

論 文

[1118] 高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験的研究

正会員○柏野謙二 (北海道大学工学部)

正会員 鎌田英治 (北海道大学工学部)

正会員 桂 修 (北海道立寒地建築研究所)

1. はじめに

近年、経済性と居住性の視点から、超高層鉄筋コンクリート造が注目され、実施工例が増加している。このような超高層鉄筋コンクリート造建築物には、高強度コンクリートが使用され、これには、最近実用化された高性能A E減水剤の役割が大きい。一般のコンクリートでは空気量を増加させることにより耐凍害性は向上するが、圧縮強度は低下する。一方、高強度コンクリートでは、高強度化のために出来るだけ空気量を少なくすることが求められるが、その反面空気量を少なくすると耐凍害性が低下するおそれがある。

本研究は、高強度コンクリートの耐凍害性を気泡組織および細孔構造との関係で検討したものである。なお、付随して行った強度試験の結果をもとに、空気の連行にともなう圧縮強度の低下の検討も行った。

2. 実験計画および方法

実験は耐凍害性と圧縮強度に関する実験に大別される。表1に示すように水セメント比、空気量、養生条件の3要因をそれぞれ変化させ、各要因の水準を、水セメント比では、28%、32%、37%、45%、55%の5水準、目標空気量については、2%から5%までの4水準、凍結融解試験開始前の養生条件を3水準とし、すべての水準の組み合わせについて実験を行った。

表1 実験計画表

水セメント比	目標空気量	養生条件
28%	2%	
32%	3%	2週水中
37%	4%	4週水中
45%	5%	8週気中
55%		

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材は細骨材として鶴川産陸砂(表乾比重2.68)、粗骨材として鶴川産砂利(表乾比重2.66)と常盤産碎石(表乾比重2.66)を1

:1の割合で混合し

表2 割合表および練り上がり結果

て使用した。また、すべてのコンクリートで高性能A E減水剤を使用し、空気量はA E助剤、消泡剤を用いて調整した。割合表および練り上がり結果を表2に示す。

実験は、凍結融解試験、圧縮強度試験、水銀圧入法による細孔構造の測定、気泡間隔係数の測定から

水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積 (l/m³)			重量 (kg/m³)			高性能AE減水剤 (kg/m³)	空気調整剤 (kg/m³)	動き物線		
				セメント	砂	砂利	セメント	砂	砂利			スラブ (cm)	強度 (%)	
28	2	42.3	170	193	261	178	607	702	473	473	12.14	—	19.9	1.3
	3	41.4		251	178	675	473	473	12.14	1.82	19.8	1.8		
	4	40.4		241	178	648	473	473	7.43	4.86	18.6	2.3		
	5	39.4		231	178	621	473	473	7.89	19.8	4.3			
	2	44.5		285	178	767	473	473	7.43	—	18.2	1.6		
32	3	43.6	170	169	275	178	531	740	473	473	7.43	2.12	18.5	2.3
	4	42.7		265	178	713	473	473	7.43	5.31	19.0	4.2		
	5	41.7		255	178	686	473	473	7.43	6.37	21.5	4.6		
	2	45.5		302	178	812	473	473	5.97	0.92*	18.2	1.5		
	3	44.6		292	181	785	481	481	5.97	—	19.9	1.9		
37	4	43.8	170	146	282	181	459	759	473	473	5.97	2.75	19.6	3.1
	5	42.9		272	181	732	473	473	5.97	5.51	20.3	5.7		
	2	48.4		334	178	898	473	473	4.91	0.76*	20.2	1.3		
	3	47.6		324	178	872	473	473	4.91	—	18.1	1.5		
	4	46.9		314	178	845	473	473	4.91	3.78	20.5	3.5		
45	5	46.1	170	120	304	178	378	818	473	473	4.91	6.05	21.3	4.5
	2	50.0		356	178	958	473	473	4.64	0.77*	16.3	1.3		
	3	49.3		346	178	931	473	473	4.64	—	18.3	2.1		
	4	48.6		336	178	904	473	473	4.64	1.85	22.0	2.8		
	5	47.8		326	178	877	473	473	4.64	3.71	20.3	4.6		

(* は 消泡剤を使用 また、空気量結果は質量法と圧力法の平均値)

なっている。

凍結融解試験は、ASTM C 666-77 A法に基づく急速水中凍結融解試験で、+5℃～-18℃の温度を一日6サイクル繰り返すものとし、ASTMの標準条件である標準養生材令2週のほか、標準養生4週、脱型後8週間の気中養生（温度20℃、湿度60%）の後に実験を開始した。測定は、重量、長さ、動弾性について行い、300サイクル時の結果により耐久性指数（DF₃₀₀）を求めた。圧縮強度試験および水銀圧入法による細孔構造の測定は、凍結融解試験開始材令のコンクリートについて行い、気泡の測定は、ASTM C 457-71 に準じたリニアトラバース法により行った。

3. 実験結果および考察

(1) 耐久性指数に影響する要因とその効果 耐久性指数を特性値として、水セメント比、目標空気量、養生条件を要因とする分散分析（三元配置法）により得られた要因効果を示したものが図1である。図は、各要因の主効果のみ示しているが、高強度コンクリートでは、水セメント比の効果が空気量の効果に匹敵するものとなり、特に水セメント比28、32%と37%以上の間で明確な耐凍害性の相違が認められた。また、空気量については、本実験のW/Cの範囲においても適切な空気量の導入が必要なることを示し、養生条件の差は認められなかった。

(2) 水セメント比の影響 図2に水セメント比の異なるNon A E（空気量2%程度）およびA Eコンクリート（5%程度）の凍結融解試験

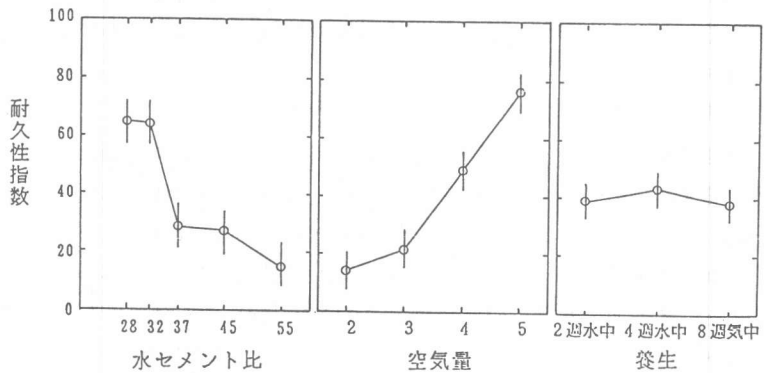


図1 耐久性指数に対する各要因の効果

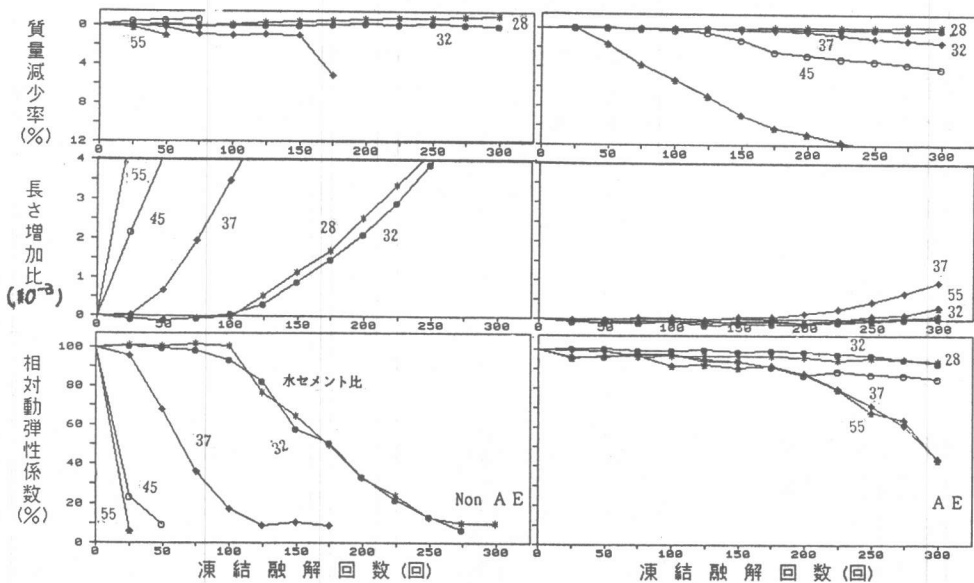


図2 凍結融解試験結果（水セメント比の影響）

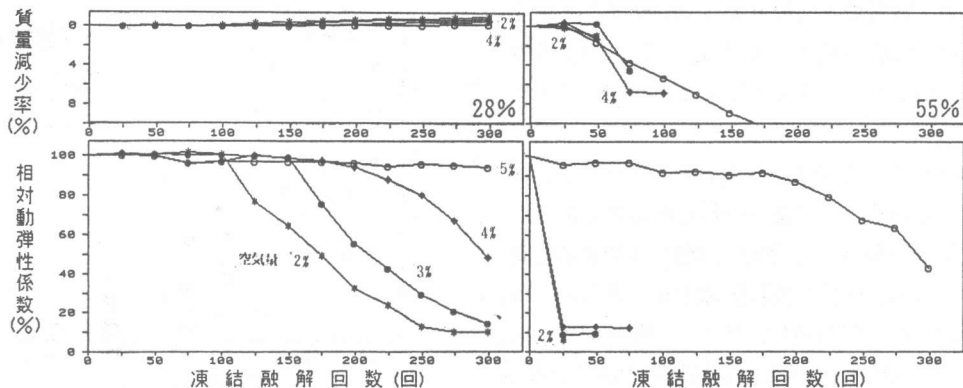


図3 凍結融解試験結果 (空気量の影響)

結果を比較して示す。Non A Eコンクリートでは相対動弾性係数の低下、膨張による劣化が先行し、重量損失がほとんど見られない段階で試験体が崩壊している。一方、A Eコンクリートでは、膨張による劣化が遅れ、また、水セメント比の増大に伴って重量損失が増大する傾向がうかがわれる。この図より長さ変化と相対動弾性係数はほぼ対応していることがわかる。

(3) 空気量の影響 図3は空気量の異なる水セメント比28%および55%のコンクリートについての結果である。水セメント比28%の場合、質量減少率では、空気量の差による影響はなく、劣化はみられない。相対動弾性係数をみると空気量が少ない試験体の順に劣化がみられ、W/C 28%においても耐凍害性を向上させるために空気量の確保が必要となることがわかる。W/C 55%の場合、この傾向はさらに顕著になり、空気量の少ないものは早いサイクルで崩壊にいたる劣化を示すも

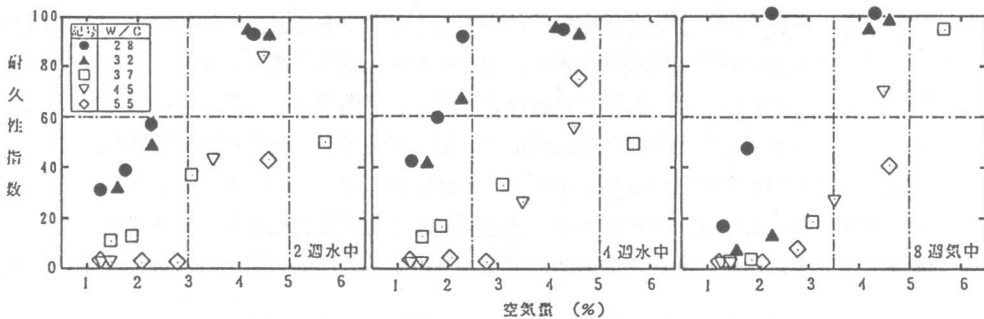


図4 空気量と耐久性指数の関係 (フレッシュコンクリート)

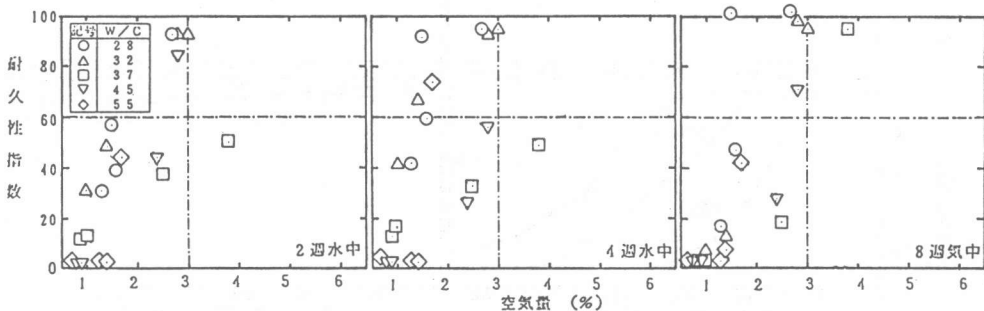


図5 空気量と耐久性指数の関係 (硬化コンクリート)

の、空気量5%程度では300サイクルまで徐々に劣化が進行している。一方、質量減少率については、空気量による差は明確ではない。

図4は耐久性指数と空気量（フレッシュコンクリート）との関係を示したものである。空気量が多いほど耐久性指数が増加する傾向がみられ、耐久性指数60以上を得るためには、W/C 28,32%の場合、2週水中養生では3%、4週水中では2.5%、8週気中では3.5%以上程度の空気量が必要であり、W/C 37,45,55%の場合、3種全ての養生条件下で5%以上程度の空気量が必要であることがわかる。

耐久性指数と硬化コンクリートで測定した空気量との関係を示したのが図5である。硬化コンクリートで測定された空気量は、フレッシュコンクリートの値を下まわる傾向を示しており、このことから3種全ての養生条件下で空気量（硬化コンクリート）が3%以上の範囲で十分な耐久性が得られる結果となった。

空気量と比較してコンクリートの耐凍害性との相関性がより優れているといわれる気泡間隔係数を指標とした場合が図6である。気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数が低下する傾向がみられる。一般に気泡間隔係数が250 μ 以下で十分な耐凍害性が得られることが知られているが¹⁾、図6では、この関係は明確ではない。

(4) 養生条件の影響 図7、8に養生条件の異なる水セメント比28%、55%のNon A EおよびA Eコンクリートの凍結融解試験結果を示す。水セメント比28%の場合、Non A Eコンクリートでは、質量の減少はないが、相対動弾性係数は8週気中、2週水中、4週水中の順で劣化がみられ、A Eコンクリートではすべての養生条件について300サイクルまでの範囲で質量減少、相対動弾性係数の劣化は認められなかった。水セメント比55%の場合、Non A Eコンクリートではすべての養生条件について少ないサイクル数で崩壊にいたる急激な劣化を示し、A Eコンクリートでは、8週気中、2週水中、4週水中の順に劣化が進行する。なお、図1では養生条件の差は見

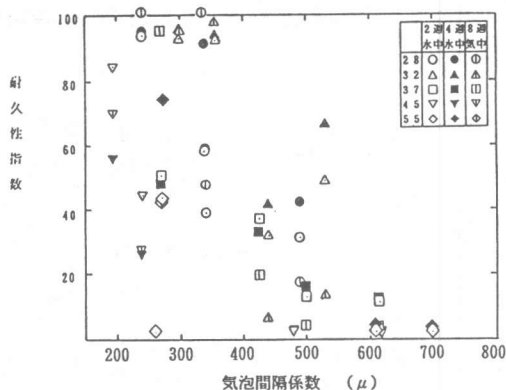


図6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

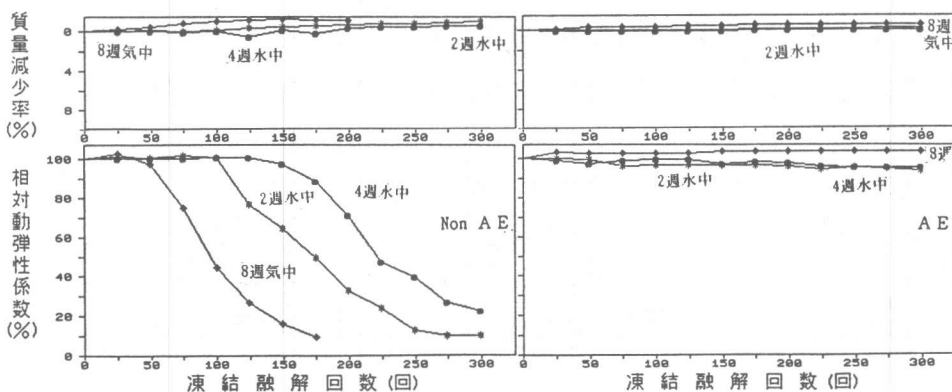


図7 凍結融解試験結果（養生条件の影響 W/C 28%）

られないが、これは低水セメント比で空気量の多い試験体や高水セメント比で空気量の少ない試験体には差がなく、そのあばれが結果に影響したものと考えられる。

(5) 耐久性指数と細孔構造の関係 セメント硬化体の耐凍害性は、ある寸法範囲の毛細管空隙量と相関性をもっており、これまで半径 320\AA 程度以上の毛細空隙が硬化セメントペーストの凍結融解による劣化に関係する結果が得られている²⁾。Non AEおよびAEコンクリートの半径 320\AA 程度以上の毛細管量と耐久性指数との関係を示したのが図9である。Non AEとAEでは耐久性指数が全く異なるものの、それぞれについて、細孔量が多いものでは耐久性指数が低いという傾向が示されている。しかし、水セメント比と細孔量との関係がばらついていることもあって、明確な関係は得られなかった。

(6) 空気量と圧縮強度の関係 図10は空気量と圧縮強度との関係を養生条件ごとに示したものである。空気量が増えると圧縮強度が低下し、水セメント比ごとの回帰直線はほぼ平行関係にあることがわかる。ここで、空気量の平均値 2.

8%の圧縮強度を水セメント比ごとに求め、これを基準強度とした圧縮強度比 ($F_c/F_{2.8}$) を得る。この圧縮強度比と空気量の関係を単回帰直線で表すことにより、圧縮強度と空気量の関係を評価した。その結果を図10に示す。圧縮強度比 $F_c/F_{2.8}$ は、

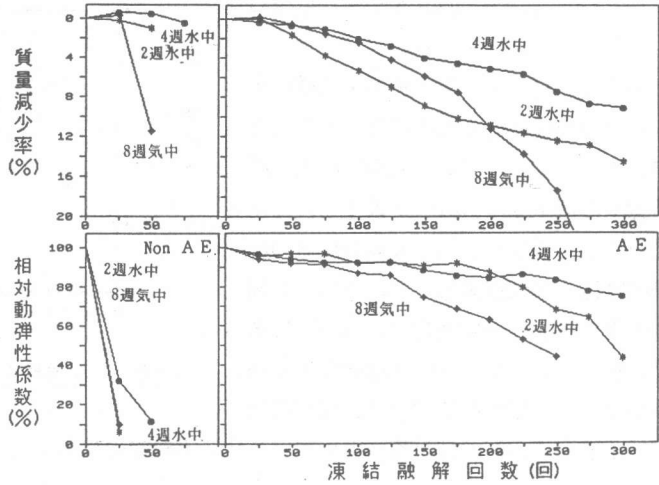


図8 凍結融解試験結果 (養生条件の影響 W/C 55%)

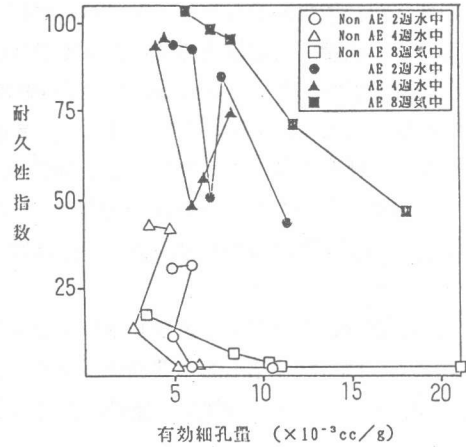


図9 耐久性指数と毛細管量 (320\AA 以上) の関係

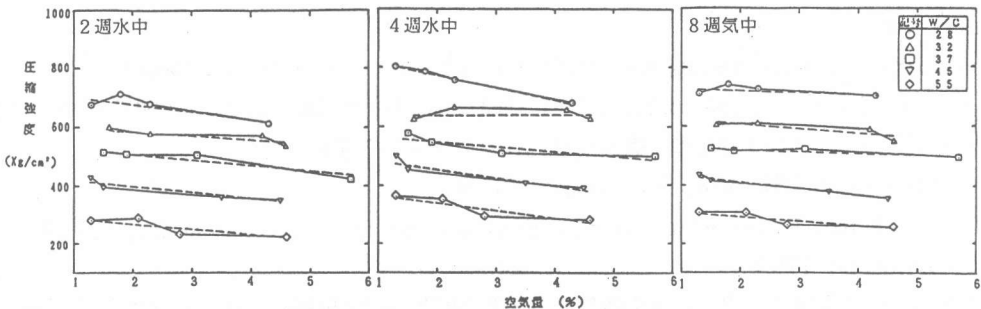


図10 空気量と圧縮強度の関係

$$F_c/F_{2.8} = -0.040(Air) + 1.117$$

$$R = 0.774$$

と表すことができ、空気量が1%増加すると圧縮強度が約4%程度低下することがわかる。なお、空気量の増加による圧縮強度の低下率は、材令・養生条件によっていくぶん異なり、気中8週の場合の圧縮強度低下率は空気量1%について3%、水中養生材令4週の場合では4.5%であった。普通コンクリートの圧縮強度低下率は約5.5%と言われており³⁾、建研の研究によると2.8%の値が報告されている⁴⁾。本研究の結果はこの間である。

5. まとめ

高強度コンクリートの耐凍害性および圧縮強度に関する検討を空気量、水セメント比、養生条件を変えた60種類のコンクリートについて行った。実験結果の普遍性を示すような成果は得られず、現段階で結論を得ることは出来ないが、実験の範囲で結果は以下のように要約できる。

(1) 高強度コンクリートにおいて十分な耐凍害性を得るためには、W/C 28、32%の場合、2週水中養生では3%、4週水中では2.5%、8週気中では3.5%以上程度、また、W/C 37、45、55%の場合、3種全て養生条件で5%以上程度の空気量が必要であった。

(2) 高強度コンクリートでは、空気量1%の増加に対し、圧縮強度が約4%程度低下した。しかし、この低下率はコンクリートの養生条件・材令によっていくぶん異なっている。

なお、硬化コンクリートとフレッシュコンクリートの空気量の値が異なっており、凍結融解試験結果も、同一空気量をもつ普通コンクリートと比較して概して弱い印象であった。これには練り混ぜ、コンクリート打設時の細部の条件などが影響する可能性があり、今後の検討が必要であろう。

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト、鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発研究の一環として実施したものである。硬化コンクリートの空気量の測定では、藤沢薬品コンクリート研究所の杉山雅氏の協力を得ました。また、実験は、本学大学院生 今井 敬、本学学生 北浜雅也の両君に協力頂きました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) T. C. Powers, Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete, J. Amer. Concr. Inst., 50, pp. 741-60 (May 1954), and Discussion, pp. 760-6-760-15 (Dec. 1954)
- 2) 鎌田英治 セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害
コンクリート工学、Vol. 19, No. 11, 1981年11月
- 3) P. J. F. Wright, Entrained air in concrete, Proc. Inst. C. E., Part 1, 2, NO. 3, pp. 337-58 (London, May 1953)
- 4) 羽木宏 高強度コンクリートの空気量が圧縮強度及び凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する実験、建設省建築研究所部外研究員報告、昭和63年

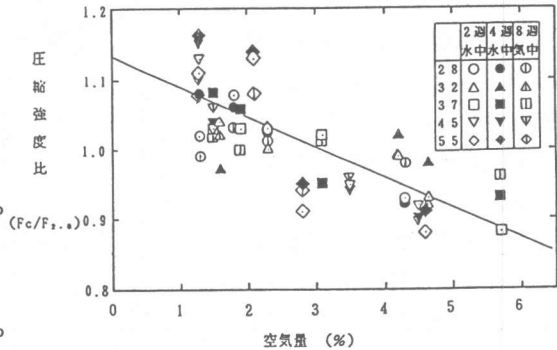


図11 空気量と圧縮強度比 ($F_c/F_{2.8}$) の関係