

個別要素法を用いた杭の打込み解析 に関する研究

桑原秀彦 (環境共生工学専攻)

麻生稔彦 (社会建設工学科)

弘中雅志 (国土交通省中国地方整備局福山工事事務所)

Pile Driving Analysis Using Distinct Element Method

Hidehiko KUWABARA (Division of symbiotic environmental system engineering)

Toshihiko ASO (Department of civil engineering)

Masashi HIRONAKA (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Fukuyama Work Office)

This study aims to clarify the applicability of Distinct Element Method to pile drive simulation. In this study, element spring constant are determined by Hertz's elastic contact theory, and ground model are created by free fall method. Four different ground models and three pile models were used in calculation. In each computation, relative displacements of pile and force distribution in ground were assessed. From the comparison with these results of analysis, effect of boundary, ground model size and pile driving force became clear.

Key Words: *distinct element method, pile driving, dynamic behavior*

1. はじめに

杭は建築物や土木構造物の基礎形式として最も一般的である。杭に関する研究は、古くから数多くあるものの、現在においても貫入不良などの施工時の問題は多く発生している。これは杭の打ち込み管理は経験に頼るところが大きいためであると考えられ、ハンマーの選定や打ち止め管理、施工時の打ち込み状況のモニタリングなどの合理的な施工が必要である。杭施工の合理化のためには、杭の貫入挙動を何らかの方法であらかじめ予測することが重要であると考えられる。しかし、杭の貫入挙動を評価する手法に関する研究はあまりなく、現場での状況により、適時対応している現状にある。

そこで本研究では、杭の貫入挙動を評価する手法の開発、およびその際の杭と地盤のモデル化手法を確立することを目的とする。連続体である地盤への杭の貫入は地盤の破壊を伴うため、破壊および大変形の問題を解くこととなる。このような破壊・大変形の現象を評価するために、本研究では個別要素法を適用することとした。個

別要素法はこれまでに斜面崩壊や粉体の移動現象などに多く適用されているものの、杭の打ち込みへ適用した事例はほとんど見あたらない。

2. 解析概要

個別要素法 (Distinct Element Method, D. E. M.) とは、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¹⁾。個別要素法については多くの成書が刊行されており、ここでは詳細は述べないが、個別要素法による計算の流れを Fig. 1 のフローチャートに示す。なお、本研究では要素の接触判定を容易にするため、円形要素とした。

個別要素法では、Fig. 2 に示すような法線・接線方向にそれぞれ弾性ばね k_n , k_s およびダッシュポット c_n , c_s を有するモデルを考える。なお、接線方向にはモール・

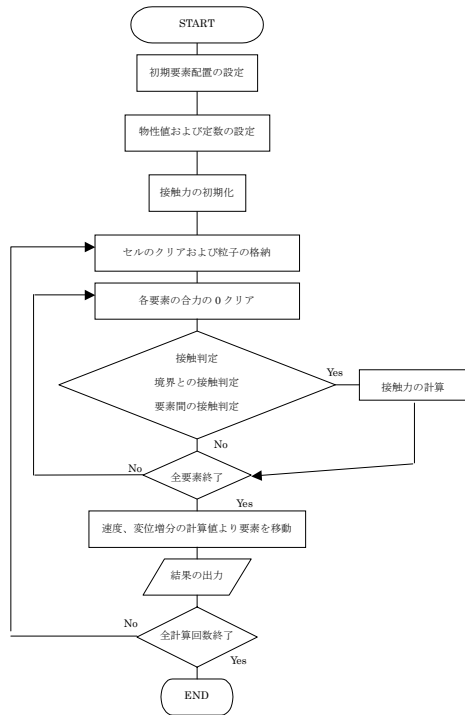


Fig.1 Flowchart of computation

クーロンの摩擦条件を満足するスライダー μ を設ける。
 本研究では、ヘルツの弾性接触論に基づきこれらのばね定数を算定した。この理論においては、要素同士が完全に接触していることを前提としており、要素間に引張力は作用しないと仮定した。以下にばね定数および減衰係数を示す。

i) 要素間の接触の場合

半径 r_i と r_j の 2 要素間の法線方向ばね定数 k_n は、要素の弾性係数 E およびポアソン比 ν を用いて次式となる。

$$k_n = \frac{\pi \cdot E}{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{2}{3} + \ln \frac{4 \cdot r_i}{b} + \ln \frac{4 \cdot r_j}{b} \right)} \quad (1)$$

上式中の b は (2) 式で与えられる。

$$b = 3.2 \cdot \sqrt{\frac{r_i \cdot r_j}{r_i + r_j} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot [e_n]_{t-\Delta t}} \quad (2)$$

ここで、 $[e_n]_{t-\Delta t}$: 要素間に働く圧縮力

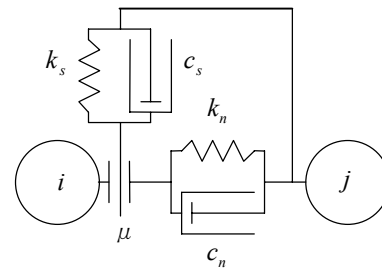


Fig.2 D.E.M Model

また、接線方向ばね定数 k_s は通減率 s_0 を用いて式 (3) とする。

$$k_s = s_0 \cdot k_n \quad (3)$$

ここで、通減率 s_0 は次式である。

$$s_0 = \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4)$$

一方、法線および接線方向の減衰係数 c_n および c_s は、それぞれ式 (5) および (6) となる。

$$c_n = 2 \cdot h \cdot \sqrt{m_{ij} \cdot k_n} \quad (5)$$

$$c_s = c_n \cdot \sqrt{k_s / k_n} \quad (6)$$

ここで、 m_{ij} は要素 i および j の質量 m_i および m_j より次式で得られる。

$$m_{ij} = 2 \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j} \quad (7)$$

ii) 要素-境界間の接触の場合

個別要素法による解析を行う場合には、いずれかの位置に境界を設ける必要がある。そのため、要素と境界との間に作用するばね定数、減衰係数は以下のように求めることとした。

要素法線方向ばね定数

$$k_n = \frac{\pi \cdot E}{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{1}{3} + \ln \frac{4 \cdot r_i}{b} \right)} \quad (8)$$

ここで、

$$b = 1.6 \cdot \sqrt{2 \cdot r_i \left(\frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right)} \cdot [e_n]_{t-\Delta t} \quad (9)$$

上式中の E_b は境界の弾性係数、 ν_b は境界のポアソン比である。

一方、接線方向ばね定数は式 (3) と同様に通減率 s_0 を用いて次式で求める。

$$k_s = s_0 \cdot k_n \quad (10)$$

また、減衰係数は要素間の場合と同様の次式で算定する。

$$c_n = 2 \cdot h \cdot \sqrt{m_{ij} \cdot k_n} \quad (11)$$

$$c_s = c_n \cdot \sqrt{k_s / k_n} \quad (12)$$

ただし、この場合には $m_{ij} = m_i$ である。

iii) 計算時間間隔

ばね定数および減衰係数が上式の手法により算出されると、ここで時間刻みが適当であるか確認しておく。個別要素法の重要な仮定として、微小時間刻み Δt の間においては、隣接する要素を超えて移動するような力が作用しないものとしている。このことに、最も影響するのが時間刻み Δt のとり方であり、本研究では以下の式 (13) を満足する時間刻みを用いるものとする。

$$\Delta t \leq 2 \cdot \sqrt{m_{ij} / k_n} \quad (13)$$

3. 地盤要素のパッキング

解析地盤モデルは有限の解析対象領域に何らかの方法で要素をパッキングすることによって作成する。本研究では地盤要素をランダムに配置する方法を用い、落下法

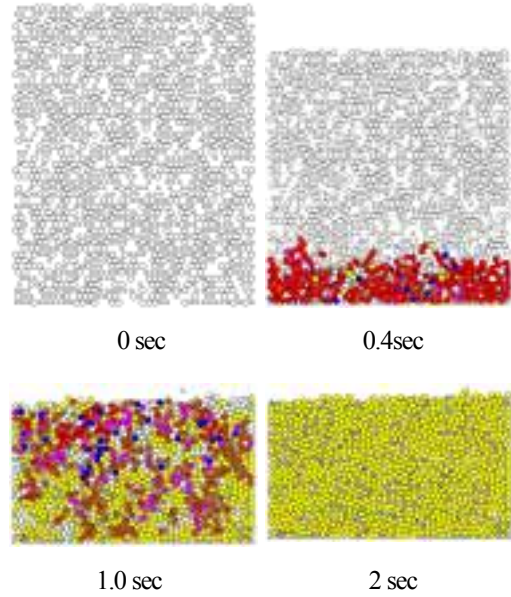


Fig.3 Generation of ground model

を用いて要素のパッキングを行った。落下法は、粒子に重力が作用することによって、あるポテンシャル場からポテンシャル場の低いほうへ落ちる現象を利用してモデルのパッキングを行う方法である¹⁾。落下法を用いることにより、①土の生成や土構造物の建設環境に近い状態が得られる、②パッキング終了時に実際に近い内部応力状態が得られる、などの利点がある。しかし、粒子落下終了後も粒子全体が安定するためには、ある程度の時間を要し、安定するまでは粒子の微小振動の問題がある。これは、粒子が相互に衝突したりすることが原因であり、堆積した粒子それぞれが微小な振動をする。この振動は微小であるので、要素に付属した減衰ダンパーによってこの微小振動を取り除くことになる。ただし、振動が小さいため通常の減衰係数を採用したのでは減衰力が小さい。そのため、より短時間で安定させるため、大きな減衰係数を用いることとする。Fig. 3 に落下法による地盤モデル作成過程を示す。

4. 地盤モデル

上述の方法を用いて4つの地盤モデルを作成した。Table 1 に、これらの地盤モデルに用いた物性値ならびに解析条件を示す。Fig. 4 は作成した地盤モデルである。モデル C1 は地盤幅 2m で、粒径 5cm, 2.5cm の2種類の要素を用いた。モデル C2 の地盤幅はモデル C1 と同様に 2m であるが、粒径 5cm の要素のみである。モデル C1 と C2 を比較することにより、等粒径要素で作成した地盤モデルと、複数の粒径要素を用いた地盤モデルを比較する。また、地盤幅をモデル C1 および C2 の2倍の 4m とし、粒径 5cm, 2.5cm

Table 1 Analytical Conditions

	Time.step (sec)	5.0×10^{-7}
	Coficient of Frition	0.577
	Dumping Coustant	1
Ground	density (kg/m ³)	2.0×10^3
	Elastic Modulus (kg/m ²)	1.78×10^7
	Poisson ratio	0.48
Pile	density (kg/m ³)	7.85×10^3
	Elastic Modulus (kg/m ²)	2.10×10^{10}
	Poisson ratio	0.3

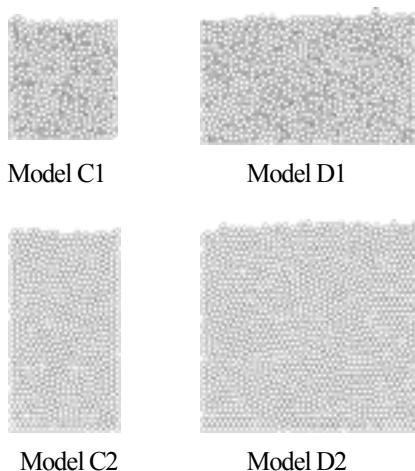


Fig.4 Ground models

の 2 種類の要素を用いて作成した地盤モデル D1, および粒径 5cm の要素のみで作成した地盤モデル D2 を設ける。これらの地盤モデル D1, D2 と、地盤モデル C1, C2 を比較することにより両側面の境界の影響について評価する。

5. 地盤のモデル化による影響

実地盤は様々な粒径の要素で構成されている。そこで杭の貫入を解析する際、地盤のモデル化を単一粒径の要素のみで構成したものと、2種類の粒径で構成したものを比較・検討した。モデルC1は粒径2.5cmと5cmの2種類の要素を用いて地盤幅2mの地盤をモデル化したものであり、モデルC2はモデルC1と地盤幅は同じであるが、粒径5cmの1種類の要素でモデル化したものである。Fig. 5に杭を単柱でモデル化したものに100kgfの荷重を載荷した場合の地盤モデルC1とC2での杭の相対変位を示す。モデルC1では、杭は1秒まで地盤に貫入しつづけるのに対して、モデルC2では0.6秒以後では杭は貫入できず、停止した状態となっている。また、最終的な貫入量もC1のほうがC2に比べ1.5倍程度大きい。これは、地盤モデルを1種類の粒径要素でモデル化するよりも、2種類の粒

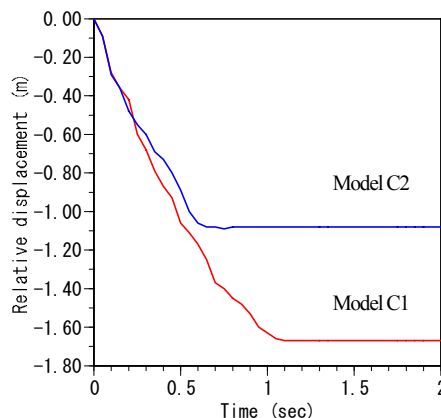


Fig.5 Relative displacement of pile (Model C1, C2)

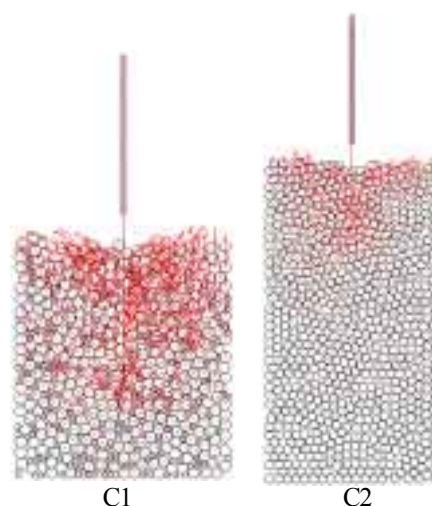


Fig.6 Trajectory of elements

径要素でモデル化したほうが、粒径の大きい要素間隙に粒径の小さい要素が移動するため粒子運動が活発に行われるためであり、杭から作用する力を地盤粒子の運動に効率的に伝えることができるため、杭の貫入量が多くなると考えられる。Fig. 6にモデルC1, C2において杭に100kgfの荷重載荷した場合の2秒間の地盤要素の挙動を示す。モデルC1では地盤粒子が様々な方向に動いているが、モデルC2では地盤要素は各々、一定の方向に移動しようとしている。そのため、粒子の挙動からも、杭から作用する力をうまく粒子の挙動に反映できていないと考えられる。したがって、地盤のモデル化にあたっては力の伝達を表現するためにも複数の粒径によるモデル化が必要である。

6. 境界の拘束による解析への影響評価

杭の打ち込み解析を行うには、境界の影響を無視できる程度に地盤幅をとり、半無限状態で解析することが望

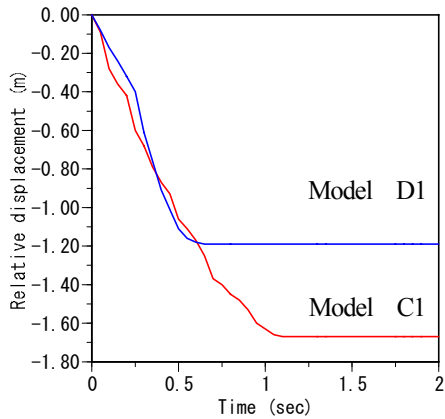


Fig.7 Relative displacement of the pile (Model C1, D1)

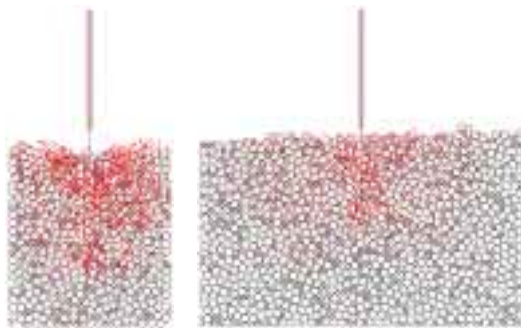


Fig.8 The behavior of the ground element

ましい。しかし、地盤幅を必要以上に取ると、要素数が増えるため莫大な計算時間を要し非効率である。そこで、地盤をモデル化の際の境界が及ぼす影響を地盤モデル C1、D1 を比較することにより検討する。地盤深さはモデル C1、モデル D1 とも同じであるが、地盤幅はモデル C1 が 2m、モデル D1 が 4m と 2 倍としている。Fig. 7 は、杭を 100kgf で定常荷重した場合、杭の相対変位である。モデル C1 での杭の貫入量はモデル D1 より大きくなっている。これはモデル C1 では、モデル D1 よりも地盤幅が狭いために、両側面の境界の影響が大きいためと考えられる。したがって、Fig. 8 の地盤粒子の挙動が示すように、杭が貫入した際、境界付近の地盤要素が、境界から大きな抵抗力をうけ、自由面である地表面に向かい上昇している。したがって、このような側面境界の影響を受けなだけの地盤幅を設ける必要がある。

7. 荷重方法の違いによる検討

杭の貫入方法にはバイプロ打ち込みやハンマーによる打ち込みなど様々な方法がある。これらの打ち込み方法の違いにより、杭の貫入の挙動も変化する。そこで、ここでは杭への荷重方法を 100kgf 定常荷重、100kgf10Hz 振動荷重および 100kgf20Hz 振動荷重の 3 通りで行い、載

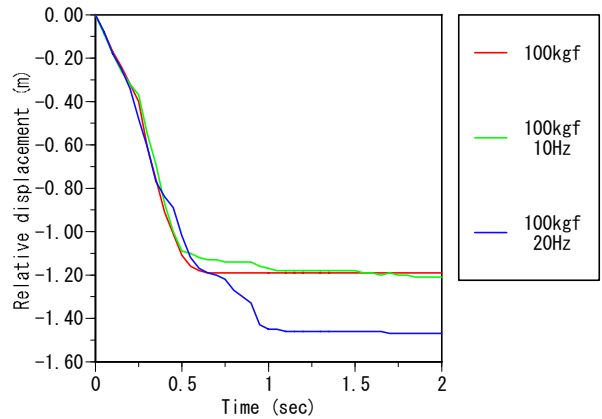


Fig.9 Relative displacement of the pile

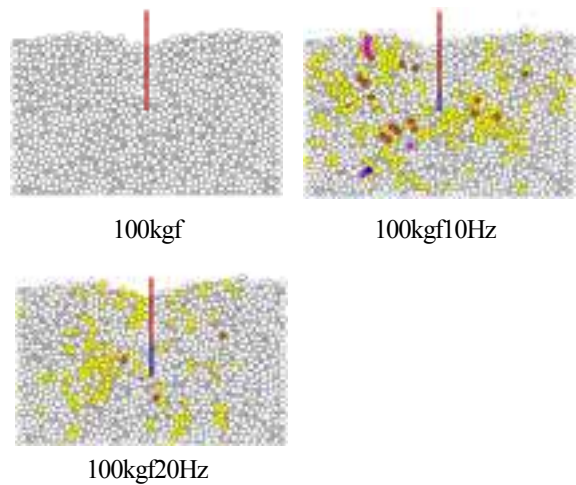


Fig.10 Force distribution in the ground

荷方法の違いによる杭の貫入挙動の違いについて比較・検討する。なお、100kgf10Hz 振動荷重、100kgf20Hz 振動荷重の比較は、振動数の違いによる杭の貫入挙動の違いを検討することを目的とする。地盤モデル D1 に単柱で杭をモデル化し貫入させた場合の相対変位を示す Fig. 9 では、100kg20Hz 振動荷重が最も相対変位が大きく、次いで 100kg10Hz 振動荷重、100kg 定常荷重の順になっており、振動荷重した場合にも貫入挙動は振動数に依存することがわかる。Fig. 10 に、地盤モデル D1 における 1.7 秒後の地盤内に存在する力の伝達状況を示す。地盤内の力の伝達を荷重条件別に比較してみると、100kgf 定常荷重の場合、杭は地盤粒子から反力を受け、止まった状態になっているため、地盤内に力の伝達もなくなっている。しかし、振動させた場合の地盤内の力の伝達をみると、若干の力が残っている。これは、杭が振動しているため常に振動を抑制しようと地盤粒子抵抗し、力が残っていると考えられる。よって、振動荷重した場合は要素へ影響が大きくなる事がわかる。

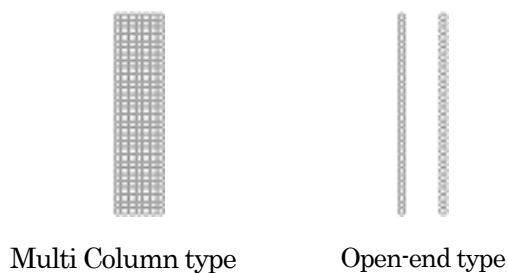


Fig.11 The modeling of the pile

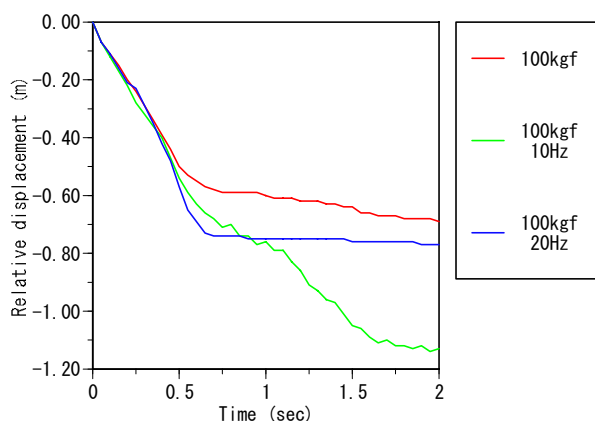


Fig.12 Relative displacement of multi column pile model

8. 杭のモデル化による違い

上述の検討では、主として地盤についての検討を目的としたため杭は単なる柱としてモデル化した。しかし、実際の杭では先端形状が開端又は閉端であり、貫入挙動に与える杭形状の違いは無視できない。そこで、ここでは杭形状の違いによる貫入挙動を比較する。Fig. 11 に複柱型、開端型の杭モデルをそれぞれ示す。Fig. 12, 13 にそれぞれ複柱型杭モデル、開端型杭モデルの杭をモデル D1 の地盤に貫入させた場合の相対変位を示す。これらの図より、複柱では、10Hz で振動载荷した場合に、最も貫入量が多く、次いで20Hz 振動, 100kgf 定常载荷となっている。一方、開端型の杭のモデルを見ると、1.5 秒後まで10Hz 振動载荷が最も貫入しており、次いで20Hz 振動载荷、100kgf 定常载荷となっている。この結果より、杭は振動させたほうが貫入しやすいことが確認できる。また、Fig. 14 に示す2秒後の地盤内の力の分布を比較すると、開端型の杭内部の地盤要素は、10Hz で振動载荷させた場合にはゆるく詰まっているが、20Hz 振動载荷させ場合は密に詰まっている。これより、振動数の違いにより杭内部に形成されるソイルキャップの評価も可能であると推測される。また、複柱型の杭は開端型杭に比べ、広い範囲の地盤に影響を及ぼしており、杭のモデル化の違いにより地盤の挙動に違いがみられる。Fig. 15 の地盤粒子の

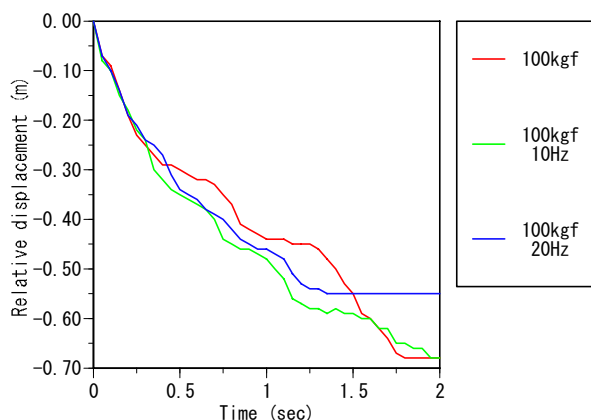


Fig.13 Relative displacement of open-end type pile model

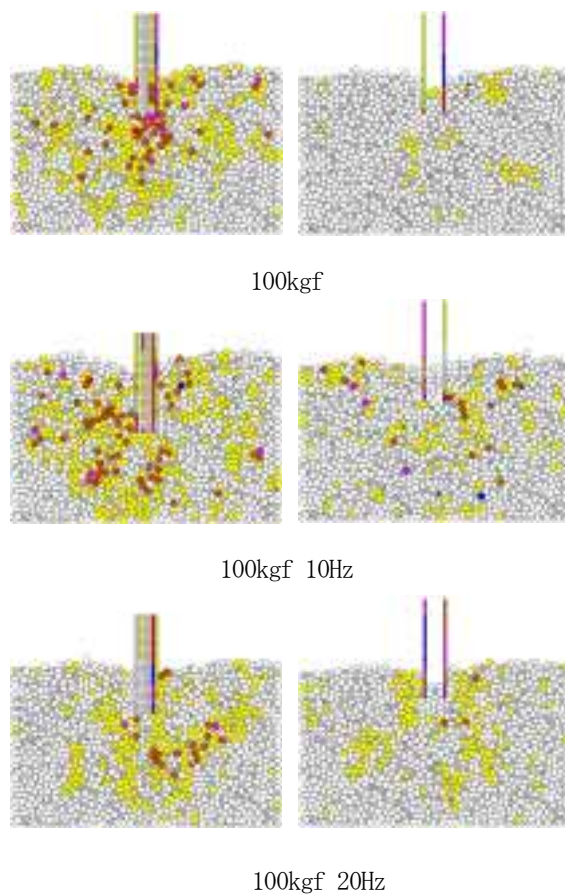


Fig. 14 Force distribution after two seconds

挙動をみると、複柱の杭の周辺地盤では10Hz 振動载荷の場合に、渦を形成していることがわかる。これに対し、20Hz 振動载荷の場合には渦は形成されていない。これらの結果から、杭の振動のさせ方も、地盤によって異なる振動特性を持っていると考えられるが、この地盤モデルの場合は10Hz で振動させれば、より効率的に杭を地盤に貫入させることができると考えられる。杭のモデル化別

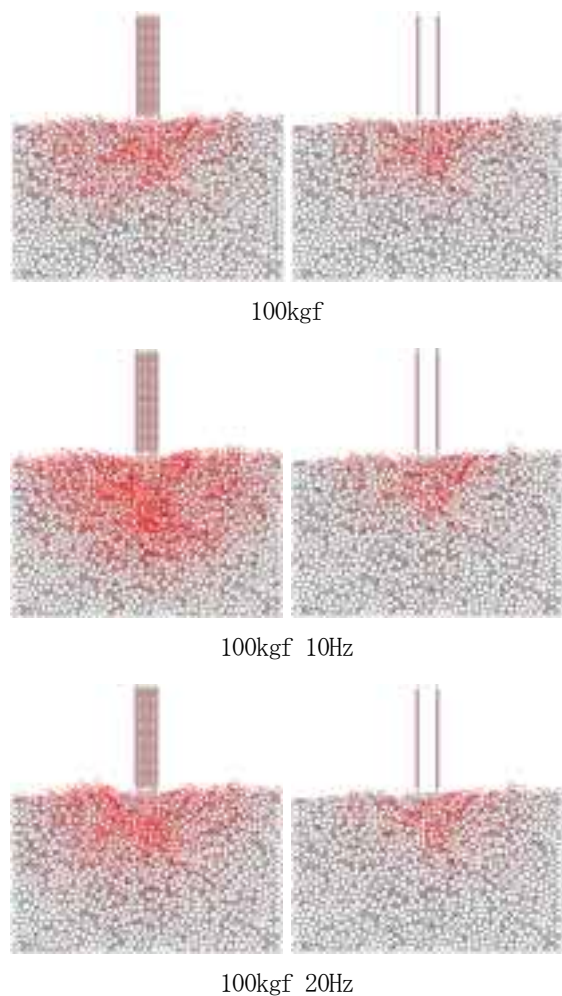


Fig.15 Trajectory of ground elements until two seconds

に検討してみると、すべての载荷条件で、複柱のほうが開端型の杭より貫入量が大きくなっている。これは、複柱型でモデル化した杭の自重は、開端型の自重の2倍あるので、その影響でよく貫入したと考えられる。また、複柱でモデル化した杭の周辺の地盤要素は、杭の貫入に伴い、地盤内に引きずり込まれるため、杭周辺の地盤表面に凹が形成されている。しかし、開端型のモデルの杭の周辺地盤の表面をみると、この凹は形成されていない。したがって、この解析結果を比較すると、先端を閉じた杭のモデルである複柱のほうが周辺地盤に対する影響が大きいと考えられる。これらの結果から、杭の形状が異なると、同じ载荷条件でも、杭の貫入の様子が異なると考えられる。

9. 結論

本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 等粒径要素で地盤をモデル化するよりも、複数の粒

径で地盤をモデル化するほうが、杭から作用する力を地盤要素の移動に反映できる。

- (2) 両側面の境界は、地盤要素の挙動や地盤内の力の伝達に大きく影響する。よって、両側面の境界の影響が無視できるくらいの地盤幅をとることが必要である。
- (3) 杭の载荷条件別では、定常载荷よりも振動载荷のほうが、比較的効率的に貫入する。また振動载荷の場合には、振動数も貫入状況に影響する。
- (4) 杭のモデル化の違いにより、杭の貫入シミュレーションで違いが示された。複柱型の杭は開端型杭に比べ、広い範囲の地盤に影響を及ぼしている。

今回の検討は個別要素法の杭貫入挙動評価への適用性を検討したものである。その結果、定性的には個別要素法を用いて杭の貫入シミュレーションを行うことは可能であることが示された。今後は実際の施工記録との比較により定量的な評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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，森北出版株式会社，1997
- 2) 粉体工学会：粉体シミュレーション入門，産業図書，1998

(平成14年8月30日受理)