



프리캐스트 콘크리트 트리플 리브 슬래브의 휨성능

황승범¹⁾ · 서수연^{1)*} · 이강철²⁾ · 이석현²⁾

¹⁾한국교통대학교 건축공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문

Flexural Capacity of Precast Concrete Triple Ribs Slab

Seung-bum Hwang,¹⁾ Soo-yeon Seo,^{1)*} Kang-cheol Lee,²⁾ and Seok-hyun Lee²⁾

¹⁾Department of Architectural Engineering, Korea National University, Chungju 27469, Rep. of Korea

²⁾Modular Business Team, Samsung C&T, Chungju 27329, Rep. of Korea

ABSTRACT The concern about hollow core PC slab has been increased to improve the workability during a construction of building by reducing self weight of structural members. In this manner, recently, TRS (Tripple Ribs Slab) was developed as a new type of half PC slab system. TRS member consists of the triple webs and the bottom flange prestressed by strands. The slab system is completed by casting of topping concrete on the TRS after filling styrofoam between the webs. This paper, presents a flexural experiment to investigate the flexural capacity of the TRS. Five full scale TRS members were made and tested under simple support condition to be failed by flexure and their strength was evaluated by code equations; the variables in the test are the depth and the presence of topping or raised spot formed when slip-forming. In addition, a nonlinear sectional analysis was performed for the specimens and the result was compared with the test results. From the study, it was found that the TRS has enough flexural strength and ductility to resist the design loads and its strength can be suitably predicted by using code equations. The raised spot did not affect the strength so that the spot need not to be removed by doing additional work. For the more accurate prediction of TRS's flexural behavior by using nonlinear sectional analysis, it is recommended to consider the concrete's brittle property due to slip-forming process in the modeling.

Keywords : Half PC slab, triple ribs slab, flexural experiment, full scale, depth, topping concrete, raised spot, nonlinear sectional analysis

1. 서 론

최근 고층건축물의 건설이 증가함에 따라, 건축물의 자중을 저감하며 공기를 단축시킬 수 있도록 기존의 바닥구조 시스템을 개선한 중공슬래브 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다.

트리플 리브 슬래브(Triple ribs slab, 이하 TRS)는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 3개의 웨브와 하부 플렌지로 구성된 바닥부재로서 웨브와 웨브 사이에 스티로폼(styrofoam)을 채워 현장 타설시 중공부를 형성하는 하프PC형 중공슬래브이다. TRS 부재는 단면에서 구조적 기능이 거의 없는 중립축 부근의 콘크리트를 생략하여 자중을 저감 시키면서도 슬래브의 두께는 크게 하여 연직하중에 저항할 뿐만 아니라 콘크리트 재료물량을 감소시킬 수 있다. 또

한 보와 하부 슬래브에 프리스트레스(Prestress)를 도입함으로써 기존의 철근콘크리트(Reinforced concrete, 이하 RC) 슬래브에 비해 향상된 휨 강도 및 강성을 확보할 수 있도록 구조적으로 최적화된 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, 이하 PC) 슬래브이다. 특히, TRS는 슬립포머방식(slipformer method)을 통해 생산되는데, 슬립포머방식은 매우 낮은 슬립폼의 콘크리트를 사용하여 거꾸집 없이 성형하기 때문

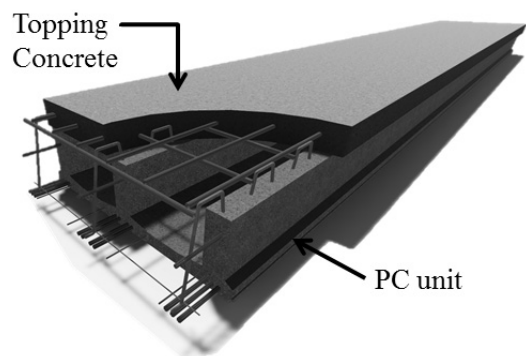


Fig. 1 Shape of TRS

*Corresponding author E-mail : syseo@ut.ac.kr
 Received March 13, 2015, Revised July 3, 2015,
 Accepted September 14, 2015
 ©2016 by Korea Concrete Institute

에 빠른 제품생산이 가능하여 대량생산에 유리한 생산방식이다.

TRS부재의 공칭 휨강도는 시공단계를 고려하여 토핑 콘크리트를 타설하지 않은 미합성 휨강도와 토핑콘크리트를 타설한 합성 휨강도가 있다. 콘크리트구조기준 2012¹⁾에 따라 TRS 부재의 휨강도를 산정할 경우에는 프리스트레스가 도입된 휨재의 설계방법을 따른다. 합성 TRS부재의 휨강도는 토핑콘크리트와 PC 부재의 합성거동여부에 따라 달라지며 미합성 TRS부재의 경우는 압축력을 받는 토핑콘크리트가 없기 때문에 시공과정에서 생기는 시공하중을 PC 부재만으로 지지할 수 있도록 설계하여야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 콘크리트구조기준에 대하여 TRS 부재의 휨강도를 평가하고자 한다. 특히 리브의 깊이와 토핑콘크리트의 유무에 따른 휨강도 변화를 관찰하고 현행 설계기준식의 적합성을 파악하고자 한다. 또한 Layer 모델에 의한 비선형 단면해석을 실시하고 그 결과를 실험결과와 비교하여 해석방법의 적합성도 평가한다.

2. 기존 연구분석

국내 프리스트레스트 중공슬래브의 대표적인 예로는 Hollow Core Slab (이하 HCS)가 있다. HCS는 슬래브 단면에 원형, 타원형 또는 다각형의 중공을 생성하여 콘크리트 재료물량 감소는 물론 자중을 경감시킬 수 있으며, 상하단의 플랜지에 프리스트레스를 도입함으로써 기존의 철근 콘크리트 슬래브에 비해 매우 향상된 휨강도 및 강성을 제공할 수 있도록 구조적으로 최적화된 프리캐스트 슬래브 부재이다.

이와 같은 HCS의 성능과 관련하여 국내외에서 많은 연구²⁻¹³⁾가 진행되어 왔으며, 현재 이를 이용한 PC구조물의 시공이 이루어져 왔다. 최근의 연구로서, 임주혁³⁾ 등은 일련의 연구를 통하여 HCS 부재의 휨성능은 우수하지만 제작특성상 수직전단 보강 및 수평전단 연결재를 설치할 수 없어, 합성 및 전단성능에 유의하여야 함을 지적하였다. 즉 HCS가 생산성 및 경제성이 뛰어나지만 수직 및 수평전단 연결재의 설치가 어렵기 때문에 콘크리트의 전단성능에만 의존해야 한다. 따라서 높은 하중이 발생하는 구조물에서는 설계하중을 만족시키기 위해서 단면의 크기가 지나치게 비대해질 우려가 있기 때문에 오히려 비경제적으로 설계될 수 있다.

기존 HCS의 장점을 보완한 공법으로서는 Ribs Plus Slab (이하 RPS)가 있다. 이 슬래브는 EPS를 매입하고 콘크리트를 타설함으로써 슬래브자중을 감소시키는 다중 역T형상을 갖는 프리스트레스트 중공슬래브이다. 박금성^{14,15)} 등의 연구에서는 RPS가 다중역T형상을 갖춤으로써 HCS에 비해 리브폭이 넓어 전단연결재의 적용이 용이하고 접합부의 중공면적을 조절가능하다고 주장하였으며, 결과적으로 RPS의 합성성능과 접합부 일체성이 뛰어난 것으로

나타났다. 다만 이 부재의 경우에는 공장에서 성형된 몰드위에 타설하여 제작하는 방식이기 때문에 반복성이 높은 바닥부재로 사용하기에는 다소 생산성이 떨어지는 단점이 있다.

HCS와 RPS의 장단점을 보완한 공법으로서 TRS가 개발되었다. TRS는 다중 역T형상을 갖춤으로써 전단연결재의 설치가 용이하고 접합부의 중공면적 조절이 가능하며 슬립포머방식을 사용하여 생산성이 향상된 하프PC형 중공슬래브이다. 이 연구에서는 TRS의 개발에 따른 기초 연구로서 TRS의 휨성능을 규명하기 위한 실험을 실시하고자 한다.

3. TRS부재의 휨강도 설계기준 검토

TRS부재의 휨강도 설계 시에는 합성 TRS부재와 미합성 TRS부재에 대하여 각각의 내력검토가 필요하다. 그 이유는 합성 TRS부재와 미합성 TRS부재의 하중발생 시의 응력 분포가 다르기 때문이다.

국내 콘크리트 구조설계기준에서는 강도설계법에 근거하여 다음과 같이 휨강도를 산정한다.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (1)$$

$$M_n = A_p f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

$$a = \frac{A_p f_{ps} + A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (3)$$

여기서, f_{ck} 는 토핑 콘크리트의 압축강도, f_{ps} 는 부재의 공칭강도에서 PS강연선의 응력, A_p 와 A_s 는 각각 하부 PS강재의 단면적, 인장철근의 단면적이며, d_p , d 는 각각 압축단부에서 하부 PS 강재의 도심, 인장철근 도심까지의 거리임.

또한, 현행 콘크리트구조기준에서는 극한상태에서 PS강재의 응력은 Eq. (4)와 같이 계산할 수 있도록 하고 있다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right] \quad (4)$$

여기서, f_{pu} 는 PS강재의 인장강도, γ_p 는 PS강재의 종류에 따른 계수, β_1 은 중립축 깊이 c 에 대한 a 와의 비(a/c), ρ_p 는 PS 강재 비($= A_p/bd_p$), ω 는 인장철근의 강제지수($= \rho f_y/f_{ck} \rho = A_s/bd$), ω' 는 압축철근의 강제지수($= \rho' f_y/f_{ck} \rho' = A_s'/bd$)임.

Eq. (4)는 근사식으로서 긴장재의 인장응력을 간단하게 계산할 수 있지만, 긴장재가 충분히 변형하지 못할 경우 긴장재의 인장응력을 과대평가할 수 있다. 미합성 TRS 부재의 경우 하부에는 플랜지가 있는 반면에 상부에는 웨브만 있기 때문에 정모멘트 작용시 상대적으로 압축력을

4. 실험

4.1 실험체 계획

Table 1에 나타난 바와 같이, 리브 깊이가 다른 두 가지의 TRS 부재에 대하여 토핑콘크리트 유무를 고려하여 총 4개의 실험체를 계획하고 또한 제품 생산과정에서 제품의 상단부에 형성되는 콘크리트 턱의 제거 여부를 고려한 실험체 1개를 포함하여 총 5개의 Full scale 실험체를 계획하였다.

제품 생산시 형성되는 턱은 Fig. 3과 같이 전단보강을 위해 배근한 래티스 바 때문에 시공과정에서 형성되며, 실제 현장에서는 부재가 양생되기 전에 이 콘크리트 턱을 제거하여 가능한 상부면을 매끈하게 처리하여 제품을 생산한다. 이는 추가의 생산공정을 요구하기 때문에 토핑콘크리트와의 합성거동에서 문제가 되지 않는다면 굳이 제거할 필요는 없다. 따라서 이 콘크리트 턱의 유무가 합성 TRS 부재의 휨거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여, F-32-T-a 실험체는 이 콘크리트 턱을 제거하지 않고 상부 토핑콘크리트를 타설하여 제작한 실험체이다.

Fig. 4는 실험체의 상세를 나타낸 그림으로써, 모든 실험체에는 직경 12.7 mm PS강연선 10개가 하부에 배치되어 3있으며, 상부 토핑콘크리트에는 직경 9.5 mm PS강연선이 배치되어 있다. 제품 제작시 PS강연선에 작용시킨 프리스트레스의 크기는 1,066 MPa이다. 또한, 하부에는 직경 5 mm 와이어 메쉬가 200 mm 간격으로 배치되어 있다. 그리고 전단철근으로서, 깊이 240 mm의 미합성 TRS 부재에는 12 mm 직경의 래티스바가 배치되어 있고, 깊이 320 mm의 미합성 TRS 부재에는 10 mm 직경의 래티스바가 배치되어 있다. 토핑콘크리트가 있는 3개의 실험체의 토핑부분에는 직경 13 mm 철근을 가로, 세로 200 mm 간격으로 배치하였다.

Fig. 2 Stress-strain relation of TRS

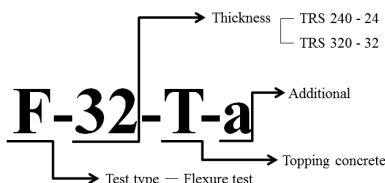
받는 PC 콘크리트의 유효폭이 작기 때문에 TRS 부재의 압축측에서 파괴될 가능성이 높다. 즉, 인장력을 받는 긴장재와 용접철망이 항복강도에 도달하기 어려워지게 된다. 따라서 미합성 TRS 부재의 휨강도를 계산하기 위해서는 미합성 TRS 부재의 변형률과 내력관계를 나타낸 Fig. 2와 같이 인장재의 순인장변형률을 산정한 뒤, 순인장변형률과 각 지배단면에 대한 한계변형률을 비교하여 공칭휨모멘트의 강도감소 계수를 산정하여야 하며, 본 논문에서는 콘크리트구조기준 및 ACI 318-11¹⁶⁾에서 제시한 휨재의 순인장변형률에 따른 강도감소계수 산정방식을 따랐다.

합성 TRS부재의 휨강도는 미합성 TRS부재와 같이 변형률적합조건과 평형방정식을 통해 산정하였으나, 산정결과 모두 인장지배 단면으로서 전술한 약산식으로도 설계가 가능하다.

본 연구에서 대상으로 하는 깊이 240 mm 및 320 mm 미합성 및 합성 TRS부재에 대하여 산정한 강도감소계수는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1 Specimen list

Specimen Name	TRS		CIP		b_w	d_p	s	Reinforcements			Strength reduction factor (ϕ)
	$f_{ck,PC}$ (MPa)	h_{PC} (mm)	$f_{ck,CIP}$ (MPa)	h_{CIP} (mm)				f_y (MPa)	f_{pu} (MPa)	f_{ys} (MPa)	
F-24	51.03	240	-	-	300	210.0	d12@100	553.5	1924	666	$\phi = 0.65$
F-32	62.77	320	-	-	300	290.0	d10@100	553.5	1924	677	$\phi = 0.68$
F-24-T	51.03	240	37.35	110	300	298.6	d12@100	553.5	1924	666	$\phi = 0.85$
F-32-T	62.77	320	35.03	130	300	387.3	d10@100	553.5	1924	677	$\phi = 0.85$
F-32-T-a	62.77	320	36.89	130	300	387.3	d10@100	553.5	1924	677	No surface treatment $\phi = 0.85$



$f_{ck,PC}$ and h_{PC} are compressive strength and depth of TRS, respectively, $f_{ck,CIP}$ and h_{CIP} are compressive strength and thickness of topping concrete, respectively, b_w and d_p are effective width and effective depth of TRS, s is space of lattice, f_y , f_{pu} and f_{ys} are yield strengths of WWF, PS strand and lattice bar, respectively.

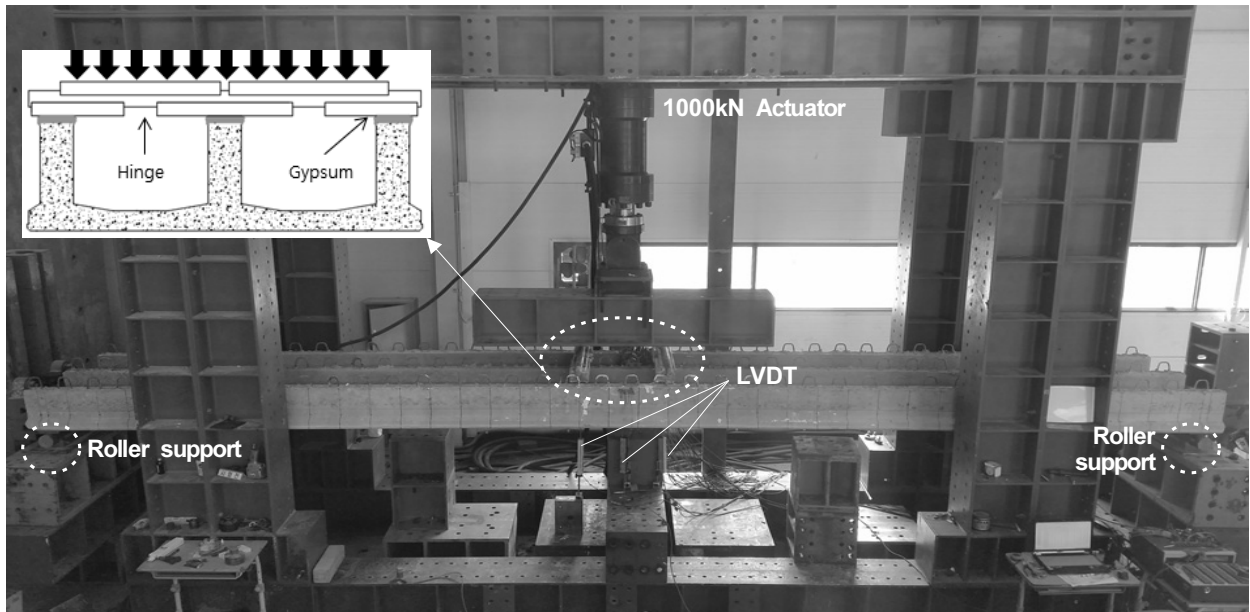


Fig. 3 Test setup

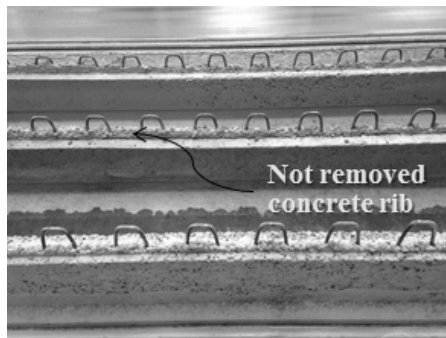


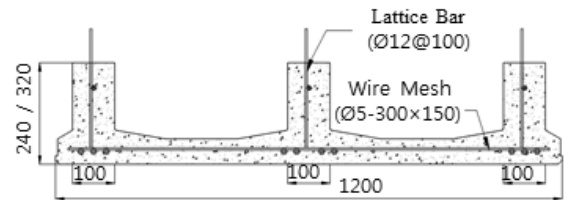
Fig. 4 Raised spot concrete formed due to lattice bars during slip-forming

실험체 제작에 사용된 콘크리트에서 PC부분의 콘크리트강도는 설계강도인 40 MPa를 초과하여 51.03 MPa와 62.77 MPa로 나타났으며, 토폽콘크리트의 강도는 37.35 MPa와 35.03 MPa로 나타났다.

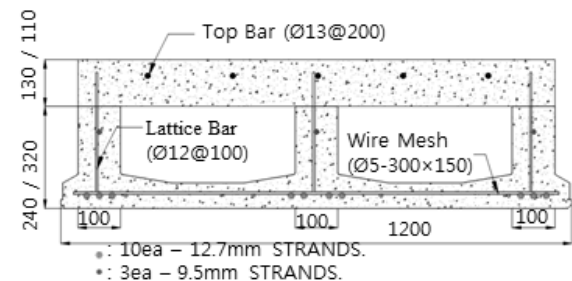
4.2 실험방법

실험체의 길이는 8,000 mm이며 Fig. 5와 같이 2점 가력으로 정하중 실험을 하였다. 반력점과 가력점간 거리는 3,550 mm, 가력점간 거리는 600 mm이며, 실험체 가력지점의 불규칙한 표면에 의해서 불균등하게 하중이 가력되는 현상을 방지하기 위하여 실험체 표면에 석고를 바르고 힌지를 올려 고른 표면을 만들었다. 또한 미합성 TRS 실험체의 경우 3개의 리브에 균등하게 힘이 전달될 수 있도록 3개의 힌지받침판 위에 봉강을 올리고 다시 이 봉강위에 2개의 힌지 받침판을 올린 뒤 가력하였다.

실험동안 부재의 변형특성을 파악하기 위하여 가력점 하부와 중앙하부에 변위계를 설치하여 처짐을 측정하였



(a) TRS without topping



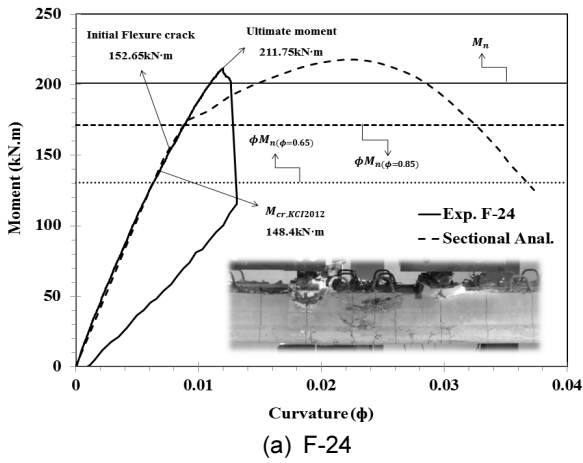
(b) TRS with topping

Fig. 5 Sectional details of TRS specimens

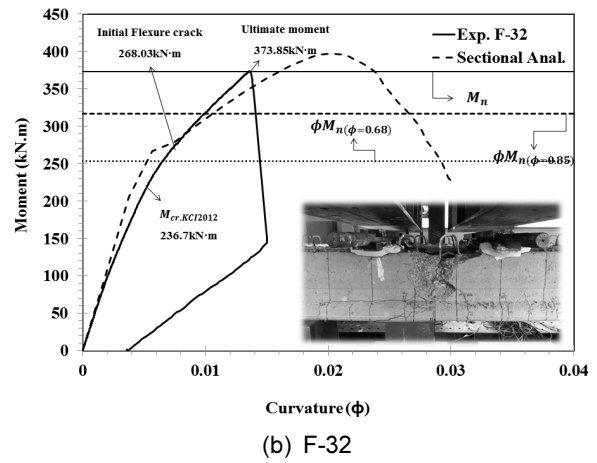
다. 또한 가력점 위치에서 PS강연선과 용접철망의 인장 변형과 콘크리트의 압축변형을 측정하기 위하여 변형도 게이지를 부착하였다.

4.3 실험결과

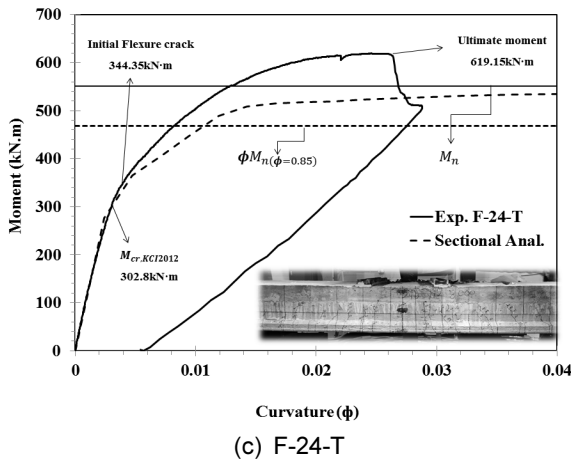
실험결과 나타난, 각 실험체의 모멘트-곡률 그래프는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 그림에서 실선은 실험결과를 나타내며 점선은 Layer model로 비선형 단면해석한 결과를 나타낸다. 또한 수평 실선과 점선은 기준식에 따라 산정한 공칭모멘트와 이 공칭모멘트에 강도감소계수를 고려한 값을 나타낸다.



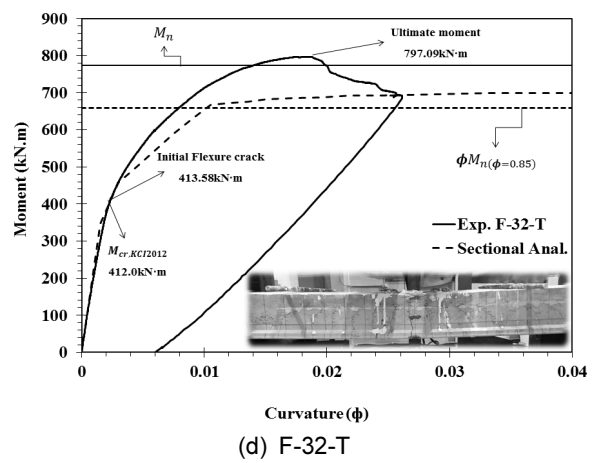
(a) F-24



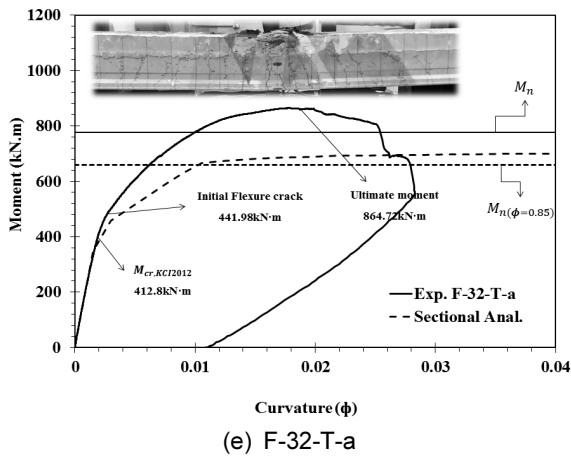
(b) F-32



(c) F-24-T



(d) F-32-T



(e) F-32-T-a

Fig. 6 Moment-curvature curves of specimens

토평 콘크리트가 없는 F-24와 F-32 실험체는 초기균열 및 최대내력이 콘크리트구조기준에서 정하고 있는 균열 강도와 공칭강도 보다 높게 나타났음을 알 수 있다. 비록 초기균열은 인장측에서 발생하였지만, 궁극적으로는 압축측 콘크리트가 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 강연선 및 와이매쉬의 내력에 비해 상대적으로 압축콘크리트 측의 단면적이 작기 때문에 압축파괴가 발생한 것으로 판단된다. 이에 따라 그래프에서도 최대내력에 도달한 뒤 급격하게 내력이 저하되는 취성파괴의 양상을 보였다.

Fig. 7은 F-24 실험체에 대하여, 가력점 위치에 있는 인장측 용접철망과 PS강연선의 모멘트-변형도 곡선을 나타

낸 그래프이다. W2와 ST3는 각각 하부플렌지 중앙의 용접철망과 PS강연선의 게이지 번호를 나타내며, ST3-1은 PS강연선의 프리스트레스에 의한 변형도 0.0053을 합산하여 나타난 곡선이다. 프리스트레스에 의한 변형도란 TRS 부재 생산시 강연선에 가해진 프리스트레스에 의한 변형에 단면수축, 슬립 등과 같은 프스트레싱 손실을 고려한 유효프스트레스를 탄성계수로 나누어 산출한 초기변형값을 말한다. 최대하중시 인장측 용접철망의 변형도는 항복변형도인 0.0027에 미치지 않음을 알 수 있고 PS강연선은 실험체 제작시 작용되는 프리스트레스에 의한 변형률 0.0053을 고려하더라도, 항복변형률인 0.0086에 미

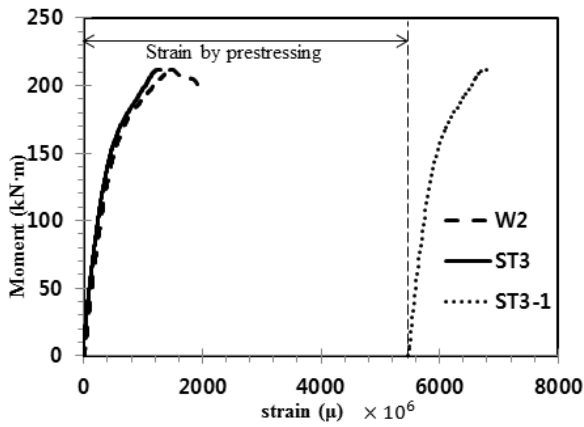
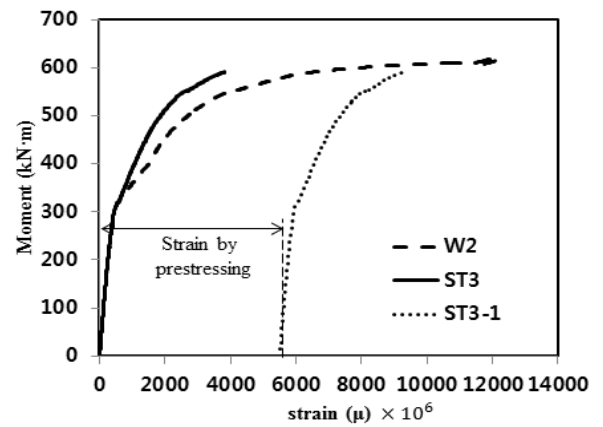


Fig. 7 Strain of PS strand and wire mesh of the specimen without topping (F24)

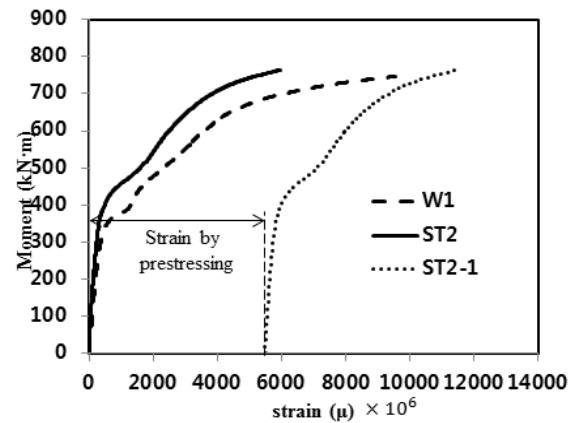
치지 않는 것으로 나타났다. 이는 실험체의 휨내력 산정 시 변형률 적합조건과 평형방정식을 통해 산정한 인장재의 인장변형률과 같은 결과로서, 실험체가 압축지배단면임을 의미한다. 즉, 이 경우 강도감소계수는 0.65를 사용해야 한다.

Fig. 8에서 토핑이 있는 실험체의 경우에도 모든 실험체의 초기균열 및 최대내력이 계산결과보다 높게 나타나, 콘크리트구조기준에 따른 설계식이 실험체의 내력을 안전측으로 평가함을 알 수 있다. 특히 토핑콘크리트가 있음에 따라, 콘크리트의 압축축 파괴가 상대적으로 줄어들었다. Fig. 8에 나타낸 인장측 PS강연선과 와이어메쉬의 변형도를 보면, 토핑이 없는 미합성 TRS부재와 달리, 인장측 PS강연선과 와이어메쉬가 PS강연선의 항복변형도(0.0086)에 가깝게 변형하여 두 재료 모두 인장항복강도에 도달하였음을 알 수 있다.

제품생산시 래티스 바 때문에 리브 상부에 형성되는 턱을 제거하지 않은 F-32-T-a 실험체의 모멘트-곡률곡선을 보면, 턱을 제거한 F-32-T 실험체와 거의 동일한 휨강도를 보이고 오히려 최대강도 이후에는 다소 연성적인 양상을 보이는 것으로 나타났다. 이는 돌출된 래티스바 때문에 시공과정중에 형성되는 콘크리트 턱을 굳이 제거할 필요가 없음을 의미한다.



(a) F-24-T



(b) F-32-T

Fig. 8 Strain of PS strand and wire mesh of the specimens with topping

4.4 실험결과의 분석

TRS 부재와 토핑콘크리트가 타설된 합성부재에 대한 휨강도계산결과와 실험결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 휨실험을 통하여 나타난 합성 TRS 부재의 휨강도는 전술한 콘크리트구조기준에 따른 설계식으로 적절하게 예측될 수 있는 것으로 사료된다. 부재의 깊이 240 mm와 320 mm 모두에 대하여, 실험결과 나타난 균열모멘트와 최대모멘트가 기준식에 의한 계산결과를 안전측으로

Table 2 Flexural strength of specimens

Specimen Name	Material strength (MPa)				Prediction (kN·m)				Test (kN·m)		Strength ratio	
	$f_{ck,PC}$	$f_{ck,CIP}$	f_y	f_{pe}	M_{cr}	M_n	ϕM_n	$M_{n,SA}$	$M_{i,cr}$	M_u	$M_{i,cr}/M_{cr}$	M_u/M_n
F-24	51.03	-	553.5	1066	148.4	201.2	130.8	217.7	152.65	211.75	1.03	1.05
F-32	62.77	-	553.5	1066	236.7	373.1	253.5	397.2	268.03	373.85	1.13	1.002
F-24-T	51.03	37.35	553.5	1066	302.8	550.6	468.0	536.0	344.35	619.15	1.14	1.12
F-32-T	62.77	35.03	553.5	1066	412.0	774.3	658.1	706.0	413.58	797.09	1.00	1.03
F-32-T-a	62.77	36.89	553.5	1066	412.8	776.8	660.3	711.1	441.98	864.72	1.07	1.11

$f_{ck,PC}$ and $f_{ck,CIP}$ are compressive strength of TRS and topping concrete, respectively, f_y and f_{pe} are yield strengths of wire mesh and PS strand, respectively, M_{cr} is strength of flexural failure, M_n and ϕM_n is bending moment and decreased bending moment, respectively, $M_{n,SA}$ is bending moment of sectional analysis, $M_{i,cr}$ and M_u is strength of initial crack and maximum bendig, respectively.

상회하고 있는 것으로 나타났다.

토펅 콘크리트가 없는 TRS부재의 경우에는 인장측에 설치된 PS강연선과 용접철망이 항복하지 않고 콘크리트의 압축측 파괴에 의해 최대내력에 도달하고, 토펅이 있는 경우에는 인장항복에 도달하여 최대내력시에는 연성적인 거동을 보이는 것으로 사료된다.

또한 레티스바 때문에 시공중 형성되는 상부 콘크리트 턱을 제거하지 않더라도 합성부재의 휨강도는 저하되지 않는 것으로 확인되었다. 이는 돌출된 레티스바 때문에 시공과정중에 형성되는 콘크리트 턱을 굳이 제거할 필요가 없음을 의미한다.

5. 비선형 단면해석

휨거동을 파악하기 위하여 각 재료의 비선형 특성을 고려한 비선형 단면해석을 수행하였다. 해석은 Berkeley에서 개발한 X-tract 프로그램¹⁷⁾을 이용하였으며, Fig. 9는 단면해석 시 사용한 재료모델을 나타내고 있다. (a)는 PC 콘크리트의 재료모델을 나타내고 있으며, 압축강도는 재료 시험 결과값인 51.03 MPa (깊이 240 mm 부재)와 62.77 MPa (깊이 320 mm 부재)로 하였다. (b)와 (c)는 각각 PS 강연선과 와이어메쉬의 재료모델을 나타낸다. PS강연선과 와이어메쉬는 제조사에서 제시한 시험성적서를 근거로 bi-linear

로 이상화 하였으며 강연선의 경우에는 변형경화 강성을 고려하지 않은 반면에 와이어메쉬는 탄성강성의 0.15%로 변형경화 강성을 고려하였다.

Fig. 10은 해석결과 응력분포상태를 나타낸 것으로서, 토펅이 없는 경우에는 TRS 부재의 하부 플랜지부가 대부분 인장응력상태이고, 웨브 부분이 압축응력상태이다. 즉 중립축이 하부 플랜지와 웨브의 경계부에 형성됨을 알 수 있다. 토펅이 있는 실험체들은 토펅콘크리트내에서 중립축이 형성되고 이에 따라 바닥 플랜지와 웨브(리브)의 대부분이 인장응력상태가 되어, 현장타설된 콘크리트의 압축과 PC부재내 강연선 그리고 와이어메쉬의 인장에 의해 휨강도가 발현됨을 알 수 있다.

해석결과 나타난 모멘트-곡률관계는 Fig. 6에 실험결과와 함께 나타내었다. 토펅이 없는 실험체들에 대한 해석결과 모멘트-곡률관계는 Fig. 6(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 전체적으로 실험결과와 최대강도를 적절하게 묘사하고 있지만 실험결과에 비하여 다소 연성적인 관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

토펅이 있는 실험체들의 경우에는 인장측 강연선과 와이어메쉬의 인장에 의해 전체거동이 지배되는 것으로 나타났다. 실제 실험에서는 인장측에서 일정변형을 보이다가 변형이 커질 경우에는 궁극적으로 압축측 콘크리트파괴가 발생하여 최대강도 부근에서 소정의 변형을 보인후

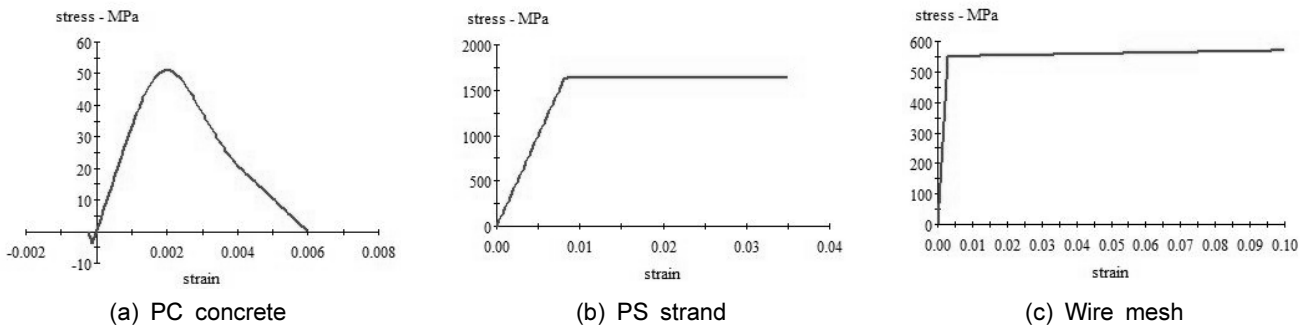


Fig. 9 Material models for sectional analysis

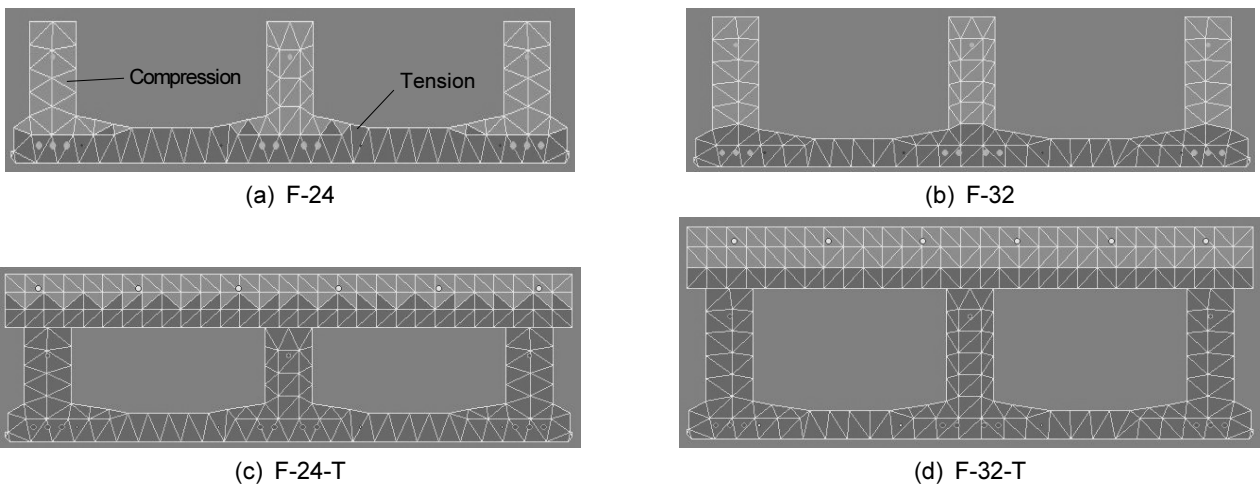


Fig. 10 Stress distribution from sectional analysis

내력이 저하되는 양상을 보인 반면에 해석에서는 강연선과 와이어메쉬의 소성구간에서의 계속하여 변형이 증가하는 양상을 보였다.

전체적으로 토핑이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 X-tract 프로그램을 이용한 비선형 해석은 초기 선형거동이 유사하게 묘사된 반면 초기균열 이후에는 비선형구간에서의 거동차이가 나타났다. 이는 슬립포머방식으로 성형된 콘크리트가 일반적인 타설콘크리트에 비해 슬립프가 낮고 공극률이 높아 다소 취성적인 파괴양상이 나타나는데, 이러한 특성이 해석에 적절히 반영되지 않은 것으로 판단된다. 또한 균열이 증가함에 따라서 프리스트레스의 손실이 발생하게 되는데, 프리스트레스가 저하되면 부재의 강성이 저하되며 급격한 내력저하를 발생시키므로 취성적 거동이 발생했다고 판단된다. 때문에 보다 정확한 해석 모델을 제시하기 위해서는 슬립포머방식으로 성형된 콘크리트의 물리적 특성과 프리스트레스가 손실됨에 따른 TRS부재의 내력손실을 분석하여 거동특성을 해석에 반영해야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트구조기준에 대하여 TRS 부재의 휨강도를 평가하기 위하여 Full scale의 부재에 대한 휨실험을 실시하였다. 특히 리브의 깊이와 토핑콘크리트의 유무에 따른 휨강도 변화를 관찰하고 현행 설계기준식의 적합성을 파악하였다. 또한 Layer 모델에 의한 비선형 단면해석을 실시하고 그 결과를 실험결과와 비교함으로써 해석방법의 적합성도 평가하였다. 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 휨실험을 통하여 나타난 TRS 부재의 휨강도는 토핑 유무와 상관없이, 전술한 현행 설계기준식으로 적절하게 예측될 수 있는 것으로 사료된다. 부재의 깊이 240 mm와 320 mm 모두에 대하여, 실험결과 나타난 균열모멘트와 최대모멘트가 기준식에 의한 계산결과를 안전측으로 상회하고 있는 것으로 나타났다. 또한 레티스바 때문에 시공중 형성되는 상부 콘크리트 턱을 제거하지 않더라도 합성부재의 휨강도는 저하되지 않는 것으로 확인되었으며 이로부터, 돌출된 레티스바 때문에 시공과정중에 형성되는 콘크리트 턱을 굳이 제거할 필요가 없는 것으로 사료된다.
- 2) 전체적으로 토핑이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 X-tract 프로그램을 이용한 비선형 해석은 초기 거동을 적절하게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 점도가 낮은 콘크리트의 취성적인 특성이 적절하게 반영되지 않은 것과 더불어 프리스트레스 손실에 의해서 최대강도 이후 다소 취성적인 파괴 형태를 보이는 특성이 고려될 필요가 있는 것으로

사료된다. 따라서 TRS의 코아분석을 통하여 TRS를 이루고있는 콘크리트의 물리적 특성을 규명하고 프리스트레스에 의한 내력손실을 분석하여 해석에 반영해야 한다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 삼성건설(주)의 지원과, 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(NRF-2015H1C1A1035953)의 지원에 의해 수행됨.

References

1. Korea Concrete Institute, Concrete Structure Design Code and Commentary, Kimoon dang, 2012, pp.123-137.
2. Kim, I. G., Park, H. S., and Yu, S. Y., "Flexural Behaviors of High Performance Hollow Core Slabs with Upper Strands", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.14, No.2, pp.156-163.
3. Im, J. H., Park, M. K., Lee, D. H., Seo, S. Y., and Kim, K. S., "Evaluation of Horizontal Shear Strength of Prestressed Hollow-Core Slabs with Cast-in-Place Topping Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.6, 2014, pp.741-749.
4. Park, S. W., Seok, K. Y., Kim, G. C., and Knag, J. W., "Flexural Capacity evaluation of One-way Hollow Half Slab and General Hollow Slab", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.30, No.11, 2014, pp.13-21.
5. Yoon, S. W., Seok, K. Y., Kim, G. C., and Knag, J. W., "Shear Performance Analysis of One-way Hollow Slab According to Shear Reinforcement", *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.18, No.6, 2014, pp.97-104.
6. Han, S. W., Moon, K. H., Kang, D. H., Im, J. H., and Kim, Y. N., "Evaluation of Shear Strength of Precast-prestressed Hollow Core Slabs Based on Experiments", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.5, 2014, pp.635-642.
7. Kim, G. C., Seok, K. Y., and Knag, J. W., "Evaluation of Flexural Performance of One-Way Voided Slabs", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.29, No.8, 2013, pp.11-18.
8. Lee, S. S., Hong, S. Y., Park, K. S., and Bae, K. W., "Evaluation of Shear Strength of Composite Hollow Core Slab with Concrete Topping", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.29, No.7, 2013, pp.47-54.
9. Lee, S. S., Hong, S. Y., Park, K. S., and Bae, K. W., "An Evaluation on the Flexural Capacity of Void Slabs with Prestressed Half PC", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.28, No.2, 2012, pp.11-18.
10. Mones, R. M., and Brena, S. f., "Hollow-Core Slabs with Cast-In-Place Concrete Toppings: A Study of Interfacial

- Shear Strength”, *PCI Journal*, Vol.58, No.3, 2013, pp.124-141.
11. Palmer, K. D., and Schultz, A. E., “Experimental Investigation of the Web-shear Strength of Deep Hollow-Core Units”, *PCI Journal*, Vol.56, No.3, 2011, pp.83-104.
 12. Hawkins, N. M., and Ghosh, S. K., “Shear Strength of Hollow-Core Slabs”, *PCI Journal*, Vol.51, No.1, 2006, pp.110-114.
 13. Becker, R. J., and Buettner, D. R., “Shear Tests of Extruded Hollow Core Slabs”, *PCI Journal*, Vol.30, No.2, 1985, pp.40-54.
 14. Park, K. S., Lee, S. S., and Choi, Y. C., “Evaluation on the Flexural Performance for Connections with the Inverted Rib-plus Precast Concrete Slab(RPS) to PC Beam”, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.27, No.5, 2011, pp.69-76.
 15. Park, K. S., Lee, S. S., and Choi, Y. C., “Evaluation on the Horizontal Shear Strength of Precast Concrete Slab with the Inverted-Rib-Plus”, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.15, No.6, 2011, pp.156-165.
 16. ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI318R-11)*, American Concrete Institute, Detroit, 2011, pp.78-79.
 17. Chadwell, C., and Imbsen, R., “*XTRACT: A Tool for Axial Force - Ultimate Curvature Interactions*”, Conference proceeding, Structures 2004: Building on the Past, Securing the Future, May 22-26, 2004, pp.1-9, United States.

요 약 건물의 자중을 저감시킴으로서 시공성을 향상시키기 위한 방안으로 증공 PC슬래브에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 같은 측면에서, 최근 새로운 형태의 부분 PC 슬래브 시스템인 Tripple Ribs Slab (TRS)가 개발되었다. TRS부재는 3개의 리브와 스트랜드로 프리스트레싱된 바닥구조로 구성되어 있다. TRS 바닥구조는 웨브와 웨브 사이에 스티로폼(styrofoam)을 채운 뒤 토핑 콘크리트를 타설함으로써 슬래브 시스템을 구축한다. 본 연구에서는 TRS의 휨성능을 검토하기 위해 휨실험을 진행하였다. Full scale로 제작된 5개의 실험체를 제작한 뒤 휨과괴되도록 단순지지조건으로 실험하였으며 실험결과 강도를 기준 식들과 비교하였다. 실험에서의 변수는 부재의 깊이와 토핑 또는 슬립포밍시 형성되는 추가의 콘크리트 턱의 유무이다. 또한 실험체들에 대하여 비선형 단면해석을 실시하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 실험으로부터, TRS는 설계하중을 충분히 지지할 수 있는 휨성능과 연성능력을 가지고 있으며 실험체의 강도는 기준 식으로 적절하게 예측될 수 있는 것으로 나타났다. 추가의 턱은 실험체의 강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으며 이에 따라 이들 턱은 굳이 추가의 작업을 통하여 제거할 필요는 없는 것으로 사료된다. 비선형 단면해석을 통하여 TRS의 휨거동을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 슬립포밍에 의한 콘크리트의 취성적인 특성을 해석에서 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하프 PC 슬래브, TRS, 휨실험, 실물규격, 깊이, 토핑콘크리트, 콘크리트 턱, 비선형 해석