

FCM 으로 가설되는 P.C 박스거더교의 횡단면 최적설계

The Cross Section Optimization of P.C Box-Girder Bridge
Constructed by Free Cantilever Method

방명석* 오김일곤* 조현준**
Bang, Myung-Suk Kim, il-kon Cho, Hyun-Joon

ABSTRACT

Free Cantilever Method(FCM) is one of the most effective construction methods when precast prestressed concrete box girders are erected in the construction site. The special feature of FCM is that precast segments are erected in cantilever on the pier and connected in the middle of span to form the complete superstructure. Therefore each structural subsystem will be shown in each construction step and it should be analyzed for design whenever the segment is erected.

In this study, the computer program was developed to optimally design the P.C box girder bridge considering the construction sequence and verified by comparing the calculated results with the data of existing P.C box girder bridges. The sensitivity analysis was performed to show the efficiency of the developed program.

1. 서론

최근들어 장대교량 시공시 P.C 박스거더교의 사용이 증가되고 있는데 이는 P.C 박스거더교가 외력에 대한 저항성이 크다는 장점외에도 P.C 박스거더교에 대한 여러가지 효율적인 가설공법이 개발되어 거의 모든지형에 제약받지않고 시공이 가능하기 때문이다.

P.C 박스거더교의 가설공법중 FCM은 교량하부에 동바리를 설치하지 않고 교각을 중심으로 좌우로 균형을 맞추면서 이동식 작업차(Form Traveler)를 이용하여 3-5m 길이의 세그먼트를 순차적으로 시공한후 최종적으로 경간 중앙에서 캔틸레버 거더를 연결시키는 공법이다.

이 공법은 1950년대에 서독의 Dywidag사에 의해서 개발된 이래 세계적으로 수많은 교량이 이 공법으로 시공되었으며 국내에서도 최초로 원효대교가 이 공법으로 시공된후(1980) 현재까지 4-5개 교량이 시공되었거나 시공중에 있다. 대부분의 구조물 설계와 마찬가지로 FCM을 사용하여 가설되는 PC 박스거더교의 설계시 설계자는 초기설계 단계에서 단면의 형상이나 횡단면 치수를 가정해야 하는데, 이 가정단면은 최소한의 시간과 노력으로 최종적인 시공단면을 얻기위해서 가능한한 시공단면에 근접한 것일수록 좋다. 이에 대한 기본자료는 외국에서도 체계적으로 정리되어 있지 않고 설계자의 축적된 경험을 바탕으로 설계에 임하고 있으나 가설교량의 요구기능과 주변조건에 맞추어 단면의 형상과 치수도 변화시켜야 하기 때문에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 단면의 높이가 일정한 박스거더교를 FCM으로 가설할 경우 교량설계시 이러한 문제점을 어느정도 해결할 수 있도록하기 위해 최적화기법을 이용하여 초기설계 단계에서 목적함수(교량상부구조 건설비용)를 최소화시키는 설계변수(횡단면 치수)를 결정하는 프로그램을 개발하였다.

2. 최적화기법과 설계변수

초기설계단계에서 박스단면의 횡단면 치수를 최적화하기 위해 사용되는 설계변수로는 그림 2.1의 횡단면 치수와 Tendon 탕이 채택될 수 있으며, 설계변수 사이의 상호관계를 고려하여 아래와 같이 분류하였다.

- a) 상수(Constants) :
b, t₄, 상하부 플렌지의 최소두께
- b) 독립변수 (Independent Variables):
b₁, b₂, b₃, d
- c) 종속변수 (Dependent Variables):
S, t₁, t₂, t₃, A_s

목적함수는 횡단면의 단위길이당 콘크리트와 Tendon 탕을 추정하여 최소경비(Minimum Cost)의 함수로 유도하였으며 아래와 같은 독립변수의 함수로 나타내었다.

$$C = f(b_1, b_2, b_3, d)$$

목적함수는 위와같이 4개의 독립변수의 함수로 표시하였으며 이에 대한 해석기법으로는 Simplex Method를 개량시킨 Nelder-Mead Method를 사용하였다.

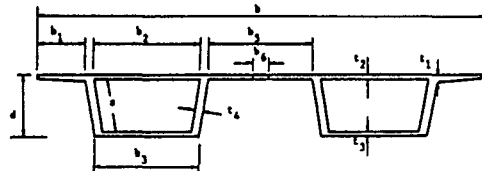


그림 2.1 박스거더의 횡단면

*한국건설기술연구원 구조연구실 선임연구원
**한국건설기술연구원 구조연구실 연구원

3. 목적함수 유도

목적함수는 박스거더의 횡단면적과 Tendon탕에 대한 함수로 표시하여 최소경비를 구하기 위한 것으로 그림 3.1의 3경간 교량을 FCM으로 가설할 경우 목적함수의 유도과정은 다음과 같다.

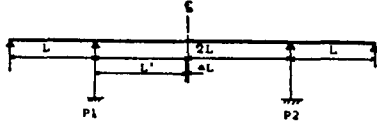


그림 3.1 3 Span 교량형식

- 1) 상부 슬래브 설계 (b1, b2 부분)
사하중과 활하중(충격포함)에 대한 모멘트를 동시에 고려하여 b1, b2 부분의 슬래브 두께(t1, t2)를 각각 구한다.

$$t = [t_s + M/R]$$

여기서 t_s : 피복두께
 $M = Rbd^2$
 R : 모멘트 저항계수

- 2) 교각에서 바닥슬래브 두께(t3) 계산
세그먼트를 조립하는 동안 발생하는 최대 부 모멘트를 견딜 수 있도록 설계한다.

$$M_s = 1.2 M_b + 1.8 M_c$$

$$t_3 = M_s / (d \times \phi \times 0.85f_c \times b_s)$$

여기서 M_b : 사하중 모멘트
 M_c : 세그먼트 가설시 사용되는 가설장비와 기타 하중으로 인한 모멘트
 ϕ : Reduction Factor

- 3) 하부 슬래브 단면변화 계산

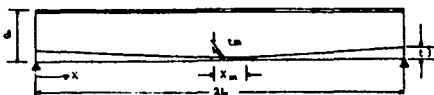


그림 3.2 종단면 변화

하부슬래브의 두께가 최소인 구간(Xm)을 결정하기 위하여 중앙부근에서 저항모멘트(M_{min})와 교량 중앙에서 교각으로 일정미소거리를 이동하면서 구한 모멘트(M_z)를 비교하여 M_z 가 M_{min} 보다 클 때 까지 X_m 구간이 계속된다고 본다.

$$M_{min} = \phi \times 0.85f_c \times b \times t_m \times d$$

$$M_z = 1.2 M_b + 1.8 M_c$$

$$= 1.2 (1/2W [L(1-Z)]^2) + 1.8(P(L'-LZ))$$

여기서 W : 콘크리트 단위 중량
 t_m : 중앙부근에서 최소두께 (15 cm)
 d : 모멘트 팔길이

Z : 0.1 부터 시작하여 0.05씩 증가한다고 가정

- 4) 상부 Tendon 탕 계산(AS_1), 극한모멘트에 대한 응력검토
세그먼트를 조립하는 동안 발생하는 최대 사하중 모멘트의 60%만 고려하여 구한 Tendon탕(AS_1)과 지점에서 극한모멘트에 의한 Tendon탕 (AS_2)를 비교하여 큰 값을 선택

$$AS_1 = M / (ds \times f_{se})$$

$$AS_2 = M_s / (dm \times \phi \times f_{su})$$

여기서 $M = 0.6(\text{Dead Load Moment})$
 $M_b = 1.2 (1/2WL^2) + 1.8(PL')$
 f_{se} : 유효 프리스트레스
 f_{su} : 0.9 fpy
 ds : Tendon의 편심
 dm : 모멘트 팔길이

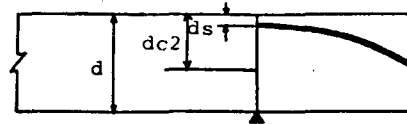


그림 3.3 지점의 Tendon 배치

- 5) 단위길이당 Tendon 탕 계산 (상부)
상부구조의 단위길이당 경비(Unit Cost)를 추정하기 위하여 4)에서 구한 Tendon탕을 단위길이당 Tendon으로 환산한다.

$$A_{st} = \alpha \cdot AS \quad (\alpha=0.45-0.50)$$

- 6) 바닥슬래브 Tendon 계산 (AS_2)
바닥 Tendon은 교량 중앙에서 극한강도를 확인할 수 있도록 설계한다.

$$M_s = 1.2(M_b) + 1.8(M_c + I_{max} M_o.)$$

$$+ (\text{Secondary Moment})$$

$$AS_2 = M_s / (dm \times \phi \times f_{su})$$

* Secondary Moment는 상·하부 Tendon의 영향을 모두 고려한다.

- 7) 단위길이당 평균 Tendon탕 계산 (하부)
 AS_2 를 단위길이당 Tendon탕으로 환산

$$AS_b = \beta \cdot AS_2 \quad (\beta=0.45-0.50)$$

- 8) 단위길이당 Tendon탕과 콘크리트 평균단면적

$$AS = A_{st} + AS_b$$

$$a = a_1 + (a_2 - a_1) Z/2$$

여기서 a_1 : 최소단면적 (중앙)
 a_2 : 최대단면적 (지점)
 Z : $x/\text{span} (L)$

- 9) 목적함수 (단위길이당 전체경비)
목적함수를 유도하기 위하여 이 밖에 철근

표 4.1 ($C=5.656a + 576 As$)

설계조건
 $\sigma_{ck} = 350 \text{ kg/cm}^2$ Span = 55.00 m
 $\sigma_{pu} = 18.000 \text{ kg/cm}^2$ B = 14.00 m

No	Initial Value (cm)				Optimal Solution (cm)				Tendon량 (kg/m)	Object Function (x1000 원)
	b1	b2	b3	d	b1	b2	b3	d		
1	200	300	240	200	195	280	265	174	14.09	350.059
2	210	310	250	210	195	281	265	174	14.09	350.059
3	190	320	240	150	195	281	265	174	14.09	350.059
4	180	330	230	250	194	281	266	174	14.09	350.059
5	220	280	240	220	194	281	265	174	14.09	350.059
6	240	250	240	200	201	276	269	171	14.09	350.059
7	260	250	240	170	195	280	264	175	14.09	350.059
8	150	350	240	170	194	281	264	174	14.09	350.059
9	150	300	200	150	184	290	298	179	13.45	350.059

과 세그먼트 조립시 사용되는 에폭시 수지 접착제가 고려되어야 한다. 철근은 별도로 계산하지 않고 전체 콘크리트 단면적의 일정 비율만 고려하기로 한다. 횡단면 최적화를 위하여 고려해야 할 재료와 이에 대한 단가는 참고문헌 1을 참고한다. 본 연구에서 유도된 목적함수는 다음과 같다.

$$C = 5.656a + 576 As$$

4. 수치해석 및 결과분석

Nelder-Mead Method에서는 도형 Simplex를 정의하는 값의 초기치가 분산이 잘 되었을때 진정한 해를 쉽게 얻을 수 있지만 최적설계 프로그램을 실행시켜 얻은 결과가 극부적인 해 (Local Solution)가 아닌지 항상 검토해야 한다.

프로그램을 실행시켰을때 얻은 결과가 진정한 해인지의 판단은 그림 4.1과 같은 등경비선 (Cost Contour Line)을 이용할 수 있지만 번거로우므로 표 4.1과 같이 초기치를 변화시키면서 여러번 실행시켜 그 결과들을 비교하여 진정한 해를 찾는 것이 효과적이다.

표 4.1의 No. 9를 제외하면(b3가 b2보다 큼) 어느 값을 선택해도 무리가 없을 정도로 어떤 값을 향해 수렴하고 있음을 알 수 있다.

표 4.2는 표 4.1의 목적함수 ($C=5.656a + 576 As$)를 기준으로 하여 Tendon의 가격만 10% 증가시켰을때 횡단면 치수와 Tendon량의 변화를 나타낸 것이다. 표 4.1의 목적함수($C = 5.656a + 576 As$)를 기준으로 Tendon의 가격만 상승되었기 때문에 Tendon량이 감소된 반면 같은 저항모멘트를 발휘하기 위해서 단면의 높이(d), 즉 저항모멘트 팔길이 증가되었고 모멘트 팔길이가 증가되었기 때

문에 가설시 발생되는 최대 부모멘트에 견딜수 있게 설계된 바닥 슬래브의 면적이 감소됨을 알 수 있다. (b3의 감소)

Tendon 가격 상승에 따른 d와 b3의 증감은 표 4.3과 같다.

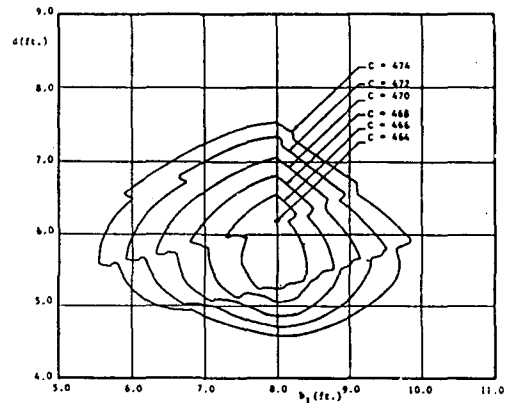


그림 4.1 Cost Contour Line

표 4.4는 표 4.1의 목적함수 ($C = 5.656a + 576 As$)를 기준으로 하여 콘크리트 가격만 10% 증가시켰을때 ($C=6.22a + 576As$) 횡단면 치수의 변화를 나타낸것으로 표 4.2의 값과 반대 현상을 보이며 이와같은 데이터를 분석해 볼때 두재료의 가격상승폭에 따라 횡단면 치수의 변화를 예측할 수 있게 된다.

표 4.2 C = 5.656a + 633 AS (Tendon 가격 10% 증가)

No	Optimal Solution (cm)				Tendon (kg/m)	Object Function (x1000)
	b1	b2	b3	d		
1	195	280	259	180	13.66	361.105
2	196	280	257	180	13.66	361.108
3	192	283	261	180	13.66	361.110
4	195	289	298	185	13.04	360.208
5	193	282	257	181	13.66	361.112
6	193	283	259	179	13.71	361.167

표 4.4 C = 6.79a + 576 AS (콘크리트가격 10% 증가)

No	Optimal Solution (cm)				Tendon (kg/m)	Object Function (x1000)
	b1	b2	b3	d		
1	198	280	264	165	14.54	398.562
2	193	284	278	165	14.49	397.220
3	201	275	273	168	14.33	397.329
4	196	280	277	166	14.49	397.234
5	187	288	278	165	14.49	397.234
6	193	283	259	165	14.54	398.539

표 4.3 Tendon 가격상승에 따른 횡단면 치수의 변화

C = 5.656a + 576 AS	10% 증가	20% 증가	30% 증가	
d	174cm (No. 1)	180 (3.4%)	189 (8.6%)	194 (11.5%)
b3	265cm (No. 1)	259 (2.2%)	249 (6.0%)	246 (7.2%)

그림 4.2는 일실 박스거더교에 대해서 경간장에 대한 단면의 높이를 기존에 국내에서 시공된 교량과 본 연구에서 개발된 프로그램을 실행시켰을 때 얻은 결과를 비교한 것이다.

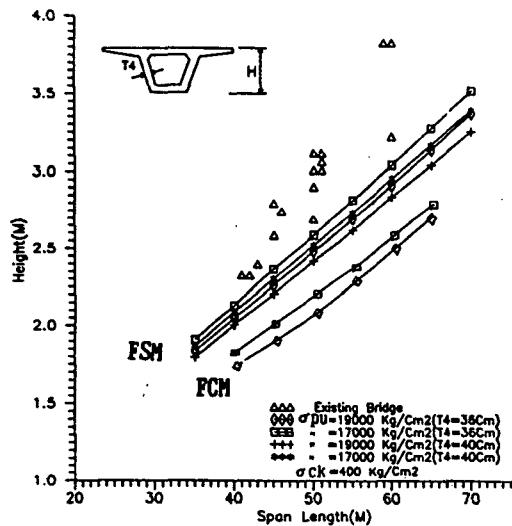


그림 4.2 경간장과 단면의 높이관계

기존에 시공된 교량의 복부두께가 대부분 35 ~ 45cm 임을 감안하여 복부두께와 Tendon의 함복강도를 변화시키면서 경간장에 대한 단면의 높이를 구해 본 결과 σ_{pu} (Tendon의 함복강도)와 T4(복부두께)가 클수록 단면의 높이가 작아지며 각각의 경우 Tendon량의 비교는 되지 않았지만 전반적으로 기존에 시공된 교량의 단면높이가 큰 것으로 나타났다.

형고비(단면의 높이와 경간장과의 비)는 박스거더교의 최적설계 개념과 밀접한 관계가 있는 것으로 PCI(Prestressed Concrete Institute)와 PTI(Post-Tensioning Institute)에서 제시하는 형고비는 아래와 같다.

- PCI : 단면의 형태와 관계없이 18 ~ 25
- PTI : One - Cell } 22 ~ 25
- Two - Cell }
- Multi - Cell } 25 ~ 29

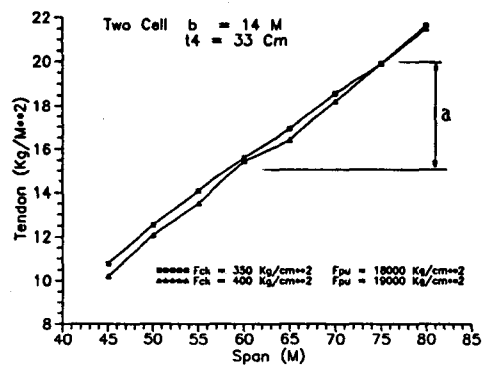


그림 4.3 경간장에 대한 Tendon량 변화

그림 4.3은 본 연구에서 개발된 최적설계 프로그램을 사용하여 경간장에 대한 Tendon량의 변화를 표시한 것이다. 기존에 국내에서 시공된 PC 박스거더교의 상부구조 Tendon 사용량이 15-20 kg/㎡임을 감안하면 (그림에서 a 구간) 비교적 잘 일치함을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 FCM으로 가설되는 교량의 횡단면 치수를 결정하기 위한 최적설계 프로그램을 개발하였고 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 개발된 최적설계 프로그램은 초기설계 단계에서 횡단면 치수를 결정할때 유용하게 사용될 수 있다고 판단되며, 개발된 프로그램에 의한 교량의 설계 결과에 의하면 기존에 시공된 P.C 박스거더 교량의 단면의 높이가 너무 큰 것으로 나타났다. 따라서 합리적인 설계 방법의 개발이 필요하다.

2) 본 연구에서 개발된 프로그램은 단면의 높이가 일정한 교량을 등바리 공법이나 캔틸레버 공법으로 가설할 경우 적용 가능하다. 따라서 이동식 비계공법이나 압출공법으로 가설되는 교량과 장경간 교량에 많이 사용되는 변단면 교량에도 적용 가능한 최적설계 프로그램 개발이 필요하다.

참고문헌

1. "교량의 계획설계에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1990
2. G.C Lacey and J.E. Breen., "The Design and Optimization of Segmentally Precast Prestressed Box Girder Bridges", Research Report. Univ. of Texas Austin, 1975
3. URI Kirsch, "Optimum Structural Design", Mcgraw-Hill Book Co., 1981
4. "경제적인 P.S 콘크리트 교량 건설공법에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1986
5. "P.S 콘크리트 박스거더 교량의 설계표준화에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1986
6. "도로교 표준 시방서", 건설부
7. Comrad P. Heins and Javid Siminou, " Preliminary Design of Curved Bridges", AISC Engineering Journal, April, 1970