

플랫 플레이트-기둥의 외부 접합부의 변수 연구

Numerical study on parameters of flat plate-column edge connections

안 귀 용* 최 경 규** 박 흥 근***
Kwi-Yong Ahn Kyung-Kyu Choi Hong-Gun Park

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 edge connection. In the present study, numerical studies were performed for edge connections of continuous flat plate. The results were compared with the existing experiments, and the variations of bending moment, drift, effective width 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 내진 설계에서는 가장 중요한 요소는 슬래브-기둥 접합부의 강도 및 연성도 확보이다.

국내 콘크리트 설계기준²⁾ 및 ACI 318-99^{3,4)}에서는 슬래브-기둥의 접합부에 대한 강도 산정식을 제안하고 있다. 그러나 Luo⁵⁾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 수밖에 없다.

본 연구에서는 중력하중과 횡하중의 다양한 조합하중을 고려하여 플랫 플레이트 외부 접합부에 대해서 비선형 수치해석을 수행하였으며, 해석결과에 근거하여 주요변수에 따른 접합부의 거동특성을 분석하였다.

* 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 석사과정

** 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정

*** 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

2. 재료모델 및 해석 프로그램의 검증

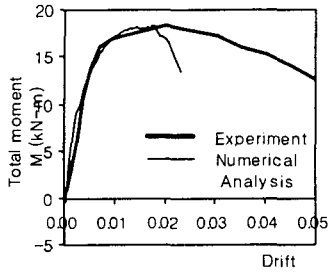


Fig. 4 Comparison of experiments and numerical analyses

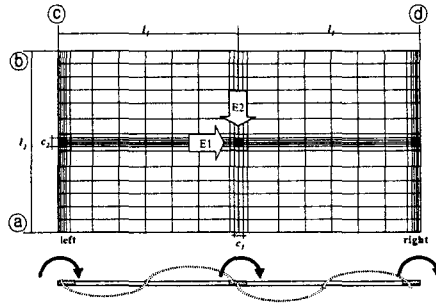


Fig. 5 the finite element model of flat plate

중력하중과 면의 모멘트를 재하받는 플랫 플레이트의 외부접합부 해석을 위해서 비선형모델 중 상대적으로 간단하며 인장-압축 상태의 콘크리트의 거동을 잘 나타낼 수 있는 등가 1축응력-변형률 곡선을 이용하는 회전스트럿-고정균열모델¹⁾을 사용한다.

Luo⁵⁾의 시험체에 대해 수치해석을 수행하였고 Fig. 1과 같이 실험 모델과 해석 모델의 강도와 변형능력이 일치하는 것을 볼 수 있다. 시험체의 대칭성을 고려해서 수치해석에서는 Fig. 2에 제시된 해석 모델을 사용하였다. 실제 연속 슬래브의 거동을 분석하기 위해서는 무한히 많은 경간의 슬래브에 대해 해석해야 하지만, Fig. 2의 2경간 모델 역시 각 접합부의 파괴순서에 있어서 연속슬래브와 거의 동일하므로 2경간 모델을 사용하였다. 슬래브의 (a), (b)면의 경계조건은 실제 실험조건들과 동일하게 직교방향의 회전변위를 구속하였으며 (c), (d)면에서는 실제 구조물처럼 자유단으로 구속하지 않았다. 한편 슬래브-기둥 접합부는 대체로 취성파괴를 일으키므로 최대강도 이후의 거동은 큰 의미를 지니지 못하며 따라서 안전측으로서 접합부의 변형능력은 최대강도까지 유효하다고 판단하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 외부접합부의 강도 및 변형능력에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 주요 변수에 대해 연구를 수행하였다. 기하학적 조건, 재료적 조건, 수직하중 수준 등 다양한 변수 조합에 대해 변수 연구를 수행하였다. 주요변수로는 c_1 =횡하중 재하방향의 기둥 폭, c_2 =횡하중 직교방향의 기둥 폭, h =슬래브두께, ρ_T =상부철근비, ρ_B =하부철근비, G =중력하중의 비율, E_1 =슬래브의 길이방향의 지진하중, E_2 =슬래브의 직각방향의 지진하중을 조합하여 중력하중의 비율과 횡하중의 방향을 조합하여 실제 플랫 플레이트 슬래브에 지진하중이 재하되었을 때와 동일한 조건을 실현하였다. 수치해석 결과에 근거하여 접합부의 전체적 거동을 설명할 수 있는 강도, 변형능력(회전변위), 유효보폭(B_{eff})을 분석하였다. 이때 B_{eff} = 최대 휨모멘트와 슬래브 폭 전체에 대한 공칭휨강도의 비율이다. (M_{max}/M_n), 여기서 M_n =슬래브 폭 전체에 대한 공칭 휨강도이다. 해석결과를 분석을 위하여 콘크리트 설계기준²⁾과 동일하게 기둥면에서 $0.5d$ 만큼 떨어진 곳에 위치하며 $c_1 + d/2$ 와 $c_2 + d$ 를 두 변으로 하는 직사각형의 둘레를 파괴면으로 간주한다. 또한 각 면에 작용하는 저항력은 Fig 3, Fig 4에 나타나 있는 바와 같이 각각에 대해서 ①면, ②면, ③면으로 정의하였다.

이때 중력하중, 상하철근비, 기둥크기, 슬래브 두께 등에 대한 기하학적, 재료적 조건은 Table 1에

나타나 있다. 각각의 변수조합에 대해 수치해석을 수행하였고, 이때 하중은 3가지 방식, 즉 중력하중만 재하한 경우, 중력하중과 C_1 방향으로 횡하중을 재하한 경우와 C_2 방향으로 재하한 경우이다.

Table 1 Parameters of specimen

하중경로	공칭 전단력	철근비		기둥의 크기 (C_1)	슬래브의 두께(h)
		ρ_T / ρ_B	ρ_T / ρ_B		
Gravity	0%	0.3%	0.3%/0.15%	30	18
Gravity →E1	25%	0.6%	0.6%/0.3%	50	
Gravity →E2	50%	0.9%	0.9%/0.45%	90	21

3. 외부 접합부 연속 슬래브에 중력하중이 재하된 경우

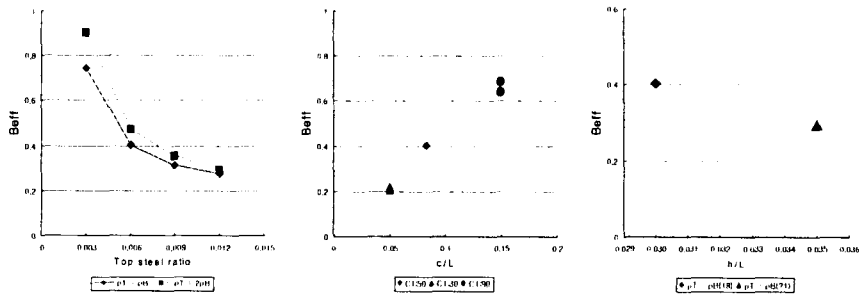


Fig. 4 중력하중 재하시 유효보폭과 주요변수의 상관관계

선정된 해석모델에서 3개의 기둥 중에서 왼쪽기둥이 가장 먼저 파괴에 도달하므로 왼쪽 기둥에 대해서 설명을 하면, 중력하중만 재하 되었을 때 철근비와 유효보폭의 관계는 중력하중의 비율에 상관없이 철근비가 작을수록 유효보폭은 증가하는 경향을 보였다. 이때 상하 철근비의 차이에 따라 유효보폭의 크기는 작아졌으나 철근비의 변화에 따라 같은 경향을 보이고 있다. 즉, 철근비가 작을수록 유효보폭은 증가하는데 그 이유는 철근비가 작을수록 모든 슬래브 폭의 철근이 항복한 이후에 접합부의 파괴가 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 기둥의 크기와 철근비의 변화에 따라 유효보폭을 나타내면, 철근비, 슬래브의 두께, 중력하중의 비를 고정하고 기둥의 크기(C_1)를 각각 50cm, 60cm, 90cm로 변경하였을 때 기둥의 크기가 작을수록 유효보폭은 감소하는 경향을 보이고 있다. 철근비의 변화에 따라 슬래브 두께와 유효보폭의 결과는 중력하중의 비, 철근비, 기둥의 크기를 고정하고 슬래브의 두께를 18cm, 21cm로 변경하였을 때 슬래브의 두께가 작을 때 유효보폭이 큰 것으로 나타났으나 각각의 차이가 아주 작아 슬래브의 크기를 증가하는 것은 유효보폭에 미치는 영향은 적다고 판단된다.

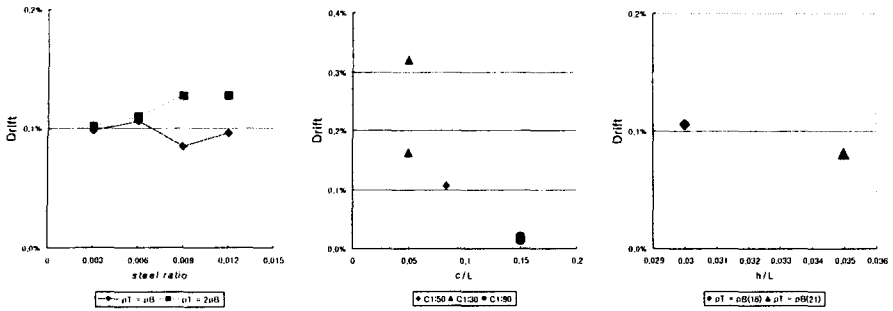


Fig 5. 중력하중 재하시 Drift와 주요변수의 상관관계

철근비와 변형능력의 관계는 철근비가 증가함에 따라 변형능력은 조금 증가하는 경향이 나타났다. 이때 상하 철근비의 차이에 따라 변형능력은 차이가 있는데, 상하부철근이 다를 때는 철근비의 증가에 따라 변형능력도 조금씩 증가하는 경향을 나타내고 있다. 철근비, 슬래브의 두께, 중력하중의 비율 고정하고 기둥의 크기(C_1)를 각각 50cm, 60cm, 90cm로 변경하였을 때 C_1 의 크기가 작을수록 변형능력은 크게 나타났다. 따라서 기둥의 크기가 작을 때 연성도 증가한다고 판단된다. 슬래브의 두께를 18cm, 21cm로 변경하였을 때 슬래브의 두께가 작을 때 변형능력이 증가하였으며 슬래브의 두께를 줄일 때 연성도가 증가하는 것으로 나타났다.

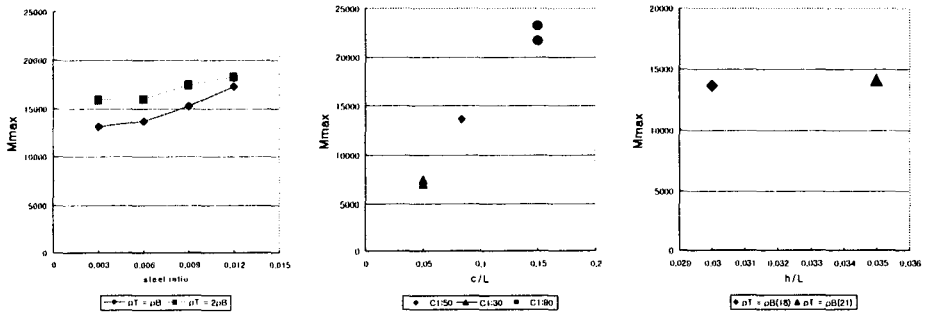


Fig. 6 중력하중 재하시 M_{max} 와 주요변수의 상관관계

철근비와 슬래브강도인 모멘트와 관계는 상하 철근비가 다름에 따라 그 크기는 차이가 있으나 철근비가 증가할수록 크기는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 철근비가 증가할수록 슬래브 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 철근비, 슬래브의 두께, 중력하중의 비율 고정하고 기둥의 크기를 각각 50cm, 60cm, 90cm로 변경하였을 때 기둥의 크기가 증가할수록 슬래브의 강도는 증가하였다. 이는 중력하중이 재하될 때 회전 중심으로부터 ①면까지의 거리가 길어지므로 슬래브의 강도가 증가한다고 판단된다. 슬래브의 두께를 18cm, 21cm로 변경하였을 때 값의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 슬래브의 두께를 증가시키는 것은 슬래브의 강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

4. 중력하중과 횡하중(E1)이 재하된 경우

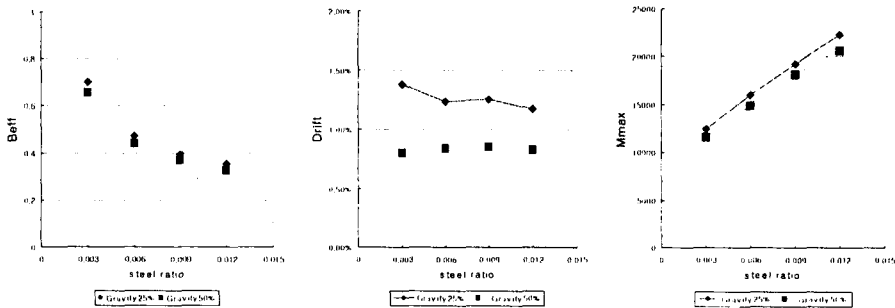


Fig. 7 중력하중과 횡하중(E1) 재하시 철근비의 상관관계

중력하중과 횡하중이 재하될 때 주요변수로서는 중력하중의 비를 극한하중의 25%와 50%를 재하한 후 횡하중을 극한하중까지 재하하는 두 가지 방법으로 설정하였고, 각각의 경우에 대하여 철근비를 변화시키면서 변수분석을 수행하였다. 유효보폭은 중력하중만 재하되었을 때와 마찬가지로 철근비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 그때 중력하중의 크기에 따라 유효보폭이 달라짐을 알 수 있다. 모든 철근비에 공통적으로 유효보폭은 중력하중의 비가 25%보다 50%일 때 작은 값을 나타내고 있다. 이는 중력하중이 플랫폼플레이트 슬래브에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

변형능력은 철근비의 증가와는 거의 영향이 없는 것으로 판단되나, 중력하중의 비에 따라서는 큰 영향을 미치고 있다. 이는 중력하중의 크기가 증가하면 변형능력이 작게 나타난다. 즉 플랫폼 플레이트 슬래브에 있어 중력하중이 크면 연성도가 낮아진다고 판단된다.

5. 중력하중과 횡하중(E2)이 재하된 경우

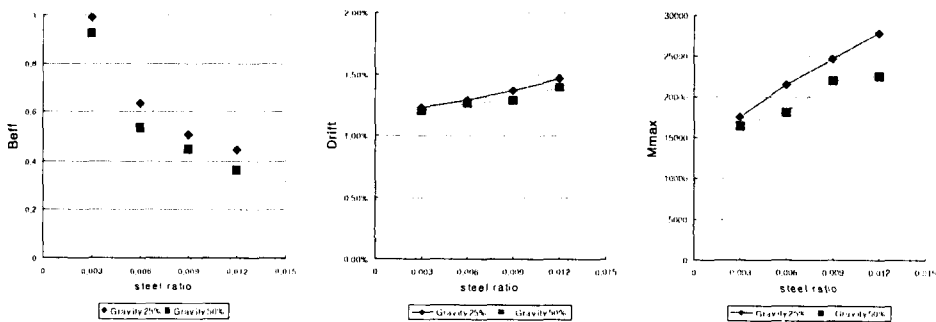


Fig. 8 중력하중과 횡하중(E2) 재하시 철근비의 상관관계

중력하중과 횡하중(E2)이 재하될 때 주요변수는 4절의 경우와 동일하며 각각의 경우도 4절의 결과

와 동일한 경향을 보이고 있다. 그러나 결과의 값은 횡하중(E1)의 값보다 크게 나타나고 있다. 따라서 횡하중(E2)보다 횡하중(E1)이 플랫플레이트 외부 접합부에 미치는 영향이 더 크다고 할 수 있다.

6. 결 론

연속 플랫 플레이트 외부 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) 슬래브의 유효보폭은 철근비와 중력하중의 증가에 따라 감소하며, 기둥의 크기가 증가하면 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 접합부 강도는 철근비, 중력하중, 기둥의 크기가 증가함에 따라 대체적으로 증가하는 것을 알 수 있다.
- 3) 접합부 변형능력은 철근비의 변화에 큰 영향을 받지 않으나, 중력하중의 증가에 따라 변형능력이 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 유효보폭은 중력하중과 횡하중(E1)이 재하되었을 때 가장 좁고, 강도와 변형능력은 중력하중만 재하 되었을 때 가장 작게 나타났다.

본 연구의 결과는 외부접합부 강도산정모델의 개발연구에 사용될 것이다.

참 고 문 헌

1. 박홍근, 엄태성. “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. Luo, J. P. Conte, “Equivalent Frame Analysis of Flat Plate Building for Seismic Loading”, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 120, No. 7, June, 1994, pp. 2137-2155.