

コンクリートの耐凍害性に及ぼす
骨材の影響に関する研究

岩手大学大学院工学研究科
生産工学専攻

袴田 豊

目 次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	1
1.1.1 コンクリート構造物の今日的課題	1
1.1.2 コンクリートの耐凍害性	2
1.1.3 骨材資源および品質の推移	12
1.2 コンクリートの耐凍害性と骨材の品質に関する既往の研究	21
1.2.1 骨材の品質とコンクリートの耐凍害性	21
1.2.2 耐凍害性からみた骨材の品質規定	22
1.2.3 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性確保	23
1.3 本研究の目的	25
1.4 本論文の構成	27
参考文献	29

第2章 実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性

2.1 緒言	32
2.2 試験の概要	32
2.2.1 供試体	32
2.2.2 試験方法	35
2.2.3 硬化コンクリートの空気量, 気泡間隔係数および圧縮強度	36
2.3 試験結果および考察	36
2.3.1 凍結融解抵抗性	36
2.3.2 骨材の吸水率の影響	39
2.3.3 ポップアウト等の影響	41
2.3.4 空気量の影響	43
2.3.5 水セメント比の影響	45
2.3.6 圧縮強度の影響	47
2.3.7 重回帰分析	50
2.4 結言	52
参考文献	54

第3章 コンクリートの耐凍害性に及ぼす砕砂中のカーボンの影響

3.1 緒言	55
3.2 実験概要	56

3.3	骨材の石質の影響	56
3.3.1	実験概要	56
3.3.2	実験結果および考察	57
3.4	骨材の微粒分の影響	60
3.4.1	実験概要	60
3.4.2	実験結果および考察	60
3.5	骨材に含まれる異物の影響	66
3.5.1	実験概要	66
3.5.2	実験結果および考察	67
3.6	結言	70
	参考文献	72

第4章 凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の耐凍害性

4.1	緒言	73
4.2	実験概要	73
4.2.1	対象とした骨材とその物性	73
4.2.2	水銀圧入法（MIP 法）	75
4.2.3	凍結融解試験	76
4.3	実験結果および考察	78
4.3.1	骨材耐久性指数に及ぼす骨材の物性の影響	78
4.3.2	残留膨張に及ぼす骨材の物性の影響	84
4.4	結言	91
	参考文献	93

第5章 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配合の影響

5.1	緒言	94
5.2	実験概要	94
5.2.1	対象とした骨材とその物性	94
5.2.2	コンクリートの配合	96
5.2.3	凍結融解試験	96
5.3	実験結果および考察	98
5.4	結言	110
	参考文献	111

第6章 低品質骨材とモルタルを組合わせた複合モデルによる照査

6.1 緒言	112
6.2 実験概要	112
6.2.1 使用材料および配合	112
6.2.2 複合モデルの形状とひずみゲージの貼付	113
6.2.3 凍結融解試験	115
6.3 実験結果および考察	117
6.3.1 複合モデルの概念	117
6.3.2 複合モデルのひずみ	121
6.4 厚肉円筒モデルによる解析	124
6.4.1 厚肉円筒モデルの概念	124
6.4.2 複合モデルに作用する圧力と解析結果の一例	127
6.4.3 厚肉円筒モデルによる解析結果	137
6.4.4 細孔径分布による考察	141
6.5 結言	143
参考文献	145

第7章 結論

7.1 実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性	146
7.2 コンクリートの耐凍害性に及ぼす砕砂中のカーボンの影響	148
7.3 凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の耐凍害性	149
7.4 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配合の影響	151
7.5 低品質骨材とモルタルを組合わせた複合モデルによる照査	153

謝辞	155
----	-----

原著論文	156
------	-----

第1章 序 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 コンクリート構造物の今日的課題

戦後、高度経済成長を支え、牽引役となった我が国の社会基盤整備にとって、コンクリート構造物が果たしてきた役割は計り知れないものがある。橋、ダム、道路などの土木構造物、一般の住宅から高層建築物にいたるまで、構造物にはコンクリートが必ずと言っていいほど用いられてきた。その基本的な役割は、安全で快適な社会基盤を築くだけではなく、それに要した公共投資は、建設事業を通じて「人」や「もの」を移動させ、消費の拡大を促してきた。さらに、これによる効果は、都市や地方を問わず、日本の経済成長のサイクルに組み込まれ、世界第二位の経済大国へと押し上げる原動力となった¹⁾。

今日の日本は、先進国としての成熟期を迎え、緩やかで継続的な成長を目指すべき時代を迎えている。我が国では、政府の支出が収入を大きく上回る大幅な財政赤字が続き、政府は巨額な債務残高を抱えている²⁾。日本全体の債務残高は、1097兆円を超えており、これは国民一人当たりで換算すると859万円にも達する。現在の状態が続けば、債務残高が発散して、我が国の財政は破綻してしまうことが予想されることから、今後は、予算の縮小により、公共投資が長期にわたり抑制される方向にあることは避けられない。このため、今までの経済成長を支えてきたシステムや社会構造の改革を図り、限られた公共投資によって、いかに効率よく社会資本を整備していくかが、緊急の課題となっている。

このような状況において、コンクリート構造物を取り巻く状況も変わりつつある。コンクリート構造物にとっては、これまで以上に長寿命化が求められ、ライフサイクルコストの削減を進める必要に迫られている。長寿命化やコスト削減にとって欠かせないのが、技術革新である。コンクリート分野において、この波を後押しするのが、仕様規定から性能規定への移行である。土木学会では、コンクリート標準示方書の施工編を皮切りに、順次、性能規定へと移行した。

性能規定の場合、設計を例にとると、その自由度が増すため、新しい技術や新しい発想を設計に取り込もうとする者にとっては有力な手段となる。反面、設計者は自らの設計に対して、その妥当性を証明する手段・方法を持たねばならず、その責任は増大することになる³⁾。

性能規定は、海外で発注される工事ではごく一般的なものになっている。我が国でもコンクリートにこの手法が取り入れられることにより、これまでの仕様規定では規格外となり、使用できなかった材料を新たな技術を導入することで、用いることが可能となった。材料の選定において、自由度が増すことは、コストの

削減に寄与するだけでなく、資源の有効利用の観点からも、大きな意義を持つ。

1.1.2 コンクリートの耐凍害性

コンクリート構造物の長寿命化を進めるには、耐久性を確保することが欠かせない。コンクリートの耐久性を損なう作用は数多いが、寒冷地においては、凍結融解繰返し作用が最も重大であると認識されてきた。コンクリートの耐凍害性を高めることは、「スクラップ・アンド・ビルド」からこれを「使い続ける」時代の観点からも必須であるだけでなく、安全上そして美観上も不可欠である。

筆者は、岩手県生コンクリート工業組合の共同試験場（現中央技術センター）に所属し、品質の優れたコンクリートの供給を技術的な観点から支える役割を果たしてきた。供給される生コンクリートにも、優れた耐凍害性が要求される。そのためには、実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性を把握する必要がある。岩手県生コンクリート工業組合と岩手大学の共同で行った生コンクリートを対象とした凍結融解試験⁴⁾で中心的な役割を果たした。

また、実際に発生している凍害の実態を把握するために行った両者の凍害調査⁵⁾にも参画し、凍害は現在でも重大な問題であり続けていることを認識した。本研究を行うにあたっての動機のひとつとなったこの凍害調査について、以下に概略を述べる。

岩手県内に存在するコンクリート構造物の多くは、岩手県生コンクリート工業組合に所属する組合員工場が供給したコンクリートであるため、調査対象地域は岩手県全域とした。ただし、岩手県内に存在するコンクリート構造物のすべてを調査するのは、多大の経費および労力を要するため、**図 1-1** に示した主要な国道および県道などの路線を選定し、その路線にある構造物を調査した。範囲としては、岩手県内全域を網羅している。

さらに、気象条件が厳しく、凍害事例が多いといわれている北海道も調査対象地域とした。ここでは、**図 1-2** に示した苫小牧市から札幌市に至るまでの複数の路線（①苫小牧→日高→支笏湖→千歳→札幌、②苫小牧→室蘭→洞爺湖→札幌）を選定し、調査を行った。

対象とした構造物は、種類を問わず、選定した路線にある変状が目についた構造物を調査した。ただし、岩手県内の調査においては、変状が見られる構造物のほかに、調査路線を通して出現する道路橋の地覆を全数調査した。これは、変状の有無にかかわらず、地覆の状態を調査することによって、凍害の発生割合や地域性を、数値的に把握したいという意図による。

調査は、目視観察によって行い、**表 1-1** に示したように、被害形態を六つに分類し、それぞれの有無を調査した。なお、被害の抽出については、凍害であると

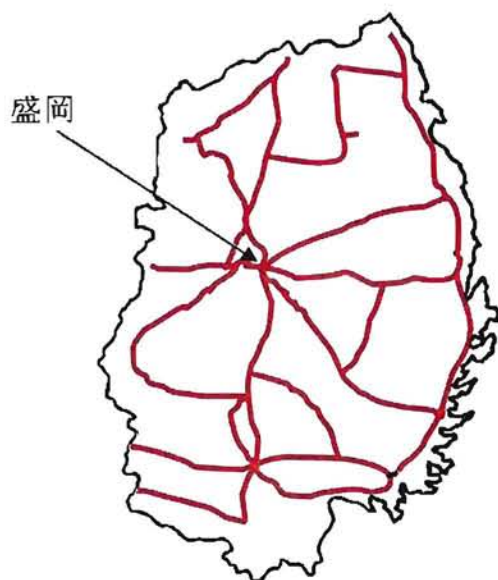


図 1-1 岩手県の調査ルート

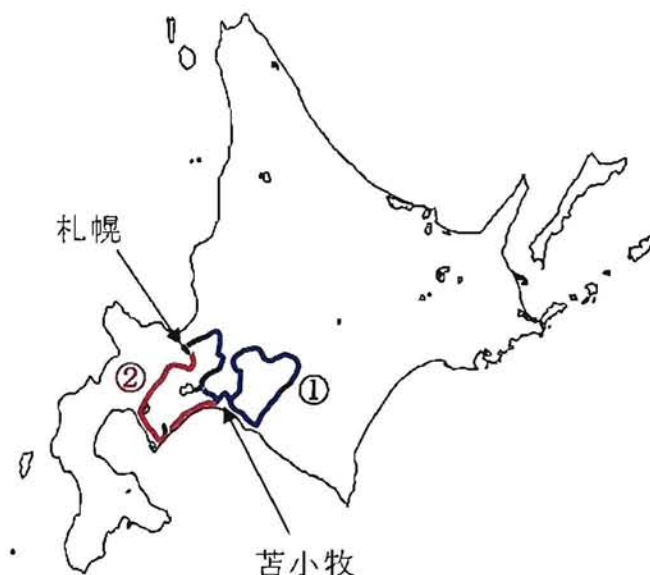


図 1-2 北海道の調査ルート

表 1-1 劣化形態の分類

No.	劣化形態の分類
1	ひび割れ
2	軽度のスケーリング (深さ<5mm)
3	中程度のスケーリング (5mm≦深さ<10mm)
4	強度のスケーリング (10mm≦深さ<20mm)
5	崩壊 (20mm≦深さ)
6	ポップアウト

※深さ：劣化の深さ

思われる事例のみを対象とするように努めたが、目視観察のため、たとえば、塩害や温度ひび割れなどと判別がつきにくい劣化現象もあり、調査結果には、凍害以外の原因による被害も含まれている可能性がある。

岩手県では 640、北海道では 48 の構造物を調査し、その総数は 688 に達した。岩手県および北海道で調査した構造物の種類の内訳を図 1-3 および図 1-4 に示す。岩手県で調査した構造物の種類としては、調査路線上の地覆のみを調べた橋梁が多かったため、橋梁が圧倒的に多く、全体の 9 割を占める。北海道においても、調査路線上の構造物を主として調べたため橋梁が多く、全体の 40% を占める。

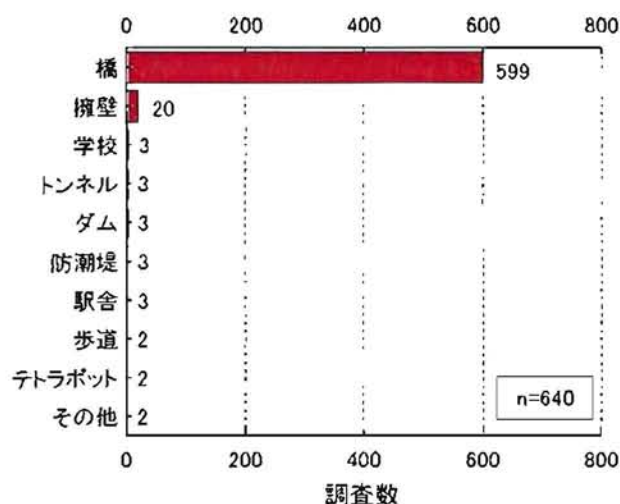


図 1-3 岩手県で調査した
構造物の種類

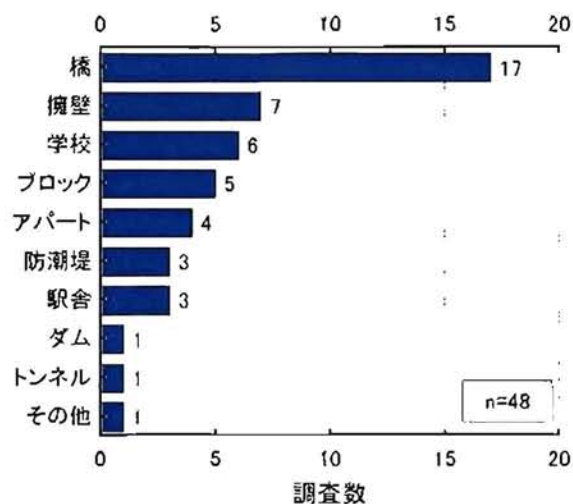


図 1-4 北海道で調査した
構造物の種類

図 1-5 は、6 つに分類した被害形態の発生割合を、岩手県および北海道に分類して示したものである。岩手県の場合、地覆のみを調べた橋梁は含まれていないので、構造物の総数は 47 である。なお、発生割合は、調査した構造物の総数に対し、その被害形態が見られた構造物の割合を示したもので、ひとつの構造物に複数の被害形態が見られた場合もあるため、発生割合の合計は 100% を超える。

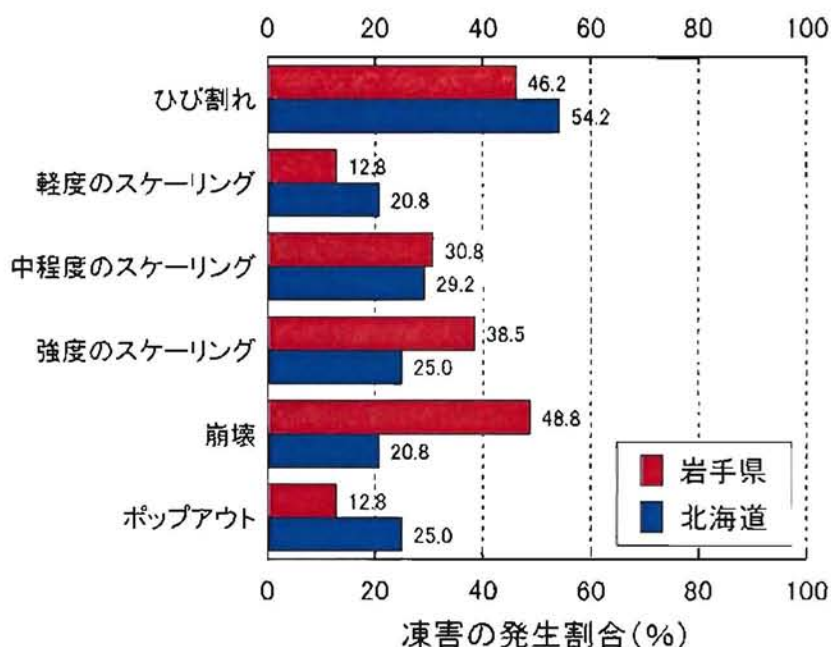


図 1-5 凍害の発生割合

着目すべきは、発生割合の絶対値であり、おしなべて高い数値となっている。これは、劣化の見られた構造物のみを対象としたためであり、既存の構造物全体に、このような高い割合で被害が発生していることを意味するものではなく、この数値は、各被害形態の相対的な比較において意味を持つ。

相対的にひび割れの発生割合が高い。ただし、ひび割れの発生原因については特定が難しく、温度ひび割れや収縮ひび割れなど、凍害以外によるひび割れが含まれている可能性が高い。凍害の大きな特徴である剥離（スケーリング）については、崩壊まで含めた4段階に区分したが、それらを合計すれば、調査した構造物の大多数に、剥離が発生していたことになる。

崩壊まで含めた剥離で興味深いのは、岩手県と北海道の違いである。北海道の場合、剥離の程度が軽度から崩壊まで、ほぼ等しい割合で発生しているのに対し、岩手県の場合は、程度の重い剥離の割合が多い。ひとつの構造物を想定すれば、剥離は徐々に進行し、次第に程度が重くなる。したがって、一般には仮設年次が古いほど、剥離の程度が重いことになり、岩手県の場合、調査した構造物に、古いものが数多く含まれていた可能性もある。しかし、実際には、両地域で調査した構造物の経過年数は25～30年程度と、大差はない。

北海道の場合、調査したのが南部とはいえ、岩手県より気象条件は厳しく、岩手県の方が、被害の程度が重いという結果は、これに矛盾していることになる。北海道は気象条件が厳しいため、凍害が発生しやすいという認識の元に、凍害防止対策が進んでいるとも受け止められる。

また、各調査地域の被害の程度を知ることによって、「その地域の凍害発生の危険性を明らかにできる」との考えから、岩手県の道路橋については、調査路線を通して出現した橋梁の地覆を全数調べた。岩手県の県土は南北195km、東西123kmと、面積は全国都府県のうち最も広く、県内でも場所によっては、気象条件に大きな違いがある。気象条件が異なれば、凍害発生の危険性にも差が出る。

ただし、被害の程度には構造物の施工の良否や経過年数など、多くの要因がかかわるため、たとえば、ある構造物をひとつだけ調べたとしても、その被害の程度でもって、気象条件がもたらす凍害の危険性を判定するには無理がある。その点、各地域内の構造物を数多く調べれば、施工のばらつきや経過年数は、平均的に各地域で同程度となり、気象条件の違いだけが、各地域の被害に反映される。このような考えのもとに、数多くの地覆を調査した。

この地覆の被害形態についても、表1-1に示したように六つに分類したが、調査手法は、たとえば、「軽度の剥離が見られる」というだけにとどめ、その面積的な広がりまでは調査していない。同程度の剥離であっても、わずかな部分にしか発生していない場合と、広範囲にわたっている場合とでは、おのずと被害の程度

が異なる。面積を測定していない本調査の範囲内では、当該の地覆について、被害の重み付けができない。そのため、凍害による何らかの劣化が見られた場合と、まったく劣化が見られなかった場合の二通りに区分することとした。

岩手県内の地域割りに関しては、細かくするほど有用な資料は得られるものの、各地域の調査数が少なくなり、施工のばらつきや経過年数などの影響が強くなる。そこで、気象条件による違いを正しく把握するために、県内をおおまかに、「北東（調査数 190）」「北西（調査数 70）」「南東（調査数 207）」「南西（調査数 130）」の四つの地域に分類した。

何らかの被害の発生割合を4つの地域と岩手県全体（調査数 597）に分類して示したのが、図 1-6 である。橋梁の地覆は、他のコンクリート構造物とは異なり、雨水や融雪水が滞留しやすいので凍害を引き起こしやすいとはいえ、岩手県全体ではこの割合が 27.7%であり、1/4 程度の地覆に凍害が発生していたことになる。各地域における被害の発生割合は、地域毎で異なり、東側より西側が、南側より北側の凍害の発生割合が多くなっている。気温で比較すれば、南側よりも北側がより寒冷であり、東西では積雪量が異なり、西側が比較的多い。凍害にかかわるこれらの気象条件の違いが地域毎の被害の差をもたらしたと推察できる。被害の多い地域は、明らかに凍害発生危険性が高い。そのような地域では、耐凍害性の確保に、より一層慎重な配慮を要する。

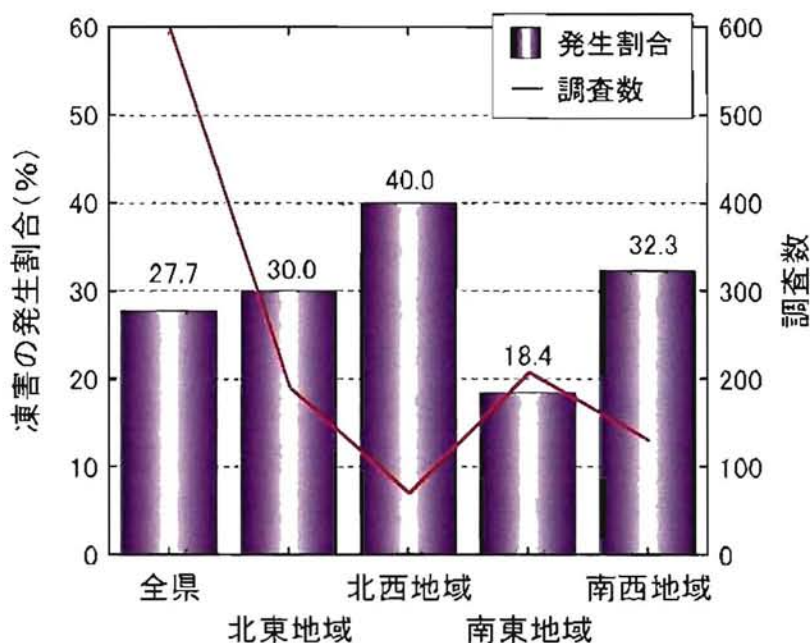


図 1-6 岩手県の地覆を対象とした凍害の発生割合

さらに、各地域における詳細な被害の程度の内訳を示したのが、図 1-7 である。南西を除く 3 つの地域では、各被害形態がほぼ同様の割合で発生していたのに対し、南西では軽度の剥離が少なく、崩壊にまで至ったとされる構造物の割合が他の 3 つの地域の 3～4 倍と非常に多い。南西地域は、奥羽山脈東麓に位置し、他の 3 地域に比べて豪雪地帯であり、凍結融解時の水分の供給が多かったことがその原因として考えられる。

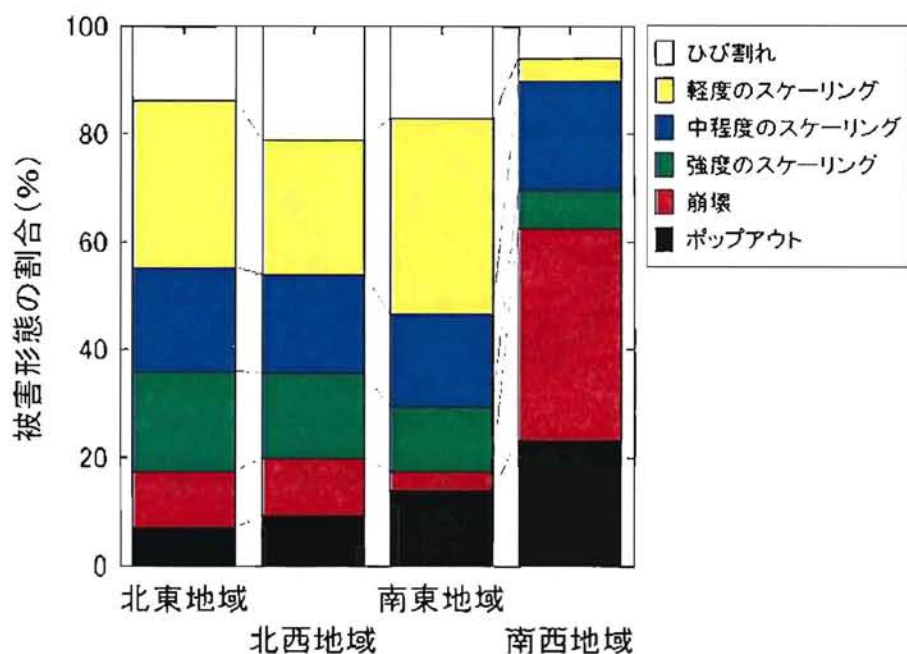


図 1-7 四つの地域の劣化の割合

次に、凍害にかかわる要因として、「気象条件」「設計」「製造」「施工」について検討する。先の図 1-6 によると、「北東」「北西」「南西」に位置する構造物の被害が比較的多く、「南東」に位置する構造物の被害は比較的少ない。コンクリート構造物に生じる凍害は、コンクリートそのものの品質によっても明らかに影響を受けるが、最低気温や最高気温によって定まるサイクルの頻度など、気象条件によっても少なからず影響を受けると考えられる。そこで、気象条件として、「最低気温」「最高気温」「降水量または積雪量」「日照時間」「全天日射量」の各要因に着目して、構造物に発生している凍害がその地域の気象条件とどのように関連しているか、把握することを目的として考察する。

「最低気温」や「最高気温」など、気象条件にかかわるデータは、いずれも財団法人日本気象協会盛岡支部で発行している「岩手県気象月報」から抽出し、平成 5 年 10 月から平成 10 年 5 月までの 5 年間のデータを対象とした。岩手県には、

図 1-8 に示すように、33 ヶ所の気象観測所がある。これらの観測所のデータを元に、凍結融解が生じたサイクル、これらのサイクルの中での最低気温、凍結融解を生じたときの最低気温の合計値などを、33 ヶ所の観測所ごとに算出した。

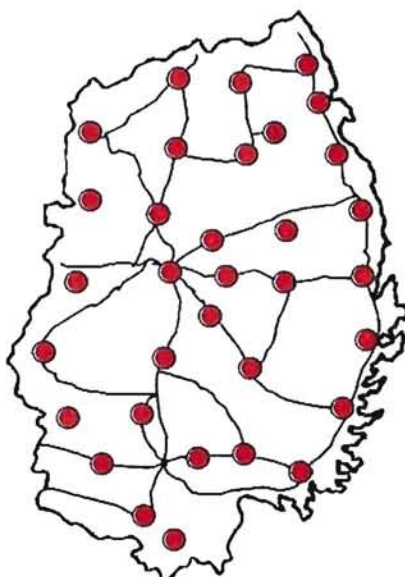


図 1-8 岩手県の気象観測所（33 ヶ所）

岩手県内の橋梁地覆を調査したときのひび割れや剥離など、図 1-6 に基づく 4 つの地域および岩手県全体の凍害の発生割合と、5 年間の気象データに基づく年間平均の凍結融解サイクルとの関係を示したのが、図 1-9 である。凍結融解のサイクルは、凍害の発生割合を示した地域と比較するために、橋梁地覆を調査した地域内にある観測所の複数のデータを平均したものである。これによると、両者の相関関係は非常に高く、凍害の発生割合を推定する上で、凍結融解サイクルは有用な指標であるといえる。

凍害が発生するためには、コンクリート構造物への水分の供給が欠かせない。この水分の供給は、設計によってほぼ決まるため、ここに設計の重要性がある。そこで、設計への配慮を欠いたため、凍害に至ったと推察される例を取り上げ、考察する。

写真 1-1 は、道路橋の南側地覆上面が、中度の剥離を生じた例である。この道路橋は、橋軸が緩やかにカーブし、橋面全体が横軸方向に対し南側に向けて傾斜する構造となっているため、路面および地覆の日射は良好で、雪は比較的容易に融けるものと推察される。融雪による水の供給は、融雪の進行とともに緩やか、かつ継続的に行われることから、比較的長時間にわたってコンクリートを湿潤状態に保ち、その含水程度を高める。さらに、融雪時の水の流れは降雨時の場合と

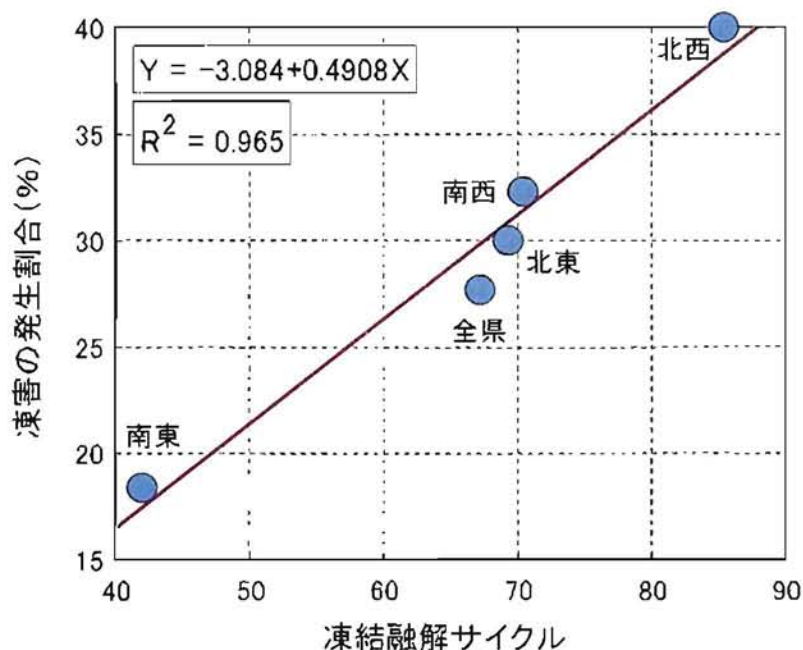


図 1-9 凍結融解サイクルと凍害の発生割合の関係



写真 1-1 地覆に生じた中程度のスケーリング

異なり，融雪水が計画した排水口まで到達せず，貯留することによって劣化を助長する場合もあり，本例の劣化は，そのような原因によるものと考えられる。

加えて，この道路橋の場合は，橋面全体の排水性能を北側の排水口のみ委ねるような片勾配の構造となっていることから，南側地覆は融雪水や雨水，日射，そしてさらには融雪剤の影響を受けやすく，これが集中的な劣化に至ったと推察される。

写真 1-2 は、築造後、約 50 年を経過した橋梁であるが、設計の配慮によって、凍害を免れた例である。高欄および地覆の主要な部分には面取りが施され、応力の集中によって被害を受けやすい隅角部を設けないような配慮が施されている。また、高欄の横棧を菱形としているほか、橋の中央部を盛り上げることによって橋面の排水をスムーズにするなど、融雪水や雨水の滞留を防ぐための細部にわたる配慮が見られた。古い時代の橋であるため、床版上への舗装がなく、50 年間にわたって直接風雨に晒されたにもかかわらず、わずかに軽度の剥離を生じているのみで、構造上の機能を全く失っていない。さらに、高欄と地覆に至っては、軽度の剥離さえほとんど見られず、高い耐久性を示している。本例は、設計上の配慮が、構造物の耐凍害性を高めた貴重な例といえる。



写真 1-2 50 年を経過した健全な橋梁

次いで、製造の影響について考察する。製造の影響とは、すなわち、生コン業の責任において凍害が発生した事例である。**写真 1-3** は、コンクリートに吸水率の比較的大きい粗骨材が混入していたために発生したポップアウトの事例であり、明らかに製造者の責任に帰着するといえる。発生数が少なければ、それほど問題になるとは言えないが、今後、発生数が増加するようであれば、そこからの浸水、凍結融解作用に伴うさらなる劣化が進行し、崩壊へと発展する可能性を秘めている。現に、崩壊状態の構造物の破壊面を観察すると、損傷した粗骨材を確認することができたことから、崩壊に至った発端は、まさにポップアウトにあったと推察される事例もあった。

劣化の原因を探るうえで、最も重要な指標の一つが、コンクリートに含まれている空気量である。この空気量の減少によって、ひび割れが発生したと推察され

るのが、写真 1-4 である。一般に生コン工場では、練混ぜ後の空気量の減少を考慮して、空気量が 0.5% 程度多くなるように製造して出荷している。しかしながら、工事現場が生コン工場から比較的遠い立地条件にある場合には、練混ぜ時の空気量が減少し、凍結時に発生する膨張圧を緩和できないことがある。本例（用水路の天端）の立地場所は、近隣の生コン工場から 1 時間以上と遠隔地にあるため、まさしく練混ぜ後の空気量の減少が原因となったひび割れであると考えられる。さらに、コンクリート打設時のバイブレーターのかけ過ぎなど、施工が原因で大幅に空気量を減少させることもありうるだけに、配合設計時における練混ぜ後の減少を見込んだ空気量の確保が重要であるといえる。



写真 1-3 ポップアウトによる損傷



写真 1-4 空気量の減少によるひび割れ

最後に、施工の影響について考察する。**写真 1-5** は、建築物の屋上のモルタル仕上げ部分の劣化を示したものである。モルタルは、橋梁親柱の化粧仕上げにもよく用いられており、調査したほとんどの親柱が何らかの被害を受けていた。モルタルはもともと収縮ひび割れが入りやすく、そのひび割れが誘因となって劣化を助長する。モルタル仕上げを施すのであれば、混和剤によって空気量を混入するなど、モルタル自体の耐凍害性を高める必要があるといえる。



写真 1-5 モルタルの損傷

以上の調査結果により、凍害を受けているコンクリートは多く、耐凍害性の確保は依然として重要な課題であることを再認識した。目視観察のみの調査であり、凍害発生の原因を特定するのは難しいが、たとえばポップアウトは紛れもなく、骨材の品質が劣るための現象である。また、ひび割れや剥離なども、骨材が原因となっている例があり得ることを否定できない。そこで次に、骨材の現況を概観してみる。

1.1.3 骨材資源および品質の推移

良質なコンクリート用骨材の条件としては、①石質が堅硬強固であること、②清浄で不純物を含まないこと、③大小粒が適当に混合されていること、④粒形が丸味を帯びていること、などが挙げられる。戦後の高度経済成長が始まる 1965 年頃までは骨材の使用量も少なく、そのほとんどは、これらの条件に適合する河川砂利・河川砂により供給されてきた⁶⁾。いわゆる河川砂利・河川砂の時代である。ところが、骨材の使用量が増えるにつれて、橋脚の洗掘などの問題が生じるようになる。

これに対応して1966年に策定された建設省の「河川砂利基本対策要綱」によって、河川砂利および河川砂の採取は、河川管理に支障をきたさないように計画的採取を行うべきこと、また、河川砂利・河川砂の枯渇化に備え、その用途規制を行うことなど、総合的な河川砂利対策がとられた結果、河川砂利・河川砂が全体の生産量に占める比重は、年々低下するようになった⁷⁾。

骨材の供給源多様化の時代(1965年～1980年)の幕開けである。図1-10に示すように、河川砂利・河川砂に代わって台頭してきたのが、陸砂利・陸砂、山砂利・山砂、海砂利・海砂である⁸⁾。河川砂利・河川砂の採掘が規制される状況下で、高度経済成長に伴って急増する需要を満たすために、これらの骨材資源の開発が進められた。この結果、これらの砂利・砂の年間総供給量は約3.5億tまで増加し、急増する需要を支えた。

1980年～1995年は、砂利・碎石の大量消費時代である。その後も骨材需要は増加し、増加分は碎石の増産によって供給されるようになり、1980年以降、骨材の供給は碎石・砕砂が主、砂利・砂が従となっていった。1990年に、骨材使用量は9億5,000万tとピークに達する。しかし、バブル経済の崩壊とともに骨材需要も減少の一途を辿るようになった。

一般に、碎石の使用は西高東低と言われてきたが、粗骨材の碎石への移行は関東、東北にも急速に及んでいる。碎石の使用割合が増加する理由は、良質の河川砂利の不足に起因する。この河川砂利・河川砂の調達難が、骨材の遠隔地での採

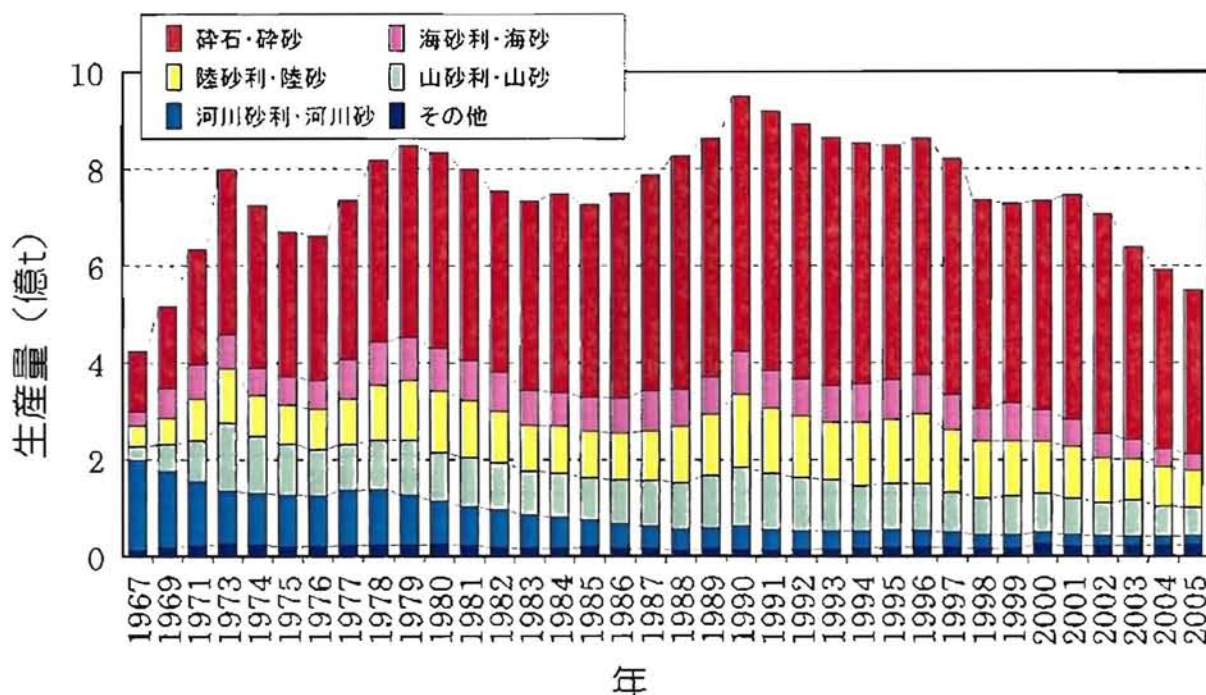


図 1-10 骨材の種類別生産量の推移

取と長距離輸送を余儀なくしており、東北地方からも石灰岩を主とした砕石の輸送が関東方面に行われている。

1995 年以降は、再生・有効利用の時代である。骨材の需要は減少するものの、骨材の大量消費のツケとして、特に良質の砂の不足が深刻化してきた。環境問題の深刻化から、海砂利の採取禁止・再生骨材の利用が進められ、代替え砂資源の確保が重要課題となっている。2005 年の骨材生産量は 6 億 t を下回り、最盛期の 58% にまで落ち込んでいるのが現状である。

日本列島を構成する各種岩石・地層の分布を把握することは、日本列島の地質資源の探査および予測に重要であるばかりでなく、骨材資源の分布を定量的に把握しようとする場合にも、欠かせない基礎情報といえる。そこで、岩石種の測定区分を次のように定め、これらの分布を把握することとする⁹⁾。

- ① 第四紀（170 万年前）の堆積岩類・火山岩類
- ② 新第三紀（2,400 万～170 万年前）の堆積岩類・火山岩類・花崗岩類
- ③ 古第三紀（6,500 万～2,400 万年前）の堆積岩類・火山岩類
- ④ 中生代（2 億 4,500 万～6,500 万年前）の堆積岩類・火山岩類・花崗岩類
- ⑤ 中・古生代（5 億 7,000 万～6,500 万年前）の堆積岩類
- ⑥ 古生代（5 億 7,000 万～2 億 4,500 万年前）の堆積岩類・花崗岩類
- ⑦ 各種変成岩類・塩基性岩類（5 億 7,000 万～2,400 万年前）

表 1-2 に東北 6 県の地層・岩石分布面積比を、図 1-11 に岩手県の砕石資源分布¹⁰⁾を示す。

表 1-2 東北地方の地層・岩石分布面積比

地 層 区 分	年代 (100 万年前)	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
第 四 紀 堆 積 岩	1.7	27.3	9.2	23.1	16.6	19.2	9.3
新 第 三 紀 堆 積 岩	24～1.7	36.1	13.4	35.4	45.9	40.5	25.0
古 代 三 紀 堆 積 岩	65～24						
中 世 代 堆 積 岩	245～65		2.2				
中・古生代堆積岩	570～65	2.2	34.2	15.3			7.8
第 四 紀 火 山 岩	1.7	17.3	13.7	14.8	12.7	8.1	16.4
新 第 三 紀 火 山 岩	24～1.7	16.6	5.5	6.0	20.2	16.8	7.4
中 生 代 火 山 岩	245～146		2.8				
花 崗 岩 類	146～65		15.5	5.4	4.4	14.3	28.3
変 成 岩 類	570～24						5.3
塩 基 性 岩 類	65～24		2.6				
そ の 他	—	0.5	1.1		0.2	1.1	0.5
合 計 (%)		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
面 積 (m ²)		9,607	15,279	7,286	11,612	9,323	13,789

砕石資源分布図

(岩手県)

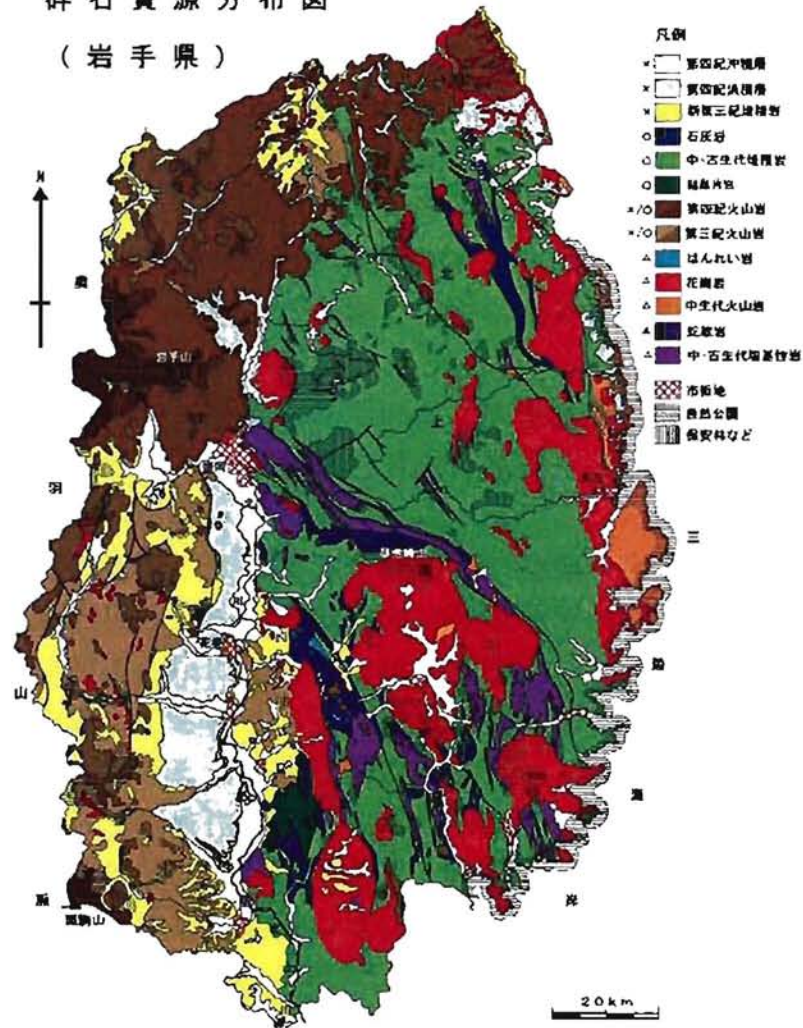


図 1-11 岩手県の砕石資源分布

東北 6 県の地層・岩石分布はほぼ類似しているが、岩手県の地層・岩石分布が他県のそれと異なる点は、第四紀堆積岩や新第三紀堆積岩が少なく、中・古生代堆積岩が多い点にある。

第四紀堆積岩や新第三紀堆積岩は、形成された年代が比較的新しく、これらの骨材は固結の程度が弱いため、重機で掘削できる程度の硬さである。このため、砕石資源となることはなく、岩手県では、奥羽山脈の東麓がこれに該当する。奥羽山脈には、第四紀火山岩や新第三紀火山岩が広く分布している。この岩石は変質鉱物のために脆くなっているものが多く、利用に当たっては注意が必要である。

一方、中・古生代堆積岩が形成された年代は 3 億年前と比較的古い。骨材は固結の程度が強いことで知られ、岩手県では北上山地に広く分布しており、ここで

採れる碎石・砕砂は良質なものが多い。品質が比較的良質な花崗岩も沿岸部および北上山地の南側に分布しており、東北6県の中でも、岩手県は比較的骨材の品質には恵まれているといつてよい。

しかしながら、近年、骨材の低品質化が盛んに言われており、岩手県も例外でない恐れがある。2005年現在、図1-12に示すように、日本では5.49億tの骨材が生産されており、このうちコンクリート用には、73%に相当する4億tの骨材が使用されている⁹⁾。1990年のピーク時の6億トンに比べて66%にまで落ち込んでいるが、生産量の低下の一方で、骨材資源の枯渇化および品質の低下が懸念されてきている。

骨材の枯渇化は、早くから指摘されていた。高度経済成長期のコンクリート工事量の増大が、その発端である。多目的ダムの建設や砂防工事などは、骨材の枯渇化を深刻にしたといわれている¹¹⁾¹²⁾。

国民の環境に対する意識の変化も、骨材資源の確保を困難にしている。砂利の採取においては、陸砂利および山砂利採取に伴う地下水および河川の汚濁等による漁業、農業および周辺住民に対する影響が指摘されている。こうした中で、各行政機関が環境に配慮してさまざまな規制を強化する方向にあり、砂利採取場の確保は年々困難になっている¹³⁾。碎石業においても、都市近郊の山林周辺において宅地の開発が進行し、地域住民と採石場の距離が近接するようになった。地域住民の環境保全意識も年々向上しつつあり、地域住民から同意を得るための負担の増加、工事削減に伴う採取可能量の減少など、個別の碎石業者では資源を確保することが困難になりつつあるのが現状である。

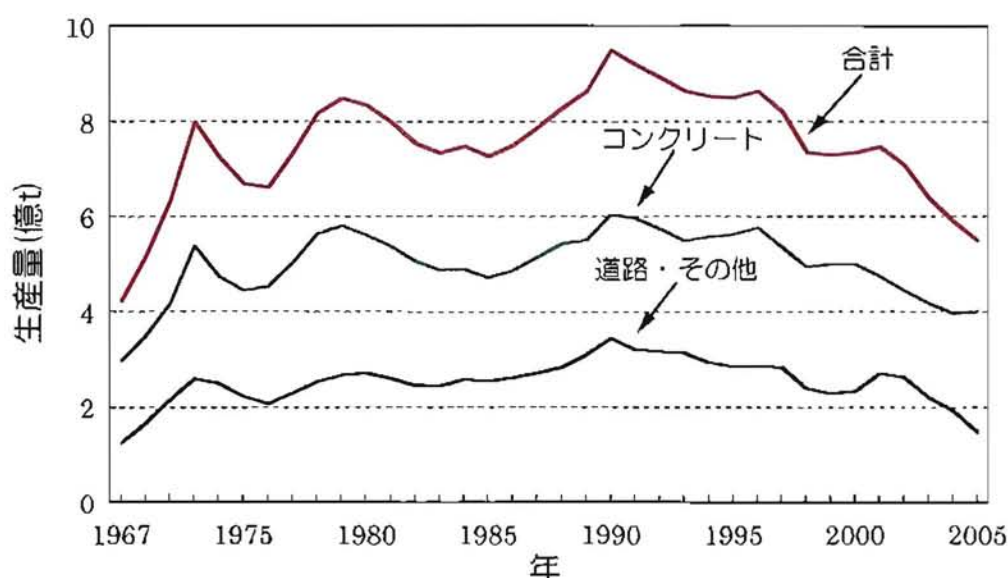


図 1-12 骨材の生産量の用途別の推移

骨材の枯渇化と低品質化には、密接な関係がある。河川は、定常的に骨材をその生産量分だけ使用していれば量的な面での問題は生じない。しかしながら、都市部において、骨材生産量を上回る需給の増加により供給不足が引き起こされると、骨材の種類の多様化や量の優先的確保が生じ、これが骨材の低品質化をもたらす直接的な原因になったと指摘されている¹⁴⁾。

細骨材の供給は、その大半を砂利業界が担っている。従来は、細骨材を品質に応じて河川砂を中心として選択して使用していたものが、河川砂の減少から選択の余地が狭まり、一般的には河川砂より相対的に品質が劣ると言われている海砂や山砂を使用せざるを得ない状況になってきている。砕砂については、単独使用以外に海砂および山砂の粒度調整用および塩分の希釈用として、その供給量が最近急速に増加している¹³⁾が、砕砂は角張りが多く単位水量を増やすことが知られており、製造方法の工夫が求められている。

社団法人セメント協会が実施した粗骨材および細骨材の品質調査結果によれば、全国各地の生コン工場およびコンクリート製品工場で実際に使用されている骨材の品質水準は、かなりの広範囲に及ぶことが判明しており、それらには、学会その他の規準に適合しない骨材も含まれていることが指摘されている¹⁵⁾。

社団法人日本コンクリート工学協会でも、「骨材の品質と有効利用に関する研究委員会」が設置され、2005～2006年の2年間にわたって、調査・研究が行われた。骨材資源とその品質の実態、および今後の骨材品質規格の方向性が検討され、報告書にまとめられている¹⁶⁾。

骨材資源の品質と有効利用に関する検討では、製造者742件、使用者372件の合計1,114件を対象としたアンケート結果（回収数534件、回収率47.9%）を元に、その実態を明らかにしている。それによると、残された天然の骨材資源は品質低下の傾向もあり、入手しやすい天然資源をいかに有効に活用するかが課題であると指摘している。

その中で、全国の269の生コン工場に対し、「規格上の問題」でコンクリート用骨材の品質基準を満足しない割合とその工場数を調査した結果が示されており、それを図1-13に示す。約6割の工場（157工場）では20%以下とする回答であったが、その一方で50%以上と回答した工場が29工場あり、骨材品質の問題の深刻さが明らかとなっている。その29工場について、地域別の割合を示したのが、図1-14である。甲信越地方、東北地方、北陸地方の割合が多く、関東地方、四国地方、沖縄地方では低いことが伺える。従来、東北地方は、骨材の品質が良くないことが指摘されており、それを裏付ける結果として注目される。

そこで、岩手県における第四紀堆積岩の代表例として、盛岡市都南地区の陸砂利の品質の推移を、図1-15に示す。骨材の物理的品質としては、絶対密度および

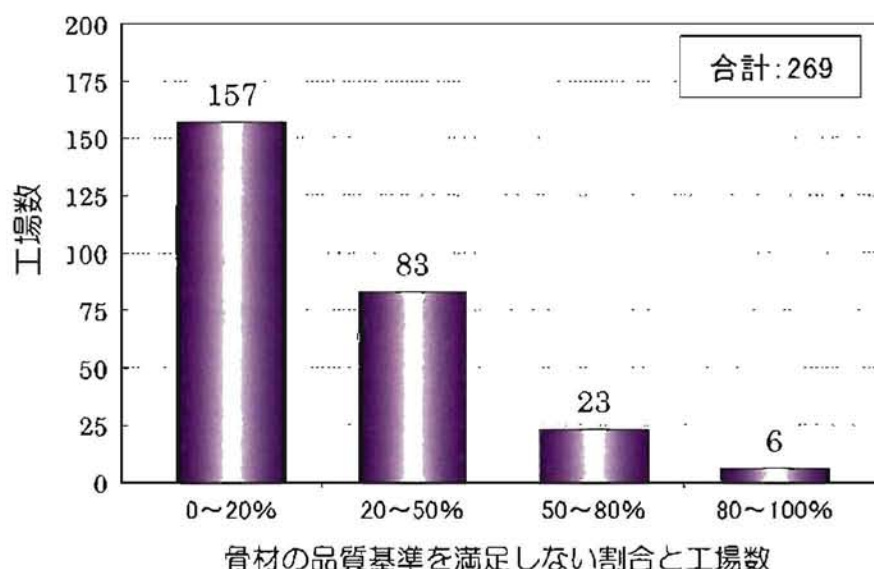


図 1-13 コンクリート用骨材の品質基準を満足しない割合とその工場数

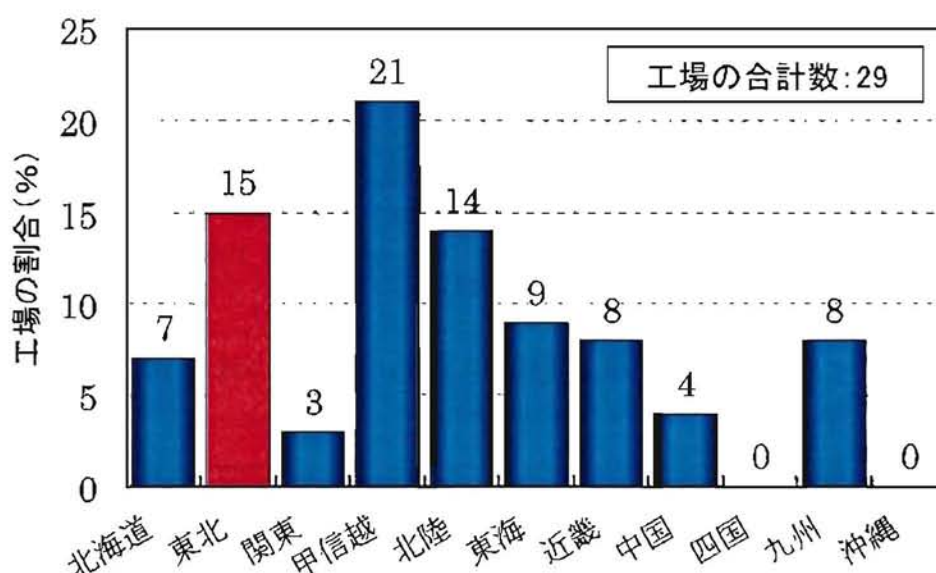


図 1-14 骨材の品質基準を 50%以上満足できない工場の地区別割合

吸水率に着目した。これらの品質に着目したのは、コンクリートの耐凍害性と骨材のこれらの物理的品質には、比較的良好な相関関係が成立するとの指摘による¹⁷⁾。絶乾密度は、JIS A 5308 附属書 1「レディーミクストコンクリート用骨材」で規定する 2.5 g/cm^3 以上（下限値①）を満足しておらず、購入者の承認によって使用することができる 2.4 g/cm^3 以上（下限値②）で対応している。吸水率の上限についても、JIS では 3.0% 以下（上限値①）と規定しているが、これでは品質を満足できないので、購入者の承認によって使用可能な 4.0% 以下（上限値②）で対

応しているのが現状である。盛岡地区の砂利の低品質化は著しく、JISを見直すか、あるいはコンクリートの配合等を工夫しない限り、早晚使用できなくなる恐れがあることを示唆している。

中・古生代塩基性岩に該当する盛岡市黒川地区の砕石（輝緑岩）の品質の推移を図1-16に示す。吸水率は1%以下と小さく、絶対乾密度は 3.0g/cm^3 に近い、経時変化のほとんど見られない品質の安定した骨材である。いずれも、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の基準を満たしており、低品質骨材とは対極にある良質骨材である。

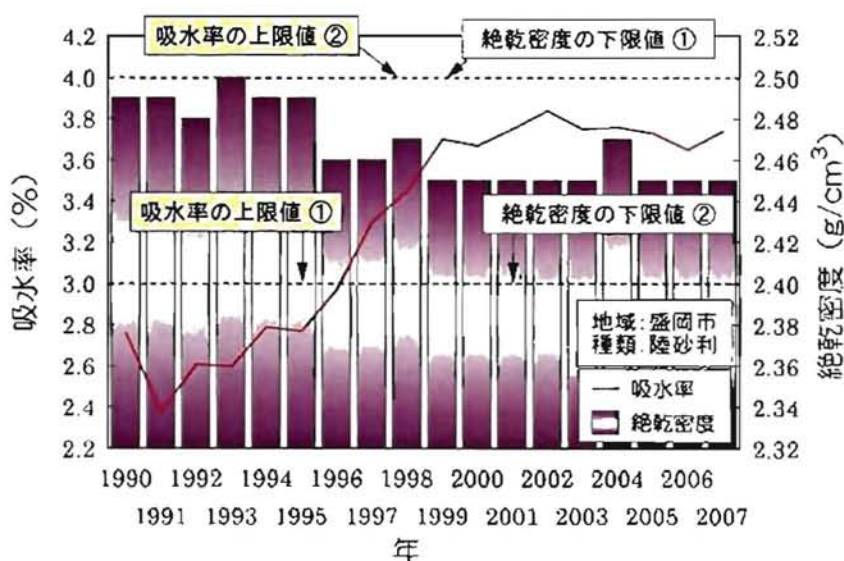


図 1-15 骨材の品質の推移（第四紀堆積岩）

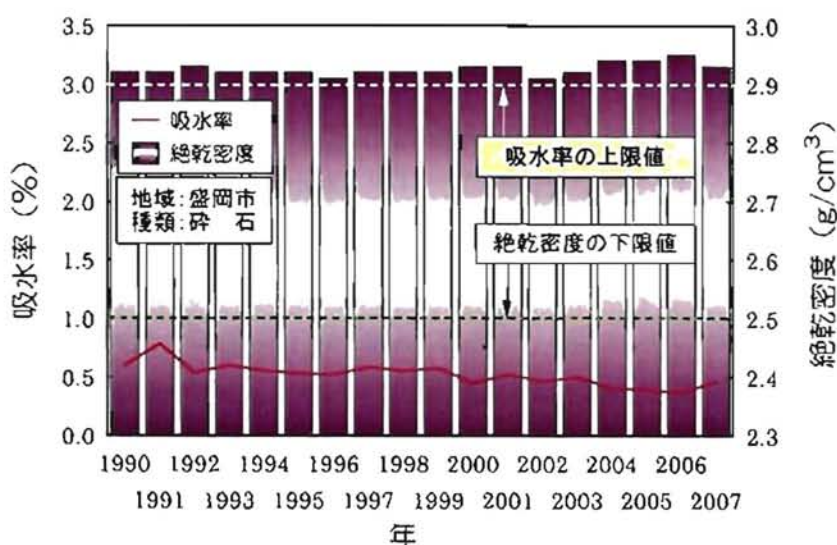


図 1-16 骨材の品質の推移（中・古生代塩基性岩）

釜石地区でも、良質な骨材が産出されている。中・古生代堆積岩に属する砕砂の絶乾密度および吸水率は、 2.68g/cm^3 および 1.2% 程度、碎石のそれは 2.72g/cm^3 および 0.7% 程度ときわめて良質である。この地区で採れる陸砂・陸砂利の絶乾密度および吸水率も、 $2.55\sim 2.62\text{ g/cm}^3$ 、1.5~2.5%と、JIS A 5308 附属書 1 の規準を上回り、経時変化の見られない安定した骨材である。良質骨材は宮古地区や岩泉地区でも産出されており、北上山地から沿岸に至る中・古生代堆積岩の地層は、コンクリート用骨材として適しているといえる。

気仙地区では、古生代・二畳紀の石灰岩が産出されている¹⁸⁾。石色は通常の石灰岩よりも黒味を帯びている。これは、粘板岩が含まれているためで、吸水率は 1% 前後と小さく、絶乾密度も $2.65\sim 2.70\text{ g/cm}^3$ の範囲で比較的安定しており、岩手県内でも良質な骨材として知られている。コンクリート用骨材として岩手県内だけでなく関東方面にも船便で運搬されており、産出される骨材は、その品質によって分別され、セメントの原料や路盤材としても用いられている。

奥羽山脈は、八幡平や岩手山の北部地域で構成される第四紀火山岩とこの南側に分布する新第三紀火山岩に分類される¹⁹⁾。2,400 万~170 万年前の海底火山活動で形成された新第三紀火山岩の凝灰岩類はグリーンタフと呼ばれている。これは、変質による膨潤性粘土鉱物を伴うことが多く、グリーンタフ以降の堆積岩は固結度が低いのが特徴として挙げられており、品質の低下が懸念される地層である。実際に、和賀地区で産出される過去 6 年間の陸砂利の品質をみると、絶乾密度は $2.50\sim 2.46\text{g/cm}^3$ と JIS A 5308 附属書 1 に規定されている 2.5 g/cm^3 以上の品質は確保できず、購入者の承認願いで許可される 2.4 g/cm^3 以上の品質を確保することで、対応しているのが現状である。吸水率の悪化も著しい。この 6 年間の値は、2.68~3.86 %と年を追う毎に大きくなっており、盛岡地区の陸砂利と同様に早晚使用できなくなる恐れがある。

岩手県は、東北の他県に比べて骨材の品質は比較的良好であると言われてきた。確かに、北上山地から東に分布する花崗岩類や塩基性岩類の骨材の品質は、比較的良好であり、コンクリート用骨材として問題はない。しかしながら、北上川周辺流域の第四紀堆積岩類や、奥羽山脈の南側に分布する新第三紀火山岩の品質は極めて劣っているのが現状である。

特に、岩手県の場合、気象条件が寒冷であり、吸水率の大きい骨材を使用すると耐凍害性が劣る恐れがある。骨材の低品質化は深刻である。しかしながら、骨材の有効利用という観点から、今後は低品質骨材でも使用していかなければならない環境にある。低品質骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性を把握し、耐凍害性が劣るのであればそこに技術力を注入し、低品質骨材を寒冷地でも有効利用できるための基礎資料を得ることが急務である。

1.2 コンクリートの耐凍害性と骨材の品質に関する既往の研究

1.2.1 骨材の品質とコンクリートの耐凍害性

細骨材と粗骨材とでは、コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響に違いが表れることが指摘されている。社団法人セメント協会が実施した結果によると、細骨材よりも粗骨材の品質が耐凍害性に大きな影響を及ぼすと報告している¹⁵⁾²⁰⁾。片平らの報告でも、細骨材の絶乾密度が2.25以下、吸水率が7%以上の極端に品質の劣る細骨材を使用しない限り、コンクリートの耐凍害性には問題は生じず、耐凍害性に細骨材の品質が及ぼす影響は少ないことを明らかにしている²¹⁾。骨材寸法が6mm程度以下であれば、凍結しても損傷を受けないという報告もある²²⁾。

長谷川らは、コンクリートとモルタルの耐凍害性を比較したり、コンクリートの細骨材率を変えることで耐凍害性を比較した結果、モルタルの耐凍害性が優れていること、細骨材率が大きいほど耐久性指数が大きくなることから、細骨材よりも粗骨材の品質が耐凍害性に及ぼす影響が大きいことを明らかにしている²³⁾。一方で、複合時のコンクリートの特性とは別に、骨材自体もコンクリート中で凍結融解作用を受けるので、骨材自体の耐凍害性もよく吟味する必要があることも指摘している。

庄谷らは、粗骨材自身の凍結融解抵抗性を検討するため、粗骨材単味での凍結融解試験を実施し、その結果について報告している²⁴⁾。それによると、骨材の耐凍害性を示す指標である100サイクル平均質量損失率は、吸水率が大きくなるほど大きくなる傾向があることを明らかにしているが、吸水率が7%程度と極端に大きくても平均質量損失率は小さくなる場合があることを示している。

骨材の吸水率とコンクリート耐凍害性の関係を明らかにしたのが鎌田らの研究である¹⁷⁾。骨材の吸水率がJISの許容値以内でも、その上限値に近づくと、気泡間隔係数が小さくても耐凍害性を満足しない場合があることを明らかにしている。ちなみに、ACI（アメリカコンクリート工学協会）では、耐凍害性を確保するためには、気泡間隔係数を $250\mu\text{m}$ 以下となるように推奨している²⁵⁾。

W.A.Cardon は、コンクリートの凍害におよぼす骨材の影響について報告している²⁶⁾。骨材には種々の大きさの気泡があり、その性状が異なることがまず述べられ、この中で、D.W.LewisとW.L.Dolchの共著「ポロシチーと吸水」で指摘されていること²⁷⁾を紹介している。凍結融解を受ける骨材粒子の挙動は、主として気泡構造、透水性、および飽水度に関係すること、そしてもっとも重要なものは、気泡の大きさの分布と透水性であることを明らかにしている。

粗骨材の細孔径分布とコンクリートの凍結融解抵抗性には密接な関連があることを明らかにしたのが、金氏の研究である²⁸⁾。これによると、コンクリートの凍結融解抵抗性（EDF）と粗骨材の細孔径分布との間には、良好な相関関係が存在

することを明らかにしている。植作らは、この EDF を用いてコンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材品質の影響について検討しており、EDF が 50% 以上の場合、耐久性指数は 60 以上を確保することを明らかにしている²⁹⁾。

骨材の種類とコンクリートの耐凍害性との関連に関する研究が、複数行われている。月永らは、コンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響について検討した結果、粗骨材の種類によりスケーリング抵抗性は大きく異なり、密度や吸水率の影響は小さいが、骨材自身の細孔直径や凍結融解抵抗性が大きく影響することを明らかにしている³⁰⁾。長谷川は、エントラップトエアと耐凍害性との関係について、基礎的な検討を行っている³¹⁾。エントラップトエアは、使用骨材の種類や粒度によって異なるため、これとの関連についても検討した結果、骨材種類による耐凍害性の差は大きく、水セメント比や空気量以上に大きな影響を及ぼすことなどを明らかにしている。

石灰岩骨材とコンクリートの耐凍害性との関連について、報告されている事例がある。高木は、コンクリートの凍結融解作用における石灰岩骨材の影響³²⁾について、文献紹介している³³⁾。これによると、北ドイツで産出される骨材は、ポラスな石灰岩を含んでおり、これを用いたコンクリートは耐凍害性が低下することから、コンクリートの凍結融解による破壊現象を、コンクリート内部の骨材の凍結膨張圧力と、コンクリートの引張強度との関係で明らかにしている。千歩らは、コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨脹係数と石粉の影響について検討した結果を報告している³⁴⁾。これによると、石灰岩の線膨脹係数は安山岩に比べて小さく、粗骨材とモルタルの線膨脹係数との差によって生じる微視的温度応力は、コンクリートの耐凍害性を低下させるひとつの原因として考えられることを示している。

1.2.2 耐凍害性からみた骨材の品質規定

一般に、コンクリートの耐凍害性に関わる粗骨材の品質としては、硫酸ナトリウムによる安定性損失質量が挙げられる。三浦らは粗骨材の品質とコンクリートの耐凍害性との関連を改めて見直した結果、安定性損失質量（12%以下）および軟石量（5%以下）のほかに、絶乾密度(2.5 g/cm³以上)、絶乾密度 2.5 g/cm³以上の含有量（20%以下）、吸水率（3%以下）およびすりへり減量（15%以下）も基準にすることを提唱している³⁵⁾。武田らの研究でも、骨材の安定性損失質量とその骨材を用いたコンクリートの耐凍害性には、比較的高い相関関係が存在することを明らかにしている³⁶⁾。安定性損失質量とコンクリートの耐凍害性との間の相関関係は、不明確であり、この試験方法の性格からすれば、コンクリートにポップアウトや点食が生ずる可能性は検討できるものの、これ以外の劣化形態に対す

る安全性の吟味には適さないと考えるのが一般的であることを明らかにしている報告もある²³⁾。

・ 社団法人日本コンクリート工学協会の報告書によると、骨材の絶乾密度、吸水率およびすりへり減量とコンクリートの耐凍害性との関係について明らかにしている¹⁶⁾。これによると、絶乾密度と吸水率には相関関係が見られ、絶乾密度 2.4g/cm^3 以下および吸水率 6.0%を上回る骨材については、すべて耐久性指数が 60 を下回る結果であったことを報告している。併せて、絶乾密度とすりへり減量の両方の規格を下回る場合には、すべてのコンクリートが耐久性指数 60 以下となること、絶乾密度が規格値を下回り、安定性損失質量が 20%を上回る場合においても、耐久性指数はすべて 60 以下となることから、骨材のこれらの品質を組み合わせることで、耐凍害性の有無を明らかにできることを報告している。

小林らは、低品質骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験を通じ、粗骨材の品質基準を提唱している³⁷⁾。それによると、粗骨材の品質をコンクリートの設計基準強度で分類しており、たとえば設計基準強度が $18\sim 30\text{N/mm}^2$ 未満の場合、耐久性を要求されるコンクリートには、吸水率 3%以下、安定性損失質量 12%以下の粗骨材を用いることを提唱している。ただし、内部コンクリートや中詰めコンクリートなど、耐久性を特に要求されない場合には、吸水率または安定性損失質量の上限値を緩和するよう提唱しており、低品質骨材の利用を促進する試案を作成している。

1.2.3 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性確保

低品質骨材と良質骨材を用いて、その耐凍害性を比較した実験が行われている。西澤らは、ダム現場で廃棄された低品質の粗骨材を用いて凍結融解試験を行った結果、水セメント比 40~65%の耐久性は、良質骨材を用いた水セメント比 85%のコンクリートの耐久性と同程度であることを明らかにしている³⁸⁾。藤原は、低品質の砂利を用いたコンクリートの諸性質として耐凍害性についても触れており、砂利の不均一性に着目した解析を行っている³⁹⁾。それによると、吸水率 8%以上の骨材粒子の割合が増えるにつれて、相対動弾性係数は低下しており、しかも両者の相関係数が大きくなることから、コンクリートの耐凍害性は低品質粒子の混入割合に大きく影響されていることを指摘している。

阿波らは、低品質骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性や、塩分環境下におけるスケーリング抵抗性について検討している⁴⁰⁾。それによると、極めて低品質な粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、配合要因を変化させても顕著な改善効果は見られないこと、凍結融解抵抗性には、粗骨材の細孔構造が大きな役割を果たしていること、スケーリング抵抗性は水セメント比や空気量を

変化させることによって大きく改善されることを明らかにしている。

低品質骨材を有効利用する観点から行われている研究がある。藤原は、低品質骨材を有効利用する観点として、配合の適切な選定による母材の強化、および良質骨材との混合による骨材の平均的性質の向上を取り上げ、これらの方法の有用性について検討している⁴¹⁾。母材の強化については、水セメント比 50%と 70%とで比較しており、粗骨材の吸水率が 8%程度までは、水セメント比を低減する効果はみられるが、それ以上の吸水率になると相対動弾性係数の低下が著しく、あまりにも品質が劣る骨材を寒冷地に用いるには無理があると結論付けている。良質骨材を混合する場合でも、混合する割合が増えるにつれて相対動弾性係数は大きくなっているが、その効果はサイクル数の増加に伴い小さくなりつつあり、混合使用による場合にも、配合に対する配慮が欠かせないことを指摘している。

伊藤らは、吸水率や密度が JIS から外れる低品質の再生骨材や火山れき等をコンクリート用骨材として活用する方法として、減圧練混ぜ方法の適用を実験的に検討している⁴²⁾。その結果、減圧練混ぜ時において復圧を瞬時に行うことにより、大気圧によってモルタルが粗骨材に圧着され、両者の界面性状が改善されることから、低品質骨材でも通常の骨材を用いた場合と同様な品質のコンクリートを製造しうる可能性を示している。

友澤らも、低品質骨材の適正利用に関する研究を行っている⁴³⁾。それによると、粗骨材の吸水率が 3.6%の低品質骨材を用いた場合、空気量が 4%程度の空気量であっても耐凍害性が著しく劣ること、水セメント比 45~65%の範囲では、水セメント比を小さくすることによる改善効果はみられなかったことを明らかにしている。

低品質骨材に良質骨材を組み合わせた際の耐凍害性に関する研究が行われている。友澤らは、1985 年 3 月に JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」が改正され、新たに骨材の混合規定が設けられたことから、低品質骨材の適正利用の観点に加え、骨材の混合規定の合理的な運用を図るための品質基準を得ることを目的とした研究を行っている⁴⁴⁾。それによると、混合骨材を用いたコンクリートの耐久性指数は、骨材の吸水率の増加および安定性損失質量の増加に伴って低下する傾向を示しており、その割合は骨材の混合比にほぼ比例していることを明らかにしている。ただし、吸水率や安定性損失質量が同等でも、混合する前の骨材の種類によって耐久性指数に大きな違いが見られることも指摘している。

猪口らは、コンクリートは粗骨材を 1 個含むコンクリート要素の集合体であると考え、この要素の表乾密度や圧縮強度を測定し、それらを組合せて耐凍害性を評価することを試みている⁴⁵⁾。その結果、このようなメゾレベルでのモデル化により、様々な品質の骨材が混在する混合骨材コンクリートの耐凍害性の評価が定

性的に可能であることを明らかにしている。

1.3 本研究の目的

コンクリートの凍害は、古くから問題視され、数多くの研究が行われるとともに、耐凍害性を確保するための技術も検討されてきた。その代表例が AE 剤の開発であり、凍害の防止にきわめて大きな効果を示す。現在は、寒冷地において AE 剤の使用は、いわば原則であり、これにより凍害は根絶するはずであった。しかし、現実には、凍害の発生は跡を絶たず、筆者らの岩手県および北海道を対象とした調査においても、凍害を受けている例が数多く見られた。

コンクリート構造物の大多数は、生コンクリートを用いてつくられる。その生コンクリートが耐凍害性を有しなければ、構造物は供用後に凍害を受ける恐れが強い。従って、生コン業としては、耐凍害性に優れたコンクリートを供給する責務がある。

そのような認識のもと、実際に製造されている生コンクリートを対象として、凍結融解試験を実施した。その結果については、次章で詳述するが、この試験でみられた耐凍害性と骨材との関連を要約すれば、以下のようになる。

- ①骨材の密度や吸水率のような物理的性質が良好であっても、コンクリートの耐凍害性が劣る例もある。この中には、空気量などの要因でその原因を説明できない例があり、密度や吸水率以外の骨材の品質が関連している可能性もある。
- ②骨材の物理的性質が規格を外れていても、コンクリートの耐凍害性を確保できる例がある。これは、規格を吟味すれば、これまで使用できなかった骨材でも有効に利用できる可能性があることを示している。
- ③骨材の物理的性質が規格をやや大幅に外れる場合、コンクリートの耐凍害性確保はきわめて難しい。しかし、低品質骨材の有効利用を図るためには、このような骨材を用いても、コンクリートの耐凍害性を確保できる方策の確立が重要である。

実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験のこの結果をもとに、原因の究明や対策の検討を行うのが、本研究の目的である。

①については、該当する生コン工場にとって切実な問題であり、これを解決できなければ、信用を損ね、場合によっては出荷できなくなる恐れがある。そのため、原因の究明が急がれた。きわめて特異な問題であるが、本研究では、考えられる原因のひとつひとつを実験によって確かめながら、真の原因を突き止めることにした。

物理的な性質に劣る骨材を低品質骨材と呼ぶならば、②と③は、これに関わっ

ており、より汎用性のある問題さらには課題であるといえる。骨材は、文字通りコンクリートの骨格材料であるだけに、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張や塩分を含む海砂による鉄筋腐食に代表されるように、骨材を厳選して使用する姿勢が望まれる。とりわけ、岩手県のように、寒冷地に特有な凍結融解抵抗性を確保するには、良質な骨材を厳選して使用することが重要であると考えられてきた。その一方で、密度や吸水率等の物理的品質に優れた骨材がしだいに枯渇し、低品質化の傾向が強まっている現実もあり、低品質骨材を有効利用する方法の確立も重要な研究課題となりつつある⁴¹⁾。コンクリート用骨材は、なるべく地元で産出されるものを使用するのが、運搬によって生じるコスト、あるいは環境への負荷を低減する観点から望ましいと言える。骨材の品質が JIS を満足しないからといって、骨材を厳選して使用することは、今後はできにくくなっていくのではないかと考えられる。土木学会でも、コンクリートに要求される品質を仕様規定から性能規定に変えており、低品質骨材を有効利用できる社会情勢も整ったといえる。本研究で、低品質骨材をコンクリート用骨材として寒冷地にも有効利用できる方法が見出されれば、その意義はきわめて大きい。

前述したように、低品質骨材と耐凍害性との関連に関する研究は、古くから行われている。しかし、その研究のほとんどは、粗骨材の吸水率や安定性損失質量など、粗骨材の物理的品質とコンクリートの耐凍害性との関連に着目したものがほとんどで、粗骨材自体の耐凍害性に着目した研究は皆無に等しい。粗骨材とモルタルの複合時の特性とは別に、骨材自体もコンクリート中で凍結融解作用を受けるので、その耐凍害性をよく吟味しておく必要があり²³⁾、本研究ではこの点に着目した実験を行った点からも、大きな意義があると考えられる。

コンクリートは、粗骨材をモルタルで包み込んだ複合材料であり、粗骨材が低品質であれば、モルタルにはその低品質を補う特性が求められる。その特性として考えられるのが、配合および空気量であり、これらの品質特性を有するモルタルと低品質な粗骨材を組み合わせた場合の凍結融解抵抗性を把握する必要がある。これまで、阿波らの研究⁴⁰⁾などを通じ、低品質骨材とモルタルの水セメント比や空気量に着目した実験は行われてはいるものの、耐凍害性の有無は粗骨材の空隙構造によって影響されると評価しており、必ずしも、水セメント比や空気量と耐凍害性との関連について明確にされているわけではない。本研究では、この点についても検討を加え、耐凍害性との関連について評価した。

さらに、低品質骨材は吸水率が比較的大きいため、これをコンクリートに用いた場合、凍結時には膨張挙動を示し、この現象がコンクリートの劣化を引き起こすと考えられる。そこで、本研究では、コンクリートを粗骨材とモルタルを組み合わせた複合モデルと仮定し、両者の凍結融解時のひずみを測定することで、実

際に生じている膨張挙動を把握した。得られたデータは、厚肉円筒モデルの概念を参考にして骨材とモルタルに生じる応力を計算し、両者の品質特性である圧縮強度あるいは引張強度と比較検討することで、耐凍害性の有無を評価した点でも意義があると考えられる。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下の構成となっている。

第 1 章 序論

第 2 章 実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性

第 3 章 コンクリートの耐凍害性に及ぼす砕砂中のカーボンの影響

第 4 章 凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の耐凍害性

第 5 章 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配合の影響

第 6 章 低品質骨材とモルタルを組み合わせた複合モデルによる照査

第 7 章 結論

第 1 章では、これからのコンクリート構造物にとって、長寿命が強く望まれ、そのためには耐凍害性の確保が寒冷地にとってきわめて重要であることを指摘し、現状では凍害の発生が跡を絶っていないことを、凍害調査の結果から明らかにした。骨材の品質も凍害の要因と考えられるため、骨材資源の推移や骨材の低品質化の現状について概説し、低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性やその確保の方法などに関する既往の研究を整理した。筆者らが行った実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験においても、耐凍害性に骨材が大きく関連していると思われる現象がいくつか見られ、本研究では、これらの原因の解明や対策の確立を目的とし、その意義について述べた。

第 2 章では、本研究を始める原点となった実際に製造されている生コンクリートの凍結融解試験について述べた。耐凍害性に及ぼす生コンクリートの諸性質との関連について検討するとともに、その結果から明らかになった問題点について整理した。岩手県の場合、その寒冷な気象条件をよく考慮して、耐凍害性に優れた生コンクリートを製造している工場が多いと評価できるが、その一方で耐凍害性に問題のある生コンクリートも少なからず出荷されていることを明らかにした。

第 3 章では、実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験において、使用骨材の密度や吸水率などの物理的性質が良好で、フレッシュコンクリートの空気量が適切であるにもかかわらず、耐凍害性に劣った特殊な例について、その原因解明のために行った一連の実験を述べた。使われていた骨材の特徴として、黒色の物質の混在が挙げられ、これに含まれるカーボンが混和剤の空気連行性を阻害し、耐凍害性を低下していたことを明らかにした。

第4章では、低品質骨材の有効利用を図るためには、まず骨材自体の特性を明らかにしておく必要があると考え、広範囲の品質の碎石を対象として、凍結融解抵抗性を調べ、骨材の諸物性との関連を解明した。吸水率などの JIS を外れる骨材であっても、優れた抵抗性を示すものがあり、これらは、規格内の骨材と同等の取扱いが可能であることを明らかにした。

第5章では、吸水率が JIS を満足しない低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性を、水セメント比や空気量の配合条件を調節することで確保できないか検討した。5%以上の吸水率を有する粗骨材の場合、空気量を増量しても耐凍害性の確保は難しくなるが、むしろ水セメント比を大きくすることで、耐凍害性を得られる事例もあり、骨材の品質に見合った配合条件を設定すれば、耐凍害性を確保できる可能性を示した。

第6章では、コンクリートを低品質骨材とモルタルを組み合わせた複合モデルと見なし、これらの凍結融解時のひずみを測定することで応力を算出し、材料の品質特性である圧縮強度や引張強度と比較検討した。粗骨材およびモルタルに生じる応力は、厚肉円筒モデルを用いた解析により求め、劣化のメカニズムを明らかにした。

以上の検討をもとに、特殊な骨材および低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性の評価を第7章で取りまとめ、これらの骨材を有効利用するに当たっての一助となるような提案を行った。

参考文献

- 1) 21 世紀の社会資本整備：鹿島建設株式会社 HP (2007)
- 2) 平成 13 年度・年次経済財政報告：内閣府 HP (2001)
- 3) 奥島敢：性能規定の時代，神戸製鋼技報，Vol.53, No.1 (2003)
- 4) 藤原忠司ほか：実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性，セメント・コンクリート論文集，No.49, pp.668－673 (1995)
- 5) 袴田豊ほか：岩手県および北海道南部におけるコンクリート構造物の凍害の現状とその原因，セメント・コンクリート論文集，No.53, pp.409－416 (1999)
- 6) 須藤定久：産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 HP (2007)
- 7) コンクリート工学：社団法人日本コンクリート工学協会，Vol.37, No.7 (1996)
- 8) 鉱業便覧：財団法人経済産業調査会編（平成 14 年版）
- 9) 須藤定久：日本における各種岩石・地層の分布と分布比率（都道府県別の骨材資源基礎情報），産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 HP (2007)
- 10) 須藤定久：日本の碎石資源，社団法人日本碎石協会 (2001)
- 11) 遠藤竹平：全国の骨材品質概況，セメント・コンクリート，No.415, pp.21－42 (1981)
- 12) 川上英男：コンクリート用骨材の地域的特性，建築の技術・施工，No.198 (1982)
- 13) 古川孝雄：骨材産業の今後のあり方について，コンクリート工学，Vol.34, No.7, pp.8－12 (1996)
- 14) 阿部道彦：コンクリート用骨材の課題，コンクリート工学，Vol.34, No.7, pp.4－7 (1996)
- 15) 社団法人セメント協会：粗骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告，F－31, (1979)
- 16) 社団法人日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会・報告書，(2007)
- 17) 鎌田卓朗ほか：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)
- 18) 渡辺一夫：川原の石ころ図鑑，ポプラ社 (2007)
- 19) 各県の地質：東北地質調査業協会 HP (2007)
- 20) 社団法人セメント協会：細骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告，F－32, (1981)
- 21) 片平博ほか：低品質細骨材の有効利用に関する研究，ダム技術，No.238, pp.25－33 (2006)
- 22) ACI Committee 201: Guide to Durable Concrete, Jour.ACI, Vol.74, No.12, 1977.12, pp.537－609

- 23) 長谷川寿夫, 藤原忠司: コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害, 技報堂出版 (1988)
- 24) 庄谷征美ほか: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響に関する研究, 第25回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.155-160 (1998)
- 25) ACI Committee, 212: Admixtures for concrete, Jour.ACI, Vol.60, No.11, 1963, pp.1481-1524
- 26) W.A.Cardon, Freezing and Thawing of Concrete—Mechanisms and Control, ACI monograph, No.3, 1966, P.99
- 27) Lewis, D.W.&Dolch, W.L., Porosity and Absorption, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Aggregates, ASTM STP 169, 1956
- 28) 金氏真: 粗骨材の細孔径分布とコンクリートの凍結融解抵抗性の相関関係について, セメント技術年報, No.33, pp.302-305 (1979)
- 29) 植作宗一郎ほか: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.818-819, 1997
- 30) 月永洋一ほか: コンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.785-790 (1999)
- 31) 長谷川寿夫ほか: 骨材の種類・粒度およびコンシステンシーによる混入空気量と耐凍害性の関係, セメント技術年報, No.31, pp.339-342 (1977)
- 32) Dr.-Ing.H.Lange und Dipl.-Ing.S.Modry, Einfluß der Porosität von Kalksteinzuschlagstoffen auf die Frostbeständigkeit des Betons, Beton Herstellung Verwendung, Jg.21, Heft 1, Janvar 1971
- 33) 高木隼二: コンクリートの凍結融解作用における石灰岩骨材の影響, コンクリート・ジャーナル, No.2, pp.48-53 (1972)
- 34) 千歩修ほか: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨脹係数と石粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.787-792 (2000)
- 35) 三浦忠ほか: 骨材の質によるコンクリートの耐久性に関する研究, セメント・コンクリート, No.317, pp.8-16 (1973)
- 36) 武田ほか: コンクリート用骨材の耐久性の調査試験, コンクリート・ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.22-30 (1968)
- 37) 小林茂敏ほか: 低品質骨材を用いたコンクリートの特性, セメント・コンクリート, No.440, Oct. (1983)
- 38) 西澤賢太郎ほか: 低品質骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する実験, 土木学会第51回年次学術講演会, V-189, pp.378-379 (1996)
- 39) 藤原忠司ほか: 低品質の砂利を用いたコンクリートの諸性質, セメント技術

- 年報, No.40, pp.134-137 (1986)
- 40) 阿波稔ほか：低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.85-90 (2000)
 - 41) 藤原忠司：低品質骨材の有効利用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第408号/V-11 (1989)
 - 42) 伊藤康司ほか：低品質骨材の有効利用に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.474-479 (1998)
 - 43) 友澤ほか：低品質骨材の適正利用に関する研究, セメント・コンクリート, No.440, pp.23-30 (1983)
 - 44) 友澤ほか：混合骨材を用いたコンクリートの長期性状, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.245-248 (1986)
 - 45) 猪口泰彦ほか：混合骨材コンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.283-288 (2000)