

# 部分的に補強された二次覆工を有する シールドトンネルの挙動に関する模型実験

松本 安弘<sup>1</sup>・出口 大志<sup>2</sup>・川端 一嘉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本電信電話株式会社 アクセスサービスシステム研究所 (〒 305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1)  
E-mail: matsumoto.yasuhiro@lab.ntt.co.jp

<sup>2</sup>非会員 日本電信電話株式会社 アクセスサービスシステム研究所 (〒 305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1)  
E-mail: deguchi.taishi@lab.ntt.co.jp

<sup>3</sup>正会員 エヌ・ティ・ティ・インフラネット株式会社 (〒 103-0004 東京都中央区東日本橋 1-8-1 ネクストサイト東日本橋ビル)  
E-mail: kawabata-kazuyoshi@nttinf.co.jp

経年劣化による構造性能の低下が懸念されているシールドトンネルを安全に使用し続けるためには、将来的に補強が必要と考えられる。現在までに行われた補強の例であるトンネル内面全周への補強では、内部で利用できる断面が減少するという問題がある。この解決には天井部などへの部分的な補強が有効と考えられるが、トンネル本体と補強部材との接合部の挙動は明らかではなく、その設計手法はまだ確立されていない。そこで本研究では接合部の挙動を把握するため、部分補強を施した二次覆工を有する鋼製セグメントのトンネルを想定した模型実験を行った。また実験により把握した接合部の挙動を考慮した、設計への応用を見据えた構造力学モデルを提案し、その妥当性をはりばね骨組構造解析の結果と模型実験の結果との比較により確認した。

**Key Words:** shield tunnel, secondary lining, partially reinforcement, model test, beam spring model

## 1. はじめに

今日では、特に都市部において通信、電力、鉄道、下水道、道路などのライフラインの提供に、地下のシールドトンネルが大きな役割を果たしており、その総延長は通信用のシールドトンネルのみでも 300km を超える。図-1 に通信用のシールドトンネルの年度ごとの設備建設量とその累積延長を示す。図-1 からわかるように、現在の通信サービス提供の要であるシールドトンネルの大部分は、1970 年代から 1990 年代に建設されたものである。そのため程度の大小の差はあれ、老朽化の影響と見られる漏水などの問題が顕在化してきている。現状では、通信用シールドトンネルの大部分では大きな変形等は確認されていないが、今後老朽化が進行していくことを考えると、将来的には補強を実施して、トンネルの使用可能期間を延長することが必要になると考えられる。

現用の通信用シールドトンネルの劣化変状の例として、図-2 にトンネル内への水の浸入および土砂の引き込みの様子を示す。図-2 のような外部からの水の浸入は、トンネルの主要構造を構成する鋼製のセグメントリングの劣化を促進し、構造的な耐力の低下につながると考えられる<sup>1)</sup>。この状態からさらにトンネルの劣化が進行した場合、トンネル内への多量の水の浸入を引き起

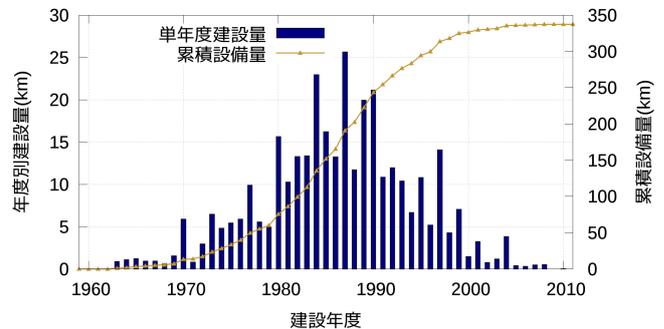


図-1 通信用シールドトンネルの年度別建設量と累積設備量

こし、大量のケーブルを収容するというトンネルの使用目的を果たすことができなくなると考えられる。そのような場合に至ったときの修繕の例として、図-3 のように、止水と構造的な耐力の回復を目的とし、内面全周へコンクリートを巻き立て、内部にもうひとつトンネルを構築するような、三次覆工による補強が数例行われている。

ただ、こうした内面全周の補強には主に二点の問題がある。まず一点目として、シールドトンネルの内部で利用可能な断面が減少することが挙げられる。補強による断面減少が原因となり、本来の使用目的である



図-2 トンネル内への水の浸入 (東京)

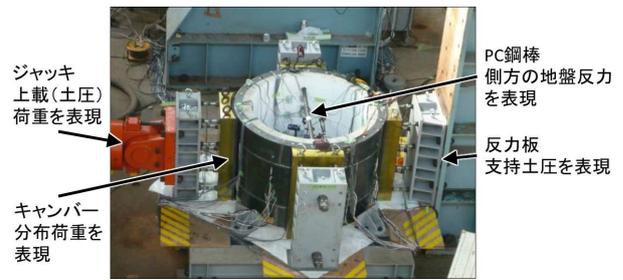


図-4 実験装置

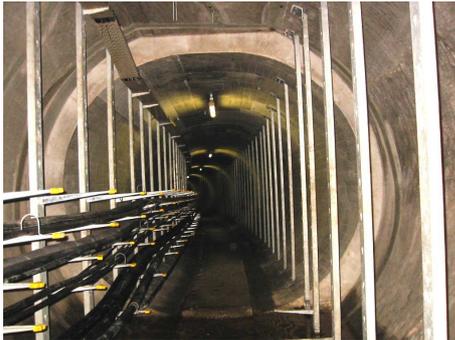


図-3 全周への補強 (内面全周へのコンクリート打設)

通信用ケーブルの敷設，維持管理に支障が出ることは好ましくない。

次に二点目として，補強費用が非常に高いことが挙げられる。これは漏水等に起因する劣化がかなり進行してから補強が行われることに起因し，内面全周に止水を行った上で補強を行う性質上，作業工程が多くなるためである。トンネルの運用上，止水は非常に重要であるため，補修，補強の実施において止水工程を省略することはできないが，トンネルの変形の進行によるセグメント継手の開きやコンクリート部のひび割れは，漏水の主要な発生原因の一つであるため，補強による変形の抑制は止水にも一定の効果があると考えられる。従って大規模な補強が必要になる前の，劣化が進行途中の状態での段階的な実施を想定した補強であれば，トンネルの内空間を維持するような補強形態を選択でき，かつ維持管理にかかるトンネルの総合的なライフサイクルコストを削減できる可能性がある。

そこで本研究ではこれらの問題への対策として，天井部などへの部分的な補強について検討する。部分補強を実施するにあたっては，まず補強すべき箇所と，補強により向上する構造性能の評価法が問題となる。

補強箇所については，建設から一定期間経過後の補強となるため，向上した構造性能は，初期の土水圧に対してではなく，その後のさらなる外力の変化やトン

ネル覆工の劣化に伴う変形の増大に対して発揮されると考えられるため，今後発生すると考えられる変化を想定することで，適切な補強箇所の検討が可能と考えられる。例えば砂質土において，地下水位の急激な低下が起こった場合，トンネルに作用する側圧が減少し，トンネルが側方に伸びるように変形すると考えられるため，天井部やインバート部への部分補強により，内面のコンクリートのひび割れ破壊を抑制できる可能性がある。また，鋼材の腐食減肉などにより一次覆工の構造性能が劣化し，負担していた応力が二次覆工に移行していく場合にも同様に，大きな曲げモーメントが作用する天井部やインバート部への部分補強が有効と考えられる。

また補強により向上する構造性能の評価については，あと施工によってトンネル本体と補強材とが接合され形成される複合構造の評価が必要となる。現状では異種の部材の接合時の挙動を完全に説明することは難しいため，一般的には個々の構造形式において安全側の設計となることが確認された方法による設計計算が行われている<sup>2)</sup>。従って，部分補強の実現のためには，トンネルの場合における補強材とトンネル本体との間の力の伝達機構を把握し，それを実用的な精度でシミュレートすることができればよい。

よって本研究では，トンネル本体と補強材との力の伝達機構の把握のために模型実験を行う。その結果，得られた力学特性を設計実務との親和性を考慮した上でモデル化を行い，その妥当性を数値計算結果と実験結果との比較によって確認する。最終的には，トンネルに部分補強を施した際の構造性能評価手法として確立することを目的とする。

## 2. 模型実験について

### (1) 模型実験の概要

図-4 に実験装置の概要を示す。図-4 の装置では四方に設置したキャンバーを介して供試体に力を伝達させる構造となっており，一方から載荷し，その反対側に

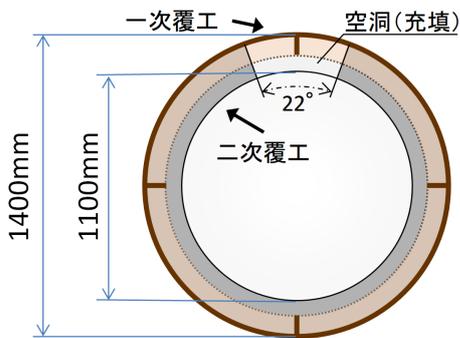


図-5 実験供試体 (補強前モデル)



図-8 部分補強モデル 2



図-6 部分補強モデル 1

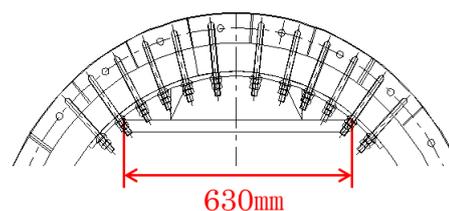


図-9 部分補強モデル 2 の部材接合部

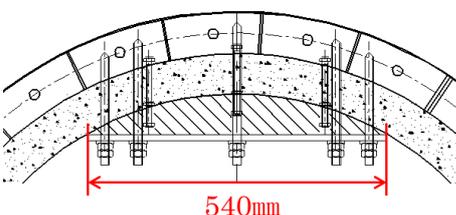


図-7 部分補強モデル 1 の部材接合部

設置した反力板から反力を受け、載荷方向に直交する 2 箇所では PC 鋼棒を用いた治具により、供試体がキャンバー方向に広がるような変形に対して抵抗させることで、地盤反力を模擬した載荷実験が可能である。

この装置を用いて、水平に横置きした供試体に油圧アムスラーで載荷し、その各点での変位およびひずみを計測した。接合部の降伏の前後の挙動を計測するため、実験では荷重をいくつか区切り、載荷と除荷を 1 セットとしたサイクルを繰り返しながら最大 500 kN まで載荷した。

実験には通信用のシールドトンネルの構造を模した、二次覆工を有する供試体計 4 体を用いた。供試体は比較用の補強なしモデル 1 体と、補強前モデルに部分補強を施した 3 体である。ここで、補強前モデルは図-5に

示すように、天井部の二次覆工に切り欠きを設け、その切り欠きを無収縮モルタルにより充填したモデルである。これは施工上の問題から実際のトンネルに生じることがある天井部の空洞の充填補修<sup>3)</sup>を考慮したものである。

これらの供試体の直径は 1.4 m であり、幅 450 mm の 3 本主桁のリングを中央に、幅 234 mm の 2 本主桁のリングをその両側に千鳥に接合した 3 つの鋼製のセグメントリングから成り、合計で計幅 918 mm である。これらのセグメントリングは、厚さ 6 mm ( 2 本主桁のリングの外側は 12 mm )、高さ 75 mm の鋼板による主桁および、厚さ 2.3 mm の鋼板によるスキンプレート、10 度間隔で設置された縦リブが溶接されて作成された 4 分割のセグメントをボルトで締結して作成した。使用鋼材はいずれも SS400 である。このセグメントリングに覆工高さが合計で 150mm となるように、打継ぎ目なく無筋コンクリートの二次覆工を打設した。

比較用の補強なしモデルは、ひび割れなどの無い健全な二次覆工を有するモデルであり、部分補強モデル 3 体は、補強前モデルに実験装置により 100 kN を載荷、除荷し、事前にひび割れを形成した後に、あと施工によりそれぞれ、図-6、図-7 のように無収縮モルタルによるクラウン、インバート部を作成し、鋼製の平板 (幅 0.1 m × 厚さ 0.012 m × 長さ 0.54 m) をクラウン部およびインバート部にそれぞれ 2 枚、ケミカルアンカーボルトで固定した部分補強モデル 1、図-8、図-9 のように鋼製



図-10 部分補強モデル3

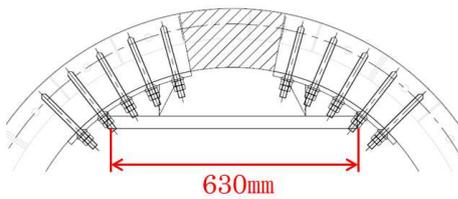


図-11 部分補強モデル3の部材接合部

の円弧状板 (幅 0.2 m × 厚さ 0.012 m × 長さ 0.94 m) に、鋼製の平板 (幅 0.07 m × 厚さ 0.032 m × 長さ 0.63 m) を溶接し、天井部およびインパート部にそれぞれ2組、円弧状板を二次覆工にケミカルアンカーボルトで固定した部分補強モデル2、図-10、図-11のように二つに分かれた鋼製の円弧状板 (幅 0.2 m × 厚さ 0.012 m × 長さ 0.365 m) に、鋼製の平板 (幅 0.07 m × 厚さ 0.032 m × 長さ 0.63 m) を溶接し、天井部およびインパート部にそれぞれ2組、円弧状板を二次覆工にケミカルアンカーボルトで固定した部分補強モデル3である。また、補強部材は二次覆工コンクリートにケミカルアンカーボルトで固定する際に、二次覆工と補強鋼板との間は5 mm ~ 10 mm 程度隙間を空け、無収縮モルタルでその隙間を埋めた後に所定のトルクで初期締め付け力を与えた。

なお、補強なしモデルと部分補強モデル1に関しては、Sudo et al.<sup>4)</sup> が行った実験の再録となるが、部分補強モデル1の構造力学モデル化に関しては本論文で新たに考察した。

## (2) 実験結果と考察

### a) 部分補強による構造性能の向上の効果

500 kN まで載荷した最終サイクルにおいて、4つの供試体について得られた載荷方向の直径変化量と荷重との関係を図-12に示し、載荷方向と直行する方向の直径変化量と荷重との関係を図-13に示す。図-12および図-13では、初期値が0から始まるように補正を行い、

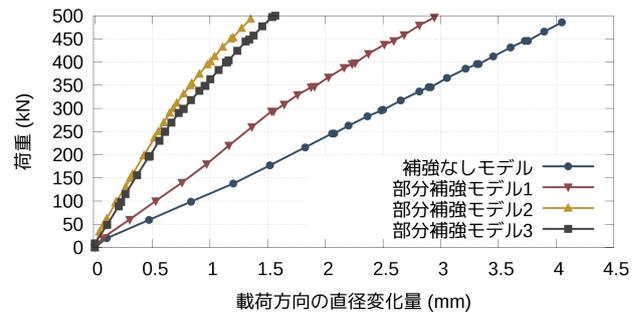


図-12 全モデルの載荷方向の直径変化量

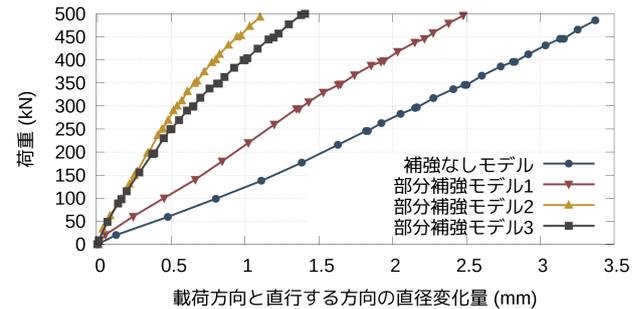


図-13 全モデルの載荷方向と直行する方向の直径変化量

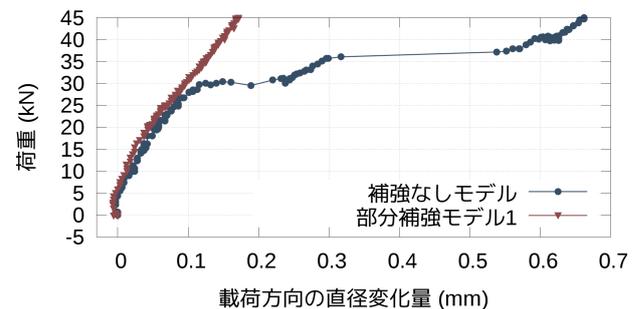


図-14 補強なしモデルと部分補強モデル1との載荷方向の直径変化量の比較

また荷重の増加時のみのデータをプロットしている。本論文では直径変化量と荷重との関係のグラフにはすべて、同様の補正を行っている。図-12および図-13から、補強なしモデルに比較して、それぞれの部分補強モデルでは直径方向の変位が小さくなっていることがわかり、部分補強による変位の抑制効果が確認できる。また補強なしモデルの荷重変位曲線の傾きから、載荷した500 kNの荷重の範囲では、荷重に対して変位量が線形性を有していることがわかる。

部分補強モデル1については、図-12において300 kN程度よりも大きな荷重状態では、補強なしモデルと荷重変位関係の傾きが同じ程度になっている。これは、使用している補強部材の鋼製の平板の断面の曲げ剛性が

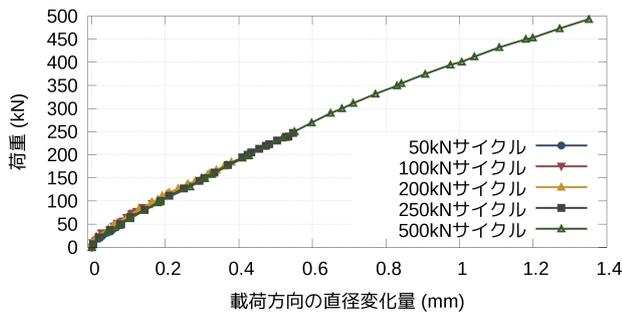


図-15 部分補強モデル2における各サイクルでの荷重方向の直径変化量

そこまで大きくないためであると考えられる。しかし、小さな荷重状態においては部分補強モデル1がよい補強効果を発揮することも確認できた。図-14に小さな荷重サイクル(50 kN)における荷重方向の直径変化量に関する補強なしモデルと部分補強モデル1の比較を示す。補強なしモデルでは、30 ~ 40 kN程度の荷重載荷時に二次覆工にひび割れが生じたため、その前後で荷重変位関係の傾きが変化している。部分補強が事前荷重により二次覆工にひび割れを作った補強前モデルへのあと施工によるものであることと、二次覆工を有するシールドトンネルでは、二次覆工の応力ひび割れが全体的な構造性能を大きく低下させること<sup>5)</sup>を考慮すると、図-14から、ひび割れにより低下した構造性能が、補強によりひび割れない状態かそれ以上にまで回復したと考えることができる。ただし、実際のトンネルにおいては、ひび割れからの漏水への止水対策等は別途必要であると考えられる。

#### b) 部分補強の補強効果の低減の考察

それぞれの部分補強モデルにおいて、試験荷重の増加に伴い、模型供試体の全体剛性の連続的な低下が見られた。図-15に、代表して部分補強モデル2における全サイクルの荷重方向の直径変化量と荷重との関係を示す。荷重変位曲線の傾きが、0 kN付近と比較すると、徐々に水平に近づき、剛性が低下していることがわかる。このとき、補強なしモデルの変位量が荷重に対して線形性を有し、またその変位量は模型の直径に比べて十分に小さいため、部分補強モデルにおける全体剛性の低下はすなわち耐荷機構の変化に起因する補強効果の低下であると考えられる。そこで耐荷機構の変化の原因について、供試体の二次覆工と補強部材との接合状態がどう変化しているか、に着目して考えていく。

まず、接合面を形成する力の種類について検討する。ずれ止めにより異種の部材を接合するための方法は主に、

##### 1. 機械的に接合する方法

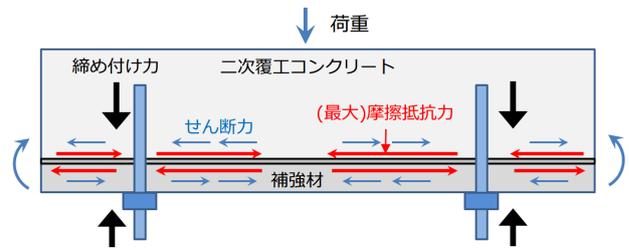


図-16 接合面に働く共役なせん断の図

2. 摩擦接合による方法
3. 付着による方法
4. 接着剤による方法

の4つに分類することができる<sup>2)</sup>。今回の接合部についても同様であると仮定すると、4.の接着剤については該当しないことが明らかであり、また化学的粘着力のことを指す3.の付着による方法に関しては、長江ら<sup>6)</sup>の検討により、鋼と無収縮モルタルとの間の付着は0とみなしても問題ないことがわかっているため、従って今回検討すべきなのは、アンカーボルトによる機械的な接合力と、アンカーボルトの初期締め付けにより導入される摩擦力であるとわかる。

補強部材と二次覆工とで曲げモーメントが伝達される際には、図-16のように接合面には荷重荷重方向に対して共役なせん断力が作用する。この共役なせん断力に対して、接合面を形成する力が十分に大きいとき、両者は剛結であると考えて差し支えない<sup>2)</sup>。これに関しては、二次覆工と補強材とはアンカーボルトの初期締め付けにより、一本あたりおよそ33 kNの鉛直力(M16規格のアンカーボルトにおいて締め付けトルク 106 N・mのため)が導入されることにより発生する摩擦力でもって接合されており、この力は十分に強いと剛結であると考えられる。実際、図-17に示すように、部分補強モデル3では、二次覆工と補強材との間の相対せん断変位を見ると、小さな荷重を作用させても、除荷すれば相対変位はほぼ0であり、接合面は弾性的に挙動している。しかし図-17からは、部分補強モデル3では、大きな荷重が作用すると、除荷しても相対せん断変位が残留していることも同様にわかる。

十分な摩擦抵抗力があったにもかかわらず、補強効果が低下した原因について考察していく。部分補強モデル2において摩擦力に着目すると、供試体では荷重方向に直交するように梁の補強部材が取り付けられており、この梁部材は模型の変形に対して引張の力を受ける。このとき、図-18に示すように、梁部材に働く引張の力はアンカーボルトによる初期締め付け力に相反するように接合面に働く摩擦力を減じ、面のせん断耐力を減少させる。そのため荷重とともに増大する接合

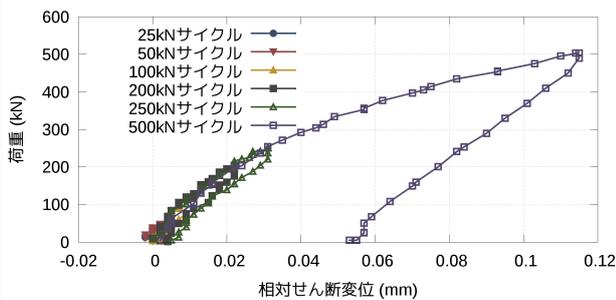


図-17 補強材と二次覆工との間の相対変位量 (部分補強モデル3)

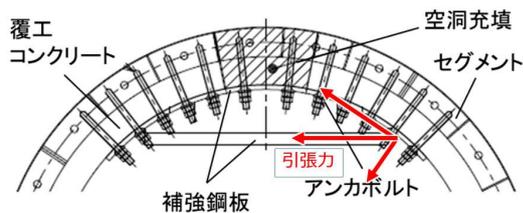


図-18 梁部材の引張によるアンカーボルト引き抜き力

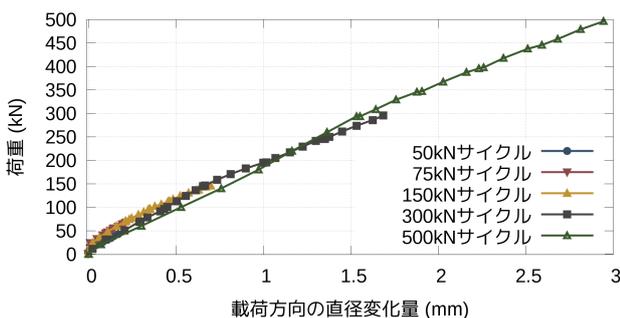


図-19 部分補強モデル1の各サイクルでの荷重方向の直径変位量と荷重との関係

面のせん断力を支えられなくなり、補強材と二次覆工とで一体化が保てず、耐荷機構が変化し、補強効果が低減したと考えられる。この変化の要因は、部分補強モデル3についても同様であると考えられる。

また、部分補強モデル1での補強効果低減について考察するにあたって、まずアンカーボルトがせん断降伏する程の力が作用しているかを調べた。部分補強モデル1において、鋼製の平板に貼付したひずみゲージの計測結果から、試験荷重の増加に伴い、引張ひずみが生じていることがわかっている。この引張ひずみがすべて、鋼板の断面に働く軸力、つまりアンカーボルトに働くせん断であると仮定すると、その大きさがアンカーボルトをせん断降伏力に到達するのは300 kN以上の試験荷重時であったが、補強効果低減は、図-19に示

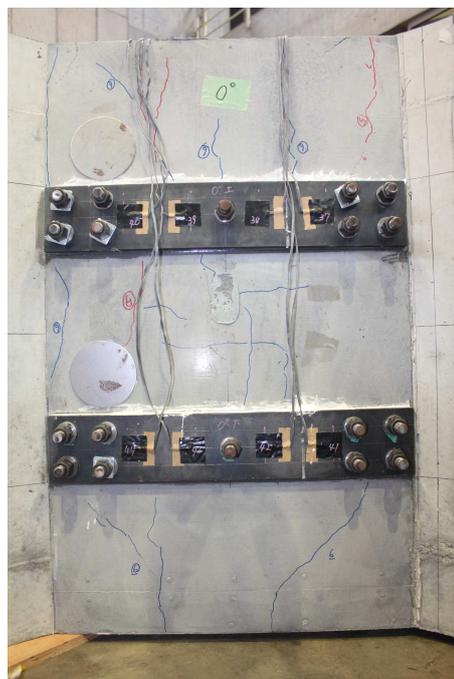


図-20 実験後のひび割れ箇所のスケッチ (部分補強モデル1)

すように、それより大幅に早期から発生している。したがって、部分補強モデル1での補強効果低減の主要因はアンカーボルトのせん断降伏ではないと考えられる。また、同様にひずみゲージの計測値から、補強に用いた鋼板が降伏するほどの力は作用していないことも確認できた。よって、部分補強モデル1での補強効果低減は接合部の二次覆工の表面に曲げ引張によるひび割れが生じ、接合面の一体性を保てなくなったことが原因と考えた。事実、図-20に示すように、接合面の母材である二次覆工には多数のひび割れが生じている。

### 3. 実験結果の数値計算による再現

本節の数値計算では、鋼材やコンクリートのヤング率などの物性値は、模型実験で使用した材料の材料試験により求めた値を用いた。

#### (1) 部分補強の構造解析モデルについて

本研究では、シールドトンネルの構造解析をはりばね骨組構造解析<sup>7)</sup>により行う。本研究における構造解析では一次覆工と二次覆工との相互作用と、さらに二次覆工と補強部材との相互作用を考慮でき、地盤から受ける外力に対するトンネルの変形や生じる応力を、実用的な精度で求められることが重要である。はりばね骨組構造解析は、三次元の有限要素法などの他の構造性能評価手法等と比較して、上記の計算を簡易なモデルで実現できるため、設計実務との親和性が高い手法

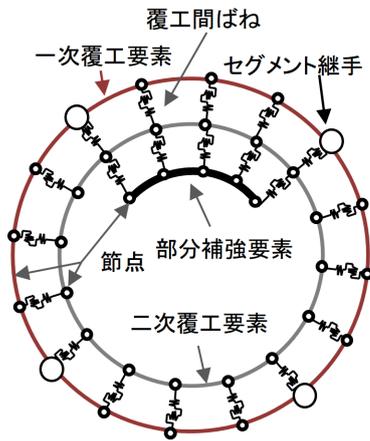


図-21 部分補強のはりばねモデルの概要

であると考えられる。なお、ソルバーとしては市販の解析汎用ソフトウェアの Moleman-i を使用した。

この手法での構造力学モデル化の概要を次に示す。セグメントと二次覆工とはそれぞれはり要素にモデル化され、さらに補強部材もはり要素でモデル化し、互いの要素間の作用や各種の継手の作用はばねとしてモデル化する。また、地盤反力に関しては主動土圧を 0 として扱い、受働土圧のみを考慮する、いわゆる Winkler の仮定に従う地盤ばねを用いる。したがって、部分補強されたシールドトンネルは図-21 のようなモデルとなる。このとき、補強部材と二次覆工との接合面の力学特性はばねでモデル化される。このばねの挙動に、節 2. の考察を、この構造解析モデルに適した形で反映するとき、その内容は次のようにまとめられる。

1. 最初は摩擦力による剛な接合で、法線方向、接線方向ともばね定数は無限大とし、もともと存在したひび割れは補強により閉じたものとする。
2. 母材の曲げ破壊や摩擦力の低下により接合面の一体化が失われる。
3. アンカーボルトによる機械的な接合に移行する。このときのアンカーボルト接続部の引張方向およびせん断方向のばね定数は、コンクリートに打ち込まれたアンカーボルトの引き抜き、せん断試験結果から決定すれば良く、本研究ではメーカーによる試験結果を用いた。圧縮方向のばね定数に関してはデータがなかったため、無限大とした。また、ひび割れは二次覆工上で極端に柔らかい部材としてモデル化した<sup>5)</sup>。

ここで、設計上特に重要となる 2 について、接合面の一体化が損失した荷重とその損失の理由を、部分補強モデル種別；接合面の一体化が失われる荷重；ほかに先行して起きた接合面の一体化の損失の理由、の順で次にまとめる。

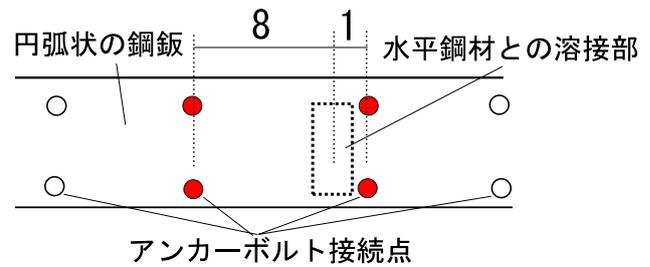


図-22 部分補強モデル 2,3 での補強部材のアンカーボルト接合位置

- 部分補強モデル 1；109.59 kN；二次覆工コンクリートの曲げひび割れ破壊荷重
- 部分補強モデル 2；394.67 kN；水平鋼材取り付け部周辺において、アンカーボルトの初期締め付け力が消失する荷重
- 部分補強モデル 3；370.64 kN；水平鋼材取り付け部周辺において、アンカーボルトの初期締め付け力が消失する荷重

ここに、水平鋼材取り付け部周辺とは、図-22 に示すように、鋼材溶接部の内で最も天井部から離れている箇所を挟む 2 点を構成しているアンカーボルト 4 本のことを指し、部分補強モデル 2, 3 では、近いアンカーボルトと遠いアンカーボルトとの距離の比が 1：8 であるため、水平鋼材の軸力の 9 分の 8 を、近いアンカーボルトが引き抜き力として受けると仮定した。

以上の条件で、数値計算を行った。なお、部分補強モデル 1 における無収縮モルタルによるあと施工のクラウン部およびインバート部は計算上無視し、数値計算では補強鋼板を二次覆工に沿った形状でモデル化した。

- (2) はりばね骨組構造解析の結果と実験結果との比較  
数値計算により得られた載荷方向の直径変化量と荷重との関係および、載荷方向と直行する方向の直径変化量と荷重との関係について、最終サイクル時(500 kN 荷重)の実験結果との比較を行うと、それぞれ部分補強モデル 1 については図-23 ~ 図-24 に、部分補強モデル 2 については図-25 ~ 図-26 に、部分補強モデル 3 については図-27 ~ 図-28 のようになる。図-23 ~ 図-28 により、接合面の力学特性を上記のようにモデル化することで、実験結果を数値的に、実務上問題の無い精度で再現できることが確認された。

#### 4. おわりに

本稿では、部分補強されたシールドトンネルの変形挙動を明らかにするために、模型供試体を用いた載荷試験を行い、その結果から補強材との接合部をモデル

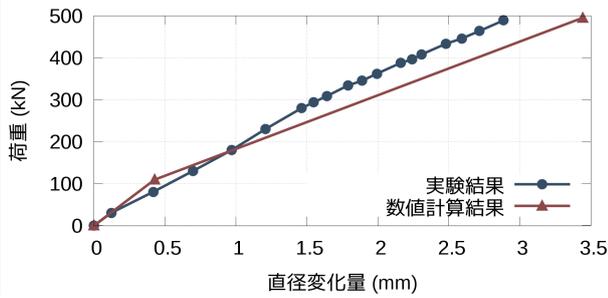


図-23 部分補強モデル 1 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向）

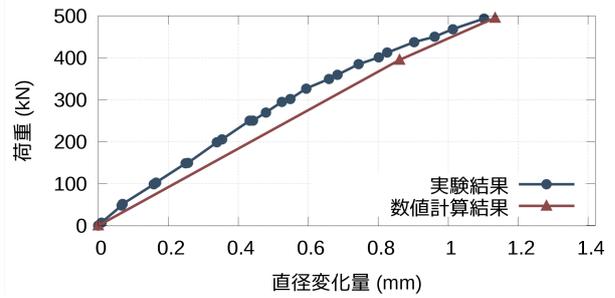


図-26 部分補強モデル 2 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向と直行する方向）

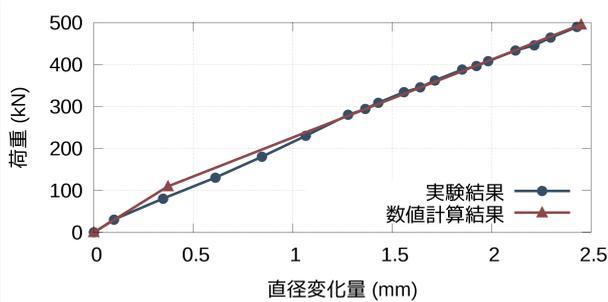


図-24 部分補強モデル 1 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向と直行する方向）

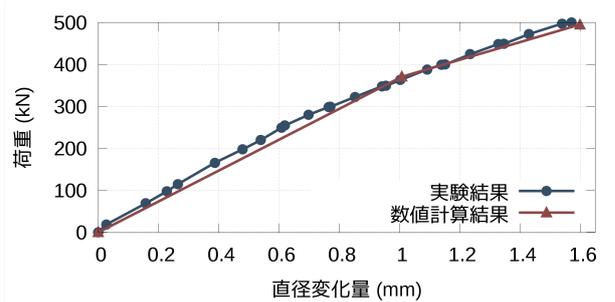


図-27 部分補強モデル 3 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向）

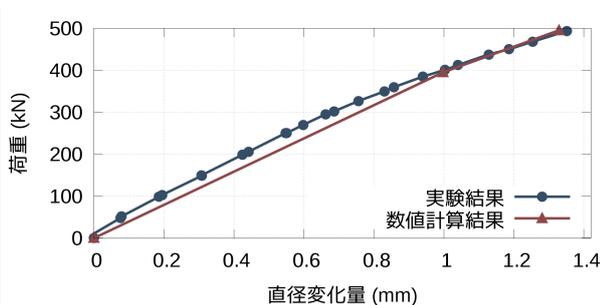


図-25 部分補強モデル 2 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向）

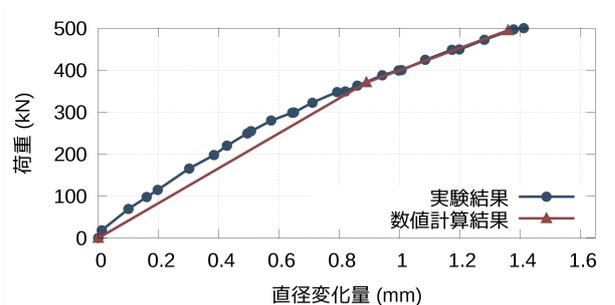


図-28 部分補強モデル 3 での実験，数値計算結果の比較（載荷方向と直行する方向）

化し，そのモデルの妥当性をはりばね骨組構造解析により確認した。

本研究の模型実験と数値計算とにより，得られた知見は次のとおりである。まず 1 点目として，部分補強により構造性能が向上することを模型実験から確認した。また 2 点目として，アンカーボルトでの接合を用いる場合には，比較的小さな荷重状態においてはトンネル本体と補強部材とが剛結であるとみなして構造計算を行ってもよいということである。3 点目は，アンカーボルトにより部分補強を固定する場合について，その降伏状態が，接合面に作用するせん断力に対し，面が有するせん断抵抗力だけでなく，母材の曲げひび割

れやアンカーボルトの引き抜きによっても決定されると考えられる。ただし，本研究における解析モデルの仮定は不明瞭であるという指摘を受けているため，解析モデルの修正を検討中である。

また課題としては，現場での施工方法の確立が挙げられる。検討した部分補強は，鋼板をアンカーボルトにより二次覆工の形状に沿って，密着させるように接合したが，現用のシールドトンネル内において，アンカーボルト打設のための多数のコア抜きの実施は実際のところ現実的ではない。現場への円滑な導入のため，補強の施工方法の簡易化についても検討が必要であると考えられる。

今後は部分補強の設計法について検討する予定である。実際のシールドトンネルにおいて部分補強設計を行う際にはトンネルの構造物としての重要性を考慮し、作用する荷重に対して、

- トンネル本体と補強部材とが剛結であるとみなして計算できる範囲で設計を行うか、
- 接合面が降伏して剛結ではなくなったときの挙動まで考慮して設計を行うか

を判断する必要がある。しかし、どちらの設計を行うときでも、接合面が降伏する荷重状態を机上で検討可能であることが重要であるため、本研究の結果を適切に反映した照査を行えるようにまとめることを検討している。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2013。
- 2) (社)土木学会：複合構造標準示方書・設計編，2015。

- 3) 本多文夫, 椎名久男, 栗原和美, 江向直美, 池島敏二：シールドとう道天井部の空洞充填補強技術の導入，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集，6-414，pp. 827-828。2009。
- 4) T. Sudo, T. Ishikawa, R. Hirasawa, H. Hoshino and A. Koizumi：An Experimental Study on the Maintenance and Repair of Communication Cable Tunnels Constructed by Shield Tunneling Method, Proceedings of the 2014 IAL-CCE Conference, Japan, pp. 678-685, 2014.
- 5) 松本安弘, 出口大志, 川端一嘉：二次覆工を有するシールドトンネルのひび割れのモデル化に関する実験および数値的考察，第71回土木学会年次学術講演会講演概要集，2016。
- 6) 長江拓也, 池永昌容, 中島正愛, 吹田啓一郎：鋼構造露出柱脚におけるベースプレートと基礎モルタル間の摩擦抵抗，日本建築学会構造系論文集，第606号，pp. 217 - 223, 2006。
- 7) (社)土木学会：2006年制定トンネル標準示方書「シールド工法」・同解説，2006。
- 8) 塩冶幸男, 内藤幸弘, 阿南健一, 大塚正博, 小泉淳：経年劣化したシールドトンネルの補強に関する研究，土木学会論文集，Vol. 67，pp. 62-78, 2011。

(2016. 8. 5 受付)

## THE MODEL TESTS ON THE BEHAVIOR OF THE SHIELD TUNNEL WITH PARTIALLY REINFORCED SECONDARY LINING

Yasuhiro MATSUMOTO, Taishi DEGUCHI and Kazuyoshi KAWABATA

Model tests of the shield tunnels made by steel segments with partially reinforced secondary lining are carried out in order to evaluate the behavior of these. From the tests, the behavior of the connection between secondary lining and partially reinforcement is grasped. The numerical analysis using beam spring model on the basis of mechanical characteristic of connection is coincide to result of the model tests.