

安山岩の風化特性と構造物に及ぼす影響

The Weathering Properties of Andesites and Their Effects on Construction Structures

鈴木 哲也 (すずき てつや)

北海道開発局開発土木研究所 地質研究室

針 谷 宥 (はりや ゆう)

北海道大学教授 理学部地質学鉱物学科

土 居 繁 雄 (どい しげお)

北海道工業大学教授 工学部土木工学科

1. はじめに

安山岩は一般に堅硬で風化しにくいと考えられているが、骨材や割栗石として使用した時、なかには極めて短期間に風化するものが存在する。つまり採取時に堅硬であった岩石も、1～2年で急激に強度を減じ、ついには細粒化する。岩石の急激な風化の原因には様々な要因が考えられるが、安山岩の場合、熱水変質作用により生成したモンモリロナイトがその原因となることが多い。そのような例として、乾湿による骨材の体積変化のため、コンクリートに発生するポップアウトがよく知られている¹⁾。また安山岩骨材を使用した空港舗装が、融雪剤により短時間に風化した事例や²⁾、防波堤の捨石として使用された安山岩の急激な風化により、防波堤が沈下した事例がある³⁾。そのほかの例として、変質安山岩中に掘削されたトンネルが、地山の風化や吸水膨張により変状した例⁴⁾などをあげることができる。

本文では安山岩が含有するモンモリロナイト量と中期的な風化現象について比較検討を行い、安山岩の風化特性について述べる。さらに安山岩の骨材や岩盤の風化が構造物に及ぼす影響について述べ、悪影響の防止対策例を示す。

2. 安山岩にみられる風化現象

2.1 風化の進行速度

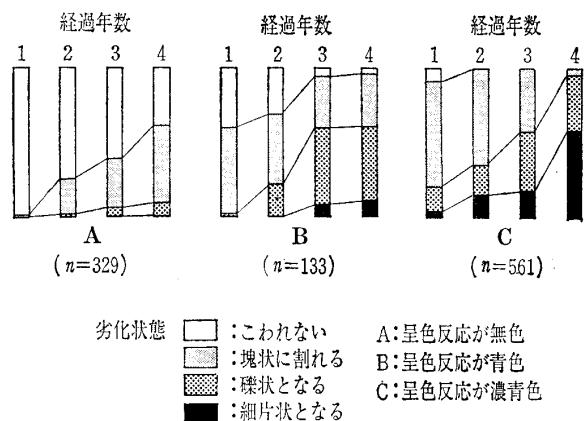
岩石の耐久性を求める試験方法として、スレーキング試験、安定性試験、凍結融解試験などが行われている。岩石の風化現象が長時間の時間的要素を伴う現象である以上、それらの短期的な試験のみならず中長期にわたる風化現象の検討も、岩石の耐久性

を評価するうえで重要である。

岩石の風化を促進する営力には多くの要因があるが、安山岩の場合、吸脱水によるモンモリロナイトの膨張収縮が強度低下や細粒化を促進する主な要因と考えられる。そこで安山岩中に含まれるモンモリロナイト量が中期的な風化現象に及ぼす影響について検討することとした。北海道産安山岩1023試料をモンモリロナイト含有量の多寡に応じて3種類に分類した。分類は、パラフェニレンジアミンによる呈色反応に基づき⁵⁾、呈色反応が濃青色を呈するもの、すなわちモンモリロナイトを多量に含むグループ、呈色反応が青色を示すもの、すなわちモンモリロナイトを中量含むグループおよび呈色反応を示さないもの、すなわちモンモリロナイトをほとんど含まないグループの3種類である。

全試料を室内に保存したうえで、各分類ごとに1年後、2年後、3年後、4年後の時点において風化状態の観察を行った。風化状態については口絵写真—3に示すように、I：こわれない、II：塊状に割れる、III：礫状になる、IV：細片状になる、に4区分し経年変化を把握した。

結果を図—1に示すが、モンモリロナイトをほとんど含まないグループは、試験開始後4年経過した時点においても礫状にまで至るものは数%程度であり、ほとんど風化していない。次にモンモリロナイトを中量含むグループは、試験開始2年目以降かなりの風化の進行が認められる。試験開始後4年経過した時点において当初の状態で存在するものは10%以下となる。モンモリロナイトを多量に含むグループは、試験開始後4年経過した時点において当初の状態で存在するものはなく、90%以上が礫状以下の



図一 安山岩のモンモリロナイト含有量と経年変化の関係

細片へと変化する。特に細粒化するものが60%以上を占め、著しい風化の進行を示す。

これらの結果から、モンモリロナイトを中量以上含む安山岩を骨材として使用した場合、経年変化により著しく風化し、本来目的とした機能を失う可能性がある。また岩盤においても、風化による強度低下等により問題を生じる場合がある。

2.2 風化機構

粘土鉱物を含む安山岩の風化機構を明らかにするため、風化促進剤として尿素を用いて強制的に風化を進行させ、電子顕微鏡により風化の微視的な進行過程の観察を行った。観察はモンモリロナイトを多量に含む安山岩を30%尿素溶液に浸し、4時間、8時間および24時間経過後に行った。8時間経過後の結果を写真一に示す。安山岩の石基は、電子顕微鏡下では主に極微細な長石や輝石等の結晶から構成されている。変質した安山岩においては、これらの微細結晶の粘土鉱物化や微細結晶間に粘土鉱物の生成が認められる。尿素溶液処理により、まず微細結

晶間に生成している粘土鉱物や粘土鉱物化した微細結晶が脱落する。引き続き微細結晶の分離が進行するとともに斑晶の分離に至る。このような過程の繰返しにより安山岩の崩壊が進行する。

したがって石基の部分が変質粘土化している安山岩は、それが変質粘土化していない安山岩よりも風化が進行しやすいと言える。風化防止のためには光学顕微鏡による鏡下観察を行い、石基の部分が変質した骨材の使用は避けるのが望ましい。

3. 風化を原因とする構造物の変状

3.1 空港舗装における事例

(1) 風化現象

北海道内の空港において、アスファルト舗装路面が施工後数か月で劣化した。この舗装の表層は密粒度アスコンであり、10月に施工された。引き続き冬期間に舗装路面より砂状の岩片が発生し始め、やがて摩耗や波打ちといった現象が認められた。劣化の著しい舗装表面では粗骨材がほとんど見あらず、骨材の存在したと考えられる部分は凹状をなし、そこに骨材の細粉状崩壊物が堆積していた。

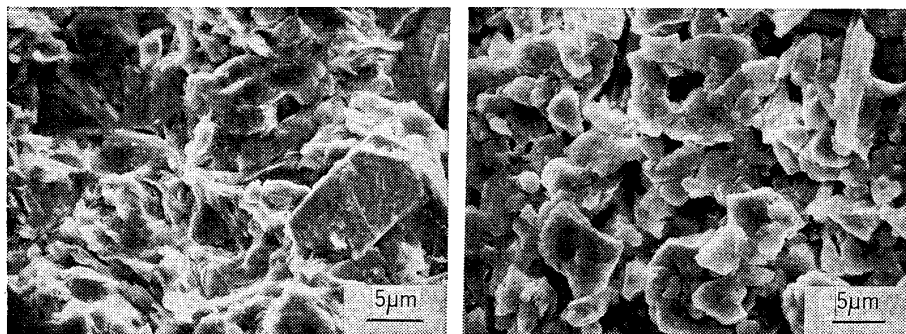
(2) 風化原因

舗装に使用された安山岩骨材の品質は比重2.67、吸水率2.3%、すりへり減量13.1%、安定性損失量2.5%であり、道路用砕石一種のJIS規格を満たしていた。しかし熱水変質作用を受けてモンモリロナイトを含んでいた。

北海道や東北の空港では、冬期間融雪剤としてEG（エチレングリコール）を主成分とする不凍液が飛行機によって散布される。EGはモンモリロナイトと反応し、モンモリロナイトを膨潤させる。この

時水の場合よりもはるかに大きな膨潤を生じる。このため骨材中に含まれるモンモリロナイト量によっては、水による膨潤では崩壊しなかった骨材も、EGにより崩壊する場合がある。

EGのアスファルト混合物に対する影響については、マーシャル供試体を作成して検討した。空港舗装に使用したモンモリロナイトを含む骨材およびモンモ



未 処 理

30%尿素溶液8時間処理
微細結晶間に生成して
いた粘土鉱物が脱落し
ている。

写真一 尿素溶液処理前後の安山岩の石基の変化

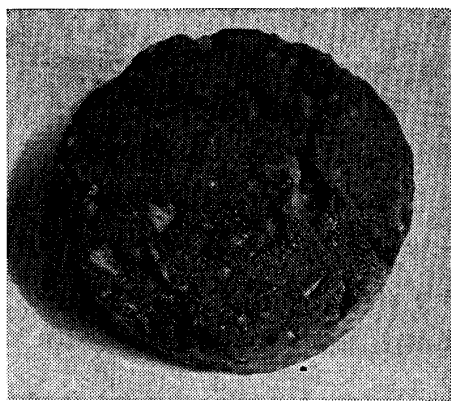


写真-2 モンモロロナイトを含む骨材を使用した供試体のエチレングリコール浸潤後の状況(2週間後)

リロナイトを含まない骨材を使用して、2種類の供試体を作成しEGで浸潤させた。2週間後モンモロロナイトを含む骨材を使用した供試体ではモルタルと骨材の間に分離面が生じ、一部の骨材には細粒化が認められた(写真-2)。一方モンモロロナイトを含まない骨材を使用した供試体では、1か月後においても異常は認められなかった。このように空港舗装の劣化は、使用骨材中に含まれていたモンモロロナイトと融雪剤中のEGの反応による骨材の急激な風化が原因と判断された。

(3) 化学的指標による骨材の品質管理

モンモロロナイトを含む骨材を使用した舗装は、使用環境によっては著しい破壊を受ける。したがって寒冷地の空港舗装のような特殊条件下におかれる骨材の選択にあたっては、風化環境を考慮に入れた試験が必要である。

モンモロロナイトはEGのみならず、ほかの有機分子とも反応して膨潤する。特に尿素はモンモロロナイトとの結合力が強いため、骨材の風化促進剤として適している。このため30%尿素溶液を使用した試験方法²⁾により、骨材の有機薬剤に対する耐久性試験を行った。その結果を図-2に示すが、骨材中のモンモロロナイト含有量が一定割合を超えない限り、骨材の損失率は数%以内にとどまる。耐久性試験結果と北海道内7空港において使用されている舗装の事例から、耐久性試験による骨材の損失率が10%以下であれば問題がない。このことから反応性有機薬剤と接触する可能性のある場所に使用する骨材について北海道開発局では、耐久性試験による損失率が10%以下となるよう管理している。

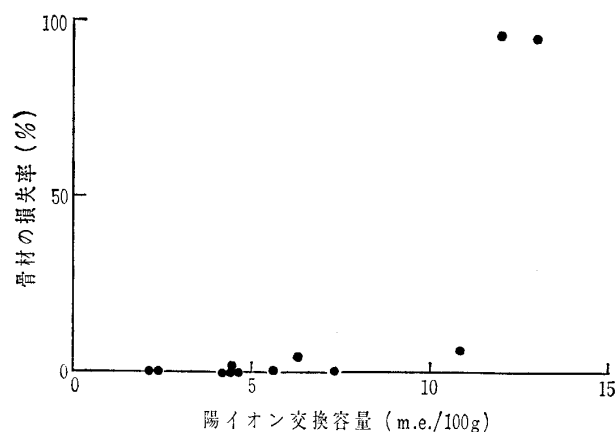


図-2 30%尿素溶液による骨材の損失率と陽イオン交換容量の関係

3.2 コンクリートにおける事例

(1) 変状現象と使用材料

北海道内において変質した安山岩骨材を使用したコンクリートに、打設後まもなく地図状の亀裂が認められた。このような亀裂はアルカリ骨材反応と呼ばれる現象で生じることがあるので、使用材料の点検を行った。セメントのアルカリ量は Na_2O 当量で4.2%であった。またアルカリ量2%におけるセメント骨材の組合わせによる潜在アルカリ反応性試験において、材齢6か月の膨張量は0.02%以下であり、有害とされる値の0.1%に比べ小さな値を示した。また骨材の潜在反応性試験の結果も無害域にプロットされた。このようにセメントにも骨材にもアルカリ骨材反応を生じさせる要因は認められなかった。

(2) 変状原因

コンクリートに使用された骨材は、モンモロロナイトを含む安山岩であった。吸水させた試料を自然乾燥させたところ、長さ方向に約0.05%の収縮を生じた。湿潤時と乾燥時の体積変化の著しい骨材を使用したコンクリートは大きな乾燥収縮を示し、亀裂も発生することがある⁶⁾。また風化に対する抵抗力も弱いとされている⁷⁾。

そこでモンモロロナイトを含む安山岩と標準骨材として秩父産硬質砂岩をそれぞれ骨材として使用し、2種類のコンクリート供試体を作成した($W/C=0.65$)。これらの供試体を気中で乾燥させ、長さ変化率を測定した。安山岩骨材を使用した供試体の乾燥収縮率は、硬質砂岩を使用したものの1.3~3.5倍と大きな値を示した(図-3)。

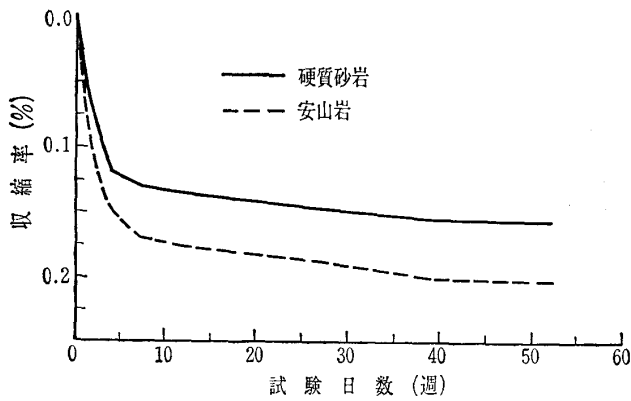


図-3 気乾による長さ変化率の経時変化

さらにセメントペーストと粗骨材の境界部分では、写真-3に示すように炭酸化作用による丸味をおびたポルトランドイトや、大きなエトリンガイトが認められた。これは粗骨材の収縮により、その周囲に多くの空隙が形成され、そこから空気が侵入しやすいためと考えられた。

このようにコンクリートに発生した亀裂は、安山岩骨材の乾燥収縮に起因すると推定された。

(3) 風化に対する抵抗性と対策

粘土鉱物を含む安山岩骨材の使用は、骨材自身の風化に対する低抵抗性のみならず、口絵写真-4に示すように骨材とペーストの付着が損なわれるため、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこでモンモリロナイトを含む安山岩骨材を使用したコンクリートの風化作用に対する抵抗性を検討するために、乾燥湿潤試験および凍結融解試験を行った。乾湿繰返しにより、安山岩骨材を使用した供試体には相対動弾性係数の低下やひび割れの発生が認められた。また凍結融解試験に対する抵抗

性も悪く、折損の生じた供試体もあった。このようにモンモリロナイトを含む骨材を使用したコンクリートには、風化に対する抵抗性の低下が認められた。

この場合改善策として、細骨材を良質なものに置換することにより、凍結融解抵抗性の改善のみならず、図-4に示すように乾燥収縮を低減させ乾燥湿潤繰返しに対する抵抗性を向上させることができた。

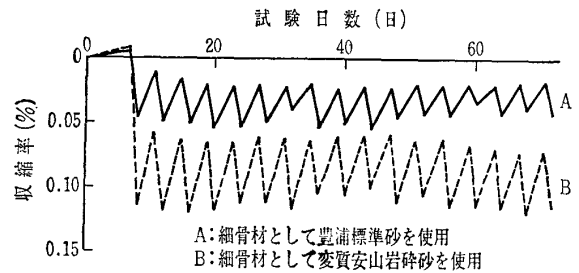


図-4 乾燥湿潤繰返しにおける供試体の長さの変化

3.3 トンネルにおける事例

(1) 変状の概要

局部的に熱水変質作用を受けた安山岩溶岩中に掘削されたトンネルにおいて、竣工後2年目より盤ぶくれが認められた。変位の進行状況を図-5に示す。変位は年間約15 mmで恒常的に進行し、5年間で75 mmに達した。変位量は大きく、温度変化に伴う熱膨縮とは明らかに異なり、また地山凍結時に認められる季節的変動を示さない。昭和60年には変位の進行が一時停止しているが、これは側壁に亀裂が入った時期にあたる。

(2) 変状原因

トンネル掘削時の記録によれば、変状区間周辺に

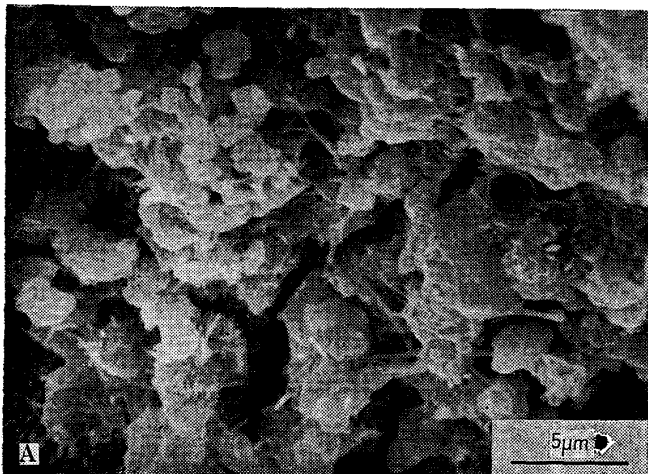
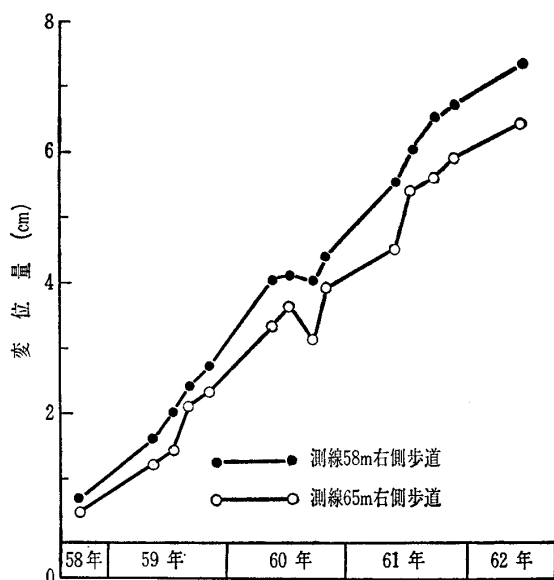
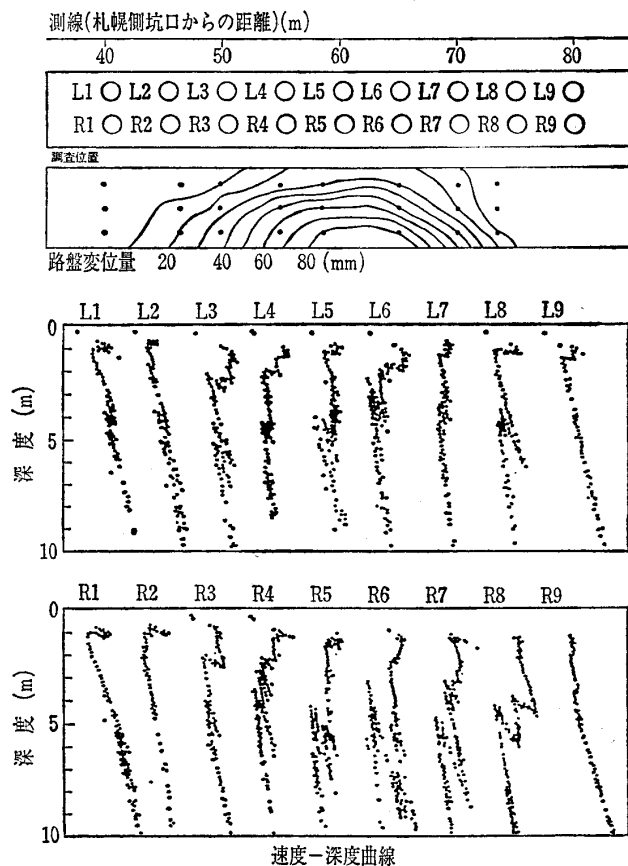


写真-3 粗骨材に接していたセメントペーストの組織

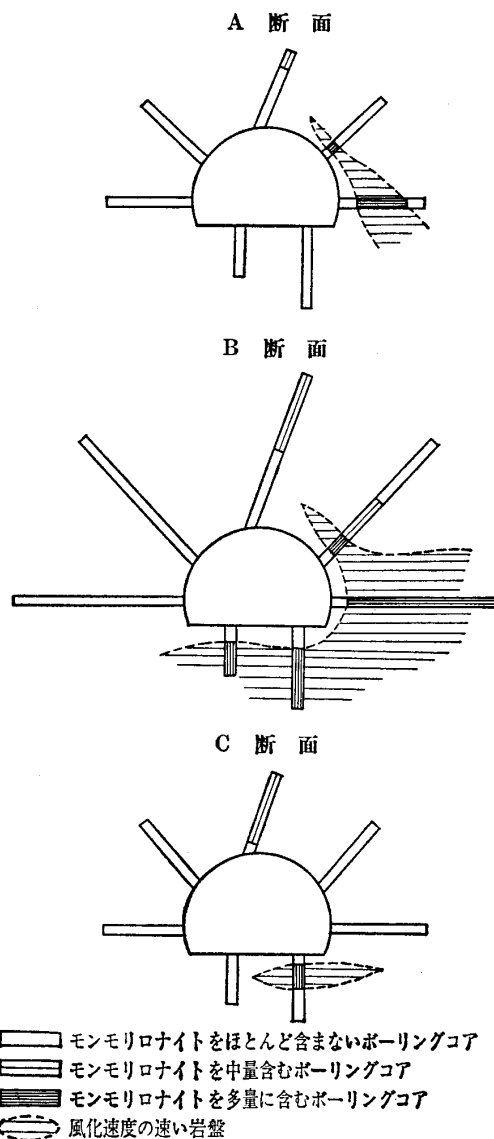


図—5 トンネル変位の進行状況

において変質した軟質な安山岩が存在したとされている。変質した安山岩とトンネルの変状とのかかわりが想定されたため、変質した安山岩の形態の把握を行うこととした。変質岩盤の形態を屈折法で把握することは困難なため⁸⁾、ここでは起振機による調査を行った。この手法を用いたのは基礎実験により、



図—6 トンネル路盤変位量分布と起振機を用いた岩盤調査により得られた速度深度曲線



図—7 風化速度の速い岩盤の分布図

速度深度曲線の乱れから安山岩の変質部と非変質部の区分が可能であったからである。調査結果を、路盤の変位量分布と対比させたものが図—6である。速度深度曲線の乱れた場所は、大きな路盤変位量が観測された場所と一致する。

物理探査結果から変状区間と変質岩盤の対応が認められたため、ボーリングにより両者の関係を調べた。ボーリングは変状の少ない場所としてA断面（坑口より47m）、C断面（坑口より77m）、変状の著しい場所としてB断面（坑口より63m）において行った。ボーリング結果をもとにトンネル周囲の岩盤を、モンモリロナイト含有量に応じて区分した。結果を図—7に示す。変状の著しいB断面においては、右側側壁から路盤下部にかけてモンモリロナイトを多量に含む岩盤、すなわち極めて風化しやすい

表—1 安山岩の物性値と呈色反応の関係

パラフェニレンジアミンによる呈色	試料数	陽イオン交換容量 (me/100 g)	比 重	吸 水 率 (%)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)
無 色	70	11.0 (5.6~17.5)	2.49 (2.22~2.68)	2.5 (0.3~ 9.7)	694 (140~1 816)
青 色	50	16.2 (6.5~36.8)	2.33 (2.00~2.53)	5.6 (1.1~19.9)	280 (27~ 821)
濃 青 色	15	32.7 (17.1~67.8)	2.06 (1.70~2.27)	13.9 (1.8~24.8)	101 (17~ 271)

注) 平均値および値の分布範囲

岩盤が広く分布する。図—6 の路盤変位量分布と比較すると、風化しやすい岩盤の分布と変位量の大きな場所は一致し、両者には密接な関係が認められる。

(3) 変状対策工

モンモリロナイトを含み風化しやすい岩盤にトンネルを掘削した場合、風化による細粒化と吸水膨張が相まって岩盤は急速に緩み、大きな地圧を形成してゆく。このトンネルにおいては周辺地山の風化による軟弱化が進むに従い、盤ぶくれから変状が始まり、舗装および覆工の破壊に至ったと推定される。

対策工としては、拘束圧下で安山岩の風化の進行が遅延すること、また吸水膨張もある圧力下で停止することから、インバート設置によりトンネル全体の構造を強化した。インバート施工中および施工後に内空変位、地中変位、ロックボルト軸力を測定した結果、リング閉合後の変位挙動は認められない。

4. 風化しにくい安山岩の選択方法

風化しにくい安山岩の選択方法として、定性的には呈色反応が無色を示すモンモリロナイトを含まない安山岩や鏡下で石基の変質していない安山岩を使用する方法がある。物性値の面からいえば、表—1 に示すように呈色反応が無色を示すものと青色を示すものが、一軸圧縮強度 500 kgf/cm² 程度で区分されることから、風化を避けるための一つの目安として、一軸圧縮強度 500 kgf/cm² 以上の材質を有する安山岩を使用することもよい。

いずれにせよ JIS 規格に合格する岩石のなかにも、使用環境によっては著しい風化を示すものがある。したがって特殊な条件におかれる骨材等の選択にあたっては、JIS 規格のみならず風化環境をも考慮に入れた調査、試験が必要である。

5. あとがき

岩石の長期間にわたる性質の変化を適切に評価するためには、力学的諸試験によるだけでなく、風化に伴う性質の変化も考慮することが必要である。このことは、風化のしやすい新第三紀以降の堆積性軟岩のみならず、本文で示したような安山岩についても必要である。さらに岩石は有している性質のみならず、置かれた環境によっても、風化の速度や程度を変化させる。岩石の風化速度を種々の環境条件に対応して定量的に評価するためには、まだ多くの課題が残されている。

おわりに、コンクリート供試体の作成および試験に協力していただいた、三菱マテリアル(株)セメント研究所朝倉悦郎主任研究員に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 有泉 昌：コンクリート骨材の問題点，粘土科学，19巻，2号，pp.41~55，1979.
- 2) 鈴木哲也・熊谷茂樹：有機系融雪剤による安山岩骨材の崩壊について，応用地質，26巻，4号，pp.1~6，1985.
- 3) 鈴木哲也：防波堤用捨石の劣化に及ぼすモンモリロナイトの影響，日本鉱物学会・日本鉱山地質学会・日本岩石鉱物鉱床学会秋期連合学術講演会講演要旨集，p.63，1979.
- 4) 鈴木哲也・岩渕 武・林 満・森田英俊：変質した地山中のトンネルにおける変状調査と対策，開発土木研究所月報，No.449，pp.2~9，1990.
- 5) 鈴木哲也：呈色反応による変質安山岩の分類について，土と基礎，Vol.35，No.3，pp.35~39，1987.
- 6) Stutterheim, N. and Chem, E.: Excessive shrinkage of aggregates as a cause of deterioration of concrete structure in South Africa, Transaction of the South African Institute of Civil Engineering, Vol.4, No.12, pp.1~17, 1954.
- 7) Snowdon, L. C. and Edwards, A. G. : The moisture movement of natural aggregate and its effect on concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.14, No.41, pp.109~116, 1962.
- 8) 小林雄一・鈴木哲也：変質岩の性状と検知について，土木試験所月報，No.39，pp.1~10，1979.

(原稿受理 1991.3.4)