

(47) 重錘落下による地盤への衝撃と個別要素法による解析

IMPACT TO GROUND BY HEAVY TAMPING AND ANALYSIS BY DISTINCT ELEMENT METHOD

河西良幸*, 宮田章**, 澤本佳和**, 横山和人***

Yoshiyuki KASAI, Akira MIYATA, Yoshikazu SAWAMOTO and Kazuto YOKOYAMA

* 工博 鹿島技術研究所第三研究部室長 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

** 鹿島技術研究所第三研究部研究員 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

*** 鹿島情報システム部 (〒107 東京都港区元赤坂 1-2-7)

キーワード：重錘，地盤，衝撃力，貫入量，軸対称，個別要素法

(heavy tamping, ground, impact force, penetration depth, axi-symmetric, distinct element method)

1. はじめに

岩砕埋立て地盤において重錘落下締固め工法による地盤改良を行う機会を得、その締固め機構の解明や落下仕様設定の一助とするため、個別要素法 (Distinct Element Method, 以下 DEM と略す) による解析を行い、実測値との検証を行っている^{1) 2) 3)}。その DEM 解析では、地盤を軸対称領域として取り上げ、地盤及び重錘を環状要素の規則配列集合体としてモデル化し、25tf の重錘が初速 22.15m/s で地盤へ衝突貫入する状況を解析した。地盤への貫入量、重錘の衝撃加速度及び重錘変位の時刻歴等の実測値と DEM 解析結果を比較したところ、概ね良い対応を示す結果¹⁾ が得られた。更に重錘落下締固め工法の機構解明のため、第1～3回までの合計3回の重錘の複数回落下状況を DEM で解析^{2) 3)} した。その際、複数回の重錘落下によって地盤要素間の間隙がどのように詰められていくかを見たところ、重錘直下の部分だけが締固められ、重錘落下の回数とともに締固め領域が深くなっていく傾向が認められた。しかし、大島ら⁴⁾ の遠心模型による重錘落下の実験、高田ら⁵⁾ の重錘落下締固め工法の現場実験及び山肩ら⁶⁾ の室内模型による重錘落下実験によると、重錘落下による締固め範囲は半球状であるとの指摘があり、筆者らの規則配列による DEM の解析結果とは異なる傾向を報告している。

筆者らが最近行った地盤の単純せん断状態の DEM 解析⁷⁾ によれば、ランダム配列モデルの場合の方が規則配列モデルに比べて応力が植物の根のように複雑状に伝播する地盤らしい挙動を示した。また、緩詰めと密詰めに配列した円筒ブロック集合体の単純せん断截荷実験に対する DEM シミュレーション解析^{8) 9)} から、間隙を有する構造体の場合には間隙の大きさによって構造体内部の応力伝播性状やせん断抵抗が大きく異なり、その特性も DEM によって説明できることが分かった。したがって、緩詰めや密詰め状態の地盤に対する重錘落下時の地盤の衝撃挙動や締固め機構は、ランダム配列において間隙比を変化させた DEM 解析によって説明できるのではないかと考えた。

そこで、本報告では、DEM の要素配列としてランダム配列を取り上げ、「緩詰め」、「中密詰め」、「密詰め」と名付けた3つの状態の砂質地盤の DEM 解析を行い、重錘の貫入量、重錘の衝撃力¹⁰⁾、締固め範囲に及ぼす DEM の要素配列や間隙比の影響を検討した。その結果、ランダム配列モデルの解析結果では、締固め領域が半球状となること、また間隙比の大きな緩詰めの場合の方が締固められる領域は小さいが、締固めの度合いが大きいこと、重錘近傍では締固めがなされにくい等山肩らの室内模型実験での実験結果⁶⁾ と類似の傾向が現われており、ランダム配列 DEM モデルの解析によって重錘落下による締固め挙動を説明できることがわかった。

2. 実験及び解析対象

実験及び解析対象の詳細は文献^{1) 2) 3)} に示すが、その要点を示すと、次の通りである。地盤は図-1 に示すように水深約 8m の海岸を緑色片岩の岩砕土 (最大粒径 30cm, 粘土・シルト分 20%) で約 12.5m 埋め立てたもので、平均 N 値は 10 (7~33) であり、地下水位は GL-4m にある。本解析の対象とする重錘落下では、重量 25.13tf の剛な直方体 (2m × 2m × 1.44m) の重錘を高さ 25m から自由落下させたもので、自由落下の条件から算定される地盤との衝突直前の速度は 22.15m/s である。重錘の衝撃力を測定するため固有振動数約 4800Hz、測定範囲 ± 500G の加速度計を、重錘上面

の対角線上の2箇所に配置し、300Hzのローパスフィルター処理して0.5ms刻みで出力した。落下終了時の最大貫入量はトランシットで、重錘の落下状況は高速ビデオ (500コマ/秒) で撮影した。

解析対象の重錘の第1回目の地盤への衝突による加速度、変位の時刻歴波形を示すと図-2の通りである。100Hzのローパスフィルター加速度波形を見ると、最大加速度は90G程度で、最大貫入量は78cmである。

3. DEMによる解析

3.1 規則配列モデルによる解析

上記の実験結果をDEMによって解析した。解析モデルは図-3に示す軸対称の規則配列モデルである。衝撃問題の場合、集中荷重として作用する衝突物体と広がりをもつ被衝突体のエネルギー的釣合を考慮、軸対称のモデル化を行うことにより衝突時の現象を良く説明できることを把握しており^{11),12)}、図-3のような軸対称のDEMモデルを用いた。したがって、図-3に示す円形要素は、実際には重錘の中心を軸対称の中心軸とする環状要素である。解析条件及び解析結果の詳細は文献^{1),2),3)}に示すが、規則配列モデルとしたのは、木山らの研究¹³⁾を参考にして目標とする内部摩擦角を要素配列や要素接触角によってコントロールしやすいと考えたからである。地盤の基本的な物性値はせん断波速度120m/s、ポアソン比0.3、粒子密度2.85g/cm³、単位体積重量2.28tf/m³とし、目標とする内部摩擦角が35°になるように要素接触角(鉛直軸に対する角度)を51.7°と定めた。この要素配列での間隙比は0.25である。要素の質点には法線及び接線方向のばねを配置したが、法線方向の力に対して、要素間の圧縮状態では力は作用するが、引張状態では作用しないものとした。なお、環状要素のリング方向のばねは考慮していない。本モデルによる解析結果は既に報告^{1),2),3)}しているが、後の解析との比較・考察に必要な重錘の加速度、重錘の変位及び締固め度合を表わす指標として初期の間隙比に対する重錘落下終了時の間隙比の比率を図-4に示す。要素間の間隙比の分布図では、締固め度合が大きい場合、色が濃くなるように表示している。この解析は重錘加速度及び重錘の貫入量(変位)の時刻歴変化を捉えていると考えられるが、図-4(c)の締固められた領域は重錘の直下部分のみで文献^{4),5),6)}の指摘のように半球状にはなっていない。

3.2 ランダム配列モデルによる解析

(1) 解析モデルと条件

以下に示すDEM解析では、その締固め特性を把握するため、要素配列をラン

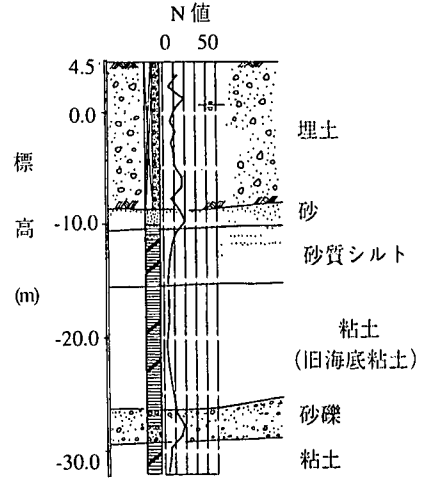
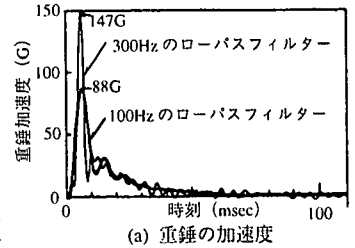
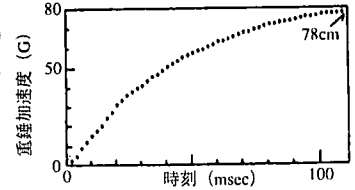


図-1 土質柱状図



(a) 重錘の加速度



(b) 重錘の変位

図-2 実験結果

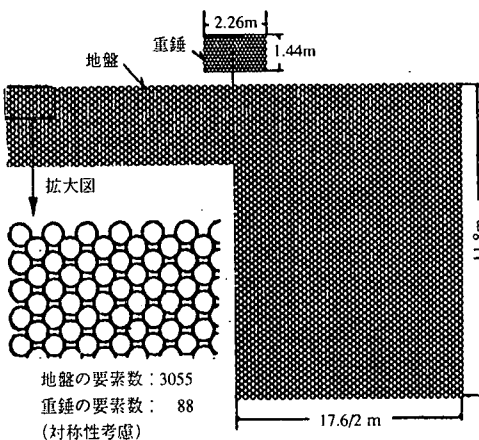


図-3 軸対称DEMによる解析モデル

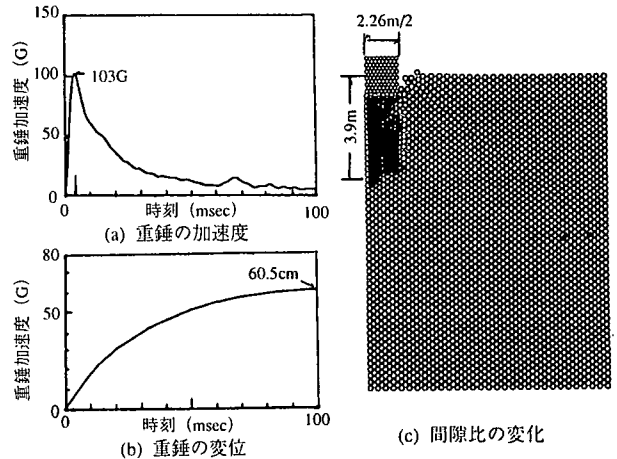


図-4 規則配列モデルによる解析結果

ダムとし、緩詰め、中密詰め、密詰めと名付けた3つの状態の砂質地盤について解析を行った。解析ケースと主要な条件を表-1に示す。また、解析モデルの例を図-5に示す。要素配列には各解析ケース間に相違があるが、図-5の大きさを示すと、解析ケースによる相違は見分けられないので、代表的な例として緩詰めの場合を示した。ランダム配列モデルの作成においては、地盤領域の大きさ(横17.6m×高さ11.8m)と要素個数(3000個)をまず定め、次に最大半径と最小半径を与えて、その範囲で正規分布となるような要素半径を有する円形要素を発生させ、更に緩詰め、中密詰め、密詰め、の3つの砂質地盤に対する2次元の間隙比として各々0.24、0.20、0.17となるように要素半径を比例的に変化させながらランダムな要素配列を作成したものである。ここで、2次元の間隙比0.24、0.20、0.17は、3次元状態の目標とする間隙比を各々緩詰め0.8、中密詰め0.7、密詰め0.6と設定し、3次元と2次元の間隙比の比率を3.4と仮定³⁾して定めたものである。前記のパッキングによって作成したランダム配列モデル全体としての平均的な間隙比の算定値は緩詰め0.240、中密詰め0.205、密詰め0.175である。

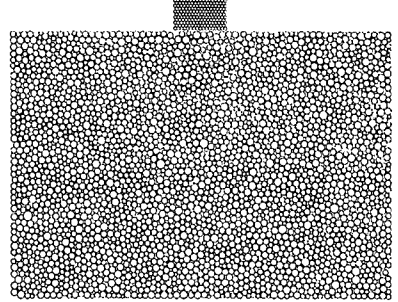


図-5 ランダム配列モデル(緩詰めの場合)

表-1 解析ケースと主要な条件

解析名称	地盤						重錘					
	3次元状態の 目標間隙比	2次元状態の間隙比		最大半径 (cm)	最小半径 (cm)	平均半径 (cm)	横 (m)	高さ (m)	要素数	横 (m)	高さ (m)	要素数
緩詰め	0.8	0.24	0.240	19.67	6.55	13.11	17.6	11.8	3000	2.26	1.44	182
中密詰め	0.7	0.20	0.205	19.94	6.64	13.29						
密詰め	0.6	0.17	0.175	20.23	6.74	13.49						

また、ランダム配列の場合も規則配列の場合のように環状要素を配置する考え方もあるが、衝撃応答や締め特性に重要な重錘直下の中心軸上の配列が特殊な条件となるので、それを避けるため全領域をランダムな要素配列とし、その代わりに中心軸からの距離を半径とする円の半周分の重量とばねを各要素の値として与えた。

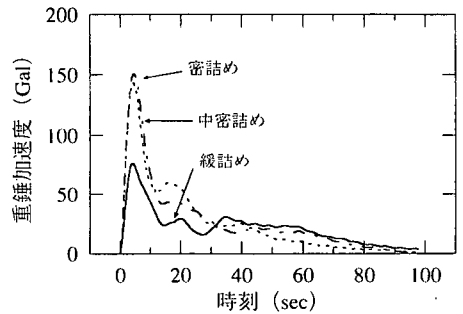
主要な解析条件は前記の規則配列モデルと同じで次の通りである。地盤の基本的な物性値はせん断波速度120m/s(緩詰めの場合)、ポアソン比0.3、粒子密度2.85g/cm³とした。法線方向の単位長さ当たりのばねは既報^{1),2),3)}と同じように

Herz理論により算定し、それを元に法線方向ばねKn(kgf/cm)と要素中心間距離の変位x(cm)の関係を $Kn=123 \cdot x^{0.322}+150$ として与えた。また、接線方向¹³⁾の単位長さ当たりのばねKs(kgf/cm)は法線方向ばねの1/4とした。なお、衝撃応答による特性をより良く把握するため、重力は無視した。地盤領域の境界部分の要素と固定端の間には振動の逸散を考慮してダッシュポットのみを設けた。要素間の摩擦係数は0.5とした。計算時間刻みは0.05msとし、100ms間の解析を行った。

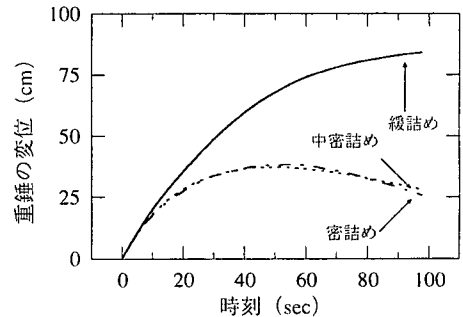
(2) 解析結果

a) 重錘の加速度及び変位時刻歴

解析による重錘の加速度と重錘貫入時の変位時刻歴を図-6に示す。緩詰めと他の2つの中密詰め及び密詰めとは非常に相違があるが、中密詰めと密詰めでは相違が少ない。最大衝撃加速度は、緩詰めの場合75Gであるのに対して、中密詰めでは143G、密詰め150Gで、緩詰めの約2倍である。また、最大貫入量については、緩詰めでは84cmであるが、中密、密詰めではほとんど差がなく、37~38cmと緩詰めの半分以下になっている。図-2に示した実測値、即ち、100Hzのローパスフィルター波形による最大加速度88G、最大変位が78cmであることを鑑みると、緩詰めの場合の解析値が実測値に比較的良く対応していると言える。なお、図-4に示した規則配列モデルと本解析のランダム配列の緩詰めモデルの間隙比が0.24~0.25と近いために最大加速度、最大貫



(a) 重錘の加速度



(b) 重錘の変位

図-6 ランダム配列モデルによる解析結果

入量及び重錘変位の時刻歴の形状が比較的近似していると考えられる。

b) 要素の速度と接触力分布

解析による4つの経過時刻における要素の速度分布、接触力分布を、緩詰めの場合を例に図-7に示す。規則配列モデルの解析^{1) 2) 3)}の際に示した要素の移動状況については、ランダム配列モデルでは経時変化を捉えにくいので、ここでは省略する。また、他の中密詰め及び密詰めの場合の結果も紙面の制約上省略するが、全体的な傾向は類似している。図-7によると、重錘の衝突直後(2.5ms)では重錘が大きな衝撃力を受けて重錘直下のみの地盤要素が鉛直下方に移動し、時間の経過(20ms, 50ms)とともに地盤要素が重錘から放射状に移動するように変化し、全体として地盤要素が半球状に変位していくことがわかる。図-7(b)の接触力分布を見ると、そのことが良く分かる。重錘の衝突直後に重錘直下のみの地盤要素が鉛直下方に大きく移動する状況は規則配列モデルの場合^{1) 2) 3)}にも生じていたが、ランダム配列モデルのように放射状に地盤が移動する傾向は少なかった。したがって、実測^{4) 5) 6)}に生じた、地盤が放射状に移動して半球状に締められる現象は規則配列モデルでは表現しにくく、ランダム配列モデルによって表現できると言える。

c) 要素の移動軌跡

そこで、重錘衝突時の地盤要素の移動を更に明らかにするため、重錘が衝突してから100msまでの要素の移動軌跡を緩詰め、中密詰め及び密詰めの場合について示すと、図-8のようになる。

図-8によると、緩詰めの場合は重錘直下の地盤が下方に大きく変位するが、中密詰めや密詰めでは重錘直下の地盤の下方への変位は小さくなっている。これは図-6(b)に示した重錘の変位時刻歴の傾向と符合するものである。また、重錘直下から離れた地盤の内部要素も放射状に移動し、最終的には地盤が半球状に変位していることが良くわかる。但し、中密詰めや密詰めの場合には、緩詰めに比べて半球状の形状が縦長になる傾向が見られる。なお、重錘の左右の側面近傍の地盤は、いずれの場合とも平らなお碗状に上方に移動している。

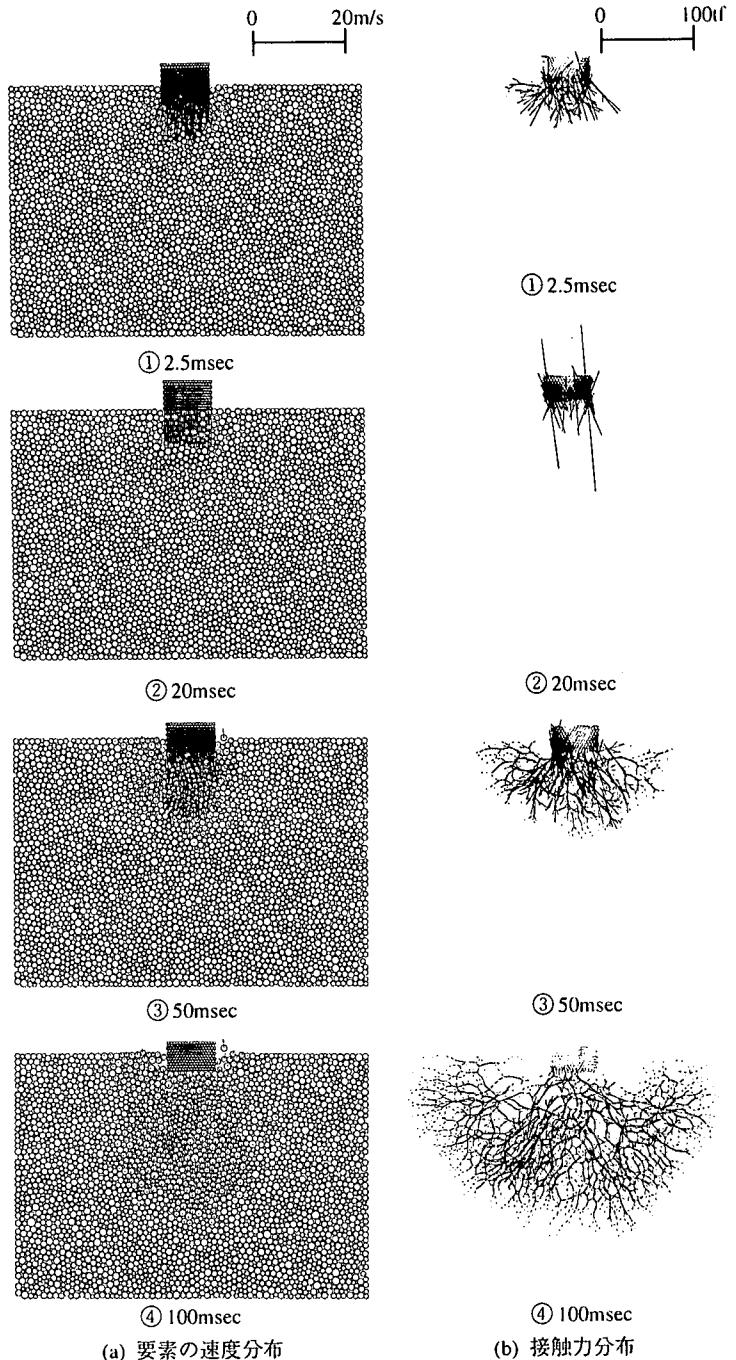


図-7 ランダム配列モデルによる解析結果(緩詰めの場合)

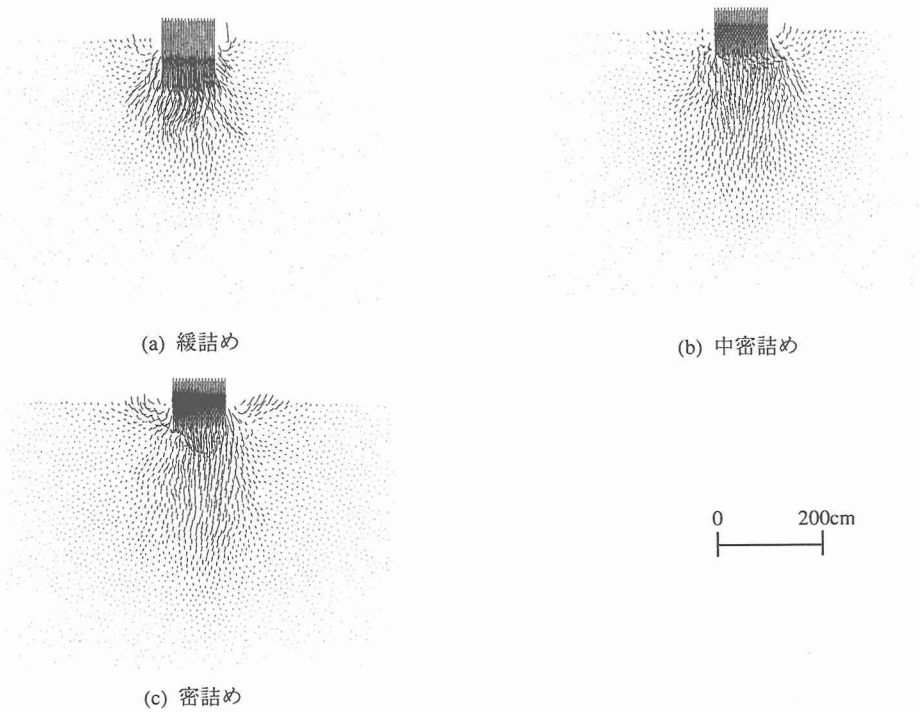


図-8 要素の移動軌跡 (0~100ms)

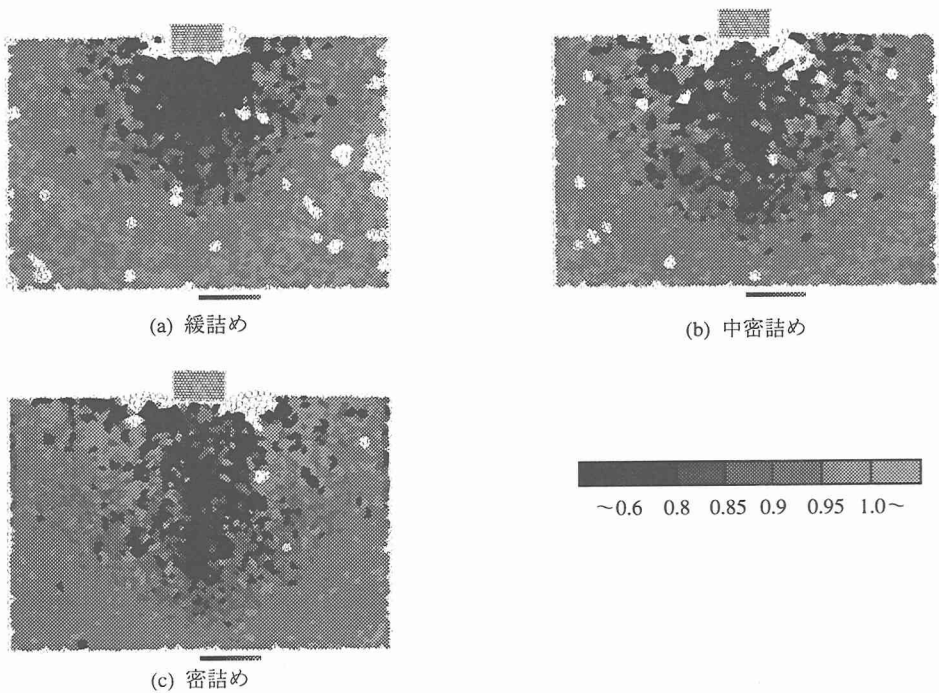


図-9 初期間隙比に対する重錘落下終了時の間隙比の比率

d) 地盤の締固め状況

地盤の締固め状況を把握するために、重錘落下終了時(100ms)の要素間の間隙比を計算し、初期の間隙比に対する比率として示したのが図-9である。図-8の要素の移動軌跡と対比できるように3ケースを示している。図-9においては初期間隙比に比べて重錘衝突終了時の間隙比が85%以下の締固められた領域が黒く見える部分である。緩詰めの場合、重錘直下が半球状に締固められ、中密詰めや密詰めでは締固め度合は小さくなるとともにその領域はやや縦長の傾向が認められる。図-8に示した地盤要素の移動軌跡と符合している。間隙比が大きな緩詰めの場合、重錘落下によって間隙が詰められる度合が大きくなり、その結果、重錘及び地盤が大きく変位して、より締固められる結果になるものと考えられる。また、図-3(c)に示した規則配列モデルでは重錘直下のみが締固められる結果であったが、図-8及び図-9に示したようにランダム配列モデルの場合には、重錘下部が半球状に締固められることが分かる。また、図-9に見るように重錘の直下周辺では締固められていない。これは、図-8に見るように重錘の近傍では地盤が上方に移動したり、図-6(b)の重錘変位の時刻歴波形に見るように、重錘落下が終了して変位が最大に達してから再び上方に変位するので、ゆるみが生ずるためと考えられる。

以上の解析結果は山肩ら⁶⁾の重錘落下締固め工法に関する室内模型実験の結果、即ち、相対密度 D_r が小さい場合の方が締固めが顕著であること、締固め領域が重錘底面を中心に半球状であること、重錘直下周辺にはゆるみ領域があること、と整合する結果であり、ランダム配列のDEM解析によって重錘落下時の地盤の衝撃応答特性や締固め特性をかなり良く表現できると言える。

4. まとめ

岩砕埋立て地盤において重錘落下締固め工法による地盤改良を行う機会を得、その締固め機構の解明や落下仕様設定の一助とするため、個別要素法DEMによる解析を行い、実測値との検証を行っている。本報告では、DEMの要素配列としてランダム配列を取り上げ、緩詰め、中密詰め、密詰めと名付けた3つの状態の砂質地盤のDEM解析を行い、重錘の貫入量、重錘の衝撃力、締固め範囲に及ぼすDEMの要素配列や間隙比の影響を検討した。

その結果、ランダム配列モデルのDEM解析結果では、締固め領域が半球状となること、また間隙比の大きな緩詰めの場合の方が締固められる領域は小さいが、締固めの度合が大きくなり、重錘近傍では締固めがなされない等山肩らの室内模型実験での実験結果と類似の傾向が現われており、ランダム配列モデルDEM解析によって重錘落下による地盤の締固め挙動が説明できる可能性のあることがわかった。

[参考文献]

- 1) 河西良幸, 笹尾光他: 重錘落下による地盤挙動と個別要素法による解析, 第28回土質工学研究発表会, pp2359~2360, 1993年6月
- 2) 河西良幸, 笹尾光他: 個別要素法による重錘の複数回落下時の地盤挙動の解析, 第29回土質工学研究発表会, pp2061~2062, 1994年6月
- 3) 河西良幸, 澤本佳他: 重錘落下による地盤改良と個別要素法による解析, 鹿島技術研究所年報第42号, pp241~246, 1994年10月
- 4) 大島昭彦, 高田直俊他: 重錘落下締固め工法の遠心模型実験(第2報), 第23回土質工学研究発表会, pp2049~2052, 1988年6月
- 5) 高田直俊他: 重錘落下締固め工法の現場実験—地盤変形と土圧について—, 第23回土質工学研究発表会, pp2057~2060, 1988年6月
- 6) 山肩邦男, 無津呂大輔, 下平祐司他: 重錘落下締固め工法に関する室内模型実験(その1: 実験概要, その2: 実験結果および考察), 第29回土質工学研究発表会, pp2063~2066, 1994年6月
- 7) 宮田章, 河西良幸他: 砂質地盤の単純せん断状態の個別要素法, 第31回土質工学研究発表会, 1996年7月
- 8) 河西良幸, 宮田章他: 円筒ブロック集合体の単純せん断状態の個別要素法, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, 1994年10月, pp171~176
- 9) 宮田章, 河西良幸他: 円筒ブロック集合体の単純せん断状態の個別要素法(その2モデルの縦横比の影響), 第30回土質工学研究発表会, pp545~548, 1995年7月
- 10) 大島昭彦, 高田直俊他: 重錘落下による衝撃加速度の現場測定実験(第2報), 第30回土質工学研究発表会, pp2039~2042, 1995年7月
- 11) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号, pp127~135, 1995年7月
- 12) 森川博司, 河西良幸他: 飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板の耐衝撃性に関する実験と解析, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp107~114, 1995年11月
- 13) 木山英郎他: せん断モデルを用いた離散剛要素法の材料定数の検討, 土木学会論文報告集, 第382号/Ⅲ-7, 1987年6月