

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—

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

垂水 尚志*・山本 征彦**・大田 弘***・野口 利雄**

Hisashi TARUMI, Yukihiko YAMAMOTO, Hiroshi OTA and Toshio NOGUCHI

Closed type shield tunnelling method has recently been popular in Japan and soil pressure acting on shield and segmental lining has been one of the topics in terms of estimation of release of in-situ stress and its influence on existing structures. So, model tests have been carried out using apparatus with several trap doors and consequently, outline of vertical load distribution pattern changing in accordance with the succeeding door displacement has been estimated. Further, the calculated results by FEM are in relatively good agreement with the test results.

Keywords: trap door, loosening pressure, stress release, model test

1. はじめに

都市トンネルの設計・施工に係わる分野において、近年、地下のより深い領域の有効活用、各種のトンネル施工方法の適用範囲の拡大等について特に関心が高まってきている。それに伴い、これまでに施工経験の少ない地盤の特性把握や地下水対策、周辺への影響評価、施工機械や構築される構造物への作用荷重の評価等の課題が、安全性、確実性、経済性等の観点から検討されてきている。

特にシールドトンネルについては密閉型が主流となり、施工時の地盤に対する拘束効果が、裏込め注入技術の向上との相乗効果もあり従前よりもかなり向上してきていると考えられる。これに伴い、応力解放の影響の程度への関心も高まってきており、シールドトンネル施工時の応力解放率、既設トンネル等の既設構造物への影響の程度といった具体的な課題を議論する事例も多くなっている。筆者らは、このような状況の中で、都市トンネルの構築に際して、トンネルの施工が周辺地盤や構造物に及ぼす影響の評価および既設のトンネルがその後の他のトンネルの施工に際して受ける荷重や変形、あるいは、建物から受ける影響の評価を行うことを目的として研究を推進しているところである。

この論文は、筆者等が実施した複数の落とし戸機構を有する小型土槽により得られた基礎的な実験結果及び解析結果に基づき、砂中のトンネル掘削による荷重の再配分の形態を主体に地盤の変形形態について考察を行ったものであり、これら一連の研究の基本となるものである。

* 正会員 工博(財)鉄道総合技術研究所 土質・基礎研究室

** 正会員(株)熊谷組 技術開発本部シールド技術部

*** 正会員(株)熊谷組 技術研究所土木構造研究部

2. 実験方法

2・1 実験装置の概要

図-1に実験装置の概略を示す。土槽の寸法は、長さ1.5m、奥行き0.3m、高さ0.8mであり、土槽の底版は8個の落とし戸からなる。各落とし戸は幅12.5cm、奥行き30cmであり、落とし戸には1個あたり6個の矩形セグメントを2方向ロードセルを介してとりつけてある。両側（前面と後面）の壁はアクリル製であり、この壁面に接する合計4個のセグメントはダミーであり、荷重の測定は中央の2枚のセグメントとロードセルによって行う。落とし戸の上下の移動は、スクリージャッキをパルスモータで稼働することにより行い、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し、自動的に作動させ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。写真-1に底盤部の構造を示す。写真の上からセグメント、ロードセル、落とし戸、スクリージャッキが示されている。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。

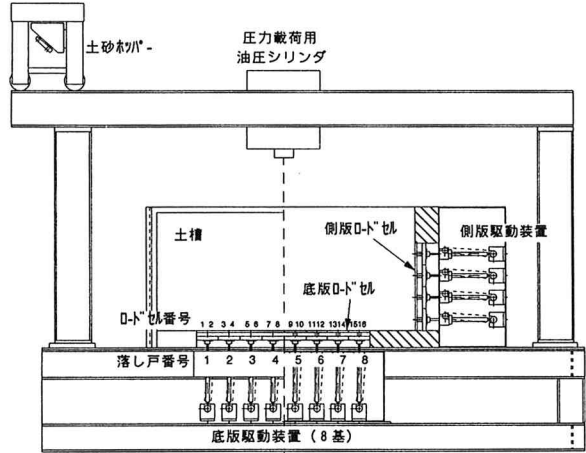


図-1 実験装置

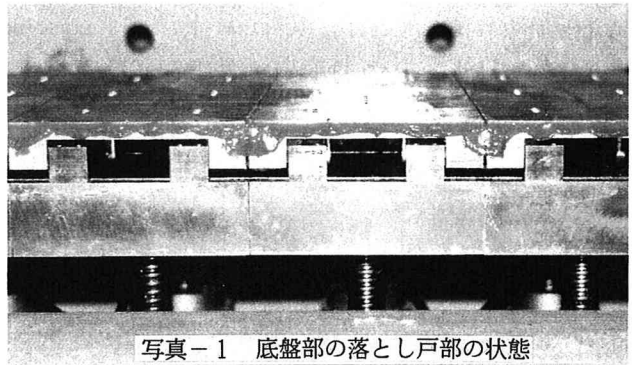


写真-1 底盤部の落とし戸部の状態

2・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。この歯形部は落とし戸の移動に伴う地盤の変形を写真撮影する際の標点となるものである。標準砂の単位体積重量は、 1.51gf/cm^3 、間隙比は0.74、含水比は0.3%である。内部摩擦角は、坂元¹⁾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° である。図-2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。

2・3 実験の種類

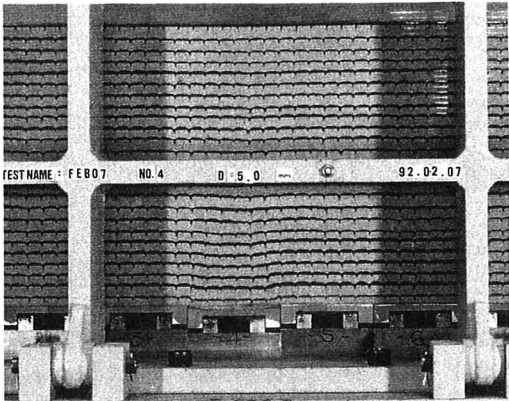
トンネルが構築された後に、新たに水平方向に併設して構築される場合に発生することが予想される土圧再配分の影響を調べる目的で実験を行う。表-1に実験のケースを示す。落とし戸幅に対する土被り厚さの影響、落とし戸の移動順序の影響を検討するものである。ケース1から4は、土被り厚さが落とし戸幅の1、2、3、5倍に対応するもので、落とし戸の移動を、落とし戸④の次に⑤、引き続き⑥を降下させ、最後に落とし戸②を降下させて、荷重や変位の影響を調べるものである。ケース5、6は、落とし戸を最初に2枚同時に降下させる場合で、次にこれに隣接する落とし戸⑥を降下させ、最後に落とし戸②を降下させる。ケース7、8は、落とし戸を最初に3枚同時に降下させ、続いて落とし戸②を降下させる。ケース9は、落とし戸⑤を降下させた後に、これに隣接する両側の落とし戸④⑥を降下させるものである。落とし戸の降下量は0～5mmとした。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ものであると考えるべきであろう。ここでは、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5mmまでとした。また、落とし戸の降下速度を毎分0.5mmとした。

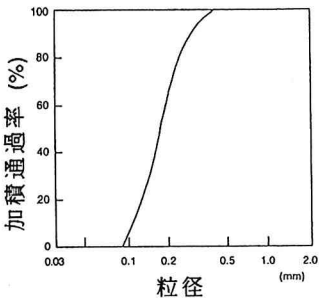
表－1 実験の種類

ケース	土被り厚さ	落とし戸の移動順序
1	12.5cm	④→⑤→⑥
2	25.0cm	④→⑤→⑥→②
3	37.5cm	④→⑤→⑥→②
4	62.5cm	④→⑤→⑥→②
5	37.5cm	④⑤→⑥→②
6	62.5cm	④⑤→⑥→②
7	37.5cm	④⑤⑥→②
8	62.5cm	④⑤⑥→②
9	37.5cm	⑤→④⑥

*降下量はすべて5mm



写真－2 落とし戸降下時の変形状態
(ケース3、落とし戸④を5mm降下)



図－2 豊浦砂の粒径加積曲線

3. 実験結果と考察

3・1 実験結果の概況

ロードセルの初期状態は、ロードセルの両端で底盤と隣接している1と16を除くと、初期値は土被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。

写真－2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。また、図－3に得られた測定結果の代表例としてケース3の場合の例を示す。落とし戸の降下と作用荷重の土被り荷重に対する比を示しているが、これはパソコンを介して得られた測定値を図化させたものである。落とし戸を初めて降下させる場合には、当該落とし戸に作用する荷重は、落とし戸の微小降下で最小荷重に達し、隣接する両側の落とし戸の増加荷重は最大荷重に達し、その変位量は0.5mm程度である。引き続き隣接する落とし戸を降下させ始めると荷重の再配分が再び始まり、降下中の落とし戸の2個の測定セグメントのうち、すでに降下した落とし戸から離れたセグメントの荷重は比較的急激に減少し、その後徐々に最小値に近づき、落とし戸幅の2%、すなわち2～3mmで最小値に達している。一方、すでに降下した落とし戸に隣接するセグメントやすでに降下した落とし戸では、比較的緩やかな速度で荷重の再配分が生じている。後者の場合には、降下量が4mm程度ではほぼ一定の値になっており、この段階では、落とし戸④の右側のセグメントの荷重は、土被り荷重に対する比が0.9程度にまで回復している。左側のセグメントでは、その比は0.5である。落とし戸⑤の降下量が1mmの段階では、その比はそれぞれ0.5、0.3である。落とし戸⑥の降下に伴う落とし戸④の荷重の変化は、右側のセグメントについては1.1程度まで上昇し、左側のセグメントでは荷重の変化は小さい。移動中の落とし戸の若い番号のロードセルの荷重変化率が、離れているロードセルよりも小さいことは、乱れ方の大きい領域では土圧の再配分の形態が異なる可能性もあり、重要な現象と考えている。

3・2 荷重の再配分による荷重増減

表－2に各ケースにおいて荷重の再配分の結果生じた荷重の増減分（土被り荷重に対しての増減分）の土被り荷重に対する比の最大値とそれが発生した段階を示す。落とし戸の降下により生ずる荷重の減少分を、幅62mmの1セグメントについて表したものである。これによれば、荷重の減少比は土被り厚さが落とし戸幅に等しいケース1では0.6、他のケースでは0.8～0.9となっている。また、増加分については、0.3～0.7の範囲である。増加比0.7は、ケース7の場合で落とし戸⑦の左側のセグメントで発生している。

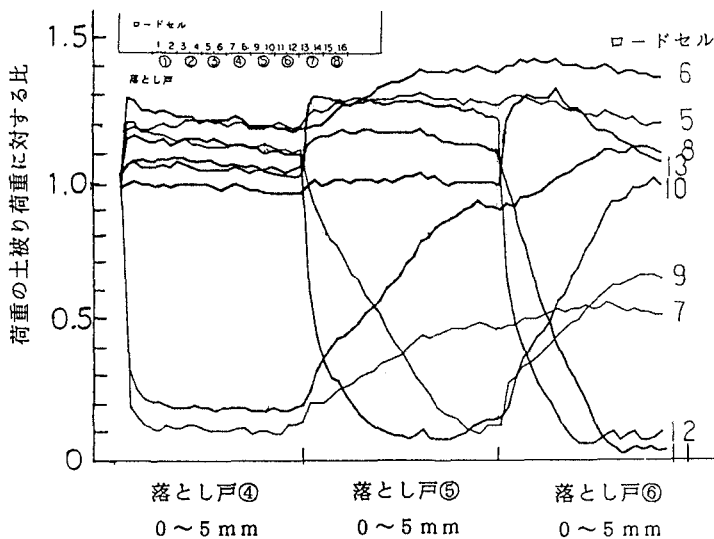


図-3 落とし戸の降下量と荷重の変化

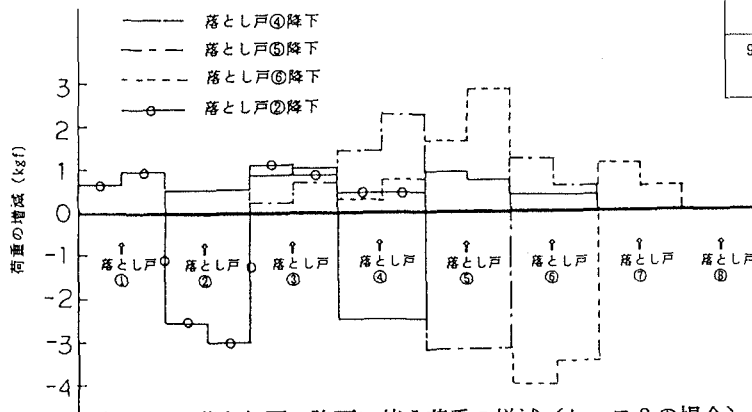


図-4 落とし戸の降下に伴う荷重の増減(ケース3の場合)

表-2 荷重増減分の土被り荷重に対する比

ケース	荷重の最大増減比	出現段階 落とし戸番号	出現箇所 ロードセル番号
1	減少比 0.6	⑤降下時	12
	増加比 0.5	④降下時	9
2	減少比 0.9	⑥降下時	12
	増加比 0.4	⑤降下時	11
3	減少比 0.9	⑤降下時	10
	増加比 0.3	⑤降下時	11
4	減少比 0.9	⑥降下時	11
	増加比 0.3	⑥降下時	13
5	減少比 0.9	⑥降下時	12
	増加比 0.5	⑥降下時	13
6	減少比 0.9	⑥降下時	12
	増加比 0.3	⑥降下時	13
7	減少比 0.9	④⑤⑥降下時	12
	増加比 0.7	④⑤⑥降下時	13
8	減少比 0.9	④⑤⑥降下時	7
	増加比 0.4	④⑤⑥降下時	6
9	減少比 0.8	⑤降下時	9
	増加比 0.5	④⑥降下時	6

表-3 Balla の式によるゆるみ荷重比

内部摩擦角	土被り厚さ (cm)			
	12.5	25.0	37.5	62.5
30	0.54	0.38	0.32	0.28
40	0.45	0.26	0.20	0.15
45	0.41	0.22	0.16	0.11

図-4にケース3の場合の荷重再配分の状況を示す。当該落とし戸を降下する直前に各落とし戸に作用している荷重に対する変化荷重を示したものである。落とし戸を初めて降下させる場合である落とし戸④の降下の場合やこれに準ずる落とし戸②の場合には、これに接する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、当該のすでに降下した落とし戸の増分荷重が、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増分荷重が特に大きい。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、その後の荷重再配分により増加し、その大きさは左右のセグメントにより異なるが、大きい荷重の作用するセグメントに着目すると、土被り荷重に近い荷重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。

図-5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7,8のロードセルの点における荷重の変化を示す。落とし戸1個、すなわちセグメント2個分に対する値であり、土被り荷重に対する荷重の比は、それぞれ50,11,16,17%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。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-3に、Ballaの方法²⁾により算定したゆるみ荷重の土被り荷重に対する比を示す。内部摩擦角を 40° とした場合の荷重比は、今回の実験結果に比較的近い。なお、Terzaghiの方法²⁾によると、内部摩擦角 40° 応力係数を1とすると、土被り厚さが12.5、25.0、37.5、62.5cmに対して、それぞれ0.48、0.29、0.20、0.12であり、Ballaの方法にほぼ類似している。

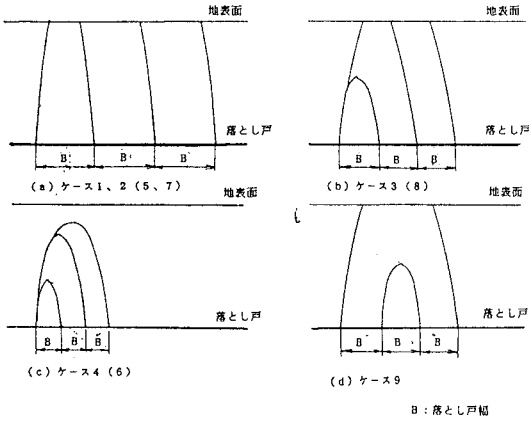


図-6 ゆるみ範囲の形態

3・3 ゆるみ範囲

図-6に今回の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等高線を参考にして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に対応したもののだが、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を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。

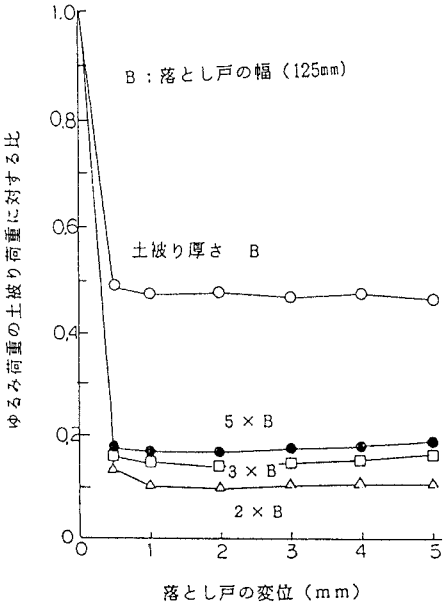


図-5 ゆるみ荷重と落とし戸の降下量

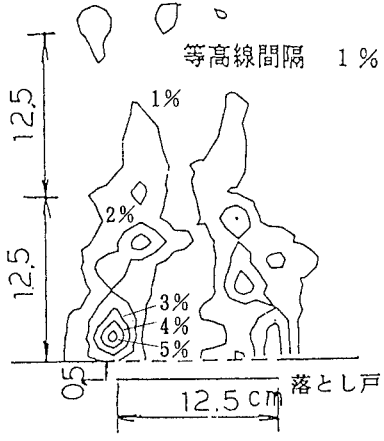


図-7 最大せん断ひずみ分布 (ケース3の場合)

3・4 せん断ひずみ分布

図-7にケース3の場合について落とし戸を5mm落下させた時点の最大せん断ひずみ分布を示す。分布は、歯形をつけた色砂の変位を写真撮影し、拡大した写真の歯形部の座標を座標読み取り装置により読み取り、矩形要素の格子点の座標変化から求める。等高線の間隔は1%である。ひずみが2%以上の領域は、ほぼ戸の幅に等しい高さまでであり、1%の領域は、戸の2倍程度の高さまでとなっている。落下した戸の両端では3～5%のせん断ひずみが生じている。

4. 実験結果の解析と考察

4・1 解析の概要^{3) 4) 5)}

材料非線形の構成則を用いた弾塑性解析で現象をモデル化することを考えた。

今回の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典型的な極限荷重値問題である。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。このときQ=0の面が降伏曲面F=0と一致するならば関連流れ則となるが、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≠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。

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

[De] : 弾性応力-ひずみマトリクス

$[\partial F / \partial \varepsilon p]$: ひずみ硬化(軟化)に相当する項

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 π 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 π 平面上に特異点がないドラッカー・プラガーの規準を用い、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ため、一般的ではないが、厳密な解析が要求される場合は採用されることがある。また解析にはひずみ軟化を考慮する。

モール・クーロン、ドラッカー・プラガ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。

a) モール・クーロン

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

b) ドラッカー・プラガー

$$F = 3\alpha \sigma_m + \bar{\sigma} - K = 0 \quad \text{--- (3)}$$

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

$\sigma_m, \bar{\sigma}, \theta$: 応力の不変量

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。

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

e : 間隙比

G_0 : 初期せん断弾性係数

4・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・37.5cm・62.5cmの3種類（実験ケース1、3、4に対応）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。戸の降下は強制変位（0.1mm きざみ50回=5mm）を作用させることにより表現する。節点数は 353、要素数は 323であり、縦62.5cmの解析モデルを図-8に示す。今回は底部中央のみ計算を実施するため、4枚（③④⑤⑥）の落とし戸をモデル化している。また以下に材料定数を示す。^{4) 5)}

せん断弾性係数： $G_0=200\text{kgf/cm}^2$	内部摩擦角： $\phi=45^\circ$
粘着力： $c=0\text{kgf/cm}^2$	ポアソン比： $\nu=0.3$
相対密度： $Dr=0.70$	単位体積重量： $\gamma=0.0015\text{kgf/cm}^3$

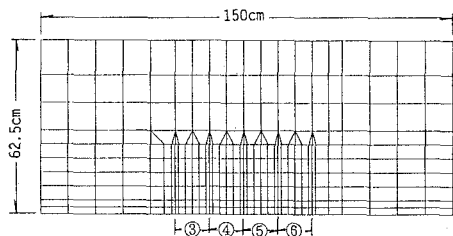


図-8 解析モデル

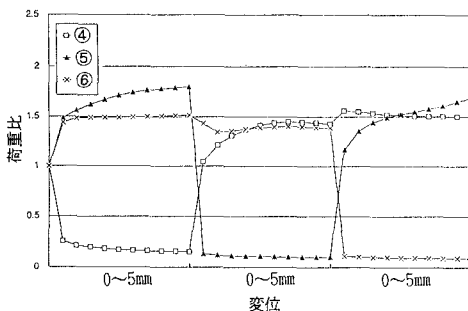


図-9 ケース3の解析結果

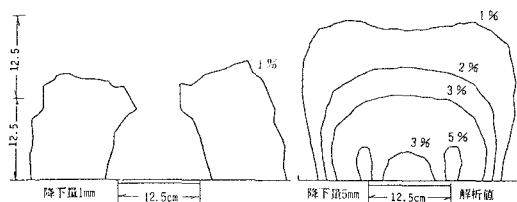


図-11 最大せん断ひずみ分布の解析値

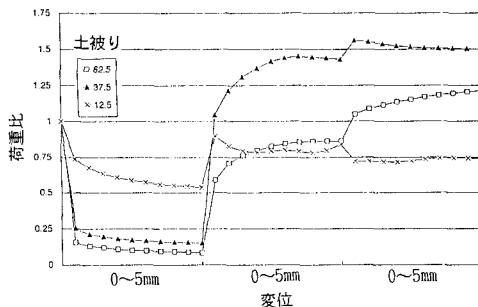


図-10 落とし戸④の解析結果

4・3 解析結果と考察

図-9にケース3の変位と荷重値の関係を示す。落とし戸④降下時には④の荷重比は変位 0.5mm程度で急激に減少し0.25以下となり、それ以降変位 5.0mmまでは漸減する。⑤、⑥の荷重比は変位 0.5mm程度で急上昇し、それ以降⑤は 1.5から 1.8まで上昇、⑥は 1.5程度を保つ。落とし戸⑤降下時には④の荷重比は増加に転じ、右上りの放物線状で 1.4程度に達する。⑤は④降下時の④の挙動と同様に、荷重値は急激に減少後、漸減する。⑥はやや減少して 1.3程度になる。落とし戸⑥降下時には④、⑤とも荷重比は増加し、最終的には両方とも 1.5以上になるが、値は⑤が④を上回る。⑥は今までの降下戸と同様の挙動を示す。

降下した落とし戸の荷重比は落とし戸の微小な変位に敏感に反応し、急激に低下するが、以後荷重比の変化は少ない。実験では 2枚目以降の落とし戸の降下時に、降下する落とし戸の荷重の減少が 1枚目（④）に比べ緩やかに発生してゆく。これは落とし戸境界部の応力再配分は瞬時ではなく、地盤攪乱の影響により、やや緩慢に進行するものと考えられる。解析では特徴的な挙動箇所において若干の差がみられる。また降下しない落とし戸の荷重比上昇が大きい。荷重比増加・減少の全体的な傾向は実験値に類似している。

図-10に落とし戸④の実験ケース1、3、4に対応する解析結果を示す。実験結果の図-4と対比すると、ケース1がケース3、4に比べ荷重比の減少が少ない傾向は一致しているが、そのときの荷重比の値、ケース3、

4 の大小関係はやや差がある。⑤降下時の④の挙動についてはケース 3 の値が大きくなっている。これは図-5 のゆるみ範囲の形態にもあるように、ゆるみ範囲が落とし戸 3 枚の降下時に、ケース 1 ではすべて地表面に到達、ケース 4 ではすべて未到達であるが、ケース 3 では⑤降下時に地表面に到達しているため、そのときから荷重比が急に増加したものと考えられる。

図-11 にケース 3 の降下量 1mm と 5mm の場合の最大せん断ひずみ分布を示す。最大せん断ひずみの解析値は、降下量 1mm の場合は 10^{-2} オーダのひずみの範囲は、高さについては落とし戸幅にほぼ等しい。降下量 5mm の場合の 10^{-2} と 2×10^{-2} の領域の幅は実験値より広がっているが、高さについてはほぼ一致している。戸の両端部では 2×10^{-2} 程度の値が生じている。

5. まとめ

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

- (a) 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。
- (b) 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。
- (c) 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はほぼ類似している。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。
- (d) 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 2 個分に相当する範囲であり、降下中の落とし戸に隣接する両側の落とし戸の降下側半分への荷重の集中が著しい。
- (e) 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。
- (f) 落とし戸の降下による最大せん断ひずみは、1 個の落とし戸を 5mm 降下させた場合には、 10^{-2} のオーダのひずみの範囲は落とし戸幅の 2 倍程度の高さである。この場合、落とし戸の両端部近傍では 5×10^{-2} 程度のひずみが生じた。落とし戸の変位が 1mm 未満では、 10^{-2} のオーダの最大せん断ひずみは、落とし戸の幅にほぼ等しい高さ程度と推測される。

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、せん断ひずみ分布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。数値解析では細部において問題はあるものの、全体傾向は比較的精度よく実験結果を追跡していると考えられ、方向性が示された。今後は基礎的な実験・解析に加え、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。

7. 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) K. チェッキー：トンネル工学—理論・設計・施工—（島田隆夫訳）、鹿島出版会、1971。
- 3) わかりやすい土質力学原論、(社)土質工学会。
- 4) 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、pp83~88、1991。
- 5) 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。