수평하중하에서 철근 콘크리트 플랫 플레이트의 구조적 거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Structural Behaviors of Reinforced Flat Plate Under Lateral Loads

조 영 직* 박 성 무**
Cho, Young Jeek Park, Sung Moo

ABSTRACT

This paper is experimental study to define the structural behaviors of reinforced flat plate under combined gravity and lateral loads. Specific objectives of this study reported herein are : (1) To study the behavior of a typical slab-column subassemblage under lateral loading. (2) To study the effects of vertical loads on slab-column lateral load behavior. (3) To investigate the post-failure behavior of slab-column connetions. To achieve these objectives, this study includes four tests of slab-column subassemblages that were made for 1/2 scale . Finally, Test results of this study show that the level of gravity load on the flat plate is one of the most important factors determining the lateral behavior of flat plate connections.

1. 서론

플랫 플레이트구조는 보와 주두가 없는 기둥에 직접 지지되어지는 슬래브로 구성되어 있다. 이러한 구조시스템은 철근이 많이들며 자중이 크다는 것과 내진성능에 관해 취약하다는 단점이 있다. 하지만 구조 계획상 층고를 줄일수 있으며 덕트설계에 용이하다. 또한 거푸집 비용이 절감되고 공간 계획상의 융통성을 가질수 있다. 이것은 향후 거주자들의 삶에 대한 다양한 욕구를 충족시킬 수 있는 자유로운 공간을 확보할 수 있게 되는 것이다. 이에 현 구조물 시공의 주류를 이루고 있는 벽식구조시스템이 가진 장점을 최대한 활용한 플랫 플레이트구조를 가진 이중골조 시스템의 연구가 매우 유용할 것이다. 1960년대 부터 이제까지 연구된 실험 및 연구데이타를 고찰하면 수직 하중에 대한 플랫 플레이트의 구조적 거동에 관한 연구는 거의 정립이 되어 해석 및 설계방법이 체계적으로 정립되었고, 아울러 건물설계 규정에 반영되어 지고있다. 그러나 현재까지 풍하중 및 지진하중 등의 수평하중에 관한 거동에 대해서는 충분하게 규명되지 않았다. 이에 본 실험연구에서는 수평하중하에서의 플랫 플레이트의 전형적인 파괴형태인 뚫림전단(Punching Shear)에 관한 연구와 슬래브-기둥 접합부의 구조적 거동 및 내력에 대한 고찰, 수직하중의 영향, 슬래브-기둥 접합부의 전단보강의 영향을 분석 고찰한다. 아울러 내부 슬래브-기둥 접합부의 파괴이후 거동도 함께 논의되어진다. 끝으로, 동 실험 결과와 기존의 문헌을 통해서, 플랫 플레이트 시스템의 강도 및 강성을 비교분석하고자 한다.

* 영남대학교 건축공학과 석사과정
** 영남대학교 건축공학과 부교수. 정회원

2. 실험체 설계 및 제작

2-1. 시험체 계획

시험체는 플랫 플레이트 건물의 내부 슬래브-기둥 조합체에 대한 1/2축소 모델이며 시험체 갯수는 총 4개이다. 내부 슬래브-기둥 조합체의 이상화는 탄성구조물에 대한 약식해석으로 기둥 중간 높이와 슬래브의 중간 스팬에서 반곡점을 갖는다. 이러한 가정은 이들 반곡점에서 각 부재를 절단하도록 함으로서 모델화할 수 있다. 그리고, 이러한 내부 접합부의 거동은 전 건물에 있어서의 해당 내부 접합부의 수평하중에 대한 거동과 유사한 것으로 간주할 수 있다. 이에 시험체는 ACI-89에 근거하여 설계함에 있어서 불균형 모멘트로 인한 뚫림파괴에 취약한 기둥단면을 가진 시험체로 구성되며 이중 한개의 시험체는 전단보강 하였다. 시험체 SS-1, SS-2, 는 위험전단단면 내에서 $0.236\sqrt{f_c'}kg/cm^2$, $0.368\sqrt{f_c'}kg/cm^2$, SS-3와 SS-4는 $0.499\sqrt{f_c'}kg/cm^2$ 의 뚫림전단력을 가진다. 이 뚫림 전단력은 ACI-89에 근거하여 산정한것이다. 이들은 표 2.1과 같다.

표 2.1 시험체 일람표

시험체	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4
기둥단면 치수 (mm×mm)	300×150	300×150	300×150	300×150
평균전단 응력 (kg/cm^2)	$0.236\sqrt{f_c'}$	$0.368\sqrt{f_c'}$	$0.499\sqrt{f_c'}$	$0.499\sqrt{f_c'}$
전단보강 유무	무	무	무	유

2-2. 시험체 제작

본 시험체는 음성 (주)청구P.C 공장에서 동일한 환경 하에서 제작되었다. 시험체의 슬래브 두께는 10cm이며 스팬길이는 가력 방향이 220cm 이고 연직방향이 250cm 이다. 하지만 양단부를 롤러로 고정하기 위해서 15cm 씩 확장하여 시험체 슬래브 단면치수는 250cm×250cm이다. 시험체의 기둥은 슬래브 중심에 위치하며, 슬래브 면으로부터 직상부와 직하부로 70cm씩 돌출되어 있다. 기둥의 단면은 30cm×15cm의 취약한 단면을 설계하였다. 가력방향의 상부 철근은 SS1 경우에 주열대 내에서 150mm간격이며 주간대는 250mm로 배근된다. SS2의 경우 각각 130mm와 250mm이며, 위험단면 내에서는 65mm이다. SS3와 SS4는 100mm와 250mm이고, 위험단면에서는 50mm이다.

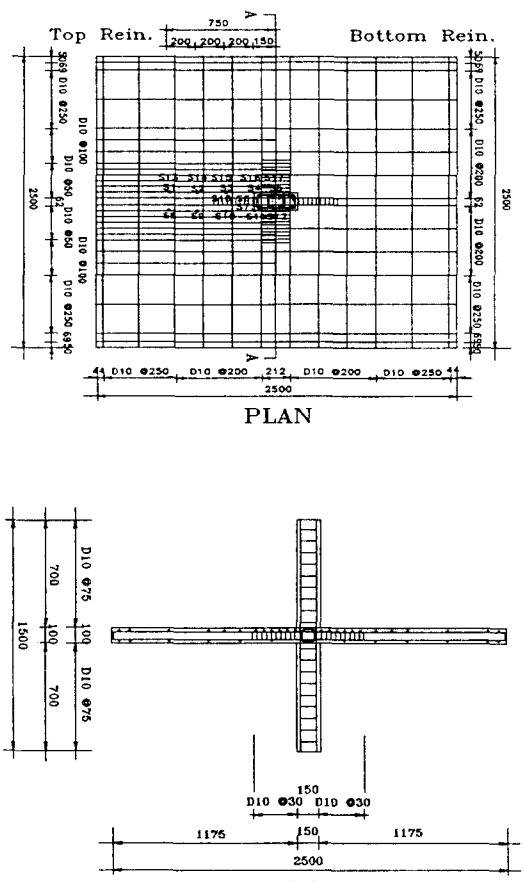


그림 2.2 SS-4시험체 배근도

2-3 재료성질

콘크리트 배합은 (주)한성에서 제공한 배합 계산서를 따랐다. 동 배합은 콘크리트의 설계 압축강도로 350kg/cm^{2}을 주었다. 최대골재 치수는 13mm이고 슬럼프치는 8cm이다. 콘크리트 압축강도는 KSF 2402 에 따라서 수행하였다. 철근의 인장강도 시험편은 KSB 0801의 라호 규정에 따라 제작하였으며, KSB 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 수행하였다.

표 2.3 콘크리트의 물리적 성질

시험체	압축강도			탄성계수	슬럼프
	7일	28일	실험시	(t/cm^2)	(cm)
SS-1	164	223	274	189.2	12.0
SS-2	320	321	342	205.8	5.0
SS-3	279	322	346	198.5	8.5
SS-4	334	342	343	200.7	8.0

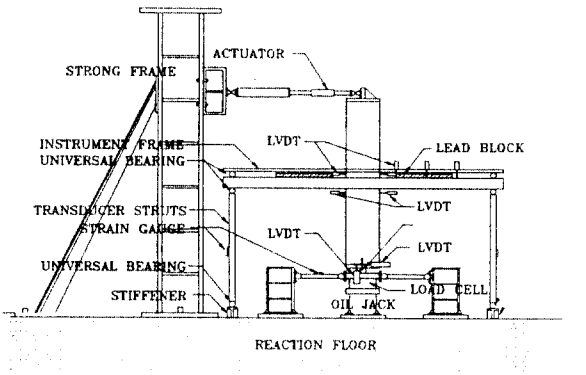
표 2.4 철근의 물리적 성질

철근종류	항복강도 (kg/cm^2)	항복변형도 ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 (t/cm^2)	인장강도
D10	4,686	5,625	1,980	6,955

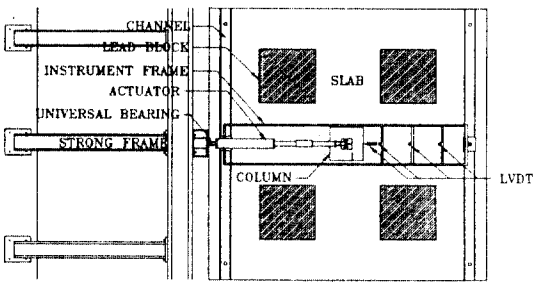
3. 실험

3-1. 실험체 설치

시험체 설치는 일정크기의 연직하중을 유지하면서 슬래브-기둥 시험체에 수평 하중이 일방향으로 가력하여 실험할 수 있도록 설계하였다. 그림 3.1에 보여지듯이 한개의 일방향 베아링을 가력 방향으로 회전할 수 있도록 기둥 멑면에 설치하였고, 베어링과 반력바닥사이에 용량이 50tons인 한개의 오일 재키를 설치하였다. 기둥 밑면의 수평반력은 기둥의 가력방향에 위치하는 4개의 강지주에 의해서 저항토록 하였다. 이들 강지주의 반력은 반력바닥에 정착된 철골보에 전달된다. 수평하중은 용량 10tons의 엑츄에이터를 이용해서 기둥의 최상부에 가력하였다. 시험체의 비틀림을 방지하기위해서 철골 프레임과 볼형식의 기구(Ball Jigs)를설치하였다.



TEST SETUP - ELEVATION



TEST SETUP - PLAN

그림 3.1 시험체 설치전경

수평하중 하에서, 실험시 발생되는 약간의 충격에 대한 에러의 발생은 시험체가 겪는 수평변위의 크기와 비교해서 아주 미소하여 무시되었다. 이는 기존의 문헌에서도 이러한 에러들이 무시됨을 볼 수 있다.

3-2. 가력방법 및 측정

실험이 시작되기전 연직하중의 일부를 상사하기 위해서, 리드 블록을 슬래브 위에 장착하였으며 오일 재키를 이용하여 연직하중을 일정하게 유지시킨다. 엑츄에이트를 사용하여 수평하중을 시험체 기둥상단에서 가력할수 있게

하며 실대 구조물이 경험할 것으로 기대되는 조건을 상사하는 수평하중을 광범위하게 시험체가 받도록 하였다. 이들은 낮은 풍하중에서부터 극심한 지진동까지를 포함한다. 변위이력은 3mm, 6mm, 12mm, 24mm, 48mm 그리고 96mm의 목표변위로 나뉘어 가력하였다.

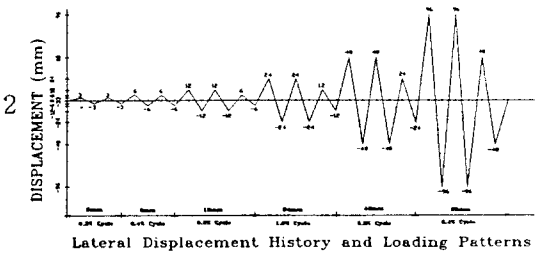


그림 3.2 시험체 변위이력곡선

12mm 사이클 이후에 별도로 앞서 실시한 1사이클을 더 가하였다. 이러한 변위이력의 목적은 큰 변위 사이클 이후에 시험체의 강도저하를 분석하는데 있다. 또한 전단파괴에 의한 균열이 발생한 후 다시 수평하중과 수직하중을 재가력하여 측정하였다. 가력 상태의 데이타들은 System 4000기기를 사용하여 3초간격으로 체크되었다.

4. 실험결과

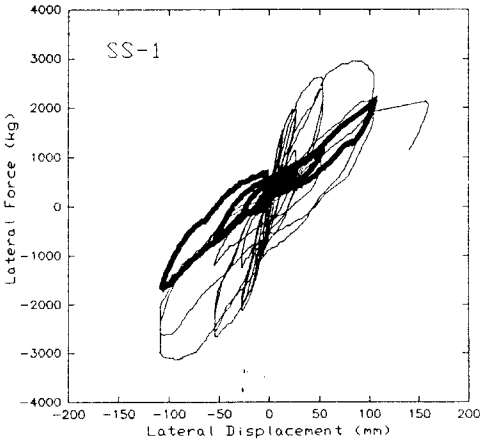


그림 4.1 SS1의 수평하중-변위곡선

그림 4.1과 4.2 는 각각 실험에 있어서 시험체 SS1에서 SS4에 대한 수평변위와 수평 하중에 대한 상관곡선을 보여준다. 수평축은 수평변위의 기둥최상부와 최하부사이의 상대변위로 정의되는 수평변위이다. 수직축은 엑츄에이터에 장착된 로드셀에 의해서 측정된, 기둥 최상부에 가해진 수평하중이다.

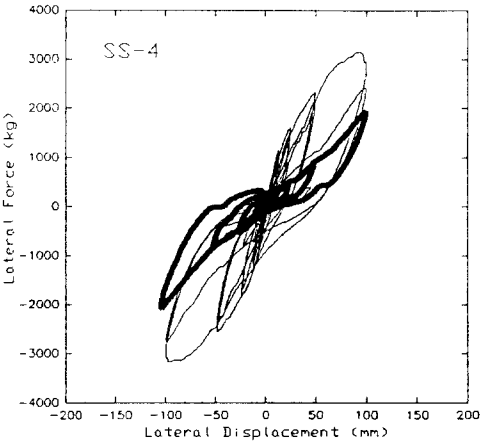


그림 4.2 SS4의 수평하중-변위곡선

모든 시험체는 슬래브-기둥 접합부에서 급격한 뚫림전단 파괴를 겪었다. 실험결과를 비교해보면 높은 연직하중이 작용하는 시험체가 낮은 연직하중의 시험체보다 작은 수평하중의 수평변위에서 파괴되었다. 낮은 접합부 전단력을 가지는 시험체는 이력곡선상에서 핀칭(Pinching)을 보여주며, 동시에 높은 항복 거동을 보여주었다. 또한 모든 시험체에 있어서 각 사이클의 처음과 두번째 루프선(loops)을 비교하면, 높은 수평변위에서 강성 저하가 더 증가됨을 알 수 있다. SS4의 경우 전단보강을 함으로써 SS3와 비교할 때 수평 변위와 강도가 더 증가됨을 알 수 있다. 변위이력 곡선 그림에서 진하게 나타난 루프선들은 전단파괴 이후 재가력하여 발생된 상관곡선이다. 슬래브-기둥 접합부의 전단파괴는 기둥면으로부터 슬래브 두께만큼 떨어져서 생기는 표면균열로 특정지어진다. 균열선의 기울기는 약 10° ~ 30° 정도로 상대적으로 완만하다. 수평하중과

수평변위는 최초 가력방향을 (+)이라 한다. 표 4.2는 실험결과를 요약한 것이다.

표 4.2 실험결과의 요약

시험체	수직하중 (tons)	최대수평 하중 (tons)	최대수평 변위 (mm)	연성비
SS1	4.31	2.95	84.99	2.51
SS2	6.71	2.77	82.98	2.41
SS3	9.11	2.35	46.55	1.54
SS4	9.11	3.15	94.35	2.00

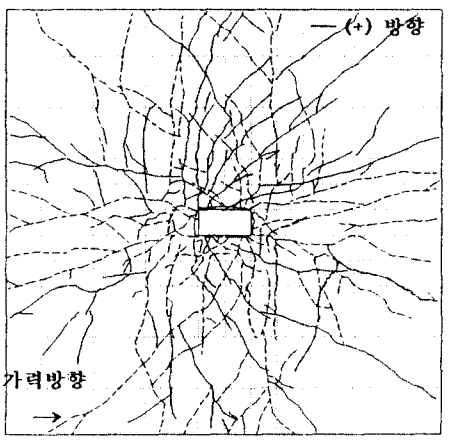


그림 4.3 SS4시험체 상부슬래브 균열상황

5. 실험결과 분석

5-1. 수직하중의 영향

수평하중 상태의 슬래브-기둥 접합면에 작용하는 수직하중에 대한 영향을 실험결과에 근거하여 분석고찰하였다. 본 실험의 결과에서는 접합부의 수평하중하에서의 거동을 분석하는데 있어 가장 중요한 요소들 중의 하나가 수직하중의 크기임을 보여준다. 이는 대부분의 파괴가 수직하중과 불균형모멘트에 의해서 야기되어지는 과도한 수직 전단 응력에 기인하였다. 따라서, 높은 수직하중에서는 수평하중으로 생긴 불균형모멘트를 막기위한 가용전단내력이 감소되었다. 표 4.2 에서 SS-1 시험체와 SS-3 시험체를 비교하면, 최대수평하중이 2.95 tons 에서 2.35 tons으로 20%정도 저하되었으며 최대수평처짐비는 5.7 %에서 3.1 %까지 45 % 저하되었다. SS-3 시험체와 전단보강된 SS-4 시험체의 경우 최대수평하중이 2.35 tons에서 3.15 tons 으로 34 % 증가되었으며 최대수평처짐비는 103 %정도 증대되었다. 그림 5.1은 수평변위에 대한 수평하중의 포락선을 비교함으로써 수직하중의 영향을 보여준다.

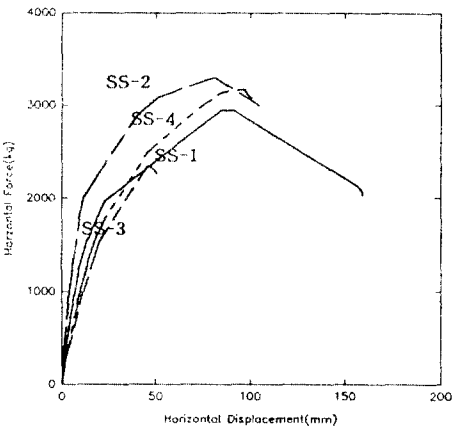


그림 5.1 Envelope Curve

그림 5.1의 포락선은 그림 4.1과 4.2에서 측정된 수평하중-변위 상관곡선으로 부터 구하였다. 이 포락선에서도 높은 수직하중에 대해 강도, 강성, 연성, 그리고 수평 처짐 능력들이 크게 감소됨을 알 수 있다.

5-2. 반복 가력의 양상

12mm사이클이 반복되기 전에 시험체는 둥 그림에는 보여지지 않지만 24mm사이클을 경험한 것으로 나타났다. 이는 플랫 플레이트 접합부가 큰 변위 사이클을 겪은 후에 큰 강성저하를 겪었음을 알 수 있다. 반복된 12mm사이클은 원 사이클과 비교할 때약 1/2인 강성을 보여준다. 즉 시험체 SS-1, SS-2, SS-3 그리고 SS-4는 각각 35%, 29%, 36%, 그리고 42%의 강성저하를 보여준다. 이는 강한 지진동하

에서 R/C건물이 수평변위 1.5 % 크기의 최대 수평 처짐을 겪을 것으로 기대된다. 슬래브-기둥 접합부의 뚫림 전단파괴 이후에 파괴 이후 거동을 평가하기 위해서 수평 및 수직하중이 지속적으로 가해졌다. 이 단계의 접합부가 가지는 수평강도와 강성능력은 매우 낮았지만,

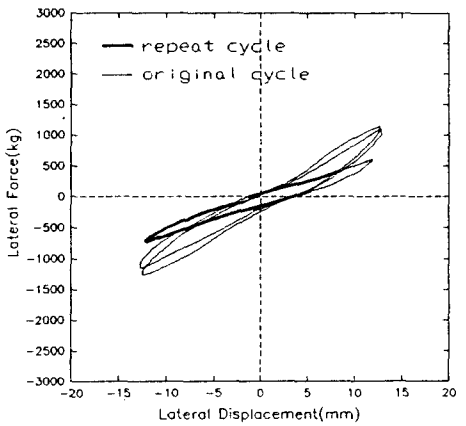


그림 5.2 SS-3시험체의 12mm사이클

수직하중이 지속적으로 가해질 수 있었다. 이러한 사실은 진행형 붕괴를 방지하기위해서는 기둥을 관통하여 가로지르는 연속적으로 배근된 하부철근이 지지한다고 본다.

5-3 수평변위 대한 수직하중의 영향

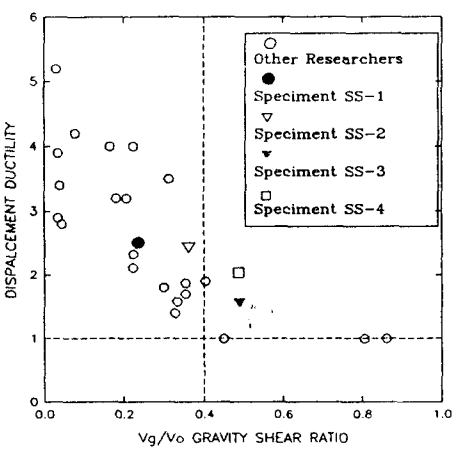


그림 5.3 수평변위와 전단력비의 관계

그림 5.3 은 수평변위와 전단력비 사이의 상관관계를 보여준다. 공칭전단력비 V_g/V_o의 값이 약 0.4를 초과하는 경우, 실제적으로 수평변위 연성이 없어진다. 또한 전단력비가 클수록 변위 연성비는 작아진다. (수평변위 연성비 μ=1) 이는 하중-변위 곡선에 있어서 임의의 항복이 보여지기 전에 뚫림에 의해서 접합부가 파괴되었음을 알 수 있다.

6.결론

본 연구실험결과를 토대로, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 실험결과 위험전단단면에 작용하는 전단응력이 클수록 시험체의 강도 및 강성 등이 크게 감소되었으며 이는 슬래브에 작용하는 수직하중의 영향이 플랫플레이트의 구조적 거동에 매우 중요한 요인의 하나임을 알 수 있었다.
(2) 전단응력을 크게 받는 시험체-접합부 거동은 전단보강을 함으로써 강성, 연성 그리고 수평 처짐능력이 크게 증가됨을 알 수 있었다.
(3) 뚫림전단 파괴이후에도 접합부의 내력이 어느 정도는 남아 있다. 즉 구조물의 피해시 보수보강을 하는 쪽이 훨씬 유리하며 보수보강에 대한 연구가 필요할 것이다. 마지막으로 실험결과와 이론해석을 통해 이들 거동을 비교 분석함이 연구과제로 사료된다.

7. 참고문헌

1. AUSTIN A.PAN and JACK P.MOEHLE
"ReinforcedConcrete Flat Plates under Lateral Loading"
ReportNO.UCB/EERC-88/16OCTOBER1988

2.. Kanoh, Y., and Yoshizaki, S.,
"Experiments on Slab-Columnand Slab Wall Connections of Flat Plate Structures,"
Concrete Journal, Japan Concrete Institute,V.13
June 1975

3. ANDRZEJ AJDUKIEWICZ and WLO D ZIMIERZ STAROSOLSKI
"Reinforced-Concrete Slab-Column Structures" 1990