격자형 강합성 바닥판의 수정된 이음부에 대한 휨성능 평가

Evaluation of the Bending Performance of a Modified Steel Grid Composite Deck Joint

신 현 섭^{1)*} 박 기 태²⁾
Hyun-Seop Shin Ki-Tae Park

Abstract

For the joint connection of the precast steel grid composite decks, the prefabricated joint which is composed of concrete shear key and high-tension bolts was already proposed. In this study, for the purpose of increasing the bending stiffness and bending strength of the proposed prefabricated joint section details of the proposed joint are modified, and through experimental tests the bending performance, such as stiffness and strength of a modified joint, is compared with those of the proposed joint. Test and analysis results show that the shear cracks in the concrete shear key are clearly reduced by the strengthening of the shear key using shear studs and additional rebars. According to analysis results of the moment-curvature relationship, bending stiffness of the modified joint is about 47% greater than the stiffness of the proposed joint. Furthermore, the modified joint has about 32% greater bending strength than the proposed joint. Compared to specimens without the joint the modified joint has same or slightly higher bending strength, but about 37% lower bending stiffness.

Keywords : Steel grid composite deck, Deck joint, Concrete shear key, High-tension bolt, Moment-curvature relationship

1. 서 론

최근 들어 교량의 시공성 및 경제성에 큰 영향을 미치는 슬래브의 중량을 감소시키고 교통량이 많은 지역에서의 신속한 시공을 목적으로 다양한 바닥판 구조가 개발되고 있다. I형강을 이용한 격자형 강합성 바닥판 (steel grid composite deck)도 이와 같은 목적으로 개발되었다. 그 구조상세를 살펴보면, 130mm 높이의 I형강과 이의 직각방향으로 철근 또는 띠형 강재를 서로 연결하여 격자형태의 구조를 형성하고, 이 격자구조의 전체 혹은 상부 일부를 콘크리트 슬래브에 매입 설치함으로써 하부 격자구조와 슬래브가 일체화 된다. 이와 같은 구조의 장점은 부재 중량을 감소시킬 수 있고, 프리캐스트 제작이 가능하기 때문에 시공성 및 경제성 향상에 기여할 수 있다는 것이다.

I 형강을 이용한 격자형 강합성 바닥판은 1939년 미국 Bronx-Whitestone교에 적용된 이후 유사한 구조가 Mackinac-

Straits교, Walt-Whitman교, George-Washington교 등의 교량에 적용된바 있다. 일본의 경우는 1973년에 준공된 관문교를 시작으로 1977년에는 평호대교에 적용되었다 (Korea Institute of Construction Technology, 2006). 최근에는 국내에서도 격자형 강합성 바닥판에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Lee et al., 2000; Chung et al., 2003; Kim et al., 2008; Korea Institute of Construction Technology, 2011).

본 논문에서 다루고자 하는 Fig. 1의 격자형 강합성 바닥판도 위와 유사한 목적으로 개발되었다. 콘크리트 슬래브 하부에 위치한 격자형 구조는 횡인장을 부담하는 T형강과 이와 직각으로 연결되는 가로막대 (cross bar)로 구성된다. 설계방법에 따라서는 T형강 사이에 위치하며 가로막대와 직각으로 연결되는 세로막대 (longitudinal bar)로 격자구조를 보강하기도 한다 (Versace and Ramirez, 2004; Pierce, 2005; Gase and Kaczinski, 2010).

기존 격자형 강합성 바닥판의 이음부 형식을 검토해 보면

1) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원, 교신저자
2) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원

* Corresponding author : hsshin@kict.re.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Fig. 1 Steel grid composite deck

철근을 배근하지 않고 채움 콘크리트만을 타설하거나, 철근을 배근할 경우에는 후크형태의 철근 겹침이음이 적용되고 있다. 서로 연결되는 각각의 바닥판은 프리캐스트 방식에 의해 제작되고 설치됨으로써 현장타설에 의한 바닥판 공법보다 더 신속한 시공이 가능하지만, 이음부 설치를 위해서는 채움 콘크리트의 타설 및 양생과정이 필요하다.

이에 비해 match-cast 방식으로 제작되는 콘크리트 전단키와 고장력볼트로 구성된 이음부(이하 볼트체결 이음부)는 기계식 연결방법을 취한 것으로서 프리캐스트로 제작이 가능한 격자형 강합성 바닥판을 플랫폼 형식의 수평지지구조에 적용하기 위해 제안된 바 있다(Korea Institute of Construction Technology, 2011; Shin et al., 2012). 이에 대한 휨실험 결과를 검토해 보면 이음부 휨강도는 이음부가 없을 경우의 연속단면 휨강도에 못 미치고 있음을 알 수 있다. 프리캐스트 방식으로 시공되는 바닥판 구조에서는 이음부가 취약부로 작용하여 구조 안전성에 문제가 발생할 수 있으므로, 이음부가 없는 단면에 비해 최소한 동등한 수준의 휨성능을 갖도록 하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 콘크리트 전단키와 고장력볼트로 구성된 볼트체결 이음부의 휨강도 및 휨강성을 증가시킴으로써 구조적 안전성을 향상시키고자 한다. 이를 위해 단면상세를 수정하여 이음부를 보강하였으며, 구조실험을 통해 얻은 결과를 기존 볼트체결 이음부와 비교 분석하였다. 휨성능 비교를 위한 분석방법은 위의 기존 연구와 비교를 위해 동일한 방법을 취하였다. 항복 및 최대하중을 기준으로 휨강도를 비교하였으며, 휨강성 비교를 위해서는 모멘트-곡률 관계곡선으로부터 구한 강성을 이용하였다. 또한, 각 이음부의 연성을 검토하기 위해 하중-처짐 관계곡선으로부터 구한 처짐비 및 모멘트-곡률 관계곡선으로부터 구한 곡률비를 서로 비교하였다.

2. 격자형 강합성 바닥판의 볼트체결 이음부

Fig. 2에 나타난 바와 같은 격자형 강합성 바닥판 구조에서 볼트체결 이음부의 콘크리트 전단키는 바닥판 간에 발생하는 전단력을 전달하기 위한 것이다. 바닥판 길이 방향, 30cm 간격으로 설치되는 고장력볼트는 이음부에 발생하는 휨인장에 저항하기 위한 것이다. 또한, 이음부 접합면에 설치된 약 2mm 두께의 강재 플레이트는 국부적인 응력집중에 대한 콘크리트 전단키의 보강을 위한 것으로 ㄷ자 형태의 철근으로 고정되고 있다(Korea Institute of Construction Technology, 2011; Shin et al., 2012).

이와 같은 이음부 구조에 대한 실험결과를 보면, Fig. 3에 나타난 바와 같은 균열거동을 보이고 있다. 최대하중 상태에서 우측의 이음부 콘크리트를 중심으로 다수의 전단균열이

Fig. 2 Bolted Joint of steel grid composite deck

Fig. 3 Crack pattern of the existing bolted joint specimen

Fig. 4 Modified section detail

발생되고 있으며, 이음부 하면에서 위로 향하는 균열은 다른 전단균열에 비해 다소 넓은 범위에 분포하고 있다. 하면에서 상단부로 향하는 직접전단 균열은 암 (female)측 콘크리트 전단키의 하단부에 전단에 대한 보강구조가 설치되어 있지 않기 때문에 발생한 것으로 예측된다. 강성 감소에 의한 처짐 증가뿐만 아니라, 조기 항복에 따른 부재내력 감소도 발생하였을 것으로 추정된다.

본 연구에서는 이음부 단면의 휨강성을 증가시키고자 Fig. 4에 나타난 바와 같이 전단 스티드 ($\phi 16$)를 바닥판 길이방향, 150mm 간격으로 T형강 웨브에 용접 설치함으로써 이음부 콘크리트에 작용하는 전단에 저항할 수 있도록 하였다. 또한, 콘크리트에 발생하는 기타 균열을 억제하기 위해 Fig. 4에서와 같이 가외철근을 설치하였다. 가외철근 끝단은 후크 형태로 가공하여 스티드에 고정될 수 있도록 하였다.

휨강도의 직접적인 향상 효과를 얻기 위해서는 고장력볼트의 제원을 M27에서 M30으로 증가시켰다. 또한, T형보 웨브에 설치되는 볼트 체결부의 지압판을 웨브 좌우측에 설치함으로써, 고장력볼트로부터 가로막대 (cross bar)로 전달되는 휨인장의 전달 구조를 보강하였다.

3. 휨실험 계획

3.1 실험체 계획

Fig. 4에 나타난 단면상세가 개선된 이음부의 휨성능평가 실험을 위한 실험체는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 실제 구조 시스템에서 바닥판 지간의 중앙부 폭 900mm 구간을 고려하여 설계되었다. 실험체 개수는 반복실험을 위해서 총 3개를 제작하는 것으로 계획하였다. 또한, 이음부가 없는 연속단면의 휨성능과 비교하기 위해 Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 전체 폭과 길이, 150mm 간격으로 총 6개가 설치된 가로막대의 제원 등이 서로 동일한 무이음부 바닥판을 실험체 계획에 포함하였다. 실험체 계획을 Table 1에 요약하였으며, Fig. 6

Fig. 5 Bending test range

(a) existing bolted joint (BCP)

(b) bolted joint with modified section details (BC)

(c) deck without joint (NJ)

Fig. 6 Detail of specimens

Table 1 Specimen list for bending test

specimen	joint type	test parameter	test no.
BCP	shear key + high tension bolt (3×M27)	existing bolted joint	3
BC	shear key + high tension bolt (3×M30)	bolted joint with modified section details - stud and additional rebar for restraint of shear crack in the shear key - dimension of high-tension bolt and bearing plate for connection	3
NJ	—	deck without the joint	3

은 실험체 상세를 나타낸 것이다. Fig. 6(a) 및 Table 1에서 BCP 실험체는 개선 전의 기존 이음부 실험체로서 분석 대상 전체를 일괄로 나타내기 위해 함께 정리해 놓은 것이다. 재

료강도로서 슬래브 콘크리트의 설계압축강도는 35MPa이고, 격자형 구조에 사용된 강재는 SM400이며, 고장력볼트 M30의 재료 규격은 F8T이다 (Korea Institute of Construction Technology, 2012).

3.2 실험체 제작

볼트체결 이음부 실험체의 제작은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 바닥판 격자구조 조립이 완료된 이후, 이음부가 설치될 측에 위치한 T형보 웹에 스티드 용접, 이음부에 설치되는

Fig. 7 Fabrication of a modified joint specimen

Fig. 8 Fabrication of steel grid composite deck without joint

가외철근을 포함한 바닥판의 철근배근, 스트레인이게이지 설치, 콘크리트 타설 및 양생과정으로 각각의 프리캐스트 강합성 바닥판을 제작하였다. 이후 28일간의 양생기간을 거쳐 콘크리트 전단기가 설치된 한쌍의 바닥판을 3개의 고장력볼트로 체결하여 일체화함으로써 제작과정을 모두 완료하였다.

또한, 이음부가 없는 NJ 실험체의 경우도 격자형 구조 조립 및 철근배근, 타설 및 양생 등 이음부 설치를 제외한 다른 부분은 유사한 과정을 통해 제작되었다.

3.3 가력 및 측정방법

이음부 실험체의 휨성능평가를 위해 Fig. 9의 셋팅상태에 나타난 바와 같이 단순지지 상태에서 실험체 중앙을 가력하는 3점 재하방법을 계획하였으며, 이는 이음부에 차량의 운하중이 직접 재하되는 경우를 가정한 것이다. 가력장치로는 2000kN급 UTM을 사용하였으며, 가력방법은 변위제어로 초당 0.01mm의 속도로 가력하였다.

지간중앙과 4등분점에서의 처짐을 측정하기 위해 변위계를 설치하였으며, 곡률측정에 의한 이음부 휨강성 산정을 위해 3개의 변위계를 추가로 설치하였다. 재하하중에 따른 각 부재의 변형률을 측정하기 위해 실험체 제작시 철근에 부착한 게이지 외에도 지간 중앙부 슬래브 및 격자형 구조의 가로막대 등에도 게이지를 부착하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-처짐 관계

4.1.1 개요

단면이 개선된 이음부 실험체 (BC1~BC3) 및 이음부 없이

Fig. 9 Set-up of specimen and LVDT

Table 2 Test results

Specimen	Load (kN)							P _m / P _n	Deflection (mm)				δ _m / δ _y
	P _{kc}		P _y		P _m		P _n		δ _y		δ _m		
BCP1	44.1	47.6	177.5	176.0 (0.85)	219.1	225.8 (0.79)	192.9	1.17	28.4	29.5	65.8	67.2	2.28
BCP2	56.1		178.2		229.1				30.3		67.5		
BCP3	42.5		172.4		229.2				29.9		68.4		
BC1	68.2	73.7	246.1	254.9 (1.23)	294.7	298.1 (1.04)	228.5	1.30	29.6	30.2	78.0	69.4	2.30
BC2	82.4		256.8		293.9				30.3		70.2		
BC3	70.6		261.8		305.6				30.7		60.1		
NJ1	138.5	129.1	205.2	206.5 (1.00)	272.4	286.1 (1.00)	173.9	1.64	10.7	11.4	19.1	22.1	1.94
NJ2	135.5		201.6		293.6				12.0		23.7		
NJ3	113.2		212.6		292.3				11.4		23.5

Fig. 10 Load-deflection curve

Fig. 11 Comparison of load-deflection curve

제작된 무이음부 실험체 (NJ1~NJ3)에 대한 3점재하 정적 휨 실험 결과를 Table 2에 요약하였으며, 하중-처짐 관계곡선을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11은 무이음부, 기존 및 개선 볼트체결 이음부 실험체에 대한 하중-처짐곡선을 서로 비교하여 나타낸 것이다. Table 2 및 Fig. 10에는 휨거동 비교를 위

해 기존 볼트체결 이음부 (BCP1~BCP3)에 대한 실험결과를 함께 나타내었다.

Table 2에서 P_{ic} , P_y , P_m 은 각각 초기균열하중, 항복하중, 최대하중을 의미하며, P_n 은 소성모멘트를 계산하여 구한 이론 최대하중이다. 여기서, 항복하중 P_y 는 하중-처짐 곡선에서 균열발생 이후의 접선과 부재 중앙부의 소성화로 인해 하중 증가율이 감소된 구간의 접선이 서로 만나는 점에서 측정된 하중이다. 소성화 구간에서의 접선 결정을 위해서는 스트레인게이지의 변형률을 참고하였다. 이음부 단면에 대한 이론 최대하중 P_n 은 콘크리트전단기로 인한 불연속성 및 회전 등을 무시하고, 단순히 콘크리트 슬래브와 고장력볼트로 구성된 일체 단면으로 가정하여 구한 것이다. 또한 δ_y , δ_m 는 각각 해당 하중이 재하된 상태에서 측정된 지간 중앙부 처짐값이다.

4.1.2 휨 및 균열 거동 비교

다음은 본 논문에서 실험한 개선된 볼트체결 이음부 (BC)를 중심으로 균열 및 휨거동을 기술한 것이며, 기존의 볼트

체결 이음부 (BCP)와 비교하여 그 차이를 설명하였다. 또한, 각 이음부 실험체의 휨강도 (최대하중) 및 최대 처짐 등을 무이음부 실험체와 비교하였다.

Fig. 12(b)는 BC3 실험체의 최대하중 발생 후의 이음부 균열상태를 예로써 나타낸 것이다. 3개 실험체의 전체적인 균열양상을 관찰해 보면, 지점과 이음부 사이에 위치한 세로 막대의 상단으로부터 슬래브 상면으로 향하는 휨균열이 좌우 슬래브에서 발생하여 하중이 증가함에 따라 진전되었다. 이음부 콘크리트에서는 직접전단에 의해 콘크리트 전단기 암 (male)측 및 수 (female)측에서 균열이 발생되었으나 하중 증가에 따른 추가 균열의 발생이나 균열폭의 진전은 크지 않았다.

개선된 볼트체결 이음부 (BC)에 대한 균열거동을 Fig. 12(a)에 나타낸 바와 같은 개선되기 전의 경우 (BCP)와 비교해 보면 다음과 같다. 개선 전의 경우 하중이 증가함에 따

라 암측의 콘크리트 전단기에 추가 균열이 집중적으로 발생한 반면에, 단면상세가 개선된 실험체의 경우는 이음부 좌우 어느 한쪽에 집중되는 균열이나 하중이 증가함에 따라 발생하는 추가 균열 및 균열폭의 진전 등은 관찰되지 않았다.

이와 같은 균열거동의 차이는 변형률 측정결과에서도 알 수 있다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 이음부를 중심으로 좌우측에 위치한 가로막대의 변형률을 비교해 보면 다음과 같다. 기존 이음부의 경우에는 균열이 집중된 이음부 측 (right side)에 위치한 가로막대의 변형률이 반대편 (left side) 가로막대의 변형률 보다 현저히 크게 발생하였으나, 개선된 이음부의 경우 최대하중이 작용할 때 까지는 좌우측 변형률 차이가 비교적 크지 않음을 알 수 있다.

위와 같은 균열상태를 고려할 때, 이음부 내에 설치한 스티드 및 가외철근이 콘크리트 전단기에 발생하는 전단균열을 효과적으로 억제한 것으로 판단된다. 특히 이음부 암측에

(a) existing joint specimen (BCP1)

(b) modified joint specimen (BC3)

Fig. 12 Comparison of crack pattern

(a) existing joint specimen

(b) modified joint specimen

Fig. 13 Comparison of strain($\times 10^{-6}$) at the bottom side of left and right cross bars

발생하였던 직접전단의 경우, 스티드 보강으로 뚜렷한 감소 효과가 있음을 알 수 있었다.

또한, 개선된 이음부에서는 전단기에 설치되는 가외철근의 끝단을 후크형태로 가공하여 스티드에 고정시킴으로써 정착 효과를 증가시키고자 했다. 기존 이음부와 비교하여 기타 다른 전단균열이 비교적 적게 발생하고 있는 것은 가외철근의 설치 및 정착방법 등이 하나의 중요 변수로서 작용했기 때문으로 추정된다.

개선된 볼트체결 이음부 (BC)의 항복하중 및 최대하중은 Table 2 및 Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이 평균적으로 254.9kN 및 298.1kN이다. 개선 전의 이음부 (BCP)와 비교하면 항복하중은 약 45%, 최대하중은 약 32% 정도 큰 것으로 분석되었다. 이음부가 없는 NJ 실험체와 비교하면 항복하중은 약 23%, 최대하중은 약 4% 더 큰 것으로 분석되어, 무이음부 단면과 동등 수준 이상의 휨강도를 갖고 있음을 알 수 있다.

BC 이음부의 실험 최대하중 P_m 은 소성모멘트 계산 (콘크리트전단기 설치로 인한 불연속면 무시)으로부터 구한 하중 P_n 의 약 1.3배로 나타났다. 기존 볼트체결 이음부의 경우 P_m/P_n 이 약 1.17인 것을 고려할 때, 개선된 이음부에서는 불연속면으로 인한 단면내력의 손실이 비교적 작게 발생한 것으로 추정할 수 있다. 단면내력 손실에 대한 분석은 추후 해석적 방법에 의해 좀 더 정확히 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

한편, 이음부 실험체에 대해 항복하중 발생 시의 처짐 (δ_y)을 무이음부와 서로 비교해 보면, 이음부 실험체의 경우 약 30mm 전후로서 무이음부의 11.4mm에 비해서는 약 3배에 가까운 처짐량을 보이고 있다. 이음부로 인해 단면의 강성이 감소하고 있음을 알 수 있다. 좀 더 구체적인 휨강성 비교는 4.2절에 나타난 바와 같은 모멘트-곡률 관계에 근거하여 분석하기로 한다.

BC 실험체의 최종 파괴과정을 검토해 보면, 최대하중 도달 시 휨인장을 받는 고장력볼트 및 지간 중앙부 부근에 위치한 가로막대 변형률은 각각 $22,000 \times 10^{-6} \sim 25,000 \times 10^{-6}$ 범위 및 $2,400 \times 10^{-6} \sim 4,200 \times 10^{-6}$ 범위에 있다. 이때의 콘크리트 슬래브 상면에서 측정된 변형률은 $2,300 \times 10^{-6} \sim 3,300 \times 10^{-6}$ 범위인 것으로 측정되었다. 최대하중 재하 시점을 기준으로 지간 중앙부에 위치한 콘크리트 슬래브 상부가 압축 파괴되었으며, 이후 하중은 감소하기 시작하였다. 이와 같은 변형률 측정값 및 실험과정에서 관찰된 슬래브의 균열상태를 고려할 때, BC 실험체도 기존 이음부 실험체의 경우와 같이 최종 휨파괴된 것으로 판단된다.

4.2 모멘트-곡률 관계: 휨강성 비교

4.2.1 휨강성 계산방법

단면개선 전후의 이음부에 대한 휨강성 변화 및 이음부 설치로 인한 휨강성의 감소량 등을 평가해 보고자 한다. 이를 위해 처짐과 곡률간의 관계를 나타낼 수 있는 모멘트 면적법 (Moment-area method)을 이용한다. 모멘트 면적법을 이용하게 되면 실험에서 측정된 처짐으로부터 이음부의 곡률을 구할 수 있다. 이 곡률과 실험으로부터 얻은 모멘트 간의 관계를 도시하면 모멘트-곡률 곡선을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 보강 전후의 이음부 각각에 대해 위와 같은 과정으로 구한 모멘트-곡률 관계로부터 휨강성을 구하고 서로 비교함으로써 휨거동의 차이점을 분석하였다.

BC 실험체에 대해 곡률계산에 이용한 처짐값은 Fig. 9에 서와 같이 지간중앙, 지간의 4등분점 및 그 사이에 위치한 3개소 등 총 5개소에서 측정한 변위값이다.

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\phi_5 = a\delta_1 + b\delta_2 + c\delta_3 + d\delta_4 + e\delta_5 \quad (2)$$

곡률계산을 위해 먼저 단순지지 상태에서 발생할 수 있는 곡률분포는 Fig. 14와 같다고 가정하였다. 각 측정 지점에서의 처짐 및 곡률을 Fig. 15에서와 같이 정하면, 지간 내 해당 위치에서의 처짐과 곡률간의 관계는 모멘트 면적법 (Moment-area method)에 의해 식 (1)과 같이 쓸 수 있다. 여기서, 상수값 a_{ii} 는 지간 내 곡률계산 위치에 따라 정해지는 상수값이다. 식 (1)에 실험으로부터 구한 처짐값 $\delta_1 \sim \delta_5$ 를 대입하여 지간 중앙에서의 곡률 ϕ_5 를 구하면 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 $a \sim e$ 는 식 (1)을 ϕ_5 에 대해 체전개함으로써 구해지는 상수

Fig. 14 Curvature distribution and moment-curvature curve

Fig. 15 Distribution of deflection and curvature

Table 3 Curvature φ_5 of each specimen (1/m)

Specimen	φ_{ic}		φ_y		φ_u		φ_u/φ_y
BCP1	0.029	0.029	0.283	0.297	0.704	0.697	2.35
BCP2	0.037		0.316		0.697		
BCP3	0.020		0.293		0.690		
BC1	0.043	0.043	0.323	0.286	0.937	0.853	2.98
BC2	0.055		0.275		0.915		
BC3	0.030		0.259		0.708		
NJ1	0.071	0.067	0.119	0.122	0.226	0.269	2.20
NJ2	0.076		0.131		0.327		
NJ3	0.053		0.116		0.254

Fig. 16 Moment-curvature(φ_5) curves

값이다. 식 (2)를 이용하여 BC 이음부 실험체의 지간 중앙에서의 곡률을 구하면 Table 3과 같다. 여기서 φ_{ic} 는 초기균열 발생시 곡률, φ_y 및 φ_u 는 각각 항복하중 및 최대하중 작용시의 곡률이다.

지간 중앙에서의 모멘트-곡률 관계를 그래프로 나타내어

Table 4 Bending stiffness of each specimen (kNm^2)

Specimen	EI_i		EI_c		EI_y	
BCP1	491.51	531.08 (0.57)	349.36	290.46 (0.43)	42.80	66.69
BCP2	627.50		243.31		70.98	
BCP3	474.22		278.72		86.30	
BC1	793.02	732.99 (0.78)	409.61	427.02 (0.63)	50.03	60.37
BC2	749.09		405.49		59.44	
BC3	656.85		465.97		71.63	
NJ1	945.42	937.24 (1.00)	645.44	678.51 (1.00)	239.03	222.54
NJ2	814.70		458.41		180.50	
NJ3	1051.61		831.68		248.09

Fig. 17 Estimation of the bending stiffness

서로 비교하면 Fig. 16과 같다. Fig. 16은 실험체 BCP3, BC3 및 NJ3을 예로 들어 비교해 놓은 것이다. 휨강성은 모멘트-곡률 관계곡선의 기울기로서 각 실험체별로 하중재하 단계에 따라 구하여 Table 4에 요약하였다. EI_i 는 초기 휨강성, EI_c 는 초기균열 발생 이후 항복하중이 재하되기 전 상태에서의 휨강성이며, EI_y 는 항복하중 재하 이후의 휨강성이다 (Fig. 14 참조). 여기서, 각각의 휨강성은 다음과 같은 가정 하에 결정한 것이다.

슬래브에서의 균열발생 및 인장부재의 항복과 같은 소성화가 진행됨에 따라서 휨강성은 연속적으로 변화하게 된다. 본 논문에서는 어느 한 하중 재하점에서의 휨강성을 비교하기 보다는 실험체별로 특징적인 거동을 서로 비교하고자 한다. 이를 위해 Fig. 17에서와 같이 초기 하중재하, 초기균열, 항복하중 등 주요 하중단계를 기준으로 구간 내 대부분의 값들을 포함하는 소위 대표적인 접선의 기울기를 휨강성으로 하여 서로 비교하였다.

4.2.2 실험체별 휨강성 비교

단면이 개선된 BC 실험체의 초기 휨강성 EI_0 은 732.99kN/m^2 으로서 무이음부 실험체 (NJ) 휨강성의 약 78%에 해당한다. 단면개선 전의 이음부에 비하면 약 38% 정도 증가한 것이다.

또한, 초기균열 발생 이후의 휨강성 EI_c 는 427.02kN/m^2 으로서 무이음부 실험체의 63%에 해당하며, 개선 전의 경우에 비하면 약 47% 증가하였다. 그러나, 항복하중 이후의 휨강성은 단면개선 여부와 상관없이 두 이음부가 거의 같은 수준으로 분석되었다.

단면이 개선된 이음부의 초기 휨강성 EI_0 가 개선 전보다 약 38% 정도 더 큰 것으로 나타난 것은 볼트체결부의 보강(고장력볼트가 통과하는 위치의 T형보 웹 좌측 및 우측 지압판 보강, Fig. 4 또는 Fig. 6 참조)에 의해 이음부 결합상태 및 힘의 전달구조가 변화된 것이 원인으로 작용하였거나, 작게는 실험체 제작 및 셋팅 상에서 발생할 수 있는 미세한 차이로 인해 발생했을 것으로 추정 된다. 구체적인 원인은 추후 유한요소해석과 같은 방법에 의해 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

초기균열 발생 이후 두 이음부의 휨강성 (EI_c) 차이는 다음과 같은 원인 때문으로 판단된다. 단면이 개선된 BC 실험체의 경우 이음부 콘크리트 내에 설치한 스티드 및 가외철근이 콘크리트 전단기의 직접전단과 미세균열의 집중 등을 효과적으로 억제하였으며 (Fig. 12 및 Fig. 13 참조), 이로 인해 약 47% 정도 휨강성이 증가한 것으로 판단된다.

무이음부 단면과의 휨강성 비교 결과에 따르면, 이음부 유무에 따라 작지 않은 강성 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 이음부 설치로 인한 단면의 불연속성과 하중재하에 따른 이음부 회전, 이음부가 없을 경우와 다른 균열발생 거동 등이 원인으로 작용한 것은 자명하다.

단, 본 논문에서는 Fig. 5에서와 같이 바닥판 중앙부의 일정 구간에 대해서 이음부 자체의 휨성능을 알아보기 위해 휨 실험을 한 것이다. 바닥판의 지지조건이 변화될 경우 전체를 포함하지는 않는다. 따라서, 추후에는 전체 바닥판이 설치된 경우에 대해 이음부로 인한 강성 감소량 및 전체 구조거동에 미치는 영향을 비교해 보고, 필요에 따라서는 추가적인 강성 보강 방법을 모색해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다. 이를 위한 비교분석 방법으로 유한요소해석에 의한 경우에는 본 논문에서 얻은 휨강성 분석결과가 이음부 모델의 단순화를 위해 참고될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 연성 비교

각 이음부 실험체에 대해 항복할 때의 처짐량에 대한 최대하중 재하시의 처짐비율 (δ_m/δ_y) 및 항복할 때의 곡률에 대한 최대하중 재하 시의 곡률비율 (ϕ_u/ϕ_y)을 비교해 보았다.

처짐량 비율의 경우, 보강 전 이음부 실험체 (BCP)가 2.28, 보강 후 이음부 실험체 (BC)는 2.30으로서 서로 유사한 수준이었다. 곡률 비율의 경우, 보강 전 이음부 실험체가 2.35이며 보강 후 이음부 실험체는 2.98로서 개선된 이음부의 경우가 다소 크게 분석되었다. 그러나, 앞서 처짐량 비율을 함께 고려한다면 연성이 더 증가했다고 결론을 짓기에는 어려울 것으로 사료된다.

따라서, BC 실험체의 경우 항복 전의 단면강성이 증가하였고 이와 함께 휨강도 증가도 상당하였으나, 부재단면이 항복한 이후 최대하중에 이르기까지 발생하는 변형량에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

프리캐스트로 제작이 가능한 격자형 강합성 바닥판을 플랫폼 형식의 수평지지구조에 적용하기 위해 match-cast 방식으로 제작된 콘크리트 전단기와 고장력볼트 체결로 구성된 조립식 이음부가 제안된 바 있다. 본 논문에서는 기 제안된 이음부의 휨강성과 휨강도를 증가시킴으로써 구조적 안전성을 향상시키고자 수정된 이음부 구조에 대해 휨실험을 하였으며, 그 결과를 기존 이음부와 비교 분석하였다. 이로 부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 단면상세 개선 전후의 각 이음부 실험체에 대한 균열 거동 및 휨강성 비교 결과를 고려할 때, 콘크리트 전단기 내에 설치한 전단스티드 및 가외철근은 이음부 균열발생 억제에 유효하게 작용한 것으로 판단된다. 모멘트-곡률 관계로부터 구한 휨강성의 상호 비교에 따르면 개선 전의 이음부에 비해 약 47% 정도 휨강성이 증가한 것을 알 수 있다.
- (2) 무이음부 단면과 휨강성을 비교한 결과에 따르면 이음부 유무에 따라 작지 않은 강성 차이가 발생함을 알 수 있다. 단, 본 논문에서는 바닥판 중앙부의 일정 구간에 대해 이음부 자체의 휨성능을 알아보기 위해 휨 실험을 한 것으로서, 지지조건 및 하중저항 특성 등이 전체 바닥판이 설치된 경우와는 다르다. 추후에는 전

체 바닥판이 설치된 경우에 대해서 이음부로 인한 강성 감소량 및 전체 구조거동에 미치는 영향을 비교해 보고, 필요에 따라서는 추가적인 보강방법을 모색해 볼 필요가 있다.

- (3) 개선된 이음부의 항복하중 및 최대하중을 개선전의 기존 이음부와 비교하면, 항복하중은 약 45%, 최대하중은 약 32% 정도 큰 것으로 분석되었다. 또한 이음부가 없는 경우와는 동등 수준 이상의 휨강도를 갖고 있는 것으로 분석되었다. 이로부터 볼트 체결부 보강 정도가 필요 휨강도 증가량에 적절하였음을 알 수 있었다.
- (4) 본 논문에서 다루고 있는 조립식 이음부는 채움 콘크리트 타설을 생략함으로써 외부조건에 효과적으로 대처하기 위한 것이다. 향후에는 이음부 구조의 효율적 설계를 위한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 (극한환경 대응 재료 및 급속시공기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Chung, Y. S., Park, C. K., Kim, Y. G., Kim, H., "Experimental Evaluation for Structural Performance of I-Grating Concrete Slab", Journal of Korea Society of Civil Engineering, Vol. 23, No. 1A, 2003, pp.37-45 (in Korean).

2. Gase, P. M., Kaczinski, M. R., "The history and benefits of prefabricated grid reinforced concrete decks", 2010 Concrete Bridge Conference, Phoenix, USA, 2010, pp.405-412.
3. Kim, S. H., Park, Y. H., Lee, S. Y., Choi, J. H., "Experimental Study on the Flexural Behavior of Inverted T-Shaped Steel Concrete Composite Deck for Bridges", Journal of Korea Society of Civil Engineering, Vol. 28, No. 3A, 2008, pp.331-340 (in Korean).
4. Korea Institute of Construction Technology, Development of Long-Life Deck Systems for Bridges; Steel-Concrete Composite Bridge Deck: KICT, 2006, pp.13-19 (in Korean).
5. Korea Institute of Construction Technology, Development of High Performance Material & Rapid Construction Technology for Extreme Environment. Annual Report: KICT, 2011/2012, pp.61-91 (in Korean).
6. Lee, K. S., Beak, J. G., Koo, J. S., Lee, A. H., Seong, T. R., "A Study on Grid deck for LRT", Proceeding of the Korean Society for Railway, Korea, 2000, pp.328-335 (in Korean).
7. Pierce, M. J., Evaluative testing of a novel weldless open steel grid deck system. Master's thesis. Pittsburgh University, 2005, pp.1-33.
8. Shin, H. S., Lee, C. H., Park, K. T., "An Experimental Study on Bending Behaviour of Steel Grid Composite Deck Joint", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 16, No. 5, 2012, pp.68-77 (in Korean).
9. Versace, J., Ramirez, J., Implementation of full-width bridge deck panels; A synthesis study. FHWA /IN/JTRP-2003/24.: Purdue University, 2004, pp.1-66.

Received : 02/19/2013

Revised : 04/11/2013

Accepted : 05/06/2013

요 지

프리캐스트 방식에 의해 제작이 가능한 격자형 강합성 바닥판의 이음부로서 콘크리트 전단키와 고장력볼트 체결로 구성된 조립식 이음부가 제안된 바 있다. 본 연구에서는 콘크리트 전단키와 고장력볼트로 구성된 이음부의 휨강성과 휨강도를 향상시키고자 단면상세를 개선하였고, 구조실험을 통해 얻은 결과를 기존 볼트체결 이음부와 비교 분석하였다. 비교분석 결과에 의하면, 전단스터드와 가외철근에 의한 이음부 콘크리트 보강으로 뚜렷한 전단균열 감소효과가 있었다. 모멘트-곡률 관계로부터 구한 휨강성을 서로 비교해 본 결과, 단면개선 전의 이음부에 비해 약 47% 정도 휨강성이 증가한 것을 알 수 있었다. 또한, 휨강도 비교결과에 의하면 개선된 이음부의 휨강도는 개선 전에 비해 약 32% 증가하였다. 개선된 이음부의 휨성능을 이음부가 없는 단면과 비교하면, 휨강도의 경우 동등 수준 이상이었으나, 휨강성의 경우는 약 37% 정도 더 작은 것으로 분석되었다.

핵심 용어 : 격자형 강합성 바닥판, 바닥판 이음부, 콘크리트 전단키, 고장력볼트, 모멘트-곡률 관계