

(63) 個別要素法による岩屑流・土石流の挙動解析

東大地震研究所 伯野 元彦、JR. 東海 内田 吉彦

1. はじめに

山地に強い地震が起った時、山崩れが頻発することは、1984年の長野県西部地震の例を見ても明らかである。この山崩れは、崩壊初期は、水分の少ない岩屑流（岩なだれ）として流れ、下流では、水分を他から貰って、水分の多い土石流となる場合もあるようである。我々は、岩屑流、土石流の解析を、粒子1個づつについて、運動方程式をたて、粒子の集合体として解析するという、Cundall の始めた、個別要素法 (Distinct Element Method, DEM)^{1), 2)}を多少修正するというやり方で行ない³⁾⁻⁶⁾、流れの表面に直径の大きい粒子が浮き、流れ表面の流速が速いため流れの先端部に巨礫が集まり、被害を大きくするという従来からの定説を肯定する結果が得られた。

2. 岩粒の運動方程式

粒子は円形二次元とし、その運動方程式は、X, Z方向と回転の次のような3個の方程式とした。

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{d^2 V}{dt^2} + C_i \frac{dV}{dt} + F_i &= 0 \\ I_i \frac{d^2 \phi}{dt^2} + D_i \frac{d\phi}{dt} + M_i &= 0 \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

ここに、V: 変位ベクトル、 ϕ : 回転角、 m_i : 質量、 I_i : 回転慣性、 C_i, D_i : 減衰係数、 F_i, M_i : i 粒子に加わる外力・モーメントの合計。

粒子と粒子の接触点には図-1に示すような、法線方向と接線方向のスプリングならびに、ダッシュボットを設け、その変形量から、接触粒子から粒表面に働く法線方向力、接線方向力を求めた。その後、前掲の運動方程式を差分化し、前進解法で解いた。

3. 土石流の場合の水の影響

岩屑流の場合には、空気抵抗などは考えず真空中ということで、前述の運動方程式によったが、水が飽和している土石流の場合には、次のように水の影響として、粒子間の相対速度の2乗に比例するような水を媒体とする相互干渉項、 f_n, f_s を考える。

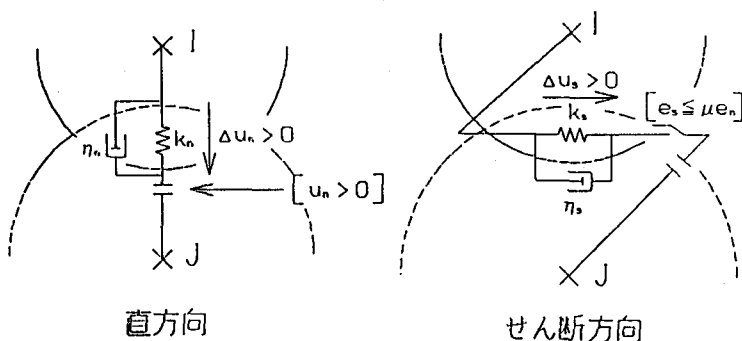


図-1 DEMの接触点における力学的モデル

$$\left. \begin{aligned} |f_n| &= C_D a \frac{\rho [V_n]^2}{2} \\ |f_s| &= C_D a \frac{\rho [V_s]^2}{2} \end{aligned} \right\} \cdots (2)$$

ただし、 f : 粒への抵抗力、 v : 粒子間相対速度、添字 n, s : 法線方向成分、接線方向成分、 C_D : 抗力係数、 a : 粒子の流れ方向への投影面積、 ρ : 水の密度

4. 巨礫の浮上

岩屑流の流れ直角の横断面を考える。3個の巨礫と、円形粒状体合計1000個のモデルとした。この流れは、底面が凹凸であったり、蛇行したりしながら流れる。これと等価な効果を粒状体を与えるために、粒状

体の外壁を上下・左右に正弦振動することとした。その結果を、図-2に示す。巨礫（特に中央の）が浮上することがわかる、また、右端の初めから表面近くに位置している巨礫は、沈み込んで行かないことも注目される。つまり、何らかの原因で浮上すると沈み込んで行かないのだから、巨礫が徐々に表面近くに集まるのである。また、流れの速度は、表面が最大なので、表面に浮んだ巨礫は、流れの先端部へ進んで行き、先端部に集まり、構造物に衝突した時被害を大きくする。

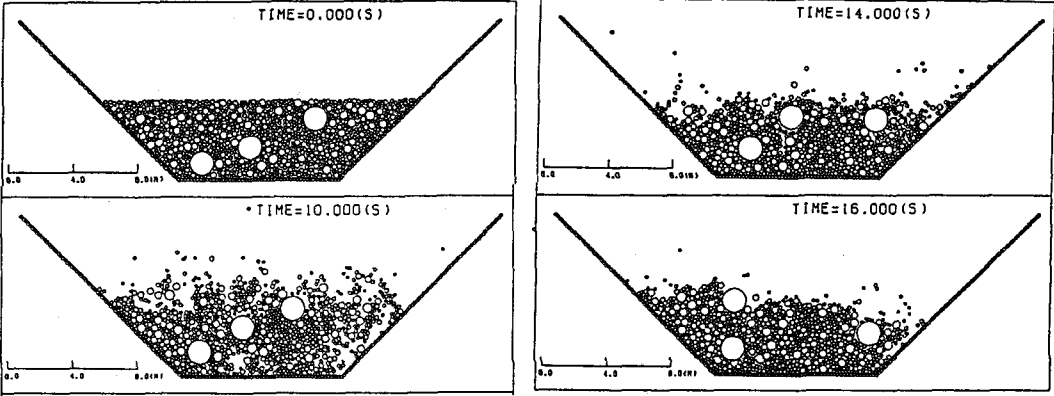


図-2 底面の凹凸による振動のための巨礫の浮上

図-3は、外壁の振動変位と巨礫の変位の時間経過を示したものであるが、水平方向の振動が加わると、急に浮上が激しくなることも知られる。また、1個だけ沈下して行くように見えるが、これは表面が低くなったので、相変らず、位置としては表面に居るのである。

5. 岩屑流の流れ

乾燥した岩なだれ（岩屑流）が凹凸のある30°斜面を流れ下る様子が図-4に示される。特徴としては、後述の土石流に比べて、流速が速いことと、飛散し易いことが挙げられる。

長野県西部地震の御岳くずれでは、崩壊頂部において、飛散した石塊によってへし折られたと思われる樹木などが散見された。

6. 土石流の流れ

飽和した水の影響を考えた土石流の凹凸斜面の流下状況を図-5に示す。特徴としては、岩屑流ほど飛散しないこと、流速も一定速度以上にはならないことが挙げられる。

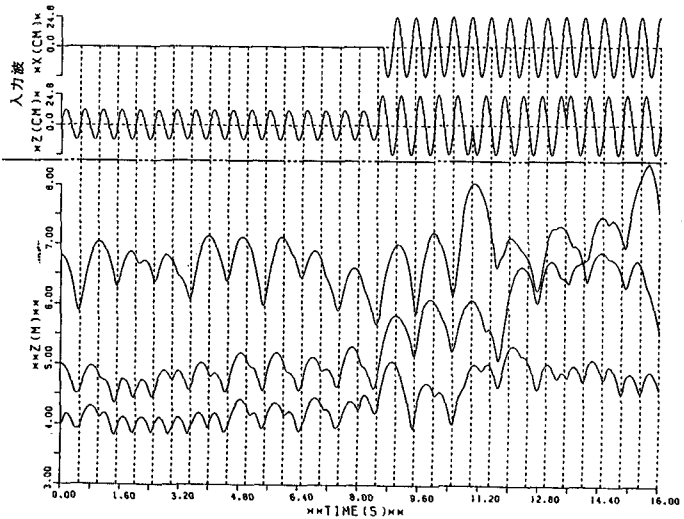


図-3 振動を受けた巨礫の浮上

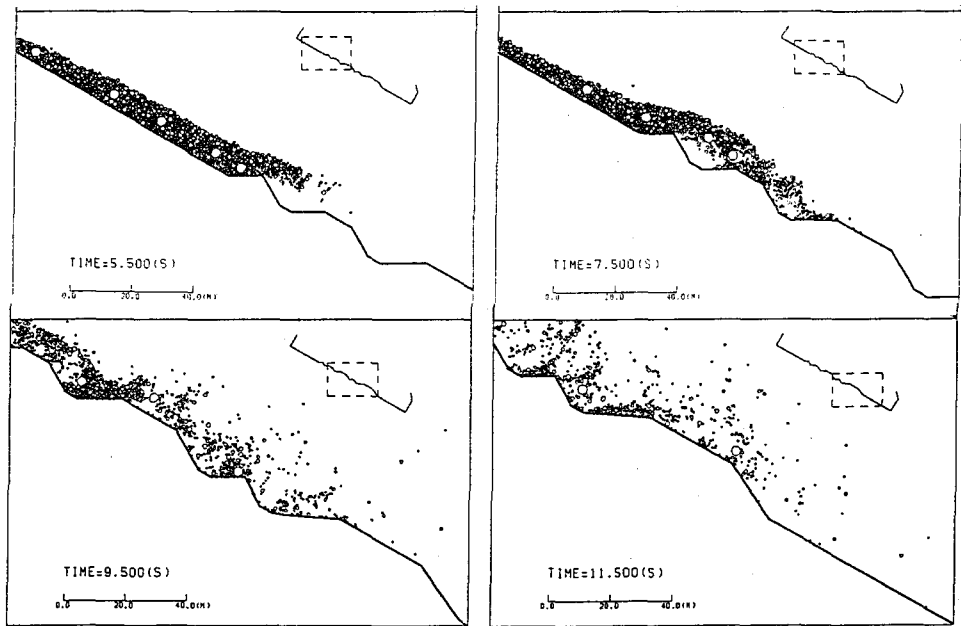


図-4 岩屑流の挙動

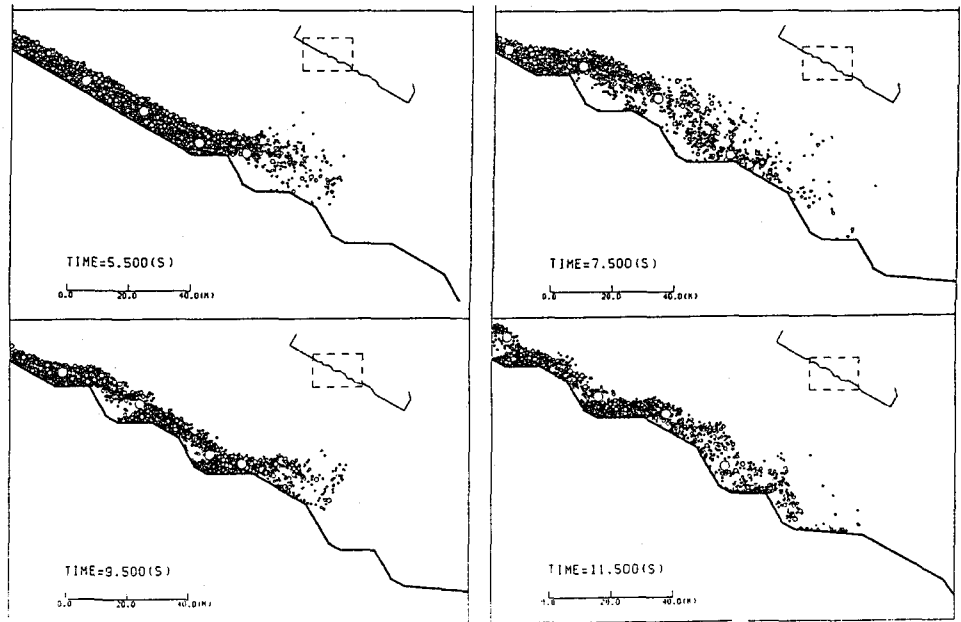


図-5 土石流の挙動

7. 土石流の鉛直壁への衝突

土石流が砂防ダムとか、その他の構造物に衝突した場合、どの程度の衝撃力を及ぼすかなど、その挙動を知ることも重要である。図-6は、その衝突状況を示している。土石流は海の波のように、衝突してとんぼ返りを打っている様子がわかる。図-7は、その衝突時の壁への衝撃水平力成分の合力の時間経過を示す。堆積してしまうと、衝撃力が小さくなることがわかる。

8. むすび

個別要素法に水の影響を近似的にいれて修正することにより、岩屑流・土石流のシミュレーションは実現象と近似することができた。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. "A Computer Model for Simulating . . . " System. Symp. ISRM, Nancy, France, Proc., 2, 129-136, 1971.
- 2) 伯野元彦・平尾寿雄, "粒状体のランダム . . ." 土木学会論文報告集, No. 219, 55-63, 1973
- 3) 木山英郎・藤村尚, "岩質粒状体の重力流動 . . ." 土木学会論文報告集, No. 322, 101-110, 1982.
- 4) Uemura, D.・Hakuno, M., "Granular Assembly Simulation for Structural Foundation." Structural Eng./ Earthquake Eng., Proc. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 4, No. 1, 155s- 164s, 1987.
- 5) Tarumi, Y., and Hakuno, M., "A Granular Assembly Simulation for the seismic Liquefaction" SE/EE. Proc. JSCE, 5, No. 2, 333s-342s. 1988.
- 6) 岩下和義, "粒状体シミュレーションによる地盤の . . ." 東大地震研彙報, 63, 201-235, 1988.
- 7) 目黒公郎・伯野元彦, "粒状体シミュレーションによるコンクリート構造" 東大地震研彙報, 63, 409-468, 1989.
- 8) Casaverde, L. M., Iwashita, K., Tarumi, Y., and Hakuno, M., "Distinct Element Analysis for Rock Avalanche," SE/ EE., Proc. JSCE, 6, No. 1, 131s-140s, 1989.

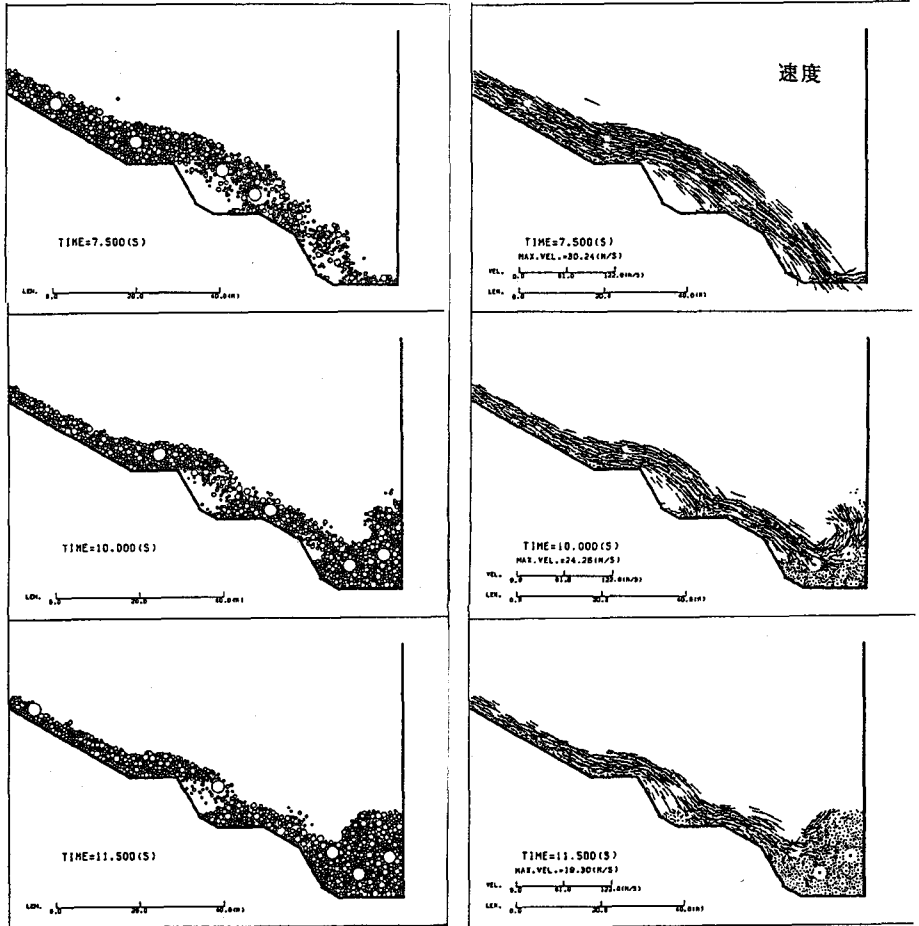


図-6 土石流の砂防ダム壁への衝突

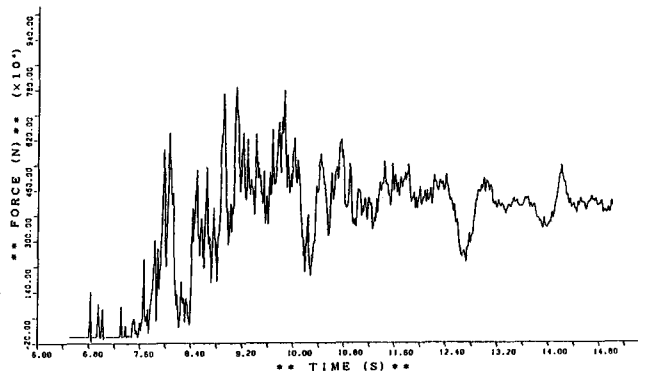


図-7 土石流の砂防ダム壁への衝撃力の時間歴