

# 砂地盤中のトンネル掘削に伴う荷重の再配分に関する基礎的研究

野口利雄<sup>1</sup>・垂水尚志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)熊谷組 技術本部土木設計部 (〒162 東京都新宿区津久戸町2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

筆者等は、トンネルの施工が周辺地盤や構造物に及ぼす影響や、既設トンネルがその後のトンネルや建物の施工に際して受ける荷重や変形による影響の評価の実施を目的として複数の落とし戸を有する小型土槽による模型実験と有限要素法を用いた数値解析により研究を推進している。今回の報告では、砂地盤ではゆるみ荷重の最小値は落とし戸幅の0.4%程度の降下時点で発生すること、落とし戸降下に伴う荷重減少の傾向は既存のゆるみ荷重の提案式によりほぼ推定できること、落とし戸内部の荷重分布はアーチ状になることなどを示す。また落とし戸降下後に地盤の表面に載荷した場合に、ゆるみ領域に隣接した部分での付加荷重の負担が著しいことを示す。

**Key Words :** trap door, loosening pressure, stress release, load concentration, model test, shield tunnel

## 1. はじめに

都市部における地中構造物の設計・施工に係わる分野では、近年、大深度領域の有効活用、各種のトンネル施工方法の適用範囲の拡大について関心が高まっている。特にシールドトンネルでは密閉式が主流となり、切羽での土水圧に見合った掘削技術の向上、及び裏込め注入材料と注入技術の進歩等により掘削地盤に対する施工時の拘束効果が、従前よりかなり期待できると考えられる。

これに伴い、応力解放の影響の程度への関心も高まっており、シールドトンネル施工時の応力解放率、既設構造物への影響の評価といった具体的な課題を議論する事例も増加してきている。筆者等はこのような状況下で、都市トンネルの構築に際し完全に解明されたとはいえない事項、すなわちトンネルの施工が周辺地盤や既設構造物に与える荷重や変形の度合い、施工したトンネル自身が地上構造物から受ける影響について検討を行い、基礎的だが定量的な所見を得た。

本論文は、筆者等が実施した複数の落とし戸を有する小型土槽の実験から得られた結果及びそれに付随して実施した数値解析結果に基づき、砂中のトンネル掘削による荷重の再配分と地盤の変形特性を主体として考察を行ったもので、実現象に即したトン

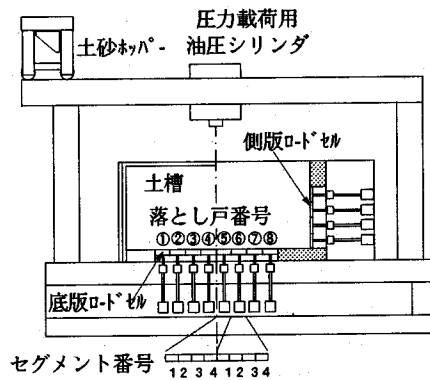


図-1 実験装置

ネル掘削時における地盤挙動予測システムの開発の布石となれば幸いである。

## 2. 実験方法

### (1) 実験装置の概要

本実験は実際のトンネル掘削時に生ずる応力解放の力学的機構を、落とし戸の降下で近似的に再現するトンネル横断方向の検討である。図-1に実験装置の概略を示す。土槽の寸法は、長さ150cm、奥行き

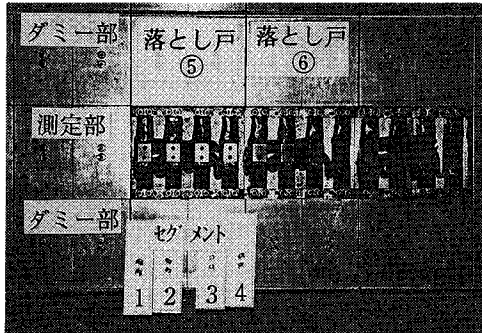


図-2 落とし戸の分割とセグメント

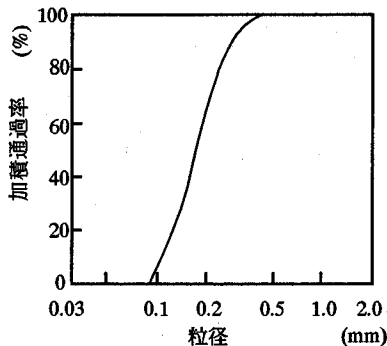


図-3 豊浦砂の粒径加積曲線

30cm, 高さ80cmであり, 土槽の底版は8枚の落とし戸からなる。図-2に落とし戸の分割とセグメントを示す。1枚の落とし戸は土槽両側(前面と後面)の亚克力製の壁面に接する4個のダミー部, および荷重の測定を行なうロードセルが介された中央の2個の測定部, 計6個のセグメントで形成され, 幅12.5cm, 奥行き30cmである。1枚の落とし戸と土槽の奥行きは等しい。落とし戸⑤と⑥は中央の測定部のセグメントが4個(後述の実験ケース10以降に改造)で, 落とし戸内部の荷重分布の測定が可能である。図-2は落とし戸⑤の4個の測定部セグメント, 1~4を外した状態で, 測定部のロードセルが見える。落とし戸とセグメントの番号は図-1と対応する。落とし戸の上下の移動は, スクリュージャッキをパルスモーターで稼働させ, その際の落とし戸の移動速度は制御装置により任意の速度に設定できる構造となっている。落とし戸のセグメント間は, 約0.5mmの間隔を有し, セグメントはロードセルを介して落とし戸に緊結されており, 落とし戸間の間隔は約0.2mmである。落とし戸上のセグメント間やセグメントと側壁の隙間にはシリコングリースを塗布する。

表-1 実験ケース

ケース	土被り(cm)	条件
1	12.5	④5mm→⑤5mm→⑥5mm
2	25.0	④5mm→⑤5mm→⑥5mm→②5mm
3	37.5	④5mm→⑤5mm→⑥5mm→②5mm
4	62.5	④5mm→⑤5mm→⑥5mm→②5mm
5	37.5	④⑤5mm→⑥5mm→②5mm
6	62.5	④⑤5mm→⑥5mm→②5mm
7	37.5	④⑤⑥5mm→②5mm
8	62.5	④⑤⑥5mm→②5mm
9	37.5	⑤5mm→④⑥5mm
10	37.5	⑤3mm→⑥3mm
11	25.0	落とし戸降下なしで局部荷重
12	25.0	⑤2mm→局部荷重
13	37.5	落とし戸降下なしで局部荷重
14	37.5	⑤2mm→局部荷重
15	37.5	⑤2mm→全面荷重

⑤,⑥など: 落とし戸番号

## (2) 地盤の構築

気乾状態の豊浦標準砂を所定の高さから自動撒きだし装置を用いて撒きだし地盤を構築する。構築しながら1.5cmごとに色砂を壁面に沿って散布し, これに2cmごとに歯形を付ける。この歯形部は地盤の変形を写真撮影する際の標点となる。標準砂の密度は,  $1.51 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ , 間隙比は0.74, 含水比は0.3%である。内部摩擦角は, 坂元<sup>1)</sup>の実験結果を参考にし, 実験に用いた標準砂の諸元を用い, せん断ひずみが1%時点での値を算定すると約 $40^\circ$ である。図-3に粒径加積曲線を示す。砂の撒きだしから実験終了までの間に底版に作用する荷重をパソコンに接続したロードセルにより測定する。

## (3) 実験の種類

表-1に実験のケースを示す。ケース1~9はトンネルが構築された後に, 新たに水平方向に併設して新たなトンネルが構築される場合に発生が予想される土圧再配分の影響を検討するものである。ケース1~4は落とし戸幅に対する土被り厚さ(落とし戸幅の1,2,3,5倍)の影響, ケース5~8は一度に降下させる落とし戸幅(2枚, 3枚)の影響, ケース9は落とし戸の移動順序(両側の落とし戸降下)の影響に着目している。ケース2から8までで最後に落とし戸②を降下させるのは, すでに掘削したトンネルからトンネルの直径だけ離れた位置での新たなトンネル掘削の挙動を把握するものである。ケース10は落とし戸幅における荷重分布を調べるため今回の実験の基本型として行ったもので, 土被り厚さが37.5cmで,

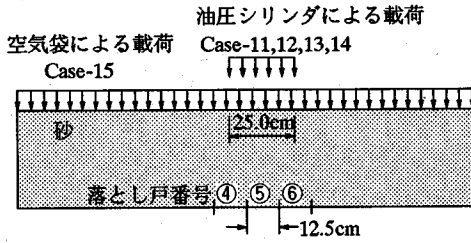


図-4 表面載荷方法

落とし戸⑤を3mm降下した後、落とし戸⑥を3mm降下させて、落とし戸部における荷重分布状況を把握するものである。ケース11以降は、トンネル掘削後地表に構造物を構築する場合を想定し、落とし戸降下後の表面載荷の影響を検討するものである。載荷の方法は局部載荷と全面載荷とし、図-4にそれらの概要を示す。

局部載荷では、平滑に均した表面に木製の板（長さ25cm、幅30cm）を設置し、この板に鋼製の載荷板（10×30cm）を接触させ、油圧装置により圧力を加える。全面載荷では、木製の板（長さ150cm、幅30cm）の上に空気袋を設置し、1個の空気挿入孔より空気を送り込み圧力を加える。木製の板は土被りの変化に対応できかつ取扱が容易であることから採用した。圧力は載荷装置と土槽の構造から、安定した載荷状態を保持できる値として0.0196MPaとした。

局部載荷の場合、木製の板と土層表面の接触状態が重要である。極力、表面を均等にした後に板を設置し、接触状態の均一性については、底部での測定結果が比較的左右対称であることから推定することにした。全面載荷の場合、空気袋の膨張が必ずしも一様ではないので、土槽底部の落とし戸のロードセルへの影響がわずかに見られたが、荷重増加が土槽底部全体にわたり左右対称であったことから、基本的には載荷方法による影響は少ないと判断した。表面載荷を行う場合には、側壁部での摩擦を低減するため、側壁にはシリコングリースを塗布した後、薄いゴム膜を貼付した。

なお、落とし戸幅と実際のシールドトンネルの天端におけるゆるみ幅を考えると、落とし戸一枚分の幅は、実際の1/50程度に該当するものと見なせる。したがって、現実のシールドトンネル施工時の地盤の変形を考える時、落とし戸の降下量は1mm未満の領域が現実に対応すると考えるべきであろう。今回は、落とし戸の降下に伴うゆるみ範囲の形状を明確にとらえるために落とし戸の降下量を5~2mmとした。また、落とし戸の降下速度を毎分0.5mmとした。

### 3. 数値解析

#### (1) 解析手法<sup>2)3)4)</sup>

今回のような落とし戸実験の場合は、落とし戸端部において地盤に急激なせん断力が発生し、不連続的ともいえる変形モードが生ずる極限荷重値問題とみなせる。このような場合、有限要素・非線形解析法・構成式の3要因について基本的要件を満足させる必要がある。有限要素には4節点アイソパラメトリック要素を、また非線形解析法は、繰り返し計算の過程において応力補正が可能な修正ニュートン・ラプソン法を用いる。

弾塑性構成モデルとしては、降伏関数 $F$ 、塑性ポテンシャル関数 $Q$ の取扱いが重要となる。一般に砂や粘土などの土構造物では $F=Q$ の関係は成立しないと言われているため、ここでは $F \neq Q$ の非関連流れ則の場合を考える。

非関連流れ則の場合の弾塑性応力-ひずみマトリクス $[Dep]$ を以下に示す。

$$[Dep] = \frac{[De][\partial Q/\partial \sigma][\partial F/\partial \sigma][De]}{[\partial F/\partial \sigma][De][\partial Q/\partial \sigma] - [\partial F/\partial \epsilon_p][\partial Q/\partial \sigma]} \quad (1)$$

ここに、

$[De]$  = 弾性応力-ひずみマトリクス、

$[\partial F/\partial \sigma]$  = 降伏関数の応力に関する微分、

$[\partial Q/\partial \sigma]$  = 塑性ポテンシャル関数の応力に関する微分、

$[\partial F/\partial \epsilon_p]$  = ひずみ硬化(軟化)に相当する項、である。

土の降伏条件としては三次不変量を考慮したモール・クーロンの規準が比較的良好に現実の土の挙動を再現すると言われている。しかしこの規準は $\pi$ 平面（主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ がすべて等しい平面）上でピラミッド状の多角形を成し、その頂点は特異点となり塑性ひずみ増分の方向が決定できなくなる欠点があるため、塑性ポテンシャル関数として採用するには問題がある。そこで降伏関数としてはモール・クーロンの規準を用い、塑性ポテンシャル関数としては $\pi$ 平面上に特異点がないドラッカー・プラグーの規準を用い、この2つの規準の長所を混合して使用することにより、初期変形から崩壊までを連続的に追従した解析を行うことができる。この組み合わせはマトリクスが非対称で計算が複雑になるが、厳密な解析が要求される場合は採用される。

モール・クーロン、ドラッカー・プラグーの両規準についての降伏関数 $F$ は以下の式で表される。

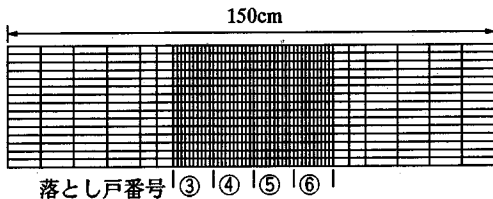


図-5 解析モデル

a) モール・クーロン

$$F = \sigma_m \sin \phi + \sigma \cos \theta - \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (2)$$

b) ドラッカー・ブラガー

$$F = 3\alpha \sigma_m + \sigma - K = 0 \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad K = \frac{6c \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_m$ 、 $\sigma$ 、 $\theta$ はそれぞれ応力の1次、2次、3次不変量に相当する項、 $c$ は粘着力、 $\phi$ は内部摩擦角である。

標準砂の応力レベルにおけるせん断弾性係数  $G$  の低減率は以下の式を使用する。

$$G = G_0 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sqrt{\sigma_m} \quad (5)$$

ここに、 $e$ は間隙比、 $G_0$ は初期せん断弾性係数である。

(2) 解析モデル

解析モデルは実験土槽と同寸法とし、横150cm、縦12.5cm・25.0cm・37.5cm・62.5cmの4種類である。境界条件は側方は水平方向固定・鉛直方向自由、底部は両方向とも固定である。戸の降下は0.1mmきざみの強制変位を作用させることにより表現する。縦37.5cmの場合の解析モデルを図-5に示す。節点数853、要素数780であり、今回は底部中央のみ計算を実施するため、4枚(③,④,⑤,⑥)の落とし戸をモデル化している。落とし戸同士が接する点は、互いに独立した節点を設けている。この措置により戸の降下時に隣接戸の要素を変形させてしまう現象を回避し、実際に近い変形モードを再現できる。また解析上の局部的かつ多大なせん断力の発生を抑制し、収束計算時の解の発散を防ぐ意味でも有効である。以下に材料定数を示す。密度は実測し、相対密度は密詰めの状態を想定して決定した。その他の定数は文献<sup>3)4)</sup>を参考にした。

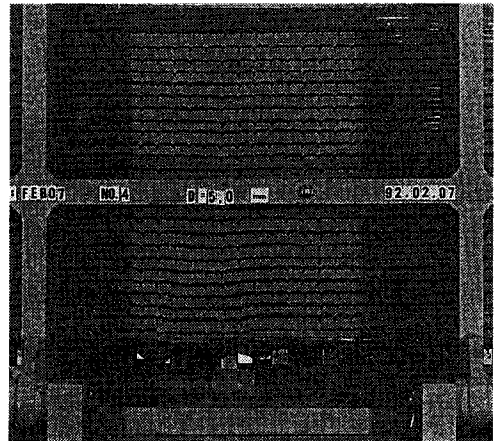


図-6 落とし戸降下後の色砂の変形

せん断弾性係数： $G_0=19.61\text{MPa}$

内部摩擦角： $\phi=40^\circ$

粘着力： $c=0\text{MPa}$

ポアソン比： $\nu=0.3$

相対密度： $Dr=0.70$

密度： $\gamma=1.51 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

解析はケース1～4の落とし戸④降下3mmまでと、ケース10～15について実施している。

4. 実験結果と考察

(1) 落とし戸降下に伴う荷重値の変化

セグメントの荷重の初期状態は、両端で底盤と隣接している部分を除くと、初期値は土盛り厚さの比に関して0.05程度のばらつきであった。これは落とし戸の機構、砂の撒き出し方等からくる応力再配分が既に生じている結果とも考えられる。図-6は、ケース3で落とし戸④を5mm降下させた時点における色砂の変化状況を示す。

a) 落とし戸降下量と荷重比の関係

図-7にケース1,2,3,4の場合について、落とし戸④を5mm降下させた場合の落とし戸④内部の2枚のセグメントに作用する荷重の平均値の変化を示す。ここでは数値解析との関係上、3mmまでの値を表示しているが、5mmまでの値も大きな変化は生じていない<sup>5)</sup>。実験では土盛り荷重に対する荷重比は、それぞれ0.46,0.10,0.14,0.17程度となっているが、これは今回の実験で、密度や間隙比等の特性が全く同一とは言えないことに起因する可能性がある。解析ではそれぞれ0.47,0.27,0.20,0.12となっている。

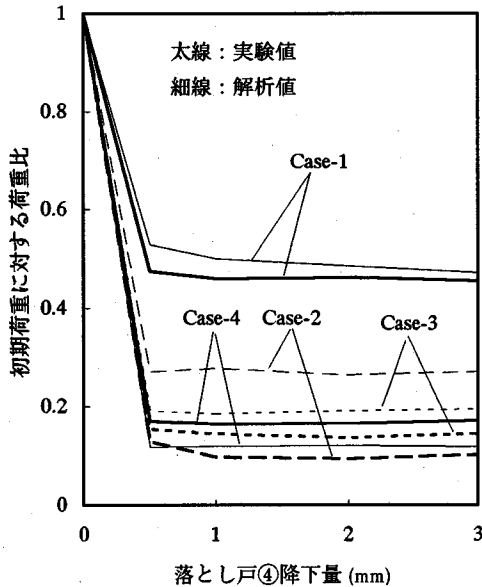


図-7 落とし戸降下量と荷重比

表-2 各手法による荷重比の比較

手法 \ 土被り厚	12.5	25.0	37.5	62.5 (cm)
実験	0.46	0.10	0.14	0.17
Balla	0.45	0.26	0.20	0.15
Terzaghi	0.48	0.29	0.20	0.12
解析	0.47	0.27	0.20	0.12

いずれのケースでも、落とし戸の降下量が0.5mm以下で、ほぼ最小に近いゆるみ荷重が出現している。表-2に、内部摩擦角を $40^\circ$ とした場合のゆるみ荷重の土被り荷重に対する比をBallaの方法<sup>6)</sup>、Terzaghiの方法<sup>9)</sup>および数値解析により求めた結果を示し実験値と比較する。実験値と解析値は落とし戸降下量3mm時の値である。両理論解析解、数値解析解とも今回の実験結果に比較的近い。

b) 荷重の再配分による荷重増減

図-8にケース3の場合の荷重再配分の状況を示す。落とし戸を初めて降下させる落とし戸④やこれに準ずる落とし戸②の場合には、両側の落とし戸の荷重変化はほぼ同等であるが、すでに降下した落とし戸に接する落とし戸を降下させた場合に、すでに降下した落とし戸の荷重増分が、降下していない落とし戸に作用する荷重の2倍程度と大きくなっている。落とし戸の降下による影響の範囲は、落とし戸2個に相当する範囲である。降下中の落とし戸に隣接している両側のセグメントの荷重増分が特に大きい。

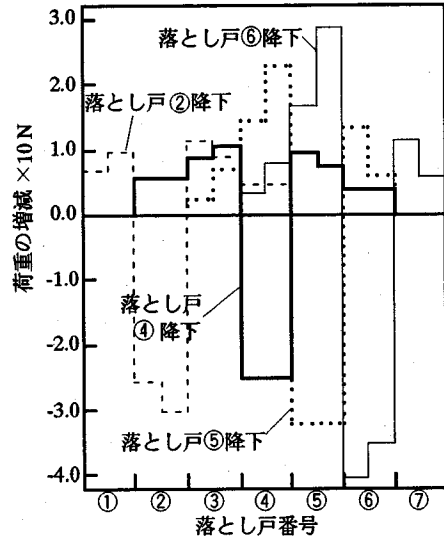


図-8 落とし戸の降下に伴う荷重の増減(ケース3)

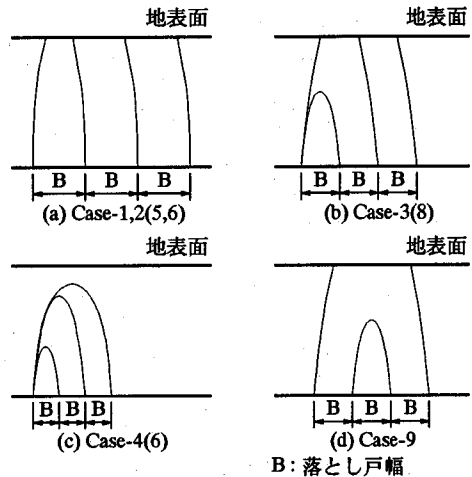


図-9 ゆるみ範囲の形態

なお、最初に降下させた1個の落とし戸に作用する荷重は、その後の再配分により増加し、大きい荷重の作用するセグメントに着目すると、土被り荷重に近い値まで回復するケースが多い。ただし、ケース9では、両側の落とし戸を降下させた結果、土被り荷重の1.5倍の荷重が最終的に作用した。

c) ゆるみ範囲

図-9に実験結果に基づくゆるみ範囲の形態を示す。落とし戸の降下に伴う色砂の変位状況を写真撮影し、これを変位読み取り装置で読み取り解析した変位の

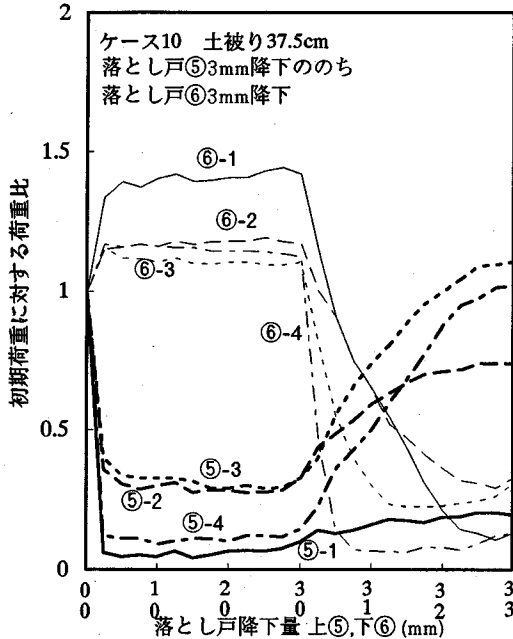


図-10 落とし戸降下量と荷重の増減 (実測値)

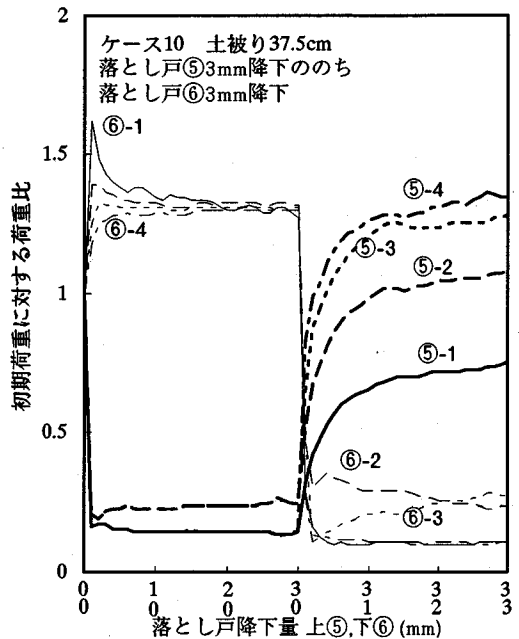


図-11 落とし戸降下量と荷重の増減 (解析値)

等高線を基に図示したものである。各曲線は当該落とし戸を5mm降下させた時の最大せん断ひずみが1%の範囲を示している。同図の(a)は、ケース1,2に対応したものが、ケース5,7もほぼこれに類似の形態であった。落とし戸④の5mm降下時点での地表面の沈下は、ケース1では落とし戸部の80%、ケース2では20%であった。引き続き隣接する落とし戸を降下させていくと、ゆるみ範囲がほぼ右側に平行移動していく。(b)は、ケース3に対応する形態であり、最終のゆるみ範囲についてはケース8の場合もこれに類似である。落とし戸④の降下により、落とし戸幅の1.8程度の高さまでゆるみ範囲が達しており、その地表変位は落とし戸⑤を5mm降下した時点で落とし戸の20%程度となり、落とし戸⑥の降下で80%程度に達した。(c)はケース4に対応した形態であり、ケース6の場合もこれに類似している。両者の場合とも、落とし戸⑥の降下後も、ゆるみは地表にまで達することなく、落とし戸3個分の幅に対して1.5倍程度の高さまでであった。(d)はケース9に対応する形態であり、落とし戸⑤の降下後、両側の落とし戸の降下により、地表の変位は落とし戸部に対して30%程度になった。なお落とし戸②の降下が、これらのゆるみ範囲に及ぼす影響は見られなかった。

#### d) 落とし戸降下に伴う荷重再配分

図-10にケース10の場合の荷重分布の実測値を示す。最初に降下させる落とし戸⑤に作用する荷重は、落とし戸⑤の微小な降下で最小荷重に、隣接する落とし戸⑥は最大荷重に達し、その変位量は0.5mm程度である。降下する落とし戸の外側のセグメント⑤-1,4の荷重低減が著しく、落とし戸の内部の2個のセグメント⑤-2,3では、外側に比べて低減程度が小さい。また、降下する落とし戸に隣接したセグメント⑥-1における増加荷重は、他の3個のセグメント⑥-2,3,4の増加荷重の2倍以上となっている。次に隣接する落とし戸⑥を降下させると荷重の再配分が始まり、降下中の落とし戸⑥の4個の測定セグメントのうち、すでに降下した落とし戸⑤から最も離れたセグメント⑥-4の荷重は比較的急激に減少し0.5mm程度の降下で最小値になる。一方、すでに降下した落とし戸⑤に隣接するセグメント⑥-1やすでに降下した落とし戸⑤では、比較的緩やかな速度で荷重の再配分が生じている。

図-11に同ケースの解析値を示す。落とし戸⑤降下時のセグメント⑥-1の荷重が一度増加しその後すぐに減少する点、落とし戸⑥降下時の荷重の再配分が急激に現われている点が実測値とやや傾向が異なるが、全体としての荷重増減の傾向、および落とし戸降下完了時の各セグメントの荷重値は実測値に近い。

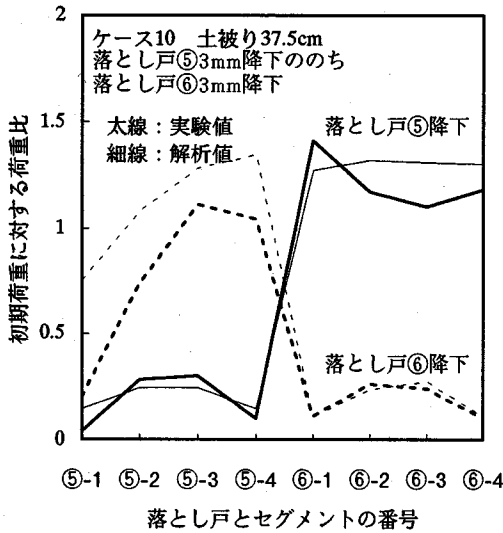


図-12 落とし戸降下後の落とし戸内部の荷重分布

図-12は、落とし戸⑤⑥を3mm降下させた時点の各セグメントの荷重比を実測値、解析値を併記して示したものである。実測値は落とし戸⑤の降下により、落とし戸⑤の範囲の荷重分布はアーチ状になり、落とし戸の中央部と端部では3~5倍の荷重の差が見られる。同様に、隣接した落とし戸⑥の左端のセグメントへの荷重の集中は他の3個のセグメントのそれより大きいことが判る。引続き、落とし戸⑥を降下させることにより、落とし戸⑤の中央部と右端のセグメントの荷重は、初期荷重よりも大きくなり、落とし戸⑥に集中していた荷重は、急激に低減して落とし戸⑤のゆるみ荷重に近い値を示している。

解析値は1枚の落とし戸に着目すると、隣接落とし戸の降下による荷重再配分が過大に評価される傾向にあるが、実測値のピークに対する誤差は10~15%程度であり、当該落とし戸降下時における落とし戸内部のアーチ形状の荷重分布を精度よく表現している。

(2) 落とし戸降下後の表面載荷による荷重分布

図-13に局部載荷であるケース11,12の実測値と解析値を示す。載荷荷重を載荷板の面積で除した値は、約0.0196MPaである。縦軸は落とし戸を降下させずに、表面に局部載荷した場合の落とし戸⑤の内側のロードセルによる測定された増分荷重で除した値を示している。ゆるみ領域が発生した後の表面載荷の実測値では、載荷板の直下においても、荷重増

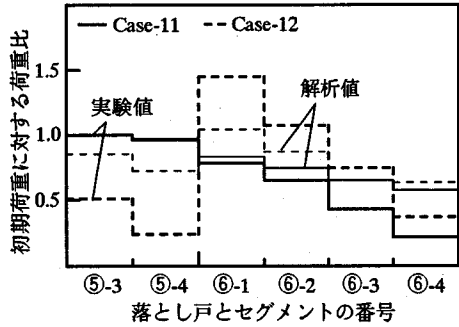


図-13 表面載荷による増分荷重 (ケース11,12)

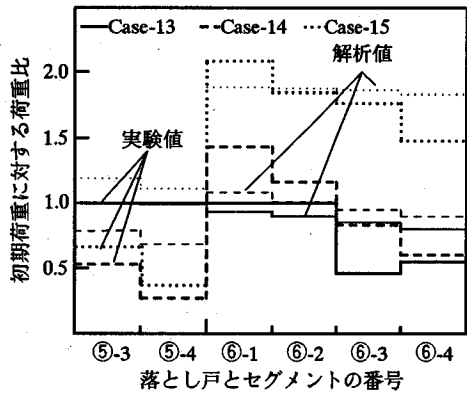


図-14 表面載荷による増分荷重 (ケース13,14,15)

分は0.3~0.5であるのに対して、降下した落とし戸に隣接した落とし戸では、1.5倍近い荷重の増分が見られている。解析値では載荷板直下の荷重増分は0.7~0.8、隣接した落とし戸の荷重増分は1.1倍程度に留まっているが、定性的な傾向は実測値と一致する。図-14は、ケース13,14,15の場合の測定結果である。ここでは、図-13に対応して圧力が0.0196MPaの場合の例を示している。局部載荷の場合の増分荷重の分布形状は、ケース12の場合の土被りが25.0cmの場合とほぼ等しい。一方、落とし戸の降下後、全面載荷を行うと、ゆるみ領域とその隣接部の荷重再配分は、降下した落とし戸の隣接部に集中する傾向が著しくなる。解析値の傾向はケース11,12に類似しており、実測値よりも荷重を大きめに評価している。

この差は落とし戸降下後の落とし戸上部の地表面形状が沈下していて載荷板および空気袋に対し完全に荷重を伝達できず、周辺部分への荷重配分が過大になった可能性がある。

## 5. まとめ

以上の実験及び解析結果とそれの考察に基づき、本研究により得られた知見を以下に要約する。

- (1) 落とし戸の降下によるゆるみ荷重の最小値は、微小降下量で出現する。本実験結果では、落とし戸幅の0.4%の降下時点で最小値に達した。ただし、降下した落とし戸に隣接する落とし戸の降下に際しては、3%程度の降下で最小値に近い状態に達した。
- (2) 最初に降下する落とし戸のゆるみ荷重の土被り荷重に対する比は、土被り厚さが落とし戸の幅に等しい場合には0.5程度、土被り厚さが2倍以上の場合には0.1~0.2であった。これは、Balla, Terzaghiの方法による計算結果に近い値である。
- (3) 落とし戸の降下による荷重の増加の出現の段階は、ゆるみ荷重の場合にほぼ類似している。増加荷重の土被り荷重に対する比は0.3~0.7である。なお、落とし戸の降下がすでに降下した落とし戸の荷重増加に及ぼす影響は、両側の落とし戸を降下させる場合に最も大きくなり、土被り荷重を越える場合があった。
- (4) 落とし戸の降下による水平方向の影響範囲は、落とし戸の約2個分に相当する範囲であった。
- (5) 落とし戸の降下量が5mmの場合のゆるみ範囲の高さについては、落とし戸幅の2倍程度であった。ゆるみ範囲は、落とし戸の降下順序の影響を受け、同一の土被り厚さについては、同時に降下させる落とし戸の個数が少ない程ゆるみ高さは小さいと考えられる。
- (7) 落とし戸の内部を細分化して荷重を計測した結果、落とし戸降下時の荷重分布は中央部が凸のアーチ状になることが確認された。また落とし戸中央部の荷重は端部の3~5倍であった。
- (8) 最初に降下した落とし戸に隣接した落とし戸の最も降下側に近いセグメントの荷重の上昇が著しく、最大で1.4程度を示した。それ以外のセグメントでは1.1~1.2程度の上昇がみられた。
- (9) 次に降下させた落とし戸の内部の荷重分布も、最初に降下した落とし戸と同様にアーチ状であり、絶対値もほぼ等しい値であった。そのとき最初に降下させた落とし戸の荷重は再び増加し、荷重比で1.0を越えるセグメントも存在した。
- (10) ゆるみ領域を有する部分の表面で圧力を載荷すると、周辺部の荷重増加が大きくなる。ゆるみ領域内外の最大値と比較すると、局部載荷の場合3倍程度、全体載荷の場合3.5倍程度周辺部が大きい。
- (11) 弾塑性有限要素法による数値解析は実験値に対し、落とし戸の降下時の荷重比について、土被りを

変更して計算した結果、微小降下量でのゆるみ荷重の発現、ゆるみ荷重値に着目した場合、実験結果の挙動に近い結果を得られることが確認できた。また、Balla, Terzaghiの方法による結果に対しても非常に近い。また、落とし戸内部を細分化した実験結果のシミュレーションについても、降下した落とし戸内部のアーチ状の荷重分布を定量的に表現できている。降下していない落とし戸の荷重増加については値はやや異なるものの、定性的には実験値と一致している。表面載荷のケースでは、実験値ほど顕著な周辺部分への荷重の分散結果は得られなかったが、降下した落とし戸内部とその周辺部の荷重増減の傾向は等しい。

## 6. おわりに

実験により、落とし戸降下量と荷重の関係、ゆるみ荷重値の割合などの概要を知ることができた。複数枚の落とし戸降下時の特徴ある挙動、土被りを変化させた場合のゆるみ範囲の形態・ゆるみ荷重比の値を概略ではあるが把握できた。また1枚の落とし戸内部で細分割化したセグメントの荷重分布を計測し、より詳細なゆるみ荷重の評価が可能となり、落とし戸降下後の上載圧力の影響を把握するため、載荷範囲及び土被りを変化させた場合の実験を行い、その概要を知ることができた。これらのことは今回の一連の研究成果であると考えている。

数値解析ではすべての項目で定量的評価は行なえなかったが、最小ゆるみ荷重出現時の落とし戸の降下量、土被り別のゆるみ荷重比、降下した落とし戸内部の荷重分布などは実験値に近い結果を得ており、理論解とのよい一致も考慮すれば、全体傾向としては精度よく実験結果を追跡しているという方向性が示されたと理解している。ゆるみ領域内部の地盤剛性の評価、強制変位ステップや要素の大きさの再検討など課題も残っているが、着目する事象を限定すれば、今回の解析手法で現実に即した地盤の挙動を再現できる見通しがついたと考えている。

具体的には、シールドトンネル掘削時の地盤に与える影響解析を行なう際に、応力解放率の概念を導入せずともゆるみ荷重を考慮した当研究手法の適用により、掘削に伴う全解放力を作用させて実際の挙動に近い結果を得ることを目標としている。

今後も基礎的な実験・解析に加え、今回の報告までに得られた知見を有効に活用し、大深度地下掘削問題等の具体的な課題を念頭に置き、研究を進めていく予定である。



謝辞：多忙な中、数値解析の指導をして頂いた明治大学農学部・田中忠治教授と模型実験について全面的に協力して頂いた(株)アルファインゾニアリソワーカーズ・海老沢伸二氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 坂元 信：極低圧下における砂の変形強度特性，東京大学大学院修士論文，1985。
- 2) わかりやすい土質力学原論，(社)土質工学会，pp.203-243。
- 3) 田中忠次：剪断帯を伴うひずみ軟化構成モデルと有限要素法による地盤の支持力解析，農業土木学会論文集第154号，pp.83-88，1991。
- 4) 田中忠次，酒井俊典：有限要素解析による進行性破壊とスケール効果の検討，農業土木学会論文集第153号，pp.1-10，1991。
- 5) 垂水尚志，山本征彦，大田 弘，野口利雄：砂地盤中のトンネル掘削に伴う荷重の再配分—落とし戸実験に基づく基礎的検討—，土木学会・トンネル工学研究発表会論文・報告集 第2巻，pp.27-34，1992。
- 6) K. チェッキー：トンネル工学—理論・設計・施工—(島田隆夫訳)，pp.135-139，鹿島出版会，1971。
- 7) 垂水尚志，山本征彦，野口利雄：落とし戸降下後の表面載荷に伴う荷重分布，土木学会・トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻，pp.95-102，1993。

(1995. 2. 27 受付)

## STUDY ON VERTICAL EARTH PRESSURE DISTRIBUTION IN SAND BY TRAP DOOR TEST

Toshio NOGUCHI and Hisashi TARUMI

Model tests have been carried out using an apparatus with several trap doors, to examine an earth pressure distribution patterns during shield driving execution and the redistribution by the succeeding change of load conditions. The present paper describes the load distribution on lowering trap doors measured by the apparatus, to get vertical load distribution pattern on trap doors and the load distribution by surface loading after lowering a trap door. The typical arching pattern of load and the load concentration on the area adjacent to the lowered trap door have been obtained. Further, the analytical results by FEM are in relatively good agreement with the test results.