외부긴장재로 보강된 강합성보의 극한거동에 대한 실험적 연구

The Experimental Study on the Ultimate Behavior of Steel-Concrete Composite Beams Strengthened with External Tendons

최 동 호* 나 호 성** 이 진 호***

Choi, Dong-Ho Na, Ho-Sung Lee, Jin-Ho

Abstract

Strengthening method of steel-concrete composite bridges using external tendons has been found as one of the most effective techniques of reinforcement and its application is increasing. In this paper, experimental test was carried out to show the effects on the yield loading and ultimate loading of steel-concrete composite beams strengthened with various configurations of external tendons. Quantitative analysis is carried out to evaluate the effects of experimental variables such as tendon force, deviator, tendon eccentricity and the shape of strands.

요 지

외부 긴장재를 이용한 보강공법은 효과적인 보강기술의 하나로써 연구되고 있으며 그 적용사례가 증가하고 있다. 본 논문에서는 실험적 연구를 수행하여 외부긴장재로 보강된 강합성교량의 항복하중 및 극한하중에 대한 효과를 살펴보았다. 또한 긴장력, 편향부, 편심거리와 긴장재의 배치형상 등의 다양한 실험변수를 설정하여 외부긴장재를 이용한 공법의 보강효과를 정량적으로 분석하였다.

Keywords : Deviator, Eccentricity, External tendon, Steel-concrete composite beam, Strengthening, Tendon configuration

핵심 용어 : 편향부, 편심, 외부긴장재, 강합성보, 보강, 배치형상

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 학생회원, 한양대학교 박사과정

*** 정회원, 한양대학교 석사과정

E-mail : samga@hanyang.ac.kr 02-2294-8154

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

우리나라 국가 경제가 급속하게 발전하던 시기에 건설된 수많은 교량들은 교통량의 증가에 의하여 시공 당시에 비해 내하력이 떨어지는 교량의 수가 증가하고 있고, 대형차량의 증가에 의해 지속적으로 설계기준의 상향 조정을 유도하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 적절한 보수·보강을 실시하여 구조물의 사용성과 안정성을 확보하고 교량의 내하력을 증가시켜 수명을 연장시킬 필요가 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 강교량의 보강방법으로는 슬래브를 재시공하는 방법, 강판이나 탄소섬유로 하부를 보강하는 방법, 교각을 증설하는 방법 등 여러 가지가 있지만 대부분은 보강효과가 높아도 공사규모가 크고 장기간 통행금지나 가설교량이 필요하게 될 가능성이 있는 등의 어려움이 따른다. 하지만, 외부긴장재를 이용한 보강 공법을 이용하여 강합성 교량의 주형을 보강하는 방법은 시공방법이 단순하여 설치가 용이하다. 또한, 긴장재가 외부로 노출되어 있어 유지관리가 쉬우며 타공법에 비해 보강효과가 크고 보강정도를 조정하기 용이한 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 국내외에서 강합성교에 외부긴장 보강방법을 이용한 시공사례 및 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 김기봉 등(1998)은 보강재의 유·무 및 긴장력의 크기에 따른 보강효과 및 거동에 대한 연구를 수행하였고 박용걸 등(2001)은 긴장 보강과정 중의 합성보의 거동에 대해 연구하였으며, 최동호 등(2006)은 원통형 정착구를 사용한 강합성보의 극한거동에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Lornec 등(2006)은 복부판에 절곡 설치된 긴장재를 이용한 외부긴장 합성보의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 기존의 연구에서는 편향부의 설치 및 긴장재의 배치형상 등의 변수들을 고려한 보강 성능의 검증에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 외부 긴장재로 보강한 단순 강합성보에 대한 파괴 실험을 수행하여 동일한 긴장력을 도입한 후 편향부의 유·무, 긴장재 편심거리, 긴장재의 배치 형상, 긴장재의 배치 위치 등의 다양한 실험 변수를 설정하여 보강 효과의 차이를 실험을 통하여 정량적으로 분석하였다.

2. 실험개요

본 실험에서 대상으로 하는 시험체의 제원은 Fig. 1과 같이 총 길이 4.0m, 지점간 길이 3.8m의 H 294×200×8×12 부재를 사용하였고 시험체의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 그리고 강부재와 콘크리트부재는 전단연결재를 사용하여 합성시켰다. 정착구는 강주형 상하부에 고장력 볼트를 사용하여 부착하였고 정착구 전후로 보강재를 설치하여 정착구에서의 좌굴을 방지하였다. 수직보강재는 하중이 재하되는 지점, 양단부의 지점과 정착부의 부착위치에 각각 설치를 하였다.

또한, PS강연선의 제원 및 물리적 성질은 Table 2와 같고 긴장력은 PS강재 항복강도의 50%, 60%를

Table 1 시험체 제원 및 물리적 성질

실험체 제원					
구분	단면적 (m^2)	단면2차 모멘트(m^4)	탄성계수 (MPa)	단위중량 (N/m^3)	항복강도 (MPa)
형강	7.238×10^{-3}	1.13×10^{-4}	2.06×10^{5}	78,500	320
슬래브	0.07	5.83×10^{-5}	2.4×10^{4}	25,000	27
합성단면	1.362×10^{-2}	2.462×10^{-4}	-		

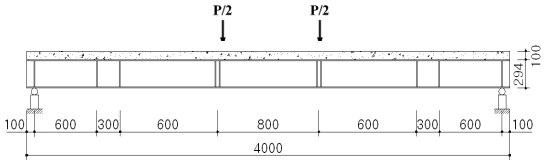
Table 2 PS 강연선의 제원 및 물리적 성질

구분 기호	표준 지름 (mm)	공칭 단면적 (mm^2)	인장 하중 (kN)	0.2%영구 연신율에 대한 하중 (kN)	릴렉세이션값 (%)	
					N	L
SWPC 7B	12.7	98.71	187.0	159.0	8.0이하	2.5이하

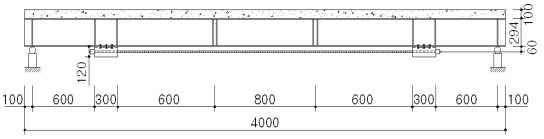
Table 3 시험체 변수의 분류

	T_o (kN)	e′(mm)	배치형상	비고
case 1	-	-	-	무보강
case 2	187.0 ($0.5\,F_y$)	60	직선배치	편향부 미설치
case 3				편향부 설치
case 4		160		
case 5			1점 절곡(5.7°)	
case 6			2점 절곡(11.3°)	
case 7		-60	직선배치	편향부미설치 하부플랜지 상단 긴장재 배치

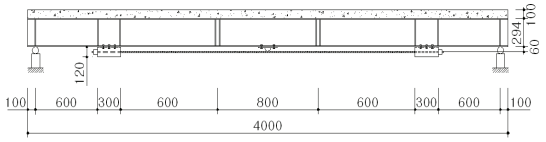
e' = 보의 하부플랜지 하단부터 긴장재 중심까지 거리



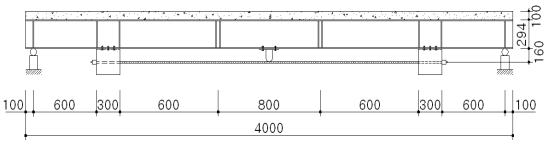
(a) case1 (무보강 표준 시험체)



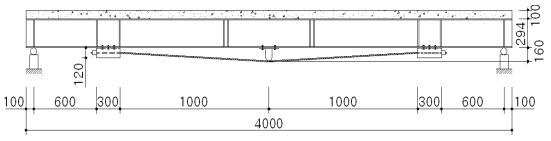
(b) case 2 ($e' = 60mm$, 편향부 미설치)



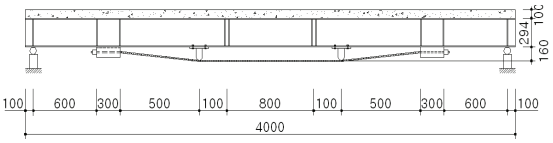
(c) case 3 ($e' = 60mm$, 편향부 설치)



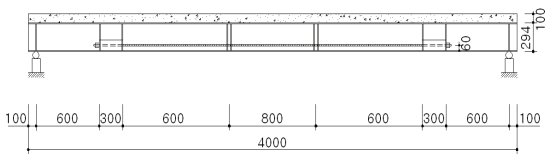
(d) case 4 ($e' = 160mm$, 편향부 설치)



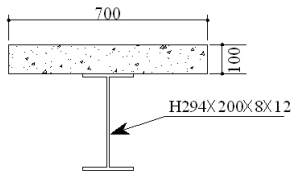
(e) case 5 ($e' = 160mm$, 1점 절곡 5.7°)



(f) case 6 ($e' = 160mm$, 2점 절곡 11.3°)



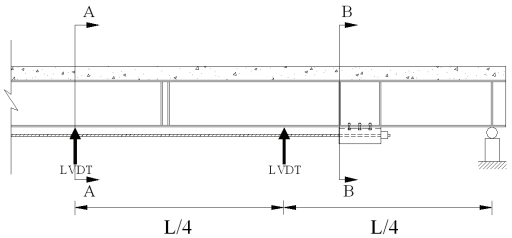
(g) case 7 ($e' = -60mm$, 하부플랜지 위 긴장재 배치)



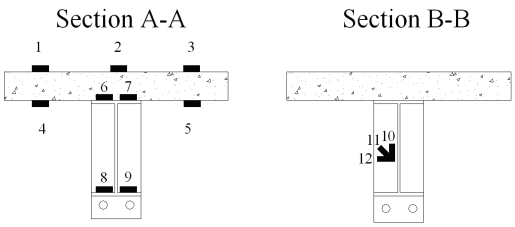
(h) 시험체 단면

Fig. 1 시험체 구조상세

가정하여 콘크리트 슬래브 상부의 인장응력에 대한 검토를 수행하였다. 그 결과 PS강재 항복강도의 60%를 도입하였을 때는 긴장력에 의한 콘크리트 슬래브 상부의 인장응력이 허용인장응력을 초과하여 콘크리트 슬래브의 허용인장응력을 벗어나지 않는 PS강재 항복강도의 50%를 기준으로 하여 각 긴장재당 93.5kN(총 187.0kN)을 도입하였다. 시험체에 재하되는 하중은 Fig. 1(a)와 같이 시험체중앙부로부터 양단으로 0.4m 떨어진 곳에 2점 재하하였다. 본 실험의 설계변수는 긴장력의 도입 유·무, 편향부 설치 유무, 긴장재 편심거리, 긴장재의 배치 형상, 긴장재의 배치 위치 등의 변수에 따른 보강 성능을 검증하였다. 자세한 설계변수는 Table 3과 같다. 또한, 정적 휨 실험에서 사용된 게이지의 부착위치는 처짐을 측정하기 위하여 강주형 L/2지점과 L/4지점 하부에 LVDT를 설치하고 강주형 중앙부의 상·하 부 플랜지, 슬래브 상·하부에



(a) 게이지 부착 단면

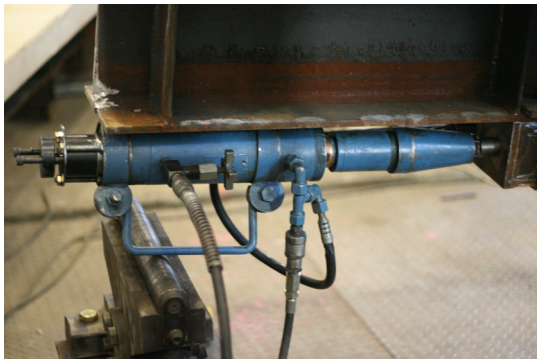


(b) 게이지 부착위치 상세도

Fig. 2 시험체 게이지 부착위치

각각 1축 변형률 게이지를 부착하였다. 그리고 시험체 복부에 전단보강효과를 검증하기 위한 3축 게이지를 부착하였다. 본 실험에 사용된 각 게이지의 세부 부착 위치는 Fig. 2과 같다. Fig. 3은 실험 전경 모습이다.

(a) 게이지 및 LVDT 부착



(b) PS 강연선의 긴장직후

(c) 시험체 세팅 및 하중재하

Fig. 3 실험 전경

3. 실험결과 분석

본 연구에서는 다양한 실험 변수에 따른 보강 효과의 차이를 실험적으로 분석·검토하였다. 실험실시 전에 Fig. 3(a)와 같이 긴장재에 게이지를 부착하여 하중재하 과정 중의 긴장재의 변형률을 측정하여 긴장재의 응력을 체크하였다. 강재항복 및 콘크리트 파괴 이전에 긴장재가 항복하지 않도록 긴장력을 도입하였고, 긴장재의 항복 직전에 실험을 중단하여 이때의 결과값을 합성보의 극한강도로 정의하였다. Table 4와 Fig. 4, 5에 각 시험체의 하부플랜지의 항복강도 및 극한강도에 대한 결과를 정리하였다.

Table 4 하부플랜지 항복강도 및 극한강도

구 분	항복강도 (kN)	항복강도 증가량(%)	극한강도 (kN)	극한강도 증가량(%)
case 1	411.04	-	537.20	-
case 2	500.80	21.8	581.85	8.3
case 3	517.38	25.9	644.71	20.0
case 4	592.23	44.0	765.57	42.5
case 5	637.06	55.0	780.68	45.3
case 6	715.84	74.2	789.18	46.9
case 7	504.82	22.8	607.53	13.1

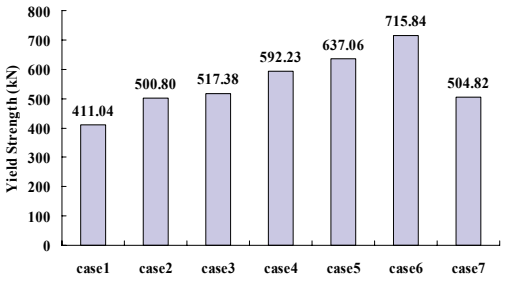


Fig. 4 시험체별 항복강도의 비교

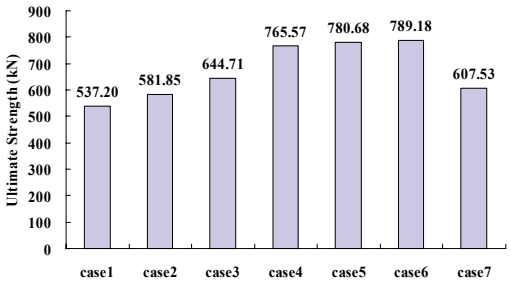


Fig. 5 시험체별 극한강도의 비교

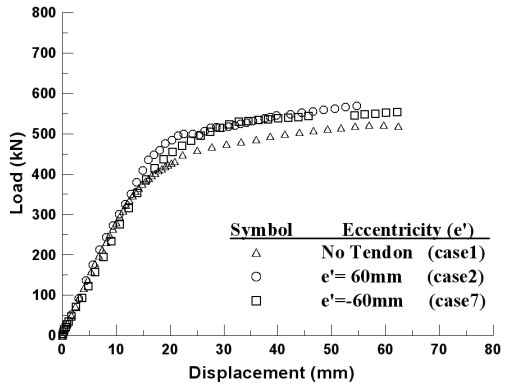
하부플랜지의 항복강도 및 극한강도를 비교한 결과 2점 절곡배치된 case 6에서 항복강도 및 극한강도가 가장 크게 증가하였고 무보강 시험체인 case 1에 비해 2점 절곡 배치된 case 6에서 항복강도는 74.2%, 극한강도는 46.9%가 증가하였다.

3.1 긴장력 도입 유·무 및 긴장재 배치 위치에 따른 보강 효과

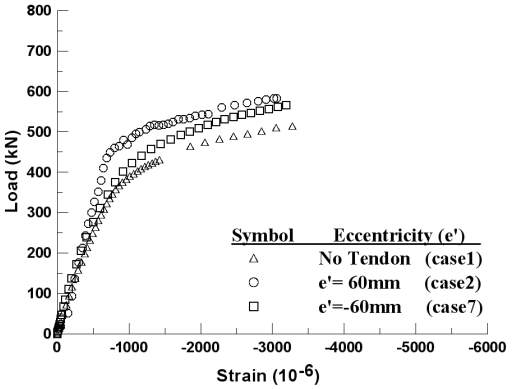
Fig. 6는 긴장력 도입에 따른 보강효과를 살펴보기 위해 긴장력이 도입되지 않은 무보강 시험체 case 1과 긴장력을 도입한 case 2, 7을 분석하였고, 긴장재의 배치 위치에 따른 보강효과를 살펴보기 위해 하부플랜지로부터 이격거리를 60mm로 고정하고 하부플랜지 아래 긴장재를 설치한 case 2와 하부플랜지 위에 긴장재를 설치한 case 7을 비교하여 보강효과를 분석하였다. Fig. 6(a) 하중-처짐 곡선의 관계를 비교해 보면 무보강시험체 case 1보다 case 2, case 7에 대해 극한강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6(b), (c)의 하중-변형률의 관계에서 볼 수 있듯이 case 1에 대하여 case 2와 case 7에서는 항복강도 및 극한강도가 증가하였다.

3.2 편향부 설치에 따른 보강 효과

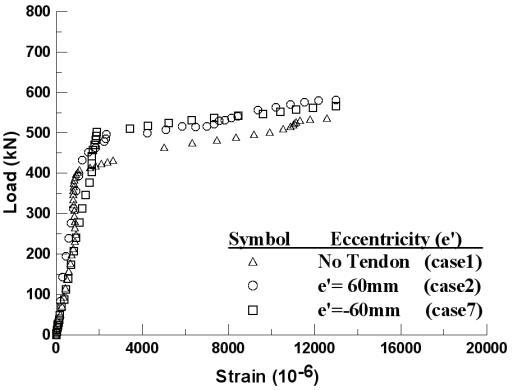
편향부의 설치는 하중이 증가함에 따라 구조물이 변형되어 처짐이 발생하여도 편심거리를 유지시켜주므로 편향부를 설치하지 않았을 경우 보다 큰 보강효과가 기대되고, 구조물이 변형을 일으키는 순간부터 전단보강 효과가 예상된다. 이와 같은 편향부 설치의 보강효과를 살펴보기 위해 case 2는 편향부를 설치를 하지 않고, case 3은 편향부를 설치하여 편향부 유·무에 따른 보강효과를 분석하였다. Fig. 7(a) 하중-처짐 곡선에서 편향부를 설치하였을 경우, 극한강도가 증가하는 것을 알 수 있고 Fig. 7(c) 콘크리트 상부 하중-변형률곡선에서는 case 3에서 극한응력이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(d) 하부플랜지 하중-변형률의 관계에서는 case 2에 비해 case 3에서 항복강도는 3.3%의 증가를 보였고 극한강도의 경우 10.8%의 증가를 보였다. 또한, Fig. 7(b)에서 전단 보강에 대한 효과를 검토한 결과 하중이 560kN 부근에서 편향부를 설치한 case 3의 전단변형률이 편향부를 설치하지 않은 case 2에 비해 약 20% 정도 감소하였다.



(a) 하중-처짐 곡선

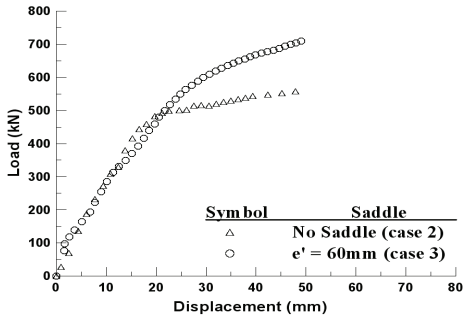


(b) 슬래브 상부 하중-변형률 곡선

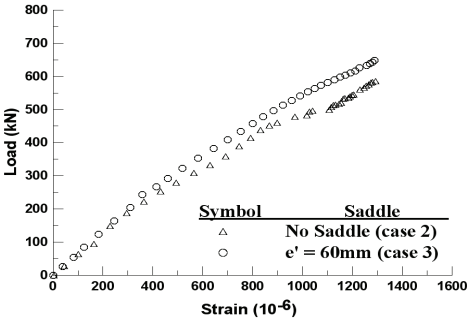


(c) 하부플랜지 하중-변형률 곡선

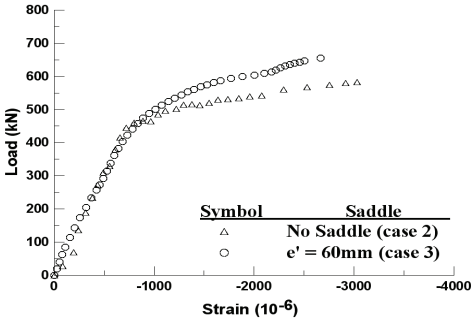
Fig. 6 긴장력 도입 및 긴장재 배치 위치에 따른 보강효과



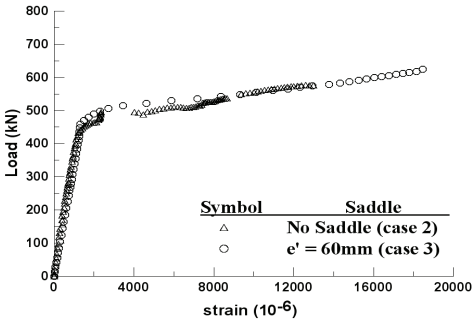
(a) 하중-처짐 곡선



(b) 강주형 복부 하중-전단변형률 곡선

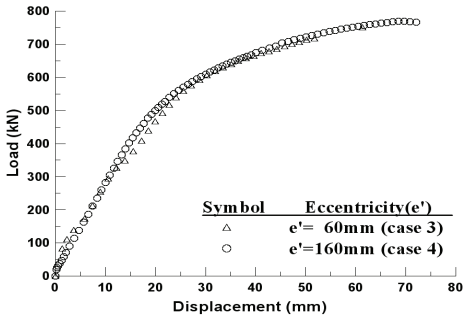


(c) 슬래브 상부 하중-변형률 곡선

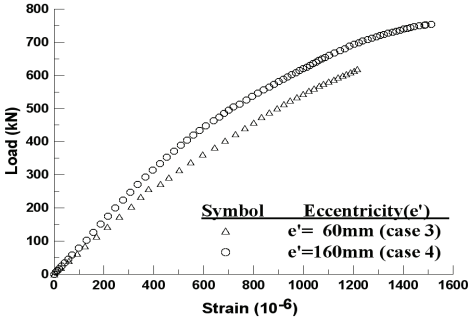


(d) 하부플랜지 하중-변형률 곡선

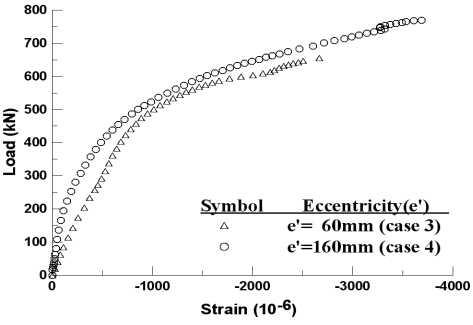
Fig. 7 편향부 설치 유·무에 따른 보강효과



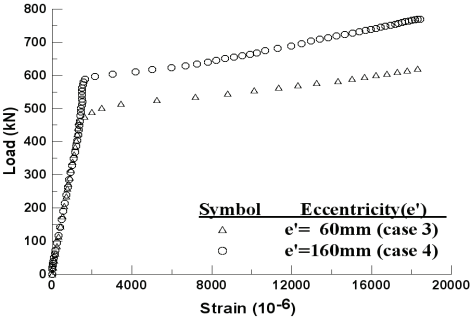
(a) 하중-처짐 곡선



(b) 강주형 복부 하중-전단변형률 곡선

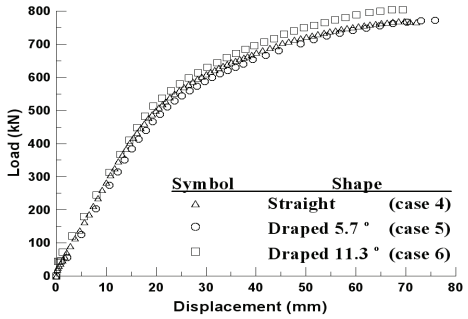


(c) 슬래브 상부 하중-변형률 곡선

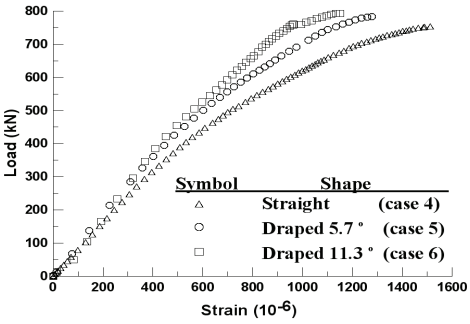


(d) 하부플랜지 하중-변형률 곡선

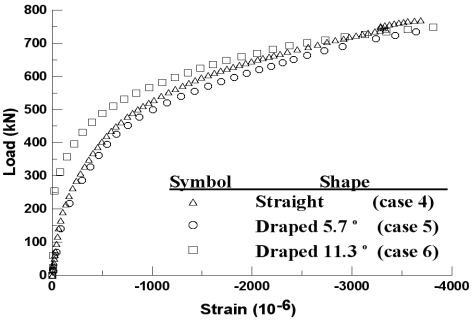
Fig. 8 편심거리에 따른 보강효과



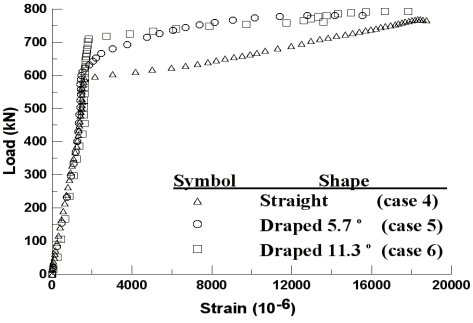
(a) 하중-처짐 곡선



(b) 강주형 복부 하중-전단변형률 곡선



(c) 슬래브 상부 하중-변형률 곡선



(d) 하부플랜지 하중-변형률 곡선

Fig. 9 긴장재 배치 형상에 따른 보강효과

3.3 편심거리에 따른 보강효과

편심거리에 따른 보강효과를 살펴보기 위해 하부플랜지하단부터 긴장재 중심까지 거리가 60mm인 case 3과 160mm인 case 4를 비교하고 편심에 따른 보강효과를 분석하였다. Fig. 8(a) 하중-처짐 곡선에서 거의 비슷한 경향을 보이고 있지만 case 4에서 극한강도가 증가하였고 Fig. 8(b)에서 전단보강에 대한 효과를 분석한 결과 case 3의 극한하중인 683kN 지점에서 case 3보다 case 4의 전단 변형률이 13.4% 증가 하였다. 또한, 하중-변형률의 관계 (c), (d)에서는 콘트리트 상부와 하부 플랜지에서 항복강도와 극한강도가 각각 증가하는 것을 알 수 있고, Fig. 8(d)에서 case 3에 비해 case 4에서 항복강도와 극한강도가 각각 14.5%와 18.7%가 향상되었다.

3.4 긴장재의 배치 형상에 따른 보강효과

배치형상에 따른 보강효과를 살펴보기 위해 하부플랜지 하단부터 긴장재 중심까지 거리를 160mm로 고정하고, 긴장재의 배치형상이 직선 배치된 case 4, 1점 절곡 배치된 case 5, 2점 절곡 배치된 case 6을 비교하였다. Fig. 9(a) 하중-처짐 곡선에서 3개의 곡선이 탄성구간에서는 비슷한 값을 가지고 있지만 항복점에 도달할수록 차이를 보이고 있다. Fig. 9(b) 하중-전단변형률 곡선에서는 case 4의 극한하중 765.57kN에서 case 4에 대비해 case 5, case 6의 전단변형률이 각각 25%, 37%가 감소하여 2점 절곡 배치 형상을 갖는 case 6이 전단 보강효과가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 9(d) 하부플랜지 하중-변형률 곡선에서는 case 4에 비해 case 5와 case 6은 항복강도가 각각 7.6%와 20.9%가 향상되었고, 극한강도는 1.9%와 3.1%가 향상 되었다. 이는 보강강선의 절곡각도가 증가함에 따라 강주형 복부에서 발생하는 전단변형율이 작아지며 내하력이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 1점절곡에 비해 2점절곡 배치형상의 시험체의 보강효과가 크게 나온 것은 1절점곡 배치형상에 비해 2절점곡 배치형상의 경우에서 편향부 설치에 위치에 따른 상향의 전단보강력의 분포 면적이 넓어져 우수한

보강효과 및 내하력 증가를 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강합성보의 내하력 향상을 위해 외부긴장력을 도입할 경우 각 변수별 보강효과를 비교·분석하여 결과를 도출하였다. 기존의 외부긴장 공법과 관련된 연구에서는 단순히 긴장력의 도입 유·무 및 편심거리 차이에 따른 연구결과를 제시하였으나, 본 연구에서는 하부플랜지 하단에 편향부를 설치함으로써 긴장재를 절곡 배치하여 이를 통한 강합성보의 내하력의 증가 정도를 실험적으로 평가하였다. 또한, 편향부를 1점 및 2점 절곡 배치함으로써 긴장재의 절곡 각도를 달리 하였을 경우의 내하력의 증가 정도를 평가하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 편향부의 설치는 하부플랜지 하단에서 강합성보의 상향으로 수직력을 발생시켜 약 20% 정도의 전단변형률 감소 효과를 나타내었으며 편향부를 설치하지 않았을 경우에 비해 하부플랜지의 항복강도는 약 3%, 극한강도는 약 11%의 증가 효과를 나타내었다.
2) 편향부를 2점 배치하였을 경우는 1점 배치하였을 경우에 비해 보강강선의 절곡 각도가 증가하게 되어 약 37%이상 우수한 전단보강 효과를 나타내었다.
3) 편향부를 2점 배치하였을 경우는 1점 배치에 비해 극한강도의 경우는 약 3%정도 증가하였으나 항복강도의 경우는 약21%가 증가하였다.
4) 편향부를 2점 배치하였을 경우에는 무보강 시험체에 비해서도 항복강도는 약 74%, 극한강도는 약 47% 증가였다.

따라서, 외부긴장재를 이용한 강합성보의 내하력 증가 방안으로써 긴장재를 2점 절곡 배치하는 방안이 가장 우수한 보강성능을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(C103A2000005-05A0200-00430) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김기봉, 정영수, 최혁주, 강보순, "외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구", 한국강구조학회논문집, 제10권, 제4호, 1998, pp. 701-708.
2. 박용걸, 박영훈, "외부 후긴장 보강 과정의 합성보 거동에 대한 실험 및 해석적 연구," 한국구조물진단학회, 제5권, 제4호, 2001, pp. 147-153.
3. 최동호, 정상환, 정재동, "원통형 정착구를 사용하고 외부 긴장재로 보강된 강재보의 극한거동," 한국구조물진단학회, 제10권, 제2호, 2006, pp. 102-110.
4. Lorenc, W, Kubica, E, "Behavior of composite beams prestressed with external tendons: Experimental study", Journal of constructional steel research, Vol. 62, No. 12, 2006, pp. 1353-1366.

(접수일자 : 2008년 5월 8일)
(심사완료일자 : 2008년 6월 13일)