

論文 浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察

林 大介^{*1}・坂田 昇^{*2}・田口 史雄^{*3}・遠藤 裕丈^{*4}

要旨: シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの耐久性について、凍害および塩害の複合劣化環境下における5年間の暴露試験および塩害環境下における6年間の暴露試験の結果を基に考察した。その結果、コンクリート表面の撥水性は2年間程度まで維持され、その後消失するものの、吸水防止層は6年間以上消失しないこと、塩化物イオンの浸透量が低減されること、相対湿度80%程度の沿岸部ではコンクリートの含水量が相対湿度40%程度の場合に相当する量まで低減され、そのために中性化が進行する可能性があることが明らかとなった。

キーワード: コンクリート, 塩害, 凍害, 浸透性吸水防止材, シラン・シロキサン系

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を簡易に向上させる方法として、浸透性吸水防止材を塗布する方法がある。浸透性吸水防止材は、コンクリート表面に塗布することによって内部に浸透し、水の浸透を抑制する層を形成する材料である。

最近では、様々な研究^{1), 2), 3)}において、多岐にわたる浸透性吸水防止材の性能を統一的に評価しようとする検討が行われるなど、技術的な知見が蓄積されつつある。その一方で、浸透性吸水防止材自体の耐久性が明らかとなっていないことなどの課題もあり、更なる知見の蓄積が必要とされている。

本検討では、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの耐久性について、凍害および塩害の複合劣化環境（以下、複合劣化環境下）である北海道の沿岸部における暴露試験5年目までの結果と、塩害環境（以下、塩害環境下）である岡山県の沿岸部における暴露試験6年目までの結果を基に考察した。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

(1) コンクリートの使用材料および配合

複合劣化環境下における暴露試験と、塩害環境下における暴露試験の使用材料および配合を、それぞれ表-1 お

表-1 コンクリートの使用材料

暴露環境	項目	記号	摘要
複合劣化環境 (北海道)	水	W	上水道水, 密度: 1.0g/cm ³
	セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
	細骨材	S1	新十津川産川砂, 表乾密度: 2.58g/cm ³ , 粗粒率: 2.75, 吸水率: 2.26%
	粗骨材 1	G1	毘砂別産砕石, 表乾密度: 2.66g/cm ³ , 実績率: 58.8%, 吸水率: 1.60%
	粗骨材 2	G2	毘砂別産砕石, 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 実績率: 58.3%, 吸水率: 1.57%
	膨張材	E	エトリンガイト系
	混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤 (変性リグニンスルホン酸系)
塩害環境 (岡山県)	水	W	工業用水/上澄水, 密度: 1.0g/cm ³
	セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
	細骨材 1	S1	倉敷市堅場島沖産除塩海砂, 表乾密度: 2.54g/cm ³ , 粗粒率: 2.61
	細骨材 2	S2	総社市新本字高本産山砂, 表乾密度: 2.54g/cm ³ , 粗粒率: 2.67
	粗骨材	G1	倉敷市福江産砕石, 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 粗粒率: 6.23
	混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-2 コンクリート配合

暴露環境	Gmax (mm)	スラン プ(cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C%)	
						W	C	E	S1	S2	G1		G2
複合劣化環境	40	8	44.3	5.5	43.5	138	312	30	765	-	477	583	1.00
塩害環境	15	18	55	4.5	50.1	189	344	-	668	168	869	-	0.75

*1 鹿島技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 土木構造・材料グループ チーフ兼首席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 首席研究員 (正会員)

*4 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員 (正会員)

よび表-2 に示す。

(2) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材

本試験では、シリコン分子を 80% 程度含有し、溶媒として水を使用するシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材⁴⁾を用いた。

(3) 供試体形状寸法

複合劣化環境下における暴露試験では、径 125mm および高さ 250mm の円柱供試体を用い、コンクリートの打込み後、28 日間の湿潤養生を行い、表面水分率が 5.0% 以下になってから全面に 200g/m² のシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した。

また、塩害環境下における暴露試験では、径 100mm および高さ 200mm の円柱供試体を用い、コンクリートの打込み後、28 日間の湿潤養生を行い、表面の水分を拭き取った後、全面に 200g/m² のシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した。

2.2 暴露試験方法

(1) 試験項目および方法

試験項目および方法を表-3 に示す。ここで、現地における供試体重量の測定については、スケーリングによる重量の減少が想定される複合劣化環境下のみで行った。

また、塩化物イオン量の測定について、複合劣化環境下の暴露試験では、供試体側面をエポキシ樹脂で被覆して浸透方向を一方向に制御したが、塩害環境下の暴露試験では、エポキシ樹脂による被覆を行わなかった。よって、塩害環境下の暴露試験で測定される塩化物イオン量には、側面より浸透した量も含まれる。

(2) 複合劣化環境下における暴露試験方法

2002 年 11 月に、北海道の日本海側に位置する石狩市浜益区の沿岸部に、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体と塗布しない供試体を設置し、暴露を開始した。供試体設置箇所は、写真-1(a)に示すように、急勾配の小規模河川の河口に位置しており、汀線より数メートルの距離にある。また、海からの強風による風雨および風雪があり、多量の飛来塩分が推察される環境にある。浜益区の 2002 年から 2007 年までの凍結融

表-3 試験項目および方法

項目	試験方法
供試体の外観	目視による観察
供試体の重量	現地における重量測定 (塩害・凍害環境のみ)
吸水防止層の深さ	割裂面に水を噴霧し、濡れ色にならない範囲を測定
塩化物イオン量	表面より 10mm 間隔の全塩化物イオン量を JIS A 1154 に準じて測定
中性化深さ	JIS A 1154 に準じて測定



(a) 複合劣化環境

(b) 塩害環境

写真-1 供試体設置箇所の状況

表-4 浜益区の凍結融解回数、降水量の合計および日照時間⁵⁾

西暦	最低気温ごとの凍結融解回数				降水量の合計(mm)	日照時間(h)
	-5~0℃	-10~-5℃	-10℃以下	合計		
2002	34	8	5	47	1256	1325.1
2003	31	16	6	53	943	1455.1
2004	43	12	6	61	1268	1354.8
2005	25	16	14	55	1400	1469.2
2006	45	12	5	62	1056	1407.3
2007	49	18	7	74	970	1645.2
平均	37.9	13.6	7.2	58.7	1148.8	1442.8
合計	227	82	43	352	6893	8656.7

表-5 現地測定の天候、気温および供試体数

年数	現地調査年月日	天候	浜益の気温 (℃)		現地測定供試体数	
			最高	最低	塗布有り	塗布無し
1 年目	2003.10.27	晴れ	13.9	6.8	30	30
2 年目	2004.11.26	晴れ	10.6	5.7	27	27
4 年目	2006.11.24	雪	3.7	-0.1	24	24
5 年目	2007.11.22	雪	-0.5	-4.7	21	21

解回数、降水量の合計および日照時間⁵⁾を表-4 に示す。

これまでに、暴露開始から 1 年目、2 年目、4 年目⁶⁾ および 5 年目の 4 材齢について試験を実施した。現地では供試体の重量を測定した際の天候、気温および供試体数は、表-5 に示すとおりである。

(3) 塩害環境下における暴露試験方法

2000 年 12 月に、岡山県倉敷市の沿岸部に位置する橋脚のフーチング上面に、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体と塗布しない供試体を設置し、暴露を開始した。供試体設置箇所は、写真-1(b)に

示すように、H.W.L よりも高い位置にあり、波が穏やかな環境にある。

これまでに暴露開始から2年目⁷⁾、4年目⁸⁾および6年目の3材齢について試験を実施した。ただし、6年目には吸水防止層の深さのみ測定を行った。

3. 試験結果

3.1 供試体外観

複合劣化環境下において5年間暴露を行った供試体を目視で観察した結果、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しなかった供試体ともに、ひび割れ、ポップアウトおよびスケリングは認められなかった。

この供試体に水を噴霧した際の状況を写真-1に示す。同写真に示すように、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の表面の撥水性は、暴露5年目においてほとんど認められなかった。これまでの調査結果も含めると、表面の撥水性は、暴露2年目まで若干認められたが、暴露4年目⁶⁾および5年目には、ほとんど認められない結果である。

塩害環境下における6年間の暴露試験においても同様の傾向であり、表面の撥水性は、暴露2年目⁷⁾まで若干認められ、4年目⁸⁾および6年目には、ほとんど認められなかった。

3.2 供試体の重量

複合劣化環境下における暴露試験の供試体の重量測定結果を図-1に示す。同図に示すように、暴露5年目までの全測定において、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の方が、塗布しない供試体よりも150g程度軽い結果となった。これは、コンクリートに含まれる水分量の違いによるものと考えられる。すなわち、各測定において、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体は比較的湿潤した状態にあったが、塗布した供試体では、外部からの水の浸透が抑制され、内部の水分が水蒸気として放出されていたことが考えられる。

3.3 吸水防止層の深さ

吸水防止層の深さの測定結果を図-2に示す。同図には、上面および底面の平均値を示した。同図より、複合劣化環境下の供試体では、暴露5年目までおおむね4mm以上の吸水防止層が確認された。また、塩害環境下の供試体では、暴露6年目までおおむね3mm以上の吸水防止層が確認された。

複合劣化環境下の供試体の方が、塩害環境下の供試体よりも、水セメント比が低いにも関わらず吸水防止層が深くまで形成される結果となったのは、塗布時にコンクリートの表面水分率を管理したためと考えられる。



(a) 塗布有り (b) 塗布無し

写真-1 表面の撥水性 (暴露5年目)

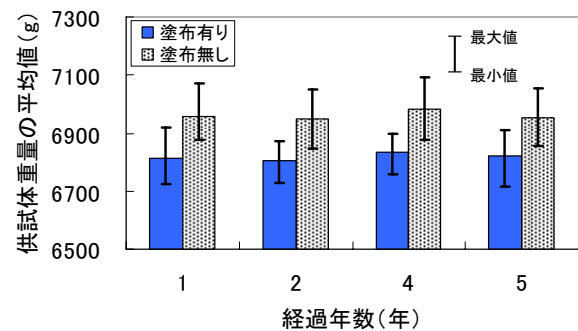


図-1 供試体重量

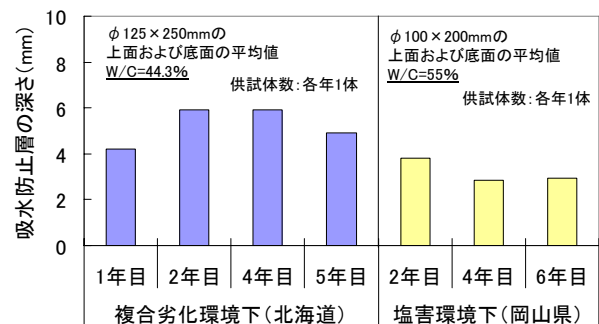


図-2 吸水防止層の深さ

また、吸水防止層の深さの経時変化については、複合劣化環境下の1年目の値が小さいことから分かるように、ばらつきが含まれる測定結果となっていることから、今後、さらにデータを蓄積して考察することが必要と考えられる。

3.4 塩化物イオン量

複合劣化環境下および塩害環境下の供試体の塩化物イオン量測定結果を、それぞれ図-3および図-4に示す。

複合劣化環境下の測定結果では、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の塩化物イオン量の方が、塗布しない供試体よりも少なくなった。暴露5年目までの結果を比較すると、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体では、深さ5mmの1.6kg/m³から深さ35mmまで拡散している傾向が認められるのに対し、塗布した供試体では、深さ5mmにおいて塗布した供試体の1/4程度となる0.4kg/m³であり、

それより内部にはほとんど拡散していなかった。この結果より、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体では、深さ4~6mmの吸水防止層よりも内部への水の浸透が抑制されたことに伴い、塩化物イオンの浸透が抑制されたことが考えられる。

また、塩害環境下の測定結果では、全体的に暴露4年目までに浸透した塩化物イオン量が少ないものの、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の塩化物イオン量の方が、塗布しない供試体よりも少ない結果となった。

複合劣化環境下の供試体の方が、塩害環境下の供試体よりも多量の塩化物イオンが浸透した理由として、海からの強風を受ける複合劣化環境の方が、風が穏やかな塩害環境よりも飛来塩分量が多量であったことが考えられる。

3.5 中性化深さ

複合劣化環境下および塩害環境下の供試体の中性化深さ測定結果を、それぞれ図-5 および図-6 に示す。これらの図には、中性化深さが時間の0.5乗に比例するものとした回帰式を示した。

いずれの暴露試験においても、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の中性化深さの方が、塗布しない供試体よりも大きな値となり、回帰式の定数である中性化速度係数が2.5~2.7倍程度の値となった。この理由として、前述のとおり、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したことによってコンクリートに含まれる水分量が減少し、結果として、中性化が進行しやすい含水量になったことが推察される。この結果を踏まえ、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの含水量について、次章の検討を行った。

4. 浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの含水量に関する考察

4.1 室内における重量測定の概要

複合劣化環境下で5年間暴露した供試体を回収し、91日間の水中浸漬後、表面の水分を拭き取って重量測定を行った。その後、21日間の105℃炉乾燥を行い、重量測定を行った。供試体数は、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しない供試体について各1体とした。

測定対象とした供試体には、現地における暴露1年目、2年目、4年目および5年目の重量測定結果があるため、これら4材齢の平均値と、上記の測定結果を対比させて検討を行った。

4.2 測定結果および考察

供試体重量の測定結果を図-7に示す。同図より、シラ

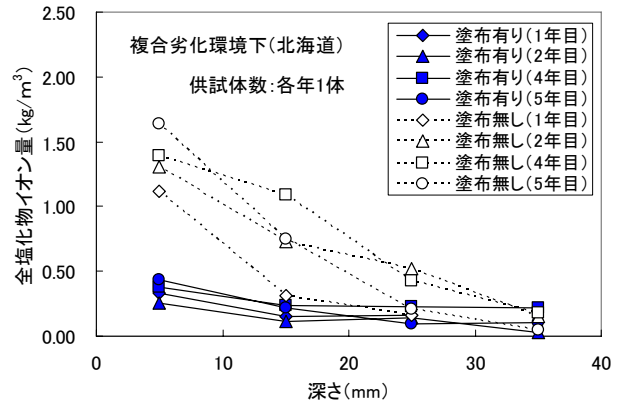


図-3 塩化物イオン量（複合劣化環境下）

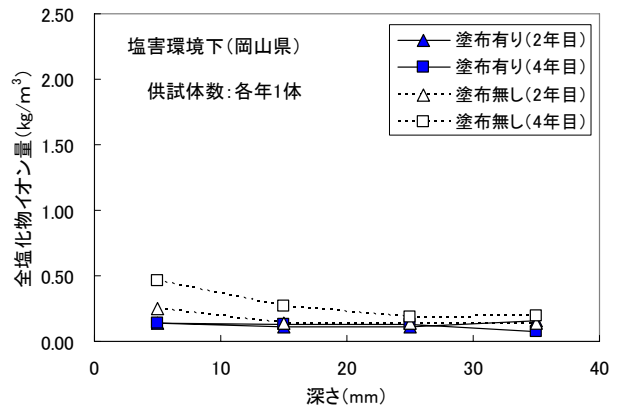


図-4 塩化物イオン量（塩害環境下）

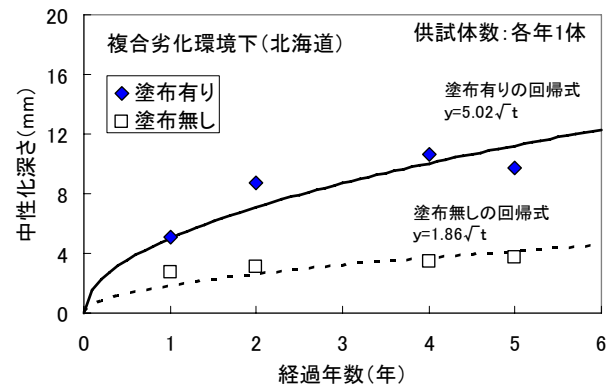


図-5 中性化深さ（複合劣化環境下）

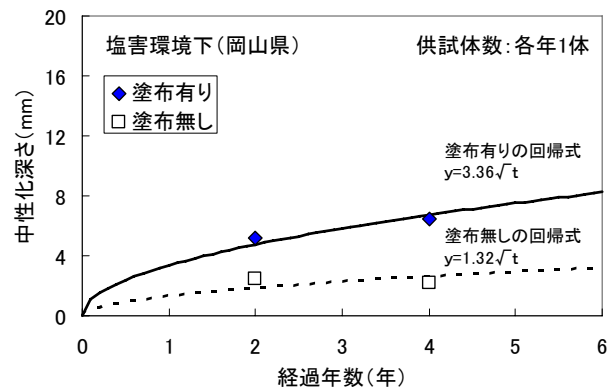


図-6 中性化深さ（塩害環境下）

ン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の水中浸漬後と 105°Cの炉乾燥後の重量差は 356.7g であり、塗布しない供試体の 447.3g に比べて小さな値であった。これは、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体を浸漬した際の吸水が、浸透性吸水防止材の塗布によって抑制されたことによるものと考えられ⁴⁾、このコンクリート自体は、塗布しない供試体と同程度に吸水するものと考えることが妥当である。このことを踏まえ、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しない供試体ともに 447.3g を含水した場合を 100%として、現地測定重量から 105°C 炉乾燥後重量を引いた現地における含水量の割合を算出すると、それぞれ 46.3%および 76.2%となる。この値を基に、既往の研究⁹⁾ で得られている平衡含水率曲線を用いて相対湿度を逆算すると、それぞれ 40.8%および 82.1%となり、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体の相対湿度の逆算値は、沿岸部において、おおむね妥当と考えられる範囲となる。一方、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の含水量は、相対湿度が比較的高い条件であるにも関わらず、相対湿度 40%程度に相当する量となった。既往の研究¹⁰⁾ によれば、コンクリートの中酸化速度係数は、相対湿度 40~50%程度の場合を最大値として、それよりも相対湿度が高くなるに従って低い値となる。例えば、水セメント比が 55%のモルタルの試験結果¹⁰⁾ では、相対湿度 40%の中酸化速度係数が相対湿度 80%の値の 2.5~2.6 倍程度となり、本試験の結果と一致する。

以上のことより、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートでは、中性化が進行しにくいと考えられる 80%程度の相対湿度環境下に置かれた場合でも、含水量が、相対湿度 40%程度の場合に相当する量となり、中性化が進行することが考えられる。

その一方で、コンクリートの含水量が相対湿度 40%程度と平衡する量になる場合、鉄筋腐食や凍害、アルカリ骨材反応に対して、抑制効果が得られることが考えられる。例えば、既往の研究¹¹⁾ において、相対湿度が中性化による鉄筋腐食速度に及ぼす影響を検討した結果によれば、相対湿度 40%の場合、温度 20~30°Cおよび酸素濃度 20%の条件において、ほとんど腐食しない。

ただし、本暴露試験では、現地における供試体重量測定を年 1 回しか実施しておらず、年間を通じた重量変化を測定していないため、今後、測定の頻度を増すことによって、より高い精度でシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の定量的な耐久性向上効果を推定していくことが必要と考えられる。

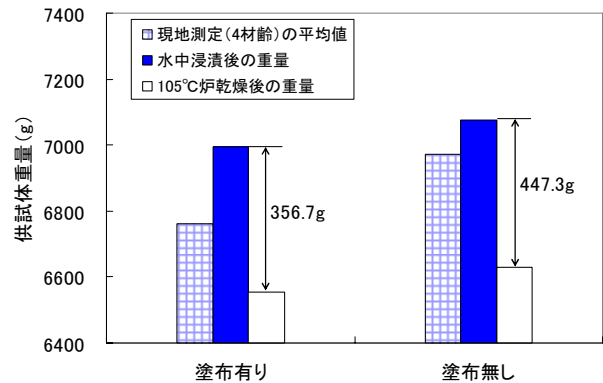


図-7 供試体重量

5. まとめ

複合劣化環境下における 5 年間の暴露試験および塩害環境下における 6 年間の暴露試験により、以下の知見を得た。

- (1) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの表面の撥水性は 2 年目まで認められるが、4 年目以降、認められない。しかし、吸水防止層は存在しており、本試験の範囲では、複合劣化環境下の 5 年目で 5mm 程度、塩害環境下の 6 年目で 3mm 程度を確認した。
- (2) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの含水量は、塗布しないコンクリートよりも少ない範囲に抑制される。本試験の複合劣化環境下では、径 125mm および高さ 250mm の供試体において 150g 程度含水量が少ない結果であった。
- (3) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の塗布により、コンクリート中への塩化物イオンの浸透が抑制される。本試験の範囲では、コンクリート表面から 10mm よりも内部には、ほとんど塩化物イオンが含まれていない結果であった。
- (4) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの含水量は、80%程度の相対湿度環境下に置かれた場合でも、相対湿度 40%程度と平衡する量に相当している可能性がある。このために、塗布しないコンクリートよりも中性化が 2.5~2.7 倍程度進行したことが考えられる。しかし、コンクリートの含水量が、この程度の範囲にあれば、鉄筋腐食を抑制できる可能性がある。

参考文献

- 1) 林大介, 守屋進, 杉田好春: 各種コンクリート保護材の性能に関する実験的検討, コンクリートの表面被覆および表面改質に関するシンポジウム論文集, pp.45-54, 2004.2

- 2) 網島和彦, 松田芳範, 津吉毅, 石橋忠良: 撥水・浸透系防水材暴露試験3年目までの評価について, コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告書, pp.225-236, 2006.4
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 谷本俊充: 寒冷環境下でのシラン系表面含浸材の試験施工1年目の評価, コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告書, pp.237-254, 2006.4
- 4) 林大介, 坂田昇, 三村俊幸, 神澤弘: シラン・シロキサン系撥水材の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.301-306, 2000.7
- 5) 気象庁ホームページ, 気象統計情報,
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 6) 芦澤良一, 林大介, 坂田昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 凍害および塩害環境下における浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの暴露試験, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, 2007.9
- 7) 安田和弘, 坂田昇, 林大介, 三村俊幸, 神澤弘: 浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの海洋環境における暴露試験, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.577-578, 2002.9
- 8) 神澤弘, 林大介, 芦澤良一, 坂田昇: 浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの海洋環境における暴露試験, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.423-424, 2005.9
- 9) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.101-110, 1994.5
- 10) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.85-94, 1990.1
- 11) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986.11