# 플랫플레이트의 내진성능에 대한 수치해석 연구

## Numerical Study on Seismic Resistance of Flat Plate

박 홍 근* 최 경 규** 황 영 현***

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

ABSTRACT

Numerical studies were performed to investigate the seismic performance of Flat Plate System. For the numerical studies, a computer program for Finite Element analysis was developed. Parametric studies were performed to investigate variations of strength and ductility of flat plate with major parameters: gravity load, reinforcement ratio, thickness, column sizes. The numerical results provide a valuable insights on the behavior of flat plates. The comparison with the current design method shows that the current design methods for strength and ductility need to be improved in some aspects.

### 1. 서론

플랫플레이트 구조는 설계가 간편하고, 시공이 용이하며, 경제성이 뛰어나기 때문에 사무실, 아파트 등 여러 가지 용도의 건물에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 플랫플레이트 구조는 강성이 작고 연성도가 크지 않아서 취성적 거동을 하므로 내진성능이 중요시되는 강진 지역에서는 사용되지 않고 있으나, 우리나라와 같은 중진지역에서는 내진성능에 따라서 가능한 구조형식으로 인식되고 있다. 근래에는 플랫플레이트 구조의 내진취약성을 보완하기 위하여 횡력저항구조와 함께 사용되고 있으며, 이를 위하여 플랫플레이트 구조의 연성도에 대한 연구가 집중되고 있다. 현재까지 많은 실험연구가 이루어졌으나, 실험의 어려움으로 인하여 그 수가 많지 않고, 실험조건이 실제와 다른 경우가 많아서 플랫플레이트의 강도 및 연성도에 대한 평가를 하기에는 미흡하다. 특히 연성도의 경우에는 구체적인 설계방법을 제시하지 못하고 설계조건을 제한하는데 그치고 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석연구를 통하여 각 주요변수의 플랫플레이트의 거동에 대한 영향을 분석하고자 한다.

*정회원, 서울대학교 건축학과 교수

**정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정

***정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 석사과정

## 2. 해석방법 및 검증

재료모델로서 비선형모델 중 상대적으로 간단하며 인장-압축 상태의 콘크리트의 거동을 잘 나타낼 수 있는 등가 1축 응력-변형율 곡선을 이용하는 회전스트럿-고정균열모델을 사용하였다. 이 모델은 이전 연구[1]에서 개발되었으며 플랫플레이트 구조를 해석하기 위해 이 재료모델과 쉘요소를 사용하는 비선형 해석 프로그램을 개발하였다.

Moehle[3]에 의해 수행된 실험을 그림 3과 같은 해석모델을 사용하여 해석을 수행하였다. Moehle 실험 3은 중력하중의 영향이 없을 때의 플랫플레이트의 거동을 나타내고 있다. 실험결과를 보면 최대강도에 이르러 시험체가 취성파괴를 나타냄을 알 수 있다. 해석결과는 실험 값과 최대강도까지 거의 일치함을 알 수 있다. 최대강도 이후에는 해석결과는 취성파괴를 잘 나타내지 못하는데 이는 해석방법이 fracture로 인한 파괴현상을 잘 반영하지 못하기 때문이다. 또한 Moehle 실험1, Daniel[4]과Amin[5] 실험 9개와의 비교도 수행하였다.

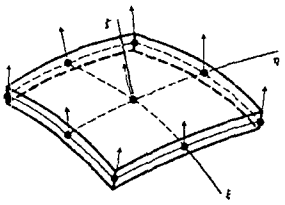

그림 1 쉘요소

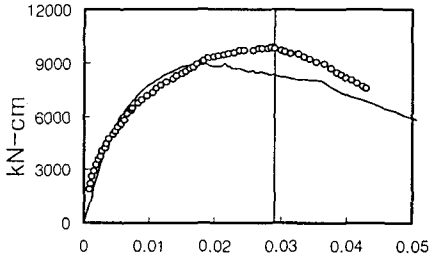


그림 2 해석방법의 검증 Moehle 실험 3

## 3. 변수연구

플랫플레이트의 강도와 연성도에 큰 영향을 줄 것으로 생각되는 기하학적인 변수, 철근비, 하중조건에 관한 다섯 가지의 변수를 고려하여 연구를 수행하였다. 모멘트 방향의 슬래브의 길이 = $l_1$, 모멘트 방향의 기둥의 길이 = $c_1$, 모멘트와 직각방향의 기둥의 길이 = $c_2$, 철근비 = $\rho$, 슬래브의 두께 = $t$, 위험단면(기둥 면에서 0.5d 떨어진 면)에서의 콘크리트의 전단강도 = $v_o$, 수직하중에 의한 위험단면에서의 전단응력 = $v$, 철근콘크리트구조설계기준[2]에서 제안한 기둥-슬래브 접합부의 모멘트성능 = $M_{KCI}$. 개별변수에 대한 연구에서 해석모델은 기존 조건은 동등하게 하고 해당 변수만을 바꾸어 해석을 수행했으며 각 변수의 범위는 설계상 적정 범위를 택하였다. 그림3과 같은 해석모델로서 60 ㎝ ×60 ㎝의 기둥, $\rho = 0.006$, $t = 18$㎝, $v/v_o = 0$ 의 조건을 가지고 있다. 연속슬래브의 조건을 고려하여 ⓐ와 ⓑ변의 수직변위는 같도록 하였으며( $v_a = v_b$), ⓒ와 ⓓ의 변위각은 0으로 제어하였다.

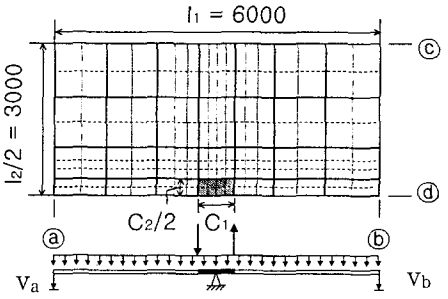


그림 3 해석모델

3.1. $c_1/l_1$의 영향

그림(c)의 점선은 Allen[6]에 의해서 제안된 탄성 상태에서의 유효폭을 나타내고 있다. 여기서 $M$ = 접합부의 강도, $M_n$ = 전슬래브폭에 대한 슬래브의 종국강도, $B_{eff}$는 전슬래브폭에 대한 유효폭의 비율을 나타낸다. $c_1/l_1$이 작은 범위에서 기존설계식은 강도를 과소평가하고 있으며, 내진성능의 기준변위각인 0.015를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. $c_1$은 편심전단에 대한 모멘트( $Mv$ )와 관계가 깊은 변수로서 설계식이 $Mv$를 과소평가하고 있으며, $c_1/l_1$이 감소할수록 취성파괴가 일어난다. $c_1/l_1$이 작을수록 유효폭이 감소하는데 이는 접합부의 취성파괴에 의하여 강도가 지배됨을 나타낸다.

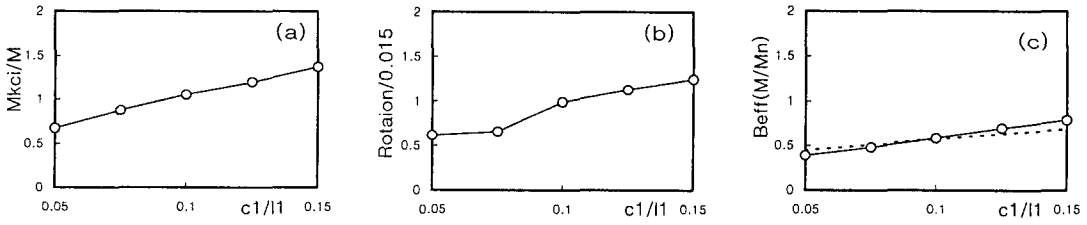


그림 4 $c_1/l_1$의 영향 (a)설계식에 대한 강도비 (b)기준연성도(0.015)에 대한 비 (c)유효폭비

3.2. $c_2/l_1$의 영향

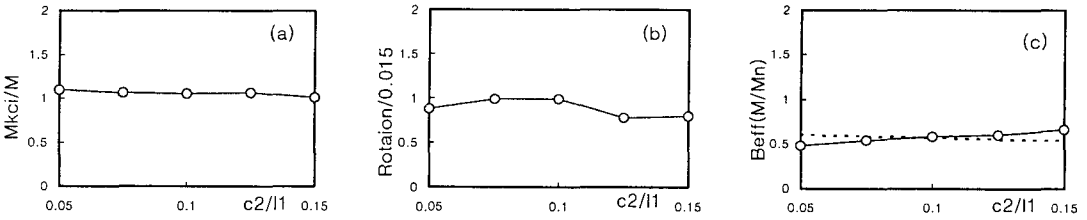


그림 5 $c_2/l_1$의 영향 (a)설계식에 대한 강도비 (b)기준연성도(0.015)에 대한 비 (c)유효폭비

$c_2$의 변화에 대하여 모멘트, 연성도, 유효폭이 거의 변화가 없음을 알 수 있으며 $c_2/l_1$이 플랫플레이트에 미치는 영향은 크지 않다고 말할 수 있다. 또한 기존설계식은 비교적 강도를 잘 예측하고 있다.

3.3. 철근비의 영향

철근비가 작을수록 기존설계식은 강도를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 연성도의 경우 철근비에 따라 거의 변화하지 않고 있다. 철근비가 작을수록 유효폭은 증가하는데 이는 철근비가 작을수록 모든 슬래브폭의 철근이 항복한 이후에 접합부의 파괴가 일어나기 때문이다.

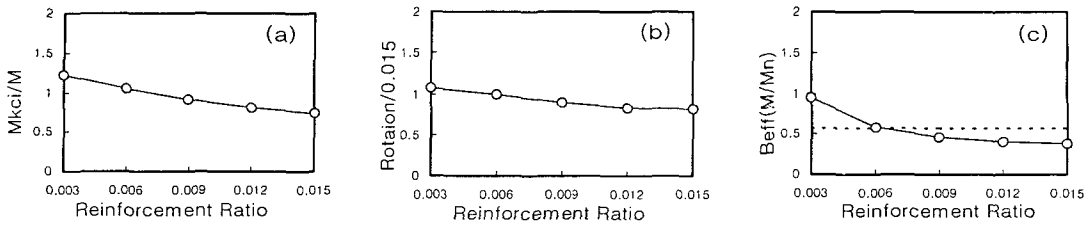


그림 6 철근비의 영향 (a)설계식에 대한 강도비 (b)기준연성도(0.015)에 대한 비 (c)유효폭비

3.4. 슬래브 두께의 영향

$t/l_1$의 변화에 따라서 강도 및 유효폭의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며 기존 설계식은 강도를 잘 예측하고 있다. 그러나 연성도는 $t/l_1$이 증가하면서 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 두께가 증가할수록 슬래브 강성이 증가하므로 작은 변위에서 큰 모멘트가 발생되며 따라서 접합부에서 극한상태에 달하기 때문이다. 따라서 연성도 설계면에서는 슬래브의 두께를 증가시키는 것은 도움이 되지 않는다는 사실을 알 수 있다.

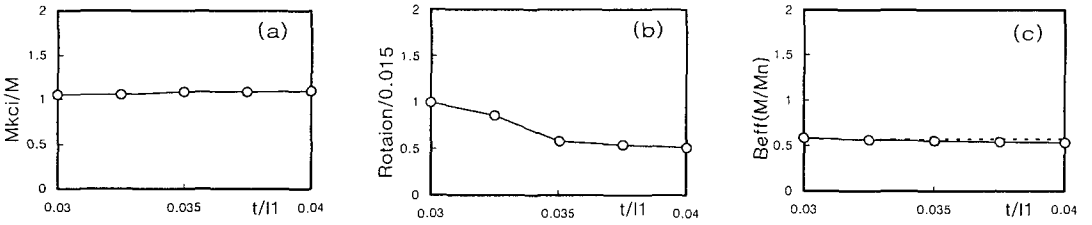


그림 7 슬래브 두께의 영향 (a)설계식에 대한 강도비 (b)기준연성도(0.015)에 대한 비 (c)유효폭비

3.5. $\rho$와 $v/v_o$ 조합변수의 영향

그림 8은 각 변수에 대한 해석결과를 나타내고 있으며, 기존의 실험결과(Moehle, Daniel, Amin)와 비교하고 있다. 중력하중이 증가할수록 기존설계식은 강도를 과소평가하고 있으며 연성도는 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 철근비와는 깊은 관계가 없음을 나타내고 있다. 또한 편심전단모멘트의 비율($\gamma_v = M_v/M$)은 중력하중 및 철근비와 관계없이 전체 전달모멘트의 약 75%에 달하고 있음을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 슬래브의 휨모멘트비($\gamma_f = M_f/M = 1-\gamma_v$)는 0.6이며 슬래브의 철근비를 증가시킴으로써 $\gamma_f$를 1.0까지 증가시킬 수 있다는 기존설계식과 크게 배치되는 결과이다. 실험결과는 해석결과보다 편차가 큼을 알 수 있는데 실험결과는 $c_1/l_1$, $t/l_1$ 등의 값이 일정하지 않기 때문이다.

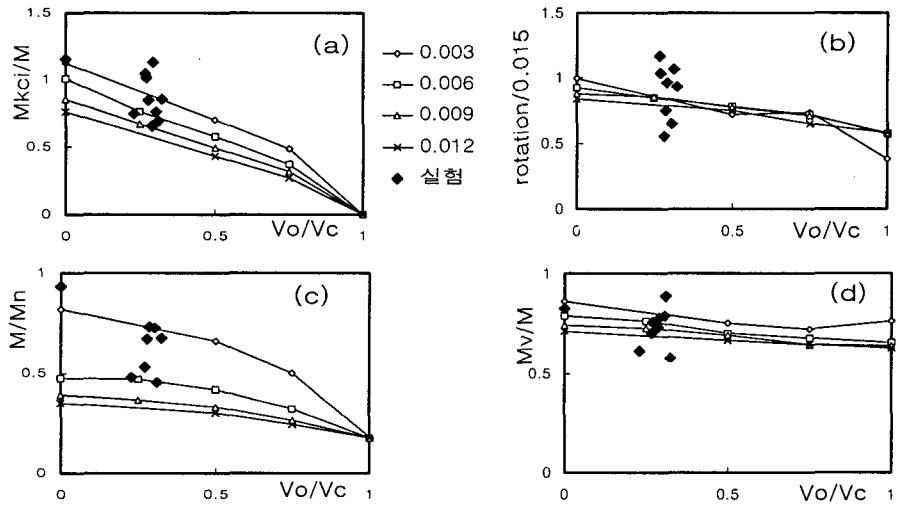


그림 8 $\rho$ 와 $v/v_o$ 조합변수의 영향 (a)강도비 (b)연성도비 (c)유효폭비 (d)편심전단모멘트비

3.6. $c_1/l_1$와 $v/v_o$ 조합변수의 영향

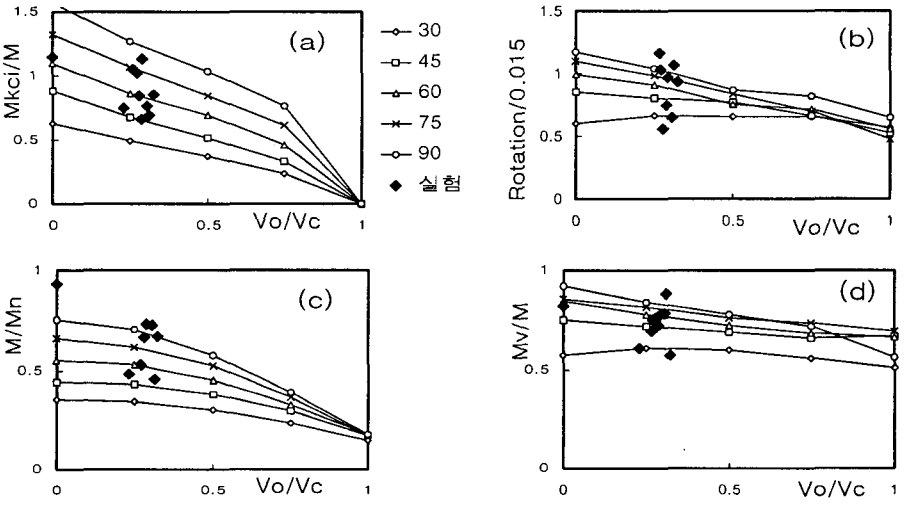


그림 9 $c_1/l_1$와 $v/v_o$ 조합변수의 영향 (a)강도비 (b)연성도비 (c)유효폭비 (d)편심전단모멘트비

기존설계식은 $c_1$이 크고 중력하중이 작은 경우 강도를 과대평가하고 있으며 반면, $c_1$이 작고 중력하중이 클 경우는 강도를 과소평가 하는 것으로 나타났다. 연성도는 중력하중이 증가하고 $c_1/l_1$이 감소

할수록 감소하는 것으로 나타났다. 다만 전체모멘트에 대한 편심전단모멘트($M_v$)의 비율은 $c_1/l_1$이 아주 작은 정도를 제외하고 $c_1/l_1$와 큰 관계없이 0.75~0.9의 값을 나타내고 있다. 이는 $c_1/l_1$가 증가할수록 $\gamma_v$가 증가하는 기존의 설계식과 그 경향은 비슷하나 기존설계식에서 해당 $c_1$의 범위에 대하여 $\gamma_v$는 0.344~0.445의 범위로 나타나고 있으므로 해석결과와 큰 차이를 보이고 있다.

## 4. 해석결과에 대한 검토 및 결론

표 1은 각 변수의 거동에 대한 영향을 요약하고 있다. 유효폭에 대한 결과에서 대략 슬래브폭의 50% 정도에서 항복모멘트에 달한 것으로 판단되며, 중력하중이 큰 경우에는 접합부에서 취성파괴가 먼저 일어나므로 유효폭은 감소한다. 또한 전체모멘트에 대한 편심전단모멘트의 비율은 변수에 관계없이 대략 75~85%로 일정함을 알 수 있다. 여러 변수에 대한 해석연구를 통하여 각 변수의 변화에 따른 플랫플레이트의 거동 양상을 파악하였다. 강도와 연성도 설계면에서 기존 설계식이나 제안이 개선될 필요가 있으며 이를 위해서 실험 및 해석연구를 통한 파괴양상에 대한 연구가 필요하다.

표 1 각 변수의 영향 요약

| | $c_1/l_1$( $c_1/c_2$) | $c_2/l_1$ | $t/l_1$ | $v/v_o$ | $\rho$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $M_{kci}/M$ | ↑ | – | – | ↓ | ↓ |
| 연성도비 | ↑ | – | ↓ | ↓ | – |
| 유효폭비 | – | – | – | ↓ | ↓ |
| $M_v/M$ | ↑ | · | · | – | – |

## 참고문헌


1. 박홍근, 엄태성. '비선형 시간이력해석에 의한 벽식 아파트의 내진 안전성 검토', 지진공학회 발표논문 2001년 4월
2. '콘크리트 구조 설계 기준', 한국콘크리트학회, 대한건축학회 1999
3. Austin D.Pan and Jack P. Moehle(1992). 'An Experimental Study of Slab-Column Connections', ACI Structural Journal, V. 89, No. 6, November-December, 1992, pp. 626-638.
4. Daniel N. Farhey, Moshe A. Adin, and David Z. Yankelevsky. 'Flat Slab-Column Subassemblages under Lateral Loading', Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 119, No. 6, June, 1993, pp. 1903-1916.
5. Amin Ghali, Mahmoud Z. Elmasri, and Walter Diler, 'Punching of Flat Plates under Static and Dynamic Horizontal Force' ACI Journal, October, 1976, pp 566-572.
6. Fred Allen and Peter Darvall. 'Lateral Load Equivalent Frame' ACI Journal, July, 1977, pp. 294-299.