

## 흙막이 지하 가시설 구조체의 띠장 휨 강성 증대를 위한 연구

## A Study on the Strength Enhancement of Wale in Temporary Retaining Structures

임동환\* · 이용준\*\* · 안상로\*\*\*

Lim, Dong Hwan · Lee, Yong Jun · Ahn, Sang Ro

## Abstract

The purpose of this study was to investigate a method for the strength enhancement of wale in temporary retaining structures. Tests on the wale structures strengthened with carbon fibre reinforced plastic (CFRP) strips and prestressed with seven wire strands were conducted. From this test, it is found that the flexural stiffness and strength of the wales strengthened with CFRP strips and seven wire strands were significantly improved compared to the unstrengthened one. The ultimate tensile strains of attached CFRP strips on the steel beam were in the range of 8,000 and 11,000 $\mu\epsilon$ , and it is noticed that the bonding ability with steel and CFRP strips is good. In this paper, a new method for enhancing the strength of wale in retaining structures is suggested.

Keywords : temporary retaining structures, wale, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) strips, prestressing

## 요 지

본 연구는 흙막이 가시설 구조물의 기본 요소가 되는 띠장의 강성을 증진시키기 위한 새로운 방법을 도출함에 목적이 있다. 이를 위하여, 띠장 부재에 탄소섬유판을 부착하고 또한 강연선을 통하여 프리스트레스 긴장력을 도입하는 실험을 수행하였으며, 탄소섬유판 및 프리스트레스 강선으로 긴장력이 도입된 부재는 보강되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며 초기강성 및 극한강성이 크게 향상되는 것으로 실험결과 나타났다. 또한 탄소섬유판에 발생하는 변형율은 8,000-11,000 $\mu\epsilon$ 의 범주로 나타나, 탄소섬유판과 띠장 부재의 부착능력이 탁월하고 탄소섬유판의 보강효과가 매우 우수한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 띠장 구조체의 휨 강성을 높이고자 하는 새로운 방법이 제시되었다.

핵심용어 : 흙막이 가시설, 띠장, 탄소섬유판, 프리스트레스

## 1. 서 론

최근 들어, 건축 및 토목구조물이 고층화 및 장대화 되면서 토압 및 지하수로 인한 수압에 충분히 저항할 수 있는 흙막이 지하 가시설 공법에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한, 도심지 및 대규모 지하굴착공사를 원활히 수행하기 위하여, 흙막이 벽체 개량 공법 및 띠장 강성증진을 위한 공법들이 개발되고 있다.

현재 널리 쓰이고 있는 가시설 공법으로는 버팀보의 압축력으로 토압을 지지하는 버팀보 공법, 강선을 지중에 고정된 Earth Anchor로 인장력을 가하여 토압을 지지하는 Earth Anchor 공법 및 PS 띠장공법 등이 있다. 그러나 버팀보 방식의 공법은 띠장재의 휨 강성이 약하여 버팀보를 일정한 간격으로 조밀하게 설치할 수밖에 없으며, 따라서 많은 강재가 소요되고, 건설 중장비 등의 작업공간이 확보되지 않는

등의 시공성 문제가 제기되고 있다. 또한 기타 다른 공법은 내부 작업공간의 확보는 용이하나, 가시설 공사비의 고가 및 프리스트레스 정착장치의 제작 등에 문제점을 안고 있다.

최근 들어, 띠장의 강성을 증대시켜 버팀보의 간격을 충분히 확보하기 위한 다양한 공법이 개발되고 있다. 특히 대단면 띠장재에 케이블 혹은 강봉으로 프리스트레스 힘을 도입하여 토압에 저항하는 방법 및 다수의 PS강연선을 곡선으로 설치하여 이를 긴장하고 위 프리스트레스 힘의 수직분력이 토압을 저항하는 공법 등이 개발되어 일부 현장 적용이 되고 있다(김성보 등, 2007; 한만엽 등, 2007). 현재 개발된 프리스트레스 힘을 도입한 띠장 강성 증대 방법은 기존 타 공법에 비하여 가시설의 효율 및 시공성을 개선하고, 공기 및 공사비의 문제에 있어서도 기존 다른 방식에 비해 유리한 것으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 건설 구조물의 보수 보강에 매우 효과적

\*정회원 · 교신저자 · 동서대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : limdh@dongseo.ac.kr)

\*\*정회원 · (주) 포스코건설 기술연구소 · 공학박사 (E-mail : civilyj@poscoenc.com)

\*\*\*정회원 · 한국시설안전공단 단장 · 공학박사 (E-mail : srahn@kistec.or.kr)

인 방법으로 채택되고 있으며(Deng 등, 2004, 2007; Tavakkolizadeh 등, 2003; Nikoukar, 2004; Al-Saidy 등, 2001, 2004), 건설 신소재로 널리 인식되고 있는 탄소섬유판(Carbon fiber reinforced plastic(CFRP) strip)을 강재에 부착하고 또한 강연선을 통하여 프리스트레스 긴장력을 도입하여, 흠막이 가시철 구조체의 띠장 강성의 증대방안을 모색하고자 한다. 이를 위하여, 본 연구에서는 탄소섬유판 및 긴장력이 도입된 보에 대한 구조실험 및 구조해석을 수행하여, 높은 휨 강성을 가질 수 있는 띠장의 형태를 제시하고자 한다.

## 2. 띠장 강성증진을 위한 구조 실험

### 2.1 실험목적 및 변수

본 실험에서는 높은 휨 강성을 가질 수 있는 띠장을 구성하기 위하여, 탄소섬유판을 부착하고 또한 프리스트레스 긴장력을 도입한 구조부재를 제작하였고 실험을 수행하였다. 제작된 실험부재는 크게 H형강 하단 플랜지부에 탄소섬유판을 부착한 SC-Beam Series, 위 탄소섬유판 및 Prestress 긴장력을 도입한 P-Beam Series 및 보의 하단 및 Web 부위에 탄소섬유판을 부착한 B2-Beam Series로 구분된다. SC-Beam Series 및 P-Beam Series 실험에서는 H200×200×8×12(SS400) 형강을 기본 부재로 사용하여 순 지간을 3.0m로 채택하였으며, B2-Beam Series 실험에서는 순 지간 2.3m인 H150×150×7×10(SS400)형강을 사용하였다. 본 연구에서는 탄소섬유판의 부착방식, 부착면적 및 프리스트레스 긴장력의 도입 등이 주 실험변수로 채택되었으며, 실험변수 및 실험부재는 표 1과 같다.

### 2.2 실험부재의 제작

본 실험에서는 스위스에서 제작된 SIKA CarborDur S strip 탄소섬유판이 사용되었으며, 위 탄소섬유판의 재료물성 및 인장강도는 표 2와 같다.

탄소섬유판은 두께 1.2mm 폭 50mm 및 100mm의 두 종류가 사용되었으며, 위 탄소섬유판을 길이방향으로 3개 혹은 2개를 부착하여 부재의 휨 효과를 분석하였다. 탄소섬유판은 H형강과의 부착으로 인하여 그 강성의 효과를 발휘하게 되므로 H형강의 코팅막을 그라인더로 제거하여 부착강도

표 1. 실험부재 및 실험변수

부재기호	Web Strip		Flange Strip		프리스트레스 하중 (kN)
	개수	폭 (mm)	개수	폭 (mm)	
CONTROL	-	-	-	-	-
SC15B90	-	-	3	50	-
SC20B90	-	-	2	100	-
P12B90	-	-	2	100	120
P16B90	-	-	2	100	160
P18B90	-	-	2	100	180
B2-CONT	-	-	-	-	-
B2-W5B0	2	50	-	-	-
B2-W10B10	2	100	1	100	-

표 2. 탄소섬유판 재료 물성

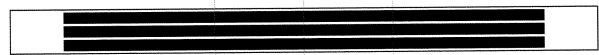
밀도	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (N/mm <sup>2</sup> )	과괴시 변형률 (%)
1.6	2800	165,000	16.9

를 최대한 증진시켰다.

SC-Beam Series부재는 지간의 90%에 해당하는 길이만큼 탄소섬유판을 플랜지 하단부에 부착하였다. 또한 P-Beam series에서는 프리스트레스 긴장력을 도입하기 위하여 부재의 양 끝단에 프리스트레스 정착단을 설치하였고, 보의 중심부에 프리스트레스 강선을 고정하는 고정장치를 제작하여 용접·부착하였다. 그리고, B2-Beam Series는 보의 Web부위 및 하단 플랜지부에 탄소섬유판을 부착하였다. 그림 1은 SC-Beam Series, P-Beam Series 및 B2-Beam Series 부재의 탄소섬유판 부착형상을 도시하고 있다.

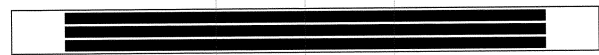
SC- Beam Series

(하부)



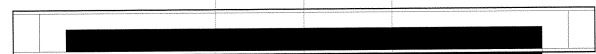
P-Beam Series

(하부)



B2-Beam Series

(측면)



(하부)

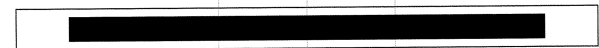


그림 1. 탄소섬유판 부착 형상

### 2.3 실험 방법

본 실험에서는 500kN 용량의 유압 액츄에이터(Hydraulic Actuator)를 이용하여 실험을 수행하였으며, 3점 재하 방식 및 4점 재하 방식으로 하중을 단계적으로 재하하였다(그림 2). SC-Beam Series 및 P-Beam Series 부재는 최대 휨 모멘트가 발생할 수 있도록 3점 재하방식으로 실험을 수행하였으며, B2-Beam Series는 4점 재하 방식으로 실험이 수행되었다. 각 실험부재에는 변위계(LVDT), 콘크리트 스트레인 게이지, 철근 스트레인 게이지, 탄소섬유판 스트레인 게이지 및 다이얼 게이지를 부착하여 변형률 및 변위 등을 분석하였으며, 위 측정값은 Data Acquisition Software를 통해 처리 분석되었다.

## 3. 구조 실험 결과

### 3.1 하중-처짐 관계특성

표 3은 실험부재의 항복강도 및 극한 강도를 나타낸 것으



그림 2. 실험장치도

로서, 플렌지 하단부에 탄소섬유판을 부착한 SC-Beam Series 부재의 극한강도는 부착되지 않은 CONTROL보에 비하여 약 27%의 증가율을 보이고 있으며, 또한 초기강성증진 효과가 CONTROL부재에 비하여 향상된 것으로 나타났다.

보 하단부에 탄소섬유판을 부착할 뿐만 아니라 프리스트레스 긴장력을 도입한 P-Beam Series부재는 그 극한강성의 증진효과가 매우 우수하게 나타났으며, 프리스트레스 긴장력이 180kN으로 도입된 부재(P18B90)에서 그 증진율이 약 37%로 최대로 나타났다. Web부의 탄소섬유판을 부착한 B2-Beam Series부재는 극한강성의 증진효과가 약 17%정도 나타나고 있으며, 초기강성도 보강되지 않은 보에 비하여 향상되는 것으로 나타났다.

그림 3은 SC-Beam Series 부재 및 P-Beam Series의 하중-처짐 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 탄소섬유판으로 보강된 부재 및 프리스트레스 강선으로 긴장력이 도입된 부재는 보강되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며 초기강성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한 실험부재의 휨강성은 탄소섬유판의 부착 면적 및 프리스트레스 강선의 긴장력 도입에 따라 크게 다른 것으로 나타났다. 또한 전술한 바와 같이, 프리스트레스 긴장력이 180kN으로 도입된 부재(P16B90)에서 그 증진효과가 최대로 나타났으며, 특히 프리스트레스 긴장력으로 인한 초기강성의 증진효과는 매우 탁월하여 사용하중상태에서의 탄성계수가 크게 향상되는 것으로 나타났다. 그림 4는 B2-Beam Series 하중-처짐 특성을 나타낸 것이다.

### 3.2 탄소섬유판의 변형률 및 파괴형상

표 4는 실험부재의 항복 및 극한상태에서의 탄소섬유판의 변형률을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 SC-Beam Series 및 P-Beam Series 부재의 지간 중심 탄소섬유판의 변형률은 8,000~10,000 $\mu\epsilon$ 의 범주로 나타났으며 이는 탄소섬유판과 부재의 부착능력이 탁월하여 탄소섬유판의 보강효과가 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

그림 5 SC Beam Series 부재의 파괴양상을 도시한 것으로서, 극한상태에서는 하단부 탄소섬유판이 탈락하면서 보가 파괴되었다. 탄소섬유판의 H Beam과의 부착능력은 매우 탁월하며 파괴 시 탄소섬유판의 탈락면을 분석한 결과 탄소섬유판 섬유질이 기본 모 부재에 흡착되어 남아있었으며, 이는 부착능력의 탁월함을 입증하고 있다.

표 3. 실험부재의 항복강도 및 극한 강도

부재기호	항복강도 Py(kN)	극한강도 Pu(kN)	증가율 Pu/Py(%)
CONTROL	207.1	240.3	-
SC15B90	238.4	285	19
SC20B90	240.5	304.3	27
P12B90	243.5	328.4	37
P16B90	274.5	330.3	37
B2-CON	178.8	194.6	-
B2-W5B0	177.9	203.3	5.0
B2-W10B10	191.7	226.5	17

프리스트레스 강선으로 긴장된 P-Beam Series에서는 보의 중심부 탄소섬유판의 응력이 약 8,000~11,000 $\mu\epsilon$  범주로 나타나고 있으며, 이는 탄소섬유판의 보강효과 및 프리스트레스 긴장효과가 매우 뛰어남을 나타내고 있다. 그러나 Web부위에 탄소섬유판을 보강한 B2-Beam Series에서는 탄소섬유판의 극한 변형률은 4,400~7,000 $\mu\epsilon$  범주로 나타났다. 이는 실험으로 채택한 보의 강성이 약하여, 보의 파괴가 탄소섬유판 탈락이 아닌 강재의 소성으로 유도되었기 때문이다. 그림 6은 프리스트레스 하중을 180kN으로 도입하고 하부플렌지에 탄소섬유판을 부착한 P Beam Series 부재의 파괴양상을 보여주고 있다. P Beam Series부재 역시 하부 플렌지에 부착된 탄소섬유판의 탈락으로 보가 파괴되었으며, 파괴 시 탄소섬유판에 발생된 변형률은 약 10,000 $\mu\epsilon$ 으로 관측되어 탄소섬유판과 H Beam의 부착능력이 매우 탁월한 것으로 판단된다.

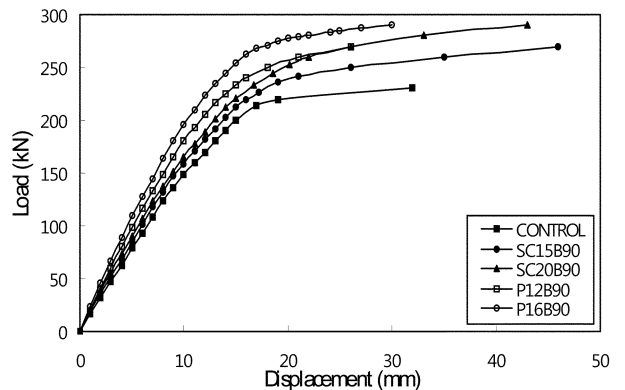


그림 3. SC Series 및 P Series의 하중-처짐 특성

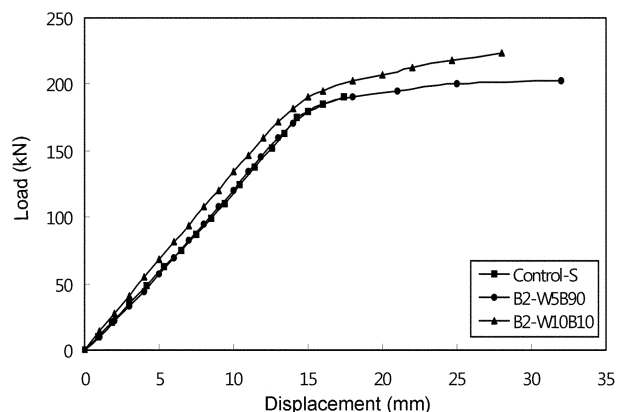


그림 4. B2-Beam Series 하중-처짐 특성

표 4. 탄소섬유판의 항복 및 변형율

부재기호	항복상태		극한상태	
	변형율 (με)	치짐 (mm)	변형율 (με)	치짐 (mm)
CONTROL	3830	21	19319	64
SC15B90	3935	23	10429	65
SC20B90	3636	24	11433	65
P12B90	4070	24	10921	95
P16B90	3861	30	7922	72
P18B90	3932	31	9737	73
B2-CONT	3942	18	4878	26
B2-W5B0	3914	18	4490	30
B2-W10B10	3992	19	7054	36



그림 5. SC Beam Series 부재의 파괴양상

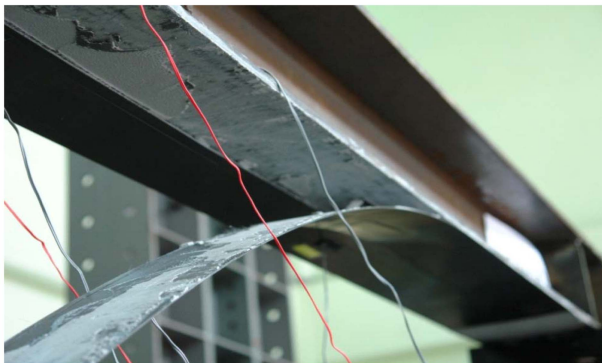


그림 6. P Beam Series 부재의 파괴양상

#### 4. 띠장 강성증진을 위한 구조해석

##### 4.1 해석방법 및 해석모델

본 해석 연구에서는 실험부재와 동일한 모델에 대한 유한요소 구조해석을 수행하였으며, 실험으로부터 도출된 결과와 비교·검토하였다. 이를 통하여, 구조해석의 신뢰성을 확보하였으며, 탄소섬유판의 부착길이, 부착면적 및 프리스트레스 도입 긴장력을 해석 변수로 하는 Parametric Study를 수행하였다. 또한 이를 기반으로, 실물 크기의 띠장에 대한 구조해석을 수행하여 흙막이 가시설 시스템의 기본 골격을 구축하고자 하였다.

본 해석연구에서는 유한요소 프로그램인 LUSAS를 이용하여 3차원 비선형해석을 수행하였으며, 강재는 변형률 경화를 고려한 비탄성 모델을 적용하였다. 또한 사용된 탄소 섬유판

은 항복응력까지 선형적으로 증가하고 이후에는 파단되는 완전 취성재료로 가정하였으며, 8절점 쉘(Shell) 요소를 사용하였다. 또한, 부착 탄소 섬유판과 콘크리트 사이의 부착은 실험결과 거의 완전한 부착거동이 관찰되었으므로, 이를 기반으로 완전한 부착거동을 하는 것으로 가정하였다.

전술한 바와 같이 본 연구에서는 구조 실험에서 수행된 모든 부재에 대해 동일하게 해석을 수행하였으며, 해석부재는 H형강 하단 플렌지부에 탄소섬유판을 부착한 SC-Beam Series, Prestress 긴장력을 도입한 P-Beam Series 및 보의 웹 부분에 탄소섬유판을 부착한 B2-Beam Series로 구분되며, 해석변수 및 부재는 표 5와 같다. 본 실험크기 해석 부재는, 소형 실험 및 해석으로부터 도출된 바와 같이, 허부 플랜지 및 웹 부위에 탄소섬유판을 부착하고, 프리스트레스 힘의 도입을 병행한 부재(C1-P40W25B30)를 채택하였으며, 사용된 강재는 가시설 현장에서 현재 널리 사용되고 있는 H300×300×10×15(SS400) 형강을 채택하였다. 본 실험부재의 해석변수는 표 6과 같으며, 실험부재의 해석모델은 그림 7과 같다.

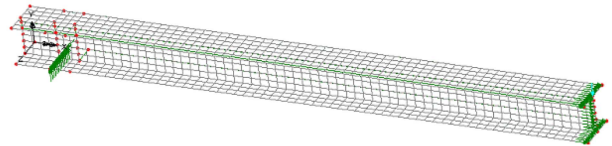


그림 7. 실험부재의 해석모델

표 5. 해석변수 및 부재

부재 ID	플렌지 탄소섬유판		웹 탄소섬유판		Prestress 긴장력 Load (kN)	비고
	개수	Type (mm)	개수	Type (mm)		
CONTROL	-	-	-	-	-	CONTROL
SC15B90	3	50	-	-	-	SC-Beam Series
SC20B90	2	100	-	-	-	
P12B90	2	100	-	-	120	P-Beam Series
P16B90	2	100	-	-	160	
P18B90	2	100	-	-	180	
B2-CONTROL	-	-	-	-	-	B2-CONT
B2-W5B0	-	-	2	50	-	B2-Beam Series
B2-W10B10	1	100	2	100	-	

표 6. 실험부재 해석변수

실험 CASE	플렌지 탄소섬유판		웹 탄소섬유판		Prestress 긴장력 Load (kN)
	N (EA)	Type (mm)	N (EA)	Type (mm)	
C1-CONTROL	-	-	-	-	-
C1-P40W25B30	3	100	2 1	100 50	400

##### 4.2 해석 결과

###### 4.2.1 실험부재

탄소섬유판으로 보강된 부재 및 프리스트레스 강선으로 긴장력이 도입된 부재는, 구조실험 결과에서 나타난 바와 같이

선형구간이 확대되며, 초기강성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한 탄소섬유판의 부착 면적 및 프리스트레스 강선의 긴장력 도입에 따라 극한 강성 역시 크게 증진되는 것으로 나타났다. 해석 부재의 하중에 따른 변위 및 발생 변형을 역시 실험 결과와 거의 동일한 결과를 나타났다.

그림 8-9는 SC-Beam Series 부재 및 P-Beam Series의 하중 처짐 관계 특성을 실험결과와 비교 도시한 것이다. 실험결과 플랜지 하단부에 탄소섬유판을 부착한 SC-Beam Series 부재는 CONTROL보에 비하여 약 27%의 증가율을 보여주고 있으나, 해석결과에서는 이보다 약간 낮게 평가되고 있다(그림 8).

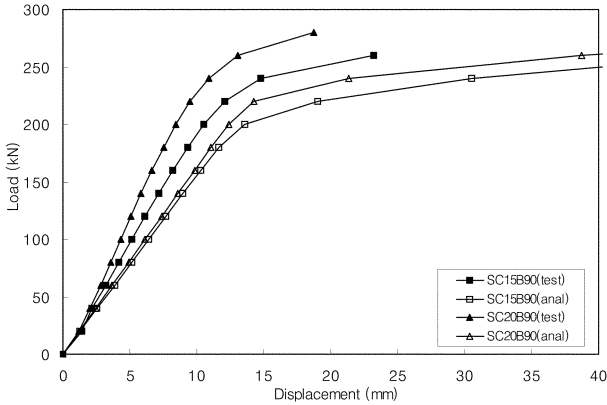


그림 8. SC Series의 하중-처짐 특성 비교

또한 P-Series의 하중-처짐 특성 역시 해석적인 방법으로 도출된 극한강도의 증진율은 실험에서 도출된 결과보다 다소 적게 평가되는 것으로 나타났다(그림 9). 그러나 이는 충분한 안전축의 범주에 속하므로 해석결과는 크게 문제가 없는 것으로 평가된다. 또한 하중 처짐 관계 특성을 실험결과와 비교한 결과, 초기강성 및 탄성계수가 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4.2.2 실물부재

그림 10은 본 해석에서 도출된 하중 처짐 관계 특성을 도시한 것이다. 해석 결과에서 나타난 하중 처짐 관계 특성 역시 하중초기에는 하중-처짐 관계 특성이 거의 선형적인 탄성 거동을 보이다가 하중이 증가함에 따라 비선형특성을 나타내는 전형적인 하중-처짐 특성을 보여주고 있다. 프리스트

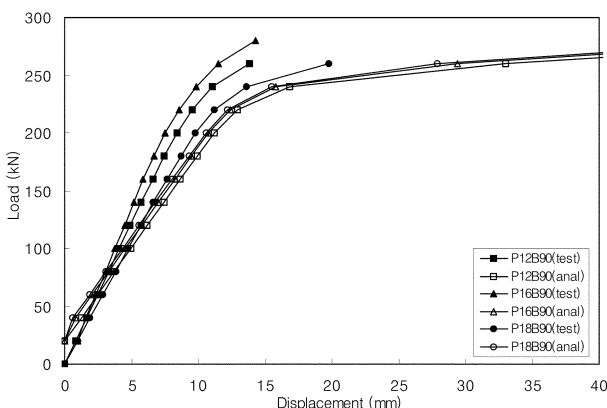


그림 9. P Series의 하중-처짐 특성

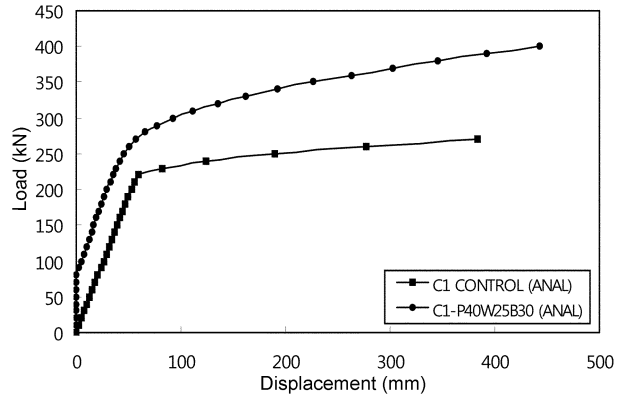


그림 10. C1-Beam의 하중-처짐 특성

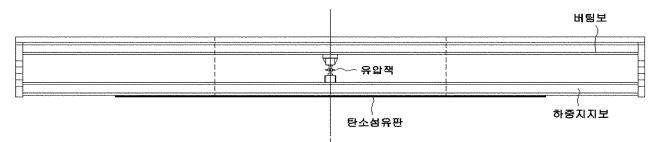
레스 긴장력이 도입되고, 웹부위 및 보 하단부에 탄소섬유판이 부착된 실물 크기의 해석 부재는 보강되지 않은 부재에 비하여 그 초기 강성이 현저하게 개선되며, 극한강도 역시 현저하게 개선되고 있음을 알 수 있었다.

### 5. 띠장 구조 시스템 구축

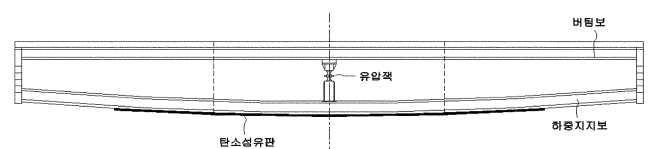
전술한 바와 같이, 본 실험 및 이론 연구를 토대로, 하부 플랜지 및 웹 부위의 탄소섬유판 부착 및 프리스트레스 힘의 도입을 병행할 때, 초기강성 및 극한강성의 증진을 향상시킬 수 있으며, 이렇게 제작된 보를 가시설 띠장 구조체로 사용할 경우 토압에 충분히 저항하는 기본 부재를 형성할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 실물 가시설 구조에 대한 해석을 수행한 결과, 본 구조해석 연구에 사용된 부재는, 극한강성의 증진, 초기강성의 증진 및 변형 특성에 매우 유리하며, 보강되지 않은 부재에 비하여 그 초기 강성이 현저하게 개선되며, 극한강도 역시 현저하게 개선되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 채택한 위 가시설 부재를 실제 적용할 경우 현재 널리 사용되고 있는 가시설 공법의 스트럿 간격을 현저하게 늘릴 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 토대로 흙막이 가시설 띠장 구조체의 휨 강성을 높이고자 하는 방법을 순차적으로 서술하면 다음과 같다.

- (1) 하중 지지대(H형강, H300x300x10x15) 준비 및 표면 처리
- (2) 하중 지지대(H형강)에 탄소섬유판 부착
- (3) 프리스트레스 강연선을 통한 긴장력 도입
- (4) 위 보를 원 띠장과 연결한 단위 띠장 시스템 제작 및 유압 Load Cell의 설치



#### (5) 유압 Load Cell로 하중을 가함



본 연구에서는 건설 신소재로 부각되고 있는 탄소섬유판을 강재에 부착하고 또한 강연선을 통하여 프리스트레스 긴장력을 도입하여, 지하 가시설 구조체 띠장 강성의 증대방안을 모색하고자 하였다. 이를 위하여, 본 연구에서는 탄소섬유판 및 긴장력이 도입된 보에 대한 구조실험을 수행 및 해석을 수행하였다.

1. 본 연구에서는 흙막이 가시설 구조물의 기본 요소가 되는 띠장의 강성증진 효과를 확보하기 위한 실험을 수행하였으며, 탄소섬유판으로 보강된 부재 및 프리스트레스 강선으로 긴장력이 도입된 부재는 보강되지 않은 부재보다 더 높은 하중에 이르기까지 선형구간이 확대되며 초기강성 및 극한강성이 크게 향상되는 것으로 나타났다.
2. 탄소섬유판에 발생하는 변형율은 부재의 변수에 따라 다소 다르게 나타났으나, 8,000-11,000 $\mu\epsilon$ 의 범주로 관찰되었으며, 이는 탄소섬유판과 부재의 부착능력이 탁월하여 탄소섬유판의 보강효과가 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.
3. 본 연구에서는 위와 같이 제작된 보를 띠장과 연결하고, 유압장치를 통하여 토압에 저항하는 하중을 직접적으로 재하 하여 띠장 구조체의 휨 및 전단강성을 높이고자 하는 기본 개념을 제시하였다.

### 감사의 글

위 연구는 (주)포스코건설 기술연구소 2008년도 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

- 김성보, 한만엽, 김문영, 정경환(2007) 시공 단계를 고려한 혁신적 프리스트레스트 가 시설(IPS) 띠장의 거동. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4호, pp. 485-492.
- 한만엽, 진경석, 강상훈, 김성보(2007) 혁신적 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS) 을 적용한 현장의 계측값과 구조해석값의 비교분석에 관한 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제1호, pp. 11-20.
- Al-Saidy, A.H., Klaiber, F.W., and Wipf, T.J. (2004) Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No. 2, pp. 163-172.
- Al-Saidy, A.H. (2001) *Structural behavior of composite steel beams strengthened/repared with carbon fiber reinforced polymer plates*. Ph.D thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Deng, J., Lee, M.M.K., and Moy, S.S.J. (2004) Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate, *Composites Structures*, Vol. 65, No. 2, pp. 205-215.
- Deng, J. and Lee, M.M.K. (2004) *Maximum interfacial stresses in beams strengthened with composite plates*. Metropolitan habitats and infrastructure, IABSE symposium report, Shanghai, China, pp. 310-311.
- Deng, J. and Lee, M.M.K. (2007) Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP Plate. *Composite Structures*, Vol. 78, No. 2, pp. 232-242.
- Nikoukar, F. (2004) *Strengthening of metallic structures using carbon fibre composite plates*, University of Southampton.
- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003) Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp. 30-40.

(접수일: 2009.1.22/심사일: 2009.2.26/심사완료일: 2009.3.18)