

중간격벽의 형상을 고려한 상자형 거동에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Behavior of Box Girder considering Middle Diaphragm Shapes

정 희 호†

Jung, Hee hyo

이 승 열*

Lee, Soeng lyoel

(논문접수일 : 2001년 11월 27일 ; 심사종료일 : 2002년 8월 30일)

요 지

상자형의 중간격벽은 상자형의 단면변형을 구속하고 상부플랜지에서 발생하는 하중을 양측의 웨브에 분포시키는 역할을 한다. 그러나 상자형의 내부공간이 중간격벽으로 차단될 경우 내부공간을 활용할 수 없으며 유지관리에 많은 어려움을 겪게 된다. 상자형의 격벽이 개구부를 갖는 경우 개구부가 없는 경우에 비하여 어떠한 영향을 갖는지를 실험을 통하여 중간격벽의 강성으로 표현하고자 하였다.

핵심용어 : 중간격벽 강성, 단면변형 휨응력, 편심하중, BEF 유사

Abstract

The middle diaphragm of box girder is to prevent the deformation of the cross section of box girder, to distribute load produced at upper flange onto the both sides of web. But if inner space of box girder is barred by the middle diaphragm, it is impossible to use in inner space of box girder and it is felt constraint on maintenance-management. The effect of middle diaphragm of box girder is intended to be expressed by the stiffness of diaphragm in comparing the diaphragm with opening of box girder with diaphragm without opening of box girder through the experiment.

Keywords : middle diaphragm stiffness, distortional stress, eccentric load, BEF analogy

1. 서 론

상자형 해석방법은 1962년 Born과 1968년 Scordelis가 상자형에 곡절판 이론을 적용하여 중간격벽이 없는 단순 지지된 단면을 해석하였고, 1968년 Abdel-Samad는 중간격벽의 간격 결정이 용이한 근사유사

방법인 BEF(Beams on Elastic Foundation) 유사 해석을 제시하였다. 이후 유한요소법, 유한차분법, 유한대판법 등에 의한 상자형 해석의 많은 방법이 제시되었다.

본 연구에서는 실제 현장에서 사용되는 상자형의 격벽이 개구부를 갖는 경우와 개구부를 갖지 않는 경우를

† 책임저자, 정희원 · 경상대학교 공과대학 건설공학부 교수

Tel: 055-751-5378; Fax: 055-751-5374

Email: hhjung@nongae.gsnu.ac.kr

* 경상대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

실험을 통해 축방향 응력과 단면변형 휨응력, 연직처짐을 구하고 횡단면 변형을 고려한 상자형 이론과 탄성지반상 보의 유사 이론을 이용하여 중간격벽의 강성의 차이에 따른 축방향 응력과 단면변형 휨응력, 연직처짐을 비교 및 분석한다.

2. 상자형의 BEF 유사해석

2.1 단면의 치수와 각 부재의 휨 강성

부재의 휨 강성은 아래와 같다.

$$D_{a,b,c} = \frac{Et^3_{a,b,c}}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

여기서, t_a, t_b, t_c 는 판 a, b, c의 두께, D_a, D_b, D_c 는 판 a, b, c의 휨강성이다.

아래의 Fig. 1은 상자형 단면을 나타내고 있다.

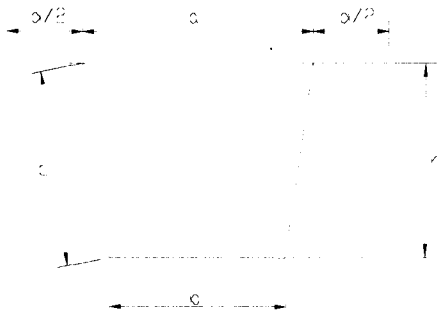


Fig. 1 Dimension of Box Section

2.2 편심하중

편심하중은 휨하중과 비틀 하중으로 구분할 수 있다. 여기서 휨하중은 기본이론에 의해 상·하부 플랜지에 최대 휨 응력을 일으키고 비틀 하중은 Saint-Venant torsion에 의한 전단류(剪斷流)와 횡단면을 변형시키는 비틀림에 의해서 뒹응력과 단면변형 휨응력을 발생시킨다.

2.3 휨응력

축방향 보강재를 포함한 단면부재의 도심축에 대한 단면 2차모멘트를 I_c , 상부 플랜지에서 도심 축까지의

거리를 y_c , 휨하중에 의한 휨모멘트를 M_c 라고 하면, 플랜지의 상하부에서 작용하는 휨응력 σ_{b1}, σ_{b2} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{b1} = \frac{M_c}{I_c} y_c \quad (2)$$

$$\sigma_{b2} = \frac{M_c}{I_c} (h - y_c) \quad (3)$$

식(2), (3)에서 복부판의 상하부에서 생기는 응력집중 즉 전단뒤집 현상에 의한 2차응력이 고려되지 않았다.

2.4 뒹응력

비틀 하중에 의한 축방향응력으로 복부판의 상하부 플랜지의 응력 σ_{w1}, σ_{w2} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{w1} = \frac{r}{2I_b} b \Delta b M \quad (4)$$

$$\sigma_{w2} = \frac{1}{2I_b} b \Delta b M \quad (5)$$

여기서,

I_b : 비틀 하중에 의한 단면 2차모멘트로서 탄성지반상 보의 단면 2차모멘트

Δb : 하부 플랜지의 평면변위계수

M : 비틀 하중에 의해 생기는 하부 플랜지의 휨모멘트, 탄성지반상 보의 휨모멘트

r : 복부판의 상부 플랜지의 하부 플랜지에 대한 응력비

식(4)와 (5)에서 계산된 뒹응력은 축방향 휨응력의 값에 합산 혹은 감산되는 형태로 작용한다.

2.5 Distortion응력

비틀 하중 요소에 의해 횡단면을 찌그러지게 하는 힘에 의해서 생기는 응력이다. Fig. 2와 같이 복부판의 좌굴을 일으켜서 복부판 상, 하부에 큰 응력과 변형을 발생시킨다. 복부판 상하부에서의 축방향 단위길이당 단면변형 휨응력 Fd_1 과 Fd_2 는 다음과 같다.

$$Fd_{1,2} = \frac{M_{11,2}}{Z_c} \quad (6)$$

단위 비틀 하중을 주었을 경우, 하부 플랜지의 중간을 절단해서 생기는 여유력(餘余力)을 V라고 했을 때 가상 일의 원리를 적용시키면,

$$V = \frac{\frac{1}{a+b} \left[\frac{a^2b}{D_a} + \frac{abc}{D_c} (2a+b) \right]}{\frac{a^2}{D_a} + \frac{2c}{D_c} (a^2+ab+b^2) + \frac{b^2}{D_b}} \quad (7)$$

비틀 하중 P에 의한 복부판 상하부의 단면변형 휨모멘트 M_{11} , M_{12} 는 식(8)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= -\frac{a}{2} \left(\frac{b}{a-b} - V \right) p \\ M_{12} &= \frac{bV}{2} p \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, Z_c 는 복부판의 단위길이당 단면계수이다. 중간격벽을 고려한 복부판 상하부에서의 단면변형 휨응력 σ_{11} , σ_{12} 는 다음과 같다.

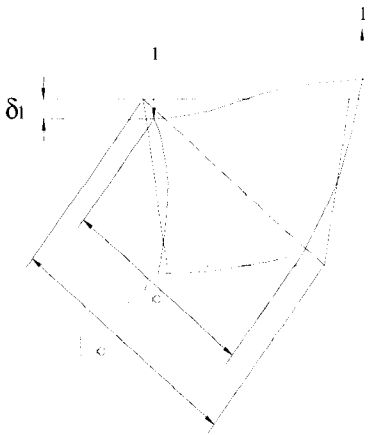


Fig. 2 Distortional Deformation

$$\sigma_{11,2} = Fd_{1,2} \frac{W}{\delta_1} \quad (9)$$

여기서,

W : 비틀 하중에 의한 복부판 상부의 처짐, 탄성지반상부의 처짐

δ_1 : 단위 비틀 하중에 의한 복부판 상부의 처짐을 나타낸다.

2.6 보강재(補剛材)

격벽이나 대경구는 축방향 힘에 대해서는 저항할 수 없으며 축방향 뒤틀 변위와 횡방향 단면변형 휨변위를 구속하는 역할을 한다.

격벽의 면적은 이를 대경구로 대체시킨 단면적 A_b 로 쓰면,

$$A_b = \frac{G_p t_p h^2}{E(a+b)} \left\{ 1 + \left(\frac{a+b}{2b} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

$\delta_b = L_b - L_b'$ 라 하면,

$$\delta_b = \frac{2 \left(1 + \frac{a}{b} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{a+b}{2h} \right)^2}} \delta_1 \quad (11)$$

이 된다.

격벽강성 Q는 다음과 같다.

$$Q = \frac{EA_b}{L_b} \left(\frac{\delta_b}{\delta_1} \right)^2 \quad (12)$$

여기서, G_p , t_p 는 격벽의 전단탄성계수, 두께이다. 식(12)는 상자형의 중간 격벽 강성을 나타내고 있으며 격벽의 강성은 탄성지반상의 보에 동일한 강성을 갖는 중간 스프링으로 대체시킬 수 있다.

2.7 뒤틀과 단면변형 휨응력의 BEF 유사(類似)

BEF에 하중 P가 작용할 때의 처짐 방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^4 W}{dx^4} + kW = P \quad (13)$$

여기서, k는 지반탄성계수이고, I는 BEF의 단면 2차모멘트이다.

식(7)에 의한 뒤틀 하중 P_w 는

$$P_w = EI_b W'''' \quad (14)$$

이고, 식 (11)에 의한 단면변형 휨하중 P_d 는

$$P_d = \frac{W}{\delta_1} \quad (15)$$

으로 표시할 수 있으며, 비틀 하중 P 는 다음 식으로 표시된다.

$$P = P_w + P_d = EI_b W'''' + \frac{W}{\delta_1} \quad (16)$$

식(16)은 I_b 가 I 에, $1/\delta_1$ 이 k 에 각각 대응할 때 식(13)과 동일한 식으로 전개될 수 있다. 따라서 상자형 단면에 격벽이 있을 경우 탄성지반상 보에 강성 Q 인 중간 스프링을 설치하여, 주어진 하중에 의한 처짐과 모멘트의 크기를 구하면 식(5)의 휨과 식(9)의 단면변형 휨응력을 구할 수 있다.

3. 탄성지반상의 보해석

3.1 중간 스프링이 없는 단순 지지보에 집중하중 P 가 작용할 경우

$$y_0 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (17)$$

이 되고 보의 휨에 대한 에너지 원리를 적용하면 V_1 은

$$du = \frac{M^2}{2EI} dx, \quad M^2 = (-EIy'')^2 \text{의 관계에서}$$

$$\therefore du = \frac{EI}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \text{ 이 되므로,}$$

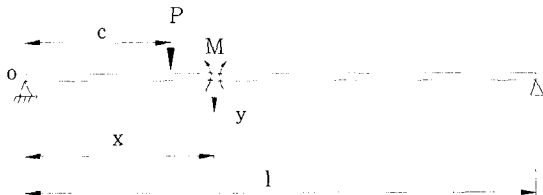


Fig. 3 BEF under A Concentrated Load

$V_1 = \frac{EI}{2} \int_0^l (y_0'')^2 dx$ 를 계산하면 아래와 같고

$$\therefore V_1 = \frac{EI \pi^4}{4 l^3} \sum_{n=1}^{\infty} n^4 a_n^2$$

처짐에 대해 에너지 원리를 적용하면 다음과 같다.

$$du = \frac{Py}{2} dx, \quad P = ky \text{ 이고,}$$

$$U = \int du dx = \int \frac{ky^2}{2} dx \text{가 되므로,}$$

$$V_2 = \frac{k}{2} \int_0^l y_0^2 dx = \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right)^2 dx$$

$$\therefore V_2 = \frac{kl}{4} \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2$$

외력에 의한 일을 U 라 하면,

$$U = P y_{oc} = P \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi c}{l} \text{로 표시되고, 이}$$

때 y_{oc} 는 거리 c 만큼 떨어진 지점에서의 하중 작용에 의한 처짐이 된다.

$U = V_1 + V_2$ 인 조건에서 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 을 구하면,

$$P \frac{\partial y_{oc}}{\partial a_n} da_n = \left(\frac{\partial V_1}{\partial a_n} + \frac{\partial V_2}{\partial a_n} \right) da_n$$

의 관계가 성립하므로,

$$P \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi c}{l} da_n = -\frac{\pi^4 EI}{2 l^3} \sum_{n=1}^{\infty} n^4 a_n da_n + \frac{kl}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n da_n$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} P \sin \frac{n\pi c}{l} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(\frac{n^4 \pi^4 EI}{2 l^3} + \frac{kl}{2} \right)$$

$$\therefore \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P\beta (2\beta l)^3}{k} \times \frac{\sin \frac{n\pi c}{l}}{(n\pi)^4 + 4 (\beta l)^4} \quad (18)$$

식(18)를 식(17)에 대입하면 처짐은 다음과 같이 되고,

$$\therefore y_0 = \frac{P\beta}{k} (2\beta l)^3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi c}{l} \sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4 (\beta l)^4} \quad (19)$$

$M = -EIy''$ 에서 모멘트는 아래 식과 같이 된다.

$$\therefore M_0 = 2 Pl \sum_{n=1}^{\infty} (n\pi)^2 \frac{\sin \frac{n\pi c}{l} \sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4}$$

모멘트를 다시 미분하여 전단력을 구하면,

$$\therefore Q = 2P \sum_{n=1}^{\infty} (n\pi)^3 \frac{\sin \frac{n\pi c}{l} \cos \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4}$$

이 된다.

3.2 중간 스프링이 있는 단순 지지보에 집중하중 P가 작용할 경우

같은 중간 스프링을 가진 경우의 처짐식은

$$y = y_0 - y_1 \tag{20}$$

으로 쓸 수 있고, y_1 은 다음의 식(21)과 같다.

$$y_1 = \frac{\beta}{k} (2\beta l)^3 \sum_{i=1}^m R_i \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi c_m}{l} \sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4} \tag{21}$$

$$\therefore y = \frac{\beta (2\beta l)^3}{k} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{l}}{\{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4\}} \left\{ P \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{c}{l} - \sum_{i=1}^m R_i \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi c_m}{l} \right\} \tag{22}$$

여기서, c 는 0점에서 하중이 작용하는 지점까지의 거리를 나타내며, c_m 은 0점에서 각 스프링 반력점(反力點)까지의 거리를 나타내고, x 는 0점에서 구하고자 하는 점까지 거리이다. 식(19)를 이용해서 y_0 를 구하고, 식(20)을 사용한 i 점의 처짐 $y_i = R_i/Q_i$ 와 식(21)을 이용하여 m 개의 반력(反力)을 계산한 후, 반력 R 을 대입하여 y_1 을 계산하고 y_1 을 식(20)에 대입하여 y 를 계산할 수 있다. 휨 모멘트식은

$$M = M_0 - M_1$$

로 쓰고 M_1 은 식(23)와 같다.

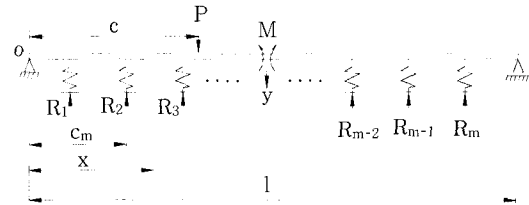


Fig. 4 BEF with Spring Supports under A Concentrated Load

$$M_1 = 2l \sum_{i=1}^m R_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi c_m}{l} \sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4}$$

$$\therefore M = 2l \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4} \left\{ P \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{c}{l} - \sum_{i=1}^m R_i \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi c_m}{l} \right\} \tag{23}$$

모멘트를 다시 미분하여 전단력을 구하면,

$$\therefore Q = 2l \frac{n\pi}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{l}}{(n\pi)^4 + 4(\beta l)^4} \times \left\{ P \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{c}{l} - \sum_{i=1}^m R_i \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi c_m}{l} \right\}$$

이 된다.

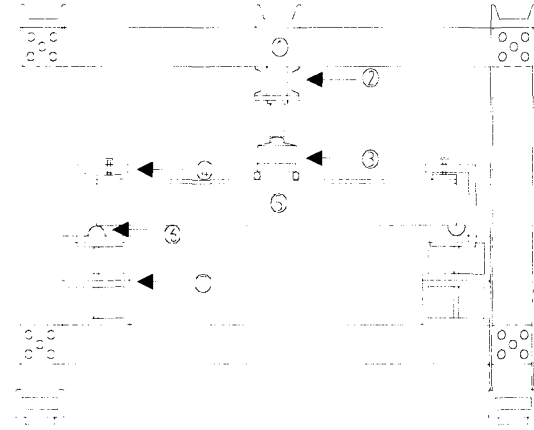
4. 실험 및 고찰

4.1 실험 장치 및 모형 보

로드 셀 아래에 하중 재하판을 설치하여 오일 잭의 하중을 상자형 보에 전달할 수 있도록 하였다.

Fig. 6처럼 길이 240cm의 상자형 중간에 편심하중을 재하하며 중간격벽 간격이 48cm가 되도록 등간격으로 설치하였다. 그래서 5L/10과 3L/10지점에는 격벽이 없고, 4L/10지점에는 중간격벽이 설치되어 있다.

보-1의 중간격벽 단면적은 432cm²이고 보-2의 중간격벽 단면적은 297cm²이며 보-3의 중간격벽 단면적은 185cm²이다. 중간격벽의 두께는 0.35cm, 실험에 사용된 강재의 탄성계수는 $E = 2.0 \times 10^6$ kfg/cm², 프와송의 비는 0.3을 사용하였다.



① structural reaction frame ② oil jack
 ③ load cell ④ clamp ⑤ box beam
 ⑥ support hinge ⑦ support bed

Fig. 5 An Experimental Equipment

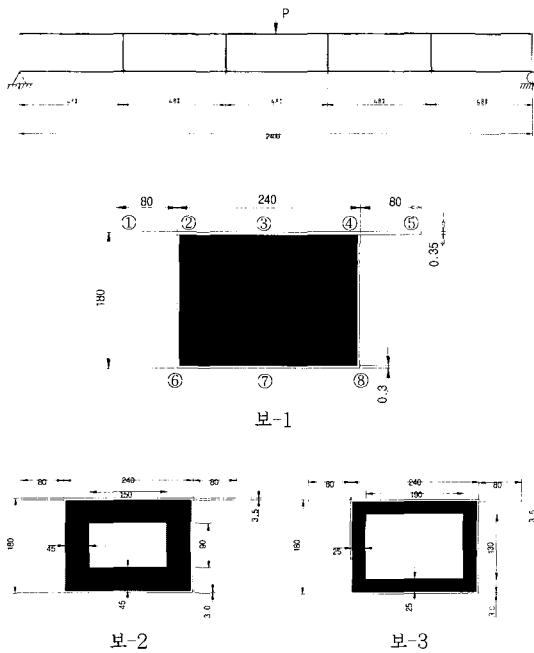


Fig. 6 Dimension of Box Girder(단위 : mm)

4.2 실험 방법

3개의 보에 대해 3tonf는 탄성범위내의 하중이고 6.5tonf는 비례한도에 근접한 하중으로 계산되어 각각

하중을 편심하중으로 재하하고, 발생하는 축방향 응력과 단면변형 휨응력을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 보의 3L/10, 4L/10, 5L/10 지점에 각각 ①~⑧까지 부착하고 연직처짐을 측정하기 위해 4L/10, 5L/10 지점에 변위계를 설치하여 인디게이트로 보-1과 보-2, 보-3에 대해 실시하였다.

4.3 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 보-1, 보-2, 보-3에 3.0tonf와 6.5tonf의 편심하중이 작용할 때, 3L/10지점과 4L/10지점, 5L/10지점에 발생하는 축방향 응력을 나타낸 그래프이다. 측정 8곳은 Fig. 6에서 보여주는 지점이다.

Fig. 8은 격벽형상에 따른 단면변형 휨응력을 나타낸 그래프이다. 보-1과 보-2, 보-3을 3L/10, 4L/10과 5L/10지점에서 측정하였고 각각 이 지점을 1, 2, 3으로 표시하였다.

Table 2와 Table 3은 Fig. 6의 ⑤지점에 변위계를 설치하고 3.0tonf와 6.5tonf의 하중을 주어 연직 처짐을 고찰하고 이론값과 비교하여 나타내었다. 여기서, 4L/10지점은 중간격벽이 있으며 5L/10지점은 중간격벽이 없는 지점이다.

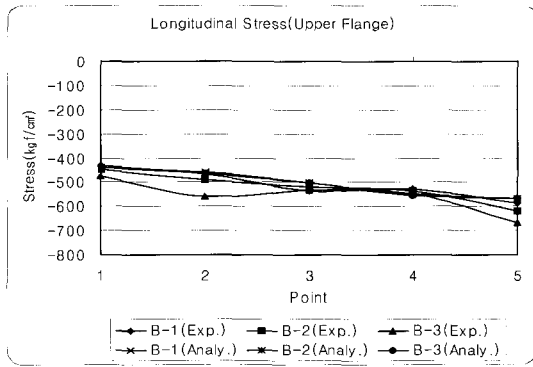
보-1의 중간격벽 형상은 격판 형식이므로 격벽강성을 계산하고 보-2와 보-3의 중간격벽 형상은 라멘 형식으로 구할 수 있다.

Table1 Stiffness of Diaphragms(단위 : kgf/cm²)

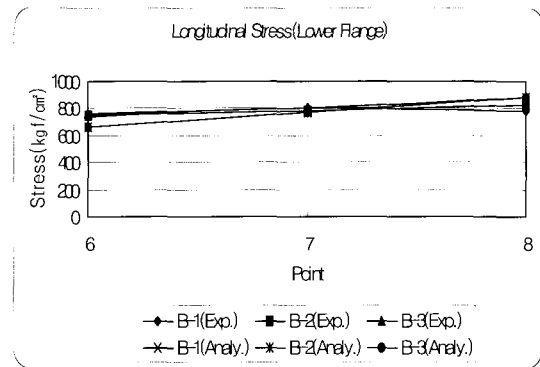
보의 종류	중간 격벽 강성
보 - 1	4.652E+08
보 - 2	2.60E+07
보 - 3	4.067E+06

Table 2 Vertical Displacement under Eccentric Load (3.0tonf)(단위 : mm)

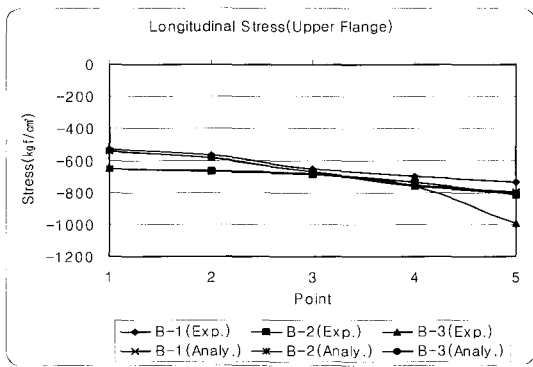
보의 종류	지점	4L/10	5L/10
		실험값	3.81
보-1	이론값	3.24	6.76
	실험값	6.70	7.16
보-2	이론값	6.56	7.10
	실험값	7.03	7.23
보-3	이론값	7.07	7.534



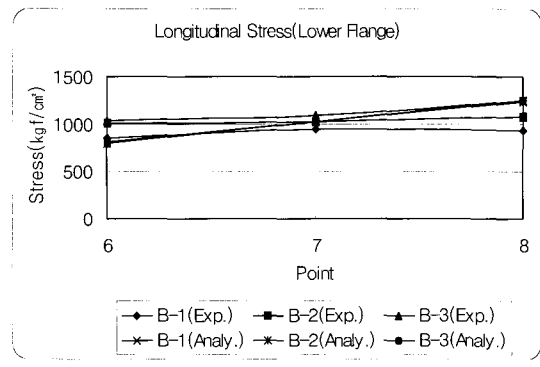
(a) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 3L/10



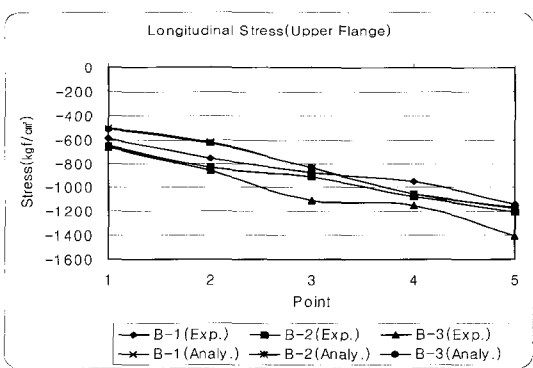
(b) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 3L/10



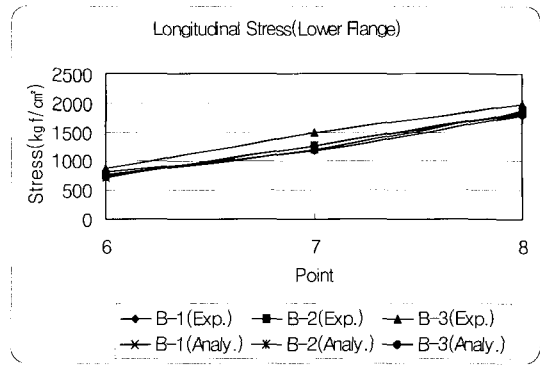
(c) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 4L/10



(d) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 4L/10

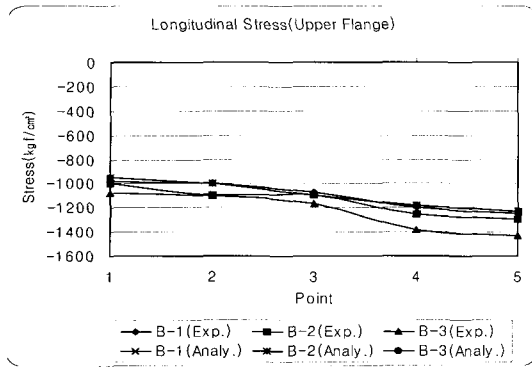


(e) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 5L/10

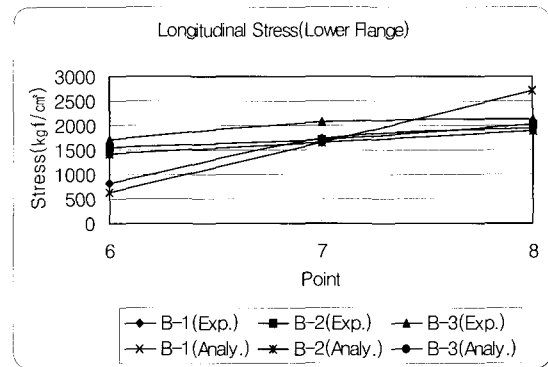


(f) Eccentric Load : 3.0tonf,
Measuring Position : 5L/10

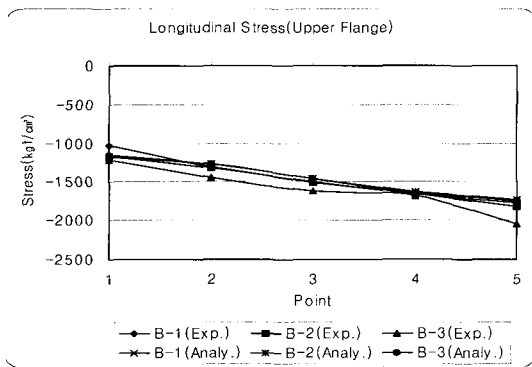
Fig. 7 Longitudinal Stress According to the Middle Diaphragm Shapes(continue)



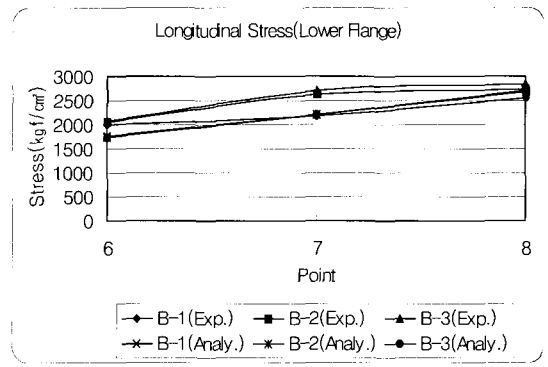
(g) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 3L/10



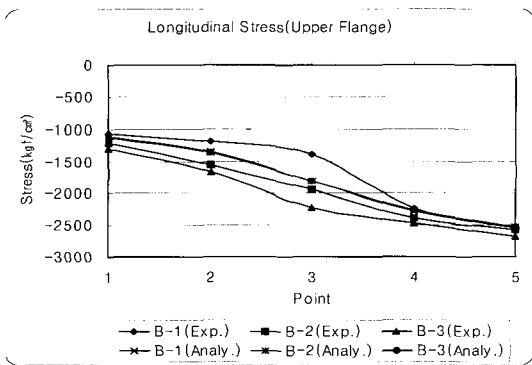
(h) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 3L/10



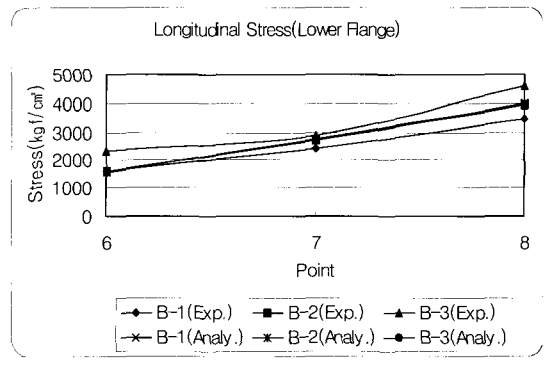
(i) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 4L/10



(j) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 4L/10

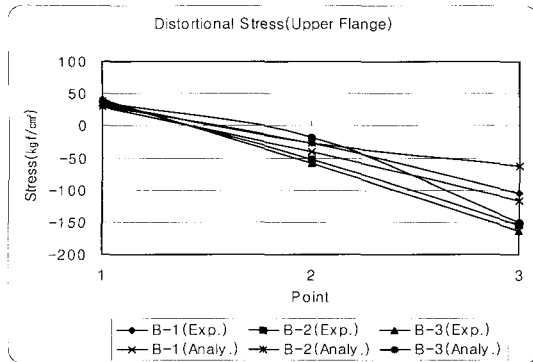


(k) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 5L/10

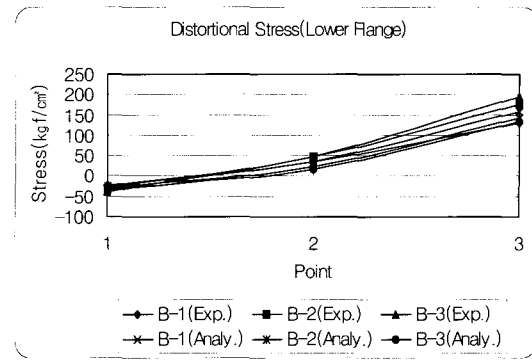


(l) Eccentric Load : 6.5tonf,
Measuring Position : 5L/10

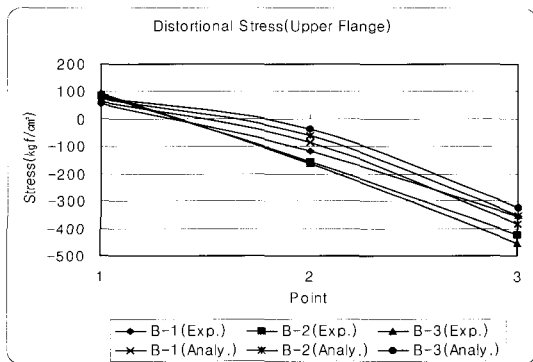
Fig. 7 Longitudinal Stress According to the Middle Diaphragm Shapes



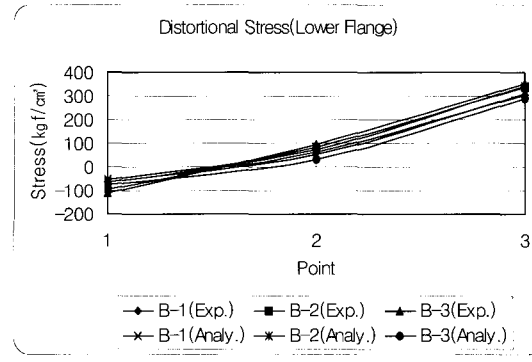
(a) Eccentric Load : 3.0tonf, Measuring Position : Point 1-3L/10, Point 2-4L/10, Point 3-5L/10



(b) Eccentric Load : 3.0tonf, Measuring Position : Point 1-3L/10, Point 2-4L/10, Point 3-5L/10



(c) Eccentric Load : 6.5tonf, Measuring Position : Point 1-3L/10, Point 2-4L/10, Point 3-5L/10.



(d) Eccentric Load : 6.5tonf, Measuring Position : Point 1-3L/10, Point 2-4L/10, Point 3-5L/10.

Fig. 8 Distortional Stress According to the Middle Diaphragm Shapes

Table 3 Vertical Displacement under Eccentric Load (6.5tonf)(단위 : mm)

보의 종류	지점	4L/10	5L/10
		실험값	8.05
보-1	이론값	8.02	10.08
	실험값	9.96	12.60
보-2	이론값	9.31	12.07
	실험값	10.03	13.40
보-3	이론값	10.74	13.151

5. 결 론

축방향 응력의 값은 상자형의 상부 플랜지에 5개의 측정점과 하부 플랜지에 3개의 측정점을 정하여 측정하였고, 축방향 응력과 단면변형 휨응력은 5L/10, 4L/10,

3L/10점에 대해 측정하였으며, 연직처짐은 5L/10점과 4L/10점에 변위계를 설치하여 측정하였다. 중간격벽 형상에 따른 중간격벽 강성의 차이로 다음과 같은 결과를 알 수 있었다.

1. 실험에서 측정된 응력 및 연직처짐과 BEF 유사이론을 이용하여 계산된 응력 및 연직처짐은 비교적 근소한 오차를 나타냈다.
2. 중간격벽의 강성을 증가함에 따라 상부플랜지의 상대적인 연직처짐은 재하된 집중하중에 대해 충분히 제한시킬 수 있었다.
3. 축방향 응력은 재하된 하중에 대해 각 보의 3L/10, 4L/10, 5L/10 점에 나타난 응력 차이가 크지 않았으며 각 측정점에 대한 중간격벽 강성에 따라 응력은 다소 감소하였다.

4. 단면변형 휨응력은 재하된 하중에 대해 중간격벽 강성이 증가함에 따라 강성의 차이가 큰 보-1과 보-2는 크게 감소하지만 중간격벽 강성의 차이가 작은 보-2와 보-3의 차이는 작게 나타났다.
5. 중간격벽의 강성은 격벽의 개구부 크기에 큰 차이를 나타내지 않았으며, 상자형의 유지 관리를 원활하게 하기 위하여 개구부의 크기를 증가시켜도 상자형에 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

- 지반상보의 처짐
- y_0 : 집중하중에 의한 탄성지반상의 처짐
- y_1 : 스프링 반력에 의한 처짐
- $\sigma_{t,2}$: 중간격벽을 고려한 복부판 상·하부에 작용하는 단면변형 휨응력
- $\sigma_{bl,2}$: 상·하부 플랜지에 작용하는 휨응력
- $\sigma_{wl,2}$: 복부판 상·하부에 작용하는 휨응력
- δ_1 : 단위 비틀 하중에 의한 복부판 상부의 처짐
- ν : 프와송의 비

기호정리

- A_b : 격벽의 면적을 대경구로 대체시킨 단면적
- Δb : 하부 플랜지의 평면변위계수
- $D_{a,b,c}$: 상·하부 플랜지 및 복부판의 휨강성
- E : 탄성계수
- $Fd_{1,2}$: 복부판 상·하부에 작용하는 단면변형 휨응력
- G_p : 격벽의 전단탄성계수
- I_b : 비틀 하중에 의한 단면 2차모멘트로 탄성지반상 보의 단면 2차모멘트
- $M_{t,2}$: 복부판 상·하부에 작용하는 단면변형 휨모멘트
- Q : 격벽강성
- r : 복부판의 상부 플랜지의 하부 플랜지에 대한 응력비
- $t_{a,b,c}$: 상·하부 플랜지 및 복부판의 두께
- t_p : 격벽의 두께
- V : 여유력(餘冗力)
- W : 비틀 하중에 의한 복부판 상부의 처짐, 탄성

참고문헌

1. Abdel Samad, S. R., Wright, R. N., and Robinson, A. R., "BEF Analogy for Analysis of Box Girder", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 94, No. ST 7, 1968
2. Vladmir, K., *Theory of Box Girder*, John Wiley and Sons, LTD, 1979, pp.371
3. 정희효, "편심하중을 받는 상자형의 거동 해석", 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 1986, pp.135
4. 장동일, 강구조의 보강설계, 건설도서, 1995, pp.586
5. Abdel Samad, S. R., Wright, R. N., and Robinson, A. R., "Analysis of Box Girder with Diaphragms", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 95, No. ST 10, 1946
6. Hetenyi, M., *Beams on Elastic Foundation*, the University of Michigan press, Ann Arbor, Mich, 1946, pp.255