

トンネル覆工コンクリート片の剥落の評価手法

津野 究* 小島 芳之*

Estimation Method of Falling of Concrete Piece from Tunnel Lining

Kiwamu TSUNO Yoshiyuki KOJIMA

This paper describes a method which quantitatively evaluates the falling of concrete pieces from tunnel linings, comparing the shear stress acting on crack surfaces with the shear capacity. The shear capacity of cracks of the various width, inclination angle, and roughness are investigated based on a double shear test simulating the falling of concrete pieces and on a simulation method, whose applicability is also described in this paper. Core samples comprising the crack surfaces are obtained at actual tunnels and crack surfaces roughness and its distribution are grasped. The resisting capacity against the falling of concrete pieces is estimated based on the proposed method under the situation assumed at the actual tunnels.

キーワード：トンネル覆工，剥落，ひび割れ，せん断強度，ラフネス

1. はじめに

平成11年に発生した鉄道トンネルの剥落事故¹⁾を契機に、覆工コンクリート片の剥落が着目されるようになった。現在鉄道トンネルの維持管理においては、目視によって得られる複数のひび割れが、繋がって閉合している、あるいは交差・平行している等のひび割れの形態と打音調査（覆工をハンマー等で打撃する調査）の結果から剥落に対する健全度を判定している。

ここで、覆工表面のひび割れの幅は大小様々であるが、ひび割れの閉合が確認された場合でも、幅が大きいほど剥落の危険性が大きくなると類推される。しかし、現行の健全度判定手法は、複数のひび割れが閉合した場合に剥落の危険性が高くなるといった定性的な考え方に基づいており、ひび割れ幅などを考慮して定量的に剥落に対する安全性を評価する手法が示されていない。これまで、道路トンネルにおいて、山岳トンネルの無筋覆工コンクリートに発生しているひび割れの形態を調査し剥落に関与する要因を整理した例²⁾や、ひび割れ部分をコア採取して一面せん断試験によりせん断強度を把握した例³⁾があるが、ひび割れ面の凹凸の程度や幅と剥落に対する安全性との関係も含めて、剥落を定量的に評価する方法まで提案されていないのが現状である。

以上を踏まえて、剥落を模擬した二面せん断試験を行い、これをシミュレーションできる解析手法を開発し、トンネル覆工片の剥落に対する安全性を定量的に評価する手法を提案した⁴⁾ので報告する。

2. 覆工コンクリート片剥落のモデル化

山岳トンネルの無筋コンクリート覆工の天端部に、図1に示すようなひび割れが閉合した部分（幅 B 、奥行き D 、厚さ H ）があり、この部分が剥落することを想定して、覆工コンクリート片の剥落現象をモデル化した。ここで、単位体積当たりの重量を γ 、閉合部分に作用する単位面積当たりの外力を f とすると、覆工片には自重（ γHBD ）と外力（ fBD ）が作用することになる。この場合、図中の網掛けしたひび割れ面に作用するせん断応力 τ_a は、網掛け部分の面積が $2H(B+D)$ であることから、次式で表せる。

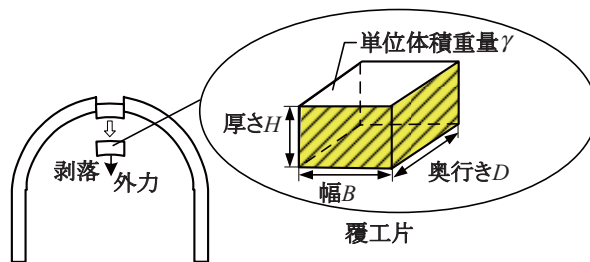


図1 覆工剥落の模式図

$$\tau_a = \frac{\gamma BD}{2(B+D)} + \frac{fBD}{2H(B+D)} \quad (1)$$

もし、ひび割れ面が滑らかで全く凹凸が無い場合は、図1の覆工片は落下する。しかし、ひび割れ面には凹凸があるため、これによりせん断抵抗力が発生して覆工片の落下に抵抗する。そこで、式(1)で計算できる「ひび割れ面に作用するせん断応力 τ_a 」が「ひび割れ面のせん断抵抗力」より大きくなると覆工片が剥落すると仮定し

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

特集：構造物技術

て、「せん断抵抗力」を「せん断応力 τ_a 」で除した値を剥落に対する安全率として評価することにした。

3. 二面せん断試験

3.1 試験概要

覆工コンクリート片の剥落に対する安全性を定量的に評価する上で、ひび割れ面の凹凸によるひび割れ面のせん断抵抗力を把握することが必要となる。そこで、図2に示すような2面のひび割れ面を有する供試体を作製し、図3に示す荷重装置を用いて剥落片に相当する真ん中のブロックを載荷することにより、覆工コンクリート片の剥落を模擬した。

ひび割れ面の凹凸は1種類とし、粗骨材最大寸法20mmの無筋コンクリート梁（長さ2000mm、幅250mm、高さ500mm）のせん断試験で得られたせん断ひび割れを型取りし、これを複製した。供試体はモルタルで作成し、セメント、砂、水を重量比1:2.8:0.6で配合した。試験時のモルタルの一軸圧縮強さは36N/mm²、静弾性係数は2.50 × 10⁴ N/mm²であった。

試験は、鉛直荷重用油圧ジャッキにより変位制御（0.015 mm/sec）で加圧部を載荷することにより行った。表1に示すように、ひび割れの幅やひび割れ面の傾斜角度を変えた7ケースの試験を行った。なお、ひび割れの幅およびダイレーション角を、図4のように定義した。

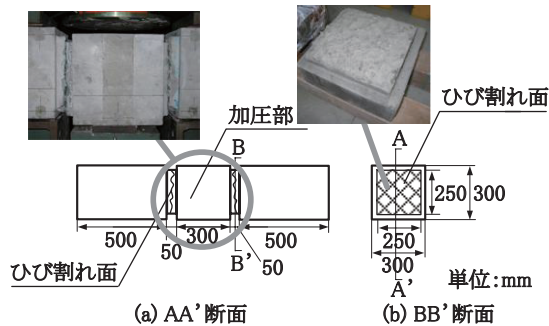


図2 二面せん断試験の供試体

3.2 試験結果

試験結果として、せん断変位に伴う水平拘束力、せん断応力および目開き量が得られるが、ここでは実験結果の内、せん断変位とせん断応力の関係を図5に示す。せん断応力は、せん断変位とともに大きくなり、せん断がある程度進んだ段階で最大値を示し、これ以降は変位が増加しても横ばいになるか低下する傾向を示している。また、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、せん断応力の最大値が小さくなり、せん断抵抗力が低下することがわかった。さらに、ひび割れ面に角度（テーパ）がついた場合、その傾斜角度が大きくなるほどせん断抵抗力が低下することも把握できた。

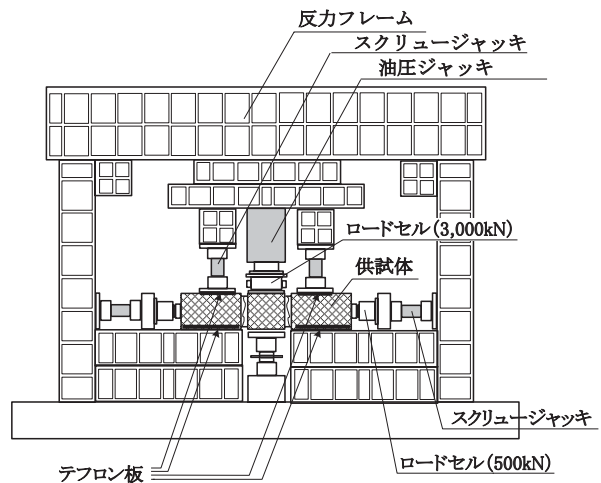


図3 二面せん断試験で用いた荷重装置の概要

表1 試験ケース

No.	ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ面の傾斜角度 (°)
1	0	テーパ無し (0)
2	1	
3	2	
4	3	
5	4	
6	0	5
7	0	10

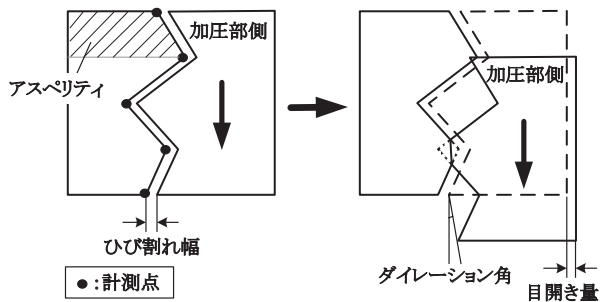


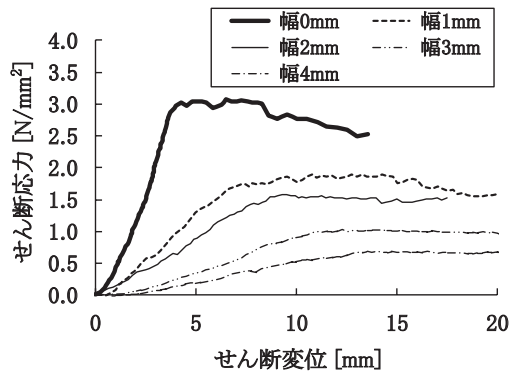
図4 ひび割れ幅およびダイレーション角の定義

4. 覆工コンクリート片剥落のシミュレーション

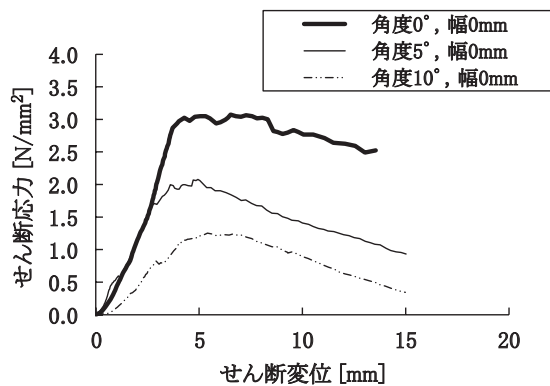
4.1 シミュレーション概要

せん断抵抗力は、ひび割れ面の凹凸形状や材料特性などによっても変化すると考えられる。そこで、ひび割れ面の凹凸形状や材料特性が異なった場合のせん断抵抗力を把握するために、ひび割れ面のせん断過程をシミュレーションする手法について検討した。ここでは、岩盤不連続面のせん断挙動の解析手法⁵⁾を応用し、ひび割れ面の凹凸形状、コンクリートの強度、ひび割れ幅が分かればせん断抵抗力が計算できる手法を提案する。

1ステップにつき1mmずつせん断変位を増加させ、二面せん断試験のシミュレーションを行った。また、二面



(a) ひび割れ幅を変えた場合の結果の比較



(b) ひび割れ面の傾斜角度を変えた場合の結果の比較

図5 二面せん断試験の結果

せん断試験の2面のひび割れ面のうち、1面に作用する水平拘束応力 σ_n およびせん断応力 τ を対象として解析を行った。

図6に、ステップ*i*における解析フローを示す。本手法は、以下の考えに基づいている。

- 1) せん断過程において、拘束圧が接触するアスペリティ（計測点間の凹凸）に作用し応力が集中する。
- 2) 接触面積はダイレクション角 θ_i （せん断および目開き量により供試体が動く方向とせん断方向との成す角度）と凹凸形状に依存することから、ダイレクション角を仮定すれば接触する部分に集中する応力が決定できる。
- 3) 接触するアスペリティに集中する不連続面に直交する方向の力 P が、一軸圧縮強さと等しくなるように、ダイレクション角の値を決定する。

ステップ*i*におけるダイレクション角を θ_i と仮定し、図6のように接触するアスペリティを抽出した場合、この接触するアスペリティに作用する水平拘束応力 σ_{ni}' は次式で計算できる。

$$\sigma_{ni}' = \sigma_{ni} \times N / N_i \quad (2)$$

ただし、

σ_{ni} ：ステップ*i*における水平拘束応力

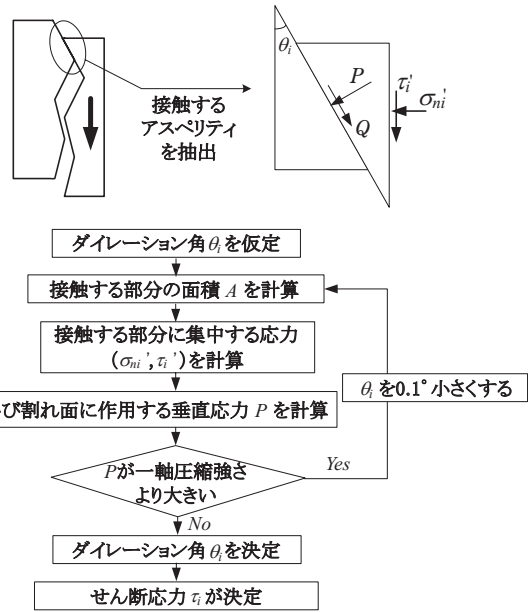


図6 ステップ*i*における解析フロー

N ：アスペリティの総数

N_i ：ステップ*i*における接触するアスペリティの数

ここで、一定剛性下のせん断を仮定し、目開き量に拘束に関するばね定数 K を乗じた水平拘束応力 σ_{ni} が作用すると仮定する。

$$\sigma_{ni} = K \left(\Delta x \sum_{k=1}^{i-1} \tan \theta_k + \Delta x \tan \theta_i \right) \quad (3)$$

ただし、

K ：拘束に関するばね定数

Δx ：計測間隔（ここでは1.0mm）

θ_k ：ステップ*k*で決定したダイレクション角

θ_i ：仮定したダイレクション角

つぎに、この接触するアスペリティに作用する水平拘束応力 σ_{ni}' およびせん断応力 τ_i' は、図6のように不連続面に垂直方向の力 P と平行な力 Q に分解できる。 P および Q は、不連続面の長さが $1/\cos\theta$ であることを考慮に入れると、次式で表せる。

$$P = (\tau_i' \sin \theta_i + \sigma_{ni}' \cos \theta_i) \times \cos \theta_i \quad (4)$$

$$Q = (\tau_i' \cos \theta_i - \sigma_{ni}' \sin \theta_i) \times \cos \theta_i \quad (5)$$

不連続面上では、次式に示す釣り合い式が成立すると仮定する。

$$Q - P \tan \phi_b = 0 \quad (6)$$

ただし、

特集：構造物技術

ϕ_b ：材料の基礎摩擦角

式(4)、(5)を式(6)に代入すると

$$\tau'_i = \frac{\sigma'_{ni} (\sin\theta_i + \cos\theta_i \tan\phi_b)}{\cos\theta_i - \sin\theta_i \tan\phi_b} \quad (7)$$

となり、これを整理すると次式のような σ'_{ni} と τ'_i の関係が導出される。

$$\tau'_i = \sigma'_{ni} \tan(\phi_b + \theta_i) \quad (8)$$

さらに σ_{ni} と σ'_{ni} の比と τ_i と τ'_i の比が等しいことを考慮に入れると、次式が成り立つ。

$$\tau_i = \sigma_{ni} \tan(\phi_b + \theta_i) \quad (9)$$

ステップ*i*では、まず、ダイレクション角 θ_i を仮定し、式(2)を用いて σ'_{ni} を求める。つぎに、式(8)より τ'_i を計算し、 σ'_{ni} および τ'_i を式(4)に代入することにより不連続面に作用する垂直方向の力*P*が求められる。ここで、*P*と一軸圧縮強さを比較し、*P*が一軸圧縮強さより大きければダイレクション角を $\theta_i = \theta_i - 0.1^\circ$ と仮定し直す。そして同様の手順を繰り返して θ_i を 0.1° ずつ小さくしていき、*P*が一軸圧縮強さ以下になったときの θ_i をこのステップにおけるダイレクション角として決定する。

まず、完全にかみ合った状態（ひび割れ幅が0mmのケースのステップ1）では、ダイレクション角以上の傾斜角をもつアスペリティが接触し、そこに応力が集中すると仮定できる。

一方、完全にかみ合っていない場合、全てのアスペリティに関して*Weight* (*W*) を計算し、アスペリティごとに計算した*Weight*の総和を取ることで接触するアスペリティの数を計算する。まず、計測点 $(k-1, j)$ においてスタブ部側供試体と加圧部側供試体が接触する場合、傾斜角がダイレクション角 θ_i より大きい場合は、接触すると考え $W = 1$ とする。小さい場合は、接触しないと考え、 $W = 0$ とする。計測点 $(k-1, j)$ においてスタブ部側供試体と加圧部側供試体が接触しない場合は、図7に示すように加圧部側供試体の $Y_i(k-1, j)$ から傾き θ_i の直線を引き、スタブ部側供試体との交点を Transit Contact Point (TCP) として、TCPと $X_i(k, j)$ の間が接触すると考え、*Weight* (*W*) を次式で計算する。

$$W = L / \Delta x \quad (10)$$

ただし、

L：TCPの*x*座標と*x* = *k*の距離

Δx ：計測間隔（ここでは1.0mm）

なお、TCPが $X_i(k-1, j)$ と $X_i(k, j)$ の間にない場合は、 $W = 0$ とする。

各ステップ終了後には、加圧部側供試体をステップ*i*で決定したダイレクション角で1.0 mmせん断方向に移動させ、次のステップに進む手順となる。

今回、二面せん断試験と同じ凹凸形状のものでシミュレーションを行い、せん断応力 τ 、水平拘束応力 σ_n および目開き量を求めた。水平拘束応力の算出にあたっては、実験より得られた目開き量と水平拘束応力の関係をもとに、式(3)中の拘束に関するばね定数*K*を1.5 N/mm³とした。なお、解析では、二面せん断試験で実施していないひび割れ幅5mm～8mmについても計算している。

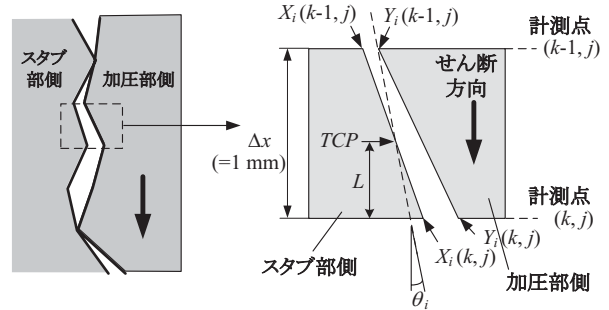
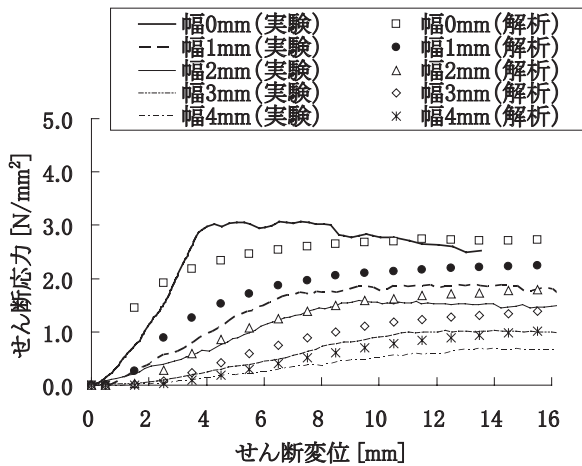


図7 WeightおよびTCPの概念

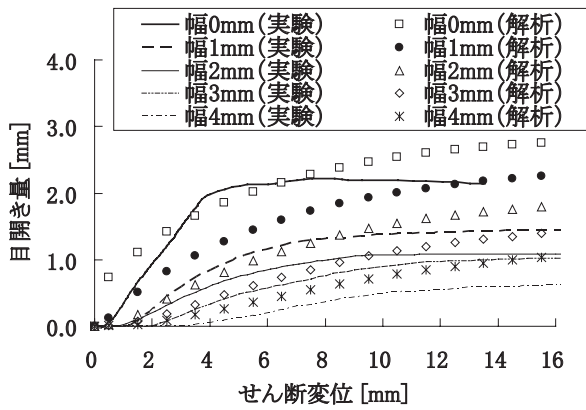
4.2 シミュレーション結果

図8に、実験と解析を比較した結果を示す。解析より得られたせん断応力は、せん断変位とともに大きくなるが、最大せん断応力を示した後は増加せず横ばいになっており、実験と同傾向を示している。また、ひび割れ幅が大きくなるにつれてせん断応力が小さくなる傾向を示している。水平拘束応力および目開き量についても、実験結果と同様に、ひび割れ幅が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示している。

つぎに、解析より得られたひび割れ幅とせん断抵抗力の関係、実験結果と合わせて図9に示す。ここでは、最大せん断応力をせん断抵抗力としている。図より、解析結果と実験結果が概ね対応しており、シミュレーションによりひび割れ幅とせん断抵抗力の関係が概ね予測できることが確認できる。また、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、ひび割れ面のせん断抵抗力が低下することがわかった。このほか、ひび割れ面の傾斜角度を変えた場合の解析も行っており、実験結果とおおむね対応していることが確認できたほか、傾斜角度が大きくなるにつれて、ひび割れ面のせん断抵抗力が低下することがわかった。



(a) せん断変位—せん断応力の関係



(b) せん断変位—目開き量の関係

図8 実験結果と解析結果の比較

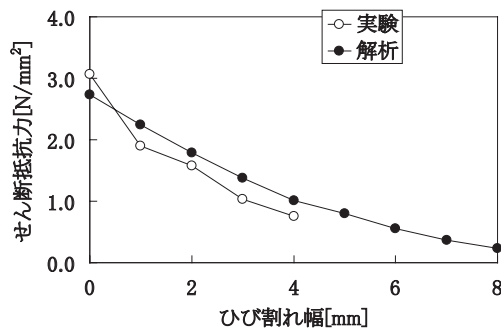


図9 ひび割れ幅とせん断抵抗力の関係



図10 コアボーリングにより採取したひび割れ面

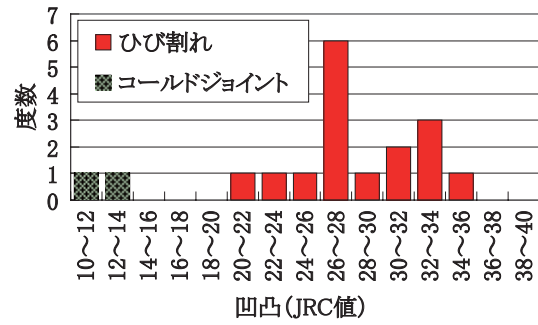


図11 実トンネルにおけるひび割れ面の凹凸

5. 実トンネルを対象とした試算例

5.1 実トンネルのひび割れ面の凹凸形状

鉄道トンネルの無筋覆工コンクリートからコア採取したひび割れ面(図10)の凹凸を、レーザー変位計を用いて0.5mm間隔で計測し、岩盤工学で不連続面の凹凸を示す指標として使われるJRC値⁶⁾を計算した結果を図11に示す。ここでは、既存の手法⁷⁾を用いて、JRC値を求めた。JRC値が大きいほど凹凸面が粗いことを意味するが、岩盤の不連続面を対象とした既往文献⁶⁾にはJRC値が20以下について示されている。

これより、ひび割れ面の凹凸のJRC値は、20~36の範囲に分布し、平均値は28.1であった。二面せん断試験におけるひび割れ面のJRC値は29.0であり、おおむね一致している。一方、コールドジョイント面のJRC値はひび割れ面より小さく、せん断抵抗力が小さい結果となっている。過去にコールドジョイントの存在が剥落に大きく影響した事例¹⁾もあるが、このようにコールドジョイントとひび割れの閉合に起因する剥落については、通常のひび割れの閉合による剥落とせん断に対する性状が異なることに留意する必要がある。

5.2 実トンネルを仮定した剥落安全性の試算

過去に鉄道トンネルにおいて天端部のコンクリート片(幅250cm, 奥行き300cm, 厚さ45cm)が剥落した事例¹⁾を参考に、同程度の大きさの剥落片が天端部から自重および列車通過に伴う風圧5kN/m²(新幹線トンネルにおいて、新幹線が270km/hで走行したときの風圧に相当)により剥落することを想定して、ひび割れ面に作用するせん断応力を試算した。式(1)を用いて試算した結果、せん断応力は、0.024 N/mm²であった。仮に幅1m, 奥行き1m, 厚さ5cmの薄型のコンクリート片が剥落すると想定しても、ひび割れ面に作用するせん断応力は0.031 N/mm²である。そこで、ひび割れ面に作用するせん断応力を0.04 N/mm²として、剥落に対する安全性を試算した。

覆工コンクリート片の剥落に対する安全性を示す指標

特集：構造物技術

として、ひび割れ面のせん断抵抗力をひび割れ面に作用するせん断応力で除した値を剥落に対する安全率と定義して試算した。一軸圧縮強さを 15 N/mm^2 および 36 N/mm^2 、ひび割れ面の傾斜角度を 30° として得られたひび割れ幅と剥落に対する安全率の関係を図12に示す。一軸圧縮強さが 36 N/mm^2 の場合ではひび割れ幅が 4 mm 以上、一軸圧縮強さが 15 N/mm^2 の場合では 3 mm 以上になると安全率が1を下回る結果となっている。これより、試算例の場合、ひび割れ幅 3 mm 以上のひび割れが閉合した場合、剥落の危険性が高くなると判断できる。このように、ひび割れ面の凹凸形状、コンクリートの強度、ひび割れ幅が分かれば、トンネル覆工片の剥落に対する安全性が定量的に評価できるようになった。

なお、試算例は大雑把な仮定で行った一例であるが、適用に当たっては検討条件を適切に設定することが重要となる。また、試算例では、自重および列車通過に伴う風圧のみが要因で剥落することを想定しているが、覆工に地圧が作用した場合はひび割れ面に作用するせん断応力が大きくなるため、注意が必要である。

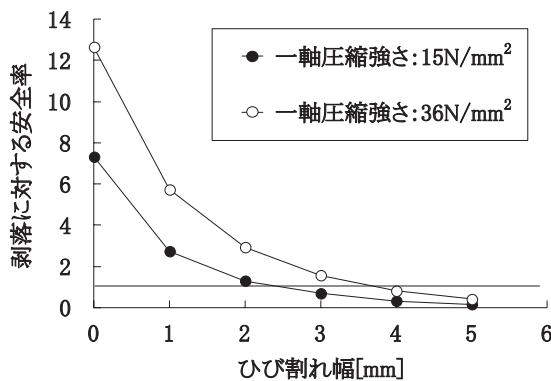


図12 剥落に対する安全率の試算結果の一例 (ひび割れ面の傾斜角度 30°)

6. まとめ

本研究では、覆工コンクリート片の剥落現象の定量化を目的とし検討を行った。まず、剥落現象をモデル化す

るとともに、剥落を模擬した二面せん断試験を実施した。また、ひび割れ面におけるせん断過程をシミュレーションできる手法を提案し、これを用いてひび割れ幅、ひび割れ面の傾斜角度、材料強度を変えた場合のせん断抵抗力について検討した。さらに、実トンネルのひび割れ面の凹凸形状を計測して粗さの程度を把握するとともに、ひび割れ幅と剥落に対する安全性との関係について試算例を示した。以上の成果を用いることにより、トンネル覆工片の剥落に対する安全性が定量的に評価できるようになった。

今後は、ひび割れ面の凹凸のデータを蓄積して精度を向上させていきたいと考えている。

提案した手法が、覆工片の剥落が発生した場合の原因究明はもとより、覆工に作用する力が大きくなると想定される場合の剥落に対する安全性を検討する場合などにも活用できるようにしていきたいと考えている。

文献

- 1) 旧運輸省：トンネル安全問題検討会報告書，pp.1-44，2000
- 2) 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のひび割れ形態調査による剥落危険性評価，土木学会論文集，No.763/VI-63，pp.87-93，2004
- 3) 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，pp.15-21，2004
- 4) 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，pp.196-208，2009
- 5) 岸田潔，津野究：摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化，土木学会論文集，No.680/III-55，pp.245-261，2001
- 6) Barton, N. , "Review of a new shear strength criterion for rock joints," *Engineering Geology*, pp.297-306, 1973.
- 7) Tse, R. and Cruden, D. M, "Estimating joint roughness coefficients," *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.303-307, 1979.