

상부단면과의 상호작용을 고려한 ILM 교량용 압출추진코의 최적화 설계식

Design Formula for Launching Nose of ILM Bridge Considering the Interaction Behavior with Superstructure Sections

이 환 우† 장 재 업*
Lee, Hwan-Woo Jang, Jae-Youp

요 지

ILM 교량의 경우 압출 중에 발생하는 일시적 응력을 흡수하기 위해 일반적으로 압출추진코가 이용된다. 압출 중에 발생되는 ILM 교량의 상부단면력은 압출추진코의 길이, 중량, 강성에 따라 크게 달라진다. 따라서 설계와 시공시에 단면의 안전성 확보를 위해서는 상부구조와 압출추진코와의 상호작용에 따른 응력변화를 반드시 고려해야 한다. 그러나 국내에서는 ILM 교량의 설계시에 경간분할 및 지간길이 등을 전례의 설계결과에 따라 결정하는 경우가 많다. 따라서 상부구조와 압출추진코의 단면들이 프로젝트에 따라 크게 달라지지 않는다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다. 이 연구에서는 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용을 고려한 해석식을 이용하여 압출추진코의 최적화를 위한 설계식을 제안하였고 활용가능성을 확인하였으며, 국내 공용중인 ILM 교량의 설계수준을 평가하여 ILM 상부단면의 최적설계를 위해 제안하였다.

핵심용어 : ILM공법, 압출추진코, 상호작용 해석식, 설계식

Abstract

In constructing ILM(Incremental Launching Method) bridges, a launching nose is generally used in order to absorb temporary stress occurring during launching. The sectional forces of superstructure of ILM bridges, which occurs during launching, varies significantly according to the length, weight and stiffness of the launching nose. Thus in order to guarantee the safety of section of ILM bridges, the change of stress according to interaction behavior between launching nose and superstructure should be considered. However, the span division and span length are often decided based on previous cases in practice. It makes the design sections of launching nose are similar in spite of different projects. The designer's anxiety to optimize the launching nose to affect the optimum design of superstructure is also weak. In this study, an design formular to optimize the nose is proposed by using the analysis formular of nose-deck interaction and the design level of ILM bridges constructed on OO Expressway is examined. According to the result of this study, the proposed design formulas are expected to make a significant contribution to section design that is economically efficient and at the same time guarantees the safety of the superstructure and launching noses of ILM bridges regardless of span length.

Keywords : *incremental launching method, launching nose, analysis formular of nose-deck interaction, design formulas*

1. 서 론

ILM(Incremental Launching Method) 교량공법은 1960년대초 서독의 Stuttgart 도시에 있는 Leonhardt &

Andra회사의 Fritz Leonhardt 등에 의하여 개발되었으며 (이광민, 1992; 신현묵, 2007), 높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 널리 채택되고 있다(Renaud 등, 1999; Sasmal 등, 2004; 2006). ILM 교량은 압출되

† 책임저자, 중신회원 · 부경대학교 건설공학부 교수
Tel: 051-629-6073 ; Fax: 051-629-6063
E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr

* 학생회원 · 부경대학교 토목공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

는 동안 상부단면이 지간의 중앙부와 지점부를 모두 통과한다. 따라서 상부단면들은 시공하중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 된다. 즉, ILM 교량의 상부단면들은 교량 완성상태와는 다른 응력들을 압출 중에 경험하게 된다(Rosignoli, 2000).

ILM 교량의 상부단면들이 압출 중에 경험하게 되는 응력들은 시공 중에만 발생하는 일시적인 응력들이지만, 그 크기는 단면의 안전성에 영향을 줄 수 있다.

압출 중 상부단면에 발생하는 일시적인 응력들을 흡수하고, 효과적으로 제어하기 위해서 일반적으로 압출추진코(launching nose)가 이용되고 있다(Rosignoli, 1999). 이때 압출추진코의 길이, 강성, 중량 및 탄성계수 등(김광수, 2008; Rosignoli, 1998)은 압출이 진행되는 동안에 상부단면에 발생하는 응력들의 크기와 변화 폭에 영향을 준다. 즉, ILM 교량에서는 압출 중 상부단면과의 상호작용에 따른 응력변화를 고려하여 최적의 압출추진코를 설계하는 것이 상부단면의 설계를 최적화 목표달성에 중요한 요인이 된다.

국내에서는 ILM 교량의 설계에서도 경간분할 및 지간길이 등이 전례의 설계결과에 따라 결정되는 경우가 많다(박상현 등, 2001). 결국, 상부구조와 압출추진코의 단면들이 프로젝트에 따라 크게 달라지지 않는다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다.

이 연구에서는 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적화를 위한 설계식을 제안하고 활용가능성의 확인과 현재 국내에서 공용중인 ILM 교량의 설계수준을 평가하여 ILM 상부단면의 최적설계를 위해 제안하고자 한다.

2. 상호작용의 해석모델

2.1 매개변수 및 기본가정

상호작용에 영향을 줄 수 있는 압출추진코와 교량 상부단면의 기하학적, 역학적인 특성을 고려하고자 선정한 4가지 매개변수는 다음과 같다(이환우 등, 2006).

- (1) 교량 상부구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 : l_n/l
- (2) 교량 상부구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위 길이 당 중량비 : $q_1/q, q_2/q$
- (3) 교량 상부구조(I)와 압출추진코(I_1, I_2)의 강성비 : $I_1/I, I_2/I$

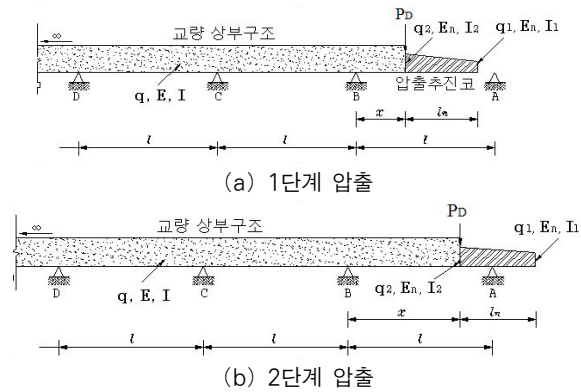


그림 1 압출시의 Nose-Deck 구조계(이환우 등, 2006)

(4) 교량 상부구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 :

$$E_n/E$$

여기서, q_1, I_1 는 압출추진코 끝단에서의 단위 중량(kN/m)과 단면 2차모멘트(m^4)를 의미하고, q_2, I_2 는 각각 압출추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출추진코의 단위 중량과 단면 2차모멘트를 의미한다.

상부단면과 압출추진코로 이루어진 구조체가 압출이 진행되는 동안 가질 수 있는 대표적인 구조계는 그림 1과 같다. 이 연구에서는 그림 1에서와 같이 상호작용의 해석모델로 총 2 단계를 정의한다. 압출추진코의 끝단이 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태(그림 1(a) 참조)를 1 단계 압출이라 정의하고, 압출추진코의 끝단이 지점 A에 도달한 후부터 교량 상부단면과 압출추진코의 연결부가 지점 A에 도달할 때까지(그림 1(b) 참조)를 2 단계 압출이라 정의한다. 그림 1에서 정의된 P_D 는 교량 상부단면과 압출추진코와의 연결부 다이어프램을 집중하중으로 나타낸 것이다.

한편, 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용의 해석모델에 다음과 같은 가정들을 적용한다(이환우 등, 2006).

- (1) 교량 상부단면은 일정한 강성 및 중량을 가진다.
- (2) 압출추진코의 높이는 단면의 길이방향으로 선형적으로 변화하고, 단면의 폭 방향으로는 일정하다.
- (3) 그림 1의 D점 이후의 지점은 지간길이가 l 인 무한개의 연속보로 되어 있다고 가정한다.
- (4) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 긴장력은 도심축을 지난다.

2.2 해석식

2.2.1 1단계 압출($M_B^1/q_1 l^2$)

압출중인 ILM 교량 상부단면의 설계단면력은 그림 1의

지점 B와 지점 C에서의 부(-)모멘트, 그리고 A-B경간과 B-C경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정될 수 있다. 일반적으로는 지점 B에서의 부모멘트가 압출 중의 설계 단면력으로 결정된다(Rosignoli, 1999).

그림 1(a)의 지점 B에서부터 압출추진코와 상부의 연결부분이 거리 x 만큼 압출되었을 때, 압출추진코의 끝은 지점 A에 도달하기 직전으로 가정하면 그림 1(a)로부터 경간길이에 대한 압출된 상부길이의 비를 $\alpha = x/l$ 로 나타낼 수 있고, α 의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1 - l_n/l$ 이다. 1단계 압출과정 중 에, 즉, 지점 A에 도달하기 직전까지에서 설계 단면력으로 결정되는 지점 B의 휨모멘트 M_B^1 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{M_B^1}{ql^2} = -\frac{1}{2} \cdot \alpha^2 - \frac{q_1}{q} \cdot \alpha \cdot \frac{l_n}{l} - \frac{1}{2} \cdot \frac{q_1}{q} \cdot \frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\alpha \frac{l_n}{l} + \frac{1}{3} \frac{l_n^2}{l^2} \right) - \frac{P_D}{ql} \cdot \alpha \quad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 1단계 압출에서, 지점 B의 휨모멘트 M_B^1 은 압출추진코와 교량 상부단면과의 길이비(l_n/l)와 중량비(q_1/q , q_2/q)만의 함수이고, 강성비(I_1/I , I_2/I)와 단성계수비(E_n/E)와는 무관함을 알 수 있다.

2.2.2 2단계 압출 (M_B^2/ql^2)

2단계 압출(그림 1(b) 참조)은 압출추진코가 지점 A에 도달한 때부터 시작된다. 압출추진코가 지점 A에 도달하게 되면 압출추진코의 끝은 교각의 지점반력에 의해 처짐이 회복된다. 이러한 탄성처짐의 회복으로 정 모멘트가 발생하게 되어 지점 B의 휨모멘트는 감소하게 된다. 2단계 압출은 지점 A에 콘크리트 상부가 도달할 때까지이다. 따라서, 2단계 압출에서 α 의 범위는 $1 - l_n/l \leq \alpha \leq 1$ 이다. 변단면 압출추진코의 단면강성 변화가 선형적이라 가정할 때, 2단계에서 지점 B의 모멘트 M_B^2 는 식 (2)와 같다.

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3} \left(\frac{\text{㉑}}{\text{㉒}} + \frac{E}{E_n} \frac{\text{㉓} + \text{㉔} + \text{㉕} + \text{㉖}}{\text{㉗}} \right) - \frac{3}{4} \quad (2)$$

여기서, ㉑~㉗는 해석식의 유도과정에서 얻어진 상수 값으로써 단면형상과 각 매개변수에 따라 결정된다(이환우 등, 2006). 또한, 압출이 종료($\alpha = 1$)될 때 M_B^2 는 강성비에 관계없이 식 (3)의 M_B^E 에 수렴된다.

$$M_B^E = (0.045q_2 + 0.089q_1)l_n^2 - 0.107ql^2 \quad (3)$$

3. 최적화 설계식

3.1 최적길이비 및 최소강성비

상부단면을 가장 경제적으로 설계하기 위해서는 캔틸레버 상태의 휨모멘트인 식 (1)의 M_B^1 의 최대 값과 압출이 완료된 후의 휨 모멘트인 식 (3)의 M_B^E 값과의 차이를 가능한 줄일 수 있는 적절한 길이의 압출추진코를 사용하여야 한다. 이 압출추진코의 길이를 최적길이라 정의한다.

식 (1)과 식 (3)은 강성비와 관계가 없는 식들이므로 중량비만을 변화시키면서 시행착오의 방법에 의해 최적의 압출추진코 길이를 결정할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 중량비의 변화 폭은 실제 설계사례들을 조사한 결과를 바탕으로 q_2/q 을 0.17에서 0.03까지 0.01씩 변화시켰고, 이 때 q_1/q 는 주어진 q_2/q 의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 최적길이를 결정하였다.

압출추진코의 최적길이를 산정한 후에는 중량비와 최적길이에 대한 압출추진코와 교량 상부단면과의 최소강성비를 산정한다. 2단계 압출과정에서의 상부단면력 M_B^2 가 M_B^E 를 초과하지 않도록 하는 압출추진코의 강성비를 최소강성비라 정의하였다. 강성비의 변화 폭은 I_2/I 를 0.085에서 0.010까지 0.005씩 변화시키고, I_1/I 의 값은 주어진 I_2/I 의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 분석하였다.

3.2 설계식

그림 2와 그림 3에서는 이 연구에서 산정한 각 중량비 경우별 최적길이들의 일부 예를 보여주고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.05$ 의 경우에는 $l_n/l=0.61$ 이, 그림 3과 같이 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 의 경우에는 $l_n/l=0.65$ 가 얻어졌고 그 결과 최소강성비는 중량비 변화에 관계없이 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 로 분석되었다. 이는 강성비가 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 이상으로만 설계된다면 중량비와 길이비 조절만으로 캔틸레버상태와 압출 완료시 최대 부 모멘트의 차이가 최소가 되도록 하는 최적의 압출추진코를 설계할 수 있음을 의미한다(이환우 등, 2006).

그림 4와 표 1은 3.1절의 중량비 $q_2/q=0.08$ 에 대한 q_1/q 의 변화에 따른 최적길이비의 예를 보여주고 있다. 중량비를 변화시키며 회귀분석을 통하여 얻은 상부단면과의 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적화 설계식을 표 2에 나타내었

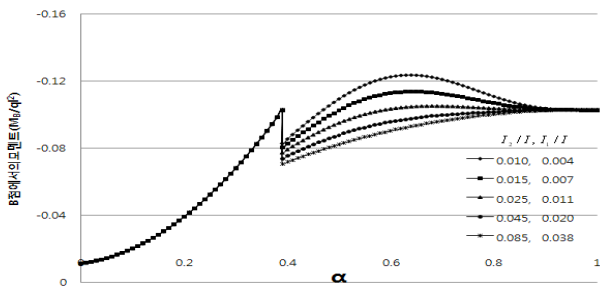


그림 2 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.05$, $l_n/l=0.61$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

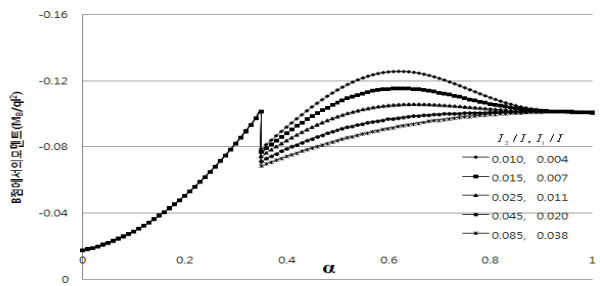


그림 3 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$, $l_n/l=0.65$ 인 경우 압출하는 동안 강성비 따른 B점의 모멘트

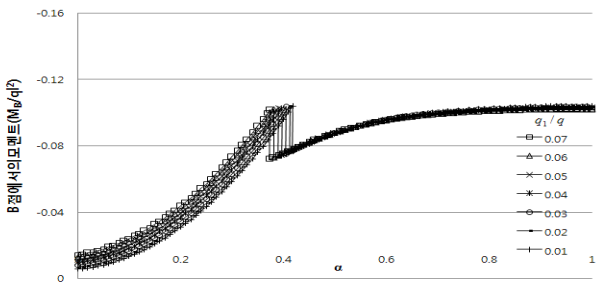


그림 4 $q_2/q=0.08$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 1 중량비 변화에 따른 최적길이비 변화($q_2/q=0.08$)

| q_2/q | q_1/q | l_n/l |
|---------|---------|---------|
| 0.08 | 0.07 | 0.626 |
| 0.08 | 0.06 | 0.618 |
| 0.08 | 0.05 | 0.610 |
| 0.08 | 0.04 | 0.603 |
| 0.08 | 0.03 | 0.595 |
| 0.08 | 0.02 | 0.588 |
| 0.08 | 0.01 | 0.582 |

다. 제안된 설계식은 최소강성비($I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$)가 제한되어져 있고, 다이어그램이 고려되지 않아 직접적인 활용에는 한계가 있다. 따라서 제안된 설계식을 통해서 얻어지는 길이비를 한계길이비라고 정의한다. 이때의 한계길이비는 압출추진코의 설계 시, 한계길이비보다 짧게 압출추진코가 설계되어서는 안된다는 의미이며, 실제 다이어그램을 적

표 2 중량비-최적길이비 설계식

| q_2/q | 설계식 | R^2 (결정 계수) |
|---------|---|------------------|
| 0.04 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 26.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 - 0.597\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.614\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.557$ | 0.99 |
| 0.06 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = -4.696\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.734\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.589\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.566$ | 0.99 |
| 0.07 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 7.059\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.633\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.634\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.571$ | 0.99 |
| 0.08 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 1.238\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.347\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.631\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.575$ | 0.99 |
| 0.09 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 5.949\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.952\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.653\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.58$ | 0.99 |
| 0.10 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 8.555\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.675\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.683\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.585$ | 0.99 |
| 0.12 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 10.256\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.649\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.718\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.595$ | 0.99 |
| 0.14 | $\left(\frac{l_n}{l}\right) = 16.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.003\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.784\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.605$ | 0.99 |

용하여 최적길이비를 산정한 후, 2단계 해석식인 식 (2)를 이용하여 최적강성비를 결정하여 최적화 과정을 수행할 수 있다.

4. 적용성 검증

4.1 상호작용 해석

제안된 설계식의 적용성을 검증하기 위하여 우리나라의 고속도로에 ILM 공법으로 건설된 표 3의 19개의 교량들을 대상으로 제안된 설계식을 이용하여 최적설계 수준을 평가하고자 한다.

조사된 교량들의 압출추진코의 단면 형식은 모두 I형 플레이트 거더로 제작되었고, 상부 구조의 지간장은 48m~60m로 조사되었다. 길이비(l_n/l)는 0.69~0.75이고 강성비는 0.001~0.006(I_1/I), 0.010~0.035(I_2/I)로 나타났다.

먼저 상호작용 해석식인 식 (1)과 (2)를 이용하여 조사교량들을 대상으로 압출 중 단면력의 변화를 해석하였다. 대표적으로 교량 A~I에 대한 단면력 궤적을 그림 5~그림 8에 나타내었다. 그림 5~그림 8에서 굵은 실선은 표 3에 나타난 해당 교량의 설계변수 l_n/l , q_2/q , q_1/q , I_2/I , I_1/I , P_D , l 을 식 (1)과 (2)에 대입하여 얻은 단면력 M_B/q^2 의 궤적이다. 또한 실제 조사교량의 각 중량비와 강성비를 고정시킨 상태에서 압출 1단계 캔틸레버 모멘트와 압출 완료 후($\alpha=1$)의 모멘트 차이를 가능한 최소화시킬 수 있는 길이비를 시

표 3 조사된 교량들의 제원

| 교량명 | M_B/q^2 (2단계 최대값 기준) | 지간장 (m) | 압출추진코길이 (m) | 차로수 | l_n/l | 상부구조 단면적(m^2) | 중량비 | | 강성비 | | P_D (kN) |
|-----|---------------------------|------------|----------------|-----|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| | | | | | | | q_2/q | q_1/q | I_2/I | I_1/I | |
| A | -0.1096 | 50 | 35 | 2 | 0.7 | 7.621 | 0.082 | 0.043 | 0.0266 | 0.0040 | 406.2 |
| B | -0.1125 | 50 | 35 | 2 | 0.7 | 7.621 | 0.082 | 0.043 | 0.0266 | 0.0040 | 406.2 |
| C | -0.1242 | 50 | 35 | 2 | 0.7 | 7.785 | 0.080 | 0.042 | 0.0252 | 0.0038 | 716.3 |
| D | -0.1242 | 50 | 35 | 2 | 0.7 | 7.785 | 0.080 | 0.042 | 0.0252 | 0.0038 | 716.3 |
| E | -0.1269 | 50 | 35 | 2 | 0.7 | 8.133 | 0.074 | 0.026 | 0.0235 | 0.0025 | 716.3 |
| F | -0.1050 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.462 | 0.085 | 0.030 | 0.0303 | 0.0017 | 816.1 |
| G | -0.1050 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.462 | 0.085 | 0.030 | 0.0303 | 0.0017 | 816.1 |
| H | -0.1050 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.462 | 0.085 | 0.030 | 0.0303 | 0.0017 | 816.1 |
| I | -0.1050 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.462 | 0.085 | 0.030 | 0.0303 | 0.0017 | 816.1 |
| J | -0.1035 | 50 | 36 | 3 | 0.72 | 11.764 | 0.084 | 0.056 | 0.035 | 0.0050 | 1214.3 |
| K | -0.1378 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.788 | 0.085 | 0.049 | 0.025 | 0.007 | 891.0 |
| L | -0.1279 | 60 | 42 | 2 | 0.7 | 9.09 | 0.085 | 0.036 | 0.0165 | 0.001 | 713.8 |
| M | -0.1109 | 55 | 38 | 2 | 0.69 | 8.610 | 0.085 | 0.048 | 0.011 | 0.002 | 704.0 |
| N | -0.1155 | 60 | 42.5 | 2 | 0.71 | 9.386 | 0.110 | 0.050 | 0.0243 | 0.001 | 766.0 |
| O | -0.1203 | 50 | 35 | 2 | 0.70 | 9.257 | 0.110 | 0.050 | 0.0220 | 0.0061 | 819.4 |
| P | -0.1258 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 8.233 | 0.085 | 0.048 | 0.0220 | 0.003 | 889.4 |
| Q | -0.1250 | 48 | 36 | 3 | 0.75 | 12.441 | 0.110 | 0.085 | 0.0303 | 0.0020 | 1234.0 |
| R | -0.1290 | 50 | 36 | 2 | 0.72 | 7.750 | 0.085 | 0.035 | 0.0100 | 0.0013 | 450.0 |
| S | -0.1221 | 55 | 40 | 2 | 0.72 | 7.788 | 0.09 | 0.054 | 0.0200 | 0.001 | 629.0 |

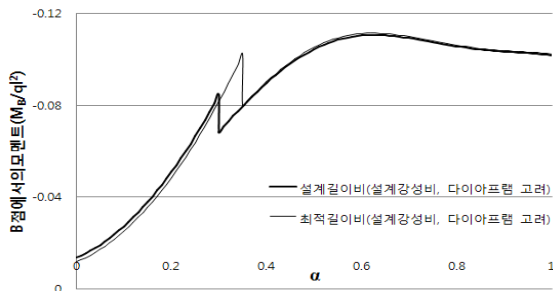


그림 5 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(A,B교량)

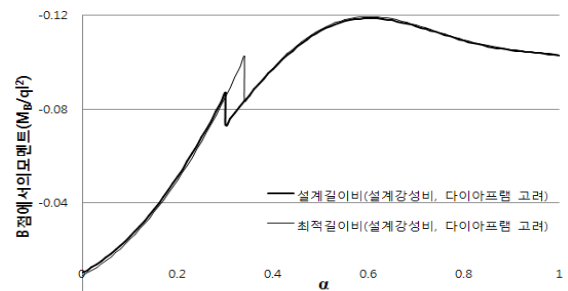


그림 7 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(E교량)

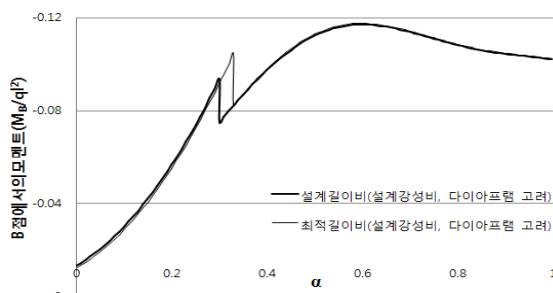


그림 6 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(C,D교량)

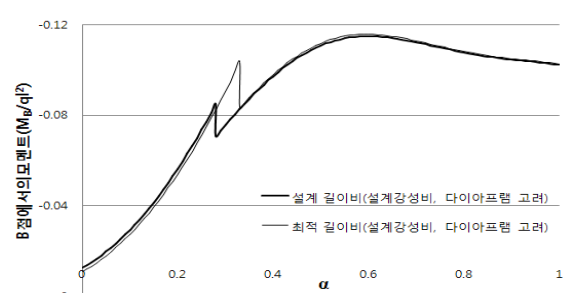


그림 8 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(F,G,H,I교량)

행착오의 과정을 통하여 산정하였다. 그 결과, A, B교량은 0.65, C, D교량은 0.67, E교량은 0.66, F~I교량은 0.67로 산정되었다. 한편 단면력 궤적은 그림 5~그림 8의 가는 실선으로 나타내었다.

그림 5~그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 실제 설계자료를 그대로 적용한 굵은실선의 경우, 1단계 압출이 종료되었을 때의 단면력보다 2단계 압출이 종료되었을 때 (M_B^E)가 크다. 이

러한 결과는 나머지 조사교량에서도 마찬가지였다. 즉, 실무설계에서는 안전측 개념의 설계관례에 따라 압출추진코를 최적 길이비에 비하여 비교적 길게 설계한 것을 알 수 있다.

한편, 그림 5~그림 8에서 최대 단면력이 2단계 압출과정 중간에 발생하는 것을 알 수 있다. 다른 조사교량의 경우에서도 굵은 실선의 경우 최대 단면력은 압출 완료후의 단면력 (M_B^E)보다 8%~11% 크게 나타났고, 가는 실선의 경우는

9%~13% 크게 발생하였다. 이것은 3.1절에서 설명하였듯이 조사교량들의 강성비가 최소강성비($I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$)보다 작게 설계되었기 때문이다.

4.2 최적설계 수준평가

비교적 긴 길이비로 설계된 조사교량들을 대상으로 이 연구에서 제안한 해석식과 설계식을 이용하여 압출추진코의 최적설계값을 구한 후에 최적설계 수준을 평가하고자 한다. 그림 9~그림 12에는 조사교량들 중 대표적으로 교량 A~I에 대한 분석결과를 나타냈다.

그림 9~그림 12에서의 굵은 실선의 의미는 그림 5~그림

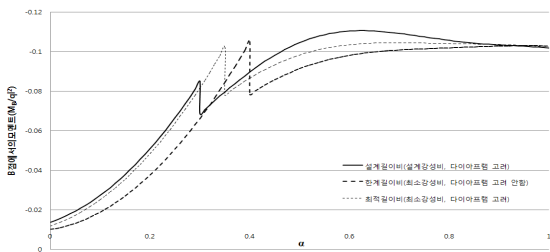


그림 9 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(A,B교량)

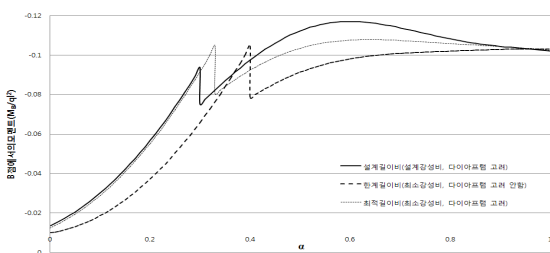


그림 10 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(C,D교량)

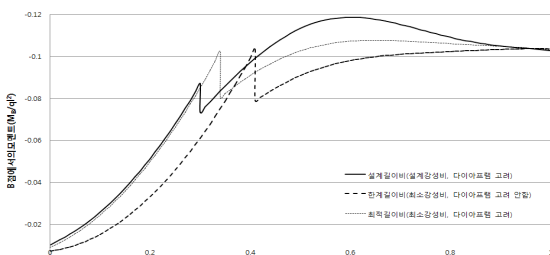


그림 11 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(E교량)

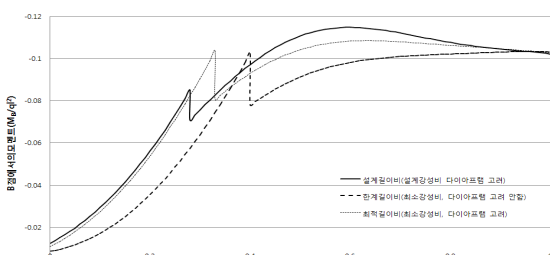


그림 12 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(F,G,H,I교량)

8에서의 굵은 실선과 같다. 굵은 점선은 표 2에서 제안한 설계식의 결과이다. 표 2의 설계식의 경우는 다이어그램이 고려되지 않은 상태이므로 실제 최적길이비는 굵은 실선과 굵은 점선사이에 존재하게 된다. 그림 9~그림 12에서 가는 점선은 설계된 다이어그램이 고려된 상태에서 압출추진코의 강성비를 최소강성비인 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 로 가정하고 중량비는 실제 중량비인 표 3의 q_2/q , q_1/q 를 적용한 상태에서 굵은 실선과 굵은 점선의 사이에서 시행착오 과정을 통하여 최적길이비를 찾아 나타난 단면력 궤적이다. 이 궤적이 이론적인 목표 최적길이비인 것이다. 즉, 그림에서 보는바와 같이 가는 점선은 압출 중 상부 단면력이 변화가 최소화될 수 있도록 최적화된 압출추진코의 설계결과라 할 수 있다.

조사교량들의 최대단면력과 길이비에 대한 분석결과를 정리하여 표 4에 나타냈다. 표 4에서 첫 번째 열(설계 강성비,

표 4 최대모멘트와 길이비

| 구분 | 현재설계 (굵은 실선) | 최적설계 (가는 점선) | 단면력 감소량 (%) | |
|---------|--------------------------|-------------------|-------------------|------|
| A,B | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1107 (0.70) | -0.1015 (0.65) | 8.3 |
| C,D | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1107 (0.70) | -0.1035 (0.67) | 6.5 |
| E | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1187 (0.70) | -0.1033 (0.66) | 12.9 |
| F,G,H,I | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1149 (0.70) | -0.1068 (0.67) | 7.0 |
| J | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1096 (0.72) | -0.1058 (0.69) | 3.4 |
| K | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1157 (0.72) | -0.1062 (0.69) | 8.2 |
| L | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1239 (0.70) | -0.1044 (0.65) | 15.7 |
| M | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1336 (0.69) | -0.1043 (0.67) | 21.9 |
| N | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1148 (0.71) | -0.1039 (0.68) | 9.5 |
| O | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1172 (0.70) | -0.1049 (0.70) | 10.5 |
| P | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1201 (0.72) | -0.1062 (0.69) | 11.6 |
| Q | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1126 (0.75) | -0.1046 (0.74) | 7.1 |
| R | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1335 (0.72) | -0.1040 (0.65) | 22.1 |
| S | M_B/q^2 (l_n/l) | -0.1181 (0.72) | -0.1038 (0.67) | 12.1 |

설계 길이비, 다이아프램 고려)은 그림 5~그림 12의 굵은 실선, 두 번째 열(최소 강성비, 최적길이비, 다이아프램 고려)은 가는 점선에 해당된다.

표 4의 두 번째 열에 해당되는 조사교량의 압출추진코의 최적길이비는 A교량~S교량의 경우 0.65~0.74로 산출되었다. 그리고 최적 설계때의 최대 단면력은 실제 조사교량의 설계자료를 그대로 입력하여 얻어진 표 4의 첫 번째 열의 현재 설계된 실제 교량의 단면력보다 6%~22%정도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

조사 교량들을 검토한 결과 압출추진코 길이를 현재보다 짧게 조정하고, 최소강성비를 만족하면 교량 상부단면에 발생하는 최대 단면력을 감소시킬 수 있다. 또한, 압출 중에 상부단면의 응력 변화폭을 최소화할 수 있다. 이를 통하여 교량 상부단면의 최적화를 이룰 수 있을 것이다.

4.3 최적설계식의 활용

3.2절에서 제안된 설계식은 다이아프램이 없고 최소강성비를 만족하는 경우에만 직접적으로 적용할 수 있는 한계를 가지고 있다. 현실적으로 실무설계에서 위의 조건을 만족시키는 경우는 그리 많지 않다. 그림 13에서는 제안된 설계식을 활용하여 압출 중 ILM 상부단면을 최적화할 수 있는 절

차를 설명하고 있다.

- (1) 설계자는 ILM 교량의 설계변수(설계길이비, 중량비, 설계강성비)를 가정한다.
- (2) 가정한 설계변수들을 제안된 설계식(표 2)에 입력하여 압출추진코의 한계길이비를 결정한다. 이때의 길이비는 가정한 설계변수가 다이아프램이 없고 최소강성비를 만족한 경우에 최적길이비가 될 수 있을 것이다.
- (3) 설계길이비와 한계길이비 사이의 범위에서 제안된 해석식을 이용하여 시행착오 과정을 통하여 다이아프램을 고려한 최적길이비를 산출한다.
- (4) 1단계 압출 종료 시 때의 단면력(M_B^{1E})과 2단계 압출 종료 시 때의 단면력(M_B^E)의 오차가 설계자의 목표수준을 만족할때를 3)의 최적길이비로 결정한다.
- (5) 설계과정에서 이론적 최적화목표를 달성하기 위하여 무조건 최소강성비를 만족하려다 보면 압출추진코의 강성이 비경제적으로 커질 수가 있다. 따라서 설계자는 상부단면의 응력 흡수능력이 허용하는 범위에서 최소강성비를 만족하지 않더라도 적절한 수준의 강성으로 압출추진코의 최적강성비를 결정한다.
- (6) 2단계 압출 중 최대 단면력(M_B^{2max})이 2단계 압출 종료 시 때의 단면력(M_B^E)의 오차가 설계자의 목표수준을 만족할 때를 5)의 최적강성비로 결정한다.
- (7) 제안된 최적설계식을 바탕으로 시행착오 과정을 통하여 얻은 최적의 설계변수들을 가지고 최적의 압출추진코 단면을 설계한다.
- (8) 압출추진코와의 상호작용이 고려되어 압출중 최적의 응력분포를 갖는 교량 상부단면을 설계한다.

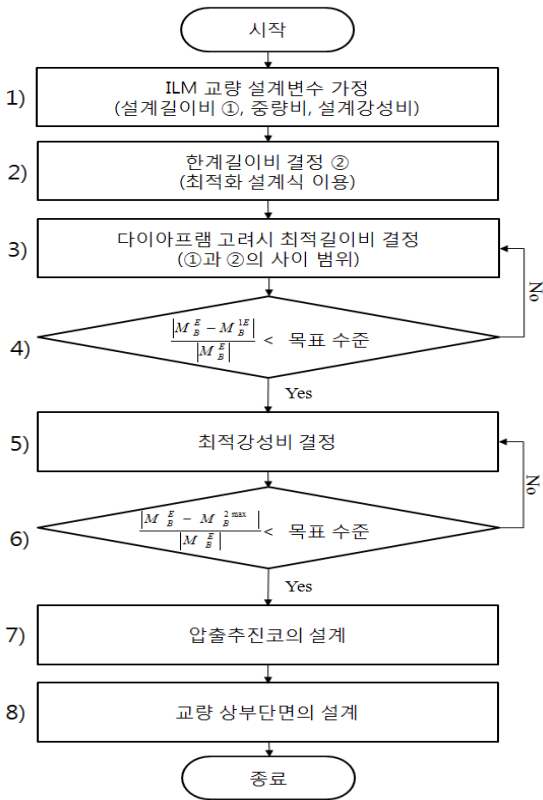


그림 13 최적화 과정

5. 결 론

- (1) 단면력의 변화를 최소화하여 ILM교량 상부단면의 최적화에 기여할 수 있는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 설계식을 제안하였다.
- (2) 공용중인 19개 교량을 대상으로 제안된 설계식의 적용성을 확인하고 최적화 수준을 평가하였다. 조사교량들의 압출추진코는 대부분이 안전측 개념의 설계관례에 따라 최적길이비에 비하여 비교적 길게 설계되었으며, 2단계 압출과정 중에 상부단면의 최대 단면력이 발생되었다.
- (3) 조사교량들의 경우 압출추진코의 최적설계를 통하여 교량 상부단면에 발생하는 압출 중 설계 단면력을 현재의 설계보다 6%~22%정도 감소시킬 수 있을 것

으로 분석하였다.

- (4) 제안된 설계식을 이용하여 압출추진코의 최적화 과정을 수행하면 경제성과 안정성을 모두 고려한 최적의 압출추진코 단면과 압출추진코와의 상호작용이 고려되어 압출 중 최적의 응력분포를 갖는 교량 상부단면을 설계할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2008-061).

참 고 문 헌

- 김광수** (2008) 파형강판 PSC 박스거더 교량의 설계 및 시공 중 안전관리, 한국안전학회지, 23(2), pp.87~97.
- 박상현, 김찬녕, 심재수, 이승주, 황의승** (2001) 경제성과 장대경간 구성을 구현할 수 있는 I.L.M교량에 사용되는 추진코의 적정제원 산정에 관한 연구, 가을학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 2001(01), pp.853~858.
- 신현묵** (2007) 프리스트레스 콘크리트, 동명사, 서울, pp.456~457.
- 이광민** (1992) ILM 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계, 콘크리트학회지, 4(3), pp.19~25.
- 이환우, 정두희, 안태욱** (2006) 변단면 압출추진코와 ILM 교량 상부단면의 상호작용 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 19(2), pp.139~150.
- Renaud, F., Marc, B., Olivier, B., Pierre, L.** (1999) Design of a Curved Incrementally Launched Bridge, *journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, 9(2), pp.128~132.
- Rosignoli, M.** (1998) Nose-Deck Interaction in Launched Prestressed Concrete Bridge. *Bridge Engineering*, 3(1), pp.21~27.
- Rosignoli, M.** (1999) Presizing of Prestressed Concrete Launched Bridge. *ACI Structural Journal*, 96(5), pp.705~710.
- Rosignoli, M.** (2000) Thrust and Guide Devices for Launched Bridges, *Bridge Engineering*, 5(1), pp.75~83.
- Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K., Srinivasm, V., Gopalakrishnan, S.** (2004) Simplified Computational Methodology for Analysis and Studies on Behaviour of Incrementally Launched Continuous Bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(2), pp.245~266.
- Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K.** (2006) Transfer Matrix Method for Construction Phase Analysis of Incrementally Launched Prestressed Concrete Bridges, *Engineering Structures*, 28, pp.1897~1910.

- 논문접수일 2009년 8월28일
- 논문심사일 2009년 9월10일
- 게재확정일 2009년10월12일