

5종 시멘트 콘크리트의 내해수성 및 철근 부식특성

박춘근* · 엄태형 · 정해문 · 최재웅 고만기

(쌍용중앙연구소)

(공주대 토목공학과)

1. 서 론

'97년 건설시장이 개방되고 대형 SOC 건설사업이 본격화되고 있는 요즘 해양 구조물의 내구성이 무엇보다도 중요한 사회적 이슈로 떠오르고 있다. 특히 교량 등 바닷물에 직접 침적되거나 간접적으로 영향을 받는 구조물에 대한 지침이 국내에는 아직 정립이 되지 않은 실정이다. 그러나 건설 선진국인 미국, 일본, 유럽 등에서는 이미 급세기 중반기부터 해양 구조물에 대한 관심과 연구를 집중시켜 시멘트 재료적인 측면과 시공적인 측면에서 확고한 지침이 확립되어 일부 국가에서는 해양도시 개발을 추진하고 있거나 계획중에 있다.

국내에서도 해양 구조물의 중요성을 인식하여 시멘트 제조회사인 S사에서 80년대 중반 시멘트 종류별, 슬래그 및 플라이애쉬 첨가별로 시멘트 재료를 다양화하여 여러 종류의 콘크리트를 제조하여 해수에 대한 내구성을 연구하였다. 또한 시멘트 종류별로 제조한 콘크리트를 군산 앞바다에 100년 계획으로 장기 침적하여 조수간만, 해풍, 동결융해, 건습작용 등이 철근 콘크리트 및 무근 콘크리트의 열화성, 철근의 부식 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이 결과 내황산염 시멘트로 제조한 시멘트 콘크리트가 해수에 의한 콘크리트 열화가 제일 낮게 나타나고 철근 부식이 적게 일어난다는 기존에 연구된 연구결과^{1~4)}들과 일치되고 있다.

본고에서는 실제 해수에 10년 동안 장기 침적한 시멘트 종류별 콘크리트 열화특성과 콘크리트 내부에 보강된 철근의 부식특성을 검토하였다.

또한 해수중 황산염과 염분이 콘크리트의 열화에 미치는 영향과 Cl의 확산, 철근의 부식 등에 관하여 논하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 시중에서 유통되는 보통포틀랜드시멘트(1종), 중용열 포틀랜드시멘트(2종), 내황산염 포틀랜드시멘트(5종)를 사용하였다. 혼합시멘트는 고로슬래그시멘트(A종, B종, C종), 플라이애쉬 혼합시멘트이며, <표 1>과 <표 2>에 이들 시멘트에 대한 화학분석 결과와 물리시험 결과를 나타내었다. 슬래그시멘트 및 플라이애쉬 시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 슬래그와 플라이애쉬를 혼합하여 제조하였다. 슬래그시멘트 A, B, C종은 blaine 비표면적 4500 cm²/g의 슬래그 미분말을 각각 30, 50, 70%를 혼합한 것이고, 플라이애쉬 시멘트는 플라이애쉬를 15% 혼합하여 조제한 것이다. 잔골재와 굵은골재는 금강 모래(조립율 2.7, 비중 2.62)와 자갈(조립율 7.0, 비중 2.58)을 사용하였으며, 혼화제는 공기량 확보를 위해 AE제를 사용하였다. 철근부식 평가를 위해 사용한 철근은 두께 20mm의 것을 사용하였다.

2.2 공시체 제작

콘크리트 배합조건은 최대 골재치수 25mm, W/C는 45%, 잔골재율을 37로 하여 슬럼프 12 ± 1cm, 공기량을 4 ± 0.5%로 맞추어 제조하였으

사용 시멘트의 화학분석 결과

<표 1>

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeSO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
보 통	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	0.12	0.92	2.1	1.2
중 용 열	22.4	4.7	3.7	61.2	3.8	0.17	1.34	1.9	1.0
내 황 산 염	21.4	4.2	3.6	63.7	3.0	0.10	0.57	2.0	1.2
슬 래 그 A	24.1	8.3	2.4	55.9	4.3	0.18	0.74	2.0	1.3
슬 래 그 B	26.5	10.1	1.9	51.5	5.0	0.19	0.69	2.7	1.5
슬 래 그 C	28.9	11.6	1.5	47.4	5.6	0.21	0.60	2.7	1.6
플라이애쉬혼합	26.7	5.2	2.6	57.6	3.1	0.12	0.98	1.9	1.3
구 분	LSF	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	
보 통	95.1	2.3	1.93	54.9	16.6	10.3	9.1	3.57	
중 용 열	84.9	2.67	1.27	36.3	36.7	6.2	11.3	3.23	
내 황 산 염	92.8	2.61	0.78	60.1	16.0	3.8	11.0	3.40	

사용 시멘트의 물리시험 결과

<표 2>

구 분	Blaine (cm ² /g)		응 결 특 성				압 축 강 도 (kg/cm ²)					
	시멘트	혼합재	W/C	초결 (분)	중결 (시간:분)	W/C	flow	1 일	3 일	7 일	28일	
보 통	3250	-	24.2	245	6 : 30	54.9	110.7	108	215	267	344	
중 용 열	2920	-	25.6	340	8 : 55	54.9	107.4	82	145	218	330	
내 황 산 염	3300	-	22.0	270	7 : 30	53.9	112.8	93	200	250	329	
슬 래 그 A	3250	4000	25.4	295	8 : 20	54.9	107.4	92	175	235	356	
슬 래 그 B	3250	4000	23.8	320	9 : 00	56.9	105.6	65	133	211	304	
슬 래 그 C	3250	4000	22.5	365	9 : 35	57.8	105.6	43	107	200	294	
플라이애쉬혼합	3250	3100	24.0	305	8 : 50	56.7	108.2	78	142	224	320	

며, 배합을 <표 3>에 나타내었다. 공시체는 $\phi 15$ cm \times 30cm 크기의 몰드에 철근을 중심에서 2cm 떨어뜨려 2개씩 삽입하여 제조하여 압축강도와 철근부식 정도를 측정하였고, 10 \times 10 \times 40cm 크기로 제작한 공시체는 휨강도, 중성화 정도를 측정하였다.

2.3 공시체 양생 및 해수침지 실험

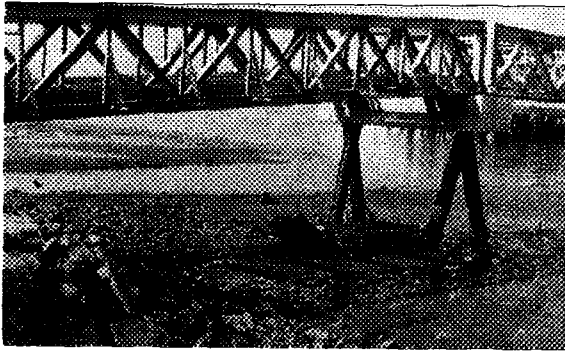
제조한 콘크리트 공시체를 전치 재령에 따른 영향을 보기 위해 각각 7일과 28일간 표준 수중 양생을 행한 후 1986년 10월 26일 군산 앞바다 접연안(군산외항소재 쌍용정유소 1번 돌핀의 아래부분)에 침적시켰다. 이 곳은 조수 간만의 차가 있는 개펄로 조수 간만에 의해 매일 건습이

콘크리트 배합

<표 3>

구 분	W/C (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	S/a (%)	압축강도 (kg/cm ²)	
					7일	28일
보 통	45	12.7	3.9	37	201	277
중 용 열		13.8	4.2		167	268
내 황 산 염		12.8	3.9		194	272
슬 래 그 A		11.9	4.5		159	256
슬 래 그 B		12.5	3.8		149	232
슬 래 그 C		13.6	3.9		119	201
플라이애쉬혼합	13.2	3.7	152	241		

반복되는 조건이다. 콘크리트 공시체의 해수침지 후 3개월, 6개월, 9개월, 1년, 2년, 3년까지는



〈시험체 전경〉



〈공시체 채취 직후 모습〉

〈그림 1〉 공시체 해수 침지 실험

외관 상태만을 관찰하였고, 5년, 10년 경과 재령에 대해서 압축강도, 휨강도, 철근부식, 중성화 깊이 등을 측정하였다. 공시체의 해수침지 실험 전경을 〈그림 1〉에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 외관 관찰

해수 침지후 3년 경과 시료에서 외관상 변색, 시멘트 페이스트 부분의 이탈, 표면박리 등의 현상이 나타나고 있다. 변색의 경우는 전치 양생 기간에 상관없이 혼합시멘트보다는 포틀랜드시멘트계에서 비교적 크게 나타나고 있으나, 이는 시멘트의 색도 차이에 의한 것으로 보인다. 시멘트 페이스트 부분의 열화에 의한 이탈과 표면박리 현상은 전치 양생이 짧은 7일 양생의 경우 슬래그 함유량이 많은 슬래그시멘트 C종 공시체에서 경과기간 3년에서부터 발생하며, 10년 경과 공시체의 경우에는 굵은골재 부분이 노출되는 정도의 열화 상태를 보여주고 있다. 보통포틀랜드시멘트

경우는 재령 10년 경과 시편에서 약간의 침식이 시작되고 있는 것으로 나타났다. 재령 5년까지는 28일 양생한 시편의 경우 시멘트 종류에는 관계 없이 외관상 양호한 결과들을 보여주고 있으나 10년 양생 시편의 경우에는 보통포틀랜드시멘트와 슬래그 함유량이 많은 슬래그 C종 공시체의 표면 열화가 시작되고 있는 상태를 보여주고 있다. 〈표 4〉에 소정 기간동안 해수에 침적한 각 콘크리트 시편의 외관 관찰결과를 나타내었다.

3.2 강도 특성

〈표 5〉에 압축강도 및 휨강도 측정값을 외관 관찰결과와 함께 나타내었다. 재령 10년 경과에서 보통포틀랜드시멘트의 강도가 둔화되기 시작했으며, 그밖에 다른 공시체에서는 전반적으로 계속해서 강도가 발현되고 있는 것으로 나타났다. 전반적으로 강도 증진비율은 혼합시멘트계가 양호한 데이터를 나타내고 있다. 이는 혼합시멘트의 강도가 해수폭로 전의 7일과 28일 강도 값이 포틀랜드시멘트계보다 작고 포졸란 반응에 의해 점진적인 강도발현을 보여주고 있기 때문이다. 압축강도의 경우 10년 경과까지 지속적인 강도 증

해수 침적시료의 외관 관찰결과

〈표 4〉

구 분	외 관 관 찰					
	3개월	1년	3년	5년	10년	
7일 양생	보 통	○	○	○	○	△
	중 용 열	○	○	○	○	○
	내 황 산 염	○	○	○	○	○
	슬 래 그 A	○	○	○	○	○
	슬 래 그 B	○	○	○	△	△
	슬 래 그 C	○	○	△	△	×
	플 라이 애 쉬	○	○	○	○	△
28일 양생	보 통	○	○	○	○	△
	중 용 열	○	○	○	○	○
	내 황 산 염	○	○	○	○	○
	슬 래 그 A	○	○	○	○	○
	슬 래 그 B	○	○	○	○	○
	슬 래 그 C	○	○	○	○	△
	플 라이 애 쉬	○	○	○	○	○

○ : 양호, △ : 표면 약간 침식, × : 열화

해수 침적시료의 압축강도 및 휨강도 발현 특성
〈표 5〉

구 분	압 축 강 도 (kg/cm ²)			휨 강 도 (kg/cm ²)			
	침지전	5년	10년	침지전	5년	10년	
7 일 전양생	보 통	201	181	179	30	45	43
	중 용 열	167	226	244	28	52	59
	내 황 산 염	194	246	293	31	55	61
	슬 래 그 A	159	187	223	19	56	54
	슬 래 그 B	149	224	245	16	45	25
	슬 래 그 C	119	252	251	12	25	5
	플 라이 애 슈	152	209	252	17	39	49
28 일 전양생	보 통	277	277	269	60	48	49
	중 용 열	268	296	335	51	50	54
	내 황 산 염	272	302	347	51	52	57
	슬 래 그 A	256	287	391	45	49	54
	슬 래 그 B	232	320	402	42	35	34
	슬 래 그 C	201	299	345	30	34	18
	플 라이 애 슈	241	317	386	30	38	42

진을 보여주고 있는 것으로 나타났으나, 양생을 7일간 행한 슬래그 C종의 경우에는 10년 경과시 타 공시체와 비교해 보았을 때 강도 증진이 둔화되고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 외관 관찰결과와 마찬가지로 혼합재인 슬래그의 함유량이 많아 응결과 경화가 늦기 때문에 표면 경화특성이 떨어지고 해수침적 환경이 매일 건습이 반복되는 곳이기 때문에 시멘트 콘크리트 구조물의 열화가 초기에서부터 계속 진행되었기 때문으로 보인다. 28일간 전 양생을 한 경우 10년 경과시에도 모든 공시체에 대해 강도 저하없이 양호한 값을 보여주고 있다. 혼합시멘트에서는 슬래그와 플라이애쉬의 포졸란 작용으로 Ca(OH)₂의 생성이 적고, 비표면적이 큰 CaO/SiO₂의 비가 낮은 C-S-H의 생성 때문이다. 한편, 휨강도의 경우에도 절대적인 강도 값은 포틀랜드시멘트계와 혼합시멘트와 비교해 거의 비슷하게 나타나고 있으나 슬래그가 많이 첨가된 슬래그 B종과 C종의 경우에는 전치 양생기간과 상관없이 10년 경과 재령에서 낮은 휨강도 값을 보여주고 있는데, 휨강도 값이 측정 시편의 표면상태에 크게 영향을 받는다는 것을 고려할 때 표면바리 현상의 발생이 표면특성을 취약하게 한데서 온 결과로 보여진다.

그러나 압축강도의 경우에는 시편의 표면 특성에 따른 영향이 적기 때문에 이러한 현상이 나타나지 않은 것으로 보여진다. 이러한 표면경화특성 불량에 의한 경우는 해수 환경의 건습이 반복되거나 파랑과 같은 물리적인 요인이 있는 곳에서는 이러한 요인이 콘크리트의 열화를 더욱 가속시킬 수 있는 것으로 보여진다. 포틀랜드시멘트계에서는 압축강도 증진과 비례해 휨강도 특성이 떨어지는 것으로 보아, 단순히 해수에서의 침적 조건에서만 압축강도의 측정으로 강도 특성을 판단하는 것은 고려되어야 한다고 생각된다.

3.3 철근 부식

콘크리트 중에 보강된 철근 부식은 슬래그 함량이 높은 공시체 슬래그 C를 제외하고는 10년 경과까지 모든 공시체에 대하여 대체적으로 철근 부식 상태가 양호하게 나타났다.

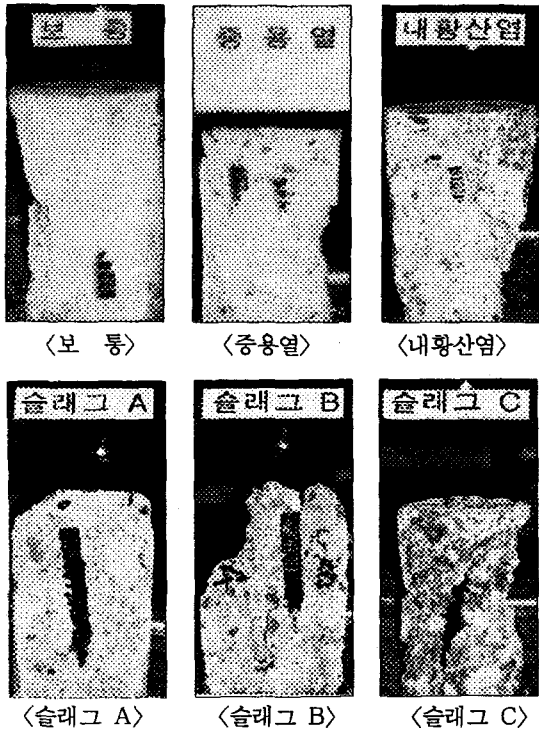
이렇게 양호하게 나타난 것은 콘크리트 공시체를 W/C=45%로 낮게 제조하였기 때문으로 보여진다. 공시체에 대한 철근의 부식 여부는 추후 경과시간이 더 지남에 따라 그 정도를 파악하는 것이 필요할 것으로 보여지나 현재까지의 결과로는 내황산염 시멘트로 제조한 공시체가 철근 부식이 제일 일어나지 않았고, 중용열 시멘트, 보통 및 슬래그 A, 슬래그 B, 슬래그 C 순으로 철근 부식 심화현상이 나타났다.

10년 경과 콘크리트 공시체 내의 철근 부식 상태를 〈그림 2〉에 나타내었다.

3.4 중성화

공시체의 중성화 측정결과를 〈표 6〉에 나타내었다. 재령 5년까지는 시멘트 종류에 관계없이 중성화 깊이가 1mm 정도로 나타났으나, 재령 10년에는 혼합시멘트가 포틀랜드시멘트에 비해 중성화 깊이가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 조직의 세공 용액에서의 알칼리도가 혼합재가 첨가됨에 따라 낮아지기 때문으로 조수 간만의 차에 의해 매일 건습이 반복되는 환경이기 때문에 그 정도가 더 큰 것으로 보여진다.

따라서 이러한 결과는 실제적으로 수중에 침지되었을 때는 콘크리트가 중성화 반응을 일으키지는 않으나 건습 및 동결융해 반복작용에 의해 표면이 열화되면 중성화가 어느정도 일어남을 보여



<그림 2> 해수 침적 10년 경과 콘크리트 공시체중의 철근부식 상태

준다. 본 실험결과 혼화재의 다량 첨가는 포졸란 반응에 의한 치밀한 내부 수화조직 측면에서는 바람직하나, 표면 경화불량 및 중성화에 의한 콘크리트 표면 조직열화 가속 및 철근 부식 촉진 가능성을 보여주고 있어 이에 대한 시공적인 측면에서 고려가 필요할 것으로 보인다.

3.5 고 찰

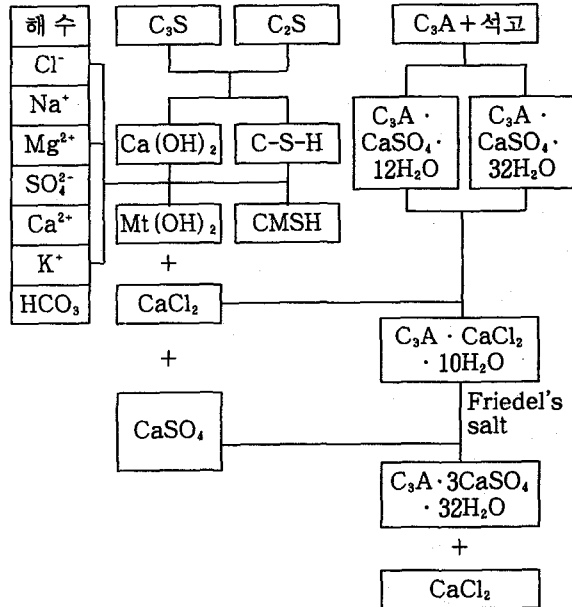
해양 환경하에서 콘크리트의 화학적 침식기구를 <그림 3>에 나타내었다. 해수중에 존재하는 Cl, SO₄ 이온 등이 시멘트 광물이 수화하여 생성한 Ca(OH)₂ 및 C-S-H 겔, C₃A·CaSO₄·12H₂O 및 C₃A·3CaSO₄·32H₂O와 반응하여 염화물이나 황화물을 생성시킨다.

즉 C-S-H 겔은 해수 중의 Mg 이온과 반응하여 C-S-H 겔 내에 MgO를 화학적으로 결합시켜 화합물을 생성시키며, 시멘트 수화물중 20~30% 정도를 차지하는 CaCl₂는 C₃A·CaSO₄·12H₂O와 반응하여 C₃A·CaCl₂·10H₂O를 생성시킨다. 이때 일어나는 화학반응 및 반응 생성물에 의해

콘크리트 공시체의 중성화 관찰 결과

<표 6>

구 분		중성화깊이 (mm)	
		5 년	10 년
7 일 전양생	보 통	1	1.9
	중 용 열	1	1.9
	내 황 산 염	1	1.9
	슬 래 그 A	1	4.7
	슬 래 그 B	1	7.2
	슬 래 그 C	1	9.6
	플 라이 애 쉬	1	7.6
28 일 전양생	보 통	1	1.8
	중 용 열	1	1.9
	내 황 산 염	1	1.8
	슬 래 그 A	1	3.6
	슬 래 그 B	1	5.1
	슬 래 그 C	1	7.3
	플 라이 애 쉬	1	6.6



<그림 3> 해양 환경에서의 콘크리트의 화학적 침식

부피 변화가 일어나며 이 결과 시멘트 구조체는 열화가 일어나게 된다. 열화된 시멘트 구조물은 해수의 Cl이나 SO₄ 등의 이온이 쉽게 구조물 내에 확산되어 시멘트콘크리트 구조물의 열화가 촉진되고 이 결과 콘크리트 내에 보강을 위해 존재하는 철근이 쉽게 부식이 일어난다. 이러한 이유

로 인하여 내해수성이 요구되는 해양 구조물 구축시에는 물량이 낮게 조절된 콘크리트가 요구되며, 화학적으로는 구조물 열화반응이 일어날 수 있는 화합물이 적은 내황산염시멘트, 2종 시멘트, 4종 시멘트 등의 사용이 바람직하다.

본 실험결과 해수 폭로 10년까지 보통포틀랜드 시멘트와 슬래그 C종을 제외하고는 콘크리트 공시체의 열화는 대체적으로 심각할 정도는 아닌 것으로 나타났다. 해수 환경하에서 콘크리트의 열화는 콘크리트 조직 자체의 화학적 부식과 염분에 의한 철근 부식, 외부의 물리적인 충격 등에서 기인되므로 내해수성의 평가는 비단 어느 한 부분만으로는 평가해서는 곤란하다. 즉 지금까지의 많은 보고들에 의하면 슬래그나 플라이애쉬, 실리카 흙 등 무기계 혼화재의 첨가는 콘크리트 내부 조직을 균질하고 치밀하게 하므로 해수중의 황산염을 포함한 성분들에 의한 화학적 침식 및 염분에 의한 침투 등을 지연시켜 주어 내해수성이 매우 우수하다고 알려져 있으나, 이 정도의 치밀한 수화조직을 갖기 위해서는 포졸란계 혼화재의 첨가는 50% 이상을 첨가해야지만 그 효과를 볼 수 있다.

본 실험결과에서 보이듯이 슬래그가 70% 첨가된 슬래그 C종의 경우 응결 경화지연으로 인한 표면 경화상태 불량으로 동결융해 등에 열화의 가속화와 포틀랜드시멘트의 첨가량이 30%로 적기 때문에 중성화 깊이가 포틀랜드시멘트에 비해 4배 정도 큰 것으로 나타나 이에 따른 철근 부식 촉진의 위험성을 갖고 있는 것으로 나타났다. 따라서 혼화재 첨가 시멘트의 표면경화 특성을 좋게 하기 위한 충분한 전 양생의 조건이 반드시 이루어져야만 내해수 시멘트로의 사용이 가능할 것으로 나타났으며, 화학적 침식 및 염분 침투에 대한 저항성을 갖기 위한 치밀한 수화 미세조직 측면과 중성화에 의한 철근부식 촉진에 대한 영향을 충분히 감안해야 할 것으로 보인다. 한편 포틀랜드시멘트계에는 재령 10년까지는 보통포틀랜드시멘트의 열화가 시작되고 있고, 그 외는 해수에 의한 열화는 관찰되지 않았다.

화학적 침식면에서는 C_3A 함량이 적은 내황산염 시멘트가, 수화 조직의 치밀도면에서는 C_2S 의 함량이 비교적 많은 중용열 시멘트가 양호한 성상을 보여 주어 내해수성 시멘트로 타당하다고 보

여지며 제반 결과들을 종합해 볼 때, 내황산염 시멘트나 중용열 시멘트를 기초로 혼화재를 30% 미만으로 혼합하는 시멘트 또한 내해수성을 위한 시멘트로 검토하는 것이 필요하다고 보여진다.

4. 결 론

5종 시멘트를 사용한 시멘트 콘크리트의 경우 해수중의 Cl 및 SO_4 등과의 화학적인 반응이 제일 적게 일어나 안정된 구조물을 나타내고 있다. 또한 철근부식 측면에서도 제일 양호한 결과를 나타내고 있다. 중용열 시멘트, 보통시멘트, 혼합재가 적게 첨가된 시멘트로 제조한 시멘트 콘크리트의 경우도 5종 시멘트에 비하여 정도는 심하지만 우려할 정도의 열화는 일어나지 않았다.

혼합시멘트의 경우는 응결경화지연, 중성화 등을 시공적인 측면에서 시급히 해결해야 할 문제점으로 나타났다. 철근부식의 경우 콘크리트 열화가 심하게 나타나면 중성화 및 해수중 Cl, SO_4 등의 이온 침투가 쉬워져 콘크리트 보강 철근의 부식이 상대적으로 심하게 나타났다.

전반적으로 10년 경과 시료는 슬래그 함량이 70%로 높은 경우를 제외하고는 구조물의 안정성 및 철근부식 측면에서 양호한 상태로 나타났다. 따라서 첨가재 함량이 높은 시멘트를 사용하기 위해서는 시공 연구가 시급히 이루어져야 할 필요가 있다. 향후 장기적으로 해수폭로에 의한 콘크리트의 내해수성 특성변화를 계속 관찰, 분석 검토하여 보고할 예정이다.

<참 고 문 헌>

1. 岡田 清, 콘크리트 耐久性, 朝倉書店(1986)
2. 岸谷 孝一, 四澤紀昭 外, "鹽害 메카니즘", 鹽害(I), 23, 技報堂(1986)
3. 竹田宣典, 迫田惠三, 十河茂幸, "海洋環境下에 10年間 暴露시킨 鐵筋 콘크리트 經年變化", 콘크리트工學年次論文報告集, No. 18(1), 753 (1996)
4. D. M. Roy, "Mechanism of Cement Paste Degradation due to Chemical and Physical Process", 8th Inter. Cong. Chem. Cement, Vol. 4, 362(1986)