

東京都 土木技術研究所 森 洋・草野 郁
 ○東京都 道路管理部 小川 好
 (株)CRC 総合研究所 曹 国強・亀岡 裕行

1. はじめに

粒状体個別要素法 (D.E.M.) は、不連続で自由に運動する要素 (ボール) の集合体を想定して、個々の要素の運動方程式から系全体の支配方程式をマトリックスの形で構築し、各要素の挙動を求める方法である¹⁾。土の様な粒状体やクラックの多い岩を想定した不連続体の変形挙動を解析する方法として、近年利用されつつある。また、粒状体の流れ問題や斜面崩壊、トンネル開削時の地盤変形等の静的問題だけでなく、液状化を伴う動的問題にまで適用されている²⁾³⁾⁴⁾。前回の発表⁵⁾では、骨格のせん断、圧縮、膨張によって過剰間隙水圧の発生量を求めることが可能な Iwan モデルを導入した粒状体個別要素法で、兵庫県南部地震で被害を受けた淀川堤防に対する液状化解析を行った。その結果、実際の沈下量には至らなかったものの、液状化による盛土堤防の沈下予測の可能性を示した。

今回は、液状化条件での繰返しせん断試験を再現し、要素シミュレーション解析の検討を行った。そして、実地盤モデルでの淀川堤防を対象とした被害断面と無被害断面を用いた液状化解析を行い、実測された沈下量との比較を行った。

2. 個別要素法の拡張と土の構成規則

通常、D.E.M.では要素 (ボール) と要素接点に設定される軸方向バネとせん断バネによって構成される。提案するモデルでのバネは物理的なバネではなく、軸ひずみとせん断方向の相対変位に対して反力を発揮する”バネ系”として扱っている。バネの反力は質点の変位と速度、加速度から前進差分によって移動量を算出し、移動量から求められる相対変位 (軸方向については軸ひずみ) を基に計算する。また、質点の加速度増分は、質点の慣性力とバネの反力の釣り合いから計算される。以上のプロセスを繰返すことで、静的および動的挙動を解析するものである。

有効応力状態での”軸方向バネ系”に作用する力は「土の骨格構造の圧縮・膨張による力」と「静水圧」、「土の骨格構造の圧縮・膨張によって発生する過剰間隙水圧」、「土の骨格構造のせん断によって発生する過剰間隙水圧」であると仮定する。また、”せん断バネ系”に作用する力は「せん断力」に相当する力だけであるが、有効応力解析とするためには、応力とひずみの非線形的性質を表現できるとともに、せん断による過剰間隙水圧にしたがって変化させる必要がある。ボール接点にはたらく法線力と相対変位を結ぶ弾性係数は、土の非排水状態での体積弾性率に相当する定数となり、結果的には”軸方向バネ系”は線形であり、過剰間隙水圧の変化に対しても独立であることから、物理的なバネを設定すればよいことになる。”せん断バネ系”の応力とひずみの構成規則関係は、修正 Hardin-Drnevich モデルとし Iwan モデルを適用する。Iwan モデルはバネとクーロン・スライダーから成る複数の Jenkin-element を、並列に連結することで構成 (並列型モデル) されており、ひずみ (相対変位) を入力として応力 (力) を出力する。また、Iwan モデルは骨格曲線が 1 個の単調な連続関数であるとき、応力とひずみ関係のヒステリシス・ループは常に Masing の規則を満足することから、Iwan モデルは任意の骨格曲線を描くことが可能である。

土の骨格構造のせん断による過剰間隙水圧の発生量と低下量は、Iwan モデルから計算される散逸エネルギーと弾性エネルギーに基づいて計算される。ここで、土の収縮に要するエネルギーは散逸エネルギーの平方根に比例し、膨張に要するエネルギーは弾性エネルギーに比例するという仮定を用いている。

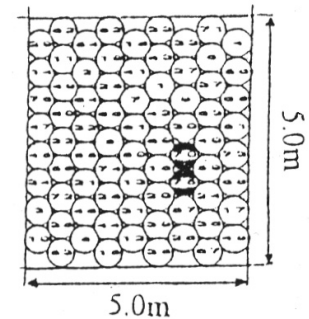


Fig.1 解析モデル

Table-1 解析条件 (繰返しせん断試験)

平均拘束圧 (等方条件)	98.1kPa
せん断剛性率	73600kPa
体積弾性率	98133kPa
液状化パラメータ: α	0.14
液状化パラメータ: β	1.02
せん断応力幅	20.6kPa
繰返し回数	20 回

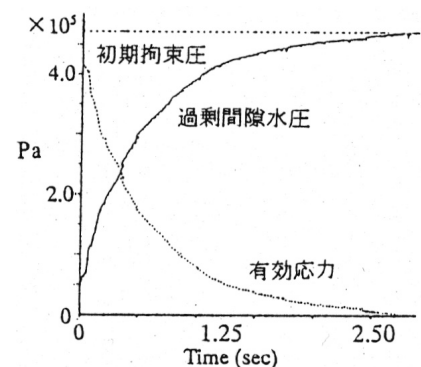


Fig.2 有効応力-過剰間隙水圧

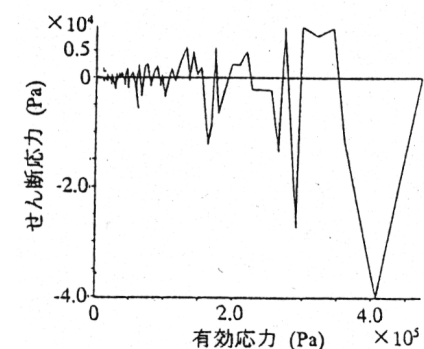


Fig.3 有効応力-せん断応力

3. 要素シミュレーション解析

Fig.1 に示すような、半径 0.3m のボール（要素）を用いて液状化条件での繰返しせん断試験を行った。解析条件は、Table-1 に示す。はじめに等方圧密試験をシミュレートし、その結果を基に Iwan モデルでの解析パラメータを再構築させながら液状化解析を行う。Fig.2 と Fig.3 には、Fig.1 に示した黒抜きのボール 70 と 75 の接触点で得られる有効応力-過剰間隙水圧の関係と、有効応力-せん断応力の関係を示した。液状化に至る解析時間は約 2.46 秒で、繰返し回数は約 19.7 回であった。想定した繰返し回数もほぼ満足しており、液状化に至る過剰間隙水圧の発生挙動ならびに有効応力の低下挙動は、想定した実験結果と比較し得る解析結果が得られた。

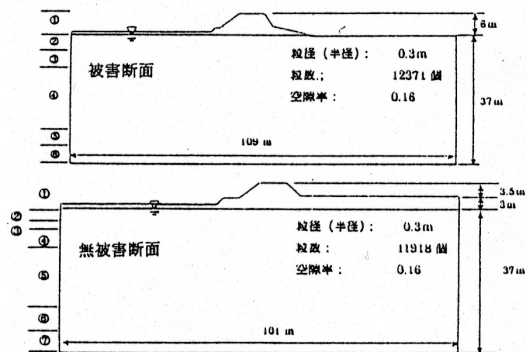


Fig.4 解析モデル (淀川堤防)

4. 淀川堤防を対象とした液状化解析

Fig.4 に示した条件で、淀川堤防を対象とした被害断面と無被害断面を用いた液状化解析を行った。上図が兵庫県南部地震時で最大約 3m 沈下した被害断面を想定したモデル、下図が高水敷を伴っている無被害断面を想定したモデルであり、文献 6)7)8)を参考にして断面条件を決定した。Table-2 に地盤区分条件ならびに解析条件を示すが、主な地盤区分の違いは無被害断面で液状化層と考えられる沖積砂質土層（約 10m）内に、層厚 2m 程度の沖積粘土層が存在していることと、堤内地側に小段が設置されている点にある。入力波形は被害地点から比較的近い場所（高見フローラル超高層住宅）で、G.L.-30m の基礎杭先端部分で測定された観測波形（E+F）である。作用させる震動時間は 25 秒間とし、最大加速度は 137.63gal で、卓越周波数は 0.5Hz 程度である。Fig.5 には、25 秒時における堤防の変形状態を示した。被害断面では堤外地側の堤防天端で約 2.5m 程度沈下し、堤体自身は堤外地側へ全体的に変形している。無被害断面では被害断面の半分程度の沈下量を示しているが、逆に堤体自身は堤内地側へ変形する傾向が表れている。また、無被害断面での過剰間隙水圧の発生領域は、被害断面に比べて狭くなった。

Table-2 解析条件 (淀川堤防)

被害断面							
No	層厚 (m)	物性名	γ_t (kN/m ³)	G_0 (kPa)	K (kPa)	α	β
①	6	盛土	17.7	38318	101946	-	-
②	5	沖積砂質土層	18.6	57712	153556	0.28	0.60
③	5	沖積砂質土層	19.1	82796	221293	0.40	0.70
④	17	沖積粘土層	16.2	34090	90708	-	-
⑤	5	沖積砂質土層	19.1	118613	315398	0.42	0.80
⑥	5	沖積粘土層	17.7	72221	192158	-	-
無被害断面							
No	層厚 (m)	物性名	γ_t (kN/m ³)	G_0 (kPa)	K (kPa)	α	β
①	6	盛土	17.7	39623	106880	-	-
②	3	沖積砂質土層	18.6	56162	149436	0.13	0.60
③	2	沖積粘土層	16.2	19787	52640	-	-
④	5	沖積砂質土層	19.1	82983	221794	0.42	0.70
⑤	15	沖積粘土層	16.2	33285	88565	-	-
⑥	7	沖積砂質土層	19.1	117524	312694	0.42	0.80
⑦	5	沖積粘土層	17.7	73428	195366	-	-

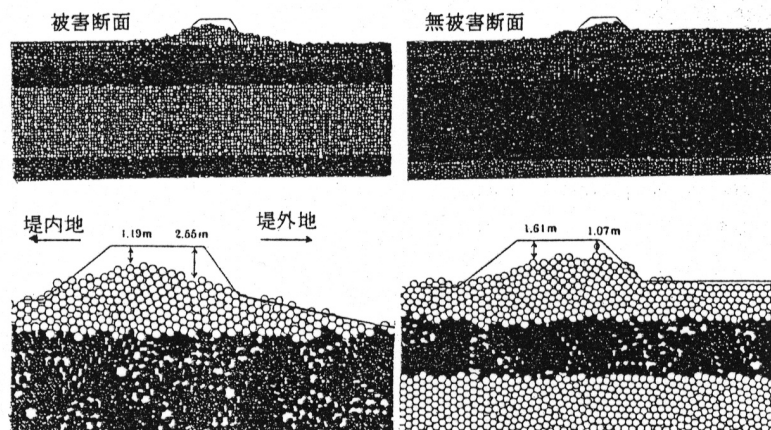


Fig.5 淀川堤防の変形状態 (全体図と拡大図)

5. まとめ

過剰間隙水圧の発生量を考慮することができ粒状態個別要素法を用いて、液状化条件での繰返しせん断試験を再現した結果、想定した試験結果を比較적으로よく再現できた。実地盤モデルでの淀川堤防を対象とした被害断面と無被害断面を用いた液状化解析では、被害断面を対象とした天端の最大沈下量が約 2.5m、無被害断面ではその半分程度となった。また、無被害断面での過剰間隙水圧の発生領域は、被害断面に比べて狭くなった。

6. 参考文献

1)山田恭央 (1992): 土の変形・強度特性—基礎理論を中心として—, わかりやすい土質力学原論 [第 1 回改訂版], 土質工学会, pp.1-pp.50. 2)Igarashi, S. and Meguro, K. (1990): Analysis of permanent ground deformation due to liquefaction with distinct element model, Proc. of JSCE, No.III-14 (Geotechnical Eng.), pp.271-pp.281. 3)Ravichandran, N. and Meguro, K. (2000): Simulation of liquefaction phenomenon at microscopic level using 3-D distinct element method, 土木学会第 55 回年次学術講演会, III-B376.

4) 竿本英貴・西岡隆 (2000): 流体の基礎方程式を考慮した個別要素法による液状化解析, 土木学会第 55 回年次学術講演会, III-B377. 5) 小川好・森洋・草野郁・Bercin, A.N.・曹国強・亀岡裕行 (2000): 個別要素法による盛土堤防の側方流動解析, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.1637-1638. 6) Matsuo, O. (1996): Damage of river dikes, Special Issue of Soils and Foundations, pp.235-240. 7) 松尾修・岡村未対・島津多賀夫・西邦夫 (1998): 地盤液状化問題における弾塑性有限要素解析法の適用, 土木技術資料 40-8, pp.50-55. 8) 浦野和彦・三原正哉・足立有史・渦岡良介 (1999): 液状化時の盛土沈下量に及ぼす地震動の影響に関する一検討, 第 25 回地震工学発表会講演論文集, pp.425-427.