

변단면 압출 추진코와 ILM교량 상부구조와의 상호작용

Nose-Deck Interaction in ILM Bridge Proceeding with Tapered Sectional Launching Nose

안 태 욱*
Ahn, Tae-Wook

김 광 양**
Kim, Kwang-Yang

이 환 우***
Lee, Hwan-Woo

ABSTRACT

The ILM(incremental launching method) bridge, which is one of PS(prestressed) concrete bridge construction methods is widely adopted in Korea owing to its effectiveness for the quality control in construction. The purpose of this study is to analyze the structural behavior of ILM bridge proceeding with tapered sectional launching nose. This study presents basic technical materials to achieve the optimum design for superstructure and launching nose of ILM bridge. First, this study introduces an equation to analyze the interaction between launching nose and superstructure. In this process, relative length, weight, and flexural stiffness between launching nose and superstructure are considered as investigating parameters. Second, the effects of superstructure resulting from these parameters is estimated analyzed by using the induced equations.

1. 서 론

프리스트레스드 콘크리트 교량공법 중의 하나인 ILM공법은 교대 후방에 설치한 제작장에서 미리 제작된 프리캐스트 세그먼트를 교량의 교축방향으로 특수 압출장비를 이용하여 밀어내어 상부구조물을 가설하는 공법이다(Zellner, 1983; Rosignoli, 1998). 이 공법에서는 압출하는 동안 발생하는 높은 일시적 응력을 해결하는 방법으로 일반적으로 압출 추진코가 이용되고 있다. 압출되는 동안, 상부의 각 단면은 사하중에 의한 정 모멘트 및 부 모멘트 그리고 최대, 최소 전단력을 경험하게 되므로, 압출 추진코의 길이 및 중량에 따라 시공 과정 중의 부재력의 거동은 크게 달라질 수 있다. 따라서, 설계시에 상부구조와 압출 추진코와의 상호작용에 따른 응력변화를 반드시 고려해야 한다. 이러한 상호작용의 분석을 위해 등단면의 압출 추진코의 형상을 가정한 연구(Rosignoli, 1998; 안태욱 등, 2003)가 수행되었다. 본 연구에서는 변단면 압출 추진코와 상부구조와의 경간 길이비, 중량비, 강성비의 3가지 매개변수를 고려하여 변단면 압출 추진코의 진행에 따른 상부구조와의 상호작용에 관하여 분석하였다. 분석결과를 바탕으로 경간 길이비, 중량비, 강성비 사이의 최적화된 관계식을 도출하였다.

* 부경대학교 건설공학부 토목공학과 석사과정

** 부경대학교 건설공학부 토목공학과 박사수료

*** 정희원 · 부경대학교 건설공학부 교수

2. 상호작용 분석을 위한 해석 모델

2.1 매개변수 및 기본가정

상부구조와 압출 추진코의 기하학적이고, 역학적인 성분을 고려하여 아래의 3가지 매개변수를 채택하여 그 상호작용을 분석하였다.

- 1) 교량구조(l)의 경간길이에 대한 압출 추진코(l_n)의 길이비 ; l_n/l
- 2) 교량구조(q)와 압출 추진코(q_2, q_1)의 단위 길이당 중량비 ; $q_2/q, q_1/q$
- 3) 교량구조(I)와 압출 추진코(I_2, I_1)의 강성비 ; $I_2/I, I_1/I$

여기서, q_2, I_2 는 각각 압출 추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출 추진코의 단위 중량과 강성을 q_1, I_1 은 압출 추진코 끝단에서의 단위 중량과 강성을 의미한다.

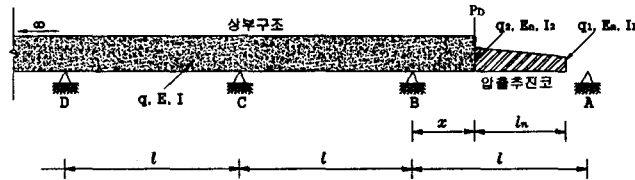


그림 1 압출 1단계

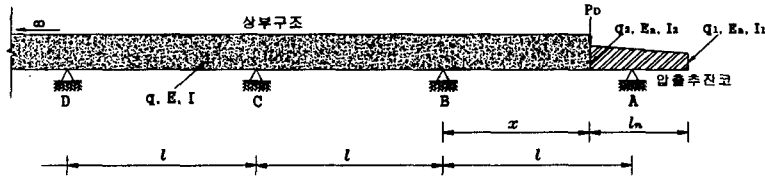


그림 2. 압출 2단계

해석 모델은 2단계로 나누어, 그림 1에서의 같이 압출 추진코가 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태를 1단계 압출로 정의하고, 그림 2에서의 같이 지점 A에 도달한 후부터 콘크리트 상부가 지점 A에 도달 할 때 까지를 2단계 압출과정으로 정의하였다. 그리고 P_D 는 상부구조와 압출 추진코 연결부의 다이아플램 집중하중을 나타낸다. 또한, 본 연구에서 적용한 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 상부는 일정한 강성 및 중량을 가진다.
- 2) 압출 추진코의 높이는 단면의 길이방향으로 선형적으로 변화하고, 단면의 폭 방향으로는 일정하다.
- 3) 그림 2의 D점 이후의 지점은 경간길이가 l 인 무한개의 연속보로 되어 있다고 가정한다.
- 4) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 긴장력은 도심축을 지난다고 가정한다.
- 5) 압출 추진코는 I형 플레이트 거더로 제작되었다고 가정한다.

2.2 해석 식

ILM 교량의 시공중 설계 단면력은 첫 번째 지점과 두번째 지점 즉, B점과 C점에서의 부(-)모멘트, 그리

고 A-B경간과 B-C 경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정될 수 있다. 이 중 B점에서의 부모멘트가 일반적으로 시공중 설계단면력으로 결정된다(Rosignoli, 1998).

지점 B에서부터 압출 추진코와 상부의 교점부분이 거리 x 만큼 압출되었을 때, 압출 추진코의 끝은 지점 A에 도달하기 직전으로 가정하면 그림 1로부터 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 중에, 즉, 지점 A에 도달하기 직전까지에서 설계 단면력으로 결정되는 지점 B의 휨모멘트 M_B^1 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

그림 2의 2단계 압출과정에서는 α 의 범위를 $1 - l_n/l \leq \alpha \leq 1$ 로 나타낼 수 있다. 이 단계에서의 지점 B의 모멘트 M_B^2 는 압출 추진코 단면의 길이방향 선형변화를 고려하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{M_B}{ql^2} = \frac{2}{3} \frac{A - (B + C + D + E)}{F} - \frac{3}{4} \quad (2)$$

여기서 A, B, C, D, E 그리고 F는 해석식의 유도과정에서 얻어진 상수값으로써 매개변수에 따라 결정된다. (안태욱, 2004).

식 (1)과 (2)의 정밀도를 판단하기 위해 지점 B의 휨 모멘트 M_B 의 해석식의 결과와 MIDAS 프로그램의 결과를 그림 3과 같이 나타내었다. 그 결과 도출된 해석식은 매우 정확한 것으로 판단되었으며, 설계시에 실용적으로 유용할 것으로 기대된다.

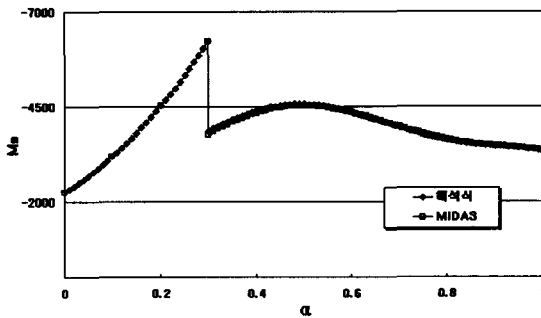


그림 3. 해석식과 MIDAS 결과와의 비교

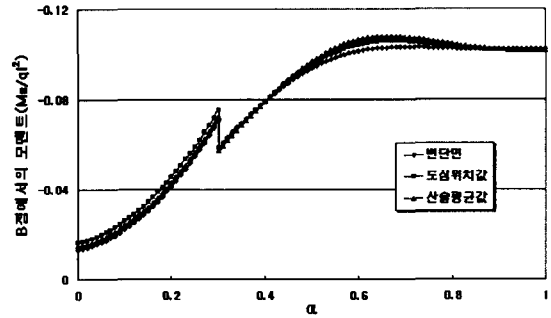


그림 4. 각 단면에서 단면력 변화

그림 4는 압출 추진코의 단면이 변단면일 경우 지점 B의 휨 모멘트를 나타내는 해석식 (1), (2)와 등단면의 해석식(Rosignoli, 1998)을 비교한 결과이다. 이때 등단면의 단면 특성치는 표 1과 같이 압출 추진코의 끝단에서부터 도심위치의 값과, 산술 평균값으로 치환된 값을 적용하였다. 예를들어 강성비의 도심값을 산정할 때 I형 플레이트 거더의 강성변화가 2차 포물선이므로 도심위치의 값은 압출 추진코 끝단에서 $\frac{3}{4} l_n$ 위치에서 산정하였다. 즉 표 1에서 q_n , l_n 값은 변단면 압출 추진코에 대한 중량과 휨강성을 등단면으로 환산한 값을

의미한다.

표 1. 단면특성

구분	길이비	중량비	강성비
변단면	0.7	$q_2/q=0.08, q_1/q=0.04$	$I_2/I=0.03, I_1/I=0.004$
도심위치값	0.7	$q_n/q=0.067$	$I_n/I=0.0195$
산술평균값	0.7	$q_n/q=0.06$	$I_n/I=0.017$

그림 4에서 알 수 있듯이 2단계 압출시 M_B 최대값은 $\alpha=0.67$ 에서 나타났으며, 실제 변단면의 값과 비교하여 도심위치에서의 값은 3%, 평균값으로 치환된 값은 5%정도 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 실제 변단면 특성치를 도심위치의 값과 산술평균값으로 치환하게 되면, 강성비가 과소평가되어 나타나는 현상이다. 그러므로 변단면을 등단면으로 치환하여 해석할 경우 2단계 압출시 지점 B에 발생하는 부 모멘트는 변단면을 고려하였을 때 보다 크게 나타나므로 상부단면이 비경제적으로 설계될 것이다. 특히 최적 강성비를 산정하는 과정에서는 단면력 궤적이 중요한 역할을 하는바 설계값은 더욱 비경제적인 과다단면으로 선택될 수 있다. 이에따라 변단면 압출 추진코를 등단면으로 치환하여 해석하는 것은 부적절한 것으로 판단된다.

3. 압출진행에 따른 매개변수 별 상호작용

3.1 압출 추진코의 길이가 긴 경우

압출 추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우로 $l_n/l=0.8, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$ 일 때를 분석하여 압출이 진행됨에 따라 휨 강성비의 변화에 대한 지점 B의 휨모멘트를 식 (1)과 (2)를 이용하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 압출 추진코가 지점 A에 도달하게 되면($\alpha=0.2$), 탄성치점의 회복으로 인한 정 모멘트의 영향으로 지점 B의 휨 모멘트 M_B (부 모멘트)는 감소하고, 그 이후의 M_B 는 강성비에 종속됨을 알 수 있다. 그림 5에서 보는바와 같이 캔틸레버 상태인 $\alpha \leq 0.2$ 일때는 강성비와 무관하고, $\alpha \geq 0.9$ 일때는 강성비의 영향이 지극히 미소함을 알 수 있다. 그러나, 강성비가 다르더라도, $\alpha=1$ (압출이 끝나는 단계)일 때 지점 B의 휨 모멘트(M_B^{EOL})는 식 (3)에 수렴한다.

$$M_B^{EOL} = (0.4478 \cdot q_2 + 0.8951 \cdot q_1) l_n^2 - 0.1067 q l^2 \quad (3)$$

$0.2 < \alpha < 0.9$ 에서는 압출 추진코의 강성보다 콘크리트 상부의 강성이 일반적으로 더 크므로 강성비가 적을수록 상대적으로 강성이 큰 B지점에 위치한 M_B 가 더 크게 나타난다. 한편, 강성비가 너무 작으면 콘크리트 상부의 설계 부 모멘트가 증가하게 된다. 결과적으로 $l_n/l=0.8$ 인 경우와 같이 압출 추진코의 길이가 경간 길이에 비하여 상대적으로 긴 경우는, 캔틸레버 상태일 때의 모멘트가 압출이 끝난 후의 모멘트 즉, M_B^{EOL} 보다 매우 낮으므로, 압출 중 단면력의 분포가 크게되어 상부단면이 비 경제적으로 설계될 수 있다. 또한, 식 (3)과 같이 M_B^{EOL} 은 강성비에 관계없이 일정한 값을 가지므로 2단계 압출시 단면력이 M_B^{EOL} 을 초과하지 않는 최소 강성비를 산정할 수 있다. 시산의 방법으로 2단계 압출시 단면력이 M_B^{EOL} 을 초과하지 않는 최소 강

성비를 산정한 결과, $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 로 나타났다.

3.2 압출 추진코의 길이가 짧은 경우

상대적으로 압출 추진코의 길이비가 짧은 경우로, 압출 추진코와 콘크리트 상부의 중량비가 $a_2/q=0.15$, $a_1/q=0.05$ 이고, 길이비가 $l_n/l=0.5$ 인 경우의 지점 B에서의 모멘트를 식 (1)과 (2)를 이용하여 나타낸 지점 B에서의 모멘트 변화는 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 압출 추진코가 짧은 경우는 캔틸레버 상태의 최대 부 모멘트가 압출이 끝난 상태의 부 모멘트보다 크게 나타난다. 즉, 지점 A에 도달 할 때까지의 상태를 보면 압출진행 초기($\alpha=0$)에는 낮은 중량의 압출 추진코는 유리하게 작용할 것이나, 점점 중량이 큰 콘크리트의 길이가 늘어남에 따라 캔틸레버 상태의 부 모멘트가 증가하게 되어, 더욱 더 불리한 상태로 작용할 것이다. 지점 A에 도달한 후부터는 강성비의 영향이 매우 뚜렷하게 나타나고 있다. 압출 추진코의 길이가 긴 경우인 $l_n/l=0.8$ 과 비교하여 볼 때, M_B^1 값이 너무 크게 나타나고 있다. 이를 저항하기 위해서는 상부의 단면이 크게 설계되어야 하고 압출 추진코를 설치하는 의미가 없어진다. 압출 추진코의 길이가 너무 짧아서도 적당하지가 않음을 알 수 있다. 이 경우의 최소 강성비도 시산의 과정을 통해 대략 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 정도임을 알 수 있었다.

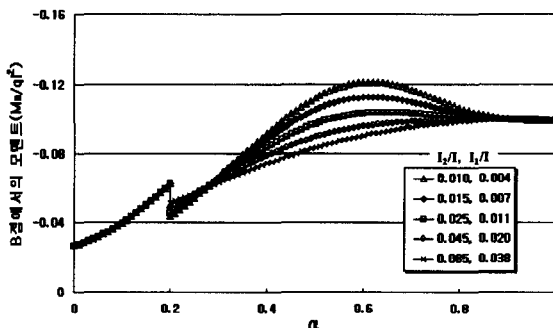


그림 5. 휨 강성비에 따른 B점의 모멘트 ($l_n/l=0.8$, $a_2/q=0.15$, $a_1/q=0.05$ 인 경우)

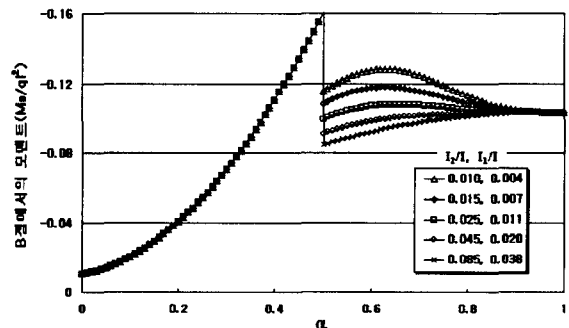


그림 6. 휨 강성비에 따른 B점의 모멘트 ($l_n/l=0.5$, $a_2/q=0.15$, $a_1/q=0.05$ 인 경우)

3.3 최적 중량비 및 최적 길이비

그림 5와 6에서 나타난 것과 같이 상부구조를 가장 경제적으로 설계하기 위해서는 캔틸레버 상태의 M_B^1 모멘트와 압출이 완료된 후의 휨 모멘트인 M_B^{EOL} 의 차이를 가능한 줄일 수 있는 적절한 길이의 압출 추진코를 사용하여야 한다. 이를 위하여 강성비와 중량비를 변화시키면서 최적의 압출 추진코의 길이를 시행착오의 방법으로 결정하였다. 강성비 변화는 I_2/I 를 0.085에서 0.010범위까지 0.005씩 변화시켰고, I_1/I 의 값 또한 I_2/I 의 값을 기준으로 0.005씩 감소시키면서 분석하였다. 중량비 변화는 a_2/q 을 0.17에서 0.03범위 까지 0.01씩 변화시켰고, 이때 a_1/q 는 a_2/q 를 기준으로 0.001씩 변화시켜 분석하였다. 그리고 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비는 국내 대부분의 현장에서 적용된 6.8359로 가정하였다.

그 결과의 예로써 중량비 변화에 따라 길이비가 최적화 되었을 경우 강성비 변화에 따른 지점 B의 휨모멘트 변화를 나타내고 있는 그림 7과 8에서와 같이 $a_2/q=0.08$, $a_1/q=0.05$ 일 경우 최적 길이비는 0.61로

나타났고 $a_2/q=0.15$, $a_1/q=0.05$ 일 경우 최적 길이비는 0.65로 나타났다.

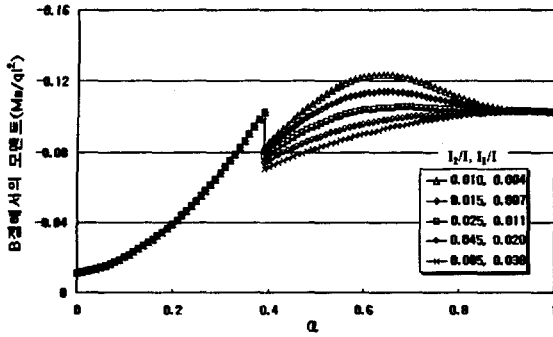


그림 7. 휨 강성비에 따른 B점의 모멘트
($l_n/l=0.61$, $a_2/q=0.08$, $a_1/q=0.05$ 인 경우)

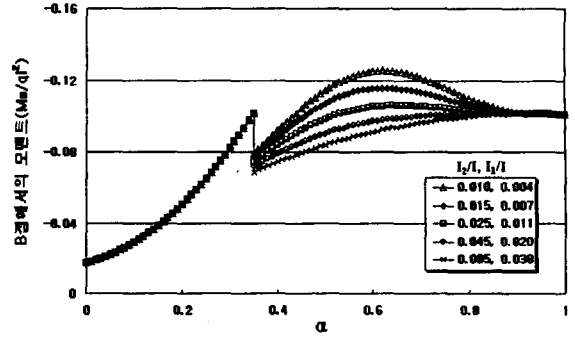


그림 8. 휨 강성비에 따른 B점의 모멘트
($l_n/l=0.65$, $a_2/q=0.15$, $a_1/q=0.05$ 인 경우)

그림 7과 8에서 알 수 있듯이, 중량비 변화에 따라 길이비를 변화시켜 1단계 압출시 캔틸레버 상태의 휨 모멘트 M_B^1 과 M_B^{EOL} 의 변화폭이 최소가 되도록 조절하면, 즉 중량비에 따른 최적 길이비가 결정되면 2단계 압출시 M_B^{EOL} 을 초과하지 않게 하는 강성비는 중량비 변화에 관계없이 모두 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 로 나타났다. 이는 강성비가 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 이상으로만 설계된다면 중량비와 길이비의 조절만으로 캔틸레버 상태와 압출 완료시 부모멘트의 변화폭이 최소가 되도록 하는 최적의 매개변수를 도출할 수 있음을 의미한다.

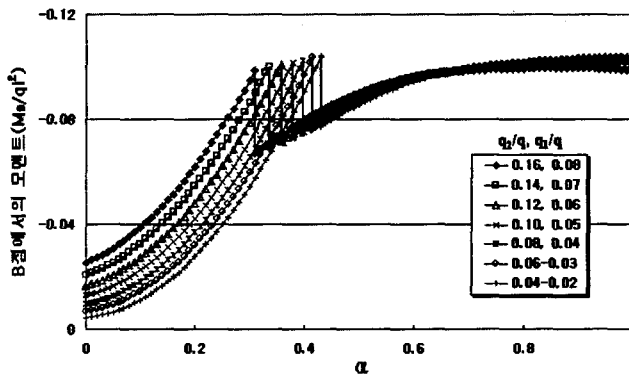


그림 9. 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 2. 길이비 변화에 따른 최적중량비 변화

l_n/l	a_2/q	a_1/q
0.691	0.16	0.08
0.665	0.14	0.07
0.642	0.12	0.06
0.622	0.10	0.05
0.603	0.08	0.04
0.585	0.06	0.03
0.569	0.04	0.02

그림 7, 8의 그래프에서 중량비 변화에 따라 최적 길이비는 변화함을 알 수 있었다. 그림 9와 표 2는 대표

적으로 $q_2/q_1=0.5$ 인 경우 중량비 변화에 따른 최적의 압출 추진코 길이비를 결정하여 나타내었다. 이때 강성비는 최소강성비로 고정하였다.

3.4. 상호작용에 대한 설계식

그림 9와 같은 방법으로 q_2/q 와 q_1/q 에 따른 최적 길이비를 산정하여 회귀분석을 통해 상호작용에 대한 설계식을 표 3과 같이 제안하였다. 표 3에 제안된 설계식으로 실무에서 강성비에 관계없이 중량비에 따른 최적길이를 간단하게 산정할 수 있을 것이다. 그리고 제안된 설계식에 이용된 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E 은 6.8359이고 강성비는 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 이상의 경우로 제한된다.

한편 강성비에 의한 단면력 변화는 I_1/I 의 변화에 의한 2단계 압출시 단면력 변화보다 I_2/I 에 의한 변화에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 예를들어 제안된 설계식에 의해 중량비와 길이비가 최적화된 상태에서 $I_2/I=0.050$, $I_1/I=0.005$ 를 적용하여도 최적의 단면력 궤적을 얻을 수 있다. 또한 탄성계수비는 강성비와 같이 2단계 압출시 단면력 궤적에만 영향을 미치는 것으로 나타났고, 탄성계수비가 6.8359 이상으로 설계되면 압출시 단면력이 M_B^{EOL} 이하로 제한되어 최적의 단면력 궤적을 나타내지만, 탄성계수비가 6.8359 미만으로 설계된다면 해석식 (1), (2)의 분석을 통해 강성비를 증가시켜 2단계 압출시의 단면력 궤적을 조절하여야 한다.

표 3. 중량비 변화에 따른 설계식

q_2/q	설 계 식	R^2 (결정계수)
0.07	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 7.059\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.633\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.634\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.571$	0.9996
0.08	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 1.238\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.347\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.631\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.575$	0.9997
0.09	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 5.949\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.952\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.653\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.58$	0.9998
0.10	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 8.555\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.675\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.683\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.585$	0.9999
0.12	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 10.256\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.649\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.718\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.595$	0.9999
0.14	$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 15.595\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.171\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.774\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.605$	0.9999

4. 결 론

- 1) 길이비, 중량비 및 강성비를 매개변수로 한 ILM 교량의 변단면 압출 추진코와 상부구조의 거동에 관하여 분석하였다.
- 2) 강성비와 탄성계수비는 단지 2단계 압출시 단면력 궤적에만 영향을 미치는 것으로 나타났다. 탄성계수비

를 국내의 현장에서 적용되고 있는 값인 6.8359로 가정하여 해석한 결과 최적의 단면력 궤적을 나타내는 최소 강성비는 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 로 분석되었다.

3) 변단면 압출 추진코와 상부구조의 거동에 따른 설계식을 제안하였다. 제안된 설계식에 의해 중량비 변화에 따른 최적 길이비를 산정할 수 있다. 이때 강성비는 중량비에 따른 최적 길이비를 구하는 과정에 변수로 작용하지 않는다.

참고문헌

1. Zellner, W. and Svensson, H., "Incremental Launching of Structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 2, 1983, pp. 520-537.
2. Rosignoli, M., *Launched Bridge*, ASCE PRESS, 1988.
3. Rosignoli, M., "Nose-Deck Interaction in Launched Prestressed Concrete Bridges", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 1, 1998, pp. 21-27.
4. Rosignoli, M., "Reduced-Transfer-Matrix Method for Analysis of Launched Bridges", *ACI Structural Journal*, ASCE, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 603-608.
5. 안태욱, 양성운, 이환우, "ILM교량의 압출 추진코와 교량 상부구조의 상호작용", 대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집, pp. 709-714.
6. 안태욱, 변단면 압출 추진코와의 상호작용을 고려한 ILM 상부구조의 거동, 부경대학교 대학원, 석사학위 논문, 2004.