

비국소 손상모델을 이용한 전력구 모형 실험체의 파괴거동 해석

Fracture Behavior Analysis of Box Culvert Specimen Using Non-local Damage Model

권 용 길* 우 상 균** 한 상 훈*** 송 영 철****

Kwon, Yong Gil Woo, Sang Kyun Han, Sang Hoon Song, Young Cheul

ABSTRACT

In case of nonlinear analysis for reinforced concrete structure, the characteristics of the failure, which are depend on loading conditions, such as tension splitting, compression crushing and shear distortion should be considered. On the analytical evaluation for the failure behavior of these, the finite element techniques is the most widely used. After the maximum load, however, an analytical results by finite element technique are depending on the size of the element. In this study, integral nonlocal model which is one of those study for overcoming the element sensitivity and dependancy, used for the failure analysis of box culvert specimen. Comparing on the experimental and analytical results, validity and reliability of integral nonlocal model are investigate.

요 약

철근콘크리트 구조물을 해석하는 경우, 하중조건 및 이들 하중의 증가에 따라 나타나게 되는 상이한 거동 특성들 즉, 인장균열, 압축파괴, 다축상태일 때의 강도의 증가, 전단파괴 시의 취성적 파괴특성 등을 반드시 고려해야만 한다. 유한요소법에 의한 해석적 평가 시, 최대하중 이후에는 요소 크기에 따라 상이한 구조응답을 나타내는 요소의존적인 응답결과를 보인다. 본 연구에서는 이러한 요소의존성을 극복하기 위한 연구결과들 중 하나인 적분형 비국소화 모델을 이용하여 전력구 모형 실험체의 파괴거동을 해석하였다. 실험결과와 해석결과를 비교하여 적분형 비국소 모델의 신뢰성과 타당성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

* 정회원, 충북대학교, 건설기술연구소, 선임연구원

** 정회원, 한국전력연구원, 환경구조연구소, 구조부지그룹, 선임연구원

*** 정회원, 충북대학교, 토목공학과, 교수

**** 정회원, 한국전력연구원, 환경구조연구소, 구조부지그룹, 그룹장

1. 서 론

일반적으로 RC 구조를 대상으로 하는 비선형 해석은 해석이론의 발전과 해석기술의 향상으로 인해 최대하중뿐만 아니라 최대하중이후의 영역까지도 예측이 가능하게 되었다. 특히 유한요소법을 이용한 비선형 해석은 충분히 신뢰할 수 있는 해석기법으로써 인식되어지고 있다. 그러나 최대 인장강도 이후의 균열진전과 함께 나타나는 변형률연화(strain softening) 현상은 균열발생 이후의 해석적 결과가 요소크기에 따라 다르게 평가되는 요소의존성을 나타낸다.

본 연구에서는 이러한 요소의존성을 극복하기 위한 연구결과들 중 하나인 비국소화 모델을 이용하여 전력구 모형 실험체의 파괴거동을 해석하고 비국소 모델의 타당성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 해석 방법

2.1 적분형 비국소화 모델

본 연구에서 사용한 적분형 비국소화 기법은 임의 점의 역학적 정보는 그 점의 역학적 정보뿐만 아니라 이웃하는 점의 정보에도 의존한다고 가정한다. 즉, 요소크기에 의존하는 국소적인 역학적 정보를 이용하는 국소해석기법과는 다르게 길이스케일을 가지는 재료의 고유크기(특성길이)를 정의하고 그 영역 내에서 얻어지는 비국소량을 이용하여 임의 점의 역학적 정보를 계산 한다. 2차원 변형률공간상의 임의점 x 에 대한 비국소변형률 $\bar{\epsilon}(x)$ 은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다^{2,3)}.

$$\bar{\epsilon}(x) = \int_A W(x, \xi) \epsilon(\xi) dA(\xi) \cong \bar{f}_i = \Omega_{i,j} f_j \quad (1)$$

여기서,

$W(x, \xi)$: 비국소화연산자(Nonlocal Operator)

$\Omega_{i,j}$: 국소량의 비국소화 변환매트릭스

i, j, x, ξ : 전체해석 영역 내에 존재하는 적분점의 좌표

A : 2차원 적분 영역,

$\epsilon(x)$: 국소 변형률량

비국소화 연산자 $W(x, \xi)$ 와 대표면적 $A_r(x)$ 은 다음의 식(2), 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$W(x, \xi) = \frac{\alpha(\|x - \zeta\|)}{\int_A \alpha(\|x - \zeta\|) dA(\zeta)} \quad (2) \quad A_r(x) = \int_A \alpha(\|x - \zeta\|) dA(\zeta) \quad (3)$$

여기서,

$\alpha(x, \zeta)$: 비국소화 영역내의 가중평균을 결정하는 형상함수

$\|x - \zeta\|$: x 점과 ζ 점의 위치벡터의 크기

ζ : 대표면적($A_r(x)$)에 존재하는 적분점의 좌표

재료의 특성을 결정하는 응력-변형률관계는 식(4)와 같은 손상모델에 기초하여 결정하였다. 손상 정도를 나타내는 $\Omega_{nonlocal}$ 은 0부터 1까지 변하는 손상매개변수이며 단조증가하는 비국소화 변형률

의 함수이다. E_0 는 초기 접선탄성계수이다.

$$\sigma(x) = (1 - \Omega_{nonlocal})E_0\epsilon(x) \quad (4)$$

본 논문에서는 압축응력상태의 손상도와 인장응력상태의 손상도를 구분하기 위해 식(5), 식(6)과 같은 손상매개변수를 새로이 정의하였다. 식(5)는 Saenz의 등가일축압축응력-변형률관계로부터, 식(6)은 인장응력상태에서의 손상매개변수로써 인장강성모델로부터 정의하였다.

$$\Omega_{noncal} = 1 - \frac{1}{1 + a \frac{\bar{\epsilon}(x)}{\epsilon_c} - b \left(\frac{\bar{\epsilon}(x)}{\epsilon_c} \right)^2 + c \left(\frac{\bar{\epsilon}(x)}{\epsilon_c} \right)^3} \quad (5) \quad \Omega_{noncal} = 1 - \frac{f_t}{E_0 \bar{\epsilon}(x) \left(1 + C \sqrt{200(\bar{\epsilon}(x) - \epsilon_t)} \right)} \quad (6)$$

3. 해석대상 및 해석결과

3.1 해석대상

본 논문에서의 해석대상은 그림1과 같은 3방향 하중을 받는 전력구 모형 실험체를 대상으로 하였다. 하중재하 위치는 그림 2와 같이 상부에는 단조 증가하중이 재하되며 측면의 토압 분포를 재현하기 위해 측면에 일정한 하중을 재하 하였다¹⁾. 해석에 사용된 재료특성들은 표1.과 같으며 적분형 국소화 모델에 사용되는 콘크리트의 특성길이는 인장부와 압축부를 각각 25mm, 250mm로 가정하여 적용하였으며 해석모델은 그림3.과 같이 4절점요소를 이용하여 모델링하였고 철근의 경우 요소내에 분포되는 smeared 요소로 모델링하였다. 철근비는 약 0.36%를 사용하였다. 측면하중은 상부하중이 재하되기 전 일정한 사전하중으로 입력하여 해석을 수행하였으며, 변위제어를 통해 상부하중을 재하 하였다.

표1. 재료특성

	탄성계수(MPa)	포아송비	인장강도(MPa)	압축강도(MPa)	인장항복변형률	특성길이(mm)
콘크리트	2.50E+4	0.18	2.00	29	8.0E-5	250(-), 25(+)
철근	1.90E+5	0.2	420	420	2.0E-3	

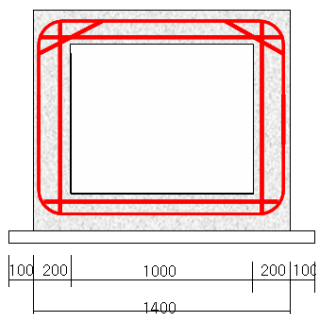


그림 1. 실험체 크기

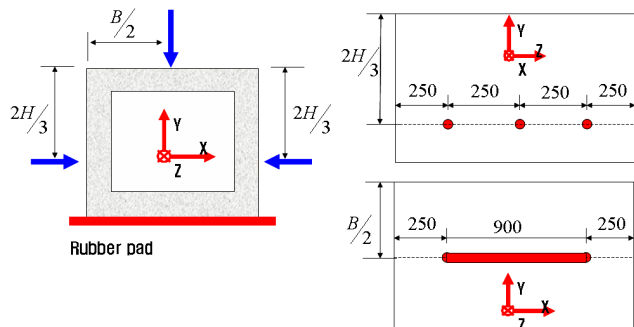


그림 2. 하중재하 위치

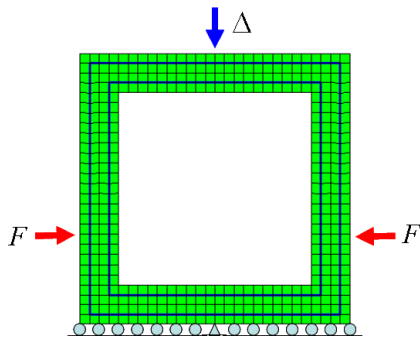


그림 3. 해석모델

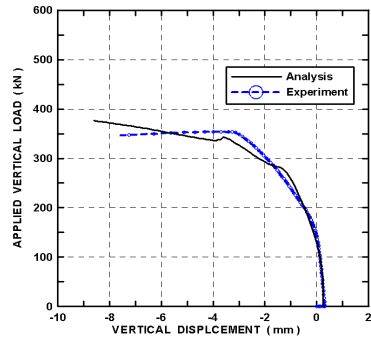


그림 4. 하중-수직변위 관계

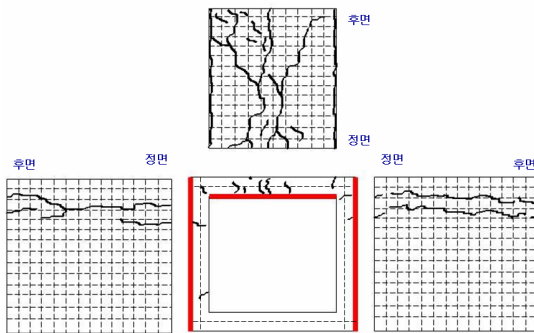


그림 5. 균열양상(실험)

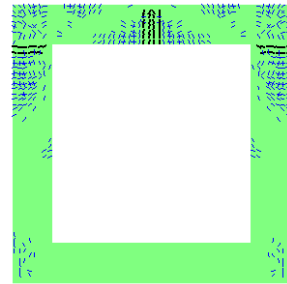


그림 6. 균열양상(해석)

4. 해석결과 및 결론

그림4.에 해석에서 얻은 수직하중-변위관계를 실험결과와 비교하였다. 초기균열시점 및 전체 구조물의 강성저하에 따른 변위의 증가를 적절히 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그림5.와 그림 6.에는 실험에서 나타난 균열양상과 해석에서 구한 균열양상을 도시하였다. 해석에 의한 최종적인 열림균열은 좌우측 상부와 상부슬래브의 중앙하단에서 발생하였으며 이는 실험에서도 관찰된 균열양상과 유사한 경향을 나타내었다.

적분형 비국소화 손상모델을 이용한 전력구 모형 실험체에 대한 비선형유한요소해석을 수행하여 본 모델의 해석결과에 대한 타당성을 검토하였으며 전력구 모형 실험체와 같은 구조물의 파괴 및 균열양상을 해석적으로 검토하는데 효과적일 것으로 판단된다..

참고문헌

1. 전력구 구조건전성평가 시스템 개발, 중간보고서, 한국전력공사 전력연구원, 2008, 4
2. Bazant, Z. P., and Pijaudier-Cabot, G. "Nonlocal continuum damage, localization instability and convergence." *J. Appl. Mech.*, 55, p.p. 287-293, 1988.
3. Jirasek, M. "Computational aspect nonlocal models" *Solids, Structures, and Coupled Problems in Engineering*, ed. W. Wunderlich, *Proceedings of the Europea Conference on Computational Mechanics, Munich, Germany, 1999.*