

軟弱地盤における杭打機転倒のメカニズム

大起コンサルタント (株) フェロー 當麻 庄司

1. 序言

筆者はこれまで移動式クレーン、杭打機およびジャッキの転倒事故は、幅広く構造不安定問題の観点からも検討する必要があると提唱してきた^{1~3)}。相継ぐこれらの転倒事故の原因には、共通して構造不安定問題が背景にあると考えられる。構造物の転倒原因の究明は(1)転倒モーメント>抵抗モーメントの場合、(2)座屈等に類する構造的な不安定、に大別される。(2)の場合、極論すれば転倒モーメントがゼロでも不安定となり得る。すなわち、座屈と同様に構造的に転倒する限界荷重(固有値)が存在する。これまでの事故原因調査では主として(1)に重点が置かれ、(2)の観点からの考察はあまりしてこられなかった。ここでは、近年頻発する杭打機の転倒事故を対象に構造不安定が素因であるとして捉え、その転倒メカニズムを考察する。

2. 剛体-回転ばね系の構造モデル

図1は杭打機転倒の一例を示す⁴⁾。これらの事故原因究明のための構造モデルは、図2のように考えることができる。同図から、作用モーメントのつり合い式は下記のようなになる⁵⁾。

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

ここに、 K_s =回転ばね剛性(線形)、 P =荷重(杭打機の自重)、 L =荷重の作用高さ、 θ =変位角、 θ_0 =初期傾斜角、 e =荷重の偏芯量

式(1)の左辺第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。そして、回転ばね剛性 K_s は地盤強度から求められる。

上式から荷重-変位角関係は次のように求められる。

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

ここに、 $P_{cr}(=K_s/L)$ は初期傾斜も偏芯もない場合の限界荷重(座屈荷重)であり、柱の構造安定におけるオイラー荷重(弾性座屈荷重)に相当する。式(2)から、初期不整(初期傾斜や偏心)による転倒荷重の低下率を求めることができる。荷重(杭打機の重量) P が式(2)に到達すれば水平力がゼロでも杭打機は転倒する。

3. 初期傾斜と偏芯荷重の影響⁶⁾

式(2)から、荷重(杭打機の重量) P と変位角 θ の関係を求めると図3に示すようになる。この図の曲線は、杭打機の重量が増加していく時のつり合い状態を表す。図中に示す縦線は、安定度(転倒傾斜角)を $\theta_u=0.21$ ラジアン(12度)と仮定した場合であり、変位角がこれを越えると転倒することになる。したがって、この転倒傾斜角の縦線の右側は転倒域になる。また、転倒傾斜角の縦線と荷重変位角曲線との交点が転倒荷重を表す。この図から、初期傾斜角や偏心の初期不整が存在すれば、転倒荷重が大きく低下することが分かる。

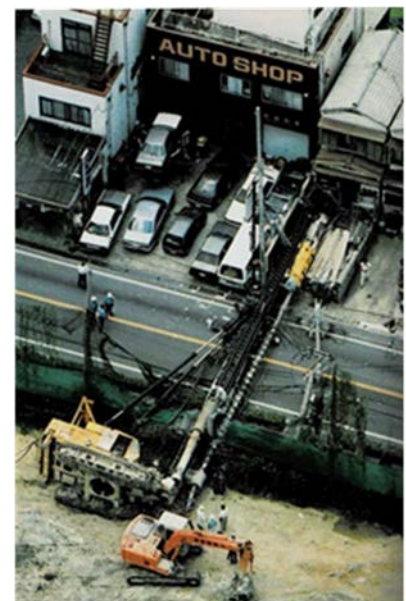


図1 杭打機転倒事故の例⁴⁾

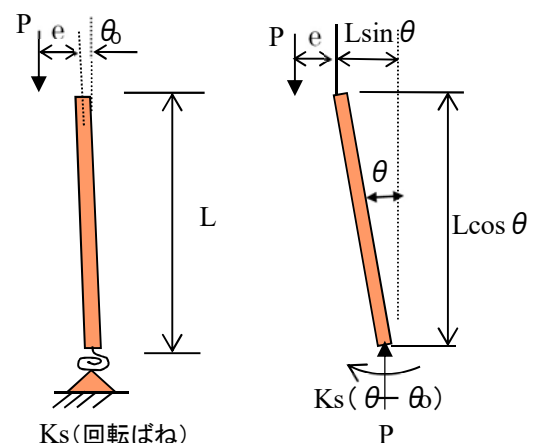


図2 初期傾斜と偏芯荷重の構造モデル

キーワード：転倒事故、杭打機の転倒、構造不安定、軟弱地盤、初期不整の影響、転倒メカニズム

連絡先：〒064-0810 札幌市中央区南10条西6丁目4-7-2 TEL 011-312-2299

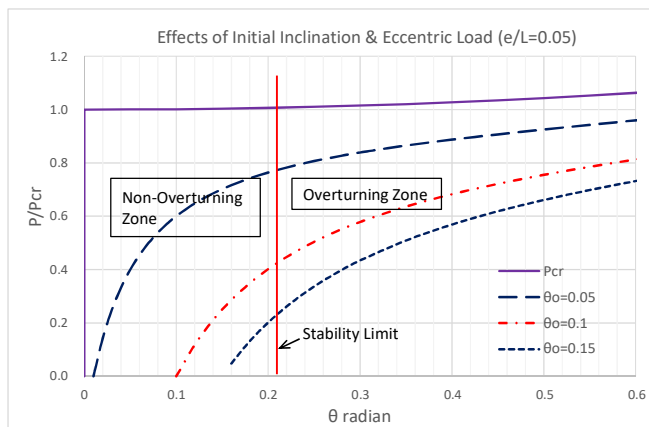
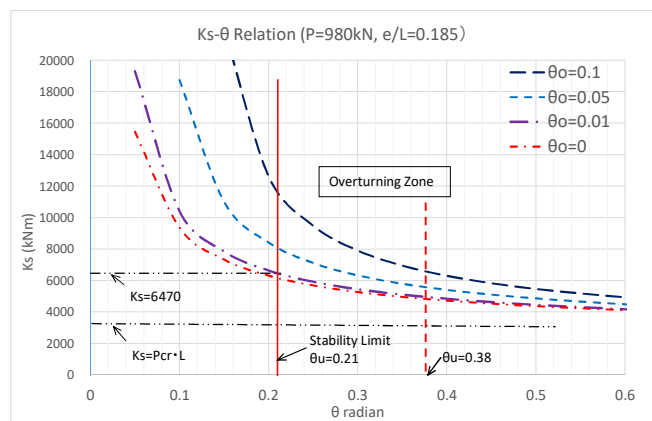


図3 初期傾斜と偏芯がある場合の荷重-変位角関係

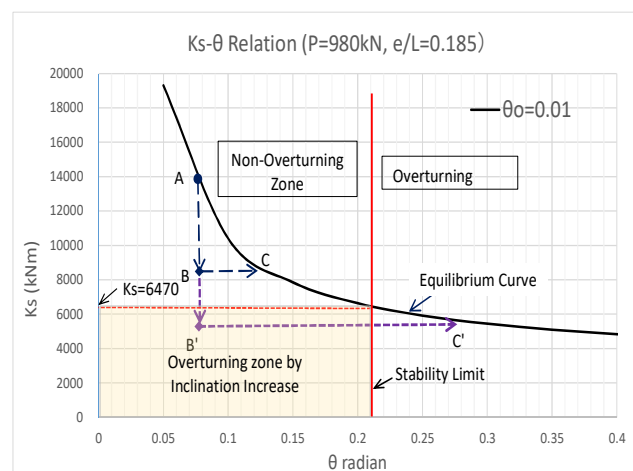
図4 ある杭打機の回転ばね剛性-変位角関係
($P=980\text{kN}$, $e/L=0.185$)

4. 回転ばね剛性-変位角曲線⁶⁾

図4は、ある杭打機 ($P=980\text{kN}$) について、式(2)を用い回転ばね剛性と変位角関係を各初期傾斜に対して求めたものである。本杭打機は、偏芯荷重が $e/L=0.185$ の場合は横方向転倒傾斜角 $\theta_u = 0.21\text{rad}$ (12度)と算定される。図4から分かるように、回転ばね剛性(地盤強度) K_s が約 6000kNm/rad より小さければ、変位角の増大度が非常に大きくなる。これは、式(1)において変位角 θ の増大に伴う復元モーメントの増加があまり期待できないことであり、いったん杭打機が軟弱地盤で傾くと止めることが難しくなることを意味している。このようなゆっくりとした転倒は、実際に起こった杭打機の転倒現象によく似ていることが分かる。

5. 軟弱地盤における転倒メカニズム⁶⁾

図5は、ある杭打機の回転ばね剛性-変位角曲線(図4)から初期傾斜角 $\theta_0=0.01$ (0.57度)を抜き出したものである。当初、杭打機はつり合い状態の点Aにあるとする。そこから軟弱地盤の点Bに移動すると、式(1)のモーメントのつり合い点Cに移り安定する。ところが、もしより軟弱な点B'に移動したとすると、つり合い点C'に向かう途中で転倒傾斜角を超えることになり、転倒が起こる。これが、杭打機の軟弱地盤における転倒メカニズムである。以上のことから、回転ばね剛性-変位角曲線と転倒傾斜角との交点が必要回転ばね剛性が得られることが解る。すなわち、図5の例において $K_s=6470\text{kNm}$ より小さい左下の範囲

図5 軟弱地盤における転倒メカニズム
($P=980\text{kN}$, $e/L=0.185$)

(“変位増大転倒域”)に杭打機が移動すると、その時点で傾斜が始まり転倒が開始されることになる。

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。
- 2) 当麻庄司：ジャッキや杭打機の転倒事故原因について一構造安定問題の観点から一，平成28年度土木学会全国大会講演概要集，I-525。
- 3) 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，安全工学会誌，Vol.60 No.5 (2021)，pp.384-390。
- 4) 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，大阪府立城東工業高校杭打機転倒(1997.8.4.)，pp.186-189，日経BP。
- 5) W.F. Chen and E.M. Lui: Structural Stability, Theory and Implementation, Chapter 1 General Principles, Elsevier, 1987。
- 6) 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，北海学園大学大学院工学研究科，工学研究，22号，(2022年発行予定)。