

초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스거더의 연성 거동

Ductile Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Segmental Box Girder

정민선¹ · 박성용² · 한상묵^{3*}Min-Seon Jeong¹ · Sung-Yong Park² · Sang-Mook Han^{3*}

(Received August 17, 2017 / Revised September 7, 2017 / Accepted September 7, 2017)

The flexural behavior tests of UHPC segmental Box girder which has 160MPa compressive strength and 15.4m length were carried out. The test variables are area of prestressing wires, volume fraction of steel fibers and longitudinal reinforcing bars in upper flange and web. PS tendons which has 32 strands of 15.2mm diameter in lower flange, 24 strands and 14 strands in lower flange were arranged and volume fraction of 2%, 1.5% and 1.0% is used in box girder concrete. UHPFRC box girder which has 32 strands in lower flange showed the over reinforcement and brittle behavior. UHPFRC box girder which has 24 strands showed the similar peak load as 32 strands girder and ductile behavior as large deflection. UHPFRC box girder which has 14 strands showed half of the peak load of 24 strands box girder and ductile behavior. After the application of the formular for the reinforcement index to the behavior of the UHPFRC box girders, reinforcement index does not determine the characteristic of behavior of UHPFRC box girder exactly. So the index should consider the dimension precisely and modify the reference value corresponding to the 0.005 strain of the prestressing strands.

키워드 : 초고강도 콘크리트, 강섬유, 연성거동, 박스거더, 강재지수**Keywords** : Ultra-high performance concrete, Steel fiber, Ductile behavior, Box girder, Reinforcement Index

1. 서론

초고강도 섬유보강 콘크리트는 고강도 콘크리트에 비해 높은 압축응력과 인장응력을 가지고 있으며, Chan et al.(2000)은 최적 충전밀도 이론에 의해 구성된 분체콘크리트는 염화칼슘침해, 중성화, 동결융해 저항성 및 수밀성 부분에서 월등한 내구성을 가지고 있음을 실험을 통해 입증하였다. Richard and Cheyreyz(1995)는 초고강도 콘크리트의 취성적인 단점을 보완하기 위해 강섬유를 혼입하였으며, Han(2015)은 강섬유와 철근집합체 조합을 통하여 경제적인 초고강도 콘크리트 거더 구현에 대한 실험을 하였다. Simone and Ekkehard(2016)은 강섬유와 철근의 조합 그리고 균열 면에서 부착강성이 사용중 상태에서 구조물 내하력 증진효과가 있으며, 경제적인 구조물 시공비용을 제공한다고 실험을 통해

입증하였다. Manning et al.(2016)은 AASHTO 기준보다 작은 전단 철근량과 축소된 콘크리트 단면을 사용한 초고강도 프리스트레스 거더가 증가된 탄성영역, 비슷한 강성 보유 그리고 강섬유의 균열 브리징으로 인한 최대하중 이후 보강된 연성거동 휨실험을 수행하였다. 위의 실험은 파괴하중 상태에서 미세균열이 발생하는 저보강 프리스트레스 콘크리트 보에 의한 실험으로서 초고강도 콘크리트 단면의 특성을 최대한 활용하기 위해 PS강재의 면적을 변수로 실험을 수행한 연구는 진행되지 않았다. 초고강도 프리스트레스 콘크리트 거더는 형고가 낮아서 초고강도 콘크리트 거더의 면적이 고강도 또는 보통 콘크리트 거더 보다 작은 관계로 강재비가 상대적으로 커서 연성거동 확보가 큰 관건이라고 할 수 있다. 초고강도 콘크리트는 압축강도가 크기 때문에 콘크리트 단면에 압축력을 많이 가할 수 있고, 이에 따른 프리스트레스 강재 면적이

* Corresponding author E-mail: smhan@kumoh.ac.kr

¹(주) 씨알디 (C,R,D Ltd, Gumi, Gyungbuk, 39376, Korea)²한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)³금오공과대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyungbuk, 39177, Korea)

Table 1. Mixing portion of UHPC(ratio of weight)

Cement	Water	Silica fume	Sand	Silica flour	W/B	Super plasticizer	Steel fiber(vol %)
1	0.22	0.25	1.1	0.3	0.18	0.056	1.0 1.5, 2.0

콘크리트 단면적에 비해 상대적으로 커질 수 있어 과보강보가 될 가능성이 있다. 따라서 이러한 단면 특성을 가진 초고강도 콘크리트 거더에 하중이 증가하면 과보강으로 인해 긴장재가 항복하기 전에 압축축 연단의 콘크리트 파괴로 취성파괴 거동 양상을 나타낼 수 있다.

ACI 318-11에 의하면 하부 강재의 순인장변형률 한계 0.005는 프리스트레스 직사각형보 단면에 있어서 0.32β_s에 해당된다. 따라서 콘크리트 면적이 작은 초고강도 콘크리트 거더에 있어서 PS강재 지수가 0.32β_s보다 작을 경우 저보강 PSC로 보지만 0.32β_s보다 큰 경우는 과보강 PSC가 될 가능성이 초고강도 프리스트레스 콘크리트보에 적용되는 지 검토해 볼 필요성이 있다. 본 실험에서는 초고강도 섬유보강 박스거더 하부 플랜지에 15.2mm 강연선 32개, 24개 그리고 14개를 배치하여 3가지의 강재면적 종류에 대한 휨실험을 수행하고, 강재면적에 따른 보의 거동특성을 분석하여 연성거동을 유도하기 위한 PS강재지수비가 초고강도 콘크리트 박스거더에 있어서 그 유효성이 있는지 검증하고자 한다.

2. 실험

실험체는 초고강도 섬유보강 콘크리트 3분절 박스 거더로써 강섬유 혼입비와 PS 강재 면적을 실험 변수로 4가지의 실험체를 제작하여 휨실험을 수행하였다. 하중은 4점 재하 휨실험을 하였으며, 변위제어 방식으로 하중을 가하여 최대하중 이후 거동을 측정할 수 있도록 하였다. 하중과 처짐관계, 하중에 따른 중앙단면에서 변형을 변화와 중립축 변화 등을 측정하여 PS강재면적에 따른 거동의 특성을 분석하였으며, 강재지수에 따른 보 파괴거동 분류에 대한 식의 타당성을 검토하였다.

2.1 시험부재의 재료 및 종류

실험체의 초고강도 섬유보강 콘크리트 배합비는 시멘트 중량대

Table 2. Material properties of strand and rebar

Kind	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)
PS strand	1665	1997
Rebar	400	540

비 물-시멘트비 0.22, 실리카흙 0.25, 실리카플로우 0.3, 물-바인더비를 0.18 및 강섬유와 콘크리트간의 재료분리가 일어나지 않고 플로우가 충분하도록 폴리카본 아크릴릭에스터 고농도 감수제를 40리터를 사용하였으며 배합비는 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 0.4mm이하의 S_O2 성분이 높은 모래를 사용하였고, 실리카흙은 분말도 0.1μm 이상의 초미립자를 사용하였으며, 실리카플로우는 평균 직경 10~15μm의 si_o2 성분이 99.5% 이상인 규사 분말을 사용하였다. 또한 초고강도 콘크리트의 압축 및 인장응력 영역에 연성거동 특성을 부여하기 위해 강섬유를 혼입하였으며 거더 제작 단가의 경제성을 도모하기 위해 체적대비 2.0%, 1.5% 혼입률 외에 f_y = 400MPa, D13의 종방향 철근과 강섬유 혼입률 1.0%를 병용하였다. 강섬유는 직경 0.2mm 길이 13mm로서 세장비는 65이고, 강섬유의 인장강도는 2500MPa이다. BF1.0, BF1.5, BF2.0의 공시체 압축강도는 각각161.4MPa, 163.1MPa, 164.7MPa로 측정되었다. Table 2에 강연선의 항복강도, 인장강도 및 철근의 물성값을 표시하였다. 강섬유 혼입률에 따라 3가지의 종류 즉, BF1.0, BF1.5, BF2.0로 분류하며, 하부 플랜지에 설치하는 PS강선의 개수에 따라 14, 24, 32개로 분류하여, 총 4 종류 즉, BF1.0-24, BF1.0-32, BF1.5-14, BF2.0-32의 실험체로 분류할 수 있으며 Table 3에 자세한 특성을 나타내었다. BF1.0-24의 경우, 강섬유 혼입률 1.0%와 상부플랜지, 복부 및 하부플랜지 종방향 철근(D13)을 병용하였으며 PS강선 24개를 하부 플랜지에 배치하였다. BF1.0-32의 경우, 강섬유 혼입률 1.0%와 상부플랜지, 복부 및 하부플랜지 종방향 철근(D13)을 병용하였으며 PS강선 32개를 하부 플랜지에 배치하였

Table 3. Kinds of UHPC box girder

Specimen	Volume of fraction of steel fiber(%)	Longitudinal steel reinforcement			No. of PS strands	
		Upper flange	Web	Lower flange	Upper	Lower
BF1.0-24	1.0	○	○	○	2×2	12×2
BF1.0-32	1.0	○	○	○	7×2	16×2
BF1.5-14	1.5	×	×	○	2×2	7×2
BF2.0-32	2.0	×	×	○	7×2	16×2

다. BF1.5-14의 경우, 강섬유 혼입률 1.5%와 하부플랜지 종방향 철근을 병용하였으며 PS강선 14개를 하부 플랜지에 배치하였다. BF2.0-32의 경우, 강섬유 혼입률 2.0%와 하부플랜지 종방향 철근을 병용하였으며 PS강선 32개를 하부 플랜지에 배치하였다.

2.2 시험부재 제작

초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스거더는 Fig. 1와 같이 길이 15.4m 3분절로 제작되었다. 단부분절은 5.2m이고 중앙분절은 5.0m로서 구성되었다. Fig. 2의 평면도와 같이 각 분절의 경계면에 100mm씩 전체 단면이 되도록 즉, 200mm의 간격을 띄우도록 EPS블록을 내부에 배치하였다. Fig. 2는 거더의 폭이 단부에서 730mm, 중앙단면에서는 600mm를 나타낸 평면도로서, 단부에서 1000mm 지점까지 폭 730mm의 전체단면을 형성하다가 1000mm 지점부터 1500mm 지점까지 폭이 600mm인 중앙단면과 같은 단면을 형성하도록 변 단면 형태를 가지고 있다. 거더의 높이는 600mm로 단부부터 중앙단면까지 동일한 높이를 가지고 있다.

Guo(2014)는 하부플랜지에 직경 15.2mm 강연선 16개씩 2개의 덕트를 배치한 2종류의 UHPC박스 거더와 동일한 기하학적 형태를 가진 박스거더에 강연선 12개씩 2개의 덕트, 강연선 7개씩 2개의 덕트를 배치한 UHPC 박스거더 2종류를 제작하여 박스거더 거동 특성에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 3은 박스형 거더의 단부 단면을 표시하였으며, 가로 730mm, 세로 600mm의 직사각형으로

서 단부에 정착구를 배치하기 위해서 중앙단면 보다 큰 단면 형태를 가지고 있다. Fig. 3(a)는 하부플랜지에 D13의 종방향 철근이 배근된 B2.0과 B1.5의 단부를 표시하였으며, Fig. 3(b)는 상하부 플랜지와 복부에 종방향 철근이 배근된 B1.0의 단부를 나타내었다. Fig. 4와 같이 박스형 거더의 중앙단면은 상부폭 600mm, 하부폭 500mm, 높이 600mm의 사다리꼴 형태를 가지고 있다. 중앙분절 중앙단면에 하부플랜지의 철근 배근, 포스트텐션의 텐던 위치 및 박스형 거더 내부의 공간형태를 도시하였으며, 박스형 단면을 형성하기 위해 EPS블록을 내부에 넣어 콘크리트를 타설하였다. Fig. 4(a)와 같이 BF2.0-32의 하부 텐던은 15.2mm 7연선 16개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 32개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 6400kN 도입하였고, 상부 텐던은 15.2mm 7연선 7개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 14개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 2800kN 도입하였다. Fig. 4(b)의 BF1.0-32 하부 텐던은 15.2mm 7연선 16개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 32개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 6400kN 도입하였고, 상부 텐던은 15.2mm 7연선 7개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 14개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 2800kN 도입하였다.

Fig. 4(c)의 BF1.0-24 하부 텐던은 15.2mm 7연선 12개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 24개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 4800kN 도입하였고, 상부 텐던은 15.2mm 7연선 2개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 4개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력

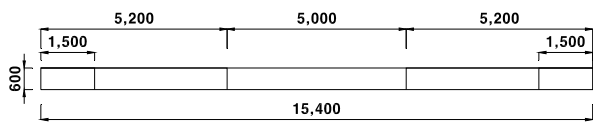


Fig. 1. Front view of box girder

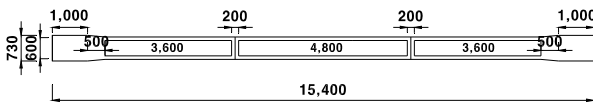


Fig. 2. Ground plan of box girder

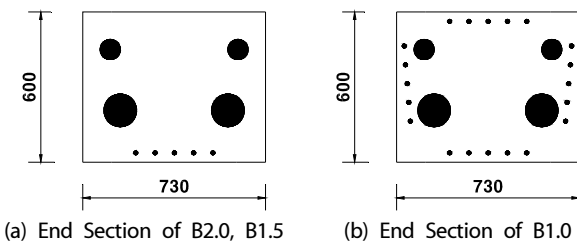


Fig. 3. End section of box girder(unit: mm)

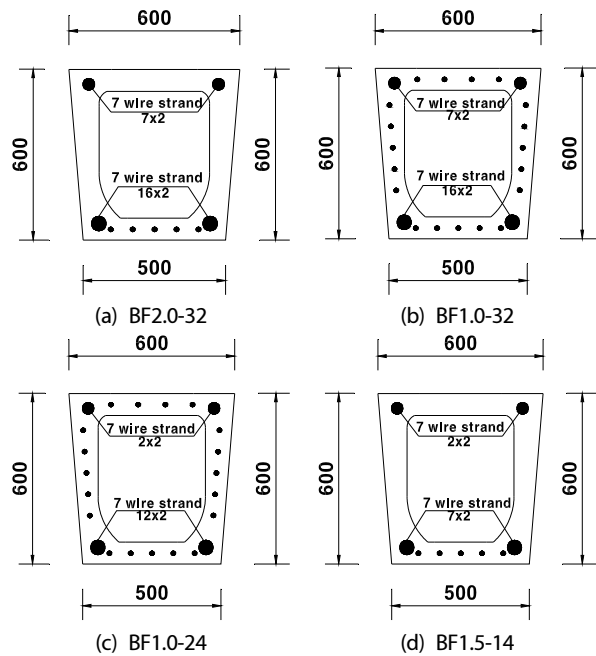


Fig. 4. Mid section of box girder(unit: mm)

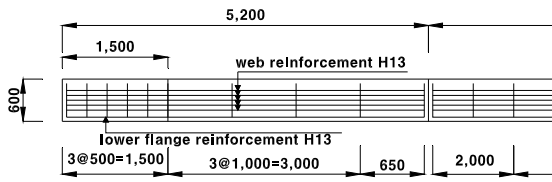


Fig. 5. Reinforcement of box girder

을 800kN 도입하였다. Fig. 4(d)의BF1,5-14 하부 텐던은 15,2mm 7연선 7개씩 2개의 덱트에 배치하여 총 14개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 2800kN 도입하였고, 상부 텐던은 15,2mm 7연선 2개씩 2개의 덱트에 배치하여 총 4개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 800kN 도입하였다.

Fig. 5는 박스형 거더의 종방향 철근과 철근 간격재를 도시한 것으로 H13 5개를 복부에 배근하였고, 수직방향 철근은 단부 1500mm구간에서는 300mm 간격으로 5개를 배치하고 이후 1000mm 간격으로 배근하였다. 간격 1000mm는 유효깊이 $d/2=300$ mm보다 커서 전단철근의 기능보다 수직 간격재 역할을 한다. 강섬유 혼입률 1.0%, 1.5%, 2.0% 가진 UHPC의 전단력은 역학적으로 안정하나 최대 하중 이후 연성거동을 유도하기 위해 종방향 철근을 배근하였다.

2.3 실험방법

Fig. 6과 같이 단순지지 경계조건으로 UHPC 박스거더에 대한 중앙 1000mm 간격을 띠운 4점 재하 방법으로 휨 실험을 수행하였다. 1000kN 용량의 액추에이터를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 가하였다. 단면의 변형을 변화와 중립축의 변동을 측정하기 위해 보의 중앙단면에 7개씩 14개의 전기저항식 변형률게이지를 Fig. 6과 같이 부착하였으며, 하부 플랜지의 철근에 게이지를 부착하여 하면에서 철근의 변형상태를 측정하였다.

또한 중앙단면 하부에 LVDT를 배치하여 하중과 처짐 간의 관계를 측정하였다. 하중 증가에 따른 최초균열, 균열의 전이 양상을 측정하였으며, 측정된 LVDT 변형과 변형률게이지의 변형데이터를 분석하여 UHPC 분절형 박스거더의 거동 특성을 파악하였다.

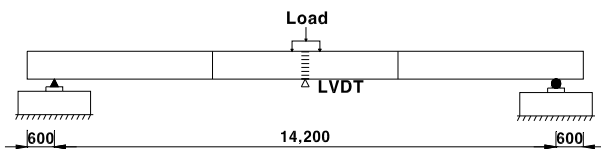


Fig. 6. Four point bending test

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 하중과 처짐 간의 관계

강섬유 혼입률이 체적대비 1.5%, 2.0%인 UHPC 박스단면의 하부플랜지에만 종방향 철근이 배근된 BF1,5-14와 BF2,0-32의 하중-처짐관계와 강섬유 혼입률이 1.0%이면서 박스단면의 상,하부 플랜지, 양복부에 종방향 철근이 배근된 BF1,0-24와 BF1,0-32의 하중-처짐 관계를 Fig. 7에 도시하였다.

BF2,0-32와 BF1,0-32는 하중 420kN까지 선형 하중-처짐관계를 가지며, 동일한 기울기를 가지고 있고 PS강연선 개수가 32개인 관계로 BF1,0-24와 BF1,5-14 보다 큰 탄성계수를 가지고 있다.

BF2,0-32의 최초균열은 470kN에서 발생하였고, BF1,0-32의 최초균열은 420kN에서 발생하였으며, BF2,0-32의 체적대비 2.0%의 강섬유 혼입률로 증가된 인장강도 효과는 BF1,0-32의 체적대비 1.0%의 강섬유 혼입, 양복부 및 상부플랜지에 배근된 종방향 철근의 조합보다 강성이 약간이 크고 비선형 하중-처짐 구간에서 기울기가 더 큰 것을 볼 수 있다. BF2,0-32의 최대하중은 747kN이고 이 때의 처짐은 184mm이며, BF1,0-32의 최대하중은 714kN이며, 이때의 처짐은 191mm이다.

강섬유 혼입률이 1.0%이고, 양복부와 상부플랜지에 종방향철근을 배근하고 PS강선의 수가 24개인 BF1,0-24의 선형 하중-처짐관계에서 PS강선수의 수가 32개인 박스거더보다 약간 작은 기울기를 가지고 있으며, 최초의 균열은 410kN에서 발생하였고, 최대하중은 720kN으로서 처짐은 256mm를 나타내었다. 즉, BF2,0-32와 BF1,0-32박스 거더는 BF1,0-24보다 PS강선의 개수가 많음에도 최대하중 차이가 크지 않고 처짐은 작아 과보강 PSC보임을 시사하고 있다.

강섬유 혼입률이 1.5%이고 PS강선의 수가 14개인 BF 1,5-14박스 거더는 선형 하중-처짐 구간에서 BF1,0-24보다 기울기가 약간 크나, 최초 균열이 260kN에서 발생하였고, 최대하중은 470kN으로서 이때의 처짐은 260mm가 발생하였다. BF1,5-14의 최대하중

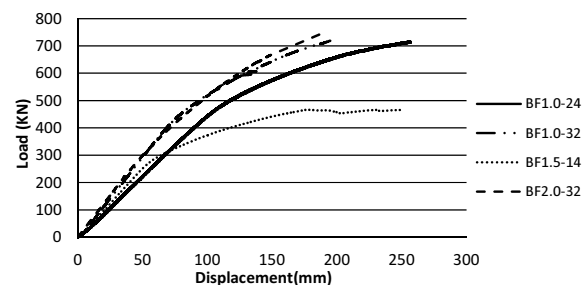


Fig. 7. Load-displacement relationship of UHPC box girder

은 BF1.0-24 최대하중의 65.3%로서 상연 콘크리트가 압축파괴하지 않고 PS강선이 항복한 후 변형이 증가하는 저보강 PSC보 거동을 보여주고 있다.

3.2 중앙단면에서 변형률과 중립축의 변화

중앙단면의 전면부와 후면부에 각각 7개씩 14개의 변형률 게이지를 설치하였고, 이들 게이지 변형률의 평균값으로 중앙단면 7개의 변형률 변화를 Figs. 8 ~ 11에 도시하였고, 중립축 변화를 Figs. 12 ~ 15에 나타내었다.

Fig. 8에서 BF2.0-32의 경우 400kN전까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가되고, 400kN 이후 철근의 인장변형률이 비선형적으로 증가하고 460kN 이후 하단부에 최초 균열이 발생한 후 하중이 증가함에 따라서 균열 폭이 증가하며 중립축이 상승하였다. 압축구역에서 600kN하중 작용 시 최대압축변형률이 2600 μ m, 737kN하중 작용 시 최대압축변형률이 2,960 μ m이 진행되었으며, 인장구역에서 600kN하중 받을시 하연에서 2,640 μ m 인장변형이 진행되었다. Fig. 12와 같이 초기 하중에서 단면의 중립축이 상단에서 아랫방향으로 287mm에서 형성되었다가 460kN이후에 중립축이 상승하여 최대하중이 작용하는 747kN에서는 상단에서 156mm까지 중립축이 상승하였다.

Fig. 9에서 BF1.0-32의 경우 400kN전까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가되고, 400kN이후 철근의 인장변형률이 비선형적으로 증가하고 420kN이후 하단부에 최초 균열이 발생한 후 하중이 증가함에 따라서 균열 폭이 증가하며 중립축이 상승하였다. 압축구역에서 600kN하중 작용 시 상연에서 압축변형률이 2,200 μ m, 718kN하중 작용 시 상연의 압축변형률이 3,340 μ m까지 진행되었으며, 인장구역에서 600kN, 668kN 하중 받을시 하연의 게이지는 절단되어 중립축 상승률이 BF2.0-32보다 빠름을 볼 수 있다. Fig. 13과 같이 초기 하중에서 단면의 중립축이 상단에서 아랫방향으로 265mm에서 형성되었다가 300kN에서부터 중립축이 상승하여 최대하중이 작용하는 718kN에서는 상단에서 162mm까지 중립축이 상승하였다.

Fig. 10에서 BF1.0-24의 경우 400kN전까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가되고, 400kN 이후 철근의 인장변형률이 비선형적으로 증가하고 500kN에서 압축과 인장구역에서 비선형성이 증가하고 있다. 압축구역에서 500kN 작용 시 상연에서 압축변형률이 4031 μ m까지 증가하였다가 600kN하중 작용 시 상연아래부분에 수평으로 균열이 발생하여 상연에서 압축변형률이 2,181 μ m로 감소되었다. 700kN, 720kN하중 작용 시 상연아래부분의 균열

이 더 진전되어 상연에서 두 번째 게이지의 압축변형률이 4,795 μ m, 5,431 μ m로 증가함에 비해 상연 첫 번째 게이지 압축변형률이 410 μ m로 감소되어 상연아래부분의 균열로 인해 아래 부분과 거의 분리되었음을 시사하고 있다. 압축구역의 경우 400kN 작용 시까

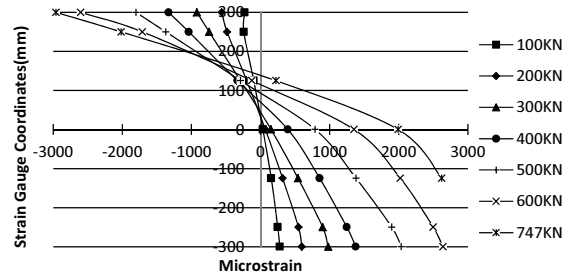


Fig. 8. Strain of the central cross section (BF2.0-32)

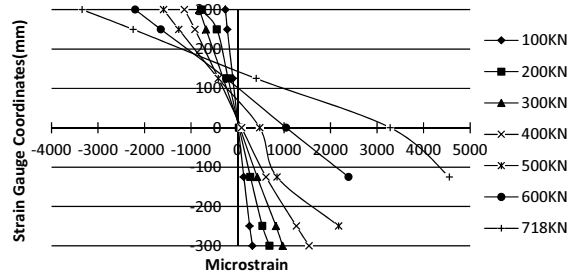


Fig. 9. Strain of the central cross section (BF1.0-32)

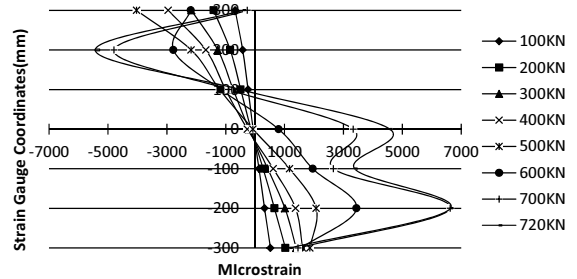


Fig. 10. Strain of the central cross section (BF1.0-24)

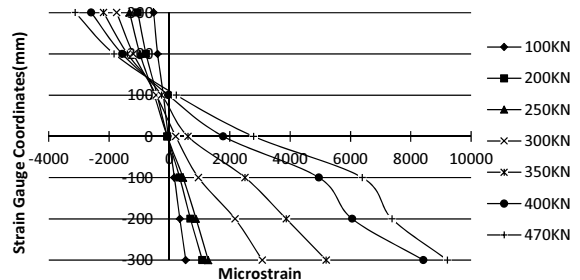


Fig. 11. Strain of the central cross section (BF1.5-14)

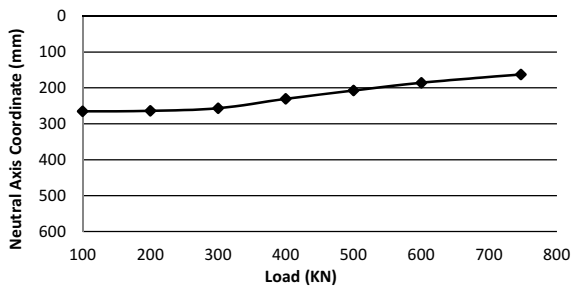


Fig. 12. Change of the neutral axis in central cross section (BF2.0-32)

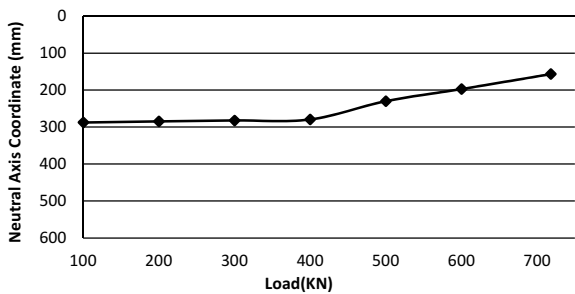


Fig. 13. Change of the neutral axis in central cross section (BF1.0-32)

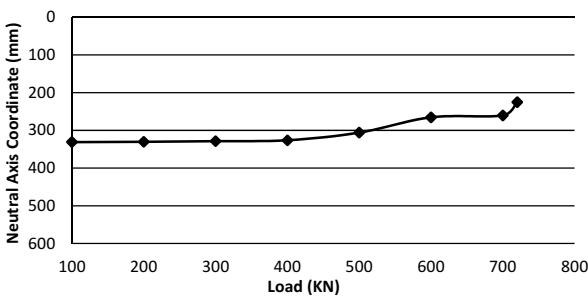


Fig. 14. Change of the neutral axis in central cross section (BF1.0-24)

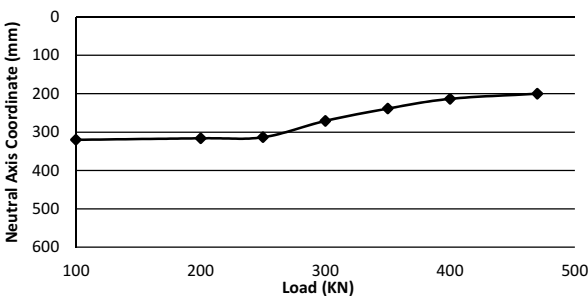


Fig. 15. Change of the neutral axis in central cross section (BF1.5-14)

지 선형적인 인장변형률 관계를 보이다가 500kN하중 작용 시 하연의 압축변형률 1,863 μ m까지 증가하였다가 600kN이상에서는 하연의 게이지 부근에 균열이 발생하여 인장변형이 1,180 μ m감소됨을 볼 수 있다. Fig. 14와 같이 하중 초기의 중립축은 상연에서 331mm하부에 형성되었다가 400kN에서부터 중립축이 상승하여 하중 720kN에서는 상연의 225mm까지 상승하였다.

Fig. 11에서 BF1.5-14의 경우 200kN전까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 200kN이후 철근의 인장변형률이 비선형적으로 증가하였고 260kN이후 하단부에 최초 균열이 발생한 후 하중이 증가하며 균열폭이 증가하였다. 400kN에서 최대압축변형률이 2589 μ m, 470kN에서 최대압축변형률이 3122 μ m이 진행되었으며, 인장구역에서 400kN, 470kN 하중 받을시 하연의 게이지에서 8,423 μ m, 9217 μ m 인장변형이 진행되었다. Fig. 15와 같이 초기 하중에서 단면의 중립축이 상연에서 320mm하부에 형성되었다가 250kN부터 중립축이 상승하여 최대하중이 작용하는 470kN에서는 상연에서 200mm까지 중립축이 상승하였다.

3.3 파괴형상과 강재지수비 관계

초고강도 콘크리트 박스 거더의 하부 PS강재가 2 \times 16개 인 BF2.0-32, BF1.0-32의 처짐이 190mm로 PS강재가 24개인 BF1.0-24의 256mm보다 작고, BF2.0-32, BF1.0-32의 최대하중은 각각 745kN, 714kN으로서 BF1.0-24의 최대하중 715kN과 큰 차이가 없는 점으로 볼 때 초고강도 콘크리트 박스거더 단면에서 PS강재 32개는 과보강 강재에 속한다고 볼 수 있다. BF2.0-32거더는 최대하중 745kN에서 파괴 시 Fig. 16과 같이 중앙단면에서 취성파괴 현상을 보였다. BF1.0-34거더는 최대하중 714kN에서 상부플랜지와 복부가 분리되면서 중앙단면이 취성파괴되는 형태를 Fig. 17에서 볼 수 있다.

BF2.0-32와 BF1.0-32거더에 최대하중 작용 시 상연에서 압축 변형률은 2,960 μ m, 3,340 μ m까지 진행되어 압축강도가 160MPa인 콘크리트의 휨압축변형률이 BF1.0-24처럼 5,431 μ m까지 진행될 여지는 있었으나 PS강재의 면적이 과다하여 파괴구면에서 인장구역의 변형률이 작은 관계로 압축구역을 구속하는 힘이 커져 취성적 파괴형태를 유도한 결과를 보이는 양상을 볼 때 과보강 PSC 박스 거더로 판단된다.

Fig. 18과 같이 BF1.0-24는 파괴 시 중앙단면의 상면에서 휨압축 파괴 현상, 하면에서는 휨인장 파괴 현상을 보여준다.

BF1.0-24는 PS강재 면적이 작음에도 BF1.0-32와 비슷한 최대하중을 부담하면서도 처짐이 256mm까지 진행되어 연성적 거동을

보이고 있다. 최대하중이 재하 되는 국면에서 PS강재의 변형률이 증가하고 동시에 압축구역에서 콘크리트의 변형률이 5,431 μ m 진행하여 거더의 변형양상을 쉽게 인지할 수 있는 연성거동 형태를 가지는 저보강 PSC 박스거더로 판단된다.

Fig. 19에서 볼 수 있듯이 BF1.5-14는 15.2mm PS강연선 7개씩

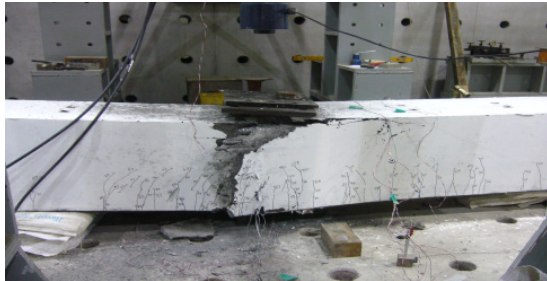


Fig. 16. Failure pattern of BF2.0-32 in central section



Fig. 17. Failure pattern of BF1.0-32 in central segment

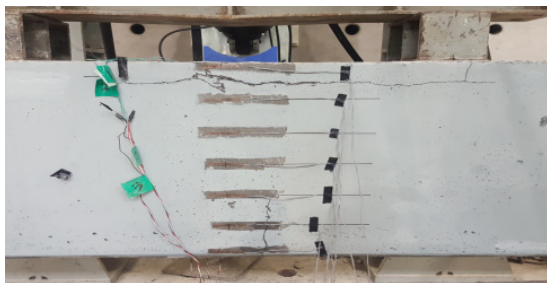


Fig. 18. Failure pattern of BF1.0-24 in central section



Fig. 19. Failure pattern of BF1.5-14 in central section

2개의 덕트를 배치하여 강재의 면적이 상대적으로 작아서 최대하중에 대한 인장변형률이 많고, 압축구역에 대한 우력이 작아 최초균열 하중, 최대균열하중이 BF1.0-24의 반절에 지나지 않으며 처짐이 251mm 진행되어도 최대하중 하에서 휨파괴 현상이 발생되지 않았다. 또한 BF1.5-14는 최대하중 하에서 콘크리트 압축구역 상연에서 변형률이 3122 μ m까지 진행되어 압축변형을 더 할 수 있는 상황으로 볼 때 강재면적이 상당히 작은 저보강 PSC 박스 거더로 판단할 수 있다.

ACI 318-11(2011)과 콘크리트 구조설계 기준(2012)의 휨보강 부재의 강재 제한사항에 프리스트레스 강재 변형률 0.005에 해당하는 강재지수는 $\omega_p=0.32\beta_1$ 으로서 과보강 또는 저보강 거더의 기준으로 제시하고 있다. 초고강도 콘크리트 박스거더 4종류에 대한 강재지수와 $0.32\beta_1$ 를 비교하여 초고강도 콘크리트 박스거더에 있어서 강재지수의 유효성을 검증하고자 한다. AFGC recommendation on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete(2013)에 초고강도 콘크리트 응력이 삼각형이므로 응력블럭의 계수 β_1 는 고강도 콘크리트 응력블럭의 최소값인 0.65에서 0.5로 감소시키고, 7연선 직경 15.2mm PS 강연선의 강도특성이 $f_{ps}=1,665\text{MPa}$, $f_{pu}=1,997\text{MPa}$ 일 경우, PS강재가 부착되지 않고, 설계기준에서 f_{ps} 식을 사용하고, 긴장재만으로 강재지수를 계산한 결과를 Table 4에 나타내었다.

$$\omega_p = \rho_p \frac{f_{ps}}{f_{ck}}, \rho_p = \frac{A_p}{bd_p} \quad (1)$$

Table 4에서 볼 때 초고강도 BF2.0-32와 BF1.0-32는 강재지수가 0.14이며 $0.32\beta_1=0.16$ 보다 작아 저보강으로 판단되나 실제로는 PS강재의 인장력이 초고강도 콘크리트 압축력을 초과하는 과보강 강재의 거동을 보여주고 있다. BF1.0-24의 강재지수는 0.11로서 설계기준에서도 저보강 강재로 판단되고, 실제거동 또한 BF1.0-32와 같은 최대하중을 가지며 처짐이 크고 콘크리트 압축파괴 전에

Table 4. Comparison of reinforcement index

Girder type	Reinforcement index(ω_p)	$0.32\beta_1$	Design code reinforcement type	Experimental reinforcement type
BF2.0-32	0.14	0.16	Low reinforcement	Over reinforcement
BF1.0-32	0.14	0.16	Low reinforcement	Over reinforcement
BF1.0-24	0.11	0.16	Low reinforcement	Low reinforcement
BF1.5-14	0.07	0.16	Low reinforcement	Low reinforcement

강재변형이 많이 발생하는 저보강 특성을 보여주고 있다. 초고강도 콘크리트 박스거더의 강재지수를 정확히 판단하기 위해서는 박스거더의 기하학적 형태를 정확히 반영하고, 강재의 변형률 0.005에 해당하는 기준값을 새로 산정해야 초고강도 콘크리트 박스거더 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 UHPFRC 박스거더의 긴장재 면적을 변수로 하중에 대한 처짐과 변형률 및 종립축 변화양상을 측정하여 거동의 특성을 파악하고 강재지수의 유효성을 판단한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 사용하였던 UHPFRC 박스거더의 강연선 개수가 32와 24개는 거의 동일한 최대하중을 가지고 강연선 개수가 작은 거더의 처짐이 크고 콘크리트의 급작스러운 취성파괴가 없는 파괴상태로 볼 때 32개의 강연선은 과보강 PSC보로 판단된다.
2. 설계기준에서 사용하고 있는 프리스트레스 보의 강재지수 판별식은 초고강도 콘크리트 박스거더의 거동을 정확하게 반영하지 못하고 있으며, 박스거더의 기하학적 형태를 세부적으로 고려하고, 강재의 변형률 0.005에 해당하는 기준값을 새로 산정해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스거더의 연성 거동

압축강도 160MPa와 길이 15.4m를 가진 초고강도 섬유보강 분절 박스거더에 대한 휨거동 실험을 수행하였다. 실험 변수로는 PS강재의 면적, 강섬유 혼입률과 복부와 상부 플랜지의 종방향 철근이다. 하부플랜지의 두 개 텐던에 16개, 12개, 7개씩을 배치하고, 강섬유 혼입률은 2.0%, 1.5%, 1%를 사용하였다. 하부에 32개의 강연선을 배근한 박스거더는 과보강 강재 거동을 보였으며, 24개의 강연선을 배근한 거더는 강연선 32개를 설치한 거더와 비슷한 최대하중을 보이면서 처짐이 많은 저보강 강재 거동을 보였다. 강연선을 14개 설치한 박스거더는 24개 설치한 거더 내하력의 1/2정도 최대하중을 보이며, 연성거동을 보이고 있다. 설계기준의 강재지수에 따른 보 파괴거동의 분류에 대한 식의 유효성을 검토한 결과 지수 판별식은 초고강도 박스거더의 거동을 정확하게 반영하지 못하고 있으며, 박스거더의 기하학적 형태를 세부적으로 고려하고, 강재의 변형률 0.005에 해당하는 기준값을 새로 산정해야 할 것으로 판단된다.

References

- AFGC. (2013). Document Scientifiques et Techniques, Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete, Recommendations, 82-89.
- American Concrete Institute. (2011). Building Code Requirement for Structural Code(ACI 318M-11), 296.
- Chan, S.Y., Feng, N.Q., Tsang, M.K. (2000). Durability of high strength concrete incorporating carrier fluidifying agent, Magazine of Concrete Research, **52(4)**, 235-242.
- Han, S.M., An, J.W. (2015). The ductile behavior test of ultra high performance fiber reinforced concrete rectangular beam by combination of the fiber and group of reinforcing bars, Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection, **19(3)**, 139-148 [in Korean].
- Manning, Mark P, Weldon, Brad D, McGunnis, Michael J, David V, Newton, Craig M. (2016). Locally developed ultra high performance concrete: behavior analysis of prestressed channel girders, UHPC Symposium_Kassel, Hiper Mat16.
- Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete, Cement and Research, **25(7)**, 1501-1511.
- Simone, Sturwald., Ekkehard, Fehling. (2016). Design of Reinforced UHPFRC in Flexure, 3rd UHPC Symposium Proceedings, Kassel 2016.