

トンネル覆工のひび割れ性状の 簡易評価に関する考察

砂金 伸治^{1*}・日下 敦¹・角湯 克典²・真下 英人¹

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
*E-mail:n-isago@pwri.go.jp

²非会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

現在，既設の道路トンネルにひび割れ等の変状が発見された場合，対策の必要性や対策の実施時期の判断は，主として過去の経験や実績に基づいた定性的な評価により行われている．今後，効率的に供用中の道路トンネルの維持や管理を行っていくためには，点検や調査を通じて得られるトンネルのひび割れ等の情報からトンネル構造の健全性を定量的に評価する方法の確立が必要である．本研究では，ひび割れの内容を模擬した覆工コンクリートに対してシュミットハンマーを用いた実験を行うことにより，ひび割れとうきやはく落の現象，および点検等における判定区分の関係を把握することを試みた．その結果，ひび割れの深さや入射角とシュミットハンマーの反発値には相関が見られる場合があり，より定量的にうきやはく落に関する状態を評価できる可能性があることが分かった．

Key Words : road tunnel, maintenance, inspection, lining, crack, Schmidt hammer test

1. はじめに

現在，道路トンネルの維持管理にあたっては，道路トンネル維持管理便覧¹⁾や道路トンネル定期点検要領(案)²⁾に基づいて点検や調査等が実施されている．点検や調査によりトンネルにひび割れ，うき・はく離，はく落，そして巻厚不足といった変状や構造的欠陥が発見された場合は，対策の必要性やその実施時期の判断を行うことになるが，それらは主として過去の経験や実績に基づいた定性的な評価により行われることが多い．

今後，財源等が制約される中で，効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには，点検や調査を通じてトンネルの変状の発生状況等に関する情報を的確に得る必要がある．また，その情報から工学的な根拠に基づいて，変状の発生原因をなるべく正確に推定し，変状状態に応じた適切な対策を実施することが重要となる．そのためには，変状の状況を客観的に判断し，トンネル構造の健全性を定量的に評価できる方法の確立が必要である．

現在の道路トンネルの定期点検において行われている方法の1つである「打音検査」は，点検用ハンマー等の定められた点検用具を使用して覆工コンクリートに人力によって打撃エネルギーを与え，打音区分として得られる清音および濁音といった反発する音によって，健全度

を判断すると同時に，覆工のうき・はく離を確認し，必要に応じてたたき落とし等の応急措置を行っている．点検結果に基づいた即座での判断や応急措置の実施は点検者に委ねられることも多く，その一方で打音検査によって得られた結果を定量化するための試み³⁾などもなされているが，その手法の適用範囲や得られた結果の解釈に時間等を要する点等が課題とされている．

トンネルで変状が発生する場合，初期の段階では構造の変形として現れるよりも先に覆工等にひび割れが発生することが多いと考えられ，ひび割れの性状に関する評価が重要な項目であると言える．しかし，ひび割れの発生は，温度応力や乾燥収縮といった材料や施工に起因する場合と外力によって発生する場合に大きく分けられると考えられているが，制約の多い点検等の実施下で目視やハンマーによる打音のみでひび割れの性状から変状の発生原因やトンネルの状態を即座に推定できるとは限らない．加えて，うき・はく離の発生は利用者被害を与える観点から，その発生を極力防止することが望まれるところであり，ひび割れとその発生している近傍の状態がなるべく簡便に把握できる手法の確立が望まれている．

打音検査に類似し，コンクリートに打撃エネルギーを与え，定量的な数値データが得られる試験方法のうち，簡便で汎用性が高い方法としてシュミットハンマー試験

がある。そこで、本研究では、トンネルの点検や調査時に行われるひび割れ等の観察や打音検査等から得られる情報に加えて、ひび割れの状態を簡易に評価できる手法に関する検討を行うために、覆工を模擬したコンクリートの供試体を使用して、従来行われている打音検査や目視による観察に加え、シュミットハンマー試験を実施し、変状の判定結果のさらなる定量化の可能性についての検討を行った。

2. 研究方法

(1) 実験の概要

本研究ではトンネルの覆工コンクリートの表面にひび割れが発生し、さらにそのひび割れがある角度を持って覆工の内部へ進展した状況下で、点検等を通じてひび割れやうき・はく離などの状態が定量的に評価できるかどうかの可能性を検討した。具体的には、覆工コンクリートの表面にひび割れが存在し、かつ内部にそのひび割れがある角度で進展している覆工を模擬したコンクリート供試体を用い、ひび割れが発生している面上で打音検査を実施した。加えて、これまでの点検や調査による結果との関連性を分析するために、文献⁹⁾に基づいて実施されている調査を供試体に対して行うことで、変状の程度の判定を実施した。さらに、シュミットハンマー試験を同一面上で実施してハンマーによる反発値を求めた。最後にこれらの結果の相互の関連性について検討を行った。

(2) 供試体および実験ケース

トンネルの覆工を模擬したコンクリート製の供試体の諸元は、矢板工法によって2車線道路トンネルが施工されたものを念頭に、覆工厚を50cmと想定し、形状は100cm×80cmの大きさとした。供試体の内部には覆工コンクリートに生じたひび割れを模擬した亀裂を含むこと

とした。表-1にコンクリートの配合を示す。

コンクリート供試体の作製は、予め成型した木製型枠にコンクリートを打ち込むことで行った。また、ひび割れを模擬する亀裂の作成は、厚さ0.2mmのテフロンシートにグリスを塗布して3枚に重ね、ピアノ線にて型枠内に固定し、その後にコンクリートを打ち込み、コンクリートが完全に硬化したのちに、そのテフロンシートを順次抜き取ることで亀裂を作り、ひび割れの発生を模擬した。また、別途強度管理や供試体の特性を把握するための一軸圧縮試験用のテストピースを作製した。

図-1に実験の供試体の概要、および表-2に実験ケースを示す。Case A～Cは覆工の表面でひび割れが完全に閉合し、さらにそのひび割れが進展して覆工の内部で連続した状態となり、コンクリートが完全にブロック化して浮いている状態を模擬したケースである。なお、実験上の制約から浮いている部分を供試体に載せる形とし、鉛直下方にシュミットハンマーや点検用ハンマーで打撃を加えた。また、Case 1～4は覆工の表面のひび割れが2方向から進展して内部で連続した状態になっているものの、覆工の表面で完全に閉合しておらず、ブロック化して浮いている状態とは判断できない供試体である。供試体は横向きにして、水平方向にシュミットハンマーや点検用ハンマーで打撃を加えた。さらに、Case 5～6は覆工の目地部に向かって発生したひび割れが進展した状況を模擬したものである。実験ケースでは供試体の表面に対して、ひび割れの交差角 θ_1 と θ_2 をパラメータとした。なお、Case A～CまたはCase 1～6のそれぞれにおいては、供試体を打撃する面、すなわち覆工の表面に相当する面から見る場合は、ひび割れの発生そのものは同一の箇所に発

表-1 供試体の配合

材齢28日の 目標強度 (N/mm ²)	W/C(%)	単位量(kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤 (AE減水剤)
18	68	252	171	866	994	2.67

粗骨材の最大寸法:20mm, スランプ:15cm

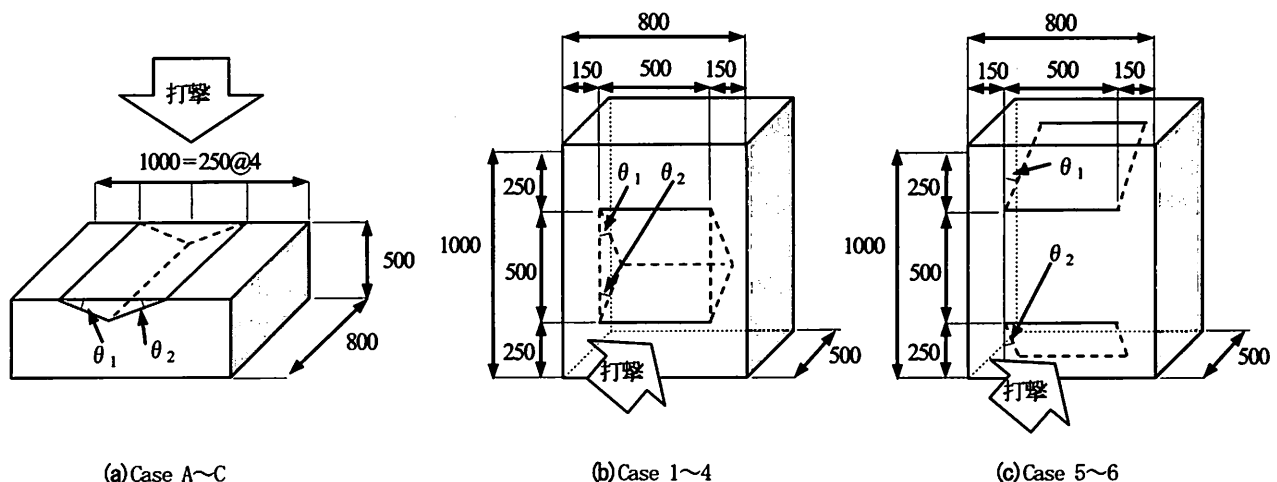


図-1 供試体の概要図

表-2 実験ケース

Case	供試体の状況	亀裂の角度(θ_1, θ_2)
A	ひび割れが表面で閉合、内部で連続し、ブロック化している部分が完全に浮いていると判断できる状況	45度, 45度
B		30度, 30度
C		10度, 10度
1	ひび割れが内部で連続しているが、ブロック化している部分が完全に浮いているとは判断できない状況	71度, 65度
2		45度, 45度
3		30度, 30度
4		10度, 10度
5	目地部に向かってひび割れが発生している状況	45度, 45度
6		30度, 30度

生しているように見える形となっている。

なお、実験上の制約から供試体の作成はCase A～CおよびCase 1～6の2バッチに分けてコンクリートを打設することにより行った。

(3) 実験手順および計測項目

図-1および表-2に示した供試体に対して、点検用のハンマーおよびシュミットハンマーを用いて打撃し、供試体の性状の確認およびシュミットハンマーによる反発値を計測した。

実験手順は、初めに供試体でひび割れの発生を模擬した面を5cmずつの格子状にマーキングし、全ての格子点に対して打音検査を模擬した方法で点検用ハンマーによって変状の判定を行った。その際、後述するシュミットハンマーによる反発値を測定することから、なるべく過度な衝撃は与えないこととし、同レベルの変状と判定される範囲をチョークによってマーキングした。表-3に本研究で用いた判定区分を示す。判定はCase 1～6のみで実施し、判定区分は文献¹⁾を参考に決定した。なお、同程度の変状でも部位によって判定区分が異なるが、本研究では変状はアーチ部に存在するものと仮定した判定を行っている。なお、ひび割れの発生した要因については、外力によるものと材質劣化によるものの区別を行うのは実験の性質上不可能であるため、本研究ではあえて特定しないこととした。

点検用ハンマーによる打音検査と変状の判定後、シュミットハンマーによる打撃を、定めた格子点で2度ずつ実施した。なお、シュミットハンマーによる打撃は供試

体にひび割れが発生している面に対して垂直に行った。本研究におけるシュミットハンマー試験の主目的はコンクリートの強度を求めるものではなく、反発値を実験的に求めるという観点から、覆工の表面で打音に適している平滑な箇所を選んで打撃することはせず、決められた点をそのまま打撃し反発度を算定した。ただし、点検用ハンマーで打撃を行うことによって覆工コンクリート表面のうち、非常に薄いコンクリートの一部が破損したが、その箇所はシュミットハンマー試験は実施しなかった。

3. 研究結果

(1) 供試体の特性

表-4に本研究で用いた供試体の一軸圧縮強度等の特性を示す。これよりケースA～Cと1～6に対して材料のばらつきはほぼないと考えられる。

(2) 反発値の傾向

シュミットハンマー試験の結果は、シュミットハンマーの反発値を用いて評価したが、結果を無次元化して評価するために、シュミットハンマーの「反発度比率」として、シュミットハンマーの反発値を「健全部の反発値」で除した値と定義して評価を行った。ここで『健全部』とは「ひび割れが直下に存在しない箇所」と定義し、ひび割れまでの距離を、作製した供試体の厚さと等しい箇所、すなわち50cm離れているものとして整理した。なお、健全部の反発値は1回目の打撃において、ひび割れが覆工の内部に存在していない箇所における反発値の全平均として算定した。

a) ひび割れが閉合・覆工が浮いている状態の場合

図-2にCase A～C、すなわちひび割れが閉合し、プロ

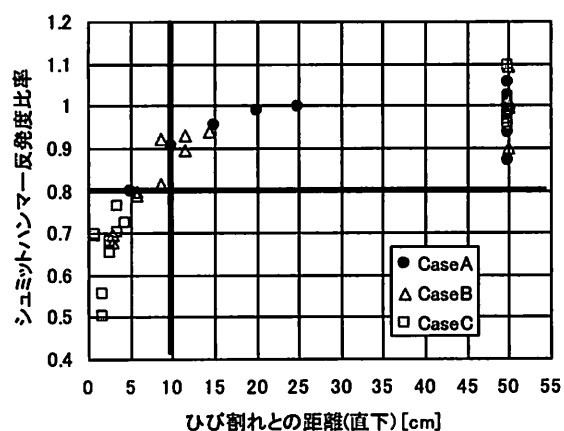
表-4 供試体の特性

ケースNo.	一軸圧縮強度 [N/mm ²]	ヤング率 [kN/mm ²]	ポアソン比 -
A～C	19.47	16.97	0.14
1～6	19.72	18.81	0.16

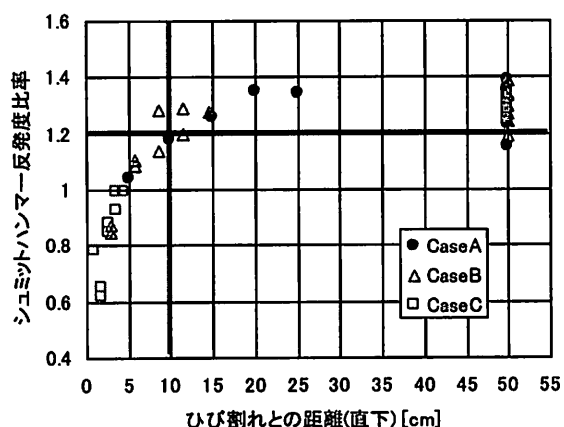
表-3 本研究における判定区分

変状の種類 判定区分	外力による変状	材質劣化による変状	
	覆工のうき・はく落	覆工などの断面強度低下	覆工のうき・はく落
3A	アーチ上部のひび割れの密集・圧ぎによるうき・はく落が生じ、コンクリート塊が落下するおそれのあるもの。	材質劣化などにより断面強度が若しく低下し、構造物の機能が若しく損なわれたもの。	アーチ上部の材質劣化によりうきが生じ、コンクリート塊が落下するおそれのあるもの、あるいはすではく落が認められるもの。
2A	側壁部のひび割れの密集・圧ぎによるうき・はく落が生じ、コンクリート塊が落下するおそれのあるもの。	材質劣化などにより断面強度が相当程度低下し、構造物の機能が損なわれたもの。	側壁部の材質劣化によりうきが生じ、コンクリート塊が落下するおそれのあるもの、あるいはすではく落が認められるもの。
A	—	材質劣化などにより断面強度が低下し、構造物の機能が損なわれる可能性があるもの。	—
B	—	材質劣化などが見られるが、断面強度への影響がほとんどないもの。	うき・はく落が認められないもの。

ック化している部分が完全に浮いていると判断できる場合の反発度比率と直下のひび割れの距離との関係を示す。ここで、(a)はシュミットハンマーにおける打撃が1回目の結果、(b)はシュミットハンマーにおける打撃が2回目の結果を示す。打撃が2回目の結果の方が打撃が1回目の結果より反発度比率が上昇しているが、これは同一箇所をシュミットハンマーで打撃すると、その局部はかなりの塑性変形を生じる⁴⁾ことに起因している可能性がある。図-2(a)より、ひび割れが覆工表面の直下10cm程度以内に存在する場合は、健全部と見なせる箇所との反発度比率よりもかなり低くとどまることが分かる。すなわち、健全部では反発度比率は1.0を中心に0.9～1.1程度となるが、ひび割れが表面から10cm以内に存在する場合は反発度比率は概ね0.8程度以下になる場合が多いことが分かる。また、図-2(b)の結果より、健全部の反発度比率は1.2～1.4に対し、ひび割れが表面から10cm以内に存在すると2回目の反発度比率が概ね1.2以下となることが分かる。このことから、覆工の表面の一部が完全にブロック化して浮いている状態の判定としては、シュミットハンマーの1回目の打撃による反発度比率で0.8を下回った場合にそのブロック化は深さが10cm程度以下のものとして存在している可能性が高いことが分かる。



(a) 打撃1回目の反発度比率



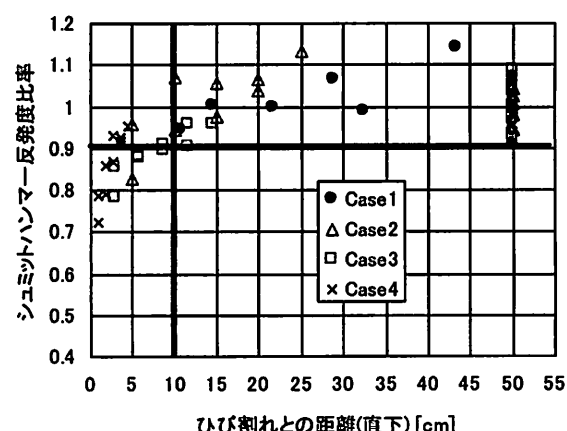
(b) 打撃2回目の反発度比率

図-2 反発度比率の傾向(Case A～C)

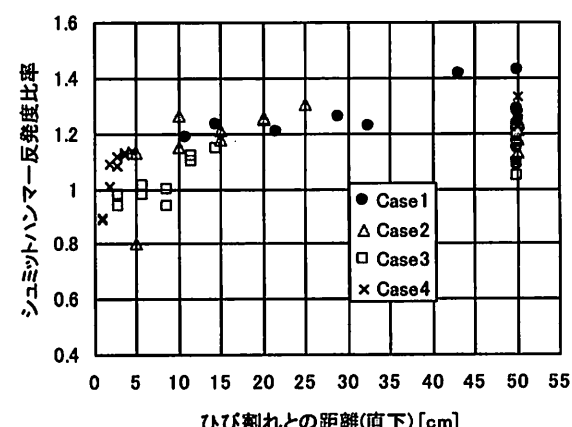
b) 覆工が完全に浮いていない状態の場合

図-3にCase 1～4、すなわちひび割れが覆工の表面で閉合しておらず、完全にブロック化して浮いている状態とは判断できない場合の反発度比率と直下のひび割れの距離との関係を示す。図-2の場合と同様に(a)は打撃が1回目の結果、(b)は2回目の打撃の結果である。図-3(a)の結果より、ひび割れとの距離が10cmを下回る場合に健全部と見なせる箇所との反発度比率が小さくとどまり、Case A～Cの場合とほぼ同様の傾向を示していることが分かる。しかし、Case A～Cの場合は反発度比率が0.8以下で10cm程度以内の距離でひび割れが存在していたことに対し、Case 1～4の場合では反発度比率が概ね0.9以下となることが多く、健全部との判別がつきにくくなることが分かる。安全側を見れば反発度比率が0.8以下となれば、確実にひび割れが表面から5～10cm以内に存在するといえるが、実務的に敷居値として用いることができるかどうかはさらなる検討が必要である。また、図-3(b)の結果より、2回目の反発度比率を用いた場合、健全部と反発度比率で判別がつきにくくなっている。

以上より、反発度比率の結果のみで安全性を議論することは出来ないという前提があるものの、反発度比率によりひび割れの覆工の内部への進展とそのひび割れが連



(a) 打撃1回目の反発度比率



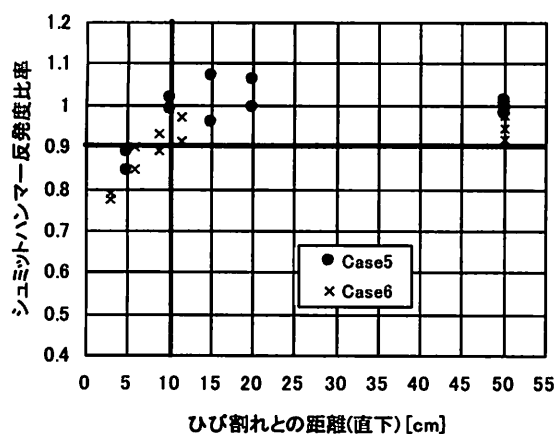
(b) 打撃2回目の反発度比率

図-3 反発度比率の傾向(Case 1～4)

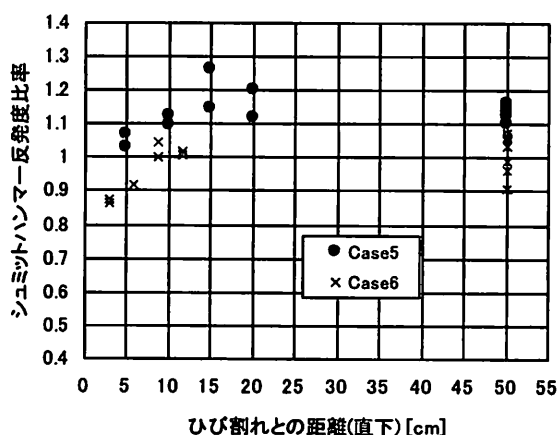
続していることによってブロック化が発生しているかどうかの目安を判断できる可能性がある。逆に、ひび割れの生じている部分が覆工の表面から15~20cm程度を越えたと反発度比率によってひび割れの存在の判断が出来ない。すなわち、ひび割れが覆工の深部で連続し、ブロック化を生じている部分の体積が大きくなるほど、打音検査やシュミットハンマー等の適用だけではトンネル構造の健全性を判断することには課題があると言える。

c) 目地部方向にひび割れが進展する場合

図-4にCase 5~6, すなわち目地部方向にひび割れが進展していると仮定した場合の反発度比率と直下のひび割れの距離との関係を示す。これまでのケースと同様に図-4(a)より、覆工表面とひび割れとの距離が10cmを下回る場合に健全部と見なせる箇所との反発度比率に若干であるが差が生じることが分かる。しかしながら図-4(b)より、2回目の反発度比率を用いた場合、健全部と反発度比率が変わらないことがあり、実務上はひび割れの存在が同定できなくなる可能性がある結果が得られた。これらより、シュミットハンマーのような打撃に委ねる場合、近傍に自由な面が存在する場合にはその影響を受け、反発度比率による評価が難しくなることを示していると考えられる。また、本ケースで模擬したひび割れの発生では、



(a) 打撃1回目の反発度比率



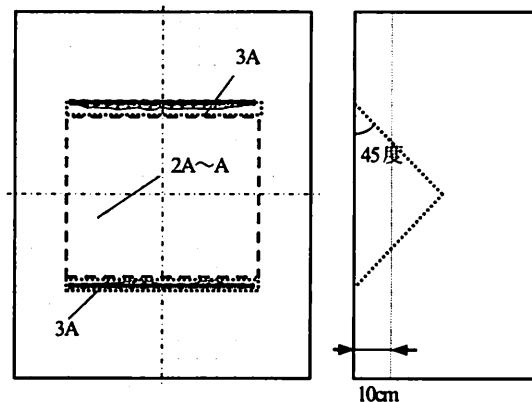
(b) 打撃2回目の反発度比率

図-4 反発度比率の傾向(Case 5~6)

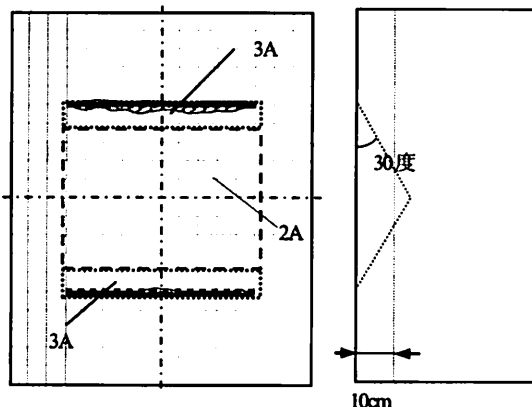
1方向からのひび割れの進展の模擬にとどまり、ブロック化を生じると想定される部分が比較的堅固に保たれており、不安定となっていなかった影響もあると考えられる。

(3) 判定区分との関連性

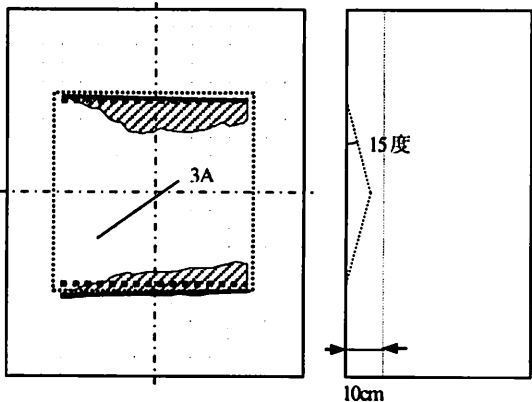
図-5にCase 2~4の供試体に対して文献¹⁾に基づいた調査が行われたと想定し、点検用ハンマーによる打音や目視等によって判定を行った結果を示す。なお、各ケースで点検者が判定を行う段階では、ひび割れの進展や発生



(a) Case 2の判定区分



(b) Case 3の判定区分



(c) Case 4の判定区分

⦿ : 打撃によるはく落範囲

図-5 ひび割れの進展と判定区分の関連性

している状況は点検者には伏せてある。図-5は供試体の正面図と側面図であり、側面図には図-2～図-4の結果から反発度との関連が見い出せる可能性があると考えた表面から10cmの深さの線を参考までに示した。

これより、各ケースとも覆工表面のひび割れの近傍ではわずかな打撃によってコンクリートのはく落が生じた。判定の結果はCase 2では、ひび割れの近傍では3A、そこから離れるにつれて2A～Aとなったが、このような判定とした理由はAと2Aの差が明瞭に分けることができなかったためである。また、Case 3ではひび割れの近傍では3A、そこから離れるに従って2A、Case 4では全体的に3Aといった判定となった。ひび割れの深さとの関係を見ると、3Aと判定される場合は、表面のうきが生じている場合にとどまることが各ケースの結果から分かる。

図-3の反発度比率と図-5の判定区分を比較した場合、Case 4においては、ひび割れの直下距離が10cm未満で反発度比率が概ね0.7～0.95程度であり、この場合で3Aと判断されている。また、Case 3の結果より、反発度比率が0.8～0.95程度で2A、またはごく一部で3Aと判断されている。しかし、健全部の判定を見ると、シュミットハンマーの反発度のばらつきから反発度比率が0.9程度以上であれば健全であると見なされる場合がある。以上をまとめて定量的に判断すれば、判定区分が3A～2Aである場合は、1回目の打撃の反発度比率は0.9～0.95程度以上にはならないと言える可能性がある。

また、Case 2においてはひび割れの近傍を除いて大部分が2A～Aとされているが、反発度比率が概ね0.9程度を上回っている。これより、判定区分がA程度であれば、1回目の打撃の反発度比率が0.9程度以下にならないと言える可能性がある。

以上より、うきやはく落を定性的な判定区分と関連づけて定量的に評価する場合、反発度比率は有用な指標となりうる事が分かる。しかしながら、反発度比率が0.9～0.95程度ではすべての判定区分に結果が属することもあり、現時点でシュミットハンマー試験の反発度比率を単独の指標として定量的に判定区分の決定や健全度の評価を行うには検討の余地が残る。また、本結果からは、2Aと3Aのそれぞれの敷居値を設定できるような結果は得られていないことが分かる。

また、図-5にはく落の範囲を示したが、実際にひび割れが発生して覆工の内部に進展したとしても、たたき落としを行うことによって、うきが除去される場合も実務上多く見られる。このような場合はシュミットハンマーによる定量化を行う必要はないと考えられ、シュミットハンマーの適用範囲は、打音の音質等に異常が見られた際にひび割れの進展の方向等を簡易に、かつ定量的に判断する際の参考に用いることができる可能性があると言

える。

4. まとめと今後の課題

本研究では、ひび割れの内含を模擬した覆工コンクリートに対してシュミットハンマーを用いた実験を通じて、ひび割れとうきやはく落の現象、および点検等における判定区分の関係を把握することを試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ひび割れの深さとシュミットハンマーの反発値には相関が見られる場合があり、特にひび割れが浅部に存在する場合はその進展の状態を推測出来る可能性がある。
- ・シュミットハンマーの反発値のみで安全性を議論することは出来ないが、ひび割れの内部への進展やひび割れの連続の度合いの目安を判断できる可能性がある。
- ・調査の判定区分が3A～2Aの場合、およびA～Bの場合の反発度比率の定量化の可能性が見いだせる。

以上より、ひび割れの深さや内部へ進展する場合の入射の方向に対してシュミットハンマーの反発値には相関が見られる場合があり、より定量的にうきやはく落に関する状態を評価できる可能性があることが分かった。しかしながら、ひび割れが覆工の深部で連続し、ブロック化の規模が大きい場合には、シュミットハンマー等での定量的な評価は難しく、適用の範囲を超えると考えられる。また、本研究から得られた1回目の打撃における反発度比率が0.9～0.95程度のように、場合によってはすべての判定区分に結果が属することもあり、現時点でシュミットハンマー試験の反発度比率を単独の指標として、定量的に判定区分の決定や健全度の評価を行うには検討の余地が残る。

今後は、うきやはく落に関してひび割れの状態との関係を踏まえた対策実施や監視との関連性の検討が必要である。また、各判定区分の具体的な事例をもとにした検証、各判定区分と健全度の関連性や定量的な評価手法の検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993
- 2) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領(案)，2002.4
- 3) 馬場弘二，下田哲史，佐野信夫，山田隆昭：トンネル覆工の打音点検仕様検討，トンネル工学報告集第16巻，土木学会，pp.263-268，2006.11
- 4) 土質工学会編：岩の調査と試験，pp.299-305，1989.9