

## シールドトンネルの新しい切り拡げ方法とその設計方法

## ENLARGEMENT OF SEGMENTED LINING TUNNEL AND ITS DESIGN CRITERIA

山本 稔\*・竹内幹雄\*\*・吉川 董\*\*\*・江上久来\*\*\*\*

By Minoru YAMAMOTO, Mikio TAKEUCHI, Tadasu YOSHIKAWA and Hisaki EGAMI

In case of construction of an additional structure outside of the tunnel, enlargement from the inside would be more economical and time-saving comparing with conventional cut and cover method.

This paper presents how to enlarge the segmented lining tunnel under soft ground of water-bearing soil by application of slurry shield tunneling technique, and how to design enlarged structure of the tunnel.

Furthermore the design problems are clarified through prototype experiment to build composite structure with primary segmental lining which is already affected by stress prior to placing secondary lining.

## 1. ま え が き

送電・通信用トンネルや鉄道トンネルには、ケーブルの接続用スペース、排水施設および換気孔など部分的に一般路線部より広い空間が必要な場合がある。シールドトンネルにおいてこのような広い空間を築造する場合、一般には開削工法によって施工されている。

しかし、近年都市においては次の理由等により内部からトンネルを切り拡げる例が増えている。

- ① トンネルの深部化に伴い、開削工法よりも内部から切り拡げる方が経済的である。
- ② 道路交通事情の悪化等によって、開削工法に必要な工事用地の確保が難しい。

従来、内部からトンネルを切り拡げる場合にはカンザシ桁圧入工法、パイプーフ工法、山岳トンネル式工法等が用いられているが<sup>1)</sup>、これらの方法はいずれも切羽を開放して掘削するため、崩壊性地盤や高水圧下の地盤では沈下、崩壊、陥没等多数の問題がある。

本文は、切羽を密閉することによってこれらの問題点を解決できるトンネルの新しい切り拡げ方法ならびに、この方法によって切り拡げるトンネルの設計方法を述べ、加えて設計上の問題点を実験によって解明した結果を報告するものである。

## 2. シールドトンネルの新しい切り拡げ方法

崩壊性地盤や高水圧下の地盤において切羽を密閉して切り拡げを行うには、泥水シールド工法や土圧系シールド工法等の技術を応用することができる。ここでは、すでに地下切り拡げに関する施工実験<sup>2)</sup>によって、施工の可能性を確認した泥水工法を用いる。また、切り拡げの形状と時期には種々の場合が考えられる。たとえば、形状に関しては左右・上下に局部的に切り拡げるもの、時期に関しては新設または既設トンネルに適用するもの等いろいろ組合せがあるが、ここでは、左右に等しく切り拡げる新設トンネルの場合を対象とし、以下に図-1に従い切り拡げの手順を施工実験<sup>2)</sup>の結果に基づいて述べる。

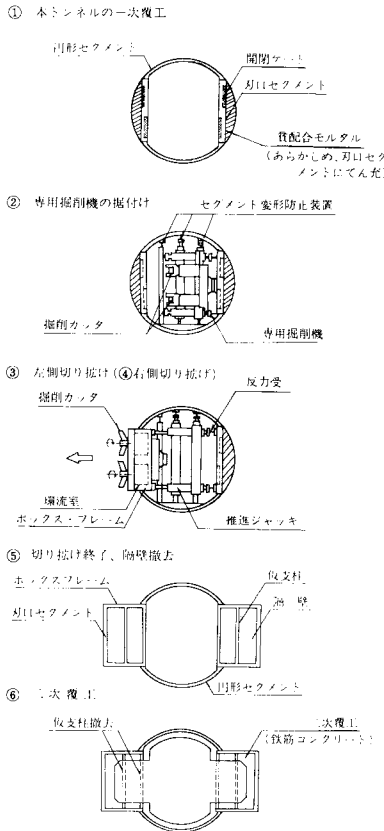
① 本トンネルの一次覆工 本トンネルの一次覆工時に図-2のような特殊セグメント（以下、刃口セグメントという）を、一次覆工材として切り拡げる箇所所定のリング数だけ組み込む。刃口セグメントは円形セグ

\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢 2-1-1)

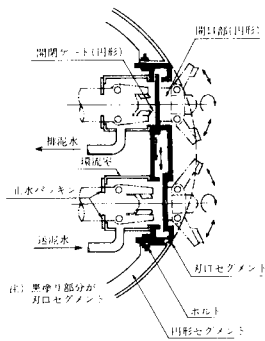
\*\* 正会員 工修 (株)奥村組土木設計部  
(〒107 港区元赤坂 1-3-10)

\*\*\* 正会員 (株)奥村組土木設計部 (同上)

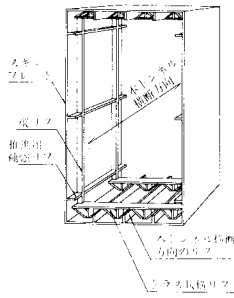
\*\*\*\* 正会員 (株)奥村組土木設計部 (同上)



図一 切り抜げの施工順序図



図二 刃口セグメント<sup>2)</sup>



図三 ボックスフレームの構造

メントにボルトで締め付けておく。刃口セグメントのスキンプレートには、掘削カッタを挿入できるように開閉ゲート付きの開口部を設けておき、掘削時以外は開閉ゲートを閉じて水密性を保持する。

② 専用掘削機の据付け

③, ④ 左右の切り抜げ 図-3 に示す鋼製の箱(以下、ボックスフレームという)を刃口セグメントに接続するとともに、刃口セグメントの開口部に環流室を取り

付け、掘削カッタを環流室に挿入する。次に、環流室に泥水を満たし泥水圧を切羽の土圧および水圧とつり合わせた後、開閉ゲートを開き掘削カッタを切羽まで挿入する。その後、刃口セグメントと円形セグメントを締め付けているボルトを外し、掘削カッタによって地山を掘削しながら刃口セグメントとボックスフレームを圧入する。圧入が完了すれば掘削カッタを引き抜き、刃口セグメントの開閉ゲートを閉じて切羽を閉塞する。

以上の手順を本トンネル軸方向に沿って繰り返す。

⑤ 隔壁の撤去 本トンネル軸方向に沿って所定の長さの圧入を完了したとき、切り抜げ部はボックスフレームの側部のプレート(以下、隔壁という)によって小さな部屋に区切られた状態である。したがって、ボックスフレームの本トンネル横断方向のリップの耐力を考慮し、適当な間隔に仮支柱となる部分を残して隔壁を撤去する。

⑥ 二次覆工 最後に、二次覆工の設計に従って鉄筋を組み立て、コンクリートを打設する。コンクリートが所定の強度に達した後、仮支柱を撤去すれば切り抜げトンネルが完成する。

なお、以上の方法を応用すれば新設、既設トンネルにかかわらず、任意の方向に切り抜げることができる。

3. 切り抜げトンネルの設計方法

設計例として、図-4 に示すような地下水位が高い砂地盤において外径6mのシールドトンネルを切り抜げる場合を対象に設計方法を述べる。なお、切り抜げはトンネル軸方向に長く行う場合を想定している。

(1) 一次覆工時におけるトンネル覆工材の設計方法

ここに述べる切り抜げ方法では、常に外荷重を受けた状態で図-1 に示すように一次覆工の構造系が変化する。したがって、一次覆工材の設計にあたっては各施工段階での構造系に応じて検討しなければならない。切り抜げ前、切り抜げ時および隔壁撤去時の構造系に応じた主たる計算モデルを、荷重の種類、材料の許容応力度と

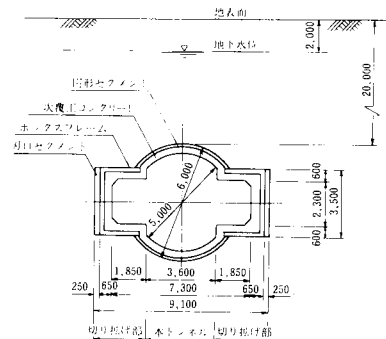


図-4 切り抜げたトンネルの形状

表一 各施工段階における主たる計算モデル、荷重の種類および材料の許容応力度

① 計算モデル		② 荷重の種類	③ 土圧を算定するときのゆるみ高さ	④ 材料の許容応力度 [トンネル標準方式(シールド編)に準拠]																									
切り抜け前	<p>鉛直土圧・水圧 水平土圧・水圧 鉛直地盤反力・水圧</p> <p>1. 部材の構成 A-B   円形セグメント A-A'   リント A-A'   刃口セグメント B-B'   リント</p> <p>2. パネは地山方向の変位に対してのみ働く。</p> <p>図 (a)</p>	鉛直土圧 水平土圧 自重 鉛直地盤反力 土載荷重の影響 その他	<p><math>45^\circ + \phi/2</math> <math>45^\circ + \phi/2</math></p> <p><math>h</math>: ゆるみ高さ <math>\phi</math>: 土の内部厚縁角</p>	<p>長期荷重に対する許容応力度</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼材の種類</th> <th>引張り</th> <th>圧縮</th> <th>曲げ</th> <th>せん断</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S S 41</td> <td>1,400</td> <td>1,400</td> <td>1,400</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>S M 41</td> <td>1,400</td> <td>1,400</td> <td>1,400</td> <td>800</td> </tr> <tr> <td>S S 50</td> <td>1,700</td> <td>1,700</td> <td>1,700</td> <td>1,000</td> </tr> <tr> <td>S M 50</td> <td>1,900</td> <td>1,900</td> <td>1,900</td> <td>1,100</td> </tr> </tbody> </table> <p>(<math>1 \text{ kg/cm}^2 = 98.0665 \text{ kPa}</math>)</p>	鋼材の種類	引張り	圧縮	曲げ	せん断	S S 41	1,400	1,400	1,400	800	S M 41	1,400	1,400	1,400	800	S S 50	1,700	1,700	1,700	1,000	S M 50	1,900	1,900	1,900	1,100
	鋼材の種類	引張り	圧縮	曲げ	せん断																								
	S S 41	1,400	1,400	1,400	800																								
S M 41	1,400	1,400	1,400	800																									
S S 50	1,700	1,700	1,700	1,000																									
S M 50	1,900	1,900	1,900	1,100																									
切り抜け時	<p>鉛直土圧・水圧 水平土圧・水圧 鉛直地盤反力・水圧</p> <p>1. 部材の構成 A-B   円形セグメント A-A'   リント A-A'   刃口セグメント B-B'   リント</p> <p>2. Pは推進反力</p> <p>3. <math>\Delta</math>印は切り抜け機械の台車に装備したセグメント変形防止装置を表す。</p> <p>図 (b)</p>	鉛直土圧・水圧 水平土圧・水圧 自重 鉛直地盤反力 土載荷重の影響 推進反力 その他	<p>片側切り抜けのとき</p> <p><math>45^\circ + \phi/2</math> <math>45^\circ + \phi/2</math></p> <p>両側切り抜けのとき</p> <p><math>45^\circ + \phi/2</math> <math>45^\circ + \phi/2</math></p>	<p>時荷重に対する許容応力度</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼材の種類</th> <th>許容応力度 (<math>\text{kg/cm}^2</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S S 41</td> <td>2,300</td> </tr> <tr> <td>S M 41</td> <td>2,300</td> </tr> <tr> <td>S S 50</td> <td>2,800</td> </tr> <tr> <td>S M 50</td> <td>3,100</td> </tr> </tbody> </table> <p>注) 切り抜け時における円形セグメントと刃口セグメントの検討に対して適用。</p>	鋼材の種類	許容応力度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	S S 41	2,300	S M 41	2,300	S S 50	2,800	S M 50	3,100															
	鋼材の種類	許容応力度 ( $\text{kg/cm}^2$ )																											
S S 41	2,300																												
S M 41	2,300																												
S S 50	2,800																												
S M 50	3,100																												
隔壁撤去時	<p>鉛直土圧・水圧 水平土圧・水圧 鉛直地盤反力・水圧</p> <p>1. 部材の構成 A-A', F-F'   刃口セグメント B-B', C-C'   板支柱 D-D', E-E'   板支柱 A-B-C, A-A'-B-C   ボックス D-E-F, D-E-F'   フレーム C-D, C'-D'   円形セグメント</p> <p>図 (d)</p>	鉛直土圧 水平土圧 自重 鉛直地盤反力 土載荷重の影響 その他	<p><math>45^\circ + \phi/2</math> <math>45^\circ + \phi/2</math></p>																										

ともに表一に示す。

a) 切り抜け前

切り抜け前のトンネルの構造は、本トンネル横断面の二次元モデルとして表一の図 (a) のようになる。荷重条件および地盤のばね定数は従来のシールドトンネルの設計方法<sup>3),4)</sup>に従って設定する。

b) 切り抜け時

切り抜け時では、トンネルの覆工は構造計算上その一部が欠損した状態になる。また、土圧や水圧などの外荷重に加えて切り抜けの推進反力が作用する。したがって、構造系を安定させるとともに過大な変形が生じないように、切り抜けにあたっては変形防止装置で円形セグメントを支持する。このような対策によって切り抜けときのトンネルの構造は、円形セグメントを支持する前の状態と支持したときの状態を対象とし、それぞれトンネル横断面の二次元モデルとして表一の図 (b) に示す (i) と (ii) のようになる。円形セグメントと刃口セグメントに生じている断面力は、(i) と (ii) のモデルで求めた断面力を重ね合わせるによって得られる。

一方、ボックスフレームは表一の図 (c) のように本トンネル軸方向断面の二次元モデルとして計算する。

切り抜けたときの土圧の算定にあたっては、設計の安全性を考慮して、小さく区切って切り抜け部分を含む

全断面が一時に掘削されたものとしてゆるみ範囲を設定する (表一③欄参照)。

c) 隔壁撤去時

隔壁を撤去したときの切り抜け部の形状を図一5に示す。このような形状が本トンネル軸方向に連続している切り抜けトンネルの構造は、本トンネル横断面方向の二次元モデルとして表一の図 (d) のようになる。

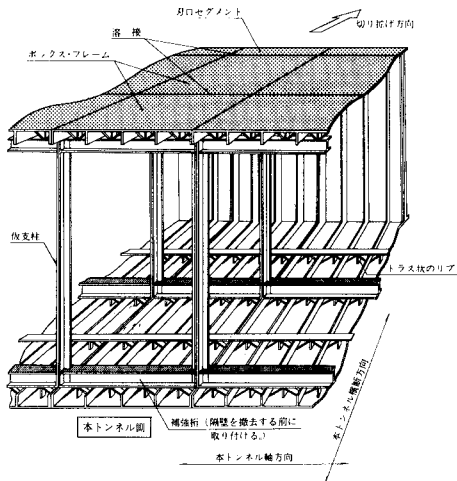
以上のような計算モデルと荷重条件によって、各施工段階における一次覆工材の断面力が計算できる。例として隔壁撤去時の荷重図と断面力図を図一6に示す。

一次覆工材はスキンプレートとリブで構成されているので、シールドトンネルのセグメントと同様にして部材の応力を計算することができる。

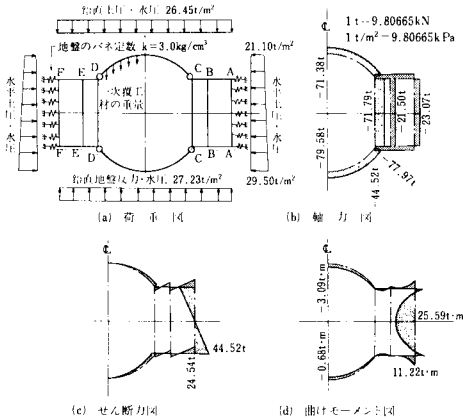
なお、図一5に示すトラス状のリブは、切り抜け時のボックスフレームを本トンネル軸方向断面で設計する際に必要なものであり、二次覆工材として打設するコンクリートの充てん性をよくするためにこのような特殊な形状としている。このトラス状のリブは切り抜けトンネルの完成時には、一次覆工材と鉄筋コンクリートの二次覆工材とのずれ止めとして利用する。

(2) 完成時におけるトンネル覆工材の設計方法

完成時においては、一次覆工材のリブが鉄筋コンクリートの二次覆工材に埋め込まれているので、一次覆工



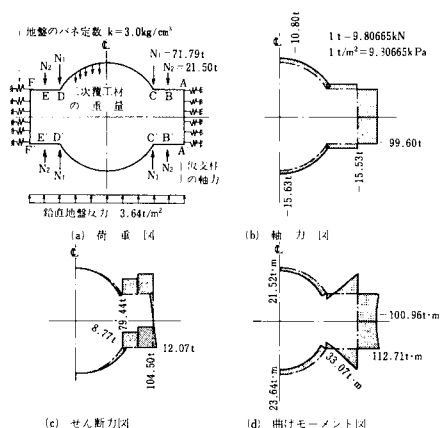
図—5 隔壁を撤去したときの切り拡げ部の形状（模式図）



図—6 隔壁撤去時の荷重図および断面力図(奥行き1m当たり)

材と二次覆工材は合成された構造として取り扱う。したがって、この合成された覆工材（以下、合成部材という）を完成時の覆工材として設計する。

完成時のトンネルの構造は、本トンネル軸方向に長く同一の断面であるから、本トンネル横断面の二次元モデルとして図—7 (a) のようになる。図中のA—A′、F—F′は刃口セグメントと二次覆工材、A—B—C、A′—B′—C′、D—E—F、D′—E′—F′はボックスフレームと二次覆工材、C—D、C′—D′は円形セグメントと二次覆工材からなる合成部材である。仮支柱の撤去に伴う荷重としては、隔壁撤去時において仮支柱に生じている断面力を逆向きにして作用させる。仮支柱切断位置の断面力のうち曲げモーメントとせん断力の値は、図—6で明らかに非常に小さく設計上無視できるので、この例では図—7 (a) に示すように軸力  $N_1$ 、 $N_2$  だけを考慮している。 $N_1$  は図—6 における仮支柱 C—C′、D—D′に、



図—7 完成時の荷重図および断面力図（奥行き1m当たり）

$N_2$  は B—B′、E—E′ に生じている軸力と同じ値であり、 $N_1$  と  $N_2$  の作用位置は仮支柱のあった位置である。この荷重条件のもとで計算した断面力を図—7 の (b)、(c)、(d) に示す。

合成部材の応力は、一次覆工材と鉄筋コンクリートとが一体化し SRC（鉄骨鉄筋コンクリート）構造を形成しているとして、図—7 に示す断面力から算出する。一次覆工材の応力は、この応力と図—6 に示す隔壁撤去時の断面力から計算した応力とを重ね合わせて求める。

以上のようにして設計した切り拡げトンネルの形状寸法を図—8 に示す。なお、ここで一次覆工材のスキンプレートには腐食代を考慮している。

#### 4. 設計上の問題点

トンネル覆工材の設計方法の概要は 3. で述べたとおりであるが、設計にあたっては、なお解明すべき問題点が残っている。その主なものは次のとおりである。

##### (1) 一次覆工材と二次覆工材との合成効果について

3. で述べた合成部材の設計方法は、隔壁撤去に伴う一次覆工材の変形が仮支柱撤去後も解放されず、かつ一次覆工材と鉄筋コンクリートの二次覆工材とが十分合成され、両者が一体となって挙動する場合に成立するものである。合成部材の曲げ剛性は一次覆工材の曲げ剛性に比して非常に大きいので、一次覆工材と二次覆工材との合成が十分であれば、隔壁撤去に伴う一次覆工材の変形は解放されないと考えることができる。したがって設計にあたっては、一次覆工材と二次覆工材との合成の程度を把握することが必要である。

一次覆工材と二次覆工材とを完全に合成させるためにずれ止めを用いる。しかし、ずれ止めとコンクリートの応力伝達機構は複雑であるので、どの程度のずれ止めを使用すべきかは実験によって確認しなければならない。

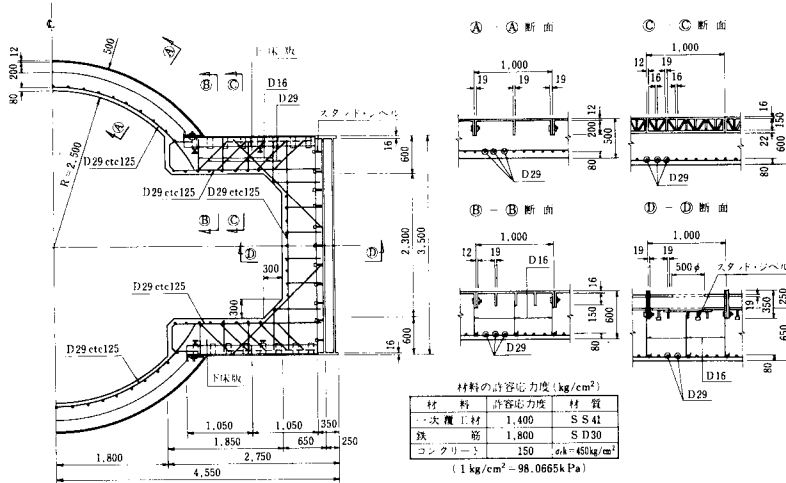


図-8 設計計算例

ここには鋼板をトラス状に組んでずれ止めに用いたが、橋梁の合成桁などに用いられている一般的なものはその形状が異なっているので、応用にあたっては試験が必要である。

なお、一次覆工材と二次覆工材との合成が完全であれば、各種の規準等に示されている鉄筋コンクリートの曲げ耐力の算定式を応用して、合成部材の終局耐力を推定できる。

(2) 隅角部の設計方法について

図-9は切り抜けた合成部材の隅角部付近を示したものであり、図の曲線は一次覆工材のスキンプレートに生じるx軸方向の応力の分布形状を模式的に示したものである。一次覆工材には隔壁撤去時の応力が初期応力として存在しており、この初期応力の分布形状は、図-6(d)の曲げモーメント図から明らかなように、スキンプレートでは曲線①のようになる。一方、仮支柱撤去後に変化するスキンプレートの応力は既往の隅角部の研究<sup>51</sup>から、曲線②のようにハンチ始点断面(④-④断面)

の付近で最大値を示す分布形状になると考えられる。

一般のRC構造における隅角部付近の設計では、曲線②の分布形状から判断してハンチ始点断面と部材端断面(⑥-⑥断面)で計算し、隅角部の他の断面での検討は省略している。しかし、曲線①に示す初期応力があり、仮支柱撤去後の応力が曲線①と曲線②を重ね合わせた曲線③のようになる場合には、最大応力が④-④断面から隅角部頂点側による分布形状となることが予想される。隅角部の一次覆工材の応力はこのように合成できるか、また、合成できるとしてその設計方法について検討する必要がある。一般のRC構造では④-④断面と⑥-⑥断面についてのみ検討しておけばよいことになっているが、その適用性について究明されなければならない。

上述の(1),(2)の問題点を解明するため、以下に示す実験を行い検討する。

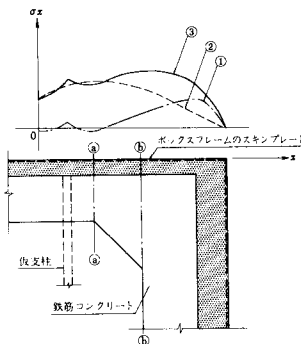


図-9 スキンプレートの応力分布 (模式図)

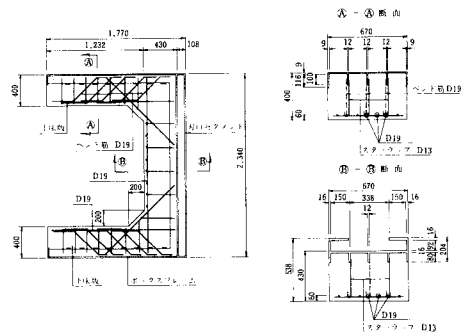


図-10 試験体の形状寸法

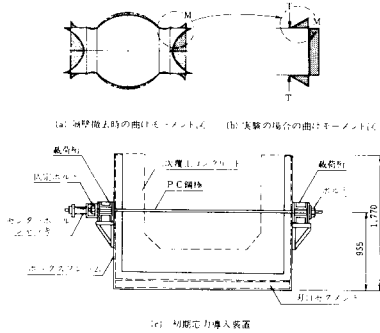


図-11 初期応力の導入方法

5. 実験概要

(1) 試験体

4. で述べた目的に合わせて、試験は図-8 に示す切り抜げトンネルの横断面の切り抜げ部を対象にして行う。

試験体としては、このトンネル軸方向の長さ1m当たりの使用部材寸法を2/3に縮小したものを採用する。試験体の形状寸法は図-10のとおりである。なお、試験体のスキンプレートの厚さには、図-8 に示す寸法から腐食代を減じ、さらに2/3に縮小したものを用いている。

切り抜げ部の断面設計は上、下床版で定まることが多いので、この部分に着目して実験する。このため初期応力の導入は、その部分の一次覆工材にあたるボックスフレームの曲げモーメントが図-11 (a) の隔壁撤去時の曲げモーメント分布に近くなるように、図-11 (c) に示す方法で行う。また、導入した初期応力が載荷まで解放されないようにボルトによって載荷桁を固定する。

初期応力導入後、二次覆工材としてのコンクリートを打設した試験体は載荷実験まで約4週間、現場において養生する。

用いた試験体は4体で、すべて同一の形状寸法であり、導入した初期応力の大きさだけ違っている。試験体の記号と初期応力の値を表-2に示す。SC-1は初期応力を導入せずに作製した試験体で、初期応力が試験結果に影響するか否かを調べるためのものである。SC-2, 3は3.

表-2 試験体の種類と一次覆工材の初期応力

試験体の号	導入した初期応力		T (kg/cm <sup>2</sup> )
	$\sigma_{10}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{20}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
SC-1	0	0	0
SC-2	1,430	450	5.1
SC-3	1,410	540	4.5
SC-4	2,400	910	8.0

下表の値は測定された寸法から、弾性係数E<sub>c</sub>=2.1×10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>として算出したもの。

1t=9.80665kN  
1kg/cm<sup>2</sup>=98.0665kPa

の設計算例(図-8参照)にならない、ボックスフレームのリップの圧縮応力として長期の許容応力度1400kg/cm<sup>2</sup>(137.3MPa)になるように初期応力を導入した試験体である。このとき、スキンプレートとリップで構成された部材では中立軸の位置が部材断面の中心よりスキンプレート側に寄っているので、スキンプレートの引張応力500kg/cm<sup>2</sup>(49.0MPa)が導入されていることになる。この関係は設計算例とほぼ同様である。なお、初期応力を導入したボックスフレームを含む合成部材が仮支柱撤去に伴う荷重を受けると、隅角部付近のボックスフレームには引張応力が生じるので、スキンプレートの引張応力は初期引張応力に加算して増加し、逆にリップの圧縮応力は減少する。したがって、リップには初期応力として許容応力度まで導入することができる。SC-4は、リップの縁圧縮応力として鋼材の降伏点に対するJIS規格2400kg/cm<sup>2</sup>(235.4MPa)の初期応力を導入した試験体である。初期応力を導入した結果として、スキンプレートには最大900kg/cm<sup>2</sup>(88.3MPa)の引張応力が生じている。

(2) 使用材料

コンクリートの標準供試体の圧縮強度は平均560kg/cm<sup>2</sup>(54.9MPa)、40%割線弾性係数は平均3.1×10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>(30.4GPa)であった。標準供試体は試験体と同条件で養生したものである。

一次覆工材はSS41、鉄筋はSD30を使用している。SS41およびSD30の降伏点応力は試験の結果それぞれ3000kg/cm<sup>2</sup>(294.2MPa)、3900kg/cm<sup>2</sup>(382.5MPa)であった。

(3) 載荷方法

図-12に載荷装置を示す。荷重は、図-7(a)の軸力N<sub>1</sub>に相当する支柱位置の単調増加集中荷重として載荷する。

6. 実験結果

(1) 初期導入力の実験結果に与える影響

図-12に示す載荷方法では、載荷重による試験体の変形に伴い初期応力を導入した張力Tが減少し、変形

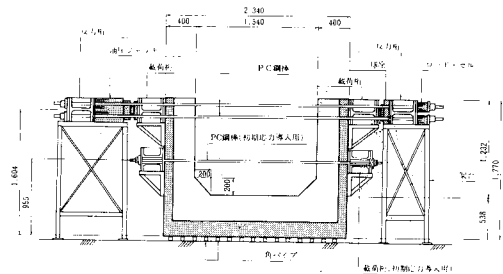


図-12 載荷装置

の進行によって  $T \rightarrow 0$  になる。しかし、合成部材の曲げ剛性は一次覆工材の曲げ剛性に比して 50 倍大きく、一次覆工材は二次覆工材の鉄筋コンクリートで十分に拘束されるため、張力  $T$  が減少しても一次覆工材の初期応力は 2% 程度しか解放されない。これを確かめるため本実験に先立ち張力  $T$  を除去して、一次覆工材の初期ひずみの変化を測定した。その結果、ひずみの変化はな

く一次覆工材の変形が二次覆工材で十分拘束されていることが確認できた。これはまた、張力  $T$  の減少によって鉄筋コンクリートに生じる応力も小さいことを示している。したがって、実験結果は張力  $T$  の減少に影響されないとみなすことができる。

(2) 実験結果の要約および試験体の変位状況

実験結果を要約して表-3 に示す。表-3 の設計荷重とは、設計計算例にならって初期応力を導入した SC-2, 3 について、3. で述べた合成部材の設計方法に従って

表-3 実験結果一覧表

項目	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4
掘削時のシールド径	3.3m	3.4m	3.5m	3.4m
掘削時のひび割れ状況	同左	同左	同左	同左
掘削時の初期応力	125.4 t	130.0 t	138.4 t	130.5 t
掘削状況	掘削した部分	同左	同左	同左
初期応力	125 kg/cm <sup>2</sup>	130 kg/cm <sup>2</sup>	138 kg/cm <sup>2</sup>	130 kg/cm <sup>2</sup>
変位した応力	945 kg/cm <sup>2</sup>	933 kg/cm <sup>2</sup>	978 kg/cm <sup>2</sup>	903 kg/cm <sup>2</sup>
合計	945 kg/cm <sup>2</sup>	1,057 kg/cm <sup>2</sup>	1,156 kg/cm <sup>2</sup>	1,119 kg/cm <sup>2</sup>
初期応力	609 kg/cm <sup>2</sup>	454 kg/cm <sup>2</sup>	578 kg/cm <sup>2</sup>	591 kg/cm <sup>2</sup>
変位した応力	609 kg/cm <sup>2</sup>	776 kg/cm <sup>2</sup>	578 kg/cm <sup>2</sup>	640 kg/cm <sup>2</sup>
合計	609 kg/cm <sup>2</sup>	1,210 kg/cm <sup>2</sup>	1,114 kg/cm <sup>2</sup>	1,353 kg/cm <sup>2</sup>
2次覆工材のコンクリートの初期応力	145 kg/cm <sup>2</sup>	155 kg/cm <sup>2</sup>	140 kg/cm <sup>2</sup>	150 kg/cm <sup>2</sup>

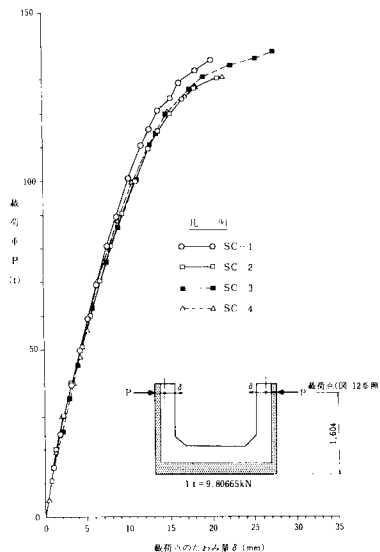
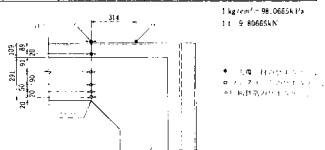


図-13 荷重 (P)-たわみ (δ) 曲線

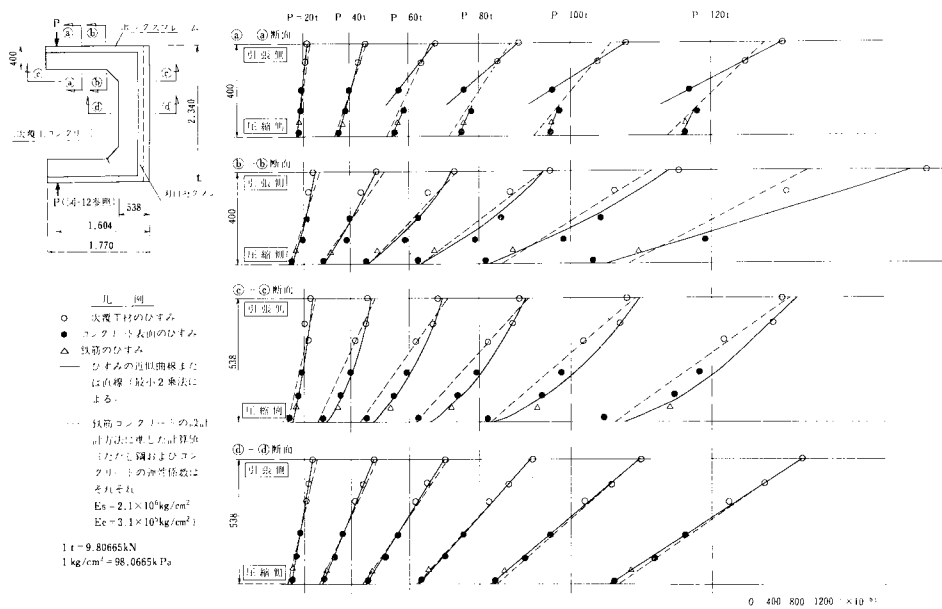


図-14 合成部材における断面内のひずみ分布 (SC-3)

試験体各部の応力度を計算し、その応力度の最大値が材料の許容応力度と等しくなるように逆算して求めた荷重(39 t, 382 kN)である。設計荷重時に生じている一次覆工材の引張応力は、表に示す④点もしくは③点で最大であった。表-3に示すように、各試験体のひびわれ状況には差異はなく、各試験体とも床版のハンチ始点断面で破壊している。また、荷重点でのたわみ量、破壊荷重、荷重によって増加したスキンプレートの応力およびコンクリートの応力は各試験体とも同程度の値である。

図-13に各試験体の荷重  $P$  と荷重点における部材のたわみ量  $\delta$  の関係を示す。初期応力の有無にかかわらず各試験体の  $P$ - $\delta$  曲線には、荷重前から破壊までを通じて明確な差異はみられない。

(3) 合成部材における断面内のひずみ分布

図-14に、試験体 SC-3 の各部材断面のひずみ分布を荷重段階ごとに示す。図中の一次覆工材のひずみは、初期ひずみから測った変化値で表示している。

図の①-①断面および④-④断面は一般に平面保持の仮定が成立すると考えられるが、ハンチ始点である②-②断面や③-③断面のひずみ分布は曲線になることが知られている。図に示している実線は、これらのひずみ分布特性を考慮して実測のひずみ分布を①-①断面と④-④断面では直線で、②-②断面と③-③断面では二次曲線で近似したものである。

①-①断面における実測のひずみは、荷重が40 t (392 kN) までは1本の直線に載る分布をしているが、荷重が40 t を越えるとコンクリートに発生する斜めひびわれの影響により、ひびわれ位置を境として引張縁側と圧縮縁側にずれが生じ、ひずみはそれぞれ別の直線に載る分布をしている。④-④断面は斜めひびわれが生じないので、このようなずれもなく実測のひずみ分布は荷重の全段階で1つの直線によく一致している。②-②断面および③-③断面のひずみ分布はほぼ二次曲線で近似できるが、破壊荷重に近くなるとひずみのばらつきが大きい。

図に示す破線は、一次覆工材を鉄筋としてその断面積が一次覆工材の重心に集中していると、通常の鉄筋コンクリートの断面計算方法によって計算したひずみ分布である。平面保持の仮定が成立する①-①断面および④-④断面のひずみ分布は、ひびわれが発生する場合を除いて破線で示す計算値とよく一致している。

SC-1, 2, 4 のひずみ分布特性は、SC-3 の分布特性と同様であった。

(4) ハンチ始点断面の曲げ変形と曲げ耐力

破壊した床版のハンチ始点における合成部材の曲げ変形とハンチ始点に作用している曲げモーメント  $M$  の関係を各試験体について求め、一括して図-15に示す。

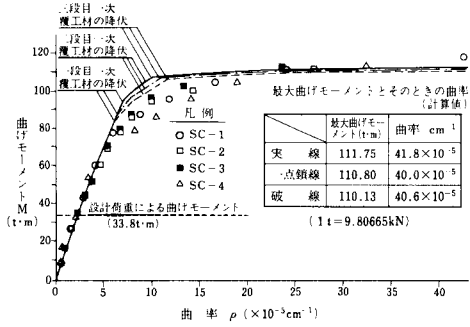


図-15 ハンチ始点断面  $M$  と  $\rho$  の関係

図中の曲率  $\rho$  は式(1)で計算した値である。

$$\rho = (|\epsilon_c| + |\epsilon_t|) / D \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\rho$  : 合成部材の曲率 (cm<sup>-1</sup>)

$\epsilon_c, \epsilon_t$  : ひずみの近似曲線から求めた圧縮縁および張縁のひずみ

$D$  : 部材厚 (cm)

また、曲げモーメント  $M$  は荷重  $P$  に荷重点からハンチ始点までの距離  $l = 0.866$  m を乗じた値である。

図中に示す実線は、一次覆工材をスキンプレートと2等分したリブの3つに分け、その断面積がそれぞれの重心に集中しているとして床版の断面を図-16(a)のようにモデル化し、一次覆工材、鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ曲線をそれぞれ図-16(b), (c), (d)のように設定して、平面保持の仮定に基づいて計算した  $M$ - $\rho$  曲線であり、初期応力のない試験体 SC-1 に対するものである。なお、図-16(d)に示すコンクリートの応力-ひずみ曲線は、原点から最高点応力までの部分を標準供試体の静弾性係数試験の結果に近似させ、かつ最高点応力を越え応力が減少する部分を直線で仮定した

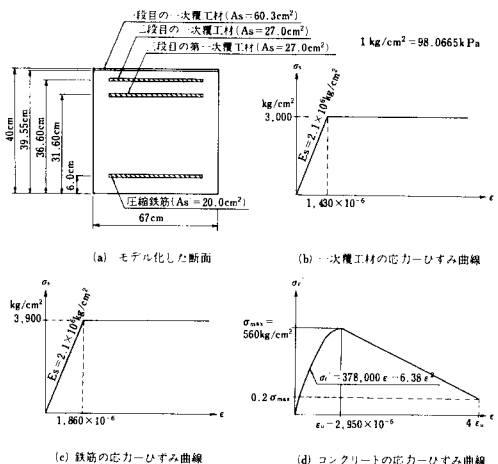


図-16 モデル化した断面と材料の応力-ひずみ曲線



ものである<sup>6)</sup>。また、図-15の一点鎖線と破線は、それぞれSC-2、3とSC-4の一次覆工材に存在する初期応力の影響を考慮して計算したM- $\rho$ 曲線である。このときの一次覆工材の応力-ひずみ曲線は、図-16(b)に示す応力-ひずみ曲線の原点を曲線上に初期応力の分だけ移動させてモデル化している。

表-4に、図-15の実線、一点鎖線、破線を求めた方法および一次覆工材を鉄筋として建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に示されている方法によ

表-4 終局耐力の比較

実験値	終局耐力の計算値		
試験体	破壊モーメント	図-15に示す方法(建築学会規準)	
SC-1	117.6t·m	111.75t·m	113.0t·m
SC-2	112.6t·m	X	
SC-3	119.9t·m		
SC-4	113.3t·m		

(1t=9.80665kN)

て計算した終局耐力と実験値を比較して示す。これらの計算値と実験値はよく一致している。

(5) ボックスフレームのリブに沿うひずみ分布

試験体のうちで最も大きい初期応力を導入したSC-4におけるボックスフレームの各荷重ごとのひずみを図-17に示す。P=0tのひずみは、ボックスフレームに導入した初期ひずみを示している。なお、断面-4ではボックスフレームを補強してある。

断面-3、4におけるスキンプレートとリブのひずみの変化量は、それぞれハンチ始点断面である断面-2におけるひずみの変化量より小さく、隅角部特有の応力状態を示している。このため、スキンプレートの初期引張ひずみは断面-2より断面-3の方が大きい、断面-2のひずみが断面-3に先行して降伏点に達している。

リブには当初、圧縮ひずみが生じているが、荷重によって発生する引張ひずみによって徐々に打ち消され、引張ひずみに移行している。断面-3、4では破壊時のひずみは小さい。

7. 考 察

(1) 一次覆工材と二次覆工材との合成効果

図-14に示したように、一次覆工材の初期ひずみから測った変化値と鉄筋コンクリートの二次覆工材のひずみは、1本の直線もしくは曲線で表示できるように滑らかに分布している。したがって、一次覆工材と二次覆工材とは、ずれることなく両者一体となって挙動していると判断できる。また、この状態は破壊荷重付近まで保たれている。上、下床版に生じたひびわれが表-3中のひびわれ図のようにボックスフレームのずれ止めの位置から発生していることは、このずれ止めの効果が現われたものと思われる。

以上のことから、使用したずれ止めは一次覆工材と二次覆工材とを完全に一体化できること、また、一次覆工材のひずみについては、初期ひずみと二次覆工後のひずみを単に重ね合わせることによって求まることが確認できた。

(2) 隅角部の設計方法

ボックスフレームの隅角部には表-2に示すような初期応力が導入されているが、いずれの試験体の場合もハンチ始点断面における一次覆工材が他の断面に先行して降伏し、合成部材はこの断面で破壊する。したがって、初期応力が存在する一次覆工材を含む合成部材の設計においても、一般のRC構造の場合と同様にハンチ始点断面および部材端断面で計算して部材の安全性を照査すればよく、隅角部の特別な検討は省略することができる。

また、リブに存在する圧縮応力は二次覆工材と合成された後の荷重によって減少するので、初期応力としては

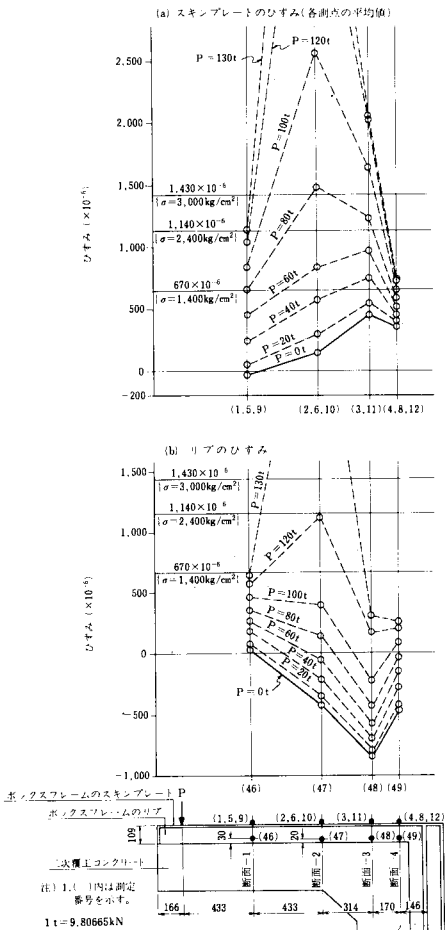


図-17 ボックスフレームのリブに沿うひずみ分布 (SC-4)

1400 kg/cm<sup>2</sup> (137.3 MPa) 以上の応力が存在していてもよい。

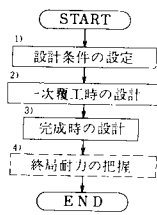
### (3) 切り拡げ部の終局耐力

切り拡げ部の終局耐力は、表—4 に示したように上、下床版のハンチ始点断面において、既述の算定方法を用いてかなり精度よく推定できる。なお、ハンチ始点断面では一次覆工材の初期応力は比較的小さいので、この応力を考慮した場合としない場合の終局耐力の計算値にはあまり差はない。

また、図—15 の実線、一点鎖線および破線で示した計算による  $M-\rho$  曲線は実測値と完全には一致していないが、この計算方法は設計にあたって合成部材の曲げ変形を推定する方法としては利用できると思われる。

## 8. ま と め

切り拡げ部の実験によって得られた問題点の解明を踏まえ、3. で述べた切り拡げトンネルの設計方法を図—18 に示す設計の手順に従って要約すれば次のようになる。



図—18 設計手順

### ① 設計条件の設定

- ① トンネルに作用する土圧は、切り拡げた部分を含むトンネルの全断面が一時に掘削されたものとして設定することにする。

### ② 一次覆工時の設計

- ① 切り拡げ前、切り拡げ時および隔壁撤去時において、それぞれの構造系に応じて検討する。
- ② 一次覆工材(セグメント、丸口セグメント、ボックスフレーム)は、その応力がトンネルの完成時において長期荷重に対する許容応力度以内になるように設計すればよい。

### ③ 完成時の設計

- ① 一次覆工材と鉄筋コンクリートの二次覆工材と

が完全に合成されているとして計算する。このとき、一次覆工材の応力は隔壁撤去時の応力を加算して安全性を照査する。

- ② 隅角部付近の設計は一般の RC 構造の場合と同様に、ハンチ始点断面と部材端面で計算すればよい。

### ④ 終局耐力の把握

- ① 鉄筋コンクリートの設計方法に従ってせん断力に対処すれば、切り拡げ部の終局耐力は床版のハンチ始点断面の曲げ耐力で評価できる。
- ② 合成部材の曲げ耐力は、その部の一次覆工材に存在する初期応力を考慮し、鉄筋コンクリートの曲げ耐力の算定式を応用した方法によって推定できる。

ただし、初期応力を無視し、建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に示されている算定方法によって推定してもよい。

この報告は、崩壊性地盤や高水圧下の地盤において安全かつ確実にトンネルを切り拡げることができる新しい方法ならびにその覆工の設計方法について述べている。

完成時の覆工は、一次覆工材と二次覆工材とを合成させ、一次覆工材の余っている応力を有効に使うことによって合理的に設計できると思われる。

なお、土圧の設定にあたっては、従来のシールドトンネルの設計方法を応用して安全側に処理したが、合理的設計を行うためには土圧および一次覆工材の応力など、今後の情報化施工を通じて、より明確な把握に努める必要があると思われる。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、塚田・三好・高橋・河田：シールド工法の実際，pp.339～372，鹿島出版会，1980。
- 2) 吉川重弘・土屋富造・吉川 薫：セグメント切拡げ工法，土木施工，Vol.11（臨時増刊），pp.37～44，1982。
- 3) トンネル標準示方書（シールド編）・同解説，pp.38～46，土木学会，1977。
- 4) シールド工用標準セグメント，pp.61～68，日本下水道協会，1982。
- 5) たとえば，福田武雄：ラーメン（アルス鉄筋コンクリート工学講座6），pp.109～123，アルス，1938。
- 6) Chen, W. F. : Plasticity in Reinforced Concrete, pp.22～25, McGraw-Hill, Inc., 1982.

(1984. 3. 29・受付)