

論文 文献調査に基づく屋外の中性化進行予測

長谷川 拓哉^{*1}・千歩 修^{*2}

要旨：屋外におけるコンクリートの中性化進行予測について、関連する文献調査を行い、普通コンクリートの屋外暴露試験データを抽出し、検討を行った。その結果、屋外の中性化深さの平均的な値に対し、既往の実験式（岸谷式、和泉式、依田式、土木学会式）は安全側の評価をしていること、地域によるばらつきは、部位のばらつきと同程度であり、進行予測には地域条件とともに部位条件を考慮することが重要であることなどが知見として得られた。

キーワード：中性化、屋外暴露、文献調査、地域・環境条件

1. はじめに

コンクリートの中性化深さは、鉄筋コンクリート構造物の維持保全を考える上で、基礎的な指標となっている。現在、数多くの研究により、メカニズムが解明されてきているとともに、その進行予測については多くの提案がなされている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。しかし、屋外暴露条件における中性化の進行予測は、材料条件と地域・環境条件が複雑に絡んでいるため、現在のところ十分とはいえず、各実験式の位置づけも明確でない。本論文では、文献調査を行い、抽出した屋外暴露試験データに基づき、屋外暴露条件における中性化予測について検討を行った結果を報告する。

2. 文献調査の概要

調査対象は、コンクリート工学年次大会論文集、セメント・コンクリート論文集（セメント技術年報）、日本建築学会大会梗概集、日本建築学会構造系論文集等とした。これらの文献の中から、1年以上の長期屋外暴露試験による中性化深さのデータがある39編を抽出し、249のデータを抽出した。抽出データは、基礎的な考察を行うことを目的としたため、普通ポルトランドセメント、普通の骨材のコンクリートを対象とし、AE減水剤などの混和剤を除き、混和材料を使用したコンクリートは調査対象外とした。表1にデータを引用した文献を示す。なお、

同じ試験体に関して、定期的に報告がある事例については、最新のものを引用した。抽出したデータの概要を図1に示す。抽出したデータは、水セメント比55%のものが多く、強度では、30～40N/mm²のものが多かった。また、期間では15年程度、地域では北海道、試験体形状では10φ×20cm、養生方法では14日20℃水中養生が多かった。概要より、抽出したデータは、一般的なコンクリートの中性化深さのデータであると判断し、以下の検討を行うこととした。

3. 文献調査の結果

3.1 結果の概要

収集したデータを水セメント比ごとに整理した結果を図2に示す。同じ図に、現在中性化進行予測に一般的に用いられている実験式（岸谷式¹⁾、和泉式²⁾、依田式³⁾、土木学会式⁴⁾）条件は標準的なもの）を示すとともに、最小自乗法による回帰式を示している。示したデータは、ばらつきが大きい、このばらつきは、骨材、混和剤などの材料、試験体形状、施工状況、養生方法、暴露地点・状況などが原因と考えられる。このうち、試験体形状、材料、施工方法はJIS規格に準拠するなど一定の範囲にあると考えられるため、ばらつきに対する影響は小さく、ばらつきは主として養生方法、暴露環境に起因すると仮定して以下の検討を行うこととした。

*1 北海道大学大学院 工学研究科空間性能システム専攻助教授 博（工）（正会員）

*2 北海道大学大学院 工学研究科空間性能システム専攻教授 工博（正会員）

表-1 引用文献

[1] 椎名国雄、「コンクリートの長期材令にわたる強度性状」、コンクリートジャーナル8-8、1970.8
[2] 森永繁ほか、「コンクリートの中性化および鉄筋の免蝕に関する研究 海砂、海水、塩カル系早強剤の影響(その1)」、日本建築学会大会梗概集、1971.11
[3] 長谷川寿夫ほか、「超早強セメントを使用したコンクリートの長期材令にわたる性状」、セメント技術年報32、1978
[4] 田畑雅幸ほか、「膨張材を用いたコンクリートの寒冷地における暴露試験」、セメント技術年報33、1979
[5] 岸谷孝一ほか、「耐硫酸塩セメントを用いたコンクリートの耐海水性に関する研究」、セメント技術年報35、1981
[6] 阿部道彦、「破砕コンクリートの長期材令における性状について(その1 材令3年までの結果)」、日本建築学会大会梗概集、1981.9
[7] 城所卓明ほか、「軽量コンクリートの中性化に関する長期試験」、セメント技術年報38、1984
[8] 伊沢克夫ほか、「海洋構造物の鉄筋腐食について・その2」、日本建築学会大会梗概集、1984.10
[9] 富田六郎ほか、「膨張コンクリートの耐久性について」、セメント技術年報39、1985
[10] 洪悦郎ほか、「各種セメントを用いたコンクリートの材令20年までの中性化およびひびわれの状況」、セメント技術年報39、1985
[11] 長谷川寿夫ほか、「各種コンクリートによる凍害の地域差に関する長期暴露試験」、セメント技術年報40、1986
[12] 牧野正義ほか、「各種ポルトランドセメントを用いたモルタルおよびコンクリートの基礎的性状」、セメント技術年報41、1987
[13] 杉田修一ほか、「重鉛水砕スラグを用いたコンクリートの品質に関する2、3の検討」、セメント技術年報42、1988
[14] 長尾之彦ほか、「35年間暴露したスラグ高含有セメントコンクリートの性状」、コンクリート工学年次論文報告集12-1、1990
[15] 武若耕司ほか、「しらすコンクリートの長期強度特性および耐久性について」、セメント・コンクリート論文集No.45、1991
[16] 依田彰彦ほか、「高炉スラグ細骨材コンクリートの10年までの性質」、AIJ大会梗概集、1993.9
[17] 平田成秀ほか、「塩化物イオン総量を変えたコンクリート中の鉄筋の腐食と防食に関する研究(その3 屋外自然暴露3年と5年の結果)」、日本建築学会大会梗概集、1993.9
[18] 迫田恵三ほか、「酸性雨環境下に屋外暴露したコンクリートの性質」、コンクリート工学年次論文報告集16-1、1994
[19] 笹谷輝彦ほか、「自然環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食性状」、コンクリート工学年次論文報告集16-1、1994
[20] 枝広英俊ほか、「塩分濃度が異なる海砂コンクリート中の鉄筋の腐食と防食に関する研究(材齢10年の結果とオートクレーブによる腐食促進の結果など)」、日本建築学会大会梗概集、1994.9
[21] 竹田宣典ほか、「海洋環境下に10年間暴露した鉄筋コンクリートの経年変化」、コンクリート工学年次論文報告集18-1、1996
[22] 枝広英俊ほか、「海砂を用いたコンクリート中の鉄筋の免蝕と防食に関する研究(材齢10年を経過した屋外暴露試験の結果)」、日本建築学会大会梗概集、1996.9
[23] 迫田恵三ほか、「海洋環境下に10年間暴露した低品質骨材コンクリートの性質」、コンクリート工学年次論文報告集19-1、1997
[24] 枝広英俊ほか、「材齢10年を経過した海砂コンクリートの基本的性質と鉄筋の腐食性状」、日本建築学会大会梗概集、1997.9
[25] 笹川幸男ほか、「膨張コンクリートの耐久性に関する研究」、セメント・コンクリート論文集No. 52、1998
[26] 長谷川拓哉ほか、「中性化における環境条件を考慮した暴露試験と促進試験の対応に関する検討」、第52回セメント技術大会講演要旨、1998.5
[27] 市川勝俊ほか、「屋外暴露または室内養生を10年間行なったコンクリートの炭酸塩化と強度」、セメント・コンクリート論文集No. 53、1999
[28] 安田正雪ほか、「フライアッシュを使用したコンクリートの屋外暴露試験」、コンクリート工学年次論文報告集22-2、2000
[29] 迫田恵三ほか、「亜熱帯、温暖および寒冷地域の海洋環境下に暴露したコンクリートの性質」、コンクリート工学年次論文報告集23-2、2001
[30] 依田彰彦ほか、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの材齢11年までの性質について」、セメント・コンクリート論文集No. 55、2001
[31] 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、2002
[32] 長谷川拓哉ほか、「モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の中性化に対する保護効果」、日本建築学会構造系論文集No.555、2002.5
[33] 大久保孝昭ほか、「長期間屋外暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状」、日本建築学会構造系論文集No.561、2002.11
[34] 笹川幸男ほか、「35年間暴露した膨張コンクリートの諸特性」、コンクリート工学年次論文報告集24-1、2002
[35] 迫田恵三ほか、「10年間海洋環境下に暴露した三成分系低発熱セメントを用いたコンクリートの性質」、コンクリート工学年次論文報告集25-1、2003
[36] 鈴木宏信ほか、「14年間海洋環境下に暴露した鉄筋コンクリート供試体の耐久性」、コンクリート工学年次論文報告集25-1
[37] 本村真悟ほか、「15年間屋外暴露されていた打放し鉄筋コンクリート外壁モデル化試験体の耐久性調査」、コンクリート工学年次論文報告集25-1、2003
[38] 長谷川拓哉ほか、「建築部材の目的指向型耐久設計に関する研究 その11 ツールに納めた外壁仕上材の劣化抑制効果に関するデータ」、日本建築学会大会梗概集、2004.8
[39] 日本コンクリート工学協会、「自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム」、委員会報告書、2005.6

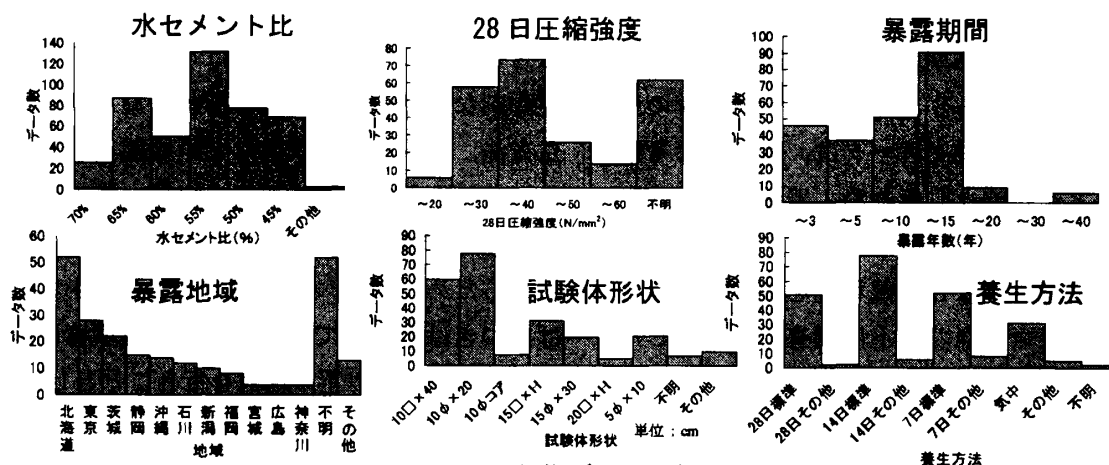


図-1 収集データの概要

養生の影響について、阿部らによれば、28 日間の 20℃水中養生（以下、「標準養生」）による中性化速度係数に対して、異なった養生による中性化深さの比（次式）が提案されている⁵⁾。

$$A_{t_{cure}} = 0.97 \times \left(\frac{0.8}{t_{cure} + 1} + 1 \right) \quad (1)$$

ここに t_{cure} : 養生期間 (日)

(1)式は促進中性化試験に基づくものため、屋外暴露試験データへの適用性を検討するため、養生条件を変えて暴露された実験データ（文献[1], [27]）に適用した。その結果を図-3に示す。これから、28 日標準養生の実測値と(1)式を用いて他養生条件のデータを換算した計算値とは概

ねよい対応を示した。図-2中の白丸として補正後のデータを示す。補正後は補正前に比べてばらつきが小さくなっていることがわかる。

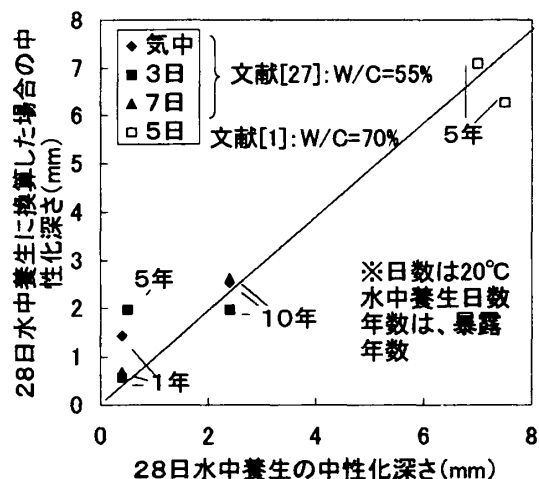


図-3 養生の影響を補正した場合の中性化深さ

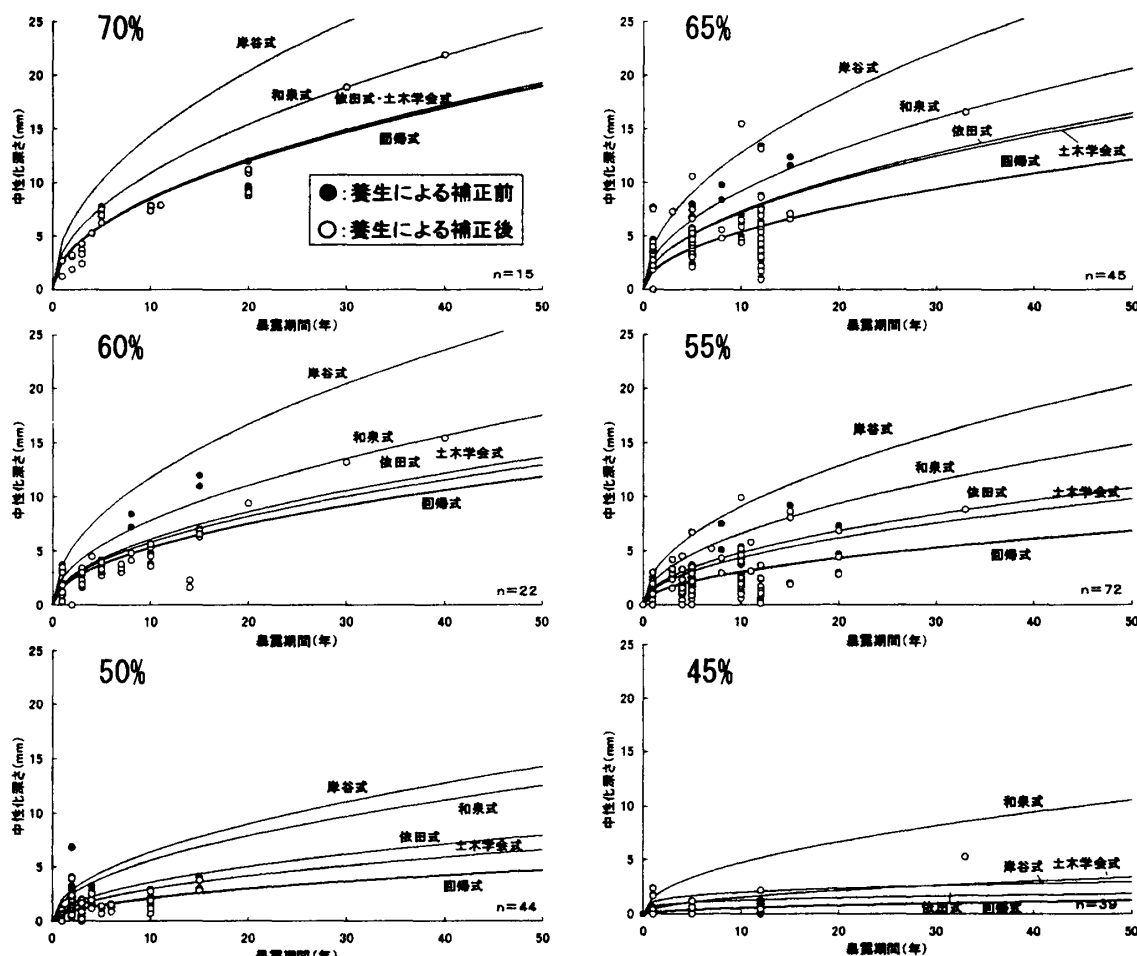


図-2 水セメント比ごとの中性化深さ

注：各実験式の条件は次の通り。岸谷式：中性化率 $R=1.0$ ，依田式：施工の程度 $\alpha=1$ ，中性化遅延 $\beta=1$ ，環境条件 $\gamma=1$ ，和泉式：普通ポルトランドセメント，28 日水中養生， CO_2 濃度 0.1%（ただし屋外条件として係数 0.59 を乗じた），温度 20℃，湿度 60% R.H.，仕上げなし，土木学会式：R 環境の影響を表す係数 $=1.0$ （乾燥しにくい環境）

3.2 既往の実験式との対応

図-2中の既往の実験式との対応をみると、いずれの式も回帰式よりも大きく、安全側の評価と考えられる。今回収集したデータの回帰式が、既往の実験式よりも小さくなったのは、データ中に中性化の進行が遅い海洋暴露試験が含まれているためと考えられる。各実験式をみていくと、依田式および土木学会式は回帰式に近く、屋外暴露による平均的な値となっていると考えられる。また岸谷式は養生のばらつきを含めた概ね上限を示しており、和泉式は養生補正後の概ね上限を示していると考えられる。既往の実験式を用いる場合、各条件設定とともに、その条件では平均値に近いのか、上限となっているのかなど、位置づけを把握した上で適切に用いるべきと考えられる。

3.3 回帰式のあてはめ

回帰式のあてはめについて、一般に暴露期間の平方根に比例するとされてきたが、屋外暴露についてそれが成り立つかどうかは明らかではない。屋外暴露については、Smolczykの実験式などでは定数項を伴うとされており⁶⁾、また平方根ではなく四乗根に比例すると報告されている例もある⁷⁾。こうしたことから回帰式を、(a)平方根に比例する場合、(b)定数項を伴う場合、(c)べき乗に比例する場合の三種類を設定し、それぞれ最小自乗法によりその係数と相関係数を求めた。この結果を表-2に示す。この結果によれば、(b)または(c)とした場合の相関係数が若干向上しているが、(a)とほとんど変わらない結果となった。このことから、本論文では期間の平方根に比例すると仮定することとした。なお、収集したデータをみると、(b)に適合性の高いデータと(c)に適合性が高いデータが混在しており、今回の検討ではその法則性は見いだせなかった。平方根に比例するとした場合の、水セメント比と中性化速度係数の関係を図-4に示す。これによると、水セメント比と中性化速度係数は強い相関があることが確認できる。養生の補正前後ではほとんど違いがないが、できるだけばら

つきの原因を低減させるために28日標準養生に補正後のデータに基づいて回帰式を求めると、(2)式のように表すことができる。

$$D = (0.094 \times w/c - 4.088) \times \sqrt{t} \quad (2)$$

ここに D:中性化深さ(mm)

W/C: 水セメント比(%)

t:暴露期間(年)

3.4 地域差によるばらつき

収集したデータは、暴露地域が異なるため、それがばらつきの大きな原因と考えられる。地域差によってどの程度ばらつくのかについて、複数地域で暴露試験を行った文献([11], [28],

表-2 回帰式の係数

W/C (%)	D=A√t		D=A√t-B				D=A ³			
	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後	補正前	補正後
70	2.740	2.690	3.145	1.400	3.090	1.382	1.892	0.634	1.824	0.641
65	1.866	1.719	0.737	-3.187	0.523	-3.378	3.828	0.160	3.787	0.125
60	1.872	1.678	2.220	1.027	1.980	0.891	1.213	0.677	0.968	0.722
55	1.028	0.965	0.862	-0.458	0.808	-0.433	1.256	0.405	1.178	0.406
50	0.819	0.665	0.385	-0.906	0.579	-0.180	1.247	0.228	0.744	0.430
45	0.179	0.176	0.225	0.138	0.225	0.145	0.001	2.423	0.001	2.445
相関係数 r ²										
70	0.872	0.861	0.891	0.880	0.890	0.880	0.904	0.894	0.894	0.894
65	0.056	0.019	0.222	0.247	0.247	0.226	0.226	0.254	0.254	0.254
60	0.866	0.866	0.878	0.897	0.897	0.888	0.888	0.915	0.915	0.915
55	0.180	0.178	0.188	0.186	0.186	0.186	0.186	0.185	0.185	0.185
50	-0.021	0.237	0.045	0.243	0.243	0.049	0.049	0.244	0.244	0.244
45	0.095	0.095	0.099	0.101	0.101	0.523	0.523	0.535	0.535	0.535

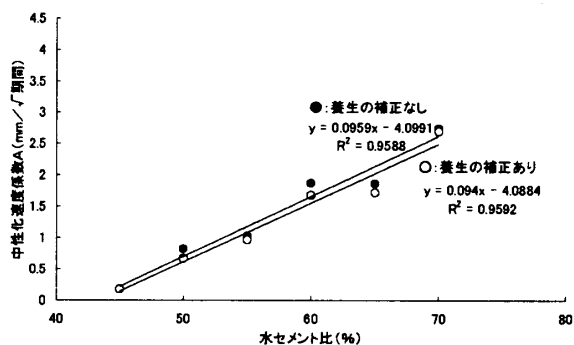


図-4 水セメント比と中性化速度係数の関係

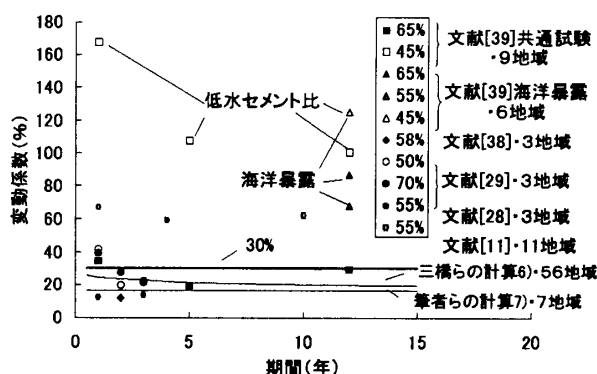


図-5 複数地域における暴露試験の変動係数

[38], [39]) を抽出し、それぞれのデータの変動係数を求めた。各々の文献データが同じ母集団に属すると仮定して、一つのグラフに示したものが図-5である。これによれば、低水セメント比のものと海洋暴露のものを除き、変動係数は概ね60%以下、平均値で約30%となっている。低水セメント比および海洋暴露は、中性化進行が遅く平均値自体も小さいため、変動係数が大きくなったためと考えられる。ここで、中性化の進行を気象因子から説明する試みのうち、三橋ら⁸⁾と筆者ら⁹⁾の地域差による変動係数を図-5中に示す。屋外暴露のデータは、計算結果と近いがこれよりも大きな値を示していることから、理想的な条件を考えた場合、地域差のばらつきは変動係数にして30%程度と推測される。ただし、図-5でも示されている通り、30%よりも大きな変動係数となる場合もある。これは、海洋暴露の変動係数が大きいことなどを考慮すると、環境条件によってコンクリートの含水率が変化することが原因と考えられる。和泉らによるかぶり厚さの信頼性設計手法¹⁰⁾では、中性化深さの変動係数として、ばらつきの大きい場合は0.5(50%)、小さい場合は0.3(30%)としていることから考えると、地域によるばらつきは部位によるばらつきと同程度と考えられる。これから、中性化予測を考えた場合、地域の影響も重要であるが、構造物の部位条件も重要であると考えられる。また、暴露試験を実施する場合は、試験体の含水率に関して配慮した設置の方法を検討すべきと考えられる。既往の研究¹⁰⁾に基づき、中性化深さは正規分布に従い、変動係数は期間によらず一定であると仮定し、危険率1%として地域差のばらつきを考慮した場合、(2)式は(3)式のように表すことができる。

$$D = (0.094 \times w/c - 4.088) \times \sqrt{t} \pm 3\sigma \quad (3)$$

ここで、 σ : 標準偏差 (次式による)

$$\sigma = C_v \times ((0.094 \times W/C - 4.088) \times \sqrt{t})$$

C_v は変動係数 (ここでは0.3を仮定)

水セメント比ごとに(3)式と28日標準養生に換算後のデータを比較的数据数の多い水セメント比が65%および55%のものを図-6に示す。一部の例外を除き概ね 3σ の中に入っていることがわかる。図-6中の $+3\sigma$ の線は、土木学会式の乾燥しやすい環境条件の場合と同程度以上であり、乾燥しやすい環境下の中性化進行を評価していると考えられる。なお、 $\pm 3\sigma$ の外にあるデータもあるが、温度が高く乾燥条件にあるなど、含水率が一般と異なる場合、変動係数が30%を超える場合が考えられる。どのような条件で変動係数が異なるのかについては、今後詳細な検討が必要と考えられる。

3.5 28日強度と中性化速度係数

28日圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-7に示す。Smolczykの研究¹¹⁾、馬場らの研究¹²⁾で指摘されているように、中性化速度係数は圧縮強度の平方根に反比例するとして、最小自乗法によって求めた回帰式を図-7中に示す。ばらつきは大きいですが、28日圧縮強度と中性化速度係数との間に相関が認められた。今後、データの蓄積により、28日圧縮強度によって中性化速度係数をより高い精度で求めることができると考えられる。また、中性化速度係数が0に近く

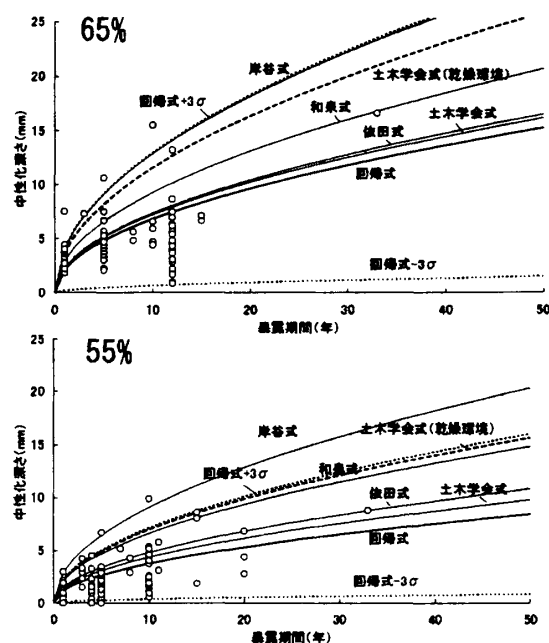
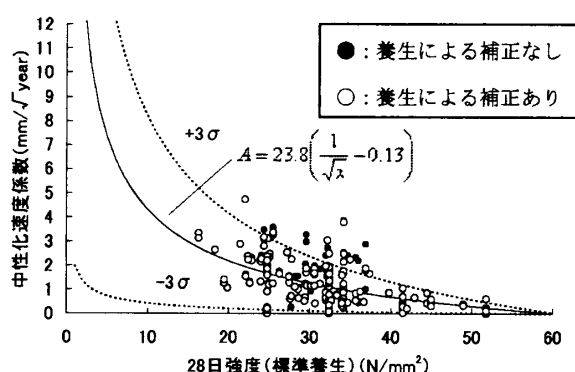


図-6 回帰式と中性化深さデータの例



※σは、(3)式同様、変動係数を0.3として仮定した値

図-7 28日強度と中性化速度係数の関係

なる点は約 60N/mm^2 であり、これは馬場らの研究¹²⁾の 61.3N/mm^2 とほぼ一致する結果となった。

4. まとめ

文献調査により屋外暴露試験による中性化深さのデータを収集し、進行予測について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1)今回収集した屋外暴露試験による中性化深さの平均的な値に対し、標準的な条件における既往の実験式（岸谷式、和泉式、依田式、土木学会式）は安全側の評価となる。
- (2)地域による中性化深さのばらつきは、一つの構造物のばらつきと同程度と考えることができ、中性化進行予測を行う場合、地域とともに部位の影響を考える必要がある。
- (3)28日圧縮強度と中性化速度係数とは相関があり、約 60N/mm^2 で中性化速度係数が0に近くなる。

なお、今回のデータは、良好な施工条件で十分な養生が行われた試験体のデータであり、実構造物の場合は、施工の影響、養生が大きく、予測にはこれらの要素を考慮する必要があると考えられる。今後、構造物調査のデータと、試験体レベルのデータとの関係についても検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1)岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp.149-153，1963.2

- 2)和泉意登志：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 中性化，コンクリート工学 Vol.32 No.2，pp.72-83,1994.2
- 3)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
- 4)土木学会：コンクリート標準示方書，維持管理編，pp.85，2002
- 5)阿部道彦ほか5名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集 NO.409，pp.1-10，1990.3
- 6)近藤連一訳：コンクリートの炭酸化－鉄筋の防食に対する影響と作用，セメント・コンクリート No.314，pp.33-37，1973.8
- 7)大賀宏行，長瀧重義：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価，土木学会論文集第390号，pp.225-233，1988.2
- 8)三橋博三ほか3名：コンクリートの中性化進行速度に及ぼす気象環境条件の影響に関する研究，コンクリート工学論文集第10巻第1号，pp.143-149，1999.1
- 9)長谷川拓哉ほか4名：建築部材の目的指向型耐久設計に関する研究 その2 劣化試験確立のための地域・環境条件の検討（コンクリートの中性化によるケーススタディ），日本建築学会大会梗概集，pp.651-652，2001.9
- 10)和泉意登志ほか2名：鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の提案－コンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合－，日本建築学会構造系論文集 NO.384，pp.58-67，1988.2
- 11)H.G.Smolczyk：Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel, Written Discussion, Proc. of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement Vol.3, pp.369-382, 1968
- 12)馬場明生ほか3名：グラウトしたコンクリートメーソンの中性化，日本建築学会構造系論文集 NO.498，pp.1-6，1997.8