

소요강도에 기반한 철근콘크리트 부재의 안전성 평가

Safety Evaluation Based on Required Strength for Reinforced Concrete Members

천주현* 김기호** 이상철*** 최정호**** 신현목*****
Cheon, Ju Hyun Kim, Ki Ho Lee, Sang Cheol Choi, Jung ho Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The Purpose of this study is to offer an appropriate and reliable safety evaluation method the reinforced concrete members like as reinforced concrete deep beams and reinforced concrete columns, etc. A nonlinear finite element analysis program named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) was used to evaluate the ultimate strength analytically for the reinforced concrete members that have complicated mechanical behaviors. The nonlinear material model for the reinforced concrete is composed of models for characterizing the behavior of the concrete, in addition to a model for characterizing the reinforcing bars. The proposed numerical method for the safety evaluation of reinforced concrete bridge structures that is consisted of reinforced concrete member is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서론

세계적으로 콘크리트 구조물에 대한 설계법이 현재의 limit State Design에서 Performance Based Design으로 전환되고 있는 추세이며 이에 따른 활발한 연구가 미국, 유럽 및 일본 등에서 이루어지고 있다. 이러한 연구에서 가장 근간이 되는 주제는 구조물의 강도뿐만 아니라 변형 능력의 정보를 포함한 신뢰도 높은 비선형 해석기술의 확보와 함께 이를 직접 설계에 적용하기 위해서는 해석결과에 대한 안전율을 확보하기 위한 연구가 필요하다¹⁾. 이 연구에서는 저자 등²⁾에 의하여 개발된 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 개별 부재로서 그 중요성이 큰 철근콘크리트 깊은 보¹⁾와 철근콘크리트 기둥 실험체³⁾를 대상으로, 실험과 해석 결과에 신뢰성이론을 적용하여 각 구조물의 목표 신뢰지수를 정한 후 해석결과에 안전계수를 도입함으로써 비선형 유한요소해석으로부터의 해석결과가 이를 확보할 수 있도록 한다. 이를 통해 철근콘크리트 부재에 대하여 성능기반 설계기준의 개발에 필요한 전반적인 기초 자료를 제시하고자 한다.

* 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사

** 정희원, (주) 삼안, 공학석사

*** 정희원, 한국시설안전기술공단 교량실 부장, 구조기술사, 공학박사

**** 정희원, 국립한경대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

***** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 그리고 탄성요소 등²⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁴⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였고, 그 동안 저자 등에 의하여 수행된 연구결과²⁾에서와 같이, 그림 1과 같은 신뢰성 있는 철근콘크리트 기둥 실험체에 적용하여 그 신뢰도를 평가 하였다.

3. 신뢰도 지수 산정

이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 통한 해석 결과에 적용할 추적인 감소계수를 아래와 같은 신뢰성 이론을 통하여 산정한다. 신뢰도 지수 산정에는 일계이차모멘트법(First-Order Second-Moment method)⁵⁾을 적용하였고, 이는 정규분포 확률변수 X 의 평균과 표준편차가 각각 μ_i , σ_i 일 때, 확률변수 X_i 의 선형 합으로 정의되는 한계상태식으로 나타낼 수 있다. 여기서, 한계상태식의 표준편차에 대한 평균의 비인 μ_G/σ_G 을 신뢰도지수(Reliability index) β 라 정의하며, 파괴확률 P_f 는 식 (1)과 같다.

$$P_f = \phi(-\beta), \quad \text{where } \beta = \mu_G/\sigma_G \quad (1)$$

4. 대상 시험체

이 연구에서 적용한 해석기법과 재료적 비선형성을 고려한 해석모델의 타당성을 검증하기 위한 대상 시험체로 우선, 아래의 표 1과 같이 균열 후의 복잡한 전단거동 특성을 나타내는 철근 콘크리트 깊은 보에 대하여 Clark A. P.(1951)와 Smith 등(1982)이 실험한 총 102개의 실험체를 선정하였다¹⁾. 이 실험체는 다양한 전단지간비(a/d)에 따라 콘크리트의 압축강도, 수직 그리고 수평전단 철근이 그 전단 거동특성에 미치는 영향을 파악하고, 그 전단 강도를 예측하기 위한 실험이다. 두 번째 대상 실험체로는 다양한 단면 및 압축강도와 배근상세를 갖는 철근콘크리트 기둥 실험체로, 각각의 실험체들은 형상비와 주철근 비를 변화시키면서 전단 파괴를 유도한 실험체(Ang 등, 1998), 겹침이음된 주철근과 크로스타이의 형상을 변화시킨 휨파괴 실험체(정영수 등, 2001), 띠철근과 나선형 철근에 대하여 축력비와 수평철근 간격, 주철근비를 변화시킨 휨파괴 실험체(이재훈 등 2001, 2002), 사각형 단면에 대하여 크로스타이를 변형시킨 휨 파괴 실험체(Guney Ozcebe and Murat saatcioglu, 1987)와 주철근비, 띠철근비와 단면의 형상 등을 변화시킨 양단 고정, 힌지의 압축 파괴 실험체(Chien-Hung Lin 등, 2004; James F. PFISTER, 1964) 등과 같이 총 115개의 대상 실험체를 선정하였다³⁾. 이 연구에서는 횡방향 철근에 대한 구속효과와 하중 재하 방법에 따른 효과를 분석한 결과 구속효과는 Mander의 모델을, 하중은 Monotonic재하를 하였다.

5. 실험 및 해석결과와의 비교·분석

이와 같은 총 217개의 신뢰성 있는 철근콘크리트 부재에 대하여 실험과 해석 및 이와와의 비교·분석을 위하여 현행의 콘크리트구조설계기준(2005)에 의한 공칭 강도에 의한 결과를 각각 표 2에 나타내었다. 표 2에서와 같이 총 102개의 철근콘크리트 깊은 보 실험체에 대한 해석과 실험으로부터의 극한 강도 비(比)에 대한 평균은 약 103%, 표준편차와 변동계수가 각각 9%와 8%정도로서 이는 이 연구에

서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램이 비교적 큰 신뢰도를 나타냄을 알 수 있다. 이에 반해, 콘크리트 구조설계기준에 의한 공칭강도와 실험에 의한 극한강도 비(比)는 평균이 71%, 그 표준편차와 변동계수가 각각 12%와 20%이상으로서, 그 결과에 대한 신뢰도가 비교적 작다고 할 수 있다. 특히, 설계기준이 오히려 실험에 의한 결과보다 그 강도를 더 크게 평가하고 있는 예도 있음을 알 수 있었다.¹⁾ 또한, 총 115개의 철근콘크리트 기둥 실험체에 대한 해석과 실험으로부터의 극한강도 비(比)에 대한 평균과 표준편차 및 변동계수로부터, 위에서와 같이 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램에 대한 신뢰성을 검증하였다. 해석과 실험으로부터의 극한강도 비(比)에 대한 정규성을 검증하였고, 이를 바탕으로 대상으로 한 철근콘크리트 실험체의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Euro Code의 Very Large의 중요도를 갖는 구조물에 해당하는 신뢰도 지수 3.72 이상을 확보하기 위하여 해석으로부터의 결과에 적용할 안전계수를 신뢰성 해석으로부터 산정하여 각각 표2에 같이 나타내었다. 이러한 결과를 성능기반 설계에의 기초자료로 활용할 수 있도록 하기 위하여, 전체 217개의 대상 실험체에 대한 평균과 표준편차 및 신뢰도 지수를 재산정하여 표 2에 같이 나타내었다. 표 2에서는 임의의 철근콘크리트 부재의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수 3.72 이상을 확보하기 위하여, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램으로부터의 해석 결과적용 할 안전계수 0.73을 산정하였고, 이를 설계기준과 비교·분석을 통하여 그 신뢰성을 검증하였다. 실험 결과와 이 연구를 통하여 수행된 결과를 바탕으로 산정된 안전계수를 해석 결과에 적용하여 각각 그림 1~그림 3에 나타내었다.

표 1 대상 실험체

| Specimen | Author | 시험체 개수 |
|--------------------------------|---|--------|
| Reinforced Concrete Deep Beams | Clark A.P(1951) | 50 |
| | K.N. Smith and A.S. Vantsiotis(1982) | 52 |
| Reinforced Concrete Columns | James F.PFISTER(1964) | 11 |
| | Guney Ozcebe and Murat saatcioglu(1987) | 4 |
| | Ang et al(1989) | 23 |
| | 이재훈 등(2002, 2003) | 28 |
| | 정영수 등(2002, 2003) | 19 |
| | Chien-Hung Lin et(2004) | 30 |
| Total | | 217 |

표 2 실험, 해석 및 설계 기준에 의한 결과

| | | Ana./Exp. | Code/Exp. | Ana(70%)/Exp. |
|--|--------|-------------------------------------|-----------|---------------|
| | | Reinforced Concrete Deep Beams(102) | 평균 | 1.029 |
| | 표준편차 | 0.087 | 0.115 | 0.063 |
| | 변동계수 | 0.084 | 0.202 | 0.089 |
| | 신뢰도 지수 | - | 3.748 | 4.634 |
| | | Ana./Exp. | Code/Exp. | Ana(76%)/Exp. |
| | | Reinforced Concrete Columns(115) | 평균 | 1.005 |
| | 표준편차 | 0.080 | 0.069 | 0.059 |
| | 변동계수 | 0.079 | 0.109 | 0.077 |
| | 신뢰도 지수 | - | 5.277 | 3.915 |
| | | Ana./Exp. | Code/Exp. | Ana(73%)/Exp. |
| | | Total (217) | 평균 | 1.017 |
| | 표준편차 | 0.084 | 0.113 | 0.061 |
| | 변동계수 | 0.083 | 0.166 | 0.082 |
| | 신뢰도 지수 | - | 2.885 | 4.230 |

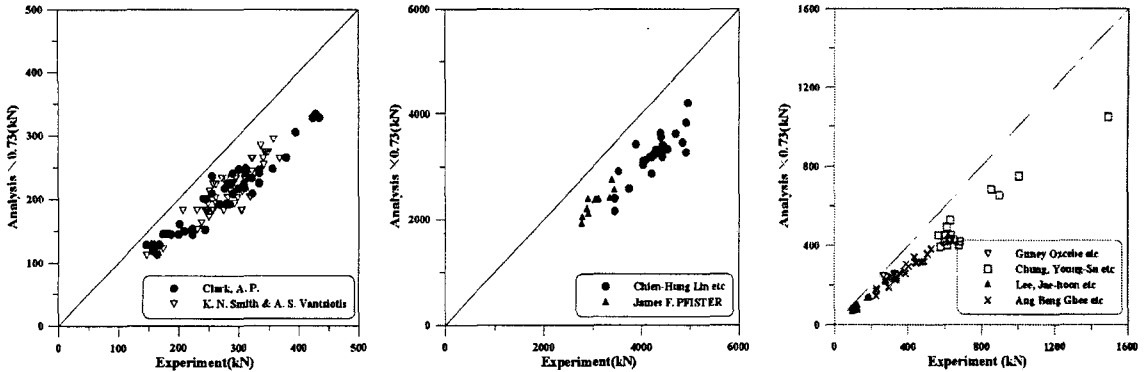


그림 1 실험 및 안전계수를 적용한 해석 결과로부터의 극한 강도

5. 결론

이 연구에서는 성능기반 설계를 위한 비선형 유한요소 해석 프로그램 RCAHEST를 신뢰성 있는 철근콘크리트 실험체에 적용한 후, 목표 신뢰도 지수의 확보를 위하여 해석 결과에 적용할 안전계수를 산정하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여, 저자 등에 의하여 수행된 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소 해석 프로그램 RCAHEST의 적용성을 신뢰성 있는 철근콘크리트 부재 실험체에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.
2. 철근콘크리트 깊은 보 및 철근콘크리트 기둥의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 설정하고, 이를 확보하기 위하여 해석 결과에 적용할 새로운 안전계수를 산정하였고, 실험 및 각 설계 기준에 의한 결과와의 비교·분석을 통하여 그 타당성을 검증하였다.
3. 이러한 결과를 바탕으로 하여, 향후 성능기반 설계를 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업(KBRC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 천주현, 김태훈, 이상철, 신현목(2005), "철근콘크리트 깊은 보의 내하력에 대한 신뢰도 평가", 한국 콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 6, pp.955~962
2. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns," Engineering Structures, 2005, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
3. 김기호(2005), "성능기반설계를 위한 철근콘크리트 구조용 비선형 유한요소해석 프로그램의 신뢰성 평가", 석사학위청구논문, 성균관대학교 대학원 토목환경공학과
4. Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
5. 양영순, 서용석, 이재욱, (1999) "구조신뢰성 공학", 서울대학교 출판부.