

프리스트레스를 도입한 강합성형 교량의 교축방향 거동

Longitudinal Behavior of Prestressed Steel-Box-Girder Bridge

박 남 회¹⁾ · 강 영 종²⁾ · 이 만 섭³⁾ · 고 석 봉⁴⁾

Park, Nam Hoi · Kang, Young Jong · Lee, Man Seop · Go, Seok Bong

요약: 본 연구는 일반 강합성 교량에 프리스트레스를 도입하는 연구로서, 바닥판 콘크리트의 단면을 유효하게 사용하기 위한 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 해석적 연구를 통해서 프리스트레스 도입 방법을 결정하였고, 실험적 연구를 통해서 프리스트레스를 도입한 강합성형 교량의 교축 방향의 거동을 검토하였다. 해석 및 실험을 위한 대상 교량은 2경간 연속 강합성형 교량이다. 결정된 프리스트레스 도입 방법은 두 가지로 대별되는데, 첫 번째는 내부 지점부 바닥판 콘크리트에 프리스트레스를 도입하는 것이고, 두 번째는 지점부 강박스 하부 플랜지에 프리스트레스를 도입하는 것이다. 실험을 위한 강합성형 교량의 모형시험체는 실제교량을 상사한 모델이다. 모형시험체는 내부 지점부 바닥판 콘크리트에 적절한 압축력이 도입되도록 시공순서를 고려하여 제작되었다. 모형시험체의 실험결과에 의하면, 프리스트레스를 도입한 강합성형 교량은 일반 강합성형 교량에 비하여 내구성이 우수함을 알 수 있었다. 즉 설계 활하중의 증가, 내부 지점부 바닥판 콘크리트 인장응력의 감소, 그리고 처짐의 감소 등과 같은 현상들을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT: To effectively use the cross section of concrete decks, analytical and experimental studies on prestressed steel-box-girder bridges were performed in this study. The method of applying prestress was determined in the analytical study and the longitudinal behavior of the prestressed steel-box-girder bridge was considered in the experimental study. The object model for these studies was a two-span continuous bridge. The method of applying prestress determined herein was divided into two parts: one is that apply prestress to the concrete deck at its intermediate support, and the other is that apply prestress to the lower flange of the steel-box-girder bridge at its end support. The prototype bridge for the experiment was simulated based on the rule of similitude and was fabricated according to construction steps to apply prestress effectively. From the results of the experimental study, it has demonstrated that the prestressed steel-box-girder bridge provides better performance than the general steel-box-girder bridge in view of the increase of the design live load, the reduction of the tensile stress of the concrete deck at intermediate support, and the reduction of the displacement.

핵심 용어: 프리스트레스, 강합성형 교량, 프리스트레스 도입방법, 내부 지점부 바닥판 콘크리트 인장응력

KEYWORDS: Prestress, steel-box-girder bridge, method of applying prestress, tensile stress of concrete deck at intermediate support

1. 서 론

강합성형 교량은 거더 단면이 I형이나 박스 형인 강거더와 콘크리트의 바닥판이 전단 연결재를 통해서 결합되어 하나의 합성단면을 구성하는 교량 형태이다. 강합성형 교량은 비합성형의 교량에 비하여 강성이 높고 강형의 중량 또한 감소시킬 수 있는 장점이 있지만, 연속화된 교량으로 설계 및 시공 시

내부 지점부에 부모멘트가 과도하게 유발되어 이를 적절하게 처리하지 않는다면 합성형의 단점으로 작용할 수도 있다. 연속화된 강합성형 교량의 내부 지점부 콘크리트에 적절하게 압축력을 도입할 수 있다면, 부모멘트에 저항하는 단면이 기존의 철근만의 단면이 아닌 철근과 콘크리트가 합성된 전단면으로 바뀌게 될 것이고, 이로 인해 콘크리트 바닥판의 내구성의 증진이라는 효과를 기대할 수 있을 것이다.

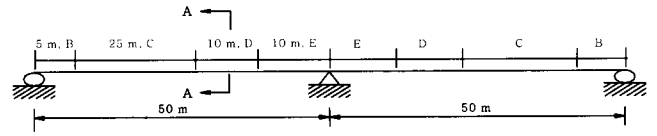
1) 정회원, 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수, 공학박사
(Tel. 02-953-1617, Fax. 02-921-5166, E-mail: nhpark@korea.ac.kr)
2) 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사(yjkang@korea.ac.kr)
3) 정회원, 코비코리아(주) 대표이사(msl@cowi.co.kr)
4) 한국토지공사 연구개발처 과장(gsb@koland.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

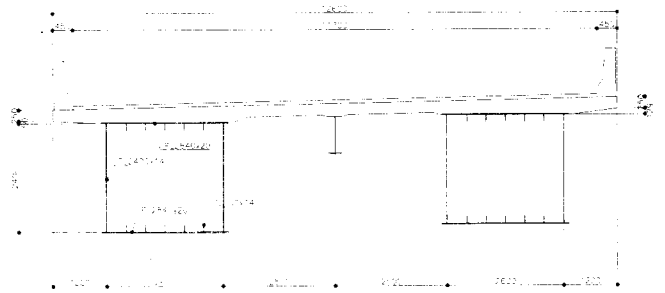
연속화된 강합성형 교량에 프리스트레스를 도입하는 연구는 국외의 경우에 많은 연구가 수행되었지만, 국내의 경우에는 아직까지 많은 연구가 수행되지 않고 있다(Dischinger 1949; Anand와 Talesstchi 1973; Anand와 Fennell 1976; Kennedy와 Grace 1982; Troitsky 1990). 더군다나, I형 단면(윤 외 3인 1998; 김 외 3인 1998; 정 외 3인 1999)이 아닌 박스 단면(류 외 3인 2002)을 갖는 강합성형 교량에 프리스트레스를 도입하는 국내의 연구결과는 현재까지 많지가 않은 실정이다.

본 연구의 목표는 박스 단면을 갖는 강합성형 교량에 프리스트레스를 도입하여 내부 지점부 바닥판 콘크리트의 내구성을 증진시키는 것으로, 이를 위해 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 해석적 연구에서는 실험적 연구에 앞서 일반 강합성형 교량에 프리스트레스를 도입하는 방법이 결정되었고, 이후 실험적 연구에서는 해석적 연구에 근거한 모형시험체가 제작되어 하중 재하 실험을 수행하였다. 해석 및 실험을 위한 대상교량은 단실 단면을 갖는 2경간 연속 강박스 거더 교량이다. 해석을 통한 프리스트레스의 도입방법은 두 가지 단계로 나누어 지는데, 첫 번째 단계는 강박스와 콘크리트 바닥판이 비합성인 상태에서 내부 지점부 콘크리트 바닥판에 프리스트레스를 도입하는 것이고, 두 번째 단계는 합성을 시킨 후 지점부 강박스 하부 플랜지에 프리스트레스력을 가함으로서 궁극적으로 내부 지점부 콘크리트에 압축력을 도입하는 것이다. 실험을 위한 모형시험체는 현재 설계 및 시공되고 있는 강합성형 교량을 선택하여 상사한 모델이다. 효율적인 압축력 도입을 위하여 시공 순서를 고려하여 모형시험체를 제작하였다. 하중 재하 실험 결과, 프리스트레스를 도입한 강합성형 교량은 일반 강합성형 교량에 비해 설계 활하중의 증가, 내부 지점부 콘크리트 인장응력의 감소, 그리고 처짐의 감소 등과 같은 내구성과 사용성 측면에서의 우수성을 알 수 있었다.

멘트 영역의 지점부 바닥판 콘크리트 단면을 무시하고 바닥판 내의 철근만을 주형의 일부로 보고 있지만, 만약 프리스트레스를 도입한다면 지점부 바닥판 콘크리트 단면을 유효하게 사용할 수 있다.



(a) 경간별 강박스 주형의 변단면 형태



(b) 단면 A-A(단위: mm)

그림 1. 대상 교량(해석 모델)의 제원

표 1. 대상교량의 경간별 강박스 주형과 가로보의 단면상수

구분	단면 번호	플랜지 두께(mm)	복부 두께(mm)	단면적 (m ²)	단면 2차모멘트 (m ⁴)
강박스 주형	B	12	12	0.1405	0.1451
	C	14	12	0.1518	0.1618
	D	20	14	0.1859	0.2123
	E	30	14	0.2523	0.3023
가로보	-	10	10	1.8900	0.006233

그림 2는 유한요소 해석 프로그램(RM)을 이용한 해석 모델의 격자(grid) 모델링의 메쉬(mesh)를 보여주고 있다. 대상 모델은 바닥판과 플랜지의 유효폭을 고려한 보 요소로 모사 되었고, 총 도입된 보의 요소 수는 200개 이다. 대상 교량의 콘크리트와 강재의 탄성계수 그리고 포아송비(Poisson's ratio)는 각각 $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 0.17, 그리고 0.3으로 가정하였다. 대상 교량에 재하 된 활하중은 도로교설계기준(2000)에서 정하는 최악의 하중조건을 따랐으며, DB-24와 DL-24하중을 재하하였다. 크리프 및 건조수축 계수는 각각 2.0과 180×10^{-6} 으로 가정하였고, 지점 침하는 각 지점에서 10mm가 발생한다고 가정하였다. 또한 바닥판 콘크리트와 강박스 주형의 온도차가 $\pm 10^\circ\text{C}$ 발생한다고 가정하였다. 프리스트레스 도입을 위해 사용된 텐던(tendon)은

2. 프리스트레스 도입 방법 결정

2.1 해석 모델

프리스트레스 도입 방법 결정을 위한 해석 모델은 일반적으로 설계 및 시공이 되고 있는 50m 지간의 2경간 연속 강합성형 교량이다. 대상 교량의 단면은 그림 1에 보이듯이 박스의 셀(cell)이 2개이고 중간에 세로보가 배치되어 있는 다중 박스 단면(multiple box section)이다. 가로보는 5m 간격으로 배치하였고, 강박스 주형은 전경간을 통해 4가지의 변단면을 갖는다. 대상교량의 가로보와 경간별 강박스 주형의 단면상수는 표 1에 정리되어있다. 현재 강합성형 교량의 설계에서는 부모

단면적이 98.71mm²인 7-wire로서 박스 당 10개를 사용하였다.

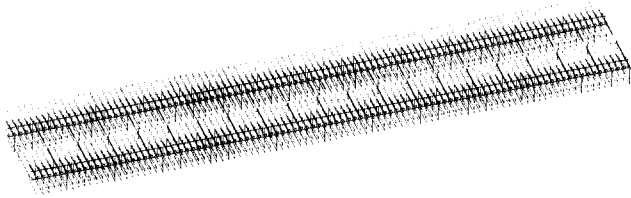


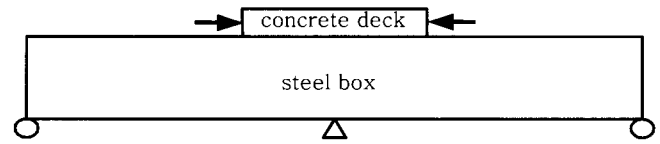
그림 2. 유한요소 모델

2.2 프리스트레스 도입 방법

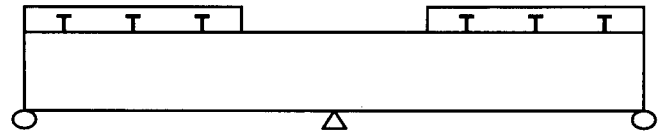
서론에서도 언급하였듯이, 압축력을 도입하는 주요한 방법은 크게 두 가지로 대별되는데, 첫 번째는 바닥판 콘크리트에 직접 프리스트레스력을 가하는 방법(이하 내부 텐던에 의한 방법)이고 두 번째는 지점부 강박스 하부플랜지에 프리스트레스력을 가함으로써 궁극적으로 내부 지점부 콘크리트에 압축력을 도입하는 방법(이하 외부 텐던에 의한 방법)이다. 본 연구에서는 대상 교량의 내부 지점부 콘크리트에 효과적인 압축력을 도입하기 위해 총 8가지 경우(내부 텐던에 의한 방법 5가지, 외부 텐던에 의한 방법 3가지)의 프리스트레스 도입 방법을 설정하였다. 각 경우별로 내부 지점부 콘크리트에 발생하는 인장응력을 분석한 결과, 그림 3과 4와 같은 내부 텐던(internal tendon)과 외부 텐던(external tendon) 도입 방법이 가장 효과적으로 압축력을 도입하는 각각의 방법들로 나타났다. 각 경우에 대한 응력의 분석 비교는 한국토지공사의 연구결과(2001)에 상세히 나타나 있는 관계로 여기서는 생략하고, 선택된 2가지의 경우에 대해서만 간략하게 설명하고자 한다.

그림 3과 같이 내부 텐던에 의해서 압축력을 도입하는 시공 순서는 3가지로 크게 나눌 수 있다. 즉, ① 내부 지점부를비합성으로 타설 후 프리스트레스 도입, ② 내부 지점부 이외 부분을 전단 연결재를 통해서 합성 단면으로 타설, 그리고 ③ 내부 지점부 콘크리트를 합성단면으로 변경하는 시공순서에 의해서 압축력을 도입한다. 내부 지점부 콘크리트의 합성단면으로의 변경은 바닥판 콘크리트의 block-out부를 요구한다. 또한 그림 4와 같이 외부 텐던에 의한 경우는 ① 전체 바닥판 콘크리트를 합성단면으로 타설, ② 지점부 강박스 주형의 하부플랜지를 통해서 프리스트레스를 도입하는 2가지 시공순서에 의해서 압축력을 도입한다. 외부 텐던에 의한 경우는 각 지점부에 정착을 위한 콘크리트 블록을 강박스 하부 플랜지 위에 타설하

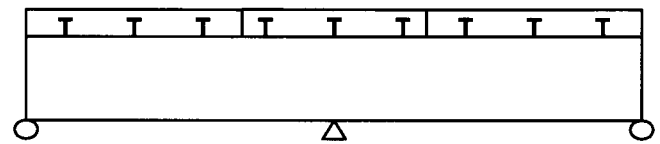
는 것을 요구한다. 본 연구에서 적용한 외부 텐던의 직선 배치는 시공성을 고려한 것이다.



(a) 내부 지점부를 비합성으로 타설 후 프리스트레스 도입

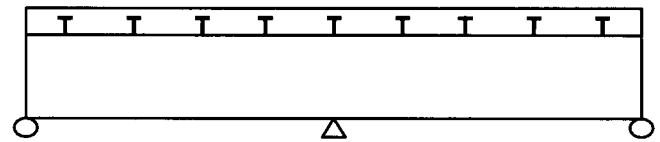


(b) 내부 지점부 이외 부분을 합성단면으로 타설

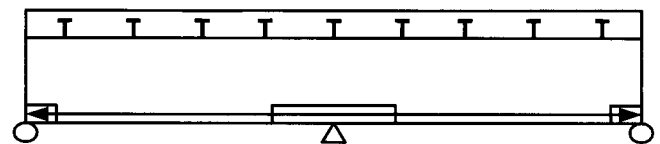


(c) 내부 지점부 콘크리트를 합성단면으로 변경

그림 3. 내부 텐던에 의한 프리스트레스 도입 방법



(a) 바닥판 콘크리트를 합성단면으로 타설



(b) 외부 텐던에 의한 프리스트레스 도입

그림 4. 외부 텐던에 의한 프리스트레스 도입 방법

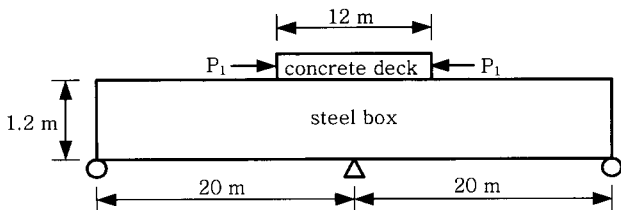
3. 모형 시험체 제작 및 정적재하시험

모형 시험체는 교폭 2.8m 교장 40m인 단실 단면을 갖는 2경간 연속 강합성형 교량으로서, 프리스트레스 도입을 위하여 내부 프리스트레스용 텐던 4개와 외부 프리스트레스용 텐던 2개를 사용하였다. 모형 시험체는 2장의 효과적인 프리스트레스 도입 방법에 의해 시공순서를 고려하여 제작하였다. 그리고 측정은 총 3단계를 거쳐 실시하였는데, 1단계는 내부 텐던 긴장 후 도입된 압축응력 측정, 2단계는 외부 텐던 긴장

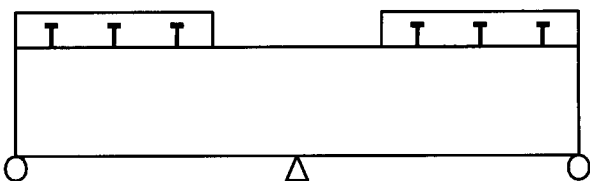
후 도입된 압축응력 측정, 그리고 마지막 3단계는 정적재하시험을 통해서 변형률과 처짐을 측정하였다.

3.1 모형 시험체 제작 및 측정 단계

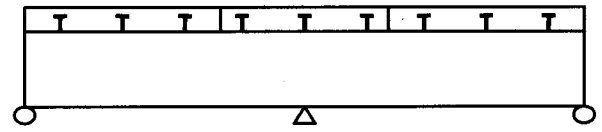
내부 지점부 바닥판 콘크리트에 효과적인 압축력을 도입하기 위하여 그림 5와 같은 모형시험체의 제작 및 측정 단계를 거쳤다. 그림 5(a)는 내부 지점부 콘크리트를 비합성으로 타설(내부 지점부를 중심으로 양쪽으로 6m씩 총 12m)하고, 내부 텐던(0.6inch 4-wire, 강연선 인장하중 26.6tonf, 인장율 62%) 4개에 의해서 압축력($P_1=263.87\text{tonf}$)을 가한 후 도입된 압축응력을 측정하는 단계이다. 이때 내부 지점부 콘크리트 안에는 추후 강박스와의 합성을 위하여 block-out부(340×185×200mm, 전단 연결재 2열 배치)가 존재한다. 그림 5(c)는 내부 지점부 콘크리트와 강박스를 합성 시키는 단계를 보여주고 있는데, 합성을 위하여 본 연구에서는 무수축 모르터를 block-out부에 타설 하였다. 그림 5(d)는 외부 텐던(0.5inch 5-wire, 강연선 인장하중 18.7tonf, 인장율 40%) 2개에 의해서 강박스 하부 플랜지 위 콘크리트 블록에 압축력($P_2=74.8\text{tonf}$)을 가함으로써 궁극적으로 내부 지점부 콘크리트에 압축응력을 도입하는 것을 보여주고 있다. 내부 지점부와 지점부 콘크리트 블록의 교축 방향 길이는 각각 8m와 2m이고, 높이는 각각 25cm이다. 마지막으로 그림 5(e)는 정적재하시험 단계를 보여주고 있는데, 재하된 하중은 각 경간 중앙에 매 10tonf(P_3) 단위로 180tonf까지 총 360tonf이 재하된다. 하중 재하를 위하여 100tonf짜리 유압 잭 4개를 사용하였다.



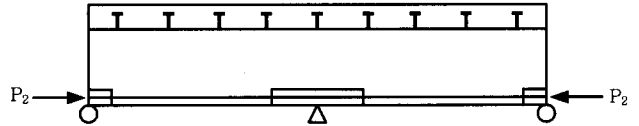
(a) 내부 텐던 긴장 후 도입된 압축응력 측정(1단계 측정)



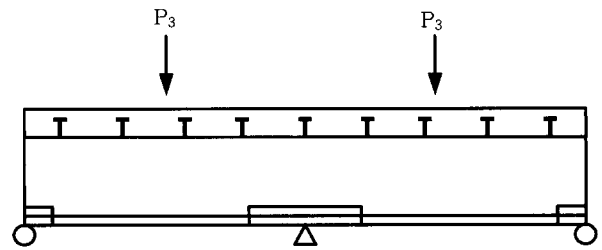
(b) 내부 지점부 이외의 부분을 합성단면으로 타설



(c) 내부 지점부 콘크리트를 합성단면으로 변경



(d) 외부 텐던 긴장 후 도입된 압축응력 측정(2단계 측정)

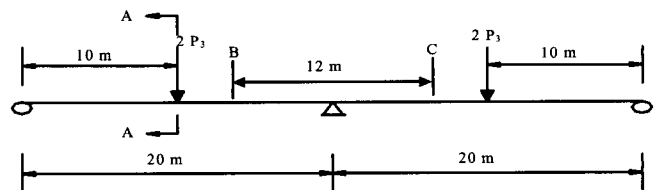


(e) 정적하중 재하시험(3단계 측정)

그림 5. 모형 시험체 제작 및 측정 단계

3.2 모형 시험체 제원

그림 6은 모형 시험체의 경간 중앙부에서의 단면도와 내부 텐던 및 block-out부의 배치도를 보여주고 있다. 모형시험체는 실험 여건상 강박스 1개를 갖는 강합성형교로 설계하였다. 모형시험체는 내부 텐던의 배치로 인해 슬래브 두께를 20cm로 고정하였고, 방호벽과 아스콘 하중은 고려하지 않았다. 또한, 캔틸레버 지간은 0.8m로 설계 및 시공하였다. 시험체의 외부 텐던이 정착되기 위한 일변의 길이가 205mm로 계산되어, 외부 텐던이 정착되는 강박스 하부 플랜지 위 콘크리트 블록의 높이를 250mm로 설정하였다. 시험체에 가해지는 활하중은 각 경간 중앙에 매 10tonf 단위로 180tonf 까지 총 360tonf을 재하 하였다. 모형 시험체의 경계조건은 내부 지점부에서는 힌지(hinge) 그리고 지점부에서는 로울러(roller)로 모사하였다.



(a) 측면도

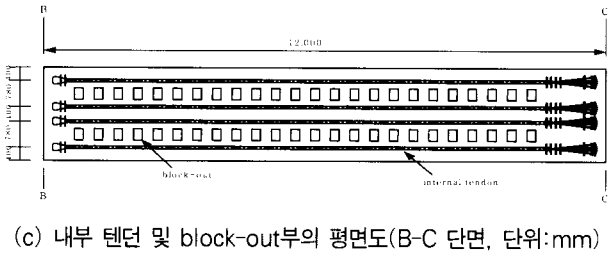
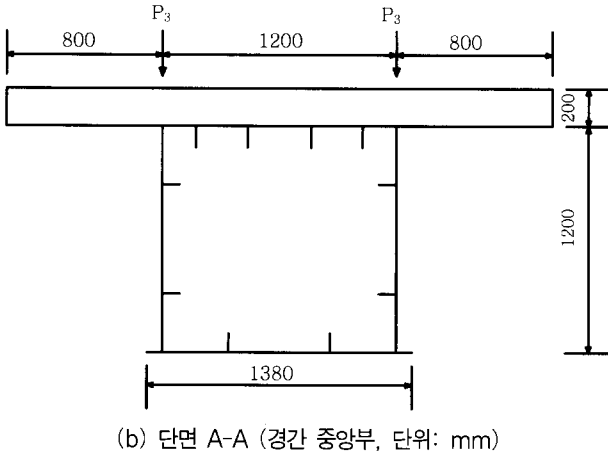


그림 6. 모형시험체의 제원

모형 시험체 바닥 콘크리트의 공시체를 통한 압축강도와 휨 인장강도는 각각 314.8 kgf/cm^2 (설계 압축강도: 300 kgf/cm^2)과 27.68 kgf/cm^2 으로 측정되었다. 또한 바닥판 콘크리트의 사용 주철근량과 사용 배력철근량은 각각 4.28 cm^2 ($H10@167\text{mm}=4.28 \text{ cm}^2$)과 2.85 cm^2 ($H10@250\text{mm}=2.85 \text{ cm}^2$)이다.

3.3 게이지 부착위치

모형 시험체의 게이지 부착위치는 그림 7(a)에 나타나 있듯이 두 개의 게이지 라인, 즉 경간 중앙부(10m 지점)와 내부 지점부(20m 지점)에 콘크리트 매립게이지와 강재 게이지를 부착하였다. 그림 7(b)는 콘크리트 매립 게이지의 위치를 보여주고 있는데, 콘크리트 매립게이지는 내부 지점부 콘크리트 상하부 철근에 12개(BM1-6, TM1-6) 그리고 경간 중앙부 하부 철근에 6개(BM7-12)를 매립하여 변형률을 측정하였다. 또한, 강재 게이지는 강박스 하단에 부착하였는데, 경간 중앙부에 10개 내부 지점부에 6개를 부착하여 변형률을 측정하였다. 처짐 측정용 LVDT(정밀도 0.001mm)는 경간 중앙부(10m, 30m) 강박스 하단에 2개를 설치하여 하중 재하에 따른 처짐을 측정하였다.

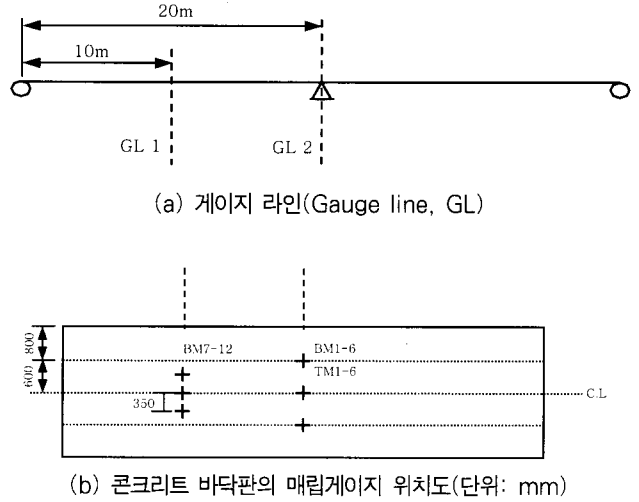


그림 7. 게이지 부착위치

4. 실험 결과

4.1 내부 텐던에 의해 도입된 압축응력(1단계 측정)

그림 5(a)에 설명 되어 있듯이, 모형 시험체 콘크리트 바닥판을 비합성으로 타설 후 내부 텐던에 의해 내부 지점부 콘크리트에 압축응력을 도입하였다. 압축력은 외부 텐던 4개에 의해서 총 263.872ton이었다. 내부 텐던 도입 시 콘크리트의 탄성계수는 $2.42 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 측정되었다. 표 2는 내부 텐던에 의해서 내부 지점부 콘크리트에 도입된 압축응력을 나타내고 있는데, 그림 7(b)의 GL 2에서 교축 직각방향의 매립게이지 측정위치는 복부 위 슬래브(BM1-2와 5-6, TM1-2와 5-6)와 중앙부 슬래브(BM3-4, TM3-4)이다. 표 2의 해석값은 범용 프로그램(ABAQUS)의 해석을 통해서 산출된 값인데, 콘크리트 바닥판을 솔리드 요소(solid element)를 사용하여 모사하였고 철근을 rebar 요소(rebar element)를 사용하여 탄성 해석 하였다. 해석 모델 양단의 교축 방향 경계조건은 로울러, 교축 직각방향 경계조건은 상하방향으로 가동할 수 있는 가동 로울러로 모사하였다. 실험 값과 해석 값이 중앙부 슬래브에서 26%정도의 차이를 보이는데, 이는 block-out부의 영향과 내부 텐던이 중앙부에 집중적으로 2개 배치된 영향 [그림 6(c)]으로 판단된다. 또한, 복부 위와 중앙부 슬래브 콘크리트에 발생하는 압축응력을 비교하면, 중앙부 슬래브 콘크리트에서 훨씬 큰 응력이 발생하는데 이는 내부 긴장력에 의한 하중들이 중앙부 슬래브에 집중되는 현상을 보여주고 있다. 표 2의 이론적인 압축응력은 압축력을 단면적으로 나눈 값이고, 수치적 평균값은 세 가지 경우(실험, 해석, 이론)의 응력들을 단순 비교하기 위해 복부 위와 슬래브의 응력들을 평균

한 값들이다. 여기서 이론적인 압축응력 산정 시 적용된 단면적은 실험 및 해석 치와의 단순 비교를 위함으로 block-out부를 고려하지 않은 단면적이다.

표 2. 내부 텐던에 의해 도입된 압축응력(내부 지점부, GL 2)

측정 위치	게이지 방향	변형률 ($\times 10^{-6}$)	압축응력 (실험)	압축응력 (해석, 솔리드 요소)	압축응력 (이론)
복부 위 슬래브	교축	-83	-23.88	-28.81	-47.12
	교축 직각	-53			
중앙부 슬래브	교축	-292	-75.42	-59.94	-47.12
	교축 직각	+8			
수치적 평균값	-	-	-49.65	-44.38	-47.12

주: 압축응력 단위는 kgf/cm^2 임

4.2 외부 텐던에 의해 도입된 압축응력(2단계 측정)

외부 텐던에 의해 내부 지점부 콘크리트에 도입된 압축응력을 검토하기 위하여 표 3에서 설명하고 있듯이, 3가지 방법에 의한 압축응력을 비교하였다. 즉 솔리드-셸 요소(solid-shell element, ABAQUS), 보 요소(beam element, RM), 그리고 실험에 의한 결과 값을 비교하였다. 표 3에서 솔리드-셸 해석과 보 해석에 의한 값들은 서로 차이를 보이지 않고 있지만, 실험 값과 상기의 두 가지 해석에 의한 값들은 복부 위 콘크리트 슬래브에서 상당히 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 여러 이유가 있을 수 있겠지만, 그 중에서도 가장 큰 영향은 내부 텐던과 block-out부의 영향으로 판단된다. 즉 외부 텐던에 의한 하중의 분배가 내부 지점부에서 교축 직각방향으로 원활 하지 않다는 것이다. 결국 block-out부와 내부 텐던이 교축 직각방향으로의 하중의 분배를 방해하고 있는 것이다. 두 가지 해석(솔리드-셸과 보 해석)에서 block-out부와 내부 텐던의 형상을 모델링 한 후 외부 텐던의 영향을 고려하기에는 범용프로그램의 용량의 문제점으로 인해 한계성을 보인다. 그러한 이유로 인해, 본 연구에서는 프리스트레스가 도입된 강합성형 교량의 교축 방향 거동을 실험에 의한 응력 값과 처짐 값을 통해서 검토하였다.

표 3. 외부 텐던에 의해 도입된 압축응력(내부 지점부)

측정 위치	게이지 방향	변형률 ($\times 10^{-6}$)	압축응력 (실험)	압축응력 (솔리드-셸 해석)	압축응력 (보 해석)
복부 위 슬래브	교축	-11	-2.37	-12.02	-11.15
	교축 직각	+11			
중앙부 슬래브	교축	-38	-9.42	-11.90	-11.15
	교축 직각	+10			

주: 압축응력 단위는 kgf/cm^2 임

표 4. 내부 텐던과 외부 텐던에 의해 도입된 압축응력 (내부 지점부, 실험)

측정 위치	내부 텐던에 의한 압축응력	외부 텐던에 의한 압축응력	총 압축응력 (내부+외부)
복부 위 슬래브	-23.88	-2.37	-26.25
중앙부 슬래브	-75.42	-9.42	-84.84

주: 압축응력 단위는 kgf/cm^2 임

표 4는 내부 텐던과 외부 텐던에 의해서 내부 지점부 바닥판 콘크리트에 도입된 압축응력을 실험 값에 근거하여 정리한 것이다. 복부 위 슬래브 보다는 중앙부 슬래브에 block-out부의 영향과 내부 텐던 배치의 영향으로 인해 더 많은 양의 압축응력이 도입됨을 알 수 있다.

4.3 정적재하시험에 의한 결과(3단계 측정)

정적재하시험을 위한 활하중은 상기에서도 언급하였듯이, 각 경간 중앙에 매 10tonf 단위로 180tonf 까지 총 360tonf 을 18단계를 통해서 재하 하였고 각 단계별로 측정을 수행하였다. 활하중을 재하 하기 전에 초기 값을 "0"으로 고정한 후 측정을 수행하였기에, 결과로 나타난 압축응력은 활하중에 의한 응력 그리고 활하중에 프리스트레스를 더한 하중에 의한 응력 값들로 나타난다. 표 5, 그림 8, 그리고 그림 9는 내부 지점부 콘크리트의 교축 방향 응력들을 복부 위와 중앙부 슬래브에서 각 하중 별로 보여주고 있다. 측정된 바닥판 콘크리트의 압축강도가 314.8kgf/cm^2 임에 따라 콘크리트 활렬 인장강도(f_{ru})는 35.48kgf/cm^2 으로 산정된다.

표 5, 그림 8, 그리고 그림 9를 자세히 관찰해 보면, 활하중에 의해서는 60tonf에서 콘크리트의 활렬 인장강도에 근접한 후 이후 추가 활하중에 의해 활렬 인장강도를 초과함을 알 수 있지만, 활하중에 프리스트레스를 더한 하중(Live load+PT)에 의해서는 130tonf에서 콘크리트 활렬 인장강도에 근접한 후 140tonf에서는 활렬 인장강도를 초과함을 알 수 있다. 결국 프리스트레스 도입의 효과로 인해 활하중을 60tonf에서 130tonf까지 늘릴 수 있다는 것을 보여주고 있는 것이고, 이는 프리스트레스 도입으로 인한 바닥판 콘크리트의 균열저항성이 증가됨을 보여주는 결과이다. 활하중의 증가는 결국 내부 지점부 콘크리트 인장응력의 감소를 의미한다.

표 5. 내부 지점부 콘크리트의 교축 방향 응력(단위: kgf/cm²)

하중 (tonf)	측정 위치	활하중 + 프리스트레스	활하중
0	복부 위	-26.25	0
	중양부	-84.84	0
20	복부 위	-20.86	+5.39
	중양부	-72.24	+12.60
40	복부 위	-15.50	+10.75
	중양부	-58.74	+26.10
60	복부 위	-15.49	+10.76
	중양부	-52.40	+32.44
80	복부 위	-12.18	+14.07
	중양부	-39.39	+46.59*
100	복부 위	-8.38	+17.87
	중양부	-28.19	+57.16*
120	복부 위	-8.55	+17.70
	중양부	-12.68	+68.17*
130	복부 위	-8.15	+18.10
	중양부	+20.60	+105.44*
140	복부 위	-7.75	+18.50
	중양부	+37.52*	+122.36*
180	복부 위	-6.33	+19.92
	중양부	+110.63*	+195.47*
200	복부 위	+4.46	+30.71
	중양부	+124.88*	+209.72*

주1: (+) 인장응력, (-) 압축응력

주2: "*"는 콘크리트 활렬인장강도(35.48kgf/cm²)를 초과함

상기에서 언급한 block-out부의 영향은 그림 8과 그림 9에서도 확인 할 수 있는데, 초기에 도입된 압축응력은 중양부 슬래브(-84.84kgf/cm²)가 복부 위 슬래브(-26.25kgf/cm²)보다 block-out부의 영향으로 인해 월등히 더 크다. 그런데, 이후 활하중을 재하 하여도 block-out부의 영향으로 인해 압축응력이 더 많이 도입된 중양부 슬래브에서 더 적은 활 하중(130tonf)에 의해 콘크리트 활렬 인장강도에 도달함을 알 수 있다. 이는 결국 활하중에 의해서도, 내부 지점부 콘크리트의 교축 직각방향 하중 분배가 block-out부로 인해 균일하지 않음을 설명하고 있는 것이다.

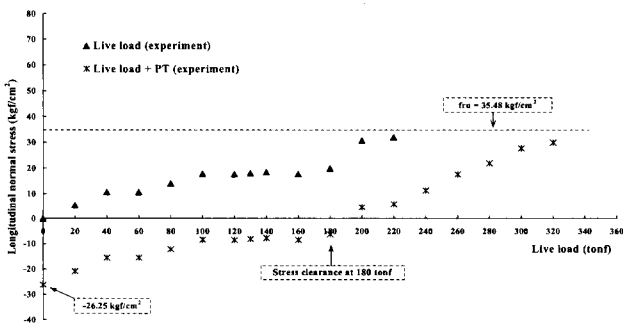


그림 8. 내부 지점부 복부 위 콘크리트의 교축 방향 응력

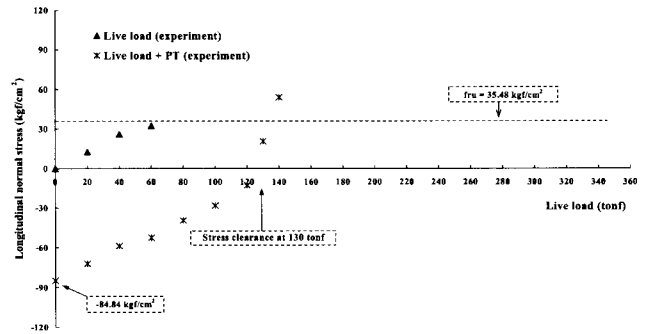


그림 9. 내부 지점부 중양부 콘크리트의 교축 방향 응력

그림 10은 경간 중양부 강박스 하단에 발생하는 교축 방향 응력을 활하중의 각 단계별로 도시한 것인데, 초기 프리스트레스력에 의해 도입된 압축응력은 -121.8kgf/cm²이었다. 활하중 360tonf를 가했을 때 강박스는 항복응력 3,200kgf/cm²을 초과하지 않음을 측정결과 알 수 있었다. 그림 11은 프리스트레스 도입에 따른 강박스 거더의 처짐의 감소 효과를 보여주고 있는데, 활하중이 60tonf 재하 되고 있는 경우이다. 활하중만에 의한 강박스 거더의 최대 처짐은 5.00mm로서 활하중에 프리스트레스력을 더한 하중에 의한 최대 처짐 3.89mm보다 약 1.11mm(외부 텐던에 의한 상향 처짐)가 더 크게 발생한다. 그림 12는 모형 시험체의 활하중 단계별 균열도를 보여주고 있는데, block-out부를 기점으로 안쪽에서 균열(140tonf 하중)이 먼저 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 block-out부와 내부 텐던의 배열로 인해 교축 직각방향 하중이 원활하게 분배되지 않고 있다는 것을 나타낸다.

그림 13은 모형 시험체의 경간 중양부 하부 플랜지의 하중-처짐 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 초기 균열은 중양부 슬래브 콘크리트에 하중 130tonf에서 발생했으며 하중이 240, 300, 360tonf으로 증가할 때 균열이 증가하고 있는 것을 나타내고 있다. 그리고 모형 시험체의 전체 거동이 약 200tonf까지는 탄성 거동을 보이고 이후부터는 비탄성 거동을 보임을 알 수 있었다.

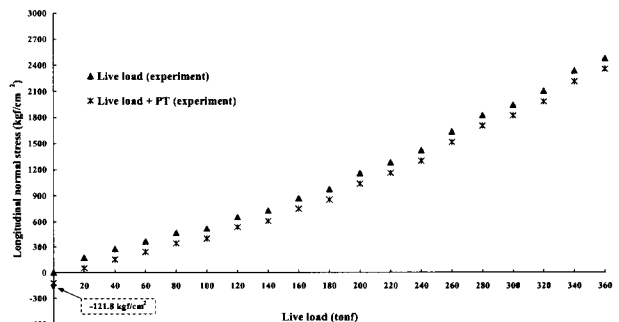


그림 10. 경간 중양부 강박스 하단의 교축 방향 응력

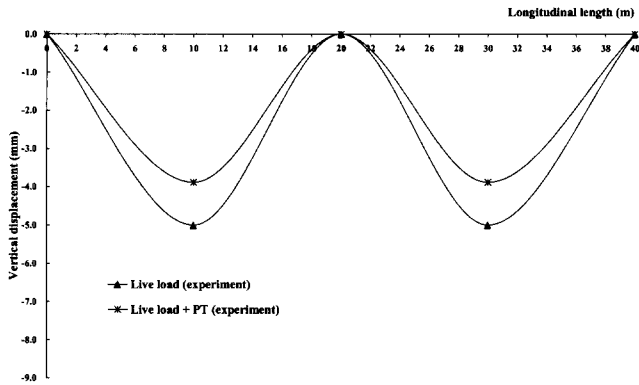


그림 11. 프리스트레스 도입에 따른 처짐의 변화

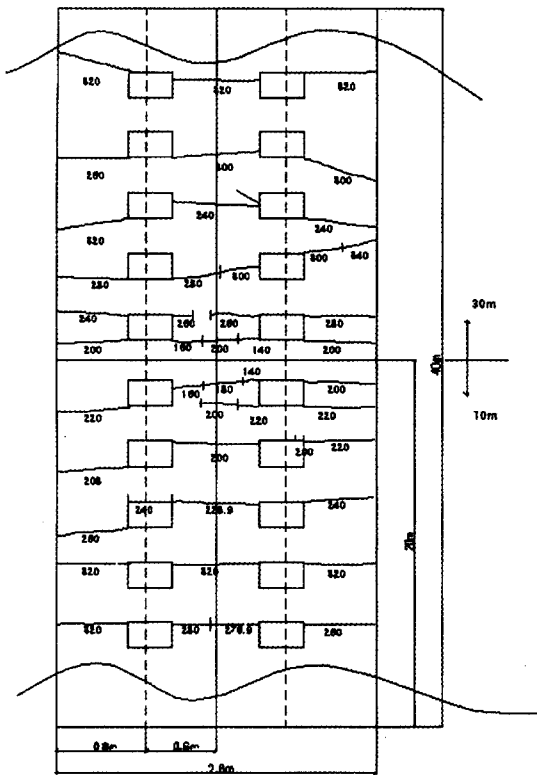


그림 12. 모형 시험체의 활하중 단계별 균열도(단위: tonf)

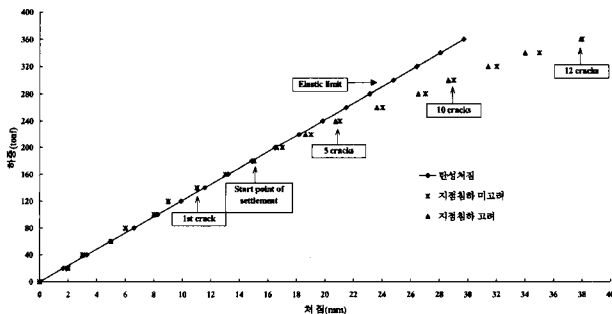


그림 13. 모형 시험체의 하중-처짐 곡선

5. 결 론

본 연구는 일반 강합성형 교량에 프리스트레스를 도입하여 내부 지점부 바닥판 콘크리트의 단면을 유효하게 사용하기 위한 해석 및 실험적 연구이다. 해석적 연구를 통해서 프리스트레스 도입 방법을 결정하였고, 실험적 연구를 통해서 프리스트레스를 도입한 강합성형 교량의 교축 방향 거동을 검토하였다. 본 연구에서 산출한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 일반강합성형 교량의 내부 지점부 콘크리트에 효과적인 압축응력 도입을 위하여 해석적 연구를 수행하였다. 해석적 연구의 결과, 시공순서를 고려하여 내부 텐던과 외부 텐던에 의한 효과적인 프리스트레스 도입 방법을 결정하였다.
- (2) 모형 시험체를 통한 정적재하시험의 결과에 의하면, 기존의 강합성형 교량에 비하여 프리스트레스를 도입한 강합성형 교량은 설계 활하중의 증가와 내부 지점부의 인장응력의 감소를 발생시킨다. 즉 기존의 설계 활하중 (60tonf)이 프리스트레스를 도입(130tonf)함으로 인해 약 2.17배까지 증가하는 것을 본 연구의 모형 시험체 결과 알 수 있었다. 이는 내부 지점부 바닥판 콘크리트의 균열저항성 증가를 의미하고, 설계 활하중의 증가는 내부 지점부 콘크리트에 발생하는 인장응력의 감소를 의미한다. 또한, 프리스트레스를 도입함으로 인해 처짐의 감소 현상을 알 수 있었다.
- (3) 해석 및 실험적 연구 결과, 외부 텐던에 의한 압축력과 활하중에 의한 하중이 콘크리트 block-out부의 영향으로 인해 교축 직각방향으로 원활하게 분배 되지 않는 현상을 관찰 할 수 있었다. 이러한 하중의 원활하지 않은 분배는 결국 교축 직각방향 중앙부 콘크리트에 응력을 집중 시키는 결과를 초래하였다. 본 연구에서는 수행하지 않았지만, 향후 block-out부에 대한 국부응력 해석이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 프리스트레스 도입에 의한 내부 지점부 콘크리트의 내구성 증가가 그 초점인 초기 연구로서 몇 가지 한정된 상황에서 해석 및 실험을 수행하였다. 그렇지만, 향후 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 재료적인 특성, block-out부에 대한 국부응력 해석, 그리고 다양한 프리스트레스력의 도입에 따른 영향 등과 같은 연구들이 수행된다면, 본 연구에서 개발한 프리스트레스 도입 방법이 많은 설계 및 시공현장에서 참고자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국 토지 공사의 1999년도 중소기업 기술개발 지원 사업의 일환으로 시작된 “프리스트레스를 적용한 강합성형 교량 형식의 개발”의 기술개발 사업으로서, 한국 토지 공사의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부, (2000). 도로교 설계기준.
 김기봉, 정영수, 최혁주, 강보순, (1998). 외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 제 10권, 4호, pp. 701-708.
 류형근, 박기남, 심창수, 장승필, (2002). 프리캐스트 바닥판 강합성 박스거더 연속교의 부모멘트 거동, 대한토목학회 논문집, 제 22권, 4-A호, pp. 805-814.
 윤석구, 심창수, 정철현, 장승필, (1998). 프리캐스트 교량바닥판에 대한 종방향 프리스트레싱력의 산정방법, 대한토목학회논문집, 제 18권, I-6호, pp. 799-810.
 정철현, 심창수, 김영진, 장승필, (1999). 합성형교량 바닥판의 종방향 거동, 대한토목학회논문집, 제 19권, I-4호, pp. 495-504.
 한국토지공사, (2001). 프리스트레스를 적용한 강합성형 교량 형식의 개발, 중소기업 기술개발 지원사업 결과 보고서.

ABAQUS Finite Element System, User's Manual, (1997). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., USA.
 Anand, S. C. and Fennell, C. J., (1976). Prestressed Composite Continuous Bridge Girder, *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the ASCE, January, pp. 311-315.
 Anand, S. C. and Talesstchi, A., (1973). Prestressed Composite Steel Beam Bridge Girder, *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the ASCE, March, pp. 301-319.
 Dischinger, F., (1949). *Composite Steel Bridges Prestressed by High Strength Cables*, Der Bauingenieur, nos. 11 and 12.
 Kennedy, J. B. and Grace, N. F., (1982). Prestressed Decks in Continuous Composite Bridges, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 108, No. 11, pp. 2394-2410.
RM Finite Element System, User's Manual, (1995). TDV Company, Austria.
 Troitsky, M. S., (1990). *Prestressed Steel Bridges-Theory and Design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
 (접수일자 : 2003. 2. 5 / 심사일 2003. 2. 17 / 심사완료일 2003. 4. 29)