싱가포르 적용 TSC 합성보의 유로코드(Eurocode) 기반 설계법

Design Method according to Eurocode for TSC Composite Beams applied to Singapore

김 종 찬 (Jong-Chan Kim), (주)센벡스 대리, jckim@senkuzo.com

김 대 경 (Dae-Kyung Kim), (주)센벡스 과장

김 정 현 (Jeong-Hyun Kim), (주)센벡스 사원

정 재 욱 (Jae-Wook Jeong), SEN SG Pte. Ltd. 법인장

이 승 환 (Seung-Hwan Lee), (주)센코어테크 대표이사

이 창 남 (Chang-Nam Lee), (주)센벡스 대표이사

1. 머리말

국내 건설시장의 신규 프로젝트 물량이 지속적으로 줄어듦에 따라 건설업계의 해외 건설시장으로의 진출이 확대되고 있다. 이에 따라 국내 구조설계 기술자들에게 해외 구조기준을 활용할 수 있는 능력이 요구되고 있다. 하지만 미국의 구조기준(ACI 318[1], AISC 360[2])을 기반으로 제정된 국내 건축구조기준(이하 KBC 2016[3])에 익숙한 국내 구조기술자들은 유럽의 구조기준인 유로코드(Eurocode)[4]-[6] 등 해외 구조기준에 대한 숙련도가 낮아 해외 건설 프로젝트 실무에 어려움을 겪고 있다.

한편 강구조 및 철근콘크리트 구조의 장점을 살리고 단점을 상호보완하기 위하여 다양한 강-콘크리트 합성구조를 개발하여 건설 프로젝트에 적용하고 있다. 이 중 TSC(Thin Steel-plate Composite) 합성보는 실험연구를 통하여 구조성능 및 내화성능을 검증하였고[7]-[21] 다수의 특허를 등록하였다(표 1 참조). 이를 기반으로 현재까지 다양한 건설 프로젝트에 적용되고 있다.

최근 싱가포르의 도시개발공사인 JTC(Jurong Town Corporation)가 공공발주한 대형 물류창고 프로젝트에 TSC 합성보 공법이 제안 및 채택되었다. 싱가포르는 국가 건축 구조설계 시 표준기준으로 유로코드[4]-[6]를 채택하고 있어 TSC 합성보의 구조설계를 위하여 유로코드[4]-[6]에 따른 설계방법을 정립하게 되었다. 이에 본 기사에서는 TSC 합성보에 대한 소개와 구조 및 내화 성능 검증 현황, 그리고 KBC 2016[3]와 유로코드[4]-[6]를 이용한 TSC 합성보 구조설계 방법에 대하여 논하고자 한다.

표 1. TSC 합성보 관련 특허

특허명	특허등록번호	등록일
성형 강판 콘크리트 보	제 0617878 호	2006.08.23
TSC 보의 강선긴장 보강 공법	제 0777566 호	2007.11.12
상부 플랜지를 안쪽으로 접어 넣은 TSC 보	제 0872959 호	2008.12.02
트러스덱 바닥판을 TSC보 측면에 부착한 띠쇠에 얹어 조정하는 합성보 공법	제 1000269호	2010.12.03
3조각 하이브리드 빔 및 그 제조방법	제 1404515호	2014.05.30
강판 조립 합성보	제 1469798호	2014.12.01

2. TSC 합성보

2.1 개발 배경 및 주요 강점

TSC 합성보는 가공조립된 U형의 강재 보 안에 콘크리트를 타설하여 채우는 합성구조 공법으로 그림 1과 같이 슬래브를 포함하여 T형의 형상이다. U형 단면의 강재 보는 하부 플레이트-웨브-상부플레이트로 구성된다. 여기서 상부 플레이트에 전단연결재로 스터드를 용접하여 콘크리트슬래브와 강재 보의

일체성을 확보하며, 이에 TSC 합성보의 U형강판-내부콘크리트-콘크리트슬래브로 이루어진 T형의 전체 합성단면이 설계강도를 발휘한다. 이때 U형 강판이 부재의 최단측에 배치되어 인장재 역할을 하기 때문에 휨에 대한 강성 및 강도를 효율적으로 확보할 수 있다. 또한 TSC 합성보의 U형 강판은 그 자체로 휨강성이 충분하기 때문에 시공 시 콘크리트 타설 측압에 견딜 수 있는 거푸집의 기능을 수행할 수 있고, 기존 철근콘크리트 보 시공에 사용되는 재래식 거푸집 및 동바리 없이 무지주 시공이 가능하다.

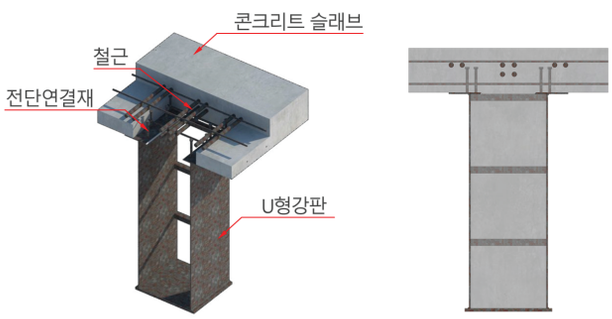


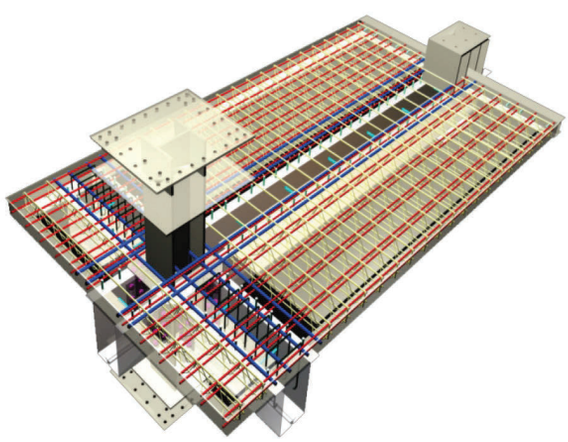
그림 1. TSC 합성보의 형상 및 구성

2.2 구조성능 검증

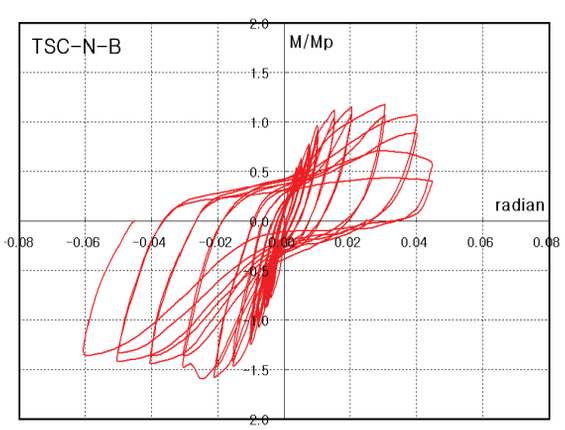
국내 다수의 학술논문집에 TSC 합성보의 구조실험을 통한 성능검증 결과가 게재되었다. 김상모와 김규석[7] 및 김상섭 등[8]은 TSC보의 단조가력 실험을 통하여 기존 H형강 합성보 설계법을 이용한 TSC 합성보의 구조설계가 가능함을 입증하였고, 전단연결재에 따른 TSC 합성보의 휨거동을 규명하는 등 TSC 합성보의 구조특성 분석 및 구조설계와 시공에 필요한 기초자료를 제시하였다. 그 외 포스트텐션 공법 적용 TSC 합성보의 구조성능 증진 실험검증[9], 판 두께와 춤이 낮은 병목형 TSC 합성보의 휨성능 구조실험기반 검증[10], 전단연결재 형상에 따른 TSC 합성보의 전단내력성능 실험검증[11] 등의 연구를 통하여 TSC 합성보의 구조성능이 검증되었다.

TSC 합성보와 다양한 종류의 기둥 간 접합부의 실험연구를 통하여 TSC 합성보로 이루어진 골조 접합부의 내진성능을 검증하였다. 그림 2에 제시된 SRC 기둥과 TSC 합성보로 구성된 내진접합부의 구조실험 성능검증[12]을 시작으로, 김성진 등[13]은 강판 영구거푸집 기둥과 TSC 합성보로 구성된 접합부의 반복가력실험을 통하여 내진성능을 평가하였고, 황현종 등[14]은 콘크리트 기둥과 TSC 합성보로 이루어진 내진접합부의 구조실험 성능검증을 수행하였다. 박홍근 등[15]은 강재기둥과 TSC 합성보로 이루어진 합성 내진접합부의 주기하중 실험으로 내진규정에 만족하는 접합부 공법을 개발하였으며, 박창희 등[16]은 TSC 합성보와 H형강으로 구성된 십자형 접합부의 강축방향 반복가력 구조성능실험으로 합성 접합부의 내진성능

(a) 실험체 설치 셋업 전경



(b) TSC 합성보-SRC 기둥 접합부 실험체



(c) 실험결과 모멘트-회전각 이력곡선

그림 2. SRC 기둥-TSC 합성보 접합부의 구조성능실험 셋업 및 하중변위이력곡선[12]

평가 및 한계상태를 제어할 수 있는 설계법을 제안하였다. 그 외 TSC 합성보와 철근 선조립기둥(Pre-fabricated Reinforced Concrete, PRC 기둥)으로 이루어진 접합부의 반복횡가력 구조실험 수행 및 내진성능의 해석[17],앵글 선조립 합성기둥(Pre-fabricated Steel Reinforced Concrete, PSRC 기둥)과 TSC 합성보 접합부의 주기하중 가력 실험으로 내진 접합부 상세 및 접합부 전단설계법 제안[18], 원심력을 이용한 고강도 철근콘크리트 기둥(Centrifugal Reinforced Concrete Column, CRC 기둥)과 TSC 합성보로 이루어진 외부 접합부의 반복가력 실험[19]을 수행하였다.

국내뿐만 아니라 국외 학술논문집에 TSC 합성보와 다양한 구조의 기둥 부재간 합성접합부의 구조성능실험 결과를 게재하여 국제적으로 그 당위성을 입증하였다. Park et al.[20]은 철근 선조립 기둥(PRC) 및 원심력 이용 고강도 철근콘크리트 기둥(CRC기둥)과 TSC 합성보로 이루어진 접합부의 반복가력 실험연구를 수행하였고, Lee et al.[21]은 H형강 기둥과 TSC 합성보, 그리고 골데크-콘크리트 슬래브로 이루어진 접합부의 반복가력 실험연구를 수행하였다. Hwang et al.[22]은 앵글 선조립 합성기둥(PSRC기둥)과 TSC 합성보 접합부의 반복가력 실험연구 결과를 발표하였다.

2.3 내화성능 검증

TSC 합성보는 상하부 플랜지 및 웨브 강판이 노출되어 있기 때문에 화재 시 설계강도를 발휘하기 위해서는 내화성능을 확보해야한다. 이에 구조성능 검증에 더하여 다양한 내화성능 연구를 수행하였다. TSC 합성보의 내화성능 평가를 위하여 부재 형상의 종류, 가력 하중, 내화피복재 보강방법 등을 주요 변수로 내화실험을 수행하였고 수학적 수치해석을 통하여 결과를 평가하였다.[23] 그리고 고온에서 TSC 합성보의 소성모멘트의 변화, 내화피복 및 콘크리트 내 보강근의 효율성을 고려한 내화실험[24]을 실시하였다. 또한 25mm 내화피복재 뿜칠 TSC 합성보의 3시간 내화성능 확보 여부를 하중의 재하 및 비재하된 각각의 상황을 실험적으로 검증[25]하였다.

국내 건축물에 TSC 합성보를 적용하기 위하여 2008년부터 주기적으로 한국건설기술연구원의 내화구조 인정을 갱신받고 있다.[26] 그림 3은 최근의 내화구조인정서로 TSC 합성보는 16mm와 21mm 내화뿜칠에 대하여 각각 2시간과 3시간, 0.65mm와 1.30mm와 3.30mm 내화도료는 각각 1시간, 2시간, 3시간의 내화구조인정서이다.

그림 3. TSC 합성보 내화구조인정서

3. TSC 합성보 관련 국내 구조기준과 유로코드

KBC 2016[3]와 유로코드[4]-[6]의 합성구조 규정을 비교하면 강재단면 및 합성단면을 구성하는 강재 요소의 분류체계, 설계식의 구성, 기반 이론 및 철학 측면에서 많은 차이가 있다. TSC 합성보 구조설계와 관련된 주요 규정은 아래와 같다.

3.1 강도감소계수

KBC 2016[3]은 부재 공칭강도에 강도감소계수를 곱하여 설계강도를 산정하도록 규정하고 있다. 반면에 유로코드[4]-[6]는 공칭 재료강도에 재료강도계수를 나누어 줄어든 설계재료강도를 산정하여 부재강도를 계산한다. 여기서 재료강도감소계수는 국가별 규정(National Annex)을 따르도록 되어있다.

KBC 2016[3]의 합성단면 설계휨강도와 전단강도의 강도감소계수는 아래와 같다.

- 합성단면의 휨강도

$$\phi_b = 0.90 \tag{1}$$

- 강재의 전단강도

$$\phi_v = 0.90 \tag{2a}$$

- 콘크리트와 철근 또는 강재단면과 철근의 전단강도

$$\phi_v = 0.75 \tag{2b}$$

유로코드[4]-[6]에서는 콘크리트와 철근, 강재의 재료강도계수를 각각 다르게 규정하고 있다. TSC 합성보에 적용되는 재료강도계수는 아래와 같다.

$$\gamma_c = 1.5 \tag{3a}$$

$$\gamma_s = 1.15 \tag{3b}$$

$$\gamma_M = 1.0 \tag{3c}$$

여기서, γ_c, γ_s, γ_M는 각각 콘크리트, 철근, 강재의 재료강도 계수이다.

3.2 강재단면을 구성하는 요소의 분류

KBC 2016[3]에서는 강재단면을 구성하는 요소를 콤팩트(조밀)요소, 비콤팩트(비조밀)요소, 세장판요소 세 가지로 분류한다. 반면 유로코드[4]-[6]에서는 강재단면을 구성하는 요소를 Class 1부터 Class 4까지 총 네 가지로 분류한다.

- Class 1: 강도저감 없이 소성해석에서 요구하는 회전성능을 소성힌지부에서 발휘할 수 있는 강재단면
- Class 2: 소성모멘트강도를 발휘할 수 있으나, 국부좌굴로 인하여 회전성능에 한계를 갖는 강재단면
- Class 3: 압축대 연단이 항복강도에 도달하는 항복모멘트강도를 발휘할 수 있으나, 국부좌굴로 인하여 소성모멘트강도를 발휘할 수 없는 강재단면
- Class 4: 단면 내 항복응력 발생 이전에 국부좌굴이 발생하는 강재단면

즉, Class 1과 Class 2는 조밀요소, Class 3은 비조밀요소, 그리고 Class 4는 세장판요소와 같다고 볼 수 있다. 강재단면 요소별 판폭두께비에 따라 분류하며 KBC 2016[3]과 유로코드[4]-[6]에서 요소 분류를 위한 판폭두께비 제한값을 다르게 규정하고 있다. KBC 2016[3]에서 TSC 합성보의 U형강판의 요소별 판폭두께비 제한값은 아래와 같다.

a. 콘크리트 타설 전 강재단면

- 정모멘트에 대한 상부 플랜지(b_f/t_f)

$$\lambda_p = 0.38\sqrt{E/F_y} \tag{4a}$$

$$\lambda_r = 0.95\sqrt{k_c E/F_L} \tag{4b}$$

- 부모멘트에 대한 하부플렌지(b_p/t_p)

$$\lambda_p = 1.12\sqrt{E/F_y} \tag{5a}$$

$$\lambda_r = 1.40\sqrt{E/F_y} \tag{5b}$$

- 정-부모멘트에 대한 웨브(h_c/t_w)

$$\lambda_p = \frac{(h_c/h_p)\sqrt{E/F_y}}{(0.54M_p/M_y - 0.09)^2} \tag{6a}$$

$$\lambda_r = 0.57\sqrt{k_c E/F_L} \tag{6b}$$

b. 콘크리트 타설 후 합성단면

- 정-부모멘트에 대한 플랜지(b_f/t_f, b_p/t_p)

$$\lambda_p = 2.26\sqrt{E/F_y} \tag{7a}$$

$$\lambda_r = 3.00\sqrt{E/F_y} \tag{7b}$$

$$\lambda_{\max} = 5.00\sqrt{E/F_y} \tag{7c}$$

- 정-부모멘트에 대한 웨브(h_c/t_w)

$$\lambda_p = 3.00\sqrt{E/F_y} \tag{8a}$$

$$\lambda_r = 5.70\sqrt{E/F_y} \tag{8b}$$

$$\lambda_{\max} = 5.70\sqrt{E/F_y} \tag{8c}$$

여기서, λ_p=조밀단면 판폭두께비 제한값, λ_r=비조밀단면 판폭두께비 제한값, $\lambda_{\max}$=합성부재 최대 허용 판폭두께비 제한값, E=강재 탄성계수, F_y=강재 항복강도, $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$ (이때, $0.35 \le k_c \le 0.76$), M_p=소성모멘트강도, M_y=항복모멘트강도.

유로코드[4]-[6]에서 TSC 합성보 U형강판의 요소별 판폭두께비 제한값은 표 2와 3과 같다. 유로코드[4]-[6]에 규정된 웨브에의 판폭두께비(h_w/t_w) 제한값은 Class 1과 Class 2에서 웨브요소 전체 깊이 대비 압축응력 작용 구간의 비(α)에 따라 달라지며, Class 3에서 강재단면 압축대 연단에 항복응력이 작용할 때 적합조건에 따라 구할 수 있는 인장대 연단 응력비(ψ)에 따라 달라진다.

3.3 TSC 합성보의 휨강도

3.3.1 콘크리트 타설 전 강재단면의 휨강도

TSC 합성보의 U형 강재단면은 강축에 휨을 받는 1축대칭 단면이므로 KBC 2016[3]의 "0706.4 콤팩트웨브 또는 비콤팩트웨브를 갖는 강축휨을 받는 H형강부재"에 제시된 규정에 따라 공칭휨강도를 산정할 수 있다.[7] 따라서 공칭휨강도 M_n은 압축플랜지항복강도, 횡좌굴강도, 플랜지국부좌굴강도, 인장플랜지항복강도 한계상태 중 최소값으로 정의할 수 있다. 다만, TSC 합성보는 웨브간 설치되는 수평앵글에 의해 충분히 횡지지 되어있으므로 횡좌굴강도는 고려하지 않는다.

a. 압축플랜지항복강도

$$M_n = R_{pc}M_{yc} = R_{pc}F_y S_{xc} \tag{9}$$

b. 압축플랜지국부좌굴강도

- 비조밀 플랜지의 경우

$$M_n = R_{pc}M_{yc} - (R_{pc}M_{yc} - F_L S_{xc})\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \tag{10}$$

- 세장판 플랜지의 경우

$$M_n = \frac{0.9Ek_cS_{xc}}{\lambda^2} \tag{11}$$

c. 인장플랜지항복강도

$$M_n = R_{pt}M_{yt} = R_{pt}F_yS_{xt} \tag{12}$$

유로코드[4]-[6]는 강재단면의 휨강도를 강재단면 분류에 따라 각각 다른 설계식을 통해 산정하도록 규정한다. TSC 합성보의 콘크리트 타설 전 U형 강재단면의 휨강도는 아래의 식(Eurocode 3[5], Eq. (6.13)-(6.15))에 따라 계산할 수 있다.

a. Class 1 또는 Class 2 단면

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} \tag{13}$$

b. Class 3 단면

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,\min}f_y}{\gamma_{M0}} \tag{14}$$

c. Class 4 단면

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,\min}f_y}{\gamma_{M0}} \tag{15}$$

여기서 $W_{el,\min}$=최소 탄성 2차단면모멘트, $W_{eff,\min}$=최소 유효 2차단면모멘트이다. $W_{el,\min}$와 $W_{eff,\min}$은 단면 내 최대 탄성응력의 크기에 따라 달라진다.

표 2. TSC 합성보 플랜지요소 판폭두께비 제한값

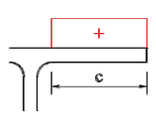
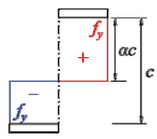
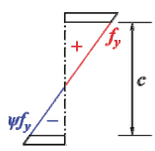
단면요소 분류	단면 및 응력분포	콘크리트 타설 전 강재단면 제한값	콘크리트 타설 후 합성단면 제한값
		(b_f/t_f 또는 b_p/t_p)	
Class 1		$\leq 9\sqrt{235/f_y}$	
Class 2		$\leq 10\sqrt{235/f_y}$	$\leq 14\sqrt{235/f_y}$
Class 3		$\leq 14\sqrt{235/f_y}$	$\leq 20\sqrt{235/f_y}$

표 3. TSC 합성보 웨브요소 판폭두께비 제한값

단면요소 분류	단면 및 응력분포	강재단면 및 합성단면 제한값(h_w/t_w)
Class 1		(1) α 〉 0.5인 경우 $\leq 396\sqrt{235/f_y}/(13\alpha-1)$ (2) $\alpha \leq$ 0.5인 경우 $\leq 36\sqrt{235/f_y}/\alpha$
Class 2		(1) α 〉 0.5인 경우 $\leq 456\sqrt{235/f_y}/(13\alpha-1)$ (2) $\alpha \leq$ 0.5인 경우 $\leq 41.5\sqrt{235/f_y}/\alpha$
Class 3		(1) ψ 〉 -1인 경우 $\leq 42\sqrt{235/f_y}/(0.67+0.33\psi)$ (2) $\psi \leq$ -1인 경우 $\leq 62\sqrt{235/f_y}(1-\psi)\sqrt{\psi}$

3.3.2 콘크리트 타설 이후 합성단면의 휨강도

TSC 합성보는 충전형 합성부재로 볼 수 있으므로 KBC 2016[3]의 "0709.3.4 충전형합성부재의 휨강도"에 따라 휨강도를 산정한다. TSC 합성보의 단면은 조밀, 비조밀, 세장판으로 분류하며, 이는 식 (7)과 (8)을 이용하여 판별한다. 조밀단면인 TSC 합성보의 휨강도는 합성단면의 소성응력분포로 구한 소성모멘트강도 M_p(식 (16))로 계산하며, 세장단면의 공칭휨강도는 첫 항복모멘트 M_y로 구한다. 그 중간인 비조밀단면인 TSC 합성보의 휨강도는 식 (17)과 같이 판폭두께비에 따라 소성모멘트와 항복모멘트를 선형보간 계산한다.

$$M_n = M_p \tag{16}$$

$$M_n = M_p - (M_p - M_y)\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \tag{17}$$

TSC 합성보의 휨강도는 철근콘크리트 슬래브의 유효폭 내 기여도를 함께 고려하여 T형 단면의 내력으로 평가한다. 이를 위하여 상부 플랜지에는 철근콘크리트 슬래브와 TSC 합성보가 합성거동 하도록 전단연결재를 설치한다. KBC 2016[3]에서는 정모멘트가 작용하는 합성부재의 휨강도를 소성응력분포를 고려하여 산정할 때, 콘크리트 슬래브의 압축력 C를 강재보와 콘크리트 슬래브 사이의 합성정도에 따라 구한다. 따라서 소성모멘트 산정 시 콘크리트 슬래브의 압축력 C는 KBC 2016[3]의 0709.3.2.1 해설식에 따라 아래 중 최소값으로 결

정된다.

$$C = A_{sw}F_y + 2A_{sf}F_y \quad (18a)$$

$$C = 0.85f_{ck}A_c \quad (18b)$$

$$C = \sum Q_n \quad (18c)$$

여기서 f_{ck}=콘크리트의 설계기준압축강도(MPa), A_c=유효폭 안에 있는 콘크리트슬래브의 면적, A_s= 강재단면의 총면적, A_{sw}=강재웨브의 단면적, A_{sf}=강재플랜지의 단면적, F_y=강재의 설계기준항복강도, $\sum Q_n$=정모멘트가 최대가 되는 위치와 모멘트가 0인 위치 사이에 있는 스터드앵커의 공칭강도의 합.

슬래브의 압축력 C가 전단연결재강도의 합 $\sum Q_n$로 결정되는 경우 완전합성보로 설계하며, 그렇지 않으면 불완전합성보로 설계한다. 불완전합성보의 압축블록깊이 a는 아래 식 (19)에 따라 산정한다.

$$a = \frac{C}{0.85f_{ck}b_e} \quad (19)$$

슬래브의 압축력 C의 크기에 따라 소성중립축 위치가 달라진다. 결국, 강재보와 콘크리트슬래브 사이의 합성정도에 따라 소성중립축 위치가 달라지며, 휨강도 역시 달라진다.

유로코드[(4)-(6)]에서는 합성단면의 휨강도(M_{Rd})를 강재단면 분류 및 합성률에 따라 나누어 정의하고 있다. 합성단면이 Class 1 또는 Class 2인 경우, 콘크리트슬래브와 강재단면 간 전단연결재의 저항성능을 기반으로 구한 합성률에 따라 완전합성 소성모멘트와 부분합성 소성모멘트로 나누어 휨강도를 산정한다. 그림 4는 콘크리트슬래브와 강재단면 보의 합성률에 따른 소성응력분포 및 소성모멘트의 변화를 나타낸다. 부분합성 소성모멘트 강도(M_{Rd})는 그림 3과 같이 콘크리트슬래브에 작용하는 압축력을 합성률($\eta = N_c/N_{cf}$)만큼 줄여 계산하거나 식 (20)을 이용하여 보수적으로 구한다.

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd})\frac{N_c}{N_{cf}} \quad (20)$$

여기서 $M_{pl,a,Rd}$=강재단면 소성모멘트, $M_{pl,Rd}$=완전합성단면 소성모멘트, N_c= 콘크리트슬래브 작용 압축력, N_{cf}=전단연결재가 충분한 콘크리트슬래브 작용 압축력, f_{cd}=콘크리트 실린더 압축강도.

TSC 합성보의 합성률($\eta = N_c/N_{cf}$)은 N_c와 N_{cf}의 비율로 구한다. 여기서 N_{cf}는 완전합성 소성모멘트를 발휘할 때 슬래브에 작용하는 압축력, N_c는 슬래브에 작용하는 압축력으로 N_c는 전단연결재의 설계강도(P_{Rd}), 콘크리트슬래브 유효폭 내 소성응력강도($N_{pl,c}$), 그리고 강재의 소성응력강도($N_{pl,a}$) 중 최소값으로 결정한다. 위 세 가지 강도는 아래 계산식에 따라 구한다.

$$P_{Rd} = \frac{0.8f_u\pi d^2/4}{\gamma_V} \text{ 또는 } 0.29\alpha d^2\frac{\sqrt{(f_{ck}E_{cm})}}{\gamma_V} \quad (21)$$

$$N_{pl,c} = 0.85f_{cd}b_eD_s \quad (22)$$

$$N_{pl,a} = A_af_{yd} + A_{r,b}f_{yd,b} \quad (23)$$

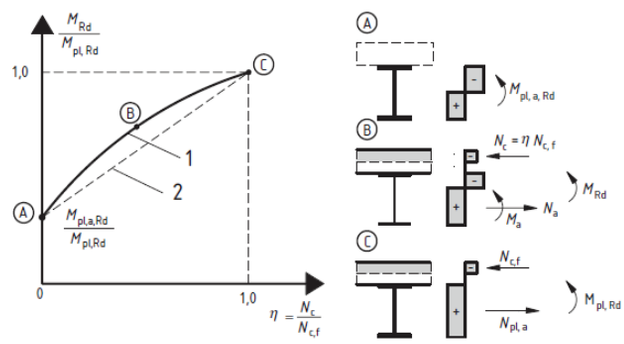


그림 4. 합성률에 따른 소성 휨모멘트 강도의 변화

한편 유로코드[(4)-(6)]에서는 합성부재 합성률(η)의 하한치를 두어 최소 합성률을 확보하도록 아래와 같이 규정한다.

$$\eta \geq 1 - \left(\frac{355}{fy}\right)(0.30 - 0.015L_e),\ \eta \geq 0.4 \quad (24)$$

여기서 L_e=부재에 작용하는 휨모멘트가 0인 지점간 거리.

3.4 합성부재의 처짐

KBC 2016[(3)]에서는 합성단면의 설계가 처짐에 의해 결정되는 경우 사용하중의 조합에 대하여 탄성범위 내에 있거나, 비탄성거동에 의한 확대효과를 고려하도록 규정한다. 여기서 합성단면 처짐은 유효휨강성으로 계산하며, KBC 2016[(3)]에서는 유효 단면2차모멘트 I_{eff}를 선형탄성이론으로 구하는 I_{equiv}의 0.75배 한 값을 유효휨강성 산정 시 사용한다. 콘크리트 수축 및 크리프에 의한 합성 부재의 장기처짐은 KBC 2016[(3)]에서는 직접적인 지침이나 규정을 제시하지 않고 있다.

유로코드[(4)-(6)]에서도 장기처짐에 관한 지침이나 규정을 명확히 제시하고 있지는 않으나, 장기처짐을 고려하기 위한 탄성계수비와 콘크리트 균열 시 휨강성과 관련된 내용을 유로코드 4[(6)]의 5.4.2.2과 5.4.2.3에서 각각 제시하고 있다. 위 규정과 유로코드 4[(6)] 기반 예제집을 활용하여 TSC 합성보의 장기처짐을 검토하였고, 싱가포르 감리단에서 TSC 합성보 장기처짐 검토 결과를 최종 승인하였다.

3.4.1 TSC 합성보의 장기처짐(유로코드 4[6])

(1) 장기하중에 대한 탄성계수비

콘크리트의 탄성계수는 시간이 지나면서 감소하게 되고, 장기적으로 작용하는 하중의 종류에 따라 그 감소되는 정도가 다르게 나타난다. 따라서 장기처짐 산정 시 시간 변화에 따른 콘크리트 탄성계수를 반영해야한다. 유로코드 4[6]는 경과시간과 하중 종류에 따라 감소되는 콘크리트의 탄성계수를 탄성계수비 n_L로써 장기처짐 산정 시 고려하며, 식 (25)에 따라 구할 수 있다.

$$n_L = n_0(1+\psi_L\phi_t) \qquad (25)$$

여기서, n_L은 콘크리트 탄성계수와 강재 탄성계수의 비율이며, ϕ_t와 ψ_L은 각각 시간과 하중의 특성을 반영하는 크리프 상수이다.

(2) 장기하중에 대한 처짐

총 장기처짐 δ_{total}을 산정하는 계산식과 이를 구성하는 계산항은 아래와 같이 정의한다.

$$\delta_{total} = \delta_{perm} + \delta_{var} = \delta_{perm} + (\delta_{var1} + \delta_{var2}) \qquad (26)$$

영구적인 작용에 의한 처짐 δ_{perm}은 시공 중 하중에 의해 발생하는 처짐 δ_{const}과 마감 하중으로 부재 단부에 인해 균열이 발생하였을 때의 처짐을 합산하여 산정한다.

한편 δ_{var}는 δ_{var1}과 δ_{var2}을 합산하여 계산하며, δ_{var1}은 재령 28일에 가하는 하중에 대한 처짐, δ_{var2}은 바닥 마감 하중과 최초 활하중이 작용한 시점으로부터 충분히 시간이 지났을 때 증가하는 처짐이다. δ_{var1}과 δ_{var2} 모두 장기효과를 고려하여 계산하는 유효 단면2차모멘트로 계산한다.

4. 맺음말

최근 싱가포르에 TSC 합성보를 적용하면서, 유로코드[4]-[6]로 TSC 합성보를 설계하였다. 이에 본 기사에서는 유로코드[4]-[6]에 의한 TSC 합성보의 설계방법을 다루었다. 먼저 TSC 합성보의 소개 및 기존 실험연구에 의한 구조성능과 내화성능 검증 결과를 제시하였고, TSC 합성보의 KBC 2016[3]과 유로코드[4]-[6]의 주요 규정을 정리하여 제시하였다. 두 기준을 이용한 TSC 합성보 구조설계의 큰 틀은 유사하였으나 강도감소계수, 강재단면 및 합성단면의 분류 체계 및 판폭두께비 계산식, 합성 단면의 휨강도 산정식 등에서 서로 다른 점을 확인하였다.

앞으로 싱가포르뿐만 아니라 전 세계 건설시장에 수많은 국내 기업이 진출할 것이다. 이에 맞추어 국내 구조기술자들은 다양한 구조기준을 활용할 수 있는 능력을 갖추고 그에 기반한 이론에 대한 이해도를 높여야 할 것이다. 본 기사가 국내 구조기술자들의 역량 강화에 보탬이 되기를 바란다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14), American Concrete Institute, 2014.
2. ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2016.
3. 국토교통부 고시 건축구조기준 및 해설(KBC 2016), 대한건축학회, 2016.
4. BS EN 1992.2004, Eurocode 2. Design of concrete structures, British Standards, 2004.
5. BS EN 1993.2005, Eurocode 3. Design of steel structures, British Standards, 2005.
6. BS EN 1994.2004, Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, British Standards, 2004.
7. 김상모, 김규석: T형 합성보의 내력평가에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 15권 4호, pp. 467-474, 2003.
8. 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석: 단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 16권 2호, pp. 225-233, 2004.
9. 김성배, 김도훈, 서동기, 김상모, 이창남, 김상섭: 포스트텐션으로 보강한 합성보의 내력평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 20권 1호, pp. 59-66,2004.
10. 김성배, 이창남, 김상섭: 단순지지 병목형 TSC 합성보의 휨 성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 22권 1호, pp. 11-17, 2006.
11. 김성배, 김상섭: T형 합성보의 시어 커넥터 형상에 따른 전단내력 평가에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 18권 2호, pp. 279-288, 2006.
12. 김성배, 함정태, 이창남, 김상섭: SRC기둥-TSC보 접합부의 거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 22권 6호, pp. 55-62, 2006.
13. 김성진, 김성배, 김상섭: 시스템 기둥-보 접합부의 내진성능 평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 23권 3호, pp. 37-44, 2007.
14. 황현종, 박홍근, 이철호, 박창희, 이창남, 김형섭, 김성배: 콘크리트 채움 U형 강재보-콘크리트 기둥 접합부의 내진성능, 한국강구조학회 논문집, 23권 1호, pp. 83-97, 2011
15. 박홍근, 이철호, 박창희, 황현종, 이창남, 김형섭, 김성배: 콘크리트채움 U형 강재보-강재기둥 합성 내진접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 23권 3호, pp. 337-347, 2011.
16. 박창희, 이철호, 박홍근, 황현종, 이창남, 김형섭, 김성배: 콘크

리트채움 U형 합성보-H형강기둥 십자형 합성접합부의 내진성능, 한국강구조학회 논문집, 23권 4호, pp. 503-514, 2011.
17. 김형섭, 이창남, 이승환, 김법렬: 콘크리트채움 U형 합성보와 선조립기둥의 내진접합부 성능실험, 대한건축학회논문집 구조계, 28권 4호, pp. 55-64, 2012.
18. 황현종, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭: TSC 합성보-PSRC 합성기둥 접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회 논문집, 25권 6호, pp. 601-612, 2013.
19. 정재천, 이창남, 이승환, 김형섭: TSC 합성보와 CRC 합성기둥의 내진접합부 성능실험, 대한건축학회논문집 구조계, 30권 11호, pp. 21-28, 2014.
20. Park H, Hwang HJ, Lee CH, Park CH, Lee CN: Cyclic loading test for concrete0filled U-shaped steel beam-RC column connections, Engineering Structures, 36, pp. 325-336, 2012.
21. Lee CH, Park H, Park CH, Hwang HJ, Lee CN, Kim HS, Kim SB: Cyclic Seismic Testing of Composite Concrete-Filled U-Shaped Steel Beam to H-Shaped Column Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, 139(3), 2013.
22. Hwang HJ, Eom TS, Park H, Lee SH, Kim HS: Cyclic Loading Test for Beam-Column Connections of Concrete-Filled U-Shaped Steel Beams and Concrete-Encased Steel Angle Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, 141(11), 2015.
23. 김성배, 최승관, 이창남, 김상섭: TSC 합성보의 내화성능에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 18권 1호, pp. 113-122, 2006.
24. 최승관, 김성배: TSC 합성보의 화재시 거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구-철근 보강과 하중비에 의한 내화성능의 영향, 대한건축학회논문집 구조계, 24권 1호, pp. 27-35, 2008.
25. 김성배, 이창남, 김우철, 김상섭: 하중재하 영향에 의한 합성보의 화재거동에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지, 23권 2호, pp. 27-35, 2009.
26. 김성배, 이창남, 이준석: 합성구조의 내화구조인정-TSC 합성보 내화구조인정 사례를 중심으로, 한국강구조학회지 기술기사, 21권 5호, pp. 65-69, 2009.