

변단면 압출추진코와의 상호작용을 고려한 ILM교량의 사례분석 Case Study of ILM Bridge Considering Nose-Deck Interaction Behavior

안 태 욱* 김 광 양** 이 환 우***
Ahn, Tae-Wook Kim, Gwang-Yang Lee, Hwan-Woo

ABSTRACT

The structural behavior of superstructure by ILM is strongly dependent on the process of launching nose according to the construction process. The ratios of length, weight, and flexural stiffness of launching nose to those of superstructure are taken as the analysis parameters in this study. The interaction behaviors are analyzed according to the variation of parameters. Design formulas to pursue the optimum values for length, weight, and stiffness of launching nose are suggested through the parametric study. As a result, the minimum stiffness ratio is analyzed as $I_2/I = 0.045$ and $I_1/I = 0.02$ for the optimum track of the sectional force while the elastic modulus ratio is 6.8359. Additionally, the design results of real projects are analyzed by the developed formulas to verify that they are designed well in structurally optimal point of view.

1. 서 론

ILM(Incremental Launching Method) 교량의 경우 압출 중에 발생하는 일시적 응력을 흡수하기 위해 일반적으로 압출추진코가 이용된다. 압출 중에 발생하는 ILM 교량의 상부단면력은 압출 추진코의 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.

본 연구에서는 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용을 분석하기 위해 유도된 해석식¹⁾을 이용하여 현재 국내 공용중인 ILM 교량의 설계수준을 검토하고, 상부구조의 최적설계를 위한 방안을 제시하였다.

2. 상호작용의 해석 모델

2.1 매개변수 및 기본가정

-
- * (주)하경 엔지니어링 구조부 사원
 - ** 부경대학교 건설공학부 토목공학과 박사수료
 - *** 정희원 · 부경대학교 건설공학부 교수

압출 중 상부단면의 부재력 변화에 영향을 줄 수 있는 압출추진코와 교량 상부단면의 기하학적, 역학적인 특성을 고려하여 아래의 4가지 매개변수를 선정한다.

- 1) 교량구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 ; l_n/l
- 2) 교량구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위 길이당 중량비 ; $q_1/q, q_2/q$
- 3) 교량구조(I)와 압출추진코(I_1, I_2)의 강성비 ; $I_1/I, I_2/I$
- 4) 교량구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 ; E_n/E

여기서, q_1, I_1 은 압출추진코 끝단에서의 단위 중량과 단면2차모멘트를 의미하고, q_2, I_2 는 각각 압출추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출추진코의 단위 중량과 단면2차모멘트를 의미한다.

상부단면과 압출추진코로 이루어진 구조체가 압출이 진행되는 동안 가질 수 있는 대표적인 구조계는 그림 1과 같은 것이다. 압출추진코가 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태(그림 1(a) 참조)를 1 단계 압출이라 명칭하고, 압출추진코가 지점 A에 도달한 후부터 콘크리트 상부가 지점 A에 도달 할 때까지(그림 1(b) 참조)를 2 단계 압출이라 명칭한다. 그림 1(a)와 그림 1(b)에서 정의된 P_D 는 교량 상부단면과 압출추진코와의 연결부 다이아플램을 집중하중으로 나타낸 것이다.

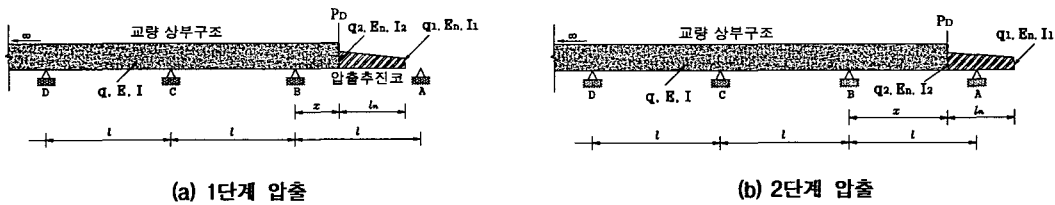


그림 1. 압출시의 Nose-Deck 구조계

한편, 본 연구에서는 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용의 해석모델에 다음과 같은 가정들을 적용한다.

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

2.2 해석 식

ILM 교량의 시공중 설계 단면력은 첫 번째 지점과 두 번째 지점 즉, B점과 C점에서의 부(-)모멘트, 그리고 A-B경간과 B-C 경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정될 수 있다. 이 중 B점에서의 부모멘트가 일반적으로 시공 중 설계단면력으로 결정된다^{2), 3)}.

지점 B에서부터 압출추진코와 상부의 교점부분이 거리 x 만큼 압출 하였을 때, 압출추진코의 끝은 지점 A에 도달하기 직전으로 가정하면 그림 1로 부터 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 있다¹⁾.

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

그림 2와 같이 2단계 압출과정에서 α 의 범위는 $1 - l_n/l \leq \alpha \leq 1$ 로 나타낼 수 있다. 이 단계에서의 지점 B의 모멘트 M_B^2 는 식 (2)와 같은 식으로 나타낼 수 있다¹⁾.

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

여기서, ㉑~㉗은 해석식의 유도과정에서 얻어진 상수 값으로써 단면형상과 각 매개변수에 따라 결정된다¹⁾. 그리고, 압출이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식(3)의 M_B^E 에 수렴한다.

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

2.3 해석식의 정확성과 단면형상의 영향

변단면 압출추진코를 사용하는 ILM교량에 대하여 지점 B의 휨모멘트를 산정할 수 있는 해석식인 식 (1)과 (2)의 정확도를 판단하기 위해 지점 B의 휨 모멘트 M_B 의 해석식의 결과와 MIDAS 프로그램의 결과를 그림 2와 같이 나타내었다. 그 결과 도출된 해석식은 매우 정확한 것으로 판단되었으며, 설계시에 실용적으로 유용할 것으로 기대된다.

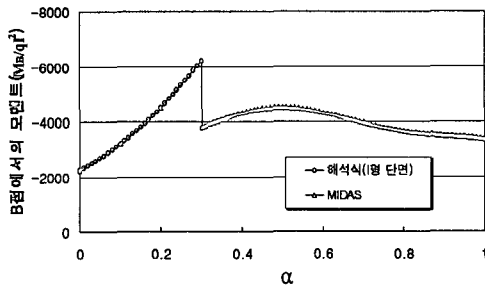


그림 2 해석식(I형단면)과 MIDAS 결과 비교

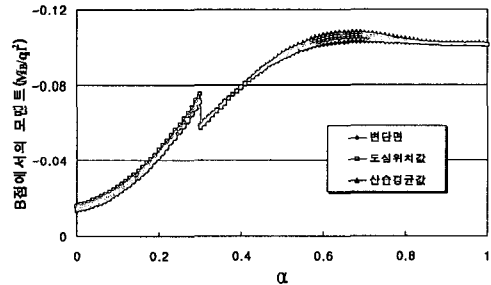


그림 3 단면형상에 따른 단면력 변화

그림 3은 압출추진코의 단면이 변단면일 경우에 유도된 해석식 (1), (2)와 등단면의 해석식³⁾의 결과를 비교한 그림이다. 그림 3의 해석 예제의 경우, 변단면의 압출추진코를 등단면으로 환산하여 해석한다면 상부단면에 발생하는 단면력이 과대평가 되어 교량 상부단면을 비경제적으로 설계하는 원인이 되므로, 본 연구에서 제시된 변단면 압출추진코를 고려할 수 있는 해석식을 이용하여 상부구조의 단면력 변화를 정확히 예측한 후 설계에 반영하는 것이 반드시 필요할 것이다.

3. 기수 해석

3.1 압출추진코의 길이가 긴 경우

압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우의 해석 예제로서 압출추진코와 콘크리트 상부의 길이비가 $l_n/l=0.8$ 이고, 중량비가 각각 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 인 경우를 가정한다. 단, 압출추진코의 형상과 탄성계수비는 대부분 ILM 교량에서 채택하고 있는 I형 단면과 6.8359로 가정하였고, 다이아플램은 고려하지 않았다.

상부구조 단면력은 캔틸레버상태인 $\alpha < 0.2$ 일 때는 중량비에 의존하고 2단계 압출과정에서 M_B 는 강성비에 종속되는 것을 알 수 있다. 그러나, $\alpha > 0.9$ 일 때는 강성비의 영향이 지극히 미소하고, 압출이 종료($\alpha=1$) 될 때는 강성비에 관계없이 식(3)의 M_B^E 에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 2단계 압출과정에서의 상부 단면력 M_B^S 가 M_B^E 를 초과하지 않도록 하는 최소강성비를 시산의 방법으로 산정한 결과, $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 으로 나타났다. 한편, 그림 4에서 알 수 있듯이 압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우는, 캔틸레버 상태일 때의 모멘트가 M_B^E 보다 매우 낮아 적당하지 않음을 알 수 있다.

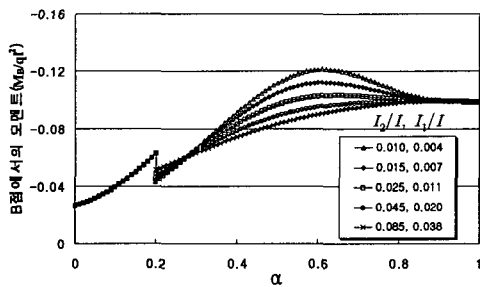


그림 4 $l_n/l=0.8, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

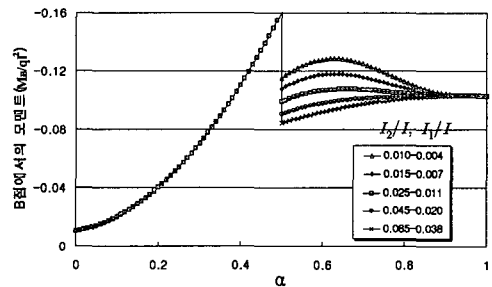


그림 5 $l_n/l=0.5, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

3.2 압출추진코의 길이가 짧은 경우

상대적으로 압출추진코의 길이비가 짧은 경우의 해석 예제로서, I형 단면의 압출추진코와 콘크리트 상부의 길이비가 $l_n/l=0.5$, 중량비가 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 이고, 탄성계수비 $E_n/E=6.8359$ 인 경우를 가정한다. 이 예제에서도 다이아플램은 고려하지 않았다.

그림 5에서 보는바와 같이 압출추진코가 짧은 경우는 특히, 캔틸레버 상태($\alpha \leq 0.5$)에서 발생하는 최대 휨 모멘트가 2단계 압출이 진행되는 동안($0.5 < \alpha \leq 1.0$)과 압출이 끝난 상태($\alpha=1.0$)의 휨 모멘트(M_B^E)보다 크게 되어 적당하지 않음을 알 수 있다. 한편, 이 해석 예제에서도 최소 강성비는 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 정도인 것을 알 수 있었다.

3.3 최적길이비 및 최소강성비

상부단면을 가장 경제적으로 설계하기 위해서는 캔틸레버 상태의 휨모멘트인 식(1)의 M_B^S 의 최대값과 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.

그림 6과 그림 7에서는 본 연구에서 산정한 각 중량비 경우별 최적길이들의 일부 예를 보여주고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.05$ 의 경우에는 $l_n/l=0.61$ 이, 그림 7과 같이 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 의 경우에는 $l_n/l=0.65$ 가 얻어졌다.

그림 6과 그림 7의 경우 모두에서 2단계 압출시 M_B^E 를 초과하지 않게 하는 최소강성비는 중량비 변화에 관계없이 모두 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 로 나타났다.

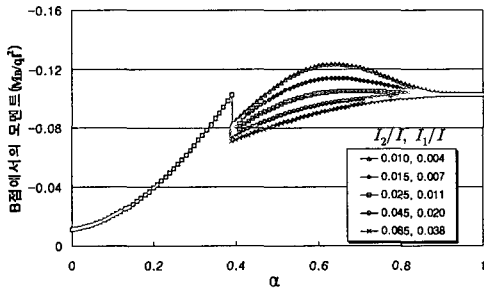


그림 6 $q_2/q=0.08, q_1/q=0.05, l_n/l=0.61$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

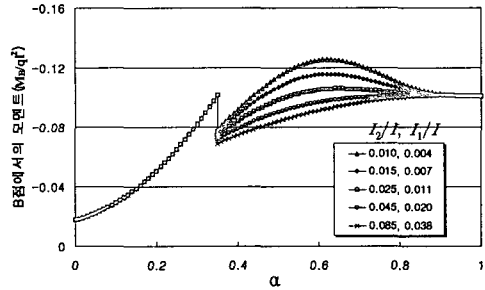


그림 7 $q_2/q=0.15, q_1/q=0.05, l_n/l=0.65$ 인 경우 압출하는 동안 강성비 따른 B점의 모멘트

3.4. 상호작용에 대한 설계식

그림 6과 7의 방법으로 산정된 각 중량비에 대한 최적길이비의 결과를 회귀분석하여 식(4)~(6)과 같이 설계식을 도입하였다.

$$q_2/q=0.07\text{일 경우: } \left(\frac{l_n}{l}\right) = 7.059\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.633\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.634\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.571 \quad (4)$$

$$q_2/q=0.08\text{일 경우: } \left(\frac{l_n}{l}\right) = 1.238\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.347\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.631\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.575 \quad (5)$$

$$q_2/q=0.09\text{일 경우: } \left(\frac{l_n}{l}\right) = 5.949\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.952\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.653\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.58 \quad (6)$$

표 2 조사된 교량들의 제원(지간장=50m)

교량명	M_B/qf^2 (2단계 최대값 기준)	l_n/l	상부구조 단면적(m^2)	중량비		강성비		$P_D(\text{tonf})$
				q_2/q	q_1/q	I_2/I	I_1/I	
A,B교량	-0.1086	0.7	7.621	0.082	0.043	0.0266	0.0040	40.615
C,D교량	-0.1242	0.7	7.785	0.080	0.042	0.0252	0.0038	71.625
E교량	-0.1269	0.7	8.133	0.074	0.026	0.0235	0.0025	71.625
F,G,H,I교량	-0.1050	0.72	8.462	0.085	0.030	0.0303	0.0017	81.608

4. 사레교량의 최적설계

4.1 사레교량

우리나라의 고속도로 교량 중에서 ILM 공법으로 건설된 표 2의 9개의 교량들을 대상으로 본 연구에서 제시한 설계식을 통하여 설계의 적정성에 대하여 분석하고자 한다.

조사된 교량들의 압출추진코의 단면 형식은 모두 I형 플레이트 거더로 제작되었고, 교량 상부구조와 압출추진코의 탄성계수비 E_n/E 은 6.8359, 지간장은 50m로 동일하였다. 그리고 압출추진코와 교량 상부구조 연결

부 집중하중 F_D 는 교량 상부구조의 단면적에 따라 차이가 있었다.

4.2 중량비와 길이비에 대한 검토

표 2에서 보는바와 같이 조사된 교량들의 중량비 q_2/q 는 대략 0.07에서부터 0.09에 해당된다. 그러므로 q_2/q 이 각각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 최적 길이비를 산정할 수 있는 식 (6), 식(7) 그리고 식(8)과 표 2의 설계자료를 그림 8에 나타내었다.

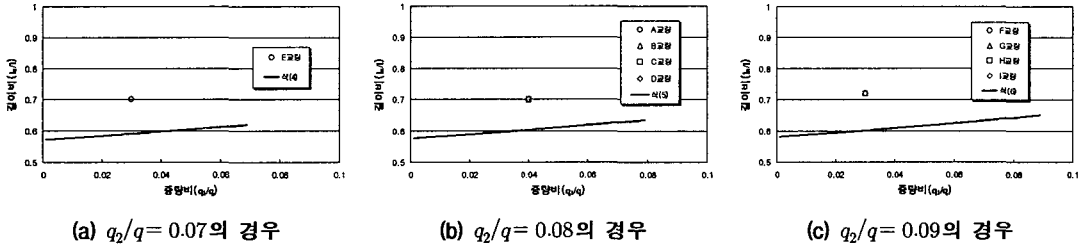


그림 8 조사교량과 설계식과의 비교

그림 8로부터 사례 교량들의 경우, 압출추진코와 상부구조의 중량비에 비하여 비교적 긴 길이비로 설계되어 있음을 알 수 있다. 이러한 경우는 강성비의 변화에 따라 단면력의 궤적변화가 크고, 압출추진코가 맞은 편 교각을 통과한 후에 캔틸레버 상태보다 큰 단면력에 의해 설계력이 결정될 수 있는 것을 의미한다. 따라서, 비경제적인 설계가 될 수 있는 것을 의미하기도 한다. 실제로, 조사 교량들의 구조계산서에 의하면, 조사 교량들은 압출추진코가 맞은 편 교각을 통과한 이후에 연속보 상태에서 최대 모멘트가 발생하였고, 이 결과가 설계 단면력으로 적용되었다.

4.3 최적설계

그림 9~그림 12에서, 표 2에 나타난 해당교량의 설계자료를 식(1), (2)에 대입하여 얻어진 단면력 궤적을 그림 9~그림 12에 굵은 실선으로 나타내었다. 또한 표 2의 조사된 교량의 각 설계 중량비 q_2/q , q_1/q 를 설계식 (4), (5) 그리고 (6)에 대입하여 산정한 최적의 l_n/l 비와 본 연구에서 얻은 최소강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 를 식(1)와 (2)에 대입하여 얻어진 단면력 M_B/qL^2 의 최적경로를 그림 9~그림 12에 굵은 점선으로 나타내었다. 이때는 다이어그램이 고려되지 않았으므로, 압출추진코를 최적으로 설계한 것이라 할 수 없다.

다음으로 강성비를 본 연구에서 제안한 최소강성비인 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 로 고정하고 중량비는 실제 중량비인 표 2의 q_2/q , q_1/q 를 적용한 상태에서 해석식 (1)과 (2)를 이용하여 시행착오 과정을 통하여 최적의 길이비를 찾았다. 본 연구에서는 굵은 점선의 결과를 이용하여 굵은 실선과 굵은 점선 사이의 범위에서만 찾았다. 결과적으로 최적의 단면력 궤적은 그림 9~그림 12에 가는 점선으로 나타내었다. 이때는 다이어그램 하중이 고려하였으므로, 최적화된 단면력 궤적을 갖는 압출추진코의 설계결과라 할 수 있다. 그림 9~그림 12에서 최대 단면력을 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 현재 공용중인 교량들이 최적화되면(가는 점선), 교량 상부구조에 발생하는 단면력을 8%~12%정도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

결론적으로 사례 교량들의 설계자료를 검토한 결과 압출추진코 길이를 현재보다 짧게 조정하고, 압출추진코의 강성을 현재보다 크게 하면 교량 상부구조에 발생하는 최대 단면력을 감소시킬 수 있다. 그리고, 압출 중에 상부단면의 응력상태를 일정하게 유지할 수 있게 할 수 있을 것이다. 이를 통하여 교량 상부단면의 설계 최적화를 이룰 수 있을 것이다.

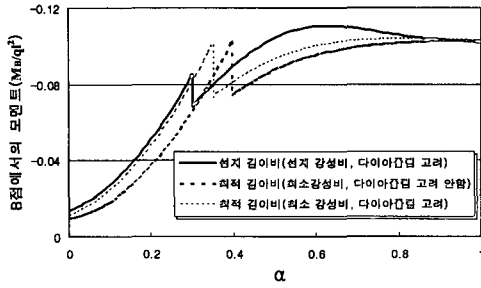


그림 9 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적 (A,B교량)

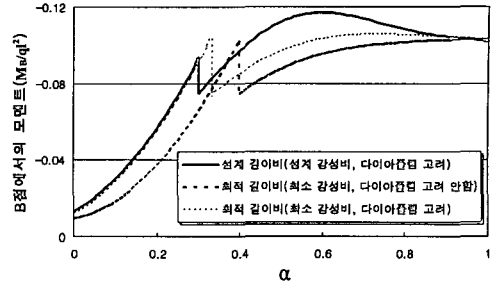


그림 10 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적 (C,D교량)

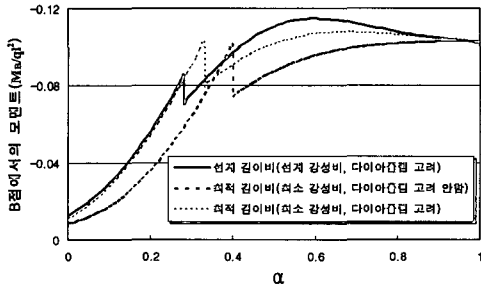


그림 11 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적 (E교량)

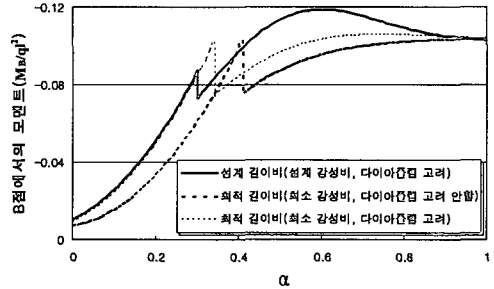


그림 12 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적 (F,G,H,I교량)

표 3 최대모멘트와 길이비

구 분	A, B교량		C, D교량		E교량		F,G,H,I교량	
	M_B/q^2	l_n/l	M_B/q^2	l_n/l	M_B/q^2	l_n/l	M_B/q^2	l_n/l
설계 강성비, 설계 길이비, 다이아그램 고려 (굵은 실선)	-0.1107	0.70	-0.1170	0.70	-0.1187	0.70	-0.1149	0.70
최소 강성비, 최적 길이비, 다이아그램 고려 안함 (굵은 점선)	-0.0972	0.60	-0.0096	0.60	-0.0873	0.59	-0.0958	0.60
최소 강성비, 최적 길이비, 다이아그램 고려 (가는 점선)	-0.1015	0.65	-0.1035	0.67	-0.1033	0.66	-0.1068	0.67

4.4 강성비와 중량비에 대한 영향

그림 13은 A교량의 강성비 변화에 따른 단면력 변화추이를 분석한 그림이다. 이때, 실제 설계자료에서 얻은 길이비 $l_n/l=0.7$ 와 중량비 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.04$ 를 고정시키고 강성비를 변화시켰다. 그 결과, 현재 A교량의 휨 강성비인 $I_2/I=0.0266$, $I_1/I=0.004$ 를 제안된 최소강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 로 조정하면 M_B 의 최대크기를 약 6% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

또한, 중량비의 영향을 검토하기 위하여 실제 설계자료에서 얻은 길이비 $l_n/l=0.7$ 과 강성비 $I_2/I=0.0266$, $I_1/I=0.004$ 를 고정시킨 상태에서 중량비를 변화시켜 그림 14에 나타내었다.

그림 14에서 알 수 있듯이 A교량의 경우는 중량비가 $q_2/q=0.20$, $q_1/q=0.04$ 보다 큰 경우에 1단계 압출 과정에서 최대 단면력이 압출 완료후의 단면력(M_B^E)을 초과하였다. 따라서, 다른 설계조건을 고정시킨 상태에

서 A교량의 경우 중량비가 $q_2/q=0.20$, $q_1/q=0.04$ 이하의 범위에서 결정되어야만, 압출과정 중에 단면력이 2 단계 압출 완료 후의 크기를 넘지 않을 것이다. 한편 A교량의 설계 중량비는 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.04$ 이므로 중량비에 대해서는 타당한 설계가 이루어진 것으로 판단된다.

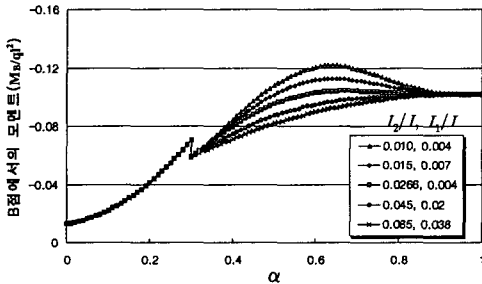


그림 13 조사교량의 강성비 변화에 따른 M_B 분포

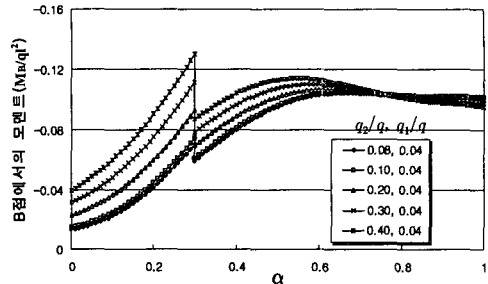


그림 14 조사교량의 중량비 변화에 따른 M_B 분포

5. 결론

- 1) 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용을 고려한 해석식을 개발하였다. 제안된 해석은 기존의 등단면으로 가정된 압출추진코에 대한 해석식(Rosignoli, 1998)보다 정확도가 개선되었다.
- 2) 압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우는 2단계 압출(연속보 상태) 과정 중에 최대 단면력이 발생된다. 이때의 단면력의 크기는 휨 강성비에 좌우된다. 짧은 경우는 1단계 압출(캔틸레버 상태) 종료시에 최대 단면력이 발생한다. 이때의 단면력의 크기는 중량비에 좌우된다.
- 3) 국내의 고속도로 상에 건설된 9개의 사레교량들은 비교적 긴 길이비로 설계된 것으로 분석되었다. 그리고 본 연구에서 제안한 최소 강성비 보다 작은 강성비로 설계되어 2단계 압출과정 중의 최대 단면력이 설계 단면력으로 결정된 것으로 분석되었다.
- 4) 현재 공용중인 ILM교량을 대상으로 본 연구에서 제안된 해석식과 설계식을 이용하여 상부단면을 최적화 한 결과 상부단면에 발생하는 단면력을 현재보다 8%~12%정도 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.
- 5) 본 연구에서 검토된 매개변수 해석과 설계식들은 콘크리트의 설계강도 $f_{ck} = 400\text{kgf/cm}^2$ 인 점을 고려하여 탄성계수비가 6.8359로 가정한 상태에서 수행되었다. 따라서, 콘크리트 재료기술의 발달에 맞추어 다양한 탄성계수비에 따른 매개변수 해석과 설계식들의 제시가 요구된다.

참고문헌

1. 안태욱 (2004) 변단면 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용, 석사학위논문, 부경대학교.
2. Rosignoli, M. (1998a) *Launched Bridge*, ASCE PRESS.
3. Rosignoli, M. (1998b) "Nose-Deck Interaction in Launched Prestressed Concrete Bridges", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 1, pp. 21-27.
4. 문영철 (2002) ILM 공법에 의해 건설되는 PS콘크리트 교량의 거동, 석사학위논문, 부경대학교.