

土被りが大きい斜坑シールド工法における 切羽安定性・切羽作用外力に関する研究

STUDY ON FACE STABILITY AND ACTING LOAD ON FACE IN DEEP INCLINED SHIELD METHOD

杉本光隆*・飯田威夫**・大石善啓***・肥田憲明****

Mitutaka SUGIMOTO, Takeo IIDA, Yoshihiro OISHI, Noriaki KOETA

This paper aims to make clear the face stability and the acting load on face in deep inclined shield method by comparing those characteristics of inclined shield model tests with those of horizontal shield model tests relatively. In this model test, X-ray radiography method is in use to investigate the behavior of ground around face. As conclusions, the followings are made clear: 1) the concept of existing method to prevent face failure can be applied to the inclined shield method because the shape of three dimensional loosen area in inclined shield method agrees well with that based on Murayama theory, and 2) the capacity which should be equipped on inclined shield can be designed based on the concept of existing method.

Keywords: inclined shield tunnelling, face stability, acting load on face, model test, X-ray radiography method

1. はじめに

近年、大都市部での大深度地下利用が脚光を浴びてきている。大深度地下利用に関わる諸課題の一つとして、経済的に大深度地下と地上のアクセスを確保する工法の開発が挙げられ、同工法に適用できる斜坑シールド工法のニーズが高まってきている¹⁾。一方、勾配30°程度の密閉式斜坑シールド工法の施工実績は皆無であり、さらに同工法の研究はほとんど行われていないのが現状である。こうした状況を踏まえ、本研究は、水平坑・斜坑シールド工法の模型実験を行ない、両者を相対比較することにより、機械設計・施工上で基本となる斜坑シールド工法における切羽安定性・切羽への作用外力を解明することを目的とする。

2. シールド模型実験

2・1 実験装置

計測手法からの制約により、実験土槽の標準幅を30cmとし、その中央に縮尺率1/100のシールド模型（直径10cm）を設置することとした。実験装置の概要を図1に示す。なお、実験装置の制約上、シールド模型は

* 正会員 工博 長岡技術科学大学 助教授 建設系

** 日本鉄道建設公団 設備部 機械課長

*** 正会員 工博 三菱重工業（株）高砂研究所 主任研究員

****学生会員 長岡技術科学大学 建設系 大学院

掘削・取込み機能を持たないものであって、固定されたケーシング部内を前進・後退させることにより、実際に起こり得る最も危険な状態、すなわち、①ジャッキ推力・掘進速度が過大な状態（受働状態），②土圧・泥水圧が静止安定状態を下回った状態（主動状態）を模擬している。また、実験地盤は、乾燥砂（珪砂5号）を用い、空中落下法で作成した。

したがって、本実験の切羽変位置（以下、変位置と呼ぶ）1mmは取込率10%に相当し、シールド模型に作用する外力は、実機ではカッターフェイス作用外力に泥水圧を加えた力に相当することになる。

2・2 実験方法

土槽中にシールド模型を設置し、前進・後退させ、切羽の安定性については切羽周辺の地中変位およびひずみ分布をX線ラジオグラフィ法²⁾により、切羽作用外力についてはシールド模型内に設置したロードセルにより計測した。実験手順を図2に示す。

実験因子としては、F1：シールドマシンの傾き，F2：切羽移動方向，F3：土槽幅の3つを取り上げ、以下に示す方針に基づき、表1に示す実験ケースを設定した。

① シールドマシンの傾き，切羽移動方向による切羽安定性・切羽作用外力への影響評価：各F1，F2における切羽周辺地盤の挙動・切羽への作用外力を把握し、相対比較を行うことにより、斜坑シールド工法の受働状態・主動状態時における切羽安定性・切羽作用外力を評価する。（CaseP1～P3，A1～A3）

② 側壁の影響評価：①では土槽幅30cmで実験を行なうが、土槽幅を100cmとして切羽への作用外力を把握し、両者を比較することにより、側壁の影響を評価する。（CaseP4，CaseA4）

なお、本実験では、土被り比 $H/D=5$ ，地盤の相対密度 $Dr=70\%$ ，シールド模型移動速度 $V=5\text{mm/min}$ とした。

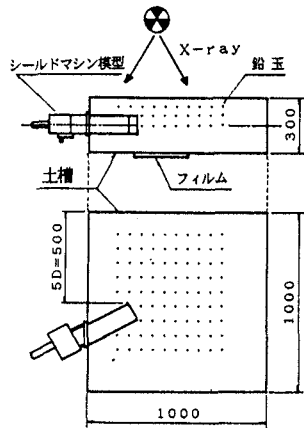


図1 実験装置の概要

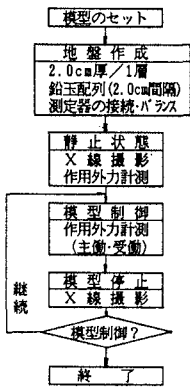


図2 実験の手順

表1 実験ケース

実験目的	Case No.	実験因子
		F1 F2 F3 θ δ W
① シールドマシンの傾きと切羽移動方向の影響評価	P1	→ P 30
	P2	↗ P 30
	P3	↘ P 30
	A1	← A 30
	A2	↖ A 30
	A3	↗ A 30
② 土槽幅の影響評価	P4	→ P 100
	A4	← A 100

但し、

・実験因子

F1：シールドマシンの傾き(+30°, 0°, -30°)

F2： " の移動方向(P:前進, A:後退)

F3：土槽幅(30cm, 100cm)

3. 実験結果と考察

3・1 静止時

各実験で得られた静止土圧係数は、水平坑では0.42と内部摩擦角を考慮した経験式で得られる土圧係数と良い一致を示したが、上り勾配斜坑では1.14、下り勾配斜坑では0.26となった。これは、上り勾配斜坑では、実験地盤が深くなるにつれて上載圧が増大し、下方の地盤は圧縮されるが、マシンは変位しないことから、切羽が周辺地盤の圧縮に伴う外力を受け、土圧係数が大きくなり、一方、下り勾配斜坑では、マシンがフードとして働き、上載圧を下方に伝達しないこと、および、切羽が下向きのために切羽前面では実験地盤が所定の相対密度に達しにくいことから、土圧係数が小さくなるためであると考えられる。したがって、変位置0mm近傍での切羽作用外力は、評価しないこととする。

3・2 受働状態時

(1) 切羽周辺地盤の変位挙動

切羽周辺地盤の変位軌跡を図3に、変位量20mmでの切羽周辺地盤の主ひずみ分布を図4に示す。これらより以下のことがわかる。

① 切羽移動によるトンネル軸方向への影響範囲は、水平坑では水平方向に発達しているのに対し、上り勾配斜坑では斜め上方に広い範囲で発達し、下り勾配斜坑では斜め下方に狭い範囲で広がっている。

② 地盤の変位挙動は、切羽面を含む楔型領域（地盤変位方向が切羽変位方向と一致している領域）と、その外部の領域（地盤変位方向が、変位量の小さい内は切羽中心より放射状に、変位量が大きくなるにつれて上向くようになる領域）とに大別できる。

これらは、既往の実験³⁾とも合致するものであって、次のように考えられる。

① 切羽周辺地盤のトンネル軸方向への変位軌跡は、静止状態から受働状態を経て貫入状態へ移行する経過を示している。

② 地盤の変位挙動・主ひずみ分布は、切羽前面にお椀状の領域が存在し、このお椀状の領域と周辺地盤との間にせん断が生じていることを示している。

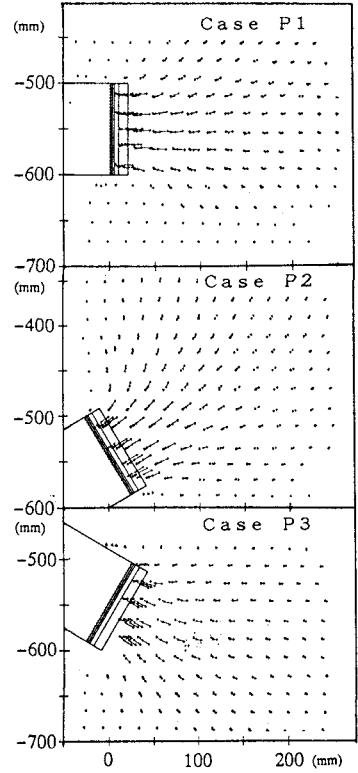


図3 切羽周辺地盤の変位軌跡 (変位量 1, 3, 5, 10, 20mm)

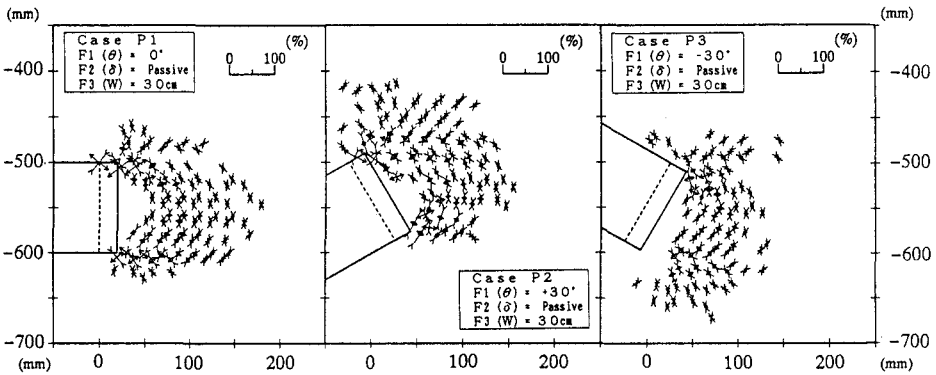


図4 切羽周辺地盤の主ひずみ分布 (変位量20mm)

(2) 切羽作用外力

変位量と切羽作用外力・側壁土圧の関係を図5に示す。ここで、軸力(N)は圧縮を正、せん断力(S)は下向きを正としている。また、 N_0^* 、 S_0^* は対応する実験ケースのN、Sの比をとったもので、特に、水平坑シールド工法と斜坑シールド工法との関係を示すCaseP2/CaseP1、CaseP3/CaseP1を、斜坑指数と呼ぶことにする。これより以下のことがわかる。

① 軸力に関する斜坑指数 N_0^* は、上り勾配斜坑では変位量2.4mmで1.0となり、その後0.8へと収束し、一方、下り勾配斜坑では変位量1.1mmで0.8であったのが、変位量4.2mmで1.0となり、変位量30mmで1.9へ増加している。いいかえれば、軸力は、変位量2.4mmまでは下り勾配斜坑<水平坑<上り勾配斜坑、変位量4.2mm

を越えると逆に、上り勾配斜坑<水平坑<下り勾配斜坑ということになる。また、側壁の影響を示すCaseP4/CaseP1の N_0^* は、変位量0.5mm以降ほぼ2である。

② せん断力は、水平坑では移動開始直後から作用しているのに対し、両斜坑では変位量10mmを越えてから変化し出していて、せん断力に関する斜坑指数 S_0^* も変位量10mmを境に異なるモードとなっている。また、側壁の影響を示すCaseP4/CaseP1の S_0^* は、変位量8mm位までは1に近い値を示すが、変位量15mm以降2に収束している。

③ 側壁土圧は、CaseP1, P4ともに移動開始直後から増加しているが、CaseP4はCaseP1に比してかなり緩やかな増加である。

これらは、以下のように考えられる。

① 各実験共に、せん断力/軸力は0.1以下であって、砂と鋼の摩擦係数より小さいことから、切羽と砂の相対変位は発生していないと考えられる。また、変位量10mm以降ではせん断力が下向きに単調に増加していることから、土を上部に押し上げる力がせん断力として働いていると解釈できる。これらの点を考慮すると、この変移点までは静止状態から受動状態への変化を示し、それ以降では貫入移行状態となっていると考えられる。こうしたことは、切羽周辺地盤の変位挙動と対応するとともに、既往の実験結果³⁾とも一致している。

② 本実験は2次元実験と3次元実験の中間に位置していると考えられ、各実験間の定性的相対比較に用いられるべきである。また、CaseP4/CaseP1の N_0^* 、 S_0^* が2に収束していることから、土槽幅30cmの実験結果を2倍することにより、3次元実験結果を概略推定することができると考えられるが、これに関する検討は、今後の課題としたい。

3・3 主働状態時

(1) 切羽周辺地盤の変位挙動

変位量5mmでの地中変位ベクトル図に、村山理論⁴⁾(Kötterの塑性釣合式)を用いて求めた緩み領域境界を記入した図を図6に、切羽周辺地盤の3次元変位挙動を図7に示す。また、切羽周辺地盤の変位ベクトル図より、変位量1mmでは明確な緩み領域は認めにくい、変位量3～10mmでは上方に延びる緩み領域が、さらに、変位量20mm以上では切羽直上の地表面に到達する緩み領域が確認できた。これらより以下のことがわかる。

① トンネル軸方向への緩み領域分布は、水平坑に比較して、上り勾配斜坑ではトンネル軸方向へ広く分布し、下り勾配斜坑では切羽近傍に留まっている。また、水平坑および上り勾配斜坑のトンネル軸方向への緩み領域境界は、村山理論と良い一致を示す。

② トンネル軸より0.5D離れた位置での変位は、切羽近傍に留まっていて、トンネル中心へ向いている。また、トンネル軸より1D離れた位置での変位は発生していないことから、トンネル横断方向への緩み領域分布は、ほとんど切羽近傍にのみ発生していて、それより遠方には到達しない。

これらは、以下のように考えられる。

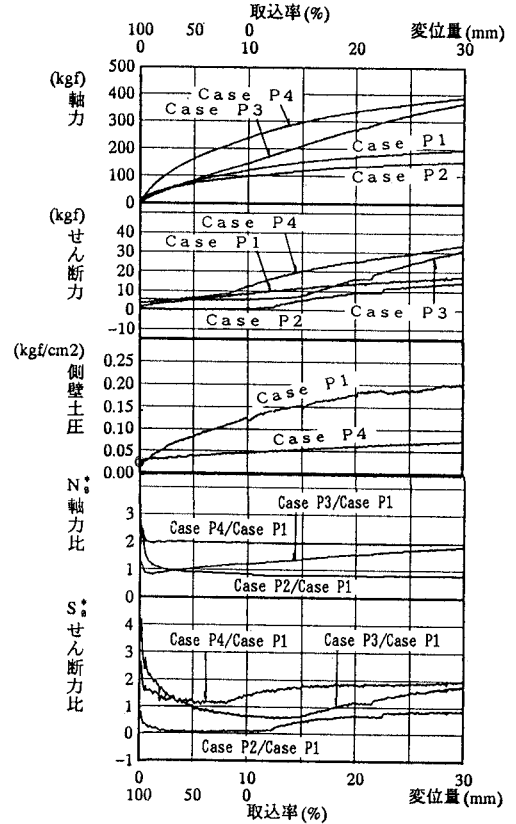


図5 変位量と切羽作用外力・側壁土圧の関係

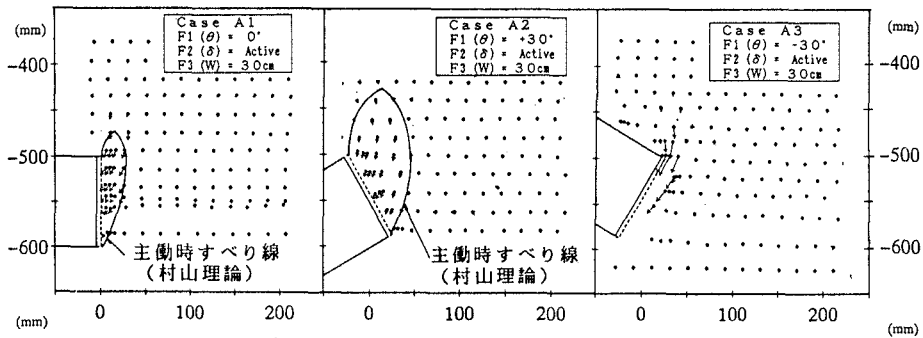


図6 切羽周辺地盤の変位ベクトル (変位量 5 mm)

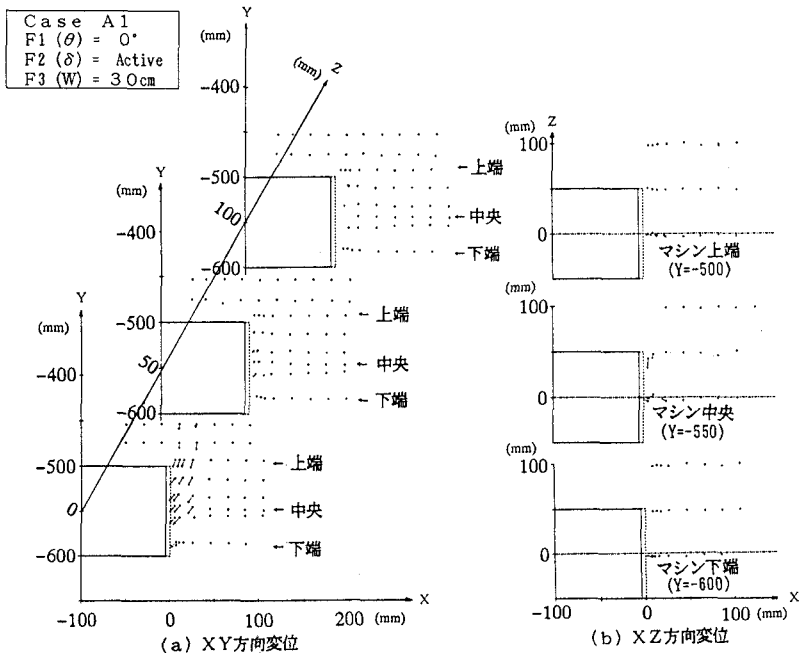


図7 切羽周辺地盤の3次元変位挙動 (変位量 5 mm)

① 下り勾配斜坑におけるトンネル軸方向への緩み領域分布は、切羽が後退することによりクラウン部を始点とする対数螺旋で表わされる緩みが生ずること、および、上記緩みにより砂の落下と応力解放がなされ切羽前面での砂の崩壊が生ずること等が複合して形成されたと考えられる。村山理論では、切羽前面のすべり線は切羽内部を通過することになる。

② トンネル横断方向への緩み領域分布が、ほとんど切羽前方にのみ発生し、それより遠方に到達しないのは、村山理論が3次元的に適用できることを示唆している。

(2) 切羽作用外力

変位量と切羽作用軸力・側壁土圧の関係を図8に示す。これより以下のことがわかる。

① 軸力は、マシンが後退を開始すると急激に低下し、変位量0.2～0.5mmで主働土圧を示した後、変位量1mmを越えるときわめて微小な一定値に収束する。また、主働土圧が発生する変位量・主働土圧値は、ともに、下り勾配斜坑<水平坑<上り勾配斜坑となっている。

② 側壁土圧は、CaseA1, A4とも同様な一定値を示す。

これらは、以下のように考えられる。

① 変位量 1 mm を越えると軸力が微少な一定値に収束するのは、切羽周辺地盤のアーチングの破壊が生じているためである。また、主働土圧発生の変位量が、下り勾配斜坑<水平坑<上り勾配斜坑となるのは、上り勾配斜坑では、切羽の主働変位に対する地盤の追従変形・応力の再配分が生じやすいのに対し、下り勾配斜坑では、フード効果により切羽への作用土圧が急減するためである。

② 本実験は 3 次元実験と見なすことができる。

4. まとめ

実機への展開を含め、本研究で得られた結果を以下に列記する。

(1) 受働状態時

① 地盤内の変位挙動は、各トンネル軸方向に発達している。また、切羽作用軸力は、静止～受働状態の間では、下り勾配斜坑<水平坑<上り勾配斜坑となるが、貫入移行状態に変化した後は、上り勾配斜坑<水平坑<下り勾配斜坑となる。

② 静止～受働状態の間の斜坑指数 N_e^* 、 S_e^* は、1 近傍にあることから、常用（静止土圧付近）掘進時における機械装備能力は、従来の設計法の考え方が適用可能である。

③ 取込率不足に伴う切羽作用外力の増加の程度は、下り勾配斜坑が最も顕著であるため、取込率不足を防止する必要がある。

(2) 主働状態時

① 斜坑シールド工法における緩み領域の 3 次元的な形状は、水平坑シールド工法と同様に村山理論による形状と良好に対応する。したがって、従来の切羽土圧管理法の考え方が適用可能である。

② 水平坑シールド工法と比較して、斜坑シールド工法の緩み領域の特徴は、

上り勾配斜坑：緩み領域（大）、変形量（小） 下り勾配斜坑：緩み領域（小）、変形量（大）

である。一方、主働土圧が発生する変位量・主働土圧値はともに、下り勾配斜坑<水平坑<上り勾配斜坑となる。したがって、上り勾配斜坑では広範囲な地盤沈下を、下り勾配斜坑では局所的かつ急激な地盤沈下を防止する必要がある。

最後に本実験は、運輸省および社団法人日本鉄道技術協会において実施した長大駅間・深層地下鉄道研究会の研究の一部として行なわれたものである。

5. 参考文献

- 1) 運輸省：長大駅間・深層地下鉄道研究会報告書，1991.
- 2) 杉本光隆，大石善啓：X 線ラジオグラフィ法の測定精度に関する検討，土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.161-168，1991.
- 3) 野村由司彦：砂地盤における水平貫入体の先端抵抗力に関する研究，土木学会論文集，No.338，pp.139-148，1983.
- 4) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧，京大防災研年報，Vol.11，pp.549-565，1968.

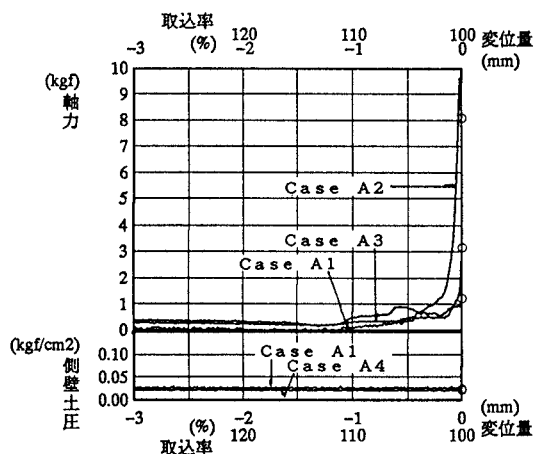


図 8 変位量と切羽作用軸力・側壁土圧の関係