

論文 トンネル覆工コンクリートのひび割れ性状に着目したはく落危険性評価に関する基礎的検討

林 詳悟*1・山本 達哉*2・全 邦釘*3・林 和彦*4

要旨：筆者らはトンネル覆工コンクリートの点検効率化の取り組みとして、可視画像から得られるひび割れの長さや幅などの情報と、覆工表面の三次元形状からはく落の危険性を推定する手法の確立に取り組んでいる。本文は、ひび割れには発生原因によって、表面のひび割れ形状と、内部のひび割れ面の形状には密接な関係性があると考え、ひび割れ表面形状とひび割れ面に発生するせん断強度の関係を明示することで、ひび割れの形状から、はく落危険性を評価する手法を提案するものである。

キーワード：トンネル覆工、ひび割れ、形状計測、光切断、せん断強度、ひび割れ表面形状、蛇行指標

1. はじめに

道路トンネル（以下、トンネル）の覆工コンクリート片のはく落事象は、第三者被害に至る可能性が高い。道路管理者は発生を未然に防ぐため打音点検を実施しているが、道路構造物の老朽化と熟練技術者不足が進む中、従来点検を支援する効率的かつ効果的な非破壊検査技術の開発が急務となっている。その一環として、高速道路のトンネルでは、覆工コンクリート表面画像を用いたひび割れの抽出結果により、ひび割れの幅、長さ、進展方向からスパン毎の健全性を評価し、注意を要するスパンの絞込みを行っていき、あくまでスパンごとの評価であり、はく落危険領域を推定するには至っていない。

そこで、筆者らは、覆工のひび割れなどの表面状態と表面の凹凸形状を同時に計測しはく落の前兆を捕らえることにより、はく落の危険性が高い箇所を抽出して打音点検範囲を絞り込む点検効率化手法を提案している¹⁾。図-1は、交通規制を伴わず走行しながらトンネル覆工の可視画像と表面形状を取得した事例である。なお、図の形状計測結果は、手前側に突出している箇所を明るく表示している。可視画像だけでは、画像全体のひび割れの有無を確認できるだけであるが、形状計測を併用すれば、突出部分（明部）に1.0mmの段差が確認でき、よりはく落の危険性が高いことが推定できる。

一方、トンネル覆工コンクリートのひび割れの進展には、様々な要因が影響すると考えられ、特に NATM のトンネル覆工コンクリートは、建設時の内空変位の大きな個所以外は無筋コンクリートであるため、内部の鋼材腐食の膨張力がはく落事象を引き起こすわけではなく、ひび割れの進展からはく落に至る詳細なプロセスと影響する因子については明らかにされていない。

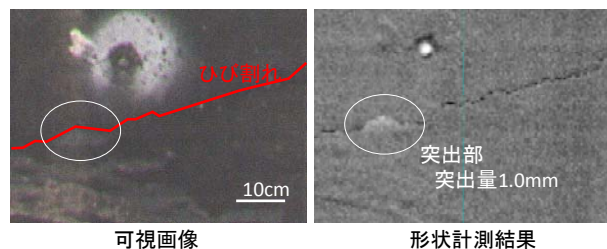


図-1 トンネル覆工の可視画像と形状計測例

筆者らは、高速道路のトンネル点検の経験から、ひび割れが進展し、三日月状となる場合ははく落しやすく、乾燥収縮ひび割れは幅が大きくても、ひび割れが進展しブロック状になっていない場合ははく落しづらいなど、ひび割れ形状とはく落危険性には定性的に傾向があると認識している。

そこで本検討では、定性的な判断となっているひび割れのはく落危険性評価を、目視によるひび割れの幅や長さなどの形状から、はく落の危険性を定量的に評価する手法を提案することを目的とした。実験ではトンネル点検における代表的なはく落危険性のある事象を参考として、コンクリートの骨材最大寸法と、発生するひび割れの形状の関係、およびひび割れ幅ごとのせん断強度の関係を整理した。

2. 実トンネルにおけるはく落危険性のある事例

覆工コンクリートには、地山の変位に伴う外力に起因するひび割れや、乾燥収縮に伴うひび割れなど様々なひび割れが見られるが、はく落に至る危険性の高い事例としては、ひび割れによってブロック状となった箇所や、目地部の三日月状のひび割れの進展によるものが代表的な事例と認識している。

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国（株）土木技術部 土木技術課（正会員）

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国（株）土木技術部 土木技術課（正会員）

*3 愛媛大学 生産環境工学専攻環境建設工学コース准教授、Ph.D（正会員）

*4 香川高等専門学校 建設環境工学科准教授 博士（工学）（正会員）

2.1 ひび割れにより独立したブロック状のはく落事例

地山の変位などによって、ひび割れが発生する場合、必ずしもコンクリートの物性が脆弱な箇所には発生するのではなく、応力が集中する場所には発生する。このような箇所では、覆工コンクリートに局所的なせん断応が発生し、ひび割れによってブロック状となったコンクリート片は、はく落の危険性が高い。また、ひび割れの周辺には写真-1のような、局所的なコンクリートのはく離が発生するケースが多く見られ、これらもはく落に至る危険性が高いと認識している。

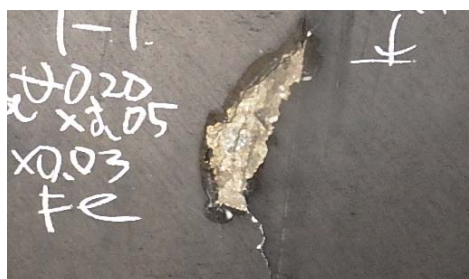


写真-1 ひび割れ近傍のはく落事例

2.2 目地部の三日月状のひび割れのはく落事例

写真-2 は目地部のはく離事例である。このはく離のひび割れの目視形状は平滑で、ひび割れ面に粗骨材が見られないことから、覆工コンクリートの打設時の材料分離によりモルタル分が集中した箇所と推定される。目地部は、覆工コンクリートの温度変化による応力の集中などが懸念されることから、特にはく落に対して注意が必要と認識している。



写真-2 目地部のはく離事例

3. ひび割れの内部進展形状とせん断強度の関係

覆工コンクリート面には、走行車両の風圧や、振動、トンネル内の温度変化による応力、乾燥収縮による応力、

地山変位による応力など様々な力が作用するとされる。発生したひび割れは、ひび割れ面が密着したものから幅2mm以上の大きなものまで様々であるが、最終的には上記のような外力の繰り返しにより、ひび割れが進展することによってはく落に至ると考えられる。なお、ひび割れ面のせん断強度は、津野らの研究²⁾で、ひび割れ面の凹凸が大きいほど、噛み合わせの効果によりはく落しづらいとされている。

実験では、前述の代表的なはく落危険性のある事例を想定して、せん断強度試験を行った。目地部のひび割れは、形状が平滑で、目地部以外のひび割れは蛇行する傾向があることから、材料分離による粗骨材の最大寸法がひび割れの目視形状に大きく影響すると考えた。そこで、最大寸法の異なるコンクリートで、ひび割れ面の目視形状とひび割れ面の三次元形状を比較し、せん断強度を計測することでその関係性を整理した。

3.1 せん断強度試験方法

(1) 供試体の作製

目地部のコンクリートは材料分離を起こしていると仮定し、粗骨材を配合どおりに含む供試体と、粗骨材を含まない供試体を作製した。粗骨材を含む供試体では、高速道路のトンネル覆工コンクリートで標準的に使用される設計基準強度18N/mm²の配合とした(表-1)。粗骨材の最大寸法は40mmと20mmの2種類とし、40mmの粗骨材4020には砂岩、20mmの粗骨材2005には石灰岩を使用した。粗骨材を含まない供試体(最大寸法5mm)は、粗骨材を抜いて配合設計を行うのではなく、骨材分離を想定して、最大寸法20mmの配合を、練り混ぜ後に5mm

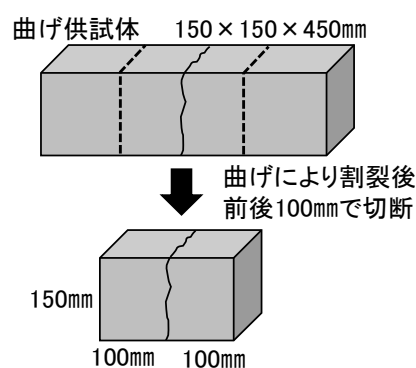


図-2 供試体概要

表-1 供試体に用いたコンクリートの配合

組骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
40	15	64.8	4.5	48.4	148	228	938	1002	1.370
20	15	63.7	4.5	50.2	158	248	951	961	1.490

ふるいでふるい、通過したモルタル分で供試体を作製した。供試体は、図-2のように、曲げ供試体を作製し、四点曲げ試験を行い、中央部を割裂したのち、割裂面の前後を切断し、せん断試験供試体とした。

(2) ひび割れ面の計測

割裂面の形状計測には光切断法を用いた（図-3）。計測対象にレーザーマーカで直線光を照射し、直線光の形状を斜めに配置したカメラにより撮影することで、形状を計測する手法である。図-4は光切断法を用いて取得した割裂後の供試体の断面の三次元形状計測例である。せん断軸方向、軸直角方向のサンプリング間隔は和田らの研究³⁾を参考に1.0mmとした。図-4の左側が覆工コンクリート表面となるため、図の左側のラインの断面形状をひび割れの目視形状と定義する。

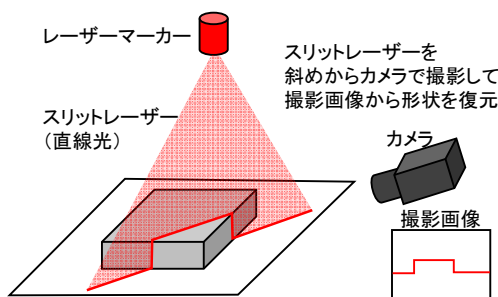


図-3 光切断法概念図

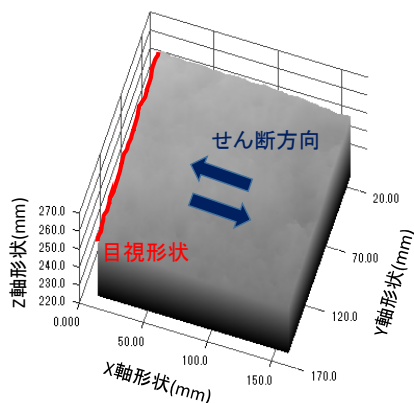


図-4 断面形状例

(3) せん断強度試験

せん断強度の試験は、伊藤らの研究⁴⁾を参考に実験を行った。治具を製作しせん断とともに発生する側方への変位を鋼材で拘束して試験を行った（図-5）。治具の支圧板と拘束板の間にローラーを配置することにより、治具の摩擦がせん断強度に影響しないようにした。せん断強度試験では、ロードセルの荷重と、鉛直変位を記録した。载荷速度は万能試験機により制御し、全ての供試体で0.1mm/sとした。

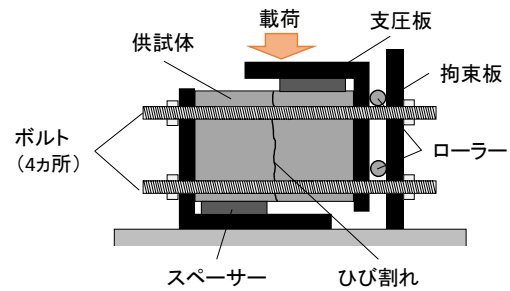


図-5 せん断試験概要

表-2 せん断強度試験条件

配合条件	ひび割れ幅	供試体個数
骨材最大寸法 40,20,5mm	幅=0mm（密着状態） 幅=1,2mm	各3個

せん断試験では、実際のひび割れ幅を想定して、割裂面が自重程度の拘束力で密着した状態、0mm、1mm、2mmの3種類でせん断強度試験を実施した。なお、ひび割れ幅の設定は、ひび割れ密着状態では、供試体の割裂面を密着させ、拘束板を固定するボルトを手締めし、再度ガタツキや緩み無いうように拘束した。ひび割れ幅1mm、2mmではシックネスゲージを4箇所差し込んだ状態で同様にガタツキが無いことを確認して手締めを行い拘束した。試験条件を表-2に示す。なお、せん断試験の実施時のコンクリートの材齢は36日、圧縮強度は、40mmが18.9N/mm²、20mmが20.0N/mm²、5mmが18.9N/mm²であった。

(4) ひび割れ形状の評価

ひび割れの目視形状を定量評価するため、形状の特徴を数値化する必要がある。そこで、ひび割れの目視形状を、式(1)（図-6）の蛇行指標を用いて数値化した¹⁾。なお、ひび割れの大きな湾曲により、式(1)の蛇行指標が過大とならないよう。前処理として近似曲線を求め（図-7）、差分して湾曲の影響を除去（図-8）した後に蛇行指標を算出した。なお、本検討における供試体の断面の大きさ150mmであるため、近似曲線は、単純な凹凸があると仮定して、二次曲線を採用した。

$$\text{蛇行指標 (mm}^2/\text{mm)} = A/L \quad (1)$$

A 凹凸面積 (mm²)

L ひび割れ基線長 (mm)

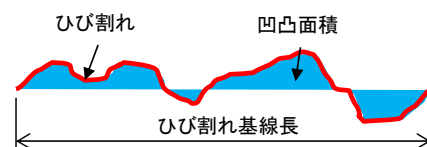


図-6 蛇行指標評価模式図

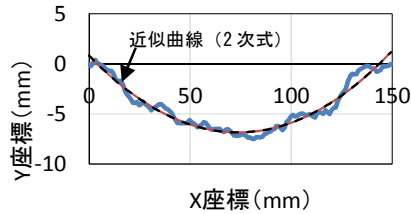


図-7 ひび割れの湾曲例

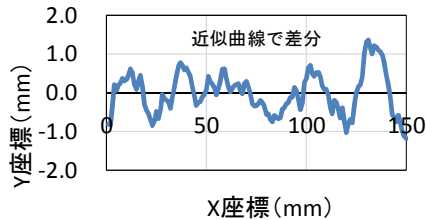


図-8 ひび割れの湾曲補正後の例

(5) 割裂面のひび割れ進展形状

図-9に粗骨材の最大寸法が5mmと40mmの割裂後の表面形状を示す。供試体を曲げにより、コンクリート表面に対して90°方向に割裂した場合、粗骨材が大きいほど、割裂面の表面積は大きくなる傾向が見られた。図-10は、最大骨材ごとのひび割れ面の表面積の分布を示した図である。エラーバーの先端は最大最小値を示し、箱の上下端および中央線は、各々75%, 25%, 中央値を示す。このように、骨材の最大寸法が大きくなると表面積が大きくなり、粗骨材の有無によって表面積が明らかに異なる結果となった。

3.2 セン断強度試験結果

図-11にせん断強度試験の結果を示す。なお、本検討

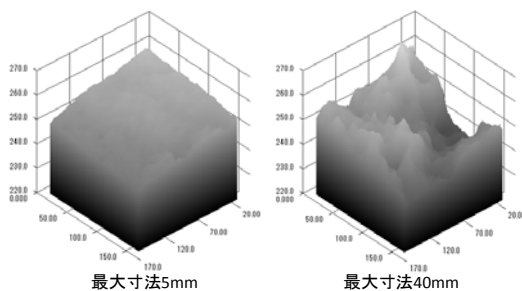


図-9 曲げによる割裂表面形状

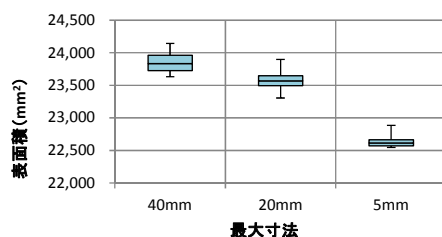


図-10 割裂断面の表面積分布

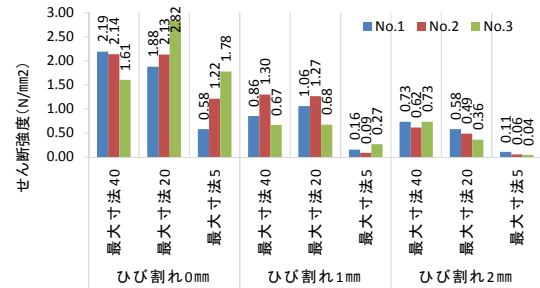


図-11 各供試体のせん断強度

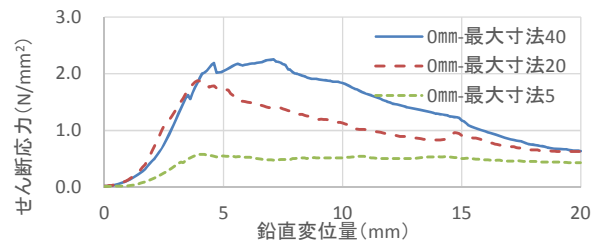


図-12 ひび割れ0mmのせん断応力と変位の関係

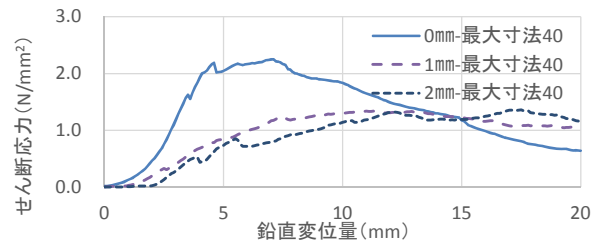


図-13 最大寸法40mmのせん断応力と変位の関係

においては、せん断強度を変位量5mm以下の最大せん断応力と定義した。ひび割れ幅が大きくなるにつれてせん断強度が低下する傾向が見られ、粗骨材を含む供試体はせん断強度が高くなる傾向が見られた。

(1) 最大寸法の影響

図-12に、ひび割れ密着状態、ひび割れ幅0mmの各骨材寸法のせん断応力と変位の関係の代表例を示す。せん断応力が降伏する変位量は、骨材に関わらず約4mmとなり、せん断強度は、最大寸法40mmがもっとも高くなった。

(2) ひび割れ幅の影響

最大寸法40mmのひび割れ幅とせん断応力と変位の関係を図-13に示す。ひび割れ幅が1mm以上になると、せん断強度が、約1/2程度に低下し、最大せん断応力が発現する変位量が大きくなった。これは、ひび割れに隙間ができると、初期のひび割れ面の摩擦によるせん断強度の上昇が期待できないこと、ひび割れ面の凹凸部分の少ない接触面積に応力集中が生ずるため、面の摩擦で対抗する場合と比較して、せん断強度が小さくなったため

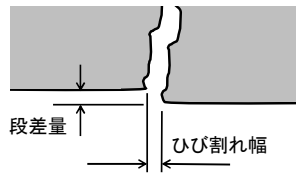


図-14 段差量とひび割れ幅の関係

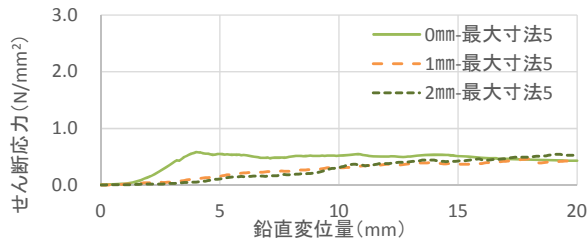


図-15 最大寸法 5mm のせん断応力と変位の関係

と考えられる。

また、ひび割れ幅が大きくなると、せん断応力の立ち上がりに、ひび割れ幅相当の変位が必要となっている。これは、図-14のように、ひび割れ幅が大きいと、変位すなわち、ひび割れ直交方向のコンクリート表面の段差が大きくなしないとコンクリートにせん断応力は発生しないことを示している。

また、図-15は、最大寸法 5mm の場合のひび割れ幅ごとの、せん断応力と変位の関係であるが、ひび割れ幅が大きくなると、凹凸が少ないため、せん断強度の上昇は、ほとんど期待できない結果となった。

(3) ひび割れ面の形状とせん断強度の関係

図-16はひび割れの面の三次元形状計測結果から、凹凸面を評価するため、ひび割れ面の表面積を求め、せん断強度の関係を示した図である。ひび割れ面の凹凸が大きくなると、表面積が大きくなる。この図では、表面積が大きいほど、せん断強度が高い傾向を示している。また、ひび割れ幅ごとにグループ化すると、表面積が同じ

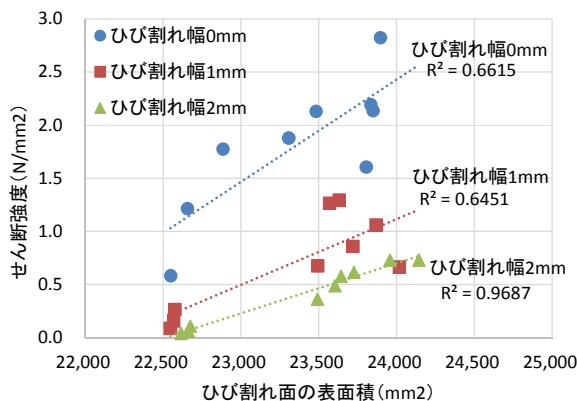


図-16 表面積とせん断強度の関係

であっても、せん断強度に差があることが分かる。

このことから、せん断強度はひび割れ幅の無い密着した状態では、ひび割れ面の表面積の摩擦によって強度を発現しており、ひび割れ幅が大きくなると、ひび割れ面の凹凸の部分的な噛み合わせによって強度を発現していると考えられる。

(4) はく落事象の発生原因の推定

ひび割れでブロック状となったコンクリート片の自重とせん断強度と比較することにより、はく落の危険性を評価した。実験で最もせん断強度が小さかった、最大寸法 5mm、ひび割れ幅 2mm のせん断強度 0.041N/mm^2 を用い、コンクリートの厚さ 300mm、ブロックの直径 300mm の押しぬきせん断として試算した。その結果、コンクリートの円柱ブロックの自重 0.49kN に対して、せん断抵抗力は 11.59kN となり、大幅にせん断抵抗力が自重を上回る結果となった。このことから、ひび割れでブロック状となった覆工コンクリートのはく落は、自重によってのはく落せず、外力の影響による応力が作用する場合に発生するものと考えられる。

また、コンクリート表面に対して浅い角度のはく離ひび割れが発生した場合には、せん断抵抗力が発揮されず、はく落危険性が高まると考えられる。写真-4は、最大寸法 40mm、ひび割れ密着状態の試験前後の写真であり、前述の実トンネルでの局所的なはく離事例（写真-2）と状態が類似している。せん断により破壊が進行すると、試験前のひび割れから枝分かれするように新たなひび割れが進展し、薄いはく落片に発展する事象が確認された。これは、内部の凹凸形状が図-17のように、部分的に突出しており、コンクリート内部に引っ張り応力を発生させることで、はく離ひび割れを発生させたと考えられる。

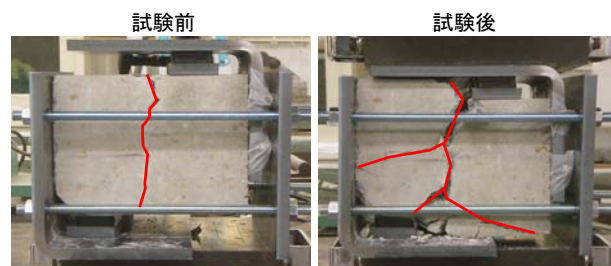


写真-4 せん断試験前後のはく落発生事例

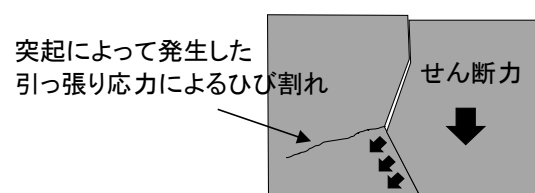


図-17 はく落概念図

(5) ひび割れ面の表面積と目視形状の関係

ひび割れ面が滑面の場合、凹凸面の噛み合わせ効果が、発揮されにくいこと、実トンネルのはく落事例から目地部のはく離ひび割れ面は滑面となりやすいことから、ひび割れ部の骨材の有無に着目して、はく落危険度を評価した。

図-18 にひび割れ面の表面積とコンクリート表面の目視形状の蛇行指標の関係を示す。ひび割れ内部の形状と、コンクリート表面のひび割れの目視形状には相関が見られ、材料分離により粗骨材の無い状態になった箇所、最大寸法 5mm の蛇行指標は、全て 1.0 以下となった。このことから、蛇行指標が 1.0 以下のひび割れは、骨材分離を伴うはく落危険性の高い箇所と考えられる。

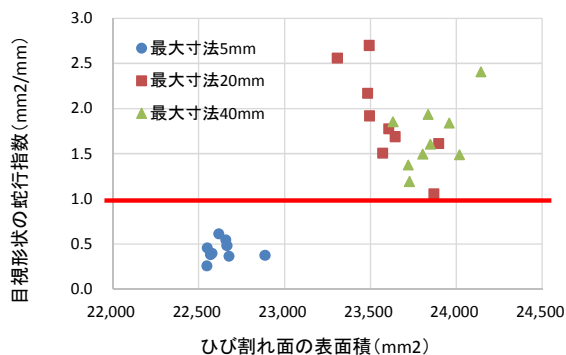


図-18 ひび割れ面の表面積と蛇行指標の関係

4. まとめ

本検討により得られた知見を以下に記す。

- (1) ひび割れの目視形状は、内部のひび割れ進展形状と相関があり、骨材の最大寸法の影響が大きい。骨材分離によって粗骨材が含まれない場合は、ひび割れの目視形状、進展形状とも、蛇行指標が著しく低下する。
- (2) ひび割れ部分で負担できる見かけのせん断強度は、ひび割れが密着している状態がもっとも大きく、その強度はひび割れ面の表面積に比例する。
- (3) ひび割れ幅が大きい場合、ひび割れ面の凹凸の噛み合わせによりせん断強度が発現すると推定され、ひび割れが密着している状態よりも最大せん断強度が発現する変位量は大きくなる。
- (4) ひび割れが密着していない場合、ひび割れ面の変位によってコンクリートにせん断応力が発生するの

は、ひび割れ幅以上に、ひび割れ直交方向に段差が発生した場合のみである。よって乾燥収縮などによって発生したひび割れは、ひび割れ幅が大きくともひび割れ表面の段差がひび割れ幅に達しない場合、せん断応力が発生せず、はく落の危険性は低いと考えられる。

- (5) 目視形状の蛇行指標が 1.0 未満のひび割れは、ひび割れ面の表面積も小さく、たとえ密着した状態でもせん断強度が小さい値を示す。
- (6) ひび割れがコンクリート面に対して 90° に近い角度で進展する場合、はく落ブロックの自重に対して十分なせん断強度を有しておりはく落の危険性は低い。
- (7) ひび割れに沿って発生したはく離箇所は、せん断抵抗力が発揮できないことが想定されるため、はく落に至る危険性が高い。
- (8) 蛇行指標が 1.0 未満の場合、ひび割れ面のコンクリートは材料分離により粗骨材を含まない状態になっている可能性がある。

今後の課題として、ひび割れを発端として、はく落に至るまでの期間を明確にするためには、ひび割れを進展させると考えられる走行車両の振動などの外力の影響を定量化することが必要と考える。

参考文献

- 1) 山本達哉, 林詳悟, 橋本和明, 松田靖博, 徳田尚器, 村上豊和: 光切断法を用いた表面形状データによるトンネル覆工コンクリート評価への提案, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 講演番号 III-361, 2017.9
- 2) 津野 究, 吉川和行, 西山達也, 小島芳之, 岸田潔: トンネル覆工コンクリート片の剥落に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F, Vol.65 No.2, 196-208, 2009.5
- 3) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: 光切断法によるコンクリート亀裂面形状特性の 3 次元分析手法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No.2, 1996.6
- 4) 伊藤哲男, 馬場弘二, 城間博通, 吉武 勇, 中川浩二: トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ界面のせん断強度実験, 土木学会論文集 No. 777/VI-65, 15-21, 2004. 12