

PSC-Edge 거더 라멘교의 정착부에 발생한 시공 균열 거동과 개선

옥재호, 임성순*
서울시립대학교 토목공학과

Behavior and Improvement of Construction Crack occurred on Anchorage of PSC-edge Girder Rahmen Bridge

Jae-Ho Ok, Sung-Soon Yhim*
Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 PSC-Edge 거더 라멘교는 Edge 거더에 긴장력을 도입하고 정모멘트를 감소시켜 저형고와 장경간화가 가능한 교량이다. 본 교량은 가설벤트가 상부슬래브의 하부에 지지되고 Edge 거더부에 2차 강연선이 긴장된 후 거더 외측 면에 45°방향의 사인장 균열이 발생하였다. 프리스트레스 정착부의 응력분포 및 파열균열의 양상에 관한 연구가 활발히 진행되었지만 기존 연구 결과는 본 구조물의 실제 형상과 경계조건이 상이하여 명백한 원인분석이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 가설벤트의 경계조건을 추가로 고려된 3D Frame 해석을 수행하였으나 Edge 거더부에서 최대 압축응력이 발생하여 균열을 원인을 규명하기에는 한계가 있었다. 따라서 LUSAS 16.1을 사용한 3D Solid 해석을 수행하였으며 그 결과 Edge 거더의 하부와 상부슬래브의 경계부분에서 최대 주인장응력이 발생하였다. 최대 주인장응력과 방향여현을 사용하여 둔각부 Edge 거더 외측면의 소요 철근량을 분석한 결과 사용 철근량이 부족한 것으로 분석되었다. 따라서 추가 시공된 교량은 기존 교량보다 정착부의 철근량과 철근보강 범위를 확장시켰다. 그 결과 Edge 거더부의 균열은 더 이상 발생하지 않는 것으로 관찰되었다. 이와 유사한 PSC-Edge 거더 형식의 교량을 설계 및 시공할 때 본문에서 제안한 해석 및 보강방법을 적용하면 시공 중 발생하는 Edge 거더 외측면의 균열을 충분히 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract PSC-Edge Rahmen Bridge makes low thickness and long span by introducing prestressed force to the edge girder and reducing positive moment. In the bridge, diagonal tension cracks occurred in the direction of 45 ° to outer side of the girder after the temporary bent supported on the lower part of the upper slab and the secondary strand is tensioned on the girder. Researches on stress distribution and burst crack behavior of pre-stress anchorage has been conducted, it is difficult to analyze an obvious cause due to difference between actual shape and boundary condition. This study performed 3D frame analysis with additional boundary condition of temporary bent, the maximum compression stress occurred in the girder and there was a limit to identify the cause. It performed 3D Solid analysis with LUSAS 16.1 and the maximum principal tensile stress occurred at the boundary between the girder and the slab. As analyzing required reinforcement quantity at obtuse angle of the girder with the maximum principal tensile stress and directional cosine, reinforcement quantity was insufficient. Additional bridges have increased reinforcement quantity and extended area and crack was not occurred. It is expected that cracks on the girder during construction could be controlled by applying the proposed method to PSC-Edge Rahmen Bridge.

Keywords : Diagonal Tension Crack, Direction Cosine, 3D Solid Analysis, Maximum Principal Tensile Stress, PSC-Edge Rahmen Bridge, Secondary Strand

*Corresponding Author : Sung-Soon Yhim(University of Seoul)

Tel: +82-2-6490-2428 email: yhimss@uos.ac.kr

Received February 12, 2019

Revised March 14, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

PSC-Edge 라멘교는 일반 PSC 라멘교에 Edge 거터를 추가한 교량으로서, Edge 거터부에 긴장력을 도입하여 정모멘트를 감소시킴에 따라 일반 PSC 라멘교에 비해 15%정도 긴장효과가 증가되어 저형고와 장경간화가 가능한 교량이다. 이는 주로 하천을 횡단하거나 폭원이 작은 교량에 많이 적용되고 있다.

본 교량의 시공방법은 Fig. 1에 표기된 바와 같이 가설벤트를 사용한 FSM(Full Staging Method)공법이며 시공순서는 Fig. 1에 나타난바와 같이 시공단계 1~3-Stage까지는 거푸집을 사용하여 기초부와 벽체부를 시공한 다음 상부 슬래브의 하부에 동바리 또는 가설벤트를 설치하는 시공단계를 나타내고 있으며 이는 일반 RC 라멘교와 동일하다. 시공단계 4~5-Stage까지는 상부슬래브와 Edge 거터부에 콘크리트를 타설한 다음 PS 강연선을 긴장하는 추가 시공단계를 나타낸다. 시공단계 1~4-Stage까지는 원활하게 시공되었으나 시공단계 5-Stage에서 상부슬래브에 1차 PS 강연선을 긴장하고 Edge 거터부에 콘크리트를 타설하고 굳은 후에 2차 PS 강연선을 긴장할 때 Fig. 2에 나타난 바와 같이 거터 외측 면에 45°의 사인장 균열이 발생하였다.

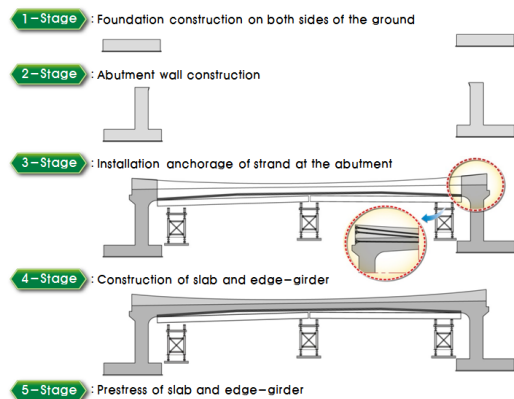


Fig. 1. Construction Flowchart of PSC Edge Rahmen Bridge

본 구조물에 발생한 균열은 프리스트레스 콘크리트의 정착부에서 파열응력에 의해 발생하는 균열로 판단되며 실제 시공 현장에서는 이와 같이 시공 중에 프리스트레스 정착부에서 예상치 못한 경사 균열이 빈번히 발생하고 있는 실정이다.

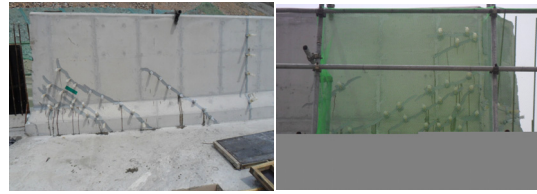


Fig. 2. Crack shape during PSC Edge part construction

기존에 수행된 프리스트레스 정착부의 구조적 거동에 관한 주요 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

오병환 등(1994)는 단일텐던과 복수텐던의 정착부 거동실험을 수행한 결과 복수텐던 설치가 단일텐던 설치시보다 파열인장의 변형도가 낮게 나타나고 균열하중에 대한 저항성이 개선되어 복수 정착부의 거동과 국부응력의 분포특성이 규명되었다[1-2].

최규천 등(2010)는 정착부의 응력분포 및 거터 형식에 따른 정착단부의 파열균열 양상을 분석하고 표준 PSC I 거터의 실험체를 제작하여 인장실험을 수행한 뒤 파열양상을 비교 분석한 결과 도로교설계기준에서 제시하는 최대 보강간격 300mm와 최대 보강범위 $2.5d_{burst} < 1.5h$ 의 범위가 구조적 안전성 확보에 충분한 것을 규명하였다[3].

김진국 등(2014~2017)는 포스트텐션 정착부 국소구역의 효율적인 설계를 위하여 지압판의 면적, 정착부의 하중분산 면적비율, 횡철근의 구속응력 조건을 변화시키면서 구조해석을 수행하여 정착부의 거동특성 및 하중전달의 효율을 분석하였으며 이로 인해 효율적인 정착장치와 정착부의 설계방향을 제시하였다[4-6].

하지만 기존에 수행된 연구 결과는 본 구조물의 형상과 실제 경계조건 등이 서로 상이하여 본 구조물에 발생한 균열에 대한 명백한 원인분석이 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석 방법으로 PSC-Edge 라멘교의 실제 형상과 시공 중의 경계조건을 구현하여 Edge 거터의 정착부에서 시공 중에 발생한 균열의 원인을 정확하게 분석하여 향후 이와 유사한 교량의 정착부에서 발생하는 균열의 제어방안을 수립하고자 한다.

2. 정착부의 응력분포 및 흐름 분석

정착부에 프리스트레스력이 작용할 경우 콘크리트에 발생하는 응력은 파열응력(Bursting stress), 할렬응력

(Spalling stress), 지압응력(Bearing stress)으로 3가지 종류의 응력이 있다. Fig. 3의 (a)에서와 같이 정착판에 긴장력(P_u)이 작용하면 정착판의 선단부에는 높은 주압축응력이 작용하고 부재내부에서는 주인장응력이 작용한다. 이처럼 부재내부에서 하중재하방향에 직각으로 작용하는 주인장응력이 파열응력이며 정착판의 선단부에서 발생하는 주압축응력이 지압응력이다. 할렬응력은 Fig. 3의 (b)에서와 같이 정착판의 수평방향으로 선단부 표면에 평행하게 발생하는 주인장응력이다.

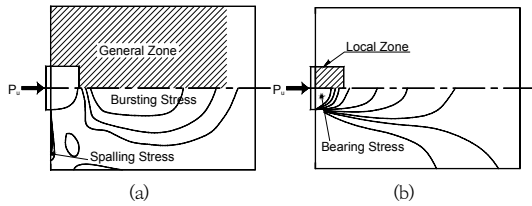


Fig. 3. Flow of stress in loaded anchorage zone
(a) Principal tension stress and general zone
(b) Principal compression stress and local zone

또한, 설계를 하기위한 정착구역은 Fig. 3에서와 같이 정착부의 긴장력이 구조물 내부에서 점진적으로 분산됨으로 횡방향으로 인장응력이 작용하는 일반구역(General zone)과 정착구의 바로 앞에 높은 압축응력이 작용하는 국소구역(Local zone)으로 구분할 수 있다.[7] 본 연구에서는 이러한 정착부의 응력분포 및 흐름의 특성을 기초하여 하여 정착부에 발생한 균열거동을 분석하였다.

3. 시공단계를 고려한 3D Frame해석

PSC-Edge 라멘교의 시공단계별 3D Frame 유한요소해석은 우선 범용 구조해석 프로그램인 RM2004를 사용하여 구조해석을 수행하였으며, 여기서 콘크리트 재료의 모델 특성은 $f_{ck}=40\text{MPa}$, $E_c = 29,315\text{MPa}$, $\nu = 0.167$ 를 적용하여 선형 탄성해석을 수행하였다[8].

3.1 해석모델의 경계조건 및 하중조건

3D Frame 해석모델은 가설벤트가 지지된 상태에서 PSC-Edge 라멘교의 콘크리트가 타설 된 후 PS 강연선이 긴장되는 시공순서가 고려된 경계조건과 하중조건을 적용하였다.

좌우측 벽체 하단부의 경계조건은 3D Frame 요소의

6자유도($X, Y, Z, X_\theta, Y_\theta, Z_\theta$)에 대하여 모두 구속시켰으며 가설벤트의 경계조건은 Fig.4에 나타난 바와 같이 수직방향으로 무한강성의 Spring요소를 적용하여 수직변위를 구속하는 효과를 부여시켰다.

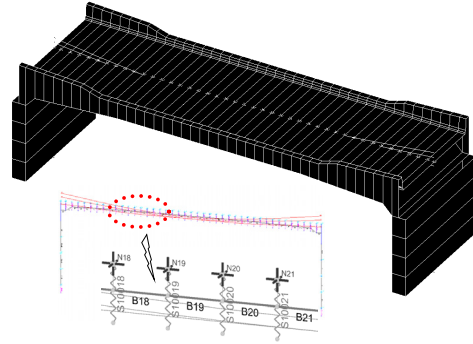
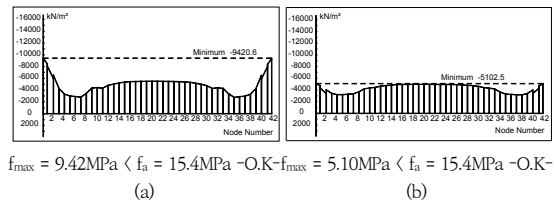


Fig. 4. Analytical modeling considering support condition of temporary bent

3.2 해석결과 및 분석

3D Frame 해석결과는 Fig. 5 (a)에 나타난 바와 같이 시공 중 Edge 거터 상부의 응력은 가설벤트의 지지조건 영향에 의해 지점부에서 최대압축응력의 값은 9.42MPa 이 발생하였다. 또한 Fig. 5 (b)에 나타난 시공 중 Edge 거터 하부의 응력은 지점부와 중앙부의 발생값이 거의 유사하며 최대압축응력 값은 5.10MPa 이 발생하였다. 각 부분의 최대 발생 압축응력은 모두 허용압축응력 값인 15.4MPa 이하이므로 구조적 안전성에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

하지만 Fig. 5 (b)에서와 같이 실제로 균열이 발생한 Edge 거터 하부의 발생응력 값이 인장응력이 아닌 압축응력이 발생함에 따라 3D Frame의 구조해석 결과로는 본 교량의 PSC-Edge 거터 외측면에 45° 방향으로 발생한 사인장 균열의 원인을 정확하게 규명하기는 어려운 실정이다.



$f_{\max} = 9.42\text{MPa} < f_a = 15.4\text{MPa} - O.K.$ $f_{\max} = 5.10\text{MPa} < f_a = 15.4\text{MPa} - O.K.$
(a) (b)

Fig. 5. Analysis result considered condition of temporary bent
(a) Edge-Girder top stress
(b) Edge-Girder bottom stress

따라서 본 논문에서는 Edge부에 2차 PS 강연선이 긴장된 후 실제로 발생한 균열방향과 형상을 정확하게 분석하기 위해서 PSC-Edge 라멘교의 일부 영역을 3차원 Solid요소를 사용하여 모델링하고 구조해석을 수행하였다.

4. 시공단계를 고려한 3D Solid해석

PSC-Edge 라멘교의 시공단계별 3D Solid 해석은 범용 3D 유한요소프로그램인 LUSAS 16.1을 사용하여 상세 구조해석을 수행하였다.[9]

콘크리트 재료의 특성 및 해석조건은 앞에서 언급한 3D Frame과 동일하게 선형 탄성해석을 수행하였다.

본 구조물은 철근과 강선이 매우 복잡하게 배치되어 있어 해석 모델링에서 이 부분을 별도로 모델링하지 않고 오직 콘크리트 부분만 3D Solid로 모델링하고 외력으로 자중과 프리스트레스력을 재하하고 해석한 다음 결과값으로 주응력과 방향여현을 구해 Eq (1)~(3)에서 제시하는 고전전인 방법으로 필요철근량을 계산하고 분석하였다.

4.1 해석모델의 경계조건 및 하중조건

3D Solid 해석모델은 8절점 Solid 요소를 사용하여 전체 중 1/4를 상세 모델링하였다. 해석 모델링과 구조 해석은 Fig. 6 (a)의 둔각부와 Fig. 6 (b)의 예각부에서 발생하는 응력과 구조적 거동이 서로 상이하므로 각각의 부분에 대하여 구분하여 모델링하고 구조해석을 수행 후에 세부적으로 분석하였다.

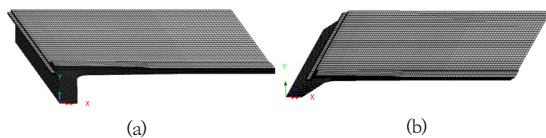


Fig. 6. 3D solid analysis modeling of PSC-Edge rahmen bridge
(a) Obtuse angle part
(b) Acute angle part

Solid 해석모델의 경계조건은 대칭조건을 고려하여 전체 변위에 대한 3자유도 (X,Y,Z) 중에서 X축 방향의 절단면은 (1,0,0), Y축방향의 절단면은 (0,1,0), 벽체의 지점부는 (1,1,1), 가설벤트가 설치된 상부슬래브의 하부는 (0,0,1)을 각각 적용하였다.

PSC Edge 라멘교의 시공단계별 작용하중은 Fig. 7에

상세히 나타나 있다. 이 중 Fig. 7 (a), (c)는 PSC-Edge 라멘교 고정하중의 재하도이고 Fig. 7 (b), (d)는 강연선의 긴장력에 의해 지압판에 작용하는 등분포하중의 재하도이다.

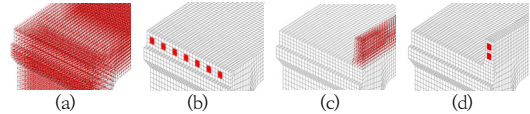


Fig. 7. Figure of load weight by construction stage
(a) Stage1 : self-weight of slab
(b) Stage2 : prestress of slab
(c) Stage3 : self weight of edge
(d) Stage4 : prestress of edge

여기서, 프리스트레스력에 의해 지압판에 등분포로 작용하는 하중은 텐돈 단위가 $\phi 15.2\text{mm}(22\text{ea})$ 인 강연선의 책킹 프리스트레스력 값인 $P_j = 0.7f_{pu} \times A_p = 4058.362\text{kN}$ 를 지압판의 면적($A = 315 \times 315 = 99,225\text{mm}^2$)으로 나눈 값 $P_j/A = 40.901\text{MPa}$ 를 적용하였다.

4.2 해석결과 및 분석

3D Solid 모델링의 해석 결과는 Fig. 8에서와 같이 Edge 거더의 정착부에서 주인장응력이 크게 발생하였다. 이 중 Fig. 8 (a)는 둔각부이고 Fig. 8 (b)는 예각부의 Edge 거더부 해석결과이다. 이 해석결과는 3D Frame해석에 나타나지 않은 Edge 거더의 하부와 상부 슬래브의 경계부분에서 주인장응력이 크게 발생하였다. 이는 파열력(Bursting Force)에 의해 정착구역에서 횡 방향으로 인장응력이 발생하는 일반구역(General zone)의 거동과 유사한 형상이다.

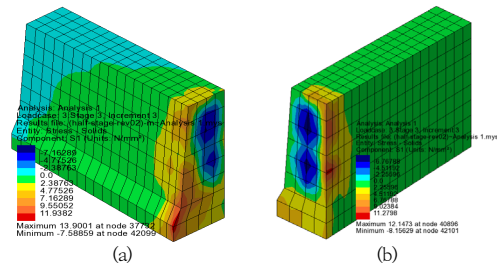


Fig. 8. Contour of principal stress S1 in 3D-modeling
(a) Obtuse angle part
(b) Acute angle part

이 해석결과는 2차 PS 강연선이 긴장될 때 Edge 거더 외측 면에 45°방향의 사인장 균열 발생원인을 분석할 수 있는 주요 인자로 이용될 수 있다. 최대 주인장응력이 발

생한 위치는 Fig. 8에서와 같이 둔각부는 방호벽 내측이고 예각부는 방호벽 외측이다. 이는 실제 시공 현장에서 발생한 균열의 발생위치와 일치하는 결과이다.

PCS 정착부의 주응력 중 주압축응력 대한 방향벡터는 Fig. 9에 나타나 있다. 주인장응력의 방향은 주압축응력에 직각이므로 발생 균열의 방향은 주압축응력과 동일한 방향으로 발생한다.

PSC-Edge 거터의 정착부에서 발생한 균열은 거터에 실제로 배근된 철근량과 연관성이 있으므로 철근배근의 적정성 분석이 필요하다.

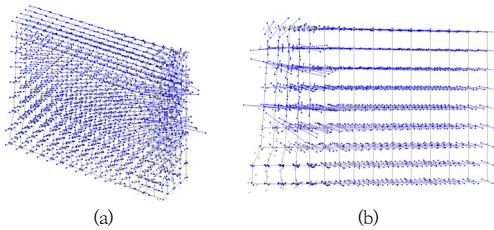


Fig. 9. Direction vector of principal stress in 3D-modeling
(a) 3D view
(b) X-Y plan view

따라서 3D Solid 해석의 결과 중 최대 주인장응력 값으로 Edge부의 소요 철근량을 각각 계산하였으며 이 계산 방법에 대한 세부내용은 다음과 같다.

평면응력에서 X방향 응력 f_x 이고 $f_y = 0$ 일 때, 임의의 경사면의 법선방향에 대한 응력 f_{x1} 은 다음 Eq. (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$f_{x1} = f_x \cos^2 \theta \quad (1)$$

Where, f_{x1} denotes normal direction stress of inclined plane, f_x denotes X-direction stress in plane stress

주응력의 X, Y, Z 방향여현을 각각 l, m, n 그리고 주인장응력을 S 라고 정의하면 X방향의 철근량은 다음과 같이 산정된다[10].

첫째, 단위폭당 주인장력은 아래와 같다.

$$T = S \times A / l \quad (2)$$

둘째, 소요 철근량은 아래와 같이 결정한다.

$$\begin{aligned} T_x &= T / l = S \times A / l^2 \\ A_{sx} &= T_x / f_{sa} \end{aligned} \quad (3)$$

Where, T_x denotes X-direction tension force of

unit width, A_{sx} denotes required rebar, f_{sa} denotes allowable stress of rebar, A denotes unit width or units thickness

상기의 소요 철근량은 최대 주인장응력이 발생된 부분의 단면을 절단 후 Eq. (2), (3)에서와 같이 주인장응력과 방향여현을 사용해서 구할 수 있다.

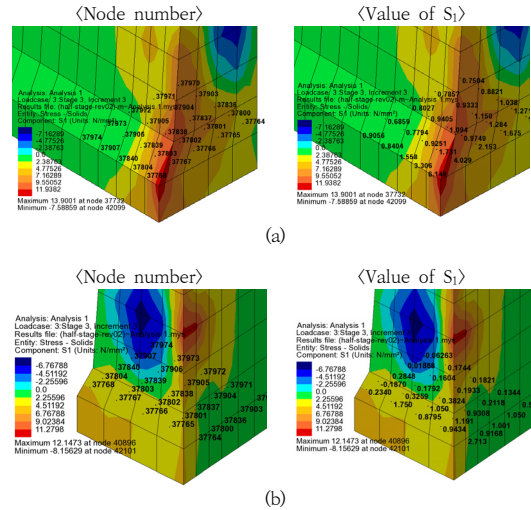


Fig. 10. S1 and Node number in 3D solid analysis
(a) S_1 and Node number on obtuse angle part
(b) S_1 and Node number on acute angle part

이러한 소요 철근량을 계산하기 위해 필요한 둔각부와 예각부의 Edge 거터 외측면에서 발생한 주인장응력 값과 절점번호는 Fig. 10에 상세히 나타나 있다.

5. 철근량 분석 및 보강방안

PSC-Edge 거터부의 소요 철근량은 예각부보다 둔각부에서 더 많이 필요한 것으로 분석되었다.

Table.1, 2는 둔각부와 예각부의 보강 전후의 사용철근량, 주인장응력의 방향여현, 배근방향 및 단위면적당 소요 철근량에 대한 결과를 정리하고 나타내었다. 사용철근량 산정시는 모델링 요소폭(Width)과 철근의 배근간격(Interval)의 비를 고려하였다. 둔각부의 Edge부 외측 사용 철근량 H16@200-1EA는 Node 37768, 37804, 37840 에서 소요 철근량 보다 부족하고 내측 사용 철근량 H22 @100-4EA는 모두 충분한 것으로 분석되었다. 예각부는 외측 사용 철근량 H16@200-1EA는 Node

37764에서 부족하고 나머지는 모두 충분한 것으로 분석되었다.

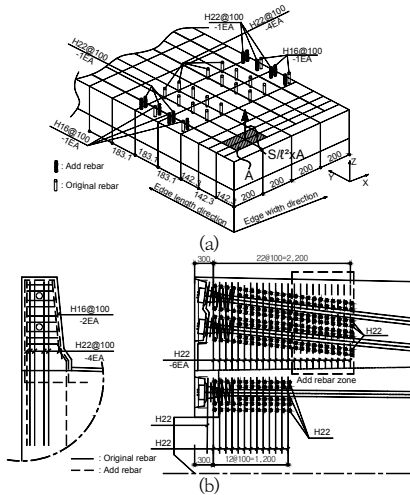


Fig. 11. Element division diagram and Drawing of PSC-Edge girder reinforcement
(a) Element division diagram
(b) Drawing of PSC-Edge girder reinforcement

따라서 추가 시공된 교량의 철근은 Fig. 11의 Add rebar라고 표기한 부분과 같이 Edge부의 외측 사용 철근량은 기존 H16@200-1EA를 H16+H22@100-1EA로 철근을 추가 보강하였다.

Table 1. Check of rebar in obtuse angle part of PSC-Edge girder

Node	S _i (MPa)	Direction cosine			Direction	Req'd As (mm ²)	Used As (width/interval, mm ²)		Review	
		l	m	n			Before	After	Before	After
37764	1.548	0.556	0.196	0.808	Z-Dir.	187.5	H16-1EA (142.3/200) =141.3	H16,22-1EA (142.3/100) =833.5	NG	O.K
37768	6.149	0.132	0.349	0.928	Z-Dir.	564.8				
37765	1.675	0.427	0.352	0.833	Z-Dir.		H22-4EA (142.3/100) =2201.8	H22-4EA (142.3/100) =2201.8	O.K	O.K
37766	2.153	0.314	0.468	0.826	Z-Dir.	1646.6				
37767	4.029	0.144	0.385	0.912	Z-Dir.					
37800	1.271	0.574	0.004	0.819	Z-Dir.	149.9	H16-1EA (142.3/200) =141.3	H16,22-1EA (142.3/100) =833.5	NG	O.K
37804	3.306	0.158	0.301	0.941	Z-Dir.	295.3				
37801	1.284	0.581	0.016	0.814	Z-Dir.		H22-4EA (142.3/100) =2201.8	H22-4EA (142.3/100) =2201.8	O.K	O.K
37802	0.975	0.517	0.172	0.839	Z-Dir.	846.6				
37803	1.731	0.108	0.368	0.924	Z-Dir.					
37836	1.038	0.512	0.083	0.855	Z-Dir.	144.4	H16-1EA (142.3+183.1)/2/200 =161.6	H16,22-1EA (142.3+183.1)/2/100 =952.9	NG	O.K
37840	1.558	0.134	0.198	0.971	Z-Dir.	168.0				
37837	1.150	0.519	0.136	0.844	Z-Dir.		H22-4EA (142.3+183.1)/2/100 =2518.5	H22-4EA (142.3+183.1)/2/100 =2518.5	O.K	O.K
37838	1.094	0.470	0.212	0.857	Z-Dir.	849.0				
37839	0.925	0.287	0.224	0.931	Z-Dir.					

Table 2. Check of rebar in actual angle part of PSC-Edge girder

Node	S _i (MPa)	Direction cosine			Direction	Req'd As (mm ²)	Used As (width/interval, mm ²)		Review	
		l	m	n			Before	After	Before	After
37764	2.713	0.037	0.268	0.963	Z-Dir.	231.5	H16-1EA (142.3/200) =141.3	H16,22-1EA (142.3/100) =833.5	NG	O.K
37768	0.234	0.028	0.764	0.645	Y-Dir.	-				
37765	0.943	0.394	0.689	0.609	Y-Dir.		H22-4EA (142.3/100) =2201.8	H22-4EA (142.3/100) =2201.8	O.K	O.K
37766	0.879	0.247	0.678	0.692	Z-Dir.	664.3				
37767	1.750	0.077	0.504	0.860	Z-Dir.					
37800	0.917	0.468	0.769	0.435	Y-Dir.	-	H16-1EA (142.3/200) =141.3	H16,22-1EA (142.3/100) =833.5	O.K	O.K
37804	-0.187	0.256	0.924	0.285	Y-Dir.	-				
37801	1.191	0.518	0.628	0.581	Y-Dir.		H22-4EA (142.3/100) =2201.8	H22-4EA (142.3/100) =2201.8	O.K	O.K
37802	1.050	0.375	0.819	0.433	Y-Dir.	-				
37803	0.326	0.251	0.966	0.060	Y-Dir.					
37836	1.001	0.742	0.282	0.608	X-Dir.	-	H16-1EA (142.3+183.1)/2/200 =161.6	H16,22-1EA (142.3+183.1)/2/100 =952.9	O.K	O.K
37840	0.285	0.098	0.888	0.449	Y-Dir.	-				
37837	0.931	0.487	0.604	0.631	Z-Dir.		H22-4EA (142.3+183.1)/2/100 =2518.5	H22-4EA (142.3+183.1)/2/100 =2518.5	O.K	O.K
37838	0.382	0.196	0.975	0.105	Y-Dir.	476.4				
37839	0.179	0.096	0.963	0.253	Y-Dir.					

Edge부의 내측 사용 철근량은 충분하므로 보강 전과 동일하게 H22-4EA를 그대로 적용하였다. Edge부 정착부 구역에 추가 배근된 철근의 보강범위는 파열력에 대한 균열 발생을 방지하기 위해서 기존 L=1,200mm를 L=2,200mm<1.5h로 확장 보강하였다.

추가 시공된 다른 방향 교량은 상기의 보강방법과 보강범위에서 제시한 철근량 만큼 PSC-Edge부에 철근을 추가 배근하고 보강하여 시공하였다. 그 결과 Edge 거더부의 균열은 더 이상 발생하지 않은 것으로 관찰되었다.

6. 결론

본 연구는 PSC-Edge 거더 정착부의 외측 면에 발생한 균열의 원인과 이를 개선하기 위한 보강방안에 대하여 분석하였다. 3D Frame 해석은 실제적인 시공현황인 가설벤트의 경계조건을 고려하여 해석을 수행하였으나 실제 균열 발생 원인을 규명하기에는 한계가 있어 실제적인 거동에 가까운 3D Solid로 모델링하고 응력해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

첫째, 3차원 Frame의 해석은 시공 중 가설벤트의 경계조건을 고려하였으며, 그 결과 Edge 거더부 상부에 발생하는 최대압축응력은 중앙부가 아닌 지점부에서 나타났다. 또한 실제로 균열이 발생한 Edge 거더 하부의 발생응력 값이 인장응력이 아닌 압축응력이 발생함에 따라 3D Frame의 해석 결과로는 본 교량의 PSC-Edge 거더 외측면에 45° 방향으로 발생한 사인장 균열의 원인을 정확하게 규명하기는 한계가 있는 것으로 분석되었다.

둘째, 3D Solid 해석결과는 3D Frame 해석에 나타나지 않은 Edge 거더의 하부와 상부슬래브의 경계부분에서 주인장응력이 크게 발생하였다. 이는 정착구역에서 횡방향으로 인장응력이 발생하는 일반구역의 거동과 유사한 형상이며 2차 PS 강연선이 긴장될 때 Edge 거더 외측면에서 45°방향의 사인장 균열을 발생시킨 주요 원인인 것으로 분석되었다.

셋째, PSC-Edge 거더부의 철근량은 3차원 주인장응력 값과 방향여현 및 배근방향을 기초로 하여 산정한 결과 예각부보다 둔각부가 더 많은 철근량이 필요한 것으로 분석되었다. Edge부 외측의 사용 철근량이 부족하므로 외측부에 H16@200-1EA, H16+H22@100-1EA로 보강 배근하였다. 또한 파열력에 대한 정착구역의 철근 보강범위는 당초 $L=1,200\text{mm}$ 에서 $L=2,200\text{mm}$ ($1.5h$)로 확장하여 보강한 결과 Edge 거더부의 균열은 더 이상 발생하지 않은 것으로 관찰되었다.

넷째, 따라서 추후 이와 유사한 PSC-Edge 거더 형식의 교량을 설계 및 시공할 때, 본문에서 제안한 해석 및 보강방법은 시공 중 발생하는 균열을 충분히 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] B. H. Oh, D. H. Lim, S. W. Yoo, "Mechanical Behavior of Anchorage Zones in Prestressed Concrete Members with Single and Closely-Spaced Anchorages", *Journal of Civil Engineering, Korea Society of Civil Engineers*, Vol.6, No.2, pp.1329~1339, November, 1994.
- [2] D. H. Lim, B. H. Oh, "Prediction of Cracking and Ultimate Loads of Prestressed Concrete Anchorage Zones in Box-Girder Bridges", *Journal of the Korea Concrete Institute, Korea Concrete Institute*, Vol.6, No.5, pp.171~182, October, 1994.
- [3] K. C. Choi, Y. H. Park, I. Y. Paik, "Evaluation of Bursting Behavior in Anchorage Zone of PSC I Girders", *Journal of Civil Engineering, Korea Society of Civil Engineers*, Vol.30, No.3A, pp.329~336, May, 2010.
- [4] J. K. Kim, Y. S. Kwon, J. M. Yang, "Numerical Analysis on the Local Anchorage Zone Behavior According to the Relative Size of Bearing Plate", *Journal of The Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol.17, No.2, pp.171~179, April, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.2.171>
- [5] Y. S. Kwon, J. K. Kim, H. G. Kwak, "Ultimate Strength of Anchorage Zone according to Geometric Parameters of Post-Tensioning Anchorage using a Finite Element Method", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.28, No.3, pp.317~324, June, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.3.317>
- [6] J. K. Kim, Y. S. Kwon, J. M. Yang, "Anchorage Zone Behavior in the Slab with Flat Anchorage", *Journal of The Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol.14, No.1, pp.67~76, February 2014
DOI: <https://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.1.67>
- [7] PTI Post-Tensioning Manual, Post-Tensioning Institute, 6th Edition, 2006.
- [8] TDV GmbH, RM2004 - Technical Description., Graz, Austria, 2004, Available From: <https://www.bentley.com>
- [9] LUSAS, Version 16.1 Manual, FEA Ltd., 2017, Available From: <http://www.lusas.com>
- [10] S.P. Timoshenko, J.N. Goodier, Theory of Elasticity, 3th Edition, 1970.

옥 재 호(Jae-Ho Ok)

[정회원]



- 1998년 8월 : 영남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (박사과정)
- 2004년 8월 ~ 2015년 9월 : (주)평화엔지니어링 근무
- 2015년 10월 ~ 현재 : (주)동성엔지니어링 상무

<관심분야>

토목구조, 구조진동

임 성 순(Sung-Sooon Yhim) [정회원]



- 1987년 8월 : 서울대학교
대학원토목공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 3월 :
서울시립대학교 토목공학과 조교
- 1999년 4월 ~ 2004년 8월 :
서울시립대학교 토목공학과 부교수
- 2004년 9월 ~ 현재 :
서울시립대학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉

토목구조, 구조진동