

コンクリートの中性化に関する全国暴露試験

片平 博・古賀裕久

1. はじめに

硬化コンクリートはセメントの水和生成物である水酸化カルシウムなどの影響によって強いアルカリ性を示す。このアルカリ環境下では、コンクリート内部に配置された鉄筋の表面には不動態皮膜が形成され、腐食しない。しかし、コンクリート中の水酸化カルシウムは、大気中の二酸化炭素の影響を受けて炭酸カルシウムへと変化するので、コンクリートのアルカリ性は表面から徐々に失われていく。これを中性化といい、鉄筋の位置まで中性化の影響が及ぶと鉄筋が腐食しうる状態となる。

そこで、コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、中性化に対する抵抗性を適切に評価する必要があり、多くの促進試験や暴露試験が行われ、コンクリートの品質と中性化抵抗性の関係が明らかにされている¹⁾。

日本においては現在、一般的な構造物を設計する際は、上記の研究成果などを考慮して、水セメント比の上限と、確保する鉄筋のかぶりが設定されており、これを満足することで、一般的な環境では中性化が問題となることはほとんどない。

一方、欧州規格 (EN) 等の国際的な技術規準では、コンクリート構造物の置かれる環境が多様であることが想定されており、中性化についても、気候等の影響を考慮したパラメータが設定されている場合がある。土木研究所の過去の調査でも、海外では、中性化速度が我が国と大きく異なる場合があることが報告されている²⁾。日本列島も南北に長く、気象条件にはかなりの相違がある。上記のように、これ

までに多くの検討が行われてきたものの、全国的に同じ条件で暴露試験を行い、中性化という観点で比較検討した研究例は多くはない。そこで、中性化に関する全国的な暴露試験を実施した。なお、暴露試験に先立ち、温度と湿度が中性化に与える影響を把握するための促進中性化試験も実施した。

2. 試験の方法

2.1 試験用コンクリート供試体の作製

コンクリートの配合を表-1に示す。一般的なコンクリートの水セメント比は50%程度であるが、中性化の進行は水セメント比に依存し、その配合ではゆっくりとしか中性化しないため、長期に及ぶ暴露が必要となる。今回の実験は、環境条件の違いが中性化に与える影響を捉えることが目的であることから、水セメント比を85%と大きくすることで、短い暴露期間で結果が得られるように計画した。

供試体作製に用いたコンクリート材料としては、水には水道水、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には川砂、粗骨材には硬質砂岩を用いた。また、所定のスランプと空気量を得るためにAE減水剤とAE助剤を適量使用した。

二軸強制練ミキサによってコンクリートを練り混ぜ、スランプと空気量を確認した後に100×100×200mmの角柱供試体を作製した。

2.2 促進中性化試験

2.1で作製した供試体を用い、前養生として、水中養生期間を2ヶ月以上とし、促進中性化試験の前に、20℃、相対湿度60%の室内環境で28日間保管して供試体を乾燥させた。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤 (cc/m ³)		スランプ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤		
20	85	50	172	202	919	962	505	6	10 (9.7) [*]	4.5 (4.7) [*]

※目標値(実測値)



図-1 B.通廊内の暴露状況

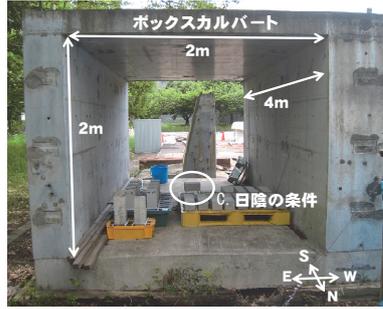


図-2 C.日陰の暴露状況



図-3 D.日なたの暴露状況

促進中性化試験は、二酸化炭素濃度5%（一般環境の100倍程度）の試験槽内に供試体を入れ、中性化を促進させるものである。今回の実験では温度を10、20、30℃の3水準、相対湿度を30、60、90%の3水準とし、促進試験期間は14日間、供試体本数は各条件1体とした。

試験期間を終えた供試体を割裂し、割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧した。これによって中性化していない部分は赤紫色に変色するので、供試体表面から変色した部分までの深さを測定した。

2.3 暴露試験

2.1で作製した供試体を1ヶ月間、水中養生した後、表-2に示す箇所に暴露した。暴露期間は1年および2年とし、供試体本数は各条件1体とした。

まず、日照、雨掛かりの有無などの局所的な環境の影響を比較するため4条件の実験をつくばで実施した。Aは気温20℃、相対湿度60%一定の実験室内の環境、Bは地下のコンクリート通廊内で風雨は受けないが、気温と湿度の変動がある環境（図-1）、Cは屋外に設置したボックスカルバート内に供試体を設置したものであり、日陰で風雨の強い時のみ雨掛りのある環境（図-2）、Dは日照と雨の影響を直接受ける条件である（図-3）。

さらに、地域による気候の違いの影響を比較するために、日照と雨の影響を直接受ける条件で、全国8箇所（図-4）に供試体を設置した。

暴露開始（2014年11月）から1年および2年間を経過した後、供試体を回収し、2.2と同様の方法で中性化深さを測定した。

3. 試験結果

3.1 促進試験結果

フェノールフタレイン溶液を噴霧した割裂面の写真の例を図-5に示す。上下左右とも概ね均等な中性化深さとなっており、表面から中性化した位置

表-2 暴露箇所の条件

1. 局所的な環境の比較	A. 20℃, 60%RH一定の環境
	B. 通廊内、気温・湿度の変動あり
2. 気候の異なる地域の比較	C. 日陰、雨掛りややあり
	D. 日なた、雨掛りあり
	全国8箇所(図-4参照) いずれも、日なたで雨掛りあり

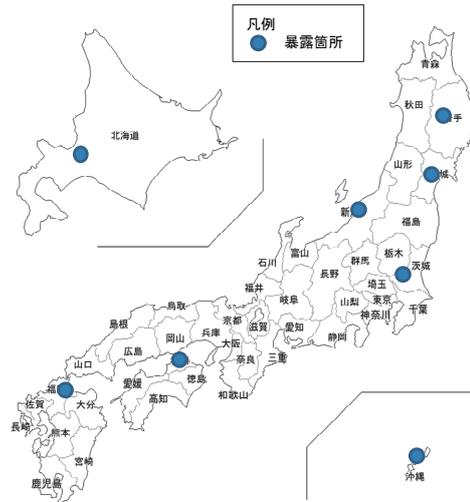


図-4 気候の異なる地域の比較を行った暴露箇所



図-5 フェノールフタレイン溶液を噴霧した割裂面の例（上面が打設面）

までの深さを1cm間隔で測定し、中性化深さの平均値を求めた。

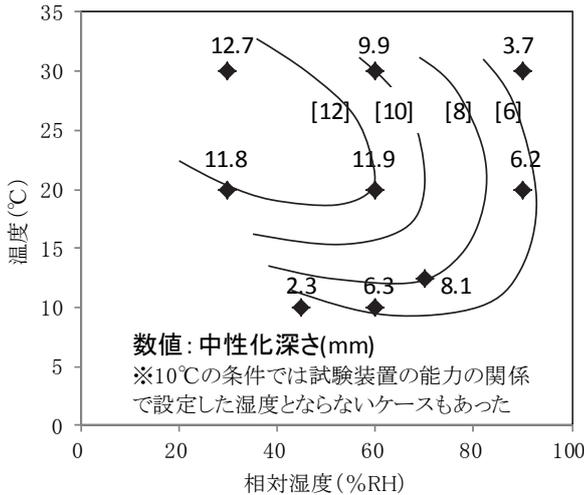


図-6 促進中性化試験結果

その結果を図-6に示す。概ね、温度が高いほど、また、相対湿度が低いほど中性化深さは大きくなる傾向を示した。

3.2 暴露試験結果（局所的な環境の影響）

日照、雨掛かり等の局所的な環境条件の違いが中性化深さに与える影響を比較した。この結果を図-7に示す。これによれば、中性化深さはAの20℃、相対湿度60%の環境やBの通廊内の環境では大きく、Dの日なた（雨掛あり）では小さくなった。すなわち、雨の当たる環境では、供試体内の含水率が高くなり、AやBのように雨掛かりのない環境に比べて中性化速度が遅くなるものと考えられる。

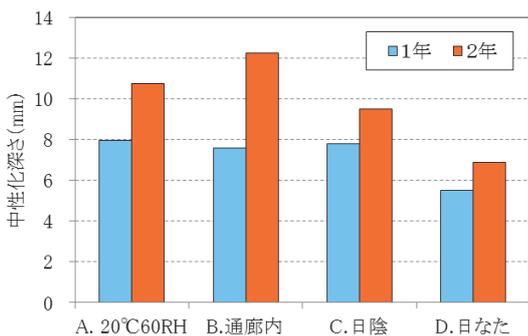


図-7 暴露試験結果（局所的な環境の比較）

なお、中性化深さは時間の平方根に比例して大きくなることが知られている¹⁾。すなわち、暴露2年の中性化深さは暴露1年の約1.4倍になると予想される。図-7によるとAとBの条件では概ねそのような関係が見られるが、Dの条件では暴露1年から暴露2年に至るまでの中性化速度が遅かった。この理由としては、供試体の表面は日照の影響で乾

燥するが、内部は降雨によって供給された水分の影響で高い含水率が保たれ、表面付近に比較して内部の中性化速度が遅くなっていることが考えられる。

3.3 暴露試験結果（気候の異なる地域の比較）

気候の異なる地域に暴露した供試体の中性化深さを比較した。この結果を図-8に示す。図には暴露1年と暴露2年の結果を示した。供試体が1体ずつのため、試験結果のバラツキも想定されるが、この図においても図-7のDと同様に、1年から2年に至る中性化速度は遅かった。

地域の比較をすると、中性化深さは図-8の左側の4地域（北海道、岩手、宮城、新潟）でやや小さく、右側の4地域（茨城、香川、福岡、沖縄）でやや大きくなった。ただし、いずれの地域でも暴露1年での中性化深さの範囲が4～5.5cmの範囲であり、顕著な差とは認められなかった。

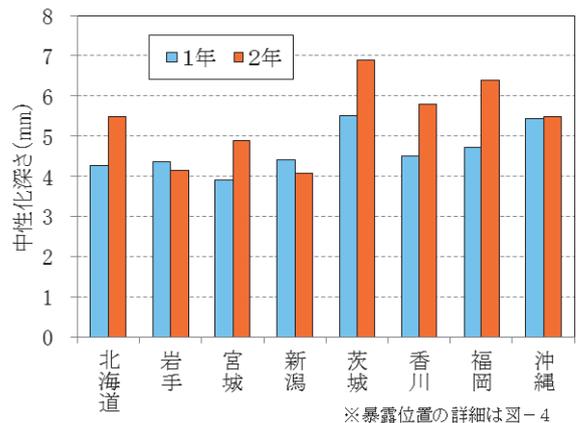


図-8 暴露試験結果（気候の異なる地域の比較）

各暴露箇所近傍の気象観測所における気象データ³⁾を表-3に示す。北海道と沖縄とでは平均気温が10℃以上異なっている。図-6に示した促進中性化試験結果では、温度の違いが中性化深さに与える影響が大きかったが、図-8の暴露試験結果では、その影響はそれほど大きく出なかった。この原因としては、暴露環境では降雨の影響によって供試体内部の含水率が高い状態に保たれることや、日光を直接受けることで供試体温度が外気温とは一致しないこと等が考えられる。そこで、表-3には、温度、湿度の他に日照や降雨に関連しそうな情報を記載した。ただし、降雨については、供試体が濡れている時間が関係すると考えられるが、気象庁のデータに降雨時間が無かったので、日照時間によって間接的に評価することとした。また、今回の暴露試験は図-3に示

すように供試体の設置位置が地上から僅か5cm程度の高さであったことから、積雪に埋もれる影響も考えられ、年降雪量も記載した。

表-3 各地の気象データ

	平均気温 (°C)	平均湿度 (%RH)	年間の日照 時間 (h)	年間の降雪量 (cm)
北海道	9.5	67	1,848	424
岩手	11.1	74	1,849	460
宮城	13.3	69	2,031	62
新潟	14.2	73	1,729	100
茨城	14.7	74	2,083	17
香川	16.9	68	1,991	1
福岡	17.5	71	1,838	2
沖縄	23.1	76	1,751	0

中性化深さと気象データとの関連について述べると、まず、平均気温が低い地域では中性化深さはやや小さく、平均気温が高い地域ではやや大きい傾向にあった。また、中性化深さが比較的小さかった地域は年降雪量が多い地域であった。最も大きな中性化深さを示した茨城は、日照時間が最も長かった。

図-9は各地域の2年目の暴露試験結果について、供試体の上面、下面、南面、北面に分けて、それぞれの面からの中性化深さを比較した結果である。これによると、上面の中性化深さが小さくなる地域が比較的多く見られた。

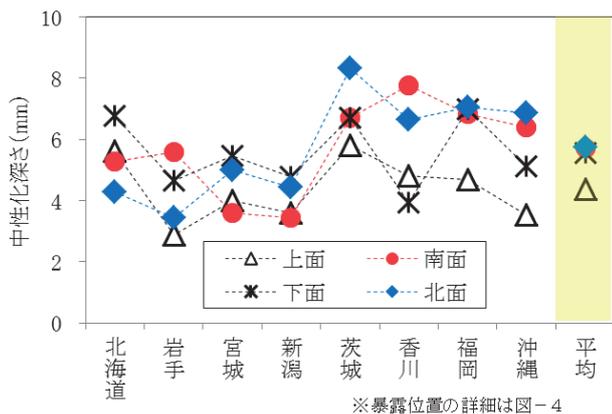


図-9 暴露試験結果
(2年目、暴露面の方向の比較)

上面は降雨の影響を最も受けやすく、コンクリート中の含水率が比較的高い状態にあったものと考えられる。南面と北面とでは、日照の有無による乾燥、コンクリート温度上昇の影響が想定されたが、今回の実験結果の範囲では有意な差は見られなかった。

以上、今回の検討結果より、供試体が乾燥しやすい環境ほど、中性化が進みやすい傾向が伺えた。ただし、地域の違いによる差は顕著ではなく、現在の設計基準を見直す必要性は低いと考える。

4. まとめ

気候や環境条件によるコンクリートの中性化速度の違いについて、促進中性化試験や暴露試験により検討した。今回の実験の範囲では、以下の結果となった。

- (1) 促進中性化試験の結果では、気温が高いほど、また相対湿度が低いほど、中性化深さが大きくなる傾向を示した。
- (2) 降雨等の影響を受ける屋外環境では、室内環境に比較して中性化深さが小さくなる傾向が確認された。
- (3) 暴露地域の比較では、外気温が高い地域、日照時間が長い地域、降雪量が少ない地域で中性化速度が大きい傾向が見られた。ただし、地域の違いによる中性化深さの差は顕著ではなかった。
- (4) 屋外暴露では、上面は下・南・北面より中性化深さがやや小さい傾向があり、雨掛かりの影響と考えられた。

謝 辞

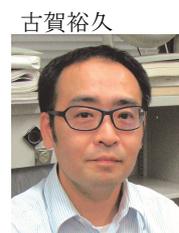
今回の暴露試験は寒地土木研究所、国土交通省東北技術事務所、北陸技術事務所、四国技術事務所、九州技術事務所、内閣府沖縄総合事務所北部ダム統合管理事務所の皆様の協力を得て実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [設計編]、土木学会、2012.12
- 2) 渡辺博志：コンクリートの中性化に与える環境条件の影響～海外での暴露試験から分かったこと～、土木技術資料、第55巻、第9号、pp.46～47、2013
- 3) 国土交通省気象庁ホームページ、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>



片平 博
土木研究所先端材料資源
研究センター 総括主任
研究員
Hiroshi KATAHIRA



古賀裕久
土木研究所先端材料資源
研究センター 上席研究
員、工博
Dr.Hirohisa KOGA