

課 題 名 コンクリートの湿潤養生による塩害抑制



所属名：徳山工業高等専門学校 土木建築工学科

発表者：温品 達也

1. はじめに

コンクリートは社会インフラを構成する基本材料の1つであり、水和反応によって硬化するため作製後の養生方法や養生期間によって耐久性は変動することが、構造物の長寿命化の観点から近年注目されている。しかし、未だ養生方法や養生期間が耐久性に与える影響については、コンクリート標準示方書の耐久性照査式¹⁾においても考慮できていない。そのため、構造物の施工時においては耐久性向上のために養生を施す際、その長寿命化効果を定量的に示すことが難しく、明確な終了時期を設定することが困難である。これは、例えば塩害試験においては、塩水浸漬試験等が主流であり、水分に浸せきすること自体が水和促進養生となり当初の養生条件の影響が不明確になること、また、実塩害環境における養生条件を要因とした検証の蓄積が少ないことなども挙げられる。そこで、本研究では養生条件がコンクリートの塩害耐久性に与える影響を定量的に示すべく、実環境による暴露と塩水浸せき試験を併用した検証を加えた。

2. 実験概要

2-1 試験体概要

本実験で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント(N, 密度 3.16, 比表面積 3340cm²/g)、高炉セメント B 種(BB, 密度 3.04, 比表面積 3900cm²/g)、フライアッシュセメント B 種(FB, 密度 2.97, 比表面積 3230cm²/g, N にフライアッシュを 15%置換)である。細骨材は砂岩砕砂(S1, 密度 2.70)および石灰砕砂(S2, 密度 2.64)を混合したものを使用し、粗骨材は砂岩碎石(G, 密度 2.70)を使用した。混和材は高機能 AE 減衰剤を使用した。配合は表-1 に示すとおりで、普通ポルトランドセメントと使用した配合を N, 高炉セメント B 種を使用した配合を BB, フライアッシュセメント B 種相当を使用した配合を FB, 計 3 配合とした。試験体の作製は、強制 2 軸練りミキサを使用して各材料を混合し、10cm 角の合板型枠に 2 層で打ち込んだ。養生条件は表-2 に示す通りで、「封緘」養生はコンクリート打込み後、型枠を取り

表-1 試験体のコンクリート配合

セメント	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)						
			W	C	B	S(S1+S2)	S1	S2	G
N	54.8	50.0	170	310	0	919	556	363	955
BB	54.6	50.0	167	306	0	919	556	363	955
FB	54.8	50.0	166	258	45	919	556	363	955

表-2 試験体の養生条件

養生種別	養生期間(日)
封緘	5(N), 7, 14, 28, 91
水中(7日脱型後)	14, 28, 91
脱型1日後封緘(7日脱型)	14(N), 28, 91(BB, FB)
脱型2日後封緘(7日脱型)	14(N), 28, 91(BB, FB)



写真-1 試験体暴露場所(角島大橋)

外さずに密閉して水分逸散を抑制して養生し、セメントの水和反応を促進させるものである。一般的には5日で脱型し、今回は長期的な養生効果を検証するために養生期間を7～91日まで延長した要因を設定した。水中養生は、脱型後にコンクリートを水中浸せきしてセメントの水和を十分に反応させるものである。耐久性が最も高くなる条件と考えられるものの、現実には可能な部位に限られるため、最も良好な養生条件として比較対象にした。脱型後1・2日後養生は、実際の現場で脱型後にビニルシートなどで構造物を密閉し、保湿することで養生を継続するものである。前述の封緘に対し、材齢初期にコンクリートが一度乾燥履歴を受けるため、一次的な乾燥の影響を検証する目的で設定した。封緘養生は打込み後、20℃、R.H.60%の養生槽に型枠を存置したまま静置した。水中養生は、同室に材齢7日まで型枠を存置したまま静置し、脱型後は水中に浸漬させた。脱型1日後封緘と脱型2日後封緘ははじめに7日間型枠養生を行い、試験体を脱型した後、1日と2日後にラップを巻き養生した。脱型後養生について、実際の現場では乾燥の影響に配慮し、より短い時間で密閉できることが考えられる。今回は安全側の評価として1日および2日後の密閉とした。養生後の試験体においては、側1面以外をエポキシ樹脂でシールし、開放面のみから塩分が浸透するよう成型した。試験体は養生期間が異なることから、養生期間の長い試験体ほど先行して作製し、所定の養生完了後、同一日に後述する暴露を開始できるようにした。

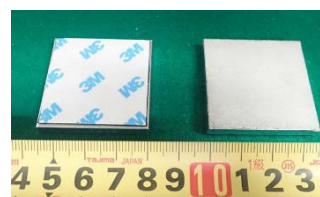


写真-2 クロルサーチ

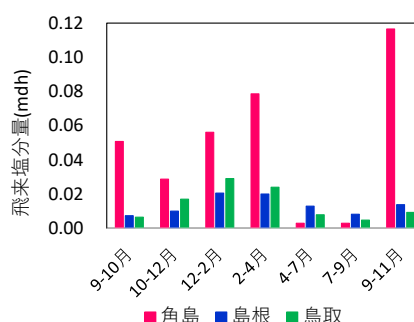


図-1 角島と山陰地方の飛来塩分量²⁾

2-2 試験体暴露および塩水浸せき

試験体は山口県の協力を得て、2018年10月から2019年9月までの11カ月間、角島大橋のA1橋台の傍で暴露した(写真-1)。暴露地点において、飛来塩分量を測定するために塩分捕集モルタル板(写真-2)を設置し、測定を行った。実測した角島の飛来塩分量および、大屋ら²⁾による島根県および鳥取県沿岸部の飛来塩分量を比較した結果を図-1に示す。この結果より角島大橋は飛来塩分量が多く、本橋自体も多くの塩害対策および維持管理・補修が行われていることから、塩害暴露試験場所として適当であると判断した。ただし、11か月程度の暴露では期間が短く、コンクリートに浸透した塩分量は深さ0.5cmで0.7kg/m³程度と少ない実測値であったことから、一部の試験体を回収して、10%の塩化ナトリウム水溶液に28日間浸せきした後に、浸透塩分量を測定した。従来の実験では、養生完了後ただちに塩水浸せきすることが主流であったものの、今回は養生完了から約1年間、角島で暴露され水に浸せきされること

なくコンクリートの水和反応が継続したことから、塩水浸せきにおける浸せき水自体による水和反応の影響が小さくなった条件で検証を行うことができたと考える。塩水浸せき後、エポキシ樹脂をハンドグラインダで除去し、試験体を3mmごとに研削して粉体を採取し、電位差滴定法によって各条件における深さごとの浸透塩分量を測定した。通常は10mm程度の厚さ毎に試験体をカットして塩分滴定を行うものの、養生条件という微細な変化を検出して、長期的な耐久性への影響を検証するために前述の研削法によって、比較的高感度で浸透塩分量を検証した。

3. 実験結果

3-1 普通セメント(N)

塩分滴定で得られた各養生条件における深さ方向の塩分量を図-2に示す。図-2(a)は封緘養生の結果であり塩分浸透深さに注目すると、最も浸透深さが小さいのは28日養生であり、封緘養生が長いほど遮塩性が向上している。図-2(b)は水中養生の結果であり、封緘養生と同様に養生期間が長いほど遮塩性が向上し、封緘養生の塩分浸透深さが2~3cmであるのに対し、水中養生は2cm程度と小さい結果であった。

図-2(c)は脱型1日後封緘養生および2日後封緘養生の結果であり、14日養生の1日後封緘、14日養生の2日後封緘、28日養生の1日後封緘、28日養生の2日後封緘の順で浸透塩分量が少なかった。また図より2日後封緘の方は1日後封緘よりも塩分浸透深さや浸透塩分量が大きいことがわかり、脱型後はできる限り早く追加養生を実施した方が遮塩性は向上すると考えられる。

図-3は養生期間が14日と28日の各養生条件における浸透塩分量の比較である。封緘養生は28日間行うことで、水中養生14日に相当する遮塩性を発揮していることが分かった。また、脱型2日後封緘養生が最も塩分が浸透しており、脱型時の乾燥期間が長いと養生期間を延長しても水和促進効果が小さい可能性が示唆された。

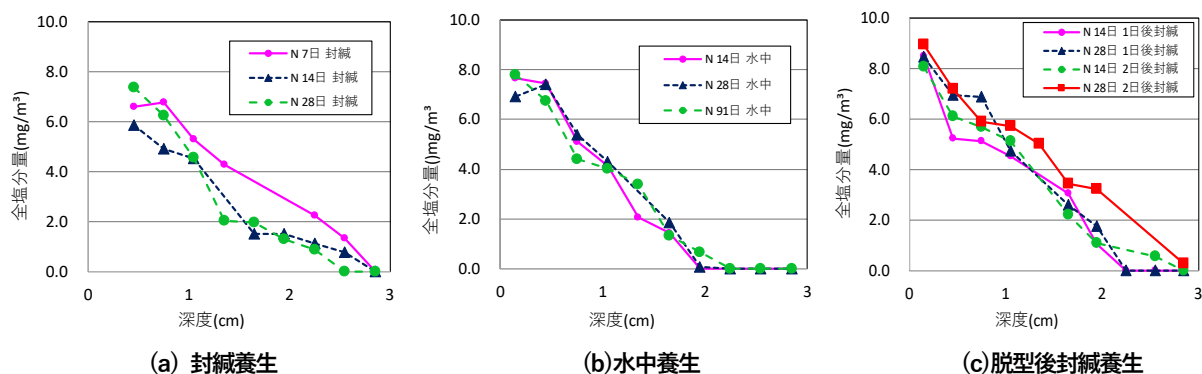


図-2 Nの養生条件と期間における深さ方向の塩分浸透量

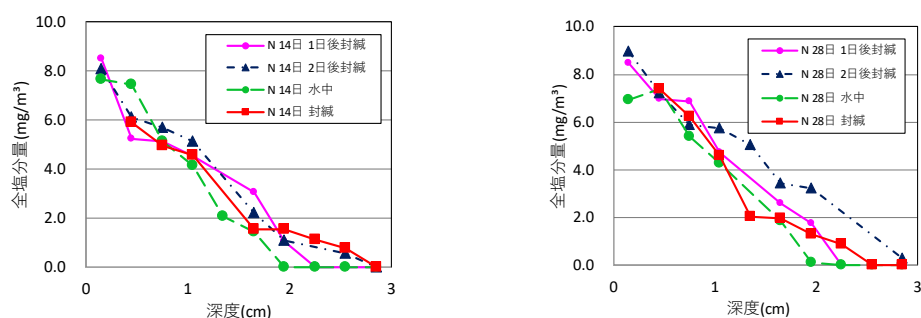


図-3 Nの養生期間14・28日における各養生条件の深さ方向の塩分浸透量

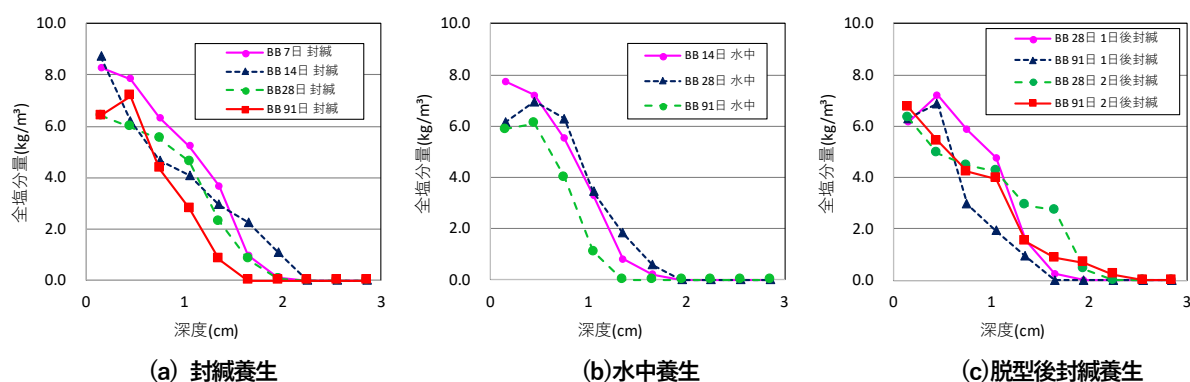


図-4 BBの養生条件と期間における深さ方向の塩分浸透量

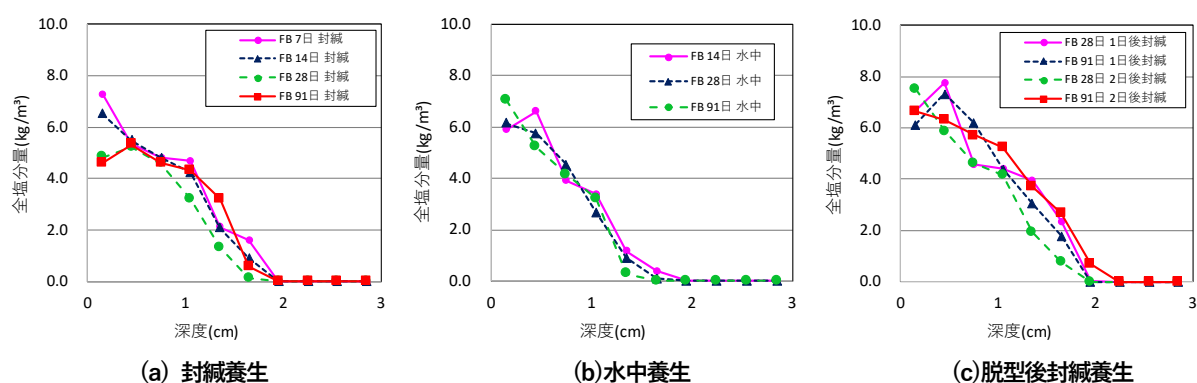


図-5 FBの養生条件と期間における深さ方向の塩分浸透量

3-2 高炉セメントB種(BB)およびフライアッシュセメントB種相当(FB)

BBにおける各養生条件での深さ方向の塩分量を図-4に示す。封緘養生において養生期間の延長に伴い塩分浸透深さ、浸透量ともに減少しており、Nと比較しても高い遮塩効果を確認した。水中養生においても封緘養生と同様の傾向であった。脱型1日後および2日後封緘養生においてもNと同様に、2日後封緘は1日後封緘よりも塩分が多く浸透した。

FBにおける各養生条件での深さ方向の塩分量を図-5に示す。封緘養生において養生期間の延長に伴い塩分浸透深さ、浸透量ともに減少しており、Nよりも高くBBと同等の遮塩効果を確認した。水中養生においても封緘養生と同様の傾向であった。脱型1日後および2日後封緘養生においてはNやBBとことなり、脱型後の乾燥期間による塩分浸透度の違いが見られなかった。

3-3 見掛けの拡散係数

これまで得た塩分浸透量データを使用して、図-6に示すとおりFickの拡散則に基づき各養生条件における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した⁴⁾。Nについて封緘養生および水中養生は養生期間の延長に伴い拡散係数は減少した。さらに、封緘養生を28日間行うことで、水中養生14~28日に相当する遮塩効果が得られることが分かった。脱型後封緘については、養生期間の延長とともに拡散係数が減少する傾向になく、乾燥の影響により養生を延長しても耐久性が向上していないことが分かった。BBについて、どの条件においても養生期間の延長に伴い、拡散係数が減少する傾向にあった。特に28日養生まででなく、91日間と長期に養生することで、さらに拡散係数が低減し長期養生による耐久性向上が顕著であることが分かった。FBについて遮塩効果は概ねBBと同等であり、Nで見られたように、28日間

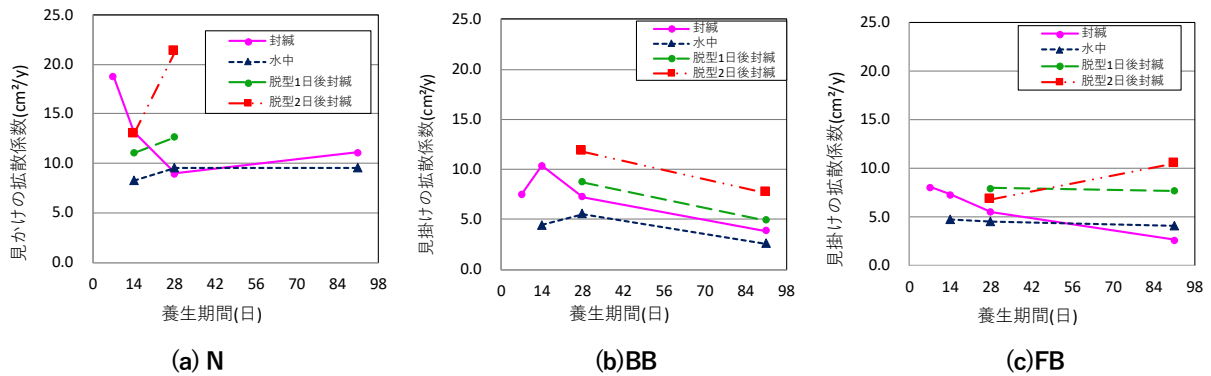


図-6 Nの養生条件と期間における深さ方向の塩分浸透量

の封緘養生により 14 日間の水中養生と同等の遮塩効果が得られることがわかった。

図-7 に養生期間 28 日におけるセメント種別と養生条件における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示す。封緘養生を 28 日間行うことで、どのセメント種においても水中養生に近い遮塩効果が得られることが分かった。また、セメント別に比較すると N よりも BB の拡散係数が小さく、FB はさらに減少して非常に高い遮塩効果を有することが分かった。なお、BB については前述のとおり 28 日を超える養生期間の延長で、拡散係数がより減少する。脱型後に乾燥を受けた場合、養生効果は減少して拡散係数は大きくなる傾向にあり、特に N で顕著であった。

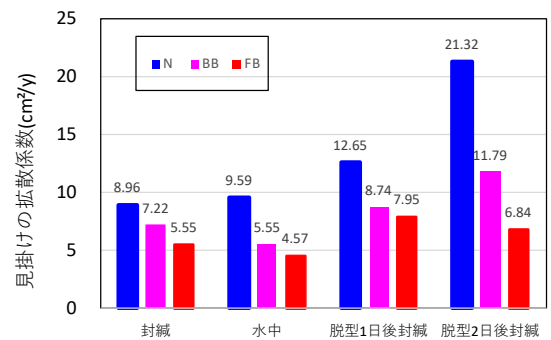


図-7 セメント種別と養生条件における拡散係数(28 日養生)

4. おわりに

従来の塩水浸せき実験では、浸せき水による養生作用により、養生条件における遮塩効果が検知できない課題を踏まえ、1 年間の塩害環境暴露および短期高濃度の塩水浸せき試験を併用することで、セメント種別毎の養生効果を明らかにした。特に、28 日間の封緘養生により 14～28 日間の水中養生に近い遮塩効果が得られること、BB については 28 日を超える長期の養生で遮塩効果がさらに上昇すること、28 日間の養生で比較すると FB が最も高い遮塩効果を有することなどが分かった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕, pp156-164
- 2) 山口県下関土木建築事務所, パシフィックコンサルタンツ株式会社：平成 24 年度 一般県道角島神田線(角島大橋)単独橋梁補修(通常)工事に伴う補修調査及び橋梁長寿命化修繕計画策定業務委託 第 1 工区・第 3 編及び第 4 編
- 3) 大屋誠, 武邊勝道, 広瀬望, 安食正太, 松崎靖彦, 麻生稔彦：風向・風速データを用いた山陰地区の飛来塩分予測, 材料と環境, 63, pp-566-569, 2014
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準, 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案) pp375, 2013

コンクリートの湿潤養生による塩害抑制



徳山工業高等専門学校 土木建築工学科
温品達也(コンクリート工学研究室)

1. 研究背景

養生条件は水セメント比のように大きな変化はない
長寿命化に伴い、小さな変化も大きな影響を持つ



土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]
養生条件は、**耐久性照査式**で考慮できていない



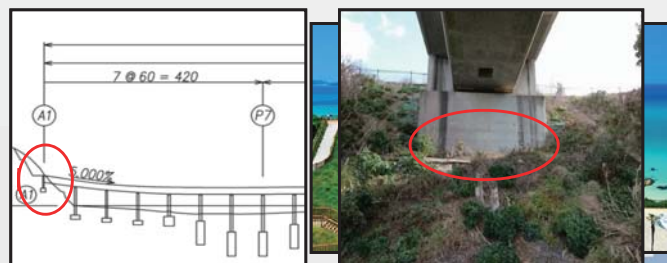
構造物の施工時に、養生終了時期が曖昧に
養生条件が塩害耐久性に与える影響を**実環境の暴露**
と**塩水浸漬**を併用した実験により検討していく

2. 実験概要

- ①飛来塩分量測定 → 暴露地点の**塩害環境評価**
- ②試験体作製・暴露
- ③塩水浸漬試験
- ④研削 → 滴定のために試験体を粉末状に
- ⑤塩分滴定 → 深さごとの塩分量を測定

2. 実験概要：①飛来塩分量測定

試験体暴露地点：山口県下関市の角島大橋の橋台の傍



2. 実験概要：①飛来塩分量測定

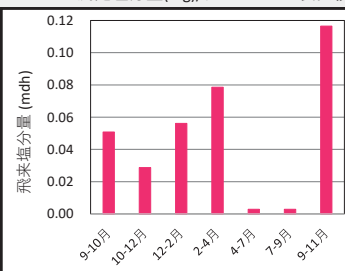


- 塩分捕集用モルタル板(コロルサーチ)を用いた
- 2～4か月間に一度回収して、飛来塩分量を測定

2. 実験概要：①飛来塩分量測定

1.角島大橋
A1橋台のmdh

mdh...測定塩分量(mg)/コロルサーチ表面積(dm²)/測定期間(hour)



西日本-日本海沿岸部の標準的な飛来塩分量
海上より小さく1/3程度

2. 実験概要：②試験体作製・暴露

試験体材料表

材料	記号	種類	摘要
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ 比表面積3340cm ² /g
	BB	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³ 比表面積3900cm ² /g
	FB	フライアッシュセメントB種 セメント混合	密度2.97g/cm ³ 比表面積3230cm ² /g
細骨材	S1	細砂	2.70g/cm ³
粗骨材	S2	石灰石砕砂	2.70g/cm ³
	G	砕砂	2.70g/cm ³
混和剤	AD	AE減水材	マスターポリヒード 15Sc×2
	AE	AE剤	マスターエア 202

2. 実験概要：②試験体作製・暴露

試験体配合表

セメント	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)								
			W	C	B	S(S1+S2)	S1	S2	G	AD	AE
N	54.8	50	170	310	0	919	556	363	955	C×1.5%	C×0.002%
BB	54.6	50	167	306	0	919	556	363	955	C×1.2%	C×0.004%
FB	54.8	50	166	258	45	919	556	363	955	C×1.2%	C×0.008%

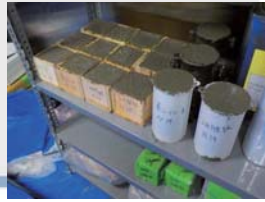
→BB,FBは、長期養生で高い遮塩効果が
発現するので、それらの実用性評価のため

2. 実験概要：②試験体作製・暴露



- ・二層に分ける
- ・一層ごとに突き棒5回とスタンプ5回

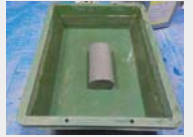
- ・表面成型
- ・20℃, R.H.60%の部屋で静置



2. 実験概要：②試験体作製・暴露

試験体養生条件

セメントの種類	養生種別	養生期間(日)
N、BB、FB	封緘	5(N)、7、14、28、91
	水中(7日脱型後)	14、28、91
	脱型1日後封緘(7日脱型)	14(N)、28、91(BB、FB)
	脱型2日後封緘(7日脱型)	14(N)、28、91(BB、FB)



養生条件は全て現場で行えるもの

2. 実験概要：②試験体作製・暴露



エポキシ樹脂を塗布



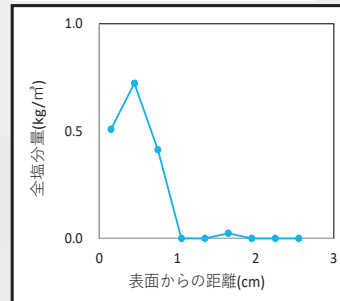
試験体暴露時の様子

暴露期間：2018年10月～2019年9月(11ヵ月間)

塩水浸漬試験

●塩水浸漬試験(補足)

N 5日 封緘養生 の実験結果



養生条件ごとに比較するには塩分浸透深さと浸透量が少ない



28日間塩水浸漬試験をして比較する

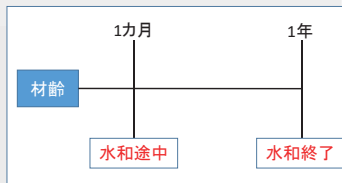
2. 実験概要：③塩水浸漬試験

試験体材齢(暴露回収日時点)

養生期間(日)	材齢(日)
5	325
7	327
14	341, 349※1, 350※2
28	355, 363※1, 364※2
91	418, 426※1, 427※2

※1: 脱型1日後封緘
※2: 脱型2日後封緘

試験体材齢がほぼ1年を超えているため再水合の影響は小さい



2. 実験概要：③塩水浸漬試験

10%濃度の塩水に試験体を浸す(28日間)



水分の逸散を防ぐためにラップで覆う

2. 実験概要：④研削法

(研削法は当研究室で改良したもの)

本実験では、**研削法**を採用

cmオーダー

mmオーダー

カット法では養生条件の微妙な変化を捉えることができない



①樹脂を削る



②浸透面から線を引く

2. 実験概要：④研削法



③試験体セッティング1



④試験体セッティング2

厚さ1mmのプラスチック板

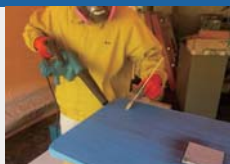


⑤ブレード部のセッティング



⑥研削の様子

2. 実験概要：④研削法



⑦研削台の掃除1



⑧研削台の掃除2



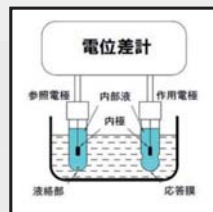
⑨粉碎机



⑩粉碎の様子

2. 実験概要：⑤電位差滴定

- この実験で深さごとの塩分量を測定する
- 溶液中の目的成分の濃度を電極の起電力差から測定し、イオン濃度の測定などに利用されている方法



電位差測定装置



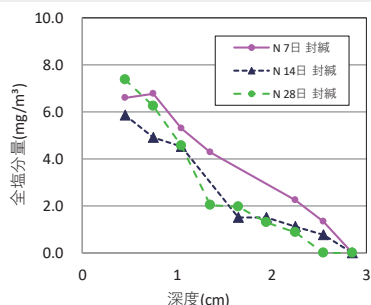
滴定の様子

引用文献

一般社団法人 日本分析機器工業会HP、電位差測定装置の原理と応用

3. 実験結果と考察(N)

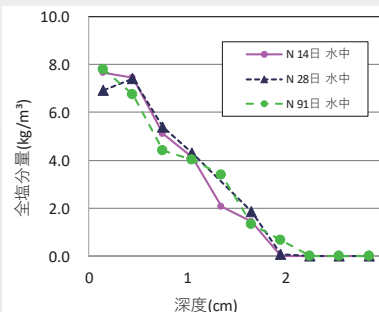
封緘養生の試験体実験結果(N)



封緘養生期間が長いほど遮塩性が向上した

3. 実験結果と考察(N)

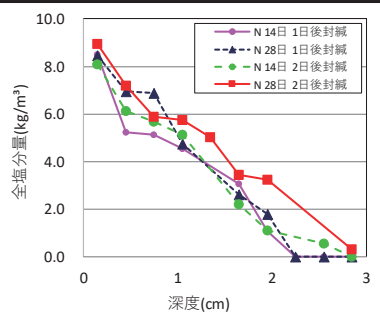
水中養生の試験体実験結果(N)



14日以上の養生を行うとそれ以降の大きな差はない
塩分浸透深さ2cm程度と浅い

3. 実験結果と考察(N)

脱型後封緘養生の試験体実験結果(N)

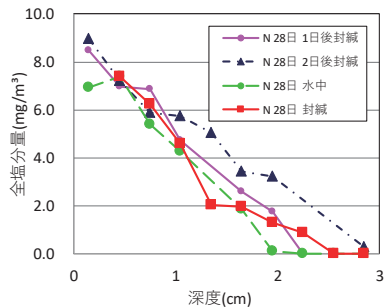


浸透深さと浸透量ともに脱型1日後の方が小さい

脱型後は早く養生した方がよい

3. 実験結果と考察(N)

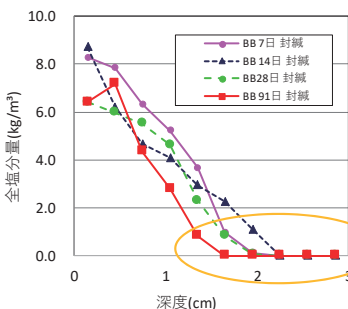
28日養生の試験体実験結果(N)



- 封緘養生28日は水中養生14日と同等の遮塩効果
- 脱型2日後封緘が最も塩分が浸透しやすく、脱型後に追加養生する場合は直ちに保湿することが効果的

3. 実験結果と考察(BB)

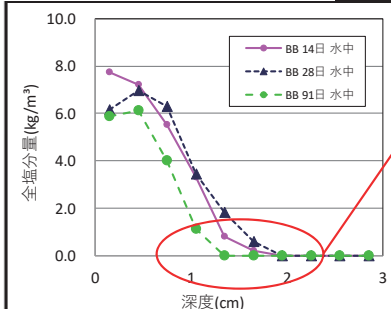
美シール養生の試験体実験結果(BB)



封緘養生期間の延長に伴い塩分浸透深さと浸透量が抑制
Nよりも高い養生効果

3. 実験結果と考察(BB)

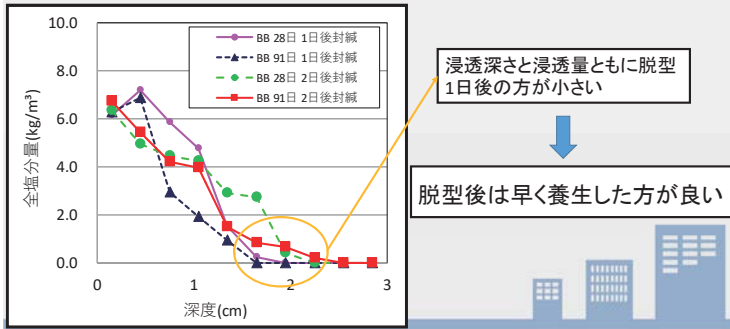
水中養生の試験体実験結果(BB)



養生期間が長いほど塩分の侵入を抑制した

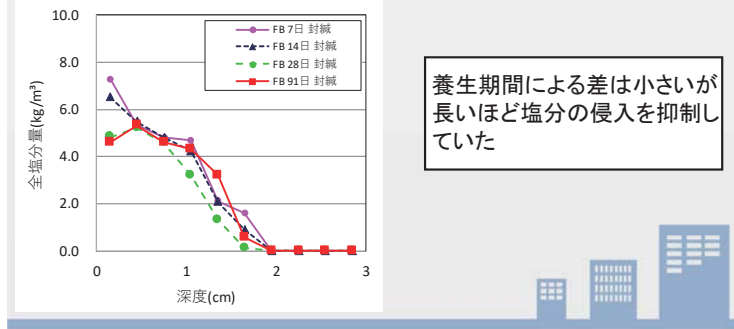
3.実験結果と考察(BB)

脱型後封緘養生の試験体実験結果(BB)



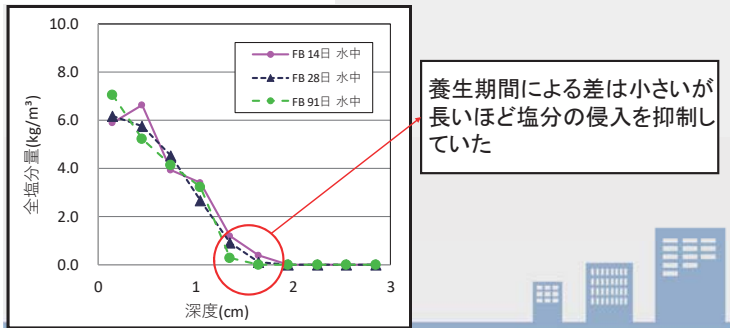
3.実験結果と考察(FB)

美シール養生の試験体実験結果(FB)



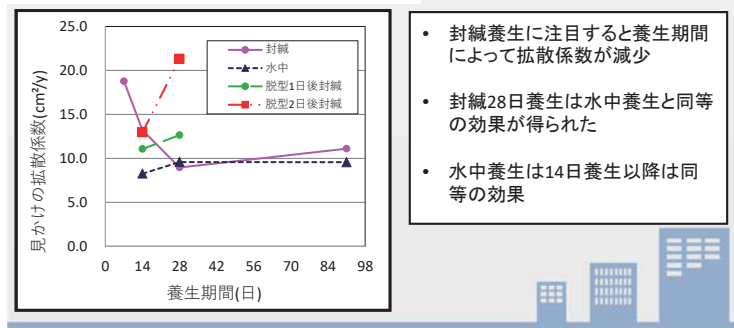
3.実験結果と考察(FB)

水中養生の試験体実験結果(FB)



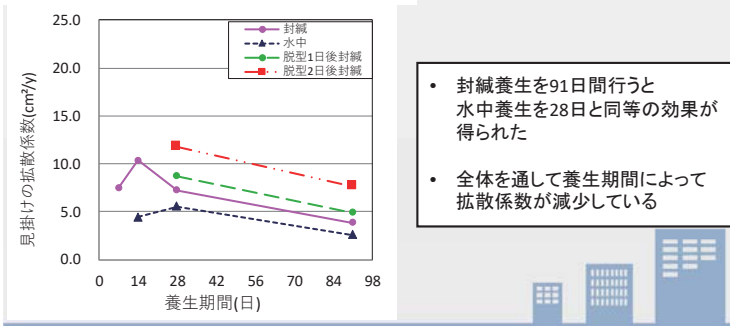
3.実験結果と考察(N)

養生条件ごとの拡散係数による比較(N)



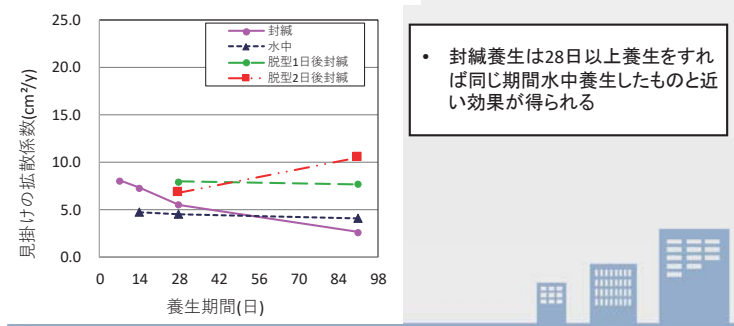
3.実験結果と考察(BB)

養生条件ごとの拡散係数による比較(BB)



3.実験結果と考察(FB)

養生条件ごとの拡散係数による比較(FB)



4.研究のまとめ

セメント種別ごとの拡散係数による比較(28日養生)

