

扁平断面シールドトンネルの 最適覆工構造に関する実験と考察

建山和由¹・倉橋 実²・Narentorn Yingyongrattanakul³・矢野隆夫⁴・足立紀尚⁵

1 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

2 正会員 工修 大成建設株式会社九州支店 (〒810-8511 福岡市中央区大手門 1-1-7)

3 正会員 工博 株式会社ガイテック設計課長 (〒112-0014 東京都文京区関口 1-13-14)

4 正会員 京都大学技官 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

5 フェロー会員 工博 地域・地盤環境研究所理事長 (〒550-0012 大阪市西区立売堀 4-3-2)

扁平断面トンネルをシールド工法で構築する場合を想定する。この場合、扁平断面トンネルのセグメント覆工には部分的に大きな曲げモーメントが作用するため、従来の覆工厚さが一様な覆工構造を採用する限りは、構造的に過剰な設計にならざるを得ない。本研究では、扁平断面トンネルにおけるセグメント覆工の厚さを部分的に変化させることにより力学的に安定な構造を作ることの可能性を模型実験により確認し、その理由を従来のセグメント設計で用いられてきた慣用設計法を拡張した簡易計算法を用いて考察した。

Key Words : shield tunneling method, flat sectional tunnel, segmental lining, model experiment

1. はじめに

近年、シールドトンネル工法は著しい進歩を遂げている。都市部の地下では、これまでアイディアの域を出なかったトンネル工事でもシールド工法で実現されている。非円形断面トンネルもその一つで、複断面に端を発した断面の非円形化は、楕円、矩形と年々複雑な断面形状へと発展している。限られた都市部の地下空間を有効に利用するには、非円形トンネルが有利な場合も多く、今後その適用は益々増えていくことが予想される。

トンネル断面を円形から楕円等の扁平形状に変えた場合の覆工構造の力学的な安定性について考えてみる。図-1(a)に示されるような円形断面トンネルに水平方向と鉛直方向から同じ強度の荷重が作用する場合、トンネル覆工には曲げモーメントは発生せず、覆工構造は軸力だけで外荷重を支えることになる。これに対し、同図(b)に示す楕円形断面に同じ荷重が作用する場合、荷重が作用する面積の違いから荷重の合力は鉛直方向が水平方向より大きくなり、これに起因してトンネル側壁部(スプリングライン)には曲げモーメントが発生することになる。このため、この部分の覆工構造の外側には引張応力が発生することになるが、セグメント覆工の材料にコンクリートが用いられることが多いことを考えると、このことは構造的に安定性が損なわれることを意味する。

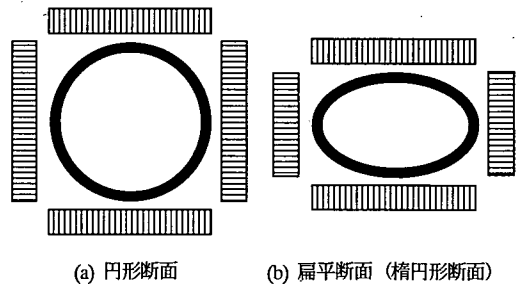


図-1 断面形状の違いと作用外力

従来シールドトンネルにおけるセグメント覆工は、一様な覆工厚さ(桁高)で設計されることが一般的で、この場合、部分的に発生する曲げモーメントの影響に耐える覆工構造を作るには、全体にわたり覆工厚さを大きくするか、引っ張りに抵抗する構造部材を使わざるを得ないことになる。

本研究では、扁平断面シールドトンネルのセグメント覆工において、その覆工厚さを部分的に変化させることにより引張ひずみの発生を抑える構造を作り得るという考えのもとに、覆工厚さの分布を変化させた覆工模型を用いて載荷実験を行い、この考えの妥当性を確認するとともに、セグメント覆工の設計に用いられてきた慣用設計法の考え方を利用して、その理由を考察した。

2. 覆工模型に対する載荷実験

(1) 実験概要

非円形断面シールドトンネルを対象にした模型実験は、これまでも行われている。小泉らは楕円形断面、矩形断面を対象に模型実験を行っている^{1,2,3}。これらの実験では実験土槽にアクリル製の異形断面トンネル覆工模型を設置し、スクリージャッキを介して4方向から載荷することでその挙動を調べ、非円形断面トンネルの覆工の力学挙動が調べられている。

また、覆工の厚さ分布が一様でない場合の模型実験も行われている。曹らは、鋼製土槽の内壁にプレッシャーバックを設置し、これに水を送ることで載荷を行いトンネル模型の破壊形態を調べている⁴。この際、覆工厚パターンが変化した場合の影響を検討し、トンネルが扁平になるほど、覆工側壁の内側で応力集中度が大きくなり、覆工両サイドの厚さをクラウンより大きくすると応力集中度を抑えることができるという結論を得ている。

本研究では、これらの先行研究を参考に、扁平トンネル非一様厚さの覆工模型に対して載荷実験を行い、覆工厚パターンと力学挙動との関係について詳細な考察を行った。実験では、水平に置いたリング状の覆工模型の周りを試料土で満たし、その外側2方向から載荷を行った。その際、覆工模型に発生するひずみを計測することにより覆工模型の挙動を計測した。この実験を覆工の形状と覆工厚さ分布を変化させた模型を用いて実施し、覆工の形状と覆工厚さ分布がその力学的な安定性に及ぼす影響について考察を行った。

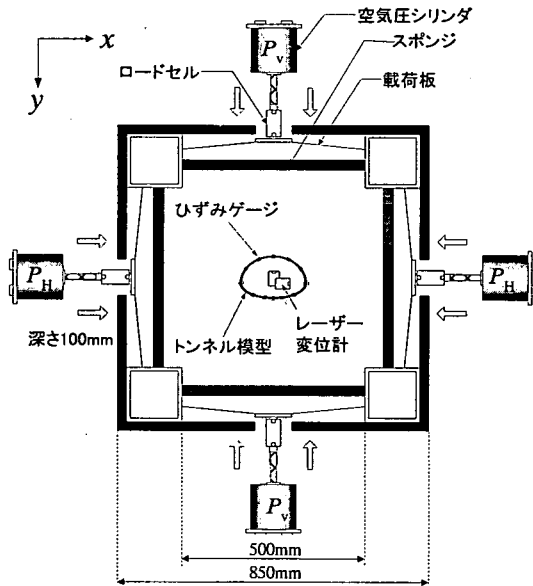


図-2 二方向載荷型模型実験装置

(2) 二方向載荷型模型実験装置

a) 実験用土槽

図-2に今回行った二方向載荷型模型実験の概要を示す。土槽の大きさは内寸で500×500×100mmであり、内壁には長さ500mmの可動式の載荷板が設置されている。各載荷板の中央外側には空気圧シリンダが取り付けられており、x方向とy方向の荷重は独立して制御できるシステムとなっている。これは、トンネルに作用する鉛直土圧 P_v と水平土圧 P_H が異なることを表現するためである。本研究では、y方向を鉛直方向、x方向を水平方向と見なし、その荷重比 P_H/P_v (以下、荷重比とよぶ)を0.3~1.5の範囲で変化させて載荷を行った。なお、載荷板の内側には載荷重が均等に土試料に作用するようにスポンジを貼り付けている。

b) 供試土と模型地盤

実験には乾燥した豊浦標準砂を用いた。模型地盤の作成は、ホッパーを用いて、地盤面上80cmの位置から試料砂を土槽全体に行き渡るよう角度を変えて落下させ、地盤の高さが所定の位置に達した後、表面をはけで整形した。実験の際の砂地盤の平均密度は1580 kg/m³で、平均相対密度は84.80%であった。

c) トンネル覆工模型

トンネル覆工模型は、石膏と水を配合比1:1.1で混合させた材料で作成した。表-1に固化した石膏の諸元を示す。トンネル覆工模型には、図-3のごとくクラウンを基準として動径が0度(クラウン)、30度、60度、90度(スプリングライン)、120度、150度、180度(インバート)である点、及びその対称となる位置の覆工内側と外側に石膏用ひずみゲージを計24枚貼付し、発生するひずみを計測した。

表-2 覆工模型材料の特性

材料名	石膏
密度	802.63 kg/m ³
一軸圧縮強度	2.65 MPa
引張強度 (割裂試験)	880 kPa
弾性係数	1933 MPa
ポアソン比	0.218

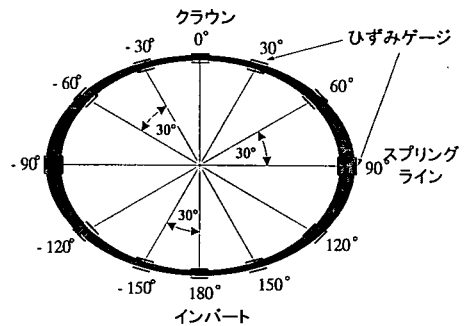


図-3 覆工模型とひずみゲージの配置

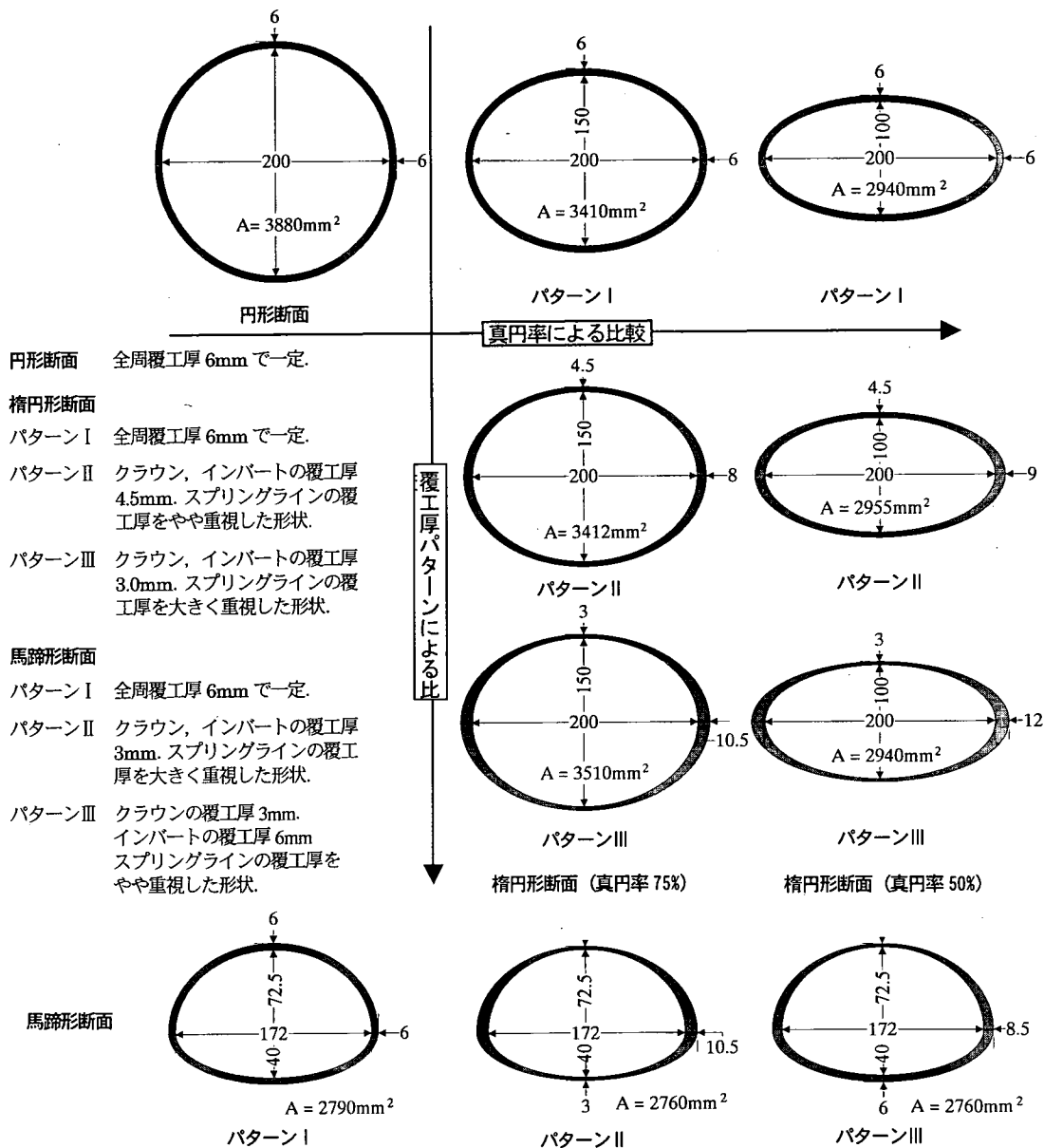


図-4 実験で用いた覆工模型

d) 載荷方法

覆工模型には、初期状態から水平方向、鉛直方向ともに載荷重 18kPa の状態になるまで載荷し、鉛直方向はさらに 60kPa まで載荷する。その後、鉛直荷重を保持したまま水平方向の圧力を 1 ステップ 6kPa の割合で、載荷重 90kPa になるまで増加させ、各ステップにおいて覆工模型に発生するひずみを測定した。

(2) 実験パターン

実験で用いた覆工模型の形状は、図-4 に示すように円形断面 1 パターン、楕円形断面 6 パターン、馬蹄形断面 3

パターンである。楕円形断面の真円率(楕円の短軸の長軸に対する比率)は 75%、50% の 2 種類を設定した。

覆工模型の奥行きはすべて 100mm で、円形断面は全周にわたり覆工厚さが一定の 1 パターンのみであるが、楕円形断面と馬蹄形断面では、内空断面が一定で覆工部分のトータル面積もほぼ一定(図中の A は覆工部分の面積を表している)となる条件のもと、場所により覆工厚さを変化させてバリエーションをもたせている。このとき、覆工厚パターンは、断面の扁平化に伴い曲げモーメントの増加が予想されるスプリングライン付近を厚くし、その分クラウンとインバートを薄く設定した。ただし、

馬蹄形断面では、クラウンと比較してインパートに大きな応力の発生が予想されるため、パターンⅢを下半面の覆工厚を重視した形状とした。これらの考え方に従い、楕円形では外側と内側の2種類、馬蹄形では上半・下半それぞれで内側・外側の計4種類の楕円関数を組み合わせさせて覆工の形を決めた。なお、これらの覆工模型は、長さの縮尺で実物の1/100を想定している。覆工厚さについては、実物で平均1mを想定しているため、単純に長さの縮尺に従うと模型では基本の厚さは10mmとなる。しかしながら、ここでは、覆工の変形を実物とあわせるためには、覆工の変位も1/100になるべきであるということ優先し、実物覆工の剛性と模型覆工の剛性の関係から、覆工模型の基本厚さを6mmと設定した。

実験は、これら各覆工厚パターンに対し、前述の荷重方法で荷重を加え、各荷重段階において覆工に発生するひずみを計測した。これらの結果から、トンネル断面の扁平率や覆工厚パターンと覆工構造の力学的な安定性との関係について考察を行った。なお、これらの実験に先立ち、同じ覆工模型と試料を用いて実験を繰り返し、結果の再現性を確認した。

3. 実験結果と考察

前述の実験で、ひずみゲージを用いた計測から覆工に発生するひずみを求め、また、覆工の外側と内側に作用するひずみの計測値から覆工模型に作用する断面力として、曲げモーメントと軸力を求めた。ただし、ここでは、曲げモーメントは覆工内側が引っ張りとなるものを正、軸力とひずみは引っ張りを正としている。動径の角度についてはクラウンを0度としてこれを基準に、±90度をスプリングライン、±180度をインパートとしている。

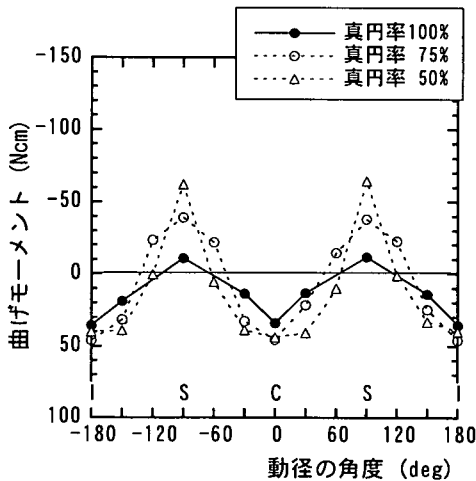


図-5 一様厚さの覆工模型に発生する曲げモーメント

以下、楕円形断面、ならびに馬蹄形断面について実験結果を示す。

(1) 楕円形断面における実験結果と考察

a) 真円率による比較

まず断面が扁平になることによる覆工構造への影響を調べるため、厚さが全周にわたり一様な円形断面と楕円形断面（パターンⅠ）の実験結果を比較してみる。

図-5, 6は、それぞれ真円率100%（円形）、真円率75%（楕円・パターンⅠ）、真円率50%（楕円・パターンⅠ）について、荷重比0.5の場合に覆工に発生する曲げモーメントと軸力を比較した結果である。これらの図から得られる知見を以下に示す。

- 1) 円形断面トンネルでは曲げモーメントが全周にわたって小さく、軸力は楕円形断面のトンネルより大きく発生している。
- 2) 真円率が小さいほど軸力が小さく、曲げモーメントが大きくなる。

同様に真円率100%（円形）、真円率75%（楕円・パターンⅠ）、真円率50%（楕円・パターンⅠ）について、荷重比0.5の場合に覆工の外側と内側に発生するひずみを比較したグラフをそれぞれ図-7, 8に示す。これらの図から以下のことが読み取れる。

- 1) 円形断面トンネルでは、全周にわたって覆工外側における引張ひずみはみられず、覆工内側においても引っ張りの発生領域は小さい。
- 2) 楕円断面では真円率75%、50%ともにクラウンとインパートの内側、スプリングライン外側付近に大きな引張ひずみの発生が認められる。特にスプリングライン外側では、扁平率が大きくなるほどこの部分で大きな引張ひずみの発生がみられる。

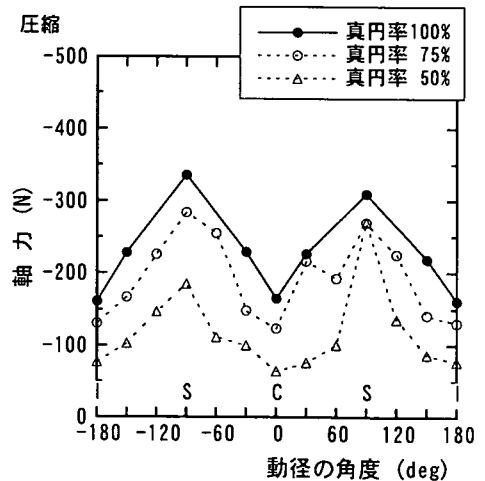


図-6 一様厚さの覆工模型に発生する軸力

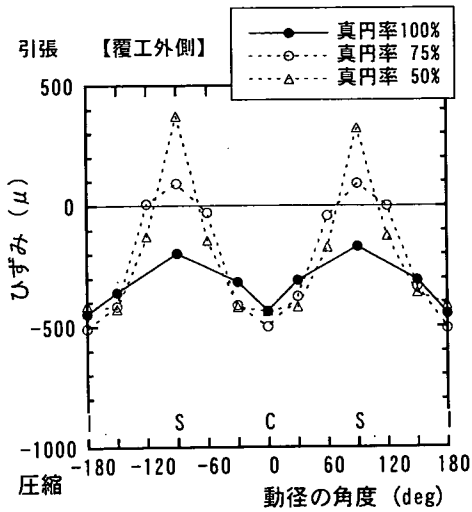


図-7 覆工外側に発生するひずみ

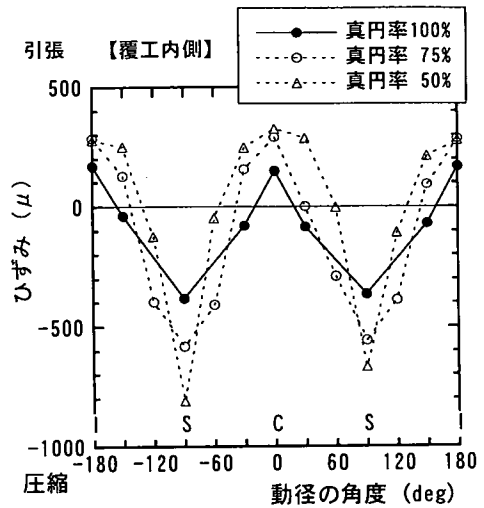


図-8 覆工の内側に発生するひずみ

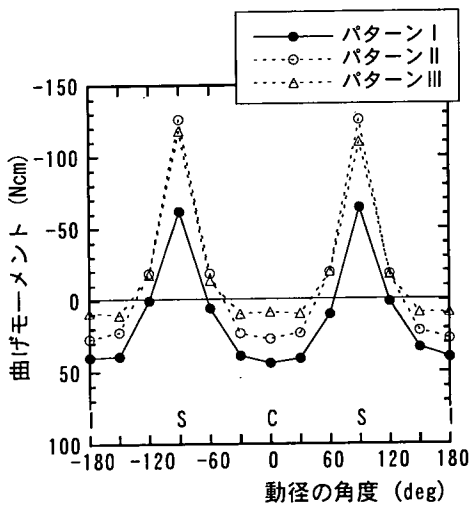


図-9 真円率 50%の楕円覆工模型に発生する曲げモーメント

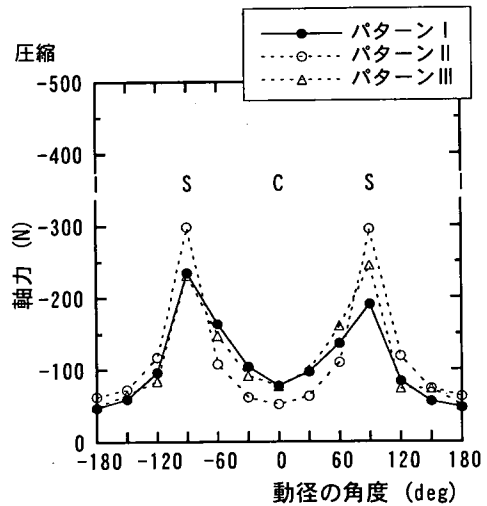


図-10 真円率 50%の楕円覆工模型に発生する軸力

ここで、図中の C, S, I は、それぞれクラウン、スプリングライン、インパートの位置を表す。これらの結果から、円形断面トンネルでは軸力が卓越しているが、扁平な断面になるほど曲げモーメントが卓越しているといえる。また、このため、円形断面では引張ひずみが生じにくい、扁平な楕円形断面では、部分的に引張ひずみが生じやすい構造になっていることが確認できる。

b) 覆工厚パターンの違いによる比較

次に楕円形断面において、同一内空断面で覆工厚パターンが変化した場合における、トンネル覆工の力学挙動の差異を実験結果から検討する。これらの実験結果では

真円率 75%と 50%でほぼ同様の傾向が得られたため、ここでは真円率 50%の場合の結果のみを示す。

真円率 50%の楕円形断面それぞれについて、荷重比 0.5 の場合にパターン I～III の覆工に発生する曲げモーメント、軸力を比較したグラフを図-9, 10 に示す。これらの結果から以下の知見を読みとることができる。

- 1) クラウン、インパート付近で正、スプリングライン付近で負の曲げモーメントが発生している。
- 2) 特にパターン III ではスプリングラインに大きな曲げモーメントが集中し、クラウン、インパートでは曲げモーメントは小さい。

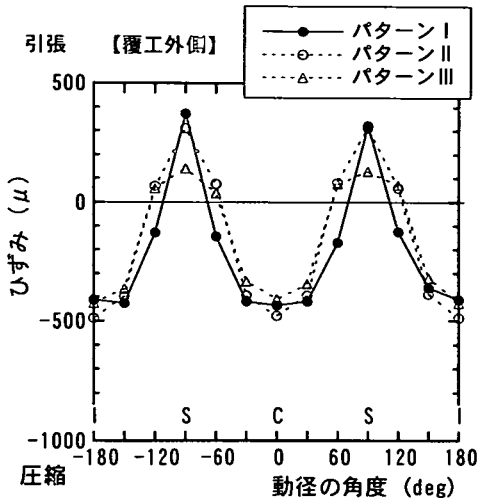


図-11 真円率 50%の楕円覆工外側に発生するひずみ

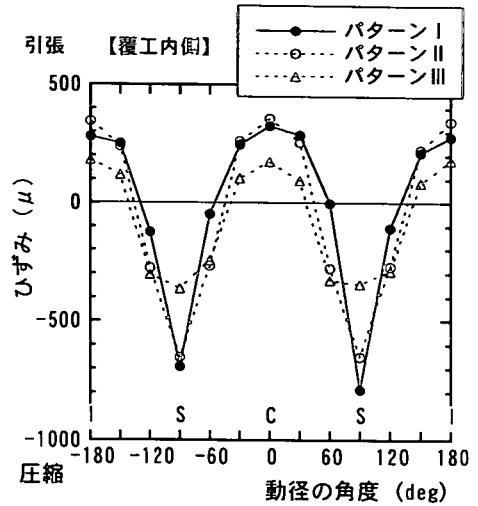


図-12 真円率 50%の楕円覆工の内側に発生するひずみ

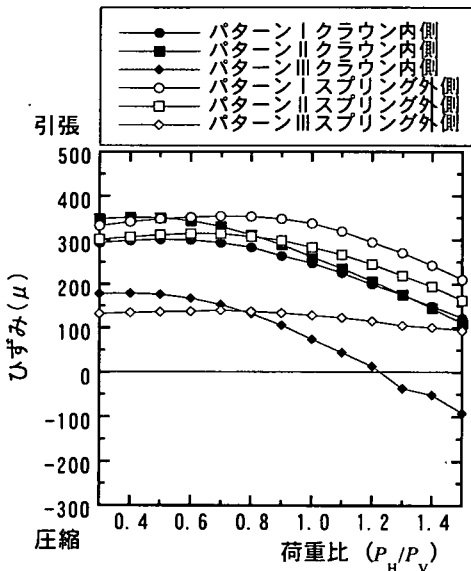


図-13 荷重比と 50%の楕円覆工に発生するひずみ

内側に発生するひずみ分布を比較したグラフを図-11, 12に示す。これらの結果から以下の知見が得られる。

- 1) 全てのパターンにおいて、クラウンとインパート内側、ならびにスプリングライン外側に大きな引張ひずみが発生している。
- 2) スプリングライン、クラウン、インパートのいずれにおいても、パターンⅢの覆工厚パターンが最も引張ひずみの発生を抑えている。
- 3) パターンⅠとパターンⅡのひずみ分布の間には明確な差異がなく、パターンⅡにおいては覆工厚パターンを変化させたことによる効果が認められない。

また、クラウン内側とスプリングライン外側で発生する引張ひずみと荷重比との関係をパターン間で比較した結果を図-13に示す。この図から以下の知見を得る。

- 1) 覆工厚パターンに関わらず全てのパターンにおいて、荷重比が増加すると引張ひずみの発生は小さくなる。
- 2) パターンⅢは最大引張ひずみの発生箇所が荷重比により変化するが、荷重比に関係なく、引張ひずみの発生を最も抑えている。このことから、側方土圧が変化してもパターンⅢの覆工厚パターンが力学的に有利であることがわかる。

以上の実験結果から、楕円形断面においては、その断面形状から部分的に大きな曲げモーメントが発生するため、クラウンとインパートの内側、スプリングライン外側付近で引張ひずみが発生するが、スプリングライン付近を厚くした覆工厚パターンを用いると、引張ひずみの発生を低下させ得ることが明らかになった。

- 3) パターンⅡの曲げモーメント分布では、スプリングラインにおける曲げモーメントは、パターンⅢと同様の傾向が見られるが、クラウンとインパートにおいてはパターンⅠとパターンⅢの中間的な分布を示している。

- 4) パターンⅡでスプリングライン付近の軸力が他のパターンよりもやや大きな傾向にあるが、軸力の分布に関してはパターン間に顕著な差異は認められない。

次に同じく真円率 50%の楕円形断面について、荷重比 0.5 の場合に覆工厚パターンⅠ～Ⅲについて覆工外側と

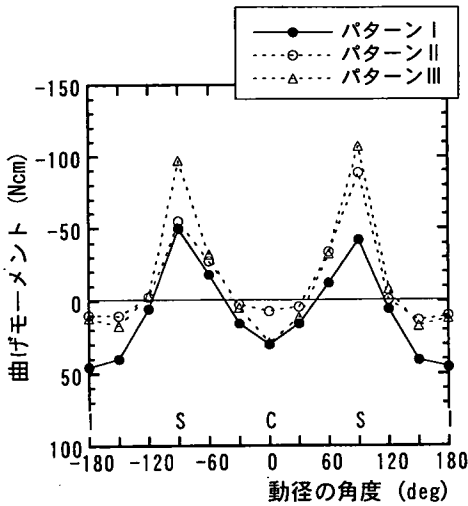


図-14 馬蹄形断面の覆工模型に発生する曲げモーメント

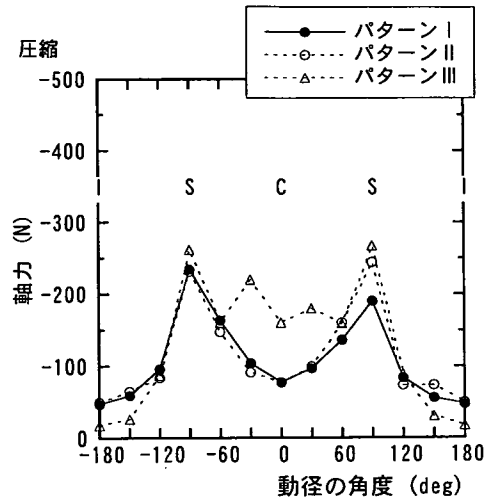


図-15 馬蹄形断面の覆工模型に発生する軸力

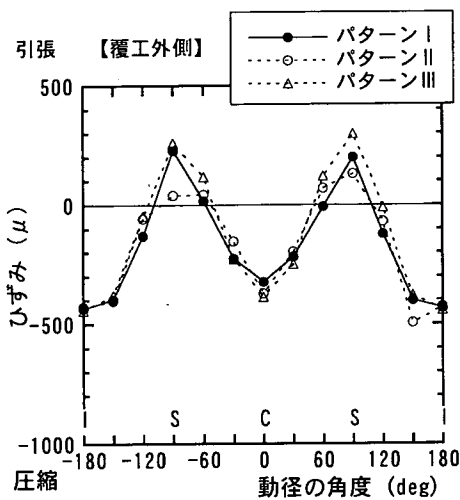


図-16 馬蹄形断面の覆工外側に発生するひずみ

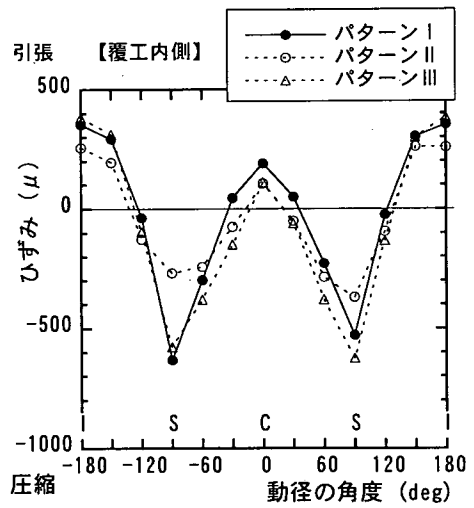


図-17 馬蹄形断面の覆工の内側に発生するひずみ

(2) 馬蹄形断面に関する実験結果と考察

次に、前述の楕円形断面に関する実験結果と同様に、馬蹄形断面トンネルの覆工厚パターンの変化がトンネル覆工の力学挙動に与える効果について検討する。

馬蹄形断面について、荷重比 0.5 の場合に覆工厚パターン I～III に発生する曲げモーメント、軸力分布を比較したグラフを図-14, 15 に示す。これらの図から得られる知見を以下に示す。

1) パターン I の覆工厚一定の一般的な馬蹄形断面では、クラウンと比較してインバートにおける曲げモーメントの発生が大きい。一方、軸力に関してはインバ

ート付近で最も小さな値になっている。

2) パターン III の曲げモーメント分布では、スプリングラインに大きな曲げモーメントが集中し、クラウン、インバートにおいて曲げモーメントの発生が小さい。

3) 軸力の分布において、パターン III では他のパターンに比べ、圧縮応力が大きく、逆にインバートでは圧縮応力の発生が抑えられている。

以上の実験結果から、馬蹄形断面トンネルにおいては、スプリングラインで曲げモーメントが大きくなることに加え、インバート付近の覆工厚さの違いにより、曲げモーメントや軸力の発生状況が異なることがわかる。

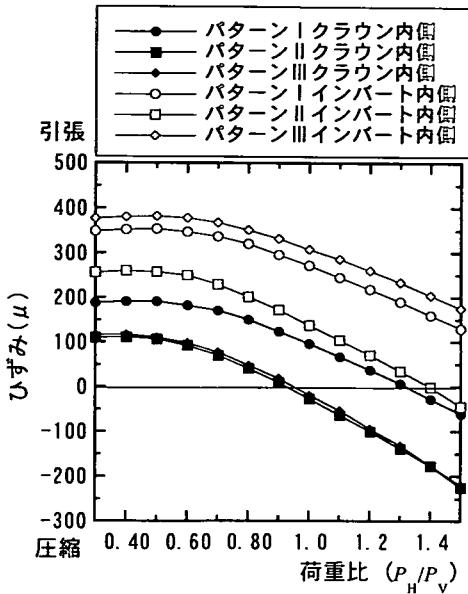


図-18 荷重比と馬蹄形断面の覆工に発生するひずみ
(クラウン、インバート内側)

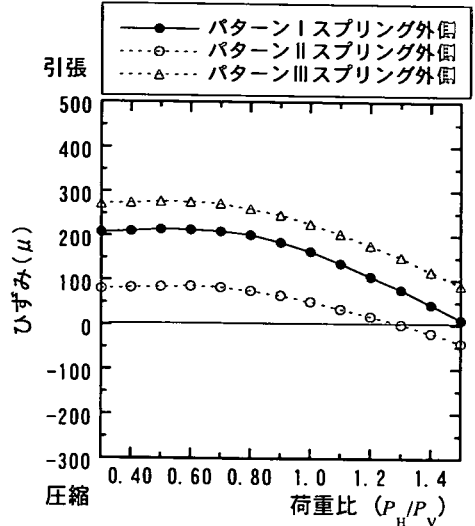


図-19 荷重比と馬蹄形断面の覆工に発生するひずみ
(スプリングライン外側)

次に、荷重比 0.5 の場合に覆工の外側と内側に発生するひずみ分布を覆工厚パターンⅠ～Ⅲの間で比較した結果をそれぞれ図-16, 17 に示す。これらの図から以下の知見が得られる。

- 1) 全てのパターンにおいて、クラウンとインバートの内側、ならびにスプリングライン外側で引張ひずみの発生がみられる。特にインバート内側での引張ひずみが大きい。
- 2) パターンⅠとパターンⅢのひずみ分布には、特に顕著な差異はみられない。したがって、パターンⅢのようにインバートで発生が予測される曲げモーメントに対応するため、この部分の覆工厚を重視したパターンが必ずしも引張ひずみの発生を有効に抑えないといえる。
- 3) パターンⅡの覆工厚パターンでは、クラウン、インバート、スプリングラインいずれにおいても他のパターンより引張ひずみの発生を抑えている。

また、クラウンとインバートの内側、スプリングラインの外側それぞれに発生する引張ひずみと荷重比との関係を図-18, 19 のグラフに示す。これらの図から得られる知見を以下に示す。

- 1) 全てのパターン、位置において荷重比が増加するにしたがって、発生する引張ひずみは小さくなる。
- 2) 全てのパターンにおいて、荷重比に関係なくインバートで最も大きな引張ひずみが発生している。

- 3) 荷重比に関係なく、パターンⅡの覆工厚パターンで発生する引張ひずみが最も小さく抑えられている。このことから、側方土圧が変化しても、パターンⅡの覆工厚パターンが力学的に有利であることは変わらないと考えられる。

これらの実験結果から、馬蹄形断面でも、楕円形断面と同様、スプリングラインを重視することで覆工に発生する引張ひずみの発生を抑えることができ、覆工の力学挙動に有利な効果が得られていることが明らかになった。

4. 簡易計算による検討

前章の実験結果から、楕円形断面、馬蹄形断面いずれにおいてもスプリングラインにおける覆工厚さを大きくすることで、引張ひずみの発生を抑え得ることが明らかになった。

この原因としては、下記の2要因が考えられる。

- 1) 覆工厚を変化させることで、覆工構造自体が引張ひずみを発生しにくい構造を作る効果。
- 2) 覆工の変形モードの相違により、地盤から覆工に作用する土圧分布が変化する効果。

ここでは、この2点に着目し、従来からセグメントの設計に広く用いられてきた慣用設計法を改良した簡易計算法を利用して、実験結果を考察していく。

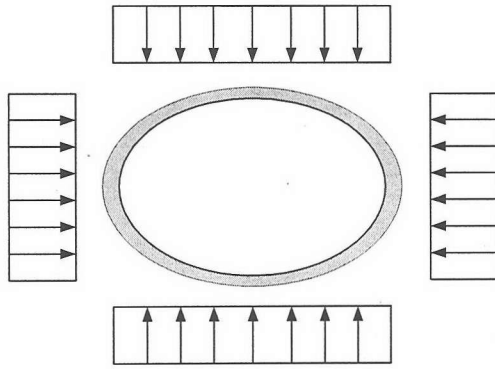


図-20 簡易計算で用いる土圧分布

(1) 簡易計算の概要

セグメント覆工の設計における慣用設計法⁹⁾は、覆工と地盤との相互作用を適切に表現できないことや、リング継手を表現できないなどの問題があるが、簡便で設計事例が多いことから広く用いられてきた。ここでは、セグメントリングを剛性一様リングとして扱って発生する断面力の算定を行う慣用設計法に関し、以下の条件を設定して扁平断面トンネル、さらに覆工厚が変化する形状へと拡張する。

- 1) 慣用設計法では、トンネル側方から作用する水平方向の地盤反力が、覆工の地盤側への変位に伴って発生するとしているが、今回の検討ではこれを考慮しない。
- 2) 側方土圧係数は、模型実験における水平方向と鉛直方向の載荷重の比率 P_H/P_V と等しい値を用いる。
- 3) 模型実験は水平状態で行われており、実験結果との比較を行うため、重力の影響は考慮しない。
- 4) 扁平断面トンネルへの拡張は、動半径 $r(\theta)$ と覆工厚 $d(\theta)$ が中心角 θ に依存して変化するとして算定する。
- 5) トンネル覆工の弾性係数は一定であるが、覆工の断面二次モーメント $I(\theta)$ が動径の角度により、覆工厚パターンに応じて変化するとして、断面力を算定する。

今回の実験では、水平方向からの載荷重が載荷板を介して空気圧シリンダで制御されているため、覆工が水平方向に変形してそれに起因する地盤反力が生じてても、結果として水平方向のシリンダ圧力に反映されるため、ここでは、1) の仮定を採用した。

これらの仮定に従い、扁平断面トンネルに作用する土圧分布を図-20 に示すような単純なモデルとして設定して覆工に発生するひずみを算定し、実験値と比較する。慣用設計法の扁平断面・非一様厚の覆工への拡張による定式化については、末尾に付録として示す。なお、計算で用いたパラメータのうち、覆工の物性に関するものは表-1 の値を、また、形状については図-4 で表される楕円の形状を表す関数形を用い、鉛直土圧 $P_V = 20\text{kPa}$ 、荷重比 $P_H/P_V = 0.5$ で計算を行った。

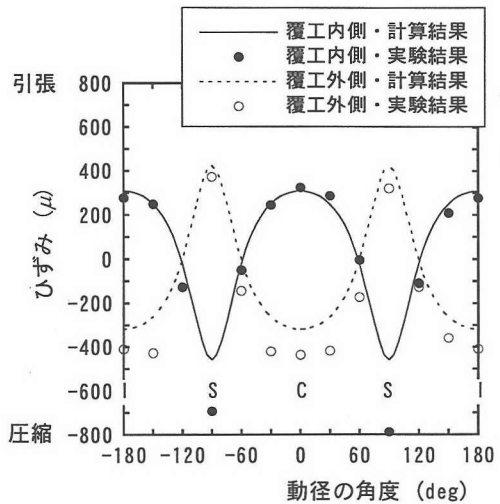


図-21 パターンIの楕円形断面の覆工のひずみ

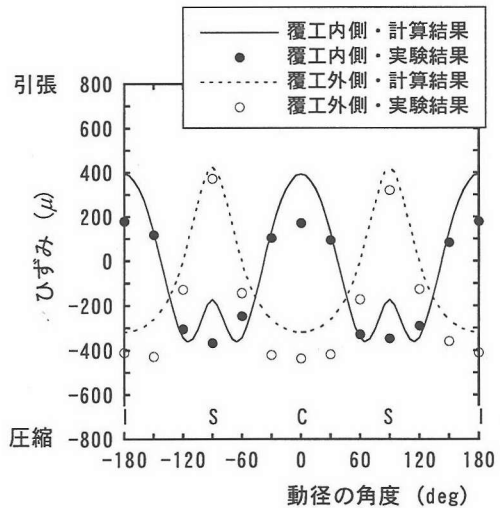


図-22 パターンIIIの楕円形断面の覆工のひずみ

(2) 等分布荷重が作用する場合の計算結果

a) 楕円形断面の場合

紙面の都合上、計算結果のすべてを示すことはできないので、一例として図-21, 22 に真円率 50% のパターン I (一様覆工厚さ) とパターン III (スプリングライン重視) の楕円トンネル覆工に発生するひずみの発生量に関し、計算結果と前述の実験結果を比較したグラフを示す。これらの図から得られる知見を以下に示す。

- 1) 図-21 のパターン I の結果より、覆工内側、外側いずれについても、圧縮ひずみに関しては、計算結果は実験結果より小さくなっているが、全体として計算結果はひずみの発生状況を表現している。特にクラウンとインバート内側、ならびにスプリングライン外側における引張ひずみに関しては、よく一致している。

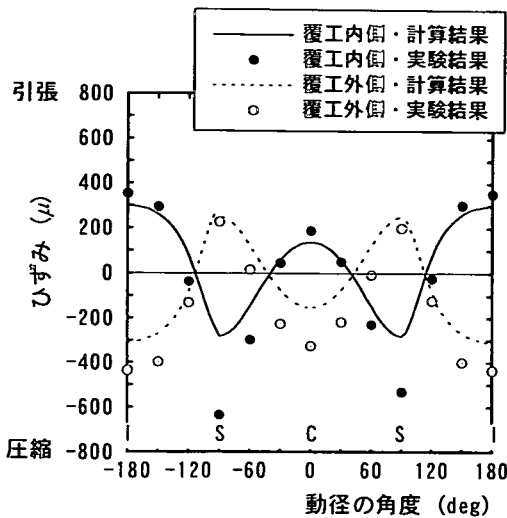


図-23 パターンIの馬蹄形断面の覆工内側ひずみ

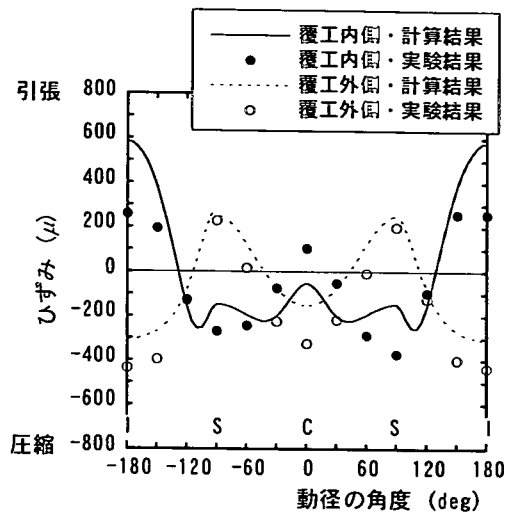


図-24 パターンIIの馬蹄形断面の覆工内側ひずみ

2) 図-22 よりスプリングラインを重視したパターンIIIでは、覆工外側に関しては、パターンIと同様の傾向を示している。これに対し、覆工内側に関しては、計算結果においてクラウン内側やインパート内側における引張ひずみは、パターンIの一樣厚さの場合と同等か、むしろ若干大きな引張ひずみが発生しているが、実験結果ではこの部分における引張ひずみの発生が抑えられている。

b) 馬蹄形断面に関する比較

楕円形の場合と同様に馬蹄形断面のパターンI(一樣覆工厚さ)とパターンII(スプリングライン重視)で、覆工に発生するひずみ分布を比較した結果を図-23, 24 に示す。これらの図から得られる知見を以下に示す。

1) 図-23 のパターンIの結果より、楕円形断面と同様に覆工内側、外側いずれについても、圧縮ひずみに関しては、計算結果は実験結果より小さくなっているが、クラウン内側とインパート内側、ならびにスプリングライン外側における引張ひずみに関しては、比較的よく一致している。

2) 図-24 よりスプリングラインを重視したパターンIIでは、覆工外側に関しては圧縮側で計算結果が実験結果より小さいという傾向はあるが、計算結果と実験結果は比較的よく一致している。これに対し、覆工内側に関しては、計算結果ではインパートにおいてパターンIの一樣厚さの場合よりかなり大きな引張ひずみが発生しているが、実験結果ではこの部分における引張ひずみの発生が抑えられている。クラウンにおける引張ひずみに関しては、計算結果では、引張ひずみの低減が大きく、ひずみが圧縮になるまで改善されているが、実験結果ではそこまでの低減効果が認められない。

これらの結果から明らかなように、模型実験結果では、楕円形断面、馬蹄形断面ともにスプリングラインを大きく重視した覆工厚パターンが最も有効に引張ひずみの発生を抑えているが、等分布荷重を与えた簡易計算結果ではこの効果を十分には表現できていない。このことから、覆工厚パターンにより引張ひずみを低減し得ることの主な原因としては、覆工構造自身の力学特性の改善によるのではなく、覆工の変形に伴う土圧の再配分の影響が大きいと考えられる。すなわち、スプリングラインを重視した覆工厚パターンでは、クラウンとインパート部の覆工厚さが小さいため、覆工の変形が生じ易く、その変形に応じて土圧分布が変化することにより、引張ひずみの発生が他のパターンよりも小さく抑えられた可能性が考えられる。

(3) 土圧分布を考慮した比較

前節で述べたように、覆工構造は地盤内で土圧を受けると変形する。これに伴い地盤内の土圧の再配分が生じ、トンネル覆工に作用する土圧分布も変化する。すなわち、覆工に作用する土圧分布は地盤と覆工の相互作用により決まることになる。そこで、以下では楕円形断面、馬蹄形断面それぞれにおいて、覆工厚パターンと変形モードの関係について考察し、それに応じた土圧分布を仮定して前述の簡易計算を行い、実験結果との比較を行う。

a) 楕円形断面の場合

真円率 50%の楕円形断面トンネルにおいて、覆工部分の断面積一定の条件下で覆工厚パターンの変化が、クラウン、スプリングラインに発生する変位量へ与える影響を図-20 の土圧条件に対し簡易計算で求めた結果を図-25 に示す。

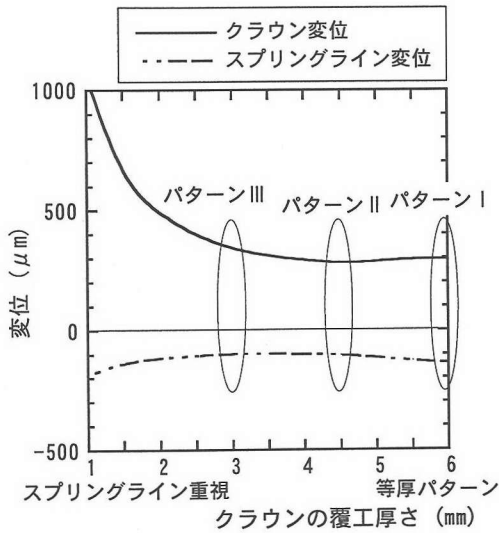


図-25 楕円形断面の覆工厚パターンと覆工の変位

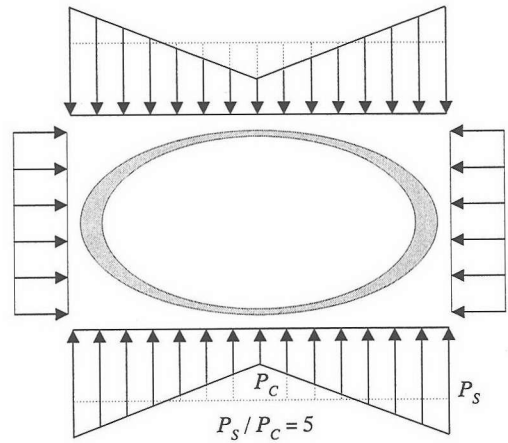


図-26 楕円形断面における覆工の変形に伴う土圧分布の改良

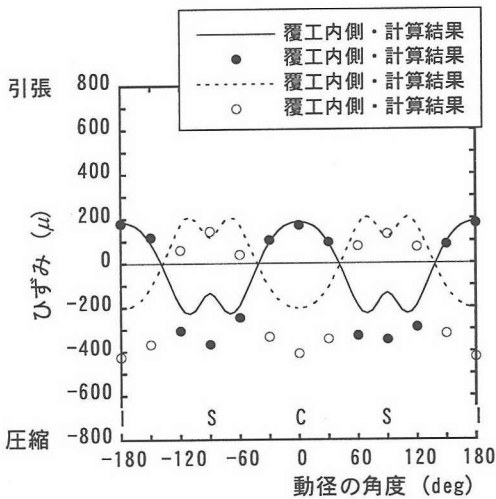


図-27 改良した土圧分布による楕円形断面覆工 (パターンIII) 内側のひずみ

図中の横軸は、クラウンの覆工厚さ(mm)で、右端の一樣厚さの6mmから左に行くに従い、スプリングライン重視のパターンになっている。

この図より、楕円形断面では、スプリングラインにおける変位は覆工厚パターンが変化しても大きな差異が発生しないことがわかる。一方、クラウンに発生する変位は、覆工厚がスプリングラインを重視したパターンへと変化するにしたがって、増大していることがわかる。

トンネルの掘削現象を模擬した木村らの降下床実験によると、地盤を支える床の一部を降下させるとこれに作用する土圧が軽減され、その分土圧は両側の側方の床に

再配分されるという結果が確認されている⁶⁾。このことから、今回の実験においては、上述の変形モードの発生に伴いクラウンとインバートにおける覆工内側方向への変形により中央部の土圧が軽減し、減少分が両側へ配分され、中央部がくびれたような土圧分布形状が発生するという仮定のもと、図-26のような土圧分布を与えて覆工に発生するひずみを簡易計算で計算した。ただし、ここでは、土圧の全合力が一定という条件のもと、覆工の中央部と端部の土圧の比を変化させ、クラウン部でのひずみが実験値と計算値で合うように土圧分布を設定した。これによる計算結果と実験値との比較を図-27に示す。

これらの図から、土圧分布の変化を考慮することにより、覆工厚パターンIIIの形状が引張ひずみを抑えている効果を表現し得ることがわかる。

b) 馬蹄形断面の場合

馬蹄形断面ではクラウンとインバートで断面形状が異なるため、クラウン、スプリングラインに加え、インバートでの変位を検討する。馬蹄形断面トンネルにおいて、覆工部分の断面積一定の条件下での覆工厚パターンの変化が、クラウン、スプリングライン、インバートに発生する変位量へ与える影響を図-28のグラフに示す。

この図から、スプリングラインとクラウンにおける変位量は、覆工厚パターンが変化しても大きな差異は認められないことがわかる。一方、インバートにおける変位量は覆工厚パターンがスプリングラインを重視した形状へと変化するにしたがって増大していることがわかる。

したがって、馬蹄形断面では覆工厚パターンがスプリングラインを重視した形状になると、特にインバート付近で覆工の変形に伴った土圧の再配分が起こると考えられる。

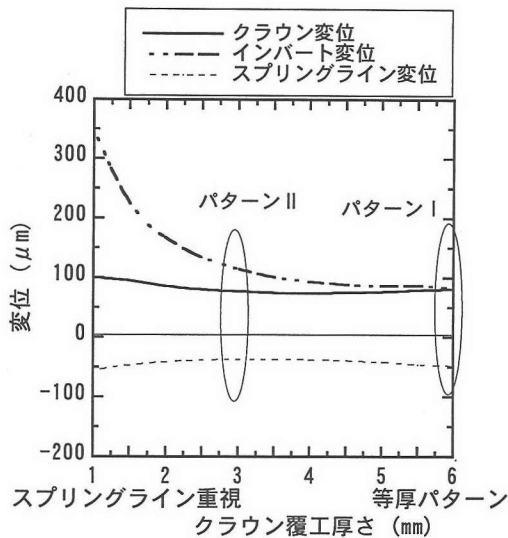


図-28 馬蹄形断面の覆工厚パターンと覆工の変位

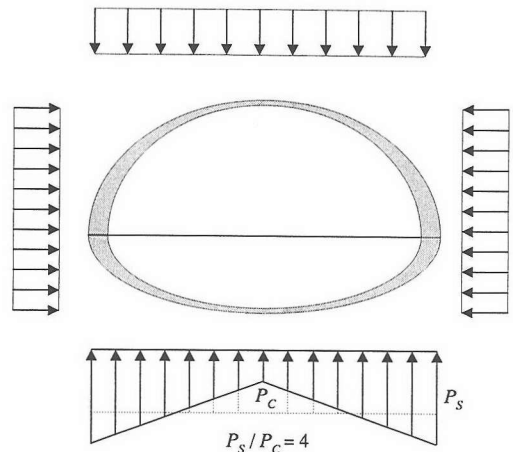


図-29 馬蹄形断面における覆工の変形に伴う土圧分布の改良

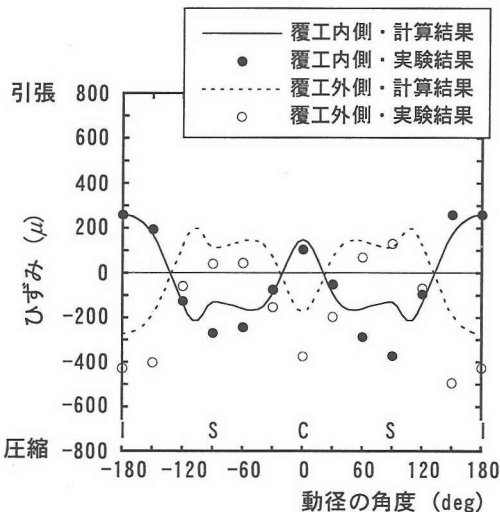


図-30 改良した土圧分布による馬蹄形断面覆工 (パターンII) 内側のひずみ

この変形モードの相違を考慮し、覆工厚パターンIIについて、インバート部のトンネル内方への変形により中央部の土圧が軽減し、減少分がインバート部の両側へ配分されて中央部がくびれたような土圧分布形状が発生すると仮定し、楕円形の場合と同様の考え方で、図-29のようにインバートの中央部と端部の土圧の比を変化させた土圧分布を与えて簡易計算を行った。この計算の結果と実験値との比較を図-30に示す。

これらの図から、覆工の変形に伴う影響を考慮した土圧分布を与えると、覆工厚パターンIIの形状が引張ひずみを抑えている効果を表現し得ることがわかる。

以上、楕円形断面、馬蹄形断面でスプリングラインを重視した覆工厚パターンについて、覆工の変形を考慮した土圧分布を想定してひずみ分布を計算すると、模型実験で観察された引張ひずみの低減をうまく表現し得ることがわかった。すなわち、覆工厚さを非一様としてスプリングラインを重視した形状を用いると、覆工の変形に伴い地盤から覆工に作用する土圧の再配分が起り、これが引張ひずみの低減に寄与するという考え方の妥当性が確認できたと考えている。

5. まとめ

本研究では、扁平断面トンネルをシールド工法で構築する場合を想定し、セグメント覆工の厚さを部分的に変化させることにより力学的に安定な構造を作ることの可能性を模型実験により調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 一様な覆工厚さを有する円形断面模型と楕円形断面模型の実験結果を比べると、円形断面トンネルでは軸力が支配的となって土圧を支えているが、扁平な断面になるほど曲げモーメントが卓越してきて、これで覆工を支えているといえる。また、このため、円形断面では引張ひずみが生じにくい、扁平な楕円形断面では部分的に引張ひずみが生じ易い構造になっていることが確認された。

- 2) 同一断面形状に関し、覆工厚さのパターンを変えた覆工模型を用いて実験を行ったところ、楕円形断面、馬蹄形断面いずれにおいてもスプリングラインを重視した覆工厚パターンを採用することにより、覆工部分の断面積を増加させることなく引張ひずみの発生を効果的に抑え得ることが明らかになった。

さらに、覆工厚パターンを非一様とすることで引張ひずみの発生を低減することのできる理由を考察するために、従来よりセグメント覆工の設計に利用されていた慣用設計法を扁平断面・非一様覆工厚さに拡張した計算手法を用いて考察した。この結果、以下のことが明らかになった。

- 3) 覆工厚パターンにより引張ひずみを低減し得ることの原因として、覆工構造自体の力学特性に起因するところは大きくない。
- 4) 覆工厚パターンの違いにより覆工構造の変形モードに違いが生じ、これに伴い地盤から覆工に作用する土圧の再配分が起こる。このため、覆工厚パターンにより地盤から覆工に作用する土圧分布が変わり、これがひずみの発生状況に影響を与える。このことは、覆工の変位に応じた土圧分布を仮定して覆工のひずみを簡易計算で計算すると、実験結果をうまく表現し得ることから妥当な考え方と思われる。

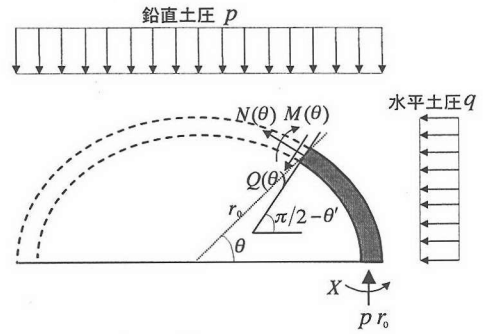
扁平シールドトンネルにおける最適な覆工土圧パターンについては、今回の実験と平行して別途数値計算を実施し、同様の結果を得ている⁷⁾。今後は、これらの結果をも踏まえて、扁平断面シールド工法における覆工構造の最適化技術の実用化を目指したい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、模型実験の進め方について近畿大学の久武勝保先生から多くの助言を得た。記して謝意を表す。

付録 扁平断面・非一様厚覆工の簡易計算手法

シールド工法におけるセグメント覆工の慣用設計法の考え方を扁平断面・非一様厚さの覆工に拡張する。いま、前述の図-20に示した荷重が覆工に発生する場合、この覆工に作用する断面力（曲げモーメント $M(\theta)$ 、軸力 $N(\theta)$ 、せん断力 $Q(\theta)$ ）を、付図-1で定義することとする。このとき、覆工に発生するひずみ $\varepsilon(\theta)$ 、覆工の変位 δ は、以下の考え方で導出することができる。

動径 0 度をスプリングラインとして、付図-1 からつり合い式を考える。 $r(\theta)$ は楕円の動径であり、式(1)で表される。



付図-1 簡易計算における断面力の定義

$$r(\theta) = mr_0 \sqrt{\frac{1}{m^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

ここで、 m は楕円の真円率、 r_0 は楕円の長軸の長さである。馬蹄形断面の場合には、上半面と下半面で異なる楕円形の関数を組み合わせることにより、覆工形状を表現することができる。 m と r_0 は覆工の内面と外面で異なり、覆工厚パターンに応じて設定する。また、付図-1中の θ' は扁平断面の接線の角度を表し、以下の式で与えられる。

$$\theta' = \text{Arc tan}\left(\frac{m^2}{\tan^2 \theta}\right) \quad (2)$$

覆工構造は不静定構造物となっているため、動径 0 度のスプリングラインにおける曲げモーメントを不静定力 X として扱う。以下につり合い式を示す。このとき、モーメントの釣り合いは式(3)で、力の釣り合いは式(4)、(5)で表される。

$$M(\theta) = X + pr_0(r_0 - r(\theta)\cos\theta) - \frac{p(r_0 - r(\theta)\cos\theta)^2}{2} - \frac{qr(\theta)^2 \sin^2 \theta}{2} \quad (3)$$

$$\text{鉛直 } N(\theta)\sin\theta' + Q\cos\theta' = pr_0 - p(r_0 - r(\theta)\cos\theta) \quad (4)$$

$$\text{水平 } N(\theta)\cos\theta' - Q(\theta)\sin\theta' = qr(\theta)\sin\theta \quad (5)$$

また、ひずみエネルギー U は、式(6)で表される。

$$U = \int \frac{M(\theta)^2}{2EI(\theta)} r(\theta) d\theta + \int \frac{N(\theta)^2}{EA(\theta)} r(\theta) d\theta \quad (6)$$

ここで、 E は部材の弾性係数、 $I(\theta)$ は断面二次モーメント、 $A(\theta)$ は断面積である。本論文では、覆工厚パターンを変化させているので、断面二次モーメント、断面積は θ の関数として取り扱っている。最小仕事の原理より、

$$\frac{dU}{dX} = 0 \quad (7)$$

であり、上式から不静定力 X が式(8)の様に来る。

$$X = \frac{p \int \frac{r(\theta)^3 \cos^2 \theta}{I(\theta)} d\theta + q \int \frac{r(\theta)^3 \sin^2 \theta}{I(\theta)} d\theta}{2 \int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} \quad (8)$$

これを式(3)に代入し、また、式(4)、(5)のつり合い式からトンネル覆工に発生する断面力が以下の様に来る。

$$M(\theta) = \frac{p\beta + q\gamma}{2\alpha} - \frac{r(\theta)^2}{2} (p \cos^2 \theta + q \sin^2 \theta) \quad (9)$$

$$N(\theta) = r(\theta)(p \cos \theta \sin \theta' + q \sin \theta \cos \theta') \quad (10)$$

$$Q(\theta) = r(\theta)(p \cos \theta \cos \theta' - q \sin \theta \sin \theta') \quad (11)$$

トンネル覆工に発生するひずみ分布は曲げモーメントと軸力を受ける真直はりとして、以下に示す式(12)、(13)に式(9)、(10)で得られた曲げモーメント、軸力を代入して求める。なお、せん断力の影響は小さいものとして、ここでは考慮しない。

$$\text{覆工の外側ひずみ } \varepsilon_{\text{外}} = \frac{N(\theta)}{EA(\theta)} + \frac{M(\theta)}{EI(\theta)} \times \frac{d(\theta)}{2} \quad (12)$$

$$\text{覆工の内側ひずみ } \varepsilon_{\text{内}} = \frac{N(\theta)}{EA(\theta)} - \frac{M(\theta)}{EI(\theta)} \times \frac{d(\theta)}{2} \quad (13)$$

ただし、 $d(\theta)$ は動径角度 θ におけるトンネル覆工の厚さを示す。

(2) 内空変位

次に、トンネル覆工に発生する内空変位を仮想仕事の原理を適用することで求める。なお、内空変位を求めるにあたり、軸力、せん断力が変位の大きさに与える影響は小さいものとして、ここでは考慮しないこととする。

図-20 に示すように、トンネル覆工に土圧分布が与えられた系(以下、実系とよぶ)と、トンネル覆工クラウンに鉛直方向の単位仮想荷重 $\bar{p} = 1$ が与えられた系(仮想系とよぶ)を考える。これらの系の間、以下に示す仮想仕事の原理が成り立つ。

$$1 \times \delta_c = \int \frac{M(\theta) \bar{M}(\theta)}{EI(\theta)} r(\theta) d\theta \quad (14)$$

ここで、 δ_c は実系におけるトンネル覆工クラウンの内空変位を表す。仮想系において、覆工に発生する曲げモーメント $\bar{M}(\theta)$ は式(15)で求められる。

$$\bar{M}(\theta) = \frac{\int \frac{r(\theta)^2 \cos \theta d\theta}{I(\theta)}}{\int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} - \frac{1}{2} r(\theta) \cos \theta \quad (15)$$

これに加え、既に式(9)で求めた実系のモーメント $M(\theta)$ を式(15)に代入することにより、式(14)に示すトンネル覆工クラウンにおける変位が求められる。

$$\delta_c = \frac{p}{2E} \left(\frac{\int \frac{r(\theta)^3 \cos^2 \theta}{I(\theta)} d\theta \times \int \frac{r(\theta)^2 \cos \theta}{I(\theta)} d\theta}{\int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} + \int \frac{r(\theta)^4 \cos^3 \theta}{I(\theta)} d\theta \right) + \frac{q}{2E} \left(\frac{\int \frac{r(\theta)^3 \sin^2 \theta}{I(\theta)} d\theta \times \int \frac{r(\theta)^2 \sin \theta}{I(\theta)} d\theta}{\int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} + \int \frac{r(\theta)^4 \sin^2 \theta \cos \theta}{I(\theta)} d\theta \right) \quad (16)$$

トンネル覆工スプリングラインにおける変位については、スプリングラインに単位仮想荷重 $\bar{p} = 1$ を与えた系を仮想系として上記と同様の計算を行えば、式(17)に示す変位 δ_s が求められる。

$$\delta_s = \frac{p}{2E} \left(\frac{\int \frac{r(\theta)^3 \cos^2 \theta}{I(\theta)} \times \int \frac{r(\theta)^2 \sin \theta}{I(\theta)} d\theta}{\int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} - \int \frac{r(\theta)^4 \cos^2 \theta \sin \theta}{I(\theta)} d\theta \right) + \frac{q}{2E} \left(\frac{\int \frac{r(\theta)^3 \sin^2 \theta}{I(\theta)} d\theta \times \int \frac{r(\theta)^2 \sin \theta}{I(\theta)} d\theta}{\int \frac{r(\theta)}{I(\theta)} d\theta} - \int \frac{r(\theta)^4 \sin^3 \theta}{I(\theta)} d\theta \right) \quad (17)$$

参考文献

- 1) 小泉 淳, 田中 学, 春名 晃宏, 小林 正典: 非円形断面形状を有するシールドトンネルの耐荷機構に関する実験的研究: 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp.204-205, 1999.
- 2) 小泉 淳, 大西 元, 花房 幸司, 小林 正典: 異形断面トンネルの合理的設計法に関する実験的研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp.208-209, 1996.
- 3) 小泉 淳, 高本 仁, 花房 幸司, 小林 正典: 異形断面を有するシールドトンネルの設計法に関する模型実験, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp.306-307, 1996.

- 4) 曹 大明, 西村 和夫, 今田 徹: 大断面・扁平トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp.252-253, 1993.
- 5) 土木学会: トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説, p31-116, 1996.
- 6) 足立紀尚, 木村亮, 岸田潔, 伊藤浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.277-296, 2001
- 7) Narentorn Yingyongrattanakul, 足立紀尚, 建山和由: 有限要素法によるトンネル覆工の最適断面形状に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, III-B073, 2001.

(2002. 5. 16 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SEGMENTAL LINING IN FLAT SECTIONAL SHIELD TUNNELING METHOD

Kazuyoshi TATEYAMA, Minoru KURAHASHI, Yingyongrattanakul NARENTORN,
Takao YANO and Toshihisa ADACHI

Segmental lining of flat sectional shield tunnel was discussed through the model experiment. In the experiment, the thickness of the model lining is partially changed to support the momentum, which is remarkably induced at the crown, invert and spring line of the flat sectional tunnel. The knowledge has been obtained that employment of the lining whose thickness is partially varied can reduce the tension strain, and its reason was studied through the calculation based on the conventional designing method of the segmental lining.