

케이블교량설계지침 (한계상태설계법) 개발 - 3장 콘크리트 구조

Development of Cable Bridge Design Guidelines
(Limit State Design) (3. Concrete Structures)

신현목 Hyun Mock Shin
성균관대학교
건축토목공학부 교수

차수원 Soo-Won Cha
울산대학교
건설환경공학부 교수

조재열 Jae-Yeol Cho
서울대학교
건설환경공학부 교수

1. 머리말

최근 ISO 등 국제표준화기구에서 한계상태설계법과 신뢰도 기반 설계기준의 적용을 구조물 설계의 일반원칙으로 채택함에 따라 미국과 유럽 등 선진국은 이에 부합되는 자국 설계기준의 국제적 영향력을 확대하며 해외교량건설시장을 선점하고 있다. 국내에서는 교량설계핵심기술연구단의 성과에 기반하여 일반교량을 대상으로 보편적으로 적용할 수 있는 도로교설계기준(한계상태설계법)이 2012년 1월에 제정되었고, 2015년 1월 적용을 앞두고 있어 기술적 자립을 위한 기반을 마련하였다. 그러나 일반교량을 대상으로 한 도로교설계기준(한계상태설계법)만으로는 설계기준의 국제적 영향력을 확대하여 해외교량건설시장을 개척하기에는 무리가 있다. 국내 건설시장의 감소추세를 감안할 때 첨단기술이 융합된 미래성장동력으로 고부가가치 기술인 초장대교량 기술을 확보하는 것은 건설 분야가 창조경제에 기여하는 것일 뿐 아니라 매우 시의 적절한 것이라 할 수 있다. 현재 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업으로 인간, 자연, 예술의 조화를 이루고 세계최고수준의 기술경쟁력을 목표로 하는 초장대교량사업단 연구가 진행되고 있으며, 중요한 과제 중의 하나가 글로벌 표준이 될 수 있는 설계지침을 만드는 것이다. 이에 제1핵심과제에서는 장경간 케이블교량 설계분야의 핵심엔지니어링 기술을 연구하여 ‘케이블교량설계지침(한계상태설계법)(안)’을 마련하였으며, 2012년부터 전문 학회를 통한 세분야별 공청회, 2회에 걸친 통합 공청회 등을 통해 장대교량 분야 기술자와 전문가 그리고 관련된 분들의 소중한 의견을 수렴하였으며, 국토교통부에 심의를 요청 직전 단계에 있다. 이 원고에서는 ‘케이블교량설계지침(한계상태설계법)(안)’ 중 ‘3장 콘크리트 구조’ 부분을 크게 구조 설계부분과 내구성 설계부분으로 나누어 특징을 간략히 소개하고자 한다.

2. 새로운 설계지침의 구조 설계기술 특징

케이블교량설계지침 제 3장(콘크리트 구조) 케이블교량설계지침(한계상태설계법)(안)의 기본개념인 한계상태설계법과 신뢰도기반 설계법을 채택하여 특수/특별 형태의 구조물 설계에 적용성 확장을 위한 통합이론 기반 검증법을 근간으로 하고 있다. 또한 고강도 및 고성능 재료 적용의 확대 및 내구성 설계법을 크게 보강하였다. 총 11개의 절로써 3.1 적용범위, 3.2 용어, 3.3 기호, 3.4 설계원칙, 3.5 재료, 3.6 프리스트레스 구조의 해석, 3.7 극한한계상태, 3.8 사용한계상태, 3.9 피로한계상태 3.10 내구성 및 피복두께, 3.11 구조 상세로 이루어져 있으며, 전체적인 구성은 Eurocode 2의 체계를 기본으로 하였으나 많은 부분이 우리나라 현실에 맞게 수정/보완하였다.

2.1 새로운 안전계수의 채택

잘 알려져 있듯이 현 콘크리트구조기준과 ACI-318은 인장지배단면, 압축지배단면, 전단 등 단면의 거동 특성에 따라 안전율을 부과하는 일명 부재계수를 채택하고 있으며, EC2는 각 재료에 안전율을 부과하는 부분안전계수(재료계수)를 채택하고 있다. 한편, JSCE는 재료계수와 부재계수를 혼용하고 있는 실정이다.

가장 합리적인 신뢰도 기반 설계법은 불확실성을 갖는 모든 설계기본변수에 안전계수를 부과할 필요가 있다. 하지만 현 시점에서 구축된 DB의 부족으로 인하여 상기의 다양한 설계법들이 최종적으로는 거의 유사한 안전율을 보이고 있는 현실이다. 그러나 이는 설계기본변수에 따른 안전계수를 부과할 경우 확보된 자료의 수준에 따라 통합안전계수를 적용함으로써 신뢰도 높은 안전한 설계가 가능하며 결국 설계법의 발전을 이끌어 낼 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 취지로 이 설계지침에서는 부재계수 대신 재료계수를 채택하였으며, 한계상태에 따라 다음 <표 1>과 같이 한계상태에 따른 재료계수를 규정하였다.

2.2 다양한 재료의 적용성 및 독창성 확대

가장 큰 특징 중 하나가 나날이 개발되고 있는 고강도/고성능 재료의 적용성 확대이다. 이를 위하여 고강도 콘크리트의 사용폭을 확대하였으며, 고강도 콘크리트 재료와 관련된 이론과 규정을 보강하였다. 또한, 고유동성 콘크리트, 고강도 철근 및 강재, 그리고 각종 섬유보강 콘크리트를 사용한 설계를 가능케 하였다. 특히, 재료상수 즉, 평균압축강도, 시멘트 종류에 따른 상수, 콘크리트 탄성계수, 철근의 연성 능력 등에 우리나라의 특성을 반영한 고유의 값을 채택하였다. 또한 비선형해석(그림 1) 그리고 단면설계를 위한(그림 2) 응력-변형률 곡선을 각각 제안하였다.

표 1. 하중조합에 따른 재료계수 (ϕ)

하중조합	콘크리트	철근 또는 프리스트레싱 강재
극한한계상태 -I ~ -VII	0.65	0.90
극단한계상태 -I ~ -IV	1.00	1.00
사용한계상태 -I, -III ~ -VI	1.00	1.00
피로한계상태	1.00	1.00

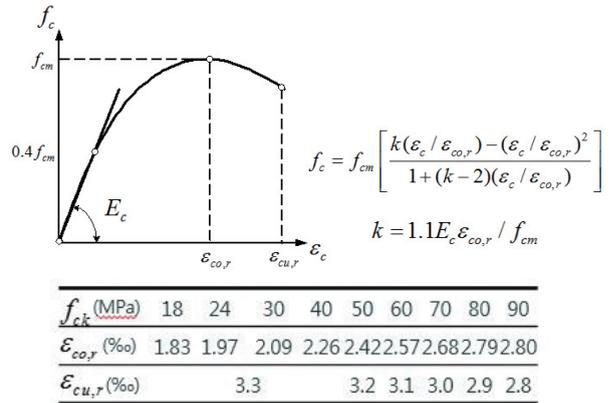
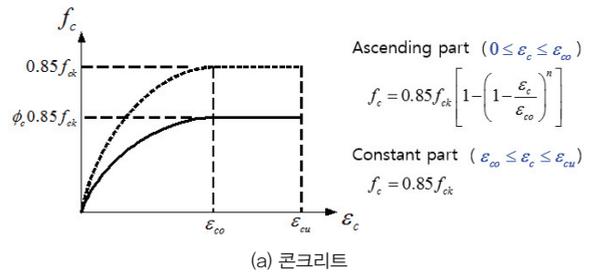


그림 1. 비선형해석을 위한 응력-변형률 곡선

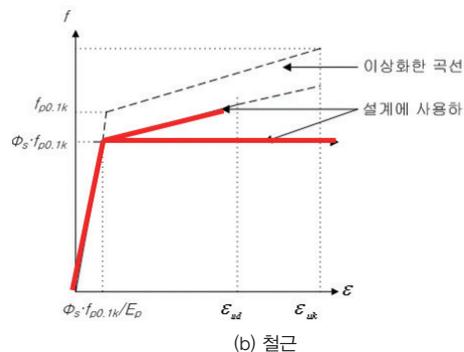
2.3 특수/특별 형태 구조물 설계에 적용성 확장

얇은 면구조의 단부, PSC정착단, 지압부 등 응력교란 영역(D-영역) 설계법을 강화하였다. 또한 면요소 설계법과 3점 판요소 설계법을 도입하여 면요소로 구성된 상자형, I-형 등 다양한 구조의 설계가 가능케하여 복합하중의 상호작용에 의한 한계상태를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

전단 및 비틀림 설계는 통합이론에 기반한 설계를 가능케 하였는데, 표준트러스 모델에 기반하여 경사각을 변각으로 설계자가 선택할 수 있는 변각 트러스 이론을 채택하였다. 이를 통하여 선택한 경사각에 따른 주철근량과



(a) 콘크리트



(b) 철근

그림 2. 비선형해석을 위한 응력-변형률 곡선

철근의 절단점을 결정할 수 있도록 하였다.

이 밖에 요구 성능을 더 이상 만족할 수 없는 한계상태를 극한한계상태(ultimate limit state)와 사용한계상태(serviceability limit state) 외에 피로한계상태(fatigue limit state)를 정의하여 피로하중을 새로이 규정하였으며, 응력 진폭 산정방법을 제시하였다. 또한 누적손상지수에 의한 피로한계상태를 정의하여 장경간 교량에서 콘크리트 구조가 직면할 수 있는 피로거동에 대한 현실적 설계를 가능하게 하였다.

3. 새로운 설계지침의 내구성 설계기술 특징

해양환경에 건설되는 케이블교량 콘크리트 부재 설계에서 가장 중요한 내구성 설계인자는 염소이온 침투이다. 콘크리트로의 염소이온 침투로 인해 철근이 부식될 경우 구조물의 사용성뿐만 아니라 안전성까지 저해할 위험이 있기 때문이다. 기존에는 염소이온 침투에 대하여 주로 결정론적인 방법을 사용하여 내구성 설계를 수행해 왔다. 이 방법은 침투해석과 내구성 설계에 관련되는 변수들이 일정한 값을 가진다는 가정에 기초하고 있다. 그러나 실제 침투현상에 관련되는 변수들은 고정된 값이 아니라 변동성을 가지고 있다. 또한 복잡한 메커니즘의 침투현상을 간단한 수식으로 모델링하여 단순화하므로 설계에 의한 예측과 실제 염소이온 침투량에 큰 차이가 발생하기도 한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 유럽에서는 염소이온 침투에 대한 내구성 설계에서도 확률이론을 도입하려는 시도가 이루어지고 있다. 이러한 세계적인 추세에 발맞추어 좀 더 합리적인 내구성 설계를 위해 케이블교량설계지침에서는 콘크리트 구조물에 대한 신뢰도 기반 내구성 설계를 적용하였다. 이 원고에서는 신뢰도 기반 내구성 설계의 주요내용(3.10절)에 대하여 소개하고자 한다.

3.1 염해 내구성 설계 절차

내구성 일반편에서는 환경조건에 따른 노출등급을 정의하였고, 노출등급에 따른 최소 콘크리트강도, 최소 피복두께 등을 제시하였다. 그러나 해양환경에 건설되는 케이블교량 콘크리트 구조물의 목표내구수명이 100년을 초과하거나 별도로 피복두께를 산정할 필요가 있는 경우 그리고 내구성 일반 규정으로 피복두께를 산정하기 어려운 경우

에는 신뢰도 기반 내구성 설계 절차에 따라 피복두께를 산정할 수 있도록 하였다.

케이블교량 콘크리트 구조물에 대한 염해 내구성 설계는 크게 설계단계와 시공단계로 나누어진다(그림 3). 설계단계는 해당 구조물의 목표내구수명과 목표신뢰도지수 설정으로부터 시작된다. 여기서 철근 위치에서 염소이온 농도가 임계값이 도달하여 철근부식이 시작되는 상태를 한계상태로 설정하고 이때까지의 시간을 수명으로 정의하였다. 구조물의 중요성을 고려하여 부식진행 및 이후 균열발생이나 피복탈락 등에 필요한 시기는 수명으로 고려하지 않았다.

다음으로 가정된 피복두께와 확산계수에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 목표내구수명 시점에서 부식이 발생할 확률 또는 부식에 대하여 안전할 신뢰도를 구한 후 이를 목표값과 비교하여 만족여부를 판단한다. 신뢰도 계산을 위해서는 일계이차모멘트법, 이계이차모멘트법, 몬테카를로 시뮬레이션 등 다양한 방법을 사용할 수 있다.

이렇게 설계단계에서 얻어진 확산계수를 목표확산계수라 하며, 시공단계에서는 이를 만족시키는 배합을 선정하고, 시험배합으로 검증과정을 거쳐 최종배합을 결정하게 된다. 케이블교량 콘크리트 구조물의 중요성 및 유지관리 비용을 고려할 때 적절하지 못한 재료선정으로부터의 피해를 최소화하기 위해 시험배합을 통한 검증과정은 매우

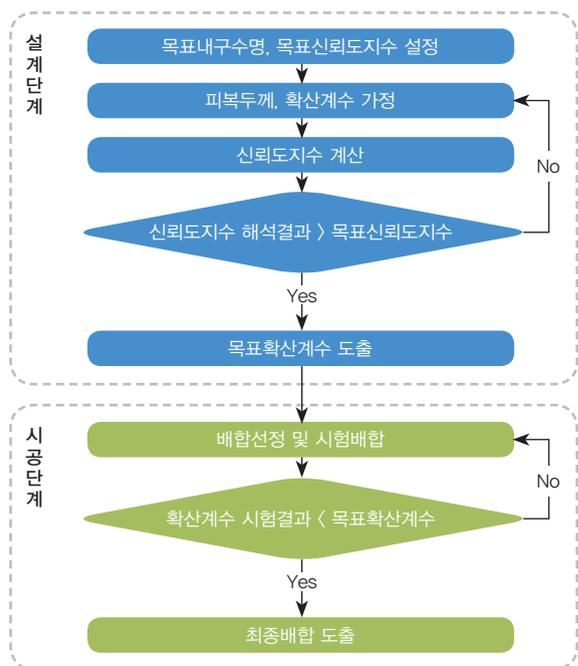


그림 3. 신뢰도 기반 염해 내구성 설계절차

중요하다. 확산계수 검증을 위해 전기영동시험이나 침지 시험 등 기존 공인된 방법을 활용하되 확산계수 측정을 위한 시험체는 현장과 동일한 방법으로 양생하여야 하고 시험은 설계에서 사용한 기준재령에서 실시해야 한다.

3.2 주요 특징

케이블교량 콘크리트 구조물의 염해 내구성 설계는 신뢰도 기반 설계를 기본으로 하였으며, 이에 따른 몇 가지 특징을 정리하면 다음과 같다.

1) 콘크리트 부재에 요구되는 신뢰도 등급을 선정할 수 있도록 하였다. 즉 목표신뢰도지수를 구조물에 따라 달리 할 수 있으므로 구조물의 중요성을 고려한 경제적인 설계가 가능하도록 하였다.

2) 염해 내구성 설계에 관련되는 주요 인자들을 확률변수로 취급하고 설계시 사용할 수 있도록 그 통계특성을 제시하였다. 주요 확률변수는 임계염소이온 농도, 표면염소이온 농도, 콘크리트 확산계수 및 재령효과를 나타내는 계수, 그리고 피복두께이다.

3) 200년 등 장수명을 목표내구수명으로 할 경우에는 피복두께와 배합조절만으로는 목표신뢰도지수에 따라 수명 확보가 어려울 경우가 있다. 이러한 경우에는 표면도장공법을 적용할 수 있으며, 지침에 이 경우에 대한 한계상태식을 제시하였다.

4) 기존 결정론적 방법에 익숙한 설계실무자들의 신뢰도 기반 염해 내구성 설계에 대한 이해를 돕기 위하여 다양한 설계조건에 대한 내구성 설계 예제집을 발간하였으며, 부식 확률 및 신뢰도지수를 산정하는 프로그램을 개발하였다.

4. 맺음말

이미 오랫동안 학습하고 사용하여 익숙한 설계 방법(개념)을 바꾼다는 것은 누구에게도 쉽사리 내키지 않는 큰 모험이다. 그러나 시대의 흐름을 주도하지 못할망정 이에 어깨를 나란히 하지도 못한다면 기술의 퇴보는 불보듯 자명하다.

제한된 지면에 수년간 연구 성과로 도출된 광범위한 내용을 모두 담기에는 무리가 있으나 이 원고는 우리 학회 회원들에게 ‘케이블교량설계지침(한계상태설계법(안))’의 존재를 알리고 이 새로운 설계법에 대한 관심을 이끌어내

는 소기의 목적을 두고자 하였다. 도로교설계기준(한계상태설계법)과 더불어 토목분야에서는 이미 신뢰도 기반 설계법으로 대 방향전환을 이루고 있음을 인지하여 건축분야와 발맞추어 나가는 우리 학회에서도 현 ACI-318 기반 설계기준에서 한 발 더 나아가 시대적 흐름에 부합되는 설계기준개발의 필요성에 대한 진지한 논의가 이루어져야 할 것으로 생각한다. □

담당 편집위원 : 조재열(서울대학교) jycho@snu.ac.kr

참고문헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-11) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011.
2. 한국콘크리트학회, 「콘크리트구조기준 해설」, 2012.
3. British Standards Institution(BSI), Eurocode 2: Design of Concrete Structures, EN 1992-1-1 : London, 2004.
4. British Standards Institution(BSI), Eurocode 2: Design of Concrete Structures, EN 1992-1-2 : London, 2004.
5. Japan Society of Civil Engineers(JSCE), Standard Specifications for Concrete Structures, 2007.



신현목 교수는 동경대학 토목공학과에서 반복하중을 받는 철근콘크리트부재의 비선형유한요소해석으로 박사학위를 취득한 후 1989년부터 성균관대학교 건축토목공학부 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 콘크리트구조물의 비선형유한요소해석, 교량의 내진설계 등이다.
hmshin@skku.edu



차수원 교수는 1999년 서울대학교 토목공학과에서 초기재령콘크리트의 수화과정 모델링과 온도 및 습도응력 해석에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 2006년부터 울산대학교 건설환경공학부 교수로 근무하고 있다. 주요 연구 분야는 수화열 및 수축응력, 내구성 평가 등이다.
chasw@ulsan.ac.kr



조재열 교수는 2001년 서울대학교 토목공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 2007년부터 서울대학교 건설환경공학부 교수로 재직 중에 있다. 현재 초장대교량 사업단 1핵심과제 총괄을 담당하고 있으며, 도로교설계기준(한계상태설계법) 해설집 집필위원으로 활동하고 있다.
jycho@snu.ac.kr