

◆ 報文 ◆

雲母を混入したモルタルの品質低下現象

脇坂安彦*

1. はじめに

雲母は白雲母(絹雲母)、金雲母、黒雲母などから構成されている鉱物の総称で、薄片状になりやすい性質を持っている。白雲母はペグマタイト、泥質の結晶片岩や片麻岩に、黒雲母は酸性から中性の火成岩類、堆積岩類および変成岩類に広く産出する代表的な造岩鉱物である。したがって、雲母はコンクリート用骨材にも普遍的に含まれているとみてよい。この雲母がコンクリート用骨材としてあまり好ましいものではないことは、コンクリート用の砂に関する研究などにおいて古くから記載されている¹⁾⁻³⁾。しかしながら、これらの記載には雲母による具体的なコンクリートの品質低下現象の記述に乏しく、また、品質低下現象のメカニズムは一切、言及されていなかった。また、我が国においては実用上、雲母が問題となった事例はあまりなかったようである。ところが近年、我が国のダムコンクリートの打設現場から、黒雲母によるコンクリートの品質低下現象が報告された⁴⁾。このような黒雲母によるコンクリートの品質低下現象が事実であるとすると、黒雲母が普遍的な鉱物であるだけに、問題は深刻である。そこで、黒雲母がコンクリートに引き起こす品質低下現象を網羅的に把握し、その品質低下現象の機構を解明することを目的に、各種骨材試験、モルタル試験を実施した。その結果、雲母による品質低下現象の全容とそのメカニズムをある程度、明らかにすることが出来たので、それについて報告する。

2. 使用骨材と試験内容

まず、代表的な雲母である黒雲母を使用して各種のモルタル試験を行った。使用した黒雲母は、カナダ産および福島県産の花崗岩ペグマタイト中の巨大な結晶である。試験に当たってはこれらを粉碎し、雲母類を含まない玄武岩と特定粒径(雲母の粒径は偏平な面の短軸の長さ)に特定量混合

Quality Drop of Mortar Due to Mica-mixing

して(黒雲母を含む代表的な岩石である花崗岩には多いもので10%以上の黒雲母が含まれている。そこで、試験では黒雲母を9.5、5、2%混合した)細骨材を製造し、使用した。なお、ここでは黒雲母(Bi)を混合した骨材を黒雲母混合骨材、黒雲母を含まない玄武岩(Bs)のみの骨材を基準骨材と呼ぶ。また、黒雲母混合骨材で作製したモルタルを黒雲母含有モルタル、基準骨材で作製したモルタルを基準モルタルと呼ぶ。

モルタル試験に先立って、骨材の密度および吸水率試験を行った。モルタル試験としては、フロー(試験回数:7)、凝結硬化速度(1)、水和発熱過程(1)、膨張量(1)、強度(3)、凍結融解抵抗性(2)に関する試験を行った。ただし、本稿では品質低下現象が認められなかった凝結硬化速度、水和発熱過程および膨張量の試験結果については述べない。

黒雲母によるモルタルの品質低下現象のメカニズムを明確にするために、OHPシート(ポリエチレン製、0.1mm厚)を疑似雲母として用いた試験(フロー2回、強度:1回、凍結融解:1回)を行った。混合したOHPシートの大きさ・形状は、およそ5mm×5mmの正方形である。OHPシートを用いたのは、雲母の特徴である薄片状の形状を呈しており、セメントに対して化学的に不活性であるからである。

3. 試験の結果

3.1 骨材の密度と吸水率

図-1は純粋な玄武岩(Bs<5mm)、玄武岩と黒雲母の混合骨材(Bi5mm[黒雲母を4.75-2.36mmに混合]と1.2mm[1.18-0.6mmに混合]の9.5%[混合比率]、5%)、玄武岩とOHPシートの混合骨材(OHP5mmの9.5%、5%)、特定粒径の純粋な黒雲母(Bi5mmと1.2mmの100%)および純粋なOHPシート(OHP5mmの100%)の密度と吸水率との関係を示したものである。純粋な黒雲母では密度は大きいが、吸水率はあまり大きくない。純粋なOHPシートは密度・吸水率とも

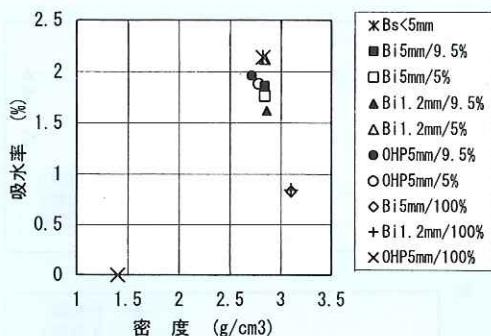


図-1 各骨材の密度と吸水率との関係

に最も小さく、吸水率は0%である。純粋な玄武岩は密度・吸水率ともに大きな値を示している。OHPと玄武岩の混合骨材および黒雲母と玄武岩の混合骨材の吸水率が大きいのは、玄武岩の微粉の効果であると考えられ、黒雲母やOHPシートには、吸水率を大きくする効果は認められない。

3.2 フロー

黒雲母に関する1回目の試験結果をみると、基準モルタル(Bs)のフロー257に対し、黒雲母含有モルタルのフローは160~248で、明らかに黒雲母含有モルタルの方が小さくなっている。モルタルのフローは骨材の吸水率と負の相関をしていることが知られているが⁵⁾図-1のようないくつかの吸水率が小さく、フローの低下には関与していない。一方、黒雲母の混合比率と比較すると、図-2のように、フロー値は混合比率が高くなると小さくなり、明瞭な相関が認められる。また、おおまかには粒径が大きくなるとフローが低下する傾向が読みとれる。

図-3はOHPシートを混合したモルタルおよび粒径4.75~2.36mmの黒雲母を混合したモルタルのフローを示したものである。試験によってフローにはばらつきがあるが、いずれの場合も骨材中の

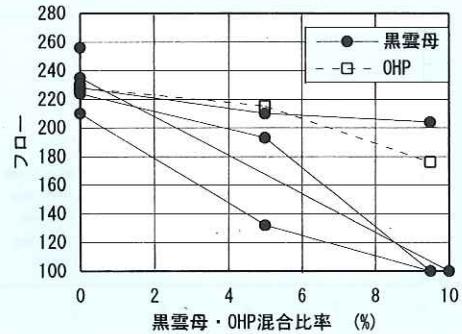


図-3 黒雲母・OHPシートの混合比率とフローとの関係
黒雲母ならびにOHPシートの混合比率が高くなるとフローは小さくなる傾向がある。OHPシートによるフローの低下傾向は、黒雲母による低下傾向のばらつきの範囲内にある。したがって、黒雲母によるフローの低下とOHPシートによる低下とは、同じメカニズムで生じていると推測される。

3.3 強度

図-4は骨材中の黒雲母混合比率と普通ポルトランドセメントを用いたモルタルの各強度(28日強度)との関係を示したものである。直接引張強度を除くと、強度は黒雲母混合比率が高くなると低下する傾向がある。この傾向は圧縮強度で顕著であり、特に混合粒径が0.6mm以上の場合には、基準モルタルの7割以下にまで低下している。黒雲母の混合粒径の影響をみてみると、おおむね、粒径が大きいものの方が強度の低下率が高くなっている。直接引張強度は黒雲母を5%混合したモルタルの強度は基準モルタルよりも多少大きくなっているが、9.5%混合すると基準モルタルよりも小さくなっている。

図-5はOHPシート含有モルタルの強度試験の結果を黒雲母混合粒径が4.75~2.36mmのモルタルの結果とともに示したものである。全体的には混合比率が高いものほど、強度は低下する傾向が認められる。強度低下の傾向は、黒雲母の場合とOHPシートの場合とで類似している。

図-6は黒雲母ならびにOHPシートの混合比率が5%の場合の試験結果について、混合した粒径と曲げ強度、圧縮強度との関係を示したものである。図のように曲げ強度、圧縮強度ともに粒径が大きくなると強度が低下し、黒雲母の低下傾向を外挿したところにOHPシートの結果は位置している。

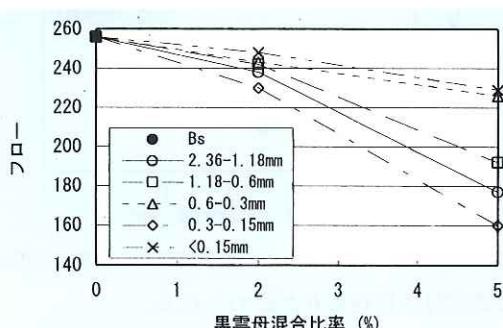


図-2 黒雲母の混合比率とフローとの関係

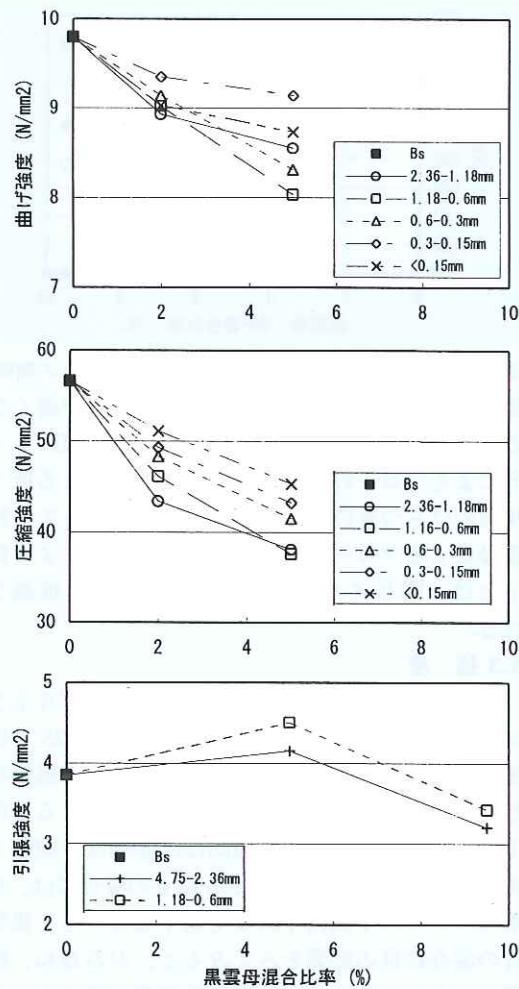


図-4 黒雲母の混合比率と各強度との関係

3.4 凍結融解抵抗性

図-7は凍結融解試験による相対動弾性係数の経時変化を示したものである。普通ポルトランドセメントを用いたモルタルでは、黒雲母混合比率がいずれの場合も相対動弾性係数は黒雲母の粒径に関わらず、基準モルタルと同じくほぼ100%である。一方、中庸熱フライアッシュセメントを用いたモルタルでは、混合比率が9.5、7.5%の場合、共鳴振動数が測定できたのは黒雲母混合粒径が5-2.5mmで90サイクルまで、1.18-0.6mmで120サイクルまでであり、その後はモルタルが崩壊している。0.15mm以下の場合は初期に急速に85%程度まで低下した後に、その値をほぼ保っている。このように中庸熱フライアッシュセメントでも粒径が0.15mm以下の場合には、300サイクルまでの間には崩壊しておらず、凍結融解抵抗性

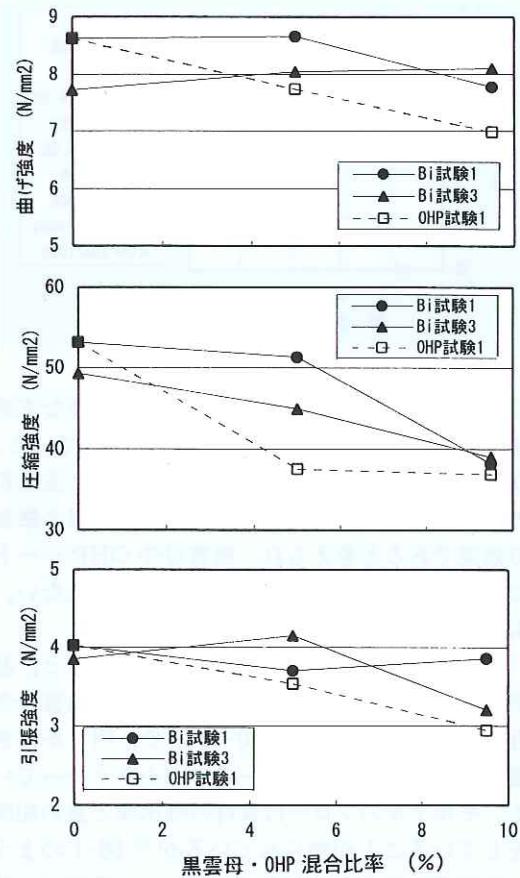
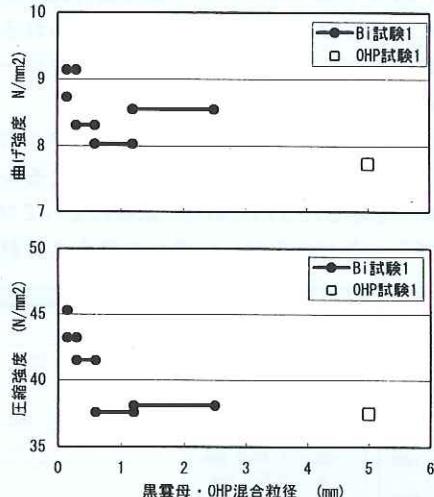


図-5 黒雲母・OHP シートの混合比率と各強度との関係

図-6 黒雲母・OHP シートの混合粒径と各強度との関係
に黒雲母の粒径依存が認められる。

OHP シート含有モルタルについても凍結融解試験を実施した。その結果、OHP シート含有モ

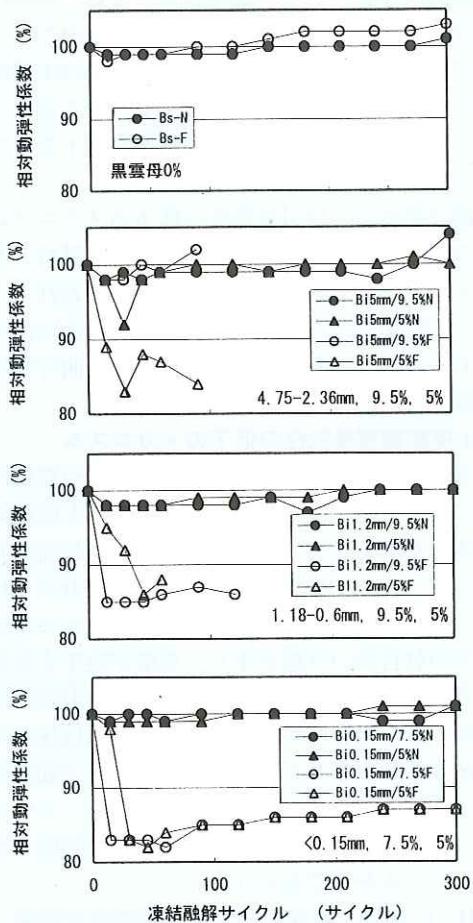


図-7 黒雲母含有モルタルの凍結融解試験による相対動弾性係数の経時変化

モルタルでは1試料以外は300サイクル以内に崩壊しており、凍結融解抵抗性は全般的に低い。このようにOHPシートを骨材とした場合でも、黒雲母の場合と同様に中庸熱フライアッシュセメントを用いることによって凍結融解抵抗性は低下する。

以上のように中庸熱フライアッシュセメントと黒雲母およびOHPシートの組み合わせで凍結融解抵抗性が低下する原因として、強度不足が考えられる。また、モルタルの凍結融解抵抗性はそれらに含まれている空気量にも規制されている。そこで、凍結融解試験を開始するまでのモルタルの養生期間を変え、試験開始時の強度を変化させた試験および混和剤の添加量を変えて空気量を変化させた試験を行ってみた。

図-8は各種強度、空気量と凍結融解抵抗性(耐久性指数DF)との関係を示したものである。全体の凍結融解抵抗性からみると、どの強

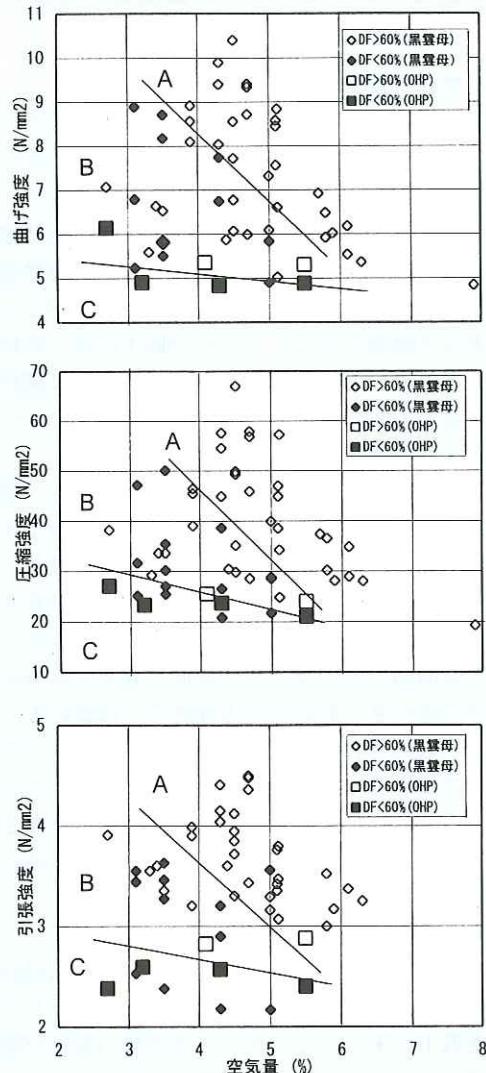


図-8 空気量・各強度と凍結融解試験における耐久性指標(DF)との関係

度を指標とした場合でも図は3つの領域に区分することができる。すなわち、凍結融解抵抗性が良好な(耐久性指数が60%以上)領域(図中のA領域)、凍結融解抵抗性が良好なモルタルと不良なモルタルが混在している領域(B領域)および凍結融解抵抗性が不良な領域(C領域)である。A領域は強度、空気量ともに大きい領域で、C領域は強度が極端に小さい領域、B領域はA、C領域の中間である。各強度毎にみると、C領域とB領域との区別がもっとも明瞭であるのは、引張強度を指標とした場合である。

4. 雲母によるモルタルの品質低下現象のメカニズム

4.1 フロー減少のメカニズム

黒雲母によるモルタルフローの減少のメカニズムは、粒径が大きいものほど減少程度が大きいこと、OHPシートでも同様の現象が生じること、本報告では詳細について述べなかったが、凝結硬化速度には影響がほとんどないこと、水和発熱過程には異常がないことから考えると、物理的なものであると推測される。フローの低下には、骨材の高吸水率も一因となる⁵⁾が、既述のように純粋な黒雲母やOHPシートの吸水率は低く、フローの低下には吸水率は関与していない。

フローに粒径依存が認められることから、黒雲母によるフロー減少のメカニズムは、次のように考えられる。黒雲母は粒径が大きいものほど、劈開面方向の長さと劈開面に直交する方向の長さの比が大きく、偏平である。他方、粒径が小さくなると劈開面方向の長さが劈開面に直交する方向の長さに近づき、形状は立方体あるいは球に近くなる。一般に骨材の形状は偏平なもの程フローやスランプは小さくなるといわれている⁶⁾。したがって、黒雲母、OHPシートの場合も粒径が大きいものほど偏平になるので、フローが低下するものと考えられる。

4.2 強度低下のメカニズム

黒雲母による強度低下のメカニズムも混合比率、混合粒径が強度に及ぼす影響とOHPシートでも強度低下が生じることから、黒雲母の形状が関与していると考えられる。黒雲母を混合したモルタルの圧縮強度が低下するメカニズムは次のように考えられる。今回の実験では単体の薄片状黒雲母をモルタル中に混合している。したがって、黒雲母は硬化したモルタル中で様々な方向に配列しており、圧縮軸に対しても様々な方向を向いている。片麻岩、千枚岩などのように雲母が一定方向に配列し、異方性のある岩石について、一軸圧縮強度試験を行うと、定方向配列に対する圧縮軸の方向によって強度が変化することが知られている。たとえば、McLamore & Gray⁷⁾によると、強度は定方向配列に対する圧縮軸の角度が0°の場合に最も大きく、角度の増加に伴い低下し、30°～60°で最低となり、90°に向かって再び最大値へと増加する。このように圧縮軸に対して30°～60°の範

囲の面が存在すると、強度は低下する。黒雲母を混合したモルタルの場合も、モルタル中でランダムに存在する黒雲母のうち、いくらかは圧縮軸に対して、30°～60°の範囲で配列しているはずである。このような配列が、圧縮強度を低下させているものと考えられる。

曲げ強度および引張強度の低下のメカニズムは次のように考えられる。表面が平滑な骨材とセメントペーストとの付着強度は低いといわれている⁸⁾。黒雲母(およびOHPシート)の表面は滑らかであるので、付着強度が小さくなり、曲げ強度や引張強度は低下するものと考えられる。

4.3 凍結融解抵抗性の低下のメカニズム

凍結融解の繰り返しによりモルタルが崩壊する際には、モルタル中のセメントペースト固化部分自体やセメントペーストと骨材の付着部分から分離していく。すなわち凍結による膨張力がモルタルの引張強度よりも大きくなった場合にモルタル中の材料間の分離が生じ、崩壊が発生するものと考えられる。このようなことから、引張強度を指標とした場合にもっとも凍結融解抵抗性が明瞭に区分されるものと考えられる。図-8で曲げ強度や圧縮強度とも凍結融解抵抗性が関係しているようにみえるのは、引張強度とそれらの強度とが相関しているからであろう。

B、C領域の境界には主に引張強度が関係しているが、A、B領域の境界には空気量も関係している。

以上のように、モルタルの凍結融解抵抗性の低下の原因は、引張強度の低下および空気連行量の低下である。

5. 雲母含有骨材の評価と有効利用

5.1 雲母含有骨材の評価

黒雲母によるコンクリートの品質低下現象は骨材中の雲母の含有量と粒径の双方に関係している。すなわち、含有量と粒径の双方によって低下現象の程度は規制されている。したがって、含有量のみで骨材品質の良否を判断することは出来ない。雲母が存在する岩石を細骨材として使用する際には、実際に岩石を粉碎した上で、分離して単体となった雲母の粒径と含有量を計測し、フロー試験、強度試験、凍結融解試験を行い、使用の可否を判断することが望ましい。

品質低下現象は、黒雲母の粒径が大きい場合は

と顕著であるので、粗粒の黒雲母が含まれている可能性のある花崗岩、片麻岩などをコンクリート用骨材として使用する際には、特に留意が必要である。

5.2 粗骨材としての利用

黒雲母によるコンクリートの品質低下現象は、いずれも黒雲母の結晶が単体としてコンクリート、モルタル中に混合したときに生じる現象である。したがって、黒雲母を含んだ岩石を粗骨材のみとして用いる場合には、雲母による品質低下現象は生じない。

5.3 細骨材としての利用

雲母が単体として存在する天然の砂や単体として分離してくる可能性がある碎砂の場合には品質低下現象が生じる可能性がある。しかし、粒径が小さい場合にはあまり問題はないので、骨材中の含有量が5%を越えるような多量の雲母が混入する場合には、粉碎方法の工夫によって比較的破碎しやすい雲母を選択的に細片化し、無害化することが考えられる。

5.4 フローの改善

フローの減少が認められる場合には、貞弘・森田⁴⁾も述べているように、単位水量を増加させることで、ある程度フローを改善することができる。

5.5 強度および凍結融解抵抗性の改善

強度を増加させる一つの方法として、養生期間を長くとることが考えられる。また、セメント量の増加も考えられるが、これは水セメント比の低下につながり、結果的にはフローを低下させることになり、適切ではない。強度を増加させることによって凍結融解抵抗性も向上させることができる。しかしながら、これらの方には限界があることは否めない。

6. まとめ

黒雲母によるコンクリートの品質低下現象のメカニズムを明らかにするために、黒雲母およびOHPを疑似雲母として各種実験を行った。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 黒雲母を骨材とした場合、フロー、強度および凍結融解抵抗性の低下が生じる。これらの品質低下現象はOHPシートを骨材とした場合にも同様に発生する。したがって、これらの性質の低下のメカニズムには、黒雲母とOHPシートの共通の性質が関与していると考えられる。具体的には以下のように考えられる。

- (2) 黒雲母・OHPシートによるフローの低下は、偏平な形状に起因している。
- (3) 黒雲母・OHPシートによる圧縮強度の低下は、圧縮軸に対して30~60°で交差する偏平な黒雲母、OHPシートによる弱面の存在、曲げ強度・引張強度の低下は、黒雲母・OHPシートとセメントペーストとの付着強度の低下に起因している。
- (4) 黒雲母・OHPシートによる凍結融解抵抗性の低下は、引張強度および空気連通性の低下が原因である。
- (5) 雲母を含んだ骨材を有効に利用するには、1)粗骨材のみとして使用する、2)細骨材として使用する際にはできるだけ細片化する、3)フローを改善するためには単位水量を増加させる、4)強度および凍結融解抵抗性を改善するためには、養生期間を長くする、ことが考えられる。

参考文献

- 1) 尾林清一：山砂、海砂コンクリート、建築技術, No.239, pp.227-244, 1971.
- 2) 渡辺明：コンクリートの性質における骨材の影響、セメント・コンクリート, No.331, pp.44-56, 1974.
- 3) De, P.L. and Jain, V.K.: Use of micaceous sand for concrete and mortar, Indian Concrete Journal, Vol.51, No.2, pp.56-58, 1977.
- 4) 貞弘丈介、森田義則：フライアッシュ置換率35%コンクリートの品質、ダム技術, No.54, pp.103-118, 1991.
- 5) 脇坂安彦、市川慧、藤原靖、宇治公隆、林順三、三谷哲、前田照信、佐々木肇：モンモリロナイト族鉱物含有骨材を使用したコンクリートの凝結特性、応用地質, 第34巻, pp.209-222, 1993.
- 6) 阿部道彦：粒形、笠井芳夫編、コンクリート総覧、技術書院, p.208, 1998.
- 7) McLamore, R. and Gray, K.E.: The mechanical behaviour of anisotropic sedimentary rocks, Journal of Engineering for Industry, 89, pp.62-73, 1967.
- 8) Hsu, T.T.C. and Slate, F.O.: Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar, Journal of ACI, Proceedings, Vol.60, pp.465-486, 1963.

脇坂安彦*



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ上席研究員
Yasuhiko WAKIZAKA