

단면회전방법을 적용한 강합성 소수주거더 개발 및 실험적 성능 평가

Development and Experimental Performance Evaluation of Steel Composite Girder by Turn Over Process

김성재* · 이나현** · 김성배*** · 김장호****

Kim, Sung Jae · Yi, Na Hyun · Kim, Sung Bae · Kim, Jang-Ho Jay

Abstract

In Korea, more than 90% of the total number of steel bridges built for 40~70 m span length is a steel box-girder bridge type. A steel box-girder bridge is suitable for long span or curved bridges with outstanding flexural and torsional rigidity as well as good constructability and safety. However, a steel box-girder bridge is uneconomical, requiring many secondary members and workmanship such as stiffeners and ribs requiring welding attachments to flanges or webs. Therefore, in US and Japan, a plate girder bridge, which is relatively cheap and easy to construct is generally used. One type of the plate girder bridge is the two- or three-main girder plate bridge, which is a composite plate girder bridge that minimizes the number of required main girders by increasing the distance between the adjacent girders. Also, for the simplification of girder section, the stiffener which requires attachment to the web is not required. The two-main steel girder plate bridge is a representative type of plate girder bridges, which is suitable for bridges with 10 m effective width and has been developed in the early 1960s in France. To ensure greater safety of two- or three-main girder plate bridges, a larger steel section is used in the bridge domestically than in Europe or Japan. Also, the total number of two- or three-main girder plate bridge constructed in Korea is significantly less than the steel box girder bridge due to a lack of designers' familiarity with more complex design detailing of the bridge compare to that of a steel box girder bridge design. In this study, a new construction method called Turn Over method is proposed to minimize the steel section size used in a two- or three-main girder plate bridge by applying prestressing force to the member using confining concrete section's weight to reduce construction cost. Also, a full scale 20 m Turn Over girder specimen and a Turn Over girder bridge specimen were tested to evaluate constructability and structural safety of the members constructed using Turn Over process.

Keywords : Two-and-three steel plate girder, economical bridge type, turn over, composite girder, confining concrete

요 지

현재 국내에서 설계되고 있는 40~70 m 지간의 강도로교 90% 이상이 박스거더교 형식이며 박스거더교는 휨 강성과 비틀림 강성이 뛰어나 장경간이나 곡선을 갖는 교량 형식으로 적합할 뿐만 아니라 가설현장에서의 작업을 최소화 할 수 있어 현장 안전관리 면에서도 유리한 구조형식이다. 그러나 박스거더는 상하 플랜지와 복부판이 수직, 수평보강재로 보강되는 구조로 부재량과 용접량이 많이 소요되어 비경제적인 교량 형식으로 많이 지적되어 왔다. 따라서, 미국이나 일본에서는 상대적으로 부부재를 줄일 수 있는 보다 경제적인 플레이트거더교가 일반적으로 적용되고 있다. 이러한 플레이트거더교의 한 형식인 소수주거더교는 강합성교량의 합리화를 위해 많이 채용되는 형식으로, 주거더 간격을 종래의 3 m 정도에서 2배 정도인 6 m 이상으로 증가하여 주거더의 개수를 최소화시키는 경제적인 교량형식이다. 또한, 거더 단면의 단순화를 위하여 거더의 복부판에 부착되는 수평보강재와 수직보강재를 최대한 생략할 수 있다. 2주거더교는 소수주거더교의 대표적인 형식으로, 유효폭 10 m 전후의 교량에 적합하여 프랑스를 중심으로 유럽에서는 1960년대부터 본격적으로 개발되어왔다. 국내에서는 소수주거더교 적용시 안전을 확보를 위해 유럽이나 일본 등에 비해 많은 강재량을 사용하고 있으며, 설계자들의 친밀도 부족과 박스거더교에 비해 복잡한 설계 등과 같은 여러가지 실무적용 차원에서 적용이 제한되고 있는 실정이다. 이 연구에서는 합리화 강교량 형식인 소수주거더교의 제작방법을 개선하고 구속콘크리트를 활용하여 강교량에서 공사비와 직결되는 강중을 줄일 수 있는 신형식 강합성거더(Turn Over Composite Girder) 구조형식을 제안하고자 한다. 또한 실물 크기인 20 m 단면회전방법을 적용한 강합성 거더시험체 및 교량시험체를 제작하여 제작성을 평가하고 구조성능 실험을 하여 구조안전성을 평가하였다.

핵심용어 : 소수주거더교, 경제적 교량형식, 단면회전방법, 신형식 강합성거더, 구속콘크리트

*정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : bridgetech@daum.net)

**정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : wwitch1@yonsei.ac.kr)

***정회원 · 연세대학교 토목공학과 BK21 박사후연구원 (E-mail : sztk77@yonsei.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr)

1. 서 론

현재 국내 대부분의 교량은 2~3경간의 단경간 교량이 대다수이며, 국내에서 설계되고 있는 30~80 m의 중소지간의 강합성교량의 경우 대부분 박스거더교량 형식을 사용하고 있다. 박스거더교는 휨 강성과 비틀림 강성이 뛰어나 구조적인 안정감이 있으나, 복부판 좌굴에 대한 우려로 인해 수직 및 수평보강재 등을 사용해야 하므로 시공상의 복잡함을 초래하게 된다. 더불어, 많은 부재량과 용접량의 소모 및 넓은 도장면적, 내부 점검의 어려움 등과 같은 유지관리의 어려움으로, 교량생애주기비용이 증가하게 된다. 이와 같은 문제로 인해 선진외국에서는 상대적으로 보강재를 줄일 수 있는 플레이트거더교를 주로 적용하고 있다. 플레이트거더교는 교량의 폭이나 지간 등의 조건에 따라 다양한 형식으로 적용 가능하며, 일반적으로 다주형 플레이트거더교(multi plate-girder bridge)를 사용하고 있다. 그러나, 다주형 플레이트거더교는 주거더가 교량 바닥판 전체에 걸쳐 배치되어 교각이 상대적으로 비대해진다(길홍배 등, 2007; 김재홍 등, 2010; 박미연, 2007; 박철순, 2003; Kim *et al.*, 2008; Montes *et al.*, 2003).

이와 같은 강박스거더교 및 다주형 플레이트거더교를 포함한 기존 강합성 교량의 복잡한 구조를 간소화하기 위하여, 최근 프랑스, 독일, 스위스 및 일본 등에서는 주거더의 개수를 최소화하는 강합성 소수주거더교에 대한 연구와 시공이 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 시공성과 경제성 향상 및 유지관리의 편리성을 고려한 강합성 소수주거더교에 관심이 증가하면서, 소수주거더교 형식에 대한 기본 연구와 안정성, 내하력 및 여유도 평가 등의 연구가 활발히 진행되고 있다(길홍배 등, 2004; 김재홍 등, 2010; 이필구 등, 2003; Brozzetti, 2000; Nakai *et al.*, 1998; Toshiyuki, 2006).

더불어 소수주거더교의 생애주기비용 최적화설계에 대한 연구와 플레이트거더 복부판의 정확한 좌굴강도 및 고성능 강재 등의 개발을 통한 단순화된 교량형식에 대한 연구 등이 진행되고 있다(경용수 등, 2005; 박용명 등, 2008; 임채선, 2008; Bouazaoui *et al.*, 2007). 한편, 소수주거더교 형식에 프리스트레싱 및 프리캐스팅 공법을 이용하는 등의 신기술 및 신공법을 적용하여 경쟁력을 확보하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다(김상효 등, 2006; 김성훈 등, 2008; 박용명 등, 2008; 이필구, 2001; 정연주 등, 2004; Montes *et al.*, 2003; Stallings *et al.*, 1996).

그러나, 이와 같은 소수주거더교에 대한 활발한 연구가 진행됨에도 불구하고, 국토해양부의 '2008년 도로교량 및 터널 현황'에 따르면, 고속·일반국도, 특별광역시 및 국가지원지방도에 속한 교량 중에 강박스형교는 2786개소, 강I형교는 98개소, 플레이트거더교는 258개소가 가설되었으며, 강박스형교는 약 89%를 차지하고 있는 반면에, 강I형교와 플레이트거더교는 높은 경제성 및 우수한 미관에 비하여 상대적으로 11%의 낮은 시공이 이뤄졌음을 알 수 있다. 이러한 현상은 국내의 소수주거더교가 박스거더교에 비하여 적은 시공 및 설계 경험으로 인해 소수주거더교에 대한 기피현상으로 판단된다. 또한, 국내의 경우, 유럽이나 일본 등에 비해 충분한 안전율을 확보하기 위하여, 상대적으로 많은 강재량의 사용 등 실무적용 차원에서 국내의 소수주거더교에 대한

적용이 제한되고 있는 실정이다(박찬희, 2007; 박철순, 2003).

그러므로, 본 논문에서는 합리적인 강합성교량 형식인 소수주거더교의 제작방법을 단면회전방법을 이용하여 개선하고, 바닥판과 별도의 구속콘크리트를 플랜지에 타설하여 강교량의 공사비와 직결되는 강중량을 줄일 수 있는 신형식 강합성 소수주거더를 제안하고자 한다. 더불어 제안된 구속콘크리트를 활용한 신형식 강합성 소수주거더의 최적단면을 도출하여 실 교량에서의 적용성을 검토하기 위하여 20 m의 강합성 소수주거더 단일 시험체와 바닥판까지 합성된 강합성 소수주거더 교량시험체를 제작하였다. 즉, 제작된 거더시험체와 교량시험체의 정적실험을 수행하여 본 연구에서 개발한 신형식 강합성 소수주거더의 구조성능 및 거동을 평가하고자 한다.

2. 단면회전방법을 적용한 거더의 기본개념

2.1 개발된 거더의 기본개념

본 연구에서 개발된 단면회전방법을 적용한 강합성 거더는 기존의 프리스트레싱을 도입한 강합성 거더와 기본적인 개념은 동일하나, I형 강재거더의 상부플랜지에 콘크리트를 합성한 후 단면회전을 하여, 거더의 지중을 강합성단면이 저항한다는 점에서 기존 강합성거더와 차별성을 두었다. 이는 기존연구에서 개발된 강선을 이용한 축력 도입이나 온도 변화를 통해 응력상태를 변화시키기 위한 특수한 장치가 필요하지 않으며, 구속콘크리트를 활용하여 강재거더에 발생하는 응력을 감소시킨 점에서 크게 차이가 발생한다(김상효 등, 2006; 김성일 등, 2006; 임채선, 2008; Brozzetti, 2000; Chiewanichakorn *et al.*, 2004; He *et al.*, 2010).

단면회전방법을 적용한 강합성 거더의 시공절차는 그림 1과 같이 4단계로 나눌 수 있다. 1단계로는 미리 제작된 비대칭 I형 강재거더의 상·하부플랜지를 뒤집어서 제작틀에 거치한다. 이때, 상부에 위치한 비대칭 I형 강재거더의 하부플랜지에는 강제지중에 의한 압축응력이 발생하며, 하부에 위치한 상부플랜지에는 인장응력이 발생하게 된다.

이후, 2단계로는 하부에 배치된 상부플랜지 주변에 구속콘크리트를 타설 및 양생한 후 거푸집을 제거하면 하부에 배치된 강제 거더 상부플랜지는 인장응력이 증가하고 상부에 배치된 하부플랜지는 압축응력이 증가하게 된다.

3단계로는 Turning-Wheel을 이용하여 부재를 회전시키면, 앞 단계에서 발생한 인장응력과 압축응력이 서로 상쇄되어 비대칭 I형 강재거더내 응력을 감소시킬 수 있게 된다. 마지막 단계로는 부재 회전 후 바닥판 슬래브 타설, 2차 고정하중 및 활하중이 재하되는 단계이다.

본 연구에서 제안한 단면회전방법을 이용한 강합성거더와 일반 플레이트거더교의 실제 응력분포도를 비교하면 그림 2와 같다. 일반 플레이트거더교의 제작시 발생하는 응력은 강거더 지중(그림 2(a))에 의해 발생하는 응력과 바닥판의 지중에 의한 응력(그림 2(b))을 합하면 하부플랜지가 부담하게 되는 인장응력과 상부플랜지가 부담하게 되는 압축응력이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다(그림 2(c)). 그러나, 단면회전방법을 적용한 강합성 거더의 경우, 콘크리트 슬래브, 즉 바닥판을 타설하기 전, 각 단계(그림 1의 1~3단계)에서 발생되

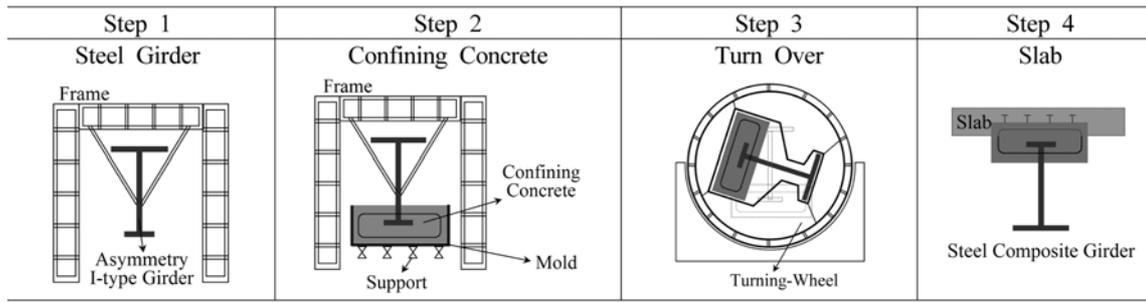


그림 1. 단면회전방법을 적용한 강합성 거더의 시공절차

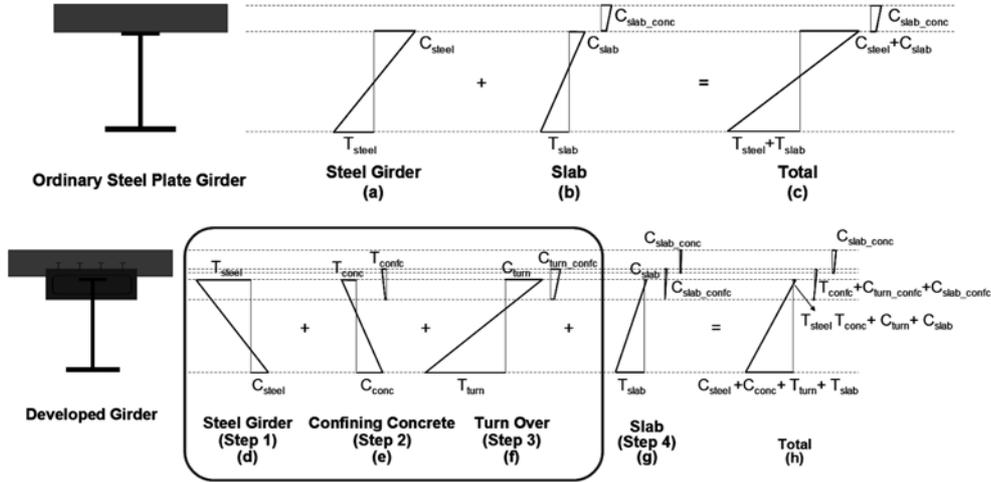


그림 2. 일반 플레이트거더교와 개발된 단면회전방법을 적용한 거더교의 응력분포도

는 응력분포는 그림 2(d)~그림 2(f)와 같다. 일반 플레이트 거더교의 강거더 응력분포(그림 2(a))와 개발된 거더교의 강 거더 응력분포(그림 2(d))는 상부플랜지가 받는 크기는 비슷 하며, 응력의 방향, 즉 각 플랜지에 적용되는 압축력과 인장 력의 방향 차이만이 있을 뿐이다.

그러나, 제작된 부재를 회전하기 위해서는 강거더와 구속 콘크리트 자중의 합(그림 2(d), 2(e)의 합)이 하중으로 작용 해야만 부재가 회전하게 되며, 그와 동시에 단면회전방법으 로 강합성 단면에 가해지는 강거더와 구속콘크리트의 합성 자중으로 인한 응력분포(그림 2(f))가 발생하게 된다. 즉, 단 면회전방법을 사용하게 되면 강거더와 구속콘크리트 자중의 대략 2배가 되는 하중이 합성단면에 작용하게 된다. 합성된 일반 플레이트거더교와 단면회전방법을 적용한 거더교의 응 력분포(그림 2(c), 그림 2(h))를 비교하면 그림 2(h)와 같이 단면회전방법을 적용한 거더교의 경우, 제작 중 발생하는 인 장응력과 압축응력이 서로 상쇄되는 효과가 있어 일반 플레 이트거더에 비하여 강제거더에 발생하는 응력을 저감시킬 수 있다.

이와 같이, 일반 플레이트거더교와 본 연구에서 개발된 거 더교의 응력분포도를 확인하기 위해, 표 1과 같이, 본 연구 에서 사용된 거더시험체와 동일한 단면에 대한 일반 플레 이트거더를 설계하여 응력분포를 검토하였다. 가해지는 하중은 자중, 활하중, 구속 및 바닥판 콘크리트의 크리프와 건조수 축을 모두 고려한 최종 하중에 대한 상·하부 강제플랜지의 응력을 계산한 결과, 본 연구에서 개발된 단면회전방법을 적 용한 거더의 상부플랜지에 발생하는 응력이 일반 플레이트 거더에 비하여 작은 응력이 작용하는 것을 확인할 수 있었

표 1. 동일한 단면에 대한 거더형상에 따른 강제설계응력

| (MPa) | 상부플랜지 | 하부플랜지 | 단면형상(mm) |
|---------------|--------|---------|----------|
| 단면회전방법에 의한 거더 | 93.34 | -220.43 | |
| 일반플레이트 거더 | 239.58 | -219.6 | |

*하중 : 자중+활하중+콘크리트의 크리프 및 건조수축

다. 이는 단면회전방법에 의하여, 상부플랜지에 가해지는 응력 이 감소하였으며, 일반 플레이트거더의 경우, 허용응력 299MPa에 근접하게 압축응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, 단면회전방법을 사용하여 거더를 원위치로 옮기게 되 면 강제 및 콘크리트의 자중을 강성이 큰 합성단면이 받게 되므로 강제사용량을 저감시킬 수 있으며, 특히 상부플랜지 의 경우에는 중립축과 가까워짐으로 작업성을 고려한 최소 의 단면 사용이 가능하다고 판단된다.

한편, 단면회전방법을 적용한 강합성 거더에 대해 기존 소 수주거더교와 단면 및 강제량을 비교하면 표 2와 같다. 여 기서, 단면회전방법을 적용한 합성거더에는 높이 400 mm의

표 2. 일반 플레이트거더교와 개발된 단면회전방법을 적용한 강합성 거더교의 단면 및 강재량

| 단면 | 기존 플레이트거더교 | | | 단면회전방법을 적용한 강합성 거더교 | | | 면적비 (B/A, %) |
|-------|------------|---------|--------------------------|---------------------|---------|--------------------------|--------------|
| | 폭 (mm) | 높이 (mm) | 면적 (A, mm ²) | 폭 (mm) | 높이 (mm) | 면적 (B, mm ²) | |
| 상부플랜지 | 800 | 40 | 32,000 | 300 | 15 | 4,500 | 14.06 |
| 복부 | 26 | 3153 | 81,978 | 26 | 3146 | 81,796 | 99.8 |
| 하부플랜지 | 800 | 57 | 45,600 | 800 | 64 | 51,200 | 112.3 |
| 총합계 | - | - | 113,980 | - | - | 86,298 | 86.2 |

구속콘크리트를 적용하였으며, 두 경우 모두 3,250 mm의 동일한 형고를 유지한다는 조건하에 비교하였다. 복부 및 하부플랜지의 경우에는 단면 및 강재량의 큰 차이는 없으나, 앞서 언급한 것과 같이 상부플랜지의 강재량이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 총 강재량의 사용이 기존 소수주 거더교에 비하여 86.2%정도의 강재량이 사용되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 강재 사용량의 감소는 강합성교량 또는 강교량의 경제성 및 경쟁력을 결정짓는 주요 인자이며, 본 연구에서 제안한 단면회전방법을 적용한 강합성거더가 공사비 절감에 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

2.2 개발된 거더의 최적단면

개발된 거더의 최적단면을 선정하기 위하여 구속콘크리트의 위치, 단면제원에 따른 강중 및 응력비, 지간에 따른 형고를 변수연구의 조건으로 고려하였다.

2.2.1 구속콘크리트의 위치

구속콘크리트 내 강재위치를 그림 3과 같이 형고 3,200 mm를 유지하고, 1,000 mm×400 mm의 구속콘크리트 위치를 상부플랜지의 상면, 중앙, 하면에 위치시켜 거더에 작용하는 응력 및 강중 등을 분석하였다.

구속콘크리트가 상부플랜지의 상면에 위치하는 경우 구속콘크리트의 압축력이 과다하게 발생하여 구속콘크리트의 폭 증가가 필요하나, 강재거더 중량이 500 kN정도로 상대적으로 적은 강재량이 사용된다. 상부플랜지 중앙에 위치하는 경우, 거푸집 등의 작업성 및 편의성이 증가하며 502 kN가량이 사용된다. 구속콘크리트가 상부플랜지의 하면에 위치하는 경우, 구속콘크리트에 작용하는 압축력이 낮아 구속콘크리트의 폭을 줄일 수 있으나, 강중은 510 kN이 사용되며, 전단 연결재 설치로 인한 거푸집 작업의 시공성이 떨어지게 된다. 따라서, 강거더 상부플랜지에 따른 구속콘크리트의 위치는 상부플랜지의 상면에 위치할 수 록 강재량을 감소시킬 수 있으나, 각 위치별 차이가 미미하며 구속콘크리트의 허용압축응력을 초과하는 상황이 발생할 수 있다. 또한 시공편의성 및 시장적용성을 고려하여 구속콘크리트 위치를 결정할 필요가 있으므로, 구속콘크리트를 상부플랜지의 중앙과 상면

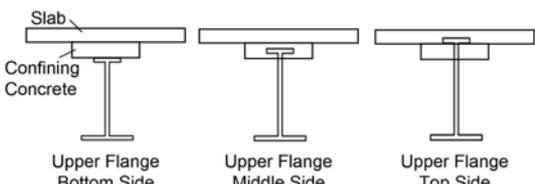


그림 3. 구속콘크리트의 위치 변수

표 3. 단면제원에 따른 변수 (unit : mm)

| 변수 | Wsb | Wst | Tfb | Tft |
|-----|-------|-------|-----|-----|
| 하한치 | 800 | 300 | 40 | 15 |
| 상한치 | 1,000 | 400 | 60 | 25 |
| Tw | H | Wc | Tc | Hc |
| 26 | 3,000 | 1,500 | 300 | 150 |
| 30 | 4,000 | 2,500 | 400 | 250 |

사이에 위치시키는 것이 최적화된 단면이라 할 수 있다.

2.2.2 단면제원에 따른 강중 및 응력비

구속콘크리트의 위치가 결정된 상태에서 콘크리트와 강재의 제원에 따른 영향을 파악하기 위해 9개의 변수, 즉 상·하부플랜지, 복부, 구속콘크리트의 폭/두께, 형고 등에 대해 표 3과 같이 상한치와 하한치의 적용범위를 두어 구조설계를 수행하였으며, 총 변수는 2⁹(512)개 이지만, DOE(Design of Experiment)기법을 적용하여 최적의 변수를 선정하여 64개의 변수를 선정하였다. 각 변수에 대한 설계 결과 중 강중 20 N/mm² 및 허용응력에 대한 발생응력비가 90% 이하인 것을 선택하여 영향인자를 분석하였고, 분석결과를 강재중량, 강재응력, 콘크리트응력으로 나눠 보면 그림 4와 같다.

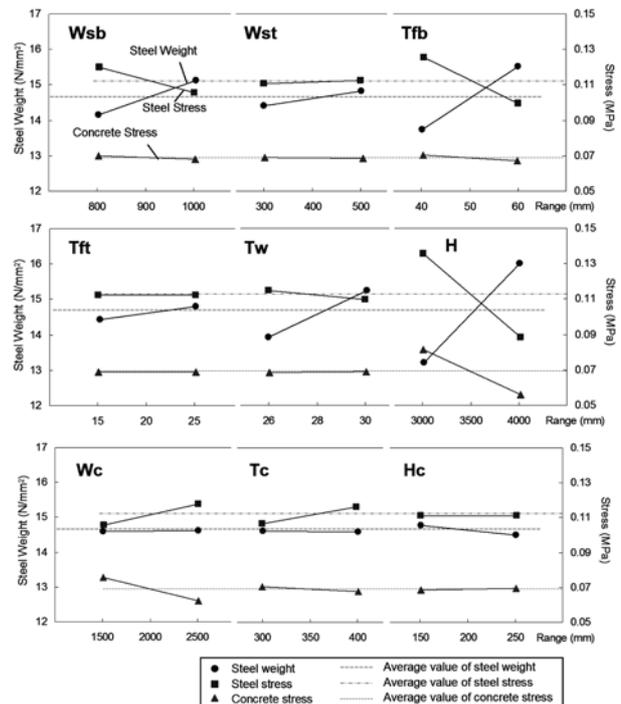


그림 4. 단면제원에 따른 강재 중량, 강재 및 콘크리트 응력의 민감도 분석

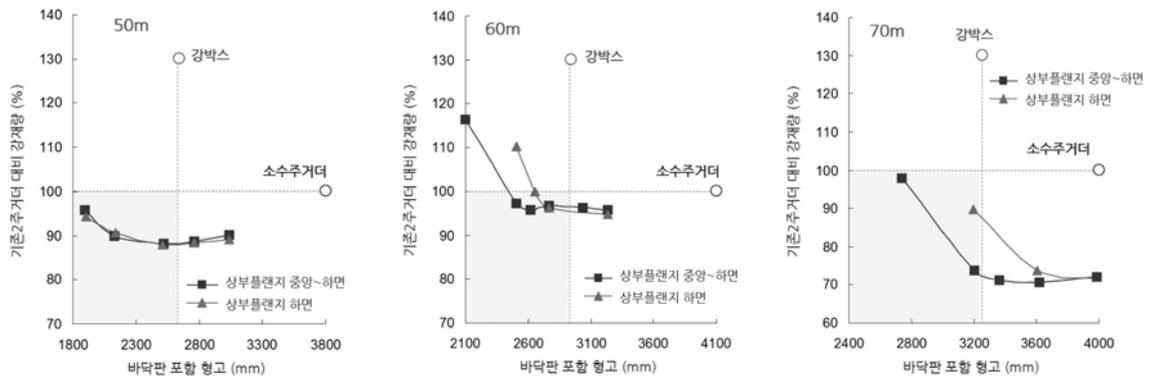


그림 5. 시간에 따른 형고 및 강재량

표 4. 단면회전방법을 적용한 시간에 따른 최적단면

| S | Multi-Turn Over Bridge | | | | Turn Over Bridge | | | | |
|---|------------------------|------|----------|--|------------------|-----|-------|--|--|
| | SL(m) | H(m) | SW(kN/본) | | | | | | |
| | 20 | 1.0 | 48.34 | | 40 | 2.1 | 311 | | |
| | 30 | 1.2 | 105.1 | | 50 | 2.6 | 469 | | |
| | 40 | 1.6 | 171.9 | | 60 | 2.9 | 755 | | |
| | 50 | 2.0 | 284.0 | | 70 | 3.3 | 1,147 | | |
| | | | | | 80 | 3.8 | 1,585 | | |

*S : Section, SL : Span Length, H : Height, SW : unit Steel Weight per girder

그림 4에서 보는 것과 같이 상한치와 하한치의 적용범위에 따른 강제중량과 응력은 선형으로 거동하며, 적용범위에 따른 결과의 차이, 즉 기울기가 클수록 그 영향인자에 대해 민감한 것을 알 수 있다. 여기서, 점선은 강제중량, 강제 및 콘크리트 응력의 평균값을 나타낸 것이다. 분석결과 강제중량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 형고(H), 하부플랜지 두께(Tfb), 복부 두께(Tw) 순이며, 강제응력의 경우 형고(H), 하부플랜지 두께(Tfb), 하부플랜지 폭(Wsb)순으로 영향을 끼친다. 또한, 콘크리트 응력의 경우 형고(H), 구속콘크리트 폭(Wc)순과 같다. 즉, 종합적으로 살펴보았을 때 형고가 강제중량, 강제 및 콘크리트 응력에 민감한 인자이며, 이와 같이 각 영향인자들은 최적단면 선정 시 복합적으로 고려하여 선정하였다.

2.2.3 시간에 따른 형고의 영향

단면제원 중 형고가 민감하게 작용하므로 적용시간별 최적 형고를 결정하기 위하여, 형고에 따른 강제량을 산출하였다. 더불어, 강제량의 경우는 기존의 소수주거터의 강제량을 100%로 두고 강박스와 비교하였다.

강박스는 낮은 형고대신 많은 강제량이 사용되나, 소수주거터교는 적은 강제량 대신 높은 형고를 가지게 되므로, 적합한 형고와 적절한 강제량을 가지기 위해서는 그림 5에서 보는 것과 같이 빗금 친 부분에 단면이 해당되도록 시간에 따라 선정하였다. 본 연구에서 제안한 단면회전방법을 적용한 최적단면은 표 4와 같으며, 각 시간에 따른 형고 및 본당 강제량을 선정하였다.

3. 개발된 거더의 정적 성능평가 실험

본 연구에서 개발된 단면회전방법을 적용한 거더의 구조성

능을 검증하기 위하여 20 m 거더시험체 및 2거더 교량시험체의 정적실험을 수행하여 실 교량의 거동을 확인하고자 하였다.

3.1 실험개요

구속콘크리트를 적용하여 단면회전방법으로 시공한 강합성 교량의 성능을 평가하기 위해 그림 6과 같은 폭 1 m의 거더시험체 및 슬래브와 함께 시공된 폭 2.8 m의 교량시험체를 제작하였다. 사용된 강재는 HSB 600을 사용하였으며, 구속콘크리트는 표 5와 같이 50 MPa의 배합강도로 설계되었으나, 시공당시의 환경조건으로 인해 대략 33 MPa~35

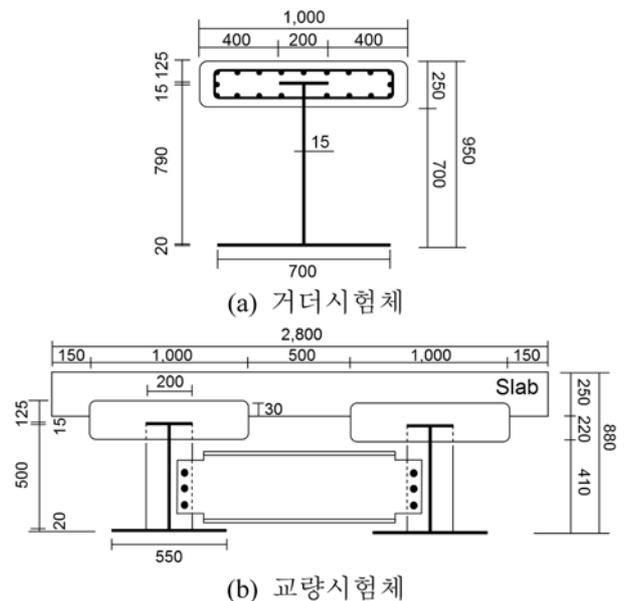


그림 6. 시험체 제원

표 5. 구속콘크리트에 사용된 콘크리트 배합

| Max. Size of Coarse Aggregate (mm) | Target Strength (MPa) | Slump (mm) | W/B (%) | S/a (%) | Unit Water (kg) | Unit Binder (kg) | | Unit Fine Aggregate (kg) | | Unit Coarse Aggregate (kg) | AE Admixture (%) |
|------------------------------------|-----------------------|------------|---------|---------|-----------------|------------------|---------|--------------------------|-----|----------------------------|------------------|
| | | | | | | Cement | Fly-ash | S1 | S2 | | |
| 20 | 50 | 500 | 30 | 42 | 153 | 474 | 36 | 429 | 289 | 1004 | 0.06 |

표 6. 시험에 사용된 콘크리트의 강도

| 시험체 | 규격 | 타설일 | Slum Flow (mm) | Air Content (%) | Average Compressive Strength (MPa) | | |
|-----|-----------|--------|----------------|-----------------|------------------------------------|--------|---------|
| | | | | | 3 days | 7 days | 28 days |
| 거더 | 20-50-500 | 1월 9일 | 700 | 3.2 | 29.1 | 32.5 | 35.1 |
| 교량 | 20-50-500 | 1월 17일 | 550 | 2.6 | 25.3 | 29.8 | 33.3 |
| 바닥판 | 25-27-180 | 1월 25일 | 610 | 3.1 | 25.4 | 26.2 | 27.8 |

MPa의 강도를 발현하였다. 타설일에 따른 거더 및 교량시험체의 콘크리트의 평균 압축강도는 표 6과 같다. 또한, 바닥판 콘크리트는 27 MPa의 설계압축강도를 가지는 콘크리트를 사용하였다. 더불어, 본 연구에 적용된 20 m 거더 및 교량시험체의 이동작업시 용이함을 위하여, 3개의 부분으로 나눠 시공한 후, 이를 현장에서 용접하는 시스템으로 구성하였다.

본 연구에서 개발된 단면회전방법을 적용한 거더의 하중재하시험은 단경간 단순지지조건하에서 수행하였으며, 거더에 3점 재하를 실시하였다. 실험에 사용된 가력장치는 최대 용량 10,000 kN을 갖는 UTM을 사용하였으며, 시험체 세팅시 초기 자리잡음을 위해 선형구간 내에서 예비가력 100 kN을 3회 재하한 후, 하중재하속도 0.1 mm/sec로 변위제어를 실시하였다. 그림 7은 정적구조 시험체의 재하 장치도를 나타낸 것이다.

정적재하는 전체적인 강성을 평가하기 위해 1/200 mm

LVDT로 지간 중앙점에서 처짐을 측정하였고, 하중 단계별 응력분포를 분석하기 위해 구속콘크리트, 바닥판 콘크리트 내 철근의 변형률과 강제거더의 상·하부플랜지, 복부의 중앙에서 변형률을 측정하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 단면회전 효과

본 연구에서 제시한 단면회전방법을 적용한 강함성 거더의 핵심기술인 단면회전시 지중의 합성거더 부담을 확인하기 위하여, 거더 제작시 단면회전 전후의 강제 변형률을 계측하여 단면회전에 의한 효과를 판단하고자 하였다. 표 7과 같이 단면회전 전후의 강제변형률을 통해 단면회전에 의한 응력변화를 상하부플랜지에서 측정된 결과, 하부플랜지에서 상부플랜지에 비하여 대략 2.5배의 인장응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 이는 상부플랜지에 상대적으로 적은 압축응력이 발생하며, 그로 인하여 상부플랜지의 강제량의 사용을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 단면회전방법을 통한 실제 계측값과 설계값을 비교한 결과, 계측결과가 설계값과 유사하게 발생하는 것을 확인하였다. 설계값에 비하여 계측결과가 다소 크게 나타난 것은 계측시점에서의 일교차에 의한 하부플랜지의 온도변화 및 시험체를 동절기에 제작하여 구속 콘크리트의 탄성계수가 다소 작아졌기 때문이라고 판단된다. 그러나, 앞서 언급한 것과 같이, 단면회전과 동시에 합성거더가 모든 지중에 대하여 원활히 저항하고 있음을 확인하였다.

3.2.2 하중-변위

단면회전방법을 적용한 거더 및 교량시험체 중앙 지점의 하중-변위곡선은 그림 8에 나타내었다. 변위제어법에 따라

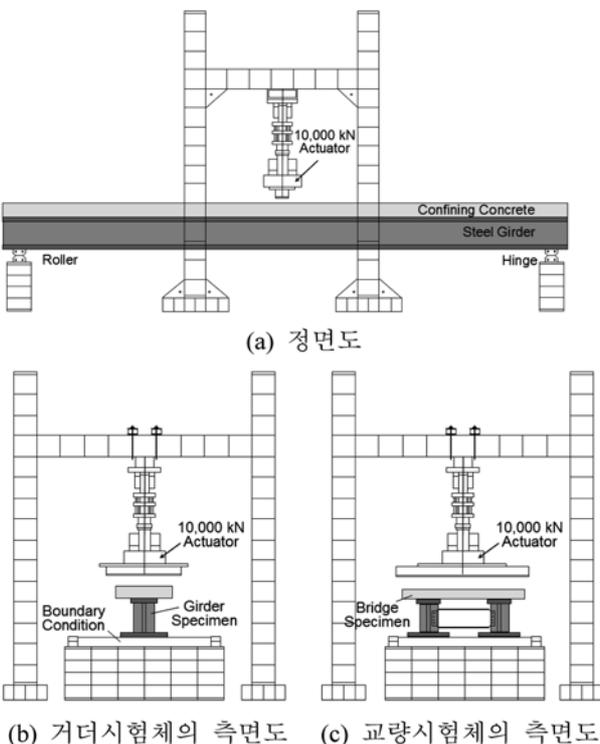
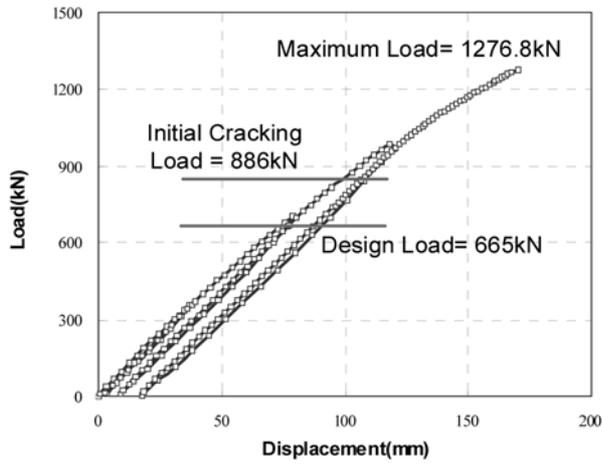


그림 7. 정적 구조시험체 재하 장치도

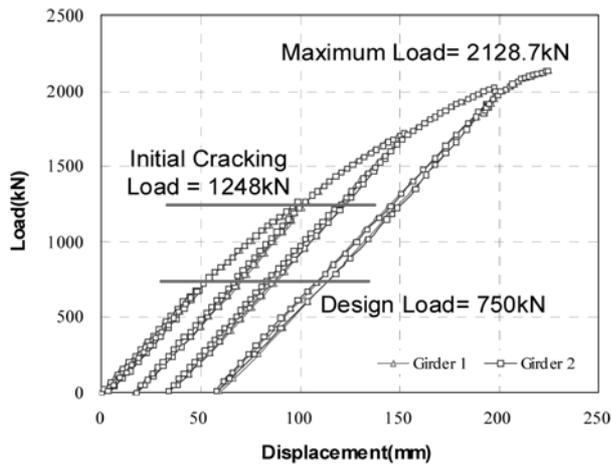
표 7. 단면회전방법에 의한 단면회전효과

| 응력변화량 (MPa) | 거더시험체 | | 교량시험체 | |
|-------------|-------|---------|-------|---------|
| | 상부 | 하부 | 상부 | 하부 |
| 설계 | 37.25 | -109.29 | 37.25 | -109.29 |
| 계측 | 49.56 | -145.11 | 58.59 | -138.81 |

*(-) : 인장, (+) : 압축



(a) 거더시험체



(b) 교량시험체

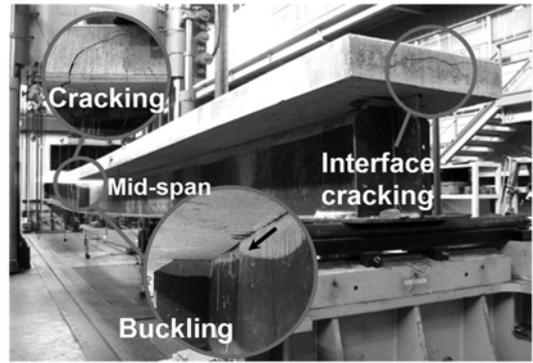
그림 8. 중앙지점의 하중-변위곡선

0.1 mm/sec의 속도로 재하한 거더 시험체와 교량 시험체의 초기 균열은 886 kN와 1248 kN에서 각각 발생하였으며, 이때의 처짐은 각각 111.1 mm와 145.5 mm이다. 초기 균열은 각 시험체의 설계하중인 665 kN과 750 kN의 1.3~1.6배 이상의 값을 갖는 하중에서 발생하였다. 초기 균열 발생이후 강성이 감소되어 거더시험체와 교량시험체의 최대기력하중은 1276.8 kN과 2128.7 kN이며, 이때 거더 중앙점에 각각 170.4 mm와 224.4 mm의 처짐이 발생하였다.

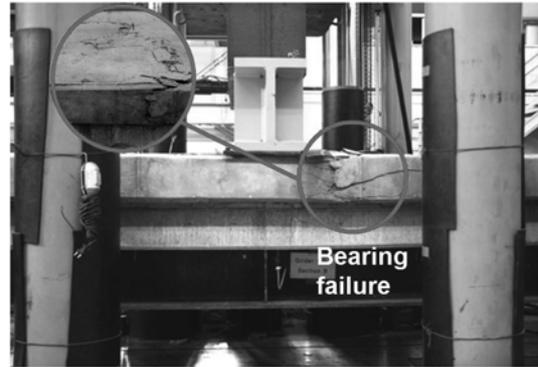
각 시험체 모두 그림 9와 같이 좌굴 및 압축과파가 발생하여 극한하중까지 측정하지 못하였으나, 최대기력하중이 설계하중에 비하여 1.9~2.8배 이상을 나타내어 충분한 내하력을 확보하고 있다고 판단된다.

3.2.3 하중-변형률

그림 10은 거더시험체와 교량시험체의 강거더 중앙지점에서 측정된 변형률을 나타내고 있다. 거더시험체의 경우 콘크리트에 초기균열이 발생한 후인 대략 900 kN이후에 비선형 거동을 나타내기 시작하였다. 이는 구속콘크리트의 파괴가 진행됨에 따라 강거더의 변형이 증가되었음을 확인할 수 있었다. 또한 그림 9와 같이 구속콘크리트가 파괴된 부분에서는 국부적인 강재의 좌굴이 발생하였다. 구속콘크리트와 강거더의 부착면 파괴 및 지압과파가 발생한 것은 앞서 언급한 표 6과 같이 50 MPa의 콘크리트 설계 강도가 약 33

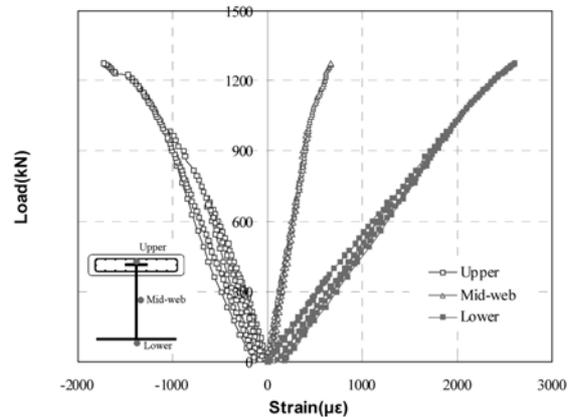


(a) 거더시험체

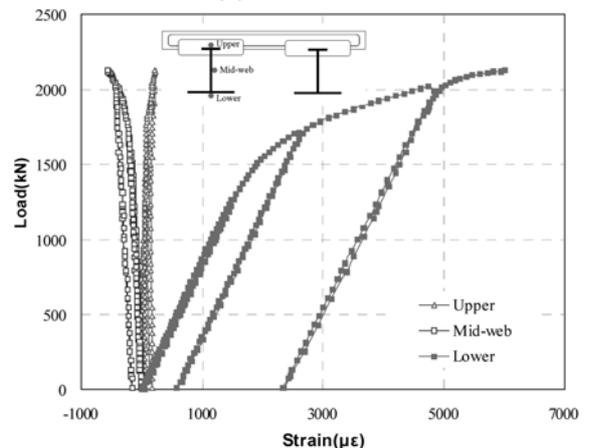


(b) 교량시험체

그림 9. 각 시험체의 파괴형상



(a) 거더시험체



(b) 교량시험체

그림 10. 강거더 중앙지점의 하중-변형률 곡선

MPa으로 콘크리트강도발현이 충분하게 발생하지 않았기 때문이라고 판단된다. 그러나 측정된 하중-변형률 계측데이터

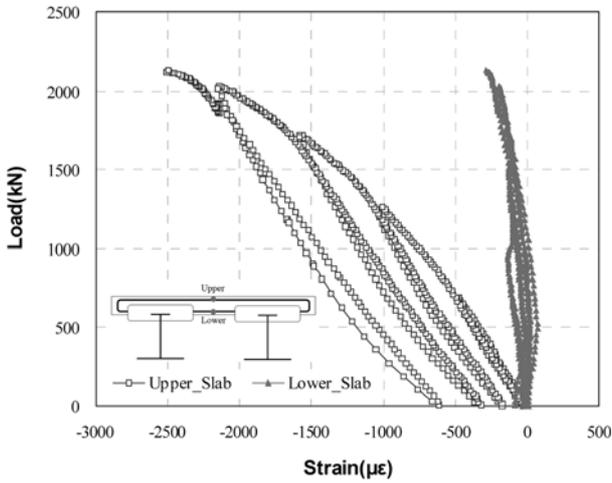


그림 11. 교량시험체 바닥판의 하중-변형률 곡선

에 의하면, 거더시험체의 하부플랜지의 경우 2500 $\mu\epsilon$ 이상의 큰 인장변형이 가능하며, 상부플랜지에는 하부플랜지에 비해 0.5배 가량의 압축변형이 발생하였다.

교량시험체의 경우 1248 kN의 하중에서 콘크리트 초기균열이 발생하였으며, 그 후로 비선형거동을 하고 바닥판콘크리트의 구속효과로 인해 상부플랜지와 복부는 580 $\mu\epsilon$ 의 적은 변형이 발생하였으며, 하부플랜지를 통해 강제의 연성거동을 보였다. 이와 같은 상부플랜지의 적은 변형은 기존 일반 플레이트거더교에 비하여 중립축을 상승시키는 것을 확인할 수 있다. 이는 하부플랜지에 비하여 상부플랜지에 응력상쇄로 인한 총 발생응력이 적게 발생시켜, 표 2에서 나타난 것과 같이 대략 86%의 상부플랜지 단면을 감소시킨다.

교량시험체의 바닥판에서의 하중-변형률곡선은 그림 11과 같으며, 상·하부면 모두 압축응력을 받음을 확인할 수 있었다. 특히, 상부면에 큰 압축응력이 발생하였으며, 개발된 단면회전방법을 적용한 강합성 거더와 바닥판 콘크리트의 합성효과가 발현한 것으로 판단된다.

4. 결론 및 분석

기존의 소수주거더를 보다 합리적으로 사용하기 위하여 단면회전방법을 적용한 신형식 강합성 거더에 대한 개발을 수행하였다. 이에 대한 강합성거더의 구속콘크리트의 위치, 단면제원, 시간별 형고에 따른 변수연구를 수행하여 최적단면을 선정하였으며, 20 m의 거더시험체와 교량시험체를 제작하여 정적구조성능을 검토 및 평가하여, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 단면회전방법을 적용한 신형식 강합성 거더는 강제거더를 뒤집어 제작대에 거치한 뒤 구속콘크리트와 합성한 후, 단면을 회전시켜, 강제와 콘크리트의 합성단면이 모든 하중에 대하여 저항할 수 있도록 하였다. 그러므로, 3,250 mm의 동일한 형고를 유지하는 경우, 사용되는 강제량을 기존 소수주거더에 비하여 14% 이상 감소시킬 수 있었다. 이와 같이 단면회전을 적용한 신형식 강합성 소수주거더는 강제량을 저감시킬 수 있어 경제적인 교량형식이며, 더불어, 거더 가설로 인해 바닥판 콘크리트 타설시 구속콘크리트가 거푸집 역할을 할 수 있어 간편한 상부공사를 수

행할 수 있다고 판단된다.

2. 개발된 거더의 최적단면을 선정하기 위하여 구속콘크리트의 위치, 단면제원에 따른 강중 및 응력비, 시간에 따른 형고 등과 같은 3개의 조건을 고려하였으며, 구속콘크리트는 시공편의성 및 시장적용성을 고려하여 상부플랜지 중앙과 상면으로 최적화하였다. 단면제원에 따른 강중 및 응력비는 변수연구를 통해 형고, 하부플랜지 두께, 상부플랜지 두께 순으로 강제중량 및 응력에 민감한 인지임을 고려하여 시간에 따른 형고의 영향을 살펴 시간에 따른 최적단면을 제시하였다.
3. 제안된 단면을 바탕으로 20 m 실험교량을 모델로 거더시험체 및 교량시험체를 제작하여 정적실험을 수행하였다. 본 정적실험을 통해 거더시험체와 교량시험체 모두 초기균열은 설계하중 이후에 발생하였으며, 설계하중 이후에도 탄성거동을 나타내었다. 더불어 최대강력하중은 설계하중의 1.9~2.8배로 충분한 내하력을 확보가능하다고 판단된다.
4. 또한 턴오버에 따른 합성거더의 지중부담이 구속콘크리트 및 강제거더에 의해 응력분배가 이뤄지고 있음을 확인하였으며, 초기균열이 발생한 후 전반적으로 비선형거동을 하며, 구속콘크리트의 파괴가 진행됨에 따라 강거더의 변형이 증가되었음을 확인할 수 있었다. 구속콘크리트와 강거더의 부차면 파괴 및 지압파괴가 발생한 것은 타설시 환경적인 영향으로 콘크리트의 강도가 충분히 발현되지 않은 것으로 판단되나, 이 또한, 설계하중 이후로 파괴되었으므로 안전성이 있다고 판단된다. 또한 상부플랜지에는 하부플랜지에 비해 적은 압축변형이 발생하는 것을 통해 상부 플랜지의 단면을 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 구속콘크리트와의 합성단면으로 압축력의 분배가 이뤄지고 있으며, 바닥판 콘크리트 또한 합성효과가 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 개발된 단면회전방법을 적용한 신형식 강합성 거더는 기존의 소수주거더교의 제작방법을 개선하고, 강중을 줄임으로써 경제적인 실무적용이 가능할 것으로 판단되며, 추후 좌굴거동에 대한 해석적인 여유도 평가가 이뤄져야 할 것이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 삼표교량기술연구소의 재정적인 지원을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

경용수, 안병국, 방진환, 김문영(2005) H형강과 고강도 강관으로 복합단면을 구성하는 프리스트레스트 플레이트거더의 개발, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권 5호, pp. 637-648.

길홍배, 강상규(2003) 플랜지 폭이 동일한 일축대칭 플레이트거더 복부판의 전단좌굴계수, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권 제1A호, pp. 121-128.

길홍배, 최병호, 권영근, 장중환(2007) 소수주거더교 설계 합리화 방안, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제19권 1호, pp. 22-30.

김상호, 조광일, 박병규(2006) 다단계 온도프리스트레싱을 이용한

- 강거더교의 보강에 관한 연구, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제18권 6호, pp. 717-726.
- 김성일, 이필구, 이정희, 여인호(2006) 프리스트레스트 강합성 거더의 모달테스트 및 이동 열차하중 해석에 의한 동적거동, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제18권 6호, pp. 793-804.
- 김성훈, 박영훈, 이승용, 최준혁(2008) 역 T형강 콘크리트 합성 바닥판의 휨거동에 관한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제3A호, pp. 331-340.
- 김재홍, 김장호, 김성배, 이나현(2010) 횡연결재에 의해 횡방향으로 보강된 분절 프리스트레스트 거더의 정적거동에 관한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권 제3A호, pp. 287-295.
- 박미연(2007) **강건 최적화 기법에 의한 고속철도 소수주형 강교량의 LCC 효율적인 실용적 최적 설계**, 박사학위논문, 한양대학교.
- 박용명, 조음돌이, 황민오, 윤태양(2008) 연속 2-거더교의 여유도 평가 실험-수평브레이싱 효과, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제4A호, pp. 417-429.
- 박찬희(2007) **TU 소수주거더 기술개발 1차 중간보고서**, 포항산업과학연구원.
- 박철순(2003) **소수주거더 3경간 연속교의 가로보 부착 위치에 따른 거동 특성 연구**, 석사학위논문, 서울산업대학교.
- 이필구, 심창수, 윤태양(2003) 대직경 스티드 전단연결재의 정적 거동, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제15권 6호, pp. 611-620.
- 이필구, 심창수, 장승필, 정철현(2001) 프리캐스트 바닥판을 갖는 연속합성보의 실험, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권 제5A호, pp. 583-592.
- 임채선(2008) **비대칭 I형 합성거더의 전단좌굴계수 분석과 적용**, 석사학위논문, 충북대학교.
- 정연주, 정광희, 구현본, 김병석(2004) 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판의 실험적 정적거동 특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제1A호, pp. 17-25.
- Bouazaoui, L., Perrenot, G., Delmas, Y., and Li, A. (2007) Experimental study of bonded steel concrete composite structures, *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 63, pp. 1268-1278.
- Brozzetti, J. (2000) Design development of steel-concrete composite bridges in france, *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 55, pp. 229-243.
- Chiewanichakorn, M., Aref, A.J., Chen, S.S., and Ahn, I.S. (2004) Effective flange width definition for steel-concrete composite bridge girder, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 12, pp. 2016-2031.
- Galambos, T.V. (1998) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 5th Edition, John Wiley & Sons.
- He, J., Liu, Y., Chenm I., and Yoda T. (2010) Experimental study on inelastic mechanical behaviour of composite girders under hogging moment, *Journal of steel research*, Vol. 66, pp. 37-52.
- Kim, J.H.J., Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, J.H., Kim, S.B., and Byun, K.J. (2008) Overview and applications of precast prestressed box-beam bridges in korea, *PCI Journal*, Vol. 53, No. 4, pp. 83-107.
- Montes, S., Vollery, J.C., and Park, J. (2003) Advantage of twin i beam composite solutions for highway and railway bridges, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 3, No. 1, pp. 65-72.
- Nakai, H., Matsui, S., Yoda, T., and Kurita, A. (1998) Trends in steel-concrete composite bridges in japan, *Structural Engineering International*, Vol. 8, No. 1, pp. 30-34.
- Staliings, J.M., Cousins, T.E., and Stafford, T.E. (1996) Effects of removing diaphragms from steel girder bridge, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1541, pp. 183-188.
- Toshiyuki, K. (2006), Consideration on recent trends in, and future prospects of, steel bridge construction in japan, *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 62, pp. 1192-1198.

(접수일: 2010.2.2/심사일: 2010.3.2/심사완료일: 2010.8.17)