

タフシートによる剥落防止効果

柳 博文*¹松岡 茂*²益田 彰久*¹

概 要

トンネル覆工などのコンクリートの剥落防止対策として、繊維材料を用いた繊維シート接着工が普及してきている。ここでは、紫外線硬化型の繊維シート（以下、タフシートと呼称）のコンクリート片剥落防止効果を確認する目的で、コンクリート平板を用いた押抜き試験を実施した。さらに、繊維シートの剥離荷重をコンクリートの引張破壊特性を考慮した剥離メカニズムを用いて、タフシートの剥離耐力の妥当性を検証した。

キーワード：押抜き試験，剥離荷重，異方性，繊維シート，剥落防止

ANTI-SPALLING EFFECT OF TOUGH SHEET

Hirofumi YANAGI*¹Shigeru MATSUOKA*²Akihisa MASUDA*¹

Abstract

Techniques using adhesive textile sheets is being widely used to prevent spalling of concrete tunnel lining. We carried out peeling-by-stamping tests using concrete board specimens to evaluate the anti-spalling effect of the ultraviolet-curing textile sheet (Tough Sheet). Furthermore, on the basis of the spalling mechanism considering the tensile failure characteristics of concrete, we validated the peeling-off resistance of the Tough Sheet.

Keywords: peeling-by-stamping test, peeling load, anisotropy, textile sheet, spalling prevention

* 1 Civil Engineering Technology Development Group, Institute of Technology, Engineering Division

* 2 Manager, Civil Engineering Technology Development Group, Institute of Technology, Engineering Division

タフシートによる剥落防止効果

柳 博文*¹・松岡 茂*²・益田 彰久*¹

1. はじめに

トンネル覆工等からのコンクリート片剥落を防止する対策としては、下記のような方法が施工されている。

- ① 劣化部分のはつり落とし+断面修復
- ② ひび割れ注入
- ③ 当て板
- ④ 繊維ネット工法
- ⑤ 繊維シート系工法

剥落防止対策としては、繊維ネットあるいは繊維シート工法が多く用いられている。タフシートは、炭素繊維やアラミド繊維などの繊維シート系工法の一つである。ただし、炭素繊維などの他の繊維シート系工法と異なる点は、補強繊維であるガラス繊維と樹脂が工場で一体化している点と補強繊維が長繊維でなく短繊維である点である。他の繊維シート系工法は、現場で繊維シートに樹脂を含浸させることにより繊維シートと樹脂を一体化させ、コンクリート表面に繊維補強プラスチック（以下 FRP）を構築することでコンクリート片の剥落を防止している。このため、施工条件が厳しい場合などでは樹脂の含浸が不均質となり、繊維シートの所定の機能が発揮できない場合が生じる危険性を有している。樹脂の含浸が局部的に不十分な箇所があると、その部分が弱点となり繊維シートの剥離が生じる危険性も考えられる。これに対して、タフシートは工場でガラス繊維と樹脂が完全に一体化した状態で出荷されるため、硬化後の FRP としての品質が一定しているが、短繊維であるため、他の繊維シートに比べると引張強度が小さい。しかしながら、コンクリートの剥落要因は、既に決まっているコンクリート表面付近の引張破壊による剥離荷重、つまり

既設コンクリートの引張強度が決定されている条件となるので、その他の要因である繊維シートの破断強度やコンクリート母材と繊維シートの付着強度は必要以上に大きくなくても良いと考えられる。

そこで、各繊維シートによるコンクリート片剥落防止効果を確認する目的で、コンクリート平板を用いた押抜き試験を実施した。さらに、繊維シートの剥離荷重は、既設コンクリート母材の引張破壊による剥離荷重以上を有していればよいという考え方から、コンクリートの引張破壊特性を考慮した剥離メカニズムを用いて、タフシートの剥離耐力の妥当性を検証した。

2. 小型平板押抜き実験

2.1 実験概要

トンネル覆工などの構造物に施工した場合を想定して、日本道路公団試験研究所では既往の実験¹⁾を参考に図-1に示すようなコンクリート平板に接着されたFRPシートを押し抜く試験が実施されている。試験体の形状と実験概要も図-1に示す。試験体は覆工コンクリートと同程度の強度（ $\sigma_{28}=20\text{N/mm}^2$ ）の無筋コンクリート平板を用いて、平板中央には載荷用に押し抜き孔をあらかじめ設けた。平板の表面は、ディスクサンダーを用いて平滑化し、その後繊維シート(430mm×430mm)を接着し、中央の押し抜き部に荷重をかけて強制的に繊維シートを引き剥がしながら繊維シートが保持できる荷重と変位を計測した。

2.2 実験ケース

今回実施された実験ケースを表-1に示す。繊維の種類は、炭素、アラミド、ガラス、ポリ

* 1 エンジニアリング本部 技術研究所 土木技術開発グループ

* 2 エンジニアリング本部 技術研究所 土木技術開発グループリーダー

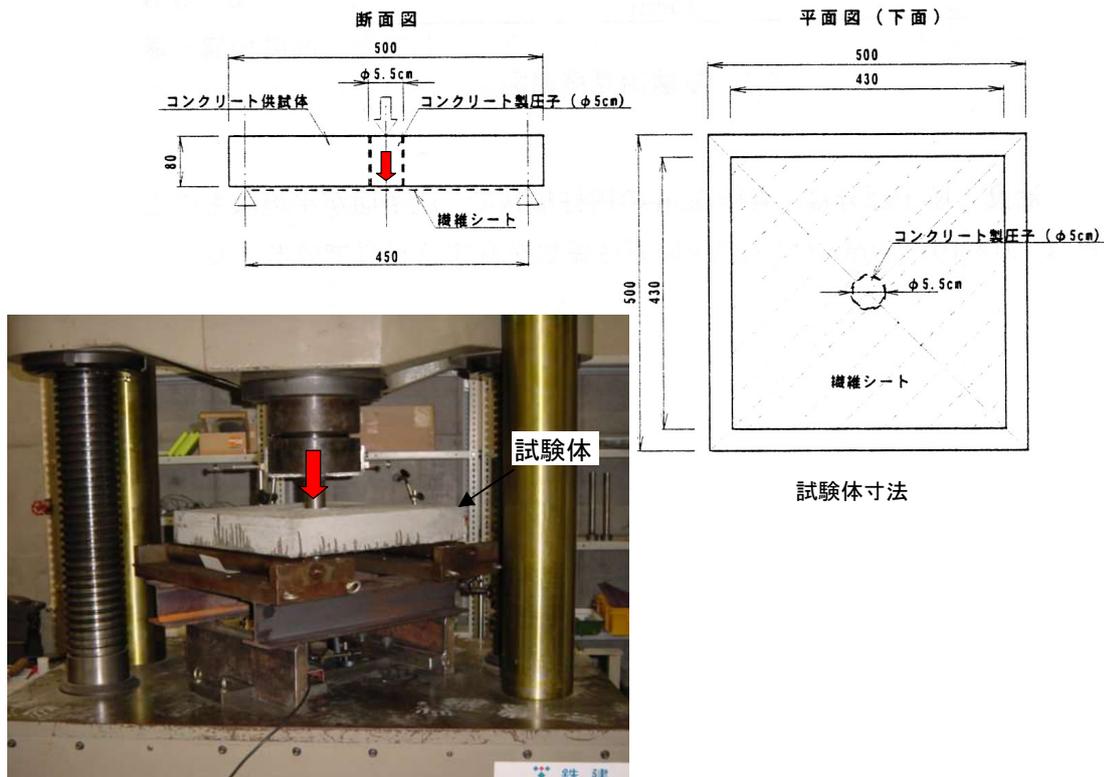


図-1 試験体概要と試験体寸法図

表-1 実験ケースと繊維シートの力学特性例

繊維シート	繊維目付量 (g/m ²)	設計厚み (mm)	引張強度 (N/mm ²)	破断強さ** (N/mm)
一方向炭素繊維シート*	200	0.111	3400	377.4
二方向炭素繊維シート	200	0.0556	2900	161.2
二方向アミド繊維シート 1	180	0.048	2060	98.9
二方向アミド繊維シート 2	162	0.0583	2300	134.1
ガラス繊維シート	200	0.0392	1900	74.5
タフシート	600	1.5	80	120.0

* トンネル覆工では縦横各1層，すなわち一方向炭素繊維シートでは2層の施工を行うことが標準である。

** 破断強さとは，繊維シート1mm幅当たりの破断荷重である。

エステル，紫外線硬化型（以下，タフシートと呼称）とした。含浸樹脂接着剤については，一般に用いられているエポキシ樹脂とMMA（メタクリル酸メチル樹脂）とした。

2.3 実験結果および考察

実験結果によると，図-2に示すようにタフシート（図中のUV）の剥離荷重が炭素繊維シート（CF）やアラミド繊維シート（AF）より剥離荷重が高い傾向を示している。3.で述べるが単位幅の剥離強さは，炭素繊維シートの

方が大きい。平板の押抜き試験ではタフシートの方が大きくなる。この原因は，図-3に示す剥離状況の違いに起因している。連続繊維を使用している繊維シートの押抜き試験では，繊維方向を対角線とした菱形の剥離が進行する。これに対して，タフシートは強度の異方性が無いために剥離が同心円状に進行する。連続繊維を使用した繊維シートでは，張力は主に図-3に示すように載荷面を横切る連続繊維で負担されるために，有効な長さは載荷面を連続繊維方向に投影した部分である。一方，

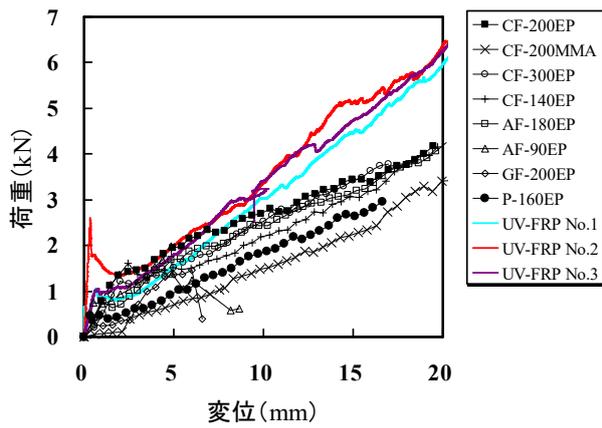


図-2 実験結果

タフシートは剥離した周長すべてが剥離に対して有効である。したがって、算定される単位幅の剥離強さと有効長さの積が平板の剥離荷重となるため、タフシートは有効長さが長いため平板の剥離荷重が他の繊維シートに比べて大きくなる。

3. 繊維シートの剥落防止効果の算定

3.1 繊維シートの力学特性

トンネル覆工の剥落防止では、トンネル軸方向と直交方向に補強繊維である連続繊維を配置することが原則であるため、タフシート以外の連続繊維シートは、表-1に示すように二方向に連続した繊維を配置した繊維シートを使用する事例が多い。連続繊維シートの引張強度は高いが、繊維が含まれる部分のみが設計上の有効厚であるために設計厚は薄い。一方、タフシートは補強繊維であるガラス短繊維が樹脂中に分散しているために、設計厚は他の繊維シートに比べて厚くなっている。その結果、設計厚と引張強度の積である破断強さについては、一方向炭素繊維シート以外は大きな差異は見られない。なお、コンクリート片の剥落をFRPシートの引張力で防止することから、繊維シートの引張強度でなくシート1枚当たりの破断強さが重要である。

3.2 繊維シートの剥離メカニズム

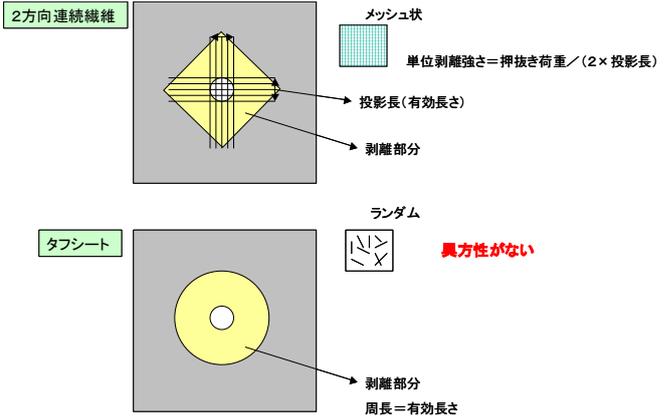


図-3 繊維シートの剥離状況

コンクリート表面に接着したFRPシートの剥離原因は、次のような3つに分類することができる。

- ① コンクリートの引張破壊
- ② コンクリートと界面との付着破壊
- ③ FRPに起因する破壊

コンクリートの引張破壊とは、FRPシートとコンクリートとの付着が良好であり、コンクリート母材の破壊が発生する状態である。したがって、コンクリートが引張破壊する場合には、これ以上の耐力を期待することができない。したがって、FRPシートとコンクリートとの付着力はコンクリートの引張強度以上とすることで、FRPシートの剥離荷重は最大値を確保することができる。FRPに起因する破壊とは、樹脂の含浸が不十分であると補強繊維と樹脂が分離してFRPとしての性能が発揮できない場合とFRPシートが破断する場合が考えられる。「FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル」(トンネル安全対策工法研究会)²⁾では、FRPシートの剥離荷重がコンクリート母材の引張破壊で決定されることを保証するために次ぎのような規定を設けている。

- ・ FRPシートの付着は、コンクリートの母材破壊で決定されるか1.5N/mm²以上の付着力を確保する。
- ・ FRPシートが剥離荷重に達した時に繊維シートが破断しないこと

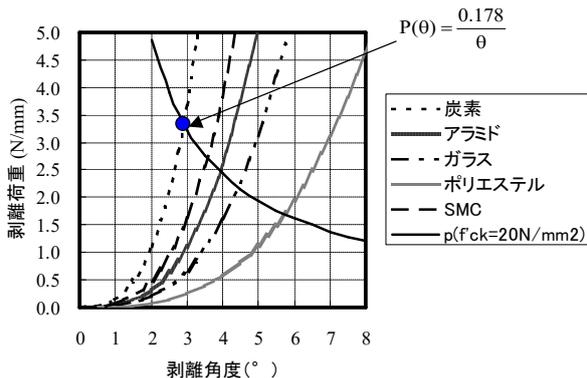


図-4 繊維シートの剥離強さ

トンネル覆工コンクリートの設計基準強度は約 20N/mm² 程度であり、その引張強度はひび割れ等が生じていない健全なコンクリートで約 1.5N/mm² 前後である。そこで、FRP シートとコンクリートとの付着力が 1.5N/mm² 以上あることを確認することになっている。ただし、補修を必要とするトンネル覆工の中には、ひび割れ等の損傷がコンクリート中に生じている場合があり、そのような場合には母材破断を確認することになっている。このような規定を設けることにより、FRP シートの剥離荷重を算定することが可能となる。

FRPシートの剥離荷重は、図-4（設計基準強度20N/mm²の場合）に示すように計算される。図中の右下がりの実線は、コンクリートの引張強度で決定される単位幅当たりの剥離荷重である。横軸は、剥離により生じるFRPシートとコンクリート表面との角度（剥離角度）である。剥離角度が大きくなるとコンクリートの引張強度で決定される剥離荷重は低下する傾向を示す。右上がりの曲線は、各繊維シートに発生する張力から算定される剥離荷重である。実際のFRPシートの剥離荷重は、コンクリートの引張強度で決定される剥離荷重とFRPシートの張力で決定されるものとの交点である。この剥離荷重の算定方法の詳細は、「FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル」（トンネル安全対策工法研究会）²⁾に記述されているので、本文では省略する。

図-4に示すように単位幅当たりの剥離強さ

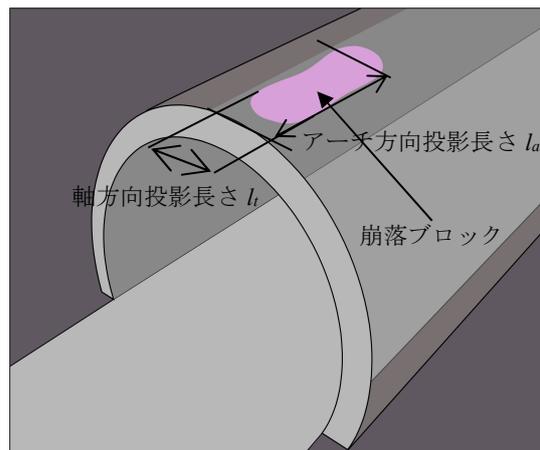


図-5 投影長さ

は、炭素繊維が最も大きく、その次にタフシートとなっている。FRP シートの張力で決定される剥離荷重の要因は、FRP シートの引張剛性（弾性係数と設計厚さの積）である。タフシートの弾性係数は、他の繊維シートと較べると低い設計厚さが厚いため、引張剛性は炭素繊維シートに次いで大きくなることから、単位幅当たりの剥離強さが比較的大きくなる。

3.3 設計式との比較

「FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル」（トンネル安全対策工法研究会）²⁾によると、繊維シートの設計に用いる有効長さは、図-5に示すような投影長さとして、単位剥離耐力の設計式は式(1)で表される。

$$P_{ud} = 2 \cdot S_{p0d} \cdot (l_t + \gamma_a \cdot l_a) / \gamma_b \quad (1)$$

ここに、 P_{ud} ：設計剥離耐力、 S_{p0d} ：設計単位剥離荷重、 l_t ：軸方向投影長さ、 l_a ：アーチ方向投影長さ、 γ_a ：曲率による低減係数、 γ_b ：部材係数(=1.1)である。

トンネル延長方向、およびアーチ方向の設計単位剥離荷重は、一般に繊維シートの引張剛性から図-6を用いて求めることができる。ここで、 E はシートの引張弾性係数、 t はシート厚さである。適用できるのは繊維シートとコンクリートが一体化しており、必ずコンクリート層を引き剥がして剥離する場合のみである。また、アーチ方向の単位剥離荷重の低減係数 γ_a は、

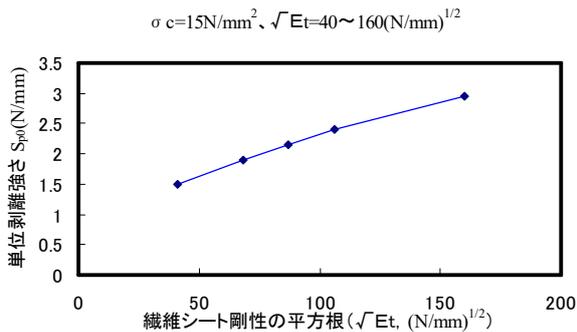


図-6 単位剥離強さノモグラム

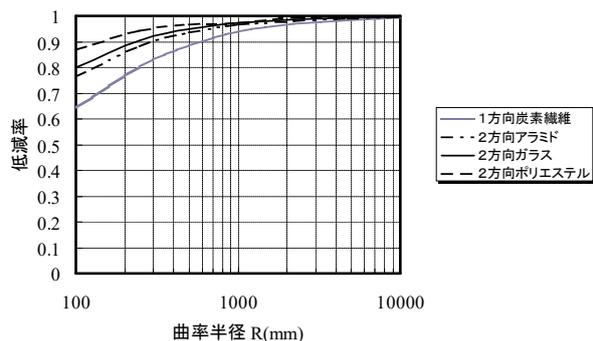


図-7 曲率半径と低減係数の関係

図-7によって求めることができる。設計単位剥離強さ S_{pod} は、図-6の単位剥離強さ S_{p0} を安全係数 $\gamma_m (=1.1)$ で除した値とする。

式(1)の設計式と比較して、実験結果を整理したものを図-8に示す。タフシート以外の繊維シート系補修工法は全て連続繊維であることから、安全を考え設計上の有効長さは載荷面を連続繊維方向に投影した長さの4倍と設定している。図中の●は小型平板押抜き実験結果(炭素, アラミド, ガラス), ■は鉄道総研で行われた大型梁(曲率なし)³⁾による実験値, ▲はタフシートの実験結果である。平板の押抜き試験から得られた荷重を設計有効長さで除した単位剥離強さは、連続繊維シートの場合には設計式の約2倍となっている。これに対して、タフシート(図中のSMC)は4倍強の結果となっており、かなり安全である。この原因は、前述したようにタフシートには強度の異方性がないため、連続繊維シートのより実際の有効長さが長いためである。

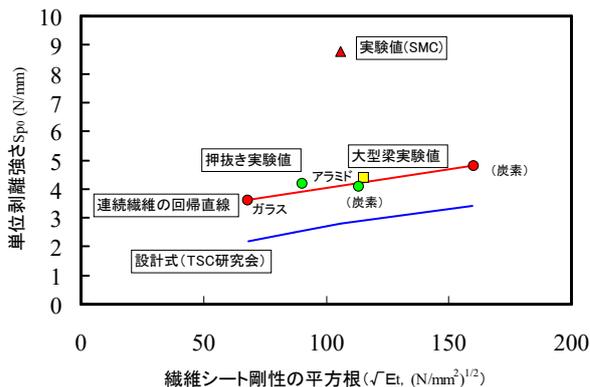


図-8 設計式と実験結果の比較

4. まとめ

剥落防止用のタフシートは、他の連続繊維シートと較べて次のような利点を有している。

- (1)硬化後も半透明であるためにタフシートとコンクリートとの密着状況を目視で確認することができる。
- (2)コンクリートの引張破壊特性を考慮した剥離メカニズムにより、タフシートが連続繊維シートと同等以上の剥離耐力を有することが確認できた。
- (3)タフシートは短繊維を用いており、強度の異方性がないため、FRPシートに集中荷重が作用しても同心円状に剥離が進展するため、他の連続繊維シートに較べて剥離荷重が大きい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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