

◆ 特集：道路舗装・トンネルの維持管理、補修・補強技術 ◆

トンネル覆工コンクリートはく落防止工法

箱石安彦* 石村利明** 真下英人***

1. はじめに

近年、老朽化したトンネルの増大に伴い、トンネルの覆工コンクリートの一部が剥落する事故などが発生しており、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の重要性が増している。

既設トンネル覆工からのコンクリート片はく落防止対策工の現行の代表的な工法としては、はつり落し工、断面修復工、ひび割れ注入工、繊維シート系材料による当て板工（炭素繊維シート接着工など）、パネル系材料による当て板工（鋼板接着工など）、形鋼系材料（L形鋼など）による当て板工、金網・ネット工などが挙げられる。これらの対策工については、炭素繊維シート接着工のように研究が重ねられ設計法が提案されているものもあるが、形鋼による当て板工のようにこれまで研究の対象に殆どなっていないものもあり、その設計法は確立されているとは言い難く、その材料の選定や設計については、経験的な判断や施工実績を元に、各現場が対応しているのが現状である。

本報文は、現在、一般的に広く採用されているはく落防止対策工であ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载荷試験を実施し、各対策工の力学的な破壊形態を調べ、その設計の考え方を整理したものである。

2. 実験方法

2.1 試験概要

トンネル覆工からコンクリート片がはく落する場合を想定して、図-1に示すような载荷試験装置を用いて、コンクリートスラブの片面にはく落防止工を施して押抜き载荷試験を行った。実験は、コ

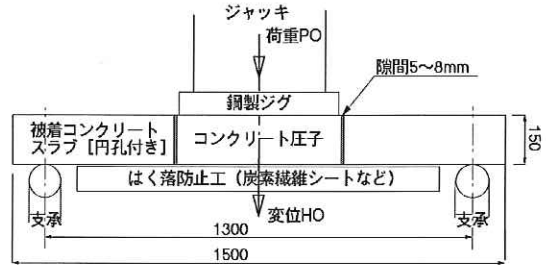


図-1 押抜き载荷試験装置の概要図

ンクリートスラブ供試体（1500mm×1500mm×150mm）の中央部に設けられた円孔（φ500mmなど）の中にコンクリート製圧子を挿入し、押抜き変位をステップ载荷し、最大荷重を確認するまで载荷を継続した。なお、供試体寸法は、実トンネルでのはく落および補修の規模に近くなるように、比較的に大きい寸法を設定した。

2.2 実験ケース

試験対象とした各対策工、a) 炭素繊維シート接着工、b) 鋼板接着工、c) ひび割れ注入工、d) L形鋼による当て板工、の母材コンクリート供試体への取付け図を図-2に示す。試験ケースとして、a) の炭素繊維シート接着工のケースでは接着する母材コンクリートの強度を変えたケースおよび接着範囲を変えたケース、b) の鋼板接着工のケースでは接着範囲を変えたケース、c) のひび割れ注入工のケースでは圧子径を変えたケース、d) のL形鋼による当て板工のケースでは圧子径および鋼材数量を変えたケースを実施した。

実験ケースを、表-1に示す。

炭素繊維シート接着方法は実際の施工時と同じ方法に準じたが、供試体の接着面が平滑なため不陸修正パテの塗布は実施していない。また、鋼板接着は、圧子を挿入した状態の母材コンクリートスラブ片面にエポキシ樹脂系注入接着剤で接着した。なお、炭素繊維シート接着工と鋼板接着工においては、圧子部と母材コンクリートの隙間は、粘土で隙間を塞いで、接着剤が隙間に入らないよ

Estimate of the Load-Carrying Capacity of Countermeasures Against Spalling of Concrete Pieces from Tunnel Concrete Lining

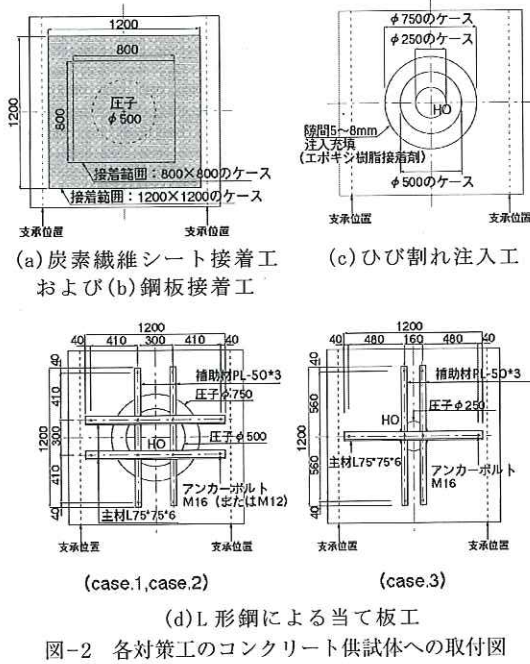


図-2 各対策工のコンクリート供試体への取付図

表-1 実験ケース

実験ケース 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	試験結果 最大荷重 P0 kN
	材料	目付	接着範囲			
シート接着工						
case. 1	炭素繊維 シート	300g/m ²	800mm	500	15.7	6
case. 2			2方向		1200mm	15.7
case. 3		200g/m ²	2方向		17.8	13
case. 4					36.1	20
case. 5					16.2	17
鋼板接着工	材料	接着	接着範囲			
case. 1	SS400	エポキシ	800mm	500	25.7	50
case. 2	t=4.5mm	樹脂	1200mm		17.8	35
ひび割れ注入工	材料	注入接着部				
case. 1	エポキシ	・母材と圧子の隙間		750	23.8	46
case. 2	樹脂	・全周×全高		500	15.5	38
case. 3	接着剤	・隙間；t=5~8mm		250	24.1	43
L形鋼による 当て板工	主材：L75*75*6 (SS400) × L1 × n1、 補助材：平鋼 t=3mm*b=50mm (SS400) × L2 × n2 鋼材端部固定：コンクリートアンカーボルト M16 (後施工)					
	L=L1=L2	n1	n2			
case. 1	1200mm	2	2	750	24.4	65
case. 2		2	2	500	17.8	72
case. 3		1	2	250	24.2	63
無垢	コンクリートスラブ供試体に円孔無し。					
case. 1	対策工無し			500	23.9	52

うにした。

ひび割れ注入工のケースについては、圧子部とスラブ部の隙間 (5~8mm) をひび割れと仮定し、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。また、参照ケースとして、円孔部の無いコンクリートスラブ供試体に対策工を施さない無垢の供試体でのケース

も実施した。L形鋼の固定には、後施工タイプのカットアンカー (M16、全長63mm、許容引張荷重10.9kN (コンクリート強度18N/mm²の場合のカタログ値)) と六角ボルト・ナットを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 炭素繊維シート接着工のケース

1) 破壊形態

図-3に、炭素繊維シート接着工ケースの荷重変位曲線を示す。いずれのケースも、炭素繊維シートは強制変位の増加に伴って、圧子形状と相似の円形状に剥離しながら、その剥離範囲を順次広げていき (写真-1)、最終的には剥離範囲は接着範囲の端部まで達し試験終了とした。

なお、全ケースにおいて、炭素繊維シートは試験時に破断することはなく、炭素繊維シートの剥離面には母材コンクリートが付着しており、破壊性状はコンクリート母材の破壊であった。

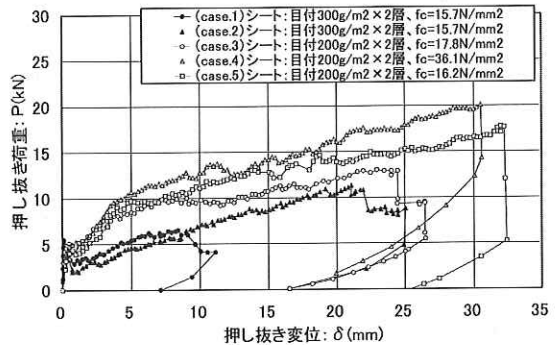


図-3 荷重変位曲線 (炭素繊維シート接着工ケース)

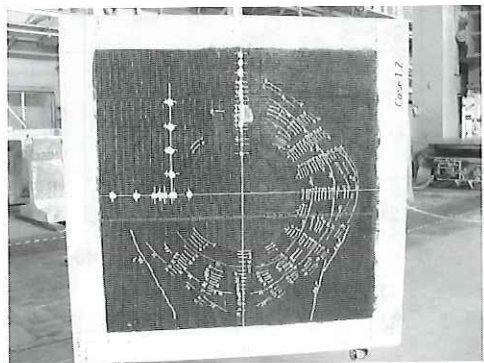


写真-1 炭素繊維シートの剥離進展状 (case. 3)

2) 単位剥離強さ

シート系材料が剥離進展する破壊形態の場合には、耐力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いる¹⁾。本実験ケースにおける単位剥離強さを押抜き変位との関係図として、図-4に示す。

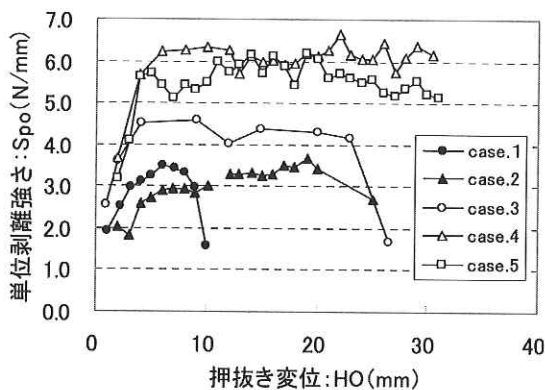


図-4 単位剥離強さと押抜き変位の関係

図-4より、単位剥離強さは、押抜き変位の漸増時のシート剥離が進展する状況では、ほぼ一定値となることが確認できる。従って、単位剥離強さは、文献1で示されるように、本対策工の設計に用いる指標となりうる。

なお、case. 1～case. 2ではcase. 3～case. 5に比べて目付量が多いにもかかわらず単位剥離強さが相対的に小さく、単位剥離強さは繊維シート剛性の平方根 (\sqrt{Et}) にほぼ比例するとして文献1の知見とは異なった。また、母材コンクリート強度の違いによる単位剥離強さの明確な違いは見られなかった (図-5)。

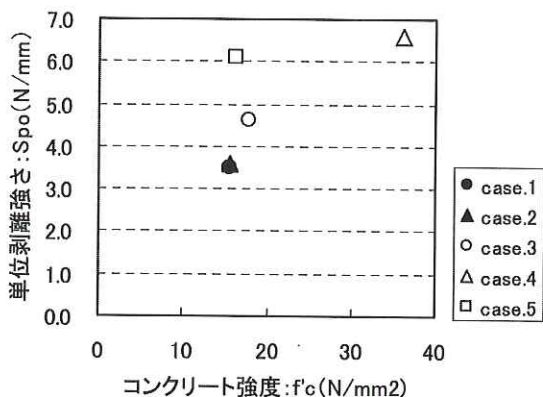


図-5 単位剥離強さと母材コンクリート強度の関係

3) 設計の考え方

炭素繊維シート接着工法の耐力はシート剥離進展時の剥離周長と単位剥離強さによって決まり、その単位剥離強さはほぼ一定値となることから、設計では必要とする耐力に応じてシート接着面積

を設定する。なお、このような考え方が適用できるのは、シートの破壊形態がコンクリート表層部で剥離進展する場合に限られる¹⁾。

設計上の注意事項としては、今回実施した各ケースでの単位剥離強さに値のバラツキが見られ、その違いの原因は現段階では明らかでないことから、単位剥離強さは可能であれば実際の対策工と同じ仕様ケースの押抜き載荷試験により求めることが望まれる。また、剥離周長をシート接着範囲の端部周長で算定した場合には期待する耐力を誤って過大に評価してしまう恐れがあるため、剥離周長はコンクリート片はく落ブロックの形状に相似の形状で周長を算定する必要がある。

3.2 鋼板接着工のケース

1) 破壊形態

図-6に、鋼板接着工ケースの荷重変位曲線を示す。押抜き変位の増加に対して押抜き荷重は最終破壊時まで直線的に増加し、最終破壊時が最大荷重時となった。最終破壊は、いずれのケースも、接着された鋼板が衝撃音を伴って一瞬にして全面的に剥離し (写真-2)、押抜き荷重は急激に抜けた。

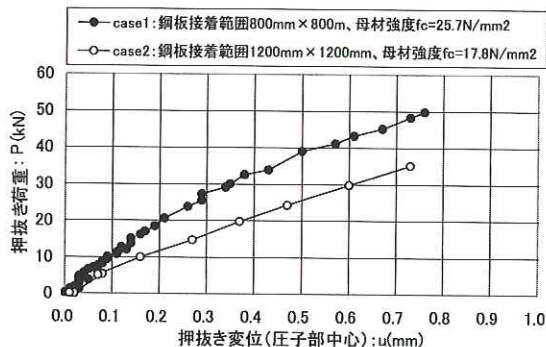


図-6 荷重変位曲線 (鋼板接着工ケース)

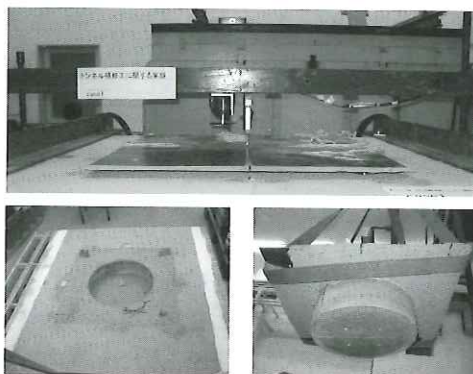


写真-2 鋼板の剥離状況 (case. 1)

剥離した鋼板の接着側面ではコンクリートが付着しており、コンクリートの母材破壊であった。圧子部では鋼板は剥がれずに接着された状態であった。

2) 平均接着強度

押抜き荷重を接着抵抗面積で除した値を平均接着強度と定義し、本指標が押抜き耐力の評価につながる指標かどうか検討してみた。本試験結果での平均接着強度を、表-2に示す。

表-2 鋼板接着ケースにおける平均接着強度

ケース 記号	母材コンクリート		試験結果		平均接着強度		
	圧縮強度 f _c	引張強度 f _t ※1)	比k1	比k2	最大荷重 P _{max}	抵抗面積 A※2)	P _{max} /A ※3)
鋼板					比k3	比k4	比k4
接着工	N/mm ²	—	N/mm ²	—	kN	×10 ⁶ mm ²	N/mm ²
case. 1	25.7	1	2.0	1	50	0.44	0.11
case. 2	17.8	0.69	1.6	0.78	35	0.70	1.24

※1) f_t = 0.23 · f_c^{2/3}より計算した値。
 ※2) 接着範囲から圧子部を差し引いた面積。
 ※3) 最大荷重を抵抗面積Aで除した値。

平均接着強度が各ケースで同じであれば、平均接着強度は耐力を算定する上での指標になると考えられる。しかし、表-2より、平均接着強度の両ケースでの一致は見られなかったため、平均接着強度は鋼板接着工の耐力を決める指標として扱うことはできない。

一方、最大荷重比は母材コンクリートの圧縮強度比にほぼ一致したことから、鋼板接着工の耐力を決める指標は、具体的には現段階では明らかではないが、母材コンクリートの圧縮強度に関するものと考えられる。

3) 鋼板に発生したひずみ分布

鋼板に発生したひずみ（接着しない面で計測した半径方向ひずみ）は、鋼板接着範囲の大小に関係なく、押抜き圧子の境界付近にのみ発生し、最大荷重時でのひずみは高々 ± 250 × 10⁻⁶であった（図-7、図-8）。

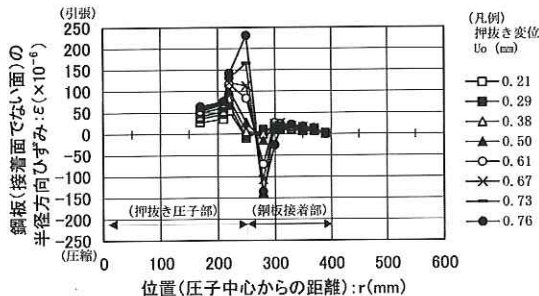


図-7 鋼板ひずみ分布 (case. 1)

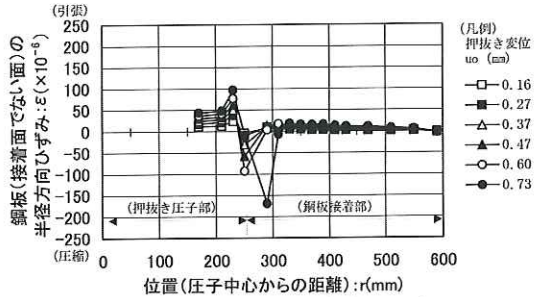


図-8 鋼板ひずみ分布 (case. 2)

鋼板のひずみ値は鋼材の許容引張応力度 σ_t に対するひずみ値 1119×10^{-6} ($= \sigma_t \div E_s = 235 \text{ N/mm}^2 \div 210 \text{ kN/mm}^2$, E_s : 鋼材の弾性定数) 以下であったことから、また剥離した鋼板は折れ曲がる等の変形は無く接着前の平板の状態とほぼ同じであったことから、鋼板は降伏せずに剥離したと考えられる。

4) 設計の考え方

鋼板接着工の耐力は、実験からは、鋼板の全面剥離によって決まることが明らかになった。また、鋼板のひずみ分布から、鋼板の全面剥離は局所的な範囲での剥離破壊挙動によって支配されると考えられ、このことは、最大荷重が平均接着強度と関係が見られなかったことや鋼板接着範囲の大小にあまり関係なかったことにも関係すると思われる。しかし、具体的な耐力の評価手法については、現段階では提案できるだけのデータは得られておらず、今後の課題として残る。なお、接着鋼板の剥離破壊は瞬時の脆性的な破壊となることから、従来より指摘されているように、必ずアンカーボルト等で鋼板が全面剥離しても落下しない安全対策の併用が必要である。

3.3 ひび割れ注入工のケース

1) 破壊形態

図-9に、ひび割れ注入工ケースの荷重変位曲線を示す。

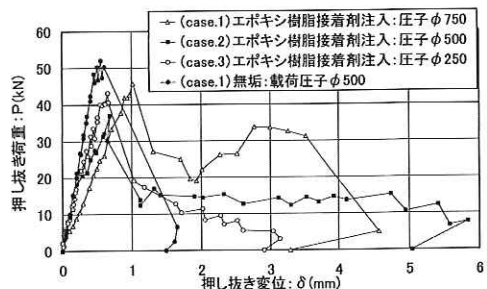


図-9 荷重変位曲線（ひび割れ注入工ケース）

全ケースとも母材コンクリートスラブの曲げ破壊が発生して(写真-3)最大荷重に達する結果となった。この破壊形態は無垢のケースの実験結果とほぼ同じであり、最大荷重も無垢のケースの結果より若干小さい程度であった。このことから、圧子と母材コンクリートとの隙間が確実に接着できれば、圧子径の大小に関係なく、圧子に作用する荷重は隙間の接着部を介して母材コンクリートに伝達され、無垢の状態とほぼ同様と考えることができる。

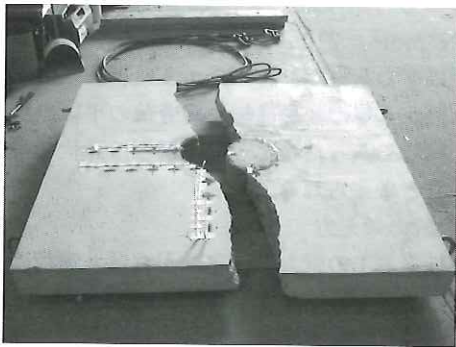


写真-3 最終破壊状況 (case. 3)

2) 設計の考え方

ひび割れを有するコンクリートにおいて、ひび割れ注入が確実に行われていれば、そのコンクリートは無垢の状態とほぼ変わらない性状を期待でき、耐力は無垢の覆工に相当する耐力が期待できることになる。しかし、現実にはひび割れ状況は複雑で、今回の実験と同じようにひび割れ部の全隙間に接着剤を注入・充填することは現状の技術では非常に難しいことを考えると、本工法の単独使用には慎重を期すべきと考えられる。

3. 4 L形鋼による当て板工のケース

1) 破壊形態

図-10に、L形鋼による当て板工ケースの荷重

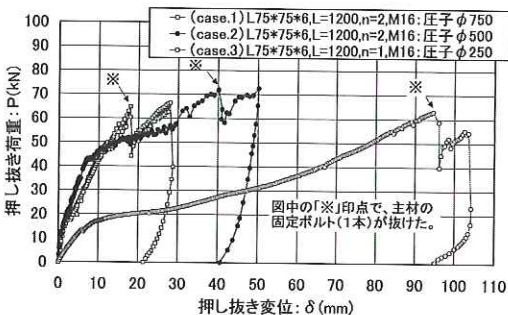


図-10 荷重変位曲線 (L形鋼による当て板工)

変位曲線を示す。

当て板工ケースでは、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。その荷重低下は全荷重が低下するわけではなく、10~20kNの低下を示して荷重低下は止まり、荷重・変位曲線は再び正の勾配を示した。これは、それまで主材が負担していた荷重を他の主材または補助材が受け替えたため、固定ボルトのまだ抜けていない鋼材で押抜き荷重に対する抵抗を示したためである。

その後、さらに強制変位を増加させたときの最終的な破壊は各ケースで異なり、case. 1およびcase. 2では他の鋼材の固定ボルトが抜ける状況に至り(写真-4)、case. 3では他の鋼材の固定ボルトは抜けずに母材コンクリートスラブの曲げ破壊に至った(写真-5)。

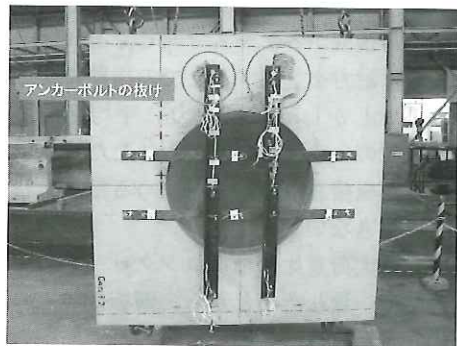


写真-4 最終破壊状況 (case. 1)

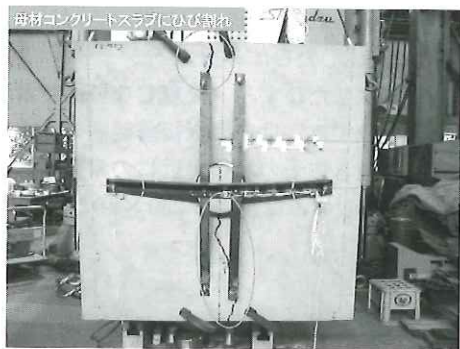


写真-5 最終破壊状況 (case. 3)

case. 3では、最終的な破壊時まで荷重支持した補助材の固定ボルトが母材コンクリートスラブの中央に位置したため、母材コンクリートスラブで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と考えられる。

主材の固定ボルトの一方が抜けるときの破壊荷

重Pは、全ケースにおいて同程度 ($P = 63\text{N} \sim 72\text{kN}$) で大差は見られなかった。アンカーボルトの引抜耐力 (P_a) は、許容引張荷重 (P_y) が安全率 (F_s) 3程度を考慮したものとすると、 $P_a = P_y \times F_s = 10.9\text{kN} \times 3 = 32.7\text{kN}/\text{本}$ となる。実験結果の破壊荷重は、いずれのケースも、アンカー引抜耐力の約2倍であり、L形鋼の両端の2箇所を固定するアンカーボルトで支えられる荷重に相当する。また、主材の固定ボルトの一方が抜けて荷重低下の挙動 (前述) を示すまでの発生変位量は、圧子径の大きいケースで小さい。これは、圧子径の大きいケースでは固定ボルト位置と圧子端部位置との間のスパン長が短いと鋼材のたわみが小さくなることに起因するものである。

2) 設計の考え方

耐力は、鋼材を固定するアンカーボルトの引抜き耐力で評価できるものと考えられる。ただし、アンカーの位置次第では、例えば今回の実験case. 3のように被着コンクリートスラブ供試体が曲げ破壊したように、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、被着コンクリートに損傷が発生する場合が考えられる。この場合には、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. 結論

既設トンネル覆工コンクリート片のはく落防止対策工は、はく落対象範囲に相当するコンクリート重量が落下することを想定して、その重量を保持できる耐力が確保できるように設計する必要がある。各対策工の設計の考え方について、本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

①炭素繊維シート接着工については、破壊形態がシート剥離進展である場合、その耐力は単位剥

離強さおよび剥離周長から算定でき、設計では必要とする耐力を確保できるシート接着範囲を設定する。設計上の注意事項として、単位剥離強さは可能であれば実際の対策工と同じ仕様ケースの押抜き載荷試験により求めることが望まれること、剥離周長はコンクリート片はく落ブロックの形状に相似の形状で周長を算定すること、の二点が挙げられる。

- ②鋼板接着工については、耐力は最終破壊時の鋼板の全面剥離で決まるが、その耐力の評価手法は今後の課題として残る。なお、鋼板接着面における単位面積当りの強度として定義した平均接着強度は、耐力算定の指標とはならない。
- ③L形鋼による当て板工については、最終破壊は鋼材を固定するアンカーボルトの引抜き破壊で決まることから、耐力はアンカーボルトの引抜き耐力で評価できる。ただし、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する状況が考えられる場合には、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ひび割れ注入工については、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耐力を期待できる。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ことを考えると、本工法の単独使用には慎重を期すべきと考えられる。

参考文献

- 1) トンネル安全対策工法研究会：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル、山海堂、2003年3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