

プレライニングトンネルの作用土圧に関する模型実験

THE MODEL TEST ON THE ACTING EARTH PRESSURE OF THE PRE-LINING TUNNEL

相良昌男*・田口善文*・米山秀樹**・笹尾春夫***

Masao SAGARA, Yoshifumi TAGUCHI, Hideki YONEYAMA and Haruo SASAO

It is expected to develop the reliable reinforced method to decrease the surface settlement on the shallow tunnel in urban region. A new pre-lining method which can make the continuous arched body on the top of the face has been developed. A pre-lining method is effectual tunnel support by arch in a cross section.

The two dimensional model test was carried out to investigate the effect of this rigid pre-lining model. This paper describes the result of the model test.

Keywords: NATM, pre-lining, model test, earth pressure

1. まえがき

土被りの薄い土砂地山トンネルをNATMで施工する場合、切羽を安定させ、地表沈下を抑制することが重要な課題である。それらの課題を解決することを目的とした工法の一つにプレライニング工法があり、その開発が盛んである。プレライニング工法とは、あらかじめ切羽前方地山内にアーチシェル状の先受け工を構築しながら、トンネルを掘削する工法で、確実な先受け効果とともに、トンネル横断方向のアーチによる支保効果を期待できる工法である。

プレライニング工法は既に幾つかの現場に適用され、その先受け効果は実証されてきている。しかし、設計のためのプレライニングに加わる荷重や切羽の安定効果など未解明な部分も多い。

筆者らは合理的なプレライニング工法の設計法の確立のために模型実験や数値解析を行い、補強効果の解明を行っている。本報告は、半円筒形の剛なプレライニングに作用する土圧を調べるために行った模型実験結果について報告する。

* 正会員 株式会社 フジタ 技術研究所

** 正会員 日本国土開発株式会社 技術本部

*** 正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験装置を図-1に示す。土槽底盤の中央部に外径34cm、厚さ2cmのアルミ製の剛な半円筒形のプレライニングを設置し、図-2に示すように半径方向の土圧、プレライニング表面に加わる円周方向応力を測定するために二方向ロードセルをプレライニングの天端、SLから45°のアーチ肩部およびSLから12.5°の側壁脚部付近に5ヵ所組み込んだ。プレライニングの内側には切羽を想定した支承板を設置し、この支承板を降下させることでトンネルの掘削を再現した。支承板の軸受部には支承板が受ける鉛直荷重を測定するためのロードセルがある。プレライニングの脚部の下端はコイル状のバネで支持されており、バネの強さを変えることにより、種々の強さの地盤に対応できるようになっている。バネの下端は別の二方向ロードセルと接続しており、脚部に加わる鉛直方向荷重と水平方向荷重を測定することができる。また、土槽底盤部にはプレライニングと25mm離れた位置からφ25mmの土圧計を左右対象に5個配置した。

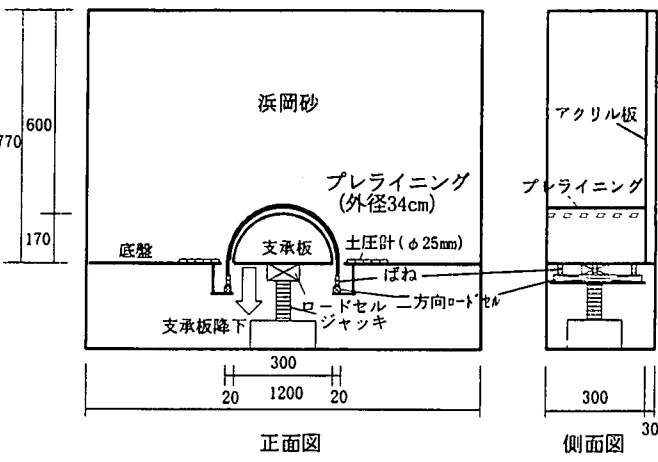


図-1 実験装置

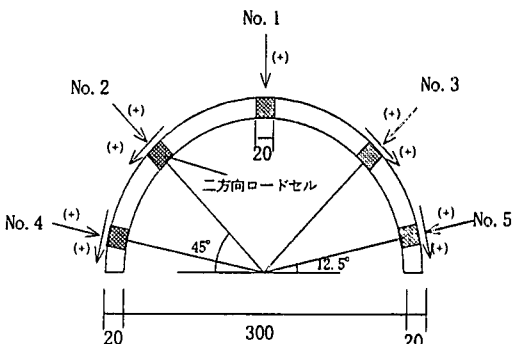


図-2 プレライニング部詳細

2.2 模型地盤

実験に用いた砂は空気乾燥状態の遠州浜岡砂でその物理特性を表-1に、粒度分布を図-3に示す。

2.3 実験手順

実験手順はプレライニング、バネおよび支承板を設置した後、空気乾燥状態の遠州浜岡砂を一定の寸法の出口から、高さ1.2mで自由落下させ、作製した。土被りはプレライニング天端から60cmの高さで一定とした。この時の $\gamma=1.51\text{tf/m}^3$ である。実験開始前はプレライニング脚部はバネと離れた状態であり、支承板が全土被り荷重を受けている。この状態から支承板を降下させ、支承板の降下に伴うプレライニングの沈下、プレライニングに作用する土圧および、バネを介して加わるプレライニング脚部への鉛直・水平荷重等を計測した。

2.4 実験ケース

今回行った実験ケースを表-2に示す。
実験は脚部支持バネ無し（円形落とし戸実験に相当）と地盤の強弱を考え、脚部支持バネの強さを2通りに変えて合計3ケースで比較、検討した。脚部支持バネは、粘性土地盤と砂質地盤を想定して2種準備した。砂質土相当地盤には、 $k=14.2\text{kgf/mm}$ のバネを、粘性土相当の地盤には $k=1.8\text{kgf/mm}$ のバネをそれぞれ用

表-1 砂の物理特性

物理特性	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.654
最大粒径 (mm)	2.00
60% 粒径 D_{60} (mm)	0.30
50% 粒径 D_{50} (mm)	0.28
30% 粒径 D_{30} (mm)	0.24
10% 粒径 D_{10} (mm)	0.17
均等係数 U_c	1.76
曲率係数 U_c'	1.13
空中落下時の作製地盤の物理特性	
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.510
間隙比 e	0.758

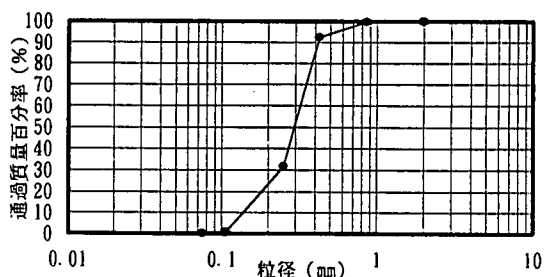


図-3 砂の粒径加積曲線

表-2 実験ケース

ケース	対象地盤	脚部支持バネ
1	円形落とし戸実験	バネ無し
2	砂質地盤相当	$k=14.2\text{kgf/mm} \times 4\text{ヶ}$
3	粘性土地盤相当	$k=1.8\text{kgf/mm} \times 4\text{ヶ}$

いた。バネはプレライニングの片側の脚部それぞれに2ヶずつ設置し、合計4ヶ使用した。

3. 実験結果

3.1 脚部支持バネ無しの場合

(円形落とし戸実験に相当)

まず、一連の実験結果の内、プレライニング脚部のバネ無しの場合について報告する。バネ無しのケースは、プレライニング脚部を支持するバネがないために、支承板とプレライニングが同等に降下する。従って、円形落とし戸実験に近い実験である。

図-4にプレライニングの沈下に伴う支承板に加わる鉛直荷重の変化を示す。支承板が受持つ荷重は地盤から受ける土圧とプレライニングの自重(10.0kgf)の合計である。

実験開始前の支承板の荷重86.6kgfから、プレライニングの沈下が5mm程度になるまで荷重は急激に減少するが、それ以降は20kgf程度に収束する。この値から支承板荷重を差し引いた値は10kgfであり、これは初期土被り荷重76.6kgfの13%程度である。

このことからプレライニングの沈下に伴い、次第に地山アーチが形成されていき、鉛直方向の荷重が減少していくことが分かる。

図-5はプレライニングの沈下に伴う二方向ロードセルにより計測したプレライニングの半径方向の土圧の変化を示す。プレライニング天端の土圧は初期土圧からほぼ直線的に減少し、最終的には 0.03kgf/cm^2 程度に収束する。特にアーチ肩部の土圧は天端に比べて急激に減少し、プレライニングの沈下量2mmでほぼ収束に向かう。これは、剛なプレライニングの特徴と考えられる。

図-6はプレライニングの沈下に伴うプレライニング表面の円周方向応力の変化を示す。プレライニングのアーチ肩部の円周方向応力

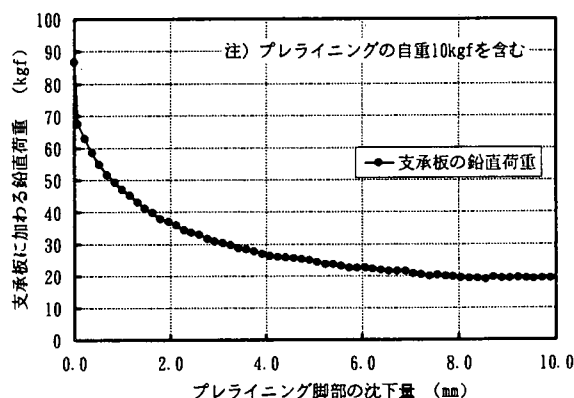


図-4 プレライニングの沈下量と支承板荷重

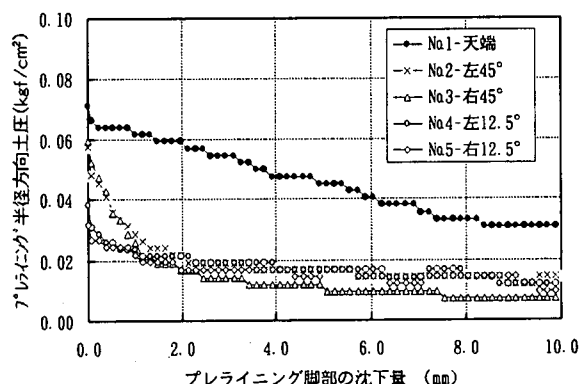


図-5 プレライニングの沈下量と半径方向土圧

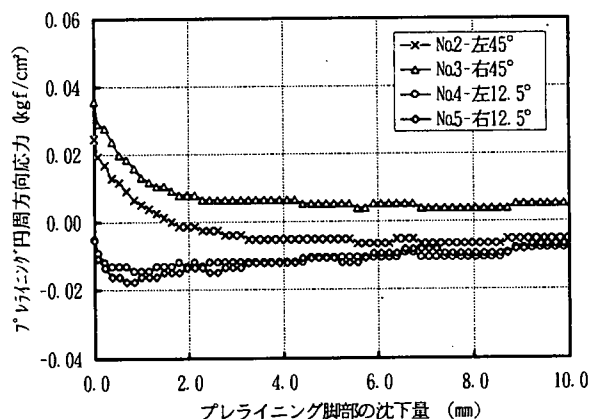


図-6 プレライニングの沈下量と表面の円周方向応力

はプレライニングの沈下2mmでほぼ収束に向かい、最終的にはほぼゼロに近い値になる。脚部では、一旦上向きの応力が大きくなり、その後また小さくなる。

図-7は、図-5の半径方向土圧と図-6の円周方向応力から求めた、実験開始前およびプレライニングが10mmまで沈下した時の土圧の合成ベクトルを示す。実験開始前はプレライニング天端からアーチ肩部において鉛直方向の土圧が大きく作用するが、プレライニングが10mm沈下した時にはアーチ肩部の鉛直方向の土圧が極端に小さくなることが確認される。

図-8はプレライニングの沈下に伴う右側壁底盤部の初期鉛直土圧からの土圧増加分を示す。ただし、R-1の土圧はプレライニングと実験土槽間のすき間の砂止め板の影響で、多少乱れた結果となっている。

支承板荷重の減少に伴い、側壁部土圧は増加する。支承板降下量が微小の初期段階では、ほぼ均等に土圧が増加する。しかし、降下量が大きくなると、側壁に近いR-1~2(2.5~5cm離れ)よりも、側壁から7.5~10cm離れた土圧計R-3,4の増加分が大きく、通常の落とし戸実験とは異なる傾向を示した。

3.2 脚部支持バネ有りの場合

バネ有りの場合はプレライニングの脚部が地盤に支持されている場合に相当し、地盤条件の差異を見るために二種類のバネ定数を用いた。1ケースは砂質土地盤に相当する $k=14.2\text{kgf/mm}$ のバネを

4ヶ用いた場合であり、もう1ケースは粘性土地盤に相当する $k=1.8\text{kgf/mm}$ のバネを4ヶ用いた場合である。

図-9に脚部支持バネ $k=14.2\text{kgf/mm}$ の時のプレライニングの沈下に伴う支承板に加わる鉛直荷重の変化を示す。また、図中には脚部のバネが受持つ支保荷重を併示する。

支承板が受持つ荷重は地盤から受ける土圧とプレライニングの自重(10.0kgf)の合計である。実験開始前の支承板の荷重79.1kgfから、プレライニングの沈下が0.9mm程度になるまで荷重は急激に減少す

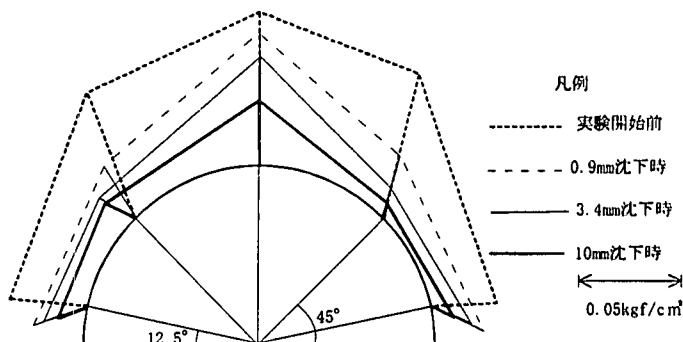


図-7 実験前後の土圧ベクトル(バネ無し)

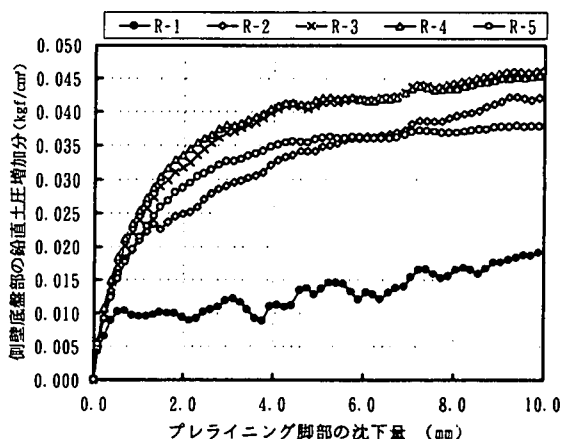


図-8 側壁底盤部の鉛直土圧の変化(バネ無し)

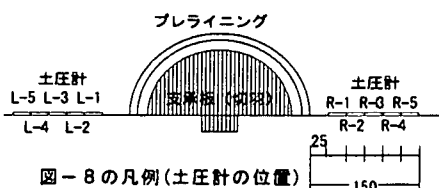


図-8の凡例(土圧計の位置)

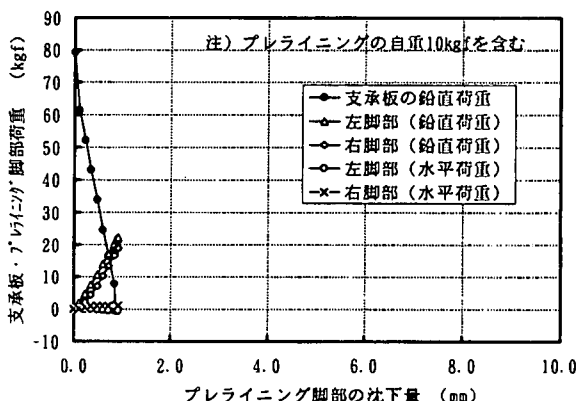


図-9 プレライニングの沈下量と支承板荷重($k=14.2\text{kgf/mm}$)

るが、それに伴い脚部荷重が増大していき、最終的には脚部反力と地山荷重がつりあって収束する。この場合、プレライニング脚部で支持する荷重は、プレライニングの自重10kgfを差し引くと、片側で約15kgfとなり、両方の脚部で30kgfとなる。

同様に、図-10に脚部支持バネ $k=1.8\text{kgf/mm}$ の時のプレライニングの沈下に伴う支承板に加わる鉛直荷重と脚部のバネが受持つ支保荷重の変化を示す。

実験開始前の支承板の荷重81.5kgfから、プレライニングの沈下が3.4mm程度になるまで荷重は急激に減少するが、それに伴い脚部荷重が増大していき、最終的には脚部反力と地山荷重がつりあい収束する。この場合、プレライニング脚部の支持荷重はプレライニングの自重を差し引くと、両脚で14kgf程度である。

このことから、剛なプレライニングの場合、脚部の支持条件により、プレライニングの沈下量、脚部の支持荷重が異なることが分かる。

プレライニングの脚部が強い地盤に支持されていれば、プレライニングの沈下は少なくなるが、支持荷重は大きくなる。また、プレライニング脚部の支持荷重は前述のバネ無し（円形落とし戸相当の実験）の同じ降下量の時の支承板荷重よりも、多少小さい。これは、プレライニングが有ることで、地山の緩み荷重がプレライニングとの摩擦、脚部支持力とのつりあいを保ちながら、地山の荷重分担を大きくする方向に応力再分配が行われるためと思われる。

図-11は、脚部支持バネ $k=14.2\text{kgf/mm}$ の時の半径方向土圧と円周方向応力から求めた、実験開始前およびプレライニングが0.9mm沈下した時の土圧の合成ベクトルを示す。同様に図-12には、脚部支持バネ $k=1.8\text{kgf/mm}$ のプレライニングが3.4mm沈下した時の土圧の合成ベクトルを示す。

特に、バネが強い場合、円形落とし戸の同じ沈下量の時と比較すると、天端部の土圧減少の割合が大きく、肩部、脚部の半径方向土圧減少の割合は少ない。また、バネが強い方が沈下は少なくなり、地山を緩めないが、プレライニングに作用する土圧は大きくなる。

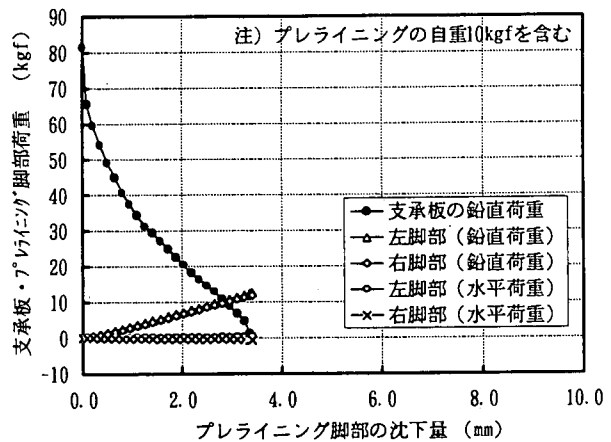


図-10 プレライニングの沈下量と支承板荷重($k=1.8\text{kgf/mm}$)

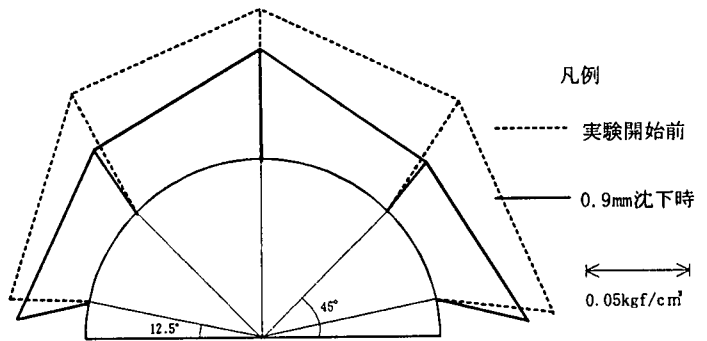


図-11 実験前後の土圧ベクトル($k=14.2\text{kgf/mm}$)

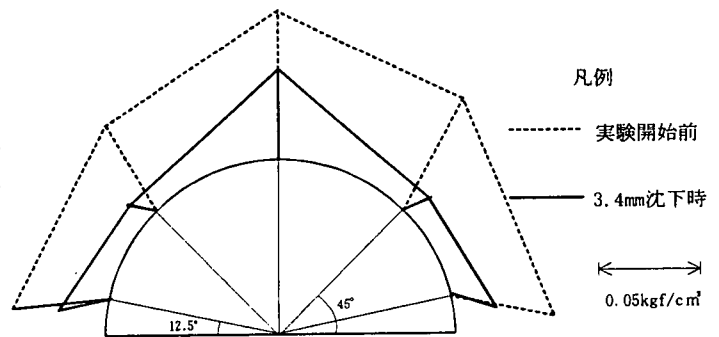


図-12 実験前後の土圧ベクトル($k=1.8\text{kgf/mm}$)

図-13は脚部支持バネ $k=14.2\text{kgf/mm}$ の時のプレライニングの沈下に伴う右側壁底盤部の鉛直土圧の増加分を示す。

今回の実験では、図-8の円形落とし戸の場合と比較して、同じ降下量の時の鉛直土圧の増加量に関しては、顕著な差異は認められないが、緩み荷重と脚部支持バネがつりあう最終状態で急激に土圧が上昇する傾向がみられた。また、脚部支持バネ $k=1.8\text{kgf/mm}$ についてもほぼ同様の傾向を示す結果となった。

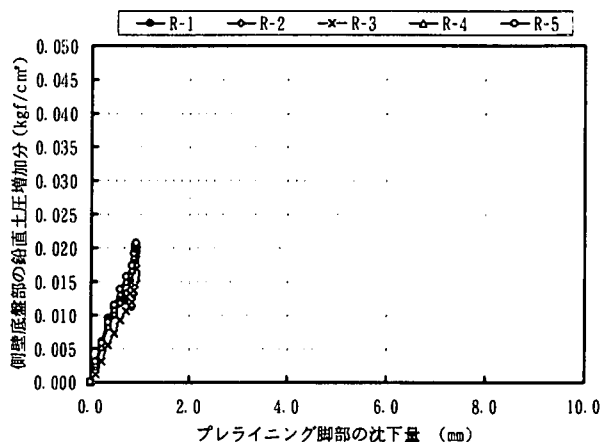


図-13 側壁底盤部の鉛直土圧の変化($k=14.2\text{kgf/mm}$)

4. あとがき

剛なプレライニングに作用する土圧を検討するために二次元の模型実験を行った。その結果、以下のことが確認された。

- (1) 剛なプレライニングを降下させた時に作用する土圧は、天端部に比べてアーチ肩部で急激に低下する。
- (2) プレライニングがあれば、地山の変形が小さくなり、地山を緩めない。
- (3) 脚部支持バネの強さの影響を比較した場合、プレライニング脚部の支持力が大きくなれば、プレライニングの沈下は減少する。一方、プレライニングに作用する土圧や脚部荷重は大きくなる。
- (4) プレライニングの変形、沈下の度合いでプレライニングに作用する荷重やプレライニングの脚部荷重が異なるので、変形に応じた設計荷重を用いることが望ましい。

今回は、かなり剛なプレライニングについての実験を行った。今後はプレライニングの変形等についても考慮し、柔なプレライニングについての実験も併せて行っていく予定である。

最後に、本実験はプレライニング工法検討委員会（委員長 足立紀尚 京都大学教授）での成果の一部をまとめたものであり、ご指導を頂いた関係各位に感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 相良昌男・田口善文・指田健次・畑生浩司：剛なプレライニングに作用する土圧に関する模型実験、土木学会第50回年次学術講演会、1995. 9
- 2) 米山秀樹・生山法裕・香川和夫・笹尾春夫：プレライニングトンネルの切羽安定性に関する模型実験、土木学会第50回年次学術講演会、1995. 9
- 3) 相良昌男・田口善文・香川和夫：都市トンネルにおけるプレライニングの補強効果に関する模型実験、第30回土質工学研究発表会、1995. 7
- 4) 田口善文・波田光敬・香川和夫：三次元模型実験によるプレライニングの地山補強効果について、第49回土木学会年次学術講演会、1994. 9.