비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 깊은 보의 내하력 평가

Load Capacity Assesment of Reinforced Concrete Deep Beams using Nonlinear Finite Element Analysis

천 주 현* 김 태 훈** 이 상 철*** 신 현 목****
Cheon, Ju Hyun · Kim, Tae Hoon · Lee, Sang Cheol · Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

This paper presents a method for the load capacity assesment of reinforcement concrete deep beams using nonlinear finite element analysis. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. From the results, determine the reliability index for the failure base from the Euro Code. Then, calculated additional reduction coefficient to satisfy the goals from the reliability analysis. The proposed numerical method for the load capacity assesment of reinforced concrete deep beams is verified by comparison with the others methods

1. 서 론

철근콘크리트 깊은 보는 주로 전단에 의해 그 거동이 지배되며 구조 및 재료의 비선형성으로 인하여 현재까지 정확한 이론적인 해석방법이 확립되지 않고 있으며 설계방법 또한 실험과 경험에 근거하고 있다.

구조물에 대한 내하력 평가는 주로 전체구조물로서 교량 상부구조에 대하여 허용응력이론(WSD), 하중-저항계수이론(LRFD), 그리고 신뢰성지수에 의한 내하력 판정 방법 등이 사용되고 있지만, 일관성 없는 기준과 각기 다른 연구결과에 의존하여 수행되는 등 적지 않은 불합리성을 포함하고 있다.

이에 이 연구에서는 전체 구조물이 아닌 개별부재로서 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 저자 등에 의해 수행되었던 연구결과[1]를 바탕으로 철근 콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 설정하였다. 그리고 이를 만족하는 적절한 감소 계수를 산정하여 합리적인 내하력 평가 방안을 마련하였으며 이러한 과정을 통해 철근콘크리트 깊은 보의 설계에 필요한 전반적인 기초 자료를 제시하고자 한다.

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사
** 정회원, 대우건설기술연구소 전임연구원, 공학박사
*** 정회원, 한국시설안전기술공단 진단 1본부 교량 2실 부장, 공학박사
**** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

2. 비선형 유한요소해석 프로그램

이 연구에 앞서 저자 등에 의하여 수행된 연구[1]에서와 같이, 철근콘크리트 깊은 보의 복잡한 거동 특성을 정확히 예측하기 위한 재료적 비선형성을 고려한 재료모델[2),3)]과 이를 바탕으로 한 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)[2),3)]를 사용하였다.

3. 비선형 유한요소해석 프로그램의 검증

앞서 수행된 연구[1]에서와 같이 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해 신뢰성 있는 총 102개의 철근콘크리트 깊은 보 시험체[4),5)]를 대상으로 선정하였다. 해석과 실험으로부터의 극한강도와 이 결과를 바탕으로 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST에 대한 신뢰 수준을 통계학적인 방법으로 산정하여 아래의 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다. 결과에 근거해 볼 때, 철근콘크리트 깊은 보의 신뢰성 있는 내하력 평가를 위해서는 추가적인 감소 계수가 필요함을 알 수 있다. 이를 위하여 철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 설정하였으며 이를 만족하도록 하는 추가적인 감소 계수를 신뢰성 이론을 바탕으로 4절에서 결정하였다.

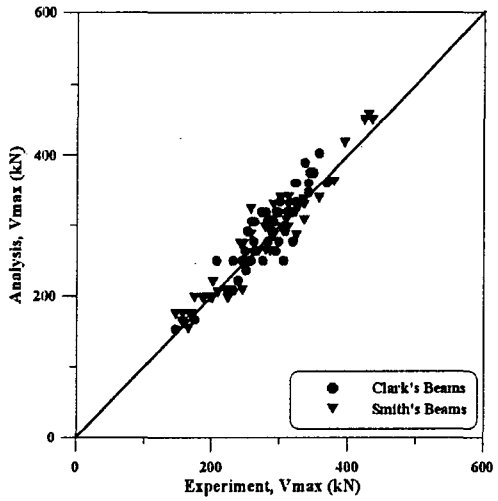

그림 1 해석과 실험의 극한강도 비교

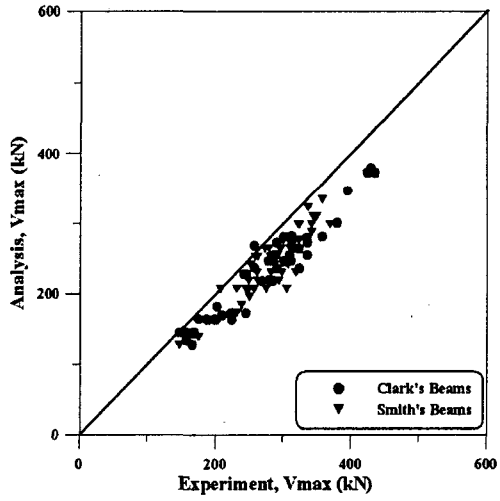

그림 2 해석프로그램에 대한 신뢰수준 적용

4. 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수 산정

4.1 신뢰도 지수

이 연구에서는 철근콘크리트 깊은 보의 신뢰성 있는 내하력 평가를 위해서 신뢰도 지수 산정에, 다음 식과 같은 일계이차모멘트법(First-Order Second-Moment method)을 적용하였다. 즉 정규분포 확률변수 X_i의 평균과 표준편차가 각각 μ_i과 σ_i일 때, 확률변수 X_i의 선형 합으로 정의되는 한계상태식으로 나타낼 수 있다.

$$g = a_0 + a_1 X_1 + ... + a_n X_n \tag{1}$$

이러한 한계상태식 g의 값을 새로운 확률변수 G라고 하면, 확률변수 G의 확률분포는 정규분포가 된다. 따라서 한계상태식 g에 대한 파괴확률은 새롭게 정의된 정규분포 확률변수 G가 0보다 작을 확률 이므로 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = P[G \le 0] = \phi(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}) = \phi(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}) \tag{2}$$

그리고 한계상태식의 표준편차에 대한 평균의 비인 μ_G/σ_G을 신뢰도지수(reliability index) β라 정의하며, 파괴확률 P_f는 다음 식과 같다.

$$P_f = \phi(-\beta), \text{ where } \beta = \mu_G/\sigma_G \tag{3}$$

4.2 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수 산정

철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 표 1에서와 같이 Euro Code에서 정의하고 있는 구조물의 중요도에 따른 목표 신뢰도 지수 기준을 바탕으로 하여, 구조물의 중요도 Very Large에 해당하는 신뢰도 지수 이상을 확보할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 신뢰성 이론과 해석결과를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2에는 해석결과에 적용할 적절하고, 합리적인 감소 계수를 결정하기 위하여 콘크리트 구조설계기준과 Euro Code에서 적용하고 있는 철근과 콘크리트에 대한 부분안전 계수 1.15와 1.5를 적용한 결과를 각각 비교하여 나타내었다. 표 2의 결과를 볼 때, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)으로부터의 해석결과에 해석 프로그램에 대한 신뢰 수준 0.83과 추가적인 감소 계수 0.85를 적용한 경우, 신뢰도 지수는 4.6정도로서 목표 신뢰도 지수 3.719이상을 확보하고 있으며, 표준 편차와 변동 계수 또한 다른 결과에 비하여 그 신뢰도가 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 철근콘크리트 깊은 보의 내하력 평가 시, 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)으로부터의 극한강도에 추가적인 감소 계수 0.7(≈0.83×0.85)을 적용하면 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

표 1 Euro Code에서 구조물의 중요도에 따른 신뢰도 지수

Very Small	○				
Small	○				
Medium		○			
Large			○		
Very Large				○	
Consequence Probability	> 0.1	> 0.01	> 0.001	> 0.0001	> 0.00001
Reliability Index	1.282	2.326	3.090	3.719	4.270

표 2 신뢰도 지수 산정

Item	Ana./Exp.	표준편차	변동계수	신뢰도지수	파괴 확률
1.50(콘크리트) 1.15(철근)	0.767	0.071	0.092	3.289	5.01×10^{-4}
V_n	0.711	0.144	0.202	2.010	2.22×10^{-2}
ϕV_n	0.569	0.115	0.202	3.748	8.91×10^{-5}
$V_{ANA}\times0.83\times0.85$	0.707	0.063	0.089	4.634	1.79×10^{-6}

5. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트 깊은 보에 대하여 적절하고 합리적인 내하력 평가를 위해 기존에 수행된 연구결과[1]를 바탕으로 신뢰성 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 철근콘크리트 깊은 보의 내하력 평가를 위하여 이 연구에서 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 기존의 신뢰성 있는 실험체에 적용하여 그 타당성을 확인하였고, 이를 바탕으로 해석 결과에 대한 신뢰도를 검증하였다.
2) 철근콘크리트 깊은 보의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Euro Code의 Very Large 기준을 만족할 수 있도록 비선형 유한요소해석 의한 해석결과에 감소계수 0.7을 적용하였다.
3) 이러한 결과를 근거로 철근콘크리트 깊은 보(Deep Beam)에 대하여 적절하고 합리적인 방법으로 내하력을 평가할 수 있는 기초 자료를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 천주현, 김태훈, 이상철, 신현목, "철근콘크리트 깊은 보의 전단거동에 관한 해석적 연구", 대한토목학회 추계 학술발표 논문집, 2004. pp 3192-3197.
2. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
3. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 9, 2003, pp. 1199-1207.
4. Clark, A. P., "Diagonal Tension in Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, V. 23, No. 2. 1951, pp 145-156.
5. Smith, K. N., and Vantsiotis, A. S., "Shear Strength of Deep Beams", ACI Journal, Vol. 21, No. 6, 1982, pp 201-213.