

다이아프램 형상 및 간격에 따른 곡선 강박스거더의 거동해석

A Behavioral Analysis of Curved Steel Box Bridge Associated with
Diaphragm's Shape and Spacing

김 연 태* 김 상 철**
Kim, Yun-Tae Kim, Sang-Chel

Abstract

In this study 3-D shell FEM model was applied to analyze the behavior of curved steel box girders stiffened by diaphragms. The reliability of the analytical method has been proved by comparing with the existing results. It was also found from this analysis that main factors affecting a distortional stress are length of a girder, curvature of the girder, and spacing of diaphragms. A modelled bridge with 30m of span length and 40m of radius was analyzed to find an optimum spacing of diaphragm, and as a result of applying different spacings, 5m was found to be most appropriate to control the stress ratio regulated by specifications. In the effect of diaphragm shape, the rhamen-typed diaphragm is found to be more effective than the fully filled-up one in the range of opening ratio of 0.4 to 0.6. But, the fully filled-up diaphragm had more efficiency in terms of reducing the distortional stress than X-truss typed diaphragm.

요 지

본 연구는 3차원 쉘요소를 이용한 유한요소해석을 통해 다이아프램으로 보강된 곡선 강박스거더교의 거동을 분석하였다. 매개변수연구를 통해 기존의 제안식과 비교함으로써 모델링의 타당성을 검증하였고, 뒤틀림 응력에 크게 영향을 미치는 인자는 중심내각, 지간길이, 다이아프램간격임을 확인하였다. 또한, 다이아프램의 간격, 개구율, 형상을 변수로 하여 해석한 결과에서는 지간이 30m, 곡률 반경이 40m인 해석모델에 대한 적정 다이아프램간격은 5m인 것으로 나타났다. 다이아프램의 형상 효과에 대해서는 라멘식 다이아프램의 경우가 개구율 0.4~0.6의 범위에서 개구부가 없는 중복판식 다이아프램보다 휨과 뒤틀림의 응력비가 낮아 거동에 유리한 것으로 나타났으며, 중복판식 다이아프램과 X형 트러스 방식의 다이아프램 비교에서는 동일한 강성을 가지더라도 중복판식 다이아프램이 뒤틀림응력을 보다 효과적으로 제어하였다.

Keywords : Distortional Stress, Ratio of Distortional to Bending Stresses, Diaphragm's Spacing, Diaphragm's Shape, Opening Ratio

핵심 용어 : 뒤틀림응력, 응력비, 다이아프램간격, 다이아프램형상, 개구율

* 정희원, 서울산업대학교 구조공학과 교수

** 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수

E-mail : schkim@hanseo.ac.kr 016-364-6534

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 교통망의 확대에 따라 고속도로 및 도시 인터체인지에 곡선교가 많이 시공되고 있으며, 구조형식으로 고정하중의 영향이 비교적 작고 시공기간이 단축되며 비틀림강성이 뛰어난 강박스거더교가 많이 사용되고 있다. 이에 부응하여 강박스거더교의 최적설계기법 개발(김상효, 1995; 조효남, 1998; 나준호, 1999)이나 곡선교의 비틀림 해석 방법(황선호, 1999; 이희업, 2000; 장병순, 2001; 최영준, 2003; 박남희, 2003) 등에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

곡선 강박스거더 단면은 곡률 및 편심하중으로 인해 횡단면이 변형을 일으키며, 과도한 뒤틀림응력이 유발되므로 이를 제어하기 위해 박스거더 내부에는 충분한 강성을 가진 다이아프램을 설치하는 것이 일반적이다.

따라서 국내 도로설계편람(2001)에는 뒤틀림응력이 휨응력의 2%, 4%, 6%로 제한될 수 있도록 다이아프램 간격을 규정하고 있으며, AASHTO시방서(1980) 곡선교 부분에서는 뒤틀림응력이 휨응력의 10%이하가 되도록 하고 있고 또, 일본 도로교시방서(1980)에서도 뒤틀림응력이 휨응력의 5%이내에 들도록 하는 Sakai & Nagai(1977)의 연구결과를 토대로 다이아프램의 간격을 구하고 있다.

이와 관련하여 본 연구는 보다 효과적인 다이아프램 간격 설정을 위하여 3차원 셸(shell)요소를 이용한 유한요소해석을 통해 중심 내각, 지간 길이, 다이아프램 간격을 변수로 하여 강박스거더 곡선교량에서 발생하는 뒤틀림응력을 구하여 기존 연구결과와 비교함으로써 방법의 타당성을 검증하고 각 대상 변수가 미치는 영향에 대해 평가하였다. 또한, 강합성 곡선 박스 거더교의 다이아프램 간격에 대한 시방서 규정과 비교함으로써 적절한 다이아프램 간격을 알아보고자 하였다.

주로 기존의 다이아프램 관련 유한요소해석이 다이아프램 간격에만 주안점을 둔 것과 달리(손준상, 1997; 김태균, 2000; 최영준, 2003) 다이아프램의 개구율과 다이아프램의 형상이 강박스거더의 거동에 미치는 영향에 대해서도 분석하였다.

2. 유한요소해석 모델의 검증 및 변수별 뒤틀림거동 비교

2.1 해석모델

인터체인지의 분기부에 설계될 수 있는 곡률반경 20~300m, 지간 20~60m의 일실(one-cell) 단순 곡선 박스거더 램프를 모델로 하여 뒤틀림 거동에 영향을 미치는 매개변수별로 해석을 수행하고, 그 결과에 대해 기존의 이론식과 비교하였다. 단위는 가능한 한 SI단위 사용을 원칙으로 하였으나 기존식과의 비교를 위해 필요한 경우 미영단위계(USCS)를 병행하여 사용하였다.

해석에 사용된 모델의 단면은 다음 Fig. 1과 같다.

또한, 재료상수로 $E_s=30,000\text{ksi}(206.7 \times 10^6\text{kPa})$, $\nu_s=0.3$, $W_s=490\text{lbs/ft}^3(76,930\text{N/m}^3)$ 을 사용하였으며, 작용하중은 고정하중으로 0.177kips/in (215.4 N/m)를 적용하였다. 수평 곡선교는 초기 곡률로 인해 직선교에 비하여 복잡한 거동 양상을 보인다. 즉, 곡선보에서는 축방향의 비틀림과 단면의 수평 및 연직 방향의 변위 성분들이 서로 커플링(coupling)하여 거동하며, 뒤틀림으로 인해 종방향 법선응력이 매우 큰 값을 보이게 되므로 곡률에 의해 추가로 발생된 뒹(warping)현상을 고려하여야 정확한 거동을 모사할 수 있다.

제원	모델단면								
	A	B	D	T1	T2	T3	D1	D2	
단위	inch	112	100	50	0.4	0.5	0.25	29.7	20.3
	cm	284	254	127	1.02	1.27	0.64	74.4	51.6

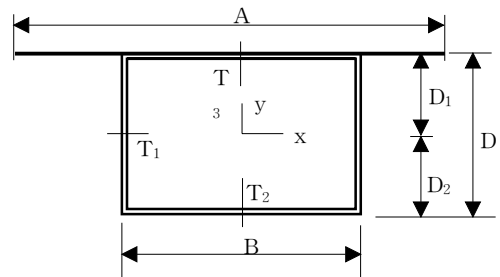


Fig. 1 해석모델

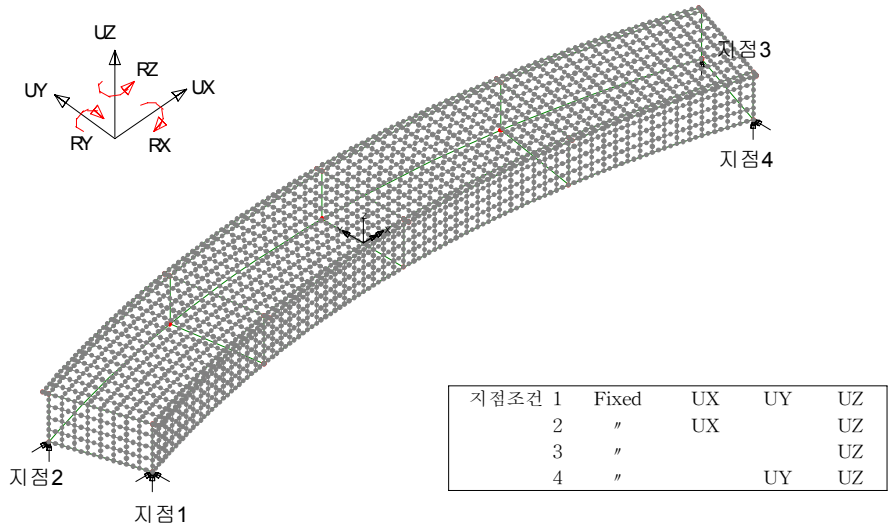


Fig. 2 유한요소 모델

본 연구에서는 범용프로그램인 LUSAS를 이용한 8절점 쉘요소를 사용하였으며, 지점조건은 일단고정, 일단가동조건으로 Fig. 2와같이 모델링하였다. 다이아프램은 양 지점에 1개소씩 단부 다이아프램을 두고, 다이아프램의 간격에 따른 갯수로 지간을 등분하는 위치에 중간 다이아프램을 설치하였다.

2.2 다이아프램 간격에 따른 뒤틀림응력 및 응력비

해석모델의 단면 및 하중조건에 곡선반경 $R=100$ ft(30.5m), 지간 $L=65$ ft(20m), 지간에 대한 다이아프램 간격(L_D)의 비 L_D/L 을 0.5~0.1까지 변화시키면서 해석하여 뒤틀림응력(f_{DW}) 및 휨과 뒤틀림응력의 비(f_{DW}/f_b , 이하 응력비로 약칭)를 구하였다. 이 때 다이아프램은 기존의 이론식과의 비교를 위해 무한히 강한 층복판식으로 가정하였다. Fig. 3과 4는 다이아프램이 설치된 위치에서의 뒤틀림응력과 응력비를 나타낸 그림이며, Fig. 5와 6은 다이아프램과 다이아프램사이 중간위치에서의 뒤틀림응력 및 응력비를 나타낸 것이다.

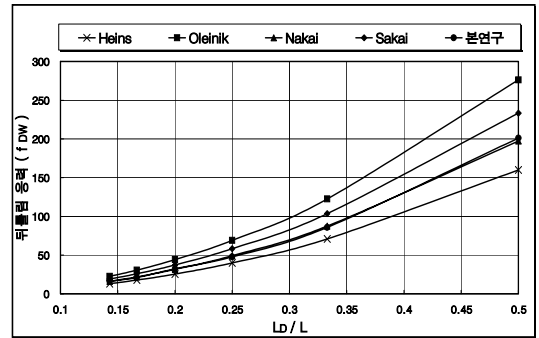


Fig. 3 L_D/L 에 따른 뒤틀림 응력(다이아프램위)

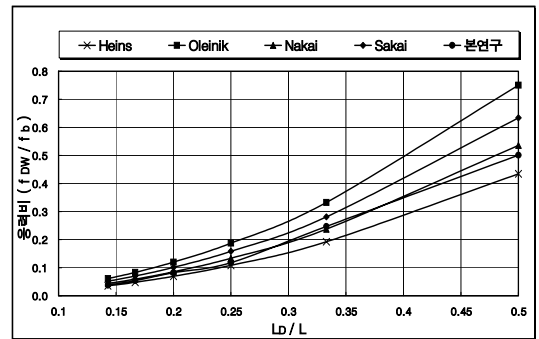


Fig. 4 L_D/L 에 따른 응력비(다이아프램위)

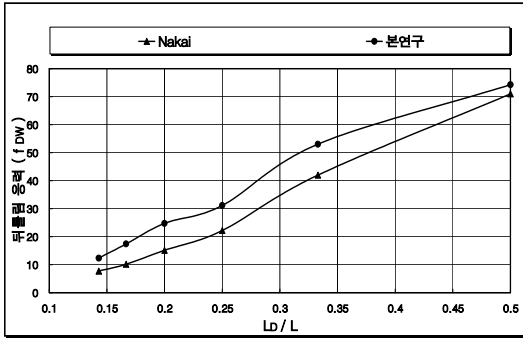


Fig. 5 L_D/L 에 따른 뒤틀림 응력(다이아프램사이중앙)

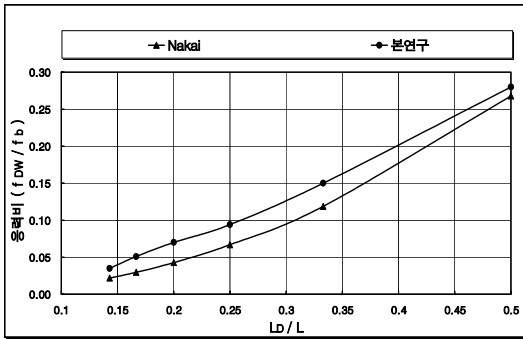


Fig. 6 L_D/L 에 따른 응력비(다이아프램사이중앙)

Fig. 3과 4의 결과를 보면, L_D/L 가 증가할수록 f_{DW} 은 증가하며, f_{DW}/f_b 도 증가함을 알 수 있다. 이는 다이아프램의 간격을 좁게 함으로서 뒤틀림응력의 값을 상당히 제어할 수 있음을 나타내는 것으로 본 연구의 값은 여러 연구자의 결과와 비교하였을 때 Nagai 등(1981)의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 앞서 본 연구와 유사한 결과를 나타낸 Nagai 등의 결과만을 선정하여 다이아프램사이 중앙에서의 결과를 비교한 Fig. 5와 6에 따르면, 다이아프램사이의 중앙에서도 앞서 다이아프램 위의 결과와 같이 L_D/L 가 증가할수록 f_{DW}/f_b 가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 f_{DW} 은 다이아프램 위보다 적게 발생하는 것으로 나타났으며 본 연구의 값은 Nagai 등의 결과보다 좀 더 큰 값을 보이고 있다. $L_D/L=0.25$ 일 때 거더 중앙, 다이아프램사이 중앙단면의 각 위치별 응력상태를 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1 거더중앙, 다이아프램사이 중앙단면의 위치별 휨응력 및 뒤틀림응력 (ksi)

위치	휨응력		비틀림응력		총응력	
	다이아프램 위	다이아프램사이	다이아프램 위	다이아프램사이	다이아프램 위	다이아프램사이
1	-8.20	-7.75	0.72	-0.61	-7.48	-8.37
2	-8.20	-7.75	-0.72	0.61	-8.92	-7.14
3	5.72	4.87	0.68	-0.455	6.40	4.42
4	5.72	4.87	-0.68	0.455	5.04	5.33

Table 1의 위치 1과 2는 지간중앙의 중간 다이아프램 설치부와 지간중앙의 중간 다이아프램과 인접 다이아프램사이의 간격을 2등분하는 위치에서의 상부 플랜지의 양 끝단이고, 3과 4는 같은 위치에서의 하부 플랜지의 양 끝단을 의미한다. 이 위치를 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 해석 결과를 살펴보면, 뒤틀림응력은 지간 중앙에서 최대가 되며, 상·하 플랜지에서는 뒤틀림응력의 분포가 반대이고 다이아프램이 놓인 지점과 다이아프램의 사이에서의 플랜지의 응력도 반대 분포가 나타남을 알 수 있다. 그리고 응력의 최대값은 북부판과 플랜지가 만나는 모서리에서 발생하게 된다.

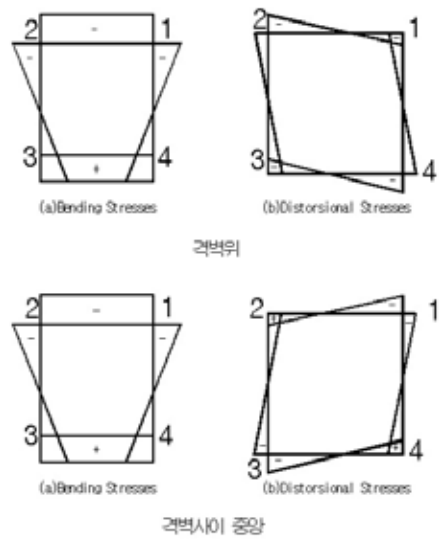


Fig. 7 휨응력 및 뒤틀림응력 분포도

2.3 곡률 반경에 따른 뒤틀림응력 및 응력비

동일한 단면, 시간길이에 및 하중조건에서 내부 다이아프램이 3개가 있는 경우에 대하여 곡률 반경(R)만을 300m, 200m, 100m, 50m, 30m, 20m로 변화시키면서 해석하여 그 결과를 나타내면 Fig. 8과 9와 같다.

그림 상에서 곡률 반경이 감소(중심내각은 증가)할수록 f_{DW} 및 f_{DW}/f_b 는 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 특히 $R \leq 50$ 에서는 급격히 상승하고 있다. 따라서 이 범위내의 곡률 반경에서는 본 모델의 주어진 다이아프램 갯수로는 뒤틀림응력을 제어할 수 없기 때문에 추가의 중간 다이아프램 설치가 필요하다는 것을 나타낸다. 본 연구에 의한 값은 Heins(1975), Nagai 등(1981)의 식과 비슷한 경향을 보이고 있다.

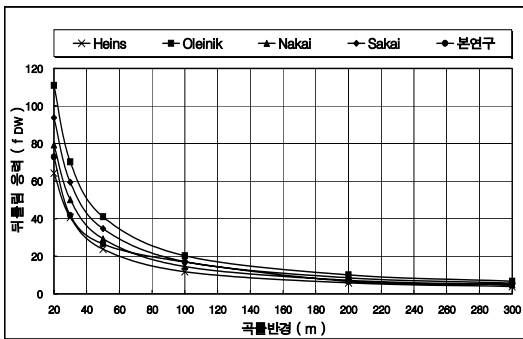


Fig. 8 곡률 반경에 따른 뒤틀림응력

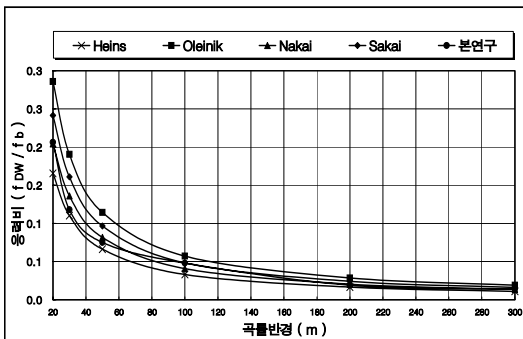


Fig. 9 곡률 반경에 따른 응력비

2.4 시간길이에 따른 뒤틀림응력 및 응력비

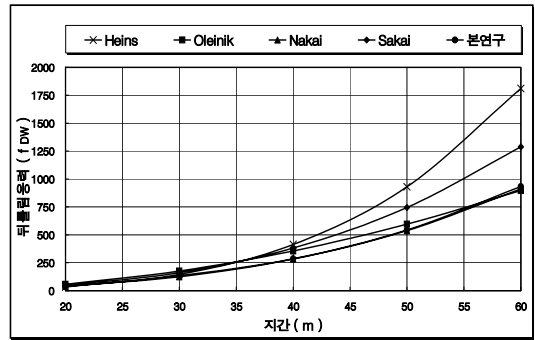


Fig. 10 시간길이에 따른 뒤틀림응력

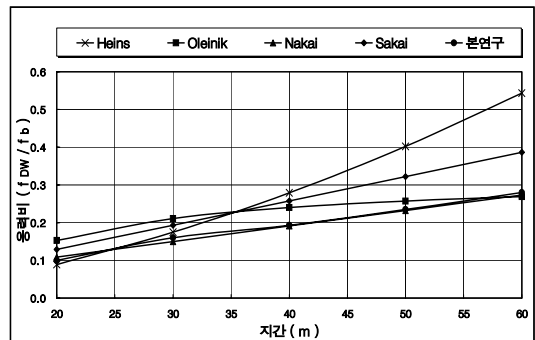


Fig. 11 시간길이에 따른 응력비

주어진 해석모델의 단면 및 하중조건에서 $L_D/L = 0.25$, 중심내각 $\phi = 30^\circ$ ($0.523rad$)로 고정하고 시간길이를 단순 곡선 박스거더교가 대략적으로 가질 수 있는 20, 30, 40, 50, 60m로 변화시키면서 해석하여 그 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 10, 11과 같다.

그림의 결과를 보면, 시간이 길어질수록 뒤틀림응력 및 응력비가 증가하는데, 이는 L_D/L 의 비가 같아도 다이아프램 간격은 시간이 길어질수록 늘어나기 때문에 그 영향이 부가되어 더욱 증가된 것으로 보인다. 따라서 시간의 길이가 일정 범위를 초과하게 되면 적절한 다이아프램의 추가배치가 필요하다는 것을 본 결과에서는 나타내고 있다. 본 연구에 의한 값은 Nagai 등(1981)의 식과 비슷한 경향을 보인다.

3. 강합성 곡선 박스거더교의 다이아프램에 따른 거동 분석

3.1 해석모델

시방서에서 제시하고 있는 다이아프램 간격의 적정성 및 다이아프램의 개구율과 형상에 따른 뒤틀림응력을 평가하기 위해 합성단면을 모델링하였다. Fig. 12와 같은 단면에 지간이 30m, 곡률반경이 40m(중심내각 $\phi = 0.75\text{rad}$)인 단순지지 강합성 박스거더교에 하중은 고정 하중과 실제 1등교 표준트럭하중(DB24)을 재하하였다. 본 교량모델에서 콘크리트 슬래브는 8절점 solid요소로, 박스거더는 8절점 shell요소로 모델링하였으며, 콘크리트 슬래브의 하면과 거더의 상부 플랜지와의 접촉면은 강결시켜 합성구조로 일체 거동하도록 하였다. Fig. 13은 합성형교에 활하중이 재하된 경우에 대한 모델도를 나타낸 것으로, 다이아프램 형상은 도로설계편람의 필요 강성을 만족하는 중복판식, 라멘식, X형 트러스방식에 대해 검토하였다.

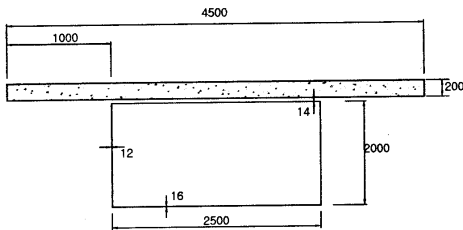


Fig. 12 합성단면의 제원

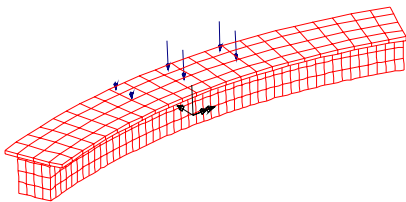
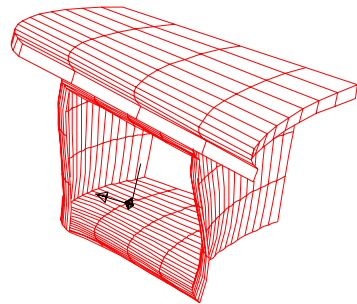


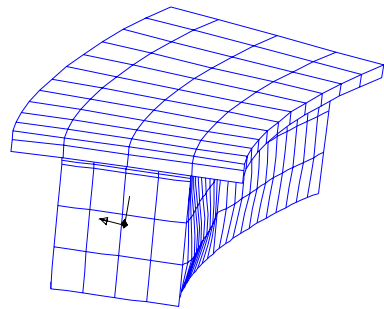
Fig. 13 활하중 재하도(지점조건은 Fig. 2 참조)

3.2 다이아프램의 간격에 따른 거동

두께 1.2cm인 중복판식 다이아프램에 있어서 중간 다이아프램이 없을 때와 중간 다이아프램의 간격이 30m, 15m, 7.5m, 5m, 3.75m인 경우에 대해 휨 및 뒤틀림응력과 변형, 처짐을 구하여 다이아프램의 증설에 따른 곡선 강합성 박스거더교의 뒤틀림 거동을 살펴 보았다.



(a) 중간다이아프램이 없을 때



(b) 다이아프램간격 5m 일 때

Fig. 14 지간중앙 단면에서의 뒤틀림변형

Table 2 다이아프램간격에 따른 최대뒤틀림응력, 응력비와 최대처짐

L_D / L	다이아프램간격	f_b (MPa)	f_{DW} (MPa)	f_{DW} / f_b	수직처짐(cm)	수평변위(cm)
1	30 m	65.02	69.39	1.067	7.4	2.43
0.5	15 m	64.60	38.49	0.596	3.36	0.57
0.25	7.5 m	64.68	6.94	0.107	3.12	0.46
0.167	5 m	63.94	2.64	0.041	3.07	0.45
0.125	3.75 m	63.92	1.44	0.022	3.02	0.38

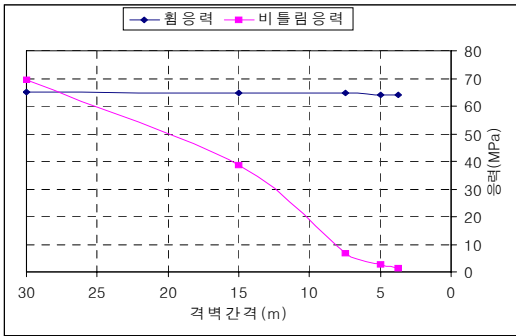


Fig. 15 최대 휨응력 및 뒤틀림응력

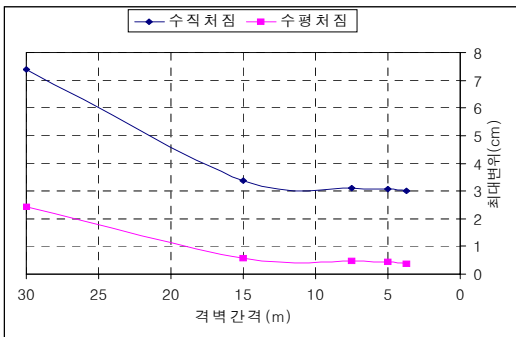


Fig. 16 최대 변위

Fig. 15와 16은 그 결과를 나타낸 것으로, 휨응력의 경우는 다이아프램의 간격에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있어 다이아프램의 간격에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 비틀림응력은 전술한 바와 같이 다이아프램이 단면의 변형을 억제하기 때문에 다이아프램 간격이 작을수록 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. Table 2를 보면, 지점에만 다이아프램이 설치되었을 때에는 69.39MPa의 뒤틀림응력이 발생하였으나 중간에 1개의 다이아프램만을 설치하더라도 38.49 MPa로 뒤틀림응력이 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전 지간의 1/4의 간격으로 다이아프램을 설치한 즉, 다이아프램 간격이 7.5m 이후부터는 뒤틀림응력의 감소폭이 적어지기 시작하여 다이아프램 간격이 3.75m일 때는 5m일 때보다 응력비의 감소폭이 0.02정도로 미미하게 나타나고 있다. 이는 어느 일정 간격으로 다이아프램의 간격을 줄이는 것은 구조물의

거동에 큰 도움이 되지만 일정 범위 이상으로 다이아프램 간격을 좁히는 것은 거동에 별다른 영향을 미치지 못함을 본 연구에서는 제시하고 있다.

한편, 최대 변위에 대해 살펴보면, 다이아프램이 없을 때는 휨과 뒤틀림의 상호작용의 증폭으로 허용 처짐 값인 4.5cm를 넘어 과도한 변형이 발생되지만, 적어도 1개의 중간 다이아프램을 설치하면 최대 변위가 두 배 이상 줄어들어 허용 처짐 이내로 되기 때문에 거더의 변형을 제어할 수 있게 된다. 그러나 다이아프램을 추가로 설치함에 따라 처짐량은 작아지지만 앞서 뒤틀림 응력과 같이 그 설치효과는 매우 작아지는 것을 알 수 있다.

주어진 대상을 모델로 하여 해석한 결과에 따르면 다이아프램 간격이 5m로 되었을 때 휨과 뒤틀림응력의 비가 도로설계편람 권고 범위인 5~6%대 이하로 들어와 가장 효율적인 다이아프램 설치 간격인 것으로 나타났다.

3.3 다이아프램의 개구율에 따른 거동

일반적으로 다이아프램은 제작, 가설, 부속물설치 및 유지관리 등의 이유 때문에 개구부(hole)를 갖는 것이 보통이다. 이때 개구부의 크기에 따라 다이아프램은 층복판식과 라멘식으로 분류되며 이에 따라 강성 또한 달라지게 된다. 다음 식(1)에 나타난 개구율 ρ 는 다이아프램의 강도를 산정하는데 사용되며 $\rho \leq 0.4$ 이면 층복판으로 간주하고, $0.4 < \rho < 0.8$ 의 범위에서는 라멘으로 간주하고 있다.

$$\rho = \sqrt{\frac{A'}{A}} = \sqrt{\frac{bh}{BH}} \quad (1)$$

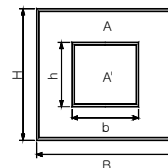


Fig. 17 개구율

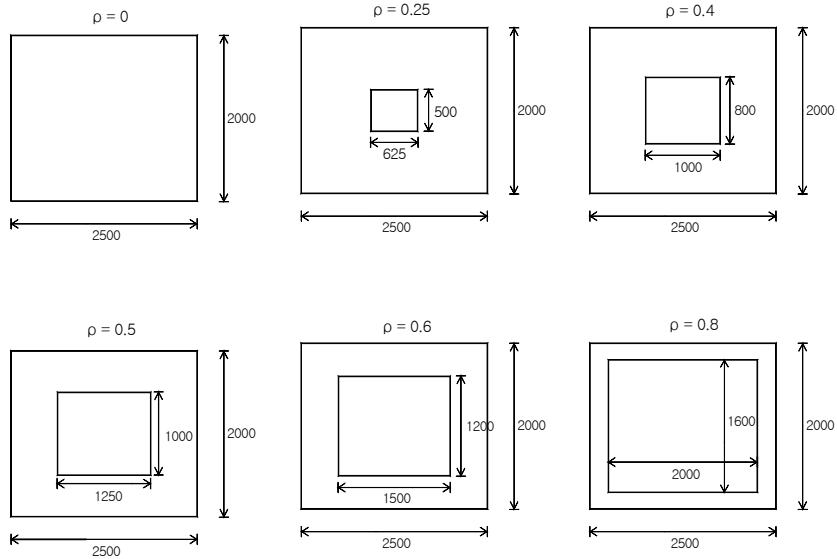


Fig. 18 개구율에 따른 다이아프램 모델

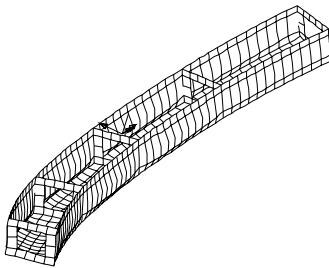


Fig. 19 개구율 $\rho=0.6$ 일때의 변형도

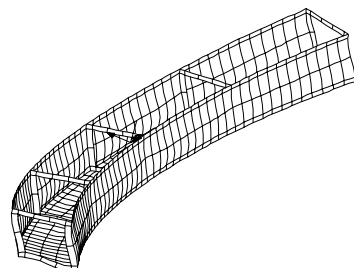


Fig. 20 개구율 $\rho=0.8$ 일때의 변형도

이에 각기 다른 개구율(ρ)을 갖는 다이아프램이 강 박스거더의 뒤틀림 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 $L_D/L=0.25$ (중간 다이아프램 3개 존재)인 경우를 대상으로 Fig. 18과 같이 각각의 개구율을 갖는 다이아프램을 모델링하여 지간 중앙에서의 응력비 및 변형, 처짐량을 살펴보았다. 여기서, 판의 두께는 1.2 cm 로 모두 동일하게 적용하였다.

Table 3을 보면, $\rho=0$ 즉, 개구부가 없을 때와 $\rho=0.25$

인 경우는 뒤틀림응력 및 응력비가 거의 비슷하고, 처짐량도 동일함을 알 수 있다. 이는 개구부의 크기가 단면에 비해 상대적으로 작게 설치된 박스거더는 개구부가 없는 다이아프램이 설치되었을 때와 거의 같은 거동을 하는 것을 의미한다. 그러나 $\rho=0.4, 0.5, 0.6$ 의 3 경우를 비교하면, 예상한 바와는 달리 개구부가 없는 경우보다 오히려 응력비가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이 사실에 비추어 볼 때 다이아프램의 개구부의 크기가 증가한다고 반드시 박스거더의 뒤틀림응력이 커지는 것은 아니

Table 3 개구율에 따른 최대뒤틀림응력 · 응력비와 최대처짐

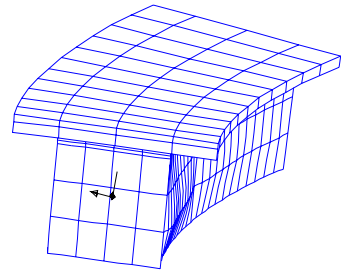
개구율(ρ)	f_b (MPa)	f_{DW} (MPa)	f_{DW} / f_b	수직처짐(cm)	수평변위(cm)
0	64.68	6.94	0.107	3.12	0.46
0.25	65.20	6.54	0.101	3.12	0.46
0.4	64.29	5.44	0.085	3.21	0.47
0.5	64.46	5.55	0.086	3.29	0.48
0.6	63.96	5.22	0.081	3.45	0.64
0.8	63.92	7.97	0.124	5.85	2.54

며 적당한 크기의 개구부는 오히려 박스거더의 뒤틀림 응력을 감소시켜 응력비를 낮추기 때문에 유리해짐을 알 수 있다. 또한, 표에 나타난 바와 같이 개구부의 크기에 대한 처짐량의 영향도 미미한 것으로 나타났다. 그러나 $\rho=0.8$ 로 개구부를 너무 확장할 경우에는 Table 3에 나타난 바와 같이 뒤틀림응력이 커져 응력비가 높아지고, 처짐량도 허용처짐량인 4.5 cm를 넘게 되어 박스거더 단면의 변형을 효과적으로 제어하지 못하게 되는 것을 알 수 있다.

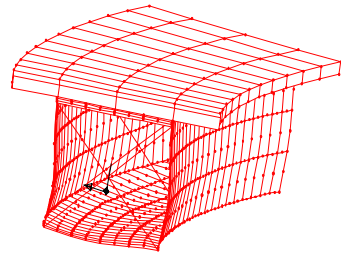
3.4 다이아프램의 형상에 따른 거동

판형식과 트러스 형식의 다이아프램이 설치되었을 때 박스거더의 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 동일 조건의 단면 및 하중조건에서 $L_D/L = 0.25$ (중간 다이아프램 3개)인 경우를 대상으로 가능한 한 동일한 강성을 갖는 층복판 방식과 X형 트러스 방식의 다이아프램으로 모델링하여 지간중앙에서의 응력비 및 변형, 처짐량을 비교하였다. 이때, 모델의 다이아프램 소요강성은 $K \geq 20 \times EI_{DW}/L_D^3 = 1.796 \times 10^{10} \text{ cm}^4$ 이며, 사용된 강성은 층복판식 다이아프램의 경우 $K = 1.6025 \times 10^{11} \text{ cm}^4$ 이고, X형 트러스 방식의 다이아프램은 $K = 1.6565 \times 10^{11} \text{ cm}^4$ 이다.

Table 4는 그 해석결과를 나타낸 것으로 층복판 방



(a) 층복판 방식일 때



(b) X형 트러스 방식일 때

Fig. 21 지간중앙 단면에서의 뒤틀림 변형

식보다 X형 트러스 방식의 다이아프램이 동일조건에서 뒤틀림응력이나 응력비가 크게 나타나며 처짐량 또한 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 변형도에서도 나타났듯이 층복판 방식의 경우는 플랜지와 복부

Table 4 다이아프램형상에 따른 최대뒤틀림응력, 응력비와 최대 처짐

다이아프램의 형상	다이아프램 간격	f_b (MPa)	f_{DW} (MPa)	f_{DW} / f_b	수직처짐(cm)	수평변위(cm)
층복판 방식	0.25	64.68	6.94	0.107	3.12	0.46
X형트러스방식	0.25	66.34	9.66	0.146	3.25	0.61

가 밀착되어 있는 반면, X형 트러스 방식은 상·하 모서리부만 연결되어 있으므로 다이어프램 설치부위의 단면 변형이 용이하기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석프로그램을 이용한 다이어프램으로 보강된 곡선 강박스거더교와 강합성 박스거더교에 대해 고정하중 및 실제 차량하중을 재하하여 뒤틀림거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 사용된 해석방법의 검증은 위해 기존의 제안식과 동일한 조건에서 비교한 결과 각 제안식과 비슷한 경향을 보였으며 특히, Nagai 등(1981)의 제안식과 근접한 결과를 보여 모델링의 타당성을 입증하였다. 본 연구는 다이어프램 설치부의 강성 변화가 고려된 결과임을 고려할 때 기존의 제안식보다 좀 더 실제 거동에 가까운 해석이라고 판단된다.
- 2) 매개변수 연구결과에 따르면, 일반적으로 뒤틀림응력과 휨응력의 비는 중심내각이 작을수록, 시간이 짧을수록, 다이어프램의 간격이 좁을수록 작아지며, 다이어프램 설치로 인한 뒤틀림응력의 감소정도는 다이어프램을 좁게 할수록 감소하지만 일정 간격 이하로 내려갈 경우 그 감소 정도는 매우 미미하여 다이어프램을 어느 일정 간격 이하로 하는 것은 뒤틀림응력을 제어하는데 별다른 영향을 미치지 못함을 확인하였다.
- 3) 다이어프램의 간격에 따른 곡선 강합성 박스거더의 거동을 해석한 결과에 따르면, 다이어프램의 수가 증가될수록 휨과 뒤틀림응력의 비가 점점 낮아지며, 다이어프램 간격이 5m로 되었을 때 휨과 뒤틀림응력의 비가 설계편람 권고 범위인 5~6%에 포함되어 경제적인 다이어프램 간격임이 확인되었다.
- 4) 다이어프램의 개구율 효과에 대해서는 개구부가 없는 경우와 개구율 $\rho=0.25$ 미만인 경우는 뒤틀림응력 및 처짐량이 거의 같아 비슷한 거동을 보였으며 특히, $\rho=0.4\sim 0.6$ 인 경우의 뒤틀림응력은 오히려 감소되어 휨·뒤틀림 응력비가 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 개구율 $\rho=0.8$ 로 개구부가 너무 커지면 오

히려 뒤틀림응력이 증가하여 응력비가 높아지고 처짐량도 허용처짐량을 초과하게 되어 강박스거더 단면의 변형을 효과적으로 제어하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 모델에서는 다이어프램의 개구율 ρ 를 0.4~0.6 정도로 두는 것이 거동에 가장 유리한 것으로 나타났다.

- 5) 강성이 같은 중복판식 다이어프램과 X형 트러스 방식의 다이어프램의 해석결과, X형 트러스 방식의 다이어프램이 뒤틀림응력이 크게 발생하여 휨·뒤틀림 응력비가 커지고 처짐량도 커져 불리한 거동을 하였다. 즉, 같은 강성을 가지는 중복판 방식의 다이어프램이 X형 트러스방식의 다이어프램보다 뒤틀림응력을 보다 효과적으로 제어하는 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. 건설교통부(2005), 도로교설계기준.
2. 건설교통부(2001) 도로설계편람(III), pp.506:153-220.
3. 강영종, 정주호, 윤기용(1996) “수평곡선 격자형교의 유한요소해석”, 대한토목학회논문집, 16권, 제8권 3호, pp.261-270.
4. 김태균(2000) 강상자형 수평곡선교량에서 발생하는 뒤틀림응력에 관한 연구, 동국대학교 공학석사학위 청구논문.
5. 손준상(1997) 상자형 거더의 다이어프램 간격이 뒤틀림 휨 응력에 미치는 영향, 고려대학교 공학석사학위 청구논문.
6. 이희업(2000) 직접강도법에 의한 곡선 강박스 거더의 뒤틀림 해석 및 설계 최적화에의 응용, 인하대학교 공학박사학위 청구논문.
7. 임성순, 장승필(1988) “유한요소법을 이용한 나선형 곡선부재의 정적해석에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제8권 2호, pp.215-225.
8. 최영준 외 3인(2003) “수평곡선 강박스거더의 다이어프램 간격에 관한 고찰”, 대한토목학회논문집, 23권 2A호, pp 345-353.
9. 박남희 외 3인(2003), “강박스 거더교의 내부다이어프램에 관한 매개변수 연구”, 한국강구조학회논문집, 15권 3호, pp.231-239.
10. AASHTO(1980) Guide Specification for Horizontally Curved Highway Bridges, AASHTO, Washington,

-
- D. C.
11. C. P. Heins(1975) Bending and Torsional Design in Structural Members, Lexington Book, Lexington, Massachusetts.
 12. C. P. Heins and Spates, K. R.(1970) "Behavior of Single Horizontally Curved Girder", Journal of the Structural Divisions, ASCE, Vol. 96, No. ST7, Proc. Paper 7420, pp. 1511-1524.
 13. Hiroshi Nagai, Chai Hong Yoo(1988) Analysis and Design of Curved Steel Bridge, McGraw-Hill, Inc.
 14. I. K. Aneja and F. Roll(1971) "Model Analysis of Curved Box-Beam Highway Bridge", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST12, Proc. paper 8063, pp. 2861-2878
 15. J. Oleink and C. P. Heins(1975) "Diaphragms for Curved Box Beam Bridges", Journal of the Structural Divisions, ASCE, Vol. 101, No. ST10.
 16. K. K. Chu and S. G. Pinjarkar(1971) "Analysis of Horizontally Curved Box Girder Bridges", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST10, Proc. Paper 8453, pp. 2481-2501.
 17. L. C. Bell and C. P. Heins(1970) "Analysis of Curved Girder Bridge", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. ST8, Proc. Paper 7462, pp. 1657-1671.
 18. Sakai, F., and M. Nagai(1977) "A Recommendation on the Design of Intermediate Diaphragms in Steel Box" Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, No. 261, pp 21-34.
 19. The Hanshin Expressway Public Corporation (1980) The Design Code, Part 2, Design Codes For Steel Bridge Structure, Osaka.
 20. N. H. Park, et al.(2004), "Effective Distortional Stiffness Ratio and Spacing of Intermediate Diaphragms in Steel Box Girder Bridges", International Journal of Steel Structures, Vol. 4, No. 2, pp. 93-102.
 21. N. H. Park, et al.(2005), "Spacing of Intermediate Diaphragms in Horizontally Curved Steel Box Girder Bridges", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 41, No. 9-10, pp. 925-943

(접수일자 : 2005년 10월 4일)