

# 地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下

木山 英郎\*・藤村 尚\*・勝見 雅\*・森木 悟\*

(1980年5月31日受理)

Surface Displacements Caused by Tunnelling in a Shallow Depth

by

Hideo KIYAMA\*, Hisashi FUJIMURA\*, Tadashi KATSUMI\*, and Satoru MORIKI\*

(Received May 31, 1980)

Today numerous constructions of shield driven tunnels are prevailed under the ground of urban areas. As a consequence of tunnelling in a low depth, a surface displacement can easily occur and undesirably affect the installations or structures within its area of influence. Thus the developements of our ability to make good forecast of the surface displacements due to such a tunnelling are strongly demanded.

To achieve this ultimate purpose, a tentative modelling test of ground movements has carried out by using the lowering panel instrument with some dry sandy grounds. In the test, the measurements of the surface subsidences and the earth pressures were made with increase of the cave-in of the lowering panel.

From the experimental results, it is discussed in this paper how the width and the maximum depth of the settlement trough are related to the geometry of a given tunnel which can be defined by the ratio of the cover depth to the width of lowering panel, and how the propagated movements to the surface are associated with the stress redistributions.

## 1. ま え が き

我国において、市街地のトンネル掘削にシールド工法が本格的に採り入れられたのは昭和30年代後半から40年代にかけてである。その後、我国の複雑な地質条件に適応するようにシールド機には幾多の改良が加えられ、かつシールドトンネルの用途も種々拡大されて、従来の開削トンネル工法に取って代って今日の隆盛をみるに至っている。

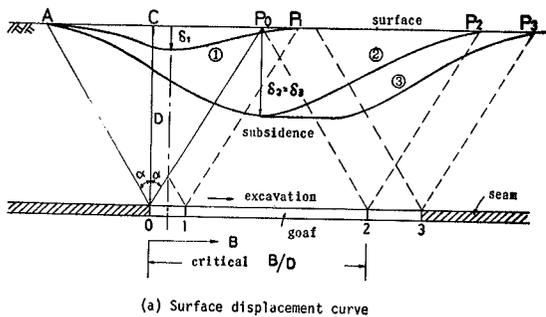
しかしながら、シールド工法に関する未解決の問題も少なくない。本論で取り扱う地表沈下もそうした問題点の一つであり、昨秋の第4回 I S R M 国際会議 (1979)

でも主要4テーマの一つに採り上げられている<sup>1)</sup>。

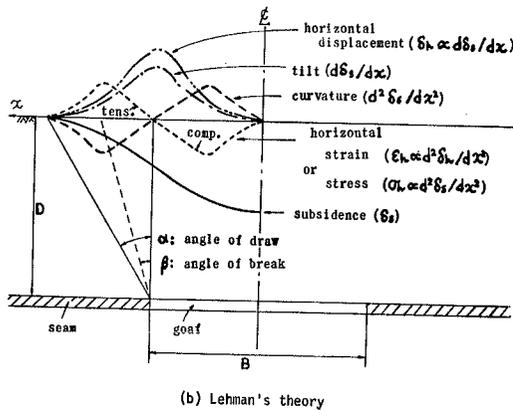
地表沈下は広義の地盤沈下の一形態であるが、通常的地盤沈下(狭義)が地下水の流失等による圧密現象に起因した経時的な地盤変位を対象とするのに対し、地表沈下は地下にトンネルや空洞を掘削することによって即時的に生ずる地盤変位を対象とする点に特徴がある。

こうした地表沈下が最初に問題になったのは、地下深所に大規模な空洞を掘削する石炭鉱山においてであった。この分野では、ドイツを中心に優れた研究成果<sup>2)</sup>が挙げられ、1950年前後には Fig. 1 に示すような一つの地表沈下理論がまとめられた。

\* 土木工学科 Department of Civil Engineering



(a) Surface displacement curve



(b) Lehman's theory

Fig. 1 Surface displacements due to exploitation of a horizontal coal seam in a great depth

すなわち、Fig. 1 (a) に示すように、一つの水平層（ただし、2次元解析の例）が点0から点1、2、3と順次採掘される時、それとともに地表面は曲線①、②、③のように次第に沈下量を増すとともに沈下範囲も増大する。

まず、沈下範囲についてみると、点0の微小部分の採掘に対し、その影響範囲は点0で立てた垂線から左右に角  $\alpha$  をなす線  $0A$ 、 $0P_0$  に囲まれた領域に限られることを基本仮定としている。したがって、区間  $0I$  を採掘すれば、地表面  $AP_1$  の部分が沈下し、沈下曲線の概略は曲線①で与えられる。ここに  $\alpha$  は限界角 (angle of draw) と呼ばれ、主として地盤 (地質) 条件によって定まる定数で、 $30^\circ \sim 40^\circ$  の範囲にあると考えられている。

そこで、たとえば地表面上の点  $P_0$  に注目すると、こ

の点の沈下に影響する採掘範囲  $B$  は点0から点2までということになり、この採掘範囲を完全面と呼ぶ（ただし、図から明らかなように深さ  $D$  の関数でもあるので通常  $B/D$  で表わす）。それ以下の  $B$  (部分面) では以後の採掘によって点  $P_0$  の沈下量は増加するし (例、①→②)、それ以上の  $B$  (超過面) では、以後の採掘によっても点  $P_0$  の沈下量は増加しない (例、②→③)。したがって、点  $P_0$  付近に重要構造物が存在し、不等沈下による悪影響を除くためには、点  $P_0$  に対する完全面  $B = 0 \sim 2$  以上の範囲を採掘する方法がとられる。

つぎに、地表沈下の形状についてみると、概略図のような正弦曲線に似た曲線が経験的に採用されており、沈下最大値  $\delta_2$  は、地盤条件を始め、深さ  $D$ 、採掘跡の充填状態等によって定まるとされ、各種の算定式が提案されている。このようにして沈下曲線が決定されると、地表面の傾斜、曲率、水平変位、水平応力あるいはひずみといった沈下特性が、Lehman の理論によって Fig. 1 (b) のように順次決定される。

ここで注目すべきは、破断角 (angle of break)  $\beta$  の存在であって、これは地表面に最大引張応力を生ずる点と採掘端と結ぶ直線が鉛直となす角を表わす。地表沈下が生ずる場合には、この線に沿って地盤の破壊の最も著しいことが現場観察されている。したがって、極限解析等で沈下範囲を定める場合には、沈下の境界線として限界角  $\alpha$  よりもむしろ破断角  $\beta$  で規定される極限破壊線 (すべり線) が表われるはずであり、実測される沈下範囲 ( $\alpha$  に依存) よりも狭い領域を算定するものと思われる。

一方、地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下は、都市部のシールド工法の隆盛とともに問題化してきた。この分野では、Fig. 2 (a) に示すように、Peck<sup>3)</sup> (1969) が地表沈下曲線の正規分布曲線による近似法\*を提案したのを契機にして、それ以後この曲線と実測値との適合性が議論の中心となってきた観がある。

正規分布曲線の形状は標準偏差  $i$  を与えれば決定し得るゆえに、Peck は沈下トラフの実質的な幅  $W$  を  $2i \times 2$  と仮定し、実測値をもとにトンネルの深さ/直径の比  $D/B$  と  $i$  との関係地盤の種類別に整理して示した (後出、Fig. 8)。

Peck の理論においても、沈下トラフの両端 ( $x = \pm 2i$ ) とトンネルのスプリングライン点  $A$  を結ぶ直線が

\*) もとは、地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下曲線の近似法に関する報告である。

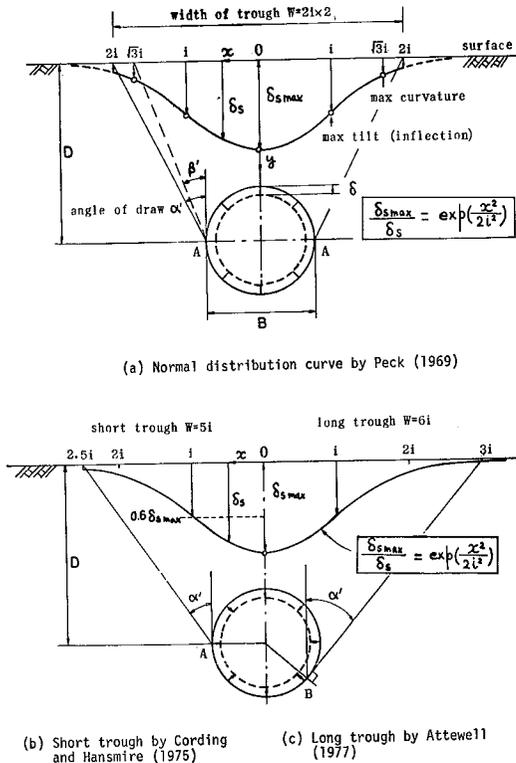


Fig. 2 Surface displacements due to tunneling in a shallow depth

沈下の影響限界線とみなされ、その鉛直との傾き角  $\alpha'$  は先の  $\alpha$  と同様限界角と呼ばれる。また Lehman 理論に習って、沈下曲線から最大傾斜点 ( $x = \pm i$ ) や最大曲率点 ( $x = \pm\sqrt{3} i$ ) などが特性点として求められる。

地下浅所におけるシールドトンネルの実績から、最近 は上記 Peck の理論を修正した形の2つの理論、すなわち、Fig. 2 (b)と(c)に示す、Cording ら (1975) のショートトラフ説と Attewell (1977) のロングトラフ説も提案されている<sup>4)</sup>。前者は  $\alpha'$  の定義はそのまま、実質トラフ幅を  $W = 2.5i \times 2$  と修正したものであり、後者は  $\alpha' = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$  として、トンネルへの接線 (接点 B) が地表面と交わる点までを実質トラフ幅とみなし、 $W = 3.0 i \times 2$  とするものである。

ロングトラフ説で顕著なように、沈下範囲を定める限界線 ( $\alpha'$  で規定される) が、主応力方向を鉛直と水平に仮定したランキン主働状態での極限すべり線を表わす

とする解釈が多く採用されている。しかしながら、先に指摘したように、沈下範囲が地盤の極限破壊線で規定されるものとするれば、地表に最大引張応力を生じる最大曲率点 ( $x = \pm\sqrt{3} i$ ) を通る破断線 (Fig. 2 (a),  $\beta'$  で規定される) に一致すべきであると考えられる。この点で、沈下範囲を塑性範囲に一致させて限界角  $\alpha'$  を定めようとする考え方には再考の余地がある。

以上のような研究結果を参考にして、本論文では地盤を単純化した模型地盤について、2次元降下床実験により地表沈下の特性や機構を究明しようとするものである。この種の実験も歴史が古く、トンネルの土圧の研究に Terzaghi<sup>5)</sup> (1940) が用いたのに始まり、我国でも同じ頃水野<sup>6)</sup> (1942) が砂質地盤のトンネル周辺の変位解析に用いている。その後再び活発にこの種の実験が行われるようになったのは、村山、松岡<sup>7)</sup> (1969) の研究に始まり、山肩ら<sup>8)</sup> (1974)、中崎ら<sup>9)</sup> (1979) と続き、トンネル周辺地盤の破壊機構や沈下機構が解明されつつある。英国でもケンブリッジ大学の Atkinson ら<sup>10)</sup> (1974) によって、ゴムスリーブを用いた可縮性の2次元トンネル模型による同種の研究が行われている。また最近はトンネル縦断面での切羽前方の先行沈下を考慮すべく、3次元降下床による実験も、Casarin<sup>11)</sup> (1977) や吉越ら<sup>12)</sup> (1978) によって試みられている。

2. 実験概要

降下床実験装置を Fig. 3 に示す、土槽は横幅 100 cm、深さ70cm、奥行き10cmで、前面と後面は厚さ1 cmの亚克力板からなっている。土槽中央に横幅15cm、奥行

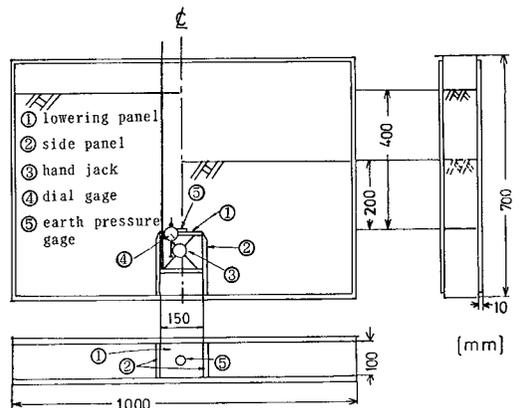


Fig. 3 Dimensions of the lowering panel instrument

き10cmの亚克力板降下床①を、土槽底面より約20cmの高さに設けてある。

降下床は、ストローク40mmの手動ジャッキ③上に固定され、試験時には2mm/分の一定速度で亚克力製側壁板②内を降下する。降下量  $\delta$  は降下床に直結した標点をダイヤルゲージ④で読み取る。降下床面に作用する土圧は、降下床中央に設置した小型土圧計⑤（共和電業製BE-2KD，容量2kg/cm<sup>2</sup>）を用いて連続記録する。

実験は、地表沈下量を測定する実験と地盤内応力を測定する実験とに大別される。前者は Photo. 1 に示すように地表面に5.5cm間隔で配置したダイヤルゲージ

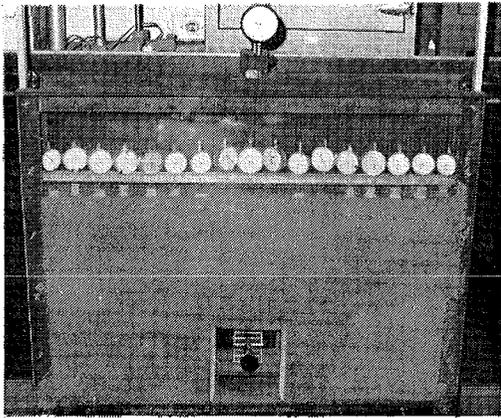


Photo. 1 The lowering panel instrument with the apparatus of surface subsidence measurement

(精度0.01mm)を用いて測定した。試験に供した模型地盤は、地表面から降下床上面までの深さ  $D=20$ cm, 30cm, 40cmの3種類である。

地盤内応力の試験は、Fig. 4 に示すように降下床深さ  $D=20$ cmと40cmの2種類の模型地盤について行った。測定は、同図に○印で示す各点において、小型土圧計（BE-2KDあるいは-2KC，容量2kg/cm<sup>2</sup>）を埋設し、降下床の降下に伴う鉛直土圧  $\sigma_y$  の変化を連続記録させた。ただし、土圧計のコードによる干渉をできるだけ少なくするため、1実験-1測点（ただし、降下床上の土圧計1個は常設）とし、1測点につき繰返し3回の実験を行うという方法で、順次各測定について同一地盤条件下で試験した。

上記両試験に供した模型地盤は、いずれも Table I に示す鳥取市賀露海岸産の砂丘砂の2mmフルイ通過分を

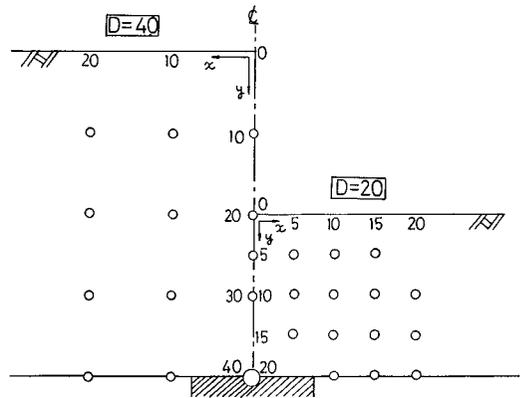


Fig. 4 Location of the earth pressure gage

Table I Samples : Sa-kyu sand (under 2mm, dry cond.)

model type		loose	dense
specific gravity	$G_s$		2.60
water content	$W(\%)$		0.19
effective grain size	$D_{10}(\text{mm})$		0.36
uniformity coefficient	$C_u$		1.44
bulk density	$\gamma(\text{g/cm}^3)$	1.616	1.673
void ratio	$e$	0.61	0.56
angle of internal friction	$\varphi(\text{deg.})$	36	46

用いて作成したもので、気乾状態のゆる詰めならびに密詰めの2種類である。

### 3. 地表沈下と浅所陥没

地表沈下をもたらす地盤内の動きをみるために着色砂層を用いて実験した。着色砂は、地盤試料(Table I)の一部を希釈したマジックインクで予め着色したもので、その比重、せん断特性が原試料と変わらないことが確認されている。この着色砂を、Photo. 2 に示すように前面亚克力板に沿って2cm間隔で層状に配置して、降下床の降下  $\delta=5$ mmごとに写真撮影して観察した。

地盤の顕著な沈下は着色砂層の垂直段差として現われ、その境界を結ぶ線は降下床を底辺とする火炎状の領域（以下、これを沈下フレームと呼ぶことにする）となる。地盤の沈下が降下床近傍から発生し、沈下フレーム

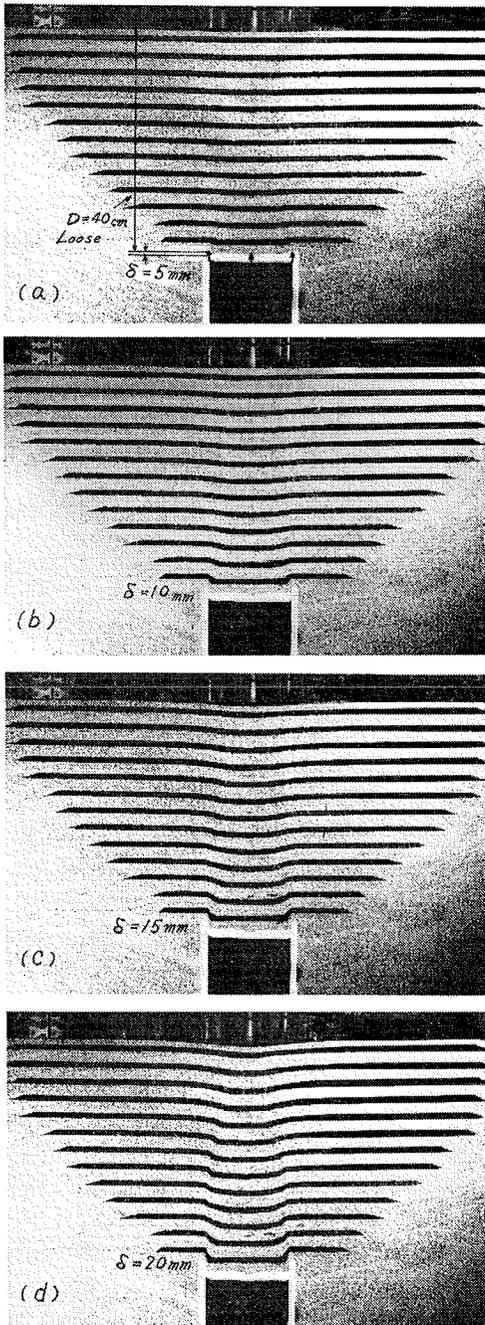


Photo. 2 Propagated ground movements to the surface due to increase of the cave-in ( $\delta$ )

をなして、 $\delta$  の増加とともに地表に伝達される様子が明瞭に伺える。すなわち、Photo. 2 に示した  $D=40\text{cm}$ 、ゆる詰め地盤の例では、 $\delta=5\text{mm}$  において降下床を底辺とする沈下フレームの先端が地表面に達しておらず、 $\delta=10\sim 15\text{mm}$  で沈下フレームの先端が地表面に達し、 $\delta=15\text{mm}$  以降  $20\text{mm}$  にかけては沈下フレーム先端が地表面上で次第に左右に広がっている様子が見られる。

一方、この間の降下量  $\delta$  と地表中央点（トンネル中心軸を通る鉛直面と地表面の交点）の沈下量  $\delta_{s,max}$  との関係を示すと Fig. 5 のようである。いずれの地盤においても、降下前半における地表沈下の増加割合の小さい部分と、降下後半における地表沈下の増加割合が大きい部分からなっている。両部分はそれぞれ、ほぼ直線で近似でき、その交点の位置は降下床深さ  $D$  とゆる詰めか密詰めかによって異なる。この交点に当る降下量  $\delta$  は、先に見た沈下フレームの先端が地表面に達する時点とよく一致する。たとえば、Photo. 2 に示した  $D=40\text{cm}$ 、ゆる詰め地盤における交点の  $\delta$  は Fig. 5 から  $12\sim 13\text{mm}$  である。

すなわち、沈下フレームが地表面に達する迄と達した後とで地表面の沈下性状が急変する。沈下フレームが地盤内にとどまっているときには、それより上部の地盤によって地表沈下は抑制されているが、達した後は降下床の降下とともにほぼ降下量に等しい地表沈下量を示す状態になる。後者の状態では、トンネル天盤の崩落を許せば、地表面に達する沈下フレームの領域がそのままトンネル内に流入し、いわゆる浅所陥没現象を呈することとなる。

この間の地盤の動きをみるため、各地盤について  $\delta=0\sim 40\text{mm}$  間の解放写真を示せば Photo. 3 のようである。最終的にほぼトンネル幅に相当する柱状形にまで発達した沈下フレームの領域がトンネル内に流動していることがわかる。この状態の地盤の動きは、サイロやホッパー内における岩質粒状体の排出時の挙動と同じであり、重力流動状態として別途解析する必要がある<sup>13)</sup>。したがって、通常のシールドトンネル等において地表沈下が問題となっているのは、沈下フレームの先端が地表面に達する迄の降下量  $\delta$  の範囲での地盤の挙動をいうことになる。

#### 4. 地表沈下曲線

降下床の降下量  $\delta$  が  $5\text{mm}$  までの範囲における、地表

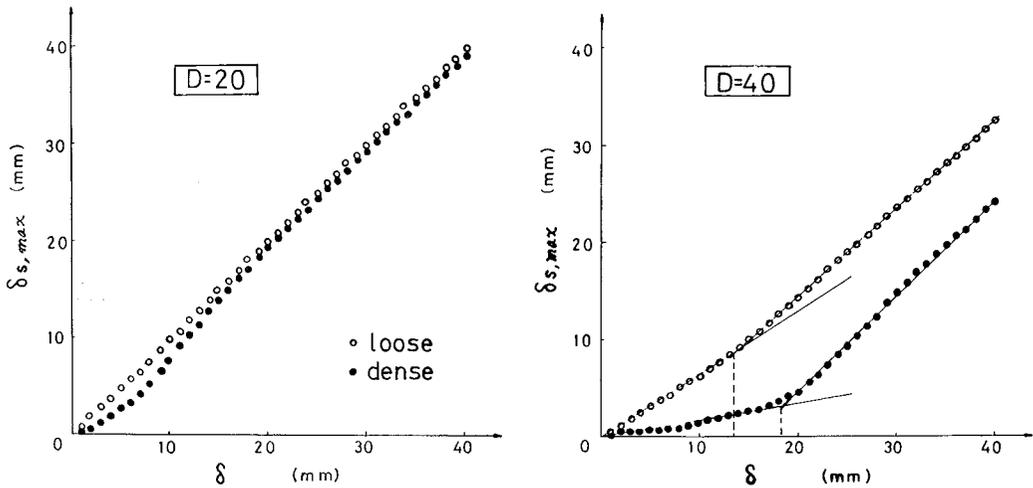


Fig. 5 Relationships between the cave-in of the lowering panel  $\delta$  and the maximum surface subsidence  $\delta_{s,max}$

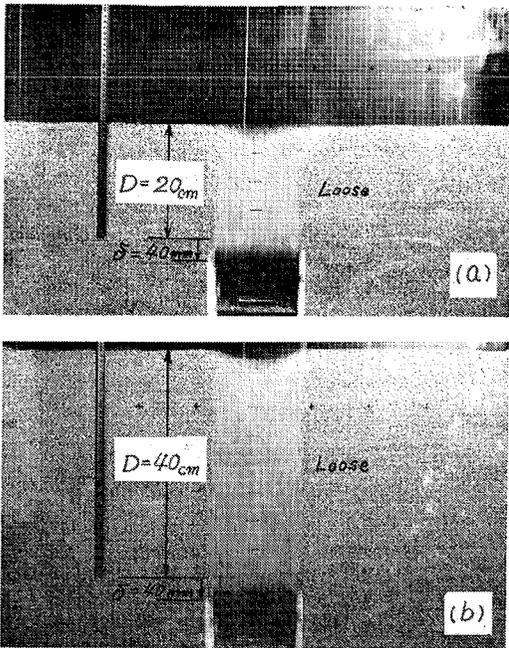


Photo. 3 Ground movements ( $\delta=0\sim 40\text{mm}$ )

面の各点の沈下量  $\delta_s$  を Fig. 6 に示す。各沈下量を結ぶ図中の曲線が地表沈下曲線と呼ばれ、降下各段階における地表面の形状を表わす。2次元解析で得られるこうした沈下形状は、トンネルの軸方向に一樣に続くものと

仮定されるので、沈下トラフ（沈下溝）とも呼ばれる。

実験結果は、降下床の降下量  $\delta$  の増加とともに、地表沈下範囲を表わす沈下トラフの幅と地表面中央点に生ずる最大沈下量  $\delta_{s,max}$  が增大することを示す。このとき、降下床の深さ  $D$  が浅いほど、また密詰めよりはゆる詰め地盤において、最大沈下量ならびに沈下トラフ幅の大きいことがわかる。

最大沈下量  $\delta_{s,max}$  と比土盛り  $D/B$ （降下床深さをトンネル幅で除して無次元化した値）の関係を Fig. 7 に示す。降下量  $\delta$  の増加とともに、 $\delta_{s,max}/\delta$  の値が1に向って増加している。 $D/B$  が大なるほど、またゆる詰め地盤よりは密詰め地盤の方が、 $\delta_{s,max}/\delta$  の値が小さいことは明らかである。

たとえば、 $D=20\text{cm}$  のゆる詰め地盤 ( $D/B=20/15$ , loose) において、 $\delta=5\text{mm}$  で  $\delta_{s,max}/\delta=0.9$  なる値を呈しているのは、降下床の降下とともに地表面中央点もほぼそれに近い沈下を示すということで、前述の沈下フレームの上端が  $\delta=5\text{mm}$  において既に地表面近くまで達していることを暗示する。同じゆる詰め地盤でも、 $D=40\text{cm}$  にすれば、 $\delta=5\text{mm}$  で  $\delta_{s,max}/\delta < 0.6$  であり、地表面近傍はまだ健全であるといえる。これに対応する密詰め地盤では、 $\delta=5\text{mm}$  のとき、 $D=20\text{cm}$  地盤で  $\delta_{s,max}/\delta=0.7$  および  $D=40\text{cm}$  地盤で  $\delta_{s,max}/\delta < 0.3$  と相対的に小さく、より健全であることを示す。

このように、地表面の最大沈下量は降下床の降下量  $\delta$

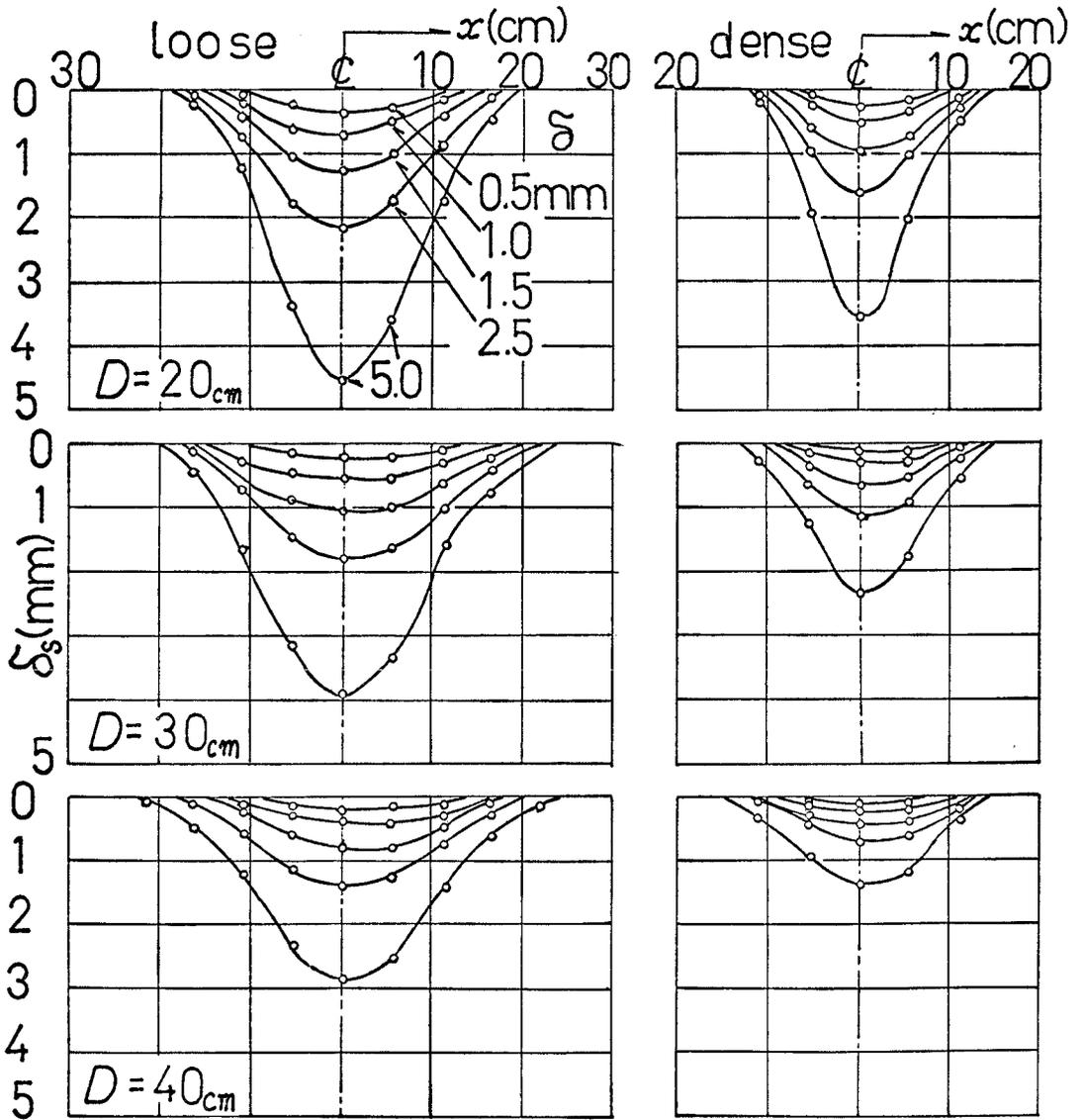


Fig. 6 Surface displacement curves due to increase of  $\delta$

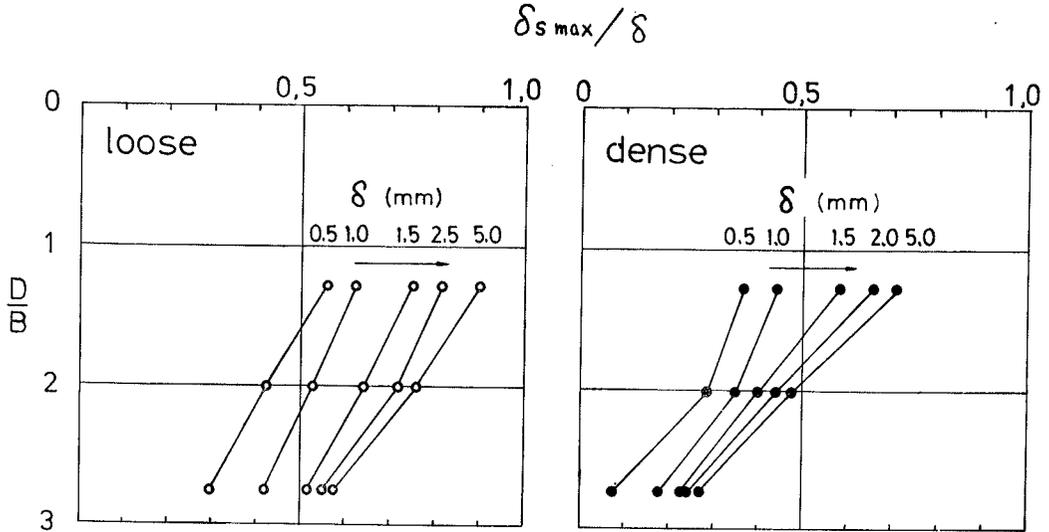


Fig. 7 Relationships between the cover to the wide ratio of the lowering panel  $D/B$  and  $\delta_{s,max}$

に最も強く影響され、ついで比土被り  $D/B$  の影響および地盤条件（ゆる詰めか密詰めか）の影響を受けることを示す。さらに、ゆる詰め地盤における比土被り  $D/B$  の影響が、密詰め地盤におけるほど顕著でないことにも留意する必要がある。したがって、ゆる詰め地盤に相当する軟弱地盤において、比土被りの小さいトンネルを掘削する場合には、比土被りの小々の増加を考えるよりも、トンネル天盤の沈下を極力抑える方策を構じる方が、最大沈下量を小さくするのに有効であるといえる。

Peck は沈下トラフの片幅  $W/2 = 2i$  と比土被り  $D/B$  の関係を各種地盤について Fig. 8 に示す破線で与えた。実験結果（ただし、降下量  $\delta = 5\text{ mm}$  のとき）を同図にプロットすると実線のようなになる。沈下トラフの幅が比土被りの増加とともに、本実験範囲内では直線的に増大していること、およびゆる詰め地盤に比べ、密詰め地盤の沈下トラフの幅が小さいことが明らかである。なお、両模型地盤ともに、Peck の区分による地下水位以浅の砂地盤に相当しており、沈下幅に関する限り模型実験の適用性が認められる。

5. 地盤内応力の変化

降下床の降下に伴う地盤内応力の変化は、前出 Fig. 4 に示した各測点について得られた。その中、トンネル

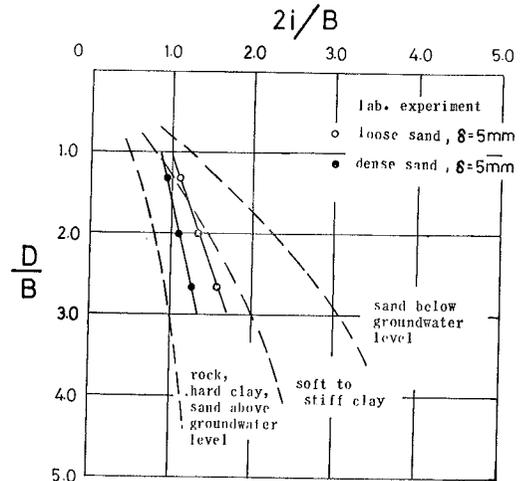


Fig. 8 Relationships between  $D/B$  and the half width of subsidence trough  $2i$  (broken lines given by Peck)

中心軸上 ( $x = 0$ ) および側壁部 ( $x = 10\text{ cm}$ ) の、各深さ位置 ( $y$ ) における鉛直土圧  $\sigma_y$  の変化を示すと Fig. 9 ( $D = 20\text{ cm}$ ) および Fig. 10 ( $D = 40\text{ cm}$ ) のようである。

この結果より、各模型地盤における応力変化の特徴を

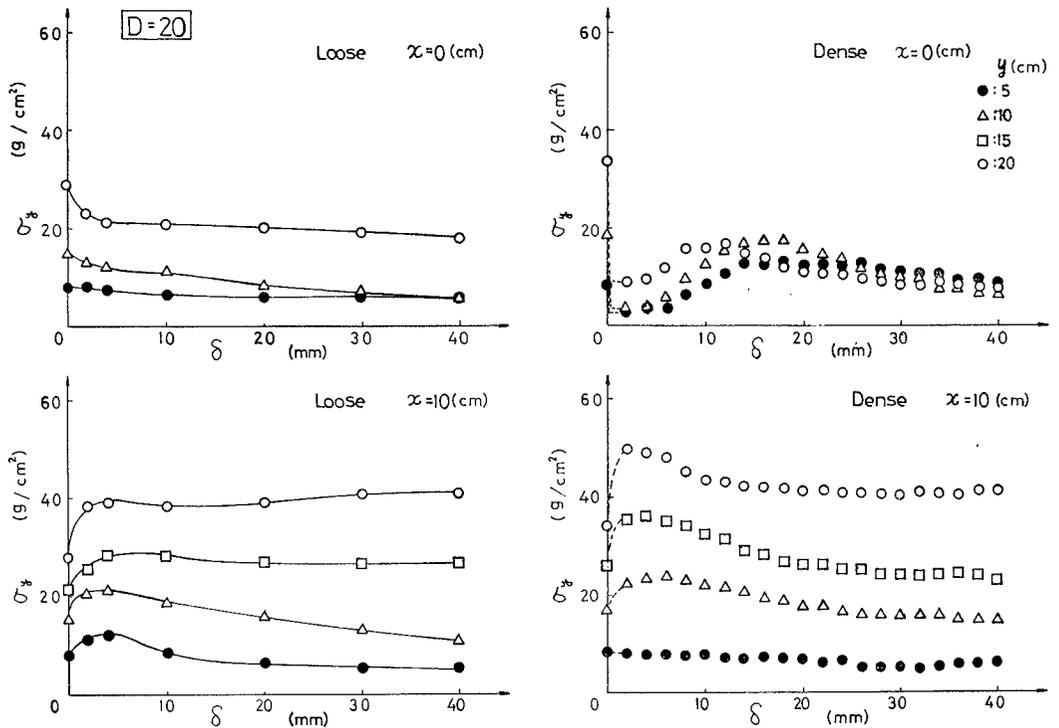


Fig. 9 Earth pressure measurements with increase of  $\delta$  ( $D=20\text{cm}$ )

まとめると以下のようなものである。

- (1)ゆる詰め,  $D=20\text{cm}$ 地盤:  $\delta=0\sim 5\text{mm}$ 間において, 降下床上部 ( $x=0$ ) の各深さ位置 ( $y=5, 10, 15, 20\text{cm}$ ) の土圧はいずれも大きく減少し, その分, 側壁部 ( $x=20\text{cm}$ ) の各深さ位置の土圧が増加して平衡している。その後 ( $\delta=5\sim 40\text{mm}$ ) は両者ともに土圧の増減は次第に少なくなり, 一定値に収束する。
- (2)ゆる詰め,  $D=40\text{cm}$ 地盤: 土圧の大きな変化を示す範囲が  $\delta=0\sim 10\text{mm}$ 間に拡大されることを除けば, 降下床上部 ( $x=0$ ) の各深さ位置 ( $y=10, 20, 30, 40\text{cm}$ ) の土圧減少分を側壁部に負担する形の平衡状態は, 上述の  $D=20\text{cm}$ の場合と同様である。
- (3)密詰め,  $D=20\text{cm}$ 地盤: ゆる詰めの場合と異なり, 降下床上部 ( $x=0$ ) の土圧が降下開始直後 ( $\delta\cong 0$ ) にいずれの深さ位置とも極めて小さい値に急激に減少する。その分, 側壁部土圧 ( $x=10\text{cm}$ ) が増加して平衡しようとする傾向は, ゆる詰めの場合と同様である。しかし, その後  $\delta=10\sim 20\text{mm}$ にかけて, 降下床上部の土圧が各深さ位置とも増加に転じ, その分, 側壁部の負担が軽減さ

れる。

- (4)密詰め,  $D=40\text{cm}$ 地盤: 降下開始直後 ( $\delta\cong 0$ ) において, 降下床上部の土圧が極めて小さい値に急減少する点は上述  $D=20\text{cm}$ の場合と同様である。その後,  $\delta$  の増加とともに, 降下床に近い, 深い位置から順に, 「土圧最低値→土圧回復→土圧ピーク→土圧暫減→一定値に収束」といった一定の土圧変化過程をたどる。このことは降下床の降下に伴う地盤内応力の再配分が単純なものではないにしても, 一定の様式に従って行われていることを示している。これほど顕著でないが, 密詰め  $D=20\text{cm}$ 地盤の場合にも明らかに認められ, 密詰め地盤の応力再配分を特徴づけるものと思われる。

上述の如く, 降下床の降下に伴う応力再配分の様子はゆる詰めと密詰めとで幾分異なるが, たとえばゆる詰め  $D=40\text{cm}$ 地盤内のそれを, 崩壊領域およびこれを取囲むゆるみ領域の進展状況と関連づけて模式的に表わすと Fig. 11 のようになる。ここに, 崩壊領域は降下床の降下とともに応力が急減する領域であって, これは前出の着色砂層を用いた実験において, 沈下フレームとして観

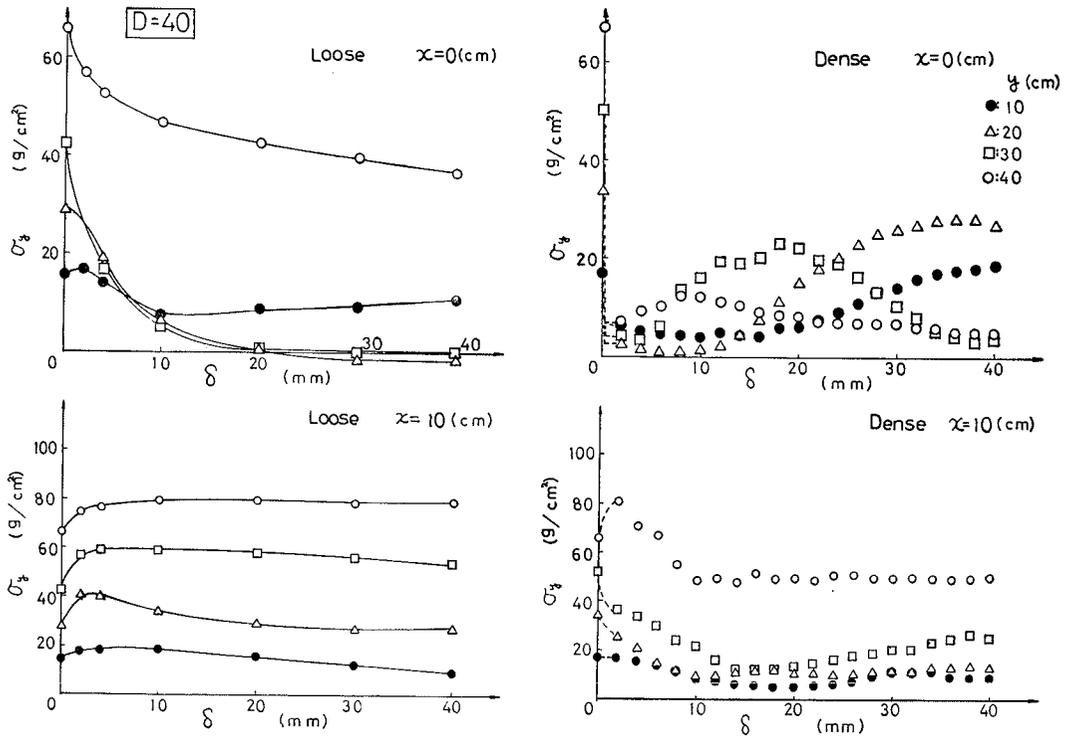


Fig. 10 Earth pressure measurements with increase of  $\delta$  ( $D=40\text{cm}$ )

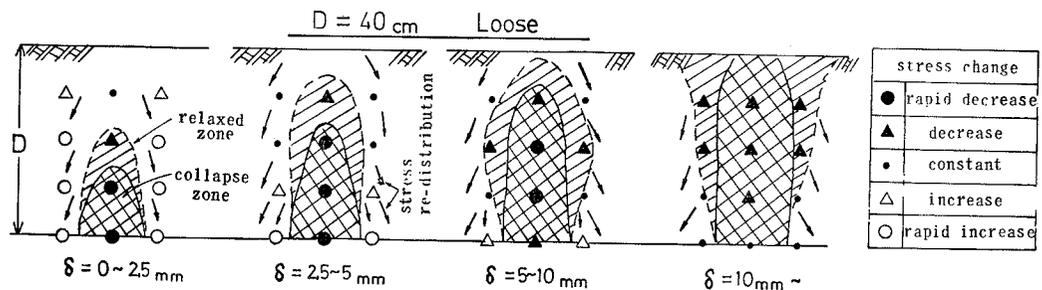


Fig. 11 Progress of the collapse zone presumed by the stress changes

察されるものとよく一致する (Photo. 2 参照)。また、ゆるみ領域は降下床の降下とともに応力が暫減する領域であって、着色砂層実験では静止した水平層と沈下フレーム域との間で、着色砂層の比較的大きな沈下曲率を示している領域にはば一致する。

この場合 (ゆる詰め,  $D=40\text{cm}$  地盤), 崩壊領域が地表面に達する  $\delta=13\text{mm}$  を境にして, それ以前は崩壊領域とゆるみ領域を取囲んで健全な地盤が存在し, 両者の拡

大をある程度抑制しているが, それ以後は崩壊領域を取囲むゆるみ領域も地表面に向って扇斗状に大きく進展する。したがって, 崩壊領域が地表面に達した後は, もはや降下床の降下に伴って降下床上の崩壊領域が落下するのを防げないということになる (浅所陥没現象)。これは先に着色砂層の実験で述べたように, 沈下フレームが地表面に達した後は地表沈下量が急増加する事実 (Fig. 5 参照) と対応するものである。

## 6. 結 語

地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下に関する基礎研究として、砂質模型地盤を用いた2次元降下床実験を行った。その結果、地表沈下曲線の特徴と地盤内応力の再配分の特徴を明らかにすることができた。以上の結果を基に、今後さらに地表沈下機構の解明と地表沈下量や沈下範囲の解析手法の開発を目指して鋭意努力するつもりである。

最後に、本研究を実施するに際し、実験データの集積と整理に多大の労力を煩わした当時土質工学研究室学生、下川博之(現・榊新井組)および中川勲(現・松山市役所)の両氏に深く感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) Theme IV, Surface Displacements as a Consequence of Excavation Activities, 4th Int. Cong. ISRM, Proc. Vol. 1, 1979, pp. 583-757
- 2) Niemczyk, O. : Bergschadenkunde, 1949, pp. 92
- 3) Peck, R. B. : Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground (Session 4 General Report), 7th Int. Conf. Soil Mech. Foud. Eng., State of the Art Volume, 1969, pp. 225-290
- 4) Kanji, M. A. : Surface Displacements as a Consequence of Excavation Activities (Theme IV General Report), 4th Int. Cong. ISRM, 1979 (Proc. Vol. 3, to be published)
- 5) Terzaghi, K. : Proc. 1st I. S. C. M., Vol. 1, 1940, and, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 1943, pp. 66-76
- 6) 水野高明：砂の鉛直圧力に関する一考察，九州帝国大学集報，第十七巻一号，1942，pp. 31-45
- 7) 村山・松岡：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，および，砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，1971，pp. 95-108
- 8) 山肩・永井・富永：落し蓋による砂のアーチ作用に関する一実験結果，第9回土質工学研究発表会講演集，1974，pp. 581-584
- 9) 中崎・浅井・岡部：乾燥砂を用いたトンネルの模型実験(その1)，第14回土質工学研究発表会講演集，1979，pp. 1493-1496
- 10) Atkinson, J. H. et al : Model Tests on Shallow Tunnels in Sand and Clay, Tunnels & Tunnelling, Vol. 6, No. 3, 1974, pp. 28-32, and Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground, ASCE, Vol. 103, No. GT4, 1979, pp. 307-325
- 11) Casarin, C. : Soil Deformations around Tunnel Headings in Clay (Master's Thesis), Cambridge University, 1977
- 12) 吉越・渡辺・高木：Prediction of Ground Settlements Associated with Shield Tunneling, 土質工学会論文報告集，Vol. 18, No. 4, 1978, pp. 47-59
- 13) 木山・小西：岩質粒状体の重力流動に関する基礎研究，鳥取大学工学部研究報告，第9巻第1号，1978，pp. 213-228