

論文 種々の気候区分における環境外力の鉄筋腐食への影響

松山 香織^{*1}・小笠原 啓人^{*2}・久保 善司^{*3}

要旨: 気象条件を含む環境条件は塩害による鉄筋腐食の過程（発生・進行）に大きな影響を与える。本研究では、気候区分の異なる地域において塩害暴露実験を実施し、気象条件を中心とした環境外力がコンクリート中の鉄筋腐食過程に与える影響を検討した。その結果、環境外力の与える影響は複雑であるものの、気温・日射によるコンクリート温度に加えて、降水の影響によるコンクリートの含水状態の影響が大きいことが明らかとなった。また、気温に加えて日射によってもコンクリート温度が上昇することが明らかとなった。

キーワード: 塩害, 鉄筋腐食, 暴露実験, 気象条件, コンクリート温度

1. はじめに

コンクリート構造物は、1970年代の高度経済成長期を通じて整備され、現在でも道路・橋梁・トンネルなど、膨大な社会資本としてストックされている。他方、我が国の厳しい使用・環境条件においては、1980年代より早期劣化問題が顕在化し、これらの構造物に対する維持管理の問題が検討されてきた。現在では、コンクリート標準示方書等により、標準的な維持管理対策手法は確立されつつある。しかし、広範な気候区分を有し、海洋環境に囲まれ、多湿な環境にある我が国の地理的要因に対して、各種使用・環境条件下のあらゆる構造物に対して、経済的な制約条件を満足し、十分な精度でライフサイクルコストを考慮した維持管理が実現されるには至っていない。より適切に効率的な維持管理を行うために、様々な気候区分、環境下にある既設構造物に対して、コンクリート中の鉄筋腐食などの劣化の程度を的確に予測することが必要とされている。

既往の研究においては、塩化物イオン量、含水状態、コンクリート温度などの支配的要因と鉄筋腐食との関係については明らかにされつつある。例えば、塩害による鉄筋腐食とコンクリート温度に関する研究では、コンクリート温度が20℃から60℃に上昇すると腐食速度が2~4倍になるという報告がされている¹⁾。他方、広範な気候区分を有する我が国において、気象条件などの環境外力がコンクリートの状態に与える影響の程度は、地域の気象条件などによって大きく異なることも予想される。例

えば、気温と腐食速度に関しては、鉄筋の腐食速度は気温により変動し、夏場は冬場の約4倍速くなるといった報告もある²⁾。また、塩害による鉄筋腐食の発生・進行は気候等の環境条件の違いにより挙動が異なるという報告もある³⁾。さらに、近年では、同一立地条件においても、同一部位中でも飛来塩分の浸透が異なるなど、局所的な影響に関する研究も行われている⁴⁾。

他方、経済的な制約条件下において、供用期間の長期化とともに、膨大な構造物を抱える我が国の現状を踏まえると、全ての構造物を同様のレベルでかつ、同時に補修等の対策を講じることは現実的には困難な状況にある。このような状況下において、環境条件ごとに異なる劣化進行速度に応じて、適切な時期に、適切な順序で対策を実施することはそれらの要求に応える一つの方法となり得る⁵⁾。本研究では、環境外力（気象条件（気候区分）、飛来塩分）の異なる暴露供試体の腐食モニタリングによる腐食発生および進行の結果と、測定されたコンクリート温度の分析に基づき、気象条件を中心とした環境外力が鉄筋腐食に与える影響について検討を行った。

2. 検討概要

2.1 供試体概要

(1) コンクリート

コンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材として手取川産の骨材(吸水率:1.33%)を用い、粗骨材として手取

表 - 1 示方配合表

W/C(%)	s/a(%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (cc/m ³)	AE助剤 (cc/m ³)
			W	C	S	G	NaCl		
65	46	0	175	272	828	968	0	1020	1088
		3.5			822		5.8	839	

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究域環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 (正会員)

表 - 2 各暴露地の環境条件

暴露地区	暴露開始年	海岸からの距離	暴露方向	気候区分	表面塩化物イオン量
留萌	2007年	10m(沿岸)	西北西	亜寒帯気候	9kg/m ³
親不知	2006年	40m(沿岸)	北北西	日本海側気候	7.2kg/m ³
金沢大学	2009年	10km(内陸)	南南東	日本海側気候	
御前崎	2006年	100m(沿岸)	南南西	太平洋側気候	2.5kg/m ³
水島	2006年	30m(沿岸)	西北西	瀬戸内海式気候	3.9kg/m ³
辺野喜	2009年	50m(沿岸)	北西	亜熱帯気候	6.8kg/m ³
琉球大学	2009年	2.7km(内陸)	東	亜熱帯気候	

川産の骨材(吸水率：1.91%，Gmax：20mm)を用いた。所定の内在塩化物イオン量とするため、塩化物としてNaClを用い、細骨材置換とした。コンクリートの品質として、風化等による劣化を受け品質が低下している既設構造物を想定し、水セメント比を若干高めめの65%とした。

(2) 塩化物イオン量

新設構造物を想定した塩化物イオン無混入のものと、既設構造物における補修を想定し、腐食発生限界塩化物イオン量よりも若干多い3.5kg/m³の塩化物イオンを混入したものを用意した。

(3) 供試体の作製

供試体は、332×332×302mmの大きさのものを用意した。打設・脱型後、湿封養生を5日間行った。また、検討面以外の5面にはポリマー含浸コンクリートの永久型枠を用い、検討面のみ環境作用を受けるようにした。内部には、かぶり30mm位置に直径9mmの丸鋼(SR235)を埋設し、腐食モニタリングに用いるものには測定用の耐候性コードを接続した。さらに、鉄筋近傍でのコンクリート温度を計測するため、かぶり30mm位置に温度センサを埋設した供試体も用意した。

(4) 暴露環境

国内の代表的な気候区分を概ね網羅できる暴露地域を選定した。各暴露地区の暴露条件を表-2に示す。なお、親不知地区については、高架下に暴露されているため、降水および日射の影響を受けにくい暴露条件であった。

2.2 環境外力に関連したデータの収集方法

(1) コンクリート温度の収集

コンクリート供試体を暴露し、深さ30mm(鉄筋と同一深さ)に温度センサを埋設し、1時間間隔でコンクリート温度を測定した。測定は早いもので2008年、遅いものでも2009年から実施した。

(2) 気象データの収集

気象庁より提供されている過去の気象データ⁶⁾より、各暴露地区での気温、日照時間、降水量等のデータの収集を行った。日射量に関しては新エネルギー・産業技術総合開発機構のデータベース⁷⁾より、各暴露地区の、暴

露面の方角における、地面に対して垂直な面での日射量を収集した。

2.3 腐食モニタリング

気象条件に暴露された供試体に対して、電気化学的腐食測定により、夏季および冬季に相当する時期を含むように年2~3回定期的に測定した。電気化学的測定は携帯型鉄筋腐食診断機(照合電極：SSE(銀/飽和塩化銀電極))を用いて、自然電位(ASTM C 876 準拠)および交流インピーダンス法による分極抵抗の測定を行った。コンクリート表面を霧吹きで濡らし、コンクリート表面近傍を湿潤状態とし、測定を行った。

自然電位および分極抵抗の簡易測定条件は、ガード対極を使用せず、センター対極のみを使用する1対極センサ方式で行い、印加交流電圧(AC)を10mVとした。開始周波数および終了周波数を10Hzおよび20mHzとし分極抵抗を求めた。

自然電位測定によって求められた電位値から、自然電位の腐食状態を評価する方法として、ASTM C 876⁸⁾の判定基準を用いた。ASTM規格は、照合電極としてCSE(飽和硫酸銅電極)を用いたものであるが、本研究で用いたSSE(銀/飽和塩化銀電極)に換算したものを判定基準とした。

分極抵抗測定によって腐食速度の判定を行った。分極抵抗による腐食判定基準はCEB(ヨーロッパコンクリート委員会)⁹⁾から提案されている判定基準を用いた。

3. 各気候区分の特徴と腐食への影響の検討

コンクリート中の鉄筋腐食に与える影響としては種々の環境要因が挙げられ、主たる要因としては、塩化物イオンの供給源である飛来塩分(表面塩化物イオン量)、腐食速度に関連する水分、および温度を支配する降水量、気温、および日照時間をここでは取り扱うこととした。ただし、表面塩化物イオン量は、土木学会の標準示方書に示されている値¹⁰⁾をもとに、距離の影響を考慮して比例配分して算出した。ただし、水島地区のみ内湾に位置し、飛来塩分の供給が穏やかであるため、示方書の値よりも

若干小さいものと予想される。

また、気温と降水量の関係、および日照時間との関係をそれぞれ図-1 および図-2 に示す（気象庁 HP より取得；1981 年から 2010 年平年値）。

気温からは以下の 3 区分に大きく分類され、本州地域では概ね 15℃前後、亜寒帯気候の留萌地区では 8℃、亜熱帯気候の沖縄地区では 20～23℃であった。沖縄地区は最も腐食の進行が大きいものと考えられる。

他方、降水量については、留萌および水島地区が他の地区よりも顕著に少なく、親不知地区を除く本州地区と沖縄地区のものは 2000～2500mm の範囲にあった。なお、親不知地区のものは高架下に暴露されているため、降雨の影響を直接受けにくい環境にあるため、降水による水分供給は少ないものと考えられる。したがって、降水による水分供給の観点からは、金沢大学地区および辺野喜地区が厳しい環境にあり、それに次いで御前崎および琉球大学地区と考えられ、留萌地区および水島地区ではコンクリートは乾燥しやすい環境にあるものと考えられる。なお、沿岸地区においては飛沫の影響を受けるため、表面水分率（高周波水分計を用いて測定）の測定結果からは、留萌地区および親不知地区の表面水分率（平均値 4.5～4.8%）は他の地区（4.0～4.3%）より 1%程度高い水分率を示すことが多く、降水以外にも飛沫によっても水分が供給されていた。なお、他の地区では水分率からは顕著な相違を確認することができず、概ね同様の値であった。降水量だけでなく、沿岸からの距離がきわめて近い場合、あるいは波浪の影響が大きい地区では、降水量よりも飛沫による水分供給も加わることを考慮する必要がある。結果としては、留萌地区および親不知地区の含水状態は高いものと推定され、水分率では確認できなかったものの、飛沫の影響が少ない水島地区のものは他の地区よりも最も乾燥しているものと推定された。その他の地区については、飛沫の影響は同程度とすると、コンクリートの含水状態は概ね降水量に依存するものと考えられる。

日照時間については、御前崎および水島地区のものが大きく、コンクリート温度の上昇が大きいものと予想される。

4. 結果および考察

4.1 腐食モニタリングによる腐食挙動

(1) Cl⁻無混入の場合

腐食モニタリングによって得られた経時変化を図-3 に示す。なお、値は実測値の移動平均を用いた。自然電位、分極抵抗ともに留萌地区のみ腐食領域にあり、暴露約 1000 日以降、腐食が激しく進行したものと考えられる。分極抵抗からは、約 2 年程度で腐食が発生したものと考

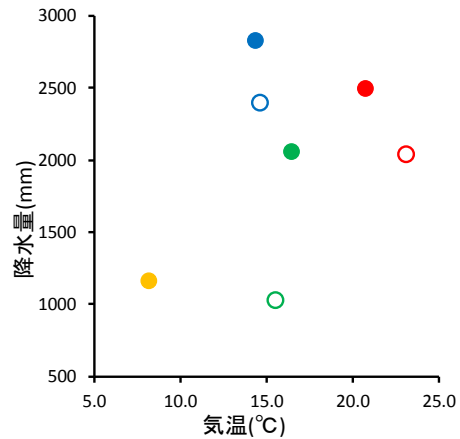


図-1 気温と降水量図

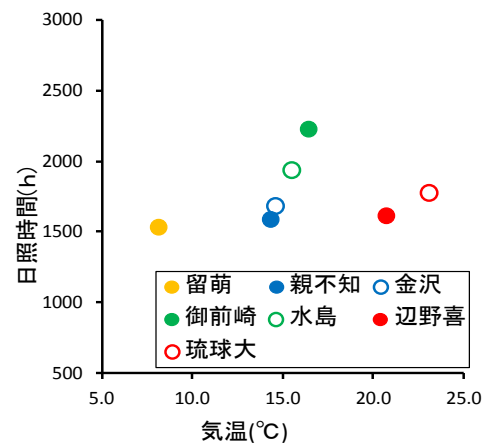


図-2 気温と日照時間

えられ、飛来塩分の影響（塩化物イオンと水分供給）が顕著に現れ、気温が低い地区にもかかわらず、早期に腐食発生しやすい状態に至ったものと考えられる。

他の地区の分極抵抗はいずれも非腐食領域を推移し、いずれのものも腐食を生じていないものと考えられる。

(2) Cl⁻混入の場合 (3.5kg/m³)

腐食モニタリングによって得られた経時変化を図-4 に示す。なお、無混入の場合と同様、移動平均を用いた。自然電位および分極抵抗の結果から、留萌地区においては最も早期に腐食が発生し、その進行も顕著であるものと考えられる。当該地区においては、気温・降水の影響は他の地区よりも小さいものの、波浪による激しい飛沫に加えて、冬季に凍害の影響によってコンクリート表層部の腐食に対する抵抗性（物質透過抵抗性）が低下したことにより、他の地区よりも腐食の進行が大幅に加速されたものと考えられる。

他方、他の地区においては、自然電位と分極抵抗の推移が必ずしも一致しなかった。原因として、留萌地区および親不知地区を除き、表面水分率では大きな相違が認められなかったものの、コンクリートの含水状態が各環境条件で異なったものと考えられ、腐食が発生した状態であっても、かぶり近傍の乾燥によって自然電位が貴側

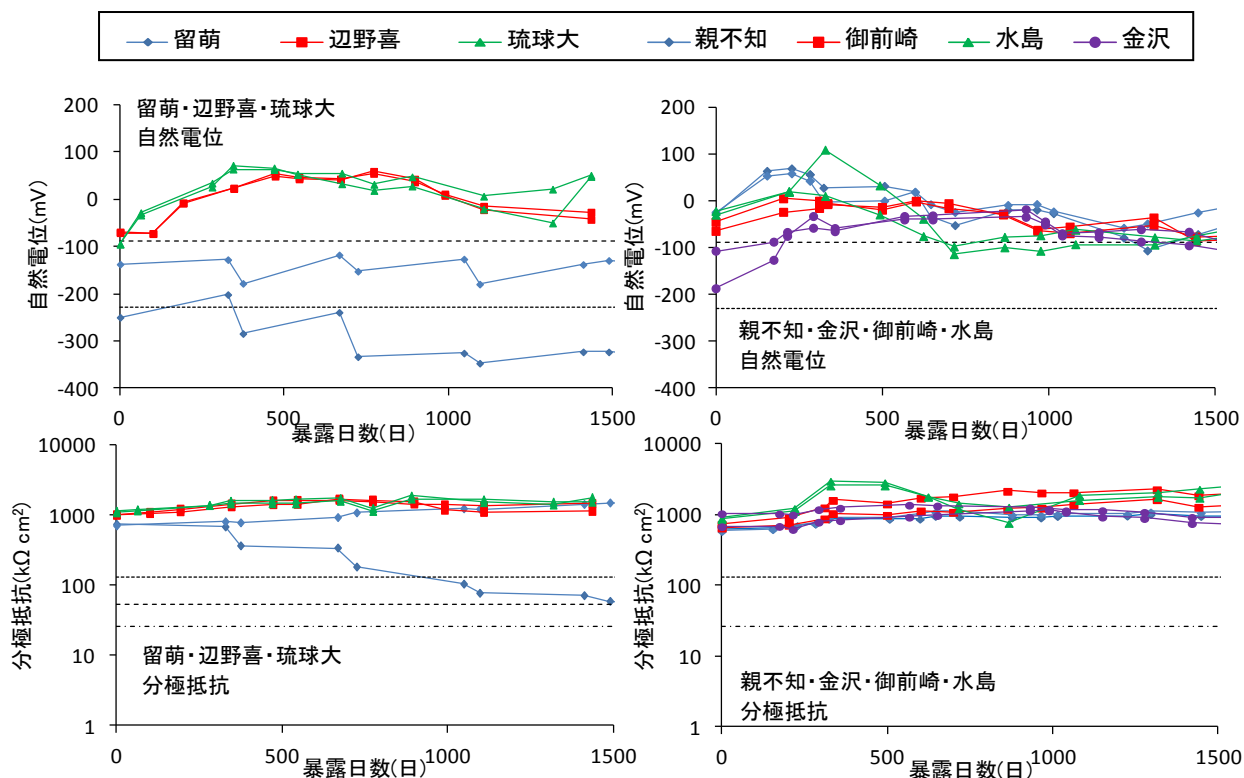


図-3 腐食モニタリング結果 (Cl⁻無混入の場合)

に推移したのもあったためと考えられる。ここでは、分極抵抗によって腐食状態（進行，速度）を評価することとした。

留萌地区以外においては、気温および降水量の多い辺野喜地区のものの腐食進行が大きく、次いで、金沢大学地区、水島地区のものが比較的早期に激しい腐食を示す分極抵抗値に達した。辺野喜地区では、降水量、日射、飛沫の影響を受け、他の地区よりも厳しい環境にあったものと考えられる。金沢大学地区のものは降水の影響によって他の地区よりも高い含水状態にあったものと考えられる。水島地区では、降水量は少ないものの、気温や日射の影響によってコンクリート温度が高められることによって腐食進行が大きくなったものと考えられる。琉球大学地区は、辺野喜地区と同様の亜熱帯の環境であるものの、辺野喜地区よりも降水量は少なく、自然電位がいずれの地区よりも貴側にあったことから、乾燥が進行し、腐食の進行が緩和され、金沢大学地区および水島地区よりも腐食進行が小さくなったものと考えられる。御前崎地区は、琉球大学地区と同程度の降水量であったものの、気温の影響が小さかったため、琉球大学地区よりも腐食の進行が小さくなったものと考えられる。

親不知地区は、高い含水状態かつ飛沫の影響を受けるため、厳しい環境にあるものと予想されたものの、いずれの地区よりも腐食の進行が緩やかであった。原

因としては、日射の影響が緩和されたため、コンクリート温度が高くなる機会が他の地区よりも少なかったためと考えられる。

飛来塩分は腐食発生の支配的要因であるものの、腐食進行に与える環境外力の影響は複雑であり、降水および気温・日射によるコンクリートの含水状態、および温度が腐食進行に与える影響は大きいものと考えられる。両要因の影響に関する定量的な評価については今後の課題であろう。

4.2 気象条件がコンクリート温度に与える影響

コンクリート温度の上昇に影響を与える環境作用として気温と日射に着目し検討を行った。

(1) コンクリート温度および気温

各地区において測定したコンクリート温度の平均値と、該当期間の気温の平均値（平均気温）の関係を図-5に示す。温度ログの不調・故障等によって季節ごとのデータ数が異なるため、季節ごとにコンクリート温度の平均値を求め、さらに四季の平均を求め、通年の平均温度とした。ただし、金沢地区においては、冬季のデータが無いため、冬季を除く期間の平均となっており、実際よりも若干高い値であるものと予想される。

通年においては、親不知および琉球大学地区を除き、平均気温よりもコンクリート平均温度は高く、特に、水島地区、金沢大学地区は他のものより高くなった。気温以外にコンクリート温度を上昇させる要因として

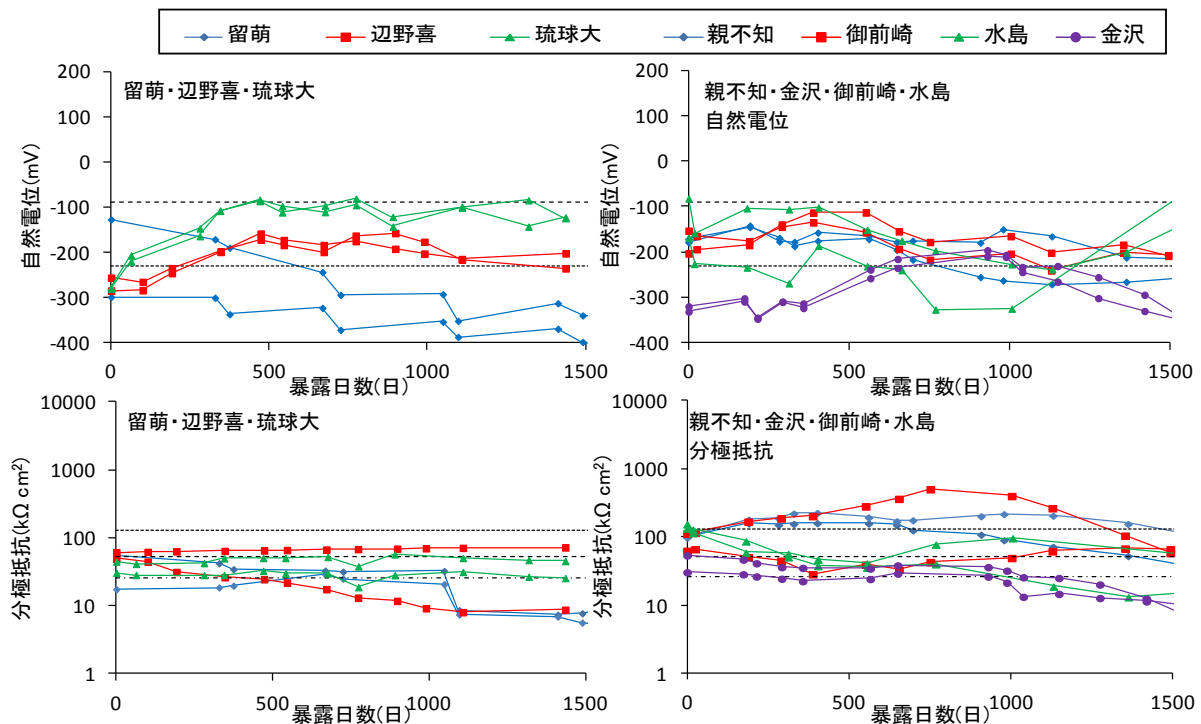


図-4 腐食モニタリング結果 (Cl⁻量 3.5kg/m³混入の場合)

は、日射の影響が考えられ、それらの影響が地区ごとに異なったものと考えられる。なお、親不知地区は、2.1(4)で述べたとおり、日射の影響を受けにくい環境にあるため、コンクリートの平均温度と平均気温が同程度となったものと考えられる。

季節的な影響については、日射の影響が大きいと予想される夏季のコンクリート表面温度に着目し、その温度上昇が日射によって生じることを確認した報告もされている¹¹⁾。そこで、夏季の平均値を比較することとした(図-5参照)。平均気温が25℃付近の暴露地区に着目すると、年平均の場合より、平均気温に対しコンクリート温度は高くなる傾向を示し、金沢大学、水島、辺野喜地区は他のものより高く、水島地区は最も高くなった。これらの相違は、各地区間の日射の影響の大小によるものと考えられる。

(2) コンクリートの温度上昇指数

日射の影響の大きさを考えるため、各測定時刻におけるコンクリート温度と気温との差(Tc-Tと略す)に着目することとした。さらに、日射の影響を確実に受けていると想定されるTc-Tに限定するため、Tc-Tが10℃以上となるデータのみを抽出し、分析を行った。

本研究では、コンクリート温度の上昇程度を表す温度上昇指数として、式-1に示す算出方法で求めた。ただし、式中のTave.(℃)はTc-Tが10℃以上のものの平均値、NはTc-Tが10℃を超える割合(頻度)を表す。

$$\text{温度上昇指数} = \text{Tave.}(\text{℃}) \times N \quad (1)$$

(3) 日射の影響

通年および夏季期間の各地区の温度上昇指数と日照時間との関係を図-6に示す。

通年においては、金沢地区は若干高い温度上昇指数が得られていることを考慮すると、親不知、水島、琉球大学地区を除き、通年および夏季のいずれも概ね日照時間が長いものほど、温度上昇指数は大きくなった。水島地区および琉球大学地区において、他のものの傾向と大きく異なった要因については、データを詳細に分析し、明らかにする必要がある。

通年および夏季期間の各地区の温度上昇指数と日射量との関係を図-7に示す。

日射量においても、通年および夏季にかかわらず、日照時間と概ね同程度の傾向が確認された。したがって、日照時間は日射量と概ね対応しているものと考えられる。日射によってコンクリート温度が影響を受け、暴露環境の日射量の大きいあるいは日照時間の長いものほど、コンクリートの温度上昇は大きくなるものと考えられる。

5. 結論

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 気象条件を中心とした環境外力が腐食発生および進行に与える影響は大きかった。
- (2) Cl⁻無混入の場合、飛来塩分が腐食発生の支配的要因であった。
- (3) 腐食発生限界Cl⁻量以上の場合には、気温および日

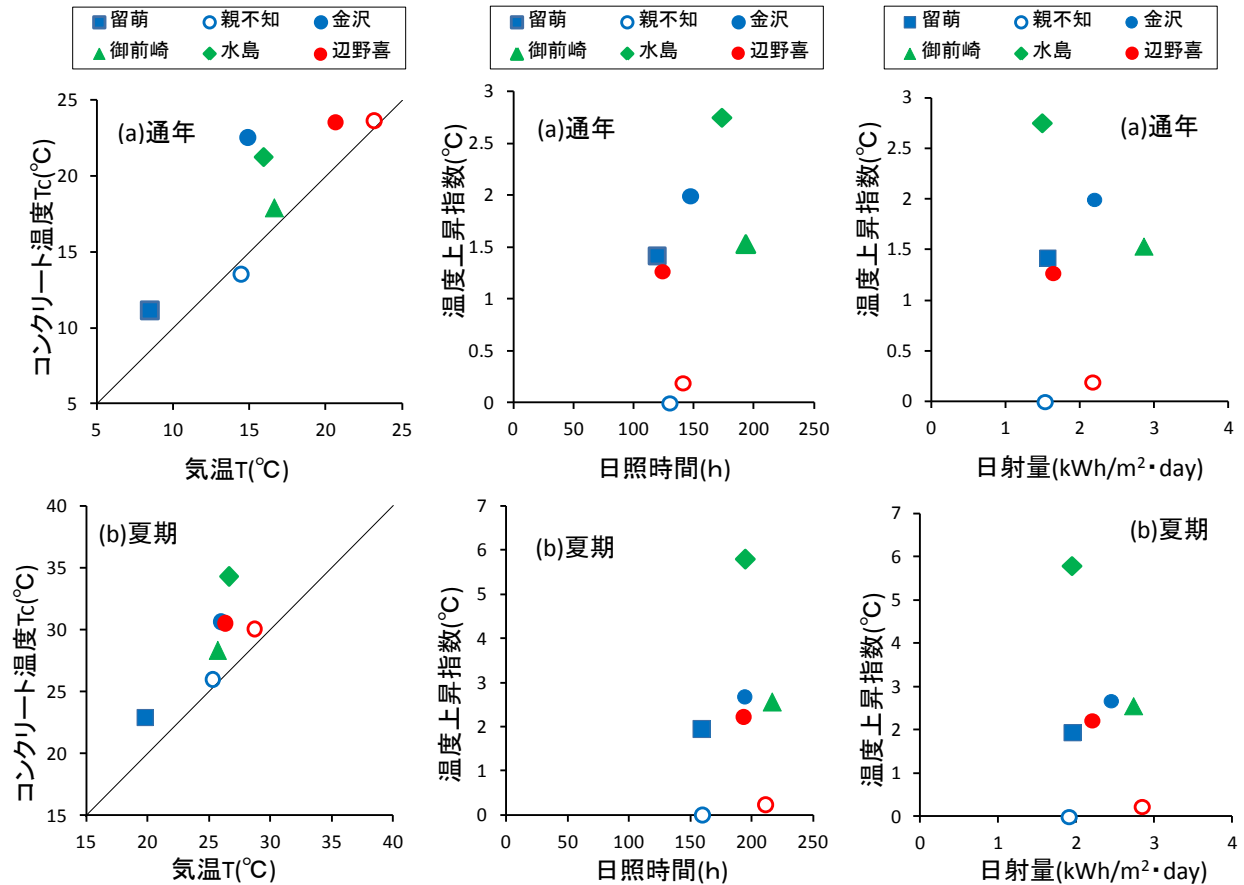


図-5 コンクリート温度と気温の関係 図-6 温度上昇指数と日照時間の関係 図-7 温度上昇指数と日射量の関係

射によるコンクリート温度に加えて、降水の影響によるコンクリートの含水状態が支配的要因であった。

- (4) 気温に加えて日射によって、コンクリート温度を上昇させることが明らかとなった。日照時間と日射量は概ね対応していた。

謝辞

本研究の遂行にあたり寒地土木研究所、NEXCO 東日本、旭化成ジオテック、日本塗料検査協会、大同塗料、琉球大学富山潤准教授に多大なご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 梶田 佳寛ら：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する実験，コンクリート工学，Vol.14，No.1，pp.781-786，1992
- 2) 横田 優ら：塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.35-40，2004.7
- 3) 横田 直倫ら：温暖な海洋環境下における含浸材の腐食抑制効果，コンクリート工学年次論文集，

Vol.31，No.1，pp.1951-1956，2009.7

- 4) 富山 潤ら：塩害環境下におかれたコンクリート橋主桁における付着塩分量調査，材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度に関するシンポジウム講演概論集，pp.331-338，2012.7
- 5) 土木学会：土木構造物のライフサイクルマネジメント，2013.7
- 6) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，2013.7
- 7) NEDO：日射量データベース閲覧システム，<http://app7.infoc.nedo.go.jp/metpv/monsola.html>，2013.7
- 8) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete，1996
- 9) CEB：Working Party V/4.1，Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion，BRI-CSTC-WTCB，1997
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書，維持管理編，2007年制定
- 11) 地濃 茂雄：日射に代えて赤外線を照射した場合のコンクリート表面の温度上昇，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.331-336，2008