

粒状体の流出について (その2)

李 相 一
北 村 仁

Flow of Granular Materials (Part 2)

Soichi Lee
Hitoshi Kitamura

Abstract

The study of the flow of granular materials is concerned with the design of outlets of structures for storing and discharging granular materials such as silos and aggregate bins and with estimation of flow of sandy soil at faces of tunnels being excavated in non-cohesive soil strata. In the previous report, the authors allowed Toyoura standard sand packed in a silo-shaped storage bin to be discharged from an outlet at the bottom to make a number of studies regarding the relations between height of specimen and volume of flow, and between discharge gate diameter and volume of flow. The present report describes experiments made with a higher degree of accuracy to obtain more exact versions of these relations, and measurements of earth pressures within the silo to provide data supporting the results deduced in the previous report.

概 要

粒状体の流出という研究は、サイロや骨材ビンのように粒状体を保存し取り出したりする構造物の取り出し口の設計や、砂質土中を掘削するトンネルの切羽における砂質土の流出量を推定することに関連するものである。前報告では、サイロ状の貯蔵ビンにつめた豊浦標準砂を底部の流出口から流出させ、試料の高さと流量の関係、流出口径と流量の関係を求め、いくつかの検討を行った。本報告はこれを更によい精度で行い、これらのより正確な関係を求めるとともに、前報告で演繹した諸結果を裏づける資料を得る為に、サイロ内の土圧を測定したものである。

1. まえがき

粒状体の流出という研究の目的は前報告に述べた通り、粒状体を保存し取り出したりする構造物の流出口の設計や、砂質土中を掘削するトンネルの切羽における砂質土の流出量を推定するという実用的側面と、粒状体と液体との相似性と相異性に着目するという理論的側面がある。結果として、サイロ状のビンにつめられた粒状体が下部の流出口から流出する時、その流量は試料の高さによらず一定であり、流出口径のみの関数であると事実が得られ、これから換算自由落下高、流動部拘束圧、流出口に作用する圧力について推論を行った。

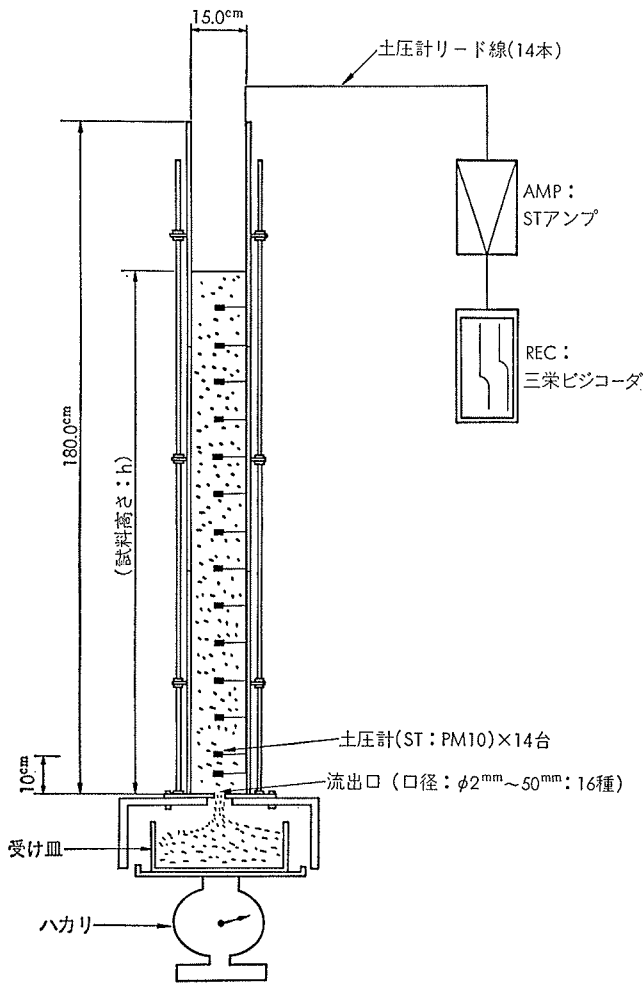
前報告は予備的なものであり、流出口径の変化が少なく、精度もよくない上に、装置そのものも小規模で

あった。これらの不備を補うとともに、前報告で行われた推論を立証する必要がある。

本報告は、この目的の為に新たに製作した装置を用いて前報告と同様の一連の試験を行うとともに、流出して静止する過程でのサイロ内の土圧を測定して、いくつかの検討を加えたものである。

2. 試験装置・方法ならびに記号

図一1に試験装置の概略図を示す。内径 15.0cm、高さ 180.0cm の円筒形の器に、下に円形の流出口を取りつけたものである。流出口の直径 ϕ は、2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50mm の16通りに増やした。試料高さ h 、重さの流量 q_w 、体積の流量 q_v の定義、試験方法、試料として乾燥した豊浦標準砂を用いたことなどは従来通りなので



図一 試験装置の概略図

省略する。

サイロ内に、受圧面を上方向に向けた土圧計を図一1の如くセットし、堆積・流出・静止の各段階の土圧を測定したのは新たな試みである。

3. 試験結果とその解釈—1

図一2に、各流出口径につき、試料高さ180cmから流出させていった場合の、各試料高さと重さの流量の関係である。これから q_w は h に無関係で一定である。この傾向は各流出口径につきまったく同様であり、 ϕ が小さなもの($\phi=2\text{mm}$)と大きなもの($\phi>40\text{mm}$)はデータのバラツキは大きい。

図一3に q_v と h の関係を示すが、 q_w の場合と同様のことが言える。

q_w を q_v で除したものは流出部の砂の密度であると、これを γ とすると、 ϕ による影響はなく、 $\gamma=1.35\text{gr/cm}^3$ である。前報告ではこれが 1.47gr/cm^3 であったが、両者の差は、サイロの内径を6.0cmから15.0

cmに増やしたことによるものと思われる。流出部分の密度がサイロの内径により変化することは、流出部分の形や運動学的性質がサイロの側壁や底板の影響を受けるものと見なされる。今回の場合、 γ の値から流出部の間隙率 $n=0.49$ となる。

図一4に ϕ ならびに ϕ/D_{50} に対して q_w をプロットしたものを示す。流出口径が大きくなると、流出口の開閉にもなう誤差が生じるので、この誤差をとり除いた値を Δ 印で示している。これによると、 q_w が ϕ の数次のべき関数になっている。従って、それを

$$q_w = k\phi^m \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表現すると、 m の値は、 ϕ が2mm~20mmの範囲では2.67、 ϕ が10mm~50mmの範囲では2.55である。

前報告ではこれが3.0であったが、今回の値の方が実験精度から判断して信頼度が高い。実用では、 ϕ の大きな範囲が対象となることが多いので、以後 $m=2.55$ の方を採用する。 q_w 、 ϕ の単位をそれぞれ gr/cm^3 、mmとし、以後もこれで統一すると

$$q_w = 0.069\phi^{2.55} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。

流出口通過時の各粒子の落下速度の平均値を v とすると、その求め方は前報告通りに行い、(2)式と組み合わせて

$$v = 0.94 \frac{q_w}{\phi^2} = 0.065\phi^{0.55} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。これをもとにして、換算自由落下高、流動部拘束圧、流出口に作用する圧力について、前報告と同じプロセスで検討を行う。記号の意味、計算方法などについては前報告を参照されたい。

換算自由落下高 h_0 は

$$h_0 = h - h_L = \frac{v^2}{2g} = 0.0021 \frac{\phi^{1.1}}{g} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(4)式の変分をとり

$$\delta h - \delta h_L = 0.0023 \frac{\phi^{0.1}}{g} \delta \phi \quad \dots\dots\dots(5)$$

従って、粒状体の流出時に流出口径の変化がないものとする、その過程でエネルギーの増加はなく、

$$\delta h = \delta h_L \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、位置エネルギーは流下につれて、運動エネルギーに転化することなくそのまま失われてしまう。このことから、流動部平均拘束圧 \bar{f} は

$$\bar{f} = \frac{\pi G_s D_{50}^3 g}{6\mu} = \text{constant} \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。

流出状態から静止状態へ移行した際に、流出口に作用する圧力 p_2 は、流出部の単位体積重量を γ とすると

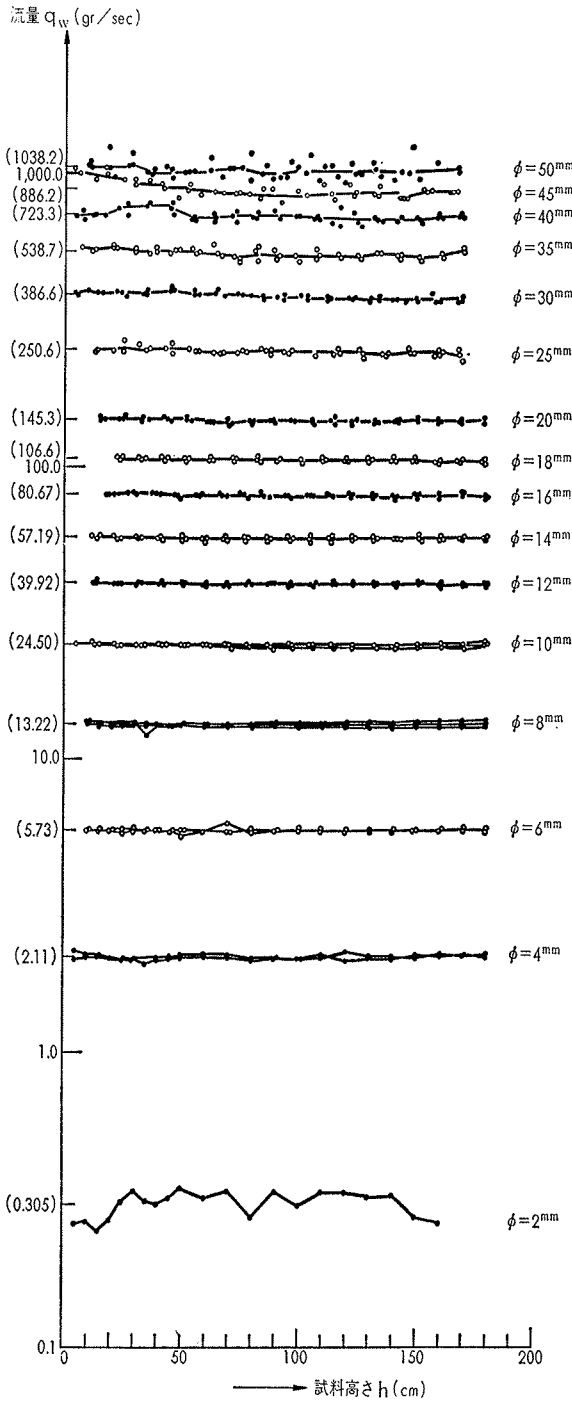


図-2 各試料高さ h における重さの流量 q_w

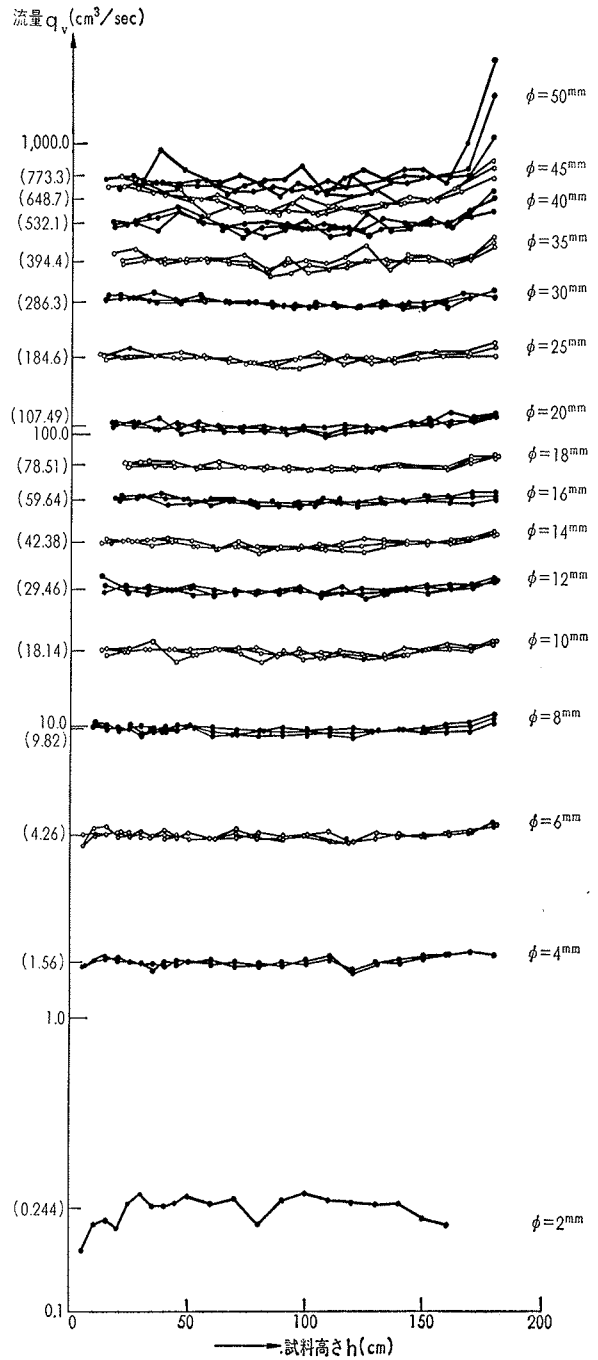


図-3 各試料高さ h における体積の流量 q_v

$$p_2 = \gamma h_0 = 0.0028 \frac{\phi^{1.1}}{g} \dots\dots\dots(8)$$

である。

4. 試験結果とその解釈 — 2

図-1 に示すように、試料高さ140cmの場合に、土圧計を受圧面を上にして、表面から10cm, 20cm..., 130cmまで10cmピッチの深さと、135cmの深さに14

個セットして、埋設時の土圧、流出時の土圧、静止させた時の土圧を測定した。

その代表的な測定例が図-5である。試料作成時は、埋設深さの大きいものほど土圧も大きく、流出をスタートさせると埋設深さの大きいものほど土圧は低減しているのが分る。これは、表面が3mm沈下するまで流出させたのちストップさせ、さらに6mmまで沈下させてストップするプロセスを、10mm, 20mm, 30

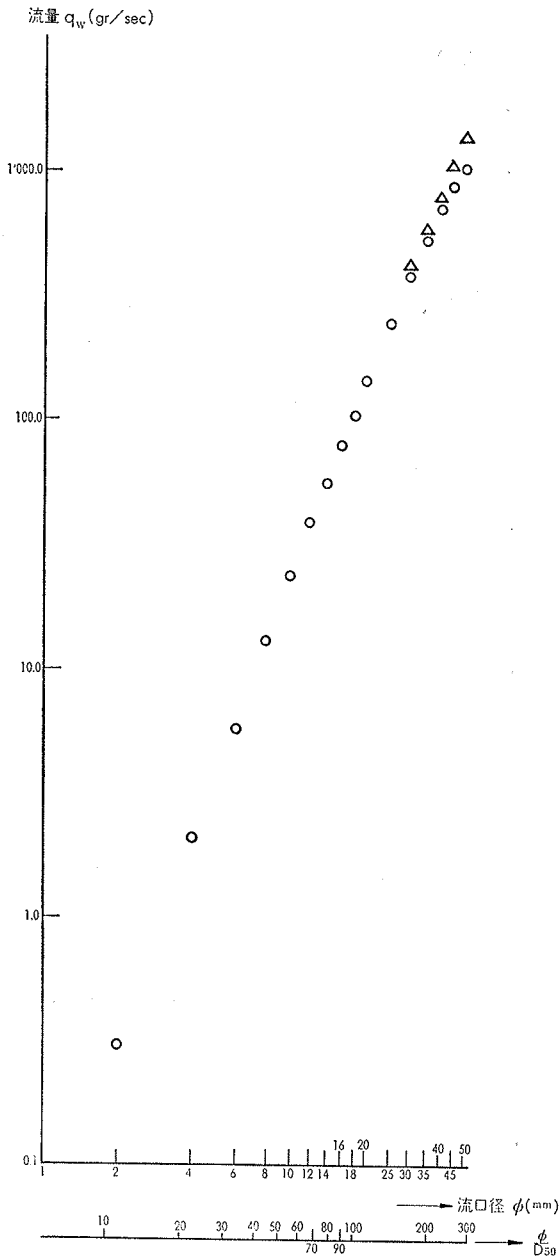


図-4 各流出口径φに対する重さの流量 q_w

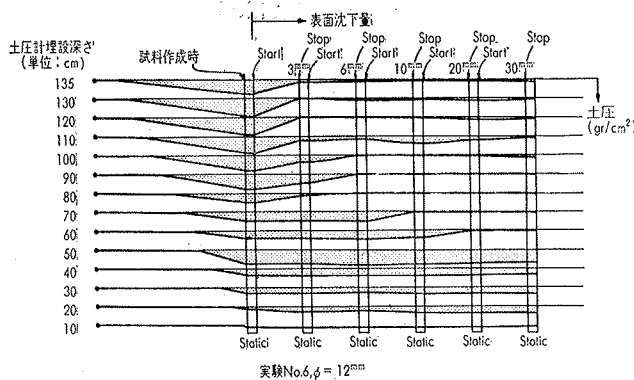


図-5 試料高さ140cmの場合の土圧計の代表的データ

mmの沈下まで行ったものである。沈下量が増加するにつれて、土圧の減少が埋設深さの浅いものにまで及んでいるのが分る。

図-6は、試料作成時の土圧の深さ方向の分布である。表層から深さ40cm付近までは深さに比例して増えており、その量は土の単位体積重量に深さをかけたものの約半分であるが、それ以後は一定である。堆積時に、すでにサイロ側壁のマツが作用しているものと見なされる。

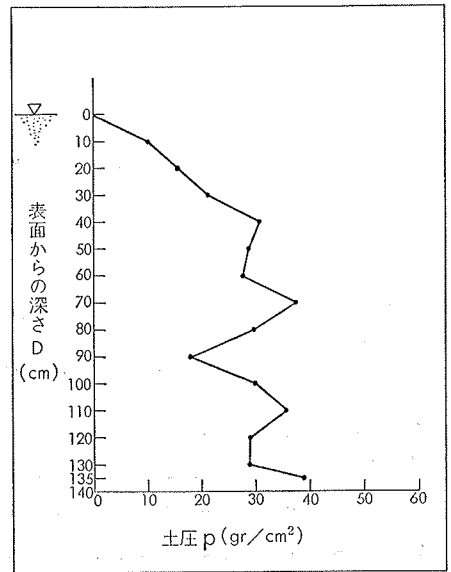


図-6 試料作成時の土圧分布

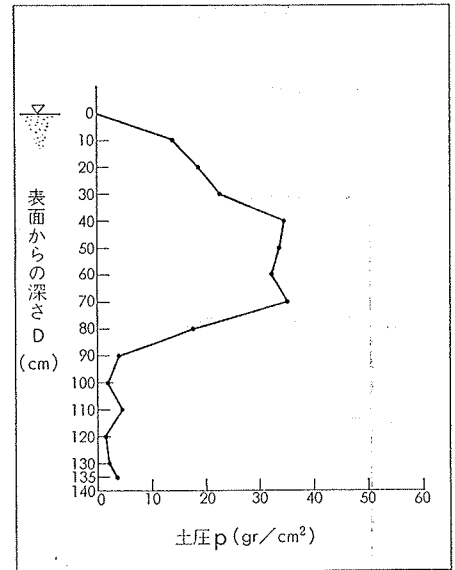
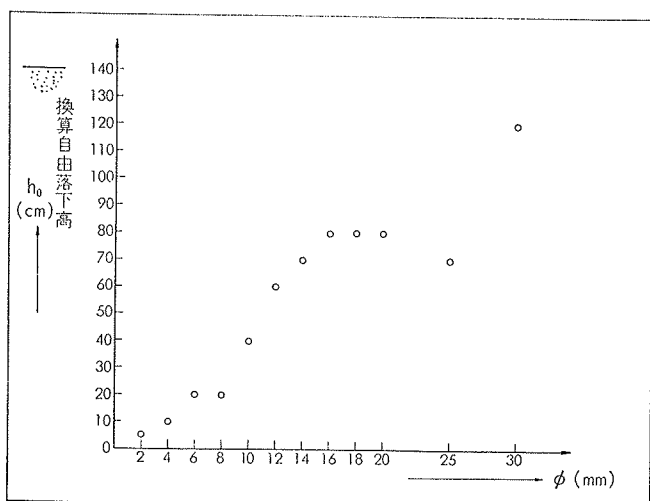
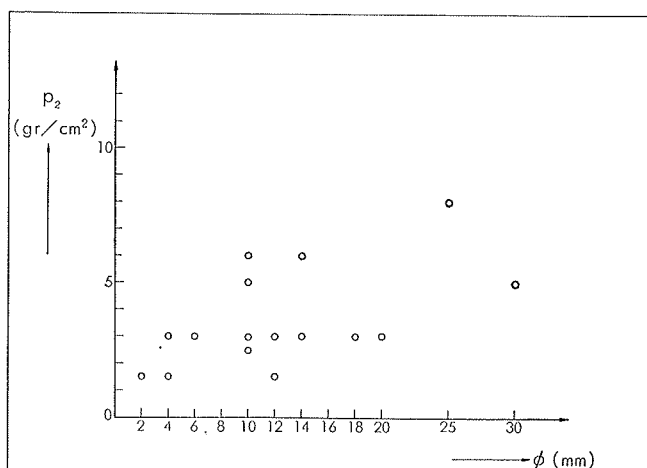


図-7 流出から静止させた土圧分布

図-7は表面が5mm沈下するまで流出させてから静止させた土圧分布の例である。深さ40cmから70cmまでの土圧は一定であり、これは式(7)の妥当性を意味しているものと思われる。深さ90cmで深(高さ50cmまで)の土圧は著しく減少している。この範囲は、流出時には圧力がほぼ零にまで減少し、場合によっては負圧となる。このように、流出時に拘束圧が零になり、それを静止させてからもごくわずかの圧力回復しか示さない範囲は、流出・静止の両状態においてアーチングが作用している範囲の下にあるものと見なされ、これが前報告で述べた流出部分に相当すると考えられる。この範囲内にある粒子は、流出時に無拘束圧で落下しているのだから、自由落下と見なされ、この範囲の高さが換算自由落下高 h_0 であると見なしうる。



図一八 流出口径φと換算自由落下高h₀



図一九 流出口径φと流出口に作用する圧力p₂

図一八は、各流出口径に対して、このようにして求めた換算自由落下高 h_0 の関係をプロットしたものである。式(4)の $h_0 \propto \phi^{1.1}$ の関係が近似的に成立していると思われる。

図一九は、埋設深さ135cmの土圧計の計測する土圧を、流出から静止へ移行した状態で、流出口に作用する土圧 p_2 として、各流出口径に対してプロットしたものである。 $p_2 \propto \phi^{1.1}$ の関係を予測していたのであるがデータのバラツキが大きく、 2.5 gr/cm^2 までの範囲は計測器の誤差範囲でもある為、判然としたことは言え

ない。より高感度の土圧計による数多くのデータを必要としている。ただ、図一八からは漠然ながら $p_2 \propto \phi^{1.1}$ の関係を予測させるものがあり、また一方、Terzaghi がまったく別のアプローチである土圧理論から $p_2 \propto \phi$ という関係を導き出しており、その結果は筆者達が導いた結果と大差がない。

以上、サイロ内の土圧を測定することにより、理論的結果を裏づける資料を得るとし、その一部は確かめられたと言えるが、一方、今後のより精度の良い実験の積み重ねが必要と思われる。

5. あとがき

粒状体の流下において、位置のエネルギーが運動のエネルギーに転化されることなく失なわれることは既に述べたが、では、どの形のエネルギーに転化するかという疑問が残る。これは、流出時にかすかにサイロ内に発生する音、サイロ側壁の振動により説明できる。音、振動、熱などのエネルギーとなって失なわれているものである。この意味で、側壁の影響をとり除いた試験が今後、必要となるものと思われる。

土が破壊する時は、それがどのような形であれ、流動性をもつ。そして、流動時の土の性質は静止時のそれと性質を異にすることが多い。筆者達はこのような目的意識をもち、土の最も単純な形である乾燥した粒状体の流動時の性質を調べているものである。

最後に、この試験を行うに当たり、日産基礎工業(株)津川明宏氏の協力を得たことを付記し、謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 李 相一：粒状体の流出について，大林組技術研究所報，No. 12, 1976.
- 2) K. Terzaghi: Stress Distribution in Dry and Saturated Sand above a Yielding Trap-Door, Proc. of Intern. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Cambridge, Mass., 1936
- 3) 村山 他：アルミ棒積層体によるトンネル切羽の安定に関する模型実験，竹中技術研究報告12号，1974.