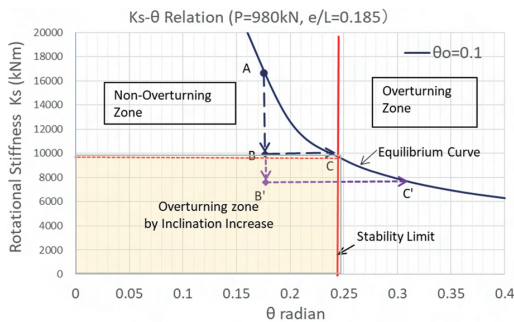


図13 瞬間的に軟弱地盤に移動した場合の転倒挙動（静解析）

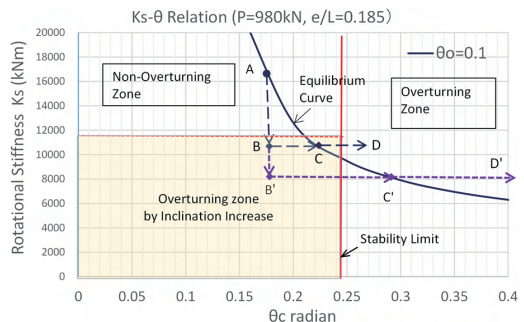


図14 瞬間的に軟弱地盤に移動した場合の転倒挙動（動解析）

4.2 徐々に移動した場合

ある諸元をもつ杭打機がつり合い点からより軟弱な地盤に徐々に移動したとき、変位角は前節同様徐々に増大すると考えられる。その変位挙動は、それぞれ**図15**（静解析）と**図16**（動解析）に示すように斜め右下方向に増大する。そして、再度つり合い状態に戻ろうとする時、静解析ではつり合い曲線上において変位は止まるが、動解析ではさらに増大し続けて転倒しやすくなる。

図13～16において、点BとB'の違いは縦軸の回転ばね剛性がB'の方がより小さくなっている。このことは、B'の方がより軟弱な地盤に移動したことであり、そうすると振動幅が大きくなる。

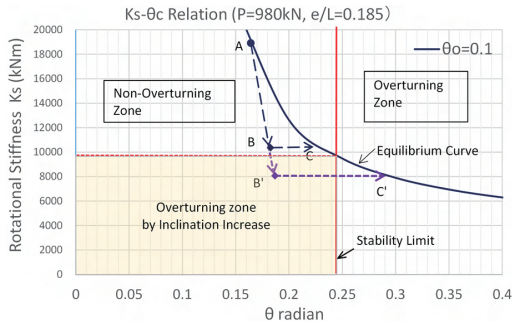


図15 徐々に軟弱地盤に移動した場合の転倒挙動 (静解析)

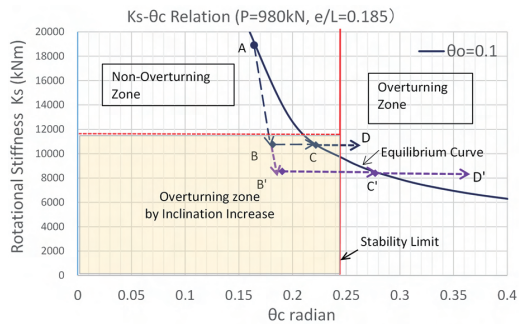


図16 徐々に軟弱地盤に移動した場合の転倒挙動 (動解析)

なり、転倒しやすくなることに繋がる。また、徐々に移動 (図15および16) するよりも瞬間的に移動 (図13および14) する方がより転倒しやすくなることも、これらの図からわかる。

5. 傾斜地へ移動した場合の転倒挙動

5.1 瞬間的に移動した場合

ここでは、ある杭打機が傾斜地へ移動した場合の転倒挙動を荷重-変位角曲線上で考察する。この時、傾斜角だけの変化なので縦軸の荷重は一定である。今、図17に示すように、初期傾斜角 $\theta_0 = 0.02$ の点Aから傾斜角0.05の点に瞬間的に移動した場合を考えると、静解析においては慣性力を考慮しないのでつり合い点Bで変位角は停止する。しかし、動解析では図18に示すように自由振動となり、慣性力によってAB間と同じ変位量の点Cまで増大する (減衰力は無視)。その間に、杭打機が転倒安定角を超えると転倒する。

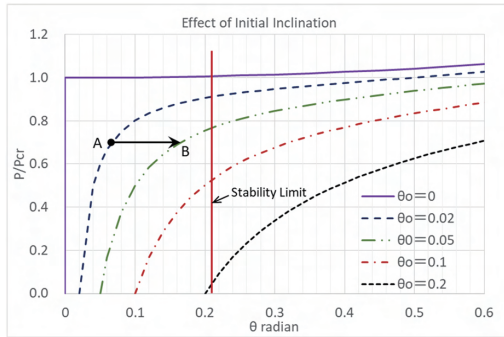


図17 初期傾斜角が瞬間的に増大した場合 (静解析)

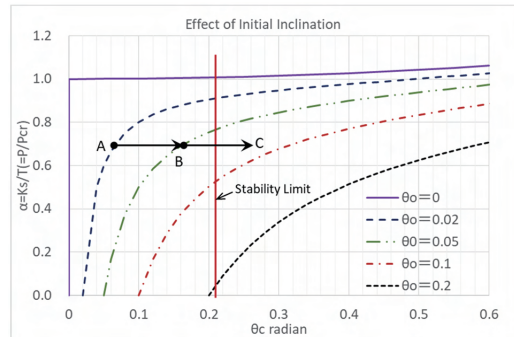


図18 初期傾斜角が瞬間的に増大した場合 (動解析)

5.2 徐々に移動した場合

次に、傾斜地への移動が徐々に行われた場合、静解析では慣性力を考慮しないので、図19に示すように図17の瞬間的に移動した場合と同じく $\theta_0 = 0.05$ 上のつり合い点Bで停止する。一

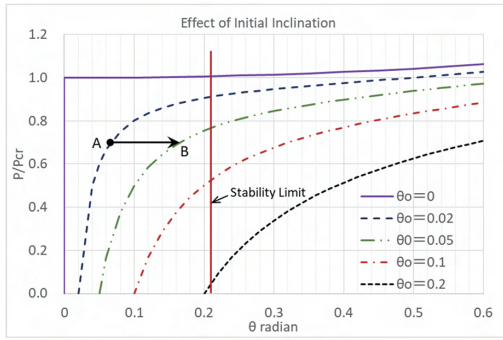


図19 初期傾斜角が徐々に増大した場合 (静解析)

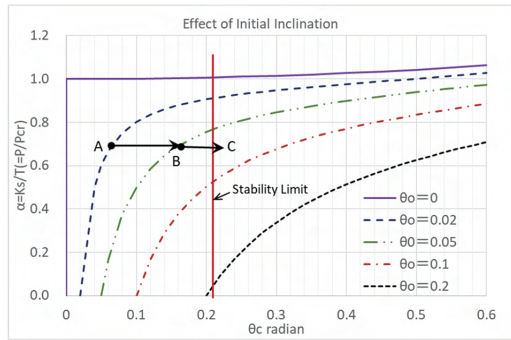


図20 初期傾斜角が徐々に増大した場合 (動解析)

方、動解析の場合は図17と図18の中間的な挙動を考えると考えられ、図20に示すようにAB間の変位量よりも小さい変位量BCだけ増大する。したがって、移動速度が大きいほどBCの変位量は大きくなる。動解析によれば、傾斜地への移動速度が転倒の危険性の程度に影響し、傾斜地への移動が急速に行われるほど振幅が大きくなり、転倒の危険性が増すことがわかる。また、傾斜の差が大きいほどA→B→Cの移動量は大きく、転倒しやすくなる。

6. 転倒安全性の評価について

ここでは、動解析を考慮した安全性の評価を考察する。転倒安全を維持するには、最大傾斜角が転倒傾斜角を超えてはならない。すなわち、

$$\theta_{max} < \theta_u \tag{13}$$

最大傾斜角は式(9)から次のようになる。

$$\theta_{max} = 2\theta_c - \theta_0 = (1 + \alpha)\theta_c \tag{14}$$

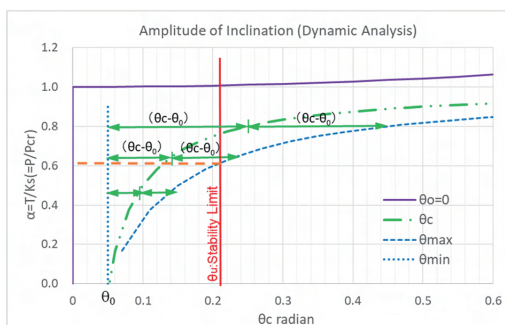
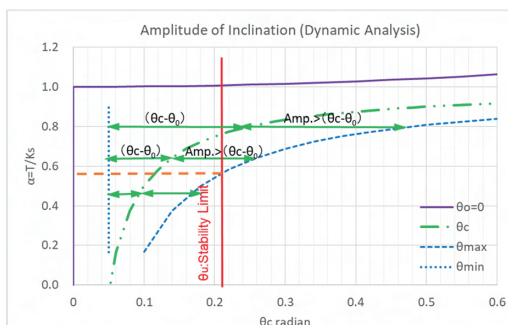
式(14)および式(4)を式(13)に代入すると、転倒安全評価式は下記のようになる¹⁰⁾。

$$(1 + \alpha)\theta_c < \tan^{-1}\left(\frac{S}{2L}\right) \tag{15}$$

式(14)の最大傾斜角をプロットすると図21に示すようになり¹⁰⁾、これが転倒傾斜角 θ_u を超えてはならない。そのときの限界荷重は図21中の赤点線で示されている。これら θ_u と θ_{max} の比を安全率 ζ と定義し、安全性を確保するための評価式とすることができる。

$$\zeta = \theta_u / \theta_{max} > S_f \tag{16}$$

このときの安全率として、ここでは現場の状況に応じて $S_f = 1.2 \sim 1.5$ 程度にすることを考え

図21 最大傾斜角 ($\omega_0 = 0$)図22 最大傾斜角 ($\omega_0 \neq 0$)

る．式 (14) の最大傾斜角 θ_{max} は，減衰力を無視し移動は瞬間的に行われるとの仮定に基づいている．もし，例えば1.2を採用するとすれば，図21中の限界荷重値（赤点線）は $S_r = 1.2$ 倍分だけ低下することになる．図21には，初期傾斜角 $\theta_0 = 0.05$ の場合の荷重ケース（振動幅）を3つ示しており，荷重が大きくなるほど，また軟弱地盤ほど振動幅が大きくなっていることがわかる．

7. 初期角速度 $\omega_0 \neq 0$ の影響について

動解析において，これまでの検討では初期傾斜角速度 $\omega_0 = 0$ としてきた．ここで，突風が吹いたり残存していた内部応力が解放されたりして初期傾斜角速度をもつ場合 ($\omega_0 \neq 0$) を考えると，最大傾斜角は次式で与えられる¹⁰⁾．

$$\theta_{max} = \sqrt{(\theta_0 - \theta_c)^2 + (\omega_0 / \omega)^2} + \theta_c \quad (17)$$

上式をみると，全振動幅が初期傾斜角速度 ω_0 によって大きくなっていることがわかる（式 (14) 参照）．図22にその一例が示されているが，初期傾斜角速度のない図21に比較して最大傾斜角 θ_{max} が大きくなっているため，限界荷重値（赤点線で示す）はその分だけ下がり，転倒の危険性は増す．

8. 回転ばね剛性の評価について

これまでの検討の中で，回転ばね剛性 K_s が転倒に対して重要な役割を果たしていることは明らかである．静解析や動解析での支配方程式では簡単のため線形と仮定しているが，実際にはもっと複雑であると思われる．より精確には，地盤工学的観点から非線形としてコンピュータ構造解析を行うことも可能であると思われる．

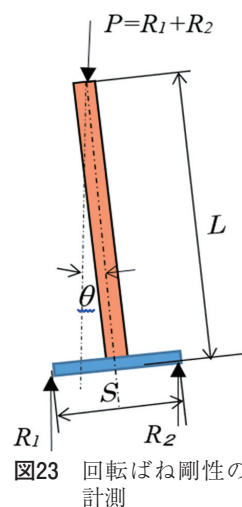


図23 回転ばね剛性の計測

回転ばね剛性は、理論的に評価することも考えられるが、ここでは現地で傾斜角 θ と転倒モーメントを計測することによる評価法を考えてみる。図23に示すように、回転ばね剛性 K_s はその定義から次式のように求められる。

$$K_s = PL \sin \theta / \theta \quad (18)$$

このときの計測は、転倒に対する安全を十分に確保できる角度の範囲で行う必要がある。このように、実測によって回転ばね剛性をより正確に求めることができ、安全の確保がより確かなものとなる。特に、ここで示した解析的研究を模型実験により検証する場合、上式を用いることができる。

9. あとがき

杭打機やクレーン等に代表される重心の高い重機類は、転倒事故を起こしやすい。これまで、著者らによってその素因と考えられる構造不安定の観点から転倒メカニズムの解明が進められてきた^{4)~8)}。そこでは、まず初期傾斜角の影響が大きいことが示され、また最近実施された動解析によると動的な慣性力によって大きく転倒しやすくなることが指摘されている⁹⁾¹⁰⁾。本論文はそれらの研究結果に基づき、さらに転倒メカニズムを静解析と動解析を比較して考察した。

その結果、荷重や高さの増大が短時間で行われる方が慣性力によって変位傾斜角が大きくなり、転倒の危険性が増すメカニズムが示された。例えば、杭打機が軟弱地盤に移動する場合やクレーンの荷重が大きくなる場合、その変化時間の短い方が慣性力は大きくなり転倒しやすい。また、慣性力は荷重の高さが2次モーメントとして関係してくるため、重心高さの影響が静解析よりも大きくなる。このように、杭打機等が転倒に至る挙動を静解析と動解析の両面から比較検討することにより、転倒過程がより明確になった。これらの結果は、転倒に対するより安全な対策を採るための判断材料とすることができる。

なお、ここでは直接言及しなかったが、橋桁落下の事故も繰り返されている。その素因の可能性として、橋軸直角方向だけではなく橋軸方向にも門型フレームと考えられる構造の不安定にあるとも考えられる。そのメカニズムは、基本的にここで述べた杭打機の転倒と同じであり、橋桁を支持するジャッキのように荷重が大きく重心の高い構造は構造安定に対する配慮が必要である。ジャッキが橋桁を支持している時に転倒するのであれば、ここで示した慣性力による動的効果も大きく影響している可能性がある。

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，pp. 62-65，2002.
- 2) 当麻庄司：ジャッキや杭打機の転倒事故原因について－構造安定問題の観点から－，平成28年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集，I-525，2016.
- 3) 当麻庄司：ジャッキ等の転倒事故の素因について，令和3年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集，I-52，2021.
- 4) 当麻庄司：ジャッキの転倒による橋桁落下事故の原因分析，災害事例分析，安全工学会誌，Vol. 60，No. 5，pp. 384-390 (2021).
- 5) 当麻庄司：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.
- 6) 当麻庄司，星野淳一：TDAPⅢによる杭打機等の転倒安定の検討，北海学園大学工学部研究報告，第50号，2023年1月.
- 7) Toma S. and Chen W.F. : Overturning Mechanisms of Jacks, Cranes and Pile Driving Machines, Structural Engineering International (SEI), Taylor & Francis Online, Overturning Mechanisms of Jacks, Cranes and Pile Driving Machines : Structural Engineering International : Vol133, No3 (tandfonline.com), July 29, 2022.
- 8) Toma S. and Chen W. F. : Some Aspects of Overturning Mechanisms of Pile Driving Machine on Soft Foundation, American Journal of Civil Engineering, 2022 ; 10(6) : pp.225-232, [http : //Some Aspects of Overturning Mechanisms of Pile Driving Machine on Soft Foundation : Science Publishing Group](http://Some Aspects of Overturning Mechanisms of Pile Driving Machine on Soft Foundation : Science Publishing Group), December 28, 2022.
- 9) Toma, S., Seto K. and Chen W. F. : Dynamic Analysis for Overturning of Pile Driving Machine, etc., on Soft Ground, Transactions on Engineering and Computer Sciences-Vol.11, No.2, pp.61-81, Dynamic Analysis for Overturning of Pile Driving Machine, etc., on Soft Ground | Transactions on Engineering and Computing Sciences (scholarpublishing.org), April 25, 2023.
- 10) 当麻庄司，世戸憲治：杭打機の軟弱地盤における転倒の動解析，工学研究，第23号，北海学園大学工学研究科，2023年9月.
- 11) 玉手聡，堀智仁：17. 杭打機の転倒に与える施工現場の支持力要因，平成21年度「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集，日本建設機械化協会.