

격자형 강합성 바닥판의 휨거동에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Bending Behaviour of Steel Grid Composite Deck

신 현 섭^{1)*} 이 진 형²⁾ 박 기 태³⁾
Shin, Hyun Seop Lee, Chin Hyung Park, Ki Tae

Abstract

To take advantage of reduced on-site construction periods and minimize traffic impacts various types of steel grid composite deck have been developed since 1930's. Modular prefabricated unfilled grid decks permit a long-distance transportation and construction under unfavorable condition, for example, in mountainous regions due to its comparatively light-weighter structure than fully filled grid deck. In this study bending tests of unfilled grid decks for the deck member of various kinds of infrastructure are carried out, bending strength and behaviour of composite action are experimentally evaluated. In this bending test, design variables are considered, such as type of shear connection between steel grid and concrete slab, spacing between cross bars and thickness of concrete slab. Through test results bending strength and behaviour of composite action are evaluated, reference data for proper type of shear connection and other details of the deck, such as spacing between cross bars, are obtained.

Keywords : Steel grid composite deck, Shear connection, Composite action, Shear slip, Bending strength

1. 서론

격자형 강합성 바닥판(steel grid composite deck)은 교량의 시공성 및 경제성에 큰 영향을 미치는 슬래브의 중량을 감소시키고 교통량이 많은 지역에서의 신속한 시공을 위해 개발된 것으로서 1930년대에 소개된 이후 현재까지도 다양한 단면상세가 연구개발 되고 있으며(P.M. Gase, 2010), 최근 국내에서도 이에 대한 연구가 진행되고 있다(정영수 등, 2003; 김성훈 등, 2007; 한국건설기술연구원, 2010; 신현섭 등, 2011). Fig. 1에 나타난 바와 같은 강형의 상부 일부만 콘크리트와 합성된 형태를 취하는 격자형 강합성 바닥판(partially filled steel grid composite deck)은 강형이 완전히 매입되는 형태에 비해 자중이 작고 공장에서 프리캐스트 제작이 가능하여 원거리의 현장이나 산악지역과 같이 건설조건이 열악한 경우에도 적용될 수 있는 구조이다. 본 연구에서 대상으로 하는 격자형 강합성 바닥판은 강형의 상부 일부만 콘크리트와 합성된 형태를 취하는 구조를 하고 있다. 격자형 철골은 휨인장을 부담하는 T형강, 이와 서로 직각으로 연결

되는 가로막대(cross bar), T형강 사이에 위치하며 가로막대와 직각으로 연결되는 세로막대(longitudinal bar)로 구성된다. 슬래브와의 합성은 강형 상부에 설치되는 전단연결부에 의하여 이뤄진다.

본 연구에서는 형강이 노출된 격자형 강합성 바닥판을 각종 기반시설물의 수평지지구조에 적용하고자 설계변수에 따른 휨강도의 변화를 실험적으로 비교 평가하였다. 단면상세에 따른 강도변화를 검토하고자 격자형을 구성하는 가로 및 세로막대, 철골 격자형과 슬래브 간의 수평전단합성을 위한 전단연결방식, 슬래브 두께와 종류 등과

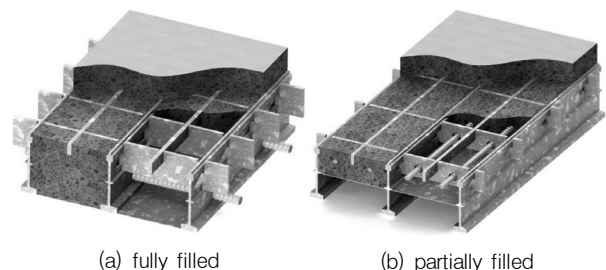


Fig. 1 Steel grid composite deck(P.M. Gase, 2010)

1) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 수석연구원
2) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원
3) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구위원

* Corresponding author : hsshin@kict.re.kr 031-910-0287

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

같은 설계변수를 실험변수로 하였다. 휨거동 및 합성거동을 비교 평가하기 위해서 처짐 및 변형률, 슬래브와 격자형 철골부재 간의 상대변위를 분석하였다. 합성면에서의 수평전단력을 산정하여 합성거동을 평가하기 위해 부분합성이론에 근거한 평형관계식법(force equilibrium method, Abdullah, R., 2009)을 적용하였다.

2. 휨실험 결과를 이용한 수평전단력 산정

전단연결부는 강부재와 콘크리트 슬래브 사이의 경계면에서 발생하는 수평전단력을 부담함으로써 두 부재를 서로 연결하는 역할을 하며, 그 거동특성은 push-out 실험을 통해 구하고 있다. 그러나, 실제 합성슬래브에서는 휨에 의한 곡률이 존재하므로 push-out 실험에서와 같은 직접전단의 하중조건과 다르고, 외부하중에 의해 강부재와 콘크리트 사이에 존재하는 구속조건도 push-out 실험에서와 동일하지 않기 때문에 push-out 실험에서 얻은 하중-슬립 거동특성을 사용하여 실제 합성슬래브의 거동을 적절히 예측할 수 없음이 제기되어 왔다(Johnson, R. P., 1991; Aribert, J. M., 1992; Daniels, B. J., 1993; An, L., 1993; Abdullah, R., 2009).

ASCE(1992)와 Eurocode 4(1994)에서는 합성슬래브의 강도를 예측할 수 있는 방법으로써 m-k 방법을 제시하고 있다. 이 방법은 합성슬래브에 대한 실험결과를 통해 식 (1)에서의 상수값인 m 및 k를 통계적 방법에 의해 결정하고, 이로부터 합성슬래브의 강도를 예측하게 된다. m-k 방법은 특정 단면조건의 합성슬래브에 대해 다수의 실험으로부터 구한 경험식으로서 다른 조건의 합성슬래브에는 적용하지 못한다. 이러한 점을 개선하고자 부분합성이론에 근거한 PSC(partial shear connection) 방법이 Eurocode 4에 도입되었다. 이 방법은 휨실험에서 얻은 결과를 이용하지만 경험식이 아닌 역학적 이론식에 근거하여 상이한 설계단면 조건에도 적용할 수 있다. 식 (2)에 의하면 실험에서 얻은 합성슬래브의 모멘트 내력에 대응하는 합성률을 결정하게 되면 수평전단력 및 부재 내력을 구할 수 있다. 여기서, 합성률은 부분합성이론에 따라 계산된 관계곡선으로부터 산정하게 된다.

$$\frac{V}{bd} = m \frac{A_p}{bL_s} + k \quad (1)$$

$$\tau \cdot b \cdot (L_s + L_o) = \eta_{test} \cdot N_{pl,a} \quad (2)$$

그러나, PSC 방법은 전단스팬 길이 및 단면높이가 모멘트 내력에 미치는 영향을 고려할 수 없다는 연구결과(Abdullah, R., 2009)에 의하면 수평전단력 및 부재 내력을 Fig. 2 및 식 (3)에 의해 구하고 있다.

이에 의하면 합성슬래브에 작용하는 외력(P), 전단스팬 길이(L_s), 하중작용점에서의 처짐(δ₁, δ₂), 단부 슬립(s) 등 휨실험 조건 및 측정값으로부터 합성슬래브 부재 사이에 발생하는 수평전단력 및 단면력을 구할 수 있게 된다. 이 방법은 근본적으로 PSC 방법과 같은 개념이나 강부재에 작용하는 모멘트(M_r) 및 모멘트 팔길이(z)를 실험에서 얻은 슬립 및 처짐값으로부터 구함으로써 전단스팬 길이 및 단면조건의 영향을 고려할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 여기서, 강부재에 작용하는 모멘트 부재력 M_r은 모멘트 곡률관계를 이용하여 합성슬래브의 처짐과 강재의 휨강성(E_sI_s)으로부터 산정하고, 모멘트 팔길이 z는 합성슬래브의 처짐과 단부에서 발생한 슬립(s)으로부터 구한다. 식 (3)의 유도 과정에서 가정된 조건은, 전단스팬 구간에서 길이방향으로의 슬립 분포가 일정하다는 것과, 고려되는 하중조건에서 강부재는 탄성상태에 존재하는 것이다.

$$F = T = \frac{\left(\frac{P}{2}L_s - M_r\right)}{z} \quad (3)$$

여기서,

F : 합성면에 존재하는 수평전단력

T : 강부재에 작용하는 인장력

P : 재하하중

L_s : 전단스팬 길이

M_r : 강부재에 작용하는 모멘트 내력

$$M_r = \frac{\delta_1 + \delta_2}{L_s(L - 2L_s)} E_s I_s$$

z : 모멘트 팔길이

$$z = \frac{1}{3}(2d + y_T)$$

d : 슬래브 상단면으로부터 강부재 도심까지의 거리

y_T : 중립축으로부터 강부재 도심까지의 거리

$$y_T = \frac{s L_s}{(\delta_1 + \delta_2)}$$

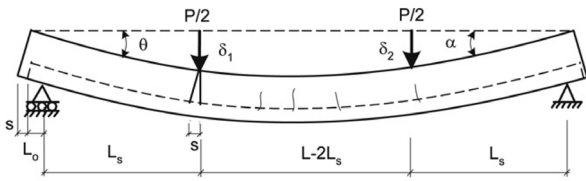


Fig. 2 Loading and deformation condition(Abdullah, R., 2009)

본 논문에서는 실험에서 얻은 측정값으로부터 식 (3)에 의해 수평전단력을 산정하여 대상 실험체에 대한 전단합성거동의 분석에 적용하였다. 식 (3)에서 모멘트팔길이 z 는 슬립분포가 전단스팬을 따라 일정하다는 조건 하에 유도된 것이나, 실제의 슬립분포는 이에 근접은 하지만 일치하지 않는다. 본 논문에서는 단면에 설치한 스트레인 게이지에 의해 측정된 변형률 분포로부터 모멘트팔길이 z 를 구하여 수평전단력을 산정하고, 이를 처짐 및 단부슬립으로부터 구한 결과와 비교함으로써 격자형 강합성 바닥판의 수평전단력 산정에의 적용 가능성을 분석하였다.

3. 힘실험 계획

3.1 실험체 계획

격자형 강합성 바닥판의 휨내력을 평가하기 위한 구조 실험에서는 실험체의 종류를 크게 상부하중을 주 지지구조인 T형강에 전달하는 방식 및 콘크리트 슬래브와의 전단연결 방식, 콘크리트 슬래브의 두께 및 종류(일반 및 경량)의 4가지로 구분하여 8개의 실험체를 제작하였다. 철골 그리드에서 가로 및 세로막대는 슬래브로부터 전달되는 상부하중을 T형강에 전달하는 역할을 하게 되며, 이를 실험변수로 계획한 것은 가로 및 세로막대의 간격을 결정하고자 한 것이다. 또한, 전단연결방식을 실험변수로

한 것은 횡방향 철근과 세로막대로 구성되는 전단연결형태를 비교 검토하기 위한 것이며, 콘크리트의 두께 및 종류를 실험변수로 정한 것은 바닥판의 자중을 더 경감시키기 위해 그 성능을 평가하기 위함이다. 이상과 같은 실험체 종류를 Table 1에 요약하였으며, 주요 실험체의 단면상세를 Fig. 3에 나타내었다. 콘크리트의 설계압축강도는 30MPa이고, 사용강재는 SM400이다(한국건설기술연구원, 2010).

3.2 가력 및 측정방법

휨실험에서의 가력방법으로는 변위제어를 하였으며 가력장치는 1000kN 급 액추에이터를 사용하였다. 등분포 하중이 재하되었을 때의 모멘트분포에 근사화 하기 위해 가력보를 사용하여 전단스팬 길이를 L/4로 하는 2점 선형 가력을 하였다. 처짐을 측정하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 3개의 200mm LVDT를 설치하였고, 철골 격자와 슬래브 사이에 발생하는 슬립을 측정하기 위해 양단부에 50mm LVDT를 설치하였다. 또한, 실험시 가력하중에 따른 변형률을 측정하기 위해 실험체 제작시 철근에 부착한 게이지 외에도 T형강 플랜지 및 웨브에 5개소, 콘크리트 슬래브 상면 및 측면 5개소에 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-처짐 관계

상부하중을 주 지지구조인 T형강에 전달하는 방식 및 콘크리트 슬래브와의 전단연결방식, 콘크리트 슬래브의

Table 1 Specimen list for bending test

No.	specimen	slab thick. (cm)	shear connection type	cross bar spacing (cm)	longit. bar number	design parameter
1	S8-A-C15-L2	8	reinf. +longit. bar	15	2	standard specimen
2	SL8-A-C15-L2					light weight concrete
3	S6-A-C15-L2					slab thickness 6cm
4	S8-A-C30-L1	8		30	1	longit. bar number
5	S8-A-C30-L2					2
6	S8-A-C45-L2				45	2
7	S8-B-C15-L2	8	reinf. +longit. bar+bolt	15	2	stud bolts
8	S8-F-C15-L2	8	cross + longit. bar	15	2	cross bar shear connection

*1) S8/S6/SL8: Thickness of normal(S) and light weight(SL) concrete slab
*3) C15/C30/C45: cross bar spacing

*2) A/B/F: shear connection type
*4) L1/L2: longitudinal bar number

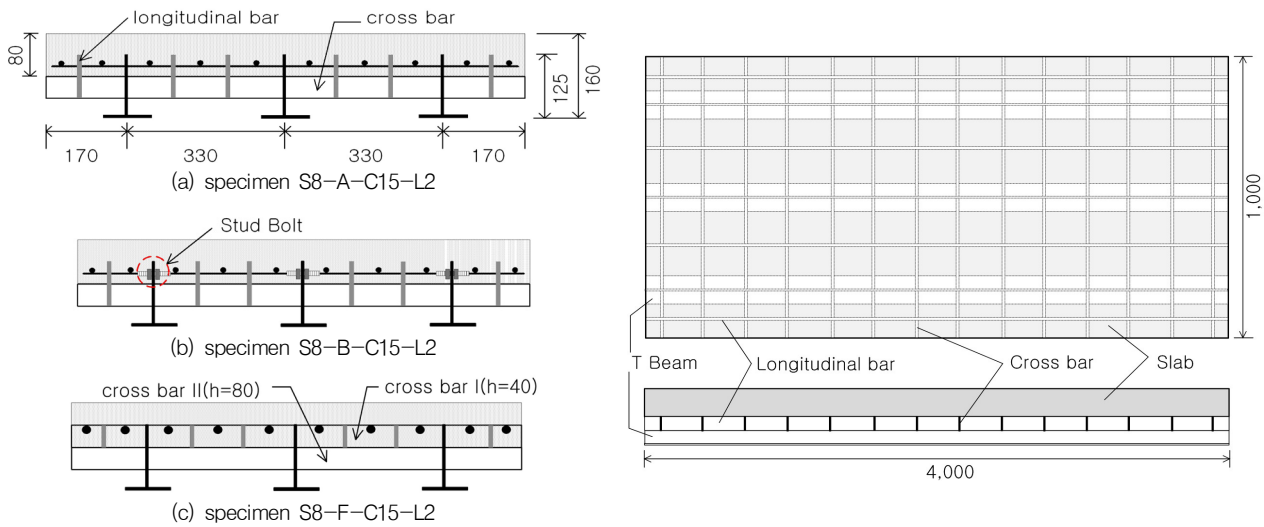


Fig. 3 Details of steel grid composite deck

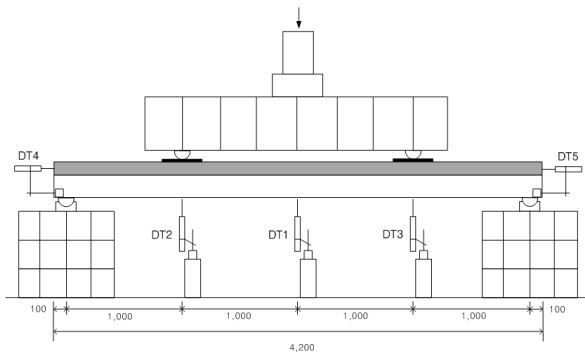
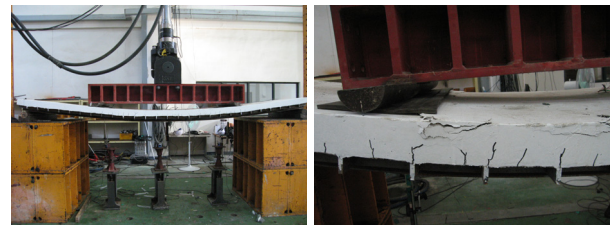


Fig. 4 Specimen and LVDT Set-up

두께 및 종류(일반 및 경량) 등의 실험변수에 따른 휨거동의 비교 분석을 위해 Fig. 6에 나타난 바와 같이 변수별 하중-처짐 곡선을 비교하였다. Table 2는 주요 하중값 및 변위값을 정리한 것이다. $P_{y,t}$, $P_{max,t}$ 는 각각 항복하중, 최대하중이며, $\delta_{y,t}$, $\delta_{max,t}$ 는 각각 해당 하중상태에서 중앙지점에 발생한 처짐값이다. 횡철근 대신 가로막대를 전단연결재로 하는 S8-F-C15-L2 실험체의 경우 built-up으로 제작된 T형강 용접부 문제로 인해 추후 재실험이 필요하여 하중-처짐 관계의 비교에서는 제외하였다. Fig. 5는 가력 종료시 실험체의 처짐형상과 슬래브의 균열상태를 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)에서와 같이 상부하중을 주 지지구조인 T형강에 전달하는 역할을 하는 가로막대의 간격이 15cm, 30cm, 45cm로 변화함에 따른 휨강도의 비교결과, 가로막대 간격이 15cm 및 30cm인 경우에 있어서 휨강도의 차이는 거의 없으며, 전체적인 하중-처짐 관계도 거의 유

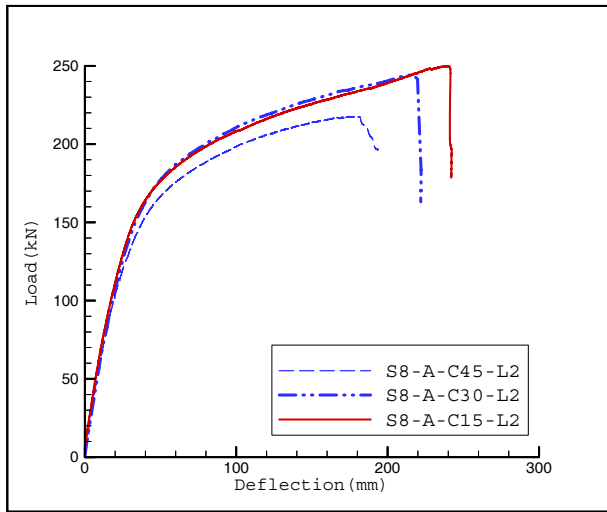


(a) deformation (b) crack pattern

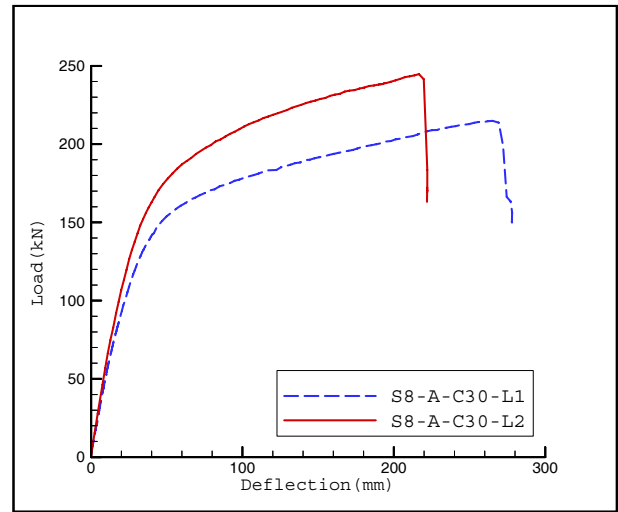
Fig. 5 Deformation and crack pattern by maximum loading condition

사하게 나타났다. 그러나, 45cm 간격일 경우는 휨강도가 약 15% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인분석을 위해 실험중 관찰된 슬래브의 균열상태를 검토해 보면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 가로막대 간격이 45cm인 경우 가로막대 사이 및 막대 상단부에서 시작되는 균열 외에도 휨전단에 의한 사균열이 진전된 것이 다른 실험체의 균열상태와 구별되는 점이었다. 이와 관련하여 Fig. 7(a)의 주철근 변형률을 비교해 보면, 가로막대 간격이 넓은 경우 인장상태로 바뀌는 시점에서의 하중이 더 작고, 같은 하중에 대해 변형률이 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 중앙부 단면에서의 변형률 측정결과로부터 구한 단면력의 모멘트 팔길이의 변화를 비교해 보면, Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 가로막대 간격이 넓은 실험체의 중립축 변화가 같은 하중일 때 더 큰 것으로 나타났으며 단면의 소성화가 더 진전된 것으로 분석되었다.

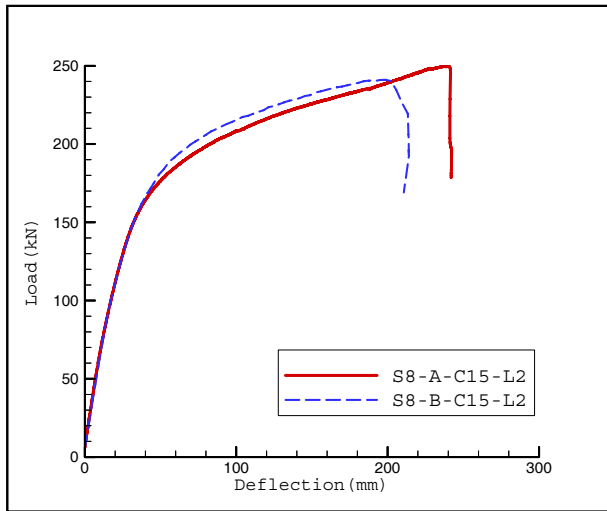
Fig. 6(b)와 같이 세로막대 개수의 변화에 대한 휨거동 비교에 의하면, T형강 사이 세로막대 개수가 1개에서 2개로 변화함에 따라 약 14%의 휨강도 증가가 있었다.



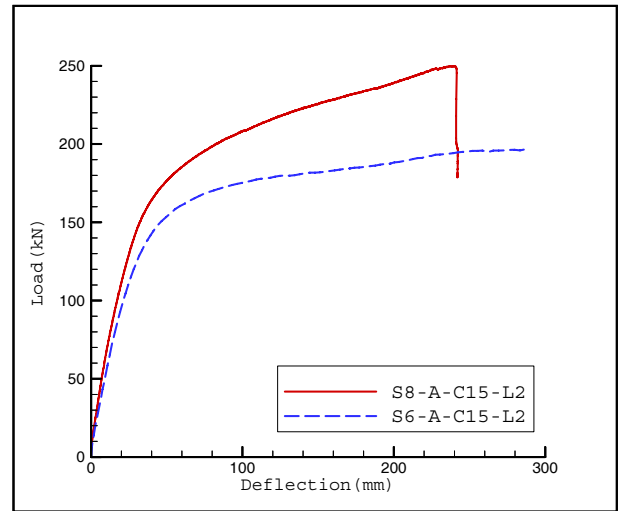
(a) cross bar spacing



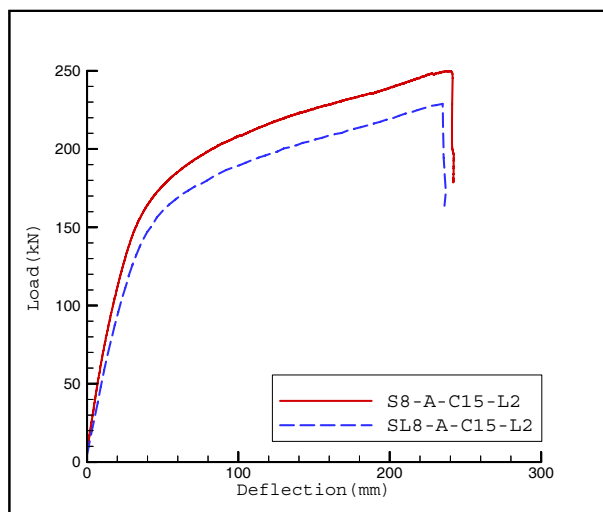
(b) longitudinal bar number



(c) shear connection type

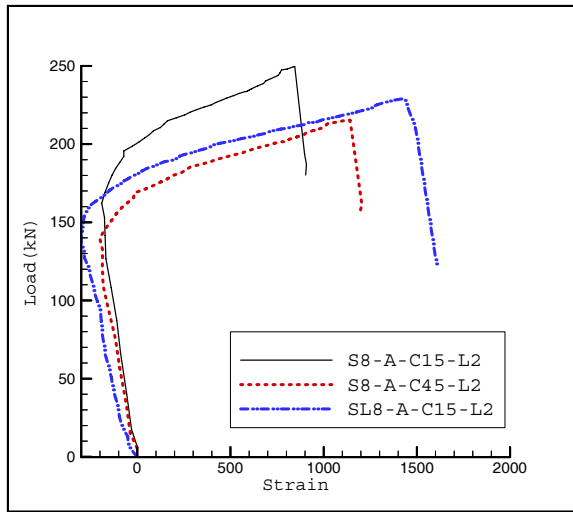


(d) concrete slab thickness

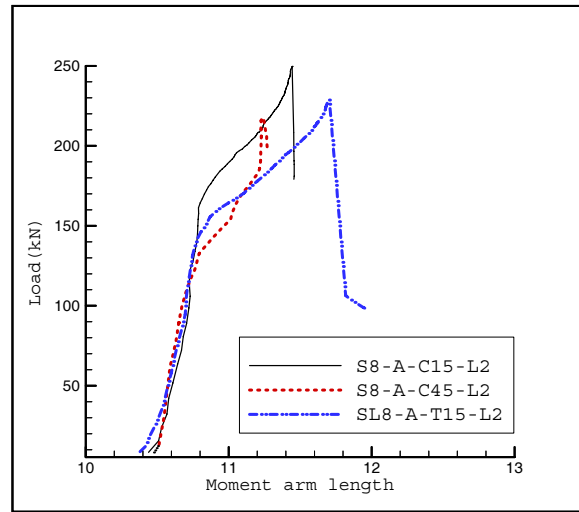


(e) normal and light weight concrete

Fig. 6 Load-deflection curve according to test parameters



(a) strain of reinforcement



(b) moment arm length

Fig. 7 Comparison of strain and moment arm length

Table 2 Bending test results

No.	specimen	$P_{y,t}$ (kN)	$\delta_{y,t}$ (mm)	$P_{max,t}$ (kN)	$\delta_{max,t}$ (mm)	$P_{max,t}/P_{y,t}$
1	S8-A-C15-L2	165.5	40.8	249.6	239.3	1.51
2	SL8-A-C15-L2	158.2	48.0	228.7	236.1	1.45
3	S6-A-C15-L2	137.5	36.6	196.4	287.2	1.43
4	S8-A-C30-L1	134.9	35.9	214.8	266.6	1.59
5	S8-A-C30-L2	167.4	42.7	244.4	216.1	1.46
6	S8-A-C45-L2	153.4	40.1	217.4	181.7	1.42
7	S8-B-C15-L2	178.2	43.1	241.0	200.2	1.35

이는 세로막대가 증가함으로써 격자형 철골의 휨강성 및 휨강도의 증가, 수평전단에 대한 횡철근 지지간격이 좁아짐으로써 전단에 대한 강성이 증가하고 또한 콘크리트와 합성되는 면적이 증가함으로써 전단합성효과가 증가된 것이 원인으로 판단되며, 이중 전단합성효과의 증가에 대한 것은 후에 기술하는 합성거동의 평가결과와 일치하고 있다.

Fig. 6(c)는 철근스터드, 철근스터드+전단볼트 등 전단합성방식이 변화함에 따른 하중-처짐 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 횡철근 대신 가로막대를 전단연결재로 하는 실험체의 경우 4.1절 서두에서 밝힌 바와 같이 하중-처짐 관계의 비교에서는 제외하였다. Fig. 6(c)에 의하면 횡철근 스테드에 추가로 스테드 볼트를 설치함으로써 휨강성 및 강도 증가를 예상하였으나, 실험결과에 따르면 휨강도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6(d)에서와 같이 콘크리트 슬래브의 두께가 6cm 및 8cm인 실험체의 휨강도를 비교해 보면 8cm인 실험체

가 약 27% 더 큰 휨강도를 갖는 것으로 나타나서 실험변수 중 가장 큰 변화폭을 보였다. 슬래브 두께가 6cm인 경우에는 전체적인 하중-변위 관계는 강재의 변형 특성에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

콘크리트의 종류를 변수로 한 S8-A-C15-L2 실험체(일반 콘크리트)와 SL8-A-C15-L2 실험체(경량콘크리트, 17kN/m^3)를 비교해 보면, 경량콘크리트의 재료적 강성이 일반 콘크리트 보다 작은 관계로 초기 휨강성에 차이를 보이고 있는 것으로 사료된다. 약 9%의 휨강도 차이가 나타난 원인은 가로막대 간격을 변수로 한 실험체의 경우와 유사하게 설명된다. 휨강도 차이는 슬래브의 균열거동에 영향을 받은 것이 주요 원인으로 분석되며, 주철근의 변형률 및 모멘트 팔길이의 변화 등에 대한 비교는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다.

4.2 전단합성거동

격자형 강합성 바닥판에서의 콘크리트 슬래브와 T형강



(a) S8-A-C15-L2



(b) S8-A-C45-L2

Fig. 8 Comparison of crack pattern

은 횡철근, 스티드 볼트, 가로막대 등과 같은 전단연결재에 의해 수평전단에 대해서 서로 합성되어 일체화 거동을 하게 된다. 이와 같은 전단연결재는 재료특성상 무한한 강성을 갖고 있지 않기 때문에 완전합성일지라도 수평전단 하중이 증가함에 따라 변형을 일으키게 되고, 이로 인해 슬래브와 T형강 사이에는 슬립이 발생하게 된다.

휨실험에서 측정된 슬립을 검토해 보면 하중재하 초기에는 슬립이 거의 발생하지 않았으며, Table 3에 나타난 바와 같이 대부분의 실험체에서는 67.5kN에서 132.2kN의 범위 내에서 슬립이 발생하였다. 볼트(S8-B-C15-L2)가 추가되거나, 강성이 강한 가로지대(S8-F-C15-L2)를 전단연결재로 사용한 실험체의 경우 각각 151.1kN과 163.2kN에서 슬립이 발생하였다. 최대하중 작용 시까지 측정된 슬립은 실험체 별로 차이는 있으나 최대 0.4mm 수준으로, 슬립이 10mm 이상씩 발생하는 다른 경우를 고려하면 상대적으로 매우 작은 수준이었다.

전단합성방식에 따른 실험체별 거동특성을 비교하기 위해 서두에서 기술한 바와 같이 휨실험에서의 처짐값과 단부 슬립으로부터 수평전단력을 산정하는 평형관계식법(force equilibrium method)을 이용하였으며, 그 결과를 Table 4 및 Fig. 9에 나타내었다.

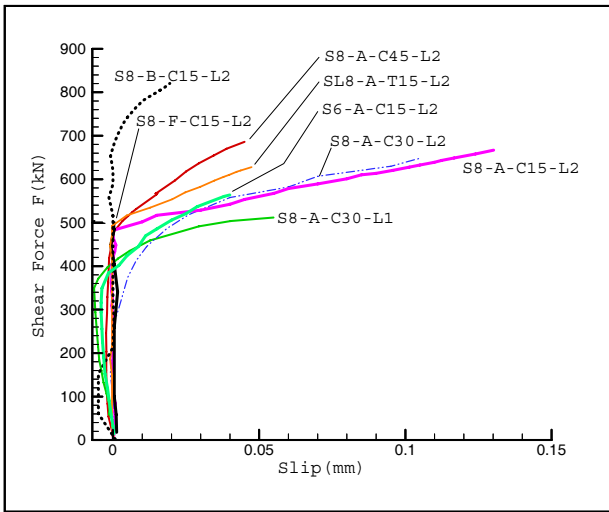
평형관계식법에서는 부재력을 산정함에 있어 전단스팬 길이방향으로 슬립의 분포가 일정하다는 가정을 하고 있으나, 실제의 슬립분포는 이에 근접할 뿐이지 일정하지 않다. 이를 검토하기 위해 Table 4에는 식 (3)에서의 모멘트팔길이 z를 실험에서 측정된 변형률 분포 및 변위(처

Table 3 Initial slip load and slip

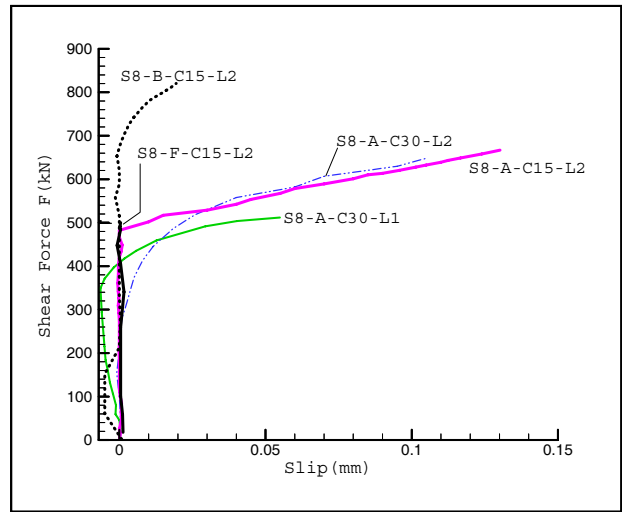
shear connection	specimen	P _{slip} (kN)		(δ _{slip}) _{max} (mm)
reinf. + 2 longit. bar (SA type)	S8-A-C15-L2	107.8	103.1 (mean)	0.43
	SL8-A-C15-L2	132.2		0.08
	S6-A-C15-L2	89.7		0.17
	S8-A-C45-L2	118.2		0.27
	S8-A-C30-L2	67.5		0.37
reinf. + 1 longit. bar (SB type)	S8-A-C30-L1	89.0		0.42
reinf.+2 longit. bar+bolt (SC type)	S8-B-C15-L2	151.1		0.19
cross + longit. bar (SD type)	S8-F-C15-L2	163.2		0.13

Table 4 Shear force at initial slip and yielding and slip stiffness

shear connection	specimen	loading		horizontal shear force					slip stiffness	
		P _{slip} (kN)	P _y (kN)	F _{slip} (kN)		F _y (kN)		F _{Test} /F _{Theory} (1)/(2)	K _{slip} (kN/mm)	
				Test	Theory	Test ^{*(1)}	Theory ^{*(2)}			
SA	S8-A-C15-L2	107.8	165.5	472.2	501.9	666.9	711.7	0.937	1552	2662 (mean)
	SL8-A-C15-L2	132.2	158.2	492.1	525.3	627.8	672.9	0.933	2677	
	S6-A-C15-L2	89.7	137.5	349.2	370.6	565.8	595.6	0.950	3279	
	S8-A-C45-L2	118.2	153.4	480.0	534.2	686.2	760.8	0.902	3798	
	S8-A-C30-L2	67.5	167.4	291.4	318.1	647.6	710.9	0.911	2004	
SB	S8-A-C30-L1	89.0	134.9	351.4	378.1	511.5	545.9	0.937	934	
SC	S8-B-C15-L2	151.1	178.2	678.3	710.5	819.7	864.7	0.948	4401	
SD	S8-F-C15-L2	163.2	129.6	>505.2	>557.0	505.2	557.0	0.907	-	



(a) all specimens



(b) specimens of different shear connection type

Fig. 9 Shear force-Slip curve

짐, 단부슬립) 측정값으로부터 구한 수평전단력을 서로 비교하여 놓았다. 또한, Table 4에는 수평전단력-슬립 관계곡선으로부터 산정한 슬립강성을 실험체별로 비교하여 놓았다. 표에서 P_{slip} 및 P_y 는 슬립발생 및 실험체 항복시의 재하하중, F_{slip} 및 F_y 는 슬립발생 및 실험체 항복시의 수평전단력을 의미하며, K_{slip} 은 초기 슬립발생 이후 수평전단력-슬립 관계로부터 구한 슬립강성이다.

전단연결방식 SA의 실험체에 대해 표에 산정된 결과를 검토해 보면, 초기슬립 발생 시의 수평전단력은 콘크리트 슬래브와 강부재 간에 존재하는 부착의 초기 파괴시점의 차이로 인해 최대 최소값이 약 92%의 차이를 보이고 있으나, 항복시점에서는 그 차이가 10% 수준으로 준 것으로 분석되었다.

세로막대 배치 개수가 서로 다른 SA 형식의 실험체 S8-A-C30-L2과 SB 형식의 실험체 S8-A-C30-L1을 비교해 보면 Fig. 9 및 Table 4에 나타난 바와 같이 세로막대의 감소에 따라 슬립강성에 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 두 실험체의 초기슬립 발생 시의 수평전단력에서 차이가 크지 않은 점을 고려하면, 세로막대가 슬래브와의 부착력 향상에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 슬립강성에 차이를 보이는 이유 중의 하나는 부착면적의 증가 보다는 세로막대의 추가로 전단합성효과에 주된 역할을 하는 횡철근 스티드의 지지간격 감소로 인한 전단강성 증가로 추정된다.

SA 형식의 실험체와 스티드 볼트가 추가된 SC 형식의 실험체를 비교해 보면, 초기 슬립발생 시 및 항복상태에

서의 수평전단력에 큰 차이를 보이고 있다.

또한, 슬립강성도 스티드 볼트가 추가된 경우가 평균적으로 약 65% 정도 큰 것으로 분석되었으며, 스티드 볼트 추가로 합성효과가 더 증가됨을 알 수 있었다.

SD 형식의 실험체 S8-F-C15-L2는 항복하중(P_y)에 도달할 때까지 슬립이 발생하지 않고, 다른 실험체의 항복하중에 상당하는 하중에서 초기 슬립이 발생한 점을 고려하면, 단면 고유내력 발휘까지 전단연결부의 거동특성으로부터 영향을 받을 수 있는 내력의 감소는 없을 것으로 예측된다.

실험에서 측정된 변형률 분포 및 변위(처짐, 단부슬립)로부터 구한 수평전단력을 비교해 보면, 약 5% ~ 10% 미만 정도가 변위로부터 구한 수평전단력이 더 크게 산정되었다. 이에 대한 원인으로서는 변형률 및 변위 측정 상에서 생길 수 있는 측정오차가 있을 수 있으며, 또한 평형관계식법에서의 기본가정과는 달리 실제의 경우 슬립분포가 전단스팬 길이방향으로 일정하지 않은 것이 원인일 수 있다. 이에 대한 명확한 원인을 찾기 위해서는 향후 유한요소해석 및 다수의 실험이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 범위 내에서는 변형률 또는 변위 측정에 의해 격자형 강합성 바닥판의 수평전단력을 산정할 수 있으며, 약 10% 수준의 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 실험값 및 안전소성이론값의 비교

T형강 격자 강합성 바닥판의 휨실험으로부터 구한 실험

Table 5 Comparison of moment strength and horizontal shear force by test and theory

shear connection	specimen	M_{max} (kNm)	M_n (kNm)	F_{max} (kN)	F_n (kN)	M_{max}/M_n	F_{max}/F_n
SA	S8-A-C15-L2	124.8	89.0	864	740	1.40	1.17
	SL8-A-C15-L2	114.4		828		1.29	1.12
	S6-A-C15-L2	98.2	85.7	701	694	1.15	1.01
	S8-A-C45-L2	108.7	89.0	870	740	1.22	1.18
	S8-A-C30-L2	122.2		825		1.37	1.11
SB	S8-A-C30-L1	107.4		765		1.21	1.03
SC	S8-B-C15-L2	120.5		911		1.35	1.23

휨강도 M_{max} 를 완전합성을 전제로 소성이론에 의해 계산한 이론 휨강도 M_n (ASCE, 1992; Eurocode 4, 1994)과 비교하여 Table 5에 나타내었다. 또한, 합성단면에 발생하는 수평전단력은 콘크리트 슬래브에 작용하는 압축력 또는 강부재에 작용하는 인장력과 같다는 평형조건 하에, 실험에서 변형을 측정으로부터 산정한 수평전단력 F_{max} 을 소성이론에 의한 수평전단력 F_n 과 비교하였다.

휨강도 비교 결과에 의하면 대부분의 실험체들이 이론 계산값의 15% 이상에 상당하는 휨강도를 발휘하는 것으로 분석되었다. 또한, 수평전단력 비교에서도 완전합성상태에서 발생할 수 있는 수평전단력이 발휘되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 전단연결방식에 따른 실험결과 분석 및 이론값과의 비교 결과, 합성작용 효과에 따라 최대 0.43mm의 슬립이 발생하고 휨강도에도 차이를 보이고 있는 것은 사실이나, 최대하중 작용 시까지 발생한 슬립량이 매우 적고, 이때의 최대 수평전단력도 완전합성상태에서 발생하는 수평전단력 이상의 값을 보이고 있으므로 실질적으로는 완전합성상태에 있는 것으로 간주하여 소성이론에 의한 내력평가가 가능할 것으로 분석하였다.

또한, 가로막대의 설치 간격에 따른 격자철골의 강성과 하중분배, 슬래브 휨전단균열 발생 등에 의한 원인으로 45cm 간격 실험체의 경우 휨강도가 15cm 간격의 실험체 보다는 작게 나온 것으로 사료된다. 그러나, 가로막대 간격을 45cm로 하여도 실제 휨강도는 이론값에 비해 22% 큰 것으로 산정되었기 때문에, 교량에서와는 달리 집중하중이 작용함으로 인한 하중분배 문제나 편칭파괴의 위험이 적은 구조물의 바닥판으로 적용되는 경우, 가로막대 간격에 대한 설계 민감도는 크지 않은 것으로 판단된다.

콘크리트 종류 및 두께를 변수로 한 실험체의 휨실험 결과로부터 자중 측면에서 보다 더 유리한 구조가 될 수

있음을 1차적으로 검토할 수 있었다. Table 5에서 슬래브 두께를 6cm로 한 실험체의 경우 비교값 F_{max}/F_n 이 다른 경우에 비해 작은 것은 하중-변위 곡선 관계에서도 나타난 바와 같이, 다른 실험체에 비해서 콘크리트 보다는 강재보의 변형 특성에 더 많은 영향을 받은 것으로 사료되며, 추후 이와 관련한 비교실험 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 형강이 노출된 격자형 강합성 바닥판을 각종 기판시설물의 수평지지구조에 적용하고자 단면설계 변수에 따른 휨강도 및 전단합성거동의 변화를 실험적으로 비교 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 집중하중이 작용함으로 인한 하중분배 문제나 편칭 파괴의 위험이 적은 구조물의 바닥판으로 적용되는 경우, 가로막대 간격에 대한 설계 민감도는 크지 않은 것으로 판단된다.
- (2) 격자형 철골의 세로막대의 증가로 인한 합성작용효과의 증가는 슬래브와의 부착력 증대 보다는 전단합성에 주 역할을 담당하는 횡철근의 지지간격 감소로 인한 전단강성의 증가가 주된 원인으로 판단되며, 이에 대한 추가 실험 및 분석이 필요하다.
- (3) 격자형 철골과 콘크리트 슬래브가 스티드 볼트 없이 세로막대 및 횡철근의 형태로 구성되는 전단연결부로 합성되어도 완전합성상태에 가까운 휨내력 발휘에 문제가 없는 것으로 분석되었다.
- (4) 콘크리트 종류 및 두께를 변수로 한 실험으로부터 자중 측면에서 보다 더 유리한 바닥판 구조가 될 수 있음을 1차적으로 검토할 수 있었으며, 추가 실험에

의한 비교가 필요하다.

- (5) 전단연결방식에 따른 실험결과 분석 및 이론값과의 비교 결과, 최대하중 작용 시까지 발생한 슬립이 매우 적고, 합성면에 발생하는 전단력도 완전합성상태에서 발생하는 수평전단력 이상의 값을 보이고 있으므로 실질적으로는 완전합성상태에 있는 것으로 간주하여 소성이론에 의한 내력평가가 가능한 것으로 분석하였다.
- (6) 부분합성이론에 근거한 평형관계식법을 적용한 결과에 의하면 변형률 또는 변위 측정에 의해 합성면에 발생하는 수평전단력을 산정할 수 있으며, 산정방법에 따라 발생할 수 있는 오차는 10% 수준임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김성훈, 박영훈, 이승용, 최준혁, "역T형강 콘크리트 합성바닥판의 휨거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제28권, 제3A호, 2007, pp.331-340.
2. 신현섭, 이진형, 주봉철, 박기태, "격자형 강합성 바닥판의 설계변수에 따른 휨강도 실험적 평가", 2011년 한국강구조학회 학술대회 논문집, 제22권, 1호, 2011, pp.277-278.
3. 정영수, 박창규, 김용곤, 김훈, "격자형 I-형강 합성바닥판의 성능평가", 대한토목학회논문집, 제23권, 제1A호, 2003, pp.37-45.
4. 한국건설기술연구원, 극한환경 대응 재료 및 급속 시공기술 개발, 1차년도 최종보고서, 2010.
5. Abdullah, R., Easterling, W. S., "New evaluation and modelling procedure for horizontal shear bond in composite slabs", Journal of Constructional Steel Research 65, 2009, pp.891-899.
6. An, L., Load Bearing Capacity and Behaviour of Composite Slabs with Profiled Steel Sheet, Phd Dissertation, Chalmers University of Technology, Sweden, 1993.
7. Aribert, J. M., "Application and Recent Development of a numerical Model for Composite Beams with Partial Shear Connection", Composite Construction in Steel and Concrete II, Proceedings of an Engineering Foundation Conference, Potosi, Missouri, 1992, pp.742-757.
8. ASCE, Standard for the structural Design of composite slabs, ANSI/AASCE 3-91, American Society of Civil Engineers, New York, 1992.
9. Daniels, B. J., Crisinel, M., "Composite Slab Behavior and Strength Analysis", Part I: Calculation Procedure, Journal of Structural Engineering, 119, 1993, pp.16-35.
10. Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1, General Rules and Rules for Building, ENV 1994-1-1:1992, European Committee for Standardization, Brussel, 1994.
11. Gase, P. M., Kaczinski, M. R., "The history and benefits of prefabricated grid reinforced concrete decks", 2010 Concrete Bridge Conference, Phoenix, Arizona, 2010.
12. Johnson, R. P., Molenstra, I. N., "Partial Shear Connection in Composite Beams for Buildings", Proceedings Institute of Civil Engineers, Part 2, Vol. 91, 1991, pp.679-704.

(접수일자 : 2011년 3월 18일)

(수정일자 : 2011년 5월 30일)

(심사완료일자 : 2011년 6월 7일)

요 지

구조용 형강을 사용하는 격자형 합성바닥판은 비교적 신속한 시공과 보수시 교통통제를 최소화할 수 있는 장점으로 인해 1930년대 이후 현재까지 다양한 단면상세가 연구개발 되고 있다. 강형의 상부 일부만 콘크리트와 합성된 형태를 취하는 격자형 합성바닥판은 강형이 완전히 매입되는 형태에 비해 자중이 작고 공장에서 프리캐스트 제작이 가능하여 원거리의 현장이나 산악 지역과 같이 건설조건이 열악한 경우에도 적용이 가능한 구조이다. 본 연구에서는 형강이 노출된 격자형 강합성 바닥판을 각종 기반시설물의 수평지지구조에 적용하고자 형강과 콘크리트의 합성을 위한 전단연결부의 형식과 격자형 구조에서 형강을 서로 연결하는 가로막대의 간격, 상부 콘크리트 슬래브의 두께 등을 변수로 휨실험을 하였고, 휨성능 및 합성거동을 비교 평가하였다. 이를 통해 설계변수 변화에 따른 구조거동의 변화를 비교 검토할 수 있었고, 적절한 전단연결방식 및 단면제원에 대한 기본자료를 얻을 수 있었다.

핵심 용어 : 격자형 강합성 바닥판, 전단연결부, 합성작용, 전단슬립, 휨강도