

# 플랫 플레이트-기둥 접합부의 내진성능에 대한 해석연구

## Numerical Study on Seismic Resistance of Flat Plate-Column Connections

박 홍 근<sup>\*</sup>      최 경 규<sup>\*\*</sup>      황 영 현<sup>\*\*\*</sup>

Park, Hong Gun   Choi, Kyung Kyu   Hwang, Young Hyun

---

### ABSTRACT

Flat plate is susceptible to punching shear failure at the slab-column connection, which may cause catastrophic structural collapse. To prevent such brittle failure, strength and ductility of the connection should be ensured. However, since it is very difficult to experimentally simulate the actual load and boundary conditions of the flat plate system, it is not easy to obtain reliable information and data regarding to the strength and ductility of the flat plate-column connection.

In the present study, numerical studies were performed for interior connections of continuous flat plate. The results were compared with the existing experiments, and the variations of bending moment, shear, torsional moment around the connection were investigated. Based on the findings of the numerical studies, the disadvantages of current design methods were discussed.

---

### 1. 서      론

플랫 플레이트는 슬래브-기둥 접합부의 파괴단면이 작기 때문에 지진 등 횡력이 작용하게 되면 취성적인 전단유형으로 파괴되며, 이 경우 구조물 전체의 붕괴가 유발될 수 있다. 따라서 플랫 플레이트 구조의 내진설계에서는 가장 중요한 요소는 슬래브-기둥 접합부의 강도 및 연성도 확보이다.

국내 콘크리트 설계기준<sup>2)</sup> 및 ACI 318-99<sup>3,4)</sup>에서는 슬래브-기둥의 접합부에 대한 강도 산정식을 제안하고 있다. 그러나 Luo<sup>8)</sup> 등의 연구에 의하면 기존의 설계식은 안전측이기는 하지만 실제의 강도를 정확히 나타내지 못하고 있다. 또한 기존의 실험연구는 실제 연속슬래브의 하중과 경계조건을 정확히 실현하지 못함으로써 실험결과의 대부분이 실제 연속슬래브의 거동 및 특성과 다를 수 있으며, 따라서 실험결과 그 자체에 기반해서 통계적으로 수행된 강도 및 연성도 연구는 근본적인 한계를 가질 수 밖

---

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 석사과정

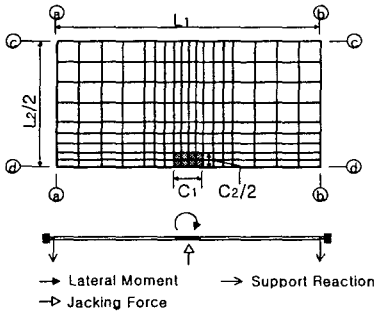
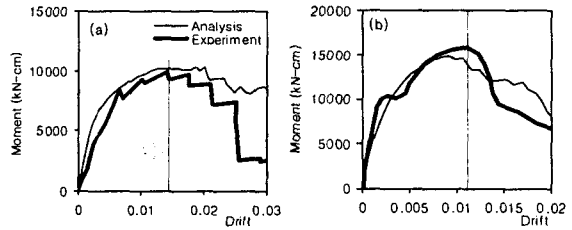


Fig. 1 Finite element model of flat plate



(a) Ghali SM 0.5 (b) Ghali DM 1.0  
Fig. 2 Comparison of experiments and numerical analyses

에 없다.

본 연구에서는 기존의 실험연구 결과를 보완하기 위하여 슬래브-기둥 접합부에 대한 비선형 해석연구를 실시하였다. 접합부에서 휨모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트의 분포 및 변화를 조사하였으며, 이에 근거하여 접합부 파괴기구를 분석하고 현 설계방법을 비교 검토하였다.

## 2. 재료모델 및 해석 프로그램의 검증

중력하중과 면의 모멘트를 재하받는 플랫 플레이트의 해석을 위해서 비선형모델 중 상대적으로 간단하며 인장-압축 상태의 콘크리트의 거동을 잘 나타낼 수 있는 등가 1축응력-변형을 곡선을 이용하는 회전스트럿-고정균열모델<sup>1)</sup>을 사용한다.

Ghali<sup>7)</sup>와 Farhey<sup>6)</sup> 그리고 Moehle<sup>9)</sup>의 시험체에 대해 수치해석을 수행하였다. 각 실험들은 실험장치 및 실험방식에서 차이가 있으며, 따라서 본 연구에서는 실험조건들의 특성을 반영하여 수치해석을 수행하였다. 시험체의 대칭성을 고려해서 수치해석에서는 Fig. 1에 제시된 해석모델을 사용하였다. Fig. 1에서 슬래브의 (a), (b), (c) 세면의 경계조건은 실제 실험조건들과 동일하며, (a) 면에서는 시험체의 대칭성을 고려하여 직교방향 회전변위를 구속하였다.

Fig. 2에는 실험과 해석에 의한 휨모멘트와 접합부 회전변위간의 상관관계를 비교하고 있으며, 해석 결과는 대체적으로 최대강도 시점까지 실험결과와 잘 일치한다. 한편 슬래브-기둥 접합부는 대체로 취성파괴를 일으키므로 최대강도 이후의 거동은 큰 의미를 지니지 못하며 따라서 안전측으로서 접합부의 변형능력은 최대강도까지 유효하다고 판단하는 것이 타당하다.

## 4. 중력하중 재하방식과 경계조건에 따른 슬래브 거동의 변화

기존의 실험들은 연속 플랫 플레이트의 거동을 유사하게 나타내고 있으나 두가지 면에서 실제 조건과는 다르다. 우선 스패의 길이가 일정한 연속 슬래브의 경계조건을 만족하기 위해서는, Fig. 1의 (c) 면에서는 회전이 구속되어야 하고 (a)와 (b)면에서는 수직변위가 일치되어야 한다. 그러나 실제 실험에서 이러한 구속조건을 실현하기는 매우 어려우며, 따라서 일반적으로 (c)면은 자유단으로 (a)와 (b)면은 단

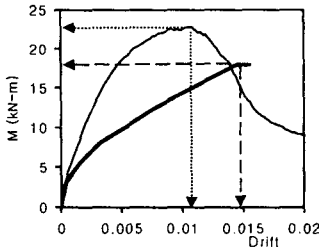


Fig. 3 Variations of Moment-Rotation relationships with boundary conditions : Farhey specimen 3

의 해석결과에 비해 강도는 저평가하고 변형능력을 과대평가하는 것으로 나타났다. 연속슬래브 조건에서는 슬래브의 구속효과로 인하여 슬래브의 유효폭이 더 넓어지므로 휨모멘트에 대한 저항능력, 즉 강도가 증가한다. 또한 강성이 증가함에 따라 최대강도에 보다 일찍 도달하므로 변형능력은 실험에 비해 감소한다.

### 5. 연속 슬래브에 대한 해석연구

기존의 실험들은 연속슬래브의 하중 및 경계조건과 각기 다른 조건을 사용하고 있으므로 연속 슬래브의 거동과 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 강도와 변형능력과 같은 전체적인 거동 뿐만 아니라 접합부 주위에서 일어나는 응력 및 내력의 변화를 조사하기 위하여 연속 슬래브에 대한 해석연구를 실시하였다.

연속 슬래브에 대해 기하학적 조건, 재료적 조건, 수직하중 수준 등 다양한 변수 조합에 대해 해석 연구를 수행하였다. 주요 변수는  $c_1$ =횡하중 재하방향의 기둥 폭,  $c_2$ =횡하중 직교방향의 기둥 폭,  $h$ =슬래브두께,  $\rho_T$ =상부철근비,  $\rho_B$ =하부철근비,  $V_c/V_c$ =공칭성능 대비 중력하중에 의한 톨립전단력의 재하비율이다. 슬래브 전체에 철근은 균등배근하였다.

연속 슬래브에 대한 휨변형 형상은 Fig. 4과 같다. 그림에서 전면(Front)와 후면(Back)은, 횡하중에 의한 휨모멘트가 수직하중에 의한 휨모멘트에 부가되는 면과 상쇄되는 면을 각각 지칭한다.

해석결과와 분석을 위하여 콘크리트 설계기준<sup>2)</sup>과 동일하게 기둥면에서 0.5  $d$ 만큼 떨어진 곳에 위치

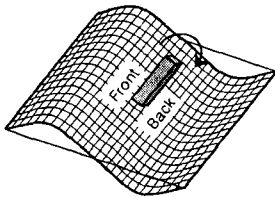


Fig. 4 Deformation shape of continuous flat plate

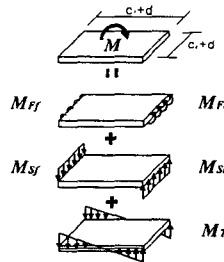


Fig. 5 Components of resisting moment at connection

하며  $c_1 + d$ 와  $c_2 + d$ 를 두 변으로 하는 직사각형의 둘레를 파괴면으로 간주한다. 또한 각 면에 작용하는 저항력은 Fig. 5에 나타나 있는 바와 같은 5가지의 성분은

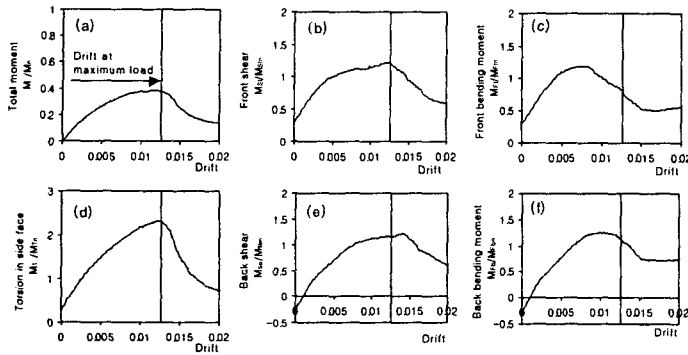


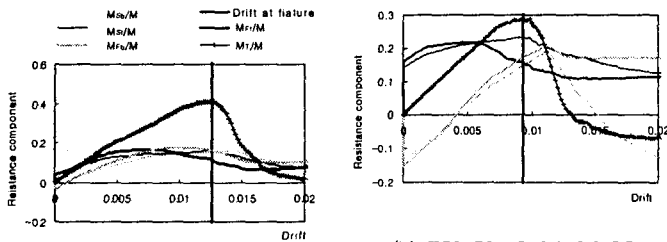
Fig. 6 Behavior of resistance components at connection: E50-50-18-0.9-0.9-25

Fig.6의 (a)는 전체 휨모멘트와 회전각과의 관계는 나타내고 있고, (b)~(f)는 각 저항성분들의 거동을 나타내고 있으며 Fig. 7는 각 성분들의 거동을 중첩하여 나타내고 있다. 여기서  $M_{Ffn}$ ,  $M_{Fbn}$  = 전후면의 공칭 휨모멘트강도,  $M_{Sfn}$ ,  $M_{Sbn}$  = 콘크리트구조설계기준에서 콘크리트의 뚫림전단내력으로 규정하고 있는  $0.33\sqrt{f_{ck}}$ 를 사용할 때 전후면 전단력에 의한 휨모멘트,  $M_{Tn} = 0.33\sqrt{f_{ck}}$ 을 사용할 때 측면의 전단력에 의한 비틀림 모멘트,  $M_n$  = 슬래브 전체의 공칭휨모멘트 강도를 지칭한다.

해석결과를 분석하면 다음과 같다. 각 저항모멘트가 최대강도에 이르는 시점이 다르다. 일반적으로 전후면의 휨모멘트( $M_{Ff}$ ,  $M_{Fb}$ )가 먼저 최대강도에 도달하고, 그 이후 휨모멘트는 저하되고 전후면의 전단력( $M_{Sf}$ ,  $M_{Sb}$ )과 측면의 비틀림모멘트( $M_T$ )가 최대강도에 도달한다. 각 성분의 공칭모멘트는 저항모멘트를 비교적 잘 나타내고 있으나,  $M_{Tn}$ 은  $M_T$ 을 중력하중이 작을수록 저평가하는 것으로 나타났다.

## 6. 파괴유형의 분석

Fig. 7는 각 저항모멘트 성분들의 거동을 비교하고 있다. 이 두 그림의 비교에서 중력하중에 따른 접합부 거동의 차이를 살펴볼 수 있다. 각 모멘트 저항성분들이 최대시점에 이르는 상관관계로부터 파괴과정 및 파괴유형을 분석할 수 있는데, 각 저항성분 중  $M_{Ff}$ 가 가장 먼저 최대값에 도달하게 되며 그 뒤 시험체의 재료 및 기하학적 특성에 따라 후면의 휨모멘트 저항성능  $M_{Fb}$ 와 전단편심저항성능의 합인  $M_v$  중 최대치에 도달하는 우선 순위가 결정된다.



(a) E50-50-18-0.9-0.9-25

(b) E50-50-18-0.9-0.9-75  
Fig. 7 Behavior of resistance component at connections

로 정의하였다.  $M_{Ff}$ ,  $M_{Fb}$  = 전면과 후면 슬래브의 휨모멘트,  $M_{Sf}$ ,  $M_{Sb}$  = 전면과 후면에 작용하는 전단력에 의한 휨모멘트,  $M_T$  = 측면에서의 비틀림모멘트, 그리고  $M_v = M_T + M_{Sf} + M_{Sb}$ 로 정의한다.

Fig. 6과 Fig. 7에는 작은 중력하중을 받는 E-50-50-18-0.9-0.9-25와 비교적 큰 중력하중을 받는 E-50-50-18-0.9-0.9-75에 대한 해석결과를 나타내고 있다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 중력

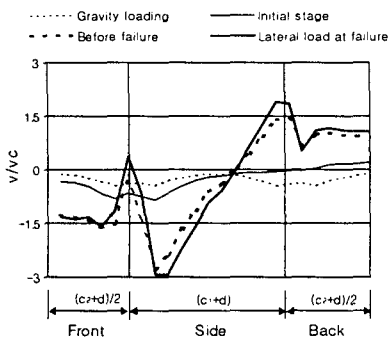


Fig. 8 Distribution of shear stress at connection

점과 전단성분의 최대값 시점 사이로써 그 파괴시점을 명확히 확정하기는 매우 어렵다. 그 이유는, 슬래브가  $M_{Ff} \rightarrow M_{Fb}$  단계 이후 거의 최대강도에 도달한 상태이며 돌입한 상태이며 다만 휨파괴의 연성적 거동으로 슬래브의 강도가 유지되는 불안정한 상태이기 때문이다. 이러한 거동을 일반적으로 휨파괴로 정의한다. 반면,  $M_{Ff} \rightarrow M_v \rightarrow M_{Fb}$ 의 경우 슬래브는  $M_{Ff} \rightarrow M_{ES}$ 의 단계 직후에 최대강도에 도달하며 곧바로 파괴되는데, 전단성분의 극한거동은 취성적이므로 휨파괴 유형과는 달리 파괴시점이 명확하다. 전단파괴 유형에서는  $M_{Fb}$  성분이 최대 성능을 발휘하지 않는다.

### 7. 전단편심모멘트

콘크리트 설계기준에서는 전체 휨모멘트 중 휨모멘트가 차지하는 비율인  $\gamma_f = 0.6$  그리고 전단편심모멘트 비율  $\gamma_v = 0.4$ 로 규정하고 있으며, 횡철근량에 따라서  $\gamma_f$ 를 증가시킬 수 있도록 되어 있다.

그러나 Fig. 7을 보면 전단편심모멘트 ( $M_v = M_T + M_{Sf} + M_{Sb}$ )의 비율이 휨모멘트 성분( $M_{Ff} + M_{Fb}$ )보다 상대적으로 큰 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이  $\gamma_v$ 는 0.6 ~ 0.8 사이의 값으로서 콘크리트 설계기준에서 정의하는  $\gamma_v = 0.4$ 보다는 매우 크다. 또한 전체 전단편심모멘트 중에서도 측면의 비틀림모멘트  $M_T$ 가 상대적으로 큰 비율을 차지하는 것으로 나타나 있다.

Fig. 8은 기둥 둘레의 평균전단응력의 분포를 나타내고 있다. 콘크리트설계기준에서는 전후면과 측면의 전단성능이  $0.33\sqrt{f_{ck}}$ 로 일정하지만 해석결과에 의하면 측면의 전단응력이 전후면의 전단응력보다 매우 크며, 이것이 측면의 비틀림모멘트  $M_T$ 가 상대적으로 큰 값을 나타내는 이유이다. 전후면과 측면의 전단응력이 다른 이유는 전후면은 편심전단력 뿐만 아니라 극한 휨모멘트가 재하되며, 따라서 편심전단응력은 극한 휨모멘트에 의한 압축, 인장응력의 영향을 받게 되므로 최대응력이 저하될 수 있다.

위의 연구결과로부터 전단편심모멘트를 정확히 추정하기 위해서는, 측면의 비틀림모멘트  $M_T$ 에 대해서는 중력하중의 영향을, 전후면의 전단편심모멘트  $M_{Sf}, M_{Sb}$ 에 대해서는 극한 휨모멘트의 영향을 고

하중이 비교적 작은 해석모델 E-50-50-18-0.9-0.9-25에서  $M_{Ff}$ 가 최대값에 도달한 이후,  $M_{Fb}$ 가 최대에 이르게 되고 그 뒤 슬래브가 최대강도에 도달하면서 파괴된 것으로 나타났다. 이러한 경향은 휨파괴로 알려진 Farhey의 Specimen 1과 Moehel의 Specimen 3에 대한 실험 및 해석결과에서도 공통적으로 확인된다. 반면 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 중력하중이 비교적 큰 해석모델 E-50-50-18-0.9-0.9-75와 뚫림 전단파괴로 보고된 Farhey의 Specimen 3에서는  $M_{Ff}$ 가 최대값에 도달한 이후, 전단편심저항 최대강도에 이르면 슬래브가 파괴에 이르렀다.

이상의 경향을 정리하면, 각 저항성분의 최대값에 도달 순서로는  $M_{Ff} \rightarrow M_{Fb} \rightarrow M_v$ 의 경로와  $M_{Ff} \rightarrow M_v \rightarrow M_{Fb}$ 의 경로가 있다. 전자의 경우 슬래브의 파괴시점은  $M_{Fb}$ 의 최대값 시

려해야 한다는 것을 알 수 있다.

## 8. 결론

연속 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부의 내진성능을 연구하기 위하여 비선형 해석연구를 실시하였다. 해석연구를 위하여 비선형 유한요소해석 프로그램을 개발하였으며, 기존 실험과의 비교를 통하여 검증하였다. 슬래브 크기, 기둥 크기, 형상, 중력비 등 주요변수에 대하여 변수연구를 실시하였으며, 그 주요한 결과는 다음과 같다.

1) 기존의 실험은 플레이트의 경계조건이나 하중조건이 연속 슬래브와는 다르며 따라서 연속 플레이트 접합부의 강도와 연성도를 정확히 나타낸다고 볼 수 없다.

2) 기존 실험 결과에 비하여 연속 플레이트 접합부의 강도 및 초기강성은 크며, 연성도는 작은 것으로 나타났다.

3) 접합부에 발생하는 휨모멘트 저항성분은 전후면의 휨모멘트, 전후면의 전단편심에 의한 모멘트, 측면의 전단편심에 의한 비틀림모멘트로 구분할 수 있으며, 각 성분의 최대강도에 도달하는 시점이 일치하지 않으며 그 시점의 차이에 따라서 파괴유형은 휨 파괴와 전단파괴로 구분할 수 있다.

4) 해석결과에 따르면 접합부의 거동에 대하여 전체 저항모멘트에 대한 전단편심 모멘트의 비  $\gamma_v$ 는 0.6 ~ 0.8로서 콘크리트구조설계기준<sup>2)</sup>에서 제시하는  $\gamma_v = 0.4$  보다 크다.

5) 콘크리트구조설계기준에서는 최대 톨림전단응력을  $0.33\sqrt{f_{ck}}$ 로 규정하고 있으나 해석결과에 따르면 측면의 최대전단응력이 전후면의 최대 전단응력보다 크다.

6) 측면의 비틀림모멘트 저항성분의 크기는 중력하중에 의하여 영향을 받으며, 전후면의 전단편심은 극한 휨모멘트의 영향을 받는다. 따라서 강도를 정확히 산정하기 위해서는 이러한 응력의 상호영향을 고려해야 한다.

본 연구의 결과는 접합부 강도산정모델의 개발연구에 사용될 것이다.

## 참고문헌

1. 박홍근, 임태성. "비선형 시간이력해석에 의한 벽식 아파트의 내진 안전성 검토", 지진공학회 발표논문, 2001년 4월.
2. 한국콘크리트학회, 대한건축학회, "콘크리트 구조 설계 기준", 1999년.
3. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete", ACI 318-99. pp. 177-180, pp. 209-228.
4. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Reinforced Concrete Slab-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete structures", *ACI Structural Journal*, V. 85, No. 6, November-December, 1988, pp. 675-696.
5. Moehle, J. P., Kreger, Michael E., and Leon, Roberto, "Background to Recommendations for Design of Reinforced Concrete Slab-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 85, No. 6, November-December, 1988, pp.636-644.
6. Farhey, Daniel N., Adin, Moshe A., and Yankelevsky, D. Z., "Flat Slab-Column Subassemblages under Lateral Loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 119, No. 6, June, 1993, pp. 1903-1916.
7. Ghali, Amin., Elmasri, Mahmoud Z., and Diler, Walter, "Punching of Flat Plates under Static and Dynamic Horizontal Force", *ACI Journal*, October, 1976, pp 566-572.
8. Luo, Y. H., and Durrani, A. J., "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings-PartI: Interior Connections", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, January-February, 1995, pp. 115-124.
9. Pan, Austin D., and Moehle, Jack P., "An Experimental Study of Slab-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 6, November-December, 1992, pp. 626-638.