

성능기반 콘크리트 구조설계기준

Performance-Based Design Code for Structural Concrete



정하선*
Ha-Sun Jeong



김 우**
Woo Kim

1. 서 론

약 150년 전인 19세기 중엽부터 현대의 콘크리트가 실용화되면서 구조물의 크기와 형태에 비약적 변화가 시작되었다. 콘크리트 공법의 광범위한 사용에 따라 공인된 설계기준이 등장하였으며, 그 첫번째가 1900년 초에 처음 작성된 영국 콘크리트설계기준이었으며, 연이어 미국을 비롯한 서양 각국의 설계기준이 제정되었다. 동양의 경우에는 1930년대 제정된 일본 설계기준을 들 수 있으며, 우리나라는 1960년대에 설계기준을 처음 제정하였다. 그 후, 설계기준은 콘크리트 구조의 기본 원리를 파악하는 정도에 따라 안전성과 경제성을 합리적으로 확보하는 방향으로 변화하고 있다. 20세기 후반에는 경제성이 강조되면서 설계기준은 큰 변혁을 겪고 있다. 특히, 21세기로 넘어오는 과정 중에는 세계 자유무역 협정에 의해, ① 국가 간 자유무역을 위한 기술적 장애 제거와, ② 국가 간 기술 규격 및 기준의 통일을 목적으로 각 나라의 설계기준은 통일된 형식과 내용을 포함하도록 요구하고 있다. 이러한 요구 사항은 ISO에 의해 설계기준은 ① 신뢰도기반 이어야 하며, ② 한계상태 설계법이어야 한다고 규정하고 있다. 더욱이 최근에는 성능기반 설계기준(performance-based design code)에 대한 논의가 각국에서 심각하게 진행되고 있는 실정이다.

이러한 현실은 더 이상 우리 국내적 요구 수준의 콘크리트 설계기준보다는 국제적 통용 가능 수준의 설계기준을 시급히 확보할 필요성이 매우 크다고 하겠다. 다행스럽게도 요즘 국내에서 설계기준 표준화 사업 등에 의해 많은 연구비가 여러 연구 집단에 지원되고 있는 실정이다. 현재 주변에서 진행되고 있는 세계화와 자유무역협정에 의해 향후 전개될 건설 시장 상황 변화에 능동적으로 대처하기 위해서 뿐만 아니라 작금의 중

은 연구 환경을 효율적으로 활용하기 위해서는, 주변의 변화를 정확하게 파악하여 우리 설계기준의 형태를 설정하고 그 효율적인 추진 전략 마련이 시급한 실정이라고 하겠다. 이 논고는 현재 건설교통부가 지원하고 우리 학회 연구소에서 진행하고 있는 "성능중심 콘크리트 구조설계기준 연구" 과제와 관련하여 연구 목표와 그 범위를 설정하는데 많은 논란이 있었던 성능기반 설계기준에 대해 많은 학자들의 관심과 토론을 도출하려는 의도로 마련하여 보았다.

2. 성능기반 설계기준

현재, 우리 건설 분야에서 "성능기반 설계기준 또는 성능기반 공학이란 무엇인가?"에 대한 해답은 정확하게 갖고 있지 않으며, 미국과 일본에서는 논의가 되고 있는 과정 중이다. 지금 우리가 사용하고 있는 설계기준은 사양중심 설계기준(prescriptive design code)이라고 한다. 이 사양중심 기준과 성능기반 기준의 차이는 Harris(2002)²⁾가 설명한 다음 예로 원론적 수준으로 이해 할 수 있다. 사양중심 기준에 의한 설계결과는 "직경 13 mm 철근을 60 mm 간격으로 슬래브 하단에 배치...", 그러나 성능기반 기준에 의한 설계 결과는 "극단하중(예로 500년 재현 주기의 지진)에서 구조물의 파괴를 적절한 수준으로 방지..."가 된다. 이러한 성능기반 설계는 자동차, 항공기 등의 다른 공학 분야에서는 새로운 개념이 아니고 이미 적용하고 있다. 즉, 제품을 획일화된 사양중심 설계기준에 의해 생산하지 않는 분야에서는 이미 성능기반 설계 및 제작을 하고 있는 것이다.

설계 관점에서 살펴보면, 사양중심 설계는 성능기반 설계보다 쉽다. 또한 사양중심 설계기준도 하중과 강도에 관한 불확실성을 반영하는 많은 변수들을 고려하고 있다. 뿐만 아니라, 사양중심 기준은 일반적인 재료를 사용한 건물이나 교량 설계에 효과적이며 경제적 설계를 가능하게 한다. 그러나 최근에 급증하는 고성능 건설 재료 개발과 시공법의 발전뿐만 아니라, 지

* 정회원, 한국콘크리트학회 부설 콘크리트공학연구소 소장
hasun@kci.or.kr

** 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

급까지는 주로 구조물의 신설이 건설시장의 주요 영역이었지만, 이제는 기존 구조물의 성능평가, 개축, 보강 및 유지관리가 점차 큰 영역으로 형성되고 있다. 현재의 사양중심 기준은 이러한 환경 변화를 반영하는데 논리적으로 한계가 있다. 이러한 배경에서 여러 설계기술자들을 중심으로 성능기반 설계기준의 필요성을 인식하게 되었다.

건물에 대한 성능기반 접근은 이미 1960년대에 시도되었다. 그 당시의 중요한 특징은 합리적인 신뢰도에 기반한 성능기준을 제시하려고 시도한 점이다. 그 후, 1970년대부터 설계기술자들은 지진에 대한 성능기반 설계를 시도하였는데, 이러한 시도는 대부분 정성적인 수준에 머물렀다. 예를 들면, 미국 캘리포니아 구조기술사협회에서 발간한 해설지침서(SEAOC 1975)에 “확률적으로 자주 발생 가능한 낮은 수준의 지진(frequent - minor earthquake)에 대해서는 손상이 발생하지 않도록, 종종 발생 가능한 보통 수준(occasional - moderate)의 지진에 의해서는 주요 구조 부재에 손상이 없도록, 그리고 흔하지 않게 발생 가능한 높은 수준(rare - major)의 지진에 대해서는 보수 가능한 정도의 손상이 발생하도록 설계”라고 규정하였지만, 각각의 지진 수준에 대한 정확하고 정량적인 정의를 제시하지는 않았다.

토목이 주로 관련된 교량 및 항만 등의 사회기반시설물에 대한 성능기반설계는 더욱 어려운 분야로 분류된다. 따라서 지금까지 기록할 만한 시도를 찾기 어려운 실정이다. 다만, 아주 최근에 유럽, 미국 및 일본을 중심으로 사회기반시설물의 성능기반 설계법에 대한 논의가 구체적으로 진행되고 있는 중이다. 이러한 활동의 배경은, 사회기반시설의 발주에 지금까지 적용했던 최저가 입찰방식이 요즘에는 설계→시공→운영→보증까지 포함하는 일괄 입찰방식의 혁신적 입찰체도가 국제적으로 점점 일반화되고 있는 상황이 성능기반설계법의 개발 필요성을 크게 증대시키고 있기 때문이다. 즉, 지금까지 사용하고 있는 사용성과 안전성에 대한 느슨하고 주관적이며 포괄적 정의 대신에 극단하중, 한계상태, 파괴 손상도 등에 대한 정밀한 정의와 시설물의 성능에 대해 객관적인 공학적 수치값으로 표현할 방법이 필요하게 된다.

건물과 교량의 성능을 공학적으로 계량화된 수치값으로 나타낸다는 것은 현재 대부분의 건설기술자에게는 상대적으로 생소한 개념이며, 이러한 분야에 관한 기초 연구도 유아기에 해당한다. 성능기반 설계는 구조물의 용도와 분류, 각 기능에 따른 성능의 정의와 그 계량방법 등으로 포함하는 많은 독립적인 상황과 서로 연관되어 있다. 따라서 여러 불확실성의 정도와 등급에서 구조물의 성능을 계량하고 기술하는 합리적 방법을 찾는 것이 성능기반 설계법의 핵심에 해당할 것이다. 현재 사용하는 사양중심 설계법의 대부분은 하중-저항계수와 한계상태를 근간으

로 하고 있다. 미래의 성능기반 설계법도 한계상태(limit states), 한계상황(limit situations)과 신뢰도기반 하중-저항계수 설계 기법(load-resistance factor design: LRFD)의 근본 개념을 반영한 형태이어야 할 것이다⁴⁾.

3. 신뢰도-기반 하중-저항계수 설계

하중-저항계수 설계 개념은 (그림 1)에 보인 것과 설계기본변수(하중, 저항강도, 및 기하적 제원)에 부분안전계수(하중계수 및 강도감소계수)를 적용하여 미리 정한 신뢰도를 얻을 수 있는 설계 기준값을 정하고, 이 값을 기준으로 검증(verification)하는 설계 기법이다.

부분안전계수(partial safety factor)의 수치 값은 (그림 2)에 나타낸 것과 같이 결정론적 방법(그림 2-(methods-a))이거나 확률론적 방법(그림 2-(methods-b)) 또는 두 방법의 조합(그림 2-(methods-c))에 의해 결정한다. 이론적으로는 완전 확률론적 방법이 정확한 값을 산출할 수 있지만, 실제적 통계 자료의 부족으로 인해 이 방법을 적용하기 어렵다. 따라서 현행 신뢰도기반 설계기준들은 대부분 (그림 2-(methods-a))와 부분

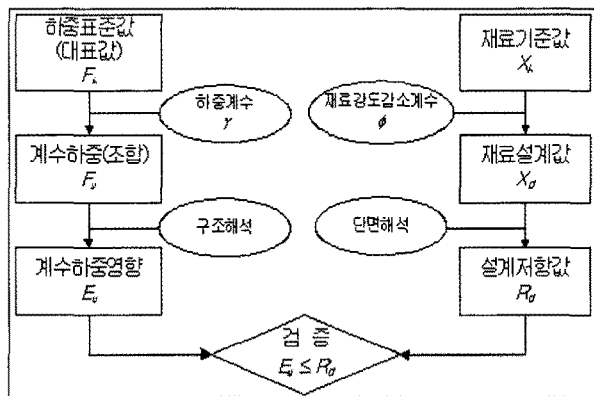


그림 1. 하중-저항계수 설계 개념

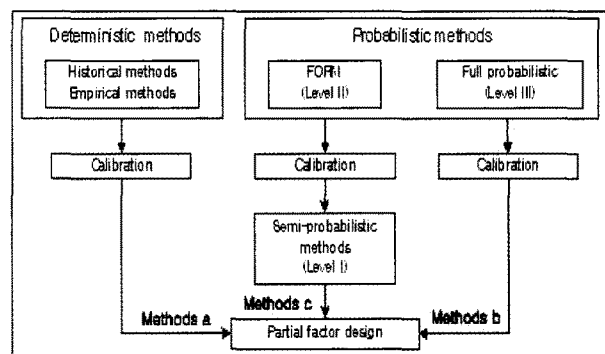


그림 2. 부분안전계수를 결정하기위한 방법

적으로 <그림 2-(methods-c)>를 적용하여 부분안전계수를 산출하였다. 확률론적 방법을 적용할 경우에서 신뢰도는 의도하는 수명 동안에 발생가능 파괴확률로 표현한다. 만약 계산된 파괴확률이 미리 설정한 목표파괴 확률보다 크다면 그 구조물은 불안전하다고 간주한다.

신뢰도기반 설계기준에서 이러한 신뢰도는 <그림 3>에 나타낸 것과 같이 설계기본변수에 따른 부분안전계수에 의해 명시적으로 반영된다. 이 부분안전계수는 크게 하중계수와 강도감소계수(또는 저항계수)로 구성되며, 각 계수는 다시 기본 변수에 따라 세분화할 수 있다.

<그림 3>은 일반적으로 사용하고 있는 부분안전계수의 정의와, 현행 신뢰도기반 설계법들에서 명시적으로 적용하고 있는 부분안전계수를 정리한 것이다. 신뢰도기반 하중-저항계수 설계개념을 기초로 성능기반 설계기준을 수립하는 것은 논리적으로 타당할 것이다. 다만, 성능기반 기준에서는 구조물의 기능, 사용성, 안전성 및 경제성을 각 경우마다 합리적으로 합성하는 방법을 강구해야 할 것이며, 이 때 그 동안의 많은 재난으로 배운 경험을 반영하여야 할 것이다.

4. 한계상태와 설계상황

한계상태(limit state)는 구조물 설계에서 요구하는 성능을 더 이상 발휘할 수 없는 상태를 말한다. 현재의 사양중심 설계기준에서 적용하고 있는 일반적인 한계상태는 크게 두 상태로 구별한다. 사용하중에서 균열, 처짐, 및 진동 등의 허용한계에 해당하는 사용한계상태(serviceability limit state), 최종 붕괴가 발생하는 극한한계상태(ultimate limit state)가 있다. 현재 한계상태 설계법의 대표적인 기준들에서 사용한계상태는 모든 설계기준에서 검증이 필요한 한계상태로 정하고 있으며, 이 한계 기준에서 조금씩 차이가 있을 뿐이다.

성능기반 설계기준에서는 지금의 사양중심 기준보다 훨씬 많은 종류의 성능한계상태가 정의되어야 한다. <표 1>에 정리한 한계상태는 1978년 CEB/FIP에서 권장하는 내용을 정리한 것

인데, 성능한계상태로 기능성, 사용성(내구성), 안전성, 및 기타 조건 한계상태로 구분한 예를 보인 것이다.

콘크리트 구조물은 의도된 성능을 발휘 할 수 있도록, 정해진 기간 동안 발생하는 실제 설계 조건에 해당하는 적절한 설계상황(design situation)을 선정하여 그에 부합되도록 설계하여야 한다. 유로코드에서 설계상황은 다음과 같이 네 가지로 구분하는데, 미래의 성능-기반 설계기준 작성에 기초를 제공할 수 있는 좋은 예에 해당한다고 할 수 있을 것이다.

- 1) 임시설계상황(transient design situation)
 - 구조물의 정상적인 사용 수명 보다 훨씬 짧은 기간 동안에 맞는 설계상황으로, 예를 들면, 시공 중이나 보수중과 같이 구조물이 일시적으로 노출되는 상황
- 2) 정상설계상황(persistent design situation)
 - 구조물 사용 수명 동안의 정상적 사용 때 발생 가능한 물리적 조건에 해당하는 상황
- 3) 극단설계상황(accidental design situation)
 - 화재, 폭발 및 국부적 파괴와 같은 구조물의 돌발적인 노출 조건을 포함하는 설계상황
- 4) 지진설계상황(seismic design situation)
 - 지진 상황에서의 설계 조건

한계상태 설계는 설계기본변수(하중, 재료 및 구조물 치수)에 대한 적절한 계수값과 설계값으로 설계하였을 때 한계상태를 초과하지 않는다는 것을 검증하여야 한다. 이 검증작업은 적합한 설계상황과 가장 불리한 경우 하중(load cases)을 파악하여 수행하여야 한다.

여기서 경우하중이란 특정 검토 상황에 동시에 발생하는 변동하중과 고정하중의 적합한 조합 하중의 배치를 의미한다. 특히 변동하중이나 환경하중의 설계 기준값(표준값)을 결정하는 일은 성능-기반 설계기준의 매우 큰 부분을 차지한다. <표 2>는 구조물에 작용하는 하중의 크기를 발생 확률빈도에 의해 결정하는 한 방법을 예시한 것이다.

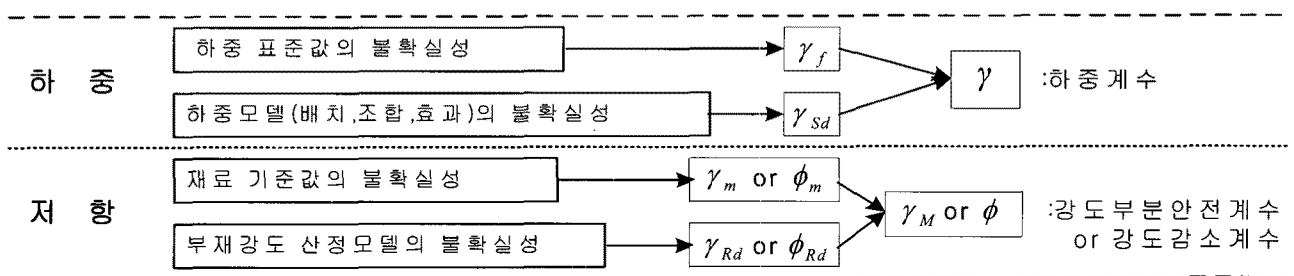


그림 3. 부분안전계수(하중-저항계수)의 구성

표 1. 한계상태 구분(예)

구분	기능한계상태	사용(내구)한계상태	안전(안정)한계상태	조건한계상태
내용	환경상 기능상실 사회적 기능상실 경제적 기능상실	과도한 변위 국부적 손상 진동 열화	구성재료 파괴 피로 파괴 과도한 변형 과도한 침하	다중비상탈출 지연 붕괴 순차적 붕괴

표 2. 하중의 설계 표준값 설정(예)

	빈도(재현 주기, 년)			
	보통빈도(0)	가끔빈도(5-25)	희귀빈도(205-500)	극단빈도(2500-5000)
고정하중 활하중 풍하중	설계지속하중 일반 적재하중 일반 풍하중	리모델링하중 포함 설계활하중 50년 주기 태풍의 초과확률 50% 크기	설계활하중 초과 50년 주기 태풍의 초과 확률 10% 크기	- - 50년 주기 태풍의 초과 확률 2% 크기
홍수 극단희귀하중	- -	100년 -	500년	전쟁, 천재지변

신뢰도-기반 한계상태설계법은 미리 정한 파괴확률로 정의된 각 한계상태에서 충분한 강도를 확보하도록 하는 방법이다. 그러나 성능-기반 설계에서는 주어진 설계상황에서 안전에 대한 검토 뿐만 아니라, 파괴위험도(risk of failure)까지 고려해야 한다. 여기서 파괴위험도란 파괴 확률 뿐만 아니라 파괴 과정과 그 영향을 포함하는 것이다. 이러한 관점에서 <표 1>과 <표 2>는 향후 성능-기반 설계기준 작성을 위한 토론에 필요한 중요한 기초 자료일 것이다.

5. 결 언

21세기 들면서 국제적 자유무역이 빠른 속도로 확대되고 있는 동시에, 국내에서는 건설 기술자들에게 사회적 책임을 부과 하려고 하는 경향이 크게 증대되고 있다. 이러한 환경은 훨씬 정교하면서, 다양한 설계환경에 부합하는 설계기준을 요구한다. 현재 우리가 사용하는 설계기준의 모태들은 지난 세기 초에 작성된 원리들에 상당한 기초를 두고 있기 때문에 이 설계기준에 의해 설계되고 건설된 콘크리트 구조물의 실제 성능은 설계시 예상한 것과는 많은 차이가 있다는 것이 밝혀지고 있다³⁾.

더 우수한 설계기준을 제정하기 위해서는 무엇보다도 실제 구조물의 거동에 대한 더 정확한 정보와 지식을 확보하는 것이 선결 조건일 것이다. 이러한 배경에서 우리 보다 앞서가는 국

가들에서는 이러한 자료를 준비하는데 노력을 경주하기 시작하였다. 우리도 당연히 이러한 시대적 변화에 대한 인식이 더 늦여져서는 않될 것이다.

더욱이, 최근에 국가로부터 건설기준 개선 작업에 많은 연구비가 할당되고 있다. 따라서 우리의 설계기준을 마련하는데 많은 학자와 기술자들의 관심과 토론이 절실히 필요하다고 하겠다. 이 논고는 다만 향후 준비할 콘크리트구조설계기준의 기본틀을 작성하기 위한 토론의 자료로 사용하기 의도로 마련한 것임을 다시 한번 언급하고 싶다. □

참고문헌

1. CEB-FIP, *Intrnational System of Unified Standard Codes of Practice for Structures*, Int Recommendation, Laussane, Switzerland, 1978.
2. Harris, J. R., "Performance-Based Structural Engineering: A Review", *Proc. Structural Congress*, ASCE, 2002.
3. Moon, F. L. and Aktan, A. E., "Impacts of Epistemic Uncertainty on Structural Identification of Constructed Systems", *Shock Vib. Dig.*, Vol.38, No.5, 2006.
4. Aktan, A. E, Ellingwrod, B., and Kehoe, B., "Performance-Based Engineering of Constructed Systems", *Journal of Struct. Engr.*, ASCE, 2007, 3, pp.311 ~ 323.