

破壊メカニズムを踏まえたはく落対策工の耐荷力の評価に関する一考察

森本智¹・日下敦²・前田洸樹³・松山彰宏⁴

¹ 正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: s-morimoto@pwri.go.jp

² 正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 22 番地)

E-mail: kouki.maeda@tk.pacific.co.jp

⁴ 正会員 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 1-1-10)

E-mail: matsuyamakh@newjec.co.jp

覆工に材質劣化によるうき・はく離が確認された場合, 利用者被害防止の観点からはく落対策を実施することとなる. 維持管理便覧(以下, 便覧)では変状面積 $0.5\text{m}^2\sim 4\text{m}^2$ 程度の変状規模の場合は, 炭素繊維シートを用いたはく落対策工を標準としている. 本工法は単位はく離強さにはく離周長を乗じた値を耐荷力として評価できるとされている. 一方, 山岳工法(NATM)により建設されたトンネルに発生するうき・はく離の面積は 0.2m^2 以下の小規模のものが多いことから, 変状規模によっては, 炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いることにより, 経済性や施工性等の向上が期待される. 本報告では, 従来から適用実績が多い炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いたはく落対策工を対象に押抜き試験を行うとともに, 破壊メカニズムを踏まえた耐荷力の評価手法について考察した.

Key Words: road tunnel, lining concrete, maintenance, repair sheet

1. はじめに

覆工に材質劣化によるうき・はく離が確認された場合, 利用者被害防止の観点からはく落対策を実施することとなる. 維持管理便覧¹⁾(以下, 便覧)では変状面積 $0.5\text{m}^2\sim 4\text{m}^2$ 程度の変状規模の場合は, 炭素繊維シートを用いたはく落対策工を標準としている. 本工法は単位はく離強さにはく離周長を乗じた値を耐荷力として評価²⁾できる. 一方, 山岳トンネル工法(いわゆるNATM)により建設されたトンネルに発生するうき・はく離の面積は 0.2m^2 以下の小規模のものが多い³⁾ことから, 変状規模によっては, 炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いることにより, 経済性や施工性等の向上が期待される. 一方, 炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いる場合, 材料の強度特性や繊維の構造等によっては, 材料の変形特性や耐荷特性, 破壊形態等が炭素繊維シートの挙動とは異なる可能性が考えられ, 耐荷力への影響が問題となることが想定される.

本報告では, 従来から適用実績が多い炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いたはく落対策工を対象に押抜き試験を行うとともに, 破壊メカニズムを踏まえた耐荷力の評価手法について考察した.

2. はく落対策工法の現状

覆工コンクリートにうき・はく離が確認された場合, コンクリート片の落下等により利用者に対して影響が生じないように, 変状等の状態を踏まえてはく落対策を実施することとなる. 本章では, 従来から実績のあるはく落対策工について示すとともに, 近年, 経済性や施工性の向上を期待して, 従来から実績のある炭素繊維シートと比較して低強度の材料や異なる構造とした工法について調査した結果を示す.

(1) はく落対策工

はく落対策工には金網工やネット工，形鋼系・パネル系・シート系の当て板工等があり，これらの適用にあたっては変状の状態や発生部位，変状規模等を考慮して選定することとなる．便覧では，はく落対策工としてシート系の当て板工を適用する場合の選定の目安として，変状面積 $0.5\text{m}^2\sim 4\text{m}^2$ 程度の変状規模の場合は炭素繊維シート（クロスメッシュ， $200\text{g}/\text{m}^2$ 目付）を用いた工法を想定している．本工法は適用実績が多く，また，文献2)により耐荷力の評価方法が既に示されており，押抜き試験の結果，変位の増加に応じてシートがはく離進展し荷重が増加する場合は，単位はく離強さにはく離周長を乗じた値を耐荷力として評価できるとしている．

なお，便覧では，炭素繊維シートより低強度のものをを用いる場合は，変状規模に応じて個別に検討を要するとしている．

(2) はく落対策に 응용が期待される工法

はく落対策工の選定にあたっては，変状状態に応じた耐荷力の評価に加えて，交通条件，経済性や施工性，耐久性等についても考慮することとなる．例えば，交通量が多いトンネルや代替ルートが確保できないトンネルでは短期間の車線規制で施工が可能となる工法が求められる．ここでは，経済性や施工性の向上を期待して，炭素繊維シートとは異なる材料を用いた工法を対象に，樹脂メーカーや施工会社等からのヒアリング，カタログ・文献等の情報をもとに事例調査を行った．

事例調査の結果，はく落対策に 응용が期待される工法の例を表-1 に整理した．炭素繊維シートとは異なる材料を用いた工法として，道路トンネルで実用されている工法を発展させたもの，他の構造物で培われた工法をトンネルの環境条件を踏まえて改良したもの，異分野から転用された技術を活用したものなどがあつた．例えば，アクリル等の樹脂材料を単独で用いる工法では，少ない工程で施工が可能となり工期短縮が期待される．繊維シートと樹脂材料を組み合わせた工法では，炭素繊維シートと比較して安価な繊維を用いることで経済性を高めた工法，光硬化型樹脂の採用により養生時間を短縮することで工期短縮する工法，繊維と樹脂を多層構造としてあらかじめ製作し現場での貼付作業を省力化する工法などがあつた．これらの工法では，炭素繊維シートを用いた工法と比較して，経済性や施工性の向上が期待される．

表-1 はく落対策に 응용が期待される工法の例

分類	使用材料	概要	期待される効果
樹脂 接着工法	アクリル樹脂 エポキシ樹脂 ウレタン樹脂 等	樹脂材料単独の構造による工法	小規模なはく落対策として少ない工程で工期短縮効果が期待される
省工程型 繊維樹脂 接着工法	紫外線硬化型樹脂 多層シート樹脂	硬化時間が短い接着材料または多層構造シート等による工法	施工性の向上効果が期待される
高耐久 初工法	FRP ネット ポリプロピレン	導水の FRP と FRP 初を組合せた工法	漏水による劣化が抑制され耐久性向上効果が期待される

3. 荷重-変位特性及び破壊状況

本章では，炭素繊維シート及び炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いた工法について，耐荷力を評価するために，押抜き試験により荷重-変位特性や破壊状況について検討した．

(1) 各工法の概要

今回の検討に用いた対策工は従来から適用実績が多い炭素繊維シートを用いた工法（Case1）に加え，炭素繊維シートと比較して引張強度が低く，ヤング率が小さい材料として，Case2 ではガラス繊維，Case3 ではオレフィン系繊維，Case4 ではウレタン系樹脂を用いた工法を選定した．試験ケースと使用材料・材料特性を表-3 に示す．Case2 はガラス繊維をアクリル樹脂で接着する工法である．Case3 は図-1 に示すようにオレフィン系繊維を3方向4層に網状に積層しアクリル樹脂でラミネートした構造（網状構造）である．施工工程はコンクリート表面の下地処理後，接着剤を塗布，網状構造を貼付する3工程となる（写真-3の(a)）．Case4 はウレタン系樹脂を単独で使用した構造である．施工工程はコンクリート表面の下地処理後，プライマーを塗布し，樹脂材料をローラーにて塗布する3工程となる（写真-3の(b)）．

(2) 押抜き試験

押抜き試験は，コンクリート供試体に対策工を設置し，はく落塊を模した押抜き部を変位制御で載荷する方法により実施した．計測項目は，押抜き部の変位（変位（mm）），抵抗荷重（荷重（kN））とした．また，シートのはく離周長を目視観察により把握した．なお，Case3 は繊維が単独で挙動したため，各繊維のはく離端部を結んだ長さをはく離周長とした．各ケースともに押抜き部の形状は円形で，Case1 は直径 200mm，Case2・Case3・Case4 は直径 500mm とした．試験状況を図-2 に示す．

表-3 使用材料・材料特性

材料	Case1	Case2	Case3	Case4
引張強度 (N/mm ²)	4,124	3,430	35	40
ヤング率 (N/mm ²)	262,000	72,500	409	14.2
繊維目付 (g/m ²)	207	203	150	-

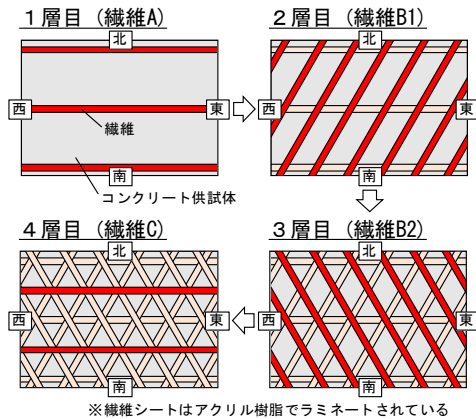


図-1 網状の編み込み構造(Case3)

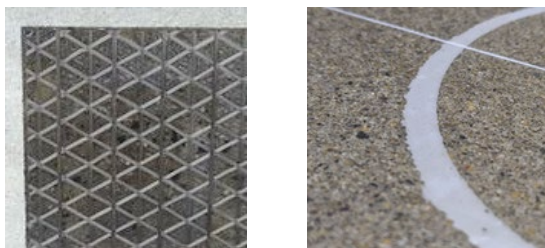


写真-3 貼付け状況

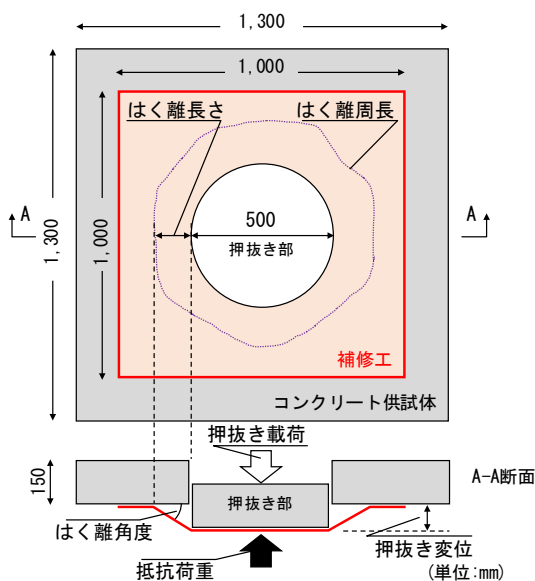


図-2 試験状況

(3) 試験結果

a) 荷重と変位の関係

図-3 に変位と荷重の関係、図-4 に荷重とシートのはく離周長の関係を示す。Case1 及び Case2 では変位の増加に応じてシートのはく離周長が増加するとともに荷重も増加した。一方、Case3 では変位の増加に伴いシートのはく離周長の増加が少なく、荷重の増加も Case1 及び Case2 と比べて少なかった。Case4 では Case3 同様に変位の増加に伴いシートのはく離周長の増加が少なく、荷重の増加もほぼ見られなかった。

b) 試験終了時の状況

図-5 に試験終了時の状況を示す。シートに破断が生じた状態を「破断」、シートのはく離が進展し供試体端部まで達した状態を「端部はく離」、有効繊維に破断が生じた状態を「有効繊維破断」と定義した。Case1 では荷重 24.5kN にて破断が確認され、その後荷重は低下した。Case2 では破断は確認されず、荷重 9.8kN にて端部はく離したため試験を終了した。Case3 では一部の繊維が先行してはく離後、荷重 5.5kN にて有効繊維破断した。Case4 では荷重 2.0kN にて破断が確認され、その後荷重は徐々に低下した。

ここで、Case1 で破断が生じた要因を考察する。図-6 に荷重とシートに発生したひずみの関係を示す。ひずみは押抜き部外縁から 100mm の位置に設置したひずみゲージにより把握した。シートのはく離は、荷重 12.0kN でひずみゲージ付近のシートがはく離して引張りひずみが発生し、荷重 25.0kN では 18,027 $\mu\epsilon$ となった。この値は表-3 に示した引張強度とヤング率から算出した降伏が推定されるひずみ 15,740 $\mu\epsilon$ を上回っていることから、シートの引張強度を超過する応力が作用したため破断に至ったと考えられる。

以上の結果から、各ケースにおける荷重と変位の関係及び破壊形態は様々であった。

Case1 及び Case2 では、変位の増加に応じてはく離周長及び荷重が増加する挙動であったことから、単位はく離強さによる評価が可能となる一方、シートの引張強度を超過する応力が作用し破断が生じた場合は荷重の上限値を設定する必要がある。

Case3 及び Case4 では、変位の増加に伴いはく離周長の増加が少なく、荷重の増加も Case1 及び Case2 と比べて少なかったことから、破壊メカニズムを考慮した新たな方法による耐力の評価が必要となる。

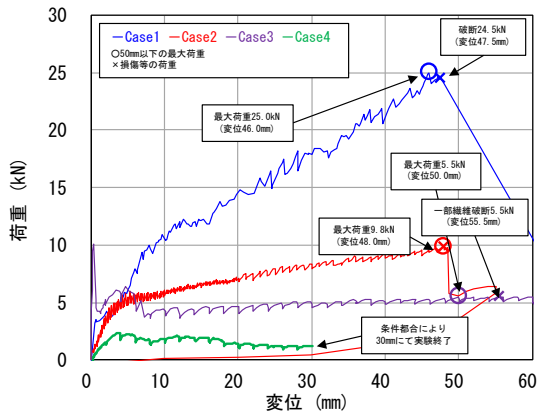


図-3 荷重と変位の関係

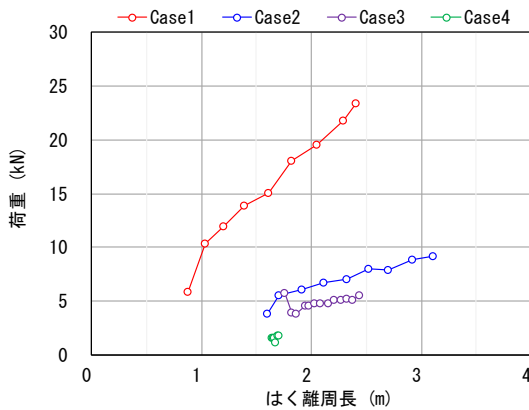


図-4 荷重とはく離周長の関係

	Case1	Case2
状況写真		
破壊形態	破断	端部はく離
状態	シートの引張応力が引張強度を上回り大部分に破断が生じた状態	シートはく離が進展し供試体端部まで達した状態
特徴	荷重は著しく低下し破断直前に最大荷重となる場合が多い	供試体寸法を大きくすることで試験を継続できる場合が多い
	Case3	Case4
状況写真		
破壊形態	有効繊維破断	破断
状態	有効繊維の引張応力が引張強度を上回り有効繊維に破断が生じた状態	シートの引張応力が引張強度を上回り破断が生じた状態
特徴	有効繊維破断後他の繊維に引張応力が転換され全体で荷重を維持する	破断後荷重は増加せず一定で推移し最終的には破断が拡大する

図-5 試験終了時の状況

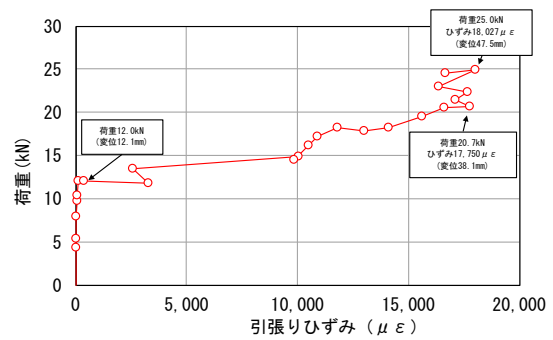


図-6 荷重とシートのひずみ (Case1)

4. 網状構造 (Case3) の破壊メカニズム

本章では、変位の増加に伴う荷重の増加が少なかった網状構造(Case3)を対象に、破壊メカニズムを考慮した耐荷力の評価方法について検討する。

(1) 荷重と変位の関係及び破壊形態

押抜き変位と荷重の関係 (図-3 の Case3 再掲) に有効繊維本数をあわせて図-7 に示す. 有効繊維本数とは押抜き部と供試体をつないで耐力として有効に機能している繊維の本数とし目視観察により把握した. 破断を確認した場合はその本数を減じた. 図に示した段階とは、段階 1 は載荷開始から繊維と接着材のはく離を確認するまでの段階、段階 2 は繊維と接着剤が一体となつてはく離している段階、段階 3 は繊維がはく離している段階、段階 4 は荷重が大きく低下し実験を終了するまでの段階とした。

押抜き変位と荷重の関係 (図-7) は、段階 1 で最大荷重を示したがこの値は押抜き部と供試体の隙間に接着剤が流入したためと考えられることから考察からは除外した. 段階 2 で荷重は 4.0kN から増加し 6.0kN で最大値となった. これは、接着剤の塗膜厚が均一でなくムラが発生してしまい部分的に多く塗布されていた箇所において繊維と接着剤が一体となって抵抗したためと考えられる. 段階 3 で変位の増加に伴い荷重の増加が少ない結果となった. 網状構造の挙動を確認すると、変位量が 55mm で一部の繊維の破断が押抜き部の近傍や繊維の中間等で確認され、変位量が 92mm で一部の繊維が端部まではく離し、変位量が 110mm で多くの繊維が端部まではく離し試験を終了した。

網状構造の荷重と変位の関係の特徴として、押抜き変位量の増加により繊維が独立して挙動する変形特性を示し、シートのはく離が進展しても荷重の増加が少ない特性を示した. また、破壊形態は表-4 に示すとおり、繊維の部分的な破断が確認され、その位置は押抜き部の近傍や繊維の中間等であった (破壊①). 一部の繊維は先

行してはく離が進展（破壊②）する形態を示し、各繊維が独立した挙動を示した。これらの破壊時の挙動は、炭素繊維シートを用いた工法²⁾と異なる結果となった。

(2) 耐力の算出

a) 単位はく離強さによる耐力の算出

図-8 に単位はく離強さと変位の関係を示す。変位の増加に伴い単位はく離強さが減少する傾向が確認できる。これは、(1)で示したとおり網状構造の破壊形態は、従来工法と異なり各繊維が独立した挙動を示すためと考えられ、従来工法と同様に単位はく離強さにより耐力を評価することは難しい。

b) 単位繊維荷重による耐力の算出

網状構造では各繊維が独立して挙動し荷重を受け持つことを踏まえ、単位繊維強度×有効繊維本数で耐力を評価できると考え、単位繊維荷重（押抜き荷重 P/有効繊維本数 n）を算出した。

図-9 に単位繊維荷重と変位の関係を示す。繊維のみはく離進展する区間では、いずれのケースも概ね 20～35N/本で推移しており、単位繊維荷重に着目することにより耐力を評価できる可能性が示唆された。

c) 有効繊維本数の算出

有効繊維本数は押抜き部と供試体をつなぎ耐力として有効に機能する繊維の本数であり、設計で用いる有効繊維本数は対象とするはく落塊をつなぐ繊維の本数となる。有効繊維本数ははく落塊の形状や大きさによって異なり、繊維方向を考慮したはく落塊の投影長さ、繊維間隔、繊維方向数（図-10）を考慮して、次式(1)のように算出した。

$$\text{有効繊維本数} = (\text{はく落塊投影長さ}) / (\text{繊維間隔}) \times (\text{繊維方向数}) \times 2 \quad (1)$$

例えば、Case3 の場合、はく落塊投影長さは 500mm（押抜き部の直径）、繊維間隔 20mm、繊維方向数 3 であるため、有効繊維本数は以下のように算出できる。

$$\text{有効繊維本数} = 500 / 20 \times 3 \times 2 = 150 \text{ 本}$$

以上のことから、炭素繊維シートと比較して引張強度が低くヤング率が小さい材料を用いて網状構造としたシートでは、各層の繊維が独立した挙動を示し、各層の繊維それぞれの破壊形態が異なる。このような破壊形態を示すシートに対しては、単位繊維強さに有効繊維本数を乗じることで耐力を算出し、破壊形態を踏まえた荷重の上限値を定めることが重要となる。

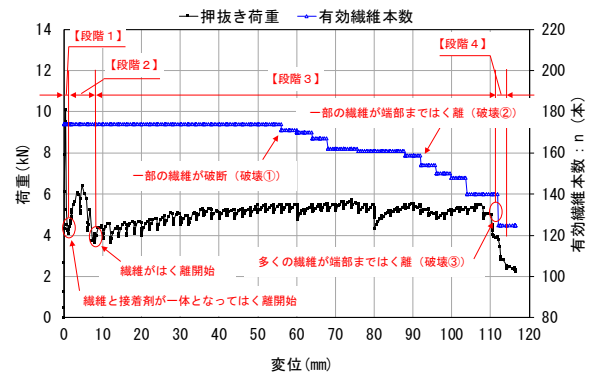


図-7 押抜き変位と荷重等の関係

表-4 破壊形態

破壊① 一部の繊維が破断	破壊② 一部の繊維が端部まではく離	破壊③ 多くの繊維が端部まではく離

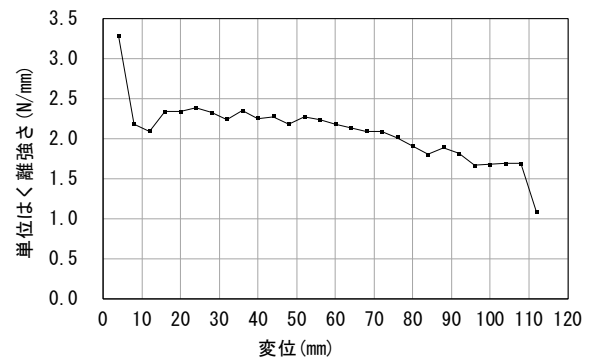


図-8 単位はく離強さと変位の関係

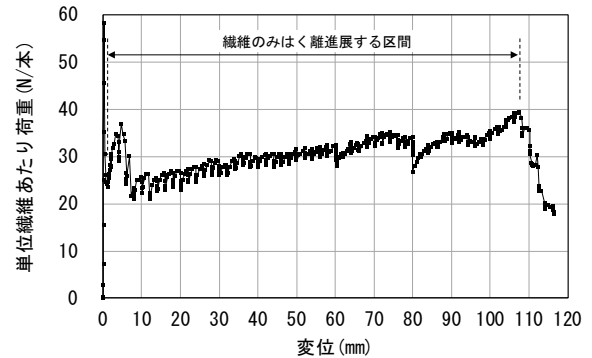


図-9 単位繊維荷重と変位の関係

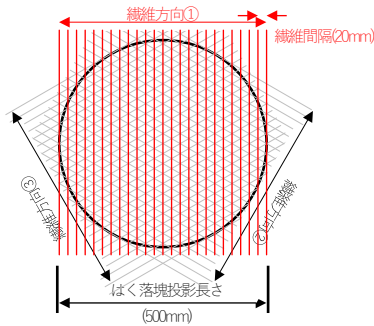


図-10 繊維方向の法線方向はく離長さ

5. 樹脂塗布型構造 (Case4) の破壊メカニズム

本章では、変位の増加に伴うはく離周長及び荷重の増加が少なかった樹脂塗布型構造 (Case4) を対象に、破壊メカニズムを考慮した耐荷力の評価方法について検討する。なお、押抜き部の寸法による影響を考慮するため、Case4-2 として円形 (φ 100mm)、Case4-3 として菱形 (対角線の長さは 210mm×75mm) のケースを追加して試験を行った。表-5 に試験ケースを示す。

(1) 荷重と変位の関係及び破壊形態

図-11 に変位と荷重の関係、図-12 に対策工の破壊形態を示す。いずれのケースも初期段階で最大荷重を示し、その後、変位の増加に伴う荷重の増加は少なく、材料の伸びが先行する結果となった。破断は荷重低下前後で確認され、その後、荷重は増加することなく一定で推移し、最終的には破断が拡大して実験が終了した。なお、Case4 に関しては、変位 30mm 以降にて押抜き部の傾きが生じ、それに伴う周辺孔壁との摩擦による荷重の増加が確認されたため、変位 30mm までを考察対象とした。

(2) 耐荷力の算出

図-13 に荷重とはく離周長の関係を示す。いずれのケースも、荷重の増加に伴うはく離周長の増加が少なく、炭素繊維シートを用いた工法のような単位はく離強さによる耐荷力評価は適用できないことが確認された。

図-14 に最大荷重と押抜き周長の関係を示す。これより、最大荷重と押抜き周長は比例関係にあることがわかる。これは、樹脂塗布型シート工法の耐荷力が材料と供試体の接着面積に依存するためと考えられる。

以上のことから、樹脂を単独で使用した構造の場合で荷重の増加に伴いはく離周長の増加が見られず、材料の伸びが先行する場合、複数の押抜き周長による試験を行うことで周長に応じた最大荷重を耐荷力として算出し、変形特性を踏まえた荷重の上限値を定めることが重要となる。

表-5 試験ケース

ケース名	供試体寸法 (mm)	押抜き形状・寸法 (mm)	押抜き周長 (mm)
Case4	1,300×1,300	円形 (φ 500)	1,570
Case4-2	600×400	円形 (φ 100)	314
Case4-3	600×400	菱形 (210×75)	504

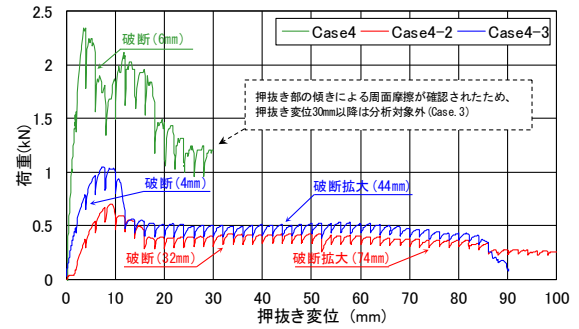
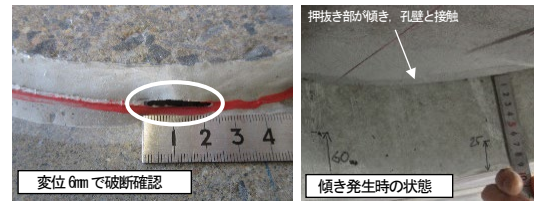
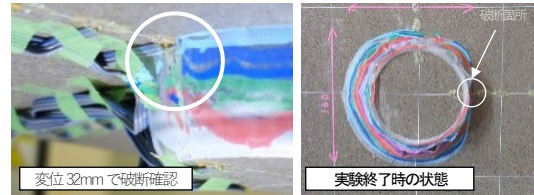


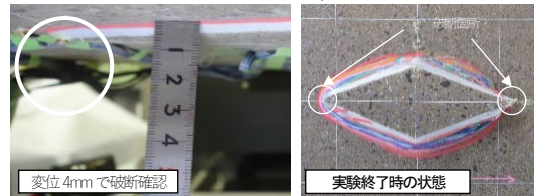
図-11 荷重と変位の関係



(a)Case4 円形(φ 500)



(b)Case4-1 円形(φ 100)



(c)Case4-2 菱形(210×75)

図-12 対策工の破断状況

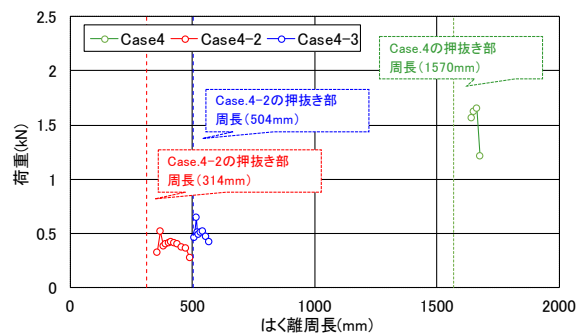


図-13 荷重とはく離周長の関係

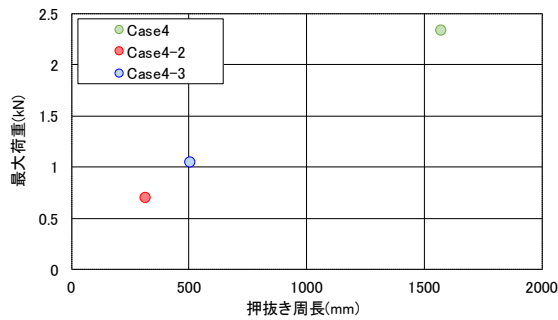


図-14 最大荷重と押抜き周長の関係

6. 耐荷力の評価

上述したとおり、使用する材料の強度特性や繊維の構造によって耐荷力は影響を受けることから、押抜き試験により得られた荷重-変位特性や破壊メカニズムを考慮して耐荷力を評価することが重要となる。本章では、押抜き試験により得られた荷重-変位特性及び破壊形態を考慮した耐荷力の評価手法について示とともに、耐荷力とはく落塊荷重と比較することで耐荷力を照査する。

(1) 耐荷力特性の評価

a) 押抜きに伴いはく離周長が増加する場合

Case1 及び Case2 のように、変位の増加に応じてシートのはく離周長が増加し、荷重も増加する場合、耐荷力は図-4 の傾き (荷重/はく離周長) すなわち「単位はく離強さ」により評価できる²⁾。

耐荷力 $Pr(kN)$ は、単位はく離強さ $Spo(kN/m)$ にはく離周長 $L(m)$ を乗じることで次式(2)のように評価できる。

$$Pr = Spo \times L \quad (2)$$

単位はく離強さ $Spo(kN/m)$ は、図-4 の傾きから Case1 は $9.7kN/m$ 、Case2 は $3.0kN/m$ となる。

b) 変位の増加に伴い各繊維が独立して挙動する場合

Case3 のように、変位の増加に伴い各繊維が独立して挙動する場合、4. (2) b) で示したように、耐荷力は単位繊維強さ $F(N/本)$ に有効繊維本数 $n(本)$ を乗じることで次式(3)のように評価できる。4. (2) c) で述べたとおり、有効繊維本数ははく離の周長が大きいほど多くなるため、はく離周長が大きいほど耐荷力は大きくなる。

$$Pr = F \times n \quad (3)$$

Case3 の単位繊維強さ $F(N/本)$ は、図-9 から $27.3N/本$ となる。

c) 荷重の増加に伴いはく離周長の増加が少ない場合

Case4 のように、荷重の増加に伴いはく離周長の増加が少ない場合、5. (2) で示したように、耐荷力は複数の押抜き周長による試験により得られた各周長に応じた最大荷重とすることで評価できる。

(2) 荷重の上限値

上記ははく離の進展による荷重増加しか考慮していないがシートに破断が生じた場合、押抜き試験により得られた荷重-変位特性や破壊メカニズムを考慮して荷重の上限値を定めることが重要となる。ここでは、破断、端部はく離、変位を考慮した荷重の最大値をそれぞれ算出し、その中から最も小さい値を荷重の上限値として設定した。

a) 破断による荷重の上限値

シート破断が確認された場合、荷重は著しく低下し破断直前に最大荷重となる。破断による荷重の上限値は、Case1 では破断が確認される直前の $25.0kN$ 、Case2 では破断は確認されず、Case3 では有効繊維破断が確認された $5.5kN$ となる。

b) 端部はく離による荷重の上限値

端部はく離が確認された Case2 では $9.8kN$ が荷重の上限値となる。より大きい供試体により実験を行うことで最大荷重は大きくなることが考えられるが、確認できた最大荷重が荷重の上限値となる。

c) 変位に対する荷重の上限値

実現場では覆工表面と建築限界の限られた空間においてははく落塊を保持する必要があるため、変位の進行に対する荷重の上限値を設けることとし、ここでは試験での変位 $50mm$ とした。変位に対する荷重の上限値は、Case1 では $25.0kN(46mm)$ 、Case2 では $9.8kN(48mm)$ 、Case3 では $5.5kN(50mm)$ となる。

(3) 耐荷力の照査

図-15 にはく離周長 $L(m)$ に応じた各ケースの耐荷力 $Pr(kN)$ 、はく落塊荷重 $Pa(kN)$ の関係を示す。一般に耐荷力の照査は、(1)、(2) で算出した耐荷力 Pr がはく落塊荷重 Pa を上回ることを確認する。はく落塊荷重 $Pa(kN)$ は、一般にはく離の面積 (m^2) 、はく落塊の厚さ $t(m)$ 、コンクリートの単位体積重量 $\gamma(kN/m^3)$ を乗じることで算出できる。本稿では、はく落塊荷重 $Pa(kN)$ は、はく落塊の形状は正方形と仮定したはく落塊周長 $L(m)$ を基に、厚さ t は覆工巻厚 $0.3m$ 、単位体積重量 γ は $23kN/m^3$ と仮定して次式(4)のように算出した。

$$Pa = (L/4)^2 \times t \times \gamma \quad (4)$$

なお、うき・はく離の面積は $0.2m^2$ のはく落塊は $L=1.79m$ に相当する。

図-15 にはく離周長 $L(m)$ に応じた耐荷力 $Pr(kN)$ 及びはく落塊荷重 $Pa(kN)$ の関係を示す。Case1 ははく離周長の増加に応じて荷重が増加し、その後繊維が破断した $25.0kN$ が上限値となる。Case2 は同様にはく離周長の増加に応じて荷重が増加し、その後端部まではく離が進展

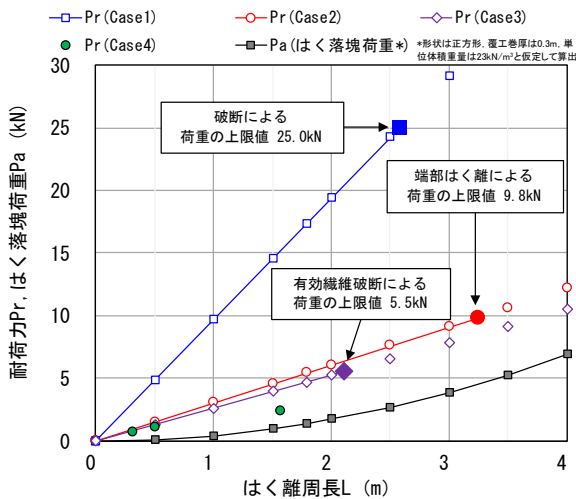


図-15 耐荷力とはく落塊荷重の関係

した9.8kNが上限値となる。Case3ははく離の周長の増加に伴い有効繊維本数が多くなるため荷重が増加し、その後有効繊維が破断した5.5kNが上限値となる。Case4は複数の押抜き周長による試験により得られた各周長に応じた最大荷重を示している。

各ケースの耐荷力 Pr は、はく落塊荷重 Pa と比較して大きいことが確認できる。例えば、対象とするはく離の面積が0.2m²（はく落塊周長Lが1.79m）と仮定した場合、はく落塊荷重 Pa は1.38kNであるのに対して、耐荷力 Pr はCase1では17.4kN(Pr/Pa=12.6)、Case2では5.4kN(Pr/Pa=3.9)、Case3では4.7kN(Pr/Pa=3.4)となり、想定するはく落塊荷重に対して各ケースともに耐荷力を有すると評価できる。

7. まとめ

本報告では、従来から適用実績が多い炭素繊維シートと比較して低強度の材料を用いたはく落対策工を対象に押抜き試験を行うとともに、破壊メカニズムを踏まえた耐荷力の評価手法について考察した。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 新たな工法の耐荷力を評価するために、押抜き試験により荷重-変位特性及び破壊状況について検討した結果、従来から実績のある炭素繊維シートを用いた工法では変位の増加に応じてはく離周長及び荷重が増加するのに対し、新たな工法では変位の増加に伴うはく離周長の増加は少なく、荷重の

増加も少ない結果となった。このことから、破壊メカニズムを考慮した新たな方法による耐荷力の評価が必要となることが明らかとなった。

- 2) 変位の増加に応じてはく離周長及び荷重が増加する挙動の場合、単位はく離強さによる耐荷力の評価が可能となるが、シートの引張強度を超過する応力が作用し破断が生じる場合は荷重の上限値を設定する必要がある。
- 3) 炭素繊維シートと比較して引張強度が低く、ヤング率が小さい材料を用いた繊維を網状に複数層編み込んだ構造を有する工法では、各層の繊維が独立した挙動を示し、各層の繊維それぞれの破壊形態が異なる。このような破壊形態を示すシートに対しては、単位繊維強さに破壊形態を考慮した有効繊維本数を乗じることで耐荷力を定めることが重要となる。
- 4) 樹脂を単独で使用した構造を有する工法ではく離周長の増加に伴う荷重の増加傾向が見られない場合、複数の押抜き周長による試験を行うことで周長に応じた最大荷重を耐荷力として定めることが重要となる。
- 5) シートに破断等が生じない場合ははく離周長による耐荷力の評価が可能となるが、端部まではく離が進展した場合はその時点で確認できた最大荷重を耐荷力として定めることが重要となる。

今後は、道路トンネルの合理的なはく落対策工の設計方法の確立に向け、耐久性・維持管理性の優れた技術の改良・開発および評価について検討していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本土工編】，令和2年8月。
- 2) 真下英人，石村利明，箱石安彦：既設トンネル覆工のはく落防止対策工の耐荷力に関する研究報告書，土木研究所資料第4004号，2006年3月。
- 3) 森本智，日下敦，吉岡和哉，長谷川慶彦：NATMにより建設された道路トンネルにおける材質劣化に起因する変状の実態，土木技術資料，第61-4巻，pp.24-27，2019.4。

(2022. 8. 26 受付)

RESEARCH ON THE EVALUATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF REPAIR SHEET BASED ON THE FRACTURE MECHANISM

Satoshi MORIMOTO, Atsushi KUSAKA, Kouki MAEDA and
Akihiro MATSUYAMA

When tunnels are deformed, repair methods are implemented. During the installation of the repair work, traffic control is required, which affects user inconvenience and social cost. Therefore, a repair method with good workability is required for the repair method. In this study, we developed a repair method with lower cost and better workability compared to carbon fiber sheets, which have been used for a long time. We conducted loading tests on the repair method using low-strength materials. As a result, the damage mechanism was different from that of the conventional carbon fiber sheet. Therefore, a new evaluation of load-bearing capacity is necessary when low-strength materials are used. We proposed a new method to evaluate the load-bearing capacity of several repair methods using low-strength materials.