

既設トンネルのはく落防止対策工の耐力評価 に関する一考察

Estimate of the load-carrying capacity of countermeasures against spalling of concrete pieces
from tunnel concrete lining

石村利明¹・真下英人²・箱石安彦³

Toshiaki Ishimura, Hideto Mashimo and Yasuhiko Hakoishi

¹正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:ishimura@pwri.go.jp

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516茨城県つくば市南原1番地6)

³正会員 工修 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516茨城県つくば市南原1番地6)

In this paper, some considerations in estimating load-carrying capacity of countermeasures against spalling of concrete pieces from tunnel concrete lining, are proposed. Those were based on the experimental results about representative repair methods, such as carbon fiber sheets bonding, steel plate bonding, patching with L-steel support beams and anchor bolts and crack repair method (injection of epoxy). In each case, the load-carrying capacity and the failure behavior, which were obtained and observed by the punching test of large-scale specimens, are shown. The experimental results of load-carrying capacity could be the reference value for designing.

Key Words : tunnel, lining, countermeasures against spalling of concrete pieces

1. はじめに

既設トンネル覆工コンクリート片のはく落防止対策工の現行の代表的な工法には、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、形鋼による当板工、ひび割れ注入工等が挙げられる¹⁾。各対策工の設計法については、炭素繊維シート接着工法のように研究が重ねられ²⁾設計法が提案されているもの³⁾もあれば、形鋼による当板工のように、これまで研究の対象に殆どなっていないものもある。本文は、上述した現行の代表的な対策工の4工法について、覆工内面からコンクリート片のはく落することを想定した押抜き載荷試験を実施し、耐力の決まる力学的な破壊形態を調べ、既往の研究成果も参照しながら、各対策工の設計の考え方を整理してみたものである。

2. 押抜き載荷試験

(1) 試験概要

トンネル覆工からコンクリート片のはく落する場合を想定して、図-1に示すような載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取り付けて押抜き載荷試験を行った。実験は、コ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載荷し、最大荷重を確認するまで載荷を継続した。なお、供試体寸法は、実トンネルではく落および補修の規模に近くなるように設定したものである。

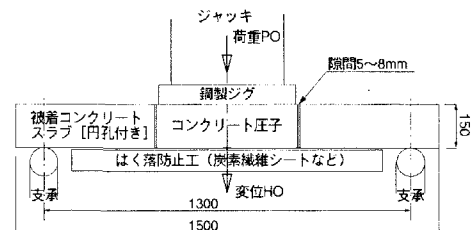
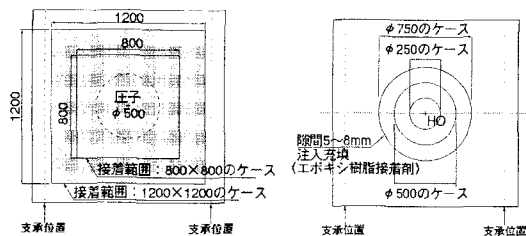


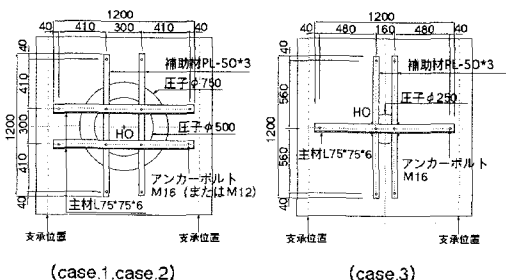
図-1 押抜き載荷試験装置の概要図

(2) 対象とした工法と実験ケース

試験対象とした対策工は、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形鋼による当板工で、各対策工の試験被着供試体コンクリートへの取付け図を図-2に示す。試験ケースとして、a) 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) は接着範囲を変えたケース、c) は圧子径を変えたケース、d) は圧子径および鋼材数量を変えたケ



(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



(case.1, case.2)

(case.3)

(d) L形鋼による当板工

図-2 各対策工のコンクリート供試体への取付け図

ースを、実施した。炭素繊維シート接着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。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、a)、b)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うにした。ひび割れ注入工については、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。また、参照ケースとして、円孔部を設けな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: カタログ値))と六角ボルト・ナットを用いた。実験ケースを、表-1に示す。

3. 実験結果と考察

(1) 耐力と破壊形態

全実験ケースの最大荷重(耐力)と破壊形態を、表-1に示す。

(2) 炭素繊維シート接着工ケースの結果と考察

a) 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^{4)、5)}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と共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。シート剥離進展が端部に達した段階で急激な荷重低下となるが、接着範囲の小さい case-1 は他ケースに比べて押抜き変位の載荷の小さい段階でシート剥離進展が端部に達したことがわかる。なお、全ケースにおいて、試験時に炭素繊維シートが切断することではなく、剥離したシートの剥離面には母材コンクリートが付着しておりコンクリート表層部の破壊であった。

表-1 実験ケースと実験結果概要

実験ケース 記号	対策工			圧子	母材	試験結果	
				直径	コンクリート	最大荷重	破壊形態
				φ	圧縮強度		
				mm	N/mm ²	kN	
シート接着工							
case-1	炭素繊維 シート	300g/m ²	800mm	500	15.7	6	シート剥離がスラブ 端部まで進展
case-2		2方向	1200mm		15.7	12	シート剥離がスラブ 端部まで進展
case-3		200g/m ² 2方向			17.8	13	シート剥離がスラブ 端部まで進展
case-4					36.1	20	シート剥離がスラブ 端部まで進展
case-5					16.2	17	シート剥離がスラブ 端部まで進展
鋼板接着工							
case-1	材料	接着	接着範囲	500	25.7	50	鋼板の急激なほぼ全面剥離
case-2	SS400	エポキシ 樹脂	800mm		17.8	35	鋼板の急激なほぼ全面剥離
	t=4.5mm		1200mm				
ひび割れ注入工							
	材料	注入接着部					
case-1	エポキシ	・母材と圧子の隙間の 全周×全高		750	23.8	46	コンクリートスラブの曲げ破壊
case-2	樹脂	・隙間:t=5~8mm		500	15.5	38	コンクリートスラブの曲げ破壊
case-3	接着剤			250	24.1	43	コンクリートスラブの曲げ破壊
当板工							
	主材:L75*75*6(SS400)×L1×n1	補助材:平鋼t=3mm*b=50mm(SS400)×L2×n2					
	L=L1=L2	n1	n2	鋼材端部固定:コンクリートアンカーボルトM16(後施工)			
case-1	1200mm	2	2	750	24.4	65	主材固定ボルト部の抜け
case-2		2	2	500	17.8	72	主材固定ボルト部の抜け
case-3		1	2	250	24.2	63	主材固定ボルト部の抜け
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	コンクリートスラブの曲げ破壊

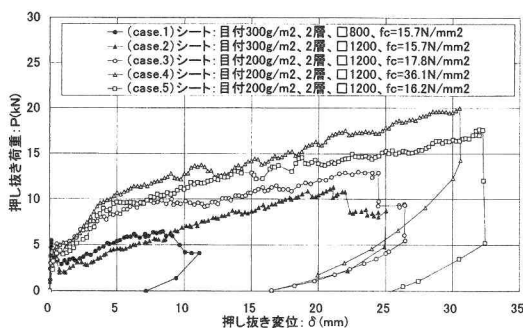


図-3 荷重変位曲線（炭素繊維シート接着ケース群）

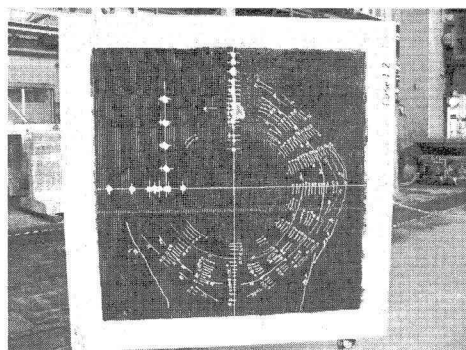


写真-1 炭素繊維シートの剥離進展状況（case-3）

b) 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長で除した単位剥離強さ（ S_{po} ）を用いることが提案されている³⁾。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 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3で示されるように、本対策工の設計に用いる特性値となりうる。

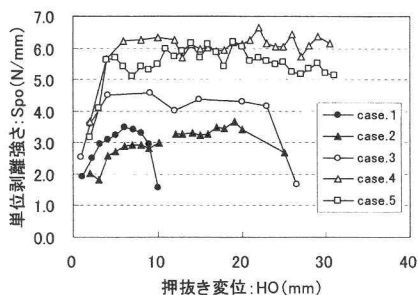


図-4 単位剥離強さと押抜き変位の関係

ただし、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た文献3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）。

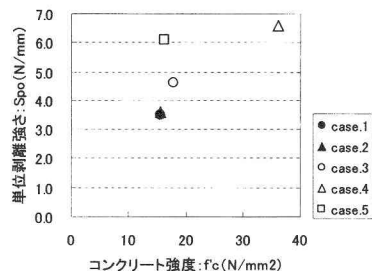


図-5 単位剥離強さと母材コンクリート強度の関係

以上のように今回実施した各ケースでの単位剥離強さに値にはバラツキが見られ、その違いはシート剛性の違いによるものでもなく、また母材コンクリート強度によるものでもないが、その原因は現段階では明らかでない。

c) 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、設計では期待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に剥離進展する場合に限られる^{2)、3)}。設計上の注意事項としては、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しいこと、剥離周長は圧子形状に相似形状の周長で算定する必要があることが挙げられる。前者については、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による。後者については、例えば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ことに対する注意である。

(3) 鋼板接着工ケースの結果と考察

a) 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。また、写真-2 に、最終破壊時の鋼板の剥離状況写真を示す。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、押抜き荷重は急激に抜けた。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。

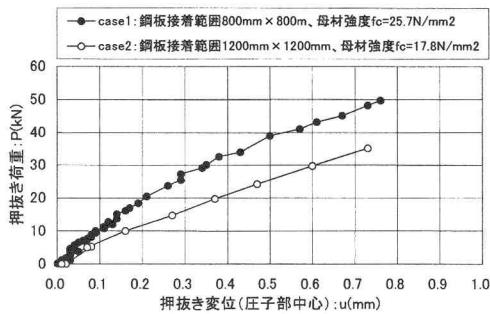


図-6 荷重変位曲線（鋼板接着ケース群）

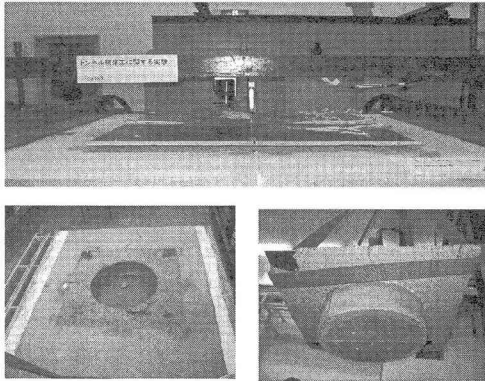


写真-2 鋼板の剥離状況（case-1）

b) 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。本試験結果から計算される平均接着強度を、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	最大荷重 P_{max}	抵抗面積 A	※2	※3	※4
鋼板 接着工	N/mm^2	N/mm^2	kN	mm^2	$\times 10^6 \text{ mm}^2$	N/mm^2	—
case-1	25.7	1	50	1	0.44	0.11	1
case-2	17.8	0.69	35	0.70	1.24	0.03	0.25

※1) $f_t = 0.23 \cdot f'_c^{2/3}$ 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特性値と考えることができる。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には不適当であると思われる。

一方、各ケースの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、具体的な指標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係すると考えられる。

c) 鋼板に発生したひずみ分布

鋼板に発生したひずみは（接着しない面で計測し

た半径方向ひずみ）、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 $\pm 250 \times 10^{-6}$ であった（図-7、図-8）。鋼板の計測ひずみ値は、鋼材の許容引張応力度 σ_t に対するひずみ値 1119×10^{-6} ($= \sigma_t / E_s = 235 \text{N/mm}^2 / 210 \text{kN/mm}^2$ 。 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てよい。

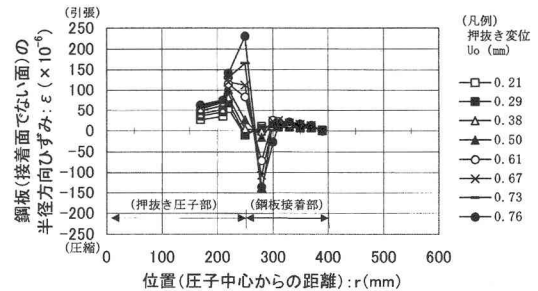


図-7 鋼板ひずみ分布（case-1）

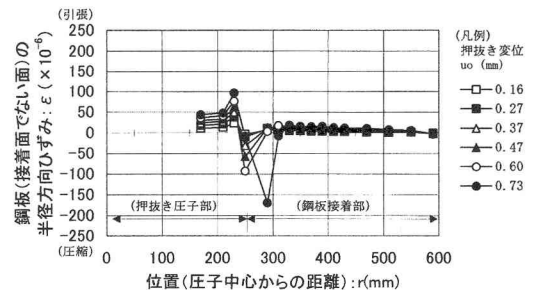


図-8 鋼板ひずみ分布（case-2）

c) 設計の考え方

鋼板接着工の耐力は、実験からは、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る鋼板の全面剥離によって決まることが明らかになった。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無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、今後も課題として残っている。

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。

(4) ひび割れ注入工ケースの結果と考察

a) 破壊形態

図-9 に、ひび割れ注入工ケースの荷重変位曲線

4)、5)を示す。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、無垢の状態とほぼ同様に、隙間の接着部を介して母材コンクリートに伝達されると考えることができる。

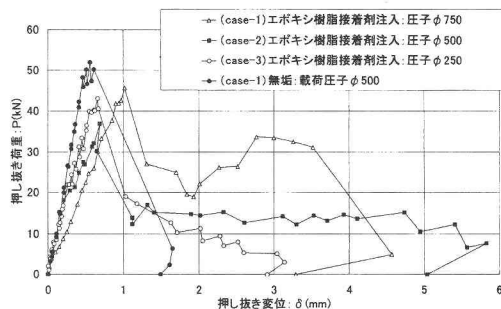


図-9 荷重変位曲線(ひび割れ注入工ケース群)

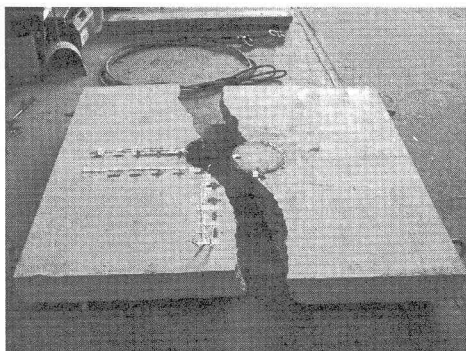


写真-3 最終破壊状況(case-3)

b) 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状況を期待でき、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。

(5) L形鋼による当板工ケースの結果と考察

a) 破壊形態

図-10に、L形鋼による当板工ケースの荷重変位曲線^{4)、5)}を示す。当板工ケースでは、いずれのケー

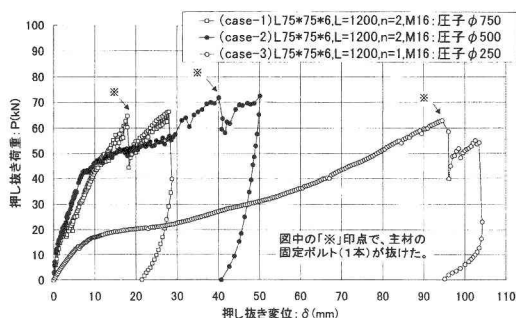


図-10 荷重変位曲線(L形鋼による当板工ケース群)

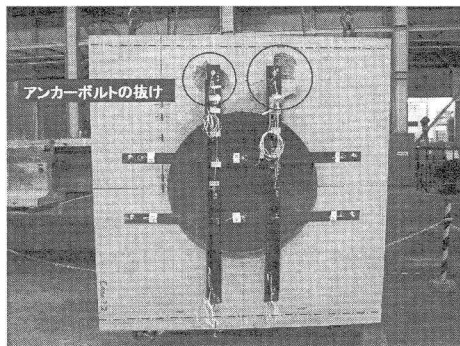


写真-4 最終破壊状況(case-1)

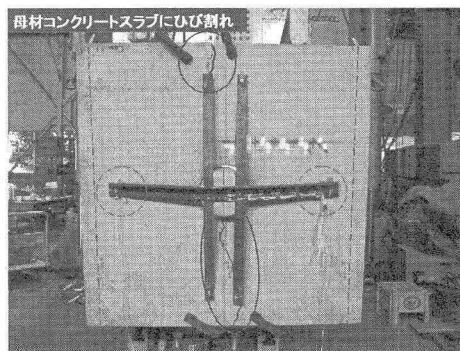


写真-5 最終破壊状況(case-3)

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で、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)。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、 $P_a=P_y \times F_s=10.9\text{kN} \times 3=32.7\text{kN}$ /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いため鋼材のたわみが小さくなることに起因するものである。

b) 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、剥離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となるように設計する必要がある。本文では、現行の代表的な対策工法である、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、L 形鋼による当板工、ひび割れ注入工について、覆工内面からコンクリート片のはく落することを想定した押抜き載荷試験を実施し、耐力の決まる力学的な破壊形態を調べ、各対策工の設計の考え方を整理した。本研究で得られた結論をまとめると以下になる。

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、設計では期待する耐力を確保できるシート接着範囲を設定する。なお、単位剥離強さを設計指標に利用できるのは、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。

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も課題として残っている。なお、鋼板接着面における単位面積当りの強度として本文で定義してみた平均接着強度は、耐力算定の特性値としては使用できない。

③L 形鋼による当板工については、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を受け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、無垢の状態とほぼ変わらない状況を期待できる。ただし、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。

5. おわりに

今回の実験では、これまでの既往の研究成果を確認する結果の部分もあるが、はく落防止対策工の耐力の評価方法を整理する上で有意義な知見を確認できた。また、今回の実験規模は実際の対策工規模を想定した規模でもあり、実験結果の最大荷重は実際の対策工の耐力を評価する上で一つの参照値となりうる。今後は、鋼板接着工の耐力評価などの課題について更なる検討を加えるなど、コンクリート片のはく落対策工の設計法の確立を図るべく研究を進める所存である。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：土木研究所資料第 3877 号、道路トンネル変状対策工マニュアル (案)、平成 15 年 2 月
- 2) 呉智深・朝倉俊弘・吉澤弘之・袁鴻・小林朗・高橋徹：連続繊維シート貼付によるコンクリート片のはく落防止効果に関する実験的・解析的研究、土木学会論文報告集 No. 662/V-49、pp. 45-58、2000 年 11 月
- 3) 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
- 4) 蒲田浩久・真下英人・石村利明・森本智：トンネルのはく落対策に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部、平成 14 年 9 月、pp. 601-602
- 5) 箱石安彦・真下英人・石村利明：既設トンネルの覆工コンクリート片のはく落防止工の耐力に関する実験的研究、第 25 回日本道路会議論文集、2003 年 11 月