

◆ 特集：道路舗装・トンネルの維持管理、補修・補強技術 ◆

変状が生じたトンネルの内面補強工法

箱石安彦* 石村利明** 真下英人***

1. はじめに

既設トンネルの覆工コンクリートが過大な土圧の作用を受けて変状や損傷が著しく、覆工の耐荷力が十分に期待できないと判断された場合には、耐荷力の確保を目的とした補強対策が必要となる。

補強対策には、覆工打ち替え工、既設覆工の内面に薄肉のコンクリートや繊維シートを設置する工法（本報文では内面補強工と呼ぶ）などがあるが、内面補強工は経済性および施工性の点で他工法に比べて有効な工法として期待されている。しかし、現時点では、損傷を受けた覆工の挙動や内面補強工の効果とそのメカニズムが明確になっていないこともあって、内面補強工の厚さや使用材料はこれまでの経験や施工実績に基づいて設定されているのが現状であり、より合理的な設計法の確立が求められている。

本報文は、覆工コンクリートに荷重が作用して損傷が発生する場合の覆工の挙動、および内面補強工の効果とそのメカニズムを明らかにすることを目的として実施した、実大規模の覆工載荷実験結果について報告するものである。実験対象とした内面補強工は、現在、一般に用いられている内巻きコンクリート工および炭素繊維シート接着工の2ケースである。

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験は、まず損傷したトンネル覆工を再現するため、2車線道路トンネル断面での覆工とほぼ同じ寸法規模の覆工コンクリート供試体（外径9.7m、覆工厚30cm、トンネル軸方向長さ1.0m、水平置き）に載荷を行い（損傷載荷）、ひび割れを発生させた。載荷はひび割れ発生後の最大荷重を確認するまで続行して行った。その後、一旦除荷し、覆工コンクリート供試体の内面に内巻きコンクリート工または炭素繊維シート接着工の補強工を施し、所定の養生期間をとった後、再度、損傷載

荷と同じ載荷形式で、最終破壊となるまで載荷を行った（補強後載荷）。載荷形式には、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の覆工天端に直接に鉛直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て、 $\theta=80$ 度、90度、100度の3箇所（位置で、油圧ジャッキ（2本/各箇所×3箇所=6本）により覆工外側からトンネル内空側へ強制変位をステップ載荷（変位制御）した。また、覆工コンクリートの背面は変位拘束が高い状態を想定し、 $\theta=80$ 度、90度、100度以外の位置では、油圧ジャッキを設置し覆工の外側への変位拘束を図った。これは、実トンネルでは背面空洞がある場合には、内面の補強工に加えて、裏込め充填工の併用も想定したものである。なお、反力ジャッキのパネ定数は、実験結果より1箇所当たり $k=1 \times 10^2 \sim 3 \times 10^2$ MN/m程度であった。

2.2 実験ケースと供試体の作成

2.2.1 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	載荷	補強工	供試体記号
case. 1	損傷載荷	—	覆工①
	再載荷	無補強	
case. 2	損傷載荷	—	覆工②
	補強後載荷	内巻きコンクリート (プレーン、 $t=12.5$ cm)	
case. 3	損傷載荷	—	覆工③
	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	
case. 4	損傷載荷	—	覆工④
	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	

実験ケースは、内巻きコンクリート工ケースを1ケース（図-1）、炭素繊維シート接着工ケースはシート接着範囲を変えて2ケース（図-2、図-3）、を実施した。また、補強工の効果を検討する上での比較参照ケースとして、同様の損傷載荷および除荷を行った後に、内面の補強工は実施せず無補強のまま再載荷を行う無補強ケースも1ケース実

施した。

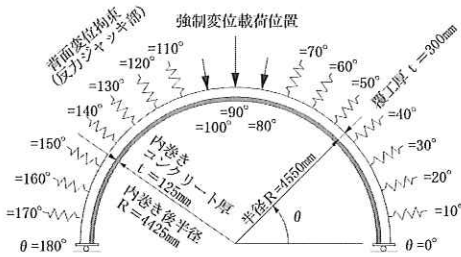


図-1 内巻きコンクリート工ケース (case. 2)

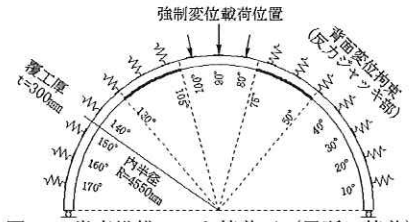


図-2 炭素繊維シート接着工 (局所に接着) ケース (case. 3)

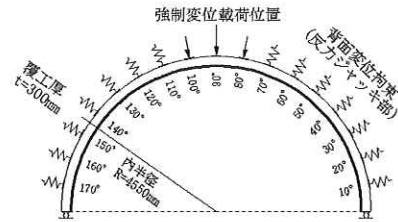


図-3 炭素繊維シート接着工 (全周に接着) ケース (case. 4)

2.2.2 供試体の作成

1) 内巻きコンクリート工

内巻きコンクリート厚は、コンクリートの品質、施工性の点で場所打ちコンクリートで施工することが困難とならないほぼ最小の値¹⁾として、12.5cmとした。内巻きコンクリート施工に先立ち、コンクリート打継面となる覆工コンクリート内側面はディスクサンダーによる目荒らしを行った。また、内巻きコンクリート打設時には、内巻きコンクリートの型枠固定用セパレータ (φ9.5mm、n=36本：75cm×50cm格子で配置)を覆工コンクリートのセパレータ頭部 (既設) に連結した。

表-2に、覆工コンクリート供試体および内巻きコンクリート供試体の力学的定数を示す。

2) 炭素繊維シート接着工

炭素繊維シート接着工の仕様を、表-3に示す。また、覆工コンクリート供試体の力学的定数は、表-2に併記した。

表-2 覆工コンクリート供試体等の力学的定数

供試体記号 (種類)	材齢 (H)	一軸圧縮強度: f_c (N/mm ²)	静弾性係数: E_c (kN/mm ²)	ポアソン比: ν (-)
覆工① (プレーン)	13	21.4	17.5	0.16
	14	21.7	18.0	0.15
覆工② (プレーン)	13	22.1	16.4	0.17
	28	25.7	18.3	0.16
内巻② (プレーン)	13	18.0	16.2	0.15
	17	20.0	17.7	0.17
覆工③ (プレーン)	28	23.1	19.0	0.16
	覆工④	13	19.5	18.4
(プレーン)	33	21.5	19.0	0.19

※) 上段は損傷載荷時、下段は補強後載荷時の値。

表-3 炭素繊維シート接着工の仕様

	目付量	プライマー	パテ	含浸接着剤	接着強度
	g/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	N/mm ²
case. 3	300 ※1	0.21	1.41	0.93	2.24
case. 4 (1層)	※2	0.26	1.33	0.90	1.57

- ※1) 幅0.25m、長さ2.2m～3.6mのシート片群を、円周方向にはラップ長0.12m、トンネル軸方向にはラップ無しで、千鳥配置状に接着した。繊維方向は円周方向のみ。
- ※2) 幅0.25m、長さ2mのシート片群を、トンネル軸方向にはラップ無しで配置し接着した。繊維方向は円周方向のみ。
- ※3) シートは、高強度炭素繊維シート。
引張強度4.3kN/mm²、引張弾性率261kN/mm²。
- ※4) プライマー、パテ、含浸接着剤は、エポキシ樹脂。パテ、含浸接着剤の硬化後の力学的特性値 (JIS-K-7208)
・パテ：圧縮弾性率2.2kN/mm²、圧縮強さ73kN/mm²。
・含浸接着剤：圧縮弾性率2.2kN/mm²、圧縮強さ89kN/mm²。
- ※5) 接着強度は、JSCE-E545-2000で求めた値で、補強後載荷日の試験値の平均値。

炭素繊維シート接着範囲は、case. 3では覆工内面が引張となる天端部には接着せずに、覆工内面が比較的顕著に圧縮となる範囲 (損傷載荷時に覆工内面の円周方向の圧縮ひずみ) が比較的顕著に発生が見られた区間を設定) のみとし、case. 4では炭素繊維シートを全周に接着した。なお、覆工コンクリート供試体の両肩内面では、case. 3およびcase. 4とも、損傷載荷時に曲げ圧縮によって剥離や浮きが発生 (圧壊) したため、当該箇所は、シート接着前に、ハンマーでたたいてコンクリートの浮いた部分を除去し、エポキシ樹脂パテ材にて断面修復を実施した (表-4)。

表-4 覆工コンクリート肩部内面の断面修復

	位置 θ (度)	浮き除去範囲		パテ使用量 (kg)
		平均幅 (mm)	平均深さ (mm)	
case. 3	70	-	-	-
	110	230	30	9.70
case. 4	70	244	23	9.05
	110	192	21	7.30

※) パテは、エポキシ樹脂

3. 実験結果と考察

3.1 無補強ケース

1) 荷重変位曲線

作用荷重 P ($\theta = 80$ 度、 90 度、 100 度位置での

ジャッキ荷重値の合計値)と天端外面 $\theta = 90$ 度位置での内空側への変位 δ の関係を、図-4に示す。

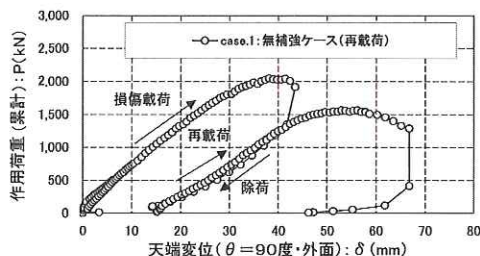


図-4 荷重変位曲線 (無補強ケース)

荷重変位曲線における最大荷重を覆工の耐荷力と定義すると、耐荷力は2048kNで、土被り高さに換算するとH=40mの緩み荷重に相当する。また、再載荷時の耐荷力は損傷載荷時に見られた耐荷力の約76%までしか回復しなかった(表-5)。なお、再載荷時の荷重経路は除荷時と同じ経路をたどった。

表-5 覆工の耐荷力 (無補強ケース)

		耐荷力	換算土被り高さ	損傷載荷による破壊荷重の低下比
実験ケース	載荷	P (kN)	Hf (※) (m)	
無補強	損傷載荷	2048	40	1
	再載荷	1563	31	0.76

(※) 換算土被り高さ: $Hf = P/A \gamma$ 。
 ここで、 γ : 地山の単位体積重量 ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ と仮定)
 A: 作用荷重面積 ($A = 2.539 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} = 2.539 \text{ m}^2$ ($\theta = 75$ 度 ~ 105 度範囲) と仮定)

2) 破壊形態

無垢の覆工コンクリート供試体には、作用荷重が覆工の耐荷力の約13%荷重時に、荷重作用点である天端部に曲げ引張による最初のひび割れが発生した。しかし、その後も覆工は構造安定を保持し作用荷重に抵抗し、最終的に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はほぼ達した。

損傷した覆工コンクリート供試体の再載荷時における最終破壊は、肩部内面の圧壊部の一方がはく落ちて当該部で覆工部材が斜め状のせん断破壊面を伴って分断され試験終了となった。一方、天端外面の圧壊部は載荷板による変位拘束があるため、コンクリートのはく落には至らず、はく落に対して変位拘束の無い肩部内面の剥落が最終破壊となった。

3) 損傷による耐荷力低下のメカニズム

図-5に、損傷載荷時および再載荷時の各載荷

時の各最大荷重に達した時点の、覆工外面、覆工内面の円周方向のひずみ分布を示す。

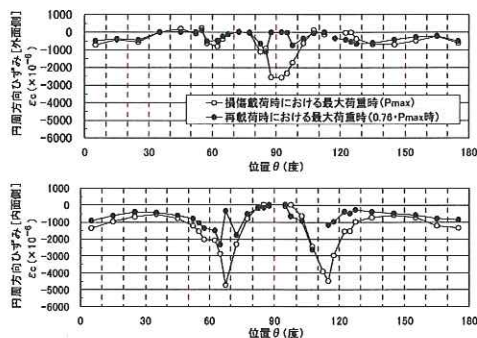


図-5 覆工の円周方向ひずみ分布 (case. 1)

図-5より、損傷した覆工の再載荷時における曲げ圧縮の集中する覆工の天端外面および左右肩部内面の圧縮ひずみは、無垢の覆工での損傷載荷時に比べてその発生ひずみ量が小さい。これは圧壊によって圧縮伝達力が低下したためと考えられ、このことが耐荷力の低下の一要因と考えられる。

3.2 内巻きコンクリート工のケース

1) 荷重変位曲線

荷重変位曲線を、図-6に示す。内巻きコンクリート工ケースの補強後載荷時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(表-6)。

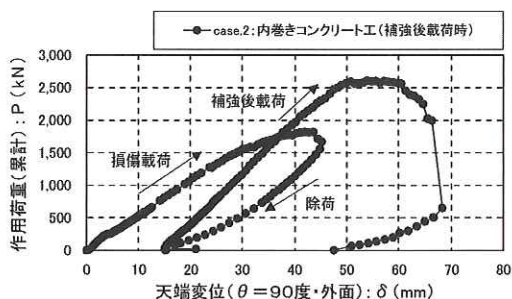


図-6 荷重変位曲線 (内巻きコンクリート工ケース)

表-6 耐荷力 (内巻きコンクリート工ケース)

		耐荷力	換算土被り高さ	損傷載荷による破壊荷重の増加比
実験ケース	作用載荷	P (kN)	Hf (※) (m)	
内巻 コンクリート	損傷載荷	1820	36	1
	補強後載荷	2603	51	1.43

(※) 換算等は、表-5に同じ

2) 破壊形態

内巻きコンクリート天端部では、無垢の覆工の耐荷力 (Pmax) の約7%荷重時 (90度位置での強制変位: $\delta = 2.0\text{mm}$) に、全引張による貫通ひび割れが発生した (図-7)。その後の作用荷重の増加に伴って、内巻きコンクリート自体にはひび割れ発生はみられなかった。覆工コンクリートと内巻きコンクリートとの打継目の縁切れは、天端部では約 $0.35 \cdot P_{\text{max}}$ 時に、肩部65度付近では約 $0.65 \cdot P_{\text{max}}$ 時に、肩部115度付近では約 $1.2 \cdot P_{\text{max}}$ 時に見られた。作用荷重が約 $1.2 \cdot P_{\text{max}}$ 時に達した時点で、内巻きコンクリートの左右肩部の内面で圧壊を示す剥離が発生し出した。作用荷重は最大荷重 (約 $1.4 \cdot P_{\text{max}}$) に達した直後、内巻きコンクリートの肩部で円周方向の比較的長いひび割れの発生を伴い荷重低下となった。

荷重低下後の $1.2 \cdot P_{\text{max}}$ 時に、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。内巻きコンクリートの破壊はこのように非常に脆性的で

あったことから、内巻きコンクリートは高じん性とする等が安全上求められる。

3) 内巻きコンクリート工の補強メカニズム

図-8に、最大荷重 (約 $1.4 \cdot P_{\text{max}}$) に達した時点の、覆工外面、覆工内面、内巻きコンクリート内面の円周方向のひずみ分布を示す。

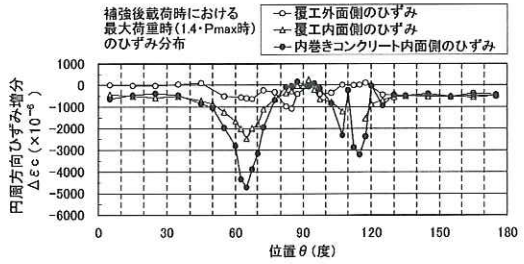
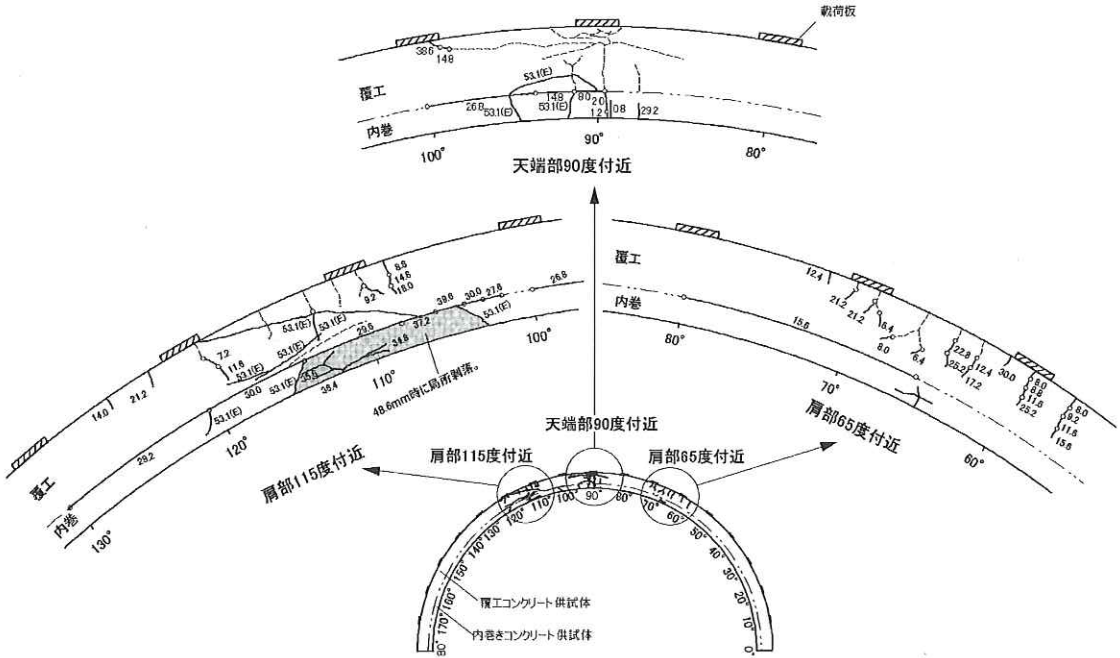


図-8 覆工の円周方向ひずみ分布 (case. 2)

内巻きコンクリートでは、両肩部内面で圧縮ひずみが顕著であり、肩部で圧縮抵抗したことが分かる。一方、局所的に引張となる天端部では、荷重の小さい段階で貫通ひび割れが発生したことから、内巻きコンクリートは補強部材とならなかったと言える。しかし、損傷覆工と内巻きコンクリー



- (凡例)
- 1) 点線：損傷載荷時に発生したひび割れ
 - 2) 実線：補強後載荷時に発生したひび割れ
 - 3) 添数字：ひび割れが発生したときの強制変位 (補強後載荷時には増分変位) 値を示す。
 - 4) (E)：補強後載荷における最終破壊時。

図-7 ひび割れ観察図 (内巻きコンクリート工ケース)

トの複合構造は、内巻きコンクリートの天端部で貫通ひび割れが発生した後も作用荷重に抵抗し続け、その耐荷力は無垢の覆工の耐荷力より大きくなったことから、天端部では、内巻きコンクリート部での圧縮力の伝達はないが、損傷した覆工側で圧縮力の伝達があったと考えられる。これは、覆工の圧壊した箇所でも、載荷板による背面側への変位拘束が圧縮力の伝達向上に寄与したためと考えられる。また、図には示していないが、覆工の肩部内面での圧縮ひずみは、内巻きコンクリート補強ケース（補強後載荷時）での値が無補強ケース（再載荷時）での値に比べて若干大きい値となった。このことから、圧壊が発生した覆工の肩部内面でも圧縮力伝達の低下が抑制されたと考えられる。その原因には、天端外面の圧壊箇所での載荷板による変位拘束効果と同様に、肩部内面の圧壊箇所では内巻きコンクリートによる変位拘束効果が考えられる。

3.3 炭素繊維シート接着工のケース

1) 荷重変位曲線

荷重変位曲線を、図-9に示す。

炭素繊維シート接着工を施した場合には、局部範囲に接着した場合（case. 3）と全周範囲に接着した場合（case. 4）のいずれも、補強後載荷時の最大荷重は損傷載荷時の最大荷重とほぼ同じで、炭

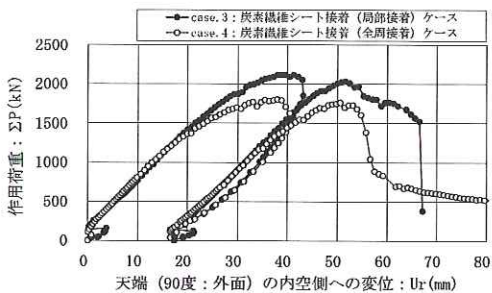
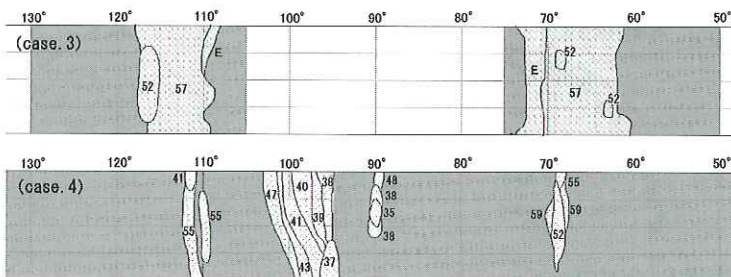


図-9 荷重変位曲線（炭素繊維シート接着工ケース）



（凡例）図中の数値は、炭素繊維シートが剥離した時の天端（外側）の半径方向変位 U_r (mm) を示す。Eは最終破壊時を示す。なお、シールド部は炭素繊維シート接着部を示す。

図-10 炭素繊維シートの剥離進展状況

素繊維シート接着工により耐荷力の回復が認められた。なお、最大荷重に達した以降では、内面の全周を接着範囲とした場合（case. 4）の方が、肩部内面のみを接着範囲とした場合（case. 3）に比べて、荷重低下が早い段階で発生し、最大荷重後のじん性が小さくなる結果となった。

2) 破壊形態

case. 3では、最大荷重に達した時点で、左右肩部のシート接着部でシート剥離がほぼ同時に発生した。最終破壊は、覆工の一方の肩部でせん断破断面を伴った脆性的な破壊となった。case. 4では、最大荷重の約66%荷重時にシートの最初の剥離が天端部で発生し、その後作用荷重の増加に伴ってシート剥離は発生箇所から左肩方向へ進展し（図-10）、最大荷重の約95%荷重時にはシート剥離進展は止まった。さらに作用荷重の増加によって、左右肩部で剥離がほぼ同時に発生し作用荷重は最大荷重に達した。最大荷重時以降は主に覆工天端部にひび割れが集中しながら荷重が低下し、載荷ジャッキのストロークが限界に達した時点で試験を終了した。肩部シート剥離発生時に最大荷重に達するという挙動はいずれのケースも同じであり、両ケース共に剥離したシート面にはコンクリートが付着して剥がれた。

3) 炭素繊維シート接着工の補強メカニズム

図-11に、補強後載荷時の最大荷重にほぼ達した時点の、覆工外面、覆工内面の円周方向ひずみ分布図を無補強ケースと比較して示す。

補強を行ったcase. 3と無補強ケースとで覆工コンクリートに発生したひずみ分布を比較すると、case. 3では肩部内面で圧縮ひずみが大きく発生しており、圧縮力の伝達が無補強ケースに比べて増加していることがわかる。case. 4では、肩部内面で圧縮ひずみが大きい傾向はひずみゲージの破損によりひずみ値が計測されない点があるため明確

には現れていないが、case. 3と同様に肩部内面で圧縮力の伝達が増加しているものと推測される。このような覆工の肩部内面での圧縮力の伝達について、case. 3、case. 4では、はつり落しによる圧壊部の剥離部分の除去および断面修復と、接着された炭素繊維シート部が圧壊した覆工の内空側への

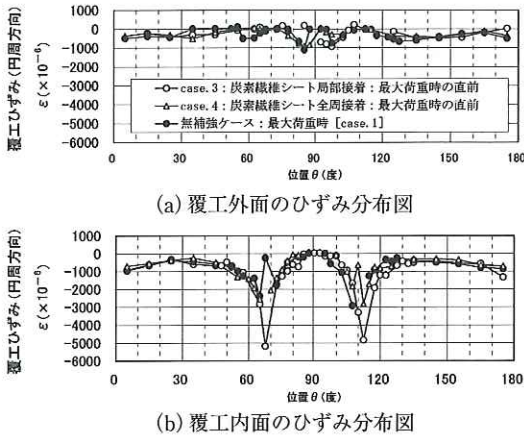


図-11 覆工の円周方向ひずみ分布 (case. 3, case. 4)

変形を拘束することにより、圧壊したコンクリート部での圧縮力の伝達の低下を抑制したものと考えられる。

4. 結論

トンネル覆工コンクリートが天端上方から外荷重を受けて肩部内面に圧壊が発生して損傷する場合の覆工の挙動と、そのような損傷を受けた覆工の内面に内巻きコンクリート工あるいは炭素繊維シート接着工の補強工を施した場合の補強効果とそのメカニズムは、今回の覆工載荷試験結果から、以下のように要約される。

- ①無垢の覆工が天端上方 から外荷重を受けた場合、荷重作用点である天端の内面で曲げ引張によるひび割れが発生した後も、覆工は天端外面および左右肩部内面の圧縮抵抗によって荷重を保持する。天端外面および左右肩部内面で曲げ圧縮が進み圧壊に至る時点で、覆工はそれ以上の荷重保持が出来なくなる。圧壊が発生して損傷した覆工の耐荷力は、無垢の覆工と同程度の

耐荷力は期待できない。

- ②圧壊の発生した損傷覆工の内面に、内巻きコンクリート工による補強工を実施すれば、耐荷力は無垢の覆工の耐荷力以上に向上する。その補強効果のメカニズムとしては、覆工内面の圧壊部付近での内巻きコンクリートの圧縮抵抗によるものと、覆工内面の圧壊部分の内空側への変位拘束によって圧壊部でも圧縮力の伝達の低下を抑制するものとの、二つが考えられる。
- ③圧壊の発生した損傷覆工の内面に、炭素繊維シート接着工による補強工を実施すれば、無垢の覆工と同程度の耐荷力の回復を期待できる。これは、はつり落しによる圧壊部の剥離部分の除去および断面修復と、炭素繊維シート接着部が覆工の圧壊部の進む箇所まで変位を拘束することにより、覆工自体の内面での圧縮力伝達の低下を抑制するためと考えられる。

なお、上記②、③においては、試験条件と同様に背面変位拘束が高い状態を確保する必要があり、覆工背面に空洞がある場合にはこれをモルタル等で充填する覆工背面空洞充填対策工の併用が前提となる。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、(7.内巻工、7-2-3厚さおよび工法、pp.100)、平成10年2月。

箱石安彦*



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループ (トンネル) 主任研究員
Yasuhiko HAKOISHI

石村利明**



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループ (トンネル) 主任研究員
Toshiaki ISHIMURA

真下英人***



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループ (トンネル) 上席研究員、工博
Dr. Hideto MASHIMO