

# 파괴 메커니즘을 고려한 내부 포스트텐션 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부의 강도식 평가

## Strength of Interior Post-Tensioned Flat Plate Slab-Column Connection based on Failure Mechanism

김민남\*      하상수\*\*      이리형\*\*\*  
Kim, Min Nam    Ha, Sang-Su    Lee, Li Hyung

### ABSTRACT

A bending moment  $M_u$  transferred at slab-column connection is resisted at the slab critical section by flexure and shear. The ACI 318-05 Building Code(1) gives an empirical equation for the fraction  $\gamma_v$  of the moment  $M_u$  to be transferred by shear at the slab critical section at  $d/2$  from the column face and also the effective wide( $c+3h$ ). The equation is based on tests of interior slab-column connections without shear reinforcement. In order to investigate the data eight test specimens were examined. The test shows that increased slab load substantially reduces both the unbalanced moment capacity and the lateral drift capacity of the connection. Especially, the specimens with the bottom reinforcement existence and nonexistence, appears remarkable differences. Studies also show that the code equation for  $\gamma_v$  does not apply to all cases. The purpose of this study is to compare the test results with present ACI 318-05 Building Code provisions for design of slab-column connections and with the analysis of the experimental data for a new limitation of strength equation without shear reinforcement and bottom reinforcement.

### 1. 서론

포스트텐션을 건축구조물에 적용할 경우에는 구조물의 균열, 처짐 제어, 내구성 및 부재의 강도를 높일 수 있다. 특히 플랫 플레이트에 적용하게 되면 장스팬 구조에 가능하며 슬래브 두께 감소, 재료 절약, 층고 절감 등 유리한 점들을 가지고 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 플랫 플레이트 구조는 슬래브-기둥접합부의 접합 면적이 작으므로 접합부에서 뚫림 전단파괴에 매우 취약한 특성을 보이며, 특히 지진력과 같은 큰 수평하중이 작용할 경우 접합부에서 응력집중이 발생하여 전단강도를 약화시키며 취성적인 저단파괴가 발생하기 쉬운 단점을 가지고 있다.

그동안 국내외에서는 슬래브-기둥 접합부의 뚫림 전단강도를 규명하기 위하여 기존 연구자들에 의해 많은 실험연구와 이론연구를 수행하였다. 이 연구결과에 근거하여 다양한 설계방법들이 개발되었다. 그러나 기준식<sup>(1)</sup>에 의해 예측된 접합부 강도는 실험결과와 큰 차이가 있음이 드러났으며, PT 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부의 강도를 정확히 예측할 수 없다. 특히 하부철근의 유무에 따라 기준식은 접합부의 강도를 정확히 예측하지 못하고 있으며, 현행기준<sup>(1)</sup>에서는 PT 플랫 플레이트에 관련된 규정이 일반 RC 플랫 플레이트의 기준을 그대로 적용하거나 기준을 기반으로 실험결과에 근거하여 경험적으로 설계강도를 제한한 식을 사용하고 있으며, RC와 PT에 대한 기준의 차이는 명확히 반영되어 있지 않는 실정이다. 이러한 기존 연구의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 PT 플랫플레이트 접합부의 강도를 분석하였다.

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원, 한경대학교 건설공학연구소 연구교수, 공학박사

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

## 2. 기존 내력식 고찰

ACI-ASCE Committee 423<sup>(2)</sup>에 의하면 PT 내부접합부에 대한 설계 전단강도 식은 포스트텐션의 적용에 따라 콘크리트 압축성분에 대한 강도 증가 효과가 고려된 아래 식을 허용하고 있다.

$$V_c = (\beta_p \sqrt{f_{ck}} + 0.3f_{pc})b_0d + V_p \quad (1)$$

$$f_{ck} \leq 34.5 (MPa), \quad 0.86 \leq f_{pc} \leq 3.45 (MPa)$$

여기서, 여기서,  $\beta_p$ 는 0.29와  $(\alpha_s d/b_0 + 1.5)/12$ 중 작은 값으로 하고  $\alpha_s$ 는 내부기둥=40; 외부기둥=30; 모서리기둥=20을 취한다. 또한,  $b_0$ 는 2방향 슬래브 전단에 대한 위험단면의 둘레길이(mm)며  $f_{pc}$ 는 콘크리트 부재에 프리스트레스트 힘을 도입했을 경우 가해진 콘크리트 단면의 평균 압축응력으로써, 본 실험<sup>(4)</sup>에서는  $f_{pc} = 1.21 MPa$ 를 적용하였으며,  $V_p$ 는 전단강도에 미치는 영향이 작으므로 '0'을 취해도 무방하다.

실험체의 전단 강도 평가는 ACI 318-05<sup>(1)</sup>에서 허용하고 있는 편심전단응력 모델을 근거로 수행하였다. 편심전단응력모델에 따르면 (그림 1)에서 보다 깊이 위험 단면의 중심에서 작용한 직접 전단력과 불균형 모멘트의 일부에 의하여 발생된 응력이 중첩되어 전단 위험단면에서 작용하는 전단 응력을 결정한다. 이때 전단 응력의 크기는 위험단면 중심에서부터 떨어진 거리에 선형 비례하여 작용한다고 가정하며, 전단 보강이 없는 슬래브에서 전단 위험 단면은 기둥면에서  $d/2$  떨어진 위치로 가정한다.

$$v_u = \frac{V_g}{b_0 d} + \frac{\gamma_v M_u c}{J} \quad (2)$$

여기서,  $v_u$ 는 전단응력;  $V_g$ 는 직접전단력;  $M_u$ 는 불균형모멘트;  $c$ 는 위험단면의 중심에서 응력이 작용하는 지점까지의 거리;  $J$ 는 중심축에 대한 위험단면 단면극2차모멘트를 각각 나타낸다. 그림 2(b)에서 나오는  $\gamma_{fy}$ 의 값은 Mast<sup>(3)</sup>의 탄성해석으로 결정할 수 있다. 일반적으로 단면 AD와 BC[그림 2. (b)] 상부 및 하부에 휨 철근을 배치하는데 이는 주로  $\gamma_{fy} M_{uy}$ 에 저항하며 접합부 연성거동을 확보하기 위한 것이며, 슬래브 두께에 대한 증가, 및 전단보강근 배치는 주로 위험단면에서 전단파괴에 대해 저항하기 위한 것이다. 하지만 경제적인 설계를 위하여서는 반듯이  $\gamma_{fy}$  값을 높이고  $\gamma_{vy}$  값을 줄이는 것이 목표다. 모멘트 전달비율에 대한 정확한 값을 얻으려면 3차원부재에서 접합부 휨 철근 및 전단보강근이 있는 것으로 가상화한 비선형유한요소 해석이 필요하다. 하지만 재료의 비선형거동, 휨과 전단에 의한 균열, 부착철근의 항복에 대해 예측하기 어렵기 때문에, 기존연구에서는 전단에 의해 전달되는 모멘트 비율은 탄성해석에 기초한다. 또한, Adel A. Elgabry and Amin Ghali에 의한 유한요소해석 결과에서는 위험단면에서의  $\gamma_v$  값을  $l_x/l_y$ 의 함수로 표현하였으며, 위험단면의 단면형상에 따라 서로 다른 값을 나타내었다.

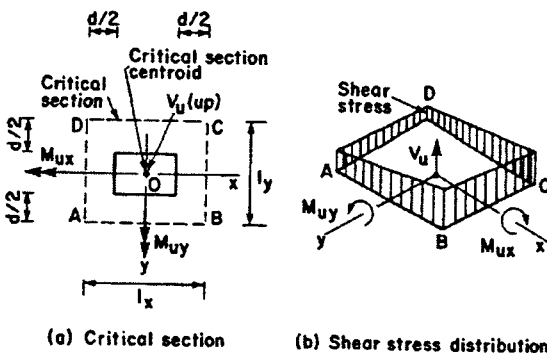


그림 1. 위험 단면내 전단응력 분포

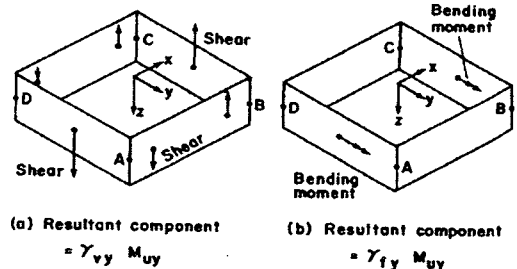


그림 2. 위험 단면내 불균형모멘트  $M_{u,y}$ 에 의한 내력 요소 구획

### 3. 실험

대상건물은 PT 플랫 플레이트 중력 저항 시스템으로 설계하고 지진력은 모두 보통 콘크리트 전단벽이 부담하도록 설계된 건물 골조 시스템으로 일반적인 주거 및 사무실 건물을 대표한다. 현행 설계 기준 ACI 318<sup>(1)</sup>의 상세조건을 따랐으며, 상부철근 및 텐던 배근 상황은 그림 3에 나타났다. 긴장재는 한국 공업규격 KSD 7002의 SWPC 7B를 사용했으며, 실험체는 대상건물의 60%의 크기로 하였고, 중력하중은 유압잭과 하중 블록을 이용하여 묘사하였으며, 횡변위는 가력장치를 이용하여 변위 제어를 통한 유사정적 반복 이력을 적용하였다. PT 플랫 플레이트 내부 접합부 실험체의 일반사항은 표 1에서 정리하였다.

표 1 내부 PT 플랫 플레이트 실험체 상세

Mark	c [mm]	d [mm]	$\rho_p$ [%]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_{pc}$ [MPa]	$V_c$ [kN]	$V_g$ [kN]
PI-B30	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	72
PI-B50	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	120
PI-B50-1	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	120
PI-B70	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	167
PI-B70-1	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	167
PI-D30	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	72
PI-D50	300	104	0.21	32.3	466	1.21	338	120
PI-D50-1	300	104	0.21	32.3	466 <td 1.21	338	120	

e.g., PI-B50-1, (P):PT, (I):Interior, (B):Banded, (50);  $V_g/\phi V_c \sim 0.50(\phi = 0.75)$ , (1):no Bottom Re-bar.

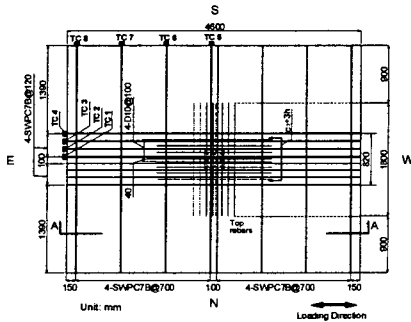


그림 3(a) 평면 배근상황(PI-B series)

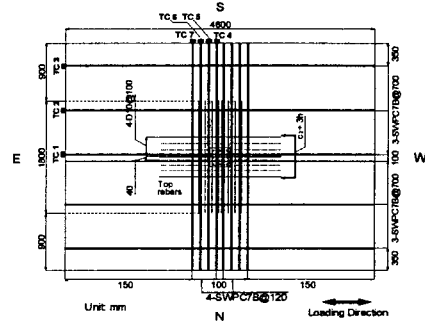


그림 3(b) 평면 배근상황(PI-D series)

표 2 실험 및 해석결과 비교

실험체명	실험결과					직접 전단력			전단강도			휨 강도		불균형 모멘트		파괴 모드
	$V_{max}$	$V_g$	$\theta_u$	$M_{u, test}$	$v_u$	$V_g$	$v_c$	$v_u/v_c$	$\gamma_f M_{u, test}$	$M_{n, c+3h}$	$\gamma_f M_{u, test} / M_{n, c+3h}$	$M_{u, ACI}$	$M_{u, test} / M_{u, ACI}$			
	[kN]	[kN]	[%]	[kNm]	[MPa]	[kN]	[MPa]		[kNm]	[kNm]		[kNm]				
PI-B30	47.86	38.54	5.9	100.51	2.17	71.64	2.01	1.08	60.31	81.04	0.74	91.16	1.10	F+P		
PI-B50	43.15	36.08	3.5	90.62	2.28	119.39	2.01	1.13	54.37	81.04	0.67	74.82	1.21	F+P		
PI-B50-1	21.85	19.42	1.75	45.89	1.51	119.39	2.01	0.75	27.53	64.49	0.43	74.82	0.62	F+P		
PI-B70	34.41	26.87	2.7	72.26	2.25	167.15	2.01	1.12	43.36	81.04	0.53	58.47	1.23	F+P		
PI-B70-1	12.29	12.03	0.75	25.81	1.44	167.15	2.01	0.72	15.49	64.49	0.25	58.47	0.44	F+P		
PI-D30	51.88	36.51	5.9	108.95	2.32	71.64	2.01	1.15	65.37	60.82	1.07	91.16	1.19	F+P		
PI-D50	49.72	40.89	4.5	104.41	2.53	119.39	2.01	1.25	62.65	60.82	1.03	74.82	1.39	F+P		
PI-D50-1	27.98	23.31	2.75	58.76	1.73	119.39	2.01	0.86	35.25	44.26	0.80	74.82	0.79	F+P		

$\gamma_f$ : 0.6(기준<sup>(1)</sup>에서는 정사각형 기둥과 슬래브 사이에 불균형 모멘트의 약 60%가 휨에 의해 전달된다고 한다.)

$M_{u, test}$ ;  $M_{u, ACI}$ : 실험결과 및 ACI 기준식<sup>(1)</sup>에 의한 불균형모멘트

$M_{n, c+3h}$ : 슬래브 위험단면 내에 배치된 철근 및 텐던에 의한 휨 모멘트)

F = Flexural yeild ; P = Punching failure

#### 4. 강도 분석

기존에서 제공되고 있는 편심전단응력모델을 통하여 허용 가능한 최대 불균형모멘트를 식 (1), (2)를 이용해 검토해보았으며, 표 2에서 실험결과와 비교하여 나타내었다. 표 2에서  $M_{u,test}$ 에 대한  $M_{u,ACI}$ 의 비율에서 볼 수 있듯이, PT 적용시 하부철근이 배근된 실험체의 경우 기준식<sup>(1)</sup>은 접합부의 강도를 비교적 정확한 예측을 하는 것으로 나타났으나, 하부철근이 배근되지 않은 실험체에 대해서는 과대평가하고 있으며, 마찬가지로 휨 강도를 검토함에 있어서 중력하중이 증가함에 따라  $\gamma_f M_{u,test} / M_{n,c+3h}$  비율은 감소하는 것으로 나타났으며 위험 단면내 모멘트 전달비율( $\gamma$ )에 대한 재검토가 필요하다. 또한 표 2에서 나타남과 같이 하부철근이 배근되지 않은 실험체에서 강선이 분산배치일 경우 기준식은 접합부 강도를 비교적 정확히 예측하는 것을 보여주고 있으나, 집중배치일 경우 긴밀히 배근된 강선에 의해 접합부에서 응력집중이 발생하여 전단강도가 저하되어 툴립 전단파괴를 가속화하였다(그림 4, 5). 따라서 강선이 집중배치일 경우 휨에 의해 저항하는 강선의 양을 정함에 있어서 유효폭( $c+3h$ )에 대한 재검토가 필요하다. 표 2에서 나타남과 하부철근이 배치되지 않은 실험체에 관해 실험체가 공칭강도에 도달하기 전에 기동 주위에서 툴립 전단파괴를 일으켰으며, 전단응력은 계산한 전단강도의 70%~80%를 나타내었다.

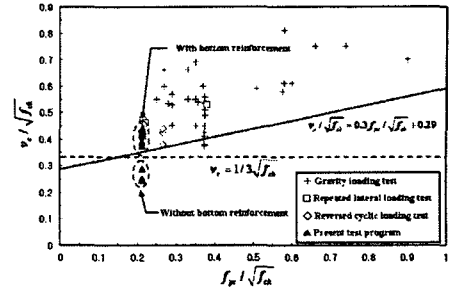


그림 4 전단강도 평가

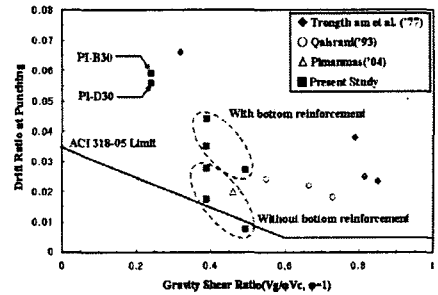


그림 5 중력 전단비 VS. 최대층간변위

#### 5. 결론

- (1) 현행 기준<sup>(1)</sup>의 편심 전단 응력 모델은 근거로 계산된 불균형 모멘트와 전단 강도는 하부 철근이 배근된 실험체에 대해 실험결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 하지만 하부철근이 배근되어 있지 않은 경우에는 기준식<sup>(1)</sup>이 타당하지 않음을 보여주었으며, 하부 철근이 배근되어 있지 않은 경우에 새로운 강도 제안식이 필요하다.
- (2) 강선의 배치형태와 중력하중의 크기는 PT 플랫 플레이트의 횡 변위 저항성능에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 강선의 집중 배치된 경우에 비해 분산배치의 경우가 횡 변위 저항성능이 커지는 것으로 나타났다. 따라서 하부철근이 배근되어 있지 않을 경우 강선이 집중배치 되었을 때 휨에 의해 저항하는 강선의 양을 정함에 있어서 유효폭( $c+3h$ )에 대한 재검증이 필요하다.
- (3) ACI-ASCE Committee 423<sup>(3)</sup>에 의한 PT 플랫 플레이트 슬래브-기둥 내부접합부에 의해 계산된 설계 전단 강도는 하부철근이 배근되어 있지 않을 경우에 관해 비교적 높은 값을 보여주었으며, 기준<sup>(1)</sup>에 의한 편심 전단 응력 모델에서 표현한 휨 및 전단에 의해 전달되는 모멘트 전달비율에( $\gamma_i, \gamma_f$ ) 대한 재검토가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년 건설기술 연구 개발사업(과제번호:03산학연 B01-01) 지원으로 수행된 연구결과의 일부임. 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-05)," American Concrete Institute, Detroit, 2005.
2. ACI-ASCE Committee 423.3R-96, "Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons".
3. Mast, P. E., "Stresses in Flat Plate near Columns," ACI Structural Journal, V. 67, No. 10, Oct. 1970, pp. 761-768.
4. 김민남, 하상수, 이리형, "내부 포스트텐션 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부의 내력평가에 관한 연구" 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 25권, 제1호, 2005. 10, pp 409~412.