論文　プレキャストコンクリート製品の耐塩害設計に関する一考察

片山　強[*1]・佐々木　謙二[*2]・原田　哲夫[*3]

要旨：プレキャストコンクリート（PCa）製品は，製造時に蒸気養生が用いられることが多いが，塩化物イオン拡散係数に及ぼす蒸気養生の影響に関する研究はほとんどみられず，塩化物イオン拡散係数に基づく最小かぶりの試算まで行った例もほとんどない。本研究では，九州地区の PCa 製品を対象に，塩化物イオン拡散係数に及ぼす水結合材比の影響を検討した。また，文献の水結合材比と塩化物イオン拡散係数の関係を整理し，実環境における拡散係数を算出するための補正値を導き出した。その補正値を用いて蒸気養生コンクリートの見かけの拡散係数予測式を提案し，設計耐用期間 100 年を満足する PCa 製品の最小かぶりを試算した。

キーワード：プレキャストコンクリート製品，蒸気養生，見掛けの拡散係数，かぶり，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

PCa 製品は一般に品質が良く耐久的であるといわれるが，根拠は必ずしも明確ではない。PCa 製品の製造では，生産性を向上させるために多くの工場で蒸気養生が用いられるが，蒸気養生条件によっては，コンクリート表面への微細なひび割れの発生，粗骨材モルタル界面の脆弱化などにより耐久性が低下する場合があることが指摘されている[1)]。

本研究では，九州地区で製造される PCa 製品を対象に，塩化物イオン拡散係数に及ぼす蒸気養生と水結合材比の影響を検討した。その後，土木学会コンクリート標準示方書（以下，土木学会示方書）に示される塩化物イオン拡散係数の予測式[2)]を参考に，実務上非常に有用となる蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数予測式の提案を試みた。土木学会予測式は，海中，飛沫帯，海上大気中および海岸部などの様々な環境において 1 年未満から数十年単位で暴露，供用されたコンクリートの水セメント比と拡散係数の関係の回帰式である[3)]。平成 11 年版に示されて以来，2002 年版の改訂および 2012 年版の改訂時に実態に即したより合理的な式へと見直されている。蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数予測式も同様にして様々な暴露環境のデータから求めたいが，現状はデータがほとんどない。そこで本研究では，蒸気養生コンクリートの室内塩水浸せき試験結果を有効活用することを考え，まず実環境における拡散係数から求められた土木学会予測式と塩水浸せきによる拡散係数値との関連性を明らかにするための文献調査を行った。その調査結果に基づき，室内塩水浸せきによる拡散係数を実環境における拡散係数に換算するための補正値を導き出した。次に，その補正値を蒸気養生コンクリートの室内塩水浸せき試験結果に適用し，蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数予測式を提案した。さらに，設計耐用期間 100 年を満足する PCa 製品の最小かぶりを試算した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

実験に用いた結合材は，普通ポルトランドセメント[N]，N と高炉スラグ微粉末[BFS]6000 の混合系(N：BFS6000=65%：35%)[NB]の 2 種類とした。九州地区での PCa 製品の実情を踏まえて，細骨材は海砂，粗骨材は砕石を用いた。**表－1** に使用材料を示す。コンクリートの練上り目標温度が 20℃となるように，各材料を恒温室に保管し，一定の温度とした後に練混ぜを行った。なお，実際の練上り温度は，20±2℃となった。

(2) 配合

表－2 にコンクリートの示方配合を示す。PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートでは，目標空気量 2.0%とし，水結合材比を 35，40，45%と変化させた。単位水量は 165kg/m^3 一定とし，目標スランプ 8cm となるよう適宜混和剤の添加量を調整した。練り混ぜ後，φ100×200mm のブリキ製軽量型枠に打設を行った。

2.2 養生条件

表－3 に養生条件を示す。本研究では，恒温恒湿槽において，所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。供試体からの水分逸散を防ぐために，供試体はビニールで密封した状態とし，恒温恒湿槽の湿度は設定可能な最高湿度の 90～95%として温度履歴を与えた。また，脱型は練混ぜから 24±0.5 時間後に行った。本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

2.3 塩水浸せき試験

材齢 28 日においてφ100×200mm の円柱供試体中心部

*1 （株）ヤマウ　技術本部　開発・設計部　開発グループ　グループリーダー　(正会員)
*2 長崎大学　大学院工学研究科システム科学部門助教　博（工）　(正会員)
*3 長崎大学　大学院工学研究科システム科学部門教授　工博　(正会員)

表－1　使用材料

項目	種類	品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(N)	密度 3.15g/cm^3，比表面積 3240cm^2/g
混和材(SCM)	高炉スラグ微粉末(BFS)6000	密度 2.91g/cm^3，比表面積 5920cm^2/g
細骨材(S)	海砂	密度 2.56g/cm^3，吸水率 1.87%，粗粒率 2.47
粗骨材(G)	砕石（安山岩）	密度 2.76g/cm^3，吸水率 0.69%，粗粒率 6.66
混和剤(AD)	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物

表－2　示方配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量（kg/m^3）					
				W	C	BFS	S	G	AD
N35	N	35	36	165	471	—	613	1175	1.41
N40		40	37		413	—	648	1189	0.83
N45		45	38		367	—	680	1195	0.37
NB35	N+BFS	35	36		306	165	609	1168	1.41
NB40		40	37		268	145	644	1183	0.83
NB45		45	38		239	128	676	1190	0.37

表－3　養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間 (h)	昇温速度 (℃/h)	最高温度 (℃)	最高温度保持時間(h)	降温速度 (℃/h)	後養生方法（材齢 1 日以降）
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生（20℃，R.H.60%）

より φ100×100mm の試験体を採取し，打ち込み面以外をエポキシ樹脂でコーティングした後，3%NaCl 溶液に浸せきさせた。所定の期間経過後，浸透面から深さ方向に試料を採取した。採取試料の全塩化物イオン量は，JIS A 1154 に準拠し，塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により測定した。その結果を Fick の拡散方程式の解で回帰して，表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出した。

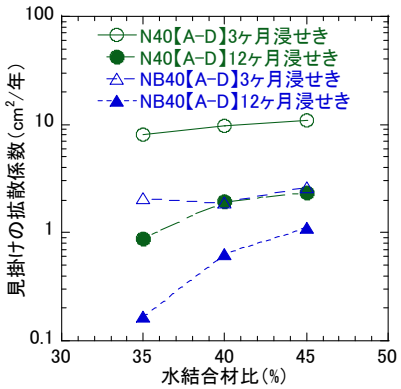
3. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数に関する文献調査

本論文では，N および BFS 混合系の結合材を使用したコンクリートの室内塩水浸せき試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数と水結合材比の関係に焦点をあてて文献調査を行った。文献調査は，コンクリート工学年次論文集，コンクリート工学論文集，土木学会論文集，土木学会年次学術講演会講演概要集，土木学会各支部の研究発表会講演概要集，セメント・コンクリート論文集（2009 年以降），材料，プレストレストコンクリート工学会シンポジウム論文集を対象として行った。

なお，土木学会示方書に示される塩化物イオン拡散係数の予測式の適用範囲が水セメント比 0.30 以上，0.55 以下であるため，この水結合材比の範囲でデータを収集することとした。また，現場打ちコンクリート（以下，現場打ち）構造物を想定して，標準養生以外の養生条件である封かん養生，湿布養生，気中養生の場合のデータも収集することとした。一般に，浸せき試験では，NaCl 溶液濃度が高くなるほど見掛けの拡散係数は増加し，浸せき期間が長いほど見掛けの拡散係数は減少することが知られているが[4]，NaCl 溶液濃度や浸せき期間に大きく制限は設けず幅広くデータを収集することとした。最終的に収集した文献データの NaCl 溶液の濃度範囲は 3%～10%であり，飽和 NaCl 溶液の場合は除外した。また，浸せき期間の範囲は 0.25～2.5 年であり，同配合・同養生条件の試験体に対して同一論文内で異なる浸せき期間のデータがある場合は，浸せき期間が 1 年に最も近いデータのみを収集することとした。さらに，海水中への自然暴露の場合も除外した。

4. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の実験結果および考察

図－1 に水結合材比と見掛けの拡散係数の関係を示す。NB の浸せき期間が 3 ヶ月の場合を除き，水結合材比が小さいほど見掛けの拡散係数が小さくなっていることが確認された。また，水結合材比よりも結合材種別の方が見掛けの拡散係数に与える影響は大きいということも**図－1** から言える。



図－1　水結合材比と見掛けの拡散係数の関係

5. 文献調査結果および考察

図－2，3 に，それぞれ N および BFS 混合系の結合材を使用したコンクリートの室内塩水浸せき試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数と水結合材比の関係に関する文献調査結果 [4)~29)]を示す。**図－2，3** には，本実験および文献 [27)]の蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数と水結合材比の関係もあわせて示した。

文献データ（標準・封かん養生等/室内塩水浸せき）の回帰式および土木学会示方書に示される予測式を比較すると，N では 4～5 倍程度，BFS 混合系では 4～7 倍程度，塩水浸せき試験による見掛けの拡散係数の方が大きくなり，個々の測定値と予測式では 1 桁以上異なる結果もあった。

また，一般に蒸気養生によるコンクリートの耐久性の低下が懸念されているが，**図－2，3** に示した蒸気養生条件【A-D】の本実験データおよび文献データ（蒸気養生/室内塩水浸せき）[27)]の回帰式（蒸気養生）と，文献データ（標準・封かん養生等/室内塩水浸せき）の回帰式の差が蒸気養生による耐久性の低下を示している可能性があると考えられる。

6. 見掛けの拡散係数の補正実験結果の補正と拡散係数予測式の提案および塩害対策最小かぶりの試算

6.1 見掛けの拡散係数の補正

前章で塩水浸せき試験による個々の測定値の方が，土木学会予測式から求まる見掛けの拡散係数より，場合によっては 1 桁大きいことを明らかにした。これは，主に環境条件および経過年の違いによるものではないかと考察される。土木学会予測式は，海中，飛沫帯，干満帯，海上大気中および海岸部などの様々な暴露環境での水セメント比と拡散係数の関係の回帰式である。さらに，その暴露経過年は，0.7～26 年である [3)]。一方，塩水浸せき試験データは，疑似海中環境で経過年は 2.5 年以内である。**図－1** のように見掛けの拡散係数は時間の経過に伴い小さくなること，実構造物の腐食発生までの期間に比べ塩水浸せき期間が短期間であること等を考えると，塩水浸せき試験のような促進試験によって求めた見掛けの拡散係数を用いて耐久性を照査した場合には，見掛けの拡散係数が大きく見積もられ過ぎ，過度に安全側の設計になる恐れがある。そこで，塩水浸せきによる見掛けの拡散係数を，実環境における測定値により算出された土木学会予測式の拡散係数と同等となるように換算するための補正を試みることにした。

図－2，3 から，水結合材比と見掛けの拡散係数の関係式の傾きは，結合材や養生条件等の違いの影響を受け，y 切片は環境条件や経過年の違いによるものではないかと考察される。そこで，式(1)のように切片を補正値 k で補正することにより，環境条件や経過年の違いを補正できると考えた。

$$\log_{10} D_k = a(W/B) + b + k \qquad (1)$$

文献データ（標準・封かん養生等/室内塩水浸せき）の回帰式を土木学会予測式に極力近づけるには，本研究では，補正値 k は $k = -0.6$ が合理的であると考えた。この考え方により補正した結果を**図－4** および**図－5** に示す。若干の違いはあるものの補正値 $k = -0.6$ により補正した式は，土木学会予測式と同等になっていると言える。

6.2 蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数予測式の提案と塩害対策最小かぶりの試算

蒸気養生コンクリートの室内塩水浸せきによる見掛けの拡散係数の回帰式に，同様に $k = -0.6$ を適用して N および BFS 混合系の蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数予測式として，それぞれ以下の式(2)，(3)を提案する。

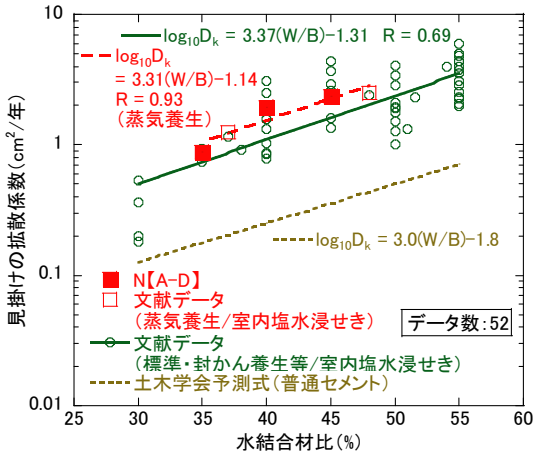
a) 普通セメントを使用する場合

$$\log_{10} D_k = 3.31(W/B) - 1.74 \qquad (2)$$

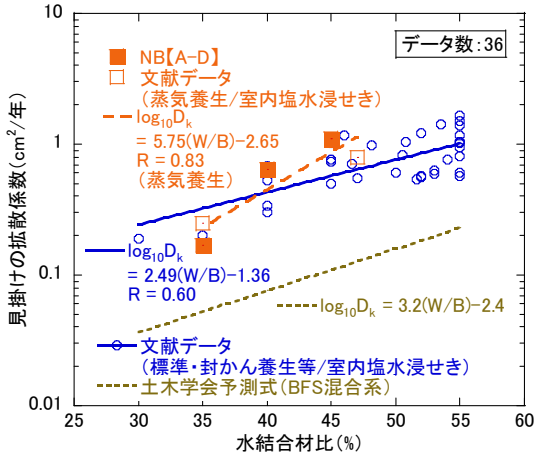
b) 高炉スラグ微粉末混合系の場合

$$\log_{10} D_k = 5.75(W/B) - 3.25 \qquad (3)$$

提案した蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数



図－2　文献調査による拡散係数（普通セメント）



図－3　文献調査による拡散係数（BFS 混合系）

予測式と土木学会予測式を比較すると，**図－5** から BFS 混合系は蒸気養生の回帰式の傾きが大きいことが分かる。

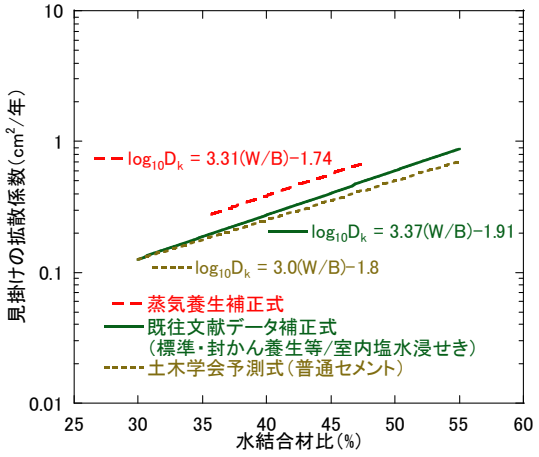
次に，式(2)，(3)から求まる見掛けの拡散係数および土木学会示方書 [2]を基に，蒸気養生コンクリートの塩害対策最小かぶりの試算を行った。かぶり試算には，**表－4** の設定値を用いた[30]。

設計の基本的な考え方として，ひび割れを発生させない場合のかぶりの試算結果を**図－6** に，PCa 製品でひび割れがある場合の試算結果を**図－7** に示す。なお，かぶりの試算結果は 5mm 単位で切り上げている。さらに，ボックスカルバート等の PCa 製品の最小かぶりが 25mm で規定されていることから[31]，かぶりの試算結果の最小値は本論文では 25mm とした。

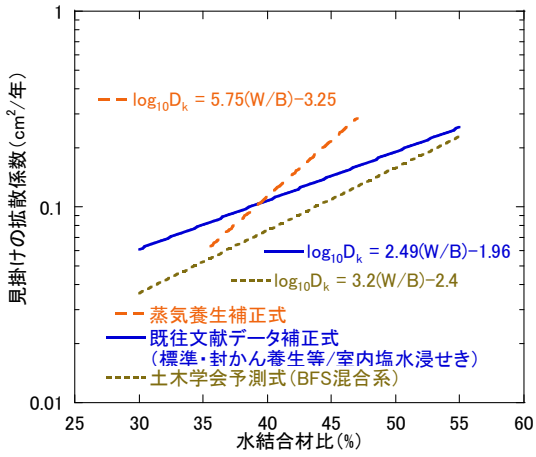
図－6 のコンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0=13kg/m^3 のかぶり試算結果から考察すると，塩害環境で現場打ちと PCa 製品が同じ水結合材比であった場合は，PCa 製品のかぶりは大きくしなければならないことが分かる。ただし，九州コンクリート製品協会技術委員会のアンケート調査結果によれば，PCa 製品は，蒸気養生による強度低下を補うために，現場打ちに比べて 10～15%程度水結合材比の小さいコンクリートで製造されるのが一般的である。従って，同程度の設計基準強度および同一環境で使用する場合は，現場打ちの水結合材比と比較して，PCa 製品は 10～15%程度水結合材比が小さいと考えられ，**図－6** より PCa 製品のかぶりは現場打ちよりも減じて良い可能性が高いと言える。

また，C_0=1.5kg/m^3 のかぶり試算結果から考察すると，PCa 製品と土木学会予測式のかぶりの計算結果は，ほとんどのケースにおいて最小値の 25mm になるため，現在のボックスカルバート等のかぶり標準値である 25mm は妥当であると考えられる。そのほかに，**図－7** から BFS 混合系の場合は，ひび割れがある場合とない場合でかぶりが大きく変わる結果となった。

プレキャストコンクリート製品の耐塩害設計に関する一考察として，**表－4** の設定値を用いた場合における九州地区の塩害最小かぶり表の試算結果例を**表－5** に示



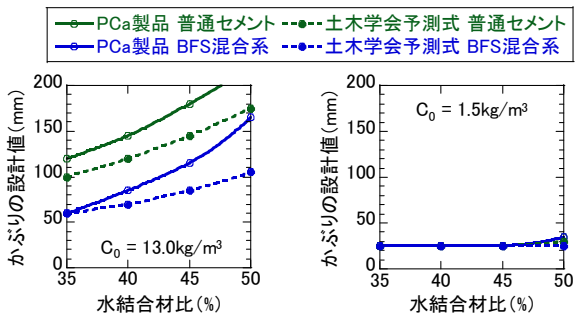
図－4　補正後の拡散係数（普通セメント）



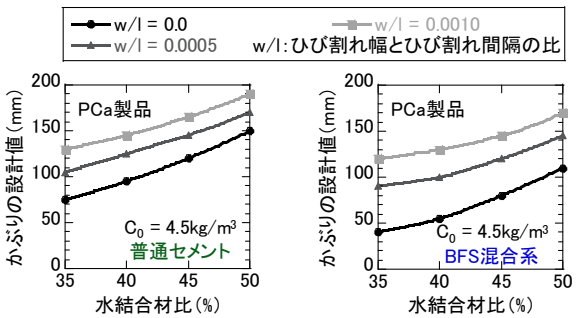
図－5　補正後の拡散係数（BFS 混合系）

表－4　最小かぶり試算に用いた設定値

塩化物イオンの侵入に対する耐用期間：t = 100 年	構造物係数：γ_i = 1.0
鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数：γ_{cl} = 1.3	コンクリートの材料係数：γ_c = 1.0
ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数：λ = 1.5	エポキシ樹脂塗膜の厚さの期待値：c_{ep} = 0.22mm
コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数：D_0 = 400cm^2/年	初期塩化物イオン濃度：C_i = 0.30kg/m^3
エポキシ樹脂塗膜内への塩化物イオンに対する見掛けの拡散係数の設計用値：D_{epd} = 2.0×10^{-6}cm^2/年	製造誤差：Δc_e = 5mm



図－6　ひび割れを発生させない場合のかぶりの設計値



図－7　ひび割れがある場合のかぶりの設計値

表－5　設計耐用期間を 100 年とした場合の九州地区における PCa 製品の塩害最小かぶり表

結合材種別						普通セメント						高炉スラグ微粉末混合系					
ひび割れ幅とひび割れ間隔の比 w/l						0			0.001			0			0.001		
PCa 製品の水結合材比（%）						35	40	45	35	40	45	35	40	45	35	40	45
道路橋示方書で規定される塩害の対策区分と最小かぶり																	
地域	塩害の影響度合い	対策区分	海岸線からの距離		最小かぶり コンクリート橋	最小かぶり 下部構造												
九州地区	影響が激しい	S	海上部及び海岸線から 20m まで	飛沫帯	---	<90>	<40>	<50>	<65>	<65>	<75>	<90>	60	85	<45>	<65>	<70>	<80>
				汀線付近	<70>	---	75	95	<25>	<25>	<25>	<25>	40	55	80	<25>	<25>	<25>
	影響を受ける	1	20m を超えて 50m まで		50	90												
		2	50m を超えて 100m まで		35	70												
		3	100m を超えて 200m まで		25	50	40	55	75	70	85	100	25	35	50	70	80	95
	影響を受けない		(0.25km)		25	---	25	40	50	45	55	70	25	25	40	50	55	70
			(0.5km)		25	---	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	35
			(1km)		25	---	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

〈 〉内の数字はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した場合

す。ただし，現在の耐塩害設計は道路橋示方書[32]に基づいて設計される場合がほとんどであるため，塩害区分や海岸線からの距離は，道路橋示方書をベースにまとめた。死荷重の増加を避けるために，かぶり 100mm までを基準とし，100mm を超える環境条件ではエポキシ樹脂塗装鉄筋を併用することとした。**表－5** の試算結果から，道路橋示方書では塩害の影響を受けないとされる海岸線からの距離 0.25km～0.5km 未満でも，水結合材比によってはかぶりの増厚が必要なことが分かる。また，S 区分では，現規定ではエポキシ樹脂塗装鉄筋が必要であるが，高炉スラグ微粉末の混合や水結合材比の低減により，かぶりの増厚だけでも対策できる可能性があることが分かる。**表－5** のような結合材種別や水結合材比に応じた最小かぶり表（みなし規定表）が作成されれば，実務上非常に合理的で有用になると考えられる。

なお，今回は実務上有益となるよう幾つかの試みを行ったが，蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数のデータ数等が十分ではないため，今後データの蓄積をするとともに，別途精査する必要がある。

7. まとめ

本研究では，PCa 製品の耐塩害設計の基礎的研究として，蒸気養生コンクリートの室内塩水浸せき試験を行った。また，塩化物イオンの見掛けの拡散係数に関する文献調査を行い，PCa 製品の耐塩害設計に関して一考察を試みた。その結果，以下のことが明らかとなった。

(1) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数に関して，文献データによる塩水浸せき試験結果の回帰式と実環境における測定値より算出された土木学会予測式を比較した結果，塩水浸せき試験による見かけの拡散係数の方が土木学会予測式より明らかに大きいことが分かった。

(2) 室内塩水浸せきによる拡散係数と土木学会予測式による拡散係数の差を環境条件や経過年の違いによるものと考え，塩水浸せきによる見掛けの拡散係数を土木学会予測式の拡散係数と同等になるように換算するための補正値を導き出した。

(3) 蒸気養生コンクリートの室内塩水浸せき試験結果に対して導き出した補正値を適用し，実環境における蒸気養生コンクリートの見かけの拡散係数予測式を提案した。

(4) 蒸気養生コンクリートの見かけの拡散係数予測式を用いて，設計耐用期間 100 年を満足する九州地区での PCa 製品の最小かぶりを試算し，表として示した。

参考文献

1) 住吉宏他：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響, セメント技術年報, Vol.35, pp.290-293, 1981
2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.148～157，pp.154-155, 2013.3
3) 土木学会：コンクリートライブラリー188　2002 年版コンクリート標準示方書改定資料，pp.83～88，2002.3
4) 佐川康貴他：高濃度 NaCl により乾湿繰返し作用を受けたコンクリートの塩分浸透性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.865-870, 2013
5) 杉本記哉他：塩水に浸せきしたコンクリートの電気抵抗率から推計した塩化物イオン拡散係数に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.831-836, 2016
6) 井口重信他：フライアッシュを混和材に用いたコンクリートの遮塩効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.753-758, 2016

7) 西村和朗他：非破壊計測結果と耐久性指標の関係性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.613-618, 2015
8) 村岸祐輔他：ごみ溶融スラグ細骨材および廃瓦骨材を用いた高炉セメントB種コンクリートの塩分浸透性に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1513-1518, 2015
9) 三浦健太他：高炉セメントとフライアッシュを併用したコンクリートの塩害および中性化抵抗性に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.148-153, 2014
10) 林亮太他：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.745-750, 2013
11) 烏田慎也他：電気泳動法の実効拡散係数と浸漬法の見掛けの拡散係数との関係に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.859-864, 2013
12) 佐野慶成他：水セメント比および浸漬期間がコンクリートへの塩化物イオン浸透のばらつきに与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1, pp.784-789, 2012
13) 高橋佑弥他：低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連成解析の高度化，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.796-801, 2012
14) 細川佳史他：各種セメント系材料を用いた相組成・空隙構造が異なるコンクリートの各種環境条件下における塩化物イオン拡散係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1027-1032, 2009
15) 審良善和他：高炉セメントB種を用いた港湾コンクリートの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度について，コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1033-1038, 2009
16) 林大介他：有機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1585-1590, 2005
17) 渡辺豊他：コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.663-668, 2002
18) 杉山隆文他：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用，土木学会論文集，No.711／V-56, pp.191-203, 2002.8
19) 横田優他：フライアッシュ混和コンクリートの耐塩性能評価のための塩水浸漬試験結果について，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.66／V-512, pp.1023-1024, 2011
20) 秋山哲治他：コンクリート耐久性向上のための再振動締固めによる有効性の定量評価，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.65／V-685，pp.1369-1370, 2010
21) 高鳴笛他：高炉セメントコンクリートの塩化物イオン拡散係数に関する考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.64／V-084, pp.165-166, 2009
22) 成田健他：材齢６ヶ月におけるフライアッシュコンクリートの耐久性評価(br) その１　実験概要および塩分浸透性，土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.64／V-291, pp.579-580, 2009
23) 前田聡他：電気泳動試験によるコンクリートの塩化物イオン拡散係数の推定，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.58／V, pp.5-6, 2003
24) 中村昭男他：３成分系セメントの塩化物イオン浸透性に関する一実験，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.58／V, pp.15-16, 2003
25) 細川佳史他：各種測定法により評価した高炉スラグ・メタカオリン混入コンクリートの塩化物イオン浸透性状，土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.58／V, pp.17-18, 2003
26) 高鳴笛他：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの塩化物イオン拡散係数に関する実験的考察，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，Vol.55／V-16, pp.663-664, 2011
27) 浦野登志雄他：フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混和材に用いたプレキャスト部材用コンクリートの強度特性および塩分浸透性について，セメント・コンクリート論文集，Vol.69, No.1, pp.311-318, 2015
28) 西田豊他：石灰石微粉末を利用した環境負荷の低い混合セメントの開発，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, No.1, pp.375-381, 2012
29) 川原真一他：シリカフュームコンクリートの塩分浸透抵抗性および鋼材腐食に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.65, No.1, pp.360-367, 2011
30) 土木学会:コンクリートライブラリー112　エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針，pp.10～16，2003.11
31) 日本道路協会：道路土工ーカルバート工指針（平成21 年版），pp.151-152，2010.3
32) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3