

플랫 플레이트 슬래브 해석을 위한 강성감소계수 제안

Stiffness Reduction Factor for Flat Plate Slabs

박영미

Park, Young Mi

한상환**

Han, Sang Whan

Abstract

The purpose of this study is to propose the stiffness reduction factor for flat plate slabs under lateral loads. Current design code (e.g., ACI 318-05) requires considering the effects of cracks for calculating slab stiffness under lateral loads. This study collected the test results of 20 interior slab-column connections, from which stiffness reduction in each test was estimated with respect to the ratio of applied moment to cracking moment (M_u/M_{cr}). Based on collected data, this study proposed equations for calculating stiffness reduction with respect to M_u/M_{cr} . To verify the proposed equations, this study conducted the experimental test of interior slab-column connections under quasi-static cyclic loading. From the test, load-deformation curve is compared to that obtained from effective beam width method with the proposed equation for the stiffness reduction. It is shown that the effective beam width method with the proposed equation for stiffness reduction predicts accurately the test results.

1. 서론

횡하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브 시스템의 해석은 일반적으로 유한요소해석법, 유효보폭법, 그리고 등가골조법을 이용한다. ACI 318-05¹⁾에서는 이러한 방법을 이용하여 해석을 할 경우, 슬래브의 강성을 계산할 때 균열의 영향을 고려할 것을 요구한다. 슬래브의 균열을 고려하지 않을 경우, 슬래브의 실제 강성을 과대평가하게 되어 슬래브에 분배되는 모멘트는 실제보다 증가할 수 있고, 전체 골조의 횡변위는 과소평가될 수 있다.

Vanderbilt와 Corley²⁾, Moehle et al^{3),4)}는 슬래브의 강성감소계수를 1/3 또는 1/4로 제안하였다. 그리고 ACI 318-05(R13.5.1.2)¹⁾에서는 슬래브 강성을 1/2~1/4로 저감시키는 것이 적절하다고 제안하고 있다. 그러나 이러한 계수는 너무 단순하여 기둥과 슬래브의 기하학적 형상, 중력하중의 크기, 횡하중의 크기에 대한 영향을 명확하게 고려하지 않았다.

Grossman⁵⁾은 Hwang과 Moehle⁶⁾의 실험 결과를 바탕으로 골조의 횡변위 크기와 접합부 위치에 따른 강성감소계수를 제안하였으나, 중력하중 크기의 변화를 반영하지 못한다.

Luo와 Durrani⁷⁾는 ACI 318-05¹⁾의 유효단면2차모멘트(I_e)를 이용하여 강성감소계수를 제안하였으나, 균열단면2차모멘트(I_{cr})의 계산에는 슬래브 철근량을 포함하므로, 철근 배근량이 결정되지 않은 설계단계에서 사용하기가 어렵다.

본 연구에서는 기존 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부의 내부 실험체 20개를 분석하여, 강성감소

* 정회원, 한양대학교 건축환경공학과 박사과정

** 정회원, 한양대학교 건축환경공학과 부교수

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10722-0)지원으로 수행되었음.

에 영향을 주는 변수를 파악하고, 실험 결과를 비선형 회귀분석하여 강성감소계수를 제안하였다.

2. 강성감소에 영향을 미치는 변수

본 연구에서는 기존의 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부 실험체를 대상으로 강성감소에 영향을 미치는 변수를 분석하였다. 균열의 지배적인 원인이 슬래브에 작용하는 모멘트라고 할 수 있고, 강성감소계수는 모멘트 크기에 직접적으로 영향을 받는다고 할 수 있다. 작용모멘트가 콘크리트 부재의 강성에 영향을 미치는 것은 이미 ACI 318-05에서 처짐 계산을 위한 보의 유효강성($E_c I_e$) 계산에 반영되어 있으며, 유효단면2차모멘트(I_e)는 균열모멘트와 작용모멘트의 비(M_w/M_o)를 계산식에 포함한다.

본 연구는 슬래브의 강성감소 영향 변수를 작용모멘트와 균열모멘트의 비(M_w/M_o)로 결정하였고, 제안한 강성감소계수는 유효보폭모델에 적용하였다. 유효보폭모델은 플랫 플레이트 슬래브 해석법으로 Banchick⁸⁾이 제안한 유효보폭계수 식 (1)을 사용하였다.

$$\alpha_i = \left(5 \frac{c_1}{L_2} + \frac{1}{4} \frac{L_1}{L_2}\right) \frac{1}{1-\nu^2} \quad (1)$$

여기서, c_1 과 L_1 는 하중이 작용하는 방향의 기둥 폭과 슬래브 길이, L_2 는 L_1 에 수직인 슬래브 폭, ν 는 포아송 비이다.

3. 플랫 플레이트 슬래브의 강성감소계수

횡하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브의 강성감소계수를 제안하기 위하여 정적 반복 횡가력하에서 실험한 내부 접합부 실험체를 대상으로 하였다. 표 1은 내부 접합부 실험체의 치수, 물성치, 철근비가

표 1. 내부 접합부 실험체의 치수, 물성치 그리고 철근비

Researchers	Label	Dimensions (cm)							f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Reinforcement ratio (%)			
		Slab				Column					Slab top		Slab bottom	
		l_1	l_2	h	d_{ave}	c_1	c_2	H			$c_2 + 3h$ (within)	$c_2 + 3h$ (out side)	$c_2 + 3h$ (within)	$c_2 + 3h$ (out side)
Morrison & Sozen ⁹⁾	S1	183	183	7.6	6.1	30.5	30.5	112	45.8	323	0.65	0.65	0.65	0.65
	S2	183	183	7.6	6.1	30.5	30.5	112	35.1	330	0.98	0.98	0.98	0.98
	S3	183	183	7.6	6.1	30.5	30.5	112	33.9	335	1.31	1.31	1.31	1.31
	S4	183	183	7.6	6.1	30.5	30.5	112	34.9	320	0.98	0.98	0.98	0.98
	S5	183	183	7.6	6.1	30.5	30.5	112	35.2	340	0.98	0.98	0.98	0.98
Robertson ¹⁰⁾	8I	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	39.3	524.7	0.83	0.31	0.36	0.31
Robertson & Durrani ¹⁰⁾	1	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	38.0	500.5	0.83	0.31	0.36	0.31
	2C	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	33.0	500.5	0.83	0.31	0.36	0.31
	3SE	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	44.0	500.5	0.83	0.31	0.36	0.31
	4S	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	44.0	500.5	0.83	0.31	0.36	0.31
	5SO	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	38.0	500.5	0.83	0.31	0.36	0.31
	6LL	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	32.2	524.7	0.83	0.31	0.36	0.31
	7L	290	198	11.4	9.2	25.4	25.4	154	30.8	524.7	0.83	0.31	0.36	0.31
Pan & Moehle ⁴⁾	1	366	366	12.2	10.3	27.4	27.4	195	33.3	471.6	0.76	0.28	0.29	0.14
	3	366	366	12.2	10.3	27.4	27.4	195	31.4	471.6	0.76	0.28	0.29	0.14
Zee & Moehle ¹¹⁾	INT	183	183	6.1	5.2	13.7	13.7	91	26.2	435.1	0.80	0.26	0.60	0.13
Farhey et al ¹²⁾	1	269	269	8.0	6.0	30	20	104	35.1	457.6	0.62	0.36	0.41	0.29
	2	269	269	8.0	6.0	30	20	104	35.1	457.6	0.62	0.36	0.41	0.29
	3	269	269	8.0	6.0	30	20	104	15.0	457.6	0.62	0.36	0.41	0.29
	4	269	269	8.0	6.0	30	12	104	15.0	457.6	0.62	0.36	0.41	0.29

나타나 있다. 앞 절에서 언급한 것과 같이 작용모멘트와 균열모멘트의 비(M_a/M_{cr})를 변수로 하여 실험체의 강성저감 경향을 찾았다. 여기서 M_a 는 기둥면의 중력하중과 횡하중에 대한 모멘트의 합이다.

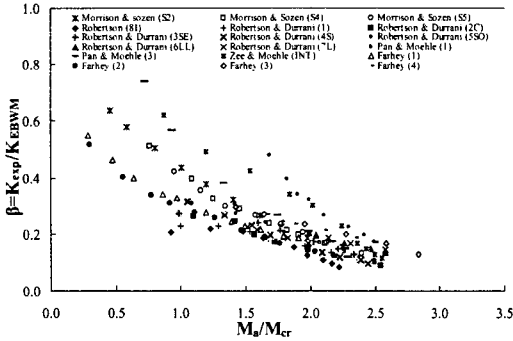


그림 1 K_{EBWM} 에 대한 K_{exp} 의 강성저감 관계

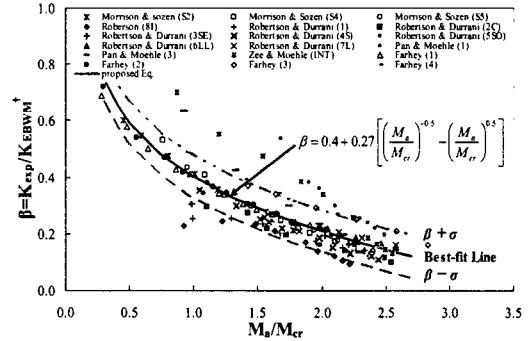


그림 2 K_{EBWM}^{\dagger} 에 대한 K_{exp} 의 강성저감 관계

중력하중에 의한 모멘트(M_g)는 발표된 결과를 인용하거나, 유한요소해석¹³⁾으로부터 얻었다.

그림1과 2는 유효보폭모델로부터 얻은 강성(K_{EBWM})과 유효강성 $0.7E_cI_g$ 을 갖는 기둥을 사용한 유효 보폭모델로부터 얻은 강성(K_{EBWM}^{\dagger})을 각각 초기 강성으로 설정하여 각 실험체들의 실제 강성(K_{exp})의 관계를 나타내었다. 그림1과 2는 유사한 경향을 보이나, 그림2의 데이터 분산이 더 작음을 알 수 있다.

식 (2)의 강성감소계수(β)는 MATLAB¹⁴⁾의 서브프로그램인 fmins.m을 이용하여 비선형 회귀분석을 수행한 결과로 얻어졌다. 회귀분석하여 얻어진 강성감소계수(β)를 평균값으로 정하고, 실험 데이터를 분석한 결과 표준편차(σ)는 0.07, 변동계수(COV)는 0.27, 상관계수(ρ)는 0.85를 나타내었다.

$$\beta = 0.4 + 0.27 \left[\left(\frac{M_a}{M_{cr}} \right)^{-0.5} - \left(\frac{M_a}{M_{cr}} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

여기서, M_a 는 작용모멘트(중력하중+횡하중에 대한 모멘트), M_{cr} 은 유효보폭에 대한 균열모멘트이다.

4. 슬래브-기둥 접합부에 대한 강성감소계수 검증

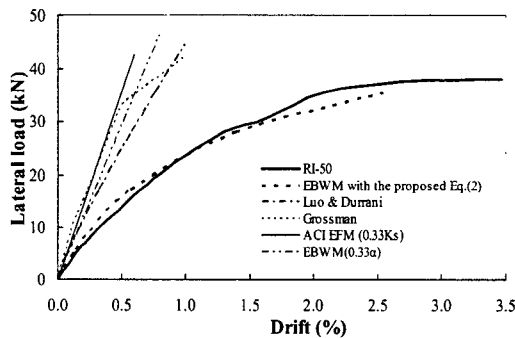


그림 3. RI-50 ($V_g/V_c=0.37$)

그림 3은 본 연구에서 수행한 내부 접합부(RI-50)의 하중 변위 실험결과와 제안된 강성감소계수 식 (2)을 사용한 해석결과를 나타내었다. 또한 그림 3은 슬래브에 강성감소계수 1/3을 적용한 ACI 등가골 조모델¹⁾과 유효보폭모델⁸⁾, Grossman⁵⁾의 제안식, 그리고 Luo와 Durrani⁷⁾의 제안식을 이용한 해석결과도 나타내었다. 이들의 해석결과는 모두 강성을 과대평가한다. 특히 제안된 강성감소계수 식을 제외한

다른 연구자들의 강성감소계수는 실험체의 횡변위의 크기에 따라 변화하는 것을 반영하지 못한다.

5. 결 론

플랫 플레이트 슬래브 접합부 실험체를 분석하여 강성감소 연구를 진행하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 슬래브 균열을 고려하지 않을 경우, 슬래브의 실제 강성을 과대평가하게 되어 구조체의 내력(모멘트, 전단력)과 변위를 합리적으로 예측할 수 없으므로 균열에 의한 강성감소의 고려는 매우 중요하다.
- (2) 강성감소는 슬래브 균열에 기인하고, 균열의 지배적인 원인은 슬래브에 작용하는 모멘트라고 할 수 있으므로, 강성감소의 주된 변수는 작용모멘트와 균열모멘트의 비(M_o/M_{cr})라 할 수 있다
- (3) 슬래브의 유효폭에 대하여 M_o/M_{cr} 을 변수로 하고, 유효강성 $0.7E_cI_g$ 을 기둥에 적용하여 플랫 플레이트 슬래브-기둥 접합부 실험결과를 분석한 후, 비선형 회귀분석을 통하여 강성감소식을 제안하였다.
- (4) 제안된 강성감소식을 이용한 유효보폭모델의 해석결과는 본 연구에서 수행한 내부 접합부(RI-50)의 하중 변위 곡선과 잘 일치하였으며, 기존 연구자들의 제안식보다 실험결과들을 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. ACI Committe 318 (2005), "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary" American Concrete Institute, Detroit.
2. Vanderbilt, M. D., and Corley, W. G., (1983) "Frame Analysis for Concrete Buildings," Concrete International : Design & Construction, V.5, No.12, Dec. pp. 33-43.
3. Moehle, J. P., and Diebold, J. W., (1985) "Lateral Load Response of Flat Plate Frame," ASCE, V.111, No.10. Oct. pp. 2149-2165.
4. Pan, A. P., and Moehle, J. P., (1988) "Reinforced Concrete Flat Plates under lateral Loading: An Experimental Study Including Biaxial Effects," Report No. UCB/EERC88/16, College of Engineering, University of California at Berkeley, Oct. 262pp.
5. Grossman, J. S., "Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slabs in Slab-Column Frames," ACI Structural Journal, V.94, No. 2, March-April. 1997, pp. 181-196
6. Hwang, S. J., and Moehle, J. P., (1993) "An Experimental study of Flat-Plate Structures under Vertical and Lateral Loads," No. UCB/EERC-93/03, University of California, Berkeley, Feb.
7. Luo, Y. H., and Durrani, A. J., (1995) "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings - Part I: Interior Connection," ACI Structural Journal, Jan-Feb. pp. 115-124.
8. Banchik, C. A., (1987) "Effective Beam Width Coefficients for Equivalent Frame Analysis of Flat-Plate Structures." ME thesis, University of California at Berkeley, Cali. May. 56pp.
9. Morrison, D. G., and Hirasawa, I. and Sozen, M. A., (1983) "Lateral-Load Test of RIC Slab-Column Connection. Journal of Structural engineering," ASCE, V.109, No. 11, Nov. pp. 2698-2714
10. Robertson, I. N., and Durrani, A. J., (1990) "Seismic Response of Connections in Indeterminate Flat-Slab Subassemblies" Structural Research at Rice, Report No.41, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, July, 266pp.
11. Zee, H. L., and Moehle, J. P., (1984) "Behavior of Interior and Exterior Flat Plate Connections Subjected to Inelastic Load Reversals" Report No. UCB/EERC-84/07, College of Engineering, University of California at Berkeley, Aug. 130pp.
12. Farhey, D. N., Adin, M. A., and Yankelevsky, D. Z., (1993) "RC Flat Slab-Column Subassemblages under Lateral Loading," Journal of Structural Engineering, ASCE, V.119, No.6, June. pp.1903-1916
13. Midas IT (2004), Midas/GENw user's manual (Version 6.3.2). Seoul, Korea
14. The MathWorks, Inc (2000) Matlab 6.0 (Release 12). Natick, USA