

플랫 플레이트 내부 접합부의 강도산정모델

Strength Prediction Model for Flat Plate-Column Connections

최 경 규** 박 홍 군* 안 귀 용***

Choi, Kyung Kyu Park, Hong Gun Ahn, Kwi Yong

ABSTRACT

The failure of flat plate connection is successive failure process accompanying with stress redistribution, hence it is necessary to compute the contributions of each resistance components at ultimate state.

In the present study, the interactions of resultant forces at each faces of connection, i.e. shear, bending moment and torsional moment are considered in the assessment of strength of slab. As a result, the strength prediction model for connection is made up as combination of bending resistance, shear resistance and torsional resistance. The proposed method is verified by the existing experimental data and numerical data of continuous slabs.

1. 서 론

플랫 플레이트는 지진 등 횡력에 대해 접합부의 거동이 매우 취약적이며, 따라서 접합부의 강도 및 연성능력에 대해 충분한 연구가 필요하다. 최근에 수행된 연구²⁾에 의하면, 슬래브-기둥 접합부의 극한상태의 거동 및 파괴과정에 대해 다음의 사실이 규명되었다.

첫째, ACI 및 국내 콘크리트 설계기준¹⁾에서 제시하는 공칭성능에 전단응력이 도달하더라도 접합부 전체가 일시에 파괴되지는 않는다. 슬래브-기둥의 접합부는 교차의 부정형 구조물이므로 전면이 전단파괴되더라도 응력이 재분배되며 따라서 전체강도가 유지될 수 있다. 연구결과 접합부의 파괴는 휨 및 전단저항성분들의 연속적인 붕괴과정으로 진행되는 것으로 확인되었다.

둘째, 접합부에서 각 저항성분들의 거동과 최대치시점이 상이하다. 접합부의 네면에는 전후면의 휨모멘트와 측면에서의 뒤틀림모멘트 그리고 전후면의 전단력에 의한 저항모멘트가 존재하며, 각각은 M_{Ff} , M_{Fb} , M_T , M_{Sf} , M_{Sb} 으로 기호화한다. (Fig. 1) 이때 슬래브의 전체강도는 각 저항성분 별 최대강도를 단순히 합한 값과는 다르다. 즉 슬래브의 강도를 구하기 위해서는 극한상태에서의 저항모멘트 크기를 각각 산정하여야 한다.

* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

** 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 박사과정

*** 정회원, 서울대학교 대학원 건축학과 석사과정

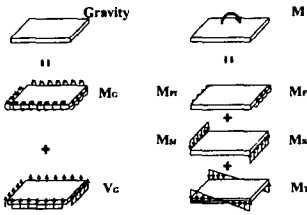


Fig. 1 Resistance moment components at connection

셋째, 슬래브에 중력하중을 재하하는 방식과 경계조건에 따라 슬래브의 거동이 크게 영향을 받는다. 따라서 기존 실험 결과에만 근거해서 수행된 강도 및 연성도 산정연구는 타당하지 않다.

본 연구에서는 이전 연구에서 수행된 연속 플랫 플레이트에 대한 비선형 수치해석 결과²⁾를 바탕으로, 접합부 파괴메카니즘에 근거한 강도산정모델을 제안할 것이다. 또한 해석결과 및 기존의 실험연구결과와 비교하여 이 모델의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 강도산정모델의 개발

플랫 플레이트의 접합부의 각면에서 발휘되는 각 저항모멘트를 산정하기 위해서는 각 면에 작용하는 전단력과 모멘트 등 각 반력의 상호작용을 고려해야 한다(Fig. 1) 즉 전면 및 후면에서는 극한상태의 전단력과 휨모멘트를 그리고 측면에서는 중력하중에 의한 휨모멘트와 뒤틀림모멘트 간의 상호작용이 강도산정과정에 반영되어야 한다.

2.1 접합부 전후면의 전단력에 의한 저항모멘트 산정

극한상태에서 슬래브 전후면의 전단성능은 압축대의 길이와 밀접한 관계에 있다. 극한상태에서는 휨모멘트에 의해 이미 전후면의 인장대에 균열이 발생하게 되며, 결국 슬래브 두께 전체가 아니라 압축대 c_u 에 의해서만 전단저항이 발휘되기 때문이다. 본 연구에서는 전후면의 평균전단성능을 분석한다.

전면과 후면에서 극한상태 압축대의 길이를 계산하기 위해, $0.85f_{ck}$ 의 수직응력이 직사각형태의 응력블럭을 이룬다고 가정하였다. 이 경우 평형관계로부터 전후면의 압축대 c_{uf} 와 c_{ub} 를 계산할 수 있다.

참고문헌 (2)에 제시된 해석모델의 부재형상 및 재료특성을 이용하여 전후면의 압축대 c_{uf} , c_{ub} 그리고 전후면의 전단성능 v_u 를 구하면 Fig. 2의 관계를 이루게 되며, c_u/h 와 v_u/v_u 는 식 (1)의 상관관계를 이루게 되며, 따라서 전후면의 전단력에 의한 모멘트의 총합 M_S 는 식 (2)로 계산된다.

$$\frac{v_c}{v_u} = 1.11 \frac{c_u}{h} + 0.0355 \quad \text{단, } c_u = (c_{uf} + c_{ub})/2 \text{이다.} \quad (1)$$

$$M_S = M_{Sf} + M_{Sb} = v_u \cdot \left[\frac{c_{uf} + c_{ub}}{2} (c_2 + d) \right] \cdot (c_1 + d) \quad (2)$$

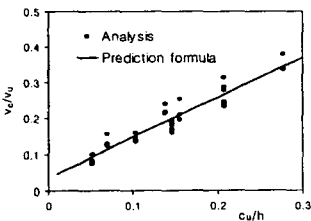


Fig. 2 Relationship between v_c/v_u and c_u/h

2.2 접합부 전후면의 휨모멘트 산정

Fig. 4의 응력분포가정에 따라 극한상태에서의 수직응력을 f_{ck} 로 가정한다. 이 때 전후면의 휨모멘트 M_{Ff} 와 M_{Fb} 로는 공칭강도를 그대로 사용한다.

2.3 접합부 측면의 뒤틀림모멘트 산정

슬래브의 측면에서는 휨모멘트가 재하되더라도 휨모멘트가 더 이상 증가하지 않기 때문에, 중력하중에 의한 휨모멘트가 크지 않으면 극한상태에서도 측면 전체가 전단응력을 발휘한다. 그러나 측면의 하단부에는 중력하중에 의해 재하된 수직응력

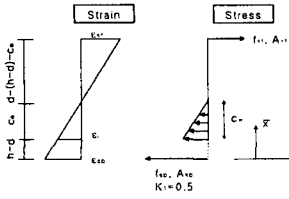


Fig. 3 Stress and strain relationship due to gravity load in side face of connection

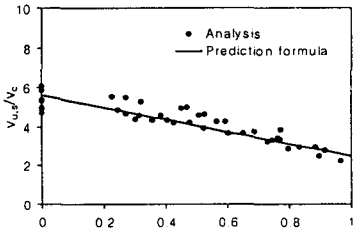


Fig. 4 Relationship between σ_e/f_{ck} and $v_{u,s}/v_c$

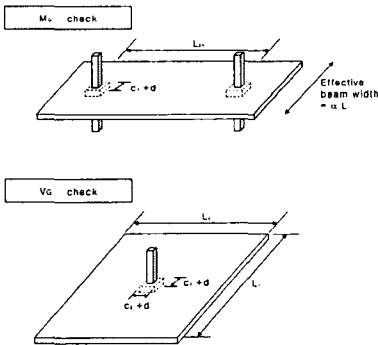


Fig. 5 Tributary area for M_G and V_G

σ_e 가 계속 존재하게 되고 결국 하단부에서 최대 전단응력이 발생하게 되므로, 측면의 극한 전단성능 산정시 σ_e 를 반드시 고려해야 한다. 측면에서 중력하중에 의해 재하된 수직응력 σ_e 를 계산하기 위해, 압축철근을 고려하여 Fig. 3과 같은 변형을 및 응력분포를 가정하였다. 평형방정식으로부터 중력하중에 의한 압축대 c_e 가 유도되며, 압축대의 중심은 \bar{x} 를 계산할 수 있다.

이때 중력하중에 의한 압축응력 σ_e 는 모멘트 평형방정식 식 (3)에 의해 식 (4)으로 정리된다. 여기서 M_G 는 중력하중에 의해 측면에 작용하는 휨모멘트를 지칭한다.

$$M_G = A_s f_s (d - \bar{x}) = A_s \left[\frac{h - c_e}{c_e} \sigma_e \frac{E_s}{E_c} \right] (d - \bar{x}) \quad (3)$$

$$\sigma_e = \frac{E_c}{E_s} \frac{c_e}{A_s (d - c_e) (d - \bar{x})} M_G \quad (4)$$

극한상태에서 측면에 작용하는 전단응력 $v_{u,s}/v_c$ 는 식 (5)과 같이 중력하중과 횡력에 의한 두 전단응력성분의 합으로 구성된다. 여기서 $V_{G(side)}$ 와 M_T , 그리고 J 는 각각 중력하중에 의해 측면에 작용하는 전단력, 측면에서의 뒤틀림 모멘트, 측면의 뒤틀림저항상수를 의미한다.

$$v_{u,s} = \frac{V_{G(side)}}{(c_1 + d)h} + \frac{M_T(c_1 + d)/2}{J} \quad (5)$$

참고문헌 (2)에 제시된 해석모델의 부재형상 및 재료특성을 식 (4)과 (5)에 적용하여 중력하중에 의한 측면의 압축응력 σ_e 와 극한상태의 전단응력 $v_{u,s}$ 를 구하면 Fig. 4의 관계를 이루게 된다. 단, 식 (5)과 (6)에서 M_G 와 $V_{G(side)}$ 그리고 M_T 의 값으로는 수치해석의 결과를 이용하였다. σ_e/f_{ck} 와 $v_{u,s}/v_c$ 는 식 (6)의 상관관계를 이루고 있다.

$$\frac{v_{u,s}}{v_c} = 5.60 - 3.13 \frac{\sigma_e}{f_{ck}} \quad (6)$$

한편, 측면의 전단성능을 식 (6)의 관계로부터 추정하기 위해서는 중력하중에 의해 측면에 작용하는 휨모멘트 M_G 가 먼저 산정되어야 한다. 본 연구에서는 Allen의 연구에서 제안된 유효보폭법³⁾에 기초해서 M_G 를 추정하고자 한다.

Fig. 5에서 중력하중에 의한 측면의 휨모멘트 M_G 는 유효보폭 αL_1 에 작용하는 전체모멘트 중 휨모멘트의 비율 γ_f 만큼 작용하게 되므로 식 (7)로 정리된다. γ_f 로는 수치해석의 평균적 결과로 도출된 0.4를 사용하도록 한다. 이때 상부철근이 항복

할 때의 항복모멘트 M_y 가 M_G 의 상한치가 된다.

$$M_G = \gamma_f \frac{w(aL_1)L_2^2}{12} = \gamma_f \frac{(aL_1)L_2^2}{12[L_1L_2 - (c_1+d)(c_2+d)]} \cdot [v_c 2(c_1+c_2+2d)d] \left(\frac{V_G}{V_C}\right) \leq M_y (= A_s f_y (d - \bar{x})) \quad (7)$$

측면에서의 뒤틀림 모멘트 M_T 는 식 (8)에 의해 계산된다. 여기서 중력하중에 의해 측면에 작용하는 $V_{G(side)}$ 로는 $V_G/4$ 를 사용했으며, J 는 측면의 뒤틀림저항상수이다. 최종적으로 접합부에서의 극한강도는 파괴시점에서 발휘되는 전후면의 저항모멘트 M_S , M_F 그리고 측면에서의 뒤틀림모멘트 M_T 의 조합으로 식 (9)으로 산정되된다.

$$M_T = \left[v_{u,s} - \frac{V_{G(side)}}{(c_1+d)h} \right] \frac{2J}{c_1+d} \quad (8)$$

$$M_n = M_S + M_F + M_T \quad (9)$$

3 강도산정모델의 검증

3.1 연속 슬래브의 강도산정

제안된 강도산정모델을 참고문헌 (2)의 해석모델에 대해 적용한 결과 산정강도 대비 해석강도가 평균 1.01, 표준편차 7.3 %로 매우 정확하게 나타났다. Fig. 6에는 ACI 설계기준에 제시된 강도산정식과 본 강도산정모델의 추정결과를 비교하고 있는데, ACI 강도식은 전반적으로 큰 편차를 보이는 것으로 확인된다.

3.2 기존 시험체의 강도산정

제안된 강도산정모델의 유효성을 검증하기 위해 기존 실험에 대해 본 모델을 적용하였다. 시험체에 대한 강도산정 과정과 실험강도와와의 비교는 Table 1에 정리되어 있다. 다만 지면관계상 일부의 시험체에 대한 산정과정만 제시하였다.

Fig. 7과 Table 1에 제시된 바처럼, 산정강도 대비 실험강도는 평균 0.812, 표준편차 10.1 %로써 강도산정모델이 ACI모델보다는 상대적으로 정확한 추정능력을 가진 것으로 나타났다. 그러나 실험결과는 산정강도 보다 대략 20 % 정도 작은 것으로 나타났다. 이 경향은 이전 연구²⁾에서 이미 확인된 바 있는데, 기존시험체에 대해 중력하중과 경계조건을 연속슬래브 조건으로 변경

해서 수치해석한 결과 강도가 크게 증가하게 되었고, 주요 원인은 다음과 같다.

첫째, 실험과정에서는 연속 슬래브에 재하되는 중력하중을 정확히 실현하지 못했다. 만약 중력하중을 기둥의 책업 등의 방식으로 집중하중으로 재했다면, 비록 접합부에 동일한 전단력이 재하되더라도 연속 슬래브 조건에서보다 훨씬 큰 휨모멘트 M_G 가 슬래브의 네면에 작용하게 된다. 따라서 실험에서 전면의 휨모멘트 M_F 가 조기에 최대

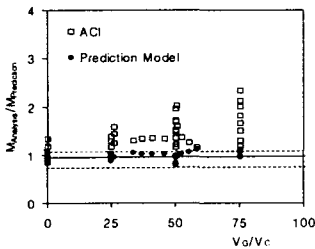


Fig. 6 Strength prediction of slab-column connections : Continuous slab

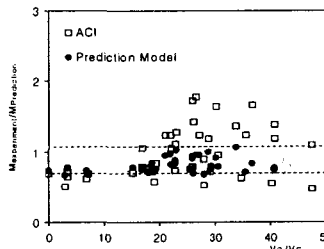


Fig. 7 Strength prediction of slab-column connections : Experiment

Table 1 Calculation the strength of specimens

Specimen		Strength Component at Front/Back face				Strength Component at Side face			Total Strength
		c_u/h	v_u	$M_{S_{Prediction}}$	$M_{F_{Prediction}}$	σ_e/f_{ck}	$v_{u,s}$	$M_{T_{Prediction}}$	$\frac{M_{Experiment}}{M_{Prediction}}$
Morison and sozen ¹⁴⁾	S1	0.053	2.221	1213	517	0.021	1.135	3339	0.676
	S2	0.106	1.192	1311	778	0.019	0.995	2928	0.773
	S3	0.149	0.895	1381	1034	0.016	0.981	2884	0.777
	S4	0.095	1.295	1272	684	0.047	0.969	2834	0.741
	S5	0.109	1.169	1320	799	0.093	0.935	2696	0.779
Islam and Park ¹¹⁾	1	0.121	1.020	1011	807	0.206	0.796	1853	0.831
	2	0.109	1.200	1068	854	0.182	0.882	2061	0.948
	3C	0.099	1.246	1007	726	0.193	0.841	1962	0.970
Robertson ¹²⁾	8I	0.130	1.161	2112	2278	0.109	1.047	4326	0.765
Mean									0.812
Standard deviation									0.101

에 도달하게 되고 측면에서도 뒤틀림모멘트성능 M_T 가 감소하게 된다.

둘째, 실험에서는 중력하중의 재하과정에서 측면에 직교하는 회전변위가 발생하게 되는데, 이는 연속 슬래브조건에 부합되지 않는다. 만약 측면의 회전이 허용된다면 휨모멘트가 접합부에 집중되게 되고 따라서 측면의 M_C 가 증가하며 뒤틀림모멘트성능 M_T 는 크게 감소되게 된다.

셋째, Farhey⁶⁾를 비롯한 많은 실험에서는 슬래브의 전후면과 양 측면의 경계조건을 비대칭적으로 설치하는 경우가 있는데 이때 접합부의 전후면에 상대적으로 전단력이 집중되게 된다. 따라서 전면이 조기에 전단파괴되므로 연속 슬래브조건에서 도출된 M_S 만큼의 성능발휘가 되지 못한다.

Farhey⁷⁾, Mochle¹⁵⁾, Ghali⁸⁾의 시험체에 대해 강도산정모델을 수정적용하였다. 그 결과 수정강도 대비 실험강도는 수정전 0.824에서 수정모델을 적용했을 때 0.915로 추정력이 크게 개선되었다.

4. 결론

플랫 플레이트 접합부의 파괴과정은 응력의 재분배과정에 따라 각 저항성분이 순차적으로 붕괴되는 과정이다. 따라서 접합부의 전체강도 산정을 위해서는 극한상태에서 개별 저항요소의 기여도를 별도로 산정해야 한다. 수치해석연구에 대한 분석결과 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 접합부의 각 면에서 발휘되는 모멘트저항성능을 산정하기 위해서는 각 면에 작용하는 반력간의 상호작용을 고려해야 한다. 전후면에서는 극한상태에서 휨모멘트로 의해 인장균열이 발생하므로 압축대 c_u 에 의해서만 전단성능이 발휘된다. 또한, 접합부 측면의 극한 전단성능은 중력하중에 의한 수직응력 σ_e 와 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 분석되었다.

둘째, 접합부의 전체강도는 극한상태에서 각 저항성분, 즉 전후면의 휨모멘트 M_{Ff} , M_{Fb} 와 전단력에 의한 모멘트 M_{Sf} , M_{Sb} 그리고 측면의 뒤틀림모멘트 M_T 의 합으로 구성된다.

셋째, 기존 실험결과는 연속슬래브 조건에 비해 중력하중과 경계조건의 차이로 인해 강도를 저평가하는 것으로 나타났다.

넷째, 연속슬래브 조건에서 제안된 강도산정모델은 연속슬래브에 대해 정확한 추정력을 가진 것으로 검증되었으며, 기존 실험체에 대해서는 부분적인 수정을 해서 적용할 때 역시 극한강도의 정확히 산정이 가능한 것으로 확인되었다.

향후 연구에서는 접합부 파괴유형 및 파괴메카니즘에 근거해서 접합부의 연성도 산정모델이 제안되어야 하며, 또한 양방향으로 가력되는 지진에 의한 강도저감효과가 추가로 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 대한건축학회, "콘크리트 구조 설계 기준", 1999년.
2. 최경규, 황영현, 박홍근, "플랫 플레이트 접합부의 내진성능에 대한 해석연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제00권 0호, 2002, pp.000~000. 심사중
3. Allen, Fred and Darvall Peter, "Lateral Load Equivalent Frame", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 6, July, 1977, pp. 294-299.
4. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete", ACI 318-99. pp. 177-180, pp. 209-228.
5. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Reinforced Concrete Slab-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete structures", *ACI Structural Journal*, V. 85, No. 6, November-December, 1988, pp. 675-696.
6. Durrani, A. J., and Du, Y., "Seismic Response of Slab-Column Connections in Existing Non-Ductile Flat-Plate building," *Technical Report*. NCEER-92-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY, May, 1992
7. Farhey, Daniel N., Adin, Moshe A., and Yankelevsky, D. Z., "Flat Slab-Column Subassemblages under Lateral Loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 119, No. 6, June, 1993, pp. 1903-1916.
8. Ghali, Amin, Elmasri, Mahmoud Z., and Diler, Walter, "Punching of Flat Plates under Static and Dynamic Horizontal Force", *ACI Journal*, October, 1976, pp 566-572.
9. Hanson, N. M., and Hanson, J. M., "Shear and Moment Transfer Between Concrete Slab and Column," *Journal of Portland Cement Association*, Research and Development Laboratories, V. 10, No. 1, Jan. 1968, pp. 2-16.
10. Hawkins, N. M.; Mutchell, D.; and Sheu, M. S., "Cycle Behavior of Six Reinforced Concrete Slab-Column Specimens Transferring Moment and Shear," *Progress Report 1973-74 on NSF Project GI-38717*, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, 1976.
11. Islam, S., and Park, R., "Tests on Slab-Column Connections with Shear and Unbalanced Flexure", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 102, No. ST3, Mar. 1976, pp. 549-568.
12. Luo, Y. H., and Durrani, A. J., "Equivalent Beam Model for Flat-Slab Buildings-Part I: Interior Connections", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, January-February, 1995, pp. 115-124.
13. Moehle, J. P., Kreger, Michael E., and Leon, Roberto, "Background to Recommendations for Design of Reinforced Concrete Slab-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 85, No. 6, November-December, 1988, pp.636-644.
14. Morrison, D. G., and Sozen, M. A., "Response of Reinforced Concrete Plate-Column Connections to Dynamic and Static Horizontal Loads," *Civil Engineering Studies, Structural Research Series*, No. 490, University of Illinois, Urbana, Apr. 1981.
15. Pan, Austin D., and Moehle, Jack P., "An Experimental Study of Slab-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 6, November-December, 1992, pp. 626-638.
16. Robertson, I. N., and Durrani, A. J., "Seismic Response of Connections in Indeterminate Flat-Plate Subassemblies," *Structural Research at Rice*, Report No. 41, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, July 1990, 266 pp.
17. Zee, H. L., and Moehle, J. P., "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. 1984, 130pp.