

降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮した トンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明

足立 紀尚¹・木村 亮²・岸田 潔³・伊藤 浩志⁴

¹フェロー会員 Ph.D. 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学助手 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

筆者らは、降下床実験を中心として掘削に伴うトンネルの力学挙動の解明を行ってきた^{1)~4)}。さらに近年、3次元降下床実験装置を開発し、トンネル交差部の力学挙動について検討を行った⁵⁾。本研究では、3次元降下床実験の改良を行い、単一降下床下降実験および連続降下床下降実験を通じてより詳細で正確な土圧分特性および地表面沈下特性の計測を実施した。連続降下床下降実験では、土圧分布特性および地表面沈下特性に降下床下降過程の影響が現れる。すなわち、既下降した降下床により地盤のゆるみが生じており、その影響で地盤がゆるんだ方向に変形が生じ、大きな荷重が作用するという現象が生じていることを確認した。

Key Words : trap door experiments, earth pressure, settlement, tunnel excavation, loosening zone

1. はじめに

国土の大部分を山地で占める我国において、地下空間の利用は必要不可欠なことである。また、限られた平野部の人口密集した都市部では、交通網の整備だけでなくライフライン機能の地下利用に関心が高まっている。さらに、近年では景観や環境問題の観点から、地下空間の利用が求められつつあるのが現状である。

現在進められている第2東名・名神高速道路の建設は、その代表例であろう。慢性的な渋滞を解消し、利用者の快適な走行環境を演出するのが目的である。この建設工事では、路線が従来の東名・名神高速道路より山間部を通過するため、橋梁・トンネル構造物比率が高く、トンネル構造物の比率は全体の約20%にも達している。また、高速性・快適性のため大断面トンネルの建設が行われている。大断面トンネルでは、掘削土量の軽減を計るため一般に扁平断面で設計・施工が行われ、トンネル覆工に作用する土圧は増加する。そこで、トンネル掘削過程におけるトンネルおよび周辺地盤内の応力再配分特性を明確にすることが重要となる。

従来より、トンネル掘削時にトンネルおよび周辺地盤に作用する土圧を解明する際、トンネル掘削による応力開放をモデル化した降下床実験(落し戸実

験)が多数を行われてきた。代表的なものは、Terzaghiの落し戸実験とそれに伴う土圧理論⁶⁾である。Terzaghiは、粘土を含まない細かく破碎された岩石または砂質地山におけるトンネル土圧を乾燥砂を用いた帯状の落し戸実験から推論している⁶⁾。

一方、我国における降下床実験の先駆的な研究として、小野・真井⁷⁾、村山⁸⁾、村山・松岡⁹⁾の研究があげられる。村山⁸⁾、村山・松岡⁹⁾は、各種直径のアルミ棒を混合して横に並べた積層体を用いて降下床実験を行い、降下床と同一の移動をする1次領域、1次領域に追従して移動する2次領域、および2次領域の外側にあって移動しない3次領域が地盤中に形成されることを明らかにした。このことは、地盤中に変位の生じる領域と変位の生じない領域の存在、すなわち変位の不連続な境界が存在することを意味している。

足立ら^{1)~4)}は、村山⁸⁾、村山・松岡⁹⁾の研究を継承し、重力場および遠心力場において降下床実験を行っている。これらの降下床実験は2次元で行われており、ある断面での応力開放に伴う土圧分布特性および変形特性の把握が行われてきた。

これに対し中井ら^{10) 11)}は、トンネル掘削問題を例に3次元模型実験と3次元弾塑性有限要素解析を行っている。地盤材料としては砂と正規状態の粘土を想定し、ダイレイタンス特性の差異が地盤の変

形挙動に及ぼす影響、掘削過程の影響を実験・解析の両面から検討を行っている。

一方、足立ら⁵⁾は、トンネル交差部の掘削の影響を考慮できる3次元降下床実験装置を作成し、砂質地盤においてトンネル交差部が本坑トンネルおよび周辺地盤にどのような影響を与えるかの検討を行っている。

足立らの研究⁵⁾では、降下床下降に伴う周辺の土圧分布特性および地表面沈下特性についての検討が、開発された3次元降下床実験で行われた。また、トンネル交差部の挙動についての検討もなされている。しかしながら、トンネル掘削過程を考慮するには降下床分割が少なく、また、降下床一つ一つが大きくそこでの詳細な土圧分布特性が把握できない等の不十分なところがあり、より詳細な検討を行うには試験装置の改良が必要であると考えられる。また、中井らの研究^{10), 11)}では、実験において地表面の沈下は計測されているものの、土圧に関する計測は行われていない。本研究では、足立らの研究⁵⁾に基づき、3次元降下床実験を改良を行い、降下床下降に伴うより詳細な周辺土圧変化および地表面の沈下状況の把握を行う。特にここでは、基本的な降下床下降に伴う地山挙動の考察を行い、さらに、トンネル掘削過程を模擬した実験を行い、周辺土圧変化や地表面沈下量の変化について検討を行う。

2. 模型実験の概要

(1) 地盤材料および地盤の作成

本実験で用いた地盤材料はケイ砂6号である。ケイ砂6号の物理特性および作成地盤の物性値をTable 1に示す。

模型地盤は、乾燥したケイ砂6号をホッパ（開口幅5.0 mm、長さ600 mm）を用いて模型地盤表面より600 mmの高さを保ちながら砂を自由落下させて作成した。なお、地盤ができるだけ等方状態となるように砂を落下させる方向を変えながら模型地盤の作成を行った。地表面の形状は必ずしも平面的にならないので、最終的には表面をはげなどで整形して模型地盤を作成した。

(2) 3次元降下床実験装置

本実験に用いた3次元降下床実験装置をFig.1に、降下床、底板パネル、土圧計の配置をFig.2に示す。本稿では、単一トンネルの掘削過程に関する結果を示すが、本装置において底板パネルを交換することで文献5)で扱った分岐トンネル問題も対応可能であ

Table 1 The physical properties of Silica sand number 6 and the properties of the ground

Physical properties		Properties of making ground	
Specific gravity	2.63	Relative density [%]	70.94
Maximum void ratio	1.03	Dry density [kN/m ³]	14.72
Minimum void ratio	0.64	Internal friction angle	36°
		Void ratio	0.753

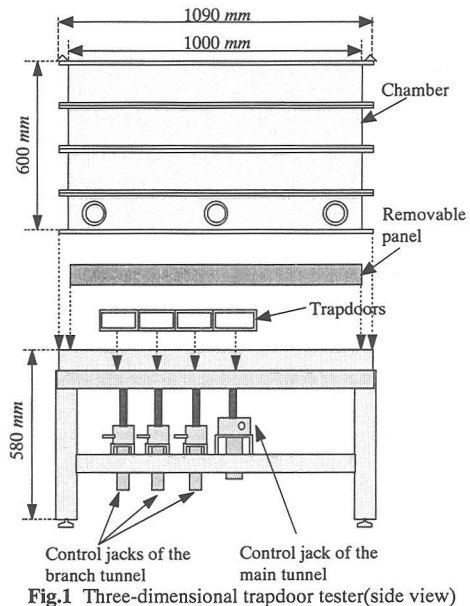


Fig.1 Three-dimensional trapdoor tester (side view)

る。文献5)で用いた装置からの改良点を含め文献5)と一部重複するが、改めてここで実験装置の説明を行う。

Fig.1に示すような1090×1090 mmの土槽の底部に、トンネルをモデル化した降下床1~6をFig.2に示すように設置する。トンネル横断方向の降下床幅は150 mmであり、トンネル縦断方向の降下床幅は、降下床1, 6は200 mmであり、降下床2, 3, 4, 5は150 mmであり、後者の4つの降下床は正方形である。文献5)で用いた装置は、降下床分割が3分割であったが、ここではより詳細に掘削過程を議論するため降下床をより細かく分割して改良を行った。降下床の下降は、降下床下部に接続したジャッキにより行う。また降下床に作用する荷重は、同じく降下床の下部に接続した、荷重計(TCLP-50KA)により計測する。また、降下床には、直径25 mmの土圧計(P325SV-02)をFig.2に示すように配置し、降下床上の詳細な土圧分布を計測する。この点も文献5)の装置からの改良点である。文献5)の装置は、降下床荷重は荷重計によってのみ計測し、降下床に作用する荷重のより詳細な検討・議論が不可能であった。この点を改良するため降下床自身に土圧計を配置し、より詳細な計測を行った。土槽底部の降下床の周辺部には、底板パネルを設置し、直径50 mm

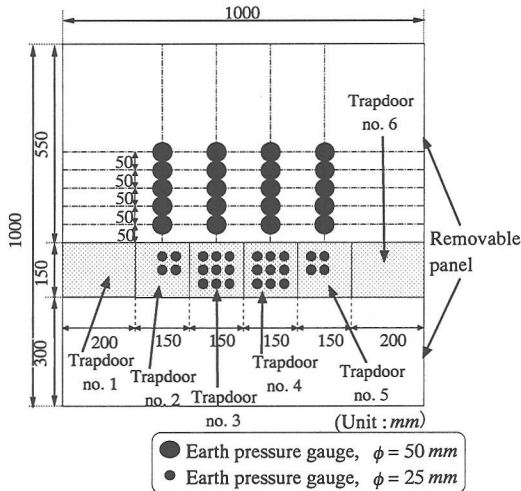


Fig.2 Set up of the trap doors and the earth pressure gauges on the removable panel

でその受圧面が直径 34 mm の土圧計 (KD-2F) を Fig.2 に示すように配置し、降下床周辺部の土圧を計測する。

荷重計および土圧計については、いずれも文献5)と同様のものを用いており、詳細は文献5)に譲る。

(3) 地表面変位計測システム

模型地盤の地表面変位は、Fig.3 に示すような地表面変位計測システムにより行った。

変位計測にはレーザ式変位センサ (LB-01) を採用した。その計測レンジは±40 mm、分解能は 0.04 mm である。レーザ式変位センサを最上部の駆動シャフトによって水平方向に移動させながら、地表面までの距離を計測し、同時に、中間のシャフトに設けた水平移動量検出センサによって水平方向の変位を計測する。レーザ式変位センサ、水平移動量検出センサの精度は、それぞれ、3 μm、350 μm であり、レーザ式変位センサから地表面までの距離は、水平移動量 2 mm 間に存在するデータ (11~12 個) の平均値をその区間の代表値としている。

地表面変位を 3 次元的に把握するために、地表面変位計測システム下部に滑車を取付け、土槽の上部にガイドレールを 2 本設置し、このガイドレール上を地表面変位計測システムが、計測する位置によって移動できる構造となっている。Fig.3 に示すように 50 mm の間隔で変位センサを 3 台設置しているので、ある地点の計測で一度に 3 測線の計測が可能である。

本研究で行うトンネル掘削過程を模擬した実験では、Fig.4(a)に示すようにトンネル縦断方向は 3 測線、Fig.4(b)に示すようにトンネル横断方向は 3 回

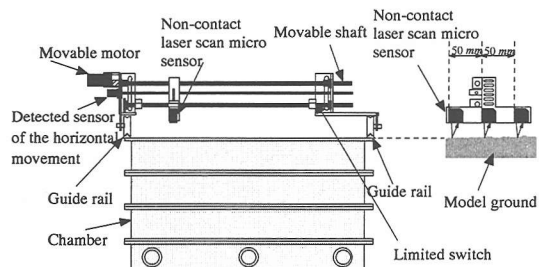
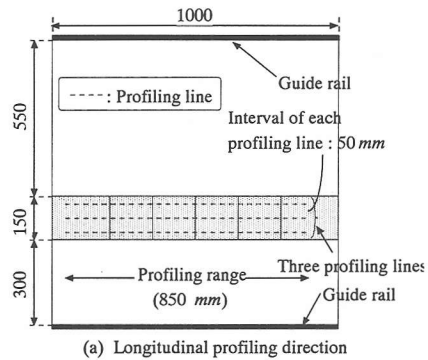
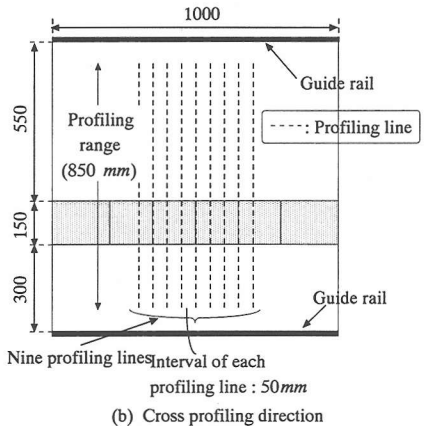


Fig.3 Surface settlement profiling system



(a) Longitudinal profiling direction



(b) Cross profiling direction

Fig.4 Profiling lines of the model ground surface (Unit : mm)

の移動により 9 測線の計測を行った。計測可能範囲は約 850 mm であり、土槽中心部分を計測する。

(4) 実験パターンおよび実験手順

本研究では、土被り H をパラメータとして、3 種類 ($H = 1D, 2D, 4D$) の実験を実施した。なお、降下床幅 D は一定 (150 mm) とする。

トンネル掘削を模擬した実験に先駆けて降下床を単一で下降させて降下床および周辺部に作用する土圧分布特性の把握を行った。

その後、トンネル掘削を模擬した降下床実験を行った。降下床の下降順序は、Fig.2 に示す降下床 1, 2, 3, 4, 5, 6 の順序で各降下床を 5.0 mm づつ下降させる。これは、トンネルを一方向から順次掘削することをモデル化している。

実験の手順は以下の通りである。

まず、すべての計測機器が正常に作動するか確認し、各計測機器の値をイニシャライズする。ラップにより降下床と底板パネルの間隔を保護する。これは、降下床とパネルの間のクリアランスに砂が詰まることを防ぎ、降下床の下降をスムーズに行うためである。その後、先に述べた方法でモデル地盤を作成し、地表面変位計測システムを土槽上に設置して地表面の初期形状を計測する。初期土圧を計測後、降下床を1, 2, 3, 4, 5, 6の順序でそれぞれ5.0 mmまで下降させる。

土圧計測は降下床下降量 δ_i が0.0 ~ 0.2 mmの間では0.05 mm間隔、0.2 ~ 1.0 mmの間では0.1 mm間隔、1.0 ~ 3.0 mmの間では0.5 mm間隔、3.0 ~ 5.0 mmの間では1.0 mm間隔で行う。

地表面計測は各降下床を5.0 mm下降させた後、トンネル掘削軸方向(縦断面)、トンネル横断面について計測する。

計測されたデータはデータロガー(TDS-303)を介してパーソナルコンピュータに保存される。

なお、本論文で多用する記号および用語についての説明を加えておく。

- D : 降下床幅(トンネル幅) (= 150 mm)
- H : 土被り[mm]
- H/D : 土被り比
- δ_i : 降下床下降量[mm]
- δ_{in} : 降下床 n の降下床下降量[mm]
- δ_{max} : 地表面最大沈下量[mm]

3. 単一降下床実験

降下床を連続的に下降させるトンネル掘削の進行を模擬した実験に先駆けて、降下床を単一で下降させることにより、単一の降下床の下降による降下床および周辺部に作用する土圧の挙動を把握する。降下床は150×150 mmの正方形(Fig.2に示す降下床3)で、降下床下降量 δ_i は5 mmである。土被り H をパラメータとし、1D, 2D, 4Dの3パターンの実験を行った。

(1) 土圧に関する実験結果および考察

Fig.5に土被り $H = 1D, 2D, 4D$ における、降下床下降量と降下床規準化土圧の関係を示す。ここで、規準化土圧とは各計測時の土圧を初期土圧(2.062 kP(1D), 3.520 kP(2D), 5.975 kP(4D))で除した値のことである。したがって、初期状態における規準化土圧は1である。

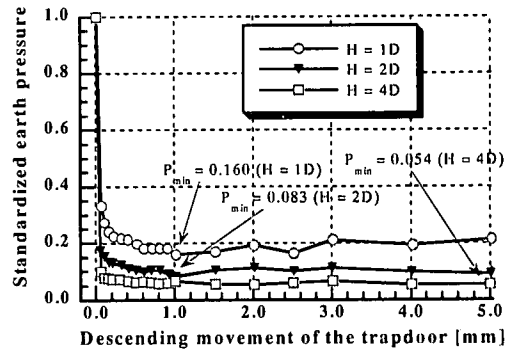


Fig.5 Relationship between standardized earth pressure and descending movement of the trapdoor

Fig.5の結果より、いずれの土被りにおいても降下床に作用する土圧は降下床下降直後より下降量0.2 mmあたりに至るまで急激に減少し、その後一定値に収束する。さらに、最小規準化土圧は、土被り比が大きくなるほど小さくなる。ただし、土被り1Dと2Dの差異は、2Dと4Dの差異より明確である。土被りが大きくなると(本研究では、ケースが少ないが2D以上)降下床に作用する土圧、すなわち緩み土圧は、土被りによらないことを示していると考えられる。これより、土被りが大きいくほど、降下床下降によるアーチ効果(降下床実験では、降下床の下降により降下床周辺の鉛直土圧が上昇すること)が十分に発揮されていることが確認できる。これらの傾向は、2次元降下床実験¹⁾と同じである。

Fig.6に土被り $H = 1D, 2D, 4D$ において、降下床周辺の3つの土圧計に着目し、降下床下降量と降下床周辺部規準化土圧増加量の関係を示す。なお、下降降下床と周辺部の3つの土圧計の位置関係は図に併記する。

Fig.6より、いずれの土被りにおいても、降下床周辺部に作用する規準化土圧は、降下床下降により増加し、降下床下降量1.0 mm以降一定値に収束する。また、降下床中心線からの距離で比較する(土圧計no.1と土圧計no.2を比較すると、降下床下降による土圧増加量は、いずれの土被りにおいても、土圧計no.1のほうが大きい。これは、2次元降下床実験では把握できない3次元の効果によるものと考えられる。降下床端からの距離で比較する(土圧計no.1と土圧計no.3を比較すると、土被り $H = 1D, 2D$ においては、降下床からの距離が小さいほど、増加は大きい。土被り4Dにおいては、増加量はほぼ等しく、このことより土被り比が大きい場合は、下降降下床の土圧の減少分を受け持つ形で形成されるアーチの足元が拡大している傾向が伺える。

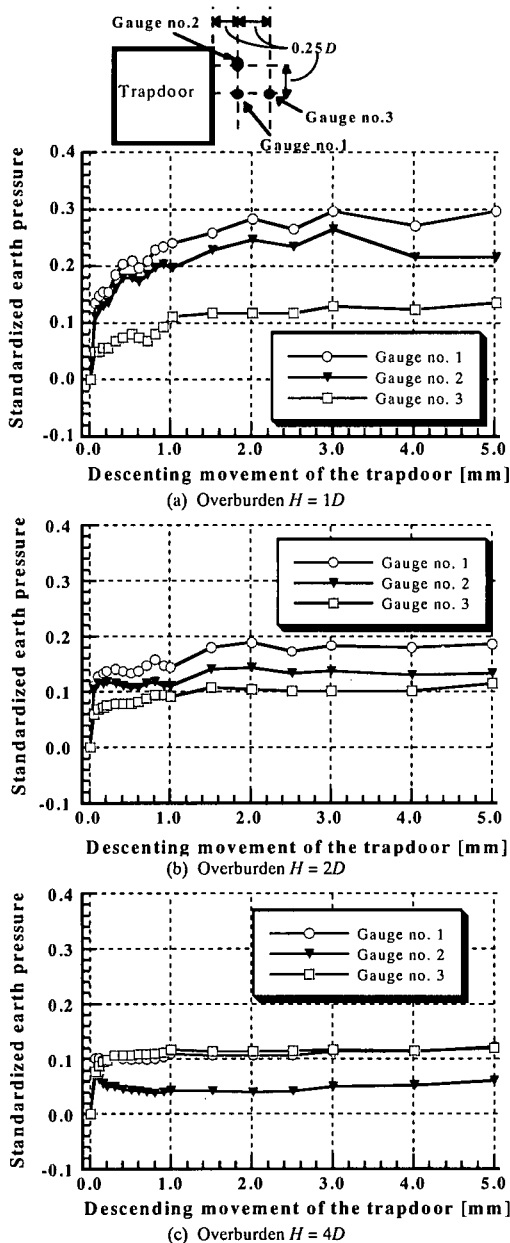


Fig.6 Relationship between changes in the standardized earth pressure and the descending movement of the trapdoor

(2) 土圧理論の適用

このように3次元で行った単一の降下床実験の結果に対して、従来から落し戸理論としてよく用いられる Terzaghi の理論⁶⁾を取り上げ、この理論を3次元問題に拡張し、上記した本実験の結果に適用する。なお、ここで取り上げる理論を応用した Terzaghi のゆるみ土圧式は、NATM トンネル、シールドトンネルなど実際の様々なトンネル建設現場において、設計土圧算定式として幅広く用いられている。Terzaghi の土圧理論から2次元降下床に作用する平

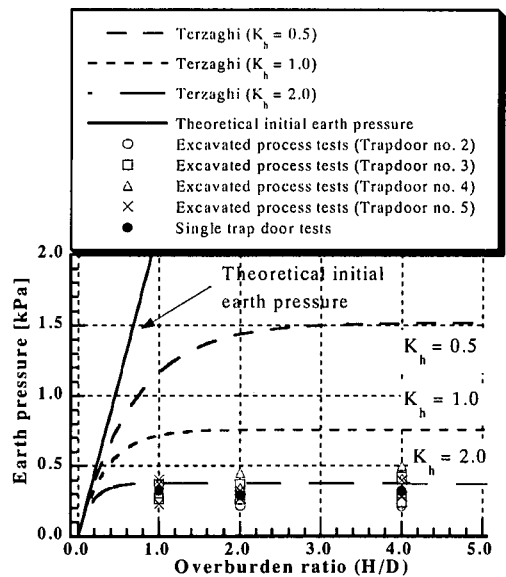


Fig.7 Comparison of theoretical and experimental earth pressure levels

均鉛直土圧の算定および3次元降下床に作用する平均鉛直土圧への拡張の誘導は、文献5)に譲る。結果として本研究では、乾燥砂を用いることおよび降下床が正方形であるので、

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma x}{4K_h \cdot \tan \phi} \left[1 - \exp\left(-\frac{4}{x} K_h \cdot H \cdot \tan \phi\right) \right] \quad (\phi \neq 0) \quad (1)$$

となる。ここで、 x は降下床の1辺の長さ、 H は土被り、 K_h は側圧係数 $K_h = \bar{\sigma}_h / \bar{\sigma}_v$ 、 ϕ は地山の内部摩擦角である。

本研究では、推定される降下床に作用する平均鉛直土圧の算定式(式(1))を実験結果に適用し、その妥当性を考察する。Fig.7 は、式(1)より算出された降下床作用土圧と土被り比 (H/D) ごとに単一降下床実験により計測された降下床最小土圧の関係を示す。また、後述する掘削過程を考慮した実験での連続で降下床を降下させた場合の、降下床に作用する最小土圧の結果も併記する。なお、計算には、砂の内部摩擦角 ϕ は 36° 、側圧係数 K_h は 0.5, 1.0, 2.0 の3種類を用いた。この図より、実験値はいずれの土被り比においても、 K_h が 2.0 の Terzaghi の理論式から求めた曲線に沿って存在している。

しかし、一般的に砂質地盤においては、初期状態での側圧係数は 0.5 程度といわれている。この実験においても、側圧係数が 2.0 程度になるとは考えにくい。よって、本実験においては Terzaghi の理論式を降下床荷重に適用できるとはいえない。

村山⁸⁾は、アルミ棒積層体を用いた降下床実験により、地山のアーチ作用によって、降下床に作用す

る荷重は、降下床と同一の変位をする1次領域の自重に概略等しくなることを示した。また、その1次領域の形状は、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の、ほぼ降下床幅を一边とする正三角形に外接するようなアーチ形状となることも示している。

そこでこの考え方を本実験のような3次元問題に拡張し、正方形降下床における1次領域を推定し、実験結果と比較しその妥当性を考える。ここで推定する1次領域は、土被りによらず同一の形状を持ち、降下床には1次領域の体積分の地山の自重が作用するという仮定を設けることとする。

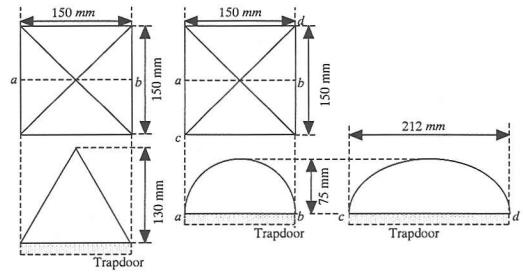
まず、上記の村山の考え方⁸⁾では、1次領域は降下床幅を一边とする正三角形に接することより、本実験の正方形降下床の場合においては、1次領域を、Fig.8(a)に示すような、正方形の対辺の中点を結ぶ直線 ab を一边とする正三角形を含む四角錐とする。そして、この1次領域の体積分の地山の重量を降下床土圧とする方法を用いた。また、円および楕円で近似した1次領域を推定する。Fig.8(b)に示すように、正方形降下床の対辺の中点を結ぶ直線 ab を直径とする半円とし、降下床の対角線を結ぶ直線 cd を長軸とする半楕円とする。その半円と半楕円の曲線の間を滑らかな曲面で結んだものを1次領域とする。

以上の方法で推定した1次領域による降下床荷重、実験による降下床最小荷重、Terzaghiの理論式による降下床荷重を、土被りごとにTable 2に示す。また、降下床に設置した土圧計による実験値と、推定した1次領域の、土圧計の位置における高さ h に地山材料の単位体積重量 γ をかけ合わせたものを表記する。実験における土圧計の値は、降下床土圧が最小となる下降量の時のものを採用した。なお、Fig.9に示すように、降下床の中心の位置における土圧を土圧 no.1、降下床中心より正方形の辺に対して平行に $0.25D$ 離れた位置における4点の土圧の平均値を土圧 no.2、降下床の中心より対角線に沿って $\sqrt{2}/4D$ 離れた位置における4点の土圧の平均値を土圧 no.3として土被りごとに表記する。

この表より、降下床作用荷重および、土圧 no.1, 2, 3の値について比較すると、円および楕円により推定した1次領域により計算した値が実験値に近いことが確認できる。

(3) 地表面変位に関する実験結果および考察

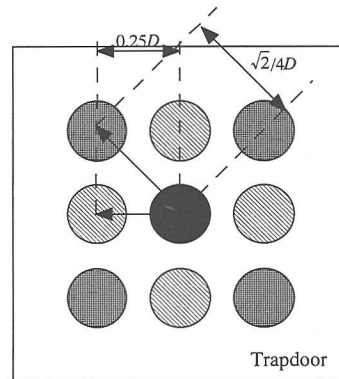
Fig.10に、降下床を5.0 mm 下降後の地表面形状を示す。なお、A線は降下床中心を通る計測線、B線は降下床中心から $0.33D$ の位置を通る計測線であ



(a) Equilateral triangle (b) Circle and ellipse
Fig.8 Concept of the shape of the first order region on the trapdoor

Table 2 Comparison of observed and predicted earth pressure levels and trapdoor loads

Observed positions	Observed or predicted	Overburden H			
		1D	2D	4D	
Trapdoor loads [N]	Observed	7.36	6.57	7.26	
	Predicted	Equilateral triangle	14.33		
		Circle and ellipse	8.23		
	Predicted by Terzaghi's theory	$K_a = 0.5$	26.19	32.31	34.08
$K_a = 1.0$		16.15	17.04	17.09	
$K_a = 2.0$		8.52	8.54	8.54	
Earth pressure no. 1 [kPa]	Observed	0.89	0.98	1.23	
	Predicted	Equilateral triangle	1.91		
		Circle and ellipse	1.10		
Earth pressure no. 2 [kPa]	Observed	0.78	0.77	0.74	
	Predicted	Equilateral triangle	0.96		
		Circle and ellipse	0.96		
Earth pressure no. 3 [kPa]	Observed	0.70	0.75	0.51	
	Predicted	Equilateral triangle	0.96		
		Circle and ellipse	0.96		



Erath pressure no. 1 : Erath pressure located in the center of the trapdoor as shown by ●
Erath pressure no. 2 : Averaged earth pressure as shown by ▨
Erath pressure no. 3 : Averaged earth pressure as shown by ▩

Fig.9 Arrangement of earth pressure gauges on the trapdoors

る。これらの結果より、土被りが小さい程、降下床上方に発生する地表面沈下量が大きく、比較的小さい土被りの $H = 1D, 2D$ の場合、降下床の中心直上で

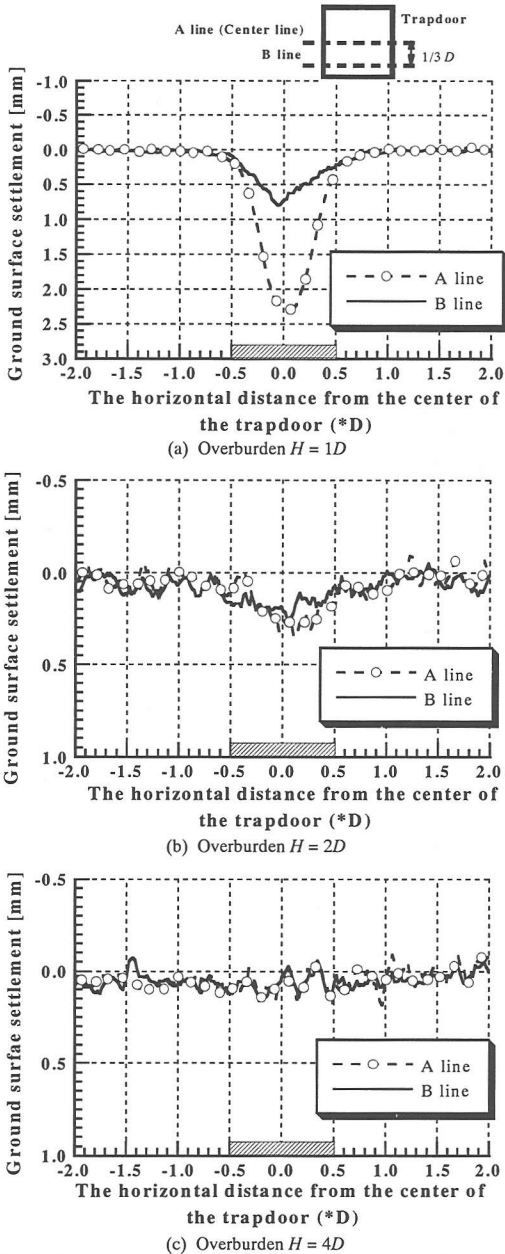


Fig.10 Settlement curves under single trapdoor experiments

沈下量が最大となっている。それと比較して土被り $H = 4D$ は沈下量が小さく、沈下の影響範囲が不明確である。また、土被り $H = 1D$ の場合には、A線とB線の最大沈下量の差が明瞭である。しかし、土被りが大きくなるに従い、その差異は不明確となる。

土被りの違いによる地表面沈下を、最大沈下量、沈下影響範囲、Volume lossの項目別に、Table 3にまとめた。ここで、沈下影響範囲とは地表面の沈下量が0.1 mm以上の範囲の水平距離 (D) である。また、Volume lossとは、Fig.11に示すように、計測線に沿

Table 3 Shape of ground surface settlement under single trapdoor experiments

Overburden	1D		2D		4D
Maximum settlement [mm]	2.34	\gg	0.50	$>$	0.35
The range of the ground surface settlement ($\times D$)	1.28	$<$	1.46		\times
Volume loss	0.282	\gg	0.061	$>$	0.039

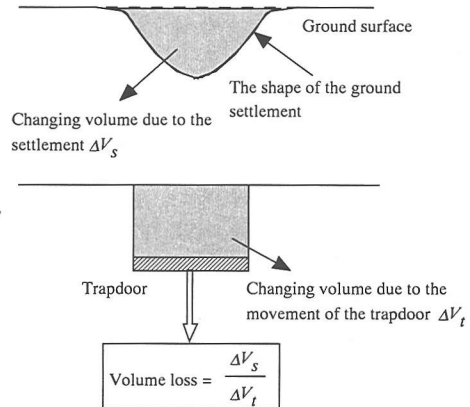


Fig.11 Concept of volume loss

った垂直面において、地表面面積変化量 ΔV_s をその垂直面に沿った降下床の下降による面積変化量 ΔV_t で除したものである。Table 3より、最大沈下量および、Volume lossは、土被りが1Dの場合に特に大きい値を示すことがわかる。また、土被りが大きいほど最大沈下量、Volume lossが小さく、降下床下降の影響が地表面に到達しないと考えられる。

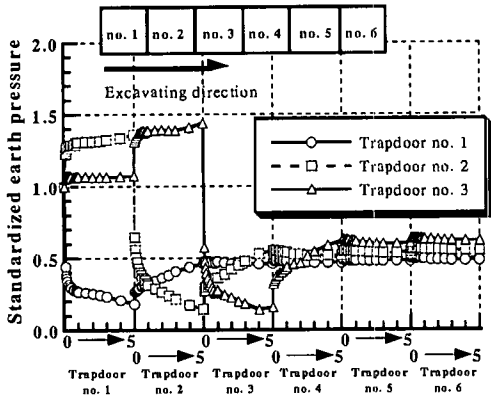
4. トンネル掘削過程を模擬した3次元降下床実験

ここでは、トンネル掘削過程を想定した実験の結果を示す。降下床を連続的に下降することにより、トンネル掘削過程を模擬し、降下床に作用する土圧および地表面沈下量を計測し、それら実験結果を示し考察を加える。

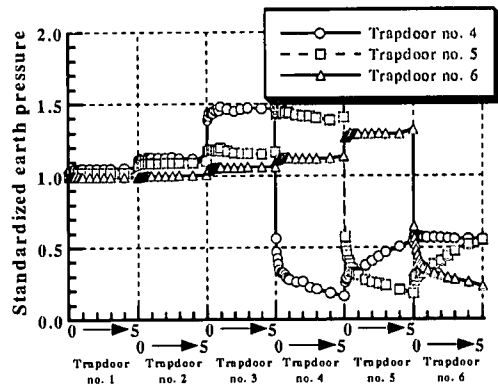
(1) 降下床に作用する土圧に関する実験結果および考察

Fig.12に3種類の土被りにおける降下床下降量と各降下床の基準化土圧の変化を示す。

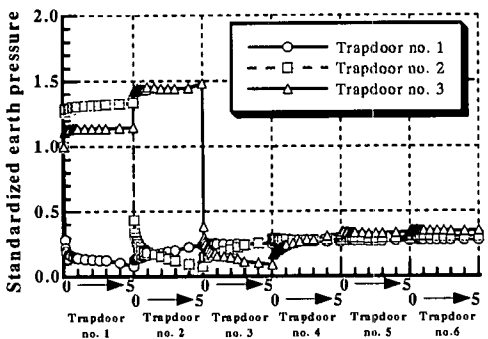
土被りにかかわらず、すべての降下床において、降下床に作用する土圧は自身の下降に伴って大きく減少し、降下床下降量 $\delta_t = 5.0$ mmに達するまでにはほぼ収束する。また、その規準化土圧の収束値は、土被りが等しければすべての降下床でほぼ同じ値とな



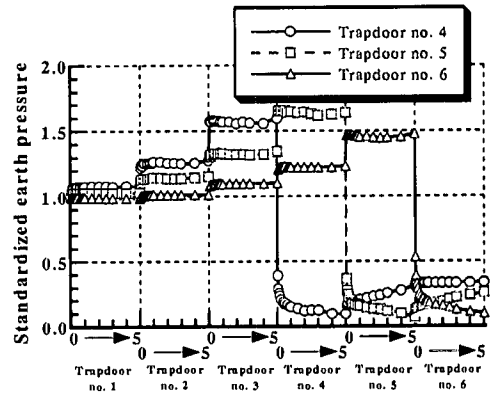
Descending movement of the trapdoors [mm]
(a) Overburden $H = 1D$ (Trapdoor nos. 1, 2, 3)



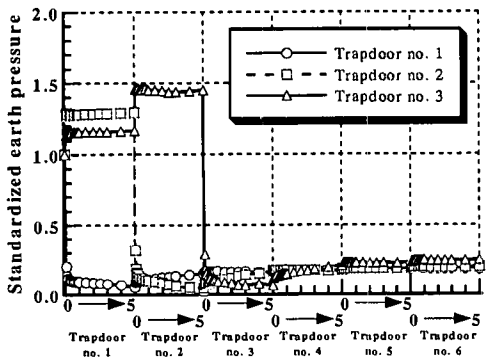
Descending movement of the trapdoors [mm]
(b) Overburden $H = 1D$ (Trapdoor nos. 4, 5, 6)



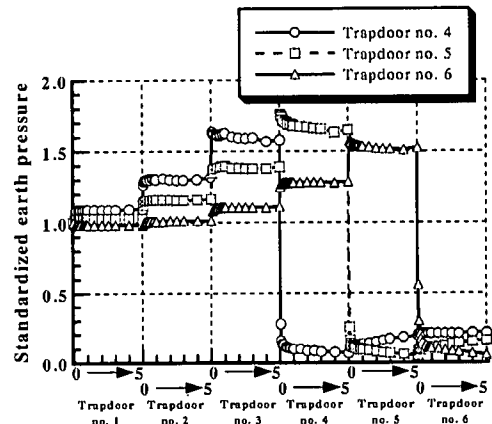
Descending movement of the trapdoors [mm]
(c) Overburden $H = 2D$ (Trapdoor nos. 1, 2, 3)



Descending movement of the trapdoors [mm]
(d) Overburden $H = 2D$ (Trapdoor nos. 4, 5, 6)



Descending movement of the trapdoors [mm]
(e) Overburden $H = 4D$ (Trapdoor nos. 1, 2, 3)



Descending movement of the trapdoors [mm]
(f) Overburden $H = 4D$ (Trapdoor nos. 4, 5, 6)

Fig.12 Relationship between standardized earth pressure and descending movement of the trapdoors

り、土被り $H = 1D$ で0.2, $2D$ で0.1, $4D$ で0.05となっている。これより、土被りが大きいほど、初期土圧からの低減はより顕著になり、アーチ効果が十分に発揮されることがわかる。

降下床2~6において、その降下床自身の下降以前に作用する土圧は、掘削方向に対して、後方の降下床の下降による土圧の減少分を受け持つ形で徐々に

増加する。特に、その降下床の後方に隣接する降下床の下降により大きく増加する。また、後方に隣接する降下床よりもさらに遠方の降下床の下降による土圧増加も見られ、その傾向は土被り比が大きいほど顕著となる。一方、降下床1~5において、その降下床自身の下降後に作用する土圧は、いずれの土被りにおいても、掘削方向に対して、前方側に隣接す

る降下床の下降による土圧の減少分を受け持つ形で増加する。しかし、そのさらに遠方の降下床の下降による影響はほとんど受けない。

Fig.7に降下床最小土圧と土被り比の関係を示す。図には先に示した単一で降下床を下降させた場合の結果もプロットされている。この図より、土被り比が大きいほど降下床土圧の低減はより顕著になり、アーチ効果が大きく発揮される。また、土被り比によらず、降下床土圧の最小値はほぼ等しく、0.5 kPa以下となっている。降下床の位置による違いおよび単一降実験との差異は、ほとんどみられない。これらより、本実験において、土被り比の違い、また単一降および連続下降の違い、降下床の位置の違いによらず、同一の正方形降下床を下降させた際には、降下床に作用する最小土圧はほぼ等しいといえる。

Fig.13は、各降下床の下降直後からの下降量と降下床4に作用する土圧の関係について、連続的に降下床を下降させた場合と単一で下降させた場合について土被りごとに示したものである。これより、下降の方法が同じ場合、土被りが異なっても降下床の下降に伴い、降下床に作用する土圧は同様の経路をたどることがわかる。下降の方法の違いにより比較すると、下降量が小さいときには、連続的に下降させる場合より、単一で下降させる場合の方が降下床に作用する土圧が小さい。また、単一で降下床を下降させる方が、下降量の小さい時点で土圧が収束する。すなわち、単一で下降させた場合の方が、降下床の下降により形成されるアーチが、下降量の小さい時点で形成され、地山が安定することがわかる。このような違いは、連続的に降下床を下降させる場合には、下降する降下床の掘削方向に対して、前方と後方の地山の状態が異なるから生じるものと考えられる。

Fig.14に降下床3, 4上に設置した土圧計により、トンネル中心線における、下降降下床中心より掘削方向に対して $-1/4D$ の位置(降下床3-a, 4-a)、降下床中心(降下床3-b, 4-b)、下降降下床中心より掘削方向に対して $1/4D$ の位置(降下床3-c, 4-c)(切羽側)での、降下床の下降直後からの下降量と規準化土圧の関係を示している。Fig.14は、土被り1Dの結果を示すこの図より、掘削方向に対する降下床中心からの距離の違いによって降下床下降による土圧の減少の挙動は異なることがわかる。降下床中心より切羽側に $1/4D$ の位置では、下降量約1.0 mmまで減少した後一定値に収束する。降下床中心の位置では、下降量約1.0 mmまで減少した後収束する。その収束値は、降下床中心から $1/4D$ の位置の規準化土圧の値

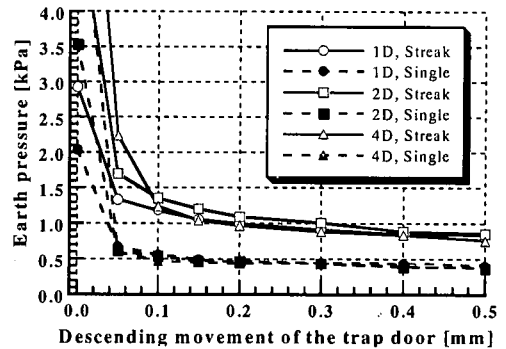


Fig.13 Changes in earth pressure with the descending movement of the trapdoor

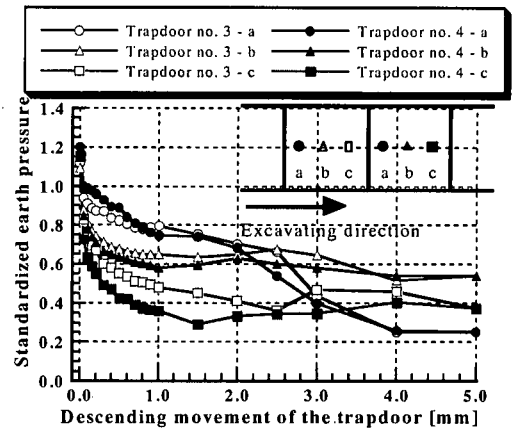
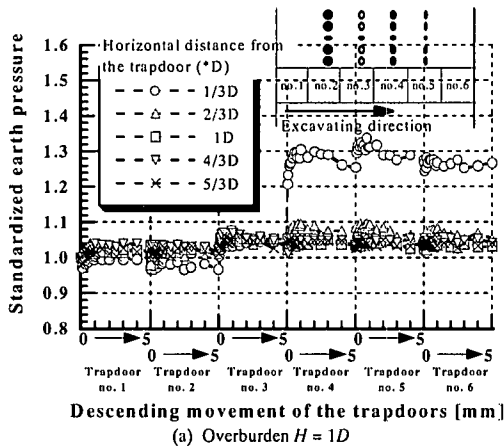


Fig.14 Relationship between standardized earth pressure and descending movement of the trapdoors in consideration of the locations of the pressure gauges on the trapdoors

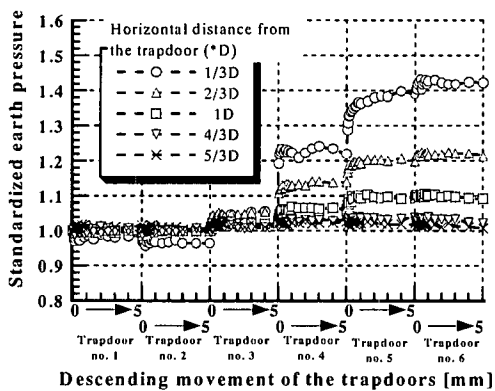
よりも大きい。また、降下床中心より $-1/4D$ の位置では、下降量5.0 mmに至るまで、徐々に減少し続ける。このことより、掘削方向に対して降下床の前方において、降下床の下降量が小さい時点で周辺にアーチが形成され地山が安定する。しかし、降下床の後方では、下降降下床のトンネル掘削方向に対して後方では、降下床の下降に伴い継続的に土圧が減少していることから、周辺にアーチが形成されず、掘削に伴う影響範囲が拡大していることが確認できる。これは、既に下降した降下床により地山がゆるんでいるためであると考ええる。

(2) 降下床周辺に作用する土圧に関する実験結果および考察

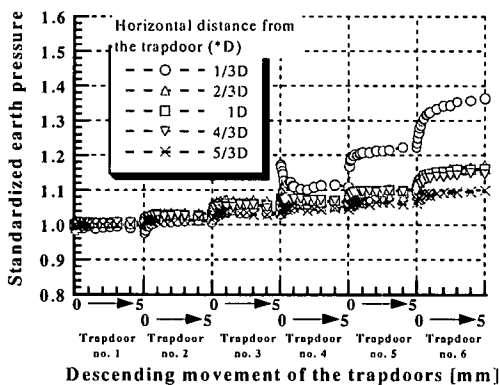
Fig.15に、土被り1D, 2D, 4Dにおける、降下床の下降に伴う周辺土圧の変化を示す。降下床4の中心から横断方向に延長した測線上に配置した土圧計の規準化土圧を縦軸にプロットした。いずれの土被りにおいても、降下床の下降により周辺土圧は増加し、その増加量は、下降中の降下床との距離に関係し、その距離が小さいほど増加量は大きく、特に降下床



(a) Overburden $H = 1D$



(b) Overburden $H = 2D$



(c) Overburden $H = 4D$

Fig.15 Changes in earth pressure around the trapdoors

4下降時の増加量が多い。土被り1Dの場合 (Fig.15 (a)) は、降下床no.4からの距離が1/3Dの位置では増加量が多いが、それより遠方の位置における増加はほとんどみられない。また、土被り2Dの場合 (Fig.15 (b)) は、降下床からの距離が1Dの位置まで増加がみられる。土被り4Dの場合 (Fig.15 (c)) は、すべての土圧計で増加がみられる。特に、降下床からの距離が1/3Dの土圧計は、降下床4の下降に伴い、急激に増加した後ピークをむかえ、その

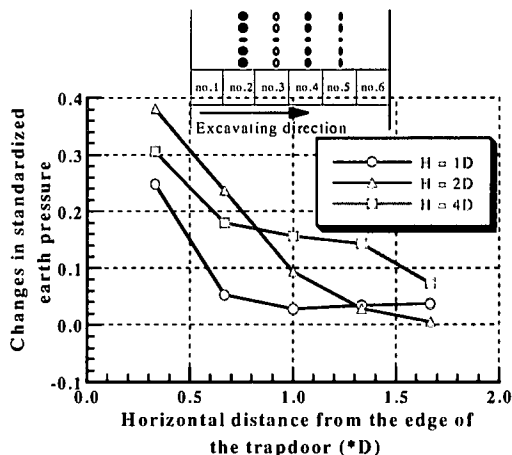


Fig.16 Relationship between changes in the earth pressure around the trapdoor and the horizontal distance from the edge of the trapdoor

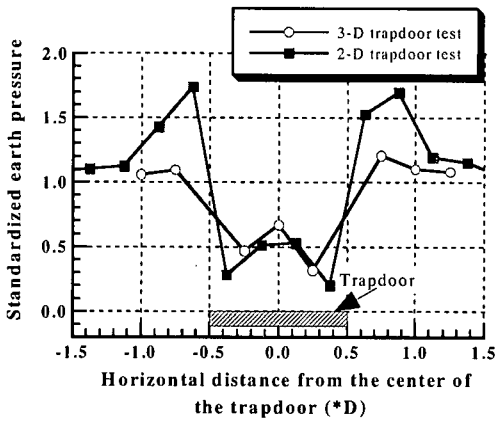
後減少し、降下床5の下降により再び増加する。このことは、降下床4下降時に形成されるアーチの足元が、降下床5のさらなる下降に伴い横断方向に拡大したことを示している。

Fig.16に、降下床の下降に伴う周辺土圧の増加量と降下床端からの水平距離の関係を示す。降下床4の中心から横断方向に延長された測線上に配置した土圧計において、降下床6下降後の土圧から降下床1下降前の土圧を差し引いた値を縦軸に、降下床端からの水平距離を横軸にプロットした。これより、降下床端からの水平距離が小さいほど周辺部の土圧増加量が多いことがわかる。

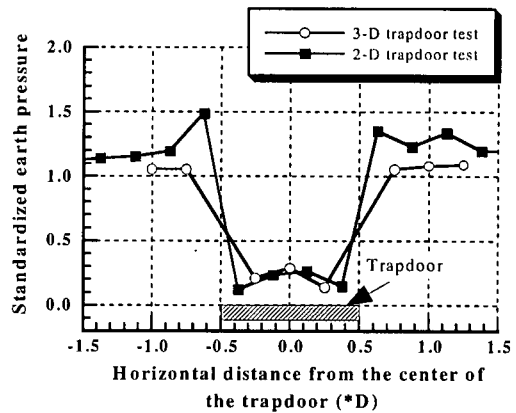
(3) 2次元降下床実験との土圧分布に関する比較

ここでは、従来よりトンネル掘削を模擬して行われている2次元降下床実験の結果¹²⁾と本実験の結果の比較を行う。なお、2次元降下床実験はアルミ棒積層体をモデル地山として行っている。また、2次元降下床実験の降下床幅は100 mm、3次元降下床実験のトンネル横断方向の降下床幅は150 mmである。

Fig.17にトンネル横断方向の土圧分布の一例を示す。いずれの実験に対しても、降下床下降量は0.02Dである。Fig.17(a)に土被り $H = 1D$ 、(b)に $H = 4D$ の結果を示す。これらの図より、いずれの土被りにおいても降下床に作用する基準化土圧は、3次元および2次元ともに初期土圧より大きく減少した値を示しており、その基準化土圧はほぼ等しい。降下床周辺部に作用する基準化土圧は、いずれも初期土圧より増加しているが、その増加の割合は2次元降下床実験のほうが大きい。この傾向は、土被りの違いによらない。3次元降下床実験の場合は、降下床下降による土圧の減少分をトンネル掘削方向に対



(a) Overburden $H = 1D$



(b) Overburden $H = 4D$

Fig.17 Comparison of 2-D and 3-D trapdoor tests

して前方・後方・側方側で3次元的に受け持つことができるのに対し、2次元降下床実験は、ある断面において2次元的に土圧減少分を受け持つためであると考えられる。

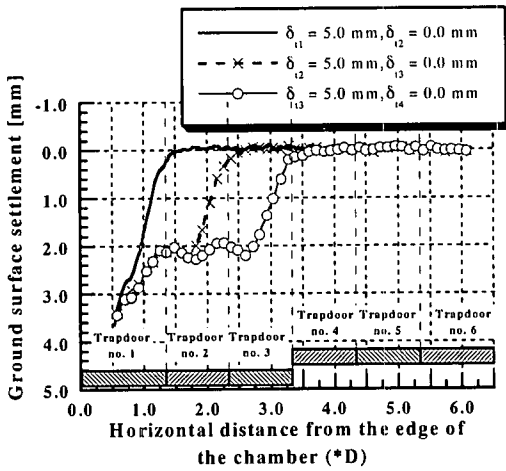
(4) 地表面沈下に関する実験結果および考察

Fig.18に土被り $H = 1D$ における各降下床下降後のトンネル中心線（トンネル軸方向）の地表面沈下形状を示す。Fig.18(a)に降下床1, 2, 3降下後の沈下形状、(b)に降下床4, 5, 6降下後の沈下形状を示す。これらの図より、降下床を順次下降させるに伴い、トンネル中心線の地表面は順次前方へと沈下が進行していく様子が確認できる。下降直後の降下床前端の直上より、後方に向かって沈下量が急激に大きくなり、その降下床の中心より後方ではほぼ一定の沈下量となっている。また、降下床6下降後の沈下形状の結果より、各降下床中心部の沈下量が若干大きくなっている。特に、降下床1および6直上の沈下量が大きくなっているのは、降下床の形状が他の降下床の形状と異なり、トンネル横断方向の土被り比 H/D は1であるが、トンネル縦断方向の土被り比 H/D は $3/4$ になるために、沈下量が大きくなっていると考えられる。同じようにFigs.19, 20に土被り $H = 2D, 4D$ における各降下床下降後のトンネル中心線の地表面沈下形状を示す。これらの場合もFig.18と同様、降下床を順次下降させるに伴い地表面は順次前方へと沈下が進行することが確認できる。また、降下床6下降後の沈下量はほぼ一定の値となる。

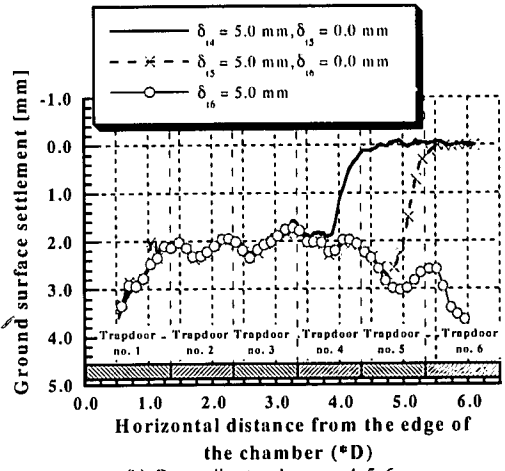
Fig.21に土被り $H = 1D, 2D$ でのトンネル中心線におけるひとつの降下床の下降による沈下量を示す。図に示す沈下形状は、降下床3下降後の沈下量から降下床2下降後の沈下量を差し引いたものであり、降下床3の下降により発生する沈下量を表している。また、比較のため単一降下床を下降させた場合の沈

下形状も示す。この結果より、連続で降下床を下降させた場合は、地表面沈下は下降降下床中心より後方で顕著になる。また、単一で降下床を下降させた場合の形状と比較すると、最大沈下量の生じる位置は後方にみられ、地表面変化の面積も大きい。これは、下降降下床の後方に隣接する降下床は既に 5.0 mm 下降しており、その下降済みの降下床の上方の地盤はゆるんだ状態(作用する土圧も減少した状態)になっており、初期の状態より地盤の密度が疎になっていると考えられる。また、下降降下床の前方の地盤は初期の状態に近く、下降降下床後方の地盤は、前方よりも相対的に密度が疎で拘束する応力も小さくなっているものとする。以上のようなことから、降下床の下降の際に下降降下床の後方の地盤において、相対的に変形を生じやすく、沈下量が大きくなると考える。実際のトンネル掘削では、何らかの支保構造がほどこされているため状況が変わってくるが、本実験の知見に基づけば、トンネル掘削に伴う変形や荷重は、既に掘削したトンネル構造に作用してくるものと考えられる。

つぎに、Fig.22に土被り $H = 1D, 2D$ における降下床3下降後の降下床3前端付近におけるトンネル横断方向の地表面沈下形状を示す。図には、降下床3前端から $-0.67D$ から $0.33D$ の距離の範囲にある4計測線の沈下形状をプロットしている。Fig.22(a)より、土被り $H = 1D$ の場合、下降降下床前端より後方の計測線では沈下が顕著に見受けられ、前端直上の計測線では若干の沈下が生じている。しかし下降降下床前端より $0.33D$ 前方の計測線では、沈下がみられない。Fig.22(b)の土被り $H = 2D$ の場合において、下降降下床前端直上より後方の計測線においてはほぼ同量の沈下がみられ、降下床3前端より $0.33D$ の計測線では、沈下が生じていない。

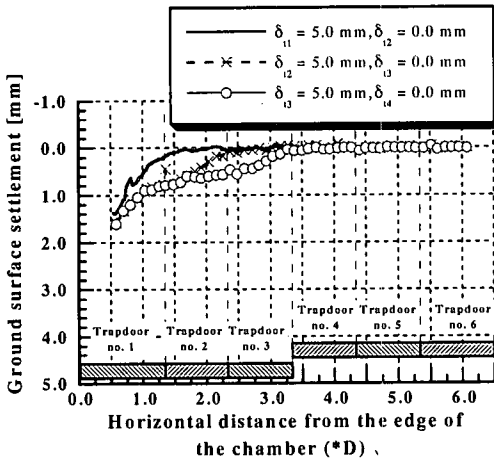


(a) Descending trapdoor nos. 1, 2, 3

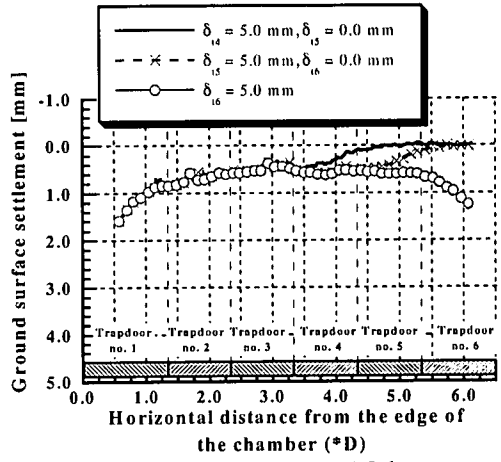


(b) Descending trapdoor nos. 4, 5, 6

Fig.18 Settlement curves in the multiple trapdoor tests (Overburden $H = 1D$)

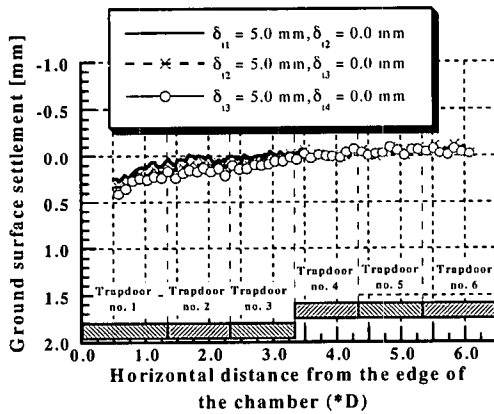


(a) Descending trapdoor nos. 1, 2, 3

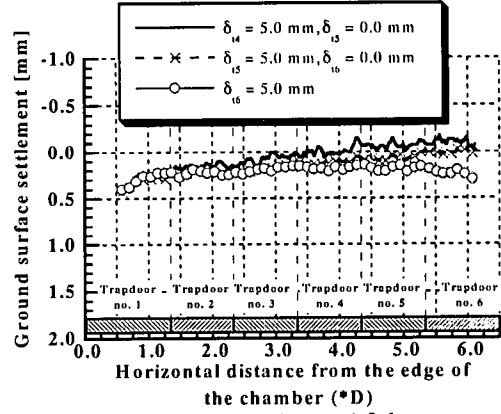


(b) Descending trapdoor nos. 4, 5, 6

Fig.19 Settlement curves in the multiple trapdoor tests (Overburden $H = 2D$)



(a) Descending trapdoor nos. 1, 2, 3



(b) Descending trapdoor nos. 4, 5, 6

Fig.20 Settlement curves in the multiple trapdoor tests (Overburden $H = 4D$)

(5) 経験式に基づいた地表面沈下の予測

Schmidt¹³⁾は、トンネル掘削による地表面の横断沈下形状を正規分布曲線で近似できるとして次のような経験式を与えている。

$$\delta = \delta_{\max} + \exp\left(-\frac{x^2}{2l^2}\right) \quad (2)$$

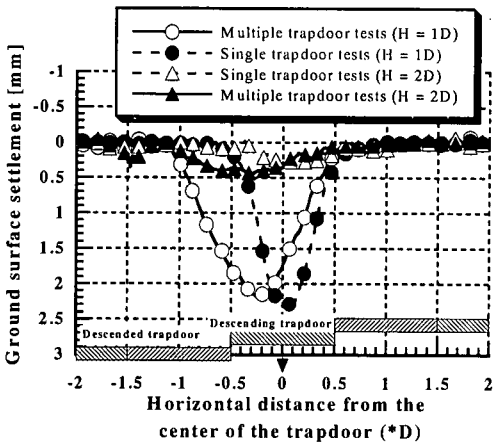


Fig.21 Comparison of settlement curves in single and multiple trapdoor tests

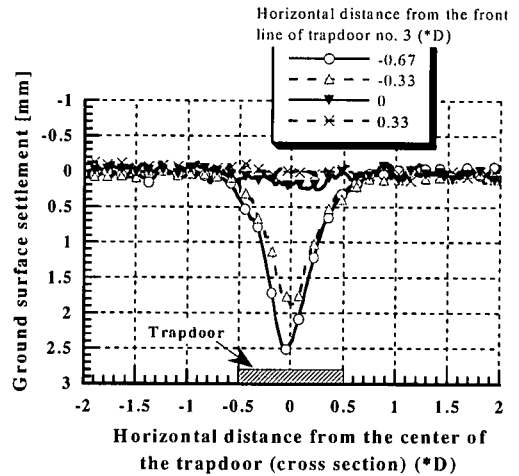
ここで、 δ は地表面沈下量、 δ_{max} は最大値表面沈下量（トンネル直上）、 x はトンネル中心軸からの水平距離および i はトンネル中心軸から沈下曲線の変曲点までの距離である。Schmidtの正規分布曲線による近似の妥当性は、現場計測やモデル実験に基づきPeck¹⁴⁾、島田¹⁵⁾、Atkinson and Potts¹⁶⁾らにより確認されている。

式(2)において i は正規分布曲線の形状を決定するパラメータであり、地盤物性やトンネル径および土被りなどにより定まる値である。地表面沈下形状を考察する際には、この i 、つまり変曲点の位置が重要な問題となる。沈下曲線において、 i の値が大きいほど地表面沈下の生じる範囲が大きくなることを意味している。さらに、現実問題としては、 $x = i$ の地点において地表面の沈下曲線の接線勾配が最大となり、隣接構造物がある場合、沈下による影響が大きくなることが考えられる。

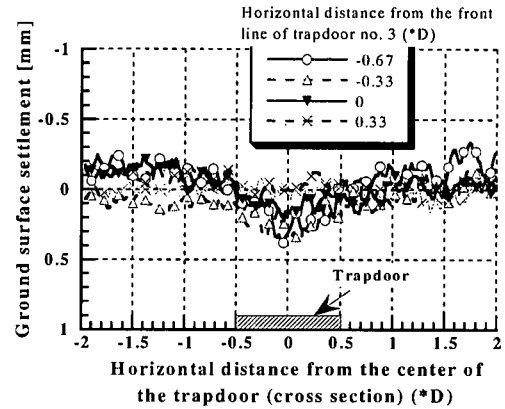
i に関する検討は、Schmidt¹³⁾やAtkinson and Potts¹⁶⁾らによって行われているが、いずれも i を土被りおよびトンネル径の関数としてのみ表現しており、地盤物性を考慮したものではない。足立ら⁵⁾は、Fig.23に示すように、土被り比が比較的小さい場合、降下床の下降により地山内に水平面と $(\pi/4 + \phi/2)$ なる角度で滑りが生じると考えると、地表面沈下の生じる範囲の半長(L)は次式であらわされる。

$$L = 0.5D + H \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (3)$$

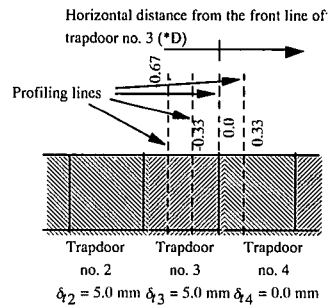
ここで、 ϕ は地盤材料の内部摩擦角である。これにより、 i の検討に地盤物性（内部摩擦角）を考慮することができる。 L と i との関係は近似的に次式で示される。



(a) Overburden $H = 1D$



(b) Overburden $H = 2D$



(c) Location of profiling lines

Fig.22 Ground surface settlement in cross section after lowering trapdoor no. 3

$$i = 0.25L \quad (4)$$

以上より i は次式のように表すことができる。

$$i = 0.25 \left[0.5D + H \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right] \quad (5)$$

本研究では、式(5)から求まる i を用いて、単層地

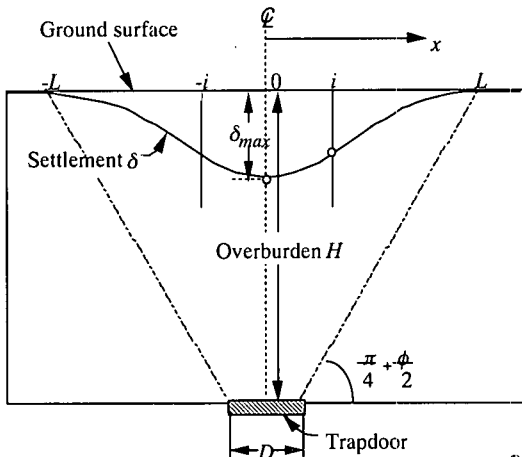


Fig.23 Approximate curve of the ground surface settlement⁵⁾

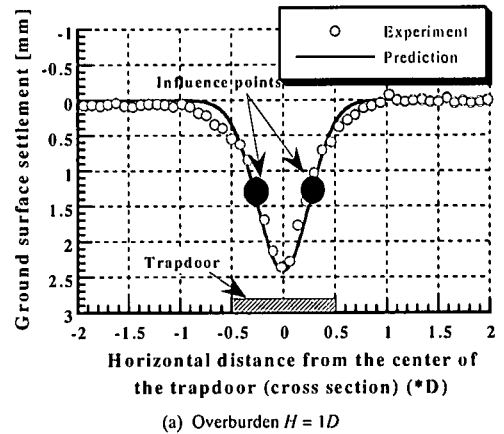
盤におけるトンネルを順次掘削した場合でのトンネル掘削軸方向および横断方向の地表面沈下形状へのSchmidtの正規分布曲線の適用性について検討を行う。

まず、式(2)を本実験のトンネル横断方向の地表面沈下形状に適用した結果をFig.24に示す。Fig.24には、式(5)より得られ変曲点の位置を示す。これらの図より、いずれの土被りににおいても沈下影響範囲は実験結果のほうがやや広いものの変曲点の位置、沈下形状ともに実験値を十分説明できている。

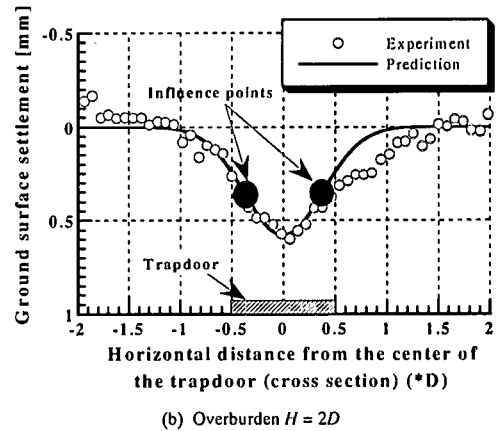
つぎに、Schmidtの正規分布曲線¹³⁾を本実験の切羽付近におけるトンネル縦断方向の地表面沈下形状に適用し、その妥当性の検討を行う。適用例をFig.25に示す。なお、図は下降直後の降下床の中心より前方、すなわちトンネルの切羽付近におけるトンネル中心線の地表面沈下形状である。この図より、いずれの土被りににおいても、沈下の影響範囲は実験値と、Schmidtの正規分布曲線にほとんど違いはみられないが、下降降下床上部にあらわれる沈下量に関しては、実験値のほうが小さい。これは、先にも述べたが、連続で降下床を下降させる場合の、降下床下降による沈下は、降下床後方に顕著にみられ、降下床前方では沈下が低減していることによる。

5. 連続降下床下降による地盤挙動の検討

本研究では、単一および連続的に降下床を下降させる場合の土圧の変化や地表面沈下形状について述べてきた。それにより、連続的に降下床を下降させる場合には、単一で降下床を下降させる場合と挙動が異なることが確認できた。特に、トンネル掘削を想定した連続降下床実験では、トンネル掘削軸方向



(a) Overburden $H = 1D$



(b) Overburden $H = 2D$

Fig.24 Comparison of experiment and predicted results for ground surface settlement applying the Schmidt curve (cross section)

に対して、降下床の前方と後方では土圧および地表面沈下挙動が異なる。ここでは、この点に着目して、降下床下降にともなう応力再配分について検討を行う。

(1) 降下床下降による応力再配分

Figs.26 ~ 28に連続降下床を順次下降させる場合において、あるひとつの降下床(降下床3)を下降させることによる周辺部土圧の増加量を3次元的に示す。Figs.26 ~ 28は、それぞれ土被り $H = 1D, 2D, 4D$ の結果を示し、各図の(a)は降下床下降量 $\delta_i = 0.1$ mmの時、(b)は降下床下降量 $\delta_i = 5.0$ mmの時の土圧増加量である。

降下床下降量 $\delta_i = 0.1$ mmの場合には、すべての土被りにおいて、下降降下床に作用する土圧の減少分を受け持つ形で、トンネル縦断方向に対して、前方、後方、側方の降下床周辺部の土圧は増加し、その増加量は、土被り $H = 1D$ の場合はトンネル縦断方向に

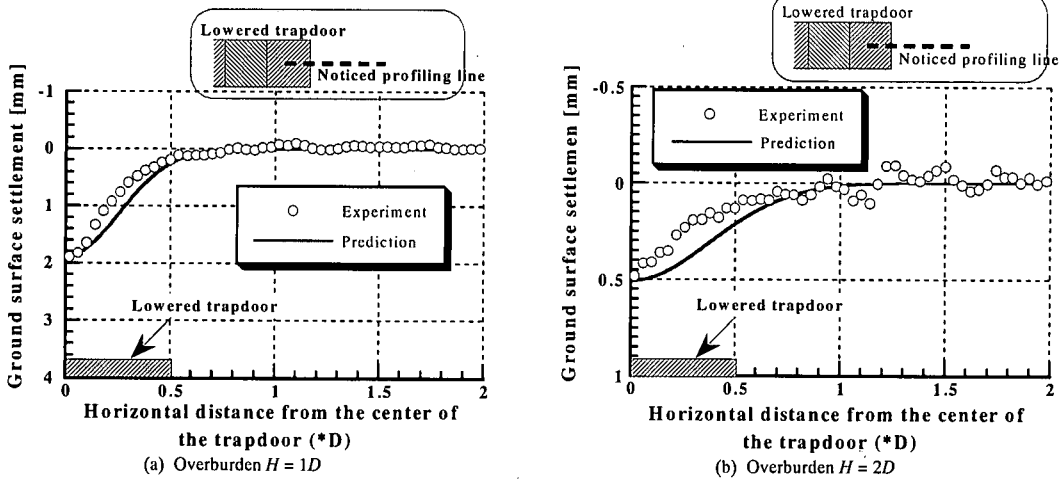


Fig.25 Comparison of experiment and predicted results for ground surface settlement applying the Schmidt curve (tunnel axis)

対して、後方側において若干大きい。土被り $4D$ においては、降下床の前方における増加量が大きい。これに対し、降下床下降量 $\delta_0 = 5.0$ mmの場合において、土被り $H = 1D, 2D$ の場合は降下床の後方側において土圧の増加量が顕著に大きい。土被り $H = 4D$ の場合は、影響範囲に差は見られるものの、降下床に近い部分では、降下床前方と後方の土圧の増加量はほぼ同量となる。また、降下床下降量 $\delta_0 = 5.0$ mmの場合において、周辺部の規準化土圧増加量は土被り $H = 1D$ の場合がもっとも大きい。

これらをまとめると、土被りの比較的小さい $H = 1D, 2D$ において、まず降下床を 0.1 mm下降させた時点では、下降降下床に作用する土圧の減少分を受け持つ形で、周辺部はトンネル縦断方向の前方、後方、側方のいずれにおいても増加する。このような下降量が小さい時点までは、弾性的な応力解放が進行すると考える。その後、さらなる降下床の下降によりそれ以前の変形挙動に依存した変形（塑性的な挙動）が進行し、下降量 5.0 mmに至った状態での結果は、特に降下床後方、すなわち既に下降させた降下床の上方で土圧の増加量が大きい。これは、降下床のさらなる下降によって、変形しやすい地盤側に偏圧が作用したものと考える。土被り $4D$ の場合においても、降下床下降量 $\delta_0 = 0.1$ mmから降下床下降量 $\delta_0 = 5.0$ mmの間の増加量は下降降下床後方において大きい。

これを受けて、降下床の下降による周辺部の土圧増加量と降下床下降量の関係をFigs.29 ~ 31に示す。これらの図には、着目土圧計における降下床下降による土圧の増加量を下降量ごとに棒グラフで示す。Figs.29 ~ 31は、それぞれ土被り $H = 1D, 2D, 4D$ の結果を示す。なお、(a)はトンネル中心線における土

圧計による結果、(b)はトンネル中心線より $0.25D$ の位置における土圧計の結果である。また、Fig.29(c)に着目土圧計の配置と棒グラフの説明を付記する。この図より、すべての土被りにおいて、またトンネル中心線および中心線からの距離が $0.25D$ のいずれにおいても、下降済みの降下床上に作用する土圧は、下降量が増加するにつれて徐々に増加することがわかる。特に、下降降下床との距離が近い土圧計ほど、下降による増加量が多い。一方、下降降下床に対して、前方に位置する降下床上に作用する土圧は、下降量 0.1 mmの時点で増加しているが、その後の下降によっては土圧の変化はほとんどみられない。

これらの結果より、下降量が小さい時点では、トンネル縦断方向に対して、前方、側方、後方のいずれにおいてもほぼ同程度に土圧は増加する。しかし、その後下降量が増加するにしたがい、特にトンネル後方に偏って土圧が増加する。連続的に降下床を下降させる場合において、応力の再配分には、降下床の下降量が影響する。そこで、なぜ下降量が増加するに伴い、下降降下床の後方、すなわち既に下降した降下床上の土圧が増加するかについて考察を加える。まず、降下床が下降し始めると、降下床に作用する荷重は急激に減少する。その際、周辺部に作用する土圧は、降下床前方、側方、後方で一様に増加することから、いずれの方向においても同様にせん断力が発揮され、降下床に作用する土圧の減少分を周辺部分がほぼ均等に受け持つ。その後さらなる下降に伴い、特に後方の土圧が大きく増加する。下降降下床に対して後方に隣接する降下床は既に 5.0 mm下降しており、その上方の地盤はゆるみ領域になっている。よって、下降降下床の後方の地盤は、前方および側方と比較すると、地盤の密度は小さく比較

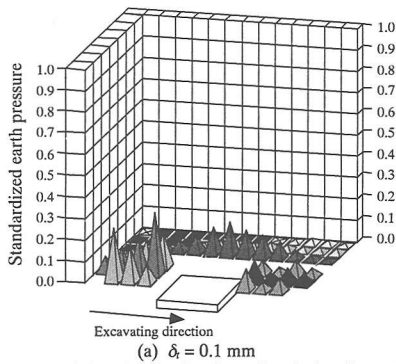


Fig.26 Distribution of variation in earth pressure due to lowering the trapdoors (Overburden $H = 1D$)

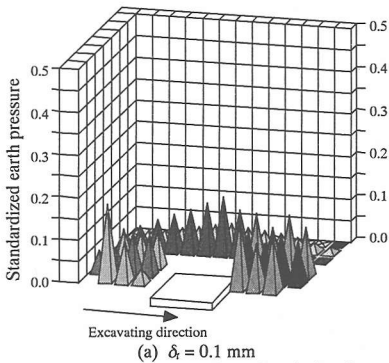
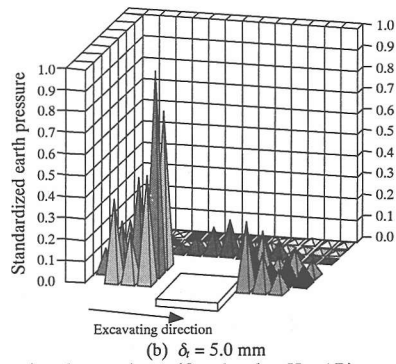


Fig.27 Distribution of variation in earth pressure due to lowering the trapdoors (Overburden $H = 2D$)

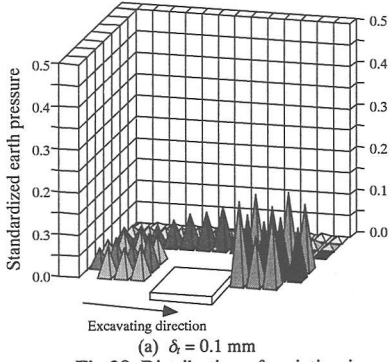
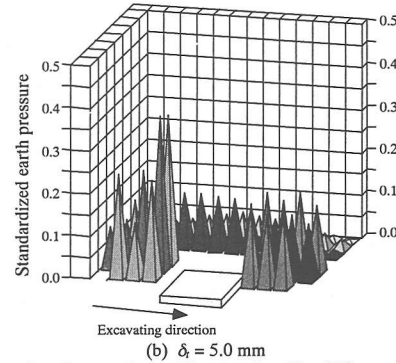
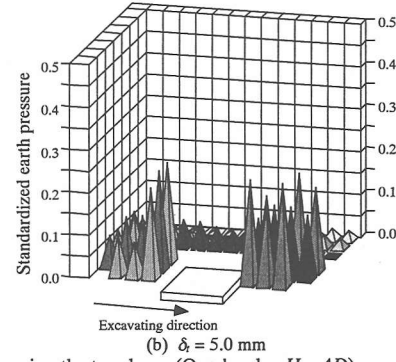


Fig.28 Distribution of variation in earth pressure due to lowering the trapdoors (Overburden $H = 4D$)

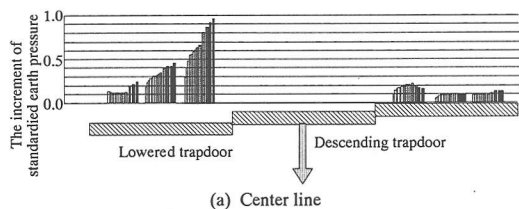


的ゆるい状態である。よって、降下床が下降するに伴う変形は、降下床の後方の地盤に偏って生じやすい状況である。いいかえれば、負のダイレイタンスが生じ、粒子の再配列が生じせん断力が発揮される。さらに、負のダイレイタンスのため、下降している降下床上部の体積が減少することにより、下降降下床上方の砂の荷重が、偏って下降降下床の後方に作用する。それらが要因となって、降下床が下降するに伴い、降下床の後方で土圧が大きく増加すると考える。

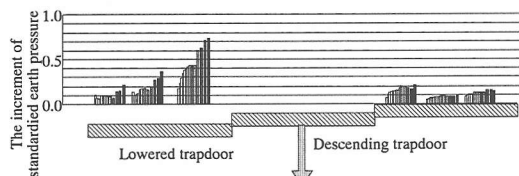
ここで、下降降下床の後方に位置する既に下降した降下床に設置した土圧計において、前方の降下床下降量と、前方の降下床下降による土圧増加量の関

係をFig.32に示す。縦軸に初期土圧で規準化した下降降下床後方の降下床における土圧増加量、横軸に降下床幅 D で規準化した降下床下降量をプロットした。Fig.32(a)に下降降下床からの水平距離が $1D$ で既に下降した降下床中心に設置した土圧計における結果を土被りごとに、Fig.32(b)に土被り $H = 2D$ における降下床中心線上の既に下降した降下床に設置された3つの土圧計における結果を示す。

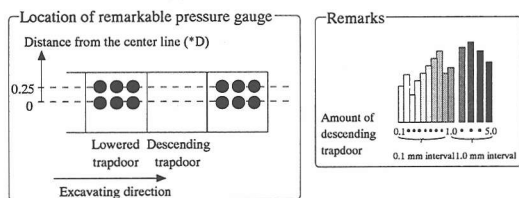
これらの図より、既に下降した降下床の土圧は、前方の降下床下降量の増加に伴い、徐々に増加する。その規準化土圧増加量は下降降下床中心からの距離が小さいほど大きく、土被りが小さいほど大きい。規準化土圧増加曲線は、双曲線的な増加をすること



(a) Center line

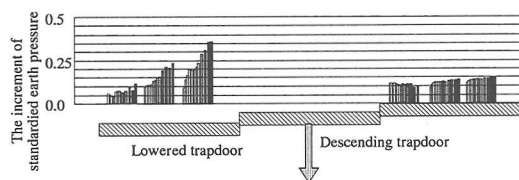


(b) 0.25D from center line

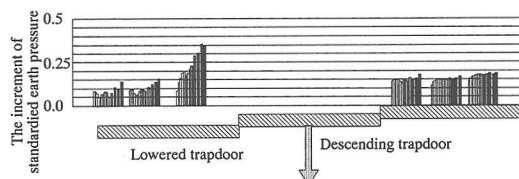


(c) Location of remarkable pressure gauge and remarks

Fig.29 Relationship between increments in standardized earth pressure and amount of descending trapdoor (Overburden $H=1D$)



(a) Center line

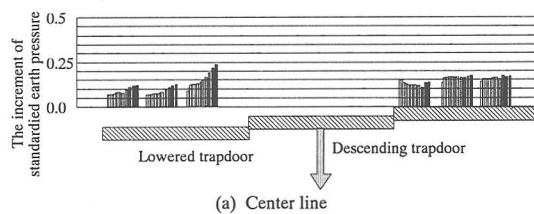


(b) 0.25D from center line

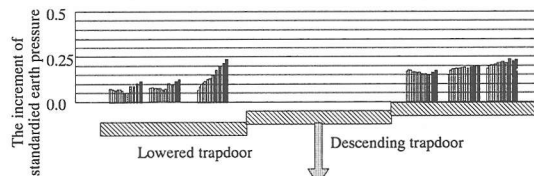
Fig.30 Relationship between increments in standardized earth pressure and amount of descending trapdoor (Overburden $H=2D$)

から、下降降下床後方の既に下降した降下床上のゆるみ領域における規準化土圧増加と規準化降下床下降量の関係は、土被り比および下降降下床中心からの水平距離をパラメータとする双曲線で近似できる。以下にその式を示す。

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\frac{\delta}{D}}{\alpha + \beta \left(\frac{\delta}{D}\right)} \cdot g\left(\frac{d_t}{D}\right) \quad (6)$$

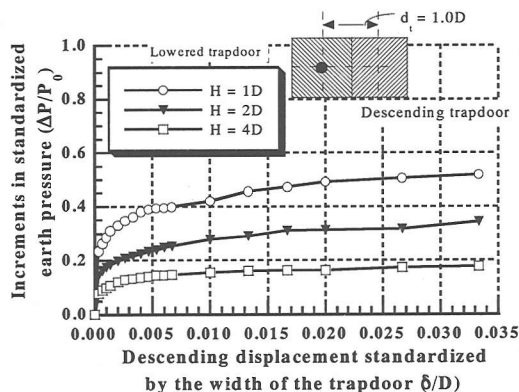


(a) Center line

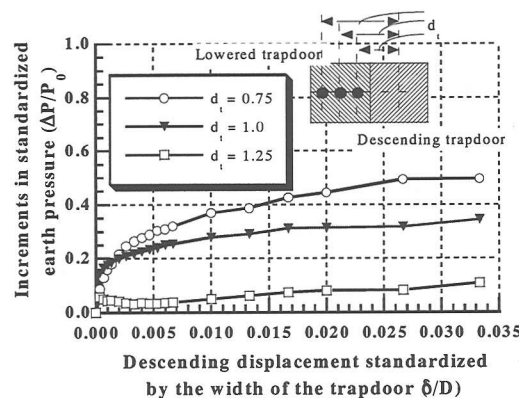


(b) 0.25D from center line

Fig.31 Relationship between increments in standardized earth pressure and amount of descending trapdoor (Overburden $H=4D$)



(a) Influence of overburden



(b) Influence of the location of pressure gauge

Fig.32 Relationship between increments in earth pressure and displacement of descending trapdoor

ここで、 α, β は土被り比(H/D)の関数とし、 $g(d_t/D)$ は下降降下床中心からの水平距離を降下床幅で除した変数(d_t/D)とする関数で表す。Fig.32の実験結果を近似した結果、

$$\alpha = 0.0015 + 0.001 \frac{H}{D} \quad (7)$$

$$\beta = 0.8 + 1.05 \frac{H}{D} \quad (8)$$

$$g\left(\frac{d_t}{D}\right) = 3 - 2\left(\frac{d_t}{D}\right) \quad (9)$$

となる。Fig.33はFig.32(a)に式(6)の双曲線を近似した結果を示す。また、Fig.34に下降降下床中心からの距離 $d_t = 0.75D$ の位置における土圧計において、実験結果と提案式による計算値を示す。これらの図から、提案式による双曲線は実験値と比較的良好一致を示していることが確認できる。これより、降下床を順次下降させる本実験においては、下降降下床後方のゆるみ領域に作用する基準化土圧の増加量は、降下床下降量、下降降下床からの距離、土被り比を変数とする双曲線で表現可能である。

(2) 降下床下降による周辺土圧増加量と地表面沈下の関係

連続的に降下床を下降させた場合の地表面沈下測定結果において、特に下降降下床の後方に大きく沈下が現れることが確認された。これは、下降降下床の後方は、既に降下床が下降しており地盤がゆるい状態になっている。前節では、これに伴い降下床の下降によって下降降下床の後方で負のダイレイタンスが生じると議論した。そこで、降下床後方で生じる土圧の増加とその位置での地表面沈下量の関係に着目する。Fig.35は、土被り $H = 1D, 2D$ における降下床の下降量 δ_t が0.1 mmから5.0 mmに至るまでの土圧の変化と下降量 $\delta_t = 5.0$ mmでの地表面沈下量の関係を示す。この図より、いずれの土被りにおいても土圧の増加量が大きい地点において、地表面沈下量が大きいことが確認できる。土圧の変化は、地表面の沈下量と強い相関性を示す。

6. まとめ

本研究では、3次元降下床実験装置を改良・開発し、3次元降下床実験を行い計測された土圧分布や地表面の沈下特性から、トンネル掘削による地盤の力学挙動について理論式を適用しながら検討・考察を行ってきた。実験は、単一降下床実験とトンネル掘削過程を考慮した降下床実験を行った。

単一降下床実験では、次のような知見が得られた。まず、いずれの土被りにおいても、降下床に作用す

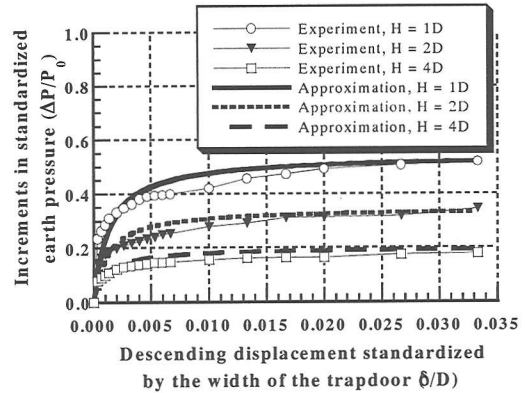


Fig.33 Comparison of approximated and experiment results of increments in earth pressure and descending displacement relation ($d_t = 1.0D$)

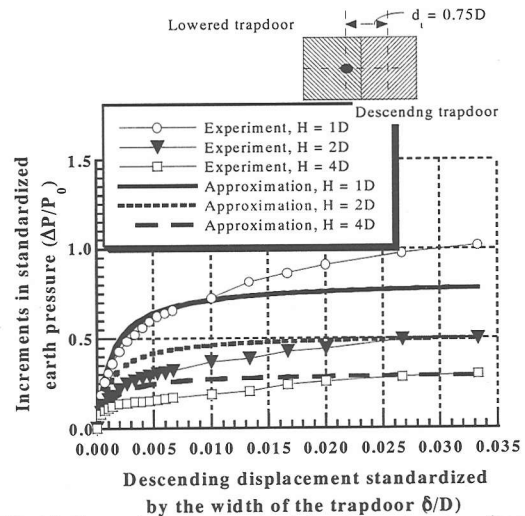
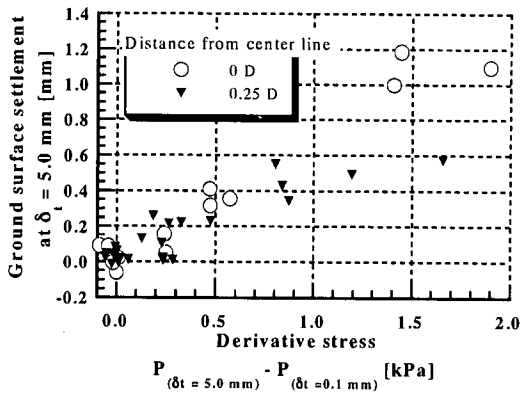


Fig.34 Comparison of approximated and experiment results of increments in earth pressure and descending displacement relation ($d_t = 0.75D$)

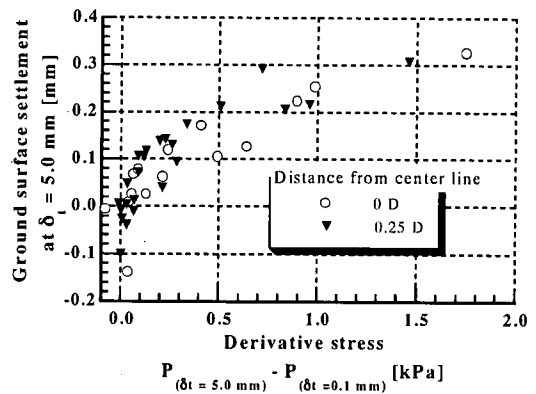
る土圧は、降下床下降直後より、下降量0.2mmあたりに至るまでに急激に減少する。降下床に作用する最小荷重はいずれの土被りにおいても、ほぼ一定である。降下床周辺部に作用する土圧は、降下床下降により増加し、その増加量は、土被りが大きいほど、降下床端からの距離が小さいほど、降下床中心線に近いほど大きい。

また、実験により得られた土圧とTerzaghiの土圧理論式で求めた土圧を比較すると、十分な相関性が得られなかった。3次元単一降下床実験の土圧分布特性をTerzaghiの土圧理論式は、十分表現できていないものと考えられる。

一方、1次領域の体積分の地山の荷重が、降下床に作用すると仮定した上で、1次領域の形状を推定した場合、円および楕円で推定した1次領域による



(a) Overburden $H = 1D$



(b) Overburden $H = 2D$

Fig.35 Relationship between derivative stress and ground surface settlement

荷重が、実験値における降下床荷重をよりよく表現していることを確認した。

トンネル掘削過程を考慮に入れた連続的に降下床を下降させる実験では、下降降下床のトンネル進行方向に対し後方に位置する既に下降した降下床において、土圧が大きく増加する。また、降下床下降による土圧の再配分の特性には、下降降下床周辺地盤の状態、降下床下降量が影響することが確認できた。すなわち、既に下降した降下床上では、地盤がゆるんだ状態になっており、次に下降する降下床により周辺に分担される荷重は、後方の降下床上がゆるんで変形しやすいため、偏って荷重が作用するためであると考えられる。

また、地表面沈下形状の計測結果から、連続的に降下床を下降させる場合、下降降下床後方の地盤はゆるんだ状態のため、降下床下降により粒子の再配列が活発になり、降下床下降による沈下は下降降下床中心より後方で顕著になる。同時に、下降降下床端より前方の地表面には、ほとんど沈下が生じないことが確認された。また、地盤内の土圧の変化量が大きい箇所では、その直上の地表面沈下量も大きく、土圧の変化と地表面の沈下量に相関性があることが確認された。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)No.10555167（研究代表者：足立紀尚）の補助を受けて行ったものである。関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

1) 足立 紀尚, 田村 武, 木村 亮, 荒巻 智: 落し戸実験における土圧分布, 第 29 回土質工学研究発表

会講演集, pp. 1989 - 1992, 1994.

- 2) 足立 紀尚, 田村 武, 木村 亮, 神谷 信毅: 双設降下床の力学挙動, 第 30 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1977 - 1980, 1995.
- 3) 足立 紀尚, 田村 武, 木村 亮, 西村 拓也: 砂質および粘性地盤に対するゆるみ土圧に関する軸対称降下床実験, 第 30 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1973 - 1976, 1995.
- 4) 足立 紀尚, 木村 亮, 小坂 馨太, 神谷 信毅: 砂質および粘性地盤の遠心力場降下床実験, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2149-2150, 1997.
- 5) 足立 紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 小坂 馨太, 坂山 安男: 3 次元降下床実験によるトンネル交差部の力学挙動, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp.285 - 299, 1999.
- 6) Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 66 - 75, 1943.
- 7) 小野 諒兄, 眞井 耕象: 乾燥砂層に於ける垂直土圧, 土木学会誌, 第 24 巻, 第 5 号, pp. 437 - 459, 1938.
- 8) 村山 朔郎: 砂層内局部沈下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, pp. 123 - 138, 1968.
- 9) 村山 朔郎, 松岡 元: 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, pp. 95 - 108, 1971.
- 10) 中井 照夫, 徐 連民, 山崎 久義: 3 次元降下床問題のモデル試験と解析, 第 30 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1323 - 1325, 1995.
- 11) 中井 照夫, 山口 大介, Hosain M. Shashin, 水越洋貴: 掘削順序の異なる三次元トンネル掘削モデル試験, 第 35 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2065 - 2066, 2000.

- 12) 足立 紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 伊藤 浩志: 2次元降下床実験によるトンネル交差部の土圧分布に関する研究, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1963 - 1964, 1998.
- 13) Schmidt, B. : Settlements and Ground Movements Associated with Tunnelling in Soil, *PhD Thesis*, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1969.
- 14) Peck, R.B. : Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground, *Proc. 7th ICSMFE*, pp. 225 - 290, 1969.
- 15) 島田 隆夫: 土被りの浅い山岳トンネルの地表沈下, 土木学会論文報告集, 第296号, pp. 97 - 109, 1980.
- 16) Atkinson, J. H. and Potts, D. M. : Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground, *Proc. ASCE*, GT4, pp. 307 - 325, 1977.
- (2001. 3. 12 受付)

MECHANICAL BEHAVIOR OF A TUNNEL AND THE GROUND AROUND IT IN CONSIDERATION OF THE TUNNEL EXCAVATION PROCESS THROUGH THE TRAPDOOR EXPERIMENTS

Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA, Kiyoshi KISHIDA and Hiroshi ITO

The authors had carried out some kinds of trapdoor experiments and had discussed the mechanical behavior of a tunnel excavation^{1) - 4)}. Moreover, they had developed a three-dimensional trapdoor tester and had performed tests with it⁵⁾. Based on the knowledge and issues in their past research works, the authors improve their three-dimensional trapdoor tester, and both single and multiple trapdoor experiments are conducted in this paper. In multiple trapdoor experiments, which are proposed for use in the excavation of tunnels, it can be confirmed that the process of lowering trapdoors, that is, the excavating process, strongly affects the distributions of earth pressure and ground surface settlement. When lowering trapdoors, deformation occurs in the direction of the loosened area because a loosened zone has already appeared due to the lowering of the previous trapdoor. Therefore, an unbalanced distribution of earth pressures can be found.