

博士論文

粗骨材がコンクリート構造物の耐久性に  
与える影響に関する研究

2024年9月

谷口 高志

岡山大学大学院  
環境生命科学研究科

## 要 旨

我が国では、1950年代後半の高度経済成長期から1970年代にかけて、社会インフラ整備が急速にすすめられた。この間、コンクリートの使用量も加速度的に増加し、これに伴い材料である骨材の使用量も拡大した。粗骨材については、元来使用されていた天然骨材が東京オリンピックなどで大量に消費されたことで、碎石の需要が拡大し、2002年のピーク以降半減するも年間5億トン以上の碎石の需要が数年続いた。こうした中で、骨材製造時の石粉の廃棄量を減らしたいという製造者の強い要望とさらなる骨材生産の円滑化を目的に、2009年にJIS A 5005にて、骨材の微粒分量の上限値が引き上げられ、微粒分の付着したコンクリートが出荷されるようになった。一方で、社会インフラについては、2000年以降“耐久性”の意識が高まり、初期の建設コストだけでなく維持管理等にかかるコストを含めたLCCが重要視されるようになった。“耐久性”の意識は、昨今の東日本大震災、熊本地震をはじめとする前例のない地震や近年増加傾向のある集中豪雨による水害等をはじめとする大規模災害を経験し、さらに加速した。コンクリート構造物においても、設計段階で耐久性に十分配慮し、施工段階では要求性能を満たすための品質確保が求められるようになった。加えて今日では「構造物の長寿命化」が求められており、構造物の設計思想の要となるコンクリートについては、安定的に一定の水準以上のコンクリートを生産することが求められている。

2023年制定コンクリート標準示方書【施工編】では、施工段階で「品質管理」を施工者と発注者が役割分担をしながら、コンクリートの要求品質を確保することが記載されている。品質管理の目的は、品質保証（構造物の品質を一定水準に確保すること）と品質改善（一定水準との乖離を解決するために改善すること）とされており、品質保証の手段の一つとしては一般的にJIS認証品の使用がある。ところが、凍結融解抵抗性については、JIS規格品の骨材を用いて空気量を $4.5\pm 1.5\%$ を満たしているものでも耐久性を得られない場合があるとされている。

本研究では、粗骨材の品質がコンクリート構造物の耐久性に与える影響について研究した。実験では、全国から収集した粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、コンクリートの乾燥収縮および凍結融解抵抗性について実験を行った。

粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の検討を行った。吸水率の大きい碎石を用いるほど、コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。火成岩や石灰岩の碎石を用いたコンクリートでは、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた場合、土木学会コンクリート標準示方書の予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が大きい場合では、 $\alpha$ に6を用いた方が計算値と実験値の誤差が小さい。一方、石灰岩を除く堆積岩では、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に6を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。従って、堆積岩は火成岩よりも吸水率の影響を受けやすいと言える。川砂利は、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた場合、予測式による計算値と実験値がよく一致した。ただし、川砂利は産地の流域に多い岩種の影響を受けることがあるため、堆積岩が多い場合には、吸水率の影響が大きくなる可能性がある。

また、コンクリートの凍結融解抵抗性については、使用する粗骨材の種類による凍結融解抵抗性について調べた。粗骨材の微粒分の影響を調べる実験においては、洗浄したもの、未洗浄のものを使用したコンクリートおよび洗浄時に回収した微粒分を混ぜたコンクリートを作製し実験を行った。コンクリートの凍結融解抵抗性との関係性は、骨材の種類や品質により異なっており、従来から凍結融解抵抗性の評価に使用されることの多い安定性がJIS規格値内の骨材でも、吸水率が高い場合はコンクリートの凍結融解抵抗性が低下する場合がある。さらに、JIS規格値を満たすコンクリートでも、粗骨材の表面の微粒分の付着状況によってはコンクリートの凍結融解抵抗性が低下する。製造工場での実績などで凍結融解抵抗性が十分に確認できない場合は、骨材表面の微粒分の付着状況に留意した練混ぜ方法を実施するのが望ましい。

## 目 次

第 1 章	序 論	1
1.1	緒 言	1
1.2	本論文の目的と構成	2
	参考文献	2
第 2 章	現在の骨材市場と骨材に関する従来の研究について	3
2.1	現在の日本の建設市場と骨材需給	3
2.2	骨材の概要	5
2.2.1	天然骨材の概要	5
2.2.2	砕砂・砕石の概要	5
2.2.3	その他の骨材の概要	6
2.2.4	副産骨材の概要	7
2.3	骨材資源の概要	9
2.3.1	岩石の種類	9
2.3.2	日本の地質構造	10
2.4	一般構造物用コンクリートの骨材の性質と岩石概観	12
2.5	骨材の品質評価方法とコンクリートの性能への影響	13
2.5.1	現状における骨材の品質規格	13
2.5.2	コンクリートの性能に与える材料の影響	14
2.6	骨材が起因する凍害被害	14
2.7	コンクリートの凍結融解抵抗性の評価に関する既報	15
2.7.1	粘板岩の砕石を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性	15
2.7.2	粗骨材の微粒分の影響	17
2.8	コンクリート標準示方書の乾燥収縮ひずみの予測式における骨材の評価	18
	参考文献	19
第 3 章	粗骨材がコンクリート構造物の耐久性に与える影響についての従来の研究	20
3.1	概 説	20
3.2	骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響	20
3.2.1	試験内容および結果	20
3.2.2	岩種・地質年代における評価	20
3.2.3	吸水率による評価	20
3.3	骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響	24
3.3.1	試験内容および結果	24
3.3.2	絶乾密度による評価	24
3.3.3	吸水率による評価	24
3.3.4	硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験による評価	24
3.3.5	凍結融解抵抗性に見られる砕石と砂利の違いに関する考察	24
	参考文献	32

第4章	粗骨材の品質が硬化後のコンクリートの性能に与える影響	33
4.1	概説	33
4.2	実験概要	33
4.2.1	使用材料および配合	33
4.2.2	練混ぜ	33
4.2.3	試験方法	33
4.3	実験結果および考察	36
4.3.1	各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度	36
4.3.2	各種骨材を用いたコンクリートの塩化物イオン透過性	36
4.3.3	粗骨材の微粒分がコンクリートの圧縮強度に与える影響	41
4.3.4	粗骨材の微粒分がコンクリートの塩化物浸透性に与える影響	42
4.4	本章のまとめ	43
	参考文献	43
第5章	粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響	44
5.1	概説	44
5.2	実験概要	45
5.2.1	使用材料および配合	45
5.2.2	試験方法	45
5.3	実験結果および考察	47
5.3.1	各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮	47
5.3.2	コンクリート標準仕様書における乾燥収縮ひずみの計算値と特性値の比較	51
5.3.3	粗骨材の微粒分がコンクリートの乾燥収縮に与える影響	57
5.4	本章のまとめ	58
	参考文献	58
第6章	粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響	59
6.1	概説	59
6.2	実験概要	60
6.2.1	配合条件および試験結果	60
6.2.2	試験方法	60
6.3	実験結果および考察	63
6.3.1	各種粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性	63
6.3.2	粗骨材表面に付着する微粒分の影響	67
6.3.3	粗骨材の産地の影響	76
6.4	本章のまとめ	78
	参考文献	79
第7章	結論	80
	附録 実験に使用した骨材の外観写真	82

# 第1章 序 論

## 1.1 緒 言

近年、紀元後2000年の歴史に例を見ない地球温暖化が進行しており、この影響により大雨や短時間豪雨の頻発等で、世界中で洪水や土砂災害等の気象災害が激甚化・頻発化している<sup>1)</sup>。災害大国とも呼ばれる我が国においては、その渦中にあり、局所的・突発的な豪雨の頻発化や台風の大規模化が著しく、国土の特徴も相まってこれまでに大きな被害を記録した。中でも、平成30年7月豪雨での倉敷市真備町の浸水被害、令和元年の東日本大型台風による被害、令和2年7月豪雨での球磨川水系の洪水被害、またこれら豪雨に伴う土砂災害は記憶に新しい。さらに、地震大国でもある我が国では、阪神・淡路大震災や東日本大震災等これまでも重大な危機に見舞われてきた。今後も大規模地震の発生リスクは高く、国土交通省の令和3年度の発表においては、南海トラフ地震および首都直下地震のいずれも今後30年以内に発生する確率が70%を超えている<sup>2)</sup>。こうした災害の激化とそれに伴う構造物の重大な被害を経験し、コンクリート標準示方書の改訂とともに、各構造物の技術基準もたびたび改訂されてきた。橋や高架の道路等の技術基準である「道路橋示方書」を例に挙げると、昭和47年制定以降7回改訂されてきたが、直近の平成29年の改訂では、①「部分係数設計法」および「限界状態設計法」の導入②設計供用期間100年を標準とし、維持管理の方法を設計時点で考慮③熊本地震を踏まえた対応等が行われた<sup>3)</sup>。また、港湾構造物の技術基準である「港湾の施設の技術上の基準」につき、平成11年にL2地震動を想定した設計手法の導入及びコンクリート部材設計へ限界状態設計法の導入が行われて以降、平成19年、平成30年に地震や津波等の現代社会を取り巻く災害に対応してきた<sup>4)</sup>。これらの技術基準の変遷により、耐震性能を始めとした高い要求性能が各構造物に求められるようになった。

コンクリート構造物の施工段階において、この“要求性能”を確保するためには、コンクリートの品質管理が適切に行われている必要がある。2023年制定のコンクリート標準示方書[施工編]（以下、標準示方書[施工編]と示す。）では、品質管理の目的は、品質保証（構造物の品質を一定水準に確保すること）と品質改善（一定水準との乖離を解決するために改善すること）により、構造物の要求性能に対する目標との差を無くす為のPDCAサイクルを繰り返すことを指している<sup>5)</sup>。そして、一般的にコンクリートの品質保証は、JIS A 5308:2024 附属書JA「レディミクストコンクリート用骨材」やJIS A 5005:2020「コンクリート用砕石及び砕砂」の規格値を基に行われる。ところが、これら規格値は硬化後のコンクリートの耐久性を保証するものではない。それは、硬化後のコンクリートの品質が、フレッシュ性状、配合、使用する材料（主にセメント、水、骨材、混和材、混和剤）の種類やその品質、施工環境など様々な要素から決まってくるからである。特に、コンクリートの凍結融解抵抗性については、JIS規格品の骨材を用いて空気量を $4.5\pm 1.5\%$ を満たしているコンクリートでも十分な耐久性を得られない場合があるとされている<sup>5)</sup>。それは、コンクリートの約6～7割を占める骨材の品質が、硬化後のコンクリートの品質に与える影響は小さくないこと、に加えて一般的な指標とされている安定性試験に不確かさがあるからである。

骨材の品質については、需要が拡大するにつれて低下の一途をたどっている。1950年代後半の高度経済成長期から1980年代にかけて、社会インフラ整備が急速にすすめられた間、コンクリートの使用量が加速度的に増加し、これに伴い材料である骨材の使用量も拡大した。元来使用されていた天然骨材が東京オリンピックなどで大量に消費されたことで、砕石の需要が拡大し、2002年のピーク以降半減するも年間5億トン以上の砕石の需要が数年続いた<sup>6)</sup>。人工骨材については、天然骨材の不足を補う砕石および砕砂の生産を円滑化するために、2009年にJIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」において、微粒分の規定値がそれまでの1.0%以下から3.0%に、さらに粒形判定実積率が58%以上の場合は5.0%までに緩和された経緯がある。

また、コンクリート用骨材は、産地、製造方法、原料である岩種等で区別すれば、多種多様なものが使用されている。硬化後のコンクリートの性能と骨材の岩種との関係性について、多くの

研究がされており、コンクリートの耐久性への影響があることまでは周知のことであるが、JIS規格値では一律にコンクリートの耐久性を評価できない。近年では、JIS規格品のレディミクストコンクリートを使用したにも関わらず、想定していた供用期間よりも早く劣化してしまう構造物が散見されている。さらに、高度経済成長期に建設された構造物が経年劣化に加えて、コンクリートの中性化や塩害、凍害、ASRおよび科学的侵食が複合的に作用し、想定していた供用期間よりも早く劣化し、機能が大幅に低下したコンクリート構造物が増加している。これらの事象の原因の一つとして、骨材の品質も含まれている可能性が高い。今日使用されている骨材の品質とコンクリート構造物の耐久性との関係性への理解が重要である。

## 1.2 本論文の目的と構成

本論文では、全国で使用されている粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性及び乾燥収縮に与える影響について検討を行った。実験により岩種の異なる骨材を使用したコンクリートの性能について整理し、骨材表面に付着する微粒分の影響についての検討も行った。

本論文は、全7章で構成されている。以下にその構成を示す。

- ・第1章「序 論」では、本研究の背景、目的および論文の構成について述べた。
- ・第2章「現在の骨材市場と骨材に関する従来の研究について」では、現在の日本における骨材の使用状況、報告されているコンクリート凍害事例、コンクリート標準示方書についての乾燥収縮ひずみの予測式における骨材の評価について述べる。
- ・第3章「粗骨材がコンクリート構造物の耐久性に与える影響についての従来研究」では、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮および凍結融解抵抗性に与える影響についての従来研究についてまとめる。
- ・第4章「粗骨材の品質が硬化後のコンクリートの性能に与える影響」では、粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度および塩化物イオン透過性に与える影響について述べる。また、骨材の微粒分の影響についての実験結果について述べる。
- ・第5章「粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響」では、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮について与える影響についての実験結果について述べる。また、骨材の微粒分の影響についての実験結果について述べる。
- ・第6章「粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響」では、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について述べた。また、骨材に付着している微粒分の影響についての実験結果について述べる。
- ・第7章「結 論」では、本研究で得られた知見を取りまとめ、結論とする。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：序章 気候変動に伴う災害の激甚化・頻発化，令和4年版国土交通白書，pp.4-7，2022
- 2) 国土交通省：第I部第1章 現在直面する機器と過去の危機，令和3年版国土交通白書，pp.4-25，2021
- 3) 国土交通省：「橋，高架の道路等の技術基準」（道路橋示方書）の改訂について，Press Release，2017.7.21
- 4) 沿岸技術研究センター：港湾の技術基準の変遷について，CDIT vol.55，pp.28-31，2021.1
- 5) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書[施工編：本編]，pp.16-17，2022.9
- 6) 鈴木 一雄：生コンクリート工以上における天然骨材の使用状況とその将来，日本コンクリート工学協会 コンクリート工学：Vol.46，No.5，pp17-19，2008.5

## 第2章 現在の骨材市場と骨材に関する従来の研究について

### 2.1 現在の日本の建設市場と骨材需給

わが国では、1950年代後半の高度経済成長期以降1980年代まで、加速度的にインフラ整備を進められた。図2.1-1は、令和5年までの建設投資額の推移を示している。建設投資額を見ると、1992年に建設投資額がピークになって以降、2010年までで約42兆円まで減少するも、ここ10年では緩やかに増えてきており、現在（令和5年調査）では約70兆円に至る。図2.1-2の通り、レディコンクリート及び骨材の需要量については、同様にピーク時から2009年までに半減し、これ以降もゆるやかに減少している。

天然骨材と砕石の使用量については、図2.1-3の通り、昭和の終わりにかけて、砕石が天然骨材の使用量を徐々に上回っている。近年では全体量の約7割程度砕石が使用されている。

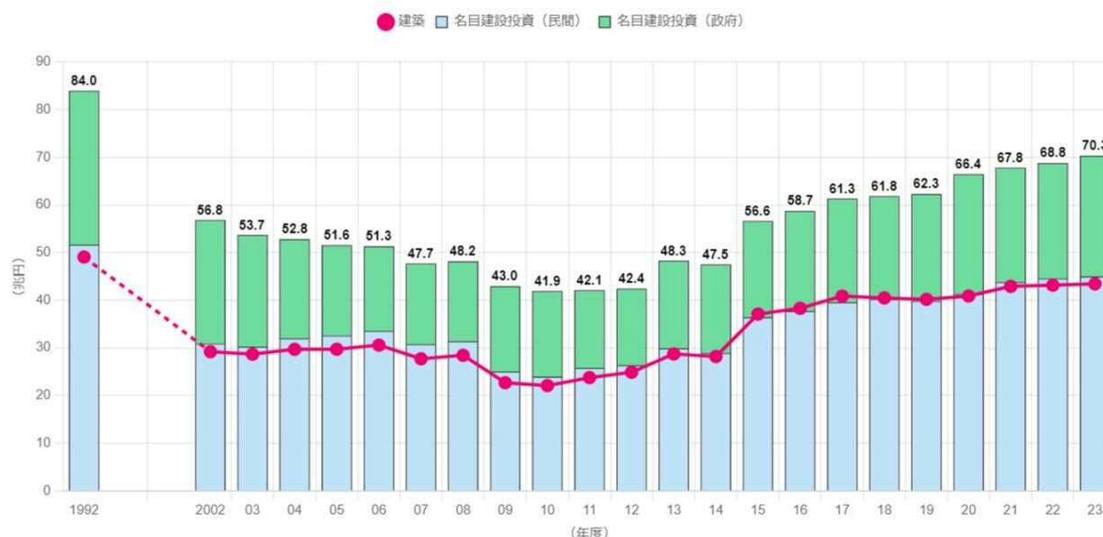


図 2.1-1 令和5年度建設投資見通し（国土交通省 HP より抜粋）

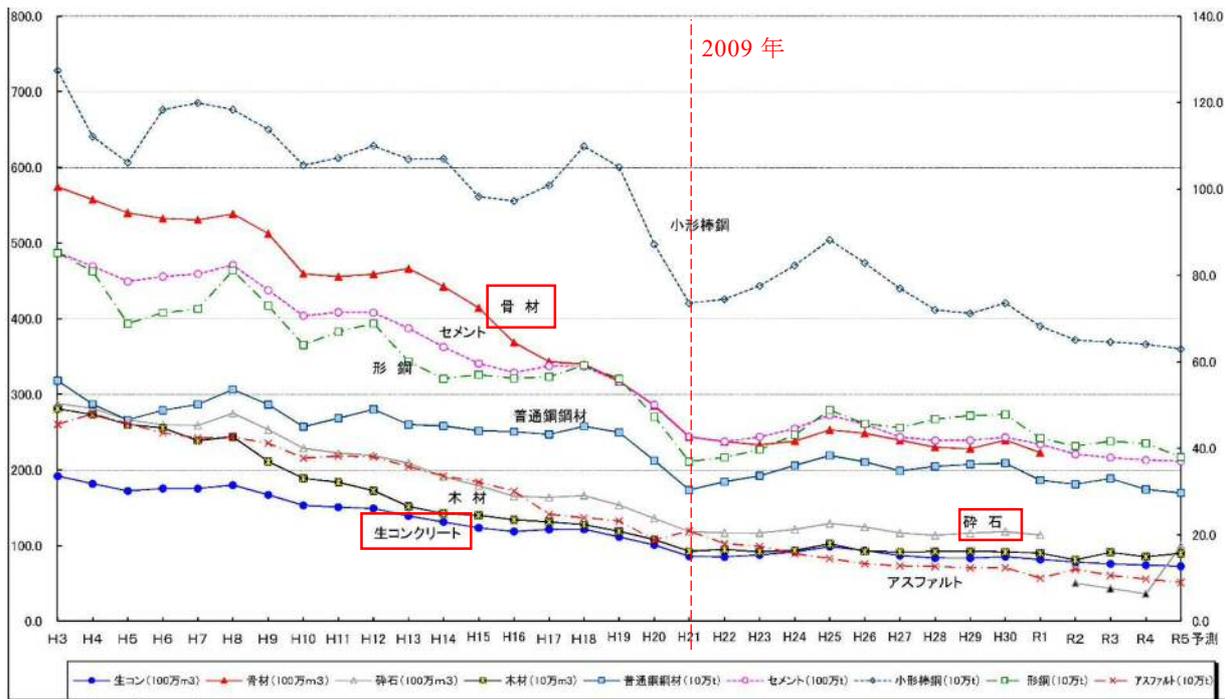


図2.1-2 令和5年度 主要建設資材需要見通し（国土交通省HPより抜粋）  
 （横軸：年度，縦軸：需要量（生コンクリート，骨材，砕石は左側 単位：100万m<sup>3</sup>））

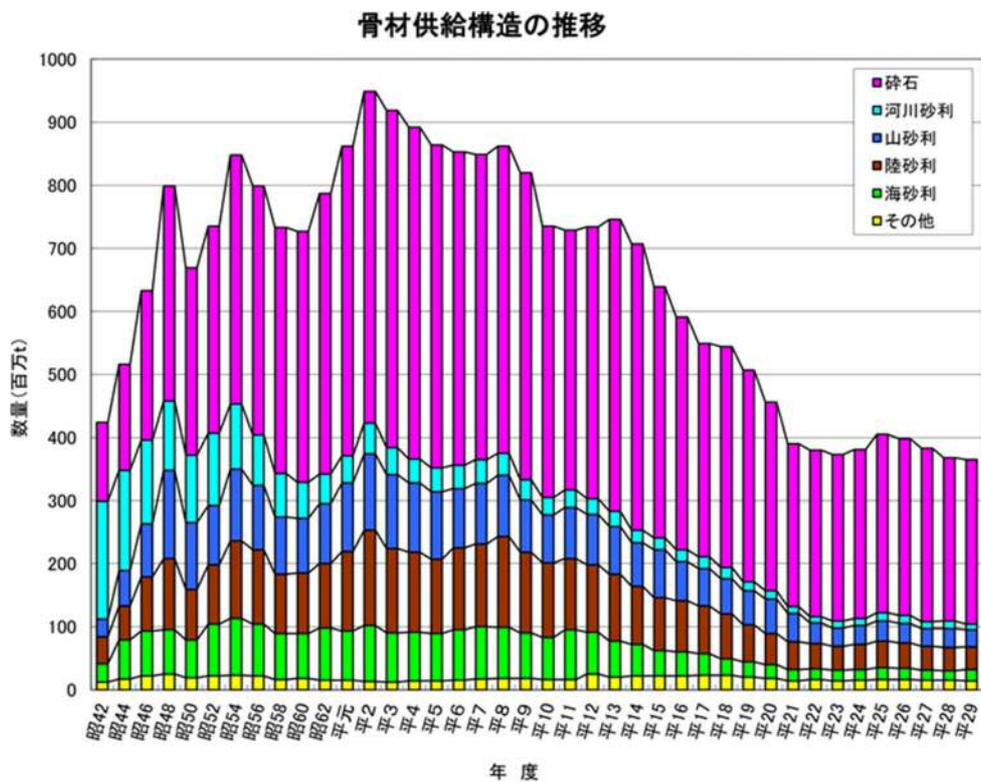


図2.1-3 骨材供給構造の推移（日本砕石協会HPより抜粋）

## 2.2 骨材の概要<sup>1)</sup>

### 2.2.1 天然骨材の概要

#### (1) 川砂・川砂利

川砂・川砂利は、河川水系上流の山や洪積台地の岩石が風化と浸食作用によって小粒径化した粒子の河床堆積物であり、水流による摩耗作用によって角張りが少なくなって丸みを帯び、上流における粒径は大きい、下流に行くほど粒径は小さくなる。一般に、水流の洗い作用による有害鉱物の溶出と摩耗作用によって、脆弱な部分がすり減り、清浄、かつ堅硬となり、良質のコンクリート用骨材として使用されてきた。しかし、砂利採取により河床が低下して橋脚の洗堀が懸念されるようになり、河川敷や河道における川砂・川砂利の採取は、1965年頃から規制されるようになった。現在、河川骨材の採取は、阿賀野川、利根川、信濃川、天竜川、富士川、木曾川など、本州中部を流域とする大河川に絞られている。中国地方および東北地方の日本海側の河川は流量が少なく、川砂・川砂利の採取は少ない。

#### (2) 陸砂・陸砂利

陸砂・陸砂利は、新生代・第四紀以降に形成された沖積沿層（平野）、盆地、扇状地で堆積物を掘削して産出する。通常、表層が耕地として使用されているので、表土を除去して保管し、その下の砂礫層を10～15m程度掘削した後、別の泥土で埋め戻し、元の表土を農地用に戻している。掘削した砂礫は、泥分の除去、洗浄およびふるいわけによる分級を行い、また径の大きな玉石は破碎によって玉砕（玉石碎石）としている。陸砂・陸砂利は、堆積年代が新しく、一般に地下水位以下にあるため風化作用を受けておらず、コンクリート骨材として良好な品質を有している。中国以西の地方では平野や扇状地の発達が不良で、陸砂・陸砂利の採取は一部に限定されている。

#### (3) 山砂・山砂利

山砂・山砂利は、新生代・新第三期末から第四期初期の河床や海底の堆積物が、地殻変動によって河岸段丘や海岸段丘、丘陵地を形成した所に産する。北海道、東北地方の日本海側、北陸、南関東、東海地方に賦存している。首都圏では房総半島、近畿地区では京都・城陽市周辺が山砂の大規模な供給地となってきたが、近年採掘量が低下してきている。これらの骨材は堆積年代が古く、固結が進行している傾向があると同時に、地下水位よりも上にあることが多いため、風化作用を受けて粒形の小さいものが多く、また粘土分、泥土分などが多いのが特徴である。このようなことから、山砂の多くは粗粒の他の骨材と混合して用いられることが多い。

#### (4) 海砂・海砂利

氷河期の海面は現在よりも140～200m低下していたので、当時の海岸部分が大陸棚となっており、旧河川の堆積物が海砂・海砂利として堆積している。骨材の供給事情が悪化するに従って、瀬戸内海、玄界灘、鹿児島湾などで重機を搭載した船舶からバケット、もしくはポンプで採取され、陸揚げした後で真水による除塩を行って使用されてきた。特に、西日本では海砂への依存度が高かったが、近年、海域の環境保全の重要性の認識が高まり、各地で海砂の採取規制がおこなわれるようになってきている（表2.2-1）。海砂採取の許認可は都道府県知事にある。徳島、香川、愛媛、兵庫、岡山、広島は既に全面禁止となっており、現在採取されているのは高知、山口、福岡、佐賀、長崎、熊本、大分、鹿児島、沖縄県となっているが、いずれの県においても採取を制限、もしくは削減方向に向かっているなかで、2005年の海砂使用量は、113万2000m<sup>3</sup>となっている。

### 2.2.2 砕砂・砕石の概要

砕砂・砕石は、良質の砂・砂利の枯渇にともなって生産量が増大している主要なコンクリート用骨材である。骨材の供給事情の変化によって、1961年にJIS A 5005砕石が、1980年にJIS A 5004砕砂が制定されている。砕石製造事業所は、現在全国に1300工場があり、2億6千万トンが製造されている。以前の主要な用途は道路用路盤材料であったが、粒状路盤材料が再生骨材などの副産材料に移行するようになり、全生産規模は1990年の5億2600万トンから減少傾向になり、2003年に

は3億9800万トンに約25%低下している。しかし、砕石の使用比率を同じ年度で比較すると、55%から62%に増大しており、これはコンクリート用途の拡大によるものと考えられる。現在の製造量は2億6300万トンであり、その用途比率は、道路用砕石39.9%、コンクリート用砕石49.9%、その他10.2%となっている。このようなことから、コンクリート用骨材としての品質に重点を置く製造への移行が課題となっている。しかし、砕石事業としては、国民の環境保全意識の高まり、生産地と需要地に係わる工場立地と運搬、コンクリート用骨材としての微粒分・砕石粉の処理などの課題がある。

#### (1) 骨材資源としての火成岩

火成岩は、活発な火山活動によって全国的に形成されている。白亜紀の火成岩は、主として流紋岩となって産出する。これは一般に硬質で砕石原料として活用されており、西南日本内帯の中国地方を中心として、全国の岩石別砕石資源採掘量の3%程度を占めている。

新第三紀および第四紀の火成岩は、主に安山岩および玄武岩として産出する。しかし、火山灰からの堆積岩となった凝灰岩と混在する場合が多く、岩脈の区分が重要である。前者は硬質で採石に適するが、後者は軟質である。全国の岩石別砕石資源採掘量の28%を占めている。深成岩の大部分を占める花崗岩は、古生代、中生代、第三紀に形成されたものもあるが、ほとんどのものは中生代・白亜紀のものであり、西南日本内帯に分布するほか、北上山地・阿武隈山地にもまとまって分布している。深成岩は、全国の岩石別砕石資源採掘量の2%程度と少ない。

#### (2) 骨材資源としての堆積岩

堆積岩は、古生代から第四紀の全ての年代に渡って形成されたものが、全国に広く分布している。古生代から中世代に形成された堆積岩は、固結度が進み、硬質で安定した良質の骨材資源として活用されている。主要な地域は、北上山地、足尾山地、関東山地、東海地方、美濃から丹波地方、紀伊半島、四国・九州南東部である。砂岩は全国の岩石別砕石資源採掘量の34%を占め、石灰岩および珪岩は17%を占めている。

#### (3) 骨材資源としての変成岩

古生代から中生代に形成された変成岩は各地に分布する。結晶片岩は神居古潭、中国山地の一部、関東山地、紀伊半島の一部、四国中央部に分布している。片麻岩は日高山脈、飛騨山地、三河地方に分布する。変成岩は、劈開する性質が見られ、扁平の形状となりやすいので、骨材資源には適さない。

### 2.2.3 その他の骨材の概要

#### (1) まさ土

まさ土は、花崗岩質岩石の風化残積土であり、領家型まさ土と広島型まさ土がある。前者の形成時期は二畳紀で、 $\text{SiO}_2$ は65~70%、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Fe}$ がやや多く、瀬戸内海、近畿地方・生駒、笠置地方、中部地方に分布（長野県高遠付近から紀伊半島北部、四国北部、山口県柳井付近を経て大分、熊本に位置に至る）する。後者の形成時期は白亜紀であり、 $\text{SiO}_2$ は70%を超え、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Fe}$ は少なく、広島、岡山、神戸地方に分布する。主要な鉱物は、石英、正長石、斜長石のほか、地域によって雲母、角閃石などが含まれている。まさ土は、風化の程度によって岩に近いものから、粒径3mm以上の粗粒、中粒、1mm以下の細粒、シルト、粘土のような微粒子を含んだものまでである。まさ土の粒度分布は、粒子は破碎しやすいために、土質分野では試料に一定外力を加えて調整してから試験することが提案されている。まさ土の真密度は $2.65\text{g/cm}^3$ 程度であるが、風化すると $2.4\text{g/cm}^3$ 程度まで減少する。良質の天然骨材資源の少ない中国地方では、海砂の採取規制の代替砂として、まさ土の粉碎整粒処理を行うことによって、コンクリート用細骨材として活用することが進められつつある。花崗岩は風化した多孔質の脆弱部分があり、また微粒分に雲母などの粘土鉱物が残像するため、単位水量の増大、強度の低下などの影響がある。このため、粉碎整粒処理して洗浄すればコンクリート用骨材として使用される。

## (2) しらす

しらすは第四紀の火砕流堆積物であり、始良カルデラ（鹿児島湾奥部）を中心とした南九州に大規模に分布するほか、東北地方北部、北海道のカルデラ周辺にも小規模ながら堆積している。カルデラを形成した火山からの火砕流は、火口から空中に高く放出される火山灰や軽石が地表に落下したものと、地表面に沿って流れ出たものがある。しらすは、大部分は破碎したガラス片状の粒子から成り、表面が滑らかで角張った形状をしており、これに軽石も加わっている。しらすの密度は深いところほど密度が大きく、一般に $2.40\text{g/cm}^3$ 程度で一般の砂よりも小さい。浅い部分に堆積したものは風化作用を受けている。南九州においては、コンクリート用細骨材としてしらすを有効利用する研究が進められている。

## (3) ダム堆砂

ダム堆砂の推定量は、全国で30億t以上に上ると推定されるが、一般に採取地と需要地とが遠距離で運搬コストが高く、骨材としての採算性が悪いため、現状では骨材資源としての利用は少ない。

## (4) 輸入骨材

日本国内における骨材資源の枯渇にともなって、特に西日本における海砂の採取規制によって、さらには関西空港の第2期工事における海外砂の輸入を契機として、海外からの骨材輸入が促進されたようである。細骨材の輸入の端緒は1990年頃のバブル景気であり、その頃は中国などの近隣諸国から100万t程度が輸入され、2005年頃には400万t以上に達していた。主な輸入国は中国、北朝鮮から、千葉・東京・川崎・横浜、大阪・和歌山、門司・長崎、沖縄の港に陸揚げされた。この他、ベトナム、マレーシア、フィリピンからも試行的輸入がある。これらの輸出国のなかで中国の占める割合が90%以上を占めていた。ところが、海洋環境と生態系を保護し、海砂の過剰な採取と損害を防ぐため、中国は2006年5月から天然砂の輸出を禁止し、2007年3月からは台湾地区、香港特別行政区、マカオ特別行政区以外への輸出禁止を実施すると発表した。輸入砂のほとんどが、国内の砂、砕砂との混合骨材として使用されており、これを用いたコンクリートの品質は概ね良好のようである。しかし、海外における採取場所による骨材品質の変動、輸出国の国内事情による供給の安定性、為替レートの変動による価格安定性、海上輸送と荷役などの課題が存在する。このようなことから、日本のコンクリート用細骨材の供給を輸入砂に頼るのは問題が大きいと言われている。

### 2.2.4 副産骨材の概要

近年、環境保全や廃棄物の有効利用に対応するため、リサイクル法（1991年）が施工され、廃棄物（副産物）の「発生の抑制」、「再利用の促進」、「適正処理の推進」を基本とした各種の施策が進められている。そして、コンクリート塊からの再生骨材、副産物特に製鉄および金属精錬によって発生するスラグ、都市ごみおよび下水汚泥焼却灰からの熔融スラグなどを、コンクリート用骨材として使用することが求められている。構造物の解体に伴って排出されるコンクリート塊の量は、毎年約3500万tにのぼり、2002年度の国土交通省の調査結果によれば、この97.5%が再利用されている。しかし、大部分は路盤材料への用途であり、コンクリート用再生骨材としての活用は未だ十分とは言えない。再生骨材もしくはこれを用いたコンクリートに関する品質規格は、2005～2007年にかけて、JIS A 5021、JIS A 5022およびJIS A 5023として制定されている。

製鉄および非鉄金属の精錬工程で発生するスラグの発生量は、表2.2-2に示す通りである。JIS A 5011「コンクリート用スラグ骨材」に、高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、銅スラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材の4種類のスラグ骨材の品質が規定されている。これらのスラグ骨材は、鉄石を熔融して金属成分とスラグとを分離し、冷却固化したものを破碎処理して、コンクリート用骨材として適当な粒度調整を行ったものである。目的とする金属の種類、熔融温度の低下およびスラグの分離を容易とするための石灰石の投入量、冷却条件などによって、骨材の性質

が変化する。そして、土木学会および日本建築学会は、それぞれのスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針を制定している。都市ごみおよび下水汚泥焼却灰などのコンクリート用溶融スラグ骨材は、2006年にJIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」制定された。

表 2.2-1 海砂採取の規制状況

地区・府県名		記 事
四国地区	徳島県	1978 年度以降採取禁止。
	香川県	2005 年度以降採取禁止。
	愛媛県	2006 年度以降採取禁止。
	高知県	海外で採取し、県外へ移住してきたが、2003 年度以降採取禁止。年間採取総枠は 100 万 m <sup>3</sup> 。
関西地区	和歌山県	採取実績無し。
	大阪府	採取実績無し。
	兵庫県	1978 年度以降採取禁止。
中国地区	岡山県	2003 年度以降採取禁止。
	広島県	1998 年 2 月以降採取禁止。
	山口県	瀬戸内海以外でも採取。前年の実績を上回らないことが条件で、採取量 100 万 m <sup>3</sup> 弱。
九州地区	福岡県	1980 年度の実績 550 万 m <sup>3</sup> を上限として採取を認めているが、「海浜海底保全調査(2004 年)」の結果により判断。
	佐賀県	2001 年度より海砂採取料の徴収。採取許可継続中。
	長崎県	2000 年度以降削減の方向性で移行し、2004 年 6 月以降は採取限度を知事が決定。
	熊本県	採取量 35 万 m <sup>3</sup> 程度。
	大分県	採取許可量を定めていない。
	宮崎県	採取実績無し。
	鹿児島県	1998 年度から削減方向。現在前年度比 2% ずつ削減中。

表 2.2-2 副産物の種類と発生量

副産物の種類		発生量 (千ton/年)	コンクリート用骨材への利用 (千ton/年)		年度／出所
コンクリート塊		32,200	—		2005年 国土交通省
高炉スラグ	徐冷スラグ	24,758 (水砕率)	粗骨材	379	2005年 国土交通省
	急冷スラグ		細骨材	2,779	
フェロニッケルスラグ		2,498	細骨材	176	2003年
銅スラグ		2,318	細骨材	62	鐵鋼スラグ協会
電気炉スラグ	酸化スラグ	3,494	細・粗骨材	49	2005年 鐵鋼スラグ協会
	還元スラグ		—		
転炉スラグ		9,933	—		

## 2.3 骨材資源の概要<sup>1)</sup>

### 2.3.1 岩石の種類

砂・砂利などの天然のコンクリート用骨材は、その物理的、鉱物的特性がコンクリートの品質に影響を及ぼしやすい。地質年代について表 2.3-1 に示す。新第三紀程度までの岩石の生成年代であれば、年代が古いものほど変性作用や風化などの影響を受け、骨材の物理的、化学的性質が変化すると考えられる。岩石はその成因から火成岩、堆積岩、変成岩に大別される。砂・砂利などの天然のコンクリート用骨材は、その物理的、鉱物的特性がコンクリートの品質に影響を及ぼしやすい。新第三紀程度までの岩石の生成年代であれば、年代が古いものほど変性作用や風化などの影響を受け、骨材の物理的、化学的性質が変化すると考えられる。岩石はその成因から火成岩、堆積岩、変成岩に大別される。

#### (1) 火成岩

火成岩は、マグマが固結してできた岩石で、地表付近で急冷固化したものは火山岩（流紋岩、安山岩、玄武岩等）、地下の浅い箇所では半深成岩（はん岩、ヒン岩、輝緑岩等）、地下深部で徐冷固化したものは深成岩（花崗岩、閃緑岩、斑れい岩、かんらん岩等）に区分される。マグマが地表面に出て急激に固化すればガラス質または微細な結晶の集合体になる。マグマの中には地表に出る以前に大きな結晶を含むものがあり、これらが後から固結した石基のなかに斑状の組織を呈して肉眼で識別できるものもある。深成岩はマグマが徐冷固化するので、完晶質粗粒の組織となっている。花崗岩、玄武岩は風化を受けていなければ強度が大きい。地表部に存在するものは微粒の砂となっている。流紋岩はオパールを、安山岩は石英や長石などを含むことが多い。安山岩や玄武岩が風化すると、スメクタイト、クロライトなどの粘土鉱物を含むことがある。

#### (2) 堆積岩

堆積岩は、水底に砂や泥などが堆積して形成された岩石であり、地層をなして産出する。堆積岩は、岩石の風化物が固結した砕屑石（泥岩、頁岩、粘板岩、砂岩、礫岩）、火山噴出物が固化した火山砕屑岩（凝灰岩）、海水や湖水中の溶解物質が沈殿した化学沈殿岩（石灰岩、チャート、石膏）、植物や動物の遺骸が堆積した有機岩（石灰岩、チャート）に分類される。砕屑岩は堆積した粒子の大きさから、礫岩（粒形 2 mm 以上）、砂岩（1/16～2mm）、泥岩（1/16mm 以下）に区分される。形成年代が古いものほど硬くなるのが特徴である。石灰岩やチャートは、石灰質、ケイ酸質の生物遺骸や化学的堆積物が固結したものである。一般に、新生年代以降に形成された堆積岩は軟らかく、骨材資源には利用できない。堆積岩で骨材資源に利用されるものは、石灰岩、中生代・古生代に形成された砂岩がある。チャートは風化しにくく硬いが、破碎すると鋭利な稜が現れ、コンクリート用砕石としての粒形が劣る場合が多い。

#### (3) 変成岩

変成岩は、火成岩および堆積岩が地殻変動やマグマの高温などの作用によって変成作用を生じた岩石である。これには、広域的な地殻変動の高温高压作用による変成を受けた広域変成岩（結晶片岩、千枚岩、片麻岩、蛇紋岩）、マグマや花崗岩の高温体に接触して変成を受けた接触変成岩（ホルンフェルス、大理石）などがある。一般に、変成岩の組織は劈開しやすいものが多く、骨材としては適さない。

## 2.3.2 日本の地質構造

### (1) 構造線

日本の砕石資源岩石の賦存分布を都道府県ごとに示した資料が刊行されている。日本の地体構造を概観すると次のようである。(図 2.3-1) 日本の地体構造は、フォッサマグナ(大地溝帯:新潟平野, 長野盆地, 松本盆地, 佐久盆地, 甲府盆地などを含む)の西縁の断層線である糸魚川—静岡構造線で東北日本と西南日本に大別され, 西南日本は中央構造線(諏訪湖—赤石山脈—紀伊半島—四国山脈—八代)を境にして, 能登半島, 中国地方, 北九州地方を含む西南日本内帯と, 紀伊半島南部, 四国山脈南部, 南九州, 南西諸島を含む西南日本外帯に区分される。

これらの構造線に区分されて地質構造は特徴的に変化する。西南日本は古生代と中生代の地層や岩石が分布し, 東北日本は新生代の地層や岩石が分布している。なお, フォッサマグナは新生代・第三紀の初期に活動を開始し, 新第三紀・中新世になって海底に沈んだ, その後海底火山が活動し隆起して陸地となり, 火山活動は現在も継続している。中央構造線は, 中生代・白亜紀の中期以前に形成されている。

### (2) 西日本

西南日本内帯の地層は, 北部は片麻岩と花崗岩に代表される飛騨変成帯, 結晶片岩, 石灰岩台地を形成する三郡変成帯, 古成層が発達した丹波帯, 雲母片岩, 片麻岩とそれともなう花崗岩の領家変成帯によってできている。

西南日本外帯は帯状分布をなすのが特徴であり, 北から順に, 結晶片岩の発達した三波川変成帯, 変成古生層の秩父帯, 上部中生層と下部第三紀層からなる四万十帯から構成されている。これらの地層は南西諸島まで確認される。また, この外帯は糸魚川—静岡構造線によって分断されるが, 外帯の地層を特徴づける三地層は関東南部にも連続して認められる。

### (3) 東北日本

東北日本南部の関東山地は南西日本外帯の延長であり, 北部は太平洋側の北上, 阿武隈山地と日本海側のグリーンタフ地域に大別される。北上・阿武隈山地は古生層および中生層が発達し, 阿武隈山地は変成岩も発達している。グリーンタフ地域は火山岩類の褶曲した新第三紀層である。北海道西部は東北日本の延長であり, 中央部は西から石狩帯, 結晶片岩からなる神居古潭変成帯, 片麻岩や雲母片岩が特徴的である日高変成帯, 常呂帯で構成され, 北海道東部は千島帯である<sup>1)</sup>。

表 2.3-1 地質年代<sup>1)</sup>

地質年代(代・紀・世)			百年前	備考		
新生代	第四紀		沖積世	0.01		
			洪積世			
	第三紀	新第三紀	鮮新世	2		
			中新世	7		大規模な火山活動
		古第三紀	漸新世	25		大陸から日本列島の分離
			始新世			
晩新生						
中生代	白亜紀		65	大規模な火山活動		
	ジュラ紀		135			
	三畳紀		180			
古生代	ペルム紀		245			
	石炭紀					
	デボン紀		409			

## 日本列島の地質

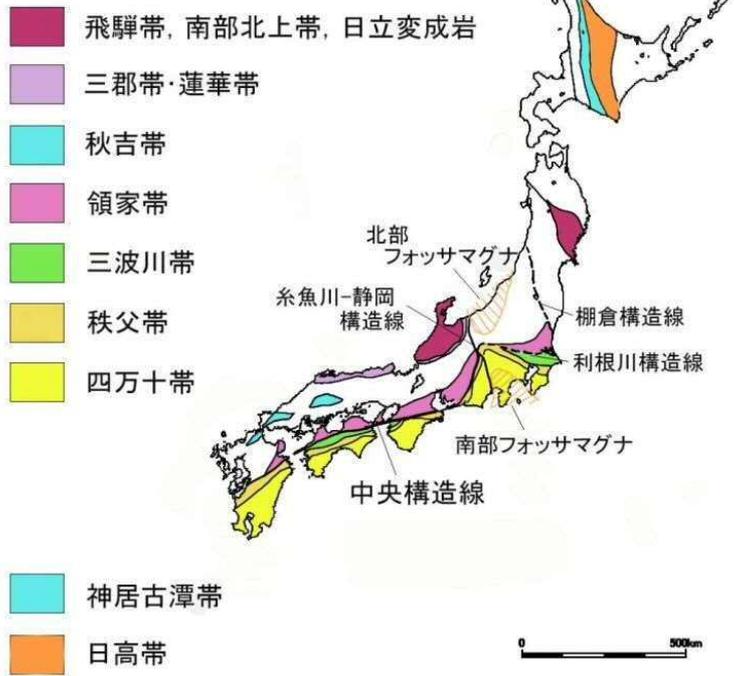


図 2.3-1 日本の地体構造<sup>1)</sup>

## 2.4 一般構造物用コンクリートの骨材の性質と岩石概観

コンクリートの強度および耐久性に悪影響を与えないために、清浄で、シルト、粘土、石炭、軟らかい石片、有機物、塩類などを含んでいないこと。川砂・川砂利がもっとも適しており、浜砂・浜砂利、山砂・山砂利および砕石を使用する場合は、水洗などの前処理を十分にする必要がある。

コンクリートが気象作用に対して耐久性であるために、物理的に安定であること、すなわち水分の吸収または温度変化により崩壊したり、コンクリートに害を与えるような体積変化を起こしたりしないこと。川砂・川砂利が適しており、岩石としては、古生層の硬質砂岩、チャート、石灰岩、第4紀火山岩、半深成岩（輝緑岩、斑岩、ヒン岩）、深成岩（花崗岩、閃緑岩、斑レイ岩）、片麻岩がのぞましい。

水/セメント比の管理を容易にするために、割れ目が少なく、間隙率および吸水率が低いこと。また水を吸着してしまうモンモリロナイト系の粘土鉱物が入っている岩石はさけるべきである。頁岩、粘板岩、第3紀の軟質の砂岩と凝灰岩質岩石と火山岩、多孔質の第4紀火山岩、蛇紋岩、結晶片岩は一般にのぞましくない。

セメントペーストの効果を十分発揮させるために、セメントペーストの強度以上の強度を持つこと。第3紀の軟質の砂岩と凝灰岩はのぞましくない。

水密的なコンクリートをつくるためにある程度以上の密度をもつこと。第3紀の凝灰岩や軟質の砂岩はのぞましくない。輝緑岩、緻密な火山岩、石英斑岩、ヒン岩、深成岩（とくに斑レイ岩）は適している。

すりへり抵抗と衝撃抵抗の大きいコンクリートをつくるために堅硬であること。硬質の砂岩、チャート、緻密な火山岩、輝緑岩、斑岩、ヒン岩、斑レイ岩、片麻岩はのぞましい。

骨材とセメントとの間の化学反応、骨材からの可溶性物質の溶出、骨材の風化による酸化などを起こさないように化学的に安定であること。骨材中の非結晶珪酸とセメント中のアルカリ成分との間の化学反応（アルカリ反応）によるモルタルの劣化を防ぐために、第3紀火山岩とくに流紋岩質火山岩はさけるべきである。また、第4紀火山岩の中には、火山活動に伴う熱水・硫気のために変質して、石膏など水にとけて硫酸性の水をつくる鉱物がふくまれていることがある。黄鉄鋼を多く含む岩石を骨材として用いると、コンクリート中で硫酸が発生して鉄筋・鉄骨などを腐食させるおそれがある。

セメントペーストとよく付着するような表面組織をもつこと。コンクリートが圧縮荷重をうけた場合のひび割れの始点は粗骨材とセメントペースト硬化体との結合部分にあり、この部分のひび割れがモルタル部分のひび割れを誘発するといわれている。あまりなめらかではいけないという意味で、蛇紋岩や結晶片岩の砕石はのぞましくない。

コンクリートの単位水量を少なくするため、モルタルの可動性を維持するため、打ち込んだコンクリート中の空隙をなるべく少なくするために、円みをおびて、かつ表面が比較的なめらかであり、片状あるいは細長い形をもっていないこと。砕石骨材、とくに頁岩、粘板岩、蛇紋岩、結晶片岩の砕石は扁平率が高いのでのぞましくない。<sup>2</sup>

## 2.5 骨材の品質評価方法とコンクリートの性能への影響<sup>3)</sup>

### 2.5.1 現状における骨材の品質規格

骨材の品質規格の標準値(表2.5-1)では、骨材の品質に関して様々な規格値が定められている。今回は、標準値をJIS規格値とし、下表の通りまとめた。本研究で取り上げている微粒分量のここ数年のJIS A 5005の改正について、2009年に微粒分量が緩和され、粒形判定実積率が向上された経緯がある。この改正で碎石の微粒分量はそれまで1.0%から3.0%に緩和されている。微粒分量の緩和は以前より製造者からの要望がつよく、さらなる碎石の利用拡大に向けて、コンクリートの品質に影響が無い範囲で規格値が緩和されている。

表 2.5-1 骨材の品質規格の標準値

項目	JIS A 5308:2024 附属書JA レディミクストコンクリート用骨材		JIS A 5005:2020 コンクリート用碎石及び砕砂	
	砂利	砂	碎石	砕砂
絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.5以上	2.5以上	2.5以上	2.5以上
吸水率(%)	3.0以下	3.5以下	3.0以下	3.0以下
粘土塊量(%)	0.25以下	1.0以下	—	—
粒形判定実積率(%)	—	—	56以上	54以上
微粒分量(%)	1.0以下	3.0以下	3.0以下 粒形判定実積率 58%以上の場合 5.0以下	9.0以下
有機不純物	—	同じ、又は淡い	—	—
塩化物量 (NaClとして)(%)	—	0.04以下	—	—
安定性(%)	12以下	10以下	12以下	10以下
すりへり減量(%)	35以下	—	40以下	—

## 2.5.2 コンクリートの性能に与える材料の影響

表2.5-2は、コンクリートの構成材料をペースト、細骨材および粗骨材に分け、コンクリートの各種性能に大きな影響を与える材料について整理したものである。温度ひび割れを除く耐久性については、骨材の影響が大きいことが既報より報告されている。特に耐凍害性については、粗骨材の影響が大きいことがわかる。

表 2.5-2 コンクリートの性能に与える材料の影響

コンクリートの性能		ペースト	細骨材	粗骨材
フレッシュ性状		●	●	●
強度		●		
耐久性	温度ひび割れ	●		
	塩害	●	●	
	中性化	●		
	凍害	●		●
	乾燥収縮	△	△	●
	乾湿繰返し			●
	ASR	●	●	●

凡例 ●：大きく影響する △：比較的影響する

## 2.6 コンクリート構造物の凍害被害

一般的な土木構造物に用いられているコンクリートは、W/Cが55%以下のAEコンクリートであり、通常環境であれば十分な耐凍害性を有する。しかし、JIS規格値を満足する骨材を使用しても、吸水率が高い骨材を使用した場合で、コンクリートの凍結融解抵抗性が低下することがある。近年でも、凍害対策として空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ に調整したコンクリート構造物においても、供用開始から10年程度のコンクリート構造物で補修が必要となった報告が東北地方市整備局やJR東日本からされている<sup>4)5)</sup>。(写真2.6-1)。

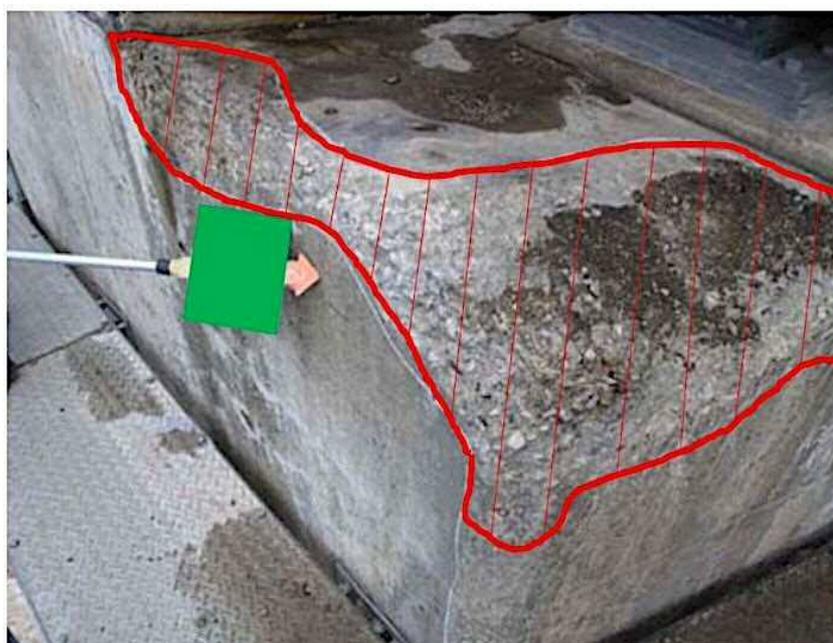


写真 2.6-1 供用後11年で凍害により補修が必要となった橋台  
(東北地方整備局「東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)(H31.3)」より引用)

## 2.7 凍結融解抵抗性の評価における問題点

### 2.7.1 粘板岩の砕石を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性

安定性試験の結果で JIS 規格値を満たす粘板岩系の砕石を使用したコンクリートについて、コンクリートの凍結融解抵抗性で耐久性指数が低下することがあるという報告がある<sup>6)</sup>。図 2.7-1 は、粗骨材に、粘板岩系の砕石 S および硬質砂岩系の砕石 T を用い、細骨材に BFS を用いた Non-AE コンクリートの凍結融解抵抗性を示したものである。いずれの粗骨材も JIS 規格に合格するもので、粗骨材の凍結融解抵抗性を表す安定性試験の結果も十分に合格する値である。しかし、粘板岩系の砕石 S を粗骨材として 100%用いたコンクリートのみ、50 サイクルの凍結融解に耐えられず破壊に至っている。図 2.7-2 は、砕石 S、砕石 T および硬質砂岩系の砕石 N を対象に、15mm のふるいを通り、10mm のふるいに留まる粗骨材のみを用いて、小片モルタル試験に準じて、塩水中で粗骨材の凍結融解抵抗性を調べた結果である。コンクリートの凍結融解抵抗性が比較的低下した粘板岩系の砕石 S の結果が、他の粗骨材に比べ、質量残存率が小さい。写真 2.7-1 は、小片モルタル試験に準じて、凍結融解作用を与えた粗骨材の 6 サイクル目および 12 サイクル目の状況を撮影したものである。粘板岩系の砕石 S の粗骨材が他の粗骨材に比べ、小粒に碎かれる傾向にある。高い凍結融解抵抗性のコンクリートを得るためには、モルタル部および粗骨材の界面部だけでなく、粗骨材の凍結融解抵抗性も重要で、その判定は、JIS に規定される安定性試験の結果だけでは判定できない。

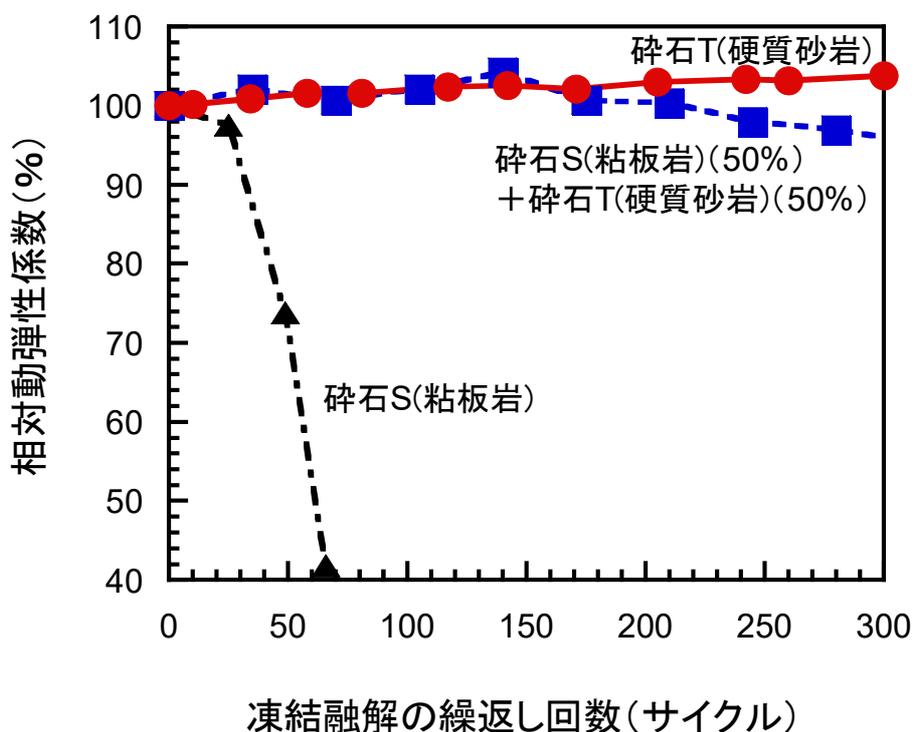
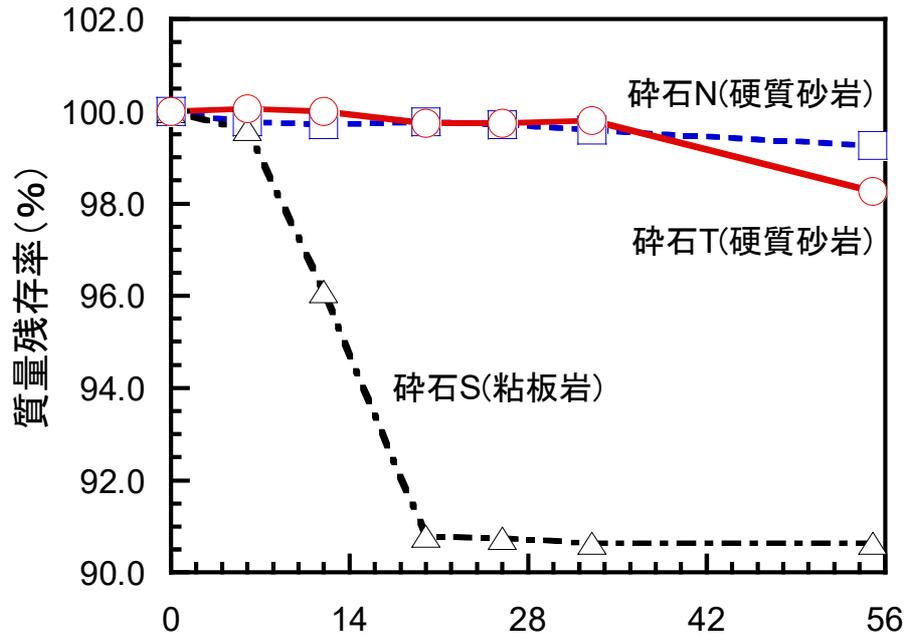


図 2.7-1 凍結融解抵抗性に対する粗骨材の影響



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図 2.7-2 粗骨材の凍結融解試験結果

サイクル数	砕石N (硬質砂岩)	砕石S (粘板岩)	砕石T (硬質砂岩)
開始時			
6 サイクル			
12 サイクル			

写真 2.7-1 粗骨材の凍結融解試験の様子

### 2.7.2 粗骨材の微粒分の影響

JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の2009年の改正により、洗い試験で失われる量、すなわち、微粒分量が1.0%以下であったものが、最大値で3.0%に大幅に緩和された。さらに、粒形判定実積率が58%以上の場合は、最大値を5.0%まで緩和できることになった。この改正により、微粒分が大量に付着した砕石が用いられることが稀ではなくなっている。微粒分が付着したままの砕石を使用したコンクリートについては、コンクリートの凍結融解抵抗性で耐久性指数が低下することがあるという報告がある<sup>6)</sup>。

図2.7-3は、粗骨材表面に膜状に付着している微粒分（以下、ノロと呼ぶ）が、AE剤を用いていないBFSコンクリートの耐凍害性に与える影響を示している。写真2.7-2は、実験に用いた粗骨材にノロが付着している場合とノロを水洗いによって除去した場合を撮影したものである。水洗いによってノロのとれた粗骨材を用いた場合は、300サイクルまで相対動弾性係数の低下がないのに対し、ノロのついたまま、通常のもルタル先練りで練り混ぜられたコンクリートは、100サイクルよりも前に破壊に至っている。また、粗骨材と水を先行して練り混ぜ、ミキサ内でノロを取り除いた後、セメントを投入する方法で製造されたコンクリートは、若干凍結融解抵抗性が改善されるが、水洗いによってノロのとれた粗骨材を用いた場合ほどの凍結融解抵抗性は得られない。洗浄の不十分な粗骨材を用いた場合には、粗骨材周辺に微粒分が多く付着した状態のままとなり、微粒分による脆弱部がコンクリート中に残存してしまうため、BFSを使用する場合の凍結融解抵抗性の改善効果が期待できない場合がある。また、硫酸ナトリウムによる安定性試験では合格する粗骨材であっても、実際に凍結融解作用を与えると崩壊するものもある。BFSコンクリートの耐凍害性を高めるには、粗骨材自身の凍結融解抵抗性も高いものを用いる必要がある。

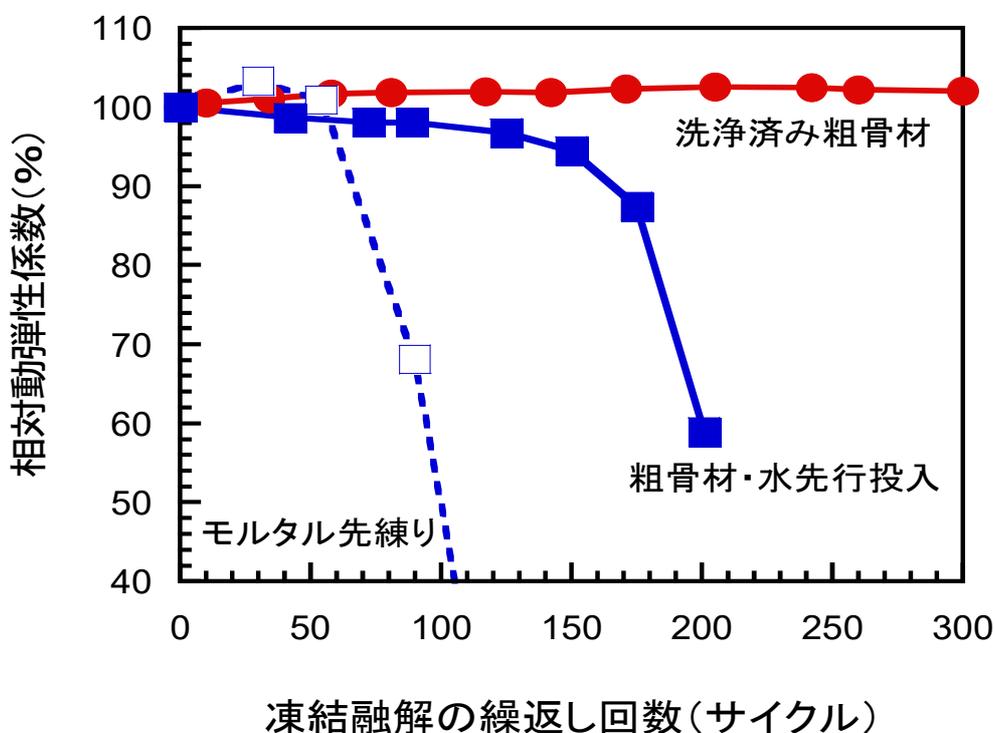


図2.7-3 粗骨材に付着したノロの影響



図 2.7-2 ノロが付着している粗骨材（左）と水洗した粗骨材（右）

## 2.8 コンクリート標準示方書の乾燥収縮ひずみの予測式における骨材の評価<sup>7)</sup>

示方書ではコンクリート構造物の性能照査において、コンクリートの収縮が影響する構造物の応答値を算定する場合は、強度等の特性値と同様に収縮の特性値を設計段階で設定すると記載されている。乾燥収縮ひずみは、7日間水中養生を行った100×100×400mmの角柱供試体を用い、湿度20±2℃、相対湿度(60±5)%の環境条件で、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に従い測定された乾燥期間6か月（182日）における値を特性値とし、実際に使用するコンクリートと同じ材料、同配合のコンクリートの試験値や、実績を基に定めることを原則としている。試験によらない場合は、下記の予測式に示される収縮特性を参考し、特性値を設定してよいとも記載されている。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left( W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (2.1)$$

ここに、 $\varepsilon'_{sh}$ ：収縮の試験の推定値（×10<sup>-6</sup>）

$W$ ：コンクリートの単位水量（kg/m<sup>3</sup>）（ $W \leq 175 \text{ kg/m}^3$ ）

$C/W$ ：セメント水比

$\alpha$ ：骨材の品質の影響を表す係数（ $\alpha=4\sim6$ ）標準的な骨材の場合は $\alpha=4$ としてよい。

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量（kg/m<sup>3</sup>）

式 2.1 に示される通り、骨材に関するパラメータとしては、骨材中に含まれる水分量の他に  $\Delta\omega$ 、骨材の品質の影響を表す係数  $\alpha$  がある。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，pp3-71，2007
- 2) 関 陽太郎：建設技術者のための岩石学，pp24-71，共立出版，1976
- 3) 土木研究所：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究，土木研究所資料，第 4199 号，2011.3
- 4) 東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料（案），2019
- 5) 三浦 修一郎：報告 東北地区の高架橋における凍害の実態と耐凍害性に関する分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, 2018
- 6) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会(354 委員会)成果報告書，pp45-47, 2018.7.6
- 7) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，pp.113-114，2022.3

## 第3章 粗骨材がコンクリート構造物の耐久性に与える影響についての従来の研究

### 3.1 概説

骨材がコンクリート構造物の耐久性に与える影響についての従来の主な研究として、(独)土木研究所の材料地盤研究グループ基礎材料チームにて平成23年3月に報告された「骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究」(以下、「土木研究所の報告」と記す。)がある。

土木研究所の報告では、本研究と関連する内容としては次に示す内容について報告されている。まず、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げられ、コンクリートの耐凍害性に与える影響に関しては、砂利と碎石で傾向が異なること、碎石については、吸水率で評価できることが示されている。また、乾燥収縮については、粗骨材の種別、物性値およびコンクリートの弾性係数等との関連が報告されている。

本章では、骨材がコンクリート構造物の耐久性に与える影響について検討する上で、上記研究で報告された内容で参考にしたものを整理した。

### 3.2 骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響

#### 3.2.1 試験内容および結果

土木研究所が用いた粗骨材の種類、物性値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみ(材齢182日)を表3.2-1に示す。細骨材には、川砂(絶乾密度 $2.56\text{g/cm}^3$ 、吸水率1.58%、安定性3.5%)、結合材には普通ポルトランドセメントを使用し、 $W/C=55\%$ 、 $s/a=46\%$ 、目標空気量4.5%となるように配合設計が行われている(表3.2-2)。

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は、JISA 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠し、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を配合ごとに2本ずつ作製し、7日間の水中養生後に、室温 $20^\circ\text{C}$ 、湿度60%の環境にて、6か月間にわたりダイヤルゲージ法によって長さ変化を測定した。材齢6か月経過時点の長さ変化率をコンクリートの乾燥収縮率として乾燥収縮を評価している。次項以降に、土木研究所が報告した検討結果を示す。

#### 3.2.2 岩種・地質年代による評価

表3.2-1に示される粗骨材は、図3.2-1に示される通り、岩種によって乾燥収縮率の大きさが異なっており、中でも、(a)の堆積岩である碎屑岩(硬質砂岩)は骨材の種類による差異が大きい。碎屑岩に関しては、表3.2-3に示される地質年代でも整理した。碎屑岩は日本ではジュラ紀又は白亜紀が多い。

図3.2-1(a)ではジュラ紀(-j)のものを実線で、白亜紀(-k)のものを破線で示されており、図より地質年代の古いジュラ紀のもので乾燥収縮が小さく、若い白亜紀のもので大きくなっている。つまり、同じ名称の碎屑岩であっても、コンクリートの乾燥収縮量が様々であり、その要因の一つとして地質年代への依存がある。

#### 3.2.3 吸水率による評価

図3.2-2に、粗骨材に碎石および砂利を用いた場合の粗骨材の吸水率とコンクリートの乾燥収縮との関係について示す。これらの図より、コンクリートの乾燥収縮は、吸水率が大きいほど増大する傾向である。また、粗骨材の物性値や種類の影響を大きく受けるほか、生成された年代によってその値が変わるものもあった。

表 3.2-1 粗骨材の種類，物性値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみ（材齢 182 日）

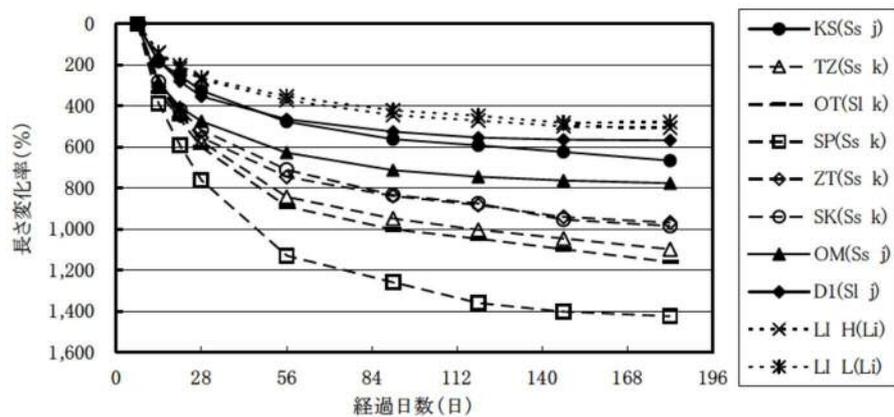
No.	記号	岩 種		最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	乾燥収縮 (×10 <sup>-6</sup> )
G1	KS	砕石	砂岩	20	2.65	0.50	3.3	667
G2	DD	砕石	花崗岩	25	2.53	1.47	23.1	822
G3	TO	砕石	安山岩	25	2.47	2.74	72.9	926
G4	TZ	砕石	砂岩	25	2.45	3.33	56.4	1099
G5	OT	砕石	頁岩	25	2.59	1.54	32.34	1160
G6	MG A	砕石	安山岩	15	2.65	2.67	14.95	886
G7	FS A	砕石	安山岩	25	2.29	6.53	56.46	1069
G8	FS B1	砕石	安山岩	25	2.48	4.38	45.27	782
G9	FS B2	砕石	玄武岩系凝灰岩	25	2.28	7.17	71.59	1142
G10	AT B	砕石	安山岩	25	2.63	1.66	4.13	733
G11	AT C	砕石	凝灰岩質安山岩	25	2.29	5.58	53.39	906
G12	AM A	砕石	安山岩	25	2.25	6.43	28.50	924
G13	SP	砕石	風化砂岩	25	2.37	4.96	89.85	1424
G14	IS G	砕石	石英安山岩	25	2.44	3.89	54.15	1011
G15	ZT	砕石	砂岩	20	2.57	1.56	34.8	986
G16	SK	砕石	砂岩	20	2.64	0.99	17.3	1018
G17	L1 H	砕石	石灰岩	20	2.70	0.29	0.7	522
G18	L1 L	砕石	石灰岩	20	2.71	0.26	1.5	511
G19	MM	川砂利		25	2.45	3.37	12.9	797
G20	KK	川砂利		25	2.53	1.90	10.61	757
G21	AT A	川砂利		25	2.39	3.72	29.31	856
G22	TW	川砂利		25	2.45	4.21	19.2	858
G23	YH	川砂利	玉砕	25	2.48	4.39	19.4	767
G24	IT A	川砂利		25	2.40	3.98	24.95	860
G25	YG A	川砂利		25	2.53	2.66	14.21	921
G26	D1	砕石	砂岩	20	2.65	0.71	2.8	568
G27	OM	砕石	砂岩	20	2.64	0.69	11.4	777
	KT	川砂利		25	2.50	2.63	8.99	667
	SG	川砂利		20	2.59	1.05	1.90	822
	IT B	川砂利		25	2.41	3.78	13.61	926
	FS B3	砕石	凝灰岩	25	2.65	2.46	28.95	1099
	YG B	川砂利		25	2.47	3.22	16.50	1160
	IS I	砕石	石英安山岩	25	2.40	4.30	55.18	886
	IS U	砕石	石英安山岩	25	2.40	4.30	32.35	1069

表 3.2-2 コンクリートの基本配合

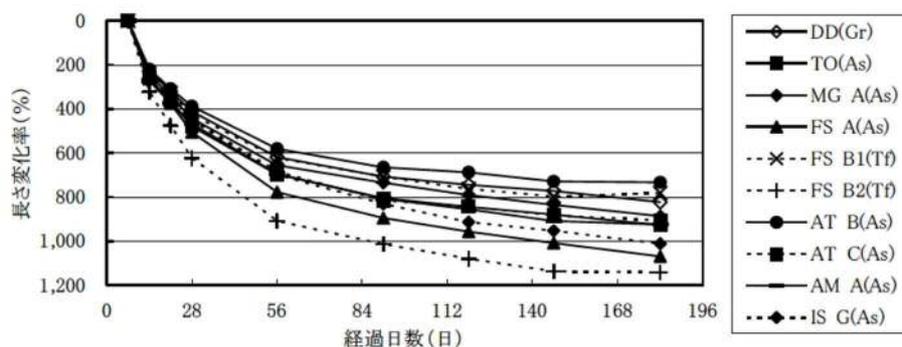
W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤(g/m <sup>3</sup> )		設計 Air (%)
		W	C	S	G	AE減水剤	AE 剤	
55	46	165	300	813 ~854	928 ~1016	930	3	4.5

表 3.2-3 地質年代 (単位: 億年前)

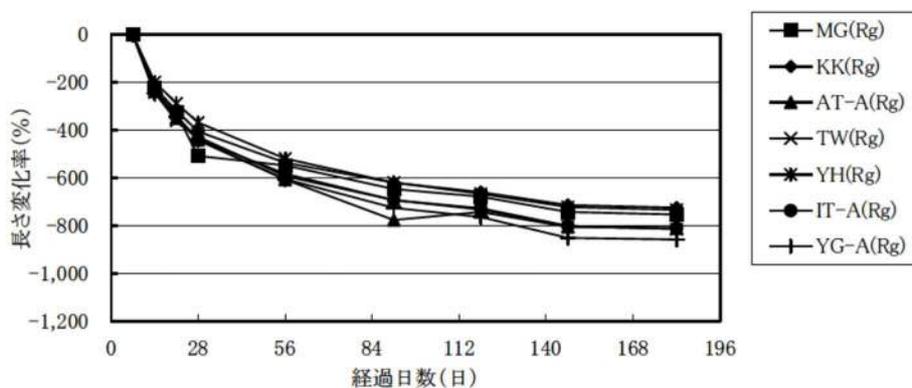
46~	5.4~	5.1~	4.4~	4.1~	3.6~	2.9~	2.45~	2.08~	1.45~	0.65~	0.026~
先カンブリア紀	カンブリア紀	オルドビス紀	シルル紀	デボン紀	石炭紀	ペルム紀	三畳紀	ジュラ紀	白亜紀	第三紀	第四紀
古生代							中生代			新生代	



(a) 碎屑岩、生物岩



(b) 火成岩、火砕岩



(c) 川砂利

図 3.2-1 岩種別の乾燥収縮 (-g: ジュラ紀 -k: 白亜紀)

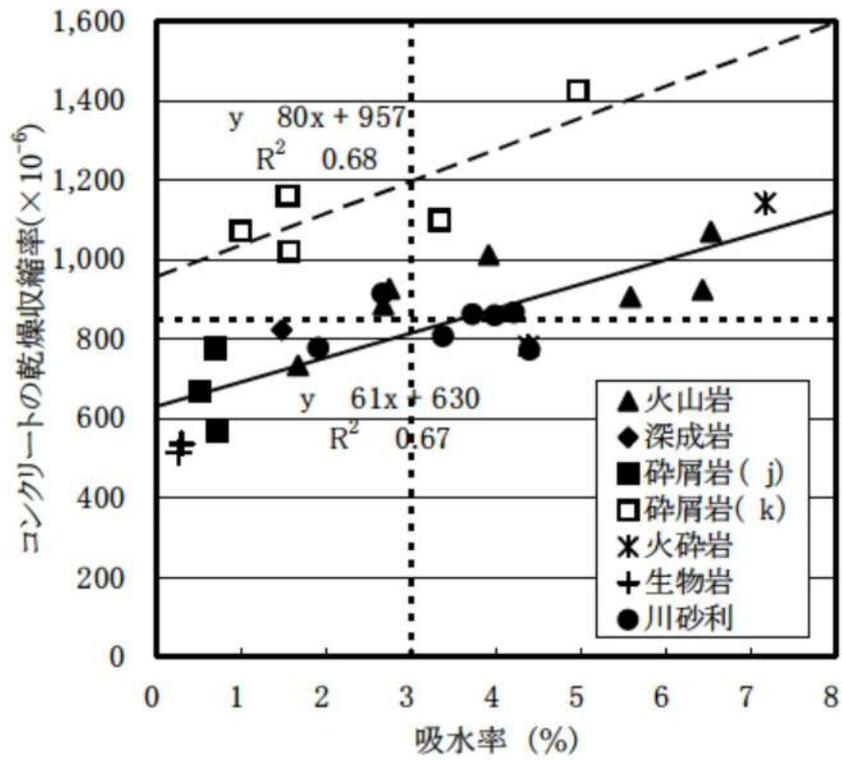


図 3.2-2 粗骨材の吸水率とコンクリートの乾燥収縮率の関係

### 3.3 骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響

#### 3.3.1 試験内容および結果

土木研究所が用いた粗骨材の種類、物性値およびコンクリートの耐久性指数を表 3.3-1 に、細骨材の種類および物性値を表 3.3-2 に示す。結合材には普通ポルトランドセメントを使用し、W/C = 50~55%、目標空気量 4.5%となるように配合設計が行われている。

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」の水中凍結融解試験方法（A 法）とする。300 サイクルまで試験を実施し、耐久性指数および質量減少率を求めた。土木研究所の研究では、この耐久性指数をコンクリートの耐凍害性の指標とし、この耐久性指数を簡易に推定することの可能な粗骨材の物性値や試験方法について検討が実施された。次項以降に、土木研究所が報告した検討結果を示す。

#### 3.3.2 絶乾密度による評価

図 3.3-1~図 3.3-2 に、粗骨材に碎石および砂利を用いた場合の粗骨材の絶乾密度とコンクリートの耐久性指数との関係について示す。これらの図より、粗骨材の種類によらず、両者にはそれほど良い対応関係が示されなかった。

#### 3.3.3 吸水率による評価

図 3.3-3~図 3.3-4 に、粗骨材に碎石および砂利を用いた場合の粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数との関係について示す。これらの図より、粗骨材が碎石の場合では、比較的良好な対応関係が示された。図 3.3-5 に示される絶乾密度・吸水率と耐久性指数の関係より、一般的な骨材の品質基準である絶乾密度  $2.5\text{g/cm}^3$ （有効桁の関係から  $2.45\text{g/cm}^3$ ）以上かつ吸水率 3.0% 以下の範囲での耐久性指数は全て 60 以上だった。一方、砂利については、いい対応関係が示されず、一般的な品質規格値を満たすものでもコンクリートの耐久性指数が 60 を下回るものもあった。

#### 3.3.4 硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験による評価

図 3.3-6 に、粗骨材に碎石を用いた場合の粗骨材の吸水率と安定性試験結果がコンクリートの耐久性指数に与える影響について示す。この図より、耐久性指数の高いもの（○）は吸水率の低い範囲に、耐久性指数の低いもの（×）は吸水率の高い範囲に分布しており、コンクリートの耐久性指数は、安定性試験の試験値よりも吸水率とより高いか対応関係にあることがわかる。図 3.3-7 に、粗骨材に砂利を用いた場合の粗骨材の安定性試験結果と耐久性指数の関係を示す。砂利については、いい対応関係が示されなかった。

#### 3.3.5 凍結融解抵抗性に見られる碎石と砂利の違いに関する考察

吸水率及び安定性試験とコンクリートの耐久性指数の関係について、碎石を使用したコンクリートと砂利を使用したコンクリートとでそれぞれの関係性の違いが明らかであった。一例として、図 3.3-8 に安定性とコンクリートの耐久性指数の関係性における両者の劣化傾向の違いを示す。砂利に比べ碎石の方が広くまばらに試験結果が分布しているのがわかる。これは、碎石がその岩種の違いによっても劣化傾向が異なるため、分布が分散しているように表現されたと推察する。

本研究所の実験結果では、碎石と砂利の形状、均質さの違いにより、各々のコンクリートの凍結融解による劣化状況が異なると考察している。以下に、その詳細について示す。

##### (1) 製造過程の違いから見る凍結融解抵抗性の違い

碎石は、碎石場で算出される。比較的均質な岩盤を砕いて製造するために、骨材粒子間の品質のばらつきは比較的小さい。破碎して製造することから、粒子形状は角張っている。一方、砂利は、河川または旧河川部の河床堆積物であり、これを掘削して得られるものである。河床堆積物

は、その河川沿いに存在する様々な山岳からの崩落岩が、長い年月の間に下線を流下し、堆積したものであるから、様々な岩種、品質の岩石の集合体となる。また、流水の摩砕作用で、粒子形状は丸みをおびている。(図 3.3-9)

凍結融解による骨材の劣化を、骨材粒子内に存在する水の氷結圧によって骨材が破壊する現象だと考えると、骨材内の空隙が大きい場合ほど氷結圧が大きくなり、骨材が劣化しやすくなることがある。同じ吸水率の砕石と砂利を比較すると、均質な砕石よりも様々な粒子の集合体である砂利のほうが、大きな空隙を有する粒子の存在確率は高くなる。

(2) 凍結融解試験結果に見られる砕石と砂利の違い

砕石を使用したコンクリートと砂利を使用したコンクリートの劣化の違いは、凍結融解試験によって動弾性係数が大きく低下した供試体のひび割れ発生状況から確認することができる。写真 3.3-1 は砕石を使用したコンクリートの凍結融解試験後の劣化状況写真、写真 3.3-2～写真 3.3-3 は砂利を使用したコンクリートの凍結融解試験後の劣化状況写真を示す。砕石を使用したコンクリートの場合は、コンクリートの表面全体に劣化が認められた。一方で砂利を使用したコンクリートの場合は、特定の一部の砂利からひび割れが延伸する傾向が認められた。

表 3.3-1 粗骨材の種類、物性値およびコンクリートの空気量、耐久性指数

年度	記号	岩種	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	Air (%)	耐久性指数	細骨材記号	
S54	A1	砕石	安山岩	25	2.54	1.6	1.7	5.9	97	A'
	A2	砕石	安山岩	25	2.55	6.6	4.4	5.6	14	A'
	A1'	砕石	安山岩	25	2.54	1.6	1.7	4.6	94	A'
	D1	砕石	粘板岩	30	2.62	1.4	7.1	4.0	80	D'
	D2	砕石	粘板岩	30	2.62	4.3	14.5	4.5	15	D'
	D3	砕石	粘板岩	30	2.47	4.4	13.4	4.3	66	D'
	E1	玉砕	火成岩	25	2.63	0.7	3.5	4.1	88	E'
	E2	川砂利		25	2.60	1.4	32.4	4.5	83	E'
	E3	砕石	堆積岩	25	2.64	2.0	35.6	4.1	67	E'
	G1	砕石	結晶片岩	25	2.71	0.6	3.5	2.8	28	G'
	G2	砕石	花崗岩	25	2.57	1.2	1.9	4.0	18	G'
	J3	砕石	粘板岩	25	2.56	3.4	85.9	4.5	10	J'
S55	A2	砕石	安山岩	25	2.48	4.9	6.9	5.7	96	A'
	B1	砕石	凝灰岩	25	2.32	9.1	41.3	4.5	1	B'
	C1	川砂利		25	2.63	1.4	4.6	4.4	78	C'
	C2	砕石	安山岩	25	2.57	2.3	15.4	4.4	95	C'
	C3	砕石	流紋岩	25	2.46	4.3	25.1	4.2	33	C'
	C4	砕石	凝灰岩	25	2.14	9.8	37.7	4.2	9	C'
	E1	砕石	花崗岩	25	2.66	0.5	12.5	4.3	84	E'
	E2	川砂利		25	2.40	3.5	24.7	4.2	54	E'
	F1	砕石	凝灰岩	25	2.39	5.7	54.3	4.5	14	F'
	G1	砕石	安山岩	25	2.37	6.2	1.2	4.6	6	G'
	G2	砕石	花崗岩	25	2.57	1.2	1.0	4.0	4	G'
	J1	砕石	砂岩	25	2.50	5.3	68.0	4.2	61	J'
	J2	砕石	粘板岩	25	2.57	4.1	79.6	4.3	4	J'
J3	砕石	チャート	25	2.58	1.8	10.5	4.2	89	J'	

表 3.3-1 粗骨材の種類，物性値およびコンクリートの空気量，耐久性指数（続き）

年度	記号	岩種	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	Air (%)	耐久性 指数	細骨材 記号		
S56	A1	砕石	安山岩	25	2.54	4.1	1.6	4.3	91	A'	
	A2	砕石	安山岩	25	2.48	4.9	6.9	4.0	94	A'	
	A3	砕石	安山岩	25	2.25	6.6	4.4	3.9	13	A'	
	B1	砕石	安山岩	25	2.52	4.3	28.8	4.5	3	B'	
	B2	砕石	安山岩	25	2.35	10.8	75.3	4.2	10	B'	
	C1	砕石	安山岩	25	2.67	0.8	25.5	4.3	97	C'	
	C2	砕石	チャート	25	2.43	5.1	6.3	4.1	69	C'	
	C3	砕石	流紋岩	25	2.50	3.5	8.4	4.1	17	C'	
	C4	砕石	安山岩	25	2.41	5.3	15.5	4.2	82	C'	
	C5	砕石	玉砕	25	2.63	1.4	4.6	4.0	86	C'	
	E1	砕石	流紋岩	25	2.34	6.6	43.7	4.4	28	E'	
	F1	砕石	硬質砂岩	20	2.69	1.1	9.6	4.0	100	F'	
	F2	砕石	安山岩	20	2.62	2.1	11.2	4.5	100	F'	
	F3	砕石	安山岩	25	2.46	3.9	4.5	4.2	100	F'	
	F4	砕石	凝灰岩	30	2.39	5.5	14.5	4.3	24	F'	
	F5	砕石	凝灰岩	25	2.46	4.1	8.3	4.0	100	F'	
	F6	砕石	凝灰岩	15	2.36	1.9	6.1	4.4	57	F'	
	G1	砕石	粘板岩	25	2.57	2.3	33.8	4.1	48	G'	
	G2	砕石	安山岩	25	2.50	4.0	8.3	4.0	59	G'	
	G3	砕石	安山岩	25	2.32	6.4	7.7	4.4	34	G'	
	G4	砕石	花崗岩	25	2.58	0.9	7.8	4.4	4	G'	
	G5	砕石	結晶片岩	25	2.71	0.5	3.4	4.3	75	G'	
	G6	砕石	花崗岩	25	2.58	0.8	5.4	4.4	37	G'	
	J1	砕石	砂岩	25	2.51	4.2	83.0	4.5	71	J'	
	J2	砕石	粘板岩	25	2.57	4.1	79.6	4.1	7	J'	
	J3	砕石	石灰岩	25	2.73	0.8	8.1	4.1	65	J'	
	H15	KS	砕石	砂岩	20	2.65	0.50	3.3	4.7	93	J''
		TZ	砕石	砂岩	25	2.45	3.33	56.4	5.7	85	J''
TO		砕石	安山岩	25	2.47	2.74	72.9	6.8	85	J''	
DD		砕石	花崗岩	25	2.53	1.47	23.1	4.2	62	J''	
H16	TW	川砂利		25	2.45	4.21	19.2	6.0	80	J''	
	MM	川砂利		25	2.45	3.37	12.9	5.6	44	J''	
	YH	川砂利	玉砕	25	2.48	4.39	19.4	5.1	74	J''	
H18	OT	砕石	頁岩	25	2.59	1.54	32.34	4.3	95	J''	
	KK	川砂利		25	2.53	1.90	10.61	6.0	56	J''	
	KT	川砂利		25	2.50	2.63	8.99	6.0	36	J''	
	SG	川砂利		20	2.59	1.05	1.90	5.2	94	J''	

表 3.3-1 粗骨材の種類，物性値およびコンクリートの空気量，耐久性指数（続き）

年度	記号	岩 種	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)	Air (%)	耐久性指数	細骨材記号
H19	IT A	川砂利	25	2.40	3.98	24.95	5.6	15	J''
	IT B	川砂利	25	2.41	3.78	13.61	5.6	49	J''
	MGA	砕石 安山岩	15	2.65	2.67	14.95	4.7	90	J''
	FS A	砕石 安山岩	25	2.29	6.53	56.46	5.6	9	J''
	FSB1	砕石 安山岩	25	2.48	4.38	45.27	3.6	91	J''
	AT B	砕石 安山岩	25	2.63	1.66	4.13	4.5	88	J''
	AT C	砕石 凝灰岩質安山岩	25	2.29	5.58	53.39	4.4	90	J''
	YG A	川砂利	25	2.53	2.66	14.21	5.2	16	J''
	YG B	川砂利	25	2.47	3.22	16.50	6.3	90	J''
	AMA	砕石 安山岩	25	2.25	6.43	28.50	5.6	8	J''
	SP	砕石 風化砂岩	25	2.37	4.96	89.85	6.0	32	J''
H20	IS I	砕石 石英安山岩	25	2.40	4.30	55.18	5.4	7	J''
	IS U	砕石 石英安山岩	25	2.40	4.30	32.35	5.2	12	J''
	IS G	砕石 石英安山岩	25	2.44	3.89	54.15	5.9	65	J''

表 3.3-2 細骨材の種類および物性値

記号	種類	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)
A'	海砂	2.75	1.2	0.3
B'	川砂	2.56	2.5	2.9
C'	川砂	2.55	2.1	2.4
D'	川砂	2.57	3.0	2.6
E'	混合	2.57	1.2	2.5
F'	川砂	2.52	1.7	1.4
J'	川砂	2.63	2.0	4.7
J''	川砂	2.56	1.6	3.5

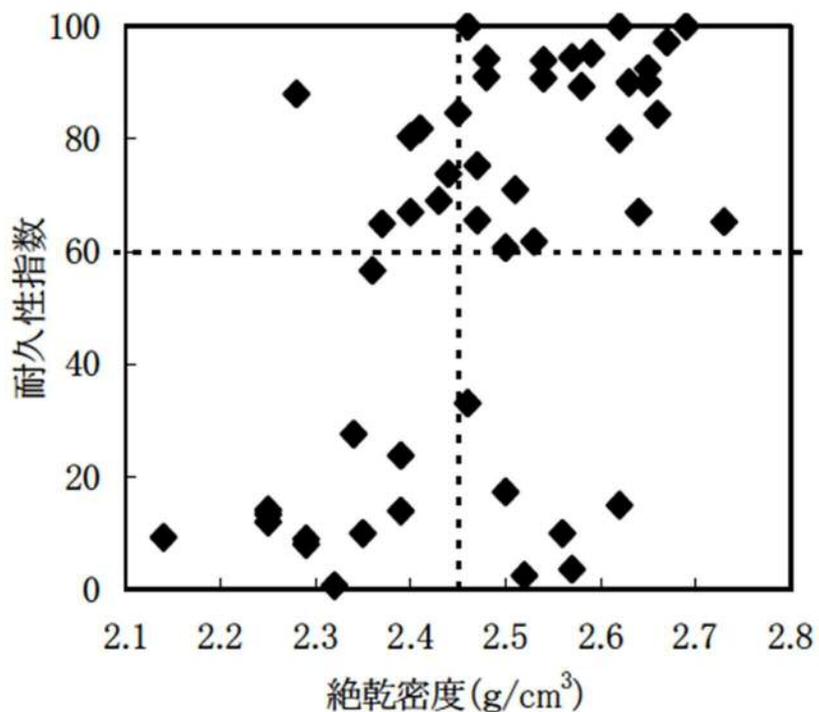


図3.3-1 絶対乾密度と耐久性指数の関係（砕石）

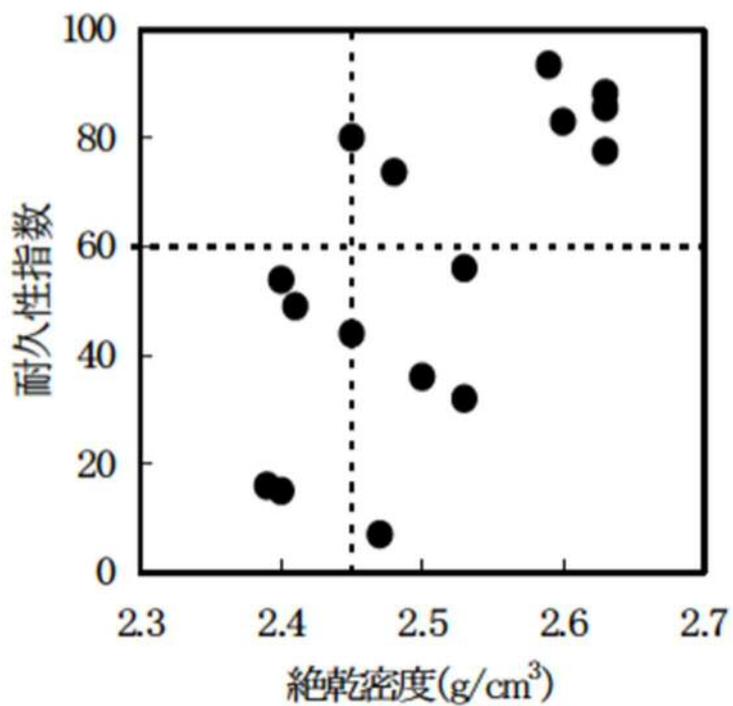


図3.3-2 絶対乾密度と耐久性指数の関係（砂利）

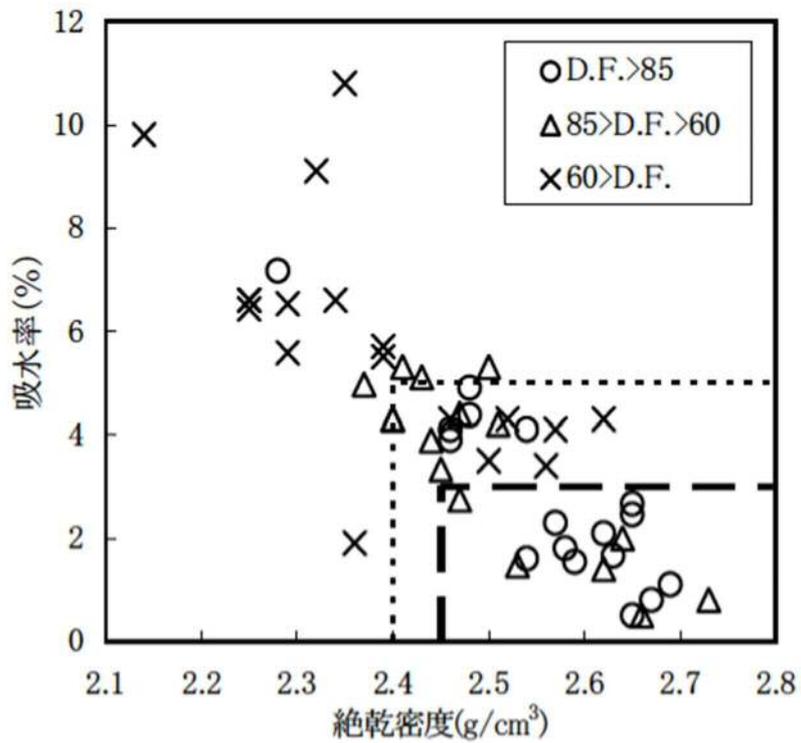


図 3.3-5 絶対乾密度・吸水率と耐久性指数の関係（碎石）

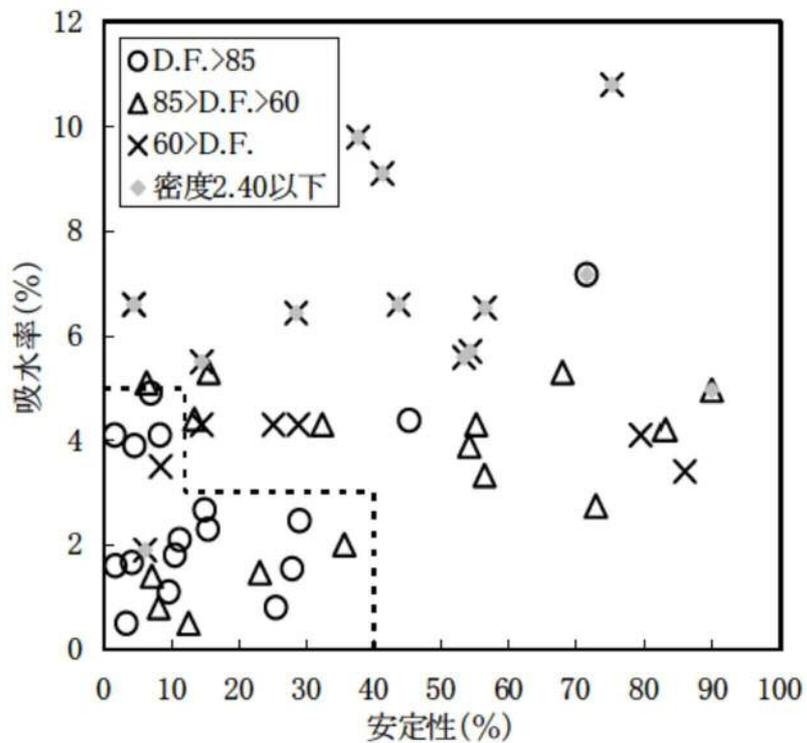


図 3.3-6 安定性・吸水率と耐久性指数の関係（碎石）

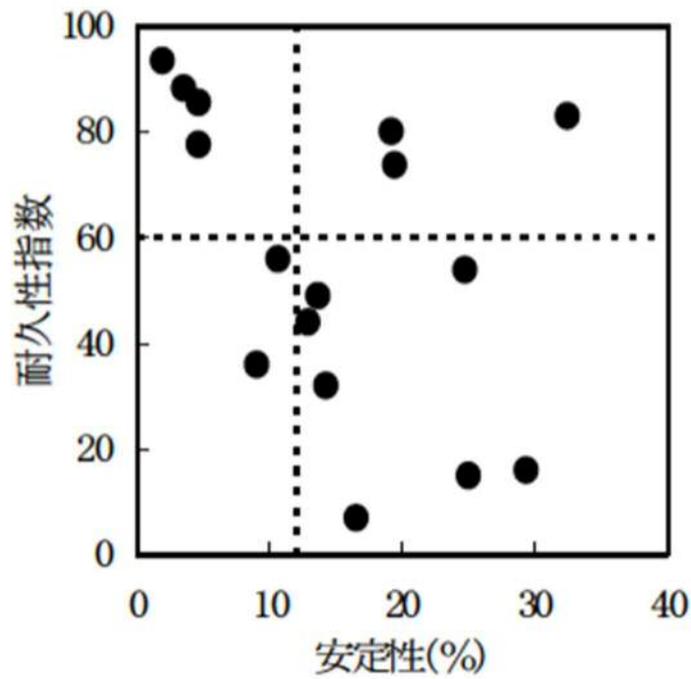


図 3.3-7 安定性と耐久性指数の関係（砕石）

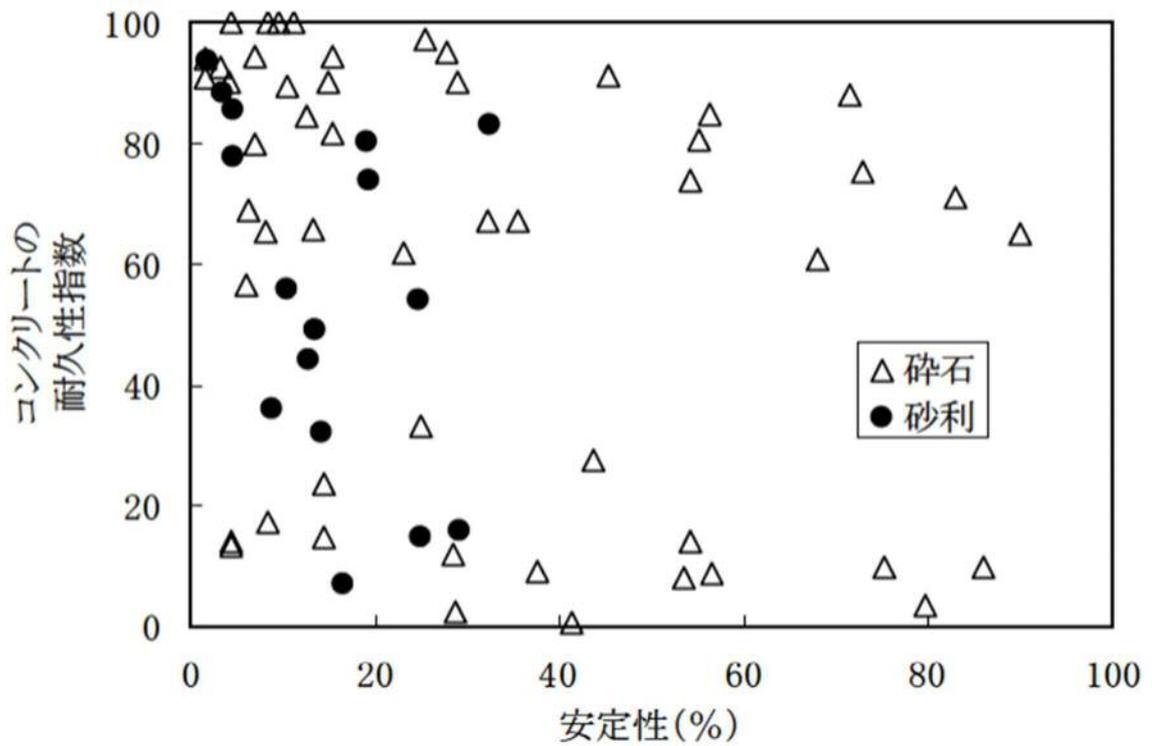


図 3.3-8 砕石と砂利との劣化傾向の違い

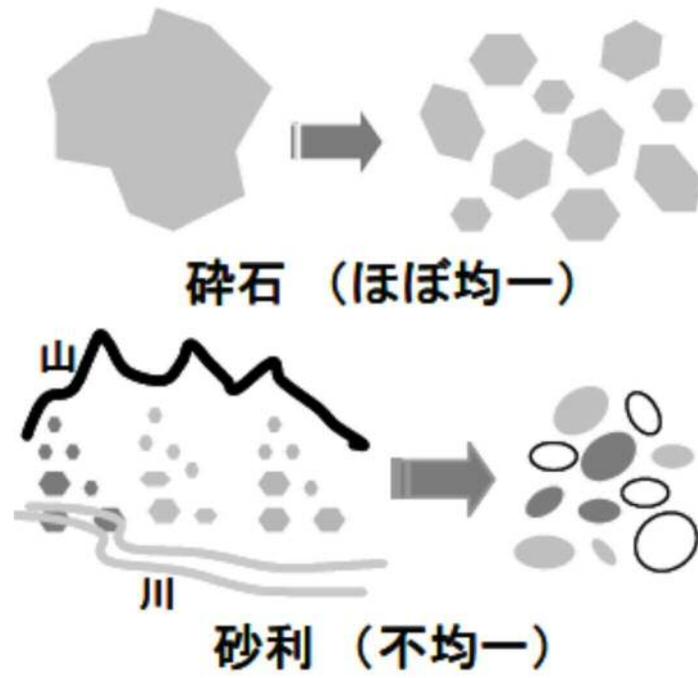


図 3.3-9 碎石と砂利の違い

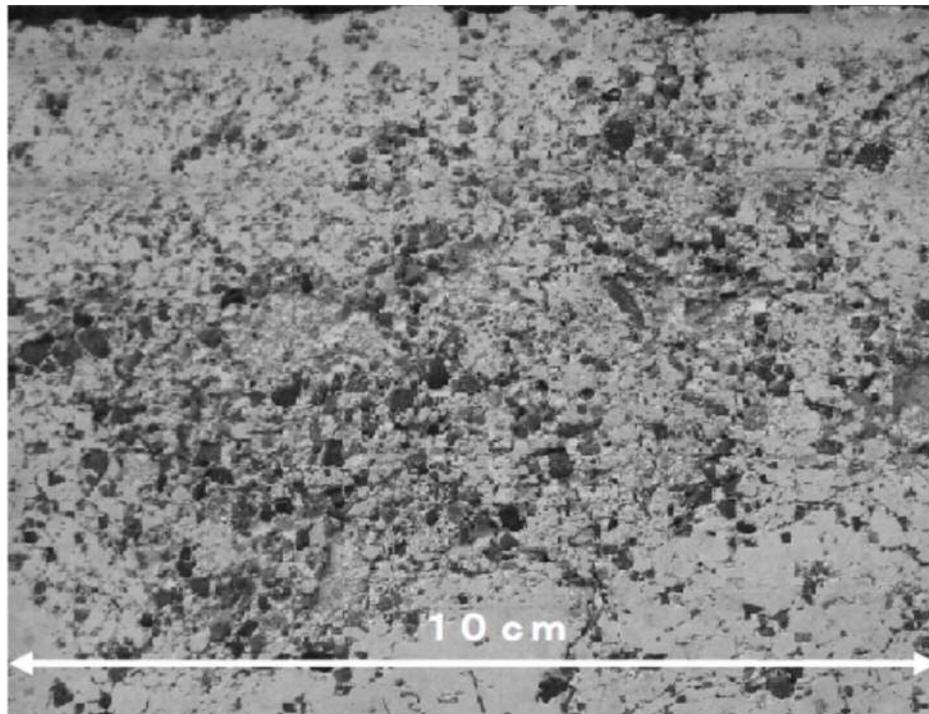


写真 3.3-1 砂利コンクリートの表面の劣化

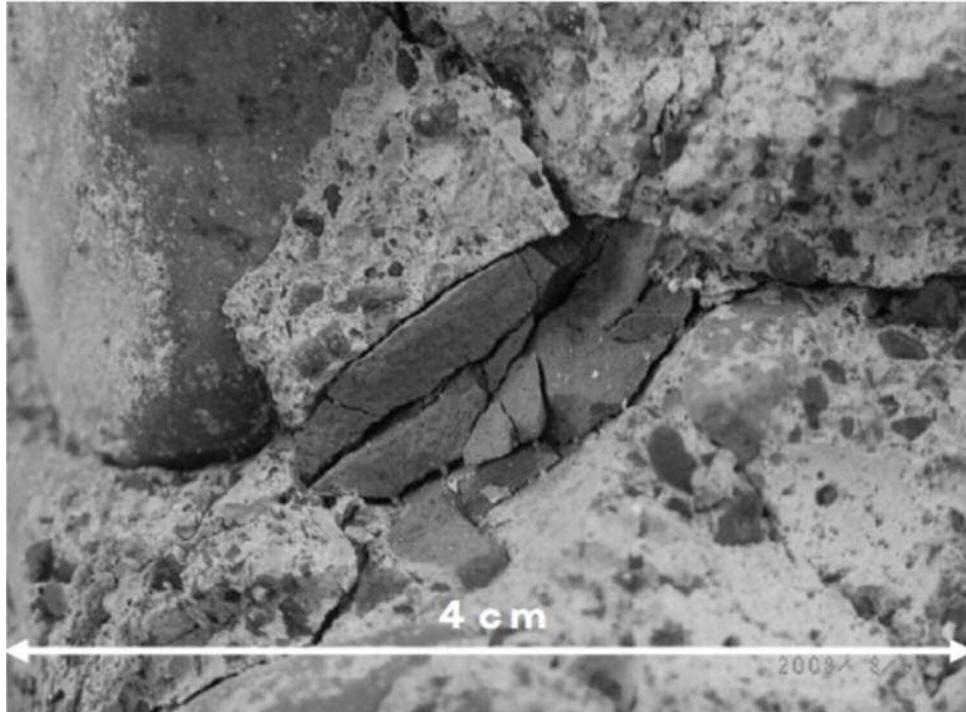


写真 3.3-2 砂利のひび割れ

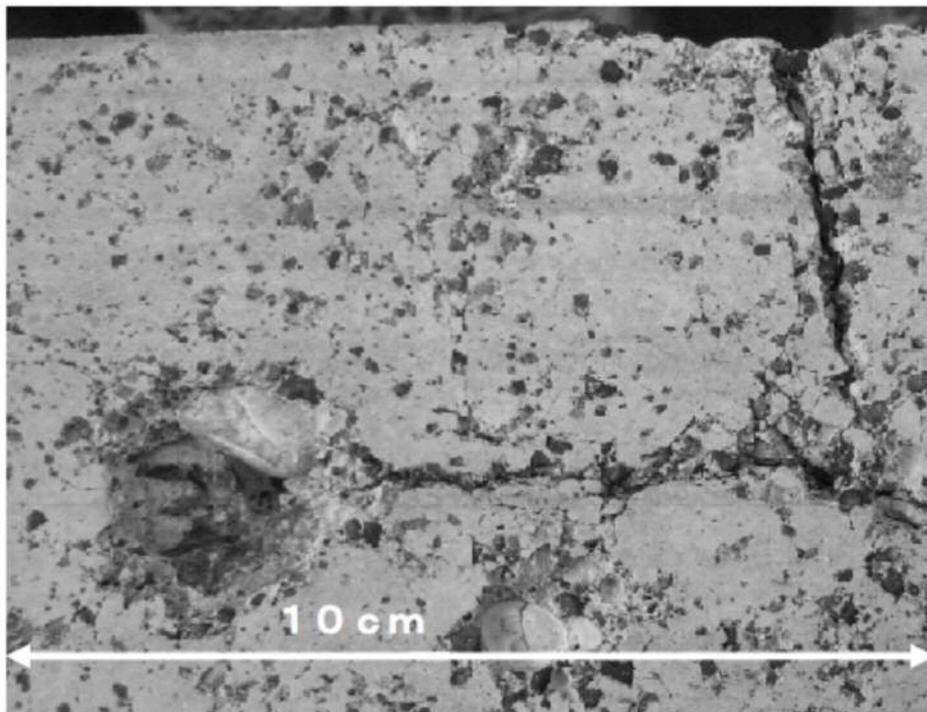


写真 3.3-3 砂利コンクリートの表面の劣化

#### 参考文献

- 1) 土木研究所：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究，土木研究所資料，第 4199 号，2011.3

## 第4章 粗骨材の品質が硬化後のコンクリートの性能に与える影響

### 4.1 概 説

コンクリート中の 6~7 割を占める骨材は、その品質がコンクリートの品質に与える影響は小さくない。骨材の品質規格の一つである微粒分量については、天然骨材の不足を補う砕石および砕砂の生産を円滑化するために、2009 年に JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の微粒分量の規定値が 1.0%から 3.0%に規制が緩和された。その過程で、骨材の微粒分に関して様々な研究がされている。既報によれば、砕石や砕砂の製造時に発生する砕石粉は、使用に伴い単位水量や細骨材率の調整は必要であるが、比較的広範囲のコンクリートに使用できる可能性があること、特に、水セメント比が大きく粉体量が少ない低スランプコンクリートへの利用が有効であること、また、水セメント比が 60%で砕石粉の使用率 10%までの範囲内であればコンクリートのフレッシュ性状、強度発現性および耐久性にほとんど悪影響を及ぼさず、ブリーディング量低減に効果があることを報告している。<sup>1)</sup>

本章では、全国各地より収集した 64 種類の粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、各種粗骨材の圧縮強度および塩化物イオン浸透性を調べた。また、その微粒分が圧縮強度および塩化物イオン浸透性に与える影響についても検討した。

### 4.2 検討概要

#### 4.2.1 使用材料および配合

実験に使用した粗骨材の岩種および物性値を表 4.2-1 に示す。実験には、61 種類の砕石および 3 種類の川砂利を用いた。いずれの砕石および川砂利とも、絶乾密度および吸水率は、JIS A 5005 もしくは JIS A 5308 附属書 A の砂利の品質規格値を満足するものであった。一方で、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率は、一部の砕石で、JIS A 5005 の規格値である 12% よりも大きいものが含まれていた。図 4.2-1 は、表 4.2-1 に示した粗骨材の産地の分布を示したものである。比較的使用頻度の多い安山岩や砂岩が多く集まっている。

コンクリートの配合条件は、水セメント比  $W/C=50\%$ 、細骨材率  $s/a=44\%$ 、単位水量  $W=170\text{kg/m}^3$ 、設計空気量を 4.5%とした。粗骨材の表面に付着する微粒分の影響を確認する実験では、「洗浄」「未洗浄」の 2 ケースで実験を行った。「未洗浄」のケースでは、製造工場等から入荷した粗骨材を洗浄等は行わず表面に微粒分が付着した状態のまま使用した。細骨材には硬質砂岩砕砂(表乾密度: $2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率: $1.57\%$ 、粗粒率: $3.11$ )(表乾密度: $2.62\text{g/cm}^3$ 、吸水率: $2.23\%$ 、粗粒率: $2.95$ )を、結合材には普通ポルトランドセメント(密度: $3.15\text{g/cm}^3$ 、プレーン値: $3,350\text{cm}^2/\text{g}$ )を用いた。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物系 AE 減水剤および AE 助剤を用いた。

#### 4.2.2 練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、強制練りパン型ミキサーを用いた。細骨材とセメントで 30 秒の空練りを行った後、練混ぜ水と混和剤を添加し 1 分 30 秒間練り混ぜ、粗骨材を加えた後、2 分間練り混ぜてからミキサーから排出し、練り舟でさらに練り返したものを試験に用いた。

#### 4.2.3 試験方法

##### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行なった。供試体は、水中養生を行って、材齢 7 日、28 日および 91 日に試験を行なった。試験は、供試体を 3 本用いて行い、その 3 本の圧縮強度の平均値をコンクリートの圧縮強度とした。

(2) 塩化物イオンの浸透性試験

塩化物イオンの浸透深さの測定には、φ100×200mm の円柱供試体を用いた。供試体は、φ100×200mm の円柱供試体の、円形の 2 面から 15mm を切断し、切り出した φ100×15mm の円柱供試体を用いた。供試体は、成形後、1 日室内で乾燥させた後、円形の 1 面を残し、他の円形の 1 面および側面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、再び試験開始材齢まで各養生を行った。各試験開始材齢より、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。また、JSCE-G 572-2013「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)」に従い、塩化物イオンの浸透深さを測定した。

表 4. 2-1 粗骨材の岩種および物性値

No.	岩 種	記 号	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	安定性* (%)
1	火成岩 Igneous rock	(I)an-1	2.66	0.83	0.4	1.1
2		(I)an-2	2.71	0.40	0.4	3.6
3		(I)an-3	2.63	0.47	0.5	8.8
4		(I)an-4	2.70	0.46	0.4	6.6
5		(I)an-5	2.71	0.42	1.0	1.9
6		(I)an-6	2.61	1.14	0.7	6.5
7		(I)an-7	2.61	1.17	1.3	5.1
8		(I)an-8	2.62	0.56	0.4	10.1
9		(I)an-9	2.60	0.64	0.5	2.9
10		(I)an-10	2.88	0.68	0.8	2.2
11		(I)an-11	2.67	1.18	0.5	24.2
12		(I)an-12	2.72	0.84	0.6	11.1
13		(I)an-13	2.65	1.06	1.0	2.9
14		(I)an-14	2.62	0.74	1.0	0.9
15		(I)an-15	2.72	1.51	1.0	6.1
16		(I)an-16	2.72	1.52	0.4	5.4
17		(I)an-17	2.75	1.50	1.8	4.7
18	流紋岩 rhyolite	(I)rh-1	2.50	2.44	1.2	12.6
19		(I)rh-2	2.57	1.36	0.7	3.5
20		(I)rh-3	2.60	0.76	0.5	6.3
21		(I)rh-4	2.60	0.85	4.5	3.3
22	斑れい岩 gabbro	(I)ga-1	2.75	0.77	0.9	2.1
23		(I)ga-2	2.74	1.33	0.7	1.6
24	閃緑岩 diorite	(I)di-1	2.67	1.47	2.5	14.7
25	ひん岩 porphyrite	(I)po-1	2.62	1.02	0.3	6.5

表 4.2-1 粗骨材の岩種および物性値（続き）

No.	岩 種		記 号	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	安定性* (%)	
26	堆積岩 Sedimentary rock	砂 岩 sandstone	(S)sa-1	2.73	0.56	1.4	9.0	
27			(S)sa-2	2.67	0.58	0.2	7.6	
28			(S)sa-3	2.65	0.69	0.6	8.1	
29			(S)sa-4	2.64	0.65	0.6	2.9	
30			(S)sa-5	2.73	0.54	0.9	10.4	
31			(S)sa-6	2.78	0.71	0.6	6.9	
32			(S)sa-7	2.67	0.56	0.5	9.2	
33			(S)sa-8	2.67	0.49	0.4	5.7	
34			(S)sa-9	2.67	0.46	0.7	3.2	
35			(S)sa-10	2.68	0.73	0.4	6.9	
36			(S)sa-11	2.69	0.84	0.8	7.2	
37			(S)sa-12	2.69	0.74	1.4	9.4	
38			(S)sa-13	2.69	0.57	0.9	2.3	
39			(S)sa-14	2.54	2.23	3.0	18.6	
40			(S)sa-15	2.66	1.63	1.2	5.1	
41			(S)sa-16	2.65	1.06	0.9	8.9	
42			(S)sa-17	2.67	0.67	0.6	2.5	
43			(S)sa-18	2.70	0.78	0.3	2.0	
44		(S)li-1	2.70	0.19	0.3	10.4		
45		(S)li-2	2.70	0.24	0.7	5.5		
46		(S)li-3	2.70	0.32	1.0	4.6		
47		(S)li-4	2.58	1.09	0.7	1.4		
48		(S)li-5	2.59	0.97	1.5	3.7		
49		(S)li-6	2.70	0.37	1.9	3.0		
50		(S)li-7	2.71	0.35	1.6	4.1		
51		(S)li-8	2.72	0.51	1.2	2.5		
52		(S)li-9	2.69	0.49	1.5	1.7		
53		(S)li-10	2.67	0.64	1.5	2.1		
54		(S)li-11	2.72	0.34	1.9	2.0		
55		(S)sl-1	2.69	0.87	0.9	11.7		
56		(S)sl-2	2.64	1.11	0.5	20.4		
57		(S)sl-3	2.66	0.97	1.2	0.9		
58		(S)sh-1	2.71	0.62	1.0	10.8		
59		(S)tu-1	2.60	0.85	0.5	2.9		
60		(S)tu-2	2.60	0.95	1.2	3.0		
61		変性岩 Metamorphic rock	ホルンフェルス hornfels	(M)ho-1	2.73	0.44	0.8	0.9
62		砂 利 Gravel	川砂利 river gravel	(G)rg-1	2.63	0.78	0.4	1.2
63				(G)rg-2	2.55	1.61	0.3	3.6
64	(G)rg-3			2.57	2.18	0.1	4.8	

※硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率

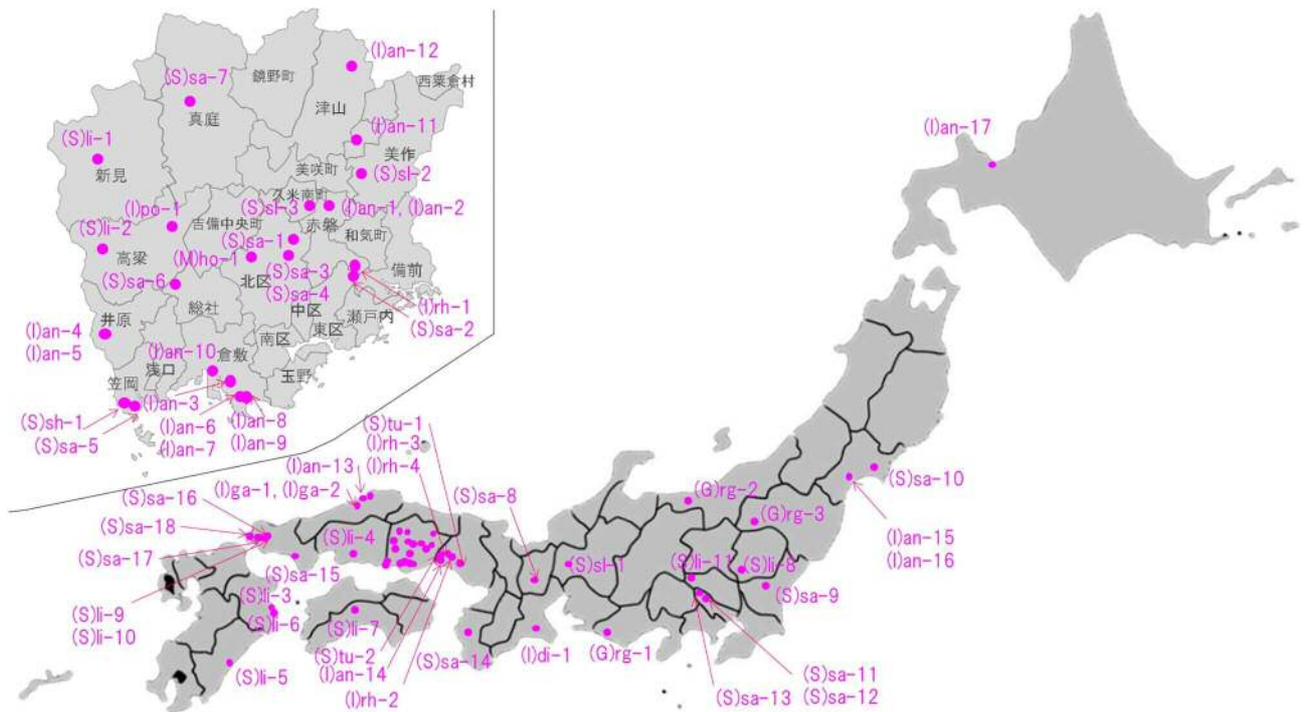


図 4.2-1 実験に使用した骨材の産地分布（左上図は岡山県内）

### 4.3 実験結果および考察

#### 4.3.1 各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度

図 4.3-1 は、粗骨材の密度と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示したものである。粗骨材は、事前に水洗いしたものを用いている。一般に、密度の大きい骨材は、密実で強固であると言われているが、本実験の範囲では、絶乾密度との間に、明確な関係は確認できなかった。図 4.3-2 は、粗骨材の吸水率と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示したものである。一般に吸水率の小さい骨材は、内部空隙が少なく密実であると言われているが、本実験の範囲内では、吸水率との間に、明確な関係は確認できなかった。また、図 4.3-3 は、粗骨材の安定性試験における損失質量分率と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示したものである。今回の実験の範囲内では、安定性試験の結果と圧縮強度との明確な関係は、確認できなかった。

#### 4.3.2 各種骨材を用いたコンクリートの塩化物イオン透過性

図 4.3-5 および図 4.3-6 は、図 4.3-4、図 4.3-5 および図 4.3-6 は、それぞれ、粗骨材の密度、吸水率および安定性試験における損失質量分率と浸漬期間 56 日における塩分浸透深さの関係を示したものである。本実験の範囲では、それぞれ、粗骨材の密度、吸水率および安定性試験における損失質量分率との間に、明確な関係は確認できなかった。また、図 4.3-7 は、材齢 28 日における圧縮強度と浸漬期間 56 日における塩分浸透深さの関係を示したものである。今回の実験の範囲内では、圧縮強度との関係においても、塩分浸透深さとの明確な関係は、確認できなかった。

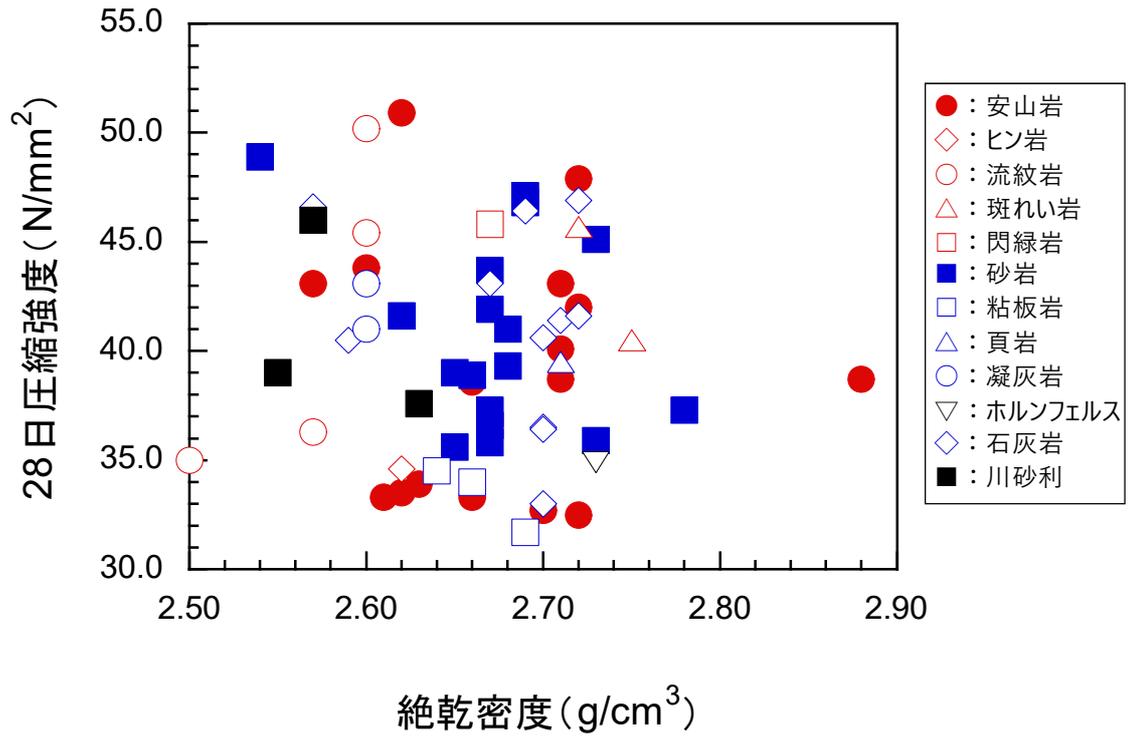


図 4.3-1 粗骨材の絶乾密度と 28 日圧縮強度の関係

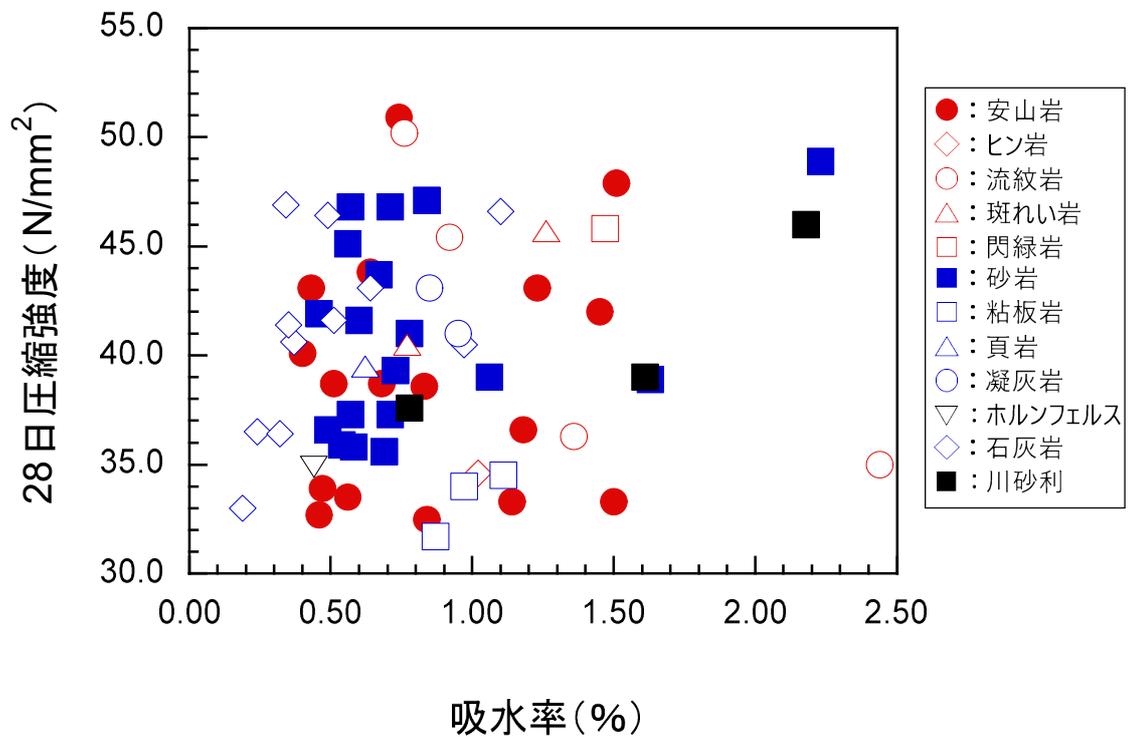
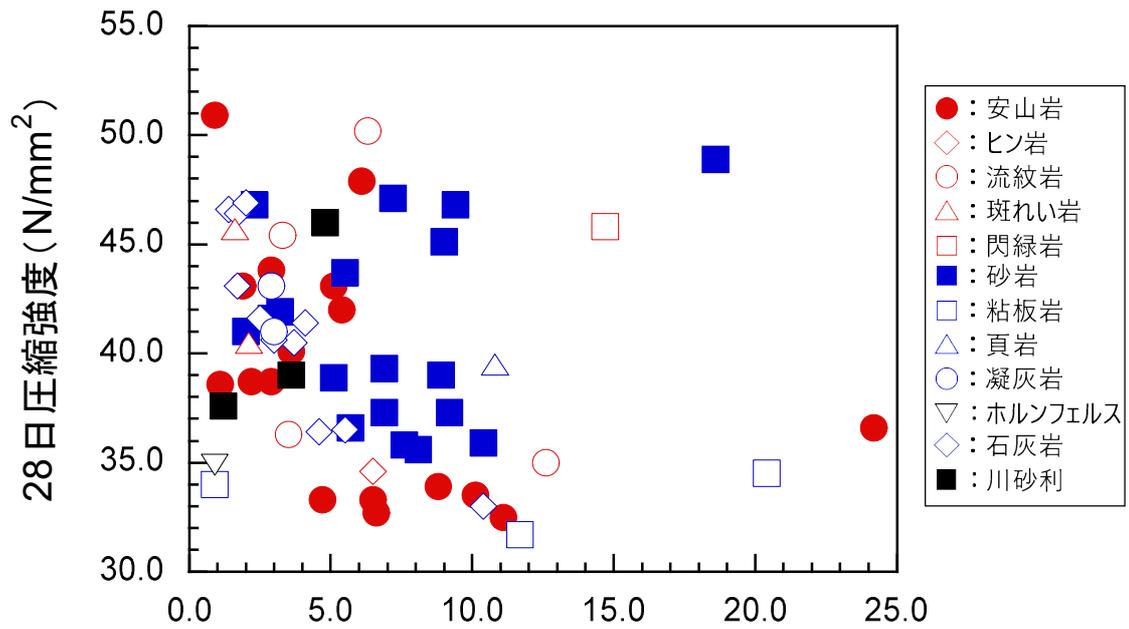


図 4.3-2 粗骨材の吸水率と 28 日圧縮強度の関係



安定性試験における損失質量分率(%)

図 4.3-3 粗骨材の安定性試験における損失質量分率と 28 日圧縮強度の関係

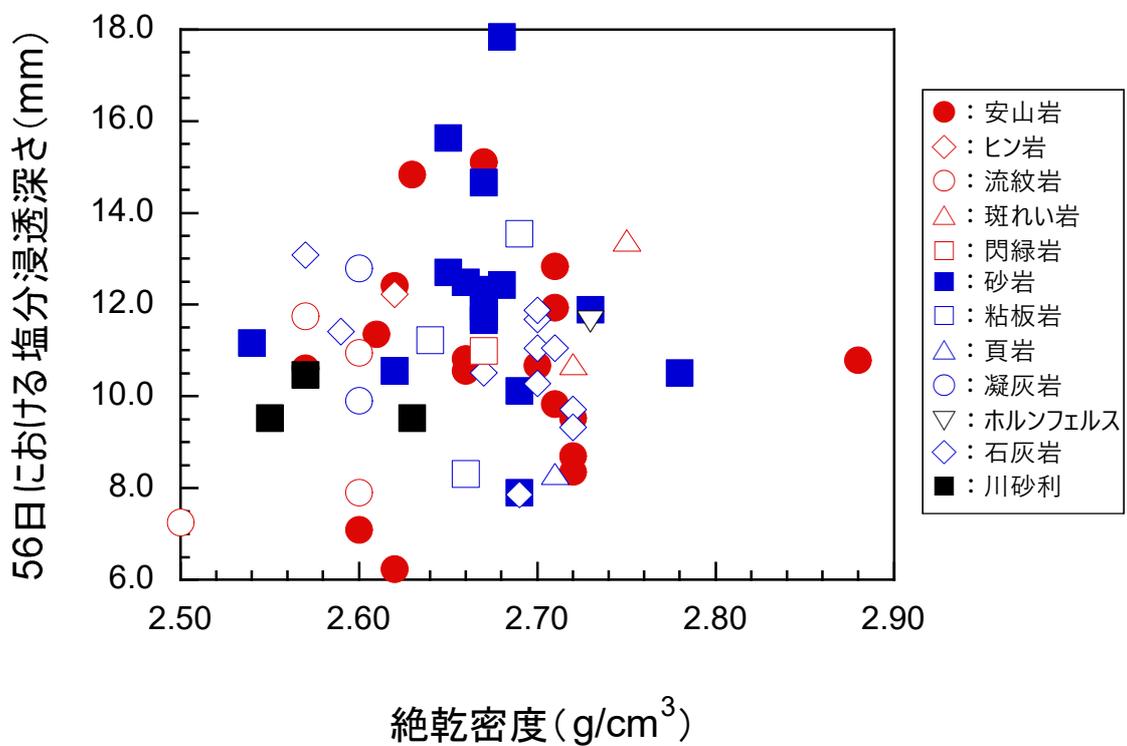


図 4.3-4 粗骨材の絶対乾密度と 56 日後の塩分浸透深さの関係

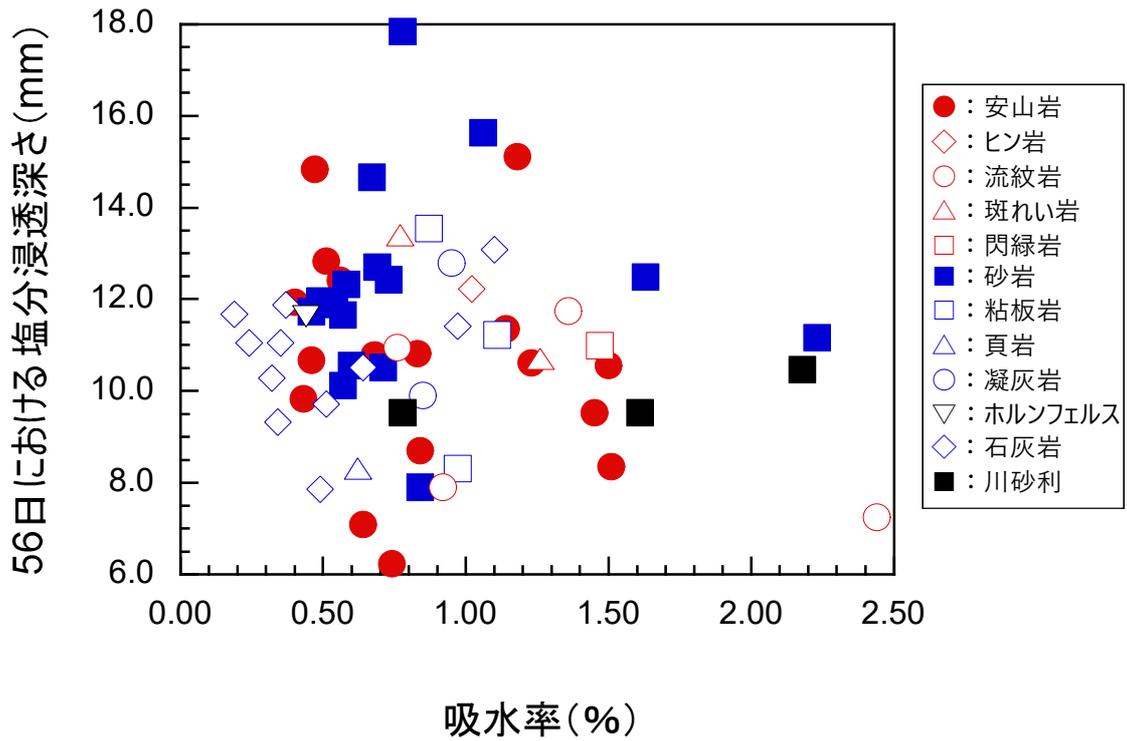


図 4.3-5 粗骨材の吸水率と 56 日後の塩分浸透深さの関係

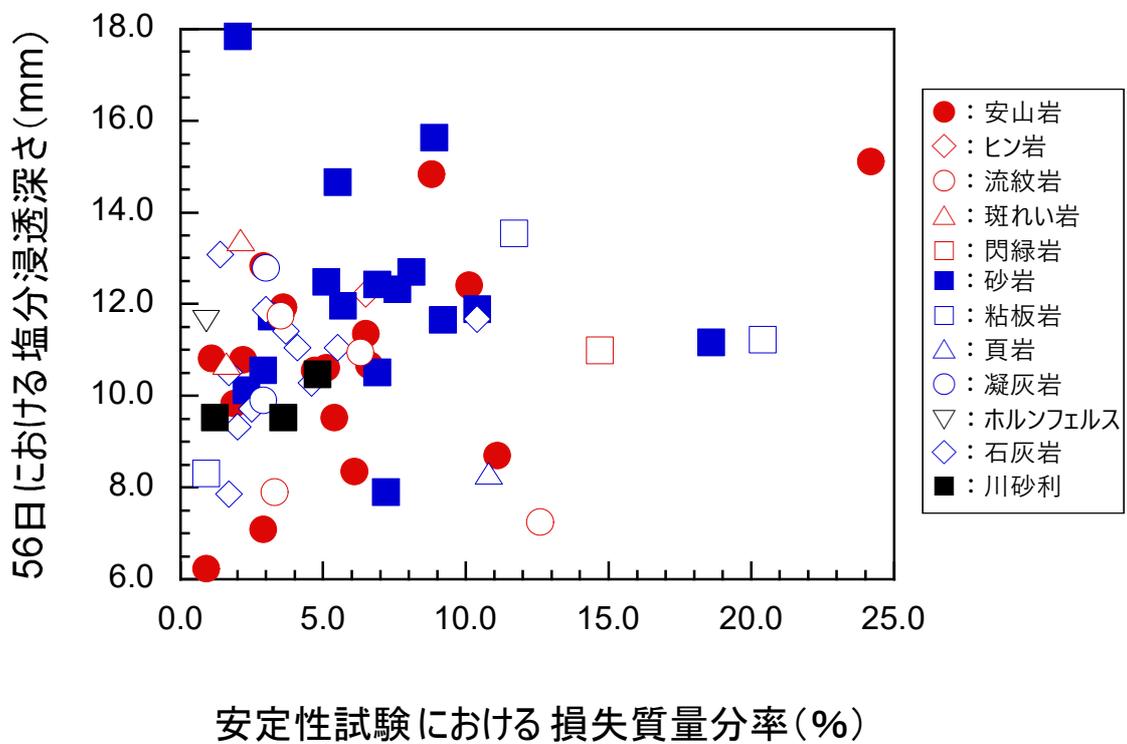


図 4.3-6 粗骨材の安定性試験における損失質量分率と 56 日後の塩分浸透深さの関係

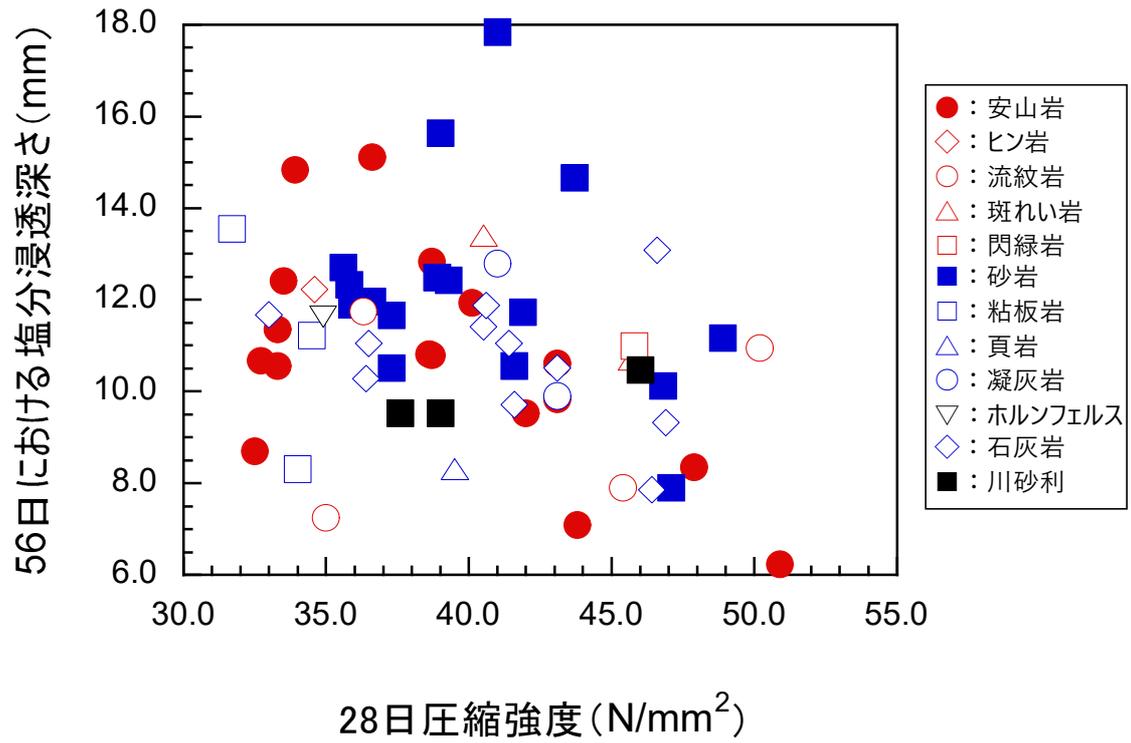


図 4.3-7 28日圧縮強度と56日後の塩分浸透深さの関係

### 4.3.3 粗骨材の微粒分がコンクリートの圧縮強度に与える影響

図 4.3-8～図 4.3-9 にそれぞれ、火成岩、堆積岩および川砂利の各粗骨材の圧縮強度の結果を示す。微粒分を洗い流した粗骨材を使用したコンクリートの試験結果を縦軸に、微粒分が付着したままの粗骨材を使用したコンクリートの試験結果を横軸に示す。これらの図より粗骨材の微粒分の有無による明確な違いは見られなかった。

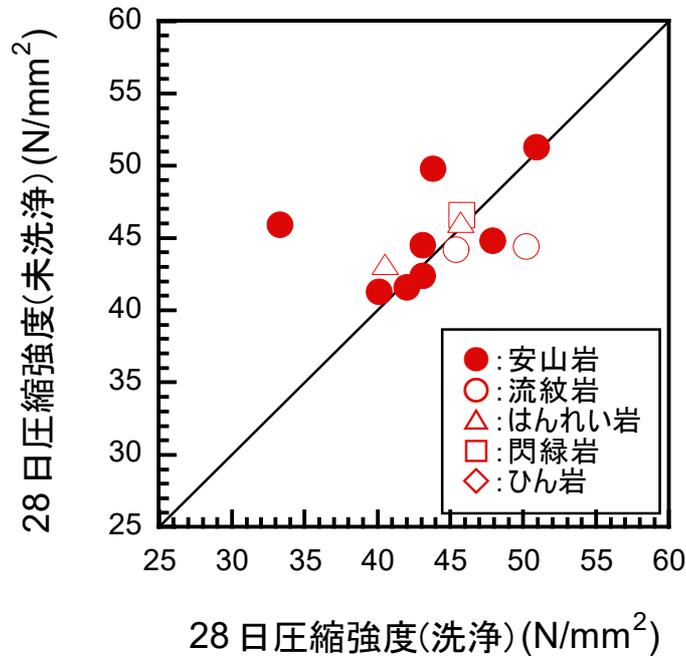


図 4.3-8 粗骨材の微粒分を洗い流したもののコンクリートと付着したままのコンクリートの圧縮強度試験結果の比較（火成岩の碎石の場合）

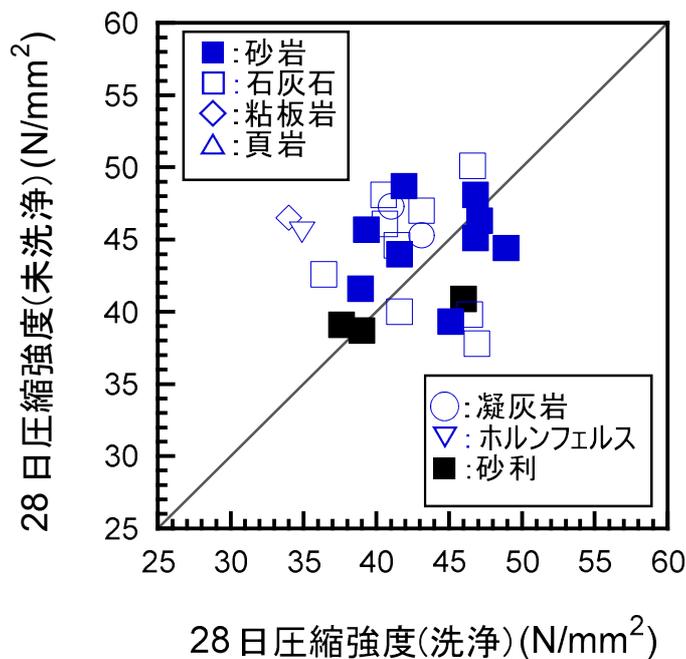


図 4.3-9 粗骨材の微粒分を洗い流したもののコンクリートと付着したままのコンクリートの圧縮強度試験結果の比較（堆積岩の碎石・砂利の場合）

#### 4.3.4 粗骨材の微粒分がコンクリートの塩化物浸透性に与える影響

図 4.3-10～図 4.3-11 にそれぞれ、火成岩、堆積岩および川砂利の各粗骨材の浸漬期間 56 日における塩分浸透深さを示したものである。圧縮強度の結果を示す。微粒分を洗い流した粗骨材を使用したコンクリートの試験結果を縦軸に、微粒分が付着したままの粗骨材を使用したコンクリートの試験結果を横軸に示す。これらの図より粗骨材の微粒分の有無による明確な違いは見られなかった。

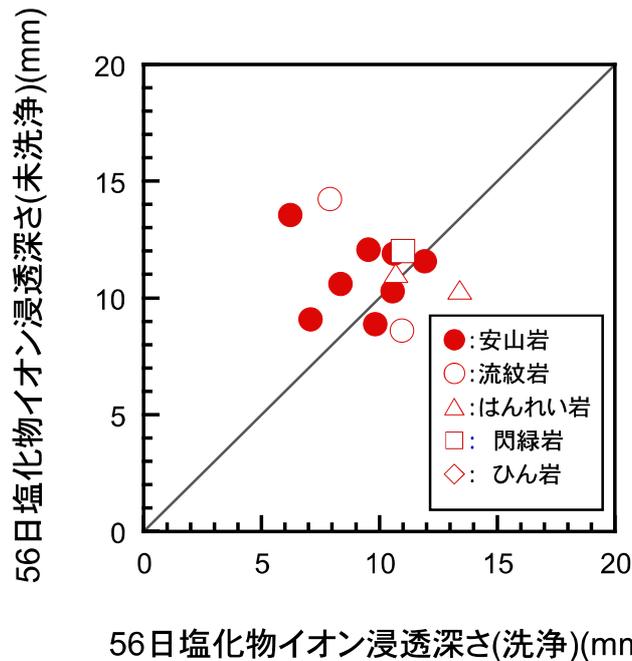


図 4.3-10 粗骨材の微粒分を洗い流したもののコンクリートと付着したままのコンクリートの塩化物イオン浸透深さの結果の比較（火成岩の碎石の場合）

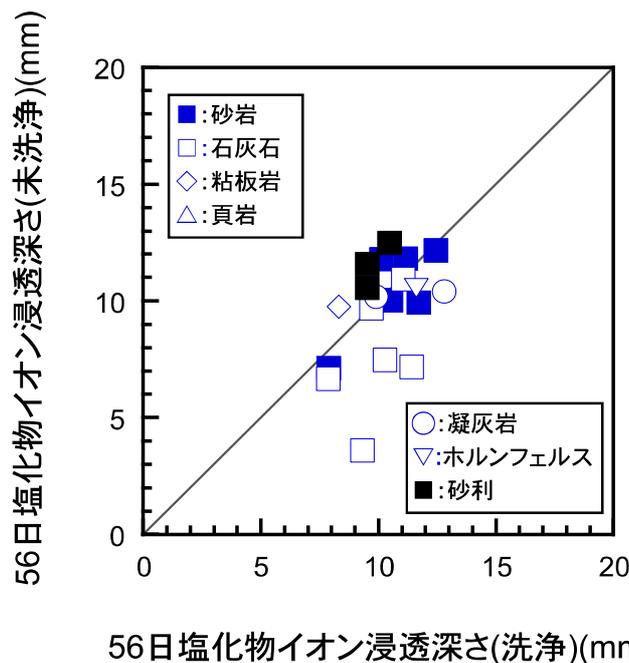


図 4.3-11 粗骨材の微粒分を洗い流したもののコンクリートと付着したままのコンクリートの塩化物イオン浸透深さの結果の比較（堆積岩の碎石・砂利の場合）

#### 4.4 本章のまとめ

本章では、粗骨材の品質が硬化後のコンクリートの性能に与える影響について調べた。粗骨材には全国から収集したサンプルを使用し、粗骨材以外の材料については同規格のものを使用し、水セメント比  $W/C$ ，単位水量  $W$ ，細骨材率  $s/a$  および設計空気量を一定にして実験を行った。各種粗骨材の絶乾密度，吸水率および安定性試験の損失質量分率の試験値と圧縮強度および塩化物イオン浸透性の関係性について検討した。また，粗骨材の微粒分が圧縮強度および塩化物イオン浸透性に与える影響についても検討した。本実験の範囲では，絶乾密度，吸水率および安定性試験の結果と圧縮強度および塩化物イオン透過性との明確な関係は，確認できなかった。

微粒分の影響については，粗骨材の微粒分を洗い流したものと微粒分が付着したのものを使用したコンクリートでそれぞれ圧縮強度，塩化物イオン浸透性について実験を行った。いずれの粗骨材の種類を用いた場合でも，実施した全ての試験結果において，微粒分の有無についての明確な違いは確認できなかった。

#### 参考文献

- 1) 真野孝次，辻幸和，友澤史紀，深松孝：碎石粉を使用した碎石・砕砂コンクリートの性状，コンクリート工学，Vol. 46，No. 11，pp. 18-10，2008. 11

## 第5章 粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響

### 5.1 概 説

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、部材のひび割れやたわみ、プレストレスの減少などに影響し、設計時にはその影響を考慮する必要があるものである。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート中からの水分の逸散によって生じる。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、結合材や骨材などの使用材料の種類、単位水量や水セメント比等の配合の影響を受ける。骨材は、コンクリート中の6~7割を占めるため、その品質がコンクリートの品質に与える影響は小さくなく、コンクリートの乾燥収縮に対しても、使用する骨材によって、乾燥収縮ひずみが異なることが、既報の文献で報告されている<sup>1),2),3)</sup>。

土木学会コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>（以下、示方書）の乾燥収縮ひずみの予測式は、2012年に改訂されたものが用いられている。この予測式は、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会が、平成22年度に全国の生コンクリート工業組合から収集したデータとセメント協会が昭和54年および昭和56年に収集したデータをもとに作成され、JIS A 1129 試験による実験値を概ね±50%の精度で推定できるとされている<sup>5),6)</sup>。この予測式では、骨材の影響を考慮するために、骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を用いているが、骨材の種類によって、その影響の大きさが異なるため、骨材の品質を表わす係数 $\alpha$ を乗じている。骨材の品質を表わす係数は、 $\alpha=4\sim6$ の値を用いることとされており、標準的な骨材では、 $\alpha=4$ としてよいとされている。予測式の作成過程を示した資料<sup>5),6)</sup>や既往の研究<sup>7)</sup>では砂岩骨材を用いた場合には、 $\alpha=6$ とするのがよいと報告されている。

本研究では、岩種や産地の異なる64種類の粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響について検討を行った。また、示方書の予測式による計算値と実験値の比較を行い、骨材による吸水率が乾燥収縮ひずみに与える影響の違いについて調べた。さらに、粗骨材に付着している微粒分の影響についても調べた。

## 5.2 実験概要

### 5.2.1 使用材料および配合

本研究に用いたコンクリートの使用材料および配合は第4章と同じである。コンクリートの配合条件は水セメント比  $W/C=50\%$ 、細骨材率  $s/a=44\%$ 、単位水量  $W=170\text{kg/m}^3$ 、設計空気量を  $4.5\%$  とした。本実験の検討に使用した粗骨材の物性値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみの試験値を表5.2-1に示す。

### 5.2.2 試験方法

乾燥収縮ひずみの測定には、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いて、JIS A 1129-2:2010 附属書 A (参考) に示される「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠して試験を行った。供試体は、脱型直後から材齢7日まで水中で養生を行った。水中養生完了後、直ちに変位を測定するための測定用ゲージを、打設面およびその反対面を除く2面にそれぞれ2対貼り付けて、長さ変化の測定を開始した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-2:2010 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計(検長:  $250\text{mm}$ 、最小目盛り:  $1/1,000\text{mm}$ )を用いて測定した。乾燥収縮ひずみの測定は、温度が  $20\pm 2^\circ\text{C}$  で、相対湿度が  $60\pm 5\%$  の恒温恒湿度室内で行った。

表 5.2-1 粗骨材の物性値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみ (182 日)

記号	岩種	絶乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率 (%)	水分量 $\omega$ ( $\text{kg/m}^3$ )	乾燥収縮( $\times 10^{-6}$ )			
					洗浄	未洗浄		
(I)an-1	火成岩 Igneous rock	安山岩 andesite	2.66	0.83	20.61	678	557	
(I)an-3			2.63	0.47	16.93	615	536	
(I)an-4			2.70	0.46	16.96	650	568	
(I)an-6			2.61	1.14	23.50	646	661	
(I)an-8			2.62	0.56	17.81	631	532	
(I)an-10			2.88	0.68	19.67	712	683	
(I)an-11			2.67	1.18	24.18	905	889	
(I)an-12			2.72	0.84	20.91	655	691	
(I)an-13			2.65	1.06	22.21	671	619	
(I)an-14			2.62	0.74	19.60	746	769	
(I)an-15			2.72	1.51	27.80	774	837	
(I)an-17			2.75	1.50	27.38	660	657	
(I)rh-1			流紋岩 rhyolite	2.50	2.44	35.35	817	744
(I)rh-2				2.57	1.36	25.54	765	708
(I)rh-3	2.60	0.76		19.75	619	608		
(I)ga-1	斑レイ岩 gabbro	2.75	0.77	20.27	721	729		
(I)di-1	閃緑岩 diorite	2.67	1.47	27.13	761	820		
(I)po-1	ひん岩 porphyrite	2.62	1.02	22.28	744	706		

表 5.2-1 粗骨材の物性値およびコンクリートの乾燥収縮ひずみ(182日)(続き)

記号	岩種		絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	水分量 ω (kg/m <sup>3</sup> )	乾燥収縮(×10 <sup>-6</sup> )			
						洗浄	未洗浄		
(S)sa-1	堆積岩 Sedimentary rock	砂岩 sandstone	2.73	0.56	18.05	691	607		
(S)sa-2			2.67	0.58	18.12	743	583		
(S)sa-3			2.65	0.69	19.18	632	631		
(S)sa-5			2.73	0.54	17.82	667	602		
(S)sa-6			2.78	0.71	19.74	649	636		
(S)sa-7			2.67	0.56	18.02	710	638		
(S)sa-8			2.67	0.49	17.20	654	600		
(S)sa-9			2.67	0.46	16.89	681	743		
(S)sa-10			2.68	0.73	19.66	717	787		
(S)sa-11			2.69	0.84	20.81	911	935		
(S)sa-13			2.69	0.57	18.07	738	851		
(S)sa-14			2.54	2.23	33.75	1099	1081		
(S)sa-15			2.66	1.63	37.90	951	965		
(S)sa-16			2.65	1.06	32.30	835	844		
(S)sa-17			2.67	0.67	28.70	723	679		
(S)sa-18			2.70	0.78	29.86	746	709		
(S)li-1			石灰岩 limestone	石灰岩 limestone	2.70	0.19	14.19	546	575
(S)li-2					2.70	0.24	14.70	566	571
(S)li-3	2.70	0.32			15.52	637	593		
(S)li-4	2.58	1.09			27.74	767	744		
(S)li-5	2.59	0.97			21.78	745	707		
(S)li-6	2.70	0.37			20.76	595	582		
(S)li-7	2.71	0.35			15.84	596	639		
(S)li-8	2.72	0.51			17.49	585	815		
(S)li-9	2.69	0.49			17.24	563	609		
(S)li-10	2.67	0.64			23.51	638	602		
(S)li-11	2.72	0.34			15.75	601	786		
(S)sl-1	粘板岩 slate	粘板岩 slate	2.69	0.87	21.13	794	673		
(S)sl-2			2.64	1.11	23.35	779	829		
(S)sl-3			2.66	0.97	22.08	783	711		
(S)sh-1	頁岩 shale	頁岩 shale	2.71	0.62	18.63	784	748		
(S)tu-1	凝灰岩 tuff	凝灰岩 tuff	2.60	0.85	20.61	725	696		
(S)tu-2			2.60	0.95	21.62	735	741		
(M)ho-1	変成岩 Metamorphic rock	ホルンフェルス hornfels	2.73	0.44	16.79	689	675		
(G)rg-1	砂利 Gravel	川砂利 river gravel	2.63	0.78	20.02	736	775		
(G)rg-2			2.55	1.61	27.80	771	775		
(G)rg-3			2.57	2.18	33.51	748	739		

## 5.3 実験結果および考察

### 5.3.1 各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮

図 5.3-1 は、安山岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい(I)an-4、最も大きい(I)an-15 および中間の(I)an-1 の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中の Q は、粗骨材の吸水率である。吸水率が最も小さい(I)an-4 を用いたものの乾燥収縮ひずみが一番小さくなっており、吸水率が大きくなるにつれて、乾燥収縮ひずみも大きくなっている。図 5.3-2 は、砂岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい(S)sa-9、最も大きい(S)sa-14 および中間の(S)sa-13 の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。安山岩碎石の場合と同様に、吸水率が最も小さい(S)sa-9 を用いたものの乾燥収縮ひずみが一番小さくなっており、吸水率が大きいものほど、乾燥収縮ひずみも大きくなっている。とくに、吸水率の大きい(S)sa-14 の碎石を用いたものでは、乾燥期間 182 日で  $1103 \times 10^{-6}$  という大きい乾燥収縮ひずみを生じていた。図 5.3-3 は、石灰岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい(S)li-1、最も大きい(S)li-5 および中間の(S)li-11 の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。石灰岩碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、安山岩や砂岩と同様に、吸水率の最も小さい(S)li-1 を用いたものの乾燥収縮ひずみが一番小さくなっており、吸水率が大きい(S)li-5 を用いたものの乾燥収縮ひずみが大きくなっている。石灰岩を骨材に用いると、乾燥収縮ひずみは小さいと言われることが多いが、(S)li-1 の碎石の吸水率は、本実験で用いた粗骨材の中で最も小さく、それを用いたコンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみは  $537 \times 10^{-6}$  と、本実験で用いたものの中で最も小さいものであった。図 5.3-4 は、3 種類の川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。本実験で用いた川砂利の吸水率は、0.78%、1.61% および 2.18% と 1.4% 程度の差があったが、乾燥収縮ひずみは吸水率によらず、ほぼ同じであった。

図 5.3-5 は、コンクリート  $1\text{m}^3$  あたりに含まれる骨材中の水分量  $\Delta\omega$  と乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。骨材中の水分量  $\Delta\omega$  は、式 5.1 より算出した。

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100+\omega_S}S + \frac{\omega_G}{100+\omega_G}G \quad (5.1)$$

ここに、  
 $\Delta\omega$  : 骨材中に含まれる水分量 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\omega_S$  および  $\omega_G$  : 細骨材および粗骨材の吸水率 (%)  
S および G : 単位細骨材量および単位粗骨材量 ( $\text{kg/m}^3$ )

図中の●, ○, △, □, および◇はそれぞれ、安山岩, 流紋岩, 斑れい岩, 閃緑岩, およびひん岩を示し、図中の■, □, ◇, △, ○, ▽, および■はそれぞれ、砂岩, 石灰岩, 粘板岩, 頁岩, 凝灰岩, ホルンフェルス, および砂利を示している。この図より、骨材中の水分量  $\Delta\omega$  が大きいものほど、乾燥収縮ひずみは大きくなることが分かる。石灰岩碎石は、他の粗骨材に比べて骨材中の水分量が少ないことで、乾燥収縮ひずみが小さいことが言える。赤色のマーカーで示す火成岩に比べて、青色のマーカーで示す堆積岩は、骨材中の水分量が乾燥収縮ひずみに与える影響が大きく、同じ骨材中の水分量であっても、乾燥収縮ひずみが大きい傾向にある。

図 5.3-6 は、粗骨材の安定性試験における損失質量分率とコンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。安定性試験における損失質量分率と乾燥収縮ひずみの間には、明確な相関関係は見られない。しかし、安定性試験における損失質量分率が極端に大きい骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。

図 5.3-7 は、粗骨材の絶乾密度とコンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。岩種による傾向の違いはあるが、絶乾密度の小さい粗骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。

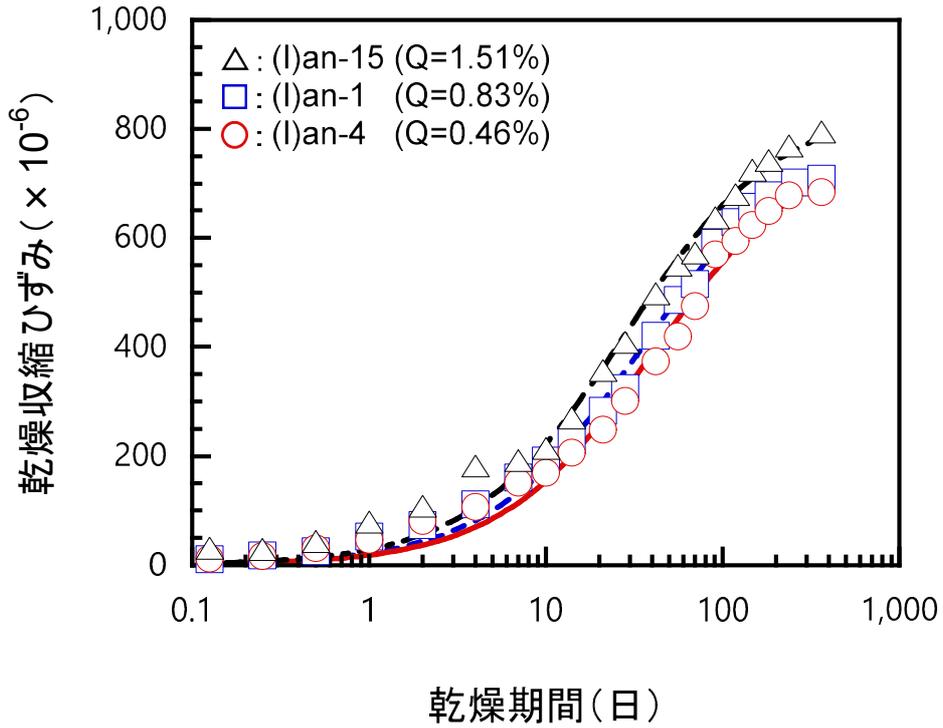


図 5.3-1 安山岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮

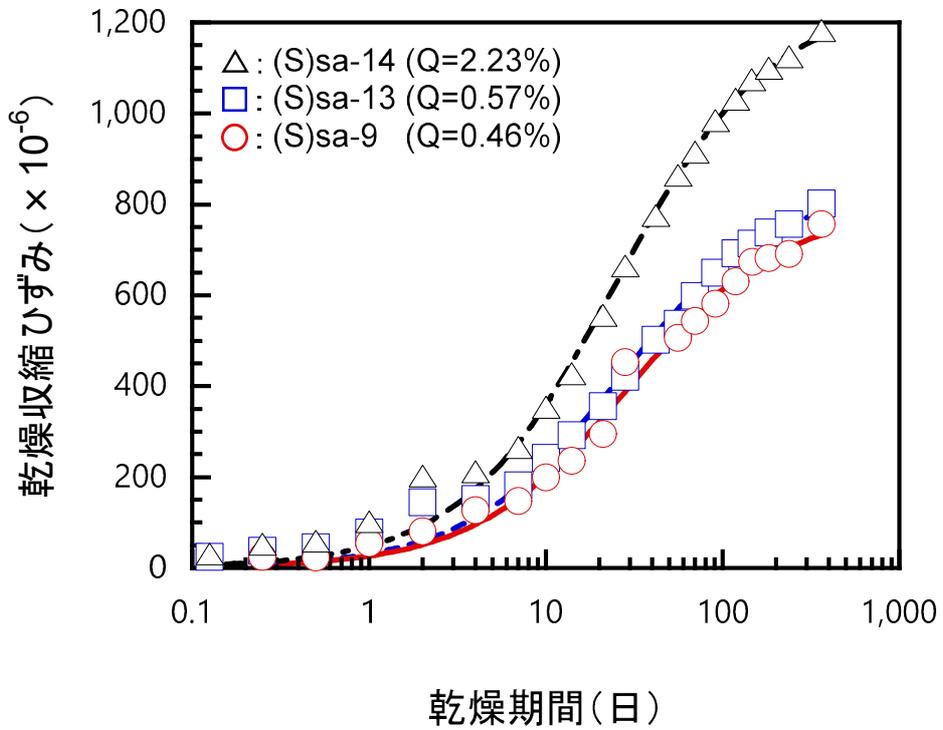


図 5.3-2 砂岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮

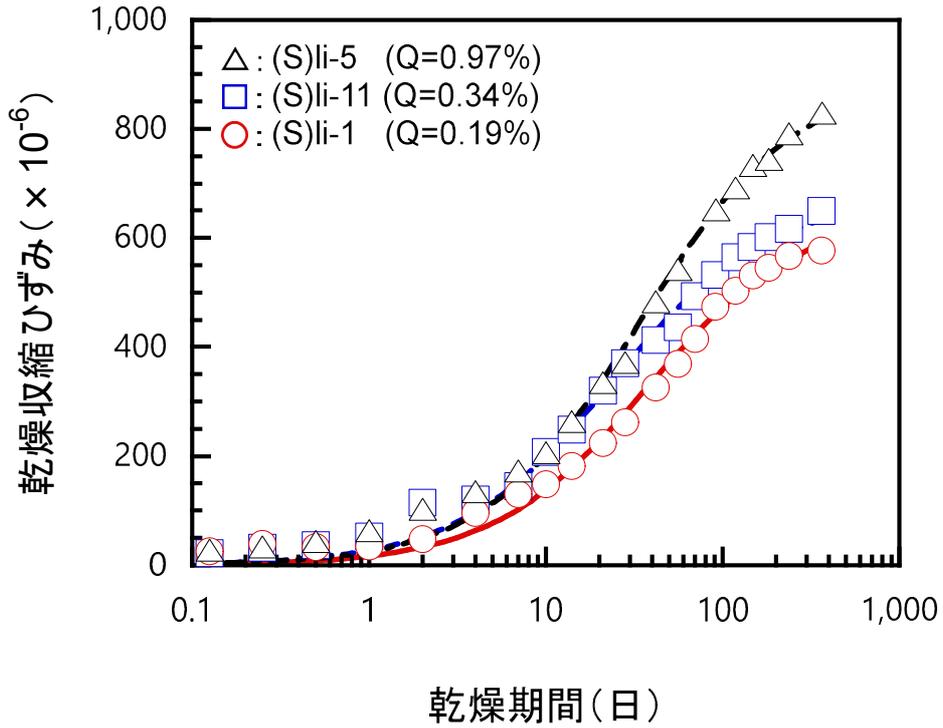


図 5.3-3 石灰岩碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮

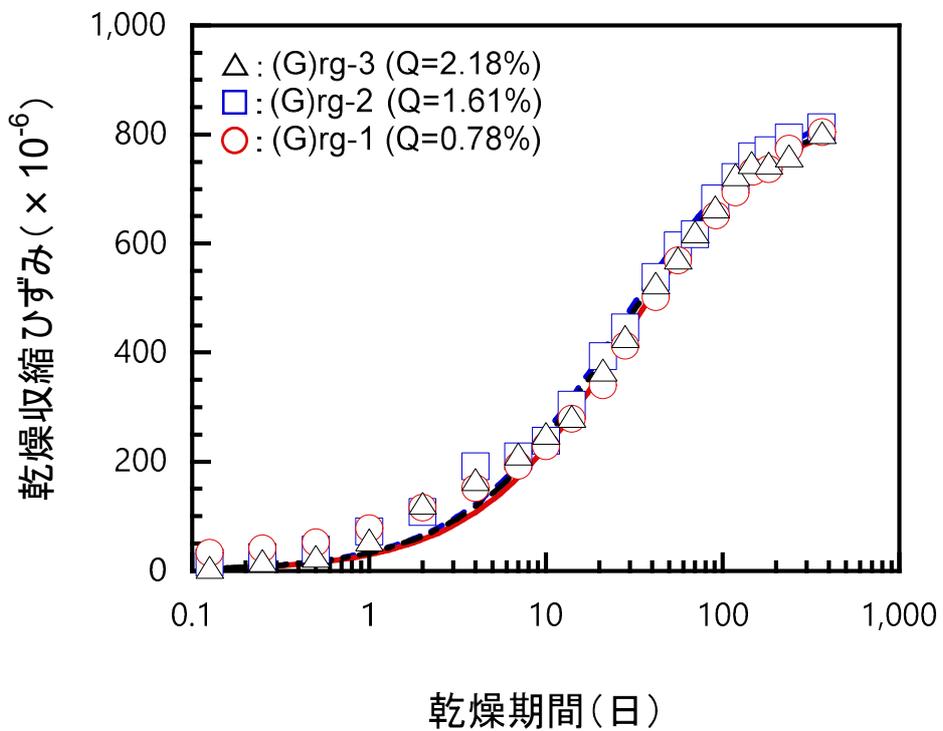


図 5.3-4 川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮

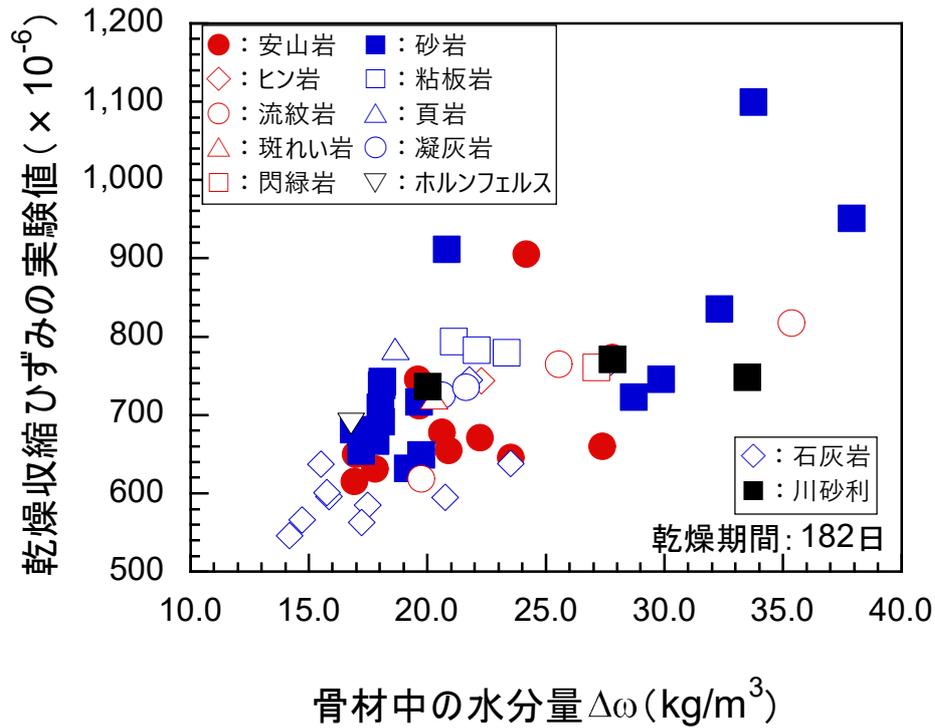


図 5.3-5 骨材中の水分量  $\Delta\omega$  とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

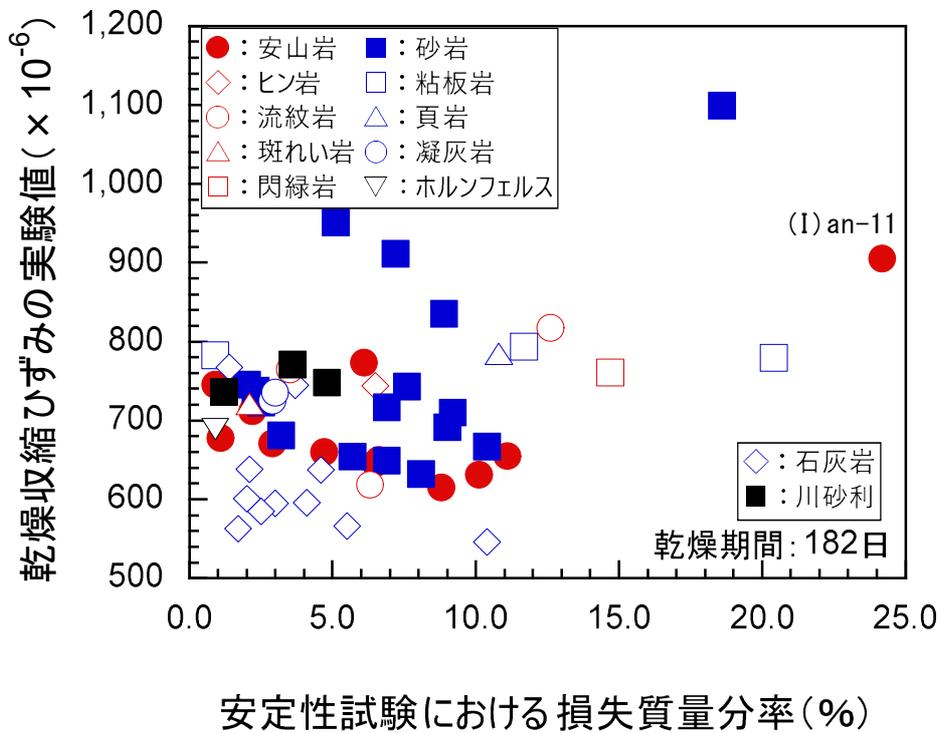


図 5.3-6 安定性試験における損失質量分率とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

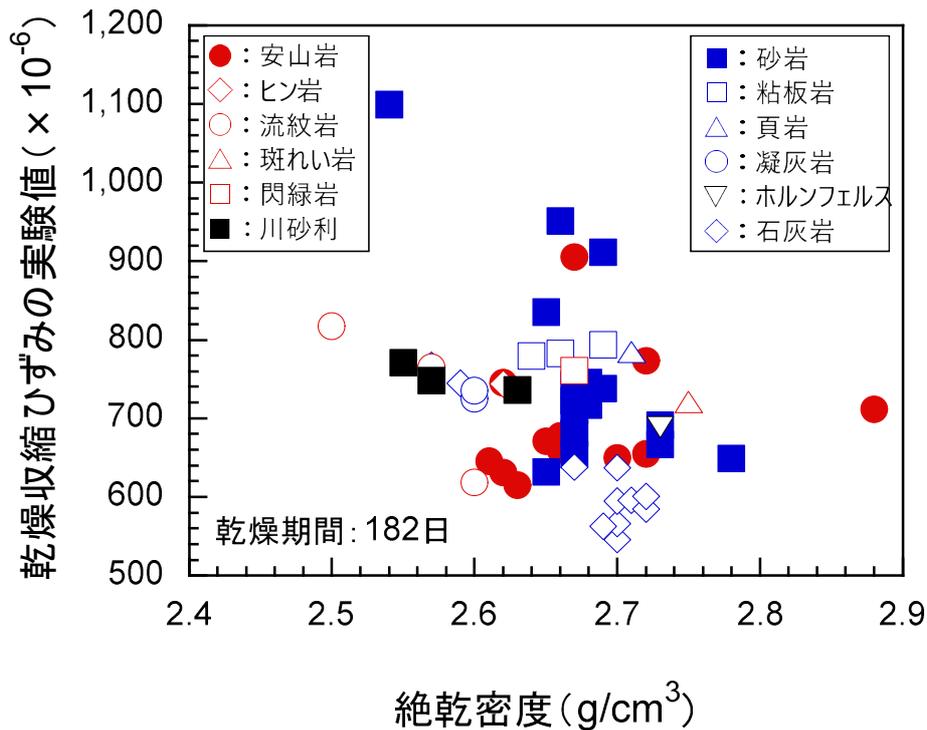


図 5.3-7 絶乾密度とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

### 5.3.2 コンクリート標準仕様書における乾燥収縮ひずみの計算値と特性値の比較

2022 年制定の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、収縮の特性値は、JIS A 1129 試験（100×100×400mm 供試体，水中養生 7 日後，温度 20℃，相対湿度 60% の環境下で 6 か月乾燥後の収縮ひずみ）によるものとされており，試験によらない場合には，以下に示す予測式 5.1 で特性値を算出する。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left( W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (5.2)$$

ここに， $\varepsilon'_{sh}$ ：収縮の試験の推定値（ $\times 10^{-6}$ ）

$W$ ：コンクリートの単位水量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）（ $W \leq 175 \text{kg}/\text{m}^3$ ）

$C/W$ ：セメント水比

$\alpha$ ：骨材の品質の影響を表す係数（ $\alpha=4\sim 6$ ）標準的な骨材の場合は $\alpha=4$ としてよい。

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）

図 5.3-8 および図 5.3-9 は，それぞれ，火成岩の砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を 4 および 6 として計算した示方書予測式による計算値とを比較し示したものである。図中にしめす RMSE は，図中のデータ全体の二乗平均平方根誤差を示す。RMSE 値より， $\alpha$ を 4 として計算した方が 6 として計算した場合に比べて，計算値と実験値がよく一致しているといえる。しかし， $\alpha$ を 4 とした場合，全体的に予測式より実測値が大きくなる傾向があるため， $\alpha$ を 6 とするのがよいと考える。また，図中の(I)an-11 の砕石は，安定性試験の結果が 24.2% と非常に高い。硫酸ナトリウムによる安定性試験は，硫酸ナトリウムの結

晶生成圧を水の凍結時の膨張圧に見立てて、骨材の耐凍害性を評価する試験であるが、骨材中の空隙や骨材強度が試験結果に関係する。硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が著しく大きい骨材では、空隙が多く骨材強度が小さいため、吸水率の影響をより受けやすい。従って、乾燥収縮ひずみが予測していた値より大きくなる危険性がある。

図 5.3-10 および図 5.3-11 は、それぞれ、石灰岩の砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を 4 および 6 として計算した示方書予測式による計算値とを比較し示したものである。二乗平均平方根誤差で比較すると、 $\alpha$ を 4 として計算した方が、 $\alpha$ を 6 として計算した場合に比べて、計算値と実験値が全体的によく一致している。石灰岩は、他の砕石に比べて吸水率が小さいものが多く、さらに吸水率による影響も小さい。

図 5.3-12 および図 5.3-13 は、それぞれ、石灰岩を除く堆積岩の砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を 4 および 6 として計算した示方書予測式による計算値とを比較し示したものである。石灰岩を除く堆積岩を用いた場合には、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を 6 として計算した方が、4 として計算した場合に比べて、予測式による計算値と実験値がよく一致していることが分かる。既報<sup>7)</sup>において、砂岩を骨材に用いた場合、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ には、6 を用いた方が、4 を用いた場合よりも実験値と計算値がよく一致することが示されている。堆積岩は、砂や泥、火山灰などの堆積物が圧縮等の作用を受けて固まった岩であるため、生成された年代が新しい場合には、収縮が大きくなることが報告されている<sup>2)</sup>。砕石を採取した地層の年代が新しい場合には、砂岩以外の堆積岩でも吸水率の影響を受けやすく、乾燥収縮ひずみが大きくなる可能性がある。

図 5.3-14 および図 5.3-15 は、それぞれ、川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を 4 および 6 として計算した示方書予測式による計算値とを比較し示したものである。全体としては、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に 4 を用いた方がよく一致しているが、 $\alpha$ に 6 を用いた方が、よく一致している川砂利もある。砕石は、均質な岩盤を破碎して製造されるため、骨材粒子間の品質のばらつきは、少ない。一方で、川砂利は、河川の堆積物であり、山の岩石が河川を流れ堆積したものであるため、様々な岩種の岩石の混合物となっているため、粒子間のばらつきが大きい。先述した通り、堆積岩は吸水率の影響を受けやすいため、流域で堆積岩が多く採取されるような地域では、 $\alpha$ を大きくしておく方がよいと思われる。

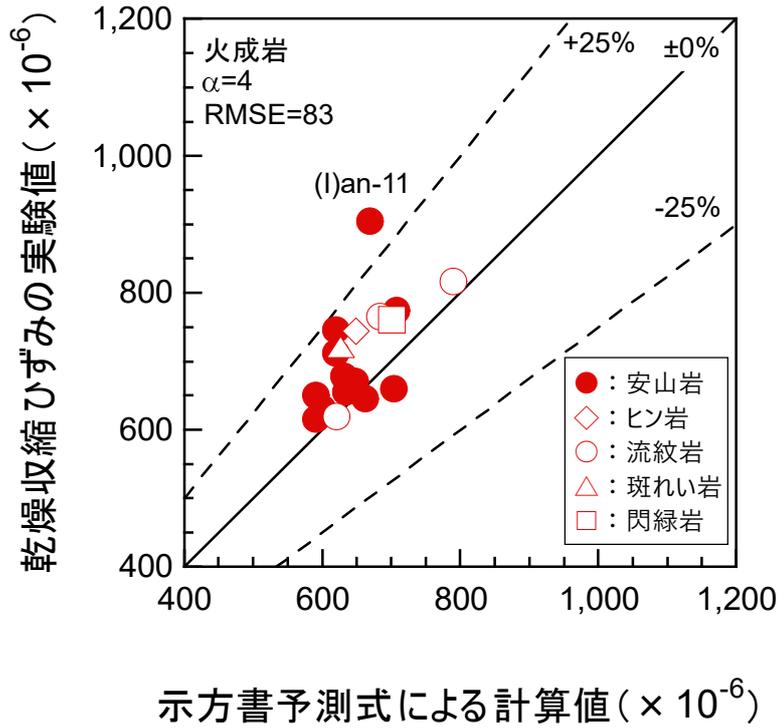


図 5.3-8 火成岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ )

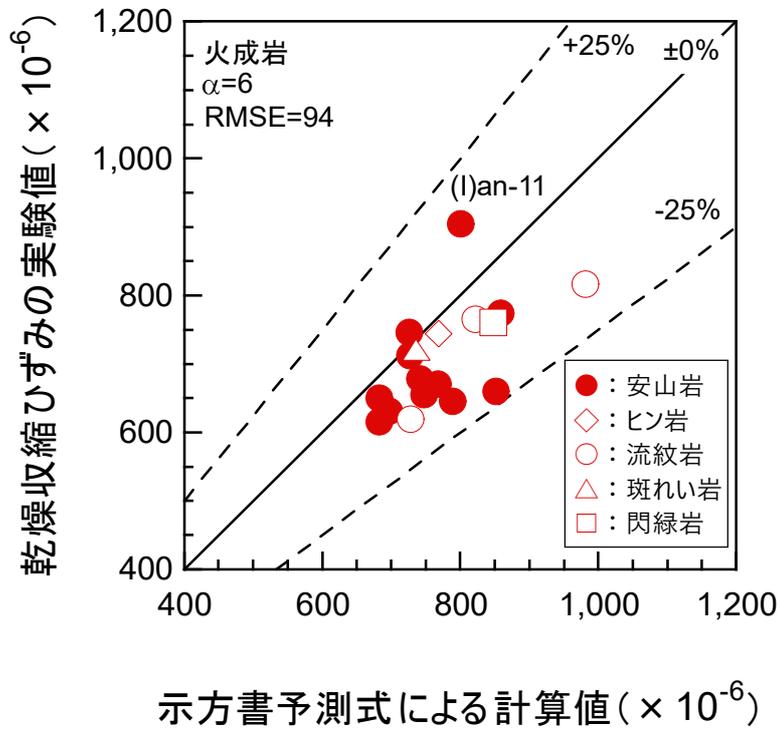


図 5.3-9 火成岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ )

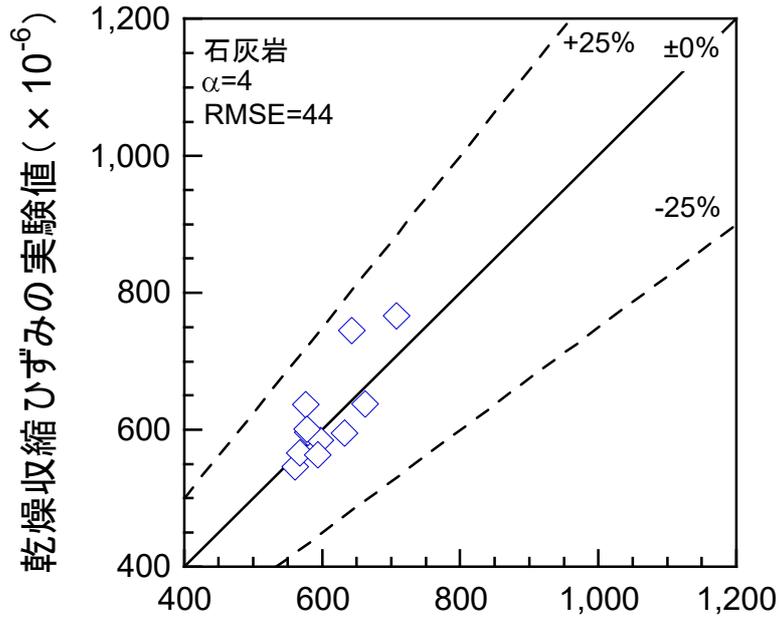


図 5.3-10 石灰岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ )

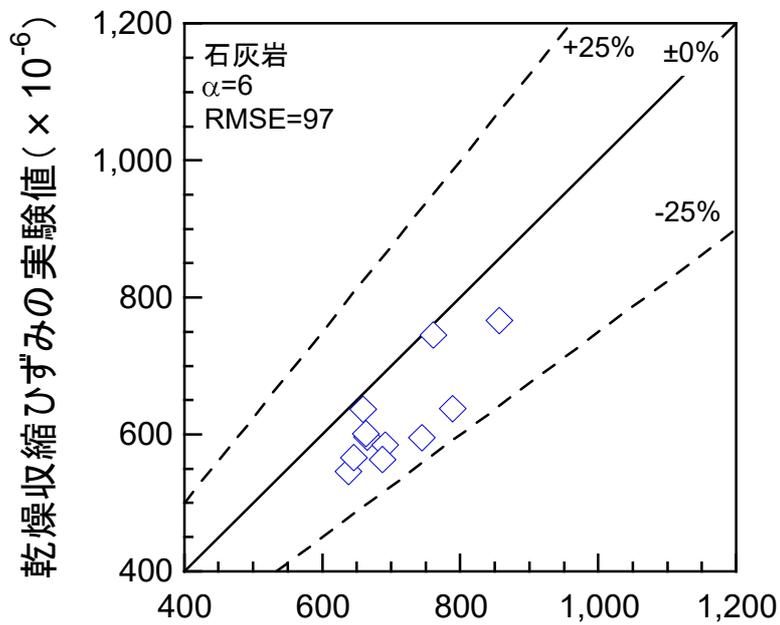


図 5.3-11 石灰岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ )

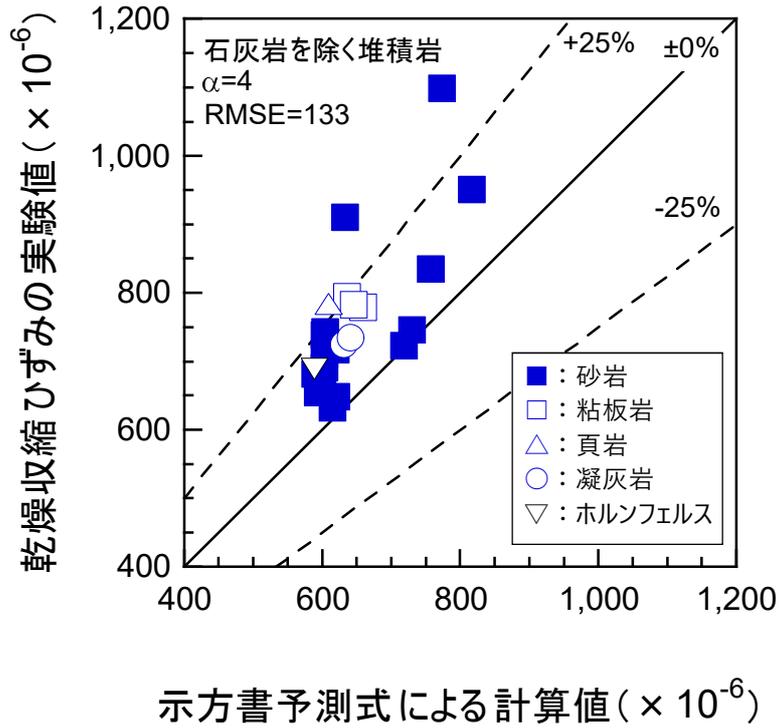


図 5.3-12 石灰岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ )

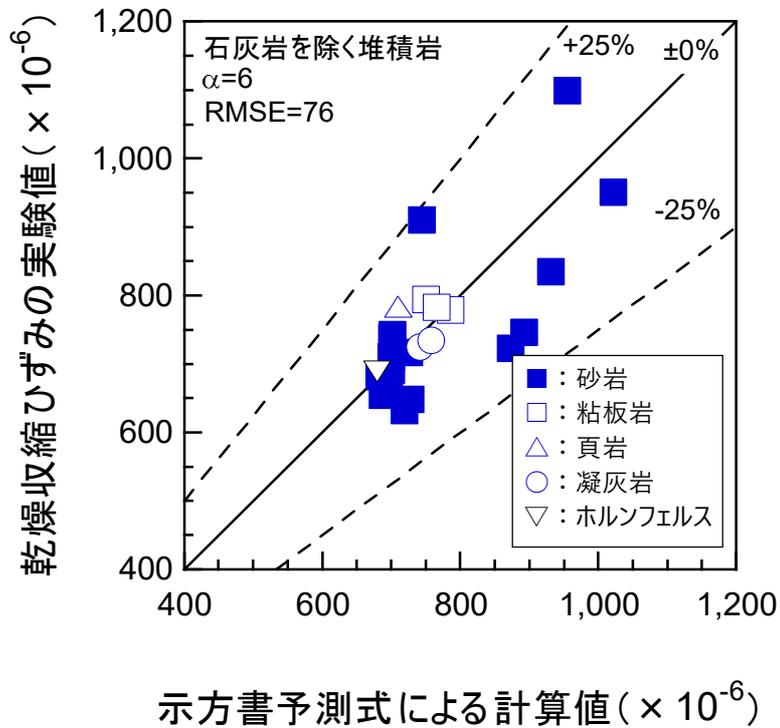


図 5.3-13 石灰岩を除く堆積岩を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ )

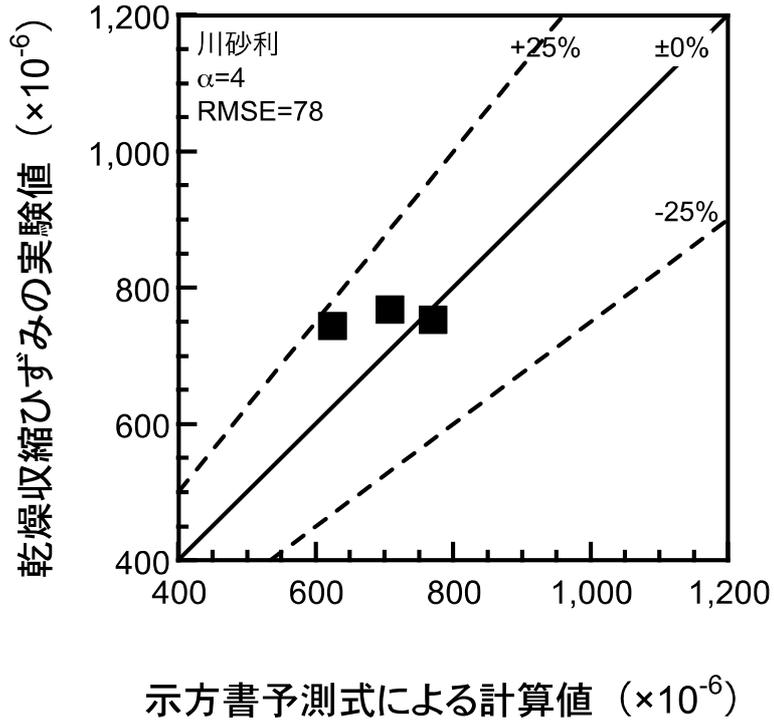


図 5.3-14 川砂利を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ )

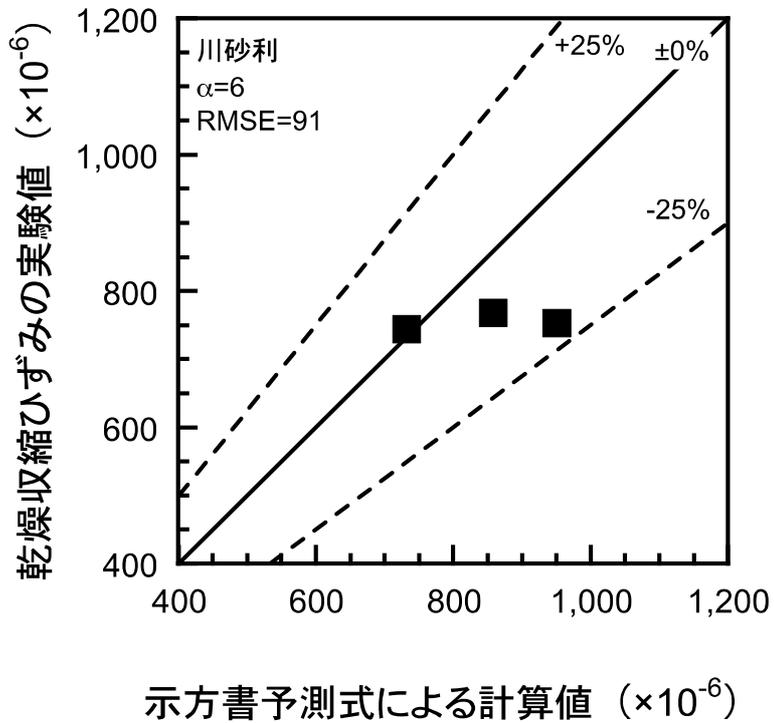


図 5.3-15 川砂利を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ )

### 5.3.3 粗骨材の微粒分がコンクリートの乾燥収縮に与える影響

図 5.3-16 および図 5.3-17 は、それぞれ、洗浄済と未洗浄の火成岩の碎石および堆積岩の碎石砂利を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を示す。図中の火成岩に分類される●, ○, △, □, ◇はそれぞれ、安山岩, 流紋岩, 斑れい岩, 閃緑岩, ひん岩を示しており、堆積岩・砂利に分類される■, □, ◇, △, ○, ▽, ■はそれぞれ砂岩, 石灰石, 粘板岩, 頁岩, 凝灰岩, ホルンフェルス, 砂利を示している。これらの図より、粗骨材に付着する微粒分がコンクリートの乾燥収縮に与える影響はほとんどないと考えられる。

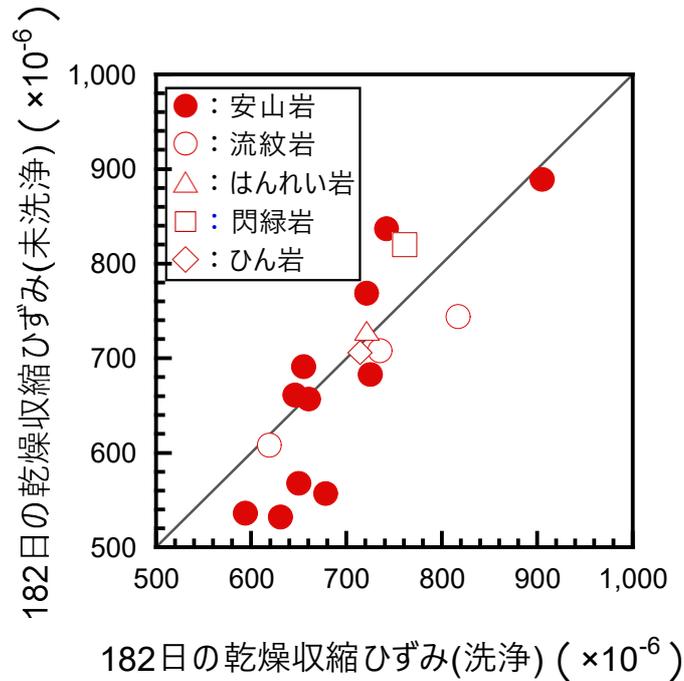


図 5.3-16 洗浄済と未洗浄の火成岩の碎石を使用したコンクリートの乾燥収縮の関係

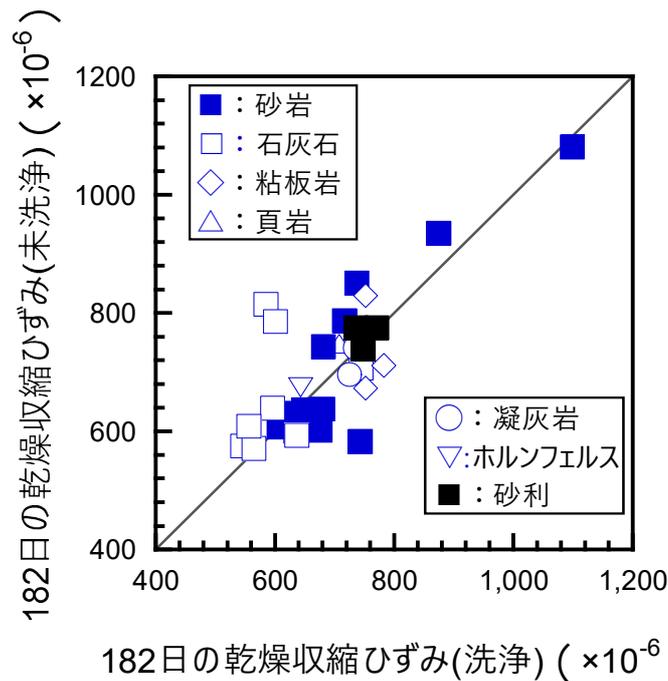


図 5.3-17 洗浄済と未洗浄の堆積岩の碎石および砂利を使用したコンクリートの乾燥収縮の関係

## 5.4 本章のまとめ

本章では、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について調べた。実験では全国から粗骨材のサンプルを収集したものを使用し、粗骨材以外の材料については同規格のものを使用した。配合についても単位水量  $W$ 、水セメント比  $W/C$ 、細骨材率  $s/a$  および設計空気量を一定にして実験を行った。骨材の物性値および骨材中の水分量  $\Delta \omega$  とコンクリートの乾燥収縮の関係性について、骨材の岩種別に確認した。また、実験値と示方書の予測式との比較検討を行い、示方書の予測式に示される骨材の品質を表す係数  $\alpha$  から、各粗骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について調べた。以下に本研究で得られた知見を要約し、結論とする。

- (1) 骨材の種類によらず、骨材中の水分量  $\Delta \omega$  が大きいものほど、乾燥収縮ひずみが大きくなるが、その傾向は骨材の種類によって異なる。
- (2) 吸水率の大きい砕石を用いるほど、コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。ただし、骨材の種類により、吸水率の影響の大小は異なる。安定性試験における損失質量分率と乾燥収縮ひずみの間には、明確な相関関係は見られない。しかし、安定性試験における損失質量分率が極端に大きい骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。絶乾密度の小さい粗骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。
- (3) 図 5.3-7 は、粗骨材の絶乾密度とコンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。岩種による傾向の違いはあるが、絶乾密度の小さい粗骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。
- (4) 火成岩や石灰岩の砕石を用いたコンクリートでは、骨材の品質の影響を表す係数  $\alpha$  に 4 を用いた場合、土木学会コンクリート標準示方書の予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が大きい場合では、 $\alpha$  に 6 を用いた方が計算値と実験値の誤差が小さい。石灰岩を除く堆積岩では、骨材の品質の影響を表す係数  $\alpha$  に 6 を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。従って、堆積岩は火成岩よりも吸水率の影響を受けやすいと言える。
- (5) 川砂利は産地の流域に多い岩種の影響を受けることがあるため、堆積岩が多い場合には、吸水率の影響が大きくなる可能性がある。
- (6) 粗骨材の微粒分がコンクリートの乾燥収縮に与える影響はほとんど無い。

コンクリートの乾燥収縮は、使用する骨材の岩種、物性値によっては、想定よりも収縮量が大きくなるおそれがあるため、JIS 規格値を外れる場合やプラントが使用する骨材が変化する場合は注意が必要である。

## 参考文献

- 1) 糟谷守, 樋渡一輝, 高田浩夫, 森本博昭: 各種コンクリート用骨材の乾燥収縮特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 559-564, 2009.6
- 2) 土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料, 第 4199 号, 2011.3
- 3) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 571-576, 2009.6
- 4) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編: 標準], pp.113-114, 2022.3
- 5) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書改定資料—基本原則編・設計編・施工編—, コンクリートライブラリー138, pp.65-70, 2012.3
- 6) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013.12
- 7) 藤井隆史, 下村匠: 最近の試験データを用いた土木学会の収縮ひずみ予測式の適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 275-280, 2021.6

## 第6章 粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響

### 6.1 概 説

コンクリート構造物の凍害は、空隙中に含まれる水が凍結・融解することで発生する劣化現象である。凍結融解作用による内部損傷、スケーリング、ポップアウト、微細ひび割れといったコンクリートの劣化により、劣化因子の透過性に対する抵抗性が小さくなり、強度や剛性といった力学的特性が低下する。

コンクリート中の 6~7 割を占める骨材は、その品質がコンクリートの品質に与える影響は小さくなく、凍結融解抵抗性に与える影響も大きい。コンクリートの凍結融解抵抗性には、骨材の種類や線膨張係数、吸水率、空隙構造が影響しているとの報告がある<sup>2),3),4)</sup>。しかし、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」に示される安定性試験の損失質量分率が規格値（12%）以下であり、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  で打設管理されたコンクリートであれば、凍害に対する耐久性があるというのが一般的な認識となっている。硫酸ナトリウムによる安定性試験は、硫酸ナトリウムの結晶生成圧が水が凍結する際の膨張圧に見立てて、骨材の凍結融解抵抗性を確認する試験である。硫酸ナトリウムによる安定性試験は、試験結果のばらつきが大きく、コンクリートの凍結融解抵抗性と必ずしも一致しないとの調査結果もある<sup>5)</sup>。また、粘板岩の砕石を使用したコンクリートでは、骨材の安定性試験の結果によらず、凍結融解抵抗性が低下するという報告もある<sup>6)</sup>。

また、骨材の微粒分については、2009 年の JIS 改訂時にコンクリートに影響を及ぼさない範囲で改訂が行われた<sup>7)</sup>。既報によれば、砕石や砕砂の製造時に発生する砕石粉は、使用に伴い単位水量や細骨材率の調整は必要であるが、比較的広範囲のコンクリートに使用できる可能性があること、特に、水セメント比が大きく粉体量が少ない低スランプコンクリートへの利用が有効であること、また、水セメント比が 60% で砕石粉の使用率 10% までの範囲内であればコンクリートのフレッシュ性状、強度発現性および耐久性にほとんど悪影響を及ぼさず、ブリーディング量低減に効果があることを報告している<sup>8)</sup>。既報によれば、砕石粉は、空気量を低下させる効果と耐凍害性を向上される効果があることを報告している<sup>3)</sup>。また、既報で、砕石粉がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える効果を検証しているが、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる効果があるとする報告している<sup>9)10)</sup>。一方では、微粒分が付着した状態の骨材を用いたい場合、コンクリートの凍結融解抵抗性が低下するという報告もある<sup>6)</sup>。

本研究では、全国より収集した粗骨材サンプルを用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について検討を行った。各粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性、および骨材表面に付着する微粒分の影響について検討を行った。

## 6.2 実験概要

### 6.2.1 配合条件および試験結果

#### (1) 使用材料および配合

実験に使用した粗骨材は、第4章の表4.2-1で示したのと同じものである。細骨材には硬質砂岩砕砂(表乾密度:2.66g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.57%, 粗粒率: 3.11)(表乾密度:2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.23%, 粗粒率:2.95)を、結合材には普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/cm<sup>3</sup>, プレーン値:3,350cm<sup>2</sup>/g)を用いた。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物系 AE 減水剤および AE 助剤を用いた。

コンクリートの配合は、(I)an-1の砕石を用いた場合のコンクリートの配合を基本とし、水セメント比が50.0%, 単位水量が170kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率が44.0%で一定の条件で配合を決定した。コンクリートの空気量が4.5±1.5%になるように、AE減水剤およびAE助剤を添加した。表6.2-1に基本配合を示す。

#### (2) 粗骨材の状態

粗骨材の表面に付着する微粒分の影響を確認する実験では、製造工場等から入荷した粗骨材を洗浄等は行わず表面に微粒分が付着した状態のまま使用した。さらに、微粒分の付着状態の影響を確認する実験では、あらかじめ粗骨材を練混ぜ水と混ぜ合わせて、粗骨材に付着していた微粒分を練混ぜ水へ洗い落とし残りの材料を投入する方法を行った。

コンクリートの練混ぜには、強制練りパン型ミキサーを用いた。細骨材とセメントで30秒の空練りを行った後、練混ぜ水と混和剤を添加し1分30秒間練り混ぜ、粗骨材を加えた後、2分間練り混ぜてからミキサーから排出し、練り舟でさらに練り返した後に試験に用いた。

#### (3) フレッシュ性状および凍結融解抵抗性試験結果

骨材の微粒分の付着状態毎で、コンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗性試験結果を表6.2-2に示す。表中では、骨材の微粒分の付着状態の異なるコンクリートを、次の通り示す。

- (a)「洗浄」・・・入荷した粗骨材を洗浄し使用したコンクリート
- (b)「未洗浄」・・・入荷した粗骨材を微粒分がついたまま使用したコンクリート
- (c)「微粒分と練混ぜ水を混合」・・・微粒分の付いた粗骨材を練混ぜ水と先行で攪拌し作成したコンクリート。

### 6.2.2 試験方法

#### (1) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法(A法)に準拠して行なった。供試体は、水中養生を行って、材齢28日より試験を開始した。凍結融解の1サイクルは、供試体の中心部温度が、5℃から-18℃に下がり、また、-18℃から5℃に上がるものとし、1サイクルに要する時間は、3時間以上、4時間以内とした。試験開始時および凍結融解36サイクルを超えない間隔で測定を行い、相対動弾性係数、耐久性指数および質量減少率を求めた。

#### (2) 硫酸ナトリウムを用いた粗骨材の安定性試験

JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」に従って行なった。試料を用意し、金網かごに入れ、試験溶液に浸水させた。16～18時間、溶液に浸水させたのち、105±5℃の温度で4～6時間、乾燥させ、1サイクルとした。乾燥後、試料の温度が常温に戻り次第、再び試験溶液に浸水させ、5サイクル時点で試験を終了とし、試料を洗浄し、乾燥後にふるいにとどまったものの質量を測定し、損失質量分率を求めた。

#### (3) 塩水を用いた粗骨材の凍結融解試験

試料を最小500g用意し、プラスチック性の容器に入れ、質量パーセント濃度5%の塩化ナトリウム水溶液に浸水させた。試験装置の凍結融解サイクルは、16時間の凍結工程と、8時間の融解工程を1サイクルとして行う。凍結工程では試験装置内の気相の温度を-18±2℃で12時間以上保

ち、融解工程では最高温度は  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  を標準とし、5 時間以上この温度を保つ。温度上昇は  $15^{\circ}\text{C}/\text{時間}$  とした。5 サイクル終了ごとに、試料を洗浄し、乾燥後に 10mm ふるいにとどまったものの質量を測定し、質量減少率を求めた。

表 6.2-1 コンクリートの基本配合

W/C (%)	s/a (%)	設計 Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C×%)	
			W	C	S	G1	G2	減水剤	AE 剤
55	44	4.5	170	340	792	508	508	0.3	0.004

表 6.2-2 フレッシュ性状および試験結果

粗骨材の種類		フレッシュ性状および試験結果												
		(a)洗浄				(b)未洗浄				(c) 微粒分と練混ぜ水を混合				
記号	岩種	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	
(l)an-1	火成岩 Igneous rock	安山岩 andesite	26.0	14.0	4.7	95	—	—	—	—	—	—	—	—
(l)an-2			26.6	16.0	4.0	85	26.9	14.5	5.0	86	27.0	10.5	4.1	92
(l)an-3			28.0	17.5	5.4	81	21.6	14.5	3.3	37	—	—	—	—
(l)an-4			26.1	17.0	5.6	93	21.5	12.0	3.5	31	—	—	—	—
(l)an-5			21.0	19.5	4.2	42	20.9	17.0	4.2	16	20.8	20.5	3.9	26
(l)an-6			27.2	17.0	5.2	89	21.6	10.5	3.5	37	—	—	—	—
(l)an-7			29.1	10.0	4.0	40	29.5	8.5	3.0	31	29.5	11.0	4.2	46
(l)an-8			26.1	14.5	5.9	94	23.6	11.5	3.5	86	—	—	—	—
(l)an-9			30.0	6.5	4.1	87	30.0	7.0	3.0	31	30.2	7.0	3.8	63
(l)an-10			26.1	16.0	6.0	90	23.6	10.5	4.4	45	—	—	—	—
(l)an-11			29.5	16.0	4.7	89	24.0	13.5	3.3	83	—	—	—	—
(l)an-12			27.1	19.5	5.7	89	23.6	12.0	3.6	59	—	—	—	—
(l)an-13			23.6	10.0	3.9	47	23.8	10.0	3.7	16	23.8	9.5	3.7	24
(l)an-14			21.3	6.5	4.0	90	24.1	6.5	3.2	79	25.2	4.5	3.0	86
(l)an-15			21.6	7.0	3.2	88	20.3	12.0	3.8	87	—	—	—	—
(l)an-16			21.6	16.5	3.6	33	26.2	18.0	4.9	62	26.2	16.5	3.6	33
(l)an-17			19.0	7.0	4.1	75	13.0	21.5	4.4	67	—	—	—	—
(l)rh-1	流紋岩 rhyolite	26.4	7.5	4.9	80	—	—	—	—	—	—	—	—	
(l)rh-2		29.6	13.0	4.8	88	19.8	14.0	3.4	35	—	—	—	—	
(l)rh-3		19.9	6.0	3.5	90	13.3	17.0	5.0	91	—	—	—	—	
(l)rh-4		28.0	7.5	3.6	54	28.0	7.0	3.3	17	28.0	6.0	3.0	34	
(l)ga-1	斑れい岩 gabbro	26.0	9.0	4.7	92	12.5	13.5	4.6	87	—	—	—	—	
(l)ga-2		21.7	17.5	3.5	32	23.5	16.5	3.8	22	21.9	16.0	4.2	35	
(l)di-1	閃緑岩 diorite	19.2	6.0	4.2	82	13.1	13.0	4.7	71	24.7	1.0	3.2	55	
(l)po-1	ひん岩 porphyrite	28.2	16.0	5.4	92	22.8	11.5	4.5	47	—	—	—	—	

表 6.2-2 フレッシュ性状および試験結果（続き）

粗骨材の種類		フレッシュ性状および試験結果												
		(a)洗浄				(b)未洗浄				(c) 微粒分と練混ぜ水を混合				
記号	岩種	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	コンクリート温度(°C)	SL(cm)	Air(%)	耐久性指数	
(S)sa-1	堆積岩 Sedimentary rock	砂岩 sandstone	22.8	13.5	4.6	48	29.2	9.0	5.6	96	—	—	—	—
(S)sa-2			26.2	7.5	5.1	98	22.7	13.0	4.4	45	—	—	—	—
(S)sa-3			29.4	17.5	4.7	85	23.9	14.5	3.9	86	—	—	—	—
(S)sa-4			29.1	14.5	3.8	57	29.6	9.5	3.9	44	29.1	7.0	3.5	42
(S)sa-5			26.1	14.5	5.8	95	20.6	12.0	4.3	46	—	—	—	—
(S)sa-6			29.5	14.5	5.8	89	22.7	8.0	3.8	60	—	—	—	—
(S)sa-7			29.5	7.0	3.8	88	20.9	12.0	3.7	57	—	—	—	—
(S)sa-8			29.7	9.5	3.7	85	19.6	13.5	4.0	25	—	—	—	—
(S)sa-9			26.1	7.0	4.1	91	12.7	15.5	4.5	50	24.0	4.0	4.2	85
(S)sa-10			25.6	8.0	3.1	93	13.1	15.5	4.3	95	24.0	11.0	3.2	104
(S)sa-11			12.5	21.5	4.1	87	11.8	14.0	4.8	89	—	—	—	—
(S)sa-12			17.5	18.5	5.0	12	17.9	11.5	4.1	9	17.3	16.5	3.5	20
(S)sa-13			18.7	7.5	4.7	90	11.7	15.5	5.8	89	24.0	5.5	4.1	90
(S)sa-14			19.3	9.0	3.3	46	12.7	15.0	4.9	88	—	—	—	—
(S)sa-15			20.8	14.5	4.0	38	21.8	13.5	3.0	10	21.1	15	3.4	18
(S)sa-16			23.6	14.5	4.0	53	23.5	13.5	4.5	83	23.4	12	4	39
(S)sa-17			22.0	9.5	3.8	56	22.1	9.5	3.0	9	22.1	10	3.3	29
(S)sa-18			23.2	13.5	3.2	44	22.9	15.5	3.3	23	23.2	15	3.6	44
(S)li-1	石灰岩 limestone	27.0	16.0	5.1	89	19.4	13.5	3.8	57	—	—	—	—	
(S)li-2		29.7	10.0	4.6	93	19.6	12.0	4.2	53	—	—	—	—	
(S)li-3		25.8	8.0	3.7	95	12.0	18.0	5.2	95	20.8	4.5	3.5	88	
(S)li-4		19.8	7.0	4.8	69	19.8	8.0	3.7	50	19.8	7.5	4.0	27	
(S)li-5		25.8	9.5	4.9	95	20.3	3.5	3.0	53	22.5	7.0	4.6	87	
(S)li-6		21.9	13.0	4.0	86	21.7	15.0	3.5	34	21.7	12.0	3.9	48	
(S)li-7		25.9	6.5	4.4	93	13.3	13.0	5.1	87	—	—	—	—	
(S)li-8		26.0	6.5	3.6	97	20.2	6.0	3.5	92	23.3	19.0	5.1	83	
(S)li-9		21.6	5.5	4.2	90	11.2	20.0	5.5	92	—	—	—	—	
(S)li-10		16.3	13.0	4.9	60	16.1	8.5	3.8	34	16.1	9.0	4.0	37	
(S)li-11		19.0	6.5	5.1	96	11.8	18.5	4.9	96	24.3	0.0	3.6	90	
(S)sl-1	粘板岩 slate	28.2	15.5	6.0	84	21.0	13.5	3.8	23	—	—	—	—	
(S)sl-2		28.5	18.5	4.7	66	25.1	15.0	3.9	30	—	—	—	—	
(S)sl-3		26.9	14.5	5.9	82	23.0	3.5	3.0	32	23.2	4.5	3.9	53	
(S)sh-1	頁岩 shale	29.5	9.0	5.6	93	19.4	8.0	3.5	41	—	—	—	—	
(S)tu-1	凝灰岩 tuff	25.3	5.5	4.6	91	11.7	17.5	3.7	67	—	—	—	—	
(S)tu-2		25.5	7.0	4.6	90	13.2	13.0	3.9	16	23.6	4.5	3.1	99	
(M)ho-1	変成岩 Metamorphic rock	ホルンフェルス hornfels	28.6	14.5	4.2	95	23.2	6.5	3.1	91	23.2	10.0	4.0	93
(G)rg-1	砂利 Gravel	川砂利 river gravel	25.9	9.0	5.1	95	12.1	20.0	4.5	95	23.6	19.0	5.7	89
(G)rg-2		21.5	12.0	4.5	91	11.2	21.8	4.8	84	24.3	18.5	5.6	86	
(G)rg-3		19.5	10.5	4.5	80	13.2	21.0	3.9	72	—	—	—	—	

## 6.3 実験結果および考察

### 6.3.1 各種粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

図 6.3-1 は、表 6.2-2 に示す堆積岩の碎石のうち、安定性試験における損失質量分率が大きかった(S)sa-14, (S)sl-1 および(S)sl-2 の碎石を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。図中の Air は、練混ぜ直後のコンクリートの空気量を、P は、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率である。JIS A 5005 の安定性試験における損失質量分率の規格値を満足する(S)sl-1 の碎石を用いたコンクリートでは、300 サイクルでの相対動弾性係数は 84%で、凍結融解抵抗性は確保されている。一方で、安定性試験における損失質量分率の規格値を上回っている(S)sa-14 の碎石では、245 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回った。また、(S)sl-2 の碎石では、269 サイクルでは相対動弾性係数が 88%であるが、300 サイクルでは相対動弾性係数が 66%まで低下している。

図 6.3-2 は、図 6.3-1 で示したのものも含めて、表 6.2-2 に示す堆積岩の碎石および川砂利を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解の耐久性指数と、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の関係を示したものである。表 6.2-2 に示すコンクリートの練混ぜ直後の空気量は、3.1%から 6.0%であった。本実験で用いた川砂利は、いずれも硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率は 5%以下と小さいもので、それを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性も耐久性指数で 80 以上であった。堆積岩の碎石でも、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が、JIS A 5005 の規格値である 12%以下のものは、砂岩を除き、空気量が 3.1%のものであっても、耐久性指数は 60 以上と十分な凍結融解抵抗性が得られた。一方で、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が 12%を超えた砂岩以外の堆積岩の碎石を用いたコンクリートでは、耐久性指数の低下は確認されなかった。砂岩の碎石では、安定性試験の結果によらず、耐久性指数が 60 に満たないものがあった。堆積岩の碎石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が JIS の規格値である 12%を超えたものは(S)sa-14 と(S)sl-2 で、練混ぜ直後の空気量が 3.3%および 4.7%であったが、耐久性指数は 46 および 66 である。従って、堆積岩のうち、砂岩の碎石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が JIS の規格値である 12%以下であっても、凍結融解抵抗性が得られにくくなるものがある。

図 6.3-3 は、表 6.2-2 に示す火成岩の碎石のうち、安定性試験における損失質量分率が大きかった(I)an-11, (I)an-12 および(I)rh-1 の碎石を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。いずれの碎石を用いたものも、300 サイクルで相対動弾性係数が 80%以上であった。(I)an-11 および(I)rh-1 の硫酸ナトリウムによる安定性試験における質量損失分率は、JIS A 5005 の規格値である 12%よりも大きい骨材であるが、安定性の規格は満足しないものでも、コンクリートの凍結融解抵抗性があることが分かる。図 6.3-4 は、図 6.3-3 で示したのものも含めて、表 6.2-2 に示す火成岩の碎石を粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解の耐久性指数と、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の関係を示したものである。また、表 6.2-2 に示すコンクリートの練混ぜ直後の空気量は、3.2%から 6.0%であった。堆積岩同様に、安定性試験の結果によらず、耐久性指数が 60 に満たないものもあった。反対に安定性試験における損失質量分率の大きいものであっても、コンクリートの耐久性指数は 80 を上回っており、硫酸ナトリウムによる安定性試験の結果との明確な関係は確認できなかった。既報<sup>4)</sup>では、80 種類の粗骨材を用いて、硫酸ナトリウムによる安定性試験の結果とコンクリートの耐久性指数との関係を調べたが、耐久性指数の大小によらず、両者の間に良好な対応関係が見られなかったことが報告されている。また、既報<sup>5)</sup>では、簡易凍結融解試験による損失率が大きい骨材でも、コンクリートの耐久性指数は高いものがあったことが報告されている。いずれの文献も、骨材の凍結融解抵抗性と、コンクリートの凍結融解抵抗性との間に明確な関係が確認されない骨材があることが報告されており、本研究の実

とが報告されており、本研究の実験結果からも、硫酸ナトリウムによる安定性試験結果と、コンクリートの凍結融解試験結果が一致しない結果となった。

図 6.3-5 は、表 6.2-2 に示す粗骨材の安定性試験による損失質量分率と骨材の凍結融解試験による損失質量分率の関係を示したものである。本研究で使用した骨材では、両者の間に良好な対応関係が見られた。しかし、既報<sup>6)</sup>によれば、粘板岩の碎石を用いた場合には、安定性試験の結果によらず、骨材の凍結融解作用で崩壊するものもある。骨材が凍結融解作用で崩壊する可能性がある場合は、コンクリート構造物で確実に耐凍害性が必要な場合はコンクリートの凍結融解抵抗性試験で判定するのがよいと考える。

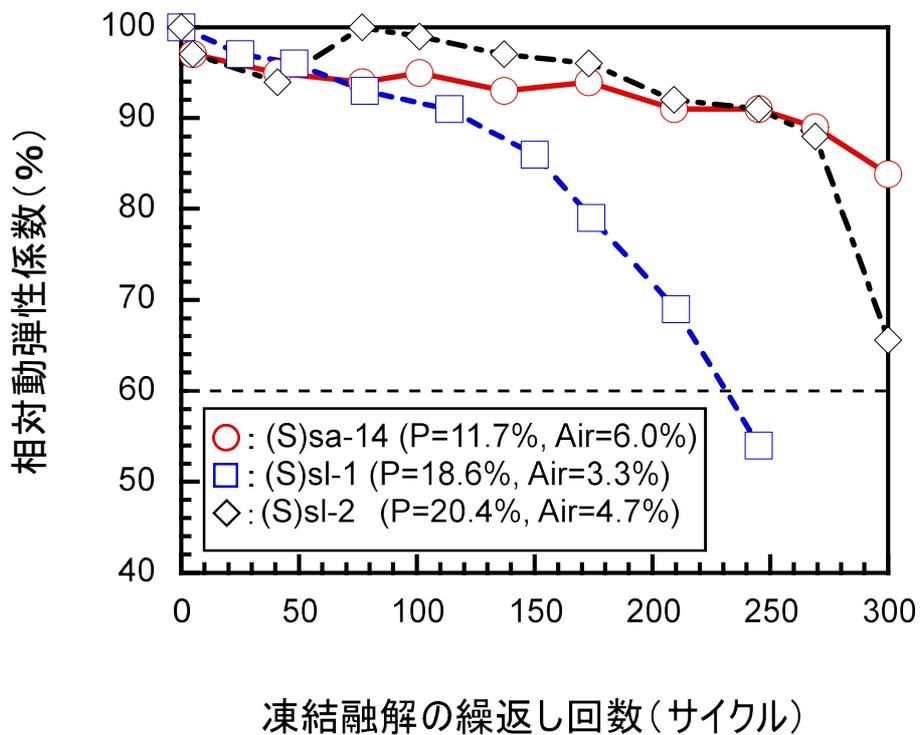
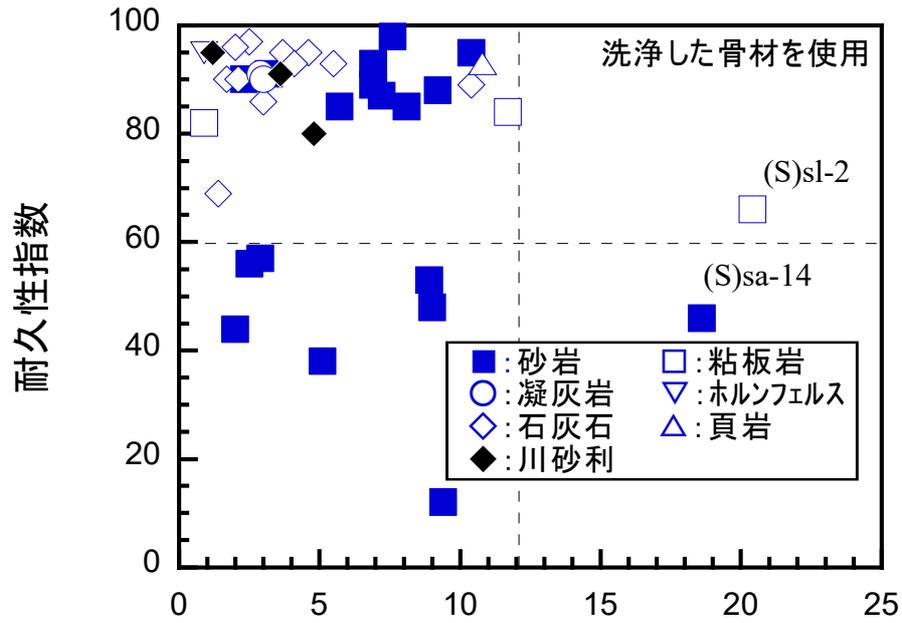
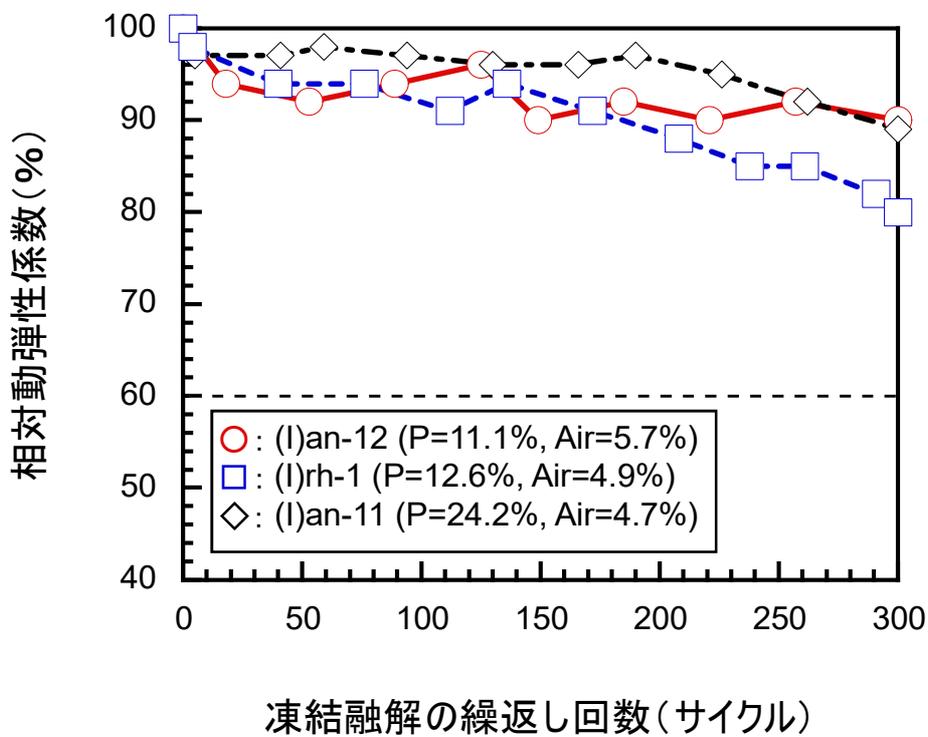


図 6.3-1 堆積岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの凍結融解試験結果



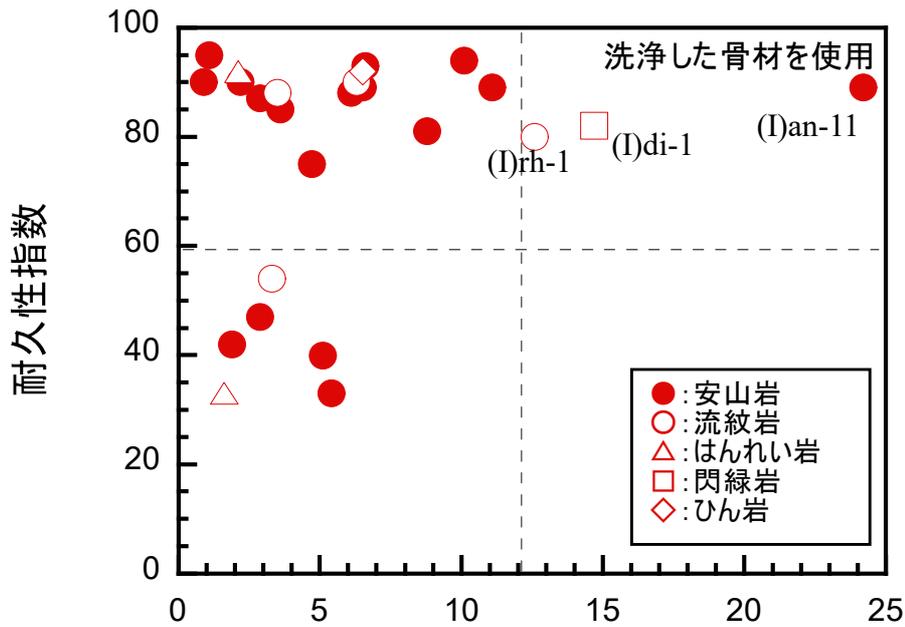
### 安定性試験における損失質量分率(%)

図 6.3-2 堆積岩の碎石，川砂利を洗い流して用いたコンクリートの骨材の安定性と耐久性指数の関係



### 凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図 6.3-3 火成岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの凍結融解試験結果



骨材安定性試験における骨材の損失質量分率(%)

図 6.3-4 火成岩の砕石を洗い流して用いたコンクリートの骨材の安定性と耐久性指数の関係

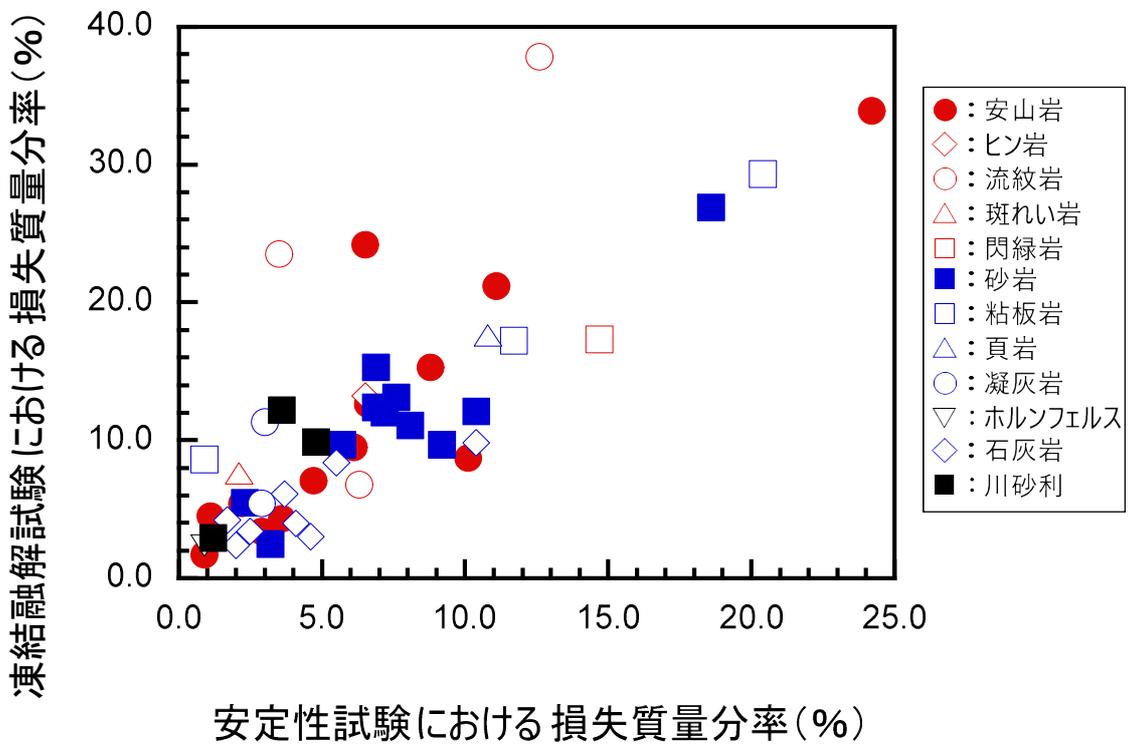


図 6.3-5 洗い流して用いた骨材の凍結融解試験における損失質量分率と安定性試験における損失質量分率の関係

### 6.3.2 粗骨材表面に付着する微粒分の影響

図 6.3-6 は、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が JIS A 5005 の規格値である 12% よりも小さい (I)an-9, (S)sa-9, (S)li-5 および (S)tu-2 の粗骨材を、微粒分が粗骨材表面に付着した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験の結果である。(I)an-9 は火成岩である安山岩で、(S)sa-9, (S)li-5 および (S)tu-2 は、それぞれ、堆積岩に分類される砂岩、石灰岩および凝灰岩である。これらのコンクリートの空気量は、3.0% から 4.5% の範囲で、AE 剤による空気は連行されていると考えられる。しかし、(S)tu-2 が 80 サイクルで、(I)an-9 が 160 サイクルで、(S)sa-9 が 250 サイクルで、(S)li-5 が 270 サイクルで、それぞれ、相対動弾性係数が 60% を下回った。これらの粗骨材を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いた場合には、十分な凍結融解抵抗性が得られなかった。一方、図 6.3-7 は、図 6.3-6 と同じ粗骨材を、表面に付着した微粒分を洗い流した粗骨材を用いてコンクリートを作製し、凍結融解試験を行った結果である。いずれの砕石を用いたコンクリートも、300 サイクルでの相対動弾性係数は 85% 以上あり、十分な凍結融解抵抗性を示している。したがって、図 6.3-6 で十分な凍結融解抵抗性が得られなかったのは、粗骨材そのものの品質ではなく、粗骨材表面に付着する微粒分の影響と考えられる。

表 6.2-2 「(b) 未洗浄」に、粗骨材を粗骨材表面の微粒分が付着した状態で用いたコンクリートの練り混ぜ直後のコンクリート温度、スランプおよび空気量と、凍結融解試験における耐久性指数を示す。図 6.3-8 は、図 6.3-6 に示した (S)sa-9, (S)li-5 および (S)tu-2 を含む堆積岩の砕石と 3 種類の川砂利を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いたコンクリートの耐久性指数と骨材に付着した微粒分の関係を示したものである。堆積岩の砕石では、図 6.3-8 に示したもののも含めて 4 割以上の砕石を用いたコンクリートで耐久性指数が 60 を下回っている。なお、本実験で用いた 3 種類の川砂利は、付着している微粒分が少ないため、微粒分を洗い流さない状態でも、コンクリートの耐久性指数が 60% を下回るものは確認できなかった。また、図 6.3-9 は、図 6.3-6 に示した (I)an-9 を含む火成岩の砕石を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いたコンクリートの耐久性指数と骨材に付着した微粒分の関係を示したものである。図 6.3-6 に示した (I)an-9 以外の火成岩の砕石でも、堆積岩と同様に骨材表面に微粒分が付着した状態で用いると耐久性指数が 60 を下回るものがあつた。図 6.3-8 および図 6.3-9 で耐久性指数が 60 を下回ったものの微粒分量は、0.5~1.5% の範囲である。JIS A 5005 の砕石の微粒分量の規格値は 3.0% 以下で、いずれの砕石もこの規格を満たしているものである。また、JIS A 5005 の砕石の絶乾密度、吸水率、安定性の規格値も満足したものである。微粒分量と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できないが、微粒分が付着した状態では、凍結融解抵抗性が低下する可能性がある。粗骨材の表面の微粒分は、コンクリートの練混ぜ後も、骨材表面にとどまったままでコンクリートが硬化したことで骨材周辺に脆弱な部分が形成され、そこが起点となって凍結融解作用による劣化が生じたものと考えられる。

図 6.3-10 および図 6.3-11 は、図 6.3-6 に示したもののうち (S)sa-9 および (I)an-9 について、あらかじめ練混ぜ水と混合し、微粒分が練混ぜ水と混ざった状態にして作製したコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。図に示すように微粒分を付着したままで練り混ぜたコンクリートでは、いずれの砕石も 300 サイクルまでに相対動弾性係数が 60% を下回っていたが、砕石をあらかじめ練混ぜ水と混合し、微粒分を骨材表面から分離した状態にしてコンクリートを作製することで、凍結融解抵抗性が改善していることが分かる。既往の研究では、砕石や砕砂を製造する際に発生する砕石粉は、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる効果と空気量を低下させる効果があると報告されている<sup>8)</sup>。また、砕石粉を用いることで、気泡間隔係数が小さくなり、凍結融解抵抗性が向上する傾向にあることが報告されている<sup>9)</sup>。粗骨材表面に付着した微粒分は、そのものがコンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる可能性は小さい。一方で、既報<sup>10)</sup>によれば、骨材表面には、セメントの水和反応で生じる水酸化カルシウムが集積し、脆弱な遷移帯が形成され、その遷移帯によってセメントペーストと骨材界面の接合強度を下げることから、凍結融

解抵抗性を低下させると報告されている。粗骨材表面に微粒分が付着したままコンクリートが硬化した場合には、セメントペーストと骨材の接合強度がさらに小さくなり、コンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる恐れがある。このように、微粒分の付着が影響するコンクリートについては、凍結融解抵抗性を確実に得るためには、表面に付着する微粒分にも留意する必要があるといえる。

一方で、骨材に付着した微粒分を骨材から分離しても十分な凍結融解抵抗性を得られないものもあった。図 6.3-12～図 6.3-14 は、火成岩の粗骨材のうち、(I)an-7, (I)rh-4 および(I)ga-2 を使用したコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。いずれも洗浄した骨材を用いたコンクリートで、相対動弾性係数が 60%を下回っている。粗骨材と水を先行投入し練混ぜた場合、相対動弾性係数が 60%を超えるほどではないが、未洗浄の骨材に比べて、改善されていることがわかる。火成岩の砕石を用いたコンクリートでは、粗骨材および水を先行で練混ぜるだけでとれるような比較的大きな微粒分が除去され凍結融解抵抗性が改善されると考えられる。堆積岩の粗骨材うち、洗浄した骨材を用いたコンクリートで、相対動弾性係数が 60%を下回っているものがあったのは砂岩のみだった。図 6.3-15 は、(S)sa-15 を使用したコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。粗骨材と水を先行投入し練混ぜた場合でも、改善されていないことがわかる。また、図 6.3-16 は、(S)li-4 を使用したコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。洗浄した骨材を用いたコンクリートのうち相対動弾性係数が 60%を上回っていたもので、粗骨材と水を先行投入し練混ぜても改善されていない。堆積岩の場合、粗骨材と水を先行で投入して練り混ぜた程度では、凍結融解抵抗性に影響のある付着の仕方をしていない微粒分が取れにくかったことによると考える。

写真 6.3-1 および写真 6.3-2 は、火成岩の砕石(I)an-6 および堆積岩の砕石(S)li-4 を示したものである。いずれも同倍率の顕微鏡で撮影している。火成岩は比較的まとまった微粒分がまばらについているが、堆積岩は表面に細かく微粒分が付着していることが写真からもわかる。堆積岩は、堆積物が長い期間重なってできたものであるため、砕石製造後の表面が均質できめの細かい粒子で構成されている。一方、火成岩はマグマが火山活動により冷えて固まったものであり、様々な鉱物やガラス質で構成されているため、細かい凹凸があると一般的に言われている。堆積岩の方が細かい粒子の隙間に微粒分が付着するため、コンクリートの練混ぜでははがれにくく、凍結融解抵抗性に影響のある付着の仕方をした微粒分が除去されなかったものと考察する。これは、コンクリートのフレッシュ性状に影響が出るほどの骨材の凹凸ではなく、大まかな形状によるものでもないため、実積率や粒度分布などでは評価が難しいと思われる。

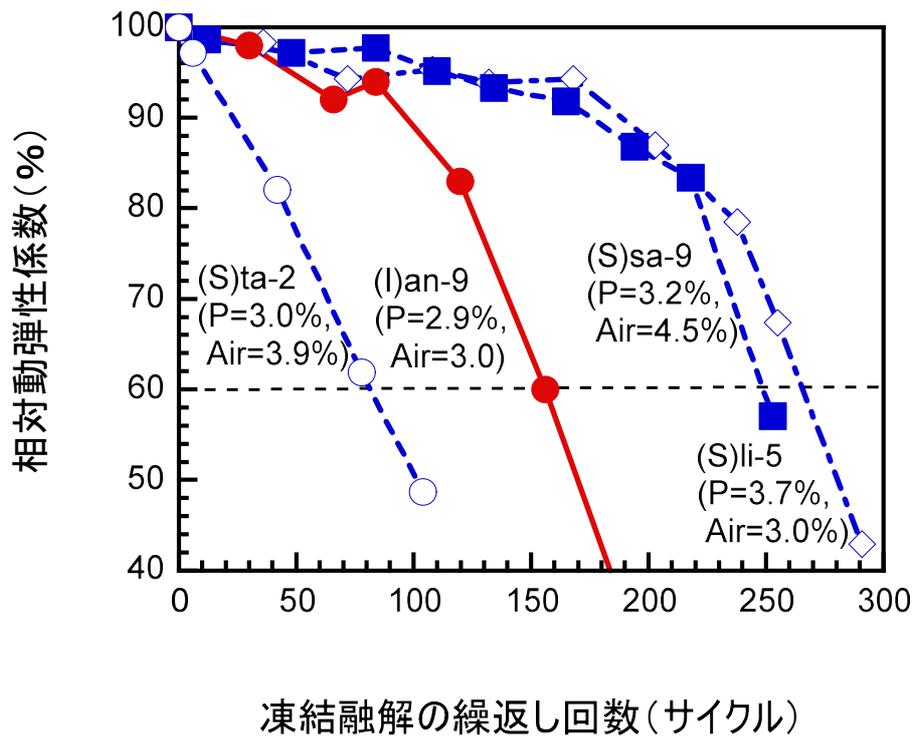


図 6.3-6 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

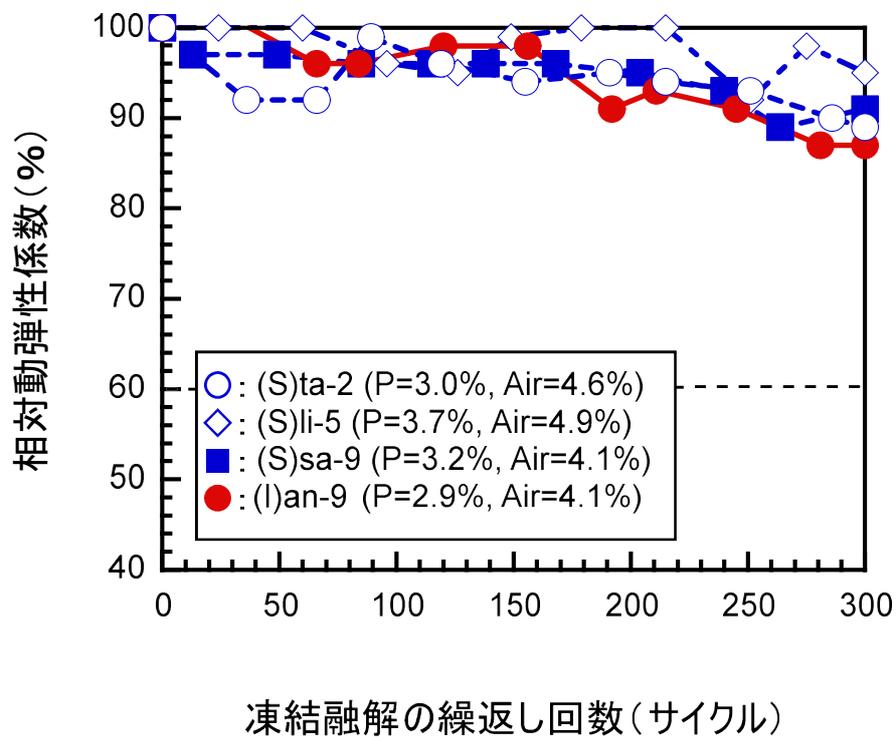


図 6.3-7 微粒分を洗い流した状態の骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

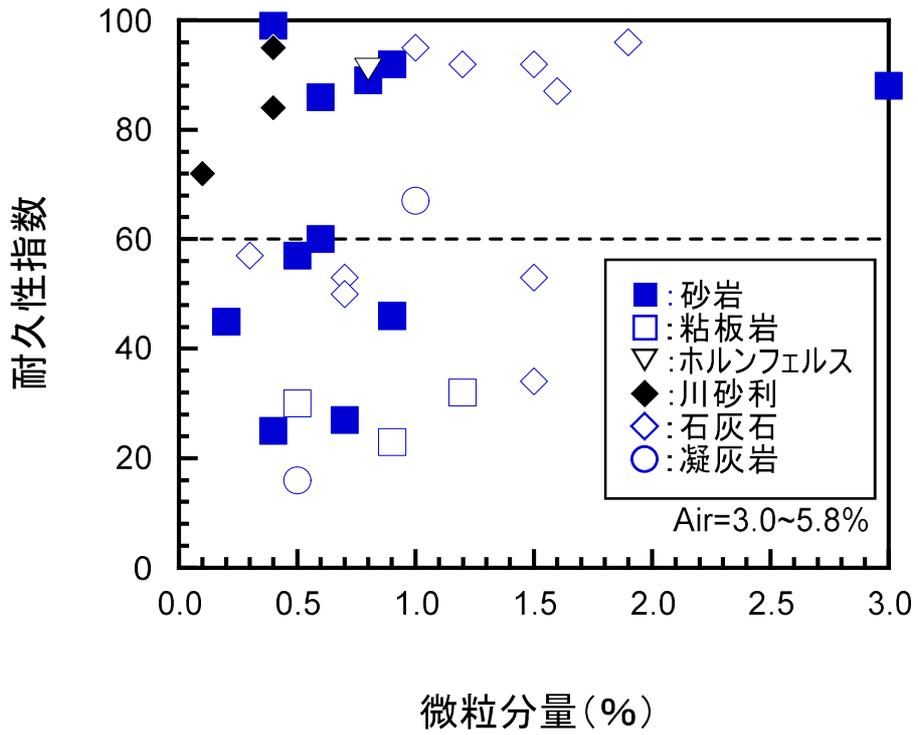


図 6.3-8 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの耐久性指数と微粒分量の関係 (堆積岩の碎石および川砂利の場合)

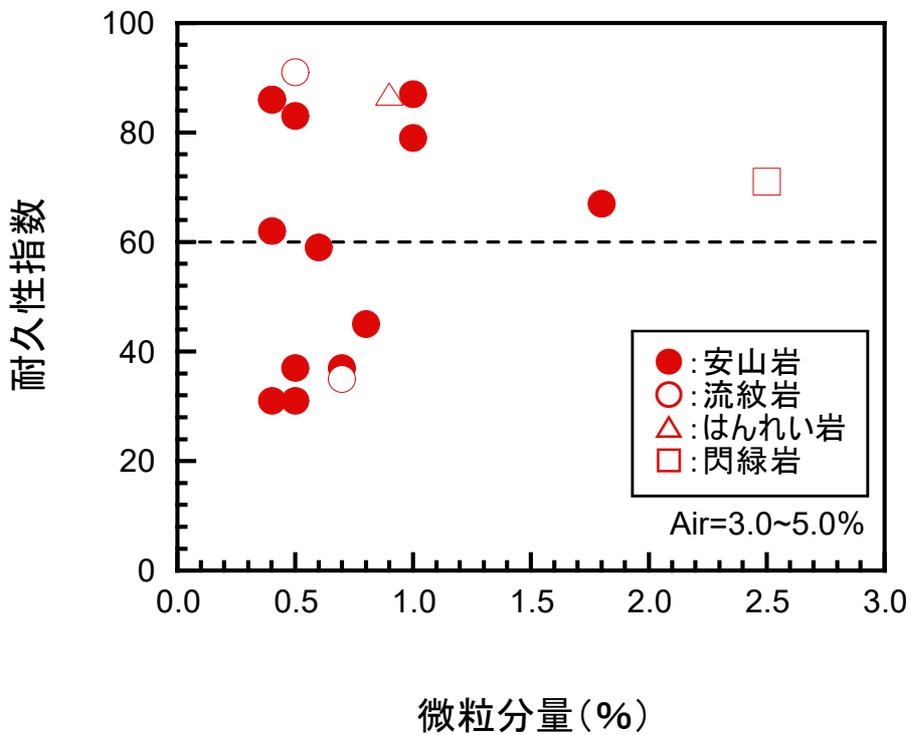
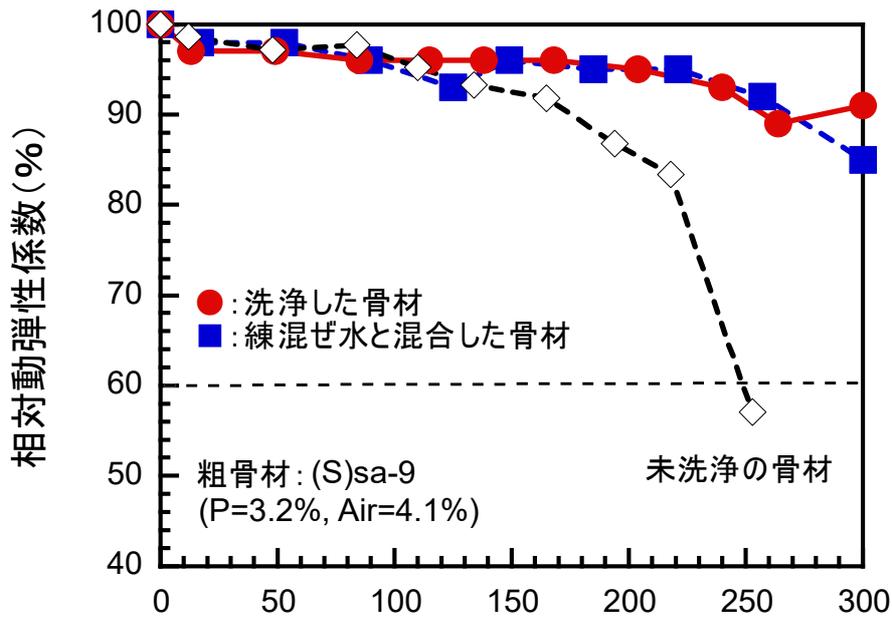
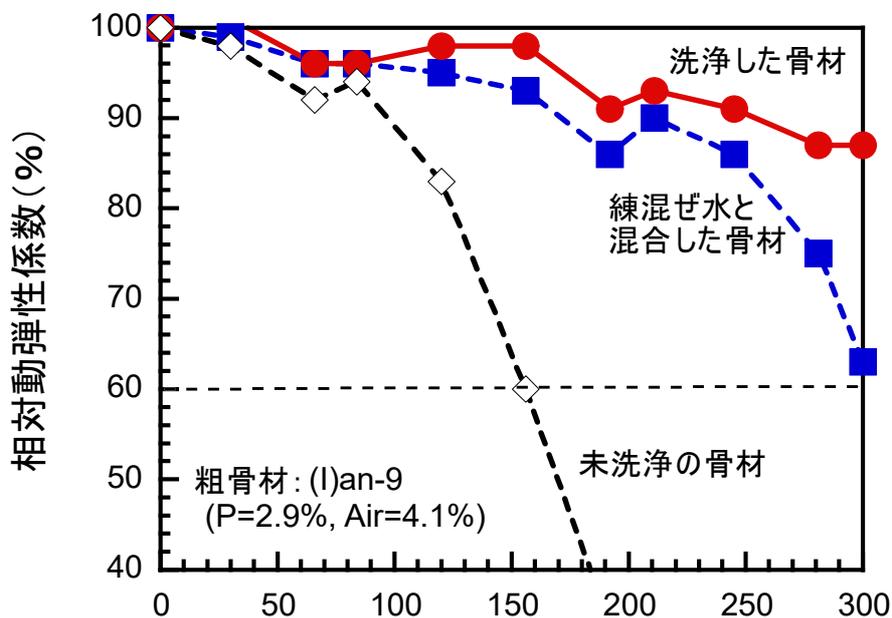


図 6.3-9 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの耐久性指数と微粒分量の関係 (火成岩の碎石の場合)



### 凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図 6.3-10 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((S)sa-9 の碎石)



### 凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図 6.3-11 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((I)an-9 の碎石)

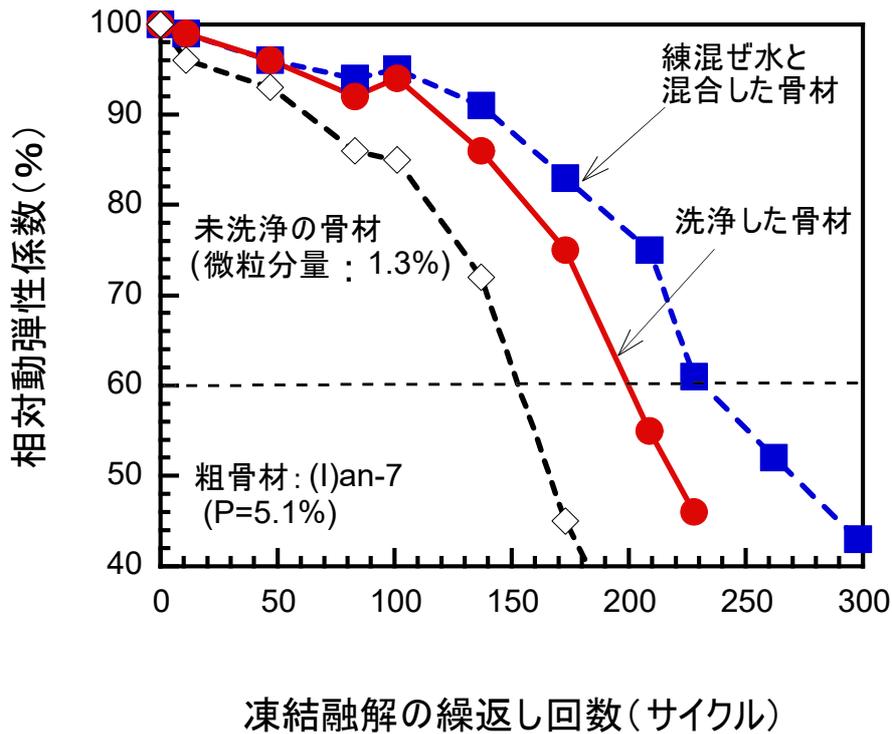


図 6.3-12 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((I)an-7 の碎石)

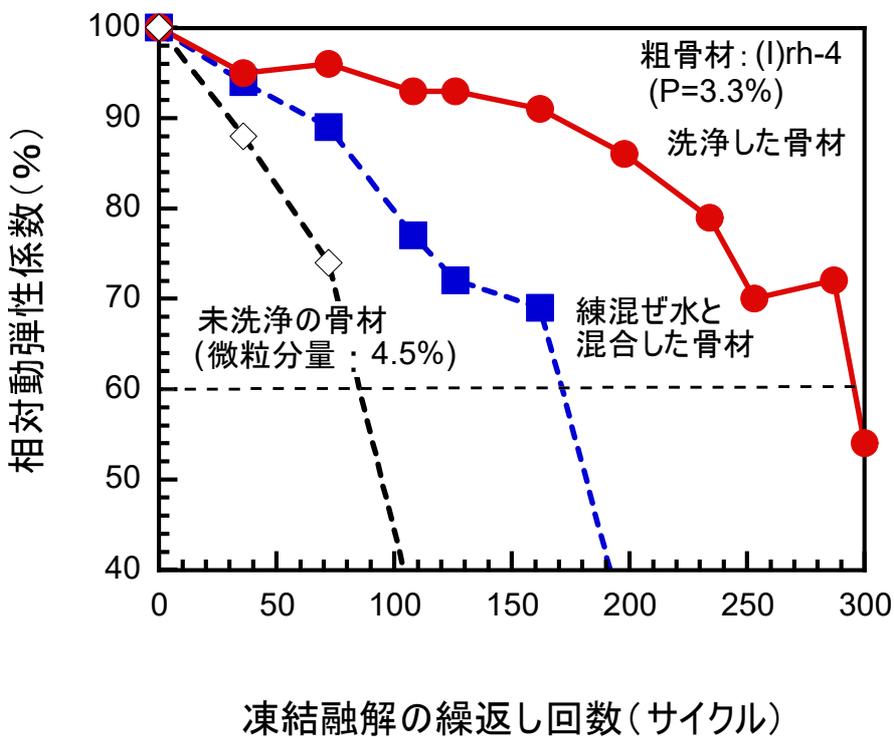


図 6.3-13 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((I)rh-4 の碎石)

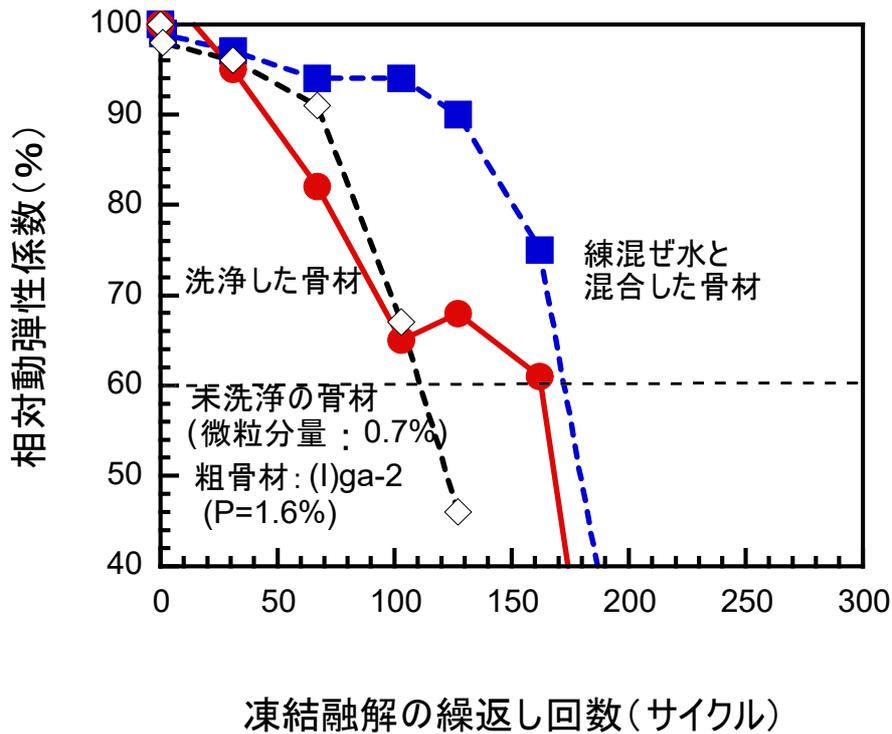


図 6.3-14 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((I)ga-2 の碎石)

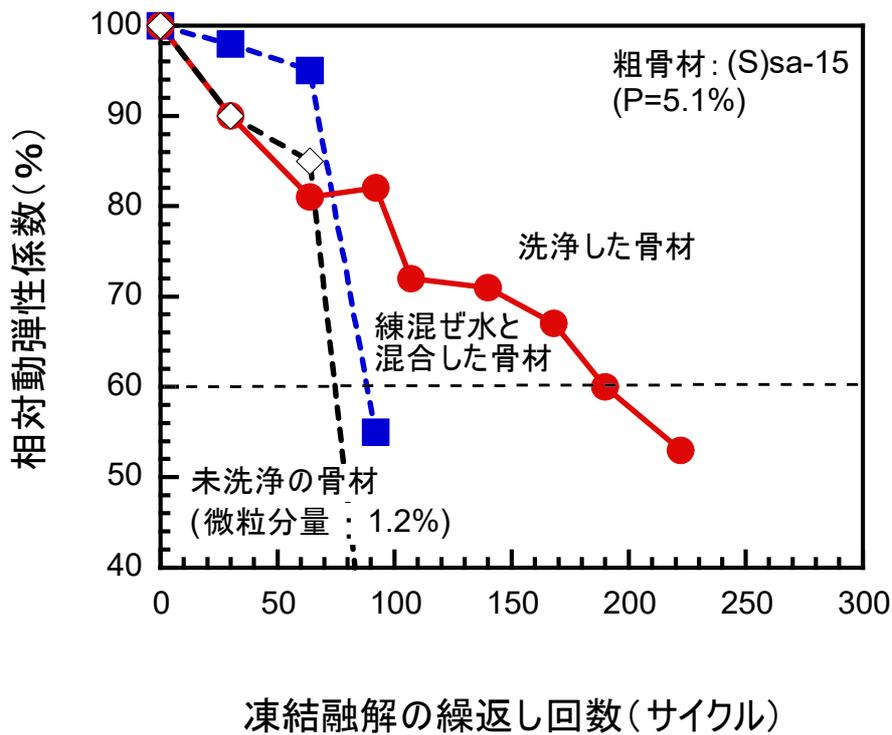
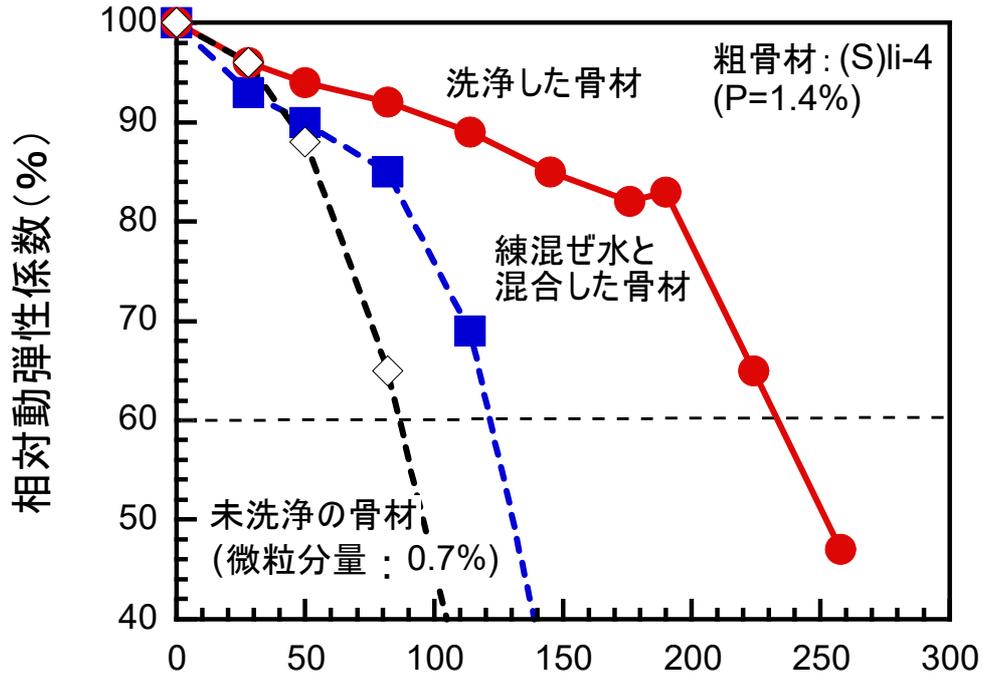


図 6.3-15 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((S)sa-15 の碎石)



### 凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図 6.3-16 粗骨材に付着した微粒分の影響 ((S)li-4 の碎石)



写真 6.3-1 粗骨材に付着した微粒分の写真 ((I)an-6 の碎石)

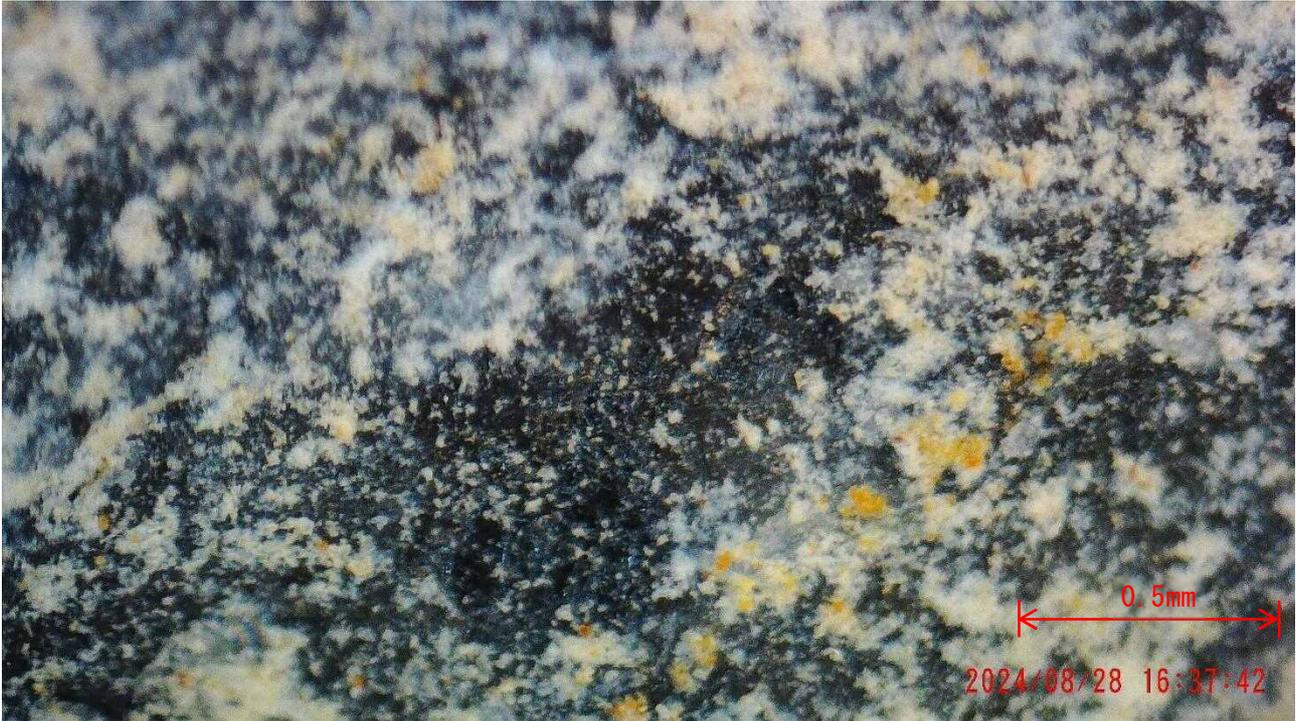


写真 6.3-2 粗骨材に付着した微粒分の写真 ((S)li-4 の碎石)

### 6.3.3 粗骨材の産地の影響

図 6.3-17 は、洗浄した粗骨材を使用したコンクリートの結果の分布を示している。図中の青字および赤字で示したプロットは、凍結融解抵抗性試験の結果、耐久性指数が 60 を上回ったものおよび下回ったものの砕石の産地を示す。コンクリートの耐久性指数が 60 を下回ったものに用いた砕石の記号には、洗浄前の骨材の安定性および微粒分量の試験値を記した。骨材のサンプル数の差を鑑みても、今回の実験の範囲では西日本において、JIS 規格値を満たす骨材であってもコンクリートの凍結融解抵抗性が十分でないものが多かった。図 6.3-18 は、未洗浄の粗骨材を使用したコンクリートの結果の分布を示している。図中の青字および赤字で示したプロットは、凍結融解抵抗性試験の結果、耐久性指数が 60 を上回ったものおよび下回ったものの産地を示す。また、前項に示される通り、微粒分を除去していない骨材では、コンクリートの凍結融解抵抗性が十分でないものが洗浄した砕石を使用した場合に比べあきらかに増加していることがわかる。図 6.3-19 は、粗骨材と水を先行投入して練り混ぜたコンクリートの結果の分布を示している。図中の青字および赤字で示したプロットは、凍結融解抵抗性試験の結果、耐久性指数が 60 を上回ったものおよび下回ったものの産地を示す。図中に“※”で示されるものは、骨材を洗浄し微粒分を落としたコンクリートの凍結融解抵抗性が十分でなかったものを示す。JIS 規格値内でもコンクリートの凍結融解抵抗性が十分でなかったものが多く確認された。しかし、分布はまばらであり、地域による傾向は確認できなかった。

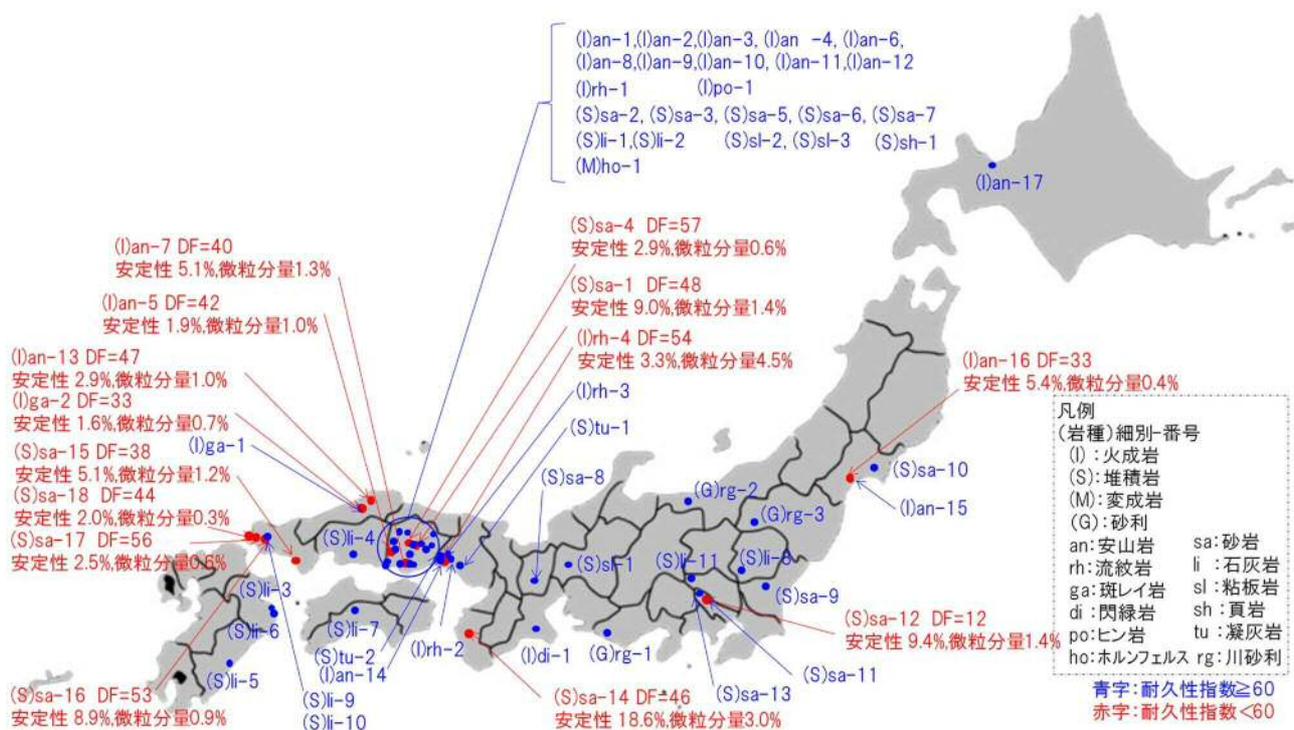


図 6.3-17 洗浄した骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性試験結果

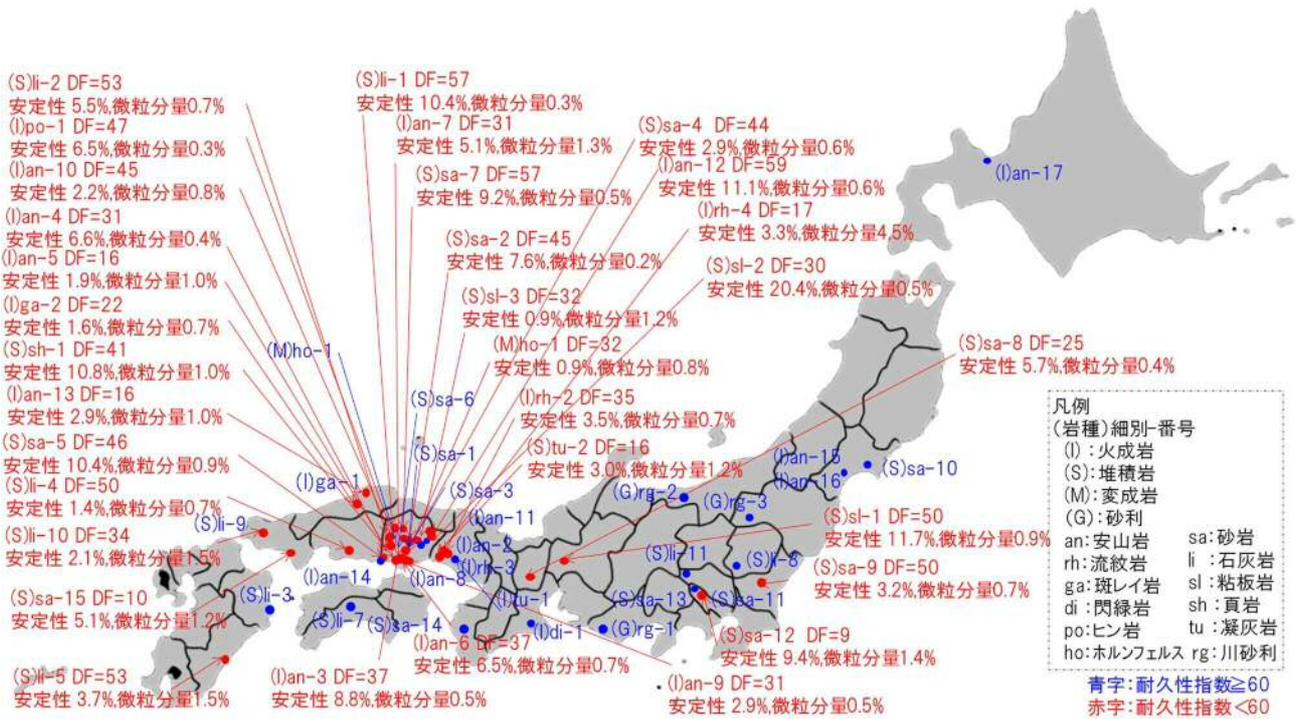


図 6.3-18 未洗浄の骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性試験結果

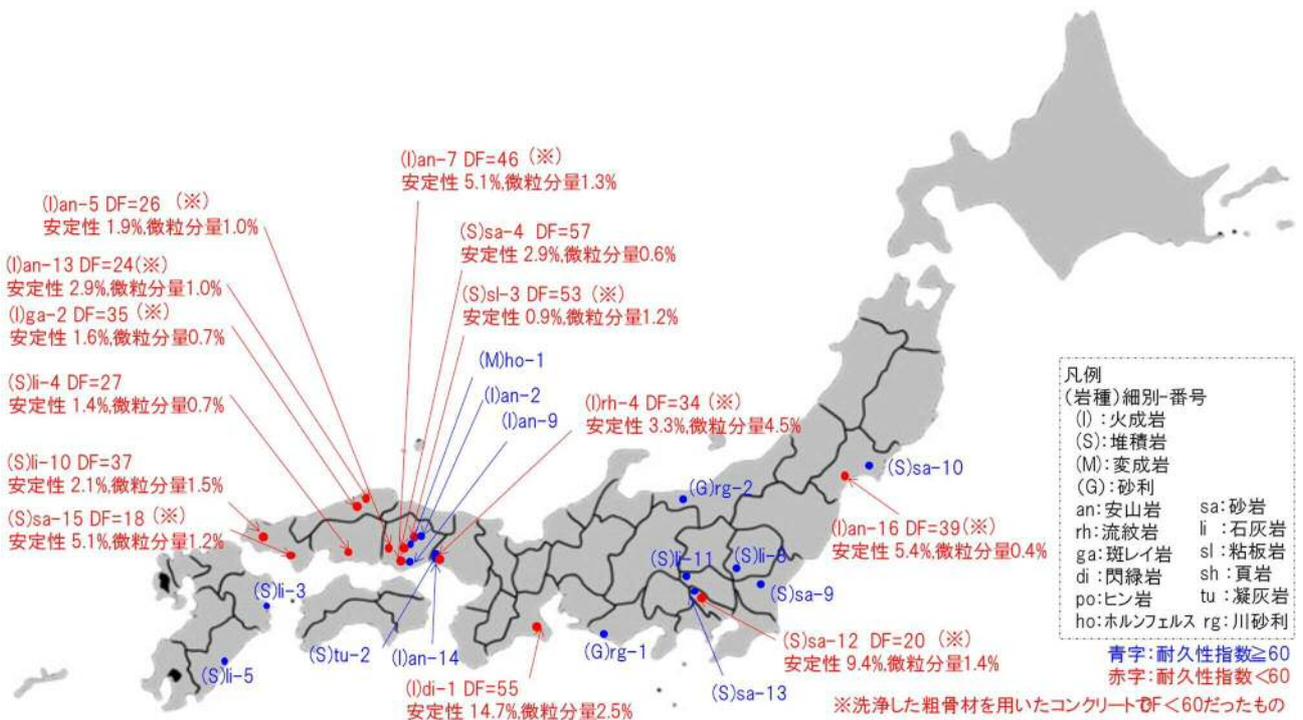


図 6.3-19 粗骨材と水を先行投入して練り混ぜたコンクリートの凍結融解抵抗性試験結果

## 6.4 本章のまとめ

本章では、コンクリートの凍結融解抵抗性に対して、材料の中でも影響の大きいとされている粗骨材に着目し、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について調べた。

各種粗骨材のコンクリートの凍結融解抵抗性を調べる実験では、骨材を洗浄し、骨材表面の微粒分を洗い流して実験を行った。また、粗骨材に付着している微粒分の影響を調べる実験では、洗浄した骨材を使用したもの、未洗浄の骨材を使用したもの、および先行で粗骨材と練混ぜ水を投入して練混ぜたものの3種類のコンクリート供試体を作成し、実験を行った。以下に本研究で得られた知見を要約し、結論とする。

- (1) 硫酸ナトリウムによる安定性試験と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できなかった。ものでも、コンクリートの耐久性指数が60を下回るものがあった。特に、堆積岩である砂岩の骨材では、その約4割以上で下回る結果となった。一方で、火成岩では安定性が12%を超えているものでも十分な凍結融解抵抗性が得られたものもあった。
- (2) 微粒分量と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できないが、微粒分が付着した状態では、凍結融解抵抗性が低下する可能性がある。粗骨材の表面の微粒分は、コンクリートの練混ぜ後も、骨材表面にとどまったままでコンクリートが硬化したことで骨材周辺に脆弱な部分が形成され、そこが起点となって凍結融解作用による劣化が生じたものと考えられる。凍結融解抵抗性を確実に得るためには、表面に付着する微粒分にも留意する必要があるといえる。
- (3) 堆積岩は、その成り立ちから骨材表面の細かい粒子間に微粒分が残りやすいと思われる。粗骨材を先行で投入する方法でも通常の練混ぜ時間では、コンクリートの凍結融解抵抗性に影響のある付着の仕方をした微粒分がはがれにくいと思われる。骨材表面の微粒分をはがすために、練混ぜ時間を長くするのは有効であると考えますが、火成岩を用いる場合に比べて長くした方がよい。
- (4) 骨材の産地による影響については、今回の実験では西日本の方がコンクリートの凍結融解抵抗性が十分に発揮されない骨材が多かった。

施工段階でJIS規格値である安定性試験での損失質量分率12%以下の粗骨材を用いたコンクリートで、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ で打設管理を行っていても、骨材の種類によっては硬化後のコンクリート構造物で耐凍害性を確保できないことがある。また、近年では微粒分が多く付着した骨材が流通するようになっており、微粒分の付着により耐凍害性が低下することもある。そのため、材料の投入順序に留意し、練混ぜ時間も品質が低下しない範囲で長くするなど、表面の微粒分を落とすような練混ぜ方法を検討する必要がある。

今回検討した骨材以外にも、コンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる要因は多く、例えば、コンクリートの凍結融解抵抗性は養生方法によっても十分な性能が発揮できないことがあるという研究もある<sup>11)</sup>。コンクリートの凍結融解抵抗性を適切に評価するためには、今後も様々な知見を蓄積し、複合的に検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，pp.113-114，2022.3
- 2) 鎌田卓朗，齊藤啓一，富田修司，藤原忠司：骨材の吸水率がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp. 819-824，1995. 6
- 3) 千歩修，浜幸雄，松村幸太郎，袴谷秀幸：コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp. 787-792，2000. 6
- 4) 土木研究所：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究，土木研究所資料，第4199号，2011.3
- 5) 二宮祐希，千歩修，長谷川拓哉：粗骨材の基礎政情がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 1，pp. 1189-1194，2009. 6
- 6) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会(354委員会)成果報告書，pp45-47，2018.7.6
- 7) 友澤史紀，辻幸和，山本和成：「JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）の改正について，コンクリート工学，Vol. 47，No. 3，pp. 3-9，2009. 3
- 8) 真野孝次，辻幸和，友澤史紀，深松孝：砕石粉を使用した砕石・砕砂コンクリートの性状，コンクリート工学，Vol. 46，No. 11，pp. 18-10，2008. 11
- 9) 賀谷隆人，長原雄一，山本春行：粒形改善砕砂の生産時に発生する石粉を混入したコンクリートの諸性状に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，Vol. 16，No. 32，pp. 5-10，2010. 2
- 10) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33，No.9，pp.5-17，1995.9
- 11) 藤井隆史，王亮，綾野克紀：粗骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.20，pp. 285-290

## 第7章 結 論

本研究では、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性及び乾燥収縮に与える影響について調べた。実験では、全国各地の砕石及び川砂利を収集し、物性値を確認し、単位水量、W/C、s/a、設計空気量を固定した配合条件でコンクリート試験体を作成した。

第4章では、粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度および塩化物イオン透過性についての実験結果を整理した。また、骨材の微粒分の影響について検討した。

第5章では、粗骨材の物性値及び骨材中の水分量 $\Delta\omega$ とコンクリートの乾燥収縮の関係性について、骨材の岩種別に確認した。また、実験値と示方書の予測式との比較検討を行い、示方書の予測式に示される骨材の品質を表す係数 $\alpha$ から、各粗骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について検討した。

第6章では、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について検討した。火成岩・堆積岩・川砂利について、各種の粗骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性を調べるために洗浄し微粒分を洗い流したもので実験を行い、結果を整理した。また、骨材を未洗浄のものとして洗浄したものを使用した場合と微粒分を練混ぜ水と混ぜて攪拌した場合の3ケースについて調べ、骨材に付着している微粒分の影響についても調べた。

以下に、本研究で得られた知見を記し、本論文の結論とする。

### (1) 粗骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響

- ・ 本実験の範囲では、絶乾密度、吸水率および安定性試験の結果と圧縮強度および塩化物イオン透過性との明確な関係は、確認できなかった。
- ・ 粗骨材の微粒分が圧縮強度、塩化物イオン透過性に与える影響はほとんどない。

### (2) 粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響

- ・ 骨材の種類によらず、骨材中の水分量 $\Delta\omega$ が大きいものほど、乾燥収縮ひずみが大きくなるが、その傾向は骨材の種類によって異なる。
- ・ 吸水率の大きい砕石を用いるほど、コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。ただし、骨材の種類により、吸水率の影響の大小は異なる。
- ・ 安定性試験における損失質量分率と乾燥収縮ひずみの間には、明確な相関関係は見られない。しかし、安定性試験における損失質量分率が極端に大きい骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。絶乾密度の小さい粗骨材は、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向がある。
- ・ 火成岩や石灰岩の砕石を用いたコンクリートでは、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた場合、土木学会コンクリート標準示方書の予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が大きい場合では、 $\alpha$ に6を用いた方が計算値と実験値の誤差が小さい。石灰岩を除く堆積岩では、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に6を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。従って、堆積岩は火成岩よりも吸水率の影響を受けやすい。
- ・ 川砂利は産地の流域に多い岩種の影響を受けることがあるため、堆積岩が多い場合には、吸水率の影響が大きくなる可能性がある。
- ・ 粗骨材の微粒分がコンクリートの乾燥収縮に与える影響はほとんどないことがわかった。

### (3) 粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響

- ・ 硫酸ナトリウムによる安定性試験と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できなかった。硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率がJISの規格値である12%以下のものでも、コンクリートの耐久性指数が60を下回ることがある。一方で、火成岩では安定性が12%

を超えているものでも十分な凍結融解抵抗性が得られることがある。

- ・ 微粒分量と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できないが、微粒分が付着した状態では、凍結融解抵抗性が低下する可能性がある。粗骨材の表面の微粒分は、コンクリートの練混ぜ後も、骨材表面にとどまったままでコンクリートが硬化したことで骨材周辺に脆弱な部分が形成され、そこが起点となって凍結融解作用による劣化が生じたものと考えられる。凍結融解抵抗性を確実に得るためには、表面に付着する微粒分にも留意する必要があるといえる。
- ・ 堆積岩は、その成り立ちから骨材表面の細かい粒子間に微粒分が残りやすいと思われる。粗骨材を先行で投入する方法でも通常の練混ぜ時間では、コンクリートの凍結融解抵抗性に影響のある付着の仕方をした微粒分がはがれにくいと思われる。骨材表面の微粒分をはがすために、練混ぜ時間を長くするのは有効であると考えるが、火成岩を用いる場合に比べて長くした方がよい。
- ・ 骨材の産地による影響については、今回の実験では西日本の方がコンクリートの凍結融解抵抗性が十分に発揮されない骨材が多かった。

本研究では、粗骨材の岩種および品質がコンクリート構造物の耐久性に与える影響について調査した。施工段階において、JIS A 5005やJIS A 5308(附属書JA)に示される品質の規定値を満たしている骨材を使用したコンクリートを用いて、適切な打設管理を行っていても、使用する骨材の種類や微粒分の付着状況によっては、硬化後に構造物の設計時に想定していた耐久性を発揮できない可能性がある。特に、コンクリート構造物の耐凍害性については、粗骨材の表面に微粒分が付着したままで使用した場合、凍結融解抵抗性が低下することがあり、本研究でも確認できた。過去のデータ等から使用するコンクリートの凍結融解抵抗性が確認できない場合は、骨材の安定性試験結果では耐久性を確認出来ないことがある。さらに、骨材自体の耐凍害性があっても、微粒分の付着状態によっては、期待された耐凍害性を得られない可能性もある。施工者は製造工場での骨材の保管状況をよく確認し、取り扱っている骨材の表面の微粒分の付着状況を確認するのが望ましい。微粒分の付着が確認される場合は、製造時の練混ぜ方法等で微粒分を骨材表面から落とす方法の検討が必要と考える。また、製造工場において、取り扱っている骨材の産地や性質が変わる場合は、注意が必要であると考えられる。

最後に、今回の研究結果により、コンクリート構造物の耐久性が改善され、構造物の長寿命化への一助となれば幸いである。

## 附録 実験に使用した骨材の外観写真



No. 1 (安山岩)



No. 2 (安山岩)



No. 3 (安山岩)



No. 4 (安山岩)



No. 5 (安山岩)



No. 6 (安山岩)



No. 7 (安山岩)



No. 8 (安山岩)



No. 9 (安山岩)



No. 10 (安山岩)



No. 11 (安山岩)



No. 12 (安山岩)



No. 13 (安山岩)



No. 14 (流紋岩)



No. 15 (安山岩)



No. 16 (安山岩)



No. 17 (安山岩)



No. 18 (流紋岩)



No. 19 (流紋岩)



No. 20 (流紋岩)



No. 21 (流紋岩)



No. 22 (斑レイ岩)



No. 23 (斑レイ岩)



No. 24 (閃緑岩)



No. 25 (ヒン岩)



No. 26 (砂岩)



No. 27 (砂岩)



No. 28 (砂岩)



No. 29 (砂岩)



No. 30 (砂岩)

写真-1 粗骨材の外観 (火成岩: No. 1~No. 25、堆積岩: No. 26~No. 30)



No. 31 (砂岩)



No. 32 (砂岩)



No. 33 (砂岩)



No. 34 (砂岩)



No. 35 (砂岩)



No. 36 (砂岩)



No. 37 (砂岩)



No. 38 (砂岩)



No. 39 (砂岩)



No. 40 (砂岩)



No. 41 (砂岩)



No. 42 (砂岩)



No. 43 (砂岩)



No. 44 (石灰岩)



No. 45 (石灰岩)



No. 46 (石灰岩)



No. 47 (石灰岩)



No. 48 (石灰岩)



No. 49 (石灰岩)



No. 50 (石灰岩)



No. 51 (石灰岩)



No. 52 (石灰岩)



No. 53 (石灰岩)



No. 54 (石灰岩)



No. 55 (粘板岩)



No. 56 (粘板岩)



No. 57 (粘板岩)



No. 58 (頁岩)



No. 59 (凝灰岩)



No. 60 (凝灰岩)



No. 61 (ルンフェルス)



No. 62 (川砂利)



No. 63 (川砂利)



No. 64 (川砂利)

写真一 2 粗骨材の外観 (堆積岩 : No. 26~61、砂利 : No. 62~No. 64)

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始変わらずご指導くださいました岡山大学大学院綾野克紀教授、藤井隆史准教授に心から感謝申し上げます。私が岡山大学大学院に入学した15年前の4月、ちょうどコンクリート研究室が阪田教授から綾野教授に引き継がれました。通常、研究室が変わるとなると学生にも何かしら変化の余波があるものだと思いますが、当時は、私の未熟さ故に、「歴史が一つ移り変わり、新たに動き始めた」といったような印象はあまり感じていませんでした。それは、「世の為」になるコンクリートを求め研鑽し続ける研究室の精神が脈々と伝承されており、加えて、綾野教授と藤井准教授のお二方の力強いマインドにより、当時の研究室が支えられていたからだ、今では痛感しています。当時配属されたことを誇りに感じております。社会に出てからも、再びこの場所でお二方と共に研究に携われたことは幸甚の至りであり、大切な財産にさせて頂きます。深く感謝申し上げます。

私は、2011年に博士前期課程を修了後、株式会社大本組入社しました。しばらく工事現場を点々とした後、2019年に土木本部の現総合技術部土木設計課に配属されました。そして、2021年に現総合技術部長 柏葉洋一氏に背中を押して頂き、博士後期課程で研究室に配属された経緯があります。その後、再度現場に監理技術者として転属し、結果、研究と監理技術者の2つの草鞋を履くことになってしまいましたが、その間も、都度ご指導ご鞭撻を下さり、私を支えてくださった大本組の柏葉洋一氏を筆頭に当時の土木本部副本部長 浜田利彦氏、当時の現場所長 光田洋一氏には大変お世話になりました。本研究を実施するにあたり、骨材収集にご協力頂いた方々にも大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

最後になりましたが、本研究の全般を担っていただいた能勢幸太郎氏、岡崎佳奈子氏、森本充氏、丁上氏、木村匡宏氏を筆頭にコンクリート研究室の卒業生および学生の皆様におかれましては、多大なるご尽力いただきありがとうございます。今後も岡山大学OBとして、皆様の会社生活でのご活躍を陰ながらお祈り申し上げます。

2024年 9月  
谷口 高志