

고강도경량콘크리트를 사용한 구조용 Deck Plate의 휨거동에 관한 연구

A study on the Flexural Behavior of Structural Deck Plate using High-Strength Lightweight Concrete

김철환*	최명신**	안종문**
Kim, Chul-Hwan	Choi, Myung-Shin	Ahn, Jong-Mun
김범조***	소병규****	신성우****
Kim, Beam-Jo	Soh, Byung-Kyu	Shin, Sung-Woo

Abstract

The object of this study is investigated to flexural behavior of structural deck plate composite slabs using high-strength lightweight concrete. Test variables are concrete compressive strength (normal weight concrete 210kg/cm², lightweight concrete 270, 350kg/cm²), topping concrete thickness (70, 75mm when span is 3.4m.), deck plate depth (50, 75mm when topping concrete thickness is 70mm and span is 3.4m) and span(3.0, 3.4m).

Test results are compared with current ACI Building Code (318-95). The test results are follows ; (1) a value of P_{test}/P_{cal} is 1.27~1.39, (2) a mean value of $\delta_{test} / \delta_{ACI}$ is , 0.60 when deflection is reached to maximum permissible computed deflection(L/360), and (3) ductility index are 3.61~6.85.

1. 서론

철골조 슬래브에 사용되고 있는 데크플레이트(Deck Plate)는 거푸집 작업이 필요없게 되어 공사기간이 단축되고, 거푸집 대체효과 뿐만이 아니라 콘크리트 타설후 하나의 합성부재로서 작용하게 되어 슬래브의 철근감소 등 많은 이점을 가지고 있다. 또한 데크플레이트에 고강도경량콘크리트를 사용할 경우 고강도의 이점과 슬래브의 자중을 줄일 수 있어, 구조물 전체의 자중감소 및 경제적 이점을 얻을 수 있다.

이미 미국을 비롯한 여러 국가에서는 다양한 실험을 통하여 각국의 특성에 맞게 데크플레이트를 이용한 합성슬래브의 휨강도, 전단부착강도, 그리고 처짐에 대한 규준식을 제정하여 합성슬래브의 설계에 반영하고 있다. 하지만 국내에서는 이 분야에 대해서는 외국의 설계식을 그대로 적용하고 있는 상태이다.

현재 국내에서도 구조용 데크플레이트를 사용이 보편화됨에 따라 이에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있으며 앞으로 안전성, 시공성 및 경제성을 고려한 활발한 연구가 진행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 슬래브의 자중 절감을 위해 구조용 데크플레이트에 고강도경량콘크리트를 사용하고, 이에 따른 합성슬래브의 적절한 설계식 도출을 위한 기본 자료를 제공하는데 있다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

**** 재옥공업(주) 대표이사

** 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

***** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

*** 재옥공업(주) 부장

2. 재료 시험

2.1 강재 인장시험

합성슬래브 실험체 제작에 사용된 강재의 재료역학적 성질을 파악하기 위하여 KS B 0801의 금속재료 인장 시험편 규정에 따라 그림 1과 같이 본 실험에서 사용된 JIF-DECK PLATE를 대상으로 하여 KS B 0802 금속재료 인장시험편 시험방법에 의해 실시하였으며, 그 결과는 다음의 표 1과 그림 2에 나타내었다.

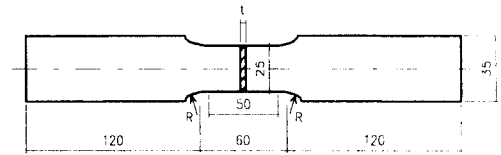


그림 1. 강재 인장 시험편

표 1. 강재인장강도 시험결과

시험체	E_s (kg/cm^2)	σ_y (kg/cm^2)	σ_u (kg/cm^2)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	신율 (%)
JIF-1.2	1.65×10^9	2627	3533	1592	28.3

표 2. 콘크리트 압축강도 시험결과

설계기준압 축강도 (kg/cm^2)	f'_{c-7} (kg/cm^2)	f'_{c-28} (kg/cm^2)	$f'_{c-실험}$ (kg/cm^2)	E_c (kg/cm^2)
보통 210	110	172	197	1.94×10^9
경량 270	207	265	270	1.44×10^9
경량 350	306	311	314	2.17×10^9

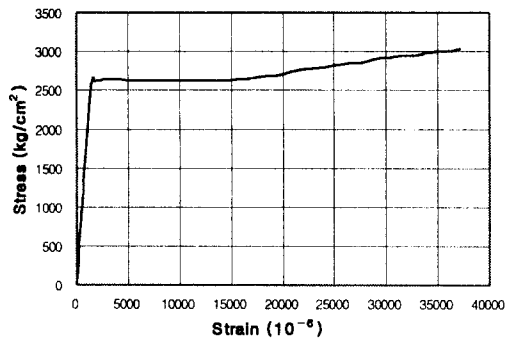


그림 2. 강재의 응력-변형도 관계

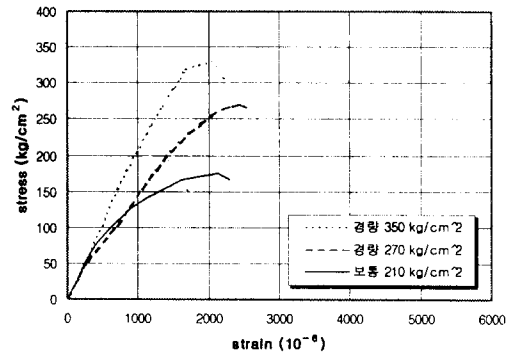


그림 3. 콘크리트 압축강도 응력-변형도

2.2 콘크리트 압축강도 시험

합성슬래브 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 재료역학적 성질을 파악하기 위해 재령 3, 7 그리고 28일에 대하여 콘크리트 공시체 압축강도 시험을 실시하였으며, 각 재령별 시험결과는 표 2와 그림 3에 나타나있다.

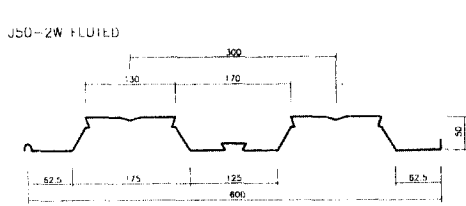
3. 합성슬래브 휨실험

3.1 실험체 계획

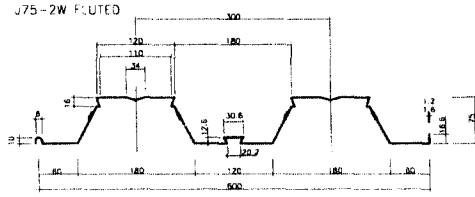
본 연구에 사용된 데크플레이트는 국내에서 생산되는 구조용 데크플레이트인 JIF-Deck Plate로서 치수와 형상은 다음 표 3과 그림 4에 나타나있다.

표 3. 데크플레이트의 특성

시험체	제품명	두께 (mm)	춤 (mm)	1m 폭당	
				단면적 (cm^2)	I (cm^4)
J50-1.2	J50	1.2	50	16.4	65
J75-1.2	J75	1.2	75	17.7	165



a) J50



b) J75

그림 4. 데크플레이트 단면형상

구조용 데크플레이트에 인장철근을 배근하지 않고 고강도경량콘크리트를 Topping 콘크리트로 타설한 합성슬라브를 제작하였으며, 각 실험체의 특성은 다음 표 4에, 실험체의 형상은 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

3.2 가력 및 측정방법

실험체를 Strong Frame에 양단 단순지지 조건으로 설치한 후 유압잭으로 2점 가력하였으며, 하중은 유압잭에 부착된 Load Cell을 이용하여 측정하였다.

가력지점과 중앙부의 처짐량을 측정하기 위해 3개의 변위계(LVDT)를 설치하고, 데크플레이트와 Topping 콘크리트사이에서 발생하는 엔드슬립(end slip)량을 측정하기 위해 양단부에 2개의 변위계를 설치하였다

표 4. 합성슬라브 실험체번호

실험체명	Deck 스펀 (mm)	Span (m)	Topping 콘크리트 두께 (mm)	f _c (kg/cm ²)	
NA-30-75	J50	3.0	75	210 보통	
LHA-30-75				270 경량	
LUA-30-75				350 경량	
NA-34-70		3.4	70	70	210 보통
LHA-34-70					270 경량
LUA-34-70					350 경량
NA-34-75			75	75	210 보통
LHA-34-75					270 경량
LUA-34-75					350 경량
NB-34-70		J75	70	70	210 보통
LHB-34-70					270 경량
LUB-34-70					350 경량

*실험체 표기 예) NA-30-75

N : Normal Concrete f'_c=210 kg/cm²

(LH : Lightweight Concrete f'_c=270kg/cm²)

(LU : Lightweight Concrete f'_c=350kg/cm²)

A : 데크스푼 50mm (B : 75mm)

30 : 스펀 30m (34 : 스펀 3.4m)

75 : Topping 콘크리트 두께 (mm)

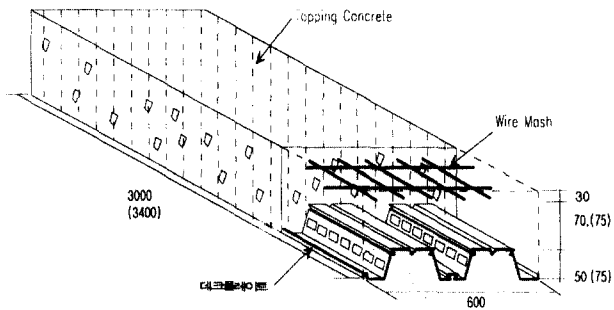
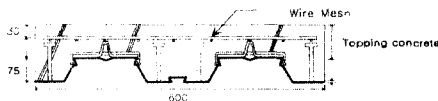
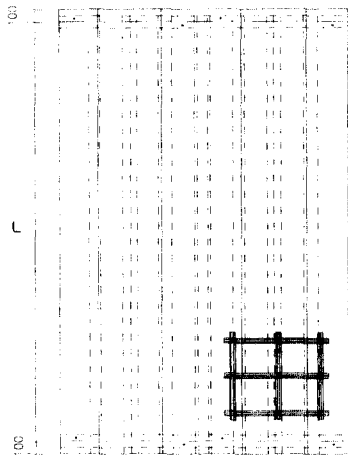
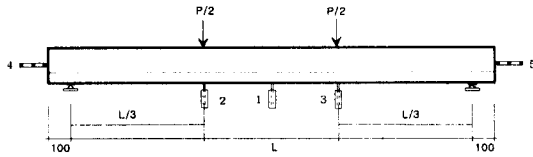
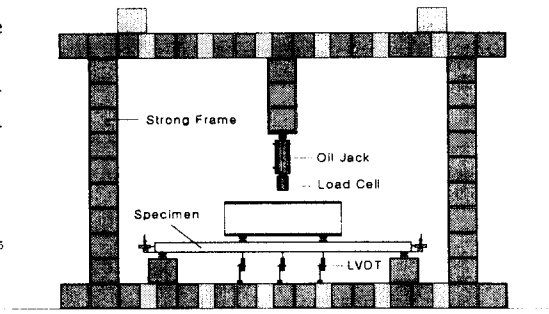


그림 5. 합성슬라브 실험체 형상

또한 실험체 중앙부의 변형도를 측정하기 위해 테크플레이트의 상,하부 플랜지와 웨브부분에 Wire Strain Gauge(W.S.G)를 부착하고, 슬래브 측면 Topping 콘크리트에도 W.S.G를 부착하였다. 이상과 같은 실험체 설치상황이 다음 그림 7에 나타나 있다.



a) 변위측정상황



b) 가력장치

그림 6. 실험체 설치상황

4 실험 결과

4.1 균열발생 및 파괴양상

합성슬래브에 대한 실험결과 대부분의 실험체에서 최대하중 이전까지는 슬립이 발생하지 않았으며, 이것은 콘크리트와 테크플레이트 사이의 부착성능이 충분히 확보된 것으로 판단된다.

표 5. 각 실험체별 실험 결과

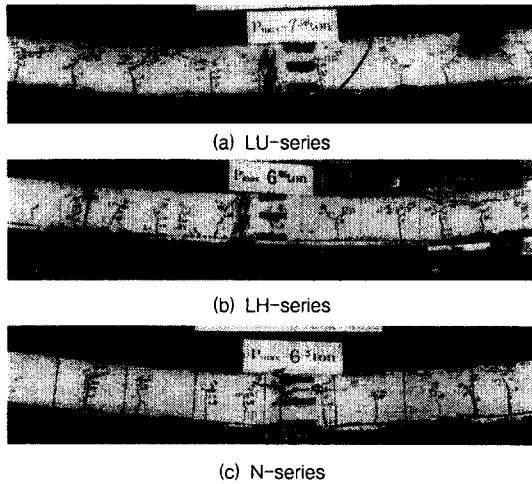
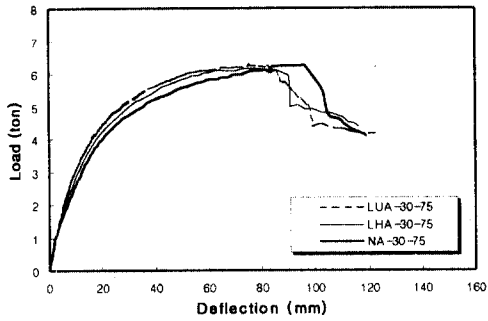


그림 7. 균열발생 및 파괴양상

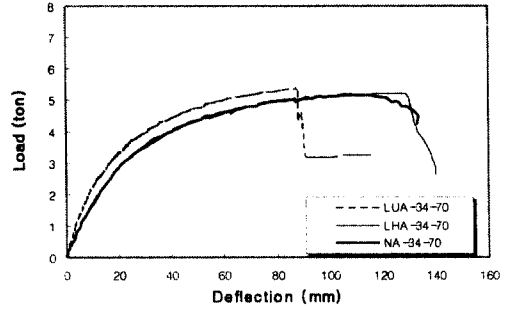
시험체명	P_{max} (ton)	P_y (ton)	P_{max}/P_y
NA-30-75	6.28	3.97	1.58
LHA-30-75	6.15	3.87	1.59
LUA-30-75	6.27	4.38	1.43
NA-34-70	5.17	3.32	1.56
LHA-34-70	5.22	3.34	1.56
LUA-34-70	5.35	3.66	1.46
NA-34-75	5.25	3.71	1.42
LHA-34-75	5.25	3.58	1.47
LUA-34-75	5.87	3.74	1.57
NB-34-70	6.10	3.88	1.57
LHB-34-70	6.52	3.96	1.65
LUB-34-70	6.25	3.47	1.80

균열발생양상은 실험체의 가력점과 중앙부에서 초기균열이 발생하여 점진적으로 스펜전체로 확산되었고, 최종파괴는 중앙부보다는 가력점에서 주로 발생하였다. 일반적으로 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 실험체 강도의 상승을 보이고 있다. 고강도경량콘크리트 실험체의 경우 취성적인 파괴가 나타나고 있으며, 최대하중이후 급격한 하중저하를 보이고 있다.

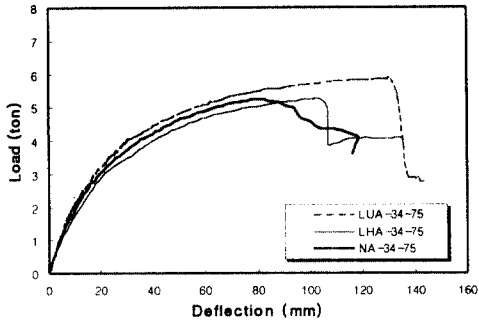
각 실험체의 휨실험 결과는 표 5에 나타나 있으며, 균열발생상황 및 최종파괴양상이 그림 7에 나타나 있다. 실험변수에 따른 각 실험체별 하중-처짐곡선은 그림 8(a)~(d)에 나타나 있다.



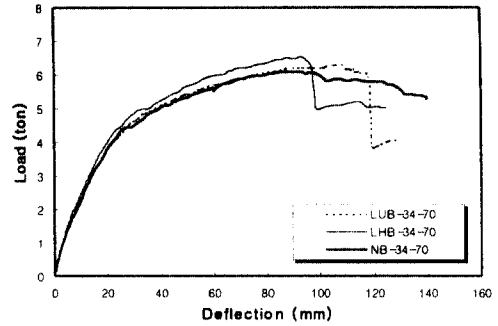
a) J50, 스패3.0m, Topping 콘크리트 두께 75mm



b) J50, 스패3.4m, Topping 콘크리트 두께 70mm



c) J50, 스패3.4m, Topping 콘크리트 두께 75mm



d) J75, 스패3.4m, Topping 콘크리트 두께 70mm

그림 8. 하중-처짐곡선

4.2 최대내력 비교

4.2.1 Topping 콘크리트 두께 변화에 따른 영향

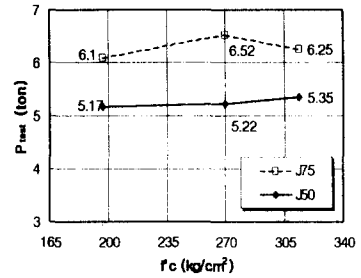
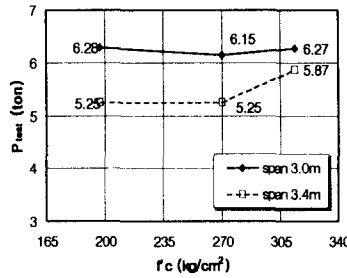
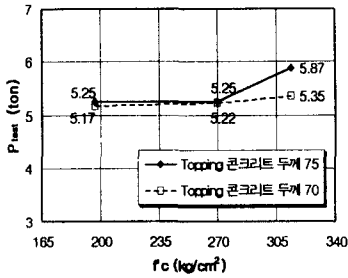
그림 9 (a)에서 Topping 콘크리트 두께가 두꺼워질수록 실험체 강도는 증가하고 있으며, 경량콘크리트 LU-series일 때 강도증가가 가장 크게 나타났다. 보통콘크리트와 경량콘크리트 $270\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우에 실험체 강도의 증가가 거의 발생하지 않았으며, 이것은 경량콘크리트가 일반콘크리트는 다른 재료적인 특성으로 인한 것이라 생각된다. 반면 경량콘크리트인 경우 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 실험체의 강도가 증가되었다.

4.2.2 스패 변화에 따른 영향

그림 9 (b)에서 동일한 스패에서 일반콘크리트 실험체인 N-series와 경량콘크리트 실험체인 LH-series의 경우 최대내력은 비슷한 값을 보이고 있으며, 경량콘크리트의 경우 콘크리트 압축강도의 증가에 따라 실험체의 내력은 증가하는 경향을 보이고 있다.

4.2.3 데크플레이트 형상(춤) 변화에 따른 영향

그림 9 (c)에서 데크플레이트 형상이 J75인 경우가 J50인 경우의 실험체보다 최대내력이 크게 나타났다. 일반적으로 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 실험체의 강도도 증가하는 경향을 보이고 있으며, J75일 때 LH_series 실험체의 경우 제작상의 오차로 인하여 최대내력이 과도하게 나타난 것으로 판단된다.



a) Topping 콘크리트 두께에 따른 영향

b) 스패 변화에 따른 영향

c) 데크플레이트 형상에 따른 영향

그림 9. 최대내력 비교

5. 분석 및 고찰

5.1 휨내력 비교

합성슬래브의 휨내력을 평가하기 위해 ACI 규준에서의 공칭모멘트인 M_n 의 값으로 이론 최대하중 P_{cal} 을 계산하여 실험최대하중 P_{test} 와 비교하였다.

$$M_n = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \quad \text{식 (1)}$$

$$P_{cal} = \frac{2M_n}{L'} \quad \text{식 (2)}$$

A_s : 데크플레이트의 단면적

f_y : 강재의 항복강도

d : 슬래브의 윗면에서 데크플레이트 도심까지의 거리

$$a : \text{등가응력블럭 층} = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b}$$

L' : 전단스팬 길이

표 6과 그림 10에서 보는 바와 같이 실험변수와의 크게 관계없이 일정한 범위의 값이 나타났다.

휨내력비교결과 P_{test}/P_{cal} 값은 1.27~1.39의 범위로 실험 최대하중이 이론 최대하중을 모두 상회하고 있어 규준식은 안전측인 것으로 나타났다.

표 6. 휨내력 비교

시험체명	P_{test} (ton)	P_{cal} (ton)	P_{test}/P_{cal}
NA-30-75	6.28	4.54	1.38
LHA-30-75	6.15	4.72	1.30
LUA-30-75	6.27	4.78	1.31
NA-34-70	5.17	3.77	1.37
LHA-34-70	5.22	3.93	1.33
LUA-34-70	5.35	3.99	1.34
NA-34-75	5.25	4.00	1.31
LHA-34-75	5.25	4.16	1.26
LUA-34-75	5.87	4.22	1.39
NB-34-70	6.10	4.67	1.31
LHB-34-70	6.52	4.85	1.34
LUB-34-70	6.25	4.92	1.27

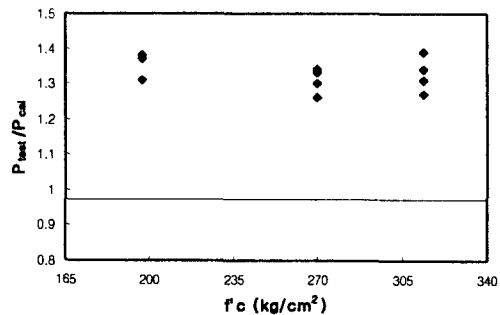


그림 10. 휨내력 비교

5.2 처짐량 비교

ACI에서 규정하고 있는 유효단면 2차모멘트(I_e)식과 처짐량(δ)계산식을 이용하여 각 실험체별로 처짐량을 계산하였으며, 실험시 각 하중단계별 단면 2차모멘트와 LVDT에 의해 측정되는 처짐량을 비교하여 합성슬래브의 사용성을 비교 검토하였다.

사용된 식은 다음 식 (3)~(5)와 같으며 결과는 다음 그림 11과 표 7에 나타나 있다.

표 7. L/360일 때 처짐 비교

실험체명	계산			실험			비교	
	M_{cr} (t · cm)	I_e 식(3) (cm ⁴)	δ_{ACI} 식(4) (mm)	Load (ton)	I_{test} 식(5) (cm ⁴)	δ_{test} (mm)	I_{test} / I_e	$\delta_{test} / \delta_{ACI}$
NA-30-75	16.87	4360.54	12.9	2.27	6730.79	8.33	1.54	0.65
LHA-30-75	18.16	5313.05	15.6	2.49	9946.69	8.33	1.87	0.53
LUA-30-75	17.56	4032.30	14.9	2.73	7236.77	8.33	1.79	0.56
NA-34-70	15.83	3879.08	15.1	1.63	6208.31	9.44	1.60	0.62
LHA-34-70	17.12	4717.69	16.0	1.56	8004.79	9.44	1.70	0.59
LUA-34-70	16.51	3586.61	19.4	2.17	7389.03	9.44	2.06	0.49
NA-34-75	16.82	4363.19	15.2	1.84	7008.15	9.44	1.61	0.62
LHA-34-75	18.16	5320.64	15.1	1.66	8517.91	9.44	1.60	0.62
LUA-34-75	17.56	4036.62	16.2	2.04	6946.37	9.44	1.72	0.58
NB-34-70	23.98	5525.09	14.3	2.19	8341.23	9.44	1.51	0.66
LHB-34-70	25.89	6722.22	16.9	2.35	12058.49	9.44	1.79	0.56
LUB-34-70	25.03	5118.84	14.2	2.26	7695.49	9.44	1.50	0.67
평균								0.60

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left\{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right\} I_{cr} \leq I_g \quad \text{식(3)}$$

여기서, $M_a \leq M_{cr}$ 이면, $I_e = I_g$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$f_r = 2.0 \sqrt{f_c}$$

(경량콘크리트시 : 저감계수 0.85 사용)

$$\delta = \frac{M_a}{24 E_c I_e} (3L^2 - 4L'^2) \quad \text{식(4)}$$

$$I_{test} = \frac{M_a}{24 E_c \delta} (3L^2 - 4L'^2) \quad \text{식(5)}$$

여기서, L' : 전단스팬비

식(3)~(5)를 이용하여 L/360만큼 발생하였을 때의 처짐량을 실험값과 비교한 결과 실험값이 대부분 규준값을 상회하고 있으며, 계산값에 대한 실험값의 평균이 0.60으로 나타나고 있어 전반적으로 규준식은 안전측인 것으로 판단된다.

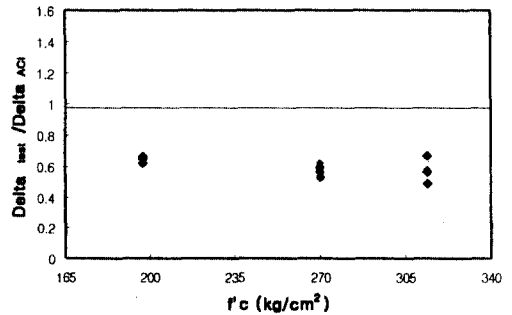


그림 11. 처짐 비교

5.3 휨연성

다음 식 (6)에 의해 합성슬래브의 휨연성을 계산하였다.

$$\mu_f = \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \quad \text{식 (6)}$$

Δ_y : 인장철근 항복시의 처짐

Δ_f : 최대하중이후 0.8Pmax에서의 처짐

휨연성 계산결과 휨연성값은 3.61~6.85로 휨부재의 연성3이상을 상회하고 있는 것으로 나타났다.

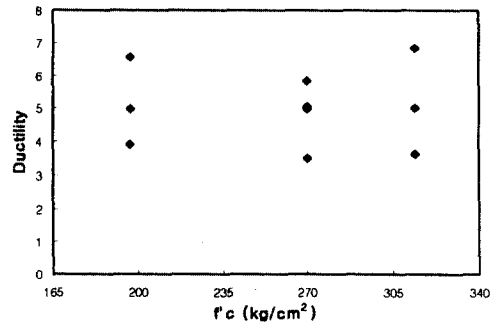


그림 12. 휨연성

6. 결론

고강도경량콘크리트를 구조용 데크플레이트에 사용하여 휩실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대부분의 실험체에서 최대하중이전까지 슬립이 발생하지 않아 콘크리트와 데크플레이트 사이의 부착효과가 우수한 것으로 나타났으며, 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 실험체의 강도가 증가하였고, 경량콘크리트의 경우 최대하중이후 급격한 하중저하를 보여 취성적인 거동을 하였다.
- 2) 휨내력을 규준식과 비교하여 볼 때, 변수와 크게 상관없이 최대내력비(P_{test}/P_{cal})값이 1.27~1.39로 안전측인 것으로 나타났다.
- 3) L/360인 단계에서 처짐량을 규준식과 비교하여 볼 때, $\delta_{test} / \delta_{ACI}$ 평균값이 0.60으로 안전측에 드는 것으로 나타났다.
- 4) 휨연성지수를 계산한 결과 3.61~6.85의 값으로 나타나 높은 연성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 5) 고강도경량콘크리트를 사용한 실험체의 경우 휨내력 및 처짐에 대해 규준식을 모두 만족하고 있으며, 연성능력도 우수한 것으로 판단된다. 따라서, 고강도경량콘크리트를 합성슬래브에 사용할 경우 많은 이점을 얻을수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구의 진행을 위하여 많은 지원과 관심을 베풀어주신 재옥공업(주) 및 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 허 충 “데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 구조적 거동 및 내력에 관한 연구”, 한양대학교, 1997. 12
- 2) “Building Code Requirements for Reinforced Concrete”, ACI 318-95, American Concrete Institute, 1995
- 3) ANSI/ASCE 3-91, “Standard for the Structural Design of Composite Slabs”, 1992
- 4) Lamport, W. B. and Porter, M. L. “Deflection predictions for concrete Slabs reinforced with steel decking”, ACI Structure Journal, vol87, No5, Sep-Oct 1990