
고로슬로그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 동결융해 저항성에 관한 연구

A study on Freezing and Thawing Resistance of Concrete
with the Ratio of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Replacement



최세규*
Choi, Se Gyu



김생빈**
Kim, Saeng Bin

ABSTRACT

Concrete using ground granulated blast-furnace slag is susceptible to a frost attack because the reaction of hydration is slow at early ages.

In this study, the freezing and thawing tests have been carried out in order to investigate the freezing and thawing resistance of concrete using ground granulated blast-furnace slag by varying the ratio of slag replacement and water-cementitious material ratio. Also, the effects of the air-entrance freezing and thawing resistance of concretes using ground granulated blast-furnace slag are investigated.

Test results show that the freezing and thawing resistance decreases as the ratio of slag replacement increases. For the non air-entrained concretes, the durability factors were below 2.4% and 40.0% for the water-cementitious material ratio 51% and 45% respectively. However, it was shown that the air-entrance considerably increases the freezing and thawing resistance. The durability factors of the air-entrained concretes were above 90.2% and 80.9% for the water-cementitious material ratio 45% and 51% respectively.

* 정회원, 동국대 토목공학과 박사수료

** 정회원, 동국대 토목공학과 교수

keywords : ground granulated blast-furnace slag, freezing and thawing test, ratio of slag replacement, water-cementitious material ratio, durability factor.

1. 서론

고로슬래그는 제철소에서 선철을 제조할 때 생성되는 부산물로서 1980년대 초반까지만 해도 재활용에 대한 연구가 미흡하여 매립용재료, 도로포장재료 등으로만 이용되었으나, 최근 선진 각국에서는 고로슬래그를 콘크리트용 골재로 이용하는 방법¹⁾이나 고로슬래그 미분말을 보통포틀랜드 시멘트 클링커에 혼합하여 제조한 고로슬래그 시멘트로 사용하는 방법, 콘크리트 배합시 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용하는 방법 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 영국, 미국, 캐나다, 일본 등에서는 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용하는 방법이 일반화되어 있고 사용실적도 상당히 많다.

우리나라의 경우 포항과 광양만 제철소에서 연간 수 천만톤의 고로슬래그가 생산되고 있으며 시멘트 대체재로서 그 가치를 서서히 인정받아 1986년 공업진흥청에서 「고로슬래그 시멘트(KS L 5210)」를 규격화 하였으며, 1995년에는 대한토목학회에 의해 「고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공지침」이 제정되었다.

고로슬래그 미분말을 적절히 사용하면 보통콘크리트에 비해 장기강도의 증진효과를 얻을 수 있으며, 수화열로 인한 온도상승을 억제시키고, 황산염이나 해수 등에 대한 화학저항성의 향상 및 알칼리 골재반응의 억제 등의 효과가 있다.²⁾ 그러나 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 혼합하여 사용하면 수화반응의 속도가 느려져 강도가 늦게 발현되므로³⁾ 어린재령시 동해(凍害)를 입을 경우에 대하여 고려해야 할 필요성이 있다. 더욱이 우리나라 중북부 지방의 겨울철 기후는 밤과 낮의 기온차가 크므로 콘크리트의 동결과 융해의 반복이 잘 일어나고 이로 인해 콘크리트 구조물이 손상을 입기 쉽다.⁴⁾

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해에 대한 내구성을 알아보기 위해 다음과 같이 실험을 하였다. 먼저 시멘트의 치환율이

따라 강도가 다르게 발현되므로 단위시멘트중량의 0%, 20%, 40% 및 60%를 고로슬래그 미분말로 치환하여 치환율이 동결융해 저항성에 미치는 효과를 알아보았으며, 각 치환율별로 물-결합재비를 45%와 51%로 각각 변화시켜 물-결합재비의 변화에 따른 동결융해 저항성을 분석하였다. 또한 동일한 치환율, 물-결합재비의 콘크리트에 AE제를 첨가시켜 연행공기로 인한 동결융해 저항성의 개선효과도 알아보았다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 어린재령시 동결융해 작용을 받았을 경우 그 저항성을 알아보기 위해 단위시멘트중량의 20%, 40% 및 60%를 고로슬래그 미분말로 각각 치환하고, 물-결합재비를 45%와 51%로 각각 변화시켜 제조한 콘크리트에 대해 KS F 2456⁵⁾에 따라 재령 14일에서 공기중 급속동결 수중 급속융해의 방법으로 동결융해시험을 실시하였다. 또한 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 보통콘크리트에도 동일한 시험을 실시하여 이와 비교분석하였다.

내구성을 고려한 적절한 공기량인 4~6%를 목표로 일정량의 AE제를 첨가하여 제작한 AE콘크리트에 대하여 동결융해시험을 실시하여 AE제를 첨가하지 않은 콘크리트와 그 저항성을 비교함으로써 AE제 사용에 따른 동결융해 저항성의 개선효과를 알아보았다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트와 고로슬래그 미분말

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 D사 제품인 1종 보통포틀랜드 시멘트(이하 NPC)이며, 고로슬래그 미분말(이하 GS)은 포항제철소에서 생산되는 제품을 사용하였다. 각각의 물리적 성질과 화학적 특성은

다음 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of Cement and Ground Granulated Furnace-Blast

Material	Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting Time (hr : min)		Compressive (kg/cm ²)		
			Initial	Final	σ_1	σ_2	σ_3
NPC	3.15	3434	3:15	6:30	210	265	350
GS	2.9	5500	-	-	-	-	-

Table 2 Chemical properties of Cement and Ground Granulated Furnace-Blast

Item Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss on ignition
NPC	20.08	5.88	3.33	62.71	2.76	2.23	0.41
GS	55.08	14.92	0.38	12.26	6.41	0.11	-

2.2.2 잔골재와 굵은골재

잔골재 및 굵은골재는 한강 상류지역에서 채취한 것을 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of Aggregate

Type	Max. size(mm)	Specific Gravity	Absorption Ratio (%)	F. M.
Fine Aggregate	-	2.58	0.72	1.98
Coarse Aggregate	25	2.73	0.93	6.60

또한 혼화제는 국내 생산제품인 리그닌 설폰산염계 AE제를 사용하여 연행공기를 도입시켰다.

2.3 배합설계

보통포틀랜드 시멘트만을 사용하여 재령 28일 압축강도 200~240kg/cm² 및 240~270kg/cm²을 목표로 시적배합설계 하였으며, 슬럼프는 8±1cm, 굵은골재 최대치수는 25mm로 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 사용량은 Table 4의 배합설계표와 같이 단위시멘트량을 고로슬래그 미분말로 일정량 치환하여 배합하였다.

2.4 공시체 제작 및 시험방법

콘크리트의 배합은 배합설계표를 기준으로 1배치 (50 l)분씩 계량하여 중력식 믹서로 배합하였으며, 굵은골재와 잔골재를 먼저 믹서에 투입하여 1분간의 건비빔을 한 후, 시멘트와 고로슬래그 미분말을 믹서에 투입하고 믹서 중에서 균등하게 분산되도록 다시 건비빔을 1분간 하였다. 연행공기를 도입시키기 위해 사용한 AE제는 미리 물에 용해시킨 후 믹서에 투입하여 3분간 비빔을 하였다.

동결융해시험용 공시체는 7.5×10×40cm의 각주형 공시체로, 압축강도 측정용 공시체는 10×20cm

Table 4 Mix Proportions of Concrete

Specimen	Coarse Aggregate Max. size (mm)	Water Cementitious material Ratio (%)	Fine Aggregate Ratio (%)	Unit Weight (kg/m ³)					AE (g/m ³)
				Water	Cementitious material		Fine Aggregate	Coarse Aggregate	
					Cement	Ground Granulated Furnace-Blast Sals			
51-NPC	25	51	36	175	341	0	655	1223	-
51-GS20	25	51	36	175	273	68	655	1223	-
51-GS40	25	51	36	175	205	136	655	1223	-
51-GS60	25	51	36	175	136	205	655	1223	-
51-NPC AE	25	51	36	175	341	0	655	1223	47.74
51-GS20 AE	25	51	36	175	273	68	655	1223	47.74
51-GS40 AE	25	51	36	175	205	136	655	1223	47.74
51-GS60 AE	25	51	36	175	136	205	655	1223	47.74
45-NPC	25	45	36	175	390	0	655	1223	-
45-GS20	25	45	36	175	312	78	655	1223	-
45-GS40	25	45	36	175	234	156	655	1223	-
45-GS60	25	45	36	175	156	234	655	1223	-
45-NPC AE	25	45	36	175	390	0	655	1223	55.60
45-GS20 AE	25	45	36	175	312	78	655	1223	55.60
45-GS40 AE	25	45	36	175	234	156	655	1223	55.60
45-GS60 AE	25	45	36	175	156	234	655	1223	55.60

51-GS20 AE
 → AE제를 첨가한 콘크리트
 → 고로슬래그 미분말의 치환율
 → 건입량 배비

의 원주형 공시체로 재령별 3개씩 제작하였다.

성형한 콘크리트는 24시간 동안 상온에서 경화시켰으며 탈형 즉시 수온 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수조에서 수중양생을 하였다.

동결융해시험은 공기중 급속동결 수중 급속융해의 방법에 의해 전자동 동결융해시험기를 사용하였으며, 이 때 공시체의 온도는 동결완료시 -17°C , 융해완료시 $+4^\circ\text{C}$ 가 되게 하였고, 동결융해의 1사이클은 약 2.5시간이 소요되었다.

콘크리트의 동결융해 저항성을 알아보기 위해 BS 4408 part 5에 규정된 초음파 속도에 의한 동탄성계수 시험법에 의하여 동탄성계수를 산정하였다.

상대동탄성계수 및 내구성지수는 아래의 식으로 구하였으며, 동결융해 반복이 300사이클이 되거나 상대동탄성계수가 60% 이하로 될 때 시험을 완료하였다.

콘크리트의 전파속도는 PUNDIT로 측정된 전파시간을 이용하여 아래의 식 (1)에 의하여 구한다.

$$V \ell = \frac{\ell}{t} \quad (1)$$

여기서, $V \ell$: 전파속도(km/sec)
 ℓ : 공시체길이(cm)
 t : 전파시간(sec) 이다.

콘크리트의 동탄성계수는 콘크리트의 전파속도를 이용하여 식(2)로 계산한다.

$$E_b = \frac{V_t^2 \times \rho \times 10^7}{g} \quad (2)$$

여기서, E_b : 동탄성계수(kg/cm²)
 ρ : 공시체의 밀도
 g : 중력가속도(cm/sec²) 이다.

콘크리트의 동결융해에 대한 내구성지수는 식(3)으로 구한다.

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (3)$$

여기서, DF : 내구성지수 (Durability Factor)
 N : 동결융해시험을 마친 사이클의 수

P : N사이클에서의 상대동탄성 계수

M : 동결융해시험 목표 사이클수 (300cycle) 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 측정결과

동결융해시험을 실시한 재령 14일에서의 압축강도와 표준강도인 재령 28일에서의 압축강도는 Table 5와 같다.

Table 5 Result of Compressive Strength

Specimen	Water-Cementitious material Ratio (%)	Slump (cm)	Air Content (%)	Compressive Strength (kg/cm ²)	
				σ_c	σ_{cs}
51-NPC	51	8.0	2.1	189	220
51-GS20	51	8.0	2.0	176	212
51-GS40	51	8.1	1.9	143	180
51-GS60	51	8.5	1.9	120	152
51-NPC AE	51	8.8	6.5	155	180
51-GS20 AE	51	9.4	6.2	141	172
51-GS40 AE	51	9.6	5.8	118	152
51-GS60 AE	51	11.1	5.8	100	136
45-NPC	45	8.0	2.0	242	270
45-GS20	45	8.0	1.9	221	256
45-GS40	45	8.2	1.7	200	247
45-GS60	45	8.4	1.6	150	203
45-NPC AE	45	8.3	4.3	224	243
45-GS20 AE	45	8.3	4.1	204	230
45-GS40 AE	45	8.6	3.9	170	222
45-GS60 AE	45	8.8	3.8	134	185

또한 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 슬럼프 및 공기량의 변화도 알아보았으며, 이에 대한 결과는 상기 표 5와 같다.

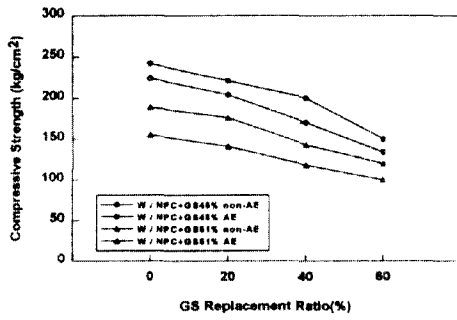
재령 14일과 재령 28일에 대한 고로슬래그 미분말의 치환율과 압축강도와의 관계는 Fig 1과 같다.

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도는 물-결합제비, AE제 사용유무, 재령에 관계없이 모두 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록 압축강도는 작게 측정되었다.

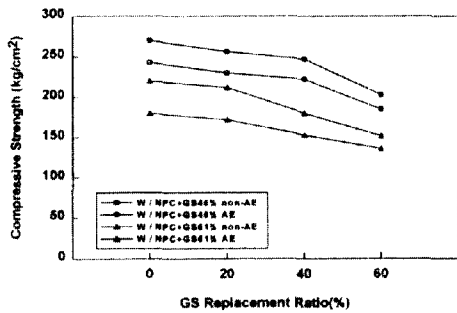
3.2 동결융해시험 결과

재령 14일에서 실시한 동결융해시험 결과는 다음 Table 6과 같다.

Fig 2는 상대동탄성계수의 변화와 고로슬래그 미



(a) Compressive Strength at 14days

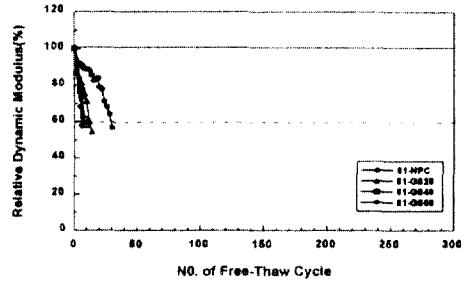


(b) Compressive Strength at 28days

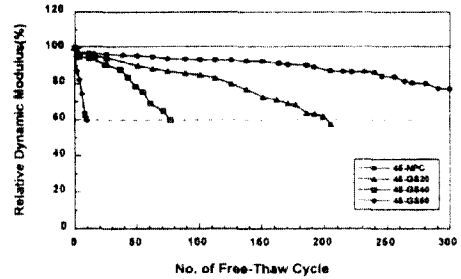
Fig. 1 Relationship between GS Replacement Ratio and Compressive Strength

Table 6 Result of Freezing and Thawing Test

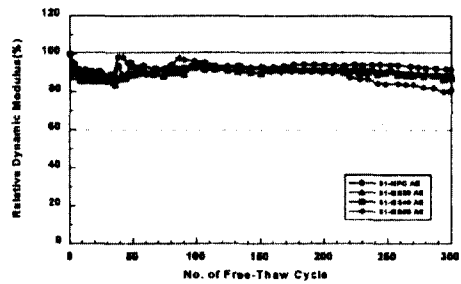
Specimen	No. of Final Cycle	Relative Dynamic Modulus(%)	Durability Factor(%)
51 NPC	20	60	5.8
51 GS20	12	60	2.1
51 GS40	9	60	2.8
51 GS60	6	60	2.2
51 NPC AE	300	91.8	91.8
51 GS20 AE	300	89.4	89.4
51 GS40 AE	300	87.1	87.1
51 GS60 AE	300	80.9	80.9
45 NPC	300	79.8	79.8
45 GS20	300	60	60.0
45 GS40	77	60	15.4
45 GS60	10	60	2.0
45 NPC AE	300	92.7	92.7
45 GS20 AE	300	91.6	91.6
45 GS40 AE	300	90.9	90.9
45 GS60 AE	300	90.2	90.2



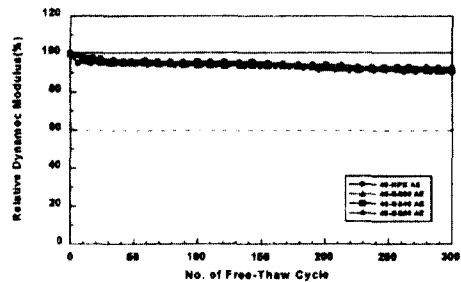
(a) non-AE Concrete (W / NPC+GS=51%)



(b) non-AE Concrete (W / NPC+GS=45%)



(c) AE Concrete (W / NPC+GS=51%)



(d) AE Concrete (W / NPC+GS=45%)

Fig. 2 Relationship between Ratio of GS Replacement and Relative Dynamic Modulus

분말의 치환율과의 관계를 나타낸 것이다.

동결융해시험결과 non-AE이고 불-결합재비 51%인 콘크리트의 경우 모두 동결융해 30사이클 이

내에서 상대동탄성계수가 60%에 도달하여 시험이

완료되었다. 고로슬래그 미분말의 치환율이 0%일 때 내구성지수는 5.8%이며, 치환율이 20%, 40%, 60%일 때의 내구성지수는 각각 2.4%, 1.8%, 1.2%로 나타나 모두 동결융해 내구성이 매우 나쁜 것으로 측정되었으며, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성은 낮은 것으로 나타났다.

물-결합재비 45%인 콘크리트의 경우 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트는 동결융해 300사이클에 도달하여 시험을 완료하였으며 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우 모두 상대동탄성 계수가 60%에 먼저 도달하여 시험이 완료되었다. 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트의 내구성지수는 76.8%이며, 고로슬래그 미분말의 치환율이 20%일 때 내구성지수는 40%, 치환율이 40%일 때 내구성지수는 15.4%, 치환율이 60%일 때 내구성지수는 2.0%로 나타나 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트의 동결융해 내구성은 비교적 양호한 것으로 나타났으나 치환율이 증가할수록 내구성은 급격히 저하되었다. 이는 고로슬래그 미분말을

사용한 콘크리트가 고로슬래그 미분말의 잠재수경성에 의해 재령 14일에서 보통콘크리트보다 수화속도가 느리고, 치환율이 증가할수록 더욱 수화속도가 느려져 동결시 콘크리트 내부에서 발생된 압력을 견딜 만큼의 강도가 발현되지 못했기 때문에 나타난 결과라고 사료된다.

non-AE콘크리트의 경우 압축강도는 AE콘크리트의 압축강도보다 작게 나타났지만 내구성지수는 물-결합재비가 45%와 51%인 경우 각각 90.2%, 80.9% 이상으로 나타나 AE제 사용에 따른 동결융해 내구성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

AE콘크리트와 non-AE콘크리트에 대한 내구성지수를 고로슬래그 미분말의 치환율에 따라 나타낸 것이 Fig. 3이다.

4. 결론

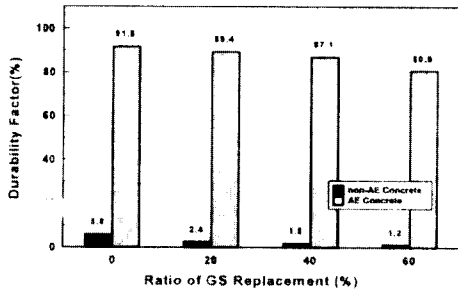
본 연구는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트가 이린재령시 동결과 융해의 반복작용을 받았을 때 나타나는 저항성을 알아보기 위한 실험적 연구로서 고로슬래그 미분말의 치환율, 물-결합재비를 변화시키고, AE제의 사용유무를 달리하여 동결융해시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 본 실험의 조건에서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 재령 28일까지의 압축강도는 물-결합재비, AE제 사용유무, 재령에 관계없이 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 작게 측정되었다.

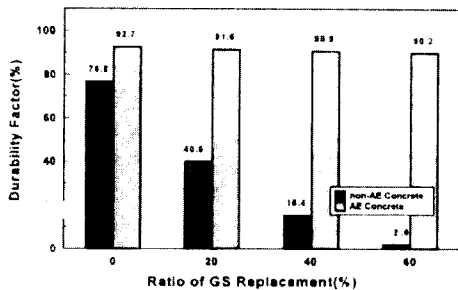
2) non-AE콘크리트 중 물-결합재비가 51%인 경우 내구성지수는 5.8% 이하로 모두 동결융해 내구성이 매우 나쁜 것으로 나타났으며, 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성은 낮은 것으로 나타났다.

3) non-AE콘크리트 중 물-결합재비가 45%인 경우 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트의 내구성지수는 76.8%로서 비교적 동결융해 내구성은 양호한 것으로 나타났으나, 고로슬래그 미분말의 치환율이 20%, 40%, 60%인 경우 내구성지수는 각각 40%, 15.4%, 2.0%로 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성이 급격히 저하되었다.

4) AE콘크리트의 경우 물-결합재비가 45%인 콘크리트의 내구성지수는 모두 90.2% 이상이며, 물-결



(a) (W / NPC+GS=51%)



(b) (W / NPC+GS=45%)

Fig. 3 Relationship between Ratio of GS Replacement and Durability Factor

합재비가 51%인 콘크리트의 내구성지수는 모두 80.9% 이상으로 나타나 동결융해 내구성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

따라서 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 구조물은 어린재령시 강도발현이 작아 동결융해에 노출되면 그 손상이 심각하게 발생할 수 있으므로 AE제 등을 사용하여 동결융해에 대해 저항성을 개선시켜야 한다.

참고 문헌

1. 공업진흥청, "콘크리트용 고로슬래그 굵은골재 (KS F 2544)," 1981.
2. 공업진흥청, "고로슬래그시멘트 (KS L 5210)," 1986.
3. 대한토목학회, "고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공지침," 1995, 8.
4. Swamy, R.N., "Cement Replacement Materials,"

Concrete Technology and Design, Vol. 3, 1986 pp.101-112.

5. Lea, F.M., "The Chemistry of Cement and Concrete," 3rd Edition, Chemical Publishing Co., New York, 1971, pp.454-489.
6. ACI COMMITTEE REPORT: "ACI 226, 1R-87: Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 84, No.4, August, 1987, pp.327-342.
7. 竹村明, "高爐スラグの性質とその水和反應性について," セメント技術年報 37, 1983 pp.81-84.
8. 남용혁, 최세규, 김동신, 김생민, "고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제8권 2호, 1996, 11, pp.148-153.
9. 韓國工業標準協會, "急速凍結融解에 대한 콘크리트의 抵抗試驗方法", KS F-2456, 1981, 12.

요약

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 수화속도가 느려 어린재령시 동해의 영향을 받기 쉽다. 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 동결융해 저항성을 알아보기 위해 고로슬래그 미분말의 치환율과 물-결합재비를 변화시켜 제조한 콘크리트에 대해 동결융해시험을 실시하였다. 또한 동일한 치환율, 물-결합재비의 콘크리트에 AE제를 첨가시켜 동결융해 저항성의 개선효과를 알아보았다.

시험결과 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 동결융해 저항성은 작게 나왔다. 또한 non-AE콘크리트의 경우 물-결합재비가 51%, 45%일 때 내구성지수는 각각 2.4%, 40.0%이하로 매우 나쁘게 나타났으나, AE콘크리트의 경우 물-결합재비가 45%와 51%인 콘크리트의 내구성지수는 각각 90.2%, 80.9%이상으로 동결융해 저항성이 매우 우수하게 나타났다.

(접수일자 : 1997. 8. 9)