

論文 各種配合のコンクリートの塩分環境下における耐凍害性

張 金喜*1・藤原 忠司*2・西城 能利雄*3・阿部 哲*4

要旨: 塩分環境下において、コンクリートの耐凍害性を確保するための条件を、水セメント比、空気量および混和材の使用量などの配合面から検討した。耐凍害性は、これらの配合要因に大きく関わり、とくに適当量の空気量および混和材の使用量とすれば、耐凍害性の向上を期待できる。塩分浸透および細孔構造に関する実験によれば、連行気泡は、塩分浸透に関わらないものの、応力緩和などの作用により、また混和材は、毛細管空隙を減少させて、塩分浸透を抑制することにより、耐凍害性の向上に寄与すると考えられる。

キーワード: 塩分環境下, 耐凍害性, 水セメント比, 空気量, 混和材, 塩分浸透

1. はじめに

寒冷地においては、スパイクタイヤの使用規制に伴い、交通安全確保のため、凍結防止剤の散布量が増大している。凍結防止剤の大半は、塩化物系であり、橋梁や歩車道境界ブロックなどの道路施設は、塩分環境下に曝されていると言える。これまで、寒冷地におけるコンクリートの場合、凍結融解作用による劣化、すなわち凍害が問題視されてきた。コンクリート内部に塩分が浸透すれば、凍害が著しく促進されることは、既に明らかにされており、塩分環境下における耐凍害性の確保は、重要な課題となっている。

本研究では、耐凍害性の確保を、配合の面から検討することにした。対象とした配合要因は、水セメント比、空気量および混和材の使用量である。水セメント比や空気量については、既に検討されており、それらの適切な設定が、耐凍害性の確保にとって重要であると指摘されている^{1),2)}。しかし、これらの要因と塩分浸透の関連など、耐凍害性にとって、基本となる点を検討している例は、きわめて少ない。また、耐凍害性に果たす混和材の役割についても、検討は不十分であると思われる。

ここでは、種々に設定した配合のコンクリートにつ

いて、塩分環境下における耐凍害性を明らかにし、得られた結果を、塩分浸透や細孔構造などの観点から解釈しようとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

用いた材料は、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³)、川砂(密度: 2.52g/cm³, 粗粒率: 2.98)、川砂利(密度: 2.52g/cm³, 最大寸法: 25mm)、混和剤としての AE 剤、混和材としての高

表-1 水セメント比を変えた配合

記号	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
W30	30	117	389	3.5	2.0
W50	50	147	294	5.0	1.6
W60	60	157	262	6.0	1.7
W70	70	165	236	5.5	1.5
W90	90	178	197	6.0	1.6

表-2 空気量を変えた配合

記号	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
A1.9	60	157	262	6.0	1.9
A3.0				7.5	3.0
A4.5				8.5	4.5
A6.0				10.0	6.0
A7.5				11.0	7.5

*1 岩手大学助手 工学部建設環境工学科 博士(工学)(正会員)

*2 岩手大学教授 工学部建設環境工学科 工博(正会員)

*3 岩手大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻

*4 東日本旅客鉄道(株) 修士(工学)

炉スラグ微粉末(密度:2.89g/cm³, プレーン値:4290cm²/g) およびシリカフェーム(密度:2.14g/cm³)である。

水セメント比を変えた場合の配合を表-1に示す。水セメント比は5水準であり、耐

凍害性の違いを広い範囲で検討するため、30%および90%のように、通常用いられない水セメント比も設定してみた。90%の場合は、材料分離が激しかったため、増粘剤を用いて、適当な軟度としている。いずれも、プレーンコンクリートとした。

表-2は、空気量を変えた場合の配合であり、水セメント比を60%と一定にし、AE 剤量を調節して、フレッシュコンクリートの空気量を5水準とした。

混和材の使用量を変えた場合の配合を表-3に示す。高炉スラグ微粉末およびシリカフェームとも、セメントと体積で置換して用い、置換しない場合も含め、置換率はそれぞれ4水準とした。いずれも、プレーンコンクリートである。なお、コンクリートの細骨材率は、すべての配合において、42.5%に統一している。

後述のように、モルタルを対象とした実験も行っている。モルタルの場合、コンクリートから粗骨材を除いた配合とした。表-4に、モルタルの空気量およびフロー値を示しているが、空気量を変えた場合については、コンクリートと異なり、3水準の空気量としている。

2.2 実験方法

水セメント比および空気量に着目した実験では、水中養生期間を28日とした。一方、混和材の使用量に着目した場合、高炉スラグ微粉末が潜在水硬性の効果を発揮するまでには、長期間を要することから、シリカフェーム使用も併せ、養生期間を91日間とした。

圧縮強度試験では、φ10×20cmの供試体を用い、養生終了後、強度を測定した。塩分浸透試験

表-3 混和材の使用量を変えた配合

記号	W/(C+B) (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	高炉スラグ微粉末		スランプ (cm)	空気量 (%)
				置換率 (%)	使用量 (kg/m ³)		
N	60	157	262	0	0	6.0	1.2
B30			190	30	72	6.5	1.4
B50			142	50	120	6.5	1.4
B70			94	70	168	7.0	1.4
記号	W/(C+SF) (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	シリカフェーム		スランプ (cm)	空気量 (%)
				置換率 (%)	使用量 (kg/m ³)		
S5	60	157	253	5	9	3.5	2.0
S10			244	10	18	3.0	2.0
S20			226	20	36	2.5	1.8

表-4 モルタルの配合

記号	W/C(%)	フロー値	空気量(%)
w30	30	174	4.2
w50	50	185	3.8
w60	60	188	3.5
w70	70	199	3.3
w90	90	215	4.3
記号	W/C(%)	フロー値	空気量(%)
a3	60	186	3.2
a6	60	190	5.8
a9	60	194	9.2
記号	高炉スラグ微粉末 置換率(%)	フロー値	空気量(%)
n	0	188	3.3
b30	30	192	3.6
b50	50	195	3.8
b70	70	203	4.3
記号	シリカフェーム 置換率(%)	フロー値	空気量(%)
s5	5	178	4.2
s10	10	172	3.9
s20	20	170	3.6

および凍結融解試験では、10×10×40cmの角柱供試体を用いた。塩分浸透試験の場合、養生終了後に、供試体を3%の濃度の塩化ナトリウム水溶液に浸し、所定の期間毎に、ドリルを用いて打設面より深さ方向1cm毎に5cmまで窄孔し、各深さ毎の粉末状試料を採取して、その試料中に含まれる全塩分量を電位差滴定法により測定した。凍結融解試験では、供試体を3%の塩化ナトリウム溶液に浸した状態で、供試体中心の温度が-20~+15℃となるよう凍結融解作用を与えた。1サイクルに要した期間は約3日間である。各サイクルにおける供試体の質量を測定し、質量減少率を算出した。

モルタルを対象とした試験項目は水分・塩分浸透試験および細孔分布測定である。いずれの試験においても、供試体は4×4×16cmのモルタル

バーとした。水分・塩分浸透試験では、養生終了後、炉乾燥により、供試体を一旦絶乾状態にした。この際、内部の微細ひび割れや表面の収縮ひび割れをできるだけ防ぐため、1面(4×4cm)のみからの水分蒸発とし、温度も段階的に上げて、最終的に110℃とした。その後、2面(4×4cm)を除き、4面(4×16cm)をコーティングした。このように準備した供試体を、図-1に示すように、鉛直に立て、コーティングを施さなかった2面のうち、1面を塩化ナトリウム3%溶液に浸して、吸水させる。他面は、湿度60%、温度20℃に曝した乾燥面としており、水分および塩分は、1方向の流れとなる。所定の吸水期間で、供試体と同図に示す位置で割裂し、得られた各試験片を絶乾状態となるまで乾燥させ、乾燥前後の質量から含水量を求め、飽水時(養生終了時)の含水量に対するこの含水量の比を算出し、それを相対含水率として、水分浸透を把握しようとした。塩分浸透に関しては、絶乾にした各試験片を粉砕し、粉末試料に含まれる全塩分量を電位差滴定法で測定した。

また、絶乾にしたモルタル供試体から、5~10mmの粒子を採取し、水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定して、塩分浸透と細孔構造との関連を考察した。なお、一連の試験で、塩水の濃度を3%としたのは、この程度の濃度が、著しい被害をもたらすと一般に考えられていることによる。

3. 実験結果および考察

3.1 耐凍害性

コンクリート供試体を塩水に浸したまま、凍結融解作

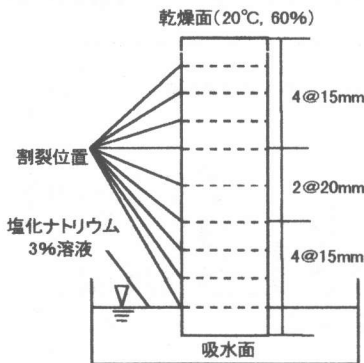


図-1 モルタルの水分、塩分浸透試験

用を与えたときのサイクル数に伴う質量減少率を、図-2に示す。なお、質量減少率のほかに、相対動弾性係数も測定しているが、傾向としては、同様であった。

水セメント比を変えた場合、水セメント比が小さいほど、耐凍害性に優れている傾向が見受けられる。この水セメント比を、30%にした場合(W30)には、本実験で設定したすべての配合条件の中で、質量減少率が最も小さく、換言すれば、耐凍害性に最も優れている。プレーンコンクリートであっても、水セメント比さえ小さくすれば、耐凍害性を確保できることを示す例として意義深い。ただし、一般には、水セメント比を小さくすることに限りがある。

より一般的と思われる水セメント比が50~70%の範囲では、いずれも質量減少率が大きく、それぞれの間には、それほど差がない。すなわち、この範囲では、水セメント比を調節したとしても、耐凍害性の確保は難しいと言える。そこで、水セメント比が60%の場合を対象とし、空気連行あるいは混和材使用により、塩分環境下における耐凍害性の向上が図れるかを検討した。

空気量を変えた場合、耐凍害性には、顕著な差が見られ、とくに、空気量が4.5%(A4.5)および6.0%(A6.0)では、耐凍害性の向上が著しい。生コンクリートの場合、一般には、4.5%の空気量を目標としている。ただし、1.5%の誤差が許されており、実

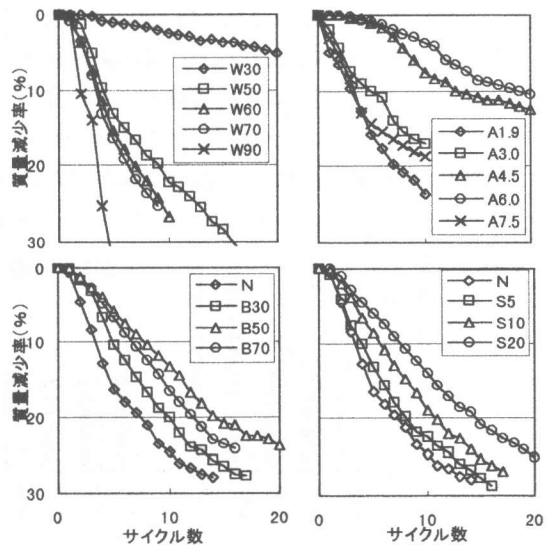


図-2 凍結融解による質量損失

際には、3.0～6.0%の範囲にあると言っていい。本結果によれば、目標値(4.5%)および誤差の上限値(6.0%)では、耐凍害性を期待できるが、下限値(3.0%)では、耐凍害性が危うくなる。この結果のみで、絶対的な判断は難しいものの、塩分環境下で耐凍害性を確保するには、これまでの目標値以上の空気量とすることも、ひとつの有効な手段であると指摘できる。ただし、空気量 7.5%(A7.5)では、ブレーン(A1.9)と同じ程度に耐凍害性に劣っており、過大な空気量は避ける必要がある。

高炉スラグ微粉末およびシリカフェームをセメントと置換した場合、質量減少率は小さくなり、耐凍害性の向上に一定の効果が見受けられる。置換率で検討すれば、高炉スラグ微粉末を用いた場合、置換率 50%までは、置換率の増大に応じ、耐凍害性は向上するが、置換率 70%(B70)では、50%(B50)よりも低下しており、置換率には、おのずと限度がある。一方、シリカフェームを用いた場合、本実験で設定した置換率の範囲では、置換率の増加に従い、耐凍害性は向上する傾向にある。しかし、いずれの混和材を用い、置換率をどのように設定しても、空気量を適切に設定した場合に比べ、耐凍害性向上の程度は小さいと言わざるを得ない。

3.2 強度および塩分浸透の影響

塩分環境下における耐凍害性に見られた傾向を、圧縮強度および塩分浸透の観点から考察してみる。耐凍害性を表す値としては、凍結融解試験から得られた 10 サイクル時の質量減少率に着目することにした。図-3は、塩分浸透の測定例を示している。凍結融解試験と同じ濃度の塩水に供試

体を浸しておけば、塩分は、時間の経過とともに、供試体内部に浸透し、その程度には、供試体によって差がある。ここでは、塩分浸透を拡散現象と捉え、拡散係数によって、供試体間の差を捉えてみる。拡散係数を求めるに際しては、浸漬期間を固定し、線形解析である Fick の拡散方程式を用いた³⁾。凍結融解試験では、主に融解中に、塩分が浸透する。凍結融解 10 サイクルでの塩分浸透時間は、おおむね塩分浸透試験での2週間に相当する。そこで、浸漬2週での拡散係数を求めた。

図-4は、質量減少率、圧縮強度および拡散係数を一括して示している。水セメント比を変えた場合、耐凍害性は、水セメント比が大きいほど劣っているが、それは、塩分が浸透しやすく、強度も低いためであると解釈できる。空気量を変えた場合の耐凍害性は、空気量のある値まで、空気量の増大とともに、著しく向上する。この範囲で、空気量の増大とともに、強度は小さくなり、拡散係数はほとんど変わらない。したがって、空気量増大による耐凍害性の向上を、強度や塩分の浸透しやすさで解釈できず、通常の耐凍害性と同様に、塩分環

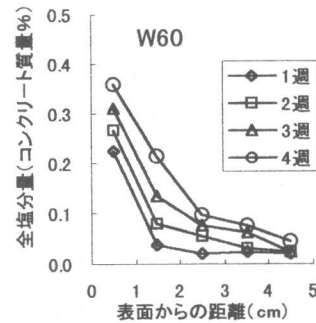


図-3 コンクリートへの塩分浸透

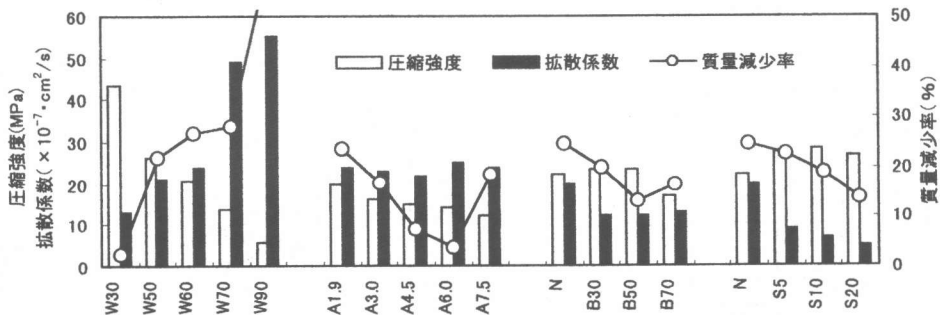


図-4 質量減少率、圧縮強度および拡散係数

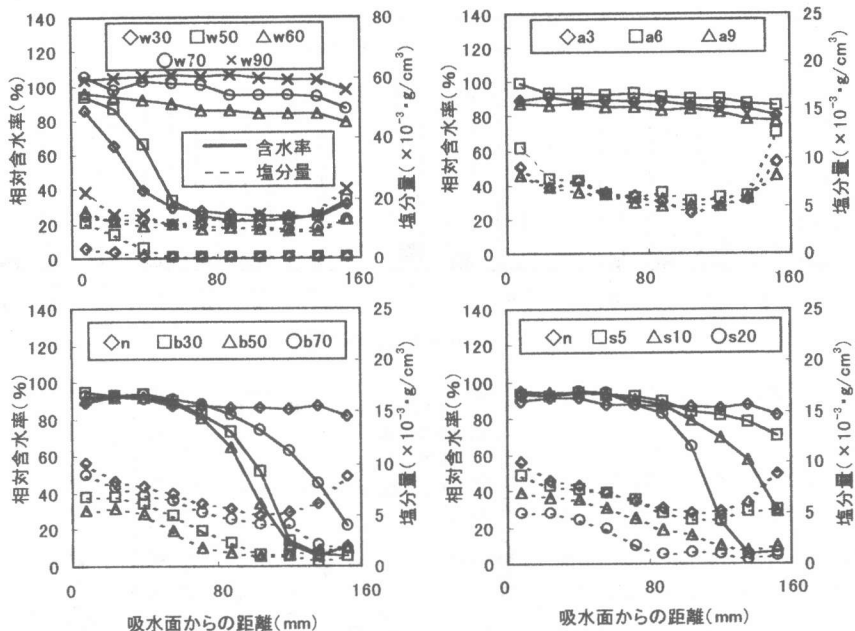


図-5 モルタルへの水分、塩分浸透

境下での耐凍害性にも、連行気泡による応力緩和などの作用が、大きな役割を果たすと言える。この範囲を超えて空気量を大きくした場合には、耐凍害性が著しく損なわれる。拡散係数は、他と同程度であり、塩分が格別に浸透しやすいとは思われない。強度がある値を下回れば、いかに気泡を連行させても、耐凍害性を確保できなくなる恐れのあることを示す例であると考えられる。混和材を用いた場合、セメントの70%を高炉スラグ微粉末で置換した例(B70)を除き、置換率が大きくなるほど、耐凍害性は向上する。強度が増加傾向にあり、さらに、拡散係数の低下が著しく、とくにシリカフェームを用いた場合の低下が顕著である。混和材は、組織を緻密化させ、強度と塩分遮断能力を大きくし、耐凍害性を向上させると言える。例外(B70)の場合、潜在水硬性を十分に発揮するには、水酸化カルシウムなどのセメント水和物が不足しており、B50に比べて強度や塩分遮断能力が劣って、耐凍害性も逆転したと考えられる。

3.3 塩分浸透に及ぼす細孔構造の影響

塩分移動をさらに検討するため、モルタルを対象にした基礎的実験を行なった。図-5は、絶乾状態から出発して、塩水を2週間吸わせたときの供

試体内部における水分および塩分の分布を示している。水セメント比を変えた場合、水セメント比が大きければ、内部はすでに飽水状態に近く、塩分も比較的多く浸透している。小さな水セメント比では、水分浸透が遅く、塩分浸透も、吸水面近傍に限られる。同様の傾向は、混和材を用いた場合にも見受けられる。一方、空気量を変えた場合には、水分および塩分浸透とも、空気量の違いによる差は、ほとんど見受けられない。

このように、水分および塩分の浸透は、配合条件によって大きく異なる傾向を示しており、それは、絶乾状態から出発した実験条件であるからこそ、より明瞭になったと言える。換言すれば、この実験結果は、それぞれが本来有している塩分浸透のしやすさを示していることになる。得られた塩分の分布より、上述と同様にして、拡散係数を求めた。この際、乾燥面において、塩分凝縮の傾向が見られることから、拡散係数の算出では、乾燥面でのデータを除外した。

図-6は、水銀圧入法によって求めたモルタルの細孔量を示している。一般には、細孔径 10 μm 程度を境とし、それ以上の径は連行気泡など、それ以下は毛細管空隙と考えられている。図では、

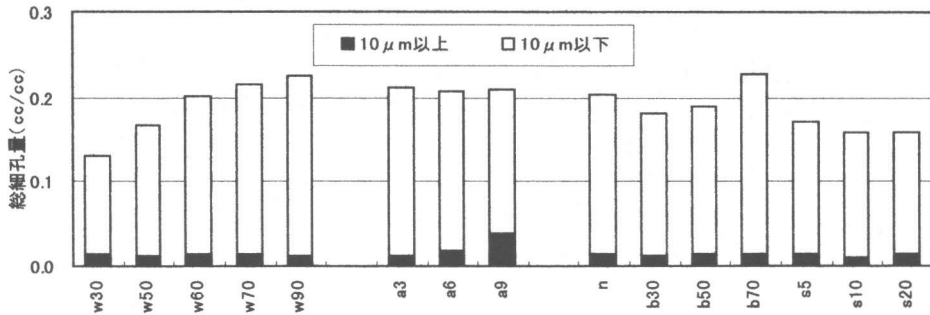


図-6 モルタルの細孔量

この考えに従い、その区分も示しておいた。

水セメント比を変えた場合、水セメント比が大きくなるに従って、毛細管空隙の細孔量が増大し、プレーンコンクリートであるためか、10 μm 以上の細孔量には、差がない。空気量を変えた場合には、総細孔量にほとんど差はないものの、10 μm 以上の細孔量は、空気量の増加とともに、増大する傾向にある。混和材を使用

した場合、置換率によって、毛細管空隙の細孔量は変化するが、これも、プレーンコンクリートであるためか、10 μm 以上の細孔量はほぼ等しい。

図-7は、細孔径の区分毎に、細孔量と塩分の拡散係数との関係を示している。10 μm 以下の細孔量と拡散係数との間には、一定の相関があり、毛細管空隙が多いほど、塩分は浸透しやすいと解釈できる。一方、10 μm 以上の細孔量は、拡散係数とほとんど関係しない。とくに、空気量によって、10 μm 以上の細孔量が変わるとしても、拡散係数はほぼ一定であり、連行気泡は、塩分浸透にほとんど関係しないと言える。

4. おわりに

塩分環境下において、コンクリートの耐凍害性を確保するための条件を、配合の面から検討した。通常の水セメント比のプレーンコンクリートにおいては、耐凍害性を確保するのが難しく、何らかの手立てを講じる必要がある。本実験の範囲では、空気量を通常より多少大きめとすることで、耐凍害性を確保できる可能性があると言える。ただし、連

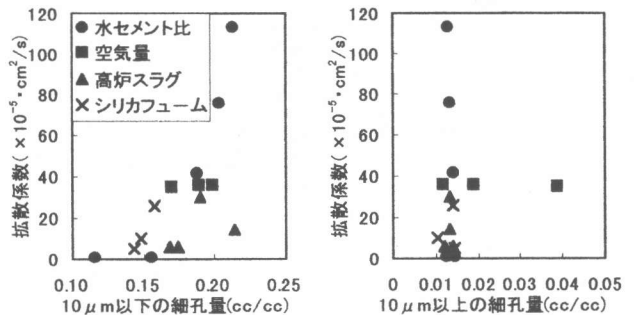


図-7 細孔量と拡散係数の関係

行気泡は、塩分遮断にほとんど寄与しない。塩分浸透を抑制しようと思えば、高炉スラグ微粉末などの混和材の使用が効果的であると指摘できる。

参考文献

- 1) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫:凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究, コンクリート工学, Vol.8, No.1, pp.121-133,1997.1
- 2) 三浦尚, 板橋洋房, 岩城一郎:凍結防止剤の影響を受けるコンクリートの凍害劣化に関する実験的研究, 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集, pp.159-166, 1999.11
- 3) 松島学, 松井邦人, 関博, 堤智明:Fick の拡散方程式の係数の同定, 土木学会論文集, Vol.28, No.520, pp.269-272, 1995.8