

FRP 모듈형 박스 부재의 연결 시스템에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Connection System of FRP Modular Box Member

곽계환*,† · 장화섭** · 양동운*** · 김호선***

Kwak, Kae Hwan*,† · Jang, Hwa Sup** · Yang, Dong Woon*** · Kim, Ho Sun***

ABSTRACT

This is a basic experimental study to apply FRP modular box member to a variety of construction structures exposed to flexural strength, such as a slab and a girder. Applying FRP modular box member to a real structure requires a large section. FRP box member was made into modular systems. Tests were conducted under various conditions in order to analyze jointing performance of the developed FRP modular box member as a large section. For the methods of jointing FRP modular box member, synthetic resins connection, mechanical connection, and a combination of both were used to test both length and breadth connection. As a result of the test, using urethane + two bolts + sheets was the most efficient method of connecting FRP modular box member. It is expected that the proposed joint system in this study will contribute to the increase of failure load and synthesis behavior of FRP modular box member.

Keywords: FRP box member; modular; connection method

1. 서 론

FRP (Fiber Reinforced Polymer)재료는 비부식, 고내구성을 지닌 재료로써, 물을 필수적으로 다루는 농업, 어업등의 분야에 저탄소 친환경소재로 활용 가능성을 지니고 있다. FRP 구조 부재를 건설에 이용하기 위해서는 일정한 단면 형상을 가진 모듈러 (Modular System)로 제작하여 용도에 맞게 절단해 연결하여야 하며, 이는 현장수송 및 시공시간을 획기적으로 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나, 모듈러를 통해 구조 부재를 연결할 경우 완전합성 거동을 할 수 있는 연결시스템이 이루어져야 하며, 파괴하중 및 파괴모드 등의 역학적 거동의 파악이 선행되어야 한다. Han et al. (2006) and Neely (2004)는

이러한 FRP 모듈러를 이용하여 교량 바닥판을 건설하기 위한 연구가 진행하였으며, 실 구조에 적용한 사례도 보고되고 있다.

본 연구는 다양한 건설 구조물 중 휨 응력을 받는 부재인 슬래브, 거더 등에 FRP 모듈형 박스 부재를 적용하기 위한 기초 실험적 연구이다. 기존의 콘크리트나 강재에서 나타난 많은 문제점 등을 보완하기 위하여 건설 휨 부재를 FRP 모듈형 박스 부재로 대체함으로써 구조물의 역학적 성능을 향상시키고자 한다. FRP 모듈형 박스 부재를 실 구조물에 적용하기 위해서는 대형 단면이 필수적이다.

FRP 모듈형 박스 부재의 설계 단면은 Jung (2008), Sung (2008), Kwak et al. (2004) 등이 제안한 단면을 사용하였으며, Jung (2008), Sung (2008)의 실험에서 나타난 FRP 모듈형 박스 부재의 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 사용재료 중 유리섬유 함유량을 10 %정도 더 보강하여 제작하였다. 이렇게 완성된 FRP 모듈형 박스 부재의 대형단면으로서의 연결성능 특징을 분석하기 위하여 다양한 조건으로 실험을 수행하였다. FRP 모듈형 박스 부재의 연결방법에는 합성수지 연결, 기계적 연결 그리고 혼합적 연결 방법을 이용하여 가로 방향과 세로방향에 대해 각각 연결실험을 실시하였다. 합성수

* 원광대학교 토목환경·도시공학부 교수·공학박사

** 한국건설기술연구원 구조교량연구실 공학박사

*** 원광대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

† Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6720

Fax: +82-0505-850-6867

E-mail address: kkh6720@wku.ac.kr

2009년 6월 9일 투고

2009년 7월 21일 심사완료

2009년 7월 24일 게재확정

Table 1 Basic physical of FRP modular box member

	Compressive strength (MPa)		Tensile strength (MPa)	
	Fiber direction	Fiber right angle direction	Fiber direction	Fiber right angle direction
Average strength	400.7	127.5	365.7	105.0

지 연결방법에서는 접착제 수지를 변수로 하여 실험을 실시하였으며, 기계적 연결방법에서는 볼트의 개수를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 혼합적 연결방법에서는 합성수지 연결방법과 기계적 연결방법에 더불어 FRP 시트를 감싸는 방법을 함께 사용하였다. 시험체들은 연결부 파괴가 유도되도록 제작하여 실험을 수행하였으며, 실험결과를 분석하여 최적의 연결방법을 제안하였다. 아래 Table 1은 FRP 모듈형 박스 부재의 기본물성값을 나타내었다.

II. 실험 개요

1. 개요

FRP 모듈형 박스 부재의 단면을 대형 구조물에 적용하기 위해서는 대형화가 필수적이다. FRP 재료의 경우 국내 설비 및 생산 기술이 다소 부족하여 현재까지는 FRP 구조 부재 단면의 대형화가 사실상 불가능하다. 현재 국내에서 생산 가능한 최대 단면은 160×300 mm로서 이러한 단면의 연결을 통하여 대형화를 추진해야 한다. 이에 본 연구에서 FRP 모듈형 박스 부재의 연결을 합성수지를 이용한 방법, 기계적인 방법 그리고 혼합적인 방법등 크게 3가지 방법을 적용하였다. 3가지 방법에 의해 제작된 연결부 파괴실험 시험체는 동일한 조건에 의해 파괴실험을 실시하여 그 결과 값을 분석하였다. FRP 모듈형 박스 부재의 연결시스템 시험체 개수 및 실험 변수는 아래 Table 2와 같다. FRP 모듈형 박스 부재의 크기는 160×300×200 mm 3개를 1set로 하여 세로연결과 가로연결로 각각 2종류로 제작하였다. 연결부 실험에 사용된 FRP 모듈형 박스 부재의 단면은 Fig. 1과 같다. 시험체의 접합부의 파괴를 유도하기 위하여 하중 가력을 조정하였으며, 하중이 가려지는 중앙의 모듈에 콘크리트를 충전함으로써 국부좌굴에 의한 파괴를 미연에 방지하였다.

2. 실험방법 및 센서부착위치

FRP 모듈형 박스 부재의 합성수지 연결 시스템 시험체는 3개의 모형이 1set로 구성되었으며, 중앙에 위치한 모형에 하중을 가력하였다. 하중재하 속도는 1±0.5 mm/min로 변위제어

Table 2 Connection system specimens and parameters

Type	Size (mm)	Number	Parameters
Connection system of synthetic resins	160×300×200	24	<input type="checkbox"/> Urethane <input type="checkbox"/> Epoxy
Connection system of mechanical		24	<input type="checkbox"/> Bolt 1EA <input type="checkbox"/> Bolt 2EA
Connection system of combination		48	<input type="checkbox"/> Epoxy+ sheet <input type="checkbox"/> Urethane+ sheet <input type="checkbox"/> Bolt+ sheet

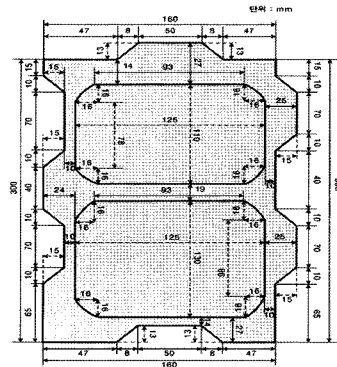


Fig. 1 A design drawing of FRP modular box member

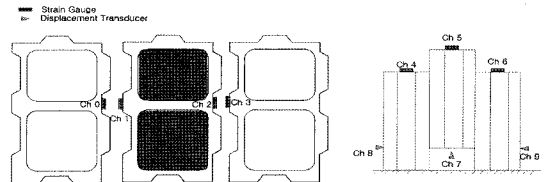


Fig. 2 Location on attached sensor of breadth connection specimens

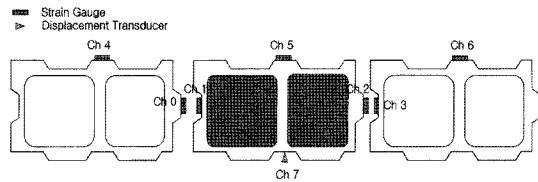


Fig. 3 Location on attached sensor of length connection specimens

방식으로 시험체가 완전히 파괴에 도달 할 때까지 하중을 재하하였다. 3개의 FRP 모듈형 박스 부재 동일 연결지점에 변형률 센서를 부착하여 합성 거동을 파악하였으며, 하중 증가에 따른 변형률 분포를 확인하기 위하여 각 부재 상부에 변형률 센서를 부착하였다. 또한, 변위 센서를 각각 설치하여 슬립정도를 파악하였다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 변형률 센서를 FRP 각 부재의 동일 연결지점 (Ch0=Ch1, Ch2=Ch3) 합성정도를, FRP

부재 상부 (Ch4 ~ Ch6)는 하중 분배정도를 파악하기 위하여 센서를 부착하였다. 또한, 변위센서는 FRP 모듈형 박스 부재 연결부의 슬립정도를 파악하고자 하였다.

III. 합성수지 연결 방법에 의한 연결부 파괴실험

1. 시험체 제작 및 실험 개요

합성수지 방법에 의한 연결부 파괴 실험을 변수로 FRP 구조 부재의 접착용으로 가장 많이 사용되는 접착용 수지 즉, 에폭시와 우레탄 2종류로 하였다. 에폭시수지는 경화 후의 기계적인 특성이 뛰어난 데다가 접착력이 강하고, 내열성, 전기절연 특성이 뛰어나 공업, 건축, 전기등 전산업 분야에 널리 이용되고 있으며, 우레탄수지는 NCO성분과 활성수소화합물 및 첨가제로 구성되며 접착성, 내열성, 내구성등에 우수하여 방화, 방

열문 생산업체에서 널리 이용되고 있다. 본 실험에서는 약 3 mm의 두께로 수지를 발라 연결하였으며, 약 2주간 자연건조를 실시하였다. 시험체의 제작 개요 및 완성된 시험체를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었으며, 시험체의 명명과 변수를 Table 3에 나타내었다.

2. 실험결과

FRP 모듈형 박스 부재의 연결 방법 중 합성수지 연결 즉, 에폭시와 우레탄을 이용한 연결부 파괴실험에 대한 결과를 정리하면 아래 Table 4와 같다. 합성물은 시험체의 동일 지점에 부착된 변형률 센서의 값의 차이에 의해 산출하였으며, 100 % 일 경우 완전합성 거동을 나타내는 것으로 평가하였다.

가. 에폭시에 의한 연결

에폭시 연결방법에 의한 시험체의 파괴형태를 분석해 보면 가로연결과 세로 연결 모두 접착부의 슬립에 의한 연결 부분의 탈락에 의한 파괴를 나타내었다. 접착제의 경우 시험체간의 마찰력 부족으로 쉽게 슬립 파괴가 발생되었다.

에폭시에 의한 연결시스템에서의 파괴는 다소 낮은 하중에 의한 파괴가 발생되었다. 합성거동을 분석해 보면 완전 합성 거동이 아닌 55 ~ 63 % 정도의 부분 합성 거동을 나타내었다. 동일 연결지점에 부착된 변형률 값이 일치하지 않고 다소 차이를 나타내고 있으며, 하중 증가에 따른 변형률 분포 값 또한 좌우 대칭이 아닌 비대칭 형상으로서 하중 전이 현상이 완전하지 않은 것으로 분석되었다. 또한, 하중 변위 곡선을 살펴보면 모든 시험체에서 선형, 탄성거동을 나타내고 있다. 가로 연

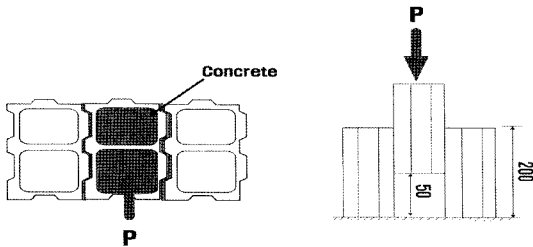


Fig. 4 Connection parameters of breadth connection specimens

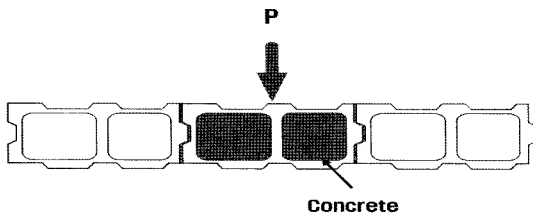


Fig. 5 Connection parameters of length connection specimens

Table 3 Synthetic resins connection system specimens and parameters

Type	Connection form	Connection system	Note
Epoxy-breadth-1	Breadth	Epoxy	
Epoxy-breadth-2			
Epoxy-length-1	Length	Epoxy	
Epoxy-length-2			
Urethane-breadth-1	Breadth	Urethane	
Urethane-breadth-2			
Urethane-length-1	Length	Urethane	
Urethane-length-2			

Table 4 Results of synthetic resins connection system testing

Type	Fracture load (kN)	Degree of connection (%)	perpendicularity displacement (mm)	Width displacement (mm)
Epoxy-breadth-1	66.1	59.0	6.5	0.8
Epoxy-breadth-2	60.4	68.0	6.1	0.8
Average	63.3	63.5	6.3	0.8
Epoxy-length-1	22.2	55.0	3.2	-
Epoxy-length-2	24.8	56.0	3.1	-
Average	23.5	55.5	3.1	-
Urethane-breadth-1	84.1	70.0	7.4	0.9
Urethane-breadth-2	80.7	71.0	7.2	1.1
Average	82.4	70.5	7.3	1.0
Urethane-length-1	39.6	65.0	4.5	-
Urethane-length-2	35.6	62.0	4.2	-
Average	37.6	63.5	4.3	-

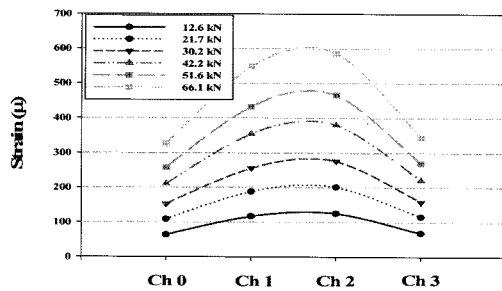


Fig. 6 Strain distribution of load application (Epoxy-Breadth-1 specimens)

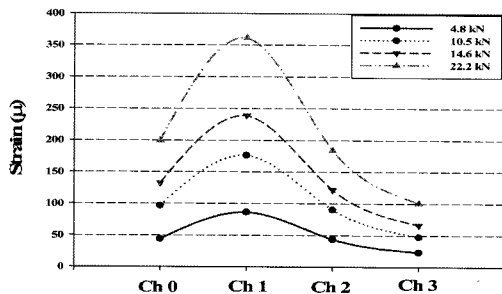


Fig. 7 Strain distribution of load application (Epoxy-Length-2 specimens)

결의 경우 파괴하중은 평균 63.3 kN, 최대 종변위는 6.3 mm, 최대 횡변위는 0.8 mm로 분석되었다. 세로연결의 경우 파괴하중은 23.5 kN, 최대 종변위는 3.1 mm로 분석되었다.

아래의 Fig. 6와 Fig. 7에서 보는 바와 같이 가로연결, 세로연결 모두 동일 연결지점 (Ch0=Ch1, Ch2=Ch3)에 부착된 변형률 값이 차이를 나타내고 있어 부분합성거동을 나타냄을 확인할 수 있었다.

나. 우레탄에 의한 연결

우레탄 연결에 의한 시험체의 파괴형태를 분석해 보면 우레탄을 이용한 연결 방법도 에폭시의 방법과 동일하게 가로연결, 세로연결 모두 접착부의 슬립에 의한 연결 부분 탈락에 의한 파괴가 발생되었다.

우레탄에 의한 연결부 파괴실험 결과 에폭시에 의한 연결방법과 비교해 볼때 파괴하중은 다소 증가하였다. 또한, 합성률을 분석해 보면 우레탄 역시 완전 합성 거동을 나타내지 않았으나, 합성률이 약 63~70 %정도인 것으로 분석되었다. 우레탄을 이용한 연결방법에서 동일 연결지점에 부착된 변형률 값이 차이를 보이고 있으며, 하중 증가에 따른 변형률 분포 역시 좌우 대칭이 아닌 비대칭 형상으로 하중 전이가 불완전한 것으로 분석되었다. 가로연결의 경우 파괴하중은 82.4 kN, 최대 종변위 7.3 mm, 최대 횡변위 1.0 mm로 분석되었으며, 세로연

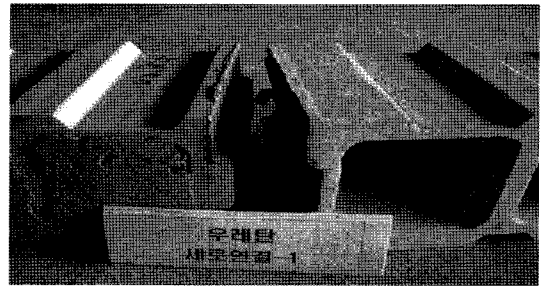


Fig. 8 Length connection specimens of urethane

결의 경우 파괴하중 37.6 kN, 최대 종변위 4.3 mm로 분석되어 에폭시에 비해 파괴하중이 약 23~37 % 정도 증가됨을 확인할 수 있었다. 세로연결 시험체의 파괴 양상을 Fig. 8에 나타내었다.

IV. 기계적 연결 방법에 의한 연결부 파괴실험

1. 시험체 제작 및 실험개요

Park (2007)의 실험결과 FRP 모듈형 박스 부재의 연결방법 중 일반적으로 성능이 가장 우수한 것은 볼트에 의한 기계적 연결방법이다. 일반적으로 FRP 바닥판에서 바닥판과 거더와의 연결을 볼트에 의해 주로 이루어지고 있으나, 볼트에 의한 연결 방법은 FRP 부재 자체에 손상을 가하므로 주의를 요하는 방법이다. 본 연구에서는 일반적으로 볼트 자체의 파괴가 일어날 경우를 고려해 고장력 볼트가 아닌 직경 15 mm인 일반 볼트를 상하부 웹 중앙부분에 연결하여 볼트의 개수를 변수로 한 연결부 파괴실험을 실시하였다.

기계적 연결 방법에 의한 연결부 파괴실험을 위한 변수로 볼트의 개수 즉, 1개와 2개의 볼트에 의한 연결부 구조거동을 파악하였다. 기타 실험방법 및 센서의 부착위치는 합성수지 연결방법과 동일하게 실시하였다. 기계적 방법에 의한 실험 광경을 아래 Fig. 9에 나타내었다.

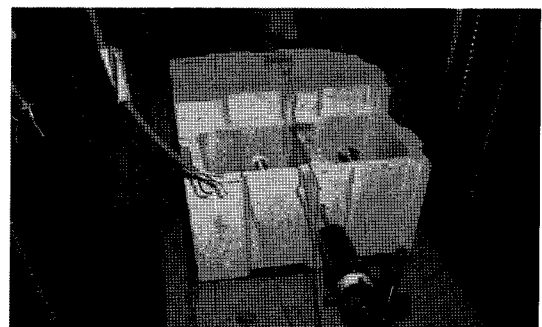


Fig. 9 Test of mechanical connection

Table 5 Results of mechanical connection system testing

Type	Fracture load (kN)	Degree of connection (%)	perpendicularity displacement (mm)	Width displacement (mm)
Bolt 1-breadth-1	104.6	27.0	14.2	1.5
Bolt 1-breadth-2	100.8	25.0	13.5	1.3
Average	102.7	26.0	13.8	1.4
Bolt 1-length-1	57.3	22.0	8.2	-
Bolt 1-length-2	52.6	26.0	7.6	-
Average	54.9	24.0	7.9	-
Bolt 2-breadth-1	157.2	46.0	15.8	1.9
Bolt 2-breadth-2	160.5	49.0	15.0	2.1
Average	158.8	47.5	15.4	2.0
Bolt 2-length-1	71.3	36.0	7.5	-
Bolt 2-length-2	81.3	38.0	7.6	-
Average	76.3	37.0	7.5	-

2. 실험결과

FRP 모듈형 박스 부재의 기계적 방법에 의한 연결부 파괴 실험결과를 종합적으로 정리하면 아래 Table 5와 같다.

가. 볼트 1개에 의한 연결 방법

파괴형태를 분석해보면 가로연결의 경우 FRP 모듈형 박스 부재의 연결부 파단에 앞서 먼저 볼트가 파단되었다. 본 시험체에 사용된 볼트가 고장력 볼트가 아닌 일반 볼트 (264 MPa)를 사용하여 시험체 (400 MPa)보다 앞서 볼트가 파단된 것으로 판단된다. 볼트의 파괴형태는 전단파괴로써 추후 고장력 볼트를 사용할 경우 파괴하중을 좀 더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 파괴시 섬유층의 파단과 함께 섬유층간의 구속효과에 의해 파괴하중이 합성수지 연결 방법보다 높게 측정되었다. 세로연결의 경우 연결부 파단이 아닌 복부부분에서 볼트의 파괴가 발생되었으며, 가로 연결과 비슷하게 섬유층의 구속효과에 의해 파괴하중이 합성수지 연결 방법보다 약 10 % 정도 증가하였다.

볼트 1개에 의한 연결부 파괴 실험 결과 합성수지 연결 방법보다 파괴하중이 약 20~34 % 정도 증가하였으나, 합성 거동의 경우 합성수지 연결 방법에 비해 절반정도 떨어지는 것으로 분석되었다. 가로 연결의 경우 파괴하중이 102.7 kN, 합성률은 26 % 정도, 최대 종변위는 13.8 mm, 최대 횡변위는 1.4 mm로 분석되었다. 세로연결의 경우 파괴하중이 54.9 kN, 합성률은 24 %, 최대 종변위는 7.9 mm로 분석되었다.

볼트 1개에 의한 연결시험체의 하중 증가에 따른 하중 분배 정도를 살펴보면 Fig. 10과 같이 3개의 FRP 모듈형 박스 부재에서 오른쪽 부재가 왼쪽 부재보다 좀 더 많은 하중을 전이

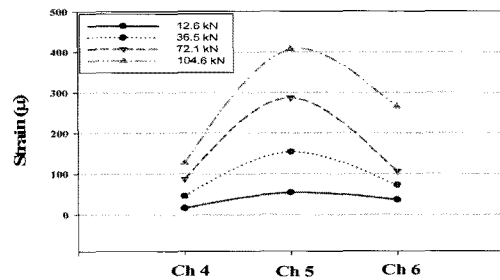


Fig. 10 Strain distribution of load application (Bolt 1-Breadth-1 specimens)

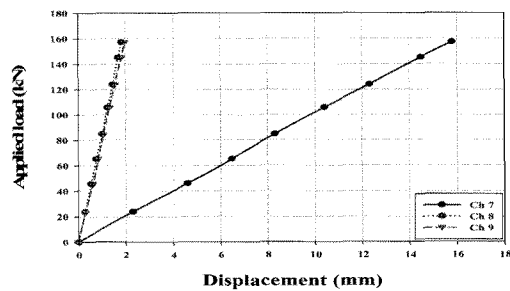


Fig. 11 Load-displacement curves (Bolt 2-Breadth-1 specimens)

한 것으로 분석되었다. 즉, 완전합성 거동이 이루어지지 않아 분배에 차이를 나타내고 있었다.

나. 볼트 2개에 의한 연결 방법

볼트 2개에 의해 연결된 시험체의 파괴형태를 분석해 보면 볼트 1개에 의한 연결 방법보다 볼트 2개에 의한 연결 시스템이 파괴하중 증가에 효율적이며, 볼트 2개에 의한 연결 시스템의 경우 일반 볼트를 사용해도 무방하다. 또한, 본 FRP 모듈형 박스 부재 3개를 1set로 연결시킬 경우 볼트 2개의 연결이 파괴하중 측면에서 적정함을 확인할 수 있었다.

볼트 2개에 의한 연결부 파괴 실험 결과 볼트 1개에 비해 FRP 모듈형 박스 부재의 합성률은 약 1.5배정도 증가됨을 확인할 수 있었다. 또한, 파괴하중이 볼트 1개에 비해 약 2배정도 증가하였으나, 합성률은 합성수지 연결 방법보다는 크게 떨어지는 것으로 분석되었다. 볼트에 의한 FRP 모듈형 박스 부재의 연결 시 볼트의 개수를 증가할 경우 합성률은 증가하겠으나, 파괴하중의 증가 기대는 어려울 것으로 판단된다. 파괴하중은 볼트 2개일 경우 가장 적정한 것으로 판단된다. 볼트 2개의 연결 중 가로연결의 경우 파괴하중이 518.8 kN, 합성률은 47.5 %, 최대 종변위 15.4 mm, 최대 횡변위 2.04 mm로 분석되었으며, 세로 연결의 경우 파괴하중 76.3 kN, 합성률 37.0 %, 최대 종변위 7.5 mm로 분석되었다.

V. 혼합적 연결 방법에 의한 연결부 파괴실험

1. 시험체 제작 및 실험 개요

본 혼합적 연결 방법은 앞에서 수행한 합성수지 연결 방법과 기계적 연결 방법에 철근콘크리트 보의 보강재로 많이 사용되고 있는 FRP 시트를 감싸는 방법으로서, FRP 시트의 구속에 의한 파괴하중 및 합성률의 변화를 파악하고자 하였다. 혼합적 연결방법에 의한 연결부 파괴실험을 위한 변수를 에폭시+시트, 우레탄+시트, 볼트1개+시트, 볼트2개+시트로서 순수 합성수지 연결일 경우와 순수 기계적 연결일 경우와의 비교를 통하여 FRP 시트의 효과를 확인하고자 하였다. FRP 시트는 모든 시험체에 약 2 mm 정도의 두께를 갖도록 감싸주었다. 기타 실험 방법 및 센서의 부착위치는 앞에서 수행한 실험과 모두 동일하게 하였으며, 시험체는 변수당 1set로 제작하여 실험을 수행하였다.

2. 실험결과

FRP 모듈형 박스 부재의 연결 방법 중 혼합적 연결인 에폭시+시트, 우레탄+시트, 볼트1개+시트, 볼트2개+시트에 대한 연결부 파괴실험 결과를 정리하면 아래 Table 6과 같다.



Fig. 12 Test of combination connection

Table 6 Results of combination connection system testing

Type	Fracture load (kN)	Degree of connection (%)	Perpendicularity displacement (mm)	Width displacement (mm)
Epoxy+ sheet breadth-1	68.2	68	4.9	1.0
Epoxy+ sheet length-1	31.2	56	3.8	-
Urethane+ sheet breadth-1	77.4	72	4.1	0.6
Urethane+ sheet length-1	47.2	65	3.5	-
Bolt 1+ sheet breadth-1	106.2	29	9.1	3.3
Bolt 1+ sheet length-1	59.2	32	4.1	-
Bolt 2+ sheet breadth-1	161.7	45	9.2	1.3
Bolt 2+ sheet length-1	71.2	37	4.5	-

가. 에폭시+시트에 의한 연결 방법

에폭시와 시트에 의해 연결된 시험체의 파괴형태를 분석해 보면, 파괴 초기에는 에폭시만 연결했을 경우와 비슷하게 접착 부에서 슬립이 발생되다가 FRP 시트의 구속에 의해 파괴 하중이 조금씩 상승하면서 시트의 파단과 동시에 시험체가 분리되었다.

에폭시+시트에 의한 연결시스템의 경우 순수 에폭시만으로 연결했을 때 보다 FRP 시트의 구속효과에 의해 파괴하중이 조금 상승되었다. 합성률의 경우 순수 에폭시만으로 연결했을 때 보다 조금 상승되었으나 이는 실험이나 시험체 제작시에 발생하는 오차 및 경제성 등을 고려한다면 영향이 크지 않는 것으로 판단된다. 에폭시+시트에 의한 연결 중 가로연결의 경우 파괴하중이 68.2 kN, 합성률 68 %, 최대 종변위 4.9 mm, 최대 횡변위는 1.0 mm로 분석되었으며, 세로연결의 경우 파괴하중 31.2 kN, 합성률 56 %, 최대 종변위 3.8 mm로 분석되었다.

에폭시+시트에 의한 연결 시스템의 경우에도 아래 Fig. 13에서 보는바와 같이 동일 연결지점에 변형률 값이 서로 상이한 값을 나타내고 있었다.

나. 우레탄+시트에 의한 연결 방법

우레탄+시트에 의해 연결된 시험체의 파괴형태를 분석해 보

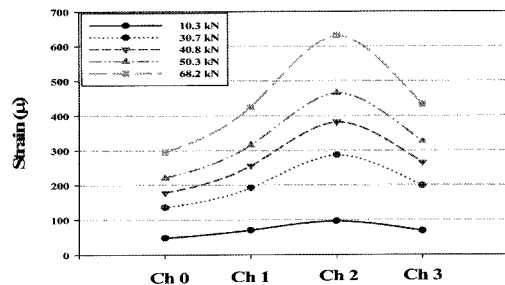


Fig. 13 Strain distribution of load application (Epoxy+Sheet-Breadth connection specimens)

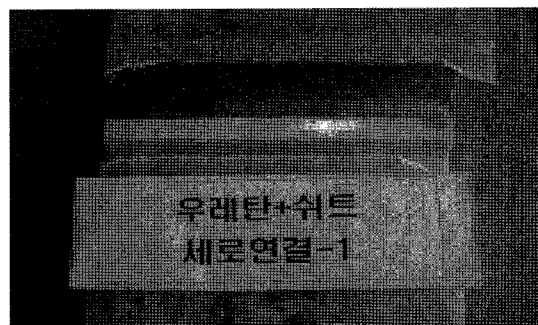


Fig. 14 Length connection specimens of urethane + sheet

면 순수 우레탄으로 연결했을 경우보다는 파괴하중이 증가되었으며, 파괴형태는 에폭시 + 시트에 의한 시험체와 동일하게 FRP 시트의 파단과 함께 파괴가 발생되었다.

우레탄 + 시트에 의한 연결시스템의 경우 순수 우레탄만으로 연결했을 때보다 가로연결의 경우 파괴하중이 다소 낮게 측정되었는데, 이는 FRP 모듈형 박스 부재의 시험체 제작 및 시험 시 실수 등에 의한 오차에 의한 것으로 판단된다. 그러나, 세로연결의 경우 역시 순수 우레탄만으로 연결했을 때보다 파괴하중이 약 11 kN 정도 상승되었으며, 합성률의 경우에는 FRP 시트에 의해 약 10 % 정도 증가되었다. 우레탄 + 시트에 의한 연결 중 가로연결의 경우 파괴하중이 77.4 kN, 합성률 72 %, 최대 종변위 4.1 mm, 최대 횡변위는 0.6 mm로 분석되었으며, 세로연결의 경우 파괴하중 47.2 kN, 합성률 65 %, 최대 종변위 3.5 mm로 분석되었다.

다. 볼트 1개 + 시트에 의한 연결 방법

볼트 1개 + 시트에 의해 연결된 시험체의 파괴형태를 분석해 보면 가로연결과 세로연결 모두 볼트의 휨에 의한 FRP 모듈형 박스 부재의 파손이 발생되다가 볼트의 파괴가 발생한 후 시트 부분의 파괴가 발생되었다. 볼트 1개 + 시트에 의한 연결시스템의 경우 볼트 1 개로 연결했을 때 가로연결과 세로연결 모두 파괴하중이 다소 증가되었으며, 합성률 또한 아주 조금 상승됨을 확인하였다. 볼트 1개 + 시트에 의한 연결 중 가로연결의 경우 파괴하중이 106.2 kN, 합성률 29 %, 최대 종변위 9.1 mm, 최대 횡변위는 3.3 mm로 분석되었으며, 세로연결의 경우 파괴하중 59.2 kN, 합성률 32 %, 최대 종변위 4.1 mm로 분석되었다.

라. 볼트 2개 + 시트에 의한 연결 방법

볼트 2개 + 시트에 의해 연결된 시험체의 파괴형태를 분석해 보면, 볼트 2개만으로 연결했을 경우와 비슷하게 볼트의 파손보다는 FRP 모듈형 박스 부재의 복부 쪽에서 먼저 파괴가 발생된 후 FRP 시트가 파괴되었다. 파괴시 모든 시험체가 항복점이 없는 취성파괴가 발생되었다.

볼트 2개 + 시트에 의한 연결시스템의 경우 역시 볼트 2개로 연결했을 때 가로연결과 세로연결 모두 파괴하중이 다소 증가되었으나, 합성률이 조금 감소되었다. 이는 시험체 제작에 따른 오차로 판단되며, 시험체 제작시 철저한 품질관리가 필요할 것으로 판단된다. 볼트 2개 + 시트에 의한 연결 중 가로연결의 경우 파괴하중이 161.7 kN, 합성률 45 %, 최대 종변위 9.2 mm, 최대 횡변위는 1.3 mm로 분석되었으며, 세로연결의 경우 파괴하중 71.2 kN, 합성률 37 %, 최대 종변위 4.5 mm로 분석되었다.

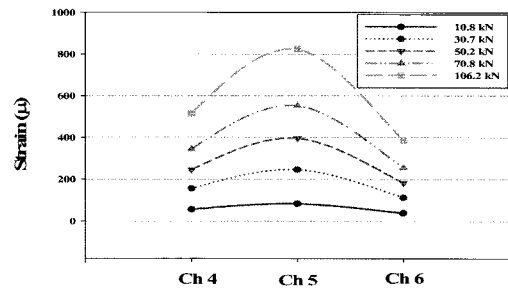


Fig. 15 Strain distribution of load application (Bolt 1+Sheet-Breadth connection specimens)

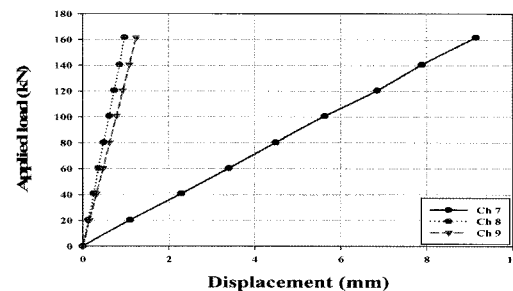


Fig. 16 Load-Displacement curves (Bolt 2+Sheet-Breadth connection specimens)

VI. 결 론

이상의 실험 결과들을 종합적으로 정리하면 아래 Fig. 17~ Fig. 19와 같다. 파괴하중 측면에서는 볼트 2개를 사용하는 것이 가장 바람직하며, 합성효과 측면에서는 우레탄을 사용하는 것이 효율적이다. 따라서, 추후 FRP 모듈형 박스 부재 연결 시에는 우레탄과 함께 볼트 2개와 시트를 함께 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

1. FRP 모듈형 박스 부재의 합성수지 연결 방법의 경우 매우 낮은 하중에서 슬립에 의한 파괴가 발생되었으나, 합성률은 우수한 것으로 분석되었다. 또한, 에폭시와 우레탄 중 우레탄이 에폭시에 의한 연결방법보다 성능이 더 우수한 것으로 분석되었다.

2. FRP 모듈형 박스 부재의 기계적 연결방법의 경우 다소 높은 하중에서 파괴가 발생되었으나, 합성률은 상당히 낮은 것으로 분석되었다. 일반적으로 160×300×200 mm의 FRP 모듈형 박스 부재에 기계적 연결방법을 적용할 경우 일반볼트 2개를 사용하는 것이 적절한 것으로 분석되었다.

3. FRP 모듈형 박스 부재의 혼합적 방법의 경우 FRP 시트에 의해 FRP 모듈형 박스 부재의 요철단면을 직사각형 단면으로 단순화 할 수 있었으며, 시트의 구속효과에 의해 파괴하중 및 합성률이 증가되었다.

4. FRP 모듈형 박스 부재의 효율적인 연결은 우레탄을 이용

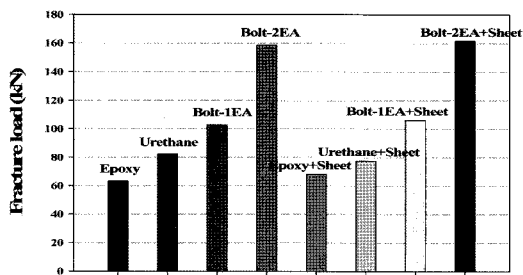


Fig. 17 Fracture load of breadth connection specimens

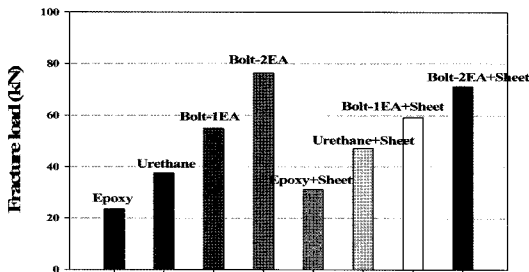


Fig. 18 Fracture load of length connection specimens

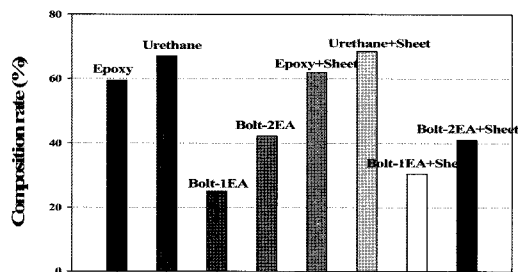


Fig. 19 Comparison on composition rate

하여 일차적으로 연결을 실시한 후 일반 볼트 2개를 추가로 연결시키고 마지막으로 FRP 시트를 감싼다면 가장 효율적인 연결방법이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 FRP 모듈형 박스 부재의 우레탄과 볼트, FRP 시트에 의한 연결방법의 경우 소형 부재의 연결시스템에 관한 기초적 연구로서 대형 부재일 경우 볼트 개수 및 간격, 볼트 연결부 파괴모드 해석 및 검증, 시트의 적용 범위 등에 대한 후속 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 단, FRP 시트의 경우 파괴하중 및 합성효과가 경제성 대비 큰 효능을 나타내지는 못해 지점부에만 보강해도 관촬을 것으로 판단된다.

본 연구는 2009년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Han, B. K., G. H. Hong, and K. S. Kim, 2006. A study on the application case in civil structures of fiber reinforced composites (bridges), *Korean Society of Civil Engineers*, 50(7): 27-31 (in Korean).
2. Jung, H. S., 2008. The development of fiber reinforced polymer composite girder, Wonkwang University a doctoral dissertation (in Korean).
3. Kwak, K. H., J. S. Sim, D. Y. Moon, and H. S. Jang, 2004. The development on hybrid FRP rod and its tensile properties, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 527-533 (in Korean).
4. Neely, W. D., 2004. Evaluation of in-service performance of the tom's creek bridge fiber-reinforced polymer superstructure, Virginia Transportation Research Council.
5. Park, Y. C., 2007. A study on the strength and fatigue characteristics of FRP decks using the bolted connection system, Suwon University a doctoral dissertation (in Korean).
6. Sung, B. K., 2008. The fracture behavior of FRP+ concrete composite girder, Wonkwang University a doctoral dissertation (in Korean).