

구속 건조수축을 고려한 PSC BOX 거더교 상부플랜지 균열폭 산정

구영호^{1*}, 한상묵²

Calculation of Crack Width of the Top Flange of PSC Box Girder Bridge Considering Restraint Drying Shrinkage

Young-Ho Ku^{1*}, Sang-Mook Han²

Abstract: The PSCB girder bridge is a closed cross-section in which the top and bottom flanges and the web are integrated, and the structural characteristics are generally different from the bridges in which the girder and the floor plate are separated, so a maintenance plan that reflects the characteristics of the PSCB girder bridge is required. As a result of analyzing damage types by collecting detailed safety diagnosis reports of highway PSCB girder bridges, most of the deterioration and damage occurring during use is concentrated on the top flange. In particular, cracks in the bridge direction on the underside of the top flange occurred in about 70 % of the PSCB girder bridges to be analyzed, and these cracks were judged to be caused by indirect loads such as heat of hydration and drying shrinkage rather than structural cracks caused by external loads. In order to improve durability and reduce maintenance costs of PSCB girder bridges in use, it is necessary to control restraint drying shrinkage cracks from the design stage. Therefore, in this paper, the cracks caused by drying shrinkage under restraint, which is the main cause of cracks under the flanges of the top part of the PSCB girder bridge, were directly calculated using the Gilbert Model, and the influencing factors such as the amount of reinforcing bars, diameter and spacing of reinforcing bars were analyzed. As a result of the analysis, it was found that the crack width caused by restraint drying shrinkage exceeded the allowable crack width of 0.2 mm for reinforcing bars with a reinforcing bar ratio of 0.01 or less based on the H16 reinforcing bar and a reinforcing bar with a diameter greater than H19 based on the reinforcing bar ratio of 0.01. Finally, based on the results of the crack width review, a method for controlling the crack width of the top flange of the PSCB girder bridge was proposed.

Keywords: PSCB girder bridge, Top flange, Bottom flange, Restraint drying shrinkage, Crack, Indirect load

1. 서 론

PSC BOX 거더교(이하, PSCB 거더교)는 상·하부 플랜지와 복부가 일체화된 폐합된 단면으로 일반적으로 거더와 바닥판이 분리된 교량과 구조적 특성이 상이하여 PSCB 거더교의 특성을 반영한 유지관리 방안이 필요하다. 고속도로 PSCB 거더교의 정밀안전진단 보고서를 수집하여 손상 유형을 분석한 결과, 공용 중 발생하는 열화·손상은 대부분 상부플랜지에 집중되어 있으며, 특히 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 분석대상 PSCB 거더교의 약 70%에서 발생하는 것으로 나타났다(Ku and Han, 2022).

Ku and Han(2022)은 PSCB 거더교 상부플랜지 하면 균열

은 다수의 균열이 일정 간격을 두고 불연속적으로 발생하고 누수나 백태 등의 열화·손상을 동반하지 않으며, 균열깊이는 최대 철근 피복깊이까지 발생되었고 균열 폭 및 길이 변화는 크지 않아 진전 가능성이 크지 않은 점 등으로부터 외부하중에 의한 구조적 균열 보다 수화열, 건조수축 등 간접하중에 의한 균열로 원인을 분석하여 제시하고 있다. 그러나 시공초기 건조수축 등의 원인으로 인하여 발생한 균열은 상부플랜지 상·하면에 동시에 발생할 가능성이 크고, 이는 교면포장 손상으로 인한 염해환경 노출 시 내구성 저하의 원인이 되기 때문에 시공초기 발생하는 상부플랜지 균열 제어를 위한 방안이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 국내 도로교설계기준 한계상태설계법에서는 건조수축 또는 온도 등의 간접하중에 의한 균열 제어를 위하여 최소 철근량 조건과 적합한 하중조합과 균열 단면을 기준으로 계산한 철근 응력에 대한 최대 철근직경이 제시되어 있다(MOLIT, 2018). 그러나 PSCB 거더교의 구조계산서를 검토한 결과, 설계 단계에서는 상부플랜지의 균열에 대한 검토는 최소철근량에 대한 검토만 이루어지고 있으며, 이는 공용중

¹정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정, 교신저자

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: kyhk@ex.co.kr

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

발생되는 균열을 제어하기에는 다소 미흡하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 PSCB 거더교 상부플랜지 하면에 발생된 균열 제어를 위하여 구속효과를 고려한 균열 폭을 직접 산정하고 실제 균열 폭 및 간격을 현장조사 결과와 비교하여 적정성을 검토하였다. 또한 국내 설계기준의 간접하중에 의한 균열 폭 기준인 최소철근량 및 철근 직경과 간격에 대한 검토를 통하여 실제 PSCB 거더교 상부플랜지에 발생된 균열 제어를 위한 설계 단계 개선사항을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 구속 건조수축 균열발생 매커니즘

한계상태설계법의 균열폭 계산식은 직접 인장부재의 직접 인장 실험 결과를 바탕으로 유도된 것으로 이웃하는 균열 사이의 철근과 콘크리트의 신장량 차이가 균열폭이 되며, 이때 철근과 콘크리트의 응력 및 변형률은 동일한 인장상태가 된다(MOLIT, 2018). 그러나 건조수축, 온도와 같은 간접하중에 의한 균열은 변형이 구속된 상태에서 발생되며, 이때 철근은 압축상태가 되고 콘크리트는 인장상태가 되어 직접 인장부재의 균열폭 거동 특성과 상이하다.

Fig. 1(a)에 표시된 완전 구속된 부재에서는 콘크리트가 수축함에 따라 균열이 발생할 때까지 구속력 $N(t)$ 가 점진적으로

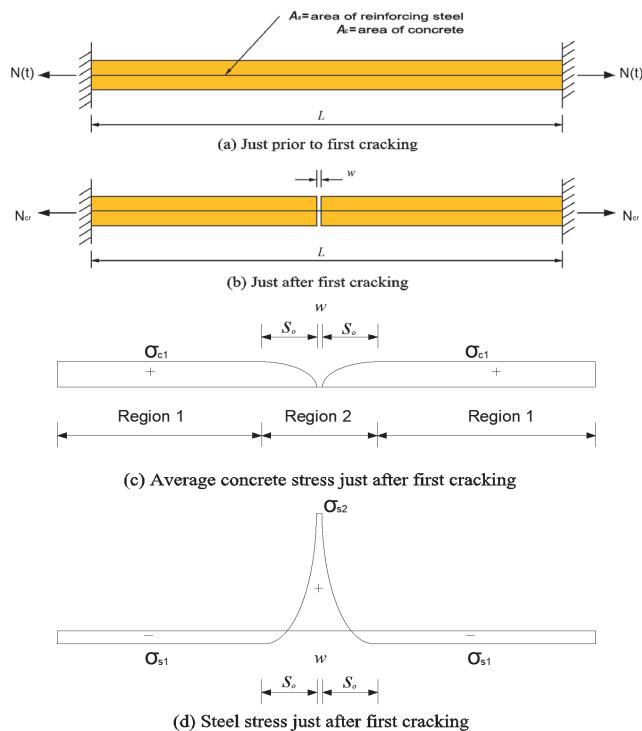


Fig. 1 First cracking in a restrained direct tension member

로 증가하게 되며, 첫 번째 균열 직후 구속력 $N(t)$ 는 N_{cr} 로 감소하고 Fig. 1(b)와 같이 콘크리트의 길이는 탄성적으로 짧아지게 되며, 완전 구속된 상태이기 때문에 부재의 길이변화는 균열폭 w 와 동일해진다. 균열면에서 모든 구속력 N_{cr} 은 철근이 부담하며 콘크리트의 응력은 0이 된다. 균열에 바로 인접한 영역, 즉 균열을 기준으로 일정거리 s_0 까지는 철근과 콘크리트의 부착응력에 따라 Figs. 1(c)와 1(d)와 같이 철근과 콘크리트의 응력은 변화한다.

Fig. 1(c)의 Region 1에서 철근과 콘크리트의 응력은 각각 σ_{s1} 및 σ_{c1} 이며, 균열에서의 철근이 모든 인장력을 부담하고 있기 때문에 완전구속 상태의 철근의 전체 연신율은 0이며, 따라서 σ_{s1} 은 압축상태이다. 평형조건을 만족하기 위해서는 Region 1에서 콘크리트는 인장응력이며 콘크리트가 전달하는 힘 $A_c \sigma_{c1}$ 은 인장력이 있어야 하고, 구속력 N_{cr} 보다 약간 커야 한다.

Fig. 1(c)의 균열을 중심으로 좌우측 s_0 거리까지인 Region 2에서는 콘크리트 응력은 균열면에서는 0이고 Region 1의 σ_{c1} 까지 변화하며, 철근 응력은 균열면에서의 모든 구속력 N_{cr} 을 부담하며 발생한 인장응력 σ_{s2} 에서 Region 1의 σ_{s1} 까지 변화한다.

Fig. 1(b)와 같이 첫 번째 균열이 발생된 후 콘크리트는 더 이상 완전 구속 상태가 아니며, 건조수축이 계속 진행됨에 따라 균열폭이 증가하게 된다. 점진적인 수축의 진행으로 인하여 구속력 $N(t)$ 증가하게 되며, 첫 번째 균열에서 일정 거리에 위치한 곳에서 두 번째 균열이 발생하게 된다.

이후에도 건조수축의 진행에 따라 추가적인 균열이 발생될 수 있지만 균열이 형성됨에 따라 신규 균열이 발생하는데 필요한 수축량이 증가하게 되어 안정화 단계에 이른다.

안정화 단계의 평균 균열 간격 s 및 평균 균열폭 w 는 철근의 양, 배근 상태, 철근과 콘크리트의 부착 품질, 콘크리트의 강도 및 건조수축량에 따라 달라진다.

일반적으로 건조수축 시작 후 처음 몇 개월 동안 균열 패턴이 확립될 때까지 프로세스가 반복되며, 구속된 상태에서의 콘크리트의 균열 발생에 따른 비균열 단면의 응력 이력은 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

2.2 구속 건조수축 균열폭 및 균열간격 산정

PSCB 거더교의 상부플랜지 하면 교축방향 균열은 시공초

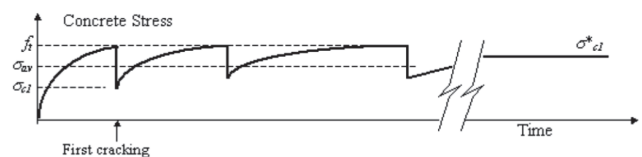


Fig. 2 Concrete stress history in uncracked Region 1(Gilbert, 1992)

기 수화열 또는 부등건조수축 등 내부구속에 의한 영향과 구속 건조수축으로 인한 외부구속 영향으로 발생할 수 있다. 그러나 내부구속에 따라 발생하는 콘크리트의 인장응력은 PSCB 거더교 상부플랜지의 경우, 두께가 약 280 mm 정도로 얇은 편이고 콘크리트의 분할 타설로 인하여 완전 구속보다 구속효과가 작아지게 되어 콘크리트 인장강도를 초과하지 않아 균열이 발생되지 않는 것으로 보고된 바 있다(KEC, 2022). 따라서 본 논문에서는 외부구속에 의한 PSCB 거더교 상부플랜지 하면 교축방향 균열에 대하여 Gilbert Model을 활용하여 균열폭과 균열간격을 산정하고 균열폭 기준의 만족 여부를 검토하였다.

2.2.1 대상 교량 기본정보

고속도로에 공용중인 PSCB 거더교를 대상으로 상부플랜

Table 1 Basic information of target bridge

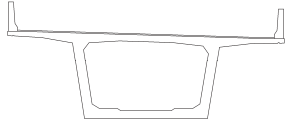
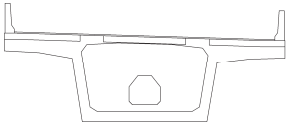
Bridge type	PSC BOX Girder
Construction method	ILM(Incremental Launching Method)
Bridge extension	$L = 40 + 9 @ 50 + 40 = 530$ m
Bridge width	$B = 12.6$ m
Section height	$H = 3$ m
Central section	
Support section	

Table 2 Information of top flange on PSCB girder

Category	Detail	
Section details	Length	5,960 mm
	Section thickness	280 mm
	Bar diameter	15.9 mm
	Bar area	198.6 mm ²
	Bar spacing	125 mm
	Area of steel per m	3,177.6 mm ²
Properties of concrete	Cover thickness	40 mm
	Concrete strength	40 MPa
	Elastic modulus	30,008 MPa
Properties of reinforcement steel	Yield strength	400 MPa
	Elastic modulus	200,000 MPa
Final shrinkage strain ϵ_{cs}^*		0.0006
Final creep coefficient ϕ^*		2.5

지 하면에 발생한 교축방향 균열의 균열폭과 균열간격을 계산하였다.

대상 교량의 기본 정보는 Table 1, 상부플랜지의 제원과 물성은 Table 2에 정리하였고 건조수축 변형률 및 크리프 계수 산정 시 주요 인자인 대기 중 상대습도(RH)는 40%를 적용하였으며(Kim, 2008), 한계상태설계법을 준용하여 계산하였다. 또한 최종 건조수축변형률은 Gilbert(2001)의 연구결과를 인용하여 부재의 두께와 콘크리트 강도를 고려하여 보간법에 의해 0.0006을 적용하였다.

2.2.2 균열폭 및 균열간격 산정 프로세스

PSCB 거더교의 상부플랜지 하면에 초기 구속된 상태에서 의 건조수축으로 인한 교축방향 균열의 균열폭과 균열간격을 산정하기 위해서 Gilbert Model을 활용하였다. 최종 균열폭과 균열간격을 산정하는 과정을 Fig. 3에 정리하였으며, 각 단계별 계산방법은 다음과 같다.

1) 초기 균열 발생 후, 응력 변화구간까지 거리 s_0

구속된 상태에서 최초 균열이 발생된 후, 균열면을 중심으로 응력이 변화하는 구간(Fig. 1(c) Region 2)은 $2s_0$ 이며, 이때 s_0 는 식 (1)로 개략적으로 계산할 수 있다(Favre et al., 1983).

$$s_0 = d_b / 10\rho \quad (1)$$

여기서, d_b 는 철근의 직경이고 ρ 는 철근비로써 A_s/A_c

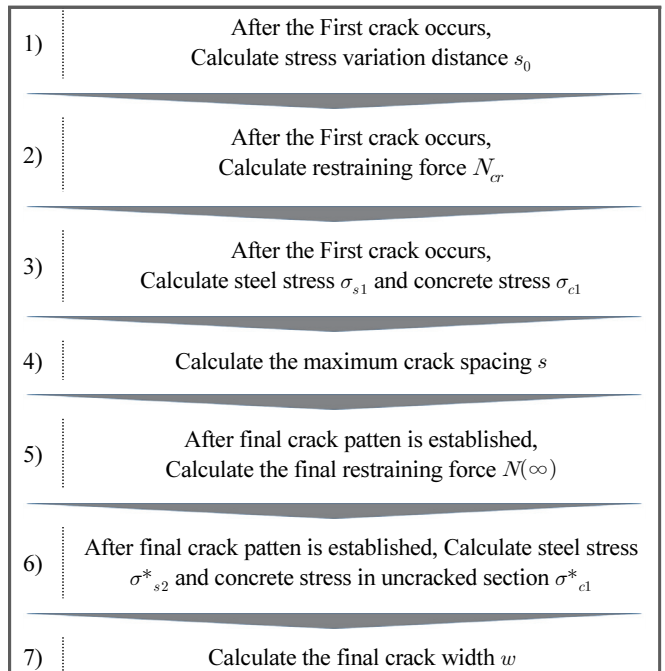


Fig. 3 Calculation process of final crack width and spacing by restraint drying shrinkage

2) 초기 균열 발생 직후의 균열하중 N_{cr}

균열하중 N_{cr} 은 식 (2)와 같으며, 이때 C_1 은 철근과 콘크리트의 초기 응력 산정을 위한 부재의 길이 L , 응력 변화구간 s_0 를 이용하여 식 (3)과 같이 계산할 수 있다(Gilbert, 1992).

$$N_{cr} = \frac{n\rho f_t A_c}{C_1 + n\rho(1 + C_1)} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{2s_0}{3L - 2s_0} \quad (3)$$

여기서, $n = E_s/E_c$, f_t 는 콘크리트의 인장강도(f_{cte} 또는 28일 이후 f_{dm})

3) 초기 균열 발생 후, 철근과 콘크리트의 응력 σ_{s1} 및 σ_{c1}

균열 발생 후의 Fig. 1(c) Region 1의 철근과 콘크리트 응력은 식 (4), (5)로 계산할 수 있으며, 균열면에서의 철근응력은 균열하중 N_{cr} 을 철근이 부담하기 때문에 식 (6)과 같이 계산할 수 있다(Gilbert, 1992).

$$\sigma_{s1} = \frac{2s_0}{3L - 2s_0} \frac{N_{cr}}{A_s} = C_1 \frac{N_{cr}}{A_s} \quad (4)$$

$$\sigma_{c1} = \frac{N_{cr} - \sigma_{s1}A_s}{A_c} = \frac{N_{cr}(1 + C_1)}{A_c} \quad (5)$$

$$\sigma_{s2} = \frac{N_{cr}}{A_s} \quad (6)$$

4) 최대 균열간격 s

최대 균열간격 s 는 식 (7)과 같으며, 계수 ξ 는 유효탄성계수 비 n^* , 콘크리트 비균열 단면의 평균응력 σ_{av} , 최종 건조수축 변형률 ε_{cs}^* 및 콘크리트의 유효 탄성계수 E_c^* 의 관계로부터 식 (8)과 같이 계산할 수 있다(Gilbert, 2001).

$$s = \frac{2s_0(1 + \xi)}{3\xi} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{-n^*\rho(\sigma_{av} + \varepsilon_{cs}^*E_c^*)}{n^*\rho(\sigma_{av} + \varepsilon_{cs}^*E_c^*) + f_t} \quad (8)$$

여기서, $n^* = \frac{E_s}{E_c^*}$, $\sigma_{av} = \frac{\sigma_{c1} + f_t}{2}$, $E_c^* = \frac{E_c}{1 + \phi^*}$

5) 균열 안정화 단계의 최종 구속력 $N(\infty)$

철근량이 충분히 많고 균열로 인하여 철근이 항복되지 않

는다면 최종 구속력 $N(\infty)$ 는 식 (9)로 계산할 수 있으며, 계수 C_2 는 최대 균열간격 및 초기 응력 변화구간 s_0 의 관계로부터 식 (10)과 같다(Gilbert, 1992).

$$N(\infty) = -\frac{n^*A_s}{C_2}(\sigma_{av} + \varepsilon_{cs}^*E_c^*) \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{2s_0}{3s - 2s_0} \quad (10)$$

6) 균열 안정화 단계, 철근 응력 σ_{s2}^* 및 비균열 단면의

콘크리트 응력 σ_{c1}^*

균열 안정화 단계의 철근의 응력 σ_{s2}^* 및 비균열 단면의 콘크리트 응력 σ_{c1}^* 은 식 (11), (12)로 계산할 수 있다(Gilbert, 2001).

$$\sigma_{s2}^* = \frac{N(\infty)}{A_s} \quad (11)$$

$$\sigma_{c1}^* = \frac{N(\infty)(1 + C_2)}{A_c} < f_t \quad (12)$$

7) 최종 균열폭 w

균열면에서 철근이 항복하지 않았다면, 최종 균열폭은 식 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$w = -\left[\frac{\sigma_{c1}^*}{E_c^*} \left(s - \frac{2}{3}s_0 \right) + \varepsilon_{cs}^* s \right] \quad (13)$$

2.3 구속 건조수축 균열폭 및 균열간격 산정 결과

2.3.1 대상 교량의 균열폭 및 균열간격

Gilbert Model을 이용하여 PSCB 거더교 상부플랜지 하면에 교축방향으로 발생하는 균열의 균열폭 및 균열간격을 검토 결과는 Table 3과 같으며, 최대 균열간격은 410 mm, 균열폭은 0.139 mm인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 프리스트레스트 콘크리트의 균열폭 허용기준인 0.2 mm를 만족하고 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(MOLIT, 2021)’의 PSCB 거더교 상부플랜지 상태평가 기준의 b등급 균열폭 기준인 0.2 mm를 만족하는 결과이다. 또한 실제 현장에서 조사된 균열폭(cw: 0.1~0.2 mm) 및 균열간격(s: 300~500 mm)과도 매우 유사하다.

2.3.2 최소철근량 적용시 균열폭 및 균열간격 검토결과

설계기준에서는 최소철근량 기준을 제시하고 있으며, 항복 응력 400 MPa의 철근을 사용할 경우, 도로교설계기준 한계상태설계법의 최소철근비는 $2.9/f_{yp}$, 이전 설계법에서의 최소철

Table 3 Calculate result of Crack width and maximum spacing by Gilbert Model

Category	Restraining force(kN)		Crack width (mm)	Maximum spacing (mm)
	N_{cr}	$N(\infty)$		
Long term	662	627	0.139	410

Table 4 Calculate result of Crack width and maximum spacing according to the minimum reinforcement ratio by Gilbert Model

Category	Restraining force (kN)		Crack width (mm)	Maximum spacing (mm)
	N_{cr}	$N(\infty)$		
Limit state design method	525	683	0.290	918
General design method	242	738	0.972	3,322

근비는 $1.4/f_y$ 이다. 두 경우에 대한 균열폭 및 균열간격을 Gilbert Model을 이용하여 계산한 결과는 Table 4와 같으며, 모두 허용 균열폭 0.2 mm를 초과하는 것으로 나타났다.

2.4 구속 건조수축 균열폭 및 균열간격 분석

2.4.1 철근비에 따른 균열폭 및 균열간격 분석

PSCB 거더교 상부플랜지에는 일반적으로 H16 철근을 사용하고 있으며, H16 철근 사용시 구속 건조수축 균열폭 및 균열간격과 철근비의 영향을 분석하고자 대상 교량의 철근비 0.0113을 기준으로 0.001 만큼 철근비를 변화시키며 철근비에 따른 균열폭과 균열간격을 계산하여 Table 5에 정리하였으며, 철근비와 균열폭 및 철근비와 균열간격의 상관관계는 Figs. 4와 5와 같다.

분석 결과, 철근비가 증가함에 따라 균열폭 및 균열간격은 감소하는 것으로 나타났으며, 2.3.2절에서 검토한 최소철근비 0.0073보다 큰 0.010 이상의 철근비에서 허용 균열폭 0.2 mm를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 철근비가 0.014보다 커지는 경우에는 철근간격이 100 mm 이하로 줄어들게 되어 철근 배근에 어려움이 발생할 것으로 판단되어 적절한 철근비를 선정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

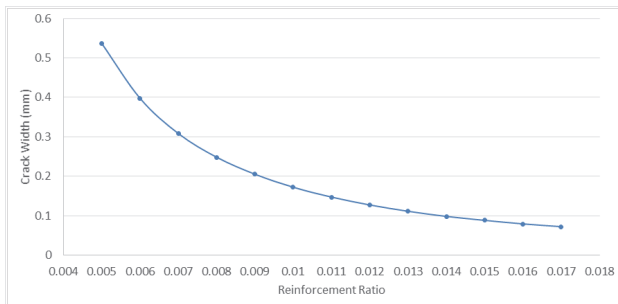


Fig. 4 Reinforcement Ratio - Crack Width correlation curve

Table 5 Calculate result of Crack width according to the reinforcement ratio(H16)

As (mm ²)	ρ	$N(\infty)$ (kN)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	w (mm)
1,400	0.005	714	510	1771	0.536
1,680	0.006	700	416	1286	0.397
1,960	0.007	686	350	981	0.308
2,240	0.008	672	300	775	0.248
2,520	0.009	659	261	628	0.205
2,800	0.010	645	230	520	0.172
3,080	0.011	632	205	437	0.147
3,360	0.012	618	184	370	0.127
3,640	0.013	605	166	319	0.111
3,920	0.014	591	151	278	0.098
4,200	0.015	577	137	244	0.088
4,480	0.016	563	126	216	0.079
4,760	0.017	549	115	193	0.072

2.4.2 철근직경에 따른 균열폭 및 균열간격 분석

허용 균열폭을 만족하는 철근비 0.010를 기준으로 철근직경이 변화함에 따라 균열폭과 균열간격의 변화를 분석하였으며, 분석 결과는 Table 6과 같다.

철근비가 동일한 경우, 철근직경이 작을수록 전체 철근 표면적이 증가하여 철근제어에 효율적임을 알 수 있으며, 철근 직경 16 mm 이하의 철근을 사용하여야 허용 균열폭 0.2 mm를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 6 Calculate result of Crack width according to the bar diameter ($\rho = 0.010$)

d_b (mm)	$N(\infty)$ (kN)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	w (mm)
13	648	231	430	0.142
16	645	230	520	0.172
19	643	229	607	0.202
22	640	228	692	0.231
25	637	227	775	0.259

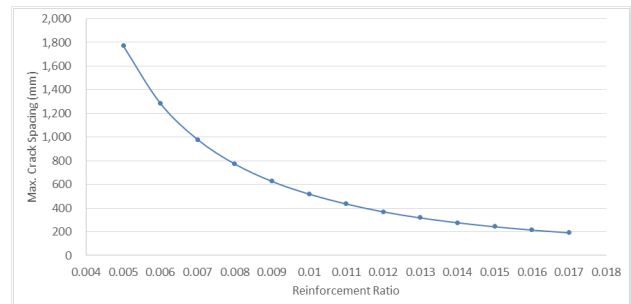


Fig. 5 Reinforcement Ratio - Max. Crack Spacing correlation curve

2.4.3 철근직경과 철근간격에 따른 균열폭 분석

실제 현장에서 사용되는 철근의 직경은 규격에 따라 정해져 있으며, 철근비는 철근의 직경과 배근간격에 따라 정해지게 되며, 이에 따른 균열폭 영향을 분석하기 위하여 철근직경과 철근간격에 따른 균열폭을 계산하고 허용 균열폭의 만족 여부를 검토하였다.

각각의 철근직경과 철근간격에 따라 변화되는 철근비와 이때 Gilbert Model로 계산된 구속 건조수축에 의한 균열폭은 Table 7 및 Fig. 6과 같다.

분석 결과, PSCB 거더교 상부플랜지에 H13 철근을 사용할 경우에는 철근비 약 0.0082 이상의 철근비(철근간격 약 115 mm 이하), H16 철근을 사용할 경우에는 약 0.0093 이상의 철근비(철근간격 약 155 mm 이하), H19 철근을 사용할 경우에는 약 0.0100 이상의 철근비(철근간격 약 200 mm 이하), H22 철근을 사용할 경우에는 약 0.0111 이상의 철근비(철근간격 약 245 mm 이하), H25 철근을 사용할 경우에는 약 0.0119 이상의 철근비(철근간격 약 295 mm 이하)를 적용해야만 허용 균열폭 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

2장의 균열폭 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 철근의 직경이 동일한 경우, 철근비가 커질수록 균열폭은 작아진다(직경이 동일한 경우 철근간격이 작을수록 균열폭은 작아진다).

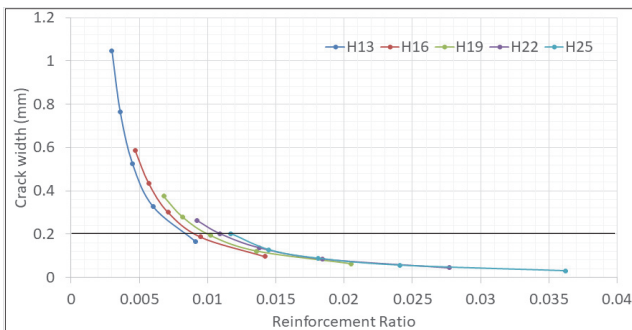


Fig. 6 Reinforcement Ratio - Crack Width correlation curve according to rebar diameter

Table 7 Calculate result of Crack width according to the bar diameter and spacing

Bar spacing (mm)	H13		H16		H19		H22		H25	
	ρ	w (mm)	ρ	w (mm)	ρ	w (mm)	ρ	w (mm)	ρ	w (mm)
100	0.0091	0.166	0.0142	0.097	0.0205	0.063	0.0277	0.045	0.0362	0.030
150	0.0060	0.327	0.0095	0.187	0.0136	0.122	0.0184	0.086	0.0241	0.056
200	0.0045	0.525	0.0071	0.302	0.0102	0.195	0.0138	0.137	0.0181	0.088
250	0.0036	0.765	0.0057	0.435	0.0082	0.279	0.0109	0.202	0.0145	0.127
300	0.0030	1.046	0.0047	0.588	0.0068	0.376	0.0092	0.263	0.0117	0.202

- 철근비가 같을 경우, 철근 직경이 작아질수록 균열폭이 작아진다.

PSCB 거더교 상부플랜지에 발생하는 구속 건조수축 균열을 제어하기 위해서는 분석결과와 같이 동일 직경의 철근을 배근할 경우에는 철근의 배근 간격을 작게(철근비를 크게) 함으로써 균열폭을 제어할 수 있으나, 시공성을 고려해야 할 것으로 판단된다. 또한 경험적으로 일정한 철근비를 적용하여 설계할 경우에는 직경이 작은 철근을 사용하여 균열폭을 제어할 수 있으나, 이 때도 철근의 직경이 작아질수록 철근간격이 작아지게 되어 시공성에 영향을 미침으로 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.

3. 구속 건조수축 균열폭 제어 방안

3.1 국내 설계기준 현황

설계기준(한계상태설계법)의 균열폭 계산식은 직접인장 부재의 균열발생 매커니즘을 기반으로 제시되었으며, 철근과 콘크리트의 응력은 크기는 다르지만 동일하게 인장응력이 발생된다. 그러나 구속 건조수축 등 간접하중으로 인한 균열은 철근과 콘크리트의 인장 압축 응력이 상반되어 설계기준(한계상태설계법)에서 제시하는 균열폭 계산식으로는 계산이 불가능하다.

한편, 한계상태설계법에서는 간접하중에 대한 균열폭을 제어하기 위하여 적합한 하중 조합에 따른 철근응력에 대하여 최대 철근 직경을 초과하지 않는 경우에는 균열폭이 허용 균열폭 이내로 간주할 수 있는 것으로 제안하고 있으며, 이때의 응력과 최대 철근 직경은 Table 8과 같이 제시하고 있다.

Table 5 와 7의 분석 결과로부터 철근의 직경별 허용 균열폭을 만족하는 경우의 균열면에서의 철근 응력을 Table 9에 정리하였으며, 한계상태설계법에서 제시하는 철근 응력과 최대 철근 직경 및 허용 균열폭을 만족하는 경우의 철근 직경별 철근 응력을 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이, 허용 균열폭을 만족하는 경우(철근 직경별 균열폭 약 0.2 mm), 철근의 응력과 철근의 직경은 반비례 관계이며, 응력이 증가할수록 직경이 선형적으로

Table 8 Maximum bar diameter for the control of cracking(Limit state design method)

Bar stress (MPa)	Maximum bar diameter (mm)	
	RC	PSC
160	32	25
200	25	16
240	16	13
280	14	8
320	10	6
360	8	5

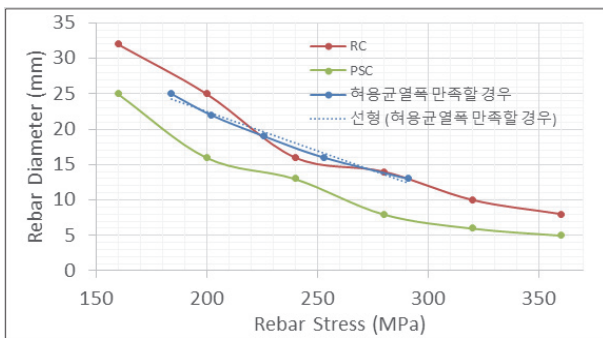


Fig. 7 Rebar Stress - Rebar Diameter correlation curve

감소하는 것을 알 수 있다. 또한 철근 응력 약 225 MPa에서 약 280 MPa 구간에서는 설계기준에서 제시하는 RC의 최대 철근 직경을 초과하였지만 허용 균열폭 기준을 만족하고 있다.

한편, 실제 PSCB 거더교의 상부플랜지는 프리스트레싱이 도입된 점을 고려하면 PSC 기준을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단되며 설계기준의 PSC 최대 철근직경을 초과하더라도 허용 균열폭 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 본 논문에서는 구속 건조수축에 따른 철근 응력만을 적용하였기 때문에 실제 초기 단계의 철근 응력을 적절하게 반영하지 못한 영향으로 판단된다.

다만, PSCB 거더교 상부플랜지는 초기 구속 건조수축으로 인하여 상부플랜지 상하부 피복에 균열이 발생된다면 공용중 내구성 문제를 야기할 수 있으며, 구속 건조수축 균열이 발생된 후 고정하중과 사용하중의 영향으로 단면 상부의 균열은 닫히며 균열폭이 상대적으로 작아지게 되고, 하부의 균열폭은 커지게 되며, 유지관리 단계의 비용 증가를 초래할 수 있기 때문에 설계 단계의 면밀한 검토가 필요할 것이다.

3.2 설계단계 구속 건조수축 균열 제어를 위한 제안

공용중인 PSCB 거더교 상부플랜지 하면에서 관찰되는 교축방향 균열은 구속 건조수축으로 인하여 발생되며, 이는 PSCB 거더교의 시공 과정(분할타설)에 기인한다. 공용중인

Table 9 The stress for each bar diameter that satisfies the allowable crack width

d_b (mm) / Spacing(mm)	ρ	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	w (mm)
H13 / 115	0.0082	<u>291</u>	611	0.195
H16 / 155	0.0093	<u>253</u>	596	0.195
H19 / 200	0.0100	<u>226</u>	593	0.198
H22 / 245	0.0111	<u>202</u>	576	0.195
H25 / 295	0.0119	<u>184</u>	569	0.196

PSCB 거더교의 내구성 향상 및 유지관리 비용 절감 등을 위해서는 설계단계부터 구속 건조수축 균열의 제어가 필요하다고 판단된다.

현행 설계단계에서는 최소 철근량 조건을 만족하고 적합한 하중조합과 균열 단면을 기준으로 계산한 철근 응력에서 주어진 철근 직경(Table 8)을 초과하지 않는 철근을 배치한 경우에는 간접하중에 대한 균열폭이 허용 한계값 이내로 간주하고 있으며, 실제 PSCB 거더교 설계 시, 하부플랜지 균열폭은 검토하고 있으나 일반적으로 상부플랜지에는 균열이 발생되지 않는 것으로 가정하여 검토에서 제외되고 있는 실정이다.

그러나 분석 결과 및 고속도로 PSCB 거더교에 발생된 균열 현황(KEC, 2022)에서도 알 수 있듯이 적절한 철근비(철근직경과 간격)를 만족하지 못하는 경우에는 간접하중으로 인하여 허용 균열폭을 초과할 수 있으며, 간접하중으로 인한 초기 균열 발생 후 직접하중으로 인하여 균열이 진전될 수 있으므로 공용중 내구성 측면을 고려한 면밀한 검토가 필요하다.

PSCB 거더교 상부플랜지의 간접하중은 수화열 및 부동건조수축 등과 같은 내적구축과 구속 건조수축과 같은 외적구축으로 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 외적구축(구속 건조수축)만을 고려하여 간접하중과 직접하중에 의한 균열폭을 계산하고 종합적으로 검토하는 방법을 제안하고자 한다. 제안 내용을 정리하면 다음과 같다.

- Step 1. 최소 철근량 검토
- Step 2. 구속 건조수축에 의한 균열폭 산정
(Gilbert Model, Fig. 3)

Check 1. 허용 균열폭 기준 만족 여부
Check 2. 직접하중으로 인한 간접하중 균열 진전 여부
(구조적 특성 등을 고려한 설계자 판단 필요)

- Step 3. 직접하중(고정하중 및 활하중) 균열폭 산정

Check 3. 간접하중 균열폭 + 직접하중 균열폭 < 허용 균열폭

4. 결 론

고속도로에 공용중인 PSCB 거더교의 약 70 %에서 상부플랜지 하면 교축방향 균열이 조사되었으며, 이는 교량의 내구성 문제와 유지관리 비용 증가의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 PSCB 거더교 상부플랜지 하면 균열의 주요 원인인 구속 상태에서의 건조수축으로 인하여 발생하는 균열에 대하여 Gilbert Model을 이용하여 직접 계산하고, 철근량, 철근직경 및 간격 등 영향인자를 분석하여 최종적으로 균열폭 제어를 위한 방안을 제안하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Gilbert Model을 이용하여 PSCB 거더교 상부플랜지 하면 교축방향 균열폭을 검토한 결과, 최대 균열간격은 410 mm, 균열폭은 0.139 mm로써 실제 현장조사 결과와 유사하며, 균열폭 허용 기준인 0.2 mm를 만족하는 것으로 나타났다.
2. 구속 건조수축 균열폭 및 균열간격과 철근비의 영향을 분석한 결과, 철근비가 증가함에 따라 균열폭 및 균열간격은 감소하는 것으로 나타났다.
3. 허용 균열폭을 만족하는 철근비 0.01를 기준으로 철근직경 변화에 따른 균열폭 및 균열간격을 분석한 결과, 철근비가 동일한 경우, 철근직경이 작을수록 전체 철근 표면적이 증가하여 철근 제어에 효과적임을 확인하였다.
4. 구속 건조수축 균열을 제어하기 위해서는 동일 직경의 철근을 배근할 경우 간격을 작게(철근비를 크게) 함으로써 균열폭을 제어할 수 있으나, 시공성을 고려해야 할 것으로 판단된다.
5. 공용중인 PSCB 거더교의 내구성 향상 및 유지관리 비용 절감 등을 위해서는 설계단계부터 구속 건조수축 균열의 제어가 필요하며, 구속 건조수축만을 고려한 경우 현행 기준만으로도 균열을 제어할 수 있는 것으로 나타났다.
6. 다만, 간접하중으로 인해 발생한 균열은 직접하중(고정하중+활하중)으로 인하여 균열폭이 진전될 우려가 있으므로, 제안된 간접하중에 따른 균열폭을 직접 계산하는 방법을 적용하여 균열에 대한 면밀한 검토가 수행된다

면 공용중 구조물의 내구성 향상과 유지관리 비용 절감에 기여할 것으로 판단된다.

7. 향후 구속 건조수축 이외의 간접하중의 영향을 고려한 균열폭 산정과 실제 공용중 발생되고 있는 균열을 설계 단계에서 제어할 수 있는 방법으로 재료적·구조적 부분을 고려한 다각적이고 종합적인 균열제어 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Ku, Y. H., and Han, S. M. (2022), A Review of the Deterioration and Damage of the Top Flange of the Highway PSC BOX Girder Bridge based on the Condition Assessment Results, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(6), 23-32. (in Korean)
2. MOLIT (2018), Bridge Design Code: KDS 24 00 00, Korea Construction Standard Center. (in Korean)
3. KEC (2022), Development of Maintenance Plan on PSC BOX Girder Bridges, Korea Expressway Corporation, Gimcheon, South Korea. (in Korean)
4. Kim, E. S. (2008), Risk Evaluation of Longitudinal Cracking in Concrete Deck of Box Girder Bridge, *Journal of Korean Society of Safety*, 23(5), 84-90. (in Korean)
5. Favre, R., Beeby, AW, Falkner, H., Koprna, M., Schiess, M. (1983), Fissuration et Deformations, *Manual du Comite Ewo-International du Beton(CEB)*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 249.
6. Gilbert, R. I. (1992), Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members, *ACI Structural Journal*, 89(2), 141-149.
7. Gilbert, R. I. (2001), Shrinkage, Cracking and Deflection the Serviceability of Concrete Structures, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1(2021), 15-37.
8. MOLIT (2021), Detailed Guideline of Safety and Maintenance for Structures-Bridge, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, South Korea. (in Korean)
9. KEC, 271 Reports of In-depth Safety Inspection for Prestressed Concrete Box Girder Bridges. Korea Expressway Corporation, Gimcheon, South Korea. (in Korean)

Received : 03/24/2023

Revised : 04/03/2023

Accepted : 04/12/2023

요 지 : PSCB 거더교는 상하부 플랜지와 복부가 일체화된 폐합된 단면으로 일반적으로 거더와 바닥판이 분리된 교량과 구조적 특성이 상이하어 PSCB 거더교의 특성을 반영한 유지관리 방안이 필요하다. 고속도로 PSCB 거더교의 정밀안전진단 보고서를 수집하여 손상 유형을 분석한 결과, 공용 중 발생하는 열화·손상은 대부분 상부플랜지에 집중되어 있다. 특히 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 분석대상 PSCB 거더교의 약 70 %에서 발생되었고, 이는 외부하중에 의한 구조적 균열 보다 수화열, 건조수축 등 간접하중에 의한 균열로 판단된다. 공용중인 PSCB 거더교의 내구성 향상 및 유지관리 비용 절감 등을 위해서는 설계단계부터 구속 건조수축 균열의 제어가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 PSCB 거더교 상부플랜지 하면 균열의 주요 원인인 구속 상태에서의 건조수축으로 인하여 발생하는 균열에 대하여 Gilbert Model을 이용하여 직접 계산하고, 철근량, 철근직경 및 간격 등 영향인자를 분석하였다. 분석결과, 간접하중으로 인하여 발생하는 균열폭은 H16 철근 기준 철근비 0.01 이하, 철근비 0.01 기준 H19보다 직경이 큰 철근의 경우 허용 균열폭 0.2 mm를 초과하는 것으로 나타났으며, 최종적으로 균열폭 검토 결과를 바탕으로 PSCB 거더교 상부플랜지의 균열폭 제어 방안을 제안하였다.

핵심용어 : PSCB 거더교, 상부플랜지, 하부플랜지, 구속 건조수축, 균열, 간접하중