トンネル坑口に巨礫崖錐がある場合の設計事例

(株)藤井基礎設計事務所　藤井　俊逸

1．はじめに

ある現場でトンネル坑口部に巨礫崖錐層(φ 0.2m～3m)が分布することが施工時に判明し、早急に調査及び設計を行う必要が生じた。まず崖錐の分布状況、状態を調査により確認し、トンネル施工時の問題点と解決策を提案した。また施工時に切羽面の状況を確認し、対策工の検証を行った。

2．調査

以下の調査を行い、地盤状況を把握した。

①ボーリング調査2本(崖錐層厚及び地盤の状態把握)

② 弾性波探査4測線(崖錐層厚の把握)

(BP.1 では施工時に孔内傾斜計観測を行った)

③ 地表踏査

その結果次のことがわかった。

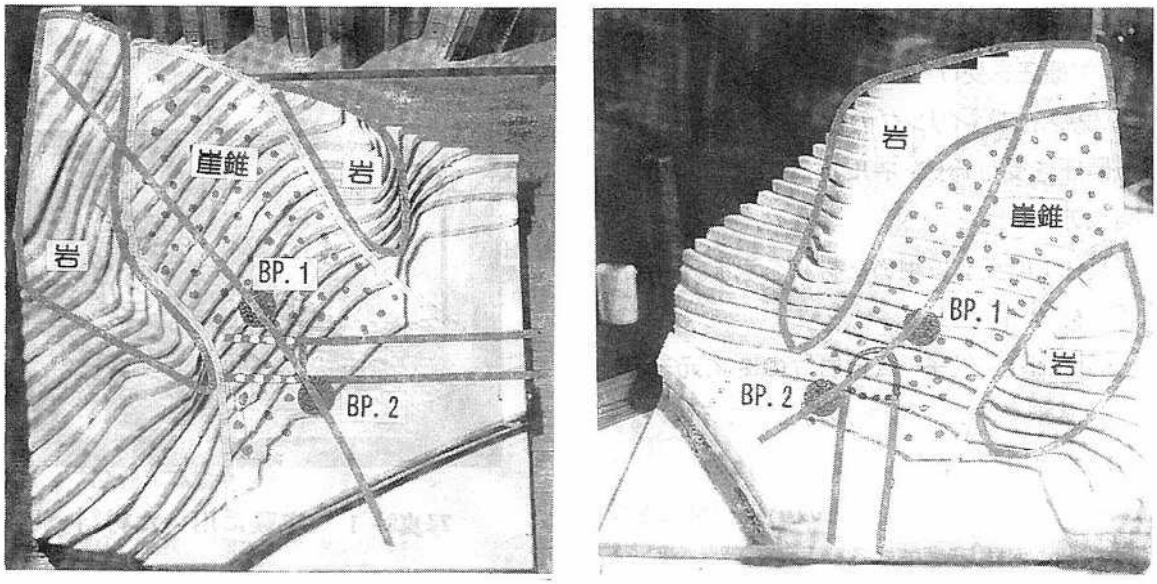
① 弾性波探査で得られた速度境界はボーリング結果の層境界とほぼ一致していたため、崖錐層の分布がほぼ把握できた。

② 崖錐層の深い位置でも巨礫(コア長 0.7m)に当たっていることから、深い位置でも地表で確認される巨礫が分布することがわかった。

③ 崖錐層表層はマトリクスのない状態で、バックホーにて現況勾配より少し急に切り込もうとしたところ表層崩壊を生じた。このことから、現況勾配(約 1:1.0)は 崖錐層の安息角と考えられる。

④ ボーリングコアではマトリクスに粘土が見られることから、下層部では礫間粘土が多少あると考えられる。

図－1は地形の立体モデル(発砲スチロールで作成)に崖錐分布、トンネル位置等を書き加えたものである。図－2は図－1のボーリングを結ぶ方向の断面でトンネルと崖錐の位置関係を模式的に示した図である。



（A）平面　　（B）正面

図-1　立体モデルによる状況説明

3．設計上の問題点と解決策

設計上の問題点として次の2点に注意する必要がある。

① 崖錐層内でトンネルが受ける偏圧

② 崖錐層トンネル掘削時の天端崩壊及び切羽安定

この2点について4項でナットモデルを用いてメカニズムを理解した上で次のような対策を行った。

① に対して偏圧がトンネルに作用しないように図－3のように押え盛土及び深礎杭を設けた。

② に対して図－7のケース.2に示すようにフォアパイルにより天端崩壊を防止した。ただし礫間に空隙があるためウレタン注入を行い、巨礫同士を密着させフォアパイルの強度増加を図った。ウレタン注入で礫が一体化するのかどうか実験してみた。5 項に結果を示すが、ウレタンと礫は十分一体化し、強度を発揮することを肌で感じた。

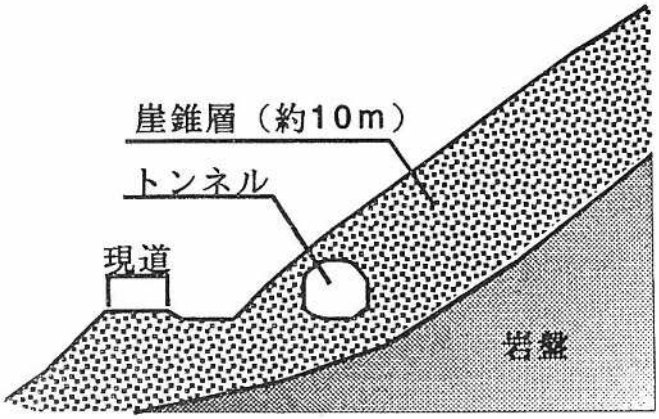


図-2　トンネルと崖錐の位置関係

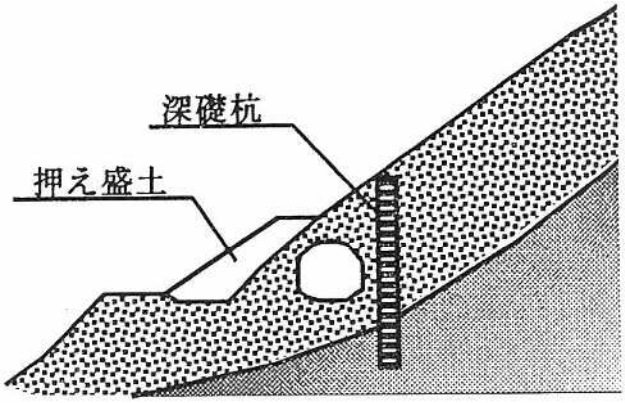


図-3　対策工断面図

4．ナットモデルによるメカニズムの把握

4-1．ナットモデルの概念

ナットモデルは粒状体地盤の2次元モデル化をナットを用いて行ったもので、重力作用を受けた際の粒状体の挙動を目で確認できるものであり、当社が独自に開発したモデルである。トンネルの安定機構を把握するために、次の項目についてナットモデルを用いてモデル化を行った。

①偏圧を受けるトンネル坑口のモデル化

②フォアパイリングの役割のモデル化

4-2．偏圧を受けるトンネル坑口のモデル化

1) 実験方法

写真－1に実験に用いた材料を示す。

① 外枠

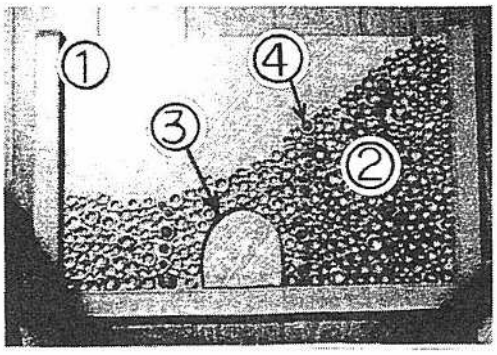
② ナット（土粒子，風化岩片の2次元モデル化）

③ 厚紙で作ったトンネル覆工のモデル

④ナットの動きを分かり易くするため

ナット中空部にピンク色の小麦粉粘土をつけた。

図－4は実験手順である。



写真－1　実験に用いた材料

2) 実験結果及び考察

3) 図－5に実験結果及び考察をまとめる。

4-3. フォアパイリングの役割のモデル化

1）実験方法

写真－2 に用いた材料を示す。

① 外枠

② ナット（土粒子,風化岩片の 2 次元モデル）

③ トンネル覆工天端

④ フォアパイリング

図－6 は実験手順である。

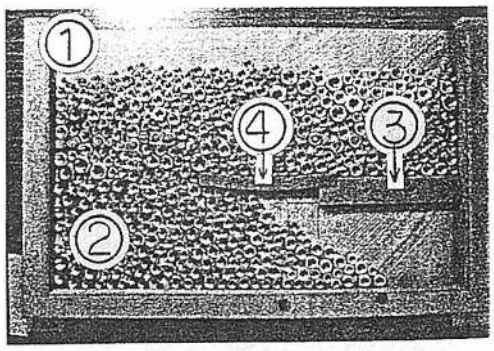
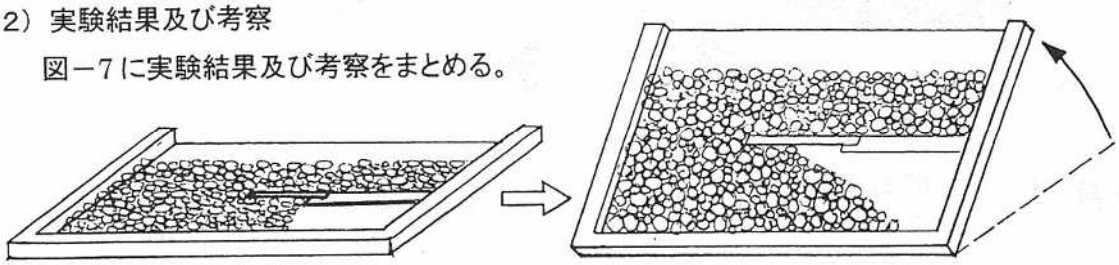


写真-2　実験に用いた材料

2）実験結果及び考察

図－7 に実験結果及び考察をまとめる。



水平面上で上図のようにセットする。

その後外枠①を傾斜させる。
この時ナット重量が作用する。

図-6　実験手順

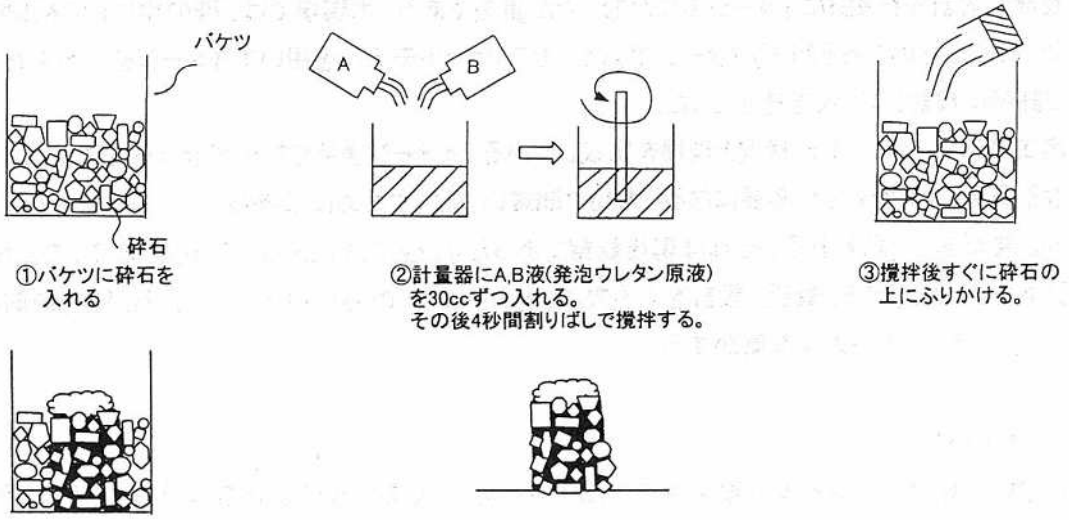
5．巨礫内にウレタン注入を行う場合の効果判定実験

5-1. 実験方法

巨礫を砕石でモデル化して図－8 の方法で実験を行った。

5-2. 実験結果

砕石の上面から発砲ウレタンをふりかけるだけで写真－4 のような改良体が形成された。砕石はウレタンにより密着し、練り石積状になっている。本地の巨礫の空隙にウレタンが入ると巨礫どうしが密着し安定するものと考えられた。



①バケツに砕石を入れる

②計量器にA,B液(発泡ウレタン原液)を30ccずつ入れる。
その後4秒間割りばしで撹拌する。

③撹拌後すぐに砕石の上にふりかける。

④しばらくして側方のウレタンのまわっていないいないところの砕石を手で取り除く。

⑤ウレタン改良部の接合具合を調べる。

図-8　実験方法

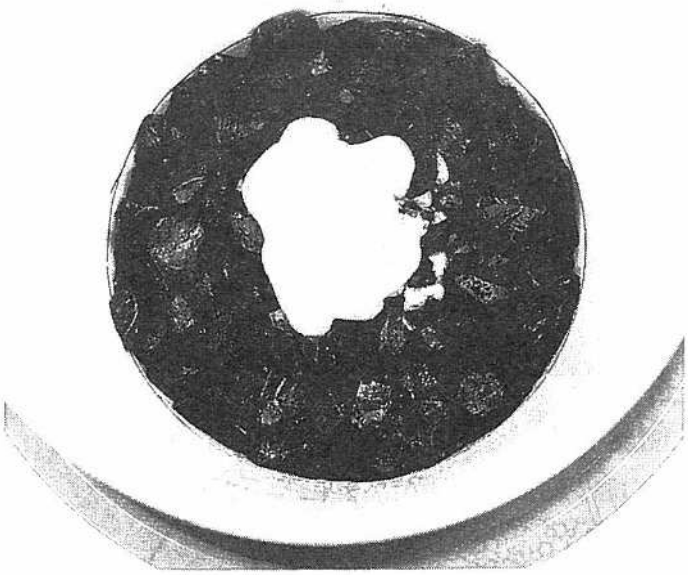


写真-3　砕石にウレタンを
ふりかけた状態

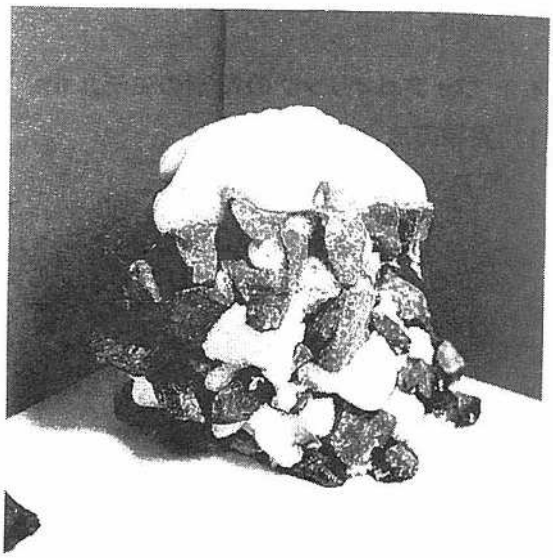


写真-4　ウレタンによる
砕石の一体化状況

6．施工時の状況

偏圧対策の効果

押え盛土及び深礎杭の施工後にトンネル掘削を行った。その際 BP.1の孔内傾斜計観測を行い、水平変位を測定した。変位は 1.4cm で収まり、偏圧に対し効果があったと考えられた。

天端崩壊及び切羽安定対策

フォアパイリング時にウレタン注入を行った結果、切羽面は安定しており、天端崩壊もなかった。巨礫に対してもウレタン注入の効果があったと考えられる。

7．おわりに

我々が設計を行う際にイメージをつかむことが重要である。本現場では、礫の中にトンネルを掘るとどんなふうになるのだろうというイメージである。そこでナットモデルを用いてイメージをつかんだ上で計算にて詳細に検討していく方法をとった。

施工時にもイメージした状況と現場を比較してみる。イメージ通りであればほぼうまくいくし、イメージと異なる場合には再検討が必要になる。大局で間違いをなくすためには適確にイメージできる手法を模索する必要があると思われる。それは現場観察であったり、砂遊びであったり、模型実験であったり、簡単な計算であったりする。最近、設計をする際に、基準や計算のみに頼りがちであるが、その前に適確なイメージを持つことが大切な気がする。

〈参考文献〉

1) 藤井　俊逸：トンネルの安定機構に関する研究：㈱藤井基礎設計事務所第 16 回夏季　研修会論文集、PP.53～PP.58、1995.8

2) 土木学会：山岳トンネルの補助工法

3) 藤井　俊逸：トンネル坑口に巨礫崖錐が推積している場合の調査・設計事例：全地連「技術フォーラム'96」PP.491～PP.494

図-5　トンネルに働く偏圧のモデル化

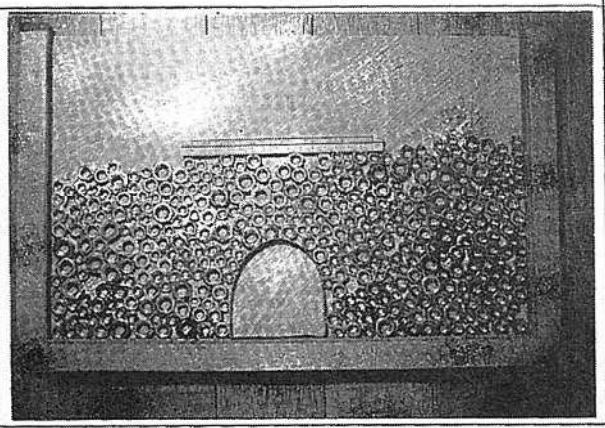
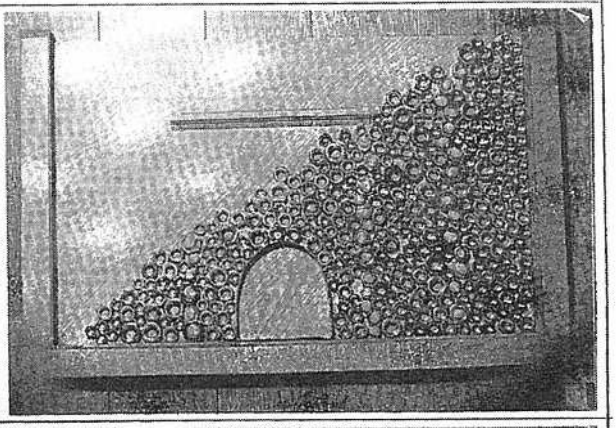
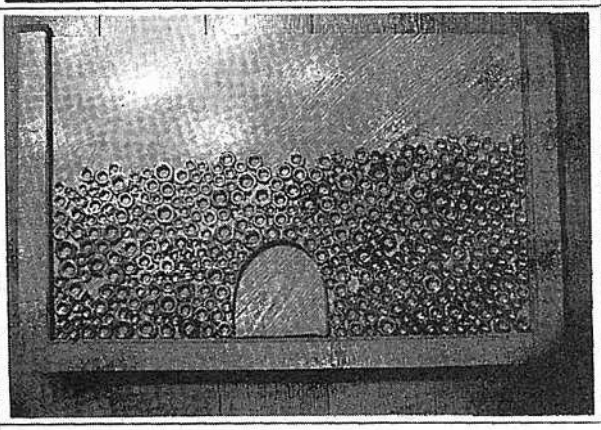
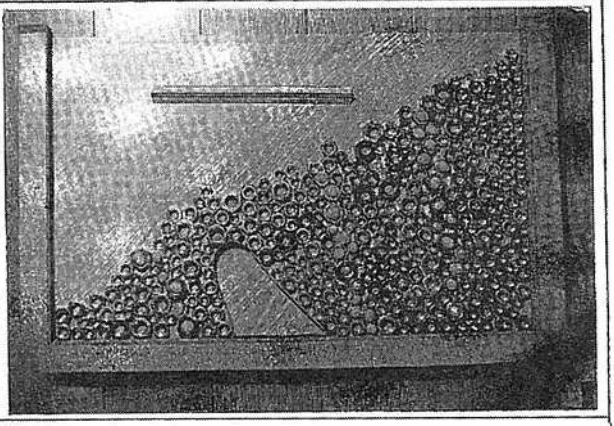
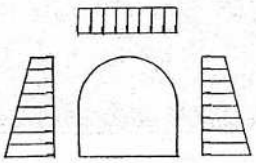
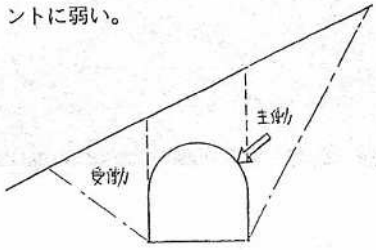
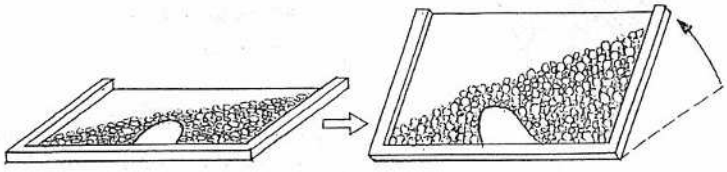
	ケース．1　偏圧が作用しない場合	ケース．2　山側・谷側に偏圧が作用する場合
自重作用前		
自重作用後		
考察	トンネルに働く荷重は左右が等しくなる。鉛直力と水平力のバランスが良い場合はトンネル覆工には圧縮力のみが作用する。しかしバランスが崩れるとケース.2のように覆工は変形する。 	ケース．2は地盤が傾斜しておりトンネル右側に大きな圧力のかかる場合を想定している。特に地盤が崖錐，崩積土，強風化土等のせん断強度の低い場合には偏圧の影響が非常に大きくなる。トンネル覆工は一般的には無筋コンクリートのため曲げモーメントに弱い。 

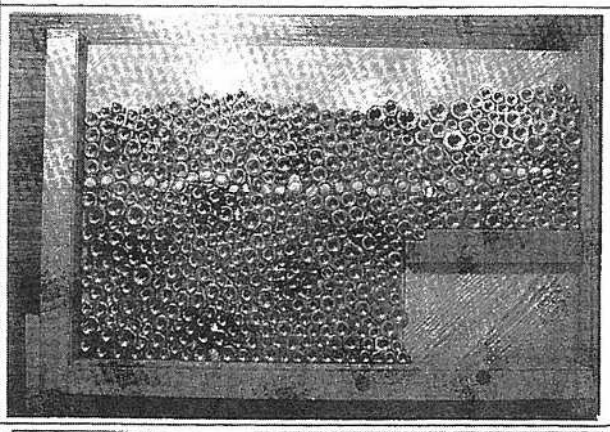
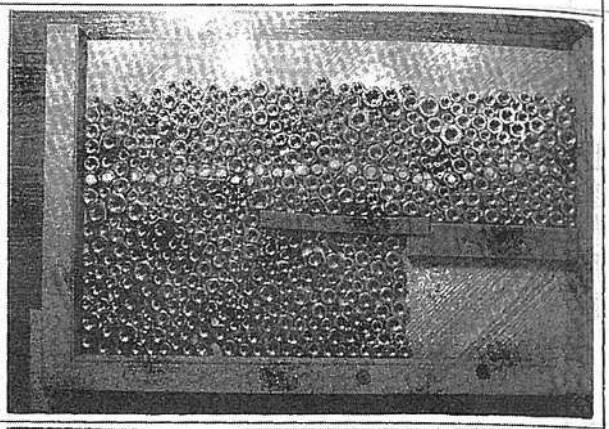
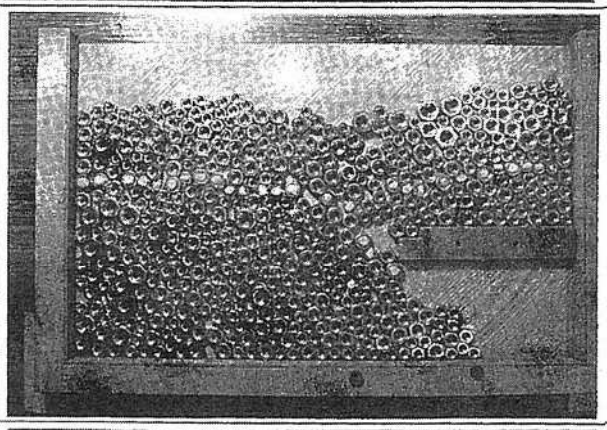
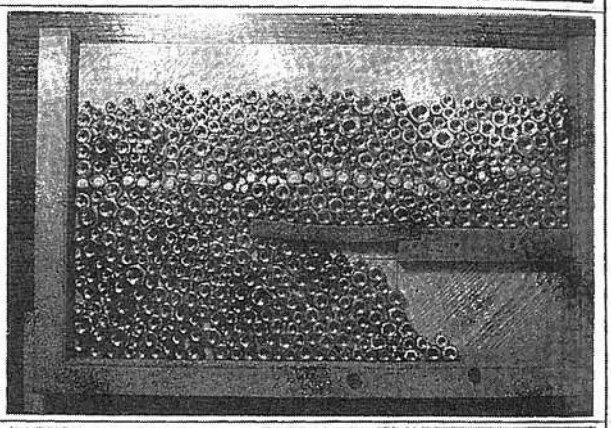
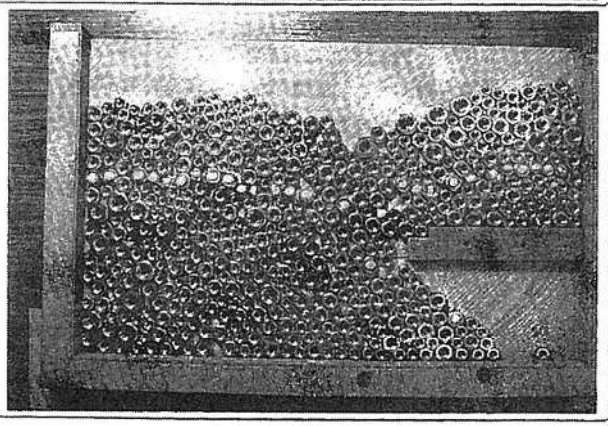
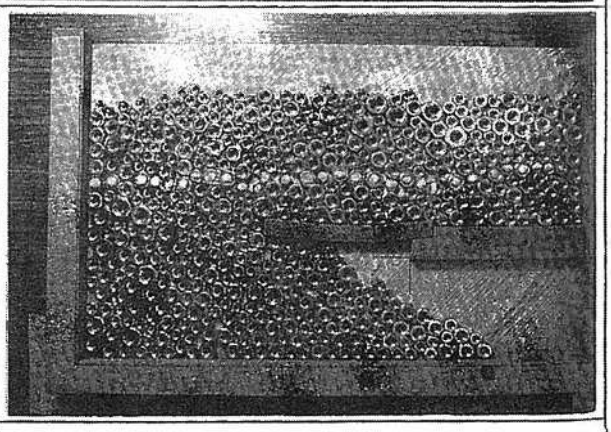
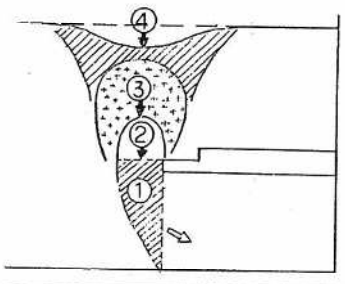
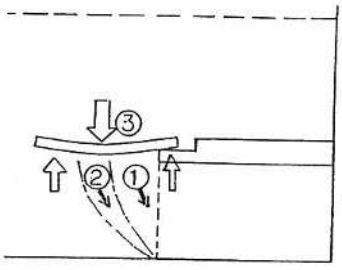
図-4　　ナットモデル実験手順



水平面上で上図のように
セットする。

その後外枠①を傾斜させる。
この時ナット重量が作用する。

図-7　トンネル掘削時の天端崩壊のモデル化

	ケース．1　フォアパイリングなし	ケース．2　フォアパイリング
自重作用前		
自重作用後（直後）		
自重作用後（時間経過）		
考察	核残し部を除去すると次のように変形する。 ①が抜け出す ②が落下 ③が落下 ④地表面が沈下 	フォアパイルが長い場合は次のように変形する。 ①が抜け出す ②に抜け出し範囲が拡大 ③フォアパイルの中央が上からの荷重で沈下 先端は地盤に支えられているため沈下しない この実験より地盤の状況に応じてフォアパイルの長さ及び剛性を適切に選定しなければならないことがわかる。