

# 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법을 이용한 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 극한강도 평가

## Ultimate Strength Analysis of Slab-Column Joints Subjected to Lateral Loads Using 3-Dimensional Grid Strut-Tie Model Approach

손우현\*

윤영목\*\*

Son, Woo Hyun

Yun, Young Mook

### ABSTRACT

Slab-column joints have been used in the constructions of many structures and buildings. However, as the prediction of the failure behavior and ultimate strength of the joints subjected to lateral loadings is very difficult, the current building and structural design codes do not explain the failure behavior of the joints clearly. In this study, the applicability of the 3-dimensional grid strut-tie model approach, suggested for analysis and design of 3-dimensional structural concrete with disturbed regions, to the ultimate analysis and design of the joints is examined by evaluating the failure strengths of 43 slab-column joints tested to failure. The validity of the 3-dimensional grid strut-tie model approach is also verified by comparing the strength evaluation results with those by ACI 318-05 and FIB 1999.

### 요약

슬래브-기둥 접합부는 많은 구조물의 시공에 사용되고 있다. 그러나 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 파괴거동 및 극한강도를 예측하는 것이 매우 어렵기 때문에 현행 구조물 설계기준은 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 파괴 거동을 명확하게 설명하지 못하고 있다. 본 논문에서는 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 극한해석과 설계를 위하여 응력교란영역을 가지는 3차원 구조의 해석과 설계를 위하여 제안된 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법을 파괴실험이 수행된 43개의 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 극한강도 평가에 적용하고, ACI 318-05 기준과 FIB 1999 기준에 의한 극한강도 평가결과와 비교함으로써 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법의 타당성을 검토하였다.

\* 정회원, 경북대학교 건축·토목공학부 박사과정  
\*\* 정회원, 경북대학교 건축·토목공학부 교수

## 1. 서론

주로 수직하중에 대한 저항구조로 사용되던 플랫 플레이트 구조형식이 최근에는 풍하중 및 지진하중 등 횡하중의 작용을 받는 고층건물에 많이 사용되고 있다. 횡하중이 작용하는 경우 슬래브-기둥 접합부에 불균형 모멘트의 영향이 커지므로, 이 접합부의 정확한 설계규정 마련을 위해 불균형모멘트에 의한 전단파괴 거동에 관한 면밀한 연구가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 콘크리트 구조부재의 기하학적 형상을 바탕으로 한 절점에서 주변의 인접한 모든 절점들로 힘을 전달할 수 있는 기본격자 요소들을 이용하는 3차원 격자 스트럿-타이 모델의 구성방법, 3차원 파괴면을 이용한 스트럿 및 절점 영역의 유효강도 결정방법, 단순최적화 알고리즘을 이용한 스트럿 및 타이의 축강성 결정방법, 그리고 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건의 검토방법 등과 관련한 신개념을 현행 설계기준의 스트럿-타이 모델 방법에 접목시킨 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법(김병현, 2004)을 이용하여 횡방향 하중을 받는 슬래브-기둥 접합부 시험체의 파괴거동 및 강도를 평가하였다. 또한 그 결과를 실험결과 및 ACI 318-05 기준과 FIB 1999 기준을 이용한 극한강도 평가결과와 비교하여 횡하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 해석 및 설계를 위한 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 슬래브-기둥 접합부의 극한강도 평가

본 연구의 해석대상 구조물은 Hanson & Hanson(1968), Symonds et al.(1976), Ghali et al.(1976), 그리고 Hawkins et al.(1989) 등에 의해 파괴실험이 수행된 횡하중을 받는 43개의 슬래브-기둥 접합부 시험체이다. Hawkins et al.에 의해 실험된 F 시리즈 시험체의 기하학적 형상 및 배근상세는 그림 1과 같으며, 나머지 시험체의 것은 참고문헌에 소개되어 있다.

ACI 318-05 기준에서는 횡하중의 작용에 의해서 접합부에 불균형 모멘트가 작용하는 경우 슬래브-기둥 접합부의 전단응력은 수직하중의 작용에 의한 수직전단응력과 횡하중에 의해 전달되는 모멘트에 의한 편심전단응력의 합으로 다음과 같이 결정한다.

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} \pm \frac{\gamma_u M_u c}{J_c} \quad (1)$$

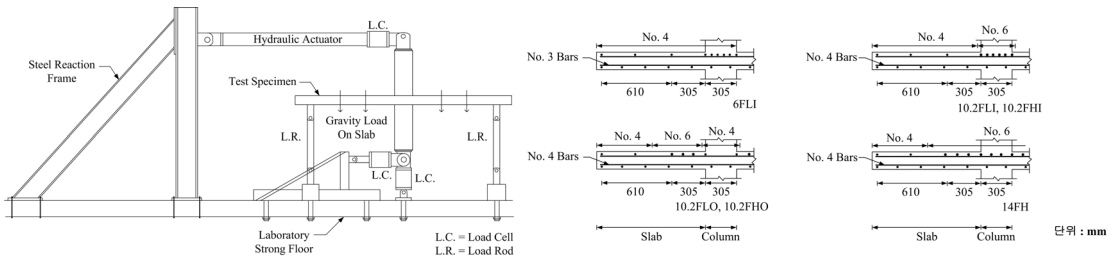
여기서,  $\frac{V_u}{b_o d}$ 는 수직전단응력  $\left( = \min \left\{ \frac{1}{3} \sqrt{f'_c}, \frac{1}{12} \left( 2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c}, \frac{1}{12} \left( 2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \sqrt{f'_c} \right\} \right)$ ,  $\gamma_u$ 는 불균형 모멘트의 전단편심에 의해 전달되는 비율  $\left( = 1 - \gamma_f = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \sqrt{b_1/b_2}} \right)$ ,  $M_u$ 는 횡하중에 의한 불균형 모멘트,  $c$ 는 위험

단면의 도심에서 연단까지의 거리, 그리고  $J_c$ 는 위험단면의 극단면 2차 모멘트  $\left( = \frac{b_1 d^3}{6} + \frac{d b_1^3}{6} + \frac{d b_2 b_1^2}{2} \right)$ 이다. FIB 1999 기준에서도 ACI 기준과 마찬가지로 수직하중의 작용에 의한 수직전단응력과 횡하중에 의해 전달되는 모멘트에 의한 편심전단응력의 합으로 식 (2)와 같이 결정한다. 그러나 ACI 기준의 편심전단모델이 위험단면 측면에서의 전단응력 분포를 선형으로 가정한데 반하여 FIB 기준에는 도심축을 기준으로 양쪽에서 반대방향으로 전 구간에 대하여 동일한 크기로 가정하는 점이 다르다.

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} \pm \frac{K M_u}{W_1 d} \quad (2)$$

여기서,  $\frac{V_u}{b_o d}$ 는 수직전단응력  $\left( = 0.12 \zeta (100 \rho_f f_{ck})^{1/3} \right)$ ,  $M_u$ 는 횡하중에 의한 불균형 모멘트,  $d$ 는 슬래브 단면의 유효깊이, 그리고  $W_1 = \int_0^{b_o} |e| dl = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1$ 이다.  $K$ 는 불균형전단력에 의해 발생하는 계수로써 하중의 편심으로 인해 하중과 나란한 방향과 하중과 직교하는 방향의 기둥의 크기에 대한 비

( $= c_1/c_2$ )에 따라 결정되며,  $c_1/c_2$ 가 0.5이하일 때 0.45, 1일 때 0.6, 2일 때 0.7, 그리고 3이상일 때 0.8이다.

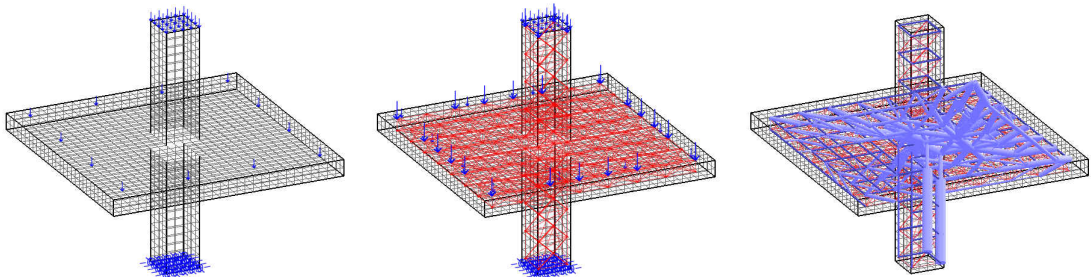


(a) 기하학적 형상 및 하중재하 장치

(b) 슬래브 배근상세

그림 1. F 시리즈 슬래브-기둥 접합부 시험체의 기하학적 형상 및 배근상세

본 연구의 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법은 슬래브-기둥 접합부의 3차원 무근콘크리트 유한요소해석과 하중전달 메커니즘을 표현하는 3차원 격자 스트럿-타이 모델의 구조해석을 수행하여 플랫 플레이트 슬래브의 극한강도를 평가한다. 그림 2(a), (b)는 플랫 플레이트 슬래브의 3차원 무근콘크리트 유한요소모델 및 3차원 격자 스트럿-타이 모델을 나타내며, 그림 3(c)는 시험체 10.2FHI의 차원화된 스트럿-타이 모델을 나타낸다. 그림 3은 각 방법에 의해 결정한 슬래브-기둥 접합부 시험체의 극한강도 평가결과를 나타내고 있다.



(a) 3차원 유한요소모델

(b) 3차원 격자 스트럿-타이 모델

(c) 차원화된 격자 스트럿-타이 모델

그림 2. 10.2FHI 슬래브-기둥 접합부 시험체의 3차원 격자 스트럿-타이 모델

### 3. 결론

횡하중을 받는 전체 43개 슬래브-기둥 접합부 시험체의 극한강도를 평가한 결과, ACI 318-05 기준은 평균 1.20 및 표준편차 0.482를 나타내어 전체적으로 시험체의 극한강도를 과대평가하였으며 편차 또한 매우 컸다. FIB 1999 기준은 평균 0.62 및 표준편차 0.273을 나타내어 큰 편차범위 내에서 거의 모든 시험체의 강도를 보수적으로 평가하는 것으로 나타났다. 이 두 기준은 모두 실험에서 사용된 다양한 설계변수와 무관하게 일관적인 결과를 나타내지 못하고 있어, 추가 연구를 통해 설계기준식의 보완이 필요할 것으로 판단된다. 특히 실험결과에서 알 수 있듯이 슬래브 인장철근비가 커질수록 횡하중에 대한 파괴강도가 크게 나타나는 경향을 볼 때, ACI 318-05 기준의 경우는 슬래브 인장철근비의 영향을 고려할 수 있는 기준을 마련하여야 할 것이다.

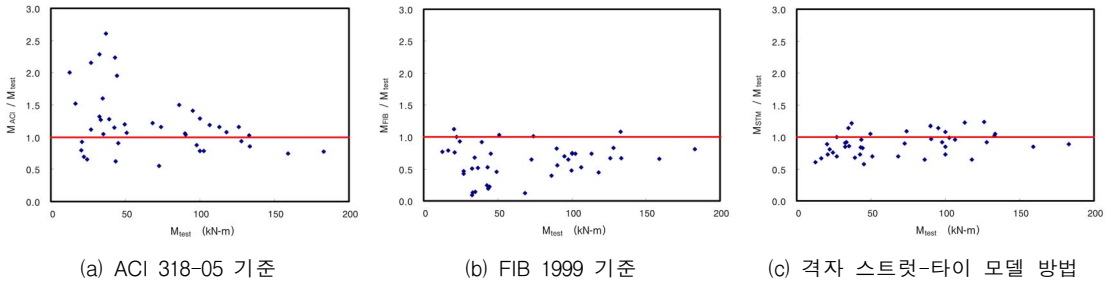


그림 3. 슬래브-기둥 접합부 시험체의 극한강도 평가결과

본 연구의 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법은 슬래브-기둥 접합부 시험체의 파괴강도를 평균 0.89, 표준편차 0.178를 나타내어, 실제 실험파괴강도를 적은 편차범위 내에서 양호하게 평가하였다. 또한 극한 상태에서의 파괴모드 또한 실험의 것과 매우 유사하게 예측하였다. 이는 3차원 격자 스트럿-타이 모델 방법이 플랫 플레이트 구조의 해석 및 설계 방법으로서의 타당함을 말해주는 것이다. 그러나, 기둥 및 슬래브의 기하학적 형상 변화에 따른 3차원 격자 스트럿-타이 모델의 선정 시 설계자의 주관개입에 따른 해석 및 설계 결과의 불확실성 해소방안에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10722-0) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 김병현, “철근 콘크리트 부재의 설계를 위한 격자 스트럿-타이 모델 방법”, 박사학위논문, 경북대학교, 대구, 2004.
2. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.
3. Amin Ghali, Mahmoud Z. Elmasri and Walter Dilger, “Punching of Flat Plates under Static and Dynamic Horizontal Forces”, ACI Structural Journal, Vol. 73, pp. 566-572, 1976.
4. D. W. Symonds, D. Mitchell and N. M. Hawkins, “Slab-Column Connections Subjected to High Intensity Shears and Transferring Reversed Moments”, Progress Report on NSF Project GI-38717, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, 1976.
5. International Federation for Structural Concrete, FIB Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 1999.
6. Neil M. Hawkins, Aibin Bao, and Jun Yamazaki, “Moment Transfer from Concrete Slabs to Columns”, ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 6, pp. 705-716, 1989.
7. Norman W. Hanson, and John M. Hanson, “Shear and Moment Transfer between Concrete Slabs and Columns”, Journal of Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Vol. 10, No. 1, pp. 2-16, 1968.
8. Yun Y. M. and Kim B. H., “Two-Dimensional Grid Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 134, No. 7, pp. 1199-1214, 2008.