

RC 플랫 플레이트 슬래브의 뚫림전단성능평가

An Evaluation on Punching Shear Capacity of R/C Flat Plate Slab

김 종 근* 신 성 우** 양 지 수*** 이 리 형****
Kim, Jong-Keun Shin, Sung-Woo Yang, Ji-Soo Lee, Li-Hyung

Abstract

The primary purpose of this study is to investigate punching shear capacity of flat plate slab using high strength concrete in column. It may be much contributed to economy efficiency and structural advantages that High Strength Concrete(HSC) used for vertical member and Normal Strength Concrete(NSC) for horizontal member. Therefore, six plate flat slab specimens with HSC column and NSC slab had been made and tested with real scale. The major variables were compressive strength of concrete($f_{ck}=285, 460\text{kgf/cm}^2$), extended length of HSC from column face and amount of shear reinforcements. As the result of this test, the maximum load and punching shear capacity of specimens is affected by extended length and shear reinforcements.

요 지

RC구조물의 기둥과 같은 수직부재에는 고강도 콘크리트를 그리고 슬래브와 같은 수평부재에는 보통강도 콘크리트를 사용할 경우 경제적인 효율성은 물론 구조적인 많은 이점을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이 경우 슬래브와 기둥의 강도 및 강성차이로 인한 뚫림전단의 위험이 있어, 본 연구에서는 기둥에는 $f_{ck}=460\text{kgf/cm}^2$ 의 고강도 콘크리트를, 슬래브에는 $f_{ck}=285\text{kgf/cm}^2$ 의 보통강도 콘크리트를 타설한 실험 크기의 플랫 플레이트 슬래브 실험체 6개를 제작하여 뚫림전단성능을 평가하였다. 주요 실험변수는 콘크리트 압축강도, 기둥면으로부터 내민길이, 휩철근 추가에 의한 전단 보강근량이다. 실험결과 고강도 콘크리트 내 민길이와 슬래브 휩철근 추가에 의한 전단보강은 최대내력의 증가와 뚫림전단저항성능을 향상시킬 수 있으나, 최대하중 이후 실험체의 거동에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Keywords : High strength concrete, Flat plate slab, Punching shear, Extended length

* 정희원, 한양대학교 건축공학과 박사과정
** 정희원, 한양대학교 건축학부 교수
*** 정희원, 대한주택공사 건축설계처 부장
**** 정희원, 한양대학교 건축공학부 교수

E-mail : kimjk1250@hotmail.com 031-400-4115

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

현재 국내에서 건설되고 있는 아파트 건물의 일반적인 구조 형식으로는 벽식구조 시스템을 채용하고 있다. 이것은 양적인 공급에 기인한 것으로 벽식 아파트 구조시스템이 가지는 장점인 건물의 낮은 층고, 대형 거푸집의 사용에 따른 시공성의 향상 및 경제성, 그리고 공기 단축 등의 효과를 고려한 것으로 보여진다.

그러나 1999년에 개정된 콘크리트 구조설계기준¹⁾에 의한 내진설계시 벽체 단부에서 철근량이 증가하게 되는 단점이 있어 이를 개선하기 위한 구조적인 노력이 요구되고 있다. 또한, 최근에 들어와서 사회환경의 변화로 인한 입주자의 기대와 요구가 다양화되고 있기 때문에, 벽식 구조시스템이 결여하고 있는 공간 계획상의 융통성과 주차장 및 주민 공동시설을 위한 지하층의 활용이 건설시장에서의 경쟁력 우위를 확보하는 절대적인 요소가 되고 있다. 이 외에도 아파트의 건물 수명을 40년 이상으로 볼 때, 단순히 골조만 튼튼한 것이 아니라 일정 기간이 지나면 교체가 불가피한 전기, 통신, 배관재 등 설비 자재를 손쉽게 교체할 수 있도록 설계하는 것은 물론, 내부 공간 구조, 설비 등도 차세대 개발 제품 및 생활 문화를 수용할 수 있는 미래 지향적인 것으로 하도록 요구되고 있으며 이에 대한 대안으로 최근 주상복합 건물과 아파트의 지하공간 활용 및 거주자의 요구에 맞는 주거 공간 활용의 확대 등 사회적 요구가 증가하고 있다.

이러한 구조 및 사회적 요구를 만족시키기 위한 새로운 구조시스템으로 벽식 구조시스템이 가지는 장점을 최대한 수용할 수 있고, 층고 저감의 효과가 있는 적정 구조시스템의 도입이 절실히 필요하며, 이와 함께 부재 크기의 최적화, 실내 공간활용의 극대화, 구조체 품질 향상이 기대되는 고강도 콘크리트의 적용이 요구된다.

그러나 고강도 콘크리트의 사용은 그 역학적 특성상 수평부재보다는 수직부재에 적용하고, 수평부재에는 보통강도 콘크리트를 사용하는 것이 경제적인 것으로 알려져 있으며, 우리나라 콘크리트 구조설계기준 및 ACI 318-99²⁾에서는 수직부재에 타설하는 콘크리트와 수평부재에 타설하는 콘크리트의 강도 차이가 1.4배 이상

일 경우, 수직부재에 타설하는 콘크리트는 수평부재로 60cm 이상의 내민길이를 확보하여 시공하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 기둥과 보통강도 콘크리트 슬래브로 구성된 플랫 플레이트 슬래브의 강도 차이에 대한 고강도 콘크리트의 내민 길이와 휨철근의 추가배근에 의한 뿔립전단 저항성능을 평가함으로써 기존 벽식 구조형식을 무량판 슬래브구조로 전환하였을 경우 발생할 수 있는 구조적인 문제점을 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

플랫 플레이트 슬래브의 뿔립전단성능 평가를 위하여 다음 Fig. 1 및 2에 나타난 것과 같이 내부 기둥-슬래브 구조를 실험대상으로 모델링하였으며, 슬래브의 폭은 변곡점을 기준으로 주열대를 중심으로 한 실험구간을 설정하여 실물크기의 실험체를 제작하였다. 실험체의 크기는 기존 벽식구조형식을 플랫 플레이트 슬래브-골조형식으로 전환할 경우 세대 내부 공간활용을 극대화하기 위하여 기둥 크기는 최대 550×550mm를, 슬래브 두께는 층고를 고려하여 최대 200mm를 초과하지 않도록 하여 최종 결정된 실험체 크기는 기둥은 500×500mm, 슬래브 두께는 150mm로 적용하였다.

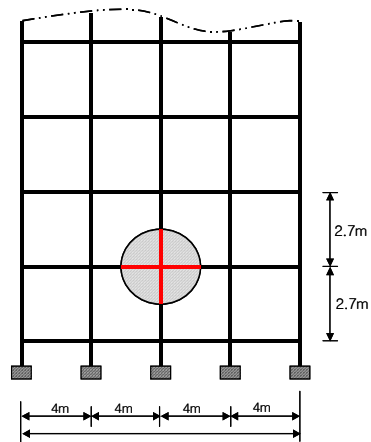


Fig. 1 Specimens Modeling

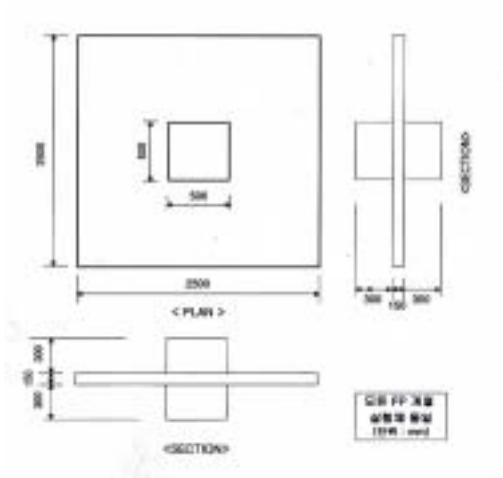


Fig. 2 Specimens Size & Shape

2.2 실험변수

본 실험에 적용한 실험변수는 고강도 콘크리트 내민 길이(l_d)와 전단보강철근량으로 수직부재와 수평부재의 콘크리트 압축강도의 차이가 1.4배 이상으로 타설될 경우에 수직부재면으로부터 수평부재쪽으로 약 60cm 이상의 내민길이를 확보하는 규정에 따라 본 실험체에서 슬래브의 콘크리트 강도는 285kgf/cm^2 , 기둥은 460kgf/cm^2 을 적용하여 접합면으로부터 위험단면($d/2$)인 6.5cm, $2d$ 인 26cm, 그리고 기준에 의한 60cm의 3가지 내민길이를 적용하였다. 또한, 기존 플랫 플레이트 구조물에 대한 검토결과³⁾ 일반적으로 주열대 특히 기둥면을 통과하는 슬래브 주근량이 부족하여 뚫림전단에 취약한 것으로 나타나 뚫림전단에 의한

슬래브의 취성과파괴를 방지하기 위한 전단보강방안으로 기둥면을 통과하는 슬래브 주철근(D10)을 1개 또는 2개를 추가로 보강하였다. 이상과 같은 실험체 계획 및 변수에 따라 제작된 실험체는 모두 6개로 다음 Fig 3 과 Table 1에 각 실험체 상세도와 특성이 나타나 있다.

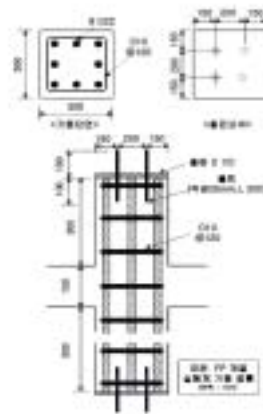
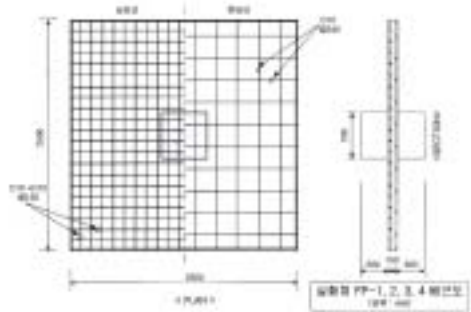


Fig. 3 Specimens Detail

Table 1 Properties of Specimens

Specimens Name	Slab(2500×2300)					Column(500×500)			Ref.
	fck(kgf/cm ²)		Extended Length	Arrangement		fck (kgf/cm ²)	Arrangement		
	Extended Length	Others		Top Bar	Bottom Bar		Longitudinal Bar	Hoop	
FP1	285	285	0	D10+13@120	D10@240	285	8-D22	D10@120	
FP2	460	285	d/2(6.5cm)	D10+13@120	"	460	"	"	
FP3	460	285	2d(26cm)	D10+13@120	"	460	"	"	
FP4	460	285	60cm	D10+13@120	"	460	"	"	
FP4-1	460	285	60cm	D10+13@120+1	"	460	"	"	shear reinforcement
FP4-2	460	285	60cm	D10+13@120+2	"	460	"	"	

2.3 사용재료

실험에 사용된 이형철근은 SD40의 D10, D13 철근을 사용하였고, 콘크리트의 최대골재크기는 25 mm, 슬럼프 15cm로 계획하였다. 다음 Table 2는 철근의 인장강도와 콘크리트의 압축강도시험 결과를 그리고 Fig. 4는 콘크리트 압축강도 시험결과 얻어진 응력-변형도 관계를 나타낸다.

2.4 실험방법

실험체는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 슬래브 단부에서의 회전을 방지하기 위하여 슬래브 4면 단부를 고정시켰고, 재하방법은 일반적으로 슬래브에 하중을 재하하는 것이 보통이지만 본 실험에서는 실험체를 뒤집어 설치하고 기둥에 축력을 가하는 방법을 취하였다. 각종 실험데이터를 취득하기 위한 측정장비로는 200tonf 용량의 로드셀과 시험체 하부에 4개의 변위계를 설치하였고, 철근과 콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여

Table 2 Properties of Materials

Materials		Elastic Modulus (kgf/cm ²)	Strength (kgf/cm ²)	
			f _y	f _u
Bar	D10	2.07×10 ⁶	4132	5108
	D13	2.24×10 ⁶	4471	6554
Concrete	Slab	2.51×10 ⁵	f _{ck/28day} =285	
	Column	2.98×10 ⁵	f _{ck/28day} =460	

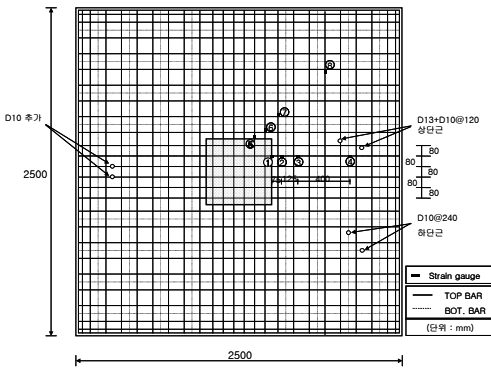


Fig. 6(a) Location of Strain Gauge on Bar

Fig. 6(a), (b)에 나타난 것과 같이 각각 8개씩의 게이지(W.S.G)를 부착하였다.

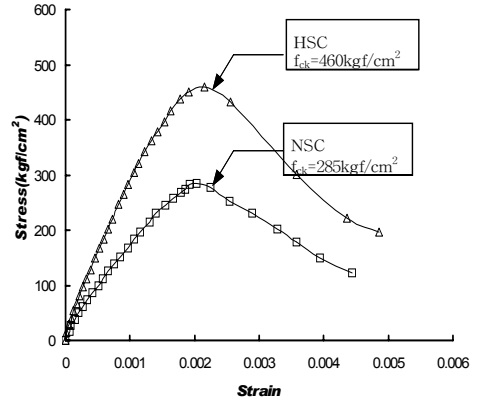


Fig. 4 Stress-Strain Curve of Concrete



Fig. 5 Test Setup

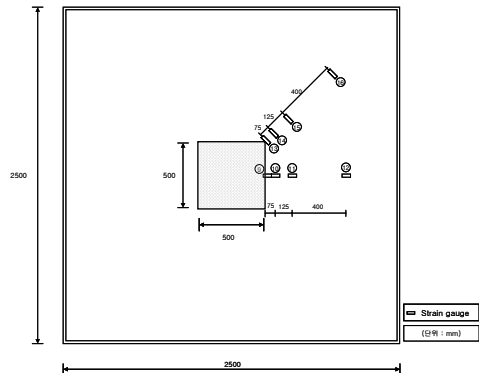


Fig. 6(b) Location of Strain Gauge on Concrete

모든 데이터는 데이터로거(TDS 303)와 스위치 박스를 이용하여 컴퓨터에 자동 저장되도록 하였다. 그리고 재하는 300tonf 용량의 오일잭을 사용하여 0.3kgf/cm²/sec의 일정속도로 증가시키고, 시험체가 파괴되어 급격히 내력이 감소하여 더 이상의 내력증가가 없다고 판단될 경우 실험을 종료하였다.

3. 실험결과

본 실험에서는 각 실험체에 하중이 재하되기 시작됨과 동시에 기둥하부의 처짐, 초기균열하중과 항복하중, 최대하중 및 슬래브의 균열발생양상들을 관찰, 기록하였으며 그 결과는 다음 Table 3과 같다.

3.1 균열발생 및 최종파괴 상황

모든 실험체에서 공통적으로 초기균열은 위험단면(d/2)에서 발생하였고, 기둥 모서리에서 대각방향으로 진전되다가 이에 직각방향의 2차 균열이 기둥을 중심으로 방사형으로 발생하였다. 최종파괴는 모든 실험체에서 기둥의 침하가 발생되면서, 슬래브 하부에서는 기둥의 단면치수(500mm)만큼 떨어진 곳에서 슬래브가 뚫림전단파괴 되면서 갑작스런 취성파괴가 발생하였다. 이와 같은 각 실험체별 균열발생 및 최종파괴양상이 다음 Fig. 7에 나타나 있다.

3.2 하중-변위 관계

Fig. 8은 각 실험체별 하중-변위곡선을 나타내고 있다.

강도 차이에 따른 내민길이 60cm를 확보한 FP4 시리지가 대체적으로 안정적인 거동을 보이고 있으며, 압축강도 285kg/cm²으로 일체 타설된 FP1 실험체도 비교적 안정적인 거동을 보이고 있다. 그러나 내민길이 위험단면(d/2 ; 6.5cm)인 FP2와 2d(26cm)인 FP3 실험체는 항복하중과 최대하중 차이가 적어, 즉 부재의 항복이 이루어진 후 최대하중까지 빠르게 도달한 후 즉시 파괴가 발생하는 매우 취성적인 거동을 나타내었다.

위의 Table 3에서 알 수 있는 것처럼 슬래브에 추가적인 휨철근을 배근함으로써 전단보강된 FP4 -1과 FP4-2 실험체가 가장 안정적인 거동을 보였는데 이는 기둥과 슬래브의 접합부에 적절한 전단보강이 되어 있으면 기둥에 작용되는 수직하중을 바닥구조로 원활히 전달하면서 기둥주변의 슬래브 위험단면을 확대하게 되어 슬래브 위험단면에서의 전단응력 집중을 완화시키기 때문으로 판단된다. 또한, 전단보강에 의해서 연직 하중으로 발생하는 슬래브 위험단면의 전단응력을 부담할 뿐만 아니라 슬래브 위험단면에서 주근의 항복영역이 확대되어 슬래브에서 응력의 재분배가 보다 효과적으로 되어 부재의 거동이 보다 안정적으로 나타나는 것으로 판단된다.

3.3 하중과 슬래브 주근의 변형

Fig. 9(a)~(c)는 하중과 위험단면에 위치한 철근에 부착된 스트레인게이지의 변형률을 나타내고 있다. 하중-변위 곡선에서와 마찬가지로 FP2와 FP3 실험체는 철근이 항복하기 전에 취성파괴가 발생되었고, FP1과 FP4는 철근이 항복되는 시점에서 파괴를 일으켰다.

Table 3 List of Test Result

Specimens	Load(tonf)		Deflection(mm)			Ductility Ratio (δ_{50} / δ_y)
	Yielding(P_y)	Ultimate(P_u)	Yielding(Δ_y)	Ultimate(Δ_u)	δ_{50} After Max. load	
FP1	51.89	65.33	8.86	15.04	20.72	2.34
FP2	49.80	59.28	10.06	14.44	18.52	1.84
FP3	48.75	54.41	8.60	10.94	14.11	1.64
FP4	42.62	54.28	12.80	20.04	25.84	2.02
FP4-1	42.68	55.95	15.40	27.18	33.75	2.19
FP4-2	50.50	67.72	10.46	19.70	27.86	2.66

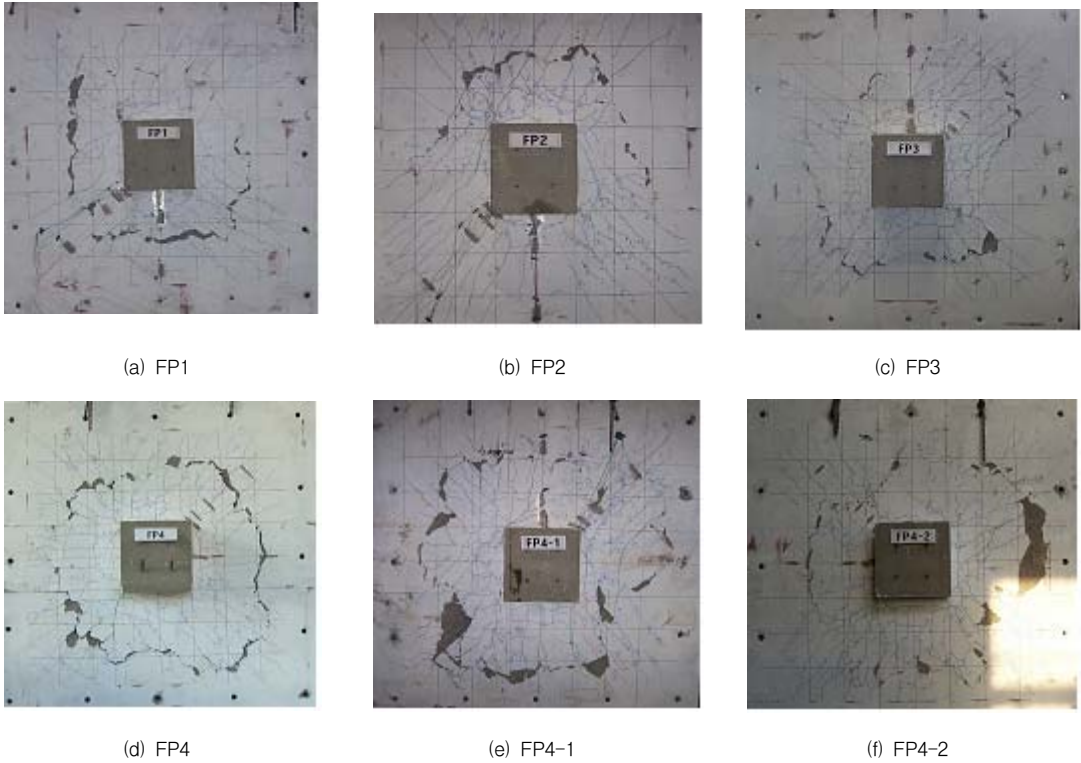


Fig. 7 Crack Propagation & Failure Shape

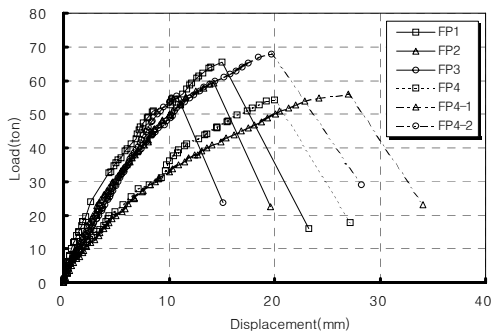


Fig. 8(a) Load-Displacement Curve
(Column Below)

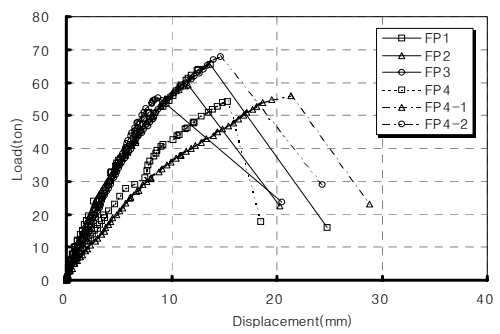


Fig. 8(b) Load-Displacement Curve
(30cm away from Joint face of Column-Slab)

그러나 진단보강을 한 FP4-1과 FP4-2는 철근의 항복이 일어난 이후에도 계속적으로 변형을 일으키는 안정적인 거동을 나타내었다.

그리고 철근의 변형률은 S1(기둥-슬래브 접합면)과 S2(위험단면 $d/2$ 게이지의 경우가 S3($2d$)나 S4(60cm)의 경우보다 큰 변형률을 나타내고 있어 뚫린전단의 영

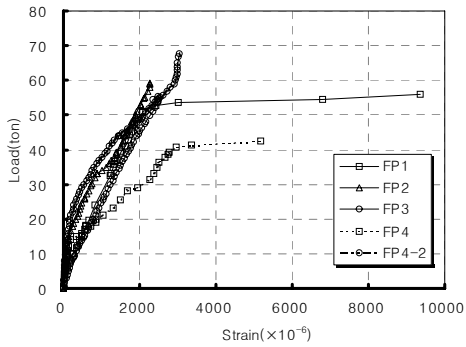


Fig. 9(a) Load-Strain(S1) Relationship

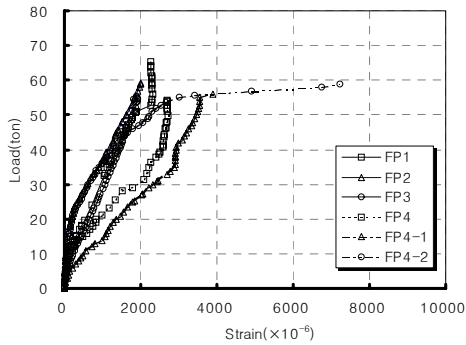


Fig. 9(b) Load-Strain(S2) Relationship

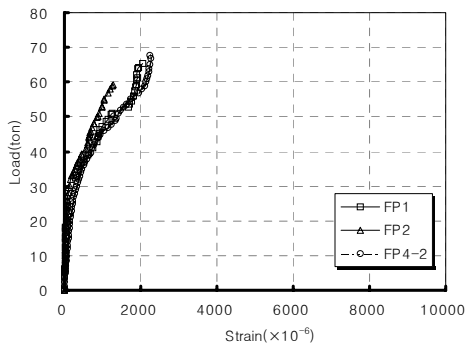


Fig. 9(c) Load-Strain Relationship (S3)

향을 받는 슬래브의 대략적인 범위가 기둥면으로부터 $d/2$ 정도의 위치임을 알 수 있으며, 이는 기둥중심으로부터 각 게이지 위치에 따른 변형률을 나타낸 Fig. 10(a)~(d)에서도 알 수 있다.

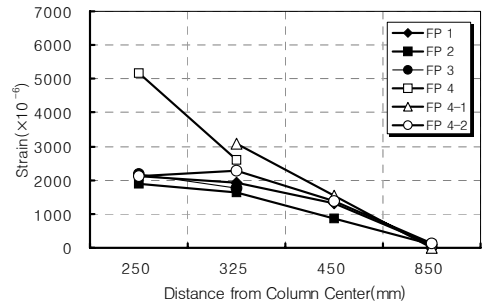


Fig. 10(a) Axial direction strain distribution in yielding load

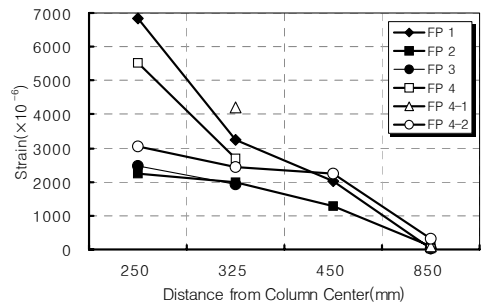


Fig. 10(b) Axial direction strain distribution in maximum load

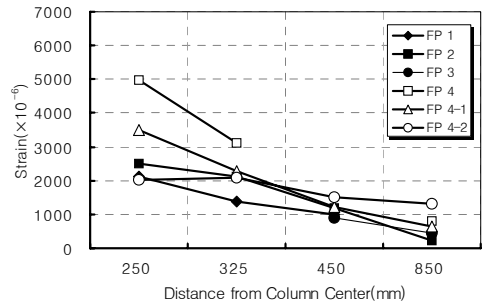


Fig. 10(c) Diagonal direction strain distribution in yielding load

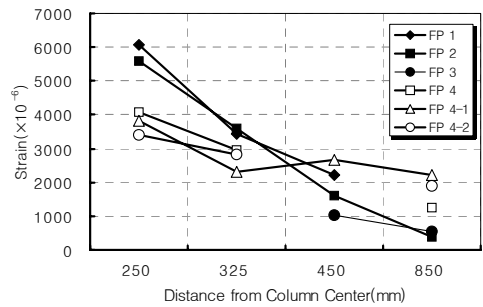


Fig. 10(d) Diagonal direction strain distribution in maximum load

4. 실험분석 및 고찰

4.1 고강도 콘크리트 내민길이평가

본 실험체는 실물크기 실험체로서 고강도 콘크리트의 내민길이를 설계기준에서 요구하고 있는 60cm 이상을 확보한 FP4 실험체의 거동이 내민길이를 확보하지 못한 실험체와 비교할 때 최대하중에는 별 차이가 없으나 항복변위 및 최대하중시 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 현재 ACI 318-99 및 우리나라 기준에서 요구하고 있는 강도 차이가 1.4배를 초과할 경우 60cm이상의 내민길이를 고려해야 한다는 규정은 플랫 플레이트 슬래브 구조에서는 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.

4.2 내력 및 변형평가

본 실험결과 전체 실험체에 285kgf/cm^2 의 보통강도 콘크리트가 사용된 경우가 분리타설된 실험체보다 항복하중 및 최대하중이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기둥-슬래브가 일체로 타설되는 경우보다 분리타설된 경우는 서로 다른 콘크리트의 접합면에서의 불균등한 응력분포로 실험체에 다수의 균열이 발생하였고 이로 인해 최대 내력이 약 10~17%정도 저하된 것으로 판단된다. 특히 내민길이가 기준보다 적게 확보된 FP2, FP3 실험체의 경우는 최대하중시 변위도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 전단보강되거나 내민길이를 확보한 실험체는 보통강도 콘크리트의 경우와 비슷한 거동을 나타내는 것으로 나타났으며 최대하중시 변위는 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

4.3 전단보강효과

내민길이를 60cm 이상 확보한 실험체에 주열대의 기둥 내부를 지나는 슬래브 주근을 1개(1-D10) 또는 2개(2-D10) 추가 배근한 실험체는 보강되지 않은 경우보다 최대하중 및 처짐에서 효과적인 것으로 나타나, 플랫 플레이트 슬래브구조의 전단보강은 구조체의 연성거동을 위해 반드시 필요하며, 이 경우 스티럽이나 철골재등을

사용한 복잡한 방법보다는 시공조건을 고려하여 슬래브 주철근량을 조절하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) 슬래브 휨철근 추가에 의한 전단보강은 그렇지 않을 경우보다 항복하중 및 최대하중이 약 25%정도 증가한 것으로 나타났으나, 최대하중시 변위는 거의 비슷한 것으로 나타났다.
- 2) 고강도 콘크리트의 내민길이는 각 실험체의 최대하중에는 영향을 미치지 못하였으나, 항복하중 및 최대하중시 변위에는 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 3) 고강도와 보통강도 콘크리트가 분리타설된 플랫 플레이트 슬래브구조에서는 구조체의 안정적인 거동을 위하여 기준에서 요구하는 2ft(60cm)의 내민길이를 확보하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 뿔집전단저항성을 증가시키기 위하여 기둥-슬래브 접합면에 대한 전단보강이 필요하며, 이 경우 시공적인 측면을 고려하여 스티럽 보다는 기둥면을 통과하는 슬래브 주철근량을 증가시키는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 대한주택공사 주택도시연구원이 주관하고 한양대학교 초대형구조시스템연구센터의 지원에 의한 연구결과와 일부로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, "콘크리트 구조설계기준", 한국콘크리트학회, 1999.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(318-99) and Commentary (318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
3. Wen Bin Siao, "Punching Shear Resistance of Flat Slabs" ACI Structural Journal September - October 1994.

-
4. David Z. Yankelevsky, Orit Leibowitz "Punching Shear in concrete Slabs" International Journal of Mechanical Science. 41. 1999. 1-15.
 5. Amin Ghali and Sami Megally, "Design for Punching Shear Strength with ACI 318-95", ACI Structural Journal July - August 1999.
 6. Reported by ACI-ASCE Committee 352 "Recommendations for Design of slab-column Connection in Monolithic Reinforced Concrete Structures" ACI Structural Journal November - December 1988.
 7. 박복만, 김형기, "플랫 플레이트 구조의 기둥·슬래브 접합부 연성에 관한 연구" 콘크리트 학회 논문집, 제 12권, 4호 2000, 8, pp.113~119.
 8. 윤영수, 데니스 미첼, "일반강도 콘크리트 슬래브를 통한 고강도 콘크리트 기둥의 축력 전달" 콘크리트 학회 가을학술발표 논문집, 제 12권, 2호 1999, 11, pp. 521~524.

(접수일자 : 2003년 3월 12일)