塩害暴露試験結果に基づく
最適な表面含浸工法による補修対策



金沢大学　理工研究域　久保　善司

コンクリート構造物を長持ちさせる

福井県坂井市　昭和28年(1953）
60年以上の長持ち
土木遺産（土木学会HPより）



十郷橋
現存最古ポストテンション方式　PC橋

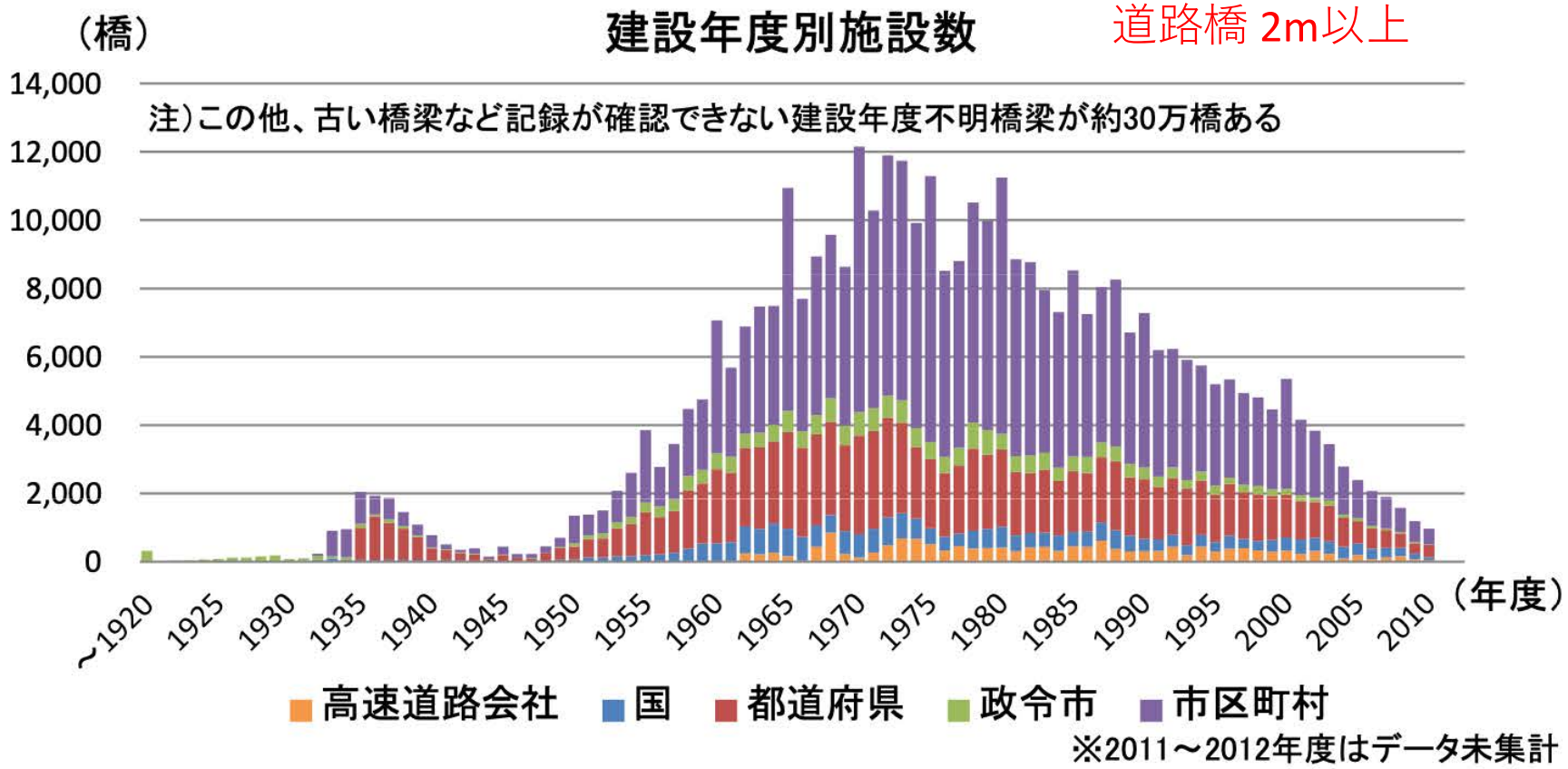
沖縄県名護市　昭和27年(1952）
厳しい環境に耐えられず。。。



適切な設計、施工　→　供用期間を耐えうる

加えて、適切な**手当**が必要

道路橋　建設施設数の推移



高度経済成長期に集中的かつ膨大な数の整備

供用期間の長期化に伴う維持管理が大きな問題！！

出典:社会インフラの維持管理の現状
https://www.mlit.go.jp/common/001016267.pdf

供用期間の長期化とその維持管理

建設後50年以上経過する社会資本の割合

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 ［約７３万橋注1）（橋長２m以上の橋）］	約２５％	約３９％	約６３％
トンネル ［約１万１千本注2）］	約２０％	約２７％	約４２％
河川管理施設（水門等） ［約１万施設注3）］	約３２％	約４２％	約６２％
下水道管きょ ［総延長：約４７万ｋｍ注4）］	約４％	約８％	約２１％
港湾岸壁 ［約５千施設注5）（水深－４．５m以深）］	約１７％	約３２％	約５８％

高度経済成長期に集中的かつ膨大な数の整備

供用期間の長期化に伴う維持管理が大きな問題！！

出典:社会資本の老朽化の現状と将来　国土交通省
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html

コンクリート構造物の維持管理をどうすべきか？

予防保全

将来の維持管理を要する構造物を減らす。

もしくは、その維持管理費用を低減する。

劣化の発生、進行・進展の抑制

現状
経済的な制約
優先順序

すでに手当てが必要な構造物は？

失敗のない、確実な対策を適切な時期に実施

取捨選択も必要：撤去、架替

現状
経済的な制約
標準的な対策手法あり
適切な時期とは？
あるいは規模？

限られた予算の範囲
将来の維持管理の負担を可能な限り低減

適切な時期、適切な規模の手当てが十分か否かの精査
後にならないと不明

ASR対策工法の変遷

1980年代	1990年代	2000年以降
塩害・ASR 早期劣化	再劣化・ 再変状	鉄筋破断
遮水系 表面保護	撥水系 弾性ゴム系 表面保護	力学的な拘束 性能回復・向上の対策 亜硝酸リチウム圧入

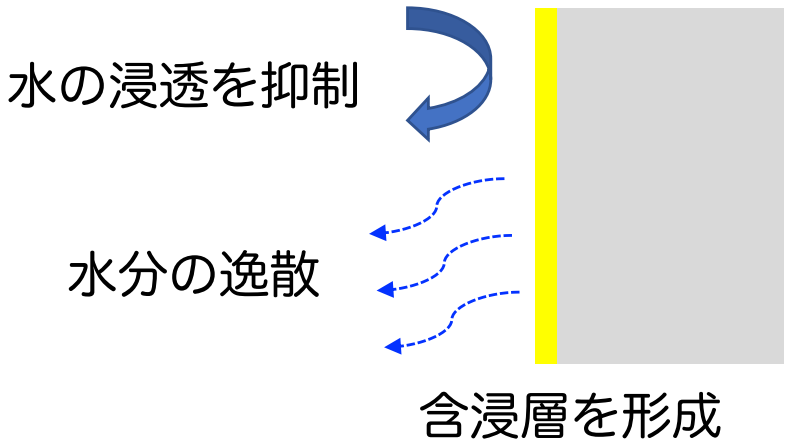
再変状が生じやすい　⇔　対策効果が未検証

対策時点，対策以後の膨張進展が不明

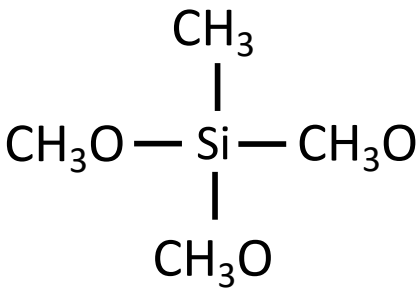
効果検証　モニタリングが必要

シラン系表面含浸工法　(撥水型)

外側からの水や塩化物イオンの浸透を防ぎ、
内部から水を逸散させる（乾燥させる）。



シランの分子構造例



加水分解し,コンクリート基層と結合
アルキル基（疎水基）が水と反発
コンクリート細孔内壁に並び、撥水性を付与。

分子構造、濃度
適用量等の影響を検討

2000年代　高濃度、高含浸性：含浸材の高性能化

シラン系含浸材の変遷

1980年代	2000年代	現在
溶媒タイプ 15-20%濃度	高濃度・高性能化 シラン・シロキサン系	併用工法 撥水以外の機能を付与



簡易かつ安価な工法
新設：予防保全
既設：延命策

ひび割れ補修への適用

・塗膜系に比べて施工が容易、比較的安価である点で適用
・適用後のコンクリート構造物の性能評価の結果としての選択は少ない
　適用後の補修効果の定量評価
・簡易補修、ひび割れ補修への適用

シラン系表面含浸工法　(撥水型)

ASR膨張抑制

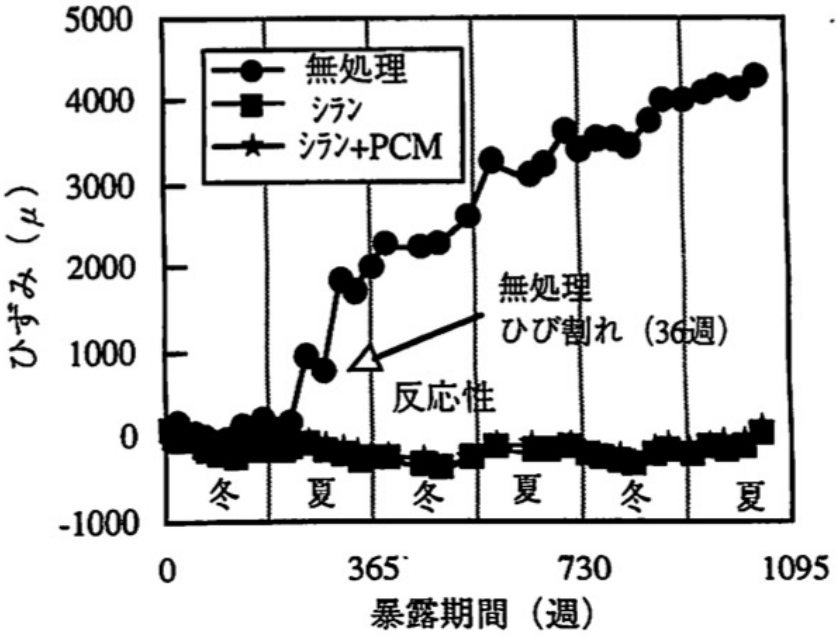


図6-4　ひずみの経時変化（角柱供試体）

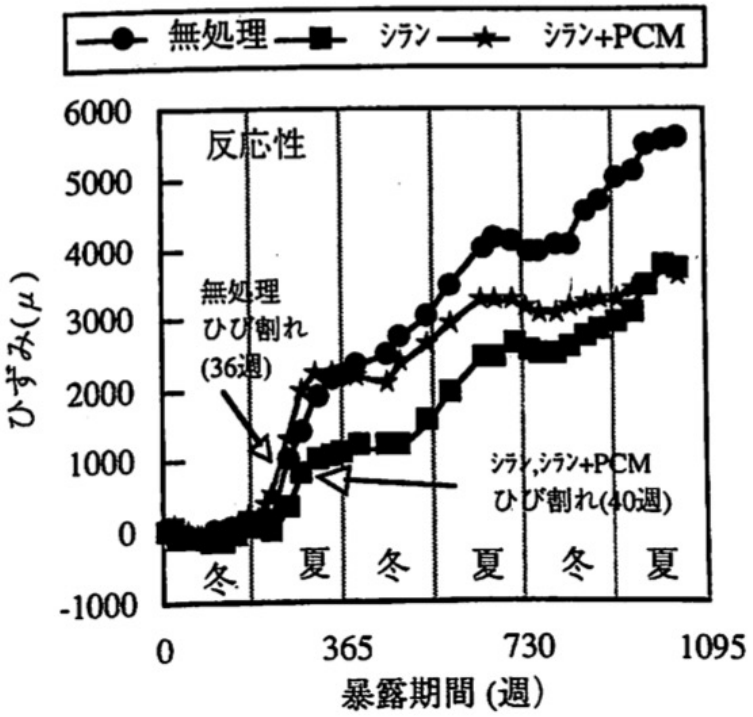


図6-6　大型供試体ひずみの経時変化

長期暴露試験　(2006年- 約19年経過)



気象条件の異なる長期暴露試験に基づく シラン系表面含浸の処理効果に関する検討

塩分浸透抑制効果、中性化への影響

腐食抑制効果、効果の持続性

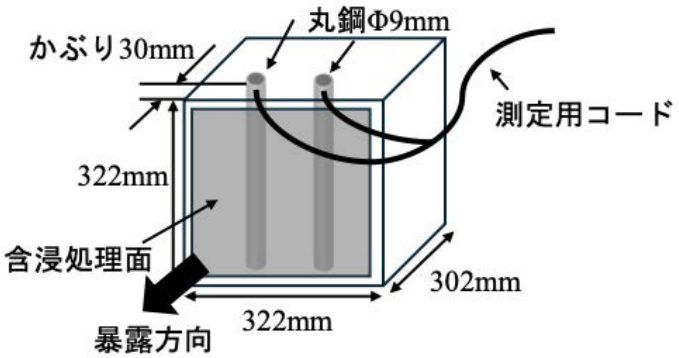
コンクリート構造物の補修、補強アップグレード論文集, Vol.24, 2024
気候条件の異なる長期塩害暴露試験に基づくシラン系表面含浸の処理効果に関する検討

塩害暴露実験概要

供試体

W/C ：65%
　コンクリートの緻密性が低下している既設構造物を想定
かぶり：3cm
　腐食等が発生しやすい閾値
表面含浸材：シラン・シロキサン系含浸材, 200g/m^2
　耐久性改善・向上を目的として開発（2000年代）
塩化物イオン濃度：0, 0.7, 1.5, 2.2, および3.5kg/m^3
　当時の腐食発生塩化物イオン濃度の閾値：1.2～2.4kg/m^3
比較用：無処理

大型供試体



小型供試体

10 x 10 x 20cm
5面防水塗装
鉄筋有無



塩害暴露実験概要

暴露環境

気象条件
　気候区分の異なる暴露地区を選定
暴露条件
　波浪の影響を直接は受けない，飛来塩分の影響 を受ける沿岸地区
　親不知地区：高架下のため、降水・日射等の影響緩和

暴露地区	海岸からの距離	気候区分	表面塩化物イオン量
留萌	10m(沿岸)	亜寒帯気候	9kg/m^3
親不知	40m(沿岸)	日本海側気候	7.2kg/m^3
金沢大学*	10km(内陸)	日本海側気候	
御前崎	100m(沿岸)	太平洋側気候	2.5kg/m^3
水島	30m(沿岸)	瀬戸内海式気候	3.9kg/m^3
辺野喜	50m(沿岸)	亜熱帯気候	6.8kg/m^3
琉球大学*	2.7km(内陸)	亜熱帯気候	

表面塩化物イオン濃度：コンクリート標準示方書

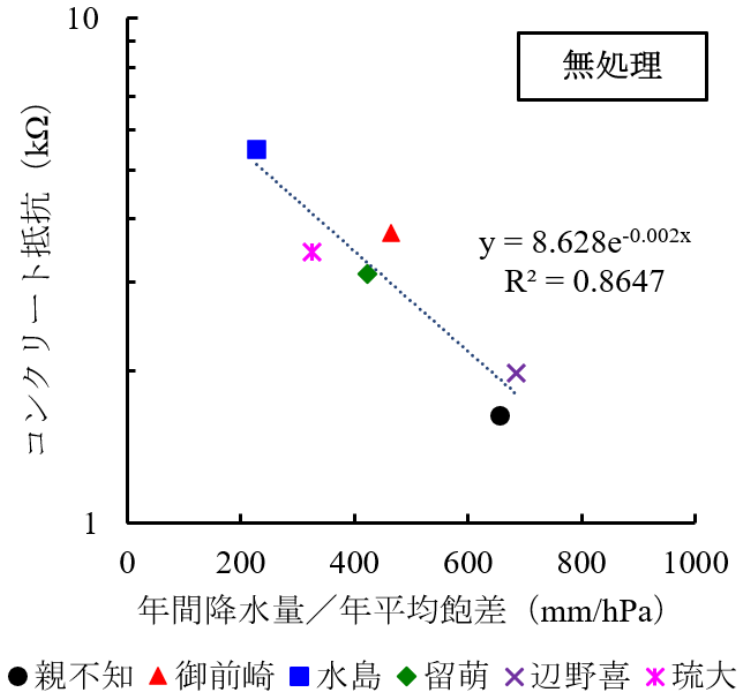
2006年1月に暴露開始
水島地区：暴露16年目に江田島地区に移動,海岸からの距離40m

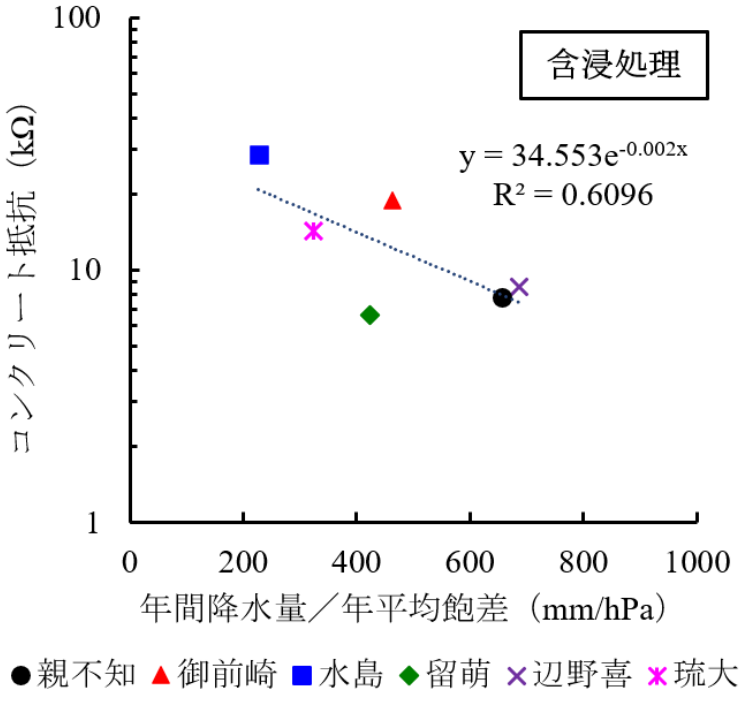
コンクリート抵抗と気象条件の関係

『吉野正敏：農業気候学における気候示数について，農業気象，第25巻，第２号，1969.9』

○ 土壌と気候との関係　⇒　**年N-S係数 = 年間降水量／年平均飽差**

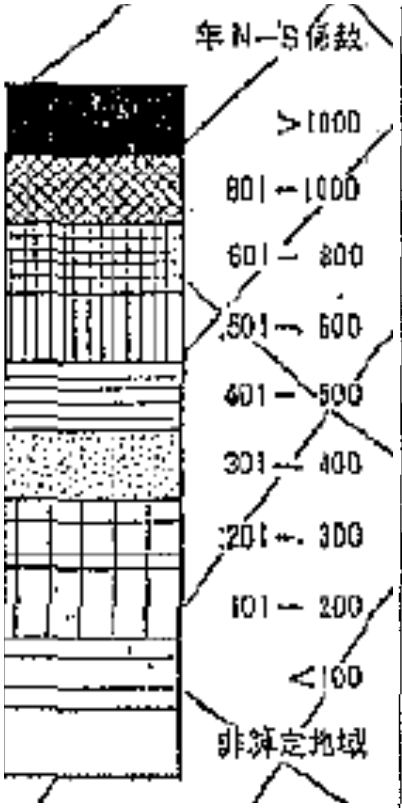
・横軸の「年間降水量／年平均飽差」が大きくなるほど、コンクリートが湿潤状態に保たれやすくなり、コンクリート抵抗が低下する相関関係が認められる





※留萌と辺野喜はCl-0，Cl-2.2のみデータを使用

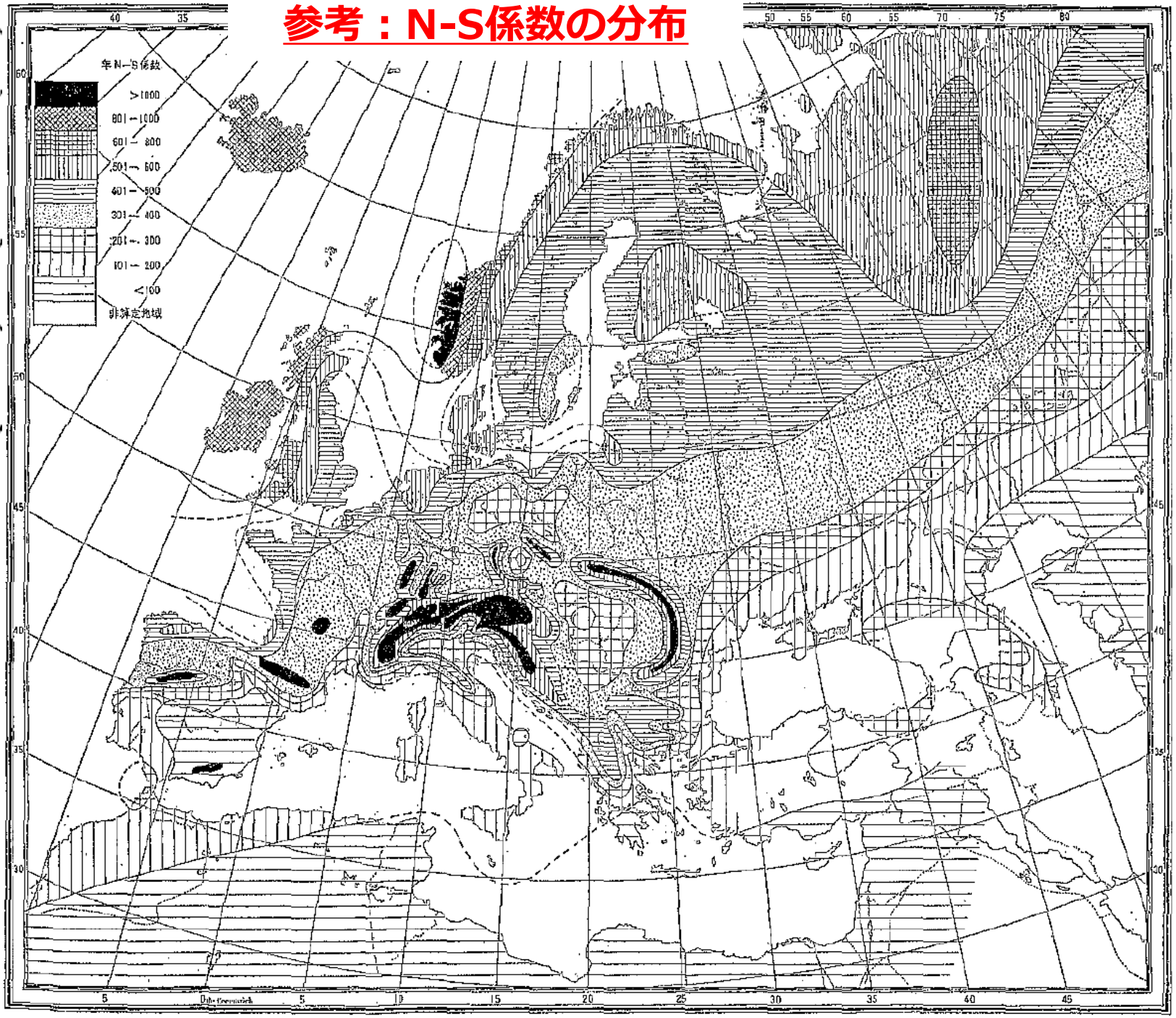
参考：N-S係数の分布



飽差[mmHg]
=0.75 飽差[hPa]

旧N-S
=1.33×現N-S

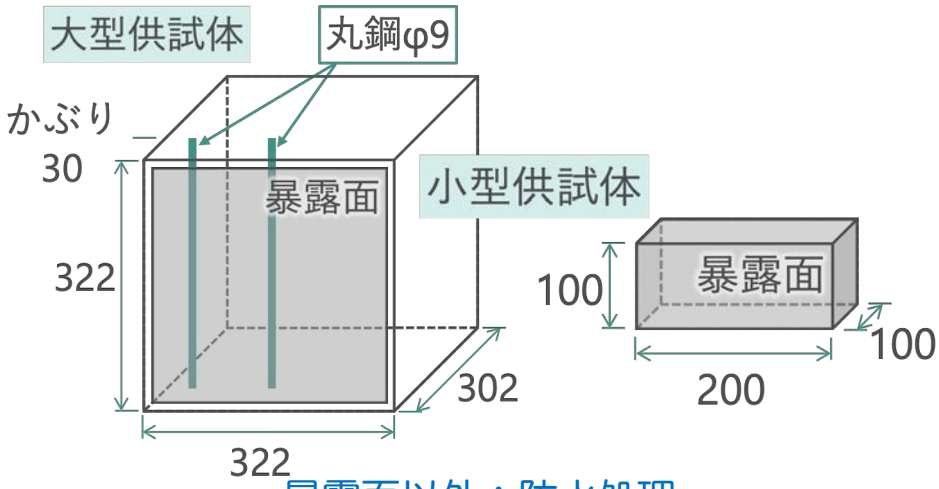
	現N-S	旧N-S
親不知	560	747
御前崎	474	632
水島	157	209
留萌	445	593
辺野喜	698	931
琉大	342	456
金大	429	572



第 156 図　ヨーロッパにおける N-S 係数の分布（Meyer 1926, Taf. VIII）
図中の白地の範囲は，係数の算出が行なわれなかった部分．

実験概要

供試体
コンクリート
　W/C=65%：既設の緻密性の低下
含浸剤
　シラン・シロキサン系材料,200g/m^2
塩化物イオン濃度
　無混和、2.2kg/m^{3}混入
かぶり
　3cm（腐食発生しやすい閾値）



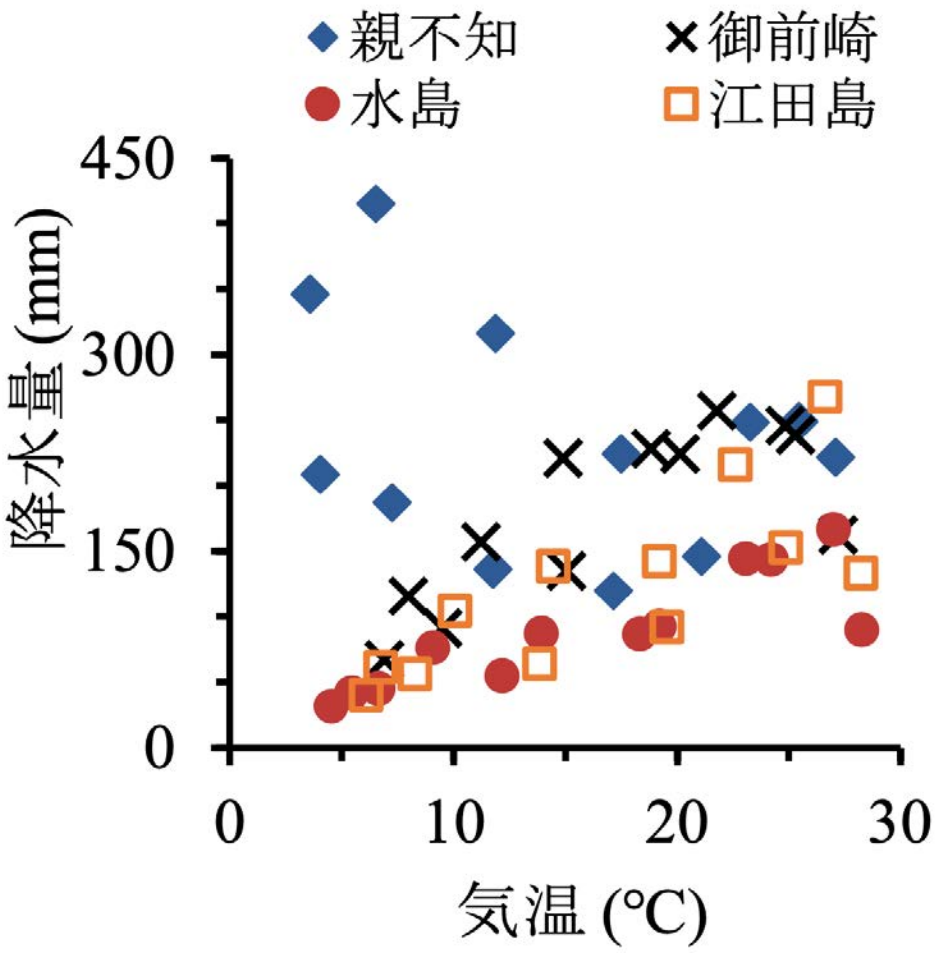
暴露面以外：防水処理

暴露地区
　親不知：日本海　（高架下）
　御前崎：太平洋
　水島（江田島）：瀬戸内海
暴露条件：波浪を直接受けない、沿岸

2006年1月から暴露開始
水島地区：16年目江田島へ移設

測定項目
　中性化深さ
　塩分浸透分布
　自然電位・分極抵抗

気象条件



年間降水量（平年値）
親不知：2763mm
御前崎：2116mm
水島　：1044mm
（2006.1から2023.9）

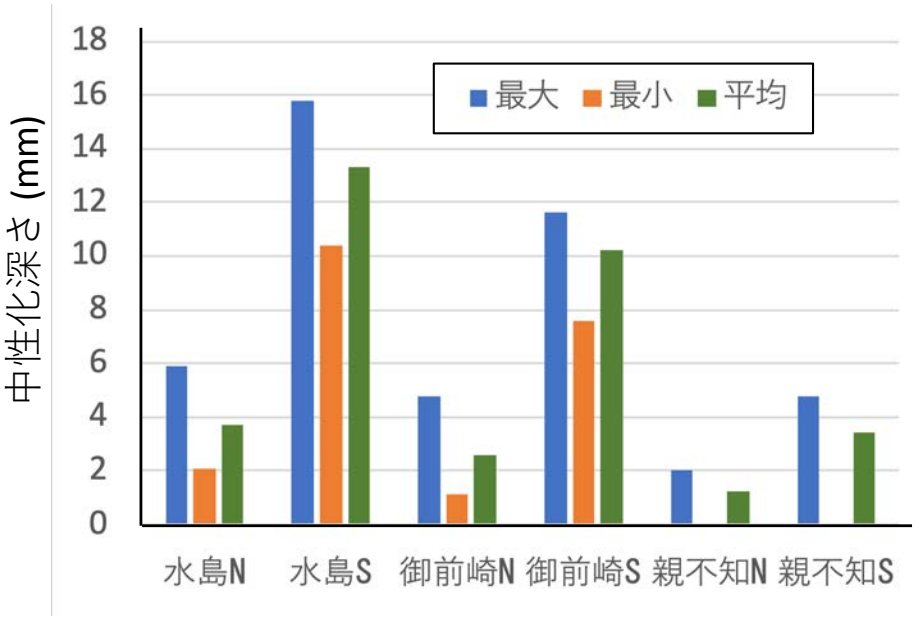
年平均気温（平年値）
親不知：14.8℃
御前崎：17.0℃
水島　：16.0℃
（2006.1から2023.9）

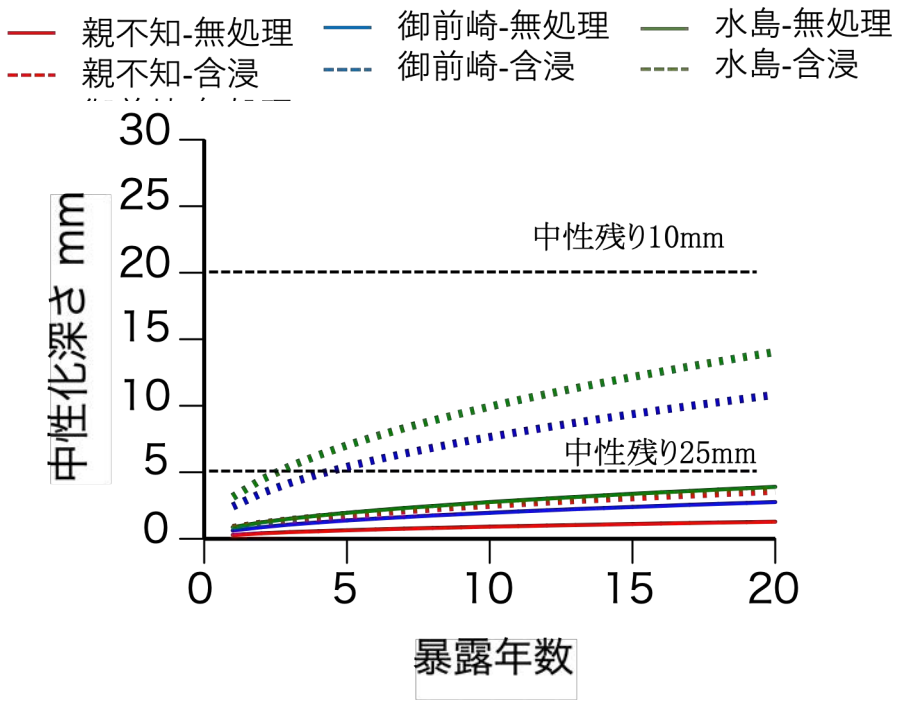
降水（水分供給）
親不知 > 御前崎 > 水島
温度
親不知 < 水島　< 御前崎

中性化深さ・中性化残り

	水島N	水島S	御前崎N	御前崎S	親不知N	親不知S
最大	5.9	15.8	4.8	11.6	2.0	4.8
最小	2.1	10.4	1.1	7.6	0.0	0.0
平均	3.7	13.3	2.6	10.2	1.2	3.4

N:無処理
S:含浸処理
単位 mm

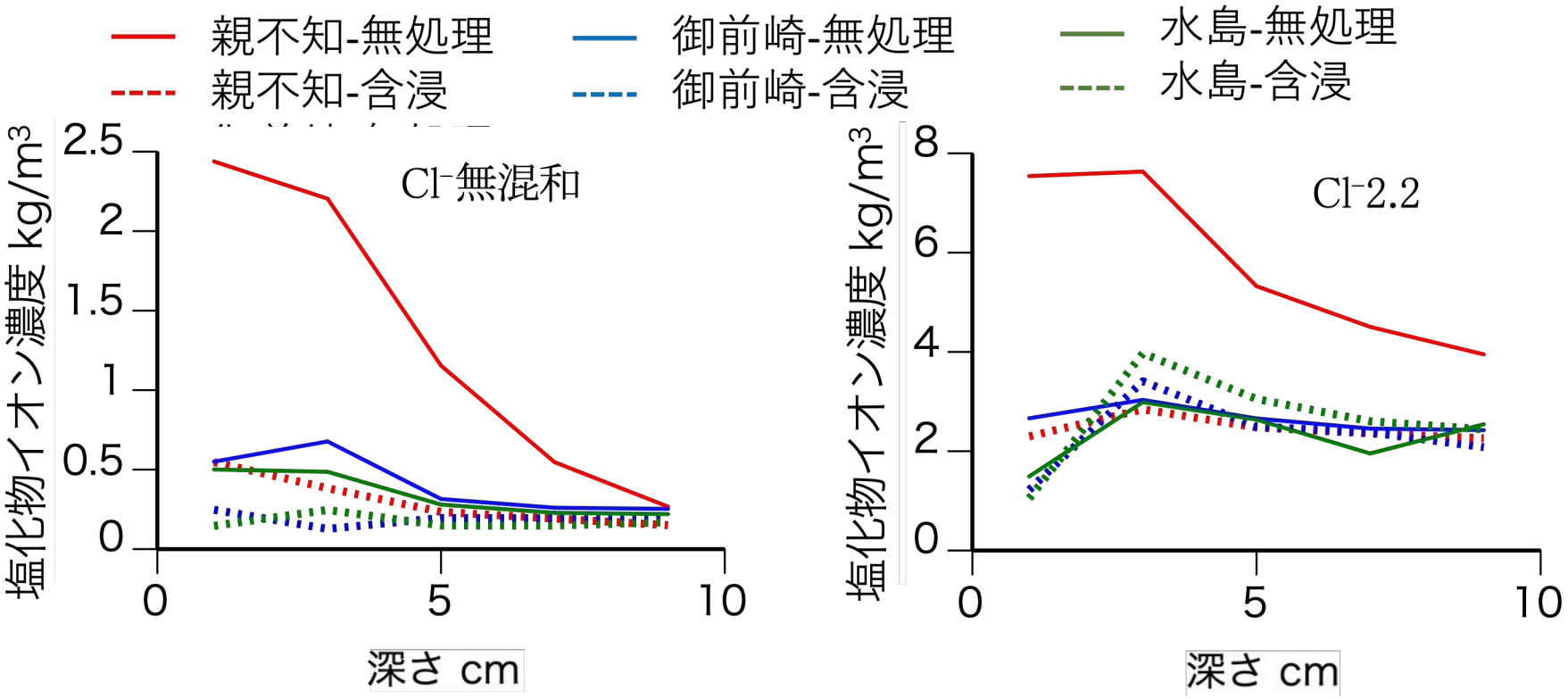




中性化　水島 > 御前崎 > 親不知
含浸処理　中性化を促進

水島・御前崎 含浸処理
中性化残り25mm以下

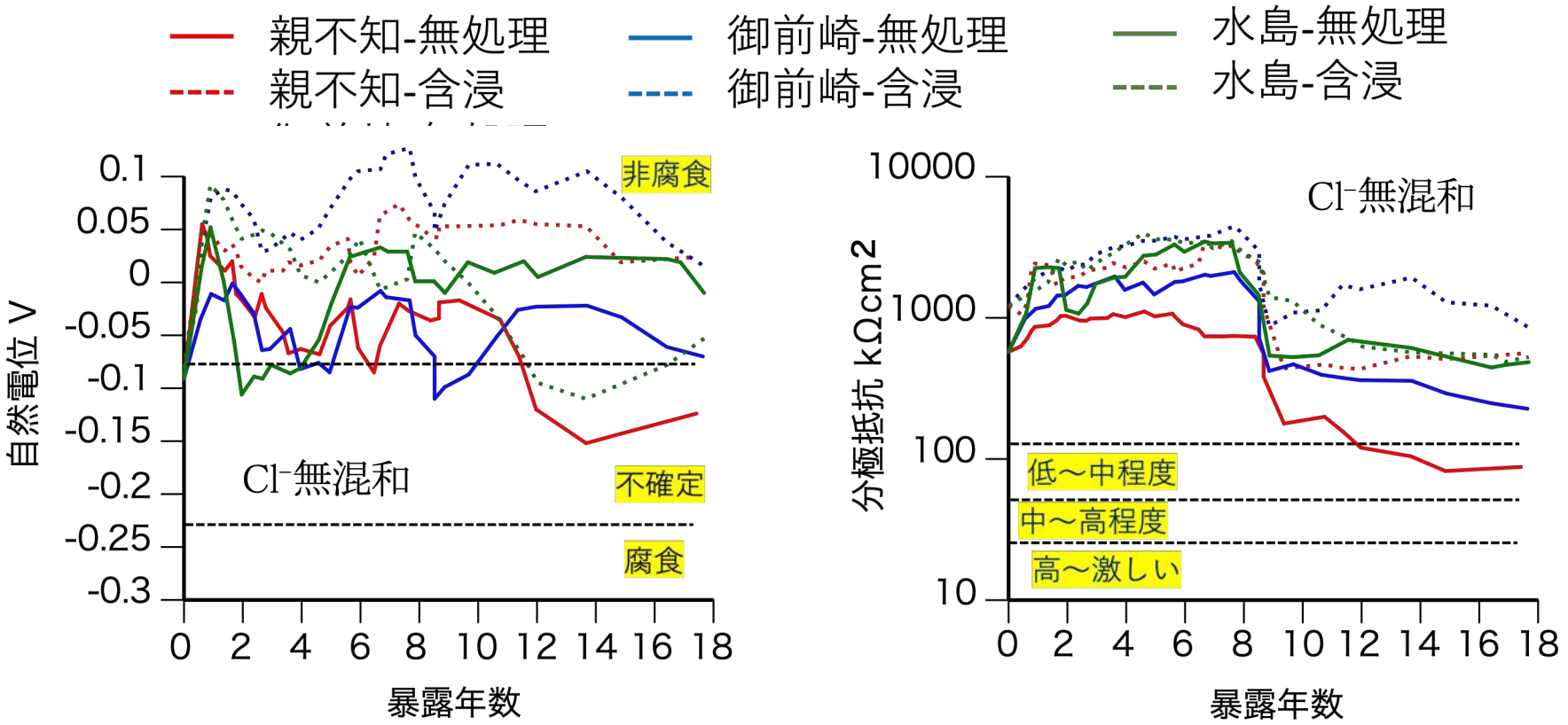
塩化物イオン浸透分布



親不知・無処理
　かぶり3cm:腐食発生
含浸
　いずれも塩分浸透を抑制

含浸処理
　御前崎・水島
　中性化による塩分濃縮

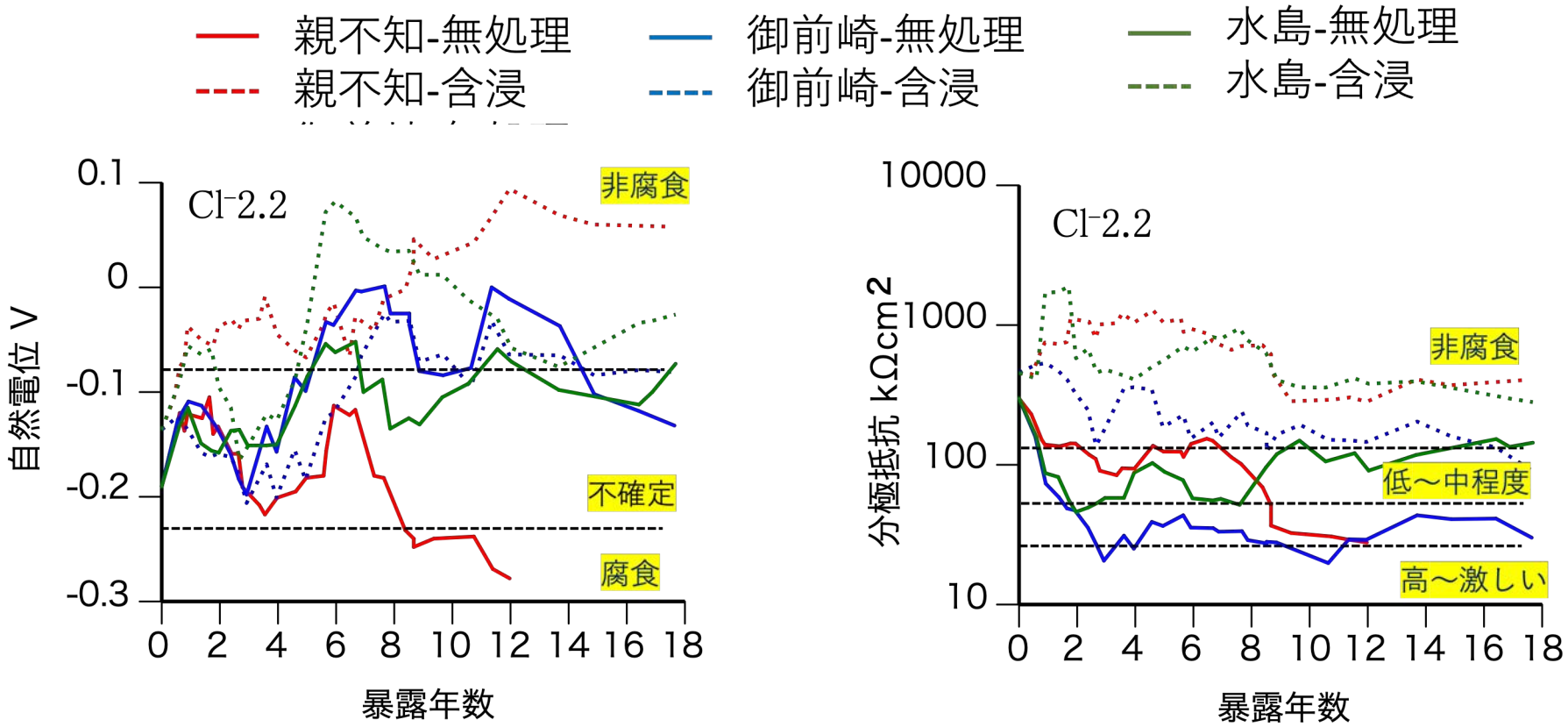
自然電位・分極抵抗　無混和



親不知・無処理
　飛来塩分による徐々に電位低下
水島・含浸
　中性化の影響による電位の低下

親不知・無処理
　低から中程度の腐食へ推移
含浸処理
　非腐食を維持
　水島：中性化の影響有、腐食は抑制

自然電位・分極抵抗　　Cl^-2.2kg/m^{3}混和



無処理
　親不知：飛来塩分による電位低下
　御前崎・水島：非腐食/不確定
水島/御前崎・含浸
　中性化の影響

無処理
　御前崎<水島，　親不知低下
含浸処理
　非腐食に維持（長期）
　御前崎/水島：中性化助長<腐食抑制効果

まとめ

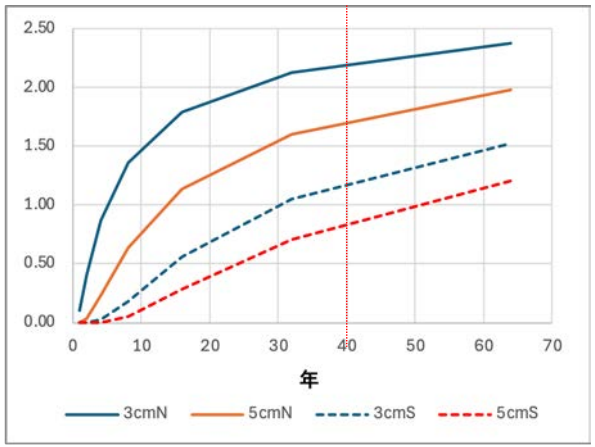
長期暴露試験に基づく含浸処理効果

・乾燥しやすい環境：含浸処理によって腐食が生じにくい状態となる
・中性化の進行は促進される。
・腐食抑制効果（遮塩性、水分逸散）は中性化助長の影響を上回る。
・長期経過後も含浸処理による腐食抑制効果は維持されている。

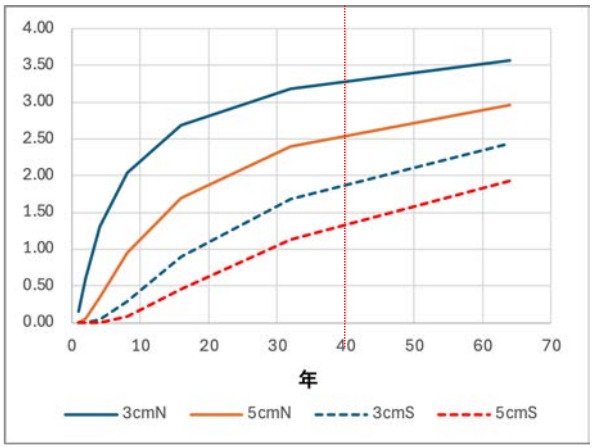
中性化は促進されるため、塩化物イオンの浸透状況
コンクリートの性状を見極めて適用する必要あり。
実構造物では飛来塩分あるいは凍結防止剤散布による浸透
今回とは中性化の影響が異なるため、この点についてはさらなる検討が必要。

塩化物イオンの浸透予測と中性化予測

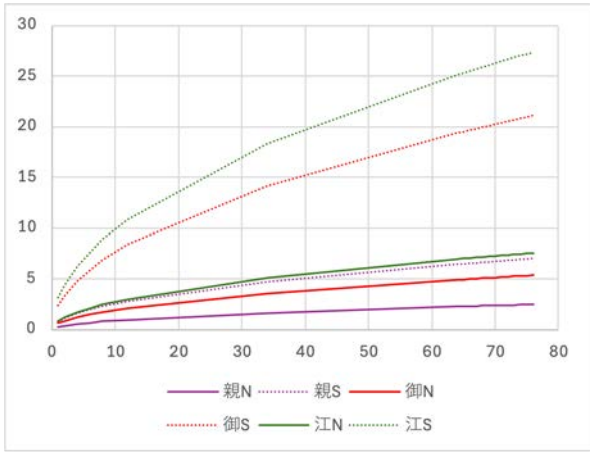
Co	3
Dc cm2/year	1.005
Ds cm2/year	0.01
ts cm	0



Co	4.5
Dc cm2/year	1.005
Ds cm2/year	0.01
ts cm	0.5



C0=4.5kg/m3



1985 to 2025 = 40年

かぶり

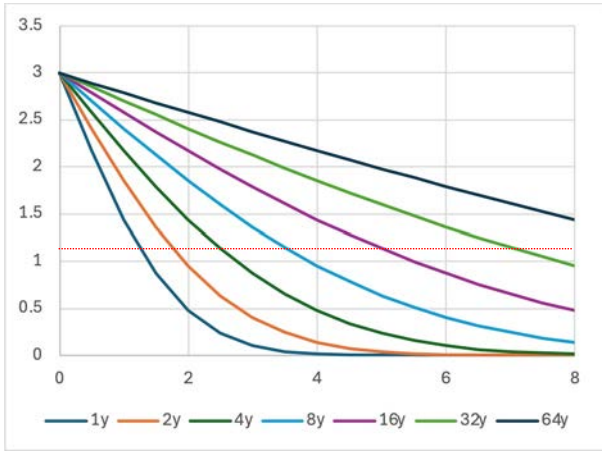
5cm 1.7kg/m^3

3cm 2.2kg/m^3

かぶり

5cm 2.5kg/m^3

3cm 3.3kg/m^3



寒冷地における長期暴露試験に基づくシラン系表面含浸材の処理効果

凍害・塩害の複合劣化環境

腐食抑制効果、効果の持続性

コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文集, Vol.26, 2016
寒冷地における長期暴露試験に基づくシラン系表面含浸材の処理効果

寒冷地において複合劣化を受けた構造物が多数報告

凍害

スケーリングによるかぶりの減少、
ひび割れによる水密性の低下

塩害

外部からの塩化物イオンの浸透促進、
鋼材腐食の早期発生

構造物の耐久性を著しく低下

既往の研究として、室内実験を中心として多くの知見が蓄積

・表面含浸材により、鉄筋腐食・スケーリングの発生抑制
・再塗布によって長期抑制に有効　など

数年規模の暴露試験における
効果検証（吸水抑制、塩分浸透抑制）については報告あり

but

実環境下における長期暴露での検証結果は少ない

本研究では、長期暴露試験（約18年間）の結果に基づき、
複合劣化作用における含浸処理の効果に関する検証を実施

供試体概要

（1）コンクリート

W/C (%)	s/a (%)	Cl^- (kg/m^3)	単位量(kg/m^3)					AE減水剤 (cc/m^3)	AE助剤 (cc/m^3)
			W	C	S	G	NaCl		
65	46	0	175	272	828	968	0	1020	1088
		2.2			824		3.6	907	
		3.5			822		5.8	839	
		5.0			820		8.3	762	
55	46	0	177	322	808	945	0	1610	1218
		2.2			804		3.6	1497	
45	43	0	150	320	787	1027	0	800	1840
		2.2			783		3.6		
		3.5			781		5.8		

セメント：W/C 65% および 55%：普通ポルトランドセメント
W/45%：高炉セメントＢ種

供試体概要

（2）表面含浸材

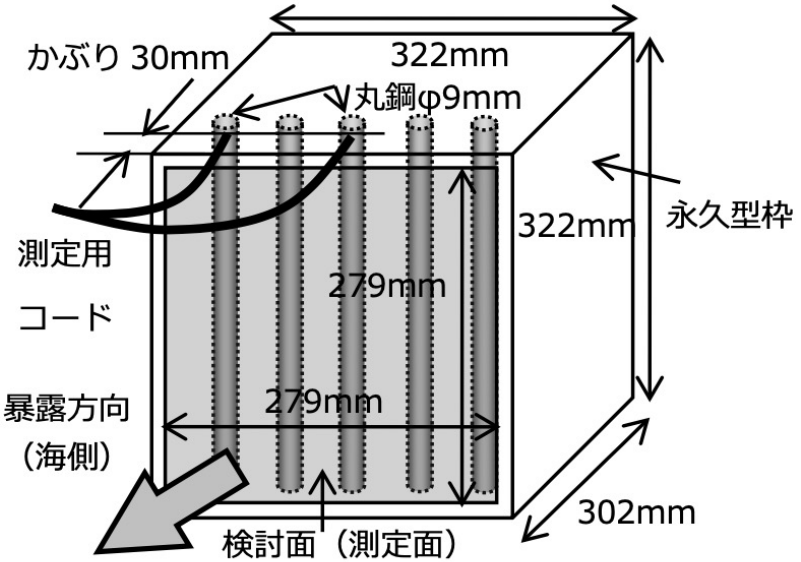
※標準適用量

仕様	含浸材性状 (有効成分)	適用量(g/m²)
A	シラン・シロキサン系(90%以上)，ジェル状	200※
A(400)		400
A(800)		800
S	シラン・シロキサン系 (80%)，乳白色ペースト	200※

（3）塩化物イオン量

W/C (%)	処理仕様	Cl^-量 (kg/m³)
65	無処理	0,2.2, 3.5,5.0
	A	
	A(400)	
	A(800)	
	S	
55	無処理	0,2.2
	S	
45	無処理	0,2.2
	A	0,2.2, 3.5
	S	

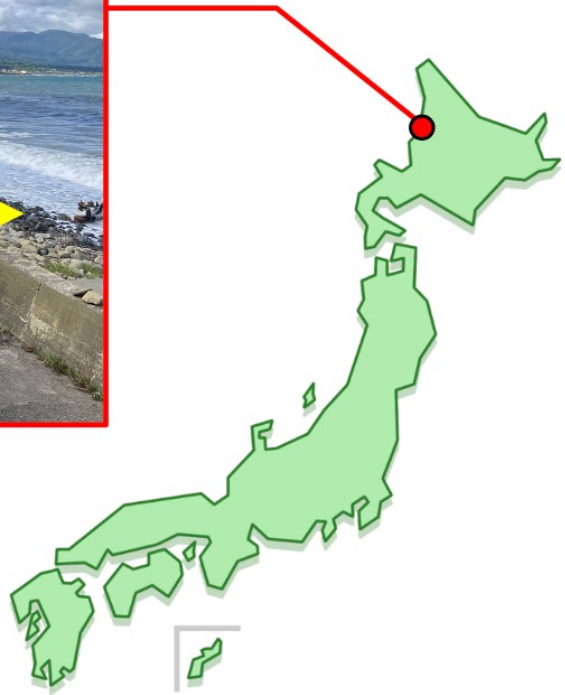
（4）供試体



暴露環境

北海道増毛地区（亜寒帯気候）、2007年9月 暴露開始



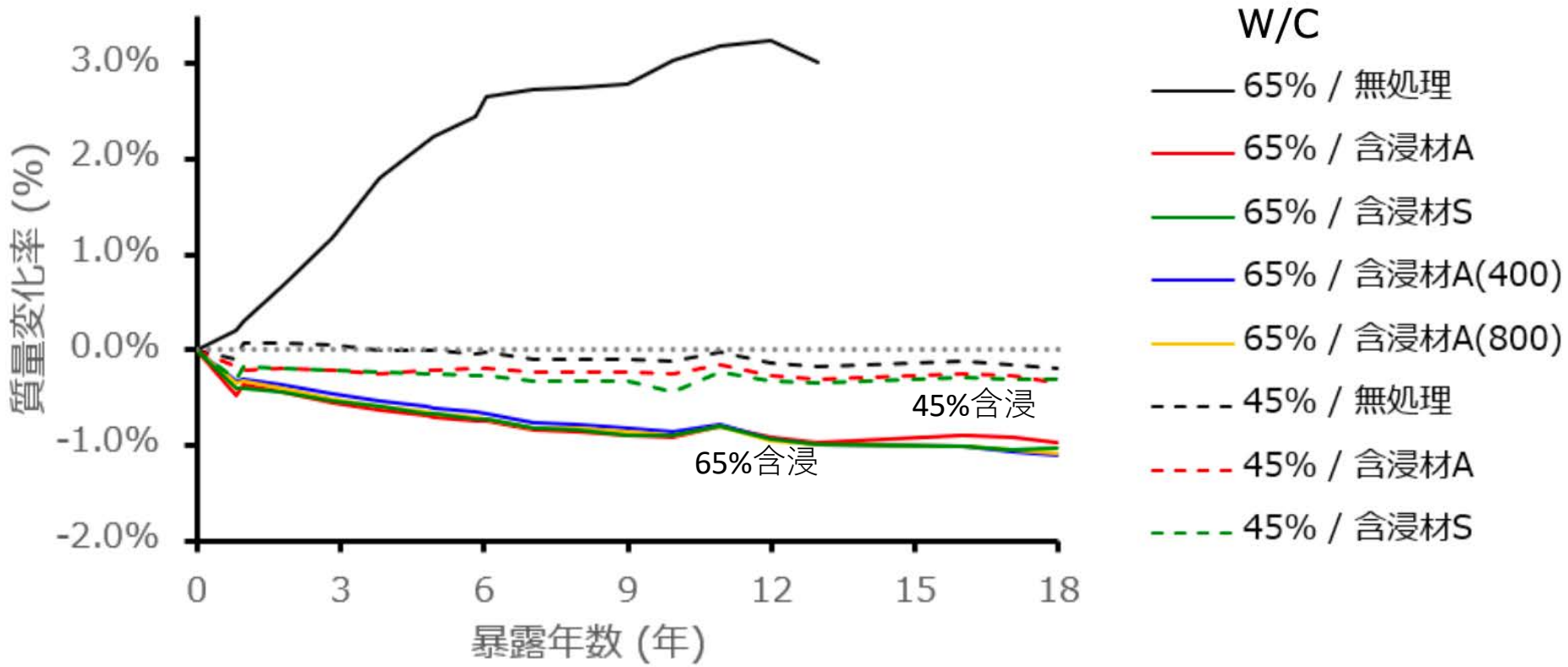


測定項目

○ 小型供試体質量

○ 自然電位および分極抵抗

小型供試体の質量変化



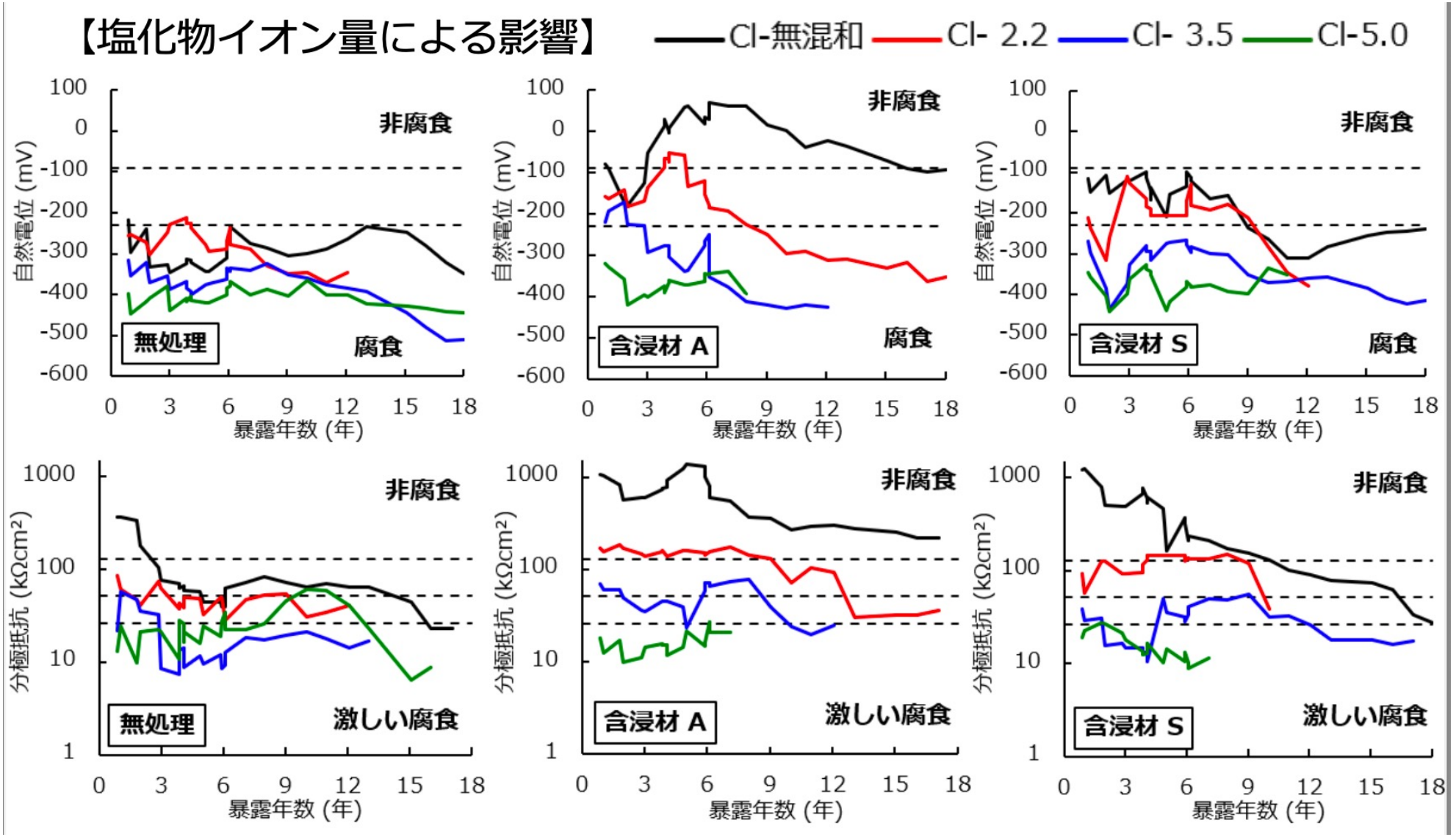
・質量変化率

65%(無処理) ＞ 45%(無処理) ＞ 45%(含浸処理) ＞ 65%(含浸処理)

・含浸処理のものは質量増加を示さず、水分浸透抑制効果が18年目においても維持

自然電位および分極抵抗

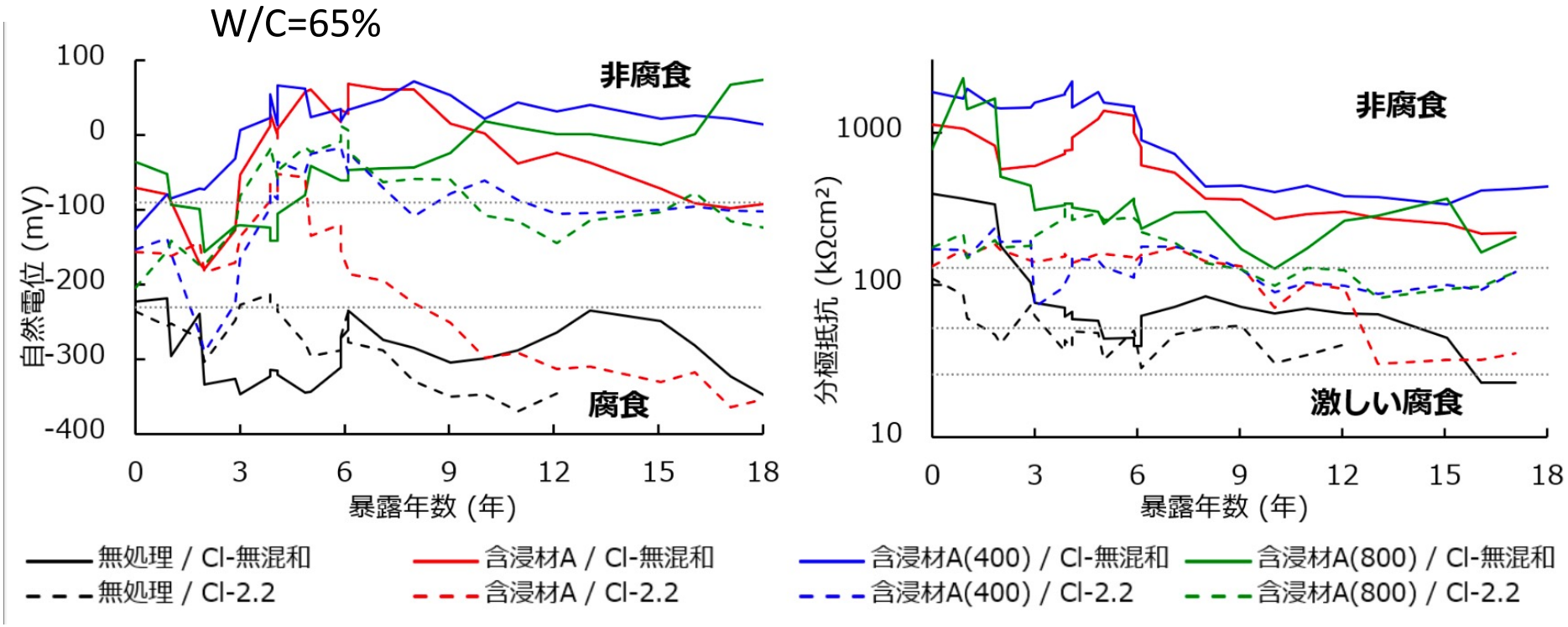
W/C=65%



Cl⁻無混和　含浸剤A > 含浸剤S

腐食抑制効果の長期間持続は困難

自然電位および分極抵抗　適用量の影響

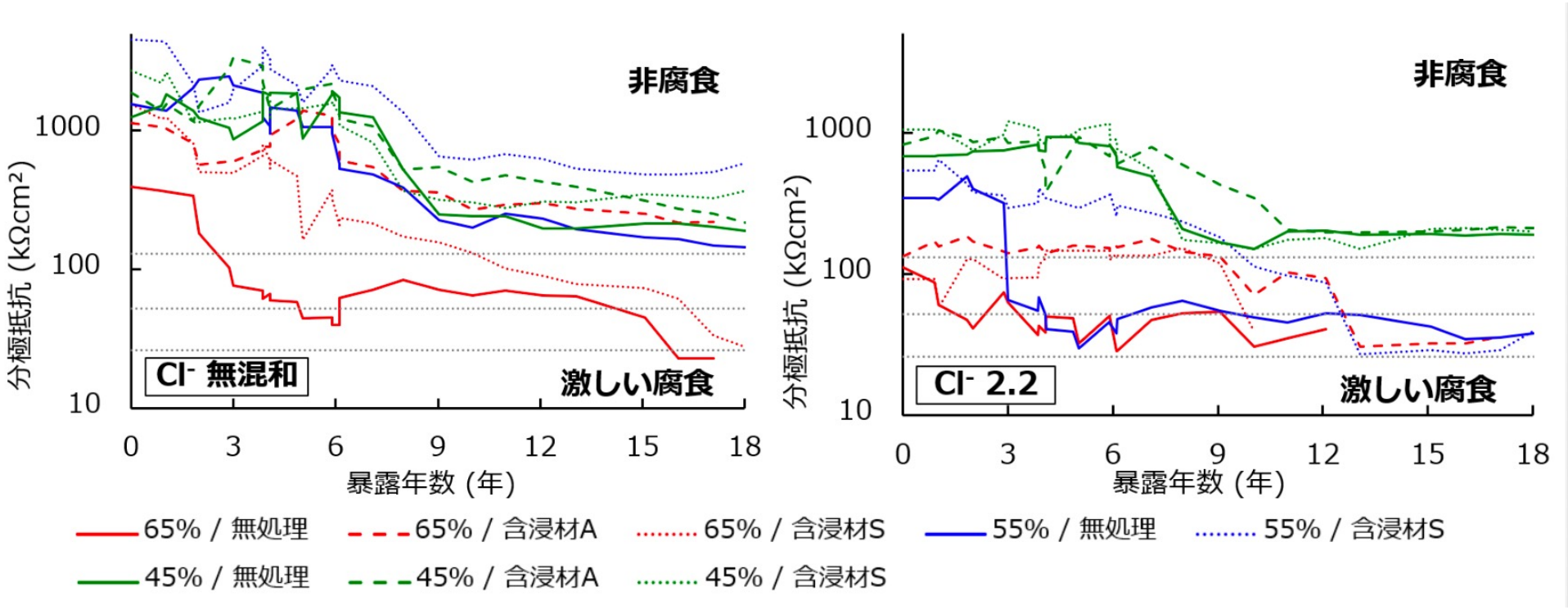


適用量の相違

400, 800g/m^2 > 標準適用量（200g/m^2)

→ 適用量の増加　→　含浸層、水分・塩化物イオンの浸透抑制効果の増加

自然電位および分極抵抗　W/Cの影響



Cl^-無混和

65%では処理の有無にかかわらず、腐食進行

Cl^- 2.2kg/m²

55%では10年程度腐食抑制、完全な腐食の抑制は困難

65%では10年程度は腐食速度を抑制

W/C \ Cl^-	新設構造物を想定 （Cl^-無混和）	既設構造物を想定 （腐食発生限界Cl^-相当）
65%	含浸材の種類によって含浸処理の効果に差 ⇒ 含浸材の仕様を適切に選択 長期間の含浸処理の効果	標準適用量の含浸処理では効果を長期間持続させることは困難 ⇒ 適切な含浸材の仕様の選択
55%	新設時の含浸材適用によって、複合劣化に対する高い抵抗性を期待できる	
45% (高炉B)		含浸材適用により長期間の腐食抑制が期待できる

まとめ　複合劣化作用下における含浸処理効果

シラン系表面含浸処理の効果は塩害単独の作用下よりも低下する.

含浸処理効果の低下の原因は凍結融解の作用による表層部の緻密性の低下による可能性が高い.

高い含浸性および適用量の増加等によって複合劣化における含浸処理効果の持続期間の延長が期待できる.

厳しい複合劣化作用下において緻密性の低い55%以上の既設構造物へシラン系表面含浸材を標準適用量で適用しても，長期の効果を持続することは期待できない場合がある.

シラン系表面含浸剤を用いたコンクリートのスケーリング抑制効果に関する研究

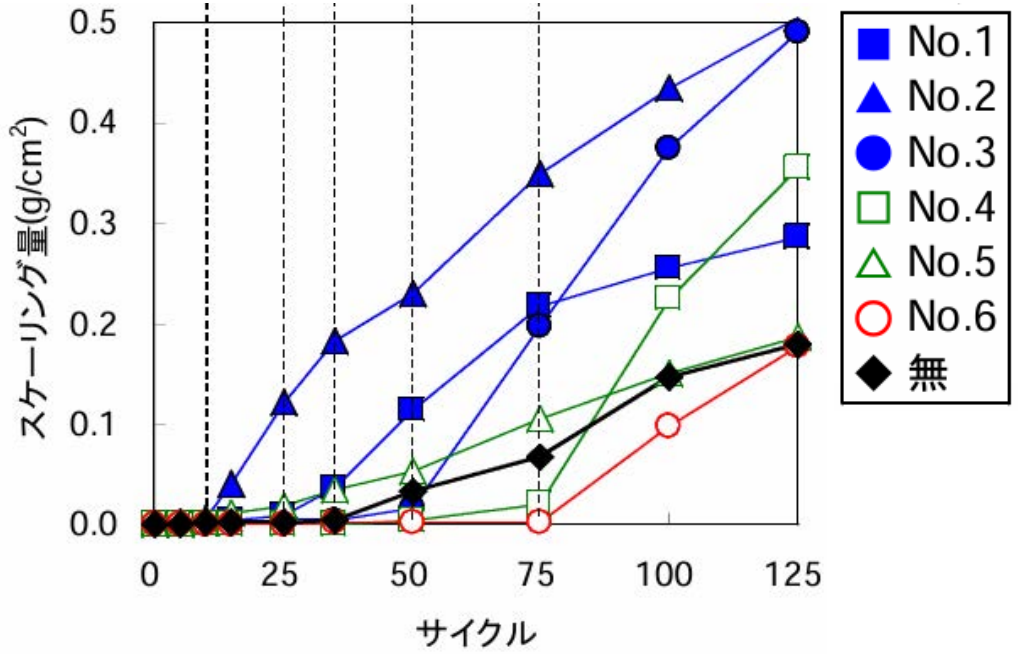
室内試験によるスケーリング抑制効果

コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文集, Vol.25, 2015
シラン系表面含浸材を用いたコンクリートのスケーリング抑制効果に関する研究

含浸処理コンクリートのスケーリング挙動

- 凍結融解試験において、**含浸層の一部が薄く剥離し、急速にスケーリングが進行する挙動**が確認されている

⇒含浸材を塗布した場合のスケーリング進行過程は不明な点が多い



遠藤裕丈，田口史雄，谷本俊充：寒冷環境下におけるシラン系表面含浸材によるコンクリート保護効果に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006

背景および目的

- 凍結融解による水および塩化物イオンの浸透性に関する研究は少なく、不明な点が多い
- 異なる配合に対する含浸材のスケーリング抑制効果の検討は少ない
- 含浸材を塗布した場合のスケーリング進行過程は不明な点が多い

目的

異なる配合に対する含浸材のスケーリング抑制効果

凍結融解による水および塩化物イオンの浸透性

含浸材を塗布した場合のスケーリング進行過程を明らかにする

実験概要｜コンクリート配合・含浸材仕様

コンクリート配合

配合名	W/C (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m^3)							スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)
			W	C	S	G	SF	AE減	AE助			
55	55	-	175	318	819	918	-	0.5	0.06	16.0	5.5	27.0
55-10	55	10	175	318	782	918	31.8	1.0	0.06	18.0	5.0	42.8
60-10	60	10	175	292	806	918	29.2	0.8	0.08	17.0	5.5	37.2
60-20	60	20	175	292	773	918	58.4	1.5	0.12	20.0	5.9	33.8
45B	45	-	150	333	763	1016	-	1.0	0.06	17.0	5.3	27.5

45B：高炉セメント B種， SF：シリカフューム， AE減：AE減水剤， AE助：AE助剤

含浸材仕様

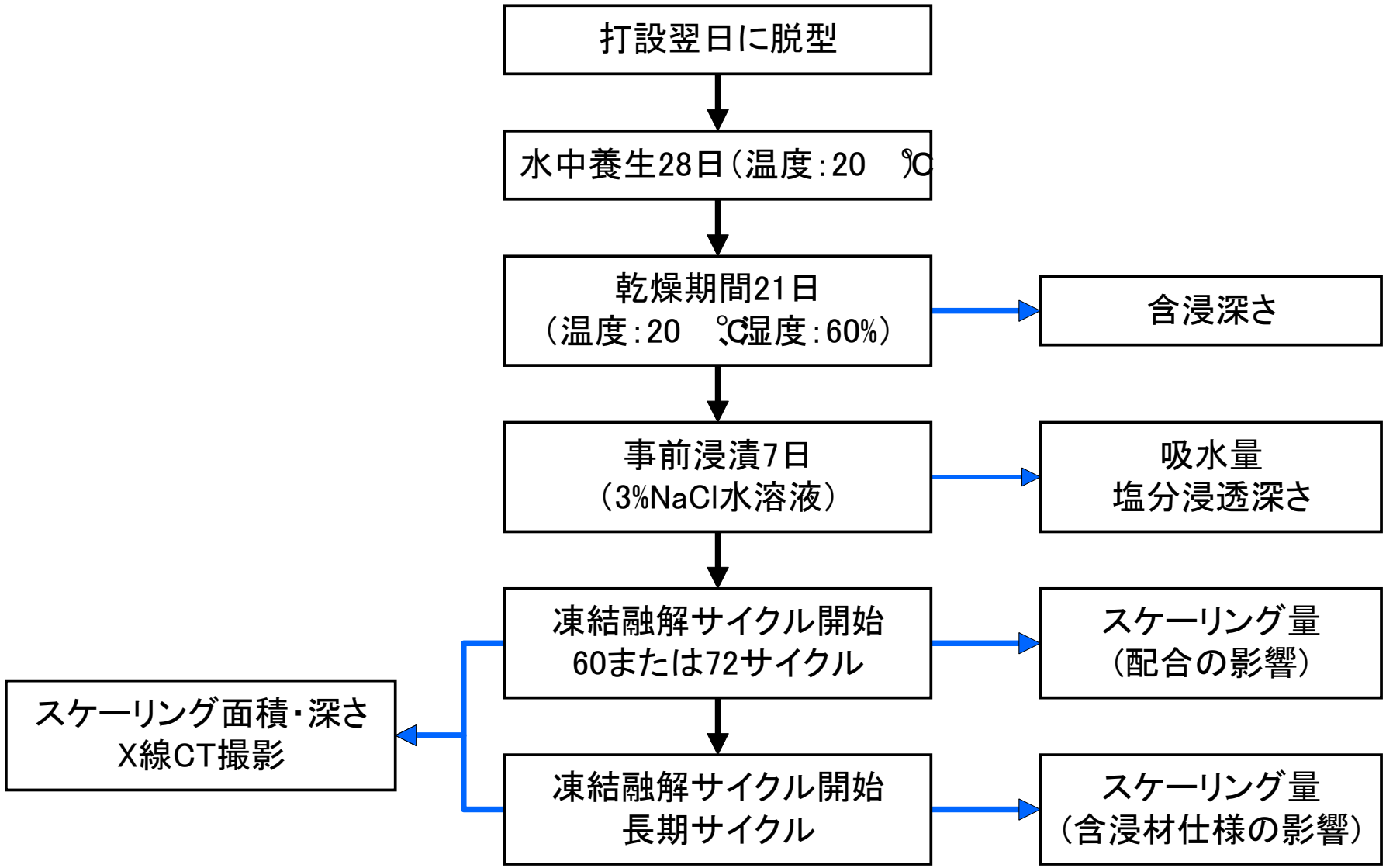
仕様	含浸材性状（有効成分）	塗布量 (g/m^2)
M2	シラン・シロキサン系（80%）,乳白色ペースト	200*
M4		400
A2	シラン・シロキサン系（90%以上）,ジェル状	200*
A4		400

*200g/m^{2}は標準塗布量

実験概要｜要因一覧

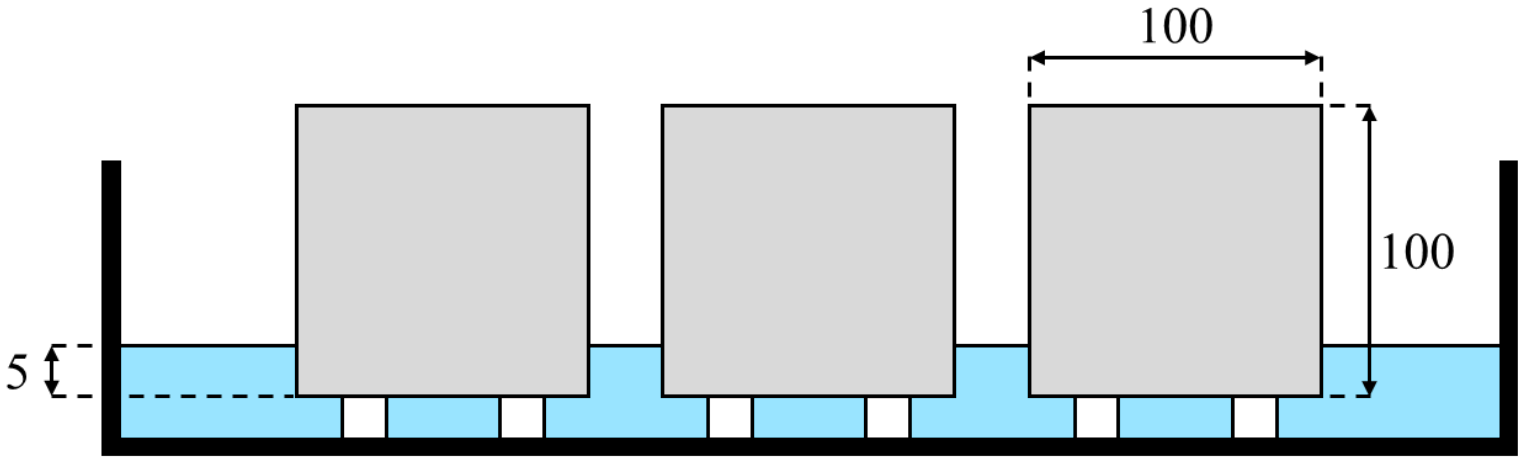
供試体名	使用セメント	W/C (%)	置換率 (%)	含浸材種類	塗布量 (g/m^2)
55	普通ポルトランドセメント	55	－	－	－
55M2				M	200
55-10			10	－	－
55-10M2				M	200
60-10		60	10	－	－
60-10M2				M	200
60-10M4					400
60-10A2				A	200
60-10A4					400
60-20			20	－	－
60-20M2				M	200
45B	高炉スラグセメントB種	45	－	－	－

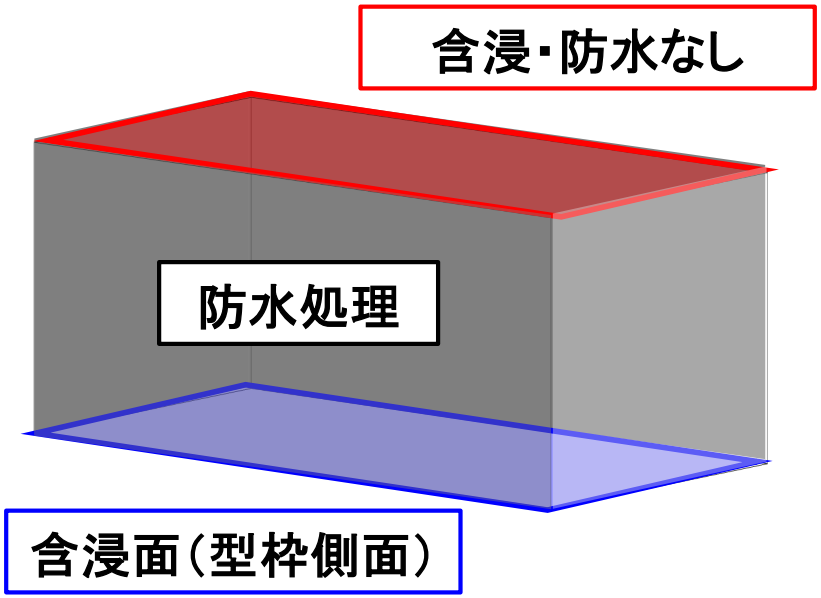
実験概要


打設翌日に脱型
水中養生28日（温度：20　℃）
乾燥期間21日
（温度：20　℃、湿度：60%）
含浸深さ
事前浸漬7日
（3%NaCl水溶液）
吸水量
塩分浸透深さ
凍結融解サイクル開始
60または72サイクル
スケーリング量
（配合の影響）
スケーリング面積・深さ
X線CT撮影
凍結融解サイクル開始
長期サイクル
スケーリング量
（含浸材仕様の影響）

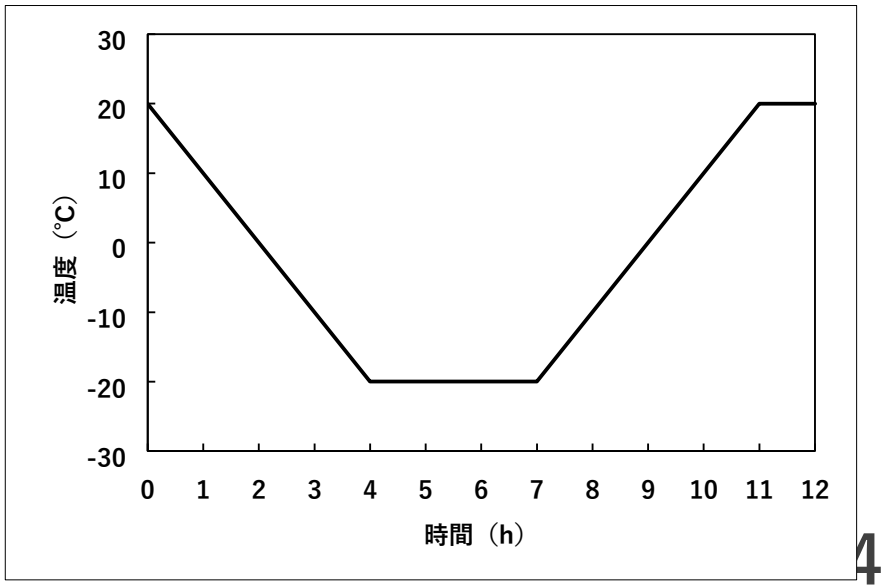
実験概要｜凍結融解試験(RILEM CDF法)

供試体(100×100×200mm)



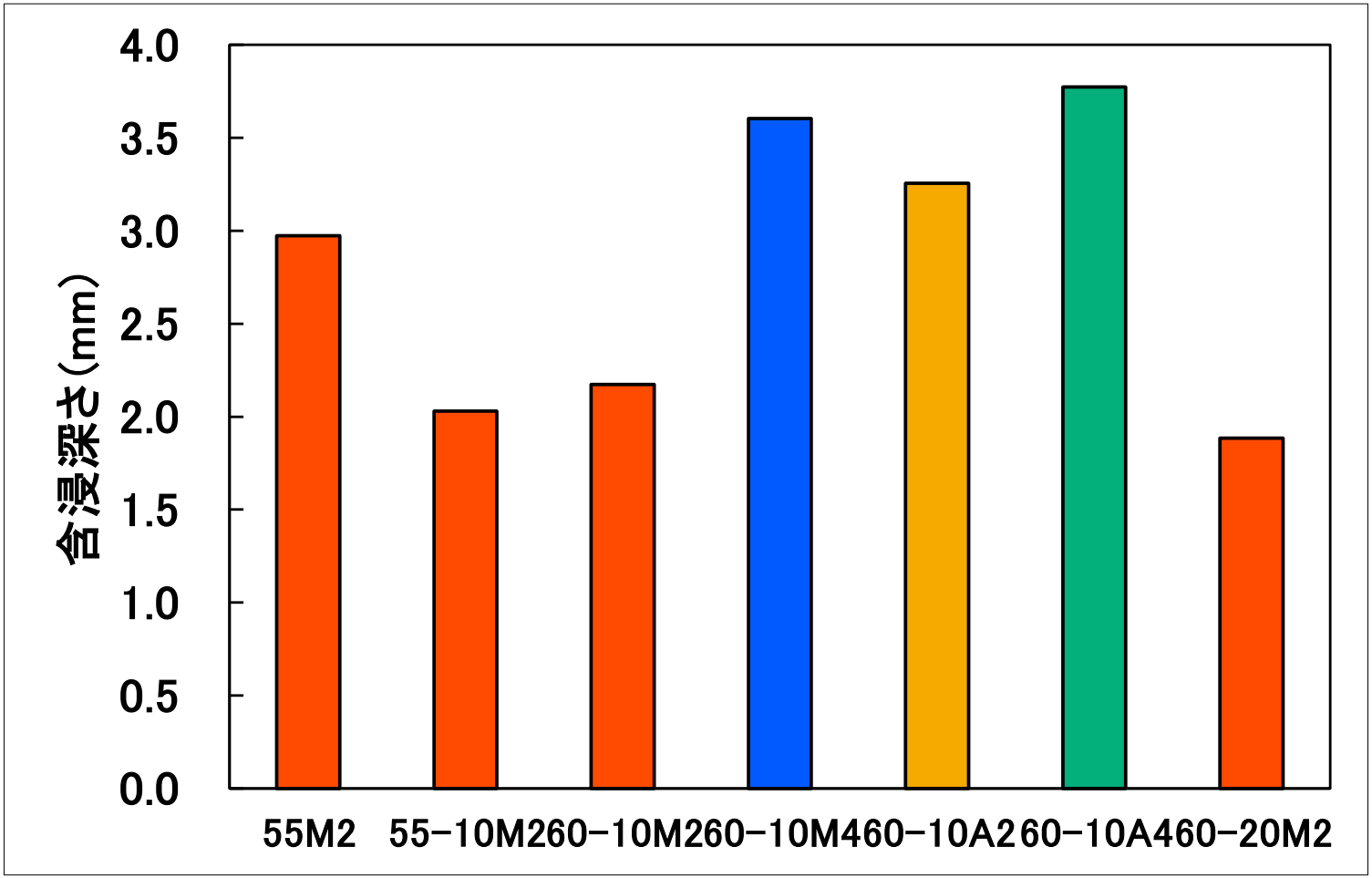


温度条件

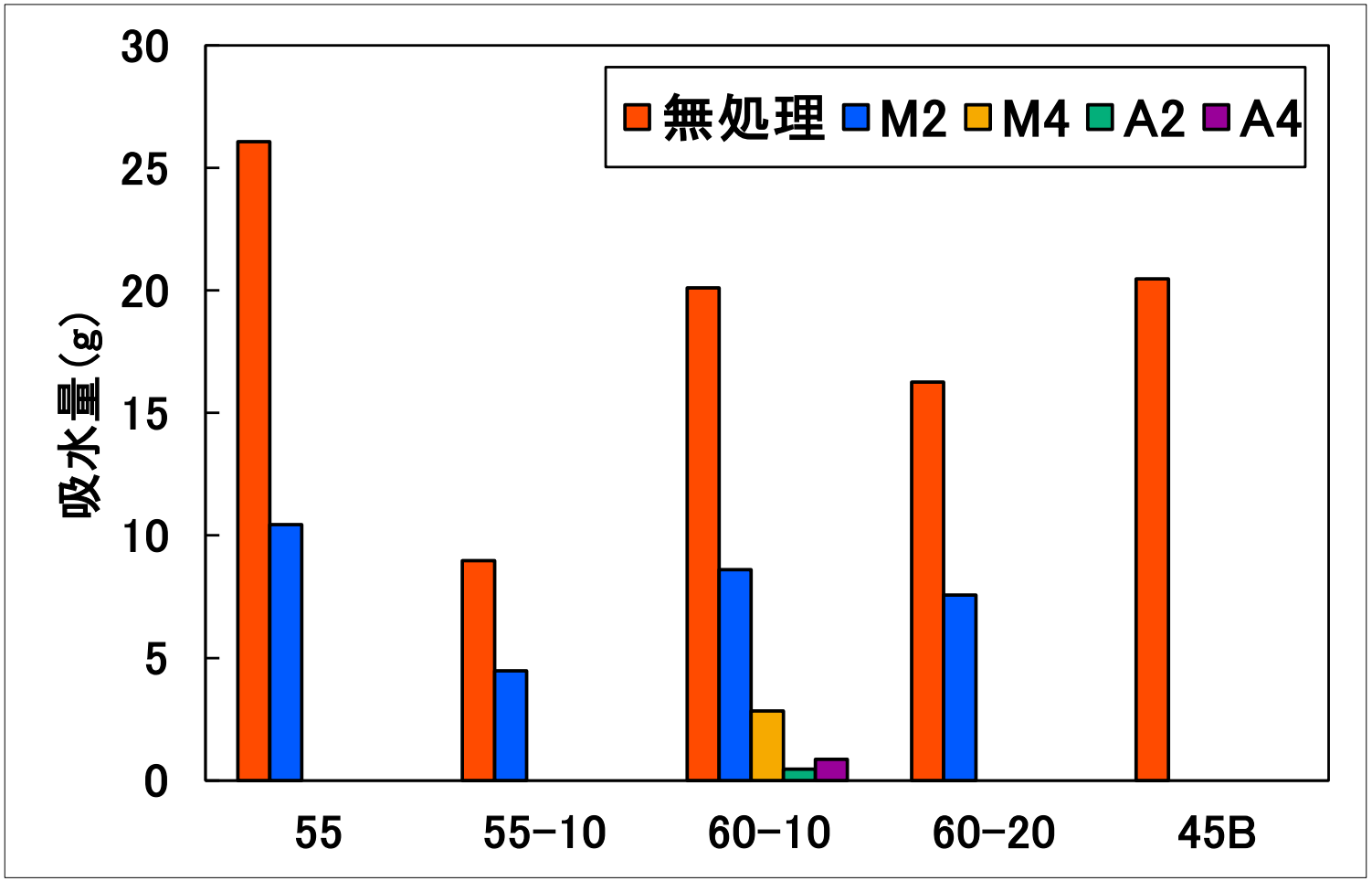


実験結果｜含浸深さ

- 含浸されるコンクリートが緻密なものほど含浸深さが小さい傾向
- 塗布量を増やすと含浸深さは大きくなった
- 含浸材Aの方が高い含浸性を有する
- 塗布量を増やした場合、含浸材Mと含浸材Aの含浸深さは同程度

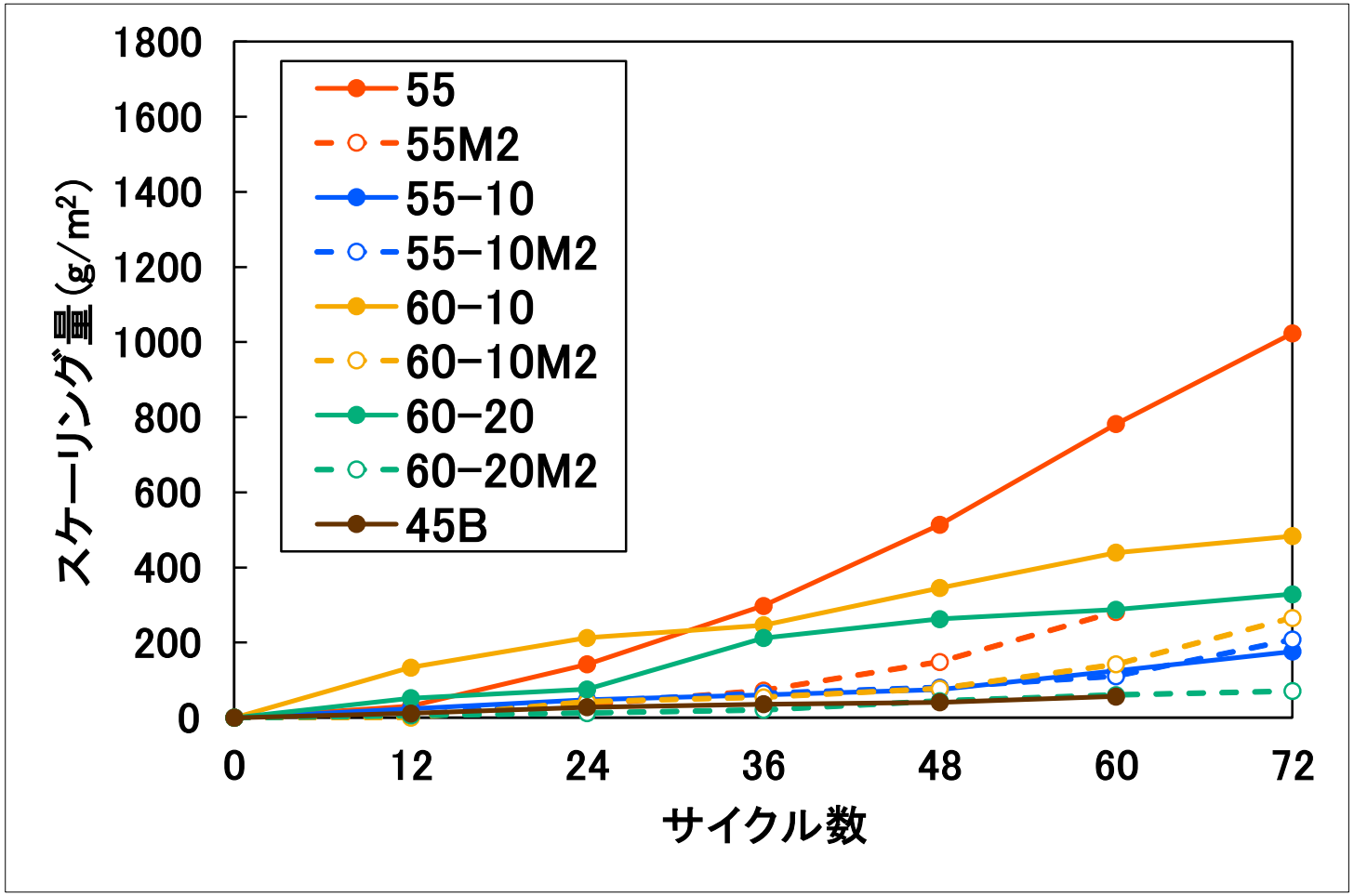


実験結果｜事前浸漬後の吸水量



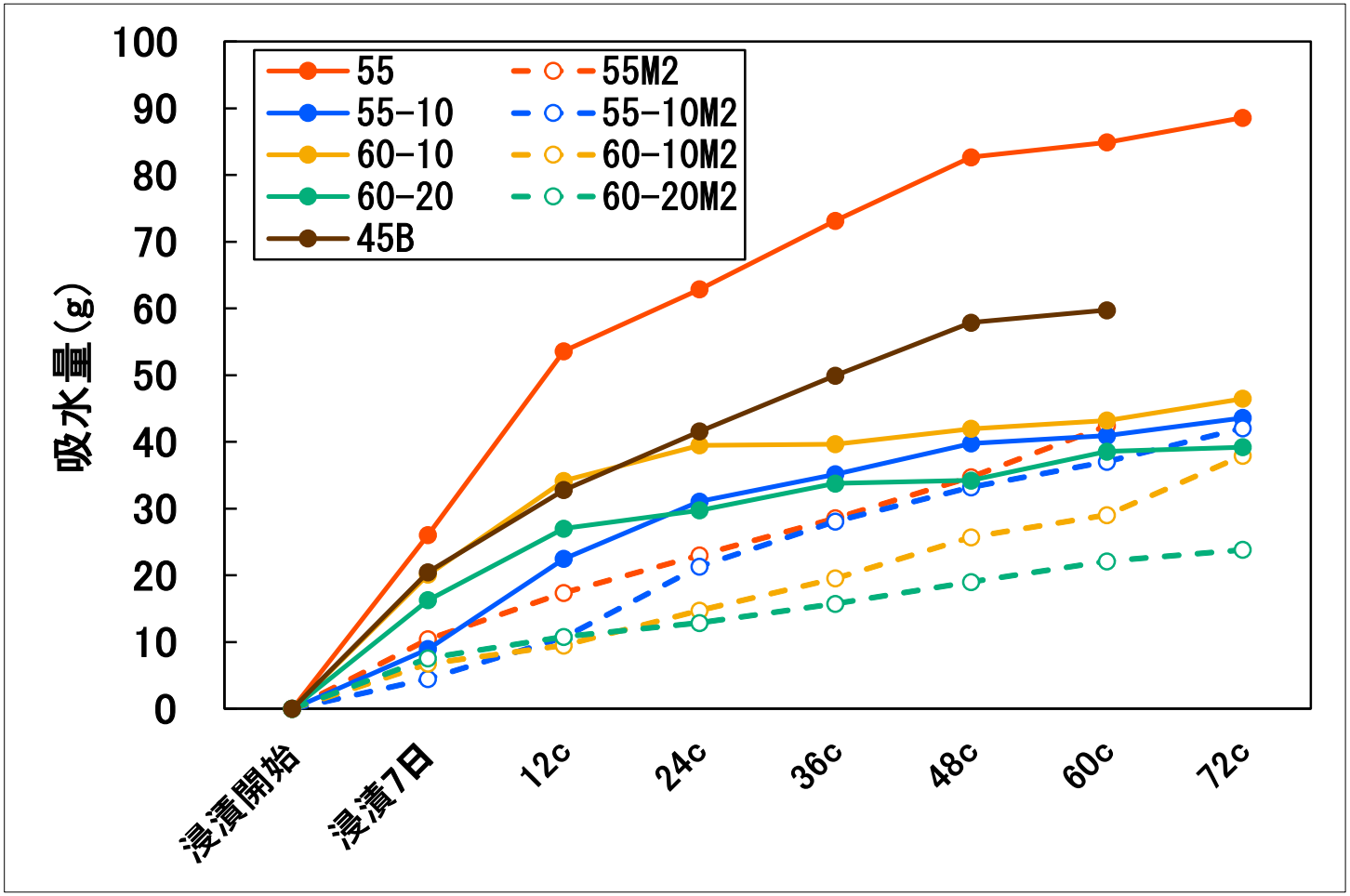
- 吸水量が小さいものほど緻密な組織が得られている
- シリカフュームの混和によって緻密性が高められた場合は、含浸処理による吸水抑制効果は相対的に小さくなる

実験結果｜スケーリング量変化（配合の影響）



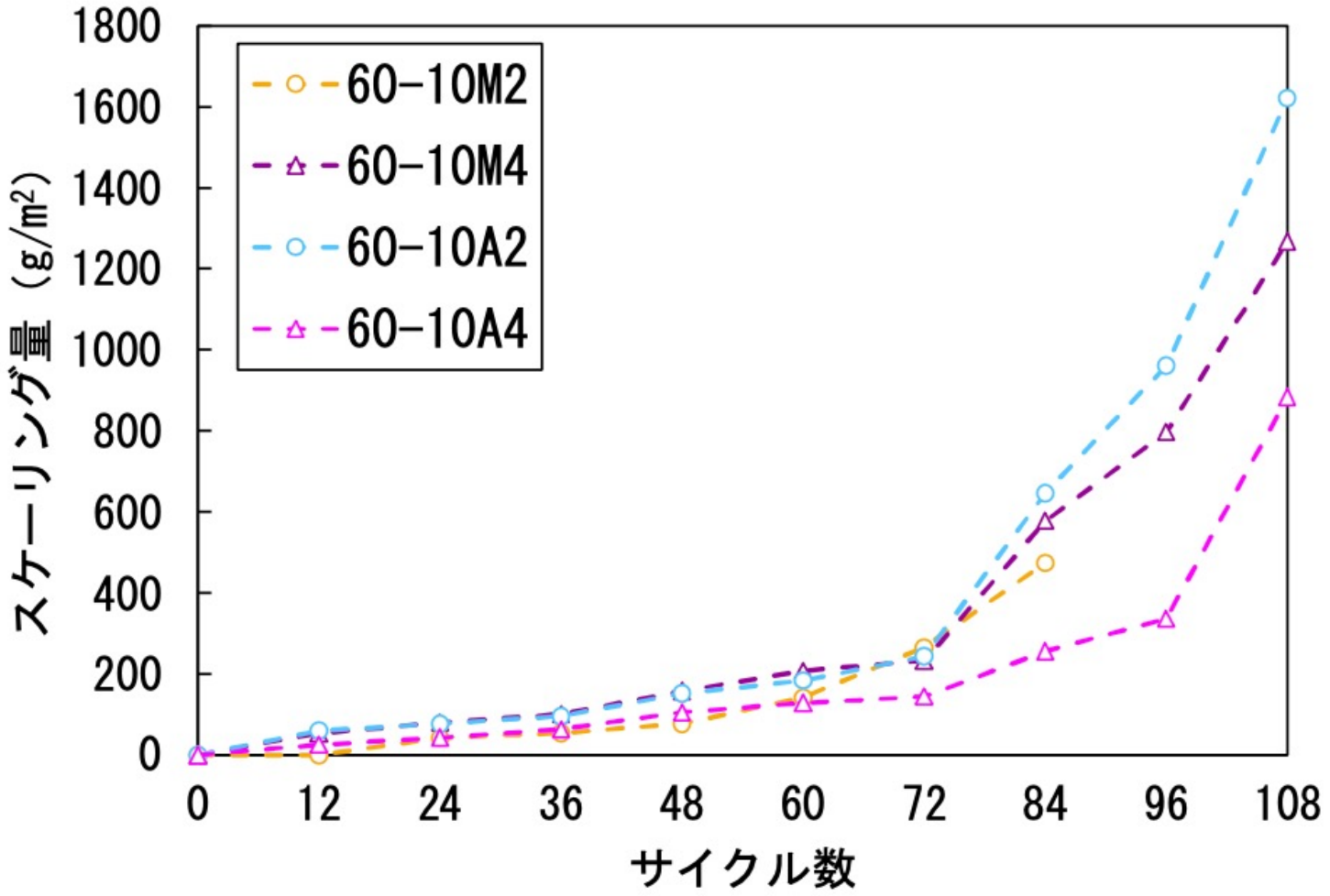
- 含浸処理されたもののスケーリング量は高炉スラグと概ね同程度
- 含浸されるコンクリート自身のスケーリング抵抗性が高いものほど、含浸処理によるスケーリング抑制効果は得られにくくなる

実験結果｜吸水量変化(配合の影響)



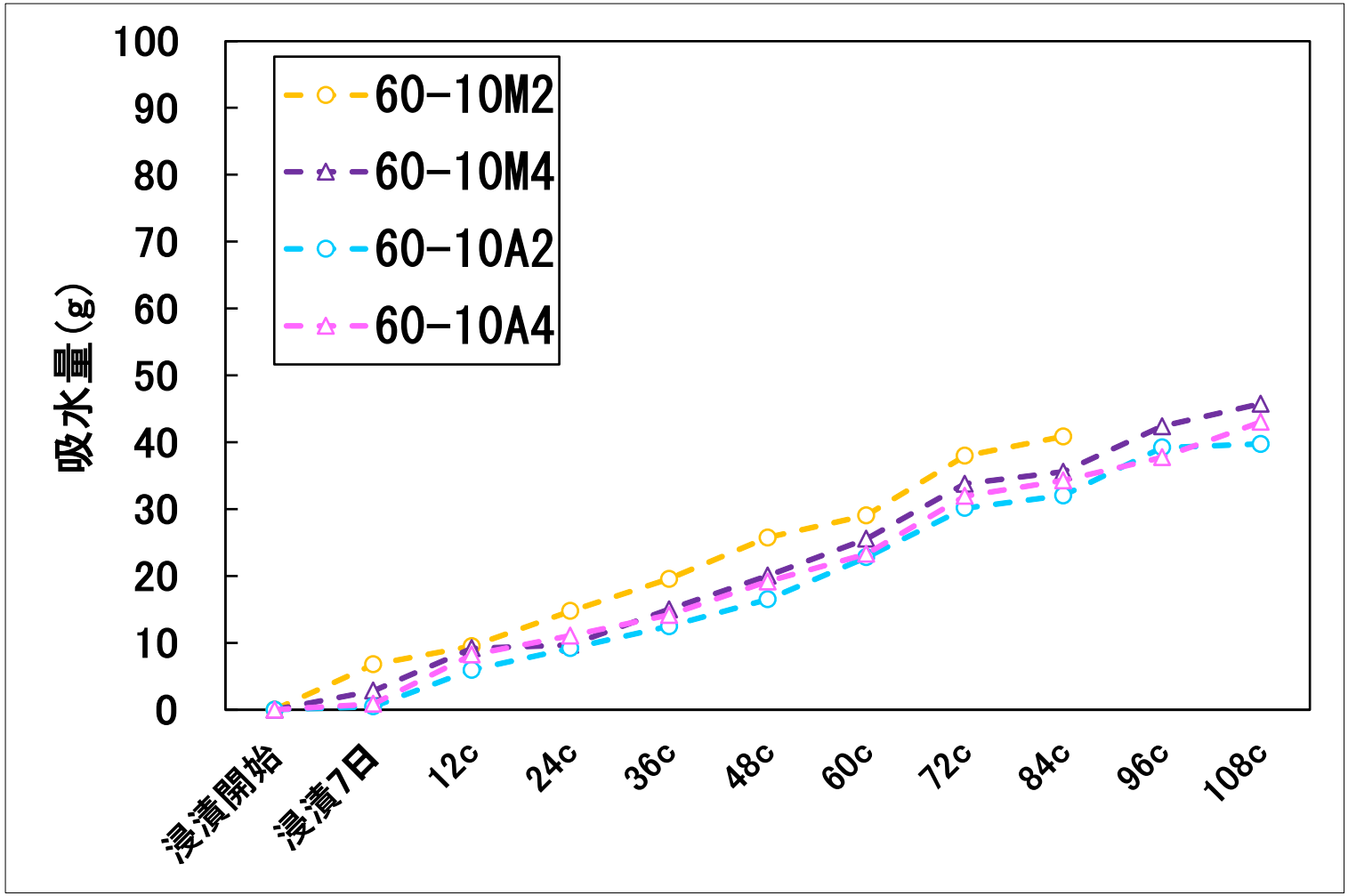
- 無処理　:初期の吸水量大⇒増加量は小さくなる
- 含浸処理:初期の吸水量小⇒一定の割合で増加
- 含浸処理は無処理のものより吸水の進行を遅らせる効果

実験結果｜スケーリング量変化（含浸材仕様の影響）



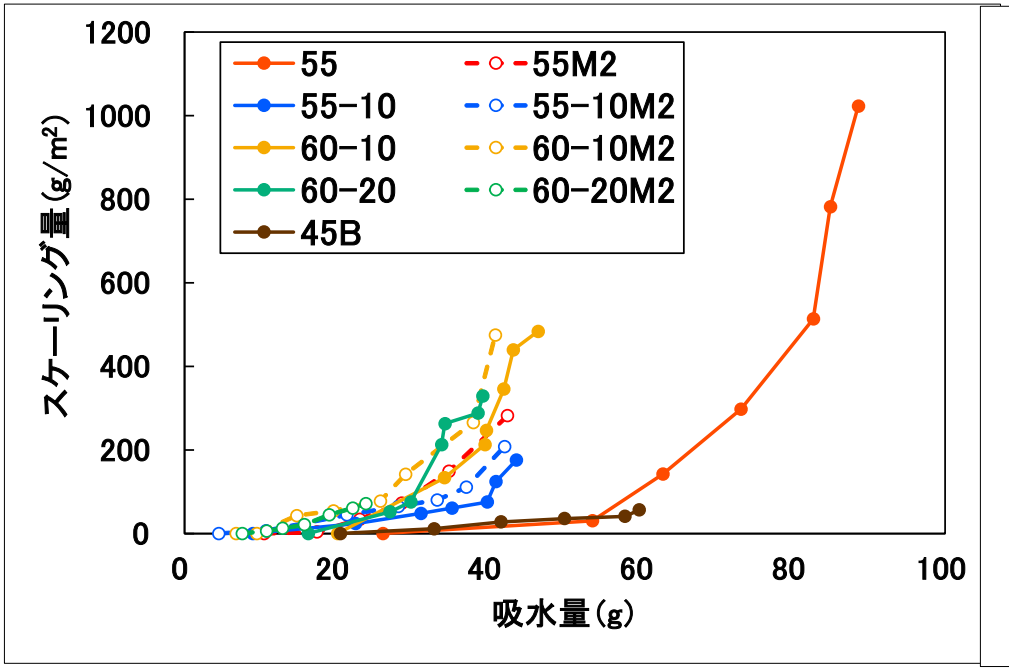
- スケーリングが少ない状態で推移した後、急速にスケーリングが進行

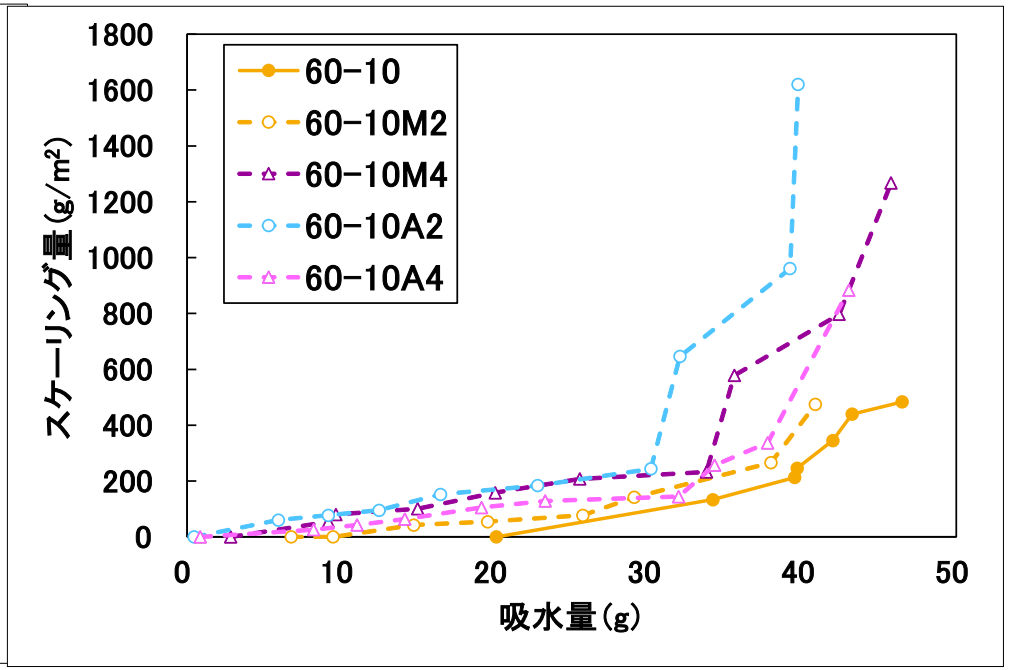
実験結果｜吸水量変化（含浸材仕様の影響）



- 含浸処理：初期の吸水量小⇒一定の割合で増加

実験結果｜吸水量とスケーリング量の関係





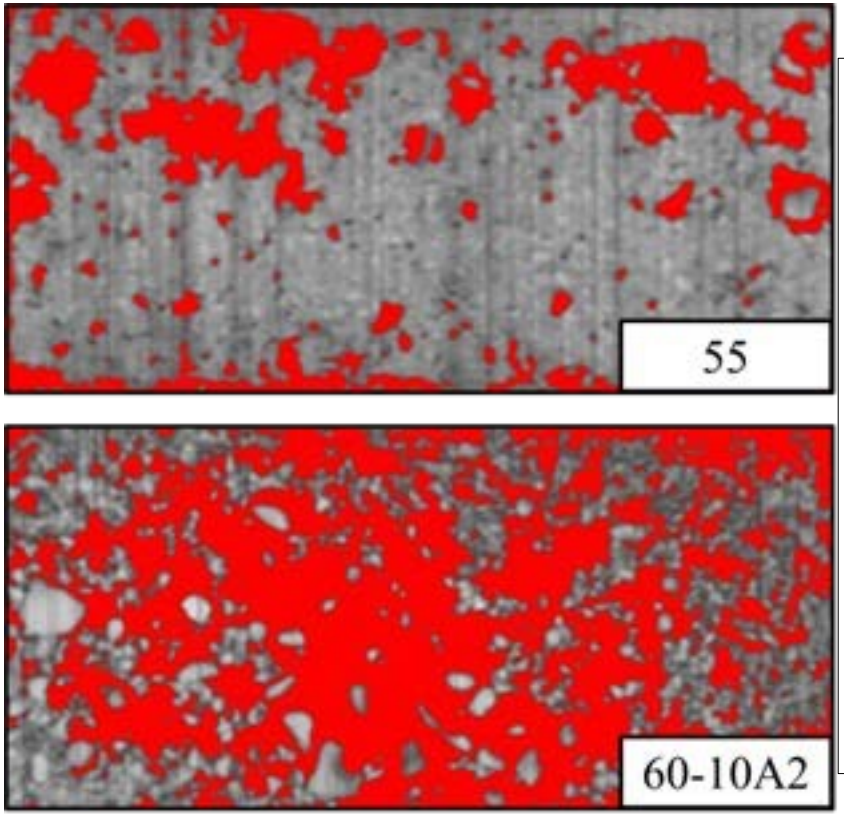
- サイクルの進行に伴い、吸水量とスケーリング量がともに増加

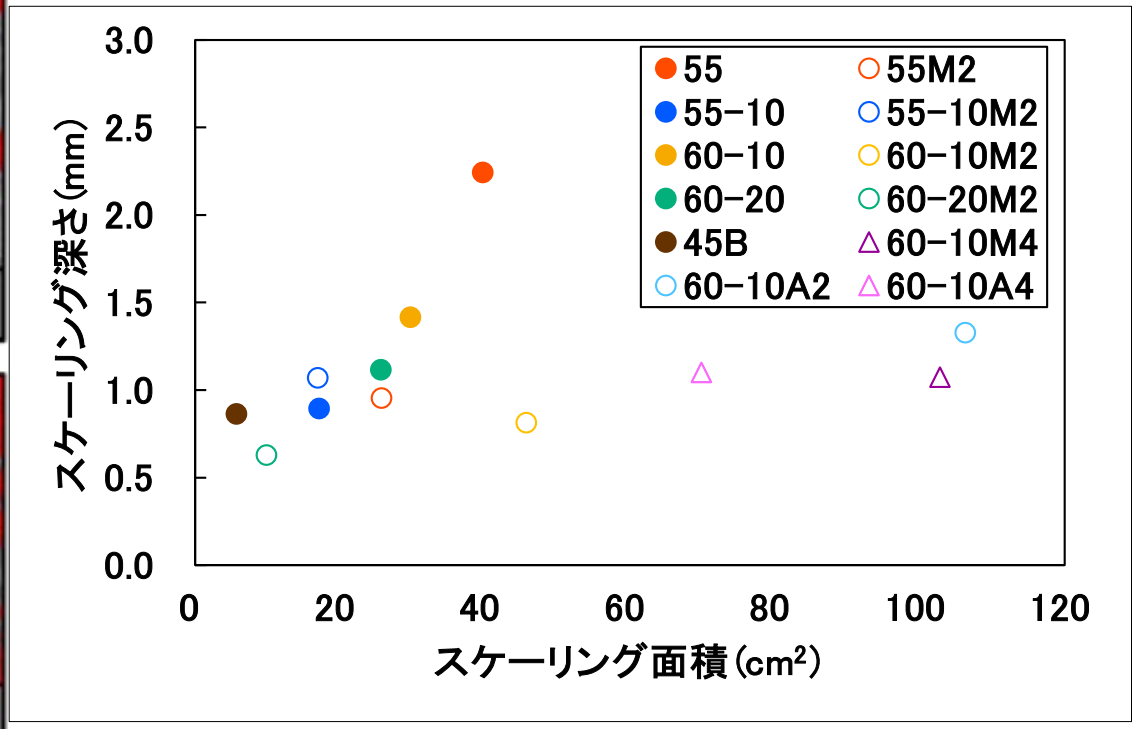
⇒ ある吸水量に達すると吸水増加量に対して、スケーリング増加量が顕著に大きくなる傾向

実験結果｜スケーリング面積とスケーリング深さの関係

平均スケーリング深さ＝スケーリング質量÷スケーリング面積÷コンクリート密度

- 無処理　:スケーリングは局所的に進展
- 含浸処理:スケーリングは浅く広く進展





まとめ

1. 含浸材の吸水抑制効果によってスケーリングの発生・進行を遅らせることが可能であった
2. 含浸されるコンクリート自身のスケーリング抵抗性が高いものほど、含浸処理による抑制効果は相対的に小さくなる.
3. 含浸処理の場合、無処理の場合と異なり、スケーリング面積が増加してもスケーリング深さは変わらず、**広く浅く面的**にスケーリングが進展する