

교대 날개벽의 합리적인 단면력 산정 및 설계 개선

Rational Sectional Force and Design Improvement of Abutment Wing-Wall

정원석* · 김민호** · 안주옥*** · 최혁진****

Chung, Wonseok · Kim, Minho · An, Zu-og · Choi, Hyukjin

Abstract

Current Bridge Specification for Highway Bridges adopts a simplified method to determine sectional forces of abutment wing by dividing its area into four sections. This simplified method was developed in Japan when numerical analysis was not mature and computer resources were expensive. This simplified method has been with us without modification. This study evaluates the problem of current design practice to improve the design guideline for abutment wing. In this study, a finite element model of abutment wing based on shell elements was developed to obtain accurate sectional force. In addition, foreign design specifications regarding abutment wing were thoroughly examined. It has been observed that sectional forces obtained from the simplified method produce inaccurate results under various geometric shapes. Thus, it is recommended that two dimensional plate analyses should be adopted for future design of abutment wing wall.

Keywords : Abutment, wing wall, sectional force, FE analysis, plate analysis, representative section

요 지

일반적으로 교량의 교대 날개벽 설계를 위한 해석은 날개벽을 4개의 구역으로 나누고 이를 1차원 캔틸레버 구조로 간략화하여 단면력을 산정하는 방법이 실무에서 관례적으로 사용되고 있다. 이러한 간편법은 수계산에 의존하던 때에 만들어진 일본 규정으로 국내 도로교설계기준에 채택되어 개정없이 계속 사용되어지고 있다. 본 연구에서는 불합리한 교대 날개벽의 단면력 산정법을 개선하기 위해서 날개벽을 단순 캔틸레버 해석이 아닌 실제에 가까운 2면 고정 판구조로 해석하여 현 도로교설계기준의 단면력과 비교 분석을 실시하였다. 또한 해외의 날개벽 단면력 산정법을 조사 분석하여 국내의 규정과 비교하였다. 본 연구에서 제시한 날개벽의 가용 매개변수 범위 내에서 유한요소 해석을 실시한 결과, 현 도로교설계기준의 간편법에 의한 단면력은 날개벽 형상에 따라 때로는 안전측이지만 때로는 비안전측인 결과를 나타내고 있어 실제의 단면력을 반영하지 못하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 교대, 날개벽, 단면력, 유한요소해석, 판해석, 대표단면

1. 서 론

교량의 교대는 양단에서 상부구조와 뒷면의 토압을 지지하는 하부구조물이다. 이 중에서 교대 날개벽(Wing Wall)은 활하중에 의한 재하하중과 양측방향 토압에 저항하며 배면 토사를 교대 측부로부터 유실되는 것을 방지하는 역할을 하는 구조물이다. 날개벽은 크게 측벽형과 평행형으로 나뉘며 이들의 형상과 치수는 교대의 설치장소, 배면의 성토높이, 비탈면의 구배 등에 따라 변화하게 된다. 측벽형 날개벽은 날개벽 종단부에 옹벽을 추가로 만들어 교대 양 옆을 도로나 인도로 사용하게 하는 형태이며 현재 가장 많이 설계되고 있는 형태이며, 평행형 날개벽은 날개벽의 길이가 최대 5 m 미만에 적용하나 구조와 뒷채움토사 보호의 불리함으로 인

해 실제로는 거의 시공되지 않고 있다. 날개벽은 교대구체 또는 옹벽에서 직각 또는 직각에 가까운 각도로 고정하여 설치하는 것이 일반적이다.

도로교설계기준 해설(2008)의 5장에서는 교대의 날개벽을 교대와 확대기초에 고정되어진 2면 고정판으로 해석한다고 규정하고 있다. 또한 해설편에서는 날개벽 길이가 8 m 미만인 경우에 대해서 날개벽을 4개 구역으로 나누고 캔틸레버 구조로 간편하게 수계산 하도록 간편법을 제시하고 있다. 이러한 기존의 간편법 해석에 대한 기존의 연구(김덕곤 등, 2005)에 의하면 교대 벽체의 안전율이 실제보다 최소 14%, 최대 41%의 과다한 단면력을 산출하는 것으로 보고되고 있다. 또한 단면력 값이 영이거나 이에 가까운 구역에도 필요 이상으로 과다 배근 되어지고 있는 실정이다. 이렇듯 설계자

*정회원 · 경희대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : wschung@khu.ac.kr)

**경희대학교 대학원생 (E-mail : hinggs@hanmail.net)

***정회원 · 교신저자 · 경희대학교 토목공학과 교수 (E-mail : zoan@khu.ac.kr)

****정회원 · 한국도로공사 해외사업처 차장 (E-mail : mrhook1@naver.com)

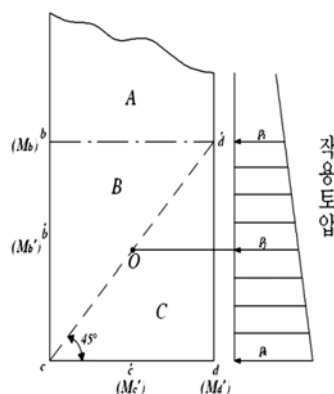
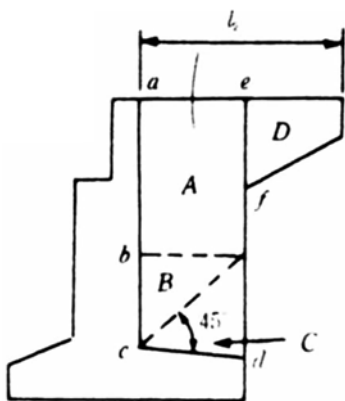
의 편의를 위해 수계산에 의존하던 종래의 설계 기준을 그대로 사용하게 되면 과도한 안전율을 고려하게 되어 경제성 면에서도 과도한 설계가 이루어질 수 있다.

최근에는 신뢰성 높은 수치해석 프로그램이 보편화되고 실제 거동과 근사한 단면력을 산정할 수 있는 프로그램이 다수 소개되어지면서 과거에 해석이 어려웠던 3차원 구조물 해석도 비교적 짧은 시간 내에 정밀한 해석을 수행할 수 있게 되었다. 이러한 배경 하에 판이론에 근거한 엄밀 유한요소 해석법으로 교대 날개벽의 단면력을 산정하고, 이에 근거하여 효율적으로 배근한다면 실제의 날개벽 거동을 반영하면서 경제적인 단면 설계가 가능할 것으로 기대된다. 특히 국내 IT 기술 발달과 더불어 최근에는 교량 설계 자동화 기술도 눈부신 발전을 거듭하고 있으므로 이러한 IT기술과 엄밀해석법의 융합을 통해 합리적이고 효율적인 교대 날개벽 설계법의 정립이 요구된다. 특히, 설계기준은 설계를 위한 주요지표가 되는 가이드라인으로 국가의 공학기술 수준을 대변한다고 할 수 있으므로 지속적인 연구와 개선이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구의 주요목적은 교대 날개벽의 단면력 산정을 위해 현재 설계기준에 제시되어 실무에서 널리 사용되고 있는 구역분할에 의한 간편법을 정량적으로 평가하고 개선책을 제시하는데 있다. 이를 위해 교대 날개벽의 단면력 산정 시에 단순 캔틸레버 해석이 아닌 실제에 가까운 2변 고정 엄밀 유한요소해석을 실시하여 날개벽의 형상과 구속조건에 따른 단면력의 영향을 분석하고 합리적인 단면력 산정 방안을 도출한다. 먼저 교대 날개벽의 해석 모델을 제시하고 이를 탄성론에 의한 이론치와 비교 검증한다. 현재 설계에서 사용되는 교대 날개벽의 평균단면인 대표단면을 선정하고 형상비를 고려한 매개변수 연구와 이에 대한 날개벽 단면력의 민감도 분석을 수행한다.

2. 국내외 교대 날개벽 설계법

국내 도로교설계기준(2008)에서는 “날개벽은 활하중에 의한 재하하중과 토압을 받는 판으로 설계하여야 한다. 이 경우 판은 벽에 고정된 캔틸레버판 또는 벽과 확대기초에 고정되어진 2변 고정판으로 한다.”라고 명시하고 있다. 그러나 2변 고정판 해석이 복잡하므로 날개벽의 길이가 8 m 미만이면 그림 1과 같이 날개벽을 분할하여 단면력을 산정하도록 하고 있다.



$$M_b = 1/2 \times p_i \times bd^2$$

$$M_b' = 1/2 \times p_i \times b'o^2$$

$$M_c = 1/6 \times (2p_i + p_k) \times dd^2$$

$$M_c' = 1/6 \times (2p_i + p_k) \times c'o^2$$

그림 1. 간편법을 이용한 날개벽의 단면력 산정(도로교설계기준 해설 2008)

록 하고 있다. 국내 도로교설계기준의 해설에서 제시되어 있고 실무에서 널리 사용되는 교대 날개벽의 단면력 산정법을 정리하면 다음과 같다. 그림 1의 A 구역과 D 구역은 a-b와 e-f에 지지된 캔틸레버로 단면력을 산정하며 여기서 A 구역과 D 구역에 작용하는 외력은 토압 합력을 작용시켜 구해지는 고정단 단면력을 a-b와 e-f에 등분포시켜 구하도록 하고 있다. B 구역과 C 구역은 b-c와 c-d에 지지된 캔틸레버로 단면력을 산정한다. 이 경우 b-c를 b-b'과 b'-c'으로 c-d를 c-c'과 c'-d'으로 분할하여 각 구간의 가장 불리한 위치에서의 단면력을 이용하여 설계하도록 유도하고 있다. 그림 1의 b-b' 구간은 b점에 있어서의 단위길이당 모멘트에 의해 설계하고, b'-c'는 M_b' , c-c'은 M_c' , c'-d'는 M_d' 에 의하여 설계하도록 하고 있다.

일본의 도로교설계기준 및 동해설(2002)에서의 날개벽의 단면력 산정에 관한 규정은 국내의 도로교설계기준에서 제시하는 날개벽 구역 분할에 의한 간편법과 크게 다르지 않으나 몇 가지 차이점을 나타내고 있다. 국내 도로교 설계기준에서는 날개벽 단면력 산정 시에 설계토압은 적어도 정지토압을 고려해야 한다고 언급하고 있으나 일본 설계기준에서는 일반적으로는 주동토압(Active Earth Pressure)으로 설계하는 것을 원칙으로 규정하고 있다. 단, 다음의 3가지 예외조건을 모두 만족할 시에 한해 정지토압으로 설계할 수 있다고 규정하고 있다. 예외조건은 접속슬래브와 보도가 설치되어 있지 않은 경우, 교대의 전벽과 날개벽과의 각도가 90도 미만일 경우, 날개벽의 형상이 측벽타입일 경우이다.

미국의 AASHTO Standard Specification(2002)과 AASHTO LRFD Bridge Design Specification(2007)에서는 날개벽 단면력 산정에 대한 내용은 제시하지 않고 있으며 날개벽 길이와 날개벽 배근에 대한 설계지침만을 제시하고 있다. 또한 미국 위스콘신 주의 Bridge Manual(2009)에서도 교대 날개벽을 교대 구체로부터 확장되어진 캔틸레버로 해석한다고 규정하고 있으며 토압계수는 주동토압 이상을 적용하도록 권장하고 있다. 또한 교대 날개벽 길이에 대한 사항을 식으로 제시하고 있는데 날개벽과 벽체 사이의 각도, 교좌폭, 벽체와 도로 사이의 각도, 기준점에서 날개벽 끝단까지의 경사거리가 변수로 작용한다. 미국 웨스트 버지니아 주의 Bridge Design Manual(2004)에서도 교대 날개벽의 길이에 대한 사항을 식으로 제시하고 있다. 국내 설계기준과 유사한 부분으로는 날개벽을 교대 벽체에 지지된 수평 캔틸레버와 기초에

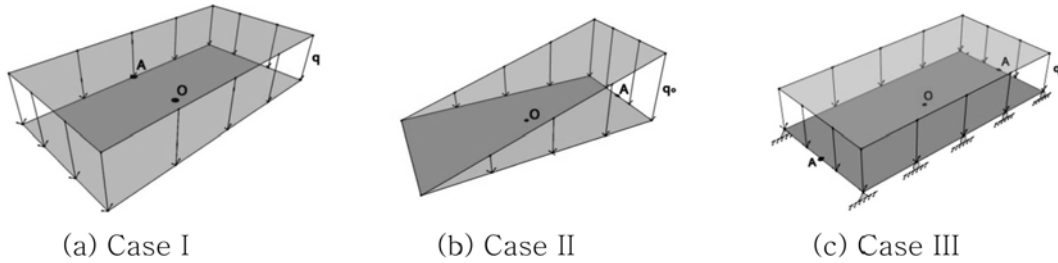


그림 2. 검증대상 직사각형 판구조

표 1. 검증대상 경우 및 이론치

Case	구속조건	하중	Kirchhoff 이론치	
			처짐	단면력
Case I	4변고정 (Built-in Edges)	등분포	$0.00254qa^4/D$	$0.0829qa^2$ (O점) $0.0412qa^2$ (A점)
Case II	4변고정 (Built-in Edges)	정수압	$0.00008q_0a^4/D$	$0.00515q_0a^2$ (O점) $0.0115q_0a^2$ (A점)
Case III	2변 단순지지 (Two Opposite Edges Simply Supported)	등분포	$0.01289qa^4/D$	$0.1235q_0a^2$ (O점) $0.0102q_0a^2$ (A점)

지지된 수직 캔틸레버로 설계하고 있는 부분이다. 날개벽 길이에 대한 식은 위스콘신 주 설계기준과 큰 차이가 없으나 날개벽과 도로가 평행할 경우의 날개벽 길이에 대해 1ft(30.48cm)의 여유길이를 확보하도록 규정하고 있다. EURO CODE(2002)에서는, “적당한 하중 모델을 적용하여야 한다”고 규정하여 설계자와 시공자의 경험에 의한 날개벽 설계를 수행하고 있으나 날개벽 단면력과 길이 산정에 대한 자세한 규정은 수록하고 있지 않다.

앞선 비교에서와 같이 국내 설계기준에서 제시하고 있는 구역 분할에 의한 단면력 산정법은 일본의 도로교 설계기준에서 그대로 발췌하여 사용되고 있는 상황이다. 국내와 일본 설계법의 차이점은 토압계수 산정을 일본 설계기준에서는 주동토압과 정지토압을 상황에 따라 선택하여 사용하고 있으며, 국내 도로교설계기준에서는 정지토압만을 적용하여 일본 설계기준보다 안전측으로 규정하고 있는 점이다. 미국과 유럽의 날개벽 설계법에서는 단면력 산정을 위한 규정을 특별히 제시하지 않고 있다. 이는 설계자가 캔틸레버 이론에 의한 1차원 간편법에 국한되지 않고 자유롭게 신뢰성 높은 방법을 채택하여 단면력을 산정하도록 유도하고 있다고 판단된다.

3. 교대 날개벽 유한요소 모델의 검증

기존의 교대 해석모델은 현행 설계기준에서 제시하는 바와 같이 일차원 보요소를 기반으로 구성된 연구(Decleli, 2002)가 수행된 바 있다. 날개벽은 기하학적으로 복잡한 판구조로 교대에 2변이 지지되어 있다. 따라서, 교대 날개벽 유한요소 해석모델의 검증을 위해서는 먼저 전통적인 판이론(Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1970)에 의해 풀이가 가능한 구조물을 대상으로 처짐 및 단면력을 비교 분석하였다. 이를 위해 4변고정 판구조와 2변 단순지지 판구조를 대상으로 유한요소 해석을 실시하여 결과치를 판이론에 의한 이론치와 비교하여 유한요소 모델링의 정확성을 검증하였다. 본 연구에

서 사용된 유한요소해석 프로그램은 다양한 유한요소와 재료 함수를 포함하고 있는 ABAQUS(2007)이다.

유한요소 모델링의 검증을 위해 그림 2와 같이 3가지 경우를 고려하였다. Case I은 4변 고정(Built-in Edges) 직사각형 판구조로 등분포하중 상태에 있는 경우이고, Case II은 4변 고정 직사각형 판구조로 정수압 상태에 있는 경우이며, Case III은 2변 단순지지(Two Opposite Edges Simply Supported) 직사각형 판구조로 등분포하중 상태에 있는 경우이다. 표 1은 본 연구에서 고려한 검증 경우 및 Kirchhoff 판 이론의 이론치를 나타낸다.

각각의 경우에 대해서 하중을 면외방향(Out-of-Plane)으로 재하시키고 구조물의 단면길이 대비 두께(L/t)를 10, 20, 50, 100, 1000으로 변화시키며 유한요소해석을 실시하였다. 사용 쉘요소는 ABAQUS에서 제공하는 general-purpose finite-strain element인 S4 요소(한 요소내에 4개의 적분점을 가지고 있는 쉘요소)를 채택하였다. 이는 S4 쉘요소가 두께 변화에 따른 횡방향 전단변형을 고려할 수 있으며 수치해석적 어려움을 극복할 수 있는 요소로 검증(Chung and Sotelino 2006)되었기 때문이다.

그림 3은 구조물 중앙에서 두께변화에 따른 처짐을 비교한 것이다. L/t가 10인 경우(두께가 두꺼운 경우)에는 유한요소 해석 결과가 최대 14%이상 큰 처짐값을 보이나 판구조물의 두께가 얇아질수록, 즉 L/t가 커질수록 유한요소 해석 결과와 이론치의 최대오차가 2% 이내로 일치해가고 있음을 확인할 수 있다. 이는 고려 대상의 쉘 요소가 모두 횡방향 전단변형(Transverse Shear Deformation)을 고려할 수 있음에 비해, 탄성론에 근거한 이론치는 횡방향 전단변형을 고려할 수 없는 Kirchhoff 판이론에 근거하여 처짐을 도출하였기 때문이다.

두께가 두꺼운 판구조물의 경우에는 횡방향 전단강성을 고려하여 유한요소를 정규화하는 Mindlin 판 요소를 사용하는 것이 합리적이며, L/t이 100 이상일 때는 순수 휨에 의해 처짐만 발생하는 Kirchhoff 판 요소를 사용하는 것이 합리

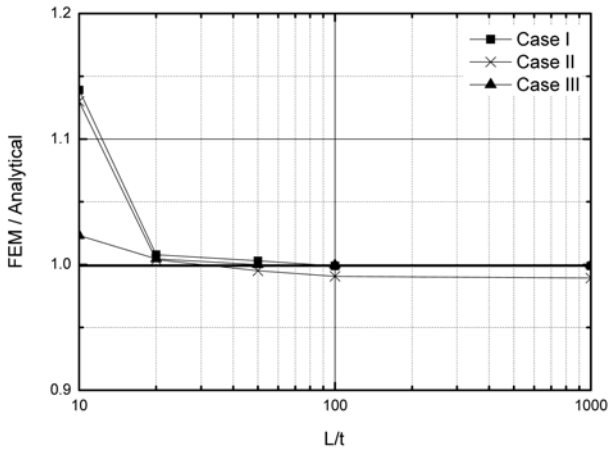


그림 3. 중앙처짐

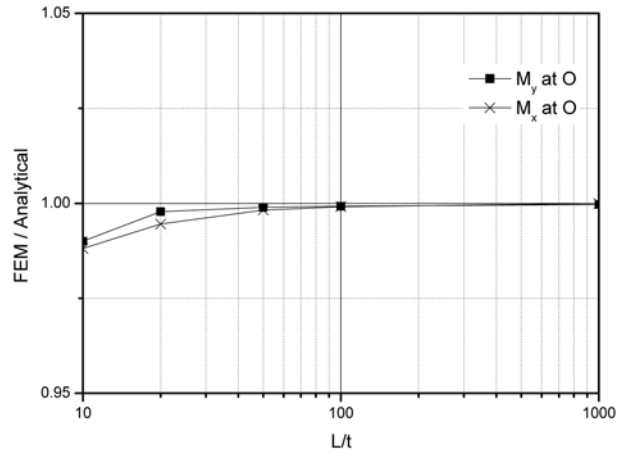


그림 6. 단면력 (Case III)

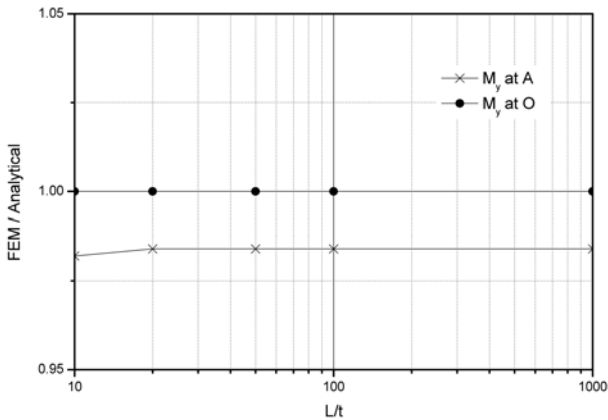


그림 4. 단면력 (Case I)

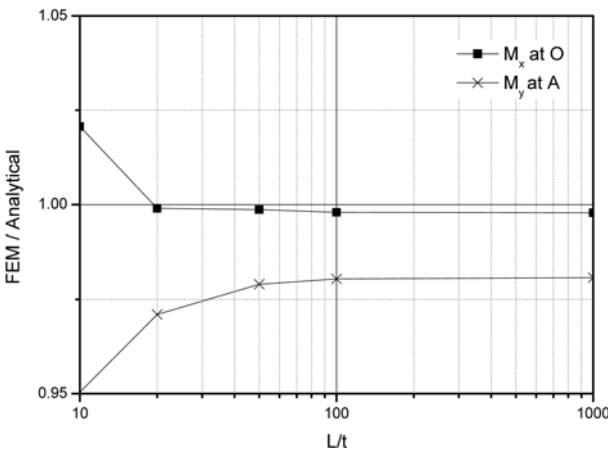


그림 5. 단면력 (Case II)

적이다. 따라서 고려 대상 관구조물의 경우에는 L/t 이 10일 때는 처짐의 약 14%가 횡방향 전단변형에 의한 처짐량으로 판단할 수 있다.

그림 4는 Case I에서 유한요소해석을 통해 산정한 단면력을 이론치와 비교한 것이다. 그림 2(a)의 A점에서는 유한요소 해석결과가 이론치에 비해 약 2%정도 작은 값을 나타내고 있으나, O점에서는 두께 변화에 관계없이 결과가 일치하였다. 그림 5는 Case II에서 유한요소 단면력을 이론치와 비교한 것으로, 그림 2(b)의 O점에서의 x축 모멘트는 두께가 감소함에 따라 이론치와 0.5% 이내로 일치하며 A점에서의 y축 모멘트는 약 2%의 오차를 나타내고 있다. 그림 6은 Case III의 O점에서의 유한요소 단면력과 이론치를 비교한

것으로 관구조의 두께가 감소할수록 이론치와 일치해가고 있다. 앞선 결과에서와 같이 단면력 결과는 관구조물 두께에 민감하지 않은 결과를 나타내고 있음을 확인하고 있다. 이는 유한요소 단면력을 산정하기 위해서 평면 내에 존재하는 응력을 두께방향 적분을 통해 합력을 계산하여 단면력을 산정하므로 횡방향 전단변형에는 큰 영향을 받지 않기 때문이다.

4. 교대 날개벽의 대표단면 선정

앞 절에서는 본 연구에서 사용하는 유한요소 해석 모델의 검증에 위해 Kirchhoff 판이론에 근거한 해석치와 유한요소 해석을 통한 수치해석 결과치를 상호 비교하여 채택된 유한요소 모델의 타당성을 검증하였다. 앞서 검증된 유한요소 모델을 교대 날개벽으로 확장하여 엄밀유한요소 해석을 수행하고 단면력을 수치적으로 산정하여 설계기준에서 제시된 단면력과 비교 분석한다. 이를 위해 고속도로교량의 교대설계시 적용되는 날개벽 중에서 국내 설계에서 많은 시행착오를 거치면서 경험적으로 많은 데이터를 가지고 있는 단면을 대표단면(Representative Section)으로 선정하였다. 선정된 대표 단면을 기준으로 날개벽의 높이, 폭 등의 다양한 변수를 변화시키며 매개변수 연구를 실시하고 단면력에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 각각 선정된 단면력을 설계기준으로 산정한 단면력과 비교하여 현재 국내 도로교 설계기준의 날개벽 단면력 산정식의 정확도 및 타당성을 분석하였다.

날개벽의 높이는 교대 형식과 높이에 가장 큰 영향을 받는 것이 일반적이다. 이러한 교대 형식 중에서 역 T형 교대는 전체 교대 시공 비율의 95%정도를 차지하며 경제적인 높이는 앞굽 높이를 포함하여 6 m에서 12 m의 범위이다. 또한 부벽식 교대는 역 T형 교대보다 높이가 높은 경우에 적용되며, 반중력식 교대는 역 T형 교대보다 높이가 낮은 경우에 적용되고 있으나 시공사례는 5% 미만인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 교량의 교대 날개벽의 대부분을 차지하는 역 T형 교대 중에서 측벽형 날개벽을 대상으로 연구를 실시하였다.

측벽형 날개벽의 매개변수는 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 날개벽 높이(H1), 날개벽 길이(B1), 날개벽 저판길이(B2), 날개벽 중단부 높이(H2)로 선정하였으며 날개벽 경사는 1:1로 고정하였다. 각 매개변수 별 적용가능 범위는 날개

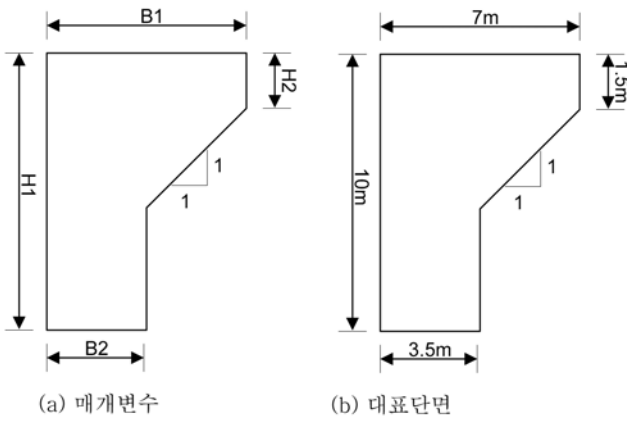


그림 7. 날개벽의 매개변수 및 대표단면 제원

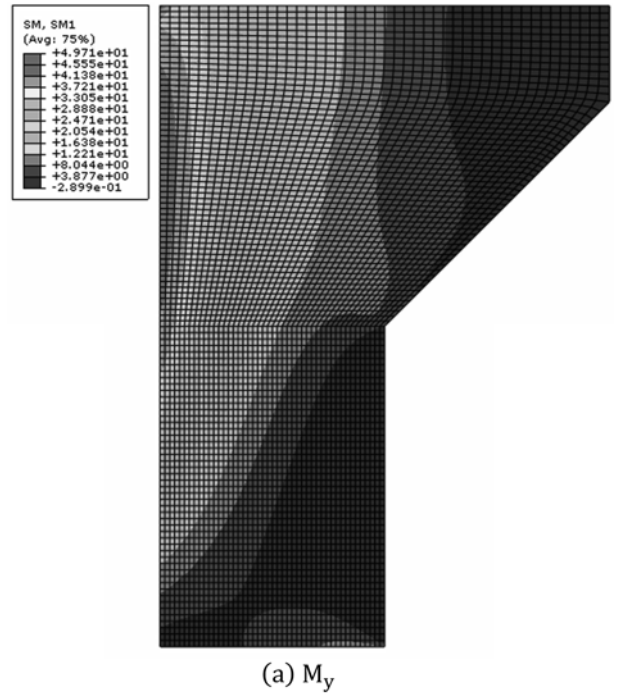
벽 높이(H1)는 6~11 m, 날개벽 길이(B1)는 6~7 m, 날개벽 저판길이(B2)는 3~4 m, 날개벽 종단부 높이(H2)는 1.5~2.5 m 로 조사되었다. 대표단면의 제원은 그림 7(b)와 같이 날개벽 높이(H1)는 10 m, 날개벽 길이(B1)는 7 m, 날개벽 저판길이(B2)는 3.5 m, 날개벽 종단부 높이(H2)는 1.5 m로 선정하였다.

5. 교대 날개벽의 매개변수 연구

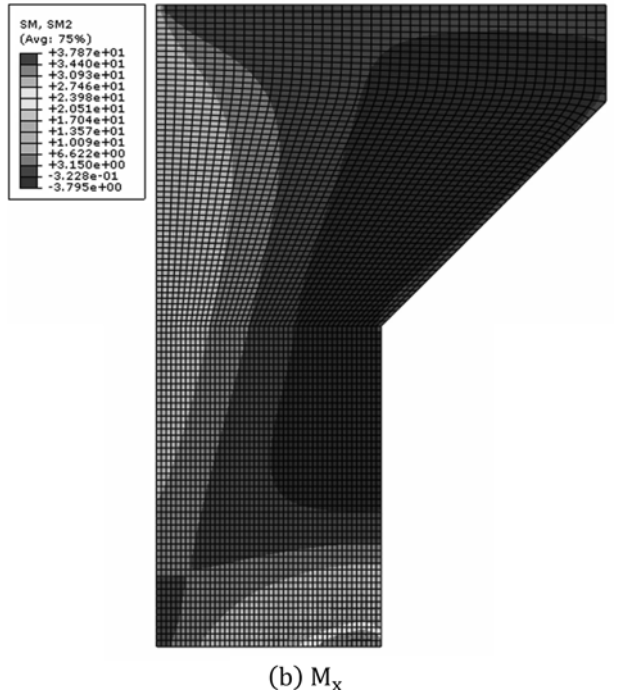
대표단면의 엄밀 유한요소 해석을 위해 흙의 단위 체적중량은 18.63 kN/m³로 정수압 형태의 토압을 고려하였으며, 추가로 상재하중을 9.8 kN/m²으로 가정하였으며 지하수위는 고려하지 않았으며 배근에 의한 추가적인 강성은 고려하지 않았다. 유한요소해석을 위한 요소망(Mesh)은 형태가 사각형에 최대한 가까우면서 형상비가 2:1이 넘지 않도록 모델링을 실시하였다. 앞선 유한요소해석 검증에 사용된 S4 쉘요소를 적용하여 교대 날개벽의 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 모델의 경계조건은 날개벽의 좌측면이 교대 벽체와 일체로 가정하였으며 날개벽의 저판은 교대의 기초판과 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 실제 상황은 교대와 날개벽이 하나의 구조시스템으로 거동하여 3차원으로 구성되어야 하지만, 본 연구에서는 설계기준에서 제시한 바와 같이 교대 부분을 고정단으로 가정하여 날개벽만의 거동에 중점을 두어 해석을 수행하였다.

그림 8은 대표단면의 단면력 분포도를 나타낸 것이다. M_y 는 좌측 고정단인 좌측 상부에서 최대치를 나타내고 있으며, M_x 는 하부 고정단에서 최대값이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8에서와 같이 단면력이 0에 가깝거나 최대 단면력 값에 현저히 작은 단면력을 갖는 단면도 실제 설계 시에 최대 단면력을 적용한다면 지나치게 과다 설계의 우려가 있는 부분으로 판단된다.

본 연구에서 선정한 4개의 교대 매개변수를 대상으로 단면력에 대한 민감도를 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 고려 대상인 하나의 매개변수를 적용 가능한 범위에서 변화시키고, 나머지 3개의 매개변수는 대표단면의 제원으로 고정시켜 단면력에 대한 영향을 검토하였다. 즉, 날개벽 높이(H1)의 매개변수 연구를 위해서는 B1, B2, H2는 대표단면 제원으로 고정시키고 H1을 6~11 m까지 변화시키며 단면력을 산정하였다. 다른 매개변수인 B1, H2, B2의 경우도 동일한



(a) M_y



(b) M_x

그림 8. 대표 단면의 단면력 분포도

방법으로 해석을 수행하였으며 자세한 매개변수 입력치는 표 2와 같다.

설계기준에서는 교대 날개벽을 여러 개의 구역(A, B, C, D)으로 나누어 단면력을 산정하고 있다. 그러나 D구역의 경우에는 A구역과의 연결부를 고정단으로 고려하므로 실제 상황과는 상이하다. 즉, 설계기준의 D구역에서의 단면력은 실제 거동과는 다르게 지나치게 안전측으로 산정되므로 유한요소해석 결과와 직접 비교하는 것은 불합리하다. 따라서 본 연구에서는 A구역, B구역, C구역의 단면력을 유한요소해석 결과와 비교 분석하였다. 여기서, A구역 유한요소 단면력은 지점부에 근접한 요소의 단면력(M_y) 평균치를 의미하고, B 단면력(M_y)과 C단면력(M_x)은 유한요소해석 결과의 최대치를 나타낸다.

그림 9와 표 3는 H1 변화에 따른 유한요소 단면력과 설계기준 단면력의 비교를 나타낸 것이다. H1이 6 m에서 11 m까지 변화함에 따라 설계기준의 A 단면력은 유한요소 단면력에 비해 최대 24%까지 작은 값을 보였으며, B단면력은 유한요소 단면력에 비해 최대 61%까지 큰 값을 보였다. 즉, 설계기준의 A단면력과 B단면력은 유한요소 단면력과 비교하여 때로는 안전측이며 때로는 비안전측임을 알 수 있다. 이처럼 유한요소 단면력(M_y)과 설계기준 단면력의 비가 일

표 2. 민감도 분석경우와 매개변수 범위 (단위: m)

CASE	H1	B1	H2	B2
H1-1	6	7	1.5	3.5
H1-2	7	7	1.5	3.5
H1-3	8	7	1.5	3.5
H1-4	9	7	1.5	3.5
H1-5	10	7	1.5	3.5
H1-6	11	7	1.5	3.5
B1-1	10	6	1.5	3.5
B1-2	10	7	1.5	3.5
B1-3	10	8	1.5	3.5
H2-1	10	7	1.5	3.5
H2-2	10	7	2.0	3.5
H2-3	10	7	2.5	3.5
B2-1	10	7	1.5	3.0
B2-2	10	7	1.5	3.5
B2-3	10	7	7	4.0

정한 추세를 보이지 않는 것은 설계기준의 단면력 산출방식이 교대 높이에 따라 달라지기 때문이다. 설계기준에서는 B 구역과 C구역의 구분을 그림 1과 같이 c점을 기준으로 45°로 나누는 규정을 제시하고 있다. 즉, 그림 13(c)와 같이 B2가 h보다 클 때는($\alpha < 45^\circ$) D구역의 토압 추가부분을 B 구역에서 고려하여 계산한다. 설계기준에서의 캔틸레버 해석으로 산정한 A구역과 D구역의 모멘트 단면력의 합은 H1이 증가함에 따라 함께 증가하지만 증가분은 날개벽의 기하학적 형상으로 인해 불규칙하게 증가한다. 이러한 모멘트 단면력의 합을 단위길이당 모멘트로 환산하기 위해 증가분이 선형인 날개벽 높이(A구역의 높이)로 나누면 표 3의 A단면의 설계기준 값과 같이 불규칙한 경향을 보이게 된다.

C구역에서는 그림 9와 같이 H1이 증가함에 따라 설계기준 단면력이 69% 비안전측에서 30% 안전측으로 전환됨을 알 수 있다. 이는 날개벽의 기하학적 형상과 정수압 형태의 토압이 복합적으로 작용하였기 때문이다. 즉, 그림 13(b)와 같이 B2와 h'이 같을 때($\alpha = 45^\circ$)를 기준으로 날개벽 높이가 크면(그림 13(a)) 토압의 크기에 의해 유한요소 M_y 가 지배되지만, 날개벽 높이가 낮은 경우(그림 13(c))는 D구역에 작용하는 토압의 영향이 증가하고 이에 의해 유한요소 M_y 가 지배되기 때문이다. M_y 는 그림 13(b)와 같이 B2가 h'와 같은 경우가 최소치를 나타낸다.

그림 10과 표 4는 날개벽 길이(B1) 변화에 따른 유한요소 단면력과 설계기준 단면력을 비교한 것이다. A구역에서는 설계기준 단면력이 유한요소 단면력보다 1~5% 작게 산출되어 비안전측의 결과를 보였으며 B1 변화에 단면력이 민

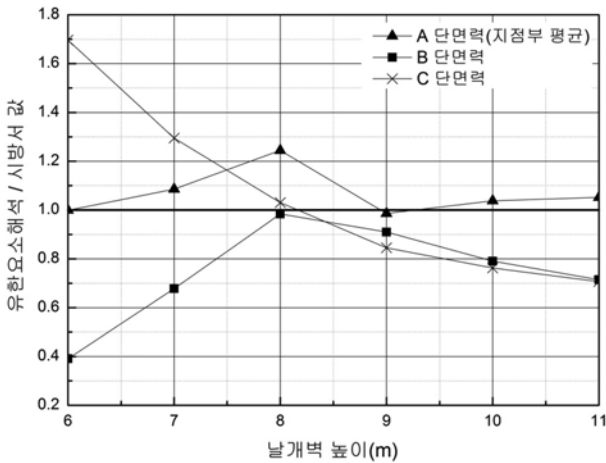


그림 9. H1 변화에 따른 단면력

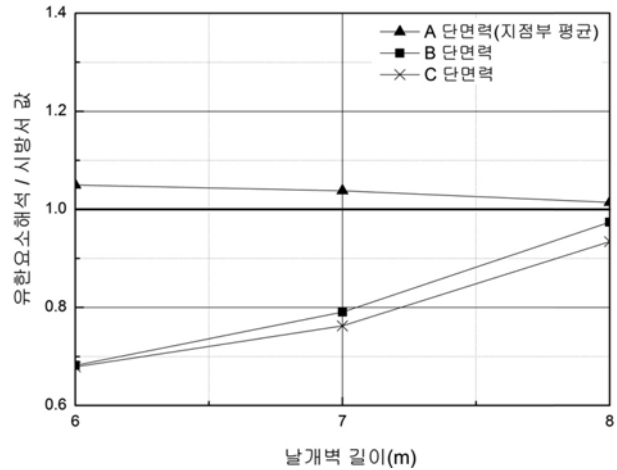


그림 10. B1 변화에 따른 단면력

표 3. 날개벽 높이(H1)변화에 따른 단면력 비교

(단위: kN-m)

CASE	A단면 (M_y)		설계기준	B단면 (M_y)		C단면 (M_y)	
	유한요소해석			유한요소해석 최대값	설계기준	유한요소해석	
	지정부 평균값	최대값				유한요소해석 최대값	설계기준
H1-1	299	367	300	256	655	406	239
H1-2	341	415	314	284	419	384	296
H1-3	371	440	298	304	309	364	353
H1-4	392	460	398	313	344	347	411
H1-5	409	459	394	317	401	357	468
H1-6	419	461	399	327	458	371	525

표 4. 날개벽 길이(B1) 변화에 따른 단면력 비교

(단위: kN-m)

CASE	A단면 (M_A)			B단면 (M_B)		C단면 (M_C)	
	유한요소해석		설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준
	지점부 평균값	최대값					
B1-1	318	341	303	274	401	317	468
B1-2	409	459	394	317	401	357	468
B1-3	542	570	534	391	401	437	468

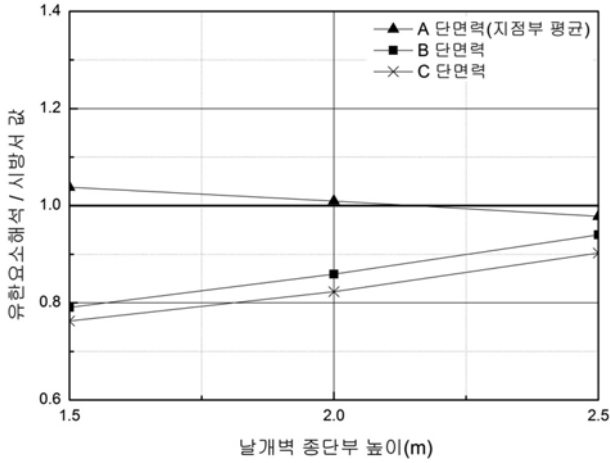


그림 11. H2 변화에 따른 단면력

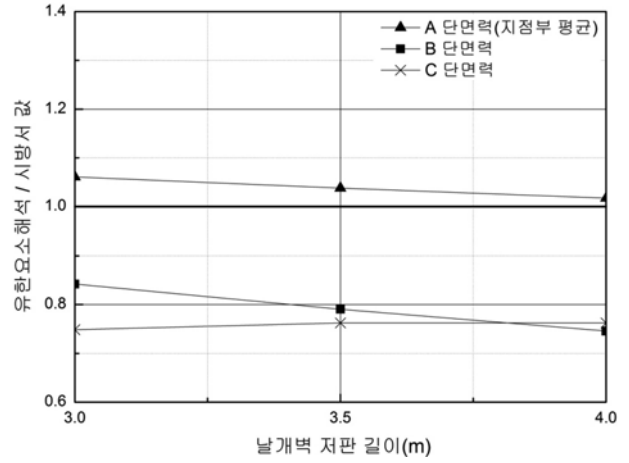


그림 12. B2 변화에 따른 단면력

감하지 않은 것으로 나타났다. B구역과 C구역의 유한요소 단면력은 B1이 증가함에 따라 안전측에서 증가하는 것으로 분석되었다.

B구역과 C구역의 설계기준 단면력은 표 4에서와 같이 B1 변화에 관계없이 일정한 값을 갖는다. 이는 B1이 증가하여도 D구역 단면이 B구역과 C구역 단면력 산정에 포함되지 않으며 토압의 크기도 일정하기 때문이다. B1이 8 m일 때 유한요소 단면력이 유한요소 해석치와 3% 이내의 오차를 나타내었다. 따라서 현재 설계기준에서 제시하고 있는 날개벽 길이가 8 m이상 일 때는 2변 고정 판해석을 해야 한다는 규정은 타당한 것으로 판단된다.

그림 11과 표 5는 날개벽 종단부 높이(H2) 변화에 따른 설계기준 단면력과 유한요소 단면력을 비교한 것으로, A구

역에서는 ±4% 이내의 오차를 나타내었다. B구역과 C구역에서는 H2가 증가함에 따라 유한요소 단면력이 설계기준 단면력에 근접해 가고 있음을 알 수 있다.

그림 12와 표 6은 날개벽 저판 길이(B2) 변화에 따른 단면력 비교이다. A구역에서는 설계기준 단면력이 유한요소 단면력에 비해 2~6% 작게 산출되었으며, 이는 설계기준이 비 안전측의 결과를 나타내고 있음을 의미한다. B구역과 C 구역에서는 설계기준 단면력이 유한요소 단면력에 비해서 15% 이상 큰 값을 나타내어 지나치게 안전측임을 알 수 있다.

앞선 매개변수 연구에서 살펴본 바와 같이 현행 도로교설 계기준에서 제시하는 구역분할에 의한 단면력 산정식은 날개벽 형상에 따라 대부분 안전측이지만 때로는 지나치게 비 안전측인 결과를 나타내고 있어 실제의 단면력 값을 반영하

표 5. 날개벽 종단부 높이(H2) 변화에 따른 단면력 비교

(단위: kN-m)

CASE	A단면 (M_A)			B단면 (M_B)		C단면 (M_C)	
	유한요소해석		설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준
	지점부 평균값	최대값					
H2-1	409	459	394	317	401	357	468
H2-2	449	505	444	345	401	385	468
H2-3	490	550	501	377	401	422	468

표 6. 날개벽 저판부 길이(B2) 변화에 따른 단면력 비교

(단위: kN-m)

CASE	A단면 (M_A)			B단면 (M_B)		C단면 (M_C)	
	유한요소해석		설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준	유한요소해석 최대값	설계기준
	지점부 평균값	최대값					
B2-1	393	451	370	266	316	268	358
B2-2	409	459	394	317	401	357	468
B2-3	423	470	416	363	487	447	586

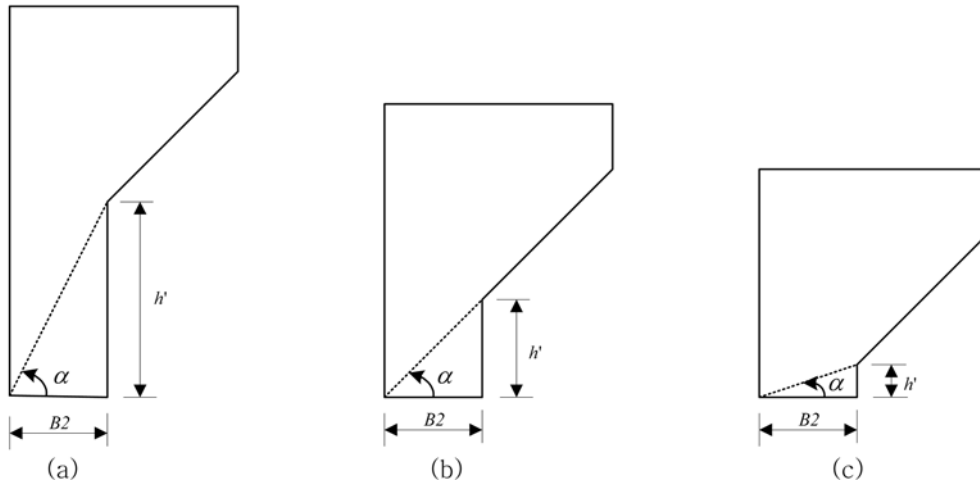


그림 13. 교대 날개벽의 기하학적 구분

지 못하고 있다. 즉, 현재 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 분할 구역에서의 단면력 산정식은 2차원 판구조를 1차원으로 지나치게 간략하게 모사하여 부정확한 단면력을 산출하고 있음을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 교대 날개벽 관련 도로교설계기준에서 단면력 산정을 위해 제시하고 있는 간편법을 개선하기 위해서 날개벽을 단순 캔틸레버 해석이 아닌 실제에 가까운 2면 고정 판구조로 유한요소해석을 실시하여 날개벽의 형상과 구속조건에 따른 단면력의 영향을 분석하고, 현 도로교 설계기준과 비교 분석하였다. 이를 위해 현재 설계에서 사용되는 교대 날개벽의 평균단면인 대표단면을 선정하고 형상비를 고려한 매개변수 연구와 이에 대한 날개벽 단면력의 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제시한 매개변수 범위 내에서 유한요소 해석을 실시한 결과, 현행 설계기준의 구역분할에 의한 단면력은 날개벽 형상에 따라 때로는 안전측이지만 때로는 비안전측인 결과를 나타내고 있어 실제의 단면력 값을 반영하지 못하고 있다.
2. 날개벽 단면력은 날개벽 높이 변화에 민감한 결과를 보였다. 설계기준의 M_y 는 유한요소 결과에 비해 24% 비안전측에서 61% 안전측의 결과를 보였다. 설계기준의 M_x 는 유한요소 결과에 비해 69% 비안전측에서 30% 안전측의 단면력을 나타내었다.
3. 현재 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 분할 구역에서의 단면력 산정식은 2차원 판구조를 1차원으로 간략하게 모사하여 부정확한 단면력을 산출하고 있다. 따라서 유한요소 해석법을 활용한 판구조 해석을 적용하여 보다 정확한 단면력을 산정하거나, 추가연구를 통해 날개벽의 기하학적 매개변수를 포함하고 정확도가 향상된 간편식의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

4. 교대 날개벽에서 단면력이 거의 발생하지 않거나 최대 단면력에 비해 현저히 작은 단면에 대해서는 철근량을 감소시키고 두께의 변화를 두어 경제적인 설계를 수행할 수 있을 것이다.

참고문헌

김덕곤, 양승록, 우성균(2005) 교대벽체의 날개벽 설치와 편경사 영향의 해석적 분석, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제17권 5호, pp. 51-57.

대한토목학회(2008) **도로교설계기준 해설**, 교량설계핵심기술연구단, pp. 736-738

한국콘크리트학회(2007) **콘크리트 구조설계기준 해설**, pp. 310-313.

AASHTO LRFD Bridge Specifications (2007) 4th Edition, American Association of State Highway and Transportation officials, Washington D.C.

AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (2002) 17th Edition, American Association of State Highway and Transportation officials, Washington D.C.

ABAQUS/Standard User's Manual - Version 6.7.1. (2007) ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.

Chung, W. and Sotelino, E.D. (2006) Three-dimensional finite element modeling of composite girder bridges. *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 1, pp. 63-71.

Dicleli, M. (2002) Computer-aided limit states analysis of bridge abutments, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, pp. 74-97.

Euro Code 1 (2002), Section 4, Actions on Structures, European Committee Standardisation.

Timoshenko and Woinowsky-Krieger (1970) "Theory of Plates and Shells", 2nd Edition. McGraw Hill.

WisDOT Bridge Design. (2009) Wisconsin Department of Transportation.

WVDOT Bridge Design Manual (2004) West Virginia Department of Transportation.

社団法人 日本道路協會(2002) **道路橋示方書・同解説**, pp. 210-212.

(접수일: 2010.5.11/심사일: 2010.10.12/심사완료일: 2011.1.24)