

離散剛要素法における岩の衝撃特性について(2)

藤村 尚*・勝見 雅*・岩成 敬介*・田中 敏彦*

* 土木工学科

(1984年8月2日受理)

Impact of Rock by Discrete Element Method (2)

by

Hisashi FUJIMURA*, Tadashi KATSUMI*, Keisuke IWANARI* and Toshihiko TANAKA*

* Department of Civil Engineering

(Received August 2, 1984)

A gravity flow of rock-like granular material may produce a large flow loading on a containing structure such as a bin, silo or bunker. We have made some modifications on the discrete element method (DEM) by P. A. Cundall (1971) and applied it to the gravity flow analysis.

In the present paper, material constant used to DEM is discussed. We have proposed that the normal stiffness K_n should be determined by the equation which is derived from the analytical solution of elastic contact of two cylinders. On the other hand, we carried out the impact test in which a repulsion of rock materials was measured. Consequently, the relationships between K_n and repulsion coefficient are made clear.

1. はじめに

不連続性岩盤における諸現象を解析するための種々の力学モデルは、各要素が互いに何らかの形で結合された固体の極限解析モデルであり、岩盤を連続体として解析を行ってきた。

最近になって岩盤を、ブロックの集合体とみなし、個々のブロックの運動方程式を解くことによって動力学的な破壊状態を解析する方法がカンドル (P. A. Cundall) によって考案された。[1]

著者らは、このカンドルの開発した離散剛要素法 (Distinct Element Method, 以下DEMと略す。) を応用し岩質粒状体の重力流動の数値解析 [2]、地下浅所のトンネル沈下モデルの2次元解析 [3] を行ない、多大の成果を得ている。この手法をより実用的な解析法として確立するためには、解の収束性・安定性を考慮した材料定数の決定法を確立する必要がある。

粒状体の場合、材料定数の決定に際し、粒子一つづつについて検討することは不可能であるために、

たとえば単純せん断試験等から、強度定数 c 、 ϕ を算出し、それから材料定数 k 、 η を検討する方法も考えられる [4]。一方、岩石のように粒径の大きいものを取り扱う場合、個体の挙動は自由落下実験を行うことにより容易に知ることができるので、この結果を踏まえて材料定数が検討できる。

以上のことから本報告は、まず前報 [5] にひき続き、DEM解析の収束性・安定性について記述する。つぎに岩石の自由落下実験を実施し、得られた結果とDEM解析結果を比較検討して、DEM解析に用いる材料定数の決定法について述べる。

2. 一球自由落下運動

弾性理論と運動方程式の減衰特性による材料定数と時間増分の決定法については、前報に詳述したので、ここでは省略する。

差分法における解の収束性・安定性を明確にするためには、材料定数の検討が必要である。ここでは砂試料と岩石試料の2種類を想定して要素半径 $R = 0.5 \text{ cm}$, 1.0 cm 、密度 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 、

Table 1 Values of K_n , η_n and Δt dependent on E

$R(\text{cm})$	ν	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$E(\text{kg/cm}^2)$	750	6.5×10^5	8.0×10^5	1.0×10^6
0.5	0.30	2.65	$K_n/\rho g(\text{cm})$	3.84×10^4	2.17×10^7	2.65×10^7	3.27×10^7
			$\eta_n/\rho g(\text{cm/s})$	1.11×10	2.64×10^2	2.91×10^2	3.24×10^2
			$\Delta t(\text{s}) <$	2.89×10^{-4}	1.21×10^{-5}	1.10×10^{-5}	9.90×10^{-6}
1.0		2.09	$K_n/\rho g(\text{cm})$	3.64×10^4	2.10×10^7	2.56×10^7	3.16×10^7
			$\eta_n/\rho g(\text{cm/s})$	2.16×10	5.19×10^2	5.72×10^2	6.37×10^2
			$\Delta t(\text{s}) <$	5.93×10^{-4}	2.47×10^{-5}	2.24×10^{-5}	2.01×10^{-5}
0.24	2.65	$K_n/\rho g(\text{cm})$	4.62×10^4	2.66×10^7	3.24×10^7	4.01×10^7	
		$\eta_n/\rho g(\text{cm/s})$	2.45×10	5.84×10^2	6.45×10^2	7.17×10^2	
		$\Delta t(\text{s}) <$	5.27×10^{-4}	7.02×10^{-5}	2.00×10^{-5}	1.79×10^{-5}	
0.24	2.65	$K_n/\rho g(\text{cm})$	3.52×10^4	2.03×10^7	2.47×10^7	3.06×10^7	
		$\eta_n/\rho g(\text{cm/s})$	2.13×10	5.15×10^2	5.63×10^2	6.26×10^2	
		$\Delta t(\text{s}) <$	6.03×10^{-4}	2.51×10^{-5}	2.28×10^{-5}	2.05×10^{-5}	

2.09 gf/cm³, ポアソン比 $\nu = 0.3 \sim 0.24$, 線荷重 $q = 30 \text{ gf/cm}$ を用いて、種々のヤング率 E (kgf/cm²) に対する方

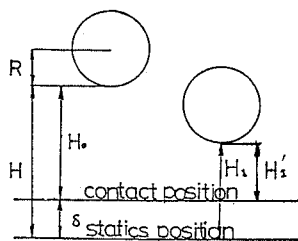


Fig. 1 Element position

線方向の定数 $Kn / \rho g$, $\eta_n / \rho g$, および Δt を Table I に示す。なお、線荷重 $q = 30 \text{ gf/cm}$ は密度 $\rho = 2.65 \text{ gf/cm}^3$, $R = 1.0 \text{ cm}$ の要素約 3.6 個分の線荷重である。この結果から E が增大すると $Kn / \rho g$, $\eta_n / \rho g$ も増大しているのがわかる。それとともに時間増分 Δt も小さくする必要があるのが知れる。また半径が大きくなると Kn は減少し、 η_n は増大する。密度 ρ が大きくなると $Kn / \rho g$, $\eta_n / \rho g$ は小さくなる。それとともに Δt は、大きくとれる。ポアソン比 $\nu = 0.3 \sim 0.24$ の大きさでは、 $Kn / \rho g$, $\eta_n / \rho g$, Δt の値にほとんど変化が見られない。

要素をある一定の高さ H (cm) から自由落下させた場合について、種々の材料定数、特に、ヤング率の大きさに注目し、要素が静止状態に到るまでの挙動について述べる。要素の初期高さは、Fig. 1 のように設定する。 H は要素の最下部から下盤までの距離 H_c と要素の質量に相当する沈下量 δ の和である。同様に H_1 もピーク時の下盤からの高さ H'_1 とすると $H_c = H'_1 + \delta$ である。

Fig. 2 は、落下高さ H と反発係数 e の関係を示す。要素の剛性定数 K

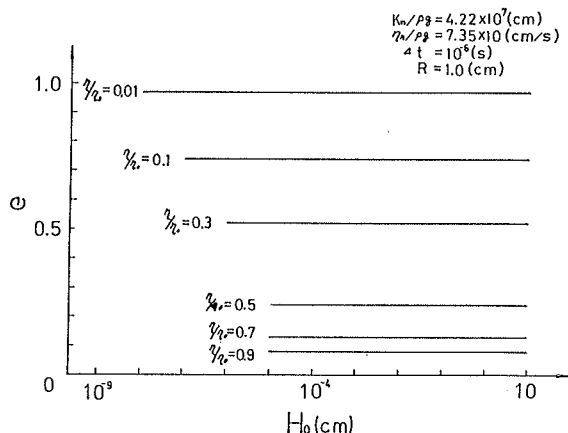


Fig. 2 Relationships between fall distance and Repulsion

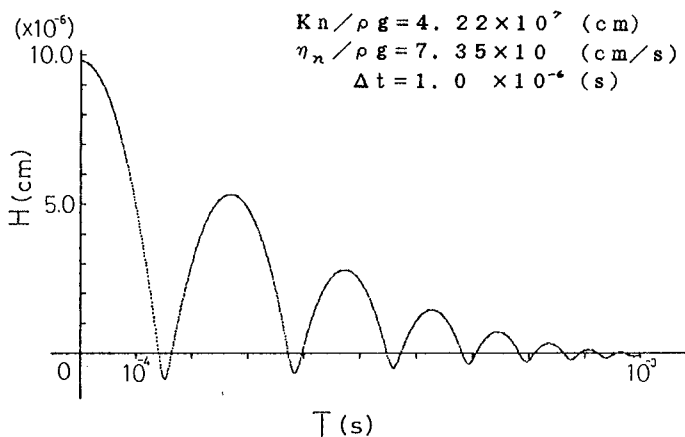


Fig. 3 Damped oscillation of element

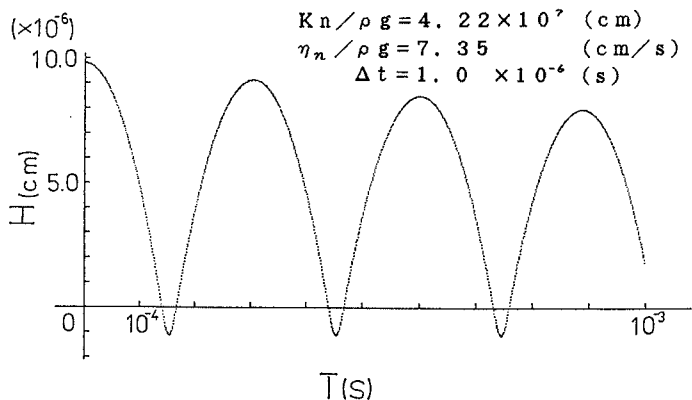


Fig. 4 Damped oscillation of element

は、鳥取産の花崗岩のヤング率 $E = 650,000 \text{ kg/cm}^2$ から算出した $Kn/\rho g = 4.22 \times 10 \text{ (cm)}$ 、粘性定数 η_n は Table 1 に示した値 η_n を 0.1 倍、0.01 倍したものをを用いた。要素半径 $R = 1 \text{ cm}$ 、 Δt は、一部を除いて $\Delta t = 10^{-6} \text{ (s)}$ とした。同図において直線の左端は要素の最下端部が接触点 (contact position) より上に出なくなった時であり、そこで計算を打ち切っている。なお粘性定数比 η/η_0 は通減率を表わしている。ここに η は粘性定数の推奨値である。この結果から e は H_0 に関係なく一定の値をとること、 η/η_0 の増加とともに e は小さくなるのがわかる。Figs. 3, 4 はこれらの数値を使用したときの要素の挙動であり、横軸に経過時間 T 、縦軸に要素の高さ H を示す。反発係数は $e = \sqrt{H_1/H}$ によって求める。粘性定数 η を $\eta < 1$ と小さくすることによって反発係数 e は大きくなり収束時間が大きくなるのがわかる。

つぎに、これまで粒状体の解析に用いてきた極めて小さいヤング率、 $E = 750 \text{ kgf/cm}^2$ の場合について検討する。 $Kn = 7.28 \times 10^4 \text{ (cm)}$ 、 $\eta = \eta_0/10$ 、 $\Delta t = 10^{-6} \text{ (s)}$ 、 $H = 9.8 \times 10^{-4} \text{ (cm)}$ 、とした要素挙動を Figs. 5, 6 に示す。なお両方の図において T の増加に伴い下盤に要素がめり込む量は、小さくなるはずであるが 3 回目の方が 2 回目よりめり込み量は大きくなり、 Δt の大きさに問題が残っている。ヤング率の大きさが極端に異なる Fig. 4 と Fig. 6 において H が同一レベルではないが、 E が大きくなると多大の時間ステップ数が必要になることがわかる。

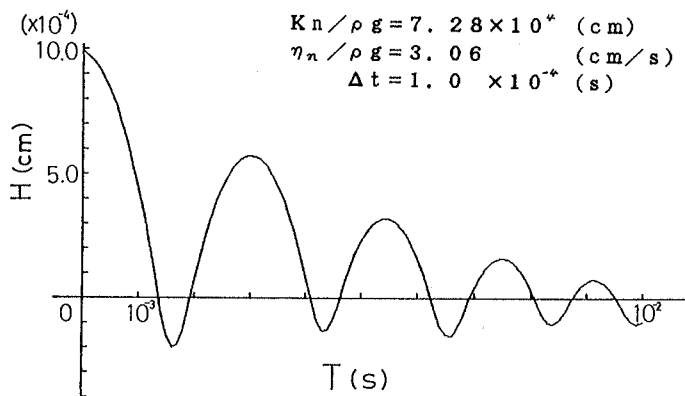


Fig. 5 Damped oscillation of element

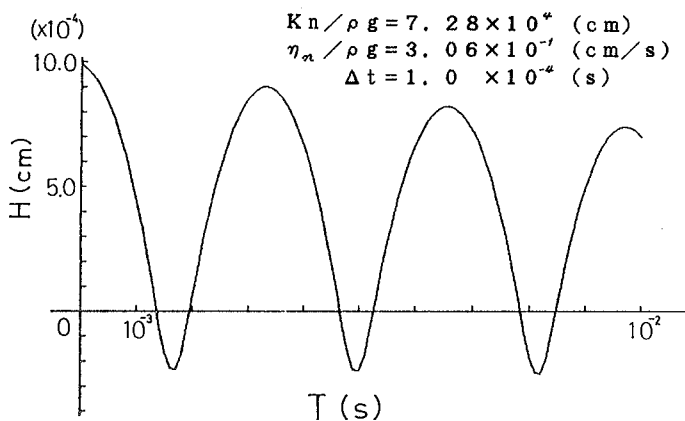


Fig. 6 Damped oscillation of element

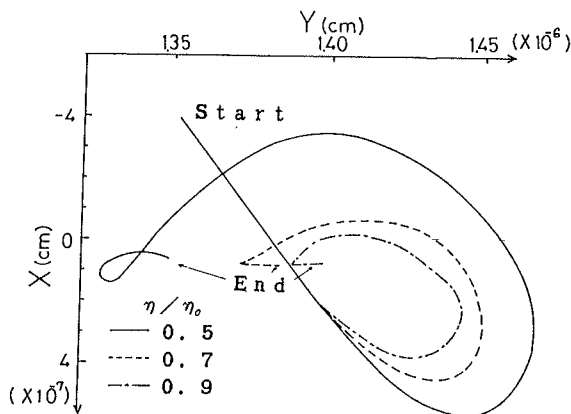


Fig. 7 Element motion occurred by rotation and body force

これまで、要素は鉛直下向きの自由落下について述べてきた (Fig. 6)。Fig. 7では $Kn/\rho g = 4.22 \times 10^7$ (cm), $\Delta t = 10^{-6}$ (s), $H_0 = 9.8 \times 10^6$ (cm) (Fig. 4と同一条件とする)に加えて水平方向に初速度 $V = 9.8 \times 10^{-3}$ (cm/s)を与えた時の要素の挙動を示す。要素は、図に示すような垂直・水平方向に移動しつつ静止状態に至る。粘性定数の値が小さいほど収束が遅いことは、前述の鉛直挙動のみ $V = 0$ の場合と同一の傾向である。

3. 自由落下実験

ここでは、自由落下装置を試作し、岩石試料に対する実験を行った。この実験を通して、試料の種類、大きさ、落下高さ、物理的定数による反発係数の相

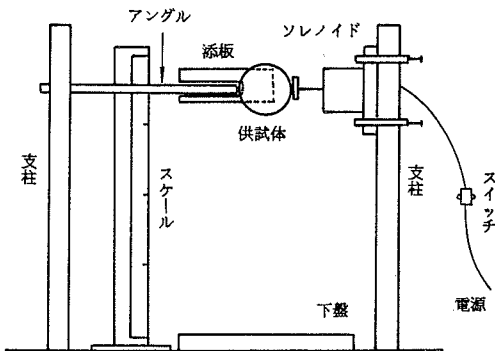


Fig. 8 Impact apparatus

違について調べる。

3.1 実験装置および試料

自由落下実験の試料保持機構は、ソレノイドを使用し岩石試料を両側から挟んで保持した (Fig. 8)。実験方法は、所期の高さ h (cm) から試料を下盤に自由落下させる。この運動状態は、写真解析を用いて

試料の軌跡を求め初期高さ h_0 と反発に続く跳ね反り最高点の高さ h から反発係数 $e = \sqrt{h/h_0}$ が算出できる。実験に供した試料は、円盤状で、岩石の物理的性質はTable IIに示す。また、下盤の物理的性質はTable IIIに示す。岩石試料のポアソン比は、どの試料もほぼ同じ値であるが、静弾性係数は、石英閃緑岩、安山質凝灰岩(2)が大きく圧碎閃緑岩は小さい。一軸圧縮強度についても頁岩、圧碎閃緑岩、石英ひん岩は他の試料に比べて小さい。安山質凝灰岩(1), (2)、花崗岩は、他の同種に比べ静弾性係数、一軸圧縮強度が大きい値を示す [6]。試料の産地ならびに肉眼鑑定結果をTable IVに示す。

3.2 実験結果・考察

Fig. 9には、下盤に硬鋼盤を使用し、花崗岩と石英閃緑岩を直径 $\phi = 3$ cm, 5 cmとした時の落下高さ h cmと反発係数 e の関係を示す。同図から、花崗岩は h が高くなると、 e が小さくなるが、

Table III Properties of base plate materials

Name	Hard steel	Soft steel	Granite	Andesite tuff (2)	Mortar
ρ (gf/cm ³)	7.84	7.67	2.65	2.95	2.02
E_s (kgf/cm ²)	2.10×10^6	2.10×10^6	6.45×10^5	9.77×10^5	1.92×10^5
E_d (kgf/cm ²)	—	—	6.83×10^5	1.18×10^6	4.40×10^5
σ_c (kgf/cm ²)	$34 \times 10^3 \sim 46 \times 10^3$	—	2.06×10^3	2.94×10^3	4.90×10^3
Re	55.40	46.00	62.38	62.60	35.40

Table II General rock properties

Name	Granite	Quartz diorite	Andesite tuff (1)	Quartz Porphyrite	Diorite	Shale	Andesite tuff (2)
	○	●	△	▲	□	■	◎
ρ (gf/cm ³)	2.65	2.85	2.64	2.55	2.82	2.78	2.95
V	0.237	0.267	0.237	0.238	0.281	0.248	0.285
E_s (x10 ⁵) (kg/cm ²)	6.45	8.07	7.33	6.16	4.92	6.59	9.77
E_d (x10 ⁵) (kg/cm ²)	6.83	10.92	8.77	6.85	6.66	9.12	11.80
σ_c (x10 ³) (kg/cm ²)	2.06	2.85	1.87	1.31	1.12	1.35	2.94
Re	62.38	62.56	62.15	54.56	52.33	58.71	62.60

石英閃緑岩は、 e の値は等しいかもしくは大きくなる。このことに関連して、両試料の破砕量 C を調べることにした(Fig. 10)。ここに、 N は、落下回数、 C は元の試料重量 w g、 N 回後の重量 w' gとすると $C = (w - w') / w \times 100$ (%) で与えられる。落下高さを45cmとした花崗岩の C 値は石英閃緑岩のものに比べ大きい。このことから、試料の破砕量が大きいほど e は、小さくなるものと思われる。なお、両者の関係については今後、詳細に検討する必要がある。また、石英閃緑岩にわずかの差異が認められるものの直径が変化しても e の値にはほとんど影響を与えないことがわかった。

次に、種々の試料について落下実験を行ない、落下物または下盤の物性と e の関係について調べる。Fig. 11は、下盤の材料を落下させた試料と同種のものを用い、落下物の静弾性係数 $\bar{E}s$ と e の関係を示す。同図によると、 e は $\bar{E}s$ に影響されないものと思われる。

Fig. 12は、シュミットハンマーによる落下

Table IV The visual properties of rock

名称 (産地)	特性
1) 角閃石黒雲母花崗岩 (八頭郡用瀬)	内部に微妙なcruckが一定方向に発達
2) 石英閃緑岩 (八頭郡用瀬)	かんらん岩が比較的多く含まれている
3) 安山岩質凝灰岩 (1) (鳥取高路)	緑簾石のnetwork状の細脈が発達している部分がある
4) 石英ひん岩 (岩美郡福部村栗谷)	岩脈状の産状を示す岩石
5) 圧砕閃緑岩 (溝口町谷川)	圧砕された後再結晶の作用が進み固結内部構造として微細な歪みが多い
6) フリント状黒色頁岩 (国府町武庫)	花崗岩が貫いていて若干の接触熱変形作用をうけて再結晶の作用あり
7) 安山岩質凝灰岩 (2) (日南町生山)	再結晶してガラスなし

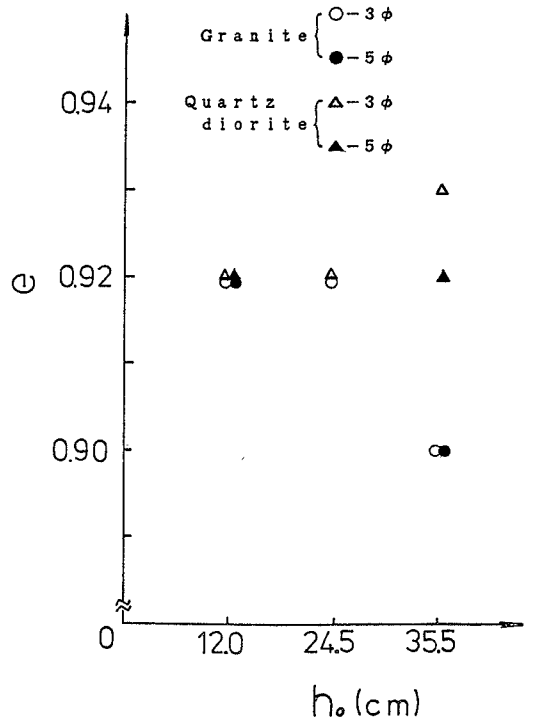


Fig. 9 Relationships between repulsion e and initial height h

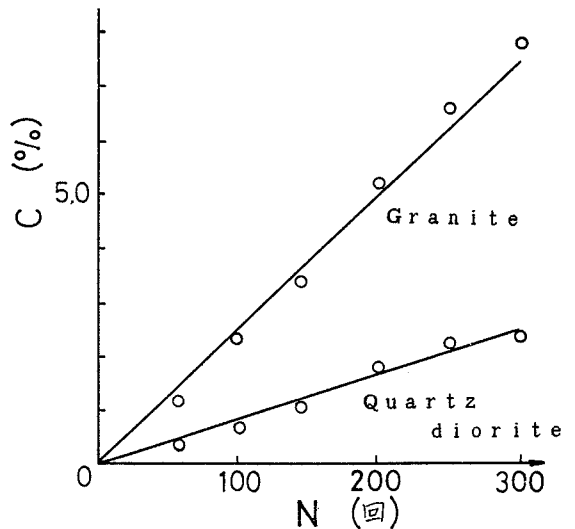


Fig. 10 Relationships between falling number and fracture

試料の反発硬度 (\overline{Re}) と e の関係を示す。また、Fig. 13 は、下盤材の反発硬度 (\underline{Re}) と e の関係を示す。 e は \underline{Re} よりも下盤材に著しく影響を受けること、 \overline{Re} の値が大きくなれば、 e も大きくなることわかる。両図の結果から、反発係数と反発硬度の関係は、 $e = a \cdot \overline{Re} + b \cdot \underline{Re} + d$ と表す。 a 、 b は Fig. 13、12 における $\overline{Re} - e$ 、 $\underline{Re} - e$ の傾きであり d は、実験定数である。各種材料の実験結果は、Fig. 14 に示す。同図から、 e と \overline{Re} 、 \underline{Re} の経験式は次式となる。

$$e = 2.0 \times 10^{-3} (2 \overline{Re} + \underline{Re}) + 0.58$$

式によると、 e は \overline{Re} より \underline{Re} に大きく依存していることがわかる。なお、この関係については今後多くの資料を集めて検討する必要がある。

4. DEM と反発係数

自由落下実験結果をもとに一球の自由落下運動に

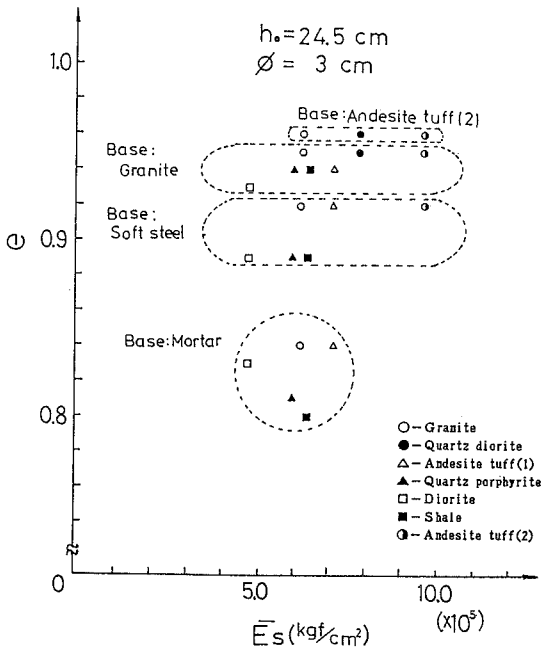


Fig. 11 Relationships between e and $\overline{E_s}$

ついてDEM解析を行う。2. 節では、要素の収束性について論じてきたが、ここでは、実験で得られた反発係数 e との対応に重点をおいて考察を進める。

自由落下運動のDEM解析として、要素半径 $R = 1.0 \text{ cm}$ 、 $Kn / \rho g = 4.22 \times 10^7 (\text{cm})$

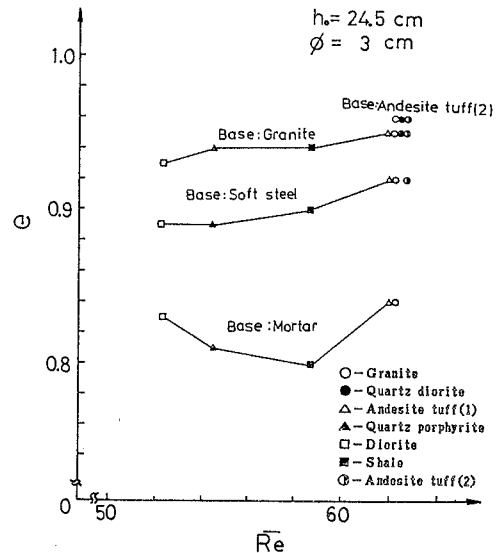


Fig. 12 Relationships between e and \underline{Re}

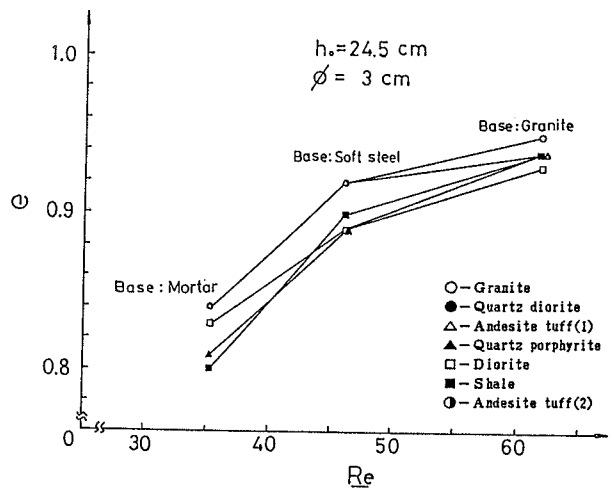


Fig. 13 Relationships between e and \underline{Re}

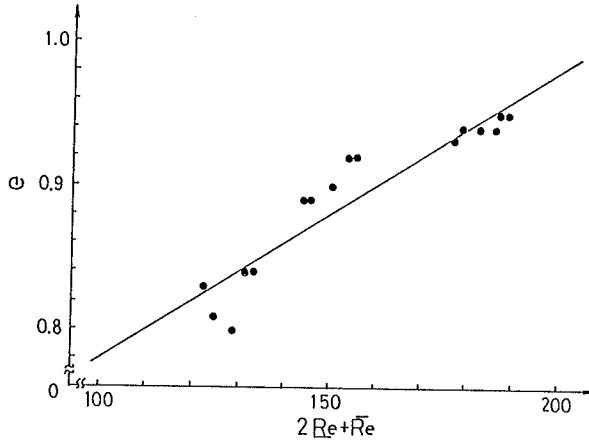


Fig. 14 Relationships between e and $(2\overline{Re} + \overline{Re})$

$\Delta t = 10^{-6}$ (s) として初期高さ $H_0 = 9.8 \times 10^{-6}$ (cm) から落下させた要素の反発係数 e と粘性定数比 η/η_0 の関係は、2. 節で述べたように粘性定数比が大きくなると e は小さくなることが知られている。一方、自由落下実験により $(2\overline{Re} + \overline{Re})$ と e との関係がみいだされた。これらの関係を用いて、任意の e に対する粘性定数比と $(2\overline{Re} + \overline{Re})$ の関係を Fig. 15 に示す。同図によれば粘性定数比と反発硬度は大いに関係があることがわかる。

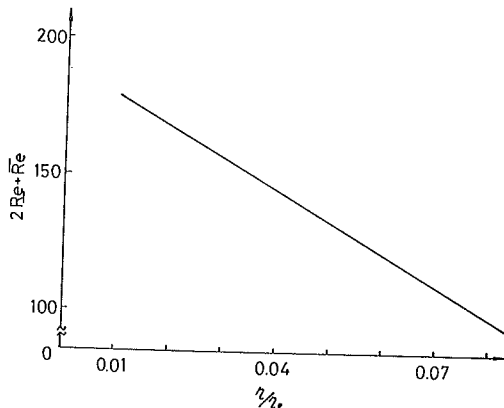


Fig. 15 Relationships between $(2\overline{Re} + \overline{Re})$ and η/η_0 .

5. 結 語

離散剛要素法 (DEM) 解析で用いられる剛性定数 k や粘性定数 η および時間増分 Δt を決定するための検討を行った。

まず剛性定数の決定に際して弾性接触理論による方法を採用し、DEMによる一球自由落下運動を解析した。つぎに岩石試料の自由落下実験を行い岩石の物理的性質と反発係数 e との関係求めた。最後にDEM解析と自由落下実験によって e を求め、 e を媒介として材料定数について検討した。要約すると以下のようなになる。

1) 現実の岩石試料のヤング率 E ならびにそれより極端に小さいヤング率を用いた一球自由落下のDEM解析が可能であることを示した。しかし、現実のヤング率を用いた解析では、要素の静止状態に至る時間ステップ数が多大であることがわかった。

2) 自由落下実験において、岩石試料の反発係数 e は $0.8 \sim 0.95$ 程度であり、落下試料、下盤材料の物性に影響を受ける。反発係数 e は、岩石試料の物理的性質のうち反発硬度 Re 値に関係するようである。本実験試料の場合反発係数は、

$$e = 2.0 \times 10^{-3} (2\overline{Re} + \overline{Re}) + 0.58$$

と表わされる。

3) DEM解析に用いた粘性定数比 η/η_0 と岩石試料の反発硬度は大いに関連していることがわかった。

なお本計算は、鳥取大学電子計算機センターの HITAC M-150 で行なった。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始御指導いただいた工学部海洋土木工学科 木山英郎教授、岩の肉眼鑑定については教育学部 吉谷昭彦教授に御指導を賜り深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

[1] Cundall, P. A. : A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol. 2 pp. 129~136, 1971.

[2] 木山 英郎・藤村 尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析、土木学会論文報告集、NO. 333, pp. 137~146, 1983.

[3] 藤村 尚・木山 英郎・西村 強：Cundallモデルによる地表沈下の解析

——地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下（その6）——, 第37回 土木学会年次学術講演会概要集、pp. 309~310, 1982.

[4] 西村 強・木山 英郎・藤村 尚：離散剛要素法による、 c , ϕ の算定と要素定数 K , η の検討、第18回 土質工学研究発表会 pp. 763~764, 1983.

[5] 藤村 尚・木山 英郎・勝見 雅・岩成敬介：離散剛要素法における岩の衝撃特性について 鳥取大学工学部研究報告、第14巻、第1号、pp. 207~216, 1983.

[6] 土木技術者のための岩盤力学、土木学会、pp. 2~9, 1975.