

프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 橋梁의 最適設計에 관한 研究

A Study on the Design and Optimization of Prestressed Concrete Box Girder Bridges

○ 노 금 래* 박 선 규** 전 찬 기*** 이 인 원****

1. 서론

대부분의 PSC 박스거더 교량의 설계가 경험에 근거하여 초기 단면 설계를 한 후, 구조 해석을 실시하고 시방서상의 요구조건들이 만족될 때까지 단면 수정 및 구조해석을 반복하는 시행 착오적 설계 방법이 일반적인 추세이다. 초기 단면 설계가 비경제적인 상태에서 콘크리트 단면이나 강재의 면적만을 부분적으로 변화시켜 구조적 적합성을 만족시키는 경우에는 매우 비경제적인 설계로 귀착될 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 시방서상의 요구조건들을 만족하면서 구조물의 재료비를 최소화하는 최적 단면을 설계하기 위해 개발중인 최적 설계 프로그램을 1경간 1실 PSC 박스 거더 교량의 설계에 적용해 봄으로써 최적 설계 프로그램의 타당성을 확인하였다.

2. 최적화 알고리즘

2.1 목적함수의 정식화

PSC 박스 거더 교량에서는 PS 긴장재, 콘크리트, 거푸집 등 각기 다른 재료들이 필요하므로 항공 구조물이나 강구조물과 같이 최소 중량 설계나 최적 체적 설계와 같은 최적화는 큰 의미가 없다. 따라서 본 논문에서는 재료비 함수를 목적함수로 취하였다. 설계 변수로는 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 단면의 높이(h)와 PS 강선의 긴장력(Pj), 복부의 두께 (bo), 하부 플랜지의 두께(t')를 취하였고 (그림 1 참조) 이러한 설계변수로 구성된 목적함수는 식 (1) 과 같다. 여기서 C_c 는 단위 체적당 콘크리트 재료비(5만원/m³)이며 C_b 는 단위 무게당 강재의 재료비(68만원/ton)이고 C_f 는 단위 면적당 거푸집 재료비(6170원/m²)로서 1993년 품셈 자료를 사용하였다.

$$\text{Minimize } Z = C_c \cdot A_c + C_b \cdot A_b \cdot \gamma_b + C_f \cdot A_f \quad (1)$$

= 박스 거더 단위 길이당 재료비 (단위 : 원)

A_c : 콘크리트 단면적 A_b : 강재의 소요 단면적 A_f : 소요 거푸집 면적

* 성균관대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원, 성균관대학교 토목공학과 조교수

*** 정희원, 인천전문대학 토목과 부교수

**** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

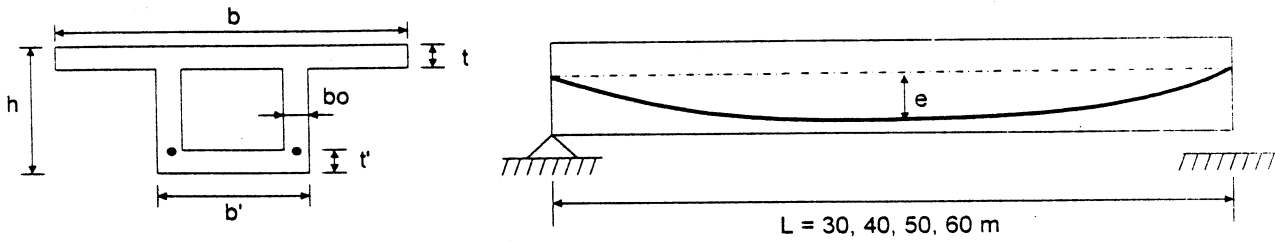


그림 1 최적 설계 대상 PSC Box Girder 교량의 횡단면과 종단면

2.2 제약 조건식

2.2.1 용력 제약 조건

PSC 박스 거더 교량은 긴장력 도입직후와 설계 하중이 작용할 때, 단면의 상·하면의 용력이 시방서 기준의 허용 용력 이하가 되어야 한다.

1) 프리스트레스 도입 직후 지간 중앙의 단면 상·하단에서의 용력 제약 조건

$$\textcircled{1} \text{ 상단 : } \sigma_{ci} \geq \frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i e}{S_t} + \frac{M_g}{S_t} \geq -\sigma_{ti} \quad (2)$$

$$\textcircled{2} \text{ 하단 : } \sigma_{ci} \geq \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i e}{S_b} - \frac{M_g}{S_b} \geq -\sigma_{ti} \quad (3)$$

σ_{ci} : 프리스트레스 도입 직후 허용 휨 압축 용력 = $0.55 \sigma_{ci}'$

σ_{ti} : 프리스트레스 도입 직후 허용 휨 인장 용력 = $0.75 \sqrt{\sigma_{ci}'}$

P_i : 프리스트레스 도입 직후 긴장력 M_g : 자중에 의한 휨 모멘트 e : 편심 거리

A_c : 콘크리트 단면적 S_t, S_b : 상,하단 단면 계수

2) 설계하중이 작용시 지간 중앙 단면 상·하단에서의 용력 제약 조건

$$\textcircled{1} \text{ 상단 : } \sigma_c \geq \frac{P}{A_c} - \frac{P e}{S_t} + \frac{M_t}{S_t} \geq -\sigma_t \quad (4)$$

$$\textcircled{2} \text{ 하단 : } \sigma_c \geq \frac{P}{A_c} + \frac{P e}{S_b} - \frac{M_t}{S_b} \geq -\sigma_t \quad (5)$$

σ_c : 설계 하중이 작용시 허용 휨 압축 용력 = $0.4 \sigma_{ck}$

σ_t : 설계 하중이 작용시 허용 휨 인장 용력 = $1.5 \sqrt{\sigma_{ck}}$

P : 모든 손실이 일어난 후 유효 긴장력 M_t : 자중, 사하중과 활하중에 의한 휨모멘트

2.2.2 극한 휨강도 제약 조건

$$M_d = \phi A_p \sigma_{ps} d (1 - 0.59 p_p \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_{ck}}) \geq M_t \quad (6)$$

2.2.3 처짐 제약 조건

PSC 교량의 사용성 확보를 위해 프리스트레스 도입 직후에 일어나는 즉시 처짐량과 사용하중이 작용하는 시점에서 프리스트레스의 손실과 지속하중으로 인한 크리프의 영향을 고려한 장기 처짐량이 모두 허용 처짐량보다 적어야 한다.

2.3 최적화 기법과 최적화 과정 흐름도

최적 설계시 최적 설계 기법은 신뢰도가 우수한 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)를 사용하였으며 최적해 Search Method로써는 David - Fletcher - Powell(DFP)에 의해 개발된 Variable metric Method를 사용하였다. 또한 최적화 과정을 거칠 때 구조해석을 하기 위해서 PSC 비선형 해석이 가능한 SPCFRAME을 이용하였으며 최적화 프로그램으로는 Vanderplaats가 개발한 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하였다.

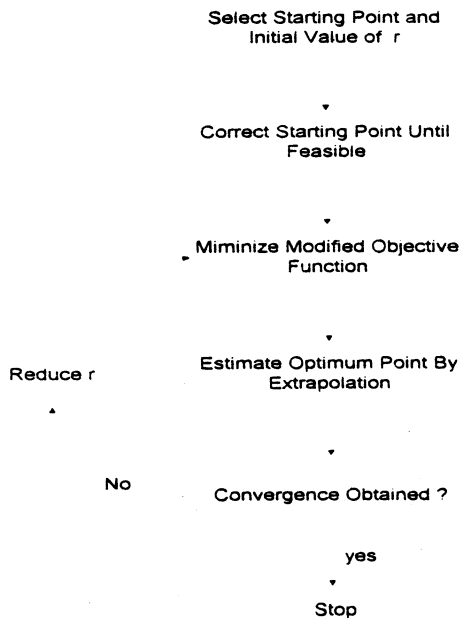


그림 2 SUMT 알고리즘

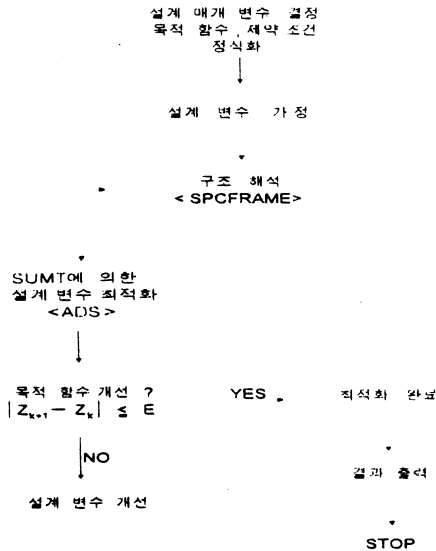


그림 3 PSC 박스거더 교량의 최적화 알고리즘

3. 수치 계산 및 최적화 결과 분석

1경간 3차선($b=15.745m$, $b'=6m$, $t=30cm$) 교량에 대해 지간이 30,40m 교량에 대해서는 DB-24 하중을 재하 하였고 50,60m 교량에 대해서는 DL-24 하중을 재하하여 최적 설계를 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 본 프로그램에서 제시하는 가장 경제적인 최적의 형고비로 15내외의 값을 얻었는데 이것은 Menn의 주장⁽⁴⁾과도 일치함을 알 수 있다. 또한 형고비가 1증가 할 때 재료비가 5% 정도 증가함을 알 수 있다.

표 1 지간별 최적 설계 결과

	초기값	최적 설계값			
		30m	40m	50m	60m
높이 (m)	5.0	2.02	2.53	3.38	3.98
긴장력 (ton)	2000	2149.6	2970	3654.4	4782.5
복부 두께 (m)	1.0	0.45	0.45	0.45	0.45
하부 플랜지 두께 (m)	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25

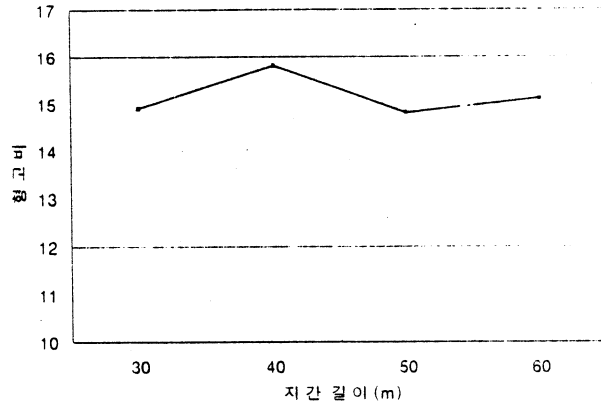


그림 4 지간별 형고비(L/H)의 분포

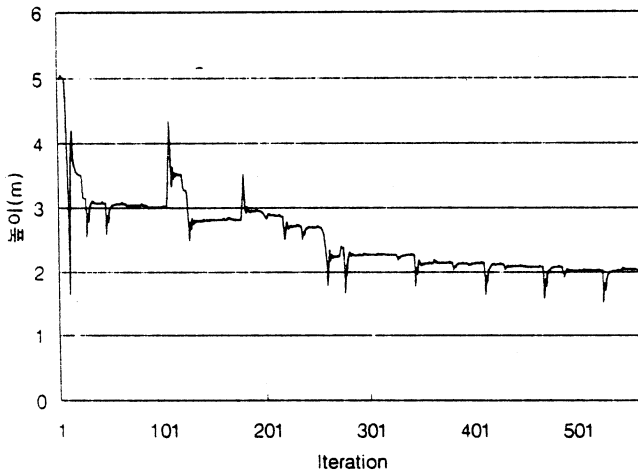


그림 5 지간 30m 교량의 단면 높이의 수렴 추이

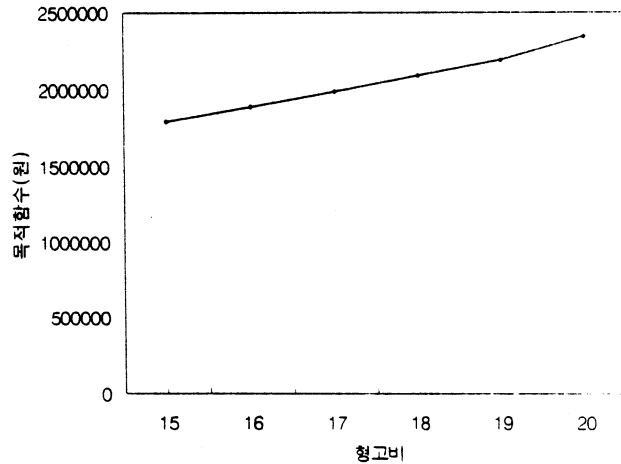


그림 6 형고비 증가에 따른 단위 길이당 소요되는 PSC Box Girder 재료비의 변화

4.결론

본 연구에서 개발한 최적 설계 프로그램을 1경간 PSC 박스 거더 교량의 최적설계에 적용해 본 결과 최적해에 수렴하므로 본 연구의 프로그램은 타당성이 있다고 판단된다. 향후 계속적으로 프로그램 수정, 보완하여 실무에서 최적 설계가 가능한 프로그램을 개발할 수 있음을 본 논문을 통해 알 수 있다.

5.참고 문헌

- (1) M.Z.Cohn, "Optimum Limit Design Continuous PSC Beams", ASCE Structural Eng. Vol.99 No.ST6
- (2) Harry Jones, "Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design", ASEC Structural Eng. Vol 111, NO 11
- (3) Vanderplaats, G.N., "ADS-Fortran Program for Automated Design Synthesis Ver 2.01", 1987
- (4) Christian Menn "Prestressed Concrete Bridges".Birkauer Verlag,1990.
- (5) 김병석 (1992), "프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 교량의 설계 및 최적화에 관한 연구", 서울대학교, 박사 논문