

# 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 설계변수 분석

## Parameter Analysis for Design of Concrete-Steel Hybrid Extradosed Bridge

노 병 철<sup>1)</sup>

이 용 진<sup>2)</sup>

최 규 형<sup>3)\*</sup>

Lho, Byeong Cheol

Lee, Yong Jin

Choi, Kyu Hyung

### Abstract

Recently, the concrete-steel hybrid extradosed bridge has been proposed as alternative bridge type at long span site. The hybrid extradosed bridge adopts light orthogonal deck girder instead of heavy concrete deck girder at the center span of bridge, and it enables to construct long-span bridge. And also, for this bridge type the decrease of self-weight of girder enables to reduce girder depth and side span length of extradosed bridge, so its type has more efficient structural behavior and makes it possible to perform optimal bridge design. Therefore, it is very important to set up the procedure and parameters of optimal design for concrete-steel hybrid extradosed bridge.

In this study, the effects of design parameters (the variation of pylon height, bridge deck depth and orthogonal deck girder length) are discussed. And numerical analysis and sensitivity analysis are carried out according to these parameters. And design weight values about these parameters are quantitatively suggested to reflect characteristics of concrete-steel hybrid bridge.

**Keywords** : Concrete-steel hybrid extradosed bridge, Parameter, Sensitivity analysis, Design weight value

### 1. 서론

엑스트라도즈드교는 기존 PSC 거더교와 PSC 사장교에 비하여 100~200 m 정도의 지간에서 구조적으로 효율적이며, 경제성 및 시공성이 우수하여 다양한 방법으로 적용되고 있으며, 현재 가장 효율적이고 경제적인 지간장이 약 120 m 정도로 보고되고 있다.

복합 엑스트라도즈드교는 기존의 엑스트라도즈드교 보다 발전된 단계로 지간장의 한계를 극복하기 위해 측경간장에 대한 중앙경간장의 비가 큰 경우 중앙경간은 비교적 가벼운 강박스거더 구조를 적용하고, 측경간은 자중이 큰 콘크리트 구조를 적용함으로써 중앙경간과 측경간과의 하중균형을 유도한 구조이다.

중앙경간에 강을 적용함으로써 고정하중의 감소로 케이블 량 및 주탑 규모가 감소되어 경제적 시공이 가능하며, 주거더의 고정하중 불균형으로 인한 구조적 단점을 극복할 수 있다.(정원기 등, 2003)

한편, 국내의 엑스트라도즈드교에 대한 연구는 현재까

지 다양한 분야에서 연구가 진행되어 왔으나, 대부분 일본의 'PC사장교 Extradosed교 설계시공규준(2009)' 등의 외국자료에 의존하여 설계를 수행하고 있는 실정이기 때문에 설계기법 및 설계와 관련된 설계변수 등에 대한 연구는 많이 진행되지 못한 실정이다.(일본 PS 콘크리트 기술협회, 2009; 오제택, 2010; 유신코퍼레이션 구조본부, 2002) 국내에서 수행된 설계기법과 관련된 연구로는 엑스트라도즈드교의 주요 부재에 대하여 케이블 배치와 주탑 높이 및 거더 단면의 특성을 변수로 교량의 케이블 응력 분담율을 기준으로 효율적인 설계변수 선정방법을 제시한 바 있다.(우보열, 2006) 국외에서는 최초의 엑스트라도즈드교인 Odawara교의 설계·시공에 대한 분석을 통한 최적 설계 및 시공 기법 연구와 구조적 최적화 방안에 대한 연구가 수행된 바 있으며,(Kasuga et al, 1994; Saad, F., 2004) 설계 기법에 대한 연구로는 설계변수 및 이에 대한 민감도 분석을 수행한 연구와 North Arm 엑스트라도즈드교의 설계기법에 대한 연구가 있다.(Wei et al, 2007)

1) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

2) 정회원, 다산건설컨설팅 상무

3) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 박사과정

\* Corresponding author : choikyuhung@nate.com 033-730-0608

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

해외의 경우 엑스트라도즈드교의 설계 최적화를 위한 연구가 국내에 비하여 많이 진행되었으나, 국내·외적으로 콘크리트와 강을 사용한 복합 엑스트라도즈드교의 설계에 관한 연구는 미비한 상태이다. 다만, 일본에서 복합 엑스트라도즈드교의 장기거동에 대한 연구를 수행하여 기존 엑스트라도즈드교와 비교하여 지간장을 보다 길게 확보할 수 있고, 복합부의 설계 및 시공을 적절하게 수행함으로써 장기간의 내구성을 확보할 수 있다고 확인한 연구정도가 보고되고 있다. (Takami and Hamada, 2001)

복합 엑스트라도즈드교는 불연속면인 복합부를 가지고 있으므로 일반 엑스트라도즈드교와 달리 설계 시 추가적으로 검토해야 할 사항이 존재하여, 이에 대한 검토가 필요한 실정이다. (노병철 등, 2007) 따라서 본 연구에서는 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교에서 도출된 주요 설계매개변수를 바탕으로 설계변수 분석과 설계변수별 설계 민감도를 분석하여 최적의 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 제원을 결정하고자 하였으며, 설계 민감도 분석결과를 바탕으로 설계시 반영할 수 있는 설계변수에 대한 가중값을 도출하였다.

## 2. 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 주요 설계변수 도출

### 2.1 대상교량

본 연구에서는 국내 최초로 시공된 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교로서 주거더는 PSC 박스거더 및 강상판거더로 구성되어 있는 전남 여수의 안도대교를 대상으로 하였으며, 주탑은 H형 주탑으로 양쪽 80 m의 측경간과 200 m의 주경간으로 이루어져 있으며, 접합방식은 후면 플레이트 접합방식을 적용하였다. 사용된 재료의 특성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 설계변수의 선정 및 도출

일반적으로 주탑 높이 (Height of pylon)가 높을수록

Table 1 Properties of materials

Index	Concrete (fck=40MPa)	Steel (SM 490)
Elastic modulus	$2.8 \times 10^4$ (MPa)	$2.1 \times 10^5$ (MPa)
Unit weight	25.0 (kN/m <sup>3</sup> )	78.5 (kN/m <sup>3</sup> )
Possion ratio	0.25	0.3

주거더의 단면력 개선에는 유리하지만, 케이블의 연직하중 분담율은 높아지는 특성이 있다. 케이블의 연직하중 분담율은 주거더의 휨모멘트와 관련되며, 이는 주거더 높이와 전체 교량의 경간장에 영향을 미치게 된다. 따라서 주탑 높이에 따라 케이블의 변동응력, 연직하중 분담율, 거더의 휨모멘트에 대한 분석이 필요하다.

한편, 엑스트라도즈드교는 주거더의 강성으로 단면력에 주로 저항하고 케이블에 의한 대편심 모멘트를 도입, 거동을 개선하는 구조 형식이므로 주거더가 케이블에 지지되어 주거더에 최소 필요량의 강도만을 주는 사장교와는 개념이 다르다. 따라서 경간장에는 강상판 거더가 포함되므로 전체적인 설계시 주거더 높이 (Height of girder)는 매우 중요한 설계변수로 작용하게 된다. 주탑 높이와 같이 케이블의 변동응력, 연직하중 분담율, 거더의 휨모멘트에 대한 분석이 필요하다.

또한 케이블은 콘크리트 구간에 대해서만 정착 가능하므로, 강상판 거더 길이 (Length of steel deck girder)는 케이블의 정착위치와도 직접적 관련이 있다. 일반적으로 정착위치를 교각에서 이격시킨 거리에 따라서 주거더의 정모멘트는 감소하고, 부모멘트는 증가한다. 케이블의 적절한 정착위치는 주거더의 휨모멘트와 케이블의 연직하중분담율 등을 신중하게 검토하여 결정되어야 한다. 특히 강상판 거더의 길이는 거더에 작용하는 휨모멘트에 영향을 미치며, 복합부의 단면력으로 작용된다. 따라서 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 설계에서는 일반 엑스트라도즈드교의 설계와는 달리 경간장과 관련된 강상판 거더 길이 결정에 신중을 기해야 하며, 케이블의 연직하중 분담율 및 변동응력, 거더의 휨모멘트, 부반력에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 설계를 위한 설계변수를 선정하기 위하여 위와 같은 사항을 고려하여 Table 2에 나타낸

Table 2 Design parameters for parameter analysis

Parameter	Analysis	Variables (m)
Height of pylon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable stress amplitude of cable</li> <li>Load sharing ratio of cable</li> <li>Bending moment of girder</li> </ul>	H=L/12, L/11, L/10
Height of girder	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable stress amplitude of cable</li> <li>Load sharing ratio of cable</li> <li>Bending moment of girder</li> </ul>	h=3.0, 3.5, 4.0
Length of steel deck girder	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable stress amplitude of cable</li> <li>Load sharing ratio of cable</li> <li>Bending moment of girder</li> <li>Negative reaction</li> </ul>	L=47, 55, 63, 71

바와 같은 변수를 선정하였다.

### 3. 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 주요 설계변수 분석

#### 3.1 설계변수 수치해석 모델

본 연구에서 설계변수 분석을 위한 수치해석은 범용 프로그램인 MIDAS/Civil 2009를 이용하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 구조형상을 모델링하였다. 케이블은 인장력 전달요소인 케이블 요소로 적용하고, 거더 및 주탑은 각각의 부재 단면특성을 고려하여 보 요소로 적용하여, 총 247개의 절점과 236개의 요소를 사용하였다. 교량의 지간, 주탑 높이, 케이블, 거더 등은 실제 구조특성을 반영할 수 있도록 3차원으로 모델링하였다.

#### 3.2 주탑 높이 검토

본 연구에서는 사례조사에 의한 분석 결과를 근거로 케이블의 효율을 높일 수 있는 적정 주탑 높이를  $L/8 \sim L/12$  범위로 선정하였다.(우보열, 2006, Kasuga et al 1994) 여기서, 케이블의 효율을 감안하여 허용변동응력을 70 MPa이하로 하였으며, 적용 가능한 주탑 높이는 Fig. 2에 나타난 바와 같이  $L/12, L/11, L/10$ 의 3가지 주탑 높이에 대하여 검토를 실시하였다. 연직하중 분담율을 확인하기 위해 중앙경간에 단위하중을 재하시켜 사재의 연직성

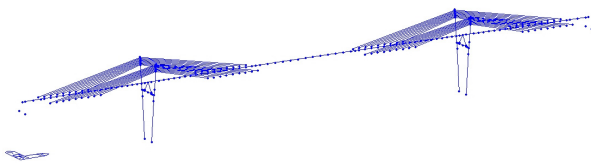


Fig. 1 3D modeling of bridge

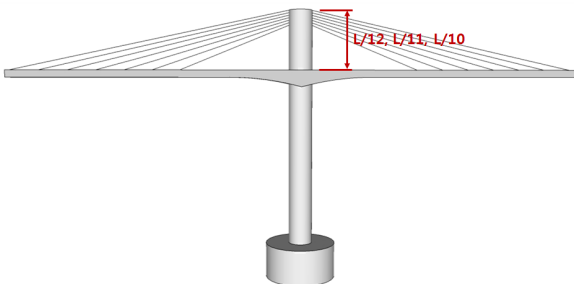


Fig. 2 Consideration of height of pylon ( $L/12, L/11, L/10$ )

분과 재하하중의 비를 확인하였으며, 강상판 길이 68 m를 제외한 PSC 거더 132 m를 적용하여 검토하였다.

#### 3.3 주거더 높이 검토

케이블의 연직하중 분담율과 변동응력 및 주거더의 휨모멘트를 만족할 수 있는 거더 높이를 결정하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 주거더 높이가 3.0~5.0 m인 경우, 3.5~5.0 m인 경우와 4.0~5.0 m인 3가지의 경우에 대하여 각각 검토하였다.

#### 3.4 강상판 거더길이 검토

복합 엑스트라도즈드교는 이미 언급한 바와 같이 중앙경간 일부 구간을 강상판 거더로 대체하여 상부중량을 경감시킴으로서 주거더 높이 축소와 경간장을 증가시킨 교량 형식이므로, 강상판 거더부 구간의 길이는 전체 교량의 하중 균형에 영향을 미치며, 그에 따라 측경간의 부반력, 주형 단면력, 케이블의 변동응력 및 가설계획과 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 설계변수 분석을 통해 강상판 거더 구간의 적정 길이를 결정하기 위해, Fig. 4에 나타난 바와 같이 강상판 거더 길이를 47~71 m 사이에서 변화시키면서 최적 길이를 검토하였다. 교량의 경간구성은 측경간 80 m, 주경간 200 m를 일정하게

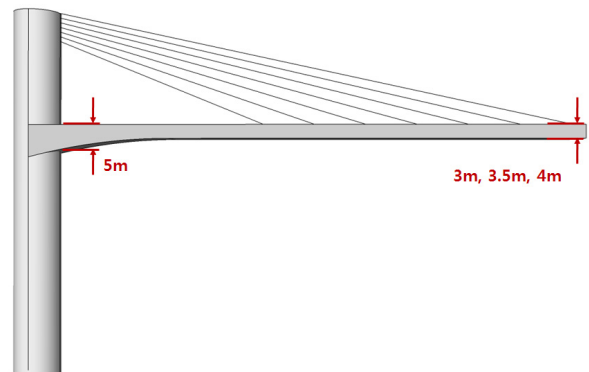


Fig. 3 Consideration of height of girder

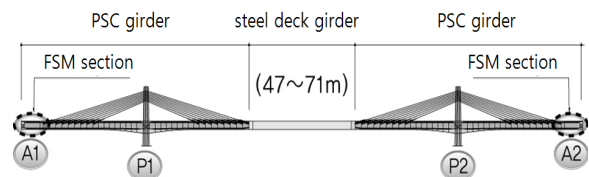


Fig. 4 Consideration of length of steel deck girder

적용하였으며, 강상판 거더부 길이는 FCM 타설 세그먼트의 길이인 4 m를 고려하여 8 m씩 변화하면서 해석을 실시하였다. 한편, 주거더 높이는 지점부 5.0 m, 중앙부 3.5 m를 적용하였다.

#### 4. 설계변수에 따른 해석 결과 비교분석

##### 4.1 주탑 높이에 따른 변수해석 결과

Fig. 5~6은 주탑 높이에 따른 케이블의 변동응력, 연직하중 분담율 및 주거더 휨모멘트를 나타낸 것이다. 주탑 높이가 높아질수록 케이블의 변동응력과 연직하중 분담율은 증가하는 것으로 나타났는데, 주탑높이가 13 m인 경우 가장 큰 63.3 MPa로 나타났으며, 이때의 연직하중 분담율은 38.9%로 나타났다. 그러나 주거더의 휨모멘트는 정모멘트의 경우 변화가 크지 않았으나, 부모멘트의 경우 주탑높이가 높아질수록 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 13 m의 가장 높은 주탑을 적용한 경우에는 약 204,000 kN·m의 휨모멘트가 발생되었으며, 이는 가장

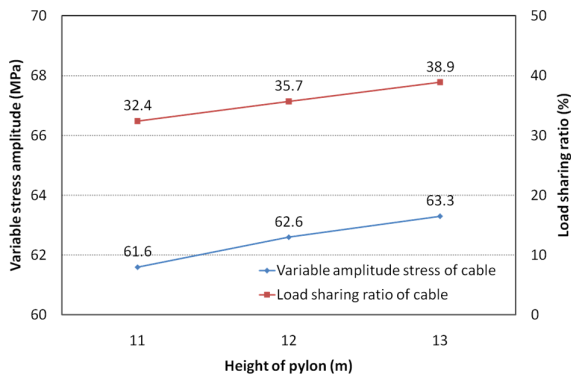


Fig. 5 Variable stress amplitude and load sharing ratio of cable according to height of pylon

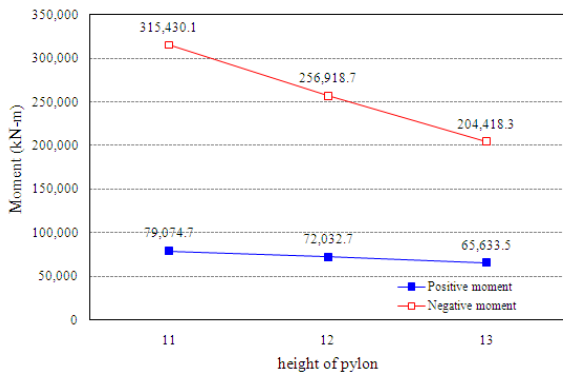


Fig. 6 Bending moment fo girder according to height of pylon

낮은 11 m의 주탑에서 발생하는 휨모멘트의 약 64.8%에 해당하는 값이다.

이상의 결과로, 주탑높이가 L/8~L/12인 경우에는 구조적 안전성을 만족하고, PSC 사장교·엑스트라도즈교 설계시공 기준에서 제시한 케이블 허용변동응력인 70 MPa를 초과하지 않는 것으로 나타났다.(일본 PS 콘크리트 기술협회, 2009) 그러나 사재의 안전율을 결정하는 중요 인자인 활하중에 의한 응력 변동폭은 사재와 주거더의 상대적인 강성비율에 따라 결정되므로, 구조적 안전성을 확보하면서, 경제성, 시공성 및 경관성이 유리하고 교량 존재감을 부여할 수 있는 주탑높이는 L/11 인 12m가 적절한 것으로 판단된다.

##### 4.2 주거더 높이 변수해석 결과

주거더 높이에 따른 케이블 변동응력, 연직하중 분담율 및 주거더 휨모멘트에 대한 해석을 실시하였으며, 해석결과를 Fig. 7~8에 나타내었다. 해석결과 주거더 높이가 높

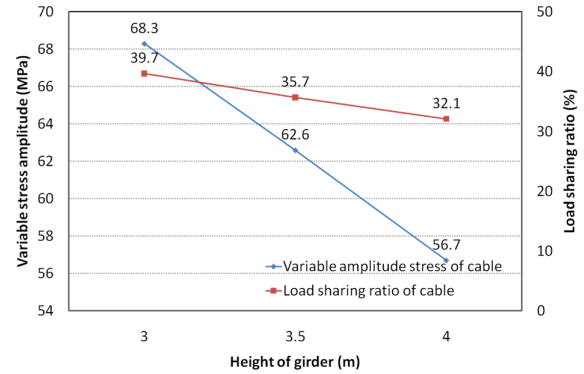


Fig. 7 Variable stress amplitude and load sharing ratio of cable according to height of girder

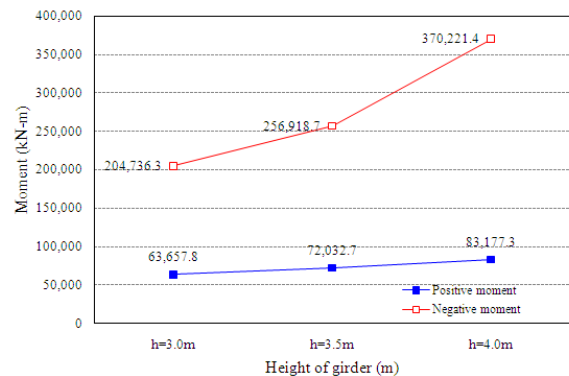


Fig. 8 Bending moment of girder according to height of girder

아질수록 케이블 변동응력과 연직하중 분담율은 감소하는 것으로 나타났으며, 높이가 4 m인 경우 56.7 MPa의 변동응력이 발생하였다. 이때 연직하중 분담율은 해석 변수 중에 가장 작은 32.1%를 분담하는 것으로 나타났다. 또한 이때의 정·부모멘트는 각각 83,177.3 kN·m, 370,221.4 kN·m로 나타났다.

분석결과, 주거더 높이에 대한 검토 범위인 3~4 m 내에서 구조적 안전성을 확보하는 것으로 나타났다. 따라서 케이블의 허용변동응력인 70 MPa를 초과하지 않는 최적의 주거더 높이는 3.5 m로 판단된다.

### 4.3 강상판 거더 길이 변화에 대한 변수해석 결과

강상판 거더 길이를 변수로 하여 케이블 연직하중 분담율 및 변동응력, 주거더 휨모멘트에 대한 해석을 실시한 결과를 Table 3 및 Fig. 9~10에 나타내었다.

콘크리트 주형에 비해 경량인 강상판 거더 길이는 케이블 분담율과 변동응력에 대해 비례관계를 나타내었다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 케이블 변동응력은 모두 허용치 70 MPa를 만족하지만 적절한 안전을 확보를 위해서는 강상판 거더부의 길이를 63 m 이하로 설계하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 강상판 거더 길이에 따른 주거더 휨모멘트 해석결과는 Table 4와 Fig. 11에 나타낸 바와 같다.

강상판 거더 길이에 따른 부반력은 Table 5와 Fig. 12

Table 3 Load sharing ratio and variable stress amplitude of cable according to length of steel deck girder

Length of steel deck girder (m)	Load sharing ratio of cable (%)	Variable stress amplitude of cable (MPa)
47	28.8	61.9
55	32.0	62.5
63	35.7	62.6
71	40.0	62.9

Table 4 Bending moment of girder according to length of steel deck girder

Length of steel deck girder (m)	End		Center	
	Moment (kN·m)	Safety factor	Moment (kN·m)	Safety factor
47	430,668.5	1.16	101,806.9	1.15
55	340,630.7	1.19	88,389.6	1.21
63	256,918.7	1.21	72,032.7	1.29
71	180,577.4	1.34	56,308.5	1.25

에 나타낸 바와 같다. 강상판 거더부 길이가 증가할수록 교대부에 작용하는 고정하중 반력이 증가하는 것으로 나타났다. 교대부의 부반력 제어를 위해서는 강상판 거더부 길이를 60 m 이상으로 설계해야 할 것으로 판단된다. 그러나 대블럭 일괄가설 공법으로 시공하는 경우 가설공

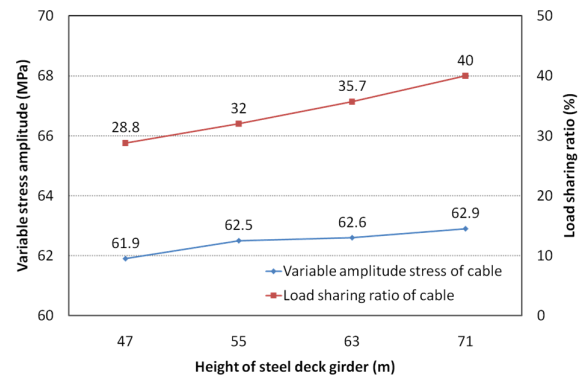


Fig. 9 Variable stress amplitude and load sharing ratio of cable according to length of steel deck girder

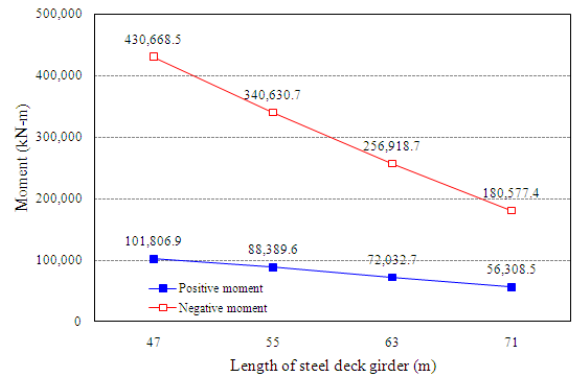


Fig. 10 Bending moment of girder according to length of steel deck girder

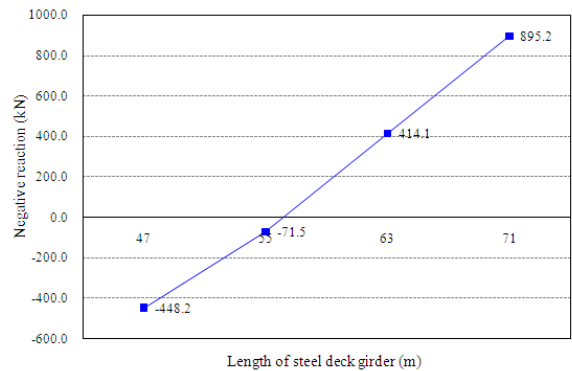


Fig. 11 Negative reaction of abutment according to length of steel deck girder

Table 5 Negative reaction according to length of steel deck girder

Length of steel deck girder (m)	Dead load $R_D$ (kN)	Live load $R_L$ (kN)	Negative reaction $R_D+2R_L$
47	109.7	-278.9	-448.2
55	474.1	-272.8	-71.5
63	946.3	-266.1	414.1
71	1412.5	-258.7	895.2

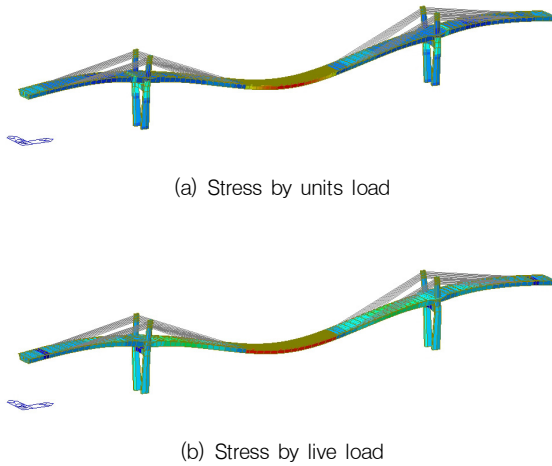


Fig. 12 Stress according to optimal length of steel deck girder (by live load)

법에 적용할 수 있는 최대중량은 약 6,000 kN이기 때문에 강상판 거더 길이를 80 m 이하로 계획할 필요가 있다.(Wei et al, 2007)

이상의 결과를 케이블 변동응력과 주거더 단면력 검토 결과와 같이 종합적으로 평가해볼 때 교량의 안전성 등을 고려하여 63 m 정도가 적정할 것으로 판단된다.

대상교량에 대한 각각의 설계변수에 따른 해석 결과를 종합적으로 평가해 볼 때, 최적의 주탑 높이는  $L/11=12$  m, 최적의 주거더 높이는 5.0~3.5 m, 최적의 강상판 길이는 63 m로 평가되었다. Fig. 12와 13은 최적의 설계변수를 적용한 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12는 단위 하중 재하시 응력결과이며, Fig. 13은 활하중 재하시 처짐 결과이다.

## 5. 설계변수의 민감도 분석 및 가중값 평가

### 5.1 민감도 분석

설계자가 설계과정에서 설계변수 사이의 상관관계를

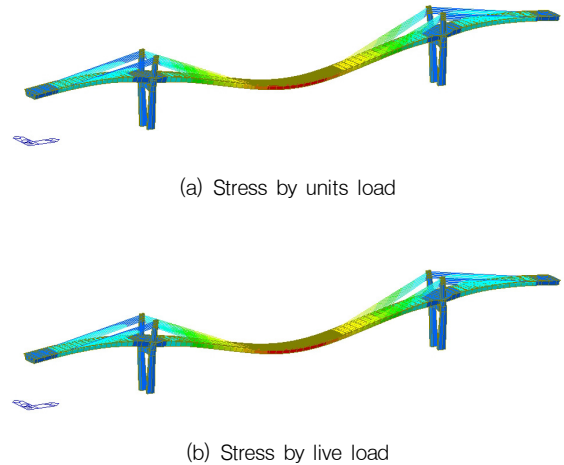


Fig. 13 Deflection according to optimal length of steel deck girder

이해하고, 설계변수에 대한 민감도를 분석하는 것은 교량을 최적의 조건으로 설계하는데 유용한 자료로 활용되므로 설계변수에 대한 민감도 분석이 필요하다.(Saad, F., 2004) 따라서 본 연구에서는 앞서 수행한 매개변수 해석 결과를 바탕으로 선형 민감도 방정식을 각각의 설계변수에 대한 상대적인 변화를 통하여 계산하는 상대 민감도 방법을 적용하여 민감도 분석을 수행하였다.

민감도는 다른 변수의 변화에 대한 한 요소의 변화율로 두개의 미분계수를 의미한다. 민감도 방정식은 양해함수 (explicit function)  $F_0$ 를 테일러(Taylor) 시리즈로 전개하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_0 = x(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (1)$$

변수  $F_0$ 는 설계 결과로 이해할 수 있다. 변수  $F_i$ 의 변화에 따른 변수  $F_0$ 의 변화는 식 (2)와 같다. 여기서  $F_0$ 는 각  $F_i$ 의 값에 대한 결과값이다.

$$x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) = F_0 + \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \Delta F_i + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_0}{\partial F_i^2} + \dots \quad (2)$$

식 (2)는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 식 (4)를 선형 민감도 방정식으로 정의할 수 있다.

$$x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) = F_0 + \frac{\partial F_0}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (3)$$

$$\Delta F_o = x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - F_o = \frac{\partial F_o}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 변수  $F_i$ 의 변화에 따른 변수  $F_o$ 의 변화를 추정할 수 있다. 선형 민감도 방정식은 한 매개변수가 동시에 변화되는 경우로 전개할 수 있으며, 식 (1)과 식 (4)로부터 민감도  $S$ 의 일반적 정의는 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$S = \frac{\partial F_o}{\partial F_i} = \frac{x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - x(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 계산된 값들은  $F_o$  또는  $F_i$ 의 어느 한 요인의 크기에 따라 일정 분자를  $F_o$ 로, 분모를  $F_i$ 로 각각 나누면  $F_i$ 의 상대적 변화에 대한  $F_o$ 의 상대적 변화를 식 (6)과 같이 추정할 수 있다.

$$R_s = \frac{\partial F_o / \partial F_o}{\partial F_i / \partial F_i} = \frac{\partial F_o}{\partial F_i} \frac{F_i}{F_o} \quad (6)$$

식 (6)은 상대 민감도를 나타내며, 상대 민감도  $R_s$  값은  $F_o$ 와  $F_i$ 의 크기에 따라 일정하기 때문에 민감도 비교를 위한 유용한 수단으로 이용될 수 있다.

## 5.2 민감도 분석결과

Fig. 14~16은 대상교량인 안도대교에 대한 설계변수별 민감도를 각각 나타낸 것으로 X축에는 설계변수 분석에서 적용된 변수를 최대변수로 나눈 값을 나타내었으며, Y축에는 설계변수별로 산정된 해석결과에 해당변수의 해석결과를 나눈 값을 나타내었다.

Table 6은 케이블 변동응력, 연직하중 부담율 및 주거더 휨모멘트의 선형회귀식을 나타낸 것으로 각각의 기울기는 설계변수의 상대민감도의 크기로 정의할 수 있다. 분석결과 본 연구에서 매개변수로 선정한 주탑 높이, 주거더 높이 및 강상판 거더 길이에 대하여 최적 제원 결정을 위한 설계 검토 단계에서 변수의 크기 조정에 따라 주거더 휨모멘트가 가장 영향을 많이 받는 민감한 요소라는 것을 확인하였다. 한편, 케이블 변동응력의 경우에는 거더 높이, 주탑 높이 및 강상판 거더 길이 순으로 민감도가 높은 것으로 분석되었으며, 하중부담율의 경우에 주탑 높

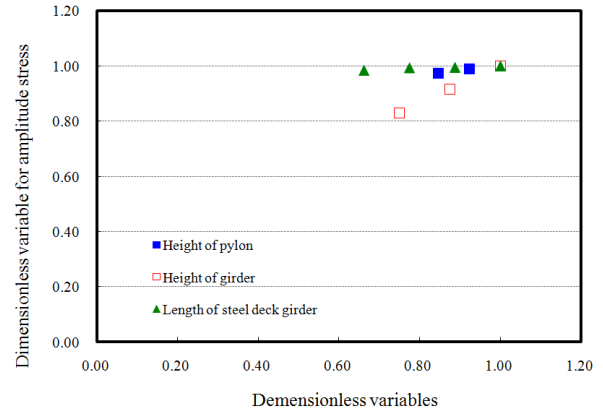


Fig. 14 Weight value according to dimensionless variable for stress amplitude according to parameter

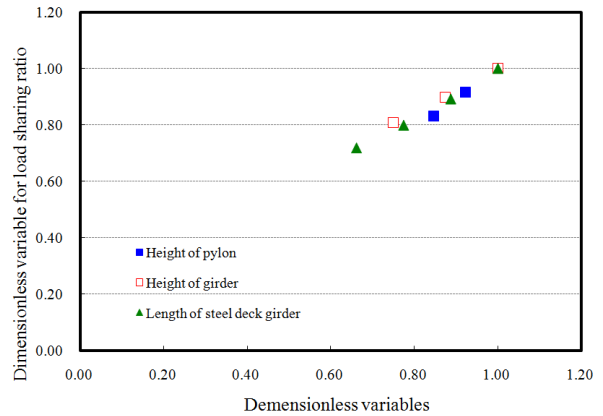


Fig. 15 Weight value according to dimensionless variable for load sharing ratio according to parameter

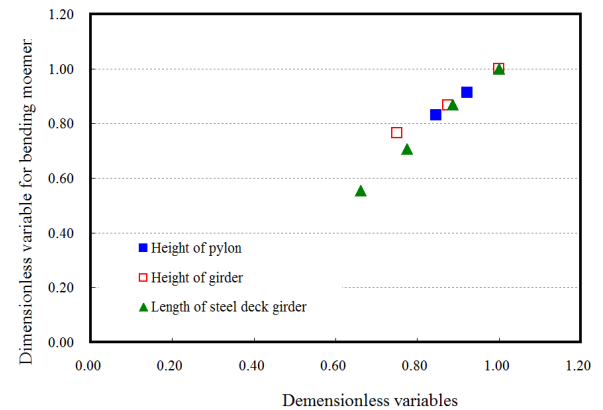


Fig. 16 Weight value according to dimensionless variable for bending moment according to parameter

이, 강상판 거더 길이 및 주거더 높이 순으로 민감도가 높은 것으로 분석되었다. 또한, 주거더 휨모멘트의 경우에는 강상판 거더 길이, 주탑 높이 및 주거더 높이 순으로



Table 6 Relational expression of sensitivity ratio according to parameter at Ando bridge

Index	Parameter	Regression equation	Relative sensitivity
Variable stress amplitude of cable	Height of pylon	Y=0.1746X+0.8262	0.1746
	Height of girder	Y=0.6794X+0.3211	0.6794
	Length of steel deck girder	Y=0.0437X+0.9569	0.0437
Load sharing ratio of cable	Height of pylon	Y=1.0861X-0.0857	1.0861
	Height of girder	Y=0.7657X+0.2326	0.7657
	Length of steel deck girder	Y=0.8276X+0.1654	0.8276
Girder bending moment	Height of pylon	Y=1.1049X-0.1062	1.1049
	Height of girder	Y=0.9387X+0.0558	0.9387
	Length of steel deck girder	Y=1.3325X-0.3251	1.3325

민감도가 높은 것으로 해석되었다.

Table 6의 분석결과, 주탑 높이, 주거더 높이 및 강상판 길이를 매개변수로 설정하였을 때 케이블 변동응력에 대한 설계변수들의 민감도가 가장 낮은 것으로 평가되었으며, 전술한 바와 같이 주거더 휨모멘트에 대한 민감도가 가장 큰 것으로 나타났다.

### 5.3 설계변수의 가중값 평가

본 연구에서는 설계변수에 대한 민감도 분석결과를 토대로 선정된 설계변수의 가중값을 평가하기 위한 연구도 수행하였다. 매개변수별로 설계시 고려되어야 할 가중값을 평가하기 위하여 케이블 변동응력, 케이블 연직하중 분담율 및 주거더 휨모멘트의 검토항목에 대하여 설계변수별로 산정된 상대민감도를 각각 정규화 하였다. 이를 위하여 Fisher의 Z변환방법을 적용하였다. 이러한 정규화 방법은 수식으로 정리하면 식 (7)~식 (9)와 같고, 데이터가 정규분포라는 가정이 만족하지 않아도 적용 가능한 장점이 있다.

$$\tilde{d}_i := \frac{d_i - E(d)}{\sigma_d} \quad (7)$$

$$E(d) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (8)$$

$$\sigma_d = \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - E(d))^2 \right)} \quad (9)$$

Table 7 Relative sensitivity ratio according to parameter

Parameter	Relative sensitivity ratio		
	Variable amplitude stress of cable	Load sharing ratio	Girder bending moment
Height of pylon	0.194	0.405	0.327
Height of girder	0.757	0.286	0.278
Length of steel deck girder	0.049	0.309	0.395

Table 8 Evaluation of weight value according to parameter

Parameter	Normalization of relative sensitivity ratio			Average value	Weight value
	Variable amplitude stress of cable	Load sharing ratio	Girder bending moment		
Height of pylon	1.316	0.209	1.107	0.877	0.931
Height of girder	1.414	0.724	0.690	0.943	1.000
Length of steel deck girder	1.374	0.978	0.395	0.916	0.971

위의 식 (7)의 정규화 과정을 거쳐 데이터를 다시 한번 평균화시켜 설계변수별로 설계에 대한 가중값을 평가한 결과를 정리하면 Table 7, 8과 같다, 여기서 상대 민감도률은 상대 민감도 수치를 각각의 검토항목별 상대비율로 표시한 결과이며, 상대 민감도률의 정규화는 Fisher의 Z 변환을 통한 평균값을 이용한 정규화 과정을 통해 산출된 값이다. 한편 설계변수 별로 도출된 평균값은 가중값 산출을 위하여 최대 평균값을 기준으로 상대비율로 표시하였으며, Table 7 및 Table 8과 같이 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 설계시 고려되어야 할 매개변수의 가중값은 거더 높이, 강상판 거더길이, 주탑 높이 순으로 결정되었으며, 매개변수별로 강상판 거더 길이는 거더 높이에 비하여 약 97%, 주탑 높이는 거더 높이와 비교하여 약 93%의 가중값을 갖는 것으로 도출되었다.

## 6. 결론

콘크리트-강 복합 엑스트라도즈드교의 최적설계를 위한 설계변수 분석에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 주탑 높이와 케이블 변동응력, 연직하중 분담율은



비례관계를 나타내었다. 주거더의 휨모멘트 경우 정모멘트의 변화는 크지 않았으나 부모멘트는 감소하는 경향을 나타내었다.

- (2) 구조적 안전성을 만족하고 PSC사장교·엑스트라도즈교 설계시공규준에서 제시한 케이블 허용 변동응력인 70 MPa를 초과하지 않는 범위에서 대상 교량의 최적 주탑높이는 12 m인 것으로 판단된다.
- (3) 주거더 높이와 케이블 변동응력, 연직하중 분담율은 반비례관계를 나타내었다. 주거더의 휨모멘트를 분석한 결과 정모멘트는 거의 변화가 없는 반면 부모멘트는 증가하는 경향을 나타내었다. 구조적 안전성과 케이블 허용변동응력을 만족하는 대상 교량의 주거더 높이는 3.5 m인 것으로 판단된다.
- (4) 강상관 거더길이가 증가할수록 교대부에 작용하는 고정하중 반력이 증가하는 것으로 나타나 교대부의 부반력 제어를 위해서는 강상관 거더길이를 60 m이상으로 설계해야 하는 것으로 나타났다. 이상의 분석결과 대상교량의 강상관 거더의 최적길이는 63 m가 적합한 것으로 판단된다.
- (5) 각각의 설계변수 분석을 통하여 도출된 최적값을 이용하여 대상교량인 안도대교의 설계변수별 상대 민감도 분석을 실시하여 교량에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 결과, 거더 높이, 강상관 거더 길이, 주탑 높이 순으로 나타났으며, 이를 토대로 강상관 거더 길이는 거더 높이의 약 97%, 주탑 높이는 약 93%의 설계가중값을 도출하였다.
- (6) 향후 콘크리트-강 접합부에 대한 연구와 이를 이용한 최적의 설계기법 개발 및 적용성 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 감사의글

본 연구는 상지대학교 교내연구비로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 노병철, 조성용, 박현철, 김문겸, “전·후면판 공용방식 접합부를 갖는 강-PSC 혼합구조의 휨 및 전단거동”, 한국구조물진단학회지, 제11권 6호, 2007, pp.201-212.
2. 오제택, “(새로운 구성)교량계획과 설계”, 반석기술, 서울, 2010, pp.15-24.
3. 우보열, “Extradosed교의 주요 부재에 대한 매개변수 연구”, 서울산업대학교 산업대학원, 석사학위논문, 2006.
4. 유신코퍼레이션 구조본부, “(실무자를 위한)Extradosed교 설계편람”, 건설도서, 서울, 2002, pp.2-56.
5. 정원기, 박상우, 구형선, “복합교량의 설계 사례”, 한국강구조학회논문집, 제15권 1호, 2003, pp.90-99.
6. PS 콘크리트 기술협회, “PC 사장교, Extradosed교 설계·시공 기준”, 技報堂出版, 일본, 2009, pp.75-80.
7. Kasuga, A., Sirono, Y., Nishibe, G., Okamoto, H., “Design and construction of the Odawara Port Bridge-The first extradosed bridge”, Congress-FIP, Structural Engineers Trading Organisation, Ltd, vol. 12, No. 1, 1994, pp.56-62.
8. Saad, F., “Structural Optimization of Extradosed Bridge”, IABSE Report, vol. 88, 2004, pp.212-213.
9. Takami, K., Hamada, S., “Long-Time Behavior of Extradosed Composite Bridges”, IABSE Reports, No. 84, 2001, pp.120-121.
10. Wei, C. M., Chen, H., Wang, Y., “Parameters’ Sensitivity Analysis of Extradosed Cable-stayed Bridge”, Journal-Zhengzhou University Natural Science Edition, vol. 39, No. 3, 2007, pp.178-182.

(접수일자 : 2011년 8월 23일)

(수정일자 : 2011년 10월 5일)

(심사완료일자 : 2011년 10월 10일)

---

## 요 지

최근 중앙경간 일부를 강박스 거더로 대체하여 자중을 감소시켜 중앙경간의 장경간화를 시도한 교량형식인 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈교는 기존 엑스트라도즈 교량을 개선하기 위한 대안으로 제시되고 있다. 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈교는 자중 감소를 통해 중앙경간의 장경간화가 가능할 뿐 아니라 기존형식과 동일한 경우 주거더의 높이와 측경간을 감소시킬 수 있어 구조적 효율성이 매우 우수한 형식으로 평가되고 있다. 따라서 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈교에 대한 최적의 설계기법을 구축하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈교에 대한 주요 설계변수(주탑 높이, 주거더 높이 및 강상판 거더 길이)를 도출하고, 이를 바탕으로 설계변수별 수치해석과 그 결과를 이용한 설계변수별 민감도 분석을 실시하여 설계변수가 교량의 설계에 미치는 영향을 정량적으로 반영할 수 있는 설계가중값을 도출하였다.

**핵심 용어** : 콘크리트-강 복합 엑스트라도즈 교량, 설계변수, 민감도 분석, 설계가중값

---