

# 高强度 콘크리트에서 氣泡組織 및 強度特性이 凍結融解抵抗에 미치는 影響

## Effect of Air Void and Strength Characteristics with Freezing and Thawing Resistance on High Strength Concrete

김생빈\* · 문제길\*\* · 김동신\*\*\*

Kim, Saeng Bin · Moon, Je Kil · Kim, Dong Sin

### Abstract

The influence of the bubble structure and strength characteristics on the freeze-thaw resistance of high strength concrete is investigated by the laboratory experiment. The test conditions are formed in the manner that water is continuously supplied externally and the specimens were received severe weather actions from ordinary to significantly low temperatures. The experiments are performed in two stages.

In the first stage, the relation between the durability to frost action and the bubble structure is analyzed especially with respect to the water-cement ratio and the amount of air. The AE and non-AE concrete specimens made of ordinary portland cement are used in the test.

In the second stage, the non-AE concrete specimens using vibratory compaction to improve the durability to frost action, and the high watertight specimens of rapid hardening portland cement to increase their initial strength are produced and tested.

The degree of watertightness of the specimens is determined by measuring the permeability of the specimens and the bubble structure of the high watertight concrete is also estimated.

### 要 旨

本 研究는 高强度 콘크리트가 外部로부터의 水分의 供給을 받으면서 常溫에서 低溫까지의 가혹한 기상작용을 되풀이 받을 때 高强度 콘크리트의 凍結融解저항에 미치는 氣泡組織 및 強度特性의 影響에 대한 實驗的 研究이다.

이 研究를 위하여 1단계 實驗에서는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 AE콘크리트와 non-AE 콘크리트에 대해 물·시멘트비와 공기량을 中心으로 耐凍害성과 기포조직과의 관계를 규명하고, 2단계 實驗에서는 non-AE 콘크리트의 耐凍害성을 向上시키기 위해 供試體 제작시 진동다짐으로 세심한 주의를 기울이고, 또 동결융해 시험시의 초기강도를 높이기 위해 早强 포틀랜드 시멘트를 사용하여 高水密性의 콘크리트를 제작하여 실험하였다. 이때 水密性은 透水試驗에 의한 透水係數를 측정하여 판단하고 아울러 高水密性 콘크리트의 氣泡組織도 측정하였다.

\* 정회원 · 동국대학교 공과대학 교수

\*\* 정회원 · 건국대학교 공과대학 교수

\*\*\* 정회원 · 동국대학교 공과대학 강사

## 1. 序 論

콘크리트가 常溫과 低溫의 반복 작용을 받으면 凍結시에 발생한 미세균열이 진전되어 이에 따라 콘크리트의 内部 組織이 이완되어 劣化된다.

콘크리트의 劣化에 영향을 미치는 要因은 많이 있지만 이 중 콘크리트의 含水量은 더욱 중요한 要因으로 생각된다.<sup>(1,2)</sup>

콘크리트 중의 空隙이 완전히 물로 채워져 있지 않다면 凍結에 의한 얼음의 팽창압은 물로 채워져 있지 않은 空隙에 흡수되어 콘크리트는 劣化를 받지 않거나 또는 劣化는 완화될 것이다. 따라서 이 공극과 관련된 콘크리트의 공기량은 콘크리트의 劣化에 큰 영향을 미치게 되고,<sup>(3,4)</sup> 또 인접하고 있는 空隙간의 거리를 나타내는 氣泡間隔係數는 콘크리트의 耐久성과 직접적으로 관계가 깊고 콘크리트의 耐久성을 판단하는데 중요한 척도가 된다.<sup>(5,6)</sup>

高強度 콘크리트에서 強度만을 중시한다면 공기량이 가능한 적은 것이 密室한 콘크리트가 되어 효과적이나 凍害에 대한 耐久성 문제가 뒤따르므로 AE제의 사용이 불가피한 경우도 많다. 한편 凍結融解에 의한 콘크리트의 劣化는 굵은 골재알의 밀면을 시작으로 해서, 즉 골재 밀면에서 시멘트풀과의 부착이완에 따른 균열에서 일어난다는 것이 실험을 통하여 확실하게 알려져 있으므로<sup>(7,8)</sup> AE제를 사용치 않은 高強度 콘크리트에서도 다짐을 충분히 하여 블리딩을 최소로 억제시키고, 가급적 空隙을 적게 하여 치밀한 콘크리트를 만든다면 외부로부터의 水分의 흡수를 방지할 수 있기 때문에 콘크리트내에서 凍結할 水分이 없으므로 凍結로부터의 피해를 대폭 減少할 수 있을 것으로 본다.

본 研究에서는 이와같은 現狀을 고려하여 고강도 콘크리트가 常溫에서 低溫까지의 가혹한 기상의 되풀이 작용을 받을 때 劣化에 영향을 주는 要因 中의 외부로부터의 水分을 공급받는 경우, 1단계 시험에서는 AE콘크리트와 Non-AE콘크리트에 대해 물·시멘트비와 공기량을 중심으로 동결융해 저항성에 관계 깊은 공기포의 간격계수<sup>(9,10)</sup> 등에 대하여 규명하고, 2단계 시험에서는 Non-AE콘크리트의 내구성 향상을 위한 고강도 콘크리트 제조에 역점을 두어 연구하였다.<sup>(11-13)</sup>

## 2. 實驗概要

### 2.1 概要

본 연구는 앞서서도 언급한 바와 같이 연구의 목적을 위하여 1단계 시험과 2단계 시험으로 연구를 진행하였다. 1단계 시험에서는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고 외부로부터의 水分의 공급을 받으면서 동결융해의 되풀이 작용을 받는 고강도 콘크리트에서 공기량과 물·시멘트비가 동결융해 저항성에 미치는 영향에 대해 알아보고 아울러 AE제를 사용한 경우 또는 사용치 않을 경우의 각 供試體의 氣泡組織, 즉 공기포의 평균길이와 間隔係數 등을 측정하여 이들이 耐凍害성에 미치는 영향<sup>(14-16)</sup>에 대해서도 알아보았으며 實驗에 제공된 供試體의 제작은 표준다짐방법으로 콘크리트 자체의 吸水性을 크게 문제삼지 않는 조건에서 實驗하였다. 그러나 콘크리트의 凍害는 凍結融解가 되풀이되는 과정에서 콘크리트 자체가 乾燥한 상태에서 또는 吸水를 계속하고 있는 상태에서 凍結融解를 받는가에 따라 凍害의 영향은 크게 달라지며, 또 콘크리트 중의 공극도 強度 뿐만 아니라 耐凍害성과 밀접한 관계가 있는<sup>(17)</sup> 것으로 본다.

따라서 2단계 시험에서는 Non-AE 高強度 콘크리트의 凍結融解 抵抗性を 개선시키는 方法으로 供試體를 제작할 때 콘크리트 内部의 空隙을 최소화시키는 수단으로 비비기와 다지기에 대해 세심한 주의를 기울이고 또 凍結融解 시험시의 初期 強度를 높이기 위해 早強 포틀랜드 시멘트를 사용하여 高水密性의 高強度 콘크리트를 제작하여 실험하였다. 이때 水密性의 판단은 透水試驗에 의한 透水係數로써 하였으며, 아울러 高水密性의 콘크리트의 氣泡組織도 측정하였다.<sup>(18,19)</sup>

### 2.2 1단계 實驗

#### 2.2.1 使用材料

시멘트는 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질은 표 1과 같다.

잔골재는 한강산을 사용하였으며 굵은골재는 화강암 부순돌을 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 각각 표 2와 표 3과 같다.

혼화제는 국산 AE제와 고성능감수제인 일본산

표 1. 시멘트의 물리적 성질

비중	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	응결시간 (시 : 분)		안정성	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
		초결	종결		σ <sub>7</sub>	σ <sub>28</sub>	σ <sub>7</sub>	σ <sub>28</sub>
3.15	3100	4:30	6:30	양호	209	310	24	37

표 2. 잔골재의 물리적 성질

표건 비중	흡수율 (%)	각 체 통과 중량의 누가 백분율 (%)							조립률 F.M.
		10 mm	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	
2.60	1.70	100	93	81	52	29	13	3	3.29

표 3. 굵은골재의 물리적 성질

표건 비중	흡수율 (%)	G <sub>max</sub> (mm)	각 체 통과 중량의 누가 백분율 (%)						조립률 F.M.
			30 mm	25 mm	19 mm	13 mm	10 mm	# 4	
2.62	1.50	25	100	96	84	67	29	1	6.86

표 4. 혼화제

품 명	주 요 성 분	비 중	상 태	색 상
SR-AE	Lignin 슬폰산 염	1.20	액 체	투 명
Mighty-150	Naphthalene 슬폰산 염	1.20± 0.02	액 체	암갈색

Mighty-150을 사용하였고, 재료의 특성은 표 4와 같다.

2.2.2 配合設計 및 供試體 製作

(1) 配合設計

일반적으로 耐凍害性的 콘크리트 製造는 AE콘크리트가 원칙이지만 여기서는 AE제를 사용하지 않는 경우와 사용한 경우의 각각의 고강도 콘크리트에 대하여 시험하고, 배합설계는 시험배합설계에 의하여 압축강도는 350~500 kg/cm<sup>2</sup>을 목표로 하였으며, 슬럼프는 10± 3 cm, 굵은골재 최대치수는 25 mm를 사용했다.

고강도 콘크리트에서 공기량의 변화, 물·시멘트비의 변화 및 단위시멘트량의 변화 등에 대한 동결융해의 저항성과 기포조직 등을 알아보기 위해서 공시체의 종류는 단위시멘트량이 500 kg/m<sup>3</sup>, 550 kg/m<sup>3</sup>에 대하여 물·시멘트비를 30%, 35%로 하여

표 5. 공시체의 종류

단위 시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	공기량 (%)			
		1.5 이하	1.6~3.5	4.0~6.0	7.0 이상
500	35	A-35-1	A-35-2	A-35-3	A-35-4
	30	A-30-1	A-30-2	A-30-3	A-30-4
550	35	B-35-1	B-35-2	B-35-3	B-35-4
	30	B-30-1	B-30-2	B-30-3	B-30-4

각각에 대해 공기량을 표 5에서와 같이 4개 그룹으로 하였고, 배합설계표는 표 10을 참조하면 된다.

(2) 供試體의 製作 및 養生

콘크리트의 비비기는 40리터 강제식 믹서를 사용하였고, 혼화제는 물에 용해시킨 후에 사용하였으며 감수제와 AE제의 혼합사용시에는 혼합하여 사용하지 않고 각각 분리해서 투입했다.

공시체는 지름 10 cm, 높이 20 cm인 원주형 압축공시체와 가로 7.5 cm, 세로 10 cm, 길이 40 cm의 동결융해용 각주형 공시체를 종류별로 제작하는데 콘크리트를 몰드속에 넣은 후, 표준다짐으로 하고 24시간 정도 실험실에 두었다가 그 후에 탈형해서 수중양생을 하였다.

압축강도용 供試體는 3일, 14일, 28일의 압축강도를 용량 200t 만능시험기로 측정하였으며 동결융해용 공시체는 14일간 양생하였다.

### 2.3 2단계 實驗

#### 2.3.1 使用 材料

시멘트는 S사의 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 그 物理的 性質은 표 6과 같다.

잔골재는 한강산을 사용하였고 物理的 性質은 1

표 6. 시멘트의 물리적 성질

비중	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	응결시간 (시:분)		안정성	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
		초결	종결		σ <sub>7</sub>	σ <sub>28</sub>	σ <sub>7</sub>	σ <sub>28</sub>
3.15	3900	3:40	5:30	양호	310	430	32	44

표 7. 굵은골재의 물리적 성질

표건 비중	흡수율 (%)	G <sub>max</sub> (mm)	각 체 통과 중량의 누가 백분율 (%)						조립률 F.M.
			30 mm	25 mm	19 mm	13 mm	10 mm	# 4	
2.70	0.40	25	100	95	80	48	26	2	6.92

표 9. 배합 설계표

공시체 종류	W/C (%)	S/a (%)	G <sub>max</sub> (%)	시멘트 (kg)	물 (kg)	잔골재 (kg)	굵은 골재(kg)	고성능 감수제(kg)
C-35-1	35	38	25	500	175	650	1090	3.2
C-35-2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
C-30-1	30	35	〃	〃	150	620	1180	4.2
C-30-2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
D-35-1	35	38	25	550	193	615	1055	3.3
D-35-2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
D-30-1	30	35	〃	〃	165	590	1145	4.4
D-30-2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃

단계 실험에서의 표 2와 같다. 굵은골재는 석화암 부순돌을 사용하였으며 物理的 性質은 표 7과 같다.

혼화제는 고성능 감수제인 Mighty-150만을 사용하였고 재료의 특성은 표 4와 같다.

#### 2.3.2 配合設計 및 供試體 製作

##### (1) 配合設計

高強度 콘크리트 配合設計는 2.2.2항과 같으나 여기서는 早強 포틀랜드 시멘트를 사용하고 壓縮強度의 設計基準값을 500~600 kg/cm<sup>2</sup>로 配合設計하였다.

單位 시멘트량은 500과 550 kg/m<sup>3</sup>의 부배함으로 하고 물·시멘트비는 표 8에서와 같이 30~35%로

표 8. 공시체의 종류

단위 시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	다짐의 정도	
			진동다짐 (치밀하게)	표준다짐
500	35	38	C-35-1	C-35-2
	30	35	C-30-1	C-30-2
550	35	38	D-35-1	D-35-2
	30	35	D-30-1	D-30-2

하였으며 목표 슬럼프값은  $10 \pm 3$  cm로 하였다. 이들 공시체를 제작하기 위한 配合設計表는 표 9와 같다.

(2) 供試體의 製作 및 養生

콘크리트 비비는 40리터 강제식 믹서를 사용하고 고성능 감수제인 Mighty 150을 물에 희석시킨후 혼합용수로 사용한다. 透水試驗用 中空 원주 몰드  $\phi 15 \times 30$  cm 및 氣泡組織 측정용으로 원주 몰드  $\phi 10 \times 20$  cm를 제작하여 시험하는데 콘크리트의 透水性은 다짐의 정도에 따라 크게 영향을 받기 때문에 다짐의 정도를 진동다짐(테이블 진동기로 진동수 약 1500 rpm, 진폭 0.8~1.0 mm)에 의해 치밀하게 다져 내부의 空隙을 가능한 적게 하고 한편 이와 비교하기 위해 표준다짐(다짐막대  $\phi 15$  mm, 길이 60 cm)으로 供試體를 각각 다져 성형하였다.<sup>(17)</sup>

또한 養生材畵은 실험실에서 수중양생 14日間하고 凍結融解 試驗, 透水試驗 및 氣泡組織 測定을 실시한다. 다만 콘크리트의 壓縮強度는 材畵 3日, 14日 및 28日에 대하여 각각 시험하였다.

3. 본 研究와 관련된 試驗

3.1 凍結融解 試驗과 氣泡組織 測定

3.1.1 凍結融解 試驗方法

콘크리트의 凍結融解 시험방법에는 2가지가 있는데 하나는 수중에서 凍結과 融解를 되풀이하는 것이고 다른 하나는 공기중 凍結, 수중에서 融解시키는 것이다. 이들 方法 모두가 ASTM C666-80에 포함되어 있으며 우리나라의 KS F 2456-81에서도 “급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법”이 제정되어 있다.

凍結融解 시험에서 공시체의 溫度는 凍結시  $-18^{\circ}\text{C}$ , 融解시  $+5^{\circ}\text{C}$  가 되게 하였으며 재령 14일에서 시험을 하였다. 시험에 사용된 기기는 일본 Marui사 제품인 全自動 凍結融解 試驗機로 하였다.

3.1.2 動彈性係數와 耐久性指數 計算

콘크리트의 動彈性係數는 “超音波 速度에 의한 動彈性係數 試驗法”<sup>(21)</sup>에 의해서 전파시간을 측정하여 전파속도를 구하고 이것을 이용하여 動彈性係數를 계산하였다.

$$E_D = \frac{V_1^2 \times \rho \times 10^7}{g} \quad (1)$$

여기서,  $E_D$  : 동탄성 계수( $\text{Kg/cm}^2$ )

$g$  : 중력가속도( $\text{cm/sec}^2$ )

$\rho$  : 공시체의 밀도( $\text{Kg/cm}^3$ )

콘크리트의 凍結融解에 대한 耐久性 指數는 식 (2)로 계산한다.

$$DF = \frac{C \times N}{M} \quad (2)$$

여기서, DF : 내구성 지수

N : 동결융해시험을 마친 사이클의 수

M : 동결융해시험 목표사이클 수

C : N 사이클에서의 상대동탄성 계수

3.1.3 氣泡組織 測定方法

굳은 콘크리트의 공기량과 기포조직 상태는 凍結融解의 耐久性和 밀접한 관계가 있다.<sup>(10,14~16)</sup> 아직까지 한국 공업규격에서 굳은 콘크리트의 기포조직 측정방법에 관한 규정은 정해놓지 않았으므로 미국에서 제정한 ASTM C 457-82a “현미경에 의한 굳은 콘크리트의 기포조직 및 공기량 측정 방법”<sup>(22)</sup>에 따라 기포조직을 측정하였다.

본 연구에서는 각 공시체마다 2개의 콘크리트 시편을 채취하여 연마사로 표면을 물갈이 한 후 양면을 다음과 같이 측정하였다. 측정방법은 횡단선 길이를 25 mm, 종간격은 1 mm로 하여 26개의 횡단선을 따라 기포조직 및 공기량을 측정하였다. 측정에 사용된 기기는 일본 Olympus사의 금속표면 측정용 현미경이며 배율은 150배율로 측정하였다.

3.2 콘크리트의 透水試驗

본 실험은 中空圓柱形 공시체를 사용한 아웃풋 (Output) 방법으로<sup>(18)</sup> 하였으며 시험기는 Marui사 제품인 三連式 透水試驗機를 사용하였다.

透水試驗은 우선 공시체의 필요한 치수를 잰 후 시험기에 定置하고 질소가스를 加壓源으로 하여 시험용기내에 일정 수압(여기서는  $25 \sim 30 \text{ Kg/cm}^2$ 의 수압을 가함)을 가하여 공시체 側方圓周로부터 수압을 받게 한다. 그리고 시험 개시후 공시체 中心孔으로부터 나오는 유출 수량을 정기적으로 측정하여 단위시간당 유출수량이 일정해지는 Q의 값을 알아내어 透水係數를 Darcy의 법칙으로부터 다음식에 의해 구한다.

$$K = \frac{2.3 \log(r_0 - r_i) \cdot Q}{2\pi \cdot P} \times \rho \quad (3)$$

여기서, K : 투수계수(cm/sec)

P : 수압(Kg/cm<sup>2</sup>)

Q : 유출 수량(cm<sup>3</sup>/sec)

l : 공시체 높이(cm)

r<sub>0</sub> : 공시체 반경(cm)

r<sub>i</sub> : 중심공 반경(cm)

ρ : 물의 단위중량(Kg/cm<sup>3</sup>)

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1 1단계 實驗에 대한 結果 및 考察

高強度콘크리트의 壓縮強度, 凍結融解試驗 및 氣泡組織의 특성 등을 측정하여 공기량과 압축강도와 의 관계, 공기량, 물·시멘트비, 중량변화를 및 기포조직 등이 耐凍害性과의 상관관계 등을 알아보았다.

이때 동결융해시험은 공시체가 외부로부터 水分이

공급되는 가혹한 조건하에서 실험하였으며 동결속도는 시간당 10°C/h 정도로 유지시켰다.<sup>(23)</sup>

##### 4.1.1 壓縮強度에 미치는 공기량의 影響

본 연구에서는 대상이 되는 고강도 콘크리트에 대해 재령별 압축강도시험을 한 결과, 그 값을 표 10에 수록하였다. 이때 재령별 압축강도비는 압축강도가 350~500 kg/cm<sup>2</sup> 정도의 고강도 콘크리트에서 재령 14일의 압축강도가 재령 28일의 압축강도에 대해 89~94%로 나타나고, 공기량과 압축강도와의 관계는 공기량이 증가할수록 강도는 감소하는데 본 시험에서는 공기량 1% 증가에 대하여 압축강도는 대략 4% 정도 감소함을 보여준다. 그러나 공기량이 7% 이상의 고강도 콘크리트에서는 같은 배합이라 하더라도 AE제를 사용치 않은 Non-AE콘크리트에 비하여 강도가 75% 이하로 떨어지며 공기량 11% 정도에서는 강도비가 60%에 불과해 고강도 콘크리트의 효과를 완전히 상실하게 된다.

##### 4.1.2 耐凍害性에 미치는 공기량 및 물·시멘트비의 影響

표 10. 압축강도시험 결과표

공시체 종류	W/C (%)	S/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 σ <sub>3</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	압축강도 σ <sub>14</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	압축강도 σ <sub>28</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>3</sub> /σ <sub>28</sub> (%)	σ <sub>14</sub> /σ <sub>28</sub> (%)
A-35-1	35	40	25	7.0	0.5	225	392	435	52	90
A-35-2	35	40	25	7.0	3.5	220	365	410	54	89
A-35-3	35	40	25	8.5	5.5	205	326	366	56	89
A-35-4	35	40	25	12.5	9.0	150	243	270	56	90
A-30-1	30	35	25	7.0	0.6	252	414	455	55	91
A-30-2	30	37	25	8.5	2.0	215	386	420	51	92
A-30-3	30	37	25	9.0	5.0	210	342	380	55	90
A-30-4	30	35	25	9.0	11.0	175	254	285	61	89
B-35-1	35	38	25	8.0	0.8	308	456	490	63	93
B-35-2	35	38	25	11.0	3.5	292	404	430	68	94
B-35-3	35	38	25	12.0	5.5	240	359	390	62	92
B-35-4	35	38	25	13.0	12.0	210	273	300	70	91
B-30-1	30	35	25	7.0	0.7	325	484	520	63	93
B-30-2	30	37	25	8.0	3.0	295	442	475	62	93
B-30-3	30	35	25	8.5	4.0	235	477	430	55	90
B-30-4	30	37	25	10.0	7.5	250	355	390	64	91

표 11. 동결융해시험 결과표

공시체 종류	W/C (%)	S/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	공기량 (%)	종료 사이클수	중량 변화율(%)	상대동탄 성계수(%)	내구성 지수(%)
A-35-1	35	40	25	0.5	65	0.01	60	13
A-35-2	35	40	25	3.5	210	0.01	60	42
A-35-3	35	40	25	5.5	300	0.00	85	85
A-35-4	35	40	25	9.0	300	0.00	97	97
A-30-1	30	35	25	0.6	70	0.01	60	14
A-30-2	30	37	25	2.0	90	0.01	60	18
A-30-3	30	37	25	5.0	300	0.00	92	92
A-30-4	30	35	25	11.0	300	0.00	101	101
B-35-1	35	38	25	0.8	80	0.01	60	16
B-35-2	35	38	25	3.5	250	0.01	60	50
B-35-3	35	38	25	5.5	300	0.00	90	90
B-35-4	35	38	25	12.0	300	0.00	99	99
B-30-1	30	35	25	0.7	90	0.01	60	18
B-30-2	30	37	25	3.0	270	0.01	60	54
B-30-3	30	35	25	4.0	300	0.00	90	90
B-30-4	30	37	25	7.5	300	0.00	98	98

동결융해시험에서는 동탄성계수를 측정하여 내구성을 판단하는데, 동결융해시험에 따른 상대동탄성계수 및 내구성지수 등의 시험결과가 표 11에 나타나 있다.

표 11에서 보듯이 같은 물·시멘트비를 가진 조건에서 공기량의 증가는 콘크리트의 내구성을 상당히 증가시켜 준다. 그러나 그림 1에서 보는 바와 같이 공기량이 같다 하더라도 물·시멘트비에 따라 상대동탄성계수는 불규칙하게 나타났으며, 특히 Non-AE콘크리트(공기량 1.5% 이하)의 경우 물·시멘트비 25%일 때 내구성지수는 18%에 불과하므로 물·시멘트비만의 감소로는 내구성 향상에 기여하지 못함을 알 수 있다. 그림 2에서 공기량이 4.8% 이상에서는 내구성지수가 90% 이상을 나타내며 공기량이 2.6~3.8% 사이에서는 내구성지수가 약 50% 정도이다. 그러므로 내구성이 좋은 콘크리트를 얻기 위해서는 보통콘크리트나 고강도콘크리트에서 4% 이상 공기량이 요구된다는 것을 알 수 있다.

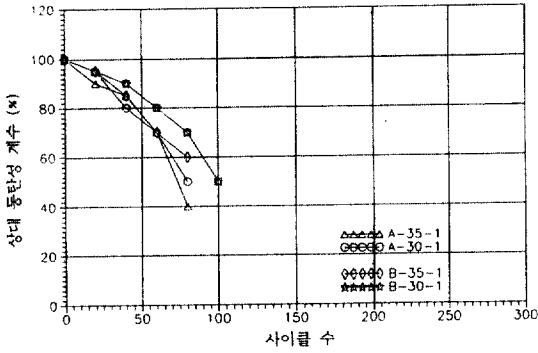
한편 보통콘크리트가 동해를 받을 때는 콘크리트의 열화에 따라 외부로부터 수분을 흡수하여 팽창이

생긴다든지 또는 供試體의 表面이 박리하는 등 동결융해가 거듭될수록 공시체의 중량이 변화된다.<sup>(20)</sup>

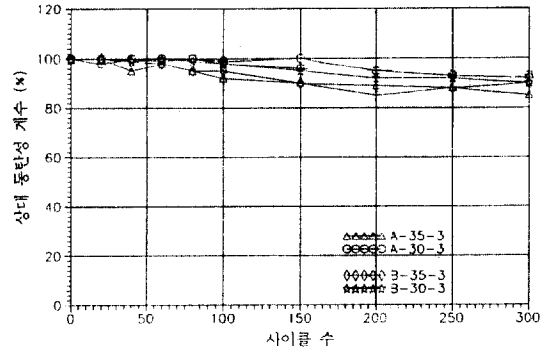
이를 알아보기 위해 동탄성계수 측정시마다 중량을 측정하여 최종 cycle에서 중량변화율을 계산하고 이를 표 11에 수록하였다. 이 표에서 보는 바와 같이 고강도 콘크리트에서는 중량변화율이 거의 없거나 있다 하더라도 0.01%에 불과하므로 어느 정도 열화가 생겼다 하더라도 供試體에서의 표면박리는 거의 없음을 보여주었다. 고강도 콘크리트에서의 열화와 중량변화율과의 관계는 상관성이 없음을 보여주었다.

#### 4.1.3 耐凍害性에 미치는 氣泡組織의 影響

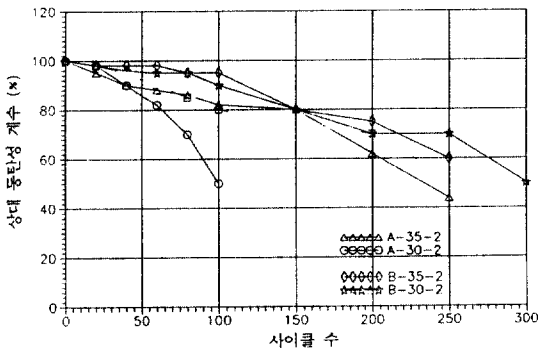
주어진 콘크리트 중의 연행공기의 양부는 ASTM C 457-82a에 기술되어 있는 간격계수로 평가되는데, 이 간격계수는 시멘트풀 중의 임의의 점에서 近接空腔의 外邊까지의 최대거리와 관계있는 것으로 耐凍害性 평가의 有用한 지표가 되고 있다.<sup>(6,15,22)</sup> 본 시험에서 실시한 굵은 콘크리트의 기포조직 시험결과가 표 12에 있고, 모든 조건에서 공기량의 증가는 간격계수의 감소를 나타낸다.



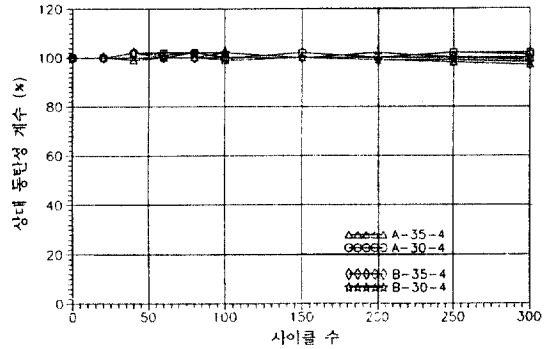
(a) 공기량 1.5% 이하인 경우



(c) 공기량 4~6%인 경우



(b) 공기량 1.6~3.5%인 경우



(d) 공기량 7.0% 이상인 경우

그림 1. 단위시멘트량 500 kg/m<sup>3</sup> 및 550 kg/m<sup>3</sup>일 때의 물·시멘트비와 상대동탄성계수와와의 관계.

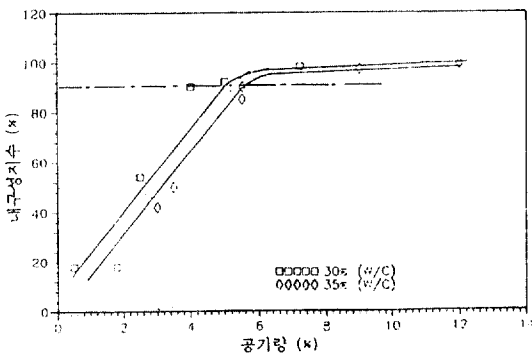


그림 2. 공기량과 내구성지수와의 관계.

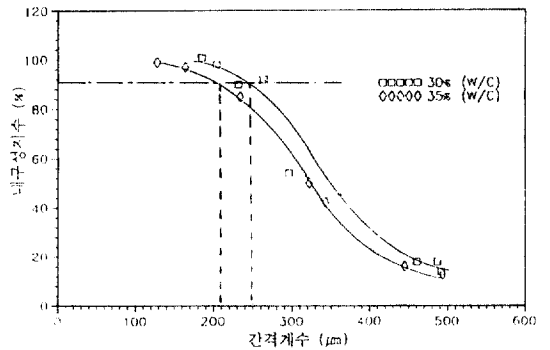


그림 3. 간격계수와 내구성지수와의 관계.

일반적으로 내구성지수가 60% 이상이면 내구성에 대해 만족할만한 콘크리트로 평가하는데 그림 3에서 내구성지수가 90% 정도 되는 부분을 임계내구성지수라 할 때, 이에 해당하는 간격계수 값은 W/C=30

%일 때 250 μm, W/C=35%일 때 210 μm로 차이를 나타내며 ASTM C 457에 규정된 보통콘크리트의 간격계수 200 μm 이하보다는 크게 나타났다. 이런 이유는 고강도 콘크리트에서 시멘트풀의 강도가 증



표 12. 기포조직 측정 결과표

공시체 종 류	W/C (%)	S/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	공기량* (%)	기포의 평균길이 $\bar{l}$ (mm)	비표면적 a (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )	공기량** A (%)	간격계수 L ( $\mu$ m)
A-35-1	35	40	25	0.5	0.21	18.78	1.38	494
A-35-2	35	40	25	3.5	0.19	21.20	2.47	343
A-35-3	35	40	25	5.5	0.18	22.33	5.18	234
A-35-4	35	40	25	9.0	0.16	24.38	8.23	164
A-30-1	30	35	25	0.6	0.23	17.50	1.51	492
A-30-2	30	37	25	2.0	0.23	17.10	1.91	461
A-30-3	30	37	25	5.0	0.21	19.30	5.04	264
A-30-4	30	35	25	11.0	0.22	17.90	9.18	185
B-35-1	35	38	25	0.8	0.17	22.93	1.21	445
B-35-2	35	38	25	3.5	0.17	23.66	2.44	322
B-35-3	35	38	25	5.5	0.20	20.22	4.75	280
B-35-4	35	38	25	12.0	0.16	24.29	11.70	128
B-30-1	30	35	25	0.7	0.16	20.55	1.17	487
B-30-2	30	37	25	3.0	0.15	26.97	2.03	296
B-30-3	30	35	25	4.0	0.15	25.87	3.78	232
B-30-4	30	37	25	7.5	0.17	23.15	6.59	204

주) \*굳지 않은 콘크리트의 공기량

\*\*굳은 콘크리트의 공기량

가하여 수압에 저항할 수 있는 능력이 향상되었기 때문이며 임계내구성지수에 대응하는 간격계수는 물·시멘트비에 따라 변한다는 것을 알 수 있다.<sup>(23)</sup> 표 12에서 비표면적과 내구성지수와는 불규칙하게 나타나므로 비표면적으로 내구성을 평가하기는 무리가 있는 것으로 본다.

#### 4.2 2단계 실험에 대한 결과 및 고찰

AE제를 사용하지 않고 고성능 減水劑만을 사용한 高强度 콘크리트의 耐凍害성을 향상시키기 위하여 供試體 성형에서 다짐을 적절히 하여 블리딩이 적고 水密성이 큰 高强度 콘크리트를 제작하여 壓縮強度와 吸水量 試驗, 凍結融解 試驗, 透水試驗 및 氣泡組織 등을 측정하였으며 이들이 耐凍害성에 미치는 영향과 상관성을 고찰하였다.

##### 4.2.1 壓縮強度에 미치는 다짐의 影響

콘크리트의 強度는 시멘트 공극비에 의해 지배된

다는 A.N. Talbot의 空隙說<sup>(5)</sup>과 같이, 특히 高强度 콘크리트인 경우에는 물·시멘트비가 적은 배합이 사용되므로 다짐이 불충분하면 공극이 많이 생겨 자연 壓縮強度는 떨어지게 된다.<sup>(14)</sup> 본 實驗에서도 材令別 壓縮強度 측정결과가 다짐정도에 따라 상당한 차이를 보여주고 있다. 즉 高强度 콘크리트일수록 壓縮強度를 크게 발휘하기 위해서는 다짐이 중요함을 알려주는 것으로 材令 28日에서의 壓縮強度 차이는 100 kg/cm<sup>2</sup> 정도가 된다.

本 研究에서는 早強 포틀랜드시멘트를 사용했으므로 材令 3일에서의 材令 28日에 대한 強度比는 대략 70~75%이고, 材令 14日에서의 材令 28日에 대한 強度比는 95~99%에 이르고 있다(표 13 참조).

##### 4.2.2 耐凍害성에 미치는 다짐특성의 影響

다짐을 표준다짐과 진동다짐으로 할 때, 이로 인한 각 供試體의 吸水率 및 透水係數 측정결과와 더불어 凍結融解試驗 결과가 표 14에 수록되어 있다.

표 13. 압축강도 시험 결과표

공시체 종류	C (kg)	W/C (%)	S/a (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 $\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	압축강도 $\sigma_{14}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	압축강도 $\sigma_{28}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_3/\sigma_{28}$ (%)	$\sigma_{14}/\sigma_{28}$ (%)
C-35-1	500	35	38	12.0	0.7	415	557	570	73	98
C-35-2	〃	〃	〃	〃	0.9	323	450	462	70	97
C-30-1	〃	30	35	11.0	0.8	436	593	605	72	98
C-30-2	〃	〃	〃	〃	1.2	345	468	485	71	96
D-35-1	550	35	38	12.0	0.6	422	570	585	72	97
D-35-2	〃	〃	〃	〃	0.8	357	451	475	75	95
D-30-1	〃	30	35	11.5	0.5	441	608	615	72	99
D-30-2	〃	〃	〃	〃	1.0	382	495	508	75	97

표 14. 내구성 지수와 투수계수 및 기포조직 측정 결과표

공시체 종류	시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	동결융해시험			투수시험		흡수율 기포의 (%)	기포조직측정	
		최종 사이 클루스	상대 동탄성 계수 (%)	내구성 지수 (%)	투수계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	(m/s)		간격계수 평균길이 $\bar{l}$ (mm)	L( $\mu$ m)
C-35-1	500	300	92	92	28	$7.5 \times 10^{-14}$	2.6	0.31	730
C-35-2	〃	180	60	36	〃	$5.0 \times 10^{-12}$	4.2	0.23	415
C-30-1	〃	300	97	97	28	$1.2 \times 10^{-14}$	2.2	0.38	825
C-30-2	〃	240	60	48	〃	$8.2 \times 10^{-13}$	3.8	0.25	450
D-35-1	550	300	97	97	28	$8.5 \times 10^{-14}$	3.0	0.29	690
D-35-2	〃	210	60	42	〃	$6.5 \times 10^{-11}$	4.8	0.22	435
D-30-1	〃	300	98	98	28	$2.8 \times 10^{-14}$	2.5	0.29	782
D-30-2	〃	260	60	52	〃	$4.7 \times 10^{-12}$	4.4	0.17	445

고성능 감수제를 사용한 高强度 콘크리트에서 표준다짐인 경우 흡수율은 3.8%~4.8% 정도였고, 진동다짐인 경우에는 2.2%~3.0% 정도로 측정되어 흡수율은 다짐의 영향을 크게 받는 것으로 측정되었다. 또한 耐久性指數도 진동다짐의 경우에는 물·시멘트비에 관계없이 90% 이상으로 좋은 결과를 얻었으나 표준다짐에서는 4.1항의 시험결과(표 11 참조)와 마찬가지로 본질의 시험결과도 耐久性指數가 모두 52% 이하로 측정되어 양호한 상태는 아니었다. 특기할만한 사실은 4.1에서의 시험결과(내구성 지수 18% 이하)보다는 좀 양호한 값으로 나

왔는데, 이는 早強 포틀랜드 시멘트를 사용한 관계로 材令 14日(동결융해시의 재령)에서의 壓縮強度가 4.1에서의 供試體 材令 28日의 壓縮強度를 상회하고 있기 때문인 것으로 본다.

또한 표 14에서 보는바와 같이 凍結融解 시험에서 최종 Cycle 300에서도 耐久性이 우수한 高强度 콘크리트는 透水係數와 밀접한 관계가 있으며<sup>(18)</sup> 본 실험에서는 대략 透水係數  $8.5 \times 10^{-14}$  m/sec 이하의 高水密性의 콘크리트(진동다짐한 것)는 耐久性指數 92% 이상으로 측정되었다. 그러나 표준다짐한 경우의 透水係數는  $8.2 \times 10^{-13}$  m/sec으로 비교적 耐透

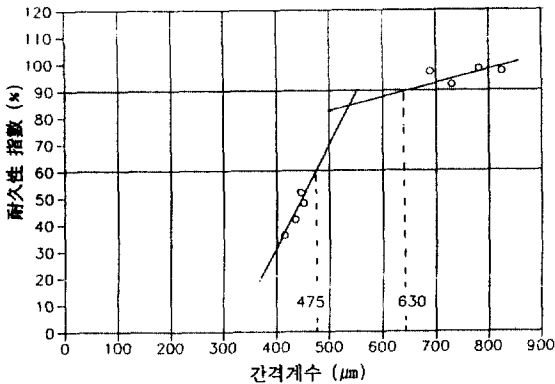


그림 4. 내구성지수와 간격계수와의 관계.

水性으로 보이나 耐久性指數는 52% 이하로 耐凍害性에는 그다지 좋지 못하다고 판단된다.

본 실험에서는 吸水率과 透水係數와도 밀접한 관계가 있는데, 吸水率이 적으면 透水係數도 상대적으로 감소하고 있음을 보여주었다.

#### 4.2.3 耐凍害성과 間隔係數와의 關係

기포조직의 측정결과가 표 14에 주어져 있다. 앞(2.2.2 참조)에서는 AE제를 사용한 高强度 콘크리트이므로 AE제 사용량 증가에 따라 간격계수는 줄어들기 때문에 耐凍害성 콘크리트에서 臨界 耐久性指數는 어떤 한계값 즉 W/C=30%일 때 250 μm, W/C=35%일 때 210 μm으로 나타났다.

그러나 여기에서는 AE제를 사용하지 않고 되도록이면 공극이 적은 밀실한 콘크리트를 만들어 흡수율이 적고 凍害를 받지 않기 위해 치밀하게 다졌기 때문에 간격계수는 자연히 커지게 된다.<sup>(10)</sup>

즉 본 실험에서는 그림 4에서 보는 바와 같이 耐久性指數가 90% 이상이 되는 간격계수는 대략 630 μm 이상이며 耐久性指數가 60% 이상이 되는 간격계수는 대략 475 μm임을 알 수 있다.

## 5. 結 論

高强度 콘크리트의 耐凍害성에 影響을 미치는 요소는 많이 있지만 본 研究에서는 주로 氣泡의 간격계수와 강도에 따른 透水係數와를 연관시켜 耐凍害성과의 상관관계를 규명하였는데 본 研究에서 얻어진 結果는 다음과 같다.

1. 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 高强度의 Non

AE 콘크리트 및 AE 콘크리트의 耐凍害성에 미치는 氣泡組織의 影響

1) AE제를 사용하지 않은 高强度 콘크리트에서 물·시멘트비와 耐久性과의 관계는 비록 물·시멘트비가 낮다 하더라도(W/C=30~35% 범위) 耐久性 향상에는 특별한 기여는 하지 못한다.

2) 耐久性 향상을 위해서는 물·시멘트비 보다는 적당량의 연행 공기를 함유시켜 줌으로써 물이 凍結할 때 발생하는 內壓을 완화시켜 주어야 하며 이때 알맞은 양의 공기량은 5% 전후임을 알 수 있다.

3) 고강도 콘크리트에서는 耐久性指數가 60%될 때까지 凍結融解시험을 완료한다 해도 供試體의 표면박리는 거의 볼 수 없었고, 중량변화율도 0~0.01%에 불과해 중량변화율과 劣化와는 상관관계를 보여주지 못하고 있다.

4) 굵은 골재의 최대치수가 25 mm로 AE콘크리트인 경우 臨界 耐久性指數(耐久性指數 90%) 이상에 대응하는 간격계수는 물·시멘트비에 따라 다르며 본 實驗에서는 W/C=30%에서 250 μm, W/C=35%에서는 210 μm임을 알 수 있었다.

2. 早強 포틀랜드 시멘트를 사용한 Non AE 고강도 콘크리트에서 강도와 間隔係數 등이 耐凍害성에 미치는 影響

1) 高强度 콘크리트에서는 비록 배합이 같아 하더라도 다짐 정도에 따라 壓縮強度의 차이가 크게 일어났는데 표준다짐과 진동다짐에서 材齡 28日에서의 壓縮強度의 차이는 100 kg/cm<sup>2</sup> 정도였다.

2) 같은 配合의 콘크리트라 하더라도 진동다짐에 의한 高水密性의 高强度 콘크리트는 耐吸水性이고 透水係數가 아주 작게 측정되어(8.5×10<sup>-14</sup> m/sec 이하) 耐凍害성에 좋으며 耐久性指數 90% 이상을 얻는데 별 문제가 없을 것으로 본다.

凍結融解 試驗은 콘크리트 材齡 14日에서 실시함으로 早強 포틀랜드 시멘트를 사용하는 경우 14日에서의 壓縮強度는 28日의 값의 대략 95~99%에 이르므로 強度 側面에서도 耐凍害성에 기여하게 된다.

3) 耐凍害성과 간격계수와의 관계에서 早強 포틀랜드 시멘트를 사용한 Non AE 콘크리트에서는 耐久性 향상을 위해 密實하고 공극이 적으며 耐吸水性이 극히 좋은 콘크리트가 되어야 하므로 간격계

수는 어떤 限界値 이상이어야 되는 반면 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 AE 콘크리트에서는 세공기포가 많이 존재해야 耐久性 향상에 기여하게 되므로 간격계수는 어떤 限界値 이하가 되어야 한다. 따라서 전자와는 상반되는 결과를 얻었다.

### 감사의 말

本 研究는 韓國學術振興財團의 1992년도 자유공모과제 研究費支援에 의해 연구되었다. 연구비지급으로 本研究를 가능하게 해준 財團當局에 감사를 드린다.

### 參 考 文 獻

1. Cook, H.K., "Permeability Test of Lean Mass Concrete", *Proceedings*, ASTM, 1951.
2. Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C., and Mann, H.M., "Permeability of Portland Cement Paste", *ACI Journal*, Nov. 1954.
3. Davis, R.E., "Entrained Air Beneficial in Freezing and Thawing Tests", *ACI Journal, Proceedings* Vol. 40, No. 6, p.522, June 1944.
4. Powers, T.C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 29, pp. 184-211, 1949.
5. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 41, No. 4, pp. 245-272, 1945.
6. Brown, L.S., and Pierson, C.U., "Linear Traverse Technique for Measurement of Air in Hardened Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, V. 47, p. 117, Bulletin No. 35, Portland Cement Assn., Oct. 1950.
7. Jackson, F.H., "Relationship between Durability of Concrete of Aggregates", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 10, pp. 103-113, 1930.
8. Scholer, C.H., "Durability of Concrete", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 10, pp. 132-163, 1930.
9. 柏野, 鎌田, 桂, "高強度콘크리트의耐凍害性에關する實驗的 研究", *콘크리트工學 年次論文報告*

書, pp. 691-696, 1990.

10. 三浦, 芳賀, 中根, "空氣量, 氣泡分布, 細孔分布가 高強度콘크리트의耐凍結融解性に及ぼす影響", *콘크리트工學 年次論文報告書*, pp. 679-684, 1990.
11. 齊藤, 大鹽, 大森, "高強度콘크리트의物性及び耐久性", *セメント技術年報*, XXIX, pp. 232-234, 1975.
12. 飛坂 柳, "高性能減水劑を用いた高強度콘크리트의性質", *セメント 콘크리트*, No. 405, 1980.
13. 金生彬, "高強度 콘크리트의 耐久性에 관한 研究", *大韓土木學會 論文集*, 제 1권, 제 1호, pp.9-19, 1981. 12.
14. Sommer, H., "The Precision of the Microscopical Determination of the Air Void System in Hardened Concrete", *Cement, Concrete, and Aggregate*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-55, Winter 1979.
15. Pigeon, M., and Lachance, M., "Critical Air Void Spacing Factor for Concrete Submitted to slow Freeze-Thaw Cycles", *ACI Journal, Proceedings*, No. 4, pp. 282-291, July-Aug. 1981.
16. 鎌田英治, "凍結融解抵抗性(耐凍害性)", *콘크리트工學*, Vol. 22, No. 3, pp. 38-46, March 1984.
17. 後藤誠史, "セメント硬化體と空隙", *セメント 콘크리트*, No. 462, pp. 16-21, No. 464, pp. 28-33, 1985.
18. 金生彬, 文濟吉, 姜輝男, 林正鎬, "콘크리트構造物의 水密性에 관한 研究", *大韓土木學會, 1986년도 學術發表會 概要集*, pp. 18-27, 1986. 10.
19. 堺毅, 河合糾茲, 川崎道夫, "超硬練り콘크리트의 凍結融解抵抗性의改善", *セメント技術年報*, XXX-VII, pp. 356-359, 1983.
20. Powers, T.C., and Helmuth, R.A., "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 32, pp. 285-297, 1953.
21. Neville, A.M., "Properties of Concrete", Great Britain, pp. 25-30, 1981.
22. Lagan, B.W., and Ward, M.A., "Determination of the Air-Void System Parameters in Hardened Concrete-An Error Analysis", *ACI Journal, Proceedings*, No. 6, pp. 943-952, 1986.
23. Pigeon, M., Prevost, J., and Simard, J.M., "Freezing-Thawing Durability Versus Freezing Rate", *ACI Journal, Proceedings*, Tech. No. 82-61, pp. 684-692, 1985.

(接受: 1993. 4. 30)