

무량판 건물의 등가 보 모델

Equivalent Beam Model for Flat-Plate Building

박 수 경*

Park Soo-Kyung,

김 두 영**

Kim Doo-Young,

박 성 무***

Park Sung-Moo

ABSTRACT

Flat-plate buildings are commonly modeled as two-dimensional frames to calculate lateral drift, unbalanced moments, and shear at slab-column connections. For gravity loads, the slab-column frames are analyzed using equivalent column approach, while equivalent beam approach is typical for lateral loads. The equivalent beam approach is convenient for computer analysis, but no rational procedure exists for determining the effective width of floor slabs. At present, the determination of the equivalent slab width and its stiffness is a matter of engineering judgement. To account for cracking, overly conservative assumptions are made regarding the stiffness of the slab. A rational approach is therefore needed to realistically estimate the equivalent slab width and its stiffness for unbalanced moment and lateral drift calculations. Based on the test results of 8 interior slab-column connections, an equivalent beam model is proposed in which columns are modeled conventionally as a function of column and slab aspect ratios and the magnitude of the gravity load. The proposed approach is verified with selected experimental results and is founded to be practical and convenient for analyzing flat-plate buildings subjected to gravity and lateral loading.

1. 서 론

현재 철근 콘크리트조 무량판 건물은 일반적으로 탄성 해석기법을 채용해서 이차원 골조로 구조해석한다. ACI Building Code(ACI 318-89)¹⁾에서는 골조의 면내방향으로 작용하는 하중에 대하여 무량판 건물을 구조해석하

는데 있어서, Corley and Jirsa가 개발한 "등가 골조법"을 채택하고 있다. 동 방법은 슬래브와 기둥 사이의 모멘트 전달을 고려하기 위해서 기둥 강성이 보정되어지는 "Equivalent Column Concept"을 채용하고 있다. 슬래브를 보요소로 모델화하고, 기둥은 슬래브 직상부와 직하부 기둥의 연성(flexibility)과 비틀림(torsional) 부재에 대한 연성의 합으로 연성이 취해지는 등가 기둥으로 모델화한다. 그러나, 동 방법은 수직 하중만을 지지하는 1층의 다스팬 무량판 조합체에 대한 실

* 영남대학교 건축공학과 석사과정

** 대한주택공사 주택연구소 연구원

*** 영남대학교 건축공학과 교수

지진 하중과 같은 수평 하중을 받는 내부 슬래브-기둥 접합부에 있어서 단조 및 반복 가력실험을 포함한다. 이들 접합부에 대한 단면 치수가 표 1에 보여진다. 사용 재료의 물리적인 성질, 슬래브 보강 철근비, 그리고 슬래브에 가해진 수직 하중이 표 2에 보여진다.

모든 시험체는 동일한 조건 하에서 제작하였으며, 플랫 플레이트 건물의 전형적인 내부 접합부를 취하여 모델링한 것이다. 실험 건물시스템은 예상되는 수평력을 저항하도록 설계된 전단벽 시스템과 수직 하중을 지지하는 플랫 플레이트 시스템으로 조합된다. 실험 건물은 슬래브 두께 20cm, 스패ん길이 420cm, 총고 300cm, 그리고 장방향 기둥(60 x 30 cm/cm)을 가지도록 설계하였다. 수직 하중으로는 슬래브 자중 0.86 t/m^2 과 적재하중 0.2 t/m^2 을 갖는다. 시험체에 대한 형상이 그림 1에 보여진다. 시험체는 실험 구조물의 1/2 축소 모델이다. 따라서, 시험체의 슬래브 두께는 10 cm이고, 스패ん길이는 220cm이다. 슬래브의 양단부를 롤러로 지지하기위해서 부가적으로 15 cm씩 확장하였다. 따라서, 슬래브의 단면 치수는 250cmx250cm, 총고는 150cm이다.

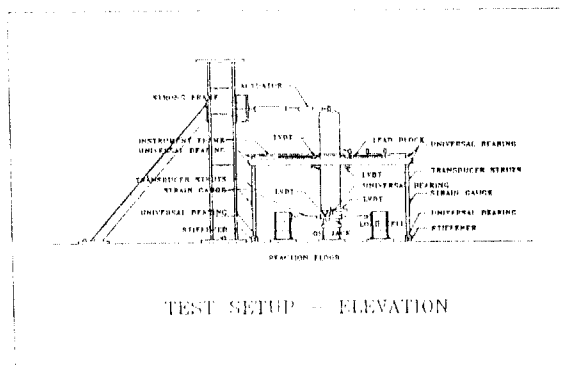


그림 1 시험체 설치도

3. Eccentric Shear Stress Model의 평가

Di Stasio and Van Buren에 의해서 개발된 Eccentric Shear Stress Model이 1971년에 ACI Building Code에 채용되었다. 동 모델에 있어서 직 전단력(direct shear force)과 불균형 모멘트의 조합으로 인한 전단응력은 critical perimeter의 중심축으로부터의 거리에 따라서 선형으로 변화하는 것으로 가정하고 있다. critical perimeter는 기둥 periphery의

표 2 시험체의 사용재료의 성질 및 파괴 모드

Specimens	Reinforcement ratios*, percent/m				f _y kg/cm ²	f' _c kg/cm ²	Gravity loads		Failure mode***	Peak drift, percent
	Slab top		Slab bottom				V _R , tons	V _R /V _c **		
	ρ/l'	ρ/(l ₂ -l')	ρ/l'	ρ/(l ₂ -l')						
LS-1	0.0069	0.0039	0.0049	0.0039	4,686	466	4.46	0.137	F	6.40
LS-2	0.0147	0.0055	0.0049	0.0039	4,686	349	6.86	0.285	F+P	6.40
LS-3	0.0192	0.0061	0.0049	0.0039	4,686	334	9.26	0.327	P	3.20
LS-4	0.0192	0.0061	0.0049	0.0039	4,686	250	9.26	0.351	F+P	7.73
SS-1	0.0070	0.0039	0.0055	0.0039	4,686	274	4.31	0.252	F	5.67
SS-2	0.0152	0.0055	0.0055	0.0039	4,686	342	6.71	0.351	P	5.53
SS-3	0.0193	0.0061	0.0055	0.0039	4,686	346	9.11	0.473	P	3.10
SS-4	0.0193	0.0061	0.0055	0.0039	4,686	343	9.11	0.475	F	6.29

* ρ = 슬래브의 폭 l' 또는 (l₂-l')에 대한 단위길이당 철근비

** V_c = 1.06 A_c √f'_c

*** F는 휨파괴, F+P는 휨+뚫림 전단파괴, P는 뚫림 전단파괴를 나타낸다.

험결과에 근거하고 있기 때문에, 현실적으로 동 방법을 수평 하중을 받는 다층골조의 구조해석용으로 채용하는 것은 불합리하다.

새로운 건물의 설계 및 기존 건물에 대한 평가이든간에 무량판 건물의 구조 해석은 플랫 플레이트를 보 요소로 모델링하도록 요구한다. 현재는 유효 슬래브 폭과 동 강성에 대한 합리적인 선택을 만드는데 있어서 설계자의 판단에 의존하고 있다. 전형적으로, 가정은 건물 거동에 대한 충분히 큰 예측을 주도록 만들어진다.

즉, 무량판 건물을 설계하는데 있어서, 등가 보의 성질(flexural properties)은 일반적으로 유효 강성을 저감함으로써, 슬래브내 선재(先在)하는 균열을 고려하기 위해서 일반적으로 보정하여야 한다. 그러나, 이러한 결정을 만드는데 있어서 설계자에게 도움을 주는 유효한 지침이 없다. 그리고, 수평 하중 하에서 슬래브와 기둥사이의 모멘트 전달메카니즘의 복잡성때문에 유효 슬래브폭과 동 강성에 대한 가정은 매우 주관적이었다. 즉, 패널의 중심선사이 폭에 대하여 1/3-1/2사이의 유효 슬래브폭을 일반적으로 채용하였다. 이때, 불확실한 모든 문제가 보상되는 것으로 가정하였다. 이러한 단순화한 가정은 이들이 안전 설계를 주는데 있어서는 문제가 되지 않으나,

이들 가정은 건물 거동에 있어서 잘못된 예측을 줄 수 있다. 따라서, 무량판 구조물의 실제적인 거동을 예측하는 합리적인 해석 방법을 개발하는 것이 필요하다.

본 논문은 무량판 건물의 설계 및 평가에 있어서 일관성있는 결과를 주는 유효 슬래브 폭을 선정하는데 있어서의 합리적인 근거를 제시한다. 이를 위해서, 슬래브-기둥 접합부에 대하여 저자 및 기보고된 다수의 관련 문헌을 분석 고찰함으로써, 내부 슬래브-기둥 접합부에 있어서의 전단력 및 불균형 모멘트를 산정하기위한, 유효 슬래브폭에 대한 해석 모델을 제안한다. 동 모델은 무량판건물이 일반적인 보-기둥 골조로 모델화되도록 허용하는 "Equivalent Beam Concept"에 근거한다. 동 모델의 큰 잇점은 강도 및 강성의 계산이 동일한 유효 슬래브폭에 근거하고 있다는 것이다. 모델은 저자가 수행한, 내부 접합부의 반복가력실험으로부터 측정된 거동과 해석적으로 예측한 거동을 비교함으로써 입증되어진다.

2. 실험결과와 고찰

저자에 의해서 수행한 내부 슬래브-기둥 접합부에 대한 8개의 실험이 기존의 연구로부터 고찰을 위해서 선택하였다. 이들 실험은

표 1 시험체 단면치수 및 형상비

Specimens	Dimensions, cm									Aspect ratio		
	Slab					Column				l_1/l_2	c_1/l_1	c_2/l_2
	l_1	l_2	h	d_{top}	d_{ave}	c_1	c_2	H				
LS-1	220	220	10	8.5	8	30	30	300	1.0	0.136	0.136	
LS-2	220	220	10	8.5	8	30	30	300	1.0	0.136	0.136	
LS-3	220	220	10	8.5	8	30	30	300	1.0	0.136	0.136	
LS-4	220	220	10	8.5	8	30	30	300	1.0	0.136	0.136	
SS-1	220	220	10	8.5	8	30	15	300	1.0	0.136	0.068	
SS-2	220	220	10	8.5	8	30	15	300	1.0	0.136	0.068	
SS-3	220	220	10	8.5	8	30	15	300	1.0	0.136	0.068	
SS-4	220	220	10	8.5	8	30	15	300	1.0	0.136	0.068	

outside 거리 $d_{ave}/2$ 에 위치한다. 최대전단응력은 식 1에 의해서 산정한다.

$$v_{max} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_{un} (c_1 + d_{ave})}{2 J} \quad (1)$$

식 1에 의해서 산정된 최대 전단응력은 허용응력 $v_c(1.06 \gamma f'_c$ 과 $(0.53+1.06/\beta_c) \gamma f'_c$ 중 작은 값)에 도달할 때, 접합부가 펀칭(punching)에 의해서 파괴되는 것으로 예측되어진다.

직전단력과 불균형 모멘트성분은 슬래브-기둥 골조시스템을 해석함으로써 규명되어진다. 슬래브-기둥 접합부에 있어서의 모멘트 전달 메카니즘은 보-기둥 접합부의 경우와 크게 다르다. 따라서, 강도와 강성에 대한 유효 슬래브폭이 수직 및 수평하중으로 인한 불균형 모멘트와 직 전단력을 산정하기 위해서 정의되어질 필요가 있다. 즉, 접합부에서 전단 응력의 산정에 있어서 정밀도는 슬래브 유효폭에 대한 가정에 좌우된다.

독립적인 슬래브-기둥 접합부에 대한 실험은 직접적으로 유효슬래브폭을 규명하는데 채용될 뿐만 아니라, ACI Eccentric Shear Stress Model을 평가하는데 채용될 수 있는, 전단력 및 관련 불균형모멘트 둘다를 줄 수

있다. Eccentric Shear Stress Model에 대한 ACI의 설계식은 내부슬래브-기둥 접합부의 불균형 모멘트 성능 및 종국 전단 능력을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_{ACI} = \left(v_c - \frac{V_u}{A_c} \right) \frac{2 J}{\gamma_v (c_1 + d_{ave})} \quad (2)$$

$$V_{ACI} = A_c \left[v_c - \frac{\gamma_v M_{un} (c_1 + d_{ave})}{2 J} \right] \quad (3)$$

본 논문에서 검토된 슬래브-기둥 접합부의 경우, 식 1에 의해서 산정한 v_{max} 와 ACI에 의해서 허용된 최대 허용 전단응력 v_c 의 비가 표 3의 8 행에 보여진다. 동 비의 평균치와 표준 편차는 각각 0.73과 0.12이다. 식 2에 의해서 계산된 모멘트 M_{ACI} 에 대한 측정된 불균형 모멘트 M_{un} 의 비는 표 3의 5 행에 보여진다. 평균치는 0.67이고, 표준편차는 0.16이다. 식 3에 의해서 계산된 전단력 V_{ACI} 에 대한 측정된 gravity shear V_u 의 비가 표 3의 7 행에 보여진다. 평균치는 0.62이고, 표준편차는 0.18이다.

슬래브-기둥 접합부의 실험 결과는 수직 하중의 크기와 기둥단면의 치수, 그리고 슬래브 상부 철근의 철근비가 내부 접합부의 강도

표 3 실험 및 해석 결과의 비교

1 Specimens	2 Ultimate transferred		6 ACI 318-89					9 Improved	
	V _u tons	M _{un} t.m	M _{ACI} t.m	3/4	V _{ACI} tons	2/6	V _{max} /V _c	V _{max} /V _c	
LS-1	4.46	3.408	7.480	0.46	17.18	0.26	0.54	-	
LS-2	6.86	2.800	5.512	0.51	15.33	0.45	0.65	0.80	
LS-3	9.26	2.008	4.577	0.44	17.28	0.54	0.66	0.77	
LS-4	9.26	2.488	3.560	0.70	12.61	0.73	0.84	-	
SS-1	4.31	2.360	3.134	0.83	7.48	0.58	0.82	-	
SS-2	6.71	2.216	3.037	0.81	10.07	0.67	0.82	1.00	
SS-3	9.11	1.880	2.479	0.84	11.56	0.79	0.87	1.02	
SS-4	6.71	2.520	3.044	0.91	8.85	0.76	0.89	-	

와 파괴 모드에 영향을 미친다는 것을 보여준다. 본 연구에서 고찰한 접합부의 관측된 파괴모드에 근거하면, 파괴메카니즘은 3개 그룹으로 분류할 수 있다. 표 2에 보여지는 것처럼, gravity shear ratio $V_g/(1.06 A_c \sqrt{f_c'})$ 에 따라 휨, 휨-전단, 그리고 전단 파괴로 분류할 수 있다.

gravity shear ratio가 0.25 이하일 때, 휨 파괴가 접합부의 거동을 지배한다. 측정된 전단응력은 선재하는 균열을 포함하는 시험체를 제외하고는 ACI 318-89에 따라 산정한 전단강도보다 20-40 % 작다. 동 비가 0.25와 0.30사이에 있는 경우에는 뚫림 전단 파괴가 슬래브 철근의 항복을 수반하는 높은 수평처짐에서 발생한다. 최대 전단 응력과 전단력을 통해서 전달된 일부 모멘트에 있어서 기둥의 형상비와 휨보강 철근비의 영향을 뚫림 파괴된 실험결과에만 한정하면, 기둥 형상비가 2인 경우보다 1인 경우에 있어서 더 크게 과소평가됨을 알 수 있으나, 휨보강 철근의 영향은 볼 수 없다. 표 3의 15행에 보여지듯이, 최대전단응력은 column strip 내 상부철근의 휨철근비가 증가할 때, 증가하는 경향이 있다. 또한, 전단을 통해서 전달된 모멘트 일부는 column strip 내 상부 철근의 휨철근비가 증가할 때, 감소함을 보여준다.

모멘트전달계수 γ_v 는 허용 전단응력으로 취해지는 최대 전단응력과 함께 측정된 종국 모멘트와 전단력을 채용함으로써 식 1로부터 산정할 수 있다. 데이터의 "best fit"에 근거하여 모멘트전달계수 γ_v 에 대한 ACI 설계식은 다음과 같이 휨철근비의 영향을 포함하도록 보정할 수 있다.

$$\gamma_v = 1.1 - \frac{1}{1 + k_1 \sqrt{(b_1/b_2)}} \quad (4)$$

여기서, k_1 는 기둥의 형상비의 영향을 고려해서 정해지는 계수로, $b_1/b_2 = 1$ 이면 7/8

이고, $b_1/b_2 = 2$ 이면 3/4이다. $1 < b_1/b_2 < 2$ 인 경우, 직선보간법으로 구한다.

편칭에 의해서 파괴될 것으로 기대되는 접합부의 경우(gravity shear ratio가 0.15이상일 때), 표 3의 9 행에 보여지듯이 보정된 모멘트전달계수가 최대 전단응력을 양호하게 예측함을 알 수 있다. 허용 최대전단응력에 대한 측정된 최대 전단 응력의 비의 평균치는 0.90이고, 표준편차는 0.11이다. gravity shear ratio가 0.25 이하일 때 접합부의 종국 전달능력은 "Equivalent Beam Model"에 의해서 예측될 수 있다. 내부 접합부의 유효처짐능력과 gravity shear ratio 사이의 관계가 표 2에 보여진다. 수평처짐능력은 gravity shear ratio가 증가할 때 급격하게 저하한다. 따라서, 내부 접합부가 편칭에 의해서 파괴되는 최대 처짐비는 gravity shear ratio로부터 예측될 수 있다.

4. 결 론

1. 단조 및 반복 하중을 받는 내부 슬래브-기둥 접합부에 대한 다수의 실험결과를 분석하면, ACI Building Code에서 채용하고 있는 Eccentric Shear Stress Model은 상이한 수직 하중과 슬래브 보강철근비에 대한 일관성없는 결과를 준다는 것을 알 수 있다. 또한, Equivalent Column Approach는 수평 및 수직의 조합하중을 받는 무량판 건물의 거동을 예측하는데 있어서 적절하지 않음을 보여준다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318-89/ACI 318R-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989, 353 pp.