

플랫 플레이트의 뚫림전단 성능에 관한 해석적 연구

Analytical Model to Predict Punching Shear Strength of Flat Plate Structures

김민숙* · 이영학** · 김희철***
Kim, Min Sook · Lee, Young-Hak · Kim, Heecheul

요약

플랫 플레이트 시스템은 기둥 주위의 국부적인 응력집중 현상으로 인한 뚫림전단 파괴에 대해 취약하다. 따라서 유한요소해석을 통해 이러한 플랫 플레이트 시스템의 뚫림전단 성능을 평가하고자 한다. 슬래브의 전단을 고려하기 위하여 Reissner-Mindlin 가정을 바탕으로 한 등매개변수 감절점 쉘 요소를 적용하였다. 콘크리트의 재료적 비선형 거동을 고려하기 위해 압축거동은 수정압축장 이론을 적용하였으며 인장강성효과 또한 콘크리트 재료모델에 반영하였다. 기존 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하고자 하였다. 비교 결과, 약 16%의 오차율을 보였으며 보강비가 낮은 실험체에 비해 보강비가 높은 실험체가 실험결과에 가까운 값을 예측하는 것으로 나타났다.

keywords : 경량 콘크리트, 연성거동, 휨 강도, 최외단 철근의 순인장 변형률

1. 서론

플랫 플레이트 시스템은 층고 절감 및 유연한 평면계획, 경제성 등의 장점을 가지고 있으나 보가 없이 기둥이 슬래브를 직접 지지하는 구조이기 때문에 슬래브에서 기둥으로 전달되는 하중으로 인해 기둥 주위에 국부적인 응력집중 현상이 발생한다. 이러한 응력집중현상은 접합부 전단파괴, 즉 뚫림전단을 유발하며 뚫림전단 파괴는 구조물의 연쇄붕괴로 이어질 수 있기 때문에 뚫림전단에 대한 파괴 메커니즘 및 전단내력 산정에 대한 많은 실험 및 이론적 연구가 진행되어 왔다. 그러나 현행 콘크리트구조 설계기준¹⁾은 아직까지 과거의 경험적인 식의 설계강도를 제안하고 있다. 이는 콘크리트 설계기준 강도, 위험단면의 둘레, 슬래브의 유효 두께만을 고려한 식으로 기둥 형상비가 달라질 경우 적용의 제한이 있으며 철근비, 경계조건 등 다양한 조건을 고려하지 못하고 있기 때문에 접합부의 복합적인 거동을 정확히 반영하지 못한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 플랫 플레이트 시스템의 뚫림 전단강도를 예측할 수 있는 해석적 연구를 수행하여 향후 플랫 플레이트 시스템의 뚫림전단강도 산정 모델 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 유한요소 해석모델

2.1 유한요소모델

* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 박사과정 kimminsook@khu.ac.kr

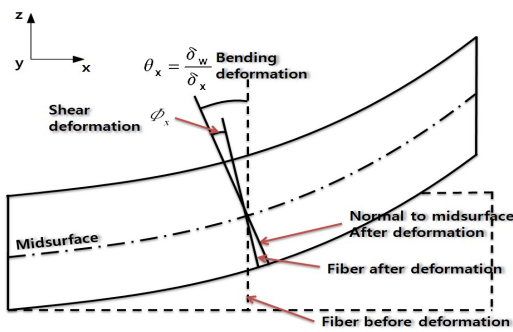
** 정회원 · 경희대학교 건축공학과 조교수 leeyh@khu.ac.kr

*** 정회원 · 경희대학교 건축공학과 교수 kimhc@khu.ac.kr

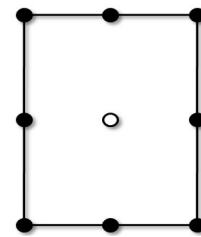
본 연구에서는 쉘 구조해석에 널리 사용되는 등매개변수 감절점 쉘요소(Degenerate Isoparametric Shell Element)를 선택하였다. 그러나 등매개변수 요소는 요소의 변형이 이동변위에 의해 정의되고 회전변위는 절점 자유도로 정의되지 않기 때문에 순수 휨에 대해서도 전단변형 모드로 응답하게 되어 구조체의 강성을 과대평가하는 강성과대현상(Locking Phenomenon)이 나타나게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 선택적 감차적분법>Selectively Reduced Integration Technique)를 적용하여 요소의 강성을 휨과 전단으로 분리하여 강성행렬을 산출하였다. 위의 요소 사용을 위해 도입된 가정은 다음과 같다.(그림 1)

- 변형 전 중립면에 수직인 직선은 변형 후에도 직선을 유지하나 반드시 중립면에 수직일 필요는 없다.
- 중립면에 수직인 방향의 응력은 무시할 수 있을 정도로 작다.

퇴화 쉘 요소는 각 절점당 3개의 이동변위(u, v, w)와 2개의 회전변위(θ_x, θ_y) 즉, 5개의 변위로 표현되나 요소당 9개의 절점을 가진 Heterosis Element를 사용하여 중앙부 절점은 회전변위로만 표현되기 때문에 요소당 42개의 자유도를 가지게 된다.(그림2)

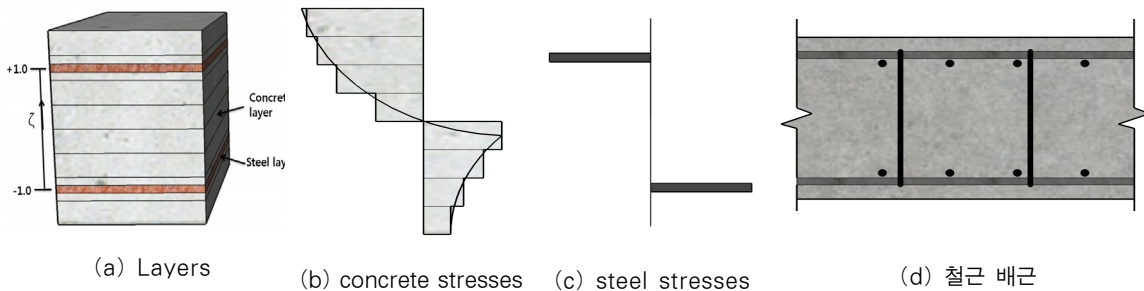


(그림 1) Reissner-Mindlin 가정



- Node with $u, v, w, \theta_x, \theta_y$
- Node with θ_x, θ_y

(그림 2) Heterosis Element

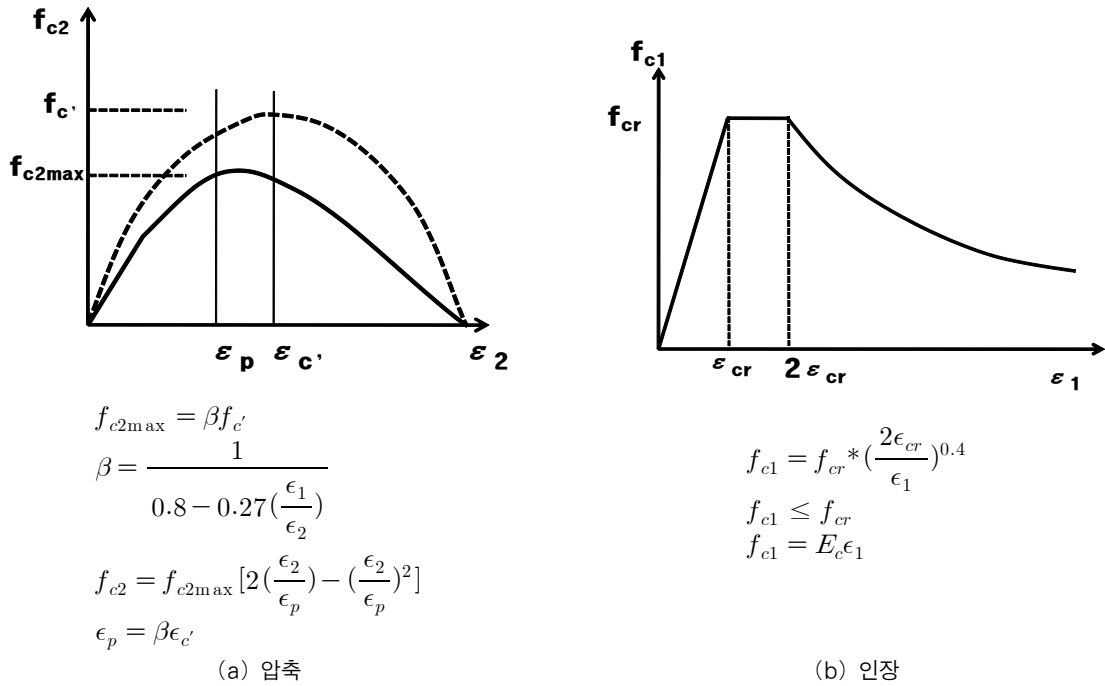


(그림 3) 적층요소

2.2 재료모델

철근 콘크리트 구조의 비선형 거동을 나타내기 위해서는 그에 적합한 재료모델이 사용되어야 한다. 그동안 많은 연구자들에 의해 콘크리트 구성모델이 제안되었으나 본 연구에서는 Vecchio and Collins²⁾에 의해 제안된 수정압축장이론(Modified Compression Field Theory)을 적용하였다. 콘크리트는 균열 발생 시점을 기준으로 재료적 거동이 달라지게 되는데 균열 발생 전에는 선형탄성의 등방성 재료로, 균열 발생 후에는 소성 변형으로 인해 이방성 재료로 보고 있다. 또한 균열에 따른 단면적 감소로 균열면에 수평인 방향의 콘크리트

압축강도는 균열 발생 전의 콘크리트 압축강도보다 낮아지게 되며 이러한 압축강도 감소에 대한 모델은 그림 4에 나타내었다. 철근 콘크리트는 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 상호작용에 의해 어느 정도 인장력에 저항할 수 있으며 이러한 인장강성효과(Tension Stiffening Effect)³⁾를 본 해석모델에 적용하였다. 이러한 재료모델을 Layered method에 적용하여 철근을 쉘 요소 임의의 층에 존재하도록 하였으며 각 층의 두께방향으로 적분점에서 응력을 계산하게 된다. (그림 3)



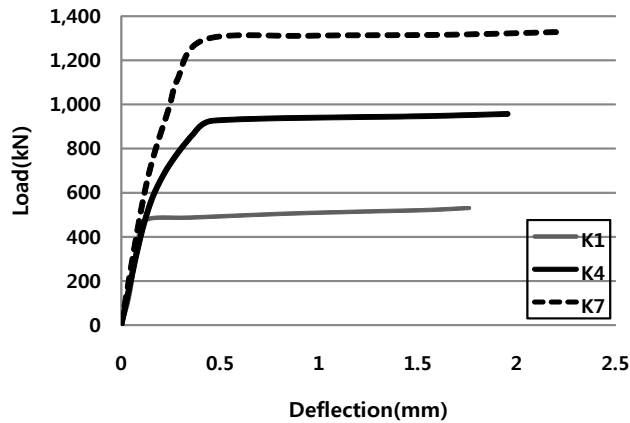
(그림 4) 콘크리트 재료 모델

3. 해석 결과

본 연구의 해석모델의 타당성을 검증하기 위하여 해석결과와 Yamada 등⁴⁾의 기존 실험결과를 비교하였다. 실험에 대한 재료의 물성치 및 보강비를 표 1에 나타내었다. 기존 실험값과 해석값을 비교한 결과 평균적으로 약 16%의 오차율을 보이는 것으로 나타났다. 그 중 전단보강근이 없는 실험체 K1에 비해 실험체 중 전단보강비가 높은 K7의 결과가 가장 가까운 결과를 나타내었다. 이는 본 연구의 해석에서 적용한 재료모델의 균열 후 콘크리트의 강성이 과소평가 되었기 때문인 것으로 판단된다.

[표 1] 기존 실험 데이터 및 해석결과

Model	$f_{c'}$ (MPa)	Flexural reinforcement			Transverse reinforcement		$V_{u(test)}$ (kN)	$V_{u(analy)}$ (kN)	$V_{u,t} / V_{u,a}$
		ρ_t (%)	ρ_c (%)	f_{yf} (MPa)	ρ_x (%)	f_{yt} (MPa)			
K1	26	1.53	1.53	568	-	-	658	530	0.8
K4	27	1.53	1.53	568	0.55	317	1153	957	0.83
K7	27.8	1.53	1.53	568	1.98	330	1498	1329	0.88



[그림 5] 하중-변위 관계(해석결과)

4. 결론

본 연구에서는 플랫 플레이트 시스템의 뚫림전단강도를 평가하기 위하여 유한요소모델을 통한 해석적 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 해석결과와 기존 실험 데이터를 비교한 결과 제안된 유한요소해석모델은 실험결과 대비 약 85%의 전단강도를 예측한 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 해석결과와 비교한 기존 실험은 적용한 하중 및 경계조건에 한계가 있으므로 추후 다양한 하중 및 경계조건이 고려된 실험결과와의 비교를 통한 해석모델의 검증 및 변수연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 3) 균열 발생 이후 실험값에 비해 해석결과가 더 작은 값을 나타내었다. 이는 균열발생 이후 콘크리트의 거동을 과소평가하였기 때문으로 판단되며 추후 균열발생 후 콘크리트의 거동을 정확히 반영할 수 있는 재료모델의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 대한건축학회 (2009) 건축구조설계기준, 기문당, 서울
- Vecchio, F. J., Collins, M. P.,(1986) The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, 83(6), pp.925-933.
- Izumo, J., Shin, H., Maekawa, K., Okamura, H.,(1992) An Analytical Model for RC Panels Subjected to In-Plane Stresses, Concrete Shear in Earthquake, Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 206-215
- Yamada, T., Nanni, A., Endo, K.,(1992) Punching Shear Resistance of Flat Slabs, ACI Structural Journal, 89(5), pp.555~563.