

35. 充填硬化材の加圧注入圧を利用したトンネルの補強技術の開発

－ 補強セグメントの解析と載荷実験 －

大成建設株式会社
大成建設株式会社
大成建設株式会社

○ 竹中 計行
高倉 克彦
猪口 泰彦

1. はじめに

高度成長期以来構築されてきた建設物が、老朽化や建設当時との荷重条件の違いによる耐荷力不足の問題に直面しており深刻な問題となっている。都市部の地下に建設されている地下鉄、下水道、共同溝などのトンネルでは、都市再開発による外荷重変化に伴う覆工の変状といった事例が生じており、トンネルの補強技術に対する需要が高まっている。このような状況を鑑み、筆者らは充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強を目的とした技術の開発を行ってきた。本稿では、提案する補強技術の解析検討とその効果を確認するために行った載荷実験結果について報告する。

2. 充填硬化材の加圧注入圧を利用した補強構造の概要

2.1 補強構造の概要

補強構造を図-1 に示す。補強構造は、既設トンネルの内面に補強リングを配置し、既設トンネルと補強リングの間にゴムチューブを配置する。そのゴムチューブ内に充填硬化材を加圧注入して既設トンネルを外側へ押す圧力を作用させて、鉄筋応力の緩和と補強リングと既設トンネルとの一体化を図るものである。

2.2 補強構造の特徴

補強構造の特徴を以下に示す。

- ① 即時的な補強効果を発揮できる。
補強時に充填硬化材の加圧注入を行うことから、補強工完了時点で、加圧注入による補強効果を発揮できる。
- ② 既設トンネル内空を大きく侵さない。
既設トンネルに支柱や水平梁などを設置して補強する従来工法に比べて、補強リングによって補強できることから、補強リングの厚さ分しか内空を侵さない。
- ③ 既設トンネルの施工誤差に対応できる。
既設トンネルと補強リングの間にゴムチューブを配置することから、既設トンネルの目違いや変形に対応した補強が可能である。

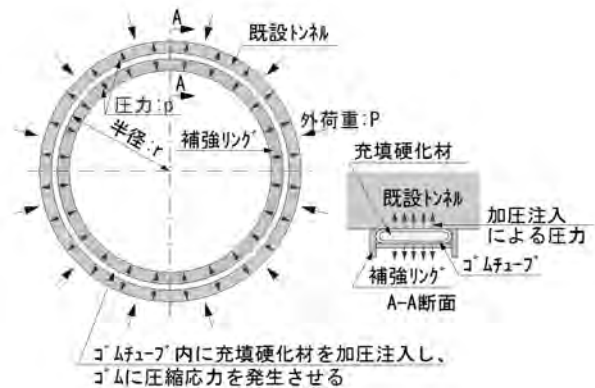


図-1 補強構造の概要

2.3 補強構造の成立性の検討

補強構造の成立性のポイントは、①充填硬化材が液体から硬化体に変化する過程で、加圧注入圧が残留すること、②既設トンネルに悪影響を与えない充填硬化材の注入圧を設定することである。

①の加圧注入圧の残留については、既実験¹⁾より圧力は 2/3 まで低くなるが残留することを確認している。②の加圧注入圧の設定は、補強リングを一定の間隔で配置(図-2 参照)して加圧注入を行うことから、セグメントのリング間継手に与える影響を考慮する必要がある。また、図-1 のようにトンネル全体に加圧注入を行う場合には、セグメントのリング方向の軸圧縮力を低減させることから、引張鉄筋への影響を考慮する必要がある。そこで、既解析²⁾により既設トンネルに悪影響を及ぼさない注入圧の大きさを確認している。

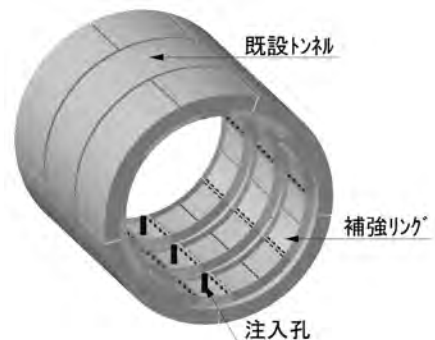


図-2 補強リング配置模式図

3. 補強対象

補強の対象は、図-3 に示すように縦つぶれの変形を生じたトンネル、もしくは将来的に縦つぶれの変形が懸念されるトンネルを考える。ここでは、縦つぶれの変形においてトンネル頂部に内側引張の曲げモーメントが卓越する場合のトンネルの部分補強を取上げる。なお、トンネル頂部には補強部材を配置可能な空間が 50cm 程度存在する条件とする。このような空間を有する構造物は、2車線の道路トンネルや複線の鉄道トンネルなどが挙げられる。

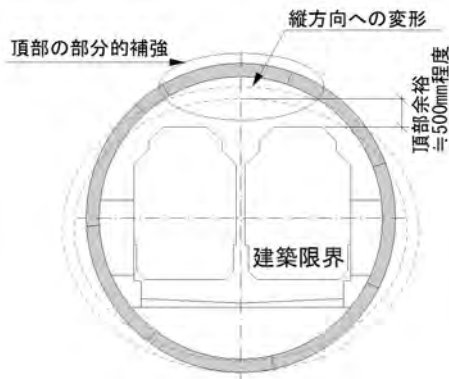


図-3 部分補強の対象概要図

4. 部分補強部材の構造検討

4.1 部分補強部材の構造検討方法

補強構造の検討は、2次元フレーム解析で行った。モデルは、図-4 に示すように円形トンネルの頂部に補強アーチを配置する形状とした。なお、補強アーチと既設トンネル（セグメント）との接続部材は剛性の高い部材とした。解析は、セグメントと補強アーチの間に充填硬化材の加圧注入圧（ 67kN/m^2 ）の圧力を作用させて、既設トンネル頂部に外側引張の曲げモーメントが効率的に発生する補強部材の構造を検討した。

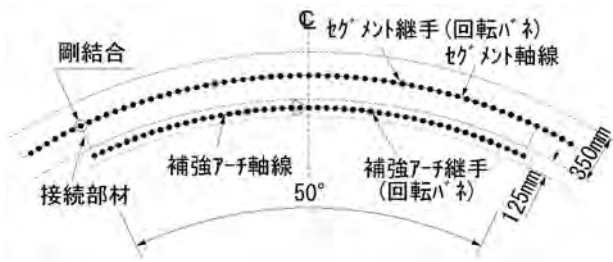


図-4 トンネル頂部構造モデル (TYPE-1)

4.2 部分補強部材の構造検討結果

補強アーチを配置したモデル (TYPE-1) に加圧注入圧を作用させた場合の頂部付近の曲げモーメントを図-5 に示す。TYPE-1 では、補強の目的とは反して頂部付近に内側引張の曲げモーメントが発生する。これは、補強アーチに発生する軸圧縮力の反力が接続部材を介して既設トンネルに内側引張の曲げモーメントが発生していると考えられる。

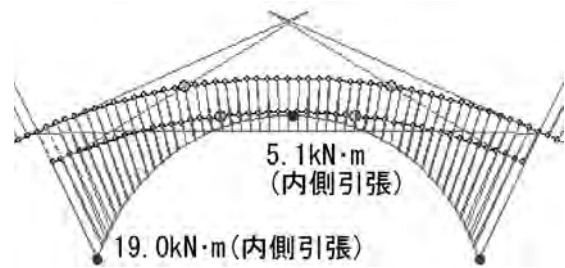


図-5 頂部曲げモーメント (TYPE-1)

そこで、内側引張の曲げモーメントを抑えるために、図-6 に示すような補強アーチ両端部を結ぶ弦材を配置したモデル (TYPE-2) を考案した。TYPE-2 の既設トンネルと補強アーチの接合 (A) 部は、スライド可能なピン結合として解析を行った。TYPE-2 のモデルに加圧注入圧を作用させた場合の頂部付近の曲げモーメントを図-7 に示す。TYPE-2 では、注入圧によって頂部付近に補強に有効な外側引張の曲げモーメントが発生することが確認された。

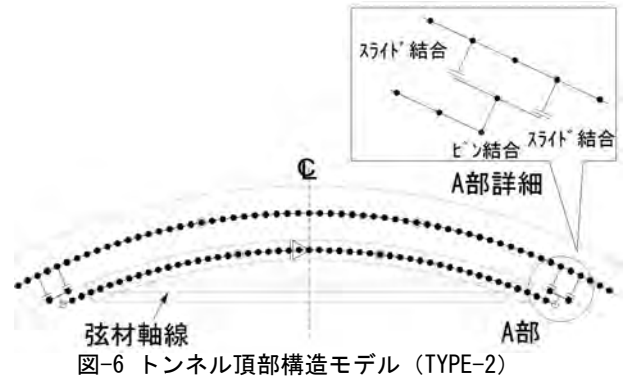


図-6 トンネル頂部構造モデル (TYPE-2)

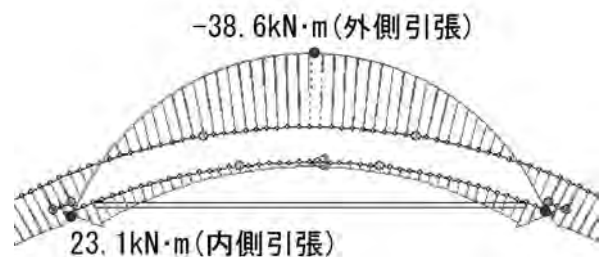


図-7 頂部曲げモーメント (TYPE-2)

4.3 部分補強部材による効果の試算

TYPE-2 による部分補強効果を確認するため、図-8 に示す検討条件で、側圧が低下し曲げが卓越するケースとして地下水が 10m 低下した場合について試算した。セグメントは、日本下水道協会の標準セグメントを参考に高さ 350mm、幅 1000mm とした。補強アーチは主桁高 125mm、幅 700mm とし、弦材は溝形鋼[125 を補強アーチ両側に 2 本設置した。加圧注入圧は、頂部設計水圧の 100kPa の残存圧力 67kPa (既実験結果 1) から加圧注入圧の 2/3) を作用させた。補強範囲は図-4 に示すように頂部から両側に 25° ずつの 50° 区間としたが、この時の補強部材の高さ (補強アーチ頂部から弦材

下端までの距離)は約45cmとなった。

設計荷重時から部分補強時までの曲げモーメント分布を図-9に示す。設計荷重時から地下水位が10m低下することによって頂部の曲げモーメントが約2倍に増加しているが、部分補強を行うことによって、頂部の曲げモーメントは地下水位低下時から約25%低下した。以上より、加圧注入圧によりセグメントに作用している断面力が緩和することを確認した。

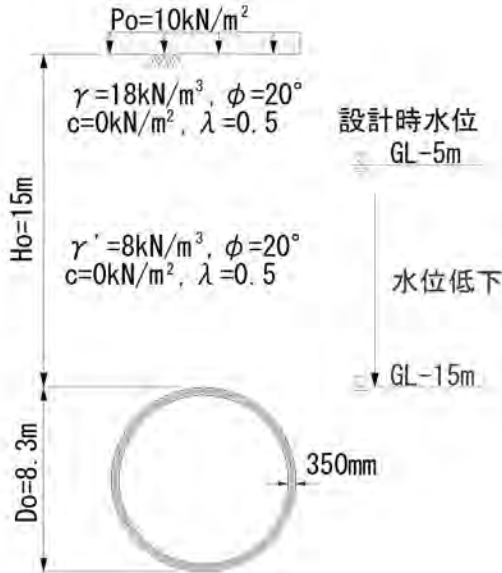


図-8 部分補強試算条件

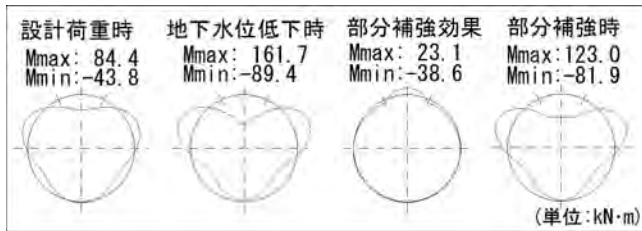


図-9 試算における曲げモーメント分布図

5. 補強セグメントの荷重実験

5.1 実験概要

部分補強の効果を確認するために、図-10に示すような部分補強を行ったセグメントの曲げ荷重実験を行った。RCセグメント内径は6,000mm、高さ300mm、幅1,200mmである。補強アーチは桁高125mm、幅750mm、弦材の仕様は溝形鋼[125とした。補強アーチの両端部は、セグメントに固定された接合金物と接合する仕様とした。この接合部は、φ35mmの丸鋼によりピン接合としているが、補強アーチの接合部の丸鋼通し孔を長孔とすることで、スライド可能な接合としている。

充填硬化材は、高炉セメント系無収縮グラウト材を使用し、セグメントと補強アーチの間にはゴムチューブを配置して、充填高さを35mmとした。加圧充填は、補強アーチを設置したセグメントをスライド支承に設置して行い、荷重実験は、充填後2週間養生して実施した。計測器は、セグメン

ト、補強アーチ、補強アーチ端部、弦材に設置し、加圧注入時及び荷重実験時に測定した。なお、実験にあたっては、セグメントを平面要素、充填硬化材の加圧時は荷重、硬化時はバネ、補強アーチを梁としてモデル化した、2次元の非線形有限要素法解析を行い比較を行った。

荷重前の標準供試体の圧縮試験の結果、セグメントの圧縮強度は84.4N/mm²、充填硬化材の圧縮強度は94.7N/mm²であった。

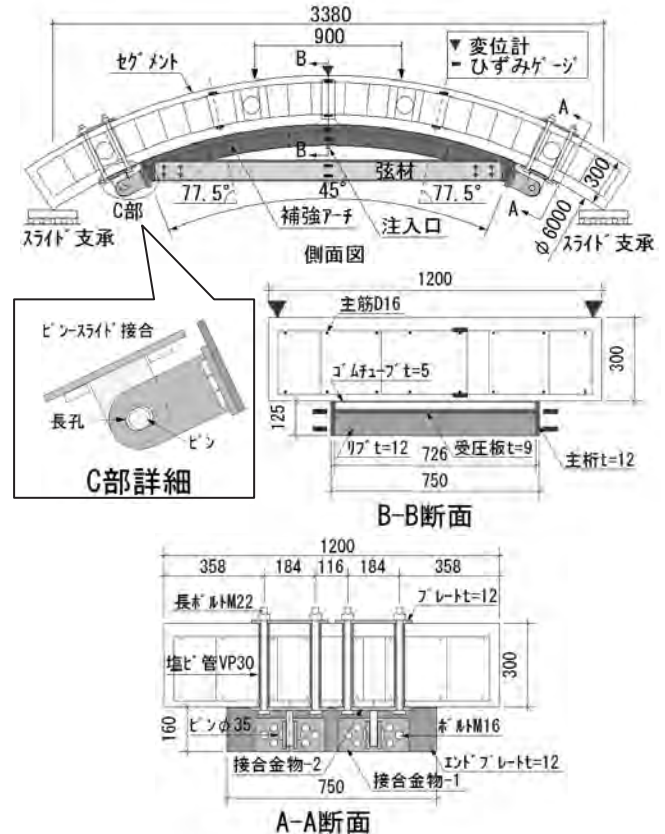


図-10 補強セグメント概要

5.2 実験結果

(1) 加圧注入結果

充填硬化材は充填性を確認するため、100kPaまで加圧注入し、20kPaまで減圧した後、再加圧して100kPa程度となった時点でバルブを閉め終了した。圧力センサーと注入口の高低差から、最終注入圧は注入口で80kPa程度であった。加圧注入圧と主筋ひずみの関係を図-11に示すが、加圧注入により目的であった外側引張の曲げの発生を確認した。また、主筋ひずみの計測値は解析により傾向を概ね再現できた。充填硬化材は約2日で固体に移行するが、主筋ひずみは外気温の変化の影響を受けつつ変化するが、引張側(外側)と圧縮側(内側)のひずみ差は最終加圧注入時から著しく小さくなるような現象は認められなかった。1週間養生後の荷重直前の主筋の内外ひずみ差は約60μであり、解析結果において硬化後の残存圧力40~60kPaに相当していた。

(2) 荷重実験結果

荷重実験は、内側の主鉄筋降伏後に荷重点のコンクリートが圧壊の兆候が見られたのでその破壊直前で荷重を中止した。最大荷重時には、補強アーチの端部が変形し、写真-1のように補強アーチの端部付近はセグメントと大きな離隔があった。最大荷重は462kNで、補強のない単体セグメントの破壊荷重299kNの約1.5倍となった。

荷重と鉛直変位の関係を図-12に示す。セグメントは200kNまでは比例関係を示しているが、250kNを過ぎた付近から変位が急に大きくなり、解析値とのずれが大きくなる。これは、破壊時に見られた補強アーチ端部の変形によるものと考えられる。

荷重と主筋ひずみの関係を図-13に示す。主筋ひずみの降伏は荷重287~368kNで発生した。計測値は有限要素法の解析値とほぼ同様の傾向を示しており、加圧注入圧が40~60kPaの解析値が計測値を概ね再現している。図-13には単体セグメントの解析結果も付記する。引張鉄筋が許容応力度に達する解析値は、単体セグメントで170kN程度、加圧注入圧40kPaの場合で260kN程度と単体セグメントの1.5倍程度の耐力増加が見込まれる。補強セグメントの最大荷重が単体セグメントの破壊荷重の約1.5倍と解析値と同じ傾向を示したことから、解析が概ね実験を再現している。

補強アーチと弦材の荷重とひずみの関係を図-14に示す。補強アーチの解析値のひずみは、軸圧縮力と曲げ成分が徐々に大きくなるのに対し、計測値は曲げ成分が卓越し、軸力成分は引張側に移行した。補強アーチははりの挙動に近い荷重分担を示したと考えられる。弦材のひずみは、計測値の傾向は解析値と近いが、計測値では曲げ成分の伸びは小さい。その原因としては、補強アーチが変形したことや弦材端部の条件がピン接合に近い状況になっていたと考えられる。

6. まとめ

充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強構造の解析的な検討と荷重実験を実施し、補強セグメントに対する充填硬化材の加圧注入時にセグメントの補強に有効な外側引張の曲げが発生すること、補強セグメントが単体セグメントの約1.5倍の破壊耐力を有することを確認した。

参考文献

- 1) 高倉克彦, 森田泰司: 充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～充填材の硬化過程における残存圧力確認実験～, 土木学会第69回年次学術講演会, VI-110, 2014
- 2) 猪口泰彦, 高倉克彦: 充填硬化材の加圧注入圧を利用した既設トンネルの補強技術の開発～部分補強に関する解析的検討～, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-327, 2015

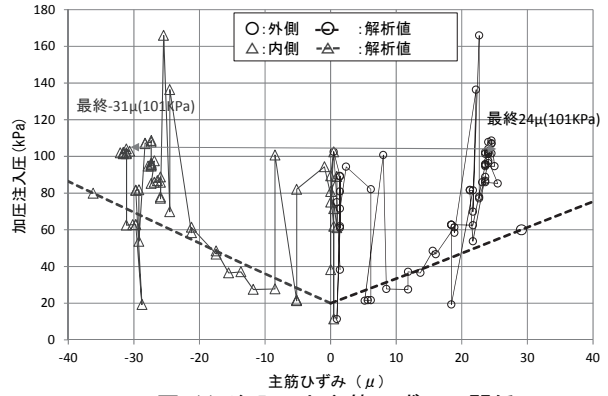


図-11 注入圧と主筋ひずみの関係

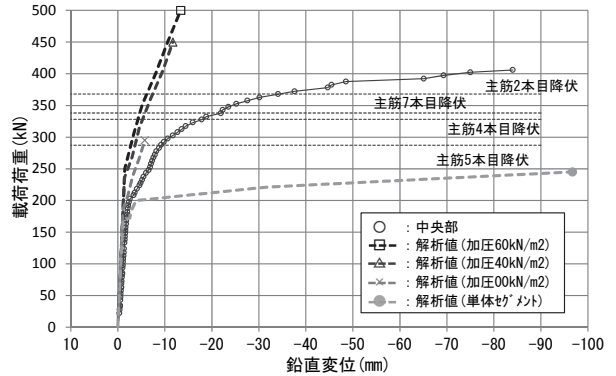


図-12 荷重と鉛直変位の関係

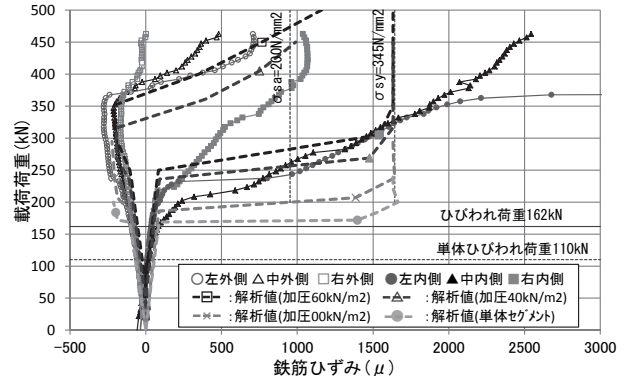


図-13 荷重と主筋ひずみの関係

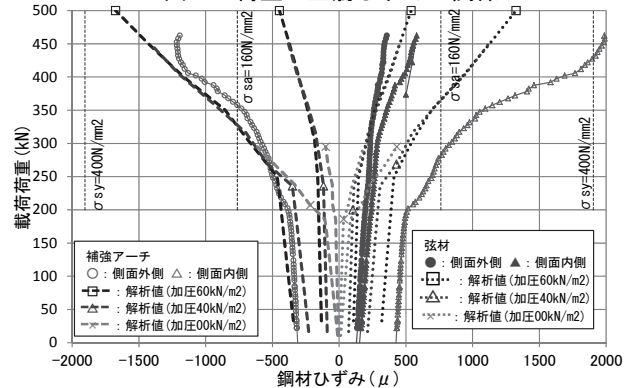


図-14 荷重と補強アーチ及び弦材のひずみの関係



写-1 荷重試験後の状況