

横三連シールド工法による上下2段並設トンネル掘進時の先行トンネル作用土圧に関する実験的研究

Acting Pressure on First Tunnel Lining of Vertical Twin Tunnel by MF Shield with Three Face

杉本 光隆* 才口 六男** 西尾 誠高*** 團 昭博****

Mitsutaka SUGIMOTO, Mutsuo SAIGUCHI, Masataka NISHIO and Akihiro DAN

Model tests on vertical twin tunnel by MF shield with three faces were carried out by using the shield model with cutting and mucking function and the lining model with the function of generating tail void. Here, five factors, i.e., mucking ratio, order of construction, vertical distance ratio, relative density of ground and width of sand box were adopted as the experimental factor. Acting pressure on first tunnel lining, and ground behavior due to the excavation of rear tunnel were discussed. As results, the acting pressure versus the above experimental factors were made clear.

Keywords: MF shield, model test, twin tunnel, sandy ground, acting pressure

1. 研究目的

都市部では、既設地下構造物が錯綜しているために、地下駅部が大深度化する傾向にあるが、こうした場合には、開削工法では不経済かつ工期を要し、また地上への影響も大きい。大深度地下駅部を経済的かつ安全に建設するための新工法として、多連型シールド工法が検討されている。しかし、多連型シールドによる施工実績は数件¹⁾しかなく、また施工条件によれば、同工法を並設させる必要性もあるが、本工法による並設での施工実績は皆無であり、さらに同工法の研究は、装備能力に着目した研究が数例¹⁾あるだけで、掘進時の周辺地盤挙動や並設トンネル等への影響に着目した研究はほとんど行われてきていないのが現状である。したがって、同工法の並設施工に関する技術的検討課題には、未だ未解明の点が多く残されている。

そこで本研究は、広域地下空間の確保が困難な地下駅部を対象構造物として、定常掘進状態を模擬するために掘削・取込機能を有するシールド模型を用いた模型実験を行うことにより、横三連シールド工法による上下2段並設トンネル施工時における後行トンネル掘進の先行トンネル作用土圧への影響を解明することを目的とする。

2. 横三連シールド模型実験

2-1. 実験装置

X線透過の制約²⁾から実験土槽は、高さ100cm・長さ100cm・標準幅30cmとし、土槽壁面に沿って縮尺1/50

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系

*** 正会員 (株) 間 組

** 東京都地下鉄建設(株)

****正会員 日本シールドエンジニアリング(株)

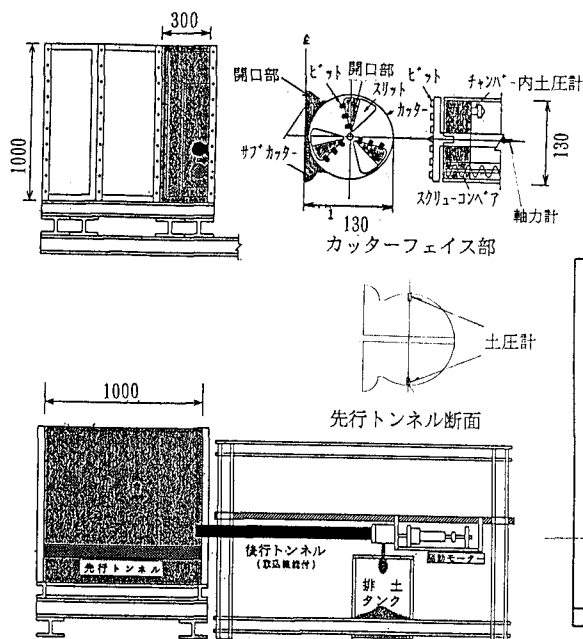


図-1 実験土槽・掘進型シールド模型概要図

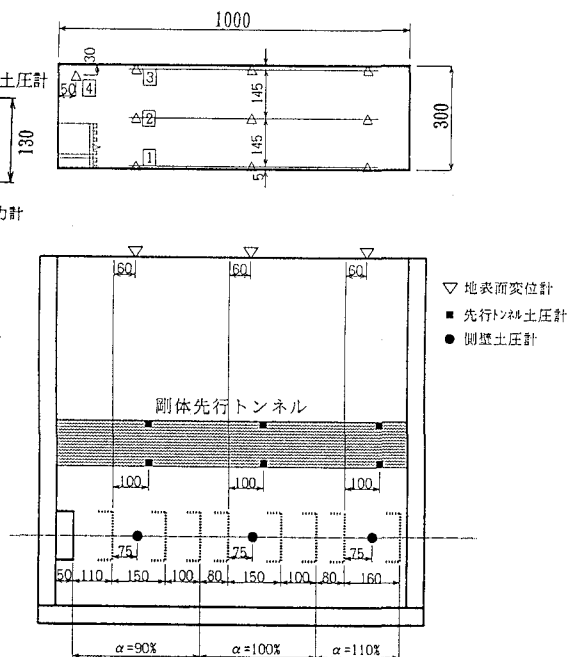


図-2 計測機器の配置

の半断面³⁾の先行トンネル模型・シールド模型を設置する。先行トンネル模型は、上半部と下半部をはめ合わせるにより緩みを発生させる機構を有する剛体とみなせる横三連シールドトンネルの模型である。また、シールド模型は、掘削・取込機能を有するカッターフェイス（以後C/Fと称す）と、掘削機能はないがテーパーにより土砂をチャンバー内に取り込む機能を有するサブカッターフェイスを装備した横三連シールド機の模型であって、カッターフェイスを回転しながら前進することにより地山を掘削するとともに、掘削土砂をスクリュウコンベヤにて排土する機能を有する構造とする。なお、実験地盤は乾燥砂（硅砂5号）を用い、空中落下法⁴⁾で作成した。実験土槽およびシールド模型の概要を図-1に、計測機器の配置を図-2に示す。

2-2. 実験方法

先行トンネル掘削による地山の緩みが後行トンネルの切羽安定性に与える影響、及び、後行トンネル掘削によって先行トンネルに作用する土圧を把握するため①掘削条件（取込率）②上下2段並設トンネル関連条件（施工順序、離間距離比）③地盤条件（地盤相対密度、土槽幅）を実験因子として、先行トンネル模型を地盤中に配置し、テールボイド26cmに相当する5.2mmの地山の緩みを発生させた後、シールド模型で後行トンネルを掘削することにより、「定常時」の施工状態を模擬した実験を行なった。なお、実験地盤の硬軟による地盤密度 ρ_a 、内部摩擦角 ϕ はそれぞれ、

硬(Dr=70%)： $\rho_a=1.663\text{gf/cm}^3$ ， $\phi=29.9^\circ$

軟(Dr=40%)： $\rho_a=1.578\text{gf/cm}^3$ ， $\phi=24.2^\circ$

であり、模型掘進速度 $V_z=3\text{cm/min}$ 、C/F開口率 $a=25\%$ 、C/F回転速度 $f=40\text{rpm}$ 、下段トンネル軸深さ $=80\text{cm}$ 、C/F回転方向：正転とした。また、取込率は取込率90%（取込不足）・取込率100%（標準値）・取込率110%（取込過多）を採用した。実験ケースを表-1に示す。

3. 実験結果及び考察

3-1. 土槽壁面の影響

掘進量と軸力・カッタートルク・側壁土圧の関係を図-3に示す。これより、土槽幅30cm、70cmの場合とも差異はみられず、土槽幅30cmの実験でも3次元実験と見なせることがわかる。

3-2. 離間距離比の違いによる先行トンネル作用土圧への影響

表-1 実験ケース一覧

実験目的	Case No.	実験因子				
		F1	F2	F3	F4	F5
①基本ケース 取込率と単設/上下2段並設の影響評価	1 0	ALL	単	—	(70)	(90)
	1 1		下	0.5		
	1 2		上	↓		
②離間距離比 離間距離比の影響評価	2 1		下	0.25		
	2 2		上	↓		
	3 1		下	1.0		
	3 2		上	↓		
	4 1		下	2.0		
	4 2		上	↓		
③軟地盤 地盤の硬軟による影響評価	5 0		単	—	40	
	5 1		下	0.5	↓	
	5 2		上	↓		
④土槽幅70cm 側壁の影響評価	7 0		↓	単	—	(70) 70

・実験因子

F1 : 取込率 ($\alpha=90, 100, 110\%$)

F2 : 施工順序 (単設, 下部先行, 上部先行)

F3 : 離間距離比 ($d/D=0.25, 0.5, 1.0, 2.0$)

F4 : 地盤の相対密度 ($Dr=70$ (硬), 40 (軟) %)

F5 : 土槽幅 (30, 70cm)

・○ : 標準値

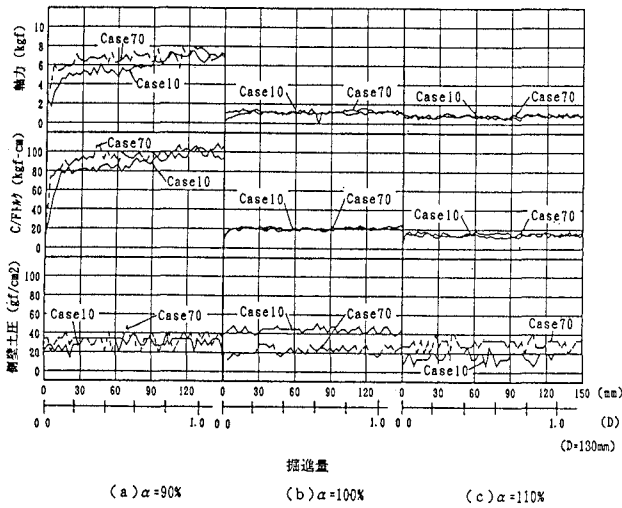


図-3 掘進量と軸力・カッタートルク・側壁土圧の関係 (単設)

(1) 下部トンネル先行

土被り圧と先行トンネル作用土圧の比 (以後、土圧比と称す) の、後行トンネル掘削による変化を図-4に、また離間距離比と土圧比最大値の関係を図-5にそれぞれ示す。これらよりわかることを以下に示す。

①取込不足状態

後行トンネル掘削による先行トンネル作用土圧への影響範囲は、離間距離比にほとんど関係なく、いずれも切羽通過前約1.5D地点から切羽通過後約0.5D地点までの範囲である。また、離間距離比と土圧比最大値の関係をみると、離間距離比 d/D が大きくなるにつれて先行トンネル作用土圧は減少し、 $d/D=1.0$ では1より小さく、また $d/D=2.0$ では十分小さくなっている。これは、いいかえれば、 $d/D=1.0$ 以遠では、後行トンネル掘削によって発生する先行トンネル作用土圧は、土被り圧を上回らないことを示している。

②取込過多状態

後行トンネル掘削による先行トンネル作用土圧への影響は取込不足状態より小さいが、取込過多状態にも関わらず、切羽が近づくにつれて、先行トンネル作用土圧は徐々に増加する。これは、先行トンネルによる緩みの影響よりも後行トンネル掘削による掘削力の影響の方が卓越しているためであると考えられる。また、土圧比最大値は、離間距離比に関わらず1.0以下であって、後行トンネル掘削によって発生する先行トンネル作用土圧は、土被り圧より小さくなっている。

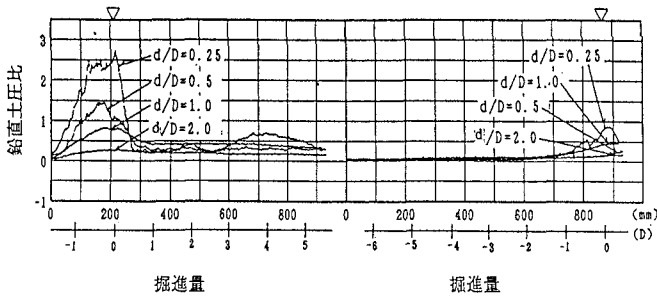
(2) 上部トンネル先行

後行トンネル掘削による土圧比の変化を図-6に、また離間距離比と土圧比最大値の関係を図-7にそれぞれ示す。これらよりわかることを以下に示す。

①取込不足状態

影響開始地点は、 $d/D=0.25$ で通過前約1.0D、 $d/D=0.5$ で通過前約0.7D、 $d/D=1.0$ で通過前約0.6Dとなっていて、離間距離比が大きくなるほど切羽に近接している。しかし、影響終了地点は離間距離比に関係なくいずれも通過後1.5Dとなっている。また、離間距離比と土圧比最大値の関係をみると、 $d/D=0.5$ で1.2と静止時鉛直土圧よりも若干大きいものの、 $d/D=1.0$ 以遠では0.5以下となり、後行トンネル掘削によって発生する先行

▽：土圧計設置位置



(a) $\alpha = 90^\circ$

(b) $\alpha = 110^\circ$

図-4 後行トンネル掘削による土圧比の変化 (下部先行) (D_r 70%)

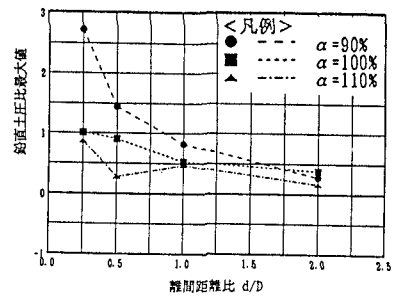
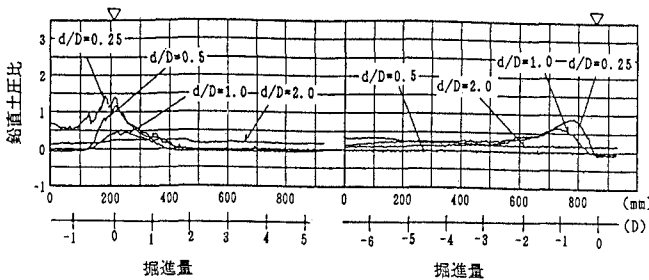


図-5 d/D - 土圧比最大値の関係 (下部先行) (D_r 70%)

▽：土圧計設置位置



(a) $\alpha = 90^\circ$

(b) $\alpha = 110^\circ$

図-6 後行トンネル掘削による土圧比の変化 (上部先行) (D_r 70%)

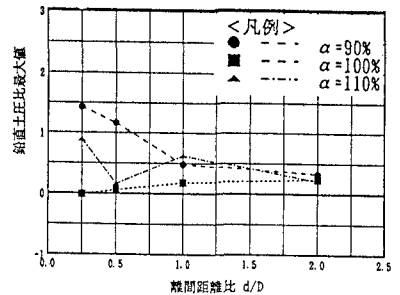


図-7 d/D - 土圧比最大値の関係 (上部先行) (D_r 70%)

トンネル作用土圧は土被り圧より小さくなっている。

②取込過多状態

下部先行の取込過多状態と同様の傾向を示す。

3-3. 施工順序の違いによる先行トンネル作用土圧への影響

離間距離比 $d/D = 0.5$ における、後行トンネル掘削による土圧比の変化を図-8に示す。これよりわかることを以下に示す。

①取込不足状態

土圧比最大値をみると、上部先行は1.2であるのに対し下部先行は1.4と、上部先行に比べ2割程度大きくなっている。これは、下部からは土砂を取り込めないこと、砂の取込領域では応力が伝播しにくいことから、上方へ応力が伝播しにくいためと考えられる。

②取込過多状態

施工順序に関係なく、後行トンネル掘進による先行トンネル作用土圧への影響はほとんどないことがわかる。

3-4. 掘進時における周辺地盤挙動

基本ケースにあたるCase10においてX線ラジオグラフィ法による切羽周辺地盤変位挙動の撮影結果を図-9に示す。これよりわかることを以下に示す。

①取込不足状態

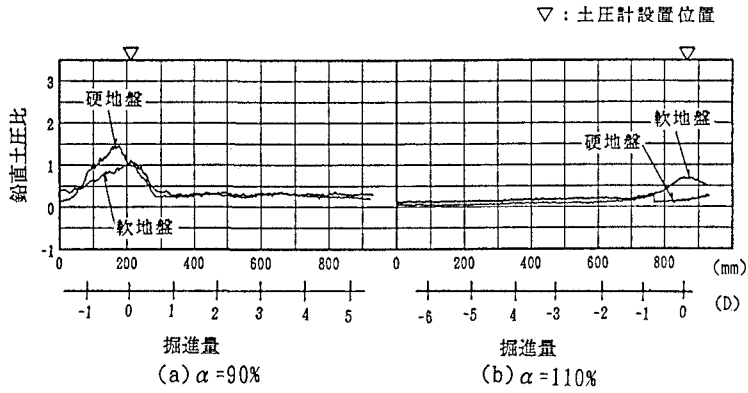


図-8 後行トンネル掘削による土圧比の変化 ($d/D=0.5$)

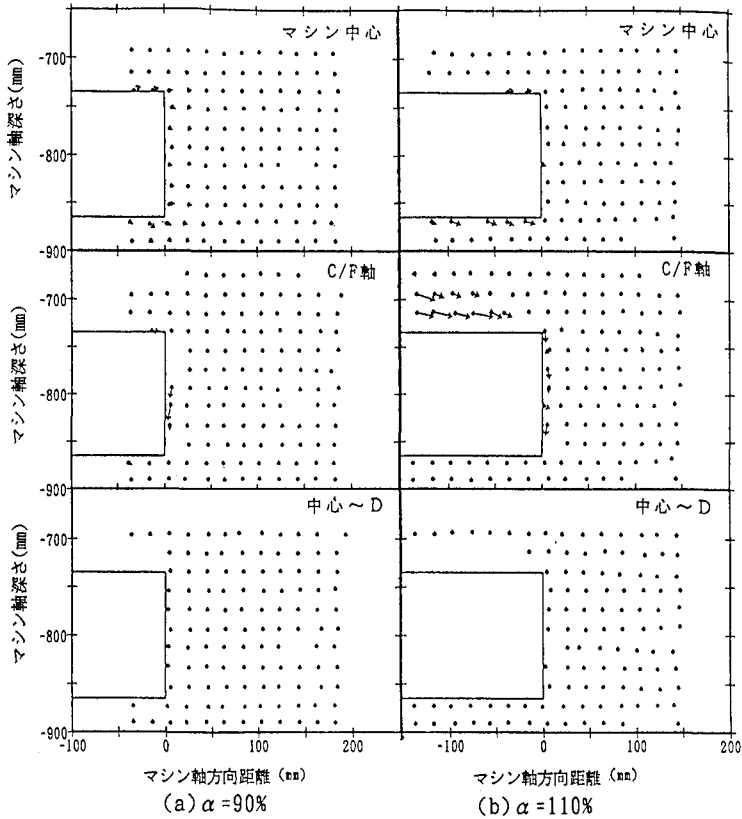


図-9 切羽周辺地盤変位挙動 (単設)

マシン中心軸, C/F軸において, マシン上下部近傍に掘進方向への変位が認められる。これは, 周面摩擦による追従変形, サブカッター部の形状が凸であるために応力集中しやすいこと, およびシールド模型のサブカッターには取込機能は装備しているものの, 側部カッターと同様な掘削機能を有していないので押込力が発生しやすいことから生じたものと考えられる。

②取込過多状態

C/F軸上のマシン天端近傍の地盤に掘進方向内側への変位が認められる。これは, 切羽前方領域からよりも,

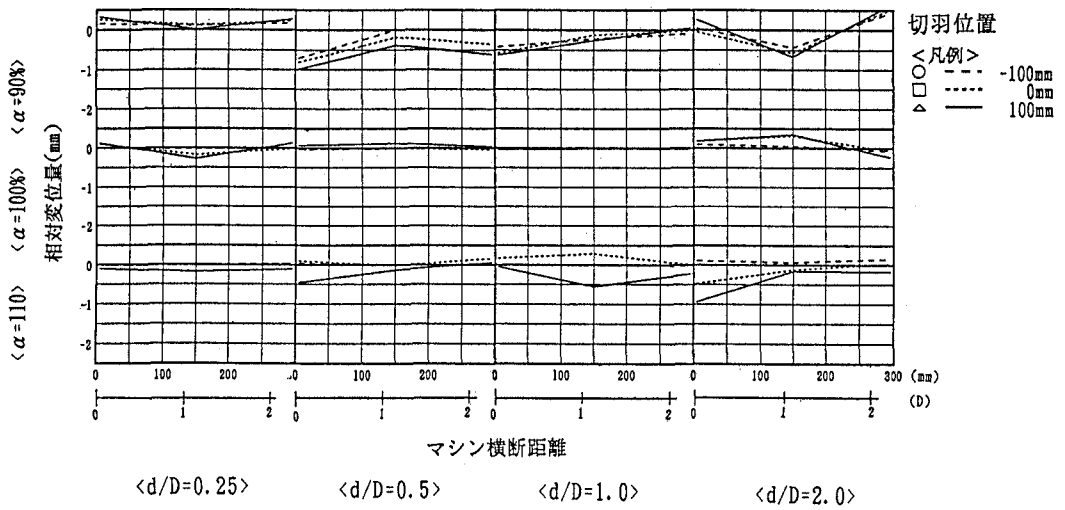


図-10(a) 横断方向地表面変位形状（下部先行）

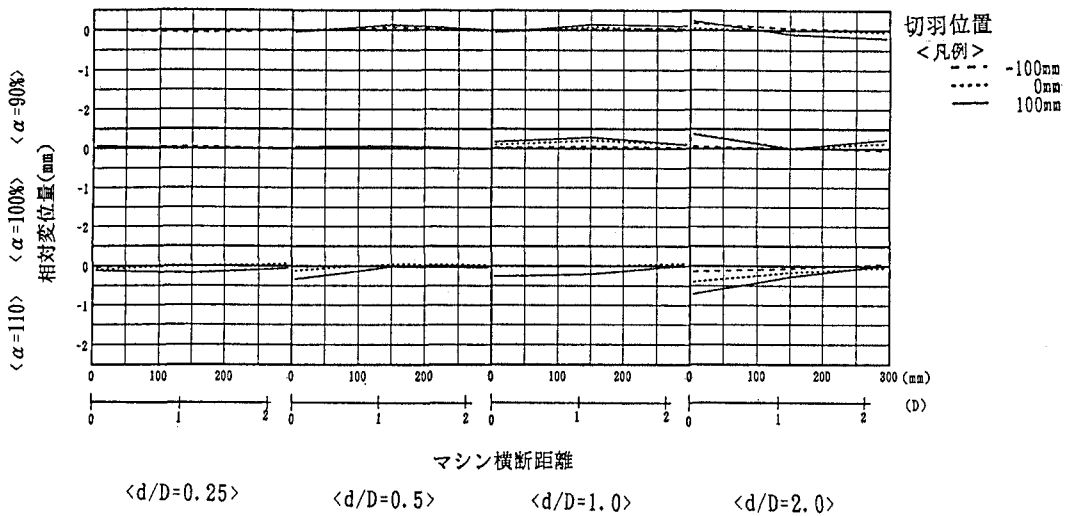


図-10(b) 横断方向地表面変位形状（上部先行）

切羽後方の緩んだ領域からの、切羽への周辺地盤の流入が大きいためであると考えられる。

次に横断方向地表面変位形状を図-10に示す。これより、以下のことがわかる。

- ① 切羽通過後100mmではほとんどのケースで0.5mm未満の微小変形となっているが、必ずしも取込状態を反映しているとはいえない。この理由としては、
 - イ. 取込率90～110%の定常掘進状態を模擬した実験を行っている。
 - ロ. 著者らの研究⁵⁾⁶⁾によれば、取込率90, 110%相当状態にまで切羽を変位させても、地表面変位形状に差異はほとんど認められない。
 - ハ. 本実験で用いたレーザー式変位計は計測スポットが極めて小さく、高精度であるため、砂粒子の移動状態によっては、過大な隆起・沈下を示す可能性がある。
- などが考えられる。したがって、地表面変位については、定性的評価をすることにする。

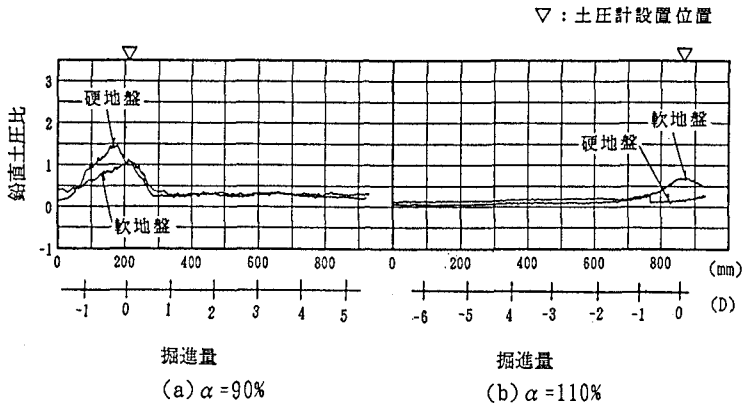


図-11 後行トンネル掘削による土圧比の変化 ($d/D=0.5$, 下部先行)

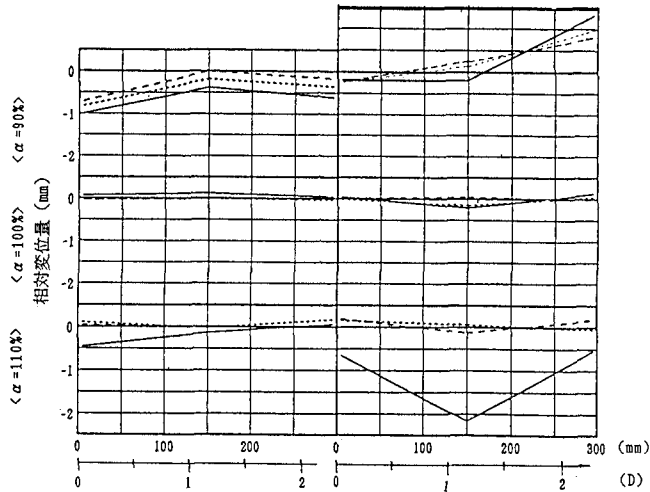


図-12 横断方向地表面変位形状 ($d/D=0.5$, 下部先行)

②上部先行より下部先行の方が地表面変位が大きくなる傾向がある。これは、剛体の上部先行トンネルが下部後行トンネルの緩みの上方への伝播を遮断する働きがあること、及び、下部先行トンネルの緩み領域の中を上部後行トンネルが掘進することにより、緩みが拡大されること等のためと考えられる。

③取込過多状態において離間距離比が大きくなるにつれて地表面沈下量は、増加する傾向がある。これは、離間距離比が大きくなるに従い、下部先行の場合には上部後行トンネルの土被りが浅くなり、上部先行の場合には上部先行トンネルのフード作用が小さくなって、後行トンネル掘削による緩み領域の地表面への影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

3-5. 地盤密度の違いによる先行トンネル作用土圧への影響

離間距離比 $d/D=0.5$ 下部先行における、後行トンネル掘削による土圧比の変化を図-11に、横断方向地表面変位形状を図-12にそれぞれ示す。これらよりわかることを以下に示す。

①取込不足状態

土圧比をみると、影響範囲は地盤密度に関係なく、ともに通過前 $1.5D$ ～通過後 $0.5D$ の区間となっているが、鉛直土圧比最大値は硬地盤で約 1.4 であるのに対し、軟地盤は約 1.1 と小さくなっている。これは、地盤密度

の低下によるものと考えられる。

②取込過多状態

土圧比をみると、軟地盤のほうが影響を受けているものの、いずれも土圧比は1.0以下であることから、後行トンネル掘削による先行トンネル作用土圧への影響はほとんどない。

③切羽通過後100mmの変形量は軟地盤のほうが大きい。これは、内部摩擦角が小さいために、硬地盤に比べゆるみ領域が大きくなるためであると考えられる。

4. 結論

実施工への展開も含め、本研究で得られた結論を以下に列举する。

- ①下部先行の場合、後行トンネル掘進による先行トンネル作用土圧への影響範囲は、側部カッター外径を D とすると、取込不足状態では離間距離比に関係なく通過前約 $1.5D$ 地点から通過後約 $0.5D$ 地点の範囲である。また $d/D=1.0$ 以遠では後行トンネル掘進による先行トンネル作用土圧は、土被り圧を上回らない。一方、取込過多状態では離間距離比に関係なく先行トンネル作用土圧は、土被り圧より小さい。
- ②上部先行の場合、取込不足状態での影響開始地点は、離間距離比 d/D が大きくなるにつれ切羽に近接するが、影響終了地点は d/D に関係なく通過後 $1.5D$ の地点である。また、 $d/D=1.0$ 以遠では掘進による影響をほとんど受けない。
- ③取込不足状態で $d/D=0.5$ の場合、先行トンネルの土圧比最大値は下部先行のほうが上部先行よりも2割程度大きい。
- ④取込過多状態で近接施工する場合には、下部先行では地表面への影響に、また上部先行では先行トンネル作用土圧の減少および先行トンネル下部の緩みに注意しなければならない。
- ⑤サブカッター部が凸部となっていること、特に下部では土砂取込みが悪くなることから、サブカッター部付近に応力集中が発生する可能性があるため、実機設計においてサブカッター部の構造に留意しなければならない。
- ⑥密度の低い地盤では、硬地盤に比し緩み領域が大きくなることから、緩み領域の拡大に十分配慮し、施工管理を行う必要がある。

5. 参考文献

- 1) たとえば松本嘉司、新井時夫、波多腰明：多円形断面シールドの掘削特性に関する実験的研究，土木学会論文集N0.406，1989.6.
- 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，1991.
- 3) 杉本光隆、西尾誠高、團昭博：全断面・半断面シールド模型を用いた周辺地盤挙動の比較，土木学会第46回年次学術講演会，1994.9. 発表予定
- 4) DS研究会機械分科会：斜坑シールド工法における切羽安定性の評価に関する研究，1991.
- 5) 杉本光隆、肥田憲明他：砂質地盤における水平坑・斜坑シールド工法の主働時切羽安定性・切羽作用外力に関する研究，土留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動，1992.5.
- 6) 杉本光隆、高橋伸裕 他：多連型シールド工法における周辺地山の挙動と切羽作用外力の実験的検討，第46回トンネル工学研究発表会，1994.11. 投稿中