공학석사 학위논문

압출가설시 발생하는 상부구조의

휨모멘트 해석식

2011년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

장 재 엽

공학석사 학위논문

압출가설시 발생하는 상부구조의
휨모멘트 해석식

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2011년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

장 재 엽

장재엽의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 2월 25일

주 심 공학박사 장 희 석 ㊞

위 원 공학박사 국 승 규 ㊞

위 원 공학박사 이 환 우 ㊞

목 차

그림목차

사진목차

표목차

Simplified Analysis Formula to Calculate the Launching Bending Moment of the Bridge Superstructure

Jae-Youp, Jang

Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

ILM (incremental launching method) has been acknowledged as the pre-stressed concrete bridge engineering method efficient to ensure quality. 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. And, a launching nose is generally used to minimize high stress creating temporarily during launching. 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.

keyword: Launching Nose, ILM Bridge, Quasi-equivalent section, Simplified Analysis Formula

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 동기

높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 널리 채택되고 있는 ILM공법(Incremental Launching Method) 교량(김용훈, 1999; Renaud 등, 1999; Sasmal 등 , 2004; 2006)은 압출되는 동안 상부의 단면이 지간의 중앙부와 지점부를 모두 통과한다. 따라서 단면들은 압출 중 자중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 되는 구조적 특성을 가지고 있다. 결국, ILM 교량의 상부단면들은 공용상태와 다른 응력들을 압출 중에 경험하게 된다(Rosignoli, 2000).

ILM 교량의 상부단면들이 압출 중에 경험하게 되는 응력들은 시공 중에만 발생되는 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; 최항용 등, 2007). 이때 압출추진코의 길이, 강성, 중량 및 탄성계수 등은 압출이 진행되는 동안에 상부단면에 발생되는 응력들의 크기와 변화 폭에 영향을 준다(김광수, 2008; Rosignoli, 1998). 즉, ILM 교량에서는 압출 중 상호작용에 따른 응력변화를 고려하여 압출추진코를 설계하는 것이 교량 상부구조 최적화 설계를 위해서 필수적으로 이루어져야 한다.

그러나 국내에서는 ILM 교량의 설계에서도 경간분할 및 지간길이 등이 전례의 설계결과에 따라 결정되는 경우가 많다(박상현 등, 2001). 따라서, 상부구조와 압출추진코의 단면들이 현장에 따라 크게 달라지지 않는

다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라, 단순히 전례의 설계결과를 정리하여 보관하는 정도의 기술축적 이외의 기술개발에 대한 절실한 필요성도 크게 제기되지 못하는 실정이다. 결국, 위와 같은 설계관행의 지속은 설계업무의 효율성 측면에서는 장점이 있으나 창의적인 설계결과를 기대하거나 이를 바탕으로 우리나라의 관련 기술 분야의 발전을 기대하기는 어려운 것이다. 따라서 설계관행에 따르는 설계가 아닌 창의적인 설계결과를 창출 할 수 있는 보다 활용적인 ILM 교량 상부단면과 압출추진코의 상호작용 해석식에 대해서 연구가 필요하다.

1.2 연구 동향

Rosignoli(2002)는 압출추진코의 단면형상을 전체 길이 내에서 동일한 단면으로 가정하였다. 등단면으로 가정한 압출추진코와 상부구조와의 상호작용을 고려한 압출 중에 변화하는 상부단면의 휨모멘트를 계산하는 해석식과 압출추진코의 길이와 중량변화에 따른 영향을 분석하였다. 그러나 압출추진코와 상부구조와의 연결부 다이아프램의 중량을 고려하지 않아 해석식의 정확성이 낮다는 단점을 가지고 있다.

문영철(2002)은 Rosignoli의 해석식을 이용하여 상호작용을 고려 할 수 있는 압출추진코의 설계식을 개발하였다. 그리고 최항용(2008)은 역시 Rosignoli의 해석식을 이용하여 압출 과정에서 발생하는 부모멘트 및 정모멘트를 최소화할 수 있는 압출노즈에 대한 최적조건을 도출하였다. 또한 도출된 최적조건을 사용하여 압출추진코의 단위중량비와 길이비의 관계식을 유도하고 압출가설시 발생하는 절대 최대 정모멘트 및 부모멘트의 산정식을 제시하였다. 최항용(2008)은 문영철(2002)에 비해 단면력으로 산정 될 수 있는 절대 정모멘트와 부모멘트에 대한 산정식을 제시 하여 설계에 있어서 유용한 결과물을 보여주고 있다. 그러나, 문영철(2002)과 최항용(2008)은 Rosignoli의 해석식을 이용하여 해석하였기 때문에 다이아프램의 하중이 모두 고려되지 않아 설계식과 최적 설계 조건의 정확성이 낮다는 단점을 가지고 있다.

안태욱(2006)은 압출추진코의 단면형상을 전체 길이 내에서 단면의 높이가 선형적으로 변화하는 단면 즉, 변단면으로 가정한 상태에서 상호작용을 고려한 상부단면의 휨모멘트를 계산하는 해석식 제안하였다. 또한 압출추진코의 길이, 강성, 중량변화 등에 따른 매개변수의 영향을 분석하였다. 안태욱의 해석식은 다이아프램의 고려와 변단면으로 가정하여 정확

성을 향상 시켰지만 해석식의 복잡함에 따라 활용도가 저하될 수 있다.

1.3 연구 목적 및 범위

기존 연구된 상호작용 해석식의 장·단점을 분석하여, 장점은 살리고 단점은 보완된 새로운 해석식을 제안할 것이다. 이러한 상호작용 해석식에 대한 연구를 통해서 설계자들이 각각의 교량 시공 조건에 상응하는 압출추진코의 단면결정에 창의적인 설계를 할 수 있을 것이라 예상한다.

이 연구에서는 해석식의 정확성을 유지하고, 활용도를 높이기 위해서 압출추진코의 단면형상을 유사등단면(강성;등단면, 중량;변단면)으로 가정하여 휨모멘트 해석식의 단순화를 연구하고자 한다. 또한 Rosignoli(2002)의 해석식에 다이아프램을 고려한 변형된 휨모멘트 해석식을 제안하고자 한다. 또한 제안된 해석식을 2000년 이후 공용중인 9개의 ILM 교량들의 설계자료를 전산구조해석 프로그램을 통해 분석하고, 이를 통해 제안된 해석식의 정확성을 검증하고, 활용방안에 대해 분석할 것이다. 그리고 상부단면의 최적설계 및 고품질의 시공을 목표로 실무 기술자들이 보다 간편하게 이용할 수 있는 기술도구를 제시하고자 한다.

2. ILM 공법 교량

2.1 ILM 공법의 개요

ILM 공법은 1960년대 초에 서독의 Stuttgart시에 있는 Leonhardt & Andr사의 Fritz Leonhardt, Willi Baur 및 Andr 3인에 의해서 개발된 공법으로 그 후 점차적으로 발전되어 현재에 이르고 있다(신현묵, 2009; 이광민, 1992; Göhler 등, 2000). 이 공법은 사진 2.1에서와 같이 상부구조물을 교대 후방에 미리 설치한 제작장에서 1개의 세그먼트(segment)씩 제작한다. 그리고, 교량의 지간을 통과할 수 있는 평형 압축력을 포스트텐션 방법에 의해 미리 제작된 상부 구조물에 프리스트레스를 도입시킨 후 교량의 교축방향으로 특수 압출장비를 이용하여 밀어내는 공법이다.

사진 2.1 ILM공법 교량

국가 경제의 발전을 위해서 사회간접시설에 대한 투자는 필수불가결한 요소이다. 우리나라의 경우에도, 국가 경쟁력을 좌우하는 물류비용을 최소화하기 위해서 고속도로를 신설하거나, 차량의 통과속도를 일정수준 이상 확보하기 위한 고속도로의 선형 개량사업이 활발히 진행하고 있다. 이에 따라 국토의 70%를 차지하는 산악지역 및 하천을 통과하기 위한 장지간의 교량 건설이 불가피해졌다.

국내의 경우, 강박스거더교를 포함하는 합성거더교는 대부분 벤트가설공법 또는 대블럭 가설공법으로 시공되고 있으며, 그 외의 다른 시공법들은 특수한 공법으로 취급되고 있어 시공성 측면에서 다양성을 확보하지 못한 상황이라고 할 수 있다. 현재 프랑스에서는 소수주거더교의 경우 약 80%가 압출가설공법으로 시공되고 있으며, 압출가설공법은 유럽을 중심으로 일반적인 공법으로 자리 잡아 소수주거더교 이외에도 박스거더교, 아치교, 사장교 등과 같은 다양한 교량형식에 적용되고 있다(황민오 등, 2004).

우리나라에서 건설된 ILM교량의 분포는 고속도로와 고속국도를 대상으로 2000~2007년 내에 설계완료를 통해 국내에서 발주 되었던 총 41건의 PSC(PreStressed Concrete) 박스거더교량의 자료를 분석해보면 표 2.1과 그림 2.1로 확인 할 수 있다(조지훈 등, 2008).

표 2.1 PSC 공법별 점유현황

PSC 공법	고속도로	국도	합계
ILM 공법	13(81%)	4(16%)	17(41%)
MSS 공법	2(13%)	8(32%)	10(24%)
FCM 공법	0(0%)	6(24%)	6(15%)
FSM 공법	1(6%)	7(28%)	8(20%)
합계	16	25	41

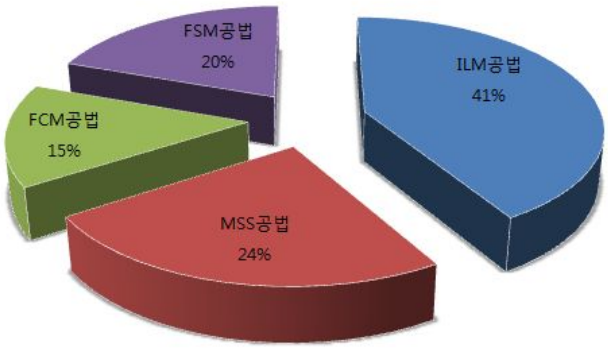


그림 2.1 PSC 공법별 점유현황

표 2.1과 그림 2.1에서 보는 바와 같이 교량 현황을 살펴보면 ILM공법 현장이 17건, MSS(Movable Scaffolding System)공법 10건, FCM(Free Cantilever Method)공법 6건, 그리고 FSM(Full Staging Method)공법 8건 등으로 ILM 공법 현장이 가장 많은 비율을 차지하고 있다(조지훈 등, 2008).

2.2 ILM 공법의 특징

2.2.1 장점

1) 기술적인 측면

(1) 제작장은 공장생산이 갖는 모든 장점을 갖는다. 즉, 반복작업으로 수행될 뿐만 아니라 전천후 제작이 가능하다.

(2) 거푸집의 반복되는 가설 및 해체작업으로 인한 시간 낭비가 없고, 계곡, 하천, 교통 장애물의 통과 지역에 적합하다.

(3) 연속교로 시공되므로 신축이음장치의 설치개소가 줄어 차량의 주행성이 양호하다.

2) 경제적인 측면

(1) 동일한 작업 공정의 반복이므로 노무비가 절감된다.

(2) 거푸집 및 가시설물의 재사용과 조립해체작업이 간편하다.

(3) 일정한 장소에서 철근가공조립 및 긴장작업이 용이하다.

(4) 자재 운반거리가 단축된다.

(5) 콘크리트 품질관리가 우수하다.

(6) 작업장에 보온설비를 함으로써 외부 기후조건과 상관없이 공사를 진행할 수 있으므로 공사기간이 단축된다.

(7) 가설 구조물(강재거푸집, 압출추진코) 및 장비의 타공사에 전용이 가능하다.

(8) 시공중에 안전도가 높고, 현장의 청결성으로 건설공해를 줄일 수 있다.

2.2.2 단점

1) 적용 대상교량은 직선구간 혹은 단일 원곡선 구간(Val Restel 교량의 경우 R=150 m)이다.
2) 교대 배면에 일정한 작업 공간을 확보할 수 있어야 한다.
3) 구조물 제작시 엄격한 규격관리가 필요하다. 제작 규격오차가 발생되면 일정량만큼 압출 후에는 교정 및 수정이 매우 어려우며 그 비용도 많이 소요된다.
4) 상부구조물의 단면높이가 일정하여야 하므로, 지간이 긴 교량의 경우에 단면 변화에 의한 재료절감을 기대할 수 없다.
5) 압출하는 동안 발생하는 일시적인 모멘트를 지지시키기 위해서는 별도의 축방향 프리스트레싱이 필요하므로 긴장재의 소요량이 많다.
6) 교장이 짧은 경우, 가설구조물 및 제작장 등에 대한 비용의 부담이 크다.

2.3 압출진행에 따른 상부 단면력의 변화

ILM 교량은 압출이 진행되는 동안, 상부의 각 단면이 지간 중앙부와 지점부를 모두 지난다. 그러므로 모든 단면이 사하중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 된다.

그림 2.2는 압출되는 동안의 발생되는 상부구조의 대표적인 단면 위치를 나타내고 있다. 먼저 그림 2.2(a)는 완성될 교량 구조계에서의 단면 위치와 압출 중의 단면 위치가 일치하는 경우이고, 그림 2.2(b)는 완성될 교량 구조계에서 지점부에 놓이게 될 단면이 지간 중앙부에 위치하는 경우이다.

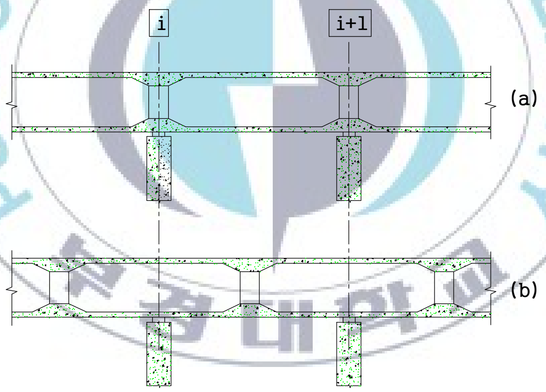


그림 2.2 압출되는 동안의 대표적인 단면위치

그림 2.2(a)와 그림 2.2(b)의 2가지 경우 모두 지간 중앙부에 위치하고 있는 단면은 완성구조계에 비하여 안전할 것이다. 압출되는 동안은 사하중만 작용하므로 사용하중이 작용되는 완성 구조계 때보다는 작은 휨 모멘트와 전단력을 가지기 때문이다. 또한, 압출과정의 안전을 위해 작용시킨 적당한 긴장력 때문에 이들 전단력과 휨 모멘트의 영향은 더욱 감소될

것이다.

한편, 지점부에 위치하는 단면은, 그림 2.2(a)인 경우, 압출되는 동안의 응력은 완성 구조계때의 응력보다는 작고, 단면의 설계가 일반적으로 사용하중에 적합하게 설계되기 때문에 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 그림 2.2(b)의 현재의 지점부 단면은 교량 완성 구조계에서 지간 중앙부에 위치할 단면으로서 정 모멘트와 낮은 전단력에 저항할 수 있게 설계되어져 있다. 그런데, 현재 상태에서는 단면의 저항능력보다 큰 크기의 부 모멘트와 전단력을 받고 있다. 이러한 일시적인 응력에 저항할 수 있기 위해서는 사용상태를 위한 저항능력보다 큰 저항력을 갖는 단면으로 설계되어져야 할 것이다.

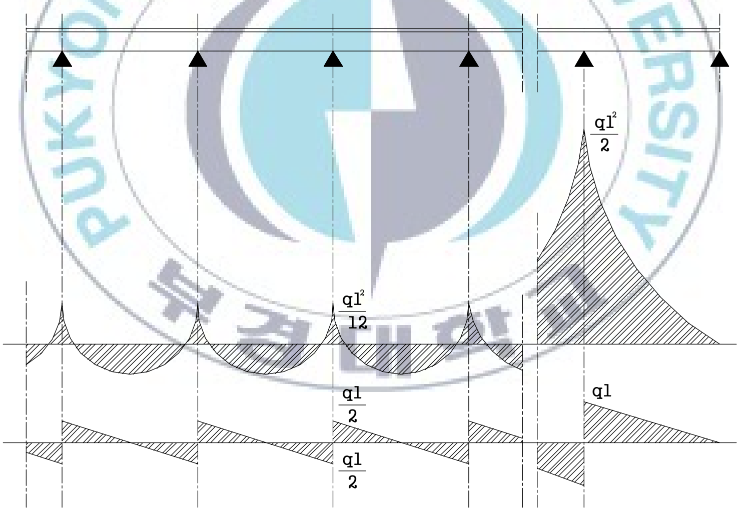


그림 2.3 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도

그림 2.3은 ILM 교량 상부구조계의 맨 첫 번째 지간의 선단이 마지막 지점부에 도달하기 직전의 상태에서의 휨 모멘트와 전단력을 나타내고 있다. 맨 앞쪽의 캔틸레버 부분의 길이를 지간의 길이와 같은 l이라 할 때,

첫 번째 지점에서의 부모멘트는 $ql^2/2$으로 나머지 배면지점의 $ql^2/12$보다 무려 6배나 높고, 전단력은 ql로 배면에서의 $ql/2$보다 2배 높게 나타난다.

배면(rear zone)지점의 모멘트와 같은 크기의 단면력이 발생되는 순간의 캔틸레버의 길이 l_{cr}을 구해보면 식 (2.1)로부터 $l_{cr} = 0.4l$이 된다.

$$\frac{ql_{cr}^2}{2} = \frac{ql^2}{12} \tag{2.1}$$

이러한 일시적으로 높은 응력을 해결하기 위한 방법으로 크게 2가지로 분류할 수 있다.

1) 지점수를 늘려서 지간 길이 l을 작게하여 압출시의 응력을 줄이는 방법.
2) 캔틸레버 부분의 중량을 감소시켜 응력을 줄이는 방법.

1)의 해결방안에 대한 적용은 각 지간에 임시교각을 설치하여 지간 길이 l을 줄이는 방법이다. 한 지간에 여러 개의 임시교각을 설치하여 더욱 응력을 줄일 수도 있지만, 실질적으로 임시교각의 지점이동, 시공오차, 상부 단면의 휨 강성 등의 이유로 1 개를 설치하였을 때처럼 두드러진 응력 감소는 나타나지 않는다. 따라서 일반적으로 1지간에 1개의 임시교각을 설치한다.

2)의 해결방안은 맨 첫 번째 지간부의 끝단의 상부단면에 콘크리트 중량보다 더 가벼운 구조체(압출추진코)를 연결시켜 전방의 교각지점에 상부구조보다 먼저 도달시키는 방법이다. 이러한 압출추진코를 이용한 방법은 임시교각을 설치하는 방법보다 비교적 간단하다는 이점이 있다. 또한,

이 방법은 안전하고, 빠르며, 경제적인 편이다. 따라서 압출추진코를 이용한 방법이 대부분의 ILM 공법에서 압출 중 상부단면에 발생되는 일시적으로 큰 크기의 응력을 제어하기 위한 기본적인 방법으로 채택되고 있다. 압출추진코는 강재 트러스나 플레이트 거더(plate girder)로 제작하여 사용되고 있다. 일반적으로는 두 개의 강재 플레이트 거더(steel plate girder)를 콘크리트 상부 끝에 연결시키며, 이때 콘크리트 상부단면의 하부와 플레이트 거더의 하부 플랜지가 일치되게 연결시킨다.

3. 단순화 해석식의 이론적 배경

3.1 매개변수 및 기본가정

이 연구에서의 압출 중 상부단면의 부재력 변화에 영향을 줄 수 있는 압출추진코와 교량 상부단면의 기하학적, 역학적인 특성을 고려하는 매개변수는 다음과 같다(Rosignoli, 2002; 안태욱, 2006).

1) 교량구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 ; $\dfrac{l_n}{l}$

2) 교량구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위길이당 중량비 ; $\dfrac{q_1}{q}$, $\dfrac{q_2}{q}$

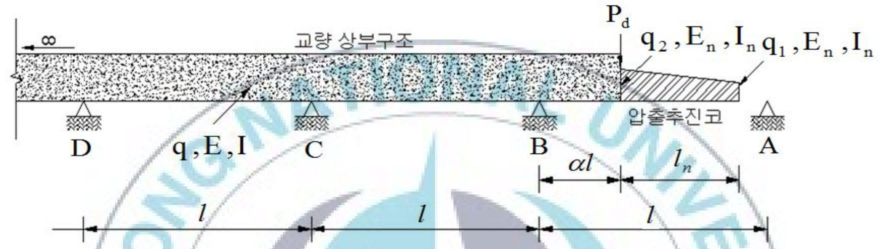
3) 교량구조(I)와 압출추진코(I_n)의 강성비 ; $\dfrac{I_n}{I}$

4) 교량구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 ; $\dfrac{E_n}{E}$

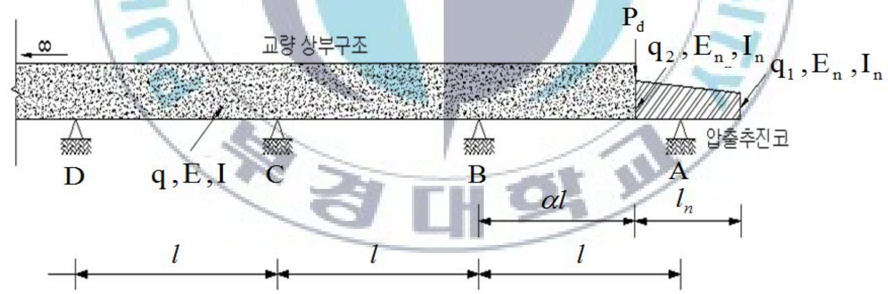
여기서, q_1은 압출추진코 끝단에서의 단위 중량을 의미하고, q_2는 압출추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출추진코의 단위 중량을 의미한다. 그리고, I_n, E_n은 압출추진코의 단면 2차모멘트와 탄성계수를 의미한다.

상부단면과 압출추진코로 이루어진 구조체가 압출이 진행되는 동안 가질 수 있는 대표적인 구조계는 그림 3.1과 같이 2단계로 정의한다. 압출추진코가 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태(그림 3.1(a) 참조)를 1단계 압출이라 정의하고, 압출추진코가 지점 A에 도달한 후부터 콘크

리트 상부가 지점 A에 도달 할 때까지(그림 3.1(b) 참조)를 2단계 압출이라 정의한다. 그림 3.1에서 압출되는 콘크리트 상부구조의 길이비를 αl로 정의하고 1단계와 2단계 압출의 α의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$이다. 그림 3.1(a)와 그림 3.1(b)에서 정의된 P_d는 교량 상부단면과 압출추진코와의 연결부 다이아프램 집중하중을 나타낸 것이다.



(a) 1단계 압출



(b) 2단계 압출

그림 3.1 압출시의 Nose-Deck 구조계

한편 이 연구에서는 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용의 해석 모델에 다음과 같은 가정들을 적용한다.

1) 콘크리트 상부구조는 일정한 강성 및 중량을 가진다.
2) 압출추진코의 중량비는 변단면으로 즉, 압출추진코의 높이는 단면의 길이방향으로 선형적으로 변화하고, 단면의 폭방향으로 일정하다고 가정한다.
3) 압출추진코의 강성비는 등단면으로 일정한 강성을 가진다고 가정한다.
4) 그림 3.1의 D지점 이후는 지간길이가 l인 무한개의 연속보로 되어 있다고 가정한다.
5) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 긴장력은 도심축을 지난다고 가정한다.

3.2 압출추진코의 강성 변화가 상호작용에 미치는 영향도

그림 3.2는 실제 압출추진코의 단면을 나타낸 도면이다. 대부분의 압출추진코는 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 이상화 시킬 수 있는지에 대한 판단을 하기 위해서는 교량 상부구조와 압출추진코의 강성 변화가 상호작용에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석이 필요하다.

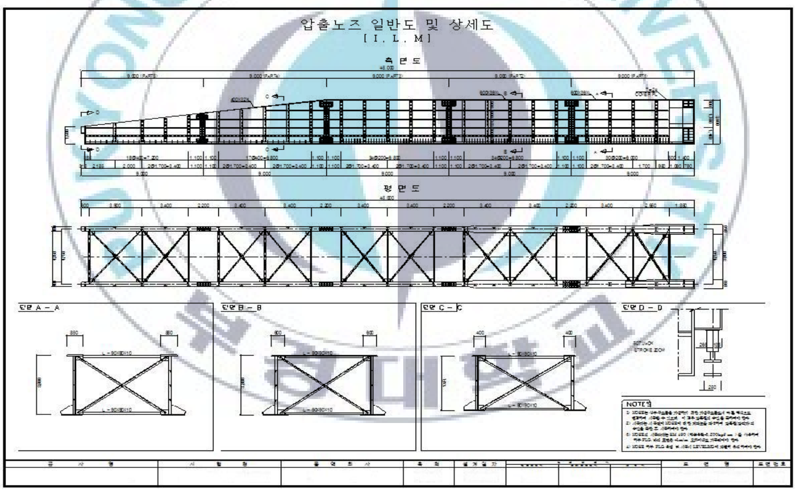


그림 3.2 압출추진코의 도면

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

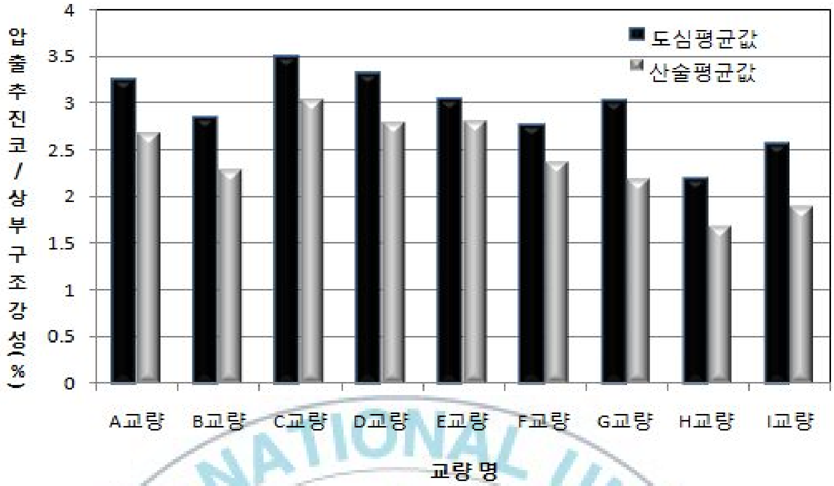


그림 3.3 각 교량별 압출추진코와 상부구조의 강성비 분포도 (도심평균값, 산술평균값)

그림 3.3은 2000년 이후 공용중인 실제 9개의 ILM 교량 설계자료를 상부구조의 강성(I)에 대한 압출추진코의 도심평균과 산술평균 강성(I_n)의 비율(I_n/I)로 나타내었다. 여기서, 도심평균값은 설계도면을 통해 압출추진코의 전체길이에 대한 도심위치에서의 강성값을 산출한 것이다. 그리고 산술평균값은 역시 설계도면을 통해 압출추진코의 전체 길이를 세분화 시켜 각각의 구간에서의 최대, 최소 강성에 대한 평균값이다. 그림 3.3에서 보는 바와 같이 9개 교량 대부분의 상부구조의 강성에 대한 압출추진코의 강성 비율은 2∼3.5%에 걸쳐 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 각 교량의 상세자료는 부록 Ⅰ에 수록하였다.

압출중인 ILM 교량 상부단면의 설계단면력은 그림 3.1(a)의 지점 B와 지점 C에서의 부(-)모멘트, 그리고 A-B경간과 B-C경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정 될 수 있다. 일반적으로는 지점 B에서의 부모멘트가 압출 중의 설계단면력으로 결정된다(Rosignoli, 2002; 안태욱, 2006).

압출추진코의 강성변화에 대한 B점 휨모멘트의 영향을 분석하기 위해 다음 2가지 민감도 해석을 수행한다. 먼저 압출추진코의 강성을 등단면으로 가정한 상태에서 강성의 크기를 실제 교량 변화분포인 2~3.5% 정도 변화시키면서 단면력의 변화를 분석한다. 그리고 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.

3.2.1 등단면 압출추진코의 강성변화

그림 3.1의 1단계 압출에서는 압출추진코가 캔틸레버 상태로 놓여지게 되므로 B점의 휨모멘트는 압출추진코의 강성에 영향을 받지 않는다. 그러나 2단계 압출에서는 압출추진코의 강성에 B점의 휨모멘트에 영향을 받게된다.

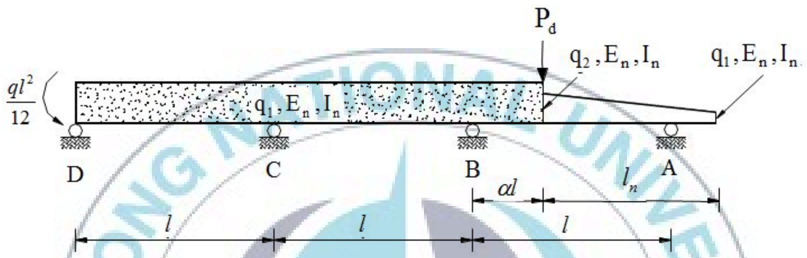


그림 3.4 압출추진코와 상부구조의 해석 모델링

2단계 압출에서 압출추진코의 강성 변화가 B점의 휨모멘트에 얼마나 영향을 미치는지를 판단하기 위한 전산구조해석 모델은 그림 3.1에서 D지점 배면의 상부구조를 무한 강성체로 가정한 그림 3.4의 단순화 모델을 사용한다. 민감도 해석 조건은 표 3.1과 같이 그림 3.3에서 조사된 교량들에 대한 평균값을 사용한다.

표 3.1 압출추진코와 상부구조 변수의 평균값

구분	평균값
상부구조의 지간 길이(l)	50 m
압출추진코의 길이(l_n)	36 m
상부구조의 중량(q)	225 kN/m
압출추진코의 중량(q_2, q_1)	$q_2 = 18.2$ kN/m, $q_1 = 10.8$ kN/m
상부구조의 강성(I)	14 m^4
압출추진코의 강성(I_n)	0.28~0.49 m^4
다이아프램의 집중하중(P_d)	800 kN
상부구조의 탄성계수	2.8×10^7 kN/m^2
압출추진코의 탄성계수	2.1×10^8 kN/m^2

그림 3.5는 등단면 압출추진코의 강성변화에 대한 민감도 해석범위이다. 압출추진코의 강성(I_n)변화는 표 3.1에 보인 0.28~0.49 m^4의 범위에서 해석한다. 상부구조의 강성(I)은 14 m^4로 고정시켰다. 한편, 압출추진코의 중량은 전체길이에 대한 높이의 비율로 계산된 q_2와 q_1값을 사다리꼴 등분포 형태로 적용하고, 다이아프램의 하중은 집중하중으로 표 3.1의 P_d값을 사용한다. 여기서, q_1, q_2, P_d 값은 표 3.1과 같이 9개의 실제 교량들에 대한 평균값인 10.8 kN/m, 18.2 kN/m, 800 kN을 적용한다.

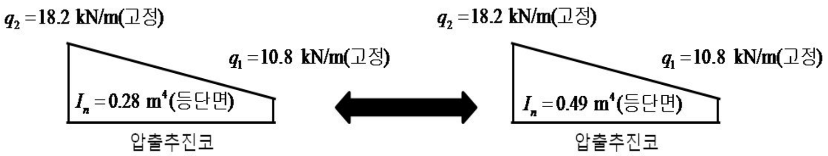


그림 3.5 민감도 해석범위(압출추진코의 강성 변화)

표 3.2 강성비의 변화에 따른 휨모멘트 비율

상부구조의 강성(I1, m^4)	압출추진코의 강성(I2, m^4)	I2/I1(%)	Mb (kN•m)	비율 (%)
14	0.28	2	-63091	104
14	0.294	2.1	-62590	103
14	0.308	2.2	-62128	102
14	0.322	2.3	-61701	101
14	0.336	2.4	-61306	101
14	0.35	2.5	-60938	100
14	0.364	2.6	-60595	99
14	0.378	2.7	-60275	99
14	0.392	2.8	-59976	98
14	0.406	2.9	-59694	98
14	0.42	3	-59430	98
14	0.434	3.1	-59181	97
14	0.448	3.2	-58946	97
14	0.462	3.3	-58724	96
14	0.476	3.4	-58514	96
14	0.49	3.5	-58315	96

그림 3.6 강성 변화에 따른 휨모멘트의 변화

표 3.2와 그림 3.6은 민감도 해석 결과이다. 그림 3.6의 수평축은 강성비의 비율을 나타내며, 수직축은 강성비 2.5% 때의 휨모멘트에 대한 각 강성비 경우의 휨모멘트 비율을 나타내고 있다. 강성비 2.5 %는 표 3.2의 압출추진코에 대한 모든 강성값들에 대한 평균값으로 산출된 값이다.

그림 3.6에서 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, 각 교량에서의 압출추진코 강성에 대한 입력 오차에 따른 변화 가능성은 훨씬 미소할 것이다. 한편 압출추진코의 강성이 클수록 강성변화에 따른 B점의 휨모멘트의 민감도는 줄어든다. 따라서, 압출추진코의 상대적 강성이 상부구조에 비하여 2~3.5% 내외정도로 아주 작은 상태에서 압출추진코의 강성을 등단면으로 이상화 시키는데에 따른 변화가 압출중 교량의 휨모멘트에 미치는 영향은 아주 미소하다고 판단할 수 있다.

3.2.2 실제단면과 등단면의 비교

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

표 3.3과 그림 3.7은 실제단면의 강성값을 적용한 그림 3.2의 B점에서의 휨모멘트에 대한 도심평균과 산술평균 강성값으로 해석한 휨모멘트의 비율을 보여준다.

표 3.3 2단계 압출시 강성의 영향력

실제사례교량	실제단면의 휨모멘트 (kN·m)	등단면	
		산술평균값(%)	도심평균값(%)
A	-86026	101.2	100.7
B	-64146	102.4	101.9
C	-70098	101.4	100.7
D	-77275	101.6	100.9
E	-60933	102.5	101.3
F	-56021	103.0	100.4
G	-52248	102.7	101.2
H	-89821	100.9	98.9
I	-89136	101.8	98.9

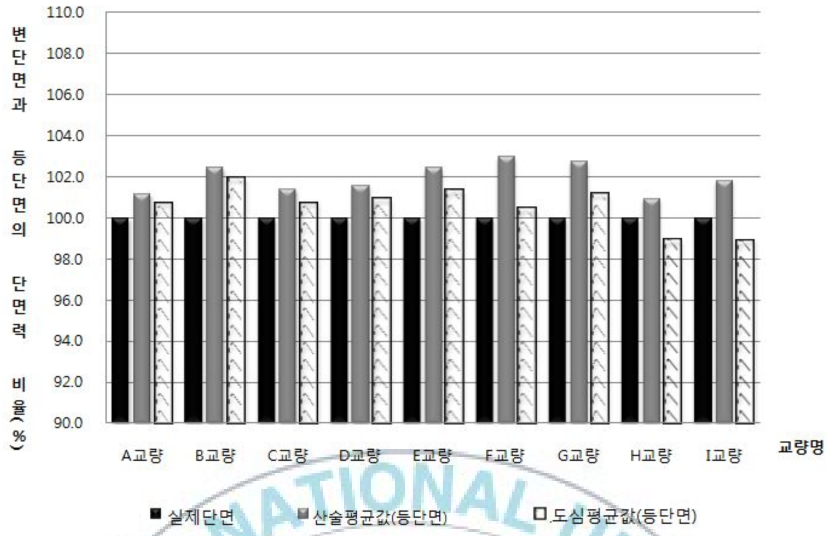


그림 3.7 2단계 압출시 강성의 영향력

표 3.3과 그림 3.7에서 보는 바와 같이 산술평균값 등단면의 경우 약 3% 이내의 차이를 보였다. 그러나 도심평균값 등단면의 경우 ±2%의 차이를 보였다. 그 중 H교량과 I교량의 경우는 실제단면을 사용하였을 때보다 단면력이 낮게 나와 불안전한 설계가 될 수도 있다. 따라서 등단면 강성을 판단하는 방법과 결정기준이 필요하다. 이에 대해서는 4장에서 설명할 것이다.

표 3.3과 그림 3.7에서 실제단면을 등단면으로 이상화 시켜도 압출중 단면력은 2~3% 정도 밖에 영향이 없다. 따라서, 이 연구에서는 압출추진코의 단면 강성을 등단면으로 사용하여 압출추진코와 상부구조의 상호작용 해석식을 산출할 것이다.

3.3 압출추진코의 중량 변화가 상호작용에 미치는 영향도

압출추진코의 중량은 1단계 압출과 2단계 압출 모두의 경우에 영향을 주는 변수이다. 압출추진코 중량 변화에 대한 민감도 해석은 표 3.1의 중량이 전체의 길이에 동일하다고 가정하였을 때와 전체 길이에서 선형적으로 변화한다고 가정하였을 때를 비교 분석한다.

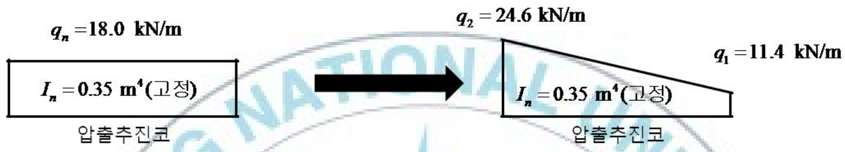


그림 3.8 민감도 해석범위(압출추진코 중량의 변화)

그림 3.8은 압출추진코의 중량의 변화에 대한 휨모멘트의 민감도 해석범위이다. 압출추진코의 강성(I_n)과 상부구조의 강성(I)은 표 3.1에서의 평균값 0.35 m^{4}과 14 m^{4}로 고정시켰다. 민감도 해석은 압출추진코의 중량의 전체 길이에 대해 동일하다고 가정한 18.0 kN/m에서부터, 전체 길이에 높이비로 변화시켜 q_2의 값은 24.6 kN/m까지 1.1 kN/m씩 증가시키고 q_1값은 11.4 kN/m로 1.1 kN/m씩 감소시켜 적용하였다. 이때 압출추진코의 중량 기울기를 변화시켜도 평균중량인 18.0 kN/m는 변화 없다. 마지막의 경우인 $q_2 = 24.6$ kN/m와 $q_1 = 11.4$ kN/m의 값은 실제교량들을 분석하였을 때 압출추진코와 상부구조의 연결부의 중량과 압출추진코 끝단의 중량에 대한 최대 기울기 값을 나타내고 있다. 그리고 다이아프램 하중은 표 3.1의 P_d값 800 kN을 적용한다.

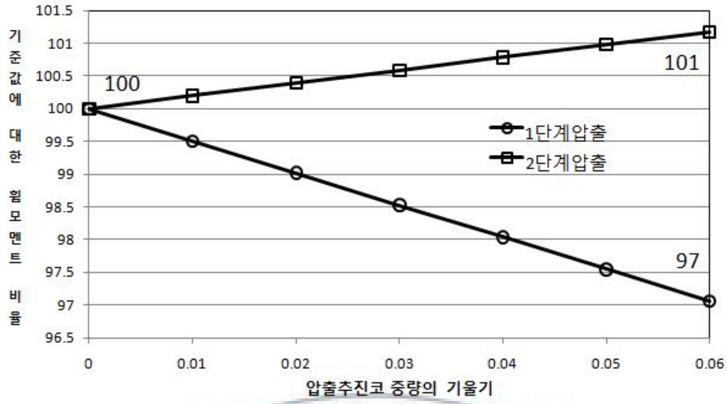


그림 3.9 중량의 기울기에 따른 단면력의 변화

그림 3.9의 수평축은 중량을 등단면으로 가정하였을 때와 변단면으로 가정하였을 때를 나타내고 있다. 즉, 수평축의 값이 0인 지점은 등단면으로 가정한 것이며, 0~0.06의 범위는 압출추진코와 상부구조의 연결부 중량과 압출추진코 끝단 중량의 기울기를 나타내고 있다. 그리고, 0.06은 실제교량들을 분석하였을 때 압출추진코와 상부구조의 연결부의 중량과 압출추진코 끝단의 중량에 대한 최대 기울기 값을 나타내고 있다. 수직축의 값은 중량을 등단면으로 가정한 값을 기준으로 휨모멘트의 비율(변단면/등단면)을 나타내고 있다. 그림 3.9의 동그라미 꼴 도형으로 이루어진 선은 1단계 압출 시 최대 단면력이 나타나는 곳에서의 휨모멘트 비율이다. 그리고, 사각형 꼴 도형으로 이루어진 선은 2단계 압출 시 최대 단면력이 나타나는 곳에서의 휨모멘트 비율을 비교한 것이다. 그 결과 1단계 압출 시에는 등단면으로 가정하였을 때 보다 변단면으로 가정하면 약 3%정도로 값이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고, 2단계 압출 시에는 약 1%정도로 값이 증가하는 것을 확인하였다.

그림 3.9와 같이 중량을 등단면으로 가정하였을 때와 변단면으로 가정하

였을 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, 2006). 그러나, 중량의 변화에 의해 단면력의 궤적이 변화하면서 최대 단면력의 압출 위치가 달라지는 경우가 발생한다.

따라서 이 연구에서 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, 다이아프램의 중량을 집중하중으로 치환시켜 고려한 변형된 등단면 해석식을 제안할 것이다.

4. 해석식의 단순화

4.1 유사 등단면의 1단계 해석식 $\dfrac{M_B^1}{ql^2}$

1단계 압출의 정의가 압출추진코의 끝이 지점 A에 도달하기 직전까지이므로 α의 범위는 $0 \le \alpha < 1 - \dfrac{l_n}{l}$이 된다. 1단계 압출에서 지점 B에 발생되는 상부단면의 휨모멘트를 M_B^1라 정의한다. 먼저, 압출이 시작되기 직전 즉, $\alpha = 0$인 경우에 휨모멘트 M_B^1는 다음 식 (4.1)과 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_B^1 = -\frac{1}{2}q_1 l_n^2 - \frac{1}{6}(q_2 - q_1)l_n^2 \tag{4.1}$$

$$\frac{M_B^1}{ql^2} = -\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\frac{l_n^2}{l^2} \tag{4.2}$$

다음으로, 압출이 진행되는 동안 즉, 압출추진코의 끝단이 지점 A에 도달하기 직전까지의 지점 B의 휨모멘트 M_B^1는 다음 식 (4.3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\mathrm{P_d}$는 압출추진코와 상부구조 연결부의 다이아프램 집중하중을 의미한다.

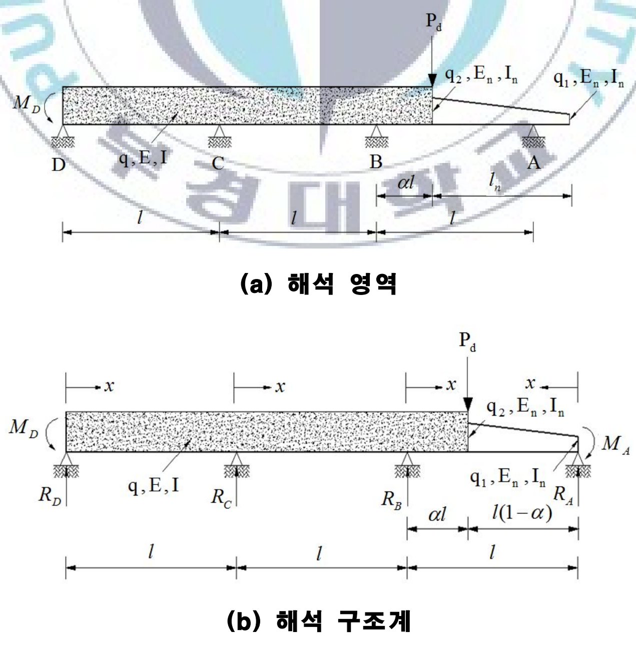
$$\frac{M_B^1}{ql^2} = -\frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{q_1}{q}\alpha\frac{l_n}{l} - \frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{2}\left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\left(\alpha\frac{l_n}{l} + \frac{1}{3}\frac{l_n^2}{l^2}\right) - \frac{\mathrm{P_d}}{ql}\alpha \tag{4.3}$$

식 (4.3)에서 보는 바와 같이 1단계 압출에서, 지점 B의 휨모멘트는 M_B^1는 압출추진코와 교량 상부단면과의 길이비($\frac{l_n}{l}$)와 중량비($\frac{q_1}{q}$, $\frac{q_2}{q}$)만의 함수이고, 강성비($\frac{I_n}{I}$)와 탄성계수비($\frac{E_n}{E}$)와는 무관함을 알 수 있다.

4.2 유사등단면의 2단계 해석식 $\frac{M_B^2}{ql^2}$

2단계 압출은 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 α의 범위는 $1-l_n/l \le \alpha \le 1$이다.

2단계 압출이 진행되는 동안에 지점 B에 발생되는 상부단면의 휨모멘트를 M_B^2라 정의한다. 휨모멘트 M_B^2의 산정을 위해서 그림 3.1의 D지점 이후는 무한연속보로 가정한 것에 근거하여 교량 전체 구조계에서 그림 4.1과 같은 3경간 연속보를 해석영역으로 선정하였다.



(a) 해석 영역

(b) 해석 구조계

그림 4.1 2단계 압출 3경간 연속보 해석 구조계

그림 4.1에서 $M_D=\frac{ql^2}{12}$으로 가정할 때, 휨모멘트 M_B^2는 식 (4.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_B^2=R_D2l+R_Cl-\frac{ql^2}{12}-2ql^2=R_D2l+R_Cl-\frac{25}{12}ql^2 \tag{4.4}$$

그림 4.1의 구조계는 4개의 지점 A, B, C, D에서 각각의 수직반력 R_A, R_B, R_C, 그리고 R_D를 갖는 2차 부정정 구조계이다. 이 연구에서는 식 (4.6)을 완전한 해석식으로 만들기 위해서 2개의 지점반력은 평형조건식으로부터, 그리고 나머지 2개의 지점반력은 부정정 구조물의 해석방법인 최소일의 방법을 이용한 추가의 조건식으로부터 산정한다.

먼저, 그림 4.1의 해석구조계에서 지점반력 R_A는 지점 D에서 모멘트 총합 $\sum M_D=0$, R_D는 지점 A에서 모멘트 총합 $\sum M_A=0$을 취하는 평형조건식으로부터 식 (4.5)와 (4.6)으로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}R_A=&-\frac{1}{3}R_C-\frac{2}{3}R_B-\frac{M_D}{3l}+\frac{M_A}{3l}+\frac{2}{3}ql+\frac{2}{3}q\alpha l+\frac{1}{6}q\alpha^2l+\frac{2}{3}q_Al(1-\alpha)\\&+\frac{1}{3}q_A\alpha l(1-\alpha)+\frac{1}{6}q_Al(1-\alpha)^2+\frac{1}{3}(q_2-q_A)l(1-\alpha)+\frac{1}{6}\alpha l(q_2-q_A)(1-\alpha)\\&+\frac{1}{18}(q_2-q_A)l(1-\alpha)^2+\frac{\mathrm{P_d}}{3}(2+\alpha)\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}R_D=&-\frac{2}{3}R_C-\frac{1}{3}R_B+\frac{4}{3}ql+\frac{1}{3}q\alpha l(1-\alpha)+\frac{q}{6}\alpha^2l+\frac{1}{6}q_Al(1-\alpha)^2\\&+\frac{1}{9}(q_2-q_A)l(1-\alpha)^2+\frac{M_D}{3l}-\frac{M_A}{3l}+\frac{\mathrm{P_d}}{3}(1-\alpha)\end{aligned} \tag{4.6}$$

다음으로 지점반력 R_B와 R_C는 식 (4.7)과 (4.8)의 최소일의 방법을 적용하여 산정하였다.

$$\sum \int \frac{1}{EI} M \left(\frac{\partial M}{\partial R_B} \right) dx = 0 \tag{4.7}$$

$$\sum \int \frac{1}{EI} M \left(\frac{\partial M}{\partial R_C} \right) dx = 0 \tag{4.8}$$

여기서 M은 해석구간에서의 휨 모멘트식을 의미한다.

표 4.1은 그림 4.1.(b)의 적분 원점 A, B, C, D로 부터의 거리 x에 대한 휨모멘트 식(M_x)과 지점반력 R_B와 R_C의 편도함수 $\partial M/\partial R_B$와 $\partial M/\partial R_C$를 정리한 것이다. 이때, Ⅰ구간은 그림 4.1에서 DC경간을, Ⅱ구간은 CB경간을, Ⅲ구간은 지점 B에서 콘크리트와 압출추진코 연결부까지를, Ⅳ구간은 지점 A에서 콘크리트 상부와 압출추진코 연결부까지를 말한다.

표 4.1 최소일의 방법

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

표 4.1의 내용으로부터 식 (4.7)과 (4.8)의 조건을 식 (4.9)와 같이 수정하므로 Ⅲ, Ⅳ구간의 방정식을 소거할 수 있어 보다 간단한 조건을 만들 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 식 (4.7)과 (4.8)의 조건식을 식 (4.9)와 (4.10)의 조건식으로 수정하여 적용시킨다.

$$\sum\int\frac{1}{EI}M\left(\frac{\partial M}{\partial R_B}\right)dx-2\sum\int\frac{1}{EI}M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx=0 \tag{4.9}$$

$$\sum\int\frac{1}{EI}M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx=0 \tag{4.10}$$

먼저, 식 (4.9)를 풀이하면 식 (4.11)과 같이 정리되고, 이어서 식 (4.12)와 같이 된다.

$$\frac{1}{3}R_Dl^3-\frac{1}{6}ql^4+\frac{2}{3}R_Dl^3+\frac{1}{6}R_Cl^3-\frac{1}{2}ql^4=0 \tag{4.11}$$

$$R_D=-\frac{1}{6}R_C+\frac{2}{3}ql \tag{4.12}$$

한편, 마지막 조건식인 식 (4.10)의 좌변을 표 4.1에서 정의한 각 구간별로 정리하면 각 각 식(4.13), (4.14), (4.15) 그리고 식 (4.16)과 같이 된다.

Ⅰ 구간 :

$$\int_0^l\frac{1}{EI}(R_Dx-\frac{1}{2}qx^2-M_D)(-\frac{2}{3}x)dx=\frac{1}{EI}\left(-\frac{2}{9}R_Dl^3+\frac{1}{3}M_Dl^2+\frac{1}{12}ql^4\right) \tag{4.13}$$

Ⅱ 구간 :

$$\int_0^l \frac{1}{EI}\left\{R_D(l+x)+R_Cx-M_D-\frac{q(l+x)^2}{2}\right\}\left(\frac{1}{3}x-\frac{2}{3}l\right)dx$$

$$=\frac{1}{EI}\left(-\frac{13}{18}R_Dl^3-\frac{2}{9}R_Cl^3+\frac{1}{2}M_Dl^2+\frac{13}{24}ql^4\right) \tag{4.14}$$

Ⅲ 구간 :

$$\int_0^{\alpha l} \frac{1}{EI}\left\{R_D(2l+x)+R_C(l+x)+R_Bx-M_D-\frac{q(2l+x)^2}{2}\right\}\left(\frac{1}{3}x-\frac{1}{3}l\right)dx$$

$$=+\frac{1}{EI}\left\{\frac{1}{3}R_D\alpha^2l^3+\frac{1}{9}R_D\alpha^3l^3+\frac{1}{6}R_C\alpha^2l^3+\frac{1}{9}R_C\alpha^3l^3+\frac{1}{9}R_B\alpha^3l^3-\frac{1}{6}M_D\alpha^2l^2\right.$$

$$-\frac{1}{3}q\alpha^2l^4-\frac{2}{9}q\alpha^3l^4-\frac{1}{24}q\alpha^4l^4-\frac{2}{3}R_D\alpha l^3-\frac{1}{3}R_C\alpha l^3-\frac{1}{6}R_C\alpha^2l^3-\frac{1}{6}R_B\alpha^2l^3$$

$$\left.+\frac{1}{3}M_D\alpha l^2+\frac{2}{3}q\alpha l^2+\frac{1}{3}q\alpha^2l^4+\frac{1}{18}q\alpha^3l^4\right\} \tag{4.15}$$

Ⅳ 구간 :

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{1}{E_nI_n}\left\{R_Ax-M_A-\frac{q_A}{2}x^2-\frac{1}{6}(q_x-q_A)x^2\right\}\left(-\frac{1}{3}x\right)dx$$

$$=\frac{1}{E_nI_n}\left\{-\frac{1}{3}R_A\int_0^{l(1-\alpha)}x^2dx+\frac{1}{3}M_A\int_0^{l(1-\alpha)}xdx\right.$$

$$\left.+\frac{1}{6}q_A\int_0^{l(1-\alpha)}x^3dx+\frac{1}{18}\frac{1}{l_n}(q_2-q_1)\int_0^{l(1-\alpha)}x^4dx\right\} \tag{4.16}$$

다음으로 식 (4.13)에서부터 식 (4.16)에 있는 지점반력 R_A, R_B, R_D를 지금까지 얻어진 지점반력에 관한 3개의 관계식들인 식 (4.5), (4.6)과 식

(4.12)를 이용하여 모두 R_C의 함수로 치환시킨 후에 식 (4.10)을 적용한다. 먼저, 식 (4.6)과 식 (4.12)로부터,

$$R_B = -\frac{3}{2}R_C + 2ql + q\alpha l(1-\alpha) + \frac{1}{2}q\alpha^2 l + \frac{1}{2}q_A l(1-\alpha)^2$$

$$+\frac{1}{3}(q_2 - q_A)l(1-\alpha)^2 + \frac{M_D}{l} - \frac{M_A}{l} + \mathrm{P_d}(1-\alpha) \tag{4.17}$$

가 얻어지고, 식 (4.5)와 식 (4.17)로부터,

$$R_A = +\frac{2}{3}R_C - \frac{3}{4}ql + \frac{M_A}{l} + q\alpha l\left\{-\frac{2}{3}(1-\alpha) + \frac{2}{3}\right\} - \frac{1}{6}q\alpha^2 l + q_A l(1-\alpha)\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha\right)$$

$$-\frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2 + l(q_2 - q_A)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\alpha\right) - \frac{1}{6}l(q_2 - q_A)(1-\alpha)^2 + \frac{2}{3}\alpha + \frac{\mathrm{P_d}}{3}\alpha \tag{4.18}$$

을 얻을 수 있다. 결국, 식 (4.12), (4.17) 그리고 식 (4.18)을 식 (4.13)에서부터 식 (4.16)에 대입한 후에 식 (4.10)을 정리하면 식 (4.19)를 얻을 수 있다.

$$\sum\int \frac{1}{EI}M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx =$$

$$+\frac{1}{EI}\left[R_C\left(-\frac{7}{108}l^3 - \frac{2}{9}\alpha l^3 + \frac{2}{9}\alpha^2 l^3 - \frac{2}{27}\alpha^3 l^3\right)\right.$$

$$+ql^4\left(\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5\right)$$

$$+q_A l^4(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{12}\alpha^2+\frac{1}{18}\alpha^3\right)+M_A l^2\left(\frac{1}{6}\alpha^2-\frac{1}{9}\alpha^3\right)+\mathrm{P_d}(1-\alpha)\mathrm{l}^3\left(-\frac{1}{6}\alpha^2+\frac{1}{9}\alpha^3\right)$$

$$+l^4(q_2-q_A)(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{18}\alpha^2+\frac{1}{27}\alpha^3\right)\Bigg]$$

$$+\frac{1}{E_nI_n}\Bigg[-\frac{1}{3}\Bigg\{+\frac{2}{3}R_C-\frac{3}{4}ql+\frac{M_A}{l}+q\alpha l\left(-\frac{2}{3}(1-\alpha)+\frac{2}{3}\right)-\frac{1}{6}q\alpha^2 l$$

$$+q_A l(1-\alpha)\left(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha\right)-\frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2+l(q_2-q_A)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha\right)$$

$$-\frac{1}{6}l(q_2-q_A)(1-\alpha)^2-\frac{2}{3}\alpha+\frac{P_D}{3}\alpha\Bigg\}\int_0^{l(1-\alpha)}x^2dx+\frac{M_A}{3}\int_0^{l(1-\alpha)}xdx$$

$$+\frac{q_A}{6}\int_0^{l(1-\alpha)}x^3dx+\frac{1}{18}\frac{1}{l_n}(q_2-q_1)\int_0^{l(1-\alpha)}x^4dx\Bigg]=0 \tag{4.19}$$

위의 식 (4.19)는 4개의 지점반력들 중에서 R_C만을 포함한 관계식이다. 한편, 식 (4.12)의 R_D를 식 (4.6)에 대입하면 식 (4.20)과 같이 R_C만의 함수인 2단계 압출과정 중 지점 B의 위치에서 휨 모멘트 M_B^2가 선정된다.

$$M_B^2=\frac{2}{3}R_C l-\frac{3}{4}ql^2 \tag{4.20}$$

그러므로 식 (4.19)에서 R_C를 구한 후에 그 값을 식 (4.20)에 대입하면 M_B^2를 산정할 수 있다. 위의 식으로부터 R_C를 정리하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_C=\frac{A+B}{C} \tag{4.21}$$

여기서, A, B, C는 식 (4.22), 식 (4.23) 그리고 식 (4.24)와 같다.

$$A=-\frac{1}{EI}\left[ql^4\left(\frac{7}{108}+\frac{1}{4}\alpha-\frac{1}{4}\alpha^2+\frac{45}{324}\alpha-\frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha)-\frac{1}{8}\alpha^4+\frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha)+\frac{1}{18}\alpha^5\right)\right.$$

$$+q_A l^4(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{12}\alpha^2+\frac{1}{18}\alpha^3\right)+M_A l^2\left(\frac{1}{6}\alpha^2-\frac{1}{9}\alpha^3\right)+\mathrm{P_d}(1-\alpha)\mathrm{l}^3\left(-\frac{1}{6}\alpha^2+\frac{1}{9}\alpha^3\right)$$

$$\left.+l^4(q_2-q_A)(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{18}\alpha^2+\frac{1}{27}\alpha^3\right)\right] \qquad (4.22)$$

$$B=-\frac{1}{E_n I_n}\left[-\frac{1}{3}\cdot\text{①}\cdot\text{②}+\frac{M_A}{3}\cdot\text{③}+\frac{q_A}{6}\cdot\text{④}+\frac{1}{18l_n}(q_2-q_1)\cdot\text{⑤}\right] \qquad (4.23)$$

$$C=\frac{1}{EI}\left(-\frac{7}{108}l^3-\frac{2}{9}\alpha l^3+\frac{2}{9}\alpha^2 l^3-\frac{2}{27}\alpha^3 l^3\right)-\frac{1}{E_n I_n}\cdot\frac{2}{9}\cdot\text{②} \qquad (4.24)$$

그리고 식 (4.23)과 (4.24)에서 ①, ②, ③, ④, ⑤는 다음과 같다.

$$\text{①}=-\frac{3}{4}ql+\frac{M_A}{l}+q\alpha l\left(\frac{2}{3}-\frac{2}{3}(1-\alpha)\right)-\frac{1}{6}q\alpha^2 l+q_A l(1-\alpha)\left(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha\right)-\frac{1}{6}q_A(1-\alpha)^2$$

$$+l(q_2-q_A)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha\right)-\frac{1}{9}(q_2-q_A)l(1-\alpha)^2+\frac{2}{3}\alpha+\frac{\mathrm{P_d}}{3}\alpha$$

$$\text{②}=\frac{1}{3}l^3(1-\alpha)^3$$

$$\text{③}=\frac{1}{2}l^2(1-\alpha)^2$$

$$\text{④}=\frac{1}{4}l^4(1-\alpha)^4$$

$$\text{⑤}=\frac{1}{5}l^5(1-\alpha)^5$$

한편, 식 (4.22)에서 식 (4.24)까지에서 지점 A에서 압출추진코의 단위 길이당 중량을 의미하는 q_A는 식 (4.25)를 대입하면 되고, M_A는 지점 A 이후의 압출추진코 자중에 의해 발생하는 모멘트로서 식 (4.26)을 대입하면 된다.

$$q_A = \frac{q_2 - q_1}{l_n}(l_n + \alpha l - l) + q_1 \tag{4.25}$$

$$M_A = \frac{q_1}{2}\{l_n - l(1-\alpha)\}^2 + \frac{1}{6}(q_2 - q_1)\left(1 + \alpha\frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n}\right)\{l_n - l(1-\alpha)\}^2 \tag{4.26}$$

결국 식 (4.21)의 지점반력 R_C를 2단계 압출의 지점 B에서 휨 모멘트를 나타내는 식 (4.20)에 대입하고 정리하면 M_B^2/ql^2는 식 (4.27)과 같다.

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3}\left(\frac{ⓐ}{ⓕ} + \frac{EI}{E_n I_n}\frac{ⓑ+ⓒ+ⓓ+ⓔ}{ⓕ}\right) - \frac{3}{4} \tag{4.27}$$

여기서 ⓐ, ⓑ, ⓒ, ⓓ, ⓔ, ⓕ는 다음과 같다.

$$ⓐ = -\left[\left\{\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5\right\}\right.$$

$$+\left\{\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\left(1 + \alpha\frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n}\right)\right\}(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3\right)$$

$$+\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-)^2\right)\right\} + \frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-\alpha)^2\right.$$

$$\left. + \alpha\frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\Bigg\}\left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3\right)$$

$$+\frac{\mathrm{P_d}(1-\alpha)}{ql}\Bigl(-\frac{1}{6}\alpha^2+\frac{1}{9}\alpha^3\Bigr)+\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\Bigr)(1-\alpha)^2\Bigl(-\frac{1}{18}\alpha^2+\frac{1}{27}\alpha^3\Bigr)\Bigr]$$

$$ⓑ=\frac{1}{3}\Bigl\{-\frac{3}{4}+\Bigl(\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\Bigl(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\Bigr)$$

$$+\frac{1}{6}\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(\frac{l_n^2}{l_n}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)$$

$$+\alpha\frac{l_n}{l}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}(1-\alpha)\Bigr)\Bigr)+\alpha\Bigl(-\frac{2}{3}(1-\alpha)+\frac{2}{3}\Bigr)-\frac{1}{6}\alpha^2$$

$$+\Bigl(\frac{q_1}{q}+\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\Bigr)\Bigr)(1-\alpha)\Bigl(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha\Bigr)$$

$$-\frac{1}{6}\Bigl(\frac{q_1}{q}+\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\Bigr)\Bigr)(1-\alpha)^2+\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\Bigr)(1-\alpha)\Bigl(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha\Bigr)$$

$$-\frac{1}{6}\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\Bigr)(1-\alpha)^2-\frac{2}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}(1-\alpha)-\frac{1}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}(2+\alpha)\Bigr\}\times\frac{1}{3}(1-\alpha)^3$$

$$ⓒ=\frac{1}{3}\Bigl\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\Bigl(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\Bigr)$$

$$+\frac{1}{6}\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l}{l_n}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l}{l_n}-2\alpha(1-\alpha)$$

$$+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\Bigr)\Bigr\}\times\frac{1}{2}(1-\alpha)^2$$

$$ⓓ=\frac{1}{6}\Bigl\{\frac{q_2}{q}+\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\Bigl(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\Bigr)\Bigr\}\times\frac{1}{4}(1-\alpha)^4$$

$$ⓔ=\frac{1}{18}\frac{l}{l_n}\Bigl(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\Bigr)\times\frac{1}{5}(1-\alpha)^5$$

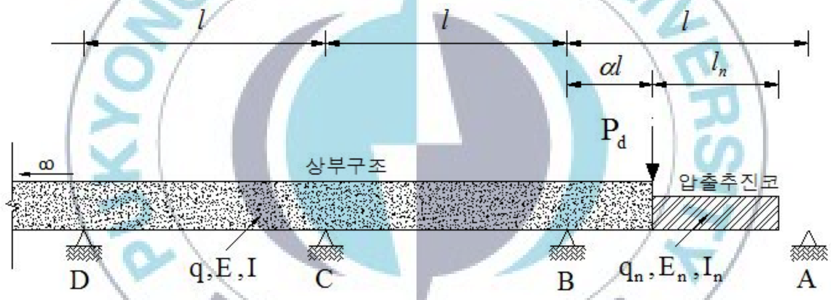
$$ⓕ = \left(-\frac{7}{108} - \frac{2}{9}\alpha + \frac{2}{9}\alpha^2 - \frac{2}{27}\alpha^3\right) - \left(\frac{2}{9}\frac{EI}{E_n I_n}\right) \times \frac{1}{3}(1-\alpha)^3$$

식 (4.27)은 압출이 진행되는 동안에 그림 4.2의 지점 B 위치의 상부단면에 발생하는 휨모멘트의 크기는 상부단면과 압출추진코와의 휨강성비에 종속되는 것을 알 수 있다. 그러나 압출이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (4.28)의 M_B^E에 수렴한다.

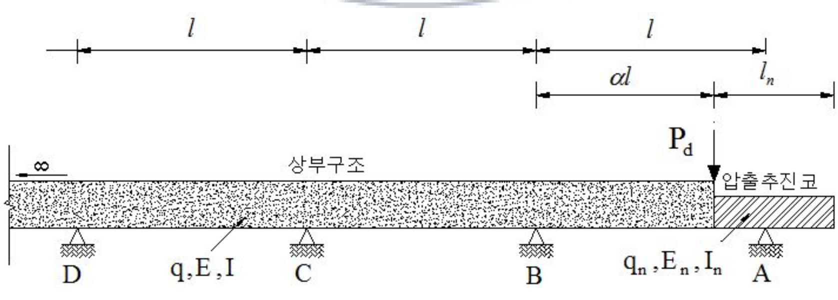
$$M_B^E = (0.045q_2 + 0.089q_1)l_n^2 - 0.107ql^2 \tag{4.28}$$

4.3 다이아프램이 고려된 등단면 해석식

3.3절에서 중량의 변화에 대한 상호작용의 영향에 대해서 알아본 결과 중량은 1단계 압출과 2단계 압출에 모두 영향을 미치지만 그 값이 미소한 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 압출추진코의 중량 역시 등단면으로 가정한 상태에서의 해석식, 즉 Rosignoli(2002)의 해석식에 다이아프램을 고려하여 해석식을 산출한다. 압출진행에 대한 해석 모델은 그림 4.2와 같이 2단계 압출로 동일하게 적용된다. 그리고, 그림 4.2과 같이 압출추진코와 상부구조의 연결부분 다이아프램을 집중하중 P_d로 표현하였다.



(a) 1단계 압출 구조계



(b) 2단계 압출 구조계

그림 4.2 다이아프램이 고려된 등단면 해석식의 구조계

Rosignoli(2002)의 해석식에 다이아프램을 고려한 경우의 1단계 압출과 2단계 압출 해석식은 3연 모멘트의 법칙과 최소일의 원리를 적용하여 식 (4.29)와 식 (4.30)으로 구할 수 있다.

$$\frac{M_B^*}{ql^2} = -\frac{\alpha^2}{2} - \frac{q_n}{q}\frac{l_n}{l}\left(\alpha + \frac{1}{2}\frac{l_n}{l}\right) + \frac{\mathrm{P_d}}{ql} \tag{4.29}$$

$$\frac{M_B^{**}}{ql^2} = \frac{①}{②} \tag{4.30}$$

여기서, ①과 ②는 다음과 같다.

$$① = -\left[\left\{\frac{1}{2}\frac{q_n}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2} + \alpha^2 + 1\right) + \frac{q_n}{q}\left(\alpha\left(\frac{l_n}{l} - 1\right) - \frac{l_n}{l}\right)\right\}\left\{\alpha^2\left(\frac{1}{3}\alpha - \frac{1}{2}\right)\right\}\right]$$

$$-\left[\frac{EI}{E_n I_n}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_n}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2} + \alpha^2 + 1\right) + \frac{q_n}{q}\left(\alpha\left(\frac{l_n}{l} - 1\right) - \frac{l_n}{l}\right)\right\}\left\{(1-\alpha)^2\left(\frac{1}{3}(1-\alpha) - \frac{1}{2}\right)\right\}\right]$$

$$-\left[\left\{\frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{6}\alpha^5 + \frac{3}{8}\alpha^4 - \frac{1}{6}\alpha^3\right\}\right.$$

$$\left.+\left\{\frac{q_n}{q}\alpha^2(1-\alpha)^2\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6}\right)\right\} + \frac{1}{2}\frac{P_D}{ql}\alpha^2(1-\alpha) + \frac{1}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}\alpha^3(1-\alpha)\right]$$

$$-\frac{EI}{E_n I_n}\left[\left\{\frac{1}{6}\alpha^2(1-\alpha)^3\right\} + \frac{q_n}{q}\left\{\left(\frac{1}{3}\alpha + \frac{1}{6}(1-\alpha) - \frac{1}{8}\right)(1-\alpha)^4\right\} + \frac{1}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}\alpha(1-\alpha)^3\right] - \frac{7}{288}$$

$$② = \left(\frac{1}{3}\alpha^3 - \alpha^2 + \alpha + \frac{7}{24} + \frac{EI}{E_n I_n}\frac{(1-\alpha)^3}{3}\right)$$

4.4 압출추진코의 평균 중량과 평균 강성값의 결정

압출중 교량 상부단면에 발생하는 휨모멘트를 산정하기 위해 압출추진코의 단면을 유사등단면으로 가정한 단순화된 해석식을 제안하였다(식 (4.3), 식 (4.27)참조). 또한, 기존 해석식인 Rosignoli의 해석식에 다이아프램의 중량을 고려한 정확성이 향상된 변형된 등단면 해석식을 제안하였다(식 (4.29), 식 (4.30)참조). 일반적으로 압출추진코의 형상은 그림 3.2에서 보는 바와 같이 압출추진코의 길이내에서 전체가 균등하지 않다. 아울러 3.2절에서 예시한 것처럼 압출추진코의 강성을 어떤 평균강성값을 사용하느냐에 따라 경우에 따라서는 불안전한 해석값이 나올 수 있다. 이번 4.4절에서는 2개의 제안된 해석식의 매개변수인 압출추진코의 중량과 강성을 어떻게 결정하여야 하는지에 대해 제시한다.

4.4.1 유사등단면 중량 및 등단면 중량의 결정

이 연구에서는 실제 ILM공법 교량의 설계자료를 바탕으로 1단계와 2단계 압출시 유사등단면(강성;등단면, 중량;변단면)으로 가정했을 때의 중량은 그림 4.3와 같이 단면을 결정한다.

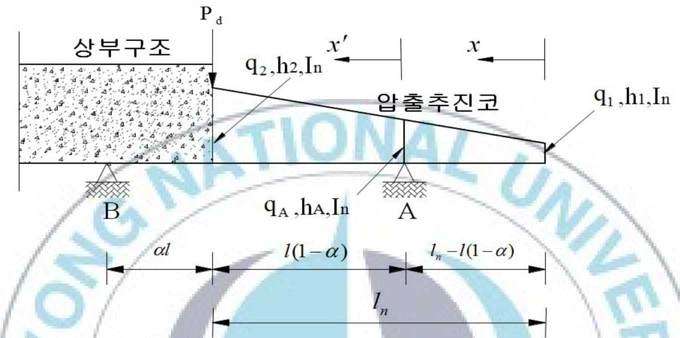


그림 4.3 압출추진코의 선형변화

그림 4.3에서와 같이 압출추진코와 콘크리트 상부구조물 연결부에서의 압출추진코 단위 길이당 중량과 높이는 각각 q_2, h_2 지점 A에서는 q_A, h_A 그리고 압출추진코 끝단에서 q_1, h_1이라고 정의한다. 그러면 압출추진코의 끝단을 기준으로 압출추진코 중량과 높이의 선형변화는 식 (4.31)과 식 (4.32)로 표현 할 수 있다.

$$q_x = \frac{q_2 - q_1}{l_n} x + q_1 \tag{4.31}$$

$$h_x = \frac{h_2 - h_1}{l_n} x + h_1 \tag{4.32}$$

한편, 압출추진코 중량을 등단면으로 가정한 상태에서 상호작용 휨모멘트 해석식을 도출한 결과인 식 (4.29)와 식 (4.30)에서의 압출추진코의 중량 q_n은 식 (4.33)과 같이 압출추진코의 전체 길이에 압출추진코의 총 무게를 나눈 값으로 결정한다.

$$q_n = \frac{q_{n,total}}{l_n} \tag{4.33}$$

4.4.2 유사등단면 강성의 결정

식 (4.27)과 식 (4.30)에서의 압출추진코의 강성 즉, 단면 2차모멘트는 길이방향에 동일한 등단면 I_n으로 가정하였다. 등단면 I_n값은 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 2차모멘트 만을 사용하는 것으로 가정한다.

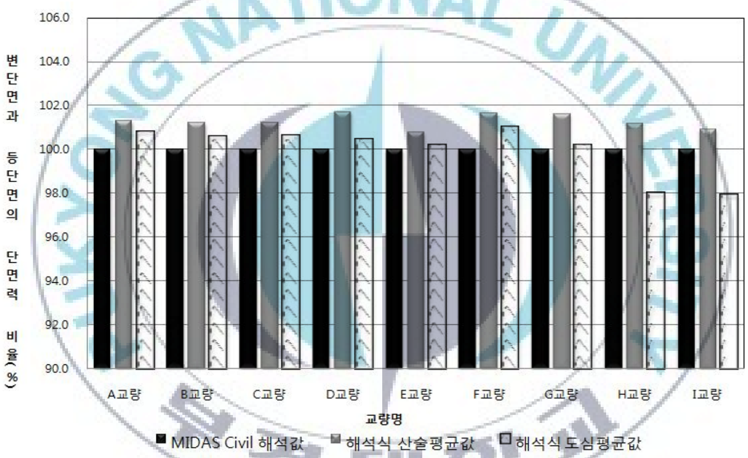
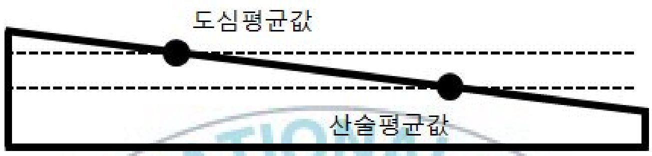


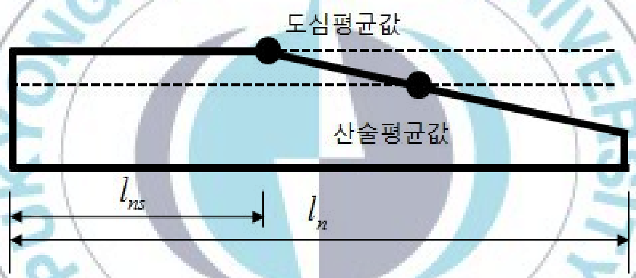
그림 4.4 강성값에 대한 단면력의 변화

그림 4.4는 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009((주)마이다스아이티, 2009)와 제안된 유사등단면 해석식을 사용하여 강성을 도심평균값과 산술평균값을 사용하여 실제 ILM 교량 9개의 최대 단면력을 비교하였다. 그림 4.4를 살펴보면 도심평균값을 사용하였을 경우 H교량과 I교량은 전산구조해석값 보다 작은 휨모멘트가 나오는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 압출추진코의 단면형상에 따라 도심평균값과 산술평균값의 차이로 인해서 도심평균값이 너무 큰 값으로 정해지므로 휨모멘트에 대한 저항력

이 커져서 전산구조해석값 보다 작게 나타나게 된다. 휨모멘트의 값이 전산구조해석값 보다 작게 나타나게 되면 해석식의 이용 시 불안전한 설계가 될 수 있다. 따라서 압출추진코의 단면형상의 비교를 통해서 단면형상에 따른 산술평균값과 도심평균값 중 어떤 값을 사용해야 전산구조해석값 이상이면서 안전성을 만족 할 수 있는지 결정 할 필요가 있다.



(a) 압출추진코의 단면형상 1



(b) 압출추진코의 단면형상 2

그림 4.5 압출추진코의 단면형상 모델

그림 4.5는 압출추진코의 단면형상에 따른 도심평균값과 산술평균값의 산정 할 수 있는 개념도이다. 그림 4.5(a)와 같은 경우는 압출추진코의 형상이 전체의 길이에 따라 강성의 형상이 선형적으로 변화하는 경우의 그림이고, 그림 4.5(b)의 경우는 압출추진코의 전체 길이에 따라 강성이 일정한 구간(l_{ns})과 선형적으로 변화하는 구간이 함께 존재하는 경우이다.

그림 4.4에서 A교량~G교량의 경우는 그림 4.5(a)의 형상 또는 그림 4.5(b)의 형상 중 l_{ns}/l_n 길이비가 0.25인 단면형상을 보인다. 이와 같은 경

우는 산술평균값과 도심평균값의 단면력 모두가 전산구조해석값에 비해 크게 나타나 보수적인 설계로서의 안전한 값을 얻었다. 그림 4.4에서 H교량과 I교량의 경우는 그림 4.5(b)의 형상 중 l_{ns}/l_n의 길이비가 0.6인 단면 형상을 보인다. 이와 같은 경우는 도심평균값이 실제 압출추진코의 강성값 보다 크게 산출되며 전산구조해석값에 비해 도심평균값은 낮은 값을 얻었다. 이럴 경우에는 산술평균값을 사용해야지 더 안전한 해석결과를 얻을 수 있다.

그림 4.6 유사등단면 해석식의 강성값 결정

그림 4.6은 압출추진코의 단면형상에 따른 유사등단면의 강성값으로 산술평균값과 도심평균값 중 어떤 값을 선택해야 하는지 그 경계를 제시한 해석결과이다. 이 연구에서는 그림 4.6에서 l_{ns}/l_n의 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 조

금 더 많은 교량의 자료를 수집하여 분석을 한다면 정확한 값을 결정할 수 있을 것이라 판단된다.

5. 해석식의 검증

5.1 해석변수 결정

4장에서 제안된 2가지의 압출추진코와 교량 상부구조 상호작용 해석식의 정확성과 활용성을 검증하기 위해 실제 사례교량의 설계조건을 바탕으로 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009((주)마이다스 아이티, 2009)를 사용하여 비교 분석하였다. 이 연구에서 제안된 유사등단면 해석식과, 다이아프램을 도입한 등단면 해석식, 그리고 기존해석식들(Rosignoli, 2002; 안태욱, 2006)을 비교 분석하였다. 실계 공용중인 9개의 교량의 데이터를 분석하여 표 5.1과 같은 분석데이터를 만들었다.

표 5.1에서와 같이 실제 ILM교량 설계자료 중에서 유사등단면으로 가정한 해석식(해석식 1)의 경우는 중량비를 변단면으로 가정하고, 강성비는 그림 4.8과 같이 A교량에서 G교량 까지는 도심평균값을 H교량과 I교량은 산술평균값을 사용하여 지점 B의 휨모멘트를 해석하였다. 다이아프램을 고려한 등단면 해석식(해석식 2)은 중량비는 등단면 값을 사용하고, 강성비는 유사등단면 해석식과 마찬가지로 A교량에서 G교량 까지는 도심평균값을 H교량과 I교량은 산술평균값을 사용하였다. 그리고, 동일한 방법으로 Rosignoli의 해석식과 비교하였다. 안태욱의 해석식은 중량비, 강성비 모두 표 5.1의 변단면에 관련된 값들을 사용하였으며, 그리고 정확성을 고려하기 위해서 전산구조해석의 경우는 중량비는 변단면의 값을 이용하여 사다리꼴 등분포 상태로 적용시켰으며, 강성비의 경우는 압출추진코의 도면을 고려하여 전체길이를 세분화시켜 강성값을 상세하게 고려하였다.

표 5.1 실제 ILM교량 설계자료를 통해 도출한 해석변수 값

교량	지간 길이 (m)	압출추진코의 길이 (m)	중량비			강성비				다이아프램하중 (kN)
			변단면		등단면	변단면 (안태욱 식)		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

5.2 실제 교량의 단면력 궤적

그림 5.1~그림 5.2는 A교량과 B교량의 단면력 궤적을 해석식의 종류에 따라 비교한 것을 나타내고 있다. 그림 5.1과 그림 5.2의 가는 실선은 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009를 사용하여 A교량과 B교량의 단면력의 궤적을 강성과 중량을 변단면 표 5.1의 설계 자료를 바탕으로 그렸다. 굵은 실선은 유사등단면으로 가정된 상태의 이 연구에서 제안된 해석식(해석식 1)의 단면력 궤적을 보여주고 있다. 그리고 굵은 점선은 다이아프램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)의 단면력 궤적이며, 둥근 점선은 안태욱(2006)의 해석식의 단면력 궤적을 보여주고 있다. 마지막으로 가는 점선은 다이아프램이 고려되지 않고 등단면으로 가정된 Rosignoli 해석식의 단면력 궤적을 보여주고 있다.

그림 5.1과 그림 5.2를 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. 다이아프램이 고려되지 않은 Rosignoli 해석식의 경우는 단면력의 차이가 매우 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 정확성이 매우 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 나머지 C교량부터 I교량까지 모두 비슷한 형상을 나타내는 그래프를 얻을 수 있었으며, 부록 Ⅳ에 나타내었다.

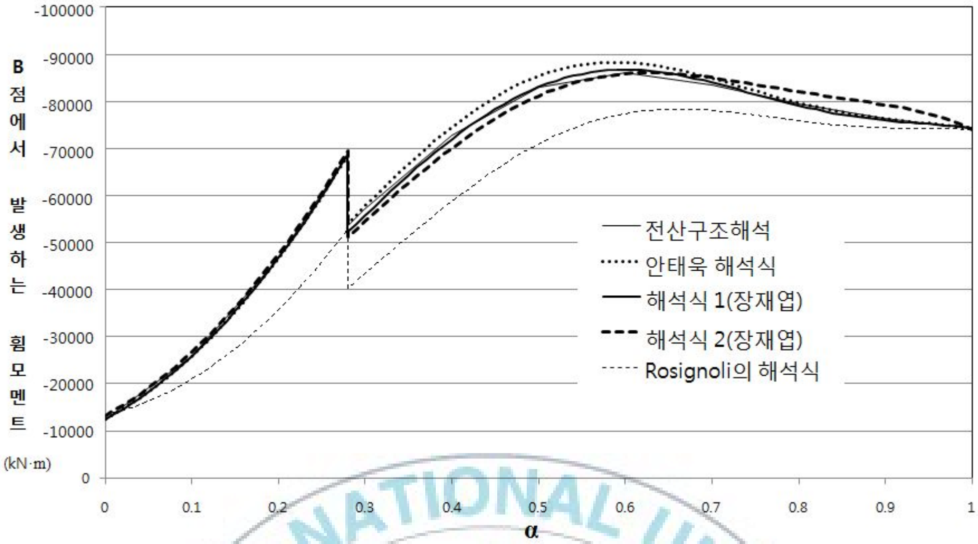


그림 5.1 A교량의 단면력 궤적 비교

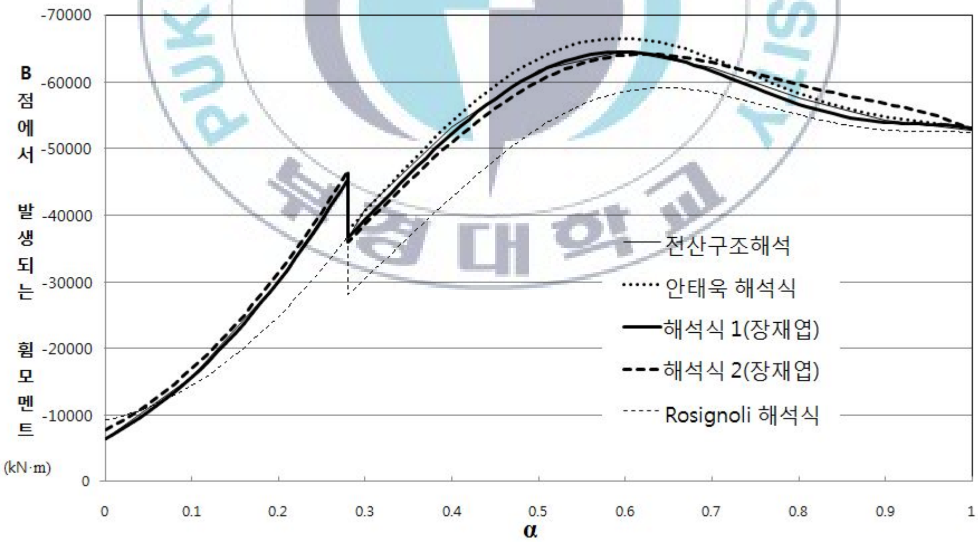


그림 5.2 B교량의 단면력 궤적 비교

5.3 제안된 상호작용 해석식의 비교

이 연구에서 제안된 2개의 해석식은 기존의 해석식(Rosignoli, 2002; 안태욱, 2006)들에 비해서 정확성이 높아졌고, 단순하다는 것을 확인 할 수 있었다. 먼저 유사등단면으로 제안된 해석식(해석식 1)의 경우는 안태욱(2006)의 해석식에 비해 단순화 되었으며, 전산구조해석프로그램을 통해 구한 단면력의 궤적과 가장 유사한 값을 보여주고 있다. 단면력이 최고가 되는 길이비에서의 전산구조해석 단면력과의 차이는 약 0.5%미만으로 확인되었다. 이는 실제 압출추진코의 도면형상을 통해서 강성값을 결정하였기 때문이라 판단된다. 그리고 다이아프램을 고려한 변형된 등단면 해석식(해석식 2)의 경우는 식이 매우 단순하며 Rosginoli의 해석식에 비해 정확성이 매우 향상된 것을 확인할 수 있었다. 단면력이 최고가 되는 길이비에서 전산구조 해석 단면력과의 차이는 약 1%미만으로 확인되었다. 하지만 중량비를 등단면으로 가정하였기 때문에 단면력의 궤적에서 약간의 차이를 보여주고 있으나 큰 값의 차이는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 안태욱의 해석식의 경우는 전산구조해석 단면력과의 차이는 약 2~3%정도로 나타났다. 안태욱의 해석식은 압출추진코의 강성이 그림 4.7.(a)처럼 전체 길이에 따라 선형적으로 압출추진코와 상부구조의 연결부, 압출추진코의 끝단이 선형적으로 변화한다고 고려되므로 강성이 실제 압출추진코의 강성보다 낮게 고려되어진다. 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 다이아프램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)에 비해 복잡하다. 또한 해석식에 필요한 해석변수들의 결정에서 중량에 관한 해석변수를 결정 해야한다. 그러나 해석식을 통해 최대 휨모멘트을 결정 할 때는 거의 동일한 시간이 소요된다. 또한 다이아프램이 고려된 등단

면 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. 결론

ILM 공법 교량의 경우 압출 중에 발생하는 일시적 응력을 흡수하기 위해 일반적으로 압출추진코가 이용된다. 국내에서는 ILM 공법 교량의 설계시 경간 분할 및 지간길이 등을 전례의 설계결과에 따라 결정하는 경우가 많다. 따라서 상부구조와 압출추진코의 단면면들이 프로젝트에 따라 크게 달라지지 않는다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다.

기존 연구에서는 압출추진코의 최적설계에 관련하여 크게 두가지의 방식으로 해석식이 만들어졌다. Rosignoli(2002)에 의해서 압출추진코의 단면을 등단면으로 가정한 상태에서의 해석식이 만들어졌고, 안태욱(2006)에 의해서 압출추진코의 단면을 변단면으로 가정한 상태에서 해석식이 만들어졌다. 이 연구에서는 기존연구들의 결과를 바탕으로 장점을 모아 유사등단면(강성;등단면, 중량;변단면)으로 가정한 상태에서의 해석식과, 다이아프램을 고려한 등단면 해석식을 제안 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

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 유사등단면 해석식을 제안하였다.

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 등

단면으로 가정한 해석식도 제안하였다.

3) 제안된 2개의 해석식은 정확성과 사용성이 충분히 만족해 설계실무에서 사용될 수 있다고 판단된다.

4) 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.

5) 유사등단면으로 가정된 해석식(해석식 1)의 경우는 중량을 변단면으로 가정하였기 때문에 다이아프램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)에 비해 복잡하다. 그러나 해석식을 통해 실무에서 최대 휨모멘트을 결정하는 데에는 큰 어려움이 없다.

6) 다이아프램이 고려된 등단면 해석식(해석식 2)의 경우는 1단계 압출과 2단계 압출 단계에서 중량이 등단면으로 고려되기 때문에 휨모멘트의 값의 차이는 미소하지만 휨모멘트의 궤적에서 차이를 보인다.

7) 제안된 2개의 해석식 중 약간의 시간적 소요 감수하더라도 유사등단면으로 가정된 해석식(해석식 1)을 사용하는 것이 안전성 측면에서 보다 신뢰 할 수 있는 설계를 할 수 있을 것이라 판단된다.

부록 Ⅰ 실제 ILM교량의 설계 제원

구분		A교량	B교량	C교량	D교량	E교량	F교량	G교량	H교량	I교량
상부구조의 지간 길이(l,m)		50	50	55	60	50	50	50	55	60
압출추진코의 길이(l_n,m)		36	36	38	42.5	35	36	36	40	45
상부구조의 중량(q, kN/m)		294	208	215	207	231	206	194	235	226
압출추진 코의 중량 (kN/m)	q_2	24.7	17.7	18.3	18.6	25.4	17.5	16.5	25.8	17.4
	q_1	16.5	10.2	10.3	11.1	11.6	9.9	6.8	11.7	8.8
상부구조의 강성(I,m^4)		18.4	10.8	13.2	14.0	12.8	10.2	9.8	19.6	16.8
압출추진 코의 강성(I_n, m^4)	도심평균값	0.35	0.30	0.46	0.30	0.39	0.28	0.59	0.65	0.43
	산술평균값	0.29	0.25	0.4	0.23	0.36	0.24	0.43	0.54	0.32
다이아프램의 집중하중(P_d,kN)		1214	891	704	796	819	887	450	629	1016
상부구조의 탄성계수(E,kN/m^2)		2.8×10^7								
압출추진코의 탄성계수(E_n,kN/m^2)		2.1×10^8								

부록 Ⅱ 안태욱의 2단계 압출 해석식

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

$$\textcircled{a}=-\left[\left\{\frac{7}{108}+\frac{1}{4}\alpha-\frac{1}{4}\alpha^2+\frac{45}{324}\alpha^3-\frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha)-\frac{1}{8}\alpha^4+\frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha)+\frac{1}{18}\alpha^5\right\}\right.$$

$$+\left\{\frac{q_1}{q}+\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\right\}(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{12}\alpha^2+\frac{1}{18}\alpha^3\right)+\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)\right.$$

$$+\frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)\right.$$

$$\left.\left.+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right\}\left(\frac{1}{6}\alpha^2-\frac{1}{9}\alpha^3\right)$$

$$\left.+\frac{\mathrm{P_d}(1-\alpha)}{ql}\left(-\frac{1}{6}\alpha^2+\frac{1}{9}\alpha^3\right)+\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\right)(1-\alpha)^2\left(-\frac{1}{18}\alpha^2+\frac{1}{27}\alpha^3\right)\right]$$

$$\textcircled{b}=-\frac{1}{3}\left[\frac{3}{4}\frac{l_n^3}{l^3}+\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)+\frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l_n}{l}(1-\alpha)^2\right)\right\}$$

$$+\alpha\frac{l_n^3}{l^3}\left(-\frac{2}{3}(1-\alpha)+\frac{2}{3}\right)-\frac{1}{6}\alpha^2\frac{l_n^3}{l^3}+\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{q_1}{q}+\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\right\}(1-\alpha)\left(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha\right)$$

$$-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{q_1}{q}+\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\right\}(1-\alpha)^2+\frac{l_n^3}{l^3}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\right)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha\right)$$

$$\left.-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n}\right)(1-\alpha)^2-\frac{2}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}\frac{l_n^3}{l^3}(1-\alpha)-\frac{1}{3}\frac{\mathrm{P_d}}{ql}\frac{l_n^3}{l^3}(2+\alpha)\right]$$

$$\times\boxed{\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3}\left[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-2\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}\times\ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}\right]}$$

$$ⓒ=\frac{1}{3}\frac{l_n^2}{l^2}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)+\frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l}{l_n}(1-\alpha)\right.\right.$$

$$\left.\left.+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l}{l_n}-2\alpha(1-\alpha)+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right\}$$

$$\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^2}\left[\ln\left\{\frac{1}{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}}\right\}\right]$$

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

$$\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^4}\left[0.5\frac{I_2}{I}-3\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}\frac{I_2}{I}+3\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^2\right]\times\left[\ln\left\{\frac{1}{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}}\right\}+\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^3\frac{I_2}{I}\right.$$

$$\left.+\frac{3}{2}\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^2\right]$$

$$ⓔ=\frac{1}{18}\frac{l_n^4}{l^4}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)}\left[4\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^3\right.$$

$$\times\ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}+\frac{1}{3}\frac{I_1^{1.5}}{I^{1.5}}-2\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}$$

$$+6\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^2\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}-\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^4\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}$$

$$\left.-\frac{10}{3}\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^3\right]$$

$$ⓕ=\left(-\frac{7}{108}-\frac{2}{9}\alpha+\frac{2}{9}\alpha^2-\frac{2}{27}\alpha^3\right)-\frac{2}{9}\frac{EI}{E_nI_n}$$

$$\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3}\left[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-2\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}\times\ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}\right]$$

부록 Ⅲ Rosignoli의 해석식

1. 1단계 해석식

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

2. 2단계 해석식

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

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

$$② = \left(\frac{1}{3}\alpha^3 - \alpha^2 + \alpha + \frac{7}{24} + \frac{EI}{E_nI_n}\frac{(1-\alpha)^3}{3}\right)$$

부록 Ⅳ C교량~I교량의 단면력 궤적 비교

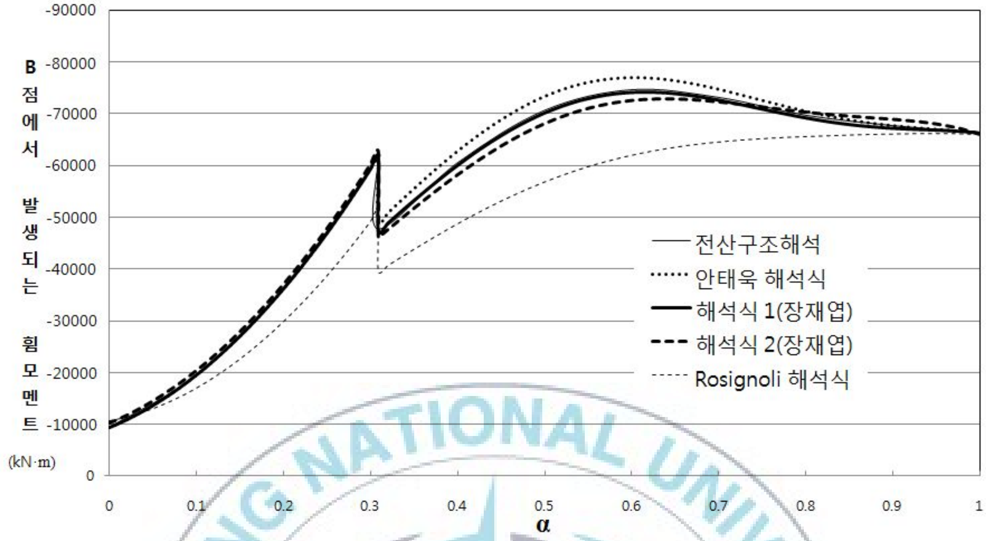


그림 1 C교량의 단면력 궤적 비교

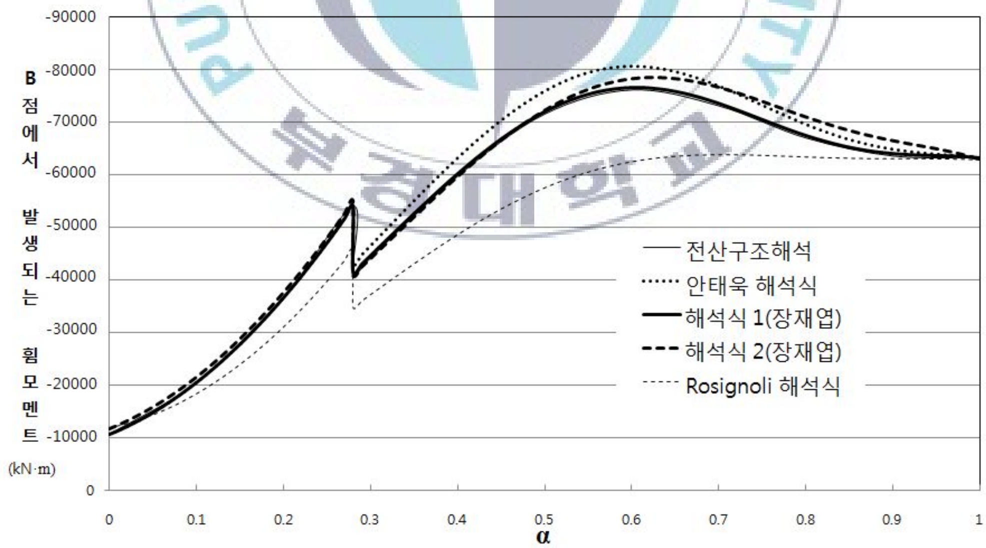


그림 2 D교량의 단면력 궤적 비교

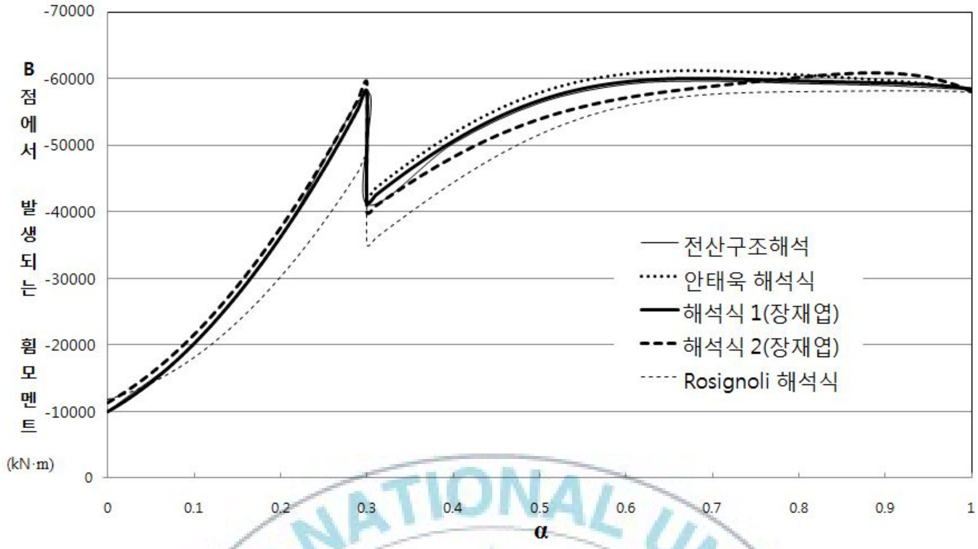


그림 3 E교량의 단면력 궤적 비교

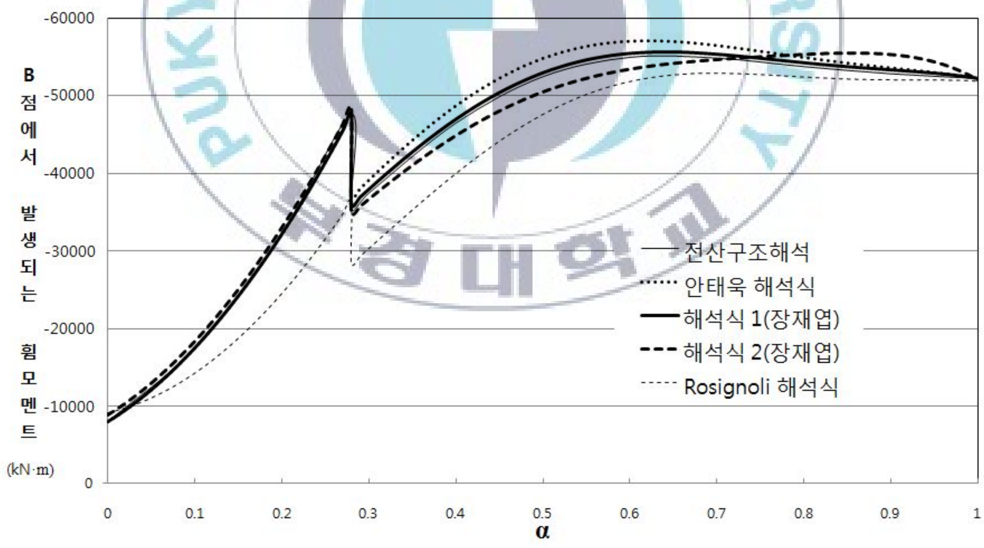


그림 4 F교량의 단면력 궤적 비교

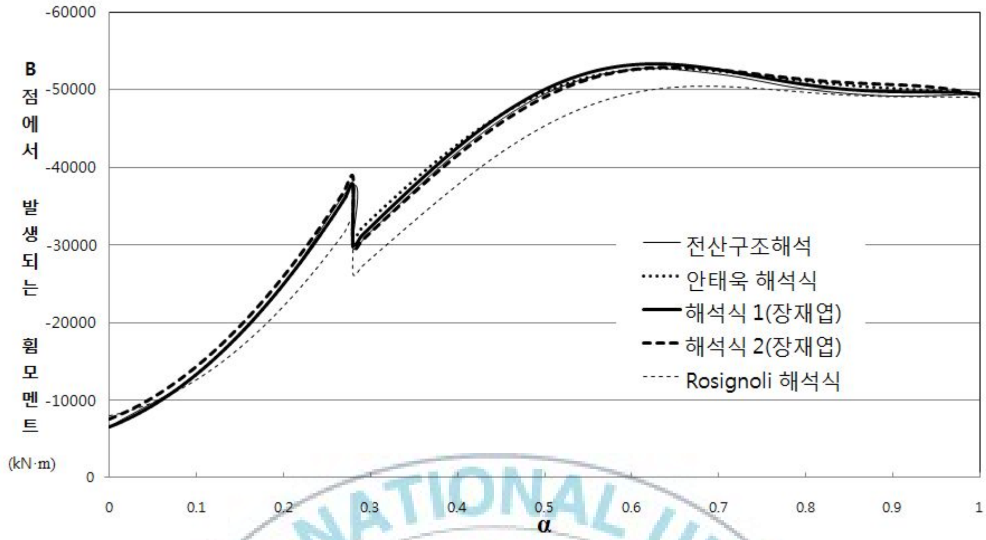


그림 5 G교량의 단면력 궤적 비교

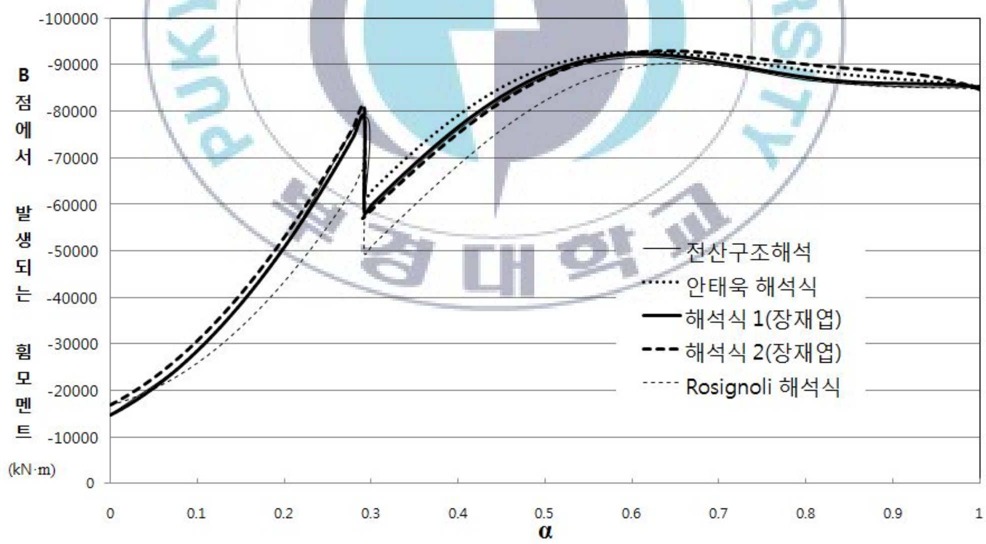


그림 6 H교량의 단면력 궤적 비교

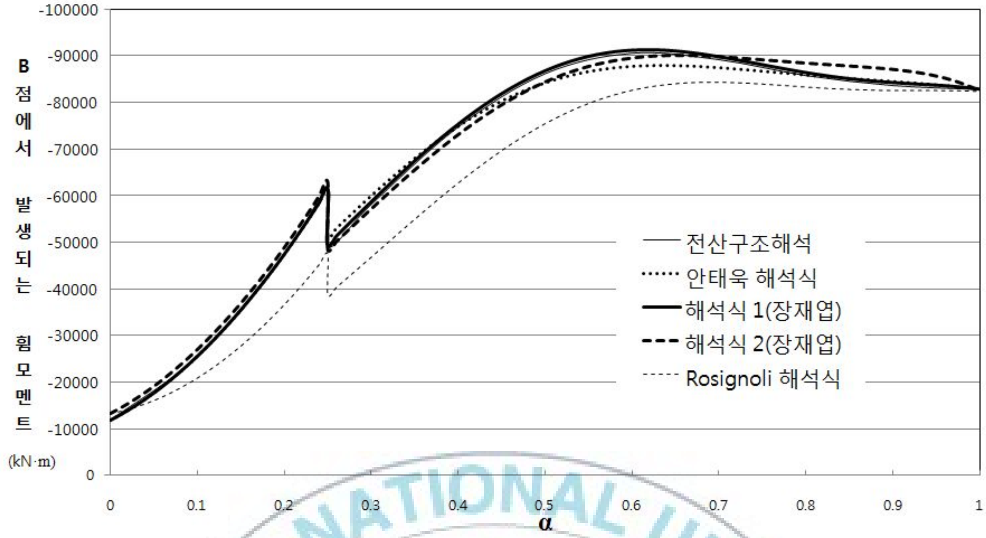


그림 7 I교량의 단면력 궤적 비교

참 고 문 헌

김광수 (2008) 파형강판 PSC박스거더 교량의 설계 및 시공 중 안전관리, 한국안전학회지, 23(2), pp. 87～97.

김용훈, 김씨동, 정승훈 (1999) ILM공법을 적용한 장폭(B=19.5m) 1Cell PSC Box Girder 의 낙단대교 상부공 설계, 한국전산구조공학회 학회지, 12(3), pp.95～101.

문영철 (2002) "ILM 공법에 의해 건설되는 PS콘크리트 교량의 거동", *부경대학교 대학원, 석사학위논문.*

박상현, 김찬녕, 김재수, 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 (2009) 프리스트레스 콘크리트, 동명사, 서울, 25(1), pp.464～466.

이광민 (1992) ILM 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계, 콘크리트학회지, 4(3), pp.19～25.

안태욱, 이환우, 정두회 (2006) 변단면 압출추진코와 ILM 교량 상부단면의 상호작용 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 19(2), pp. 139～150.

정병률, 류동훈, 김준모 (2009) 연속압출공법(ILM)을 이용한 수저터널공법에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 21, pp.28～41.

조지훈, 김상법 (2008) 대표공종 기반의 P.S.C 박스 거더교 개략공사비 산정모델 개발-상부공사 중심으로-, 한국건설관리학회 정기학술발표대회 논문집, 7, pp.197～201.

최항용, 서석구, 오명석, 오세환 (2008) 압출가설시 발생하는 휨모멘트의

최소화 조건을 통한 압출노즈의 최적설계, 대한토목학회논문집, 28(4A), pp.487～495.

한국콘크리트학회 (2007) 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당.

황민오 등 (2004) 강교 ILM 설계 및 시공기술개발 연구, 연구보고서, 2003E007, 포항산업과학연구원 강구조연구소.

(주)마이다스아이티 (2009) MIDAS/CIVIL 2009, (주)마이다스아이티.

Göhler, B., Pearson, B. (2000) Incrementally Launched Bridge, Ernst & Shon.

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 Presstressed 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) Trust and Guide Devices for Launched Bridge, *Bridge Engineering*, 5(1), pp. 75～83.

Rosignoli, M. (2002) *Bridge lunching*, 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.

감사의 글

대학원 진학이라는 결정을 내리고 구조설계 연구실에 첫발을 내딛은 지가 벌써 2년이 흘렀습니다. 대학원 과정을 거치면서 많이 배우고 여러 가지를 얻었지만, 무엇보다 가장 소중한 것은 훌륭하신 교수님을 비롯하여 구조설계 연구실의 여러 선·후배님들을 알게 된 것이라 생각합니다. 이것은 앞으로의 사회생활에 큰 용기와 힘을 줄 것이라 의심치 않습니다.

항상 부족한 저에게 답을 가르쳐 주시기 보다는 답으로 가는 방법을 가르쳐 주신 이환우 교수님께 진심으로 고개 숙여 감사드립니다. 교수님의 큰 은혜는 평생 잊지 못할 것입니다. 그리고 열정적으로 강의 해주신 장희석 교수님, 이동욱 교수님, 김명식 교수님, 국승규 교수님, 김명식 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 2년이란 시간동안 준비한 논문이 완성되었습니다. 비록 부족한 논문이지만 이 분야에 관련 기술자들에게 작은 도움이 되었으면 하는 바램입니다.

진정으로 후배를 생각해 주시고 물심양면으로 저를 많이 챙겨주신 구조설계 연구실 형님들께도 감사드립니다. 그리고 연구실 후배 승일아, 호진아! 너희랑 같이 보낸 시간도 2년이 다되어가는구나. 그 동안 너희들 덕분에 참 즐겁고 재미있는 대학원 생활을 보낸 것 같다. 너희도 빨리 졸업하고 더 큰 물에서 만나자. 그리고 열정적인 연구실 막내 경섭아! 최강 구조설계연구실을 만든다는 그 꿈 꼭 이루길 바라고, 필요하면 언제든지 연락해. 꼭 전화 받을게! 그리고, 초등학생부터 대학생까지 함께 해온 토곡 친구들에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 저를 가장 잘 알아주시고 믿어주시는 아버지와 어머니 못난 아들 대학원까지 공부시키신다고 정말 고생 많으셨습니다. 그리고, 뒤에서 저를 밀어주는 세상에 하나뿐인 누나에게도 고맙다는 말을 전합니다. 세상에서 가장 사랑하는 아버지와 어머니께 이 논문을 바칩니다.