

粒状体個別要素法 (DEM) による河川堤防の液状化解析

Liquefaction Analysis of River Dikes with Distinct Element Method (DEM)

森 洋 (もり ひろし)
 東京都土木技術研究所地象部 研究員

小川 好 (おがわ よしみ)
 東京都土木技術研究所地象部 主任

曹 国強 (そう ごうきょう)
 (株)CRC ソリューションズ社会基盤ソリューション部

亀岡 裕行 (かめおか ひろゆき)
 (株)CRC ソリューションズ社会基盤ソリューション部 部長

1. はじめに

液状化時での河川堤防における耐震性評価は、一般に Δu 法による円弧すべり計算手法に従っている。 Δu 法とは、慣性

表-1 安全率と沈下量

$F_s (kh)$	$F_s (\Delta u)$	沈下量
	$1.0 < F_s$	0
	$0.8 < F_s \leq 1.0$	$H \times 0.25$
$F_s \leq 0.8$	$0.6 < F_s \leq 0.8$	$H \times 0.50$
-	$F_s \leq 0.6$	$H \times 0.75$

H: 盛土高さ

力を作用させないで液状化抵抗率 (F_L) より過剰間隙水圧比を算出し、有効上載圧を低減させて円弧すべり計算を行い安全率 (F_s) で評価する方法である。これにより、河川管理者は兵庫県南部地震以降に出された全国の直轄管理河川および都道府県管理河川堤防 (土堤) を対象とした耐震点検マニュアル (表-1 を参照) に従い、二次被害を含んだ耐震対策の詳細検討区間 (対策優先区間) を総合的に判断している。表-1 は、過去の地震被害・無被害事例を事後解析して得られた円弧すべり計算結果 (kh 法・ Δu 法) と実測の天端沈下量 (上限値) との関係より求めたものであり、あくまでも危険側の評価であることに注意を要する。

東京都の管理している多くの河川堤防は、高潮を想定した防潮堤であり、その形状は擁壁構造物等を伴うカミソリ型護岸で、前面に根固め (鋼管杭 (矢板)) 構造を有する特殊堤と一般に呼ばれているものである。平成7年の兵庫県南部地震以降、耐震設計基準 (案)¹⁾ の見直しが行われてきたが、そのほとんどは土堤の河川盛土堤防を対象としたもので具体的な自立式構造物 (鋼管杭) を擁する特殊堤に関する耐震性の評価手法は示されていない。また、レベル I・レベル II 地震動のような地震規模の違いによる影響を明確な形で規定していないのが現状である。実際、多くの特殊堤は東京下町低地にあり液状化による耐震設計が要求されていると同時に、河川の親水性向上にも有効なスーパー堤防整備事業化も進められている。図-1 には、軟弱な沖積粘性土層上に数m規模の液状化対象層を有する河川流域で現在進められている一般的な耐震設計断面の概略図を示す。東京都が進めている現状での既設堤防全体の安定性に関する設計概念は、河川背面 (堤内地) 側に盛土したスーパー堤防化を想定しており、一般的には堤外地側を対象とした耐震設計 (鋼管杭を伴う地盤改良工法) を行っている。設計上では盛

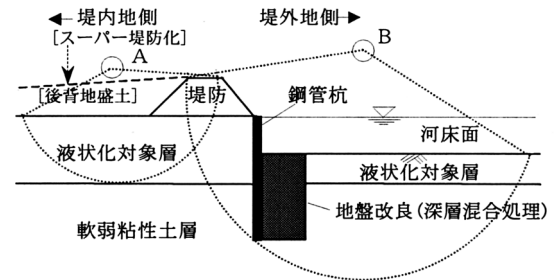


図-1 一般的な耐震設計断面 (特殊堤)

土直下での地盤改良を行わないと同時に、将来スーパー堤防化するという考えの基に円弧すべり面 B (安全率 1.2 以上) での設計断面を想定している。しかし、多くの構造物が隣接している都市型河川堤防の一つである特殊堤背面には住宅地域等が広がっており、スーパー堤防化するには多くの時間と予算を要する。そのため、図-1 に示した円弧すべり面 A に代表されるような堤内地側での耐震性評価は無視できないと考える。以上のように今後の耐震河川事業においては、地域性を伴う独自の河川 (堤防) 環境に即した設計手法のあり方を模索する必要性があると同時に、安全率を中心とした現行の (実務) 設計体系を補足すべく新たな耐震評価手法の導入が急務であると思われる。

本報告は、液状化対象層が堆積する特殊堤防を対象とした粒状体個別要素法 (DEM) による液状化解析の適応を試みる。特にスーパー堤防化に至っていない設計断面での耐震性の効果を過剰間隙水圧比分布ならびに変形量等で定量的に検討する。

2. DEM に対する有効応力概念の導入

個別要素法 (DEM) は解析対象物を小要素の集合体として取り扱うことで、各要素ごとに独立した運動方程式を適用し、時間領域で差分近似して前進的に解いていく非連続体解析手法の一つである。一般的には、図-2 に示したような粒状体の要素 (ディスク) と要素間の接点に設定される法線方向ばねと接線方向ばねによって構成される。本解析プログラムは、ミリオーダーの要素運動に伴う要素間の間隙変化によって発生する過剰間隙水圧変化をモデル化するような微視的な方法²⁾ではなく、

メートルオーダーの実地盤を想定した大変形を伴う液状化解析を目的としている。そのため、今回は地盤を適当な土塊の大きさの集合体として取り扱う巨視的な方法³⁾を採用している。また、土の圧縮・膨張特性やせん断過程での非線形特性ならびに過剰間隙水圧の発生といった力学的性質は、要素間ばねによって表現される。特に、過剰間隙水圧の発生と低下は接線方向ばねが消費する散逸エネルギーと弾性エネルギーに基づいて評価することで有効応力解析を可能としている⁴⁾。

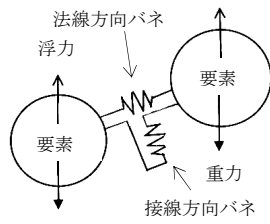


図-2 粒状体個別要素モデル

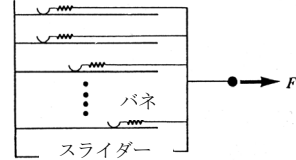


図-3 Iwan の並列型モデル

地下水面以下の砂質土を対象とした法線方向ばねに作用する法線力 (F^n) として次式のように仮定する⁵⁾。

$$F^n = F_b^n + F_s^n + F_c^n = K_n \cdot u^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{b,0}^n = F_b^n + F_s^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_c^n = F^n - F_{b,0}^n = K_n \cdot u^n - F_{b,0}^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 F_b^n は要素間接点に作用する有効法線力、 F_s^n は骨格のせん断によって発生する過剰間隙水圧、 F_c^n は骨格の圧縮・膨張によって発生する過剰間隙水圧、 u^n は法線方向の相対変位である。 K_n は法線ばね定数であり、Igarashi and Meguro³⁾が提案している Lamé の定数ならびに要素密度等を考慮した波動伝播速度から求まる要素ばね定数を参考にして決定することが可能である。式(2)で示された F_b^n と F_s^n の和は、要素に重力と浮力が働いている状態 (図-2 を参照) で自重解析した時点の要素間接点に作用する初期の有効法線力 ($F_{b,0}^n$) に一致すると規定する。式(3)では自重解析後の非排水条件下での動的解析過程で得られる u^n の変化に伴う法線力を、すべて F_c^n に転化されると仮定している。

接線方向ばねに作用するせん断力 (F^s) は、有効法線力による比例則を適用するとして次式より仮定する。

$$F^s = \frac{F_b^n}{\sigma'_{mi}} \cdot T \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F^s = S \cdot T \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 σ'_{mi} は初期有効拘束力、 T は Iwan⁶⁾によって提案された図-3 に示すようなばねとクーロン・スライダから成る複数のジェンキン・エレメントを並列に連結することで土の非線形特性を表現する力学的モデルから得られるせん断力である。Iwan モデルは一価の単調な増加関数であるとした時、常に Masing の規則を満足する Hardin-Dornevich モデルに従ったヒステリシス・ループ

を描くことになる。また、粘性土に対するせん断力に関しては、式(4)のような法線力の比例則は適用できないため、式(5)に示すような要素配置形状から求まる接触要素数に対する単位接触面積 (S) を考慮する必要性がある^{3,5)}。

過剰間隙水圧 (F_s^n) の発生量 (P_n) と低下量 (P_p) は、Iwan モデルから計算される散逸エネルギー (E'_L) と弾性エネルギー (E_p) に基づいて次式より求める⁴⁾。

$$F_s^n = P_n + P_p = K(\varepsilon_n + \varepsilon_p) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_n^2 = E'_L \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma'_{mi} \cdot \varepsilon_p = -E_p \cdot \beta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 K は体積弾性係数、 ε_n は体積収縮ひずみ、 ε_p は体積膨張ひずみ、 m_v は体積収縮係数である。 P_n は E'_L の平方根に比例し、 P_p は E_p にほぼ比例する関係にあることを用いている。 α と β は、 m_v を K の逆数とした場合の液状化発生と低下のパラメータである。

3. 繰返し単純せん断試験における液状化解析

数十mから数百m規模での実地盤モデルを対象とした液状化解析を取り扱う上で、実用範囲内であると思われる粒子半径 (R) 内での影響を要素試験レベルで検討した。対象とする物性条件は、塩見⁷⁾が行った繰返し単純せん断試験に従って決定している。図-4 には、 R を 30cm, 15cm, 7.5cm とした個別要素モデルを示した。図-5 には、等方圧密条件下での繰返し回数に対する、ある代表的な要素間 (図-4 に示された黒抜きした2要素) での過剰間隙水圧比と接線方向での相対変位量の関係を示した。繰返し回数が少ない段階では過剰間隙水圧比に若干の差異を示すものの、 R に関係なくほぼ規定の繰返し回数 (20 回) で液状化状態に達しており、過剰間隙水圧比の上昇傾向も一致する。また、2要素間での相対変位量は所定の繰返し回数付近に達すると急激に増加するが、それまでの繰返し回数内では $R=30\text{cm}$ の場合 (■) で若干大きいものの、 R による顕著な差異は認められなかった。口絵写真-1 には、各粒子半径での繰返し回数に伴う過剰間隙水圧比分布を接点ばねの位置で示した。 R が小さくなるに従って、1要素当たりの接点数が増加

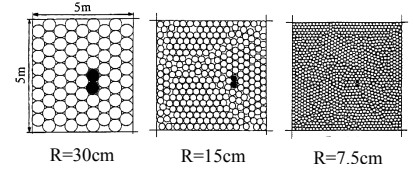


図-4 個別要素モデル

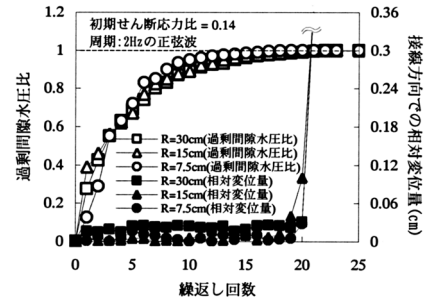


図-5 過剰間隙水圧比とせん断変形量

するため、液状化の発生分布が画像上明確に現れたのだと思われる。また、今回は所定のせん断力に相当するモーメントを側壁面部に作用させて繰返し回転させる制御手法を採用しているため、供試体を取り囲む周面部分での液状化発生頻度が高くなると予想されるが、その幾何学的な模様がある種の局所的なすべり面に似た分布形状を示すことは大変興味深い。ただし、次章で示す実地盤モデルを対象とした液状化解析では、実用性に基づいた計算効率やコストパフォーマンスを考慮して $R=30\text{cm}$ の個別要素モデルを用いている。

4. 盛土堤防

1995 年の兵庫県南部地震で最大 3 m 程度の盛土沈下を示した淀川堤防を対象とする液状化解析を試みた。図-6には、表層付近で液状化対象層 (No.2・No.3) が約 10m 程堆積している解析対象断面 (間隙率: 0.16, 総粒子数: 約 12,000 個) を示しており、詳細な物性条件等は文献 8) を参照していただきたい。入力波形は被害地点から比較的近傍の G.L.-30m 付近の基礎杭先端部分で測定された観測波形を用いた (図-7 を参照)。口絵写真-2 には、最終状態 (25 秒後) での過剰間隙水圧比分布に伴う残留変形状態を示した。堤外地側の堤防天端で約 3m 沈下し、実被害での観測沈下量ともよく一致しており、本解析プログラムによる適応の可能性を示すことができた。また、堤体自体は主に堤外地側へと変形する傾向にあるが、地震防災の観点から言えば堤内地側への変形も無視できない。

5. 特殊堤防

一般的な耐震設計断面 (図-1 を参照) を対象とした特殊堤防における耐震性効果を液状化解析で検討した。図-8 は、軟弱な沖積粘性土層 (No.4~No.8) 上に約 10m 程の液状化対象層 (No.2・No.3) が堆積している解析対象断面 (間隙率: 0.16, 総粒子数: 約 8,100 個) を示しており、一般的な耐震設計断面 (ケース 3) に堤内地側地盤改良を行った場合 (ケース 4) の想定モデルである。地盤を含めた鋼管杭や地盤改良等の物性パラメータは、実際の実務設計で使用されている数値を採用している⁹⁾。表-2 には、耐震対策効果を検討するための解析ケースを示した。口絵写真-3 には、各ケースの最終状態での過剰間隙水圧比分布に伴う残留変形状態を示した。ケース 1 では前面に強固な抑止 (自立式) 構造物が無いため、堤内地側にも堤外地側にも盛土材が流入しており、堤防高の約 70% が沈下する。ケース 2 では約 2m の杭頭変位を許すが、ケース 1 ほどの沈下量は示さなかった。ただし、堤内地側には盛土材の流入が観察される。一般的な耐震設計断面であるケース 3 では、深層混合処理での地盤改良より杭頭変位量がセンチメートルオーダーとなり盛土天端沈下量も小さくなるが、堤内地側への盛土材流入は避けられない。円弧すべり計算より所定の安全率を満足する条件で設定した堤内地側地盤改良モデルの

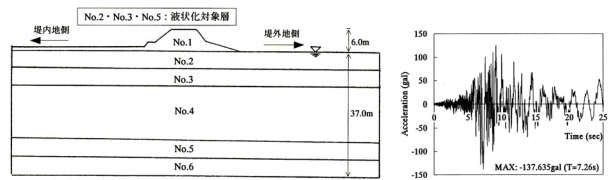


図-6 盛土堤防解析モデル

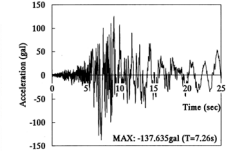


図-7 入力波形

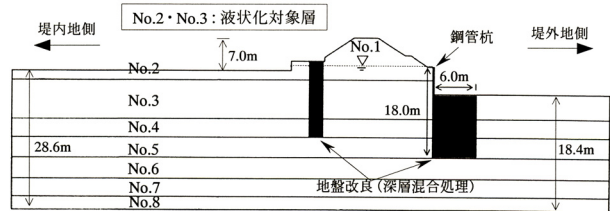


図-8 特殊堤防解析モデル (ケース 4)

ケース 4 では、堤防高の約 36% ($H \times 0.36$) まで盛土天端沈下量を抑止することが

表-2 耐震対策ケース

	耐震対策条件
ケース 1	無対策モデル
ケース 2	鋼管杭モデル
ケース 3	鋼管杭+堤外地側地盤改良モデル
ケース 4	鋼管杭+堤外地・堤内地側地盤改良モデル

可能となり、堤内地側への盛土材流入も比較的少なかった。また、耐震対策工法を施すに従って地盤全体での液状化の頻度は軽減する傾向にあった。

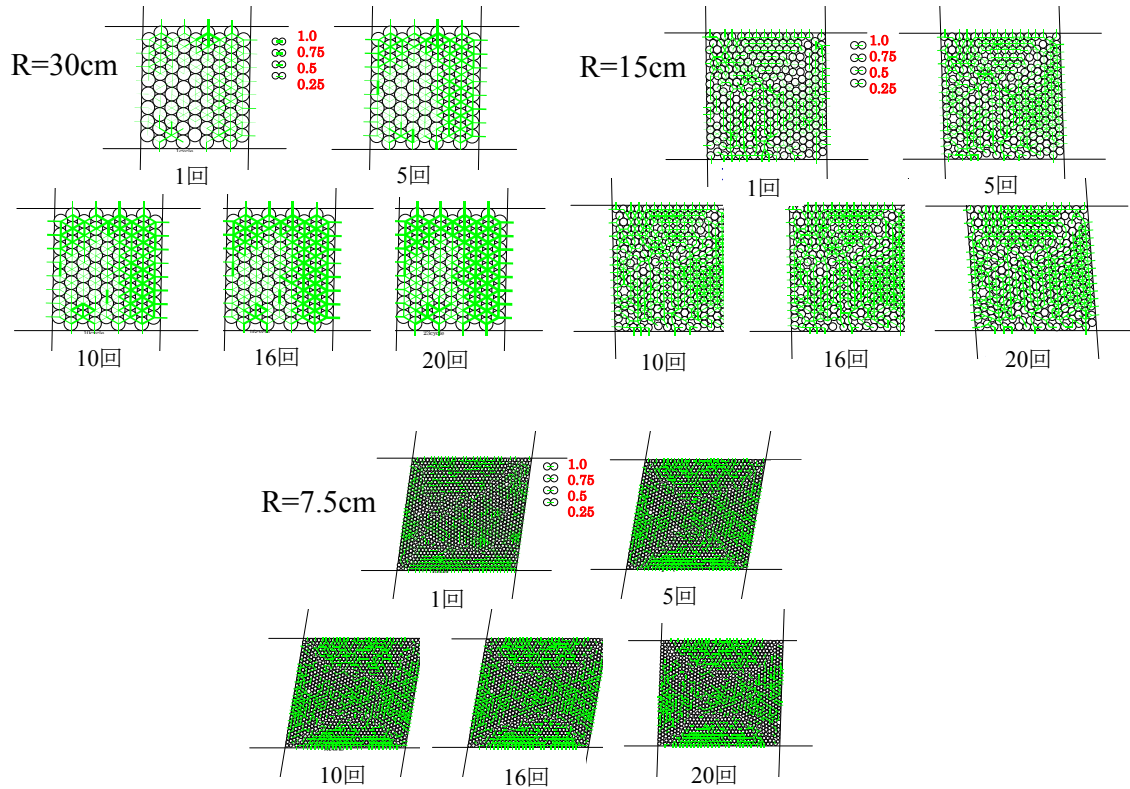
6. まとめ

淀川堤防を対象とした粒状体個別要素法による液状化解析を行った結果、実被害での沈下量を再現することができた。また、特殊堤防についても、鋼管杭や地盤改良による沈下量の低減効果を定量的に解析することができた。このことは、本解析手法が今後の耐震性能に向けての新たな設計提案を可能にすると考えられる。

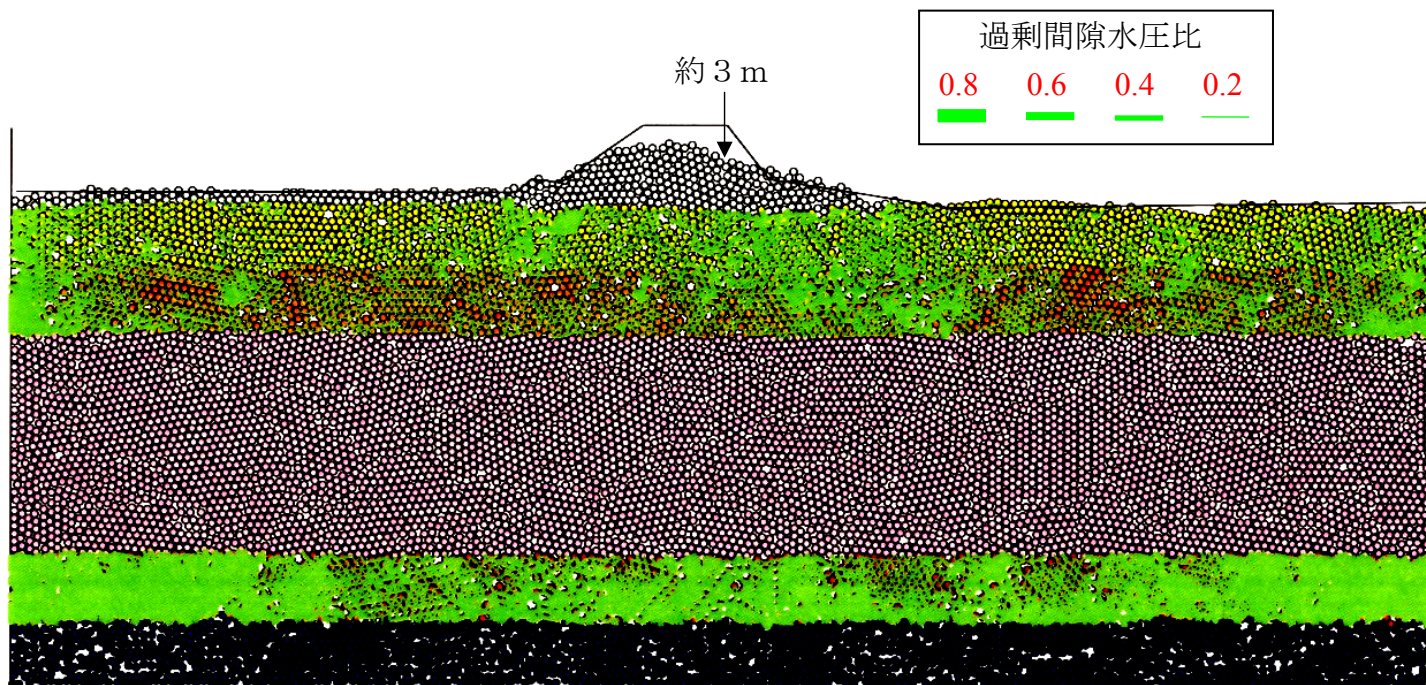
参考文献

- 1) 例えば、日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準(案) 同解説, 山海堂, 1977.
- 2) 垂水 祐二・伯野 元彦：粒状体シミュレーションによる砂の液状化解析, 第23回土質工学研究発表会, pp.915~918, 1978.
- 3) Igarashi, S. and Meguro, K. : Analysis of Permanent Ground Deformation due to Liquefaction with Distinct Element Method, Proc. of JSCE, No.424/III-14, pp.271~282, 1990.
- 4) Ogawa, Y., Kusano, K. and Abe, H. : Dissipative Energy and Stored Elastic Energy during Liquefaction Process, 12WCEE, No.1984, 2000.
- 5) 小川 好・森 洋・草野 郁：個別要素法による盛土堤防の側方流動解析, H14. 都土木技研年報, pp.243~254, 2002.
- 6) Iwan, W.D. : A Distributed-Element Model for Hysteresis and Its Steady-State Dynamic Response, J. of Applied Mechanics, December, pp.893~900, 1966.
- 7) 塩見 忠彦：委員会発表, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム・発表論文集, pp.54~55, 1989.
- 8) Mori, H., Ogawa, Y., Cao, G. : Liquefaction Analysis of River Dike with Discrete Element Method, ASCE, Discrete Element Methods, Proceeding of The Third International Conference, Geotechnical Special Publication No.117, pp.172~177, 2002.
- 9) 森 洋・小川 好：粒状体個別要素法による中川堤防を対象とした液状化側方流動解析, H15. 都土木技研年報, pp.219~222, 2003.

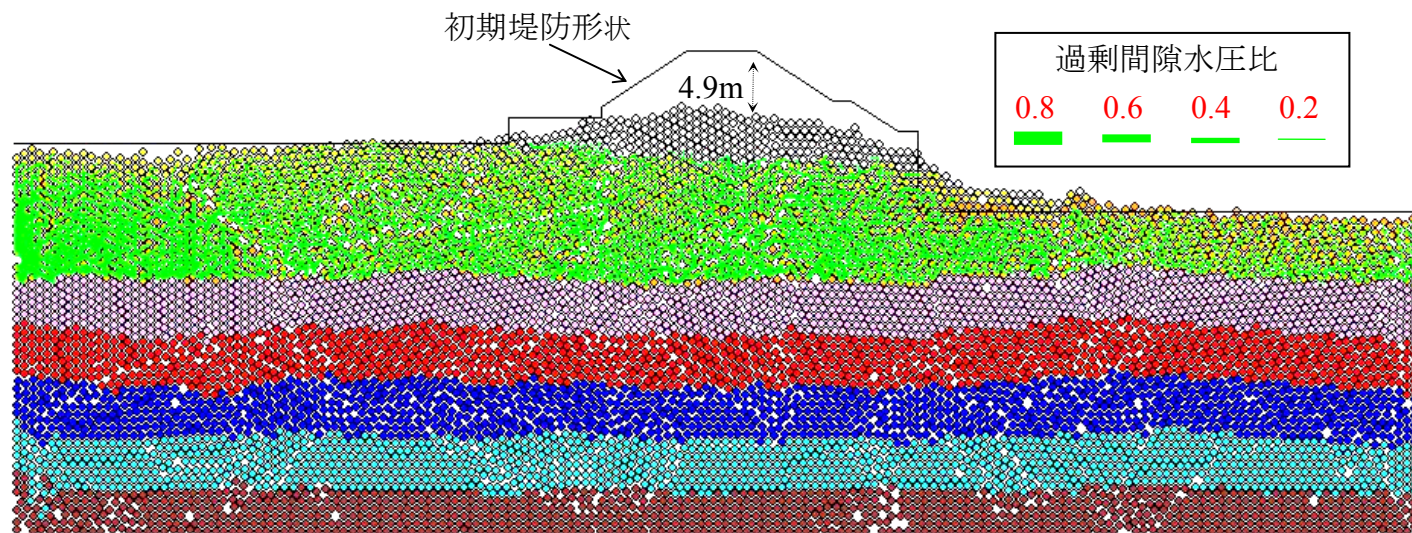
(原稿受理 2004. 5. 12)



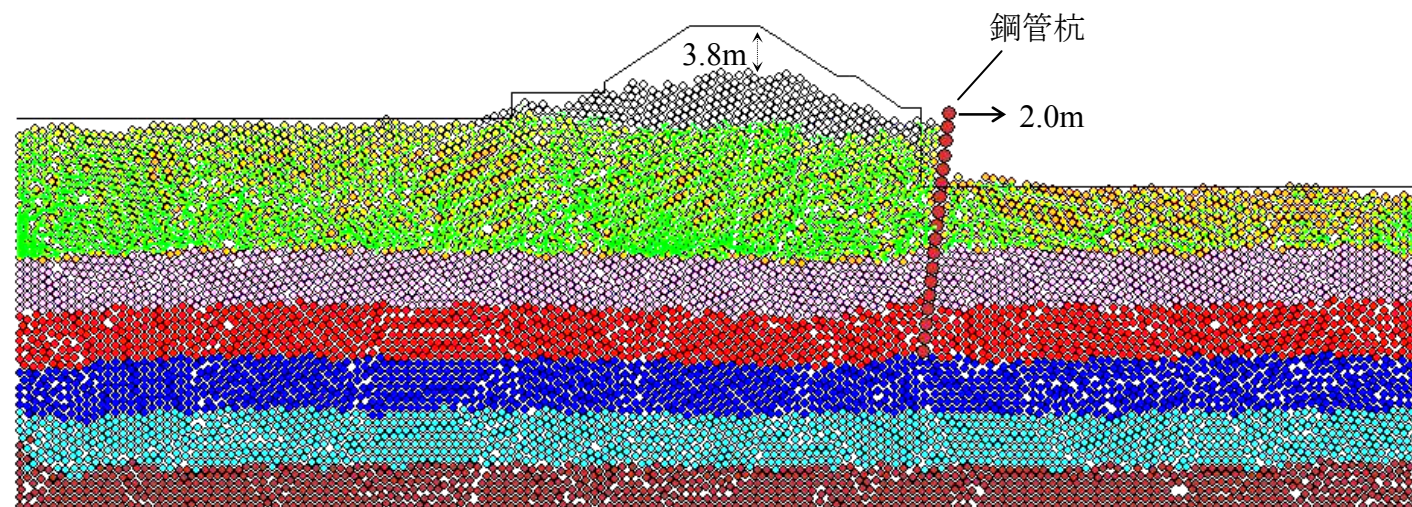
口絵写真ー 1 繰返し単純せん断試験を想定したDEM解析で得られた過剰間隙水圧比分布 (緑色の濃淡によって過剰間隙水圧比 [1.0, 0.75, 0.5, 0.24] の頻度を示している)



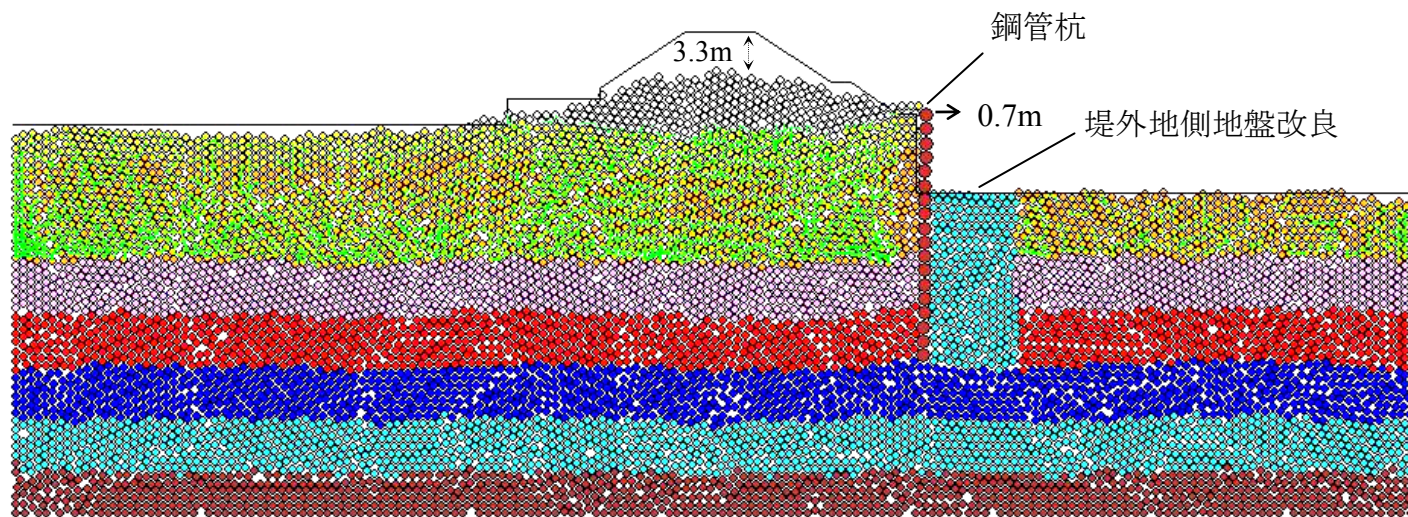
口絵写真-2 過剰間隙水圧比分布を伴う残留変形状態 (盛土堤防)



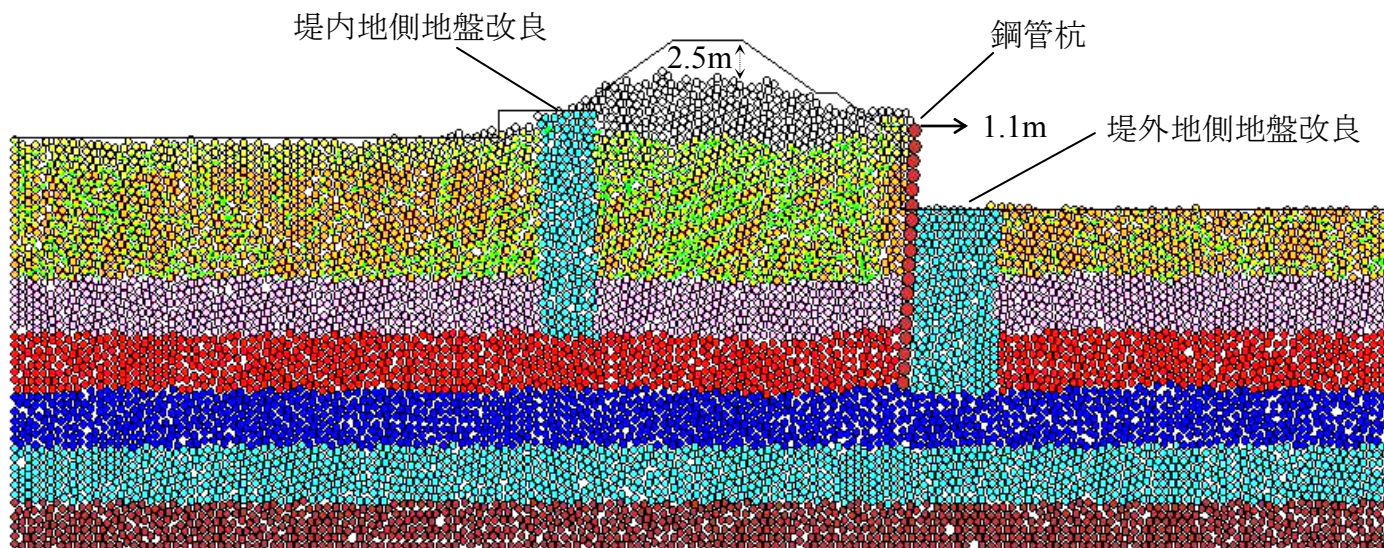
Case-1 (無対策モデル)



Case-2 (鋼管杭モデル)



Case-3 (鋼管杭+堤外地側地盤改良モデル)



Case-4 (鋼管杭+堤外地・堤内地側地盤改良モデル)

口絵写真-3 過剰間隙水圧比分布を伴う残留変形状態 (特殊堤防)