

철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과 해석

Size-Effect Analyses of Shear Behavior in Reinforced Concrete Beams

변근주*
Byun, Keun-Joo

하주형**
Ha, Ju-Hyung

송하원***
Song, Ha-Won

ABSTRACT

Shear failure of reinforced concrete beams is serious problem due to sudden brittle failure and many experimental results proved that size effect in shear behavior is an important feature of reinforced concrete members. For this reason, the structural safety of the reinforced concrete beams for shear has been checked by applying empirical design formula, which includes the size-effect, derived from experimental data. However, as the sizes of reinforced concrete members become extremely large, experiments sometimes become very difficult so that the formula or the experimental data could not be obtained and size-effect analyses of shear behavior become significant. In this study, size-effect analysis of shear behavior in reinforced concrete beams is performed by modeling tension stiffening/shear stiffening on reinforced concrete and the tension softening/shear softening on plain concrete. Then, the influences of models in the size-effect analyses of shear behavior in reinforced concrete beams are analyzed.

1. 서론

철근콘크리트 보의 전단파괴는 취성파괴를 일으키기 때문에 안전상 중요한 문제이며 많은 실험 결과는 전단강도에서의 크기효과가 철근콘크리트 부재의 중요한 특징임을 보여준다. 최근에 철근콘크리트 보의 크기가 점점 대형화되고 이러한 보에 대한 구조적 안전성을 평가하기 위하여 실험데이터에 근거한 크기효과가 고려된 실험적 설계식이 사용되어왔지만, 대규모 철근콘크리트 구조물의 경우 실험이 매우 어려워 실험에 근거한 경험식을 얻기 어려운 실정이다. 이러한 경우 대규모 철근콘크리트 구조물에 대하여 전단거동에서 실제 존재하는 크기효과를 재현할 수 있는 해석적 방법은 매우 중요하다. 본 연구에서는 철근콘크리트에서는 인장경화구성모델, 전단경화구성모델을, 무근콘크리트에서는 인장연화구성모델, 전단연화구성모델을 적절하게 모델링함으로써 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 해석적으로 재현하였고, 각 구성모델이 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과 해석결과에 미치는 영향을 고려하였다.

2. 전단거동 해석

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 해석시 철근의 부착의 영향이 미치는 콘크리트에 대해서는 인장경화모델,

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

전단경화모델등을 고려하였고, 이외의 무근콘크리트에 대해서는 인장연화모델, 전단연화모델등을 고려하였다.

2.1 철근콘크리트 모델

그림 1은 콘크리트가 균열 부분에서 더 이상 인장응력에 저항할 수 없어도, 콘크리트가 철근과의 부착효과를 통해 철근으로부터 전달된 인장응력을 균열이후에도 계속해서 받을 수 있다는 것을 보여주며,¹⁾ 또한 콘크리트와의 부착이 고려된 경우 철근의 구성모델을 보여준다. 이와 같이 철근콘크리트에서는 철근의 부착효과로 인해 인장경화 거동을 보이며 이는 콘크리트의 전체적인 거동에 영향을 준다.

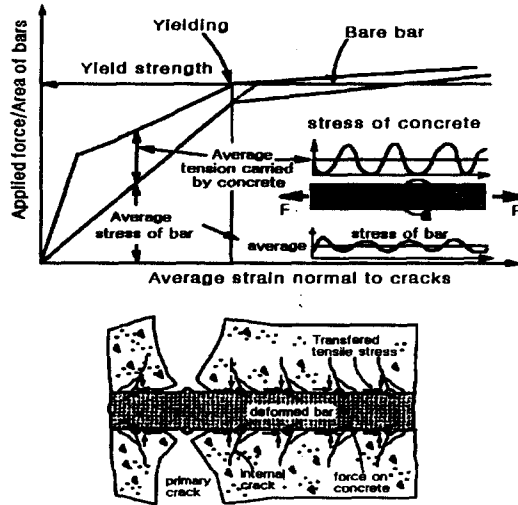


그림 1 Bond effect in cracked concrete

부착효과에 의한 콘크리트의 인장경화모델은 식 (1)과 같이 표현될 수 있으며 그림 2와 같이 보강철근의 종류에 따라 다른 경화계수 c 를 도입하여 경화의 정도를 다르게 고려할 수 있다.²⁾

$$\sigma_t = \sigma_t(\epsilon_t; c) = \sigma_{tk} \left(\frac{\epsilon_{tu}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

여기서, σ_t = 균열에 수직인 평균 인장응력, σ_{tk} = 콘크리트의 인장강도, ϵ_t = 균열에 수직인 평균인장변형률, ϵ_{tu} = 콘크리트의 균열변형률이다. 전단력에 대해서도 철근의 전단저항능력 때문에 전단경화 거동을 보이며 이에 따라 콘크리트의 전단경화모델은 식 (2)로 표현되며 균열과 수직인 평균인장변형률의 크기에 따라 그림 3과 같이 전단경화의 정도를 다르게 할 수 있다.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2)$$

여기서, τ = 평균 전단응력, γ = 평균 전단변형률, G = 전단 탄성계수, $G = 1/(1/G_{st} + 1/G_c)$, G_c = 비균열 콘크리트의 전단계수, G_{st} 는 균열 콘크리트의 전단계수로서 식 (3)으로 표현된다.³⁾

$$G_{st} = f_{st} \beta / (1 + \beta^2) \quad (3)$$

식 (3)에서 f_{st} 는 전단강도로서 $18(\sigma_{ck})^{1/3}$ 를 사용하였으며 $\beta = (2\gamma)/\epsilon_t$ 로 정의되는 계수이다.

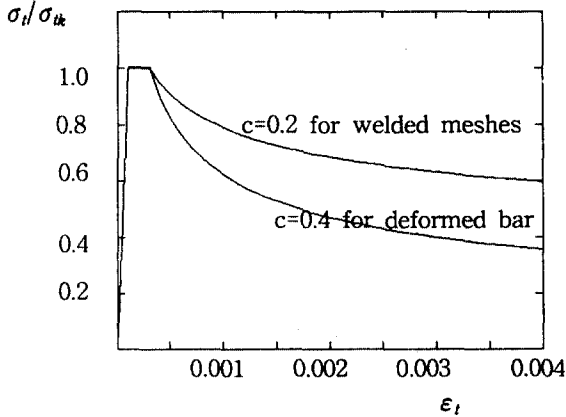


그림 2 Tension-stiffening model for concrete

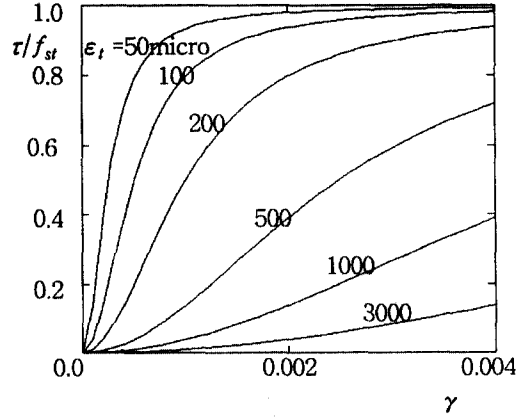


그림 3 Shear-stiffening model for concrete

철근부착효과가 미치는 영향은 철근의 주위를 둘러싸는 콘크리트의 영역(철근콘크리트 영역, 소위 RC 영역)으로서 표현되며 RC 영역의 크기에 따라 그림 4와 같이 균열 후의 부재의 강성도와 파괴형태에 영향을 준다. 그림 4의 C를 근거로 RC 영역의 최대면적 A_{cmax} 와 이 크기에 대응하는 구형면적으로 환산할 때 RC영역의 최대높이 h_{max} 는 식 (4)로 구할 수 있다.

$$A_{cmax} = \frac{A_s \sigma_y}{\sigma_{th}}, \quad h_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} d_b \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{th}}}$$

여기서, A_s = 철근의 단면적, σ_y = 철근의 항복강도, d_b 는 철근의 직경이다.

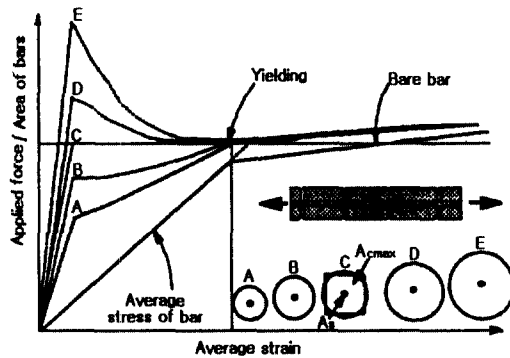


그림 4 Crack control capability and concrete area

2.2 무근콘크리트 모델

무근콘크리트 혹은 무근콘크리트 영역(소위 PL 영역)은 인장과 전단하중하에서 변형률-연화 현상이 나타나며 변형률-연화현상은 유한요소의 요소크기에 의존하기 때문에 각기 다른 크기의 요소에 대해서 동일한 파괴에너지를 갖도록 응력-변형률 곡선은 요소크기에 관하여 수정되어야 한다. 계산에서 사용된 인장연화 곡선은 식 (5)로 표현되며 그림 5와 같다. 전단변형률 γ 가 최대 전단응력 τ_{max} 에 의한 극한 전단변형률

γ_u 에 도달할 때 전단연화가 시작되며 식 (6)으로 표현된다. 그림 6은 인장변형률이 0.00005인 경우 c 에 따른 전단응력-변형률 연화 곡선을 나타낸다.

$$\sigma_t = \sigma_{tk} \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (5)$$

$$\tau = \tau_{\max} (\gamma_u / \gamma)^c \quad (6)$$

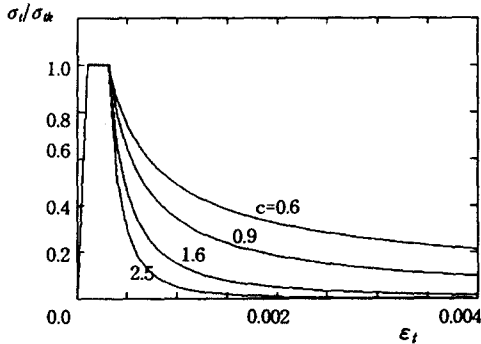


그림 5 Tension-softening curve in computation

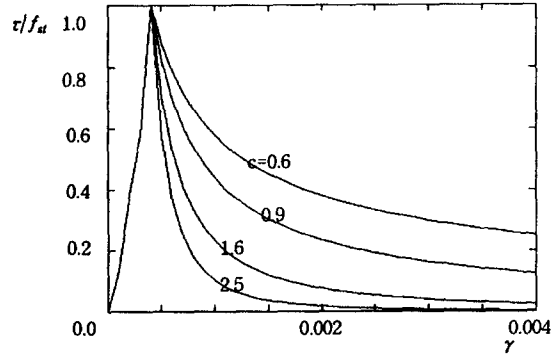


그림 6 Shear stress-strain softening curve

3. 전단거동 유한요소해석

그림 7과 같이 Walraven이 행한 3가지 크기의 전단강도 실험체⁴⁾에 대한 전단거동에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 표 1은 재료물성치와 실험결과이다.

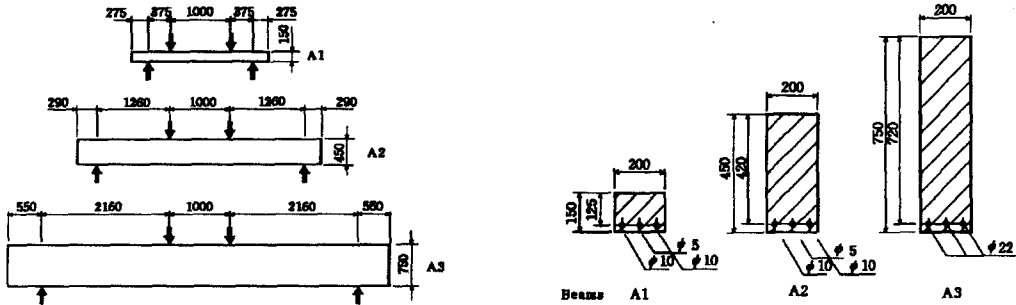


그림 7 Details of specimen

표 1 Experimental details

Model	d (cm)	σ_{ck} (kg/cm ²)	σ_{tk} (kg/cm ²)	ρ (steel ratio) (%)	v (shear strength) (kg/cm ²)
A1	12.50	335.16	24.50	0.83	12.16
A2	42.00	335.16	24.50	0.74	8.58
A3	72.00	341.04	26.46	0.79	7.14

먼저 인장경화의 영향을 검증하기 위하여 RC 영역을 제거한 경우, 즉 인장경화를 고려하지 않은 경우에 대해 실험값과 해석값을 비교하였고, 다음으로 전단연화의 영향을 검증하기 위하여 모델에서 전단연화

를 고려하지 않은 경우에 대해 실험값과 해석값을 비교하였다. 한편 전단경화의 영향을 검증하기 위하여 모델에서 전단경화를 고려하지 않은 경우에 대해 실험값과 해석값을 비교하였다. 그림 8에서 인장경화를 고려하지 않았을 경우, 크기효과가 해석적으로 나타나지 않음을 알 수 있다. 그림 9를 보면 전단연화를 해석에 고려하지 않음으로 인해서 실험값보다 약간 해석값이 크게 나오나 크기효과는 해석적으로 나타남을 알 수 있다. 그림 10에서 전단경화를 고려하지 않을 경우 크기효과는 존재하나 해석값이 실험값보다 아주 적게 나타남을 알 수 있다. 즉, 인장경화와 전단경화의 영향이 전단연화의 영향보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 그림 11은 각 모델을 모두 고려하여 여러 유효깊이에 대해 행한 해석을 실험결과 및 다른 여러 전단강도식과 비교하였다. 비교로부터 변형률-경화, 변형률-연화를 인장과 전단에 대해서 고려함으로써 철근 콘크리트의 전단거동에서의 크기효과를 기존의 전단강도식보다 더욱 정확하게 재현할 수 있음을 알 수 있다.

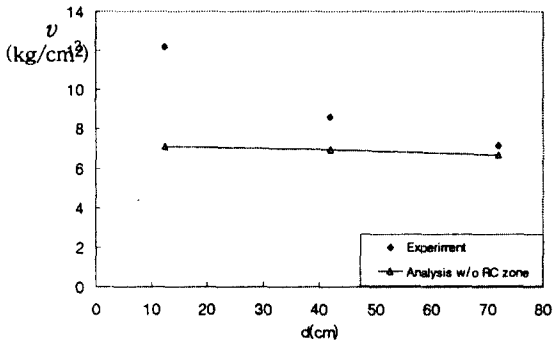


그림 8 RC zone effect on size effect computation

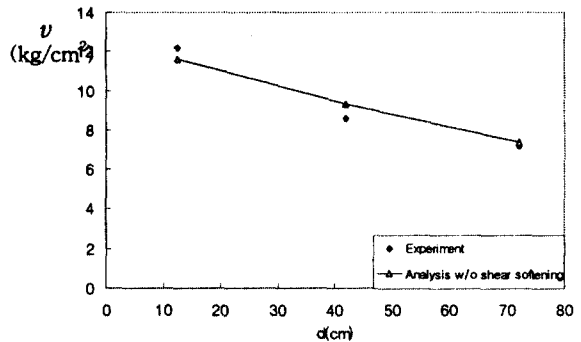


그림 9 Shear-softening effect on size effect computation

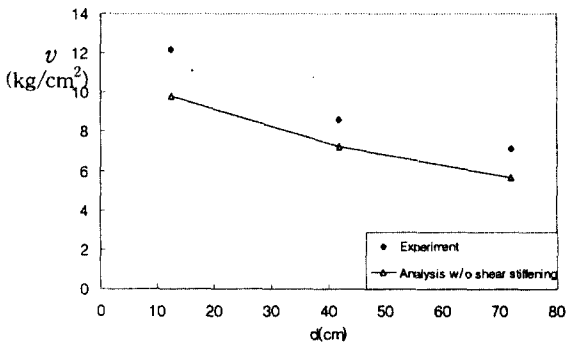


그림 10 Shear-stiffening effect on size effect

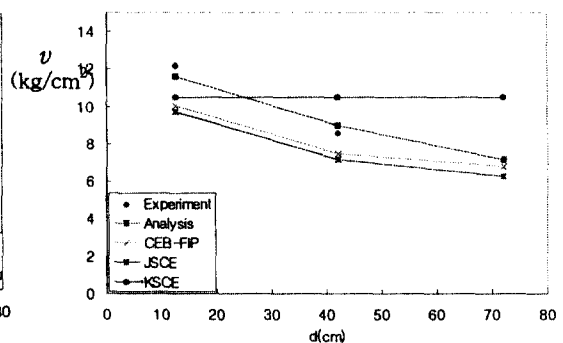


그림 11 Comparison of size effect models

다음으로 유효깊이가 16cm에서 93cm까지의 깊은 보들에 대해 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과를 해석하고 실험결과와 비교하였다.⁴⁾ 그림 12에서는 유한요소해석에 사용된 모델을 나타내고 이때 RC 영역의 높이는 유효깊이가 93cm 보의 경우는 22cm이다. 그림 13은 보의 깊이에 따른 전단강도값을 보여준다. 여기서 유효깊이가 20cm 이하의 작은 보의 해석에서 재하판의 강성의 영향을 고려하지 않았기 때문에 약간 작게 평가되었으나 실험과 해석결과가 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 14는 실험과 해석에서의 균열발생을 비교한 것으로서 해석이 실제의 균열진전을 유사하게 재현함을 알 수 있다.

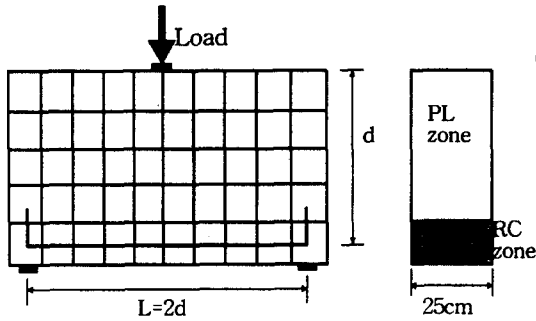


그림 12 Model used in analysis

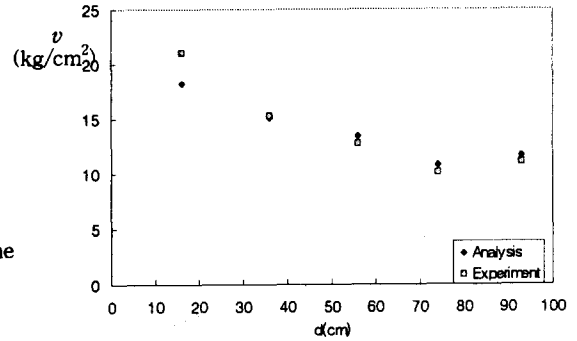
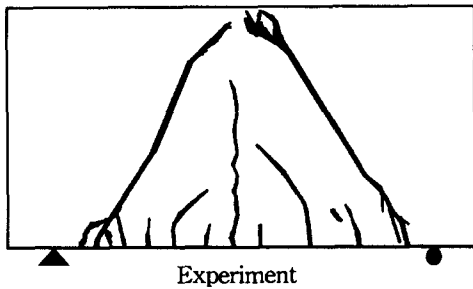
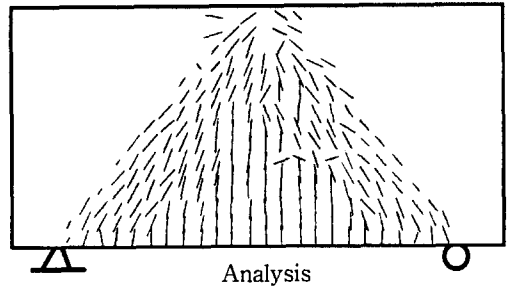


그림 13 Comparison between experiment and analysis



Experiment



Analysis

그림 14 Crack pattern comparison of beam (d=93cm)

4. 결 론

본 연구는 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 해석적으로 재현한 것으로서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트에서는 인장경화, 전단경화를, 무근콘크리트에서는 인장연화, 전단연화를 적절하게 모델링함으로써 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 더욱 정확히 해석할 수 있음을 밝혔다.
- 2) 본 연구의 모델에 의한 해석과 기존의 실험결과의 비교분석을 통해 본 연구의 모델이 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 타당하게 재현할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. P. Bartos.(ed.), *Bond in Concrete*, Applied Science Publishers LTD, London, 1982.
2. Okamura, H. and Maekawa, K., "Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element", *Finite Element Analysis in Reinforced Concrete Structures*, ASCE, 1985, pp. 528-543.
3. Okamura, H. and Maekawa, K., *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Gihodo - Shuppan, Tokyo, Japan, 1991.
4. Walraven, J. C., "Size Effect : Their Nature and their Recognition in Building Codes", *Proceeding of JCI International Workshop*, Sendai, Japan, 1993, pp. 295-314.