해양환경을 고려한 다성분계 시멘트 콘크리트의 황산염 및 동결융해 저항 특성

김명식* · 백동일** · 강준호*

*부경대학교 토목공학과

**한국해양대학교 토목공학과

Sulfate and Freeze-thaw Resistance Characteristic of Multi-component Cement Concrete Considering Marine Environment

Myung-Sik Kim*, Jun-Ho Kang* and Dong-Il Beak**

*Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Pusan, Korea

**Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Pusan, Korea

KEY WORDS: Freeze-thaw attack 동결융해 열화, Sulfate attack 황산염 침식, Fly ash 플라이애시, Ground granulated blast slag 고로슬래그, Mata-kaolin 메타카올린

ABSTRACT: Recently, concrete using multicomponent blended cement has been required to increase the freeze-thaw and sulfate resistances of concrete structures exposed to a marine environment. Thus, the purpose of this study was to propose the use of concrete containing multicomponent blended cement as one of the alternatives for concrete structures exposed to a marine environment. For this purpose, batches of concrete containing ordinary portland cement (OPC), binary blended cement (OPC-G, G: ground granulated blast slag), ternary blended cement (OPC-GF, F: fly ash), and quaternary blended cement (OPC-GFM, M: mata-kaolin) were made using a water-binder ratio of 50%. Then, the durability levels, including the sulfate and freeze-thaw resistances, were estimated for concrete samples containing OPC, OPC-G, OPC-GF, and OPC-GFM. It was observed from the tests that the durability levels of the concrete samples containing OPC-G and OPC-GF were found to be much better than that of the concrete containing OPC. The optimum mixing proportions were a 40% replacement ratio of ground granulated blast slag for the binary blended cement and a 30% replacement ratio of ground granulated blast slag and 10% fly ash for the ternary blended cement.

1. 서 론

최근 콘크리트 분야에서 대두되는 많은 현안 사항 중 두드러진 연구분야로 해양환경에 노출된 콘크리트의 내구성 연구와 산업부산물의 재활용에 대한 연구가 주목 받고 있다.

이와 관련하여 첫 번째로 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 특히 부산은 해양환경에 항상 노출되어 있는 지역이다. 이러한 지역에서 건설되는 해양콘크리트 구조물의 설계에서는 콘크리트 강도뿐만 아니라 내구성 개념을 반영하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 최근 국내외적으로 해양환경에서 건설되는 콘크리트 구조물의 강도 및 내구성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구들에 의하면 해양환경에 노출된 콘크리트의 직접적인 성능저하 현상은 구조물 위치에 따라 다소 차이는 있으나, 대부분 염해 및 황산염에 의한 화학적 침식(김명식과 백동일, 2007), 동결융해와 황산염의 복합열화에 기인하고 있고(김명식 등, 2009), 간접적인 요인은 비례 염분에 의해 장기적인 열화현상이 발생하는 것으로 보고되고 있다.

두 번째로 경제발전 및 산업화의 가속화에 따라 환경오염 및 자원의 고갈문제는 사회적으로 큰 부담이 되고 있고, 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 산업부산물의 재활용에 대한 사회적 관심이 크게 대두되고 있다. 자원의 재활용에 관련하여 여러 가지의 접근방법이 제시되고 다양한 견해가 도출되고 있으나, 역시 가장 효율적인 방안은 기존자원을 보호하면서 다량으로 배출되는 폐기물을 충분히 재활용하는 방안을 들 수 있겠다. 이에 대표적인 산업부산물인 고로슬래그와 플라이애시는 포졸란 물질로서 콘크리트의 알칼리성 수화생성물인 수산화칼슘 (Ca(OH)_2)의 영향으로 잠재 수경성을 발휘하는 부산물이다. 제철산업의 부산물인 고로슬래그와 화력발전소의 부산물인 플라이애시는 사용 시멘트 양을 감소시키며, 그 외에도 수화열 저감, 장기강도 증진, 수밀성 증대 등 내구성 향상(배수호 등, 2010)에 도움을 주어, 장기적인 관점에서 보면 유지관리 비용 절감을 가져오므로 경제적 효율성이 증대되는 효과가 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되고 해양콘크리트의 내구성에 우수하다고 알려져 있는 각종 광물질 혼화재료(고로슬래

그, 플라이애시, 메타카올린)를 사용하여 다성분계 시멘트 콘크리트를 제작한 후 기본적인 물리적 특성을 확인하고, 배합변수를 다양하게 변화시켜 해양환경에 노출된 콘크리트의 화학적 침식 및 상온과 저온의 반복적인 기상작용을 받을 때의 저항성들을 파악하고자 한다. 이를 위해 동결융해저항실험과 해양환경을 고려하여 10% 농도의 황산마그네슘용액에 일정기간 침적시켜 촉진실험을 실시하였다. 이와 같은 실험결과를 중심으로 해양환경에 노출된 콘크리트에서 황산염 및 동결융해저항성에 효율적인 최적 배합 안을 도출하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 물리·화학적 특성은 Table 1에 정리하였다. 그리고 시멘트 외에 결합재로 강도 및 내구성 증진에 효과가 뛰어난 플라이애시, 고로슬래그, 메타카올린과 같은 광물질 혼화재료를 사용하였다. 플라이애시는 삼천포 화력발전소에서 생산되는 분말도 $4400\text{cm}^2/\text{g}$ 인 Class F급을 사용하였고, 고로슬래그는 국내 S사에서 생산되는 제품, 메타카올린은 국내 N사의 제품을 사용하였다. 광물질 혼화재료의 물리적 성질과 화학조성비는 Table 2 와 같다. 본 연구에서 사용한 골재는 부산 근교에 위치한 김해지역에서 생산되는 부순골재(쇄석, 부순모래)를 사용하였으며, 특히 잔골재는 부순모래에 입도 조정용으로 낙동세사를 혼합하여(부순모래:낙동세사=7:3) 실험하였다. 사용 골재의 물리적 특성은 Table 3 에 정리하였다.

2.2 배합

본 실험의 배합조건은 물시멘트비(W/C) 50%, 잔골재율(S/a) 43%, 단위시멘트량을 423 kg/m^3 으로 고정시켜 보통콘크리트(PLC : Plain concrete)를 제작하였다. 그리고 결합재로 광물질 혼화재료를 사용하여 제작한 콘크리트의 종류는 고로슬래그를 혼입한 2성분계 시멘트 콘크리트(PLC-G), 고로슬래그와 플라이애시를 혼입한 3성분계 시멘트 콘크리트(PLC-GF), 고로슬래그, 플라이

Table 1 Properties of cement

Physical properties		Chemical properties (%)					
Speccific gravity	Fineness (cm^2/g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.15	3,235	21.2	5.20	2.80	61.3	4.00	2.40

Table 2 Properties of mineral admixture

Type	Density (g/cm^3)	Form	Chief ingredient	Specific surface area (cm^2/g)
Fly-ash	2.2	powder	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	4,000
Slag powder	2.59	powder	SiO ₂ , CaO, Al ₂ O ₃	12,000
Meta-Kaoiln	2.85	powder	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	6,000

Table 3 Properties of aggregate

Type	Density (g/cm^3)	F.M (%)	Maximum size (mm)
Crushed sand	2.7	2.31	-
Crushed stone	2.61	7.22	25

애시 및 메타카올을 혼입한 4성분계 시멘트 콘크리트(PLC-GFM) 등 3가지 종류를 제작하였고, 각각의 배합은 Table 4에 정리하였다.

2.3 공시체 제작 및 양생

황산염 및 동결융해 저항특성을 파악하기 위한 공시체 제작은 한국산업규격에서 정하는 「KS F 2403 콘크리트의 강도실험용 공시체 제작방법」에 준하여 $10\times 20\text{cm}$ 몰드를 사용하여 제작하였다.

공시체 제작방법은 먼저 굵은 골재와 잔골재, 시멘트, 결합재를 넣고 1분 30초 동안 건비빔한 후 물과 혼화제를 넣어 2분간 믹싱하여 콘크리트를 제작하였다. 그리고 제작한 콘크리트를 몰드에 넣어 3층 25회 붓다짐을 하여 공시체를 제작하였다.

이와 같이 제작된 공시체들 중 황산염 저항특성 실험을 위한 공시체들은 공시체 탈형 후 바로 10% 황산마그네슘 수용액에 침적시켜 촉진 실험을 실시하였고, 동결융해 저항특성용 공시체들은 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 의 담수에서 2주간 수중양생 후 동결융해 시험장치에 넣어 실험을 실시하였다.

황산염 침식 저항특성의 변화를 관찰하기 위한 양생기간은 10% 황산마그네슘 수용액에서 침적시켜 28일, 60일, 120일, 180일, 240일, 300일 동안 실험을 하였고, 동결융해 실험은 공시체 제작 후 2주간 수중양생을 실시 한 후 동결융해 시험장치에 넣어 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 사이클에 실험을 실시하였다.

2.4 황산염 및 동결융해 저항 특성 평가 방법

4종류의 배합별로 제작된 공시체의 열화정도를 파악하기 위하여, 기본적으로 단위중량변화, 압축강도변화를 측정하였고, 황산염 침식 실험에서는 외관형상변화와 미세구조변화(SEM : Scanning electron microscope, EDS : Energy dispersive spectrometer)를 측정하였다. 외관형상변화는 ASTM(2004)에서 정한 스케일링의 육안등급을 기준으로 하여 평가하였고, Table 5에 나타내었다. 그리고 동결융해실험은 「KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트 저항 시험 방법」에 준하여 실시하였다. 1cycle은 공시체 중심부의 온도가 4°C 에서 -18°C 로 떨어지고, 다시 -18°C 에서 4°C 로 상승될 때를 말하는 것이며, 소요시간은 2시간 이상, 4시간 이하로 정하고 있다. 본 실험에서는 약 4시간 전후로 소요되었고 해당 사이클에서 상대동탄성계수를 측정하고 내구성 지수를 산정하여 저항특성을 평가하였다.

3. 황산염 저항 실험분석

3.1 외관형상변화

10% 황산마그네슘 용액에 양생시킨 공시체의 외관형상을 재령 60일, 120일, 180일, 240일, 360일에 관찰하여 사진 촬영후 Table 6에 정리하였다.

Table 4 Mixing proportions of concrete

Type	fck (MPa)	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit content (kgf/m ³)						AE (g/m ³)		
							W	S	G	Binder				1	2
										C	GGBS	FA	MK		
PLC	24	25	50	4.5	50	43	211	668	916	423	-	-	-	844	338
PLC-G								668	916	254	169	-	-		
PLC-GF								668	916	254	127	42	-		
PLC-GFM								668	916	212	127	42	42		

Table 5 Visual rating of scaled surface (ASTM C 672)

Rating	Condition of surface
0	No scaling
1	Very slight scaling
2	Slight to moderate scaling
3	Moderate scaling
4	Moderate to severe scaling
5	Severe scaling

PLC-G와 PLC-GF의 경우 채령 180일에 약간의 미세균열이 발생하였고, 채령이 증가할수록 그 양상은 뚜렷하게 나타났으며, 채령 300일에서는 균열이 진전되고 있음을 확인하게 알 수 있었다. PLC와 PLC-GFM은 PLC-G와 PLC-GF와는 달리 좀더 빠른 채령 60일부터 미세균열이 관찰되었고, 채령증가에 따라 균열진전 및 공시체 단면감소 등 외관열화현상은 더욱 가속화되고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 미세구조변화

각 배합별로 제작한 공시체를 10% 황산마그네슘 수용액에 침적시킨 후, 외관형상에 열화현상이 나타나기 시작한 채령 180일의 공시체를 기준으로 하여 실험을 실시하였다. 공시체 내부에서 유해물질 생성 유무 등을 확인하기 위해 SEM(Hitachi-Japan, S-2700) 및 EDS(Hitachi-Japan, S-2700)로 미세구조를 관찰하고 그 결과를 Table 7에 정리하였다. SEM 촬영배율은 10,000 배로 촬영을 실시하였다. PLC의 경우 중앙부에 넓게 침상모양의 결정이 생성되어 퍼져있고, EDS 분석 결과 표면부에 황산마그네슘 침식에 의한 쏘마사이트(Thaumasite)가 다량으로 생성되어 있음을 관찰할 수 있었다. PLC-G와 PLC-GF 및 PLC-GFM도 침상의 쏘마사이트가 관찰은 되고 있으나 PLC 보다 매우 적은 양

이 확인되며, 그 분포도 국부적으로 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 뿐만아니라 EDS 분석 결과 PLC 보다 마그네슘이 보다 적은 것을 확인 할 수 있었다. 이는 광물질 혼화재료가 시멘트 수화물 중 수산화칼슘과 포졸란 반응을 하여 CSH 겔($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 의 3성분으로 구성되는 수화물)을 형성하게 되는데, 이때 형성된 CSH 겔이 공시체의 내부공극을 밀실하게 채우게 되고, 마그네슘과 반응하는 수산화칼슘을 소비하여 열화물질이 보다 적게 생성되는 효과가 있는 것으로 사료된다.

3.3 단위중량변화

콘크리트의 단위중량은 콘크리트의 강도, 탄성계수, 내구성에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 4종류의 배합별 콘크리트 공시체를 제작한 다음 담수와 10% 황산마그네슘 용액에 침적하여 단위중량 변화를 살펴보았다. 단위중량을 측정한 후 그 증감상태를 확인하기 위하여 식 (1)과 같이 단위중량 변화율을 구하여 Fig. 1에 나타내었다.

$$\text{Unit Weight Change}(\%) = \frac{S - S_{28}}{S_{28}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, S는 각 채령별 단위중량, S₂₈은 각 공시체의 채령 28일 단위중량을 나타낸다.

담수 양생의 경우 모든 배합에서 지속적으로 단위중량이 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 시간이 경과함에 따라 공시체 내부에서 수화반응이 지속적으로 발생하여, 공극이 치밀화되어 단위중량이 증가하는 것으로 사료된다. 그러나 10% 황산마그네슘 수용액에 침적 양생시킨 경우는 모든 공시체의 단위중량 변화율이 감소하였고, 이는 황산마그네슘의 침식에 의해 공시체의 내부에서 화학적 열화가 진행되어 발생한 것으로 미세구조분석에서 확인하였다. 특히 PLC의 경우 초기 채령부터

Table 6 Photos of concrete specimen exposed to sulfate deterioration

Name	Concrete specimens									
PLC	I		I		II		III		III
	60 day		120 day		180 day		240 day		300 day	
PLC-G	0		0		I		I		II
	60 day		120 day		180 day		240 day		300 day	
PLC-GF	0		0		I		I		II
	60 day		120 day		180 day		240 day		300 day	
PLC-GFM	I		I		II		III		IV
	60 day		120 day		180 day		240 day		300 day	

Table 7 SEM and EDS photos of concrete specimen exposed to sulfate deterioration

Type	SEM (scanning electron microscope)	EDS (energy dispersive spectrometer)
PLC	<p>10μm Electron Image 1</p>	<p>Full Scale 1532 cts Cursor: -0.001 (795 cts)</p>
PLC -G	<p>10μm Electron Image 1</p>	<p>Full Scale 1532 cts Cursor: -0.001 (1941 cts)</p>
PLC -GF	<p>10μm Electron Image 1</p>	<p>Full Scale 1532 cts Cursor: -0.001 (1137 cts)</p>
PLC -GFM	<p>10μm Electron Image 1</p>	<p>Full Scale 1532 cts Cursor: -0.001 (1996 cts)</p>

Fig. 1 Unit weight change of each concretes at sulfate attack

재령 300일까지 급격하게 단위중량 변화율이 감소하였다. 반면에, 광물질 혼화재료를 혼입한 경우(PLC-G, GF, GFM)의 단위중량 변화율은 재령 300일에서 -0.25~-0.35로 매우 서서히 감소하는 것으로 나타나 황산염 침식 저항에 효과가 있는 것으로 확인되었다. 그 효과는 2성분계인 PLC-G, 3성분계인 PLC-GF, 4성분계인 PLC-GFM 순으로 나타나 황산염 침식에는 2성분계인 PLC-G 가장 효과가 뛰어났다.

3.4 압축강도변화

황산염 침식의 경우 열화로 인하여 시편의 표면 및 모서리 등에서 박리, 박락이 일어나고 이로 인해 시편의 단면이 감소하므로 압축강도가 저하된다. 따라서 본 연구에서는 각 배합별 공시체의 재령 증가에 따른 압축강도 및 압축강도 변화율을 측정하여 그 특성을 살펴보았다. 압축강도 변화율은 식 (2)에 의해 산정하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

$$\text{Compressive Strength Change (\%)} = \frac{SC - SC'}{SC'} \times 100 \quad (2)$$

여기서, SC는 침적양생시 압축강도, SC'는 담수양생시 압축강도를 나타낸다.

압축강도를 살펴보면 담수 양생의 경우 모든 공시체가 재령이 증가함에 따라 강도도 증가하는 일반적인 경향을 보였고, 특히, PLC의 경우 초기 재령(28일)에서의 압축강도가 광물질 혼화재료를 혼입한 경우보다 높게 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 광물질 혼화재료의 수화반응 특성을 보여주는 것으로 수화반응 속도가 늦음을 확인하였다. 10% 황산마그네슘 수용액에 침적한 경우 PLC는 재령 60일 이후부터 재령이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타나 황산마그네슘에 의한 침식의 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러나 광물질 혼화재료를 혼입한 경우는 담수양생과 유사한 경향을 보이고 있어, 황산마그네슘

Fig. 2 Compressive strength and change of each concretes at sulfate attack

의 침식에 대한 저항성이 높은 것으로 나타났다.

다음은 압축강도 변화율로 PLC의 경우 재령 240일 이후 담수 양생의 경우보다 -16.82%의 급격한 감소율을 나타냈다. 반면에 2성분계(PLC-G)와 3성분계(PLC-GF)에서는 재령 300일에서도 담수양생과 비슷하거나 오히려 더 높은 강도값을 보임으로서 장기강도에 효과가 있는 것으로 나타났다. 4성분계(PLC-GFM)의 경우는 재령 300일에서 담수와 비교해 -6.73%의 압축강도 감소를 보임으로서 압축강도 측면에서는 2성분계나 3성분계가 더 효과적인 것으로 나타났다.

4. 동결융해 저항 실험분석

4.1 단위중량변화

콘크리트의 종류에 따른 사이클별 단위중량 측정결과와 단위중량 변화율을 Fig. 3에 나타냈다. 여기서 단위중량 변화율은 다음 식 (3)에 의하여 구하였다.

$$\text{Unit Weight Change (\%)} = \frac{F - F_0}{F_0} \times 100 \quad (3)$$

여기서, F는 각 사이클별 단위중량, F0는 0사이클 단위중량을 나타낸다.

Fig. 3 (a)를 보면, PLC 공시체가 다른 광물질 혼화재 공시체들보다 초기 사이클(0사이클)에서 단위중량값이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 PLC 공시체에 있는 시멘트와 다른 광물질 혼화재료의 비중차이로 인한 단위중량의 차이이다. 비중이 가장 큰 시멘트로 제작된 PLC 공시체가 단위중량이 높은 것이다. 사이클이 진행됨에 따라 그 감소정도를 확인해 볼 때, PLC 공시체가 다른 광물질 혼화재를 혼입한 콘크리트에 비해 단위중량 감소정도가 크다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3

Fig. 3 Unit weight and change concretes at freeze-thaw attack

(b) 에서도 확연히 드러난다. PLC 공시체를 제외한, 광물질 혼화제를 혼입한 공시체들의 단위중량변화율을 살펴보면, 100 사이클 이전에는 단위중량변화율이 감소하다가, 100 사이클 이후로 미세하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 PLC 공시체의 경우에는, 사이클이 증가함에 따라 단위중량 변화율이 지속적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 차이는 앞서 황산염 저항 실험에서도 확인하였듯이, 광물질 혼화제 혼입에 따른 공시체 내부 공극의 치밀화로 인하여 단위중량이 증가 되었다고 판단되어진다. 그러나 PLC 공시체의 경우, 온도변화에 따른 콘크리트의 물리적 열화가 진행되어 단위중량이 감소하는 것으로 생각된다. 그 중 실선인 PLC 공시체의 단위중량변화율은 300 사이클에서 -0.44로 감소하는 변화율을 보이는 반면에, 광물질 혼화제를 혼입한 공시체들(PLC-G, GF, GFM)의 단위중량변화율은 300 사이클 에서 0.05~0.05로 변화가 거의 없음을 확인 할 수 있다.

4.2 압축강도변화

콘크리트의 종류에 따른 사이클별 압축강도 측정결과와 압축강도 변화율을 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 압축강도 변화율은 다음 식 (4)에 의하여 구하였다.

$$\text{Compressive Strength Change}(\%) = \frac{FC - FC_0}{FC_0} \times 100 \quad (4)$$

여기서, FC는 각 사이클별 압축강도, FC₀는 0사이클 압축강도를 나타낸다.

Fig. 4 (a)에서 압축강도를 살펴보면, 시간이 지남에 따라 압

Fig. 4 Compressive Strength and change concretes at freeze-thaw attack

축강도가 서서히 증가되나 광물질 혼화제의 혼입 유무에 따라 그 증가량이 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 광물질 혼화제를 혼입하지 않은 PLC 콘크리트 공시체의 경우에는 0 사이클 강도 25MPa에서 300 사이클 강도 27.4MPa로 그 증가량이 2.24 MPa으로 다른 광물질 혼화제를 혼입한 공시체들(PLC-G는 4.7 MPa, PLC-GF는 6.5MPa, PLC-GFM은 5.4MPa)보다 낮았다. 압축강도 변화율로 확인해 보면 더욱더 확실한 차이를 확인 할 수 있다. Fig. 4 (b)에서, 광물질 혼화제를 혼입하지 않은 PLC 공시체의 압축강도 증가율은 다른 광물질 혼화제를 혼입한 공시체와 비교하였을 경우 증가율이 낮은 것을 확인 할 수 있다. 이것은 일반 콘크리트가 초기 양생 중에 동해를 받을 경우, 양생이 제대로 이루어지지 않아 강도 발현에 어려움을 받을 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. 그렇지만 광물질 혼화제를 혼입한 경우의 콘크리트는 양생 중에 동해를 받을 경우, 초기에 강도발현이 어려우나 시간이 지남에 따라 포졸란 반응으로 인한 CSH겔의 형성으로 내부 공극의 밀실화로 강도 발현이 이루어지는 것으로 판단되어진다.

4.3 상대동탄성계수변화

동결융해 사이클의 수에 따른 공시체의 열화상태를 알아보기 위하여 콘크리트의 종류별로 50 사이클 마다 공명진동주파수를 측정하여, 상대동탄성계수 값으로 구하였다. 그리고 이 실험 결과 값으로 구한 내구성지수를 다음 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 내구성지수는 다음 식 (5)와 같다.

$$DF(\%) = \frac{PN}{M} \quad (5)$$

여기서, DF = 내구성지수

P = N 사이클에서의 상대 동 탄성계수(%)

N = 상대동탄성계수가 60%이거나 동결융해실험이 종료된 싸이클수

M = 동결융해 실험이 종료된 싸이클 수

동결융해 실험의 사이클 수는 총 300 사이클이었으나, 300 사이클에 도달하였을 때 공시체들 간에 큰 변화를 관찰하지 못하여 700 사이클까지 연장하여 실험을 실시하였다. 동결융해 700 사이클에서 열화상태를 비교해본 결과 광물질 혼화재료를 혼입하지 않은 PLC가 상대동탄성계수와 내구성지수가 62.5%로 산

Fig. 5 Relative dynamic elastic modulus and Durability factor at freeze-thaw attack

정되었고, 300 사이클 이후 상대동탄성계수가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 300 사이클에서 PLC와 광물질 혼화재를 혼입한 다른 공시체들간의 큰 차이는 없었으나, 700 사이클에 도달하였을 때에는 상대동탄성계수가 2배 정도 차이를 보였다. PLC의 경우 동결융해가 진행됨에 따라 수분의 침투로 인해 조직이 이완되고 열화 진행속도가 빨라져 공명진동주파수가 낮아진 것으로 사료된다. 그러나 광물질 혼화재료를 혼입한 경우는 포졸란 반응으로 인하여 생성된 CSH겔이 내구공극을 서서히 충전시킴으로서 공극이 밀실화되어 상대적으로 공명진동주파수 감소가 적은 것으로 판단되어진다.

5. 결 론

본 연구에서는 보통콘크리트와 광물질 혼화재료를 첨가한 4종류(PLC, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM)의 배합으로 공시체를 제작한 후 황산염 침식과 동결융해 실험을 실시하여 각 콘크리트 공시체의 외관형상변화, 단위중량, 압축강도, 미세구조변화, 상대동탄성계수 등을 측정하여 해양환경을 고려한 콘크리트의 황산염 및 동결융해 저항 특성에 대한 내구성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 황산염 저항 실험에서, 외관형상 및 미세구조를 관찰한 결과 황산염 침식 재령이 증가함에 따라 PLC가 PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM에 비해 열화현상이 뚜렷하게 나타나 광물질 혼화재료가 황산염에 대한 저항성이 효과가 있는 것으로 나타났다.

(2) 단위중량변화를 관찰한 결과, 황산염 저항실험에서는 재령 증가에 따라 PLC의 단위중량변화율이 -1.44%로 가장 큰 감소율을 보였고, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM의 경우는 각각 -0.26%, -0.31%, -0.36%로 나타났으며, 동결융해 저항 실험에서는 PLC가 300 사이클에서 단위중량변화율이 -0.44%의 감소를 보였고, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM의 경우는 0.05%~0.05%로 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

(3) 압축강도변화를 관찰한 결과, 황산염 저항실험에서는 재령 증가에 따라 PLC가 압축강도변화율이 -14.83%로 가장 큰 감소율을 보였고, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM의 경우 각각 -0.89%, 1.16%, -6.73%으로 나타났고, 동결융해 저항 실험에서는 동결융해 300 사이클에서 PLC는 9.6%의 압축강도증가를 보였고, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM의 경우 각각 19.11%, 32.02%, 26.34%의 증가율을 보였다.

(4) 동결융해 저항 실험에서, 상대동탄성계수 측정 결과 700 사이클에서 PLC가 62.5%로 가장 낮은 내구성지수를 보였고, PLC-G, PLC-GF, PLC-GFM의 경우 각각 85%, 90%, 83%로 산정되었다.

(5) 따라서, 보통 시멘트 콘크리트(PLC)보다 광물질 혼화재료를 사용한 2성분계, 3성분계, 다성분계 시멘트 콘크리트가 황산염 및 동결융해에 대한 내구성이 우수한 것으로 사료된다.

(6) 본 연구에서 도출된 실험결과를 토대로 해양환경에 노출된 콘크리트의 최적 배합은 2성분계 시멘트 콘크리트의 경우 고로슬래그 40% 치환, 3성분계 시멘트 콘크리트의 경우 고로슬래그 30%, 플라이애시 10% 치환하는 경우가 가장 효과적인 것으로 사료된다. 향후 2성분계와 3성분계에 비해 황산염 및 동결융해에 대한 저항 성능이 떨어지는 다성분계(PLC-GFM)의 내구성에 대한 체계적이고 세밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2010학년도 부경대학교 기성회 학술연구비(PK-2010-053)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 김명식, 백동일 (2007). "황산염 침해를 받는 부순모래 모르타르의 단위중량 및 압축강도 특성", 대한토목학회 논문집, 제 27권, 제4-A호, pp 585-591.
- 김명식, 백동일, 최강석 (2009). "동결융해와 황산염의 복합작용을 받는 부순모래 모르타르의 기초 특성 평가", 한국해양공학회지, 제23권, 제5호, pp 54-60.
- 배수호, 박재입, 이광명 (2010). "콘크리트의 황산 및 황산염 침투 저항성에 미치는 광물질 혼화재의 영향", 콘크리트 학회지, 제22권, 제2호, pp 219-228.
- American Society for Testing Materials (ASTM) C 672 (2004). Standard Testing for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (ASTM C 672/C 672M-03).

2012년 3월 8일 원고 접수

2012년 4월 23일 심사 완료

2012년 6월 21일 게재 확정