

불균형모멘트를 고려한 RC 무량판 슬래브 설계방법

Design Method of RC Flat Plate Slab Considering Unbalanced Moment

송진규* 송호범** 오상원*** 한선애***
Song, Jin Kyu Song, Ho Beom Oh, Sang Won Han, Sun Ae

ABSTRACT

In structural design provision, maximum punching shear stress of slabs is prescribed as combined stress of direct shear occurred by balanced gravity load and eccentric shear occurred by unbalanced moment. This means that the effect of unbalanced moment is considered to decide the punching shear stress. However, from the resistance capacity standpoint, the effect of unbalanced moment strength is not considered for deciding punching shear strength. For this problem, a model to show unbalanced moment-punching shear interrelation was proposed. In the model, the relation between load effect and resistance capacity in unbalanced moment-punching shear was two-dimensionally expressed. Using the interrelation model, a method how unbalanced moment strength should be considered to decide the punching shear strength was proposed. Additionally, an effective width enlargement factor for deciding the unbalanced moment strength of flat plates with shear reinforcements was proposed. The interrelation model proposed in this paper is very effective for the design because not only punching shear and unbalanced moment strengths but also failure modes of flat plates can be accurately predicted.

요약

구조설계기준에서, 슬래브의 최대 펀칭전단응력은 연직하중에 의한 직접전단과 불균형모멘트에 의한 편심전단의 조합응력으로 규정하고 있다. 이것은 슬래브에 작용하는 펀칭전단응력에 불균형모멘트의 영향을 반영한 것이다. 그러나 부재의 저항성능 즉 펀칭전단강도에는 슬래브의 불균형모멘트강도 영향을 전혀 고려하고 있지 않다. 본 논문에서는 이를 위하여 펀칭전단-불균형모멘트 상관모델을 제시하고 이를 2차원으로 표현하였다. 상관모델을 통하여, 슬래브의 펀칭전단강도를 결정하는데 있어 불균형모멘트강도를 어떻게 반영할 것인지에 대한 방안을 제시하였으며 전단보강재가 불균형모멘트강도에 미치는 영향을 분석하고 이를 구조설계에 반영하기 위한 유효폭확대계수의 적용을 제안하였다.

* 정회원, 전남대학교 건축학부 교수

** 정회원, 전남대학교 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 전남대학교 건축공학과 석사과정

1. 서론

철근콘크리트 무량판 구조(RC flat plate structures)는 보가 없기 때문에 슬래브에 작용하는 모든 하중이 기둥으로 직접 전달된다. 이 때, 전달하중으로 인한 불균형모멘트와 편칭전단력은 모두 기둥 근처 슬래브에 집중된다.

우리나라와 미국의 구조설계기준(KCI 2007¹⁾과 ACI 318-05²⁾)은 불균형모멘트의 일부가 편칭전단에 의해 전달된다고 가정하여 슬래브의 위험단면에 작용하는 최대 편칭전단응력을 연직하중에 의한 직접전단과 불균형모멘트에 의한 편칭전단의 조합응력으로 식 (1)과 같이 규정한다.

$$v_{\max} = \frac{V_g}{A_c} + \frac{\gamma_v M_{unb} c}{J_c} \quad (1)$$

여기서, v_{\max} 는 최대 편칭전단응력, V_g 는 연직하중에 의한 직접전단력, A_c 는 슬래브의 위험단면적, γ_v 는 전단편심에 의해 전달되는 불균형모멘트의 비율, M_{unb} 는 불균형모멘트, c 는 도심에서 위험단면까지의 거리, 그리고 J_c 는 극 단면 2차모멘트이다.

이와 같이, 현행 구조설계기준^{1),2)}은 불균형모멘트의 영향을 최대 편칭전단응력에 적절히 반영하고 있지만 부재의 저항성능 즉 편칭전단강도에는 불균형모멘트강도를 전혀 고려하고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 슬래브의 부재력과 저항성능에 있어, 불균형모멘트와 편칭전단을 동시에 고려할 수 있는 새로운 모델을 제시하고자 한다.

2. 불균형모멘트를 고려한 편칭전단 상관모델

2.1 편칭전단 상관모델 기본 개념

슬래브에 작용하는 부재력을 검토해볼 때, 식 (1)의 최대 편칭전단응력의 양변에 위험단면적 A_c 를 곱하면 위험단면에서의 최대 편칭전단력 V_{\max} 는 식 (2)와 같다.

$$V_{\max} = V_g + \frac{\gamma_v c A_c}{J_c} M_{unb} \quad (2)$$

여기서, $\gamma_v c A_c / J_c$ 는 슬래브-기둥 접합부의 기하학적 특성에 따라 정해지는 상수 값으로 이를 K 로 치환하면 위험단면에서의 최대 편칭전단력 V_{\max} 는 식 (3)과 같이 기울기 K 와 y 절편 V_g 를 갖는 1차식이 된다.

$$V_{\max} = KM_{unb} + V_g \quad (3)$$

2.2 불균형모멘트강도

불균형모멘트와 편칭전단에 대한 저항강도를 검토해 보면, 구조설계기준에서 규정하는 전단보강 슬래브의 편칭전단강도 V_n^{SR} 은 식 (4)와 같다.

$$V_n^{SR} = V_c + V_s \leq \frac{1}{2} \sqrt{f_{ck}} b_o d \quad (4)$$

여기서, V_c 는 콘크리트 슬래브의 편칭전단강도(= $1/6(\sqrt{f_{ck}} b_o d)$), f_{ck} 는 콘크리트 설계기준강도, b_o 는 기둥면으로부터 $d/2$ 만큼 떨어진 위치에서의 위험단면 둘레길이, d 는 슬래브 유효두께이다. 또한, V_s 는 보강재에 의한 편칭전단강도이다. 이때, 구조설계기준은 식 (4)의 최대값을 무보강 슬래브 편칭전단강도의 1.5배까지로 한정하였다. 구조설계기준에서는 전단보강재의 유무 및 종류에 관계없이 휨으로 전달되는 불균형모멘트에 대하여 $c_2 + 3h$ 폭을 갖는 슬래브 단면이 저항하도록 규정하고 있다. 그러나 기존 연구결과³⁾에 의하면, 전단보강 슬래브는 기둥 근처에 휨모멘트가 집중하는 무보강 슬래브와 달리, 휨

철근의 소성재분배가 원활하게 일어나기 때문에 불균형모멘트에 저항하는 유효폭의 범위가 확장되는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 이와 같이 전단보강 슬래브에서 유효폭이 증가하는 현상을 “유효폭확대계수 λ ”로 나타냈다. 유효폭 증가로 인해 불균형모멘트강도가 증가하는 현상을 그림 1에 개념적으로 나타냈다. 유효폭확대계수를 적용할 경우, 전단보강 슬래브의 유효폭은 구조설계기준에서 규정하는 무보강 슬래브의 유효폭에 확대계수를 곱하여 $\lambda(c_2+3h)$ 이 된다. 결국, 전단보강 접합부의 불균형모멘트강도 $M_{n,unb}^{SR}$ 는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 여기서, $M_{n,\lambda(c_2+3h)}$ 는 $\lambda(c_2+3h)$ 폭을 갖는 슬래브 단면의 휨 강도이다.

$$M_{n,unb}^{SR} = \frac{M_{n,\lambda(c_2+3h)}}{\gamma_f} \quad (5)$$

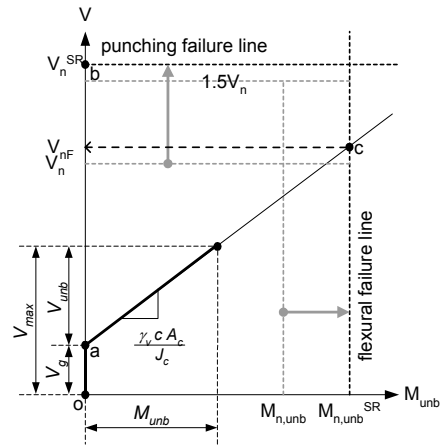


그림 1 불균형모멘트-편칭전단강도 상관관계

유효폭확대계수는 무보강 실험체의 불균형모멘트강도에 대한 전단보강 실험체의 불균형모멘트강도의 비율이다. 기존 횡력 실험결과⁴⁻⁷⁾를 분석해 보면, 보강재의 종류에 따라 접합부의 모멘트 저항 능력은 상당한 차이를 보였다. 슬래브의 전단성능을 증진시키기 위해 일반적으로 사용하는 스티럽과 전단스티드의 유효폭확대계수 평균값은 각각 1.11 그리고 1.25로 나타났다. 그리고 새로운 보강기술인 전단밴드와 래티스의 유효폭확대계수는 각각 1.22 그리고 2.06이다. 단, 전단밴드와 래티스에 대한 확대계수는 횡하중에 대한 추가 실험이 없어, 단 하나의 실험결과에 기초한 것이다.

기존 실험결과⁴⁾에서, 래티스 보강재는 다른 전단 보강재에 비해 불균형모멘트강도 증진에 대단히 효과적이다. 그러나 그림 1에서 불균형모멘트강도 $M_{n,unb}^{SR}$ 가 편칭전단강도 V_n^{SR} 에 비해 상대적으로 크게 증가하면 슬래브의 취성지배 파괴의 가능성이 증가되므로, 이러한 현상이 슬래브 거동에 무조건 긍정적이라고 볼 수는 없다. 특히, 슬래브의 연성능력 확보가 매우 중요한 설계에 있어, 래티스를 이용한 보강은 극히 주의하여야 할 것이다.

2.3 불균형모멘트강도를 고려한 편칭전단강도

슬래브에 작용하는 불균형모멘트가 이에 관한 강도를 초과하면 슬래브는 휨파괴된다. 여기서, 한 가지 중요한 점은 슬래브가 불균형모멘트에 의해 휨파괴될 경우 슬래브의 최종적인 편칭전단강도를 어떻게 정의해야 하는가이다.

이 문제는 기존의 횡하중에 대한 일반적인 실험결과와 식 (1)의 편심전단응력모델에서 그 해답을 구할 수 있다. 횡하중 실험은 일반적으로 일정한 연직하중에 대하여 횡변위하중을 점진적으로 증가시킨다. 이때, 횡변위하중은 접합부의 불균형모멘트를 유발하는데, 접합부는 불균형모멘트강도에 도달한 이후 더 이상의 강도 증가 없이 연성거동하거나 또는 급격히 취성파괴된다. 이것을 그림 1에 표기하면, $V_{n,F}$ 는 부재력과 불균형모멘트강도의 교점 c에서의 편칭전단강도로 정의할 수 있다. 결국, 전단지배 파괴가 발생하는 슬래브의 편칭전단강도는 구조설계기준에서 제시하는 V_n 또는 V_n^{SR} 이지만 슬래브가 휨에 의해 파괴할 경우 슬래브의 최종적인 편칭전단강도는 $V_{n,F}$ 로 정의된다.

3. 불균형모멘트와 편칭전단 상관관계를 고려한 RC 슬래브의 설계 방법

지금까지 언급한 편칭전단 상관모델은 슬래브에 실제 작용하는 사용하중과 공칭저항강도에 관한 것이다. 그러나 우리나라와 미국의 구조설계기준은 극한강도설계법에 기초하므로, 하중의 영향에는 계수하중을, 그리고 부재의 저항성능에는 강도감소계수를 각각 고려하여야 한다. 본 논문에서는 편칭전단 상관모델을 구조설계에 적용하기 위한 새로운 설계방법론을 다음과 같이 제시하였다.

- (1) 부재력은 계수하중을 고려한 계수 편칭전단력과 계수 불균형모멘트를 구하고 이를 상관모델에 표시한다. 여기서, 편심전단의 기하기 $\gamma_v c A_c / J_c$ 는 접합부의 기하학으로부터 계산한다.

- (2) 부재의 설계강도는 전단과 휨에 대한 강도감소계수(ϕ)를 적용하여 계산하고 이를 상관모델에 표시한다. 이때, 무보강 슬래브의 설계강도는 각각 ϕV_n , $\phi M_{n,unb}$ 이고 전단보강 슬래브의 설계강도는 각각 ϕV_n^{SR} , $\phi M_{n,unb}^{SR}$ 이다.
- (3) 상관관계를 이용하여 접합부의 파괴모드를 결정하고 휨지배파괴일 경우, 불균형모멘트 설계강도가 고려된 편칭전단 설계강도 ϕV_{nF} 를 최종적인 편칭강도로 정의한다. 이때, ϕV_{nF} 는 그림 1에서 계수 하중에 의한 부재력과 강도감소계수를 고려한 불균형모멘트강도의 교점 c에서의 편칭전단강도이다.
- (4) 편칭전단에 대하여 $V_{u,max} \leq \phi V_n$, ϕV_n^{SR} , ϕV_{nF} , 불균형모멘트에 대하여 $M_{u,unb} \leq \phi M_{n,unb}$, $\phi M_{n,unb}^{SR}$ 을 각각 검토하고 이를 만족하지 못할 경우 접합부의 성능을 증진시킨다.
- (5) 2)단계부터 4)단계까지 반복 작업을 통하여 접합부의 설계를 완료한다.

4. 결론

먼저, 무량판 구조에서 슬래브의 편칭전단은 연직하중에 의한 직접전단과 불균형모멘트에 의한 편심전단의 조합으로 정의된다. 이러한 개념을 부재의 저항성능에 그대로 적용하여 슬래브에 작용하는 하중영향과 저항성능을 모두 불균형모멘트와 편칭전단의 상관관계로 설명하는 새로운 모델을 정립하였다.

그리고 슬래브에서 불균형모멘트에 대한 저항성능은 전단보강재의 유무 또는 종류에 따라 차이를 보인다. 이러한 차이를 구조설계에 효과적으로 반영하기 위하여 전단보강재에 따라 유효폭의 크기를 확대시키는 유효폭확대계수의 적용을 제안하였다.

최종적으로, 불균형모멘트-편칭전단 상관모델 및 유효폭확대계수를 이용하여 새로운 접합부 설계방법을 제시하였다. 본 기사에서 소개한 설계방법론을 이용할 경우, 다음과 같은 장점을 갖는다.

- (1) 작용하중의 영향과 부재의 저항성능을 하나의 상관관계 모델로 검토할 수 있다.
- (2) 접합부의 최종적인 파괴모드에 대한 예측이 가능하다.
- (3) 각각 독립적으로 수행하였던 편칭전단과 불균형모멘트 설계를 하나의 모델로 통합설계한다.
- (4) 구조설계에서 하중과 전단보강재의 종류에 따른 영향을 직접적으로 반영할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B04) 지원 사업과 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(지방연구중심대학육성사업/바이오하우징연구사업단)

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 2007년도 개정 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2007.
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-05 and ACI-318R-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
3. 최정욱, 송진규, 박홍근, 김준희, “전단 보강된 무량판-기둥 접합부의 횡지향 성능”, 대한건축학회논문집 구조계, 제23권, 제9호, 2007, pp. 47-54.
4. 최정욱, 송진규, 김준희, “슬래브-기둥 접합부의 편칭강도 및 횡변위 성능에 관한 반복 횡하중 실험”, 한국구조물진단학회지 제11권, 제4호, 2007, pp. 99~108.
5. Elgabry, A. A. and Ghali, A., “Tests on Concrete Slab-Column Connections with Stud-Shear Reinforcement Subjected to Shear-Moment Transfer”, ACI Structural Journal, V.84, No.5, 1987, pp. 433-442.
6. Robertson, I. N., Kawai, T., Lee, J. and Enomoto, B., “Cyclic Testing of Slab-Column Connections with Shear Reinforcement”, ACI Structural Journal, V.99, No.5, 2002, pp. 605-613.
7. Megally, S. and Ghali, A., Elgabry, A. A., “Seismic Behavior of Edge Column-slab Connections with Stud Shear Reinforcement”, ACI Structural Journal, V.97, No.1, 2000, pp. 53-60.