

## 복합적 요인에 의한 콘크리트의 내구성능저하

Deterioration of Concrete Durability Subjected to the Combined Factors



김성수\*  
Seong-Soo Kim



박광필\*\*  
Kwang-Pil Park



이창수\*\*\*  
Chang-Soo Lee



윤익식\*\*\*\*  
Eui-Sik Yoon

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 내구성능저하(deterioration)는 해양환경 하에 노출되어 염분침투에 의한 염해, 한냉지에서의 동결융해 반복작용, 이산화탄소에 의한 탄산화, 각종 유해이온 침투에 의한 화학적 침식 및 반응성골재에 의한 알칼리 골재반응 등을 들 수 있다. 그러나 실제 콘크리트 구조물은 각종 성능저하요인이 동시에 작용하기 때문에 복합적인 내구성능저하가 발생되고 있다는 것은 주지의 사실이다. 예를 들어 해안가에 축조되는 콘크리트 구조물의 경우, 염분 침투에 의한 내구성능 저하가 주요한 요인이 되겠지만 동시에 공기중 이산화탄소에 의한 탄산화는 물론 겨울철에는 동결융해작용도 동시에 발생한다고 볼 수 있다. 이러한 경우에는 세 가지의 내구성능 저하요인이 복합적으로 작용한다고 볼 수 있으며, 뿐만 아니라 공장폐수 등의 화학적 약품에 노출되어 있는 경우에도 화학적 침식은 물론 동결융해 등의 작용을 복합적으로 받아 내구성능저하에 따른 구조물의 수명 또한 급격히 줄어들 수가 있다.

본 고에서는 이러한 복합적인 내구성능저하에 대한 국내외 연구동향을 조사해보고, 지금까지의 연구결과를 종합하여 복합 내구성능저하에 대한 메커니즘을 분석함으로써 앞으로의 연구방향을 제시하고자 한다.

### 2. 콘크리트의 복합성능저하에 대한 연구동향

콘크리트의 내구성에 대한 연구는 수많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으며, 현재도 지속적으로 연구되고 있다. 지금까지 수

행된 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 연구는 주로 내구성 요인에 대한 단독적인 성능저하의 원인규명과 내구성 향상을 위한 연구가 대부분을 차지하고 있는 것은 주지의 사실이다. 근래에 복합성능저하에 대한 관심이 높아지면서 일본과 미국을 중심으로 여러 가지 내구성 요인의 복합작용에 대한 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 몇몇 연구자들에 의해 복합적인 성능저하에 대한 연구를 실시하여 보고한 예가 있다. 현재까지 국내외적으로 복합성능저하에 대한 연구의 방향은 염해를 중심으로 한 동결융해작용 및 탄산화의 복합성능저하, 탄산화 중심으로 한 염해 및 동결융해의 복합성능저하, 화학적 침식을 중심으로 한 동결융해작용 및 탄산화의 복합성능저하 등이 주요한 연구내용이다. 그러나 전반적으로 복합성능저하에 대한 연구는 규정된 시험방법이 없고, 성능저하요인에 대한 변수도 많기 때문에 아직까진 연구자의 주관적인 판단과 실험조건에 따른 결과의 차이가 많아 정확한 결론을 내리기가 어려운 것이 사실이다.

복합성능저하에 대한 지금까지의 연구는 염해와 탄산화 및 염해와 동결융해와의 복합성능저하가 주를 이루고 있다. 염해와 탄산화에 대한 복합성능저하에 대한 연구는 주로 콘크리트의 탄산화를 촉진 시킨 후 염분침투확산 등에 대한 연구가 많이 실시되었다. 국외의 경우, 일본에서는 다테마스(立松) 등<sup>1)</sup>이 중성화와 염분침투의 복합작용에 관한 실험적 연구, 가와바타(川端) 등<sup>2)</sup>은 고로슬래그 미분말 및 플라이 애쉬와 같은 혼화제를 혼입하여 제조한 모르타르의 염분침투와 탄산화의 복합열화에 관한 연구, 호소가와(細川) 등<sup>3)</sup>은 염해와 탄산화를 동시에 받는 복합열화 환경에 있는 콘크리트 구조물의 복합열화에 기인한 화학반응에 의한 시멘트 경화체의 고상과 액상의 조성변화를 열역학적 평형론에 근거하여 재현하는 모델을 검토한 바 있다. 국내에서는 염화물 혼입이 탄산화 속도에 미치는 영향과 탄산화에 의한 염소이온의 침투 특성에 대한 연구를 시작으로<sup>4,5)</sup> 이창수 등<sup>6)</sup>은 탄산화와 염해를 동시에 받는 복합열화 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 적절한 피복두께와 복합작용을 받는 구조물의 목표내

\* 정회원, 대진대학교 건설시스템공학과 교수  
sskim@daejin.ac.kr

\*\* 정회원, 대진대학교 토목환경공학과 박사수료

\*\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 한국원자력안전기술원 책임연구원

구수명을 만족하는 적절한 배합을 제시한바 있다. 조봉석 등<sup>7)</sup>도 탄산화와 염해에 대한 복합열화를 받는 콘크리트 구조물의 열화 진행 정도를 주변 환경 및 표면피복 실시여부에 따른 확산특성과 철근부식특성을 비교 검토하였으며, 탄산화 깊이와 염화물 이온의 침투깊이가 증가할수록 철근의 부식속도가 증가하는 것으로 보고하였다.

윤인석 등<sup>8)</sup>은 탄산화가 염소이온의 확산계수에 영향을 미친다는 보고에 의거하여 탄산화 및 비탄산화된 콘크리트의 염소이온 확산계수 예측실험을 실시하는 등 전체적으로 콘크리트의 탄산화를 촉진 시킨 후 염분침투확산 실험을 통한 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다. 그러나 미국, 유럽에서의 염해와 탄산화에 대한 복합성능저하에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 실정이다.

염해와 동결융해와의 복합성능저하에 대한 연구는 일본의 경우, 鮎田 등(1971)은 보통시멘트와 플라이 애쉬 시멘트 2종류를 이용하여 해수 및 담수 중에서 급속동결시험을 실시하여 복합성능저하에 대한 평가를 수행하였으며, 근래에도 염해환경 하에 있어서 동결융해작용을 받는 콘크리트의 염화물의 침투성(竹田 등, 2001), 다구찌(田口) 등(2006)은 한냉지 해안가에 위치한 콘크리트 구조물의 동해와 염해를 동시에 받는 복합성능저하에 대한 연구 등을 수행하였다. 국내에서도 정용 등(1992)은 해수환경하 콘크리트 경화체의 동결융해 저항성에 관한 연구를 실험을 통하여 고찰하였으며, 고경택 등(2001)은 동결융해와 염소이온 침투의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하를 평가하는 방법을 검토하기 위한 일련의 실험을 실시하는 등 간헐적인 연구가 이루어지고 있으나 체계적인 연구는 거의 없는 실정이다. 미국이나 유럽 등에서는 복합성능저하에 관한 논의는 계속되고 있으나 실제적인 연구 성과는 거의 나오지 않는 실정이며, 아직까지도 단독성능저하에 대해 규명해야할 연구가 많이 남아있을 뿐만 아니라 복합성능저하에 대한 연구비용이 많이 소요된다는 문제점도 있는 것으로 사료된다. 최근에는 RILEM TC 117 위원회가 제설제 용액을 모관 흡수시키는 CDF (Capillary suction of Deicing chemicals and Freeze thaw test) 시험방법을 제시하는 등 복합성능저하 연구에 대한 준비 등을 하고 있다.

### 3. 콘크리트의 복합성능저하 메커니즘

<그림 1>은 해양환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 복합성능저하 현상에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 해양환경하에 있는 구조물의 경우, 직접적으로 해수의 작용을 받아 염분침투에 의한 철근부식과 해수중의 화학적 이온에 침식을 받는 경우뿐만 아니라 공기중의 탄산가스 작용과 수분의 존재에 따른 동결융해 및 건습반복작용 등 여러 가지 물리, 화학적

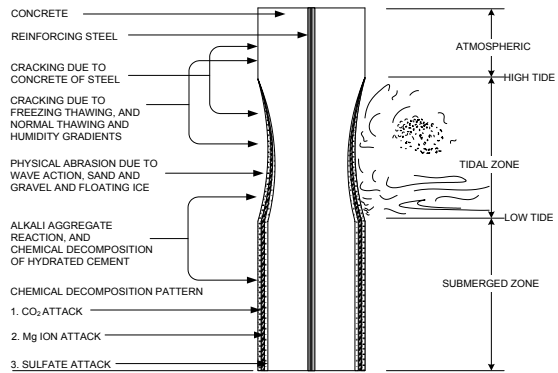


그림 1. 해양환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 복합성능저하<sup>20)</sup>

복합작용에 의해 콘크리트의 성능저하 현상이 일어나는 것을 종합적으로 보여준다.

복합성능저하는 복수의 열화작용이 복합적으로 작용하여 생긴 열화라고 간단히 정의할 수 있지만, 실질적으로 복합성능저하의 발생방식은 다양한 패턴이 있다. 즉, 열화요인의 복합적으로 작용하는 시기로 볼 때 동시에 복수의 성능저하작용이 생긴 경우와 하나의 성능저하작용이 선행하고 일정한 시간이 경과한 후

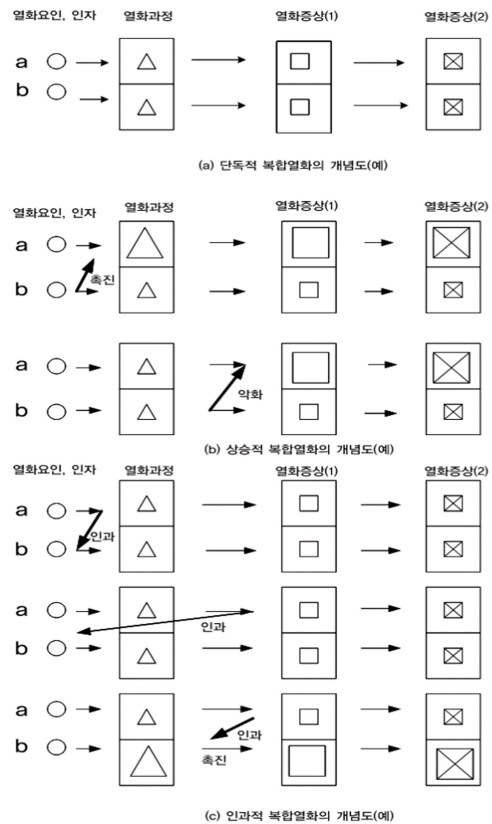


그림 2. 복합성능저하의 분류

다른 성능저하작용이 병행하는 경우가 있다. 또한 성능저하증상의 복합시기에 있어서도 동시에 복수의 성능저하증상이 나타나는 경우와 일정한 시간차를 두고 다른 성능저하증상이 나타나는 경우로 구분할 수 있다. 성능저하증상의 진행속도 측면에서도 단독성능저하의 경우와 같이 성능저하속도로 진행되는 복합성능저하가 있고, 단독성능저하보다 빠른 성능저하속도로 진행되는 복합성능저하도 있다. 이들을 종합해서 볼 때 복합성능저하는 「단독적 복합성능저하」, 「상승적(相乘的) 복합성능저하」 그리고 「인과적 복합성능저하」로 크게 분류할 수 있으며, <그림 2>에서는 이러한 분류를 도시화하여 나타내었다.

단독적 복합성능저하는 성능저하는 동시에 일어나지만 성능저하 요인간의 상승(相乘)효과는 발생하지 않고, 성능저하증상의 진행속도도 단독성능저하의 경우와 같은 정도로 진행되는 복합성능저하를 말한다. 상승적 복합성능저하는 성능저하요인의 상승효과뿐만 아니라 성능저하과정에서도 상승효과가 있어 진행속도가 단독성능저하 경우보다 가속되는

복합성능저하를 의미한다. 한편 인과적 복합성능저하는 하나의 성능저하과정에 의한 현상이 다른 성능저하작용을 초래하는 경우와 하나의 성능저하증상이 나타난 결과 다른 성능저하과정을 촉진시키는 경우 등이 있다. 상승적 및 인과적 복합성능저하에 있어서는 일반적으로 성능저하속도가 크게 되고, 성능저하증상도 가중하게 된다.

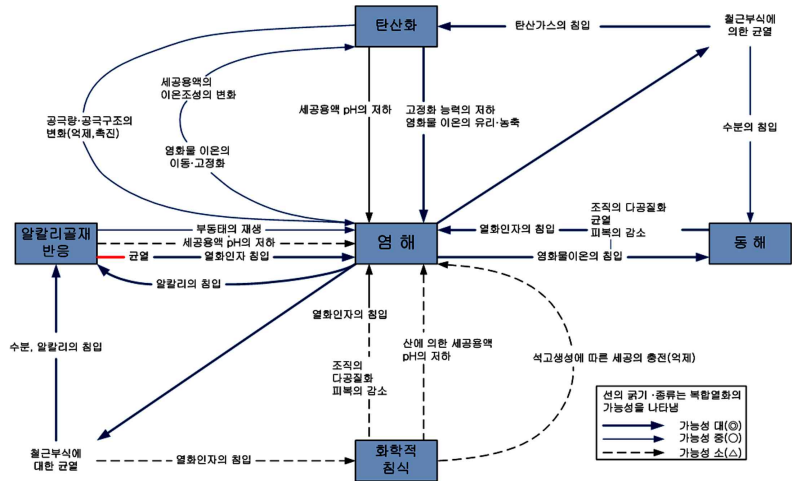


그림 3. 염해를 중심으로 한 복합성능저하의 상관관계<sup>19)</sup>

표 1. 염해와 관련된 복합성능저하

현상	복합작용	필요조건	성능저하과정·성능저하기구	성능저하형태 및 성능저하증상	복합성능저하분류	가능성
①	탄산화	염화물 이온의 이동·고정화	세공용액의 이온조성의 변화	탄산화의 가속	인과적	중
②	탄산화	균열의 발생	탄산가스의 침입	탄산화의 가속	인과적	소
③	ASR	NaCl의 침입	알칼리의 침입	ASR의 가속	상승적	대
④	ASR	균열의 발생	수분, 알칼리의 침입	ASR의 가속	상승적	대
⑤	화학적 침식	균열의 발생	성능저하인자의 침입	화학적 침식의 가속	인과적	소
⑥	동해	염화물 이온의 침입	응고점 강하에 의해 침투압의 상승	동해의 가속	상승적	대
⑦	동해	균열의 발생	수분의 침입	동해의 가속	인과적	중
a-1	탄산화	염해가 선행, 내재염분, 동결방지제 사용	공정화 능력의 저하에 의해 염화물 이온의 유리, 이동, 농축	부식의 가속	상승적	대
a-2	탄산화	중간정도의 함수상태	세공용액의 pH의 저하	부식의 가속	인과적	중
a-3	탄산화	중간정도의 함수상태	피복 콘크리트의 공극량-공극구조의 변화	부식의 지연 혹은 가속	상승적	중
b-1	ASR	ASR의 진행	알칼리의 소비에 의한 세공용액 pH의 저하	부식의 가속	인과적	소
b-2	ASR	균열의 발생	성능저하인자의 침입촉진	부식의 가속	상승적	대
b-3	ASR	알칼리실리카의 생성	부동태의 재생	부식의 억제	인과적	중
c-1	화학적 침식	조직의 다공화, 피복의 감소	성능저하인자의 침입촉진	부식의 가속	인과적	소
c-2	화학적 침식	산에 의한 침식	산에 의한 세공용액 pH의 저하	부식의 가속	인과적	소
c-3	화학적 침식	석고생성에 따른 세공의 추전	피복 콘크리트의 밀실화	부식의 지연	인과적	소
d-1	동해	조직의 다공화, 균열, 피복의 감소	성능저하인자의 침입촉진	부식의 촉진	상승적	대

※ ①~⑦는 다른 성능저하에 주는 영향, 현상 a~d는 다른 성능저하로부터 받는 영향

대표적으로 염해를 중심으로 한 복합성능저하에 대한 메커니즘을 알아보기 위하여 성능저하 상관관계를 <그림 3>과 <표 1>에 나타내었다. 염해가 다른 성능저하작용에 의한 성능저하를 촉진시키는 복합성능저하는 다음과 같이 분류할 수 있다<sup>19)</sup>.

- (1) 부식균열의 발생에 따라 다른 성능저하작용에 관계한 부식인자의 이동이 촉진된 경우(②, ④, ⑤, ⑦)
- (2) 염해에 관계한 성능저하인자가 다른 성능저하작용에도 영향을 미치기 때문에 성능저하가 복합적으로 진행된 경우(①, ③, ⑥)

다른 성능저하작용에 의해 염해가 촉진된 복합성능저하는 다음과 같이 분류한다.

- (1) 조직의 다공화 혹은 피복의 감소, 균열의 발생에 따라 염해에 관한 성능저하인자의 공급이 촉진된 경우(a-3, b-2, c-1, d-1)
- (2) 다른 성능저하작용의 영향에 의해 성능저하인자의 이동이 촉진된 경우(a-1, d-2)
- (3) 세공용액의 pH의 저하에 의해 부식발생 임계 염화물 이온 농도가 저하하고, 부식이 촉진된 경우(a-2, b-1, c-2)

염해와 탄산화의 복합염화는 시멘트 수화물에 프리델염(Friedel's salt) 등으로 고정된 염화물이온이 탄산화에 의해 세공용액 중에서 유리되고, 세공용액 중의 염화물이온 농도가 상승하게 된다. 이러한 염화물이온 농도의 증대는 염화물이온의 이동을 촉진하고, 탄산화 부분보다 오히려 염화물이온이 농축된다. 이로 인해 철근위치에서의 염화물이온 농도가 상승하고, 염해를 촉진시킨다. 또한 강재표면의 부동태막의 파괴한계가 염화물 이온 농도와 수산화물 이온농도의 비( $Cl^-/OH^-$ )로 나타났는데, 탄산화에 의해 세공용액의 pH의 저하는 강재의 부식시기를 빠르게 할 가능성이 있다.

한편, <그림 4>에서 알 수 있듯이 해안 및 항만 구조물은 내륙에 위치한 구조물에 비해 동결융해 작용에 의한 피해를 받기 쉽다. 해수 중에서 동결융해 시험을 실시한 콘크리트는 담수 중에서 동결융해 시험을 실시한 콘크리트에 비해 동결융해 저항성이 상당히 저하되고 있으며, 특히 질량감소율이 내구성 지수 및 길이변화율보다 저하 정도가 더욱 크다. 즉 해수와 동결융해의 복합작용을 받은 콘크리트는 내부조직은 비교적 건전하더라도 스�কে링이 발생하기 쉽다<sup>9)</sup>.

또한 최근 동절기에 차량의 안전 주행을 위해 도로 및 교량에 염화칼슘, 염화나트륨 등 제설제의 살포량이 현격히 증가하고

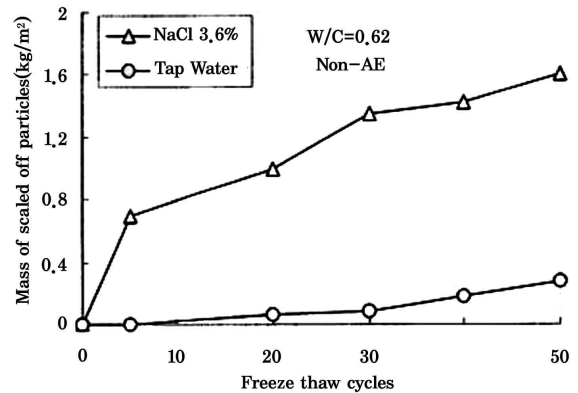


그림 4. 염화나트륨 사용이 스�কে링에 미치는 영향

있으며 이로 인해 내륙 콘크리트에서도 해안 콘크리트와 마찬가지로 동결융해와 염해의 복합작용에 의해 콘크리트의 내구성이 저하되는 것으로 알려져 있다.

#### 4. 맺음말

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓여있고, 사계절이 뚜렷하기 때문에 콘크리트 구조물은 복합 내구성능저하가 필연적으로 발생하는 지리적 환경에 접해 있다고 할 수 있다.

최근에 건설된 세계에서 5번째로 긴 사장교량인 인천대교를 비롯한 서해대교, 영종대교 등 해안도시를 잇는 대형교량들이 건설되면서 콘크리트 구조물의 내구수명에 대한 관심이 고조됨과 더불어 복합성능저하에 대한 관심도 높아지고 있는 실정이다. 하지만 주지하는 바와 같이 아직까지 복합성능저하에 대한 연구는 미비한 실정이기 때문에 앞으로의 많은 연구가 필요하며, 복합성능저하에 대한 앞으로의 연구는 복합성능저하 메커니즘 규명은 물론 복합성능저하를 억제할 수 있는 콘크리트의 개발, 복합성능저하를 고려한 내구수명평가 등을 들 수 있으며, 콘크리트 관련 연구자들의 많은 관심이 필요할 때라 사료된다. ☐

#### 참고문헌

1. 立松 和彦, 山崎 順一, 山田 優(2001), 中性化と鹽分浸透の複合劣化作用に関する實驗的研究, 日本コンクリート工學協會, pp. 7~14.
2. 川端 雄一郎, 松下 博通, 藤田 數正, 祝井 健志(2005), 混和材を混入したモルタルの鹽分浸透と中性化の複合劣化に関する検討, 콘크리트工學年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 841~846.
3. 細川 佳史, 山田 一夫(2006), 複合劣化に起因した化學反應によるセメント硬化體の組成變化の熱力學的モデルによる再現, 콘크리트工學年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 977~982.

4. 신상태, 유택동, 최기봉, 서치호(1999), 해사를 잔골재로 사용한 콘크리트의 촉진증성화에 관한 연구, 구조물진단학회논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 163 ~ 171.
5. 오병환, 강의영, 인광진, 이성규, 서정문, 콘크리트 구조물의 단일 및 복합염화 환경 하에서의 염소이온 확산특성, 한국콘크리트학회 논문집, 2002, Vol. 14, No. 5, pp. 708 ~ 717.
6. 이창수, 윤인석, 박종혁, 제빙화학제 살포로 인한 콘크리트 교량 바닥판의 철근부식 시작시기의 예측, 콘크리트학회 논문집, 2003, Vol. 15, No. 4, pp. 606 ~ 614.
7. 조봉석, 장재봉, 김재환, 김용로, 권영진, 김무한, 복합염화 환경 하에서의 중성화 및 염화물 이온 확산특성이 철근부식에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 2003, Vol. 23, No. 2, pp. 455 ~ 458.
8. 윤인석, 김은겸, 이창수, 중성화의 영향을 고려한 콘크리트의 염소이온 확산계수 산정에 대한 해석적 기법 연구, 대한토목학회 논문집, 2007, Vol. 27, No. 4A, pp. 617 ~ 625.
9. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, 동결융해와 염해의 복합 작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하 평가, 한국콘크리트학회 논문집, 2001.
10. 권영진, 정시영, 김무한, 중성화에 관련하는 복합성능저하 등에 기인한 철근부식이 구조물의 역학적 거동에 미치는 영향(1), 한국구조물진단학회, 2001, Vol. 5, No. 4, pp. 19 ~ 27.
11. 권영진, 김재환, 한병찬, 장승엽, 복합성능저하축진실험 및 장기현장 폭로실험에 의한 RC구조물 보수공법의 보수성능평가, 한국철도학회논문집, 2006, Vol. 9, No. 4, pp. 349 ~ 356.
12. 김영봉, 조봉석, 김영덕, 나철성, 김규용, 김무한, 염해 및 중성화의 복합성능저하작용에 따른 콘크리트의 내구특성 평가에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표회, 2007, Vol. 27, No. 1, pp. 587 ~ 590.
13. 문소현, 소승영, 소양섭, 모르타르 내의 염화물이 중성화에 미치는 영향, 대한건축학회 학술발표논문집, 1995, Vol. 15, No. 2, pp. 749 ~ 752.
14. 이창수, 윤인석, 대기환경 변화를 고려한 콘크리트 구조물의 중성화 예측, 콘크리트학회논문집, 2000, Vol. 15, No. 4, pp. 578 ~ 588.
15. 정용, 김원기, 정재동, 한기성, 최상훈, 해수환경하 콘크리트 경화체의 동결융해 저항성에 관한 연구, 한국 콘크리트 학회지, 1992, Vol. 4, No. 3, pp. 157 ~ 164.
16. 今野 竜也, 阿波 稔, 庄谷 征美, 月永 洋一, 凍結融解作用を受コンクリートの鹽化物浸透性と鐵筋腐食, 콘크리트工學年次論文集, 2007, Vol. 29, No. 1, pp. 1137 ~ 1142.
17. 田口 史雄, 小尾 稔, 達藤 裕文, 콘크리트의凍害および鹽害による複合劣化に關する調査, 콘크리트工學年次論文集, 2006, Vol. 28, No. 1, pp. 971 ~ 976.
18. 小林 一補, 白木 亮司, 河合 研至, 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中に鹽化物, 硫黄化合物及およびアルカリ化合物の移動と濃縮, 콘크리트工學論文集, 1990, Vol. 1, No. 2, pp. 69 ~ 82.
19. 岸谷孝一, 小林一補, 櫻野紀元, 宇野祐一, 鹽化物を含むコンクリート中における鐵筋腐食と中性化との關係, 콘크리트工學論文集, 1991, Vol. 2, No. 1, pp. 77 ~ 84.
20. Mehta, P. K., Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, 1980, pp. 20.
21. Mehta, P. K., Concrete, Prentice Hall, 1993, pp. 126 ~ 176.
22. Young, Mindess, Darwin, Concrete, Pearson Education, 2002, pp. 477 ~ 516.
23. Sarja, A. and Vesikari, E, Durability Design of Concrete Structures, E & FN SPON, 1996.

담당 편집위원 :  
권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr

▶ 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서 구매 가능합니다.

## 제2판 콘크리트용 앵커 설계법 및 예제집

| 한국콘크리트학회 편 | 343쪽(A4변형) | KCI-M-10-005 |

| 비회원 20,000원, 회원 16,000원 | 출판사 기문당 | 2010년 06월 15일 개정판 발행 |

### ■ 소 개

2007년 「콘크리트구조설계기준」에 ‘콘크리트용 앵커설계법’이 새롭게 신설되면서, 실무기술자와 학생들에게 앵커설계의 개념과 배경을 설명하고자 하였다. 1판 발간 이후 ACI 318-08에 앵커설계법에 대한 새로운 개념이 도입되었으며, 기계식 후설치앵커에 대한 평가지침이 국내에는 없어 「콘크리트구조설계기준」의 범위를 벗어나는 후설치앵커의 성능평가는 미국기준에 따라 수행되어야 했다.

이에 우리학회 전문위원회인 정착이음위원회에서는 발전된 설계/평가/시방을 반영하고, 독자의 요구를 수용하기 위해 2판을 준비하였다.

