

리프리스트레스트 프리플렉스 합성형의 최적설계에 관한 연구

A Study on the Optimal Design of Represtressed Preflex Beams

조 병 완* 김 정 호** 조 태 준*** 김 도****
Jo, Byung Wan Kim, Jung Ho Cho, Tae Jun Kim, Do

ABSTRACT

Represtressed preflex beams do not allow tensile stress under service load by introducing additional prestressing at the lower concrete of beams. In this study, optimal design of represtressed preflex beams are numerically investigated. Design variables are dimension of plate girder. Object function is the total weight of plate girder. Constraints of the stress of plate girder and upper and lower concrete flange and lower and upper bounds on the design variables are imposed. Structural analysis is performed by D.A.R.P.(Design and Analysis of Represtressed Preflex beams). For numerical optimization, ADS(Garret N. Vanderplaats) program is used. From result of application examples, optimum designs of different cases are successfully obtained. The design program developed in this study seems efficient and robust for the optimization of represtressed preflex beams.

1. 서론

프리플렉스 합성형은 형고를 낮추고 형하 여유고를 늘리기 위해, 하부플랜지에서 균열발생 응력인 $2.0\sqrt{\sigma_{ck}}$ 까지 허용하는 Partial Prestressing 방법으로 설계함으로써, 공용 개시 후 인장균열이 발생하게 된다. 이와 같은 기존 프리플렉스 합성형의 문제점을 개선하기 위해서 하부플랜지 콘크리트에 적정량의 PC강재를 정착하여 하부플랜지 콘크리트에 압축응력을 추가로 도입시키기 위해 재긴장(Represtress)을 실시함으로써 Full Prestressing 방법으로 설계가 이루어질 수 있도록 하여 기존 프리플렉스 합성형에서 발생하는 문제를 효과적으로 해결하고 기존 프리플렉스 합성형의 형고 및 단면을 유지 또는 개선할 수 있는 보다 경제적인 단면의 형태인 Represtressed Preflex Beam (RPF 합성형)

*정회원, 한양대학교 지구환경건설공학부 부교수

**한국건설기술연구원 선임연구원

***한국건설기술연구원 연구원

****한양대학교 토목공학과 석사과정

이 개발되었다.

RPF합성형은 여러 단계의 시공과정을 거치게 되고 설계변수들이 서로 종속적인 관계에 있기 때문에 경제적인 단면을 얻기 위해서 많은 반복설계가 필요하게 된다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 해석과 단면설계를 할 수 있는 전산프로그램인 D.A.R.P.(Design and Analysis of Represtressed Preflex Beam)¹⁾를 이용해서 RPF합성형에 대해 해석 및 설계하였고, 수학적 최적화 기법인 순차 비제약 최소화기법(Sequential Unconstrained Minimization Techniques, SUMT)²⁾³⁾을 도입하였고, 설계변수 및 구조거동에 부과된 다수의 제약조건을 동시에 만족하는 가장 경제적인 설계단면을 산정할 수 있는 기초자료를 제공하였다.

2. 최적화문제의 정식화

2.1. 목적함수

RPF 합성형의 최적화 목적함수는 강재 중량을 감소시킴으로써 강재 비용을 최소화하는 것으로 결정한다. 본 연구의 목적함수는 식 (1)과 같다. RPF합성형의 단면, 내부 강형의 설계단면과 설계변수는 그림 1및 그림 2와 같다.

$$\begin{aligned}
 OBJ = & \{ (WTF(1) \times TCPL(1) + WTF(2) \times TCPL(2) + WTF(3) \times TCPL(3)) \times TTF \\
 & + (WBF(1) \times BCPL(1) + WBF(2) \times BCPL(2) + WBF(3) \times BCPL(3)) \times BTF \quad (1) \\
 & + TW \times (SGH - TTF \times 3 - TBF \times 3) \times XL \} \times \gamma_s
 \end{aligned}$$

여기서, WTF · WBF : 플랜지 폭, TCPL · BCPL : 플랜지 길이,
TTF · TBF : 플랜지 두께, TW : 웨브 두께
SGH : 강형 높이, XL : 지간
 γ_s : 강재의 단위중량이다,

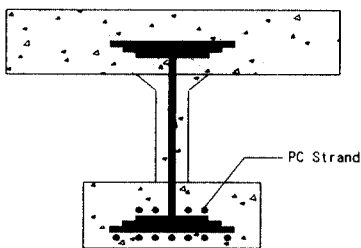


그림 1 RPF 합성형의 단면

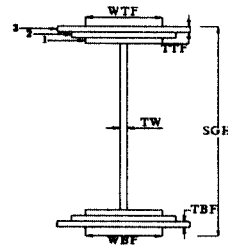


그림 2 설계단면 및 설계변수

2.2. 제약방정식

2.2.1. 설계변수에 대한 제약조건 방정식

본 연구에서는 RPF합성형의 단면 중 상·하부 플랜지의 두께와 폭, 웨브의 두께와 깊이를 설계변수로 하였다. 설계변수에 대한 제약조건식은 도로교통표준시방서(1996)⁴⁾ 및 리프리스트레스드 프리플렉스 합성형의 설계, 제작 및 시공지침서(안)(1997)⁵⁾ 규정에 따라 구성하였다. 설계변수 및 설계변수에 대한 제약조건은 표 1과 같다.

표 1 설계변수에 대한 제약조건

설계변수	치환변수	제약조건방정식	설계변수	치환변수	제약조건방정식
WTF(1) WBF(1)	X(1)	$20 \leq X(1) \leq 60$	TTF TBF	X(4)	$0.8 \leq X(4) \leq 3.2$
WTF(2) WBF(2)	X(2)	$20 \leq X(2) \leq 60$	TW	X(5)	$0.8 \leq X(5) \leq 3.2$
WTF(3) WBF(3)	X(3)	$20 \leq X(3) \leq 60$	SGH	X(6)	$X(6) \leq 100$

2.2.2. 구조거동에 대한 제약조건식

RPF합성형은 시공단계에 따라, 각 단계별로 단면이 변하게 되며 구조적 특징상 제작단계별 허용응력이 다르기 때문에 정확해법으로 수식화하여 설계를 수행하는 것은 곤란하므로 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 RPF 합성형의 설계 및 해석 프로그램인 D.A.R.P.를 이용해서 합성형의 각 단면위치에서 강형과 콘크리트의 상·하부에 발생하는 응력 및 처짐 등을 구조거동에 대한 제약방정식의 구성에 포함하여 최적설계를 수행하였다.

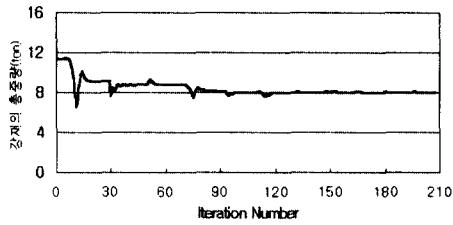
3. 수치에 및 고찰

본 연구에서는 RPF 합성형 표준도면 중 2차선 지간 30m, 40m, 50m 교량단면을 초기설계로 하여 최적화를 수행하였다. 최적화를 수행한 결과를 표준도면과 비교하면 표 2와 같다.

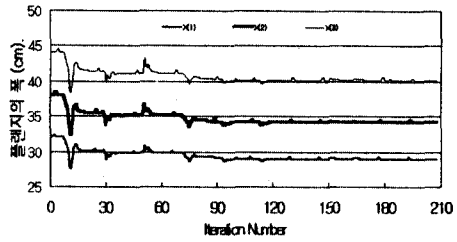
표 2 지간별 최적화 결과

구분	30m		40m		50m		
	표준도면	최적화 결과	표준도면	최적화 결과	표준도면	최적화 결과	
주형간격 (cm)	300	300	300	300	300	300	
형고 (cm)	120	114.32	150	137.84	190	172.72	
플랜지 폭 (cm)	1	32	29	35	32.55	35	32.5
	2	38	34.12	45	41.31	46	42.09
	3	44	40.16	52	48.29	52	48.23
플랜지 두께 (cm)	1.9	1.36	2.2	1.72	2.7	2.11	
웨브 두께 (cm)	1.5	1.34	1.7	1.55	1.7	1.54	
웨브 깊이 (cm)	96	90.32	124	111.84	164	146.72	
목적함수값 (ton)	11.40	8.02	20.95	15.80	33.12	24.85	

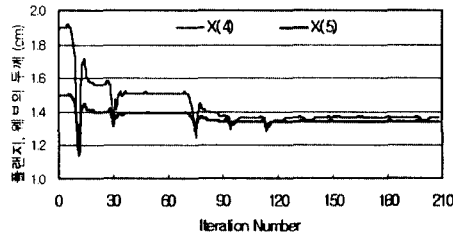
지간 30m의 경우에 대해 최적화 단계별 목적함수 및 설계변수들의 변화를 그림 3에 나타내었다.



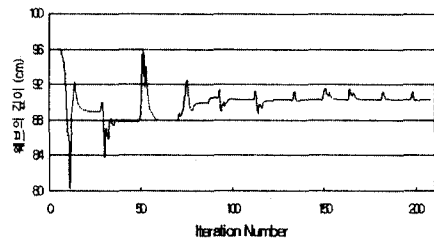
(a) 목적함수 값의 변화



(b) 플랜지 폭의 변화



(c) 플랜지, 웨브의 두께의 변화



(d) 웨브의 깊이의 변화

그림 3 목적함수 및 설계변수 값의 변화

초기 설계치가 최적화 결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 지간 30m 교량을 대상으로 웨브의 깊이를 제외한 설계변수들의 초기치를 표준도면 치수의 70%, 100%, 130%로 하여 최적화를 수행하였다. 초기설계치 변화에 따른 최적화 결과를 표 3과 그림 4에 나타내었다.

표 3 초기설계치에 따른 최적화 결과

구분	CASE 1 (100%)	최적화결과	CASE 2 (70%)	최적화결과	CASE 3 (30%)	최적화결과
주형간격 (cm)	300	300	300	300	300	300
형고 (cm)	120	114.32	120	118.12	120	118.12
플랜지폭 (cm)	1	32	29	23.29	42	34.83
	2	38	34.12	27	29.16	39.07
	3	44	40.16	31	34.24	41.82
플랜지두께	1.9	1.36	1.3	1.57	2.5	1.08
web 두께	1.5	1.34	1.1	1.09	2.0	1.86
web 깊이	96	90.32	96	94.12	96	96
목적함수값 (ton)	11.40	8.02	6.30	7.45	18.33	8.75

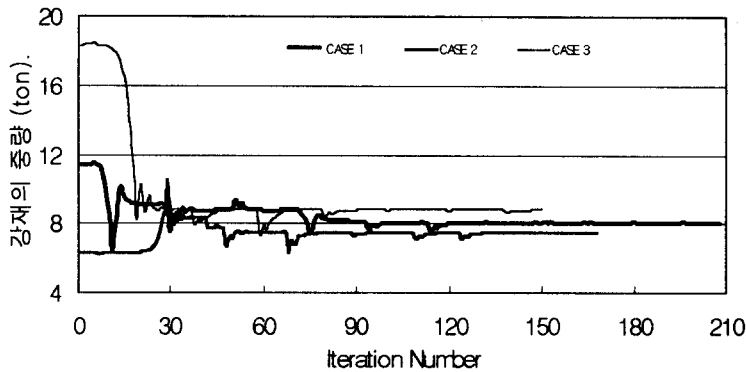


그림 4 초기설계치에 따른 목적함수값의 변화

수치해석결과, 표준도면에 비해 강재양이 지간 30m, 40m, 50m인 경우 각각 29.6%, 24.5%, 24.9% 정도 감소되는 것을 알 수 있었다. 초기 설계치를 변화시키면서 최적화를 수행한 경우에 초기설계치와는 관계없이 모두 수렴하는 것을 알 수 있었다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 최적화 결과값이 상이한 것을 알 수 있는데 이는 다수의 국부 최적치가 존재하는 것으로 생각된다. 본 최적설계 예의 경우 콘크리트와 PC 강재를 설계변수에서 제외시킨 결과이므로 실제로 이를 유동적으로 변화시킬 수 있으므로 이에 따라 강재비용 감소효과가 다소 변화를 보일 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서 RPF합성형의 표준도면을 초기설계치로 하여 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지간이 30m, 40m, 50m인 경우 각각 30%, 25%, 25%의 강재양을 감소시킨 최적단면을 얻을 수 있었다.
2. 설계변수들의 초기치를 표준도면 치수의 70%, 100%, 130%로 하여 최적설계를 수행한 결과, 초기설계치와 무관하게 모두 수렴을 하는 것을 알 수 있었다.
3. 설계변수의 초기치가 다른 경우에 최적화 결과값에 차이가 있었는데, 이는 다수의 국부 최적치가 존재하기 때문인 것으로 생각되므로 다수의 초기설계치를 이용하여 최적설계를 수행하는 것이 바람직할 것이라고 생각된다.

참고문헌

- 1) 한국건설기술연구원, "RPF합성형 개발 연구 보고서", 1997. 3.
- 2) Garret N. Vanderplatts, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with applications", McGraw-Hill, 1984.
- 3) Garret N. Vanderplatts, "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California, 1985.

- 4) 건설교통부, 도로교 표준 시방서. 1996.
- 5) 한국건설기술연구원, “리프리스트레스트 프리플렉스 합성형교의 설계, 제작 및 시공지침서(안)”, 1997. 3.
- 6) 구민세, 신현섭, “시공단계를 고려한 P.S. 연속 합성보 교량의 최적설계에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 1993