

2거더 연속강합성 교량의 프리캐스트 바닥판 종방향 프리스트레스 설계

Design of longitudinal prestress of precast decks in twin-girder continuous composite bridges

심 창 수^{1)†} · 김 현 호²⁾ · 하 태 열³⁾ · 전 승 민⁴⁾
Shim, Chang Su · Kim, Hyun Ho · Ha, Tae Yul · Jeon, Seung Min

요 약 : 연속 강합성 교량에 종방향 프리스트레스를 도입해야 하는 프리캐스트 바닥판을 적용하기 위해서는 균열제어를 위한 사용성 설계가 이루어져야 한다. 특히, 2거더 교량의 경우에는 장지간 바닥판의 설계에서 요구되는 주철근 및 횡방향 프리스트레스와 합성설계를 위해 요구되는 전단포켓의 존재로 인해서 상세가 복잡해지게 된다. 이 논문에서는 2거더 연속강합성 교량의 프리캐스트 바닥판 채움을 위해서 필요한 유효 프리스트레스 크기의 산정과 상세의 단순화를 이루기 위해서 부착강도를 인정할 수 있는 채움재료의 선정 및 그 기준을 제시하였다. 또한, 장기거동에 대한 평가 방안을 제시하고 그 결과로부터 초기 프리스트레스의 크기 결정을 수행하여 기존의 설계의 개선 정도를 평가하였다. 일정 수준이상의 부착강도를 갖는 채움재료를 부모멘트가 크게 발생하는 영역에 사용하면 연속 강합성 교량의 전구간에 걸쳐서 일정한 종방향 프리스트레스 도입이 가능하고 이로 인해 상세의 단순화 및 경제성을 높일 수 있다.

ABSTRACT : Serviceability design is required to control the cracking at the joint of precast decks with longitudinal prestress in continuous composite bridges. Details of twin-girder bridges are especially complex not only due to their main reinforcements and transverse prestresses for the design of long-span concrete slabs, but also due to the shear pockets for obtaining the composite action. This paper suggests the design guidelines for the magnitude of the effective prestress and for the selection of filling materials and their requirements that would allow for the use of precast decks for twin-girder continuous composite bridges. The necessary initial prestress was also evaluated through long-term behavior analysis. From the analysis, existing design examples were revised and their effectiveness was estimated. When a filling material with a bonding strength higher than the requirement is used in the region of a high negative moment, a uniform configuration of the longitudinal prestressing steels along the whole span length of continuous composite bridges can be achieved, which would result in the simplification of the details and the reduction of the construction costs.

핵심용어 : 연속강합성 교량, 프리캐스트 바닥판, 종방향 프리스트레스, 균열제어, 채움재료

KEYWORDS : continuous composite bridge, precast deck, longitudinal prestress, crack control, filling material

1. 서론

최근에 건설 분야의 환경 변화가 급격하게 이루어지면서 기존의 교량 설계 및 시공 기술에 대한 개선 혹은 관점의 변화가 요구되고 있다. 환경 및 민원 문제의 증가나 건설현장 여건이 과거와 달리 제약사항을 많이 지닐 정도로 간접자본 시설의 밀

도가 높아진 것과 같은 건설 환경의 변화는 다양한 형태의 구조물을 요구하고 있다. 교체교량인 경우에는 신설교량보다 교통방해 최소화, 공기단축과 같이 시공성에 제한조건이 까다롭게 주어지는 경향이 있는데, 이 같은 경향 때문에 기존의 거푸집을 이용한 현장타설 방법으로 해결하기 어려운 점이 많아 그 해결방안으로서 프리캐스트 바닥판의 사용에 관한 관심이 높아

1) 교신저자, 정회원, 중앙대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
(Tel. 031-670-4707, Fax. 031-675-1387, E-mail: csshim@cau.ac.kr)
2) 정회원, 중앙대학교 건설환경연구소 전임연구원, 공학박사(hhkim@wm.cau.ac.kr)
3) 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 공학석사(badseed@wm.cau.ac.kr)
4) 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정(seungmin79@wm.cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

지고 있다.

국내에서 강거더에 합성되는 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판 시스템에 대한 실용화 연구가 완료되어 중부내륙고속도로 시험주로에 실 시공완료 되었고 청주육교의 바닥판 개량공사에 적용되어 신설공사와 교체공사에 모두 적용된 예가 있다. 선행 연구에서 개발된 프리캐스트 콘크리트 바닥판은 강거더를 갖는 합성거더교에 적용되거나 특별히 고안된 전단연결부를 이용해서 PSC 거더교에도 적용될 수 있다. 조립식 교량 부재의 설계 및 시공을 위한 연구는 주로 연결부에 집중되어 있다. 선행 연구도 연결부 형태의 선정(장승필 등, 1996), 채움재료의 특성 평가(Shim 등, 2000), 횡방향 이음부 성능 평가(Shim 등, 2003) 및 종방향 프리스트레스 크기 결정(윤석구 등, 1998; 정철현 등, 1999; Shim 등, 2003), 전단연결부 평가(심창수 등, 1996; 심창수 등 1999; 류형근 등, 2003), 부재단위의 피로성능 검증 실험(심창수 등, 1999; Shim 등, 2000) 등으로 이루어졌다.

국외의 사례를 살펴보면 설계기준의 측면에서는 프리스트레스를 도입하는 프리캐스트 바닥판 이음부의 균열 제어를 위해서는 1.7MPa 이상의 압축응력을 도입하는 형태의 단순한 규정이 존재한다(LRFD, 2004). EUROCODE 합성형 교량편에서는 기본적인 설계 개념을 제시하는 수준에 그치고 있다(Eurocode, 1994). 프리캐스트 바닥판의 사용성에 대한 조사가 미국에서 이루어져서 공용중에 발생한 문제와 원인에 대한 검토가 행해졌고(Issa 등, 1995) 합성형 교량의 탄성해석을 통해서 필요한 유효 프리스트레스의 크기를 산정하고 이를 LRFD 시방규정과 비교하는 연구가 이루어졌다(Issa 등, 1998). 이와 같이 사용성에 대한 충분한 연구 자료가 미비하기 때문에 이를 설계 규정화하기에는 이르기 때문이라고 판단된다. 채움재료에 대해서는 다양한 제안들이 이루어지고 있는데 초기에 예폭시 모르터를 사용한 경우에는 프리스트레스를 도입하지 않는 개념을 사용하여 이후 사용성에 많은 문제점을 일으킨 바가 있다.

그림 1에서 보는 바와 같은 female-to-female 형태의 횡방향 이음부는 이음부에 철근의 연결이 단절되고 대신에 종방향 프리스트레스를 통한 압축력 도입으로 균열 제어를 한다는 개념에 따라 설계된다. 심창수(2000)의 연구에 따르면 횡방향 이음부의 사용성 설계의 기준으로 이음부에 발생하는 인장응력을 허용하지 않고 이는 채움재료로 선택된 무수축모르터의 부착특성의 변동성이 큰 것을 보완하기 위한 것으로 규정하였다. 여러 개의 거더를 가진 강합성 교량에 대해서 정모멘트 구간 경우에는 차량 윤택중에 의한 국부적으로 바닥판 하면에 발생하는 인장응력을 기준으로 유효 프리스트레스의 크기를 결정하였고 부모멘트 구간에서는 2차 고정하중 및 활하중에 의한 전

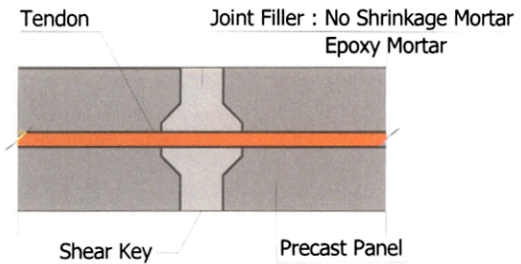
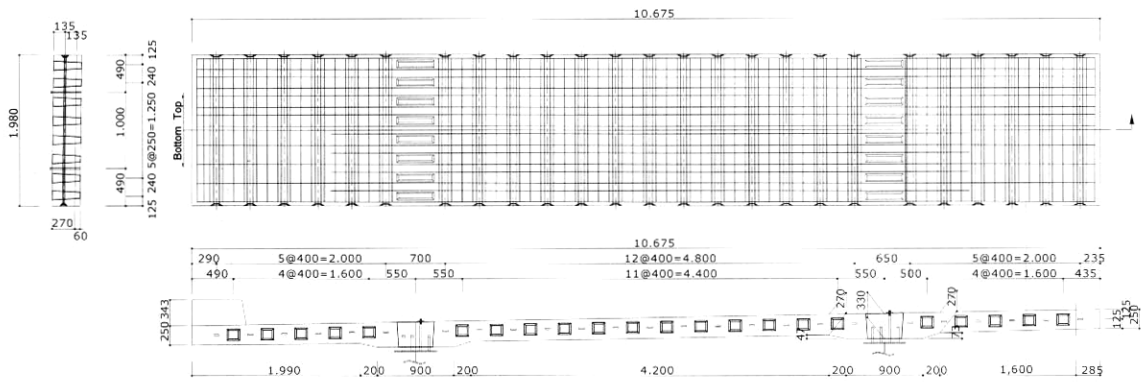


그림 1. 프리캐스트 바닥판 횡방향 이음부

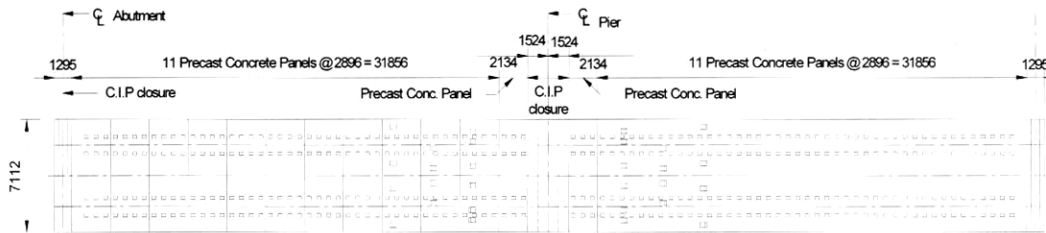
체 거동에 따른 바닥판 상부 인장응력을 기준으로 결정하도록 하였다. 그 결과 정모멘트 구간에 비해서 부모멘트 구간에 발생하는 인장응력의 수준이 크게 되어 고정하중에 의한 변곡점 구간에서 정/부 모멘트 구간의 프리스트레스 강재의 정착부를 혼재하여 설계되어야 한다. 이러한 설계 개념은 다거더 교량에서는 이러한 문제가 어느 정도 해결 가능하지만 2거더 교량의 경우에는 설계 상세에서 상당한 어려움을 갖게 된다.

기존 연구는 주로 다거더(multi-girder) 시스템에 적합하도록 프리캐스트 바닥판이 설계되어서 교축방향 프리스트레스의 크기가 작고, 주철근 배근량이 많지 않았다. 그러나, 현재 설계되고 있는 2거더 연속교의 경우에는 다거더 시스템보다 설계상세가 훨씬 복잡해진다. 예를 들면 바닥판 지간이 길어지면서 주철근량이 많아지고, 바닥판 두께를 줄이기 위해 횡방향 프리스트레스를 도입하면서 결국 횡방향텐던, 종방향텐던, 주철근, 배력철근으로 이루어지는 복잡한 상세를 가지게 된다. 또한, 거더가 2개이기 때문에 합성작용을 확보하기 위한 전단포켓이 많아져서 주철근 배근 공간 확보에도 어려움이 있게 된다. 그림 2에 예시를 제시하였다. 또한, 바닥판의 지간이 증가하면 현재의 단위폭 설계 개념과 달리 종방향 모멘트의 평가에 의한 균열제어 검토가 요구된다. 특히, 프리캐스트 바닥판을 사용하는 경우에는 이음부에 발생하는 종방향 응력의 수준이 바닥판 지간 증대에 따라 증가하기 때문에 도입해야 하는 유효 프리스트레스의 크기가 과다할 수 있다. 이로 인해서 바닥판의 상세 설계에 어려움을 겪을 수 있다.

이 논문에서는 female-to-female 이음부를 갖는 전두께 프리캐스트 바닥판의 횡방향 이음부에서의 사용성을 보장하기 위해서 기존 연구에서 사용한 무수축모르터를 대체할 수 있는 채움재료를 사용하여 단순교와 연속교에 대해서 도입해야 하는 종방향 프리스트레스의 크기를 개선할 수 있는 방안을 연구하였다. 연속교의 경우에는 활하중에 의해서 발생하는 바닥판의 종방향 인장응력의 크기가 정모멘트 구간과 부모멘트 구간이 서로 상이하여 프리스트레스 텐던 배치 상세가 복잡해지는 문제가 발생하는데 이를 부모멘트 구간 일부에 부착능력이 뛰어난 채움재료를 사용하여 균열제어에 소요되는 유효 프리스트레스의 수준을 정모멘트 구간과 동일한 수준으로 유지할 수 있도록



(a) 바닥판 상세도 예



(b) 긴장재 정착부 배치의 예

그림 2. 2거더 프리캐스트 바닥판 상세도 예 (unit:mm)

록 하는 방안을 연구하였다. 또한, 설계에서 이방향 모멘트 산정을 위한 3차원 유한요소해석을 대체하여 종방향 모멘트를 산정하여 간략한 종방향 바닥판 인장응력 산정 방안을 제시하여 설계를 단순화시키는 개념을 사용하였다. 장기 손실을 평가하기 위한 해석적 방안을 제시하여 2거더 연속교에 프리캐스트 바닥판을 적용하기 위한 설계 제안사항을 LRFD 기준을 사용한 한계상태 설계를 만족하도록 도출하였다. 프리캐스트의 장점을 활용하고 2거더 교량에 장시간 바닥판에 대해서 프리캐스트 바닥판 사용시 발생할 수 있는 거동 특성을 밝혔다.

2. 프리캐스트 바닥판 균열제어를 위한 사용성 설계

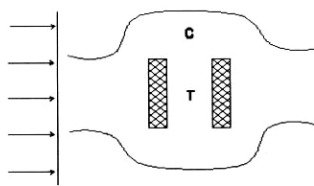
현재 강합성 교량의 전두께 프리캐스트 바닥판에 대한 설계 규정은 AASHTO LRFD(2004)에서 제시하고 있는 최소한의 도입 압축응력 기준이 1.7MPa가 있고 국내에서 제시된 가이드라인에 따르면 활하중에 의해서 이음부에 인장응력이 발생하지 않도록 제시하고 있다(심창수, 2000). 다양한 설계조건에 따라 이러한 규정들이 구체화될 필요가 있는데 이 논문에서 프리캐스트 바닥판 균열제어를 위한 사용성 설계의 원칙을 다음과 같이 제시하였다.

- 1) 유효프리스트레스의 크기결정은 사용하중으로 인해 이음부에 발생하는 최대 인장응력을 기준으로 한다. (AASHTO LRFD(2004) 기준의 경우에 고정하중과 활하중의 0.8

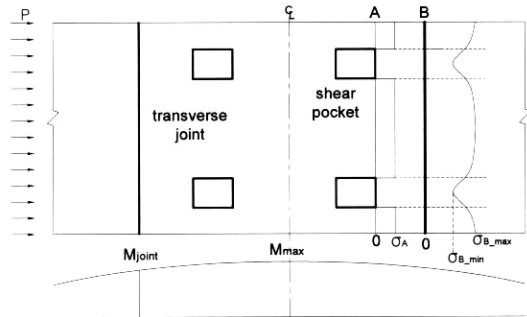
배를 한 하중조합을 사용한다).

- 2) 정모멘트 구간에 발생하는 인장응력은 활하중에 의한 국부적인 바닥판 하면 교축방향 인장응력에 근거하고 부모멘트 구간은 고정하중 및 활하중에 의해 발생하는 전체적인 바닥판 상면 인장응력을 기준으로 한다. 이때 부모멘트 구간의 콘크리트 바닥판의 단면은 유효한 것으로 보고 계산한다.
- 3) 인장응력의 허용여부와 크기는 프리캐스트 바닥판 채움재의 부착특성으로 결정한다.
- 4) 연속교인 경우 정모멘트구간과 부모멘트구간 일부에서 이음부 채움재를 다르게 설정할 수 있고 이에 따라 필요한 유효 프리스트레스의 크기를 결정한다.
- 5) 프리스트레스의 손실량은 프리스트레스 도입시기의 프리캐스트 바닥판 콘크리트 재령을 고려하여 결정하고 도입시기와 합성작용 확보 시기가 7일 이내인 경우에 이 기간의 계산에서 무시할 수 있다.
- 6) 교축방향 긴장재는 단면중심에 위치하는 것을 원칙으로 한다.
- 7) 프리스트레스가 도입되는 바닥판의 압축응력을 산정할 때에는 바닥판 단면에서 전단포켓 면적을 제외한다.

그림 3에 프리스트레스에 의한 압축응력 및 설계모멘트 분포를 나타내었다. 전단포켓이 있는 단면 A의 경우는 포켓면을 따라서 응력의 분포가 그림과 같이 단순화 될 수 있고, 프리스트



(a) 포켓으로 인한 응력의 흐름



(b) 압축응력 및 설계모멘트 분포

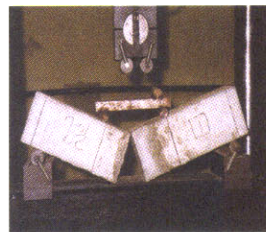
그림 3. 교축방향 프리스트레스 산정시 설계 원칙

레스에 의한 도입압축응력은 σ_A 와 0의 값을 가진다. 또한, 부모멘트 최대단면에서 제일 근접한 횡방향 이음부 단면인 B에서는 프리스트레스에 의한 도입압축응력이 $\sigma_{B_{max}}$ 와 $\sigma_{B_{min}}$ 의 값을 갖게 된다. 사용하중에 의해 발생하는 단면 최대 모멘트는 최대값 M_{MAX} 과 첫 번째 이음부에서의 모멘트값 M_{JOINT} 의 차이가 실교에서는 미미하기 때문에 사용하중에 의해 발생하는 인장응력의 평가는 설계에서 균열제어의 기준으로 하는 단면에서 계산하기 보다는 부모멘트 최대값을 그대로 사용해도 무방한 것으로 본다. (정철현 등, 2001)

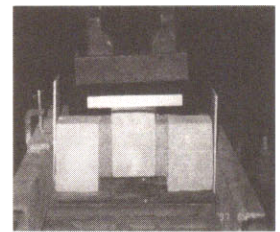
프리캐스트 부재사이 이음부의 채움재로는 무수축 모르터, 탄성 모르터, 에폭시 모르터 등이 고려될 수 있는데 이 연구의 목적이 제품간의 품질평가에 있는 것이 아니라, 채움재료로 사용 가능성을 평가하기 위한 기초실험이므로 채움재료로는 국내에서 사용가능한 자료를 참고하고 시공현장에서 일반적으로 널리 사용하는 제품을 선정하였다. 무수축 모르터는 D사의 제품을, 에폭시 모르터는 J사의 제품(콘크리트 모르터용, 상온경화형 수지접착제)을 각각 사용하였고 탄성 모르터는 수입제품을 사용하였다. 각 재료의 대표적인 재료성질은 제품 제조사의 정보에 따라 표 1에 정리하였다.

표 1. 채움재료 재료성질 (7일 강도 기준)

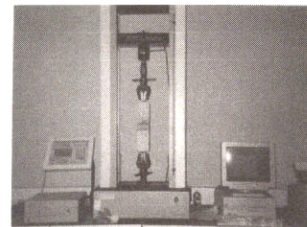
	압축강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)
무수축 모르터	43.0	6.1	2.16×10^4
에폭시 모르터	75.4	30.9	2.1×10^4
탄성 모르터 A	42.07	2.0	2.35×10^4
탄성 모르터 B	44.83	1.55	2.28×10^4
탄성 모르터 C	55~62	6.90~8.25	$(7.50 \sim 8.50) \times 10^3$



(a) Flexural Test Specimen



(b) Shear Test Specimen



(c) Direct Tension Test Specimen

그림 4. 채움재료 부착강도 실험

부착강도의 평가는 여러 가지 하중모드에 따라 수행할 수 있는데 프리캐스트 바닥판 이음부가 받는 하중의 형태를 고려하여 휨-인장 시험 결과를 기준으로 한다. 이음부의 간격은 실제 설계를 고려하여 30mm로 정하였고 직접인장실험을 위한 인장기구와 인장시편은 그림 4와 같이 고안하여 사용하였다. 100mm×100mm×170mm의 틀 속에 인장기구를 먼저 설치한 후 콘크리트를 타설하였다. 부재가 완성되면 부착면 처리 후, 채움재료를 타설하였다. 채움재 양생 후 돌출된 직경 15mm의 강봉을 이용하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험시 편심재하를 방지하기 위해 인장기구가 부재중심선과 일치되도록 제작상 주의를 기울였다. 인장기구의 내부에 설치되는 60mm×60mm크기의 철판에서 접합면까지의 거리를 단면크기보다 큰 120mm로 하여 이음부에 균일한 인장응력이 분포되도록 하였다. 직접전단실험과 휨 인장에 대한 부착실험은 그림 4 (b), (c)와 같이 제작하여 시험을 수행하였다. 각 부착실험의 시편을 3개를 기준으로 하였고 평균의 10%를 넘는 데이터를 제외한 평균값을 표 2에 제시하였다. 탄성모르터의 경우 전단실험은 수행하지 못하였다.

설계에서 소요 부착강도가 요구되면 휨 실험을 통해 재료 성질을 검증하도록 하는 것이 타당하다. 이는 직접 인장에 의한 부착강도 평가가 난해하고 편차가 있을 수 있기 때문에 이를 최소화하기 위해서는 기존의 몰드를 활용할 수 있는 휨 부착강도를 이용하는 것이 바람직하다. 부착의 특성상 변동성이 크고

표 2. 부착강도 실험결과

	전단실험(MPa)	휨 실험(MPa)	인장실험(MPa)
무수축 모르터	0.70	0.70	0.25
에폭시 모르터	0.85	3.80	1.25
탄성 모르터	-	1.33	1.06

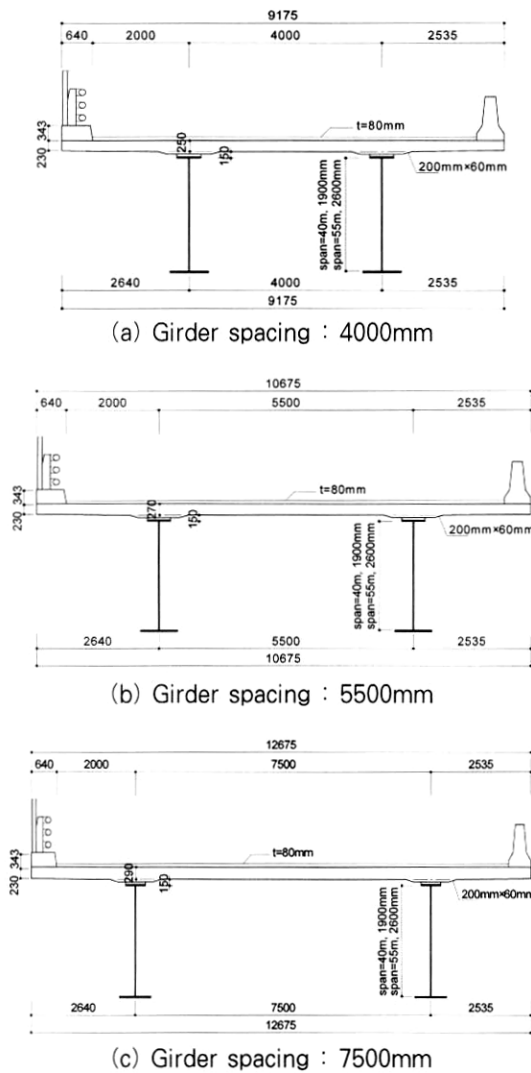


그림 5. 2거더 예제교량

현장에서의 작업 품질을 고려하여 충분한 안전율을 확보할 필요가 있다.

3. 유효 프리스트레스의 크기 결정

프리캐스트 바닥판 강합성 교량에서 특별히 2거더 교량에 주목하는 이유는 장기간 바닥판의 설계의 결과가 철근 배근 및 강선 배치 등으로 인해서 복잡한 상세를 제공하고 있기 때문이다. 또한, 바닥판의 거동이 2방향 판거동을 하기 때문에 정모멘트 구간에 활하중에 의해 발생하는 국부적인 교축방향 인장응력에 대한 평가가(정철현 등, 1999) 설계를 위해서 단순화될 필요가 있기 때문이다.

대상교량은 2경간과 3경간 연속교를 선택했고, 바닥판 지간을 설계변수로 교축방향 인장응력을 산정하였다. 바닥판 지간은 4.0m, 5.5m, 7.5m이고, 바닥판 두께는 각각 250mm, 270mm, 290mm로 다르게 설정하였다. 발생응력의 수준이

표 3. 정모멘트구간 바닥판 인장응력

Span	Girder Spacing	종방향 모멘트 M_l (kN·m/m)	하부인장응력 σ_l (MPa)
40m	4.0m	3351.46	2.57
	5.5m	4838.04	3.19
	7.5m	7005.74	4.00
55m	4.0m	3199.29	2.46
	5.5m	4630.99	3.05
	7.5m	6723.97	3.84

비슷하도록 거더를 설계하였고, 설계트럭하중은 도로교설계기준에서 규정하고 있는 DB-24 표준트럭하중과 DL-24 표준차선하중을 재하하였다. 그림 5에 예제 교량의 단면을 제시하였는데 경간을 따라 단면 변화를 주지는 않았다.

정모멘트 구간의 바닥판 하면에 발생하는 활하중에 의한 인장응력의 산정은 3차원 해석이 요구되지만 설계를 위한 간략화된 평가가 필요하다. 이 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통해서 유도된 간략화된 바닥판 종방향 모멘트 평가식으로부터 응력 산정을 하였다. 바닥판의 지간이 넓어지면 판의 2방향성이 커져서 교축방향 휨모멘트가 증가한다. 이 연구에서 사용한 교축방향 휨모멘트 식은 바닥판과 거더의 상대강성이 미치는 영향을 고려한 식 (1), (2)를 사용하였다(정철현 등, 2004).

$$M_{do} = (0.095L - 0.01)P(1 + i) \quad (1)$$

$$M_{longitud} = (0.026L + 0.63)M_{do} + (0.31/S)P(1 + i) \quad (2)$$

여기서, L : 바닥판 지간(m), P : 작용하중(kN), i : 충격계수, $S = \frac{E_s I_g}{LD_s}$: 상대강성이고 $D_s = \frac{T_s^3 E_c}{12(1 - \nu_c^2)}$ 이며, E_s : 거더 탄성계수, E_c : 바닥판 콘크리트 탄성계수, I_g : 거더의 단면2차모멘트, L : 거더의 지간길이, T_s : 바닥판의 두께, ν_c : 콘크리트 푸아송비를 나타낸다.

정모멘트 구간 바닥판의 하연인장응력과 종방향 모멘트를 표 3에 정리하였다. 여기서는 LRFD(2004)에서 규정하는 사용하중계수 0.8을 곱해주었다.

부모멘트 구간의 콘크리트 바닥판에 발생하는 인장응력의 산정은 기존의 설계에서 하는 유효폭을 가진 합성보 단면에 대한 전체 해석의 결과로부터 산정한다. 하중은 합성 후 바닥판에 작용하는 2차고정하중을 고려하였고, DB-24 트럭하중과 DL-24 차선하중을 재하하였다. 포장두께는 80mm이고 단위중량 22.5 kN/m³이다. 그 외 난간과 방음벽, 중앙분리대와

표 4. 부모멘트구간의 최대응력(2경간교량)

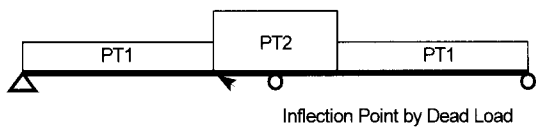
교량 경간	바닥판 지 간	M_{2d} (kN·m)	$M_{vehicle}$ (kN·m)	$M_{service}$ (kN·m)	σ_{long} (MPa)
2@40m	4.0m	1671.26	5626.69	6172.61	3.38
	5.5m	2068.68	6702.59	7430.75	3.72
	7.5m	2519.29	6890.79	8031.92	3.69
2@55m	4.0m	3160.39	9724.88	10940.29	4.26
	5.5m	3911.92	11584.89	13179.83	4.69
	7.5m	4764.02	11910.17	14292.16	4.67

표 5. 부모멘트구간의 최대응력(3경간 교량)

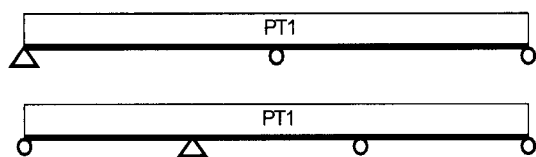
교량 경간	바닥판 지 간	M_{2d} (kN·m)	$M_{vehicle}$ (kN·m)	$M_{service}$ (kN·m)	σ_{long} (MPa)
3@40m	4.0m	1337.36	5357.00	5622.96	3.08
	5.5m	1655.39	6381.33	6760.45	3.38
	7.5m	2015.96	6560.51	7264.37	3.34
3@55m	4.0m	2528.66	9214.43	9900.20	3.85
	5.5m	3129.98	10976.80	11911.42	4.24
	7.5m	3811.75	11285.00	12839.75	4.19

가로등처럼 실교량에 있을 수 있는 합성 후 고정하중 조건을 입력하였다.

연속교 2경간과 3경간과 바닥판 지간별로 종방향 발생모멘트를 산정하였는데 바닥판 지간이 클수록 모멘트도 크게 발생하고, 발생 인장응력은 2경간이 3경간인 경우보다 크다. 사용하중에서의 응력을 산정할 때 LRFD(2004)의 사용하중상태



(a) 무수축 모르타 사용시 프리스트레스 분포



(b) 부착특성 개선시 프리스트레스 분포

그림 6. 유효프리스트레스의 분포

표 6. 부착특성 개선시 유효프리스트레스 (2경간 교량)

교량 경간	바닥판 지 간	전 경 간 소요압축응력 MPa	부착강도를 갖는 채움재 이용구간 m	부모멘트구간 채움재의 소요부착강도 MPa
3@40m	4.0m	2.57	중간지점 좌우 3m	0.81
	5.5m	3.19	중간지점 좌우 2m	0.53
	7.5m	4.00	0	0.00
3@55m	4.0m	2.46	중간지점 좌우 6m	1.80
	5.5m	3.05	중간지점 좌우 3m	1.64
	7.5m	3.84	중간지점 좌우 3m	0.83

표 7. 부착특성 개선시 유효프리스트레스 (3경간 교량)

교량 경간	바닥판 지 간	전 경 간 소요압축응력 MPa	부착강도를 갖는 채움재 이용구간 m	부모멘트구간 채움재의 소요부착강도 MPa
2@40m	4.0m	2.57	중간지점 좌우 2m	0.51
	5.5m	3.19	중간지점 좌우 1m	0.19
	7.5m	4.00	0	0.00
2@55m	4.0m	2.46	중간지점 좌우 5m	1.39
	5.5m	3.05	중간지점 좌우 2m	1.19
	7.5m	3.84	중간지점 좌우 1m	0.35

에 대한 하중조합에 따라 하중계수를 2차고정하중에는 1.0, 활하중에는 0.8을 적용하였고, 그 계산 결과를 표 4와 표 5에 나타내었다.

정모멘트 구간과 부모멘트 구간의 바닥판에 발생하는 인장응력을 기준으로 균열제어를 위해 도입해야 하는 유효 프리스트레스의 크기를 결정하면 그림 6(a)에서 보는 것과 같이 고정하중 변곡점을 기준으로 서로 다른 크기의 프리스트레스 도입이 요구된다(심창수, 2000). 물론, 바닥판의 지간이 길어지면 이 차이가 줄어들어 경향을 보이게 된다. 상세의 단순화를 위해서는 전 경간에 동일한 프리스트레스를 도입하는 것이 좋는데 이를 위해서는 이음부의 부착강도를 인정할 수 있는 재료의 선택이 필요하다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같은 동일 크기의 유효 프리스트레스를 도입하는 경우에는 부모멘트의 일정구간에 사용되는 채움재료에 대한 부착강도 요구조건을 별도로 제시하여야 한다. 즉, 설계시 채움재료의 소요 부착강도의 최소기준과 이 재료를 사용해야 하는 구간을 명시하여 사용성을 확보할 수 있다는 개념이 사용된다. 표 6과 표 7에 이 값들을 정리하였는데 바닥판 지간이 7.5m 인 경우는 발생 인장응력이 정모멘트와 부모멘트 구간에서 거의 유사하게 나타나서 별도의 채움재

료의 부착강도 요구조건이 없어도 동일한 크기의 프리스트레스 도입이 가능하다. 다만, 손실량을 고려한 초기 프리스트레스의 크기가 과다한 경우에는 전구간에 부착강도를 인정할 수 있는 재료를 사용하여 프리스트레스 소요량을 줄일 수 있다.

4. 장기거동 평가를 통한 초기 프리스트레스 크기 산정

강합성 교량에 프리스트레스를 도입하는 경우에 강재의 구속 효과에 따른 도입 압축응력의 손실량이 일반적으로 상당한 수준으로 발생한다. 이러한 손실량은 강재의 상대적인 강성비 및 프리캐스트 부재의 재령, 프리스트레스 도입량 등에 따라 달라지기 때문에 좀 더 엄밀한 형태의 장기 손실 평가가 요구된다. 이 논문에서는 초기 손실량은 다루지 않고 장기손실만을 고려하였다. 재령보정 유효 탄성계수법을 사용하여 장기거동을 평가하였고(Ghali 등, 1993), 재료특성값은 국내설계기준을(2005) 따라 결정하였다.

프리스트레스를 도입한 즉시 발생하는 축방향 변형률과 곡률은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_o(t_0) \\ \psi(t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_{ref}(AI - B^2)} \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}_{equiv} \quad (3)$$

여기서, E_{ref} 는 환산 시 기준이 되는 재료의 탄성계수이고, A, B, I 는 환산단면의 단면적, 단면 1차 모멘트, 단면 2차 모멘트, N 과 M 은 기준점에 작용하는 축력과 휨모멘트이다. 시간 t_0 일 때 환산단면 중심에 기준점 O 가 있다고 하면 $B=0$ 이 되고 따라서 식 (3)은 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_o(t_0) \\ \psi(t_0) \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_{ref}} \begin{Bmatrix} N_{equiv} / A \\ M_{equiv} / I \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서, ε_o : 기준점에서의 변형률, ψ : 곡률이다.

포스트텐션에서는 프리스트레스 덕트의 단면적은 콘크리트 단면적에서 공제해야 하고, 환산단면을 써서 식(3)과 식(4)으로 계산할 경우 PS강재의 단면적은 빼주어야 한다.

콘크리트 단면의 임의 점의 탄성변형률과 탄성응력은 다음의 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$\varepsilon_c(t_0) = \varepsilon_o(t_0) + \psi(t_0)y \quad (5)$$

$$\sigma_c(t_0) = [E_c(t_0)]_i [\varepsilon_o(t_0) + \psi(t_0)y] \quad (6)$$

여기서, y : 기준점에서 구하는 위치까지 거리이다.

콘크리트와 강재, 또는 PS강재로 이루어진 합성부재는 크리프, 건조수축, 릴랙세이션으로 인한 응력재분배가 발생한다. 완전합성을 가정하는 경우 콘크리트와 강재는 일체로 거동을 하게 되며, 따라서 크리프, 건조수축, 릴랙세이션은 두 재료에 영향을 준다. 하중을 재하한 시점, 즉 자중과 같은 고정하중이 작용하기 시작한 시점 t_0 부터 구하고자 하는 미래의 어느 시점 t 까지 변형률에 변화량 Δ 가 발생하고, 이 변화량은 축방향 변형률 $\Delta\varepsilon_o$ 과 곡률 $\Delta\psi$ 증분량으로부터 구할 수 있게 된다. 처음에는 휨모멘트 ΔM 과 기준점의 축력 ΔN 이 합성단면을 강제 구속하지만, 나중에 이 구속력은 우력으로 제거된다. 이 결과를 아래 식 (7)과 같이 변화량으로 정리할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_o \\ \Delta\psi \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_c(A\bar{I} - \bar{B}^2)} \begin{bmatrix} \bar{I} & -\bar{B} \\ -\bar{B} & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, (-)로 표기된 기호는 재령수정 환산단면에 대한 단면성질을 나타내고, \bar{E}_c 는 재령수정 탄성계수이다.

구속력은 다음 식 (8)과 같이 세 항의 합으로 계산할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{cr} + \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{sh} + \begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{relax} \quad (8)$$

발생한 크리프·건조수축·릴랙세이션으로 인한 변형을 상쇄시키는데 필요한 구속력은 식 (9), (10), 그리고 식 (11)에 각각 나타내었다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{creep} = - \sum_{i=1}^m \left\{ \bar{E}_c \varphi \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ B_c & I_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_o(t_0) \\ \psi(t_0) \end{Bmatrix} \right\}_i \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{shrinkage} = - \sum_{i=1}^m \left\{ \bar{E}_c \varepsilon_{cs} \begin{bmatrix} A_c \\ B_c \end{bmatrix} \right\}_i \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M \end{Bmatrix}_{relaxation} = \sum \left\{ \begin{bmatrix} A_{ps} & \Delta\bar{\sigma}_{pr} \\ A_{ps}y_{ps} & \Delta\bar{\sigma}_{pr} \end{bmatrix} \right\}_i \quad (11)$$

식(9), (10)에서 단면성질은 콘크리트 단면만을 말하고, A_{ps} 는 PS강재 단면적, $\Delta\bar{\sigma}_{pr}$ 은 릴랙세이션 감소량이다.

구하고자 하는 위치의 크리프와 건조수축 구속응력은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

표 8. 초기프리스트레싱력 산정 (2경간 교량)

Span	Girder spacing (m)	$f_{required}$ (MPa)	P_{eff} (kN)	$f_{initial}$ (MPa)	t (day)	Δf_{loss} (MPa)	$f_{remained}$ (MPa)	P_i (kN)
2@40m	4.0	2.57	1818	7.20	30	4.58	2.62	5046
				6.17	90	3.51	2.66	4325
				5.14	180	2.54	2.60	3604
	5.5	3.19	2644	7.82	30	4.60	3.22	6426
				6.70	90	3.48	3.22	5508
				5.74	180	2.54	3.20	4721
	7.5	4.00	3840	9.00	30	4.90	4.10	8574
				7.80	90	3.70	4.10	7431
				6.80	180	2.71	4.09	6478
2@55m	4.0	2.46	1740	6.64	30	4.17	2.47	4658
				5.66	90	3.15	2.51	3968
				4.80	180	2.31	2.49	3364
	5.5	3.05	2528	9.46	30	6.36	3.10	7773
				8.08	90	5.01	3.07	6645
				5.34	180	2.25	3.09	4388
	7.5	3.84	3686	10.75	30	6.89	3.86	10243
				9.68	90	5.69	3.99	9219
				8.06	180	4.18	3.88	7682

표 9. 초기 프리스트레싱력 산정 (3경간 교량)

Span	Girder spacing (m)	$f_{required}$ (MPa)	P_{eff} (kN)	$f_{initial}$ (MPa)	t (day)	Δf_{loss} (MPa)	$f_{remained}$ (MPa)	P_i (kN)
3@40m	4.0	2.57	1818	9.64	30	7.03	2.61	6578
				8.22	90	5.63	2.59	5767
				6.81	180	4.23	2.58	4776
	5.5	3.19	2644	10.85	30	7.56	3.29	8917
				9.25	90	6.03	3.22	7606
				7.98	180	4.66	3.32	6557
	7.5	4.00	3840	12.40	30	8.29	4.11	11813
				10.80	90	6.72	4.08	10289
				9.20	180	5.12	4.08	8764
3@55m	4.0	2.46	1740	9.10	30	6.58	2.52	6383
				7.87	90	5.31	2.56	5520
				6.40	180	3.90	2.50	4485
	5.5	3.05	2528	10.07	30	6.95	3.12	8275
				8.54	90	5.48	3.06	7021
				7.32	180	4.19	3.13	6018
	7.5	3.84	3686	11.90	30	7.84	4.06	11340
				10.37	90	6.31	4.06	9877
				8.83	180	4.76	4.07	8414

$$\sigma_{restrained} = -\overline{E}_c(t, t_0) [\varphi(t, t_0) \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cs}] \quad (12)$$

여기서, $\varepsilon_c(t_0)$: 탄성변형률, ε_{cs} = 건조수축변형률이다.

5. 연속교의 프리스트레스 손실량 평가

일반적으로 강합성교량은 바닥판의 프리스트레스 도입시기에

따라서 현장타설 바닥판과 프리캐스트 바닥판으로 구분할 수 있다. 현장타설 방식의 경우는 슬래브에 도입한 프리스트레스의 편심으로 인한 솟음 또는 처짐을 내부지점이 구속함으로써 2차 모멘트가 발생하는 2차 효과의 문제를 야기하고 프리캐스트 방식에서는 슬래브와 거더의 합성 후 전단연결재가 있는 거더가 슬래브 하단의 크리프 변형을 구속함으로써 슬래브와 거더의 합성시기에 따라 다른 거동을 한다. 합성형 교량에서는 콘크리트 바닥판의 축방향 변형을 전단연결재로 인하여 강거더

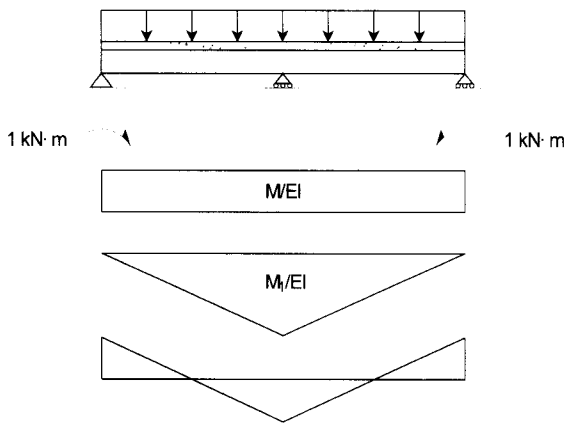


그림 7. 크리프, 건조수축에 의한 2차부정정 모멘트

가 억제하기 때문에 손실량 산정에서 이를 반영해야 하고 합성 시기에 따라 건조수축과 크리프에 의한 손실량이 달라진다.

연속교에서는 2차 부정정력에 대한 고려가 필수적이다. 2차 부정정력은 그림 7과 같이 우선 정정계의 모멘트에 영향계수 k 를 곱하여 부정정계의 휨모멘트를 얻을 수 있다.

초기에 도입해야 하는 종방향 프리스트레스의 크기는 긴장시 발생하는 초기손실, 그리고 건조수축과 크리프에 의해 발생하는 시간의존적 손실로 구분하여 결정해야 한다. 여기서는 릴랙세이션에 의한 손실은 사용하는 프리스트레스 강재에 따라 결정될 수 있는 값이기 때문에 고려하지 않았다.

기존의 해석결과와 실험결과를 근거로 판단할 때, 프리스트레스 강재의 긴장력 손실보다는 이음부에 도입한 압축응력의 손실이 더욱 중요하다. 특히, 이음부 하면에서의 손실량이 상대적으로 크기 때문에 초기 프리스트레스의 결정에서 압축응력의 손실량을 기준으로 한다. 먼저, 작용하는 하중과 무관하게 발생하는 건조수축에 의한 압축응력의 손실량을 평가하기 위해서 도로교설계기준에서 규정하고 있는 최종 건조수축 변형률을 기준으로 환산단면에 의해 계산하였다. 장기거동 해석시 변수로 고려되는 것은 주로 프리스트레스의 도입시기이다. 프리캐스트 바닥판을 만든 이후에 프리스트레스를 도입하는 시기가 늦어질수록 손실량은 상당히 줄일 수 있다. 이 연구에서는 1개월(30일), 90일(3개월), 180일(6개월)에서의 손실량을 구했고, 손실량 평가방법은 AAEM으로서, 프리캐스트 바닥판의 크리프계수는 엄밀하게 생각하면 프리캐스트 바닥판의 양생기간이나 합성형의 시공순서에 따라 지속하중이 재하될 시점의 재령도 고려할 필요가 있기 때문에 식 (13)의 재령수정탄성계수를 이용하였다.

$$\bar{E}_c(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0)\Phi(t, \tau_0)} \quad (13)$$

여기서, $E_c(\tau_0)$ 는 콘크리트 탄성계수, $\chi(t, \tau_0)$ 는 재령수정계수, $\Phi(t, \tau_0)$ 는 크리프 계수이다. AAEM으로 손실량을 계산하고 초기프리스트레스 크기를 산정한 것을 표 8과 9에서 정리하였다. 프리스트레스 도입시기를 30일에서 180일로 지연할 경우에 2경간과 3경간 연속교에서 각각 45%와 40%의 손실량의 감소효과를 나타내었다. 그리고 바닥판의 지간이 7.5m인 장지간 교량의 경우 초기도입응력이 10MPa 이상의 값을 나타내어 과도한 크기가 될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 채움재의 부착강도 활용을 고려한 설계가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결론

2거더 연속강합성 교량의 프리캐스트 바닥판 채움을 위해서 필요한 유효 프리스트레스 크기의 산정과 상세의 단순화를 위해서 부착강도를 인정할 수 있는 채움재료의 사용가능성 평가를 위한 기초 실험을 수행하였다. 또한, 장기거동에 대한 평가 방안을 제시하고 그 결과로부터 초기 프리스트레스의 크기 결정을 수행하여 기존 설계의 개선정도를 평가하였다. 주요 결론으로는 다음과 같다.

- (1) 정모멘트 구간과 부모멘트 구간의 바닥판에 발생하는 인장응력을 기준으로 균열제어를 위해 도입해야 하는 유효 프리스트레스의 크기를 결정하면 고정하중 변곡점을 기준으로 서로 다른 크기의 프리스트레스 도입이 요구된다. 또한 이음부에 발생하는 종방향 응력의 수준이 바닥판 지간 증대에 따라 증가하기 때문에 도입해야 하는 유효 프리스트레스의 크기가 과도하게 되며 이로 인해서 바닥판의 상세 설계에 어려움을 겪을 수 있다.
- (2) 고정하중에 의한 변곡점 부근의 정착상세를 단순화 하여 프리캐스트 바닥판의 배근상세에 여유를 가져오고 시공성을 개선할 수 있다.
- (3) 장지간 바닥판의 설계에서 일정수준의 부착강도를 갖는 채움재료를 사용하여 종방향과 횡방향의 인장응력 수준을 동일화시켜 전경간에 걸쳐 동일한 종방향 프리스트레스의 도입이 가능하다.
- (4) 전 경간에 동일한 크기의 프리스트레스를 도입하는 개선안은 초기 프리스트레스의 크기를 줄일 수 있고 기존의 설계방안에 비해서 전체적인 손실량을 줄일 수 있다. 또한 프리스트레스 도입시기의 지연 효과가 40~45% 정도로 나타났다.
- (5) 바닥판의 지간이 7.5m인 장지간의 교량의 경우 초기도입응력이 10MPa 정도로 과도한 크기가 될 수 있다. 따라서 채움재의 부착강도 활용을 고려한 설계가 필요한

것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005), 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
 류형근, 심창수, 장승필 (2003), 프리캐스트 바닥판 강합성 박스거더 연속교의 극한 거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제2호, pp.355-362.
 심창수 (2000), Serviceability design of steel-concrete composite bridges with full-depth precast decks, 박사학위논문, 서울대학교.
 심창수, 이필구, 장성욱, 장승필 (1999), 프리캐스트 바닥판을 갖는 강-콘크리트 합성보의 정적 및 피로거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제3호, pp.851-862.
 심창수, 정철현, 김철영, 장승필 (1998), 프리캐스트 바닥판 교량 전단연결부의 전단강성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제10권, 제4호, pp.749-758.
 윤석구, 심창수, 정철현, 장승필 (1998), 프리캐스트 교량바닥판에 대한 종방향 프리스트레싱력의 산정방법, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제I-6호, pp.799-810.
 장승필, 김영진, 김종희, 심창수 (1996), 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 구조 특성에 관한 사례 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(1), pp.169-172.
 정철현, 심창수, 김영진, 장승필 (1999), 합성형교량 바닥판의 종방향 거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제4호, pp.495-504.
 정철현, 심창수, 윤석구, 정운용 (2001) 프리캐스트 바닥판의 연속교 적용에 관한 연구, 한국강구조학회 학술발표회 논문집, pp.573-578.
 정철현, 이한주, 황훈희 (2004), 장시간 바닥판의 설계힘모멘

트에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권 제2호, pp.431-437.

Ghali, A., and Favre, R. (1993) Concrete Structures: Stresses and Deformations, E&FN SPON.
 Issa, Mohsen A., Issa, Mahmoud A., Khayyat, Salah Y., Yousif, Alfred A. and Kaspar, Iraj I. (1995), Field Performance of Full Depth Precast Concrete Panels in Bridge Deck Reconstruction, PCI Journal, V. 40, No. 3, May-June, pp. 82-108.
 Issa, Mohsen A., Yousif, Alfred A., Issa, Mahmoud A., Kaspar, Iraj I., and Khayyat, Salah Y. (1998), Analysis of Full Depth Precast Concrete Bridge Deck Panels, PCI Journal, January-February, pp. 74-85.
 Shim, C.S., Chang, S.P. (2003) Cracking of Continuous Composite Beams with Precast Decks, *Journal of Constructional Steel Research*, ELSEVIER, Vol. 59, No. 2, pp.201-214.
 Shim, C.S., Kim, J.H., Chung, C.H. and Chang, S.P. (2000) The Behaviour of Shear Connection in Composite Beam with Full-Depth Precast Slab, *Proc. Instn Civ. Engrs, Structures and Buildings*, Vol. 140, pp.101-110.
 CEB (1990), *CEB-FIP Model Code 1990*, Comite Euro-International du Beton.
 AASHTO (2004), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 3rd Edition..
 EUROCODE 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 2. Composite Bridges, DD ENV 1994-2, BSI

(접수일자 : 2006. 5. 9 / 심사일 2006. 6. 5 / 심사완료일 2006. 9. 18)