

プレライニングトンネルの作用土圧に関する模型実験(その2)

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 sturding 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

土被りの浅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。本報告では、これまで行ってきた剛なプレライニングを用いた模型実験に加えて、アクリル製の半円筒形の柔なプレライニングを用いた模型実験を行ったので、それらの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半円筒形のプレライニングを設置した。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。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6個配置した。

2.2 プレライニング模型

プレライニングには、剛性の異なる2種類の材料を用いた。アクリル製の柔なプレライニングは、外径300mm、厚さ3mmで、プレライニングに加わる軸力、曲げモーメントを測定する。それらは、図-2 (a) に示すように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5箇所の内外に、ひずみゲージを貼付し、測定した。アルミ製の剛なプレライニングは、外径34cm、厚さ2cmで、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、柔なプレライニングと同様の位置5ヵ所に二方向ロードセルを組み込んだ(図-2 (b) 参照)。

2.3 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。

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

2.4 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

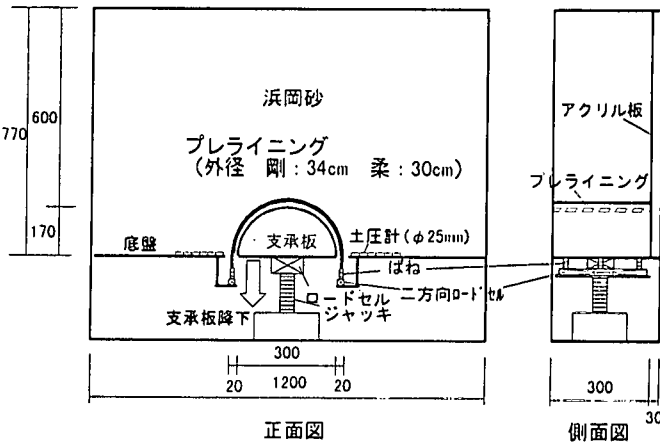


図-1 実験装置

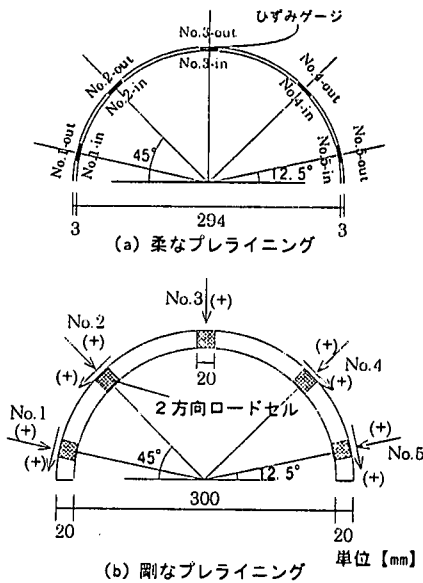


図-2 プレライニング部詳細

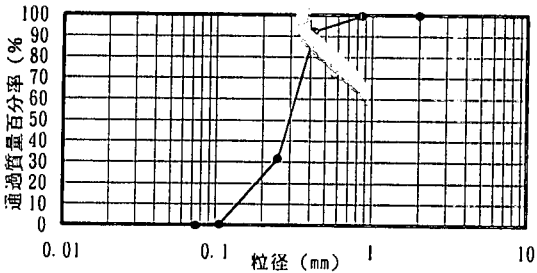


図-3 砂の粒径加積曲線

重を受けている。この状態から支承板を降下させ、掘削を再現し、支承板の降下に伴うプレライニングの沈下、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。これに加えて、剛なプレライニングを用いた実験では、プレライニングに作用する土圧を、柔なプレライニングでは、プレライニングの軸力、曲げモーメントを測定した。

2.5 実験ケース

今回行った実験ケースを表-2に示す。

プレライニングは、剛性の異なる材料で2ケースを準備した。

脚部支持については、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、脚部支持バネの弱と強の2通り、計3ケース（無、強、弱）とした。

よって、合計6ケース（ $= 2 \times 3$ ）の実験について比較、検討した。ただし、ケース4の結果については、別報¹⁾を参照されたい。脚部支持バネは、粘性土地盤と砂質土地盤を想定しており、砂質土相当地盤には、 $k=14.2\text{kgf/mm}$ のバネを、粘性土相当地盤には $k=1.8\text{kgf/mm}$ のバネをそれぞれ用いた。バネはプレライニングの片側の脚部それぞれに2ヶづつ設置し、合計4ヶ使用した。

3. 柔なプレライニングの実験結果

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、柔なプレライニングを用いた実験の内、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(2.3kgf)の合計である。実験開始前の支承板の荷重 68.2kgf 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 10kgf 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 7.7kgf であり、これは初期土被り荷重 65.9kgf の 12% 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。この傾向は、別報¹⁾にて報告した剛なプレライニングを用いた実験においても、確認されている。

3.2 脚部支持バネ有りの場合

図-5(a)には、脚部支持バネが強い場合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および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荷重は 67.1kgf であるが、プレライニングの沈下が 0.9mm 程度になると、支承板荷重は急激に減少し、ゼロになる。一方、それに伴い脚部荷重は、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 2.3kgf を差し引くと、片側で約 11kgf となり、両方の脚部で 22kgf となる。

同様に図-5(b)に、脚部支持バネが弱い場合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

表-2 実験ケース

ケース	プレライニング	対象地盤	脚部支持バネ強度
1	柔 (7ヶ所)	無し	無し
2		砂質土地盤	強: $k=14.2\text{kgf/mm} \times 4ヶ$
3		粘性土地盤	弱: $k=1.8\text{kgf/mm} \times 4ヶ$
4	剛 (7ヶ所)	無し	無し
5		砂質土地盤	強: $k=14.2\text{kgf/mm} \times 4ヶ$
6		粘性土地盤	弱: $k=1.8\text{kgf/mm} \times 4ヶ$

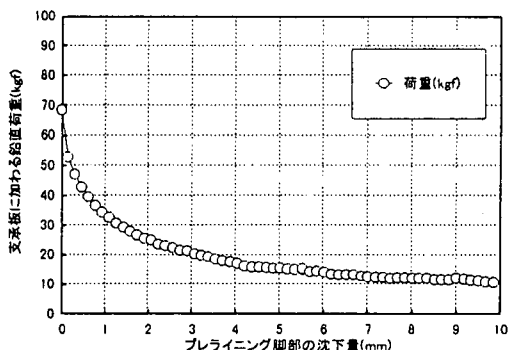


図-4 プレライニングの沈下量と支承板荷重

のバネが受持つ支保荷重の変化を示す。

脚部支持バネが弱い実験では、プレライニングの沈下が2.5mm程度になると、実験開始前の支承板の荷重66.5kgfから急激に減少し、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2.3kgfを差し引くと、両脚で12kgf程度である。

これらのことから、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。

表－3に同一沈下量における、バネ無しとバネ有りの支承板荷重と脚部荷重の結果を示す。

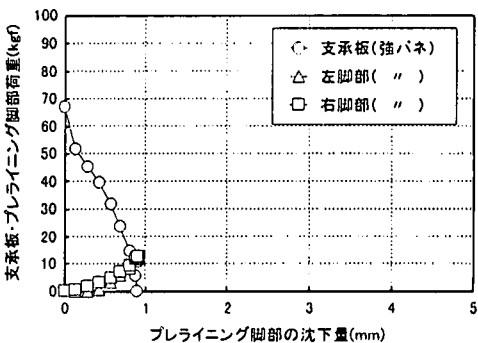
脚部支持バネが強い場合における、最終状態（沈下量0.9mm）での脚部の支持荷重は、合計で21.6kgf、弱バネの場合は、最終状態（沈下量2.5mm）で12.2kgfであった。これに対して、バネ有りと同じ沈下量の時のバネ無し（円形落とし戸相当の実験）の支承板荷重は、プレライニング沈下量0.9mmで32kgf、沈下量2.5mmで20kgfである。以上のように、バネ有りのプレライニング脚部の支持荷重は、前述のバネ無し（円形落とし戸相当の実験）の同じ沈下量の時の支承板荷重よりも、多少小さい値を示した。

これは、プレライニングとの摩擦により、プレライニング脚部での荷重が減少するためと考えられる。

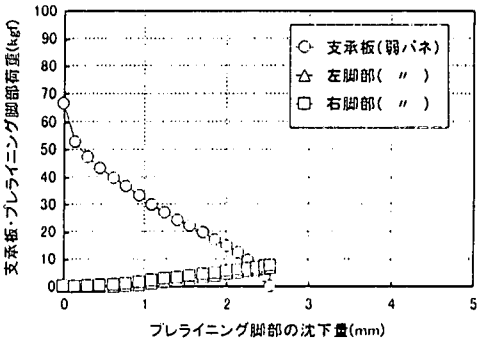
図－6に脚部支持バネが強い場合と弱い場合の最終状態（各々0.9mm、2.5mm沈下時）における、プレライニングの軸力の分布を示す。図から、プレライニングの全周でほぼ様な軸力が発生しており、全体的にみれば鉛直方向の土圧と水平方向の土圧が等しく作用しているようである。

また、脚部支持バネの弱い方が、強い場合よりも、軸力は小さな値を示した。このことから、脚部の支持条件により、プレライニングに加わる軸力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、プレライニングに加わる軸力は大きくなると考えられる。



(a) 脚部支持バネ強



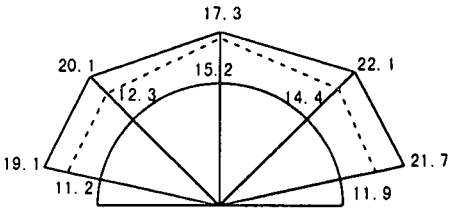
(b) 脚部支持バネ弱

図－5 プレライニングの沈下量と
支承板荷重および脚部荷重

表－3 同一沈下量におけるバネ無しとバネ有りの鉛直荷重

プレライニング種類		柔なプレライニング			
バネ種類		バネ無し	強バネ	バネ無し	弱バネ
プレライニング沈下量(mm)		0.9	0.9	2.5	2.5
支承板鉛直荷重(kgf)		34.3-2.3=32.0	---	22.1-2.3=19.8	---
脚部荷重 (kgf)	右脚鉛直	---	12.8-1.2=11.6	---	7.7-1.2=6.5
	左脚鉛直	---	12.2-1.2=11.0	---	6.9-1.2=5.7
	合計	---	11.6+11.0=21.6	---	6.5+5.7=12.2

—— 脚部支持バネ強(0.9mm沈下時)
----- 脚部支持バネ弱(2.5mm沈下時)
【単位：kgf】



図－6 プレライニングの軸力

図-7は図-6と同様に、各々の脚部支持バネにおける、最終状態でのプレライニングの曲げモーメントの分布を示す。脚部支持バネが強い場合、弱い場合、いずれのケースにおいても、プレライニングに加わる曲げモーメントは、天端部で正値を、それ以外ではほとんどの箇所では負値を示し、それらの絶対値は、肩部で大きくなる傾向である。脚部支持バネが強い場合よりも弱い場合の方が、天端および肩部で曲げモーメントが多少生じる結果となった。

図-8(a)～(e)に側壁底盤部の鉛直土圧の増加分を初期値との比(%表示)で示す。図-8(a)は、脚部支持バネ無しの場合の最終状態における鉛直土圧増加分を示しており、プレライニングの沈下に伴い側壁部の鉛直土圧は増加する傾向が確認された。また、脚部支持バネが強い場合(図-8(c))と弱い場合(図-8(e))においても、同様の傾向を得る。図-8(b)、(c)には、プレライニングの沈下量が同一の時に、脚部支持バネ無しとバネが強い場合を、図-8(d)、(e)には、同一沈下量における、バネ無しとバネが弱い場合の鉛直土圧増加分を示す。いずれの図においても、脚部支持バネ無しよりも、バネ有りの方が、側壁底盤部の鉛直土圧の増加量は大きく、この傾向はプレライニングにより近い位置の土圧計で顕著である。これは、プレライニングの変形に応じて、側壁付近に地山アーチが形成され、その足元として側壁底盤部の土圧が増加したためと考えられる。

4. 剛なプレライニングの実験結果

図-9(a)は、剛なプレライニングの脚部支持バネが強い場合の初期状態での土圧分布を示しており、各々の値は2方向ロードセルから測定したトンネル半径方向応力と円周方向応力を鉛直、水平方向成分に分解したものである。同様に、図-9(b)、(c)に、脚部支持バネが強い場合と弱い場合の最終状態(各々0.9mm、3.4mm沈下時)における、プレライニングに作用する鉛直、水平方向の土圧分布を示す。図-9(a)、(b)から、沈下量が0.9mmで

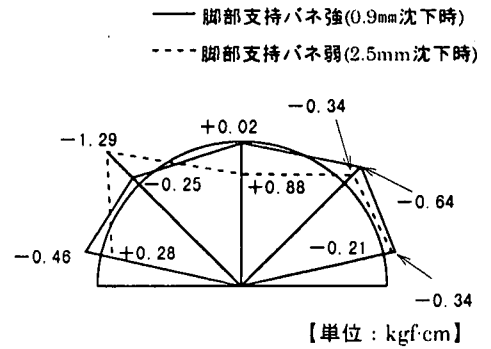


図-7 プレライニングの曲げモーメント

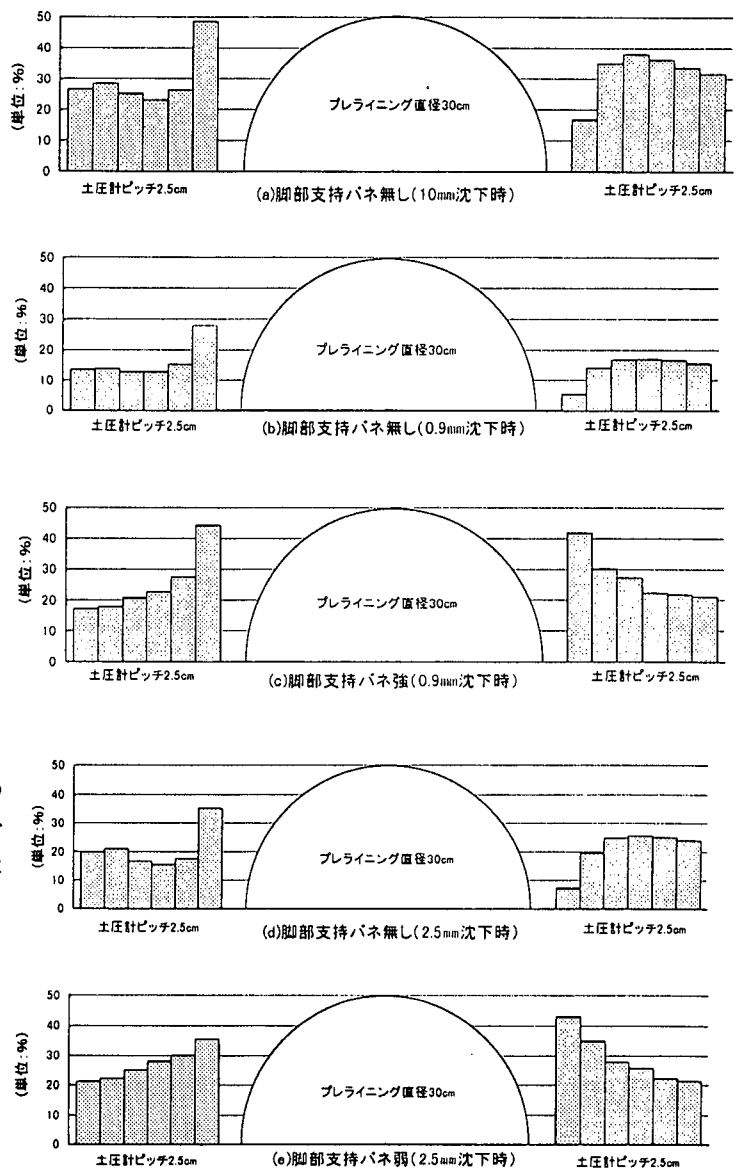


図-8 側壁底盤部の土圧の増加

は、鉛直、水平土圧ともに肩部で多少低下し、図-9(c)に示す弱いバネの3.4mm沈下時には、その傾向がより顕著になる。沈下が大きくなるに従い、鉛直方向の作用土圧は等分布から三角形に近い分布形状となる結果が得られた。

4. あとがき

プレライニングに作用する土圧、軸力等を検討するために、剛性の異なる2種類のプレライニングを用いて、模型実験を行った。その結果、以下のことが確認された。

○柔なプレライニングを用いた模型実験から

(1) 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軸力や脚部荷重は大きくなる。プレライニングの沈下量により、脚部の支持荷重、プレライニングに加わる応力、側壁底盤部の鉛直土圧等が異なることが確認された。

(2) プレライニングの軸力は、ほぼ一様である。

(3) プレライニングが有ることで、側壁付近の地山を緩めずに、側壁底盤部は地山アーチの足元として鉛直土圧が増加する。

○剛なプレライニングを用いた模型実験から

(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) プレライニングに作用する鉛直土圧は、プレライニングの沈下が増加するにつれて、等分布から三角形分布に近づく傾向を示しており、プレライニング周辺には、地山アーチが形成され、土圧の再分配が行われていると考えられる。

今後は、これらの結果に加えて、追加実験や共同研究による実験・解析結果を考慮し、設計法の確立を目指したい。

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、田口、米山、笹尾：プレライニングトンネルの作用土圧に関する模型実験、(社)土木学会 トンネル工学研究発表会 論文報告集、Vol. 5、1995
- 2) 相良・田口・指田・畑生：柔なプレライニングに作用する土圧に関する模型実験、第31回地盤工学研究発表会、1996. 7
- 3) 米山・生山・香川・笹尾：プレライニングの先受け・支保機構に関する考察、土木学会第51回年次学術講演会、1996. 9
- 4) 相良・田口・指田・畑生：模型実験によるプレライニングの作用土圧について、土木学会第51回年次学術講演会、1996. 9

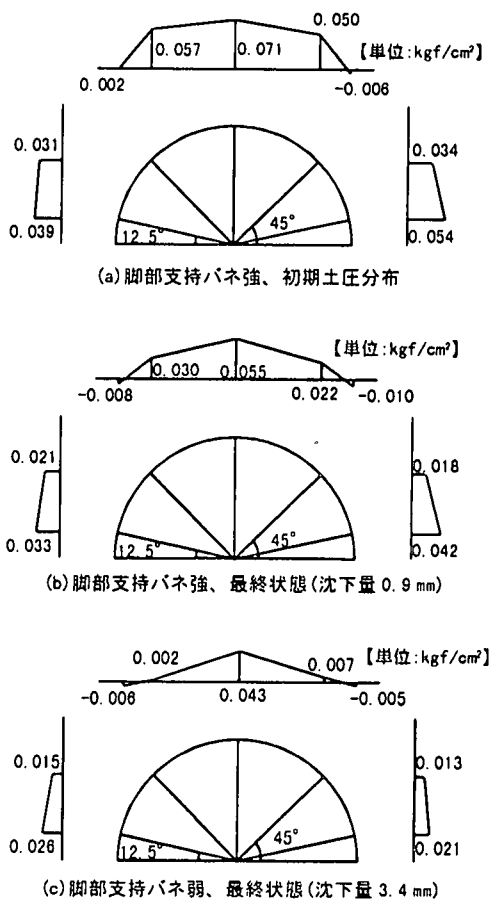


図-9 剛なプレライニングに作用する鉛直、水平方向土圧分布