

論文 無機系材料による剥落防止工法の押し抜き耐力の評価法

藤倉 裕介^{*1}・伊藤 祐二^{*2}・秩父 顕美^{*3}

要旨：本論文では、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法における性能評価として、連続繊維シートの強度特性や押し抜き圧子の形状が異なる場合の押し抜き試験を実施した。その結果、押し抜き強度は連続繊維シートの強度特性に依存することを確認した。また、無機系のモルタルを用いる場合では、モルタルの破壊と連続繊維シートの繊維束破断の2つの耐力を押し抜き圧子の形状や剥離破壊後の周長により評価できることが分かった。

キーワード：剥落防止工法, ポリマーセメントモルタル, 連続繊維シート, 押し抜き強度

1. はじめに

近年、トンネル覆工コンクリートや高架橋コンクリートの劣化による剥落が大きな問題となり、繊維シート接着による剥落防止対策が活発に行われている。これに対し、工程を短縮して経済的な剥落防止対策を施工するために、無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法を開発し、これまでに適用実績を示してきた¹⁾。これら剥落防止工法の性能を評価する方法として一般に押し抜き試験が実施されており、有機系の接着剤を用いた工法において、その評価方法^{2), 3)}が提案されている。本研究では無機系のポリマーセメントモルタルをライニング材として用いた場合の剥落防止効果を確認し、押し抜き耐力の評価方法を検討する目的で、連続繊維シートの強度特性や押し抜き圧子の形状が異なる場合の押し抜き試験を実施した結果について述べる。

2. 施工方法の概要と使用材料の物性

2.1 施工方法の概要

本工法は劣化コンクリートの剥落片の落下を防止、補修する対策工であり、ポリマーセメントモルタルを連続繊維シートの接着材、あるい

はライニング材（厚さ 3.5mm）として用いる工法¹⁾である。樹脂系接着剤を用いる剥落防止工法と比較して、ポリマーセメント比(=P/C)が10%以下の無機系のポリマーセメントモルタルは、人体への影響が少ないだけでなく、コンクリート表面が湿潤であっても施工可能であること、無機材料であるため、紫外線などに対する耐久性が高く、劣化対策を必要としないこと、などの優位性があると考えられる。

2.2 使用材料

(1) 連続繊維シートの物性

使用する連続繊維シートは、表-1に示すようにアラミド系を原料としたA~C、ビニロン系のD~Fの計6種類である。どのシートも繊維束が2軸、3軸といった網目状に編まれており、厚さは0.1~0.2mm程度である。シートの物理量を示すものとして、繊維束の密度や目付量があるが、これらの数値が明確でないものがあり、また表示方法が各シートで統一されていないため、表-1示すように、繊維束の軸数や繊維束1本当たりの幅、幅10mm当たりの繊維束の本数などの形状の特徴を調べた。さらに、これらのシートの繊維束1本を採取し、オートグラフ（島津製作所社製）を用いて、引張試験を実施した。織

*1 (株) フジタ 技術センター土木研究部土木材料グループ 工修 (正会員)

*2 (株) フジタ 技術センター土木研究部土木材料グループ長 工修 (正会員)

*3 (株) 高環境エンジニアリング 建設事業部長 工博

維束 1 本当たりの強度として表-1 中に示す。

(2) ライニング材の物性

ライニング材として用いるポリマーセメントモルタルには、天井あるいは壁面へ施工可能な粘性を有すること、短時間で硬化すること、十分な付着性能をもつことなど、現場への施工性や施工対象をふまえた性能が要求される。そのため、フロー試験や回転粘度計を用いて流動性や粘度を検討し、モルタルの配合を決定している¹⁾。また、ライニング材はプレミクスされた粉体（セメントと珪砂、硬化調整剤）と希釈されたポリマー混和液（エポキシ変成アクリル樹脂）を配合するだけで、簡単にライニング材として使用できるようにしてある。ちなみに、粉体 1 に対して混和液の配合比（重量比）は 0.27 としており、水セメント比（=W/C）は 39.4%，ポリマーセメント比（=P/C）は 0.1 である。材齢 7 日での圧縮強度は 30.0N/mm²，付着強度は 2.8N/mm²である。

3. 押し抜き試験

3.1 試験方法

試験体の作製は以下のようである。まず、400×600×60mm の大きさのコンクリート製の平板中央部に押し抜き圧子を入れるための孔を設けた状態で作製し、別に作製したコンクリート製の圧子を孔の中に設置した。圧子を固定した後、孔と圧子の隙間にはバックアップ材を設置し、圧子を中心として 400×400mm の大きさに剥落防止工法を施工した。

押し抜き試験はアムスラー式万能試験機を用いて、試験体のコンクリート圧子に垂直方向に変位を与える方法¹⁾で実施した。載荷速度は、モルタル（ライニング材）の破壊が生じるまで 1.0mm/min，その後は 5.0mm/min に調整して実施した。また、圧子の鉛直変位の増加に伴う施工面の剥離の進行過程を調べるために、鉛直変位 1.0mm ごとに載荷を一時中断し、剥離の状況を観察し、マーキングした。押し抜き試験後、キルビメータを用いて剥離周長を測定した。

表-1 連続繊維シートの物性

シートの種類	軸数	繊維束の幅 (mm)	繊維束本数(本/10mm)	繊維束 1 本当りの引張耐力(N/本)	
アラミド系	A	2	1.23	2.2	173
	B	2	0.5	6.0	31
	C	3	1.4	1.8	380
ビニロン系	D	2	0.15	10.2	8.8
	E	3	1.4	1.8	210
	F	3	1.4	3.3	210

3.2 試験条件

(1) 連続繊維シートの物性が異なる場合

表-1 に示す 6 種類の連続繊維シートを用いた剥落防止工法を施工し、施工後の材齢は 7 日にて試験を行った。押し抜き試験用の圧子は、φ100mm の円形とし、それぞれ各 3 体ずつ試験体を作製した。

(2) 押し抜き圧子の形状が異なる場合

コンクリート製の圧子が φ50，100，150，200mm の円形の場合、1 辺が 50，100，150mm の正三角形および正方形の圧子および試験板を作製し、表-1 中のアラミド系のシート A を用いて施工を行った。各圧子について、3 体ずつ試験体を作製し、施工後の材齢が 7 日にて押し抜き試験を実施した。

4. 試験結果

4.1 連続繊維シートの物性が異なる場合

図-1 にアラミド系の繊維シート A~C の結果を、図-2 にビニロン系のシート D~F の結果を、圧子の鉛直変位と押し抜き荷重の関係として示す。図-1，2 に示すように、鉛直変位の増加に伴い、モルタルの破壊が生じる。その後、荷重は繊維シートに負担され、剥離の進行を伴いながら繊維シートの伸び変形が生じる。この間、モルタルのひび割れは進行するが、落下することは無く、連続繊維シートとの付着は保たれたままである。さらに、シート A~C のアラミド系のシートでは、鉛直変位 15~20mm 程度で、ビニロン系のシート D~F では、鉛直変位 20mm 程

度でシートの繊維束が部分的に破断し、荷重が低下した。繊維束破断時の押し抜き耐力は、表-1に示す繊維束の引張強度や破断前に荷重が負担される繊維束の本数に関係しているものと考えられる。また、荷重と変位の関係に示される挙動は繊維束の剛性や形状に起因し、アラミド系のシートと比較してビニロン系のシートは剛性が低いため、繊維束破断時の押し抜き耐力が得られる際の変位は、より大きな値を得るものと推察される。

さらに、圧子の変位に伴う剥離挙動に関しても同様に、繊維束破断時の剥離の程度は、シートA~C(アラミド系)に比べ、シートD~F(ビニロン)では小さい¹⁾。すなわち、剛性が低い材料では、ある程度剥離が進展すると、それ以上剥離は大きく進展せず、鉛直変位の増加に伴って荷重はシートの伸びに対して負担されるためであると考えられる。ちなみに、剥離はライニング材と連続繊維シートとの界面から生じ、試験体基盤が破壊したり、繊維シートがライニング材から破り出るような挙動は生じなかった。

4.2 押し抜き圧子の形状が異なる場合

図-3、4には押し抜き圧子の形状や大きさが異なる場合の押し抜き試験の結果の一例を示す。図-3は、圧子の形状が円形の場合の結果を示し、図-4には圧子の形状が正三角形あるいは正方形の場合の結果を鉛直変位と荷重の関係として示す。図中の凡例は圧子の形状および大きさ(円形の場合は直径、正三角形あるいは正方形は圧子の一辺の長さ)を示す。図-1、2と同様にモルタルの破壊が生じ、その後荷重は繊維束に負担され、鉛直変位の増加とともに荷重は増加し、剥離が進行する。その後、鉛直変位15~20mmにて繊維束の部分的な破断が生じ、荷重は低下する。これらの図より、圧子の形状が大きい場合では、モルタル破壊時および繊維束の破断時の押し抜き荷重は大きな値を得ることが分かる。これは、有機系の材料を用いた既往の実験結果^{2), 3)}においても示されている。

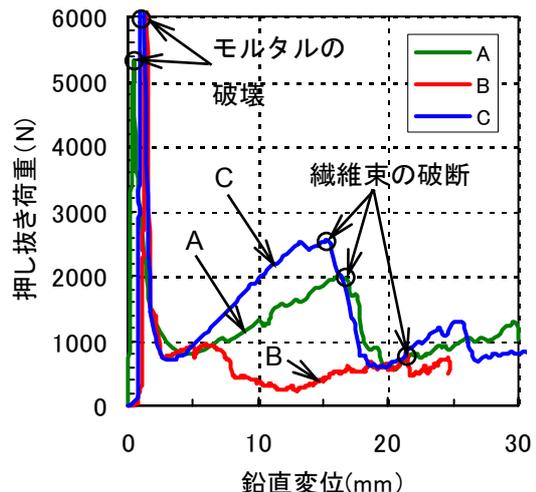


図-1 鉛直変位と押し抜き荷重の関係 (アラミド系シートA~Cの場合)

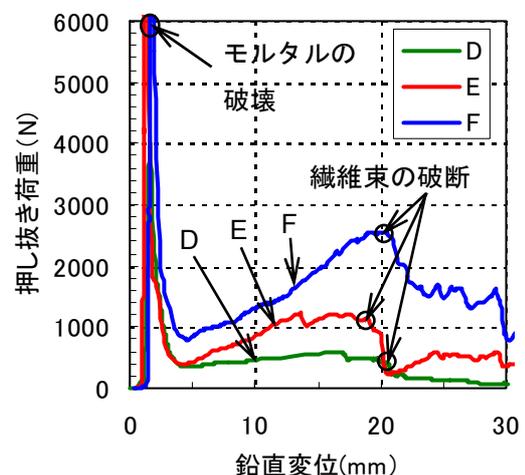


図-2 鉛直変位と押し抜き荷重の関係 (ビニロン系シートD~Fの場合)

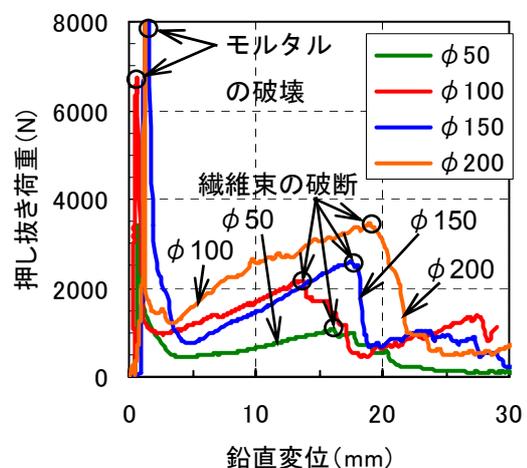


図-3 鉛直変位と押し抜き荷重の関係 (圧子が円形で大きさが異なる場合)

5. 考察

5.1 押し抜き強度について

(1) 繊維束の引張強度特性と押し抜き耐力

図-1, 2にて示される繊維束の破断時の押し抜き強度について考察を加える。既往の研究では、連続繊維シートの剛性の平方根と押し抜き耐力を剥離周長で除した単位剥離荷重との関係から求める剥落対策の設計法³⁾が提案されているが、今回使用したような格子状に編まれたネット状の連続繊維シートの場合、押し抜き耐力は繊維束の引張強度や荷重が負担される繊維束の本数、軸数に依存すると推察される。そこで、押し抜き耐力を剥離周長で除した単位剥離荷重³⁾と表-1に示される繊維束一本当たりの引張強度、単位幅当たりの繊維束本数、軸数を掛け合わせた値 (=連続繊維シートの強度特性値と定義する。)との関係を図-5に示す。なお、図中には各試験の平均値をプロットしている。更なる実験データの収集が必要であるが、図-5より、強度特性値 (繊維束の引張強度と形状を示す単位幅当たりの繊維束本数や軸数により簡易的に与えた特性値) の増加に伴い、単位剥離荷重は線形的に増加していることが分かる。

(2) モルタル破壊時の耐力と圧子の形状

ライニング材 (厚さ 3.5mm) の破壊時の押し抜き耐力について、面部材の押し抜きせん断耐力式⁴⁾から算定した設計値との比較を行う。面部材の押し抜きせん断耐力 V_{pcd} は、式(1)で求められる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

ここで、 $\beta_d = \sqrt[4]{1/d} < 1.5$, $\beta_p = \sqrt[3]{100p} < 1.5$,

$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25(u/d))$, $f'_{pcd} = 0.2\sqrt{f'_{cd}}$ で表され、

f'_{cd} はモルタルの圧縮強度で 30.0N/mm^2 , u はコンクリート製圧子の周長、 d は有効高さ (モルタルの厚さ) で 3.5mm , p はモルタルと繊維シートの断面積比とし、 γ_b は、 1.0 とした。図-6は、上式から算定した設計値および実験から得られ

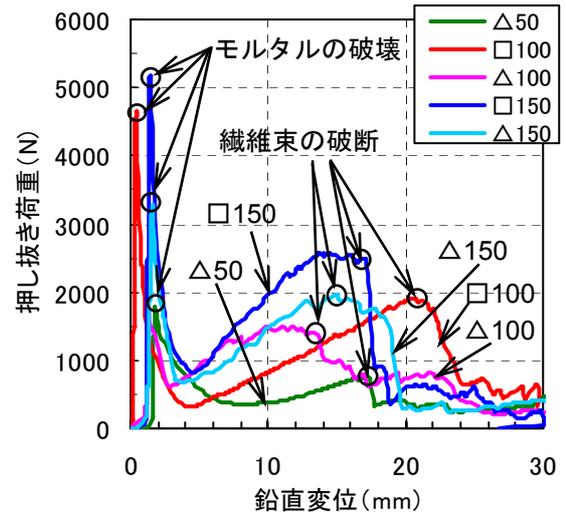


図-4 鉛直変位と押し抜き荷重の関係 (圧子が正三角形あるいは正方形の場合)

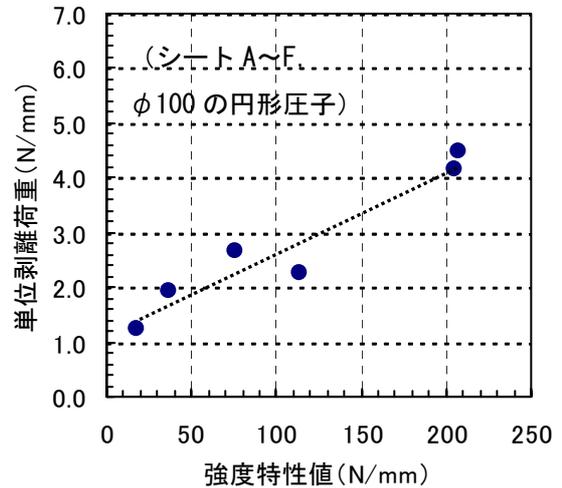


図-5 強度特性値と単位剥離荷重の関係

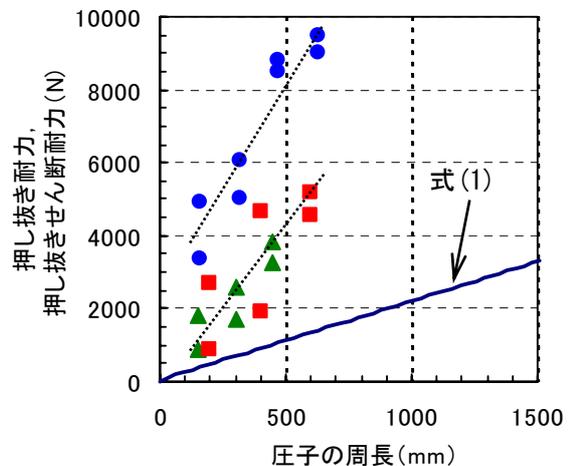


図-6 圧子の周長と押し抜き耐力、押し抜きせん断耐力の関係

たモルタル破壊時の押し抜き耐力に関して、圧子の周長との関係として示した。図中の○や△、□のプロットはそれぞれ圧子の形状を示している。図中には実験値の近似直線を示すが、押し抜き耐力の実験値は、圧子の周長にほぼ比例することがわかる。しかし、圧子の形状が円形の場合と三角形あるいは正方形の場合とでは、圧子の角形状の影響により、分布の傾向が異なることも分かる。また、実験値は設計値よりも大きな値を示すことが分かる。

(3) 繊維束破断時の耐力と圧子の形状

図-7には図-3, 4で得られた繊維シート破断時の押し抜き耐力と剥離周長との関係を示す。図-6と同様に図中の○や△、□のプロットは圧子の形状を示している。図-7より、繊維シート破断時の剥離周長の増加に伴い、押し抜き強度はほぼ線形的に増加することが分かる。すなわち、剥落対象から剥離周長を算定することで、性能評価としての押し抜き耐力を推定できるものと考えられる。

5.2 押し抜き試験後の剥離範囲について

剥落防止工の施工計画においては、繊維シートの物性や圧子の形状、大きさから押し抜き耐力を求めるとともに、選定した繊維シートや剥落対象から剥離範囲を予測し、必要とされる施工面積を推定することが必要であると考えられる。今回の実験では連続繊維シートAを用いた検討であるが、図-8には元の圧子の周長と繊維束破断時の剥離周長の関係を示す。この図より、元の圧子の周長が150~630mm程度の範囲では、押し抜き試験後の剥離周長は線形的に分布し、元の圧子の周長により、剥離後の周長を推定することが可能であることが分かる。

6. 最適工法の選定と押し抜き耐力の評価

以上の結果より、実際の施工に適用する際のフローを図-9に示す。あるコンクリート片の剥落対象は、その被り深さやトンネルの覆工厚などから、設計値となる質量や大きさ（周長や投影長さ）を推定することができる。剥落を防止

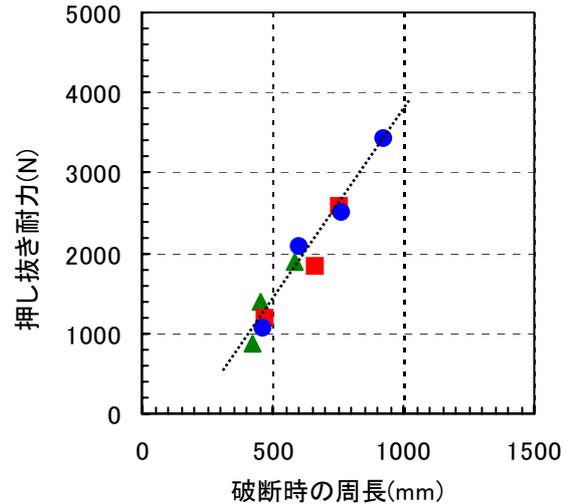


図-7 繊維束破断時の周長と押し抜き耐力の関係

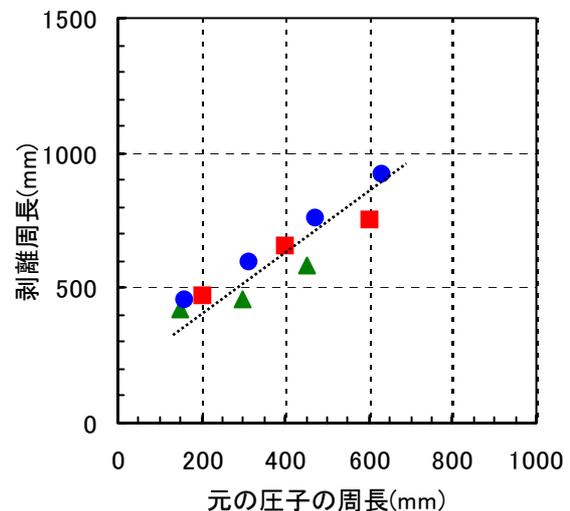


図-8 元の圧子の周長と剥離周長の関係

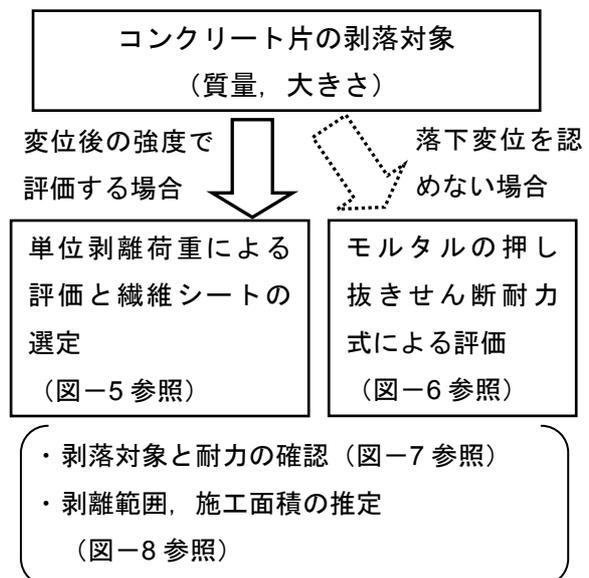


図-9 工法の選定と耐力の評価方法

する性能に対する評価は鉄道系や道路系の各機関により異なるが、一般に剥落片の落下方向の変位を認めている。このような場合、例えば変位 10mm 以降の最大の押し抜き耐力にて評価される場合では、図-5 で示す単位剥離荷重³⁾が適用され、実験結果に基づき、単位剥離荷重から剥落対象に合わせた最適な連続繊維シートの選定が可能であると考えられる。さらに、図-7 に示すように、同一の繊維シートを用いる場合、押し抜き耐力は破断時の剥離周長に依存することが分かる。また、今回使用した圧子の大きさの範囲では、剥離周長は元の圧子の周長から推定できることが図-8 から分かる。すなわち、剥落対象の周長を調べ、図-8 より剥離周長を推定することで、剥落対象に合わせた施工範囲が把握できるものと考えられ、求めた剥離周長から押し抜き耐力を算定することも可能である。この押し抜き耐力と剥落対象の質量との比較により、剥落防止工法の性能を確認できるものと考えられる。ただし、繊維シートの物性により剥離範囲が異なる^{1), 2), 3)}こと、トンネルなどのアーチ形状による押し抜き耐力の低減^{2), 3)}などの結果を考慮する必要があると考えられる。さらに、モルタルをライニング材として使用するため、材齢による強度発現により、モルタルの破壊時あるいは繊維束破断時の押し抜き強度が異なること⁵⁾、母材の強度や劣化の状態による影響など、様々な因子を考慮した統一的な設計法の確立が必要である。一方、剥落片の落下方向の変位を認めない場合については、安全係数の検討が必要であるが、図-6 で示したモルタルの押し抜きせん断耐力の評価が適用できるものと考えられる。

7. まとめ

無機系のポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いたコンクリート片の剥落防止工法において、剥落防止効果を確認し、押し抜き耐力の評価方法を検討する目的で、連続繊維シートの強度特性や圧子の形状、大きさが異なる

場合の押し抜き試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 押し抜き試験の結果として、押し抜き荷重と圧子の鉛直変位の関係として整理し、モルタル破壊時および繊維束の破断時の強度値により評価できることを示した。
- (2) 連続繊維シートの物性から求まる強度特性値の増加に伴い、単位剥離荷重は線形的に増加する。圧子の鉛直変位 10mm 以降の押し抜き耐力で評価する場合には、単位剥離荷重が適用可能であることが分かった。
- (3) モルタル破壊時の耐力で性能を評価する場合、式(1)による押し抜きせん断耐力式を設計値とすると、今回の実験の範囲では、実験値は設計値よりも大きな値が得られた。
- (4) 圧子の周長の増加に伴い、押し抜き試験後の剥離周長は線形的に増加し、剥落対象の周長から施工範囲を把握するとともに、剥離周長から押し抜き強度を推定できることを示した。

参考文献

- 1) 藤倉裕介, 伊藤祐二, 秩父顕美: ポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, pp.1487-1492, 2003.7
- 2) 呉智深, 朝倉俊弘ほか: 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
- 3) トンネル安全対策工法研究会 (TSC 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, 2003.5
- 4) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書【構造性能照査編】, pp.73, 2002
- 5) 藤倉裕介, 伊藤祐二, 秩父顕美: ポリマーセメントモルタルと連続繊維シートを用いた剥落防止工法における付着強度の発現と剥離破壊挙動, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, V-139, pp.277-278, 2003