

論文 乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響

千歩 修^{*1}・濱田 英介^{*2}・友澤 史紀^{*3}

要旨：ここでは乾湿繰返しがコンクリートの耐凍害性に与える影響を明らかにするためにコンクリートの調合(W/C、空気量)を変えた試験体を作製し、乾湿繰返し(なしおよび乾燥温度 50・80)を行ったものに凍結融解試験、吸い上げ吸水試験および薄片によるひびわれ観察を行った。これらの結果、乾湿繰返しによるコンクリートの吸水性状・耐凍害性の変化およびこれらの関係が明らかになった。

キーワード：乾湿繰返し, 吸水性状, 凍結融解試験, 微細ひびわれ

1. はじめに

通常の促進凍結融解試験で耐凍害性が高いと評価されたコンクリートでも屋外暴露後に促進凍結融解試験を行うと耐凍害性が大きく低下するものがあり、特に低水セメント比の non A E コンクリートでこの傾向が著しいことが報告¹⁾されている。この原因のひとつとして現実の屋外の環境では乾湿繰返し作用がコンクリートに微細なひびわれを発生させていることが考えられる。また、コンクリートの微細なひびわれは、ひびわれ自体が耐凍害性を低下させるのではなく、水分浸透を容易にする役割を果たすことでコンクリートの耐凍害性と密接にかかわっている²⁾とする研究も報告されている。

ここでは、乾湿繰返しがコンクリートの吸

水性状と耐凍害性に及ぼす影響を検討する。

さらに、乾湿繰返しの試験体に屋外暴露を行った試験体(文献¹⁾の試験体から選定)を加え、コンクリートの薄片により微細なひびわれの発生状況を確認し、微細なひびわれの影響も検討する。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

表1に実験計画を示す。ここでは、水セメント比(25%、50%)と空気量(1%、4%)を変えたコンクリートを作製し、これに乾燥温度の異なる2種類(50、80)の乾湿繰返しを行い、吸水性状の変化および耐凍害性の変化を検討する。また、ここでの試験体に屋外暴露後の試験体(文献¹⁾の試験体から選定)を加

表1 実験計画

コンクリート種別		乾湿繰返しの条件							屋外暴露後
W/C (%)	目標空気量 (%)	なし (養生後)	50			80			
			4c	8c	12c	4c	8c	12c	
25	1								-
	4								-
50	1								-
	4								-
32	2	-	-	-	-	-	-	-	*

注) :凍結融解試験(ASTM C666(JIS A 1148) A法)

:吸い上げ吸水試験

:ひびわれ観察

*:参考文献¹⁾で用いたもの

*1 北海道大学大学院 教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*2 前田建設(株) 工修

*3 日本大学 教授 理工学部 工博 (正会員)

え、ひびわれの発生状況を確認する。

2.2 実験方法

コンクリートの調合および基礎性状を表2に示す。コンクリートは型枠に打ち込み、材齢1日で脱型後、材齢2週まで水中養生を行った。試験体は、吸上げ吸水試験(ひびわれ観察)用では10×20cmの型枠に打ち込み、中央部から10×3cmに切り出したものとし、凍結融解試験用では7.5×7.5×40cmで、両端に長さ測定用のゲージプラグを埋め込んだものとした。なお、屋外暴露の試験体形状は、凍結融解試験用のものと同じである。

乾湿繰返しの条件は、「50 または80 で5日間乾燥し、2日間20 水中で吸水」を1サイクルとした。乾湿繰返し0、4、8および12サイクルで吸い上げ吸水試験、0 および12サイクルで凍結融解試験およびひびわれの観察を行った。また、ひびわれ状況の比較のために屋外暴露後の試験体を用いたが、この暴露条件は、北大建築棟の屋上の水切りのよい台のうえに7年間暴露したものである。

吸い上げ吸水試験は、RILEM CDC3(限界飽水度試験方法)の中に規定される吸水試験(Scap)に準じて行ったもので試験方法の概念図を図1に示す。なお、吸水試験開始時の条件は、養生後または乾湿繰返し後の湿潤状態の試験体を50 で3日間乾燥したものとし、吸水試験期間は14日間とした。なお、50 の条件はRILEM CDC3のなかで含水率調整等に用いられているもので、コンクリートの耐凍害性に対する影響が少ないと考えられている条件である。

凍結融解試験は、ASTM C666 A法(水中凍結水中融解試験)により-18 ~+5、6サイクル/日の条件で300サイクルまで行った。なお、養生条件は水中養生2週であり、試験開始条件は乾湿繰返し(50・80)を0 および12サイクル後である。また、測定項目は、たわみ振動の一次共鳴周波数(動弾性係数)、長さ変化、質量である。

ひびわれの観察は、吸水試験終了後の試験体を用い、図2に示すような位置から試料を採取した。観察には薄片(0.3μm厚)を使用した。これは採取した試料に青色染料で着色した低粘度のエポキシ樹脂を減圧状態で含浸させ、スライドガラスへの接着・切断・研磨を行って作製した。なお、エポキシ樹脂含浸

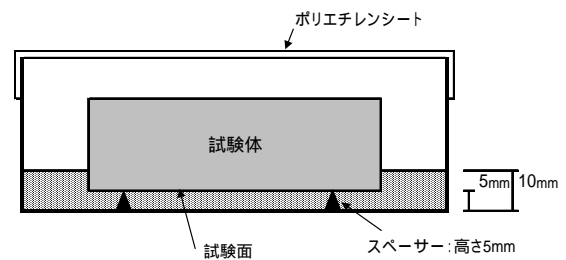


図1 吸い上げ吸水試験方法の概念図

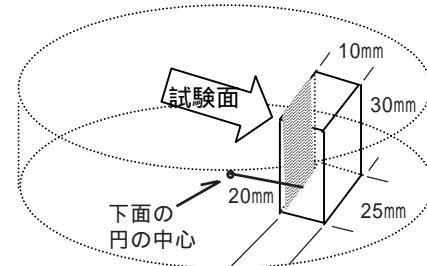


図2 ひびわれ観察用試料の採取方法
(10×3cmの試験体から切り出し)

表2 コンクリートの調合および基礎性状

記号	W/C (%)	目標Air (%)	S/a (%)	単位水量 (l/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			混和剤 (kg/m ³)		実測Air sl. [70-] (%)	F ₁₄ (MPa)	
					セメント	細骨材	粗骨材	SP	その他			
2N	25	1	39.3	175	222	233	360	9.1	-	0.8	[69.0]	93.1
2A		4	36.1	175	222	203	360	9.1	0.028*	4.1	[75.0]	87.7
5N	50	1	48.9	175	111	344	360	2.1	0.035**	1.8	11.5	41.5
5A		4	46.6	175	111	314	360	2.1	0.007**	3.1	19.2	35.9
3B	32	2	52.1	175	173	329	303	8.2	3***	2.3	[61.0]	68.5

注) *: AE助剤, **: 消泡剤, ***: 増粘剤, SP: 高性能AE減水剤
セメント: 普通ポ(密度:3.16)、細骨材(表乾密度:2.68、吸水率:1.08)、粗骨材(表乾密度:2.69、吸水率:2.54)

前の乾燥および硬化のための加熱は50 以下の条件で行った。薄片の観察は、デジタル顕微鏡を用い、透光条件で行い、倍率は50から225倍を使用した。また、ひびわれ量の把握のため、顕微鏡倍率を50倍程度とし、ASTM C-457に準じたりニアトラバース法を行った。総測線長は試験体寸法の制約から400mm程度とし、測線を横断するひびわれおよび粗骨材の幅・個数を測定した。

3. 結果および考察

3.1 乾湿繰返しによるコンクリートの変化

乾湿繰返しサイクルにおける2日吸水後のコンクリートの長さ変化率、質量減少率および相対動弾性係数の変化を図3に示す。縦軸のどの値も乾湿繰返しの条件と調合によって、増加傾向、低下後増加傾向および低下の傾向を示している。相対動弾性係数の変化は、乾湿繰返しにおける湿潤時の養生効果により大きくなることと、ひびわれの発生により低下することが複合されて現れているものと考えられる。また、同様に質量変化率および長さ変化率の変化にも含水状態の変化、養生効果およびひびわれの発生が影響していると考えられる。どの項目をみても80 で乾湿繰返しを行ったものが変化が大きくなっているのがわかる。

3.2 乾湿繰返しによる吸水性状の変化

吸上げ吸水試験の吸水曲線として横軸を時間の平方根で示したものを図4に示す。これらの図から、乾湿繰返しの効果は、試験開始時の含水率を低下、すなわち乾燥しやすくさせ、吸水曲線を上に凸の曲線から初期吸水勾配が大きく、明確な勾配の変化点をもつ吸水曲線に変化させていることがわかる。これは乾湿繰返しによってコンクリートに水が入りやすくなっていることを意味している。なお、W/C25%の50の乾湿繰返し後のものは、初期の吸水曲線

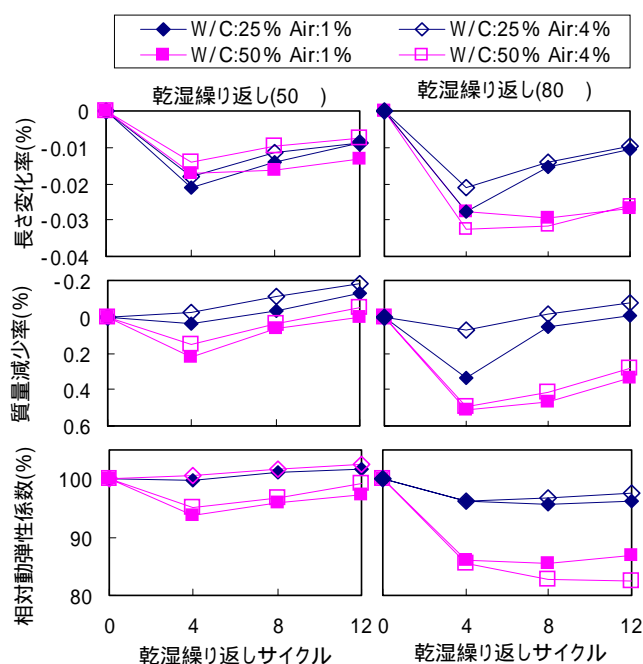


図3 乾湿繰返しによるコンクリート性状の変化

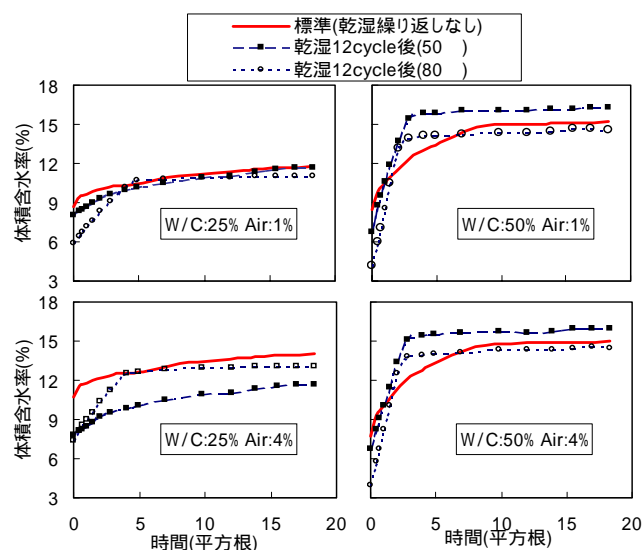


図4 吸上げ吸水試験結果

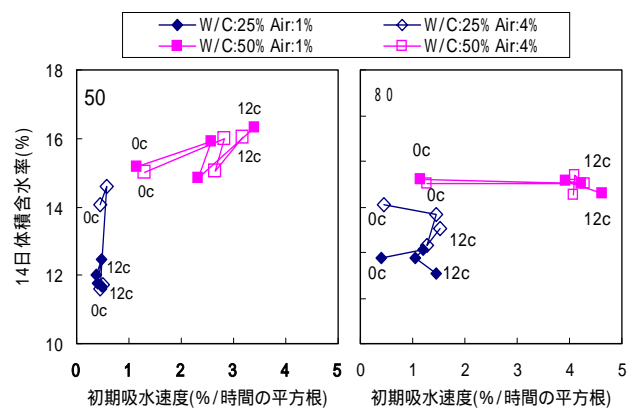


図5 乾湿繰返しによる吸水性状の変化

に近い形状を示しており、低水セメント比のものは乾湿繰り返しによる吸水性状の変化が小さいといえる。

初期吸水速度と14日の体積含水率の関係を図5に示す。なお、初期吸水速度とは吸水曲線の初期の吸水速度の大きい部分の勾配(後半の緩やかな勾配の線の開始点と吸水試験開始時の点を結ぶ直線の勾配)を求めたものである。W/C50%をみると乾湿繰り返しは初期の吸水速度を大きくし、最大の含水率はほとんど変化していない。また、W/C25%のものでは乾湿繰り返しに対する吸水性状の変化が小さいが、80の乾湿繰り返しでは初期吸水速度が大きくなっているのがわかる。なお、14日体積含水率に変化のあるものもあるが、これは試験体の品質ばらつきによるものと考えられ、明確な傾向も認められないため、乾湿繰り返しによって14日含水率に大きな変化はないものと考えられる。

3.3 乾湿繰り返しによる耐凍害性の変化

凍結融解試験結果を図6に示す。乾湿繰り返しのないものではW/C50%・空気量1%のものが激しく劣化している。これ以外はスケーリングの多いものもあるが、比較的高い耐凍害性を示している。50の乾湿繰り返しを受けたものでは、W/C25%・空気量1%で耐凍害性が大きく低下し、W/C50%・空気量4%のものでも耐凍害性が低下している。軽微な乾燥はコンクリートの耐凍害性を向上させることが報告³⁾されているが、今回行った50の乾湿繰り返しは、単に乾燥を行うものよりもきびしい条件であることが考えられる。また、80乾湿繰り返しでは、早期に大きく劣化するものが多く、W/C25%・空気量4%のものでも耐凍害性が低下している。

劣化のパターンをみると、乾湿繰り返しを行ったものではスケーリングによる質量減少が大きくなっていることが認められる。既往

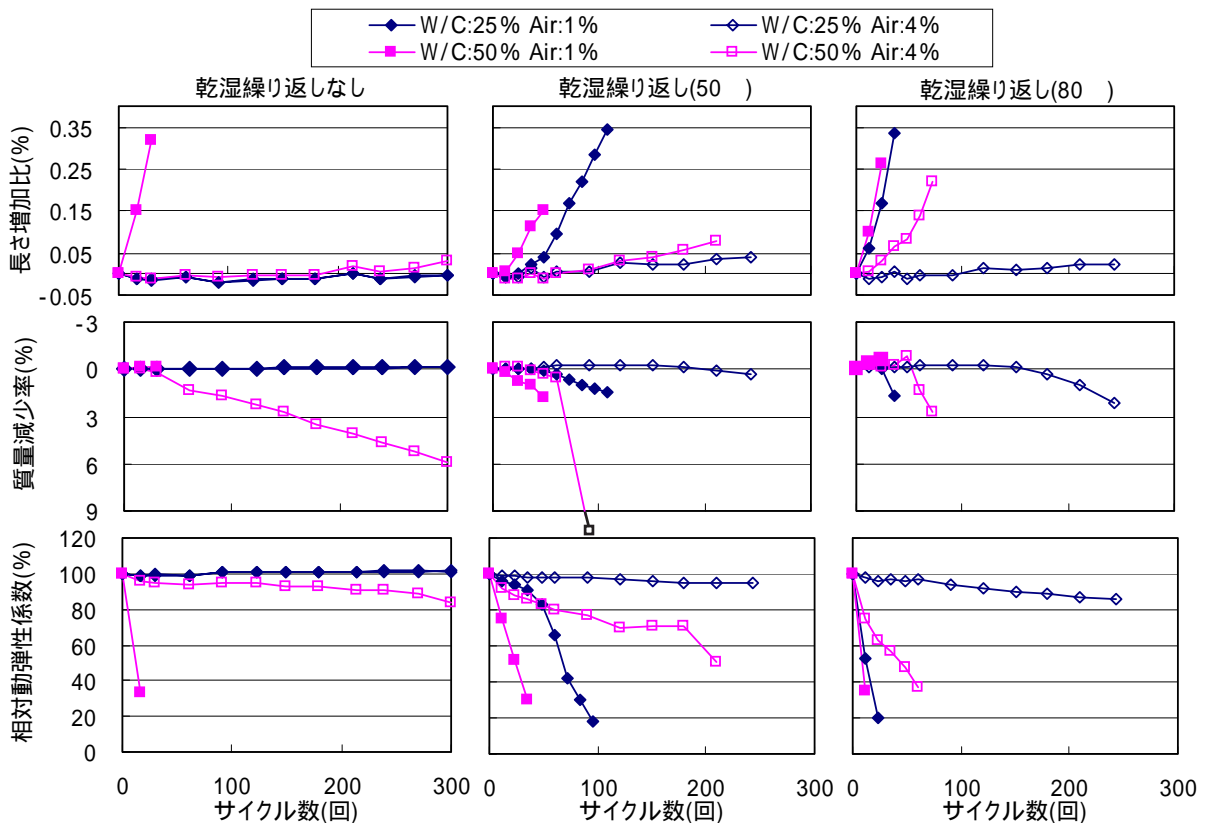


図6 凍結融解試験結果

の研究¹⁾で屋外暴露後に低水セメント比のコンクリートの促進凍結融解試験を行った結果、凍結融解時の質量増加が認められることが報告されており、今回行った乾湿繰返しの条件は屋外暴露とは異なったタイプのひびわれを発生させていることが考えられる。

吸水性状と耐久性指数の関係を図7に示す。初期吸水速度との関係を見ると空気量4%のものでは初期吸水速度が大きくなるにつれて耐久性指数が小さくなる傾向がある。しかしながら、W/C25%・空気量1%のものでは乾湿繰返しを行わないものは耐凍害性が高いが、乾湿繰返しによって初期吸水速度がほとんど変化せずに耐久性指数が低下している。また、14日体積含水率は、その値に大きな差がないこともあり、耐久性指数とは明確な傾向が認められない。

乾湿繰返し1サイクルにおける水分の放出量と耐凍害性の関係を図8に示す。田畑ら³⁾は、A E 剤は乾燥による凍害促進の防止に著しく効果があること、さらにnon A E コンクリートでは放出水量4~6%(体積)程度で耐久性指数が最も大きくなり、比較的軽微な乾燥が耐凍害性に有利なことを示しており、W/C60%のA E コンクリートは放出水量15%(体積)でも耐久性指数が低下しないデータが示されている。しかしながら、今回の乾湿繰返しの実験の範囲ではこれらの傾向が認められず、乾湿繰返しは、A E コンクリートの耐凍害性も低下させている。ここで行った乾湿繰返しは乾燥条件だけのものよりもきびしいものと考えられる。

3.4 ひびわれの状況と耐凍害性

デジタル顕微鏡を用いたひびわれ写真の一例を写真1に示す。粗骨材界面等にひびわれが発生しているのが確認できる。50倍程度の

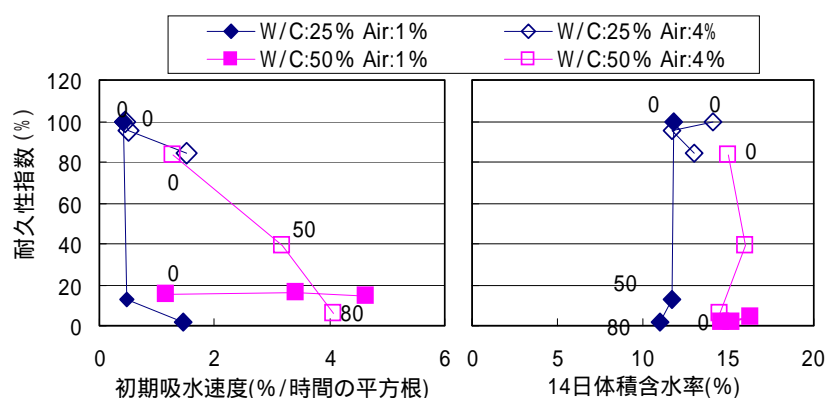


図7 吸水性状と耐久性指数の関係

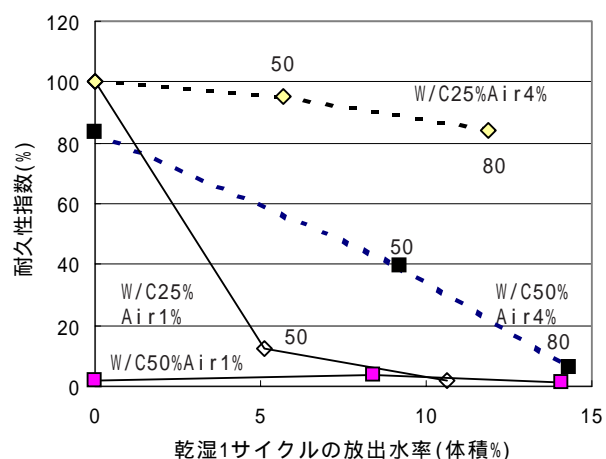


図8 乾湿時の放出水率と耐久性指数の関係

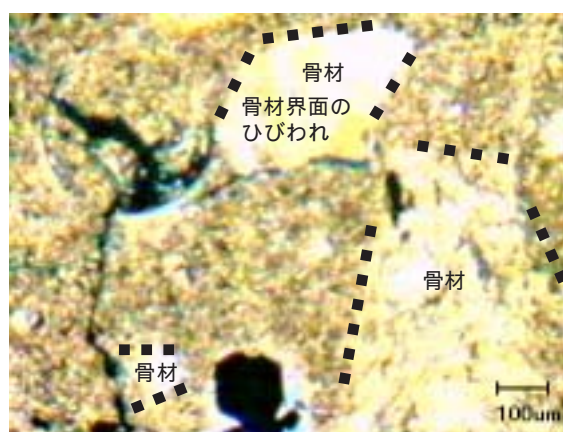


写真1 ひびわれの発生状況 (屋外暴露後の試験体)

倍率では5 μm程度までのひびわれ幅のものが確認可能である。より高倍率とするとひびわれと同様の色に着色されているようにみ

える部分が認められるが、これがひびわれであるか、あるいは試料研磨時の汚れ等であるかの判別が難しく、5 μ m程度以下のものではひびわれと断定するのは困難であった。

このため、ここでは5 μ m程度までのひびわれについて、リニアトラバース法測定結果から「ひびわれ個数/総測線長」をひびわれ量の指標として算出し、耐久性指数との関係を図9に示す。この図から乾湿繰り返しを行った試験体のひびわれ量に大きな差はない結果となっている。これは乾湿繰り返しを行わない試験体についても薄片の加工時に50程度の乾燥にさらされており、薄片の場合にはこの乾燥がひびわれの発生に影響を与えたことが考えられる。また、ここでは5 μ m程度までのひびわれを対象としたが、これ以下の微細なひびわれが影響していることも考えられる。いずれにしても、ひびわれの測定方法についての検討が必要であり、今回の実験では試験体のひびわれ状況は明確にならなかったものと考えられる。また、屋外暴露を行ったもののひびわれがかなり多くなっており、ここで行った乾湿繰り返しの条件とは異なった要因が作用していることが考えられる。

4.まとめ

本研究では、乾湿繰り返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響を検討した。概要を以下にまとめる。

- 1) 乾湿繰り返しはコンクリートの初期吸水速度を高めるが、最終的な吸水量は乾湿繰り返しを行ってもほとんど変化しない。また、低水セメント比のものは乾湿繰り返しに対する吸水性状の変化が小さい。
- 2) 乾湿繰り返し後のコンクリートは、耐凍害性が低下し、特にスケーリングが顕著となる。また、乾湿繰り返し時の乾燥温度が高い(乾燥

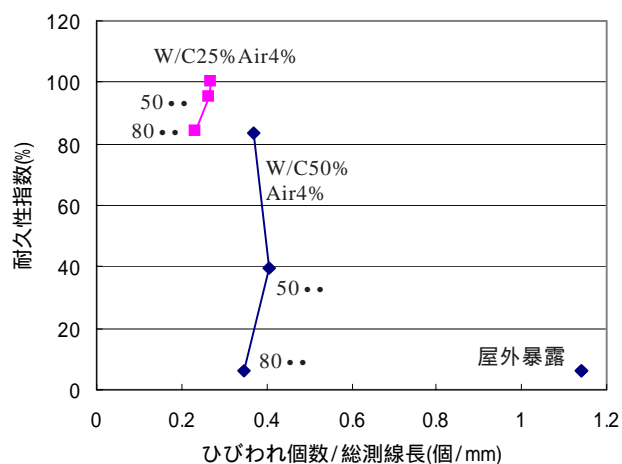


図9 ひびわれ量と耐久性指数の関係

時の放出水量が大きい)ほど、耐凍害性の低下は大きくなる。

3) 空気量は乾湿繰り返しによる耐凍害性の低下防止に有効であるが、乾湿繰り返し条件がきびしくなると、この防止効果は低下する。

4) A E コンクリートでは、W/Cにかかわらず、乾湿繰り返しによって初期吸水速度が大きくなるほど、耐久性指数が小さくなる。

5) 乾湿繰り返しを行わないもので高い耐久性指数を示す低水セメント比のnon A E コンクリートは、乾湿繰り返しを行うと吸水性状の変化が小さくても耐凍害性が大きく低下する。

参考文献

- 1) 浜 幸雄、千歩 修、友澤史紀、濱田英介: 7~12年間の屋外暴露によるコンクリートの耐凍害性の変化、第56回セメント技術大会講演要旨、pp.216-217、2002.5
- 2) 田畑雅幸、洪 悦郎、鎌田英治: コンクリートの凍害におけるひびわれの役割の考察、日本建築学会構造系論文集、第366号、1986
- 3) 田畑雅幸、鎌田英治、宮崎重宗: コンクリートの耐凍害性におよぼす乾燥の影響、セメント技術年報32、365-368、1978