

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289134

研究課題名(和文) 日本全国を網羅したコンクリートの経年劣化の評価に関する基礎モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of basic model on evaluation of aged deterioration of concrete based in exposure test of concrete conducted in whole of Japan

研究代表者

久田 真 (HISADA, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80238295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本全国を網羅したコンクリートの経年劣化の評価に関する基礎モデルを構築する目的で、日本各地に10年間コンクリートを曝露して、外部環境の違いがコンクリートの劣化に及ぼす影響について検討した。その結果、水セメント比が大きいものほど外部作用を強く受けることが、圧縮強度試験や透水試験、中性化試験などから確認できた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to construct a basic model on estimation of aged deterioration of concrete based on several investigation results which were obtained from some exposure tests conducted in whole of Japan during 10 years. This study investigated the influence of the environment on some properties of concrete. As a result, it was confirmed that the concrete with high water to cement ratio was susceptible to environmental effects through compressive test, water permeability test and carbonation test.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：曝露試験 環境作用 耐久性 中性化

1. 研究開始当初の背景

現在、コンクリート構造物の老朽化が社会問題となっている。コンクリート構造物の老朽化は、首都圏では繰返し荷重による疲労が大きな要因であるが、地方ではそれ以外に環境作用による経年劣化も大きな要因となっている。そのため、高規格道路などの重要構造物では、首都圏に限らず交通量の比較的に少ない地域でも補修・補強工事が行われているのが現状である。

環境作用による経年劣化に関して、コンクリートはセメント水相の水和反応によって硬化しており、環境作用を受けない場合において、コンクリート内部では各水和物の平衡が保たれている。しかしながら、環境作用によってコンクリート内部の平衡が乱されると、水和物の変質に伴う劣化が生じる。環境作用が異なれば、コンクリート内部の平衡状態も異なるため、劣化の進行程度もこれに依存して変化すると考えられる。

ここで、日本の環境作用に関して、日本は四季の変化に富み、国土は長大、かつ、種々の山岳地帯により地域が分断されており、コンクリートへの環境作用は地域ごとに多種多様である。このような理由から、日本では、コンクリート構造物の維持管理について、環境作用を一律として取り扱うことは困難であり、地域ごとに適切に環境作用を考慮する必要がある。しかしながら、環境作用による経年劣化は数年で顕在化するものではないため、環境作用の違いがコンクリートの経年劣化に及ぼす影響に関する知見は非常に少ないため、詳細な検討が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、日本各地に10年間曝露した供試体を用いて、まず、種々の環境作用を受けたコンクリートの経年的な性状の変化を取得する目的で、コンクリートの諸物性を曝露地点ごとに整理し、コンクリートの長期性能を評価した。さらには、コンクリートの諸性能と環境作用の関連性を明確にする目的で、コンクリートのセメント水和物の化学分析を行った。そして、環境作用や気象条件、中性化の進行と分析結果を関連付けることによって、環境作用がセメント水和物の変質に及ぼす影響を検討した。なお、一般に中性化と炭酸化は混同して扱われることがあるが、本研究ではコンクリートの性状の変化を正確に述べるために、セメント水和物の炭酸化反応を「炭酸化」、また、コンクリート内部のpHの低下を「中性化」と称し、区別する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の方法により研究を遂行した。

- (1) コンクリート構造物の耐久性評価に資するデータの整理・蓄積を目的として、日本各地に10年間曝露されたコンクリ

ートの諸物性を曝露地点ごとに整理した。また、気象データおよびコンクリートの物性値を指数としてクラスター分析を行い、類似性のある地域をグルーピングした。

- (2) (1)で得られた10年目のコンクリートの性状の変化として中性化に着目し、中性化の進行とセメント水和物の変質の関係について検討を行う。

4. 研究成果

本研究では、普通ポルトランドセメントを結合材として使用してW/C=40, 50, 60%のコンクリートを作製し、表1に示す地点で約10年間コンクリートを曝露した。

表 1 供試体の曝露地点

No.	設置条件	設置場所	所在地
1	封かん	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
2	屋上部	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
3	水中部	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
4	土中部	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
5	封かん	(独)港湾空港技術研究所	神奈川県横浜市長瀬3-1-1
6	屋上部	(独)港湾空港技術研究所	神奈川県横浜市長瀬3-1-1
7	飛沫帯	(独)港湾空港技術研究所	神奈川県横浜市長瀬3-1-1
8	干満部	(独)港湾空港技術研究所	神奈川県横浜市長瀬3-1-1
9	海中部	(独)港湾空港技術研究所	神奈川県横浜市長瀬3-1-1
10	屋上部	北海道大学	札幌市北区北13条西8丁目
11	屋上部	八戸工業大学	八戸市大字妙字大開88-1
12	屋上部	東北大学	仙台市青葉区荒巻字青葉06
13	屋上部	新潟大学	新潟市五十嵐二の町8050
14	屋上部	金沢大学	石川県金沢市小立野2-40-20
15	屋上部	金沢工業大学	石川県石川郡野々市町扇が丘7-1
16	屋上部	群馬大学	桐生市天神町1-5-1
17	屋上部	東京大学生産技術研究所・千葉実験所	千葉市稲毛区弥生町1-8
18	屋上部	首都大学東京	東京都八王子市南大沢1-1
19	屋上部	中部大学	春日井市松本町1200
20	屋上部	岐阜大学	岐阜市柳戸1-1
21	屋上部	京都大学	京都市左京区吉田本町
22	屋上部	大阪工業大学	大阪市旭区大宮5-16-1
23	屋上部	岡山大学	岡山市津島中3-1-1
24	屋上部	広島大学	広島県東広島市鏡山1-4-1
25	屋上部	徳島大学	徳島市南常三島2-1
26	屋上部	九州大学	福岡市東区箱崎6-10-1
27	屋上部	鹿児島大学	鹿児島市都元1-21-40
28	屋上部	琉球大学	沖縄県中頭郡西原町字千原1
29	屋上部	太平洋セメント(株)	千葉県佐倉市大作2-4-2
30	屋上部	(社)セメント協会・研究所	東京都北区豊島4-17-33

本報告書では、取得した基礎物性のうち、代表として封緘供試体(土木研究所)、北海道、仙台、沖縄のデータを示す。

表 2 封緘供試体の基礎データ

	W/C = 40 %	W/C = 50 %	W/C = 60 %
圧縮強度 (N/mm ²) :	80.0	66.1	38.7
中性化深さ (mm) :	-	-	-
空隙率 (%) :	9.8	13.5	15.6
水分透散係数 (10 ³ g/cm ² 日 ^{1/2}) :	4.1	5.8	8.0
透水係数 (10 ⁻⁶ cm/s) :	0.09	0.31	0.46

表 3 北海道曝露供試体の基礎データ

	W/C = 40 %	W/C = 50 %	W/C = 60 %
圧縮強度 (N/mm ²) :	63.9	47.1	48.0
中性化深さ (mm) 二面平均 :	1.0	0.9	1.6
曝露上面 :	0.7	2.0	2.9
曝露底面 :	2.3	0.4	1.4
空隙率 (%) :	10.9	11.4	12.8
水分逸散係数 (10 ³ g/cm ² /日 ^{1/2}) :	5.8	5.9	7.7
透水係数 (10 ⁻⁶ cm/s) :	0.08	0.12	0.25

表 4 仙台曝露供試体の基礎データ

	W/C = 40 %	W/C = 50 %	W/C = 60 %
圧縮強度 (N/mm ²) :	71.5	54.8	55.0
中性化深さ (mm) 二面平均 :	0.4	0.9	2.6
曝露上面 :	0.2	0.7	3.3
曝露底面 :	0.9	1.8	4.0
空隙率 (%) :	11.5	13.3	9.3
水分逸散係数 (10 ³ g/cm ² /日 ^{1/2}) :	3.8	5.9	11.6
透水係数 (10 ⁻⁶ cm/s) :	0.10	0.18	0.18

表 5 沖縄曝露供試体の基礎データ

	W/C = 40 %	W/C = 50 %	W/C = 60 %
圧縮強度 (N/mm ²) :	73.1	59.6	45.4
中性化深さ (mm) 二面平均 :	0.7	2.3	1.8
曝露上面 :	1.1	2.4	0.5
曝露底面 :	0.9	4.1	3.5
空隙率 (%) :	11.3	13.9	13.6
水分逸散係数 (10 ³ g/cm ² /日 ^{1/2}) :	3.9	7.0	8.5
透水係数 (10 ⁻⁶ cm/s) :	0.12	0.17	0.22

表 2~表 5 より、曝露環境が異なることで基礎物性が異なっていることがわかる。例えば、水セメント比 (W/C) が小さい W/C=40 % の実験系に着目すると、北海道に曝露したものは他の曝露地点のものと比較して圧縮強度の発現性は小さかった。そして、封緘養生を 10 年間施したものが最も圧縮強度が大きい結果となった。一方で、W/C が大きい W/C=60 % の実験系に着目すると、封緘養生を施した供試体よりも屋外に曝露した供試体の方が圧縮強度が大きい結果となっている。この要因については様々考えられるが、例えば、水分逸散係数と透水係数を合わせて考えると、以下の理由が考えられる。

水分逸散係数と透水係数は概ね W/C が小さいほど小さくなる傾向であった。したがって、W/C が小さいほど水分の移動は行われ難く、W/C が大きいほど水分は移動し易いということである。この実験事実に基づけば、本研究で使用した供試体では、大まかに W/C=40 % の供試体が最も水分が移動し難く、すなわち、系外からの水の作用を受けにくく、W/C=60 % の供試体が最も水分が移動し難く、すなわち、系外からの水の作用を受け易いと

いうことである。この理由から、W/C=60 % の供試体では、封緘養生を施した供試体よりも屋外に曝露した供試体の方が圧縮強度が大きい結果になったと考えられる。

一方で、系外からの水の作用を最も受けにくい W/C=40 % については最も圧縮強度が大きかったのは封緘供試体であったが、この理由について考える。まず、系外から作用するのが水のみであれば、屋外に曝露した供試体は封緘供試体と同程度の圧縮強度を有していてもおかしくはない。したがって、その他の要因によって、屋外に曝露した供試体の圧縮強度は封緘供試体と比較して低下したものと考えられる。そして、その他の要因の 1 つとして有力なのは、温度の影響が考えられる。W/C=40 % と W/C=50 % の供試体では、北海道に曝露した供試体が最も圧縮強度が小さくなった。北海道は仙台や沖縄と比較すると年平均気温が低く、冬季は氷点下になるため、低温による長期的な水和反応の阻害や凍結による微細ひび割れの影響等が生じ、北海道に曝露した供試体が最も圧縮強度が小さくなった可能性が考えられる。仙台や沖縄に曝露した供試体については、封緘供試体と比較して圧縮強度が小さくなった理由は定かではないが、表層における乾燥・湿潤の繰り返し等により微細なひび割れ等が生じた可能性も考えられるし、その他の要因の可能性も十分に考えられる。ただし、屋外に曝露した供試体については、正の要因については、水分の供給による水和の促進があり、負の要因については、温度や湿度の変化による供試体の劣化が挙げられ、この正負の要因により供試体の圧縮強度が変化したものと考えられる。

次に中性化深さに着目すると、温度等の違いによる整理が難しかったため、詳細な検討を実施した。その結果について、代表的なものを示す。

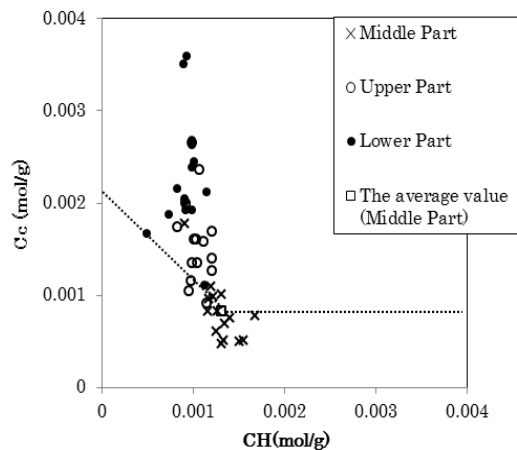


図 1 W/C=60 % 供試体の水酸化カルシウム量とカルサイト量の比較

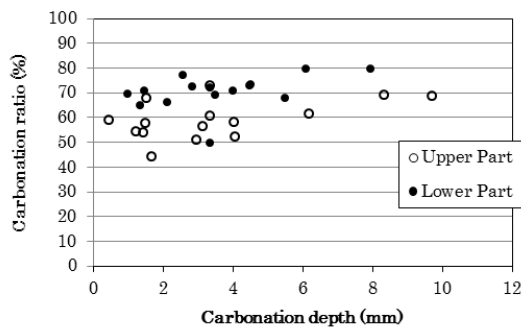


図 2 W/C=60 %供試体の中性化深さと炭酸化率の関係

図 1 と図 2 はそれぞれ、W/C=60 % 供試体の水酸化カルシウム量とカルサイト量の比較と W/C=60 % 供試体の中性化深さと炭酸化率の関係を示したものである。

図 1 に示してある線は、水酸化カルシウムのみがカルサイトに変質した際のものであるが、概ねこの直線と比較して水酸化カルシウム量とカルサイト量の関係が上に位置していることがわかる。これは、水酸化カルシウムの反応量に対してカルサイトの生成量が多いことを表しており、すなわち、水酸化カルシウム以外の水和物も炭酸化したことが考えられる。また、×点は供試体中心部、白点は供試体の曝露上面部、黒点は供試体の曝露底面部を示しているが、曝露上面部と比較して、曝露底面の方が水酸化カルシウム以外の水和物も炭酸化している傾向にあることがわかった。

次に図 2 に着目すると、同じ中性化深さの供試体同士を比較すると、曝露底面の方が曝露上面部と比較して炭酸化が進行している傾向にあることが確認できた。この意味については、曝露底面の方が湿潤な環境になりやすく、そのため炭酸化が進行したものと考えられる。一方で、曝露上面部については、日光や風の影響等で乾燥しやすかったために炭酸化の進行が曝露底面と比較して小さかった可能性が考えられるが、それでもコンクリートの中性化が停滞しているとは言いきれず、このメカニズムについては、詳細に検討する必要があると考えられる。

また、水酸化カルシウム量とカルサイト量について、すべての曝露地点の供試体をまとめて標準偏差を計算したものを図 3 に示す。

図 3 より、まず、水酸化カルシウム量の標準偏差と比較して、カルサイトの標準偏差の方が概ね大きくなっていることがわかった。この結果は、すべての曝露地点の測定値の差を示しているものであるため、環境作用によってカルサイトの生成量に違いが生じた結果、標準偏差が大きくなったと推察した。さらには、W/C 毎で確認すると、W/C=60 % の供試体が最も標準偏差が大きくなった。この点についても、W/C が大きいほどコンクリートは粗になるため、環境作用が強く表れたと考えられる。

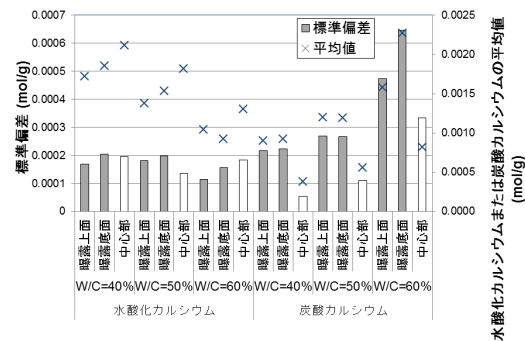


図 3 測定部位ごとの水酸化カルシウムおよびカルサイトの標準偏差と平均値

最後に、本研究で得られた成果を取りまとめる。

- (1) 圧縮強度に着目した場合、水セメント比が小さいものについては、封緘養生を施した供試体の方が実環境に曝露した供試体と比較して強度は大きくなる傾向であった。
- (2) 圧縮強度に着目した場合、水セメント比が大きいものについては、封緘養生を施した供試体と比較して実環境に曝露した供試体の強度は大きくなる傾向であった。
- (3) (1), (2)について理由を考えると、水分逸散係数や透水係数が高水セメント比ほど大きくなる傾向にあったことから、水セメント比が大きい供試体ほど系外からの水の作用を受け易く、封緘養生を施した供試体と比較して水和が増進し、圧縮強度が大きくなったと考えた。
- (4) 中性化について、カルサイトの生成量と水酸化カルシウムの反応量に着目すると、同中性化深さで比較した場合、供試体の曝露上面部と底面では曝露底面の方が炭酸化が進行している傾向が確認できた。
- (5) すべての供試体を水セメント比毎で取りまとめた場合、水酸化カルシウム量とカルサイト量では、カルサイト量の方が標準偏差が大きかった。さらには、水セメント比が大きい方が標準偏差が大きかった。すなわち、水酸化カルシウムと比較してカルサイトの方が、また、高水セメント比の方が、環境作用の影響が強く表れ、曝露地点毎の差が大きくなったと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

倉田和英, 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真: 日本各地に10年間曝露したコンクリートの中性化によるポルトラングライト量の変化と水セメント比の関係, セメン

ト・コンクリート論文集，Vol.70，
pp.435-442, 2017，査読有．

〔学会発表〕(計2件)

倉田 和英，宮本 慎太郎，皆川 浩，
久田 真：異なる環境に10年間曝露し
たコンクリートの環境作用の影響に関
する検討，平成26年度土木学会東北支
部技術研究発表会，2015年3月7日，東
北学院大学多賀城キャンパス（宮城県・
多賀城市）．

倉田和英，宮本慎太郎，皆川浩，久田真：
異なる環境に10年間曝露したコンクリ
ートの中性化の進行と気象条件との関
係，土木学会第70回年次学術講演会，
2015年9月16日，岡山大学津島キャン
パス（岡山県・岡山市）．

6．研究組織

(1)研究代表者

久田 真 (HISADA MAKOTO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80238295

(2)研究分担者

皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10431537

宮本 慎太郎 (MIYAMOTO SHINTARO)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60709723