

단실단면을 갖는 강박스 거더교의 다이아프램의 강성과 간격에 관한 설계 최적화

Design Optimization on Diaphragm Stiffness and Spacing of Steel-Box Girder Bridges with a Single-Cell Section

임다수* · 박남희** · 한택희*** · 강영종****

Lim, Da-Soo · Park, Nam-Hoi · Han, Taek-Hee · Kang, Young-Jong

ABSTRACT

Generally, diaphragms are installed in the box girder to prevent or decrease the distortion of the cross section. In engineering practice, diaphragms are spaced in 5m intervals without reasonable basis. And the usual diaphragm type is solid-plate type. It is considered to be noneconomical design to the almost design engineers. In this paper, the parametric study was performed to present the design proposal about the diaphragm stiffness and spacing only in the single cell box girder. For that, the distortional warping normal stress, bending normal stress and transverse bending normal stress were analyzed using finite element program 'SMB' for the accurate structural analysis.

1. 서론

강박스 거더교에는 보통 뒤틀림 방지를 위해 격벽을 설치하게 된다. 이 때 크게 두 가지 요소를 결정해야 하는데, 하나는 격벽의 종류이며, 다른 하나는 격벽 사이의 간격이다. 국내에서는 보통 일률적으로 간격 5m를 사용하며 격벽의 종류는 중복식을 대부분 사용한다. 또한 중복식과 중복식 격벽 사이에 라멘타입의 격벽을 더 설치하기도 한다. 이에 반해 국외에서는 라멘 타입이나 트러스 타입과 같이 국내에 비해 다양한 격벽을 사용하며 격벽강성도 중복식보다 다소 작은 것을 사용하고 있다. 따라서 국내의 격벽설계가 국외와 비교하여 너무 일률적이거나 과대설계 경향이 있다고 할 수 있다. 따라서 단일 강박스 거더교량에 한해, 격벽강성과 격벽간격을 큰 매개변수로 하여 이것들 둘을 최적화 시켜보고자 했다.

본 연구에서는 범요소를 사용한 범해석프로그램인 SMB를 사용했으며, 우선 본격적인 매개변수 연구에 앞

* 석탑엔지니어링 사원

** 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수

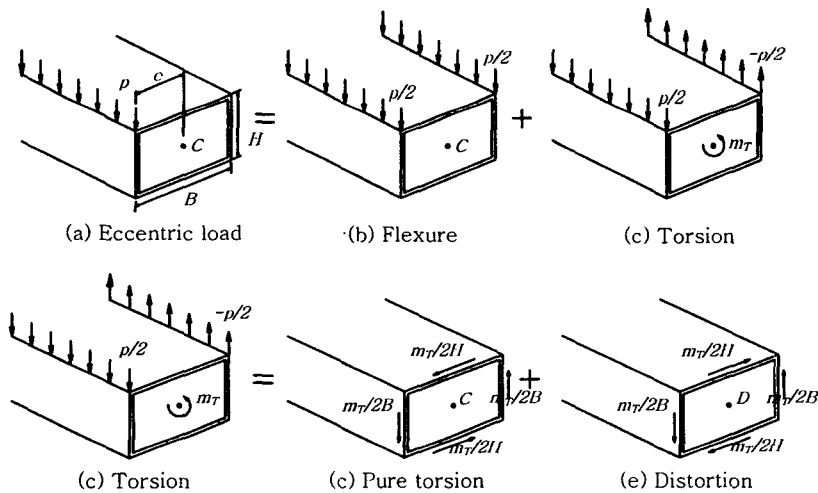
*** 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 박사과정

**** 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 부교수

서 기존의 셀요소를 사용한 유한요소프로그램들과 SMB를 비교, 검증해 보았다. 이후 매개변수연구를 각종 제한 응력조건들을 만족하며 충분한 뒤틀림 저항성능을 가진 최소의 격벽 강성을 먼저 산정하였다. 그리고 그러한 최소의 격벽 강성을 가진 알맞은 형태의 격벽 종류를 제안할 것이며, 다음으로는 좀 더 실용적인 형태의 격벽간격도 제안하였다.

2. 뒤틀림 현상

격벽의 역할은 뒤틀림에 저항하는 것이다. 따라서 뒤틀림이 발생했을 때 생기는 응력성분들을 얻어내어 분석해야 한다. [그림1]은 편심하중에 의한 응력성분들의 분리를 설명한 것이다. [그림1]과 같이 단면이 편심하중을 받으면 편심하중은 힘-평형관계에 의하여 휨을 유발하는 인자와 비틀림을 유발하는 인자로 나누어 진다. 여기서 비틀림을 유발하는 인자는 다시 순수 비틀림과 뒤틀림으로 나누어 진다. 따라서 편심하중을 받은 박스거더교에는 크게 휨과 비틀림, 그리고 뒤틀림에 의한 응력이 발생하는 것이다. 이렇게 편심하중을 통해 발생하는, 크게 세가지 응력성분들의 강상자 위에서의 분포는 다음과 같다. 그림에서, 상자형 거더에 발생하는 비틀림응력은 다른 응력에 비해 상대적으로 그 크기가 매우 작으며 격벽과 관련하여 주요 응력성분은 휨 법선 응력과 뒤틀림 휨 법선응력이다.



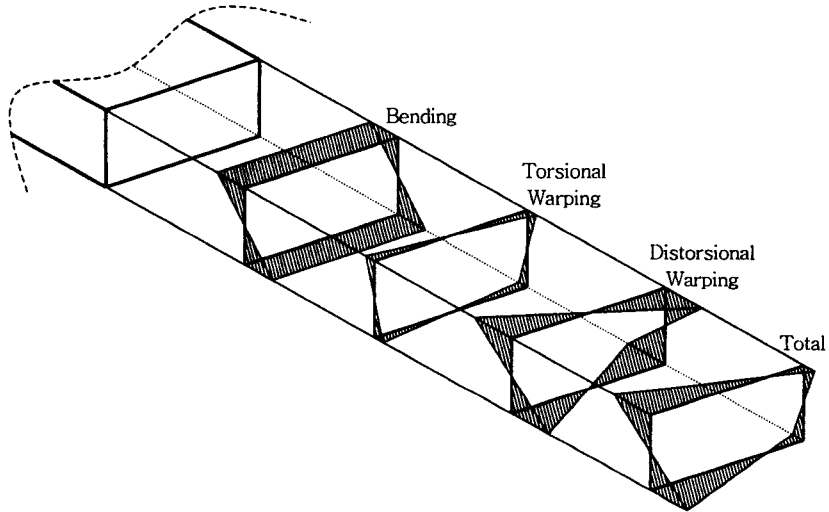
[그림1] 강상자위에 작용하는 편심하중의 분리

이 때, [그림2]에서 현재 격벽과 관련된 설계 지침서들에서는 특히 휨 법선응력과 뒤틀림 휨 법선응력의 비를 가지고 제한을 두고 있다. 즉 어떤 편심하중을 받는 강박스 거더교량에서 발생하는 최대 휨 법선응력과 최대

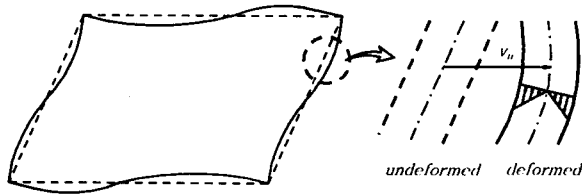
뒤틀림 휨 법선응력을 찾아 응력비를 계산하여 그것을 어떤 기준 이하로 제한하는 것이다.

$$\text{응력비} = \frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \quad (\sigma_{dw} = \text{뒤틀림 법선 응력}, \sigma_b = \text{휨 법선 응력})$$

격벽 설계 지침서들에서 또 한가지 제한 조건으로 두고 있는 요소인 횡방향 휨이란 다음과 같이 단면의 뒤틀림으로 인해 발생하는 교축 직각 방향으로의 휨을 말한다.

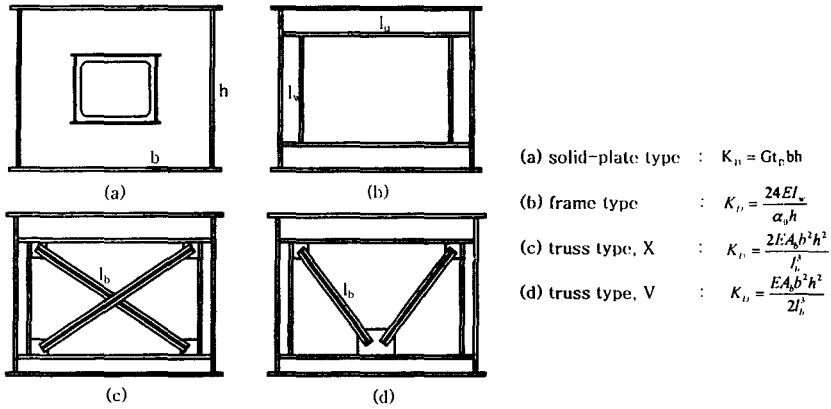


[그림2] 단실 강박스 위에 작용하는 응력성분들의 분포



[그림3] 횡방향 휨(σ_{ls})

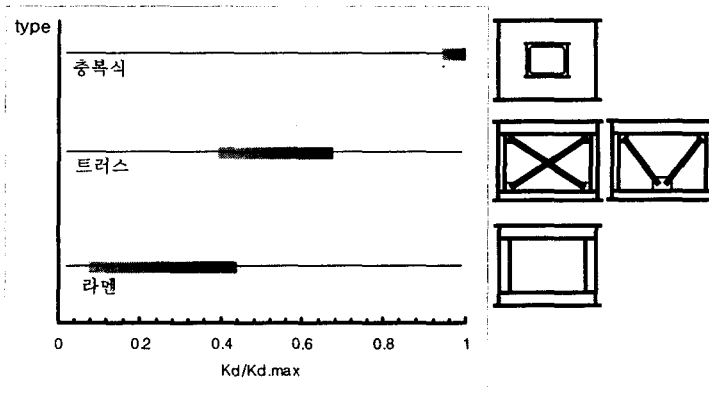
이러한 응력들을 일정 크기 이하로 구속하기 위해 필요한 격벽들의 국내와 국외의 일반적인 종류와 그것들의 격벽강성 산정식은 다음과 같다.



[그림4] 격벽의 종류와 강성산정식

이러한 격벽강성 산정식들은 간단한 공학적 원리만으로 직접 유도 가능하다. 여기의 산정식들을 보면 어떤 동일 직사각형 단면에 설치하는 격벽 종류중 시각적으로 봐도 중복판 형식의 것이 가장 강성이 크고 라멘 타입의 격벽강성이 가장 작을 것이다. 국내는 여기에서 중복판 형식의 것만을 주로 일률적으로 사용한다.

다음은 어떤 임이 직사각형 단면에서 필요한 격벽의 강성을 무차원적으로 표현해주기 위한 표현법을 설명 하겠다. 동일 단면에서 각각의 격벽형식들이 갖는 격벽강성을 상대적으로 나타내면 대략적인 자료이나 다음과 같은 분포를 보인다.



[그림5] 격벽강성비의 종류별 분포

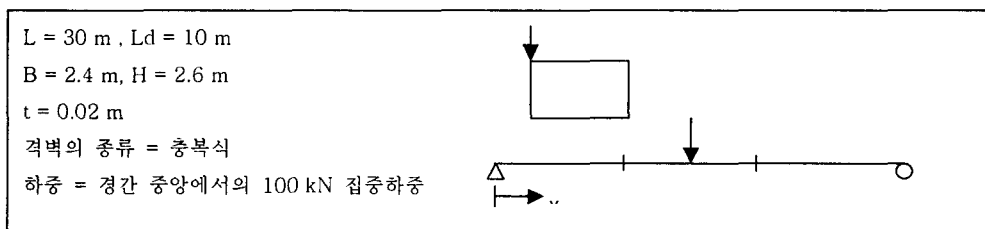
즉 중복식 형태의 격벽강성을 1로 본다면 트러스 타입이나 라멘 타입의 격벽강성은 1보다 작은 [그림5]와 같은 분포를 보인다. 동일 단면에서 어떤 임의 형식의 격벽강성을 그 단면 최대의 격벽강성인 중복식의 격벽강성으로 나눈 값을 격벽강성비라고 할 것이다. 예를 들어 편심하중을 받은 어떤 강상자 교량이 뒤틀림에 저항하기 위해서 필요한 격벽의 종류가 중복판 형식의 격벽까진 필요없고 트러스 타입이나 라멘타입으로 충분하다면 이것은 격벽 강성비가 1보다 작게 나타난다는 것을 의미한다. 또 반대의 예로 뒤틀림 구속을 위해 격벽강성비가 0.2로 충분하다면 이렇게 강성비가 0.2인 라멘타입을 사용해도 좋다는 것을 의미한다. 즉 격벽강성비란 것을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{격벽강성비} = \frac{K_d}{K_{d, \max}} \quad (K_d = \text{임의형식 격벽강성}, K_{d, \max} = \text{중복식 격벽강성})$$

3. 해석 프로그램 (SMB)

매개 변수 연구를 수행하기에 앞서, 연구를 수행하는데 사용할 SMB의 검증을 해보았다. SMB 뒤틀림 현상을 포함한 빔요소를 사용한 다실 박스 거더교의 해석 프로그램이다. 대칭 단면을 갖는 직선 다실 박스거더 교량의 정적해석에 적용될 수 있는 박판 다실 박스 보요소를 사용했다. 또한 일반 6자유도의 빔요소에 비해 휨, 비틀림, 그리고 뒤틀림에 의한 변형을 설명할 수 있도록 절점당 9자유도를 갖는다. 빔요소를 사용하기 때문에 셀요소를 사용하는 것보다 상대적으로 매개변수 연구를 수행하기에 용이하다. 또한 결과에서 각 거동에 대한 단면력들이 uncoupling되기 때문에 필요한 응력성분들만을 산출하기 용이하다.

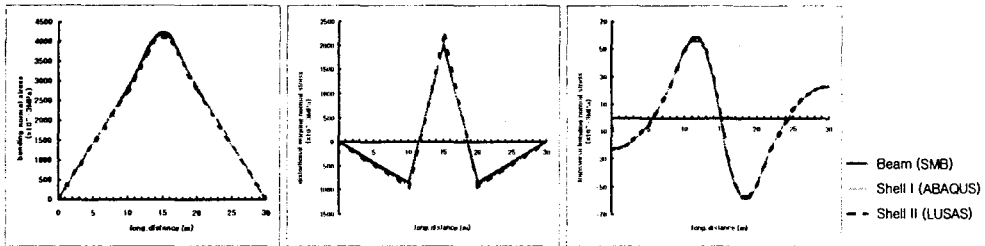
이미 SMB를 첨부한 논문에서 그것의 정확성을 검증하긴 했으나 검증 모델링을 좀더 본 연구에 맞도록 하여 다시 한 번 프로그램의 검증을 해보았다.



[그림6] 해석프로그램 검증 모델링 재원

지간 길이 방향에 대해서 휨 법선 응력, 뒤틀림 뒹 법선 응력, 횡방향 휨 법선 응력 부분을 비교해 봤으며, 박스 단면에 발생하는 응력성분들은 이외에도 여러 가지가 있겠지만, 현행 설계 지침서에서 제한하는 성분들과 관련된 응력성분들만을 보기로 한다.

이 세가지 응력성분들에 대해서 SMB와 기존의 범용 유한요소 프로그램인 LUSAS 13.4와 ABAQUS CAE를 사용한 쉘 요소의 모델을 비교한다. 이 때 SMB는 이미 결과 파일에서 각 거동, 즉 휨, 비틀림, 뒤틀림에 의한 단면력들이 따로따로 나오지만, 쉘요소를 사용한 모델에서는 그렇게 따로따로 볼 수가 없다. 따라서 SMB에서의 휨, 비틀림, 뒤틀림에 의한 응력성분들과의 비교를 하기 위해선 쉘요소에 가해 주어야 하는 하중 조건이 [그림1]에서와 같이 결과를 보고자 하느냐에 따라 다른 조건으로 주어야 한다. 이상의 조건들을 만족하며 범요소와 쉘요소에 의한 결과를 다음에 나타냈다. 결과 그래프에서 보여주듯 큰 차이가 나지 않는다.



[그림7] 범요소와 쉘요소에 의한 응력 비교

4. 매개변수 연구

4.1 매개변수 연구의 범위

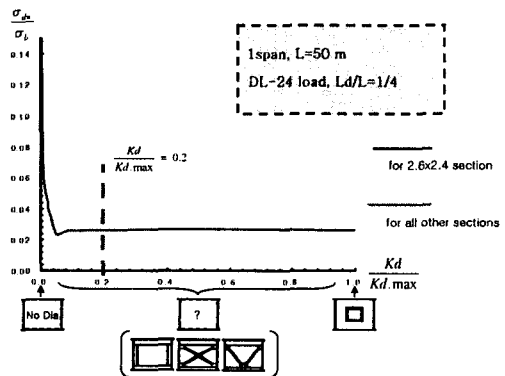
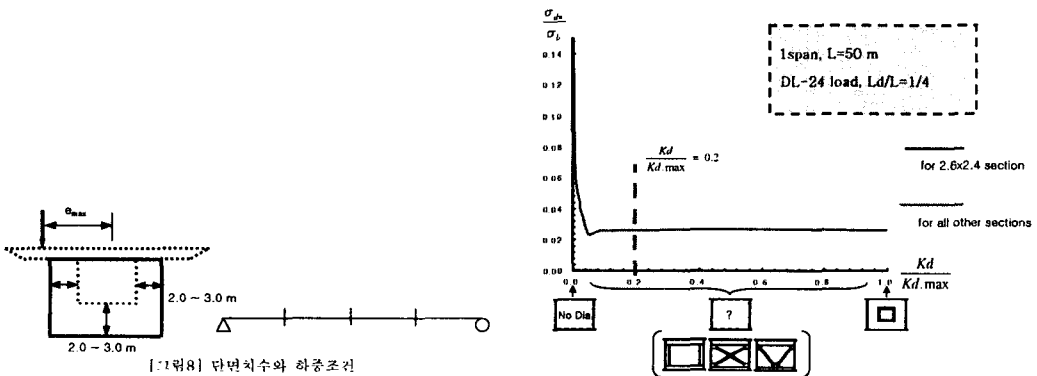
매개 변수 연구의 범위는 다음과 같다. 다음의 변수 범위는 국내 단일 강박스 거더교량의 실제 시공조건들을 반영한 범위이다.

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 적용대상 : 단일 강박스 직선교 (2차선) 2. 단면종류 : B, H = 2 ~ 3 m, t = 2 cm 3. 지간길이 : 30 ~ 150 m 4. 경간수 : 1 ~ 3 5. 격벽간격 : 등가지간장의 동일 배분 길이 6. 격벽강성 : 0 ~ $K_{d,max}$ (= 중복식 격벽타입 강성) 7. 하중조건 : 최대편심거리를 가진
DL-24, DB-24, 자중 |
|--|

[표1] 매개변수 연구의 범위

4.2 최소 격벽 강성비의 산정

선행 연구자료나 현행 설계 지침서들을 살펴보면 박스 거더 교량의 단면 치수에 대해서는 특별히 어떤 명시를 하고 있지 않은 상태에서 격벽에 관한 사항을 다루고 있다. 본 연구과정의 첫번째로 뒤틀림 응력에 대해서 과연 단면의 치수에 따른 영향이 얼마나 되는지 단면의 치수를 제외한 다른 모든 조건들을 다 같게 한 상태에서 격벽 강성비와 최대 법선 응력비의 분포를 살펴보겠다. 다음 나오는 결과는 지간 길이 50m, 단경간 교량에서 격벽을 3개, 즉 12.5m 간격으로 설치하여 가로와 세로의 치수가 2m에서 3m까지 0.2m단위로 변화면서 얻은 격벽 강성비와 최대 법선 응력비를 나타낸 것이다.

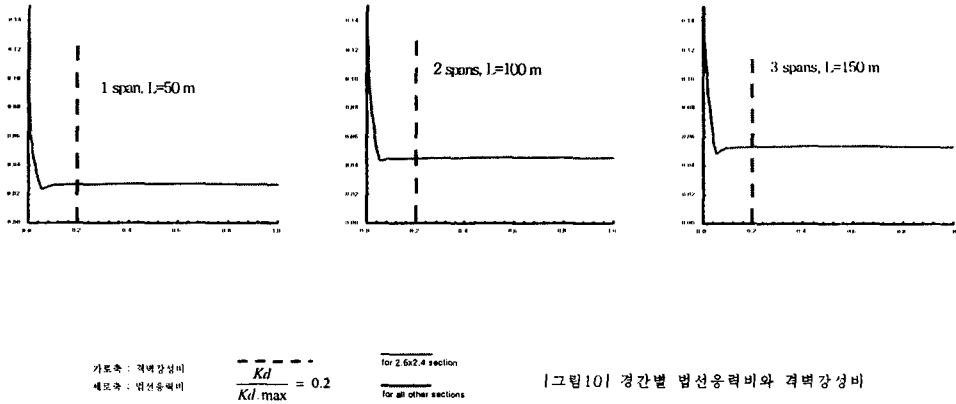


[그림9] 최소 격벽 강성비

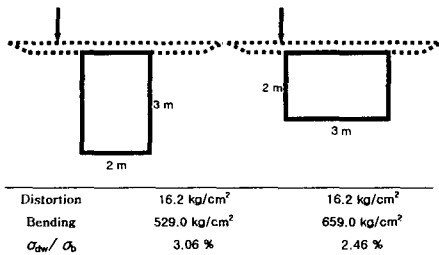
4.3 경간수별 최소 격벽 강성비의 결정

다음에 나오는 그래프들은 각각 1경간, 2경간, 3경간에 대한 것이며 지간길이는 각 지간당 50m이다. 따라서 50m에서 150m까지의 결과라 할 수 있겠다. 하중조건은 이 장의 처음에 명시했듯 고정된 최대 편심거리에 걸리는 DL-24 하중이며 모든 강판과 격벽의 두께는 항상 2cm로 일정하다. 격벽의 수는 3개이며 격벽간 간격은 일정하게 12.5m이다.

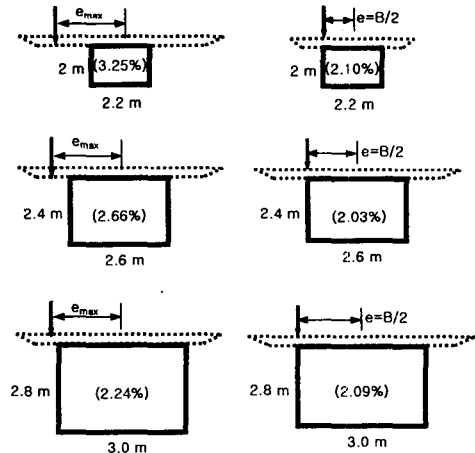
[그림10]은 경간별 법선응력비와 격벽강성비의 분포를 보여준다. 앞절에서는 우선 1경간, 지간 30m의 교량에서 단면의 치수와 상관없이 격벽강성비가 0.2이상인 되는 조건에서 더 이상의 법선응력비의 감소효과가 없는 것을 먼저 살펴보았다. 이번에는 2경간, 3경간에 대해서도 그러한 결과를 보여주는지 살펴본 것이며, 역시 격벽 강성비가 0.2이상인 되는 이후부터는 더 이상의 법선응력비 감소가 없다는 동일한 경향을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 경향이 격벽강성비가 어떤 값을 갖든지 간에 단면의 치수와 법선응력비가 전혀 상관없다는 것은 아니다.



[그림11]와 같이 법선응력비는 같은 치수를 가진 단면을 세로로 길게 놓았을 때와 가로로만 놓아 방향만 바뀌도 달라진다.



[그림11] 단면별 법선응력비와 격벽강성비



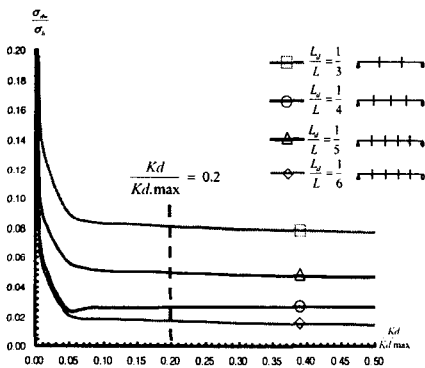
[그림12] 편심거리별 법선응력비(관호안값)

본 연구에서는 보다 안전하고 실용적인 변수의 범위를 잡기 위해 특히 편심거리를 2차선이 가질 수 있는 최대치로 고정시켜서 격벽강성비에 대해 다른 법선응력비를 가지게 되며, 실제로 몇몇 선행연구에서는 편심거리를 설정할 때 단면의 폭에 비례하는 거리를 사용한다. 그렇게 할 경우 [그림12]와 같이 일정한 법선응력비를 가지게 된다. [그림12]의 좌측열은 본 연구수행에서 사용한 고정된 최대 편심거리를 사용한 조건에서의 법선응력비이며, 우측열은 일반적으로 사용하는 단면 폭에 비례하는 편심거리를 사용한 법선응력비이다. 결과에서 보듯

우측열의 결과들은 법선응력비가 일정하게 된다는 것을 알 수 있다. 결국 이상에서 알 수 있는 것은 격벽강성비와 법선응력비의 분포는 단면의 치수에 상관이 없다는 것이다.

4.4 격벽 간격별 최소 격벽 강성비의 결정

이 절에서는 또 하나의 설계변수인 내부 격벽 사이 간격을 변화시켜가면서 역시 격벽강성비와 법선응력비의 분포를 살펴보겠다. 다음에 나오는 결과는 단경간교량 모델에 대한 것이며 지간 길이는 30m이다. 현재 국내의 설계 조건을 반영한 DL-24 하중조건을 사용한 것이며, 현재 가장 일반적인 단면 치수라고 할 수 있는 가로 2.6m, 세로 2.4m의 단면 치수를 가진 것이다. 격벽의 간격 또는 격벽의 수를 설계 변수화 시킬 때, 한 지간당 설치하는 격벽들간의 간격이 일정한 것이 일반적이고 실용적이므로 격벽사이의 간격을 지간의 길이로 나눈 값을 격벽의 간격 또는 격벽의 수를 반영하는 변수로 설정하였다.



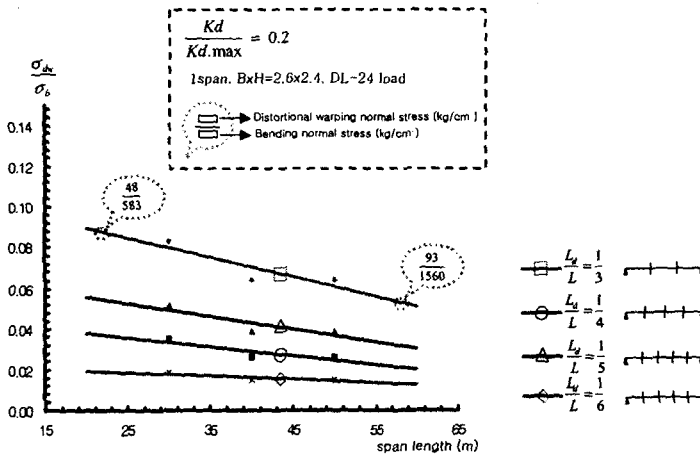
[그림13] 격벽 간격별 법선응력과 격벽강성비

[그림13]에서 간격이 넓어지거나 같은 의미로 지간당 설치하는 격벽의 수를 감소시키면 동일 격벽강성비에 대해 법선응력비가 대체로 커진다. 이것은 뒤틀림에 저항하는 격벽이 많아지면서 당연한 결과라고 할 수 있으며 격벽강성비가 0.2 이상이 된 이후부터는 격벽강성을 더 증가시키는 것이 뒤틀림응력의 감소에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 이후부터는 격벽강성비를 0.2로 고정시킨 상태에서 격벽의 수 또는 간격을 실용적인 형태로 제안하는 연구를 수행하였다.

4.5 격벽 간격의 결정

뒤틀림 저항성을 크게 하기 위해서 격벽의 강성을 증가시키는 방법이 있고, 격벽의 설치 개수를 늘려도 되는 것인데, 이 중에서 격벽의 강성을 무한정 크게 하는 것이 계속 뒤틀림 응력을 줄이지는 못한다. 어떤 단면에 대해서 그 단면의 치수에 따른 중복식 형태의 격벽 강성을 우선 산정한 다음 그것의 20% 정도가 되는 격벽의 강성이면 그 이후부터는 격벽의 강성을 크게 하는 것이 뒤틀림 응력을 줄이는데 효과가 없다. 격벽강성비가

0.2가 되기 위해선 굳이 중복식 형태의 격벽이 필요치 않다는 것이다. 외국과 같이 트러스 타입이나 라멘 타입이 바람직 할 것이다. 따라서 격벽강성비를 0.2로 고정시킨 다음 격벽을 몇 개소에 설치해야 하는지 결정한다면 그런 설계법이 경제적일 것이다. 실제로 현행 격벽가이드들은 법선응력비를 5%나 10%로 제한을 하고 있는데 본 연구에서도 격벽강성비를 0.2로 고정시킨 상태에서 그렇게 법선응력비를 5%, 10%, 15%로 제한을 하여 실용적인 형태의 격벽간격비를 제안할 것이다.



[그림 14] 단경간에서의 지간길이와 법선응력비

[그림 14]에서는 격벽강성비를 0.2로 고정시킨 상태에서 격벽간격비를 여러가지고 바꿔가면서 단경간에 대해서 지간의 길이에 따른 법선응력비를 본 것이다. 지간의 길이가 길어질수록 대체로 직선형이나 길이에 따라 법선응력비가 다소 줄어드는 경향이 있다. 이것은 실제로 어떤 한 점에서의 휨법선응력과 뒤틀림법선응력의 실제 값을 얻어보면 그 원인을 알 수 있다. 그래프에서 보면 지간길이가 길어질수록 휨법선응력의 증가정도가 뒤틀림법선응력의 증가정도보다 다소 크기 때문에 결과적으로 법선응력비가 줄어드는 것이다. [그림 14]의 경향은 2, 3 경간에서도 마찬가지이다. 단경간에서처럼 지간길이가 길어질수록 일률적으로 법선응력비가 줄어드는 경향이 있는 것은 아니지만 역시 대체로 선형적인 분포를 가지고 있다.

4.6 DB-24 하중조건의 검증

이상의 결과를 보면 실용적인 형태의 격벽간격을 제안할 수 있을 것이다. 그러나 마지막으로 고려해 봐야 할 것은 지금까지의 모든 결과과 DL-24 하중조건, 즉 등분포 하중조건에 관한 것이라는 점이다. 실제로 DL-24 하중조건 말고도 국내에는 DB-24 집중하중 조건이 있으며 사실 짧은 지간길이를 가진 교량에 대해서는 DB-24

하중조건과 같은 집중하중이 더 크리티컬 할 수가 있다. 따라서 여기서 DB-24 하중조건에 대해서 지금까지의 결과로 얻은 격벽강성비 0.2와 설계변수 구간내에서 가장 짧은 지간길이인 30m, 단경간 교량에 대해서, 또한 가장 뒤틀림응력이 크게 발생할 가로 2.2m, 세로 2m 단면치수를 가진 것에 대해 검증을 해보았으며 등분포 하중조건에 대한 결과를 그대로 사용해도 제한 법선응력비를 만족시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

4.7 횡방향 휨 응력의 검증

본 연구의 초반에 언급된 횡방향 휨응력의 검증도 필요하겠다. 단순히 법선응력비를 5% 또는 10% 로 제한을 했다고 해서 안전한 것은 아니기 때문이다. 실제로 법선응력비는 작아도 뒤틀림 휨 법선 응력의 실제값은 매우 커져서 격벽에 좌굴이 생기는 문제가 발생할 수도 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 모든 경우에 대해서 횡방향 휨응력을 50kg/cm² 로 제한을 하도록 하였으며, 모든 경우에 대해서 횡방향 휨응력은 50kg/cm² 이하가 되었다.

5. 결론

1) 단일 강박스 거더교량에서 뒤틀림 방지를 위해 격벽을 설치할 경우 격벽의 강성을 높일 수도 있고, 격벽의 간격을 줄일 수도 있다. 이 때 본 연구에서는 박스단면치수, 지간수, 지간길이에 상관없이 격벽의 강성을 무한정 높여도 어느 한계 이후부터는 더 이상 뒤틀림응력을 줄여주지 못한다는 것을 알 수 있었다. 그러한 한계치는, 어떤 임의 단면에 알맞는 중복식 형태의 격벽 강성의 20% 에 해당하는 격벽 강성이다. 즉 중복식 형태의 격벽 강성의 20% 에 해당하는 격벽강성을 가지고 있다면 그것이 꼭 중복식이 아닌 트러스 타입이나 라멘 타입이라도 그것으로 충분하다는 것이다. 그 이상으로 격벽 강성을 더 높이는 것은 비경제적이며 뒤틀림응력의 크기를 크게 줄이지도 못한다. 따라서 격벽강성비가 0.2 가 되도록 격벽의 종류와 치수를 결정하면 좋을 것이다.

2) 결론 1.의 조건에서, 즉 격벽강성비를 0.2로 고정시킨 상태에서 격벽의 간격 또는 개수는 경간수와 법선응력비의 제한 조건에 따라 각각 다음과 같이 하면 경제적이고 실용적일 것이다.

$$-\frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \leq 0.05 : \frac{L_d}{L} = \frac{1}{4} (1span), \frac{L_d}{L} = \frac{1}{6} (2, 3spans)$$

$$-\frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \leq 0.1 : \frac{L_d}{L} = \frac{1}{4} (1 \sim 3spans)$$

$$-\frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \leq 0.15 : \frac{L_d}{L} = \frac{1}{3} (1 \sim 3spans)$$

3) 동일한 하중조건에 대해서 지간의 길이가 길어지면 자연스레 휨응력과 뒤틀림 응력의 값은 증가할 것이다. 그러나 일반적으로 지간길이가 늘어나면서 뒤틀림 응력이 증가하는 것보다는 휨응력이 증가하는 정도가 약간 더 크므로 지간 길이가 늘어날수록 법선응력비는 다소 감소하는 경향을 보인다.

4) 2차선의 단일 강박스 거더교량에 한해서 격벽의 개수가 한 지간당 최소 3개 이상만 되어도 횡방향 휨 응력의 값은 50kg/cm^2 이내의 값으로 매우 작게 나타나므로 격벽자체의 좌굴등은 결론 1,2 조건을 만족한다는 전제하에 일어나지 않는다.

참고 문헌

1. Hiroshi Nakai and Conrad P. Heins, "Analysis Criteria for Curved Bridges", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.103, No. ST7, July, 1997. pp1419-1427
2. Hiroshi Nakai, Chai Hong Yoo : Analysis and Design of Curved Steel Bridges
3. 건설교통부, 도로교표준시방서, 2000
4. 황선호, "상자형 거더의 격벽 간격이 뒤틀림에 미치는 영향", 석사학위논문, 고려대학교, 1997