

積層導坑トンネルの施工法と遠心力載荷模型実験

CENTRIFUGAL STUDY OF STACKED-DRIFT TYPE TUNNELS

尾上篤生* 堀田洋之** 風間広志*** 竹村次朗**** 木村 孟*****
Atsuo ONOUE, Hiroyuki HOTTA, Hiroshi KAZAMA, Jiro TAKEMURA and Tsutomu KIMURA

A series of centrifugal tests on "Stacked-drift" type tunnels has been performed to quantify earth pressures around the drifts and contact pressures between drifts under an acceleration of 100G both in dry sand and in saturated clay. Test results revealed that contact pressures at the springline are about three times at the crown and the invert in dry sand. Earth pressures at the crown and invert are less than 1/3 overburden pressures, and these ratios at the springline are more than 2/3, which is quite different from existing test data on hollow cylindrical tunnels.

Key words : centrifugal test, earth pressure, stacked drift, thrust, tunnel

1. はじめに

現在都市部での公共用地の取得が困難なことから首都高などでは新設予定道路の多くが地下道路となっている。このような状況の中で、将来の3車線以上の道路の建設のために直径20m以上の大断面トンネル施工方法の様々な検討が各機関で行われている。大断面道路トンネルの実施例としてアメリカ・シアトルの内径19.4mのMt. Baker Ridgeトンネルがある。その施工法は“Stacked-drift 工法”と呼ばれ、導坑をリング状に積み上げた覆工構造体を構築し、その後にその内部を掘削してトンネルとするもので、他の工法に比べ費用が安いとされている。また都市部でのトンネルは地表面の沈下を抑えることが重要である。Mt. Baker Ridgeトンネルでは最大沈下の一部の地滑り地区で20 cm程度あったと報告されている。これは導坑を馬蹄形のオープンタイプシールド機で施工したが、その際の施工ミスによるもので、他の区間では5~6 cm程度である。そしてトンネル覆工体完成後、内部掘削中の沈下の進行はほとんど無く、構造体として安定であったことが報告されている¹⁾。しかしこの覆工構造体が安定を保つメカニズムや、土圧と導坑内部応力、施工に伴う変形などは未だに不明な点が多い。

本報告では日本の都市部における未固結・帯水地山での大断面トンネルを積層導坑工法で施工する場合のトンネル施工法の概念と、トンネル完成後のリング状覆工体の挙動に関する遠心力載荷模型実験結果について報告する。

* 正会員 工博 清水建設機技術研究所 ** 正会員 同 技術研究所 *** 正会員 同 技開本部
**** 正会員 工博 東京工業大学 土木工学科 助教授 ***** 正会員 工博 同 教授

2. トンネル施工法の概要

2.1 施工手順

図-1に施工法の手順を示した。導坑トンネルの施工には裏込コンクリートを厚く打設出来るようなシールド機を使用する。またこのシールド機は未固結・帯水地山での施工を考慮し、密閉式とする。まず先行導坑を1本おきに、かつその間隔をシールド径より小さく構築する。その後先行導坑の裏込コンクリートの一部を後行シールド機で切削しながら掘進し、裏込コンクリートを打設して先行・後行の導坑を重合・一体化させる。これをトンネル覆工構造体とし、その内部を掘削して大断面トンネルを構築する。

積層導坑工法では、導坑の数を増減させることにより、ト

ンネルの大きさを自由に選定することができる。また重合の形状を変えることによりトンネルの形を自在に変化させることも可能であるので、通常のシールド工法やNATMでは難しい未固結・帯水地山での内径が20mを越える超大断面トンネルや、トンネルの分岐・合流が容易に施工できる特徴を持っている。

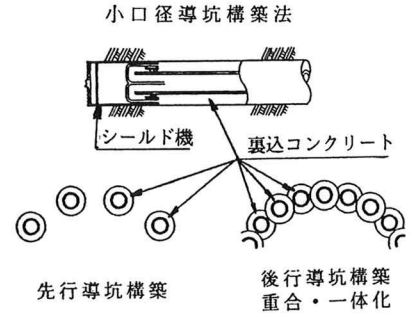


図-1 トンネル施工手順

2.2 分岐・合流方法

図-2は2車線と3車線のダブルデッキトンネルを合流させて5車線のダブルデッキの道路トンネルを構築した場合を示している。施工の手順は次の通りである。

- (a) 合流させる2つのトンネルの中心距離を徐々に近付ける。
- (b) 両トンネル覆工体が接した位置から先行の裏込コンクリートを切削しながら後行のトンネルと重合・一体化を始める。その後重合部分が鉛直になるように制御する。この部分は中壁としての機能を果たすことになる。
- (c) 両トンネルの覆工構造体の曲率と中壁高をともに大きくして行く。

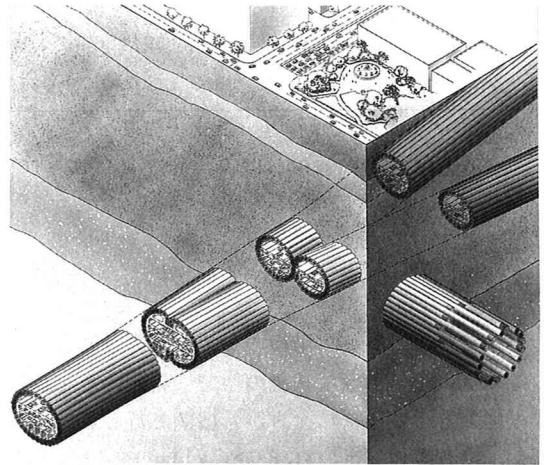


図-2 トンネル分岐・合流概念

- (d) 最終的には合流後の5車線トンネルの覆工構造体の曲率と同じになった時点で合流は完了する。この位置で中壁部の導坑の掘進は中止し、その先は単一円形断面のトンネルとなる。

合流区間の内部掘削は、2つのトンネル構造体間が1つの構造となるように補強を行いながら実施して行く。十分な補強が完了した時点で、道路構造上必要な部分の中壁を撤去し、道路を完成させる。

3. 実験方法

3.1 トンネル模型、模型地盤と遠心加速度

図-3に示すように、先行導坑として長さ14.9cm（一部14.7cm）、直径2cmの円形の両腹を $r=1$ cmの曲面で切り欠いたアルミロッド、後行導坑として円形のロッドを各10本を交互に配置し、純内径10cm、外径14cmの積層導坑覆工体を形成してトンネル模型とした。

3.2 模型地盤

遠心模型実験用土槽の前面と背面にはグリスとメンブレンを貼り壁面摩擦を低減した（一部の実験ケースはメンブレンが無い）。地盤は乾燥砂地盤と飽和粘土地盤の2種類で、それぞれの地盤の作成方法は以下の通りである。

(a) 砂地盤・・・前面を取り外し、横にした土槽の所定の位置に上記トンネル模型を組み立て、全ロッドがばらばらにならないように仮止めをする。その後トンネル模型周辺に乾燥豊浦砂を均一に撒いた。地盤の乾燥単位体積重量は $\gamma_d = 1.6 \text{ gf/cm}^3$ 、

間隙比は $e = 1.65$ 、相対密度は $D_r = 0.87$ である。仮止めはトンネルが自立する高さまで砂を撒き終えた時点で撤去した。この後外した片面を取り付け、容器を立てて地盤上部を土被り厚さ（トンネル外径から）8 cm（深さ 30 cm）になるように整形した。この上に厚さ 5 cm の鉛散弾（砂換算厚さ 22 cm）を敷設した。

(b) 粘土地盤・・・かさあげ用のカラーを付けた土槽の中で圧密圧力 2 kgf/cm^2 のもとに、脱気したカオリンのスラリーを約2週間圧密をした。圧密終了時の湿潤単位体積重量は $\gamma_s = 1.62 \text{ gf/cm}^3$ 、間隙比は $e = 1.54$ 、含水比は $w = 59.8\%$ である。砂地盤と同様に容器を横向きにし、アルミロッドと同径（外径 2 cm）のパイプで中掘りしながら粘土地盤をくり抜いた穴にロッドを挿入して、トンネル模型を組み立てた。土被りは 7cm（深さ 29 cm）とし、この上に厚さ 3 cm の鉛散弾（粘土換算厚さ 13 cm）を敷設した。

3.3 計測方法と遠心力载荷方法

計測は、トンネル中心軸上（中央）および土槽端部から 10 cm の位置（端部）での鉛散弾表面（地表面）変位、トンネルのクラウンとインパート間の鉛直内空変位、スプリングラインに沿った水平内空変位、ロッドに作用する垂直土圧、およびロッド間の接触圧力の各項目について行った。地表面変位の測定には L. V. D. T. を、内空変位の測定にはレーザー変位計を用いた。レーザー変位計による水平内空変位の測定方法は図-3に示す通りである。

砂地盤の土圧は図-4に示す梁型圧力計と丸型圧力計²⁾で測定した。梁型圧力計は幅 7 mm の溝を切削した円形アルミロッドに、 $\phi 6 \text{ mm}$ 、厚さ 3.5 mm の超小型ロードセル（定格荷重 20~100 kgf）を2個埋め込み、溝に埋め込んだ受圧梁を介して荷重を測定した。梁の向きに応じた梁自重による荷重の補正をした後、梁投影面積で除して圧力に換算した。丸型圧力計は腹部に丸溝を切削したロッドに1個のロードセルを埋め、その上に挿入した表面がロッド表面の曲率と面一にしたキャップを介して測定した。粘土地盤の土圧測定には $\phi 6 \text{ mm}$ のダイヤフラム型土圧計を1~3個埋め込んだロッドも一部使用した。

導坑間接触圧は梁型圧力計の受圧梁部を隣りのロッドとの接触面に向けて測定した³⁾。

载荷は各実験ケースについて 0G から 100G までの遠心加速度を2~4回繰り返し载荷・除荷した。

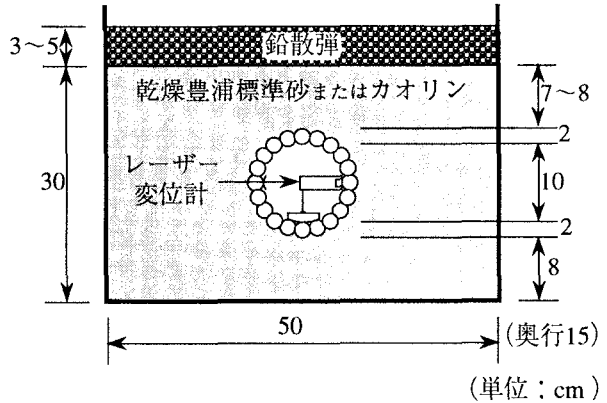


図-3 トンネル模型と模型地盤

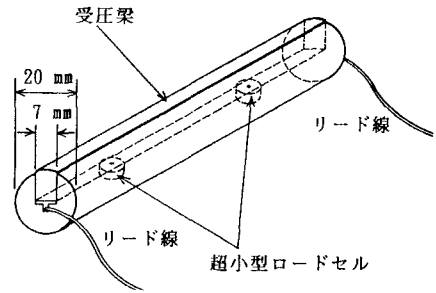


図-4 梁型圧力計概要図

4. 実験結果

4.1 遠心加速度載荷・除荷課程における各種測定値の残留値

遠心加速度 0 ～ 100 G の繰り返し載荷・除荷課程において、初回の除荷後に地表面変位、内空変位とも 100 G における値の約 1/2 の残留値がある。これは地盤とトンネルとの初期の若干の馴染み不足の影響もあろうが、主として地盤の自重圧縮に伴う塑性変形によるものであり、載荷 2 回目以降の弾性的変位量はほぼ一定である²⁾。土圧、導坑間接触圧などについても初回の除荷後にいくらかの応力が残留する。そこで載荷 2 回目以降はその残留値からの増分を測定値とし、載荷 1 回目と載荷 2 回目以降とに分けてそれぞれ遠心加速度 100 G 時点の測定値で整理した。

4.2 砂地盤における地表面変位と内空変位

メンブレンの有無により多少異なるが、砂地盤における地表面変位とトンネル内空変位の平均値は表-1 に示すとおりであり、載荷 2 回目以降の平均値は 1 回目のほぼ 1/2 である。本実験は、重力場ですでに中抜きされた積層導坑周辺地盤の自重を 100 倍にするもので、地下で先に積層導坑を建設してからその内部土砂を除去する実際の工事手順を模擬していない。したがって、変位の絶対値について実大換算しても実験結果が持つ意味は小さい。絶対変位量に関する実験結果は、実験をシミュレートする数値解析方法の妥当性を吟味する点でのみ意味がある⁴⁾と言えよう。

一方、変位の相対値は導坑覆工構造体外周に沿う土圧や導坑間接触圧の分布と密接な関係があることから重要である。表-1 に見る通り鉛直内空変位は押し潰される方向に、また水平変位は側方に拡がる（膨脹する）方向に生じている。水平変位は鉛直変位の約 30 % と小さいが、別に行った FEM 解析で予測された通り⁴⁾、スプリングライン近傍では周辺地盤を押し付けるように変位する。

4.3 土圧

(a) 砂地盤における各導坑に作用する土圧分布をその深度における有効土被り圧で正規化して図-5 に示した。クラウンとインバートで 0.3 弱と非常に小さく、それに対しスプリングライン近傍では 0.8 前後と大きな値となっている。

このような傾向は埋設管に関する既往の遠心模型実験結果と著しく異なっている。本実験結果を、剛性の異なる 2 種類の単一円管について Tohda, et. al.⁵⁾ が行った実験結果と比較したものを図-6 に示す。剛性管に作用する土圧はクラウン及びインバートで

表-1 地表面変位・内空変位の平均値（砂地盤）
（単位 mm）

遠心載荷	地表面変位		内空変位	
	中央	端部	鉛直圧縮	水平膨脹
1 回目	4.1	3.8	1.5	0.4
2 回目以降	2.2	2.1	0.7	0.2

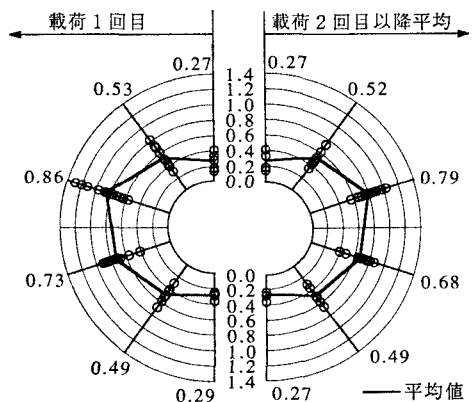


図-5 正規化土圧分布（砂地盤）

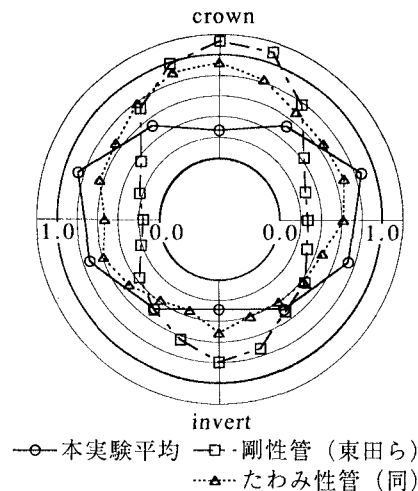


図-6 トンネルの剛性、構造の違いによる正規化土圧の違い（砂地盤）

は土被り圧前後の値となっているが、スプリングラインでは静止土圧に近い。この傾向は萩原ら⁸⁾、三戸ら⁷⁾の剛性管についての実験結果においても同様である。円管がたわみ性になると、管の変形に伴う土圧の再配分が生じて正規化土圧の分布はトンネル外周上で部位によらず一様に近づく。積層導坑トンネルではこの傾向がさらに進み、土圧はクラウンとインバートで主動土圧側に、またスプリングラインで受動土圧側に移行している。このことは前節に示した模型の変形形状とも符合している。このような傾向を示す理由としては、導坑間は接触しているだけであり、変形の自由度が大きいこと、引っ張り応力および曲げモーメントの伝達が無いことによるものと考えられる。

(b) 粘土地盤における正規化土圧の分布を図-7に示した。図中に破線で併記した砂地盤の正規化土圧と比べると、スプリングライン近傍では両地盤に差は無いが、クラウンとインバート付近では砂地盤に比べて粘土地盤の正規化土圧の方が大きく、トンネル外周に沿って一様な分布形状に近い。

4.4 導坑間の接触圧

導坑間の接触圧を図-8に示した。分布はほぼ土圧の分布と同様の傾向を示しており、スプリングライン付近で大きく、クラウン、インバートへ向かうほど小さくなっている。1回目の値によればスプリングライン付近の上下45°の間の導坑間接触圧はほぼ均一で20kgf/cm²強であり、実大換算すると奥行き1m当たり140tf強の導坑間力に相当する。

スプリングライン近傍の接触圧はクラウン付近の約3.3倍である。材質の異なる外径8cm、肉厚2mmの3種類の円管を用いた仲松ら⁸⁾の実験によると、この比率(軸力比)は円管の円周方向の曲げ剛性に比例する傾向を示しており、本実験結果を当てはめるとおよそ47.1 N・m²/mの曲げ剛性を持つことになる(図-9)。この結果は前節に述べた内容と一見相反するようであるが、積層導坑トンネルの複雑な挙動を示すものとして興味深い。

5. 実験結果と現場実測値との比較

図-10はMt. Baker Ridgeトンネル現場での内空変位の実測値¹⁾である。測定はテープ式伸縮計を使用し、その設置はトンネル内部掘削中に行っている。測点A B C間の測定値は計器設置から内部掘削完了時まででB Cが0.025 cmの伸び、A B、A Cがそれぞれ0.17 cm、0.02 cmの縮みであり、これから

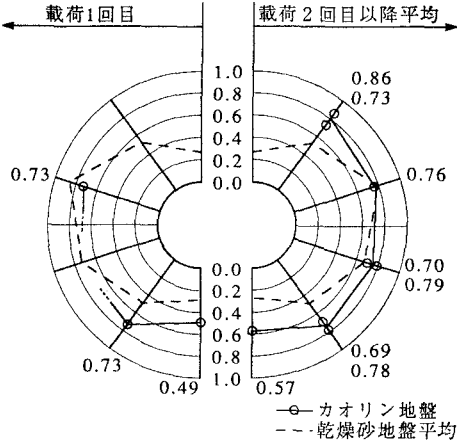


図-7 正規化土圧分布(粘土地盤)

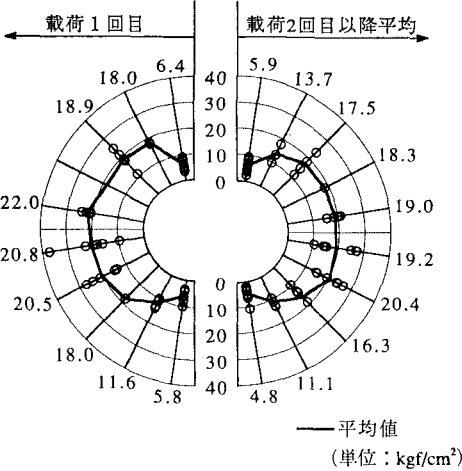


図-8 導坑間接触圧(砂地盤)

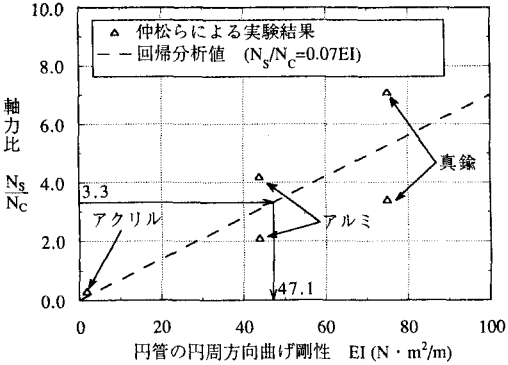


図-9 模型円管の曲げ剛性と軸力比(仲松ら⁸⁾改)

直線BCを基準とした測点Aの沈下量を算定すると0.18 cmであった。同様に測点ADEの設置後の直線DEに対する測点Aの沈下量は0.07 cmであった。

掘削がある程度進んだ時点からの計測であるため施工に伴う全変位量にはなっていないが、地表面の沈下が内部掘削の期間にはほとんど生じていないことを考え合わせると、内部掘削開始からの内空変位量もかなり小さかったものと推定される。

本実験結果では実大換算で鉛直内空変位が载荷1回目の平均で13 cm、2回目以降の平均で7 cmと内径10 mのトンネルにしては非常に大きな値となっている。また同図に併記されているMt. Baker Ridgeトンネルでの導坑間力の実測値¹⁾によると、スプリングラインの導坑間力に対するクラウンのその比は実験結果に近く0.2であるが、インバートのそれは1.1と実験結果とは著しく異なっている³⁾。

これらの実験・実測両結果の違いの理由として、Mt. Baker Ridgeトンネルの地山がN値が50以上のシルト・粘土層であり、かなりの自立性が期待できること、ならびに積層導坑トンネル構造体が地山圧力を受けてある程度変位していたことが考えられる。また先に述べたように本実験は実際の施工手順を模擬していないことも理由の一つであろう。

6. 終りに

今後、所定の遠心加速度に達してからライニング内部土砂を掘削するような実施工を模擬した実験、および地震時の挙動実験等を行うなど、実験的・解析的検討を進める予定である。

最後になりましたが本実験を進めるに当たり、遠心模型実験の基本から細部に至るまで丁寧に指導して下さい、東京工業大学の末政直見、廣岡明彦両助手にお礼を申し上げます。

7. 参考文献

- 1) R.A. Robinson, et. al.: "GROUND AND LINER BEHAVIOR DURING CONSTRUCTION OF THE MT. BAKER RIDGE TUNNEL", Proc. 1987 Rapid Excavation and Tunneling Conference, Vol.1, pp.309~328, 1987.
- 2) 尾上篤生他: 導坑積み重ねタイプトンネルの部材力と安定性について(その1), 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp.2061~2062, 1992.6.
- 3) 堀田洋之他: 積層導坑トンネルの導坑間接触圧について, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 1992.9. 投稿中
- 4) 新宅正道他: 導坑積み重ねタイプトンネルの部材力と安定性について(その2), 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp.2063~2064, 1992.6.
- 5) J. Tohda, et. al.: "Centrifuge model tests on several problems of buried pipes", PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE CENTRIFUGE 1991, pp.83~90, 1991.6.
- 6) 萩原敏行他: 乾燥砂中の剛な埋設管に作用する土圧測定の試み, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, III-431, pp.936~937, 1989.10.
- 7) 三戸憲二他: 遠心模型実験による乾燥砂中の剛なトンネル模型に作用する土圧の測定, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1739~1742, 1990.6.
- 8) 仲松宇大他: 遠心模型実験による乾燥砂中の柔なトンネル模型の断面力の測定, 第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1735~1738, 1990.6.

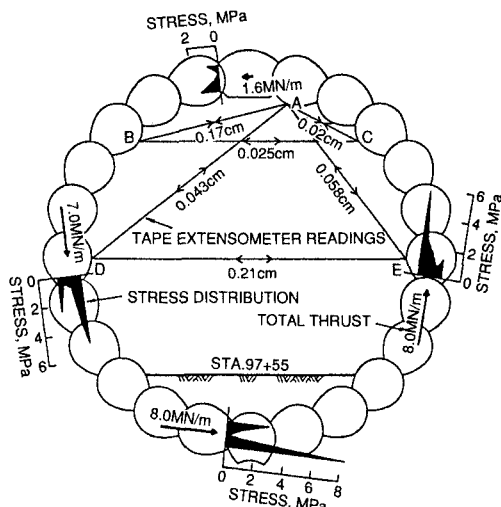


図-10 Mt. Baker Ridgeトンネルでの実測値 (Robinson, et. al. ¹⁾ 改)