

損傷トンネル覆工における内巻きコンクリートの補強効果 に関する実験的研究

A experimental study on load-carrying capacity of tunnel with the damaged lining reinforced with inner concrete reinforcement lining

箱石安彦¹⁾、真下英人¹⁾、石村利明¹⁾、森本智¹⁾

Yasuhiko HAKOISHI, Hideto MASHIMO, Toshiaki ISHIMURA and Satoshi MORIMOTO

The installation of inner concrete reinforcement lining within the damaged lining of existing tunnels that are still in service, will be one of the methods for extending the design life, the gradual deterioration of the structures and they require on-going maintenance. However, their reinforcement mechanism has not yet been clarified and the rational design methodology has not yet been established.

In this paper, the load-carrying capacity and the failure behavior, that were obtained and observed by the carrying test of the full-scale specimens for real tunnel, are shown in case of inner concrete reinforcement lining. And a couple of notes regarding reinforcement mechanism of those reinforcements are discussed.

Key words: tunnel, the damaged lining, inner concrete reinforcement lining, the load-carrying capacity

1. まえがき

変状を受けた既設トンネル覆工コンクリートの補強工の選定や設計においては、特に変状原因となる地山からの作用荷重の設定と、その作用荷重を受けた場合のトンネル覆工コンクリートの力学的な挙動の把握が重要であるが、いずれもまだ不明確な要素を含んでいるのが現状である。筆者らは、このような現状に鑑み、後者の研究アプローチとして、ひび割れ等の変状や損傷を受けた後の覆工コンクリートの挙動を追跡し、補強対策実施後の最終的な耐力がどの程度得られるかを把握する目的で、2車線道路トンネル断面を想定した実大規模の覆工載荷実験を実施してきている^{1)、2)}。本文は、内巻きコンクリート工を補強工として実施したケースの実験結果の概要を報告するものである。

2. 覆工載荷実験

(1) 実験手順

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）に損傷載荷を与え、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、（補強工施工時の安全確保のため）一旦除荷し、覆工コンクリート供試体の内空側に内巻きコンクリートを打設し、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再載荷を行った。

(2) 載荷形式

載荷形式（図-1）は、背面拘束が高い状態で、覆工コンクリートに天端上方から荷重が作用した場合を想定し、 $\theta=80$ 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

1) 正会員、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)

トンネル内空側へ強制変位をステップ载荷（変位制御）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。背面変位拘束の高い条件は、実トンネルでは背面空洞がある場合には（内巻きコンクリートの補強に加えて）裏込め充填の施工も想定したものである。なお、反力ジャッキのバネ定数は、実験結果より1箇所当り $k=2 \times 10^3$ MN/m 程度であった。

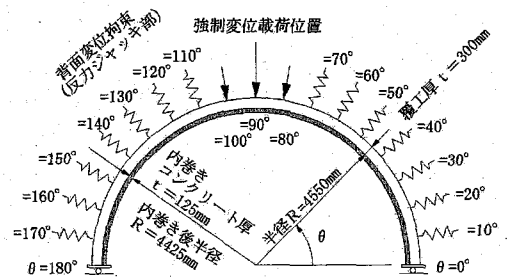


図-1 载荷形式（载荷形式 A）の概要図

(3) 実験ケース

表-1に、実験ケースを示す。補強工の効果を検討する上での比較参照ケースとして、同様の損傷载荷および除荷した後に、特に補強工は実施せず無補強のまま再载荷を行う無補強ケースも実施した。表-2に、供試体コンクリートの力学的定数を示す。なお、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最小の値として、文献3)に基づいて、設定した。

表-1 実験ケース

実験ケース記号	作用荷重	補強工	供試体記号
case-1.1	損傷载荷	—	覆工①
case-1.2	再载荷	無補強	—
case-2.1	損傷载荷	—	覆工②
case-2.2	再载荷	内巻きコンクリート (ブレン, $t=12.5$ cm)	内巻②

表-2 供試体コンクリートの力学的定数

供試体記号 (種類)	材齢 (日)	軸圧縮強度: f_c (N/mm ²)	弾性係数: E_c (kN/mm ²)	ポアソン比: ν (—)	コンクリート配合
覆工① (ブレン)	13	21.4	17.5	0.16	普通18-12-40-N
覆工① (ブレン)	14	21.7	18.0	0.15	普通18-12-40-N
覆工② (ブレン)	13	22.1	16.4	0.17	普通18-12-40-N
覆工② (ブレン)	28	25.7	18.3	0.16	普通18-12-40-N
内巻② (ブレン)	13	18.0	16.2	0.15	普通18-12-20-N
覆工③ (ブレン)	13	19.6	18.4	0.19	普通18-12-40-N
覆工③ (ブレン)	34	21.6	19.0	0.19	普通18-12-40-N

補強工の施工に先立ち、コンクリート打継面となる覆工コンクリート内側面は、下地処理としてディスクサンダーによる目荒らしを実施した。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: $75\text{cm} \times 50\text{cm}$ 格子で配置) を覆工コンクリートのセパレータ頭部 (既設) に連結したが、これがジベル筋の役目を多少していると思われる。

3. 実験結果と考察

(1) 荷重変位曲線

作用荷重 P と天端 $\theta=90$ 度外側面位置での内空側への変位 δ の関係曲線を、図-2に示す。ここで、作用荷重 P は、 $\theta=80$ 度、 90 度、 100 度位置でのジャッキ荷重値の合計を示す。再载荷時の荷重経路は、無補強の場合には除荷時と同じ経路をたどったのに対して、補強実施ケースでは除荷時とは別の経路をたどった。

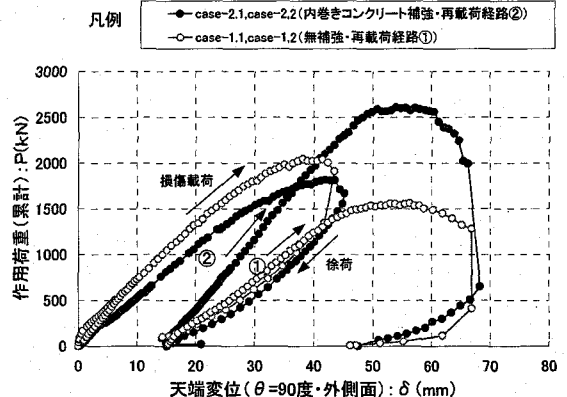


図-2 荷重変位曲線

荷重変位曲線における最大荷重を破壊荷重と定義し、表-3に示す。表-3より、無垢の覆工コンクリートの破壊荷重は1820~2048kNで、土被り高さに換算すると $H=36 \sim 40\text{m}$ の緩み荷重に相当する。覆工コンクリートが破壊荷重を受けて損傷した後に内巻きコンクリート補強を実施したケースでは、破壊荷重は2603kNとなり、損傷を受けていない無垢の覆工コンクリートの破壊荷重1820kNの1.43倍であった。また、荷重変位曲線の直線部の勾配は、無垢の場合に比べて約1.4倍となった。

表-3 破壊荷重

実験ケース記号	作用荷重	破壊荷重 P (kN)	換算土被り高さ H_f (※) (m)	補強工による破壊荷重の増加比
case-1.1	損傷载荷	2048	40	1
case-1.2	再载荷	1563	31	0.76
case-2.1	損傷载荷	1820	36	1
case-2.2	再载荷	2603	51	1.43

(※) 換算土被り高さ: $H_f = P/A\gamma$ 。

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) 破壊に至るまでの変状

各実験ケースでの、覆工コンクリートの最終破壊に至るまでの変状の経過の概要を、以下に示す。なお、説明で使用する「内側面、外側面、上面」は、図-3に示す位置の面を示す。また、内側面、外側面にて、高さ中央位置で円周方向に取り付けたひずみゲージの計測値（+引張、-圧縮）についても言及する。

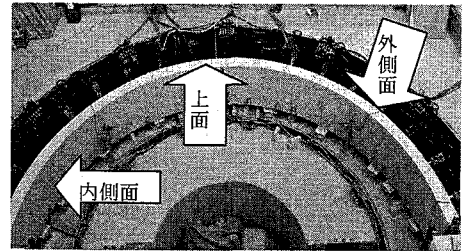


図-3 覆工の内側面、外側面、上面

(2.1) 無補強の場合 (case-1.1, case-1.2)

①損傷載荷時 (case-1.1)

破壊荷重の約13%荷重で天端部90度付近の内側面および上面に曲げ引張りひび割れが数本発生し（第一ひび割れ）、破壊荷重の約22~27%荷重で肩部65度・115度付近の外側面および上面に曲げ引張りひび割れが数本発生した（第二ひび割れ）。作用荷重が破壊荷重の約94%荷重時に、天端部の外側面に剥離が多数発生しだした。この剥離は圧壊を示す現象である。続いて、両肩部内側面に同様な剥離が多数発生しだし、作用荷重は破壊荷重に達した。その後、両肩部内側面では剥離の発生範囲の広がりが見られ、その間は作用荷重の低下は見られず破壊荷重値が維持された。さらに強制変位の増加に伴って、天端部の内側面および上面で円周方向のひび割れが発生して、荷重の低下が起きた。この円周方向のひび割れは、円周方向の軸圧縮ひずみに対するポアソン効果による引張りひずみが数百 $\times 10^{-6}$ に達したため発生したものと考えられる。

圧壊が見られ出した時点での圧縮ひずみは、天端部外側面では約 -4000×10^{-6} 、肩部115度内側面では約 -4700×10^{-6} 、肩部65度内側面では約 -4500×10^{-6} であり、圧壊の発生した圧縮ひずみレベルは天端部外側面と肩部内側面とでは若干異なった（図-4参照）。

②無補強での再載荷時 (case-1.2)

損傷載荷時に発生した天端部の内側面および上側面の曲げ引張りひび割れは、除荷時の荷重低下により閉口し、再載荷時の荷重増加により再び開口した。再載荷の開始以降、覆工コンクリートに新たなひび割れ発生や進展は殆ど見られず、この間の荷重変位曲線は除荷時とほぼ同じ経路をたどった。天端変位が除

凡例	δ (mm)	P (kN)	P/Pmax	変状など
1 ×	2.4	266	0.13	天端〔上面・内側面〕に曲げ引張りひび割れ発生。
2 ○	7.2	548	0.27	両肩部〔上面・外側面〕に、――に――
3 △	20.5	1345	0.66	圧縮ひずみ $\epsilon_c > 2000 \times 10^{-6}$ (1測点でも左記となった。)
4 ▴	28.8	1773	0.87	圧縮ひずみ $\epsilon_c > 3500 \times 10^{-6}$ (1測点でも左記となった。)
5 ▾	33.4	1930	0.94	天端〔外側面〕に剥離が発生(圧壊)。
6 □	38.1	2048	1	損傷載荷時の最大荷重 (Pmax)。
7	39.6	2025	0.99	両肩部〔内側面〕に剥離が発生(圧壊)。
8	41.2	2041	1.00	$\theta=90$ 度~110度間の内側面に円周方向にひび割れ発生。
9 ●	43.5	1912	0.93	載荷ステップの最終ステップ。
10	41.8	1349	0.66	除荷第1ステップ。

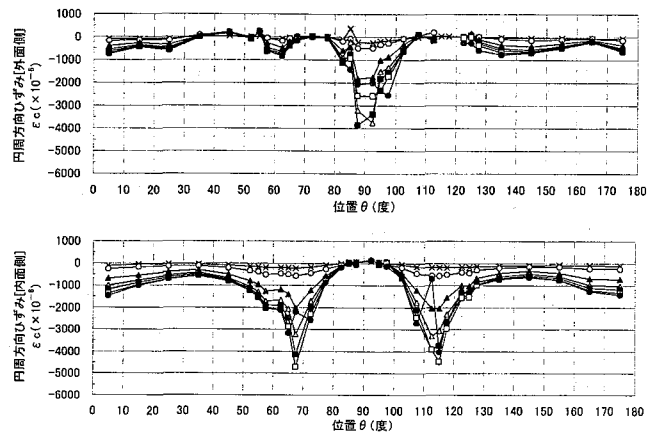


図-4 覆工コンクリート外側面・内側面の円周方向ひずみ (損傷載荷時: case-1.1)

凡例	δ (mm)	P (kN)	P/Pmax	変状など
1 ×	19.3	242	0.12	
2 ○	29.6	698	0.34	
3 △	39.1	1206	0.59	
4 ▴	48.0	1507	0.74	
5 □	56.2	1563	0.76	再載荷時の最大荷重
6 ●	66.8	1286	0.63	最終破壊時の天端変位 (δ_{max})

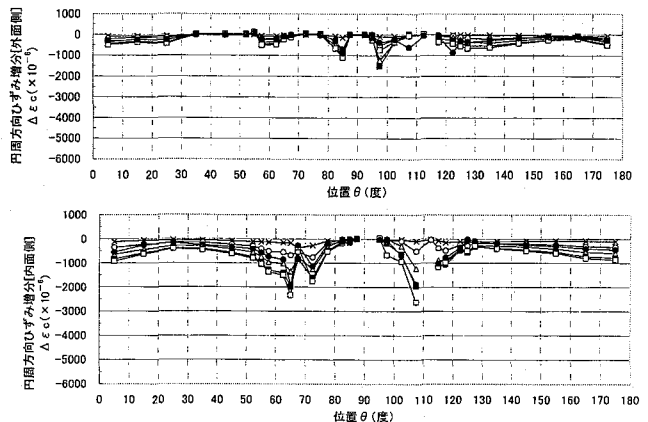


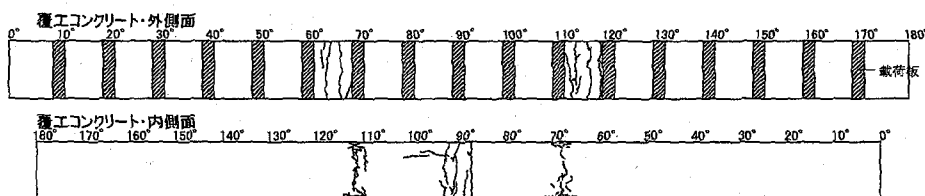
図-5 覆工コンクリート外側面・内側面の円周方向ひずみ増分 (再載荷時: case-1.2)

荷開始時の変位値付近に接近すると、天端部および両肩部の、各上面では損傷載荷時に発生したひび割れ群の先端からひび割れの進展が発生し、各内側面では新たなひび割れが発生しだした。このひび割れの種類は、損傷載荷時の終了付近で発生した円周方向のひび割れと同じ種類のものである。最終的には、肩部 115 度付近の内側面および上面で、円周方向に比較的長いひび割れが一気に発生し、ほぼその発生直後に、作用荷重の急激な低下を伴って、肩部 115 度内側面の圧壊部でコンクリートが粉状になって剥落した。その剥落箇所の範囲は円周方向約 70cm、覆工厚方向の厚さは約 10cm であった。再載荷には、損傷載荷時と同様に両肩部内側面で圧縮ひずみが集中したが ($\Delta \epsilon = -2000 \sim -2500 \times 10^{-6}$)、天端部外側面では、ひずみゲージ貼付部付近のコンクリートが剥離して、増分ひずみは殆ど計測されなかった (図-5 参照)。

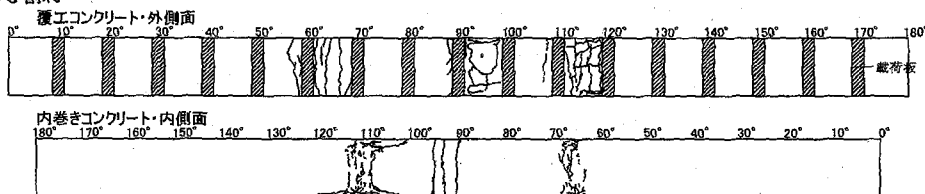
(2.2) 内巻きコンクリート補強の場合 (case-2.1, case-2.2)

損傷載荷時および再載荷時の、覆工および内巻きコンクリート供試体のひび割れスケッチ図を、図-6 に示す。

(a) 損傷載荷完了時：覆工コンクリート供試体【外側面・内側面】でのひび割れ



(b) 再載荷完了時（最終破壊時）：覆工コンクリート供試体【外側面】および内巻きコンクリート供試体【内側面】でのひび割れ



(c) 再載荷時：覆工コンクリート供試体【上面】および内巻きコンクリート供試体【上面】でのひび割れ

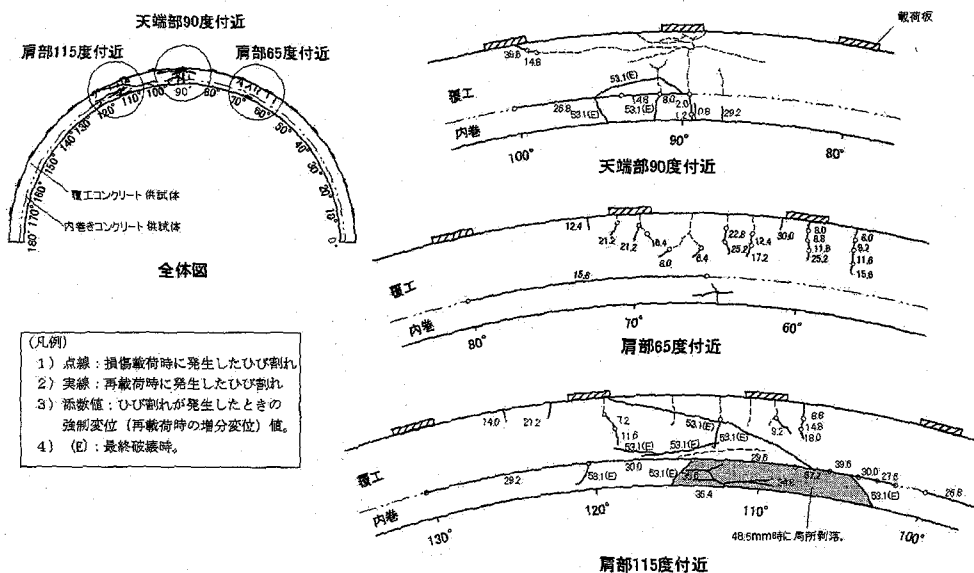


図-6 覆工コンクリート供試体および内巻きコンクリート供試体のひび割れスケッチ図

①損傷載荷時 (case-2.1)

ひび割れ発生やひずみ発生などの挙動は、case-1.1 にほぼ同様であった(図-7 参照)。

②再載荷時 (case-2.2)

内巻きコンクリート天端部の内側面および上面には、損傷載荷時の破壊荷重(以下、 $P_{2.1}$ 荷重と称す。)の約7%荷重時に、全引張による貫通ひび割れが発生した。その後、 $P_{2.1}$ 荷重の約35%荷重時に、天端部では内巻きコンクリートと覆工コンクリートとの打継目(以下、打継目と略称する。)にひび割れが発生した。このとき、覆工コンクリートの両肩部の、外側面および上面では損傷載荷時に見られた曲げ引張ひび割れの発生位置とは異なった位置に新たな曲げ引張ひび割れが発生し、また上面では損傷載荷時に発生した曲げ引張りひび割れの進展も見られた。 $P_{2.1}$ 荷重の約64~67%荷重時には、打継目において、肩部65度付近でひび割れが発生し縁が切れた状態となり、天端部ではひび割れの進展が見られた。 $P_{2.1}$ 荷重の約121%荷重時には、内巻きコンクリートの肩部115度付近内側面で圧壊を示す剥離が発生し、打継目にひび割れが発生し縁が切れた。作用荷重がピーク荷重(補強後の破壊荷重)にほぼ達した時点で、肩部65度付近内側面で圧壊現象が見られ出し、もう一方の肩部115度付近では、打継目の縁切りひび割れの進展がとまった。その後、肩部115度付近の内側面で円周方向に比較的に長いひび割れが発生し、それ以降は荷重の低下となった。強制変位量が無補強ケースでの最終破壊時の変位量と同じ値に達した時点で、内巻きコンクリートの肩部110度付近の内側面が剥落し、覆工コンクリートが一部露出した。剥落はcase.1-2と同様で粉状に剥落し、その剥落範囲は周方向長さ約20cm~80cmであった。ここで、内巻きコンクリートが剥落した箇所は、圧壊を示す剥離が発生した箇所よりやや天端よりの箇所ので、先に説明した覆工肩部外側面で曲げ引張ひび割れが新たに発生した箇所付近に近い箇所であった。さらに、その直後、当該部付近の覆工コンクリートが斜めひび割れ(覆工コンクリートの外側面から内側

凡例	ϕ (mm)	P (kN)	P/Pmax	挙動など
1	1.8	110	0.06	天端「上面・内側面」に曲げ引張ひび割れ発生。
2	7.7	408	0.22	両肩部「上面・外側面」に曲げ引張ひび割れ発生。
3	21.2	1154	0.63	内巻き「内側面」に曲げ引張ひび割れ発生(圧壊)。
4	27.7	1452	0.80	天端「外側面」に剥離が発生(圧壊)。
5	28.8	1479	0.81	内巻き「内側面」に剥離が発生(圧壊)。
6	38.8	1774	0.98	両肩部「内側面」に剥離が発生(圧壊)。
7	39.5	1772	0.97	$\theta=90$ 度~100度間の内側面に円周方向にひび割れ発生。
8	41.9	1820	1	損傷載荷時の最大荷重(P_{max})= $P_{2.1}$ 荷重。
9	42.7	1814	1.00	$\theta=90$ 度~100度間の内側面に円周方向にひび割れ急伸。
10	45.2	1676	0.92	載荷ステップの最終ステップ。
11	44.8	1555	0.85	除荷第1ステップ。

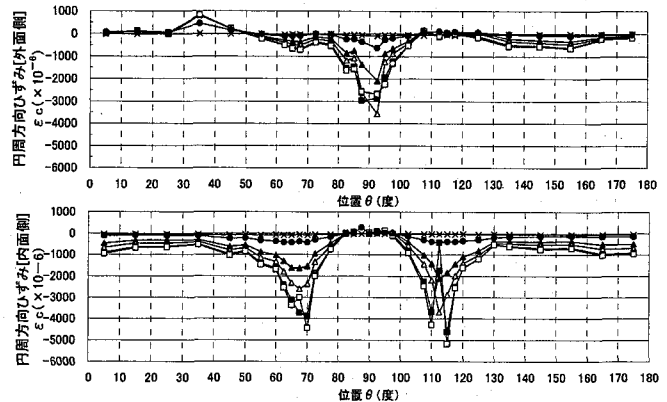


図-7 覆工コンクリート(外側面・内側面)の円周方向ひずみ(損傷載荷時: case-2.1)

凡例	ϕ (mm)	P (kN)	P/Pmax	挙動など
1	15.9	126	0.07	内巻き天端「上面・内側面」に貫通引張ひび割れ発生。
2	23.1	629	0.35	覆工天端・肩部「上面・外側面」に曲げ引張ひび割れ発生。
3	36.3	1676	0.92	内巻き「内側面」に曲げ引張ひび割れ発生(圧壊)。
4	43.4	2196	1.21	内巻き「内側面 $\theta=115$ 度付近」に剥離が発生(圧壊)。
5	45.8	2336	1.28	内巻き「内側面 $\theta=65$ 度付近」に剥離が発生(圧壊)。
6	49.9	2516	1.38	再載荷時の最大荷重。
7	54	2609	1.43	内巻き「内側面 $\theta=115$ 度付近」にアーチ方向にひび割れが発生。
8	54.7	2598	1.43	内巻き「内側面 $\theta=115$ 度付近」にアーチ方向にひび割れが発生。
9	63.7	2324	1.28	内巻き「内側面 $\theta=105$ 度付近」の局所的な剥落。
10	66.2	1995	1.10	...
11	68.2	653	0.36	覆工肩部「 $\theta=112.5$ 度付近」せん断ひび割れが発生し2分される。

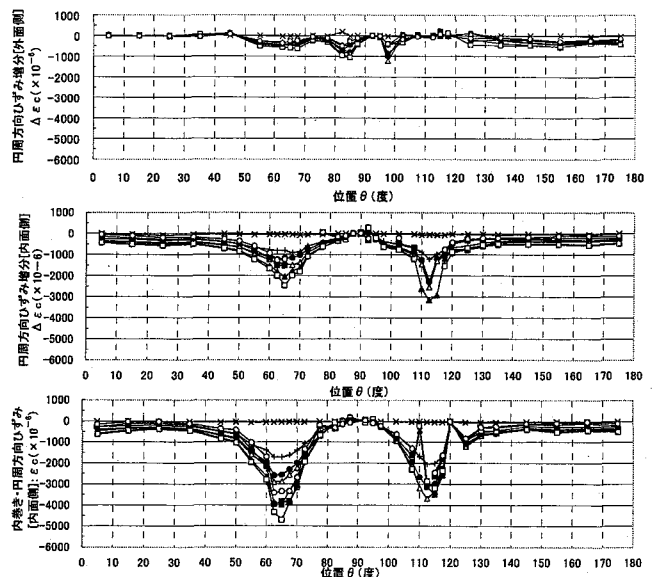


図-8 覆工(外側面・内側面)および内巻きコンクリート(内側面)の円周方向ひずみ増分(再載荷時: case-2.2)

面まで貫いたひび割れで、円周接線方向に対して約 20 度) を発生して破壊し 2 分割され、急激な荷重低下となった。内巻きコンクリート剥落部の破断面は、円周接線方向に対して約 45 度面であったことから、内巻きコンクリートの剥落は円周方向の一軸圧縮による破壊と考えられる。再載荷時の覆工および内巻きコンクリートの円周方向のひずみは、損傷載荷時と同様に、いずれも両肩部内側面で圧縮ひずみが集中した。肩部内側面での圧縮ひずみの最大値は、覆工コンクリートでは $\Delta \varepsilon_{\max} = -2800 \times 10^{-6}$ (65 度付近)、 -3100×10^{-6} (115 度付近) で、内巻きコンクリートでは $\varepsilon_{\max} = -4700 \times 10^{-6}$ (65 度付近)、 -3700×10^{-6} (115 度付近) であった (図-8 参照)。

4. 考察

(1) 覆工コンクリートの破壊メカニズムに関する考察

本実験条件下での、無垢・無補強の覆工コンクリートの破壊メカニズムは、以下のように考えられる。天端から作用荷重を受けた覆工コンクリートは、天端部で内側面引張の曲げにより曲げ引張りひび割れが発生し、その曲げ変形の支点が両肩部に内部形成される。天端部外側面および両肩部内側面では、圧縮ひずみが $\varepsilon = -3400 \times 10^{-6}$ ~ -4700×10^{-6} に達したときに圧壊がはじまる。圧壊は、天端外側面で先に発生し、次いで両肩部内側面で発生し、後者の時点で作用荷重は最大荷重 (破壊荷重) に達する。圧壊はすぐにコンクリートの剥落を伴うものではなく、破壊荷重値を維持しながら圧壊範囲の広がりを呈するが、肩部内側面の圧壊部でコンクリートが剥落すると同時に急激な荷重低下となる。圧壊部でのコンクリート剥落は、載荷ジャッキの載荷板で変位拘束されている天端外側面よりも変位拘束のない肩部内側面で発生し、構造系としては内部支点の破壊となり荷重負担できなくなったと説明できる。

(2) 内巻きコンクリートの補強効果に関する考察

本実験条件下で、内部支点となる肩部の内側面では曲げ圧縮 (局所的な回転変形による圧縮を含む) となるが、内巻きコンクリートはその圧縮に対する抵抗部材となり、覆工コンクリートの耐力および変形剛性の増加に寄与したと考えられる。この局所的な圧縮抵抗は、覆工コンクリートと一体化している状態では主に曲げ圧縮で、覆工コンクリートとの一体化が切れた後は主に軸圧縮と考えられるが、いずれの状況でも、圧縮に対して有利な材料特性をもつ内巻きコンクリートが抵抗したと考えられる。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。

荷重変位曲線上で最大荷重を過ぎて荷重低下が見られ出したところで発生した、内巻きコンクリート肩部の剥落は、覆工コンクリートと縁が切れた状態で発生し、一軸圧縮状態下の脆性的な破壊であった。さらに、その内巻きコンクリート剥落後、内巻きコンクリート剥落箇所近傍の覆工コンクリートは、それまで内巻きコンクリートが負担していた一軸圧縮力を急ぎに負担することになり、その荷重はやはり一軸圧縮状態でかつ急激に作用することになるため、覆工コンクリートも脆性的に破壊した。このことから、内巻きコンクリートは、脆性破壊とならないように、最大荷重後のじん性の高い部材とすることが安全上必要である。

5. まとめ

内巻きコンクリート補強は、損傷覆工コンクリートの耐力および変形剛性を向上させることができ、それは無垢・無補強の覆工の耐力以上および変形剛性以上に期待できる。その補強メカニズムは、覆工コンクリート内側面が曲げ変形によって局所的に圧縮となる両肩部において、内巻きコンクリートで圧縮抵抗を増すことによる。

参考文献

- 1) 国土交通省土木研究所・日本道路公団試験研究所：トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書、第 275 号、平成 13 年 3 月
- 2) 蒲田・真下・石村：トンネル変状対策工の補強効果に関する実験的研究、土木工学研究論文・報告集第 12 巻、pp. 441-446、2002 年 11 月
- 3) 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
- 4) 独立行政法人土木研究所：道路トンネル変状対策工マニュアル (案)、土木研究所資料第 3877 号、2003 年 2 月