

建物および土砂崩壊のシミュレーション分析

伯野 元彦

1. はじめに

日本は、太平洋プレートとアジアプレートの接点に位置しているため地震・火山が多く、台風も毎年忘れずにやってくるといったように、いろいろな自然災害が多く発生する。これらの災害は、ほとんど構造物など何かが壊れて発生する。地震でどんなに揺れようと、構造物が壊れなければ災害は発生しない。電車にしるバスにしる揺れるときには強い地震より余計に揺れることだってあるのだが、われわれには、地震時に感じるような恐怖感はない。

それは、そのくらいの揺れでは壊れない、つまり災害とならないことを知っているからである。

地震時には、建物などは電車やバスより大きく重いため、より大きな地震力（慣性力）を受けることと、木、コンクリート、土というように、鋼に比べればはるかに強度の低い材料を使うため、電車、バスと同様な振動を受けても壊れてしまうことがある。それでは、ビルなど全部鋼で作ればよいではないかというご意見もあろう、確かに最近はその傾向があり、ビルの建設現場をご覧になっておわかりのように、鉄骨の骨組みを作り、その周囲に申し訳けのようにコンクリートを打ったり、プレハブのコンクリート板を張ったりする工法が多い。コンクリートを打つのは、火災時に直接火にあぶられて鋼が軟化するのを防ぐためである。

われわれ技術者は、災害を軽減しなければならないのだが、そのためには、破壊を少なくする必要がある。そのためには、破壊がどのようにして起こるのかを知らなければならない。われわれが、地震被害を調査する時、構造物が壊れてしまった結果から、その破壊の原因を想像するより仕方がなかった。破壊の過程がより詳しくわかればなおさらよいし、もし破壊過程のシミュレーションができれば、破壊防止のために非常に役立つ。われわれは拡張個別要素法（Extended Distinct Element

Method, EDEM)を開発し、いろいろな破壊シミュレーションに応用したので、報告申し上げる。

2. 連続体解析と不連続体解析

破壊または崩壊シミュレーションがなぜ最近までできなかったかといえば、満足すべき不連続体解析手法がなかったからである。ご存知のように、連続体解析は、固体解析にせよ流体解析にせよ、長い歴史があり洗練された理論がある。したがって、不連続体と思われるものの解析でも、近似的に連続体と見なして解析されるのが普通であって、しかも、立派な成果をあげてきた。たとえば、車とか人の交通流の問題は、近似的に圧縮性流体の解析手法で取り扱うことができた。しかしながら、取り扱えない問題も数多くある。たとえば、土石流で大きな岩塊が浮上する傾向のあること、またその結果、流れの先頭部分に集まり、破壊力を増すことなどは、従来、観測、実験では確かめられていたが、連続流体解析では、岩塊の大きさについての取扱いはできなかった。破壊とか崩壊は、構造に亀裂が入り、他の亀裂と合流し、要素がバラバラになるなどのように、要素が互いに離れてしまうという現象が入ってくる、ここが連続体と本質的に異なる点であって、不連続なのである。有限要素法など、ちょっと考えると不連続体も取り扱えるのではと思われるかもしれないが、各有限要素は隣の有限要素と辺と格子点を共有しているため離れることはできない。各有限要素が独立に辺と格子点をもっていれば、それは、それぞれ離れることができる。これは、Cundallの始めた個別要素法（Distinct Element Method, DEM）の一種である。ただ、これでは、連続体の上に適当に線を引いて独立要素を作ったものであるから、各要素が変位しようとしても、なかなか変位しづらい。また実際の土とかコンクリートなどの対応もつけにくい。Cundallはそこで円形要素を用いた。われわれは、さらに、コンクリートの砂利に相当するものを円形または球形要素にし、間隙を埋めているモルタルは法線方向とせん断方向の力を伝えるバネに置き換えて、全体として、有限要素法と同様なバネ・マス系とした。ただし、このバネは非

はくのもとひこ 東洋大学 工学部 土木工学科
〒350 川越市鯨井2100

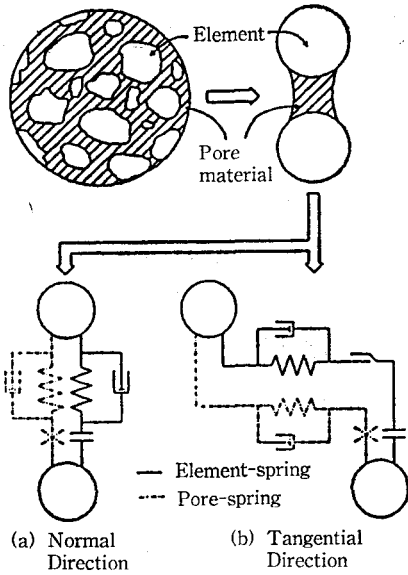


図1 コンクリートの間隙（モルタル）バネ

線形であって、ある程度以上の引張力が働けば、切れて要素が互いに離れることになるし、せん断方向にも摩擦力以上の力が働けば要素は滑るといった具合である。この要素の間隙を満たしている物質をバネで置き換えたということで、コンクリートや粘性土まで、応用範囲を広げることができたので、われわれは Cundall の個別要素法を拡張したと称しているのである。

3. 拡張個別要素法 (EDEM)

2.で述べたように、Cundall の始めた個別要素法では要素と要素が接触している時しか要素間に力は生じなかった。われわれは要素と要素の間の物質（土の場合には粘土とか水、コンクリートの場合にはモルタル）をバネ、ダッシュポット、スライダーに置き換えた(図1)。各要素の運動方程式は次のような通常の並進ならびに回転の運動方程式である。

$$m_i \ddot{U}_i + C_i \dot{U}_i + F_i = 0 \quad (1)$$

$$I_i \ddot{\Phi}_i + D_i \dot{\Phi}_i + M_i = 0 \quad (2)$$

ここに、 m_i は i 要素の質量、 U_i は並進変位ベクトル、 I_i は回転慣性、 Φ_i は回転角ベクトル、 F_i は i 要素に働く外力和、 M_i は i 要素に働くモーメント和、 C_i 、 D_i は減衰係数。

この方程式を時間に関して前進的に数値的に解いてゆけば、 U_i 、 Φ_i が求まる、といった簡単な方法である。

この方法によって、建物とか土石流のシミュレシヨ

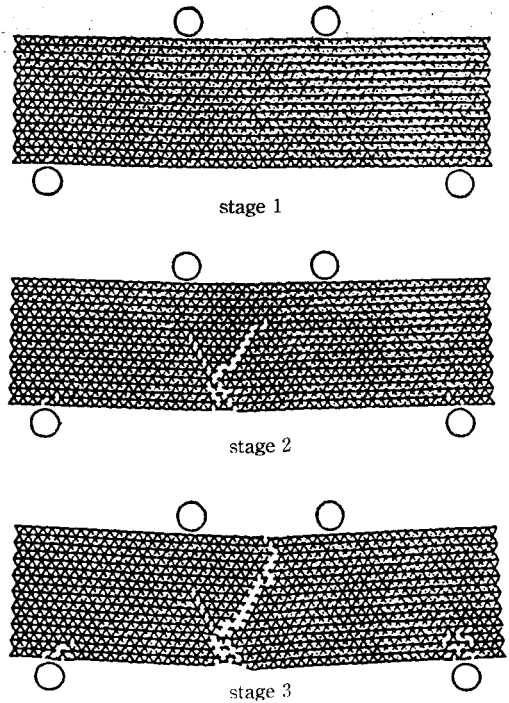


図2 無筋コンクリートの曲げ破壊

ンを行なったので報告させていただく。

4. シミュレーション結果

建物の部材の破壊を取り扱う時には、要素をかなり小さくして計算することができが、建物全体の崩壊を取り扱う時には、部材の時のように要素を小さくした場合には、要素数が膨大となって事実上シミュレーションの実行が不可能となってしまいます。そこで、応力分布の正確さなどは多少犠牲にしても全体としての崩壊過程を知りたい場合には、要素数を極力少なくした。

4.1 無筋はり模型の曲げ破壊試験シミュレーション

図2は、はり模型を水平に置いて、上から2点荷重で曲げ破壊を起こしたシミュレーション結果である。間隙物質のためのバネ（間隙バネ、コンクリートの場合はモルタルバネ）を図化する場合には、実際とは異なって、(実際には図1に示したように要素と要素の間に配置する)要素の中心間を結ぶ線分で示す。なお、図1に示したように、この間隙バネは、要素間に法線方向と接線方向の2個あるはずであるが、1本しか描かない。また、これが切れたり滑ったり壊れた場合、2本とも壊れた場合に図化しない。したがって、間隙バネ分布図の変化を見れば、どの部分が壊れたかを知ることができる。図にお

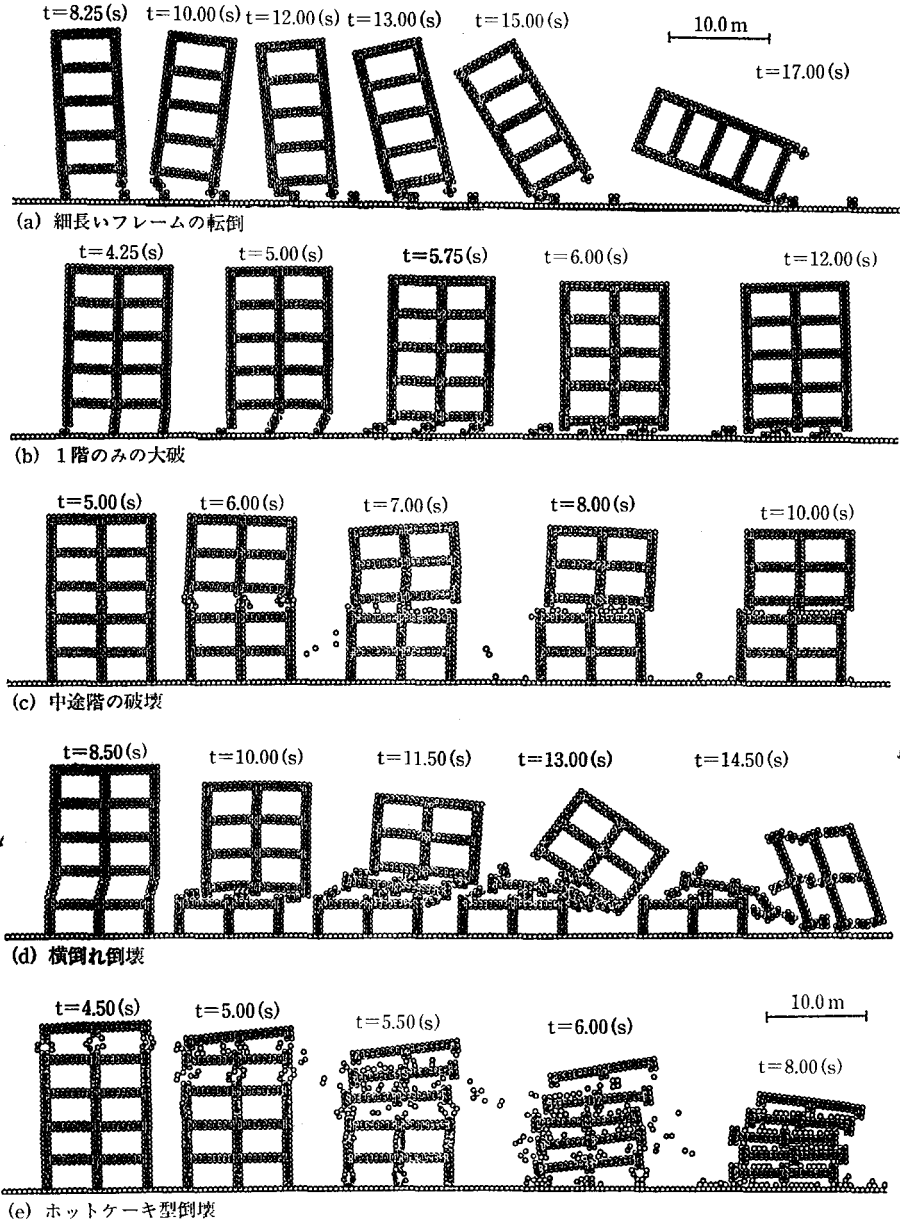


図 3 建物の 2 次元地震崩壊シミュレーション

いて、stage 1, 2, 3 と亀裂が進行していることがわかる。

4.2 建物の地震時崩壊シミュレーション

建物は 2 次元のフレームと仮定し、計算時間をなるべく少なくするため、柱とか梁の断面方向には 2 個の要素を配列するものとする。

図 3 は、2 次元建物フレームが、いろいろな強度をもっていて、異なった特性の地震動を受けた時、どのよう

な崩壊パターンを示すかについてのシミュレーション結果である。

図 3 (a) は細長いフレームの転倒型倒壊

図 3 (b) は、柱が十分強くて、応力が 1 階部分に集中するための被害。日本のビルは滅多に壊れないが、壊れてもこのタイプ。

図 3 (c) は中途階の柱が打継ぎなどのため弱い場合の被害。

図3(d)はある程度建物の強度が強く、地震動に共鳴するまで建物が耐え、結局横倒れ式に崩壊する場合。1990年フィリピン地震による Hyatt Hotel Tower の崩壊シミュレーション。

図3(e)は、柱の強度が上層階に行くに従っていちじるしく低下するフレームの地震による崩壊過程のシミュレーション。1985年メキシコ地震で多くみられたホットケーキ状崩壊に対応。

図4に、1層フレームの3次元崩壊シミュレーションを示す。

図5に、同じく3層フレームの3次元崩壊シミュレーションを示す。

4.3 土砂崩壊シミュレーション

図6(a)は、砂利のように、粘着力がなく摩擦のみの材料で崖の形を作り、支えをはずして崩した場合のシミュレーション。崩れた後の斜面勾配が摩擦角と一致するような直線的な斜面となる。

図6(b)は摩擦以外に粘着力をもっている粘性土のような材料でできた崖が、雨が降って摩擦力が低下した場合に起きる崩壊のシミュレーションである。崩壊斜面頭部は、切り立った地山が残っている。

図7は、図6のように土砂が崩壊した後も傾斜が続き、水分の補給もなされると土石流となるが、それが砂防ダムのような垂直な壁に衝突した時の挙動を知るためのシミュレーションである。海の波が防波堤にぶつかる時の挙動に似ている。

図8は土砂崩壊というより一種の地殻変動であるが、(a)図は地下から熱いマグマが地表面を押し広げて上昇する時の間隙パネ分布を示す。これにより、どこに破壊が生じるかがよくわかる。また(b)図は噴火爆発のシミュレーションを示す。

5. おわりに

以上のように、定性的にはあるが、破壊過程のシミュレーションが実行可能となった。今後は、計算機の高速度とともに要素数を増やすことができれば、応力状態などもより精密に評価することができるようになり、さらなる定量化につながってゆくのではないかと思う。

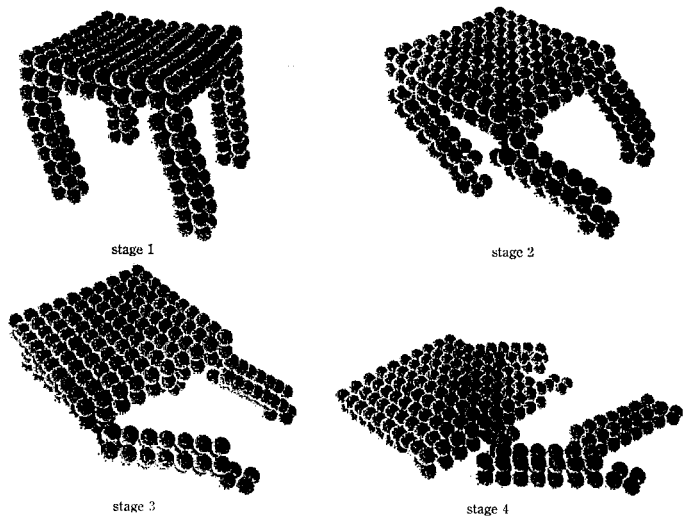


図4 1層フレームの3次元崩壊シミュレーション

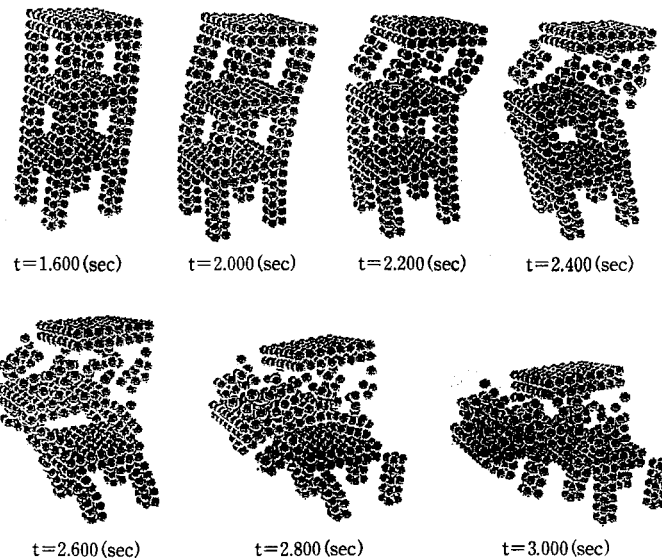
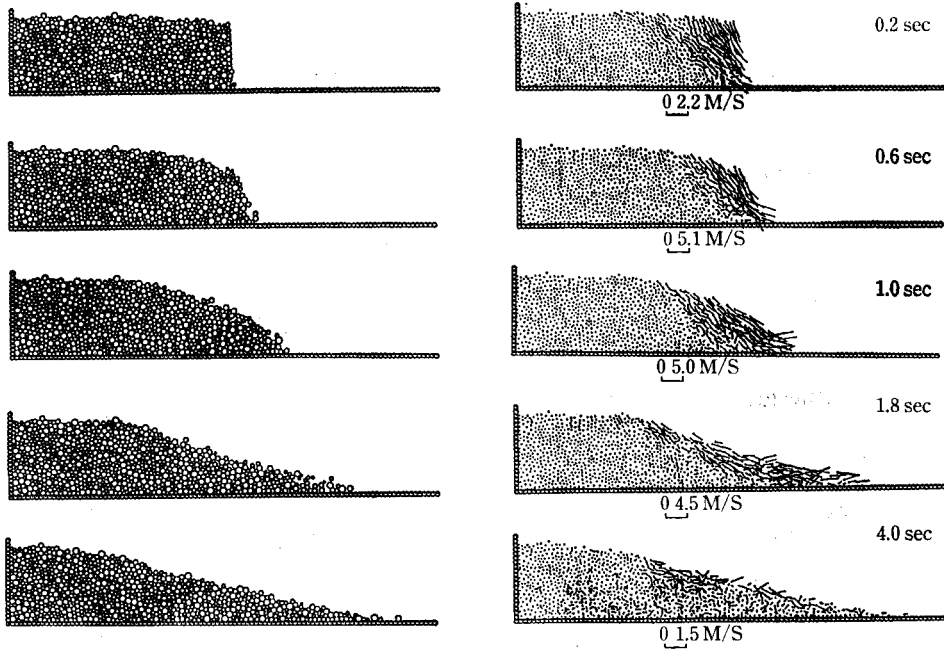


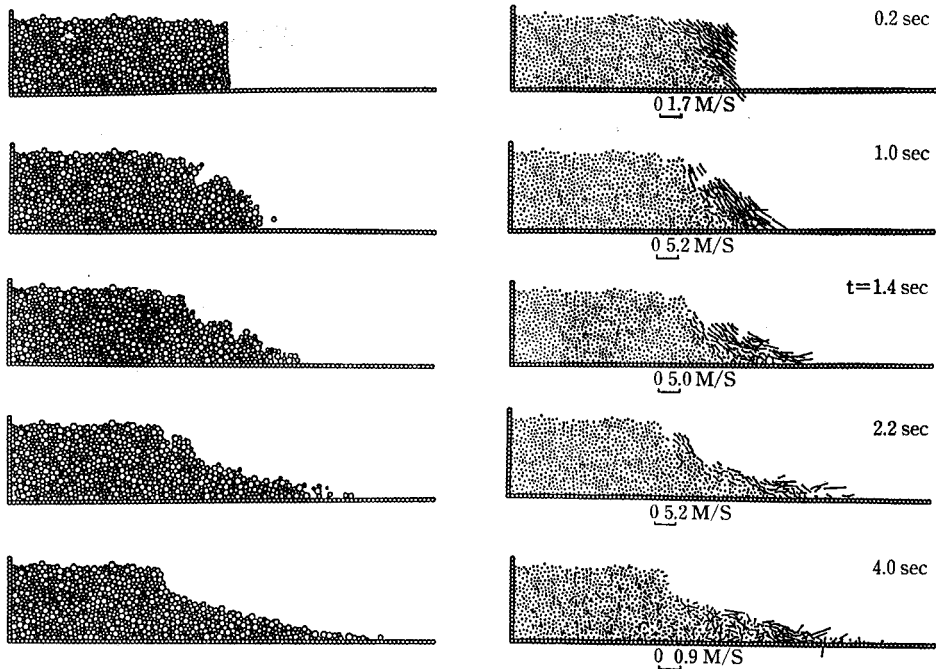
図5 3層フレームの3次元崩壊シミュレーション

参考文献

- [1] Mogami, T. (1965). A Statistical Approach to the Mechanics of Granular Materials, Soils and Foundations, Vol.5, No.2, pp.26-36.
- [2] Satake, M. (1981). On Distortion of Tensor and Yield Criteria of Granular Materials, Int. J. Engineering Science, Vol.19, No.12, pp.1643-1650.
- [3] Cundall, P. A. (1971). A Computer Model



(a) 砂利（摩擦のみ）の崩壊



(b) 土（粘性土）の崩壊

図 6 崖くずれシミュレーション

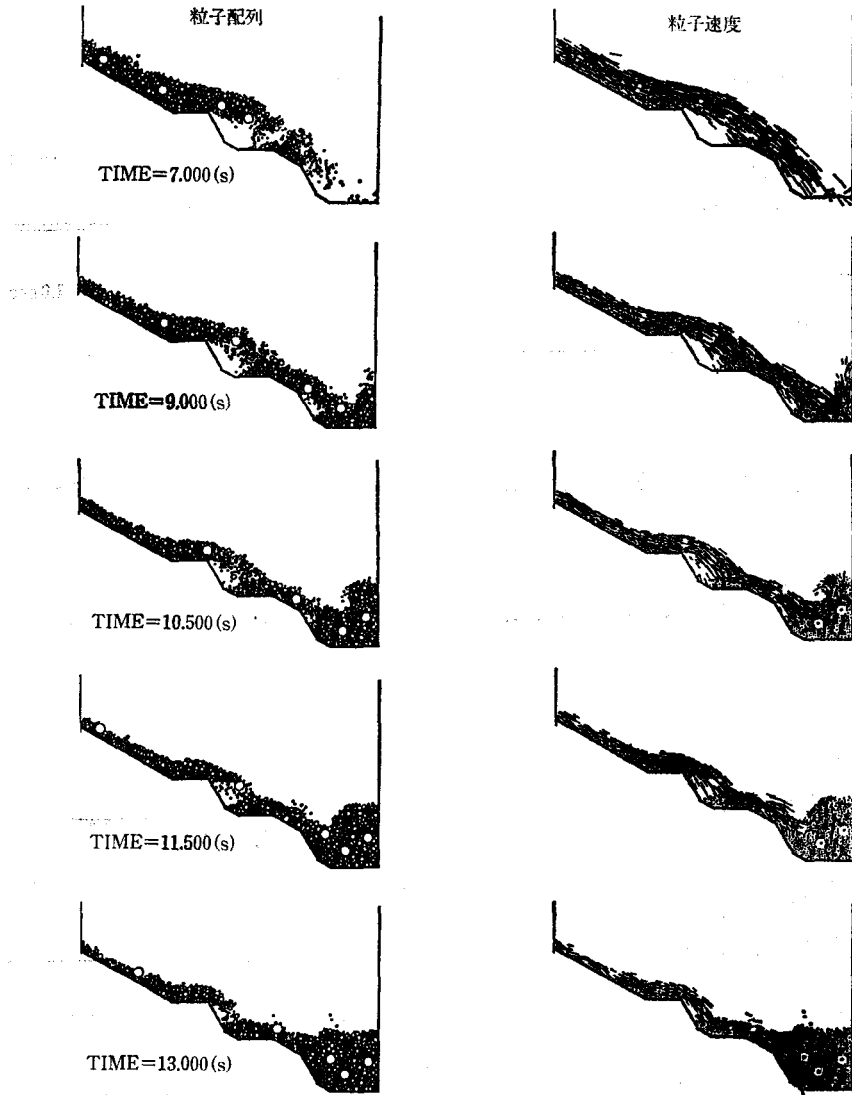


図 7 土石流の垂直壁への衝突

for Simulating Progressive, Large Scale Movement in Block Rock Systems, Symp. ISRM. Nancy, France, Proc.2, pp.129-136.

[4] Hakuno, M. and Hirao, T. (1973). A Trial Related to Random Packing of Particle Assemblies, Japan Society of Civil Engineers, Proc. of JSCE No.219, pp.55-63, (in Japanese).

[5] Cundall, P. A. and Stack, O. D. L. (1979). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.2, No.1, pp.47-65.

[6] Kiyama, H. and Fujimura, H. and Nishimura, T. (1982). On Analyzing Settlement of the Ground Surface Owing to Tunnel Excavation with Cundall's Model, Annual meeting of Japan Society of Civil Engineers, No.3, pp.309-310, (in Japanese).

[7] Uemura, D. and Hakuno, M. (1987). Granular Assembly Simulation with Cundall's Model for the Dynamic Collapse of a Structural Foundation, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.4, No.4, pp.155s-164s, Proc. Japan

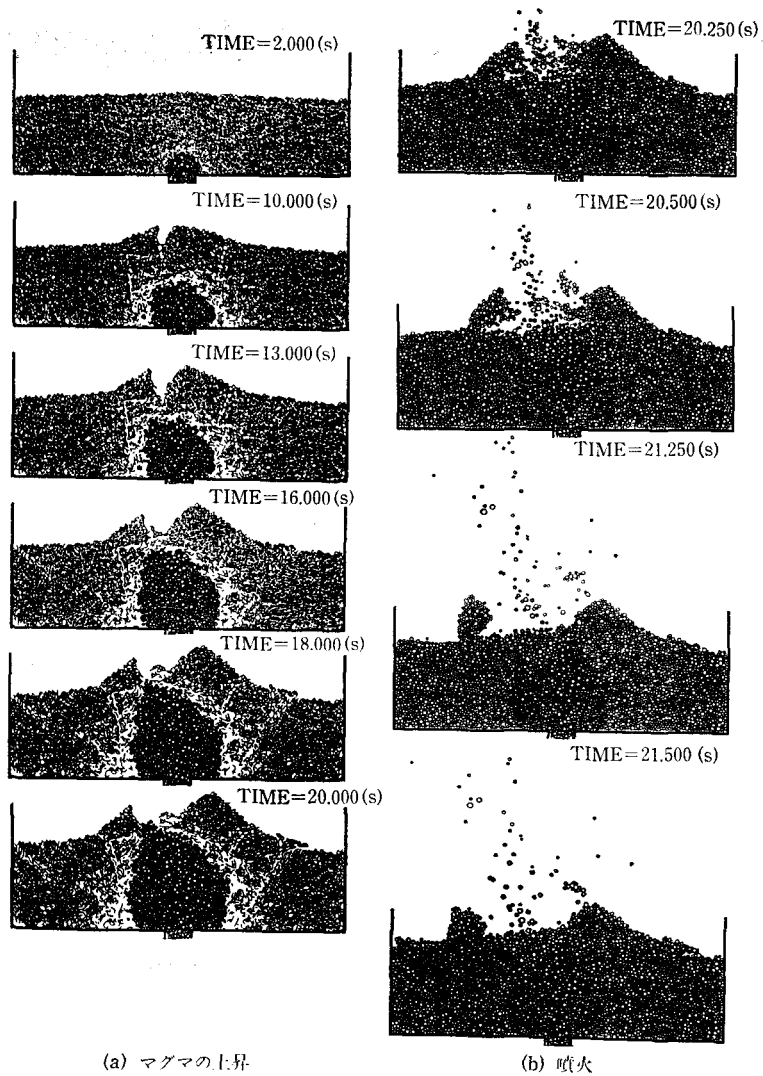


図 8 マグマの上昇と噴火

Society of Civil Engineers.

[8] Meguro, K. and Hakuno, M. (1989). Frac-
ture Analyses of Concrete Structures by the

Modified Distinct Element Method, Structural
Eng./Earthquake Eng., Vol.6, No.2, pp.283s-
294s, Proc. Japan Society of Civil Engineers.