

프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적설계

Optimum Design of Prestressed Concrete Girder Railway Bridge

조산규*, 윤석구*, 서봉주**, 정계동***, 김원우****
Cho, Sun Kyu · Youn, Seok Goo · Seo, Dong Joo · Jung, Jae Dong · Kim, Hyun Woo

ABSTRACT

The prestressed concrete girder bridges have been used widely at the domestic national road as well as highway because it is great in the functional and economical efficiency. Also it has the advantage of convenience of design and construction due to being given standard sections. However it could be easily verified that a standard section of P.S.C girder is excessive design, which has much more redundancy than is necessary against design loads. Thus, in this paper the formulation of the optimum design for PSC girder railway bridge is suggested and dominant design variables and constraints are inquired as performing the optimum design. The objective is adopted as total cost of PSC girder bridge and in order to effective optimum design, design variables are formulated as PSC girder section dimension and girder space as well. And constraints are formulated according to Korean railway design specification and considering construction-ability such as PS anchorage and girder space. Using the proposed optimum design system, optimum PSC girder bridge design has been performed. And from the results of analysis it is suggested to denote the optimum section which satisfies the structural safety and economical efficiency all together.

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 거더교는 기능성과 경제성 측면이 우수하여 중·소규모의 교량에 많이 적용되는 교량형식으로 도로교뿐만 아니라 철도교에 오래전부터 널리 건설되어왔다. 특히 공사현장에서 제작공정이 간편할 뿐만 아니라 다른 교량형식보다 비교적 공사비가 저렴한 장점이 있기 때문에 교량연장이 긴 철도교에 많이 적용되어왔다. 철도교는 도로교에 비하여 열차개도에 관련된 고정하중이 추가되고 도로교 활하중보다 큰 열차하중이 재하되기 때문에 일반적으로 큰 강성의 단면을 필요로 한다. 따라서, 안전성 측면에서 큰 안전율이 적용된다면, 작용하중이 매우 크기 때문에 단면도 크게 증가하게 되고 이에 따라 경제성에 대하여 불리하게 작용될 것이다. 철도 교량계획에서 많은 비중을 차지하는 PSC 거더교의 구조적 안전성을 유지하면서 보다 경제적인 활용을 위해서 PSC 거더교에 대한 최적설계를 도입하여 지배적인 설계변수와 제약조건을 파악하는 물론 PSC 거더교의 최적단면의 도출을 통하여 보다 합리적인 PSC 거더교에 대하여 검토하고자 한다.

2. PSC 거더교의 정식화

2.1 목적함수

최적설계의 목적함수는 식 (1)에 나타낸 바와 같이 PSC 거더교의 총제작비용 함수로 정식화하

* 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

** 서울산업대학교 석사과정, 비회원

*** (주)나린이앤씨 대표이사, 비회원

**** 서영기술단 기술연구소, 비회원

었다. 총제작비용은 PSC 거더 제작에 비용, 콘크리트 제작비용, 철근 제작비용, PS강선 제작비용, 위스칸 제작비용, 경각구 제작비용, PS강선 긴장비용 그리고 PSC 거더 강재거푸집 제작비용의 합으로 정식화하였다.

$$F = F_{\text{beam}} + F_c + F_s + F_{\text{sp}} + F_{\text{sk}} + F_{\text{ms}} + F_{\text{tm}} + F_j \quad (1)$$

여기서,

F : PSC 거더의 총제작비용 F_{beam} : PSC 거더 제작에 비용 F_c : 콘크리트 제작비용
 F_s : 철근 제작비용 F_{sp} : PS강선 제작비용 F_{sk} : 위스칸 제작비용
 F_{ms} : 경각구 제작비용 F_{tm} : PS강선 긴장비용 F_j : 강재 거푸집 제작비용

2.2 설계변수

설계변수는 그림 1에 나타난 바와 같이 PSC 거더 단면형상과 PSC 거더 간격으로 정식화하였다. 거더 단면의 설계변수는 상·하부 플랜지의 폭원, 두께 그리고 천지 두께 그리고 목부의 두께 및 높이로 정식화하였다. PS강재량은 비선형설계 예후 큰 설계인자이므로 설계단면과 같이 설계변수로 정식화하기에는 부적합의 수렴성을 감소시킨다. 따라서, 실무에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 PS강재인, SWPC7- ϕ 12.7mm \times 12 의 사용계수를 3EA, 4EA 및 5EA의 세 가지 강선배치로 고려하는 설계상수로 정식화하였다. 그리고 PSC 거더가 등간격 및 대칭으로 배치되므로 거더간격을 설계변수로 정식화하여 거더배치가 고려된 PSC 거더교의 최적단면에 대하여 조합하도록 하였다.



(a) PSC 거더단면

(b) 거더 간격

그림 1 설계변수에 정식화

2.3 제약조건

PSC 거더 최적설계를 위한 제약조건은 표 1에 제시된 바와 같이 형상 검토상계기준(검토교편)을 바탕으로 프리스트레스드 콘크리트 거더의 각 하중단계에 대하여 긴장거푸, 손실부 및 압입부 관

표 1 PSC 거더 최적설계의 제약조건

구분	제약조건	기호 설명	
PSC 거더	긴장거푸 허용액	$G_1: f_{1s} \leq f_{1st}$ (1)	f_{1s} , f_{1st} - X라스트레스 도입 직후 거더 상·하단에서의 휨응력
	손실부 허용액	$G_2: f_{2s} \leq f_{2st}$ (2)	f_{2s} , f_{2st} - 손실부 콘크리트 상·하단의 허용휨장응력
	손실부 휨응력	$G_3: f_{3s} \leq f_{3st}$ (4)	f_{3s} , f_{3st} - 손실부 적용하중 상태에서 거더 상·하단의 휨응력
		$G_4: f_{4s} \leq f_{4st}$ (5)	f_{4s} , f_{4st} - 손실부 콘크리트 상·하단의 허용휨장응력
	압입부 휨응력	$G_5: f_{5s} \leq f_{5st}$ (6)	f_{5s} , f_{5st} - PSC교 상·하단의 휨응력
		$G_6: f_{6s} \leq f_{6st}$ (7)	f_{6s} , f_{6st} - PSC교 상·하단의 허용휨장응력
단면	긴장거푸 PS강선배치	$G_7: f_{7st} \leq f_{7sm}$ (8)	f_{7st} , f_{7sm} - 단일 상부 PS 강재 응력 및 허용응력
	손실부 PS강선배치	$G_8: f_{8st} \leq f_{8sm}$ (9)	f_{8st} , f_{8sm} - 손실부 PS 강재의 유효응력 및 허용응력
	휨강도	$G_9: M_s \leq 4M_c$ (10)	M_s - 하중휨강도, $4M_c$ - 설계휨강도
	전단강도	$G_{10}: S_s \leq 4S_c$ (11)	S_s - 하중전단강도, $4S_c$ - 설계전단강도

표 1 PSC 거더 최적설계의 제약조건 (계속)

구분	제약조건	기호설명
최적화	$G_U: T_{UK} \leq T_{UK}$ (12)	T_{UK} - 좌측 편심레버부 두께, T_{UK} - 좌측 비약물 최소두께
	$G_D: T_{DK} \leq T_{DK}$ (13)	T_{DK} - 내측 비약물 두께, T_{DK} - 내측 비약물 최소두께
	$G_B: T_{BK} \leq T_{BK}$ (14)	T_{BK} - 우측 편심레버부 두께, T_{BK} - 우측 비약물 최소두께
	$G_U: A_{UK} \leq A_{UK}$ (15)	A_{UK} - 좌측 편심레버부 비약물 필요면적량
	$G_D: A_{DK} \leq A_{DK}$ (16)	A_{DK} - 내측 비약물 필요면적량, A_{DK} - 최대사용면적량
	$G_B: A_{BK} \leq A_{BK}$ (17)	A_{BK} - 우측 편심레버부 비약물 필요면적량
기하적 소 견	$G_U: S_U \leq 0.6 \times S_U$ (18)	S_U - 좌측 편심레버부 길이, S_U - 내측 거더길이
	$G_D: S_D \leq 0.6 \times S_D$ (19)	S_D - 우측 편심레버부 길이
	$G_B: H_{UB} \leq H_B$ (20)	H_B - 거더높이, H_{UB} - 정적형의 실제 필요최소높이

따라서 거더의 응력조건식(2)~식(7)과 1% 강재의 응력조건식(8)~(9) 그리고 강도조건식(10)~식(11)의 규정에 기초하여 PSC 거더 단면의 구조저항에 관련된 제약조건을 정식화하였다. 그리고 최적의 거더대처를 위해서 막단면의 최소두께물량과 비약물 사용필요량에 대한 제약조건식(14)~(16)을 정식화하였으며, 기하적 형상에 대한 제약조건으로 정착공까지 사용갯수에 따른 정착강지 설치에 필요한 최소필요형고에 대한 제약조건과 막단면 편심레버 길이내측거더 길이의 60%를 초과하지 않는 제약조건을 추가하였다.

3. 최적설계 시스템 구성

PSC 거더로 최적설계 정식화를 바탕으로 설립적인 최적설계 시스템을 그림 2에 나타낸 바와 같이 구성하였다. 최적화 알고리즘은 참고문헌[7]의 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하여, 복잡 변수 라그랑지법(Augmented Lagrange Multiplier Method, ALM)을 사용하였으며 다변수 무제약 최적화 탐색기법은 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)방법을 사용하였다. 그리고 단일변수함수의 최적해 탐색은 다항식 보간법(Polynomial Interpolation)을 적용하였다. 최적설계 시스템은 그림 2에 나타낸 바와 같으며, 종방향 및 횡방향 구조해석을 통하여 PSC 거더단면과 거더간격의 변화에 따른 단면력을 제약조건 산정에 반영하도록 구성하였다. 그리고 설계변수는 실수형으로 정식화되었기 때문에 최적점이나 설계치로 제약되기 어려운 값이다. 따라서, 설계 설계단면에 적용할 수 있도록 실수형 변수를 거더단면 폭수는 5mm 단위와 거더간격은 10mm 단위로 이산화시키고 설계점 중을 거쳐 최종적으로 이산형 최적해를 산출하도록 최적설계 시스템을 구성하였다.



그림 2 PSC 거더로 최적설계 시스템

4. 최적설계 결과

4.1 대상구조물

PSC 거더 형태로 최적설계를 위한 대상구조물은 참고문헌[6]의 기설계된 실무자료에서 선정하였다. 교량지간은 25m이고 폭원은 10.9m의 복선교량으로 그림 3에 나타낸 바와 같다. 설계활하중은 1등급 교량인 LS-22 일차하중을 적용하였으며 실제에 적용될 재료물성치와 제반 설계값수들은 참고문헌[6] 값을 적용하였다.

거기단리의 영향을 감소시키기 위해서 동일한 교량폭원에 대해서 PSC 거기다 5개 배치된 경우와 4개 배치된 경우에 대해서 각각 대량 구조물로 적용하였다. PSC 거기다교의 제작비용을 산출하기 위한 각 건설재료 및 공정별 단가의 구성은 참고문헌[1]의 값을 적용하였다.



그림 3 최적설계 대상구조물

4.2 최적설계 결과 및 고찰

PSC 거기다교에 사용된 거리 개수변화와 PS 강재량에 따른 설계변수와 목적함수의 최적설계 결과를 표 2에 나타내었다. 그리고 각 경우에 대한 최적 PSC 거기다단면을 표준단면과 함께 그림 4에 나타내었다.

표 2 최적설계 결과

종류	구분	포장 단면	PSC 거기다 4개 배치된 경우						PSC 거기다 5개 배치된 경우					
			#12.7-3EA		#12.7-4EA		#12.7-5EA		#12.7-3EA		#12.7-4EA		#12.7-5EA	
			최수형	이상형	최수형	이상형	최수형	이상형	최수형	이상형	최수형	이상형	최수형	이상형
거리	H_{tot} (m)	1.000	0.649	0.625	0.749	0.720	0.824	0.825	0.917	0.923	0.744	0.745	0.792	0.795
	T_{top} (m)	0.180	0.141	0.140	0.162	0.165	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	
	H_{st} (m)	0.100	0.105	0.105	0.100	0.100	0.084	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	
단면	T_{top} (m)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	
	H_{st} (m)	1.275	2.000	2.000	1.607	1.610	1.275	1.275	1.514	1.515	1.265	1.265	1.210	
	H_{st} (m)	0.720	0.631	0.630	0.750	0.750	0.892	0.895	0.917	0.920	0.744	0.745	0.815	
형상	V_{top} (m)	0.250	0.222	0.225	0.224	0.224	0.226	0.225	0.251	0.252	0.220	0.220	0.251	
	H_{st} (m)	0.250	0.279	0.280	0.246	0.245	0.234	0.235	0.262	0.265	0.215	0.215	0.230	
	거리간격 (m)	1.500	2.265	2.260	2.265	2.260	2.265	2.260	2.088	2.100	2.087	2.100	2.086	
높이	중심높이 (m)	1.620	1.537	1.530	1.530	1.530	1.529	1.529	1.257	1.250	1.257	1.250	1.228	
	H_{st} (m)	2.130	2.777	2.780	2.345	2.350	2.220	2.220	2.220	2.270	2.024	2.025	1.984	
Conc(단면적 A, m^2)	0.810	0.805	0.807	0.780	0.782	0.778	0.780	0.895	0.891	0.895	0.896	0.750		
	거리당 제작비용(만원)	1923	1644	1645	1645	1648	1748	1800	1451	1438	1523	1521	1721	
보안 총제작비용(만원)	2482	1824	1821	1822	1824	2182	2322	2321	2324	2012	2017	2092		



그림 4 최적 PSC거리 단면

PSC 거리의 단면치수와 거리간격에 대한 최적설계 결과를 최수형 및 이상형 변수로 각각 나타내었다. 최적의 거기다 제작비용은 PSC 거기다 5개 배치된 교량에서 PS 강재량이 #12.7-3EA가 사용된 경우에 1,828만원이고, 최적의 교량 제작비용은 4개 거리가 배치된 경우에 동일한 PS 강재량이 사용된 경우로 6,281만원으로 나타났다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, 거기다 제작비용은 거리가 4개 사용된 경우가 5개 사용된 경우보다 약 4.3%~12.5%정도 크지만, 총제작비용은 PSC 거리

교량에 사용된 모든 거더제작비용의 합으로 구성되기 때문에, PSC 거더교량에 대한 최적의 총제작비용은 PS 강재량이 $\phi 12.7$ -3개 사용된 경우, 거더가 4개 배치된 교량에서 나타났다. 텐던이 5개 사용된 경우의 제작비용이 표준교량의 비용보다 크게 발생하였다. 이것은 PS강재량의 증가에 따른 제작비용의 증가한 원인과 콘크리트 단면이 감소하다가 텐던배치를 위한 최소필요형고가 있기 때문에 단면감소가 제한된 이유라고 사료된다. 거더당 제작비용의 구성은 식(1)에 나타난 바와 같으며, 주요 공종별로 구분하여 전체 거더제작비용에 차지하는 비율을 그림 6에 나타내었다. PS 강재공종과 PSC 거더 기부집공 그리고 철근공이 각각 약 25%, 30% 그리고 25%로 다른 공종에 비하여 상대적으로 비중이 큰 것으로 나타났으며, 콘크리트공은 거더 제작비용의 약 13%를 차지하였다.

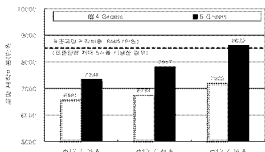


그림 4 PSC 거더교 총제작비용

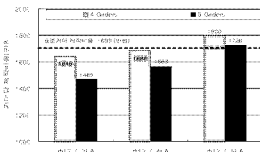


그림 5 거더당 제작비용

PS 강재량이 증가함에 따라 거더의 높이는 감소하고 플랜지의 폭은 넓어지는 것으로 나타났다. 그림 7에 나타난 바와 같이 거더가 4개 사용된 교량에서는 PS 강재량이 $\phi 12.7$ -3EA 사용된 경우, 형고가 2.780m로부터 $\phi 12.7$ -5EA 사용된 경우, 형고 2.230m로 약 20% 감소하였으며, 거더가 5개 사용된 경우에는 약 12% 감소하였다. 그리고 그림 8에 나타난 바와 같이 거더 4개의 교량에서 텐던이 3개 사용된 경우 상부플랜지가 620mm이고 텐던이 5개 사용된 경우는 855mm로 약 38% 정도 넓어졌으며, 거더 5개의 교량에서는 각각 620mm, 795mm로 약 28% 증가하였다. 사용된 거더의 개수와 PS 강재량의 증가에 따라 거더의 단면2차 모멘트는 감소하였다.

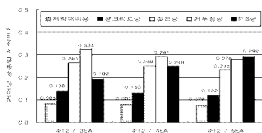


그림 6 거더당 공종별 비용

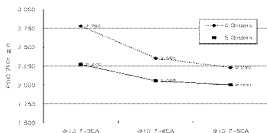


그림 7 PSC 거더 높이

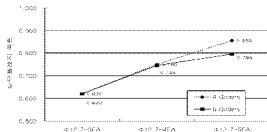


그림 8 상부플랜지 폭원

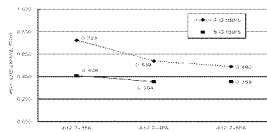


그림 9 거더 단면 2차 모멘트

따라서, 최적의 PSC 거더단면은 교량에 사용된 거더매치와 PS 강재량의 영향을 받으며, 강재량이 증가할수록 거더높이가 낮아지고 플랜지 폭원이 증가하게 되며, 이로 인하여 교하공간에 필요한 어유고 확보에 유리하고, 종단계획을 줄일수 있어 접속부 트공량을 줄이는 효과와 시공시 거더의 선도방지에 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 PS 강재량이 차지하는 제작비용의 비중이 크므로 PS강재량의 증가는 제작비용을 증가시키므로, 경제성을 감안하여 교량의 입지조건과 붕괴조건을 계획에 고려하여 최적의 거더단면을 산정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 그리고 지배적인 제약조건으로는 작업 직후 거더 상·하면 인장응력과 압축응력에 대한 제약조건이 가장 지배적으로 나타났으며, 강재응력과 지점부 전단강도에 대한 제약조건이 그 다음으로 지배적인 척으로 나타났다. 또한, 단면을 5개 사용한 경우에는 정착장치 설치에 필요한 최소형고 제한이 지배적인 제약조건으로 거동하였다.

5. 결론

본 연구에서 제안한 PSC 거더 철도교의 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 거더 제작비용에서 약 25%의 비용을 차지하는 PS 강재량이 감소할수록 최적 총제작비용의 PSC 거더 교량을 설계할 수 있으며, 사용된 거더의 수가 적을수록 거더당 제작비용은 증가하지만 오히려 PSC 거더 교량의 총제작비용은 감소하게 되는 것을 확인하였다.
- (2) PS 강재량이 증가할수록 PSC 거더의 높이는 감소하고, 플랜지 폭원도 넓어지는 형상의 단면 을 얻을 수 있었다. 따라서 교량의 입지조건 및 붕괴조건에 따라 PS 강재량을 변화시켜 최적 단면을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 지배적인 제약조건으로는 작업직후 거더상면의 인장응력과 거더 하면의 압축응력 그리고 PS 강재의 응력 및 지점부 전단강도에 대한 제약조건 순서로 나타났으므로, 이에 대하여 설계시 각별히 검토해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 조선규, 최의호(2000), “프리스트레스트 콘크리트 보 단면의 최적설계”, 콘크리트학회 논문집, 제12권 4호
- 2) 조선규, 조효남, 민대홍, 이광민, 김환기(2000) “설계민감도 해석을 이용한 PSC 박스거더교의 최적설계”, 콘크리트학회 논문집, 제12권 2호
- 3) 조선규(2001) “이동식 비계공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교의 최적설계”, 단국대학교 박사학위논문
- 4) 철도청(2003), 철도설계기준(철도교편)
- 5) 한국콘크리트학회(2000), 콘크리트구조설계기준·해설
- 6) 철도청(2003), 중앙선(미소~양수간)복선전철 건설공사 구조계산서 및 도면
- 7) Garret N. Vanderplaats(1985), ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
- 8) Al-Shaleh, Khaled Saad (1994), Optimum Design of Straight Steel Box Girder Bridges, Ph.D dissertation, Georgia Institute of Technology.
- 9) Al-Gahtain, Ahmed (1986). Optimum Design of Welded I-Beams Subjected to Highway Bridge Loads. Ph.D dissertation, Univ. of Iowa
- 10) Lust, R.V. and L.A.Schmit (1985), Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis, AIAA/ASME /ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 333-348, April
- 11) Garret N. Vanderplaats (1984). Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, McGraw-Hill, Inc.