

DEMによる杭の打込み解析に関する基礎的研究

山口大学大学院 学生会員 ○桑原秀彦
山口大学 正会員 麻生稔彦
山口大学 フェロー会員 會田忠義
山口大学大学院 学生会員 弘中雅志

1. はじめに

杭の打込みにおけるハンマーの選定や打ち止め管理は経験に頼るところが小さい。一方で建設コストの縮減や工期の短縮のためには合理的な杭打ちを実施する必要がある。合理的な杭打ちのためには、杭の貫入挙動をあらかじめ予測することが重要であるが、杭の貫入挙動を評価する手法はあまりない。杭の打込み挙動は動的な破壊現象ととらえられるため、個別要素法の適用が適当でないかと考えられる。そこで、本研究は個別要素法（DEM）により杭の打込みをシミュレーションする際の基礎的資料を得ることを目的として、要素の形状や貫入速度等の各パラメータが解析結果に与える影響を検討した。

2. 解析理論

個別要素法は、不連続面で区切られた要素の集合体において、個々の要素ごとに独立した2階常微分方程式をたて、これを差分近似し、時間領域においてステップ・バイ・ステップで前進的に解くことにより、要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析しようとするものである。本研究では、要素の接触判定を容易にするため、要素の形状を円形とした。要素間に働く力は、図-1に示す結合ばねで表現し、要素の中心間距離が要素直径の1.42倍以下¹⁾のときに結合ばねが作用することとした。式(1)に要素の運動方程式を、図-2に結合ばねの性質を示す。

$$m_i \cdot \{\ddot{u}\} + C_i \cdot \{\dot{u}\} + F_i = 0$$
$$I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i = 0 \quad (1)$$

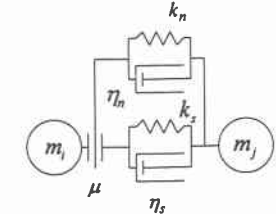
ここで、 F_i ：要素に働く合力
 M_i ：要素に働く合モーメント
 C_i, D_i ：減衰係数
 $\{u\}$ ：要素の変位ベクトル
 ϕ ：要素の回転変位（スカラー）

3. 解析モデル

杭および地盤を奥行き長を有する円形要素の集合体として図-3のようにモデル化し、杭の貫入挙動をシミュレートする。解析に用いた基礎的パラメータは表-1の通りである。なお、解析を行うにあたって、杭要素間の相対変位は0とし、杭を剛体と仮定した。また、今回の解析では簡単のために杭は一定速度 V_0 で地盤に貫入するものとしている。²⁾

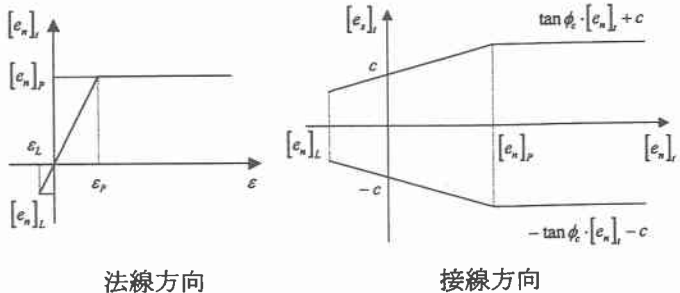
4. 解析結果

地盤要素の直径の違いによるモデル化の検討を行うために、地盤要素と杭要素との直径の比 ϕ_{soil}/ϕ_{pile} が0.5と0.25の場合について解析を行った。図-4は、 $V_0=4.0$ m/secで杭の貫入量 L_p



k_n, k_s ：法線、接線方向のばね定数
 η_n, η_s ：法線、接線方向の減衰係数
 μ ：摩擦係数
 m_i, m_j ：要素i, jの質量

図-1 解析モデル



$[e_n]_L, [e_n]_R$ ：法線、接線方向のばね力、
 $[e_s]_L, [e_s]_R$ ：法線方向の圧縮限界および引張限界ばね力
 ϵ ：ひずみ、 ϵ_p, ϵ_L ：法線方向の圧縮限界および引張限界ひずみ
 ϕ ：内部摩擦角、 c ：粘着力

図-2 結合ばねの性質

表-1 解析に用いた基礎的パラメータ

時間刻み	1.0×10^{-6}
杭	
要素数	4
要素直径 (cm)	20.0
単位体積重量 (kgf/cm ³)	7.85×10^{-3}
ヤング係数 (kgf/cm ²)	-
地盤	
単位体積重量 (kgf/cm ³)	1.80×10^{-3}
ヤング係数 (kgf/cm ²)	700
圧縮強度 (kgf/cm ²)	100
引張限界ひずみ	0
せん断強度 (kgf/cm ²)	0
内部摩擦角 (°)	30

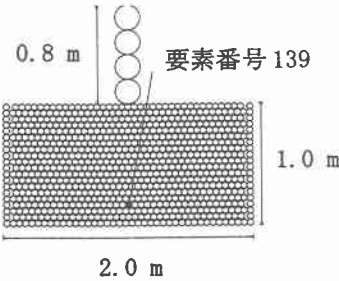


図-3 解析モデル

が地盤深さ H の半分の状態 ($L_p/H=0.5$) における地盤内に発生した力の分布を示したものである。この結果から要素直径の違いにより、地盤内の力の分布には違いが見られる。これは、地盤をモデル化する要素数に比例して要素間の接触点が多くなるためであると考えられる。よって、接触点の多い方が力の分布を詳細に表現できると考えられる。図-5は、地盤の初期要素配置を正方形配置と三角形配置とした場合の地盤内の力の分布を示したものである。地盤要素の初期配置の違いにより、力の伝達方向に違いがみられる。これは、要素配置の違いにより、要素間の有効接触面積が異なるためであると考えられる。そのため、伝達する力の大きさが要素配置の違いにより異なると考えられる。図-6は、杭の貫入速度の違いによる杭の打込み解析の解析結果を示したものである。この解析では杭の貫入速度の違いにより解析時間が異なるため、 $L_p/H=0.5$ での地盤内の力分布を示している。

これらの結果より、杭の貫入速度が大きい程杭先端付近の地盤要素が大きい力を持っていることがわかる。また、杭の貫入速度が小さい程杭付近の地盤の盛り上がりが大きくなっていることがわかる。図-7は、要素の奥行き長 d の違いによる杭の打込み解析結果であり、地盤の下層中部の要素(要素番号139)に着目した下向き方向の力の時刻歴および速度時刻歴を示したものである。これより、要素の奥行き長に比例して、要素に働く力は大きくなるが、要素の速度に変化は見られない。これは、奥行き長に比例して要素間の有効接触面積が大きくなるが、同時に要素質量も大きくなるため、要素がもつ加速度は奥行き長に依存せず、速度も奥行き長に依存しないためと考えられる。図-8は、減衰係数 η_s の違いにより、要素番号139に生じる下向き方向の力の時刻歴である。この結果より、減衰定数が大きい程要素に伝達する力が小さくなっており、伝達する時刻が早いことがわかる。逆に、減衰定数が小さい程要素に伝達する力が大きくなっており、伝達する時刻が遅いことがわかる。

5. まとめ
本研究では、DEMを用いて杭の打込み解析プログラムを作成し、これを用いて基礎的解析を行い、解析結果より要素配置、貫入速度、減衰定数などが解析結果に与える影響を検討した。

[参考文献]
1) 藤原新：個別要素法を用いた緩衝材付き砂防ダムの衝撃応答解析，山口大学理工学部大学院修士論文，平成7年
2) 伯野元彦：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，森北出版

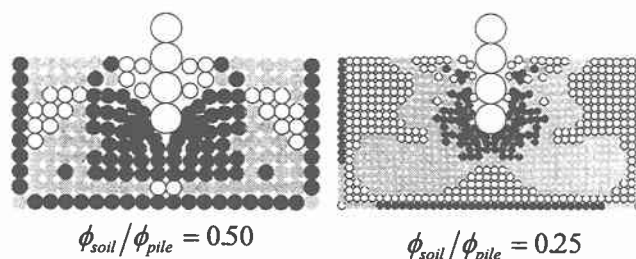


図-4 力分布 ($L_p/H=0.5$)

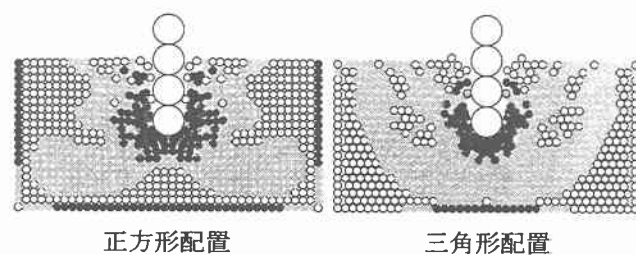


図-5 力分布 ($L_p/H=0.5$)

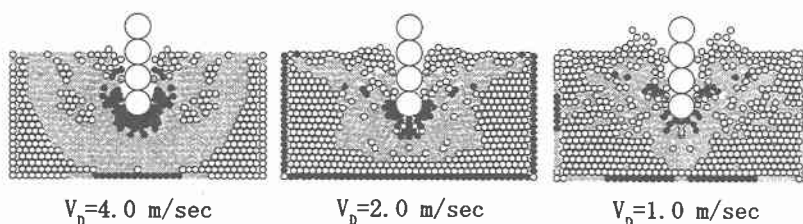


図-6 力分布 ($L_p/H=0.5$)

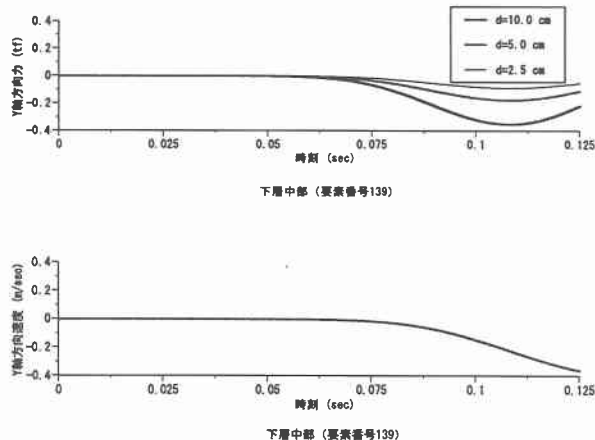


図-7 力時刻歴および速度時刻歴

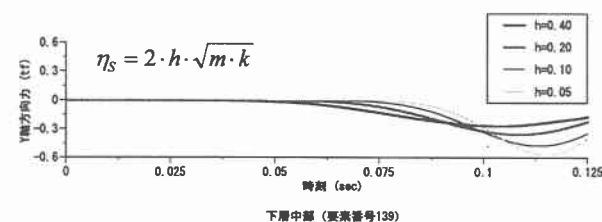


図-8 力時刻歴