

V-7 既設トンネルの補修・補強技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定、道路整備勘定）

研究期間：平 12～平 16

担当チーム：基礎道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、石村利明、箱石安彦

【要旨】

老朽化したトンネルが増大する状況の中、公共投資財源が制約される中で効率的なトンネルの維持管理を進めるために、変状が発生しているトンネルに対して適切な補修、補強を行うための技術開発が求められている。

本研究では、変状が発生したトンネルに適用される補修工や補強工の、耐荷力の決まる破壊形態を押抜き載荷試験や覆工載荷実験によって明らかにし、その設計に用いる耐荷力の評価方法を検討した。また、新材料を用いた新工法として、覆工コンクリート片はく落防止の役目とともに対策実施後も覆工表面のひび割れが観察可能な補修工、および覆工が損傷して耐荷力が低下した覆工の内面に薄肉の補強工を施すことで耐荷力の向上を図る補強工を開発した。さらに、変状トンネルの変状発生メカニズムとして、変状が発生したトンネルを対象にシミュレーション解析による作用荷重の推定を行った。

キーワード：トンネル、覆工コンクリート、はく落防止工、内巻きコンクリート工、炭素繊維シート接着工

1. はじめに

老朽化したトンネルが増大する状況の中、公共投資財源が制約される中で効率的なトンネルの維持管理を進めるために、変状が発生しているトンネルに対して適切な補修、補強を行うための技術開発が求められている。ここで、補修工とは、漏水対策工やコンクリート片のはく落防止工のように機能の低下したトンネルにおける機能劣化の進行抑制または機能を復元させる対策工を、補強工とは、構造物の耐荷力を強化し性能を高める対策工をいう。

本研究では、補修工では、コンクリート片のはく落防止工を対象にして、覆工内面からコンクリート片がはく落することを想定した押抜き載荷試験を実施することにより、また補強工では、覆工内面の補強工を対象にして、内巻きコンクリート工、炭素繊維シート接着工を施した場合の耐荷力を実大規模の覆工載荷試験を実施することにより、補修・補強工の設計における耐荷力の評価方法を検討した。また、民間企業 13 社との共同研究により、新しい補修工として覆工コンクリート片はく落防止の役目とともに対策工後も覆工表面のひび割れ等が観察可能なはく落防止工を、また新しい補強工として損傷した覆工の耐荷力の向上を図る覆工内面の薄肉の補強工を、各々、開発した。さらに、変状トンネルの変状発生メカニズムとして、変状が発生したトンネルを対象にシミュレーション解析による作用荷重の推定を行った。

2. はく落防止工の設計法

はく落防止工の設計においては、はく落懸念の高い覆工コンクリート片が落下することを想定して、はく落防止工がその落下するコンクリート片の重量を保持できる耐荷力を有するかどうかを照査する必要がある。しかし、多くのはく落防止工については、その耐荷力の評価方法が確立されていないのが現状である。このため、以下の実験検討を実施した。

2.1 はく落防止工の耐荷力に関する押抜き載荷試験

本研究では、現在一般的なはく落防止工¹⁾のうち炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、形鋼による当て板工、ひび割れ注入工について、覆工内面からコンクリート片がはく落することを想定した押抜き載荷試験

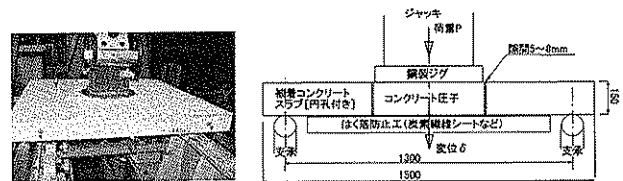
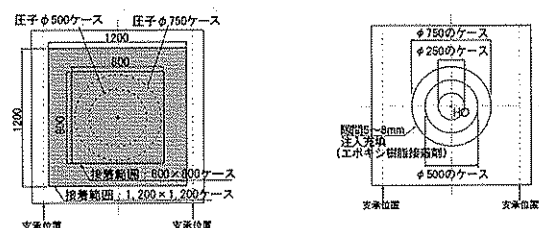
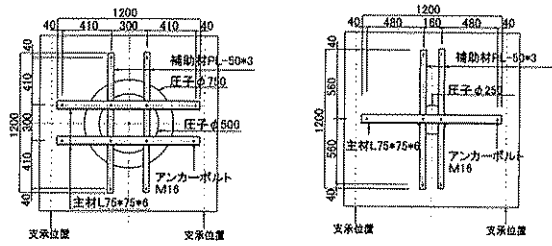


図 2.1 押抜き載荷試験の装置概要



(a) 炭素繊維シート接着工および(b)鋼板接着工 (c)ひび割れ注入工
図 2.2(1) 各対策工のコンクリート供試体への取付図(1)



(d) L形鋼による当て板工

図 2.2(2) 各対策工のコンクリート供試体への取付図(2)

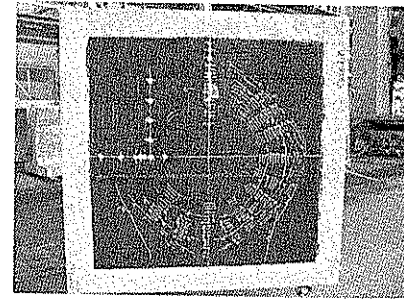


写真 2.1 炭素繊維シートの剥離進展状 (case.3)

表 2.1 試験ケース

| 試験ケース 記号 | 対策工 | | | 圧子 直径 φ mm | 母材コン クリート 圧縮強度 N/mm ² |
|-----------------|--|---------------------|-----------------|---------------------|---|
| | 材料 | 目付 | 接着範囲 | | |
| 炭素繊維 シート接着工 | | | | | |
| case.1 | 炭素繊維 シート (エポキシ 樹脂系 接着剤) | 300g/m ² | 800mm*800mm | 500 | 15.7 |
| case.2 | | ×直交2層 | 1,200mm*1,200mm | | |
| case.3 | | 200g/m ² | | | |
| case.4 | | ×直交2層 | | | |
| case.5 | | | | | |
| 鋼板接着工 | 材料 | 接着 | 接着範囲 | | |
| case.1 | SS400 | エポキシ | 800mm*800mm | 500 | 25.7 |
| case.2 | t=4.5mm | 樹脂 | 1,200mm*1,200mm | | 17.8 |
| case.3 | | (接着厚は 約5mm) | | 750 | 25.7 |
| case.4 | | | | | 26.3 |
| L形鋼による 当て板工 | 主材:L75*75*6(SS400)×L1×n、 補助材:平鋼t=3mm*b=50mm(SS400)×L2×m 鋼材端部固定:コンクリートアンカーボルトM16(後施工) | | | | |
| | n | m | L=L1=L2 | | |
| case.1 | 2 | 2 | 1,200mm | 750 | 24.4 |
| case.2 | 2 | 2 | | 500 | 17.8 |
| case.3 | 1 | 2 | | 250 | 24.2 |
| ひび割れ 注入工(※1) | 材料 | 注入接着部 | | | |
| case.1 | エポキシ | ・母材と圧子の隙間 | | 750 | 23.8 |
| case.2 | 樹脂 | の全周×全高 | | 500 | 15.5 |
| case.3 | 接着剤 | ・隙間:t=5~8mm | | 250 | 24.1 |
| 無垢 | コンクリートスラブ供試体に内孔無し。 | | | | |
| case.1 | 対策工無し | | | 500 | 23.9 |

(※1)ひび割れ注入工のケースについては、ひび割れを圧子部とスラブ部の隙間(5~8mm)でモデル化し、この隙間にエポキシ樹脂接着剤を充填して、ひび割れ注入工の試験モデルとした。

(図 2.1、図 2.2(1)~(2)、表 2.1) により、各はく落防止工の力学的な破壊形態を調べ、耐荷力の評価方法を検討した。

2.2 試験結果と耐荷力の評価方法

(1) 炭素繊維シート接着工のケース

押抜き荷重試験では、炭素繊維シートは強制変位の増加に伴って、圧子形状と相似的なほぼ円形状の剥離形状で剥離範囲を順次広げながら(写真 2.1)押抜き荷重が漸増し、最終的には剥離範囲が接着範囲の端部に達した時点で荷重低下となった(図 2.3)。

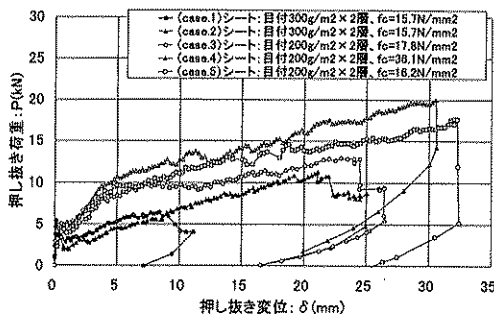


図 2.3 荷重変位曲線 (炭素繊維シート接着工ケース)

このような破壊形態の場合には、耐荷力(最大荷重)の算定に押抜き荷重を剥離周長で除した単位剥離強さ(Spo)を用いることが提案されており²⁾、本試験でもその提案の考え方の妥当性が確認された。したがって、炭素繊維シート接着工法による場合の押抜き耐荷力(P)は、シート剥離進展時の剥離周長(L)と単位剥離強さ(Spo)の積として、次式で評価できる²⁾。

$$P = S_{po} \times L \quad \dots (式 2.1)$$

ここで、Spoは押抜き荷重試験(荷重、剥離周長)から設定できる。参考値として、今回の試験結果はSpo=3~6N/mmであった。また、Lは、剥離形状をばく落塊形状と相似形とし、シート接着範囲内で最も大きい剥離範囲における剥離周長として設定する。

(2) 鋼板接着工のケース

押抜き荷重試験では、強制変位の増加に対して押抜き荷重は最終破壊時までほぼ直線的に増加し、剥離が圧子境界付近または全面で一瞬にして発生し、押抜き荷重が急激に抜けた(図 2.4)。

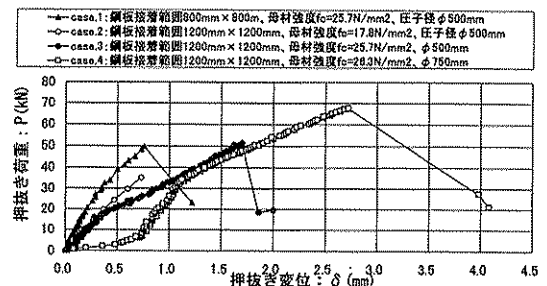


図 2.4 荷重変位曲線 (鋼板接着工ケース)

耐荷力の算定する指標として、最大荷重を接着面積で除した値(平均接着強度)、最大荷重を圧子境界の周長で除した値(単位剥離強さ)の2つの指標について検討してみた結果(表 2.2)、耐荷力比は、平均接着強度比とは異なり、単位剥離強さ比とはほぼ同じであった。このことから、耐荷力は、接着面積には関係なく、剥離開始位置となる圧子境界近傍の抵抗で決まると考えられる。

表 2.2 平均接着強度と単位剥離強さの計算

| 鋼板 接着工 ケース 記号 | 試験結果 | | 平均接着強度 | | | | 単位剥離強さ | | |
|------------------------|------------|------|--|--------|------|----------------------|--------|------|--|
| | Pmax kN | 比k1 | 抵抗面積 A (※1) ×10 ⁶ mm ² | Pmax/A | | 抵抗周長 L (※1) mm | Pmax/L | | |
| | | | | 比k2 | 比k3 | | 比k2 | 比k3 | |
| case.1 | 50 | 1 | 0.44 | 0.113 | 1 | 1,571 | 31.8 | 1 | |
| case.2 | 35 | 0.70 | 1.24 | 0.028 | 0.25 | 1,571 | 22.3 | 0.70 | |
| case.3 | 51 | 1.02 | 1.24 | 0.041 | 0.36 | 1,571 | 32.5 | 1.02 | |
| case.4 | 68 | 1.36 | 1.00 | 0.068 | 0.60 | 2,356 | 28.9 | 0.91 | |

※1) 接着範囲から圧子部を差し引いた面積。
 ※2) 比k1~k3は、各々、case.1の値に対する比。

したがって、鋼板接着工による場合の押抜き耐荷力 (P) は、鋼板接着面積には関係なく、鋼板剥離時の単位剥離強さ (Spo) にはく落塊の境界の周長 (Lo) の積として、次式で評価できる。

$$P = Spo \times Lo \quad \dots (式 2.2)$$

単位剥離強さ Spo は、今回の試験結果からは 22~32N/mm が得られているが、現時点ではデータ数が4ケース分と非常に少ないことから、今回の試験条件と大きく異なる場合の単位剥離強さについては試験等で確認する必要がある。

(3) L形鋼による当て板工 (L形鋼) のケース

押抜き載荷試験では、いずれのケースでも主材の固定ボルトの一方が抜けて荷重低下を示す挙動となった (図 2.5 中では※印)。しかし、他の抜けていない主材または補助材がそれまで主材が負担していた荷重を受け替えるため、荷重変位曲線は再び正の勾配を示した。最終破壊形態は、最終破壊時まで荷重支持した固定ボルト (補助材部を含む) 部の母材コンクリートスラブ構造上での位置によって異なり、例えば case.3 では、最終破壊時まで荷重支持した補助材の固定ボルトの位置が供試体スラブ中央に位置したため、母材コンクリートはスラブ中央に集中荷重を受けた状態となり曲げ破壊に至った。

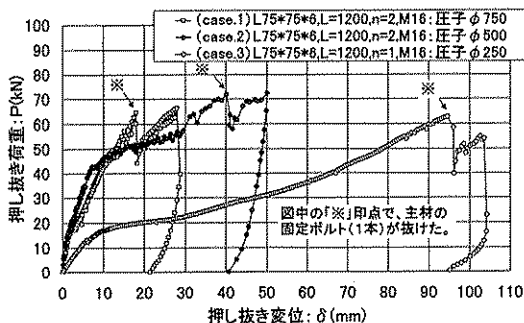


図 2.5 荷重変位曲線 (L形鋼による当て板工)

主材両端の固定ボルトの一方が抜けるときの押抜き耐荷力 (P=63N~72kN) は、全ケースで、一本の形鋼の両端2箇所を固定するアンカーボルトの引抜耐力 (Pa= 33 kN/本×2 箇所) にほぼ相当した。圧子

を数本の形鋼で覆っても、押抜き荷重は全ての形鋼に均等に作用することではなく、荷重負担の最も大きい一本の形鋼で固定アンカーがまず抜け、その後も同様に残された形鋼群の中で荷重負担の最も大きい形鋼で固定アンカーが一本ずつ抜けていった。つまり、圧子を覆う形鋼の本数を増やしても、その本数に比例した押抜き耐荷力は得られず、押抜き耐荷力は一本の主材の固定アンカーの引抜耐力で決まった。したがって、形鋼による当て板工の場合の押抜き耐荷力 (P) は、はく落塊を覆う数本の鋼材群のうち一本の鋼材の両端2箇所を固定するアンカーボルトの引抜き耐力 (Pa) で決まり、次式で評価できる。

$$P = n \times (m \times Pa) \quad \dots (式 2.3)$$

ここで、n : はく落塊を覆う主材の本数 (n=1)

m : 主材を固定するアンカーボルト本数 (m=2)

また、アンカーの位置次第では、被着コンクリート部材がアンカー部を介して受ける荷重によって損傷を受ける場合があるため、被着コンクリート側での構造計算チェックも必要である。

(4) ひび割れ注入工のケース

押抜き載荷試験では、いずれのケースも母材コンクリートスラブの曲げ破壊が発生して (写真 2.2) 押抜き荷重が低下した (図 2.6)。この挙動は参照ケースとして実施した無垢ケースの場合とほぼ同じであったことから、ひび割れ注入が確実に行われていれば無垢の状態とほぼ同程度の押抜き耐荷力を期待できると考えられる。しかし、複雑なひび割れ部の全隙間に接着剤を注入・充填することは現在の技術では非常に難しいため、本工法の単独使用には慎重を期すべきと考える。

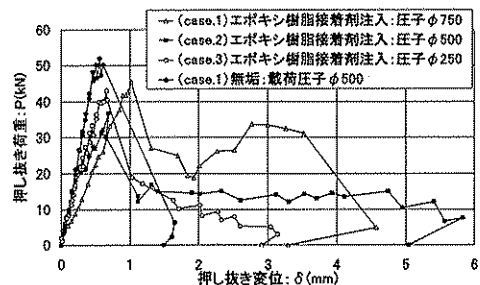


図 2.6 荷重変位曲線 (ひび割れ注入工ケース)

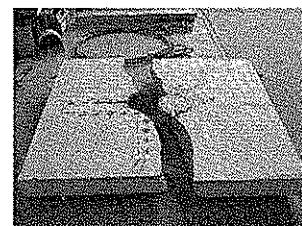


写真 2.2 最終破壊状況 (ひび割れ注入工ケース: case.3)

3. 覆工内面の補強工の設計法

覆工内面の補強工の設計においては、損傷して耐荷力の低下した覆工とその内面に施された補強工の複合構造が、想定される作用荷重に対して構造不安定とならない耐荷力を有するかどうかを照査する必要がある。しかし、このような複合構造の耐荷力については、その評価方法は確立されておらず、また補強効果のメカニズムや耐荷力が決まる破壊形態も明らかになっていない。このため、以下の実験検討を実施した。

3.1 覆工内面の補強工の耐荷力に関する覆工載荷実験

(1) 実験概要

損傷した覆工の内面に補強工を施した場合の複合構造の破壊形態および耐荷力を調べ、さらにはその複合構造の耐荷力の評価方法を検討する目的で、実大規模の覆工載荷実験を実施した(写真3.1)。ここで、覆工コンクリート供試体(呼び配合 18-12-40-N)の寸法は、二車線道路トンネル断面(上半)の覆工と同じ寸法規模とし、外径 9.7m、覆工厚 30cm とし、これを水平置き(トンネル軸方向長さ 1.0m)にして載荷した。

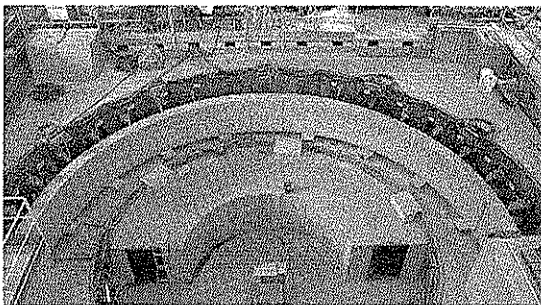


写真 3.1 覆工載荷実験

(2) 載荷方法

実験の作用荷重には、以下の2形態を設定した。

載荷形式 I: トンネル上方の地山が緩んで、ある高さ相当の地山重量がトンネル覆工天端に直接に荷重として作用する、いわゆる典型的な緩み土圧を想定した荷重形式(図3.1)。

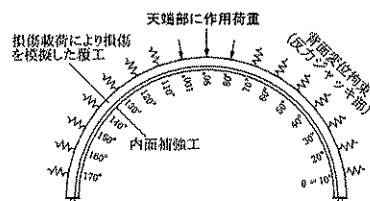


図 3.1 載荷形式 I (概念図)

載荷形式 II: 膨張性地山のように、トンネル覆工

の全周に等方的に等荷重が作用する場合を想定した荷重形式(図3.2)。

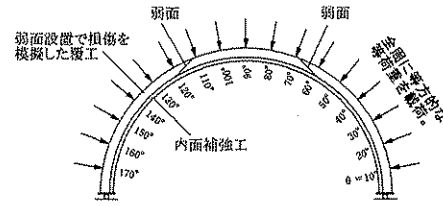


図 3.2 載荷形式 II (概念図)

(3) 対象工法と実験ケース

実験の対象工法は、内巻きコンクリート工、炭素繊維シート接着工とした。実験ケースを、載荷形式 I については表 3.1、図 3.3~図 3.5 に、載荷形式 II については表 3.2、図 3.6 に示す。

表 3.1 載荷形式 I に対する実験ケース一覧

| 実験ケース | 実験ケース内容 | | 供試体コンクリート | | |
|--------|---------|--|-----------|------------------------|----|
| | 載荷 | 補強工 | 材齢(日) | 圧縮強度 N/mm ² | |
| case.1 | 損傷載荷 | — | 13 | 21.4 | 覆工 |
| | 再載荷 | 無補強 | 14 | 21.7 | |
| case.2 | 損傷載荷 | — | 13 | 22.1 | 覆工 |
| | 補強後載荷 | 内巻きコンクリート (アレン、 $t=12.5\text{cm}$) | 28 | 25.7 | |
| case.3 | 損傷載荷 | — | 17 | 20.0 | 覆工 |
| | 補強後載荷 | 炭素繊維シート接着 接着範囲: $\theta=50-75$ 度および $105-130$ 度の2箇所。 | 28 | 23.1 | |
| case.4 | 損傷載荷 | — | 13 | 19.5 | 覆工 |
| | 補強後載荷 | 炭素繊維シート接着 接着範囲: $\theta=0-180$ 度の全周。 | 33 | 21.5 | |

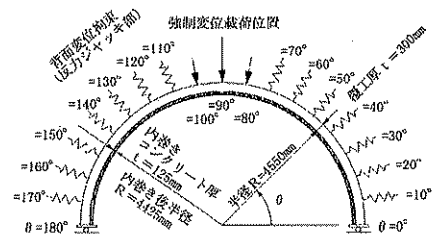


図 3.3 内巻きコンクリート工ケース (case.2)

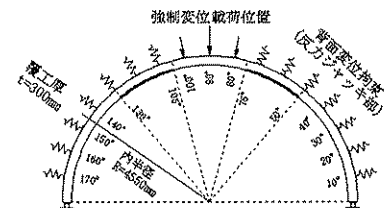


図 3.4 炭素繊維シート接着工ケース (case.3)

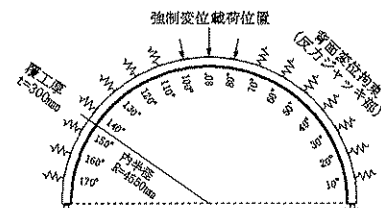


図 3.5 炭素繊維シート接着工ケース (case.4)

表 3.2 荷重形式 II に対する実験ケース一覧

| 実験ケース | 実験ケース内容 | | 供試体コンクリート | |
|--------|-----------|----------------------------|-----------|---------------------------|
| | 荷重 | 補強工 | 材齢 (日) | 圧縮強度 (N/mm ²) |
| case.5 | 補強後 載荷 | 内巻きコンクリート (厚さ t=12.5cm) | 32 | 25.4 |
| | | | 15 | 19.9 |

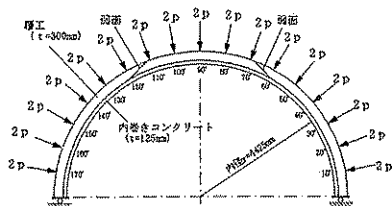


図 3.6 内巻きコンクリート工ケース (case.5)

(4) 覆工の損傷の模擬と実験手順

荷重形式 I の場合: 荷重形式 I で、無垢の覆工供試体にひび割れや圧壊が発生するまで荷重を行い、荷重荷重が最大荷重の約 95% 荷重時まで低下した状態を損傷供試体とした (損傷載荷)。次に、損傷載荷終了時荷重を一旦除荷して、覆工供試体の内面へ補強工を施し、再度、損傷載荷と同じ荷重形式で荷重を行い最終破壊まで荷重した (補強後載荷)。

荷重形式 II の場合: 等方的に覆工に荷重が作用した場合には、円周方向に高い圧縮軸力を受けた状態でのせん断破壊が発生するため、荷重形式 II では、せん断破断面を模擬した覆工供試体として、左右肩部に覆工の内面から外面まで貫通する斜め面状 (円周方向の接線方向に対して約 15 度の角度) の弱面を設けた。弱面の作成は、テフロンフィルム (t=0.2mm) を 2 枚のステンレス板 (SUS304、t=2mm) で挟みこんで覆工供試体の型枠内に挿入してコンクリートを打設した。次に、弱面を設けた覆工供試体へ補強工を施し、荷重を行った。

3.2 実験結果

(1) 荷重形式 I の場合

1) 無補強ケース (case.1)

覆工を損傷させた後に無補強で再載荷したときの耐荷力は、無垢の覆工の耐荷力 (図 3.7 の荷重変位曲線の最大値で約 2,000kN。土被り高さ約 40m の緩み荷重に相当。) の約 76% までしか回復しなかった。また、無補強で再載荷したときの曲線勾配は、無垢の覆工の場合とほぼ同じであった (図 3.7)。

無垢の覆工供試体では、天端外面および左右肩部内面で圧壊が発生して作用荷重が覆工の耐荷力にほぼ達し、天端から左右肩部にかけて円周方向の比較的長いひび割れの発生して荷重低下となった。

天端外面及び肩部内面に圧壊を生じた覆工供試体

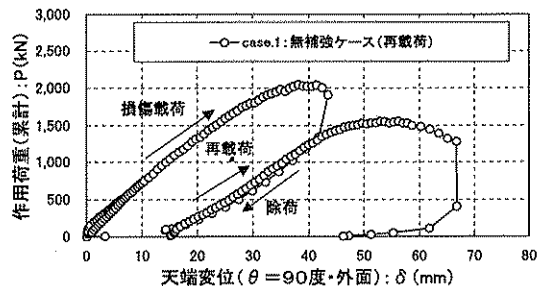


図 3.7 荷重変位曲線 (無補強ケース)

を再載荷した場合の最終破壊は、肩部内面の圧壊部の一方がはく落し、その直後に当該部で覆工部材が斜め状のせん断破断面を伴った圧縮せん断破壊となった。耐荷力が低下した原因は、圧壊部で圧縮力の伝達耐力が低下したためと考えられる。

2) 内巻きコンクリート工ケース (case.2)

天端外面及び肩部内面に圧壊を生じた覆工を内巻きコンクリート工 (t=125mm) で補強した場合の耐荷力は、無垢の覆工の耐荷力の約 1.4 倍まで増加し、また荷重変位曲線の直線部の勾配も無垢の場合に比べて約 1.4 倍となった (図 3.8)。

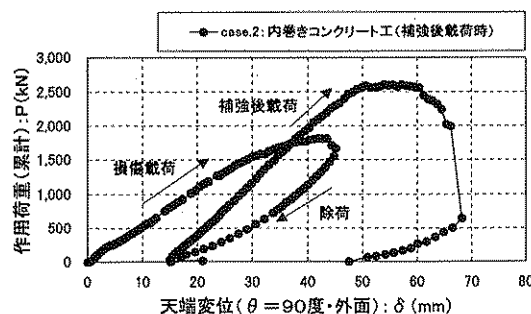


図 3.8 荷重変位曲線 (内巻きコンクリート工補強ケース)

最終破壊は、内巻きコンクリートが肩部 65 度付近で急激に粉状になってはく落し、覆工コンクリートが一部露出し、その直後に当該部付近の覆工コンクリート部で斜め状のせん断破断面を伴って最終破壊に至った。

耐荷力が増加した原因として、肩部内面の圧壊部付近で内巻きコンクリートの圧縮抵抗によって圧縮力の伝達耐力が増したためと考えられる。

3) 炭素繊維シート接着工ケース (case.3~case.4)

図 3.9 は、炭素繊維シート接着工を肩部内面に施したケース (case.3) および全周に接着したケース (case.4) の荷重変位曲線である。図 3.9 より、いずれのケースも、耐荷力は無垢の覆工の耐荷力 (損傷載荷時の最大荷重) とほぼ同じで、肩部でシート剥離が発生して最大荷重に達した。case.3、case.4

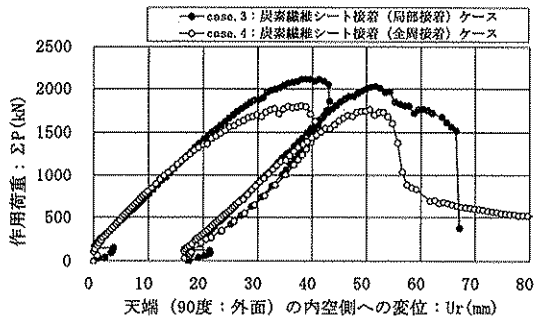


図 3.9 荷重変位曲線 (炭素繊維シート接着工ケース)

で炭素繊維シート接着によって耐荷力が回復した原因は、肩部内面の圧壊部のはつり落としによる除去および断面修復と、その箇所を覆うように接着された炭素繊維シート部が断面修復部の内空側への変形を拘束することにより、肩部の覆工内面で圧縮伝達耐力を回復したためと考えられる。

(2) 載荷形式 II の場合: 内巻きコンクリート工ケース (case. 5)

case.5 は、覆工の弱面部付近の内巻きコンクリートに局所的な変形により曲げ引張りひび割れが発生し、最終的には覆工の弱面の延長線上のせん断破壊となった (図 3.10)。

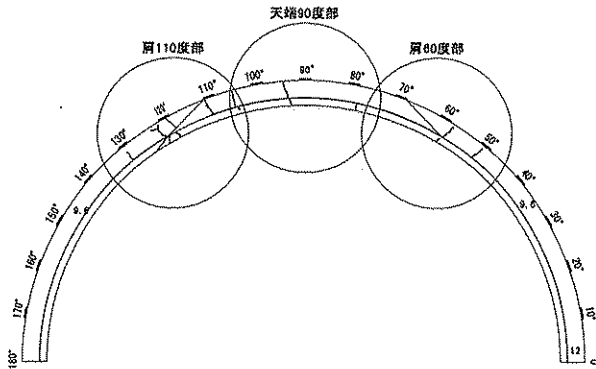


図 3.10 供試体上面で観察したひび割れ状況図

このときの破壊時荷重をジヤッキ荷重 (ジヤッキ荷重 185kN/本) から換算すると 412kN/m^2 であった。この値は、過去に実施した載荷形式 II での覆工載荷実験の結果³⁾ (圧縮強度 $f_c=14.4\text{N/mm}^2$, 覆工厚 $t=30\text{cm}$, 覆工供試体の耐荷力: ジヤッキ荷重 $P_0=290\text{kN/本}$) から推定される無垢の覆工の耐荷力 (約 800kN/m^2) の約半分となっている。

3.3 補強工を施した覆工の耐荷力の評価方法

(1) case. 2 の耐荷力の解析例

載荷形式 I で損傷した覆工の内面に内巻きコンクリート工を施した実験ケース (case. 2) を検討対象として、その耐荷力を解析的手法によって評価してみた。評価手法には、コンクリートのひび割れなど

の非線形挙動を考慮できる鉄筋コンクリートの静的非線形解析プログラム (ATENA-2D⁴⁾) を用いた。この解析では、二軸強度包絡線により破壊基準を評価し、コンクリートの二軸応力-ひずみ関係を等価一軸応力-ひずみ関係に変換している。また、ひび割れ開口変位はひび割れ帯モデルに基づいてひずみに置換している。

覆工の損傷部は、実験時にはひび割れや圧壊が発生した、覆工の肩部 60 度～天端～肩部 120 度の範囲の要素の圧縮強度を低減させることでモデル化した (図 3.11)。圧縮強度の低下比は実験時の耐荷力の低下比 (76%) に同じとし、内巻きコンクリート要素は損傷を模擬した覆工コンクリート要素に一体化させた。

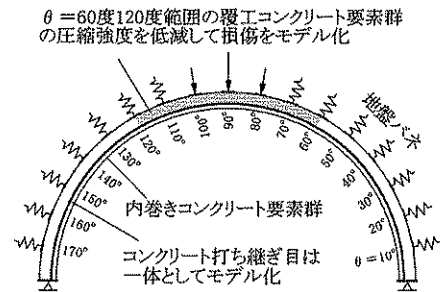


図 3.11 損傷した覆工と内巻きコンクリートのモデル化

コンクリート構成則は、応力-ひずみ曲線を圧縮側は圧縮強度までは二次曲線とし、圧縮強度以降は完全塑性とした。引張側では引張強度までは線形とし、引張強度以降は応力はひび割れ開口幅に依存させ、その引張軟化曲線には Hordijk の指数型開口則を使用した。解析用物性値であるコンクリート圧縮強度は供試体の圧縮試験結果を使用した。

図 3.12 に、解析結果を荷重変位曲線に整理して示す。図 3.12 より、解析値は耐荷力に達した以降の荷重低下は再現できないものの、解析で求めた荷重変位曲線の作用荷重の最大値 (耐荷力) は実験値と良い近似を示す。

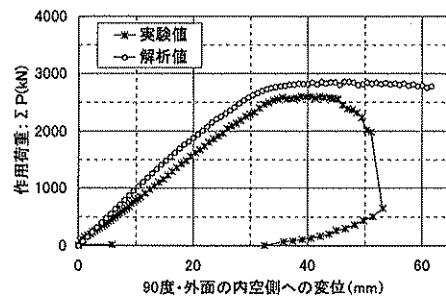


図 3.12 荷重変位曲線 (解析結果)

(2) 耐荷力の評価方法

内面補強工がコンクリート材料の場合で、かつ載荷形式 I のような作用荷重の場合で覆工および補強工の各部材が曲げ圧縮破壊となる場合には、損傷部を適切にモデル化することができれば、前述の解析例のように、コンクリートの非線形挙動を考慮できる FEM 解析で補強を施した覆工の耐荷力の評価が可能である。一方、載荷形式 II のように耐荷力が圧縮せん断破壊で決まる場合には、前節で示した解析例に示す方法では挙動の再現ができず、今後の課題として残った。

4. 新材料を用いたはく落防止工と覆工内面の補強工の開発

4.1 開発の着眼点

(1) はく落防止工

現行の炭素繊維シート接着工や鋼板接着工では接着後はひび割れ等の発生した覆工コンクリート表面が見えないが、施工後もこれが見えて観察が可能となり追跡調査が可能となれば、実施した対策工の妥当性の判断や施工後に発生する変状に対して追加対策の判断が遅れることのない対応が期待できる。このため、覆工コンクリート片のはく落防止を図ると同時に接着した覆工表面のひび割れ等が目視観察できる工法を、共同研究で開発した。

(2) 覆工内面の補強工

損傷した既設覆工の打替え工に代わって、覆工内面に極力薄肉化した補強工を施すことで耐荷力を無垢の覆工と同等以上に期待できる工法を、共同研究で開発した。

4.2 開発したはく落防止工

(1) 各工法の概要

1) 光硬化樹脂を用いた二軸メッシュ接着工

覆工表面に高密度ポリエチレン二軸メッシュ（目合 2cm、目付 45g/m²）を可視光硬化型ビニルエステル樹脂で接着する工法で、覆工表面は、メッシュの隙間となる目合い部（繊維束の間）から観察可能である（写真 4.1）。

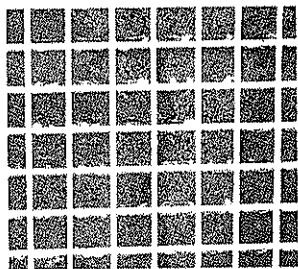


写真 4.1 二軸メッシュを接着した覆工面の可視状況

2) アクリル樹脂を用いたナイロクロス接着工

覆工表面に二方向ナイロクロス（目付 200g/m²）をアクリル樹脂で接着する工法で、覆工表面は接着したクロス透過して観察可能である（写真 4.2）。

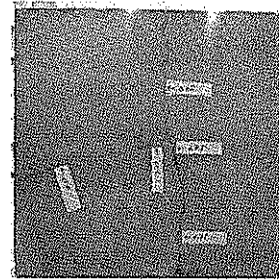


写真 4.2 ナロクロスを接着した覆工面の可視状況

(2) 各工法の耐荷力と可視性

耐荷力については、いずれの工法も、少なくともはく落塊の大きさとして約 1.7m（覆工厚 30cm）程度のコンクリート重量を保持できる耐荷力は確保できることが、押抜き載荷試験（図 2.1）から確認された。さらに、温冷繰り返しと湿潤繰り返し促進負荷試験を行ったが（室内試験）、押抜き耐荷力の低下は見られなかった。また、接着後の可視性については、いずれの工法も、土木研究所構内の実大トンネル実験施設で実施した試験施工箇所約一年半の観察では可視性の低下は認められなかった。さらに、ひび割れのある供試体に本工法を施し、同様な促進負荷を与えた後に供試体ひび割れ状況を観察したが、可視性の程度に変化は見られなかった。

4.3 開発した覆工内面の補強工

(1) 各工法の概要

1) 連続繊維メッシュ入り短繊維混入モルタル内巻き工

本工法は、内巻き補強材として、圧縮強度とじん性に優れた短繊維混入モルタルと、引張補強材として連続繊維メッシュ（使用材料例：t=1.5mm、引張強度 88N/mm²）を組み合わせる工法である（図 4.1）。

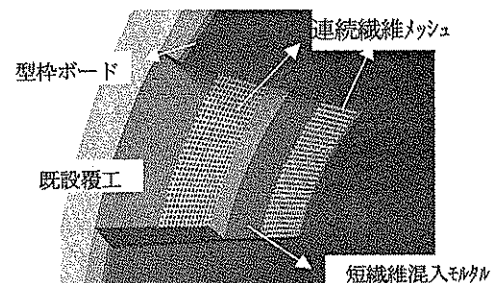


図 4.1 連続繊維メッシュ入り短繊維混入モルタル内巻き工の概要図

補強厚は、t=50～100mm を標準とする。短繊維混入（PVA 繊維。標準的な混入率 2%vol.）モルタルは、

圧縮強度 $40\sim 50\text{N/mm}^2$ で、薄肉の狭い部分に現場打ちすることから自己充填可能な高流動とする。連続繊維メッシュは、短繊維混入モルタル部の内面側および外面側（既設覆工内面側）に配置する。また、施工に際しては、同じ短繊維混入モルタルで作成された型枠ボード ($t=5.5\text{mm}$) を既設覆工からコンクリートアンカーで吊す等して固定を図り、モルタル打設することにより、セントル型枠を用いない施工が可能となる。

2) 部分薄肉PCL版設置工

既設トンネルの補強工の現行の一工法にPCL（プレキャスト・コンクリート・ライニング）工法があるが、トンネル内空断面（建築限界）に余裕がない場合には、従来のPCL工法を適用すると建築限界が確保できないため盤下げなどの併用が必要であった。そこで、建築限界を侵す可能性の高いトンネル肩部のみを薄肉化したPCL版を開発した（図4.2）。

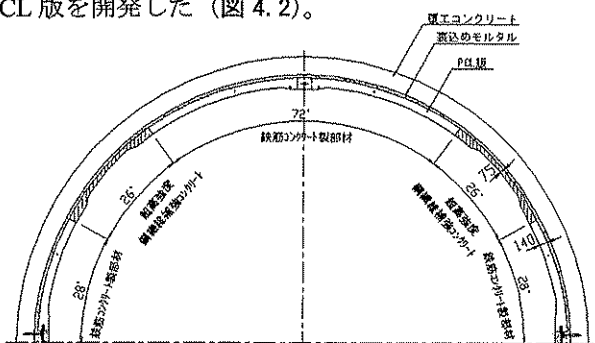


図4.2 部分薄肉PCL版設置工の概要図

肩部の薄肉化した部分のPCL版は、鉄筋入りの超高強度鋼繊維補強モルタルである。肩部以外は、従来のPCL版で、RC部材（コンクリート圧縮強度 40N/mm^2 ）である。部材厚は薄肉部で $t=75\text{mm}$ 、他部で $t=140\text{mm}$ で、背面に $t=50\text{mm}$ の裏込めモルタル工（セメントと砂の質量比 $C:S=1:2$ ）を実施するため、出来形は薄肉部で $t=125\text{mm}$ 、他部で $t=190\text{mm}$ となる。

3) エキパンドモルタルまたは鋼板入りECC吹付け工

本工法は、覆工内面に高じん性繊維混入セメント（ECC：Engineered Cementitious Composites）を吹付ける工法である（図4.3）。吹付けに際しては、吹付け面にエキパンドモルタルを設置し、また既設覆工にひび割れ等の弱面が存在する場合には当該箇所にも局所的な併用補強工として鋼板接着工を行った後に、ECC吹付けを行う工法である。補強厚は、 $t=50\sim 70\text{mm}$ を標準とする。ECC（PVA繊維の混入率 $2\%\text{vol.}$ ）は圧縮強度 30N/mm^2 以上、引張強度 2.0N/mm^2 以上（引張ひずみ約 0.2% ）である。吹付け工法のため、型枠は不要となる。

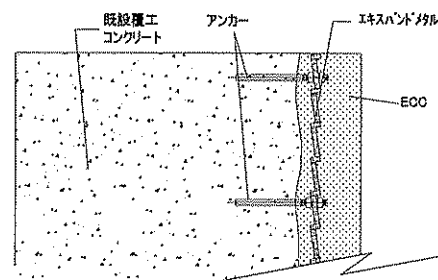


図4.3 エキパンドモルタルまたは鋼板入りECC吹付け工の概要図

4) ポリレフィン短繊維混入コンクリート吹付け工

本工法は、覆工表面に繊維混入コンクリートを吹付ける工法である（図4.4）。

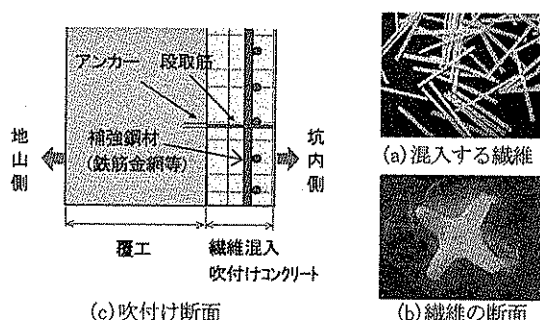


図4.4 ポリレフィン短繊維混入コンクリート吹付け工の概要図

混入する繊維はポリレフィン短繊維で、繊維の凹凸形状により繊維とセメントの付着性の向上を図ったものである。補強厚は、 $t=125\text{mm}$ を標準とする。繊維混入コンクリート（繊維の混入率 $0.3\%\text{vol.}$ ）は、圧縮強度約 $40\sim 60\text{N/mm}^2$ 、曲げ強度約 4N/mm^2 である。吹付けに際しては、吹付けコンクリートの付着を良好にする目的で溶接金網またはメッシュ鉄筋を覆工表面に取り付ける。吹付け工法のため、型枠は不要となる。

(2) 各工法の耐荷力

各工法の耐荷力は、実大規模の覆工載荷実験により確認し、載荷形式Iに対してはいずれの工法も無垢の覆工の耐荷力以上の耐荷力が得られることを確認した。一方、載荷形式IIに対してはいずれの工法も無垢の覆工の耐荷力までの耐荷力を得ることはできず、補強厚を厚くするかまたは別の補強工を併用するかなど課題が残った。

5. 土圧の作用によるトンネル変状メカニズム

5.1 解析方法

本章では、トンネル覆工の変状事例のシミュレーション解析を行い、変状発生メカニズムとして主に作用荷重について検討した一例を示す。解析は、

変状や損傷する前のトンネル覆工構造にどのような荷重が作用した場合に実際と同じような変状や損傷が発生するかを解析的に検討し、想定される作用荷重を求めるものである。手順は、覆工コンクリートを有限要素で、周辺地山をバネ要素でモデル化し、この有限要素-バネ系構造に、仮定した荷重モードで荷重をステップ载荷により単調増加させ、覆工コンクリートに着目した変状（ひび割れなど）が発生した解析ステップ時の荷重値を変状発生時の荷重値と考えた。

5.2 変状事例のシミュレーション解析例

(1) 変状概要

対象トンネルは、完成後 30 年以上経過し、両肩部には背面まで貫通したひび割れ（改築時に確認）が、天端付近内面には圧ざが発生している（図 5.1）。

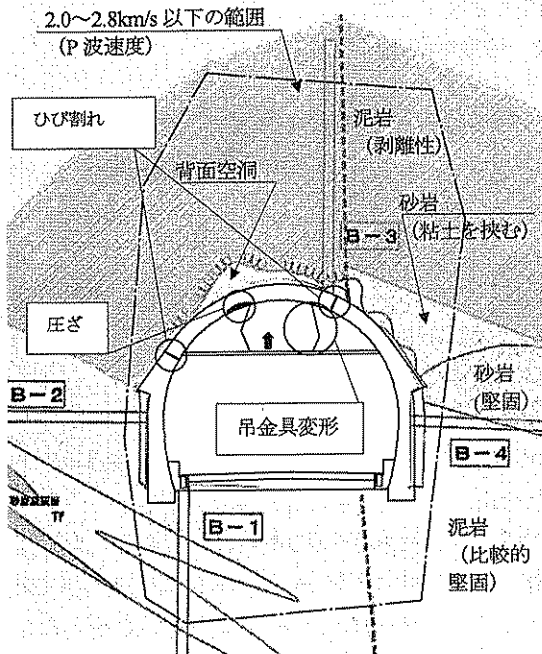


図 5.1 覆工の変状および周辺地山状況

(2) 解析モデル

解析モデルには、①天端に背面空洞がある状態で側壁部から外力を作用させる解析モデル 1、②側壁部は背面空洞は無く新鮮な岩盤であるため地盤バネを配置し、アーチ部上部で空洞範囲を除く部分に外力を作用させた解析モデル 2、を考えた。各モデルを図 5.2 に示す。なお、解析モデル 2 では土圧の作用方向 θ を $\theta=45^\circ$ と 75° の 2 ケースを設定した。

解析コードおよびコンクリート要素等は、3.3 節で用いた解析方法に同じとした。覆工コンクリートの主な解析用物性値は、弾性係数 $2.2 \times 10^4 \text{MPa}$ 、ポアソン比 0.2、圧縮強度 18MPa、引張強度 1.6 MPa 等とした。また地盤バネ係数は 4.3MN/m^3 （周辺地山の変形係数 4.4

$\times 10^6 \text{kN/m}^2$ 相当）とした。

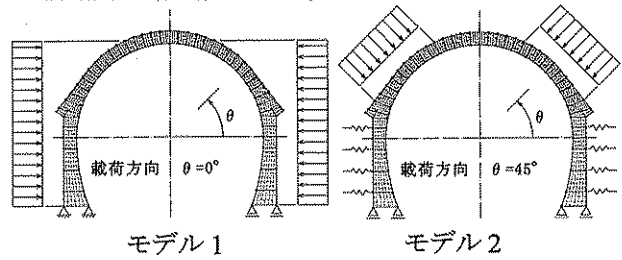
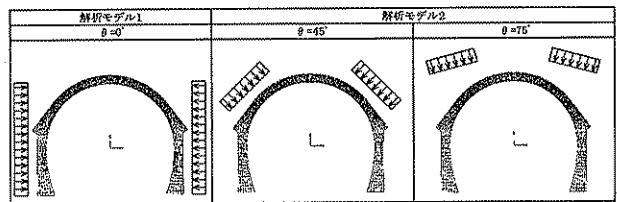


図 5.2 解析モデル図

(3) 変状メカニズムと推定荷重値

表 5.1 に、解析結果を示す。解析モデル 1 では、ひび割れが側壁部内側と天端部外側に発生するモードとなったのに対して、解析モデル 2 では土圧の作用方向が 45° の場合も 75° の場合も、両肩部内側および天端部外側に発生するモードとなった。なお、どちらのモデルとも天端に発生するひび割れ位置反対側の覆工内側の圧縮ひずみが増大して、最終的には圧ざに至った。

表 5.1 ひび割れ状況図（解析結果）



解析モデル 2 のひび割れ発生位置が実際のひび割れ発生位置に近い結果であることから、作用荷重としては、解析モデル 1 のように側壁部からではなく、解析モデル 2 のようにアーチ部に土圧が作用したと考えられる。

図 5.3 は解析モデル 2 で土圧の作用方向が 45° と 75° の場合の天端変位と土圧の関係を示したもので、天端部内側には圧ざが確認されていることより天端部内側の圧縮ひずみが 3000μ になるまで解析した結果である。

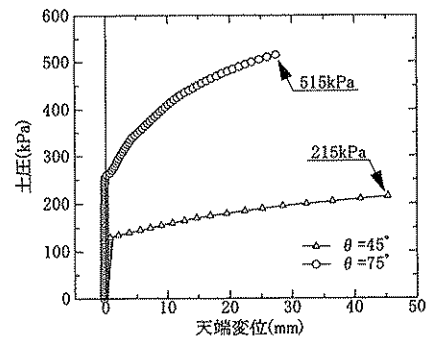


図 5.3 荷重変位曲線（解析モデル 2）

図 5.3 での最初の折点（ $\theta=45^\circ$ ケースで約 130kPa、 $\theta=75^\circ$ ケースで約 250kPa）は両肩部内側および天

端外側にひび割れが入ったため、それ以降は天端変位が急激に増加した。図 5.3 より、内側に圧ぎが発生したと考えられる土圧は、 $\theta=45^\circ$ ケースでは 215kPa、 $\theta=75^\circ$ ケースでは 515kPa と推定され、土被り換算高さは、各々、約 9m、約 20m（地山の単位体積重量 $\gamma_t=25\text{kN/m}^3$ ）とした土荷重に相当する。なお、 $\theta=45^\circ$ ケース結果（約 9m）は P 波速度の低速度（3km/sec 以下）範囲と同程度の高さであった。

6. まとめ

6.1 本研究の成果

研究目標を達成できたと思われる。本研究で得られた知見を、以下に列挙する。

- ①はく落防止対策として用いられる炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、形鋼による当て板工、ひび割れ注入工の各工法の耐荷力が決まる破壊形態および耐荷力の評価方法として、以下のことが分かった。
 - ア) 炭素繊維シート接着工の耐荷力は、シートの剥離進展が接着範囲端部に達した時点で決まり、剥離周長と単位剥離強さの積として評価できる。
 - イ) 鋼板接着工の耐荷力は、鋼板の全面的な剥離で決まり、鋼板接着面積には関係なく、圧子（はく落塊）の境界の周長と単位剥離強さの積として評価できる。
 - ウ) L 形鋼による当て板工の耐荷力は、形鋼を固定するアンカーボルトの引抜き破壊で決まり、アンカーの引抜き耐力で評価できる。
 - エ) ひび割れ注入工の耐荷力は、ひび割れ注入が確実に行われていれば、母材コンクリートスラブの曲げ破壊で決まり、無垢の状態のコンクリートの耐荷力で評価できる。
- ②天端からの作用荷重により覆工内面で圧縮破壊が発生した覆工コンクリートの内面を内巻きコンクリート工または炭素繊維シート接着工で補強した場合には、覆工の耐荷力が向上し、その原因として、肩部内面の圧壊部における圧縮伝達耐力の向上が大きいことが分かった。また、等方的な荷重の作用によりせん断破壊が発生した覆工コンクリート内面を内巻きコンクリートで補強した場合には、無垢の覆工の耐荷力と同レベルの耐荷力を得ることはできなかった。
- ③圧縮破壊が発生した覆工コンクリート内面に補強対策工を施した場合の耐荷力は、補強工がコンクリート系材料の場合には、圧壊した範囲の覆工の

圧縮強度を低減する等でモデル化することにより、ひび割れの進展を考慮できる FEM 解析で評価することが可能である。

- ④新材料を用いたはく落防止工として、高密度ポリエチレンネットまたはナイロクロスを用いた覆工コンクリート片はく落防止とともに対策後も覆工表面のひび割れ等が観察可能な工法を開発した。また、新材料を用いた薄肉の覆工内面の補強対策工として、高じん性繊維混入モルタルの内巻き工、PCL 版設置工、高じん性繊維混入セメントの吹付け工、ポレオレフィン繊維混入コンクリートの吹付け工を開発した。
- ⑤ひび割れの進展を考慮できる FEM 解析を用いて、変状が発生したトンネルを対象にしたシミュレーション解析を行い、トンネルに変状をきたす作用荷重を推定した。

6.2 今後の課題

今後の課題を、以下に列挙する。

- ①覆工内面の補強対策工の耐荷力を FEM 解析を用いて適切に評価するためには、損傷を受けた既設覆工、補強対策工と損傷覆工との接触部などのモデル化の更なる検討が必要である。
- ②変状メカニズムの更なる解明のため、より多くの変状事例を収集し、解析結果の蓄積を図る必要がある。
- ③せん断破壊した覆工の耐荷力を、薄肉の内面の補強対策により向上させるための材料の開発が必要となる。
- ④開発した新補修工や新補強工の実施工においては、覆工内面の補強工における脚部の取り付け方法の検討など、構造細目に関する検討が必要となる。

6.3 達成度の自己評価

本研究では、幾つかの課題が残ったが、研究成果は当初の目標をほぼ達成できたと思われる。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：道路トンネル変状対策マニュアル（案）、平成 15 年 2 月
- 2) トンネル安全対策工法研究会（TSC 研究会）：FRP によるトンネル覆工剥落対策マニュアル、2003 年 3 月、山海堂
- 3) 国土交通省土木研究所道路部トンネル研究室・日本道路公団試験研究所道路研究部トンネル研究室：トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書、平成 13 年 3 月
- 4) (株) 計算力学研究センター：ATENA 理論マニュアル改訂版、2002 年 5 月