

## 委員会報告 自然環境下のコンクリート劣化研究委員会

湯浅 昇\*1・濱 幸雄\*2・小山 智幸\*3・緒方 英彦\*4・杉山 隆文\*5・山田 義智\*6・濱崎 仁\*7・野中 英\*8

**要旨:** 本研究委員会では、コンクリートの劣化について、実態の把握を行うとともに、劣化メカニズムに係った最新環境評価手法整理と検証、最新試験方法の整理を行った。対象とした劣化は、中性化による鉄筋腐食、塩害、凍害、土壌劣化であるが、特に、九州および中国地域における凍害について、精力的に実態調査し、その劣化外力を考察するとともに、新規暴露を開始した。

**キーワード:** 自然環境、暴露、実構造物、劣化、凍害、塩害、中性化、土壌劣化、環境評価、試験方法

### 1. はじめに

本研究委員会「自然環境下のコンクリート劣化研究委員会」は、1991-1992年度に委員長を故鎌田英治先生とする「自然環境下のコンクリート研究委員会」、2003-2004年度に委員長を佐伯昇先生とする「自然環境下のコンクリート性能研究委員会」の後継委員会として、これまでの2つの研究委員会で掲げた構想、培った技術・結果・ノウハウや議論を、現時点のものとしてモディファイ/アップグレードし、後生に、「自然環境下のコンクリート」研究を託していくことを目的としている。

1991年、2003年の先行研究委員会が、12年周期で立ち上げてきた経緯も踏まえて、本研究委員会では、対象とする環境・劣化を①一般環境下の劣化(中性化)、②塩害環境下の劣化、③凍害環境下の劣化、④火山性腐食ガス・土壌環境下の劣化とするが、今回の重点課題として「九州・中国地域のコンクリートの凍害」の研究を位置づけ活動してきた。九州・中国地域における凍害の実態調査、劣化外力の大きさの検討と新規暴露試験を開始した。これらの重点課題以外では、それぞれの課題について、2003年以降の委員内外の暴露試験や実構造物調査の情報を整理した。委員構成を表-1に示す。

### 2. 凍害環境評価に関する研究

凍害劣化を対象とした研究は、古くから行われており、劣化機構の解明、材料、調合に関連する研究だけでなく、長期間にわたる屋外暴露試験、実構造物の劣化調査等、積雪寒冷地である北海道・東北地方の研究組織を中心に継続的な研究が精力的に行われ、その成果が各種仕様、指針類に反映されてきている。

本委員会の凍害環境WGでは、北海道・東北凍害環境SWG、中国凍害環境SWG、九州凍害環境SWGを組織した。北海道・東北凍害環境SWGでは北海道・東北地域で実施されてきたこれまでの暴露試験および実構造物で

の凍害劣化の実態調査を再整理した。一方、中国地方および九州地方は一般的には温暖地域として位置づけられており、凍害環境として認識されておらず、これまでは凍害劣化調査が系統的には行われてこなかったが、中国地方、九州地方の内陸部および山間では、冬期間の降雪、気温の低下が以外に厳しく、コンクリートに凍害被害が散見されることから、中国凍害環境SWG、九州凍害環境SWGでは、中国地方と九州地方での凍害に着目した実態調査を行った。

表-1 委員構成

委員長：湯浅 昇 (日本大学)	
幹事：濱 幸雄 (室蘭工業大学) 杉山隆文 (北海道大学) 小山 智幸 (九州大学) 緒方 英彦 (鳥取大学) 山田 義智 (琉球大学)	
【凍害環境WG】◎WG主査, ○SWG主査	
◎濱 幸雄 (室蘭工業大学)	○小山 智幸 (九州大学)
○緒方 英彦 (鳥取大学)	○杉山 隆文 (北海道大学)
濱田 秀則 (九州大学)	井上 真澄 (北見工業大学)
徳重 英信 (秋田大学)	山口 明伸 (鹿児島大学)
黒田 保 (鳥取大学)	伊藤 是清 (東海大学)
藤井 隆史 (岡山大学)	大谷 俊浩 (大分大学)
周藤 将司 (松江高専)	佐川 康貴 (九州大学)
野中 英 (熊谷組)	
【塩害環境WG】	
◎山田 義智 (琉球大学)	富山 潤 (琉球大学)
佐川 孝広 (前橋工科大学)	佐伯 竜彦 (新潟大学)
宮里 心一 (金沢工業大学)	濱田 秀則 (九州大学)
山口 明伸 (鹿児島大学)	佐川 康貴 (九州大学)
野中 英 (熊谷組)	
【中性化WG】	
◎濱崎 仁 (芝浦工業大学)	佐川 孝広 (前橋工科大学)
野中 英 (熊谷組)	
【土壌劣化WG】	
◎小山 智幸 (九州大学)	伊藤 是清 (東海大学)
大谷 俊浩 (大分大学)	

\*1 日本大学 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工博 (正会員)

\*5 北海道大学大学院 工博 (正会員)

\*7 芝浦工業大学 工博 (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工博 (正会員)

\*4 鳥取大学 工博 (正会員)

\*6 琉球大学 工博 (正会員)

\*8 (株)熊谷組 技術本部 工博 (正会員)

## 2.1 北海道・東北地方における凍害劣化

北海道や東北などの寒冷地域における凍害は、コンクリート構造物に致命的な損傷を与える劣化として認識され、継続的、組織的な研究が行われてきた。

凍害を対象とした暴露試験は、北海道大学、北見工業大学、土木研究所寒地土木研究所を中心に、古くから積極的に行われてきた。例えば、札幌市の北海道大学構内や紋別市での暴露試験、寒地土木研究所が管理している留萌海岸コンクリート暴露試験場、美々コンクリート凍害実験場、北見工業大学ではオホーツク海沿岸の干満帯での長期暴露等の実施が有名であり、多くの文献で紹介されている。

また、日本コンクリート工学会北海道支部の積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会（委員長：杉山隆文北大教授）では、北海道内のコンクリート橋梁の劣化実態調査を行い、凍害単独の劣化だけでなく、凍害と塩害、凍害と ASR、凍害と中性化の複合劣化が多くみられると報告している<sup>1)</sup>。このことから、劣化原因の推定、評価、判定を行うにあたり、単一の劣化だけでなく、凍害を中心とした複合劣化に関する知見を深める必要があるとしている。また、調査橋梁の架設年代のピークは1970年代であるものの、凍害劣化（複合劣化も含む）の発症ピークが1960年代であることが示されており、実務における凍害対策の普及効果が認められ、架設年代が新しい構造物での凍害が激減していることが示されている。さらに、凍害単独劣化は凍害危険度の高い地域で多くみられるものの、凍害との複合劣化を含めた被害の状況は必ずしも凍害危険度との対応が明確ではないとしている。

## 2.2 中国地方の環境と凍害事例調査

### (1) 中国山地における積雪・融雪の特徴

中国地方は、山陰と山陽の境に中国山地が連なって脊梁山地を形成している。山陽の南部は瀬戸内海に面し、主に島しょ部と平野部で構成され、北部は主に山地や盆地で構成されている。一方、山陰は、日本海に面しており、日本海側気候の特性が現れ、冬は内陸部や山間部を中心に寒さが厳しく、大雪に見舞われることがある。

中国地方の雪は、水分を多く含んでおり重い傾向にある。表-2 は、日本海沿岸地域 22 都市の雨雪量計法により求められた新積雪（6 時間あるいは 12 時間以内の比較的短時間に積もった雪）の密度である<sup>2)</sup>。鳥取の雪密度は 0.073g/cm<sup>3</sup> であり、福井、松江、新潟に次いで重いことがわかる。また、中国山地のほぼ中央に位置する岡山県真庭市にある鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンター教育研究林（蒜山の森）（35° 17'15.5"N, 133° 35'13.1"E）で測定した積雪の密度を図-1 に示す。積雪表面から 50cm までは 0.19g/cm<sup>3</sup> であり、それより深くなると圧縮されることで 0.32~0.39g/cm<sup>3</sup> と大きくなる。

このように、中国山地の雪は重く水分を多く含むのが特徴であるが、積雪の高さによって密度も増すことから、融解時に多くの水分がコンクリートに供給される環境にあることがわかる。このことから、中国地方におけるコンクリート構造物の凍害は、この重い雪質による影響を加味すべきであるといえる。

図-2 は、蒜山の森の中に設置されている暴露場で撮影した 2018 年 2 月 11 日から 2 月 14 日における 11 時の定点カメラの画像である。地面から供試体を設置している架台までの高さは約 1.2m である。

定点カメラの画像からは、積雪と融雪の繰返しが短時間で生じていることがわかる。このことから、太陽光が差し込む地において、積雪が残りやすい地面近くを除き、最高積雪高さに至る高さのコンクリートは連続して雪に埋もれることはなく、融雪水による湿潤、大気に曝されることによる乾燥を繰返し受けることがわかる。この乾湿繰返しを非凍結期だけでなく、冬期間においても受けるのが中国山地の特徴であり、中国地方におけるコンクリート構造物の凍害は、この点も加味すべきであるといえる。

表-2 日本海沿岸 22 都市における新積雪密度<sup>1)</sup>

都市	雪密度 (g/cm <sup>3</sup> )	都市	雪密度 (g/cm <sup>3</sup> )
稚内	0.058	輪島	0.073
留萌	0.047	高田	0.064
札幌	0.061	富山	0.063
帯広	0.059	長野	0.048
寿都	0.045	金沢	0.069
函館	0.048	高山	0.056
青森	0.043	福井	0.082
秋田	0.066	敦賀	0.073
酒田	0.071	鳥取	0.073
山形	0.052	松江	0.077
新潟	0.074	彦根	0.061

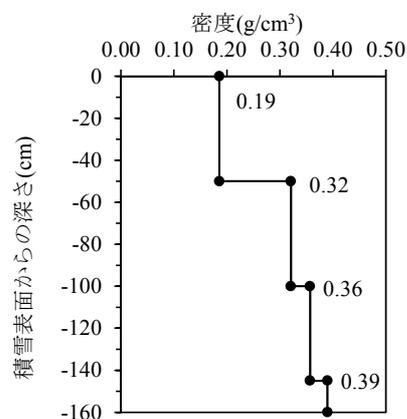


図-1 蒜山における積雪の密度



図-2 蒜山暴露場の定点カメラ画像

(2) 中国地方における凍害事例調査

中国地方における凍害事例調査は、公共構造物を主な対象として、それらの管理を行っている機関を中心に協力を依頼した。したがって、今回の調査では、民間団体または個人で管理している建築物は調査の対象となっていない。調査は、依頼先に調査票を送付し、そこに記入された事項を集計する方法で行った。調査票の記入項目は、「所在地（緯度・経度）」、「構造種別」、「変状発生部位」、「変状発生部位の方位」、「竣工年あるいは供用年数」、「凍害と判定した変状」、「画像あるいは変状展開図」、「変状発生部位への水の供給源・経路」、「推定される劣化のメカニズム・進行等」、「周辺環境の特徴」、「凍結防止剤の影響の有無」および「詳細調査（非破壊試験やコア採取）の実施の有無」である。調査期間は平成28年8月～平成29年2月であり、期間内に77件、91部位についての回答が得られた。回答のあった構造物の種類と件数は、橋梁62件、道路11件、擁壁2件、駐車場1件、ダム1件である。今回の調査は公共構造物が主な調査対象であったこともあり、橋梁に関する回答が多く、その中でも橋台の堅壁、橋脚の梁部等の橋梁下部工に関する回答が全体の6割もあった。図-3に中国地方における凍害危険度と調査により得られた凍害構造物の所在地点を示す。凍害危険度が0となる地域においても凍害構造物の事例があることがわかる。

黒丸：凍害危険度1と判定された地点  
 白丸：凍害危険度0と判定された地点  
 灰丸：事例調査で凍害と判定された構造物の所在地点



図-3 凍害危険度と凍害構造物の所在地点

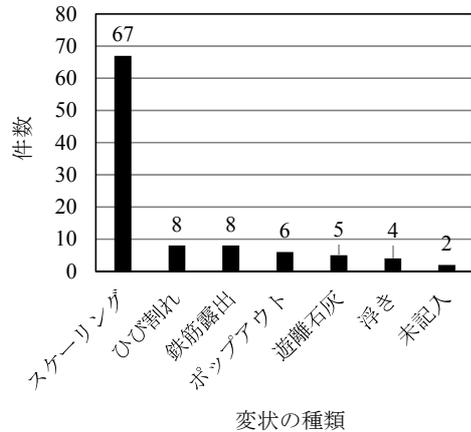


図-4 変状の種類別による集計結果

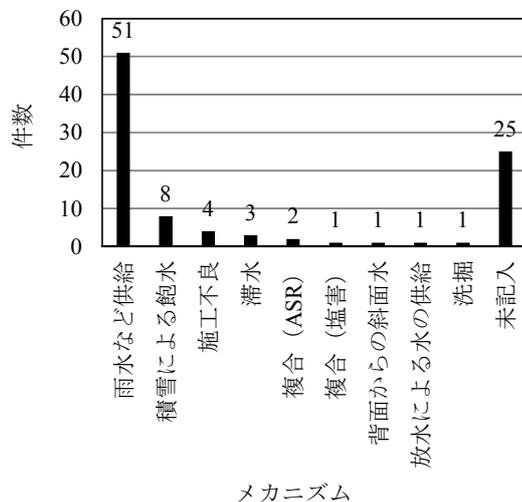


図-5 変状発生メカニズムによる集計結果

以下、今回の事例調査で得られた結果の一部を示す。  
 図-4に確認された変状の種類別の集計結果を示す。確認される変状としては、スケーリングが最も多く、ひび割れ、鉄筋露出の順になった。  
 図-5に変状発生のメカニズムごとに集計した結果を示す。雨水などの供給と積雪による飽水によって変状が発生しているという場合が大半であった。回答が得られた中で変状発生部位は橋梁堅壁に多く、橋梁翼壁や擁壁側壁では少なかったこともあり、背面からの斜面水などの影響を受けるものは少数であった。  
 このように、中国地方においても、雨水が供給されやすい箇所において凍害が発生しており、特に橋梁においては排水装置が重要になることがわかる。



写真-1 橋梁の地覆に生じたスケーリング



写真-2 桁に生じたスケーリングと鉄筋露出



写真-3 階段側面に生じたエフロレッセンス



写真-4 橋梁の桁に生じたポップアウト



写真-5 軒先の剥落と鉄筋露出



写真-6 独立柱の頂部に生じたひび割れ



写真-7 橋台に生じたスケーリング



写真-8 建物に生じたひび割れと防水層の膨れ



写真-9 庇の対策の例(室蘭)

## 2.3 九州における凍害の事例とその特徴

### (1) 調査の概要

北海道や東北などの寒冷地域における凍害は、コンクリート構造物に致命的な損傷を与える劣化として認識され、長年にわたり研究がなされてきた。得られた成果は設計面および材料・調合面で対策として適切に取り入れられ実施されてきた結果、近年では凍害を生じたコンクリート構造物は見られなくなりつつある。一方、九州を中心とする温暖地域では凍害は生じにくいと考えられてきた。日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事<sup>3)</sup> 26 節「凍結融解作用を受けるコンクリート」に示される凍害危険度の分布図においても、阿蘇・雲仙周辺の、標高が高い山岳上部の限られた範囲において凍害危険度が危険度 1「ごく軽微」とされるほか、内陸部において、「品質の悪い骨材を用いブレンコンクリートとした場合の凍害発生危険地域」とされている。しかし、「ごく軽微」以下の危険度であるにもかかわらず、凍害を生じた事例は現在でも多く確認され、また、上記危険地域以外の場所においても凍害事例は散見される。九州のような温暖地域においては凍害に対する知識は十

分ではなく、適切な対策が施されていないことも一因と考えられる。同様に、凍害に対する関心のレベルも高くないため、劣化の状況や特性も十分には把握されていない。こうした背景を踏まえ、九州凍害環境 SWG では、九州におけるコンクリート構造物の凍害の全体像を把握すること、また、九州で生じる凍害が寒冷地で見られる一般的な凍害と比較して、どのような特徴を有するかなどを中心に検討した。本調査では、九州内において凍害が疑われる変状を生じたコンクリート構造物を対象として、委員らが把握していたもの、ならびに新たに情報提供頂いたものを中心に、外観調査を行った。

### (2) 調査結果

凍害が疑われる変状を生じた構造物について、以下に代表的な事例を示し、九州における凍害について、一般的な凍害との相似点および相違点を述べる。なお現時点で凍害かどうかの最終判断ができていない事例もあるが、表記が長くなるので以後、「凍害が疑われる変状を生じた構造物」を、単に「対象構造物」あるいは「事例」と表記する。

対象構造物の例を**写真-1~8**に示す。多くの事例が、

先の凍害危険度マップにおいて、「コンクリートの品質が良くない場合には発生する可能性がある」地域または凍害の危険度が1の地域に含まれていたが、福岡市郊外の山間部や屋久島中腹など、これら以外の地域においても事例が確認された。

凍害による代表的な変状であるスケーリング（写真-1）やひび割れは多くの事例で見られた。これらの劣化が進行し、鉄筋露出（写真-2）に至っている事例も見られた。そのほか多く見られた事例として、ひび割れからのエフロッセンスがある。ひび割れの内部から染み出しているものや、ひび割れの直下につらら状に析出しているもの（写真-3）があった。これらは、ひび割れ部位に水分の供給が継続し、ひびわれが水の通過経路となっていることを示しており、劣化の更なる進行が懸念される。なお、今回の事例中、ポップアウトは比較的少なかった（写真-4）。

凍害による変状は、一般に、融雪水の供給量が多い屋上周辺や庇などで生じやすく、とくに温度変化が大きくなる突出部や隅角部で顕著になるとされる。今回の調査においても同様な傾向が見られ、屋根スラブの軒先（写真-5）や庇、パラペットなどにおいて劣化が多く見られたほか、外柱頂部の突出部（写真-6）においても変状が生じていた。

また、水の滞留する場所や水の供給を受けやすい場所で劣化が顕著に生じる事例も多く見られた。福岡市内の山間部の橋梁（写真-7）では、背面からの水の供給が多い北側の橋台で変状が生じていた。写真中、橋台上部の張出し部分から滴下した水滴がちょうど当たる部分で顕著な変状が見られた。

建築物においては、躯体コンクリートの劣化に先立って仕上げの劣化が進行し、そこから水分が侵入して凍害が生じている事例が多く見られた。仕上げの塗膜の内側に水が滞留している事例もあった（写真-8）。降水等が劣化した防水層から浸入し、コンクリートのひび割れや剥離した塗膜とコンクリートの界面などを伝って剥離していない箇所できき止められて塗膜の内側に留まっているものと考えられる。このように多少の差異はあるものの、個々の変状を見ると、九州においても寒冷地と大差ないように思われる。次に全体の傾向について気候条件と関連させながら一般的な凍害と比較する。

厳冬期の寒冷地では、日最低気温が氷点下となる日には日最高気温も氷点下となることが多く、コンクリートは一度凍結すると日射が当たらない限り融解しにくい。このため、凍害は建物南面を中心に日射の当たる面で生じやすいとされる。一方、九州では、日最低気温が氷点下となる日においても日最高気温が氷点下となることは稀である。したがって、夜間にコンクリートが凍結した

場合、日射が当たらない箇所でも、その日のうちに容易に融解することが多いと予想される。このような気候特性を反映し、今回の事例ではあらゆる方位で劣化が生じていた。

また、寒冷地における厳冬期の気温と異なり、九州で気温が氷点下10℃を下回ることは極めてまれである。従って低所の平地では凍害が生じにくく、標高500mを超える高所に位置するものが多い。ただし、内陸部の盆地である日田周辺では標高150~300m程度の比較的標高の低い場所でも事例が多く見られた。これは内陸であるため冬期に気温が低下しやすいこと、冬期も比較的湿度が高くコンクリートが湿潤な状態に保たれやすいことなどが要因として考えられる。

対象建造物の竣工年は昭和30年から40年代のものが多く、最も築後年数の短いもので30年程度であった。九州における年間の凍結融解の回数は寒冷地と比較して1/2~1/4程度である。寒冷地においては早ければ10年程度で劣化を生じると比較し、九州では、凍害が生じる場合でも、より長い年月を経過して変状が顕在化するものと考えられる。これらのことが上記年代の建造物に劣化事例が多いことと関連している可能性がある。ただし、近年は温暖地域においても主としてワーカビリティ向上の目的からAE剤の使用と確実な空気連行がなされていることなどから、比較的新しい建造物で事例が少ないことも考えられる。なお、九州における凍害による変状の程度が寒冷地における場合と比較して軽微であることは、現存事例が多い理由とも考えられる。

これらに加え、北海道ではあまり見られないコンクリート製の庇（写真-9）は室蘭における対策の例）や水の溜まりやすい納まりなど、設計上の配慮がなされていないことなども九州における凍害の特徴であるといえる。

九州の別の特徴として、雲仙、阿蘇、霧島、えびのなどの火山・温泉地の近隣に位置する地域では酸性ガスの影響を受けやすく、凍害と化学劣化との複合劣化が疑われる事例も多いことも挙げられる。同様に、土木建造物の一部では周辺での凍結防止剤の使用の影響を受けている可能性があり、塩害との複合劣化が想定される。

## 2.4 地域の凍害環境指標の検討

凍害に対する地域の外的要因（気象環境条件）の危険度を示した資料としては、長谷川の凍害危険度の分布図が広く知られており、日本建築学会 JASS5<sup>3)</sup> や、コンクリート診断技術<sup>4)</sup> などの刊行物にも記載されており、貴重な資料として現在でも用いられている。

長谷川の凍害危険度の分布図は、気温を中心とする気象データを用いた上で、融雪水による水分の供給に対して重み付けを行って凍害危険度を算出していることが特徴である<sup>5)</sup>。凍害危険度を6段階の凍害危険度にグレー

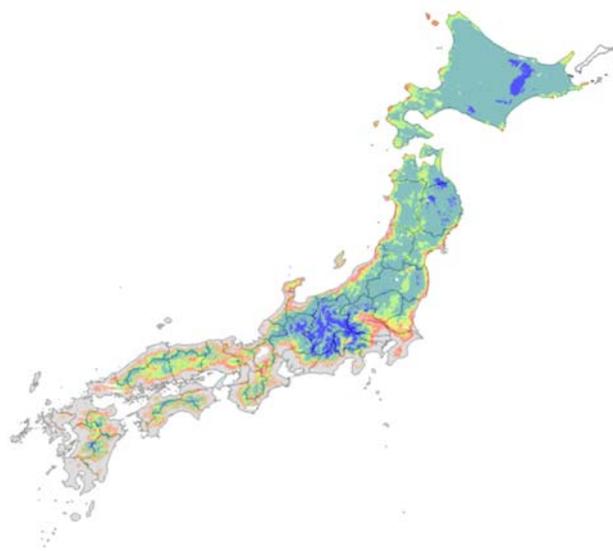


図-6 FD-CIによる凍害環境マップ

ド分けしたものを等値線で示している。当時使用された気象データは、1965年から1970年にかけてのものであり、凍害危険度の算出地点は全国140地点の気象観測所であるが、詳細な地点の凍害危険度の判定まで行うことは難しい。

一方で、近年はアメダスデータ等多くの気象統計データが容易に入手可能となっており、成田らは、長谷川の考え方を踏襲した上で、地点ごとの詳細な危険度と算出するためにメッシュ気候値に着目した176地点の現地調査データも踏まえて凍害損傷リスクマップを作成している<sup>6)</sup>。メッシュ気候値は過去30年間の観測地から1km四方ごとの平年値を計算により推定した気象データであり、他の気象統計データと比較して、より詳細な地点における指標の算出が可能である。成田らが使用したメッシュ気候値2000は、気温や最深積雪などの気象データについて1971年から2000年までを統計期間とした平年値を用いて作成されたものであるが、最新のデータは2010年までのものに更新されている。

さらに、最近の研究として、濱らは夏期の乾燥がコンクリートの細孔構造を粗大化させポテンシャルとしての耐凍害性を低下させる影響を<sup>7), 8)</sup>、気象環境条件の評価に反映させ、凍結融解の環境条件を表すASTM相当サイクル数<sup>9)</sup>と組み合わせた指標として、FD-CI(凍害環境指標:Frost Damage-Climate Index)を提案し、最新のメッシュ気候値2010を用いてマップ化した(図-6)<sup>10)</sup>。この図によると、本WGで着目した中国地方および九州地方の内陸、山間部は北海道と同等の凍害環境にあることがわかる。

### 3. 塩害環境評価に関する研究

本委員会の塩害環境WGでは、コンクリート工学会、

土木学会、建築学会で過去10年の間に投稿された塩害環境評価に関する研究についてまとめるとともに、塩害の劣化外力となる飛来塩分の測定・評価方法、暴露場および暴露試験情報、さらには最新の塩分の計測・分析手法の情報をまとめた。

ここでは、既往の飛来塩分測定方法の概要と、近年その使用が増えている薄板モルタル供試体による飛来塩分測定法および飛来塩分環境評価事例を示す。さらに、本章では、2017年に日本非破壊検査協会で制定された「硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法」(NDIS 3433)についてその概略を記す。

#### 3.1 各種飛来塩分捕集方法と薄板モルタル供試体による飛来塩分環境評価事例およびその課題

##### (1) 各種飛来塩分の捕集方法

海洋からの飛来塩分量を測定する方法として代表的なものが土研式捕集器による方法<sup>11)</sup>が挙げられる。捕集器の外観を写真-10に示す。同図に示したように、この測定方法では10cm×10cmのステンレス板に付着した塩分をタンクに貯留する。その塩分濃度を測定することにより、飛来塩分量を測定する。測定間隔は、概ね1ヶ月単位で行うことが多い。測定した飛来塩分量は、mg/dm/day(mdd)という単位で整理される。また、同捕集器は一方向の方位だけでなく、4方位の飛来塩分量を測定するように改良された捕集器も用いられている<sup>12)</sup>。

上記の土研式飛来塩分捕集器は大型であり、重量がかさむため設置場所の制約を受けることが課題である。それを克服する一つの方法として乾燥したガーゼに飛来塩分を捕集させる手法<sup>13)</sup>としてドライガーゼ法があり、その概要を図-11に示す。

この方法ではガーゼに付着した塩分を精製水などに溶解させて、その溶液の塩分量を測定することにより飛来塩分量を評価する。塩分の捕集面積が土研式と同様のため、ドライガーゼ法による飛来塩分量の単位は土研式と同様になる。なお、ドライガーゼ法は、風が通り抜ける構造となっており、どの方位からどれだけの飛来塩分が付着したのかを、把握することは困難である。そこで、飛来塩分の捕集面を8面とし、かつ風がガーゼを通り抜けない構造の捕集器も提案されている<sup>14)</sup>(写真-11参照)。

土研式飛来塩分捕集器では、大気中に漂う微細な塩分粒子がステンレス板の表面に付着しきれない可能性がある。一方、ドライガーゼ法では、土研式とは逆で、波しぶきのような粒形の大きい塩分を捉えきれないことが予想される。また、両者ともに捕集面に降雨や降雪が付着するため、その影響を防ぎきれない可能性がある。

さらに、実際のコンクリート構造物への塩分浸透を考慮すると、構造物の表面に付着した塩分は全てが構造物

の内部に浸透するのではなく、洗い流しやコンクリート多孔体への吸着により一部の塩分が浸透する。そのため、構造物へ飛来して浸透する塩分量を評価するためには、コンクリートに近い材料を用いることが適切な飛来塩分量の把握につながる。そのような考えのもと、佐伯ら<sup>15)</sup>は直径100mm・厚さ10mmのモルタル円盤供試体による飛来塩分計測手法を提案している。

近年では、モルタル円盤供試体よりもより小型な薄板モルタル供試体<sup>16)</sup>(縦40mm・横40mm・厚さ5mm)が市販され使用実績が増えている(写真-12参照)。

## (2) 薄板モルタル供試体による飛来塩分環境評価事例

耐久的な構造物の構築や合理的な維持管理のためには、劣化外力を定量的に評価する必要がある。ここでは、近年使用実績が増えつつある薄板モルタル供試体<sup>16)</sup>による飛来塩分測定事例を示す。

薄板モルタル供試体はその貼り方によって、構造物に付着した雨水が流水となり薄板モルタル供試体に影響を与えることが想定される(図-12参照)。そこで、沖縄県の4暴露試験場および10橋梁で貼り付け方の違いによる塩分捕集の差異を検証した結果、貼り付け方の違いによる影響は、図-13に示す様に認められなかった<sup>17)</sup>。

また、沖縄県宮古島の伊良部大橋暴露場においては、薄板モルタル供試体と土研究式(4方向)の比較を行った。その結果を図-14に示す。その結果、4つのデータのみであるが、両方法は良い相関を示した<sup>17)</sup>。

新潟県を含む日本海側沿岸地域は、沖縄県と同じように厳しい塩害環境にあることが知られている。文献<sup>18)</sup>では、塩害の劣化外力として海からの飛来塩分環境の評価を薄板モルタル供試体にて検討している。ここでは、各暴露地点の海岸条件を考慮した海岸からの距離の補正を行うことで評価を行った。補正で考慮されているのは、海岸種類(砂浜系、岩礁系)、消波施設(消波ブロック、防波堤)の有無、標高、風向、波エネルギーである。

補正距離算出式は式(1)となる。

$$x = (x_0 + 25z) \frac{1}{\cos \theta} \cdot \frac{39.6}{W_0} \quad (1)$$

ここに、 $x$ : 補正後の距離 (m)

$x_0$ : 実際の海岸からの距離 (m)

$\theta$ : 最多風向と汀線直角方向とのなす角度

$z$ : 標高 (m)

$W_0$ : 対象地点の波エネルギー (kW/m)

上記の補正距離と表面塩化物イオン濃度の関係を図-15に示す。ここで、表面塩化物イオン濃度は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比を50%、単位セメント量 $350\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートを想定して薄板モルタル供試体への塩分浸透量から換算している。

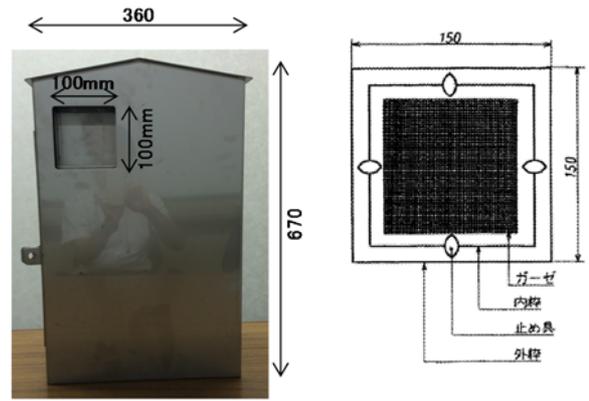


写真-10 土研式捕集器

図-11 ドライガーゼ概要



写真-11 8方位ドライガーゼ捕集器

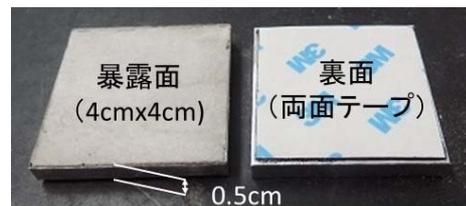


写真-12 薄板モルタル供試体

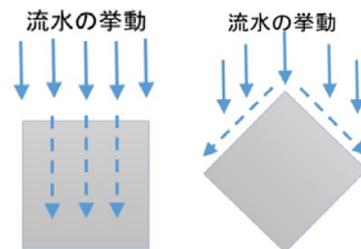


図-12 貼り付け方の違いによる流水の影響

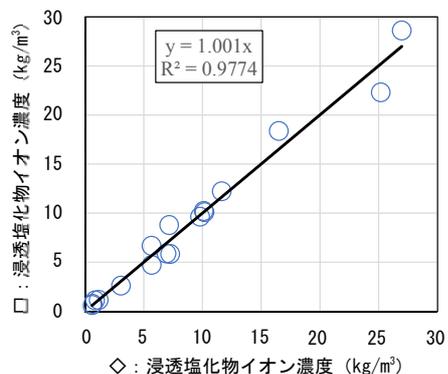


図-13 貼り付け方の違いによる差異

図-15 より、海岸条件を考慮した距離補正によって、表面塩化物イオン濃度を高い精度で推定できることが確認できる。なお、海岸の状態を目視で「岩礁系」、「砂浜系」、消波施設の有無で分類したが、本研究の調査の範囲では、これらの影響は明確には認められていない。

コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の塩分浸透解析を行う際に必要な境界条件を与えるものであり、式(1)の有用性は多くの地域でも検証する必要がある。

### (3) 飛来塩分環境評価の課題

図-15 の破線で囲んだ地点は、防風林など障害物のある特殊な環境であり、これらの影響の評価は今後の課題である。また、式(1)では、標高が1m 高くなることは海岸からの距離が 25m 増える事に相当するとする 2007 年度版コンクリート標準示方書[維持管理編]の仮定を用いている。この仮定は局所的な上昇気流や、地表近くで障害物の無い場合には正しいものと思われる。しかし、海岸構造物や建物による局所的な上昇気流や、建物群による障害物がある場合には、地上高さが高い方が地表近くよりも飛来塩分量が増える可能性があり、その事例を図-16 に示す。

図-16 は、海岸近くの火力発電所構内の 5 地点で構造物の高さ方向に数枚の薄板モルタル供試体を貼り付けて飛来塩分量を測定した結果<sup>19)</sup>である。ここで、縦軸の飛来塩分量増加割合とは、各観測地点における構造物高さ 2m での飛来塩分量を基準値として、各構造物高さの飛来塩分量を基準値で除した値である。同図より、海岸近くで構造物が密集する火力発電所では、構造物の地表近くよりも高さが高い場合において飛来塩分量が増加する場合や、高さに関わらず飛来塩分量がほぼ一定となる傾向が認められた。このような構造物などによる局所的な影響を評価するためには数値解析<sup>20)</sup>の活用が必要になると考えられる。

### 3.2 塩化物イオン量の簡易試験方法

2003 年の JIS A 1154 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法)では粗骨材の最大寸法の 3 倍以上の径のコア採取が標準であり、分析試料の調製や試験室での分析を要することなどから、構造物への損傷の低減や試験の迅速化が望まれていた。

このような背景から、2017 年に日本非破壊検査協会より、そこで、NDIS 3433 (硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法) (以下、NDIS) が制定された。ここでは、NDIS の概要について説明する。

図-17 に NDIS と JIS の試験方法の比較を示す。NDIS では試料採取の方法をドリル削孔あるいは小径コア試料を標準としており、分析に必要な試料のはかりとり量も少なくてもよいこととされている。

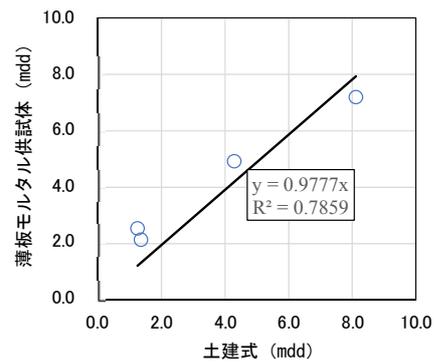


図-14 土研式と薄板モルタルの比較

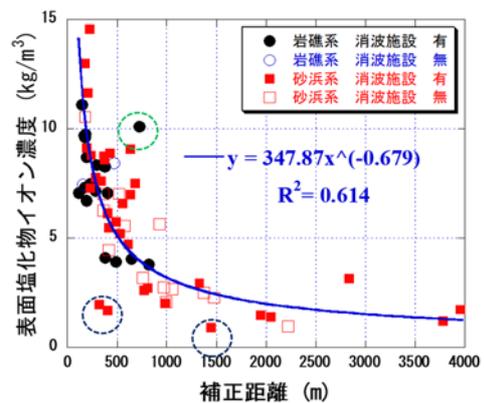


図-15 補正距離と表面塩化物イオン濃度の関係

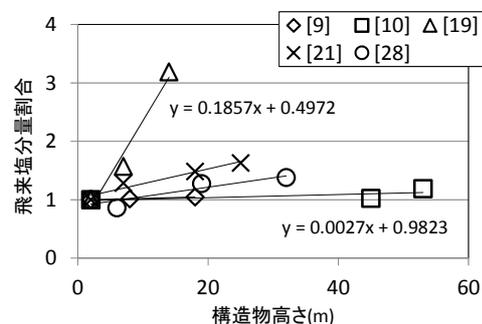


図-16 構造物高さで飛来塩分量の関係

試料調整は、JIS では 150 $\mu$ m のふるいを全通するまで微粉砕するがこの調整に時間を要する。NDIS ではドリル削孔粉であれば粒が無くなる程度でよいとし、試験結果の影響がほとんどないことを実験で確認している<sup>21)</sup>。また、コアの切断は湿式カッターを用いてもよいとし、試験の簡易化を図っている。

塩化物イオンの抽出は、JIS では硝酸を用いて煮沸溶解した溶液をろ過するが、NDIS では有機酸や炭酸塩を用いて全塩化物イオンを抽出する方法を採用し、20 分程度の作業で抽出が可能である。また、塩化物イオン量の測定について、NDIS ではモル法 (検知紙, 検知管)、電量滴定法、イオン電極法などのフレッシュコンクリートの塩分量測定に用いられている簡易的な測定器を適用し、調査現場でも測定が可能なる方法となっている。

これらの一連の方法により、迅速な方法の組み合わせ

であれば、調査現場で試料採取を始めてから 1~2 時間程度で試験結果が得られることになり、屋外での構造物調査や暴露試験などにおいて、現場で試験結果を得て、調査計画や試料採取計画を立案するのに有効である。また、このような簡易試験法で問題になるのが試験精度であるが、NDIS で提案されている一連の方法を適用した場合でも、一定の精度（例えば JIS 法の ±10%程度）の試験結果が得られることが確認されている<sup>22)</sup>。

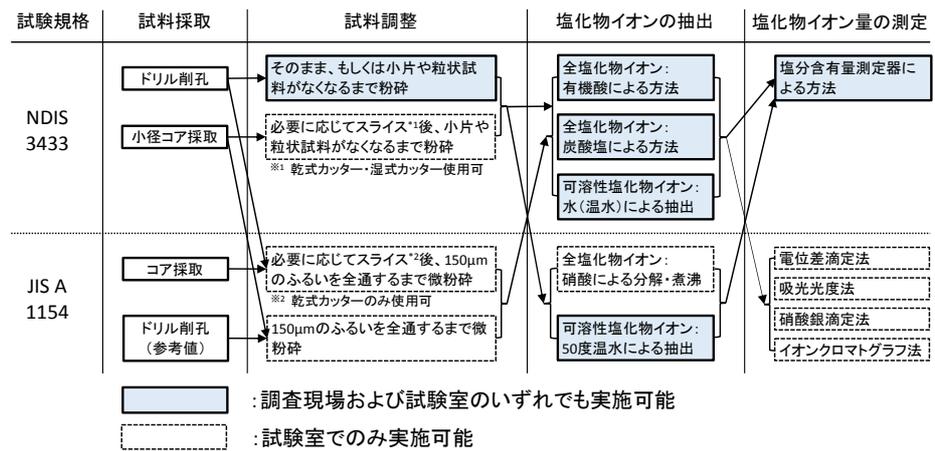


図-17 NDIS と JIS の試験方法の比較

#### 4. 土壌劣化

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を阻害する変状の要因として化学劣化が挙げられる。九州には、阿蘇山や霧島山、桜島など現在も活動する火山が多く、その周辺には湯布院や別府、霧島など温泉地帯が広く分布している。また、これらに旧産炭地を加えて硫酸塩土壌も散見される。本 SWG では、これらに起因するコンクリートの劣化に関して、土壌を経由して生じるものを中心に、文献や委員らのこれまでの研究を中心に調査を行った。

##### (1) 強酸性環境

上記のように九州には火山・温泉地帯など強酸性土壌が広く分布し、これらに接する土木構造物、例えば九州を横断して建設された大分自動車道の工事では、工事に先駆けて入念な調査と実験が行われた<sup>23)</sup>。塚原温泉では pH1~2 程度、明礬温泉では pH2~3 程度の強酸性の温泉が湧出しており、周辺土壌も強い酸性を示している。一般に、強酸性環境下では、水セメント比を低くするなどのコンクリートの緻密化による対策はむしろ逆効果であることが指摘されている<sup>24)、25)</sup>。同工事でも、コンクリートの増厚や表面の紡織ライニング、土壌のアルカリか処理などの対策が施された<sup>26)</sup>。近年では、霧島火山帯の橋梁で、シラスを細骨材として用いたコンクリートが強酸対策として施工され、効果を得ている<sup>27)</sup>。

##### (2) 弱酸性環境

建築においては、コンクリート構造物が温泉地帯などの硫酸酸性地盤に建設される場合であっても強酸性の硫酸地盤に直接曝されることは稀であり、pH4~5 程度の比較的 low 濃度の硫酸酸性地盤に接することが多い。しかし、弱酸性環境における劣化の進行には数年から十年単位の時間を要し、研究例も少ない。ただし、委員らの研究に



写真-13 霧島火山帯における暴露実験 (奥の土壌中にも埋設)

あるように、強酸性環境でのコンクリートの劣化と弱酸性環境での劣化は反応プロセスや生成物が異なることが多いため<sup>28)</sup>、強酸性環境で得られた結果から弱酸性環境での劣化を予測・評価する、いわゆる促進試験は適切ではない。従って実験に相当の時間を要することになるが、霧島火山帯において 10 年を超える暴露実験も行われてきた<sup>29)</sup> (写真-13)。そのこれらの結果から、弱酸性の硫酸土壌においては、低水セメント比や混和材料の使用によってコンクリートを緻密化することで対処可能であることが明らかになっている。

##### (3) 硫酸塩土壌

旧産炭地付近でボタを用いて造成された住宅地などで、委員らの研究にあるように、床下でコンクリート製束石や布基礎が劣化する事例がかつて見られた。地盤中の硫酸イオンが硫酸塩として床下に濃集し、エトリンガイトの生成や硫酸ナトリウムの結晶圧によりコンクリートが劣化した点で共通しており、地盤中に含まれる硫酸イオンが硫酸塩やコンクリートの劣化に影響を及ぼしていることが明らかとなった<sup>30)</sup>。床下に土壌を露出させないようにボタ基礎とした事例では劣化は軽微であった。また委員らの実験でも、コンクリートの緻密化や混和材の適切な使用により、劣化を低減できることが示されている<sup>31)</sup>。

## 5 おわりに

本研究委員会の活動を通して、長期暴露試験に欠かさない人作り(後継者の育成)、ノウハウやコンクリート工学の分野としての協力体制の共有化を図ったつもりである。本研究委員会の成果は、次の通りであったと考える。

- (1)九州・中国地域における凍害の実態、劣化外力の大きさを検討した。
- (2)九州・中国地域における凍害に関する暴露を開始し、試験データを蓄積しはじめた。
- (3)中性化、塩害、土壌劣化について、この10年の研究・試験技術等の動向を把握した。
- (4)暴露試験のあり方の議論、暴露試験の標準化、ノウハウ・データの扱い方等の共有化・情報整理を行い、2003年研究委員会で提案された「コンクリートの長期暴露試験マニュアル」を改訂した。
- (5)コンクリート分野の次世代の暴露試験のリーダーの育成、試験協力ネットワークが構築された。

2003-2004年度の研究報告書で、佐伯昇委員長が書かれたまえがきの締めくくりに、「暴露試験を主体とした研究は長い年月が必要であり、データの蓄積、有効活用の面からも次の研究委員会に引き継がれることを希望している」とある。この言葉を、本研究委員会委員一同で噛みしめ、後生に送り、気持ちを託したい。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会北海道支部：積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会報告書，2010.3
- 2) 山田穰：日本海沿岸 22 都市における新積雪密度の度数分布と平均値について，防災科学技術研究所研究報告，第 52 号，pp.51-67，1993.12
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，pp.203-205，2012
- 5) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報，No.29，pp.248-253，1975
- 6) 成田健，小山慎一郎，三橋博三：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.1，pp.29-38，2008
- 7) 中村暢，濱幸雄，谷口円，乾燥による直径 40-2000nm の細孔量変化と温度時間積の関係，日本建築学会構造系論文集，No.713，pp.981-989，2015.7
- 8) 坂口朗央，濱幸雄：乾燥によるモルタルの細孔構造変化を表す温湿度時間積，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.16，pp.79-84，2016.10
- 9) 浜幸雄，松村光太郎，田畑雅幸，富板崇，鎌田英治：気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.9-16，1999.3
- 10) 松本皓太，Nguyen Xuan Quy，崔亨吉，濱幸雄：コンクリートの凍害劣化を対象とした気象指標 (FD-CI) の提案，Proceedings of the 13th Korea/Japan Joint Symposium on Building Materials & Construction，pp.103-108，2017.8
- 11) 建設省土木研究所：飛来塩分量全国調査(1)，土木研究所資料，1985年
- 12) 真喜志和広，山田義智，富山潤：塩害環境下における飛来塩分量特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，

- Vol.28，No.1，pp.929-934，2006.7
- 13) 日本工業規格 JIS Z 2382：大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定
- 14) 藤田竜輔・宮里心一・菊池徹・森山守：8 方位を考慮した飛来塩分の調査結果，第 58 回日本学会材料連合講演会講演論文集，pp.95-96，2014.10
- 15) 佐伯竜彦，竹田光明，佐々木謙二，嶋毅：飛来塩分環境の定量評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.66，No.1，pp.1-20，2010年
- 16) 例えば，吉次優祐，富山潤，松田愛子，佐伯竜彦：薄板モルタル供試体を用いた PCT 桁橋上部工における塩害環境調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.727-732，2017.6
- 17) 八神孝佑，富山潤，須田裕哉，藍檀オメル，砂川恒雄，風間洋，比嘉正也：薄板モルタル供試体による沖縄県の塩害環境の定量評価に関する基礎研究，土木学会西部支部沖縄会第 7 回技術研究発表会，pp.32-33，2018.1 (沖縄)
- 18) 秋山広太郎，鈴木志朗，佐伯竜彦，斎藤 豪：海岸条件を考慮した飛来塩分環境の定量評価に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 V，2018 (投稿中)
- 19) 崎原康平，石川嘉崇，石川学，山田義智，富山潤：火力発電所における塩害環境評価に関する基礎的研究，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，第 17 巻，pp.593-598，2017.10
- 20) 富山潤：コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.874-879，2014.6
- 21) 濱崎仁，湯浅昇，太田達見，森濱和正：塩化物イオン量試験におけるドリル削孔試料の採取および調整方法の影響，日本非破壊検査協会平成 25 年度春季講演大会梗概集，pp.23-26，2013.6
- 22) 原田七瀬，濱崎仁，長井義徳，湯浅昇，川俣孝治，久富真悟：硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法に関する適用性の検証，日本非破壊検査協会平成 28 年秋季講演大会講演概要集，pp.129-132，2016.10
- 23) 徳光善治，松下博通，市原誠夫ほか：別府温泉におけるコンクリートの腐食試験，コンクリート工学，Vol.26，No.11，pp.10-19，1978.11
- 24) 雲仙と温泉とコンクリートの耐蝕性に就いて：雲仙コンクリート研究会，1964
- 25) 蔵重勲，魚本健人：コンクリートの耐硫酸腐食劣化に関する考察，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.383-389，2000
- 26) 森省吾，三浦泰博，小原富徳，城戸靖彦：温泉地における RC アーチ橋の耐震補強工事 -大分自動車道 別府明礬橋-，プレストレストコンクリート工学会，第 24 回シンポジウム論文集，pp.79-82，2015.10
- 27) 森高康行，武若耕司，山口明伸，多々良勇貴：温泉環境下に曝露したシラスコンクリート中の劣化モニタリングに関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2071-2076，2009
- 28) Tomoyuki Koyama, Yasunori Matsufuji, Shizuo Harada, Toshio Yonezawa, Kyoichi Tanaka, Etsutaka Maeda and Fumio Oshida : DETERIORATION PROCESS OF CONCRETE IN WEAK SULFURIC ACID SOIL, 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure 2010, Vol.1, pp.213-220, 2010.10
- 29) 原田志津男，松藤泰典，小山智幸，米澤敏男，田中恭一，前田悦孝：硫酸酸性地盤に 10 年間暴露された高品質コンクリートの物理性状，日本建築学会構造系論文集，第 604 号，pp.1-8，2006.6
- 30) 松下博通，佐川康貴，佐藤俊幸：地盤調査結果に基づくコンクリートの硫酸塩劣化地盤の分類，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp.507-519，2010.12
- 31) 伊藤是清，小山智幸，原田志津男，片村祥吾，平山茉莉子：フライアッシュ外割混合コンクリートの耐硫酸性および耐硫酸塩性に関する研究，都市・建築学研究，九州大学大学院人間環境学研究院紀要，第 28 号，pp.165-170，2015.7