

연속 합성 박스거더 설계, 해석 및 실험

Design, Analysis and Testing Continuous Composite Box-Girders



류형근*



장승필**

*서울대학교 지진공학연구센터 전임연구원 공학박사

**서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수 공학박사

1. 서 론

콘크리트 바닥판과 강거더로 이루어진 합성거더는 바닥판에 압축이 작용하고 거더 하부 플랜지에 인장이 작용하는 정모멘트를 받는 경우에 매우 합리적인 구조물이 된다. 이 때 합성구조의 성능은 일차적으로 합성정도에 달려있다. 즉, 바닥판과 거더를 연결하는 전단연결재에 의한 합성이 충분히 확보되어야 합성단면의 내력이 충분히 발휘될 수 있다. 일반적으로 상대슬립이 일어나는 가 일어나지 않는가에 따라 부분 또는 불완전결합(Partial or Incomplete interaction)과 완전결합(Full or Complete interaction)으로 나뉜다. 전단연결재의 강성이 슬래브나 거더 단면의 강성에 비해 상대적으로 작을 경우, 합성경계면에서 상대슬립이 발생하게 되는데, 이 경우를 부분결합 구조라고 할 수 있다. 한편, 강도측면에서는 합성단면의 소성력이 발휘되는 동안 전단연결재의 극한강도가 발휘되기까지 합성단면의 소성력이 전부 발휘되도록 하는 경우를 완전합성(Full shear connection)이라고 하고 그렇지 못할 경우를 부분합성(Partial shear connection)이라고 한다. 부분합성단면이 되면 합성단면이 발휘하는 소성모멘트는 합성단면 소성모멘트(Full composite section plastic moment)보다 감소된다. 그러나 실질적으로 합성정도는 마찰이나 부착과 같은 효과로 이론적으로 평가된 수준보다 증진된다.¹⁶⁾

결합측면에서는 콘크리트 단면과 거더 단면의 비와도 관계가 있다.¹⁶⁾ 부분합성 효과를 반영한 합성거더에 대한 해석적 연구는 현재 까지도 꾸준히 진행되고 있다.^{16,19)} 합성거더의 사용성 평가를 위해 크리프 및 건조수축을 고려한 장기거동 해석²⁰⁾에 대한 연구도 상당부분 진척되었는데, 외부 프리스트레스를 도입한 합성거더의 장기거동 해석에 대한 연구 등도 수행된 바 있다.¹⁸⁾

합성단면이 정모멘트를 받는 경우, 강거더는 상부 플랜지와 이에 근접한 일부 복부판을 제외하고는 대부분 인장 영역에 놓이기 때문에 국부 좌굴 발생 가능성이 상당히 줄어들게 되고 따라서 대부분 조밀단면(compact section)으로 간주할 수 있게 된다. 다만, 전단연결재의 간격이 크게 배치되어 있는 상부 플랜지의 경우에는 극한상태에서 국부 좌굴 발생 가능성이 있다. 또한 거더의 형고가 상당히 커지거나 하부 플랜지가 매우 두꺼워 질 경우에 복부판의 압축 영역이 커지기 때문에 이에 대한 좌굴 검토가 필요해질 수 있다. 이러한 좌굴 검토는 휨 좌굴이나 일정 압축력에 대한 국부좌굴 검토가 되며 복부판의 전단좌굴에 대한 검토는 별개로 이루어지게 된다.

정모멘트를 받는 합성거더의 경우와는 달리 부모멘트를 받는 합성거더의 경우, 바닥판에는 인장이 작용하여 균열 발생으로 인한 사용성 문제를 야기시키고 복부판 하단부 및 하부 플랜지에는 압축력이 작용하여 좌굴 발생 가능성

으로 인한 강도 감소가 발생한다. 따라서 합성거더의 강도 측면에서 좌굴 검토는 부모멘트를 받는 경우에 대해 보다 주의 깊게 이루어져야 한다.

합성거더의 국부좌굴에 대한 검토는 압축을 받는 플랜지와 복부판에 대해 단면 세장비로부터 검토될 수 있다. 복부판의 경우에는 휨이 작용하는 경우와 전단이 작용하는 경우, 그리고 휨과 전단이 동시에 의미 있는 크기로 작용하는 경우에 대해 강도를 검토해야 한다. 국부좌굴에 대한 검토는 EUROCODE의 경우 단면등급(class)을 4등급으로 구분하여 정의하고 있으며 AASHTO LRFD에서는 조밀단면(compact section), 비조밀단면(noncompact section), 세장단면(slender section)으로 구분하고 있다. AISC LRFD에서는 조밀단면보다 더욱 조밀한 초조밀단면(Ultra compact section)에 대한 단면 세장비를 제시하고 있다. 각 단면의 등급에 따라 국부좌굴 발생의 정도가 달라지고 따라서 외부 모멘트에 대한 단면의 저항 정도를 모멘트-회전 곡선으로부터 분류해 볼 수 있다. 단면의 모멘트-회전능은 합성거더의 성능과 모멘트 재분배를 평가할 경우 매우 중요한 특징이 된다.

한계상태설계법을 위해 지속적으로 개정 중인 AASHTO LRFD 시방 기준이나 EUROCODE 4에서는 합성단면이 조밀단면 혹은 등급(class) 1, 2인 경우에 소성모멘트를 발휘할 수 있는 것으로 규정하고 있다. 합성단면이 소성 모멘트를 발휘하기 위해서는 앞서 검토한 좌굴 검토를 만족해야 될 뿐만 아니라 완전합성이어야 하며 횡 좌굴이 방지 되도록 지지조건을 만족하고 있어야 한다.

이와 같이 합성거더를 설계하기 위해서는 콘크리트 슬래브와 강거더의 개별적 특성을 각각 잘 파악하고 있어야 하며, 적절한 전단연결재를 배치하여, 합성단면으로서의 거동을 보장해야 한다. 이 논문에서는 한계상태설계 개념으로 설계된 연속 합성박스거더에 대한 해석 및 실험적 연구 결과를 제시하고자 하였다.

2. 실험적 연구

2.1 프리캐스트 바닥판 강합성형 교량

프리캐스트 바닥판을 합성형 교량(그림 1)에 적용할 경우, 바닥판간 이음부 및 거더와 바닥판간 이음부의 특성에 대한 고찰이 필요하다.²⁾ 바닥판간 이음부는 크게 중방향 프리스트레싱에 의한 female-to-female 연결부¹⁵⁾와 현장 타설 연결부인 loop joint 이음부^{13,17)}가 있다(그림 2). 바닥판과 거더간 전단연결재의 강도 평가는 기존에 제안되

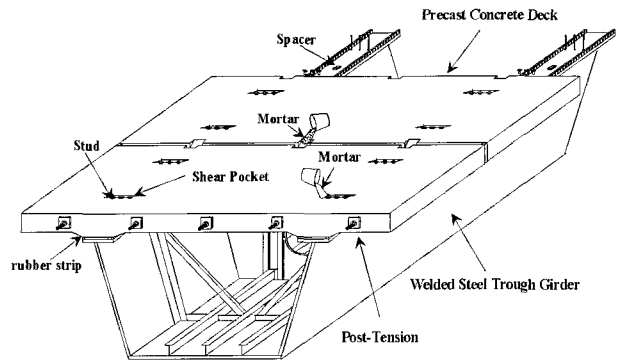
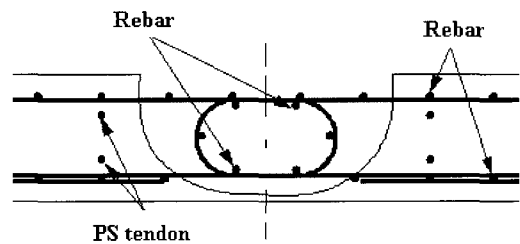
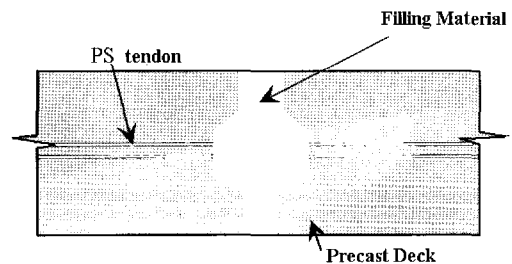


그림 1 프리캐스트 바닥판을 적용한 강합성형 박스거더 교량



(1) 루프 이음부



(2) female-to-female 이음부

그림 2 프리캐스트 바닥판간 이음부의 종류

어 있는 것과 다를 수 있는데, 이러한 요인으로 전단포켓 채움재의 특성과 배딩층의 영향을 고려해야 한다. Push-out 실험을 통한 프리캐스트 바닥판 전단연결부에 대한 정적 강도와 피로강도에 관한 연구가 수행되었고 이러한 일련의 연구 결과로부터 전단연결부의 정적강도식과 피로수명식을 제안할 수 있었다.⁶⁾ Push-out 실험을 통해 검증된 요소강도를 기준으로 설계한 전단연결부를 합성보에 적용하고 이에 대한 정적 및 피로 실험을 수행하였다.¹⁴⁾ 실험 결과, 프리캐스트 바닥판을 갖는 합성보의 피로하중에 의한 휨강성의 감소는 주로 부착의 소실과 전단연결부의 전단강성 감소로 인한 것으로 보고 되었으며, 프리캐스트 바닥판과 강거더 사이의 부착과 마찰이 전단연결부의 피로수명을 상당히 증진시키는 효과를 가져오는 것으로 판단하였다. 또한 전단지간내의 전단연결재 사이의 하중 재분배 현상을 관측하고 이로부터 전단연결재의 등분포 배치

가 유효한 것으로 생각하였다. 한편, 이러한 결과는 단순 합성보에 적용된 경우이고, 연속합성보에 적용된 경우에 대해서도 다음 절에서 부터 제시되는 실험적 연구로부터 살펴보았다.

2.2 연속합성 박스거더 교량

경간장 10m인 2경간 연속 개구제형 강합성 박스거더 (CBG1)에 대한 정적 및 피로실험을 수행하였다 (그림 3).⁷⁾ 프리캐스트 바닥판은 폭 1470mm, 길이 980mm로 양 경간에 걸쳐 총 21개의 바닥판으로 구성되어 있다. 전단연결재는 직경 16mm 스티드를 사용하였다. 전단연결재는 바닥판 한 개당 6개(한쪽 플랜지당 3개씩)의 전단포켓에 3열로 배치하여 전체 $6 \times 60 = 360$ 개를 등간격으로 배치하였다. 전단연결재의 직경 및 배치간격의 기준은 강도 측면에

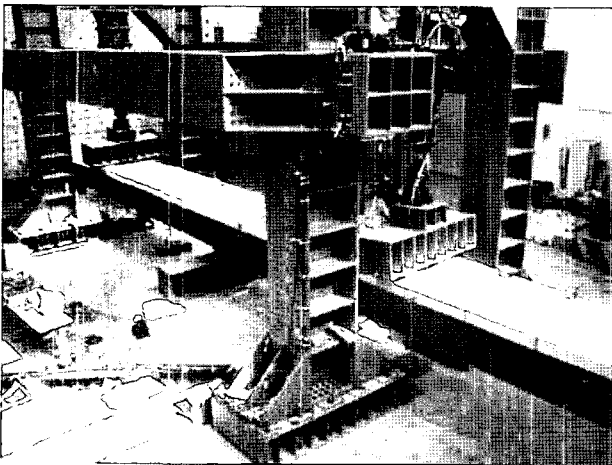


그림 3 연속합성 박스거더의 실험전경

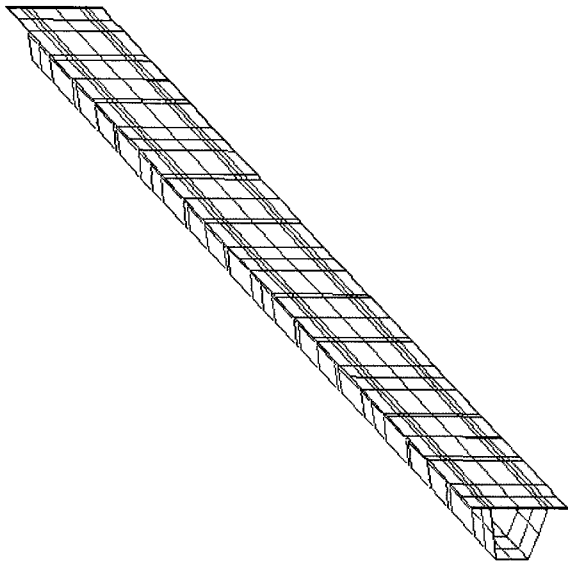


그림 4 FEM 모델

서 완전합성을 만족하도록 설계하는 데에 있었다. 거더는 개구제형 강거더를 적용하였고, 상부 플랜지는 폭 150mm, 두께 10mm이며, 하부 플랜지는 폭 540mm, 두께 14mm이고, 복부판은 높이 800mm, 두께 12mm이다. 거더의 지점부에는 전단력이 집중되는 것을 고려하여 다이아프램을 설치했고 양쪽 경간 중앙의 하중재하 단면에도 다이아프램을 설치했다. 그리고 경간의 중앙과 지점사이마다 거더의 비틀림과 좌굴을 방지하기 위해 수평과 수직 브레이싱을 설치하였다. 제작이 완료된 실험체의 양 중앙 경간에 유압기에 의해 하중이 가해졌고, 균열하중 이전까지 탄성 거동을 확인한 이후 실험 교량의 사용하중을 고려한 200만회 반복재하 실험이 수행되었다. 정적 탄성 거동은 3차원 유한요소 해석(그림 4)결과와 비교하였으며, 단면 변형률 분포로부터 완전합성 거동을 확인하였다. 200만회 반복 재하 이후 휨강성 감소는 하중-처짐 곡선의 변화로부터 4.1% 정도 되는 것으로 추정하였다. 피로하중 이전과 이후의 최대 정모멘트부 및 최대 부모멘트부의 합성 단면 변형률 분포를 살펴보고, 반복하중의 효과로 약간의 슬립이 진전된 것을 확인할 수 있었으나 그 양은 미소한 것으로 판단되었다. 200만회 반복재하 이후 정적 하중을 순차적으로 증가시키면서 실험체에 가해졌고, 하중이 증가함에 따라 내부 지점부 근처 바닥판에 균열이 발생하였다. 이로부터, 균열 발생 전과 발생 이후의 단면변형률 분포를 비교하여 살펴보고, 합성거동에 미치는 균열 발생의 영향을 분석하였다.

2.3 외부 프리스트레스트 연속합성 박스거더 교량

한편, 경간장 20m인 2경간 강합성 박스거더 연속교 (CBG2)에 대한 실험을 수행하였다 (그림 5).⁸⁾ 단면 상서는 앞서 수행된 강합성 박스거더(CBG1) 실험단면과 동일

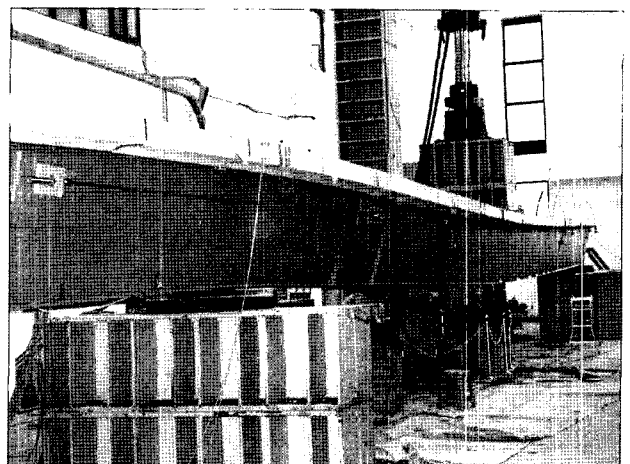


그림 5 외부 프리스트레스를 도입한 연속합성 박스거더

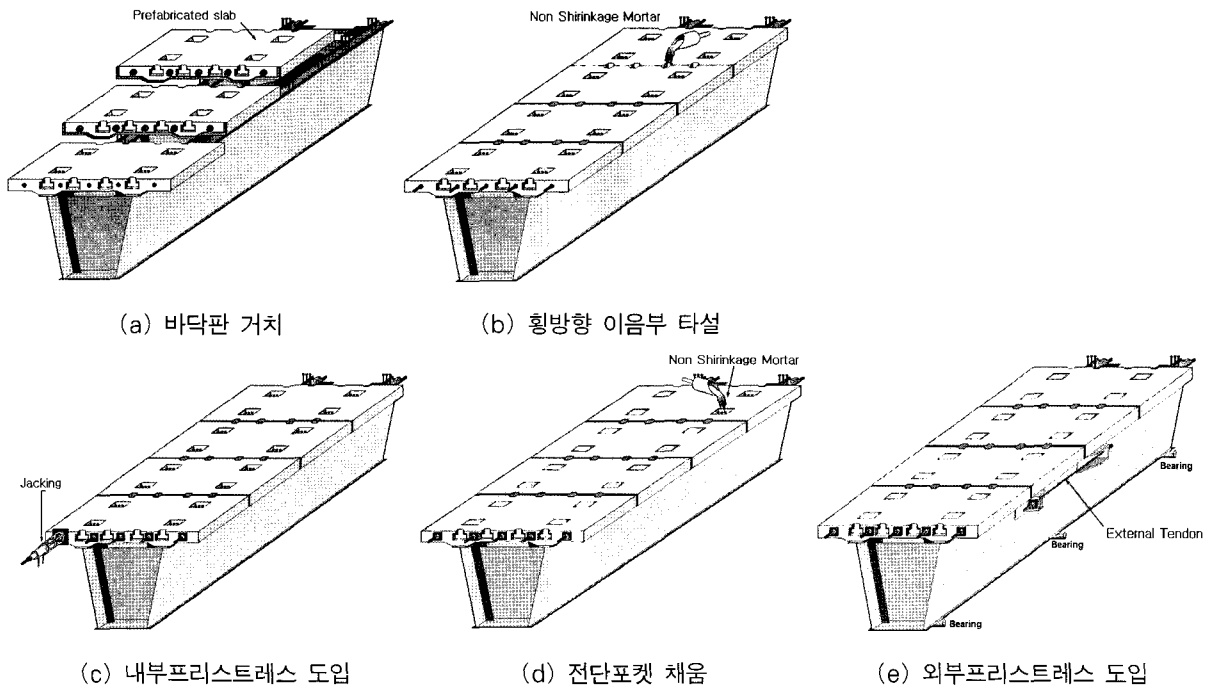


그림 6 제작 과정

하지만, 이 실험체의 경우 내부 지점부 근처 바닥판의 효과적인 균열제어를 도모하기 위해 외부강선에 의한 프리스트레스가 추가로 도입된 실험체이다 (그림 6). 개구제형 강거더를 적용하였으며 강재는 모두 SS400을 사용하였다. 거더 하부에는 수평보강재를 설치하고 또한 외부 강선 정착구 위치에도 국부좌굴을 예방하기 위해 수평보강재를 설치하였다. 지점이 설치되는 위치에는 다이아프렘과 수직보강재를 설치하였으며, 거더에 83cm 간격으로 K-브레이싱을 설치하여 보강하고 상부 플랜지에 수평브레이싱을 설치하여 뒤틀림을 방지하였다. 직경 19mm, 높이 120mm의 전단연결재를 전단 포켓당 3열로 배치하고 교축방향으로 등간격 배치하여 완전합성 거동을 하도록 하였다. 실험에 적용된 프리캐스트 바닥판의 두께는 150mm이고 바닥판 하나당 교축방향 길이는 1500mm, 횡방향 폭은 1470mm이다. 또한 외부강선에 의한 프리스트레스를 도입하기 위하여 부모멘트 구간에 해당하는 거더의 복부에 총 4기의 정착구를 설치하였다. 정착구는 거더의 한쪽에 5.83m 간격으로 설치되었으며, 외부강선이 삽입되는 정착구 홀의 직경은 39mm이고 정착구와 거더의 연결은 직경 25mm의 볼트를 10개 사용하였다.

이 실험체도 강도 측면에서 완전합성이 이루어지도록 전단연결재를 배치하였다. 교축방향으로 바닥판과 거더 간에 상대슬립을 LVDT를 이용하여 측정하였고, 극한하중이 재하될 때까지 측정된 최대 상대슬립을 관측한 결과

1mm를 넘지 않았다. 이러한 슬립 양은 매우 적은 양으로 Push-out 실험으로부터 측정된 극한변위에도 훨씬 미치지 못하며, 기존에 극한 슬립량에 대해 통계적으로 연구한 결과와 비교해보아도 매우 작은 양인 것을 알 수 있었다. 외부 프리스트레스의 도입으로 인한 합성정도의 문제점은 발생하지 않았고, 2경간 박스거더 시험체가 완전히 붕괴될 때까지 전단연결부에 의한 합성정도는 완전합성 상태를 유지하였다. 따라서 붕괴 실험으로부터 얻어진 파괴하중은 완전합성단면에 대해 소성붕괴메커니즘에 의해 산정된 극한하중과 잘 일치하였다.

정모멘트를 받는 합성거더의 복부판과 상부 플랜지에 국부좌굴 발생가능성이 없고, 적절한 횡지지로 횡비틀림 좌굴 발생가능성이 없다면, 그리고 충분한 전단연결재를 배치하여 완전합성을 만족하도록 설계되었다면, 이러한 합성거더의 단면회전 성능을 결정하는 주요 인자로는 바닥판의 두께와 거더 높이의 비율을 들 수 있다. 콘크리트 바닥판 단면에 발생하는 변형률의 수준이 압괴 변형률에 도달하기 이전에 강거더 하단부의 변형률이 변형률 경화에 먼저 도달하게 한다면, 단면의 효율적인 이용이 이루어지는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 개념을 바탕으로 Rotter⁵⁾는 연성도 지수를 제안하였다. 2개의 강합성 박스거더 연속교(CBG1 & CBG2)의 극한 실험으로부터 연성도를 분석한 결과, 10m×10m 강합성 박스거더 연속교 CBG1의 정모멘트부 단면의 연성도는 1.38, 20m×20m 연

속합성박스거더 CBG2의 연성도는 1.73로 각각 평가되었다. 따라서, 정모멘트부 합성단면에서는 극한상태에서도 좋은 연성도를 보이며 큰 회전성능을 발휘할 것으로 예상할 수 있다. 실제, 파괴실험 결과, 두 실험체 모두 좋은 연성 거동을 보여주었다.⁹⁾

연속 합성거더의 극한강도를 산정하기 위해서는 정모멘트부 합성단면의 내하력 뿐만 아니라 부모멘트부 합성단면의 내하력도 정확히 평가해야 한다. 그런데 부모멘트부에서는 바닥판에 인장력이 도입되므로 균열이 발생한다. 그리고 정모멘트부와는 달리, 거더의 복부판 및 하부 플랜지에 압축력이 작용하기 때문에, 좌굴에 대한 주의가 필요하다. 바닥판에 발생하는 균열은 합성거더의 사용성 및 내구성 측면에서 매우 중요하다. 바닥판에 프리스트레스를 도입함으로써 사용하중에 의해 도입되는 인장응력을 제어하거나, 균열은 허용하지만, 균열폭에 제한을 두는 방안으로부터 합성거더의 사용성 및 내구성을 고려한 설계를 수행할 수 있다.¹⁰⁾ 이에 대한 보다 엄밀한 방안을 마련하기 위해 합성거더의 균열거동에 대한 연구는 좀 더 면밀히 수행될 필요가 있으며, 또 현재 진행 중에 있다.^{10,11)} 그러나 이와 같은 균열거동에 대한 평가는 합성거더의 극한강도를 평가할 때도 매우 필요한 일이 된다. 거더 단면에 분포하는 단면력은 바닥판에 발생하는 균열과, 철근이 발휘하는 인장강성 효과 등에 의해 변화되며, 결과적으로 합성거더의 정확한 휨강성 평가가 가능할 때, 합성거더에 발생하는 단면력을 정확히 파악할 수 있다. 정확한 단면력의 분포로부터 좌굴 발생 가능성을 추측할 수 있다.^{11,12)}

앞서 언급한 두 개의 연속합성 박스거더 실험체(CBG1 & CBG2)에 대한 파괴 실험 및 해석적 연구가 수행되었다. 두 시험체 모두 부모멘트부 단면은 AASHTO LRFD 시방기준으로부터 검토할 경우, 조밀단면(compact section), EUROCODE로부터 검토할 경우 등급(class) 1 단면에 해당되기 때문에, 부모멘트부 단면에서도 완전소성해석(rigid plastic analysis)에 의해 결정된 단면내하력을 발휘할 것으로 예상할 수 있다. 또한 두 시험체 모두 박스거더 단면을 갖고 있기 때문에 높은 비틀강성을 지니고 있고 따라서 횡비틀림 좌굴에 대해 충분한 지지 조건을 만족하고 있다. 이처럼, 두 시험체는 충분한 단면 회전 성능이 각각의 설계 시방서로부터 보장되고 있기 때문에, 극한하중의 평가는 붕괴메커니즘(Collapse mechanism)을 따르는 단순소성해석(simple plastic analysis)에 의해 가능할 것으로 판단된다. 두 시험체에 대한 실험결과로부터, 균열하중, 최대 정모멘트부 항복하중 및 최대부모멘트부 항복하중 그

리고 붕괴하중을 관측하였고, 콘크리트 인장 강도와 바닥판에 도입된 프리스트레스를 고려하여 산정된 균열하중, 비균열합성 단면과 균열합성단면에 대해 평가된 항복하중 그리고 단순소성해석의 결과를 각각 비교하였다.

균열하중의 경우 CBG1과 CBG2 모두 예상하중보다 약간 상회하는 실험결과를 보여주었다. 이것은 프리캐스트 바닥판 시스템의 특성과 연관이 있다.^{7,8)} CBG1의 경우 최대정모멘트부 항복하중이 최대 부모멘트부 항복하중에 비해 보다 적은 비율을 보여주었다. 이것은 모멘트 재분배를 보여주는 것으로 판단된다. 일반적으로 연속합성거더의 모멘트 재분배는 부모멘트 구간에서 발생한 균열로 인해 부모멘트부 모멘트가 정모멘트부로 재분배된다. 따라서 탄성적으로 비균열합성단면에 대해 산정된 모멘트 분포는 실질적으로 부모멘트부에서는 과대 평가되고 정모멘트부에서는 과소 평가되는 결과를 낳는다. 한편, CBG2의 항복하중은 계산결과를 매우 상회하는 결과를 보여주었는데, 이는 CBG2에 부가적으로 설치된 정착구 단면과 외부강선의 단면적을 고려하지 않고 항복하중을 산정한 결과로 생각된다. CBG2는 부모멘트구간에서 효과적인 균열제어를 위해 외부 강선에 의한 프리스트레스가 추가로 도입되었다.

CBG1의 경우 완전한 파괴하중은 관측할 수 없었는데, 그것은 가력기의 용량 부족 때문이었다. 그러나 가력기에 의해 재하된 하중의 크기는 예측되는 극한하중의 90%수준이었고, 측정된 하중-처짐 곡선과 재료 비선형 해석을 이용하여 CBG1의 극한거동 및 극한하중 수준을 모사할 수 있었다.⁹⁾

CBG2의 경우, 더 이상의 가력기의 하중이 증가하지 않는 상태의 붕괴하중을 관측할 수 있었는데, 단순소성해석에 의해 산정한 극한하중에 비해 실험으로부터 측정된 붕괴하중이 거의 유사한 수준인 것으로 파악되었다. 이것은, CBG2의 부모멘트부의 단면내하력 산정시, 완전소성해석(rigid plastic analysis)을 이용하였고, 외부강선에 대해서도 이를 동일하게 적용하였기 때문으로 생각된다. 그러나 실질적으로 실험결과를 분석해보면, 외부 강선은 소성 상태에 있지 않았다. 따라서, 외부 강선이 발휘하는 단면력을 과대 평가한 결과가 되는 것이다. 그러나 외부 강선 단면적이 합성거더 단면적에 비해 그리 크지 않을 경우에는 그러한 오차가 심각할 만큼 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 사료된다. 그러나 그렇지 않을 경우에는 면밀한 검토가 요구된다고 생각한다.

한편, 이러한 문제를 해결하기 위해 콘크리트 바닥판, 강거더, 외부강선 및 철근 등 각각의 재료에 대한 비선형

효과를 고려하여 외부 프리스트레스가 도입된 합성거더의 탄소성 해석을 수행할 수 있다.²¹⁾ 외부 프리스트레스를 도입한 합성거더에서 외부 강선에 대한 효과적인 설계를 위해서는 외부 강선에 추가로 도입되는 긴장력의 크기를 정확히 평가하는 것이 중요하다.^{8,9,18,19,21)}

연속합성거더, CBG1과 CBG2의 극한거동을 해석적으로 모사하기 위해 콘크리트 및 강재의 재료 비선형을 고려한 유한요소해석 방안을 마련하였다. 연속합성거더를 모사하기 위해 요소는 기본적으로 3차 Hermitian 다항함수를 갖는 보요소를 적용하였는데, 이는 시험체의 단면 특성과 관련이 있다.⁹⁾ 두 시험체에 대한 실험결과로부터 최대 정모멘트부와 최대 부모멘트부 합성단면에 대한 모멘트-곡률 곡선을 도출할 수 있었다. 모멘트-곡률 곡선으로부터 합성단면의 정확한 휨강성을 평가할 수 있는데, 재료 비선형을 고려한 유한요소해석으로부터 구한 최대 정모멘트부 및 부모멘트부 합성단면의 모멘트-곡률 곡선이 실험 결과로부터 얻어진 모멘트-곡률 곡선을 매우 잘 모사하는 것을 확인할 수 있었다.⁹⁾ 따라서, 재료 비선형을 고려한 유한요소해석방안의 타당성을 검증한 것으로 생각되고 이를 이용하여 CBG1과 CBG2의 모멘트 재분배율을 평가해보았다. 그 결과, CBG1과 CBG2 모두, EUROCODE 4에서 제시하고 있는 40%의 모멘트 재분배율을 상회하는 것으로 분석되었다. EUROCODE 4의 경우, Class 1 단면에 대해 모멘트 재분배율을 40%까지 허용하는 것으로 되어 있는데, 이것은 실험결과와 일치하는 내용으로 판단된다. 건물구조에 적용되는 합성보와는 달리 합성형 교량에서는 EUROCODE나 AASHTO LRFD에서 모두 모멘트 재분배율을 10%로 제한을 두는 등 상당히 엄격한 방안을 적용하고 있다. 그러나 이것은 보통 교량에 적용되는 거더 단면이 세장하거나 비조밀 단면에 해당하기 때문으로 생각되며, 이에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 최근 AASHTO LRFD의 경우, 합성거더의 대표적 모멘트-회전 관계식을 실험 및 해석적 연구로부터 추출하여 이로부터 모멘트 재분배율을 결정하도록 하는 방안을 제시하고 있는데, 이에 대한 연구가 국내 LRFD 시방 규정 제정을 위해서도 매우 필요할 것으로 생각된다.

3. 결 론

한계상태 개념으로 설계된 연속합성 박스거더에 대한 실험 및 해석적 연구 결과를 정리해보았다. 구조물의 거동 및 극한강도를 파악하는 것은 매우 기본적인 작업으로, 이

에 대한 정확한 평가가 이루어질 때 그 구조물에 대한 보다 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. 향후, 바닥판 균열에 의한 인장강성 효과 및 이로 인한 거더 좌굴의 영향성 분석, 복부판의 탄성 휨좌굴 강도 및 후좌굴 강도 그리고 인장장(Tension field) 형성에 의한 복부판의 전단 강도 및 비탄성 횡비틀림 좌굴강도에 대한 고찰이 지속적으로 이루어질 것으로 판단된다.¹¹⁾ 이러한 연구들은 향후 국내 강교의 설계법이 한계상태 설계법으로 전환되기 위해 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (1998), SI units, 2nd edition.
2. Chang SungPil, Ryu HyungKeun (2004) Development of steel and concrete composite bridges with precast decks in Korea" International Journal of Steel Structure, March, 2004
3. EUROCODE 3: Design of Steel Structures, DD ENV 1993-1-1, BSI
4. EUROCODE 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 2. Composite Bridges, DD ENV 1994-2, BSI
5. J.M.Rotter, P.Ansourian (1979), Cross-section behaviour and ductility in composite beams, Proc.Instn Civ Engrs Part 2, 67, June, pp.453~474
6. Kim Jong-Hee, Shim Chang-Su, Shigeyuki Matsui and Chang Sung-Pil (2002), "The Effect of Bedding Layer on the Strength of Shear Connection in Full Depth Precast Deck", AISC Volume 39, No.3 Third Quarter Engineering Journal
7. Ryu. H.K., Shim. C.S., Chang. S.P. (2004), "Testing a Continuous Composite Box-Girder Bridge with Precast Decks", ICE, Proc. Instn Civ. Engrs, Structures and Buildings, 157, Aug., issue SB4, pp.243~250
8. Ryu. H.K., Shim. C.S., Chang. S.P., Chung. C.H. (2004), "Inelastic Behaviour of Externally Prestressed Continuous Composite Box-Girder Bridge with Prefabricated Slabs", Journal of Constructional Steel Research, Vol 60/7 pp.989~1005.
9. Ryu H.K., Chang SP (2005), Ultimate strength of continuous composite box-girder bridges with

- precast decks, Journal of Constructional Steel Research, 61, 2005, pp.329~343.
10. Ryu H.K., Chang SP, Kim YJ, Kim BS (2005), Crack control of a steel and concrete composite plate girder with prefabricated slabs under hogging moments, Engineering Structures, Vol 27/11, pp. 1613~1624, 2005.
 11. Ryu H.K., Ultimate strength of Continuous Composite Girders with Semi-compact and Slender section, Ph.D. Thesis, Seoul National University, 2005.
 12. Ryu HK, Youn SG, Bae DB, Lee YG, "Bending Capacity of Composite Girders with Class 3 sections", Journal of Constructional Steel Research, 2006.
 13. Ryu HK, Chang SP, Kim YJ, Experimental study on Static and Fatigue strength of Loop Joints, Engineering Structures, in press.
 14. Shim, Chang-Su, Kim, Jong-Hee, Chung, Chul-Hun, and Chang, Sung-Pil (2000), "The Behaviour of Shear Connection in Composite Beam with Full-Depth Precast Slab," Proc. Instn Civ. Engrs, Structures and Buildings, Feb., Vol.140, pp.101-110.
 15. Shim, CS, Chang, SP, Cracking of Continuous Composite Beams with Precast Decks, Journal of Constructional Steel Research, 2003, Vol. 59, pp.201~214.
 16. 류형근, 윤석구, 배두병, 장승필 (2005), "조밀단면을 갖는 부분합성보의 극한강도 평가", 대한토목학회 논문집, Vol.5-A
 17. 류형근, 김영진, 장승필 (2005), "2거더 연속합성형교 루프 이음 프리캐스트 바닥판의 정적 및 피로거동", 대한토목학회 논문집, Vol.5-A
 18. 류형근, 장승필 (2003), "증가프리스트레스력을 고려한 외부프리스트레스트 강합성교량의 장기거동해석에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 1, 2003.
 19. 류형근, 장승필 (2003), "부분합성을 고려한 외부 프리스트레스트 합성보의 증가 프리스트레스 산정", 대한토목학회 학술발표회, 2003.
 20. 배두병, 윤석구, 함상희 (2004) "콘크리트 건조수축에 의한 합성거더의 장기거동", 한국강구조학회 논문집, 제16권, 6호, 12월, pp.807~817
 21. 정승인, 류형근, 장승필 (2003), "외부 프리스트레스트 강합성보의 탄소성 휨거동 해석", 한국강구조학회 논문집, 2003. 2. 