

강상자형 교량의 하중분배 거동에 대한 비교 연구

A Comparison Study on Load Distribution Behavior of Steel Box Girder Bridge

나 준 호¹⁾ 정 광 모¹⁾ 김 문 영²⁾
Na, Joon Ho Chung, Kwang Mo Kim, Moon Young

ABSTRACT

To design steel box girder bridge, designers have taken the classical load distribution coefficient methods. Due to the rapidly developing computer technique, steel box girder bridge is simply modeled as grillage method for analyzing the girder, or as fully finite element method for more accurate and detailed analysis. Recently, cruciform space frame method is developed for modeling and analyzing it more simply and easily compared with finite element method. So, this study for the examination of upper methods' characteristics loaded unit moment load and analyzed the distortional deflection with shell element method and cruciform space frame method, and for three span three girder steel box bridge, loading DB-24 loads, analyzed it by upper methods and compared the results.

1. 서 론

강상자형 교량의 설계에 있어서 그동안 하중분배계수 방법인 0-1법(simple beam method)과 Leonhardt-Homborg(이하 Leon.-Hom.)의 격자이론¹⁾ 등이 사용되어왔다. 이러한 방법에서는 횡방향의 하중분배를 고려하여 각 주형에 걸리는 최대모멘트를 계산하여 각 주형을 설계하였다.

최근 들어 구조해석 분야에서는 전자계산기의 발달로 인해 강력한 구조해석 수단인 유한요소법이 많이 이용되고 있다. 그러나 이러한 유한요소법 해석프로그램에서는 모델링의 방법에 따라 서로 상이한 결과를 얻게 되는 경우가 많다. 또한, 모델링에 대한 입력시간, 계산시간, 결과의 분석 시간이 많이 걸릴 뿐 아니라, 계산기의 성능상 계산이 불가능한 경우도 종종 발생한다. 따라서 이에 대한 보다 효율적이고 정확한 근사적 해석 기법이 요구되고 있다. 국내에서는 1995년에 허정욱²⁾이 단순상자형에 대한 등가 보요소와 유한요소법의 해석 결과등을 비교하였고, 1997년에는 박영명³⁾ 등이 상자형교에 대한 격자해석법의 정확성등을 검토하였다.

1) 성균관대학교 토목공학과 석사

2) 성균관대학교 토목공학과 부교수

이에 따라 본 연구에서는 복잡한 구조형태 및 구성요소를 가지고 있는 원형(prototype)의 구조물을 이상화된 부재로 치환하여 단순화된 모델기법에 의해 가장 근사적인 해석결과를 얻을 수 있는 기법들인 격자해석법(grillage method)과 십자 공간뼈대법(cruciform space frame method)을 사용하여 강상자형 교량을 해석하였다. 또한, 하중분배법인 0-1법과 Leon.-Hom.의 격자이론과 가장 신뢰할 수 있는 유한요소법(shell element method)의 해석결과와 비교 검토하여 간략 구조 모델링 방법들의 정확성과 효율성을 알아보려고 한다. 최근에는 다주형 다경간 교량이 많이 지어지고 있는 점을 고려하여 일반적이라고 할 수 있는 3경간 3주형 교량을 선정하여 해석을 하였다. 그리고 DB-24 하중이 교량에 재하될 때의 최대인장응력과 최대압축응력이 발생하는 경우를 영향선을 통해 찾아 위의 모델링 방법들에 의해 해석하고 비교해 보며, 상자형 교량에서 거동에 중요한 영향을 미치는 격벽과 횡보의 영향을 각각이 설치되는 간격별로 모델링하여 검토해 보고자 하였다. 또한 십자 공간뼈대법과 유한요소법에 의해 상자형의 변위를 해석하고 결과를 비교해 보았다.

2. 강상자형 교량의 모델링 기법

2.1 0-1법

0-1법은 횡방향의 상판이 Fig. 1.에서와 같이 거더와 거더 사이에 단순보라는 가정하에 운하중에 따른 하중분배계수를 구한다. 그리고 이에 따른 운하중의 분배량을 구한다. 이는 단순하고 쉬워 실무에서 많이 사용되나 거더의 비틀림이나 횡보의 조건등은 고려할 수 없다.

Fig. 1. 0-1법

2.2 Leon.-Hom.의 격자이론

Leon.-Hom.의 격자이론은 합성거더와 횡보의 상대강도를 고려하여 하중분배계수를 구하게 되는데 그 조건하에서 교량을 격자구조로 단순화한다. 이 방법은 다소 복잡하나 상자형교의 비틀림강도와 횡보의 영향을 고려할 수 있다. 다음의 Fig. 2.에서 볼 수 있는 것과 같이 한 거더에 영향을 미치는 하중재하의 범위가 교량의 전폭에 걸쳐있다.

Fig. 2. 격자이론에 의한 분배계수

이 방법으로 하중분배계수를 구하기 위해서는 격자 휨강도와 격자 비틀림강도의 두 파라미터가 필요한데 이 두 파라미터를 사용하여 일람표를 사용하여 분배계수를 구한다.

$$\text{격자 휨강도} \quad : \quad Z = (1 / 2a)^3 \cdot I_Q / I \quad (1)$$

$$\text{격자 비틀림강도} \quad : \quad Z_T = (1 / 8a) \cdot E \cdot I_Q / (G \cdot J) \quad (2)$$

여기서, l = 주형의 지간, a = 주형의 간격, I = 주형의 단면 2차 모멘트

I_Q = 횡보의 단면 2차 모멘트, E = 탄성계수, G = 전단 탄성계수

J = 주형의 비틀림상수(= C)

2.3 격자해석법

격자해석법⁴⁾은 상자형을 하나의 종방향 보로 보고 계산해 횡방향으로는 시간에 따라 적절한 보요소를 고려하여 요소수와 절점수가 비교적 작아 빠른 시간에 교량의 해석이 가능하다. 그러나 2차원 격자모델은 사용자에 따라 횡 및 종방향 분할방법이 달라져 해석 결과가 서로 달라질 수 있다.

아래의 Fig. 3.는 본 연구에서 고려한 격자모델의 평면도이다. 해석을 위한 프로그램으로는 범용 구조해석 프로그램인 SAP90⁵⁾을 사용하였다.

Fig. 3. 본 연구에서 고려한 격자의 평면도

하중재하의 경우 교량을 격자구조로 모델링하면 원래모델을 등가의 보요소로 치환하기 때문에 실제로 재하되는 위치에 하중을 재하할 수 없게되는 경우가 많다. 이런 경우에는 다음의 Fig. 4.의 방법과 같이 횡방향으로 연속인 콘크리트 슬래브에 하중을 재하시켜 나온 반력을 격자구조에 재하시킨다.

Fig. 4. 격자에 하중재하 방법

2.4 십자 공간뼈대해석법

십자 공간뼈대요소⁴⁾ 모델링은 강판과 보강재를 일정한 간격으로 자르고 이를 보요소로 대표시켜서 3차원 뼈대의 형태로 모델링하는 방법으로서 유한요소법의 경우보다 비교적 간단하게 해석이 가능하다. 이는 다양한 교량의 표현도 가능하며 처짐값은 유한요소법의 경우보다 다소 크다. 아래의 Fig. 5.과 같이 십자요소부재를 설명할 수 있다.

Fig. 5. 등가십자요소

<PQ 의 4가지 부재단면상수>

$$\text{압축면적} : A_x = b \cdot d \quad (3)$$

$$\text{면외휨강성} : I_{33} = b \cdot d^3 / 12 \quad (4)$$

$$\text{면내휨강성} : I_{22} = b \cdot a^2 \cdot d / 15 = (a / b)^2 \cdot b^3 \cdot d / 15 \quad (5)$$

$$\text{비틀림상수} : C = b \cdot d^3 / 6 \quad (6)$$

다음의 Fig. 6은 상자형을 십자 공간뼈대로 모델링한 것이다. 3경간 3주형에 걸쳐 모델링을 하게 되어 많은 수의 뼈대요소가 필요하였다. 해석 프로그램으로는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁶⁾를 사용하였다.

Fig. 6. 단면의 십자 공간뼈대모델

하중재하는 격자해석법에서 하중을 재하 했던 방법과 동일한 방법으로 슬래브를 표현하는 뼈대부재 위치에 하중이 재하될 수 있도록 콘크리트 슬래브 위에 하중을 재하시켜 나온 반력을 뼈대부재 선상의 절점 위

에 재하하였다.

2.5 유한요소법

유한요소법은 비교적 근래에 개발되기 시작하여 현재에는 국내에서도 각종 구조물의 해석에 널리 사용되고 있다.

Fig. 7. 대상 교량을 쉘요소로 모델링한 예

유한요소모델에 의한 해석방법은 1970년대 들어와서 거의 완벽한 이론적인 체계를 갖추게 된 것으로 모든 역학문제에 대해 가장 보편적인 해결책으로 각광받고 있다. 상자형을 쉘요소의 3차원적 조합으로 생각하고 쉘 유한요소로 이상화한다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 각각의 방법들에 의한 결과를 검토하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 위의 단면제원에 대해서 교량 전체를 쉘요소로 모델링하였다. 절점 4320개, 뼈대요소 548개(슬래브와 강판의 강결 연결 기능), 쉘요소 3384개로 모델링하였으며 하중재하의 방법은 실제의 경우와 같이 재하하였다.

3. 수치해석

3.1 대상교량의 조건

본 연구에서 고려한 교량의 단면제원은 강상자형 합성형 교량으로서 총 130m(각각 40m, 50m, 40m의 구간)의 연속교이며 4차선의 일방통행 도로로 가정하였다. 격벽과 횡보는 40m, 20m, 10m, 5m 간격으로 배치되도록 모델링하였고 각각의 모델링 방법에 따른 영향을 검토하였다. 아래의 Fig. 8은 본 연구에서 고려한 주형이 3개인 3경간 강상자 합성형교의 횡단면도이다.

Fig. 8. 횡단면의 하중 재하점

차수는 위에 표기된 것과 같으며 4차선으로 DB-24 하중만을 고려하였다. 모델링에 적용하는 하중의 조합은 1대, 2대, 3대, 4대를 편측으로 재하하는 경우로 하였고 시방서의 규정을 따라 3대의 경우는 차륜하중의 90%를, 4대의 경우는 차륜하중의 75%를 고려하였다.

본 연구에서 고려하는 DB-24 하중은 모델링한 구조에 적용하기 위하여 시방서의 규정과 다소 차이를 두었는데 앞차륜과 뒷차륜의 간격을 5m로 두었다(실지의 시방서 기준은 앞차륜과 뒷차륜의 거리가 4.2m이고 뒷차륜간의 거리는 4.2~9.0m 사이로 규정하고 있다). 본 연구에서는 각 모델링 기법들을 서로 비교하는 것이기 때문에 이 하중을 재하해도 무리가 없으리라 생각된다. 이 차륜하중의 모델은 다음과 같다.

Fig. 9. 본 연구서 고려한 DB-24 하중

위의 하중으로 인한 최대인장응력과 최대압축응력을 조사하기 위해서 가장 큰 인장응력을 발생시키는 1경

간 3/8지점의 영향선과 가장 큰 압축응력을 발생시키는 첫번째 지지점의 영향선을 그렸고 최대 종거가 위치하는 곳에 하중을 재하하였다. 첫 번째 경간의 3/8 지점의 영향선은 다음과 같다.

Fig. 10. 1경간 3/8 지점의 영향선

첫 번째 지지점의 영향선은 다음의 Fig. 11.과 같다. 이는 최대압축응력을 발생시키는 영향선이다.

Fig. 11. 첫 번째 지지점의 영향선

3.2 수치해석 결과

3.2.1 단위모멘트 재하시 비틀 변위의 비교

먼저 지간이 40m인 단순지지의 단주형 교량에 단위모멘트를 재하하였다. 해석은 비틀 변위의 해석이 가능한 십자 공간뼈대법과 유한요소법으로 모델링하였고 단위모멘트의 재하위치는 지간의 중앙점이며 격벽의 간격의 변화(5m, 10m, 20m, 40m)에 따라 비틀에 의한 수직·수평 변위를 검토하였다.

다음 Fig. 12.은 하중 작용의 조건과 그 변위를 나타낸 그림이다.

Fig. 12. 하중조건과 비틀 변위

다음 그림은 지지점 외에 격벽의 개수가 0, 1, 3, 7개(간격변화는 40m, 20m, 10m, 5m)로 변할 때 비틀 수직변위(u_1)의 변화를 나타내었다.

Fig. 13. 비틀 수직변위(u_1)

3.2.2 사하중 작용시

사하중이 작용할 때 최대처짐이 발생하는 위치는 두 번째 경간의 중앙점이다. 그리고 최대인장응력이 발생하는 위치는 첫 번째 경간의 3/8위치이며, 최대압축응력이 발생하는 위치는 첫 번째 지지점에서의 위치이다. 다음 결과들은 격벽과 횡보의 배치간격이 5m인 경우이며, 응력은 하부플랜지 부분을 검토하였다.

Fig. 14. 사하중 작용시 최대처짐

Fig. 15. 사하중 작용시 최대인장응력

Fig. 16. 사하중 작용시 최대압축응력

3.2.3 DB-24 하중 3대 재하시 최대인장응력과 최대압축응력

내상 연속교량 위에 차륜하중이 1대에서 4대로 재하 될 때 시방서를 고려한 최대응력을 발생시키는 하중 조합은 편축 3대 재하시였다. 이에 대한 응력 결과들을 다음에 표시하였다.

Fig. 17. 3대 재하시 최대인장응력

Fig. 18. 3대 재하시 최대압축응력

4. 결 론

이상의 과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 강상자형 교량 설계시 격벽과 횡보를 시간내에 1개 배치했을 때 배치하지 않는 경우보다 비틀변위가 현저히 감소하였고 1개 이상에서는 차이가 크지 않았다.

2) 0-1법은 쉽고 빠르게 단면응력을 계산할 수 있으나 정확한 거동을 표현하지 못하며 과다한 안전측의 결과를 내었다.

3) Leon.-Hom.의 격자이론과 격자해석법은 유사한 이론을 바탕으로 서로 거의 일치하는 응력의 결과를 나타내었고 쉘해석에 비해 다소 안전측으로 근사한 결과를 내었다.

4) 십자 공간배해석법은 간략 해석 기법으로 유한요소법과 더불어 강상자형 교량의 비틀변위를 잘 표현하며 그 변위값을 계산할 수 있고 다양한 하중조건과 격벽과 횡보의 배치조건에 따른 응력의 변화를 잘 표현하였다.

이상의 연구를 통하여 복잡한 교량의 모델링시 유한요소법을 대신해 다소 단순하게 모델링하여 교량의 거동특성을 보고자 할 때 격자해석이 적합하다고 판단되며 이상의 해석 방법들을 사용할 수 있다.

참고문헌

- 1) 高島 春生, 원기술, "도로교 횡분배 실용계산법", 1995, pp. 225-370
- 2) 허정욱, "상자형 교량의 근사해석 기법에 관한 연구", 부산대학교 공학석사학위논문, 1995
- 3) 박영명의 3명, "A Study for Accuracy Evaluation of the Grillage Method in Box Girder Bridge", Computing in Civil and Building Engineering, 19-21, August 1997
- 4) Humbly, E. C., E & FN SPON, "Bridge Deck Behavior", Second Edition, 1991
- 5) E. L. Wilson and A. Habibullah, Computers & Structures Inc., SAP90 User's Manual, 1992
- 6) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual Vol. I and Vol. II, Ver. 5. 5, 1996

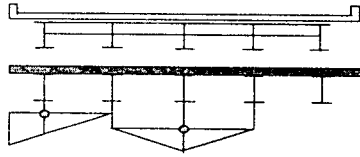


Fig. 1. 0-1법

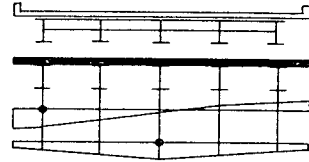


Fig. 2. 격자이론에 의한 분배계수

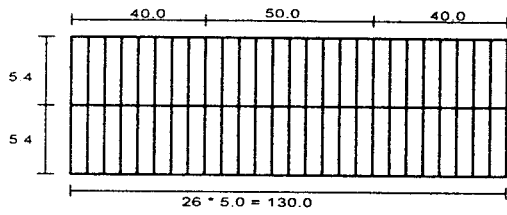


Fig. 3. 본 연구에서 고려한 격자의 평면도

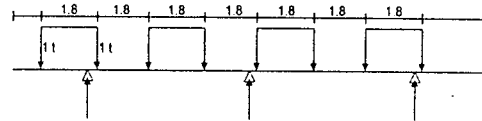


Fig. 4. 격자에 하중재하 방법

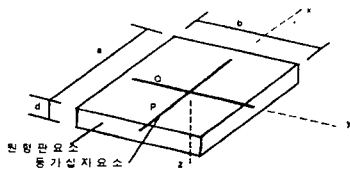


Fig. 5. 등가십자요소

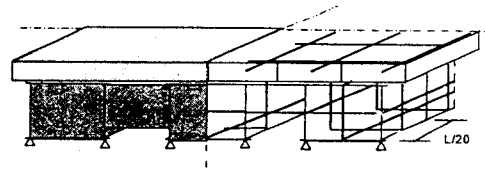


Fig. 6. 단면의 십자 공간뼈대모델

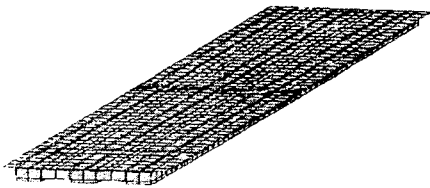


Fig. 7. 대상 교량을 셀요소로 모델링한 예

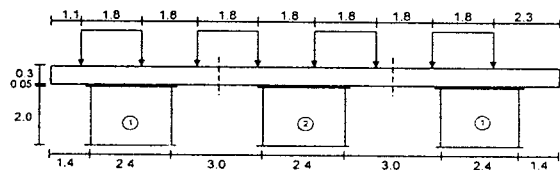


Fig. 8. 횡단면의 하중재하점

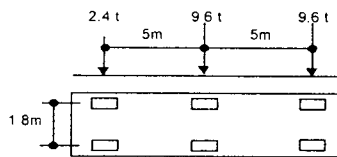


Fig. 9. 본 연구서 고려한 DB-24 하중

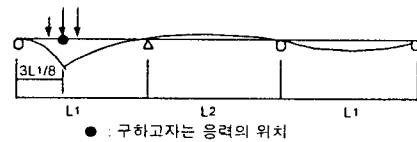


Fig. 10. 1경간 3/8 지점의 영향선

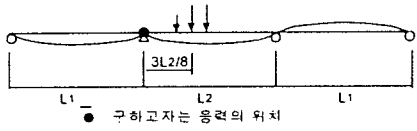


Fig. 11. 첫 번째 지지점의 영향선

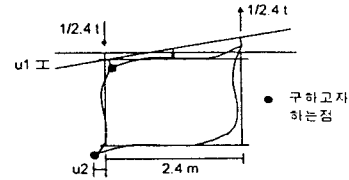


Fig. 12. 하중조건과 비틀변위

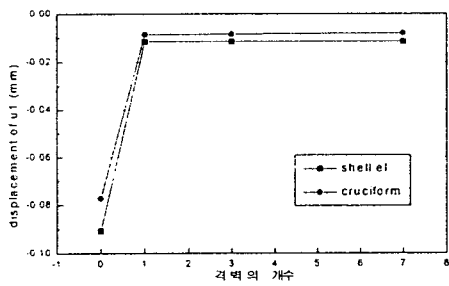


Fig. 13. 비틀 수직변위(u1)

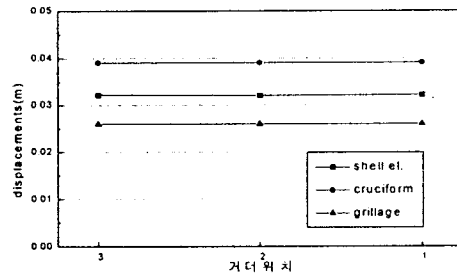


Fig. 14. 사하중 작용시 최대처짐

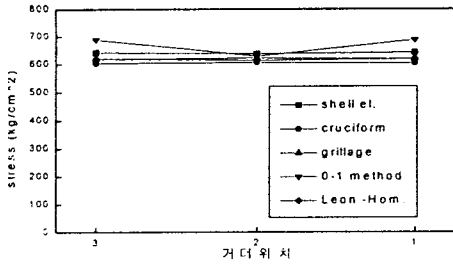


Fig. 15. 사하중 작용시 최대인장응력

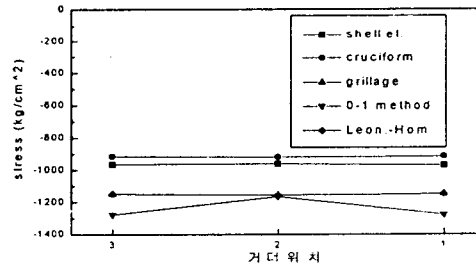


Fig. 16. 사하중 작용시 최대압축응력

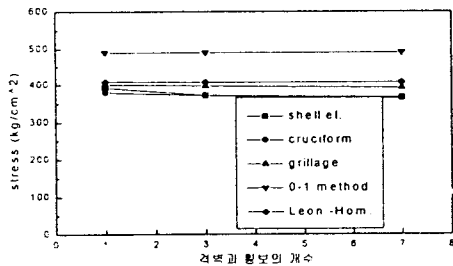


Fig. 17. 3대 재하시 최대인장응력

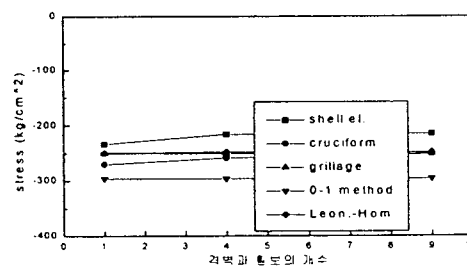


Fig. 18. 3대 재하시 최대압축응력