

14.4 規格外骨材の耐久性評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：材料地盤研究グループ（基礎材料チーム）

研究担当者：渡辺博志、片平博、伊佐見和大

【要旨】

骨材資源を有効に利用するためには、その骨材がコンクリートの性能に与える影響を正しく評価する必要がある。硬化コンクリートの性能のうち骨材品質の影響を強く受けるものとして耐凍害性と乾燥収縮がある。耐凍害性はコンクリート供試体による凍結融解試験か、骨材に対する安定性試験によって評価されてきた。この安定性試験における結晶圧の作用機構の解明と試験条件が結果に与える影響について検討した。また、再生骨材の耐凍害性の評価を目的に開発した簡易試験法¹⁾等の天然骨材への適用性について検討した。コンクリートの乾燥収縮に関しては、簡易な指標による乾燥収縮量推定方法の確立を目指し、骨材の密度、吸水率、比表面積やコンクリートの弾性係数と乾燥収縮量との関連について調査した。

キーワード：コンクリート、規格外骨材、耐凍害性、安定性、冷凍庫、乾燥収縮、動弾性係数

1. はじめに

近年、良好な原石山が減少しており、骨材品質が低下する傾向にある。また、これに合わせて採石場での掘削量の増大、廃棄岩の処分場の増大、骨材輸送距離の増大等による環境負荷が大きくなっている。これらのことから、現在の品質規格を満足しない骨材であってもコンクリートの性能を損なわない範囲の骨材であれば、有効利用を図ることで骨材の供給量を確保し、環境負荷を低減する必要がある。

骨材品質がコンクリートに与える影響としてはフレッシュ性状、強度、耐久性などがあるが、特に耐凍害性や乾燥収縮に与える影響が大きく、また、これらの照査には、コンクリートを製造しての長期間に及ぶ試験が必要である。このため、簡易な評価試験法の確立が望まれている。

20年度は、以下について検討を行った。

- (1) 骨材の耐凍害性の目安となる「硫酸ナトリウムを用いた安定性試験方法」における硫酸ナトリウムの結晶圧の作用機構の解明と試験条件が結果に与える影響の検討
- (2) 再生骨材の耐凍害性の評価を目的に開発した簡易試験法等の天然骨材への適用性についての検討
- (3) コンクリートの乾燥収縮量を簡易に推定する指標として、骨材の密度、吸水率、比表面積やコンクリートの弾性係数と乾燥収縮量との関連についての検討

2. 安定性試験に関する検討

2.1 目的

骨材の耐凍害性の評価方法としては JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」がある。この試験方法は硫酸ナトリウムの結晶圧による破壊作用を応用

したものである。安定性試験は我が国に導入されてから長い年月が経過し、骨材の評価のための一試験方法として定着はしている。しかし、安定性試験による骨材の試験成績と、この骨材を用いたコンクリートの凍結融解性能との相関性は必ずしも良いとは言えず、安定性試験による骨材利用の判断に対する信頼性が欠けるところである。また、安定性試験による骨材破壊メカニズムが十分に明らかになっていないことも、安定性試験結果の解釈を複雑にしている要因である。

この状況を解消するためには、1) 安定性試験に変わる新たな骨材性能試験方法を確立するか、2) 安定性試験による骨材破壊メカニズムを解明した上で、試験方法に改良を加える等の対応策が考えられる。

安定性試験では、骨材試料を硫酸ナトリウム溶液と乾燥炉とに交互に入れるが、その間の硫酸ナトリウムの変化をみると、まず溶液中で硫酸ナトリウム 10 水和物 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) が析出、結晶化する。これを乾燥炉に入れると水が分離し、粉状の無水物 (Na_2SO_4) に変化する。硫酸ナトリウムの結晶圧が作用する時期としては 10 水和物が形成される溶液中であるとする説と、無水物に変化する乾燥中であるとする説の双方があり、その機構が解明されているとは言い難い。

そこで、どの時点で結晶圧が作用するかについて実験的な検討を行った。また、溶液の温度や蒸発条件が安定性試験結果に与える影響について検討を行った。

2.2 岩片を用いた実験

JIS A 1122 に準拠し、 $20 \times 60 \times 140\text{mm}$ 程度の岩片（玄武岩）を対象に、安定性試験を実施し、硫酸ナトリウム溶液

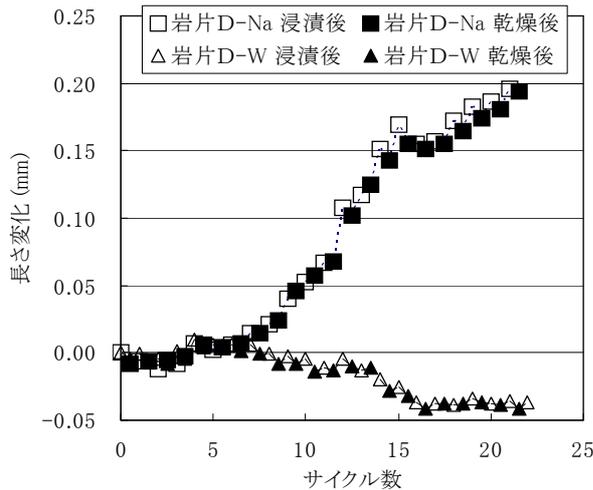


図-1 岩片を用いた安定性試験における長さ変化

表-1 浸漬条件を変えた安定性試験の条件と結果

	条件	液中の結晶の量	液の密度 (g/cm ³)	損失質量百分率(%)
I	20℃蓋あり	中	1.133	16.5
II	20℃蓋なし	多	1.124	26.3
III	25℃蓋あり	少	1.164	11.2

浸漬後と乾燥後の岩片の長さ変化をコンタクトゲージ法により測定した。なお、他の条件は同一に硫酸ナトリウム溶液ではなく水に浸漬する条件でも試験を実施した。

実験結果を図-1に示す。硫酸ナトリウム溶液に浸漬した岩片では、溶液に浸漬する毎に膨張し、乾燥後はやや戻る挙動を繰り返した。また、9サイクル目からひび割れが確認された。水に浸漬した岩片ではひび割れは生じず、逆に僅かに収縮する挙動を示した。

2.3 浸漬条件を変えた安定性試験

上記の実験の結果から硫酸ナトリウムの結晶圧は溶液中で作用している可能性が高いと考えられる。それならば、溶液の温度や溶液の蒸発速度の条件が試験結果に与える影響が大きいと考え、それを確認する実験を行った。

実験条件は表-1に示す3条件とし、15リットルのポリバケツに4リットルの硫酸ナトリウム溶液を入れ、実験Iは20℃でバケツに蓋をして密閉状態としたケース、実験IIは20℃で蓋を外して溶液からの水分の蒸発を許容したケース、実験IIIは温度を25℃として蓋をしたケースとした。その他の実験条件はJIS A 1122に従うこととし、骨材試料には粒径20~15mmの安山岩(密度2.50g/cm³, 吸水率3.91%)を用いた。

実験結果は表-1に示すように、環境条件を変えたことで、溶液の密度やバケツの底に析出する硫酸ナトリウム10水和物の結晶の量が異なっており、溶液の密度はケースI

とIIで同程度であるが、水分の蒸発を許容したケースIIでは結晶の析出量が多くなった。ケースIIIでは溶液の密度が高くなった分だけ、結晶の析出は少なかった。

もし仮に、結晶圧が乾燥時に生じるとするならば、溶液濃度が最も高いケースIIIで骨材の損失率が大きくなると考えられ、逆に溶液中で結晶圧が作用するのであれば結晶の析出量が最も多いケース2で骨材損失率が大きくなると考えられる。

結果は表-1に示すようにケース2の骨材損失率が最も大きく、溶液中の硫酸ナトリウム10水和物の結晶の析出によって骨材に圧力が作用することを裏付ける結果となった。なお、浸漬中の温度の違いや水分蒸発の違いが、試験結果に比較的大きな影響を与えることも分かった。今後、更に詳細な検討を行い、より適切な試験条件の設定や試験上の留意点を整理する必要があると考える。

3. 骨材の耐凍害性の評価手法の検討

3.1 目的

骨材の耐凍害性を評価する試験法として、再生骨材の簡易凍結融解試験方法¹⁾(以下、PP試験と称す)の適用性を検討した。

3.2 実験方法

表-2に示す24種類の比較的低品質な粗骨材を全国から収集し、吸水率試験、安定性試験、PP試験を実施した。また、これらの骨材を用いて、骨材最大寸法25mm、水セメント比55%、目標空気量4.5%の条件でコンクリートを練混ぜ、JIS A 1148(A法)に準拠して凍結融解試験を実施した。

表-2 使用骨材

砕石				川砂利
安山岩	凝灰岩	砂岩	頁岩	
8	2	2	1	11

骨材のPP試験方法を以下に概説する。まず、水温が20℃程度の水槽、槽内温度が-18℃以下となる冷凍庫、容量1,000cc程度のポリプロピレン(PP)製容器を用意する。次に、骨材試料を25・20mm、20・15mm、15・10mm、10・5mmの単粒径の各群にふるい分け、容器に詰める分の質量を測定する。それから、この試料を容器に入れ、容器に水を満たす。そして、容器を冷凍庫に入れ中の水分が完全に凍結するまで冷凍する。約16時間経過後、容器を冷凍庫から取り出し、水槽に入れ、中の氷が完全に融解するまで、約8時間水中に置く。一日一サイクルで、上述の凍結と融解とを交互に繰り返す。所定のサイクル数(20サイクル)を終了した後に容器から試料を取り出

して、各群の粒子がとどまったふるい目から抜け落ちる量（質量損失率、以下PP値という）を測定する。

3.3 実験結果

骨材の吸水率、安定性、PP値とコンクリートの耐久性指数の関係を図-2～4に示す。図-2～4より、各々の試験結果はいずれも砕石と砂利で異なる傾向を示した。

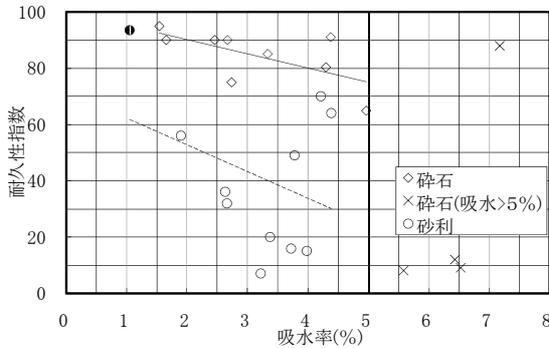


図-2 吸水率と耐久性指数の関係

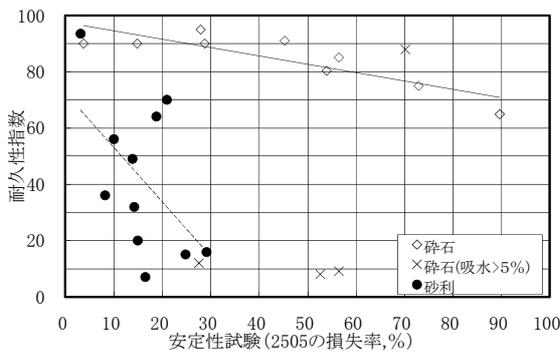


図-3 安定性と耐久性指数の関係

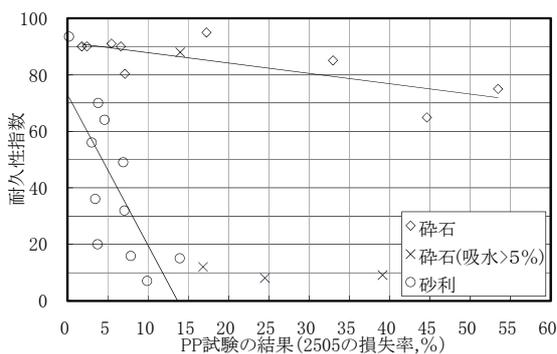


図-4 PP試験結果と耐久性指数の関係

まず、砕石の傾向を述べる。図-2より、耐久性指数60未満の砕石はすべてが吸水率5%以上であり、吸水率と耐久性指数は良い対応を示したが、図-3～4より、安定性およびPP値は耐久性指数60未満の砕石を評価できなかった。この原因として、吸水率の大きな砕石では、

骨材中の水の凍結圧が周囲のモルタルを劣化させ、耐久性指数を大幅に低下させたことが考えられる。一方、吸水率5%未満の砕石では、吸水率・安定性・PP試験の全てで耐久性指数と相関がみられた。

次に、砂利の傾向を述べる。図-2～4より、耐久性指数との相関が高いものから順にPP値($r = -0.744$)、安定性($r = -0.527$)、吸水率($r = -0.359$)であった。これより、品質にばらつきの大い砂利では、品質の悪い粒子を破壊して得られるPP値や安定性のほうが、吸水率よりも砂利の耐凍害性を評価できていることが考えられる。特に、PP試験は実際の凍結融解と同じ氷圧を作用させる点で安定性試験よりも優れていると考えられ、吸水率5%以下の骨材に対しては耐久性指数との相関も良かった。

4. 乾燥収縮量推定手法の検討

4.1 目的

近年、骨材の品質低下によってコンクリートの乾燥収縮量の増加が懸念されている²⁾。コンクリートの乾燥収縮量を測定する方法としては「JIS A 1129 コンクリートの長さ変化試験」があるが、コンクリート供試体を製造した後、20℃、湿度60%の環境で6ヶ月の測定を行う必要があり、その検証は容易ではない。そこで、乾燥収縮量を比較的簡易に推定できる手法について検討した。

4.2 実験方法

表-3に示す13種類の低品質な砕石(Gmax25mm)を粗骨材として、W/C55%のAEコンクリートを練混ぜ、10×10×40cmの角柱供試体を製造し、JIS A 1129に従って長さ変化を測定した。6ヶ月経過時点の長さ変化率について、

表-3 乾燥収縮の実験に用いた粗骨材の種類

砂岩	頁岩	花崗岩	安山岩
3	1	1	8

表-4 比較対照とした物性と長さ変化率と関係

比較対象とした物性	測定方法	長さ変化率との関係	
		関係式	決定係数
粗骨材の基本物性	絶乾密度	JIS A 1110	1次式 0.22
	吸水率	JIS A 1110	1次式 0.21
	安定性	JIS A 1122	1次式 0.56
粗骨材の水蒸気吸着率	20℃、湿度33%での吸着率	1次式	堆積岩0.88 火成岩0.50
コンクリートの弾性係数	撓み振動	JIS A 1127 (角柱供試体)	2次式 0.61
	縦振動	JIS A 1127 (円柱供試体)	2次式 0.58
	超音波	超音波伝搬速度より算出 (円柱供試体)	2次式 0.55
	静弾性(1)	JIS A 1149 (1/3応力割線)	2次式 0.33
	静弾性(2)	初期接線	2次式 0.60

表-4に示す各種物性との対応を検討した。

乾燥収縮に影響を与える要因としては骨材の空隙や強度が関係していると考え、絶乾密度、吸水率、安定性損失質量百分率を候補とした。水蒸気吸着率とは、骨材の内部空隙も含めた比表面積を簡易に推定するために提案されている方法³⁾で、絶乾にした粗骨材を20℃、湿度33%の容器内に入れ、空気中の水蒸気を吸着させ、吸着前後の粗骨材の質量差から水蒸気吸着率を求めるもので、その水蒸気吸着率が骨材の比表面積と対応するというものである。また、乾燥収縮は主にペーストの収縮によって起こり、骨材はその収縮の抵抗する役割を果たす。従って乾燥収縮の大きなコンクリートは、骨材が軟らかく、結果としてコンクリートの弾性係数が低いことが予想される。そこで表-4に示すように様々な測定手法で弾性係数を測定した。なお、静弾性係数は、円柱供試体の圧縮試験時における破壊応力の1/3に至るまでの応力ひずみ曲線の割線で求めるのが一般的であるが、乾燥収縮は

低い応力で発生すると考えられることから、応力ひずみ曲線の初期接線からも弾性係数を求めた。なお、圧縮試験時のひずみはコンプレッソメータで測定した。

4.3 実験結果

コンクリートの6ヶ月経過時点の長さ変化率と表-4に示す各物性との関係を1次または2次式で回帰し、その回帰式の決定係数を求めた。この値を表-4に示す。

骨材の基本物性のなかで決定係数が比較的高かったのは安定性であった。水蒸気吸着率は図-5に示すように、堆積岩と火成岩とで傾向が異なったが、各決定係数は高かった。動弾性係数は3手法とも比較的高い決定係数を示した(図-6)。静弾性係数は1/3応力割線による値での決定係数は低く、初期接線での値は高かった。

以上の結果と試験の簡便性から判断して、容易に長さ変化率を推定する方法としては、動弾性係数の測定が最も良いと考えられる。今後とも試験データを増やし、適応範囲と評価指標値の検討を行う必要がある。

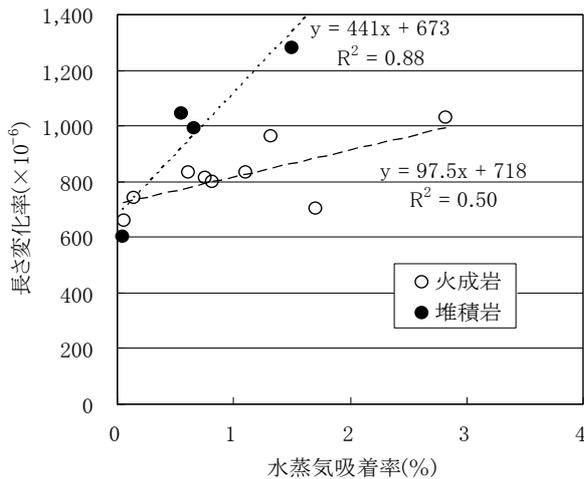


図-5 水蒸気吸着率と長さ変化の関係

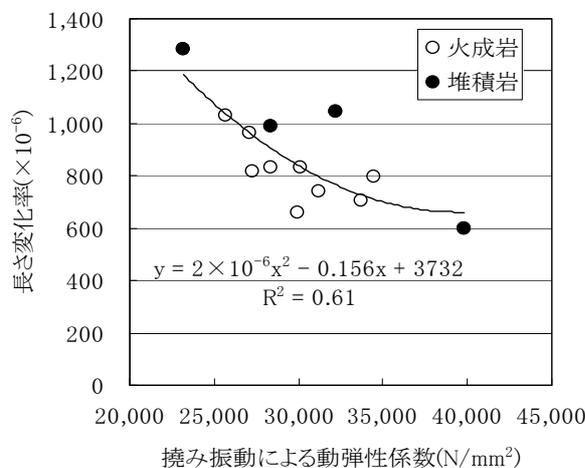


図-6 動弾性係数と長さ変化の関係

5. まとめ

20年度の検討から以下の結果が得られた。

- (1) 骨材の耐凍害性を評価する試験法として用いられている安定性試験は、溶液に骨材を浸漬中に結晶圧が作用すること、および溶液の温度や蒸発の条件が結果に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。
- (2) 骨材の耐凍害性の評価方法の検討結果として、吸水率5%以下の骨材に対しては、コンクリートの耐久性指数と最も良い対応を示したのは簡易凍結融解試験であった。
- (3) コンクリートの乾燥収縮量と比較的対応の良かった物性は、安定性、水蒸気吸着率および動弾性係数であった。試験の簡便性等を考慮すると、動弾性係数の測定が最も適していると考えられる。

上記の結果を得たが、(2)(3)については、限られたデータの結果であり、今後とも検討を継続する必要がある。

参考文献

- 1) 片平博、渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、pp.1351-1356、2005
- 2) 百瀬晴基他：全国のレディーミクストコンクリート工場を対象としたコンクリートの乾燥収縮に関する調査研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) pp.291-292、2007.8
- 3) 今本啓一、石井寿美江、荒井正直：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響、日本建築学会構造系論文集、第606号、pp.9-14、2006.8

A STUDY ON DURABILITY TEST METHOD OF LOW QUALITY AGGREGATE FOR DAM CONCRETE

Abstract :

The purpose of this study is to develop the effective utilization of low quality aggregates for dam concrete.

We studied the following three contents in 2008.

1. A study of soundness test ;

We studied the mechanism of the crystallization of sodium sulfate, and the effects of the surrounding environment on the process.

2. A study on valuation methods of aggregate ;

We researched the relation between durability factor of concrete and the following three factors of aggregate: water absorption; soundness; and the test results of the original freezing-thawing test for aggregate.

3. A study of prediction methods on drying shrinkage of concrete ;

We examined the correlation between drying shrinkage of concrete and various parameters.

Dynamic elastic modulus of concrete specimens was the most suitable index for the prediction of drying shrinkage.

Key words :

concrete , low quality aggregate , freeze-thaw resistance , soundness , freezer , drying shrinkage , elastic modulus