



지속하중을 받는 탄소섬유판의 장기 거동

유영찬^{1)*} · 최기선¹⁾ · 김궁환¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 건축구조·자원연구실

Long-Term Behavior of CFRP Strips under Sustained Loads

Young-Chan You,^{1)*} Ki-Sun Choi,¹⁾ and Keung-Hwan Kim¹⁾

¹⁾Building Structure & Resource Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT Experimental study was performed to evaluate the long-term behavior of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) strips under sustained loads including prestressing force in strengthening RC members with post-tensioned CFRP strips. Two types of CFRP strip such as unidirectional CFRP strip and hybrid CFRP strip which is composed of carbon fiber and steel plate were considered. Also two types of loading scheme were included in this study. Direct sustained loading test had been carried out to estimate the creep deformation and relaxation of CFRP strips including slip deformation at both mechanical anchorages for over 700 days. Also, flexural sustained loading test had been conducted to estimate the initial prestress losses on clamping the CFRP strips at jacking anchorages for over 90 days. From the sustained loading tests, it was observed that stress losses of unidirectional CFRP strips due to the creep deformation and relaxation of material itself and slip deformation at mechanical anchorage were ignorable. On the other hand, significant stress losses caused by the yielding of steel embedded in CFRP strips were found in case of hybrid CFRP strips due to the initial jacking force over steel yielding stress. Also, initial prestress losses during setting of CFRP strips on mechanical anchorage were about 10% of initial jacking force, which must be considered in the design.

Keywords : CFRP strips, external prestressing, sustained loads, prestress loss, creep

1. 서 론

콘크리트구조에서 강재의 부식문제를 근본적으로 보완하기 위하여 제안된 FRP 보강재는 콘크리트구조물에 대한 보강분야 뿐만 아니라 신설구조물의 철근 및 강연선을 대체하기 위한 분야로의 적용을 위해 지속적으로 연구되고 있다.¹⁾ 즉, 신소재인 FRP의 개발로 인하여 기존의 강관을 이용한 보강공법이 외부부착형 FRP를 이용한 공법으로 급격히 대체되고 있으며, FRP의 보강형태도 초기에 슈트형으로 개발된 FRP 보강공법이 현장품질관리 측면에서 우수한 플레이트형 FRP 보강공법으로 발전되었다. 이에 따라 각국에서 FRP를 이용한 구조물 보강기술의 적용을 위한 기술지침서가 제정되어 보급되고 있다.²⁻⁶⁾ 이러한 연구개발의 한 분야로서 최근에는 FRP 보강재에 외부 프리스트레스를 도입한 보강기술에 관한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다.⁷⁻⁹⁾ 이러한 일련의 연구중에서 지속하중에 대한 FRP 보강재의 장기거동을 평가하기 위한 연구가 시도되고 있으나, 그 연구실적은 미

미한 것으로 조사되고 있다.

한편, PSC구조에서 FRP 긴장재는 통상적으로 부착시스템 (bonded system)으로 설계되며, 철근 대용재로 개발되는 FRP 봉 또한 콘크리트 내에 매립되어 완전부착으로 거동하므로 지속하중에 대한 장기거동의 영향은 그다지 크지 않은 것으로 고려되고 있다. 그러나, PSC 구조를 비부착시스템 (unbonded system)으로 적용할 경우에는 그라우팅의 생략으로 인한 시공의 간편성뿐만 아니라 재긴장을 할 수 있는 장점이 있어 FRP 긴장재에 의한 PSC 구조에서는 비부착시스템을 적극적으로 검토하고 있다. 이와 같이 비부착시스템으로 PSC 구조를 설계할 경우에는 특히 FRP 긴장재의 장기거동에 대한 평가가 특별히 요구된다. 더욱이 PSC 구조에서 강연선을 대체하고자 개발되고 있는 FRP 긴장재의 경우는 재료 설계강도의 50% 이상까지 상시하중을 부담하는 경우를 상정하여 설계되어야 하므로 특히 중요한 평가항목으로 등장하게 된다.

국내에서 개발단계에 있는 외부 프리스트레스 탄소섬유판에 의한 보강기술¹⁰⁻¹²⁾에서도 콘크리트와 탄소섬유판의 부착 여부에 따라 부착/비부착시스템 (bonded/unbonded system)으로 설계가 가능하며, 비부착시스템을 적용할 경우에는 프리스트레스에 의한 장기 지속하중에 대한 검토

*Corresponding author E-mail : yeyou@kict.re.kr
Received March 20, 2008, Revised August 22, 2008
Accepted March 12, 2009
©2009 by Korea Concrete Institute

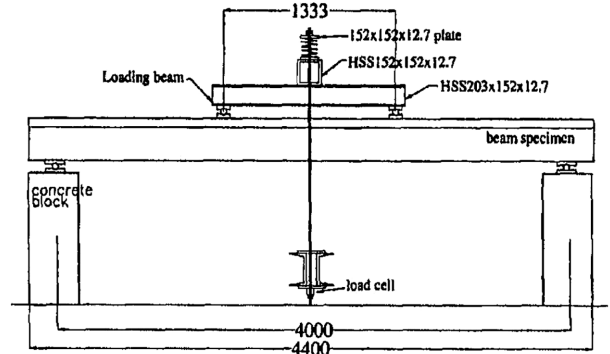
가 필요하게 된다. 또한 기존연구¹³⁻¹⁶⁾에서는 주로 단기하중에 대한 강도평가 부분에 집중되어 있으므로, 개발된 정착장치에서의 부분적인 슬립이 장기적으로 발생하는지의 여부도 검토가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 보강재인 탄소섬유판에 지속하중이 작용하였을 때의 장기거동을 평가하기 위한 일련의 실험을 실시함으로써 개발된 정착장치의 성능을 검증하고, 장기거동에 따른 탄소섬유판 및 정착장치의 요구성능을 보강설계에 반영하기 위한 자료를 구축하고자 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

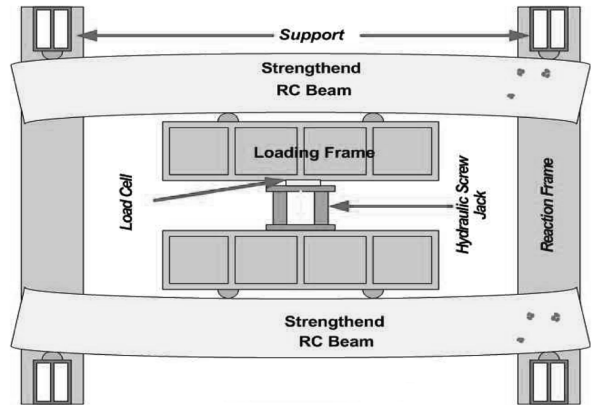
2.1 실험 방법 검토

탄소섬유와 같은 복합소재의 장기거동을 파악하기 위한 실험은 항공·선박 등의 분야에서 주로 수행되었으나, 대부분 재료시험 수준에 한정되어 있으며 현재까지도 매우 제한적인 정보만이 이용 가능한 실정이다.⁵⁾ 또한 복합소재가 건설분야에 본격적으로 적용되기 시작한 것은 1990년 이후로서 공사연역이 제한되어 장기거동에 대한 불확실성이 존재하고 있다. 이에 따라 이를 규명하기 위한 실험적 연구가 일부 진행되었으나 실험방법 및 연구기간의 제한으로 인하여 성능파악에 한계가 존재하는 것이 사실이다.

Mathys등¹⁷⁾은 프리스트레스가 도입된 강연선과 AFRP 보강재로 보강된 콘크리트 슬래브에 대하여 지속하중 실험을 실시하였으며, Sen 등¹⁸⁾도 AFRP 보강재로 프리스트레스가 도입된 RC보의 장기거동에 대한 실험 결과를 보고하였다. 특히 Braimah¹⁹⁾는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같은 실험계획에 따라 약 2년간의 지속하중 하에서의 CFRP 보강재로 프리스트레스된 T형보의 거동에 대한 실험 결과를 보고하였다. 또한 박중섭 등²⁰⁾은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 외부긴장된 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 장기거동을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 상기의 대표적인 실험계획은 실험체 및 하중의 형상을 실제 구조물 조건과 가능한 근접하게 함으로써 FRP 보강재의 응력상태를 최대한 모사할 수 있는 장점이 있는 반면, 실험체 설치 및 제어가 힘들고 넓은 실험공간을 장기간 점유해야 하는 단점이 있다. 한편, 본 연구에서 대상으로 하는 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 보강기술에서는 비부착상태에서 탄소섬유판이 초기 긴장력을 받은 이후 거의 일정한 응력을 유지하게 된다. 또한 통상적으로 보강대상인 구조물은 콘크리트 타설 후 어느 정도 시간이 경과된 경우가 대부분으로 모재인 RC의 크리프 및 건조수축이 대부분 완료된 상태로 가정할 수 있기 때문에 모재의 장기변형은 무시할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 가정에 근거하여 보다 단순한 실험계획에 의해 탄소섬유판의 지속하중에 대한 거동을 평가하는 것으로 계획하였다.



(a) Braimah¹⁷⁾



(b) Park et al.¹⁸⁾

Fig. 1 Experimental scheme for long-term loadings

2.2 실험 재료

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 24 MPa를 기준으로 하였다. 콘크리트 블록에 사용된 철근은 부재 축방향 주철근으로 D19를 사용하였으며, 직각방향의 부철근으로 D13을 사용하였다. 또한 휨부재에 대한 장기거동 측정을 위한 실험체는 3-D13의 압축철근과 3-D10의 인장철근으로 구성되어 있으며, D10의 전단철근을 10 mm 간격으로 배치하였다. 탄소섬유판은 직접 지속하중 실험에서는 기존에 개발된 탄소섬유판을 사용하였으며, 휨 지속하중 실험에서는 본 연구에서 개발된 일방향 탄소섬유판을 사용하였다. 재료시험 결과를 나타내면 Tables 1~3과 같다.

Table 1 Properties of concrete

Design strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
24	2.2	20.7	21.6

Table 2 Properties of reinforcing bar

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
D-13	466.2	679.3	211	17.2
D-19	404.5	694.3	170	16.1

Table 3 Properties of CFRP strips

	Dimension (mm)			Tensile strength (MPa)		
	Composition	Thickness	Width	Catalog	Test	
Direct	CFRP	Carbon	1.40	50	2,320	2,846.9
	Hybrid CFRP	Carbon + steel	3.83	50	1,000	1,030.2
Flexural	CFRP	Carbon	1.60	50	2,100	2,208.9

2.3 가력 및 측정 계획

2.3.1 가력장치 계획

위에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 외부 프리스트레스트에 의해 지속하중을 받는 탄소섬유판의 응력상황을 가능한 실제상황과 근접하게 모사하되 가력장치를 단순화한 형태로 실험계획을 수립하였다. 즉, 본 연구에서 지속하중을 받는 탄소섬유판의 장기거동 평가를 위한 실험은 Figs. 2 및 3에서 보는 바와 같이 콘크리트 블록을 이용하여 탄소섬유판에 단순 인장력을 도입하는 직접 지속하중 실험과 휨 실험체를 이용하여 탄소섬유판에 인장력을 도입하는 휨 지속하중 실험체로 구성하였다.

콘크리트 블록을 사용한 장기거동 측정 실험의 설치상황은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 고정단 정착장치 (dead anchor)가 정착되는 콘크리트 블록을 반력대 (reaction frame)에 고정시켜 변위가 발생하지 않도록 하고, 이동단 정착장치 (live anchor)가 정착되는 콘크리트 블록은 고정단과 연결된 유압램의 피스톤 진행방향에 볼트로 유압램과 연결하여 유압램의 가력에 의해 축방향 변위가 발생하도록 계획하였다. 각 콘크리트 블록의 측면에는 정착장치를 설치하고 탄소섬유판을 고정시킨 후 50 tonf 용량의 유압램으로 콘크리트 블록의 중앙부에 집중하중을

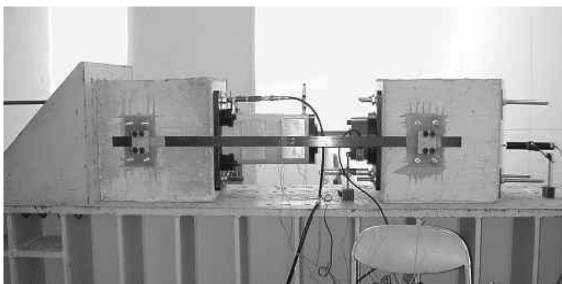
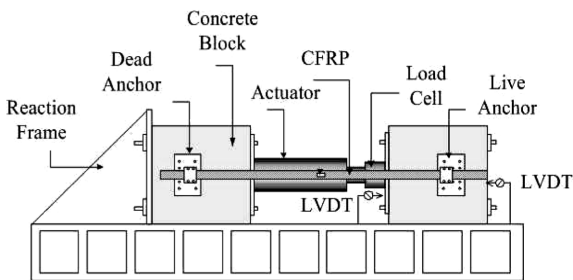


Fig. 2 Test set-up for direct sustained loading

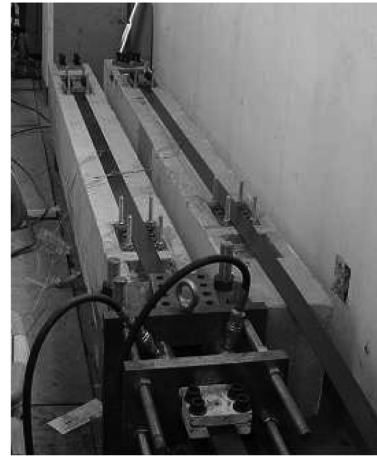
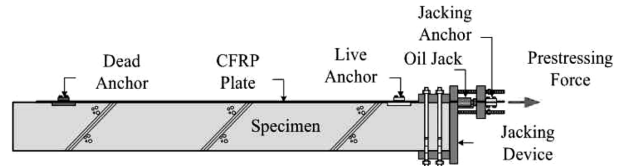


Fig. 3 Test set-up for flexural sustained loading

가력함으로써 탄소섬유판에 인장력을 도입하였다. 실험장치의 설치시에는 양단 대칭으로 탄소섬유판을 배열하여 하중가력으로 인한 편심이 발생하지 않도록 하였다.

휨 실험체를 이용한 장기거동 실험체의 설치상황은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 실험체의 단부에 고정단 정착장치에 의해 탄소섬유판을 고정하고 긴장장치를 이용하여 반대쪽 단부에서 탄소섬유판에 프리스트레스를 도입하였다. 프리스트레스 도입이 완료되면 고정단 정착장치의 반대편에 있는 정착장치로 긴장된 탄소섬유판을 고정하고 긴장장치를 제거함으로써 탄소섬유판의 프리스트레스를 유지한다. 이때 탄소섬유판은 콘크리트에 순수 정착장치만으로 고정되어 있기 때문에 긴장력의 감소여부에 따라서 정착장치의 슬립 및 탄소섬유판의 장기변형에 대한 판단이 용이하다.

2.3.2 측정 계획

지속하중을 받는 탄소섬유판의 장기거동에 대한 측정 계획은 탄소섬유판의 인장력 도입에 따른 탄소섬유판의 변형을 측정하기 위하여 탄소섬유판 중앙부에 변형률 게이지를 부착하였으며, 각 콘크리트 블록의 축방향 변위를 측정할 수 있도록 100 mm와 50 mm LVDT를 각각 이동단 앵커가 설치된 콘크리트 블록의 전면과 후면에 설치하였다. 또한 온도 변화에 따른 유압변화 및 탄소섬유판의 변형 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 온도센서 (thermo couple)를 설치하였다.

가력된 하중은 유압램 연단에 부착되어 있는 로드셀을 이용하여 연속적으로 측정하였다. 시간의 변화에 따른 탄소섬유판의 응력변화 및 콘크리트 블록의 변위 변화를 측정하기 위하여 Table 4에서 보는 바와 같이 측정구간을 3등분하고, 긴장력 도입 직후 발생하는 긴장력 손실

Table 4 Measuring scheme

Step		Control	Period	Data acquisition	Note
Direct sustained load	1	Force control	10 min.	0.5/sec	-
	2		1 day	0.1/min	-
	3		2 years	0.5/hour	-
Flexural sustained load	1	Force control	10 min.	0.5/sec	-
	2		1 day	0.1/min	-
	3		90 days	0.5/hour	-

량을 측정하기 위하여 2초 간격으로 10분 동안 측정하였으며, 응력의 변화가 심할 것으로 예상되는 초기 1일 동안 10분 간격으로 측정하였다. 초기 긴장력 손실이 발생한 후에는 탄소섬유판의 장기적인 변형 및 긴장력 변화를 측정하기 위하여 2년 동안 2시간 간격으로 측정하도록 계획하였다. 축소모형 휨 실험체에 대한 탄소섬유판 장기거동 측정 실험은 유압램과 같은 가력유지장치가 필요없기 때문에 탄소섬유판의 변형을 변화만으로 긴장력 손실량을 평가할 수 있으며, Table 4에 나타난 바와 같이 3단계로 90일에 걸쳐 측정되었다.

2.4 실험체 개요

탄소섬유판의 장기거동 측정을 위해 고정단 및 이동단 정착장치가 설치되는 콘크리트 블록은 크기가 600 × 600 × 500 mm로서, 콘크리트 블록의 축방향으로 제작 당시부터 φ30 mm 파이프를 유압램의 크기에 맞게 400 × 200 mm 간격으로 매설함으로써 체결볼트에 의해 콘크리트 블록을 반력대에 고정할 수 있도록 하였다. 또한, 휨실험체의 단면치수는 200 × 300 mm로 인장측과 압축측 피복두께를 30 mm로 하였으며, 전체 실험체 길이는 2,700 mm로 계획하였다. 철근배근은 압축철근으로 3-D13, 인장철근은 3-D10을 배근하였으며 전단과피를 방지하기 위해 지간에 HD10@100을 배근하였다. 휨실험체의 제원 및 상세를 나타내면 Fig. 4와 같다.

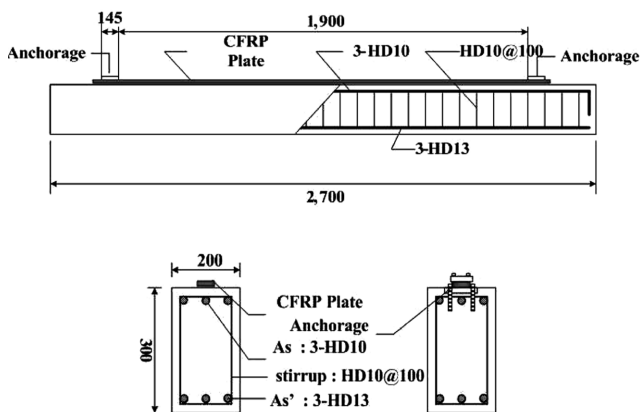


Fig. 4 Test specimen details

2.5 실험 변수

탄소섬유판의 시간에 따른 프리스트레스 손실량에 직접적으로 영향을 주는 요소는 단기적으로 정착장치에서 발생하는 슬립량 및 장기적으로 탄소섬유판의 릴렉세이션을 들 수 있다. 전자는 정착장치의 제원 및 형상에 따라 변할 수 있으며, 후자는 탄소섬유판의 특성뿐만 아니라 프리스트레스 양에 따라 변할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 요구되는 탄소섬유판의 두께에 따라 도출된 최적의 정착장치^{21,22)}에 대해서 프리스트레스에 따른 장기거동의 변화를 평가하고, 시간에 따른 탄소섬유판의 거동특성을 분석하기 위하여 3개월 동안 정착장치 및 시스템에서 발생하는 단기성능을 관찰하며, 이후 2년 이상의 관측을 통하여 장기성능에 대한 평가를 수행하도록 하였다. 본 연구에서 설정한 실험변수를 정리하여 나타내면 Table 5와 같다.

직접 지속하중 실험에서는 기존에 상용화되고 있는 일방향 탄소섬유판과 국내 A기업에서 제작한 강판매입 탄소섬유판을 대상으로 실험을 실시하였다. 아울러, 프리스트레스가 도입된 상태에서 시간에 따른 탄소섬유판의 응력변화 (= 프리스트레스 손실량)를 평가하기 위한 장기거동 실험체는 본 연구에서 개발되는 탄소섬유판을 대상으로 수행하였다. 휨 지속하중 실험에서는 정착장치에서의 슬립량을 집중적으로 검토하기 위하여 약 3개월간의 재하에 따른 거동특성을 파악하였다.

3. 실험 결과

3.1 직접 지속하중 실험

직접 지속하중에 의한 탄소섬유판의 장기거동 실험은 700일 동안 측정하였다. 초기 37일간은 온도 센서를 부착하지 않은 관계로 기상청에서 제공하는 외기온도를 기준으로 하였으며, 37일 이후에는 직접 온도 센서를 부착하고 실험실 내부온도를 측정하였다. 이에 대하여, 강판매입 탄소섬유판의 측정기간은 총 640일 동안 측정되었다. 이 기간은 일방향 탄소섬유판의 측정기간과는 달리 동절기를 지나는 시점으로 온도차가 크지 않았으며, 대기온도가 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Table 5 Test parameters

	Parameter	Test set-up	
		Direct sustained load	Flexural sustained load
Stress variation (prestress loss)	CFRP strips	CFRP, CFRP+steel	CFRP
	Thickness	1.4 mm 3.83 mm	1.6 mm
	Initial prestress	50% of tensile strength	60% of tensile strength
	Loading period	2 years	3 month

3.1.1 시간경과에 따른 하중 및 변위

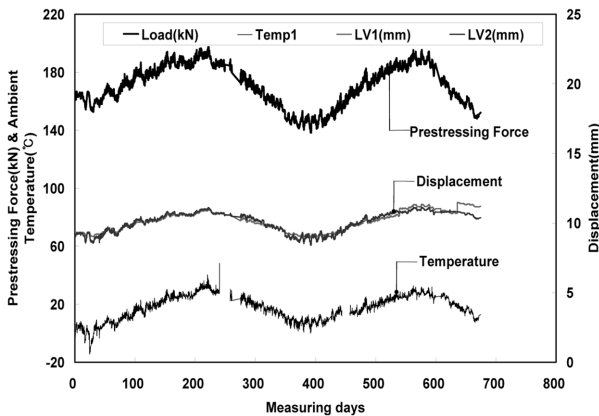
Fig. 5는 일방향 탄소섬유판의 시간에 따른 대기온도 변화와 유압램에 의해 탄소섬유판에 가해진 하중 및 축방향 변위를 나타낸 것이다. 초기 가력하중은 167 kN으로 이때 측정된 탄소섬유판의 변형률은 6,000 μ 이었다. 그림에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 따라서 하중의 증감이 반복되고 있으며, 그 경향은 대기온도의 변화와 일치함을 알 수 있다. 즉, 대기온도의 변화에 따라 유압램 내부의 오일점성이 변화하면서 내부의 압력이 변화되고, 그로 인하여 콘크리트 블록과 탄소섬유판에 가해지는 작용력 또한 변한 것으로 판단된다. 특히, 측정시점이 겨울이었기 때문에 초기 온도변화의 폭이 크고, 시간이 경과할수록 대기온도의 상승으로 하중 및 변위도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 전체적인 시간이력곡선의 경향을 파악해 보면, 일방향 탄소섬유판의 지속하중에 대한 영향은 거의 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 대하여, 강판매입 탄소섬유판은 Fig. 5(b)에서 보는 바와 것과 같이 전체적인 온도변화와 탄소섬유판에 작용하는 유압램의 하중은 대체로 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 시간이 경과함에 따라 강판매입 탄소섬유판에 작용하는 하중이 약 5%가 저하되고 있다. 이러한 원인은 강판매입 탄소섬유판의 경우, 초기에 도입된

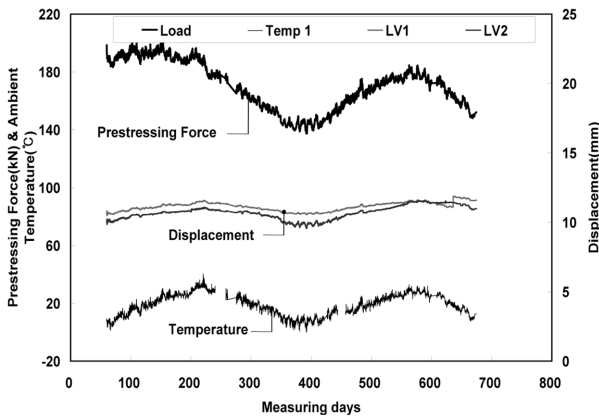
프리스트레스 양이 매입된 강판의 항복변형률을 2배 정도 초과함에 따라 강판의 변형이 지속적으로 증가된 것에 일차적인 원인이 있는 것으로 판단된다. 따라서 프리스트레스의 도입을 전제로 강판매입 탄소섬유판을 적용할 경우에는 강판의 항복변형률 이하로 프리스트레스를 도입하거나 프리스트레스 변형률 이상의 항복변형률을 갖는 고강도 철판으로 대처하는 것을 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.1.2 시간경과에 따른 탄소섬유판의 하중 및 변형률

Fig. 6은 시간의 경과에 따른 탄소섬유판의 인장변형률 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 일방향 탄소섬유판의 시간이력에 따른 변형률은 하중의 변화와 거의 동일한 것을 알 수 있다. 즉, 일방향 탄소섬유판은 열팽창계수가 거의 0에 가까우며 크리프나 릴렉세이션과 같은 자체의 응력손실이 적기 때문에²⁾ 시간의 경과에 따른 탄소섬유판의 변형률 추이도 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이로부터 재료강도의 50% 정도까지 지속하중을 받는 범위내에서 탄소섬유판과 정착장치에서의 슬립은 거의 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 여기서, 시간에 따른 하중의 변화는 연간 온도변화에 따른 유압램의 내부압력의 변화에 의한 것이다.

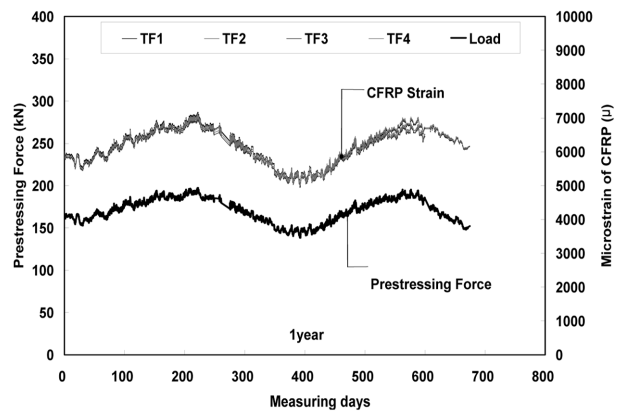


(a) CFRP strips

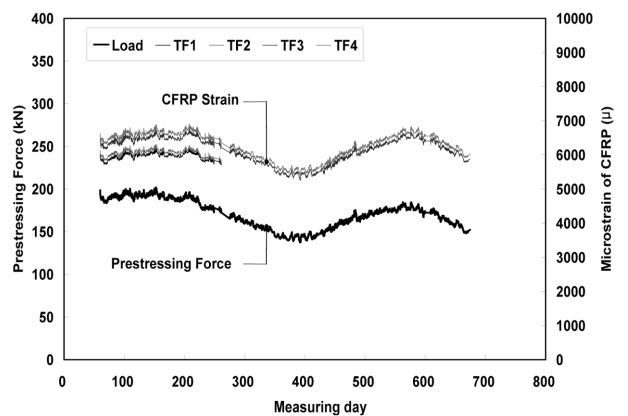


(b) Hybrid CFRP strips

Fig. 5 Time dependent curve for force, displacement and ambient temperature by direct sustained loading



(a) CFRP strips



(b) Hybrid CFRP strips

Fig. 6 Time dependent curve for strain and force of CFRP strips by direct sustained loading

이에 대하여, 강관매입 탄소섬유판은 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 온도변화에 따라서 하중 및 변형률 경향도 변하지만 시간의 경과에 따라서 하중 및 변형률의 감소폭이 증가되는 것으로 나타났다. 즉, 초기 하중 및 변형률 측정시점으로부터 온도변화에 따라서 증감을 반복하지만 동일한 온도조건이 되는 1년 경과 후 및 종료시점에서 강관매입 탄소섬유판은 대략 5% 하중감소와 3% 변형률 증가가 발생한 것으로 관측되고 있다. 이에 따라 크리프나 릴렉세이션과 같은 탄소섬유판 자체의 응력손실이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 힘 지속하중 실험

3.2.1 시간경과에 따른 탄소섬유판의 변형률

힘 지속하중 실험에서는 RC 휨실험체를 대상으로 실제 부재에서와 같이 고정단과 이동단 정착장치만을 이용하여 탄소섬유판에 도입된 긴장력을 구속하기 때문에 긴장력을 유지시키는 별도의 유압램이 필요없다. 도입된 긴장력은 재료강도의 60%에 해당하는 $7,600 \mu$ 으로 긴장력을 도입하고 정착장치로 고정한 후에 가력장치를 제거하였다.

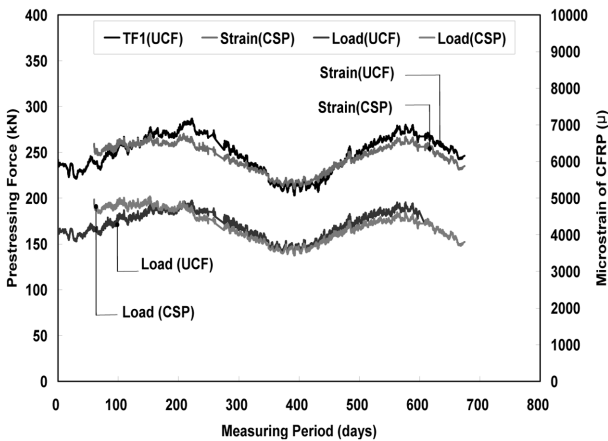


Fig. 7 Comparison of long-term behavior between CFRP and hybrid CFRP strips

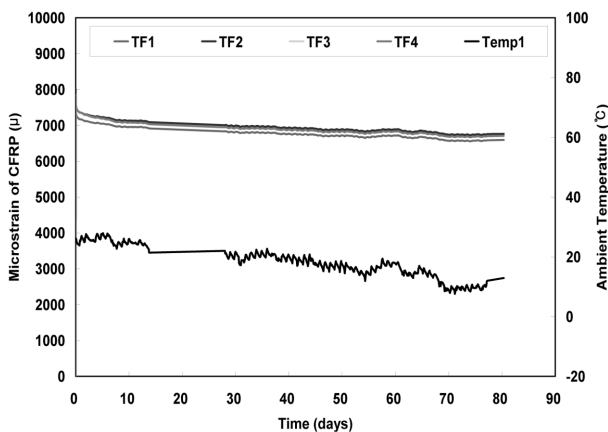


Fig. 8 Time dependent curve for strain and force of CFRP strips by flexural sustained load

본 연구에서 개발된 탄소섬유판의 시간에 따른 변형률 변화와 온도 변화를 병행하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 긴장력 도입 후 초기에 변형률의 감소가 크게 발생되며, 이후 시간의 경과에 따라서 완만한 감소율을 유지한다. 한편 시간의 경과에 따른 온도변화를 측정하면 긴장력 도입 초기를 제외하고는 시간 이력곡선이 탄소섬유판의 변형률 변화와 일치함을 알 수 있다. 즉, 긴장력이 도입된 탄소섬유판은 초기에 응력손실이 발생하며 이후에는 외부온도의 영향에 따라 변형률이 변하는 것으로 판단된다.

3.2.2 시간경과에 따른 탄소섬유판의 응력손실 분석

Fig. 9는 힘 지속하중 실험을 통하여 얻어진 탄소섬유판의 변형률에 대한 시간이력곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 8일까지는 탄소섬유판의 변형률이 온도변화에 비하여 빠르게 감소하는 것으로 나타났으며, 이후에는 온도변화의 기울기와 거의 유사한 것으로 관측되었다. 즉, 온도조건에 관계없는 순수 탄소섬유판의 응력손실은 긴장 후 8일 정도까지 대부분 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 탄소섬유판에 긴장력을 도입하고 정착장치에 의해 고정되는 과정에서 발생하는 응력손실 (seating loss)은 약 초기 긴장력의 4% 정도이며, 이후 시간 경과에 따라 발생하는 응력손실 (time dependent loss)은 대략 6~8% 정도로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발된 탄소섬유판의 긴장력에 대한 응력손실은 재료강도의 60% 정도로 초기 긴장력을 도입하였을 때 약 10% 내외 일 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 외부프리스트레스 탄소섬유판에 의한 보강기술에서 긴장력을 포함하는 지속하중이 작용하였을 때의 장기거동을 평가하기 위한 실험을 통하여 개발된 정착장치의 성능을 검증하고, 장기거동에 따른 탄소섬유

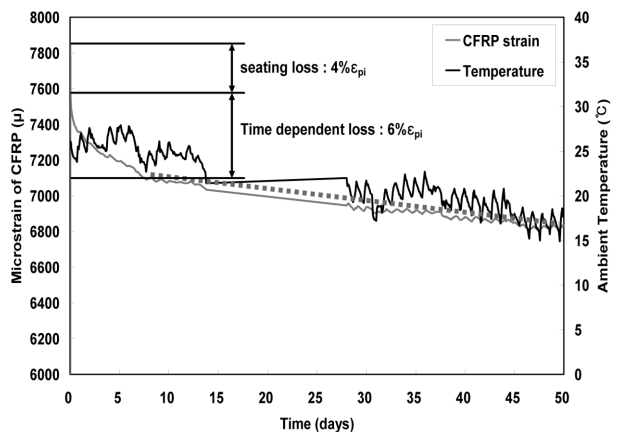


Fig. 9 Comparison of long-term behavior of CFRP strain and ambient temperature

판 및 정착장치의 요구 성능을 보강설계에 반영하기 위한 자료를 구축하였다. 본 실험을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지속하중을 받는 일방향 탄소섬유판의 장기거동 파악을 위한 실험 결과에 의하면, 탄소섬유판의 크리프나 릴렉세이션과 같은 재료자체의 변형 및 정착장치에서의 슬립에 기인한 응력손실은 적은 것으로 나타났다. 단, 유압램을 사용한 가력시스템 내에서는 연간 온도변화에 따른 물리적 변화에 따라 하중이 영향을 받는 것으로 나타나 이에 대한 보정이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 강판매입형 탄소섬유판은 온도변화에 기인한 하중의 변화량에 비하여 탄소섬유판의 변형률이 감소하는 경향으로 나타나, 크리프나 릴렉세이션과 같은 재료 자체의 변형에 의한 자체 응력손실이 있는 것으로 판단된다. 이는 탄소섬유판 재료강도를 기준으로 도입된 초기 긴장력이 강판의 항복변형률을 초과함에 따라 강재의 변형이 크게 발생된 것에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 탄소섬유판의 정착과정에 발생하는 긴장력의 즉시 손실량은 응력도입 초기의 약 10% 정도이며, 그 이후의 응력 손실량은 무시할 만 한 것으로 나타났다. 따라서, 프리스트레스트의 도입시에는 이를 고려하여 긴장력을 결정할 필요성이 있을 것으로 판단된다.
- 4) 온도의 영향을 제외하고는 시간의 경과에 따른 가력시스템의 기계적 문제는 없는 것으로 판단되며, 정착장치에서의 슬립에 의한 하중감소는 발생하지 않은 것으로 보여진다.

감사의 글

본 논문은 ‘02 건설핵심기술연구개발사업 (E01-01) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법 개발’의 일부분으로 수행된 연구임을 밝히며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ISIS Canada, *Reinforcing Concrete Structure with Fibre Reinforced Polymer*, Design Manual No. 3, ISIS Canada, 2001, pp. 1.1~2.3.
2. ISIS, Canada, *Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual No. 4, ISIS Canada, 2001, 48 pp.
3. Concrete Society, *Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials*, Technical Report No. 55, The Concrete Society, 2000, 39 pp.
4. CSA Standard, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, S806-02, Canadian Standards Association, 2002, 36 pp.
5. ACI 440.2R-02, *Guide for the Design and Construction of*

Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI, 2002, pp. 11~12.

6. 土木學會 콘크리트委員會, 콘크리트 구조물의 보강지침(案), 土木學會, 1999, pp. 62~66.
7. El-Hacha, R., Wight, R. G, and Green, M. F., 2004, “Pre-stressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures,” *J. Composite. for Construction*, ASCE, Vol. 8, No. 1, pp. 3~13.
8. Lamanna, A. J., Bank, L. C., and Scott, D. W., “Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips,” *Journal of Composites for Construction*, ASCE, No. 3, 2004, pp. 203~210.
9. Triantafillou, T. C. and Deskovic, N., “Innovative Prestressing with FRP heets: Mechanics of Short-Term Behaviour,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 117, No. 7, 1991, pp. 1652~1672.
10. 박상렬, 양철영, 김창훈, “CFRP 긴장재를 이용한 외부 보강 철근콘크리트 보의 극한 휨강도,” 대한토목학회 논문집, 27권, 5A호, 2007, pp. 671~679.
11. 한만엽, 이재형, 이상열, “외부 프리스트레스트 보강 공법에 사용되는 인장형 단부 브래킷의 개발 연구,” 대한토목학회 논문집, 21권, 5A호, 2007, pp. 611~618.
12. 심낙훈, 박영석, “강연선 또는 CFRP를 이용한 RC보의 외부 프리스트레싱 보강공법에 관한 실험적 연구,” 구조물진단학회논문집, 8권, 3호, 2004, pp. 207~215.
13. 유영찬, 최기선, 박영환, 박종섭, 김궁환, “외부 부착형 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 거동,” 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 17권, 1호, 2005, pp. 255~258.
14. 유영찬, 최기선, 박영환, 박종섭, 김궁환, “외부 비부착형 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 거동,” 대한토목학회 정기학술대회논문집, Oct. 2005, pp. 627~630.
15. 유영찬, 최기선, 박종섭, 박영환, 김궁환, “스터드형 정착장치를 이용한 외부 비부착 프리스트레스트 탄소섬유판 보강 RC보의 휨 거동,” 한국구조물진단학회 봄학술발표 논문집, 10권, 1호, 2006, pp. 197~202.
16. 최기선, 유영찬, 박영환, 박종섭, 김궁환, “외부 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 실물모형 RC보의 휨 거동,” 한국구조물진단학회 봄학술발표논문집, 10권, 1호, 2006, pp. 303~308.
17. Mathys, S. and Taerwe, L., *Long-Term Behaviour of Concrete Slabs Pre-tensioned with AFRP or Prestressing Steel*, in Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, (Editors: Benmokrane, B. and Rahman, H.), 1998. pp. 95~106.
18. Sen, R., Shahawy, M., Rosas, J., and Sukumar, S., “Durability of Aramid Fiber Reinforced Plastic Pretensioned Elements Under Tidal/Thermal Cycles,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 95~104.
19. Braima, A., *Long-Term Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Prestressed Concrete Beams*, Queen's University, Ontario, Canada, 2000, pp. 28~29, 102~104.
20. 박종섭, 박영환, 정우태, “지속하중을 받는 탄소섬유판 부착 보강 철근콘크리트 보의 장기거동,” 한국구조물진단학회 봄학술발표대회논문집, 10권, 1호, 2006, pp. 209~214.

21. 유영찬, 최기선, 김공환, “외부프리스트레스 탄소섬유판에 의한 RC구조물 보강공법의 정착시스템 기본형상 결정시험,” 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 24권, 2호, 2004, pp. 143~146.

22. 유영찬, 최기선, 박영환, 박중섭, 김공환, “외부 프리스트레스 탄소섬유판 정착장치의 콘크리트에 대한 정착성능,” 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 226~229.

요 약 본 연구에서는 외부프리스트레스 탄소섬유판에 의한 보강기술에서 긴장력을 포함하는 지속하중이 작용하였을 때의 장기거동을 평가하기 위한 실험연구를 수행하였다. 지속하중 도입을 위한 실험계획은 탄소섬유판에 직접 인장력을 도입하는 직접 지속하중 방식과 휨 실험체를 통한 휨 지속하중으로 구분하여 실시하였다. 직접 지속하중에 의한 실험은 탄소섬유판의 종류별로 약 700일에 걸쳐 실시하여 탄소섬유판의 장기 크리프/릴렉세이션 등의 변형을 주로 평가하였으며, 휨 지속하중 실험에서는 탄소섬유판의 정착시 정착장치에서의 슬립량을 주로 평가하기 위해 약 90일 간으로 수행되었다. 일방향 탄소섬유판에 대한 2년간의 지속하중 실험 결과에 의하면, 탄소섬유판의 크리프나 릴렉세이션과 같은 재료자체의 변형 및 정착장치에서의 슬립에 기인한 응력손실은 적은 것으로 나타났다. 그러나, 강판매입형 탄소섬유판은 강판의 항복변형률을 초과하여 도입된 긴장력으로 인하여 재료 자체의 변형에 의한 자체 응력손실이 발생되었으므로 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. 아울러, 탄소섬유판의 정착과정에 발생하는 긴장력의 즉시 손실량은 응력도입 초기의 약 10% 정도이므로 프리스트레스의 도입시에는 이를 고려하여 긴장력을 결정할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 탄소섬유판, 외부긴장, 지속하중, 긴장력 손실, 크리프