

砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究

EARTH PRESSURE ON TUNNELS IN SANDY GROUND

村山 朔郎*・松岡 元**

By Sakuro Murayama and Hajime Matsuoka

1. 緒 言

トンネルその他の地中掘削部に作用する土圧の解明は地下開発上きわめて重要な課題であり、その理論的解明は今世紀の初めから各国の多くの研究者によって取り扱われてきた。またトンネル土圧の現場測定についても近年多大の努力がはられるようになってその精度も向上しているが、実際のトンネル設計にはゆるみ高さなどの経験公式を適用して外力を推定しているのが現状である。これは自然物である地盤材料の力学特性の複雑さもさることながら、トンネル土圧の真の発生機構が適確に把握されていないことにも基因していると考えられる。

従来のような土圧現象についてなされた理論的な説明を便宜上大きく分類すれば、沈下部周辺地盤に認められる土粒子間の相対変位の大きい領域での現象の一つのすべり現象と考え種々の形のすべり面を仮定すべり条件式を導入して解析するすべり説と呼ばれるものと、沈下部上方の地盤にアーチ状の粒子間力の伝達線の形成を考慮するアーチ説と呼ばれるものがある。一般に土のエレメントにはせん断と圧縮の両現象が同時に起こっていると考えられるので、すべり説・アーチ説という分類の仕方自体に問題があるようであるが、ここではこのような土圧現象に対してどちらがより支配的な機構かという意味において一応この分類にしたがって以下説明する。この両説にはそれぞれ現象の見方に特徴があり長短があるので、最近の外国での発表論文^{1),2)}をみてもその現象の説明は二分されているようである。著者は数年来種々の実験を行ないこの点について検討を加え、村山³⁾はさきこの問題をいわゆるすべり説の面から解析したが、ここではアーチ説に基づいて説明する場合これを支持するに有利な実験事実をアーチ説の立場で考察してみた。

従来砂質土地盤中の局部沈下部に作用する土圧の解明には、乾燥砂を箱につめて底板の一部を降下させる実験が行なわれることが多かった。このような実験を降下床(lowering panel) 模型実験と名付ける。しかし砂を用いる実験では砂と容器壁面との間の摩擦が誤差として入るなど実験の精度を低下させるおそれがある。そこで本論文では、砂質土の 2 次元モデルとして各種直径のアルミ棒を混合し横にならべて積み上げた積層体を用いて、降下床の降下による積層体中の棒の運動状況を詳細に調べ、同時に降下床上に作用する荷重(この荷重を降下床土圧と仮称する)を降下床直下のロード・セルによって測定した。また光弾性材料でアルミ棒と同様の丸棒を作成し、同じくこれを横に積み上げた積層体に対して光弾性実験を行ない、降下床降下時の粒子間力の伝達状況を観察した。以上の実験結果を検討して、砂質土中の局部沈下部の作用土圧を支配する主要な基本的現象の一つであるアーチ作用と呼ばれるものの意味を考察した。

さらに降下床上に各種形状のブロックをのせて降下部の形状をかえ、いかなる降下部の形状のとき作用土圧が最小になるかという問題をアーチ作用との関連において検討した。またアーチ作用により降下床周辺部には応力集中が起こり、この応力集中のために降下床周辺部が沈下すれば、降下床土圧が増加する。この現象を降下床周辺部を沈下させることによって再現し、降下床土圧が増加する条件や機構を明らかにして、古くから経験的に「地山をゆるめるな」といわれていることの力学的意味を検討した。

以上、本論文においては砂質土中のトンネル土圧の発生機構の解明から出発して、実際のトンネル設計・施工上の 1, 2 の問題点について言及した。

2. 実験の概要

(1) 実験に用いた地盤材料

従来は砂のような粘着力のない砂質土中の局部沈下部

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程

にかかる土圧現象を解析するには、前述のように乾燥砂を容器のなかに詰め容器の底板の一部に降下床を設け、これを徐々に降下させて降下床に作用する荷重（降下床土圧）を測り、また砂の移動を容器前面のガラス板を通して観察することが多く行なわれていた。しかしこのような容器を用いた場合は、降下床の降下につれて砂が下方に移動するとき砂と容器壁面間の摩擦力のため、砂の移動が真の2次元状態と異なることや降下床にかかる砂の圧力が真の値より小さくなること、あるいは砂層中に標点を入れにくいことため砂層の変形状態の観察が困難であることなどの欠点があった。

これらの欠点を除くため、ここでは、まず砂の代わりに長さが50mmで種々の直径をもつアルミ棒を適当な混合比でまぜ、それを柱面を平行にしてわくのなかに水平に積み上げた積層体を地盤材料として実験を行なった。アルミ棒の積層体は、(イ) 径1.6, 3mmを混合したもの、(ロ) 径3, 5, 9mmを混合したもの、(ハ) 径1.6mmだけのものの3種類を使用した。(イ)の混合重量比(3:2)および(ロ)の混合重量比(8:7:5)はいずれも豊浦の標準砂の粒径加積曲線に平行になるような割合で決定したものである。また光弾性実験を行なって粒子間力の伝達状況を把握するため、長さが20mmで径6.2mmと10mmの光弾性材料の棒を作成し、これを同様に積層したものも地盤材料とした。これらの棒の積層体を用いる利点は、① 棒の積層体は自立するから前後面を壁面で支える必要がなく、したがって試料と壁面間の摩擦の影響が皆無である。② 積み上げられた棒の端面にじかに標点や標線を描くことにより、地盤の変形状態を明確に観察することができる。③ 後述する重ね撮り方式などにより個々の棒の運動状況まで精密に写真撮影できる。④ 径の異なった棒の混合比を変えることにより種々の粒度組成の粒状体に類似させられる。⑤ アルミ棒を用いる場合には、その比重(2.69)が砂れきなどの比重に類似している。⑥ アルミ棒の積層体のせん断試験の結果、その内部摩擦角がほぼ 30° になり、一般の砂の内部摩擦角に近い。⑦ 光弾性材料の棒を積層し、上載荷重をかけて光弾性実験を行なうことにより、砂質土中の粒子間力の伝達状況を2次元モデルとしてシミュレートできる、などがあげられよう。

(2) 実験装置および実験方法

アルミ棒の積層体を用いた降下床の実験装置の模様を写真-1に示す。下の降下床降下用のハンドルをチェーンを介してモーターによって1回転すると降下床は0.5mm降下する。通常の実験では約1.0mm/minの速さで降下させた。降下床を支持しているシャフトは直下のロードセルに接しており、降下床にかかる荷重(降下

床土圧と仮称)を測定することができようになっている。降下床の幅 B は種々に変えることが可能で、本実験では $B=3, 6, 9, 10, 12, 15, 20$ cmの7種類について行なった。土かぶり(地盤材料の高さ) D は、通常30cmと60cm前後の2種類を採用した。左右の仕切り壁間の距離は約60cmとした

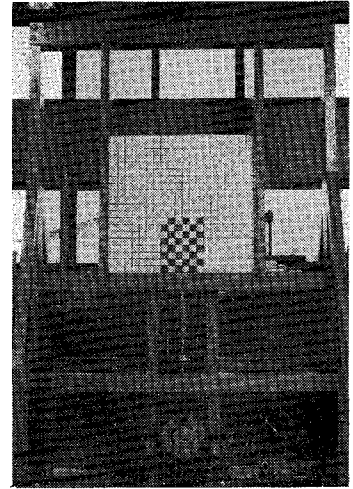


写真-1 アルミ棒を積層した降下床模型実験装置

が、この幅は降下床幅、土かぶりに対して十分に広く、地盤材料の動きに対して影響をおよぼさないように考慮した。

この場合の実験はつぎのような方法で行なった。まず所定の混合比に混合されたアルミ棒を左右の仕切り壁間に積み上げ、必要に応じて積層体の端面にインクで標線(マス目状)を描いた。降下床の降下に伴う地盤材料の移動状況を見るため、降下床をある量降下させるごとに写真撮影し、同時にロードセルによって降下床にかかる荷重を測定した。なお写真の撮影法は必要に応じつぎの3方式を採用した。

[a]-方式：カメラを地上の定位置に固定し、各降下床の降下量ごとに地盤の正面を撮る。標線が描かれている場合は、地盤中の各点の沈下量および地盤の変形状態を知ることができる。

[b]-方式：上と同様カメラを地上に固定し、降下床がある高さ降下する間を同じフィルムに重ねて写す。この重ね撮り方式によれば、地盤材料の移動流線が得られ地盤の移動状況を知ることができる。

[c]-方式：カメラを降下床に直結した台にすえ降下床と同じだけ降下するようにして、ある降下距離の間重ね撮りする。したがってこの方式では、降下床と同じ降下をする地盤の範囲が鮮明な静止像として写ることになる。

なお降下床の表面形状の降下床土圧におよぼす影響や降下床周辺部に生ずる応力集中による沈下の影響についても実験を行なったが、それらについては後節でそれぞれ説明する。

3. 降下床土圧について

(1) すべり説とアーチ説

一般にアーチ作用 (arch action) とかアーチング (arching) と呼ばれている現象は砂質土中の局部的変形に起因する砂中の応力の一種の再分布現象であって、直観的には広く理解されているようであるが力学的に十分解明されるには至っていない。ここではまず降下床模型実験より得られた写真を参照しながら従来の考え方の要点をまとめてみる。

写真-2 は [a]-方式で撮影した写真であり、降下床 (三角印の間が降下床部分) の降下に伴う地盤の変形状態が観察できる。黒く塗りつぶしてあるのはマス目の変形の様子を見やすくしたものである。また 写真-3 は [b]-方式による写真であり地盤の流動領域が判定できる。さらに 写真-4 は降下床に直結されたカメラで撮影した [c]-方式による写真であり、静止して鮮明に写っている部分は降下床と同一の沈下をする領域を意味する。これらの写真より、降下床周辺の地盤を便宜上 図-1 に示すように降下床と同一の移動をする 1 次領域と、この 1 次領域に追従してゆっくり移動する 2 次領域および 2 次領域の外方において降下床を降下させても土粒子が移動しない静止領域に分ける。またこれら 3 領域の境界面は一つの不連続面と考えられるから、それらをそれぞれ内側境界面、外側境界面と名づける。

さて降下床土圧の理論的な説明については、前述のようにすべり説に基づくものとアーチ説に基づくものがある。ここですべり説というのは、降下床の降下により土粒子間に大きい相対変位の生ずる外側境界面か内側境界面あるいはその両方に着目して、これらの境界面ではいわゆるすべり現象が起きていると考え、降下床土圧を解析するものである。したがって、この考え方によれば、これらのすべり面において地盤材料に対するせん断試験結果を適用することができ、その力学解析は比較的明解である。一方アーチ説というのは、降下床の降下に伴って降下床上のアーチ形状の領域がただちに弛緩、沈下し周辺部よりも下がる結果、今までほぼ真下に伝わっていた粒子間力の大部分がそのアーチ形状の領域の外周部に沿って左右に分かれて降下床外方に伝わるようになると考え、このアーチ状の粒子間力の伝達線、換言すればアーチ状の最大圧縮主応力線の形成が降下床上に作用する土圧の大きさを支配する主要な現象と考えるものである。このアーチ形状の領域として、1 次領域と類似の領域を想定している理論が多いが、降下床と同一の沈下をする 1 次領域という物理的意味を示しているものはない。

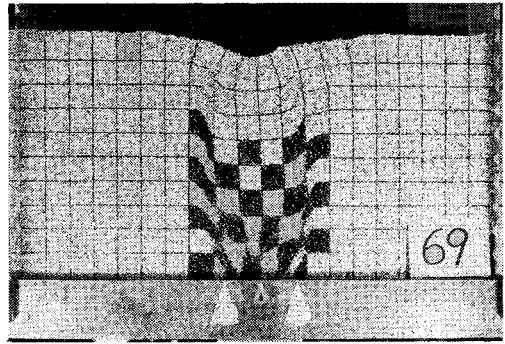


写真-2 アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$) の変形状況, $B=9 \text{ cm}$, $D=30.7 \text{ cm}$, $\delta=70 \text{ mm}$

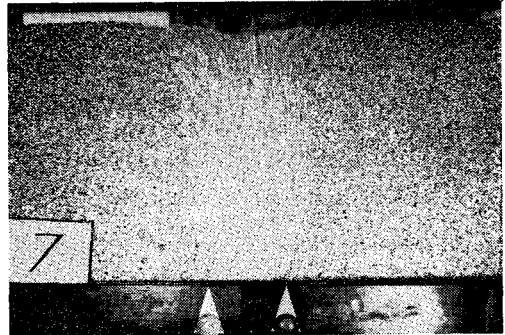


写真-3 アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$) の流動状況, $B=9 \text{ cm}$, $D=30.7 \text{ cm}$, $\delta=46\sim 70 \text{ mm}$

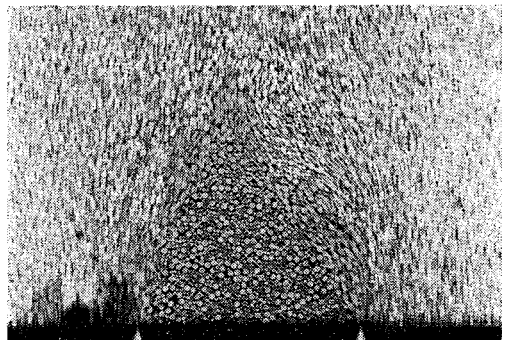


写真-4 降下床に直結されたカメラで撮影したアルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$) の移動状況 $B=9 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=8\sim 11 \text{ mm}$

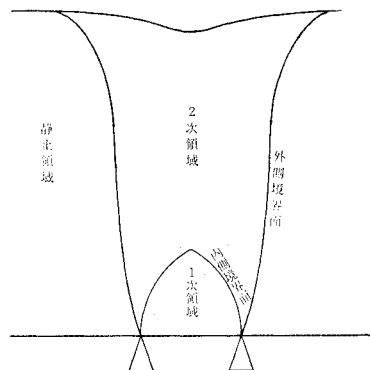


図-1 1次、2次、静止領域と内側、外側境界面

(2) 降下床土圧に関する従来の研究

降下床土圧に関する従来の理論的解析を大別すると、前述のようにすべり説に基づくものとアーチ説に基づくものがある。またすべり説のなかでも1次領域と2次領域の境界面である内側境界面付近に着目しているものと2次領域と静止領域の境界面である外側境界面に着目しているものおよび内・外両境界面に着目しているものに分類できる。

まずすべり説のうちで内側境界面だけを考慮している研究について述べる。従来の研究には先に述べたような明確な物理的意味をもつ1次領域を定義しているものがないので、その境界面である内側境界面については研究者によりその定義、形状、挙動についての見方が種々に異なっている。しかしながら、その物理的意味が不明確であっても、乾燥砂を用いた降下床の実験などを行なえば2次領域より多く沈下するアーチ形状の領域が観察されるので、その境界面を一つのすべり面とみなして解析した研究が多く発表されている。伊藤¹¹⁾は1次領域付近の土粒子間の相対変位が最大と思われる点を結んで、これをすべり面で囲まれた楕円と仮定し、さらに楕円の頂点では応力が0、楕円はその上の3点ですべり条件を満足するものと仮定して降下床土圧を求めている。Balla⁹⁾は1次領域に相当するものとして降下床中心軸上で交差する一対の対称な円弧のすべり面で囲まれた領域を仮定し、その領域の頂点の応力はその上方地表までの土かぶりのもとで受働破壊状態にあるとして解いている。

つぎにすべり説のうちで外側境界面だけに着目した研究について述べる。これは1次領域を顧慮せず、これを2次領域と一つに合わせて考え、この一体とした流動領域に相当する土柱のつり合いから降下床に作用する土圧を算定するものである。この分類に属するものは、Culmann⁶⁾、Bierbaumer⁷⁾、Völlmy⁸⁾などの研究があり、最近よく使われているものにTerzaghi⁹⁾の研究がある。これらは外側境界面をすべり面と考え、このすべり面の形状やそこに作用するせん断応力の取り扱い方に相違がみられるけれども、いずれも1次・2次両領域を一つの領域とみなしてそれに作用する外力のつり合いより降下床土圧を算定するものである。Terzaghiは「ground arch」¹⁰⁾を想定しているが、降下床土圧の解析には単に外側境界面でのすべり条件をつかっているにすぎない。

すべり説の第3の分類に属するものは、内・外両境界面に着目した研究である。すなわち、1次・2次・静止の3領域を考慮した解析で、これには水野¹¹⁾、村山³⁾の研究がある。水野¹¹⁾は内・外両境界面はともに塑性状態にあると仮定し、特に内側境界

面は普通のすべり面ではなく塑性限界点の連続する軌跡面とし、また1次領域の頂点は降下床の降下に伴い上昇していることが特徴である。その結果、1次領域は降下床の両端を通る双曲線で囲まれた領域となる。また村山³⁾は内側境界面を降下床中心軸上で交差する一対の対称な対数ラ線のすべり面と仮定し、外側境界面を降下床両端から立ち上がる左右2つの鉛直面と近似して解析を行なっている。すなわち、鉛直面に近似した外側境界面に対してTerzaghiの理論⁹⁾を適用して内側境界面の頂点応力を算定し、その頂点応力の値および頂点における受働破壊の条件から対数ラ線の内側境界面についてKötter-Massauの理論を用いて降下床土圧の算定式を誘導している。

つぎにアーチ説に基づく研究について述べる。これは前述のように砂中にアーチ形状の粒子間力の伝達線の形成を考えるものである。アーチの形状としては、降下床の両端を通る放物線、楕円などがよく用いられ、これに属する研究にはRitter, Engesser, Willmann, Wagner, Kommerellなどの一連の研究¹²⁾、Meem¹³⁾や小野・真井¹⁴⁾の研究などがある。これらは砂中のアーチングの概念を用いて降下床直上のアーチ形状の領域の重量が降下床土圧として作用すると考えるものであるが、このアーチ形状の領域と1次領域との関連は明らかにされていない。また小野・真井¹⁴⁾はアーチ作用に基づくアーチ形の抵抗線を主働破壊状態にある砂層中の土圧曲線(geostatic curve)と仮定し、さらにこれを楕円に近似して、そのアーチ以下の重量が土圧として作用するとしている。

(3) 降下床土圧に関する実験結果とその解釈

ここでは降下床土圧に関係する種々の実験結果をあげ、それらを総合的に判断してアーチ作用の実態と考えられるところを述べる。

図-2は降下床の降下量 δ (mm)と降下床にかかる土圧合力 P (kg)の関係を示す降下床模型実験結果の一例

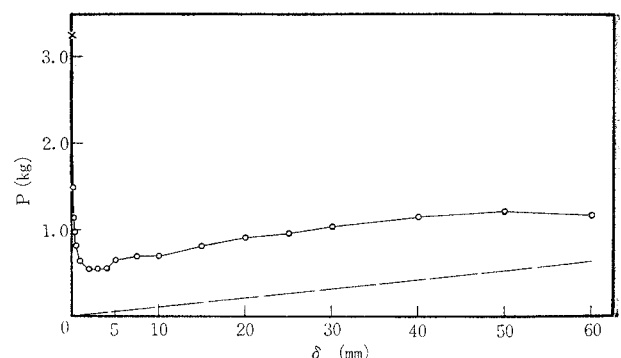


図-2 アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6$ mm, $\phi 3$ mm) の $P \sim \delta$ 関係。 $B=10$ cm, $D=30$ cm

である。これは径 1.6 mm と 3 mm のアルミ棒の積層体（混合重量比 3:2）について行なわれたもので、その実験条件は降下床幅 $B=10$ cm, 土かぶり $D=30$ cm, 積層体の単位体積重量 $\gamma=2.16$ g/cm³, 積層体の初期間げき比 $e_0=0.24$ である。この図中に×印で示すように $\delta=0$ のとき土圧合力 P は自然堆積状態の土かぶり重量と一致しているが、①「降下床を降下すると急激に減少し、きわめて微小な降下量（2~3 mm）で土圧は最小値となる」。そしてその後土圧合力は δ の増加とともに漸増するが、②「降下床の降下につれてできた降下床直上のくぼみ内にたまるアルミ棒の重量（図中に破線で示す）を差し引けば、ほぼ一定値を示す」のがみられる。①および②はアルミ棒積層体についての多くのこの形式の降下床実験で一貫して得られた実験事実であり、また砂について行なわれた小野・真井の実験¹⁴⁾でもいわれているので、砂質土についての一般的な特性とみなしてよいであろう。したがって現場でよくいわれている「地山をゆるめるほど土圧が大きくなる」という考えは、この意味において必ずしも当を得ていない。

また実験事実①に述べているように、土圧はせいぜい $\delta=2\sim 3$ mm というような微小降下量で最小となるが、このときはまだ土粒子の動きは外側境界面あたりまで伝

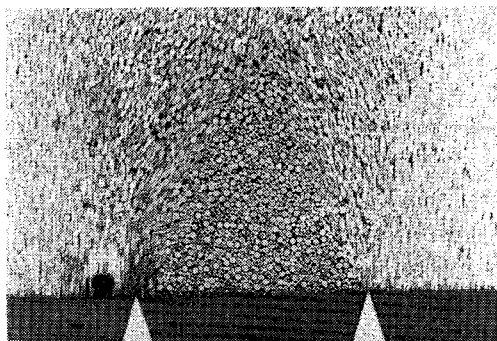


写真-5 降下床に直結されたカメラで撮影したアルミ棒混合積層体（ $\phi 1.6$ mm, $\phi 3$ mm）の移動状況
 $B=9$ cm, $D=30$ cm, $\delta=36\sim 39$ mm

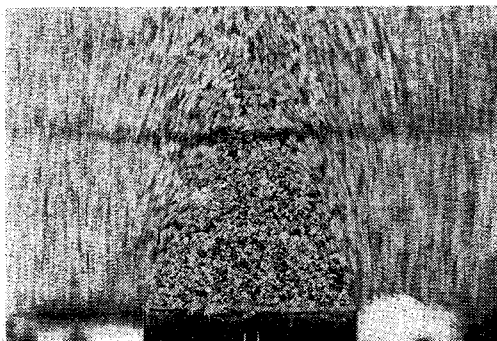


写真-6 降下床に直結されたカメラで撮影した粗砂（ゆる詰め）の移動状況
 $B=10$ cm, $D=49$ cm, $\delta=0\sim 10$ mm

わっていないようである。したがって流動領域（1次および2次領域）とその周囲の静止領域の境界面である外側境界面はまだ完全なすべり面には発達していない。そこで1次領域付近に着目して、先の写真-4と同じ[c]-方式による写真-5および写真-6を示す。ここに写真-5はアルミ棒積層体についての、写真-6は乾燥砂についての撮影結果である。これらの写真-4, 5, 6より、③「アルミ棒積層体についても、砂についてもきわめて類似した形状の降下床と同一の沈下をする1次領域の存在が認められ、かつそれは δ の増加に伴い多少上下左右に動揺するが基本的には降下量に無関係なほぼ同一の形状を示している」ことが観察される。

ここで以前にすでに発表したが¹⁵⁾、この1次領域が形成される物理的な意味について考察する。1次領域の形状は粒径と粒子配置に関係すると考えられるので、実験にもっとも多く用いた2種の径（ $\phi 1.6$ mm, $\phi 3$ mm）のアルミ棒混合積層体の粒子配置をシミュレートすることを試みた。このときその粒子抽出法としては、一般の粒度分布をもった砂に対するモンテカルロ法を利用した松尾・駒田・高橋¹⁶⁾の粒子抽出法にならってつぎのように行なった。すなわち、2種の径の混合重量比（60:40）を粒子数比（本数比）（84:16）に換算し、一様乱数表をひいて例えば 01~84 の数字が出たときは $\phi 1.6$ mm の粒子を、85~00（00 は 100 とみなす）の数字が出たときは $\phi 3$ mm の粒子を抽出し、この操作を繰り返して順次粒子を抽出するのである。

つぎにその粒子配置は最下段では左から右に横につめて並べるものとし、その上では左から右へ粒子が自立（self-support）する位置に順次積み上げるものとした（「左から右へ」というのは粒子の配置順序を決めるための一つのルールであるから、これを「右から左へ」としても乱数表にしたがって粒子を抽出しているので本質的な差はないように思われる）。なおこのとき、すでに配置の完了した粒子は常に静止しているという条件のもとで、新たに配置する粒子の自重のもとでの安定を考慮して配置するものとする。このような方法で最下段列の上に粒子を順次積み上げた一例を図-3に示す（図中の連続番号は並べた順序を示す）。なおこの図の間げき比を計算すると約 0.24 となり実験での間げき比とよく一致した。この図で最下段列の幅を降下床幅とすれば、図のアーチ形状の領域は降下床の降下につれて鉛直降下の可能な部分であり、これを1次領域の物理的な意味と考える。事実、図-3の形状は写真-4, 5, 6に示された1次領域と類似している。

また特別な場合として、等大径（ $\phi 9$ mm）のアルミ棒の最密（六角形配置）構造および最疎（正方形配置）構造の場合について降下床模型実験を行なうと、前者では

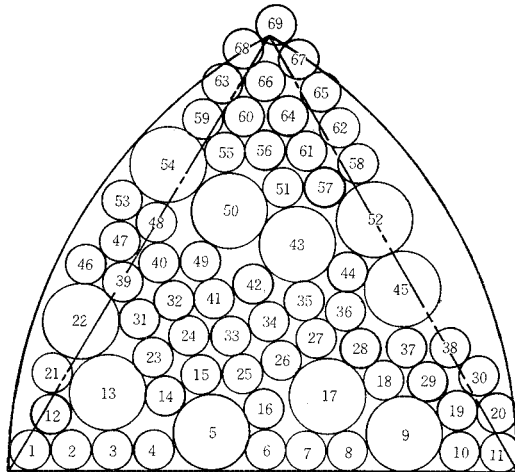


図-3 モンテカルロ法による粒子配置の推定と1次領域

写真-7 にみられるように正三角形の1次領域が形成されるのに対し、後者の場合は写真-8 に示すように降下床の幅で表面にまでおよぶ流動領域が観察される¹⁵⁾。このように1次領域は必ずしも固定された形状ではなく粒径とその粒子配置によって変化するものであるが、最疎（正方形配置）構造は不安定な粒子配置であり、実際の地盤ではあまり存在しない構造と考えられる。以上のことを総合して、1次領域の物理的意味はその地盤の粒径および粒子配置のもとで降下床の降下につれて降下床と一体となって鉛直降下することの可能な領域という意味であり、その形状は粒径および粒子配置によって多少変動するものであるが、ほぼ正三角形に外接するようなアーチ形状であると考えられる。

つぎに降下床幅 B および土かぶり D を種々に変化させて降下床にかかる最小安定時の土圧合力 P を測定し、その結果を整理した（このデータは4.表-1に P_m として示す）。これより、④「土圧合力 P は降下床幅 B によって大きく変化するのに対して土かぶり D にはあまり影響されない」ことがみられた。これは小野・真井の砂についての実験¹⁴⁾でもいわれていることである。さらに興味あるのは、⑤「この土圧合力 P が前述の1次領域内の土粒子の自重にほぼ等しい」ことである。これは従来よりアーチ説でばく然といわれていたアーチ以下のゆるんだ地盤の重量だけが降下床に土圧として作用するという考え方に一致する。しかしながら1次領域内の地盤だけが沈下し、周辺の地盤は沈下を起さず、その境界面（内側境界面）に沿って明確なすき間ができるわけではなく、2次領域の土粒子も1次領域に追従して移動している。したがって実際に1次領域の境界面（内側境界面）が力の伝達上の不連続面になるのか、1次領域の外周から力の伝達があるが、内側境界面での土粒子の相対変位に基づくせん断抵抗力をうけてみかけ上

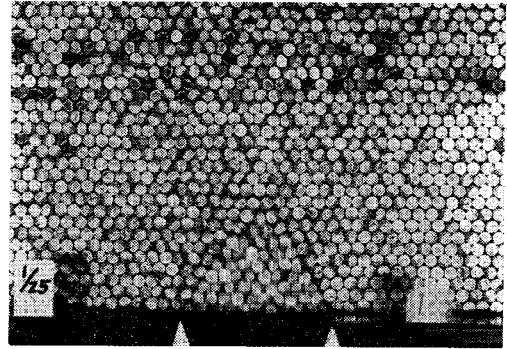


写真-7 最密（六角形配置）構造の等大径アルミ棒積層体(φ 9 mm)の移動状況、 $\delta=2\sim 5$ mm

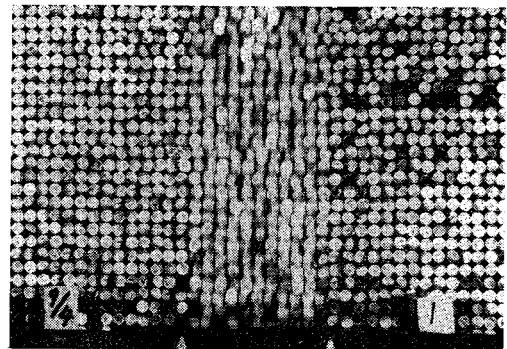
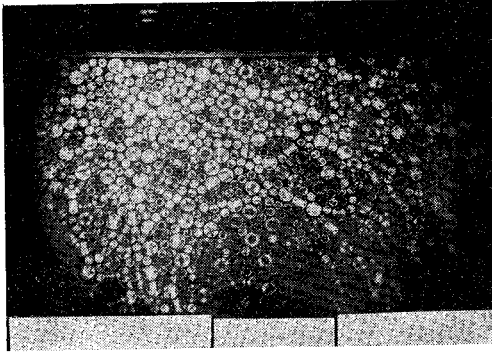


写真-8 最疎（正方形配置）構造の等大径アルミ棒積層体(φ 9 mm)の移動状況、 $\delta=0\sim 5$ mm

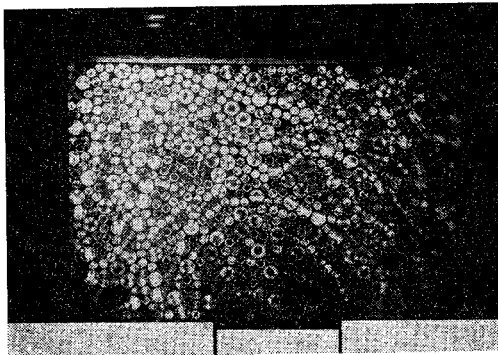
1次領域の自重に等しくなるのか、このどちらの機構が支配的なのかという問題になる。

さて、1次領域の外周に沿って完全にすき間があくことは少ないが、小野・真井¹⁴⁾はそこで砂の間げき比が大きくなることを指摘しているし、ホッパー内の粉体の流れをX線写真で撮影したところ1次領域の外周にきわめて類似したアーチ形状の曲線に沿って密度の低い不連続面があらわれるという報告¹⁷⁾もされている。また伊藤⁹⁾は楕円形のアーチを仮定して降下床上の作用土圧の解析を行なっているが、そのなかでアーチの頂点での伝達応力が0という条件を置き、その理由としてアーチの頂点付近では砂がパラパラと落下するのが観察されるという実験事実をあげている。アルミ棒の積層体に対する降下床実験において、薄いゴム膜の受圧面をもつ水压変換型の圧力計¹⁸⁾によって1次領域のアーチ形外周面の頂点付近での作用応力を測定したが、これより⑥「1次領域の頂部での応力は降下床の微少な降下によって急激に低下し、ほとんど0に等しいきわめて微小な値となる」ことが判明した。

以上の実験事実①～⑥よりアーチ作用の性状はほぼ明らかにされたが、さらに明確な見解を得るため、光弾性材料の棒の積層体に対して降下床の光弾性実験を行なった。降下床の降下前には上部の板を介して載荷され



写真—9 降下床の降下による粒子間力の伝達状況：光弾性材料の棒の混合積層体（ $\phi 6.2 \text{ mm}$, $\phi 10 \text{ mm}$ ）の光弾性縞写真， $B=7.5 \text{ cm}$, $\delta=4 \text{ mm}$



写真—10 降下床の降下による粒子間力の伝達状況：光弾性材料の棒の混合積層体（ $\phi 6.2 \text{ mm}$, $\phi 10 \text{ mm}$ ）の光弾性縞写真， $B=7.5 \text{ cm}$, $\delta=7 \text{ mm}$

た上載荷重により発生した光弾性縞からほぼ鉛直方向の力の伝達が認められるが、⑦「降下床をわずかに（2～3 mm）降下させれば光弾性縞の様子は一変し、写真—9、10 に示すような降下床をまたぐアーチ形状の力の伝達線が形成される」。その後降下床をさらに降下させれば、棒は沈下するのでアーチ形状の伝達線がこわれることがあるが、すぐ新たな伝達線が形成される。このようにアーチ状の力の伝達線の形成は、不安定な過渡的な現象であるが、これが降下床土圧の支配機構であると考えられる。しかも写真—9、10 にみられるように、⑧「力がほとんど伝達されなくなったアーチ以下の部分はほぼ1次領域の形状と一致するようである」。これらのことはつぎのように解釈できる。すなわち、降下床が降下すれば1次領域はその物理的意味からただちにそれと同一の沈下をするので、1次領域外周部の土粒子は一斉に1次領域に追従しようとする。その結果、アーチ状の1次領域外周部に沿って一時的な土粒子の閉そく状態が生じ、いままでも真下に伝達されていた力の大部分はその伝達方向を1次領域外周部に求める。1次領域の外周はアーチ形状をしているので、それに沿って力の伝達線が形成されやすいと考えられる。また1次領域の外周に沿っては伝

達線が形成されにくいような状況であっても、あるいは沈下がすすんで崩壊しても、外周部のある幅をもった領域内のアーチ状の伝達線が形成されやすいところで、一時的に形成されていくのである。なお、この実験事実⑧は実験事実⑤とも矛盾しない。

以上の実験事実を総合すれば、従来アーチ作用と呼ばれている現象の主要な性状としては、その名の示す通りアーチ状の力の伝達を想定したアーチ説の主張がよく認められ、写真—9、10 からその実態がうかがわれる。また、これらの写真から明らかなように内側境界面では面に垂直な方向の力の伝達はきわめて少ないので、ここで土粒子間のすべり（相対変位）が起こっても降下床土圧に対するその力学的寄与は少ない。しかし厳密には内側境界面に垂直な方向の小さな力をも考慮しなければならないであろうが、近似的には1次領域の重量のみが降下床に作用するものと仮定しても大きな誤差はないように判断される。また降下床幅に対して粒子が小さい場合とか、地山の粒子がゆる詰め状態にある場合、あるいは降下床幅に対して土かぶり小さい場合に、はたして上述のメカニズムが支配的であるかどうかという問題点が考えられる。次節で示す実験データによればゆる詰めと比較的粒径の小さい砂についてもほぼ同様に説明できるようである。アーチ作用は、アーチ方向の土粒子の圧縮現象がより支配的なメカニズムである現象と考えられる。ゆえに、ゆる詰めであっても地盤を形成している限りは極端に不安定な粒子構造ではないであろうし、前述したように1次領域に追従して一種の閉そく状態を呈するので、ゆる詰めの場合でもアーチ状の粒子間力の伝達線を形成しうるものと考えられる。また降下床幅程度かそれ以下の薄い土かぶりしかない場合には、上述したような降下床をまたぐ単一のアーチ状の粒子間力の伝達線は形成されにくいと考えられるが、このときには降下床上の全土かぶり重量がそのまま作用すると考えてもあまり大きな値にはならず実用上は問題にならないであろう。このような土かぶりの小さい場合には Terzaghi の理論⁹⁾を適用することができると考えられる。

4. 降下床模型実験結果とその考察

(1) 通常の降下床模型実験

ここでは、前節で明らかにしたアーチ作用の発生機構に照らして降下床模型実験の結果を検討し、降下床土圧について考察した。

3. (3) において種々の実験事実から判断したように、局部沈下部に作用する土圧を支配するアーチ作用の主要な効果は、局部沈下部の上方からの粒子間力のうち

沈下部に直接伝達される部分は少なくなり、大部分の力が沈下部をまたぐアーチ状の粒子間力の伝達線に沿って左右に分かれて沈下部外方に伝達されることである。したがって、近似的にはアーチ状の粒子間力の伝達線より下の領域にある地山の自重が局部沈下部に土圧の主力として作用すると考えられる。しかもアーチ状の粒子間力伝達線下の領域は、降下床と同一の沈下をする1次領域とほぼ等しいことが見い出された。これらのことより、通常の条件のもとで降下床に作用する荷重は、アーチ作用によって地山の1次領域の自重に概略等しくなることになる。

1次領域の形状は、前述したように地山構成材料の粒径および粒子配置などによって多少変動するものであるが、ほぼ正三角形に外接するようなアーチ形状とみられる。また図-3および写真-4, 5, 6などから、その形状は一辺を降下床幅 B とする三角形とその底辺の2頂点に中心をもち半径 B の2つの円弧からなるアーチの間に大略おさまるであろうと判断される。そこで1次領域の形状がこれらの正三角形と円弧アーチの間にあると仮定すれば、1次領域の面積はそれぞれつぎのように計算される正三角形と円弧アーチ内の面積の間にあることとなる。

$$\frac{\sqrt{3}}{4} B^2 \approx 0.43 B^2,$$

$$2\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{4}\right) B^2 + \frac{\sqrt{3}}{4} B^2 \approx 0.62 B^2$$

したがって、2次元的な平面ひずみ条件において降下床に作用する荷重(降下床土圧と仮称)は近似的に次式によって算定できる。

$$P_c = (0.43 \sim 0.62) r B^2 L \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 r は地山の単位体積重量、 B は降下床幅、 L は奥行き長さである。

表-1 アルミ棒積層体の種々の実験条件に対する降下床土圧の測定値と計算値の比較

地山材料	降下床幅 B	土かぶり 高さ D	単位体積重量 r	降下床土圧の 計 算 値 P_c	降下床土圧の 測 定 値 P_m
アルミ棒 $\phi 1.6, 3\text{mm}$	3 cm	30 cm	平均 2.16 g/cm ³	42~60 g	60 g
	3	59		42~60	60
	6	30		167~241	220
	6	60		167~241	210
	9	30		376~542	450
	9	61		376~542	430
	10	29		464~670	650
	12	60		669~964	950
	15	31		1045~1507	1280
	15	60		1045~1507	1430
20	30	1858~2678	2700		
アルミ棒 $\phi 1.6\text{mm}$	6	30	平均 2.27	176~253	230
	9	30		395~570	540
	9	60		395~570	530
アルミ棒 $\phi 3, 5, 9\text{mm}$	10	42	平均 2.23	479~691	660
	10	66		479~691	660

表-1 はアルミ棒積層体の種々の径よりなる地山材料、種々の実験条件に対する式(1)による降下床土圧の計算値(P_c)と降下床模型実験により得た測定値(P_m)の比較を示している。降下床土圧の測定値は、図-2にも示したように、土かぶり重量にほぼ等しい $\delta=0$ における値から数 mm の降下量によりアーチ状の粒子間力の伝達線の形成によって急激に減少して最小値となり、その後アーチ状の粒子間力の伝達線の崩壊と再形成を暗示するかのようになら多少動揺しつつ、徐々に増加する。しかし、徐々に増加する主な原因は前述したように降下量が大きくなって降下床上のくぼみにたまった地山材料の重量によるものと考えられ、この重量を差し引けばほぼ一定の値を保つようである。それゆえ、表-1 にあげた降下床土圧の測定値(P_m)にはアーチ状の粒子間力の伝達線の形成が明確な最小値付近の代表値を選んだ。表-1 より降下床土圧の測定値(P_m)は計算値(P_c)とほぼ良好な対応を示しているのがみられる。また測定値は計算値の上限値($0.62r B^2 L$)に近いものが多いようである。

伊藤・藤井・小副川¹¹⁾はゆる詰め乾燥砂(粒径 0.5~2.5 mm; $r=1.51\text{ g/cm}^3$)を地山材料として、 $B=10\text{ cm}$, $D=80\text{ cm}$, $L=50\text{ cm}$ なる実験条件のもとで降下床模型実験を行ない、降下床土圧の測定値として $P_m=3500\text{ g}$ を得て、各種の理論式による計算値と比較している。伊藤らによれば、Engesser 式による計算値は 2297 g、小野・真井式の場合は 6040 g、Terzaghi 式の場合は 6436 g、伊藤式の場合は 5517 g と計算されている。一方、式(1)によって降下床土圧を計算すると $P_c=3247\sim 4681\text{ g}$ となり、測定値 $P_m=3500\text{ g}$ はその間に入りここにあげたほかのどの理論式よりも測定値をよく説明している。

また、小野・真井¹⁴⁾はゆる詰め乾燥砂($r=1.4\text{ g/cm}^3$)を円筒形の容器に入れ、容器の底部中央に円形の降下床を設けて、種々の降下床径($\phi 4\text{ cm}\sim 20\text{ cm}$ の9種)、土かぶり高さ(5 cm~100 cmの8種)のもとで降下床模型実験を行なった。この場合は粒子の動きが3次元的になるが、先に述べた2次元的な平面ひずみ条件での考察を拡張して降下床土圧の算定式を誘導する。すなわち、円形降下床の場合の1次領域の体積を、正三角形を鉛直軸のまわりに回転した円すい形の体積と前述の円弧アーチを同じく鉛直軸のまわりに回転した回転体の体積の間の値として評価する。底面径が d で高さが $(\sqrt{3}/2)d$ の円すい形の体積はつぎのように表わされる。

$$\frac{\pi}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{2} d \approx 0.23 d^3$$

また、この円弧アーチの回転体の体積はつぎのように計算できる。

$$\pi \int_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}d} \left(\sqrt{d^2 - z^2} - \frac{d}{2} \right)^2 dz$$

$$= \pi \left(\frac{3\sqrt{3}}{8} - \frac{\pi}{6} \right) d^3 \approx 0.40 d^3$$

ここに、 z は円弧アーチ回転体の回転軸の座標で、回転体の底面に原点をもち上向きを正にとっている。したがって、円形降下床の場合の降下床土圧の算定式は次式となる。

$$P_c = (0.23 \sim 0.40) \gamma d^3 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 γ は地山の単位体積重量、 d は降下床径である。

表-2 は種々の降下床径に対する式(2)による降下床土圧の計算値(P_c)と小野・真井の行なった円形降下床模型実験により得た測定値(P_m)の比較を示している。なお、表-2のカッコ内の値は降下床の降下量38mmまでの測定値の平均値を示したものである。この表より、降下床土圧の計算値(P_c)は測定値(P_m)をほぼ説明できるようであり、2次元の場合の考察を拡張することによって3次元の円形降下床に作用する荷重も同様に予測できる。なお、この表には土かぶり高さが記入されていないが、土かぶり高さが降下床径より大きい場合には、砂層の高さにほとんど関係なく降下床土圧はほぼ同一の値になるからである。このことは表-1からも推察のつくように、アルミ棒積層体の地山についても成り立つようである。

表-2 乾燥砂の種々の実験条件に対する降下床土圧の測定値(小野・真井¹⁴⁾による)と計算値の比較

降下床径 d	降下床土圧の計算値 P_c	降下床土圧の測定値 P_m
4 cm	21~36 g	16 g
6	70~121	60
8	165~287	190
10	322~560	360
12	556~968	661 (700)
14	884~1537	1098 (1300)
16	1319~2294	1497 (1800)
18	1878~3266	2023 (2500)
20	2576~4480	2917 (3200)

($\gamma = 1.4 \text{ g/cm}^3$, $D = 25 \sim 100 \text{ cm}$ の4種)

以上の考察より、前節で明らかにしたアーチ作用の発生機構に基づいて誘導した降下床荷重の算定式(1)、(2)は、その単純な形にもかかわらずアルミ棒積層体や乾燥砂などの粒状土中の局部沈下部に作用する荷重測定値をかなりよく説明するものであり、ここでのべたアーチ作用の特性はほぼ妥当なものと考えられる。

(2) 各種の表面形状をもつ降下床模型実験

地山中にトンネルを掘削すれば、いかに支保を強固なものとしても掘削部は周辺部に対して局部的に沈下す

る。上述した局部沈下部の作用土圧の発生機構と照らし、トンネルの断面形状がトンネルに作用する土圧(トンネル土圧)にいかなる影響をおよぼすかという問題を調べるため、降下床(幅: $B=10 \text{ cm}$)上に三角形, 半円形, アーチ型などの各種表面形状のブロック(木製)をのせて実験した。写真-11~写真-15は降下床と同じ降下をするカメラで撮影([c]-方式)した各種表面形状

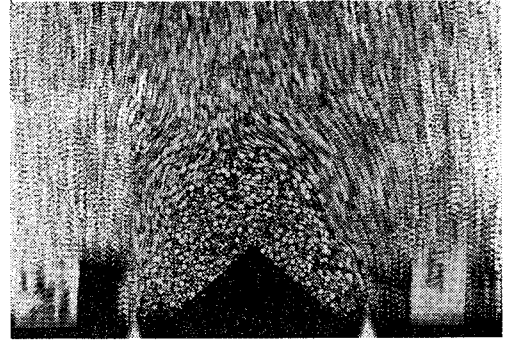


写真-11 表面が低い三角形の降下床上におかれたアルミ棒混合積層体($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$)の移動状況([c]-方式撮影).
 $B=10 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=10 \sim 20 \text{ mm}$

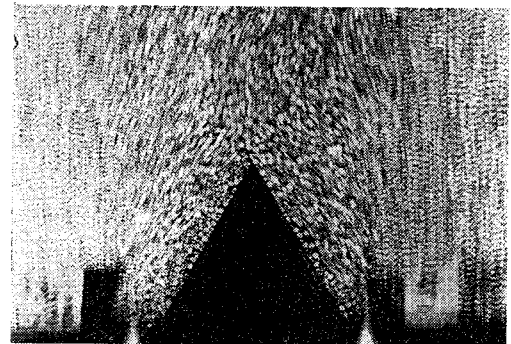


写真-12 表面が正三角形の降下床上におかれたアルミ棒混合積層体(1.6 mm, $\phi 3 \text{ mm}$)の移動状況([c]-方式撮影).
 $B=10 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=10 \sim 20 \text{ mm}$

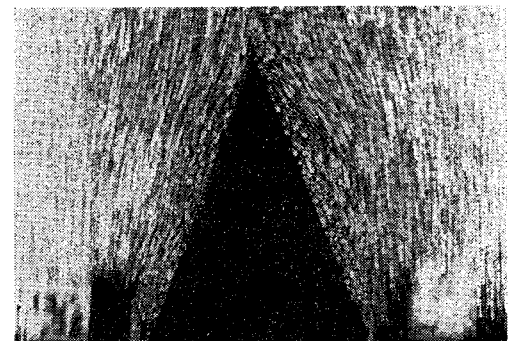


写真-13 表面が高い三角形の降下床上におかれたアルミ棒混合積層体($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$)の移動状況([c]-方式撮影).
 $B=10 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=3 \sim 10 \text{ mm}$

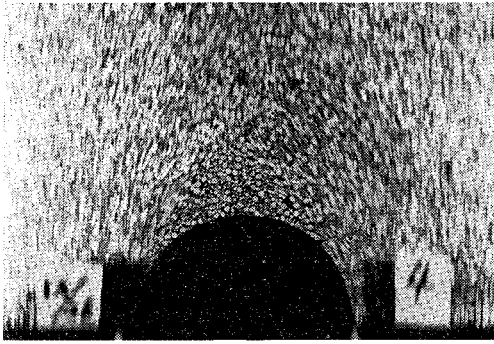


写真-14 表面が半円形状の降下床におかれたアルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$) の移動状況 ([c]-方式撮影)。
 $B=10 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=5\sim 10 \text{ mm}$

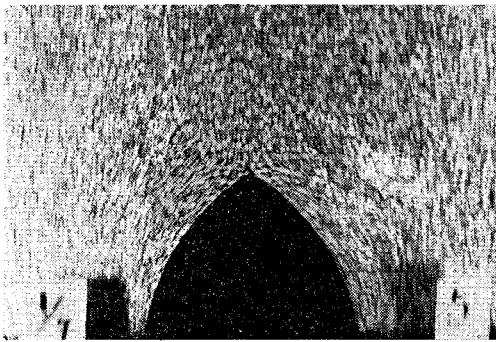


写真-15 表面が円弧アーチ形状の降下床におかれたアルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$) の移動状況 ([c]-方式撮影)。
 $B=10 \text{ cm}$, $D=30 \text{ cm}$, $\delta=10\sim 15 \text{ mm}$

のブロックをのせた降下床模型実験中の写真であり、静止して鮮明に写っている部分が降下床と同じ降下をする1次領域である。これらの写真からも1次領域の形状を正三角形に外接するアーチ形状と仮定することはほぼ正しいようである。

さて、これまでに述べてきたアーチ作用のメカニズムがこの場合にも同様に成立するとすれば、ブロックが1次領域内に完全に含まれる場合には、ブロックに作用する荷重は1次領域からブロックのしめる面積を差し引いた残りの地山の自重に等しくなるはずである。また、ブロックが1次領域外に少しでもみ出すか、2次領域に接する場合には、1次領域と周辺の2次領域とは降下床の降下に伴う沈下速度が異なるので、ブロックに何らかの干渉がおよぼされるものと予想される。事実、実験結果は、低い三角形(写真-11)および正三角形(写真-12)の場合は正值の降下床土圧の測定が可能であったが、1次領域からはみ出した高い三角形(写真-13)や2次領域に接する半円形(写真-14)、正三角形に外接する円弧アーチ形(写真-15)の場合には降下床を下げると、ブロックが降下床から浮き上がり降下床土圧が消

滅した。また写真-11および写真-12の場合のブロックに作用する荷重の測定値は、降下床上にブロックをのせない通常の降下床模型実験と同様の傾向を示して急激に低下し、その最小値は予想通り1次領域からブロックのしめる面積を差し引いた残りの地山の自重にほぼ等しくなっている(データ省略)。これらのことより、ブロックに作用する土圧は、ブロックの表面形状が1次領域の形状にできるだけ近いときに最小にすることができると考えられる。実際、1次領域の形状にもっとも近い円弧アーチ形ブロックを浮き上がらないように降下床の一部固定(完全固定するとブロックに作用する偏心的な外力のため荷重測定部の機構上降下床土圧が測定不能になるようであるので、ある程度の移動、回転ができるようにセロテープでゆるくとめた)して実験すると、作用土圧がほとんど0に近くなるのが観察された。このような、観点だけから判断すれば、トンネルの断面形状は1次領域の形状に近いほど土圧に対しては有利であると考えられる。

Getzler, Komornik, Mazurik²⁾は砂中に埋設された構造物の形として上面が平らな場合、低い三角形、高い三角形、低いアーチ形、高いアーチ形をそれぞれのせた場合を考え、アーチ作用に関する模型実験を行なっている。彼らの実験では、降下床のように構造物の部分を人為的に降下させていないし、また1次領域のような明確な物理的意味をもった領域を規定していないが、傾向としては構造物の形が1次領域の形状に近づくほど構造物に作用する土圧の測定値は小さくなるようであり、上の考察と矛盾しないようである。このような構造物を相対的に降下させなくてアーチ作用の影響を調べる場合には、構造物自身の圧縮性と周囲の砂層の圧縮性の相対関係が重要な要素になると考えられる。

5. 降下床周辺部の沈下の影響

いままでの考察では、地盤中のある降下床幅の部分だけが局部的に沈下し、その両側の周辺部の底板はまったく沈下しない理想的な場合を考えてきた。アーチ作用の発生機構からすれば、降下床を降下させると降下床をまたぐアーチ状の粒子間力の伝達線が形成され、上からの土圧の大部分はその伝達線に沿って左右に分かれて降下床両側の周辺部に伝達されるので、降下床両側部に応力集中がおこる。このことは、地山材料の応力比-ひずみ-ダイレタンシー関係から解析的に求めた降下床周辺地盤の応力分布をもとにして図-4のような結果をすでに報告²⁰⁾した。また、伊藤・藤井・小副川¹⁹⁾および藤井・松島²¹⁾も降下床周辺部に設置した土圧計の測定値より降下床周辺部における応力集中の発生を実験的に検証してい

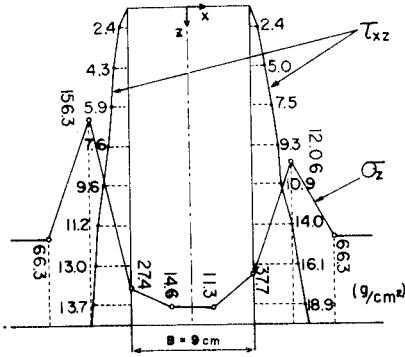


図-4 降下床周辺地盤の応力分布 ($\delta=70$ mm)

る。ここでは、この応力集中によって降下床の周辺部が沈下すれば降下床に作用する土圧はどのような影響を受けるであろうか、あるいは実際のトンネル施工では経験的に「地山をゆるめるな」とよくいわれているが、それ

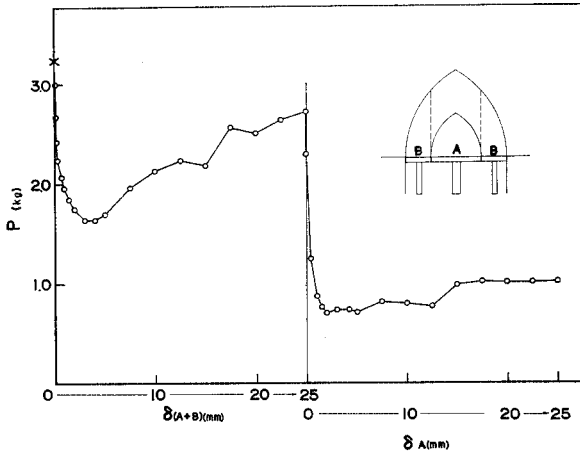


図-5 周辺降下床がある場合の $\delta \sim P$ 関係, アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6$ mm, $\phi 3$ mm), $D=30$ cm

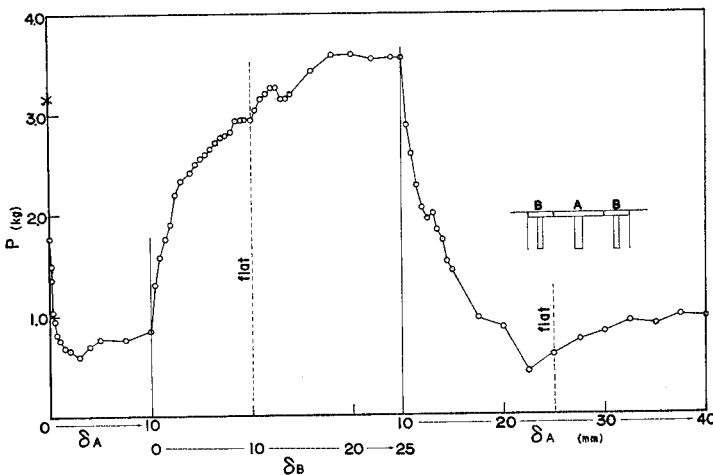


図-6 周辺降下床がある場合の $P \sim \delta$ 関係, アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6$ mm, $\phi 3$ mm), $D=30$ cm

はトンネル土圧の発生機構上どういう意味をもつものかという問題について考察した。

このような問題を考えるために、まず今まで用いていた降下床幅 $B=10$ cm の降下床の両側にそれぞれ幅 $B=5$ cm の周辺降下床（ここでは作用荷重の測定ができない）を設け、周辺降下床の降下のさせ方が中央降下床の作用土圧におよぼす影響を調べた。まず、中央降下床と周辺降下床の3つの降下床を同時に同じ量（25 mm）だけ降下させ、その後中央降下床だけを25 mm降下させると、中央降下床に作用する荷重 P は中央降下床の降下量 (δ_A) と周辺降下床の降下量 (δ_B) に対して図-5 のようになる。この図において前半の最小の測定値は、中央降下床と2つの周辺降下床の幅を加え合わせた $B=20$ cm に対するアーチが形成され、アーチ内の1次領域の重量のうち荷重測定の可能な中央降下床の幅 $B=10$ cm の部分（図中の大きいほうのアーチ内の点線には含まれた部分）の重量だけが測定されていると考えれば説明がつく。また、後半の測定値は中央降下床だけが周辺部に対して相対的に沈下するので中央降下床の幅 $B=10$ cm に対するアーチが形成され、その1次領域の重量が作用すると考えれば同様に納得のできる値である。これらのことから、周辺部が中央部と相対変位のない状態で沈下する場合と、中央部のほうが周辺部に対してより多くの相対変位を起した場合の中央部に作用する土圧現象は明らかにされた。特に、後半の測定データは前半に与えられた地山のゆるみなどの履歴にほとんど関係なく、わずかの相対変位で中央降下床上にアーチが形成されることを示しており、この意味からもここで述べたアーチ作用の発生機構は妥当なものであるように思われる。

つぎに、周辺部のほうが中央部に対してより多くの相対沈下をした場合の土圧現象を調べるため、つぎのような実験を行なった。すなわち、まず中央降下床だけを降下 ($\delta_A=10$ mm) させ、その後中央降下床の降下をとめて周辺降下床だけを降下 ($\delta_B=25$ mm) させるのである。このときの中央降下床に作用する荷重の測定結果を図-6 に示す（なおこの図には周辺降下床を降下させたあと、さらに中央降下床だけを降下 ($\delta_A=10 \sim 40$ mm) させた場合の測定値もつけている）。この図において、荷重測定値の最初の部分は中央降下床の幅 $B=10$ cm に対するアーチ作用から求められる値であるが、周辺降下床を中央降下床に対して相対的に

降下させると中央降下床に作用する荷重は急激に増加しはじめ、最後には土かぶり重量をも越えるようである。これは、その状況のもとに存在する構造物にとってはきわめて危険なことで、トンネルの設計・施工上注意を要する問題であろう。ここで、なぜこのような強大な荷重が作用するのかという問題を考える。図-6の実験において、中央降下床だけを降下させた状態ではアーチ作用によって左右の周辺降下床付近は大きな粒子間伝達力を支え、このため中央降下床上にはほぼ1次領域の重量だけが作用しているものと考えられる。ところが、アーチ状の荷子間力の伝達線の支持端の役目をはたしている周辺降下床の部分が降下すると、支持端を失った粒子間力は中央降下床や周辺降下床の外方に支持を求めて伝達されるようになる。周辺降下床の降下量が大きくなるにつれてこの傾向は顕著になり、周辺降下床上に中央降下床と周辺降下床の外方に支持端をもつ左右2つのアーチ状の粒子間力の伝達線が形成されるため、中央降下床に作用する荷重は増大するのである。このときの粒子間力の伝達状況を光弾性材料の棒の積層体に対する光弾性実験結果から写真-16に示す。この光弾性実験用の降下床模型実験装置は、 $B=7.5\text{ cm}$ の中央降下床の両端に $B=3.75\text{ cm}$ の周辺降下床を有しており、左右の仕切りわ

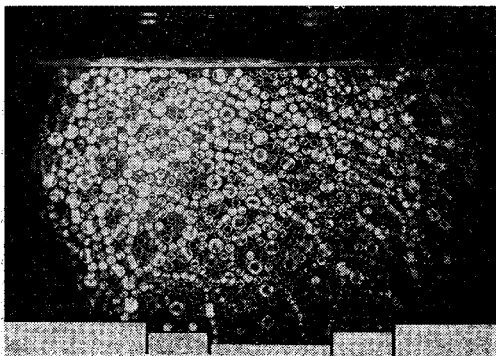


写真-16 周辺降下床の降下による粒子間力の伝達状況の変化：光弾性材料の棒の混合積層体（ $\phi 6.2\text{ mm}$, $\phi 10\text{ mm}$ ）の光弾性縞写真

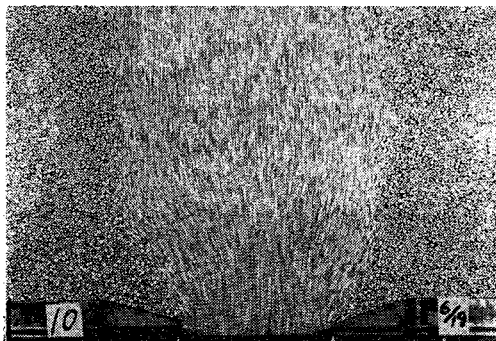


写真-17 降下床の周辺部が傾斜する場合のアルミ棒混合積層体（ $\phi 1.6\text{ mm}$, $\phi 3\text{ mm}$ ）の移動状況

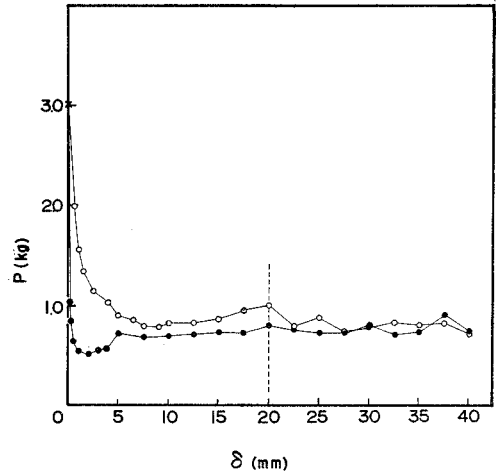


図-7 降下床の周辺部が沈下する場合と沈下しない場合の $P\sim\delta$ 関係の比較、アルミ棒混合積層体（ $\phi 1.6\text{ mm}$, $\phi 3\text{ mm}$ ）、 $B=10\text{ cm}$, $D=28\text{ cm}$

く間の距離は40 cmある。この写真から、周辺降下床の上にはその外方と中央降下床を支持端とするアーチ状の粒子間力の伝達線の形成が観察される。

つぎに、局部沈下部周辺の応力集中に基づく沈下現象をよりよく再現するために、降下床周辺部に長さ6 cmにわたって薄い金属板を設け、その内側の先端が降下床の降下量 $\delta=20\text{ mm}$ までは降下床と同じ降下をするように傾斜する機構とした²²⁾（写真-17参照）。図-7の○印のプロットはこのような型の周辺部の沈下を許した場合の降下床土圧と降下床の降下量の関係を示したものであり、●印のプロットは周辺部の沈下がまったくない降下床を用いた場合を示している。ただし、この図ではとも降下床のくぼみのなかにたまった地山材料の重量は差し引いてある。この図より、周辺部の沈下のない場合は $\delta=2\text{ mm}$ で降下床土圧は最小となるのに対し、降下床の降下にもなって周辺部が沈下する場合には $\delta=10\text{ mm}$ 付近で最小となりその値も少々大きいようである。これは、周辺部が沈下する場合は降下床の周辺部に対する相対降下量が小さくなるのと、このような沈下形状では局部沈下部上にできるアーチの形成が前記のものと多少相違するためと考えられる。また、 $\delta=20\text{ mm}$ 以上になると周辺部の沈下はそれ以上進まず降下床の降下だけが進むことになるが、この部分では両方の測定荷重の値はほぼ等しくなるようである。つぎに、図-8は写真-17と同じ装置を用いて $\delta=10\text{ mm}$ までは周辺部の沈下を許さずに降下床を降下させ、 $\delta=10\text{ mm}$ において降下床周辺の薄い金属板の左右の両先端（降下床側）を20 mm急激に沈下させた場合の降下床土圧と降下床の降下量の関係を示している。前と同様、周辺部が降下床に対して相対的に大きく沈下した場合には、非常に大

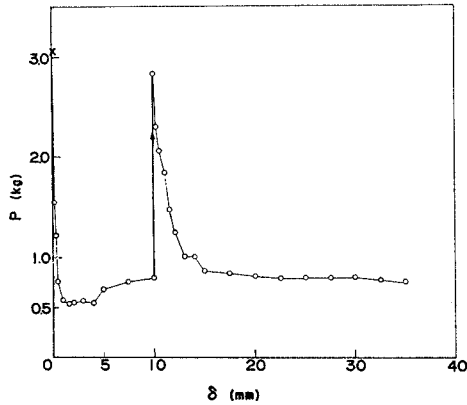


図-8 降下床の周辺部が急激に大きく相対沈下する場合の $P \sim \delta$ 関係, アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$), $B=10 \text{ cm}$, $D=28 \text{ cm}$

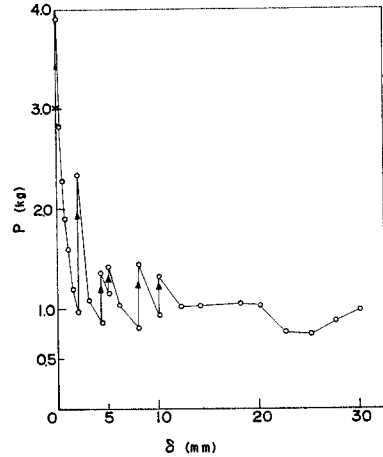


図-9 降下床の周辺部が何回も相対沈下する場合の $P \sim \delta$ 関係, アルミ棒混合積層体 ($\phi 1.6 \text{ mm}$, $\phi 3 \text{ mm}$), $B=10 \text{ cm}$, $D=28 \text{ cm}$

きな降下床土圧の増加がみられる。また、図-9 は同じく写真-17 に示す装置によって降下床周辺の薄い金属板の左右の両先端を降下床の降下量 $\delta=0, 2, 4, 5, 8, 10 \text{ mm}$ においてそれぞれ 2 mm ずつ沈下させたときの関係を示している。これらの実験結果より、周辺部が降下床に対して相対的に沈下する場合には、わずかの沈下であっても非常に敏感に降下床土圧の値に影響をおよぼすことがわかる。

最後に、トンネル現場ではよく「地山をゆるめるな」といわれているが上記の降下床土圧の発生機構と照らしてこの言葉のもつ意味を考える。3. (3) で述べたように、降下床を降下させると降下床土圧は最初の土かぶり重量から急激に減少して最小値となり、さらに降下床の降下量を大きくすると作用土圧は少しは漸増するが、降下床上のくぼみにたまった地山材料の重量を差し引いた純粹の降下床土圧はあまり顕著な変化はしないようである。したがって、降下床のようなゆるみ方をする場合には地山がゆるむほどトンネル土圧が大きくなるとはいえず、地山のゆるみ量とトンネル土圧の値とは必ずしも対応するものではない。「ゆるみ高さ」とか「ゆるみ荷重」という言葉は地山のゆるんだ部分だけがトンネルに作用する荷重になるという響きをもつため、誤解をまねきやすいように思われる。むしろ、仮りにトンネル掘削部の沈下がまったく起こらないとすれば、掘削部の支保には全土かぶり重量が作用することになりかえって大きな土圧が作用することになるわけである。さて、それではどのような地山のゆるめ方をした場合に危険であるかといえば、少なくとも先に述べたようなトンネル掘削部に対してその周辺部が時間的におくれで相対的に沈下する場合であって、このときは周辺部の沈下がわずかな場合であってもトンネル土圧の値に敏感に影響をおよぼすものと推察される。このことはトンネル施工上きわめて重要

な問題であって、上部半断面掘削後に土圧をはらうとか、側壁部の地山がトンネル内部へ流動するなど周辺部をゆるめる場合には、このような土圧増加の可能性に十分注意すべきであると思われる。今までに発表された多くのトンネル土圧に関する理論式は、たいていの場合降下床のような理想的な局部沈下現象に対するものであり、周辺部の沈下の影響を考慮していないようである。このような理論式は降下床に作用する土圧の理論式であるとしても実際のトンネルに作用する土圧の理論式とはいいいくく、特にトンネル周辺部の沈下の影響を考慮することは実際のトンネル土圧を予測する場合やトンネル土圧の時間依存性²³⁾の解明上の重要なキー・ポイントとなるであろう。

6. 結 言

本論文は、砂質土に対して種々の形式の降下床 (lowering panel) の模型実験を行なうことによって、アーチ作用の効果を現象論的に考察し、これより砂質土中のトンネルに作用する土圧の発生機構について言及したものである。降下床の実験では、砂質土のような粒状土の2次元モデルとして種々の径のアルミ棒を平行に積んだ2次元的な積層体を地山材料に採用した。また光弾性材料の棒の積層体も同様に使い、光弾性実験を行なって粒子間力の伝達状況を観察した。これら棒の積層体の有する実験上の利点を生かしてアーチ作用に関する多くの実験事実を求め、それらを総合的に判断した結果アーチ説を支持する多くの事項に対してここではアーチ説の立場でアーチ作用の機構について考察した。また、このアーチ作用のメカニズムをもとにして降下床に作用する土圧の近似的な算定式を誘導した。この算定式はその単純な形

にもかかわらず、種々の径よりなるアルミ棒積層体の地山材料や種々の実験条件に対する降下床土圧の測定値をかなりよく説明し、また乾燥砂に対する降下床の実験にもほぼ適用可能なことが検証された。これらの降下床土圧に対して得た結果を実際のトンネル土圧にまで拡張するため、トンネルの断面形状やトンネル周辺部の沈下がトンネル土圧におよぼす影響についても考察した。特にトンネル現場でよくいわれる「地山をゆるめるな」という言葉のトンネル土圧の発生機構上もつ意味についても言及した。

ここで述べたのは砂質土地山中のトンネル土圧に関する基礎研究であるが、現在粘性土地山に対しても同様の降下床模型実験を、特に時間効果に着目して行なっている。このような砂質土の地山および粘性土の地山中の降下床土圧の発生機構の解明からはじめて、普通の降下床の実験よりもより実際のトンネルに近い状況での模型実験、特にトンネル周辺部の沈下やトンネル内部への変位の影響を加味した模型実験を行なうこと、および実際のトンネル現場でのトンネル土圧の測定データを蓄積することの2つの方向を追求することによって、トンネル土圧が Terzaghi のゆるみ高さよりも進んだ形で解明される日も速くないと思われる。

終りにあたり、3., 4. の実験結果の解釈に関して神戸大学 軽部大蔵助教授（当時本学防災研究所助手）よりご助言をいただいたことを記し、ここに心からの謝意を表します。また、卒業研究の一部として実験に協力していただいた現日本工営（株）の小川雅裕（当時本学学生）、現（株）熊谷組の富永克己（当時本学学生）両氏に深く感謝するとともに、光弾性実験に関して多くのご好意をいただいた本学土木工学教室丹羽研究室の方々、特に光弾性実験の協力を得た同研究室の大学院生森竹淳氏にも感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Ladanyi, B. and Hoyaux, B.: "A Study of the Trap-door Problem in a Granular Mass", Canadian Geotechnical Journal Vol. 6, No. 1, 1969, pp. 1-15
- 2) Getzler, Z., Komornik, A. and Mazurik, A.: "Model Study on Arching buried Structures", Proc. A.S.C.E. SM 5, 1968, pp. 1123-1141.
- 3) 村山朝郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧，京都大学防災研究所年報第11号 B, 1968, pp. 549-565.
- 4) Ito, T.: "Calculation of Sand Pressure on Horizontal Top Surface of the Tunnel Heading", Tech. Report of Osaka Univ. 10-374, 1960, pp. 109-111.
- 5) Balla, A.: "Rock Pressure determined from Shearing Resistance", Proc. of the Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest, 1963, pp. 461-471.
- 6) Culmann, K.: "Die Graphische Statik", 1866.
- 7) Bierbaumer: "Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks," 1913.
- 8) Völlmy, A.: "Eingebettete Rohre", Mitt. Inst. Bau- statik, Eidgen. Tech. Hochschule, Zurich, Mitt. No. 9.
- 9) Terzaghi, K.: "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York, 1943, pp. 66-76.
- 10) Proctor, R.V. and White, T.L.: "Rock Tunneling with Steel Supports", 1946, pp. 47-85.
- 11) 水野高明：砂の鉛直圧力に関する一考察，九大工学い報 17 卷1号，1942, pp. 31-45.
- 12) Kommerell, O.: "Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk", Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1912.
- 13) Meem: Transaction of A.S.C.E., 1908, p. 12.
- 14) 小野諒兄・真井耕象：乾燥砂層における垂直土圧，土木学会誌 24 卷5号，1938, pp. 437-495.
- 15) 村山朝郎・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について，土木学会論文報告集第 172 号，1969, pp. 31-41.
- 16) 松尾 稔・駒田智久・高橋通夫：砂層の変形に関するモンテカルロ法的研究，土木学会第 21 回年次学術講演会講演概要 III-52, 1966.
- 17) Cutress, J.O. and Pulfer, R.F.: "X-Ray Investigations of Flowing Powders", Powder Technol. 1, 1967, pp. 213-220.
- 18) 村山朝郎・松岡 元：粘性土の応力緩和によるトンネル土圧，土木学会論文報告集第 168 号，1969, pp. 37-43.
- 19) 伊藤富雄・藤井清司・小副川徹：トンネルの周辺におけるアーチ作用の研究，土木学会第 23 回年次学術講演会講演概要 III-107, 1968, pp. 273-274.
- 20) 村山朝郎・松岡 元・小川雅裕：トンネル外周地盤の応力と変形について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要 III-31, 1968.
- 21) 藤井清司・松島功雄：砂層中の土圧変化に関する考察，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要 III-23, 1970.
- 22) 村山朝郎・松岡 元：トンネル土圧と地山の変形について，土木学会第 23 回年次学術講演会講演概要 III-108, 1968, pp. 275-276.
- 23) 村山朝郎：トンネル土圧の時間依存性について，第6回トンネル工学シンポジウム，1970, pp. 53-68.

(1970. 10. 15・受付)