

PSC 박스거더교 정착부의 최소파열력에 대한 강선긴장순서

Minimization of Bursting Force at Anchorage Zone Using Prestressing Order for PSC Box Girder Bridge

정 지 승*

Chung, Jee-Seung

구 형 선**

Koo, Hyoung-Seon

Abstract

In this paper, the prestressing order of tendons is studied to minimize a bursting force of an anchorage. The bursting forces is a primary factor of anchorage failures. The forces of the anchorage depend on the prestressing order and size of the tendons, if a lot of tendons are introduced to the anchorage. Many studies have been made to analyze the bursting force of the anchorage. However, the studies have been limited to the bursting forces of the anchorage having one or two tendons.

PSC box girder bridges usually have a lot of tendons. And the difference of the bursting forces lies in the prestressing order of the tendons. As a result of the lack of studies on the prestressing order for the bridges, the order depends on the designer's intuition and experiences. It may be stated that this study should be useful for determining the reasonable prestressing order of tendons for the PSC box girder bridges.

keywords : PSC Box Girder Bridge, Bursting Forces, Prestressing Order, Anchorage

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC)는 철근 콘크리트가 인장저항에 취약하다는 문제점을 극복하기 위해서 미리 콘크리트에 긴장력을 도입하여, 콘크리트에 작용하는 휨인장력에 저항할 만한 압축력을 작용시킨 콘크리트이다. 최

근에는 PSC의 다양한 긴장력 도입 기술 개발 및 콘크리트와 고강도 강선의 부착에 대한 많은 연구로 인해 토목 및 건축분야에서 다양하게 사용되고 있는 실정이다. 특히 교량 분야에서는 PSC를 적용한 교량이 증가추세에 있으며, 특히 PSC 박스거더교는 경제성, 유지관리 및 미관적인 측면에서 기존의 강경간 강교량과 경쟁하기에 이르렀다.

* 정회원, (주)삼보기술단 차장, 공학박사/구조기술사

** (주)삼보기술단 대리, 공학석사

● 본 논문에 대한 토의끝 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2001년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이러한 추세에 맞추어서 PSC교량의 국부거동에 대해서도 많은 연구가 수행되고 있으며, 이중에서도 과도한 집중응력이 작용하는 정착부에 대한 연구도 많이 수행되고 있다. 긴장력 도입에 의한 과도한 집중하중으로 인해 정착부 내부에서는 파열력(bursting force)이 발생되고 이는 정착부 파괴의 수원인이 된다⁽¹⁾. 이러한 파열응력상태를 파악하기 위해 많은 연구가 수행되고 있으나, 대부분의 연구는 상선의 프리스레싱을 단독으로 사용시키거나 2개의 강선을 동시에 사용시킨 경우에 대해서만 연구되었다⁽²⁾. 실제 토목구조물에 적용되는 PSC 구조물은 여러개의 강선을 긴장한다. 강선을 긴장시킬 경우에도 긴장력은 순차적으로 도입하며, 이러한 긴장순서에 따라 콘크리트의 정착부에 발생하는 파열력의 크기는 크게 차이가 난다. 그러나 정착부의 긴장순서에 대한 연구 부족으로 인해 강선의 긴장순서는 정착부의 단면 형상 및 복부 두께와 상관없이 기존의 자료와 경험적 지식을 바탕으로 결정되고 있다. 이러한 경험에 기초한 관용적인 방법을 적용할 경우에도 적절한 긴장력으로 인해 현재까지 시공된 PSC 박스거더교 정착부의 안전성 측면에서 크게 문제가 발생된 사례는 없다. 그러나 콘크리트 및 재료의 개선에 따라 보다 큰 긴장력이 도입될 경우 정착부 파열력의 증대로 정착부의 안전성 및 경제성 향상을 위해 강선 긴장순서를 합리적으로 결정하여야 될 것이다. 본 논문에서는 여러개의 강선이 도입되는 PSC 박스거더교에 대한 합리적인 강선순서를 결정하기 위해 강선의 긴장순서에 따른 정착부의 파열력의 크기를 연구하였다.

2. PSC 박스거더교의 정착부

PSC 박스거더교의 정착부에는 과도한 긴장력이 도입되므로 정착부 부근의 콘크리트는 국부적인 지압응력에 저항할 수 있는 강도이상이어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 긴장시 콘크리트의 압축강도가 인장 석후에 콘크리트에 발생하는 최대압축응력의 1.7배 이상이 되지 않으면 안되며, 특별한 규정이 없을 경우 부재의 양생조건과 동일한 상태에서 양생시킨 시편에 대한 콘크리트의 압축강도가 프리텐션부재에서는

300kgf/cm², 포스트텐션부재에서는 270 kgf/cm²이 될 때까지 콘크리트에 힘을 가하지 않아야 한다.⁽⁶⁾ 이와 같은 규정이 만족되지 않을 경우 Fig. 1처럼 균열 발생 가능성이 있으며, 이러한 균열을 방지하기 위해 Fig. 2처럼 철근으로 보강하기도 한다.

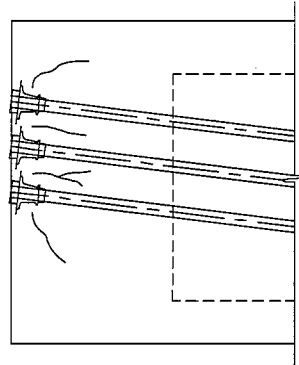


Fig. 1 균열 발생 장소

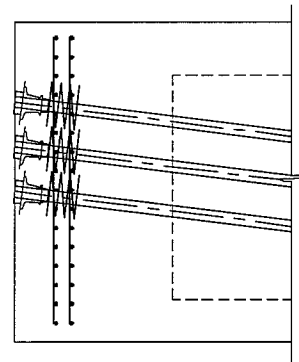


Fig. 2 정착부 철근보강

성착부의 강선 인상시에 발생하는 성착파괴의 주원인은 상기와 같은 시압응력에 의한 파괴보다도 정착부 내부에서 발생하는 파열력이 주원인이다. 이러한 파열력에 대해 저항하기 위해서 정착부에 나선, 폐합 HOOP 또는 정착된 띠철근을 보강한다. 이러한 보강 철근량 산정에 필요한 파열력을 계산하기 위해서는 Strut-Tie model, 유한요소해석법 및 근사해법이 사용된다. 이때 적용되는 근사해법은 다음과 같다^{(3),(4),(6)}. 정착부에서 발생하는 파열력 T_{burst} 는 식(1)과 같이 나타낸다.

$$T_{burst} = 0.25 \Sigma P_u \left\{ 1 - \frac{a}{h} \right\} + 0.5 | \Sigma (P_u \sin \alpha) | \quad (1)$$

파열력의 위치를 나타내는 d_{burst} 는 식(2)와 같다.

$$d_{burst} = 0.5(h - 2\theta) + 5\theta \sin \alpha \quad (2)$$

여기서,

T_{burst} = 정착부의 전면에서 긴장재축에 횡방향으로 작용하는 정착부에서의 인장력(N)

F_u = 설계긴장력(N)

d_{burst} = 정착장치와 파열력 T_{burst} 의 도심사이의 거리(mm)

a = 고려한 방향으로 정착장치 혹은 정착장치 그룹의 측면치수(mm)

e = 단면의 도심에 대한 정착장치 혹은 정착장치 그룹의 편심으로 항상 양으로 나타냄(mm)

h = 고려한 방향으로의 단면의 측면치수(mm)

α = 부재의 도심선에 대한 긴장력의 경사각으로 집중 긴장재 혹은 정착력이 단면의 도심을 향하고 있으면 양의 부호를, 정착력이 단면의 중심으로부터 떨어져 있으면 음의 부호를 가짐

일반적으로 PSC 박스거더교는 여러 개의 강선이 긴장되므로 강선이 단독으로 작용할 경우보다 정착부 내부에서 발생되고 파열력은 추정하기가 어렵다. 특히 강선의 긴장순서에 대한 정착부의 파열력은 긴장순서의 경우에 따라 크게 차이가 난다.

정착부의 파열력에 대해서는 일반적으로 파열력에 저항하는 철근 양을 철근 보강으로 계획할 수도 있으나, 보다 근본적인 방법으로 강선의 긴장순서를 조절하여 파열력을 감소시키면 보다 경제적으로 정착부의 안정성을 확보할 수 있다. 따라서 PSC 박스거더교처럼 여러개의 강선이 정착부에 정착될 때에는 강선의 긴장순서 검토가 우선되어야 한다.

3. 정착부 해석모델

해석을 수행한 대상교량은 청주-상주간 고속도로 건설공사 제3공구에 시공예정인 화북1교로서 연장은 $5 \times 50 = 250\text{m}$ 이며 MSS공법이 적용된 PSC 박스거더교이다.

긴장력에 의한 정착부내부의 파열응력을 해석하기 위해서 정착부를 포함한 박스거더에 대한 해석모델을 범용 FEM 프로그램인 LUSAS를 이용하여 3차원 solid요소로 모델링하였다. 이때 거더 전체를 3차원 solid 요소로 modeling 하기 위해서는 매우 많은 수의 solid 요소가 필요하므로 가능한 solid 요소의 수를 줄이기 위해서, 박스거더단면의 강선수가 적, 우로 대칭인 점을 고려하여 적, 우 대칭되는 한쪽 복부단면에 대해서만 modeling을 수행하였다. 또한 본 해석을 통해서 관심있는 항목은 강선긴장순서에 따른 정착부내부에 발생하는 파열력이며, 이는 정착부에서 일반적으로 10m이내에서 응력이 발생된다. 따라서 정착부내부의 파열응력을 해석하기 위한 해석모델로 정착부에서 교축방향으로 25m까지 modeling 하였으며, 단부에서부터 10m 구간은 요소를 세밀하게 분할하여 정밀도를 확보하였다.

본 연구에 적용된 정착부 해석예제는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 강선수는 6개이며 복부에 2개씩 3단으로 배치되었다. 본 예제에 대한 정착부의 해석모델은 Fig. 4에 나타내었으며, 본 모델에 적용된 solid 요소의 수는 12,032개이고, solid 요소의 Aspect Ratio는 1.5 이내로 제한하여 요소분할을 수행하였다. Solid 요소의 최소크기는 5.3cm이며, 최대 크기는 26.1cm이다. 박스거더 내부에 작용하는 긴장재의 상향력은 등가하중으로 치환하여 재하하였으며, 박스거더 지중에 의한 반력의 영향을 고려하기 위해 포트받침의 면적에 해당하는 부한강성의 스프링으로 구속하였다. 적용긴장력은 강선이 정착되는 위치에서 지압관 면적에 해당되는 요소에 대해서 1개의 긴장력을 지압관 면적으로 나눈 하중을 재하하였다.

또한 강선긴장에 의한 탄성변형으로 인해 선행 긴장시킨 강선의 긴장력 감소를 해석한 결과 강선의 긴장시마다 0.5% 감소되었다.

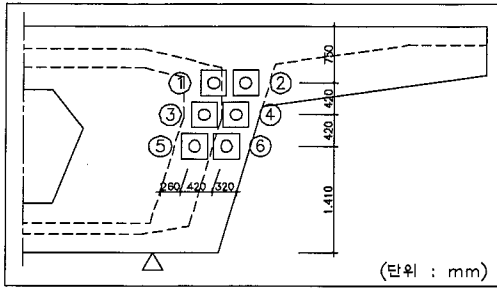


Fig. 3 해석예제

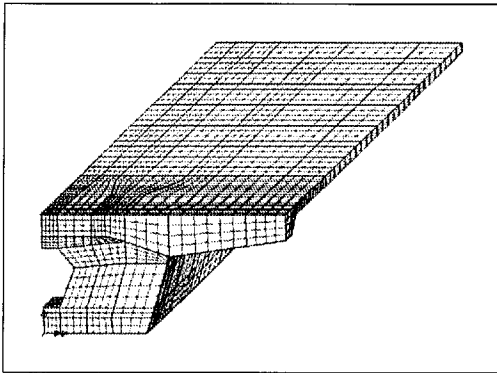


Fig. 4 해석모델

이러한 감소율은 미소할 뿐만 아니라 본 논문의 목적인 긴장순서에 따른 파열응력의 상대비교와는 무관하므로 강선긴장에 의한 탄성변형의 긴장력 감소율은 무시하였다.

4. 긴장순서에 따른 파열응력검토

강선수가 6개인 Fig. 3에 나타난 적용예제에 대해서 강선을 순차적으로 긴장시켰을 경우의 긴장순서에 따른 파열응력을 Table 1에 정리하였다. Table 1에 나타난 것처럼 정착부 내부의 파열력을 최소화시키기 위한 강선의 긴장순서는 No. 5-2-3-1-6-4 로, 최대 파열력이 발생하는 긴장순서인 No. 6-2-4-1-3-5인 경우에 비해 긴장 단계에 따라 각 단계별로 파열응력은 8%~82%의 범위이다. 또한 파열응력 최소가 되는 긴장순서에서 정착부에 발생하는 최대 파열응력은 26.436kgf/cm² 으로 파열응력 최대가 되는 긴장순서에

Table 1 긴장순서에 따른 파열응력 (단위 : kgf/cm²)

파열응력 최소시		파열응력 최대시	
긴장순서	응력	긴장순서	응력
No. 5	2.274	No. 6	28.395
No. 2	5.414	No. 2	28.603
No. 3	10.108	No. 4	28.984
No. 1	21.216	No. 1	26.325
No. 6	26.436	No. 3	32.204
No. 4	25.924	No. 5	25.924

서 정착부에 발생하는 최대 파열응력인 32.204kgf/cm²에 비해 82%에 불과하다. 부록에는 모든 강선의 긴장순서에 대한 파열응력을 나타냈다. Fig. 6, Fig. 7은 긴장순서에 따라 최소파열력 및 최대파열력이 발생하는 경우의 응력도이다.

강선을 단독으로 긴장할 경우 강선의 위치에 따라 파열응력이 다르게 나타나는데 이때의 파열응력은 Table 2에 나타난 것처럼 매우 큰 편차가 있으며, 강선을 전부 긴장시켰을 경우의 8.8~109.5%의 응력이 작용한다. 이때의 응력을 비교해 보면 박스거더의 외측에 위치하는 강선에 의한 파열응력이 내측의 강선에 의한 파열응력에 비해 매우 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5와 같이 외측 강선에 의한 파열응력이 부부 및 부부와 플랜지의 접속부에서 집중현상을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 긴장순서를 잘못 설정할 경우 강선 6개를 전부 긴장시킨 경우보다 1개 긴장시킨 경우가 오히려 파열응력이 크게 될 경우가 발생할 수 있다.

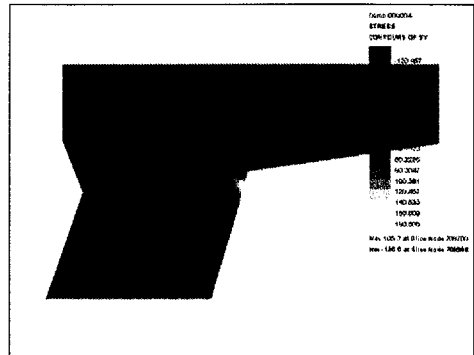
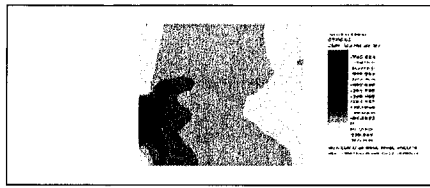
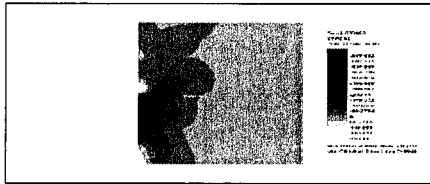


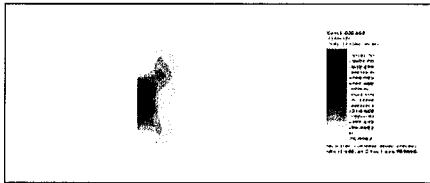
Fig. 5 외측 강선 긴장시의 응력분포



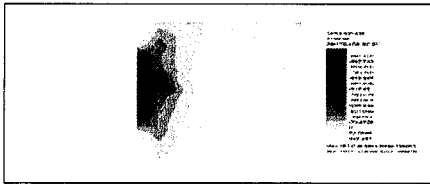
강선 5 긴장시



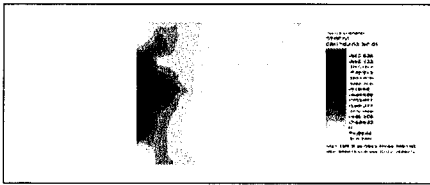
강선 5→2 긴장시



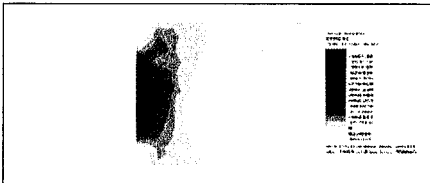
강선 5→2→3 긴장시



강선 5→2→3→1 긴장시

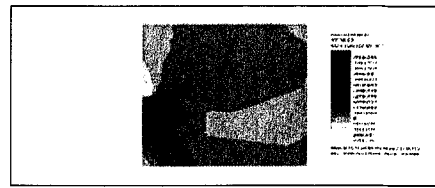


강선 5→2→3→1→6 긴장시

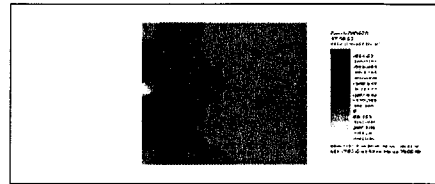


강선 5→2→3→1→6→4 긴장시

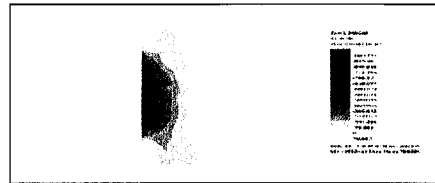
Fig. 6 강선긴장순서에 따른 최소피열력의 응력도



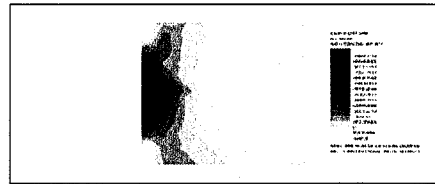
강선 6 긴장시



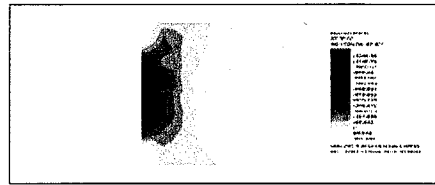
강선 6→2 긴장시



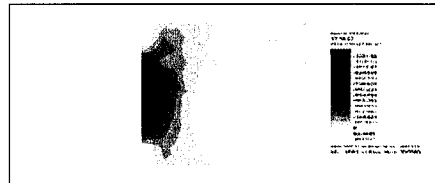
강선 6→2→4 긴장시



강선 6→2→4→1 긴장시



강선 6→2→4→1→3 긴장시



강선 6→2→4→1→3→5 긴장시

Fig. 7 강선긴장순서에 따른 최대피열력의 응력도

Table 2 단독긴장시의 파열응력 (단위 : kgf/cm²)

강선번호	S _x	S _y	S _{max}
No. 1	2.721	5.534	5.534
No. 2	3.329	3.033	3.329
No. 3	2.914	8.640	8.640
No. 4	27.480	15.415	27.480
No. 5	2.274	1.802	2.274
No. 6	27.706	28.395	28.395

Table 3 긴장순서에 따른 철근량 (단위 : kgf/cm²)

경 우	철근량(cm ²)	비 율
파열응력최소	0.014	1.00
파열응력최대	0.017	1.21
No.6 단독긴장	0.015	1.07

Table 4 강선 긴장 조합별 발생 응력 (단위 : kgf/cm²)

구분	긴장강선	S _x	S _y	S _{max}	구분	긴장강선	S _x	S _y	S _{max}
강선 1개 긴장	1	2.721	5.534	5.534	강선 3개 긴장	2,3,5	6.017	10.108	10.108
	2	3.329	3.033	3.329		2,3,6	23.682	18.504	23.682
	3	2.914	8.640	8.640		2,4,5	20.015	13.276	20.015
	4	27.480	15.415	27.480		2,4,6	26.984	9.942	26.984
	5	2.274	1.802	2.274		2,5,6	23.642	18.592	23.642
	6	27.706	28.395	28.395		3,4,5	7.510	16.014	16.014
강선 2개 긴장	1,2	6.463	7.614	7.614	3,4,6	24.915	15.299	24.915	
	1,3	5.216	5.620	5.620	3,5,6	19.853	18.641	19.853	
	1,4	22.904	12.696	22.904	4,5,6	23.478	12.749	23.478	
	1,5	5.216	5.816	5.816	강선 4개 긴장	1,2,3,4	11.868	23.451	23.451
	1,6	28.526	27.367	28.526		1,2,3,5	9.352	21.216	21.216
	2,3	4.102	6.492	6.492		1,2,3,6	25.795	22.716	25.795
	2,4	23.099	16.009	23.099		1,2,4,5	19.482	26.333	26.333
	2,5	5.127	5.414	5.414		1,2,4,6	25.340	26.325	26.325
	2,6	28.603	22.190	28.603		1,2,5,6	24.007	21.196	24.007
	3,4	29.939	14.229	29.939		1,3,4,5	13.953	23.202	23.202
	3,5	5.600	5.627	5.627		1,3,4,6	25.379	21.782	25.379
	3,6	24.467	21.758	24.467		1,3,5,6	19.986	20.744	20.744
	4,5	23.932	13.756	23.932		1,4,5,6	23.985	18.964	23.985
	4,6	28.129	11.405	28.129		2,3,4,5	9.792	20.066	20.066
5,6	23.211	20.914	23.211	2,3,4,6		24.529	22.127	24.529	
강선 3개 긴장	1,2,3	8.524	20.675	20.675		2,3,5,6	20.710	18.720	20.710
	1,2,4	18.766	12.413	18.766		2,4,5,6	24.334	19.318	24.334
	1,2,5	7.178	10.602	10.602	3,4,5,6	19.344	18.692	19.344	
	1,2,6	29.633	26.007	29.633	강선 5개 긴장	1,2,3,4,5	13.569	33.204	33.204
	1,3,4	8.346	21.715	21.715		1,2,3,4,6	22.815	32.127	32.127
	1,3,5	8.129	10.016	10.016		1,2,3,5,6	21.216	26.436	26.436
	1,3,6	25.419	25.589	25.589		1,2,4,5,6	25.105	27.260	27.260
	1,4,5	22.048	14.057	22.048		1,3,4,5,6	20.674	25.655	25.655
	1,4,6	28.910	13.774	28.910		2,3,4,5,6	20.275	26.630	26.630
	1,5,6	23.982	24.285	24.285		강선 6개 긴장	1,2,3,4,5,6	21.528	25.924
2,3,4	8.765	21.808	21.808						

Table 4에 나타낸 것처럼 긴장력에 의한 파열력을 최소로 하기 위해서는 복부의 강선은 반드시 내측에서 외측으로 긴장시켜야 한다. 이러한 긴장순서에 따른 경제성을 정량적으로 평가하기 위해 각 경우의 보강 철근량을 Table 3에 정리하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 PSC 박스거더교의 강선긴장순서에 따른 정착부의 파열력을 검토하기 위하여 solid 요소를 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) PSC 박스거더교 처럼 여러개의 강선을 긴장시킬 경우 동일한 크기 및 개수의 강선을 긴장하더라도 긴장순서에 따라 정착부의 파열력(Bursting Force)의 크기는 상이하므로 정착부의 파열력을 최소화 하는 순서로 강선을 긴장시켜야 한다. 이때 긴장순서는 내측에서 외측으로 긴장시키는 것이 파열력을 최소로 하는 방법이며, 6개의 강선을 갖는 예제를 통해 분석한 결과, 최소파열력은 강선긴장 순서에 따라 최대 파열력대비 82% 수준으로 감소된다. 또한 부적절한 순서에 의한 단독긴장의 파열력이 합리적인 순서에 의해 긴장된 6개의 파열력보다도 오히려 7% 증대된다.
- 2) 동일한 크기의 6개의 강선을 단독으로 긴장할 경우도 강선의 위치에 따라서 정착부의 파열력은 다르게 나타난다. 즉 정착부 및 강선의 기하학적인 변형에 대해서 파열력은 민감하게 반응하므로 본 예제에서 적용한 정착부와 형상이 다를 경우 정확한 파열력 및 합리적인 긴장순서를 파악하기 위해서는 1)에서 제시한 순서에 기초하여 유한요소해석을 수행하여야 한다.
- 3) 강선긴장에 따른 정착부에서 발생하는 파열력에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 유한요소해석, Strut-Tie model 및 근사해석을 통해서 수행되었다. 그러나 이러한 연구의 대부분은 1개 또는 2개의 강선이 긴장될 경우에 대해서만 수행되었으며, PSC 박스거더교 처럼 여러개의 강선의 긴장이 요구되는 경우 긴장순서에 따른 파열력의 크기에 대한 검토는 수행되지 않았다. 따라서 기존의 PSC 박스거더교에 적용된 긴장순서는 경험적이고 기존의 자료를 수정없이 적용하였으나, 본 연구결과 및 방법을 기초할 경우 보다 합리적인 강선 긴장순서를 결정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김민수, 김진근, 유영섭, 이상순, "포스트텐션용 정착구의 하중전달특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 2000, pp. 657~667
2. 윤영목, "PSC 텐론 정착부의 Strut-Tie 모델 해석", 도목기술강좌, Vol.5, No.1, 2000, 3, pp. 45~66
3. ACI 318-99(1999), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary
4. AASHTO(1998), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications
5. 대한토목학회, 1996, 도로교 표준시방서
6. 대한토목학회, 1996, (부록)도로교 표준시방서(하중 저항계수 설계법)

(접수일자 : 2000년 6월 30일)