

콘크리트 역학적 성질의 통계적 특성

Statistical Characteristic of Mechanical Properties of Concrete

김 지 상* 신 정 호** 최 연 왕*** 문 재 흠**** 김 주 형*****
Kim, Jee-Sang Shin Jeong Ho Choi Yeon-Wang Moon Jea-Heum Kim Joo-Hyung

ABSTRACT

The mechanical properties of concrete such as compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity, are considerably influenced by various factors including locality. The material property prescriptions in national concrete design codes should reflect them. In Korea, they have not been studied systematically yet. A new performance-based design code is being prepared in Korea as a government-supported project and it has a plan to make new material prescriptions adopting domestic research results. As a starting point for the research on material properties, the statistical characteristics of mechanical properties of concrete are studied. In this paper, a probabilistic model of compressive strength, relationship between compressive strength and splitting tensile strength and compressive strength and elastic modulus are proposed based on experimental data.

요 약

철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어 구성 재료의 역학적 특성은 기본적인 자료로서 그 불확실성 및 변동성을 합리적으로 고려하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 기존의 문헌자료 및 추가적인 실험 자료를 바탕으로 콘크리트의 품질 기준으로 가장 널리 쓰이고 있는 콘크리트 압축강도의 통계적 모델을 확립하고, 압축강도와 쪼갬 인장강도의 관계식을 정리하였으며 콘크리트 구조설계기준에 제시된 콘크리트의 탄성계수를 결정하는 방법을 검증하였다. 각 결과는 우리나라 설계기준을 포함한 각국의 설계기준 상의 규정과 비교하여 그 적합성을 확인하였다. 향후 추가적인 실험 연구 및 자료 조사가 이루어지면 우리나라 실정을 반영하는 보다 합리적인 콘크리트 역학적 성질의 통계적 특성에 대한 모델을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

* 정회원, 서경대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서경대학교 도시환경시스템공학과 석사과정
*** 정회원, 세명대학교 토목공학과 교수
**** 정회원, 한국건자재시험연구원 선임연구원
***** 정회원, 한국건자재시험연구원 연구원

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 있어 구성 재료의 역학적 특성은 기본적인 자료로서 그 불확실성 및 변동성을 합리적으로 고려하는 것이 매우 중요하다. 특히, 성능기반 설계기준을 작성하는 경우 신뢰도 기반으로 설계기준의 구성이 이루어지게 되므로 재료 성질의 통계적 성질을 정확히 파악하는 것이 필수적인데, 아직 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구 결과의 축적 및 분석이 부족한 실정이다. 이 논문에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 합리적인 확률모델을 제안하고, 콘크리트의 압축강도를 이용하여 쪼갬 인장강도 및 탄성계수를 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연구범위 및 방법

이 연구에서 사용된 콘크리트 시험자료로는 국내 레미콘회사 3곳의 2007년 현장 강도 데이터와 실내 실험 결과를 이용하였다. 콘크리트의 압축강도를 기술하는 확률 분포모델을 도출하기 위해 전체 4340개의 자료를 이용하였으며 설계기준강도의 영향을 배제하기 위하여 설계기준강도와 실제 측정된 압축강도의 비(f_{cu}/f_{ck})를 확률변수로 하였으며, 확률분포모델은 Minitab²⁾을 이용하여 작성하였다. 콘크리트 공시체의 압축강도와 쪼갬인장강도 사이의 상관관계를 분석하기 위해 209개의 자료를 이용해 적합한 관계식을 도출하였으며 탄성계수와와의 상관관계를 분석하기 위해 265개의 자료를 이용하였다.

3. 콘크리트 압축강도의 확률분포모델

콘크리트 압축강도의 확률모델을 결정하기 위하여 실제 레미콘 회사에서 생산되는 콘크리트 압축강도 자료를 수집하였으며, 별도의 실내실험을 병행하였다. 그림 1, 3, 5는 레미콘 회사자료로 콘크리트 공시체의 설계기준강도를 각각 24MPa, 30MPa로 분류한 것과 실내배합 자료의 압축강도의 확률분포를 나타낸 것이고 그림 2, 4, 6은 앞의 통계자료를 확률지로 옮기고 95%신뢰도 구간을 기준으로 각 확률모델의 적합성을 검증한 것이다. 레미콘 회사 자료를 분석한 결과 변동계수가 6.9%, 6.0%, 14.25%를 기록하여 대수정규분포가 적합하다고 할 수 있으며, 실내배합데이터는 정규분포 모델을 적용할 경우 신뢰도 95%의 수준으로 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.

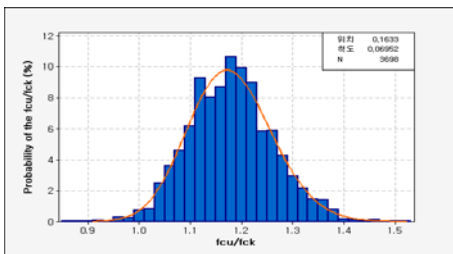


그림 1. 레미콘회사의 설계기준강도 24MPa 자료의 압축강도 확률곡선(대수정규)

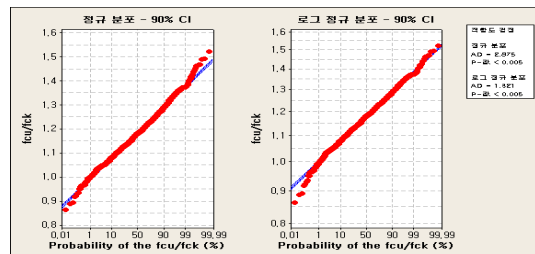


그림 2. 확률지에 그린 정규분포 및 대수정규분포곡선 (레미콘회사의 24MPa)

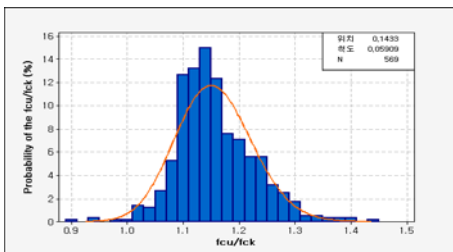


그림 3. 레미콘회사의 설계기준강도 30MPa 자료의 압축강도 확률곡선(대수정규)

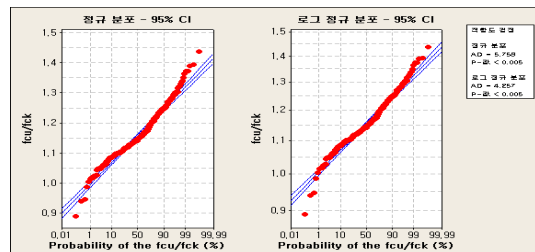


그림 4. 확률지에 그린 정규분포 및 대수정규분포곡선 (레미콘회사의 30MPa)

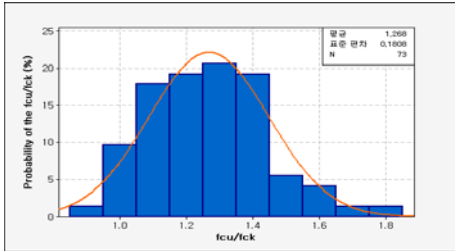


그림 5. 실내배합의 설계기준강도 24MPa 자료의 압축강도 확률곡선(정규)

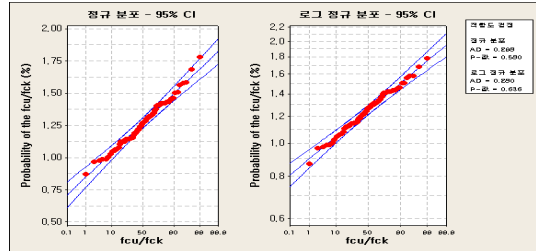


그림 6. 확률지에 그린 정규분포 및 대수정규분포곡선 (실내배합자료의 24MPa)

표 1. 모든 압축강도 자료의 Method of Moments Estimation

Distribution	PDF of PMF	Parameters			Relation to Moments
		R24	R30	Lab	
The Method of Moments					
Gaussian (normal)	$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right];$ $-\infty < x < \infty$	$\mu = 1.1802$ $\sigma = 0.0820$	$\mu = 1.1561$ $\sigma = 0.0690$	$\mu = 1.268$ $\sigma = 0.1808$	$\mu_X = \mu$ $\sigma_X^2 = \sigma^2$
Lognormal	$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right];$ $x \geq 0$	$\lambda = 0.1633$ $\zeta = 0.0694$	$\lambda = 0.1433$ $\zeta = 0.0596$	$\lambda = 0.2274$ $\zeta = 0.1419$	$\mu_X = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right)$ $\sigma_X^2 = \mu_X^2(e^{\zeta^2} - 1)$

R24 : 레미콘 3사의 설계기준강도 24MPa, R30 : 레미콘 3사의 설계기준강도 30MPa, Lab : 실내배합데이터의 전체자료

4. 콘크리트 압축강도와 쪼갬인장강도, 탄성계수와 상관계

4.1 콘크리트 압축강도와 쪼갬인장강도의 상관관계

콘크리트 압축강도와 쪼갬인장강도 및 탄성계수와 상관계는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$f_a = c \times f_b^n \quad (1)$$

여기서 f_a 와 f_b 는 상관관계를 가지는 각각의 강도 및 탄성계수이고 c 와 n 은 상수이다. CEB-FIP Model Code 1990⁵⁾의 경우 식(1)과 유사한 형태를 제시하고 있는데, 압축강도가 낮을 때는 인장강도를 과소평가하고 높을 때는 과대평가하는 경향을 볼 수 있다. 그림 7은 209개의 자료를 이용하여 회귀분석을 수행한 것이고, 여기서 최적화된 상관관계식은 $n=0.513$ 일 때, $c=0.508$ 로서 식(2)는 관계식을 식(1)의 형태로 표현한 것이다.

$$f_{sp} = 0.508 \cdot f_c^{0.513} \quad (2)$$

여기서 f_{sp} 는 쪼갬인장강도이며, f_c 는 실측한 압축강도이다.

4.2 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 상관관계

콘크리트 구조물 설계기준(2007)³⁾에서는 콘크리트의 탄성계수와 압축강도의 관계식에서 설계기준강도(f_{ck})에 8MPa를 더한 재령 28일에서 평균압축강도(f_{cu})를 사용하도록 규정하고 있는데, 식(3)의 값이다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (3)$$

그림 8은 265개의 자료를 이용하여 $n=1/3$ 일 때의 최적화된 관계식을 도출한 것으로 식(4)가 회귀 분석 결과식인데 식(3)과 비교하여보면 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

$$E_c = 8,871 \sqrt[3]{f_c} \quad (4)$$

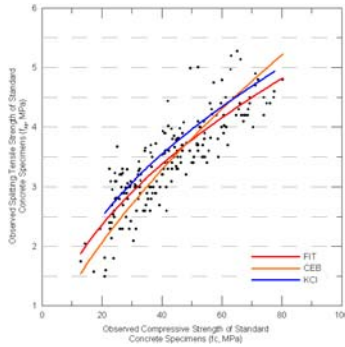


그림 7. 쪼갬인장강도-압축강도 상관 그래프

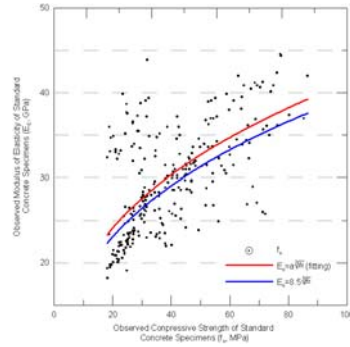


그림 8. 탄성계수-압축강도 상관 그래프

5. 결 론

1. 콘크리트 압축강도의 확률모델로 정규분포 및 대수정규분포모델에 대하여 적합성을 검증하였다.
2. 콘크리트 압축강도와 쪼갬인장강도와의 관계식에서는 최적화된 관계식을 도출하였는데, 우리나라 설계기준에서 제시한 28일 평균압축강도(f_{ck})를 사용하는 경우 탄성계수 값을 크게 추정하는 것으로 판단된다.
3. 추후 추가적인 실험을 진행하고 연구결과를 축적하여 우리나라 실정을 반영할 수 있는 콘크리트 역학적 특성의 확률모델을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 산하 한국건설교통기술평가원의 「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다

참고문헌

1. Mirza, S. A., Hatzinilolas, M., MacGregor, J.G., "Statistical Descriptions of the Strength of Concrete," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST6, June 1979, pp.1021-1037.
2. Minitab, "통계 소프트웨어", www.minitab.co.kr
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준(2007)"
4. ACI Committee 214(1997), "Simplified Version of the Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214.3R-88)," American Concrete Institute.
5. Comite Euro-International Du Beton, "CEB-FIP MODEL CODE 1990." Thomas Telford, 1993