

(11) C E Mによる地盤解析に関する考察

近 畿 大 学 久武勝保
(株) 地崎工業 村上敏夫

Considerations on CEM analysis to evaluate ground behavior

M. Hisatake Kinki University
T. Murakami Chizaki-Kogyo Co., Ltd

Abstract

In order to make clear the possibility of the new analytical approach CEM (Contact Element Method), which has been proposed by the authors, some considerations are given on the analytical results of failure phenomena of (A): a solid bar due to its collision to v-shaped floor and (B): a slope which is subjected to vertical loading at the top of the slope. Through numerical simulation and a model test of the slope, good applicability of the method has been confirmed.

1. 諸 論

地盤を構成する粒子同士の接触・変形・結合・分離現象を微視的な視点から表現できれば、これにより地盤の巨視的な挙動も追跡できるとの認識から、著者らは、地盤の連続体挙動から滑り面発生後の挙動までを統一的に解析するCEM(Contact Element Method)を既に開発した^{1)~4)}。

本研究では、CEM要素間に導入する粘着力の値を変化させた場合について、解析対象材料の挙動がどのように変化するかを示すと共に、外力を受ける斜面の連続体的変形挙動から滑り面の発達による破壊挙動までを模型実験とCEM解析で比較し、本手法の地盤解析への可能性について検討した。

2. CEMの概要

CEM要素間で伝達される力は、要素間接触面での分布応力として表現されており、この分布応力を摩擦抵抗応力(以後、摩擦力)や粘着抵抗応力(以後、粘着力)に関して評価することより、要素同士の結合、すべり、分離現象が表現されている。すなわち、要素の相対的な運動と要素形状から接触面上の変位分布が求められるので、これから法線方向と接線方向の分布応力が決定され、分布応力を接触面上で積分する事より接線方向、法線方向の合力、及び合モーメントが算出されている。法線方向の分布応力が引張り応力となる場合には、粘着力からその限界値を定め、また接線方向の分布応力については、粘着力と摩擦力により限界値を設けている。また、CEMでは地盤の滑りや分離方向が要素形状によって既定されないために、無限の潜在滑り面を有するとして円形要素が採用されている。

3. 考 察

(1) 挙動に及ぼす粘着力の影響

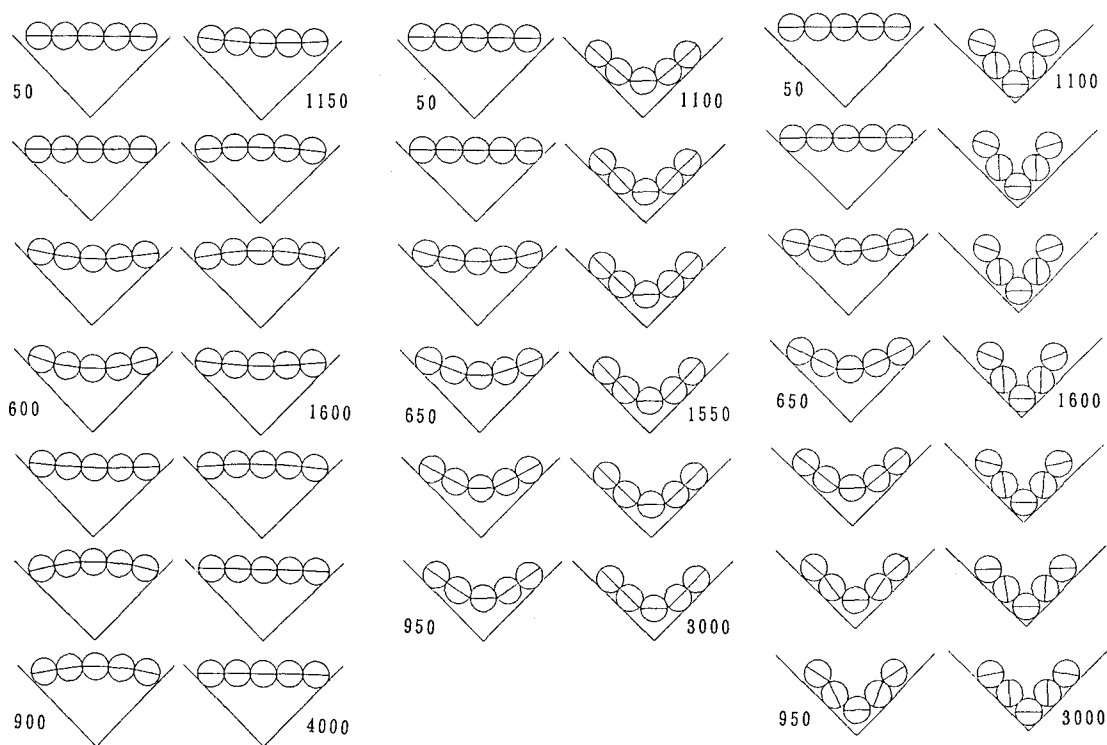
粘着力 c の値によって、解析対象材料がどのような挙動を示すかを明らかにするために、要素間に c を導入して5個の要素を棒状に結合させておき、それをV形の床に水平自由落下させるシミュレーションを行い、棒の弾性、塑性、破壊現象を検討してみた。

Table 1 に用いたパラメータの値を示す。ここに、 Δt 、 r 、 ρ 、 $\tan \phi$ はそれぞれ数値積分の時間間隔、要素半径、要素の密度、要素間の摩擦係数であり、また k 、 ζ は要素間に導入されているばね、ダッシュポットの並列力学モデルの単位面積あたりのばね定数と減衰定数である。添え字の n と s は法線方向と接線方向を示す。

Fig. 1 の Case A は要素を大きな粘着力で結合させた場合の結果である。図中の数字は落下開始からの時間ステップ

Table 1 使用パラメータの値

$\Delta t = 0.0001 \text{ sec}$, $r = 1.0 \text{ cm}$, $\rho = 2.50 \text{ g/cm}^3$			
Element to element		Wall to element	
kn	$5 \times 10^7 \text{ dyn/cm/cm}^2$	kn	$1 \times 10^8 \text{ dyn/cm/cm}^2$
ks	$1.25 \times 10^7 \text{ dyn/cm/cm}^2$	ks	$2.5 \times 10^7 \text{ dyn/cm/cm}^2$
ζn	0.5	ζn	0.2
ζs	0.5	ζs	0.2
$\tan \phi$	0.577	$\tan \phi$	0.157
Case A	$c = 1 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$	Case A	$c = 0$
Case B	$c = 3 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$	Case B	$c = 0$
Case C	$c = 1 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$	Case C	$c = 0$



(A) Case A の場合

(B) Case B の場合

(C) Case C の場合

Fig. 1 粘着力の値を変えた場合における床への衝突による棒の挙動

ブ数を示す。棒の端部が床に衝突すると棒の中央部は下方に撓む。しかし、最大撓みに達した後、撓みを減少させ、元の状態にもどる反力により棒は一旦上部に跳ね上がる。そして空中で自由振動をしながら再度床に衝突し、両端を接触した状態で振動しながら落ち着いている。この結果は弾性棒の衝突・跳ね上がり・自由振動挙動を表現しており、 c の値が大きい場合には材料に塑性や破壊現象は生じず、弾性的現象をCEMで表現できる事が分かる。

Fig. 1のCase Bは、 c の値をCase Aの場合と比較して小さくした場合の結果である。棒の両端が床に衝突するとその中央部は下方に撓むが、しかしCase Aの場合のように最大撓みに達した後撓みを減少させたり跳ね上がる事はない。中央要素は床に接触する事なく最大撓みに達した後動きが止まっている。この現象から、あたかも柔らかい粘土で作った様な棒の塑性変形現象をCEMで表現出来る事が理解できる。

Fig. 1のCase Cは、 c の値をさらに小さくした場合の結果である。棒の両端が床に衝突すると中央部は下方に大きく撓む為、中央要素はその両わきの要素（以後、内部要素という）と接触しつつも非結合状態に至る。また、両端の要素は内部要素の回転に伴ってこれと連続状態を保ちながら一旦床から持ち上げられるが、しかし内部要素の回転モーメントが大きい為、ついには両端要素は内部要素と非結合の状態に至る。この時中央要素は床に衝突するため、これは上部に跳ね上がろうとして内部要素に上向きの力を与え、また内部要素はこの上向き力をその上部にある両端要素伝える為に全要素は空中に跳ね上がり、その後床に落下して安定する。即ち、最終状態では棒を構成する全要素は非結合の状態になり、壊滅状態に至っている。

以上の解析から、粘着力の値を変化させる事により、材料の弾性的、塑性的挙動、及び当初連続体として挙動していた物体が分離、破壊する現象をCEMにより一貫して解析できる事が確認できる。

（２）斜面の破壊現象に関する模型実験とCEM解析

斜面上部への载荷による地盤の破壊現象を、貧配合モルタルを用いた模型実験とCEM解析の結果を定性的に比較してみた。

Photo. 1は実験で用いた模型斜面であり支持板からの地盤高さ16cm、幅40cm、奥行き5cm、である。载荷による地盤の変形特性を明らかにするために、地盤表面にはあらかじめ縦横に線を引いている。平面ひずみ状態を保持するために、地盤の前後面に硬質ガラスをセットし、斜面上部に载荷幅6cmで強制変位を与えて载荷した。

Photo. 2に载荷力がピークに達した時の地盤変状を示す。

次に、Table-2に示すパラメータを用いて模型斜面の挙動をCEM解析した。まず、解析領域内に乱数により4種類、600個の要素を発生・自由落下させた後、パッキングを行い、その際粘着力を導入する。次に、不要な領域の要素を消去して、斜面を作成する。斜面上部への载荷は、1.0cm/secの速度で変位を与えた。Fig. 2に要素中心点の

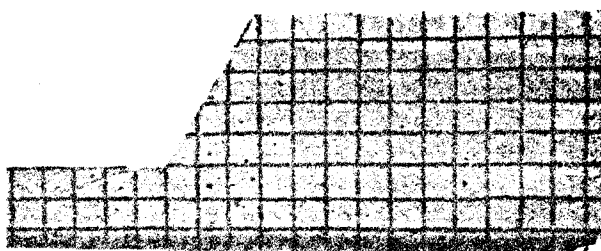


Photo. 1 初期状態の模型地盤

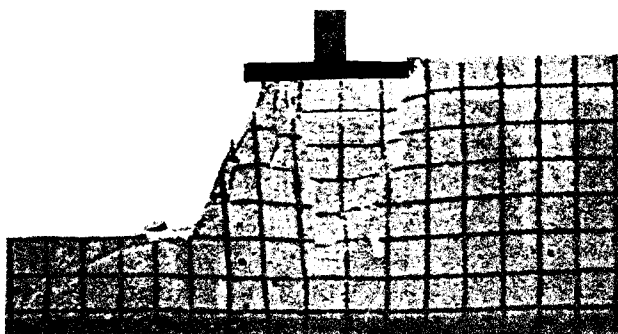


Photo. 2 载荷終了時の模型地盤

Table 2 解析で用いたパラメターの値

		要素と要素	要素と壁
法線方向の剛性定数	K_n (dyn/cm/cm ²)	1.00×10^7	2.00×10^7
減衰係数	ζ_n	1.00	1.00
接線方向の剛性定数	K_t (dyn/cm/cm ²)	0.25×10^7	0.50×10^7
減衰係数	ζ_t	1.00	1.00
摩擦係数	μ	0.839	0.839
粘着力	c (dyn/cm/cm)	1.00×10^4	1.00×10^5
時間間隔	Δt (sec)	40×10^{-6}	
要素の密度	ρ (gr/cm ³)	2.5	

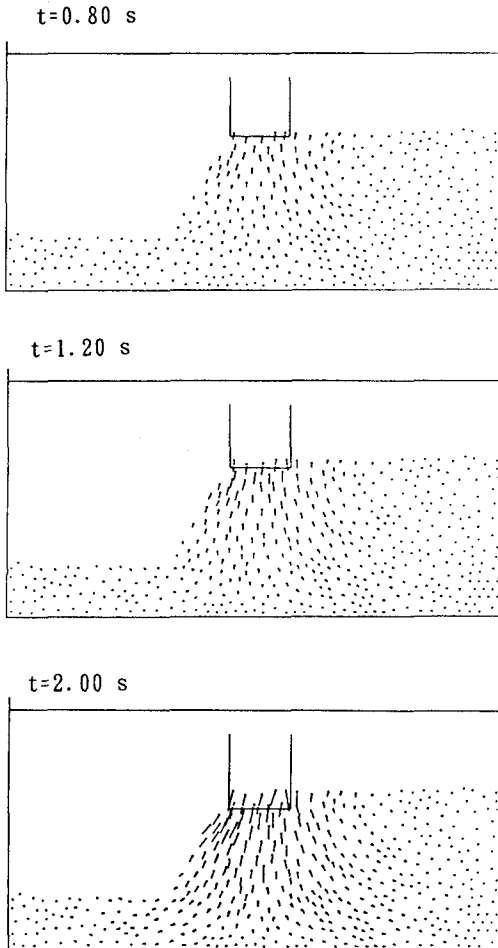


Fig. 2 地盤の変位ベクトル

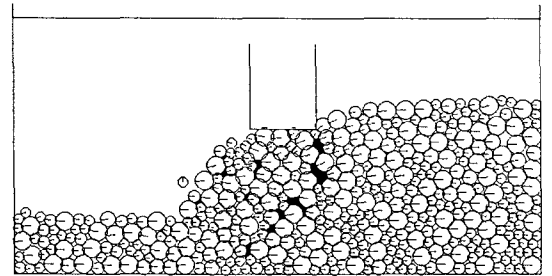


Fig. 3 要素分離（黒塗り）状況

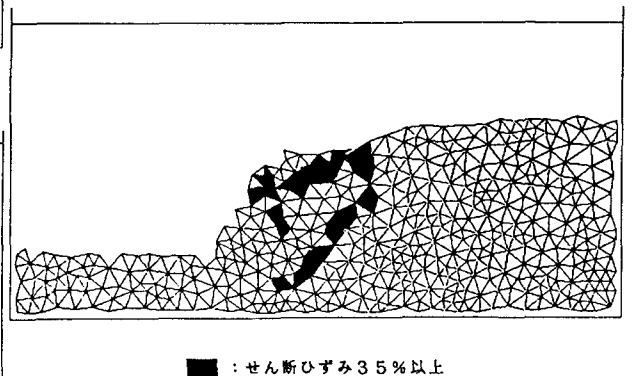


Fig. 4 地盤のせん断ひずみ

変位ベクトルを示す。なお、時間は載荷時刻からのものである。これより、載荷により地盤は当初ほぼ鉛直方向に変位していたが、載荷が進むに従って載荷面下方から左右方向に、特に斜面側方向に膨らむ挙動を呈しているのが理解できる。F i g . 3 には載荷力がピークに達した時において、地盤に発生している要素分離領域を黒く塗りつぶして示した。ただし、本解析で用いた粘着力などの値は、模型地盤の力学特性に対応する様、確固たる手法によって決定したものではないので、載荷力がピークに達したときの強制変位量は実験と解析で異なっている。また F i g . 4 は C E M 解析結果から得られた要素中心座標を結んで作成した三角形領域の最大せん断ひずみを表現したものである。F i g . 3 に示した要素分離領域は F i g . 4 の 3 5 % 以上のせん断ひずみ領域とほぼ対応しており、更にこれらの解析結果は P h o t o . 2 の実験結果から読み取れる滑り面の位置とよい対応関係を示している。本解析では前述のように、入力パラメータの値を客観的な手法によって決定していないので、実験結果と解析結果の定量的な比較は当然出来ないが、しかし地盤が連続体的特性を保持している状態から、滑り面が発生した後の挙動までを C E M により一貫して解析できる事が模型実験結果との比較から確認出来た。

4. 結 論

- 1) C E M 要素を結合して作成した棒の水平自由落下現象をシミュレートする事より、導入粘着力の値により弾性的、塑性的挙動と共に、当初連続体として挙動していた棒が分離・破壊する挙動までを一貫して C E M で解析できる事が確認できた。
- 2) 斜面上部に載荷する事による地盤の変形、破壊現象について、模型実験と C E M 解析の結果を比較する事より、地盤が連続体的特性を保持している状態から、滑り面が発生した後の挙動までを C E M により一貫して解析できる事が確認できた。

なお、本 C E M に含まれるパラメータを一軸圧縮試験結果から決定する手法⁵⁾や、積分時間間隔 Δt と含まれるパラメータとの関係⁶⁾については既に明らかにしているので、今後はこれらの成果を生かしてトンネル、斜面などの地盤挙動を定量的に予測して行く予定である。

参考文献

- 1) 久武勝保・村上敏夫：個別要素法の地盤工学適用に関する二、三の考察、日本応用地質学会平成2年度研究発表会講演論文集、pp.105-108, 1990.
- 2) 久武勝保・村上敏夫：粘着力を考慮した個別要素法の開発、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、第三部、pp.902-903, 1990.
- 3) 久武・村上・森：C E M による連続体・不連続体の統一解析の試み、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.286-290, 1992.
- 4) 久武・中野・久保・松山：C E M による斜面の連続体・不連続体統一解析、土木学会第47回年次学術講演概要集、第三部、pp.850-851, 1992.
- 5) 久武・村上・森：C E M における定数決定、第27回土質工学研究発表会、pp.1387-1388, 1992.
- 6) 村上敏夫・久武勝保：C E M におけるパラメータと積分時間間隔の関係についての考察、土木学会第47回年次学術講演概要集、第三部、pp.556-557, 1992.