

高强度콘크리트의 凍結融解抵抗에 미치는 氣泡組織의 影響

Effect of Air Void System of High Strength Concrete on Freezing and Thawing Resistance

김 생 빈*

Kim, Saeng Bin

요 약

콘크리트의 내동해성은 일반적으로 공기량이나 기포조직 및 분포에 따라 크게 영향을 받으며 콘크리트의 강도와도 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 고강도콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 공기량 및 기포조직 특히 간격계수의 영향에 관한 실험적 연구로서 우선 압축강도는 Non-AE콘크리트를 대상으로 400~500kg/cm²를 목표로 하였고, 실험결과 내구성지수가 10~20%정도에 불과하므로 다음단계로 공기량 2~12%인 AE콘크리트로 하여 내구성 향상을 도모하였다. 이때 단위시멘트량, 물·시멘트비 등을 변화시킨 20종류의 콘크리트 배합에 대해 500cycle 까지 동결융해시험을 실시하였다. 결론적으로 동결융해의 저항성은 물·시멘트비 보다는 공기량과 더 밀접한 관계가 있었고 임계내구성지수에 대응하는 간격계수는 물·시멘트비에 따라 다르다는 사실을 알 수 있었다.

Abstract

It is generally known that the frost-resistance of concrete is much affected by the air content in concrete and by the air void system or air distribution. And also the frost-resistance is believed to vary with the strength of concrete.

This article is prepared to describe, based on experiment, the effect of the air content and the air void system, particularly the effect of the spacing factor, on the freeze-thaw resistance of the high strength concrete. For this purpose, I first worked on Non-AE concrete to make its compressive strength set about 400 to 500 kg/cm². However, the freeze-thaw test on the Non-AE concrete resulted in low durability factor, i.e., 10~20%. Thus to enhance the durability, another supplementary step was needed.

I used AE admixture, which enhanced durability by changing the air content from 2% to 12%.

The frost-thaw test was then performed 500 cycles on the 20 kind of concrete mixtures which differ in unit cement content and in water-cement ratio.

Keywords : frost-resistance, air content, air void system, air distribution, spacing factor, freeze-thaw test, durability factor, capillary cavity, Linear Traverse Method.

* 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

근래 콘크리트구조물이 대형화되어가고 또 품질개선면에서 고강도 콘크리트가 요구되고 있다. 고강도 콘크리트는 양질의 재료를 사용해서 고성능감수제나 특수성형 및 고압증기양생 등에 의하여 제조가 가능하다. 이들 고강도 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 일반적으로 공기량이나 기포분포의 영향을 크게 받으며 콘크리트의 강도와도 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.^(1,2)

고강도 콘크리트에서 강도만을 중시한다면 공기량이 가능한 적은것이 밀실한 콘크리트가 되어 효과적이나 동해에 대한 내구성(耐久性)문제가 뒤따르므로 AE제의 혼입이 불가피한 경우가 많다.

콘크리트의 동해에 의한 파괴는 콘크리트 내부공극에 차있는 물이 얼 때 약 9%가 팽창하는데 이로인해 발생되는 내압에 의해 일어나며, 이 내압의 정도는 내부공극에 얼마의 물이 차있는가에 따라 다르고, 포화상태에 가까울수록 높은 내압을 발생하여 파괴에너지는 커진다.^(1,4)

한편 적당량의 AE제를 사용한 AE콘크리트에서는 콘크리트의 동결융해에 의한 파괴작용에 대해 높은 저항성을 갖는데 이는 동결에 의한 압력이 발생해도 콘크리트에서의 자유수(自由水)의 이동을 쉽게 할 수 있어 내압을 완화시키기 때문이다.

T.C Powers^(1,2,18)는 동결융해작용에 대한 저항성을 기포간의 간격계수(間隔係數)에 의해 설명하고 있으며, ASTM C 457에서는 이 간격계수를 0.008in(0.2mm)라 규정하고 있다.

본 연구에서는 고성능감수제를 사용한 고강도 콘크리트에 대하여 단위시멘트량, 단위수량 및 AE제량 등을 변화시켜 이들 콘크리트에 대한 압축강도 및 기포조직 등을 측정하고 이들 因子들과 동결융해 시험에 의해 얻어진 내구성지수(耐久性指數)와의 상관관계를 알아보았다.

2. 사용재료의 특성과 실험계획

2.1 사용재료의 특성

1) 시멘트는 시중에서 구입한 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table.1과 같다.

2) 잔골재는 한강(미사리산)에서 채취한 모래이고, 굵은 골재는 화강암 부순돌을 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table.2 및 Table.3과 같다.

Table.1 Physical Properties of Cement

specific gravity	specific surface (cm ² /g)	Setting Time(h:m)		Soundness	comp Strength(kg/cm ²)		Tensile Strength(kg/cm ²)	
		Initial	Final		σ ₁	σ ₂	σ ₁	σ ₂
3.15	3.100	4:30	6:30	Good	207	312	24	38

Table.2 Physical Properties of Fine Aggregate

S.G.*	Absorption(%)	Sieve Passing weight (%)							F.M
		10 mm	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	
2.61	1.66	10	93	81	52	29	13	3	3.29

* Specific Gravity in Saturated and Surface-Dry

Table.3 Physical Properties of Coarse Aggregate

S.G.*	Absorption(%)	G _{max}	Sieve Passing Weight (%)						F.M
			30 mm	25 mm	19 mm	13 mm	10 mm	No.4	
20.65	0.50	25	100	97	85	66	30	1	6.84

* Specific Gravity in Saturated and Surface-Dry

Table.4 Properties of Chemical Admixtures

Item	Component	Specific gravity	State	Colour
SR-AE	Lignin sulphate	1.20	Liquid	Clear
Mighty 150	Naphtalene sulphate	1.20±0.02	Liquid	Dark brown

3) 혼화제는 AE제와 고성능감수제(Mighty 150)를 사용하였고 이들의 특성은 Table.4와 같다.

2.2 실험계획

2.2.1 실험개요 및 배합표

본 연구는 고성능감수제를 사용한 고강도콘크리트⁽²⁰⁾의 동결융해에 대한 저항성시험으로 압축강도는 Non-AE 콘크리트를 기준해서 400~500kg/cm²를 목표로 하였다. 콘크리트의 배합은 Table.5에서 보는 바와 같이 단위시멘트량 500kg/m³ 및 550kg/m³로 하고 물·시멘트비는 25%, 30% 및 35%로 하여 이들 조합의 5개 그룹의 배합에 대한 동결융해저항 특성을 알고자 균지않은 콘크리트 상태에서의 공기량을 각각 1.5%이하, 1.6~3.5%, 4~6% 및 7% 이상으로 조정하여 총 20개 배합에 대하여 실험하였다.

2.2.2 실험내용

- 1) 균지않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정.
- 2) 압축강도(재령3일, 7일 및 28일)측정(공시체는 지름 10cm, 높이 20cm인 원주형 공시체).
- 3) 동결융해시험(10cm×7.5cm×40cm의 공시체에 대해 재령14일에서 실시함. KS F 2456).
- 4) 경화콘크리트에 대한 공기량 및 기포조직의 측정

(ASTM C 457: Linear Traverse Method).

Table.5 Mix Proportions of Concretes

Test No.	W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	Cement (kg)	Water (kg)	Super plasticizer (kg)	AE agent (kg)	slump (cm)	Air (%)
A 35-1	35	40	25	500	175	2	0.00	5.0	0.5
A 35-2	35	40	25	500	175	2	0.08	6.0	3.0
A 35-3	35	40	25	500	175	2	0.15	7.0	5.5
A 35-4	35	40	25	500	175	2	0.20	12.0	9.0
A 30-1	30	35	25	500	150	4	0.00	6.0	0.6
A 30-2	30	37	25	500	150	4	0.06	8.0	1.8
A 30-3	30	37	25	500	150	4	0.16	8.5	5.0
A 30-4	30	35	25	500	150	4	0.20	6.0	11.0
A 25-1	25	33	25	500	125	6	0.00	6.5	0.9
A 25-2	25	33	25	500	125	6	0.07	7.0	2.7
A 25-3	25	36	25	500	125	6	0.11	8.5	5.6
A 25-4	25	36	25	500	125	6	0.24	10.0	11.0
B 35-1	35	38	25	550	193	2.2	0.00	8.0	0.8
B 35-2	35	38	25	550	193	2.2	0.07	11.0	3.5
B 35-3	35	38	25	550	193	2.2	0.11	12.0	5.5
B 35-4	35	38	25	550	193	2.2	0.22	13.0	12.0
B 30-1	30	35	25	550	163	4.4	0.00	6.5	0.6
B 30-2	30	37	25	550	163	4.4	0.07	7.0	2.5
B 30-3	30	35	25	550	163	4.4	0.17	7.5	4.0
B 30-4	30	37	25	550	163	4.4	0.19	9.0	7.2

Note: A-35-1
 Air content(1: 1.5% under, 2: 1.6~3.5%, 3: 4~6%, 4: 7% over)
 Water-Cement Ratio
 Unit Cement Content (A: 500kg/m³, B: 550kg/m³)

3. 동결융해시험 및 기포조직측정

3.1 동결융해시험

동결융해시험은 KS F 2456에 의한 “공기중 급속동결 및 수중 급속융해 시험방법”에 의하고 공시체는 재령 14일에서 시험하였다.

각 공시체는 시험전에 초기동탄성계수를 측정하고 시험이 진행됨에 따라 10~30cycle마다 동탄성계수를 측정하여 상대동탄성계수를 측정하며 최종 cycle수는 500회를 기준하였다. 다만, 시험도중에서 상대동탄성계수가 60이하인 경우에는 60에서 시험을 완료한다.

1cycle에 소요되는 시간은 대략 2.5시간이며 시험과정에서의 기내온도 및 공시체의 온도변화는 Fig.1과 같

다.

시험에 사용된 기기는 일본 Marui사 제품인 전자동 동결융해 시험기로 하였다.

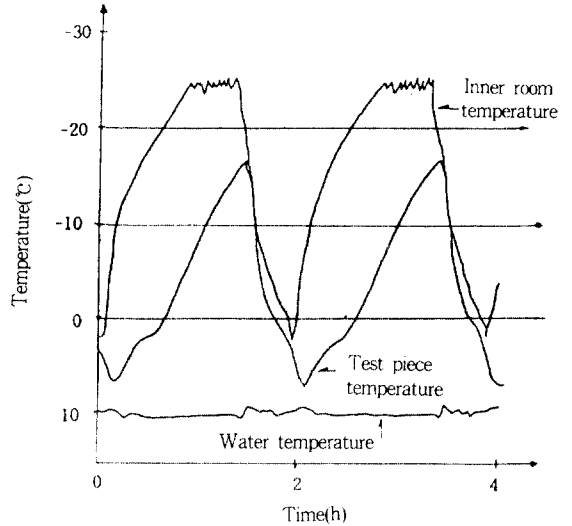


Fig.1 Temperature Change in Freezing and Thawing Testing Machine

콘크리트의 동결융해에 대한 내구성지수(Durability Factor: DF)는 다음 식으로 계산한다.

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

여기서, DF: 내구성지수

C : N사이클에서의 상대동탄성계수

N : 동결융해 시험을 마친 사이클 수

M : 동결융해시험복표 사이클 수

3.2 굳은콘크리트의 기포조직측정

시멘트 硬化體에는 成因이 서로 다른 켈공(gel pore), 모세관공극(capillary cavity)및 공기포(air void)의 3종의 공극이 산재해 있고 이들 공극은 치수나 모양이 다르며 콘크리트의 동결융해에 대한 내구성과 밀접한 관계가 있다.^(21,26,29)

한국공업규격(KS)에는 굳은콘크리트의 기포조직 측정방법에 관한 규정이 없으므로 본 실험에서는 ASTM C 457-82a “현미경에 의한 굳은콘크리트의 기포조직을 선형횡단법(Linear Traverse Method)으로 측정하였다.

측정에 사용된 기기는 일본 Olympus사 제품의 급속표

면 측정용 현미경으로 배율은 150배이다. 현미경으로 콘크리트의 기포조직을 측정한 결과를 이용하여 공기포의 평균길이, 비표면적, 공기량 및 간격계수 등을 구한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압축강도에 미치는 공기량의 영향

압축강도의 측정결과가 Table.6에 주어져 있다. 재령별 압축강도비는 압축강도가 400~500kg/cm² 정도의 고강도 콘크리트에서 재령7일에서의 압축강도가 재령28일의 압축강도에 대해 0.75~0.85정도로 보통콘크리트의 비 0.65~0.75에 비해 큰값을 나타내고 있다. 이 이유에 대해서는 고강도 콘크리트에서는 단위시멘트량이 많으므로 양생초기에 수화열이 높아 수화작용을 촉진시키고 또 물·시멘트비가 작으므로 시멘트풀이 응결할 때 시멘트 입자간의 간격이 좁아 수화현상이 빨라지기 때문인 것으로 본다.

Fig.2는 공기량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것으로 회귀分析에 의해 압축강도 σ_{28} (kg/cm²)과 공기량 A(%)과의 관계는 식(4.1)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} W/C=30\% \text{에서 } \sigma_{28} &= 496 - 18.8 \times A \\ W/C=35\% \text{에서 } \sigma_{28} &= 467 - 17.0 \times A \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Fig.2에서 보듯이 공기량이 증가할수록 압축강도는 감소하고 있는데 본 실험에서는 대체적으로 공기량 1% 증가에 대하여 압축강도는 4% 정도 감소하고 있다. 감소 원인에 대해서는 콘크리트속의 공기량이 증가할 수록 콘크리트의 밀도가 작아져 치밀성이 감소되기 때문이다.

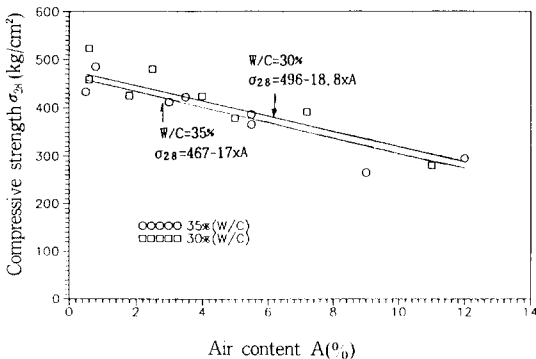


Fig.2 Relationships between Air Content and Compressive Strength

Table.6 Compressive Strength and Durability Factor

Test No.	Air (%)	Comp. strength (kg/cm ²)	Comp. strength (kg/cm ²)	Comp. strength (kg/cm ²)	I.D.M.EI ¹⁾ (kg/cm ²)	Final Cycle No.	R.D.M.EF ²⁾ (%)	D.F ³⁾ (%)
A-35-1	0.5	225	329	433	52800	65	60	13
A-35-2	3.0	222	309	412	52200	210	60	42
A-35-3	5.5	201	271	365	47200	310	85	85
A-35-4	9.0	146	190	265	42300	300	97	97
A-30-1	0.6	251	356	458	54100	70	60	14
A-30-2	1.8	213	332	425	53400	90	60	18
A-30-3	5.0	208	287	378	48400	300	92	92
A-30-4	11.0	171	204	280	43900	300	101	101
A-25-1	0.9	319	412	515	54400	90	60	18
A-25-2	2.7	304	368	486	51700	230	60	46
A-25-3	5.6	274	310	392	49500	300	98	98
A-25-4	11.0	191	243	308	44900	300	102	102
B-35-1	0.8	306	403	485	54000	80	60	16
B-35-2	3.5	296	359	422	52500	250	60	50
B-35-3	5.5	239	309	386	45100	300	90	90
B-35-4	12.0	207	236	295	42800	300	99	99
B-30-1	0.6	324	429	523	55300	90	60	18
B-30-2	2.5	293	413	480	54300	270	60	54
B-30-3	4.0	233	339	424	50700	300	90	90
B-30-4	7.2	258	313	391	49200	300	98	98

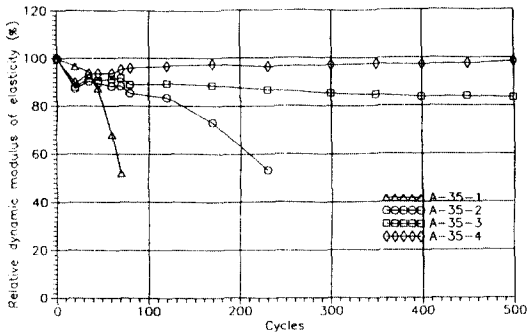
- 1) Initial Dynamic Modulus of Elasticity.
- 2) Relative Dynamic Modulus of Elasticity.
- 3) Durability Factor.

4.2 내동해성에 미치는 공기량 및 물·시멘트비의 영향

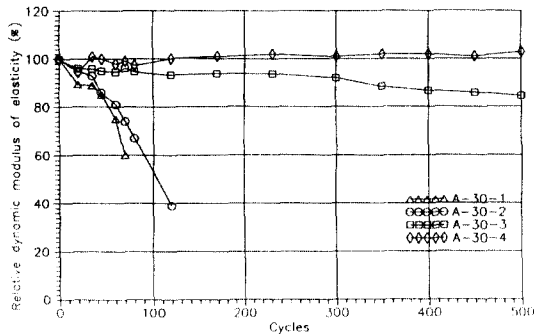
동결융해시험에 의한 내구성 결과가 Table.6에 나타나 있다. 콘크리트의 내동해성에 가장 영향을 크게 미치는 요소는 공기량이며 이외의 물·시멘트비나 강도와의 관계가 있는 것으로 알려져 있다.^(26,27) Fig.3은 5종류의 배합에서 공기량을 변화시켰을 때의 상대동탄성계수를 알아본 것으로 각 배합에 대하여 물·시멘트비가 같더라도 공기량의 증가에 따라 콘크리트의 내동해성을 평가하는 상대동탄성계수는 점차 증가하고 있음을 보여준다. 반면 Fig.4는 공기량을 같게한 조건에서 물·시멘트비를 변화시켰을 때의 상대동탄성계수를 알아본 것이다. 물·시멘트비 25~35% 범위에서는 물·시멘트비가 낮더라도 내구성에는 특별한 개선점을 발견할 수 없었다. 특기할만한 사항은 Non-AE의 고강도 콘크리트 (Fig.4(a) 참조)의 경우 물·시멘트비 25%의 경우에도 내구성지수는 18%(Table.6 참조)에 불과해 내구성향상에 기여하지 못함을 알 수 있었다. 따라서 고강도 콘크리트에서는 단지 물·시멘트비의 감소로 인한 내구성의 증가보다는 공기량 증가로 인한 내구성 증진이 더 바람직함을

알 수 있다.

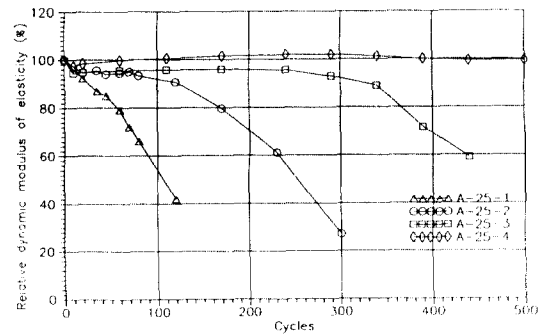
콘크리트의 내동해성에서 기포의 역할에 대해서는 서론에서 설명한 바와 같이 콘크리트 내의 물이 동결할 때 발생하는 내압을 완화시켜주므로 적당량의 공기를 함유한 AE콘크리트는 동결융해작용에 대하여 내동해성이 우수한 것이다.



(a) W/C=35%

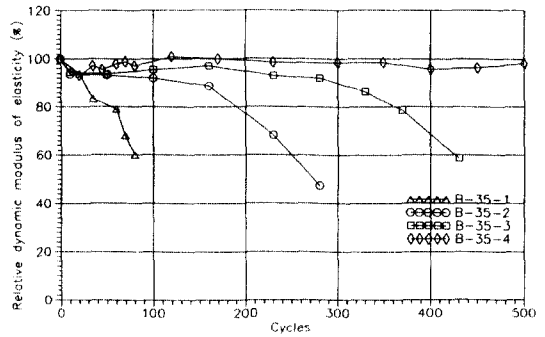


(b) W/C=30%

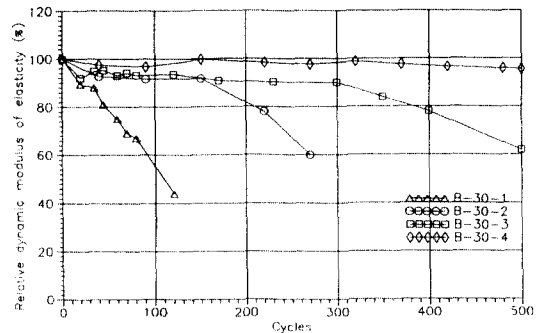


(c) W/C=25%

(1) Unit Cement Content 500kg/m³



(d) W/C=35%



(e) W/C=30%

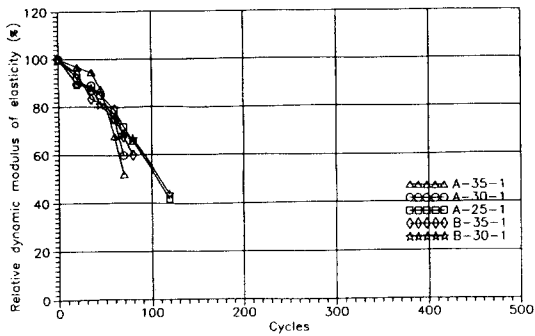
(2) Unit Cement Content 550kg/m³

Fig.3 Relationships between Air Content and Relative Dynamic Modulus of Elasticity

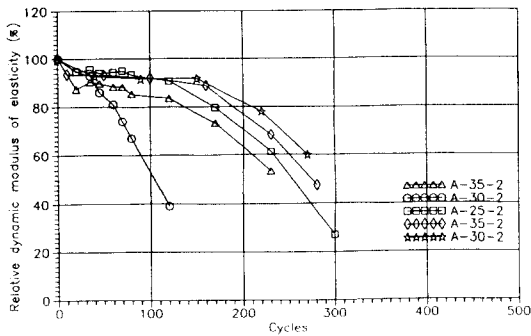
Fig.5는 물·시멘트비가 각각 25%, 30% 및 35%인 경우의 공기량과 내구성지수와와의 관계를 나타낸 것이다. 내동해성에 극히 우수한 내구성지수 90%에 해당되는 공기량은 대략 5% 전후이며 이 값 이상에서도 내구성은 우수함을 알 수 있다. 그러나 Fig.2에서 보는 바와 같이 공기량이 증가할 수록 압축강도는 상대적으로 저하하기 때문에 콘크리트의 동결융해저항성과 압축강도를 동시에 만족하는 최적공기량은 역시 5%정도로 보아야 한다.

4.3 내동해성에 미치는 기포조직의 영향

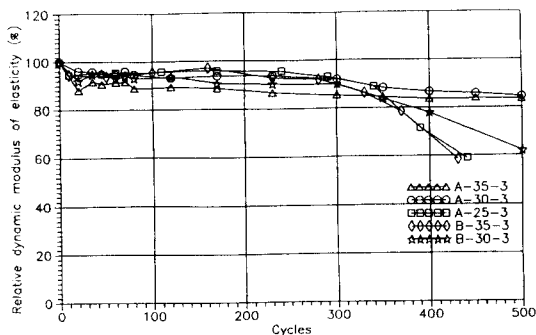
현미경에 의한 균콘크리트의 기포조직 및 공기량측정 값이 Table.7에 주어져 있다. Fig.7는 공기량과 간격계수와의 관계를 나타낸 것으로 공기량 증가에 따라 간격계수는 감소하고 있다.^(17,18)



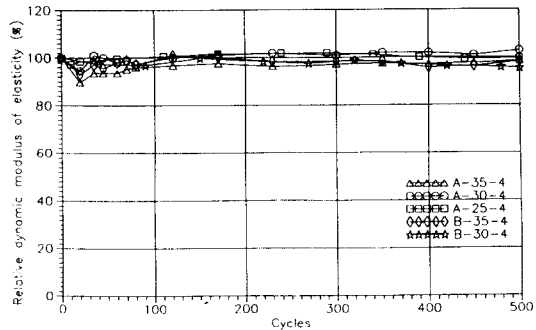
(a) Air Content 1.5% under (Non-AE Concrete)



(b) Air Content 1.6~3.5% under (AE Concrete)



(c) Air Content 4~6% under (AE Concrete)



(d) Air Content 7% over (AE Concrete)

Fig.4 Relationships between Water-Cement Ratio and Relative Dynamic Modulus of Elasticity (Unit Cement Content 500 kg / m³)

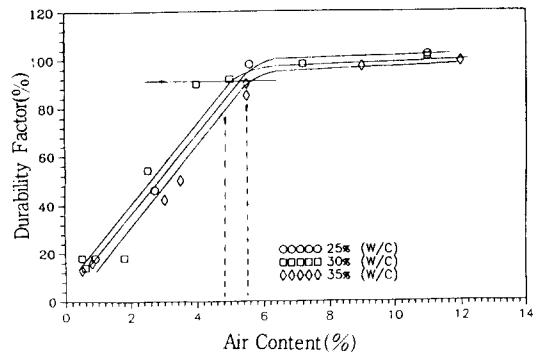


Fig.5 Relationships between Air Content and Durability Factor

Table.7 Test Results of Void System

Test No.	Specific Surface Σ (mm ² /mm ³)	Air * A (%)	Paste Ratio p(%)	p/A	Spacing Factor L (μm)	Durability Factor (%)
A 35-1	18.78	1.38	33.92	23.86	494	13
A 35-2	21.20	2.47	33.80	13.70	343	42
A 35-3	22.33	5.18	33.80	6.53	234	85
A 35-4	24.38	8.23	32.92	4.00	164	97
A 30-1	17.50	1.51	30.46	20.14	492	14
A 30-2	17.10	1.91	31.27	16.39	461	18
A 30-3	19.30	5.04	31.27	6.21	264	92
A 30-4	17.90	9.18	30.46	3.32	185	101
A 25-1	15.09	1.67	27.97	16.73	526	18
A 25-2	18.51	2.39	27.97	11.70	367	46
A 25-3	21.01	4.89	28.74	5.87	237	98
A 25-4	21.39	8.80	28.74	3.26	153	102
B 35-1	22.93	1.21	36.46	30.23	445	16
B 35-2	23.66	2.44	37.18	15.21	322	50
B 35-3	20.22	4.75	37.18	7.83	280	90
B 35-4	24.29	11.70	36.46	3.12	128	99
B 30-1	20.55	1.17	33.65	28.82	487	18
B 30-2	26.97	2.03	34.40	16.94	296	54
B 30-3	25.87	3.78	33.65	8.90	232	90
B 30-4	23.15	6.59	34.40	5.22	204	98

※ Air Content of Hardened Concrete

본 연구의 주안점인 고강도콘크리트의 기포조직 특히 간격계수가 내동해상에 미치는 영향에 대해 그림으로 나타낸 것이 Fig.7.이다. 일반적으로 내구성지수가 60% 이상이면 내구성에 대해 만족한 것으로 평가하지만 여기서는 극히 우수한 90% 이상을 임계내구성지수로 규정할 때 이에 대응하는 간격계수의 값은 본 실험에서는 물·시멘트 25%에서 280μm, 30%에서 250μm, 35%에서는 210μm로 측정되었다. 이 값은 ASTM C 457에서 권장된 보통콘크리트의 간격계수 200μm 이하보다 크게

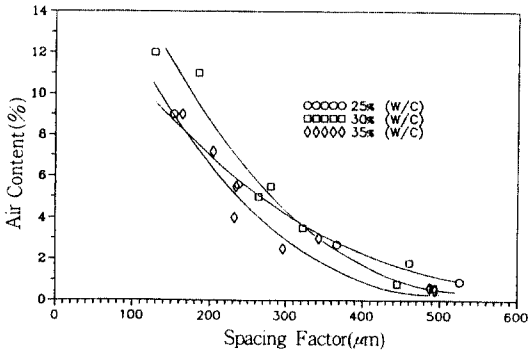


Fig.6 Relationships between Air Void Content and Spacing Factor.

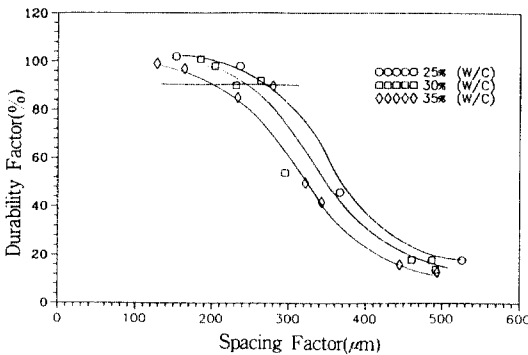


Fig.7 Relationships between Spacing Factor and Durability Factor.

나타났는데, 이것은 고강도 콘크리트에서는 시멘트풀의 강도가 증가함에 따른 수압저항능력이 향상되었기 때문이며, 굽은골재의 최대치수가 같더라도 물·시멘트비가 작아지면 작아질 수록 임계내구성지수에 상당하는 간격계수는 좀 커진다는 사실이다.

5. 결론

본 연구에서는 단위시멘트량, 물·시멘트비 및 공기량을 변수로 한 고강도 콘크리트에 대하여 압축강도, 동결융해시험 및 기포조직 등을 측정된 결과로부터 강도, 물·시멘트비, 공기량, 간격계수 등이 동결융해저항성에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. AE제를 사용한 고강도 콘크리트에서 공기량의 증가는 동결융해에 대한 내구성을 증가시키지만 강도면에서는

공기량 1%증가에 대하여 압축강도는 4%정도 감소한다.

2. AE제를 사용치 않은 고강도 콘크리트에서 물·시멘트비와 내구성과의 관계는 비록 물·시멘트비가 낮아 하더라도(W/C=25~35%범위) 내구성 향상에는 별로 기여하지 못함을 알 수 있다. 결국 물·시멘트비 보다는 공기량의 증가가 내구성에 더 많은 영향을 미친다. 공기량이 많으면 기포의 간격계수는 작아지며, 간격계수와 내구성지수와의 관계가 본 실험에서는 굽은골재의 최대치수가 25mm로 일정한 경우라도 임계내구성지수에 대응하는 간격계수는 물·시멘트비에 따라 다르게 측정되었다. 즉 W/C=25%에서 280 μ m, W/C=30%에서 250 μ m, W/C=35%에서 210 μ m 임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Powers, T.C., "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.41, No.4, 1945, pp.245-272.
2. Powers, T.C. and Helmuth, R.A., "Theory of Volume changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing", Proceedings, Highway Research Board, Vol.32, 1953, pp.285-297.
3. Cordon, N.A., "Freezing and Thawing of Concrete", ACI Monograph No.3, 1966, pp.5-15, 23-40, 51-53.
4. Pigeon, M.Prevst, J and Jean, M.S., "Freezing-Thawing Durability Versus Freezing Rate", ACI Journal, Proceedings Tech No.82-61, 1985, pp.684-692.
5. Kennedy, H.L., "The Function of Entrained Air in Potland Cement", ACI Journal, Proceedings Vol. 40, No.6, June 1985, pp.515-517.
6. Meissner, Harmon S., "Laboratory Freezing and Thawing Tests on Concrete containing Various Air-Entraining Agents", ACI Journal, Proceedings Vol.40, No.6, June 1944, pp.517-522.
7. Davis, Raymond E., "Entrained Air Beneficial in Freezing and Thawing Tests", ACI Journal, Proceedings Vol.40, No.6, June 1944, pp.522.

8. Hogentogler, C.A. and E.A.Willis, "Discussion on the Durability of Concrete", Proceedings, Highway Research Board, Vol.10, 1930, pp.164-205.
9. Jackson, F.H., "Relationship between Durability of Concrete of Aggregates", Proceedings, highway Research Board, Vol.10, 1930, pp.103-113.
10. Long, F.C. and C.A.Hughws, "Discussin in Relation Between Durability of Concrete and Durability of Aggregate", Proceedings, Highway Research Board, Vol.10, 1930, pp.113-131.
11. Neville, A.M., "Properties of Concrete", Great Britian, 1981, pp.25-30.
12. Scholer, C.H., "Durability of Concrete", Proceedings, Highway Research Board, Vol.10, 1930, pp. 132-163.
13. Powers, T.C., "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste", J.Amer. Ceramic Soc., 41, Feb. 1958, pp.1-6.
14. Verbeck, G.J., "Pore Structure", ASTM Sp. Tech. Publicn. No.169, 1956, pp.136-142.
15. Stark, D., "Characteristics and Utilization of Coarse Aggregates Associated with D-Cracking", ASTM Sp. Tech.Publicn. No.579, 1976, pp.45-58.
16. Powers, T.C., "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", Proceedings, Highway Research Board, Vol.29, 1949, pp.184-211.
17. Mielenz, R.C., Backstrom, J.E., Burrows, R.W., Wolkodff, V.E. and Flack, H.I., "Orign, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.55, No.1-3, July-Sept. 1958, pp.95-122, 261-272, 359-376.
18. Powers, T.C., "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.9, May 1958, pp.741-760.
19. ACI Committee 212, ACI Journal, Proceedings Vol.60, Nov. 1963, pp.1481-1524.
20. Weston. T.Hester, "High-Strength Concrete", 1990.
21. 김생빈, "고강도 콘크리트의 내구성에 관한 연구", 대한토목학회지 논문집, 제1권, 제1호, 1981.12, pp. 9-19.
22. 김동신, "굳은 콘크리트의 동결기구에 관한 연구", 동국대학교, 1985.
23. 임상혁, "동결융해를 받는 굳은 콘크리트에서의 기포 조직의 영향", 동국대학교, 1989.
24. 한국콘크리트학회, "고강도콘크리트 실용화 연구", 1991.1.
25. 한국과학기술연구원, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구(Ⅲ)", 1990. 6.
26. 鎌田英治, "セメント硬化體の微細構造とコンクリートの凍結", 콘크리트工學 Vol.19, No.11, Nov. 1981, pp.36-42.
27. 鎌田英治, "凍結融解抵抗性(耐凍害性)", 콘크리트工學 Vol.22, No.3, March 1984, pp.38-46.
28. 콘크리트工學年次論文報告集, "高強度콘크리트의耐凍害性に關する實驗的 研究", 1990, pp.691-696.
29. 콘크리트工學年次論文報告集, "空氣量, 氣泡分布, 細孔分布が高強度콘크리트의耐凍結融解性に及ぼす影響", 1990, pp.679-684.

(접수일자 : 1991. 12. 9)