

플랫플레이트-기둥 접합부 강도발현에 관한 연구

A Study on Strength of Flat Plate-Column Connections

강수민* 이도범** 김옥중* 이지웅* 박홍근*** 이리형****

Kang, Su Min Lee, Do Bum Kim, Ook Jong Lee, Ji Woong Park, Hong Gun Lee, Li Hyung

ABSTRACT

A numerical analysis was performed for interior connections of continuous flat plate to analyze the effect of design parameters such as column section shape, gravity load and slab span on the behavioral characteristics of the connections. Through the parametric study, the variations of shear stress distribution around the connection were investigated. According to the result of numerical analysis, as the length of the cross section of column in the direction of lateral load increases and gravity load increases, the effective area and the maximum shear strength providing the torsional resistance decrease considerably. And as the slab span loaded with relatively large gravity load increases, the negative moment around the connection increases and therefore the strength of connection against unbalanced moment decreases.

1. 서론

플랫플레이트 구조형식은 공기단축, 낮은 층고, 자유로운 평면계획, 층간소음저감 등의 장점을 가진다. 이러한 많은 장점들로 인하여 플랫플레이트 구조형식이 최근 고층주거건물에 많이 사용되고 있다. 그런데 플랫플레이트 구조형식은 이전의 벽식구조에 비하여 시공적, 계획적인 측면에서는 많은 장점을 가지나 구조안전성 측면에서는 안전율이 크지 않기 때문에 정밀한 시공과 구조검토를 필요로 한다. 구조적 측면에서 볼 때, 플랫플레이트 구조형식은 면요소인 슬래브와 선요소인 기둥으로 이루어진 구조로서 접합부의 거동이 매우 복잡하며, 합리적인 구조계획이 이루어지지 않는 경우 접합부에서 편칭에 의한 취성과파괴가 발생할 수 있다. 따라서 플랫플레이트 접합부의 강도확보는 지진과 같은 횡력에 플랫플레이트 시스템이 효과적으로 저항하기 위한 가장 중요한 사항이다.

	ACI 318(KC)	CEB-HP Model code	Park & Choi Model
Moment capacity $\gamma = M_f/M_c$ $\gamma = 1 - \gamma_f$	$M_u = M_f + M_c$ $\gamma_f = 0.6, \gamma_c = 0.4$ γ_c can be increased.	$M_u = M_f + M_c$ $\gamma_f = 0.4, \gamma_c = 0.6$ γ_c can be increased.	$M_u = M_f + M_c + M_T$ Not necessary
Flexural moment			
Moment transferred by eccentric shear	 $v_c = 0.33\sqrt{f_c'}(MPa)$	 $v_c = 0.12(1 + \sqrt{1/50})[100\sigma_f']^{1/3}$ (MPa)	M_c (Front, Back) $v_c = 0.33\sqrt{f_c'}(MPa)$ M_T (Side) $v_c = 3.5' 0.33\sqrt{f_c'}(MPa)$

그림 1 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정모형

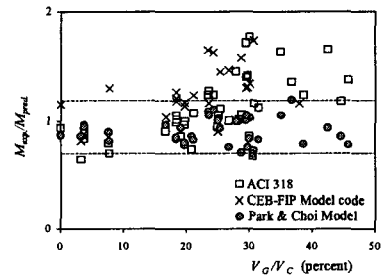


그림 2 각 강도산정모형의 실험결과 예측

*정회원, 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 연구원

**정회원, 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 팀장

***정회원, 서울대학교 건축학과 교수

****정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

콘크리트구조설계기준(ACI¹⁾, KCI²⁾), 그리고 CEB-FIP Model Code³⁾에서는 플랫플레이트-기둥 접합부에 대한 강도 산정모형을 제안하고 있다. 그러나 Luo⁴⁾, 박홍근⁵⁾ 등의 연구에 의하면 기존의 설계식들이 잘못된 응력분포 가정과 위험단면 선정으로 인하여 기존 실험연구에서의 플랫플레이트-기둥 접합부 강도를 정확히 예측하지 못하고 있다(그림 2 참조). 이는 기존의 설계방법이 접합부의 복잡한 거동을 적절히 반영하고 있지 못함을 의미한다. 박홍근⁵⁾은 비선형유한요소 해석을 통하여 플랫플레이트-기둥 접합부 위험단면에서의 응력분포상태를 새롭게 정의하고 접합부의 경계조건을 현실적으로 고려한 플랫플레이트 접합부 강도산정모형을 제안하고 있다. 박홍근이 제안한 강도산정모형은 비교적 실험 결과를 정확히 예측하고 있다(그림 2 참조). 하지만 비선형유한요소해석에 사용된 변수들이 실제 플랫플레이트-기둥 접합부의 설계요인을 정확히 반영하지 못한 측면이 있다. 박홍근의 강도모형은 벽기둥(Wall-Column)과 같은 단면크기가 큰 기둥이 적용된 플랫플레이트 접합부 강도를 과대평가하는 경향이 있는데 이는 비선형유한요소해석의 변수로 사용된 기둥 치수나 슬래브 치수가 실제 건설되고 있는 플랫플레이트 시스템의 기둥, 슬래브 치수보다 작기 때문이다. 특히 최근 국내에서 건설되고 있는 플랫플레이트 구조시스템은 횡력에 대한 저항성을 크게 하기 위하여 기둥의 단면이 매우 큰 직사각형 형태를 가지는 경우가 많으므로 접합부 강도산정모형에서는 이러한 기둥의 형태적 요소를 적절히 반영해야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 강도산정모형에서 고려가 부족했던 기둥단면형태, 경간, 철근비 등의 설계변수에 따른 접합부의 거동변화를 비선형유한요소해석을 통하여 분석하고자 한다. 이를 토대로 하여 실제 사용되고 있는 플랫플레이트-기둥 접합부의 설계요소를 합리적으로 반영할 수 있는 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정모형에 대하여 논의하기로 한다.

2. 플랫플레이트-기둥 접합부의 비선형유한요소해석

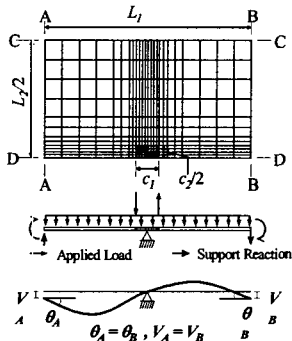


그림 3 해석모델

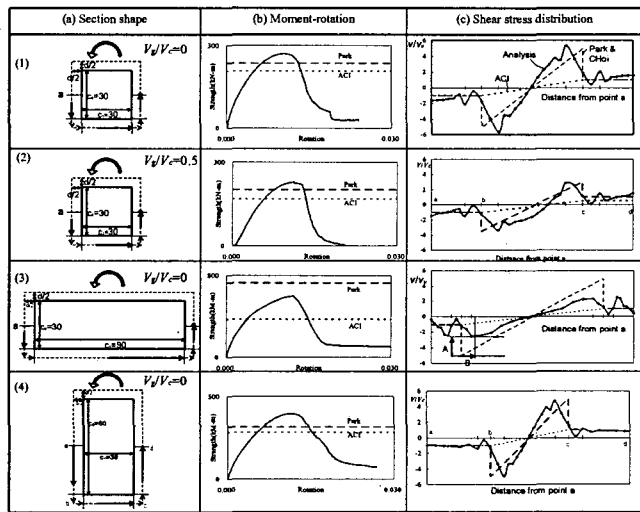


그림 4 설계변수에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동양상

다양한 설계변수에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부 강도를 분석하기 위하여 박홍근의 연구⁶⁾를 통하여 검증된 비선형유한요소해석 프로그램 RCSHELL⁶⁾을 이용하였다. RCSHELL은 중력하중과 면외모멘트를 재하받는 플랫플레이트의 해석을 위하여, 비선형모델 중 상대적으로 인장-압축상태의 콘크리트 거동을 잘 나타낼 수 있는 등가 1축 응력-변형을 곡선을 이용하는 회전스트럿-고정균열모델⁶⁾을 사용하여 콘크리트의 거동을 나타낸다. 슬래브의 휨거동에 대한 유한요소해석을 위해 9절점의 쉘요소를 사용하였다. 또한 철근은 배근면에서 재료특성이 균등하게 분포된 재료로 이상화하였다. 박홍근의 연구⁶⁾에서는 Ghali⁷⁾와 Farhey⁸⁾, Moehle⁹⁾의 실험연구와 RCSHELL의 해석결과를 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하였다. 기둥단면형태, 슬래브 스펠, 철근비, 슬래브 두께에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 극한거동을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 해석모델을 사용하였다. 해석모델에서는 실제 연속슬래브의 경계조건을 충실히 반영하였다. 해석모델은 스펠 길이가 일정한 연속슬래브의 대칭성을 고려하기 위하여 슬래브의 A면과 B면에서는 서로 대응되는 모든 변위가 일치하도록 하였으며 C면과 D면에서는 C-C축과 D-D축에 대한 회전변위를 구속하였다. 기둥단면에 해당하는 슬래브부분(접합부 패널존)은 무한휨강성을 가지는 요소로 이상화하였으며, 중력하중을 실현하기 위하여 슬래브에 수직하중을 균등재하하

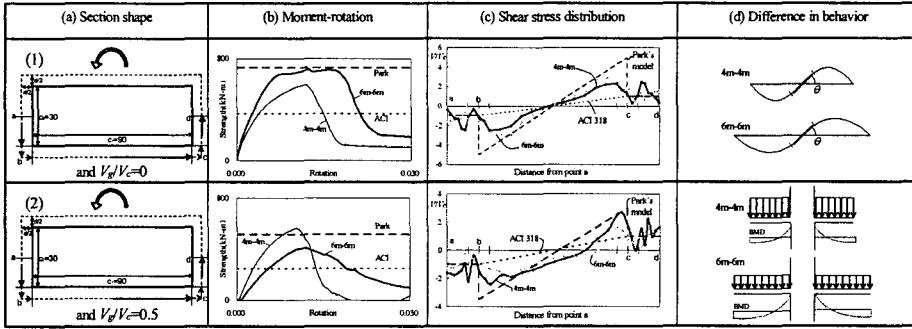


그림 5 스패ン 길이와 중력하중에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동양상

였고 기둥에 작용하는 불균형 모멘트는 두개의 짝힘으로 재하하였다. 기둥의 단면형상에 따른 접합부의 거동특성을 살펴 보기 위하여 다양한 가로와 세로 비율의 기둥단면형상에 따른 접합부의 거동변화를 분석하였다. 단면형태 뿐만 아니라 중력하중($V_g/V_c=0, 0.25, 0.5, 0.75$), 스패ン 길이(4~6m), 슬래브 두께(0.2~0.3m), 철근비(0.36~1.2%)를 해석변수로 하여 총 3348가지 형태의 무량관 접합부에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동양상은 기존 규준^{1),2),3)}에 제시된 바와 같이 단순하게 표현될 수 없으며 다양한 변수에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 여러 해석변수 중 접합부 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 중력하중의 크기와 횡하중 가력방향의 기둥폭(a_1)이다. 중력하중은 플랫플레이트-기둥 접합부의 강도와 연성도에 큰 영향을 미치는 변수로 알려져 왔다.^{4,5,6)} 수치해석을 통해 살펴본 중력하중에 의한 접합부의 거동변화는 그림 4 (1),(2)에 나타난 바와 같다. 그림 4 (1),(2)에서는 양방향의 슬래브 스패ン 길이=4m, 슬래브 두께=0.2m, 상부철근비=0.8%, 하부철근비=0.4%, 기둥치수가 0.3×0.3(m)이고 중력하중이 가력되지 않은 경우와 전단강도에 50%에 해당하는 전단력을 접합부에 전달하도록 중력하중을 가력하는 경우에 대해 플랫플레이트-기둥 접합부의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그림 4 (1),(2)에서 볼 수 있듯이 ACI 318은 접합부강도를 과소평가하고 있으나 박홍근 모델의 경우, ACI 318보다 비교적 합리적으로 강도를 평가하고 있다. a_1 이 접합부 거동에 미치는 영향은 기존 연구^{5),6),7)}나 규준^{1),2),3)}에서 고려된 바가 없으므로 이에 대한 분석이 필요하다. 그림 4(1), (3)은 슬래브 스패ン=4m, 슬래브 두께=0.2m, 상부철근비=0.8%, 하부철근비=0.4%, 중력하중=0 기둥치수가 0.3×0.3, 0.9×0.3(m)인 플랫플레이트 접합부의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그림 4에는 비선형 유한요소해석 결과로서 기둥의 단면형태에 따른 전단응력 분포의 변화가 보여지고 있다. 그림 4에서 전단응력 분포는 접합부가 최대강도를 발휘할 때, 하중가력 축과 위험단면이 만나는 a점에서 시작하여 화살표 방향의 전단응력분포를 나타내고 있으며 ACI 기준에서 가정된 전단응력 분포, 박홍근 모델에서 가정하는 전단응력 분포, 비선형 유한요소해석에 의한 전단응력 분포를 함께 보여주고 있다. 기본적으로 ACI 기준은 전단응력을 실제보다 작게 산정하는 것을 볼 수 있다. 박홍근 모델에서 가정된 전단응력분포는 0.3×0.3(m)의 기둥 접합부에서는 해석결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 하중가력방향과 평행한 기둥면이 긴 0.9×0.3(m)의 기둥 접합부에서 해석결과에 의한 전단응력분포는 박홍근 모델과 상당한 차이를 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 하중가력방향과 평행한 기둥면(a_1)이 길어질수록 위험단면에서 극한의 응력을 받는 부분이 커지게 되고 이로 인해 휨에 의한 불균형모멘트 저항성분이 감소하고 위험단면의 전후면에 인접한 측면까지 휨에 대해서 영향을 받아 비틀림 전단응력이 작아지기 때문이라고 판단된다. 반면, 0.3×0.6(m)인 플랫플레이트 접합부의 수치해석에서의 전단응력분포를 박홍근 모델의 전단응력분포가 비교적 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 따라서 횡하중 가력직각방향 기둥폭(a_2)에 의한 접합부 거동의 변화는 박홍근 모델을 사용하여 결과를 예측하는 데에 큰 무리가 없는 것으로 판단된다. 위험단면에서의 응력상태는 플랫플레이트의 슬래브의 스패ン 길이에 의해서도 큰 영향을 받는다. 그림 5는 슬래브 두께=0.2m, 상부철근비=0.8%, 하부철근비=0.4%, 기둥치수가 0.9×0.3(m)이고 중력하중이 없는 경우와 전단강도의 50%에 해당하는 전단력을 접합부에 전달하도록 중력하중을 가력하는 경우, 그리고 양방향의 슬래브 스패ン 길이가 4m 또는 6m일 때, 플랫플레이트-기둥 접합부의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그림 5(1)은 중력하중이 없는 경우, 양방향 스패ン 길이가 4m, 6m인 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동을 비교하고 있다. 그림 5(1)에서 스패ン 길이에 따라서 거동양상이 달라지는 것을 알 수 있다. 스패ン 길이가 6m인 경우, 접합부의 강도와 연성도가 스패ン 길이가 4m인 경우보다 큰 것을 그림 5(1-b)를 통해서 알 수 있다. 이는 그림 5(1-d)에서와 같이 스패ン 길이에 따른 거동양상의 차이에 기인한다. 접합부에 불균형모멘트가 재하될 때, 스패ン 길이가 짧은 경우는 스패ン 길이가 긴 경우보다 동일한 회전에서 더 큰 곡률이 위험단면에서 발생하게 된다. 따라서 스패ン 길이가 짧을수록 접합부의 작은 회전에서 전후면 휨성능이 극한에 도달하게 되고 위험단면의 전후면에 인접한 측면까지 휨에 대해서 영향을 받아 비틀림 전단응력이 작아지게 되어 접합부의 전체강도가 떨어진다. 이는 그림 5(1-c)의 전단응력분포를 통해 파악할 수 있다. 결국 스패ン 길이와 횡하중 가력방향의 기둥폭(a_1)의 상대적 비율이 접합부 주변의 응력상태에 미치는 영향이 크므로 이러한 영향을 접합부 강도설계에 반영해야 한다.

그림 5(2)는 중력하중을 접합부 전단강도의 50%가 되도록 가력한 경우($V_g/V_c=0.5$), 양방향 스패ン 길이가 4m, 6m인 플

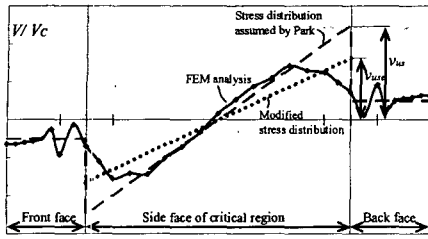


그림 6 위험단면에서의 전단응력분포

확인할 수 있다. 따라서 접합부강도를 산정할 때, 스패ん길이와 중력하중의 복합적인 영향을 합리적으로 고려해야 한다. 기둥의 단면형태(α_1, α_2), 중력하중, 스패ん길이 뿐만 아니라 철근비와 슬래브 두께에 대한 수치해석을 실시하였다. 철근비의 경우 일반적으로 슬래브설계에 쓰이는 범위에서는 접합부 거동에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 철근비가 커질수록 측면전단력이 증가하는 양상을 보이기는 하지만 그 정도가 미미하다고 할 수 있다. 또한 슬래브 두께가 증가할수록 접합부의 강도를 증가시키고 연성도를 감소시키는 영향을 미치지만 그 영향이 크지 않다고 할 수 있다. 기존연구^{3,4)}에서도 철근비와 슬래브 두께가 접합부 거동에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보고되고 있다.

그림 6은 플랫폼플레이트 위험단면에서의 전단응력분포를 나타낸다. 그림 6에서 접합부 성능을 비교적 정확하게 예측하는 박홍근 모델에서 가정된 전단응력분포와 실제 전단응력분포는 상당한 차이를 나타낸다. 실제 전단응력분포는 단면형태, 스패ん길이, 중력하중 크기 등의 영향으로 비선형분포를 나타내나 박홍근 모델은 이러한 영향을 반영하지 못하고 있다. 따라서 플랫폼플레이트 접합부의 강도를 정확히 예측하기 위해서는 설계변수의 영향을 보다 합리적으로 고려할 수 있는 강도산정모형이 필요하다고 할 수 있다.

3. 결론

설계변수에 따른 플랫폼플레이트-기둥 접합부의 거동특성을 분석하기 위하여 기존의 강도모델을 분석하고 비선형유한요소해석을 실시하였다. 비선형유한요소해석 결과, 하중가력방향과 평행한 기둥면이 길어질수록 위험단면에서 극한의 응력을 받는 부분이 커지게 되고 이로 인해 휨에 의한 불균형모멘트 저항성분이 감소하여 위험단면의 전후면에 인접한 측면까지 휨에 대해서 영향을 받는다. 이로 인해 비틀림 전단을 받는 유효영역과 최대전단강도가 줄어들어 접합부의 강도가 기존 설계제한식으로 예상한 값보다 큰 폭으로 감소한다. 또한 중력하중은 접합부 위험단면에 부모멘트를 재하시킴으로써 측면의 최대편심전단응력을 감소시키며 접합부의 강도와 연성도를 줄여줄게 한다. 중력하중이 재하되지 않은 경우, 스패ん길이가 길어질수록, 위험단면의 강성이 줄어들어 접합부의 강도와 연성도가 증가한다. 반면, 중력하중이 상대적으로 크게 재하된 경우, 스패ん길이가 짧을수록 접합부 강도가 증가하는데, 이는 동일한 크기의 전단력이 위험단면에 재하된다 하더라도 스패ん길이가 길어질수록 접합부 주변의 부모멘트로 인한 영향을 더 크게 받기 때문이다. 하지만 현재 기준이나 설계제한식은 이러한 설계변수의 영향을 합리적으로 반영하지 못하고 있다. 따라서 플랫폼플레이트 접합부의 강도를 정확히 예측하기 위해서는 설계변수의 영향을 보다 합리적으로 고려할 수 있는 강도산정모형이 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

1. ACI, "Building Code Requirements for Structural Concrete," ACI 318-02, pp.184~186, pp.213~312.
2. 한국콘크리트학회, 대한건축학회, "콘크리트구조설계기준," 1999.
3. CEB-FIP Model Code 1990, "Structural Concrete Textbook on Behavior," 1993.
4. Luo, Y. H., and Durrani, A. J. "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings-Part1: Interior Connections." *ACI Structural Journal*, 1995, 92(1), 115-12.
5. 최경규, 박홍근, "불균등 휨모멘트를 받는 플랫폼플레이트-기둥 접합부의 강도산정모델," 한국콘크리트학회 논문집, 제 14권 6호, 2002, pp. 961-971.
6. 최경규, 박홍근, "불균등 휨모멘트를 받는 플랫폼플레이트-기둥 내부접합부의 강도에 대한 해석모델," 한국콘크리트학회 논문집, 제 14권 6호, 2002, pp. 949-960.
7. Ghali, A., Elmasri, M. Z., and Diler, W. "Punching of Flat Plates under Static and Dynamic Horizontal Force." *ACI Journal*, October, 1976, 566-572.
8. Farhey, D. N., Adin, M. A., and Yankelevsky, D. Z. "Flat Slab-Column Subassemblages under Lateral Loading." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1993, 119(6), 1903-1916.
9. Pan, A. D., and Moehle, J. P. "An Experimental Study of Slab-Column Connections." *ACI Structural Journal*, 1992, 89(6), 626-633.