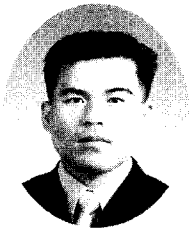
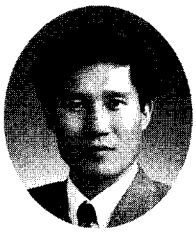
특집

‖ 철근 콘크리트 구조물의 우수성과 미래 ‖

해양 철근 콘크리트 구조물

- Offshore Reinforced Concrete Structures -


양동석*


박선규**

1. 서 론

콘크리트는 산업발달과 우리 생활에 큰 영향을 주었고 앞으로도 연구 노력에 따라 현재 사용하고 있는 콘크리트보다 강도가 매우 크고 가벼워져 건축물뿐만 아니라 새로운 분야까지 다양하게 쓰여질 것이다.

콘크리트는 모래, 자갈, 시멘트를 섞어 여기에 물을 첨가하여 타설하고 일정기간(6~8시간)이 지나면 굳어져 요구하는 강도를 발현하는 건설 재료이다. 콘크리트는 많은 장점을 가지고 있지만 콘크리트 속성상 피할 수 없는 단점도 동시에 가지고 있다. 콘크리트 배합을 잘하여 단점을 최소화함으로써 우리가 당초 목표로 하는 구조물을 건설할 수가 있으나 잘못할 경우에는 사회적인 물의를 일으키는 대형 사고로 이어지므로 콘크리트의 성형 과정과 근본적인 성질을 이해하는 것이 매우 중요하다.

최근 들어 여러 연구 결과와 현장 조사에 따르면 콘크리트는 노출 환경과 사용 재료에 따라 내구성이 저하하여 실제 구조물 전반에 심각한 문제를 발생시키는 것으로 조사되고 있으며 더욱이 최근 양질의 천연 시공 재료가 고갈되고 콘크리트 구조물이 유해 환경에 노출될 가능성이 높아짐에 따라 장기적인 관점에서 콘크리트 구조물의 내구적 열화 현상은 더욱 심화될 것으로 예견된다.

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

또한, 이러한 콘크리트의 내구적 열화 문제는 구조물의 안전성 측면에서 뿐 만 아니라 구조물의 보수 및 유지 관리 측면의 경제적 요인과도 관련되어 사회적으로도 그 관심이 고조되어 가고 있는 실정이다. 이에 따라 구조물의 건전성 확보 및 효율적인 유지 관리를 위해서 구조물의 내구성 및 사용 수명을 평가할 수 있는 시스템 구축에 관한 요구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

일반적으로 콘크리트의 주요 내구적 열화 현상에는 염해, 중성화, 동결 융해, 황산염 침해 등이 있다. 이들 열화 현상의 공통점은 각 열화 메카니즘에 의해 콘크리트 내부에 팽창압이 유발되어 인장력에 약한 콘크리트가 재료적·구조적으로 손상된다는 점이다.

결국 내구적으로 우수한 콘크리트란 물리적으로 공극 내부 구조가 밀실하여 유해 물질의 침투에 대한 저항성이 높고 화학적으로 외부로부터 유입된 유해물질에 대한 저항성을 가지는 콘크리트를 의미하며 이러한 콘크리트의 내구성은 설계적·시공적 요인에 따른 콘크리트 품질과 열화 정도 및 유지 관리에 의해 결정된다.

일반적으로 콘크리트 구조물이 해양 환경에 노출되어 있는 경우, 해당 구조물에 발생 가능한 대표적 열화 현상은 콘크리트 내부로 침투된 염소이온에 의한 매설 철근의 부식, 즉 염해이며 이에 따른 열화 현상은 기타 다른 열화 요인에 비해 그 손상 정도나 발생 빈도 면에서 매우 심각한 것으로 알려져 있다.

2. 동결 융해에 대한 저항성

2.1 동결 융해에 의한 콘크리트 열화 기구

2.1.1 결빙에 의한 팽창압

얼음의 밀도는 0℃에서 0.917 g/cm^{3}이기 때문에 물이 동결되면 그 체적은 약 1.09배가 된다. 이 체적 팽창이 구속되면 팽창압이 생겨서 파괴 작용이 일어난다. 얼음이 팽창압이 생기는 데에는 물의 용적이 공극 용적의 91.7%이상이 아니면 안된다. 이것을 한계 포수도라고 한다.

2.1.2 콘크리트의 열화 기구

콘크리트 속의 공극은 미세한 겔간 공극에서 블리딩에 의해 생긴 비교적 큰 모세관까지 여러 가지 다양한 콘크리트 속의 물이 동결에 의한 팽창압의 발생은 위에서 말한 바와 같이 단순한 것은 아니다.

① 콘크리트는 일반적으로 외부에서 냉각되므로 먼저 표층부 모세관내 물이 0℃로 동결된다. 이 때 내부의 물은 미동결이므로 표층부 동결 팽창에 알맞은 중심부로 향하여 수분 이동이 일어난다.

② 콘크리트가 0℃가 되었을 때 공극 내의 물이 일제히 동결되는 것은 아니다. 미세 공극 내의 물은 표면 장력의 영향에 의해 공극 지름이 작을수록 동결 온도가 저하된다. 이것을 모세관 응축액의 동결 저하 이론 이라 하며 공극 지름과 동결 온도와의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$T_r = T_0 e^{-\frac{A}{r}} \quad (1)$$

여기서,

T_r : 반경 r 세공내 물의 동결 온도(K)

T_0 : 물의 빙점(° K)

r : 세공 반경(cm)

A는 Valmer에 의하면 $A = \frac{2\sigma M}{\rho Q}$

여기서,

σ : 물과 얼음의 계면 장력

(10.2 dyne/cm = 10.2 erg/mol)

M : 물과 분자량(18.02 g/mol)

Q : 얼음의 분자 융해열

(1,430 col/mol = 59.89×10^7 erg/mol)

ρ : 얼음의 밀도(0.917 g/cm^3)

계산 결과는 〈그림 1〉의 실선에 나타낸 것과 같이 거칠고 큰 공극(空隙)중의 물이 0℃에서 동결하는데 대한 예를 들면, 반경 1000Å(Å: 10^{-7}mm)의 가는 구멍내의 물은 -0.6℃이며 100Å의 가는 구멍내의 물은 -1.8℃, 10Å로는 -17.7℃ 동결하게 된다. 그러나 이 결과는 세공 반경과 모관수 동결 온도와의 관계에서 일반적 경향은 나타내고 있으나, 0℃ 물의 표면 장력 σ = 75.62 dyne/cm^{2}을 사용한 경우(파선)쪽이 사실에 근접한다.(1000Å : -1.2℃, 100Å : -12.2℃, 10Å : 99.9℃)

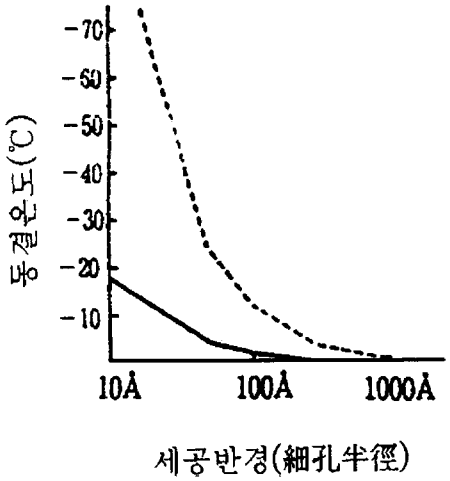


그림 1. 細孔半徑과 모관액의 동결 온도와의 관계

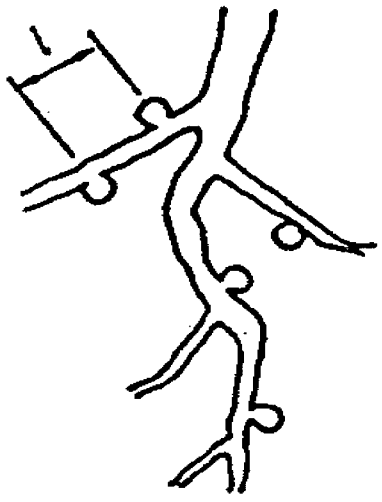


그림 2. 콘크리트 속의 空隙의 모식도

③ 〈그림 2〉는 콘크리트 속의 공극의 모식도이다. 굵은 모세관 속의 물은 0℃에서 동결되나 가지 모양의 가는 지름의 모세관 중의 물은 아직 얼지 않기 때문에 결빙에 의한 체적 증가에 따른 굵은 모세관에서 가는 모세관을 향하여 수분 이동이 일어난다. 이 수분 이동은 온도의 강하에 따라 점차로 가는 모세관으로 진행된다.

가는 관내의 물의 흐름에 대해서는 다음 식으로 나타내는 법칙이 있다. 이것을 Hagen Poiseuille(하겐 · 포아주)의 법칙이라 한다.

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta}\frac{\Delta P}{l} \quad (2)$$

여기서,

Q : 유량(cc/s)

η : 물의 점성계수(g · s/cm^2)

r : 세관의 반경(cm)

l : 세관의 길이(cm)

ΔP : 압력차(g · g/cm^2)

결빙에 의한 팽창량에 상당한 물이 보다 가는 모세관 내를 흐르기 위해 압력이 발생하며 압력의 크기는 다음 식과 같이 관경의 4승에 반비례하며 관의 길이에 비례한다.

$$\Delta P = \frac{8\eta l}{8\pi r^4} Q \quad (3)$$

이와 같이 비교적 큰 공극 내의 빙압 및 미세 공극 내의 유수압의 되풀이에 의한 조직의 이완, 균열의 발생 등에 의해 콘크리트는 차츰 열화되는 것이다.

2.2 동결 융해 저항성에 영향을 주는 요인

(1) 〈그림 3〉에 표시한 바와 같이 콘크리트의 동결 융해 저항성은 AE공기에 의해 비약적으로 증대하고 물-시멘트비가 작을수록 커진다.

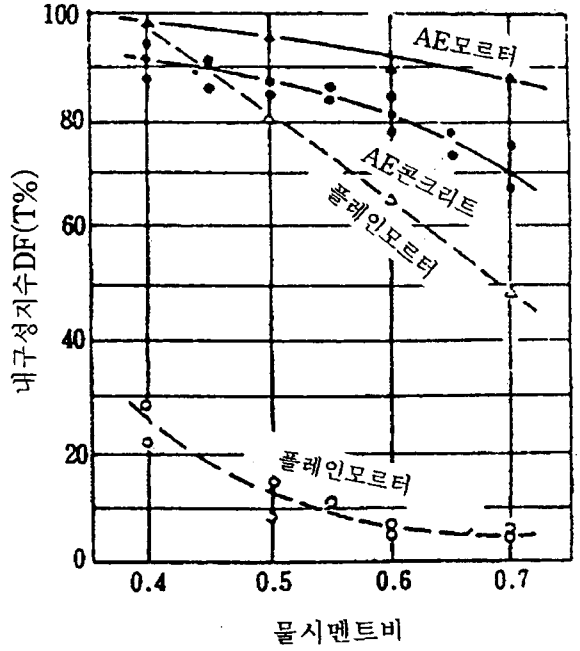


그림 3. 공기량 및 물-시멘트비가 콘크리트 동결 융해 저항성에 미치는 영향

(2) 콘크리트의 경화 후에도 AE공기로 가득 차 있기 때문에 온도 저하에 의해 공극 내를 유동하는 압력수는 AE공기 내에 흘러 들어 압력은 감소한다. 그러므로 공기량이 4~6%(AE공기 3~4%)라면 그림 2의 기포간의 거리 l은 식(3) 속의 모세관 길이 l에 상당하기 때문에 기포의 간격이 좁을수록 유수압은 작으며 내구성의 개선에 유효하다는 것을 알 수 있다. 즉, 가급적 가느다란 기포가 다수 분산되는 것이 바람직하다. 기포의 간격을 나타내는 데 보통 기포간격 계수 $\bar{L}$ 이 이용된다. 이것은 모든 기포를 같은 지름의 구로 가정했을 때 기포 표면 간의 거리 1/2로써 산출하는 것이며 $\bar{L} \leq 0.2$~0.25mm가 추천되고 있다.

(3) 물-시멘트비가 작을수록 시멘트 풀에 대한 공극 지름이 작으며 동결 수량이 적게 되는 등에 따라 동결 융해 저항성이 개선된다.

3. 화학 작용에 대한 저항성

3.1 일반

골재는 석회암질의 것을 제외하고 화학적으로 극히 안정하기 때문에 알칼리 금속에 대한 반응성 골재 등의 특별한 경우를 제외하고 콘크리트의 화학적 침식은 시멘트 풀 부분에 일어나며 특히 화학 작용을 받기 쉬운 수산화칼슘에 기인되는 것이 많다.

3.2 산, 염류에 대한 저항성

3.2.1 산의 작용과 대책

① 황산, 염산, 초산 등의 강한 무기산은 수산화칼슘을 용해하고 또한 알루민산 석회염, 규산석회염을 분해한다.

② 초산 등의 유기산의 분해 작용은 무기산보다 약하고 콘크리트를 점차로 침해한다. 단, 수산 등 콘크리트에 영향을 주지 않는 것도 있다.

③ 무기산의 작용에 대해 사용 재료, 배합의 선정이 대응할 수는 없다. 산화염, 타일의 특수 시공 등의 보호공을 필요로 한다. 침식성 유기산의 작용을 받는 경우는 아스팔트 또는 특수 와니스를 도포한다.

3.2.2 염류의 작용과 대책

① 나트륨, 칼슘 및 마그네슘의 황산염이 수화풀 속의 수산화칼슘과 반응하여 석고를 만들고 다시 C_3A의 수화물 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O$)과 결합하여 에트링가이트를 생성한다. 에트링가이트는 다량의 결정수를 잡고 용적을 더하고 콘크리트를 팽창 파괴한다. 황산나트륨에 의한 반응식을 표시하면 다음과 같다.

$$Na_2SO_4 \cdot 10H_2OCa(OH)_2 = CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH + 8H_2O$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 13H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

② 황산염에 의한 팽창 반응은 C_3A량에 기인하기 때문에 C_3A의 함유량이 적은 내황산염 시멘트의 사용 또는 플라이 애쉬의 사용에 의한 $Ca(OH)_2$의 불용화가 유효하다.

3.3 해수의 작용에 의한 저항성

3.3.1 해수에 포함된 염류의 작용

① 콘크리트는 해수에 포함된 염화마그네슘, 황산마그네슘, 황산나트륨, 중탄산안티몬 등의 화학 작용을 받는다.

② 염화마그네슘은 수화페이스트 속의 수산화칼슘과 화합하여 염화칼슘을 생성하며 용이하게 녹고 경화체가 다공화가 된다.

③ 마그네슘, 나트륨 등의 황산염은 수산화칼슘 및 C_3A의 수화물과 화합하여 에트링가이트를 생성한다.

3.3.2 해수 중의 콘크리트 강도

물-시멘트비 53~73%의 콘크리트를 재령 7일까지 표준 양생하고 이후 해수에 침적된 경우 압축 강도는 재령 1~2년까지는 점차로 증가되나 그후 거의 일정하며 재령 5년 정도부터 저하의 경향을 나타낸다. 이것을 표준 양생을 계속한 공시체의 각 재령에 대한 강도와 비교하면 재령 10년에 있어서는 보통 포틀랜드 시멘트를 이용한 경우 약 55%, 고로 시멘트 B종, 플라이 애쉬 시멘트 B종을 이용한 경우에도 각각 70% 및 80%이다. 이 시험 결과는 공시체 치수가 $\phi 10 \times 20$cm로 작은 경우이지만 해수의 화학 작용이 상당히 큰 것을 표시한다.

3.4 염화물의 작용과 허용 함유량

3.4.1 콘크리트 속의 염화물의 작용

① 콘크리트 속에 다량의 염화물이 포함되면 철근이 부식을 진행하여, 구조물의 내구성을 손실하고 심한 경우에는 내하력을 저감한다.

② 염화나트륨, 염화칼륨의 존재는 알칼리골재 반응을 촉진할 우려가 있다.

3.4.2 콘크리트 속의 염화물 허용 함유량의 한도

① 콘크리트 속의 염화물 함유량은 콘크리트에 포함된 염화물의 이온 총량으로 나타낸다. 이것은 혼합시 콘크리트에는 물, 시멘트, 골재, 혼화재에 따라 NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$ 등의 염화물이 포함되나 철근의 부식에 직접 관여하는 것은 염소이온 Cl^-이며 염소이온량으로 측정은 비교적 용이하므로 화합물로서의 양이 아니고 염화물 이온의 총량으로 나타내기도 한다.

② 콘크리트 속의 철근의 발청에는 염화물의 함유량뿐 아니라 콘크리트의 배합, 시공의 조건, 피복 두께, 구조물의 환경조건(외부에서의 염분의 침투 유무 등)등도 영향이 되므로 콘크리트 속의 염화물 함유량의 허용 한도를 임의적으로 정하기는 어렵다.

시방서에서는 혼합시 콘크리트 속의 염소이온 총량은 원칙으로서 0.3kg/m^3 아하로 규정하고 있다. 이것은 일반적으로 철근 및 프리스트레스 콘크리트에 대한 값으로 응력 부식을 받기 쉬운 프리텐션방식의 프리스트레스 콘크리트, 전식이나 염해를 받는 구조물인 경우에는 되도록 작은 값으로 하는 것이 바람직하다.

③ 염화물 이온 총량은 일반적으로 현장 배합에 기초하여 각 재료 중의 염화물 이온량의 총합으로 산정한다. 이 경우 혼합수로 상수도물을 사용하고 여기에 포함되는 염화물 이온량이 불명확할 때는 0.04kg/m^{3}로 생각해도 좋다.

4. 중성화에 대한 저항성

4.1 중성화

콘크리트 속에 공기중의 이산화탄소(옥외 0.03%정도, 옥내 0.1%정도)가 침투되면 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하여 비활성의 탄산칼슘을 생성한다. 이것은 탄산화 반응이라 한다.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$$

수산화칼슘 부분의 pH는 12~13인데 탄산화한 부분의 pH는 8.5~10로 된다. 즉, 탄산화 반응에 따라 콘크리트는 알칼리성을 손실하므로 중성화라 부른다.

콘크리트는 $Ca(OH)_2$이외에 KOH, NaOH 등의 강염기성염에 의해 강한 알칼리성을 나타내고 있으나 철근 위치까지 중성화가 진행되면 녹이 생길 우려가 있으며 철근 콘크리트 부재의 내구성에 중대한 영향을 미친다.

중성화 깊이와 경과년수와의 사이에 다음의 관계가 있다.

$$x = \frac{1}{b}\left(\frac{W}{C} - a\right)\sqrt{t} \qquad (4)$$

여기서,

x : 평균중성화 깊이(mm)

t : 경과년수(년)

W/C : 물시멘트비

a, b는 상수로서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 W/C = 55~75%의 콘크리트를 옥외 폭로 한 경우 a=38.4, b=12.0

4.2 중성화에 영향을 주는 요인

4.2.1 시멘트의 종류

산화칼슘(CaO)을 많이 포함한 시멘트일수록 잘 중성화되지 않는다. 따라서, 조강성의 시멘트는 잘 중성화되지 않고 혼합시멘트는 중성화가 빠르다. 예를 들면, 조강 시멘트 콘크리트의 중성화 깊이는 보통 시멘트를 사용한 경우의 약 60~80%이며 고로 시멘트(A종~C종)의 중성화 깊이는 보통 시멘트를 사용한 경우의 약 1.2~1.8배가 된다.(〈표 1〉 참조)

4.2.2 혼화제

AE제 및 AE감수제의 사용에 따라 중성화 깊이는 이것을 쓰지 않는 경우의 약 60% 및 40%가 된다.

표 1 시멘트의 종류에 의한 중성화 속도비

보통 포틀랜드 시멘트	조강 포틀랜드 시멘트	고로 시멘트			플라이 애쉬 시멘트 B종	실리카 시멘트 B종
		A종	B종	C종		
1.00	0.79	1.29	1.41	1.82	1.82	1.82

4.2.3 수중에서의 콘크리트의 탄산화 반응

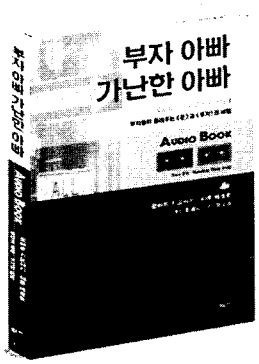
수중에서는 콘크리트의 탄산화 반응이 일어나는 진행 속도는 아주 낮다. 이것은 수중의 탄산가스량, 예를 들면 보통 하천수인 경우 용존하는 탄산가스와 탄산이온으로 용해하고 있는 분을 합계하여 이것을 탄산가스 농도로 나타내면 0.001~0.003%로 아주 적기 때문이다. 또, 습윤 상태에서 탄산칼슘의 pH는 10정도이므로 중성화 정도가 적다. 누수된 콘크리트의 중성화가 진행못함도 같은 이유에 의한다.

5. 맺음말

본 기사에서는 해양 구조물에 있어서 관련된 콘크리트의 열화기구의 일반적인 사항에 대하여 항목별로 간단히 기술하였다. 그러나 일본과 유럽 등지에서 상당히 많은 연구가 진행되는 반면에 우리나라의 해양 구조물에 관련된 연구는 가장 기초적인 수준이며 미흡한 실정이다. 앞으로 학계 및 업계가 해양 구조물에 관련 연구를 활발히 진행되어야 할 것이다. ◙

참고문헌

1. 심종성, "철근 콘크리트 구조물의 열화 진단 및 보수에 관한 국내 현황," 콘크리트학회지, 제2권 제 4호, pp. 22~30, 1990.
2. 정재동, "철근 콘크리트의 중성화 현상과 그 대책," 콘크리트학회지, 제4권 제1호, pp. 17~24, 1992.
3. 김문한, "염해와 그 대책," 콘크리트학회지, 제4권 제1호, pp. 35~42, 1992.
4. T. Fujiwara, "Deterioration of Concrete used in Road Bridges due to Freezing and Thawing," ACI SP-100, Vol I, 1987.



부자 아빠 가난한 아빠

· 저 자 : 로버트 기요사키, 샤론 레흐트
· 출판일 : 2002년 02월
· 정 가 : 9,900원
· 페이지 : 285면
· ISBN : 8982732365

■ 소 개

자본주의 시대속에서 돈을 제대로 아는 것은 더이상 악의 근원으로서의 돈을 아는 것이 아니다. 오히려 돈의 부족이 초래하는 것들이 악함의 근원이 되었다. 저자는 건전한 투자로 돈을 버는 방법과 새로운 금융지식, 투자원칙을 알려주고, 시장의 법칙을 연구해 금융지식을 높이자는 것. 잘못된 재테크 습관을 지적하고 잘아는 것이 약이 되는 돈에 대해 설명한다.