



경량골재 콘크리트 바닥판의 펀칭전단강도의 실험적 평가

김정중¹⁾ · 문지호²⁾ · 염광수^{3)*}

¹⁾경남대학교 건축학과 ²⁾한국철도기술연구원 ³⁾GS건설 인프라구조팀

Experimental Evaluation of the Punching Shear Strength with Lightweight Aggregate Concrete Slabs

Jung-Joong Kim,¹⁾ Ji-Ho Moon,²⁾ and Kwang-Soo Youm^{3)*}

¹⁾School of Architecture, Kyungnam University, Changwon 631-701, Korea

²⁾Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

³⁾Dept. of Infra Structure Team, Technical Division, GS E&C, Seoul 110-130, Korea

ABSTRACT This paper investigates the punching shear strength of lightweight aggregate concrete (LWAC) slabs through a series of experimental study. Five full scale slabs were constructed using normal concrete and four different types of LWAC. Each lightweight aggregate (LWA) used in this study had different sources (clay, shale, or slate) and shapes (crushed or spherical shape). Based on the test results, the effect of the lightweight aggregates (LWA) on the punching shear behavior was investigated. From the test results, it was found that the punching shear failure surface of LWAC slab with spherical shape coarse aggregate was less inclined than that with crushed shape coarse aggregate, which resulted in an increase of the area of the shear failure surface. As a result, it leads to the increased punching shear strength of the slab. On the other hand, the failure surfaces of LWAC slab with crushed shape coarse aggregate and normal coarse aggregate were inclined similarly. Finally, the test results of this study were compared with the punching shear strength obtained from current design models, such as ACI and CEB-FIP, to examine the validation of current design model to predict the punching shear strength of the LWAC slab.

Keywords : lightweight aggregate concrete (LWAC), punching shear capacity, concrete slabs, design model

1. 서 론

최근 미국 등의 국가에서 노후 교량구조물의 급속교체 시공을 위해, 구조물의 자중을 줄이고자 다시 경량골재 콘크리트(lightweight aggregate concrete, LWAC)의 적용이 증가하고 있다.^{1,2)} 또한 국내외에서 건축물의 에너지효율을 높이고 벽체의 단열성능을 높이고자 경량골재(lightweight aggregate, LWA)를 적용하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.³⁻⁵⁾ 특히 장대교량에 적용 시 자중감소에 따른 케이블 물량 감소나 중앙경간의 장기간화로 경제성을 확보할 수 있기 때문에, 유럽이나 미국에서는 이미 많은 시공실적을 확보한 상태이지만, 아직 국내에서는 이에 대한 연구나 시공사례가 미흡한 실정이다.^{6,7)} 주요한 원인으로는 경량골재의 높은 가격과 국내생산설비의 미비 등으로 인

해 경량골재의 국내 사용빈도가 낮기 때문이다. 하지만, 이러한 높은 비용은 예를 들면 초고층건축물의 경량골재 콘크리트 슬래브 등과 같이 자중감소로 유도되는 전체적인 구조물의 원가절감으로 상쇄할 수 있다.⁸⁾

이러한 초고층구조물에 사용되는 콘크리트 바닥판이 집중하중을 받을 경우, 파괴형상은 작은 처짐에서 취성적으로 발생하는 펀칭전단파괴(punching shear failure)와 휨철근의 항복이 바닥판 거동을 지배하는 휨파괴의 2가지로 구분할 수 있다.^{9,10)} 취성적이고 구조물의 붕괴를 유발하는 바닥판의 펀칭전단파괴를 막기 위하여, 펀칭전단강도를 예측하기 위한 다양한 수치적 모델들이 개발되었다.¹¹⁻¹⁴⁾ 또한, 일반콘크리트 바닥판의 펀칭전단강도에 대한 많은 연구들이 광범위하게 지난 수십 년간 진행되어왔으며, 관련 실험 결과 자료들 역시 많은 연구자들에 의해 정리되었다.¹⁵⁾ 최근에는 바닥판의 펀칭전단강도를 높이기 위한 대안으로 섬유보강 콘크리트(fiber reinforced concrete) 슬래브에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다.¹⁶⁾

하지만, 다양한 구조물에 사용되어 온 경량골재 콘크리트의 오랜 역사에도 불구하고, 경량골재 콘크리트 바닥판

*Corresponding author E-mail : ksyoun@gsconst.co.kr

Received April 14, 2014, Revised May 29, 2014,

Accepted June 5, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

의 편칭 전단 강도에 대한 연구는 극히 미미한 반면에, 경량골재 콘크리트의 역학적 특성을 분석하는 연구에 집중되고 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

이 연구에서는, 일련의 실험을 통해 경량골재 콘크리트 바닥판의 편칭전단 강도를 예측하기 위하여, 설계기준강도 30 MPa 이상인 총 5 기의 콘크리트 바닥판 실험체를 제작하였다. 이 중 한 기는 비교실험체로 일반 콘크리트로 제작하였고, 나머지는 모두 원재료 및 형상이 다른 4종류의 경량골재를 사용한 콘크리트로 만들어 각 경량골재 종류별 편칭전단강도의 특성을 분석하였다. 또한, 바닥판 두께를 다르게 제작하여 철근비에 따른 영향을 파악하고자 하였다. 제작된 경량골재 콘크리트 바닥판은 4번 고정 후 정적파괴실험을 실시하여 각 실험체에서 발생한 편칭전단강도, 파괴면(failure surface) 그리고 파괴각(failure surface angle)을 관찰한 후, 설계기준들에서 제안한 편칭전단강도와 실험 결과를 비교하였다.

2. 편칭전단강도 예측식

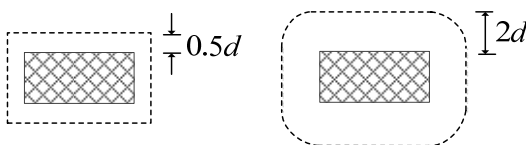
콘크리트 바닥판의 편칭전단강도를 예측하기 위해 많은 설계모델이 적용가능하지만, 이들 모델의 대부분은 위험단면접근법(critical section approach)을 바탕으로 한다. 위험단면과 콘크리트 전단강도에 대한 다양한 정의들은 각 설계기준에 따라 다르게 정의되고 있지만, 편칭전단강도에 영향을 주는 주요 변수들은 대표적으로 콘크리트 강도, 철근비, 위험단면 둘레와 바닥판 두께를 들 수 있다.

예를 들어, ACI 318-11 설계기준은 콘크리트의 전단강도를 콘크리트 압축강도(specified compressive strength)의 제곱근에 비례한다고 규정하고 있는 반면에, CEB-FIP model code 2010는 콘크리트 특성압축강도(characteristic compressive strength)의 세제곱근의 함수로 규정한다.^{11,12)} 더욱이, ACI 318-11과 CEB-FIP 2010은 Fig. 1과 같이 기준둘레(control perimeter)에 대하여 서로 다른 정의를 사용한다.

ACI 318-11 기준에 따르면, 사각기둥이 접합된 바닥판의 편칭전단강도는 다음의 식 (1)로 계산된다.

$$0.33 \sqrt{f_c} \lambda b_0 d \quad (\text{in MPa}) \quad (1)$$

여기서, b_0 는 기준둘레로, Fig. 1(a)와 같이 재하면적에서 $0.5d$ 떨어진 위치를 기준으로 결정한다. 또한 d 는 바닥판의 유효깊이(effective depth)이며, λ 는 경량콘크리트(lightweight



(a) ACI 318-11 (b) CEB-FIP design model

Fig. 1 Definition of control perimeter

concrete)의 효과를 고려하기 위한 보정계수(modification factor)이다. ACI 318-11에서 정의된 보정계수 λ 는 전경량골재 콘크리트(all-lightweight concrete)의 경우 0.75를 사용하고, 모래경량골재 콘크리트(sand-lightweight concrete)는 0.85를 사용한다. 일반잔골재를 경량잔골재로 치환한 부피 비율에 따라서 0.75와 0.85 사이는 선형보간법을 적용할 수 있다. 특히, 평균 활렬인장강도(average splitting tensile strength, f_{sp})를 알고 있는 경우에는 보정계수 λ 를 다음의 식 (2)로 구한다.

$$\lambda = f_{sp} / (0.56 \sqrt{f_c}) \leq 1.0 \quad (\text{in MPa}) \quad (2)$$

ACI 318-11에서, 식 (1)은 장변과 단변의 비가 2.0 이상인 사각단면 기둥과 연결된 바닥판의 편칭전단강도의 계산에서 편칭전단강도를 과대평가할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 장변과 단변의 비가 2.0을 초과하는 경우는 다음의 식 (3)을 이용하여 편칭전단강도를 예측할 수 있다.

$$\frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \sqrt{f_c} \lambda b_o d \leq 0.33 \sqrt{f_c} \lambda b_o d \quad (\text{in MPa}) \quad (3)$$

여기서, β 는 사각단면기둥의 장변과 단변의 비이다.

반면에, CEB-FIP는 바닥판의 편칭전단강도를 다음 식 (4)와 같이 계산한다.

$$0.18 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} b_o d \quad (\text{in MPa}) \quad (4)$$

여기서, ξ 은 콘크리트 바닥판의 두께를 고려하기 위한 수정계수로써 $1 + \sqrt{200/d}$ 로 정의된다. ρ 는 바닥판의 철근비를 나타내며, $\sqrt{\rho_x \rho_y}$ 로 계산된다. 여기서 ρ_x 와 ρ_y 는 각각 x 와 y 방향의 휨철근비이다. 기준둘레 b_0 는 Fig. 1(b)와 같이 재하된 면적에서 $2d$ 만큼 떨어진 곳으로 정의된다. CEB-FIP에서 콘크리트의 전단강도는 콘크리트 설계강도의 세제곱근의 함수로 표현되며, 철근비의 효과를 고려하고 있다.

국내기준에서 바닥판의 콘크리트에 의한 편칭전단강도는 식 (5)와 같이 계산한다.²⁰⁾

$$\lambda k_s k_{bo} f_{tc} \cot \psi (c_u/d) b_o d \quad (\text{in MPa}) \quad (5)$$

여기서, λ 는 경량콘크리트계수로 ACI 기준과 같다. k_s 는 슬래브의 두께계수로 d 의 함수이며 최대값은 1.0이다. k_{bo} 는 위험단면 둘레길이의 영향계수로 α_s, b_o, d 의 함수이며 최대값은 1.25이다. 내부기둥에 대한 α_s 는 1.0이다. f_{tc} 와 ψ 는 각각 압축대 콘크리트의 인장강도와 슬래브 휨 압축대의 균열각도이고, f_{ck} 의 함수로 표현된다. c_u 는 압축철근을 무시하고 계산된 슬래브 위험단면 압축대 깊이의 평균값으로 f_{ck}, d, ρ 의 함수로 계산된다. ρ 는 바닥판의 인장철근비를 나타내며 최소값은 0.005를 사용한다.

3. 실험계획

이 연구에서 총 4 종류의 구조용 경량골재를 사용하여 경량골재콘크리트 공시체와 바닥판 실험체를 제작한 후 역학적 특성을 측정하였다.

3.1 사용재료

이 연구에서는 사용한 시멘트는 KS L 5201 규정을 만족하는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 물리적 특성은 Table 1과 같다. 플라이애쉬는 KS L 5405 규정에 적합한 제품을 사용하였으며 그 물리적 특성을 Table 2에 요약하였다.

Table 1 Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine fineness (cm ² /g)	Setting time (min)		Soundness (%)	Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final		3days	7days	28days
3.15	3378	234	327	0.1	32.2	42.1	51.3

Table 2 Physical properties of fly-ash

Blaine fineness (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Ig. loss (%)	Hyg. moisture (Wt %)	Comp. strength rate (%)	SiO ₂ (%)
3485	2.22	4.6	0.2	89	52

Table 3 Physical properties of lightweight aggregates

Items	Normal	LA	LB	LC	LD
Raw material	Granite	Shale	Clay	Slate	Clay
Max. size (mm)	25	19	8	13	12
Particle density (kg/m ³)	-	1250	1130	1470	1500
Shape	Crushed	Crushed	Mixed	Crushed	Spherical

Table 4 Physical properties of fine natural aggregate

Unit weight (kg/m ³)	Specific gravity	Fineness modulus
1572	2.62	2.83

Table 5 Mix proportions

Label	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m ³)						Remark
			Water	Cement	Fly-ash	Sand	Gravel	LWA	
NR	39	45	152	351	39	807	982	-	NA
LA							-	612	Type A
LB							495	276	Type B+NA
LC							-	548	Type C
LD							-	529	Type D

실험에 사용한 일반골재와 구조용 경량골재의 각 종류별 특징과 형상을 Table 3에 정리하였다. 경량골재 LD만 원형이며, 나머지는 모두 일반골재와 유사한 형상을 가지고 있다. 각 경량골재의 원재료는 셰일(shale)인 경량골재 LA, 점판암(slate)인 경량골재 LC, 그리고 점토(clay)인 경량골재 LB와 LD가 있으며, 24시간 침수 후 흡수율은 점토로 만든 경량골재 LB와 LD가 가장 높다. LC의 밀도는 1.4 g/cm³, 흡수율이 약 6%로 가장 낮은 흡수율을 갖고 있다.

잔골재는 세척사를 하였으며, 재료특성을 Table 4에 정리하였다. 혼화제는 리그닌계와 폴리카본산계 경량골재 콘크리트 전용혼화제를 사용하였다.

3.2 실험체 제작

설계기준강도 30 MPa, 슬럼프 190 mm 이상을 가지도록 Table 5와 같이 경량골재콘크리트 배합을 계획하였다. 사용한 각각의 경량골재 부피비는 일정하게 유지하였으며, 바닥판 실험체는 각기 다른 4종류의 경량골재콘크리트 배합과 1개의 비교용 일반콘크리트 배합으로 제작하였다. 바닥판 실험체 LB의 경우에만 경량골재 LB와 일반골재(normal aggregate, 이하 NA)를 부피비로 50%씩 사용하여 제작하였다. 각 바닥판실험체 이름은 사용한 경량골재 종류와 같도록 지정하였다.

Fig. 2에 묘사된 바닥판 실험체는 초고층건축물의 바닥판 중 4번 지지를 받게 되는 일부 고층부 바닥판 단면과 유사한 폭 2.5 m, 길이 3.0 m의 사각단면으로 제작하였다. 제작된 총 5기의 실험체는 바닥판 두께를 제외하고는 모두 동일한 단면크기와 철근배근을 가진다. 실험체 NR, LA, 그리고 LD는 바닥판 두께 200 mm인 반면, 실험체 LB는 두께 280 mm, 실험체 LC는 두께 300 mm로 제작되어, 철근비의 영향에 따른 거동을 검토하였다. 인장 휨철근은 D10 ($f_y = 411 \text{ MPa}$, $d_b = 9.53 \text{ mm}$)을 150 mm 간격으로 배근하였으며, 상부철근은 동일한 철근을 300 mm 간격으로 배근하였다. 피복두께는 상하부 모두 20 mm이며, 모든 실험체에 전단보강철근은 배근하지 않았다. 300 mm×300 mm 크기의 하중판을 사용하여 정적재하하중을 실험체 파괴 시까지 변위제어방법으로 0.005 mm/s로 재하 하였으며, 균열의 진행상황을 확인하였다. 정적 재하실험 시 연직하중과 총 5개 지점에서 바닥판의 처짐을 측정하였다. Fig. 3과

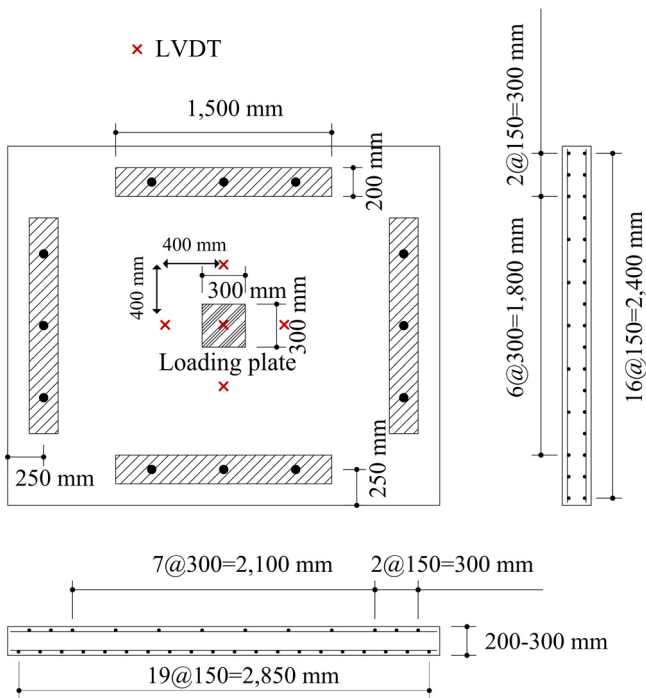


Fig. 2 Dimensions of the test specimen



Fig. 3 Test setup

같이 실험 시 바닥판의 경계조건은 볼트로 4변을 고정시켰다.

3.3 콘크리트의 역학적 특성

바닥판에 사용된 일반콘크리트 및 경량골재콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 활렬인장강도(splitting tensile strength)를 관련 KS규정에 따라서 측정하였다. 각 콘크리트별 구조적 특성을 Table 6에 정리하였다. 실험체 LB와 LC의 압축강도가 상대적으로 높게 측정된 것은 플라이애쉬를 사용하지 않은 점과 고성능감수제인 폴리카르복시계를 사용했기 때문으로 추정된다. 또한, 모든 경량골재 콘크리트는 일반콘크리트와 비교하여 탄성계수가 최고 37% 작음을 알 수 있다. 이는 경량골재콘크리트의 대표적인 특징으로 동일강도의 경량골재콘크리트를 사용한다면 동일한 사

Table 6 Mechanical properties

Specimen label	f'_c (MPa)	E_c (GPa)	f_{sp} (MPa)	Density (kg/m ³)
NR	40.6	31.7	3.41	2335
LA	37.2	22.6	3.40	1807
LB	46.7	20.9	3.41	2059
LC	45.6	20.2	3.17	1816
LD	34.2	20.0	2.82	1847

용하중에 대해서 일반콘크리트보다 많은 처짐이 발생할 수 있기 때문에, 이를 보완하기 위하여 교량구조물의 경우 강도를 높은 경량골재콘크리트를 사용하고 있다.²¹⁾

하지만, 압축강도와 탄성계수의 차이에도 불구하고 활렬인장강도는 경량골재 LD를 사용한 경우를 제외하고는 유사하게 측정되었다. 일반골재와 경량골재 LB를 절반씩 혼합해서 사용한 LB 실험체를 제외하고는, 나머지 경량골재콘크리트의 단위중량은 일반콘크리트에 비해 22~25% 낮았다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

Fig. 4는 바닥판 실험체의 중앙점에서 측정한 연직변위와 재하하중과의 관계를 나타낸 그림이다. 일반콘크리트

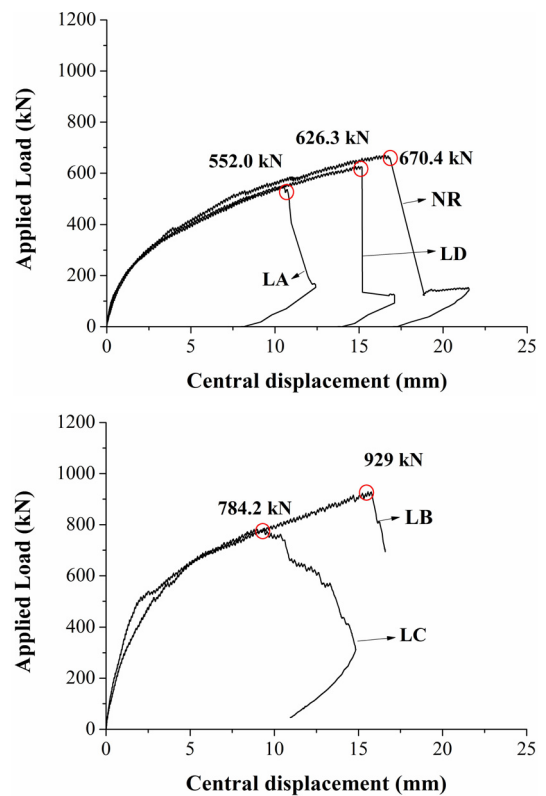


Fig. 4 Relationship between vertical load and central displacement

로 만든 기준 실험체(NR)은 670.4 kN에서 전단 파괴가 발생하였으며, 실험체 두께가 동일한 경량골재콘크리트로 제작한 실험체 LA와 LD는 각각 552.0 kN과 626.3 kN에서 파괴되었다. Fig. 4에서 실험체 NR, LA, 그리고 LD는 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 실험체 두께를 증가시킨 LB와 LC 실험체는 각각 929.0 kN과 784.2 kN에서 파괴되었다. Table 7에 실험 결과를 정리하고, 설계기준의 예측값과 비교 분석하였다.

제하실험이 종료된 후 실험체를 절단하여 내부에 발생한 두 파괴면(failure surface)과 파괴면의 파괴각(failure surface angle)을 관찰하였다. Fig. 5에 각 실험체별로 절단 후의 사진을 보이고 파괴면의 파괴각을 비교하였다. LB는 파괴 직후 실험을 종료하였기 때문에 절단면에서 파괴각을 잘 확인할 수 없었다. LC의 파괴각은 두 파괴면을 평균하여 26.5°로 측정되었다. 경량골재 실험체 LA,

Table 7 Test results and predictions from design models.

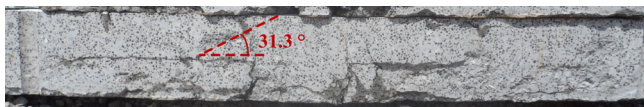
Specimen label	Test results (kN)	Predicted punching shear strength (kN)		
		KCI	ACI 318-11	CEB-FIP
NR	670.4	627.6	726.7	492.1
LA	552.0	518.8	591.3	478.0
LB	929.0	958.5	1116.4	767.2
LC	784.2	1061.2	1230.4	833.0
LD	626.3	505.1	566.9	464.8



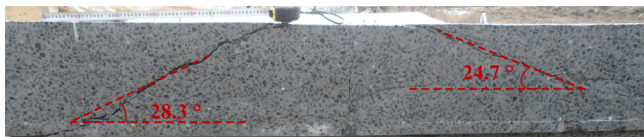
(a) NR slab specimen



(b) LA slab specimen



(c) LB slab specimen



(d) LC slab specimen



(e) LD slab specimen

Fig. 5 Failure surface and its angles of all specimens

LB, LC, LD의 파괴각은 두 파괴면을 평균하여 20.5°~27.8°로 일반콘크리트 실험체의 두 파괴면의 평균 30.4°보다 작았다. 이는 경량골재 사용 시 파괴면의 면적이 넓어졌음을 의미한다. 경량콘크리트를 사용한 다른 연구 결과에서도 고강도 경량콘크리트의 경우 파괴각은 25°~29°의 범위 내에서 측정되었으며, 일반 고강도 콘크리트의 경우 26°~36°로 측정되었다.^{9,18)}

4.2 결과 분석

국내설계기준(KCI)에 의한 펀칭전단강도를 실험 결과와 비교해 보면, Table 7에서 인장 철근비가 0.24%인 NR, LA, LD의 경우 모두 예측 펀칭전단강도를 상회하여 파괴되었다. 반면, 인장 철근비가 각각 0.16%, 0.15%인 LB와 LC의 경우 예측 펀칭전단강도에 못 미쳐서 파괴가 발생하였다. LB, LC 바닥판의 경우 전단에 의한 파괴 이전에 휨에 의한 파괴가 발생한 것으로 예측된다. 향후 유한요소해석 등을 이용하여 LB, LC의 응력도를 확인하여 휨에 의한 파괴를 검증할 필요가 있을 것이다.

국외의 설계기준과 실험 결과를 비교해 보았다. Fig. 6에 ACI 318-11의 식 (1)과 CEB-FIP의 식 (4)에 따라서 펀칭전단강도를 예측한 후 실험 결과와 함께 도시하였다.

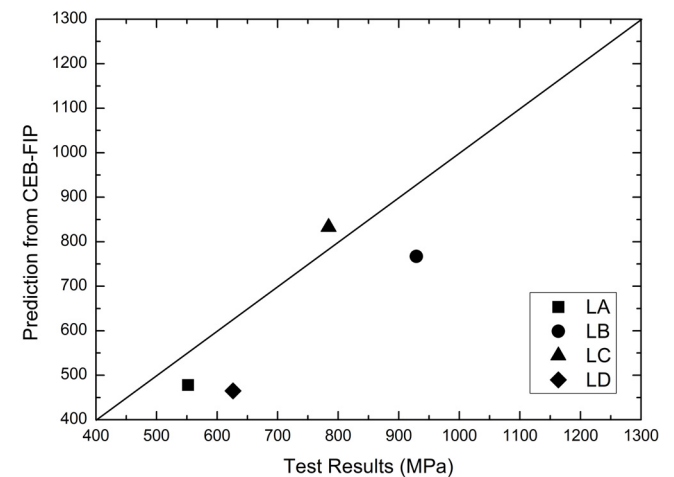
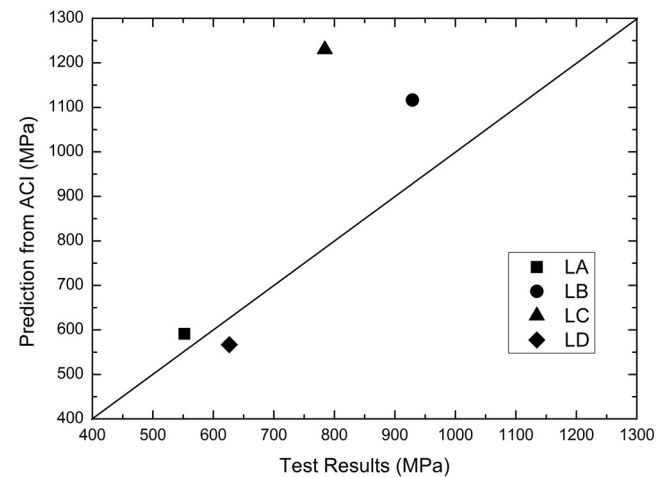


Fig. 6 Comparison of test results with design models

ACI 318-11 설계기준의 식 (1)에 의한 전단강도는 바닥판 실험체 LD를 제외하고는 모두 과다하게 계산되었다. ACI 설계기준의 적용에서 경량골재 보정계수 λ 는 모래 경량골재 콘크리트의 0.85를 적용하였다. 인장 철근비가 각각 0.16%, 0.15%인 LB와 LC의 경우 실험 결과와의 차이가 각각 20%와 57% 크게 예측되었다. 반면에 CEB-FIP model code의 식 (4)로 계산한 전단강도는 LC를 제외하고는 과소평가하였다.

편칭전단강도 예측에 있어서 이러한 설계기준간의 상이한 결과는 각각의 설계기준에서 서로 고려하는 변수에 차이가 있기 때문으로, 특히 ACI 설계기준의 경우 인장 철근비를 고려하지 않기 때문에 상대적으로 인장 철근비가 작은 슬래브에 대하여 과다한 전단강도를 예측하는 것으로 판단된다.

특이사항은, LA와 LD의 경우 동일한 규격의 바닥판 실험체로 유사한 콘크리트 압축강도로 제작되었으나, 접토로 만든 원형의 경량골재를 사용한 LD가 LA에 비하여 더 큰 편칭전단강도를 보여주었다. 압축강도가 유사할 경우 파괴각 또한 유사하게 산정되지만, LA와 LD실험체의 파괴각은 각각 평균 27.8°와 20°로 상이하게 나타났다. 이러한 결과로부터 경량골재를 사용한 철근 콘크리트의 편칭전단강도 계산 시 경량골재의 형상과 성질을 고려하여 파괴각을 산정할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 각각 하나의 실험체에서 얻어진 결과이므로 추가적인 실험이 뒷받침 되어야 할 것이다.

5. 결 론

이 연구에서는 다양한 종류의 경량골재를 사용한 콘크리트로 바닥판 실험체를 제작하여 각 경량골재별 편칭전단강도 특성을 분석하였다. 설계기준들에서 제안한 예측식과 실험 결과를 비교하였다. 이 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 4 종류의 원재료와 형상이 다른 경량골재를 사용하여 바닥판 실험체를 제작하였다. 각 실험체는 설계강도 30 MPa 이상을 확보하였으며, 골재형상에 따라서 활렬인장강도는 일반골재콘크리트와 차이가 없었다. 일반콘크리트 대비 최대 25%까지 단위중량이 줄어들었으며, 경량골재콘크리트의 특징인 탄성계수의 감소는 약 40%까지 발생하였다. 특히 일반골재와 경량골재를 같은 용적으로 혼합한 경우에도 동일한 경향을 보인 점을 고려해 볼 때, 경량골재가 탄성계수 감소의 직접적인 원인으로 판단된다.
- 2) 국내설계기준, ACI 318-11과 CEB-FIP model code의 편칭전단강도 예측식을 사용하여 실험 결과와 비교하였다. 국내설계기준의 경우 인장 철근비 0.24%인 NR, LA, LD는 보수적으로 예측하였고, 인장철근비가 각각 0.16%, 0.15%인 LB와 LC는 과다하게 예측하였다. ACI 318-11 설계기준에 따르면, 바닥판 실험체 LD를 제외하고는 모두 과다하게 계산되었으며, 특히 인장 철근비가 낮은 실험체의 경우에는 실험 결과와의 차이가 상당히 크게 나타났다. CEB-FIP model code을 따를 경우, 전반적으로 편칭전단강도를 보수적으로 예측하였다.

- 3) 바닥판 두께가 동일한 세 실험체는 유사한 하중-변위 관계를 보여주었으며, 바닥판 두께를 증가시킨 다른 두 실험체는 휨 거동이 지배적인 것으로 판단된다.
- 4) 재하실험 후 절단된 실험체 내부에서 발생한 파괴면과 파괴각을 관찰한 결과, 일반콘크리트의 파괴각인 30.4°보다 작은 20.5°~27.8°에서 경량골재 실험체가 파괴되었다.

이 연구에서 얻은 실험 결과를 바탕으로 경량골재 종류별 편칭전단강도 예측식을 제안하기 위해 추가적인 실험을 수행하여 신뢰도를 높인다면 초고층건축물 또는 교량 바닥판에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Castrodale, R. W. and Harmon, K. S., "Recent Projects Using Lightweight and Specified Density Concrete for Precast Bridge Elements," *The PCI-FHWA National Bridge Conference*, Phoenix, USA, 2007, pp. 1-14.
2. Castrodale, R. W. and Ries, J. P., "Use of Lightweight Concrete Decks for Accelerated Bridge Construction," the Proceedings of the 3rd Accelerated Bridge Construction Conference, San Diego, USA, 2005, pp. 1-6.
3. Yun, T. S., Jeong, Y. J., Han, T. S., and Youm, K. S., "Evaluation of Thermal Conductivity for Thermally Insulated Concretes," *Energy and Buildings*, Vol. 61, 2013, pp. 125-132.
4. Yun, T. S., Jeong, Y. J., and Youm, K. S., "Effect of Surrogate Aggregates on the Thermal Conductivity of Concrete at Ambient and Elevated Temperatures," *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, pp. 1-9.
5. Kim, S. H., Jeon, H. K., Hwang, I. D., Seo, C. H., and Kim, S. H., "The Properties of Concrete with Lightweight Aggregate Impregnated by Phase Change Material," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 3, 2013, pp. 331-338.
6. Fergestad, S. and Asa-Jakobsen, I. A., "Bridges Built with Lightweight Concrete in Norway," *International Symposium on Lightweight Concrete Bridges*, USA, 1996, pp. 1-26.
7. Manzanarez, R., "The New Benicia-Martinez Bridge Project: A Lightweight Concrete Segmental Structure," *International Symposium on Lightweight Concrete Bridges*, USA, 1996, pp. 27-37.

8. Dhir, K., Mays, R. G. C., and Chua, H. C., "Lightweight Structural Concrete with Aglite Aggregate: Mix Design and Properties," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 6, No. 4, 1984, pp. 249-261.
9. Marzouk, H. and Hussein, A., "Experimental Investigation on the Behavior of High-Strength Concrete Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, 1991, pp. 701-713.
10. Guandalini, S., Burdet, O. L., and Muttoni, A., "Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios," *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 1, 2009, pp. 87-95.
11. ACI 318-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA, 2011.
12. CEB-FIP Model Code 2010, *Bulletin D'Information*, Lausanne, Switzerland, 2011.
13. Elshafey, A. A., Rizk, E., Marzouk, H., and Haddarac, M. R., "Prediction of Punching Shear Strength of Two-Way Slabs," *Engineering Structures*, Vol. 33, No. 5, 2011, pp. 1742-1753.
14. Choi, K., Taha, M., and Sherif, A., "Simplified Punching Shear Design Method for Slab-Column Connections using Fuzzy Learning," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp. 438-447.
15. Theodorakopoulos, D. D. and Swamy, R. N., "Ultimate Punching Shear Strength Analysis of Slab-Column Connections," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 24, No. 6, 2002, pp. 509-521.
16. Swamy, R. N. and Ali, S. A. R., "Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connections Made with Steel Fiber Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 79, No. 6, 1982, pp. 392-406.
17. Cho, S. K., Kwark, J. W., Lee, J. M., and Moon, D. J., "Punching Shear Behavior of High-strength Lightweight Concrete Slab Under Concentrated Load," *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 11, 2006, pp. 219-228.
18. Marzouk, H., Osman, M., and Helmy, S., "Behavior of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete Slabs under Column Load and Unbalanced Moment," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 6, 2000, pp. 860-866.
19. Chung, S. Y., Han, T. S., Yun, T. S., and Youm, K. S., "Evaluation of the Anisotropy of the Void Distribution and the Stiffness of Lightweight Aggregates Using CT imaging," *Construction and Building Materials*, Vol. 48, 2013, pp. 998-1008.
20. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, 342 pp.
21. Murugesu, G. and Cormier, K., *When Lighter is Better*, ASPIRE, 2007, pp. 20-28.

요 약 이 연구에서는 실험연구를 통하여 경량골재콘크리트 바닥판의 편칭전단강도를 평가하였다. 일반콘크리트와 서로 다른 4 종류의 경량골재를 사용하여 총 5 개의 바닥판 실험체를 제작하였다. 이 연구에서 사용된 4 가지의 경량골재는 서로 원재료 (점토, 세일, 혹은 점판암) 및 형상 (원형 혹은 분쇄형)이 다르며, 이러한 서로 다른 경량 골재들이 바닥판의 편칭전단강도에 미치는 영향을 실험 결과를 바탕으로 분석하였다. 실험 결과, 원형 경량골재로 만든 바닥판실험체의 편칭전단과괴면은 일반콘크리트 실험체 및 파쇄된 경량골재 바닥판실험체보다 기울기가 낮았으며, 이로 인해 전단과괴면이 더 넓게 분포하였다. 이로 인해 편칭전단강도가 증가될 수 있었다. 반면에 파쇄된 경량골재의 경우 파괴면이 일반 콘크리트와 유사한 것으로 나타났다. 마지막으로 실험 결과를 현재 편칭전단강도를 예측하는데 널리 쓰이는 국내기준과 ACI318-11 및 CEB-FIP 코드와 비교 분석하여 경량골재콘크리트 바닥판의 편칭전단강도 예측의 유효성을 검증하였다.

핵심용어 : 경량골재콘크리트(LWAC), 편칭전단강도, 콘크리트 바닥판, 설계식