

매크로 요소를 사용한 판형교 바닥판의 휨거동 해석

A Study on the Flexural Behavior of Plate Girder Bridge Decks Using a Macro-Element

최진유* 양기재** 박남희*** 강영종****
Choi, Jin-Yu Yang, Gi-Jae Park, Nam-Hoi Kang, Young-Jong

요 지

교량 바닥판 설계에 대한 현 시방규정은 바닥판 슬래브가 처짐이 구속된 거더에 연속 지지되어 있다고 가정하므로, 바닥판 지간 중앙의 정모멘트와 거더 상단에 발생하는 부모멘트의 크기가 같은 것으로 간주하고 있다. 그러나 바닥판에 발생하는 휨모멘트는 거더의 처짐에 의해서 많은 영향을 받고 있으며, 거더의 처짐을 고려치 않는 현 시방규정에 의해 설계된 바닥판은 상부철근의 부식으로 인한 내구성 저하와 유지보수 비용 증가 등의 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 매크로 요소를 이용해 거더의 처짐 효과를 고려할 수 있는 해석법을 개발하였고, 이를 유한요소법을 통해 검증하였다. 또한, 이 해석법을 바탕으로 바닥판의 횡방향 휨모멘트에 영향을 미치는 여러 변수에 대한 분석을 수행하였다. 해석 결과, 바닥판의 지점부 모멘트는 거더의 간격뿐만 아니라 거더와 바닥판의 휨강성비, 교량의 길이, 하중의 재하위치, 거더의 비틀림 강성, 가로보의 휨강성과 배치 간격 등에 많은 영향을 받고 있는 것을 알 수 있으며, 영향선을 이용해 최대하중 위치를 결정하여 몇 개의 예제 교량을 대상으로 지점부의 설계모멘트를 계산해 본 결과, 현 시방규정이 다소 보수적인 값을 나타내고 있다.

핵심어 : 교량, 바닥판, 부모멘트, 상대처짐, 상대강성비, 슬래브

Abstract

Current specification prescribes that upper and lower reinforcement mat is required in the same amount to resist negative and positive moment in bridge decks. But the negative moment is much smaller than positive moment because the actual behavior of decks consists of local deflection of slab and global deflection of girder. From this study, the analysis method based on harmonic analysis and slope-deflection method was developed and verified by finite element method. The negative moment, obtained from this method, were smaller than those computed based on the KHBDC specifications as much as 40~50% in the middle of bridge. The amount of reduction of the design negative moment was shown herein to be dependent on variable parameters as shape factor(S/L) of slab, relative stiffness ratio of girder and deck slab, and so on. This investigations indicate that the upper reinforcement mat to resist negative moment can be removed. But further experimental study is required to consider durability and serviceability. From this new design concept, the construction expense can be reduced and the problem of decreasing durability resulting from corrosion of upper reinforcement steel settled.

Keywords : bridge, deck, negative moment, relative displacement, relative stiffness ratio, slab

* 학생회원 · 고려대학교 부설 방재과학기술 연구센터, 선임연구원

** 만영엔지니어링 부설연구소, 연구원

*** 고려대학교 토목환경공학과, 박사과정

**** 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과, 부교수

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

1930년대에 Westergaard는 양단이 단순 지지된 무한판의 집중하중에 의한 정모멘트를 수식적으로 유도했으며, 이 식을 바탕으로 AASHTO나 한국의 도로교시방서(KHBDC)에서 제시하고 있는 바닥판의 설계모멘트 식이 발전되어왔다.¹⁶⁾ 그러나 이 식은 바닥판 슬래브가 처짐이 구속된 거더에 연속 지지되어 있다고 가정하므로, 단지 거더의 간격(S)과 하중의 크기(P)만의 함수로 구성되어 있어 실제 바닥판의 거동을 정확하게 묘사하고 있지 못할 뿐만 아니라, 연속 바닥판의 경우 바닥판의 거더 중앙에 발생하는 정모멘트와 거더 상단에 발생하는 부모멘트의 크기가 같은 것으로 간주하고 있다. 또한 부모멘트에 해당하는 상부의 인장철근은 콘크리트 덮개의 크기가 상대적으로 작으므로 이를 따라서 온도 변화나 건조수축에 의한 미세 균열이 집중되기 쉬우며, 이 균열의 틈으로 빗물이나 기타 화학적 변화를 일으킬 수 있는 물질이 침투하여 상부철근의 부식을 촉진시켜, 결과적으로 바닥판의 내구성을 저하시키고 교량의 유지보수 비용을 증가시키는 문제점을 가지고 있다.⁴⁾

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 Bazant나 Csagoly 등의 연구에서 알 수 있듯이 상부 철근의 지름을 줄여 콘크리트 덮개와 철근 지름의 비를 증가시키는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 바닥판의 부모멘트를 정확하게 산정할 필요가 있다. 또한 바닥판의 거동에 관한 최근의 실험에 의하면^{7,8)} 실제 바닥판의 횡방향 모멘트는 거더의 처짐이 구속된 경우 하중에 의한 국부처짐 효과와 거더 시스템의 전체처짐 효과의 중첩으로 설명할 수 있으며, 거더의 상대처짐 현상에 의해서 바닥판의 부모멘트는 상당히 감소하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 거더의 상대처짐을 고려할 수 있는 간략 해석법을 개발하여 바닥판의 지점부에 발생하는 횡방향 부모멘트에 대한 매개변수 분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 몇 개의 예제 교량의 설계 부모멘트를 산정하여 현 시방규정과 비교하였다.

2. 바닥판 설계에 대한 시방규정의 검토

식(1)은 각각 한국의 도로교 시방서와 일본의 도

로교 시방서(JHBDC), AASHTO에서 제시하고 있는 교량 바닥판의 횡방향 휨모멘트 설계식을 나타내고 있으며, 이에 따라 거간에 따른 휨모멘트를 계산하면 그림 1과 같다. 이와 같이 바닥판 설계에 대한 각국 시방규정은 바닥판의 휨모멘트를 거더간격과 후륜하중의 크기만으로 표현하고 있음을 알 수 있으며, 그 중 한국의 도로교 시방서에서 사용하고 있는 트럭하중의 후륜하중이 9.6ton으로 가장 크고, 설계 휨모멘트 식도 가장 보수적인 것으로 나타나고 있다.

또한 식(1)은 단순바닥판의 정모멘트에 대한 설계식이므로 3개 이상의 거더로 연속 지지된 연속바닥판의 정모멘트와 부모멘트는 0.8의 연속계수(Continuity Factor)를 단순판의 정모멘트식에 곱해 사용하도록 하고 있다. 따라서 식(1)의 시방규정을 사용할 경우에는 바닥판의 상·하부에는 같은 량의 인장철근이 배근되므로, 거더의 상대처짐에 의한 바닥판의 지점부 부모멘트 감소효과를 반영하지 못하고 있다.

표 1 시방서별 트럭하중

시방서	트럭하중	후륜하중
KHBDC	DB-24	9.6ton
JHBDC	T-20	8.0ton
AASHTO	HS-20	7.3ton

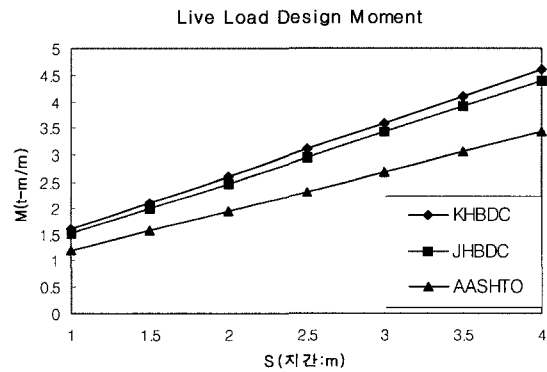


그림 1 거간에 따른 시방서별 바닥판 설계모멘트

$$M = \frac{L+0.6}{9.6} P, M_t = (0.12L + 0.07)P \quad (t \cdot m/m),$$

$$M = \left(\frac{S+2}{32} \right) P \quad (lb \cdot ft/ft) \quad (1)$$

3. 거더의 상대처짐을 고려한 바닥판의 간략 해석법 개발

사용하중 상태에서 바닥판의 휨거동은 거더의 처짐이 구속된 경우 하중에 의한 판의 국부처짐 효과와 거더의 처짐에 의해서 발생하는 전체처짐 효과를 중첩하여 해석할 수 있다. 또한 바닥판은 두께에 비해 그 처짐량이 상당히 작으므로 얇은판 이론을 적용하여 해석할 수 있다. 본 연구에서는 판과 보의 매크로 요소에 조화해석법(Harmonic Analysis)을 적용하여 각 요소의 응답을 결정하였으며, 처짐각법(Slope-Deflection Method)의 원리를 적용하여 거더와 바닥판의 상호관계를 모델링하였다. 또한 유연도법(Flexibility Method)을 이용하여 가로보와 내부지점 효과를 묘사하였다.

바닥판에 작용하는 하중은 Fourier전환을 이용해 조화함수의 급수형태로 나타낼 수 있으며, 그 중 한 항을 판에 작용시키면, 판의 지점에 발생하는 처짐(Δ), 처짐각(ϕ), 모멘트(M), 수직반력(R) 등의 응답요소도 그와 같은 주기를 갖는 조화함수로 표현할 수 있다. 또한 바닥판의 지점인 거더에도 조화함수 형태의 수직력(F)과 비틀림 모멘트(M_T)가 작용하게 되므로 마찬가지로 조화해석법을 적용하여 해석할 수 있다.

조화해석법을 이용해 판과 거더의 응답을 결정 한 후에 처짐각법을 적용하면 바닥판의 각 지점에 발생하는 모멘트와 수직반력은 그 지점의 처짐각(ϕ)과 처짐(Δ)의 함수로 나타낼 수 있으며, 식(2), 식(3)과 같이 각 지점의 모멘트 및 수직력의 평형방정식을 조합함으로써 각 조화함수의 증폭계수를 결정할 수 있다.

- 거더의 처짐이 구속된 경우 (국부처짐 효과)

$$[K]\{\phi_{(i)}\} = \{-M_{(i)S}\} \quad (2)$$

- 거더의 상대처짐 효과 (전체처짐 효과)

$$\begin{bmatrix} [Q^A] & [K] \\ [T] & [Q^B] \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \{\Delta_{(i)}\} \\ \{\phi_{(i)}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{0\} \\ \{-R_{(i)}\} \end{pmatrix} \quad (3)$$

- 가로보 및 내부지점 효과

$$\{R_c\} = -[I] + [[K]_{(i)}] \cdot [W]^{-1} \cdot [[K]_{(i)}] \cdot \{db\} \quad (4)$$

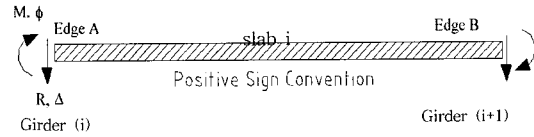


그림 2 바닥판 슬래브의 기호정의

식(2)는 거더의 처짐이 구속된 경우로, 지점의 모멘트 평형에 의해서 처짐각(ϕ)만의 함수로 평형방정식을 구성할 수 있으며, 식(3)의 거더간 상대 처짐 효과는 지점의 모멘트와 수직력의 평형방정식을 이용해 ϕ 와 Δ 를 결정할 수 있다. 또한 식(2)와 식(3)의 행렬 $[Q]$, $[K]$, $[T]$ 는 바닥판의 형상(S, L)과 휨강성(D), 거더의 비틀림 강성(GJ) 및 휨 강성(EI)에 의해서 결정되는 강성계수(Stiffness Factor)이며, 행렬 $\{-M_{(i)S}\}$ 는 조화하중에 의해서 각 지점에 발생하는 고정단 모멘트의 합을 나타낸다. 그리고 식(3)의 $\{-R_{(i)}\}$ 는 거더의 처짐이 구속된 경우 거더에 전달되는 수직 반력의 합을 나타낸다.

식(4)는 유연도법을 이용해 가로보에서 거더로 전달되는 반력을 계산하는 식으로, $[K]_{(i)}$ 는 각 가로보를 절점당 2개의 자유도를 갖는 보요소로 모델링할 경우의 강성행렬을 나타내며, $[W]$, $\{db\}$ 는 가로보의 자유도에 해당하는 단위하중을 바닥판에 가할 경우 가로보가 없는 바닥판의 변위를 나타내는 유연도 행렬과 외부하중이 작용할 때 가로보 위치에서의 변위를 나타내는 행렬이다. 내부지점의 경우에는 강성행렬 $[K]_{(i)}$ 를 그에 맞게 조정함으로써 반력을 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산된 가로보나 내부지점의 반력을 바닥판의 외부하중과 같이 작용시켜 식(2)와 식(3)을 통해 지점부 바닥판의 횡방향 모멘트를 계산할 수 있다.

윤하중과 같은 집중하중부에 발생하는 바닥판의 정모멘트는 윤하중의 분포폭을 AASHTO의 3.24.4의 규정에 따라 직사각형의 등분포형태로 가정하여 계산하였으며, 네변이 단순지지된 판에 등분포 형태로 치환된 집중하중에 의해 발생하는 모멘트와 처짐각법을 이용해 이미 계산된 바닥판의 지점부 모멘트에 의한 효과(Continuity Effect & Relative Girder Deflection)를 중첩하여 계산하였다.

위와 같은 해석과정을 이용해 유한요소법 등을 이용하지 않더라도 단시간 내에 바닥판의 휨거동을 정확히 묘사할 수 있는 해석 프로그램(ASGB)을 작

성하였으며, 이를 이용하여 바닥판의 휨모멘트에 대한 매개변수 분석을 수행하였다.

4. 바닥판의 횡방향 모멘트에 대한 매개변수 분석

바닥판의 횡방향 모멘트에 영향을 미치는 변수로는 식(1)에서와 같이 바닥판의 폭(거더간격, S)과 하중하중의 크기(P)를 들 수 있으며, 거더의 처짐에 의한 전체처짐 효과와 바닥판의 국부처짐 효과에 모두 영향을 미치는 바닥판과 거더의 상대휨강성비(H), 거더의 비틀림 강성, 가로보의 간격 및 휨 강성, 하중 재하위치 등이 있다. 다른 변수들을 고정시킨 상태에서 각 인자들에 대한 효과를 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 국부처짐 효과와 거더의 전체처짐 효과를 분리하여 해석하였다.

4.1 바닥판 형상의 영향(S, L)

4.1.1 거더의 처짐이 구속된 경우(바닥판의 국부처짐)

하중이 바닥판의 일정한 위치에 고정되어 있는 경우 바닥판의 내측지점부에 발생하는 횡방향 모멘트는 그림 3 및 표 2와 같은 분포를 나타낸다. y/L 이 0인 경우, 즉 하중위치에서 최대 부모멘트가 발생하고 있으며, 하중에서 S만큼 떨어진 경우 그 값이 최대값의 10%이하로 급격히 감소하고 있다. 또한 바닥판의 형상비(S/L)이 0.5이하일 경우에는 최대 부모멘트 값이 일정한 값을 유지하고 있으며, 0.5이상부터는 그 값이 조금씩 작아지면서 전체 분포면적이 증가하고 있다. 이러한 경향은 판의 이방향 거동성과 관련이 있다. 형상비가 0.5이하일 경우에는 그림 3과 같이 모멘트 분포가 교량 양단의 영향을 받지 않기 때문에 일방향으로만 거동하며 따라서 하중재하 위치에 따라 최대 부모멘트값은 일정한 값을 가지게 된다. 반면에 형상비가 0.5이상일 경우에는 교량 양단의 영향을 받기 시작하므로 바닥판은 이방향으로 거동하게 되어 최대 부모멘트는 감소하는 반면 분포 면적이 증가하여 내측 지점의 전체 모멘트 합이 증가하고 있다. 따라서 내측 지점부에 발생하는 횡방향 모멘트의 경우에는 윤하중의 영향분포를 그림 3과 같이 2S정도로 가정할 수 있게 된다.

S/L-My 분포 곡선(거더의 처짐이 구속된 경우)

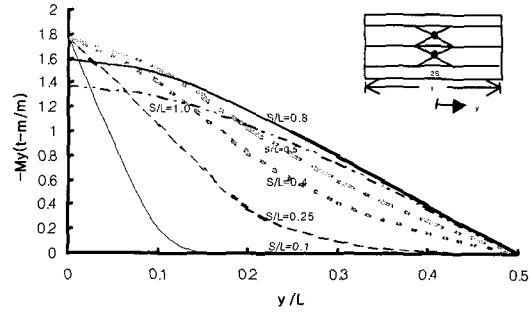


그림 3 바닥판의 지점부 부모멘트 경향

표 2 바닥판의 지점부 부모멘트 (3거더, t·m/m)

y/L	S/L=0.1	S/L=0.25	S/L=0.5	S/L=0.8	S/L=1.0
0	1.77E+00	1.77E+00	1.77E+00	1.60E+00	1.37E+00
0.1	1.97E-01	1.04E+00	1.52E+00	1.48E+00	1.29E+00
0.2	-1.35E-03	3.67E-01	1.03E+00	1.18E+00	1.06E+00
0.3	-9.76E-04	9.96E-02	5.98E-01	7.93E-01	7.38E-01
0.4	-4.28E-05	1.94E-02	2.69E-01	3.95E-01	3.76E-01
0.5	0	0	0	0	0

4.1.2 거더간 상대처짐 효과(거더 시스템의 전체처짐)

거더의 처짐에 의해서 바닥판의 내부 지점에 발생하는 횡방향 모멘트는 바닥판의 국부처짐에 의한 모멘트와는 달리 바닥판의 형상비(S/L)에 따라서 결정되는 것이 아니라 거더간격(S)과 거더의 길이(L)에 각각 영향을 받게 된다. 그림 4와 같이 거더의 길이와 하중 재하위치를 고정시킨 경우 바닥판의 내측 지점 모멘트는 S가 증가함에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이며 형상비가 0.1~0.15 범위에 있을 때 최대값을 나타낸다. 판의 지점에 조화함수의 처짐이 발생할 경우 지점에 발생하는 횡방향 모멘트 값은 식(5)와 같은 강성계수와 처짐량의 곱으로 표현된다. 따라서, 거더 간격(판의 폭, b)이 증가하여 표 3과 같이 내측 거더의 하중분담율이 증가하고 그에 따라 거더간 상대처짐량도 증가하게 되지만 그에 따른 강성계수에 의해서 횡방향 모멘트는 다시 감소하는 경향을 나타낸다.

$$Q = \beta^2 \left[\frac{\sinh^2 \beta + \beta^2}{\sinh^2 \beta - \beta^2} + \nu \right] \frac{D}{b^2}, \quad \beta = \frac{n\pi b}{a} \quad (5)$$

표 3 S, L의 변화에 따른 거더의 상대처짐 효과-부모멘트 감소 효과(3거더)

L=10m S	상대 처짐량	하중분배율(%)			바닥판 모멘트 (t-m/m)	S=2m L	상대 처짐량	하중분배율(%)			바닥판 모멘트 (t-m/m)
		외측거더	내측거더	합				외측거더	내측거더	합	
0.33	5.13E-06	31.21	36.34	98.76	2.90E-01	5	4.54E-05	17.95	51.39	87.30	2.05E-02
0.50	1.26E-05	30.49	37.17	98.15	3.37E-01	10	2.13E-04	23.38	45.95	92.71	4.17E-01
1.00	6.24E-05	28.39	39.51	96.28	4.58E-01	15	2.78E-04	27.48	39.65	94.61	5.60E-01
1.17	8.71E-05	27.55	40.56	95.67	4.79E-01	20	2.73E-04	29.14	37.33	95.61	5.55E-01
1.33	1.14E-04	26.67	41.72	95.05	4.85E-01	25	2.61E-04	29.93	36.37	96.23	5.42E-01
1.67	1.67E-04	24.93	44.01	93.87	4.65E-01	30	2.52E-04	30.41	35.81	96.63	5.37E-01
2.50	2.64E-04	21.58	47.87	91.02	3.32E-01	50	2.27E-04	31.40	34.65	97.44	5.37E-01
4.00	3.20E-04	18.81	48.46	86.09	1.54E-01	100	1.70E-04	32.14	33.77	98.05	5.37E-01

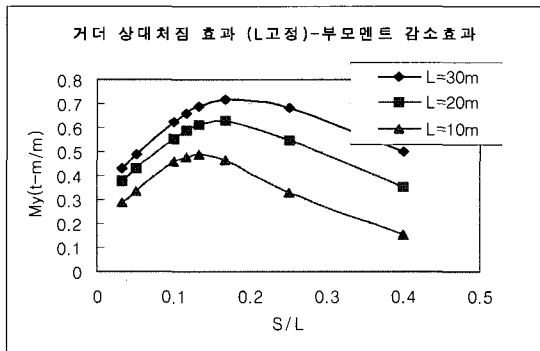


그림 4 S의 변화에 따른 상대처짐 효과

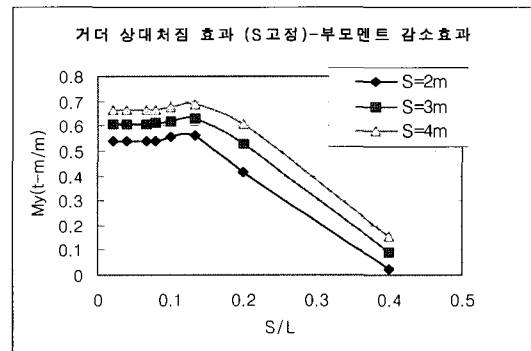


그림 5 L의 변화에 따른 상대처짐 효과

여기서, a : 판의 길이(거더 길이, L), b : 판의 폭(거더 간격, S), D : 바닥판의 횡강성

반면에 S를 고정시키고 L을 변화시킬 경우에는 바닥판에 의한 하중분배 효과가 증가하여 내측과 외측 거더의 하중분배율이 비슷해지고 있으며, 판의 이방향성이 감소하므로 거더의 종방향 모멘트 분담율이 100%에 근접하고 있다. 또한 L이 증가함에 따라 거더의 휨 강성 감소와 거더간 하중분배 차이의 효과를 동시에 받게 되므로 상대처짐량은 일정 범위까지 증가하다가 천천히 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 상대처짐에 의한 바닥판의 지점부 모멘트는 상대처짐량이 감소하기 시작하더라도 그 값이 일정하게 유지되는 경향이 있으며, 이는 판의 횡방향 모멘트는 포아손 효과에 의해서 횡방향 곡률 외에도 종방향 곡률의 영향을 받기 때문이다. 즉, L이 증가할수록 상대처짐량에 의한 횡방향 곡률은 작아

지더라도 종방향 곡률은 계속적으로 증가하므로 표 3과 그림 5와 같이 일정한 값을 나타내게 된다. 거더의 개수나 간격, 강성, 혹은 하중의 위치가 바뀌더라도 이러한 경향은 일정하게 유지되며, 형상비가 0.05이하가 될 때는 바닥판 지점부 모멘트는 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

그러나 거더간격(S)이 변할 경우 그에 따라 최대 부모멘트를 일으키는 하중의 재하수와 위치가 변할 수 있으므로 거더의 길이(L)에 따른 부모멘트 변화에 더 주목할 필요가 있으며, 거더의 길이가 증가할수록 상대처짐 효과에 의해 부모멘트가 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2 하중 재하위치의 영향

4.2.1 종방향 하중위치의 변화

DB-24 트럭하중의 후륜하중을 그림 6과 같이

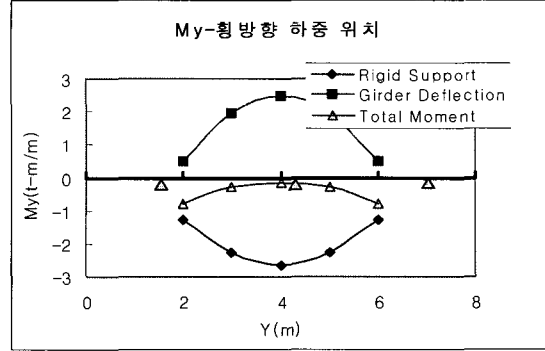
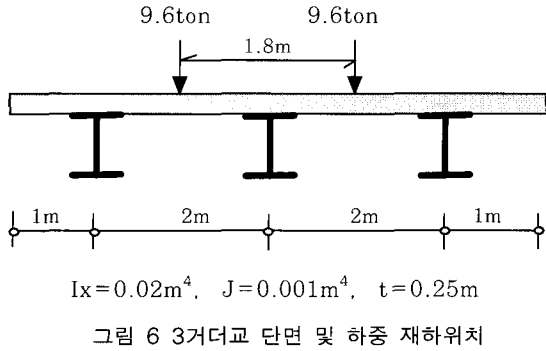


그림 8 하중의 횡방향 위치에 따른 바닥판 부모멘트

은 무시하고 거더의 단면2차 모멘트를 0.011237m^4 으로 고정한 경우이다. 그래프상의 각 점들은 양 후륜 하중의 중앙점을 나타낸다.

거더의 처짐이 구속된 경우에는 윤하중이 내측거더에 대칭으로 재하될 때 최대 부모멘트가 작용하게 되지만, 이 위치에서 상대처짐에 의한 부모멘트 감소 효과도 최대로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 거더의 상대처짐 효과를 고려할 경우 최대 부모멘트를 일으키는 하중위치가 변하게 되며, 설계 모멘트를 결정할 때에도 이런 효과를 고려해야 할 것으로 생각된다.

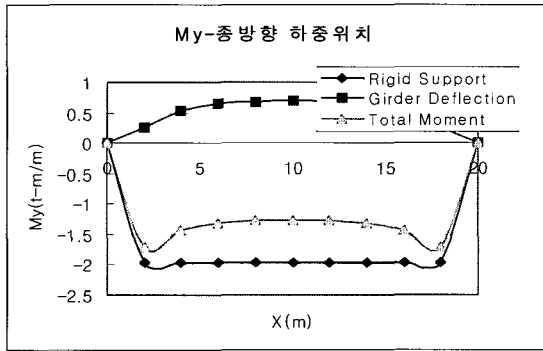


그림 7 하중의 종방향 위치에 따른 바닥판 부모멘트

재하하고 이를 바닥판 종방향으로 이동시킬 경우 재하위치에서 바닥판의 국부처짐(거더의 처짐이 구속된 경우, Rigid Support)에 의한 바닥판 내부지점의 횡방향 모멘트는 교량 양단의 영향을 받지 않는 범위에서 일정한 값을 유지하게 된다. 즉, 하중의 종방향 $S(X(L-S))$ 의 범위에 있을 때에는 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 국부처짐 효과는 일정한 값을 가지게 된다. 단지 거더의 상대처짐 효과(Girder Deflection)만이 교량중앙으로 이동할수록 큰 값을 가지게 된다. 따라서 그림 7과 같이 교량 중앙에서 부모멘트가 가장 작게 발생함을 알 수 있다.

4.2.2 횡방향 하중위치의 변화

DB-24 트럭하중을 횡방향으로 이동시킬 경우 바닥판의 내부지점부 모멘트는 그림 8과 같이 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 국부처짐 효과와 거더의 상대처짐 효과가 중첩되어 나타나게 된다. 그림 8은 캔틸레버 판의 폭과 거더 간격이 각각 1.5m, 3m이고 교량길이가 30m인 교량으로 거더의 비틀림 강성

4.3 거더와 바닥판의 강성비 영향

거더의 종방향 휨강성에 대한 바닥판의 횡방향 휨강성비를 상대강성비(H)로 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

$$H = \frac{EI_{Girder}}{D_{Slab}} \quad (6)$$

일반적으로 거더로의 하중분배에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 거더의 간격과 이러한 상대강성비에 의한 바닥판의 하중분배효과를 들 수 있다. 표 3에서와 같이 거더간격이 증가할수록 내측거더의 하중분담율이 증가하고 있으며, 바닥판의 두께가 증가할수록 각 거더로의 하중분배는 더 균등하게 이루어고 있다. 그러나 대개의 시방서에서는 거더간격만의 함수로 하중분배율을 계산하고 있으며, 미국 철도시방서(AREA Code)에서만 상대강성비의 개념을 도입

하여 철도교의 거더 설계에 사용하고 있다.

바닥판의 횡방향 모멘트도 이러한 상대강성비의 영향을 받게 된다. 이는 거더간 상대처짐효과가 거더와 바닥판의 강성비에 따라 변하기 때문이며 그림 9와 같이 탄성 지지된 연속보의 거동을 살펴보면 쉽게 이해할 수 있다.

그림에서 상대강성비는 스프링의 강성 k 와 보의 휨강성 EI/S^3 의 비로 정의할 수 있으므로 보의 내부지점에 발생하는 모멘트는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 식(7)에서 H 가 8이하일 경우에는 스프링 강성이 상대적으로 작아져서 보의 국부적인 처짐 현상보다는 탄성지점이 전체처짐 효과가 보의 거동을 지배하게 되어 내부지점에는 오히려 정모멘트가 작용하게 된다. 그리고 H 가 증가함에 따라 국부처짐 효과가 점점 증가하게 되고 전체처짐 효과는 감소하면서 내부지점에는 부모멘트가 도입되기 시작한다.

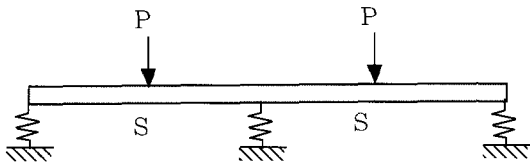


그림 9 탄성 지지된 연속보

$$M = \frac{3S(8EI - kS^3)P}{16(9EI + kS^3)} = \frac{3S(8-H)P}{16(9+H)} \quad (7)$$

바닥판의 횡방향 모멘트도 탄성 지지된 연속보와 같이 거동하게 되어, 거더와 바닥판의 상대강성비는 바닥판 모멘트가 국부처짐(거더의 처짐이 구속된 경우)의 영향을 많이 받을 것인지를, 거더 시스템의 전체처짐(거더의 상대처짐 효과)의 영향을 많이 받게 되는지를 결정하게 된다. 표 4의 좌측은 바닥판의 두께를 0.25m로 고정시키고 거더의 단면이차모멘트를 증가시켜 상대강성비를 변화시킨 경우를 비교한 것이다. 거더의 강성이 상대적으로 증가함에 따라 하중분배효과가 감소하여 내측거더의 모멘트가 증가하고 있으며, 거더의 강성증가에 따라 각 거더의 처짐량이 감소하므로 거더의 전체처짐에 의해 발생하는 바닥판 모멘트도 감소하는 것을 알 수 있다. 표 4의 우측과 같이 바닥판의 두께를 감소시킨 경우, 바닥판의 횡방향 휨거동에 의한 하중분배효과가 감소하므로 마찬가지로 내측거더의 모멘트만 증가하고 있으며, 거더의 강성이 고정되어 있는 상태이므로 하중분배효과만에 의해서 상대처짐량이 증가하고 있다. 그러나 상대처짐량의 증가보다도 두께 감소에 따른 바닥판의 휨강성 감소 효과가 더 크게 작용하므로 거더간 상대처짐에 의한 바닥판 모멘트는 결국 감소하는 결과를 나타낸다. 또한, 상대강성비가 일정한 값을 갖는다면 두 경우 모두 바닥판 모멘트와 거더에 발생하는 모멘트가 같은 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 거더간 상대처짐량은 두 경우가 다른 값을 나타내므로 바닥판과 거더의 휨강성이 각각 영향

표 4 상대강성비에 따른 바닥판의 내부지점 모멘트(ton, m, 하중재하위치:그림6)

H	Girder I	바닥판 모멘트			상대 처짐량 Relative D	거더 모멘트		바닥판 두께 t	바닥판 모멘트			상대 처짐량 Relative D	거더 모멘트	
		Rigid	Girder D.E.	Total		Outer	Inner		Rigid	Girder D.E.	Total		Outer	Inner
20	0.003	-1.80	0.98	-0.82	2.7E-04	27.19	30.38	0.481	-1.80	0.98	-0.82	3.8E-05	27.19	30.38
40	0.006	-1.80	0.79	-1.00	2.9E-04	28.07	32.57	0.382	-1.80	0.79	-1.00	8.2E-05	28.07	32.57
60	0.008	-1.80	0.71	-1.09	2.9E-04	28.23	33.65	0.333	-1.80	0.71	-1.09	1.2E-04	28.23	33.65
80	0.011	-1.80	0.65	-1.15	2.9E-04	28.23	34.37	0.303	-1.80	0.65	-1.15	1.6E-04	28.23	34.37
100	0.014	-1.80	0.61	-1.19	2.8E-04	28.17	34.92	0.281	-1.80	0.61	-1.19	2.0E-04	28.17	34.92
120	0.017	-1.80	0.58	-1.22	2.8E-04	28.08	35.39	0.265	-1.80	0.58	-1.22	2.3E-04	28.08	35.39
160	0.022	-1.80	0.54	-1.26	2.7E-04	27.89	36.15	0.240	-1.80	0.54	-1.26	3.0E-04	27.89	36.15
200	0.028	-1.80	0.51	-1.29	2.6E-04	27.68	36.79	0.223	-1.80	0.51	-1.29	3.7E-04	27.68	36.79
240	0.034	-1.80	0.48	-1.32	2.6E-04	27.48	37.35	0.210	-1.80	0.48	-1.32	4.3E-04	27.48	37.35
280	0.039	-1.80	0.46	-1.34	2.5E-04	27.28	37.87	0.200	-1.80	0.46	-1.34	4.9E-04	27.28	37.87
300	0.042	-1.80	0.45	-1.35	2.5E-04	27.18	38.11	0.195	-1.80	0.45	-1.35	5.2E-04	27.18	38.11

을 미침을 알 수 있다.

결론적으로 상대강성비가 감소할수록 바닥판의 지점부 부모멘트가 감소하고, 거더간 하중분배효과도 증가하는 것을 알 수 있다.

4.4 거더의 비틀림 강성의 영향

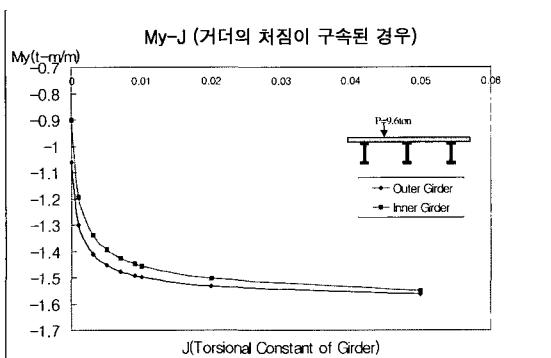
거더의 비틀림 강성(GJ)은 바닥판의 국부처짐 효과와 거더의 전체처짐 효과에 모두 영향을 미친다. 국부처짐 효과에 의한 바닥판 모멘트는 거더의 비틀림 강성과 바닥판의 휨강성비(GJ/D)에 의해 변하게 되며, 거더의 비틀림 강성증가와 바닥판의 두께 감소가 표 5와 같이 서로 같은 효과를 가지게 된다. 표 5는 그림 10의 (b)와 같이 하중을 재하한 경우로 내부지점은 회전이 구속된 고정단과 같이 거동하게 된다. 이런 경우에 각 지점의 비틀림 강성을 증가시키

게 되면 두 지점이 모두 고정단(Fixed End)의 상태로 수렴하게 되므로 내부지점 모멘트는 감소하고 외부지점의 모멘트가 증가하게 된다. 그러나 (a)와 같이 하중을 대칭으로 재하하지 않고 단면 상태도 그 지점에 대해 대칭이 아니라면 내부지점과 외부지점의 회전이 구속된 상태가 아니기 때문에 거더의 비틀림 강성이 증가함에 따라 양 지점의 부모멘트가 증가하면서 모두 고정단 모멘트로 수렴하게 된다.

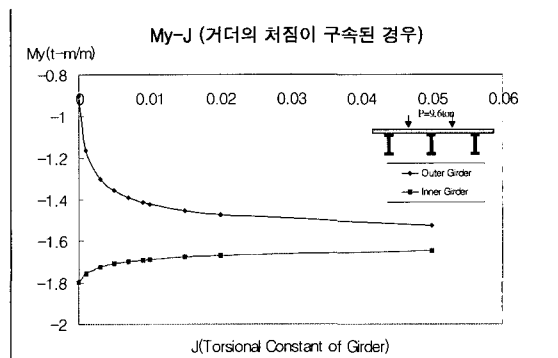
거더의 비틀림 강성이 증가하게 되면, 하중 재하 위치와 상관없이 지점 상태가 고정단으로 수렴하게 되어 외측과 내측의 지점 반력이 같아지므로 거더간 상대처짐량이 감소하게 된다. 따라서 하중이 (a)와 같이 재하된 경우에는 바닥판의 내부지점 모멘트는 거더의 비틀림 강성이 증가함에 따라 상대처짐 효과는 감소하고 국부처짐에 의한 부모멘트가 증가하므로 전체 부모멘트는 증가하게 된다.

표 5 거더의 비틀림 강성에 따른 바닥판 모멘트

GJ/D	J	내측 지점 바닥판 모멘트			상대처짐	t	내측 지점 바닥판 모멘트			상대처짐
		Rigid	Girder D	Total			Rigid	Girder D	Total	
0.00	0	-1.80	0.56	-1.24	2.73E-04					
2.74	0.001	-1.76	0.56	-1.20	2.47E-04	0.250	-1.76	0.56	-1.20	2.47E-04
8.21	0.003	-1.72	0.54	-1.19	2.11E-04	0.173	-1.72	0.41	-1.32	5.56E-04
13.69	0.005	-1.71	0.51	-1.20	1.87E-04	0.146	-1.71	0.34	-1.37	7.50E-04
19.17	0.007	-1.70	0.49	-1.21	1.70E-04	0.131	-1.70	0.29	-1.40	8.86E-04
24.64	0.009	-1.69	0.47	-1.22	1.56E-04	0.120	-1.69	0.26	-1.43	9.87E-04
27.38	0.01	-1.69	0.46	-1.23	1.50E-04	0.116	-1.69	0.25	-1.44	1.03E-03



(a) 하중이 비대칭인 경우



(b) 하중이 대칭인 경우

그림 10 거더의 비틀림 강성에 따른 바닥판 내부지점의 모멘트

4.5 가로보의 영향

도로교 시방서에 의하면 3개 이상의 주형으로 지지되어 있고 지간이 10m이상일 경우에는 하중분배를 위해서 강성이 큰 가로보를 20m이하의 간격으로 설치하도록 하고 있으며, 과대 하중의 집중을 완화하고 주형간 상대처짐을 억제하기 위해 6m이하의 간격으로 중간 수직 브레이싱(Sway Bracing)을 설치하도록 하고 있다. 이러한 가로보와 수직 브레이싱은 거더의 상대처짐을 억제할 뿐만 아니라, 설

치 위치에서 거더의 비틀림 강성을 급격히 증가시키는 효과가 있으므로 바닥판의 지점부 모멘트에 상당한 영향을 미치게 된다.

가로보의 강성이 증가하면 거더간 상대처짐량이 작아지고, 하중을 그림 10의 (a)와 같이 재하할 경우 가로보에 의한 비틀림 강성 증가에 따라 바닥판의 국부처짐 모멘트가 증가하므로 바닥판의 지점부 모멘트는 증가하게 된다. 또한 가로보의 개수가 증가할 경우에는 그림 11과 같이 거더의 상대처짐 효과가 조금씩 감소하게 되지만, 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 국부처짐 모멘트에는 영향을 미치지 않는다.

표 6 가로보의 강성 증가에 따른 바닥판의 내부지점 모멘트

Icross-Beam /girder	가로보 강성 (m ⁴)	바닥판 국부처짐 효과 (t-m/m)	거더의 상대처짐 효과 (t-m/m)	Total Moment (t-m/m)
0	0	-1.13	0.25	-0.88
0.03	0.0006	-1.58	0.17	-1.41
0.05	0.001	-1.65	0.14	-1.51
0.1	0.002	-1.72	0.10	-1.62
0.2	0.004	-1.76	0.06	-1.70
0.3	0.006	-1.78	0.04	-1.74
0.4	0.008	-1.78	0.03	-1.76

5. 수치해석 결과와 시방규정의 비교

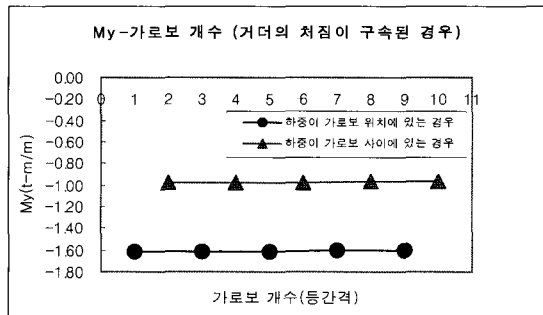
바닥판 상부 철근량의 감소 가능성을 검증하기 위해서, 몇 개의 예제 교량(단순교)을 대상으로 본 연구에서 개발된 해석프로그램을 바탕으로 바닥판의 설계 휨모멘트를 산정하였으며, 그 결과를 현 도로교 시방규정(KHBDC)와 비교하였다. 매개변수 결과를 바탕으로 교량의 형상비(S/L)가 0.1이하인 경우와 상대강성비(H)가 80(바닥판 두께=0.25m, 거더 단면이차 모멘트=0.0113m⁴)인 경우만을 고려하였다. 또한 그림 8과 같이 DB-24하중을 횡방향으로 이동시키면서 내부 지점부의 바닥판 모멘트에 대한 영향선을 작성하였으며, 이를 바탕으로 트럭하중의 재하위치를 결정하였다. 활하중 재하시 트럭하중간 최소 간격과 방호벽과 트럭하중의 최소간격은 각각 1.2m와 0.6m로 가정하였다. 사하중의 경우에는 바닥판의 단위중량을 2.5t/m³으로 가정하여 0.625t/m²의 등분포하중을 바닥판 전체에 재하하였으며, 사하중과 활하중에 대한 하중증가계수(1.3, 2.15)를 사용하여 바닥판의 지점부 설계 휨모멘트를 산정하였다.

각 예제 교량에 대하여 다음과 같은 두 가지 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

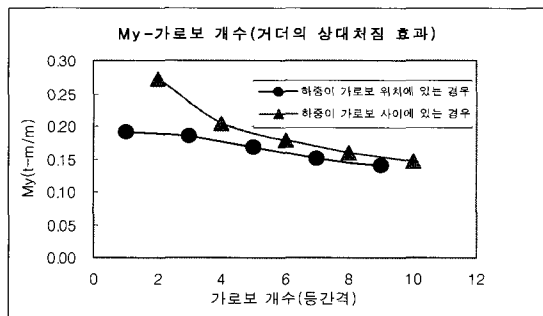
- Case(1) : 가로보의 영향을 고려하지 않은 경우
- Case(2) : 거더의 휨강성의 1/30에 해당하는 가로보가 5m 간격으로 배치되어 있는 경우

해석결과, 모든 예제 교량의 설계 부모멘트는 도

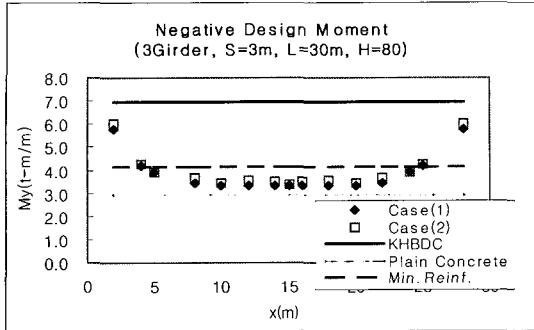
그림 11 가로보의 개수에 따른 바닥판의 내부지점 모멘트



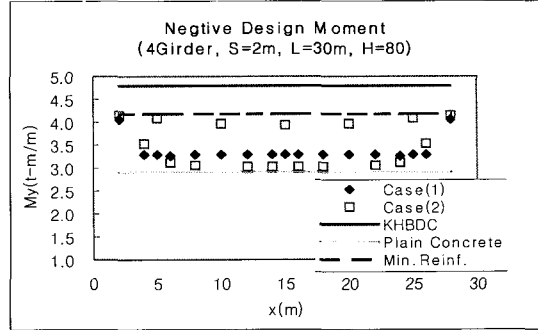
(a) 바닥판의 국부처짐 효과



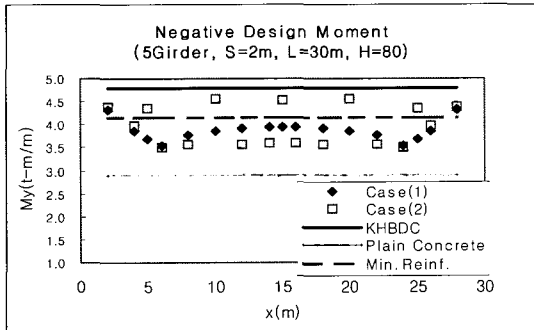
(b) 거더의 상대처짐 효과



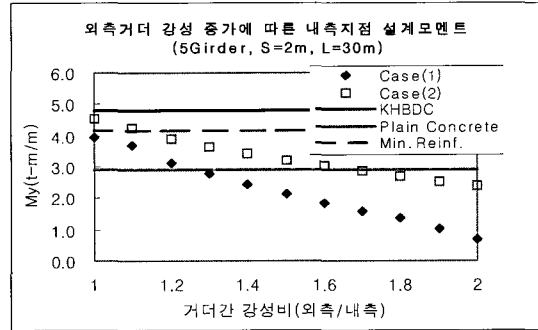
(a) 3거더교



(b) 4거더교



(c) 5거더교



(d) 외측거더의 강성을 증가시킨 경우(5거더)

(a), (b), (c) : 종방향 위치별 설계 부모멘트 (d) : 교량 중앙에서의 설계 부모멘트

그림 12 예제 교량별 설계 부모멘트

로교 시방서에서 제시하고 있는 것보다 작은 값을 나타내고 있었다. 특히 3거더교에서는 그림 12(a)와 같이 가로보의 효과를 고려하더라도 교량 전 구간에서 시방규정보다 50%이상의 작은 값을 보이고 있으며, 이는 휨부재의 최소철근비 규정에 의한 모멘트보다 작은 값을 알 수 있다. 또한 이 값은 무근 콘크리트의 인장강도에 의한 극한 모멘트와 비슷한 값을 나타내고 있다. 교량 중앙에서 활하중에 의한 모멘트는 Case(2)의 경우 $-1.595 (t \cdot m/m)$ 로 시방규정의 -2.880 에 비해 45%이상 부모멘트 감소효과가 있으며, 사하중에 의한 모멘트는 시방서의 $wS^2/10$ (w : 등분포하중의 크기)에 의한 부모멘트 -0.5625 와 달리 오히려 0.021 의 정모멘트가 작용하고 있다. 따라서 그림 12(a)와 같이 교량중앙에서 부모멘트 감소 효과가 최대로 발생하고 있으며 상대처짐 효과가 작아지는 교량 양단으로 이동할수록 설계 모멘트 값이 시방서 규정에 근접하는 것을

알 수 있다. 4거더교와 5거더교의 예제 교량도 마찬가지로 시방규정에 비해 10~20%정도의 부모멘트 감소효과를 보여주고 있다.

그림 12의 (d)는 5거더교 예제 교량의 외측거더의 강성을 증가시켜 상대처짐 효과를 증가시킨 것으로, 외측 거더의 강성 증가에 따른 교량 중앙에서의 설계 부모멘트를 나타내고 있다. 외측 거더의 강성을 내측에 비해 약 1.5배 증가시킬 경우 부모멘트는 무근 콘크리트의 인장강도에 의한 모멘트 보다 작아지고 있으며, 이는 (c)의 경우보다 상대처짐에 의한 부모멘트 감소 효과가 10배 이상 증가하는 것을 알 수 있다.

6. 결론

바닥판의 상부철근의 부식은 바닥판의 내구성을 감소시키고 교량의 유지보수 비용을 증가시키는 원

인이 된다. 이를 해결하기 위해서는 상부철근의 감소를 통해 상부철근을 따라 집중적으로 발생하는 미세균열을 조절해야 하며, 그에 따라 바닥판의 부모멘트를 정확히 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 연구 목적의 일환으로 사용하중 상태에서 바닥판의 휨거동을 명확히 묘사할 수 있는 해석법을 개발하였으며, 이를 통해서 바닥판의 부모멘트에 영향을 미치는 여러 인자들에 대해서 분석을 수행하였다. 본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

1) 사용하중 상태에서 바닥판의 휨거동은 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 국부처짐과 거더의 상대처짐 효과를 중첩하여 해석할 수 있으며, 거더의 상대처짐 효과에 의해서 바닥판 부모멘트는 상당히 감소하게 된다.

2) 거더의 처짐이 구속된 경우 바닥판의 지점부 모멘트는 바닥판의 형상비(S/L)만의 영향을 받으며, 형상비가 0.5 이하가 된다면 최대 부모멘트는 일정한 값을 나타낸다.

3) 바닥판 지점부의 횡방향 모멘트는 거더 간격(S)이외에도 거더 길이(L) 및 비틀림 강성과 바닥판과 거더의 상대강성비(H), 가로보의 간격 및 강성의 영향을 받게 된다.

4) 상대강성비가 감소할수록 거더간 상대처짐 효과가 증가하므로 바닥판의 부모멘트가 감소하고 바닥판의 하중분배 효과가 증가한다. 또한 거더의 비틀림 강성과 가로보의 강성이 증가하고 가로보의 간격이 감소할수록 내부지점의 바닥판 부모멘트가 증가하게 된다.

5) 현 시방규정의 설계 모멘트식은 거더 간격(S)만의 함수만으로 구성되어 있어 바닥판의 실제 거동을 명확히 묘사하지 못하고 있다. 또한 예제 교량을 대상으로 바닥판 지점부의 설계 모멘트를 산정한 결과, 가로보의 효과를 고려하더라도 현 시방규정이 다소 보수적인 결과를 보이고 있다.

이와 같이 바닥판의 지점부에 발생하는 부모멘트는 거더의 처짐에 의해서 많은 영향을 받고 있으며

로, 이런 효과를 적절히 반영한 바닥판의 설계 휨모멘트 식이 제시되어야 할 것으로 생각된다. 또한 해석상 부모멘트 감소에 의해 상부철근의 제거가 가능하더라도 상부철근의 제거가 바닥판의 사용성과 피로강도에 미치는 영향에 대해 충분한 실험적인 검토가 선행되어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 건설교통부 국책과제 '상부철근이 부분제거된 판형교 바닥판의 개발'의 연구를 바탕으로 작성되었으며 연구비 지원에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996
2. 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 1996
3. 양기재, 최진유, 강영종, 유철수, "거더간 상대처짐을 고려한 바닥판의 해석", 한국전산구조공학회 봄 학술발표논문집, 1998, pp.141~148
4. Allen, J. H., "Cracking, Serviceability and Strength of Concrete Bridge Decks", Transportation Research Record, No 1290, 1991
5. Bakht, B. and Jaeger, L.G. *Bridge Analysis by MicroComputer*, McGraw-Hill, Inc., 1987
6. Beal, D.B., "Load Capacity of Concrete Bridge Decks", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 108, No. ST4, 1982, pp.814~832
7. Cao, L., and Shing, P. B., "Behavior of RC Bridge Decks with Flexible Girders", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 122(1), 1996, pp.11~19
8. Cao, L., Allen, J. H., Shing, P. B., and Woodham, D., "A Case Study of Concrete Deck Behavior in a Four-Span Prestressed Girder Bridge: Correlation of Field Tests and Numerical Results", Report No. CDOT-CU_R_94-8, Colorado Department of Transportation, April., 1994

9. Fang , I. K., Worley, J. A., Burns, N. H., and Klinger, R. E., "Behavior of Isotropic R/C Bridge Decks on Steel Girders", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116(5), 1990, pp.659~678
10. Michael F. Petrou et al, "Static Behavior of Noncomposite Concrete Bridge Decks under Concentrated Loads", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 1(4), 1996, pp.143~154
11. Ministry of Transportation and Communications, Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC), 2nd ed., Ontario, Canada., 1983
12. Newmark, N. M., "Design of I-beam bridge", *Symp. of Hwy. Bridge Floors*, ASCE Trans., 114, 1949, pp.979~1072
13. Newmark, N.M., "A Distribution Procedure for the Analysis of Slabs Continuous Over Flexible Beams", Bulletin No. 304, Univ. of Illinois Eng. Experiment Station, Urbana., 1938
14. Phillip C. Perdikaris, Sergio Beim, "RC Bridge Decks under Pulsating and Moving Load", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(3), 1988, pp.591~607
15. Standard specifications for highway bridges., 15th Ed., Am. Assoc. of State Hwy. and Transp. Officials (AASHTO), 1992
16. Westergaard, H. M. *Computation of Stresses in Bridge Slabs due to Wheel Loads*, Public Roads (Mar.), 1930, pp.1~23

(접수일자 : 1999. 3. 15)