

대형 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과 해석

Size Effect Analysis for Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams

한 상 호*

Han, Sang-Ho

요 지

철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과는 다른 각종 강도에 대한 크기효과에 비해 현저히 나타난다는 것이 많은 실험적 연구로부터 입증되었으며, 이를 배경으로 세계 여러 나라의 전단강도에 대한 설계 기준식들이 전단강도의 크기효과를 반영하고 있는 실정이다. 그러나, 철근콘크리트 구조물이 점점 대형화됨으로써 이와 같은 설계 기준식의 실험적 검토는 사실상 불가능하게 될 것이다. 본 연구에서는 파괴역학에 근거한 비선형 유한요소프로그램을 이용하여 전단보강철근이 없는 대형 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과를 재현해 보았다. 또한, 해석 및 실험결과를 이용하여 크기효과가 고려된 몇 가지 대표적인 전단강도식과 비교하였다.

핵심용어 : 철근콘크리트 보, 전단강도, 크기효과, 파괴역학, 유한요소, 전단강도식

Abstract

It has been confirmed from many experimental researches that the size effect on the shear strength of reinforced concrete beams is more remarkable than that on the other strength. Against these researches, shear strength design formulas using in many countries reflect the size effect on shear strength. However, with the increase in the size of reinforced concrete structures, experimental verification of these design formulas will be substantially impossible. In this study, the size effect on the shear strength of the large reinforced concrete beams without shear reinforcement is analyzed using a nonlinear finite element program based on fracture mechanics. The results of analysis and experiment are compared with those of several representative shear-strength equations considering the size effect.

Keywords : reinforced concrete beams, shear strength, size effect, fracture mechanics, finite element, shear-strength equations

1. 서 론

콘크리트 구조물 또는 부재의 거동을 실험적으로

조사하기 위해 오래 전부터 모형실험이 이용되어져 왔지만, 모형실험에 의한 실험결과와 실 구조물의 거동 사이에는 여러 가지 차이점이 나타나는 경우

* 정회원 · 순천대학교 토목공학과, 전임강사

· 이 논문에 대한 토론을 1999년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

가 있다. 그 중에서도 콘크리트의 휨, 전단, 인장, 압축강도 등은 부재크기의 증가에 따라 강도가 저하된다고 알려져 있다. 이와 같이 부재크기에 의해 발생하는 강도의 차이를 일반적으로 크기효과(size effect)라 부르며, 예로부터 중요한 문제의 하나로써 주목되어져 왔다^{1)~3)}.

특히 전단보강철근이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과는 다른 각종강도에 대한 크기효과에 비해 현저히 나타난다는 것이 Kani¹⁾ 등 많은 연구에 의해 실험적으로 입증되었으며, 일본토목학회의 콘크리트표준시방서⁴⁾나 CEB-FIP 모델코드⁵⁾ 등에서는 이러한 전단강도에 대한 크기효과를 고려한 설계식이 규정되어 있다. 그러나, 최근 재료의 발달 및 설계·시공기술의 향상과 더불어 철근콘크리트 구조물이 점점 대형화됨으로써 이와 같은 실험적 설계식의 적용한계를 넘어 실험적 검토가 사실상 불가능한 사태가 발생할 가능성이 충분히 예상된다. 따라서, 대형 철근콘크리트 구조물에 대한 전단강도의 크기효과를 정도 높게 재현할 수 있는 해석적 평가방법이 절실히 요구되고 있다.

AN 등⁶⁾은 井畔 등⁷⁾이 실시한 전단보강철근이 없는 철근콘크리트 보를 대상으로 철근의 부착 영향에 따라 RC영역과 PL영역으로 구분하여 모델링함으로써 전단강도의 크기효과를 해석적으로 검토하였다. 또한, 송하원 등⁸⁾은 같은 방법으로 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과에 영향을

주는 인자를 해석적으로 분석하여 주요 전단강도식과 비교하였다.

본 연구에서는 파괴역학에 근거한 2차원 비선형 유한요소프로그램을 이용하여 井畔 등⁷⁾이 실시한 전단보강철근이 없는 대형 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과를 해석적으로 재현해 보았다. 또한, 해석 및 실험결과를 이용하여 전단강도의 크기효과가 고려된 몇 가지 대표적인 전단강도식과 비교·검토하였다.

2. 콘크리트의 인장연화모델

본 연구에서 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 균열부근에서 철근과 콘크리트의 부착 열화가 고려된 2차원 비선형 유한요소프로그램⁹⁾으로써, 콘크리트의 인장연화모델에는 파괴역학적 개념을 도입하여 유한요소의 크기에 따라 인장연화영역의 크기가 조정되도록 하였다. 또한, 압축응력하에서의 콘크리트의 항복조건 및 파괴조건 등 비선형성의 취급은 소성이론¹⁰⁾에 준하였다.

2.1 가상균열모델과 분산균열모델

콘크리트 시험체의 순수 인장시험을 실시하면, 그림 1과 같이 최대하중 이후 미세한 균열이 국부적으로 집중하여 마침내 파괴된다. 이때 시험체 전체의 인장변형은 비파괴영역의 변형과 파괴영역의

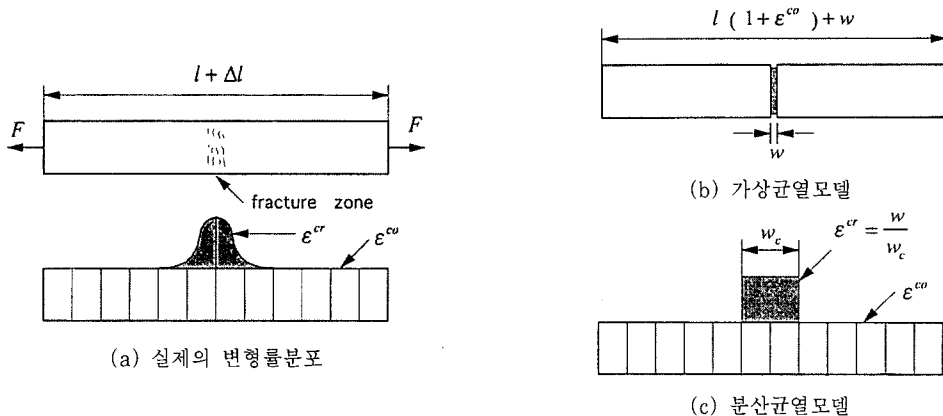
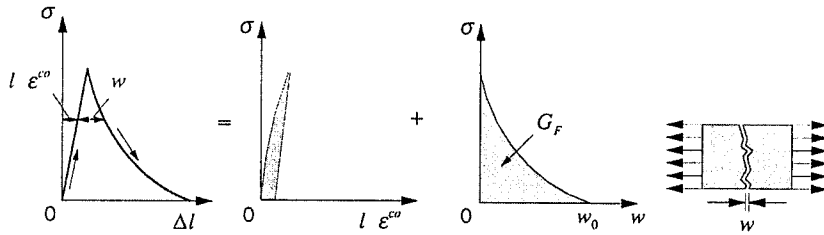
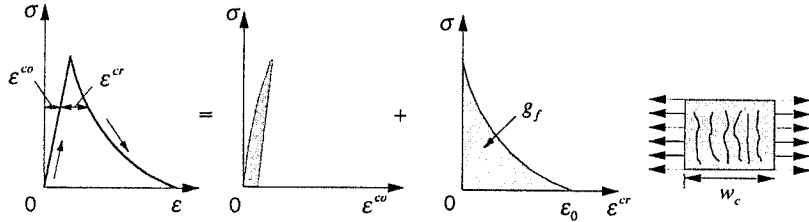


그림 1 인장파괴시의 변형률분포



(a) 가상균열모델



(b) 분산균열모델

그림 2 인장응력과 변형의 관계

비회복성 변형과의 합으로 나타낼 수 있다. 이 비회복성 변형률을 1개의 가상균열폭 w 로 나타낸 것이 가상균열모델(fictitious crack model)이고, 그 변형을 폭 w_c 에 균등하게 분산시킨 것이 분산균열모델(smearred crack model)이다.

이들을 인장응력과 변형의 관계로 나타내면 그림 2와 같다. 가상균열모델의 인장연화곡선은 인장강도 f_t , σ - w 곡선으로 둘러싸인 파괴에너지 G_F (fracture energy, 단위투영면적당 균열의 진전에 소비되는 에너지), 그리고 연화곡선의 형상에 의해 정의된다. 분산균열모델의 인장변형률 연화곡선은 인장강도 f_t , σ - ϵ^{cr} 곡선으로 둘러싸인 면적 g_f , 그리고 연화곡선의 형상에 의해 정의된다. 따라서, 서로 다른 파라미터 G_F 와 g_f 의 관계를 조사하면 두 모델의 대응관계가 명백해진다.

파괴에너지는 $G_F = \int \sigma dw$ 와 같이 정의되며, 여기서 w 는 파괴영역내의 모든 미세 균열에 의한 개구변위의 합이다. 한편 분산균열모델의 경우, w 는 균열대폭 $h (= w_c)$ 이라 불리는 유한요소내의 누적 균열변형률에 의해 나타내어져 $w = h \epsilon^{cr}$ 로 정의된다. 따라서, G_F 와 g_f 의 관계는 균열대폭 h 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_F = h \cdot g_f \tag{1}$$

2.2 인장중국변형률

분산균열모델이 도입된 이후 계산상의 편리함 등의 이유로 실제의 문제에 광범위하게 이용되고 있지만, 고전적인 분산균열모델은 요소의 크기에 결과가 좌우된다. 즉, 요소의 크기를 작게 하면 할수록 최대하중은 감소한다는 문제이다.

본 연구에서는 이와 같은 요소크기에 따른 의존성문제를 해소하고 진단강도의 크기효과를 해석적으로 구명하기 위해 재료의 인장연화곡선을 유한요소의 크기에 따라 조정함으로써 적당한 파괴에너지가 소비되도록 하였다. 즉, 요소 1개의 크기가 인장 파괴영역의 크기에 일치하도록 응력-변형률곡선의 연화구배를 요소크기에 의해 조정하였다.

먼저, g_f 는 그림 2의 σ - ϵ^{cr} 곡선으로 둘러싸인 면적이며 다음과 같이 계산된다.

$$g_f = \frac{f_t^2}{2E} + \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon^{cr} \tag{2}$$

여기서, σ 는 인장연화곡선으로써 직선, 2직선, 다직선, 그리고 곡선 등 다양한 모델이 이용되어지고 있지만, 본 연구에서는 실제의 인장연화곡선의 형상과 유사한 다음과 같은 지수곡선을 이용하였다.

$$\sigma = f_t \cdot \exp\left(\frac{-k \cdot \epsilon^c}{\epsilon_0}\right) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면, 다음 식과 같다.

$$g_f = \frac{f_t^2}{2E} + f_t \cdot \frac{\epsilon_0}{k} \{1 - \exp(-k)\} \quad (4)$$

그리고, 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 종국변형률 ϵ_0 에 대해 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_0 = \left(\frac{G_F}{h \cdot f_t} - \frac{f_t}{2E}\right) \frac{k}{\{1 - \exp(-k)\}} \quad (5)$$

여기서, k는 지수곡선변형률연화의 정도를 조정하는 파라미터로써 k=5에 의해 직접인장강도시험에서 관찰된 변형률연화를 근사할 수 있다. 따라서, k=5를 식 (5)에 대입함으로써 다음 식과 같이 요소크기에 따른 인장종국변형률을 계산할 수 있다.

$$\epsilon_0 = \left(\frac{G_F}{h \cdot f_t} - \frac{f_t}{2E}\right) \times 5.04 \quad (6)$$

2.3 분산균열모델에 의한 콘크리트의 인장파괴 모델링

인장변형률 연화영역에 있어서, 평면응력 상태에 있는 콘크리트의 균열과 그것에 직교하는 국부 좌표계에 관한 응력-변형률 관계는 다음 식으로 주어진다¹¹⁾.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon^f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서, E는 탄성계수, G는 전단탄성계수, ν 는 포아송비, ϵ^f 는 파괴변형률(fracture strain), β 는 전단강성저감계수이다. 또한, σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , 및 ϵ_{11} , ϵ_{22} , γ_{12} 는 균열면에 수직한 방향을 1로 하였을 때의 응력 및 변형률을 나타낸다. ω 는 콘크리트의 인장변형률 연화특성을 나타내기 위해 도입한 손상도 변수로서 $\omega=0$ (무손상)부터 $\omega=1$ (완전손상)까지의 임의의 값을 취한다. 손상도 ω 와 식 (7)의 파괴변형률 ϵ^f 의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\epsilon^f = \frac{\omega}{1-\omega} \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (8)$$

손상도 ω 는 균열면에 수직한 응력 σ_{11} 에 대응하여 그림 3과 같이 조정된다. 즉,

$$\omega = \begin{cases} 0 & (\epsilon_{11} < \epsilon_t) \\ 1 - \frac{f_t}{E \epsilon_{11}} \exp\left[\frac{a}{\epsilon_0} (\epsilon_{11} - \epsilon_t)\right] & (\epsilon_{11} \geq \epsilon_t) \end{cases} \quad (9)$$

여기서, ϵ_t 와 f_t 는 인장연화 시점에서의 변형률과 응력, ϵ_0 는 연화곡선에 있어서 응력을 0으로 볼 수 있는 식 (6)에 의해 계산된 인장종국변형률이다.

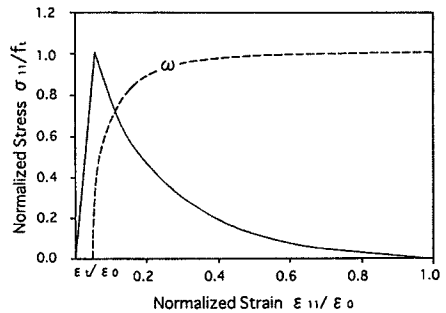


그림 3 인장연화곡선과 손상도함수 ω

3. 해석대상물 및 해석개요

3.1 해석대상물

井畔 등⁷⁾은 유효깊이가 10cm에서 300cm까지 변

화하는 7개의 전단보강철근이 없는 철근콘크리트 보에 대한 등분포하중 실험을 실시하여, 주로 d 가 100cm를 넘는 보에 대한 크기효과를 실험적으로 조사하였다. 본 연구에서는 이 7개의 보를 대상으로 해석을 실시하였다.

시험체는 그림 4와 같이 유효깊이를 각각 10, 20, 60, 100, 200, 300cm의 6단계로 변화시켰으며, 단면폭 및 철근직경에도 크기비를 고려하였다. 또한, 모든 시험체에 대하여 지간 l 과 유효깊이 d 의 비는 $l/d=12$ 로 일정하게 하였으며, 유효깊이 d 가 각각 200cm, 300cm인 시험체 6번과 7번의 철근비는 0.4%로 일정하게 하였지만, d 가 100cm이하의 시험체에 대해서는 전단파괴보다는 지간 중앙부에서의 휨 파괴가 선행될 것으로 예상되어 지점으로부터 $1.5 \times d$ 만큼 떨어진 곳에서부터 중앙부까

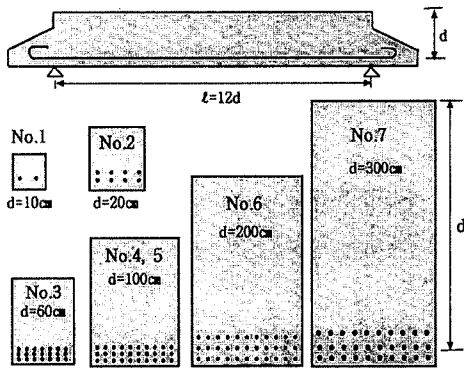


그림 4 시험체의 크기 및 배근도

표 1 콘크리트 및 철근의 재료특성

시험체 종류	콘크리트			철근		
	조골재의 최대크기 G_{max} (mm)	압축강도 f'_c (MPa)	인장강도 f_t (MPa)	직경 D	항복점 f_{sy} (MPa)	주철근비 ρ (%)
No.1	10	20.6	1.85	D6	440	0.4
No.2	10	19.7	1.87	D6	440	0.4
No.3	10	21.1	1.81	D6	440	0.4
No.4	10	27.2	2.05	D10	370	0.4
No.5	20	21.9	2.23	D10	370	0.4
No.6	20	28.5	2.73	D16	370	0.4
No.7	20	24.3	2.19	D25	360	0.4

지를 휨 보강하였다. 표 1은 사용된 콘크리트 및 철근의 재료특성을 나타낸 것이다.

3.2 해석개요

그림 5는 일례로서 시험체 No.1의 유한요소 분할도를 나타낸 것이다. 해석에서는 시험체의 형상과 하중의 대칭성을 고려하여 우측 절반만을 이용하였다. 콘크리트에는 정변형률 삼각형요소, 철근에는 1차원 트러스요소를 이용하였으며, 그 경계면에는 균열부근에서의 부착열화가 고려된 부착링크요소를 삽입하였다⁹⁾. 또한, 시험체 No.3~No.7의 주철근은 3단으로 배근되어 있지만, 본 연구에서는 철근의 순간격과 요소의 크기를 고려하여 중심위치의 1단 철근으로 모델링하여 해석을 실시하였다.

콘크리트 및 철근의 재료정수는 표 1의 실측치를 사용하였으며, 콘크리트의 파괴에너지 G_F 는 98.1 N/m로 가정하였다. 또한, 철근에는 변형률경화계수 $0.01E_s$ 의 바이리니어 응력-변형률관계를 가정하였다.

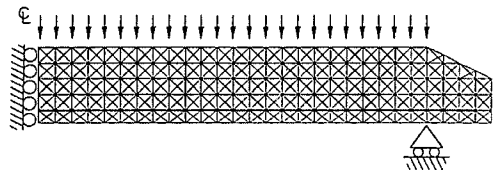


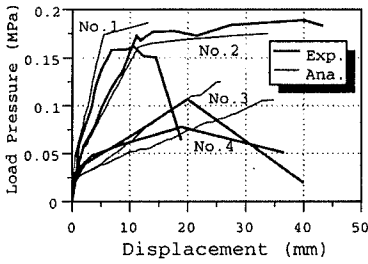
그림 5 시험체 No.1의 유한요소 분할도

4. 해석결과 및 고찰

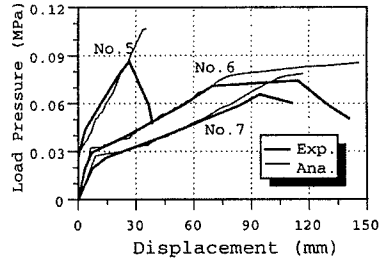
본 연구에서 실시한 해석결과와 井畔 등⁷⁾에 의한 실험결과로부터 하중-변위 관계, 균열패턴, 전단강도에 대한 크기효과를 비교·검토하였다. 또한, 전단강도의 크기효과에 대해서는 크기효과를 고려한 몇 가지 대표적인 전단강도식도 함께 비교하였다.

4.1 하중-변위 관계

그림 6은 모든 시험체에 대하여 실험 및 해석결과로부터 얻어진 지간 중앙부에서의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 단, 실험에 의한 하중-변위 곡선은 처녀하중의 것을 이용하였다.



(a) 시험체 No.1, No.2, No.3, No.4



(b) 시험체 No.5, No.6, No.7

그림 6 보 중앙부에서의 하중-변위 곡선

시험체 No.1과 No.2에 대해서는 실험 및 해석 결과가 함께 휨 파괴되어 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있지만, No.3부터 No.7까지는 실험에서와 같이 경사균열의 진전에 따른 급격한 사인장 파괴가 해석에서는 재현되지 않아 약간의 하중 증가를 나타내고 있다.

4.2 균열패턴

그림 7은 예로서 시험체 No.3 및 No.7에 대한 실험 및 해석으로부터 얻어진 최종균열패턴을 나타낸 것이다. 이때 해석결과에 의한 균열패턴은 식 (8)로부터 얻어진 파괴변형률 ϵ^f 의 크기와 방향을 각 요소의 적분점에서 벡터로 표시한 것이다.

실험결과에 의하면 시험체 No.1과 No.2는 전단 파괴에 도달하기 전에 보 중앙부에서의 휨 파괴로 파괴되지만, 그 이외의 시험체는 지점에서 $1.5 \times d$ 만큼 떨어진 부근에서 발생한 경사균열이 보 중앙부의 휨 파괴보다도 우세하게 되어 최종적으로 급격한 사인장 파괴에 이른다고 보고되어 있다⁷⁾.

해석에서는 실험에서와 같이 지점부근까지 진전

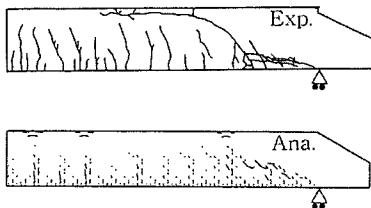
하는 수평균열은 재현되지 않았지만, 균열간격 등 전체적인 균열패턴은 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

4.3 전단강도의 크기효과

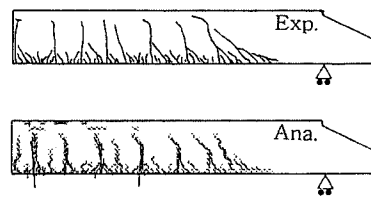
본 해석에 이용한 RC보는 등분포하중을 받고 있으므로 전단력의 분포는 그림 8과 같이 지간 중앙부를 향하여 직선적으로 감소하게 된다. 실험에서는 균열상황을 참고로 하여 지점에서 $1.5 \times d$ 만큼 떨어진 위치를 파괴단면으로 가정하여 이 위치에서 전단강도의 검토를 실시하였으므로, 본 해석에 있어서도 같은 위치에서 검토하였다. 즉, 해석에서 얻어진 최종파괴하중을 이용하여 다음과 같은 식으로 전단강도를 구하였다.

$$\tau_u = V_c / bd = q_u \times 4.5 \quad (10)$$

여기서, τ_u 는 전단강도(MPa), b 는 시험체의 폭(cm), V_c 는 전단력(N), d 는 유효깊이(cm), q_u 는 파괴하중(MPa)을 나타낸다.



(a) 시험체 No.3



(b) 시험체 No.7

그림 7 실험 및 해석결과에 의한 균열패턴의 비교

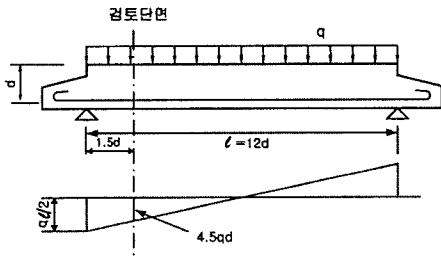


그림 8 전단력과 검토단면

그림 9는 실험 및 본 해석결과로부터 얻어진 전단강도와 유효깊이와의 관계를 나타낸 것이며, 크기효과가 고려된 몇가지 대표적인 전단강도식에 의한 결과도 함께 비교하였다. 그림에서 CEB는 식 (11)의 CEB-FIP 모델코드⁵⁾, JSCE는 식 (12)의 일본콘크리트 표준시방서⁴⁾, Kim은 식 (12)의 Kim & Park¹²⁾에 의한 전단강도를 나타낸 것이다.

$$\tau_{u,CEB} = 0.15(3d/a)^{1/3} (100 \rho f'_c)^{1/3} (1 + \sqrt{20/d}) \quad (11)$$

$$\tau_{u,JSCE} = 0.20(100 \rho f'_c)^{1/3} (100/d)^{1/4} \quad (12)$$

$$\tau_{u,Kim} = \frac{3.5 f'_c{}^{1/3} \rho^{3/8} (0.4 + d/a)}{(\sqrt{1 + 0.08d} + 0.18)} \quad (13)$$

여기서, 각 전단강도식은 기호 및 단위의 통일을 위하여 약간 수정되었으며, τ_u 는 전단강도(MPa), ρ 는 철근비, f'_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), d 는 보의 유효깊이(cm), a 는 전단스팬(cm)을 나타낸다.

본 해석결과는 대표적인 전단강도식이나 실험결과와 같이 보의 유효깊이가 증가하면 전단강도가 감소

하는 전단강도의 크기효과를 나타내고 있다. 또한, 유효깊이의 증가에 따라 일본콘크리트표준시방서 및 Kim & Park에 의한 전단강도는 단조롭게 감소하고 있지만, CEB-FIP 모델코드에 의한 전단강도는 일정한 값에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

유효깊이 10cm에서 300cm까지 변화하는 본 연구의 범위에서는 Kim & Park의 전단강식이 해석결과와 비교적 잘 일치하였으며, 이는 송하원 등⁸⁾의 연구결과에서도 나타났다. 그리고, 유효깊이가 100cm이상의 범위에서 해석 및 실험결과는 CEB-FIP 모델코드 보다 JSCE에 의한 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이 범위에서의 CEB-FIP 모델코드에 의한 전단강도는 과대평가될 수 있다.

그림 10은 크기효과만을 조사할 목적으로 시험체 No.4의 전단강도 $\tau_{100,25}$ 를 기준으로 하여, 모든 시험체에 대한 전단강도와 유효깊이와의 관계를 대수 그래프로 나타낸 것이다. 해석결과는 실험결과와 같이 유효깊이가 100cm이상에서도 전단강도의 크기효과는 $d^{1/4}$ 에 반비례하고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 파괴역학에 근거한 2차원 비선형 유한요소프로그램을 이용하여 전단보강철근이 없는 대형 RC보의 전단강도에 대한 크기효과를 해석적으로 재현해 보았다. 또한, 해석 및 실험결과를 이용하여 전단강도의 크기효과가 고려된 몇 가지 대표적인 전단강도식과 비교·검토해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 해석법을 이용하여 보의 유효깊이가 증가하면 전단강도가 감소하는 전단강도의 크기효과

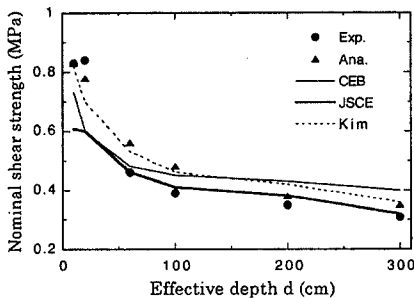


그림 9 전단강도와 유효깊이와의 관계

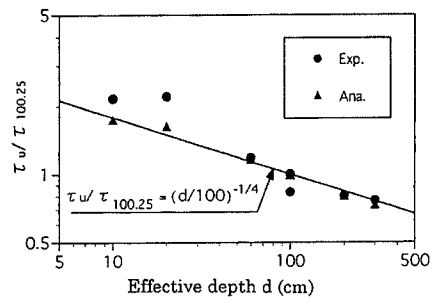


그림 10 전단강도비와 유효깊이와의 관계

를 재현할 수 있었다. 또한, 유효깊이가 100cm 이상의 경우에도 실험결과와 같이 전단강도의 크기효과는 $d^{1/4}$ 에 반비례함을 알 수 있었다.

- 2) 시험체 No.3부터 No.7까지의 해석결과는 실험결과와 같은 지점부근의 수평균열 및 급격한 사인장 파괴가 재현되지 않아 최종파괴하중이 실험결과보다 약간 크게 나타났지만, 균열간격 등 전체적인 균열패턴은 실험결과와 유사한 경향을 나타냈다.
- 3) 해석 및 실험결과는 일본콘크리트표준시방서와 Kim & Park에 의한 결과처럼 유효깊이가 증가함에 따라 전단강도는 단조롭게 감소하였으나, CEB-FIP 모델코드에서는 일정한 값에 수렴하였다.
- 4) 해석 및 실험결과를 몇 가지 대표적인 전단강도식과 비교해 본 결과, Kim & Park에 의한 전단강도식이 해석결과와 비교적 잘 일치하였으며, 보의 유효깊이가 100cm 이상의 경우에 대하여 CEB-FIP 모델코드에 의한 전단강도는 과대평가될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?", *Journal of ACI*, Vol. 64, No. 3, 1967, pp.128~141
2. Taylor, H.P.J., "Shear Strength of Large Beams", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 98, Nov. 1972, pp.2473~2490
3. Sabnis, G.M. and Mirsa, S.M., "Size Effects in Model Concrete", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, June 1979, pp.1007~1020
4. 土木學會콘크리트委員會, 콘크리트標準示方書 (設計編), 土木學會, 1991
5. Comite Euro-International du Beton, *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d'Information, No. 213/214, 1993
6. An, X., and Maekawa K., "Size Effect Analysis for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 18, No. 2, 1996, pp.635~640
7. 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉, "等分布荷重における大型鐵筋コンクリートはりのせん断強度に関する實驗的研究", *土木學會論文集*, 第348号, V-1, 1984年 8月, pp.175~184
8. 송하원, 하주형, 변근주, "스터립이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과", *콘크리트 학회지*, Vol. 10, No. 6, 1998. 12, pp.179~190
9. Han, S.H., "Investigation of the Crack Distribution in Reinforced Concrete Structures Using a Nonlinear Bond Model", *Journal of KSCE*, Vol. 17, No. I-6, 1997, pp.867~874
10. Bolander, J.E., and Wight, J.K., "Towards realistic FE models for reinforced concrete shear wall buildings subjected to lateral loadings", The University of Michigan Department of Civil Engineering Report No. 89-2, January 1989
11. Bazant, Z.P., and Oh, B.H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Material and Structures, RILEM*, Vol. 16, 1983, pp.155~177
12. Kim, J.K. and Park, Y.D., "Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement", *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 3, 1996, pp.213~222

(접수일자 : 1999. 3. 2)