

論文 実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響

松田 芳範^{*1}・上田 洋^{*2}・石田 哲也^{*3}・岸 利治^{*4}

要旨: 外部環境に晒される既設構造物の中性化深さについて調査を行った。その結果、実環境での中性化深さはコンクリート表面における雨水等の水の影響が顕著であることがわかった。また、普通ポルトランドセメントを使用したと推定されるコンクリート構造物と、高炉セメントを使用したと推定されるコンクリート構造物の中性化深さに大きな差が無いことがわかった。その一方で、調査を行った構造物から採取したコアを用いた促進中性化試験では、高炉セメント使用コンクリートが普通ポルトランドセメント使用のコンクリートに比べ中性化が早い結果となった。

キーワード: 中性化, 実構造物, 経年, 普通ポルトランドセメント, 高炉セメント, 水, 促進中性化試験

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象の一つに中性化がある。中性化が進行することにより細孔溶液の pH が低下し、コンクリート中に配置されている補強鋼材（鉄筋等）の不動態皮膜が破壊され鋼材が腐食するため、構造物の健全性を損なう要因とされている。このためコンクリート標準示方書「設計編」¹⁾では、耐久性に関する照査を行い、設計耐用期間に渡り所要の性能を確保するように定められている。この照査に用いる中性化の予測式では、高炉セメントを使用する場合には普通ポルトランドセメントを使用する場合と比べて、中性化の進行が早いとされる。しかしながら、依田らは高炉セメントを用いて長期間暴露試験を行った結果、中性化の進行は普通ポルトランドセメントと大きく変わらないことを報告している²⁾。このような違いを検証し、より良い予測式を構築していくには、供試体による実験を進めるとともに、実構造物における中性化深さの実態を知ることが必要である。

そこで、本研究では実構造物における中性化の進行に着目し、主に乾燥湿潤環境の違いと使用セメントの違いが中性化の進行に与える影響について考察した。

2. 調査方法

2.1 調査構造物概要

表-1 に調査を行った構造物の概要を示す。調査構造物は、北海道から沖縄までの日本各地に存在しているので、鉄道関連構造物を主体として、橋梁 21 箇所、トンネル 2 箇所、道路関連構造物 6 箇所、水路施設 2 箇所、建築構造物 3 箇所、海洋構造物 2 箇所の計 36 箇所で行った。これら対象構造物の経年は、7年から93年と幅広い。図-1 に経年別の調査箇所数を示す。経年 20 年から 59 年については、コンクリートへの加水が問題視される前

表-1 調査構造物一覧

No.	分類	名称	区分	材齢	セメント種別	測定数
1	鉄道橋	N 橋	PC 桁	7	OPC	4
2	鉄道橋	N 橋	PC 桁	8	OPC	2
3	鉄道橋	HW 高架	床版	27	OPC	16
4	道路橋	G	PC 桁	10	早強	2
5	鉄道橋	D 橋	PC 桁	53	早強	3
6	鉄道橋	D 橋	橋台	53	OPC	1
7	鉄道トンネル	N T	覆工	92	OPC	1
8	道路橋	TE 橋	PC 桁	18	早強	1
9	道路橋	T 橋	PC 桁	42	早強	2
10	鉄道橋	R 線	橋脚	33	高炉	3
11	道路橋	C 橋	PC 桁	57	早強	1
12	鉄道橋	TH 橋	PC 桁	55	早強	1
13	鉄道トンネル	O T	覆工	74	OPC	1
14	鉄道橋	N 橋	橋脚	67	OPC	2
15	水路施設	K	堤体	45	FA	1
16	水路施設	S	付帯物	68	FA	1
17	鉄道橋	T 橋	橋脚	43	高炉	2
18	鉄道橋	K 高架	柱	56	OPC	2
19	道路橋	Y 橋	橋台	25	高炉	1
20	道路橋	O 橋	橋脚	66	OPC	2
21	建築物	SK	壁	50	高炉	1
22	建築物	SK	支柱台	49	高炉	1
23	建築物	SK	壁	48	高炉	1
24	鉄道橋	S 橋	RC 桁	86	OPC	4
25	護岸	K	護岸壁	9	OPC	1
26	護岸	K	護岸壁	9	FA	2
27	鉄道橋	R 線	橋脚	20	高炉	1
28	鉄道橋	R 線	橋脚	32	高炉	5
29	鉄道橋	R 線	RC 桁	20	高炉	2
30	鉄道橋	R 線	橋脚	34	高炉	23
31	鉄道橋	R 線	RC 桁	34	高炉	2
32	鉄道橋	K 橋	橋脚	11	OPC	3
33	鉄道橋	T 橋	橋脚	28	高炉	2
34	鉄道橋	H 高架	柱	15	OPC	2
35	鉄道橋	A 高架	柱	30	OPC	3
36	鉄道橋	W 橋	橋脚	40	OPC	2

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター 副課長 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート材料研究室 室長 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

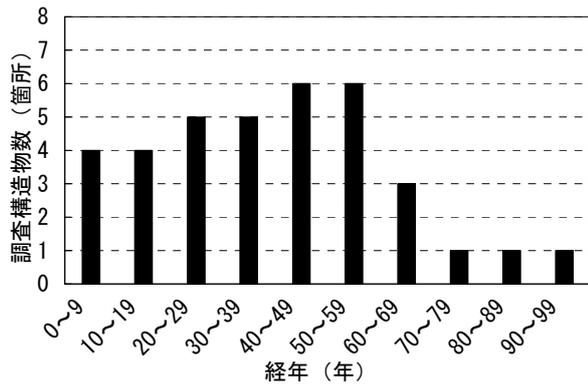


図-1 経年別調査箇所数

の時代背景を考慮し多めに調査対象とした。中でも経年40年から59年の間については高度成長期前に建設された構造物として位置付けた。調査対象構造物のコンクリートについて使用されたセメント種別を区分したところ、普通ポルトランドセメント（以下 OPC）15箇所、早強ポルトランドセメント（早強）6箇所、高炉セメント（高炉）12箇所、フライアッシュセメント（FA）3箇所となった。

2.2 現地調査方法

調査は対象箇所にドリルで数ヶ所穿孔した後、タガネで周囲をハツリ、コンクリート破面を露出させ1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して赤紫色に呈色しない領域を測定した。また、コア採取が可能な箇所についてはコアを削孔した後の孔内で測定した。測定はハツリ箇所およびコア採取後の孔内を4等分して各箇所で行った。骨材が存在した箇所では左右の直近位置で測定した。

測定位置は、トンネル覆工コンクリートでは側壁、橋梁や高架橋、建築構造物では橋台、橋脚、柱、壁、また水路施設等については歩行通路等の壁面とし、地盤面または床面から1.0~1.5m程度の高さで行った。PC桁およびRC桁はウェブ、下フランジ下面、スラブ端面等で行い、床版はコアボーリングにて貫通コアを採取して床版の上面および下面で測定した。護岸壁は水面から2.0m程度高い位置において、飛沫帯ではあるものの常時水の影響を受ける位置ではない箇所で行った。

2.3 使用セメント区分方法

調査構造物のセメント種別の区分は、各構造物の財産記録、当時の施工記録や規程等といった設計図書類（セメント種別、設計配合等）、採取コアによる分析などから推定して区分を行った。また、建設当時の時代背景等を検討し、当時一般的に使われたと考えられるセメント種類や配合等の情報も参考にした。表-2にPC桁の現場配合の例、表-3にRC構造物の示方配合の例を示す。

採取コアによる分析は、一部の構造物を対象として高炉セメント使用の有無を推定したもので、ここでは電子顕微鏡観察およびエネルギー分散型X線分光法による分

表-2 PC桁の現場配合例

設計基準強度 (kgf/cm ²)	セメント種類	W/C (%)	スランプ (cm)	配合 (kg/m ³)				
				セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
400	普通	40	15	413	165	765	972	5.37

表-3 RC構造物の示方配合例³⁾

設計基準強度 (kgf/cm ²)	セメント種類	粗骨材 Max (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	耐久性から定まるW/C (%)
240	普通	25	12±2.5	4±1.0	53

析、水酸化カルシウムの有無、加熱によるスラグの結晶化から高炉スラグの混和を推定する手法⁴⁾を応用した方法などを用いた。

2.4 促進中性化試験

構造物から採取したコア試料の一部を用いて促進中性化試験を行った。試験方法は、自然環境での中性化部分を切断除去した内部コアの上面および底面にコーティング処理を施し、一定環境下（温度20℃、相対湿度60%、炭酸ガス濃度10%）で試験を行ったのち、円柱コアを輪切りにし断面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化を測定した⁵⁾。

3. 調査結果と考察

3.1 中性化深さ全データと経年の関係

図-2に全構造物の中性化深さと経年との関係を示す。中性化深さには大きなばらつきがみられ、中性化深さの最大値は経年74年のトンネル覆工コンクリートで40mmであった。当該トンネルの覆工コンクリートは無筋であるため、中性化が直接耐久性に影響するものではないが、当時のコンクリート品質および施工技術などを検討するため調査対象とした。同じ覆工コンクリートで経年92年の覆工コンクリートは中性化深さが僅か5mm程度であったことから、同時期に建設された構造物であってもコンクリート品質の差は大きいものと思われる。

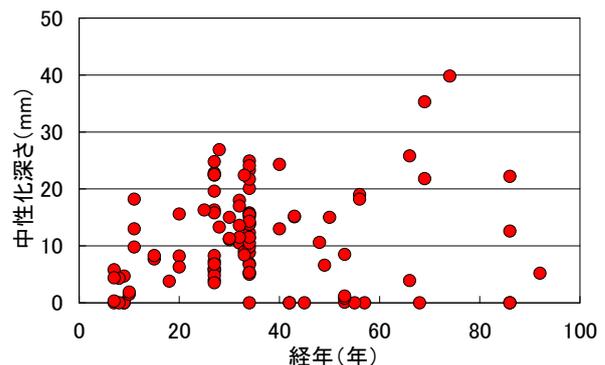


図-2 中性化深さ(全データ)

3.2 水セメント比領域区分ごとの傾向

中性化深さにばらつきがみられる原因の一つとして、コンクリートの配合、特に水セメント比が異なることが考えられる。調査対象とした各構造物に実際に打設されたコンクリートの水セメント比は明らかではないので、ここでは設計図書類や構造形式などからおおよその水セメント比を推定することとした。

図-3 に設計 W/C=40%以下と推定される構造物の中性化深さを示す。これらは主に PC 桁の値であり、低 W/C の領域では中性化の進行が遅いことがわかる。土木学会中性化予測式¹⁾(1)では、普通ポルトランドセメントの場合、W/C=40%以下では中性化は進行しないことになるが、概ねこれを裏付ける結果であった。ただし、経年の浅い構造物で中性化が進行している状況も見られた。

$$y d = \gamma c b \cdot \alpha d \sqrt{t} \quad (1)$$

$$\alpha d = \alpha k \cdot \beta e \cdot \gamma c$$

$$\alpha k = \text{中性化速度係数} \quad -3.57 + 9W/C$$

$$\beta e = \text{環境係数} \quad 1.6$$

$$\gamma c d = \text{安全係数} \quad 1.15$$

$$\gamma c = \text{材料係数} \quad 1.0$$

また、図-4 に設計 W/C=53%~60%程度と推定される構造物の中性化深さを示す。調査の結果、非常にバラツキが多い結果となった。

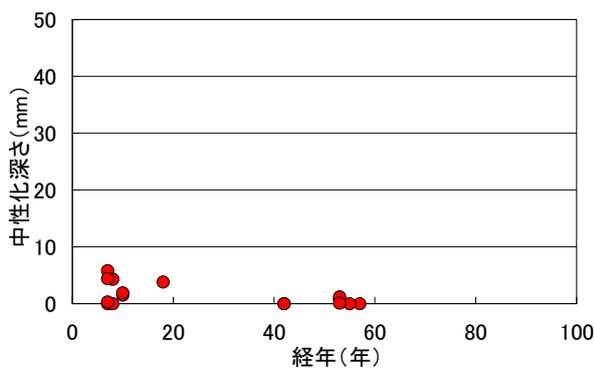


図-3 中性化深さ(W/C=40%以下)

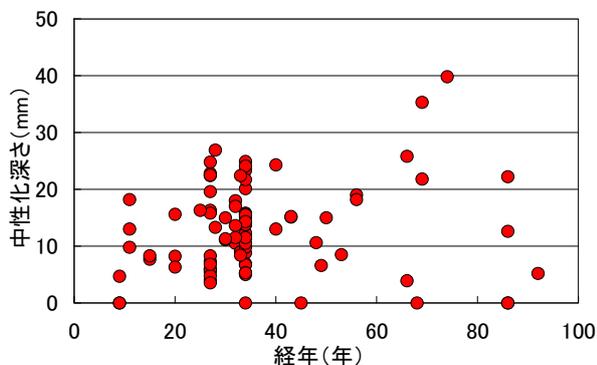


図-4 中性化深さ(W/C=53~60%程度)

3.3 セメント種別ごとの傾向

設計 W/C=40%以下のデータを除き、推定された使用セメント種別ごとに中性化深さと経年の関係を整理した。

図-5 に普通ポルトランドセメント、図-6 に高炉セメント、図-7 にフライアッシュセメントの調査結果を示す。普通ポルトランドセメントは経年7年~92年と広くデータを得ることが出来たが、明確な傾向を示すものとはなっていない。時間の経過とともに中性化が進行しているように見られるが早い段階から中性化深さに幅がみられる。高炉セメントについてもやはり幅がみられるが、本調査の結果からは時間経過に伴う進行が顕著には見られない。フライアッシュは、今回調査を行った範囲では中性化を確認できなかった。

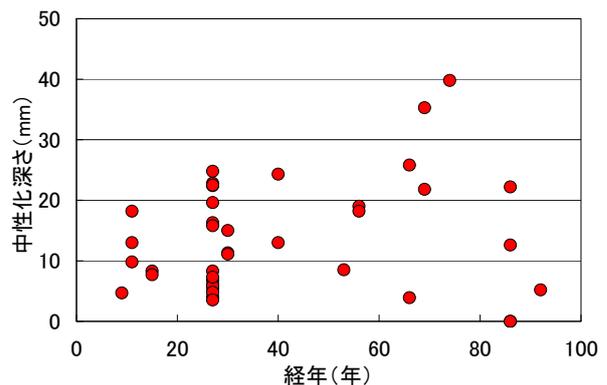


図-5 普通ポルトランドセメントの中性化深さ

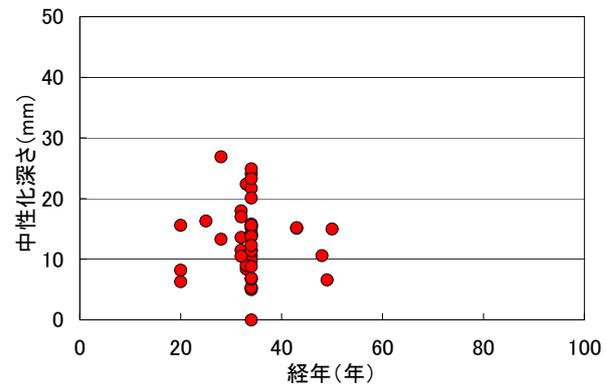


図-6 高炉セメントの中性化深さ

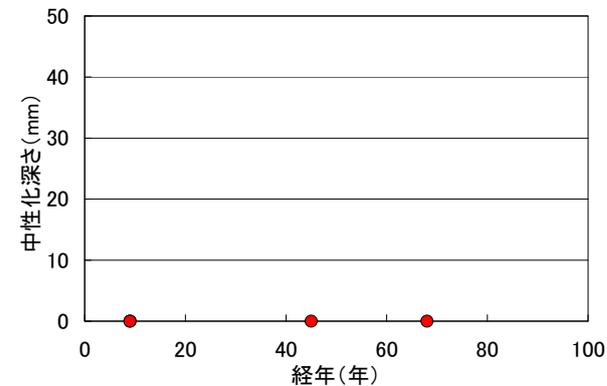


図-7 フライアッシュセメントの中性化深さ

3.4 水の影響の有無の違いによる傾向

実構造物では、現地の外部環境としてコンクリート表面の乾燥または湿潤が中性化の進行に大きな影響を与えることが知られており、土木学会式(1)でも環境係数 βe

が与えられている。写真-1に、外観から水の影響の有無が判別されるコンクリート表面状態の例を示す。日射や雨掛り、また土壌からの吸水などによりコンクリートの含水状態は変化すると考えられるが調査時に表面水の影響の違いが表面の色彩から明確に判別できた。以下、水の影響が有るまたは多いと考えられる場所と乾燥状態が維持され水の影響が無いまたは少ない場合の中性化深さを区別して述べる。

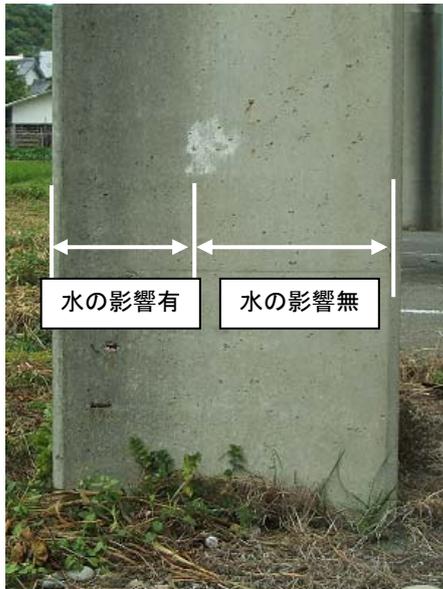


写真-1 コンクリート表面の水の影響範囲

図-8に、雨水等による水掛りの影響の有無により区別した普通ポルトランドセメントの中性化深さの結果を示す。図-5では中性化深さに大きなバラツキが見られたが、表面への水の影響の有無を考慮した結果、バラツキが小さくなり、時間の経過とともに中性化が進行する傾向を示すことがわかる。

同様に、図-9に高炉セメントの場合、図-10にフライアッシュセメントの場合の結果を示す。高炉セメントでも水の影響を考慮した結果、バラツキが小さくなり水の影響が無いまたは少ない場合には、時間の経過によって中性化が進行する傾向が見られる。しかし、水の影響が有るまたは多い場合には、時間の経過に関わらず中性化深さが15mm程度に留まっている傾向も認められる。フライアッシュセメントと区分したものは僅か3点のみであるが、水の影響を受けている場合といない場合、どちらも中性化深さは0mmであった。なお、経年45年と68年の調査箇所は、直接水の影響は受けていないものの比較的高湿度環境に位置している。

3.5 同品質間で比較した水の影響の有無の違い

前節で行った比較では、種々の品質のコンクリートが混在していた。そこで、同一の構造物から水の影響のみが異なる隣接する箇所においてコンクリート品質が同じ

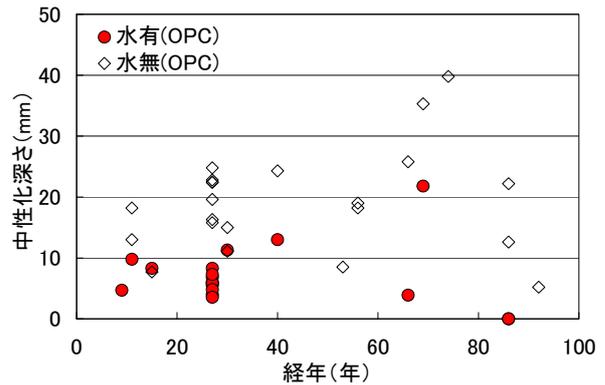


図-8 水の影響の有無による比較 (OPC)

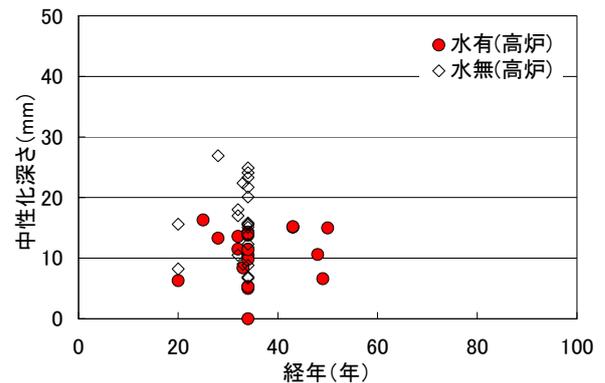


図-9 水の影響の有無による比較 (高炉)

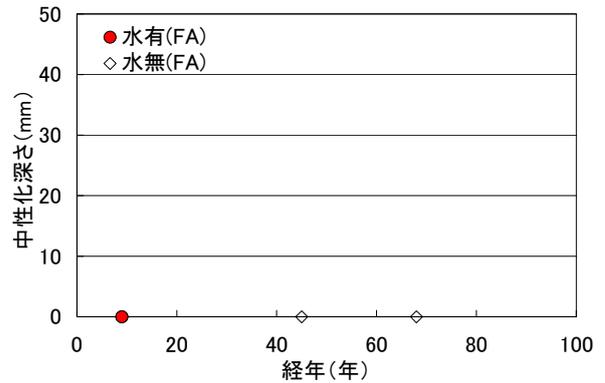


図-10 水の影響の有無による比較 (FA)

と考えられる位置での水の影響の有無について検討した。図-11および図-12に普通ポルトランドセメントと高炉セメント別に同一の品質と見なせるコンクリートにおける水の影響の有無による中性化深さの相違を対比させて示した。このように、同一のコンクリート品質ごとに比較した場合には、水の影響を受ける位置と受けない位置での差が明確に現れており、水の影響を受けた位置では中性化深さが小さくなっている。

図-11には、土木学会式(1)を用いて、普通ポルトランドセメント、W/C=55%とした場合の乾燥しやすい環境 ($\beta_e=1.6$)と乾燥しにくい環境 ($\beta_e=1.0$)における中性化深さの経年変化の算定値を示した。なお、W/C=55%としたのは、実構造物の設計配合はW/C=53~60%程度と推定されるため、近似値をW/C=55%と設定し予測値

と実測データを比較した。この算定値では、経年 40 年の場合、中性化深さは乾燥しやすい環境で約 17mm、乾燥しにくい環境では約 10mm となる。実測値では経年 40 年の構造物で、水の影響を受けない箇所で約 25mm、水の影響を受ける箇所で約 13mm である。この構造物の W/C は特定できていないが、W/C=55%の算定値と比べて、中性化が早い傾向となっている。

図-12 に普通ポルトランドセメントと同様に、高炉スラグ微粉末 45%置換の高炉セメント、W/C=55%とした場合の乾燥しやすい環境 ($\beta e=1.6$) と乾燥しにくい環境 ($\beta e=1.0$) における中性化深さの経年変化の中性化算定値を示す。高炉セメントをスラグ 45%置換としたのは、高炉 B 種の JIS 規格で高炉スラグ微粉末置換率が 30~60%であることから、その中心値とした。算定値では経年 33 年の場合、乾燥しやすい環境で約 23mm、乾燥しにくい環境では約 14mm となる。実測値では影響を受けない箇所で約 13mm、水の影響を受ける箇所で約 5mm である。経年 28 年の構造物では影響を受けない箇所で約 27mm、水の影響を受ける箇所で約 13mm となっており、水の影響を受ける箇所では算定値とほぼ同じであるが影響を受けない箇所の中性化は早い傾向を示している。このように算定値と比べ水の影響の有無による差が生じていることがわかる。経年 28 年の構造物を除けば算定値と比べて中性化が遅い傾向となっている。

3.6 セメント種類の影響

図-13 に水の影響を受けない場合の普通ポルトランドセメントと高炉セメントの中性化深さの実測値を示す。図中には W/C=55%、土木学会式(1)を用いて環境条件を乾燥しやすい ($\beta e=1.6$) とした場合の普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 45%置換の高炉セメントの中性化算定値を示す。算定値では、高炉セメントは経年 40 年において中性化深さが約 25mm となり、普通ポルトランドセメントの約 1.5 倍進行することになる。中性化深さの算定値と比較すると、普通ポルトランドセメントは経年が同じであれば、中性化深さの実測値は算定値よりも大きい傾向を示している。ただし、古い構造物の中には中性化深さが小さいものもあることから、コンクリート品質の相違の影響もあると考えられる。高炉セメントもバラツキは大きいですが、算定値と比較すると今回の調査結果では実測の最大値が概ね算定値と同程度となっている。このことは、算定値よりも今回の調査対象構造物では中性化が進行していないことを示している。これらの理由についてはさらなる検討が必要であるが、本調査の範囲においては図-13 に示すように、普通ポルトランドセメントを使用したと推定されるコンクリートと、高炉セメントを使用したと推定されるコンクリートにおいて、中性化深さに大きな違いが認められないこと

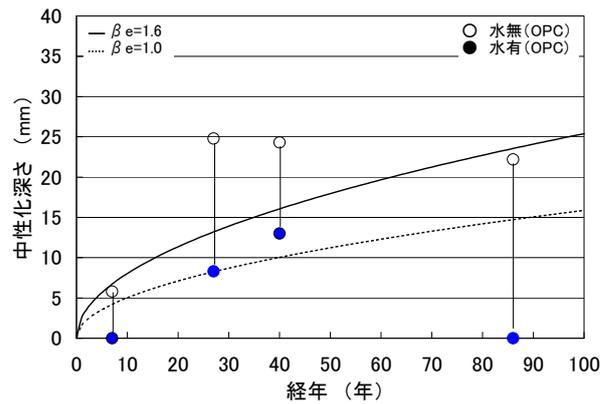


図-11 同品質における水の影響比較 (OPC)

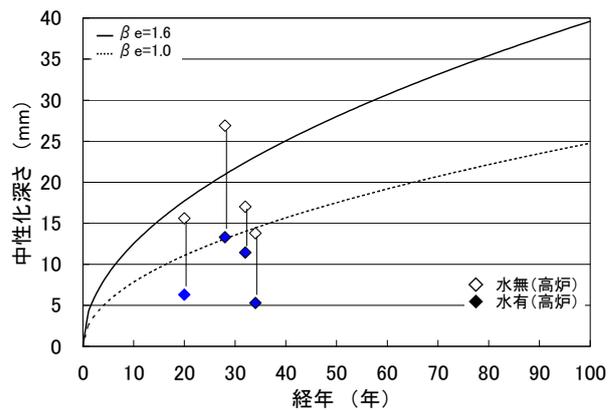


図-12 同品質における水の影響比較 (高炉)

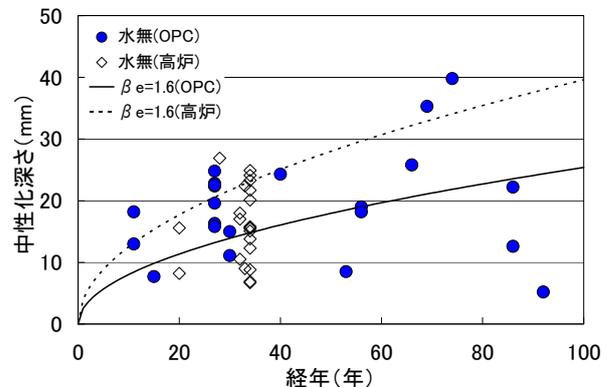


図-13 セメント種類による比較 (水の影響無し)

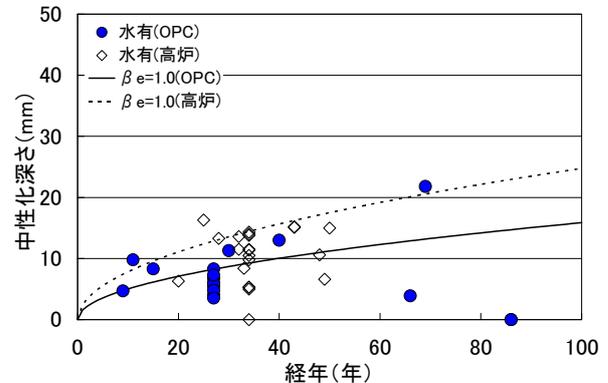


図-14 セメント種類による比較 (水の影響有り)

がわかる。

これは、高炉セメントの中性化の進行は普通ポルトラ

ンドセメントの約 1.5 倍になるという算定結果と傾向を異にする結果である。コンクリートの品質の影響を考慮する必要はあるものの、実構造物の実態としてこのような結果が得られたことから、実環境下においては普通ポルトランドセメントと高炉セメントの中性化の進行性にほとんど差が生じない可能性があるといえる。

図-14 に水の影響を受けた場合の普通ポルトランドセメントと高炉セメントの中性化深さの比較を示す。普通ポルトランドセメントの中性化深さは経年 40 年の構造物で約 13mm となっており、算定式の普通ポルトランドセメントと高炉セメントとの中間程度の値であった。水の影響を受ける環境下の結果でも高炉セメントの方が僅かに大きい傾向を示しているものの両者でほとんど変わらないと思われる。少なくとも実環境下の実構造物においては、実務上両者の差は無いに等しいと考えられる。

3.7 促進中性化試験

図-15 に採取コア供試体による促進中性化試験の結果を示す。コア供試体の実構造物での中性化深さの実測データは壁高欄 (OPC) が経年 29 年、雨水の影響を受ける環境で殆ど中性化していなかった。橋脚 (高炉) は経年 33 年、水の影響は少ない環境にあり 20mm 程度であった。高濃度の CO₂ 環境下では、高炉セメントを使用したコンクリートコアの中性化速度が大きいことがわかる。土木学会式(1)によれば、高炉セメントを用いた場合、混和材の種類により定まる定数 k を 0.7 と設定するため、中性化速度係数は大きく算定される (図-13)。すなわち促進中性化試験の結果と土木学会式の取り扱いが整合する。しかしながら、3.6 節で述べた実構造物の中性化深さの調査結果では、普通ポルトランドセメントと高炉セメントとの中性化深さに大きな差が見られない。この事実は、セメント種類を変えた際に、実構造物における中性化の進行が促進中性化試験の結果と定性的に異なる可能性を示唆している。これは、促進中性化試験では CO₂ 濃度が相当に高く常に乾燥状況下で行われるのに対し、実環境では CO₂ 濃度が低く降雨や湿度の影響を受けるなど、幾つかの相違点があるためと考えられる。

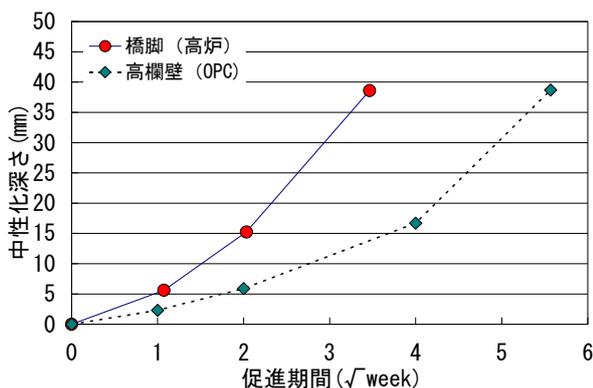


図-15 促進中性化試験結果

4. まとめ

今回、広範囲において実構造物の中性化深さ調査を行った結果、下記の知見が得られた。

- (1) 実環境における実構造物の中性化深さの値は普通ポルトランドセメント、高炉セメントともにバラツキが大きいことがわかった。これは実構造物の品質差が影響していることを示唆するものと考えられる。
- (2) コンクリート表面に水の影響を受けると中性化の進行が遅くなることが確認できた。同一品質のコンクリートでこの差は大きく、現在の予測式での β_e を検証する必要がある。
- (3) 実環境下における実構造物の中性化深さにおいて、普通ポルトランドセメント使用コンクリートと高炉セメント使用コンクリートの中性化深さは経年に関わらずその差は小さい結果となった。
- (4) 実構造物から採取したコア供試体を用いた促進中性化試験では、高炉セメント使用の方が中性化速度が早いという結果を得た。
- (5) 実構造物の中性化深さと促進中性化試験の中性化速度の結果で、普通ポルトランドセメントと高炉セメントで違いが見られることが判った。

謝辞

本研究の一部は国土交通省建設技術研究開発費補助金を受けて実施した。また、現地調査は、土木学会コンクリート委員会「歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会 (216 委員会)」、「構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会 (335 委員会)」の活動の一環として実施した。芝浦工業大学伊代田助教には貴重な調査データをご提供いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会編：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2008.3
- 2) 依田彰彦：40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果，セメントコンクリート論文集，No.56，pp.449-454，2002.
- 3) 日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局編集：上越新幹線工事誌 (水上・新潟間)，pp.197-198，1983.3
- 4) 佐川孝広，名和豊春：リートベルト法及び選択溶解法による高炉スラグの反応率測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.209-214，2006
- 5) 中野秀樹，石田哲也：同一コアサンプルを用いた促進ならびに自然環境下における中性化進行比較と分析法による微視的機構の解明，第 62 回セメント技術大会講演要旨，pp.254-255，2008.