

원통형 정착구를 사용하고 외부 긴장재로 보강된 강재보의 극한거동

Ultimate Behavior of Steel Beam Strengthened with External Tendon and Cylindrical Anchorage

최 동 호* 정 상 환** 정 재 동***
Choi, Dong-Ho Chung, Sang-Hwan Jung, Jae-Dong

Abstract

This paper examines experimentally the ultimate behavior of I-type steel beam strengthened with external tendon and cylindrical anchorage and analyzes the strengthening effect on the parameters such as initial tendon force, eccentricity, number of strands, and strand areas. The experiment demonstrated that increasing the number of strands, strand areas and eccentricity is more effective than increasing initial tendon force. The proposed cylindrical anchorage system has advantages in applying these parameters. The results showed that the cylindrical anchorage system is efficient and applicable to strengthen steel beam.

요 지

본 논문에서는 원통형 정착구를 사용하고 외부 긴장재로 보강된 강 I형 보의 극한거동을 실험을 통하여, 초기 긴장력, 편심거리, 강연선의 개수 및 단면적의 변수에 대한 보강 효과를 분석하였다. 실험을 통해 초기 긴장력 보다 강연선의 개수, 단면적, 편심거리를 크게 하는 것이 보강에 더 효과적인 것으로 나타났다. 제안된 원통형 정착 시스템은 이러한 변수를 적용함에 있어 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그 결과로 원통형 정착 시스템이 강주형의 보강에 효율적이고 적용성이 있음을 입증하였다.

Keywords : Strengthening, External Tendon, Cylindrical Anchorage, Steel Beam, Strand, Eccentricity

핵심 용어 : 보강, 외부 긴장재, 원통형 정착구, 강주형, 강연선, 편심

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수,

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정, 감사원 과장

*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정, (주)다린이엔씨 대표이사

E-mail : samga@hanyang.ac.kr 02-2220-0328

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량 구조물은 공용기간 증대, 과적차량, 환경적 요인 등에 의해서 손상을 받아 구조물의 내구성, 강성이 감소하기 때문에 적절한 보수·보강을 실시하여 구조물의 사용성과 안정성을 확보하고 교량의 내하력을 증가시켜 수명을 연장시킬 필요가 있다. 이러한 보강공법 중에는 상판을 재시공하는 방법, 강판이나 탄소섬유로 하부를 보강하는 방법, 외부 긴장재를 이용하는 방법 등이 있다.

외부 긴장재를 이용하는 방법은 구조물의 탄성거동 범위를 증대시키고 극한하중의 증가와 피로 및 파괴 강도를 향상시킨다(Saadmanesh et al., 1989a, b). 또한 적용되는 부재의 자중이 적어서 추가 사하중에 대한 해석이 필요 없고, 필요시 긴장재의 교체가 용이하며(김기봉 등, 1998), 기존의 연구에 의해서 그 효과가 입증되었다. 또한 시공기간이 짧고 간편하여 실용성과 경제성에 있어서 효율적인 보수·보강을 할 수 있다(Troitsky et al., 1989).

외부 긴장재를 이용한 보강 공법에 사용되는 정착방식 및 정착장치는 다음과 같다. 콘크리트 교량에서는 정착판을 고정시키는 앵커볼트의 전단력만으로 긴장력을 지지하는 전단지지방식, 단부판과 정착판을 π 자 형태로 설치하여 단부판과 접촉하는 단면이 긴장력을 지지하는 지압지지방식, 강봉을 고정시켜 주는 볼트의 압축력에 의한 부착 전단마찰력으로 지지하는 마찰지지방식 그리고 기존의 전단지지와 지압지지방식을 혼합한 복합지지방식 등이 있으며, 각각의 방식에 따라 인장력을 효율적으로 전달할 수 있는 앵커키, 신전단 지지 정착구 등이 사용되고 있다(한만엽 등, 2002).

강교량에서는 강 I형보의 하부 플랜지와 정착구를 고장력 볼트로 체결하여 마찰지지하는 방법을 주로 사용하고, 강봉이나 강연선 등으로 긴장력을 도입하여 가설교량에 주로 사용되어 왔다(조두용 등, 2002).

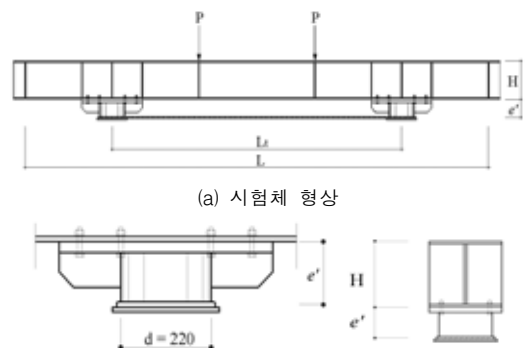
본 연구에서는 외부 긴장재를 이용한 보강공법에 사용되는 정착장치로 원통형 정착구를 적용하였다. 원통형 정착구를 적용한 외부 긴장 보강공법의 경우, 가요성(可撓性)이 있는 피복된 PS강연선을 사용하므로 곡선배치가 쉬워 시공성이 좋고, 노출된 강재의 부식을

예방할 수 있다. 정착구를 중심으로 PS강연선을 감아서 정착하므로 PS강연선 1개소에서의 긴장을 통해 2배의 긴장력이 도입되고, 정착구의 편심거리 조절이 용이하다. 그 결과 강연선 긴장에 따른 편심이 거의 발생하지 않고 정착구 중심에 하중을 작용시킬 수 있는 장점이 있다.

그러나 실교량의 보수·보강에 원통형 정착구를 적용하기 위해서는 실험 및 이론적 검증이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 원통형 정착구를 적용하고 외부 긴장재로 보강된 H-beam을 이용하여 정적 휨 시험을 실시하였다. 하중의 증가에 따라 발생하는 강주형 하부의 처짐, 상·하부 플랜지의 응력 그리고 긴장재의 증가 프리스트레스력을 검토하여 강교에서 외부 긴장재를 이용한 보강 공법의 효과를 분석하고, 원통형 정착구의 보강성능과 효율성 및 적용성에 대해 검토하였다.

2. 실험개요

본 실험에서 대상으로 하는 시험체의 제원은 Fig. 1(a)와 같이 총길이 4.2 m, 지점길이(L) 4.0 m의 현재 상용중인 H 294×302×12×12 부재를 사용하였다. 원통형 정착구(D = 220 mm)는 Fig. 1(b)와 같이 강주형 하부에 고장력 볼트로 부착하고, 원통형 정착부 둘레로 긴장재를 배치하여 외부 긴장력을 도입하였다. 강주형에 재하되는 하중은 주형 중앙부로부터 양단으로 50cm 떨어진 곳에 1m 폭으로 선하중을 재하하고, 수



(a) 시험체 형상
(b) 정착부 형상과 긴장재 이격거리
Fig. 1 시험체 형상과 정착부 상세



Fig. 2 강연선 커플러



Fig. 3 실험전경

직보강재는 하중이 재하되는 지점과 양단부의 지점 그리고 정착부의 부착위치에 각각 설치하였다. Fig. 2는 강연선 커플러 사진이고, Fig. 3은 실험 전경이다.

시험체에 사용하는 긴장재는 SWPC 7B 12.7 mm 와 15.2 mm 두 종류를 사용하였다. 긴장력은 일반적으로 PS강재 항복강도의 40% 이하로 도입할 경우 릴렉세이션에 의한 긴장력의 손실을 무시하기 때문에 이를 감안하여 항복강도의 40%를 기준으로 하였으며, 초기 긴장력(T_0)의 차이에 따른 변화를 살펴보기 위해 각 긴장재당 항복응력의 30%, 40%, 50%로 긴장력을 도입하였다. 또한 긴장재의 단면적과 개수, 편심거리를 변수로 하여 보강성능을 확인하였다. 긴장력 도입시 정착구 좌우의 편심 문제는 강연선에 구리사가 충전된 피복을 씌우거나 정착구에 윤활제를 발라서 감소시킬 수 있다.

자세한 시험체의 실험변수는 Table 1과 같다.

하중의 재하는 정격하중 980 kN의 UTM을 이용하여 재하하고, 일정한 휨모멘트를 받는 구간을 만들기 위해 2점 재하를 할 수 있는 재하블럭을 제작하여 하

Table 1 시험체 변수의 분류

	L_s/L	T_0 (kN)	Strand	e/H	e' (mm)
Case 1	무보강				
Case 2	0.625	62.72 ($0.4F_y$)	12.7mm 1EA	0.8	88.2
Case 3				1.0	147.0
Case 4				1.2	205.8
Case 5			12.7mm 2EA	0.8	88.2
Case 6				1.0	147.0
Case 7				1.2	205.8
Case 8			47.04 ($0.3F_y$)	12.7mm 1EA	1.0
Case 9		78.40 ($0.5F_y$)	12.7mm 1EA	1.0	147.0
Case 10		88.20 ($0.4F_y$)	15.2mm 1EA	1.0	147.0

e = 보의 도심으로부터 긴장재 중심까지 거리

e' = 보의 하부플랜지 하단부터 긴장재 중심까지 거리

중을 재하하였다.

정적 휨 실험에 사용된 게이지 부착위치는 Fig. 4에 나타내었다. 주형의 처짐을 측정하기 위하여 부재 중앙과 $L/4$ 지점의 하부에 LVDT를 설치하고, 강주형 중앙부의 변형률을 측정하기 위하여 상·하면 플랜지와 웨브에 각각 변형률 게이지를 설치하였다. 또한 초기 긴장력과 외부하중 재하에 따른 긴장재의 영향을 측정하기 위해 강연선에 변형률 게이지를 부착하였다.

시험체 단면의 제원은 Table 2에 나타내었고, 사용된 PS 강연선의 제원 및 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

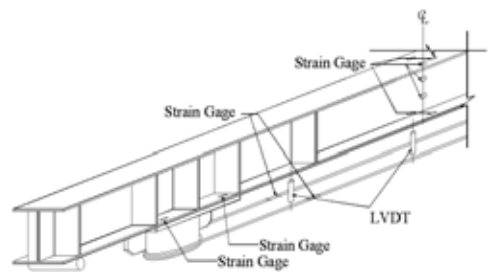


Fig. 4 게이지 부착위치 상세도

Table 2 시험체의 제원

H형강					
구분기호	단면적, A (cm ²)	단면 2차 모멘트, I (cm ⁴)	탄성계수, E (MPa)	단위중량 (N/m ³)	항복강도 (MPa)
H 294×302 ×12×12	107.7	16,900	2.06×10 ⁵	76,930	235

Table 3 PS 강연선의 제원 및 물리적 성질

PS 강7연선						
구분기호	표준 지름 (mm)	공칭 단면적 (mm ²)	인장 하중 (kN)	0.2% 영구연신율에 대한 하중 (kN)	릴렉세이션 값 (%)	
					N	L
SWP C 7B	12.7	98.71	183.26 이상	155.82 이상	8.0 이하	2.5 이하
	15.2	138.7	260.68 이상	221.48 이상		

3. 실험결과와 분석

본 연구에서는 원통형 정착구를 적용한 강재보의 극한거동을 초기 긴장력(T_0), 편심거리비(e/H), 강연선 (Strand) 개수 및 단면적을 변수로 한 실험을 통하여 제안한 원통형 정착구의 적합성과 효율성을 검토하기 위한 것이므로 구조해석과의 비교는 수행하지 않고, 실험 결과값을 통해 원통형 정착구의 보강성능을 분석하였다. 각 Case별 강도와 강성에 대해 정리하여 Table 4에 나타내었다.

3.1 T_0 의 변화에 따른 보강효과 (Case 1, 3, 8, 9와 Case 1, 3, 10)

Fig. 4는 초기 긴장력 T_0 의 변화에 따른 보강효과를 살펴보기 위해 편심거리비(e/H)를 1.0, 강연선의 개수를 12.7 mm 1개로 고정하고, 무보강과 47.04 kN, 62.72 kN, 78.40 kN으로 T_0 를 변화시켰을 때 하중이 증가함에 따라 강주형 중앙부의 처짐, 상·하부 플랜지

Table 4 시험체별 강도 및 강성

	T_0 (kN)	Strand	e/H	최대 재하하중 (kN)	강성 (kN/mm)
Case 1	무보강			504.50	20.91
Case 2	62.72 (0.4 F_y)	12.7mm 1EA	0.8	550.37	22.38
Case 3			1.0	569.48	23.04
Case 4		1.2	614.17	23.83	
Case 5		12.7mm 2EA	0.8	593.10	23.29
Case 6			1.0	667.67	24.12
Case 7			1.2	672.67	25.47
Case 8		47.04 (0.3 F_y)	12.7mm 1EA	1.0	594.96
Case 9	78.40 (0.5 F_y)	1.0		598.00	23.24
Case 10	88.20 (0.4 F_y)	15.2mm 1EA	1.0	586.73	28.43

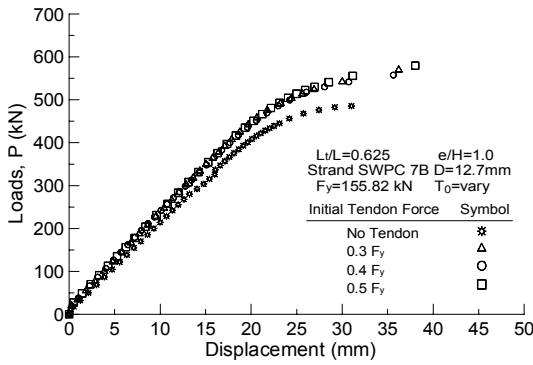
지의 응력 그리고 증가 프리스트레스력의 변화를 나타내었다.

Fig. 4에서 보면, 무보강에 비해 긴장력을 도입한 경우에는 처짐의 감소와 상·하부 플랜지의 응력이 감소하였으며 하부 플랜지의 응력 감소가 좀 더 크다. 이것은 초기 긴장력이 증가할수록 강주형의 중립축이 강주형의 하부 쪽으로 이동하면서 상부플랜지에 더 큰 압축응력이 작용하기 때문이다. 초기 긴장력이 도입된 경우, 긴장력별로는 하중이 증가함에 따라 처짐과 상부 플랜지의 응력 그리고 ΔT 의 증가량은 큰 차이를 보이지 않았다.

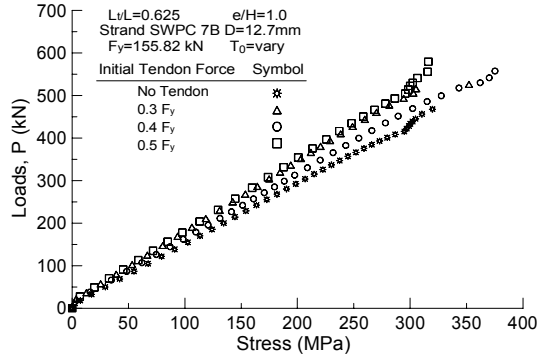
Table 5의 결과에서 보면, 무보강에 비해 긴장력을 도입한 경우에는 극한하중 및 강성이 증가하였다. 그러나 도입 긴장력에 따라 극한강도 및 강성은 뚜렷한 차이가 없었다.

Fig. 5는 e/H 를 1.0으로 고정하고, 강연선을 12.7 mm와 15.2 mm를 사용하여 각각 62.72 kN과 88.20 kN으로 긴장력을 도입하였을 때 하중이 증가함에 따라 강주형 중앙부의 처짐, 상·하부 플랜지의 응력 그리고 증가 프리스트레스력의 변화를 나타내었다.

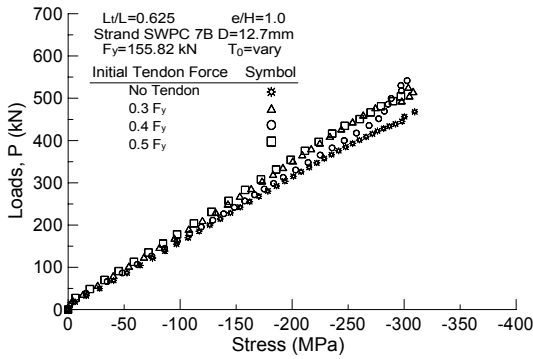
Fig. 5에서보면 강연선 15.2 mm를 사용한 경우가 12.7 mm를 사용한 경우보다 처짐과 상·하부 플랜지



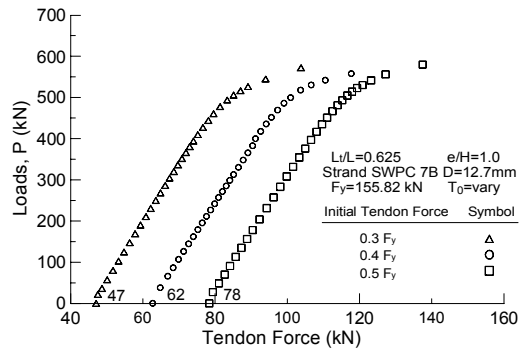
(a) 재하하중과 처짐 곡선



(b) 재하하중과 하부 플랜지의 응력 곡선



(c) 재하하중과 상부 플랜지의 응력 곡선



(d) 재하하중과 증가 프리스트레스력 곡선

Fig. 4 초기 긴장력에 따른 강주형 중앙부의 변형

Table 5 초기 긴장력이 변화하는 경우의 실험결과 비교

Case	초기 긴장력 (kN)	강연선	e/H	P_u (kN)	변화량	강성 (kN/m)	변화량
1	무보강		1.0	504.50	-	20.91	-
3	47.04	12.7 mm		569.48	13%	23.04	10%
8	62.72	1EA		594.96	18%	23.35	12%
9	78.40	1EA		598.00	19%	23.24	11%

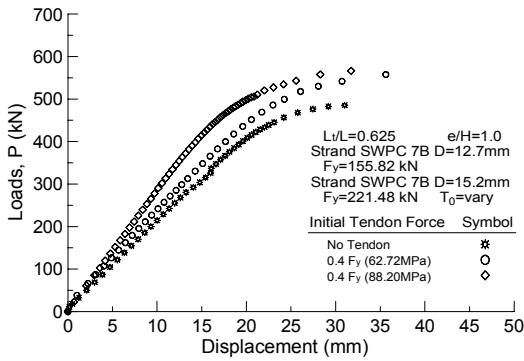
의 응력이 감소하였으나, 하중 증가에 의한 ΔT 의 증가량은 12.7 mm와 15.2 mm의 단면적 차이에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 6에서보면, 강연선의 단면적의 증가에 따라 극한강도는 무보강에 비해 13~18%, 강성은 10~

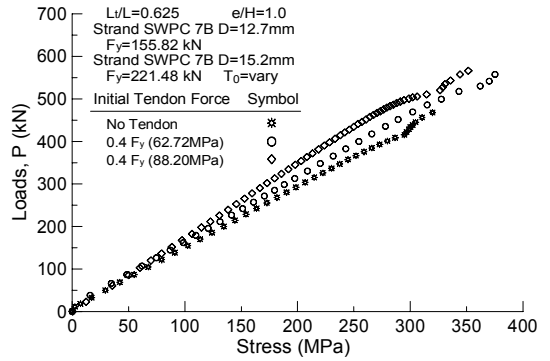
36%로 증가함을 알 수 있다.

Table 6 초기 긴장력과 강연선이 변화하는 경우의 실험결과 비교

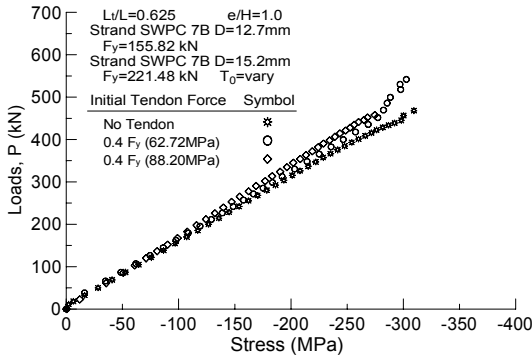
Case	초기 긴장력 (kN)	강연선	e/H	P_u (kN)	변화량	강성 (kN/m)	변화량
1	무보강		1.0	504.50	-	20.91	-
3	47.04	12.7 mm 1EA		569.48	13%	23.04	10%
10	62.72	15.2 mm 1EA		586.73	18%	28.43	36%



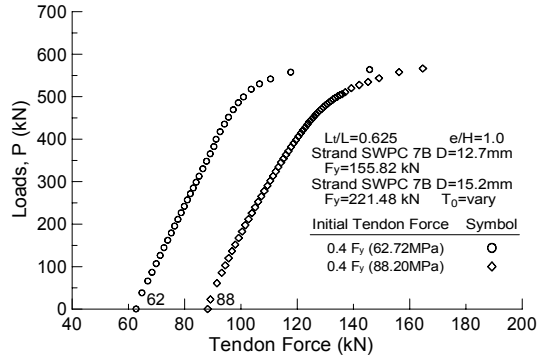
(a) 재하하중과 처짐 곡선



(b) 재하하중과 하부 플랜지의 응력 곡선



(c) 재하하중과 상부 플랜지의 응력 곡선



(d) 재하하중과 증가 프리스트레스력 곡선

Fig. 5 강연선의 종류에 따른 강주형 중앙부의 변화

3.2 편심거리의 변화에 따른 보강효과 (Case 2, 3, 4)

Fig. 6은 강연선의 개수를 12.7 mm 1개, 초기 긴장력을 62.72 kN으로 고정하고, 편심거리의 비 (e/H)를 0.8, 1.0, 1.2로 변화하였을 때 하중의 증가에 따라 강주형 중앙부의 처짐, 상·하부 플랜지의 응력 그리고 증가 프리스트레스력의 변화를 나타내었다.

Fig. 6에서 보면, e/H 가 0.8에서 1.2로 커질수록 처짐은 감소하지만, 상·하부 플랜지 응력은 뚜렷한 차이가 없었다. ΔT 는 e/H 가 클수록 증가량은 커진다. 이는, 편심거리를 크게 할수록 강연선이 하중에 더 많이 저항하기 때문이다.

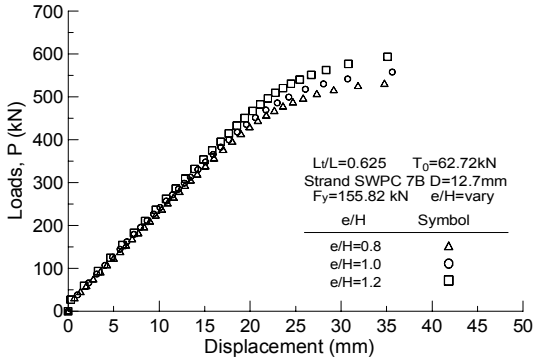
Table 7에서보면, 무보강인 경우에 비해 e/H 가 커

질수록 극한강도는 9~22%, 강성은 7~14% 증가함을 알 수 있다.

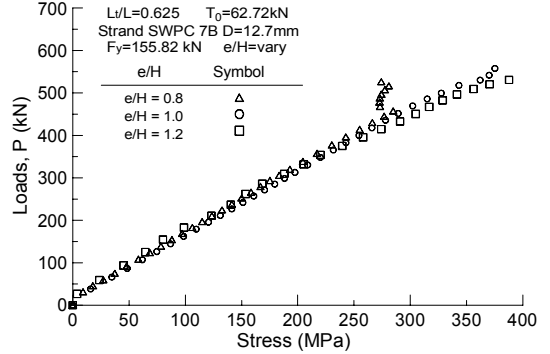
3.3 강연선 개수의 변화에 따른 보강효과

Table 7 편심거리가 변화하는 경우의 실험결과 비교

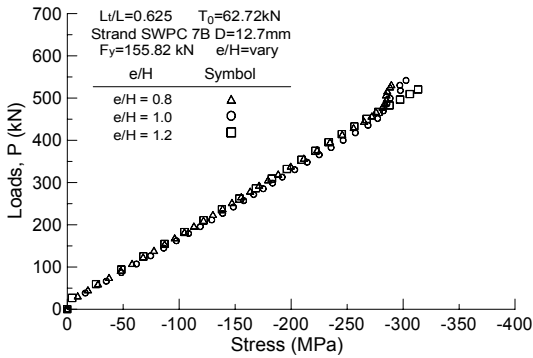
Case	초기 긴장력 (kN)	강연선	e/H	P_u (kN)	변화량	강성 (kN/m)	변화량
1		무보강		504.50	-	20.91	-
2	62.72	12.7 mm 1EA	0.8	550.37	9%	22.38	7%
3			1.0	569.48	13%	23.04	10%
4			1.2	614.17	22%	23.83	14%



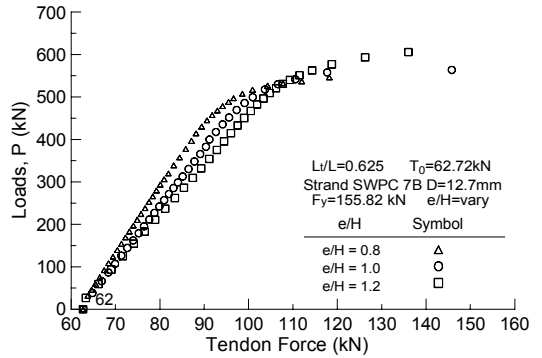
(a) 재하하중과 처짐 곡선



(b) 재하하중과 하부 플랜지의 응력 곡선



(c) 재하하중과 상부 플랜지의 응력 곡선



(d) 재하하중과 증가 프리스트레스력 곡선

Fig. 6 편심거리 비(e/H)에 따른 강주형 중앙부의 변화

(Case 3, 6)

Fig. 7은 e/H 를 1.0으로 고정하고, 강연선의 개수를 1개와 2개로 변화를 주었을 때, 하중이 증가함에 따라 강주형 중앙부의 처짐, 상·하부 플랜지의 응력 그리고 증가 프리스트레스력의 변화를 살펴보았다.

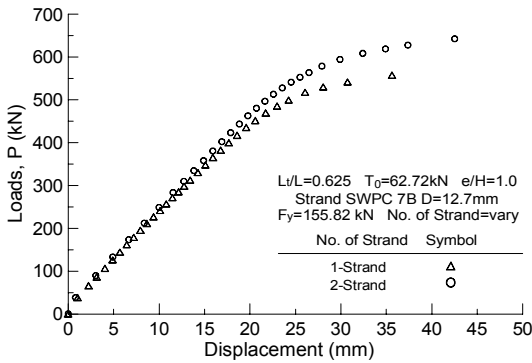
Fig. 7에서 보면 강연선의 개수가 1개에서 2개로 증가함에 따라 처짐의 제어효과와 하부 플랜지의 응력 감소 효과가 나타났으나 상부 플랜지의 응력 감소는 크지 않았다. 또한 ΔT 는 감소하는 경향을 볼 수 있다.

Table 8에서는 무보강인 경우에 비해 강연선의 개

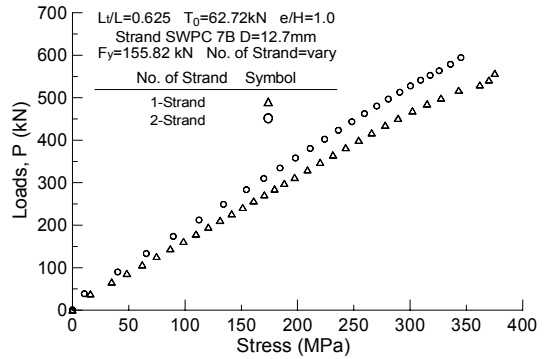
수가 증가함에 따라 극한강도는 13~32%, 강성은 10~15%의 증가가 발생하였다.

Table 8 강연선 개수가 변화하는 경우의 실험결과 비교

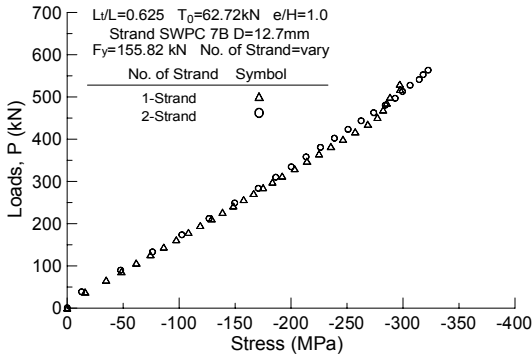
Case	초기 긴장력 (kN)	강연선 개수	e/H	P_u (kN)	변화량	강성 (kN/m)	변화량
1		무보강		504.50	-	20.91	-
3	62.72	12.7 mm 1EA	1.0	569.48	13%	23.04	10%
6		12.7 mm 2EA		667.67	32%	24.12	15%



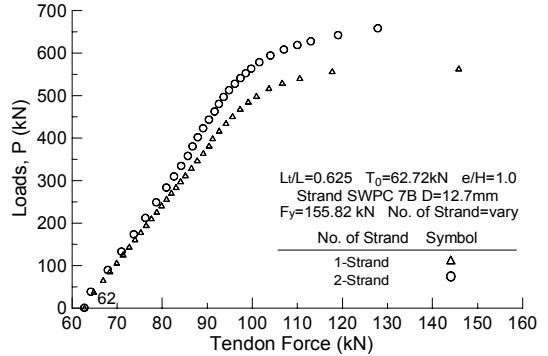
(a) 재하하중과 처짐 곡선



(b) 재하하중과 하부 플랜지의 응력 곡선



(c) 재하하중과 상부 플랜지의 응력 곡선



(d) 재하하중과 증가 프리스트레스력 곡선

Fig. 7 강연선 개수에 따른 강주형 중앙부의 변화

4. 결론

강교량의 보수·보강 공법으로써 원통형 정착구를 사용하고 외부 긴장재로 보강하기 위하여, 본 논문에서는 I형 강재보에 원통형 정착구를 설치하여 외부 긴장재의 초기 긴장력, 편심거리, 강연선의 개수 및 단면적을 변수로 실험을 하였다. 외부하중 증가에 따라 강주형 하부의 처짐, 상·하부 플랜지의 응력, 증가 프리스트레스력의 변화를 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 외부 긴장재로 보강된 강주형은 항복강도 및 극한 강도와 강성이 증가하고, 탄성거동이 확대되며, 특히 주형의 압축측인 상부플랜지보다 인장측인 하부

플랜지에서 더 효과적임을 알 수 있다.

- 2) 초기 긴장력을 변수로 하였을 경우, 무보강에 비해 처짐과 상·하부 플랜지의 응력은 감소하였고 극한 강도와 강성은 증가하였다. 그러나 도입된 긴장력의 차이에 따라 처짐, 상·하부 플랜지의 응력, ΔT 의 증가량 및 극한강도와 강성은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.
- 3) 편심거리비(e/H)가 증가함에 따라, 처짐은 감소하지만 상·하부 플랜지의 응력 감소는 큰 차이를 보이지 않았고, ΔT 의 증가량은 커진다. 또한 무보강과 비교하여 e/H 가 커질수록 극한강도 및 강성은 각각 9~22%, 7~14% 정도 증가하였다.
- 4) 강연선의 개수 및 단면적을 증가시킨 경우, 처짐과 상·하부 플랜지의 응력이 감소하였으며, ΔT 의

증가량은 강연선 개수가 증가함에 따라 감소하였으나, 강연선 단면적이 증가함에 따라서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 강연선의 개수를 증가시킨 경우, 무보강에 비해 극한강도는 13~32%, 강성은 10~15% 증가하였으며, 강연선의 단면적을 증가시킨 경우, 무보강에 비해 극한강도는 13~18%, 강성은 10~36% 증가하였다.

- 5) 각각의 변수 중에서 강연선의 개수를 증가시킨 경우 극한강도의 증가효과가 32%로 가장 크게 나타났고, 강연선의 단면적을 크게 한 경우 강성의 증가가 36%로 가장 크게 나타났다.
- 6) 강연선의 개수, 단면적, e/H 의 조절에 대한 보강효과가 우수하였으며, 이에 대해 조절이 용이한 원통형 정착구의 보강효과와 효율성을 입증하였다. 따라서 실교량에 외부 긴장재를 이용하여 보강할 경우, 원통형 정착구를 사용하면 효과적인 보강이 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업(2003산학연 A06-05) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김기봉, 정영수, 최혁주, 강보순, “외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구,” 한국강구조학회논문집, 제10권, 4호, 1998, pp. 701-708.
2. 조두용, 박대열, 박선규, “현장실험을 통한 외부 후긴장 Steel I-Beam의 휨거동 특성,” 한국구조물진단학회, 제6권, 제3호, 2002, pp. 151-158.
3. 한만엽, 박영훈, “외부 강선 보강의 체계적 분류 연구,” 한국콘크리트학회 2002년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 411-416.
4. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B. M., “Analytical Study of Prestressed Composite Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 9, 1989a, pp. 2364-2381.
5. Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B. M., “Experimental Study of Prestressed Composite Beams,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 9, 1989b, pp. 2348-2363.
6. Troitsky, M. S., “Prestressed Steel Bridges Theory and Design,” Van Nostrand Reinhold Company, USA, 1990.
7. Troitsky, M. S., Zielinski, Z. A. and Nouraeyan, A., “Pre-Tensioned and Posttensioned Composite Girders,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 12, 1989, pp. 3142-3153.

(접수일자 : 2005년 6월 22일)