

고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 내동해성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Frost Resistance of High-Strength Concrete Using Granulated Blast-Furnace Slag



김무한*

Kim Moo-Han



권영진**

Kwon Young-Jin



강석표***

Kang Suk-Pyo



박선규***

Park Sun-Gyu

ABSTRACT

This study is to investigate for the frost resistance of high-strength concrete using finely ground granulated blast-furnace slag with experimental parameters, such as water/binder ratio, replacement proportion of granulated blast-furnace slag, air content and methods of curing.

The high-strength concrete using granulated blast-furnace slag is effective to resist frost and decrease scaling. The more increasable replacement proportion of granulated blast-furnace slag is, the better the effect is. The high-strength concrete using granulated blast-furnace slag needs hydrating adequately to prevent deterioration by drying in the early curing period. The micro structure of high-strength concrete, increased to the pore number with diameter of 0.03~0.1mm, is changed by using granulated blast-furnace slag, but is presented differently according to water/binder ration and replacement proportion of granulated blast-furnace slag.

Keywords : high-strength concrete, granulated blast-furnace slag, frost resistance, micro structure, freezing and thawing

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수·공박

** 정회원, 상용엔지니어링 안전기술부 부장·공박

*** 정회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

산업부산물인 고로슬래그를 미세하게 분쇄시킨 고로슬래그 미분말을 고강도콘크리트 분야에서 활용하는 연구가 콘크리트 시공의 합리화, 콘크리트 구조물의 내구성향상, 에너지 절약화라는 견지에서 주목받고 있다.^(1,2)

물시멘트비가 매우 낮은 고강도콘크리트의 경우 동결온도범위에서 수분이 미동결 상태로 남게 되어 공기를 연행시키지 않은 고강도영역의 콘크리트에서도 동해발생 가능성은 적으며, 기존 연구에서도 공기를 연행시키지 않은 고강도콘크리트는 표준적인 동결융해시험에서 우수한 내동해성을 나타내었다.⁽³⁾

그러나 고강도콘크리트를 2년간 옥외폭로 후에 동결융해시험을 행한 결과 내동해성이 매우 취약한 것으로 나타나고 있어, 실제 구조체에서는 일사, 건조 등의 작용을 받기 때문에 고강도콘크리트가 표준양생의 조건에서 내동해성이 우수하더라도 공기의 연행이 필요하다고 보고되어 있다.⁽⁴⁾

따라서 본 연구는 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 물결합재비, 고로슬래그 미분말 혼입율, 공기량 및 양생방법에 따른 동결융해시험 및 기포조직 분석을 통하여 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 내동해성을 검토하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

본 연구는 Table 1에서 보는 바와 같이 2개의 시리즈로 구성되어져 있다. I 시리즈의 경우, 물결합재비 및 고로슬래그 미분말 혼입율에 따른 고강도콘크리트의 내동해성을 검토하기 위하여 물결합재비를 28, 35, 55%의 3수준, 고로슬래그 미분말 혼입율을 0, 40, 60%의 3수준으로 설정하였다. II 시리즈의 경우 공기량, 고로슬래그 미분말 혼입율, 양생방법 등에 따른 고강도콘크리트의 내동해성을 검토하기 위하여 목표공기량을 2.0, 3.5, 5.0%의 3수준, 고로슬래그 미분말 혼입율을 0, 40, 60%의 3수준, 동결융해시험 전의 양생방법을 2주수중양생, 4주수중양생, 2주기건양생의 3수준으로 설정하였다.

측정항목으로서는 굳지않은 콘크리트의 경우 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량, 경화된 콘크리트의 경우 동결융해시험 전의 압축강도, 동탄성계수, 기포직경 및 기포수를 측정하였다.

콘크리트 배합은 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트의 경우 목표슬럼프를 18cm로 설정하여, 소정의 공기량이 되도록 수 차례 예비 실험을 통하여 결정하였다. 또한 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 경우 고성능AE감수제의 첨가율을 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 콘

Table 1 Experimental factors and levels

Series	W/B (%)	Aiming air content (%)	Replacement proportion of BS* (%)	Curing method	Test item
I	28		0	· Water curing for weeks	- Fresh Concrete
	35	3.5	40		· Slump, Slump-Flow, Air content
	55		60		- Hardened Concrete
II	35	2.0	0	· Water curing for weeks · Water curing for weeks · Air curing for weeks	· Compressive strength
		3.5	40		· Dynamic modulus of elasticity (Durability factor)
		5.0	60		· Number of pore and pore diameter(Liner Traverse Method)

* Granulated blast-furnace slag

Table 2 Mix proportion of concrete and test results of fresh concrete

Series	W/B (%)	Aiming air content (%)	Replacement proportion of BS (%)	s/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					Dosage of SP (%)	Dosage of AE agent	Slump (cm)	Air content (%)
					W*	C*	BS*	S*	G*				
I	28	3.5	0	41.5	172	615	0	665	934	1.8	0.4	21.5	3.7
			40			368	246	659	923		1.5	14.0	3.8
			60			246	368	654	918		2.5	7.4	3.4
	35		0	44.7	172	492	0	764	939	1.0	0.4	18.5	3.1
			40			295	197	758	931		0.8	20.1	3.4
			60			197	295	756	926		1.8	18.4	3.5
	55		0	48.7	172	313	0	906	947	0.5	0.6	22.0	4.7
			40			188	125	903	942		1.1	20.9	5.5
			60			125	188	900	939		1.8	21.7	4.9
II	35	2.0	45.9	172	492	0	804	939	1.0	0	18.3	2.2	
					40	295	197	796		934	0	19.1	1.8
					60	197	295	793		928	0	16.6	1.7
	3.5	0	44.7	172	492	0	764	939	1.0	0.4	18.5	3.1	
		40			295	197	758	931		0.8	20.1	3.4	
		60			197	295	756	926		1.8	18.4	3.5	
	5.0	0	43.3	172	492	0	724	939	1.0	1.2	20.9	4.7	
		40			295	197	718	931		1.9	19.9	5.5	
		60			197	295	713	928		3.4	17.1	4.9	

* W : water, C : cement, BS : granulated blast-furnace slag, S : fine aggregate, G : Coarse aggregate

Table 3 Properties of using materials

	Type	Remarks
Binder	Ordinary portland cement	Specific gravity : 3.16 Fineness : 3,320cm ² /g
	Granulated blast-furnace slag	Specific gravity : 2.90 Fineness : 6,080cm ² /g
Fine aggregate	River sand	Specific gravity : 2.68 FM : 2.43 Absorption : 1.17%
Coarse aggregate	Crushed stone	Specific gravity : 2.64 FM : 6.69 Absorption : 2.82%
Chemical admixture	Superplasticize	Polycarboxylic ether type
	AE agent	Surface active agent of rosin type

크리트와 동일하게 하고, 공기량은 AE제의 첨가를 변화시킴으로써 조절하였으며, 본 연구의 콘크리트 배합 및 굳지않은 콘크리트의 측정결과를 Table 2에 나타내었다.

2.2 사용재료 및 비빔방법

본 연구에서는 결합재로서 보통포틀랜드시멘트 및 분말도 6,000 cm²/g 수준의 고로슬래그 미분말을 사용하였으며 각 사용재료에 대한 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

비빔방법은 강제식 팬타입믹서를 이용하여 잔골재 1/2 + 시멘트 및 고로슬래그미분말 + 잔골재 1/2(30초) → 물 + 혼화제(1분30초) → 굵은골재(4분)의 순서로 총 비빔시간은 6분이 소요되었다.

2.3 실험 방법

동결융해시험은 ASTM C 666에 준하여 시험체의 온도를 동결완료시 -18℃, 융해완료시 +5℃의 동결융해 반복을 1일 6사이클로하여 급속수중 동결융해시험을 실시하였다. 동해에 의한 전

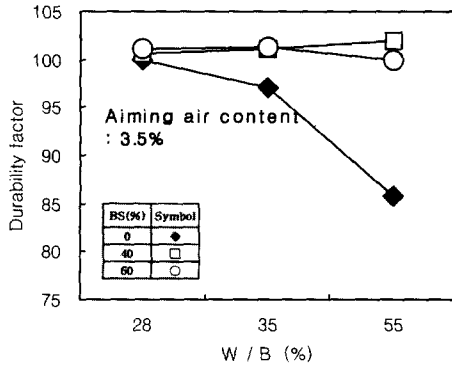


Fig. 1 Durability factor according to water/binder ratio

반적인 성능저하 지표로서 내구성지수, 표면층 스케일링의 지표로서 중량감소율을 측정하여 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 내동해성을 평가하였다.

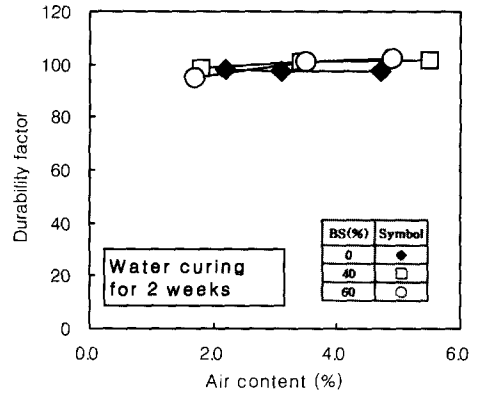
또한, 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 양생방법에 따른 내동해성을 검토하기 위하여 ASTM 규격의 동결융해시험에 있어 동결융해시험을 실시하기 위한 표준조건인 2주수중양생 이외에 4주수중양생, 2주기건양생(20℃, 60%RH)을 실시하였다.

경화된 콘크리트의 기포조직과 내동해성을 검토하기 위하여 기포직경 및 기포수는 ASTM C 457-71에 준하여 경화콘크리트를 절단한 평면상의 직선을 따라 횡단하는 총 기포수 및 기포길이를 측정하여 기포량 및 기포간격계수 등의 기포특성을 산출하는 Liner Traverse법으로 측정하였다.

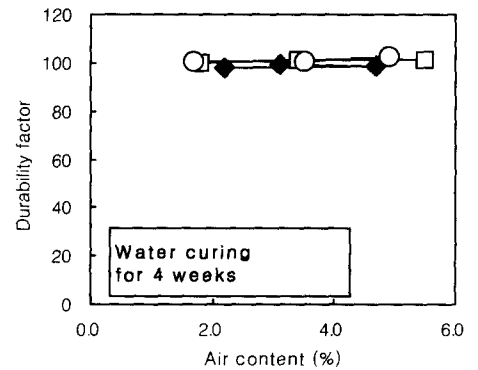
3. 실험결과 및 고찰

3.1 물결합재비에 따른 고강도콘크리트의 내동해성

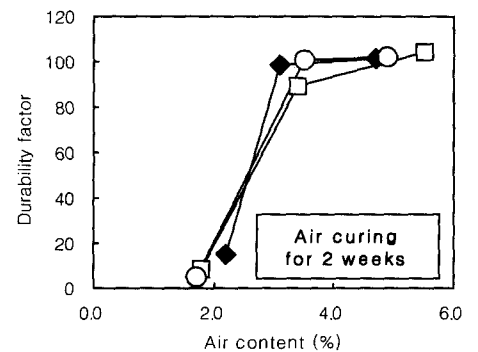
Fig. 1은 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 물결합재비와 내구성지수와의 관계를 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말 무혼입 콘크리트에서는 물결합재비가 증가할 수록 내구성지수가 저하하는 경향을 보이고 있지만 고로슬래그 미분말을 혼입



(a) Water curing for 2 weeks (W/B 35%)



(b) Water curing for 4 weeks (W/B 35%)



(c) Air curing for 2 weeks (W/B 35%)

Fig. 2 Durability factor according to curing method

한 경우, 고로슬래그 미분말 치환율 28% 이상에서는 물결합재비가 증가하더라도 내구성지수는 저하하지 않고 있어 고로슬래그 미분말이 콘크리트 내동해성에 유효한 것으로 판단된다.

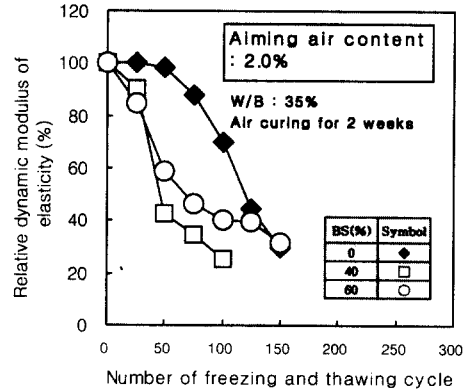
3.2 양생방법 및 공기량에 따른 고강도콘크리트의 내동해성

Fig. 2는 물결합재비 35%의 고강도콘크리트 양생방법에 따른 공기량과 내구성지수의 관계를 나타낸 것으로서 내구성지수는 전반적으로 양호한 것으로 나타나고 있으나, 2주기건양생의 경우 공기량 2%수준에서는 내구성지수가 현저하게 저하하는 경향을 보이고 있다.

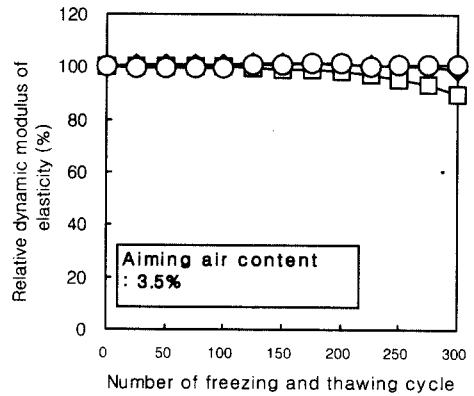
공기량 3.0% 이상인 경우, 양생방법 및 고로슬래그 미분말 혼입에 관계없이 90이상의 양호한 내구성지수를 보이고 있지만, 공기량 2.0%수준의 경우 2주 수중양생 및 4주 수중양생에서는 양호한 내구성지수를 나타내고 있는 반면 2주기건양생에서는 현저하게 내구성지수가 저하하고 있는데, 이는 건조에 의하여 내동해성이 저하된 것으로 판단되며 충분한 수화가 얻어질 수 있는 초기양생이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 3은 2주기건양생한 고강도콘크리트의 목표 공기량별 동결융해횟수에 따른 상대동탄성계수의 변화를 나타낸 것으로서 목표공기량 3.5% 및 5.0%의 경우 동결융해횟수 300사이클에서도 상대동탄성계수는 90%이상으로 양호하게 나타나고 있다.

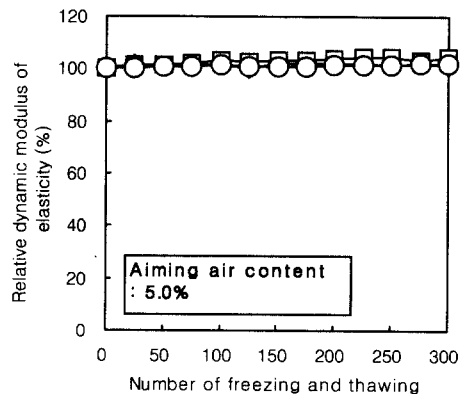
그러나, 목표공기량 2.0%의 경우 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 고강도콘크리트 뿐만 아니라 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트에서도 상대동탄성계수가 현저하게 저하하고 있다. 특히, 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 상대동탄성계수는 혼입하지 않은 고강도콘크리트와 비교하여 상대적으로 낮게 나타나고 있는데 이는 잠수경성 재료인 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트가 2주기건양생으로 인하여 충분히 양생이 되지 않은 상태에서 급속동결융해를 받았기 때문으로 사료된다.



(a) Aiming air content 2.0%

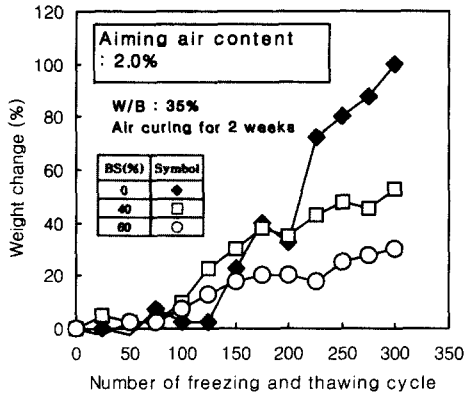


(b) Aiming air content 3.5%

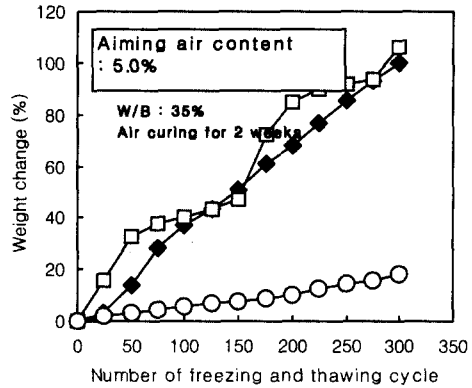


(c) Aiming air content 5.0%

Fig. 3 Relative dynamic modulus of elasticity according to aiming air content



(a) Aiming air content 2.0% (W/B 35%)



(b) Aiming air content 5.0% (W/B 35%)

Fig. 4 Weight change according to number of freezing and thawing cycle

3.3 고강도콘크리트의 스케일링에 미치는 고로슬래그 미분말의 영향

Fig. 4는 목표공기량별 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 고강도콘크리트의 동결융해횟수와 질량감소율과의 관계를 나타낸 것이다.

목표공기량 2.0%의 경우, 동결융해횟수 초기의 150사이클까지는 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트는 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 고강도콘크리트와 비교하여 상대적으로 질량감소율이 크게 나타나고 있지만, 150사이클 이후에는 고로슬래그 미분말 혼입율이 증가할수록 질량감소율이 작게 나타나고 있어 스케일링저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

그러나 목표공기량 5.0%의 경우, 동결융해 초기에 있어서도 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 콘크리트와 비교하여 질량감소율이 작게 나타나고 있어 공기량을 증가시킴으로서 초기 스케일링을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 기포조직

Fig. 5는 고로슬래그 미분말 혼입율에 따른 공

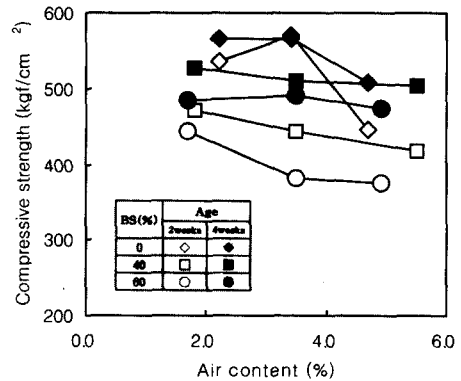
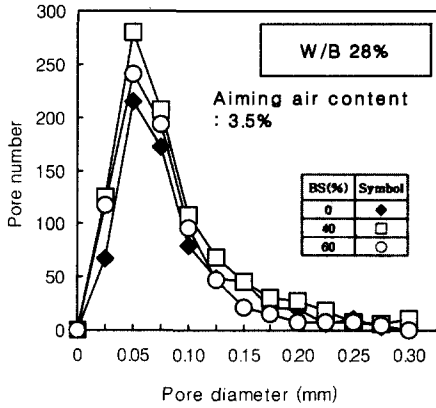


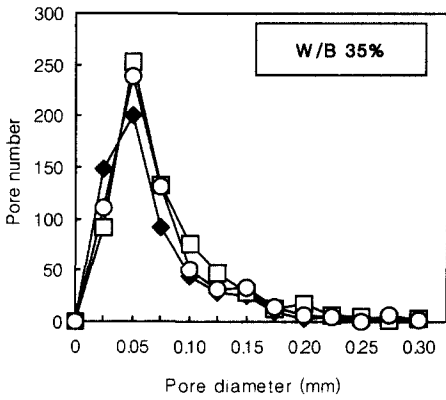
Fig. 5 Relation between compressive strength and air content

기량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것으로서 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 고강도콘크리트의 경우, 재령에 관계없이 공기량이 1%증가함에 따라 압축강도는 4.5%정도 저하하는 경향을 보이고 있지만, 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 경우 공기량에 따른 압축강도의 저하는 거의 보이지 않고 있어 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트와는 다르게 나타나고 있다.

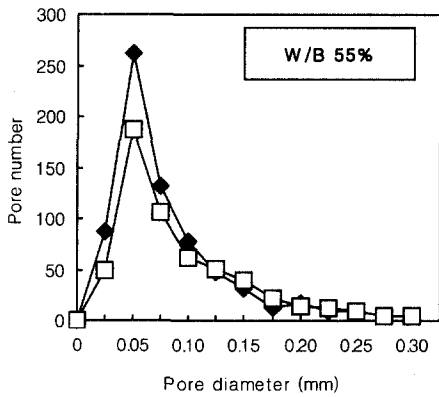
Fig. 6은 물결합재비별 고로슬래그 미분말 치환율에 따른 기포직경의 변화를 나타낸 것으로서 물결합재비 28% 및 35%의 경우 고로슬래그



(a) W/B 28%



(b) W/B 35%



(c) W/B 55%

Fig. 6 Pore distribution according to W/B

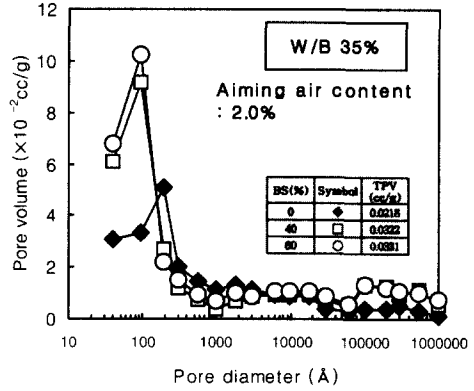


Fig. 7 Pore volume according to replacement proportion of BS

미분말을 치환한 콘크리트는 기포직경 0.03 mm~0.1 mm 범위의 기포수가 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트와 비교하여 상대적으로 많은 경향을 보이고 있다.

그러나 물결합재비 55%의 경우, 고로슬래그 미분말을 40% 치환한 콘크리트는 기포직경 0.03 mm~0.1 mm 범위의 기포수는 고로슬래그 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트와 비교하여 상대적으로 적은 경향을 보이고 있어 기포직경 분포에 미치는 고로슬래그 미분말의 영향은 물결합재비에 따라서 다르게 나타나고 있다. 이는 고로슬래그 미분말을 혼입함으로써 보통콘크리트 수준의 물결합재비 55%에서는 기포조직을 증대시키지만 결합재량이 증가하게 되는 낮은 물결합재비 수준에서는 직경이 작은 기포가 증대한다는 기존의 보고⁽⁴⁾와 일치하고 있다.

Fig. 7은 고로슬래그 미분말 혼입율에 따른 고강도콘크리트의 세공조직 분포를 나타낸 것으로서 고로슬래그 미분말을 혼입함으로써 총세공량이 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이는 고로슬래그 미분말의 혼입에 의하여 세공직경이 작은 공극이 형성되고 그 양이 무혼입콘크리트와 비교하여 증가된다는 기존의 보고⁽⁴⁾와 일치하고 있다. 그러나 일반적으로 동결융해에 관계하는 공극의 반경은 수 100~수 1000Å 정도인 것으로 알려져 있으며,^(5,6) 고로슬래그 미분말 혼입에 의하여 이 범위의 세공은 감소함으로써 Fig. 3(a)에 나

타낸 바와 같이 고로슬래그 미분말 무혼입 콘크리트와 비교하여 상대적으로 내구성지수가 저하한 것으로 사료된다.

4. 결 론

고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 물결합재비, 고로슬래그 미분말 혼입율, 공기량 및 양생방법에 따른 동결융해시험 및 기포조직 분석을 통하여 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 내동해성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고로슬래그 미분말의 혼입은 고강도콘크리트의 내동해성 향상 및 스케일링 저감에 효과가 있는 것으로 나타났으며, 고로슬래그 미분말 혼입율이 증가할수록 그 효과는 현저하였다.
- 2) 고로슬래그 미분말을 혼입한 고강도콘크리트에서는 양생방법, 특히 건조에 의해서 내동해성이 저하될 수 있는 것으로 나타나 충분한 수화가 이루어 질 수 있도록 초기양생이 필요하며, 충분한 내동해성을 확보하기 위해서는 공기량 3.5% 이상을 확보하여야 한다.
- 3) 고로슬래그 미분말의 혼입이 고강도콘크리트의 기포조직에 미치는 영향은 물결합재

비·혼입율에 따라 다르게 나타나고 있으나, 0.03~0.1mm 정도의 미세한 기포의 비율을 증가시켜 콘크리트의 내동해성이 향상되는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 日本建築學會編, 高爐スラグ微分末を用いたコンクリートの技術の現況, 1992, pp.55~60.
2. 加藤ら, 高強度コンクリート用混和劑に関する研究, 日本建築學會講演梗概集, 1991, pp.753~754.
3. 島崎ら, 高爐スラグを用いた高強度コンクリートの諸性質について, コンクリート工學年次論文報告集 Vol.13, No.1, 1991, pp.275~280.
4. 權・浜・鎌田・金, 高爐スラグ微分末を混入した高強度コンクリートの氣泡組織と耐凍害性, 自然暴露とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, 1993, pp.77~84.
5. 鎌田英治, 凍結融解抵抗性, 콘クリート工學, Vol.22, No.3, 1984, pp.38~46.
6. 山本ら, 高爐スラグを用いたコンクリートの耐凍害性, 콘クリート工學年次論文報告集, Vol.10, 1989, pp.355~360.
7. 洪悅郎, 鎌田英治, 콘크리트의凍害と初期凍害, 콘크리트工學, Vol.16, No.5, 1978, pp.1~10.
8. 김무한, 고로슬래그를 이용한 고강도콘크리트의 내동해성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1999.11, pp.671~674.

요 약

산업부산물인 고로슬래그를 미세하게 분쇄시킨 고로슬래그미분말을 고강도콘크리트 분야에서 활용하는 연구가 콘크리트 시공의 합리화, 콘크리트 구조물의 내구성향상, 에너지 절약화라는 견지에서 주목받고 있다. 본 연구는 고로슬래그미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 물결합재비, 고로슬래그미분말 혼입율, 공기량 및 양생방법에 따른 동결융해시험 및 기포조직 분석을 통하여 고로슬래그미분말을 혼입한 고강도콘크리트의 내동해성을 검토하고자 한 것이다.

본 연구의 결과 고로슬래그미분말의 혼입은 고강도콘크리트의 내동해성을 향상 및 스케일링 저감에 효과적인 것으로 나타났으며, 고로슬래그미분말 치환율이 증가할수록 그 효과는 현저하였다. 고로슬래그미분말을 혼입한 고강도콘크리트에서는 양생방법, 특히 건조에 의해서 내동해성이 저하될 수 있는 것으로 나타나 충분한 수화가 이루어 질 수 있도록 초기양생이 필요하다. 또한 고로슬래그미분말의 혼입이 고강도콘크리트의 기포조직에 미치는 영향으로써, 물결합재비·치환율에 따라 다르게 나타나고 있으나, 0.03~0.1mm 정도의 미세한 기포의 비율을 증가시켜 내동해성을 향상시키는 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2000. 2. 21)