

(25) トンネル切羽付近の応力状態に関する模型実験

建設省土木研究所 ○猪熊 明
石村 利明

§1 まえがき

トンネルの覆工がまわりの地山からどのような力をうけるのかは現在のところよくわかっていない。それを調べる方法は幾通りがあるが、今回は模型実験によつてトンネルが地山から受ける外力(トンネル土圧)を調べる。模型実験によつてトンネル土圧だけでなくトンネルの周辺の地山の応力状態についても明らかにすることが出来る。

§2 方法

模型(model)が原型(prototype)の予測手段として有効であるためには、模型と原型との間になんらかの相似性(similarity)がなければならぬ。この相似性を支配する法則を相似則という。そしてこの相似則を満足させるために模型と原型の相方で等しくなければならぬ無次元量(元, パイナンバー等と呼ばれる)をとちめて実験をすすめる。必要な無次元量を発見するため、今回次元解析と Buckingham の元定理を用いる。

トンネル土圧のメカニズムを図1に示す。次元解析の初期要因はトンネル土圧を支配する要因を選ばねばならない。それらは、 H , D , d , γ , C , ϕ , T の7ヶとする。(記号に関しては、表-1参照)次元としては、 F (力) - L (長さ) システムを選ぶ。Buckingham の定理により必要な無次元量の数は、 $7-2=5$ 個である。

それらの無次元量を、表-2のように決定する。表-2に無次元量の意味についても合わせて示した。今回は実験手法上の問題から、特に π_4 については考慮しないこととした。このことは、いわゆる Fenner-Pacher curve (あるいは ground reaction curve) の考え方からすると重大な欠陥となるように思われる。しかし、本実験での地山の変位量は5mm以上であつて、これはかなりゆるんだ状態にあつたことを示しており、さらに、小野、真井らの論文¹⁾に示されるように砂質地山においては、ゆるんだ状態での土圧の増加はゆるやかであることを考え合わせれば π_4 を無視してもその影響は少ないと思われる。

また強度パイナンバーを一致させるためには、重くて弱い実験

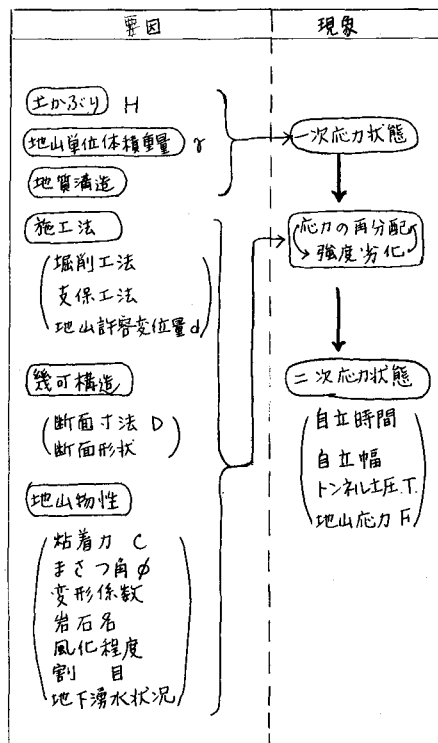


図1 トンネル土圧の要因と応力状態

表1 次元解析

初期要因	次元	F	L
H (土かぶり高)		0	1
D (トンネル直径)		0	1
d (地山許容変位量)		0	1
γ (地山単位体積重量)		1	-3
C (粘着力)		1	-2
ϕ (まさつ角)		0	0
T (地山応力、土圧)		1	-2

表2 主要なパイナンバー

幾何	π_1	H/D
強度	π_2	C/rL ($L=D$ or H)
	π_3	$\tan \phi$
許容変位	π_4	d/D
トンネル土圧	π_5	T/rL ($L=D$ or H)

地山材料が必要とされる。このため一般には乾燥砂が用いられるが、乾燥砂は粘着力がまったくないため現象自身が異なるものになるかもしれない。また地山材料の物性をコントロールするという点からも好ましくない。このため本実験には含水比の小さい砂（普通砂と呼ぶ）を用い、サクシヨンの効果によって見かけ上のごく微少な粘着力を得る方法を考えた。実験は普通砂と乾燥砂について行われた。実験装置も各地山材料に適したものが考案された。

地山材料には乾燥砂と普通砂の2種類を用いた。その各物性値は表一に示す。乾燥砂はレキ分16%、砂分82%、シルト粘土分2%のレキまじり砂を乾燥炉で乾燥したものである。普通砂はそれに適量の水を加え含水比を2%にしたものであり、水のサクシヨン効果によりごくわずかの粘着力を得る（図4）。

実験装置は、一言でいえば、土槽中の地山の中を実際に掘削していき、トンネルおよびトンネル周辺に地山が与える鉛直応力を計測するものである。

土圧は、受圧板のところで計測する（図-2、図-3、参照）。受圧板の構造の概略を説明する。まず土槽床板の受圧板を設置する位置に、トンネル進行方向にもって溝をつくる。そこに小荷重計を3個設置し、その上に受圧板を置く。この受圧板が地山から土圧を受け、小型荷重計に力を伝えるのである。

平面的には1枚の受圧板の上にちょうど1個の覆工がのる大きさである。すなわち、1個の半円筒トンネル覆工が1枚の受圧板に対応する。トンネル土圧は各トンネル覆工が土圧を受けその下にある受圧板を通して荷重計に力を伝える。

乾燥砂の場合、トンネルを掘削するのに問題があった。というのは切羽において掘削面が自立しなためである。この問題を解決するため、乾燥砂については図-2のような装置を用いた。まず土槽床面の荷重計の上に1列にトンネル覆工を置き、その上から「トンネル・カバー」と称する鋼製半円筒カバーを設置する。さらにカバーの上に地山材料としての乾燥砂を所定の高さまで盛る。こうしておいて荷重計をセットしトンネルカバーを引き抜く。ここで、砂がトンネル・カバーからトンネル覆工まで落下することをもってトンネル掘削とみなすのである。

普通砂の場合よりは簡単であった。粘着力があるためトンネル切羽が自立し、実際のトンネル施工のように掘削できた。すなわち、単位掘進長だけ掘削した後トンネル覆工をツールドのように押し込むのである。この方法だとトンネル切羽における掘削面と支保工建込み断面との間の無支保区間をも相似できる。

実験は乾燥砂については、土かぶり・トンネル直径比 H/D が 0.5 1.0 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 の8種類、

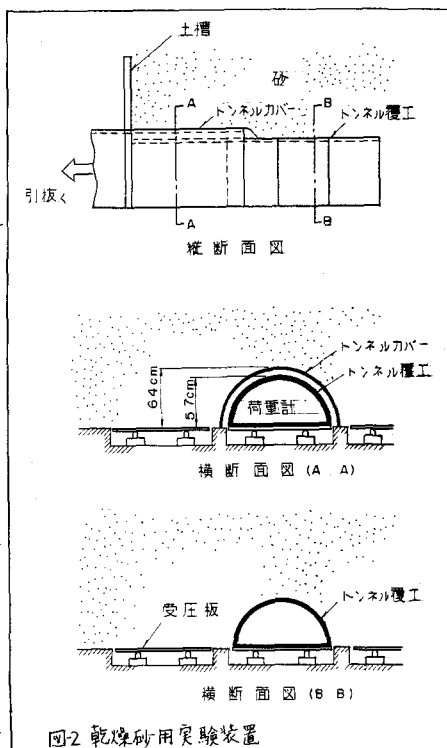


図2 乾燥砂用実験装置

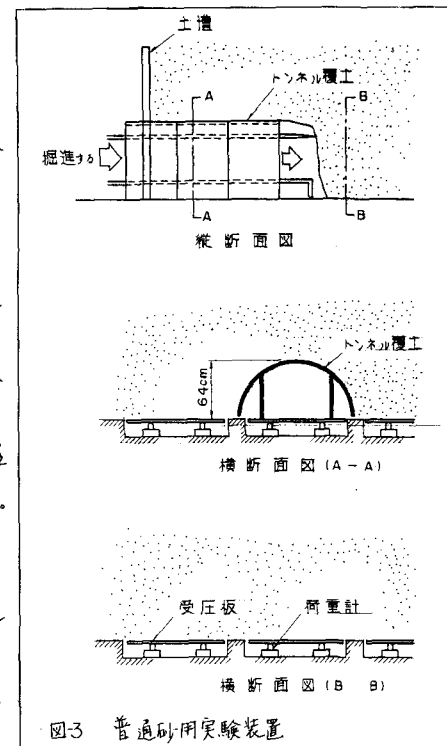


図3 普通砂用実験装置

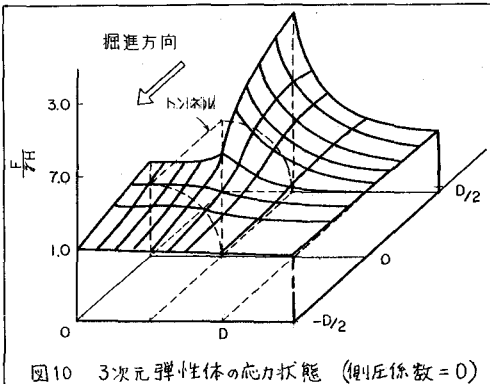
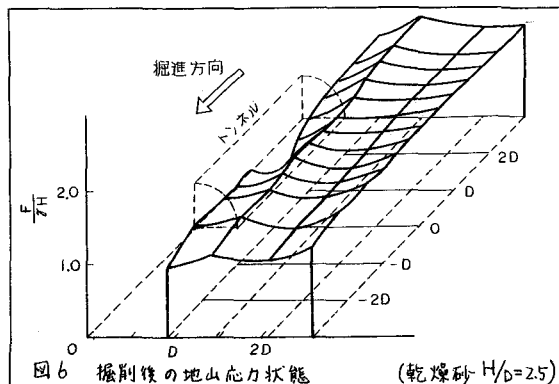
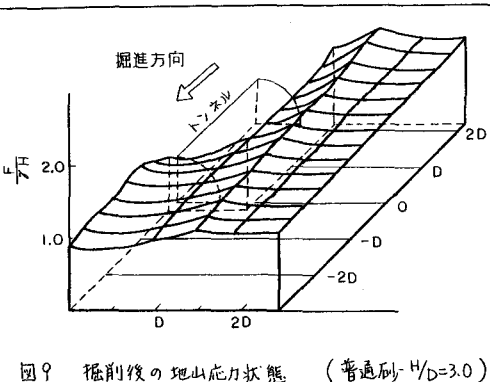
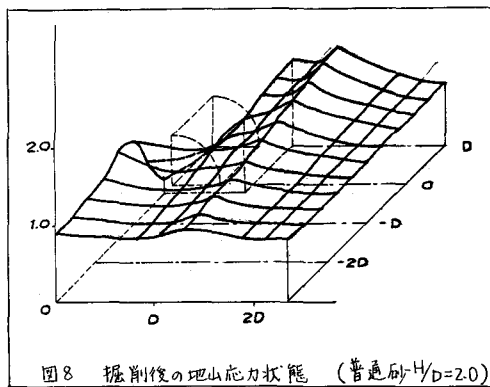
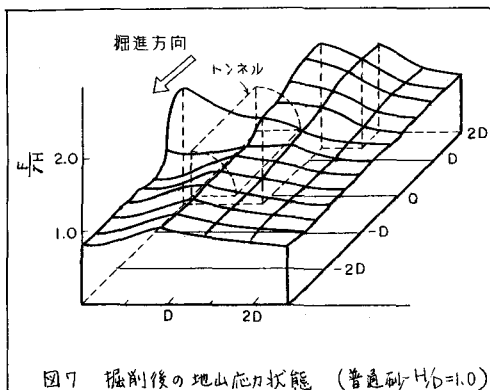
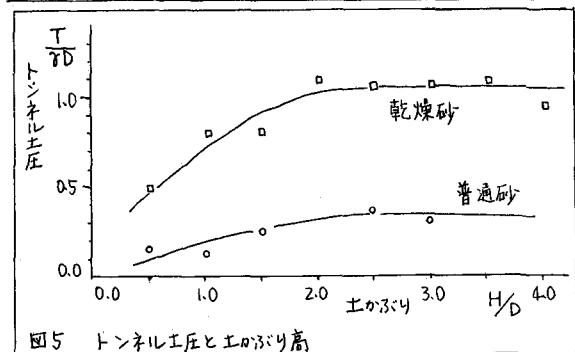
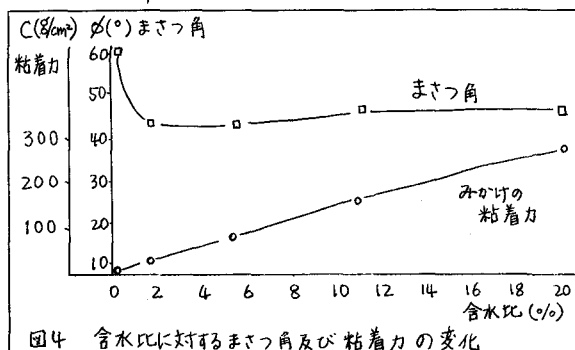
普通砂については H/D が 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 の 6 種類、計 14 ケース行った。

§3 結果

実験の結果についてその一部を以下のように図に示す。

- トンネル土圧
 - 乾燥砂地山………図-5
 - 普通砂地山………図-5
- トンネル周辺の地山中の土圧
 - 乾燥砂地山………図-6
 - 普通砂地山………図-7 図-8 図-9

また参考までに図-10 に 3 次元弾性論によるトンネル周辺の土圧図を示す。



トンネル土圧の実験結果をみると、乾燥砂の場合グランドアーチの作用が確実に働いていることがわかる。その値は、Terzaghiの主張とも一致している（乾燥砂地山はTerzaghiの地山分類表の6等級で永久に地下水面上にあるものに相当すると考えられる）。普通砂の場合、明瞭な傾向はみられないが乾燥砂の場合のトンネル土圧の値近くであり、粘着力の影響力の大きいことがわかる。

トンネル周辺の地山中の応力の実験結果をみると、乾燥砂の場合土かぶり高に関係せず必ず破壊をおこし、しかも変位が大きい。ボーア応力の認めにくい応力分布となっている。普通砂の場合、土かぶり高によって異なった鉛直地山応力分布を示している。地山の1軸圧縮強度が掘削後の地山応力より小さい場合、地山が降伏し $H/D=3.0$ のような応力分布になると考えられる。地山強度が地山応力に比べて十分大きい場合は $H/D=1.0$ のような応力分布を示すが、これは弾性体地山の応力分布と似ている。

現場への適用性をみるために、貝塚トンネルにおける計測結果と比較してみた。貝塚トンネルは千葉市近郊に位置し、国道16号線と京葉道路の各上下線の計4つの2車線道路トンネルが並列にならぶメカネートンネルである。

土かぶりの浅いこともあり、図-11に示すような各種の計測が行われた。パイナメンバー、地山の物性値等は、表-3に示す。これからも、地山の粘着力の影響が強いことがうかがえる。

3.4 まとめ

トンネルの力学的模型実験に関して、新しい実験地山材料と実験装置を報告した。これらは今後切羽の安定問題を模型実験によって解明しようとする際、役立つことと思う。

参考文献

1) 小野諒兄, 貞井耕象: 乾燥砂層における垂直土圧, 土木学会誌, 24巻5号, 1938, pp.437~445.

2) Karl Terzaghi, Introduction to Tunnel Geology, Rock Tunneling with Steel Support, 1946.

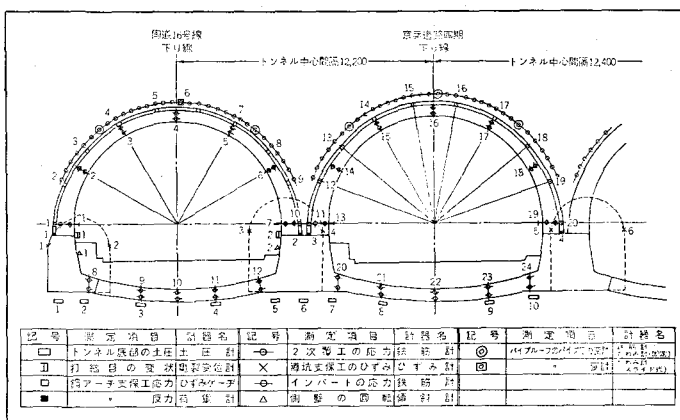


図-11 貝塚トンネルにおける各種計測の状況

表3 現場と模型実験の比較

		現場(貝塚トンネル)	乾燥砂模型実験	普通砂模型実験
π_1	H/D	0.41	0.5	0.5
π_{2A}	c/rD	0.33	0	0.28
π_{2B}	c/rH	0.81	0	0.55
π_3	$\tan \phi$	0.49	0.87	0.84
π_5	T/rD	0.21	0.5	0.18
ϕ	°	26	41	40
c	g/cm^3	650	0	6.01
γ	g/cm^3	1.6	1.75	1.7
H	cm	500	5.7	6.4
D	cm	1220	11.4	12.7

Three Dimensional Tunnel Model Test

to Evaluate the Stress Conditions around a Tunnel Face

Public Works Research Institute

Akira Inokuma

Toshiaki Ishimura

The earth pressure on tunnels is not clearly known yet. There are several ways to make it clear. Model test is one of them. The authors carried out three dimensional tunnel model tests.

1. Law of Similitude

We used dimensional analysis to get the law of similitude concerning this model test and found 5 π numbers (table 2). In this case we ignored π_4 .

2. Experiments

Fig 2 and 3 show the experimental equipment. Roughly speaking, we excavated a tunnel through earth in a tank (1m x 1.5m x 0.5m). We measured vertical pressures both on and around the tunnel.

In order to satisfy π_2 , we needed weak and heavy material for the model's earth. We found that sand with 2% water content, which had a little cohesion resulting from its suction effect, was suitable for this purpose.

Fig 7, 8 and 9 show the results of these experiments.

3. Comparison of the Experiments with a In-Situ Measurement

We compared the results of the model tests with the results of field measurements, which were done at Kaizuka Tunnel Construction Site.

Table 2

π_1	H/D
π_2	C/rL (L=D or H)
π_3	tan
π_4	d/D
π_5	T/rL (L=D or H)

Notation and its dimension		force	length
H	earth covering	0	1
D	tunnel diameter	0	1
d	allowable ground loosening	0	1
r	unit weight of earth	1	-3
C	cohesion of earth	1	-2
ϕ	friction angle of earth	0	0
T	earth pressure on tunnel	1	-2