

부산-거제간 연결도로 콘크리트 구조물의 내구성 설계

Busan-Geoje Fixed Link : Durability Design of Concrete Structure

정상균*

장영**

장현갑***

Jeong, Sang Kyoon Chang, Young Jang, Hyun Gab

ABSTRACT

The present report addresses the durability related design issues for the structural reinforced concrete of the Busan-Geoje Fixed Link - Bridges and Immersed Tunnel. The overall aim of the durability related issues is to establish the requirements to the design and the construction that will secure the stated and achieve that objective with cost effective construction. To prove that the stated design life of 100 years is valid, a performance and reliability based verification, according on the DuraCrete approach have been performed.

1. 서론

본 사업은 부산광역시 강서구의 가덕도와 경남 거제시의 장목면을 연결하는 SOC 민간투자사업으로서 근접한 진해항과 현재 개발 중인 부산 신항의 선박출입을 고려하여 3개의 구간으로 구분되어 있다. 지역적 특성, 환경적 요인, 경제성, 기술적인 문제 등을 종합적으로 검토하여 제안된 본 사업은 총 연장 8.2km로 제1 구간 및 제2구간은 특수 장대교량형식인 사장교를 적용하였으며, 제3구간은 침매터널을 적용하였다. 설계와 시공을 병행하는 Fast Track방식을 채택하여 2010년 완공을 목표로 현재 실시설계를 수행 중에 있으며, 국내의 건설기술을 한 단계 발전시키는 커다란 계기를 마련할 것으로 기대된다. 본 사업의 주변 환경조건은 해양환경으로 인한 염해를 주된 열화인자로 하고 있으므로, 구조물의 목표내구수명동안 구조적 안전성은 물론이고 염해에 대한 내구성이 충분히 확보되어야 한다. 콘크리트 구조물은 다른 재료에 비하여 내구성이 우수하다는 것이 일반적인 견해이나 최근에는 여러 콘크리트 구조물에서도 충분한 내구성이 확보되지 않은 경우가 많이 보고되고 있으며, 이에 따라 고품질의 내구성확보를 위한 연구의 중요성이 나날이 증대되고 있는 실정이다. 부산-거제간 연결도로의 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 국내에서는 최초로 유럽을 중심으로 여러 분야의 전문가가 참여, 구조물의 성능을 기반으로 실제 구조물의 거동 및 실측데이터를 사용하여 개발된 최신 설계법인 DuraCrete에 의하여 수행되었다. DuraCrete에서는 염화물 침투와 콘크리트의 탄산화 등 각종 열화인자 등을 고려하여, 100년의 설계수명동안 90%의 확률로 초기부식발생을 방지할 수 있는 콘크리트의

*정회원, (주)대우건설 GK설계팀 대리, 공학박사

**정회원, (주)대우건설 GK설계팀 대리, 공학석사

***정회원, (주)대우건설 GK시공사업단장, 공학사

최소피복두께(공칭 피복두께)와 내구성에 대한 가장 중요한 변수 중 하나인 최대 염화물확산계수를 제시한다.

2. DuraCrete의 설계개념

DuraCrete에 의한 내구성 설계의 기본적인 목표는 염화물 침투 및 탄산화 등의 열화메카니즘에 대하여 목표내구수명동안 구조물이 일상적인 유지관리 하에서 충분한 안전도를 확보하는 데 있으며, 기본적인 설계개념은 콘크리트 구조설계기준인 하중저항계수설계법(LRFD)과 일관성을 같이하고 있다. 이러한 개념 하에 특정사용기간 즉, 목표내구수명 동안에 구조물의 각종 열화인자에 저항하도록 재료 배합 및 구조 상세를 결정하고 이를 적용하는 절차로 수행된다. 최근에 개발된 DuraCrete를 비롯한 최신의 내구성 설계법은 지금까지 대부분의 국가에서 사용하고 있는 규정과 다른 구조신뢰성이론에 기초한 확률적 사용연한설계 접근방법을 사용하고 있으며 이를 간단히 설명하면 다음 표 1과 같다.

표 1 내구성설계법의 비교

	기존의 내구성설계	최근의 내구성설계	
		Level 1	Level 2
		AASHTO, BS, EC	ACI-Life365
원리	경험 및 직관	비확률론적 계산	확률론적 계산
설계결과	최소피복, 최대 물시멘트비만 제시	열화메카니즘을 기초로 한 설계결과 - 내구수명, 손상확률, 최소피복, 최대염화물확산계수, 최소 탄산화 저항 등을 제시	
환경 분류	불충분한 분류	상세하지 못한 분류	상세한 환경 분류 - 수중부, 비말대부, 대기부 등
열화모델	전달 및 열화모델 없음	전달 및 열화메카니즘에 대한 수학적 모델링	
콘크리트 품질	실제 콘크리트 특성과 무관	이론적인 특성에 기초 (콘크리트 배합에 근거한 이론적인 염화물 확산계수 도출)	실제 콘크리트 특성에 기초 (시험을 통한 실제 콘크리트의 염화물 확산계수 확인)

염화물침투에 대한 열화모델에 사용된 식은 다음 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 일반적으로 확산방정식에 널리 사용되는 Fick's 2nd law이다.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

위 식에서 $C(x, t)$ 는 표면 x 에서 떨어진 거리에서 시간 t 에 대한 염화물농도를 나타내고, C_s 는 표면 염화물농도, C_0 는 초기염화물농도, D 는 염화물확산계수, erf 는 오차함수를 나타낸다. DuraCrete에서는 염화물확산계수가 시간의존적인 변수라는 실측결과를 바탕으로 다음 식(2)와 같이 염화물침투의 수정된 열화모델을 제시하고 있다.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right\}, D_a = \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot D_0 \quad (2)$$

식 (2)에서 D_a 와 D_0 는 각각 시간 t 와 $t = t_0$ 에서의 염화물확산계수 값이고 n 은 재령계수이다.

또한, DuraCrete에서는 위와 같은 열화메카니즘에 의한 설계방정식뿐 아니라 하중과 저항의 설계

변수 및 특성값, 각 하중 및 저항변수에 적용되는 각종 부분계수 그리고 확률론적 계산을 통한 신뢰성 지수 등이 고려되고 있다. 이러한 확률론적 분석은 상업용 프로그램인 STRUREL의 한 부분인 COMREL이라는 구조신뢰성분석 프로그램을 이용하여 수행된다.

3. 부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성설계기준

3.1 구조물의 위치와 환경에 따른 노출등급

부산-거제간 연결도로 구조물의 주변 환경조건은 해안환경으로 염해를 주된 열화인자로 하고 있으므로, 교량과 침매터널 모두 다음과 같은 노출등급으로 분류된다.

표 2. 노출등급에 따른 구조물의 분류

노출등급 분류	교량구조물	터널구조물	환경조건
대기구간 (+3.5m 이상)	교각, 주탑, 교대, 상판 슬래브	내측벽체, 내측 상부 및 하부슬래브	유해이온 농도가 서서히 증가
비말대구간 (-9.5~+3.5m)	교각, 주탑, 케이슨	-	반복되는 건설작용으로 인한 매우 높은 부식 환경
수중구간 (-9.5m 이하)	케이슨 하부	외측벽체, 외측 상부 및 하부슬래브	구조물의 모든 부분이 해수에 노출

3.2 설계입력변수의 결정

DuraCrete에서는 위의 표에서 나타낸 노출등급에 따른 입력변수로 사용된 실제 데이터를 실제 구조물로부터의 측정치, 실험결과, DuraCrete에 의한 조사 및 일부 공학적인 판단을 근거로 다음과 같이 결정하였다.

- 표면염화물량(Cl_s^-) : 노출등급에 따라 결합재 중량의 2~4%
- 기초염화물량(Cl_0^-) : 콘크리트 배합시 내부의 염화물량으로서 결합재 중량의 0.1%
- 염화물확산계수(D_{cl}^-) : NT Build 492 기준에 의해 결정되는 염화물의 확산속도를 나타내는 값으로 $2.0 \sim 7.0 \times 10^{-12} m^2/sec$
- 임계염화물량(Cl_{cr}^-) : 노출등급에 따라 결합재 중량의 0.6~1.8%
- 재령지수(n) : 재령에 따른 염화물확산계수의 감소정도를 나타내는 지수(0.3~0.6)

3.3 설계수명의 결정과 허용기준

부산-거제간 연결도로 구조물에 요구되는 내구성설계의 품질기준은 각각 다음과 같다.

- 목표내구수명 : 100년
- 내구연한의 종료시점 : 철근의 부식시작점(부식진행기간은 포함되지 않음)
- 신뢰성 지수 : $\beta = 1.3$ (신뢰도 90%)

4. DuraCrete 에 의한 내구성설계결과

DuraCrete 접근방식에 의한 부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성설계의 결과로 다음 표에서 제시된 최대 염화물확산계수와 최소 콘크리트 피복두께를 설계원칙으로 제시하였고 재령계수는 적용이 가

능한 값 중에서 가장 낮은 값을 사용하였으므로 제시된 설계치는 안전측으로 제안된 것이다.

표 3. 내구성설계에서 제시된 구조물별 조건

노출등급 분류	교량		침매터널	
	최대염화물확산계수 ($10^{-12}m^2/sec$)	최소피복두께 (mm)	최대염화물확산계수 ($10^{-12}m^2/sec$)	최소피복두께 (mm)
대기구간	3.5	50	6.0	75
비말대구간	3.5	75	-	-
수중구간	6.5	75	6.0	75

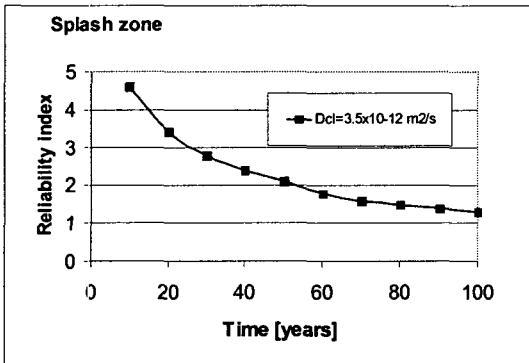


그림 1. 사용연한에 대한 신뢰성지수-교량대지구간

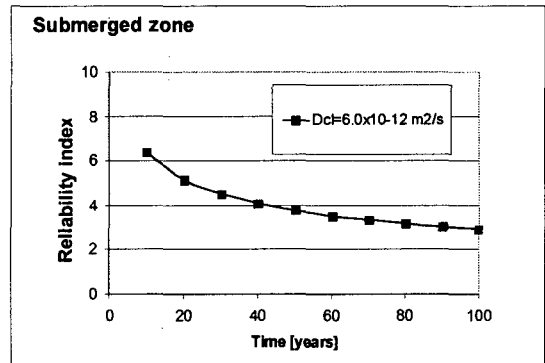


그림 2. 사용연한에 대한 신뢰성지수-터널수중구간

5. 결론

부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성 설계기준으로 사용된 DuraCrete는 유럽을 중심으로 수행된 연구와 실적을 바탕으로 개발된 설계법으로 내구성에 관한 새로운 접근법을 제시하고 있다. 즉, 구조물의 내구성을 명확한 방법과 기준으로 설계하기 위하여 기존의 하중에 의한 설계와 같은 방법으로 구조물의 내구성한계상태를 규정하고, 환경에 의한 열화요인을 고려하여 이에 따라 구조물이 가져야 하는 자체적인 내구저항 및 신뢰성이론을 도입한 확률론적인 내구성설계를 수행할 수 있도록 제시하고 있으며, 사용수명의 계산에서도 구조물의 한계상태와 환경조건을 합리적으로 고려할 수 있도록 하고 있다. 부산-거제간 연결도로 공사에는 현재 이러한 최신 내구성설계를 도입하여 국내의 내구성설계기술 및 염해에 우수한 콘크리트 제작기술의 발전을 도모하고 있다.

참고문헌

1. 부산-거제간 연결도로 콘크리트 구조물의 내구성설계검토(2004). 사단법인 한국콘크리트학회.
2. DuraCrete - Final Technical Report (2000). Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures. Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram III, Published by CUR, May, The Netherlands.
3. Nordtest method NT Build 492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficients from non-steady migration experiments.
4. STRUREL (1995), A structural reliability analysis program system, RCP Consulting, Munich.