

외부 후긴장 보강 과정의 합성보 거동에 대한 실험 및 해석적 연구

The Experimental and Analytical Study on the Behavior of Composite Beam in the Processing of External Post Prestressing strengthen

박 용 곁*

Park, Yong-Gul

박 영 훈**

Park, Young-Hoon

Abstract

The major objectives of this study are to investigate experimental and analytical behavior of composite steel plate strengthened by external post prestressing method and to study the increasing magnitude of load carrying capacity by the external post prestressing method. With installed strain gauges and LVDT, the change of structural behaviors according to the amount of prestressing force is measured and the effects of shear strengthening according to the degree of angle in tendon are studied. The analytical structural behavior according to the amount of prestressing force is also investigated using finite element method. The effectiveness of strengthening of external post prestressing method is proved and an efficient FEM model is suggested by comparing the test results and analyzing results.

keywords : External Post Prestressing, Reinforcement, Load Carrying Capacity

1. 서 론

최근 이루어지고 있는 높은 경제성장속도는 교통량의 증가뿐만 아니라 교통하중의 증량화를 동반하고 있으며, 이러한 교통하중의 증량화는 지속적인 설계기준의 상향 조정을 유도하고 있다.

그 결과, 국내의 공용중인 전체 교량 중 약 70% 이상의 교량이 D6, T6, D8, T8, D9, T9, DB13,

DB13.5, DB18의 설계 활하중에 의해 설계되어, 현행 설계기준으로서는 최대 2등급 이하의 내하력 수준을 확보하고 있는 것으로 볼 수 있으며, 설계 당시의 설계하중 이상의 지속적인 차량하중에 의한 손상의 가중으로 공용 가능 기간이 급속도로 감소하고 있는 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 대두 될 수 있는 교량의 신설방안은 그 결과가 가장 확실한 방법이나, 가

* 서울산업대학교 구조공학과 교수

** 부천대학 토목공학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2002년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

교(temporary bridge) 건설비등 건설에 따른 유형경비와 함께 물류이동의 지연, 연료소비 증대 등의 무형비용의 막대한 재원이 필요하게 되어 아주 신중하게 검토되고 있다.

한편, 기존 교량의 보강이 합리적으로 이루어질 경우, 상대적으로 적은 비용으로도 요구되는 내하력을 확보할 수 있어 경제적으로 매우 효율적인 방안이 될 수 있으며, 현재 국내에서 사용되고 있는 보강방법으로는 강관뒤틀림, 탄소 및 유리섬유 부착공법, 교각 증설 공법, 후긴장을 이용하는 공법 등이 있다.

특히, 후긴장 보강공법은 설계에 수반되는 구조해석이 비교적 명확하며 교량구조물 뿐만 아니라 건축구조물 등 그 적용범위가 매우 넓은 보강방법이다.⁵⁾ 그러나 이러한 후긴장 보강공법의 보강효과 검증에 대한 실험 및 연구는 국내에서 극히 일부 시도되었으나,^{1),2)} 후긴장력 도입양 및 도입과정에 따른 합성보의 거동 변화에 대한 연구는 매우 미비한 상태이다.

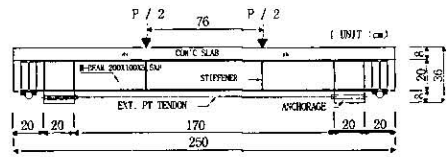
따라서, 본 연구에서는 기존 교량의 외부 후긴장 보강 공법의 적용에 있어서 긴장력 도입과정의 합성보의 거동 변화를 측정된 주형하부 플랜지, 슬래브 상부, 정착단의 변형 및 처짐과 비선형 해석의 결과를 비교하여 분석하였으며, 휨보강과 함께 전단보강까지 고려되는 외부 철골 후긴장 합성보에 있어서도 긴장재 절곡각도에 따른 거동을 실험치와 해석치를 비교하여 연구하였다.

2. 외부 후 긴장력 결정 및 실험방법

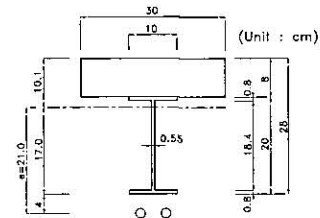
본 연구에서는 Fig. 1과 Table 1과 같이 시간에 따른 유효폭을 갖는 합성보 시험편에 강선을 이용한 후긴장 보강을 실시하였다. 한편, PS 강연선의 제원 및 물리적 성질은 Table 2에 나타내었다.

한편, 적용 최종 외부 후 긴장력 결정을 위하여 Fig. 2와 같이 기존 상용 구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 구조해석을 실시하였다.

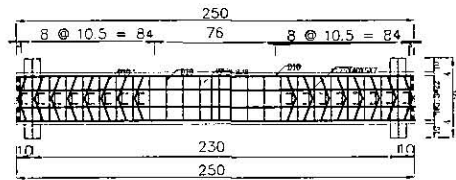
Fig. 2에서 슬래브는 솔리드(solid) 요소를 사용하였으며, 주형은 쉘(shell) 요소를 사용하였다. 또한, 슬래브와 주형, 주형과 정착단을 LUSAS에서 지원되는 Tied Mesh 기능을 이용하여 연결하였으며, 실제



(a) 측면도 및 정착단



(b) 단면도



(c) 배근도

Fig. 1 합성보 실험체 단면 제원

Table 1 실험체 제원 및 재료성질

공칭 단면적 (mm ²)	인장 하중 (tonf)	0.2%영구연신율에 대한 하중(tonf)	연신율 (%)	릴랙세이션 값(%)	
				N	L
138.7	26.6 이상	22.6이상	3.5 이상	8.0 이하	2.5 이하

Table 2 PS 강연선의 제원 및 물리적 성질

	A (cm ²)	I (cm ⁴)	E (kgf/cm ²)	단위중량 (kgf/cm ³)	허용응력 (kgf/cm ²)
슬래브	240	1,280	2.51×10 ⁵	2.5	33.5
형강 (SS400)	27.16	1,761	2.1×10 ⁶	7.85	1,400
합성단면	55.88	4,601			

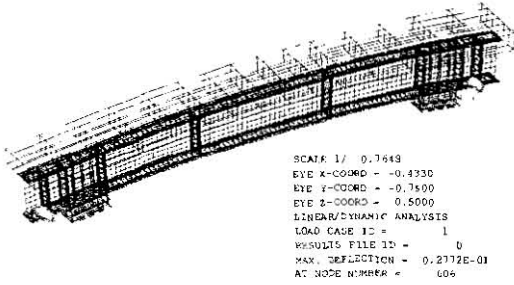


Fig. 2 시험체 유한요소해석 모델링(Model-A)

시험체에서의 정착단과 주형의 하부 플랜지는 고장력 볼트만에 의해 강결되어 있는 점을 고려하여 정착단과 정착단 주형 하부 플랜지의 볼트 구멍 주위의 일정 면적만으로 강결시켰다.

최종 외부 후 긴장력 결정에 있어서 Fig. 2의 유한요소해석 모델을 이용하여 해석한 결과, 도입 긴장력 9.6tonf에서 상부 슬래브의 휨인장응력이 콘크리트 파괴계수(modulus of rupture)에 도달하는 것으로 분석되었으며, 30tonf까지 긴장한 예비 실험에서는 약 9.6t~11.5tonf 정도의 도입 긴장력에서 콘크리트 슬래브 상단에 균열이 발생하는 것으로 나타났다.

한편, 국내에서 실제 외부 후긴장 공법의 적용에 의해 1등급교(DB-24) 내하력이 상승된 강합성 교량의 보강효과를 분석하면, 외부 긴장에 따라 주형 하부 플랜지에 최종적으로 도입된 압축응력은 293 kgf/cm^2 로서, 강부재 항복응력(1400 kgf/cm^2)의 약 21% 정도의 압축응력 도입으로 2등급의 수준의 교량이 1등급 수준의 교량으로 보강되었다.³⁾

따라서, 본 연구에서는 유한요소해석 결과 및 예비 긴장 실험결과에 따른 콘크리트 파괴거동, 실제 교량에 적용된 보강 효과를 고려하여 Table 3과 같이 적정 긴장력을 해석상으로 주형 하부 플랜지에 351.2 kgf/cm^2 정도의 압축응력이 도입되는 3.84tonf으로 선정하였으며, 콘크리트 파괴에 따른 비선형 상태에서의 긴장력 변화에 따른 보강효과의 변화를 조사하기 위하여 긴장력 6.73tonf, 9.61tonf, 13.45tonf의 긴장력을 도입하여 실험을 수행하였다. 또한, 휨보강 뿐만 아니라 전단보강 효과를 증진시키기 위한 절곡보강 시험체 (2.5° , 5°)에 있어서⁶⁾ 절곡 각도 변화에 따른 전

Table 3 시험체의 분류

시험편 번호	긴장방법	도입 긴장력(tonf)	비고
1	직선보강	3.84	
2	직선보강	6.73	
3	직선보강	9.61	
4	직선보강	13.45	
5	절곡보강	9.61	절곡각도 2.5°
6	절곡보강	9.61	절곡각도 5.0°

단보강 효과를 분석하기 위하여 직선 보강 시험체 3편 같은 긴장력 9.61tonf을 도입하여 실험을 실시하였다. 외부 후 긴장력의 도입은 Photo 1과 같이 Centre hole Jack(ZPE-23FJ) 2대를 동시에 사용하여 각각의 강연선에 대한 긴장력의 차이를 최소화 하였으며, 보강 긴장력의 조절은 Jack에 연결된 Hydraulic Pump의 가압조절장치를 이용하여 단계별로 실시하였다. 설치된 변형을 게이지 및 처짐기 부착위치를 Fig. 3에 나타내었다.

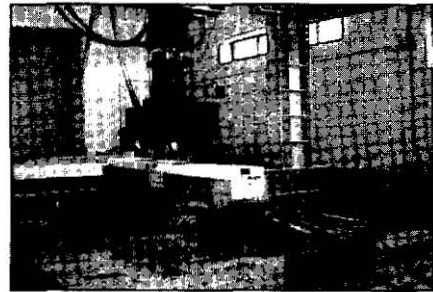


Photo 1 외부 후긴장 도입 전경

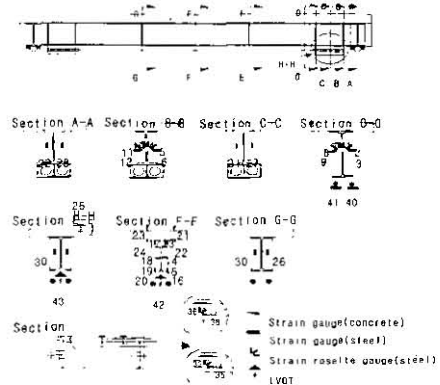


Fig. 3 변형률 게이지 및 처짐기 부착 위치도

Fig. 3에서 긴장력 도입에 따른 발생 휨 응력과 전단 응력을 측정하기 위하여 경간 중앙부와 전단부에 변형을 게이지를 설치하였으며, 실제 도입되는 긴장력의 손실량을 측정하기 위하여 직접 강선에 변형을 게이지를 부착하였다. 또한, 외부 후 긴장에 따른 정착부의 주형 하부 플랜지의 거동 또한 측정하였다.

3 직선 외부 후긴장에 따른 합성보의 거동 분석

3.1 긴장력 손실량 측정

직선 외부 후긴장에 있어 Hydraulic Pump의 가압 조절장치에 나타나는 실제 긴장력에 따른 측정 변형률과 (1)에 의한 계산 변형률을 Fig. 4에 나타내었다.

$$\epsilon_{ca} = \frac{P}{A_p \cdot E_p} \quad (1)$$

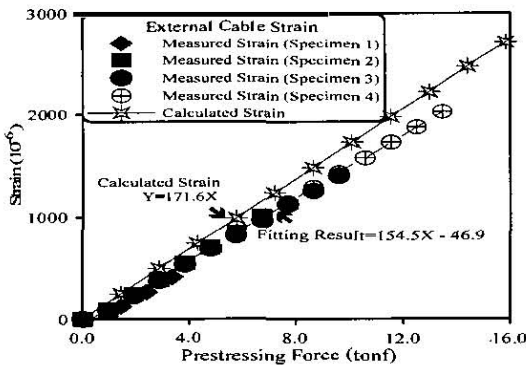


Fig. 4 긴장력 도입에 따른 강선 변형률

(1)에서 ϵ_{ca} 는 계산 변형률, P는 Hydraulic Pump의 도입 긴장력, A_p 는 강선의 단면적, E_p 는 강선의 탄성계수이다.

Fig. 4를 살펴보면, 실제 측정 변형률이 계산 변형률보다 적게 나타나고 있어, 긴장력 도입 과정에서 어느 정도 손실이 발생하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 이러한 손실량은 긴장력의 증가와 비례하여 긴장력 13.45tonf에서는 측정 변형률이 계산 변형률보다

약 12% 정도 적게 발생하고 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 긴장력 손실의 원인으로는 유압 펌프 게이지 및 가압장치의 기계적 오차와 Centre hole Jack과 강선 사이에 발생하는 미소한 미끄러짐등에 의한 것으로 본 연구에서는 사료된다.

3.2 하부플랜지 도입 압축응력 분석

본 절에서는 긴장력 증가 과정에서 도입되는 주형 하부 플랜지의 압축 변형률과 비교를 위하여 실험에 사용된 시험체에 대한 재료의 비선형성을 고려한 유한요소 해석을 수행하였으며, 콘크리트의 균열 이후의 거동을 해석적으로 분석하기 위하여, 본 논문의 해석적 연구에 사용된 LUSAS의 Element Library에서 콘크리트의 인장 연화를 고려하는 모델을 사용하였다.

한편, 주형은 LUSAS의 stress potential option을 사용하였으며, 복부는 쉘요소, 상·하부 플랜지는 빔요소를 이용하여 모델링 하였다.

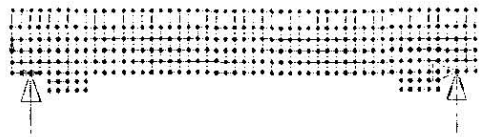
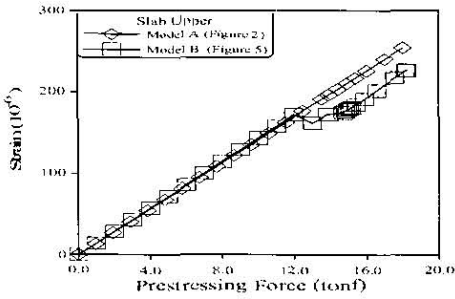


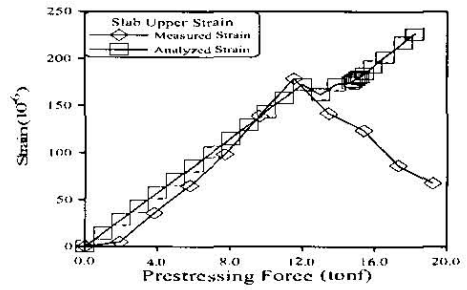
Fig. 5 시험체 유한요소해석 모델링(Model-B)

한편, 긴장력 결정시 고려되었던 Fig. 2의 유한요소 해석모델과 Fig. 5의 유한요소 해석 모델에 있어서 재료의 비선형성 고려 여부와 해석 모델의 차이에 따른 해석치의 변화 양상을 동일 하중 조건에서 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

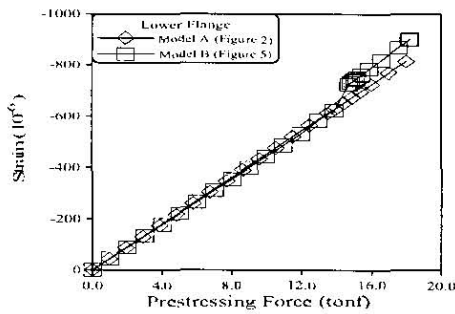
Fig. 6을 살펴보면, 재료의 선형 구간에서는 유한요소 모델의 형태에 무관하게 해석치가 거의 동일하게 나타나고 있는 것으로 분석되고 있으나, 긴장력 약 12톤 정도를 상회하면서 Fig. 6(a)의 Model-B에 의한 슬래브 상단의 발생 변형률 증가 양상이 비선형적인 양상을 보이고 있으며, 이러한 슬래브 상단 변형률의 비선형적인 일시적 감소에 의하여 Fig. 6(b)의 주형 하부 플랜지에서 Model-B의 변형률 기울기가 증가하고 있다.



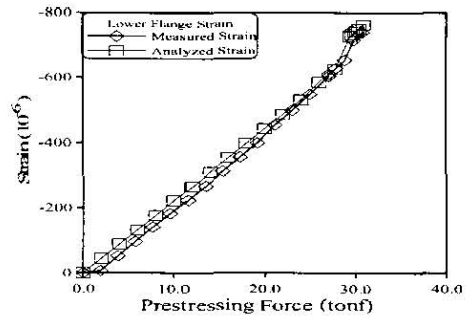
(a) 상부 슬래브



(a) 상부슬래브



(b) 주형 하부 플랜지



(b) 주형 하부 플랜지

Fig. 6 해석 모델에 따른 분석치 비교

Fig. 7 해석치와 측정결과와의 비교

한편, 실교량의 보강에 있어서 기존의 슬래브를 완전히 제거 한 후 외부 후 긴장을 진행 할 경우에는 주형 하부 플랜지의 도입 압축 응력과 정착단의 거동, 사용하중에 의한 긴장재의 응력 정도만 고려하게 되나, 보강에 있어서 기존의 슬래브를 제거하지 않고 외부 후 긴장력을 도입할 경우 긴장에 따른 슬래브 상단의 파괴계수를 고려하여 긴장력을 고려하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 실교량의 기존 슬래브를 제거하지 않은 상태의 외부 후 긴장 보강의 경우를 고려하여 실험을 실시하였으며, Fig. 5의 비선형 유한요소 해석 모델에 의한 해석치와 실험치를 비교하여 Fig. 7에 정리하였다.

주형 하부 플랜지의 해석치와 실험치를 비교한 Fig. 7(b)에서는 전 구간에서 그 결과가 거의 동일하게 나타나고 있으나, 슬래브 상단의 측정치와 해석치를 비교한 Fig. 7(a)의 재료의 비선형 구간에서는 하중의 증가에 따라 측정치가 급속도로 감소하여 해석치와의 차이가 증가하는 것으로 분석되었다.

이러한 현상은 실제 실험에 있어 변형을 게이지 주변의 균열 발생 및 진전에 의한 상대적 변형 감소로 인해 발생하는 현상으로 분석된다.

한편, Fig 7(a)에서 슬래브 상단의 재료 비선형성은 실험치와 해석치 모두 동일하게 인장응력 44.9kgf/cm² 정도부터 발생하는 것으로 나타나, ACI에서 제안하고 있는 (2)에 의해 계산된 콘크리트의 파괴계수 33.5kgf/cm² 보다는 높은 응력 수준에서 슬래브 상단의 휨 인장 파괴가 시작되는 것으로 분석된다.

$$f_r = 2.0\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

(1)에서 f_r 는 파괴계수, f_{ck} 는 콘크리트 압축 강도이다.

3.3 정착단 주형 하부플랜지의 거동 분석

외부 후긴장에 있어서 밀차적으로 높은 긴장력을 받

는 부분은 정착단으로서 정착단과 고장력 볼트로 연결된 주형 하부플랜지는 볼트구멍에 의한 단면적 감소와 추가적인 외력에 의해 높은 국부 응력이 발생하는 것으로 기존의 문헌에서도 분석하고 있다⁽²⁾.

따라서, 본 연구에서는 긴장력 도입에 따른 정착단 주형 하부플랜지의 거동을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 볼트구멍으로 인한 단면 감소로 높은 집중응력의 발생이 예상되는 부분에 변형률 게이지를 설치하여 측정하였다.

한편, Fig. 2의 유한요소 해석모델을 이용하여 긴장력 증가에 따른 정착단 주형 하부플랜지의 교축방향 응력을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8의 해석 결과와 Fig. 3의 정착단 주형 하부플랜지의 측정 응력을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9를 살펴보면, 본 연구의 해석 결과와 측정된 결과가 거의 일치하고 있으며, 동일 교축방향 위치임에도 긴장력의 증가에 따라 변형률 게이지 35번과 38번의 측정 변형률의 미소하게 차이가 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다.

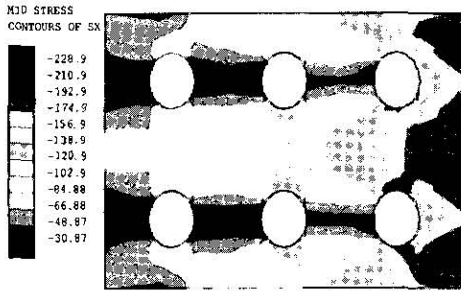


Fig. 8 정착단 주형 하부플랜지 해석 결과

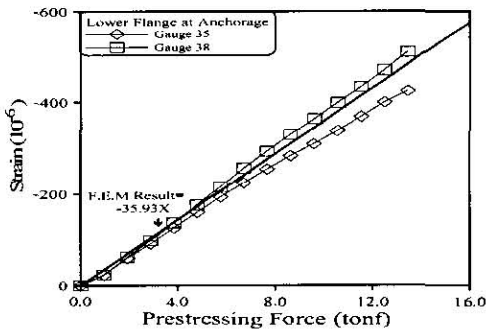


Fig. 9 정착단 주형 하부플랜지 측정 및 해석 결과

4 긴장재 절곡각도에 따른 합성보의 거동 분석

본 연구에서는 Photo 2와 같이 절곡 각도 변화에 따른 전단 보강 효과를 분석하였으며, 절곡 외부 후긴장은 Fig. 10에서와 같이 부 전단력의 발생에 의해 외부 직선 후긴장에서 고려되는 휨 보강뿐만 아니라 전단 보강도 추가적으로 이루어지게 된다.

Table 3의 시험편 3번과 6번에 있어서 절곡 긴장각도에 따른 측정 전단보강 효과와 Fig. 5의 유한요소 해석 모델을 이용한 해석 결과를 Fig. 11에서 분석하였다.

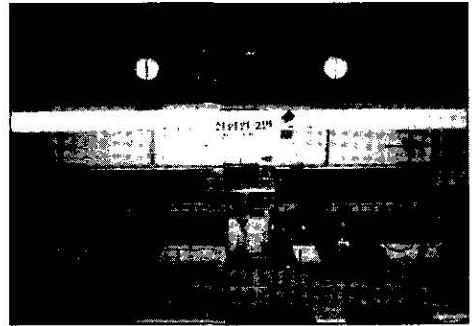


Photo 2 절곡 외부 후 긴장 시험편

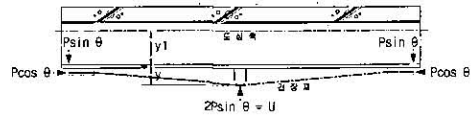


Fig. 10 절곡긴장에 따른 등가하중

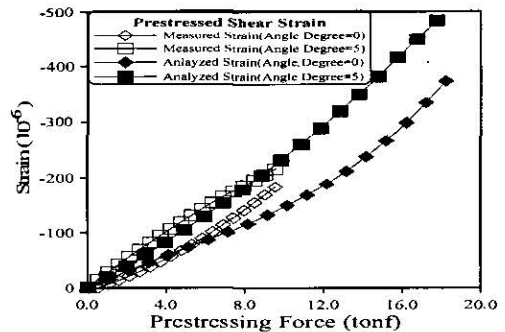


Fig. 11 절곡각도에 따른 도입 부 전단력

Fig. 11의 측정치를 살펴보면, 동일 긴장력에서 절곡각도 5°에서 발생하는 부 전단 변형율이 절곡각도 0°보다 약 17~32% 정도 높은 것으로 분석되어, 절곡에 따른 전단 보강의 영향이 크게 나타나고 있으며, Fig. 2의 유한요소 해석 모델에 의한 비선형 해석 결과에서도 측정치와 거의 동일한 경향을 보여주고 있다. 한편, 절곡각도의 증가에 따른 주형 하부 플랜지의 휨 보강 효과의 실험치와 해석치를 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12에서 절곡각도 증가에 따른 긴장수평력 감소의 영향보다 편심거리 증가에 의한 효과가 더욱 높아 휨 보강 효과가 약 60~80% 정도 증가하는 것으로 측정치에서 분석되었으며, 해석결과 또한 동일한 휨 보강 효과를 보여주고 있다.

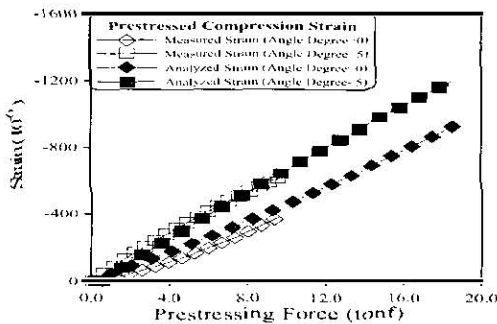


Fig. 12 절곡각도에 따른 휨 보강 효과 비교

5. 결론

본 연구에서는 강교의 보강공법중 하나인 외부 후긴장 공법에 있어서 직선 및 절곡 긴장재에 의한 긴장력 도입 과정에서 나타나는 거동을 실험 및 해석적으로 분석하였으며, 그 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 외부후긴장 공법에 의한 강합성보의 보강 결과, 휨응력에 대한 보강효과가 상당부분 증가하며, 이는 긴장력의 증가에 따라 그 효과가 커짐을 알 수 있었다.
- (2) 외부 후 긴장에 있어서 정착후에 발생 하는 긴장력의 즉시손실 및 시간적 손실 외에 긴장력을 도입 하는 과정에서 기계적인 오차에 의해서 Hydraulic Pump의 가압조절장치의 긴장력 보다는 실제 강

선에 도입되는 긴장력이 낮은 것으로 분석되었다.

- (3) 실험량 외부 후긴장 보강시 슬래브 상단의 휨 인장 파괴는 ACI 규정에 의한 계산 휨 인장응력 보다 높은 응력 수준에서 발생하는 것으로 실험 및 해석적으로 분석되었으며, 본 연구에서 제안한 유한요소 모델이 주형 하부 플랜지와 슬래브의 실거동을 잘 반영하는 것으로 나타났다.
- (4) 정착단 주형 하부플랜지에 높은 긴장력 도입시 정착단의 불균형적인 미끄러짐 현상 등에 의해 하부 플랜지의 동일 교축 방향 위치에서도 편향된 응력이 발생 하는 것으로 나타나고 있어, 정착단 및 정착단 주형 하부 플랜지 부위에 대한 설계에 있어서는 적절한 안전계수의 도입이 바람직한 것으로 분석되며, 이에 대한 보다 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.
- (5) 본 연구에서는 절곡각도 증가에 따른 전단보강 효과가 실험 및 해석으로 입증되었고, 편심거리 증가에 의한 영향에 의하여 추가적으로 휨보강 효과 또한 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 송재필, "후긴장을 이용한 단순 합성 격자형교의 보강 방법에 관한 연구", 중앙대학교 석사학위논문, 1996.
2. 최혁주, "외부 후긴장으로 보강한 합성 보에 대한 실험적 연구", 중앙대학교 석사학위논문, 1998.
3. 건설교통부 "문막교 보강 공사에 따른 보강효과 및 내하력 조사 보고서", 1996.
4. 건설교통부, "전국교량현황조사", 1999.
5. Hamid Saadatmanesh, Pedro Albrecht, "Experimental Study of Prestressed Composite Beams", ASCE, Vol. 115, No. 9, 1989, pp. 2348~2363.
6. M. S. Troitsky, D. Sc. "Prestressed Steel Bridge Theory and Design", VNR, 1990.
7. Edward G. Nawy, "Prestressed Concrete", PRENTICE HALL, 1995.

(접수일자 : 2001년 2월 27일)