

콘크리트 전단 기여분 결정을 위한 균열모사 방법

Crack Modelling to Determine Concrete Contribution to Shear Resistance

조 순 호*
Cho, Soon Ho

ABSTRACT

The fixed-angle based modified compression field theory(MCFT) was developed to include the slip deformation across the crack, thereby allowing for the non-coincident directions of the principal strain and stress. To investigate the significance of crack modelling on the analysis, a series of tests on beams without transverse reinforcement was predicted by both rotating- and fixed-angle crack models within the frame of the MCFT. The results predicted by the fixed-angle MCFT were comparable to those by the rotating-angle MCFT when the initial crack angle of 45 deg. and the related friction law are used.

1. 서론

지난 20여년 동안 콘크리트 전단 분야의 연구는 간편하면서도 통합적이고, 충분히 물리적 의미를 부여할 수 있는 합리적인 해석모델을 개발하는데 주력하여왔다. 그 결과로, 최근에 이르러서는 여러 합리적인 전단 해석이론 및 설계방법이 제시되었는데, 이들 대부분은 트러스 모델 개념(Truss Model Concept)에 근거하고 있다. 응력이 균등한 지역(Uniform Stress Field Region)에는 단면해석 모델(Sectional Model)을, 응력이 혼돈된 지역(Disturbed Stress Field Region)에는 스트럿-타이 모델(Strut-and-Tie Model)을 적용할 것을 제안하고 있다.¹ 한편, 단면해석법에도 균열방향 및 변형을 정의하는 방법, 균열된 콘크리트의 재료거동 및 균열면의 마찰거동을 묘사하는 구성방정식에 따라 다양한 이론이 존재한다. 대표적인 단면해석법으로는 수정압축장 이론(MCFT), 회전 및 고정각

* 정회원, 광주대학교 건축학부 교수 (본 연구는 KOSEF 및 STRESS의 연구비 지원으로 수행된 내용의 일부임)

연화 트러스 모델(RA-STM 혹은 FA-STM) 및 균열 마찰모델(CFTM) 등을 들 수 있는데, 이들 중 MCFT 및 CFTM 만이 전단보강근이 없는 보의 하중지능력(V_c 혹은 v)을 예측할 수 있다. RA-STM은 콘크리트의 전단지지 기여분을 무시하고 있으며, 반면에 FA-STM은 콘크리트 기여분을 결정하는 식의 분모에 웨브 보강근량을 포함하고 있어 이를 비현실적으로 고려하기 때문이다. 하지만, 보다 최근에 들어서는 MCFT도 주응력 방향과 주변형을 방향이 일치한다는 가정을 채택하고 있는 점과 균열면에서 마찰력을 고려하는 방법에서 그 타당성에 문제점이 제기되고 있다. 따라서, 본 논문은 상기 문제점을 해결하고자 본래 회전 균열각 모델을 채택하고 있는 MCFT(RAM) 대신에, 고정 균열각 모델을 채택하는 또 하나의 MCFT(FAM)를 제안하였다. 또한, 균열모델이 콘크리트 전단지지 거동 예측에 미치는 영향을 조사하기 위하여 콘크리트가 전단 지지의 주요 요소가 되는 일련의 전단 보강근이 없는 보의 실험결과를 회전 및 고정 균열각 모델에 근거한 MCFT로 예측하여 그 결과를 비교 및 검토, 토의하였다.

2. 회전각 균열모델 해석

휨, 전단 및 축력(M, V, N)이 작용하는 전단 보강근이 없는 보의 경우에 보의 전체응답을 결정하기 위한 회전각 균열모델의 해석절차는 아래와 같다. 전단 보강근이 없는 보의 단면응답을 결정하기 위하여, 단면의 최대변형을 위치를 기준으로 한다.

단계 1: 주근 위치에 발생 가능한 주 인장변형도(ϵ_1) 가정

단계 2: 주압축응력도 작용 방향(θ) 가정

단계 3: 콘크리트 기여강도 산정(f'_c 는 MPa)

$$V_c = \frac{0.33\sqrt{f'_c}}{1 + \sqrt{500\epsilon_1}} \cot \theta b_w d_v \quad (\text{단, 식(2)보다 크지 않아야 함}) \quad (1)$$

$$V_c = \frac{0.18\sqrt{f'_c}}{0.3 + [24/(a + 16)](\epsilon_1 s_2 / \sin \theta)} b_w d_v \quad (2)$$

단, $\epsilon_1 < \epsilon_{cr}$ 일 때, $V_c = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{cr}} f_{cr} \cot \theta b_w d_v$, $\theta = 45^\circ + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{N/A}{2V/b_w d_v} \right)$

a , ϵ_{cr} , f_{cr} = 골재의 직경, 균열 변형도 및 응력도

식(1)은 균열사이의 비균열 단면에 존재하는 평균인장응력 값에 의하여 결정된 전단내력이며, 식(2)는 균열면에 발생하는 마찰작용에 의하여 결정된 전단내력이다.

단계 4: 주압축응력도(f_2) 산정

$$f_2 = \frac{V_c}{b_w d_v} \cot \theta \quad (3)$$

단계 5: 주압축변형도 산정(ϵ_2)

$$\epsilon_2 = -0.002 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{f_2}{f_c} (0.8 + 170\epsilon_1)} \right] \quad (4)$$

단, $(0.8 + 170\epsilon_1) \geq 1.0$

단계 6: 주근 위치에서 길이방향 변형도(ϵ_x) 산정

$$\epsilon_x = \frac{M/d_v + 0.5N + V_c \cot 2\theta - A_{ps} f_{ps}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \quad (5)$$

단, A_s, A_{ps}, f_{ps} = 주근량, 텐돈량 및 주변 콘크리트 응력이 0일 때의 텐돈 응력

단계 7: 주인장 변형도(ϵ_1) 산정

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + (\epsilon_x - \epsilon_2) \cot^2 \theta \quad (6)$$

단계 8: 단계 7에서 산정한 주인장 변형도(ϵ_1)가 단계 1의 가정치와 다르면 새로운 θ 를 가정하여 단계 2로 감.

단계 9: 주인장근의 항복 여부 조사

$$A_s f_y + A_{ps} f_{ps} \geq \frac{M}{V} + 0.5N + V_c \cot \theta \quad (7)$$

단, f_{ps} = 텐돈에 작용하는 응력

단계 10: 새로운 주인장 변형도(ϵ_1)를 가정하여 단계 1로 감.

3. 고정각 균열모델 해석

고정각 균열모델은 미리 가정된 균열폭 w 에서 내부응력과 외부 작용하중 사이의 평형조건을 만족시키는 미끄러짐 균열변형(Δ) 및 주압축응력 방향(θ)을 반복적으로 찾아내는 해석논리를 사용한다.

단계 1: 균열각도 가정 및 간격 산정(χ 및 s_x)

단계 2: 균열폭 및 미끄러짐 가정(w 및 Δ)

단계 3: 해당 구성법칙에 따라 균열면의 전단 및 법선응력(v_{ci} 및 f_{ci})을 산정

단계 4: 주압축응력 방향(θ) 산정

단계 5: 응력에 대한 Mohr의 원을 사용하여 비균열부의 응력 및 미리 알고 있는 균열면의 국부응력으로부터 주응력 및 변형률($f_{c1}, f_{c2}, \epsilon_{c1}$ 및 ϵ_{c2}) 산정

$$f_{c1} = f_{ci} + \frac{v_{ci}}{\tan(\chi + \theta)} \quad (8)$$

$$f_{c2} = f_{c1} - v_{ci} \left[\tan(\chi + \theta) + \frac{1}{\tan(\chi + \theta)} \right] \quad (9)$$

단계 6: 국부($\epsilon_{xw}, \epsilon_{yw}, \gamma_{xyw}, \epsilon_{x\Delta}, \epsilon_{y\Delta}$ 및 $\gamma_{xy\Delta}$) 및 평균변형률($\epsilon_{cx}, \epsilon_{cy}$ 및 γ_{cxy})을 합하여 전체변형

를(ϵ_x, ϵ_y 및 γ_{xy}) 산정

$$\epsilon_{xw} = \frac{w}{s_x} \cos^2 \chi, \quad \epsilon_{yw} = \frac{w}{s_x} \sin^2 \chi, \quad \gamma_{xyw} = \frac{w}{s_x} \sin 2\chi \quad (10)$$

$$\epsilon_{x\Delta} = -\frac{\Delta}{2s_x} \sin 2\chi, \quad \epsilon_{y\Delta} = \frac{\Delta}{s_x} \sin \chi, \quad \gamma_{xy\Delta} = \frac{\Delta}{s_x} \cos 2\chi \quad (11)$$

$$\epsilon_{cx} = \left(\frac{\epsilon_{c1} - \epsilon_{c2}}{2} \right) (1 - \cos 2\theta) + \epsilon_{c2} \quad (12)$$

$$\epsilon_{cy} = \epsilon_{cx} + (\epsilon_{c1} - \epsilon_{c2}) \cos 2\theta \quad (13)$$

$$\gamma_{cxy} = 2(\epsilon_{cy} - \epsilon_{c2}) \tan \theta \quad (14)$$

단계 7: 균열면에서의 보강근 응력(f_{sx})을 산정하여 전체응력(f_x, f_y 및 v_{xy}) 결정

$$f_x = f_{cx} + \rho_x f_{sx}, \quad f_y = f_{cy} + \rho_y f_{sy}, \quad v_{xy} = v_{cxy} \quad (15)$$

단계 8: 주인장응력이 식(16)과 일치하지 않으면 새로운 θ 를 가정하여 단계 4로 감.

$$f_{c1} = v_{cxy} \tan \theta \quad (16)$$

단계 9: 길이방향 변형률 및 콘크리트 전단지지 능력이 식(17)과 일치하지 않으면 새로운 Δ 를 가정하여 단계 2로 감.

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M}{d_v} + 0.5N + V_c \cot 2\theta}{E_s A_s} \quad (17)$$

단계 10: 콘크리트 전단지지 능력 산정

$$V_c = (v_{ci} \cos \chi - f_{ci} \sin \chi) \frac{b_v d_v}{\cos \chi} \quad (18)$$

단계 11: 새로운 균열폭(w)을 가정하여 단계 1로 감.

4. 실험결과 예측

KAIST 실험은 시험체 2개를 한 조로 주철근비(1%, 1.9%, 3.4%), 전단경간비(1.5, 4.5, 6.0), 보의 춤(142 mm- 915 mm) 등을 주요변수로 전체 20개의 보를 계획하였으며, 모든 시험체는 전단보강근을 포함하고 있지 않다.² 콘크리트의 압축강도(f'_c)는 53.7 MPa이고 하부 인장철근의 항복강도(f_y)는 477 MPa이다. 2점 가력, 단순지지의 4점 휨시험 시스템을 사용하였다.

고정각 균열모델은 거친 균열 모델(Rough Crack) 및 초기 균열각도 $\alpha_{cr} = (90 - \chi)$ 을 45° 에서 60° 까지 변화시켜 해석을 수행하였으며, 또한 균열마찰이론과의 비교를 위하여 균열마찰이론이 제시하는 마찰구성법칙 및 초기 균열각도($\alpha_{cr} = 60^\circ$), 주압축응력 각도($\theta = 30^\circ$)를 각각 적용하여 해석을 수

행하였다. 예측된 결과에 의하면, 초기 균열각도를 45° 로 한 고정 균열각 모델은 회전 균열각 모델과 대등하게 실험강도를 정확히 예측하고 있음을 알 수 있었다(실험/예측 = 1.050 대 1.027). 하지만, 초기 균열각이 크면 클수록 비안전측의 강도를 예측하였으며, 또한 균열마찰이론이 제시하는 마찰구성법칙 및 초기 균열각도, 주압축응력 각도를 사용한 결과는 매우 안전측의 결과를 나타내었다. 두 이론에 대한 보다 자세한 비교는 참고문헌 3등에 발표되었다. 한편, 균열폭에 대하여 두 이론을 비교하면, 유사한 크기의 균열간격이 사용되었음에도 불구하고 고정각 모델은 주근비가 변화하는 시험체의 전단응답을 표시하는 그림 1~4에서 보는 바와 같이 균열면의 큰 슬립으로 인하여 회전각 모델보다 훨씬 큰 변형을 예측하고 있다. 이외에도 균열폭에 영향을 미치는 요소는 균열의 벌어짐 및 미끄러짐 등에 관한 구성법칙을 들 수 있다.

5. 결론

1. 고정각 균열모델은 초기 균열 각도 및 균열면의 마찰법칙에 따라 매우 민감한 결과를 나타내었다. 하지만 초기 균열각을 45° 로 하였을 때 회전 균열각 모델과 동일한 강도를 예측하였다. 보다 신뢰성 있는 결과 예측을 위해서는 초기 균열각도와 다양한 마찰구성법칙의 상관관계를 정의하는 연구가 요구된다.

2. 고정각 균열모델에 의하여 예측된 평균변형률은 균열면의 슬립변형의 포함으로 회전각 모델보다 항상 큰 값을 나타내었으며, 특히 최대하중 부근에서는 구성법칙의 적용범위를 초과하는 균열폭을 예측하였다. 따라서 보다 안전측의 결과를 확보하기 위해서는 균열마찰이론에서처럼 최대 균열폭을 제한하는 절차가 필요하다.

3. 고정각 균열모델에서 균열면에 작용하는 법선응력을 무시할 경우 초기 균열각의 1/2에 해당하는 주압축응력의 경사 방향이 예측되었다. 이는 균열마찰이론이 제시하는 경사각과 동일하다. 하지만, 균열마찰이론은 이에 대한 배경을 제시하고 있지 않다.

참고문헌

1. ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion, "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 12, Dec. 1998, pp. 1375-1417.
2. Kim, J. K., and Park, Y. D., "Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams without Web Reinforcement," Magazine of Concrete Research, V. 46, No. 166, Mar. 1994, pp. 7-16.
3. Cho, S. H. and Lee, L. H., "Rotating- and Fixed-Angle Crack Models in Beams Without Transverse Reinforcement," ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 5, Sept.-Oct., 2000, pp. 757-764.

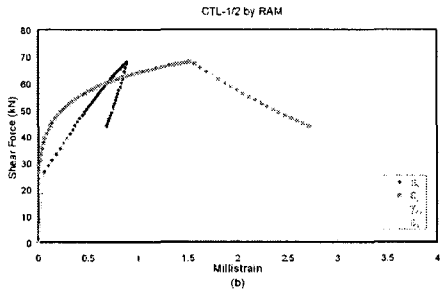
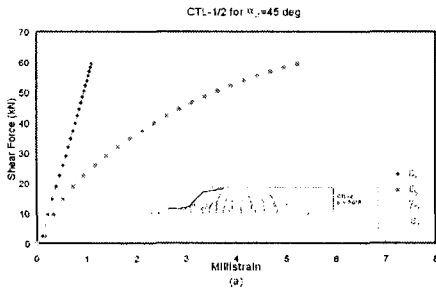


그림1 CTL에 대한 전단응답

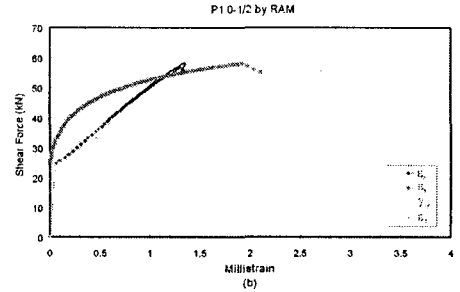
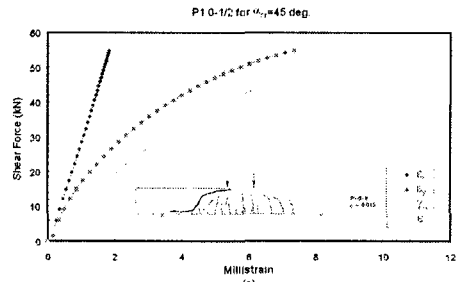


그림 2 P1.0에 대한 전단응답

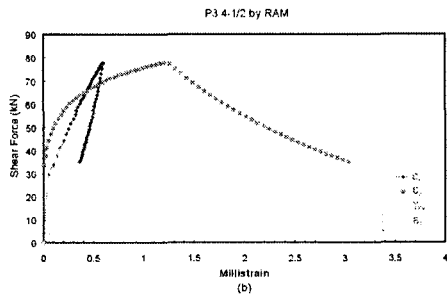
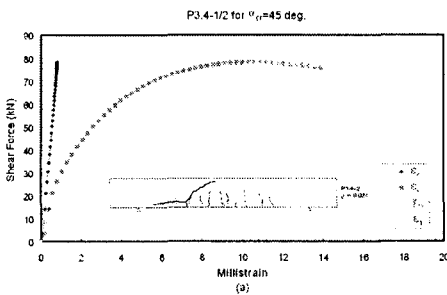


그림3 P3.4에 대한 전단응답

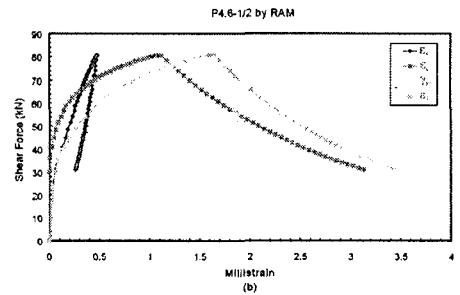
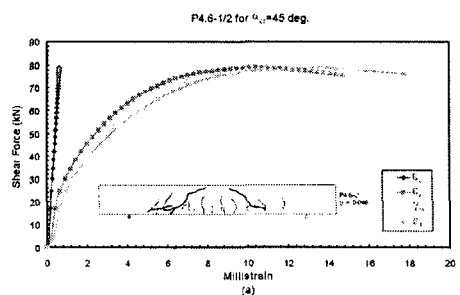


그림 4 P4.6에 대한 전단응답