

특별직교이방성 이론에 의한 포스트 텐션된 교량의 해석(I) - 철근 콘크리트 슬래브교 -

김덕현*·원치문**·이정호***

Analysis of Post-tensioned Bridge by Specially Orthotropic Laminate Theory (I) - Reinforced Concrete Slab Bridge

Kim, D. H., Won, C. M and Lee, J. H.

Key Words: Specially Orthotropic Laminates, Post-tensioned Bridge, Finite Difference Method, Reinforced Concrete Slab Bridge

Abstract

A post-tensioned reinforced concrete slab bridge is analyzed by specially orthotropic laminate theory. Symmetrically reinforced slab with tension and compression steel is considered for convenience of analysis. Each longitudinal and transverse steel layer is regarded as a lamina, and material constants of each lamina is calculated by the use of the rule of mixture. This bridge is under uniformly distributed vertical loads, and axial loads and end moments due to post-tensioning.

In this paper, finite difference method is used for numerical analysis of this bridge. Theory and analysis method of specially orthotropic laminate plates used in this paper can be used for design of new bridges, and maintenance and repair of old bridges.

1. 서론

대부분의 구조물은 판 구조요소로 되어있으며 이들 중 많은 부분이 여러 소재를 합성한 복합구조요소로 구성된다. 이러한 구조물의 대표적인 것이 철근 콘크리트 슬래브 교량이다. 따라서 철근콘크리트 슬래브는 복합적층판으로 취급되어야 한다. 본 논문에서는 프리스트레스가 도입된 복철근으로 배근된 단순지지 철근콘크리트 슬래브를 특별직교이방성 이론에 의해 해석하였다. 그 과정에서 편미분방정식은 유한차분법을 이용하여 해석하였으며 이의 정확도를 입증하기 위해 등분포 하중을 받는 보의 중앙점 처짐과 비교.검토하

였다. 그리고 프리스트레스의 작용위치와 크기에 따라 슬래브에 발생하는 모멘트와 처짐을 계산하여 프리스트레스트 콘크리트 교량의 설계와 기존 철근콘크리트 교량의 유지.보수시 실무자료로 이용될 수 있도록 도표와 그림으로 나타내었다.

2. 기본 이론

2.1 슬래브의 강성계산

슬래브의 강성을 계산하는데 있어서 해석의 간편함을 위해 복철근으로 대칭 배근된 단순지지 철근콘크리트 슬래브 교량을 대상으로 하였다. 이때 종방향 철근이 배근된 층과 횡방향 철근이 배근된 층을 각각의 Lamina로 간주하였고 다음식(1)의 혼합법칙을 이용하여 각 Lamina의 재료상수를 계산하였다.

* Korea Composites 대표

** 한라대학교 건축토목공학부 전임강사

*** 영동대학 토목과 전임강사

$$E_{11} = E_m V_m + E_f V_f$$

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (1)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f}$$

$$\nu_{12} = \nu_{21} = \nu_m V_m + \nu_f V_f$$

일방향으로 보강된 적층의 평면응력(plane stress) 및 평면변형률(plane strain)의 경우 환원강성(reduced stiffness) $Q_{i,j}$ 는 다음 식(2)와 같다. ^{(1),(6)}

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}},$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (2)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

이러한 환원강성으로부터 변환된 환원강성(transformed reduced stiffness) $\bar{Q}_{i,j}$ 은 다음 식(3)과 같다.

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4)$$

$$\bar{Q}_{13} = Q_{13}m^2 + Q_{23}n^2$$

$$\bar{Q}_{16} = -Q_{22}mn^3 + Q_{11}m^3n - (Q_{12} + 2Q_{66})mn(m^2 - n^2)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4$$

$$\bar{Q}_{23} = Q_{13}n^2 + Q_{23}m^2 \quad (3)$$

$$\bar{Q}_{26} = -Q_{22}m^3n + Q_{11}mn^3 + (Q_{12} + 2Q_{66})mn(m^2 - n^2)$$

$$\bar{Q}_{33} = Q_{33}$$

$$\bar{Q}_{36} = (Q_{13} - Q_{23})mn$$

$$\bar{Q}_{44} = Q_{44}m^2 + Q_{55}n^2$$

$$\bar{Q}_{45} = (Q_{55} - Q_{44})mn$$

$$\bar{Q}_{55} = Q_{55}m^2 + Q_{44}n^2$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12})m^2n^2 + Q_{66}(m^2 - n^2)^2$$

변환된 환원강성을 이용하면 Laminate의 강성은 다음 식(4)와 같다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h^2_k - h^2_{k-1}) \quad (4)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h^3_k - h^3_{k-1})$$

2.2 슬래브의 수치 Modeling

등분포 수직하중과 축방향 하중을 동시에 받는 특별직교이방성 복합적층판의 평형방정식은 다음 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -q(x, y) \quad (5)$$

이 때 단면력과 처짐과의 관계는 다음 식(6), (7), (8)과 같다.

$$M_x = -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (6)$$

$$M_y = -D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (7)$$

$$M_{xy} = -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (8)$$

식(8)을 식(5)에 대입하여 정리하면 다음 식(9)가 된다.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 4D_{66} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -q(x, y) \quad (9)$$

식(9), (6), (7)을 차분식으로 전개하면 다음 식(10), (11), (12)로 된다.

$$\frac{1}{\Delta x^2} [M_{x,i-1,j} - 2M_{x,i,j} + M_{x,i+1,j}]$$

$$- 4D_{66} \frac{1}{\Delta x^2 \Delta y^2} \begin{bmatrix} w_{i-1,j+1} & -2w_{i,j+1} & w_{i+1,j+1} \\ -2w_{i-1,j} & 4w_{i,j} & -2w_{i+1,j} \\ w_{i-1,j-1} & -2w_{i,j-1} & w_{i+1,j-1} \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{1}{\Delta y^2} \begin{bmatrix} M_{y,i,j+1} \\ -2M_{y,i,j} \\ M_{y,i,j-1} \end{bmatrix} - N_x \frac{1}{\Delta x^2} [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}]$$

$$= -q(i, j) \quad (10)$$

$$M_x = -\frac{D_{11}}{\Delta x^2} [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] - \frac{D_{12}}{\Delta y^2} \begin{bmatrix} w_{i,j+1} \\ -2w_{i,j} \\ w_{i,j-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M_y = -\frac{D_{12}}{\Delta x^2} [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] - \frac{D_{22}}{\Delta y^2} \begin{bmatrix} w_{i,j+1} \\ -2w_{i,j} \\ w_{i,j-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서 $C_1 = \frac{1}{\Delta x^2}$, $C_2 = \frac{1}{\Delta y^2}$,

$$C_3 = \frac{4D_{66}}{\Delta x^2 \Delta y^2}, \quad C_4 = \frac{D_{11}}{\Delta x^2}, \quad C_5 = \frac{D_{12}}{\Delta y^2},$$

$$C_6 = \frac{D_{12}}{\Delta x^2}, \quad C_7 = \frac{D_{22}}{\Delta y^2}, \quad C_8 = \frac{N_x}{\Delta x^2}$$

라고 정의한 후 다시 정리하면 다음 식(13), (14), (15)로 된다.

$$\begin{aligned}
& C_1 [M_{x\ i-1,j} - 2M_{x\ i,j} + M_{x\ i+1,j}] \\
& - C_3 \begin{bmatrix} w_{i-1,j+1} & -2w_{i,i+1} & w_{i+1,j+1} \\ -2w_{i-1,j} & 4w_{i,j} & -2w_{i+1,j} \\ w_{i-1,j-1} & -2w_{i,j-1} & w_{i+1,j-1} \end{bmatrix} \\
& + C_2 \begin{bmatrix} M_{y\ i,j+1} \\ -2M_{y\ i,j} \\ M_{y\ i,j-1} \end{bmatrix} - C_8 [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] \\
& = -q(i,j) \quad (13)
\end{aligned}$$

$$M_x + C_4 [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] + C_5 \begin{bmatrix} w_{i,j+1} \\ -2w_{i,j} \\ w_{i,j-1} \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

$$M_y + C_6 [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] + C_7 \begin{bmatrix} w_{i,j+1} \\ -2w_{i,j} \\ w_{i,j-1} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

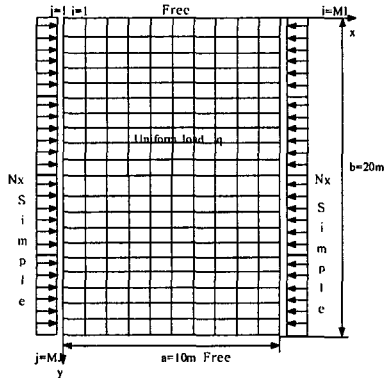


그림 1. 교량 상판의 모델링

교량의 지간방향을 x 축으로하고 교량의 폭 방향을 y 축으로 하여 그림 1과 같이 정하고 상부 자유지지단에서 경계조건을 고려하면 다음 식(16), (17)과 같다.

$$\begin{aligned}
M_y &= -C_6 [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] - C_7 \begin{bmatrix} w_{i,j+1} \\ -2w_{i,j} \\ w_{i,j-1} \end{bmatrix} \\
& = 0 \quad (16)
\end{aligned}$$

$$V_y = Q_y + \frac{\partial M_{yx}}{\partial x} = \frac{\partial M_y}{\partial y} - 2D_{66} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = 0 \quad (17)$$

식(16)에서 영역밖의 처짐을 영역안의 처짐으로 표시하면 다음 식(18)로 된다.

$$w_{i,j-1} = -C_{13} w_{i-1,j} + (2+2C_{13}) w_{i,j} \quad (18)$$

$$- C_{13} w_{i+1,j} - w_{i,j+1}$$

식(17)의 두 번째 항을 전향차분법으로 전개하여 정리하면 식(19)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
M_{y\ i,j-1} &= M_{y\ i,j+1} - 4 C_{14} w_{i,j+1} + 10 C_{14} w_{i+1,j+1} \\
& - 8 C_{14} w_{i+2,j+1} + 2 C_{14} w_{i+3,j+1} - 2 C_{13} C_{14} \\
w_{i-1,j} &+ (4+9 C_{13}) C_{14} w_{i,j} - (10+16 C_{13}) C_{14} w_{i+1,j} \quad (19) \\
& + (8+14 C_{13}) C_{14} w_{i+2,j} - (2+6 C_{13}) C_{14} w_{i+3,j} \\
& + C_{13} C_{14} w_{i+4,j}
\end{aligned}$$

식(18)과 식(19)를 식(13), (14), (15)에 대입한 후

$$C_9 = \frac{4D_{66}}{\Delta x^2}, \quad C_{10} = \frac{\Delta x^2}{D_{11}} = \frac{1}{C_4}, \quad C_{11} = \frac{1}{2\Delta y},$$

$$C_{12} = \frac{D_{66}}{\Delta x^2 \Delta y}, \quad C_{13} = \frac{C_6}{C_7}, \quad C_{14} = \frac{C_{12}}{C_{11}},$$

$$F_1 = C_4 + C_5, \quad F_2 = C_6 + C_7, \quad F_4 = -2C_2 C_9,$$

$$F_5 = -C_8 - C_2 C_9, \quad F_6 = 2C_3 - C_8, \quad F_7 = 2C_2 C_9 + 2C_8$$

$$F_8 = -4C_3 + 2C_8, \quad A_1 = C_2 C_{14},$$

$$A_2 = 14 C_3 C_{13} - 10 C_2 C_{14} - 14 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_3 = -14 C_3 C_{13} + 8 C_2 C_{14} + 14 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_4 = 6 C_3 C_{13} - 2 C_2 C_{14} - 6 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_5 = -C_3 C_{13} + C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_6 = -C_8 + 2 C_3 C_{13} - 2 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_7 = 2 C_8 - 9 C_3 C_{13} + 4 C_2 C_{14} + 9 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_8 = -C_8 + 16 C_3 C_{13} - 10 C_2 C_{14} - 16 C_2 C_{13} C_{14},$$

$$A_9 = C_4 - C_5 C_{13}, \quad A_{10} = C_6 - C_7 C_{13},$$

$$B_1 = 2 C_3 - C_8, \quad B_2 = C_4 + C_5, \quad B_3 = C_6 + C_7,$$

로 정의하여 정리하면 상부 자유단의 시작부분에 대해 다음 식(20), (21), (22)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
& (A_6) w_{i-1,j} + C_1 M_{x\ i-1,j} \\
& + (A_7) w_{i,j} - 4 A_1 w_{i,j+1} - 2 C_1 M_{x\ i,j} + 2 C_2 M_{y\ i,j+1} \\
& + (A_8) w_{i+1,j} + 10 A_1 w_{i+1,j+1} + C_1 M_{x\ i+1,j} \quad (20) \\
& + (A_3) w_{i+2,j} - 8 A_1 w_{i+2,j+1} \\
& + (A_4) w_{i+3,j} + 2 A_1 w_{i+3,j+1} \\
& + (A_5) w_{i+4,j} = -q(i,j)
\end{aligned}$$

$$M_x + (A_9) w_{i-1,j} - 2 A_9 w_{i,j} + (A_9) w_{i+1,j} = 0 \quad (21)$$

$$M_y + (A_{10}) w_{i-1,j} - 2 A_{10} w_{i,j} + (A_{10}) w_{i+1,j} = 0 \quad (22)$$

마찬가지로 상부 자유단의 끝부분에 대해 정리하면 다음 식(23), (24), (25)로 된다.

$$(A_6)w_{i-1,j} + C_1M_{xi-1,j} - 4A_1w_{i,j-1} + (A_7)w_{i,j} - 2C_1M_{xi,j} + 2C_2M_{yi,j-1} + 10A_1w_{i+1,j-1} + (A_8)w_{i+1,j} + C_1M_{xi+1,j} - 8A_1w_{i+2,j-1} + (A_3)w_{i+2,j} + 2A_1w_{i+3,j-1} + (A_4)w_{i+3,j} + (A_5)w_{i+4,j} = -q(i,j) \quad (23)$$

$$M_x + (A_9)w_{i-1,j} - 2A_9w_{i,j} + (A_9)w_{i+1,j} = 0 \quad (24)$$

$$M_y + (A_{10})w_{i-1,j} - 2A_{10}w_{i,j} + (A_{10})w_{i+1,j} = 0 \quad (25)$$

하부 자유단의 시작부분에 대한 차분식은 다음 식(26), (27), (28)로 된다.

$$(A_6)w_{i-1,j} + C_1M_{xi-1,j} - 4A_1w_{i,j-1} + (A_7)w_{i,j} - 2C_1M_{xi,j} + 2C_2M_{yi,j-1} + 10A_1w_{i+1,j-1} + (A_8)w_{i+1,j} + C_1M_{xi+1,j} - 8A_1w_{i+2,j-1} + (A_3)w_{i+2,j} + 2A_1w_{i+3,j-1} + (A_4)w_{i+3,j} + (A_5)w_{i+4,j} = -q(i,j) \quad (26)$$

$$M_x + (A_9)w_{i-1,j} - 2A_9w_{i,j} + (A_9)w_{i+1,j} = 0 \quad (27)$$

$$M_y + (A_{10})w_{i-1,j} - 2A_{10}w_{i,j} + (A_{10})w_{i+1,j} = 0 \quad (28)$$

하부 자유단의 끝부분에 대한 차분식은 다음 식(29), (30), (31)로 된다.

$$(A_5)w_{i-4,j} + (A_4)w_{i-3,j} + 2A_1w_{i-3,j+1} + (A_3)w_{i-2,j} - 8A_1w_{i-2,j+1} + (A_8)w_{i-1,j} + 10A_1w_{i-1,j+1} + C_1M_{xi-1,j} + (A_7)w_{i,j} - 4A_1w_{i,j+1} - 2C_1M_{xi,j} + 2C_2M_{yi,j+1} + (A_6)w_{i+1,j} + C_1M_{xi+1,j} = -q(i,j) \quad (29)$$

$$M_x + (A_9)w_{i-1,j} - 2A_9w_{i,j} + (A_9)w_{i+1,j} = 0 \quad (30)$$

$$M_y + (A_{10})w_{i-1,j} - 2A_{10}w_{i,j} + (A_{10})w_{i+1,j} = 0 \quad (31)$$

단순지지된 경계선에서는 처짐과 모멘트가 "0"이므로 차분식을 적용하지 않았다. 상기차분식을 나머지 전체 절점에 적용할 때 프리스트레스 힘이 작용하는 단순지지 경계점에 해당하는 모멘트(M_x)에는 프리스트레스 힘과 편심거리의 곱으로 계산되는 모멘트를 대입하여 행렬식을 풀면 해를 얻을 수 있다.

3. 수치해석

3.1 해석의 타당성과 정확성 검토

본 연구의 해석방법에 대한 타당성과 해석 결과에 대한 정확성을 입증하기 위해 등분포 수직

하중이 작용할 경우 단순보의 처짐과 슬래브 중앙에서의 처짐을 비교하였다. 이때 고려한 단면은 그림 2, 그림 3과 같다.

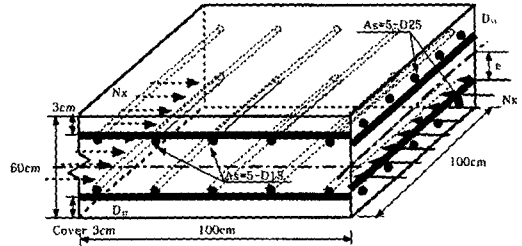


그림 2. 교량 상판의 단면

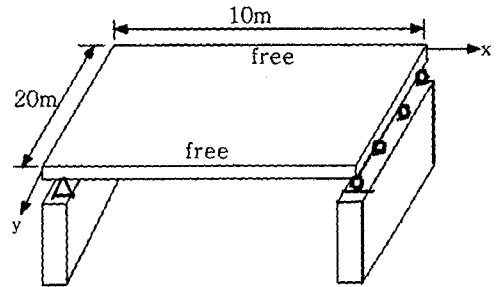


그림 3. 교량의 지지상태

콘크리트의 설계기준강도는 $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하였으며 그림 2에서 보인바와 같이 종방향 철근은 D25를 20cm 간격으로 배근하였고 횡방향 철근은 D13을 20cm 간격으로 배근하였다. 이때 상하 철근의 덮개는 3cm로 하였고 철근의 탄성계수는 $E_s = 2,000,000 \text{ kgf/cm}^2$, 콘크리트의 탄성계수는 $E_c = 15,000 \times \sqrt{f_{ck}} = 232,379 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하였다. 또한 철근의 포아손 비는 0.3으로 콘크리트의 포아손 비는 0.18로 하였다. 상기 물성을 이용하여 계산된 휨강성은 표 1에 나타내었고 메시 크기별 슬래브 중앙에서의 처짐과 단순보의 처짐 비교치를 표 2에 나타내었다.

표 1. 고려된 단면의 휨 강성 D_{ij} ($N \cdot m$)

D_{11}	483909280.00
D_{12}	78999832.00
D_{22}	443173824.00
D_{66}	177517632.00

표 2. 프로그램의 정확도
($L=10m, B=20m, q=8000 N/m^2$)

Mesh Analysis	0.5 ^m	1.0 ^m	1.1 ^m	1.2 ^m
	×	×	×	×
F.D.M.	0.0021 840467	0.0021 935618	0.0020 791225	0.0018 697391
Beam theory	0.0021526073			
Difference (FDM/(Beam theory)(%)	1.46	1.9	3.41	13.14

표 2에서 보여지듯이 적은 망 분할에서도 매우 높은 정도의 해석결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 망의 크기를 1.0m로 고정하고 교량 중심으로부터 편심거리가 0.2m 일 때, 축하중별 단면력과 처짐을 표 3, 표 4, 그리고 표 5에 제시하였으며 이것을 그림 4, 그림 5, 그리고 그림 6에 도시하였다.

표 3. 축방향력 증가에 따른 교량 중심선상 지점으로부터 위치별 처짐(m)

(Nx) 위치(m)	100kN	200kN	400kN	700kN	1000kN
1m	0.00220 3763	0.0020 20175	0.0016 50813	0.0010 91249	0.00052 4878
3m	0.00575 1269	0.0053 23599	0.0044 62569	0.0031 5677	0.00183 3337
5m	0.00708 8657	0.0065 79795	0.0055 55145	0.0040 00624	0.00242 438
7m	0.00575 127	0.0053 23573	0.0044 62567	0.0031 56793	0.00183 3345
9m	0.00220 3763	0.0020 20167	0.0016 50808	0.0010 91257	0.00052 4883

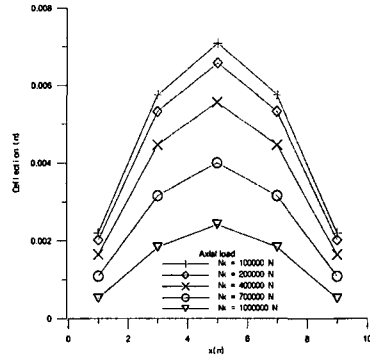


그림 4. 지간방향 거리에 따른 처짐

표 4. 축방향력 증가에 따른 교량 중심선상 지점으로부터 위치별 모멘트, M_x ($N \cdot m$)

(Nx) 위치(m)	100kN	200kN	400kN	700kN	1000kN
1m	105734 6172	85866 30469	46009 48828	-14063 23242	-74491 11719
3m	273697 25	25402 9.0781	21446 4.0781	154434 1719	93551.1 875
5m	329762 0625	31018 8.625	27073 0.75	210737 5781	149744 5
7m	273690 0313	25403 4.6406	21446 1.7656	154425 2813	93552.2 8125
9m	105735 2188	85864 21094	46009 19922	-14062 .31836	-74490 53125

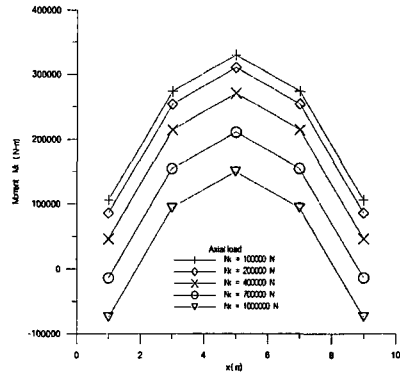


그림 5. 지간방향 거리에 따른 모멘트 M_x

표 4. 축방향력 증가에 따른 교량 중심선상 지점
으로부터 위치별 모멘트, M_x ($N \cdot m$)

(Nx) 위치(m)	100kN	200kN	400kN	700kN	1000kN
1m	15817.1 2402	12674. 17578	6372.0 48828	-3119. 869873	-12662. 23535
3m	40896.2 5391	37959. 125	32032. 12891	23052.2 9297	13964.5 0586
5m	49158.2 6172	46290. 01563	40513. 36719	31740.9 1406	22831.5 7227
7m	40899.7 2266	37955. 1875	32033. 68164	23055.5 7617	13965.2 3535
9m	15817.1 2402	12674. 27148	6372.5 67383	-3120. 396973	-12662. 45996

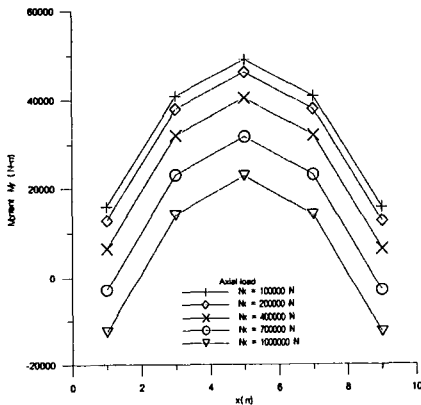


그림 6. 지간방향 거리에 따른 모멘트 M_y

4. 결론

본 논문은 포스트 텐션된 철근콘크리트 슬래브 교량에 대해 특별직교 이방성 판 이론을 이용한 해석방법을 제시하였다. 이때 배근된 철근층을 한 개의 Ply로 간주하여 강성을 계산하였고 특별 직교이방성 판의 평형방정식을 유한차분법에 의해 해석하였다.

단순지지되고 등분포 수직하중을 받는 슬래브에 대해 망의 크기별로 단순보의 경우와 비교하여 본 해석법의 정확성을 입증하였다.

본 논문에서 제시한 축방향 압축력과 단부 모멘트 그리고 등분포 수직하중을 받는 철근콘크리트 슬래브 교량에 대한 단면력과 처짐값은 새로

운 교량의 설계나 기존 교량의 유지 및 보수.보강 시 매우 유효한 자료라고 사료된다.

참고문헌

- (1) Kim, D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN SPON, London, 1995.
- (2) Kim, D. H., "A Simple Method of Analysis for the Preliminary Design of Particular Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction", Journal of Material Processing Technology 55, London, 1995, pp 242-248.
- (3) 김덕현, 원치문, 심도식, 이원석, "양단단순-타단자유 지지된 적층복합판의 처짐에 대한 종방향 모멘트 무시효과", 한국전산구조공학회 가을학술발표회 논문집, 1998, pp.77-83.
- (4) 김덕현, 원치문, "복합적층판으로 구성된 토목건설용 구조물의 예비설계를 위한 간편해석법", 한국복합재료학회지, 제13권 2호, 2000, pp.30-39.
- (5) Kim, D. H., "Design of Composite Material Structures", Proc. of China-Japan-USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering, Nov.5~9, Harbin, 1991, pp 1-5-1~1-5-10.
- (6) Tsai, S. W., Composite Design, 4th Ed., Think Composite, Dayton, Ohio, 1998.