

기둥 단면형상에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부 강도에 관한 수치해석연구

Numerical Analysis on Strength of Interior Flat Plate-Column Connections according to Column Section Shape

강수민* 김옥종* 이도범** 박홍근*** 천영수**** 이현호*****
Kang, Su Min* Kim, Ook Jong* Lee, Do Bum** Park, Hong Gun*** Chun, Young Soo**** Lee, Hyun Ho*****

ABSTRACT

In the present study, a numerical analysis was performed for interior connections of continuous flat plate to analyze the effect of column section shape on the behavioral characteristics of the connections. For the purpose, a computer program for nonlinear FE analysis was developed, and the validity was verified. Through the parametric study, the variations of shear stress distribution around the connection were investigated. According to the result of numerical analysis, the column section shape has a serious effect on the behavior of the connections. As the length of the cross section of column in the direction of lateral load increases, the effective area and the shear strength at the sides providing the torsional resistance decrease considerably. Therefore the strength model for the flat plate-column connections should be modified by considering the effect of column section shape on the behavior of the connections.

1. 서론

최근 계획적, 시공적 측면에서 많은 장점을 가지는 플랫플레이트 구조시스템이 고층주거건물의 구조형식으로 많이 사용되고 있다. 그러나 플랫플레이트 시스템은 구조안전성 측면에서 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 취성파괴가 발생할 수 있다. 따라서 플랫플레이트 접합부의 강도확보는 지진과 같은 횡력에 플랫플레이트 시스템이 효과적으로 저항하기 위한 가장 중요한 사항이다.

콘크리트구조 설계기준(ACI¹⁾, KCI²⁾), 그리고 CEB-FIP Model Code³⁾에서는 플랫플레이트-기둥 접합부에 대한 강도 산정모델을 제안하고 있다. 그러나 Luo⁴⁾, 박홍근⁵⁾ 등의 연구에 의하면 기존의 설계식들이 잘못된 응력분포 가정으로 인하여 기존 실험연구에서의 플랫플레이트-기둥 접합부 강도를 정확히 예측하지 못하고 있다. 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 실험결과를 정확히 예측하고 있다. 하지만 비선형유한요소해석에 사용된 변수들이 실제 플랫플레이트-기둥 접합부의 설계요인을 정확히 반영하지 못한 측면이 있다. 비선형유한요소해석에서 사용된 기둥 치수나 슬래브 치수가 실제 건설되고 있는 플랫플레이트-기둥 접합부의 치수보다 작기 때문에 제안된 응력분포의 유효성을 검증받아야 할 것이다. 특히 최근 국내에서 건설되고 있는 플랫플레이트 구조시스템은 횡력에 대한 저항성을 크게 하기 위하여 단면크기가 매우 크며 직사각형형태를 가지는 경우가 많으므로 접합부 강도 산정모형에서는 이러한 형태적 요소가 반영되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 제시된 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정모형^{1),2),3),5)}을 분석, 검증해보고 기존의 강도산정모형에서 고려가 부족했던

* 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 연구원
** 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 건축연구지원팀 팀장
*** 정희원, 서울대학교 건축학과 교수
**** 정희원, 대한주택공사 주택도시연구원 책임연구원
***** 정희원, 동양대학교 건축학과 교수

기둥 단면형태를 변수로 하여 비선형유한요소해석을 실시하여 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동 특성을 분석하고자 한다.

2. 기준 및 기존연구 고찰

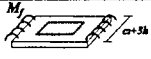
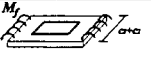
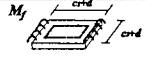




	ACI 318(KCI)	CEB-FIP Model code	Park & Choi Model
Moment capacity $\gamma_f = M_u/M_n$ $\gamma_f = 1 - \gamma_r$	$M_n = M_f + M_s$ $\gamma_f = 0.6, \gamma_r = 0.4$ γ_f can be increased.	$M_n = M_f + M_s$ $\gamma_f = 0.4, \gamma_r = 0.6$ γ_r can be increased.	$M_n = M_f + M_s + M_r$ Not necessary
Flexural moment			
Moment transferred by eccentric shear	 $V_s = 0.33\sqrt{f_c'}(A/P_0)$	 $V_s = 0.12[1 + \sqrt{1/(5d)}][100\sigma_f']^{1/2}(A/P_0)$	M_s (Front, Back)  $V_s = 0.33\sqrt{f_c'}(A/P_0)$ M_r (Side)  $V_s = 3.5 \cdot 0.33\sqrt{f_c'}(A/P_0)$

그림 1 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정모형

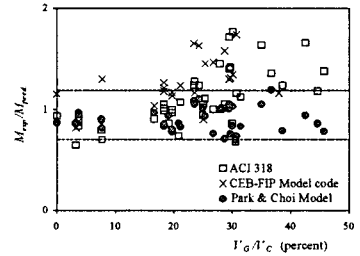


그림 2 각 강도산정모형의 실험결과에측

ACI(KCI) 기준에서 제시하는 플랫플레이트-기둥 접합부의 강도(M_n)는 그림 1과 같이 힘에 의한 모멘트(M_f)와 편심전단에 의한 모멘트(M_s)의 합으로 이루어진다. 이는 플랫플레이트-기둥 접합부에서 불균형 모멘트를 기둥 전후면의 휨과 기둥주변의 전단응력에 의해서 전달한다는 것을 의미한다. 편심전단에 의한 응력상태를 정의하기 위해 ACI 318에서는 직접 전단력과 불균형 모멘트에 의해 발생하는 전단 응력은 그림 1과 같이 접합부의 위험단면에서 선형으로 분포한다고 가정한다. 휨과 편심전단에 의한 접합부의 모멘트전달능을 정의하기 위해 ACI 318에서는 기둥면에서 $0.5d$ 떨어진 곳을 편심전단에 대한 위험단면으로 정의하였고, 휨모멘트에 대한 위험단면으로는 슬래브 폭 $c_2 + 3h$ 를 사용하였다. 여기서 h 는 슬래브 유효층, $c_{1(2)}$ 는 횡하중 평행(직교)방향의 기둥폭, h 는 슬래브 두께. ACI 318에서 제시된 강도산정모형은 현재 플랫플레이트-기둥 접합부의 강도를 평가하는 데에 가장 널리 쓰이고 있다. 하지만 Luo⁴⁾, Elstner⁵⁾, 박홍근⁵⁾ 등의 연구에 따르면 ACI 318 기준식은 접합부의 강도를 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 그림 2는 플랫플레이트-기둥 접합부 강도실험결과와 각 강도산정모형에 의해 예측된 강도를 비교한 그림으로 ACI 318에 의한 강도 산정모형이 실험결과를 잘 예측하지 못하는 것을 보여주고 있다. 이는 ACI 318의 강도산정모형이 실험결과와 통계적 분석을 기초로 하여 이상적인 응력분포를 가정하였기 때문이다. 접합부의 전후면과 측면은 콘크리트의 응력상태가 상이할 것으로 예상되므로 전단응력이 그림 1과 같이 선형적으로 연속된다고 가정하는 것은 이론적 근거가 부족하다고 판단된다. 또한 ACI 318에서는 플랫플레이트-기둥 접합부에서 힘에 의한 모멘트 성분을 산정하는 위험단면은 $c_2 + 3h$ 이고 편심전단에 의한 모멘트 성분을 산정하는 위험단면은 $c_1 + d$ 와 $c_2 + d$ 를 두 번으로 하는 사각형의 둘레로서 휨과 편심전단에 의한 모멘트 성분이 서로 다른 위험단면에서 산정된다(그림 1 참조). 이는 일반적인 모멘트 평형관계를 위반하는 것으로 모멘트 평형관계로부터 유도된 설계개념과도 모순된다. 즉 $[(c_2 + 3h) - (c_2 + d)]$ 폭의 슬래브에서 발생한 휨모멘트는 결국 편심전단 비틀림 모멘트에 의하여 기둥에 전달되어야 하며 이는 슬래브의 휨모멘트 강도가 편심전단모멘트 강도에 영향을 받는다는 것을 의미한다. 따라서 이는 접합부의 저항능력이 슬래브의 휨모멘트와 편심전단모멘트의 합으로 정의된다는 설계의 기본가정과 상충된다. 또한 ACI 318의 강도산정모형의 근거가 된 실험연구 역시 연속슬래브의 하중 및 경계조건을 만족시키지 못하므로 접합부에 대한 강도 및 연성능력을 정확히 나타낸다고 할 수 없다. 따라서 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정에 가장 널리 쓰이는 ACI 318 기준은 강도산정의 정확성과 이론적 근거에 많은 단점을 지니고 있다고 할 수 있다. CEB-FIP Model Code³⁾도 ACI(KCI) 기준과 마찬가지로 플랫플레이트-기둥 접합부의 강도(M_n)는 그림 1에서와 같이 힘에 의한 모멘트(M_f)와 편심전단에 의한 모멘트(M_s)의 합으로 이루어진다. 하지만 CEB-FIP Model Code에서 제시하는 접합부 강도 산정모형은 전단응력분포가정과 위험단면의 위치, 크기가 ACI 318과 차이가 난다. CEB-FIP 모델에서는 편심전단모멘트를 산정하기 위하여 전단응력이 위험단면에서 응력재분배를 통하여 균일한 값을 가지는 것으로 가정하였다(그림 1참조). 하지만 CEB-FIP 모델에서 가정한 응력분포도 이론적 근거가 명확하지 않은 이상적인 값이라고 할 수 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이 기존의 실험결과와 CEB-FIP 모델에서 예측한 강도를 비교했을때, 실험결과를 지나치게 과소평가하는 것을 알 수 있다. 또한 전단과 휨 저항성분에 대한 위험단면이 일치하지 않기 때문에 설계기본가정에 위배되는 문제점을 가지고 있다. 박홍근^{5),6)}은 비선형유한요소해석을 통하여 플랫플레이트-기둥 접합부 강도산정모형을 제안하였다. 박홍근은 휨과 편심전단에 대한 위험단면을 기존실험연구와 비선형유한요소해석을 근거로 하여 $c_1 + c_2$ 와 $c_2 + d$ 를 두 번으로 하는 사각형의 둘레로 일치시켰다. 따라서 휨모멘트와 편심전단의 독립된 저항 성분의 합으로 접합부 성능을 정의하는 설계개념의 일

관성을 유지하고 있다.

기존 ACI(KCI) 설계기준에서는 전후면과 측면의 최대편심응력이 $v_u=0.33(f_{ck})^{0.5}$ (MPa)로 일정하게 정의하고 있다. 반면 박홍근이 제안한 설계방법에서는 비선형해석결과에 근거하여 전후면과 측면의 최대 편심전단응력을 각기 별도로 산정하였으며, 그 크기는 전후면에서는 대략 $v_u=0.33(f_{ck})^{0.5}$ (MPa)이고 측면에서는 안전측으로 $v_{us}=3.5 \times 0.33(f_{ck})^{0.5}$ (MPa)로 정의하였다. 플랫플레이트-기둥 접합부가 불균형모멘트를 받을 때, 위험단면의 전후면과 측면은 서로 다른 응력상태를 가지게 되므로 최대편심전단응력을 전후면과 측면에서 다르게 산정하는 것은 합리적이라고 판단된다. 그림 2에 나타나 있듯이 기존 실험결과예측에 있어서 박홍근 모델은 기존의 ACI, CEB-FIP 설계기준보다 정확한 강도예측을 보여주고 있다. 또한 박홍근은 실험연구를 통해서도 고려하기 힘든 플랫플레이트-기둥 접합부의 경계조건을 보다 현실적으로 고려하였기 때문에 기존 규준보다는 명확한 이론적 근거를 제공한다고 볼 수 있다. 하지만 그림 2에서 볼 수 있듯이 박홍근 모델은 일부 경우에 있어서 실험결과를 과대평가하고 있으며 대부분 기둥의 형태가 직사각형인 실험에 대한 결과를 예측하는 경우에 이러한 과대평가가 이루어졌다. 따라서 박홍근의 접합부 강도산정모형은 기존 기준의 강도산정모형보다 우수한 강도예측이 가능하며 논리적 이론 전개를 배경으로 하고 있으나 다양한 기둥 형태에 따른 접합부 강도변화를 간과한 측면이 있다. 이는 박홍근의 연구에서 실시한 비선형유한요소해석에서 기둥의 단면형태에 대한 고려가 부족했기 때문이다. 따라서 기둥의 단면형태에 따른 플랫플레이트 접합부 강도 변화를 적절히 고려할 수 있는 강도산정모형이 필요하며 이에 대한 분석이 요구된다.

3. 플랫플레이트-기둥 접합부의 비선형유한요소해석

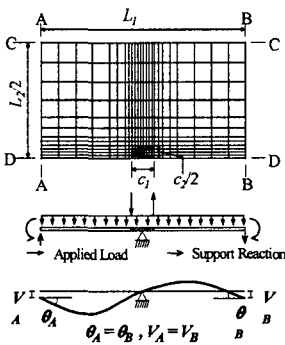


그림 3 해석모델

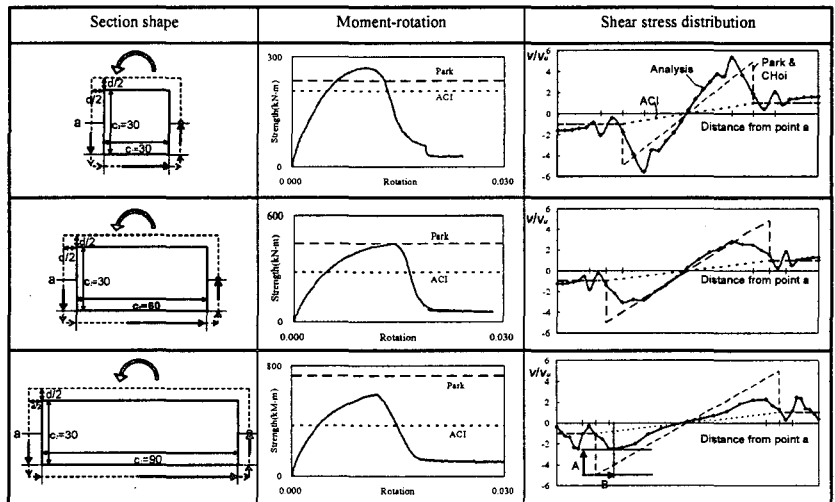


그림 4 횡하중 가력방향 기둥 폭에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동양상

기둥단면형태에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부 강도를 분석하기 위하여 박홍근의 연구⁶⁾를 통하여 검증된 비선형유한요소해석 프로그램 RCSHELL⁶⁾을 이용하였다. RCSHELL은 중력하중과 면의모멘트를 재하받는 플랫플레이트의 해석을 위하여, 비선형모델 중 상대적으로 인장-압축상태의 콘크리트 거동을 잘 나타낼 수 있는 등가 1축 응력-변형률 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. 이중 Farhey의 시험체는 기둥의 단면형태가 직사각형 형태이며 기존 연구⁶⁾를 통해 살펴볼 때, RCSHELL에 의한 비선형 해석이 실험결과를 비교적 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 따라서 직사각형 단면을 가지는 기둥과 플랫플레이트 접합부의 거동을 예상하기 위해 RCSHELL을 이용하는 데에는 큰 무리가 없는 것으로 판단된다. 기둥단면형태, 슬래브 스패, 철근비, 슬래브 두께에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 극한거동을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 해석모델을 사용하였다. 해석모델에서는 실제 연속슬래브의 경계조건을 충실히 반영하였다. 해석모델은 스패길이가 일정한 연속 슬래브의 대칭성을 고려하기 위하여 슬래브의 A와 B면에서는 서로 대응되는 모든 변위가 일치하도록 하였으며 C면과 D면에서는 C-C축과 D-D축에 대한 회전변위를 구속하였다. 기둥단면적에 해당하는 슬래브부분(접합부 패널존)은 무한휨강성을 가지는 요소로 이상화하였으며 중력하중을 실현하기 위하여 슬래브에 수직하중을 균등재하하였고 기둥에 작용하는 불균등 모멘트는 두개의 짝힘으로 재하하였다. 기둥의 단면형상에 따른 접합부의 거동특성을 살펴보기 위하여 다양한 가로와 세로 비율의 기둥

단면형상에 따른 접합부의 거동변화를 분석하였다. 단면형태 뿐만 아니라 중력하중($V/V_c=0, 0.25, 0.5, 0.75$), 스패길이(4~6m), 슬래브 두께(20~30mm), 철근비(0.36~1.2%)를 해석변수로 하여 총 3348가지 형태의 무량판 접합부에 대한 수치해석을 수행하였다.

해석 결과, 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동양상은 기존 기준^{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(α)이다. 특히 α 이 접합부 거동에 미치는 영향은 기존 연구^{5),6),7)}나 기준^{1),2),3)}에서 고려된 바가 없으므로 이에 대한 분석이 필요하다. 그림 4는 슬래브 스패=4m, 슬래브 두께=0.2m, 상부철근비=0.8%, 하부철근비=0.4%, 중력하중=0이고 기둥치수가 0.3×0.3, 0.6×0.3, 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. 전단응력 분포는 플랫플레이트 접합부의 거동을 예측하는 데 기본이 되며 이를 기초로 하여 플랫플레이트 접합부 강도를 산정할 수 있다. 그림 4에서 전단응력 분포는 접합부가 최대강도를 발휘할때, 하중가력 축과 위험단면이 만나는 a점부터 시작하여 화살표 방향으로 나타내고 있으며 ACI 기준에서 가정한 전단응력 분포, 박홍근 모델에서 가정하는 전단응력 분포, 비선형 유한요소해석에 의한 전단응력 분포를 함께 보여주고 있다. 기본적으로 ACI 기준은 휨에 대한 위험단면이 전단에 대한 위험단면보다 크게 산정되기 때문에 휨성능을 지나치게 크게 고려하여 전단응력의 분포를 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 0.6×0.3, 0.9×0.3(m)의 기둥 접합부에서 해석 결과에 의한 전단응력분포는 박홍근 모델과 상당한 차이를 가지는 것으로 나타났다. 하중가력방향과 평행한 기둥면(α)이 긴 경우에는 비틀림 전단을 받는 유효영역이 줄어드는 것을 볼 수 있으며(그림 4의 B) 또한 최대 비틀림 전단응력이 박홍근 모델에서 제시한 수치보다 작아지는 현상도 발견할 수 있다(그림 4의 A). 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 하중가력 방향과 평행한 기둥면(α)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. 따라서 본 연구에서 수행된 비선형 수치해석연구 그리고 기존 실험연구 등을 분석해볼 때, 기둥의 단면형상은 플랫플레이트 접합부의 강도에 큰 영향을 미치는 변수로서 기둥 단면형태에 따라 무량판 접합부의 강도를 산정할 수 있는 접합부 설계식이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

기둥단면형태에 따른 플랫플레이트-기둥 접합부의 거동특성을 분석하기 위하여 기존의 강도모델을 분석하고 비선형유한요소해석을 실시하였다. 비선형유한요소 해석결과, 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 설계제안식으로 예상한 값보다 큰 폭으로 감소한다. 하지만 현재 기준이나 설계제안식은 이러한 기둥단면형상에 따른 접합부의 강도변화를 고려하지 못하고 있다. 따라서 추후 연구를 통하여 기둥단면형상에 따른 접합부의 거동변화를 고려할 수 있는 접합부 설계방법이 제안되어야 할 것이다.

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 플랫플레이트-기둥 접합부의 강도산정모델," 한국콘크리트학회 논문집, 제 14권 6호, 2002, pp. 961~971.
6. 최경규, 박홍근, "불균등 휨모멘트를 받는 플랫플레이트-기둥 내부접합부의 강도에 대한 해석모델," 한국콘크리트학회 논문집, 제 14권 6호, 2002, pp. 949~960.
7. Ghai, 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 Yankelovsky, 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), 626-638.