

강합성 2거더교 프리스트레스트 바닥판의 설계 최소두께

Minimum Design Thickness of Prestressed Concrete Deck Slabs for Composite Two-Girder Bridges

황훈희* · 조창빈** · 곽종원*** · 이용우***

Hwang, Hoon Hee · Joh, Changbin · Kwark, Jong Won · Lee, Yong Woo

Abstract

Minimizing the self weight of long-span deck slabs is one of the key factors for the practical and economic design of a composite two-girder bridge. In this paper, the minimum design thickness and rebar details of prestressed concrete deck slabs for composite two-girder bridges with girder span length from 4 m to 12 m are studied based on the safety and serviceability. The bridge deck slab with minimum thickness is designed as a one-way slab considering orthotropic behavior. Then fatigue safety of the deck slab is examined. Serviceability requirements for the deck slab such as deflection and crack width limits are also examined. The result shows that rebars with diameter less than 16 mm is recommended for the improved fatigue behavior, and, for the deck slab with span length longer than 8 m, the deflection limit governs the minimum design thickness. The result also shows that, for the deck slab with span length longer than 4 m, the distribution rebar requirement in the current Korea Highway Bridge Design Code is not sufficient to maintain the structural continuity in bridge axis as expected from the deck slab with span length shorter than 3 m.

Keywords : composite two-girder bridge, minimum design thickness, fatigue, long span bridge deck slab

요 지

2거더교를 위한 장지간 바닥판의 설계에서 바닥판의 안전성과 사용성을 만족시키면서 두께를 줄여 자중을 최소화하는 것은 중요한 요소 중의 하나이다. 이 논문에서는 2거더교를 위한 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 설계 최소두께와 배근상세를 안정성, 사용성을 고려하여 제시하였다. 대상 교량은, 실용적인 2거더교를 대표할 수 있는 교량으로, 교량길이 40 m의 단순교이다. 대상교량의 바닥판의 지간을 4 m~12 m로 변화시켜 가며 분석하였다. 바닥판의 이방성 거동을 고려하여 최소단면을 일방향 슬래브로 설계하고, 균열폭과 피로강도를 평가하였으며, 치짐제한을 충족시킬 수 있는 최소 수준의 두께와 비교하였다. 연구결과, 피로내구성의 확보를 위해서는 직경 16 mm이하의 철근을 사용하는 것이 좋으며, 지간이 8 m를 넘는 장지간 바닥판은 치짐에 대한 사용성이 두께 결정의 지배적 요소임을 확인하였다. 또한, 현행 도로교 설계기준의 배력 철근량 규정을 적용하면 지간 4 m 이상의 바닥판에서는 지간 3 m 이하의 바닥판에서 기대되는 정도의 교축방향의 구조적 연속성을 확보할 수 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 2거더교, 최소 설계두께, 피로, 장지간 바닥판, 파괴모드

1. 서 론

일반적으로 철근콘크리트 바닥판의 손상은 교통류에 의해 유발되는 재료의 피로와 수분 및 동결방지제의 침투로 인한 부식이 원인이 되어 편칭전단 형태로 나타나게 된다(松井, 1997). 건조수축 등으로 발생한 콘크리트의 미세 균열이 차량 하중의 반복 재하로 인해 격자형 균열로 발전되고, 이 균열을 따라 침투한 수분이나 화학성분들이 철근의 부식을 촉진시켜 단면의 강성을 감소시킨다. 이와 같은 반복작용에 의해 바닥판 콘크리트의 탈락이 유발되고, 결국 국부적인 함

몰로 이어지게 된다.

프리스트레스트 콘크리트 바닥판은 일반적인 철근콘크리트 바닥판에 비해 초기 바닥판 공사비는 크지만, 긴장력에 의해 위와 같은 바닥판의 피로손상 기구(Mechanism)의 발생이 저지되므로 상대적으로 피로수명이 길다. 긴장력은 콘크리트의 건조수축으로 발생한 미세균열의 진전을 방지할 뿐만 아니라 하중으로 인하여 발생하는 2차적인 균열을 억제시키므로 판의 전단강도가 증가되며, 철근의 부식 환경을 완화시키므로 초기 판의 강성은 장기적으로 유지된다.

프리스트레스트 콘크리트 바닥판은 2거더교의 설계에서 요

*정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사수료(E-mail: poonhee@dankook.ac.kr)

**교신저자 · 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사(E-mail: cjoh@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사(E-mail: origilon@kict.re.kr)

****정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail: ywlee@dankook.ac.kr)

구되는 교량의 장수명화를 위한 바닥판의 내구성 향상과 사하중 경감에 의한 경제성 등을 고려할 때, 2거더교의 효율적인 바닥판 형식으로 주목받고 있으며 관련 연구도 활발히 진행되고 있다(김병석 등, 2000; 김영진 등, 2002). 김병석 등(2002)은 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 부분실험모델의 정적 및 피로실험을 수행하여 긴장재의 배치간격이 좁을수록 바닥판의 구조적 성능이 우수하며 최종적인 파괴는 편칭전단 형태로 나타난다고 보고하였다. 그러나, 정철현 등(2003)에 의해 수행된 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 부분실험모델의 정적 및 피로실험에서는 휨거동에 의한 항복전 형태의 균열이 파괴 시까지 유지되어 전자와는 다른 파괴모드를 나타내었다. 위의 두 실험에서 사용된 실험체는 거더간격이 약 7m로서 실물크기로 제작되었으나 교축방향의 연장길이는 각각 3.2m와 2m로 매우 짧다. 이 때문에 교축방향 모멘트 분배가 실교의 경우와 차이가 있으므로 교축방향 길이 40m의 실교와 동일한 모멘트 분배를 나타내도록 유한요소해석에 근거하여 보강용 H-형강을 교축단부의 양쪽 자유변에 부착시켜 경계조건을 조정하였다.

바닥판의 지간이 길어짐에 따라 바닥판의 거동은 휨에 의해 지배될 것으로 예상되나 프리스트레스트의 도입으로 인하여 바닥판의 휨내하력은 증대될 것이므로 집중하중으로 작용하는 윤희중에 의해 국부적으로 발생하는 편칭파괴의 가능성은 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 위와 같은 부분실험모델의 거동은 보강용 H-형강의 강성에 따라 크게 달라질 것으로 예상되므로 장지간 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 파괴모드는 판거동을 하기에 충분한 교축방향 길이를 확보한 실험체로부터 검증되어야 할 것이다.

한편, 이한주 등(2004)은 직교이방성 거동을 고려한 장지간 바닥판의 최소두께를 제안하였다.

이와 같은 연구성과에도 불구하고 2거더교에 프리스트레스트 콘크리트 바닥판을 적용한 설계 및 시공사례는 그리 많지 않은 실정이다(한국도로공사, 2000; 김수보 등, 2003). 2005년 이전의 도로교 설계기준(2000)에 장지간 바닥판의 특성이 반영된 규정이 없었다는 것도 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 활용에 큰 걸림돌이 되었다. 2005년의 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)의 개정 시에는 장지간 바닥판의 최소두께를 설계자의 판단에 따라 설계하중에 대한 안전성 및 충격을 포함한 활하중에 대해 사용성을 만족하는 수준으로 결정하도록 하는 내용이 포함되었다. 이 개정된 규정은 장지간 바닥판에 적용되는 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 활용에 필요한 것이다. 그러나 개정된 규정은 장지간 바닥판의 두께를 결정할 때 고려해야 할 필요조건만을 규정하였을 뿐 설계자들에게 익숙한 바닥판 지간에 따른 구체적인 최소두께를 포함하고 있지 않아, 과거 규정에 익숙한 설계자들이 개정된 규정을 적용하여 장지간 바닥판을 합리적으로 설계하기에는 다소 어려움을 겪을 것으로 예상된다.

이 연구에서는 설계자들이 개정된 규정을 손쉽게 적용하여 2거더교에 프리스트레스트 콘크리트 바닥판을 설계할 수 있도록 긴장재를 편심 배치한 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 설계 가능한 최소수준의 두께를 개정된 도로교 설계기준에 적합하도록 안전성과 사용성에 대한 검토를 바탕으로 바닥판 지간에 따라 제시하였다.

2. 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 휨설계

강합성 2거더교의 경제성을 극대화하기 위해서는 구조적 성능을 저해하지 않는 범위 내에서 상부구조의 고정하중을 최소화하여야 한다. 긴장재의 편심배치를 고려하면 바닥판을 보다 얇게 설계할 수 있으므로 상부구조의 지중을 경감시킬 수 있다. 여기서는 구조적 안전성을 확보할 수 있는 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 두께의 최소수준을 구하기 위해 교축직각방향 균열에 의해 유발되는 모멘트의 재분배 효과를 고려한 유한요소해석을 통하여 설계모멘트를 산정하고, 주철근 단면에 대해 완전프리스트레스트를 도입한 허용응력설계를 수행하였다.

대상 교량은, 실용적인 2거더교를 대표할 수 있는 교량으로, 교량길이 40m의 단순교이다. 대상 교량의 바닥판의 지간을 4m~12m로 변화시켜 가며 분석하였다. 콘크리트의 설계기준강도는 40 MPa, 철근의 항복강도는 400 MPa, 긴장재는 직경 15.2 mm의 SWPC7B 강연선을 사용하는 것으로 가정하였다. 연구대상 교량의 제원과 재료특성을 다음의 표 1에 요약하였다.

일반적으로 교량의 바닥판은 일방향 슬래브로 설계되므로 교축직각방향으로 발생하는 모멘트에 대해 주철근 단면이 적정한 안전성을 갖도록 두께 및 배근량을 결정하고 있다. 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판은 도입된 긴장력에 의해 교축방향과 나란한 균열이 억제되고 사용하중에 의해 교축직각방향과 나란한 균열만이 발생하게 된다. 따라서 바닥판은 교축방향으로의 재료적 연속성을 상실하게 된다. 이로 인한 모멘트의 재분배 효과를 고려하여 설계모멘트를 결정하였다.

바닥판의 교축직각방향에 대한 교축방향 단면의 강성비(이하 이방성도)의 변화에 따른 교축직각방향 모멘트의 변화는 바닥판 지간에 따라 다소간의 차이가 있으나 크지 않으며, 이방성도가 0.1인 경우에도 교축직각방향 모멘트의 증가율은 등방성 해석결과에 대해 약 9%를 밑도는 수준인 것으로 보고되었다(윤희진 등, 2004). 이와 같은 수준의 교축직각방향 모멘트의 증가가 설계두께에 미치는 영향은 매우 작으므로 여기에서는 안전측의 결과를 도출하기 위해 등방성으로 가정한 유한요소해석 결과에 대해 10%를 증가시킨 값을 활하중에 의한 모멘트값으로 사용하였다. 활하중은 그림 1과 같은 치측 간격과 접지면적을 갖는 도로교 설계기준의 DB-24 트럭하중이 최대모멘트가 발생하는 위치에 만재되도록 재하하였다.

설계모멘트의 산정을 위해 바닥판은 4절점을 갖는 SHELL 요소를 사용하여 해석하였고, 거더는 부재축을 따라 연속된 힌지지점으로 가정하였다. 캔틸레버 길이는 시공사례를 참고하여 지간의 0.4배로 모델링하였다. 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 이용한 3차원 유한요소해석 모델의 예를 그

표 1. 대상교량의 제원 및 재료특성

교량 길이 (m)	바닥판 지간 (m)	콘크리트 설계강도 (MPa)	사용철근 항복응력 (MPa)	긴장재
40	4-12	40	400	SWPC7B 15.2 mm

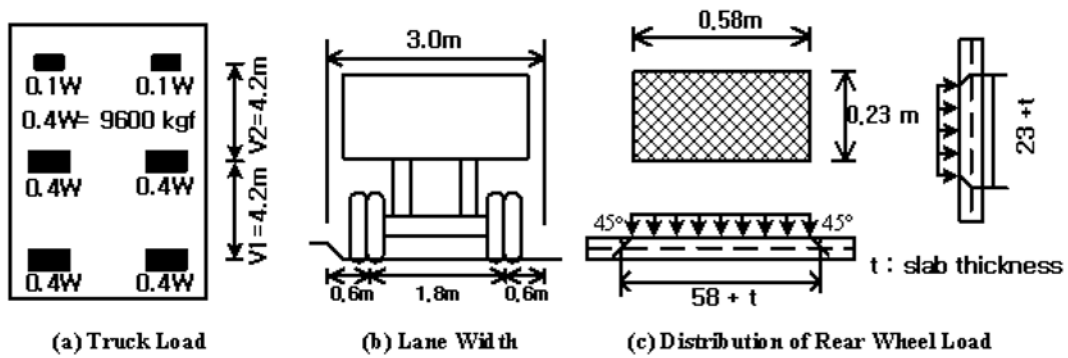


그림 1. 활하중 모델(DB-24)

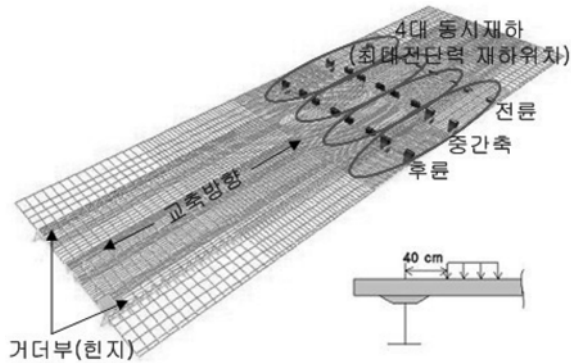


그림 2. 유한요소해석모델(지간 7 m)

림 2에 나타내었다.

바닥판의 교축직각방향 단면은 콘크리트 단면의 하단에 인장응력이 발생하지 않고 상단의 응력이 허용압축응력 이하가 되는 완전프리스트레스를 도입하여 설계휨모멘트에 견디기 위해 필요한 최소수준의 바닥판 두께를 갖도록 설계되었다. 또한, 파괴 시 최소한의 연성거동을 확보하기 위해 강재 지수가 도로교 설계기준의 허용값을 넘지 않도록 긴장재의 배근량을 결정하였고, 바닥판 하면의 최소피복두께와 배력철근 및 쉬스판의 직경 등을 고려하여 긴장재 중심으로부터 바닥판 하면까지 최소 100 mm의 공간을 확보할 수 있는 수준의 편심을 허용하여 직선으로 배치하였다. 프리스트레스의 도입 전까지 발생하는 건조수축 등에 의한 초기균열 제어를 위해서 긴장재 외에 별도의 가외철근을 배치하였다. 가외철근량은 도로교 설계기준에 따라 바닥판 단면적의 0.2%를 사용하였다.

교량의 바닥판은 일방향 슬래브로 설계되므로 도로교 설계 기준에서는 차량 진행방향이 교축방향과 나란한 경우, 교축 직각방향 단면의 주철근량을 계산에 의해 구하고 교축방향으로는 연속성의 확보를 위해 주철근량의 $120/\sqrt{L}$ 과 67% 중 작은 값 이상의 배력철근을 배근하도록 하고 있다. 여기서, L 은 바닥판의 지간(m)이다. 바닥판에 대한 유한요소해석 결과에 따르면 현행 도로교설계기준의 바닥판 설계개념과 같이 하중의 대부분을 주철근 단면에서 부담하게 되므로 교축방향으로는 교축직각방향에 비해 매우 작은 수준의 모멘트가 유발된다. 일반적인 거더교에 적용되는 철근콘크리트 바닥판의 지간은 약 3 m 이내이므로 주철근량의 67% 이상을 배력철근으로 배근하게 되는데 이는 교축방향 슬래브의 모멘트 강도를 확보할 수 있는 수준의 철근량이다. 그러나, 바닥판의 지간길이가 3.2 m를 넘어서면서부터 주철근량의

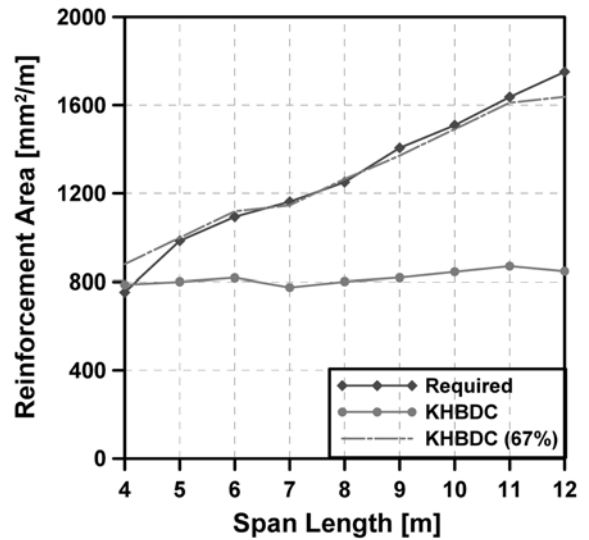


그림 3. 배력철근량의 비교

$120/\sqrt{L}$ (%) 이상의 배력철근 산정기준이 적용되어 지간이 길어짐에 따라 주철근량에 대한 백분율이 감소되므로 지간에 관계없이 약 800 mm² 전후의 일정한 경향을 나타내며, 바닥판 지간이 증가하여 주철근량에 대한 백분율이 감소되고 사용된 긴장재의 양이 동일한 경우에는 오히려 배력철근량이 감소되는 경향도 나타난다. 바닥판 지간의 증가에 따른 배력철근량의 변화를 그림 3에 나타내었다.

바닥판의 지간이 증가함에 따라 교축직각방향 모멘트에 비해 작은 값이기는 하나 교축방향 모멘트도 선형적으로 증가되므로 교축방향 모멘트강도를 확보하기 위해 필요한 배력철근량(Required)은 바닥판 지간이 증가함에 따라 선형에 가깝게 증가한다. 도로교설계기준의 배력철근 규정에 따라 계산된 배력철근량(KHBDC)은 바닥판의 지간이 증가하여도 큰 변동 없이 거의 일정하므로 지간 4 m를 넘어서면서부터 극한모멘트에 견디기 위해 필요한 철근량(Required)보다 아래쪽에 분포하는 것으로 나타나지만 주철근량의 67% 이상의 배력철근량 산정기준(KHBDC 67%)을 적용하면 바닥판의 교축방향 모멘트강도를 확보하기 위해 필요한 배력철근량(Required)과 거의 동일한 것으로 나타났다(그림 3). 따라서, 장지간 바닥판에 대해서도 지간 3 m 이하의 일반적인 철근콘크리트 바닥판에서와 동일한 수준의 연속성을 확보하기 위해서는 주철근량의 67% 이상을 배근하거나 별도의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 장지간 바닥판에서도 지간 약 3 m 이하의

표 2. 휨설계에 의한 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 최소단면의 상세

지간 (m)	바닥판 두께 (mm)	편심량 (mm)	사용된 PS강재		배력철근량(cm ² /m)	
			개수 (EA/m)	단면적 (cm ² /m)	도로교 설계기준	필요량
4	240	20	6	8.322	7.87	7.53
5	260	30	7	9.709	8.00	9.85
6	280	40	8	11.096	8.18	10.94
7	300	50	8	11.096	7.75	11.62
8	320	60	9	12.483	8.01	12.51
9	330	60	10	13.87	8.19	14.06
10	350	70	11	15.257	8.45	15.09
11	370	80	12	16.644	8.70	16.37
12	390	90	12	16.644	8.47	17.51

바닥판에서와 동일한 수준의 구조적 연속성을 확보하기 위해 교축방향에 대한 모멘트강도를 확보할 수 있는 수준의 배력철근을 배근하였다. 설계하중에 대한 안전성을 확보하기 위해 필요한 최소수준의 두께를 갖도록 설계된 단면상세를 표 2에 나타내었다.

3. 설계단면의 사용성 평가

긴장재의 편심을 허용하여 설계된 바닥판 단면은 상대적으로 얇으므로 사용성에 대한 면밀한 검토가 요구된다. 사용성 측면은 균열, 피로와 처짐으로 구분하여 살펴보았다.

3.1 교축직각방향 균열폭의 검토

배력철근 단면은 프리스트레스트콘크리트 구조인 주철근 단면과는 달리 철근콘크리트 구조이므로 바닥판 하면의 인장응력으로 인해 균열이 발생하게 된다. 초기 균열은 건조수축 등으로 인해 미세균열 형태로 발생되지만 하중이 증가함에 따라 콘크리트의 인장응력이 파괴계수를 초과하게 되면 휨균열이 발생된다. 배력철근 단면이기는 하나 균열폭의 확대는 외관저하, 누수 뿐만 아니라 철근의 부식을 촉진시켜 구조물의 안전을 위협하게 되므로 이에 대한 검토를 수행하였다.

도로교 설계기준에 따르면 휨모멘트 및 축방향력에 의한 콘크리트의 인장응력이 콘크리트 설계 인장강도의 60%보다 작을 경우에는 휨균열에 대한 검토를 수행하지 않아도 되나 인장철근의 항복강도가 300 MPa 이상인 경우에는 식 (1)에 의해 계산된 균열폭이 허용균열폭 이하가 되도록 제한하고 있다. 일반환경에서 철근의 허용균열폭은 식(2)와 같다.

$$w = 1.08Rf_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-5} \quad (1)$$

여기서, R : 인장부 연단에서부터 중립축까지의 거리 / 주철근의 도심으로부터 중립축까지의 거리

- f_s : 사용하중에서 계산된 철근의 응력(MPa)
- d_c : 인장축 연단에서 가장 가까운 철근중심까지의 콘크리트의 피복두께 (mm)
- A : 유효인장단면적 (mm²)
(주인장 철근 주위의 인장부 콘크리트 단면적을 철근

의 개수로 나눈 값.)

$$w_a = 0.005t_c \quad (2)$$

여기서, t_c 는 최외단 철근의 표면과 콘크리트 표면사이의 최소피복두께(mm)이다.

배력철근량은 앞서 언급한 바와 같이 지간 5 m 이상부터 도로교 설계기준의 배력철근 관련규정을 따르지 않고 교축방향의 극한강도를 확보할 수 있는 값을 사용하였다.

허용균열폭은 식(2)으로부터 기상조건이 양호한 곳에서의 콘크리트 바닥판 슬래브 하단철근에 대한 최소값인 30 mm를 적용하여 0.15 mm로 계산되었다. 각각 직경 12.7 mm (H13), 15.9 mm(H16)와 19.1 mm(H19)의 교축방향 철근을 사용한 경우를 가정하여 식(1)로부터 계산된 균열폭을 허용균열폭과 비교하여 그림 4에 나타내었다. 여기서, 교축방향 철근량은 앞서 언급한 바와 같이 지간 5 m 이상부터 도로교 설계기준의 배력철근 관련규정을 따르지 않고 교축방향의 극한강도를 확보하기 위해 필요한 최소량을 사용하였다.

H19의 사용을 가정하여 계산된 균열폭은 바닥판의 지간 4 m~12 m의 전 구간에서 허용균열폭보다 큰 값을 나타내었는데 이를 허용값 이내로 제어하기 위해 철근의 사용량을 늘려 배치간격을 좁히면 비경제적인 단면상세가 되므로 H19 철근의 사용은 적절치 않은 것으로 판단된다.

반면, 직경이 작은 철근을 여러 개 사용하는 것이 균열분산에 효과적이므로 H13의 사용을 가정하여 계산된 균열폭은 전 구간에서 허용균열폭 이하로 나타나며, 검토된 철근들 중 가장 작은 값을 가지므로 다른 철근들의 균열폭 값보다 아래쪽에 위치함을 볼 수 있다. 그러나 바닥판의 지간이 증가함에 따라 단위폭당 배근되어야 할 철근의 개수도 증가되어 배근간격이 도로교 설계기준의 최소허용값인 100 mm 이하로 좁아지므로 지간 8 m를 초과하는 바닥판에서는 보다 큰 직경을 갖는 철근의 사용이 불가피한 것으로 나타났다.

H16의 경우에는 8 m 이상의 지간에서부터 계산된 균열폭 값이 허용균열폭보다 아래에 분포하였으므로 가장 경제적인 교축방향철근의 배근을 위해서는 지간 8 m 이하의 경우 H13, 그 이상의 지간에 대해서는 H16 철근을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

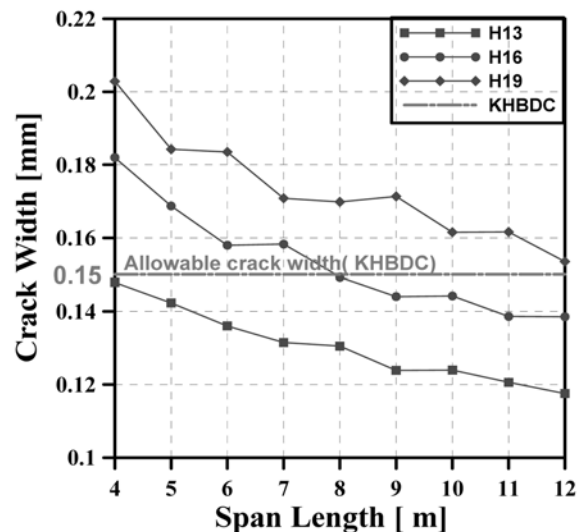


그림 4. 균열폭의 검토

3.2 바닥판 피로강도의 평가

일반적인 철근콘크리트 바닥판의 피로파손 사례는 편칭전단 형태로 알려져 있으나 장시간화에 따라 휨거동에 의한 피로파괴가 선행될 가능성이 제기되고 있으므로(정철현 등, 2004), 바닥판에 대한 지배적인 피로거동을 각각 전단과 휨으로 가정하여 피로평가 기준을 충족시키는지 검토하였다. 즉, 피로평가 기준을 충족시키기 위해 필요한 바닥판의 전단내하력 및 긴장재와 철근의 허용응력범위를 계산하고, 각각 설계단면의 전단내하력과 활하중에 의해 유발되는 긴장재 및 철근의 응력과 비교하여 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 설계 단면의 피로파괴 가능성을 검토하였다.

바닥판의 피로평가 기준은 명확하게 제시되어 있지 않으나 반복되는 트럭하중에 의한 피로손상만을 고려하고 교량바닥판의 설계수명을 50년이라 가정하는 경우 2×10^6 회를 철근콘크리트 바닥판의 피로설계규정으로 적용해도 안전측인 것으로 보고되었다(윤석구, 2004). 바닥판의 장시간화에 따른 두께의 증가와 긴장력의 영향으로 인해 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 피로수명은 철근콘크리트 바닥판에 비해 상당히 증가될 것으로 예상되므로 위의 피로평가 기준을 적용하였다. 한편, 재료의 부식에 따른 피로강도의 저하는 반드시 고려되어야 할 것이나 이에 대한 규명은 쉽지 않다. 이 논문에서는 바닥판을 관통한 균열에 우수가 스며들었을 때 피로수명이 50~250배로 감소한다는 보고(松井 등, 1987)에 따라 피로평가 기준에 각각 50배와 250배를 곱한 1×10^8 회와 5×10^8 회의 기준에 대한 검토를 통해 단순히 비교하였다.

松井 등(2000)은 바닥판이 교축직각방향과 나란한 균열의 발달로 인해 교축방향의 연속성을 상실하여 그림 5와 같이 단위화된 바닥판의 전단거동으로 반복하중에 저항한다고 판단하고 실제 차량의 재하상태를 모사한 윗하중 실험으로부터 철근콘크리트 바닥판의 피로강도 평가식을 개발하였으며 이 식에 긴장력의 효과를 도입하여 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$\log(Q/P_{sx}) = -0.7835 \log N + \log 2.032 \quad (3)$$

$$\text{여기서, } P_{sx} = 2B(\tau_{max} \cdot X_m \cdot \alpha + \sigma_{max} \cdot C_m) \quad (4)$$

Q : 단위화된 바닥판에 작용하는 최대전단력

N : 하중 재하 반복횟수

B : 단위화된 바닥판의 폭 ($=b + 2\alpha_d d_s$, cm)

X_m : 인장축 콘크리트를 무시할 때의 주철근 단면의 중립축 깊이 (cm)

C_m : 주철근의 피복두께 (cm)

τ_{max} : 콘크리트 최대 전단강도
($=0.252f_{ck} - 0.000246f_{ck}^2$, kgf/cm²)

σ_{max} : 콘크리트 최대 인장강도 ($=0.583f_{ck}^{2/3}$, kg/cm²)

b : 재하면 짧은변의 길이 (cm)

d_d : 배력철근의 유효깊이 (cm)

α : 긴장력을 고려한 전단파괴면 기울기의 역수 $=1/\tan\theta$

α_d : 배력철근 방향 전단파괴면 기울기의 역수

(철근콘크리트 구조이므로 $1/\tan 45=1$)

θ : 전단파괴면의 각도 $=\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2\tau_{cr}}{\sigma_{pe}}\right)$

$\tau_{cr} : 1.005\sqrt{\sigma_{imax}^2 + \sigma_{imax}\sigma_{pe}}$, kgf/cm²

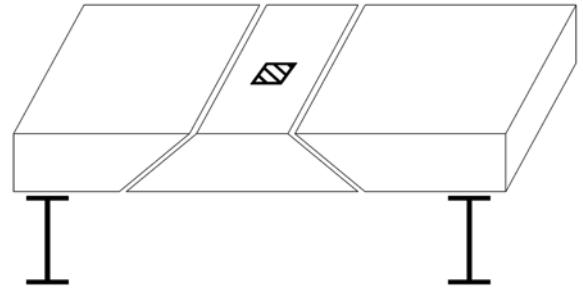


그림 5. 단위화 바닥판의 전단거동

σ_{pe} : 콘크리트 유효긴장응력 (kgf/cm²)

피로평가 기준을 충족시키기 위해 필요한 단위화 바닥판의 전단내하력 P_{sx} 는 식(3)의 N 과 Q 항에 각각 피로평가기준과 최대전단력값을 대입하여 구하였다. 최대전단력의 크기 Q 는 유한요소해석을 통하여 결정하였다. 최대전단력은 지점부에서 발생할 것이나 현치에 의한 단면증가가 있으므로 지점부로부터 일정거리 떨어진 위치가 전단에 대해 취약할 것이다. 실제 바닥판의 편칭전단파괴는 경사진 균열 형태로 나타나므로 현치의 폭과 현치 끝단으로부터 바닥판 상면을 향해 경사지게 발달한 균열거리 등을 고려하여 거더중심에서 약 400 mm 떨어진 곳을 전단에 대한 위험단면으로 결정하였다. 설계모멘트 산정 시와 동일한 유한요소해석 모델을 사용하여 구한 위험단면에서의 전단력을 최대전단력 Q 로 결정하였다. 앞장에서 설계된 단면상세를 갖는 단위화 바닥판의 전단내하력은 식(4)로부터 계산하고, 피로평가 기준에 의한 값과 비교하였다.

비교결과에 따르면, 2×10^6 회의 피로평가 기준을 충족시키기 위해서는 시간에 따라 약 110~260 kN의 전단피로내하력이 필요하며 빗물 등의 침투를 고려한 5×10^8 회의 피로평가 기준에 대해서는 약 170~410 kN의 전단피로내하력이 요구되는 것으로 나타났다(그림 6). 설계단면들의 피로에 대한 전단내하력은 약 630~1670 kN로서 장시간화에 따른 두께증가로 인해 시간에 따라 선형에 가깝게 증가하며 가장 불리한 피로평가기준인 5×10^8 회의 하중반복횟수에 견디기 위해 필요한 전단내하력보다도 평균 4배 정도 큰 값을 나타내고 있

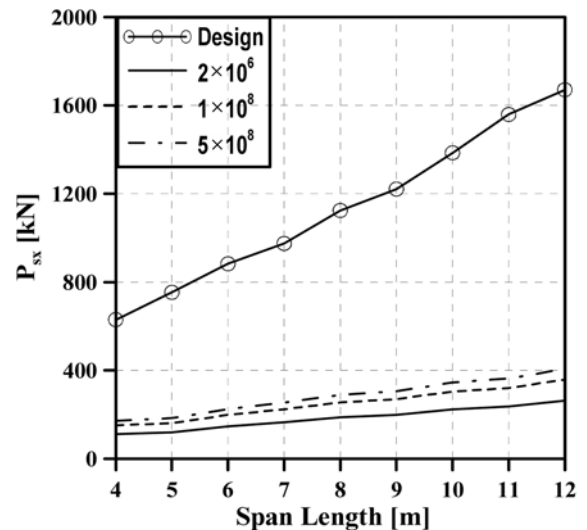


그림 6. 피로에 대한 전단내하력 비교

으므로 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 설계단면들의 전단거동에 의한 피로파괴 가능성은 희박한 것으로 판단된다.

휨거동에 의한 피로파괴 가능성을 예측하기 위해서 프리스트레스트 콘크리트 구조인 주철근 단면에 대해 긴장재의 피로를 검토하였고, 철근콘크리트 구조인 배력철근 단면에 대해서는 철근의 피로를 검토하였다. Tilly(G.P.Mallet, 1991)는 긴장재와 철근에 대한 직접인장 피로실험과 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨피로실험을 수행하여 반복하중에 의해 발생하는 마멸(fretting)과 부식(corrosion)에 의해 긴장재의 피로 성능이 감소됨을 확인하고, 약 5~10%의 단면손실을 갖는 강연선의 피로강도 평가를 위한 식(5)과 철근의 피로강도 평가를 위한 식(6)을 제안하였다.

$$\log f_a = 3.1018 - 0.1551 \log N \quad (5)$$

$$\log f_r = 2.99 - \frac{1}{9} \log N, \quad D \leq 16 \text{ mm} \quad (6)$$

$$= 2.87 - \frac{1}{9} \log N, \quad D > 16 \text{ mm}$$

여기서, N 은 재하반복횟수, D 는 철근의 직경, f_a 와 f_r 는 각각 긴장재와 철근의 응력변동 범위(MPa)이다. 긴장재 및 배력철근의 허용 응력변동 범위는 위의 식(5)과 식(6)에 피로 평가 기준에 상응되는 하중반복횟수를 대입하여 구하였다.

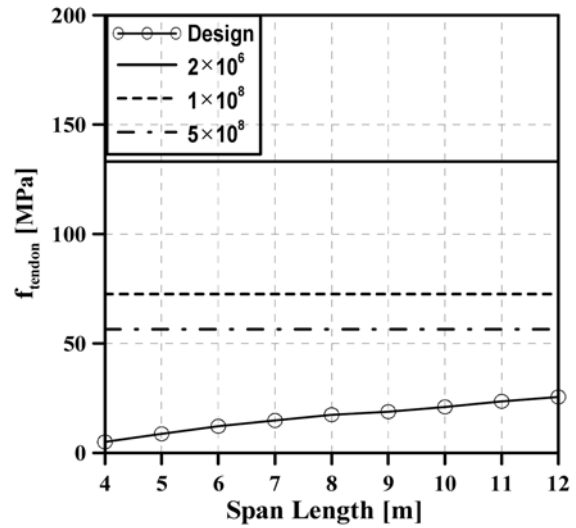
주철근 단면은 완전긴장상태로 설계되어 설계하중 작용 시 균열이 발생하지 않으며 전단면이 유효하므로 긴장재와 동일 위치의 콘크리트 단면의 응력을 치환하여 활하중에 의해 유발되는 긴장재의 응력을 구하였다. 배력철근 단면은 철근콘크리트 구조이므로 교축직각방향과 나란한 균열의 발생을 고려하여 균열환산단면 2차모멘트를 적용한 아래의 식(7)로부터 활하중에 의해 유발되는 배력철근의 응력 f_s (MPa)를 계산하였다.

$$f_s = n \times \frac{M_d}{I_{d,cr}} (d_d - X_d) \quad (7)$$

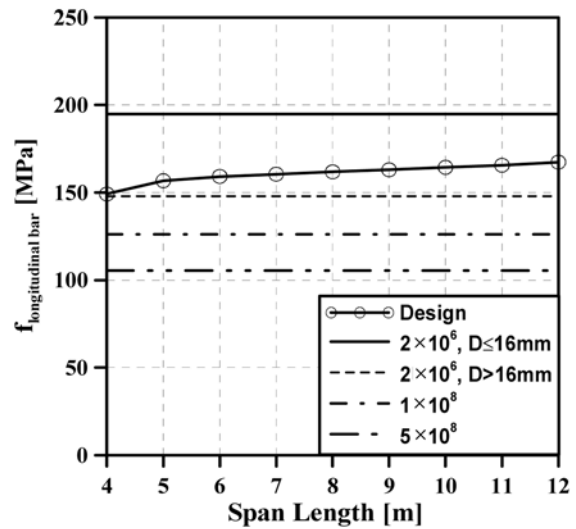
여기서, M_d 는 교축방향(배력철근단면)의 모멘트(N·mm), $I_{d,cr}$ 은 배력철근 단면의 균열환산 단면2차모멘트(mm⁴), d_d 는 배력철근의 유효깊이(mm), X_d 는 배력철근 단면의 중립축 깊이(mm)이고 n 은 탄성계수비이다. 활하중에 의해 유발되는 긴장재 및 철근의 응력과 빗물 등의 침투를 고려한 피로평가 기준에 상응되는 허용 응력범위를 비교하여 그림 7에 나타내었다.

활하중에 의해 추가적으로 부담해야하는 긴장재의 인장응력은 약 5~26 MPa로서 긴장력의 도입을 위한 긴장응력의 약 0.5~2.5% 수준으로 매우 낮으며, 가장 불리한 피로평가 기준인 5×10^8 회의 하중반복횟수에 견디기 위해 허용될 수 있는 긴장재의 응력변동 범위인 약 57 MPa에 대해 상당한 여유가 있으므로 공용기간 중 긴장재의 피로파손 가능성은 없는 것으로 나타났다(그림 7(a)).

한편, 도로교 설계기준에서는 항복강도가 400 MPa 이상인 철근에 유발되는 최대응력이 150 MPa 이하일 때는 피로에 대한 검토를 생략해도 되는 것으로 규정하고 있다. 활하중에 의한 배력철근의 응력변동은 약 150~170 MPa 범위의 값이므로 이보다 크나 직경 16 mm 이하의 철근에 대해 2×10^6



(a) 긴장재의 응력변동 크기



(b) 배력철근의 응력변동 크기

그림 7. 피로에 대한 휨내하력 비교

회의 피로강도 평가기준을 충족시키기 위해 허용될 수 있는 응력변동 값인 약 195 MPa보다 작으므로 배력철근 단면은 휨피로내구성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다(그림 7(b)). 다만, 직경 16 mm를 넘는 철근의 응력이 약 148 MPa를 넘게 되면 2×10^6 회의 피로강도 평가기준을 충족시킬 수 없으며 직경 16 이하의 철근을 사용하더라도 빗물 등의 침투를 가정한 2×10^8 과 5×10^8 의 하중반복횟수에 견디기 위해서는 철근의 응력이 각각 약 126 MPa과 약 106 MPa 이하가 되어야 하는 것으로 나타났으므로 환경적 요인에 대한 보다 신중한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 바닥판의 처짐제한 검토

유한요소해석에 의해 바닥판의 처짐제한을 만족하는 수준의 두께를 결정하였다. 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판에서는 도입된 긴장력에 의해 차량진행 방향과 나란한 균열의 진전은 억제되지만 철근콘크리트 구조인 배력철근 단면의 균열로 인해 교축방향으로의 재료적 연속성이 상실된다. 이로 인한 바닥판의 거동변화를 고려하기 위해 Huber (Timoshenko 등, 1959)가 제안한 바닥판의 직교 이방성 휨

강성식을 이용하였다.

$$D_x = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} [I_{cx} + (n-1)I_{sx}] \quad (8)$$

$$D_y = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} [I_{cy} + (n-1)I_{sy}] \quad (9)$$

여기서, D_x, D_y : 바닥판의 강성

I_{cx}, I_{cy} : 콘크리트의 단면2차모멘트

I_{sx}, I_{sy} : 철근의 단면2차모멘트

ν_c : 콘크리트의 포아송비

n : 탄성계수비

위의 식에 의하면 사용하중하에서 바닥판의 이방성도는 주로 균열발생에 따른 콘크리트의 단면2차모멘트 감소에 영향을 받을 것으로 예상된다. 이 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 구조인 주철근 단면에 대해 전단면 2차모멘트, 철근 콘크리트 구조인 배력철근 단면에 대해 균열환산단면 2차모멘트를 사용하여 바닥판의 강성을 계산하고 교축직각방향에 대한 교축방향의 강성비로써 이방성도를 정의하였다.

유한요소해석 과정에서는 해석모델의 교축방향 탄성계수를 감소시켜 교축직각 방향에 대한 교축 방향 탄성계수의 비가 계산된 이방성도와 동일하게 하여 바닥판의 이방성 거동을 구현하였다. 유한요소 해석모델의 두께를 바꾸어 가며 반복 해석을 수행하고, 활하중에 의한 상부구조물의 처짐이 도로교 설계기준의 처짐제한과 일치하는 바닥판의 두께를 결정하여 표 3에 나타내었다. 여기서, l 은 바닥판의 지간(m)이다. 도로교 설계기준에서는 상부구조물의 처짐이 바닥판 지간의 1/800 이하 또는, 보행자의 통행이 허용되는 도심지 교량에서는 1/1000 이하가 되도록 제한하고 있다.

4. 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 두께

안전성과 사용성을 확보할 수 있는 최소수준의 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 두께를 제시하였다. 설계단면의 두께들은 균열 및 피로에 대해 허용기준을 만족하는 것으로 나타났으므로 처짐허용기준의 확보에 필요한 두께와 비

표 3. 처짐제한을 만족하는 최소수준의 횡방향 PSC 바닥판 두께

지 간 (m)	이방성도	l/1000		l/800	
		처짐 제한 (mm)	바닥판 두께 (mm)	처짐 제한 (mm)	바닥판 두께 (mm)
4	0.1356	4	170	5	160
5	0.1644	5	210	6.25	200
6	0.1735	6	250	7.5	230
7	0.1764	7	280	8.75	260
8	0.1815	8	310	10	280
9	0.1969	9	340	11.25	310
10	0.2023	10	360	12.5	340
11	0.2098	11	390	13.75	370
12	0.2153	12	420	15	390

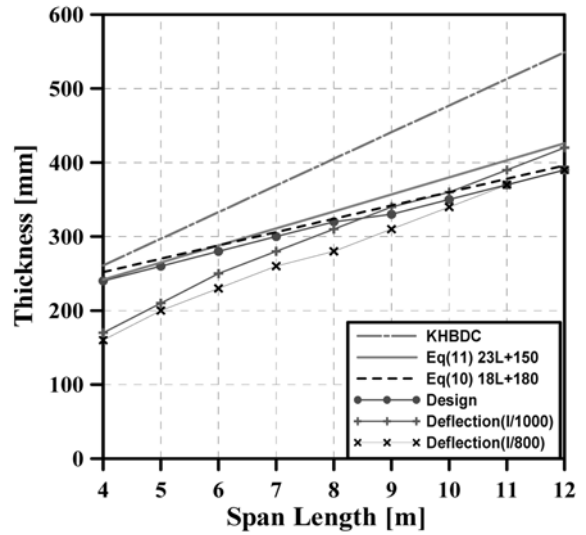


그림 8. 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 두께비교

교하여 두께 결정의 중요요소를 확인하였다. 설계단면의 두께를 처짐에 대해 확보되어야 할 최소수준의 두께와 비교하여 그림 8에 나타내었다.

상대적으로 불리한 기준인 도심지 교량에 대한 처짐제한과 비교하면, 일방향 슬래브로 취급하여 설계된 단면 두께는 바닥판의 지간이 약 8 m 이내에서 처짐에 대한 사용성을 확보할 수 있는 것으로 나타나지만 처짐에 대한 여유는 지간이 증가함에 따라 급속히 감소하여 약 9 m 이상의 지간에서는 처짐제한을 만족하기 위한 두께가 설계단면의 두께보다 크게 나타났다. 따라서, 부분적으로 보행자에 의해 사용되는 도심지 교량의 경우는 처짐에 의한 사용성 문제가 장지간 바닥판 두께 결정의 중요요소임을 확인하였다.

그러나, 일반적인 교량 상부구조물에 대한 처짐제한으로서 바닥판 지간의 1/800 수준의 기준을 적용하면, 이 논문에서 고찰한 12 m 이내의 바닥판 지간에서 일방향 슬래브로 취급하여 설계된 단면 두께는 균열과 피로는 물론 처짐에 대한 사용성도 충족시키는 것으로 나타났다.

이상의 비교로부터 바닥판의 지간을 독립변수로 직선회귀 분석을 수행하여 안전성과 사용성을 확보할 수 있는 설계가 가능한 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 두께의 참고기준을 일반적인 교량에 대해 식(10)과 도심지 교량에 대해 식(11)같이 제안하였다.

$$t = 18L + 180 : \text{일반교량} \quad (10)$$

$$t = 23L + 150 : \text{도심지 교량(보행자가 있는 경우)} \quad (11)$$

여기서, t 는 바닥판의 두께(mm)이고 L 은 바닥판의 지간(m)이다. 위의 제안식들은 설계단면의 두께 및 처짐제한을 만족하기 위한 최소두께와 비교할 때 일반교량에 대한 식(10)은 지간에 따라 1.3~3.9%의 범위에서 평균적으로 약 2.8% 정도 큰 값을 나타내며, 도심지 교량에 대한 식(11)의 경우에는 지간에 따라 0.83~5.6%의 범위에서 평균적으로 약 3.2% 정도 큰 값을 나타내며 상관계수도 약 0.99로서 지간의 증가에 따른 바닥판 두께 증가의 경향을 잘 표현하는 것으로 판단된다(그림 8).

5. 결 론

2거더교를 위한 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 최소 설계두께와 배근상세를 안정성, 사용성 및 자중을 고려하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 도로교 설계기준에 따라 결정된 배력철근량으로는 지간 4 m를 넘어서면서부터 지간 3 m 이하의 바닥판에서와 동일한 수준의 교축방향 구조적 연속성을 확보할 수 없는 것으로 판단된다.

둘째, 철근콘크리트 구조인 배력철근 단면의 특성상 교축 직각방향과 나란하게 발생하는 균열의 폭을 허용값 이내로 제어하기 위해서는 바닥판 지간 8 m 이내에서는 H13, 바닥판 지간 8~12 m에는 H16을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

셋째, 긴장력의 도입과 장지간화에 따른 두께증가로 인해 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 전단피로 내구성은 피로평가 기준에서 요구하는 것보다 매우 크며, 활하중에 의해 유발되는 긴장재의 응력변동 범위는 매우 작은 것으로 나타났으므로 장지간 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 피로파괴 가능성은 희박한 것으로 판단된다. 다만, 피로내구성의 확보를 위해서는 직경 15.9 mm 이하의 배력철근을 사용하는 것이 바람직하며 차량진행 방향과 직각으로 발생될 것으로 예상되는 균열을 통한 수분 및 화학성분의 침투를 최소화해야 할 것이다.

넷째, 콘크리트 구조물의 상부구조물 처짐제한(L/800)을 적용할 때, 이 논문에서 고찰한 지간 12 m 이내에서 일방향 슬래브로 설계된 바닥판의 두께는 사용성을 확보할 수 있다고 판단된다. 다만, 부분적으로 보행자에 의해 사용되는 도심지 교량에 대한 기준(L/1000)을 적용하면, 바닥판 지간 8 m 이내에서는 바닥판의 사용성을 확보할 수 있으나 그 이상의 지간에서는 처짐에 의한 사용성 문제가 장지간 바닥판 두께 결정의 중요 요소임을 확인하였다.

다섯째, 이상의 연구 결과와 도로교설계기준의 상부구조물 처짐제한을 적용하여, 안전성과 사용성을 확보할 수 있는 설계가 가능한 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 두께의 참고기준을 제안하였다.

강합성 2거더교에 적용될 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 설계 경험이 부족한 설계자들이 이 연구에서 제안된 설계 가능한 최소 수준의 두께를 장지간 바닥판 두께결정의 참고자료로 활용한다면 도로교 설계기준의 개정된 장지간 바닥판 설계기준 조항의 의도에 따라 장지간 바닥판의 장점을 극대화한 효율적 설계가 가능할 것으로 기대된다. 다만, 이 논문에서는 이방성을 고려한 처짐 산정 시 교축방향의 강도를 확보할 수 있는 수준의 배력철근량을 고려하여 이방성도가 계산되었다. 따라서, 현행 도로교설계기준의 배력철근 기준을 따를 경우에는 처짐이 증가되므로 바닥판의 설계두께는 본 논문의 제안두께보다 증가될 것이다. 장지간을 갖는 횡방향 프리스트레스트 콘크리트 바닥판이 적용된

강합성 2거더교의 정적 및 운하중 피로실험을 통하여 거동 특성에 대한 명확한 규명과 실험자료가 축적된다면 제안값의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 POSCO(주)의 연구비 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2005) 도로교 설계기준, 한국도로교통협회
- 김병석, 김영진, 박성용, 이정우, 주봉철(2000) 합리화 2주형교용 바닥 개발에 관한 연구(I) 최종연구보고서, 한국건설기술연구원
- 김병석, 김영진, 박성용, 이정우, 주봉철(2002) 합리화 2주형교용 바닥 개발에 관한 연구(II) 최종연구보고서, 한국건설기술연구원
- 김수보, 김씨동, 안승주, 최유진(2003) 현장타설 PSC 상판을 갖는 장지간 2주형 강관형교(옥정교)의 설계 사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제15권 1호, pp.81-89.
- 김영진, 주봉철, 이정우, 김병석, 박성용(2002) 강합성 2거더교 PSC 바닥판의 정적 거동, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제14권 4호, pp.503-512
- 이한주, 이용우, 정철현(2003) 장지간 바닥판의 최소두께에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 23권, 제 5호 pp. 851-857
- 이한주, 정철현, 이용우(2004) 직교이방성을 고려한 장지간 바닥판의 두께결정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 24권, 제 4A호 pp. 731-737
- 윤석규(2004) 교량바닥판의 등기축중 반복하중의 평가, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 24권, 제 2A호 pp. 311-319
- 윤혜진, 조창빈, 김병석(2004) 2거더 강합성형교의 장지간 바닥판 설계 휨모멘트, 대한토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 184-190
- 정철현, 이한주(2003) 프리캐스트 장지간 바닥판의 정적 및 피로 거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 23권, 제 4A호 pp. 721-731
- 정철현, 이한주, 이용우(2004) 장지간 바닥판의 파괴모드에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 24권, 제 1A호 pp. 101-106
- 한국도로공사(2000) 청주-상주간 고속도로 설계보고서 및 구조계산서.
- 松井繁之(1987) 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲勞強度と水の影響について, 콘크리트工學年次論文報告集, 第九卷, 第二號 pp. 627-632
- 松井繁之(1997) 床版の技術開發 一耐久性の向上, 施工合理化-. 橋梁と基礎, Vol. 31, No. 8, pp.84-94.
- 松井繁之, 江頭慶三(2000) 長支間PCI床版の疲勞耐久性に関する一考察, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.185-190.
- Wilson, E.L. (1998) Sap2000 Tutorial Manuals, Computer & Structures, Inc.
- Mallet, G.P. (1991) Fatigue of Reinforced Concrete, HMSO
- Thimoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S. (1959) Theory of Plates and shells, 2nd., McGraw-Hill.

(접수일:2005.8.16/심사일:2005.10.13/심사완료일:2005.12.23)