

영구거푸집으로 사용한 유리섬유 FRP 판과 현장타설 고강도콘크리트로 이루어진 합성보의 휨/전단파괴거동에 관한 실험적 연구

유승운*

¹가톨릭관동대학교 토목공학과

An Experimental Study for Flexure/Shear Failure Behavior of Composite Beam with GFRP Plank Used As a Permanent Formwork and Cast-in-place High Strength Concrete

Seung-Woon Yoo^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Catholic Kwandong University

요 약 유리섬유강화폴리머(GFRP) 판을 현장타설 고강도콘크리트 구조물의 영구거푸집으로 사용하기 위한 실험을 수행하였다. 현재 생산되는 GFRP 판의 경우 표면이 매끈하여 콘크리트와 일체 거동에 다소 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 GFRP 판 하부의 잔골재 부착여부, GFRP판 웹의 천공유무 및 간격, 상부 플랜지 폭을 실험 변수로 하여 현장타설 고강도콘크리트와 GFRP를 영구거푸집으로 활용한 전단경간비가 짧은 합성보의 휨/전단파괴거동을 분석하였다.

GFRP 판 웹을 천공하지 않은 경우 잔골재 부착효과 여부를 위한 실험 결과, 잔골재를 부착한 경우 미부착의 경우 보다 약 47% 정도의 높은 극한하중 값을 보여주며, 파괴형태도 휨/전단파괴모드를 보여 주었다. 웹의 천공유무 및 간격효과는 잔골재를 부착하지 않은 경우 천공간격이 조밀한 경우가 약 24% 정도 높은 극한하중 값을 보여주었으며, 잔골재를 부착한 경우 천공 간격이 조밀하지 않은 경우가 약 25% 정도 낮은 극한하중 값을 보여주었다. 상부플랜지 영향을 살펴보면, 폭 40mm 경우가 20mm에 비해 약 17% 정도 큰 극한하중 값을 보여주었다.

Abstract In this study, an experiment which utilized glass fiber reinforced polymer(GFRP) plank as the permanent formwork of cast-in-place high strength concrete structures was performed. The GFRP plank currently being produced has smooth surface so that it causes problems in behavior with concrete. Therefore, this research analyzed the flexure/shear failure behavior of composite beams, which used GFRP plank as its permanent formwork and has short shear span ratio, by setting the sand coated at GFRP bottom surface, the perforation and interval of the GFRP plank web, and the width of the top flange as the experimental variables.

As a result of the experiments for effectiveness of sand attachment in case of not perforated web, approximately 47% higher ultimate load value was obtained when the sand was coated than not coated case and bending/shear failure mode was observed. For effectiveness of perforation and interval of gap, approximately 24% higher maximum load value was seen when interval of the perforation gap was short and the fine aggregate was not coated, and approximately 25% lower value was observed when the perforation gap was not dense on the coated specimen. For effectiveness of top flange breadth, the ultimate load value was approximately 17% higher in case of 40mm than 20mm width.

Key Words : Composite beam, GFRP, Perforated web, Permanent formwork, Sand coated

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2013R1A1A2010852)으로 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Seung-Woon Yoo(Catholic Kwandong Univ.)

Tel: +82-33-649-7513 email: swyoo@cku.ac.kr

Received February 23, 2015

Revised (1st April 30, 2015, 2nd June 10, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

1. 서론

최근 콘크리트 관련 기술의 발전과 더불어 건설 구조물에 사용되는 보강재로서 철근 부식의 단점을 보완한 재료의 필요성이 대두되기 시작하였다. 현재까지 철근 부식을 억제하기 위한 방법으로는 콘크리트 조직을 치밀하게 하는 방법과 콘크리트 피복 두께를 증가하는 방법, 폴리머 콘크리트의 사용 및 에폭시로 도막 처리한 철근을 사용하는 방법 등을 사용했지만 장기 내구성 측면에서는 큰 성과를 거두지 못하고 부식에 대한 근본적이고 재료적인 문제는 남아있다. 따라서 보다 새로운 재료를 사용하여 재래의 거푸집을 대신하고, 철근콘크리트 구조에서 철근을 배근할 필요 없이 현장에서 콘크리트만을 타설하고 양생하는 신개념 합성 콘크리트 교량 바닥판을 개발할 필요성이 있다[1]. 최근 철근콘크리트 바닥판의 단점을 원천적으로 보완할 목적으로 재료적 측면과 구조적 측면에서 새로운 바닥판 시스템을 개발하려는 노력이 계속 되었다. 내구성과 내식성에 강한 재료특성을 갖는 섬유강화폴리머(fiber reinforced polymer: FRP)가 국내 외적으로 건설재료로 인식되어 관심을 갖게 된 것은 비교적 최근의 일이다[2,3]. FRP는 다른 건설 재료에 비해 다소 가격이 비싸므로 주로 구조물의 보수/보강 재료로 활용되다가 최근 주 구조부재료의 활용이 시도되고 있다[4]. FRP 합성 바닥판의 설계 개념은 콘크리트 타설 시 FRP 거푸집 부재만으로 콘크리트 타설 하중 및 시공 하중을 지지하고, 향후 콘크리트가 양생 된 후에는 FRP 보강재와 콘크리트가 일체적 합성거동으로 인한 합성단면으로 추가 고정하중과 활하중을 지탱하는 구조 형식이다[5].

선진국의 경우에는 바닥판 연구의 중요성을 인식하고 이미 1980년대부터 재료적인 측면과 구조형식적인 측면에서 새로운 바닥판 시스템을 개발하고 새로운 작업을 지속적으로 추진하고 있다[6]. 휨 파괴 및 계면파괴에 따른 보강내력을 연구하여 FRP 보강 철근콘크리트 보의 규준을 제시하였고, 간편한 휨 보강 내력식을 도출하여 FRP 보강비 한계를 제시하였다[7,8]. 캐나다의 경우 콘크리트 내부에는 철근을 배근하지 않는 고내구성 콘크리트 바닥판을 개발하고 이의 실용화 단계에 접어들고 있다[9]. 국내의 경우 FRP 판을 구조물의 거푸집 대용 및 인장 보강재로 활용하기 위한 실험을 수행하였다[10].

본 연구는 유리섬유 FRP(glass fiber reinforced polymer: GFRP) 판을 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용한 전단

경간비가 짧은 합성보를 대상으로 GFRP 판 하부의 골재 부착유무, GFRP 판 웨브의 천공유무 및 간격, GFRP 상부 플랜지 폭을 실험 변수로 하여 휨/전단과 파괴 거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험 시편 설계 및 제작

본 실험에서는 인장 보강재 및 영구거푸집으로 GFRP 판을 사용하였고 그 외 추가적인 인장 및 전단 보강재는 사용하지 않았다. Table 1에는 실험체 및 비교 실험체의 제원 및 기호(NO-a-b-c-d-e-No)를 나타내었고, 여기서 a는 인장 보강재의 종류(S:철근, F:FRP), b는 잔골재 부착여부(N:미부착, C:부착), c는 GFRP 판의 상부 플랜지 길이(2:20mm, 4:40mm), d는 GFRP 웨브의 천공간격 배수(3:3배수, 5:5배수), e는 부재의 길이(1200mm), No는 실험체 수(1:1개, 2:2개)를 나타낸다.

Table 1. List of experiments

Name of experiment	No.	Tensile reinforcement	Perforation of the web	Perforated interval (times)	Top flange width (mm)
NOST001No	1	Steel bar(3D10)	No perfbond	-	-
NOFN401No	1	No coated GFRP	No perfbond	-	40
NOFN431No	2	No coated GFRP	perfbond	3	40
NOFN451No	2	No coated GFRP	perfbond	5	40
NOFC401No	2	Sand coated GFRP	No perfbond	-	40
NOFC431No	2	Sand coated GFRP	perfbond	3	40
NOFC451No	2	Sand coated GFRP	perfbond	5	40
NOFC201No	2	Sand coated GFRP	No perfbond	-	20

NO-a-b-c-d-e-No:

a(S:steel, F:FRP), b(N:no coated, C:coated), c(2:20mm, 4:40mm), d(3:3 times interval, 5:5 times interval), e(1200mm), No(Number of specimen)

Fig. 1은 실험에 사용한 FRP판의 형태 및 치수이며, 실험 시편의 제작은 먼저 GFRP 판을 폭 180mm, 길이 1200mm로 절단 후 GFRP 판 하부 플랜지 부분에만 S사 에폭시를 사용하여 4~7mm 크기의 잔골재를 4Kg/m² 규모로 부착하였고, Fig. 2는 잔골재가 부착된 GFRP 판의 완성된 모습이다. 실험체 제작에 사용한 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 43MPa이며, 굵은골재 최대치수는 20mm이다. Table 2, 3에는 GFRP 판과 에폭시의 물성을 나타내었다.

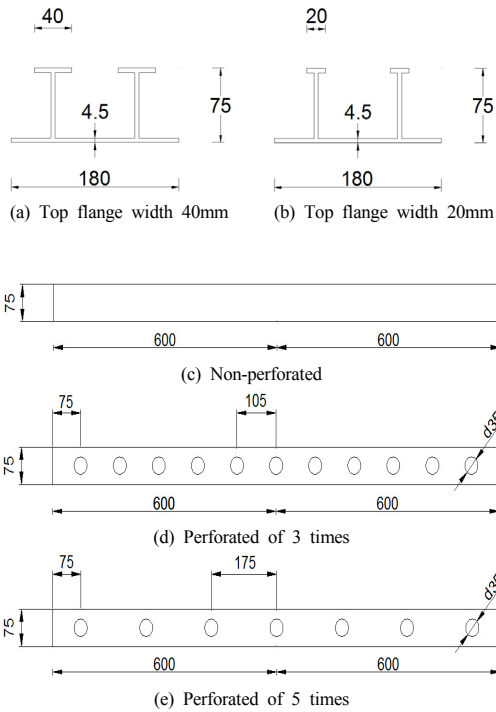


Fig. 1. Dimensions of GFRP plank

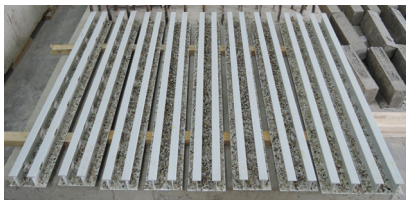


Fig. 2. Aggregate coated GFRP planks(1200mm)

Table 2. Material properties of GFRP

Type	Production method	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Glass	Pultrusion process	4.5	386	328	25.3

Table 3. Mechanical properties of epoxy

Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Compressive yield strength (MPa)	Gel time (min)	Shear strength (MPa)
77.9	4.8	84.0	65.0	18.3

2.2 실험방법

지점 사이 순 간격은 1000mm이고, 지간 중앙에 유압식 압축장치를 이용하여 하중을 가했으며, 지점조건은

단순지지이고 로드셀(load cell)과 실험 시편 중앙에 설치한 2개의 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였다. 전기저항식 변형률계지를 이용하여 GFRP 판 및 콘크리트 상하부의 변형률을 측정하였다. 상부에 설치한 변형률계지들은 하중 재하점을 피해 중앙에서 100mm 떨어진 2곳에 설치하였고, 하부에 설치한 변형률계지는 중앙에 설치하였으며 자세한 형상은 Fig. 3와 같다.

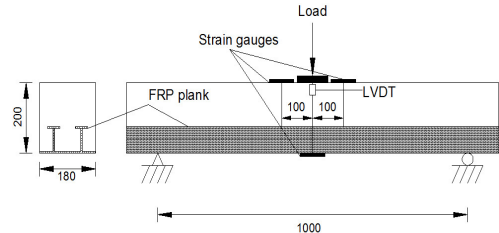


Fig. 3. Dimension and typical instrumentation of specimens (mm)

3. 실험 결과 분석

3.1 잔골재 부착 영향

GFRP 판에 잔골재 부착 여부에 대한 영향을 분석하기 위하여 GFRP 하부에 잔골재를 부착한 경우, SD400 이형철근인 D10을 3개 배근한 경우, GFRP 하부에 잔골재를 부착하지 않은 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 4. Results of aggregate attachment

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOST0011	104.68	104.68	7.36	7.36	12	shear
NOFN4011	93.54	93.54	4.63	4.63	6	flexure
NOFC4011	128.65	137.08	8.92	8.08	11	shear
NOFC4012	145.51		7.23		15	shear

Table 4 및 Fig. 4는 GFRP 판에 잔골재를 부착한 실험 시편과 비교 실험 시편들의 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 GFRP 판에 잔골재를 부착한 경우 최대 하중이 가장 높게 나타났으며 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편의 최대 하중이 가장 낮게 나타났다. GFRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편의 경우 6개의 균열 폭이 큰 휨 균열이 발생한 반면 GFRP 판에 잔골재를 부착한 실험 시편의 경우 11~15개의 균열 폭이 상대적으로 고르게 형성되었다. 하중이 증가함에 따라 GFRP 판과 콘

크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 잔골재를 부착한 실험의 경우 최대 하중에 도달함에 따라 GFRP의 변형률이 0.0045를 넘어서면서 GFRP와 콘크리트가 분리되며 최종 파괴에 이르렀다.

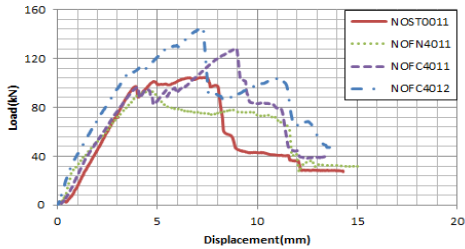


Fig. 4. Load-displacement curve of NOST0011, NOFN4011, NOFC4011 and NOFC4012

Fig. 4를 살펴보면 NOST0011, NOFN4011 실험 시편, 즉 비교 실험 시편의 경우 GFRP 판을 인장 보강재로 사용한 실험 시편의 최대 하중이 낮게 나타났다.

NOST0011 실험은 하중 43.31kN, 변위 1.93mm일 때 중앙 하단에 100mm 떨어진 곳에 초기 균열이 관측되었으며 하중 87.08kN, 변위 3.41mm일 때 중앙 상단에서 전단 균열이 발생하였으며 최대 하중은 104.68kN, 변위 7.36mm였다. 이후 하중이 서서히 감소하였으며 하중 97.43kN, 변위 8.01mm일 때 전단 균열이 크게 벌어지며 하중이 급격히 감소하였고 하중 27.43kN, 변위 14.30mm일 때 전단파괴가 발생하였다.

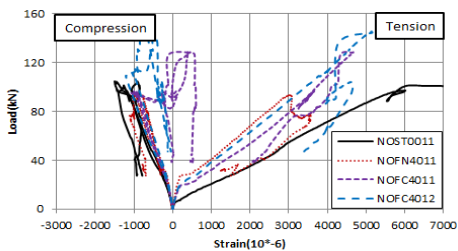


Fig. 5. Load-strain curve of NOST0011, NOFN4011, NOFC4011 and NOFC4012

NOFN4011 실험은 하중 29.12kN, 변위 0.80mm일 때 중앙 하단에 초기 균열을 관측하였고 최대 하중은 93.54kN, 변위 4.63mm이었으며, 이후 중앙의 휨 균열이 벌어지며 하중이 서서히 감소하였다. 하중 71.16kN, 변

위 10.99mm일 때 GFRP 판 하부와 콘크리트가 분리되며 하중이 급격히 감소하였고, 하중 41.76kN, 변위 11.97mm일 때 GFRP 판과 콘크리트가 미끄러지며 파괴가 발생하였다. GFRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편의 실험 결과 휨 파괴 후 GFRP 판과 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였고 총 6개의 휨 균열이 52~163mm 간격으로 발생하였다.

NOFC4011과 NOFC4012는 초기균열하중이 42.09~46.44kN이고, 96.07~110.16kN에서 전단 균열이 발생하였으며, 최대 하중은 128.65~145.51kN으로 나타났다. 실험은 모두 전단파괴가 발생하였으며, 총 11~15개의 휨 균열이 32~137mm 간격으로 발생하였고 GFRP 판에 잔골재를 부착하지 않은 실험 시편보다 휨 균열 분포가 상대적으로 고르게 형성되었다.

균열분포를 살펴보면 잔골재를 부착하지 않은 시편의 경우 GFRP 판과 타설 콘크리트가 분리되며 미끄러짐이 발생하였으며, 휨 파괴 형태를 보여주고 있다. 반면 잔골재를 부착한 시편의 경우 초기 하중 단계에서 분산된 초기 휨 균열 양상을 보이다 하중이 증가함에 따라 휨 균열이 전단 균열로 진행되었으며, 전단 균열에 의해 파괴가 발생하였다.

3.2 잔골재 미부착 GFRP판 웹 천공 영향

잔골재 미부착 GFRP 웹의 천공 및 간격 효과에 대한 영향을 분석하기 위하여 웹에 천공을 하지 않은 경우, 직경 35mm로 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 5. Result of perforation influence-no coated

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFN4011	93.54	93.54	4.63	4.63	6	flexure
NOFN4311	111.19	115.69	6.78	6.52	8	flexure
NOFN4312	120.18		8		flexure	
NOFN4511	105.34	105.18	5.43	5.63	7	flexure
NOFN4512	105.01		5.82		8	flexure

Table 5 및 Fig. 6은 GFRP 판에 잔골재를 부착하지 않고 GFRP 웹에 천공을 하지 않은 실험 시편과 직경 35mm로 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 실험 시편의 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중이 가장 낮게 나타났으며 천공간격이 직경의 3배, 즉 천공간격이 좁은 경우 최대 하중

이 가장 높게 나타났다. 이 현상은 GFRP 판 웹에 천공을 한 경우 장부효과에 대한 영향이 커지면서 최대 하중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 하중이 증가함에 따라 GFRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 극한 파괴 하중에서 콘크리트 압축 부분의 변형률은 0.002 이하이고, GFRP 판이 받는 변형률도 0.0045 이하이므로 콘크리트의 압축파괴 형태나 GFRP 판의 인장파괴 형태는 아닌 것으로 판단된다.

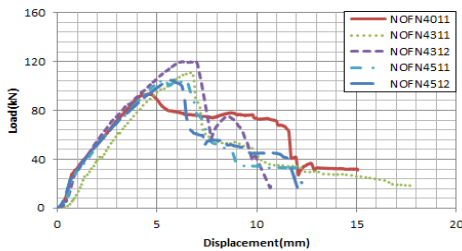


Fig. 6. Load-displacement curve of NOFN4011, NOFN4311, NOFN4312, NOFN4511 and NOFN4512

NOFN4511 및 NOFN4512는 25.05~30.01kN에서 초기균열이 관측되었으며, 96.07~100.09kN일 때 전단 균열이 관측되었고, 최대 하중은 105.31~105.34kN이다. 실험은 전단파괴 후 GFRP와 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 총 7~8개의 휨 균열이 42~208mm 간격으로 발생하였다.

NOFN4311 및 NOFN4312의 초기균열하중은 27.01~49.06kN이고, 하중 75.00~76.08kN일 때 전단 균열이 관측되었으며, 최대 하중은 111.19~120.18kN으로 나타났다. 실험 결과 전단파괴 후 GFRP와 콘크리트의 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 총 8개의 휨 균열이 75~226mm 간격으로 발생하였다.

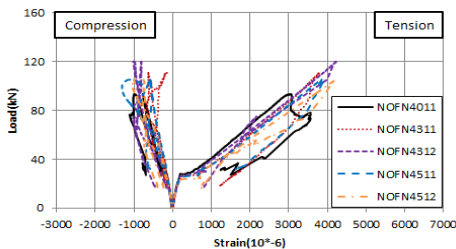


Fig. 7. Load-strain curve of NOFN4011, NOFN4311, NOFN4312, NOFN4511 and NOFN4512

천공에 대한 실험 결과 잔골재를 부착하지 않은 경우 천공간격이 촘촘할수록 최대효과를 나타냈다.

천공을 하지 않은 경우 휨 균열 발생 후 GFRP 판과 타설 콘크리트가 분리되며 미끄러짐 파괴가 발생하였다. NOFN4511 및 NOFN4512의 경우 GFRP 상부 플랜지와 콘크리트 경계면에서 전단 균열이 발생하였으며 균열이 보의 끝까지 진행되었고, 최종적으로 GFRP 판과 콘크리트가 분리되며 미끄러짐 파괴가 발생하였다. NOFN4311 및 NOFN4312인 경우 NOFN4511 및 NOFN4512인 경우와 유사하게 GFRP 상부 플랜지와 콘크리트 경계면에서 전단 균열이 발생하였지만 균열이 보의 끝까지 진행되는 않아 최대 하중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 웹에 천공을 한 경우 GFRP 판과 콘크리트가 장부효과에 의한 영향이 발생하여 높은 하중을 나타낸 것으로 판단되며, 천공간격이 조밀할수록 그 영향이 커지는 것으로 판단된다.

3.3 잔골재 부착 GFRP판 웹 천공 영향

잔골재 부착 GFRP 웹의 천공 및 간격 효과에 대한 영향을 분석하기 위하여 웹을 천공 하지 않은 경우, 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 경우를 변수로 하여 실험하였다.

Table 6. Result of perforation influence-coated

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFC4011	128.65	137.08	8.92	8.08	11	shear
NOFC4012	145.51		7.23		15	shear
NOFC4311	132.16	137.57	7.54	7.99	17	shear
NOFC4312	142.98		8.44		15	shear
NOFC4511	103.00	102.27	6.30	6.09	13	shear
NOFC4512	101.55		5.87		11	shear

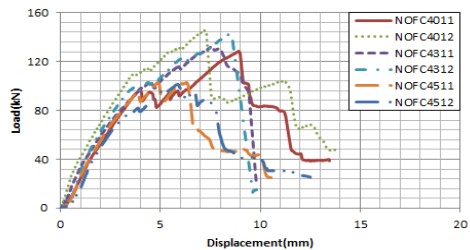


Fig. 8. Load-displacement curve of NOFC4011, NOFC4012, NOFC4311, NOFC4312, NOFC4511 and NOFC4512

Table 6 및 Fig. 8는 GFRP 판에 잔골재를 부착하고 GFRP 웹에 천공을 하지 않은 실험 시편과 직경의 3배, 5배 간격으로 천공한 실험 시편의 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 3배인 실험 결과 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 5배인 경우 최대 하중이 가장 낮게 나타났다. Fig. 9은 하중이 증가함에 따라 GFRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 인장력을 받는 실험 시편 하단부의 GFRP 변형률은 0.0045를 넘어서고 있다. NOFC4011 및 NOFC4012, NOFC4311 및 NOFC4312는 최대 하중 및 변위가 비슷하게 나타났다. NOFC4311 및 NOFC4312는 하중 43.07~49.06kN일 때 초기균열이 관측되었고, 91.01~98.08kN에서 전단 균열이 발생하였으며, 최대 하중은 132.16~142.98kN이고 전단파괴가 일어났으며, 총 15~17개의 휨 균열이 46~133mm 간격으로 발생하였다.

NOFC4511 및 NOFC4512의 초기균열하중은 43.49~47.24kN이고, 67.09~78.04kN에서 전단 균열이 발생하였으며, 최대 하중은 101.55~103.00kN이다. 실험은 전단파괴가 발생하였으며 NOFC4311 및 NOFC4312와 파괴모드가 비슷하게 나타났고, 총 11~13개의 휨 균열이 30~196mm 간격으로 발생하였다.

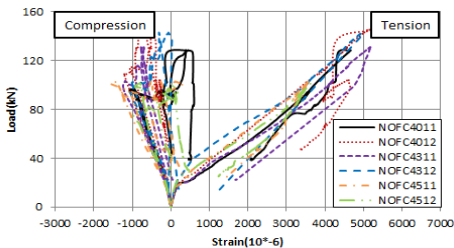


Fig. 9. Load-strain curve of NOFC4011, NOFC4012, NOFC4311, NOFC4312, NOFC4511 and NOFC4512

잔골재를 부착한 실험 시편의 결과 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 3배인 실험 결과 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 5배인 경우 최대 하중이 가장 낮게 나타났다. 천공을 하지 않은 경우 장부효과에 대한 영향은 없지만 천공을 하지 않아 GFRP 판의 강성 변화가 없고, 천공간격이 3배인 경우 GFRP 판의 강성이 많이 저하되었지만 천공간격이

좁아져 장부효과에 대한 영향이 커지면서 최대 하중이 비슷하게 나타난 것으로 판단된다. 천공간격이 5배인 경우 장부효과에 대한 영향이 미미하고 천공에 의해 강성이 저하되어 최대 하중이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

균열분포를 살펴보면 천공을 하지 않은 실험 시편의 경우 GFRP 상부 플랜지를 따라 균열이 진행되는 반면 천공을 한 실험 시편의 경우 GFRP 하부까지 균열이 진행되어 파괴에 이르렀다. 이 현상은 천공으로 인해 강성이 저하되어 균열이 하부까지 진행된 것으로 판단된다.

3.4 GFRP 상부 플랜지 영향

GFRP 상부 플랜지 폭에 대한 영향을 분석하기 위하여 GFRP 상부 플랜지 폭이 20, 40mm인 두 가지 변수를 이용하여 실험하였다.

Table 7. Results of top flange variable

Name of experiment	Load (kN)	Load average (kN)	Displacement (mm)	Displacement average (mm)	No. of flexural cracks	Failure mode
NOFC4011	128.65	137.08	8.92	8.08	11	shear
NOFC4012	145.51		7.23		15	shear
NOFC2011	117.13	117.28	6.32	6.48	12	shear
NOFC2012	117.42		6.64		12	shear

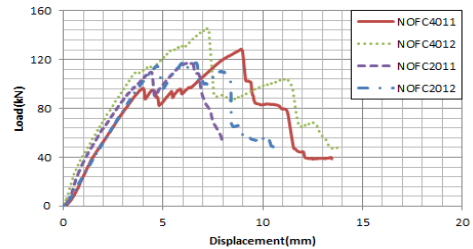


Fig. 10. Load-displacement curve of NOFC4011, NOFC4012, NOFC2011 and NOFC2012

Table 7 및 Fig. 10은 GFRP 판 하부에 잔골재를 부착하고 GFRP 상부 플랜지 폭이 40, 20mm인 실험 결과이다. 실험 결과를 살펴보면 GFRP 상부 플랜지 폭이 넓은 경우 최대 하중이 높게 나타났다. 하중이 증가함에 따라 GFRP 판과 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 11에 나타내었으며, 그림에서 보는 바와 같이 인장력을 받는 실험 시편 하단부의 GFRP 변형률은 0.0045를 넘어서고 있다.

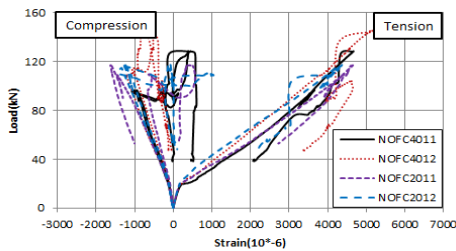


Fig. 11. Load-strain curve of NOFC4011, NOFC4012, NOFC2011 and NOFC2012

NOFC2011 및 NOFC2012의 초기균열하중은 35.16~40.26kN이고, 하중 72.14~91.29kN일 때 전단 균열이 관측되었으며, 최대 하중은 117.13~117.42kN으로 나타났다. GFRP 상부 플랜지 폭이 좁은 경우 전단파괴가 일어났으며, 총 12의 휨 균열이 36~152mm 간격으로 발생하였다.

균열분포는 GFRP 상부 플랜지 폭이 넓은 경우 전단 균열이 GFRP 하부까지 진행되며 최종 파괴에 이르렀고, 상부 플랜지 폭이 좁은 경우 전단 균열이 상부 플랜지와 콘크리트 경계면을 따라 진행되면서 최종 파괴가 발생하였다. 이 현상은 상부 플랜지 폭이 넓은 경우 상부 플랜지와 콘크리트의 부착면적이 넓어져 상부 플랜지 폭이 좁은 경우보다 균열의 진행이 작아지면서 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유리섬유 FRP 판을 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용한 전단경간비가 짧은 합성보를 대상으로 휨/전단파괴 거동을 검토한 것으로, 결과를 요약하면 다음과 같다.

GFRP판의 웨브를 천공하지 않은 경우에 잔골재 부착 영향을 위한 실험결과, 잔골재를 부착한 경우 미부착의 경우보다 약 47% 정도의 높은 극한하중 값을 보여주었다. 또한 균열분포를 살펴보면 잔골재를 부착하지 않은 시편의 경우 GFRP 판과 타설 콘크리트가 분리되며 미끄러짐이 발생하였으며, 휨 파괴 형태를 보여주고 있다. 반면 잔골재를 부착한 시편의 경우 초기 하중 단계에서 분산된 초기 휨 균열 양상을 보이다 하중이 증가함에 따라 휨 균열이 전단 균열로 진행되었으며, 전단 균열에 의

해 파괴가 발생하였다.

상부 플랜지 폭의 영향을 살펴보면 폭이 40mm인 경우가 20mm에 비해 약 17% 큰 극한하중 값을 나타냈다.

GFRP 판 웨브의 천공유무 및 간격영향에서 잔골재를 부착하지 않은 실험 결과를 살펴보면, 천공을 한 경우 최대 하중이 높게 나타났으며, 천공간격이 조밀할수록 최대 하중이 높게 나타났다. 천공을 한 경우 GFRP 판과 콘크리트의 장부효과에 대한 영향이 커지면서 최대 하중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 잔골재를 부착한 실험 시편의 결과를 살펴보면, 천공을 하지 않은 실험 시편의 최대 하중과 천공간격이 3배인 실험 결과 최대 하중이 비슷하게 나타났으며, 천공간격이 직경의 5배인 경우 최대하중이 낮게 나타났다.

Reference

- [1] K. H. Cho, S. Y. Park, J. R. Cho and B. S. Kim. "Structural systems and behavioral characteristics of an innovative FRP-concrete composite deck", *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 27, No. 3, pp. 347-357, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470121429>
- [2] L. C. Bank, *Composites construction: Structural design with FRP materials*, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006.
- [3] H. J. Joo, J. H. Jung, B. S. Kim and S. J. Yoon, "An experimental study on the Behavior of shear comecors for FRP-concrete composite deck", *Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 1-4, 2005.
- [4] N. Deskovic, T. C. Triantafillou and U. Meier, "Innovative design of FRP combined with concrete: Short-term behavior", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 7, pp. 1069-1078, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:7\(1079\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:7(1079))
- [5] L. C. Bank, M. G. Oliva, H. U. Bae, J. Barker and S. W. Yoo, "Pultruded FRP plank as formwork and reinforcement for concrete members", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 1-11, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1260/136943307782417681>
- [6] L. C. Bank, M. G. Oliva, H.U. Bae, B. V. Bindrich, "Hybrid Concrete and Pultruded-plank slabs for Highway and Pedestrian Bridges", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 4, pp. 552-558, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.002>

- [7] Y. N. Zirzba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. M. Sharif, A. K. Azad and G. J. Al-Sulaimani, "Guidelines toward the design of reinforced concrete beams with external plates", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 6, pp. 639-646, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14359/1538>
- [8] H. A. Rasheed and S. Perviaz, "Effects of FRP bond-slip on the response and design of strengthened reinforced concrete bridge beams", *Bradley Univ, Hueser Research Report*, pp. 64, 2000.
- [9] M. Erki, "Fiber-reinforced polymers for structural engineering in Canada", *Structural Eng, International*, Vol. 9, No.4, pp. 278-280, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2749/101686699780481691>
- [10] S. W. Yoo, H. U. Bae, M. Oliva and L. C. Bank, "Experimental study of concrete beam with FRP plank as formwork and reinforcement", *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 19, NO. 1, pp. 67-74, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2007.19.1.067>

유 승 운 (Seung-Woon Yoo)

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학과 (공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 합성구조, 구조물보수보강