

繊維シート接着工による トンネル覆工コンクリートの剥落対策設計法

小島芳之¹・吉川和行²・六車崇司³・小林朗⁴・若菜和之⁵・
松岡茂⁶・朝倉俊弘⁷・呉智深⁸

¹正会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ykojima@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 ショーボンド建設(株) 中国支店 (〒731-5124 広島市佐伯区皆賀3-2-30)

元 鉄道総合技術研究所

⁴正会員 日鉄コンボジット(株) 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小船町3-8)

⁵正会員 ショーボンド建設(株) 土木事業部 (〒536-0022 大阪市城東区永田3-12-15)

⁶正会員 工博 鉄建建設(株) 技術研究所 (〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

⁷正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科 助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁸正会員 工博 茨城大学工学部 教授 (〒316-0033 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

本論文は、最近トンネル覆工コンクリートの剥落対策として普及している、炭素、アラミド、ガラス等の繊維シートを覆工内面に樹脂により接着する工法(以下「繊維シート接着工」)に着目し、その設計法と選定法を提案するものである。まず、過去の剥落事例を調査したうえで、剥落事例ごとの要因の分類とその特徴を考察し、剥落対策工としての効果を把握するために押抜き実験を行った。また、押抜き実験の結果を繊維シートとコンクリートの剥離破壊エネルギーに基づいた解析解やコンクリートの引張軟化特性を用いた解析解と対比することにより、繊維シート接着工による剥落対策設計法を提案した。さらに、以上の結果に基づき剥落形態を4段階に区分し繊維シート接着工の選定法の大まかな考え方を整理した。

Key Words : tunnel lining, fiber sheet, countermeasure for spalling, design method

1. はじめに

最近、土木構造物からのコンクリート片の剥落対策として、炭素、アラミドなどの連続繊維シートやガラス短繊維シートをそれぞれエポキシ樹脂や光硬化型樹脂等を用いて壁面に含浸接着あるいは紫外線照射で一体化させる工法(以下「繊維シート接着工」という)が普及してきている。特に供用中のトンネルでは、内空余裕や施工時間に制限があることから、重機を使わず短時間で施工でき、ほとんど内空断面を侵さず、金属製の材料を使用しないことから錆びない等の利点を有する本工法が、適用実績を着実に伸ばしている。

繊維シート接着工のコンクリート表面からの剥離メカニズムに関する研究には、以下のものがある。

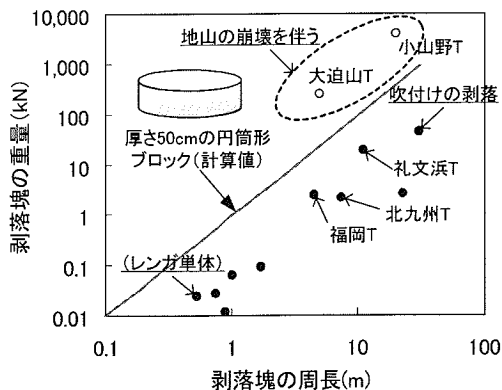
1方向の連続繊維シートを対象としたものとしては、Karbhari and Engineer¹⁾が実験的な検討を行っており、金原ほか²⁾も実験的・解析的な検討を行っているが、実際に構造物からコンクリート片が剥落す

ることを想定して検討されたものではなかった。

2方向の連続繊維シートを対象としたものとしては、朝倉ほか³⁾、呉ほか⁴⁾が実験的、解析的な検討を行っている。朝倉ほか³⁾は、コンクリートスラブ試験体下面に連続繊維シートを貼付け、コンクリート片を介して押抜き荷重を負荷し、シートを面外方向に剥離させる押抜き模型実験を行っている。この実験では、連続繊維シートの配向方法、コンクリート圧縮強度、連続繊維の材質、接着樹脂の種類等の影響が検討されている。また、呉ほか⁴⁾は、連続繊維シートとコンクリートの剥離破壊エネルギー G_c を用いた解析手法を提案し、シートの面外剥離性状及び剥落防止効果を評価した。しかし、剥落対策として実務的な設計法の提案までには至っていなかった。

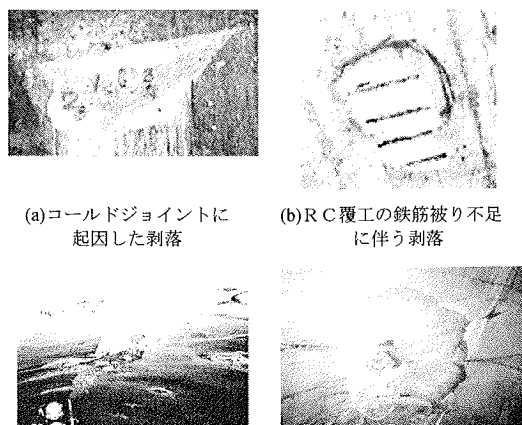
一方、短繊維シートについては、実験的、解析的な検討が行われていないのが現状である。

以上より、剥落対策としての繊維シート接着工法の選定の考え方や設計方法は、十分に整理されていないのが実状である。



●：平成10年度以降に新聞等で公表された鉄道トンネルの剝落事例
○：平成10年以前に文献で公表された剝落事例

図-1 剝落塊の重量と周長との関係



(a)コールドジョイントに起因した剝落
(b)RC覆工の鉄筋被り不足に伴う剝落
(c)圧さによる剝落
(d)押抜きによる剝落

図-2 剝落の現象例

そこで筆者らは、①過去の剝落事例を調査し、剝落事例ごとの要因の分類とその特徴を考察した。②覆工コンクリートから連続繊維シートや短繊維シートが剝離する形状や強さを把握するため、押抜き模型実験を実施した。③得られた実験の結果を、呉ほか⁹⁾による剝離破壊エネルギーに基づいた考え方によって評価した。④コンクリートの引張軟化特性を用いた解析解を導き、その解析解を実験結果と対比することにより、繊維シート接着工による剝落対策設計法を提案した。⑤以上の①~④の結果に基づき、剝落形態を4段階に区分し、繊維シート接着工の選定法の大まかな考え方を整理した。

2. トンネル覆工の剝落要因と特徴

(1) 剝落事例の調査

繊維シート接着工の適用範囲を把握するために、平成10年度以降の鉄道トンネルにおける剝落実績を調査し、剝落塊の重量と周長との関係を整理したものを図-1に示す。この図では、剝落の大部分を占める数10N程度までの小片の剝落は除外した。

同図より、トンネル覆工は無筋コンクリートの場合がほとんどであるが、中には数~10kNオーダーに及ぶものもあることが分かる。また、地山の崩壊を伴う事例もあり、この場合には数 10^2 ~ 10^3 kNに達することが分かる。

(2) 剝落要因と規模

a) 剝落要因の分類

トンネル覆工の剝落事例の規模は図-1に示すように多様であり、その要因は、次の3つに分けられる。

①施工に起因する剝落：施工目地、コールドジョイント、乾燥収縮ひび割れ、脱型時のひび割れ等が閉じた剝落、ジャンカ等の豆板が分離する剝落、など。

②材料劣化による剝落：RCにおける中性化等による被りコンクリートの剝落、凍害などによる表層コンクリートの剝落、など。

③地圧等の外力による剝落：曲げ圧縮、圧縮せん断、押抜きせん断破壊に伴う剝落。

b) 剝落要因毎の特徴

これらの要因毎に剝落の特徴を整理すると以下のとおりである。

①施工時の変状に起因する剝落

平成11年度に生じた剝落事故の殆どは、山陽新幹線福岡トンネルの例(図-2(a)参照)⁹⁾をはじめとして、施工時に生じた変状が主因であった。これらは、剝落に至るまで数年以上をかけてゆっくりと進行するので、目視・打音による定期的な検査(鉄道では2年周期)で把握できることが明らかになっている⁹⁾。剝落の規模は、一般には表層部の細片が落下する場合(重さ数10Nまで)が殆どであるが、図-1に示したように、時に数~10kNオーダーに達することもある。

②材料劣化による剝落

RC構造で一般に見られる被りコンクリートの剝落(図-2(b)参照)は、鉄筋の被りが不足している箇所において足した箇所における鉄筋周辺のコンクリートの中性化による鉄筋の腐食・膨張によって発生することが知られている⁶⁾。JR西日本が平成11年に山陽新幹線で行った一斉点検結果によれば、打音検査で「濁音」が生じた箇所数は、RC覆工の方が無筋コンクリート覆工より多い傾向にあった⁷⁾。ただし剝落は小規模で、一般に数10Nのオーダーまでで

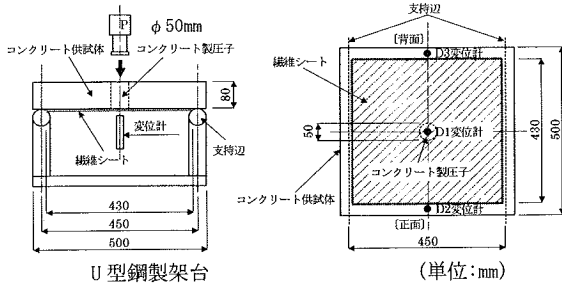


図-3 小型実験装置と供試体

表-1 実験ケース (小型実験)

No.	繊維シート	下地処理	コンクリート強度 N/mm^2	接着剤 ^{※2}	設計厚さ t [mm]	引張弾性係数 E [kN/mm ²]	引張剛性 $E \cdot t$ [kN/mm]
1	1方向炭素×2層	有	20	E	0.1110	245	27.20
2	2方向炭素	有	20	E	0.0556	230	12.79
3	2方向アラミド ¹	有	20	E	0.0640	118	7.55
4	2方向アラミド ²	有	20	E	0.0583	80	4.66
5	2方向ガラス	有	20	E	0.0392	120	4.70
6	3軸ビニロン	有	20	E	0.0340	縦:2.85 斜:2.53	縦:0.10 斜:0.09
7	2方向ポリエステル	有	20	E	0.1160	14.6	1.69
8	2方向ナイロン	有	20	E	縦:0.097 横:0.061	縦:2.14 横:2.21	縦:0.21 横:0.13
9	2方向炭素	有	20	M	0.0556	230	12.79
10	2方向炭素	有	20	H	0.0556	230	12.79
11	SMC ^{※1}	有	20	EA	1.5000	9.1	13.65
12	2方向炭素	無	20	E	0.0556	230	12.79
13	2方向炭素	有	10	E	0.0556	230	12.79

※1 : Sheet Molding Compound

※2 : E : 普通エポキシ樹脂, M : メチルメタクリレート (MMA)

H : 変性エポキシ樹脂, EA : エポキシアクリレート

あると考えられる。トンネル覆工のほとんどを占める無筋コンクリートの場合、劣化要因（有害水、凍害等）が限られ劣化の進行性も一般に緩慢であるが、①と③の要因との相乗効果により、大規模な剥落が生じる可能性がある。

③地圧等の外力による剥落

覆工の曲げ圧縮破壊（圧ざ）や圧縮せん断破壊による剥落（図-2(c)参照）が問題となるトンネルは、地圧の影響を受ける一部のトンネルに限られる。トンネルの補強が必要になるが、剥落規模としては①と同様であると考えられる。

押抜きに伴う剥落も一般には稀である。しかし、礼文浜トンネル⁹⁾に見られるように、時に10kNを超える規模の剥落を生じることがある（図-2(d)参照）。また、クラウン部の覆工厚が特に薄く材質不良で背面空洞がある場合には、福塩線大迫山トンネル⁹⁾などの例に見られるように、上部地山の緩みに伴って大規模な崩落が生じることがある。

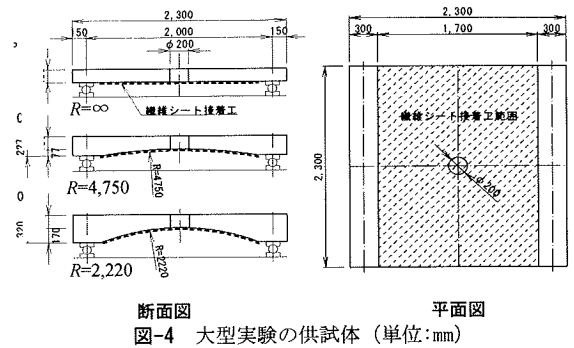


図-4 大型実験の供試体 (単位:mm)

表-2 試験ケース (大型実験)

No.	名称	アーチの曲率半径 (m)	備考
1	平板曲率なし	∞	曲率なし
2	平板 R=4750	4.75	新幹線複線標準断面の R
3	平板 R=2220	2.22	在来線単線標準断面の R

以上より、剥落対策として繊維シート接着工を適用した場合、過去の種々の規模の剥落事例についてどの程度まで対応可能か否かを明確にする必要がある。そのためには、繊維シート接着工の剥落対策としての剥離メカニズムを解明する必要があるため、押抜き模型実験を行った。

3. 押抜き模型実験

(1) 実験の概要

繊維シート接着工による剥落対策において、その剥離耐力や剥離挙動を把握することが、剥離メカニズムを解明するうえで重要になるため、小型・大型の2タイプの押抜き模型実験を行った。

a) 小型実験

小型実験では、主に繊維シート接着工の剥落対策効果に与える影響要因を把握することを目的に、繊維シートの材質、接着剤の種類、下地処理の有無、コンクリート強度等をパラメータ（表-1参照）とした。

小型実験に用いた実験装置は、図-3に示すように供試体の2辺を支持するスパン450mmのU型鋼製の架台部分とφ50mmの円筒形のコンクリート製圧子によって繊維シートを押抜く載荷装置から構成される。供試体には、中央に押抜き圧子用の孔（φ50mm）を開けた幅500mm×奥行き500mm×厚さ80mmの無筋コンクリートスラブ（最大骨材寸法は20mm）の下面に繊維シートを接着したものをを用いた。

供試体の孔部に挿入し載荷する圧子は、孔径（φ50mm）より僅かに小さい円筒形のコンクリート柱で

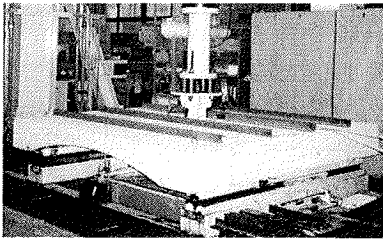


図-5 大型実験の押抜き状況

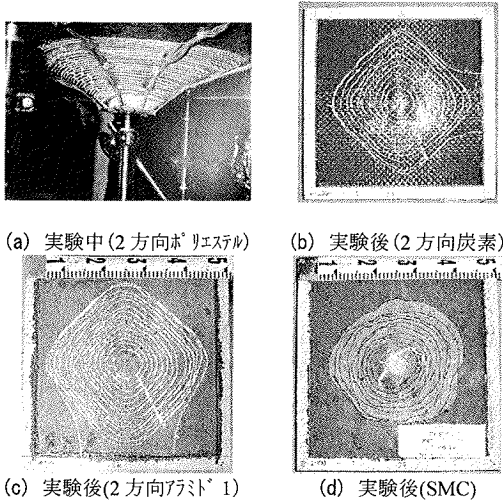


図-6 実験中、後の状況(小型実験)

圧子面は平坦である。また、供試体孔壁と圧子との摩擦を少なくするため供試体孔壁にテフロンシートを2枚重ねたものを設置した。なお、圧子は平板とともに繊維シートに接着した。

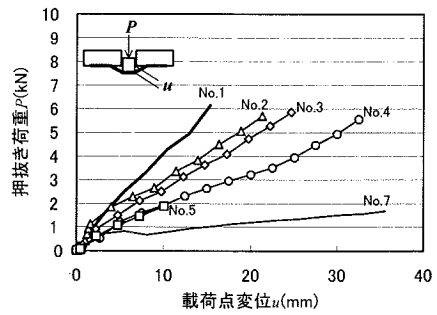
b) 大型実験

大型実験は、トンネル覆工のアーチ部の曲率半径の大きさと圧子の大きさが繊維シート接着工の剥落対策効果に与える影響を把握することを目的に行った。大型実験の供試体は、押抜き実験中のたわみを考慮して図-4に示すように幅2,300mm×奥行き2,300mm×厚さ150mmの鉄筋コンクリートスラブで、中央にはφ200mmの孔があるものを用いた。

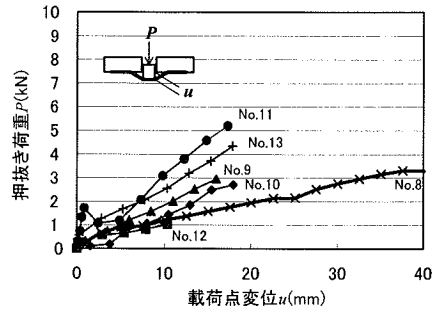
(2) 実験ケース

a) 小型実験

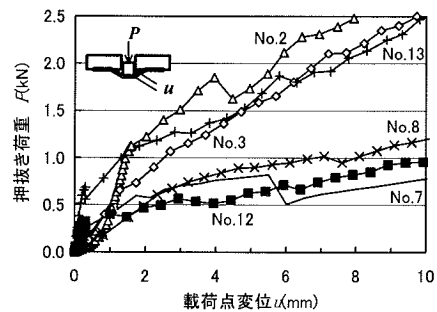
小型実験の実験ケースは、表-1に示す13ケースである。連続繊維シートの材質としては、炭素、アラミド、ガラス、ポリエステル、ビニロンの6種類で繊維シートの目付量は、市販されているものの中から、ビニロン(3軸、目付量44g/m²)を除き200g/m²程度のものを採用した。ただし、ケース1については、1方向の連続繊維シート(目付量200g/m²)を2層直交して供試体に貼り付けた。含浸接着剤には、一般に良



(a) No.1~7



(b) No.8~13



(c) 荷重点変位10mmまでの拡大図
(No.2, No.3, No.7, No.8, No.12, No.13)

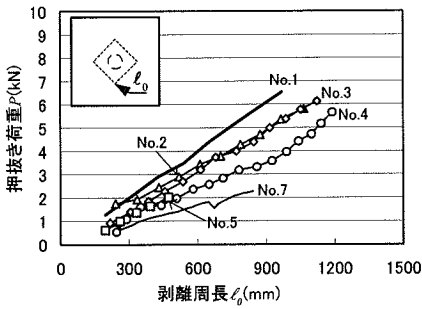
図-7 押抜き荷重と荷重点変位の関係(小型実験)

く使われる普通エポキシ樹脂、速硬化のあるMMA樹脂、変性エポキシ樹脂の3種類を用いた。また、コンクリートスラブの表面状態の条件として下地処理ありの場合にはディスクサンダーを用いて下地処理を行った。コンクリートスラブの強度としては、 $f_{ck}=10, 20\text{N/mm}^2$ の2種類(28日強度で、それぞれ11.3, 21.4N/mm²)を用意した。

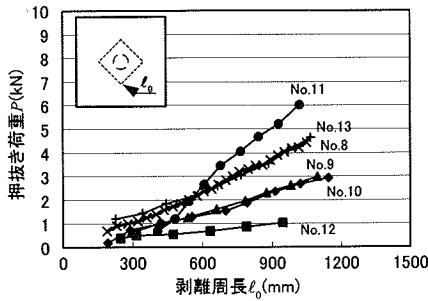
なお、連続繊維シートとの対照実験として、ガラス短繊維シート(SMC)の実験も併せて行った。

b) 大型実験

大型実験では、表-2に示すように覆工の曲率半径をRとして新幹線断面R=4,750mm、在来線単線R=2,220mm、曲率なしの3ケースの実験を行った。接着する連続繊維シートとしては全て2方向の炭素繊維シート(目付量:200g/m²)を用いた。曲率があるケースについては、連続繊維の2方向がそれぞれ

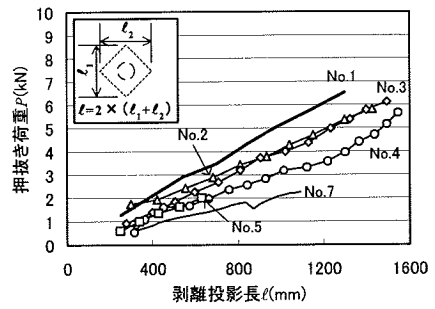


(a) No.1~7

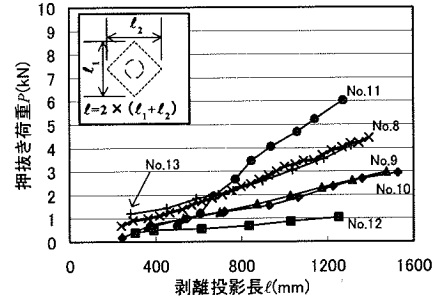


(b) No.8~13

図-8 押抜き荷重と剥離周長の関係(小型実験)



(a) No.1~7



(b) No.8~13

図-9 押抜き荷重と剥離投影長の関係(小型実験)

トンネル軸方向、周方向と平行となるように貼り付けた。コンクリート強度($f_{ck}=20\text{N/mm}^2$: 28日強度で 22.4N/mm^2)、下地処理の有無、接着剤等の条件等は、小型実験のケース2と同様である。

(3) 実験方法と計測項目

実験方法は、小型実験、大型実験(図-5参照)とも共通であり、圧子による供試体への载荷(押抜き)は変位制御とし、剥離開始前までは 0.2mm/min 、剥離開始後は 1.0mm/min とした。

計測項目は、圧子によって強制的に繊維シートが引き剥がされる過程における押抜き荷重、載荷点変位、引き剥がされる繊維シートの剥離の縁周長(剥離周長: L_0)、同繊維方向の繊維シートの剥離長さ(剥離投影長: L)、および繊維シートの表面ひずみである。

データの測定は、剥離開始前は押込み量 0.05mm 毎に、剥離開始後は押込み量 0.5mm 毎に行って、その後の2分間で繊維シート接着工の状況を観察した。剥離範囲の観察は、押込み量 2mm 毎に叩き検査を実施して、繊維シートの表面に剥離範囲をマーキングすることで行った。

(4) 実験結果

a) 小型実験

図-6に、载荷中の繊維シートの剥離状況、実験終了後の繊維シートの状況を示す。同図より、繊維シ

ートを押抜くことで、2方向の連続繊維シートでは繊維方向に(図-6(b)、図-6(c)参照)、SMCような短繊維シートでは同心円状に剥離(図-6(d)参照)が進展していくことがわかる。

図-7には、各実験ケースの押抜き荷重 P と載荷点変位 u の関係を示す。図-7(c)には、載荷点変位 10mm までの代表的なケースの拡大図を示す。なお、実験ケース6については、目付け量が少ないため、押し抜き直後に繊維シートが破断したため省略した。同図より、全ての実験ケースにおいて載荷点変位が 2mm 程度のところで、勾配が異なる2つの直線で表されると考えられる。1次段階(1つ目の直線)は、繊維シートが剥離する前の段階である。実験終了後、圧子と孔壁の状況を観察したところ、圧子と孔壁の隙間に接着剤が回り込んでいたことが確認された。したがって、1次段階では、接着剤を介して圧子と孔壁の隙間に大きな摩擦抵抗が生じ、押抜き荷重が大きくなったものと考えられる。

一方、2次段階(2つ目の直線)は、繊維シートが剥離してゆく段階である。以降の議論では、この2次段階での直線における挙動を扱うことにする。

図-8に押抜き荷重 P と剥離周長 l_0 との関係を示す。同図より、押抜き荷重は、剥離周長に対して各繊維シート毎に一定の傾きで大きくなり、押抜き荷重は剥離周長と比例の関係にあり、傾きは単位剥離周長あたりの剥離強さと考えることができる。

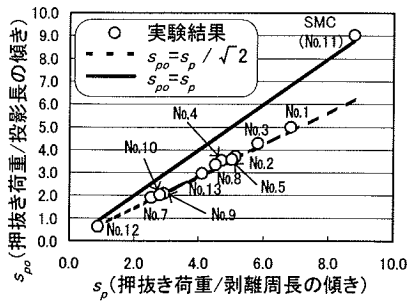


図-10. 投影長と剥離周長による s_p と s_{po} の関係

一方、2方向の連続繊維シートでは、剥離の進展が繊維方向に卓越する(図-6参照)ことから、剥離周長を代表する長さとして、剥離箇所の繊維配向方向に投影した長さ(剥離投影長)の2倍で整理したものを図-9に示す。同図より、図-8と同様に押抜き荷重と剥離投影長には比例の関係があると考えられる。

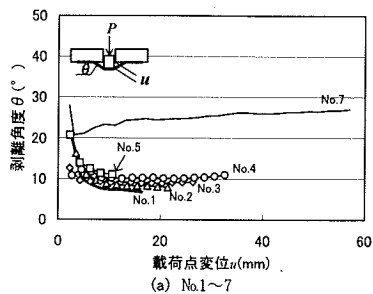
そこで、図-9に示されている押抜き荷重と剥離投影長の関係を直線回帰した直線の傾き(s_{po} 、表-3参照)と、図-8に示されている押抜き荷重と剥離周長の関係を直線回帰した傾き(s_p 、表-3参照)との関係を図-10に示す。同図より、投影長で求めた単位剥離強さと剥離周長で求めた単位剥離強さの間には、2方向の連続繊維シートでは、 $s_{po} = s_p / \sqrt{2}$ の関係があり、短繊維シートでは、 $s_{po} = s_p$ であることが分かる。

図-11には、繊維シートの剥離角度と載荷点変位との関係を示す。図より、剥離が進行すると剥離角度は一定となって剥離することが分かる。

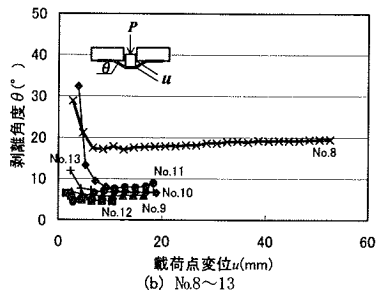
表-3に小型実験結果のまとめとして、最大押抜き荷重 P_0 、そのときの載荷点変位 u 、剥離後(2次段階)の押抜き荷重と剥離周長の回帰直線の傾き(s_p)、押抜き荷重と剥離投影長の回帰直線の傾き(s_{po})、実験終了要因、剥離形態等を示す。

最大押抜き荷重 P_0 は、圧子による押抜きによって、繊維シートの剥離が繊維シートの端部に到達するか、あるいは到達以前に、繊維シートに発生する応力度が破断強度に達する破断かで規定される。また、剥離の形態としては、ピニロン(No.6)、ポリエステル(No.7)、ナイロン(No.8)等の繊維シート以外のメッシュ状の補強材では、繊維シートと接着剤の界面剥離が見られたが、これ以外の繊維シートでは接着剤のコンクリートの母材破壊または、一部界面剥離を伴うコンクリート母材破壊であった。

ここで、繊維シートの材質の影響について着目すると、表-1、表-3より、繊維シートの引張剛性が高いもの(例えばNo.1の1方向炭素×2層)ほど、押抜き荷重と剥離周長、剥離投影長さ等との傾き(s_p 、 s_{po})が大きいたることがわかる。



(a) No.1~7



(b) No.8~13

図-11 剥離角度と載荷点変位の関係(小型実験)

表-3 実験結果総括表(小型実験)

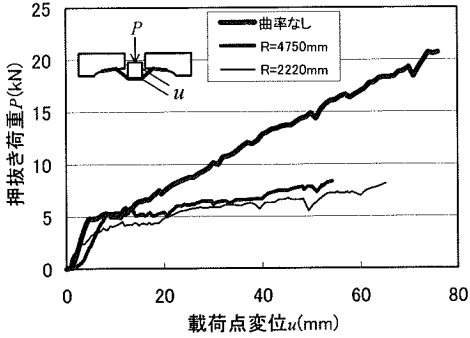
No.	最大押抜き荷重発生時		2次段階における押抜き荷重を剥離周長、剥離投影長で直線回帰した場合の勾配(N/mm)		実験終了要因 ※1	剥離形態 ※2
	P_0 (kN)	u (mm)	s_p	s_{po}		
1	6.92	17.4	6.83	5.01	T	B
2	5.98	21.9	5.12	3.73	T	B
3	6.25	26.7	5.81	4.31	T	B
4	5.92	33.5	4.69	3.56	T	B
5	2.10	11.1	5.01	3.59	F	B
7	2.26	57.0	2.53	1.93	F	F
8	4.43	52.6	4.50	3.36	F	F
9	3.05	17.0	2.91	2.11	T	K
10	2.93	18.9	2.79	2.05	T	K
11	6.10	18.3	8.78	9.05	F	B
12	1.04	10.9	0.88	0.65	T	K
13	4.88	19.4	4.09	2.99	T	B

※1: 実験終了要因; T: 端部まで剥離, F: 繊維シートの破断

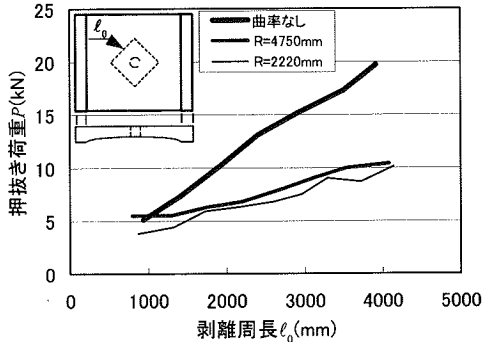
※2: 剥離形態; B: 母材破壊, K: 界面剥離と一部母材破壊, F: 繊維シートと接着剤の界面

※3: No.6については、繊維目付け量が少なく実験がうまく行なえなかったので省略。

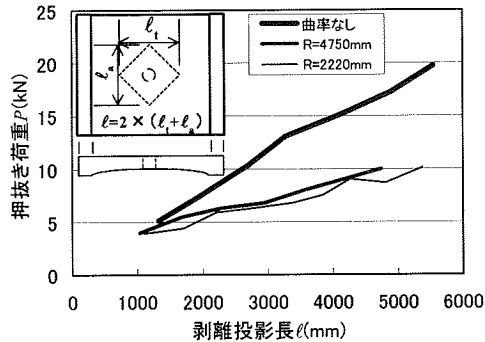
一方、含浸接着剤の材質の影響(No.9, No.10)、コンクリートの下地処理の有無の影響(No.12)、コンクリート強度の強弱(No.13)等の影響についてみると、どのケースも基本ケースのNo.2と比較すると、最大押抜き荷重 P_0 や s_p 、 s_{po} が小さいことがわかる。これより、①含浸接着剤の種類により、繊維シートとコンクリートとの付着強度が異なる可能性があること、②覆工表面にレイトランスが存在すれば、繊維シート



(a) 押抜き荷重と載荷点変位の関係



(b) 押抜き荷重と剥離周長の関係



(c) 押抜き荷重と剥離投影長の関係

図-12 大型押抜き実験結果

との付着強度が低下する可能性があること、③覆工コンクリートの圧縮強度が小さいと繊維シートとの付着強度が低下する可能性があること等が考えられる。②③については、一般にコンクリートの圧縮強度と引張強度には強い相関があることから、コンクリート表面の引張強度が繊維シートとの付着強度に影響すると推測される。

b) 大型実験

図-12(a)には、大型実験における押抜き荷重と載荷点変位の関係を示す。同図より、1次段階の直線の勾配は曲率半径の大小に係わらずほぼ一定の傾きで、剥離開始時の載荷点変位 u は曲率なしで8.2mm、

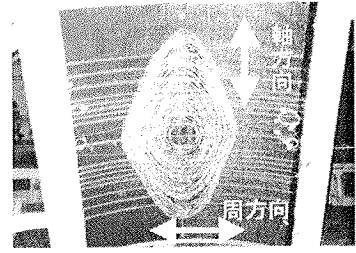


図-13 実験終了後の剥離の状況 (R=2,220mm)

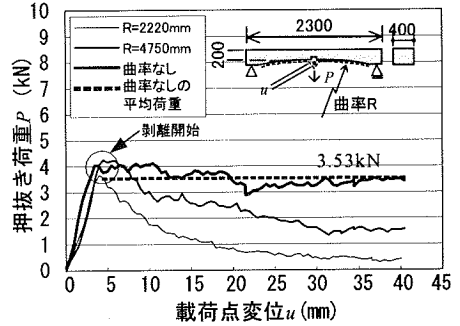


図-14 大型梁における押抜き実験結果¹⁰⁾

$R=4,750\text{mm}$ で8.8mm、 $R=2,220\text{mm}$ で4.3mmであった。

剥離後の2次段階の直線勾配は、曲率半径が小さくなるにつれ小さくなること分かる。

図-12(b)、図-12(c)には、それぞれ大型実験における押抜き荷重と剥離周長、押抜き荷重と剥離投影長の関係を示す。

圧子の大きさの影響を見るため、図-12(b)、図-12(c)における曲率なしのケースにおいて、2次段階(繊維シートが剥離する段階)での押抜き荷重と剥離周長、または剥離投影長を直線線帰すると、押抜き荷重と剥離周長の勾配 s_p 、押抜き荷重と剥離投影長 s_{p0} は、各々 4.88N/mm^2 ($R^2=0.994$, R^2 : 決定係数で以下同様)、 3.43N/mm^2 ($R^2=0.995$)となり、小型実験(ケース2)の $s_p=5.12\text{N/mm}^2$ ($R^2=0.995$)、 $s_{p0}=3.73\text{N/mm}^2$ ($R^2=0.992$)と同程度となる。よって、圧子の大きさが剥離強さに与える影響は少ないと考えられる。

図-13に押抜き実験終了後の繊維シートの剥離の状況(覆工面の $R=2,220\text{mm}$)を示す。同図より、覆工面に曲率を有する場合、載荷点変位が増加するにつれ、繊維シートはトンネル軸方向に卓越して剥離することが分かる。

ところで、既往の研究⁹⁾で知られていたような覆工面に曲率がない場合、覆工面から剥離が進行しても繊維シートの剥離周長が長くなるため剥離耐力が増加し、覆工片の重量と釣り合った状態で剥離が停止し、覆工片を保持できるが、覆工面に曲率を有する場合は、剥離が進行しても剥離耐力の増加の割合

が曲率がない場合と比べて小さいため、剥離が生じ剥離周長（投影長）が大きくなると覆工片を保持できない場合もあると考えられる。そこで、極端な例ではあるがトンネル軸方向の投影長がない2次元の大型梁による押抜き実験における押抜き荷重と載荷点変位との関係¹⁰⁾を図-14に示す。

実験に使用した繊維シートは、2方向炭素繊維シートで目付量200g/m²であり、載荷用の圧子は丸鋼（φ40mm）でその他コンクリート強度、接着剤、下地処理などの実験条件、実験方法、実験ケース、計測項目等は大型実験に準じている。

図-14の大型梁の実験結果から、剥離が始まるまでは、曲率の有無、大小に関わらず押抜き荷重と載荷点変位の関係はほぼ同じ挙動を示すが、剥離が進行し始めると、曲率半径の小さいものほど押抜き荷重が急激に低下している結果となっている。また、先に述べたように、大型実験の曲率ありケースでも、剥離発生後も剥離の進展に伴って剥離耐力が増加するものの、曲率のないケースに比べて剥離耐力が明らかに小さく、剥離範囲の形状も曲率のないケースと明らかに異なる形状となっている。

よって、設計において覆工面からの繊維シートの剥離を許容することは、①トンネル周方向の投影長に関わる剥離耐力がさほど期待できない、②想定剥落塊が剥落し、剥落塊が傾くことによって繊維シートと剥落塊のエッジとが接触した場合、シートの破断を別途検討する必要があると推測される。

(5) 実験結果の考察

押抜き実験から、以下のことが明らかになった。

- ① 剥離後の押抜き荷重(P)は、剥離周長(ℓ_0)や剥離投影長(L)にほぼ比例する ($P=s_p \times \ell_0$, $P=s_{po} \times L$)。
- ② 単位剥離強さ(s_p , s_{po})は、繊維シートの引張剛性、接着剤の付着強度、コンクリート表面の引張強度、アーチ曲率により異なる。
- ③ 剥離後の剥離角度は繊維シート毎に一定となる。
- ④ 剥離形状は、繊維の異方性に伴い菱形（連続繊維シートを2方向とした場合）または円形形状（短繊維シート）になる。
- ⑤ 押抜き実験における圧子の大きさが、剥離周長、剥離投影長あたりの単位剥離強さ(s_p , s_{po})や剥離角度等の実験結果に及ぼす影響は小さい。
- ⑥ 最大押抜き荷重 P_0 は、繊維シートの破断強度あるいは接着領域のどちらかで規定される。
- ⑦ 覆工に曲率がある場合、繊維シートの剥離はトンネル軸方向に卓越し、トンネル周方向の投影長に関わる剥離耐力はさほど期待できない。

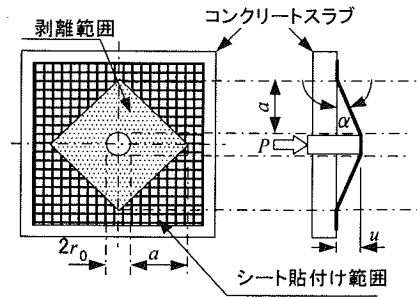


図-15 小型押抜き実験

- ⑧ 繊維シートの剥離を許容して剥落対策の設計を行う場合は、剥落塊が傾くことで繊維シートと剥落塊のエッジとが接触することを考慮し別途繊維シートの破断を検討する必要がある。

4. 繊維シート接着工の剥落対策効果の評価

小型実験の結果を踏まえて、繊維シート接着工の剥落対策としての効果を評価するために、繊維シート接着工の固有の剥離強さを呉ほか⁹⁾の研究による方法で検討した。呉ほかの研究によれば、2方向の連続繊維シートをコンクリート表面に接着した場合、剥離のパターンは、ほぼ繊維方向に対角を有する正方形に近くなり、剥離強さは繊維シートの剥離角度と剥離長および引張剛性の関数で表せ、剥離角度は、エネルギー解放率から算定することができると示されている。ただし、呉ほかの考え方には前提条件があり、剥離形態がコンクリートの母材破壊で剥離角度が一定となることである。これら条件は、表-3、図-11よりビニロン(No.6)、ポリエステル(No.7)、ナイロン(No.8)等の繊維シート以外満足していることを確認した。以下に、呉らによる2方向連続繊維シートの剥離破壊エネルギーの考え方に基づいて小型実験の実験結果（図-15参照）から押抜き荷重を算定するための式を以下に示す。

$$P_c = 4 \cdot E \cdot t \cdot (r_0 + a) \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right) \quad (1)$$

$$G = E \cdot t \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 + \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} - 1 \right) - E \cdot t \cdot \frac{a}{a + r_0} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \beta^2 - \sqrt{1 + \beta^2} + 1 \right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{u}{a} = \tan \alpha \quad (3)$$

$$L_{0w} = 4\sqrt{2} \cdot (r_0 + a) \quad (4)$$

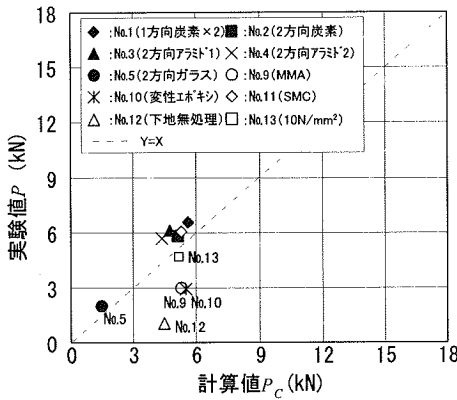


図-16 押抜き荷重の計算値と実験値の比較
(小型実験, $G_c=0.4\text{N/mm}$)

ここに, P_c : 押抜き荷重(N), E : 繊維シートの引張弾性係数(N/mm²), t : 繊維シートの単位長さにおける断面積(mm²/mm), r_0 : 圧子の半径(mm), a : 剥離長(mm), u : 鉛直変位(mm), G : エネルギー解放率(N/mm), L_{ov} : 剥離周長(mm)である。

ここで, エネルギー解放率 G が剥離破壊エネルギー G_c と等しいと仮定し, 呉ほか⁴⁾の研究にしたがって $G_c=0.4\text{N/mm}$ として, 式(2)に表-1, 表-3中の E , t , r_0 , a を代入して β を算出し式(1)より押抜き荷重 P_c を求める。

図-16に剥離破壊エネルギーより求めた押抜き荷重 P_c と実験値の関係を示す。同図より, 炭素繊維(No.1,2), アラミド繊維(No.3,4), ガラス繊維(No.5)の実験値は呉らによる計算値とほぼ同等な値となっている。

これより, 本実験で使用した炭素, アラミド, ガラスについては呉らが提案する評価法で推定できることがわかる。

一方, MMA樹脂(No.9), 変性エポキシ樹脂(No.10), 下地の無処理(No.12)等に本手法を適用するには, 低減係数等に乗ずるなどの補正が必要であることが分かる。また, コンクリート強度 10N/mm^2 のケース(No.13)は, 表面強度は 20N/mm^2 程度あったと考えられる。

以上より, 以下のことが明かになった。

- ① 小型実験において炭素, アラミド, ガラスのケースについては, 呉ほかが提案する剥離破壊エネルギーによる評価法で押抜き荷重が推定でき, 押抜き実験が適切に行われたことが分かった。
- ② MMA, 変性エポキシ等の接着剤を使用した場合や下地の無処理の場合は, 設計に際しては押抜き荷重を低減する必要があると考えられる。

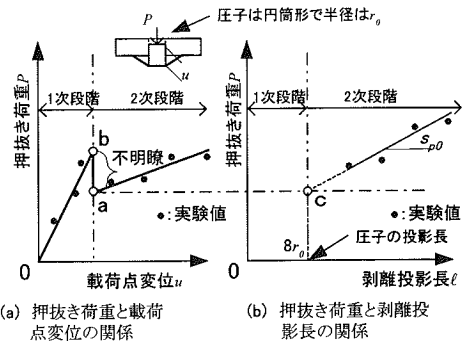


図-17 繊維シート接着工の剥離メカニズム

5. 繊維シート接着工の剥離メカニズムと設計方針

繊維シート接着工の剥離メカニズムを押抜き実験の押抜き荷重と載荷点変位の関係から見ると, 図-17(a)に示すように, 一般に繊維シートが剥離する前の段階(1次段階)と押抜き荷重が一旦落ち再度荷重が増加し剥離が進行する段階(2次段階)との2つの状態に区分することができる。1次段階と2次段階の境界付近では, 圧子と孔壁の隙間に回り込んだ接着剤が押抜き荷重によって縁が切れ始める状態で, 実験より押抜き荷重(図-17(a)中のb点)を特定することは, 困難であった。よって, 図-17(a)の押抜き荷重と載荷点変位の関係の2次段階の勾配から, 図-17(a)中のa点を外挿して安全側の設計を行うことも可能ではあるが, 設計に際しては個々の剥落塊(圧子)の大きさに応じて, 押抜き実験を行う必要があるため, 実用的なやり方とは言い難い。

ところで, 押抜き実験より, 圧子による大きさが2次段階の s_{p0} に対して及ぼす影響が小さいことが確認されている。これより, 任意の大きさの剥落塊(圧子)に応じて個々に押抜き実験を行わずとも, 押抜き荷重と剥離投影長の勾配(s_{p0})を用いて剥落対策の効果を評価すれば, 任意の大きさの剥落塊(圧子)に応じた押抜き荷重を評価することが可能となる。よって, 図-17(a)のa点に相当する押抜き荷重を図-17(b)の押抜き荷重と剥離投影長の関係より, 外挿してc点として評価することも可能で, この場合同時に安全側の評価にもなる。

したがって, 繊維シートの剥離を許容しない設計を行うとすれば, 1次段階の押抜き荷重(b点)を持って設計を行うことが前提となるが, 1次段階の押抜き荷重を実験から特定することは, 上記の理由より困難である。よって, 1次段階の押抜き荷重で評価するより, 2次段階の押抜き荷重と剥離投影長の勾

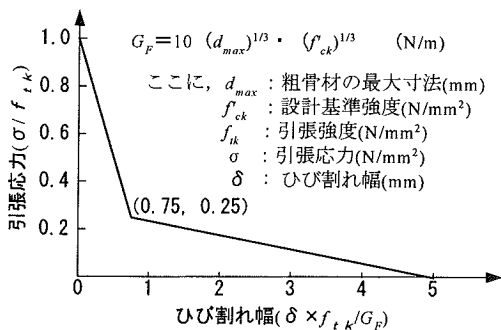


図-18 コンクリートの引張軟化特性¹¹⁾

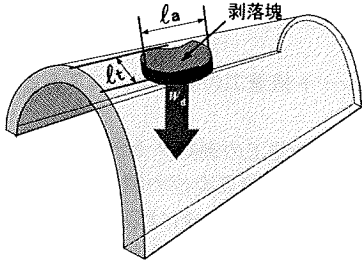


図-19 剥落塊の W_d , l_t , l_s の概念図

配(s_{po})を用いて外挿して押抜き荷重値(c点)で評価する方が、繊維シートの剥離耐力の評価としては、十分安全側となり、かつ任意の大きさの剥落塊(圧子)についても対応可能となる。

また、設計において覆工面からの繊維シートの剥離を許容することは、3.(5)で述べたように①トンネル周方向の投影長に関わる剥離耐力がさほど期待できないこと、②想定剥落塊が剥落し、繊維シートと剥落塊のエッジとが接触した場合、シートの破断を別途検討する必要があること、など設計上不確実な点がある。したがって、安全側の評価として、以下においては繊維シートが覆工コンクリートから剥離が生じないように、設計法を検討することとする。なお、トンネルでは内空余裕(建築限界)の点からも、なるべく剥離を許容しない設計がよいと考えられる。

6. 繊維シート接着工の剥落対策設計法の提案

(1) 設計における基本仮定

繊維シート接着工における設計の基本的な考え方として、コンクリート塊の剥落が生じた場合でも繊維シートがコンクリート表面から顕著な剥離が生じないことを原則とする。

なお、設計の簡易化を図るために3.(5)で得られた知見を基に以下の仮定を行う。

①剥離強さは、剥離周長(l_0)あるいは剥離投影長(l)に比例することから、設計では簡易化を図るため、剥落塊の形状に左右されないように剥落塊のトンネル軸方向、周方向に投影した単位長さ($l=2 \cdot (l_1+l_2)$)当りの剥離強さを単位剥離強さ(s_{po})とする。

②単位剥離強さ(s_{po})は、繊維シートの引張剛性で決定され繊維シートが決まれば剥離角度も一定となる。

③覆工のアーチの曲率の大きさによる剥離強さの低減の影響は、曲率を持たないケースを基準とした低減係数を乗じて考慮するものとする。

④繊維シート接着工における剥離は、コンクリートの母材で起る。すなわち、繊維シートとコンクリートとの付着強度(含浸接着剤の対コンクリート付着強度)は、コンクリートの引張強度より大きく、剥離は、コンクリート表面付近の引張破壊で生じるものと仮定する。よって、繊維シート接着工の単位剥離耐力は、コンクリートの引張破壊特性¹¹⁾は、コンクリートの圧縮強度(f_{ck})と最大骨材径(d_{max})の関数として以下の式(5)のように表される(図-18参照)。

$$G_F = 10 \cdot d_{max}^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (5)$$

このときの f_{ck} は、15N/mm²以上とする。

(2) 設計法の提案

(1)の設計の基本仮定をもとに、繊維シートの設計法を提案する。設計では繊維シートを覆工面に接着した場合、①繊維シートが剥落塊の自重により覆工コンクリートから剥離するか否か、②剥離時において繊維シートが破断するか否かを考慮する必要があるため、それらの照査方法を以下に示す。

a) 繊維シートの剥離の照査

繊維シートの剥離の照査は、以下の式(6),(7)により行う。

$$\gamma_i \cdot \frac{W_d}{P_{ud}} \leq 1.0 \quad (6)$$

$$P_{ud} = 2 \cdot \frac{s_{po}}{\gamma_m} \cdot \frac{(l_t + \gamma_a \cdot l_a)}{\gamma_b} \quad (7)$$

ここに、 W_d : 設計剥落荷重(図-19 参照)、 P_{ud} : 設計剥離耐力、 γ_i : 構造物係数、 s_{po} : 単位剥離強さ、 γ_m : 安全係数、 γ_b : 部材係数、 γ_a : トンネル覆工の曲率の大きさによる低減係数、 l_a : トンネル周方向の投影長、 l_t : トンネル軸方向の投影長(図-19 参照)である。

b) 繊維シートの破断の照査

剥離発生時に繊維シートの応力度を低く見積もる

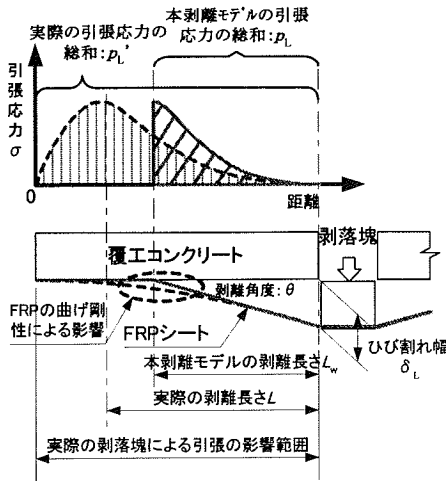


図-20 繊維シート接着工におけるコンクリート塊の剥離モデル(剥離開始直前の力の釣合い)

と、剥離が進行する前に繊維シートの破断が先行することがあり、危険側の評価となる。そこで、繊維シートの破断の照査は、この点を考慮して修正係数 ρ_m を用いて、以下の式(8),(9)により行う。

$$\rho_m \cdot \frac{\sigma_{p0}}{f_{ud}} \leq 1.0 \quad (8)$$

$$\sigma_{p0} = E \cdot (1/\cos\theta - 1) \quad (9)$$

ここに、 σ_{p0} : 剥離発生時の繊維シートの応力度、 f_{ud} : 繊維シートの設計引張強度(引張強度を材料係数 γ_m で除した値)、 E : 繊維シートの引張弾性係数 (N/mm^2)、 θ : 繊維シートとコンクリート付着面の剥離角度 θ (rad)、 ρ_m : 修正係数である。

ここで、上記の式(7)の単位剥離強さ(s_{po})や覆工の曲率の大きさによる低減係数(γ_s)、または式(9)の剥離角度(θ)については、個々のケース毎に解析または実験により算出することが煩雑なため、ノモグラム化を行った。以下にノモグラム化にあたっての検討方法を説明する。

(3) 単位剥離強さ(s_{po})と剥離角度(θ)

a) 剥離モデルと剥離耐力

押抜き実験結果では、単位剥離強さ(s_{po})および剥離角度(θ)は、繊維シートの特性の影響を強く受けることがわかった。設計においては繊維シートの特性が重要な要因となる。そこで、覆工からコンクリート剥落塊が剥落するモデル(想定剥落塊が覆工より剥落し、繊維シートが剥離し始めるときの理想的

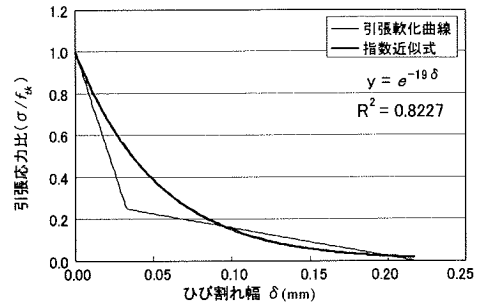


図-21 引張軟化特性の近似曲線

な力の釣合い状態)を図-20 のような 2次元梁型モデルと仮定する。ただし、繊維シートの曲げ剛性は無視する。

いま、繊維シートとコンクリート付着面の剥離角度(θ)とし、剥離開始位置から距離 x におけるコンクリート表面で伝達される引張応力 $\sigma(x)$ を引張軟化特性に従い求めることとする。

まず、小型押抜き実験の実験条件に合わせると、 $f'_{ck}=20(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、 $d_{\max}=20(\text{mm})$ なので、コンクリートの破壊エネルギー G_F は、式(5)より

$$G_F = 73.68(\text{N}/\text{m}) \quad (10)$$

となる。 f_{ik} は、

$$f_{ik} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} = 1.69(\text{N}/\text{mm}^2) \quad (11)$$

となる。

ここで、伝達される引張応力値が 0 になるひび割れ幅を δ_L とすると図-18 の引張軟化曲線より、

$$\delta_L \cdot \frac{f_{ik}}{G_F} = 5 \quad (12)$$

となるので、式(12)に式(10)、式(11)の値を代入すると δ_L は、

$$\delta_L = 0.217\text{mm} \quad (13)$$

となる。よって、 δ_L が微小より

$$L_w \approx \delta_L / \theta = 0.217 / \theta \quad (14)$$

となる。

このとき、繊維シートとコンクリート表面との引張応力分布は、引張軟化曲線(図-18参照)に従い図-21のようになる。そこで、この引張軟化曲線をひび割れ幅 δ の指数関数で近似すると式(15)を得る。

$$\frac{\sigma(\delta)}{f_{ik}} = e^{-19\delta} \quad (15)$$

よって、距離 x におけるひび割れ幅を δ とすれば、剥離角度が θ より、 $\delta = \theta x$ となり

$$\sigma(x) = 1.69 e^{-19\theta x} \quad (16)$$

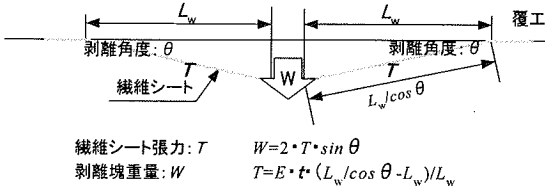


図-22 繊維シートに作用する張力と剥落塊重量との関係

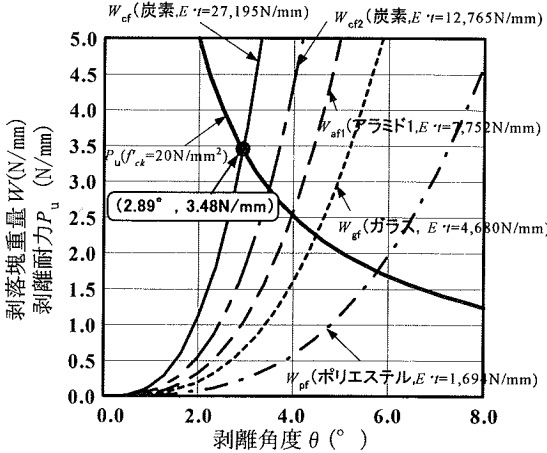


図-23 剥離角度 (θ) と剥落塊重量 (W), 剥離耐力 (P_u) の関係 ($f_{ca} = 20 \text{ N/mm}^2$)

となる。

次に、図-20の左端繊維シートが受持つ引張応力の総和 p_L (図中の斜線部面積) は、式(16)を x 方向に0から L_w で積分したものと等しく、また式(17)から剥離角度 θ の関数として表される。

$$p_L(\theta) = \int_0^{L_w} \sigma(x) dx = \int_0^{0.217/\theta} 1.69 \cdot e^{-190x} dx \quad (17)$$

したがって、コンクリートの引張軟化特性から決定される繊維シート接着工の剥離耐力 $P_u(\theta)$ は、

$$P_u(\theta) = 2 p_L(\theta) = 2 \int_0^{0.217/\theta} 1.69 \cdot e^{-190x} dx = \frac{0.175}{\theta} \quad (18)$$

となる。

b) 剥落塊重量と繊維シートの伸びの関係

一方、繊維シートの曲げ剛性を無視すると図-22に示すように剥離角度 θ が生じる時の剥落塊重量 W , 繊維シート張力 T は、それぞれ式(19), 式(20)のように θ の関数で表される。

$$W(\theta) = 2T(\theta) \cdot \sin \theta \quad (19)$$

$$T(\theta) = E \cdot t \cdot \frac{(L_w / \cos \theta - L_w)}{L_w} \quad (20)$$

よって、式(19), (20)より

$$W(\theta) = 2(1/\cos \theta - 1) \cdot E \cdot t \cdot \sin \theta \quad (21)$$

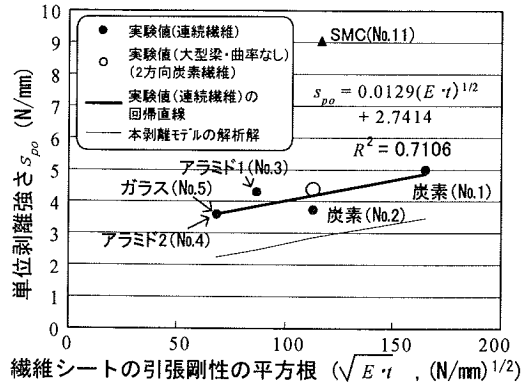


図-24 繊維シートの引張剛性の平方根と単位剥離強さとの関係

となる。ここに、 E は、繊維シートの引張弾性係数 (N/mm^2), t は、繊維シートの単位奥行き当たりの断面面積 (mm^2/mm) である。

c) 単位剥離強さ

各繊維シートの剥離耐力を算出するため、以上の式(18), 式(21)より、剥離角度 θ を変化させたときの剥落塊重量 W , 剥離耐力 P_u を図化したものが図-23である。これより、炭素繊維シート (400 g/m^2 , $E \cdot t = 27,195 \text{ N/mm}$) では、剥離角度 $\theta = 2.89^\circ$ のとき剥離耐力 $P_u = 3.48 \text{ (N/mm)}$ を得ることになる。また、本剥離モデルが2次元梁型モデルであるため剥離耐力 P_u がそのまま繊維シート毎の単位剥離強さ (s_{po}) となる。以降、各繊維シートの交点を求めると各繊維シート毎の単位剥離強さが求まる。

d) 本剥離モデルの妥当性

本剥離モデルの妥当性を評価するため、本剥離モデルで求めた繊維シート毎の単位剥離強さ (解析解) と小型実験結果において呉らによる評価方法に適合し、2倍の投影長で整理した単位剥離強さ (s_{po}), および大型梁(曲率なし)の押抜き実験結果から得られた単位剥離強さを図-24に示す。ここで、大型梁の単位剥離強さ¹⁰⁾は、曲率がない場合の剥離開始後の平均押抜き荷重値(約3.53kN)を梁幅が400mmより剥離投影長800mmで除した値4.41N/mmを用いた。

図-24より、本剥離モデルの解析解と大型梁(曲率なし)の値を比較すると、本剥離モデルの解析解の方が2/3程度小さくなっている。両者の差の原因は、図-20参照に示すように本剥離モデルの解析解が、ひび割れ発生以降の引張軟化域のみしか引張伝達力を考慮していない(引張側の弾性領域の引張伝達力を無視している)ことや繊維シートの曲げ剛性を無視していること等が考えられる。

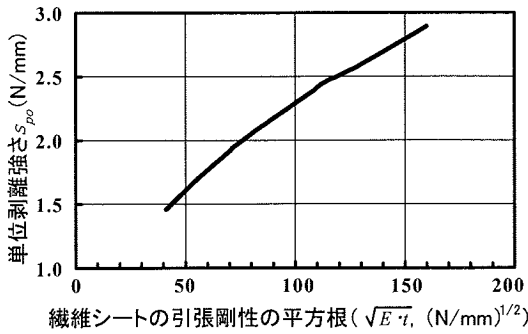


図-25 繊維シートの引張剛性の平方根と単位剥離強さ s_{po} との関係($f'_{ck}=15\text{N/mm}^2$)

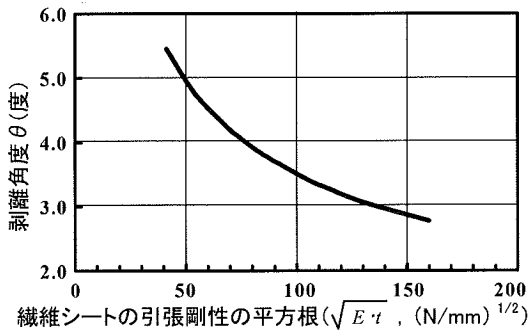
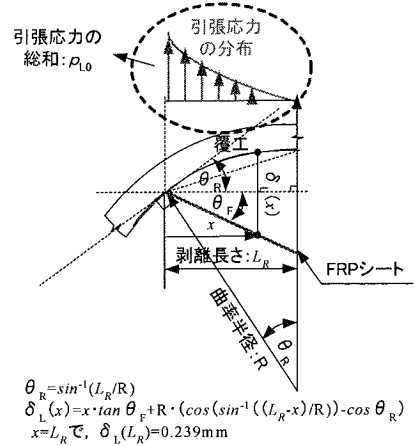


図-26 繊維シートの引張剛性の平方根と剥離角度 θ との関係($f'_{ck}=15\text{N/mm}^2$)

一方、小型押抜き実験における連続繊維シートの実験結果(図中●印)と大型梁(曲率なし)の実験結果(図中○印)がよく適合していることがわかる。これより、単位剥離強さを剥離投影長によって整理することで、3次元である小型押抜き実験の剥離強さも本剥離モデルである2次元梁モデルの剥離強さで同等に評価できると考えられる。

よって、連続繊維シートの剥離の設計においては、本剥離モデル(引張側の弾性領域の引張応力を無視した2次元梁型モデル)の剥離強さをを用い、トンネル軸方向、周方向に直交する方向に沿って本剥離モデルを重ね合わせたモデルとして考えれば、小型実験で現れるような連続繊維シートの繊維方向に沿って生じる剥離の異方性や任意な剥落塊毎の多様な剥落塊周長を考えなくても、安全側の設計が行えると考えられる。

なお、短繊維シートであるSMCについても、連続繊維シートの同様な考え方で設計しても、図-24より実験値(図中▲印)が連続繊維シートの回帰直線よりもかなり上側にあることから、十分安全側の設計となると考えられる。



$$\theta_R = \sin^{-1}(L_R/R)$$

$$\delta_L(x) = x \cdot \tan \theta_F + R \cdot (\cos(\sin^{-1}((L_R-x)/R)) - \cos \theta_R)$$

$$x=L_R \text{で、} \delta_L(L_R)=0.239\text{mm}$$

図-27 曲率を有する覆工面の剥離モデル

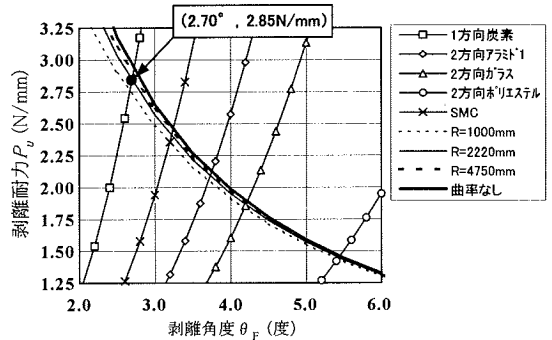


図-28 剥離角度 θ_F と剥離耐力 P_u との関係($f'_{ck}=15\text{N/mm}^2$)

e) ノモグラムの制定

剥落が問題となるような覆工では、一般にコンクリートの強度そのものが低いと考えられるので、ノモグラム化に際しては、圧縮強度を $f'_{ck}=15\text{N/mm}^2$ を剥落対策工の基本条件とした。

この場合、 $f'_{ck}=15\text{N/mm}^2$ に変更することで式(13)は式(22)となり、引張軟化曲線と近似すると式(16)は式(23)となる。よって、式(18)は式(24)となる。

$$\delta_L = 0.239\text{mm} \quad (22)$$

$$\sigma(x) = 1.40e^{-200x} \quad (23)$$

$$P_u(\theta) = \frac{0.139}{\theta} \quad (24)$$

ここで、式(22)、式(19)とを図解法により交点を求めて単位剥離強さ(s_{po})、剥離角度(θ)のノモグラムを算出するとそれぞれ図-25、図-26となる。

(4) 覆工の曲率の大きさによる低減係数(γ_a)

トンネル壁面は、曲面となっている場合が多く、曲面が繊維シート接着工の剥離耐力に与える影響を考慮する必要がある。そこで、曲面とFRPシートと

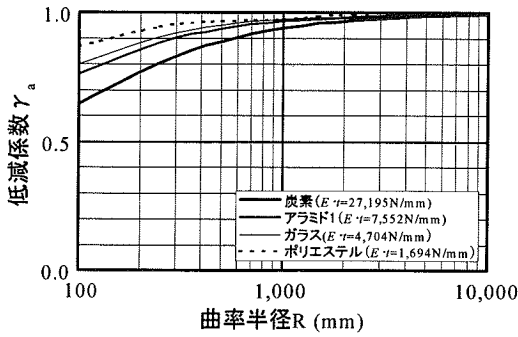


図-29 各曲率半径における剥離耐力比(低減係数 γ_a 、曲率なしの剥離耐力を1とした場合)

の剥離角度を、図-27に示すように、曲面の接線から水平線までの角度 θ_R と水平線からFRPシートまでの角度 θ_F に分けて考える。この場合、図-27より、剥離開始位置から x におけるひび割れ幅 $\delta_L(x)$ は、以下のようなになる。

$$\delta_L(x) = x \cdot \tan(\theta_F) + R \cdot (\cos(\sin^{-1}((L_R - x)/R)) - \cos(\sin^{-1}(L_R/R))) \quad (25)$$

ところで、引張応力が伝達できる最大のひび割れ幅は、 $f_{ck} = 15 \text{ N/mm}^2$ とすると、式(22)より 0.239 mm であるので、式(25)が 0.239 mm となるように $x = L_R$ として L_R を求める。

$$\delta_L(L_R) = L_R \cdot \tan(\theta_F) + R \cdot (1 - \cos(\sin^{-1}(L_R/R))) = 0.239(\text{mm}) \quad (26)$$

ここで、式(26)について各曲率半径(R)と繊維シートの剥離角(θ_F)毎に剥離長さ(L_R)を算出し、この剥離長さ(L_R)を式(25)に代入して、式(27)により剥離耐力(P_u)を求める。

$$P_u = 2P_{LO} = 2 \int_0^{L_R} \sigma(\delta_L(x)) dx \quad (27)$$

ただし、 $\sigma(\delta)$ は、式(23)より $\sigma(\delta) = 1.40e^{-20\delta}$ であり、 δ はひび割れ幅である。

一方、繊維シートの曲げ剛性を無視すれば剥離角度 θ_F が生じ、そのときの剥落塊重量を W とすると、式(28)で表される(図-28参照)。

$$W(\theta) = 2(1/\cos\theta_F - 1) \cdot E \cdot t \cdot \sin\theta_F \quad (28)$$

ここで、横軸に剥離角度 θ_F を縦軸に式(27)より求めた剥離耐力(P_u)ならびに式(28)の値を示したものが、図-28である。同図より、曲率半径 $R = 2,220 \text{ mm}$ を有する覆工表面に炭素繊維シート(400 g/m^2 , $E \cdot t = 7,195 \text{ N/mm}$)を接着させた場合の剥離耐力 P_u (単位剥離強さ s_{po}) は、 $R = 2,220 \text{ mm}$ と $E \cdot t = 27,195 \text{ N/mm}$ の曲線との交点であり、 2.85 N/mm であることを意味している。

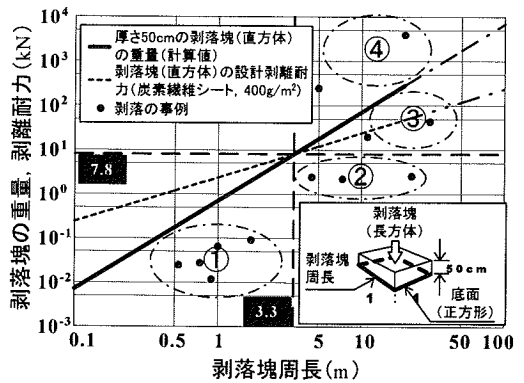


図-30 繊維シート接着工の適用範囲

以降、各繊維シートの交点を求めれば曲率半径毎の剥離耐力が求まる。また、曲率なしの剥離耐力を1とした場合の各曲率半径の剥離耐力比(低減係数 γ_a)をグラフ化したものを図-29に示す。同図より、低減係数 γ_a は、曲率半径 R が小さくなるにつれて低下し、 $R = 1,000 \text{ mm}$ より小さくなると低下の度合いが顕著になることが分かる。なお、この傾向は、繊維シートの引張剛性が大きいものほど影響を強く受けることがわかる。

7. 繊維シート接着工による剥落対策工の選定方法

今回、新たに提案した繊維シート接着工の設計法において、炭素繊維シート(目付量 400 g/m^2 : $s_{po} = 2.94 \text{ (N/mm)}$)を用い、 $\gamma_m = 1.1$, $\gamma_b = 1.1$, $\gamma_a = 0.95$, $\ell_a : \ell_t = 1:1$ とした場合の設計剥離耐力(P_{ud} , 式(7))と過去の剥落事例(図-1参照)および仮想の剥落塊(長方体で剥落塊の底面は、正方形、厚みは 50 cm)重量と剥離周長の関係をプロットしたものを図-30に示す。図より、覆工厚 50 cm の場合、剥離周長 3.4 m 、剥落塊の重量 8.3 kN までは繊維シートの設計剥離耐力が大きい、これより剥落塊が大きくなると剥落塊の重量の方が大きくなり剥離が進行することを表している。

以上の結果を踏まえて、剥落の形態・規模を、①覆工細片(大きさ: レンガ大~一辺 0.825 m まで/重量: 7.8 kN まで)、②覆工片(大きさ: 一辺 0.825 m 以上/重量: 7.8 kN まで)、③覆工塊(大きさ: 一辺 0.825 m 以上/重量: 7.8 kN 以上)、④地山崩落を伴うもの、の4種類に分類した。この分類に基づき、繊維シート接着工の選定の考え方は以下のように表現できる。(1) 押抜き実験結果をもとに、繊維シート接着工(た

ただし、炭素繊維で目付け量400g/m²を想定)を単独の対策として行う場合の適用可能範囲は、上記の①、②と③の一部までである。ただし、地圧等の外力による剥落の場合は、地圧対策工を併せて考える必要がある。なお、③に対しては、他の工法との併用(セントル補強、ロックボルト補強等)が必要になるものと考えられる。

- (2) ①に分類されるものに関しては、繊維シート材料等の選定の自由度が高い。しかし、②、③に対しては、剥離強さについて十分に検討する必要がある。炭素繊維、アラミド繊維の剥離強さが他の材料に比較して優れているので、設計剥落重量が大きい場合には、これらの材料を選定するのが良いと考えられる。

なお、炭素繊維は導電性があることから、鉄道トンネルの電化区間での使用には注意が必要となる。また、繊維シート接着工は、コンクリートに樹脂が十分に接着されることが前提である。したがって、本工法の採用にあたり、a)漏水の除去、b)脆弱な部位や汚損した部位の除去、c)不陸の修正、が必須となる。事前に対策を講じてもこれらの影響が懸念される場合は、ネット工などの他の対策工を選定すべきものと考えられる。

8. まとめ

剥落対策工として、繊維シート接着工に着目し、その設計法を確立するために、①過去の剥落事例を調査し、剥落事例ごとの要因の分類とその特徴を考察した。②覆工コンクリートから繊維シートが剥離する形状や強さを把握するため、押抜き実験を実施した。③得られた実験の結果を、呉ら⁹⁾による剥離破壊エネルギーに基づいた考え方によって評価した。④コンクリートの引張軟化特性を用いた解析解を導き、その解析解を実験結果と対比させた。その結果、以下に示す事項が明らかになった。

- (1) トンネル覆工の剥落事例調査より、要因毎の剥落の特徴は、以下のようである。

- ① 施工時に起因する剥落：剥落の規模は、一般には表層部の細片が落下する場合(重さ数10Nまで)が殆どであるが、時に数~10kNオーダーに達することもある。
- ② 材料劣化による剥落：剥落の規模は、一般に小規模で数10Nのオーダーまでであると考えられる。

- ③ 地圧等の外力による剥落：問題となるトンネルは、地圧の影響を受ける一部のトンネルに限られ、剥落規模としては①と同様であると考えられる。

- (2) 繊維シートの押抜き実験の結果から、剥離後の押抜き荷重、単位剥離強さ(s_p , s_{po})、剥離後の剥離角度は、剥離形状、最大押抜き荷重、実験における圧子の大きさの影響、覆工に曲率がある場合の剥離性状を把握した。

- (3) 押抜き実験結果を剥離破壊エネルギーの考え方で評価することにより、以下の成果を得た。

- ① 小型実験において炭素、アラミド、ガラスのケースについては、押抜き荷重が推定でき、押抜き実験が適切に行われた。
- ② MMA、変性エポキシ等の接着剤を使用する場合や下地を無処理とする場合は、別途、設計剥離耐力を低減する必要がある。

- (4) 押抜き実験結果を2次元梁型モデルによる解析解と比較することにより、以下の成果を得た。

- ① 単位剥離強さは、3次元である小型実験を剥離投影長によって整理することで、2次元梁型モデルと同等に評価できる。
- ② 短繊維シートは、連続繊維シートと同様に設計すれば十分安全である。
- ③ 覆工の曲率半径が小さくなるにつれ、押抜き荷重は小さくなり、曲率半径が1,000mmより小さくなると急激に小さくなる。また、その傾向は、繊維シートの引張剛性が大きいものほど著しい。

以上の知見を踏まえて、コンクリート塊の剥落が生じた場合でも繊維シートがコンクリート表面から顕著な剥離が生じないことを前提として、(4)の考え方に基づく設計法を提案した。

また、設計法の簡易化を図るため、繊維シートの単位剥離強さ(s_{po})、繊維シートの剥離角度(θ)、覆工の曲率の大きさによる低減係数(γ_s)については、ノモグラム化を行った。

さらに、同設計法の適用範囲を剥落の形態・規模を、①覆工細片、②覆工片、③覆工塊、④地山崩落を伴うもの、の4種類に分類し、繊維シート接着工を単独の対策として行う場合の適用可能範囲は、①、②と③の一部までとした。ただし、地圧等の外力による剥落の場合は、地圧対策工を併せて考える必要がある。なお、①に分類されるものに関しては、繊維シート材料等の選定の自由度が高い。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の補助金を得て実施したものであり、設計法の取りまとめに際しては、TSC研究会の白瀬昇快会長（清水建設株式会社）をはじめ委員各位にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Karbari,V.M.and Engineer,M.:Investigation of Bond between Concrete and Composite:Use of Peel Test, pp.208-227, *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol.15-Feb., 1996.
- 2) Kimpara,I., Kageyama,K., Suzuki,T., Ohsawa,I. and Yamaguchi,K. : Characterization of Peeling Structure of FRP Sheet Bonded on Mortar and Concrete, *Proceedings of The Eighth JAPAN-U.S. Conference on Composite Materials* , pp.1011-1019, 1998.
- 3) 朝倉俊弘, 呉智深, 植村政彦, 吉澤弘之 : 炭素繊維シートの剥落防止効果に関する研究, コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像-性能照査型補強設計指針(案), pp. II-61-67, 1998.
- 4) 呉智深, 朝倉俊弘, 吉澤弘之, 遠鴻, 小林朗, 高橋徹 : 連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.45~58, 2000.11.
- 5) トンネル安全問題検討会編 : トンネル安全問題検討会報告書-事故の原因推定と今後の保守管理のあり方-, 2000.2.

- 6) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会編 : 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, 2000.7.
- 7) 松田好史, 中村圭二郎, 村田一郎 : 山陽新幹線トンネル安全総点検, トンネルと地下, pp.65~75, Vol.31, 2000.5.
- 8) 小島芳之, 野城一栄, 朝倉俊弘, 小山幸則 : 鉄道トンネルの覆工剥落事故と原因推定, トンネルと地下, Vol.31, pp.63~70, 2000.9.
- 9) (財)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, 1998.2.
- 10) 六車崇司, 小島芳之, 吉川和行 : 繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策における覆工曲率の影響, 土木学会第56回年次学術講演会, V-536, 2001.10.
- 11) 土木学会編 : コンクリート標準示方書(構造型能照査編) 2002年制定, 2002.3.
- 12) 吉川和行, 小島芳之, 六車崇司 : FRPによるトンネル覆工剥落対策工への適用性評価, 鉄道総研報告, 第16巻, 第3号, pp.37~42, 2002.3.

(2003.2.26 受付)

A DESIGN METHOD OF FIBER REINFORCED PLASTIC METHODS AS A COUNTERMEASURE FOR CONCRETE SPALLING FROM TUNNEL LINING

Yoshiyuki KOJIMA, Kazuyuki YOSHIKAWA, Takashi MUGURUMA, Akira KOBAYASHI, Kazuyuki WAKANA, Toshihiro ASAKURA and Zhishen WU

Recently, fiber reinforced plastic method (FRP), mainly using carbon fiber and/or aramid fiber, has increasingly been used to prevent concrete spalling from tunnel lining. However, no sufficient design criteria or countermeasure selection criteria has been established. Thus, it has been desired to establish a rational design method in order to apply FRP. This paper introduces a series of punching shear tests of concrete slabs glued with a fiber sheet, and proposes a method to evaluate of the effect of FRP in order to establish design criteria. This paper also analyzes and categorizes past concrete spalling accidents into four levels according to their spalling scales, and proposes selection criteria and a design method of FRP.