

다중 셀 박스형 교량에 대한 구조해석 모델의 비교연구

A Comparative Study on Structural Modeling of Multicellular Box Girder Bridges

김동욱*
Kim, Dong-Wook

김상훈**
Kim, Sang-Hoon

김문영***
Kim, Moon-Young

ABSTRACT

Due to the rapidly developing computer technique, bridges can be modeled by using grillage method for analyzing the girder, or FEM for more accurate and detailed analysis. If the cells of multicellular decks are stiffened with diaphragms or cross-bracing at frequent intervals, to prevent them changing shape by distortion, the deck can be analysed like a beam if it is narrow, or like slab if it is wide. However it is often convenient and acceptable to use cellular structures and box-girders which do distort under shear and torsional loading, and it is then necessary to take account of the distortion in the method of calculation. But plane grillage method cannot consider effect of distortion and FEM is non-economical because it is not easy to modeling and needs lots of time. So, this study suggests the Shear-flexible Grillage which reproduces the distortion behaviour of the cells.

1. 서 론

전산 구조해석 분야의 급속한 발달과 함께 교량의 해석에 있어서도 강력한 구조해석 수단인 유한요소법이 사용되고 있다. 특히 셀 유한요소 해석법⁽²⁾은 가장 정확한 방법이긴 하지만, 모델링에 따른 입력과 계산, 그리고 결과의 분석에 시간이 많이 걸린다. Multicellular 텍에 있어서 셀이 격벽이나 내부 브레이싱이 촘촘한 간격으로 배치된 상태로 강성을 갖게 되어 뒤틀림에 의한 형상변화를 막아준다면, 텍의 폭이 좁을 경우는 보로, 넓은 경우는 슬래브로 해석할 수 있다. 그러나 전단과 비틀림을 받는 셀 구조물이나 박스 거더에는 뒤틀림이 발생하는데 이를 고려하는 것이 필요하다. 이를 평면격자에서 해석 할 경우 뒤틀림 형상을 고려할 수 없기 때문에 전단변형거동을 통하여 뒤틀림 효과를 고려하는 Shear-flexible Grillage⁽¹⁾를 사용해야 한다. 본 연구에서는 다중 셀 박스형 교량의 해석에 있어서 상대적으로 계산하기에 간편하고 이해하기 쉬운 Shear-flexible Grillage 의 모델링 방법에 대해서 알아보고, 결과를 셀 유한요소법과 비교하고자 한다.

* 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정
** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정
*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

2. Multicellular 텍의 모델링 기법

2.1 Shear-flexible Grillage

Multicellular 텍이 편심하중을 받을 경우에 휨, 비틀림, 뒤틀림이 발생한다. 편심하중에 대한 텍의 거동은 기본적인 4가지 변형모드 즉 교축방향과 교축직각방향의 휨, 비틀림, 뒤틀림과 이들이 종합된 최종적인 변형형태로 나타난다.

2.1.1 교축방향 휨

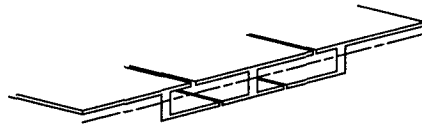


그림 1. 텍의 중립축에 의해 잘려진 I-beam

교축방향 휨 거동은 그림 1 에서 보는 바와 같이 텍을 몇 개의 I-beam으로 교축방향으로 자름으로써 구체화 된다. 그림 1 에 있는 횡단면상의 교축방향 휨응력들은 I-beam의 휨응력과 유사하다. 휨에 대한 전단응력 분포 또한 I-beam의 단순보 이론과 유사하다. Cellular 텍은 분리된 I-beam이 아닌 일체 거동을 하기 때문에 그림 1과 같이 Cellular 텍 자체의 중립축을 기준으로 이 중립축에 맞도록 단면을 나누어야 한다. 결과적으로 격자요소로 표현된 각각의 I-beam의 단면상수는 전체 텍 단면에 대하여 계산된다.

2.1.2 교축직각방향 휨

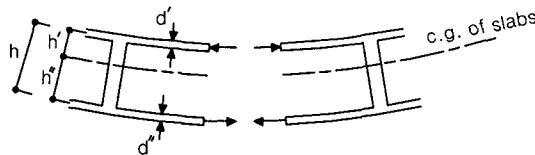


그림 2. 교축직각방향 휨

그림 2 와 같은 교축 직각방향의 휨은 횡단면의 중립축에 대한 휨인태 상, 하부 슬래브는 마치 무한 전단강성을 가지는 복부에 의해 연결된 것처럼 볼 수 있다. 교축 직각방향 부재의 단면 2차 모멘트는 슬래브의 중립축에 대해서 식 1 에 의해 계산된다.

$$i_t = (h'^2 d + h''^2 d'') = \frac{h^2 d' d''}{(d' + d'')} \quad (\text{단위길이당}) \quad (1)$$

여기서, d' = 상부 슬래브의 두께 ; d'' = 하부 슬래브의 두께

h' = 중립축에서 상부 슬래브까지의 거리 ; h'' = 중립축에서 하부슬래브까지의 거리

2.1.3 비틀림

비틀림이라 횡단면의 일그러짐의 효과가 없이 톱을 비틀음으로서 생기는 전단력과 전단변형을 말한다. 박스거더를 비틀게 되면 슬래브를 한바퀴 돌려 복부 아래 위 방향으로 발생하는 전단흐름(전단류)이 존재한다. 교축방향이나 교축직각방향의 격자부재의 비틀림강성은 해당 부재의 상,하부 슬래브의 비틀림강성과 같게되어 식 2에 의해서 구할 수 있다.

$$c = 2(h'^2 d' + h''^2 d'') = \frac{2h^2 d' d''}{(d' + d'')} \quad (\text{단위폭당}) \quad (2)$$

이 상수는 St Venant 비틀림강성의 1/2과 같게 되는데 이것은 교축방향의 부재가 비틀림을 받게 되면 횡단면이 전체 톱오크의 반만을 제공하여 나머지 반은 종방향 부재의 반대편에 수직전단력으로 전달됨을 의미한다. 그림 3 은 실제의 톱과 격자부재의 등가 비틀림력을 보여주고 있다.

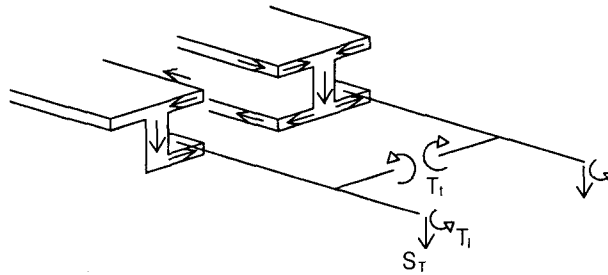


그림 3. 톱과 격자부재의 등가 비틀림

2.1.4 뒤틀림

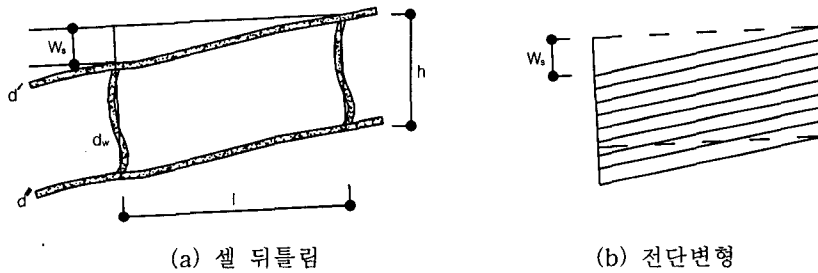


그림 4. 셀 뒤틀림과 등가의 전단변형

뒤틀림은 셀이 격벽이나 내부 브레이싱이 없는 경우나 충분하지 않을 경우 셀을 가로지르는 수직전단력이 슬래브와 복부가 독립적으로 면외로 변형하는 것을 의미한다. 평면격자에서는 이러한 거동을 엄밀하게 구할 수 없지만 교축직각방향 부재의 전단강성을 줄임으로서 어느 정도 근사적으로 구할 수 있다. 이러한 강성은 격자부재와 셀이 같은 전단력을 받도록 결정하며 식 3은 Multicell 격자부재의 등가 전단면적 표현식이다. 식 3의 유도과정은 부록에 설명하였다.

$$a_s = \frac{d''^3 + d'''^3}{I^2} \left[\frac{d_w^3 l}{d_w^3 l + (d''^3 + d'''^3)h} \right] \frac{E}{G} \quad (\text{단위넓이당}) \quad (3)$$

Single-cell box-girder에서는 복부의 강성이 Multicell처럼 두 셀에 분할되어 나누어지지 않기 때문에 $d_w^3 l$ 대신에 $2 d_w^3 l$ 을 대입해야 한다.

2.2 셀 유한요소법

단순 직사각형의 평판 셀요소는 평판휨요소와 평면응력요소(면내거동)의 합으로 나타낼 수 있다. 이 요소는 평판의 합으로 구성된 대관구조나 곡선 셀에도 사용된다. 다음 그림 5는 노드당 국부적으로 5개의 자유도를 가진 셀 요소를 보여주고 있다.

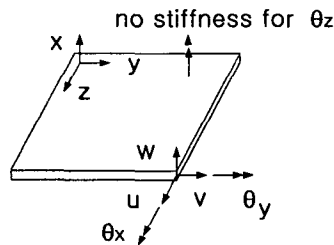
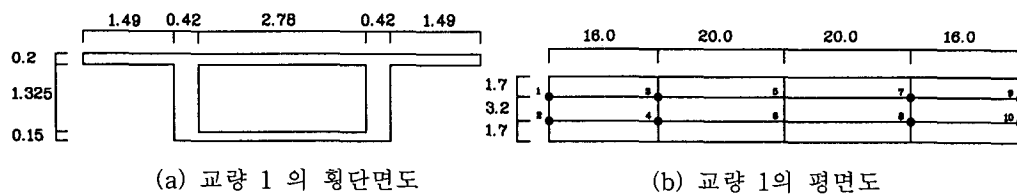


그림 5. 셀 요소의 힘과 변위

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 연구에서는 해석모델로 세계의 교량을 선택하였다. 교량 1은 그림 6(a)와 같은 횡단면도를 가지고 그림 6(b)와 같은 평면도를 가진다. 지간은 총 72m(16m+40m+16m)의 연속교이며 해석에 사용된 하중은 그림 6(b)의 평면도에서 5에 20ton을 재하하였다

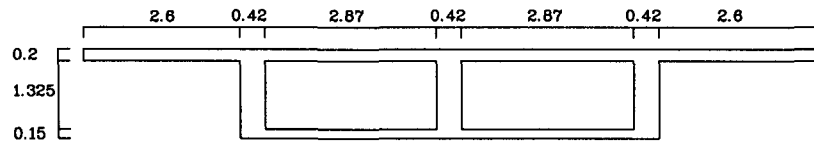


(a) 교량 1의 횡단면도

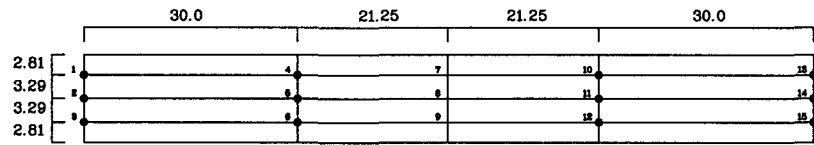
(b) 교량 1의 평면도

그림 6. One-cell concrete box-girder deck

교량 2는 그림 7(a)와 같은 횡단면도를 가지고 그림 7(b)와 같은 평면도를 가진다. 지간은 총 102.5m(30m+42.5m+30m)의 연속교이며 해석에 사용된 하중은 그림 7(b)의 평면도에서 7,8에 50ton을 재하하였다.



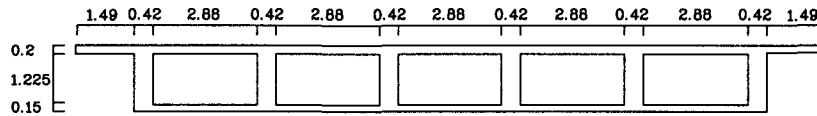
(a) 교량 2 의 횡단면도



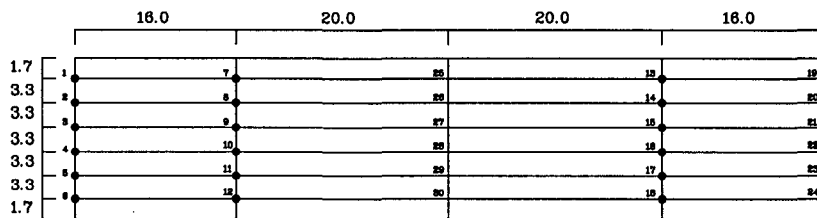
(b) 교량 2 의 평면도

그림 7. Two-cell concrete box-girder deck

교량 3은 그림 8(a)와 같은 횡단면도를 가지고 그림 8(b)와 같은 평면도를 가진다. 지간은 총 72.0m(16m+40m+16m)의 연속교이며 해석에 사용된 하중은 그림 8(b)의 평면도에서 26 에 200ton 을 재하 하였다.



(a) 교량 3 의 횡단면도

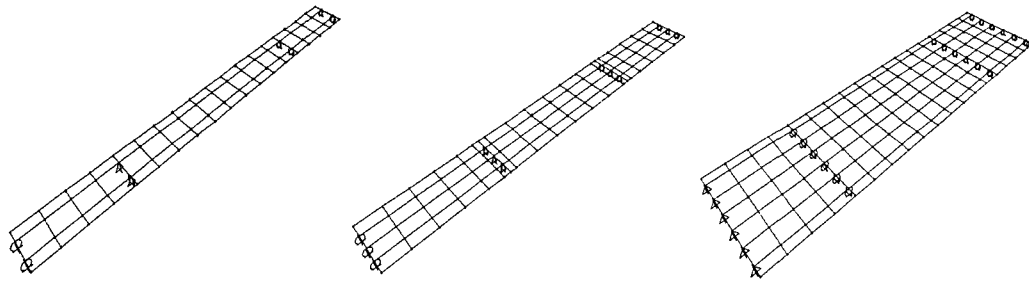


(b) 교량 3 의 평면도

그림 8. Five-cell concrete box-girder deck

3.2 Shear-flexible Grillage

Shear-flexible Grillage 에서 필요한 단면상수는 교축방향 부재와 교축직각방향 부재의 면의 단면 2 차 모멘트, 비틀상수, 전단면적 이다. 그림 9는 격자모델링을 보여준다.



(a) 교량 1

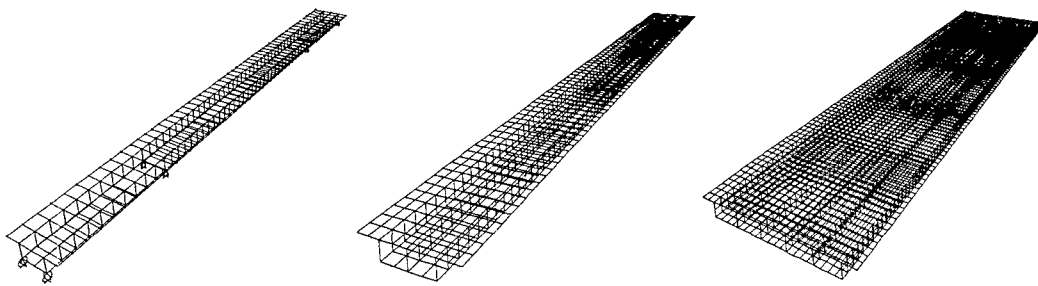
(b) 교량 2

(c) 교량 3

그림 9. 격자 모델링

3.3 셀 유한요소법

앞에서 설명한 Shear-flexible Grillage 에 의해 산출된 결과를 검토하기 위하여 셀 해석을 수행하였다. 그림 10은 셀 모델링을 보여준다.



(a) 교량 1

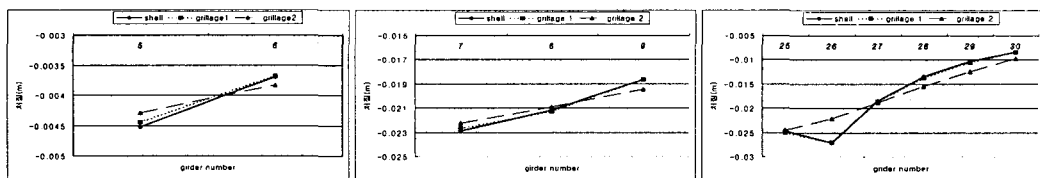
(b) 교량 2

(c) 교량 3

그림 10. 셀 모델링

4. 해석결과

교량 1,2,3 의 해석결과를 아래 그림에 나타내었다. 먼저 교량 중앙부의 처짐을 비교했고, 중앙부와 지점부의 휨응력을 비교하였다. grillage 1 은 디스토션의 효과를 고려한 해석결과이고, grillage 2 는 디스토션의 효과를 고려하지 않은 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 디스토션의 효과를 고려한 결과가 셀 해석의 결과에 더 일치한다.

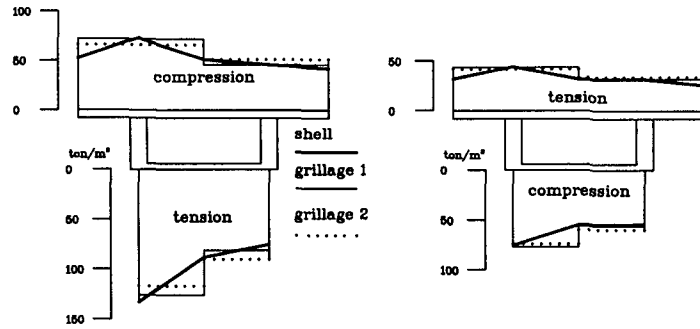


(a) 교량 1

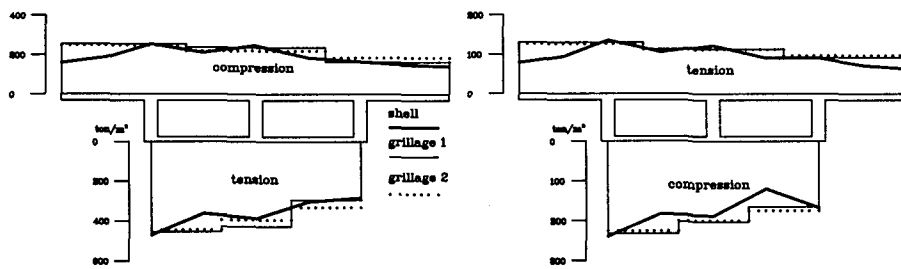
(b) 교량 2

(c) 교량 3

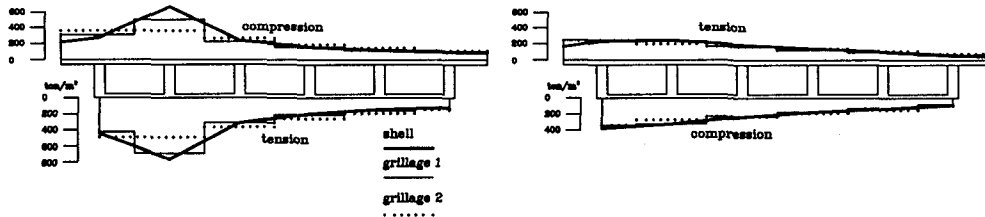
그림 11. 중앙부의 처짐비교



(a) 교량 1의 중앙부의 응력비교 (b) 교량 1의 지점부의 응력비교



(c) 교량 2의 중앙부의 응력비교 (d) 교량 2의 지점부의 응력비교



(e) 교량 3의 중앙부의 응력비교 (f) 교량 3의 지점부의 응력비교

그림 12. 휨 응력 비교

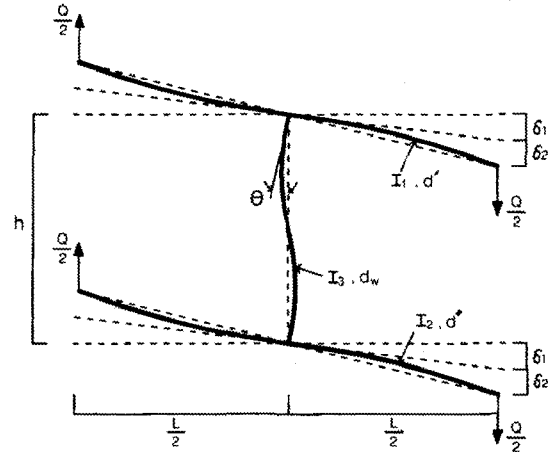
5. 결 론

본 연구에서는 multicellular 텍의 해석에 있어서 유용한 방법인 Shear-flexible Grillage 해석에 대해서 설명하고 결과를 뒤틀림에 의한 효과가 무시된 경우의 해석과 셸 해석의 처짐, 단면의 휨응력을 비교함으로써 Shear-flexible Grillage 해석의 정확성과 효율성을 검토하였다. 위의 해석결과 그림에서 볼 수 있듯이 multicellular 텍의 해석에 있어서는 Shear-flexible Grillage 해석이 2차원 해석이지만 3차원 셸 해석의 결과와 잘 일치하므로 셸의 뒤틀림 효과가 잘 고려됨을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Hambly, E. C (1991), Bridge deck behaviour, 2nd Ed., E & FN SPON
2. K. J. Bathe(1996), *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, pp.205-209

특 Multicell 격자부재의 등가 전단면적 표현식 유도



우력 $\frac{Ql}{2}$ 이 작용시 복부 끝단의 회전각은 $\theta = \frac{Qlh}{12EI_3}$

회전각 θ 에 의한 변위는 $\delta_1 = \frac{\theta l}{2} = \frac{Ql^2h}{24EI_3}$

하중 $\frac{Q}{2}$ 에 의한 플랜지의 처짐은 $\delta_2 = \frac{Ql^3}{24E(I_1 + I_2)}$

따라서, 전단변형율은 $\gamma = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{l}{2}} = \frac{Qlh}{12EI_3} + \frac{Ql^2}{12E(I_1 + I_2)}$ (1)

전단력은 $Q = G\gamma a_s$ (2)

식 (1)을 식 (2)에 대입하면, 전단면적은

$$a_s = \frac{d'^3 + d''^3}{l^2} \left[\frac{d_w^3 l}{d_w^3 l + (d'^3 + d''^3)h} \right] \frac{E}{G}$$

여기서, $I_1 = \frac{d'^3}{12}$; $I_2 = \frac{d''^3}{12}$; $I_3 = \frac{d_w^3}{12}$