

압출추진코와 ILM 교량 상부구조 상호작용 해석식의 단순화

Simplified Analysis Formula for the Interaction of the Launching Nose and the Superstructure of ILM Bridge

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

요 지

압출공법(Incremental launching method)은 교대 배후에 거더 제작장소를 설치하고, 콘크리트를 이어쳐서 교량거더를 제작하고, 이것을 잭(jack)으로 밀어내는 가설방법이다. 이 공법에 의해 시공되는 교량의 상부단면은 시공 중에 지간의 중앙부와 지점부에 일시적이거나 모두 위치하게 된다. 따라서 단면들은 자중에 의해 발생하는 최대 정모멘트와 최대 부모멘트, 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 되는 구조적 특성을 가지고 있다. 한편 거더의 캔틸레버 작용을 감소시키기 위하여 거더의 선단에 압출추진코(launching nose)를 부착시킨다. 이때 상부단면에 발생하는 일시적인 응력의 크기는 압출추진코의 단면특성에 따라 달라진다. 이 연구에서는 압출추진코와 상부단면의 상호작용에 관한 해석식의 정확성을 유지하고, 활용도를 높이기 위해서 압출추진코를 유사등단면(강성; 등단면, 중량; 변단면)으로 가정하여 단순화된 해석식을 제안하였고, 압출추진코의 단면이 등단면으로 가정한 기존 해석식의 정확성을 향상시키기 위해서 다이아그램의 중량을 집중하중으로 치환시켜 변형된 등단면 해석식을 제안하였다. 그리고 제안된 2개의 해석식의 정확성과 활용성을 판단하기 위해 실제 ILM 교량 설계자료들을 통해 전산구조해석 프로그램과, 기존 해석식들과 비교·분석하였다.

핵심용어 : ILM공법, 압출추진코, 단순해석, 유사등단면

Abstract

ILM(Incremental launching method) is a way of construction, installing a girder producing spot behind the abutment, making the bridge girder infilled with concrete continuously and launching with using by jack. The superstructure of the bridge constructed by this method is temporarily located on the center of the span and the supporting points under construction. Therefore, the sections are structurally undergone maximum positive moment, maximum negative moment, and maximum shear force arising from self weight. On the other hand, launching nose is attached to the front of the girder to decrease the cantilever effect. The magnitude of this temporary stress creating on the upper section is dependent upon the launching nose's characteristics. This study has proposed an analysis formula simplified on the assumption that the launching nose section is a quasi-equivalent section (rigid; equivalent section, weight; tapered section) in order to ensure the accuracy of the analysis formula and improve its usage with reference to the interaction between the launching nose and the upper section; and a prismatic analysis formula modified by displacing a diaphragm's weight by a concentrated load in order to improve the accuracy of the existing analysis formula that assumes the launching nose section as the equivalent section. To judge the accuracy and usage of two analysis formulas proposed, we have compared and analyzed computational structural analysis programs and existing analysis formulas based on actual ILM bridge data. As a result, all of two reveal the superior accuracy and also their usage has been improved by the simplification of analysis formulas.

Keywords : ILM bridge, launching nose, simplified analysis, quasi-equivalent section

1. 서 론

대표적인 가설공법 중 하나인 ILM(Incremental Launching

Method) 교량공법은 높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 널리 채택되고 있다(Renaud 등, 1999). ILM 교량의 콘크리트 상부구조는 압출이 진행되는

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

* (주)대한콘설타트 기사

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

동안 지간의 중앙부와 지점부를 모두 통과한다(Sasmal 등, 2004; 2006). 따라서, 상부단면들은 시공하중에 의한 최대 정·부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 된다. 즉, ILM 교량의 상부단면들은 교량 완성상태와 다른 시공중에만 발생하는 일시적인 응력들을 압출 중에 경험하게 된다(Rosignoli, 2000). 압출 중 상부단면에 발생하는 일시적인 응력들을 흡수하고, 효과적으로 제어하기 위해서 일반적으로 압출추진코(launching nose)가 이용되고 있다(Rosignoli, 1999). 압출추진코와 상부구조의 길이, 강성, 중량 및 탄성계수는 압출이 진행되는 동안 상부구조에 발생하는 응력의 변화에 영향을 미친다(김광수, 2008; Rosignoli, 1998). 즉, ILM 교량에서는 압출 중 상호작용에 따른 응력변화를 고려하여 압출추진코를 설계하는 것이 교량 상부구조 최적화 설계를 위해서 필수적으로 이루어져야 한다(이환우 등, 2010).

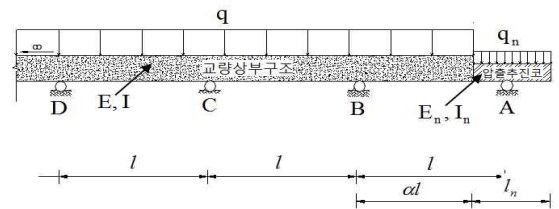
일반적으로 ILM교량은 전산구조해석 프로그램을 사용하여 설계단면력을 산정하고 있다. 이와 같이 전산구조해석 프로그램을 사용할 경우 일일이 압출단계를 가정해야 하고 압출단계를 세밀히 나누어야 하는 단점이 있다. 따라서 이런 단점을 보완하기 위해서 다음과 같은 선행 연구들이 연구되어졌다(안태욱 등, 2006). 먼저 Rosignoli(2002)는 압출추진코의 단면을 길이방향으로 동일하다고 가정한 상태에서 해석식을 제안하였으며, 최항용 등(2008)은 Rosignoli의 해석식을 이용하여 압출과정에서 발생하는 부모멘트 및 정모멘트를 최소화할 수 있는 압출추진코에 대한 최적조건을 도출하였다. 안태욱 등(2006)은 압출추진코의 단면이 길이방향으로 선형적으로 변화한다고 가정한 상태에서 해석식을 제안하였다. Rosignoli의 해석식은 압출추진코를 등단면으로 가정하여 단순하다는 장점이 있으나 다이아프램을 고려하지 않았다. 안태욱 등(2006)의 해석식은 다이아프램을 고려하였으며, 변단면으로 가정하였기 때문에 정확성은 높다. 그러나 해석식이 복잡하다는 단점이 있다.

이 연구에서는 정확성은 높으면서도 해석식을 단순화시키기 위해서 압출추진코의 단면형상을 2가지 방법으로 가정하여 해석식을 제안하였다. 먼저 압출추진코의 단면형상을 Rosignoli(2002)의 해석식에는 다이아프램 하중을 고려한 등단면(강성;등단면, 중량;등단면, 다이아프램;고려)으로, 안태욱 등(2006)의 해석식에서는 강성을 등단면으로 가정하여 유사등단면(강성;등단면, 중량;변단면, 다이아프램;고려)으로 가정하여 해석식을 제안하였다. 또한 제안된 해석식은 전산구조해석 프로그램과 기존 해석식과의 비교를 통해 정확성과 활용성을 판단하였다.

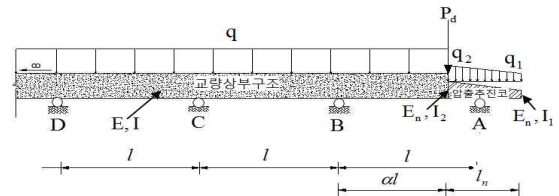
2. 단순화 해석식의 이론적 배경

2.1 매개변수 및 기본가정

상부구조와 압출추진코의 상호작용 해석식에 대한 기존 연구결과의 개념도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)과 같이 Rosignoli(2002)의 해석식은 압출추진코의 강성과 중량을 모두 등단면 즉, 압출추진코의 전체 길이에 동일하다고 가정하여 산출하였으며, 다이아프램의 하중을 고려하지 않았다. 그리고 그림 1(b)와 같이 안태욱 등(2006)의 해석식은 압출

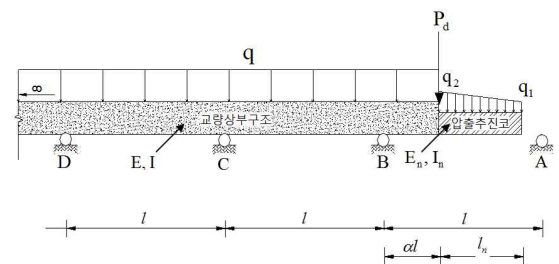


(a) Rosignoli의 해석식
(강성;등단면, 중량;등단면, 다이아프램; 미고려)

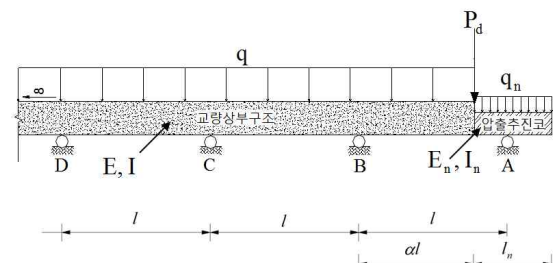


(b) 안태욱 등(2006)의 해석식
(강성;변단면, 중량;변단면, 다이아프램; 고려)

그림 1 기존 해석식 모델 개념도



(a) 유사등단면 해석식
(강성;등단면, 중량;변단면, 다이아프램; 고려)



(b) 등단면 해석식
(강성;등단면, 중량;등단면, 다이아프램; 고려)

그림 2 제안된 해석식 모델 개념도

추진코의 강성과 중량을 모두 변단면 즉, 압출추진코의 전체 길이에 대해서 선형적으로 변화한다고 가정된 상태에서 산출하였으며, 다이어그램의 하중을 고려하였다.

이 연구에서 제안할 두가지의 해석식에 대한 개념도는 그림 2에 나타내었다. 먼저 그림 2(a)와 같이 압출추진코의 단면을 유사등단면으로 가정한 해석식과, 그림 2(b)와 같이 압출추진코의 강성과 중량을 전체길이에 대해 동일하다고 가정하고, 다이어그램을 고려하여 산출한 해석식을 제안할 것이다. 이 두가지 해석식은 압출 중 발생하는 부재력 중에서 상부단면 설계에 가장 큰 영향을 미치는 휨모멘트 변화에 대한 해석식을 산출할 것이다. 이런 휨모멘트에 영향을 주는 압출추진코와 교량 상부단면의 기하학적, 역학적인 특성을 고려한 매개변수는 다음과 같이 정의한다(Rosignoli, 2002; 안태욱 등, 2006).

- 1) 상부구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이 비 ; l_n/l
- 2) 상부구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위길이당 중량비 ; $q_1/q, q_2/q$
- 3) 상부구조(I)와 압출추진코(I_n)의 강성비 ; I_n/I
- 4) 상부구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 ; E_n/E

여기서, q_1 은 압출추진코 끝단에서의 단위 중량을 의미하고, q_2 는 압출추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출추진코의 단위 중량을 의미한다. 그리고, I_n, E_n 은 압출추진코의 단면 2차모멘트와 탄성계수를 의미한다.

상부단면과 압출추진코로 이루어진 구조체가 압출이 진행되는 동안 가질 수 있는 대표적인 구조체는 그림 3과 같이 두 단계로 정의한다. 압출추진코가 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태(그림 3(a) 참조)를 1단계 압출이라 정의하고, 압출추진코가 지점 A에 도달한 후부터 콘크리트 상부가 지점 A에 도달 할 때까지(그림 3(b) 참조)를 2단계 압출이라 정의한다. 그림 3에서 압출되는 콘크리트 상부구조의 길이를 αl 로 정의하면 1단계와 2단계 압출의 α 의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다. 그림 3(a)와 그림 3(b)에서 정의된 P_d 는 교량 상부단면과 압출추진코와의 연결부 다이어그램으로 인한 집중하중을 나타낸 것이다.

이 연구에서의 해석모델에 다음과 같은 가정들을 적용한다.

- 1) 콘크리트 상부구조는 일정한 강성 및 중량을 가진다.
- 2) 압출추진코의 단면은 압출추진코의 높이 변화에 따라 길이방향으로 선형적으로 변화하고, 단면의 폭방향으로는 일정하다고 가정한다.
- 3) 그림 3의 D지점 이후는 지간길이가 l 인 무한개의 연속 보로 되어 있다고 가정한다.

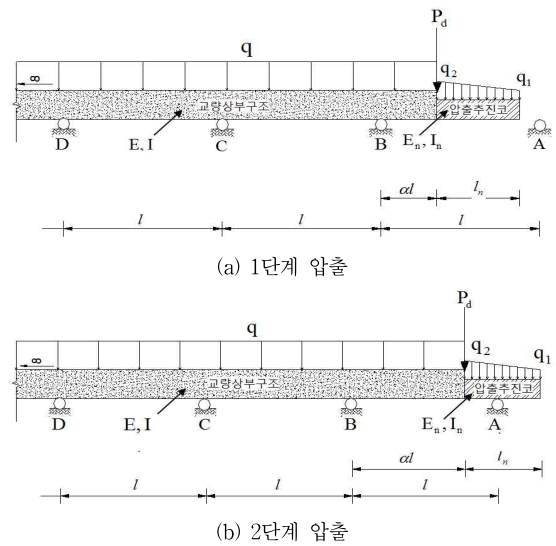


그림 3 압출시의 Nose-Deck 구조계

- 4) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 진장력은 도심축을 지난다고 가정한다.

2.2 압출추진코의 강성변화가 상호작용에 미치는 영향도

대부분의 압출추진코는 그림 4에서 보는 바와 같이 I형 플레이트를 양쪽에 배치하고, 비틀림을 방지하기 위해 수평·수직 브레이싱으로 보강되어 제작된다. 그러므로, 압출추진코의 길이 내에서 단면 특성치인 강성 분포와 중량 분포가 균등하지 않고 변화한다. 따라서, 압출추진코를 등단면으로 이상화시킬 수 있는지에 대한 판단을 하기 위해서는 교량 상부구조와 압출추진코의 강성 변화가 상호작용에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석이 필요하다.

일반적으로 휨부재의 강성은 탄성계수(E)와 단면 2차모멘트(I)의 곱으로 표현된다. 그러나 이 연구에서는 탄성계수와 단면 2차모멘트 각각을 독립적인 매개변수로 정의하고 압출추진코의 강성은 단면 2차 모멘트만으로 표현하였다.

그림 5는 2000년 이후 공용중인 실제 9개의 ILM 교량 설계자료를 상부구조의 강성(I)에 대한 압출추진코의 도심평균

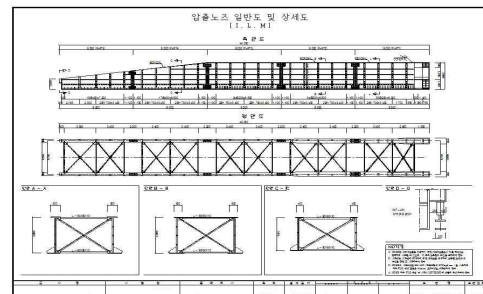


그림 4 압출추진코의 단면

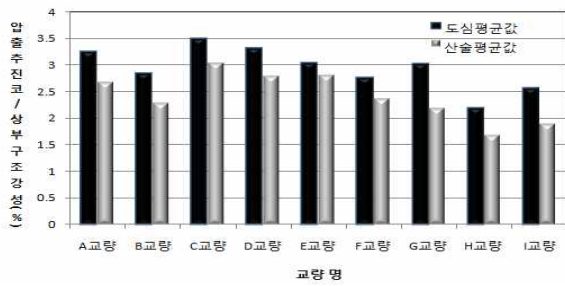


그림 5 각 교량별 압출추진코와 상부구조의 강성비 분포도 (도심평균값, 산술평균값)

과 산술평균 강성(I_n)의 비율(I_n/l)로 나타내었다. 여기서, 도심평균값이란 설계도면을 통해 압출추진코의 전체 길이에 대한 도심위치에서의 강성값을 산출한 것이다. 그리고 산술평균값이란 역시 설계도면을 통해 압출추진코의 전체 길이를 세분화시켜 각각의 구간에서의 최대, 최소 강성에 대한 평균값이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 9개 교량 대부분의 상부구조의 강성에 대한 압출추진코의 강성 비율은 2~3.5%이다.

압출추진코의 강성변화에 따른 상부구조 휨모멘트의 변화를 분석하기 위해 다음 2가지 민감도 해석을 수행한다. 먼저 등단면으로 가정한 압출추진코의 강성 크기를 상부구조 강성 크기의 2~3.5% 비율 이내에서 변화시키면서 단면력의 변화를 분석한다. 그리고 그림 5에서 분석한 9개의 실제교량 각각에 대하여 압출추진코의 실제단면 강성과 등단면(도심평균값, 산술평균값) 강성으로 이상화시킨 해석값과의 차이에 대해서 분석한다. 두 경우 모두 중량은 실제 압출추진코의 중량분포인 사다리꼴 등분포 형태로 사용한다.

2.2.1 등단면 강성의 변화에 대한 민감도 해석

압출 중인 ILM 교량 상부단면의 설계단면력은 그림 3(a)의 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(안태욱 등, 2006; Rosignoli, 2002).

그림 3의 1단계 압출에서는 압출추진코가 캔틸레버 상태로 놓여지게 되므로 B점의 휨모멘트는 압출추진코의 강성에 영향을 받지 않는다. 그러나 2단계 압출에서 B점의 휨모멘트는 압출추진코의 강성의 영향을 받게된다.

2단계 압출에서 압출추진코의 강성 변화가 B점의 휨모멘트에 얼마나 영향을 미치는지를 판단하기 위한 전산구조해석 모델은 그림 1에서 D지점 배면의 상부구조를 무한 강성체로 가정한 그림 6의 단순화모델을 사용한다. 민감도 해석 조건은 표 1과 같이 그림 5에서 조사된 교량들에 대한 평균값을 사용한다.

그림 7은 등단면 압출추진코의 강성변화에 대한 민감도

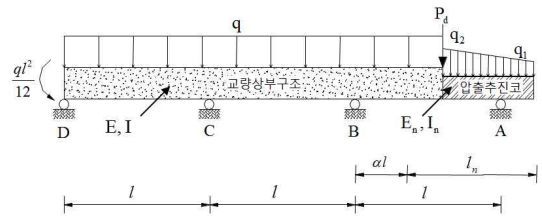


그림 6 압출추진코와 상부구조의 해석 모델링

표 1 압출추진코와 상부구조 변수의 평균값

구분	평균값
상부구조의 지간 길이(l)	50m
압출추진코의 길이(l_n)	36m
상부구조의 중량(q)	225kN/m
압출추진코의 중량(q_2, q_1)	$q_2 = 18.2\text{kN/m}$, $q_1 = 10.8\text{kN/m}$
상부구조의 강성(I)	14m^4
압출추진코의 강성(I_n)	0.35m^4
다이아프램의 집중하중(P_d)	800kN
상부구조의 탄성계수	$2.8 \times 10^7 \text{kN/m}^2$
압출추진코의 탄성계수	$2.1 \times 10^8 \text{kN/m}^2$

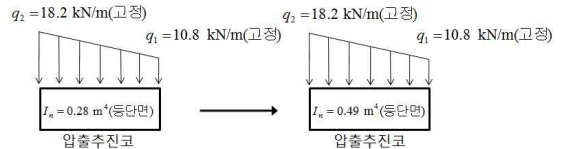


그림 7 민감도 해석범위(압출추진코의 강성 변화)

해석범위를 설명한다. 압출추진코의 강성(I_n)변화는 그림 5에 보인바와 같이 상부구조의 2~3.5% 강성비에 해당하는 $0.28 \sim 0.49\text{m}^4$ 의 범위에서 해석한다. 상부구조의 강성(I)은 14m^4 로 고정시켰다. 한편, 압출추진코의 중량은 전체 길이에 대한 높이의 비율로 계산된 q_2 와 q_1 값을 사다리꼴 등분포 형태로 적용하고, 다이아프램의 하중은 집중하중으로 표 1의 P_d 값을 사용한다. 여기서, q_1, q_2, P_d 값은 표 1과 같이 9개의 실제 교량들에 대한 평균값인 10.8kN/m, 18.2kN/m, 800kN을 적용한다.

그림 8은 민감도 해석결과이다. 그림 8의 수평축은 압출추진코의 상부구조에 대한 강성비의 비율을 나타내며, 수직축은 강성비 2.5% 때의 휨모멘트를 기준으로 한 각 강성비에 대한 휨모멘트 비율을 나타내고 있다. 이때 강성비 2.5%는 9개 교량의 압출추진코 강성값들에 대한 평균값으로 산출되었다

그림 8에서 보는 바와 같이 압출추진코의 강성이 최대 1.5% 차이났을 때 B점의 휨모멘트 변화 폭은 약 8% 정도이다. 강성비 1.5%의 차이는 9개 실제 교량에서의 최대값과 최소값의 차이이고, 각각의 교량에서 압출추진코 강성값의 가정에 대한 오차는 1.5% 이하일 것이다. 따라서 실제 교량

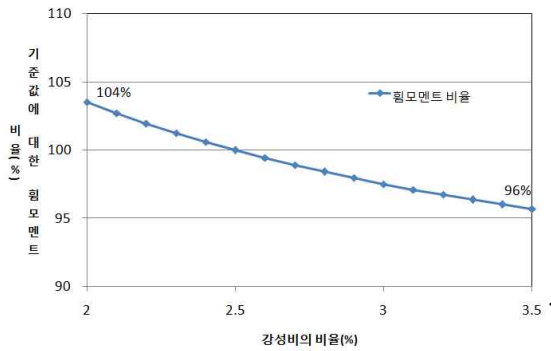


그림 8 강성 변화에 따른 회모멘트의 변화

에 대한 회모멘트 변화폭은 훨씬 미소할 것이다. 한편 압출추진코의 강성이 클수록 강성변화에 따른 B점의 회모멘트의 민감도는 줄어든다. 따라서, 압출추진코의 상대적 강성이 상부구조에 비하여 2~3.5% 내외정도로 아주 작은 상태에서 압출추진코의 강성을 등단면으로 이상화 시키는데에 따른 변화가 압출중 교량의 회모멘트에 미치는 영향은 아주 미소하다고 판단할 수 있다.

2.2.2 실제단면과 평균등단면의 비교

압출추진코 강성의 영향을 받는 2단계 압출에 대하여 압출추진코의 강성을 압출추진코 전체 길이에서 동일한 등단면으로 이상화하였을 경우와 설계도면에 따라 압출추진코의 실제 강성값을 적용하였을 때의 회모멘트를 비교하였다.

그림 9는 실제단면의 강성값을 적용한 그림 6의 B점에서의 회모멘트에 대한 도심평균과 산술평균 강성값으로 해석한 회모멘트의 비율을 보여준다. 그림 9에서 보는 바와 같이 산술평균값 등단면의 경우 실제 단면의 강성값을 적용한 경우와 약 3% 이내의 차이를 보였다. 도심평균값 등단면의 경우는 ±2%의 차이를 보였다. 따라서, 압출추진코의 단면 강성을 등단면으로 가정한 압출추진코와 상부구조의 상호작용 해석식은 적절한 정확도를 유지할 수 있을 것이다. 한편 H교량과 I교량의 경우는 실제단면을 사용하였을 때 보다 단면력이

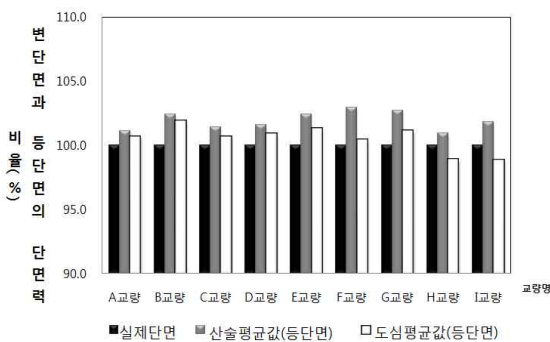


그림 9 2단계 압출시 강성의 영향력

낮게 나와 불안정한 설계가 될 수도 있다. 따라서 등단면 강성을 적용하되 어느 값을 적용할 것인가에 대한 결정기준이 필요하다. 이에 대해서는 4장에서 분석할 것이다.

2.3 압출추진코의 중량 변화가 상호작용에 미치는 영향도

압출추진코의 중량은 1단계 압출과 2단계 압출 모두의 경우에 영향을 주는 변수이다. 압출추진코 중량 변화에 대한 민감도 해석은 중량이 전체의 길이에 등분포라고 가정하였을 때와 전체 길이에서 선형적으로 변화한다고 가정하였을 때를 비교 분석한다.

그림 10은 압출추진코의 중량 변화에 대한 회모멘트의 민감도 해석범위이다. 압출추진코의 강성(I_n)과 상부구조의 강성(I)은 표 1에서의 평균값 $0.35m^4$ 과 $14m^4$ 로 고정시켰다. 민감도 해석은 압출추진코의 중량이 전체 길이에 대해 $18.0kN/m$ 로 등분포한다고 가정한 경우에서부터, 전체 길이에 대한 높이비에 따라 q_2 의 값은 $24.6kN/m$ 까지 $1.1kN/m$ 씩 증가시키고 q_1 값은 $11.4kN/m$ 로 $1.1kN/m$ 씩 감소시켜 해석하였다. 이때 압출추진코의 중량 기울기를 변화시켜도 평균중량인 $18.0kN/m$ 는 변화없도록 하였다. 마지막의 경우인 $q_2 = 24.6kN/m$ 와 $q_1 = 11.4kN/m$ 의 값은 실제교량들을 분석하여 얻은 압출추진코와 상부구조의 연결부의 중량과 압출추진코 끝단의 중량에 대한 최대 기울기 값이다. 그리고 다이아프램 하중은 표 1의 P_d 값 $800kN$ 을 적용한다.

그림 11의 수평축은 압출추진코 중량분포의 기울기를 나타내고 있다. 즉, 수평축의 값이 0인 지점은 등분포로 가정한 것이며, 0~0.06의 범위는 압출추진코와 상부구조의 연결부 중량과 압출추진코 끝단 중량의 비를 기울기로 나타내고 있다. 그리고, 0.06은 실제교량들을 분석하여 얻은 압출추진코와 상부구조의 연결부의 중량과 압출추진코 끝단의 중량에 대한 최대 기울기 값이다. 수직축의 값은 중량이 등분포 하다고 가정한 값(등단면)을 기준으로 회모멘트의 비율(변단면/등단면)을 나타내고 있다. 그림 11의 동그라미 꼴 도형으로 이루어진 선은 1단계 압출 시 최대 단면력이 나타나는 그림 2의 B점에서의 회모멘트 비율이다. 그리고, 사각형 꼴 도형으로 이루어진 선은 2단계 압출 시의 회모멘트 비율을 나타낸 것이다. 그 결과 1단계 압출 시에는 등단면으로

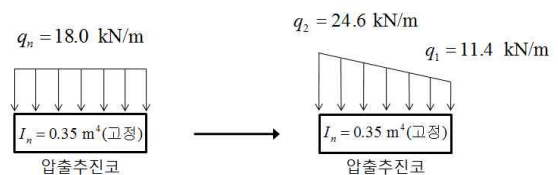


그림 10 민감도 해석범위(압출추진코 중량의 변화)

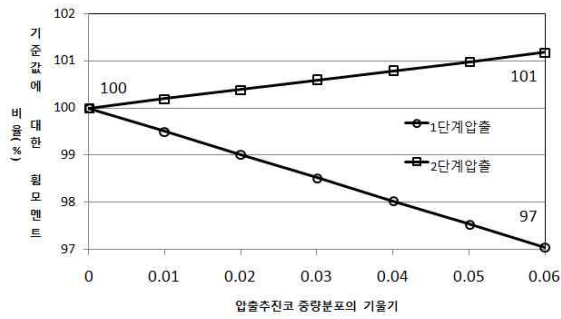


그림 11 중량분포에 따른 단면력의 변화

가정하였을 때 보다 변단면으로 가정하면 약 3%정도로 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 2단계 압출 시에는 약 1%정도로 값이 증가하는 것을 확인하였다.

그림 11과 같이 중량을 등단면으로 가정하였을 때와 변단면으로 가정하였을 때 값의 차이가 미소하지만 1단계 압출과 2단계 압출의 값의 변화가 다르게 나타난다. 선행 연구 결과를 살펴보면 일반적인 ILM교량의 경우 최대 단면력은 2단계 압출에서 발생한다(안태욱 등, 2006). 따라서 압출추진코의 중량분포를 등분포로 가정한 해석식도 적절한 정확도를 유지할 수 있을 것으로 본다. 다만, 중량의 변화에 의해 단면력의 궤적이 변화하면서 최대 단면력의 압출 위치가 달라지는 경우가 발생한다.

이 연구에서는 중량은 압출추진코의 단면을 고려하여 변단면으로 가정한 해석식과 등단면으로 가정한 상태의 해석식에 대해서 제안할 것이다. 즉, 유사등단면(강성;등단면, 중량;변단면)으로 가정한 상태에서의 단순화 해석식과, 다이어그램의 중량을 집중하중으로 치환시켜 고려한 변형된 등단면 해석식을 제안할 것이다.

3. 해석식의 단순화

3.1 유사 등단면의 1단계 해석식(M_B^1/ql^2)

1단계 압출은 강성비와 탄성계수비의 영향없이 중량비와 길이비의 영향만을 받는다(안태욱 등, 2006). 따라서 이 연

구에서 제안된 유사등단면 해석식의 경우는 압출추진코의 강성만을 등단면으로 가정하였기 때문에 안태욱 등(2006)의 1단계 압출 해석식과 동일하며 식 (1)과 같다.

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

3.2 유사 등단면의 2단계 해석식(M_B^2/ql^2)

강성을 등단면으로 가정한 유사등단면의 2단계 압출해석식은 안태욱 등(2006)의 해석식에 비해 단순화된다. 해석식의 유도는 그림 12와 같이 2단계 압출 해석영역을 정하고, 4개의 구간으로 나누어 최소일의 원리를 적용하였다.

표 2는 최소일의 원리를 적용하기 위한 각 적분구간 별 휨모멘트(M)식과 지점반력 R_B 와 R_C 의 편도함수 $\partial M/\partial R_B$ 와 $\partial M/\partial R_C$ 의 해를 정리한 것이다. 표 2에서 I구간은 그림 12(b)의 DC경간을, II구간은 CB경간을, III구간은 지점 B에서 압출추진코와 상부구조의 연결부까지를, IV구간은 지점 A에서 압출추진코와 상부구조의 연결부까지를 말한다.

최소일의 원리를 적용한 2단계 압출과정 중의 설계 단면력 M_B^2/ql^2 의 해석식은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3} \left(\frac{\text{a}}{\text{f}} + \frac{EI}{E_n I_n} \frac{\text{b} + \text{c} + \text{d} + \text{e}}{\text{f}} \right) - \frac{3}{4} \quad (2)$$

여기서, a~f는 해석식의 유도과정에서 얻어진 중량비(q_1/q ,

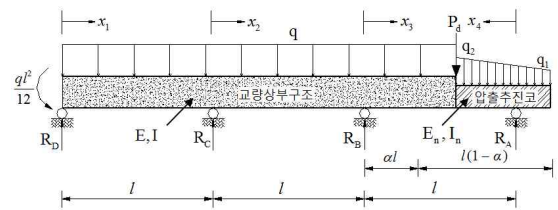


그림 12 최소일의 원리 적용

표 2 최소일의 원리 적용

구간	x 원점	적분구간	M_x	$\partial M/\partial R_B$	$\partial M/\partial R_C$
I	D	0~l	$R_D x - M_D - \frac{1}{2} q x^2$	$-\frac{1}{3} x$	$-\frac{2}{3} x$
II	C	0~l	$R_D(l+x) + R_C x - M_D - \frac{q(l+x)^2}{2}$	$-\frac{1}{3} l - \frac{1}{3} x$	$-\frac{2}{3} l + \frac{1}{3} x$
III	B	0~ αl	$R_D(2l+x) + R_C(l+x) + R_B x - M_D - \frac{q(2l+x)^2}{2}$	$-\frac{2}{3} l + \frac{2}{3} x$	$-\frac{1}{3} l + \frac{1}{3} x$
IV	A	0~ $l(1-\alpha)$	$R_A x - M_A - \frac{q_A x^2}{2} - \frac{x^2}{6} (q_x - q_A)$	$-\frac{2}{3} x$	$-\frac{1}{3} x$

표 3 해석식의 다항식 비교

구분	안태욱 등(2006) 해석식		본 연구 해석식 1
사용된 매개변수	$\frac{l_n}{l}, \frac{q_2}{q}, \frac{q_1}{q}, \frac{I_2}{I}, \frac{I_1}{I}, \frac{E_n}{E}$		$\frac{l_n}{l}, \frac{q_2}{q}, \frac{q_1}{q}, \frac{I_n}{I}, \frac{E_n}{E}$
2단계 해석식	기본 구성	동일(식(2))	
	㉑	동일	
	㉒	$\textcircled{b} = \dots \times \frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3} \left[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - 2 \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right\} \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\} \right]$	$\textcircled{b} = \dots \times \frac{1}{3} (1 - \alpha)^3$
	㉓	$\textcircled{c} = \dots \times \frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^2} \left[\ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}} \right\} \right]$	$\textcircled{c} = \dots \times \frac{1}{2} (1 - \alpha)^2$
	㉔	$\textcircled{d} = \dots \times \frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^4} \left[0.5 \frac{I_2}{I} - 3 \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\} \frac{I_2}{I} + 3 \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^2 \frac{I_2}{I} \right. \\ \left. + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right] \times \ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}} \right\} + \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^3 \frac{I_2}{I} \\ + \frac{3}{2} \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^2 \right]$	$\textcircled{d} = \dots \times \frac{1}{4} (1 - \alpha)^4$
	㉕	$\textcircled{e} = \dots \times \frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)} \left[4 \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^3 \right. \\ \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\} + \frac{1}{3} \frac{I_1^{1.5}}{I^{1.5}} - 2 \frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}} \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\} \right. \\ \left. + 6 \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^2 \frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}} - \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^4 \frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}} \right. \\ \left. - \frac{10}{3} \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\}^3 \right]$	$\textcircled{e} = \dots \times \frac{1}{5} (1 - \alpha)^5$
	㉖	$\textcircled{f} = \dots \times \frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3} \left[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - 2 \left\{ \left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}} - \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}} \right\} \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}} \right\} \right]$	$\textcircled{f} = \dots \times \frac{1}{3} (1 - \alpha)^3$

q_2/q 와 길이비(l_n/l)에 대한 다항식이다. 그리고 강성비를 등 단면으로 가정하였기 때문에 ㉑를 제외한 대부분의 다항식들이 많이 단순화 된 것을 확인할 수 있다. 안태욱 등(2006)의 해석식과 유사등단면으로 가정한 상태에서 제안된 해석식의 단순화된 다항식 ㉑~㉖의 비교를 표 3에 나타내었다.

3.3 다이아프램 하중이 고려된 등단면 해석식

2.3절에서 압출추진코의 중량은 1단계 압출과 2단계 압출에 모두 영향을 미치지만 그 값이 미소한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 압출추진코의 중량 역시 등단면으로 가정하고 다이아프램을 고려한 해석식의 적용도 실무적으로 가능할 것이다. 압출진행에 대한 해석 모델은 그림 13과 같이 압출추진

진코의 강성과 중량분포가 등분포로 가정되고 압출추진코와 상부구조의 연결부분 다이아프램을 집중하중 P_d 로 정의된 모델이다.

다이아프램이 고려된 등단면 해석식은 식 (3)과 식 (4)와 같다. 식 (3)은 1단계 압출 중 해석식이고 식 (4)는 2단계 압출 중 해석식이다.

$$\frac{M_B^*}{ql^2} = -\frac{\alpha^2}{2} - \frac{q_n}{q} \frac{l_n}{l} \left(\alpha + \frac{1}{2} \frac{l_n}{l} \right) + \frac{P_d}{ql} \tag{3}$$

$$\frac{M_B^{**}}{ql^2} = \frac{\textcircled{1}}{\textcircled{2}} \tag{4}$$

여기서, ①과 ②는 다음과 같다.

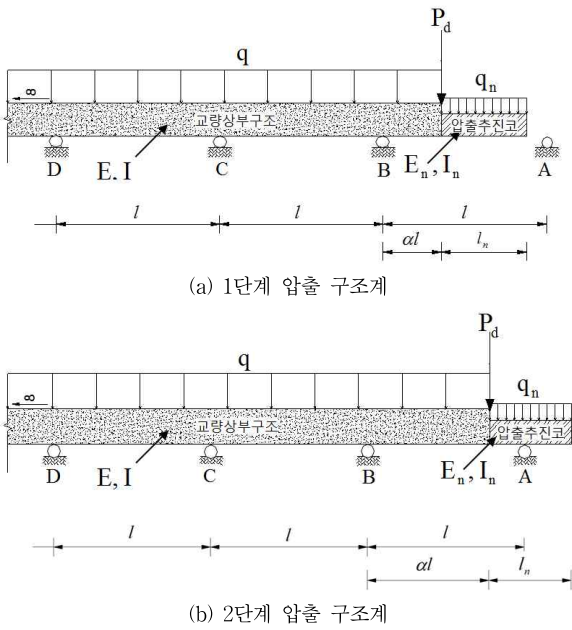


그림 13 다이어그램이 고려된 등단면 해석식의 구조계

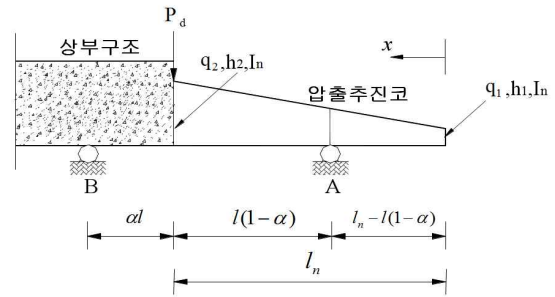


그림 14 압출추진코 단면의 선형변화

h_2 그리고 압출추진코 끝단에서 q_1, h_1 이라고 정의한다. 그러면 압출추진코의 끝단을 기준으로 압출추진코 중량과 높이의 선형변화는 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$q_x = \frac{q_2 - q_1}{l_n} x + q_1 \quad (5)$$

$$h_x = \frac{h_2 - h_1}{l_n} x + h_1 \quad (6)$$

한편, 압출추진코 중량을 등단면으로 가정한 상태에서 상호작용 휨모멘트 해석식을 도출한 결과인 식 (3)과 식 (4)에서의 압출추진코의 중량 q_n 은 식 (7)과 같이 압출추진코의 전체 길이에 압출추진코의 총 무게를 나눈 값으로 결정한다.

$$q_n = \frac{q_{n, total}}{l_n} \quad (7)$$

4.2 유사등단면 강성의 결정

식 (2)와 식 (4)에서의 압출추진코의 강성 즉, 단면 2차모멘트는 길이방향에 동일한 등단면 I_n 으로 가정하였다. 등단면 I_n 값은 설계 도면에서 단면 2차모멘트의 도심평균값 또는 산술평균값으로 산정하여 그 중 하나를 선택할 수 있다. 이 연구에서는 휨 강성에는 수평·수직 브레이싱이 큰 영향이 미치지 못하므로 가장 일반적인 설계인 I형 플레이트의 단면 2차모멘트만을 사용하는 것으로 가정한다.

그림 15는 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009 ((주)마이다스아이티, 2009)을 사용하여 실제단면의 강성을 고려한 해석값과 제안된 유사등단면 해석식을 사용하여 강성을 도심평균값과 산술평균값을 사용하여 그림 5의 교량들에 대한 최대 단면력을 비교하였다. 그림 15를 살펴보면 도심평균값을 사용하였을 경우 H교량과 I교량은 전산구조해석값 보다 작은 휨모멘트가 나오는 것을 알 수 있었다. 이것은 압출추진코의 단면형상에 따른 도심평균값과 산술평균값의 차이

$$\begin{aligned} \textcircled{1} = & - \left[\left\{ \frac{1}{2} \frac{q_n}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} + \alpha^2 + 1 \right) + \frac{q_n}{q} \left(\alpha \left(\frac{l_n}{l} - 1 \right) - \frac{l_n}{l} \right) \right\} \right. \\ & \left. \left\{ \alpha^2 \left(\frac{1}{3} \alpha - \frac{1}{2} \right) \right\} \right] - \left[\frac{EI}{E_n I_n} \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_n}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} + \alpha^2 + 1 \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{q_n}{q} \left(\alpha \left(\frac{l_n}{l} - 1 \right) - \frac{l_n}{l} \right) \right\} \right] \left\{ (1-\alpha)^2 \left(\frac{1}{3} (1-\alpha) - \frac{1}{2} \right) \right\} \\ & - \left[\left\{ \frac{1}{6} \alpha^3 (1-\alpha) - \frac{1}{6} \alpha^5 + \frac{3}{8} \alpha^4 - \frac{1}{6} \alpha^3 \right\} \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{q_n}{q} \alpha^2 (1-\alpha)^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6} \right) \right\} + \frac{1}{2} \frac{P_d}{ql} \alpha^2 (1-\alpha) \right. \\ & \left. + \frac{1}{3} \frac{P_d}{ql} \alpha^3 (1-\alpha) \right] - \frac{EI}{E_n I_n} \left[\left\{ \frac{1}{6} \alpha^2 (1-\alpha)^3 \right\} + \frac{q_n}{q} \right. \\ & \left. \left\{ \left(\frac{1}{3} \alpha + \frac{1}{6} (1-\alpha) - \frac{1}{8} \right) (1-\alpha)^4 \right\} + \frac{1}{3} \frac{P_d}{ql} \alpha (1-\alpha)^3 \right] \\ & - \frac{7}{288} \\ \textcircled{2} = & \left(\frac{1}{3} \alpha^3 - \alpha^2 + \alpha + \frac{7}{24} + \frac{EI}{E_n I_n} \frac{(1-\alpha)^3}{3} \right) \end{aligned}$$

4. 압출추진코의 평균 중량과 평균 강성값의 결정

4.1 유사등단면 중량 및 등단면 중량의 결정

압출추진코의 단면을 유사등단면(강성:등단면, 중량:변단면)으로 가정했을 때의 중량은 그림 14와 같이 단면을 결정한다. 그림 14에서와 같이 압출추진코와 콘크리트 상부구조물 연결부에서의 압출추진코 단위 길이당 중량과 높이는 각각 $q_2,$

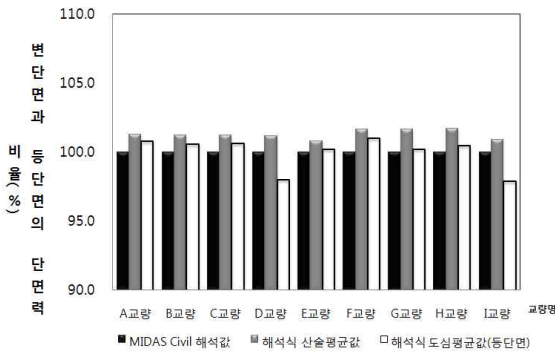


그림 15 강성값에 대한 단면력의 변화

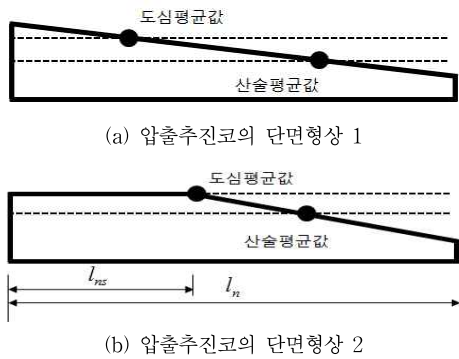


그림 16 압출추진코의 단면형상 모델

로 인해서 도심평균값이 과다하게 큰 값으로 정해져 압출추진코의 휨모멘트 분배가 상부구조 쪽보다 압출추진코 쪽으로 커지게 되기 때문이다. 상부구조에서의 휨모멘트의 값이 작게 산정되면 해석식의 이용 시 불안정한 설계가 될 수 있는 것을 의미한다. 따라서 압출추진코의 단면형상의 비교를 통해서 단면형상에 따른 산술평균값과 도심평균값 중 어떤 값을 사용해야 전산구조해석값 이상이면서 안전성을 만족할 수 있는지 결정할 필요가 있다.

그림 16는 압출추진코의 단면형상에 따른 도심평균값과 산술평균값의 산정할 수 있는 개념도이다. 그림 16(a)와 같은 경우는 압출추진코의 형상이 전체의 길이에 따라 강성의 형상이 선형적으로 변화하는 경우의 그림이고, 그림 16(b)의 경우는 압출추진코의 전체 길이에 따라 강성이 일정한 구간(l_{ns})과 선형적으로 변화하는 구간이 함께 존재하는 경우이다.

그림 15에서 A교량~G교량의 경우는 그림 16(a)의 형상 또는 그림 16(b)의 형상 중 l_{ns}/l_n 길이가 0.25인 단면형상을 보인다. 이와 같은 경우는 산술평균값과 도심평균값의 단면력 모두가 전산구조해석값에 비해 크게 나타나 보수적인 설계로서의 안전한 값을 얻었다. 그림 15에서 H교량과 I교량의 경우는 그림 16(b)의 형상 중 l_{ns}/l_n 의 길이가 0.6인 단면형상을 보인다. 이와 같은 경우는 도심평균값이 실제 압출추진코의 강성값 보다 크게 산출되며 전산구조해석값에 비해

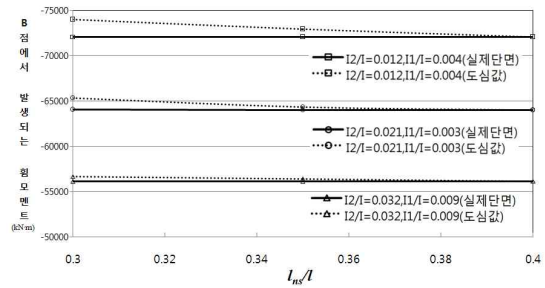


그림 17 단면 형상에 따른 강성결정 길이비 분석

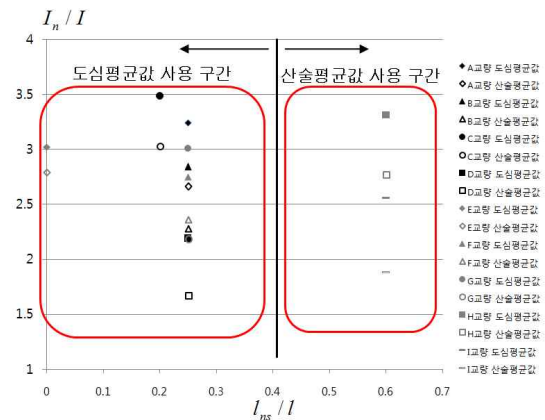


그림 18 유사등단면 해석식의 강성값 결정

도심평균값은 낮은 값을 얻었다. 이럴 경우에는 산술평균값을 사용해야지 더 안전한 해석결과를 얻을 수 있다.

유사등단면 해석식의 정확성과 안전성을 높이기 위해서 그림 17과 같은 압출추진코 단면형상에 따른 강성결정 길이비에 대해서 분석하였다. 9개의 실제교량 강성값을 가지고 압출추진코의 양 끝단의 강성비를 결정하고, 압출추진코의 단면형상을 변화시켰다. 압출추진코의 단면형상은 그림 16(a)에서부터 그림 16(b)처럼 l_{ns}/l 의 길이를 증가시키면서 실제 단면과 도심평균값을 사용하였을 경우 B점에서 발생하는 휨모멘트의 크기를 전산구조해석 프로그램을 통해 분석하였다. 이때 강성비를 제외한 다른 해석조건은 표 1에 나타난 값을 사용하였다. 대표적인 3개의 강성비에 대해서 그림 17에 나타내었다. 그림 17에서 압출추진코와 상부구조의 연결부분의 강성비(l_2/l)를 0.032, 0.021, 0.012로 변화시켰다. 수평축은 그림 16(b)의 전체 압출추진코의 길이에 대한 직선으로 변화는 길이비(l_{ns}/l)를 나타낸다. 그림 17에서 실선은 실제 강성비를 고려한 단면의 휨모멘트를 계산한 값이고, 등근 점선은 압출추진코의 단면의 강성비를 도심평균값으로 계산한 결과값이다. 그림 17에서 확인할 수 있듯이 l_{ns}/l 의 길이가 0.4에 도달할 때 실제단면을 사용한 경우와 도심평균값을 사용하였을 때의 휨모멘트가 같아지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 18은 그림 17의 분석결과를 바탕으로 압출추진코의

단면형상에 따른 유사등단면의 강성값으로 산술평균값과 도심평균값 중 어떤 값을 선택해야 하는지 그 경계를 제시한 해석결과이다. 이 연구에서는 그림 18에서 l_{ns}/l_n 의 크기가 0.4이하일 때는 도심평균값을 사용하고, 0.4 이상일 때는 산술평균값을 사용하는 것이 안정성과 경제성에서 올바른 해석이라는 분석을 할 수 있었다. 하지만 이 연구에서는 실제 교량의 해석 개수가 9개 교량 밖에 되지 않으므로 조금 더 많은 교량의 자료를 수집하여 분석을 한다면 정확한 값을 결정할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 해석식의 검증

5.1 해석예제

3장에서 제안된 2가지의 압축추진코와 교량 상부구조 상호작용 해석식의 정확성과 활용성을 검증하기 위해 실제 사례교량의 설계조건을 바탕으로 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009((주)마이다스아이티, 2009)를 사용하여 비교 분석하였다. 이 연구에서 제안된 유사등단면 해석식과, 다이어그램을 도입한 등단면 해석식, 그리고 기존해석식들(Rosignoli, 2002; 안태욱 등, 2006)을 비교 분석하였다. 검증해석에 사용된 예제들은 그림 9와 그림 16에서 사용한 실제 공용중인 9개의 교량 해석에 적용된 입력자료는 표 4와 같다.

표 4에서와 같이 실제 ILM교량 설계자료 중에서 유사등단면으로 가정한 해석식(해석식 1)의 경우는 중량비를 변단면으로 가정하고, 강성비는 그림 18과 같이 A교량에서 G교량까지는 도심평균값을 H교량과 I교량은 산술평균값을 적용하였다. 다이어그램을 고려한 등단면 해석식(해석식 2)은 중량비는 등단면 값을 사용하고, 강성비는 유사등단면 해석식

과 마찬가지로 A교량에서 G교량까지는 도심평균값을 H교량과 I교량은 산술평균값을 사용하였다. 그리고, 동일한 방법으로 Rosignoli의 해석식과 비교하였다. 안태욱 등(2006)의 해석식은 중량비, 강성비 모두 표 4의 변단면에 관련된 값을 사용하였다. 그리고 정확성을 고려하기 위해서 전산구조 해석의 경우는 중량비는 변단면의 값을 이용하여 사다리꼴 등분포 상태로 적용시켰으며, 강성비의 경우는 압축추진코의 도면을 고려하여 전체길이를 세분화시켜 강성값을 상세하게 고려하였다.

5.2 실제 교량의 단면력 궤적 및 최대 단면력

그림 19와 그림 20은 A교량과 B교량의 단면력 궤적을 비교한 것이다. 가는 실선은 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009의 결과이고, 굵은 실선은 이 연구에서 제안된 유사등단면 해석식(해석식1)이고 굵은 점선은 다이어그램이 고려된 등단면 해석식(해석식2)이다. 등근 점선은 안태욱 등(2006)의 해석식의 단면력 궤적을 보여주고 있다. 마지막으로 가는 점선은 다이어그램이 고려되지 않고 등단면으로 가정된 Rosignoli 해석식의 단면력 궤적을 보여주고 있다.

그림 19와 그림 20을 분석하여 보면 먼저 전산구조해석과 가장 비슷한 값을 나타내는 식은 해석식 1이다. 해석식 2의 경우는 중량을 등단면으로 가정하였기 때문에 1단계 압출의 단면력이 높게 나타났으며, 2단계 압출 초반에는 단면력이 낮게 나타나고, 어느정도 이상의 압출이 일어나면 단면력이 전산구조해석의 값보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 안태욱 등(2006)의 해석식의 경우는 압축추진코의 강성을 그림 16(a)와 같이 선형적으로 변화한다고 가정하였기 때문에 다른 해석식의 경우보다 단면력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다이어그램이 고려되지 않은

표 4 실제 ILM교량 설계자료를 통해 도출한 입력자료 값

교량	지간길이 (m)	압축추진코의 길이 (m)	중량비			강성비				다이어그램하중 (kN)
			변단면		등단면	변단면 (안태욱 등(2006) 해석식)		등단면		
			q_2/q	q_1/q	q_n/q	I_2/I	I_1/I	도심평균값	산술평균값	
A	50	36	0.084	0.056	0.070	0.042	0.003	0.0228	0.0173	1214.3
B	50	36	0.085	0.030	0.058	0.030	0.010	0.0271	0.0232	891
C	55	38	0.085	0.048	0.067	0.050	0.010	0.0348	0.0303	704
D	60	42.5	0.11	0.050	0.080	0.033	0.003	0.0219	0.0167	796
E	50	35	0.11	0.050	0.080	0.041	0.014	0.0302	0.0279	819.4
F	50	36	0.085	0.048	0.067	0.032	0.009	0.0276	0.0236	887.5
G	50	36	0.085	0.035	0.060	0.036	0.006	0.0276	0.0234	450
H	55	40	0.09	0.054	0.072	0.033	0.002	0.0331	0.0278	629
I	60	45	0.077	0.039	0.058	0.037	0.002	0.0256	0.0189	1016.5

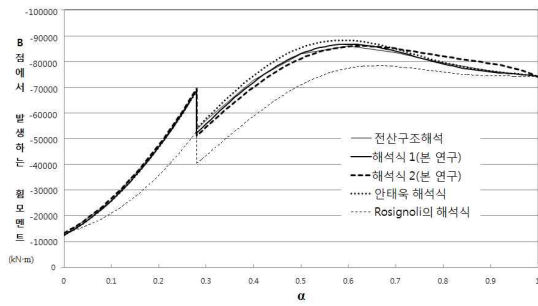


그림 19 A교량의 단면적 궤적 비교

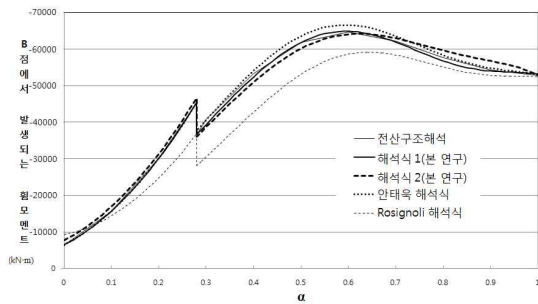


그림 20 B교량의 단면력 비교

표 5 최대 단면력이 발생하는 압축길이비(α)의 비교

구분	전산구조 해석	해석식 1 (본 연구)	해석식 2 (본 연구)	안태욱 해석식	Rosignoli 해석식
A	0.60	0.60	0.63	0.59	0.66
B	0.60	0.60	0.62	0.59	0.64
C	0.61	0.62	0.64	0.60	0.95
D	0.61	0.61	0.63	0.60	0.71
E	0.68	0.68	0.73	0.68	0.75
F	0.63	0.64	0.68	0.62	0.70
G	0.63	0.63	0.65	0.64	0.68
H	0.61	0.61	0.64	0.61	0.65
I	0.63	0.62	0.65	0.63	0.69

Rosignoli 해석식의 경우는 단면력의 차이가 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 정확성이 매우 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 나머지 C교량부터 I교량까지 모두 비슷한 형상을 나타내는 그래프를 얻을 수 있었다.

표 5는 각각의 교량에 대해 전산구조해석과 4가지 해석식에서 산출된 최대 단면력이 발생하는 압축길이비(α)를 나타내었다. 표 5에서와 같이 전산구조해석과 해석식 1, 안태욱 등(2006)의 해석식은 거의 동일한 위치에서 최대단면력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 압축추진코의 중량을 등분포라고 가정한 해석식 2와 Rosignoli의 해석식의 경우는 최대단면력이 발생하는 위치가 약간의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 최대단면력의 발생위치는 압축추진코와 상부구조의 강성비가 아닌 압축추진코와 상부구조의 중량비의 고려 방법에 따라 변화한다는 것을 확인할 수 있었다.

표 6은 전산구조해석의 통해서 구한 최대단면력이 발생하는 압축위치에서 4가지 해석식의 단면력을 비교하여 나타내었다. 그 결과 해석식 1의 경우는 전산구조해석 보다 +1.4%이내의 차이를 보였으며, 해석식 2의 경우는 ±2.8%이내의 차이를 보였다. 그리고 안태욱 등(2006)의 해석식은 ±5.9%이내의 차이를 마지막으로 Rosignoli 해석식의 경우는 -17.4%이내의 차이를 분석되었다. 따라서 해석식 1의 경우가 전산구조해석과 가장 가까운 결과를 나타내면서 모든 차이가 양의 값으로 분석되므로 안전한 설계를 할 수 있다는 것을 확인하였다.

5.3 제안된 상호작용 해석식의 비교

이 연구에서 제안된 2개의 해석식은 기존의 해석식(Rosignoli, 2002; 안태욱 등, 2006)들에 비해서 정확성이 높아졌고, 단순하다는 것을 확인할 수 있었다. 먼저 유사등단면으로 제안된 해석식(해석식 1)의 경우는 안태욱 등(2006)의 해석식에 비해 단순화되었으며, 전산구조해석 프로그램을 통해 구한 단면력의 궤적과 가장 유사한 값을 보여주고 있다. 단면력이 최고가 되는 길이비에서의 전산구조해석 단면력과 차이는 약 1.4%미만으로 확인되었다. 이는 실제 압

표 6 최대단면력이 발생하는 위치에서의 단면력 비교

구분	전산구조해석 휨모멘트(kN·m)	해석식 1 (%)	해석식 2 (%)	안태욱 등(2006) 해석식(%)	Rosignoli해석식 (%)
A	-86029.0	100.8	99.8	102.6	90.0
B	-64643.0	100.4	99.1	103.0	90.7
C	-73563.1	100.8	102.5	99.0	89.8
D	-75974.0	100.7	102.8	105.9	82.6
E	-59702.6	100.5	98.2	102.5	96.2
F	-54910.4	101.2	98.1	103.8	95.5
G	-52557.1	101.4	100.5	100.3	95.4
H	-91650.5	100.7	101.2	101.1	97.8
I	-90560.6	100.7	99.3	97.1	92.4

출추진코의 도면형상을 통해서 강성값을 결정하였기 때문이라 판단된다.

그리고 다이어그램을 고려한 변형된 등단면 해석식(해석식 2)의 경우는 식이 매우 단순하며 Rosignoli의 해석식에 비해 정확성이 매우 향상된 것을 확인할 수 있었다. 단면력이 최고가 되는 길이비에서 전산구조해석 단면력과 차이는 약 ±2.8%미만으로 확인되었다. 하지만 중량비를 등단면으로 가정하였기 때문에 최대단면력이 발생하는 압출길이비(α)에서 0.05정도의 차이가 확인되었다. 안태욱 등(2006)의 해석식의 경우는 전산구조해석 단면력과 차이는 약 ±5.9%정도로 나타났다. 안태욱 등(2006)의 해석식은 압출추진코의 강성이 그림 16(a)처럼 전체 길이에 따라 압출추진코와 상부구조의 연결부, 압출추진코의 끝단이 선형적으로 변화한다고 고려되므로 강성이 실제 압출추진코의 강성과는 차이를 보인다. 따라서 2단계 압출에서 단면력이 약간의 차이를 가지게 된다.

이 연구에서 제안된 2가지 해석식의 경우 다음과 같은 장·단점을 가지고 있다. 먼저 유사등단면으로 가정된 해석식(해석식 1)의 경우는 중량을 변단면으로 가정하였기 때문에 다이어그램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)에 비해 복잡하다. 또한 해석식에 필요한 해석변수들의 결정에서 중량에 관한 해석변수를 결정해야 한다. 그러나 해석식을 통해 최대 휨모멘트를 결정할 때는 거의 동일한 시간이 소요된다. 또한 다이어그램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)의 경우는 1단계 압출과 2단계 압출 단계에서 중량이 등단면으로 고려되기 때문에 휨모멘트의 값의 차이는 미소하지만 휨모멘트의 궤적에서 차이를 보인다. 따라서 약간의 시간을 사용하여도 유사등단면으로 가정된 해석식(해석식 1)을 사용하는 것이 안전성 측면에서 보다 신뢰할 수 있는 설계를 할 수 있을 것이라 판단된다.

6. 결 론

- 1) 압출추진코의 강성을 실제 단면과 등단면(산술평균값, 도심평균값)을 사용하였을 때 휨모멘트는 2~3% 정도 밖에 영향이 없다. 따라서 압출추진코의 단면 강성을 등단면으로 가정하고 중량은 변단면으로 가정한 유사 등단면 해석식을 제안한다.
- 2) 압출추진코의 중량을 변단면과 등단면으로 가정하였을 때의 휨모멘트는 1단계 압출에서 3%와 2단계 압출에서 1% 정도로 미소하게 나타났다. 그러나 중량의 변화는 최대 단면력의 압출 위치를 변화시킨다. 따라서 중량분포를 변단면으로 가정한 유사등단면 해석식과 아울러 등단면으로 가정한 해석식도 제안한다.

- 3) 압출추진코의 단면형상에 따라 유사등단면 해석식의 강성값을 결정하는 기준을 제시하였다. 압출추진코의 전체 길이에 대한 직선구간의 길이비가 0.4 이상일때는 산술평균값을 0.4이하일때는 도심값을 사용해야 실무설계에서 보수적으로 안전한 단면력을 산출할 수 있다.
- 4) 해석식의 매개변수 중 강성의 결정방법을 제시하였고, 그 방법에 따라 매개변수를 결정하고, 해석식으로 설계 단면력을 결정한 결과 전산해석 프로그램의 결과에 가장 근접한 설계단면력 값을 산출할 수 있다. 이와 같이 압출추진코의 단면형상에 따른 매개변수의 결정방법을 이용하여 단순화된 해석식으로 기존의 해석식에 비해 정확성을 향상시켰다.
- 5) 제안된 2개의 해석식 중 약간의 시간적 소요 감소하더라도 유사등단면으로 가정된 해석식(해석식 1)을 사용하는 것이 안전성 측면에서 보다 신뢰할 수 있는 설계를 할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(C-D-2011-0069).

참 고 문 헌

- 김광수 (2008) 파형강판 PSC 박스거더 교량의 설계 및 시공 중 안전관리, 한국안전학회지, 23(2), pp.87~97.
- 안태욱, 이환우, 정두희 (2006) 변단면 압출추진코와 ILM 교량 상부단면의 상호작용 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 19(2), pp.139~150.
- 이환우, 장재엽 (2010) 상부단면과의 상호작용을 고려한 ILM 교량용 압출추진코의 최적화 설계식, 한국전산구조공학회 논문집, 23(1), pp.53~60.
- 최항용, 서석규, 오명석, 오세환 (2008) 압출가설시 발행하는 휨모멘트의 최소화 조건을 통한 압출노즈의 최적설계, 대한토목학회 논문집, 28(4A), pp.487~495.
- (주)마이다스아이티 (2009) MIDAS Civil 2009, (주)마이다스아이티.
- 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.
- Rosignoli, M. (2002) Bridge Lurching, Thomas Telford Ltd., London.
- 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 2012년 3월 12일
- 논문심사일
1차 2012년 3월 18일
2차 2012년 6월 1일
- 게재확정일 2012년 6월 13일

부록 1. 2단계 압출 해석식

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

$$\begin{aligned} \text{㉑} = & - \left[\left\{ \frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5 \right\} \right. \\ & + \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3 \right) + \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \\ & + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) \right) \\ & + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \left. \right\} \left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3 \right) \\ & \left. + \frac{P_D(1-\alpha)}{ql} \left(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3 \right) + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3 \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{㉒} = & \frac{1}{3} \left[-\frac{3}{4} + \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l_n}{l} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} (1-\alpha) \right\} \right. \\ & + \alpha \left(-\frac{2}{3}(1-\alpha) + \frac{2}{3} \right) - \frac{1}{6}\alpha^2 + \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} (1-\alpha) \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha \right) \\ & - \frac{1}{6} \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} (1-\alpha)^2 + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\alpha \right) \\ & \left. - \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 - \frac{2}{3} \frac{P_D}{ql} (1-\alpha) - \frac{1}{3} \frac{P_D}{ql} (2+\alpha) \right] \times \frac{1}{3} (1-\alpha)^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{㉓} = & \frac{1}{3} \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) \right) \right. \\ & \left. + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l}{l_n} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right\} \times \frac{1}{2} (1-\alpha)^2 \end{aligned}$$

$$\text{㉔} = \frac{1}{6} \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} \times \frac{1}{4} (1-\alpha)^4$$

$$\text{㉕} = \frac{1}{18} \frac{l}{l_n} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \times \frac{1}{5} (1-\alpha)^5$$

$$\text{㉖} = \left(-\frac{7}{108} - \frac{2}{9}\alpha + \frac{2}{9}\alpha^2 - \frac{2}{27}\alpha^3 \right) - \frac{2}{9} \frac{EI}{E_n I_n} \times \frac{1}{3} (1-\alpha)^3$$