

철근콘크리트 연속보에서 부분프리스트레스 도입에 의한 휨보강 효과

Strengthening of Reinforced Concrete Continuous Beams in Flexure by
Partial External Unbonded Tendons

윤 현 도* 양 일 승** 임 재 형*** 문 정 호****
Yun, Hyun-Do Yang, Il-Seung Lim, Jea-Hyung Moon, Jeong-Ho

Abstract

A variety of techniques for strengthening have been developed, including pate bonding, external prestressing and overslabbing. Expecially, a strengthening technique for reinforced concrete beams using external unbonded reinforcement offers advantages in speed and simplicity of installation. The purpose of this paper is to investigate the capabilities of a new retrofitting technique, namely external prestressing(out-cable), for flexural strengthening of beams. Results of 2 physical tests (external post-tension and out-cable system specimen) on strengthened reinforced concrete continuous beams are reported and compared. It is shown that the out-cable system can provide strength enhancement.

요 지

최근 손상된 부재를 원상으로 회복하면서 보강할 수 있는 프리스트레스 보강공법에 대한 관심이 고조되고 있다. 손상된 부재를 보강하기 위한 기존의 포스트텐션공법은 구조부재에 추가적인 손상을 발생시킬 수 있으므로, 인접부재에 손상을 주지 않는 새로운 형태의 부분프리스트레스공법에 관한 개발 및 성능평가가 요구된다. 본 연구에서는 새로운 외부포스트텐션공법 중 하나인 아웃케이블 공법에 대한 구조성능을 평가하기 위해 휨 보강된 연속보에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과, 기존 포스트텐션과 아웃케이블공법의 주요 파괴모드는 균열이 고르고 넓게 분포한 휨파괴의 형태를 나타냈다. 그리고, 초기의 휨균열 시 강성 및 철근항복 시 강성, 항복하중, 최대하중에서 유사한 거동특성을 보임으로써 두 공법에 의한 보강효과는 동일한 결과를 보였다.

Keywords : Prestressing, Continuous Beam, Strengthening Technique, Out-cable System, Strength Enhancement

핵심 용어 : 프리스트레스, 연속보, 보강기법, 아웃케이블공법, 강도증진

* 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 강사

*** 정희원, 우송공업대학 건축공학과 교수

**** 정희원, 한남대학교 건축공학과 교수

E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr 042-821-5622

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 사용 중 건조수축 및 진동, 구조설계 또는 시공 상의 오류, 구조물의 노후화, 과다 하중, 강도저하 등 여러 요인들에 의하여 손상을 경험하며 보수·보강의 필요성이 제기된다.

손상된 콘크리트 구조물을 보수·보강하는 방법으로는 에폭시 주입법과 철판을 이용한 철판압착보강법, 복합재료(탄소섬유, 아라미드 섬유 등)의 부착법 및 프리스트레스 보강법 등이 있다. 에폭시보강재료는 접착력이 뛰어나고 내화학적, 내수성이 높아 광범위하게 사용되고 있는 반면, 그 효용성이 극히 제한되어 있으며 재료성능 표에 언급되어 있는 내용을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 철판압착보강방법은 사용 중인 구조물을 상대적으로 신속하게 보강할 수 있으며 보강 후 부재크기의 변화가 매우 적고, 건축구조물의 인장, 압축, 전단부위 등 광범위하게 콘크리트 표면에 시공된다는 장점이 있는 반면, 열을 취급하는 공간의 부재 보강 또는 화재에 대해서는 불리한 보수보강방법이라 할 수 있다.

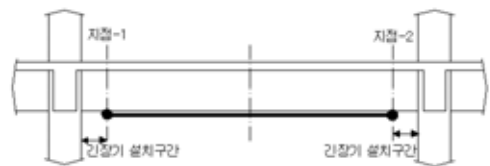
이러한 문제점 때문에 최근 국내에서는 손상된 부재를 원상으로 회복하면서 보강할 수 있는 프리스트레스 보강공법에 대한 관심이 고조되고 있다.⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾ 기존의 포스트텐션공법이 손상된 부재를 보강하기 위하여 직접 사용되는 경우에는 손상되지 않은 구조부재에 추가적으로 구조적 손상을 발생시킬 수 있으므로, 인접부재에 손상을 주지 않는 새로운 형태의 포스트텐션공법에 관한 개발 및 성능평가가 요구된다.

본 연구에서는 기술한 제 문제를 해결할 수 있는 방법으로 (사)한국구조물진단학회에서 개발한 새로운 외부포스트텐션(External Post-tension)공법 중 하나로 제안된 공법(이하, 아웃케이블공법)⁽¹⁾⁻⁽²⁾에 대한 구조적인 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 기존 프리스트레스 공법 및 아웃케이블공법을 통하여 휨보강된 연속보에 관한 실험적 연구를 수행하였으며 이를 통하여 아웃케이블공법의 거동 및 강도 특성을 규명하고자 하였다.

2. 제안된 공법 개요

2.1 기존의 외부 포스트텐션 공법

기존의 외부포스트텐션공법은 보의 측면에 정착단부를 형성하고 보의 중앙에서 절곡하는 형태로 보강하는 방법과 Fig. 1과 같이 휨부재의 하단 단부에 정착단을 형성하여 편심거리가 전체 경간에 일정하게 형성되도록 직선으로 보강하는 방법이 있다. 이러한 보강공법은 프리스트레싱 보강재의 긴장에 의한 탄성복원력을 이용하여 부재의 고정하중에 의한 응력을 감소시키고 부재 내력을 증가시키며, 부재의 안정성을 효과적으로 증가시켜 주는 공법이다. 그러나 프리스트레스로 인한 압축력은 인접부재에 변형을 일으키거나, 균열을 발생시킬 가능성이 있어 매우 주의를 요하게 된다. 즉, 추가적으로 발생하는 부재력 중에서 Fig. 1에 표현된 모재의 축력과 같이 보강되는 구간에는 압축력이 발생되고 정착단과 보강부재를 지지하는 사이구간에서는 인장력이 발생한다. 따라서, 기존의 외부포스트텐션에 의한 보강방법은 추가적으로 건물에 손상을 줄 수 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 외부포스트텐션공법의 개발이 필요하다. 또한, Fig. 1에 나타난 바와 같이 보강재의 긴장력을 도입하는 긴장기 설치의 보강부재가 충분히 길 때는 확보할 수 있지만, 보강부재의 길이가 짧은 경우는 프리스트레싱 보강재의 길이가 짧아지게 된다 또한, 프리스트레싱 보강재의 길이가 짧아지게 되면 정착에 의한 정착손실(Anchorage loss)이 많아져서 소정의 긴장력을 확보할 수 없게 된다.



(a) 해석모델 (보 및 슬래브 보강)



(b) 모재의 축력도

Fig. 1 기존 외부포스트텐션공법 개념

2.2 아웃케이블공법

아웃케이블공법은 긴장력에 의하여 발생된 축력이 보강부재에 전달되지 않고 보강하는 시스템 내에서 흡수할 수 있도록 압축재를 신설한 공법이다. 제안된 공법은 Fig. 2와 같이 기존의 포스트텐션공법에 의하여 발생된 축력이 보강부재에 전달되지 않고 자체 시스템에서 흡수할 수 있기 때문에 추가적인 구조문제를 발생시키지 않으며, 기존 포스트텐션공법과 동일한 보강효과를 가지게 된다.

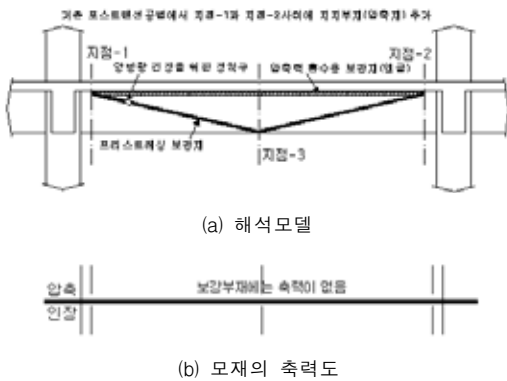


Fig. 2 아웃케이블공법 개념

2.2.1 아웃케이블공법의 보강상세

아웃케이블공법의 역학적인 보강개념은 기존 포스트텐션공법과는 달리 고정 정착단을 보강하는 부재에 고정시키지 않고 압축력을 흡수하는 압축재에 정착하였으며, 긴장력에 의하여 발생하는 반력을 지지용 새들(Saddle)이 지지할 수 있도록 하였다(Fig. 3). 또한 압축력을 흡수하는 압축재에는 슬롯을 형성하고 고정용 앵커로 슬래브에 고정하여 압축력이 보강하는 부재에 전달되지 않도록 한다. 아웃케이블 공법을 적용한 보 및 플랫 슬래브의 보강은 보강재를 공장에서 미리 제작한 후에 현장에서 설치하는 방법을 사용하는데, 긴장력 도입은 중앙부에서 압축력 흡수용 앵글과 프리스트레싱용 봉강의 간격을 조절하는 방법을 사용한다. 또한 보의 보강은 지지부의 새들과 압축력 흡수용 앵글을 설치하고 프리스트레싱 보강재를 양방향 긴장장치에서 긴장력을 도입하면 된다.

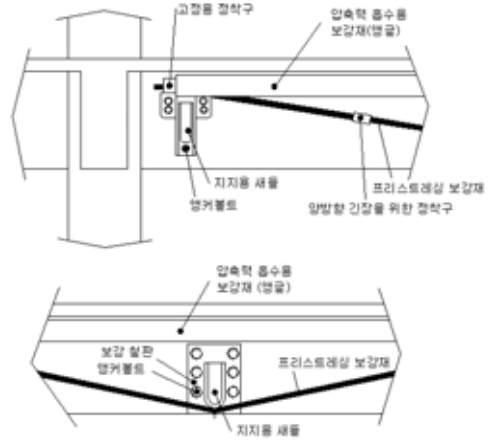


Fig. 3 아웃케이블공법의 정착단 및 새들

2.2.2 아웃케이블 공법의 장점

기존 포스트텐션공법에서 발생하는 추가적인 압축력을 보강시스템 내에서 흡수하여 보강되는 부재에는 긴장력에 의한 압축력이 발생하지 않도록 하는 보강공법이므로 기존 건물의 변형이나 균열이 발생하지 않는 장점이 있다. 특히, 보 등에서는 양방향 긴장장치를 사용하기 때문에 긴장력 도입을 위한 긴장장치 설치구간이 특별히 필요하지 않다는 것이다. 또한 보강재의 단부 정착철물을 고정하기 위한 세트앵커도 기존공법에서는 프리스트레싱에 의하여 발생할 수 있는 압축력과 수직반력에 대하여 저항하도록 설계되어야 하지만, 아웃케이블공법에서는 수직반력에 대하여만 저항하기 때문에 적은 양의 세트앵커를 사용한다.

2.2.3 아웃케이블공법의 시공순서

아웃케이블공법에 대한 시공방법 및 순서를 요약하면 다음과 같다.

- ① 현장점검 : 작업계획을 수립하기 위해 마감재, 설비, 전기 등의 지장물을 파악
- ② 보강면의 정리 : 보강재와 보강면의 밀착을 방해하는 마감재(미장, 흡음재 등)를 제거
- ③ 보강구간 실측 : 정착단의 위치 확인 및 보강용 철물의 정확한 제작을 위해 현장실측
- ④ 보강용 철물제작 : 현장실측한 결과대로 각 자재

들을 설계기준에 맞게 공장제작

- ⑤ 보강용 철물설치 : 공장제작된 보강용 철물 및 기타장치 등을 앵커볼트를 이용하여 지정된 정위치에 설치
- ⑥ 긴장용 강연선의 재단 및 설치 : 설계기준에 맞는 비부착용 강연선을 알맞은 길이로 재단한 후에 양방향 이구형 정착구와 함께 보강구간에 설치
- ⑦ 유압장비 설치 : 자동 또는 수동 유압장비의 정확한 작동상태를 점검한 후에 양방향 이구형 정착구에 유압잭을 고정
- ⑧ 강연선 긴장 : 구조계산에 의한 긴장력까지 정확하게 긴장력을 도입
- ⑨ 마감 : 노출된 강연선 및 보강용 철물 등을 녹막이 페인트와 구리스 캡 등으로 마감

3. 실험

3.1 시험체

본 연구에서는 기존 포스트텐션공법(CB-SP)과 보강되지 않은 인접부재와 같이 새로운 구조부재에 손상이 발생하지 않은 포스트텐션 공법인 아웃케이블공법(CB-SB)을 사용한 연속보의 구조적인 성능을 평가하기 위하여 실험을 행하였다. 시험체는 우선 부착 긴장재를 갖는 부재로 설계하였으며, $M_{in} > 1.2M_{cr}$ 을 만족하도록 하였다. 시험체 일람 및 상세는 각각 Table 1 및 Fig. 4와 같다. CB-SP시험체는 기존 포스트텐션공법에 의하여 보강된 시험체이고, CB-SB시험체는 아웃케이블공법에 의하여 보강된 시험체이다. CB-SP와

Table 1 시험체 일람

	CB-SP	CB-SB
Load Block	D:80ea, L:50ea	D:80ea, L:50ea
F_{se}	$D:T=1.79t/ea, L:T=0.49t/ea$	-
보강 방법	기존 포스트텐션	아웃케이블
보강재	강연선	강연선
경간	5.3m(연속보)	5.3m(연속보)
L/d_b	12($d_b=45cm$)	-
크기	23×43cm	23×43cm
보강비	0.112	0.112
보강철근	4-D16	4-D16
보강재료	4-3연선	4-3연선

* Note : 1. Load Block은 500×500×15mm 철판을 의미
 2. F_{se} 는 유효프리스트레스이므로 Jacking Force는 예비 프리스트레싱 실험을 통하여 결정함

CB-SB시험체는 4-#6 3연선 긴장재가 보의 옆면에 절곡된 형태로 배치되어 있으며, $F_{se}=0.6F_{pu}$ 이다. 즉, 모든 조건이 동일한 연속보에서 보강방법에 따른 보강효과를 분석하도록 하였다.

3.2 정착구 및 긴장장치

포스트텐션 부재의 휨실험에서는 부재의 외부에 정착구(Wedge set)를 이용하여 긴장재에 긴장력을 유지시켜 주어야 한다. 정착구는 Fig. 5(a)에서와 같이 췌기와 고정구로 구성되어 있으며 독일에서 생산되는 제품을 사용하였다. 긴장장치는 Fig. 5(b)와 같이 긴장력을 정확하게 가력할 수 있는 장치로 결정하였는데, 독일 Paul사에서 제작된 소형 긴장장치로 60kN~200kN용량의 수동펌프를 사용하였다.

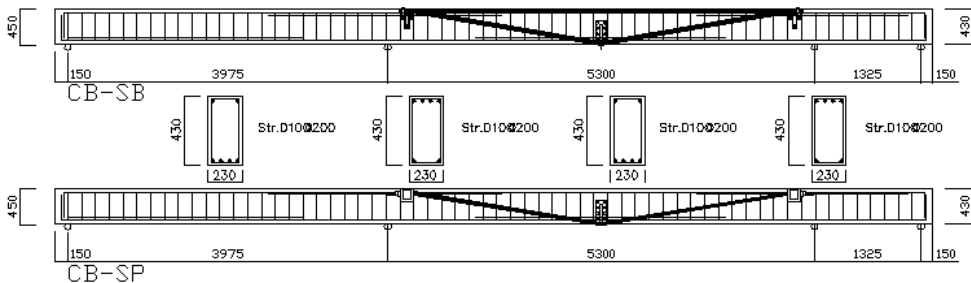


Fig. 4 CB-SB, CB-SP 시험체



(a) 정착구상세 (b) 긴장장치

Fig. 5 정착구 및 긴장장치

3.3 재료시험

시험체에 사용된 긴장재는 $\phi 6\text{mm}$ 인 3연선(3-wire strand)으로 단면적은 0.1982cm^2 이며 KS D 7002 (ASTM A 416)와 PTI 위원회의 규정에 따라 국내의 K제강에서 생산되는 제품으로서 제작사 제시자료를 참고하였다. 주근으로 사용된 D16 철근의 재료적 특성과 인장강도를 알아보기 위하여 KS B 0802에 준하여 시험을 실시하였다. 철근의 기계적 성질은 Table 2와 같다. 콘크리트의 압축특성을 파악하기 위하여 KS규격에 의거하여 시험체 제작과 동시에 공시체를 제작하였으며, 시험결과는 Table 3과 같다.

Table 2 철근의 기계적 성질

항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	항복변형 ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	인장변형 ϵ_u ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 E_s (GPa)
414	541	2,710	157,000	192.9

Table 3 콘크리트의 압축특성

압축강도 f_{cu} (MPa)	극한변형 ϵ_u ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 E_c (GPa)
27.4	5,130	23.4

3.4 실험방법

시험체에 도입하는 유효프리스트레스는 소정의 각각 응력이 시험체에 작용할 수 있도록 단부에서 긴장력을 수회에 걸쳐 가력하였으며, 크기는 단부에 설치되어 있는 긴장력 측정용 로드셀 값으로 결정하였다.

하중의 가력은 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 단순지지되어 있는 보의 상부에서 1,000kN용량의 오일잭을 이용하여 가력하였다. 실험의 종료는 최대하중 이후 가력하중이 감소될 때와 긴장재의 응력이 항복하중에 근접될 때로 하였다.

하중재하에 따른 변위와 단부의 회전각을 측정하기 위하여 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 경간의 중간부, 중앙부에서 30cm 떨어진 부위 및 단부에 각각 다이얼 게이지를 설치하였다. 그리고, 철근과 콘크리트의 변형률과 응력을 측정하기 위하여 인장 및 압축철근에 스트레인 게이지(Wire strain gauge)를 부착하였으며, 콘크리트 게이지를 중앙부와 단부에 부착하여 변형률을 측정하였다. 마지막으로, 시험체에 사용된 긴장재의 응력은 각각의 긴장재에 로드셀(Load cell)을 이용하여 측정하였다.

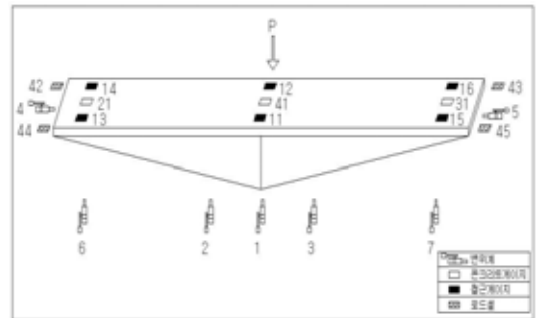


Fig. 7 변위계 및 W.S.G.의 부착위치

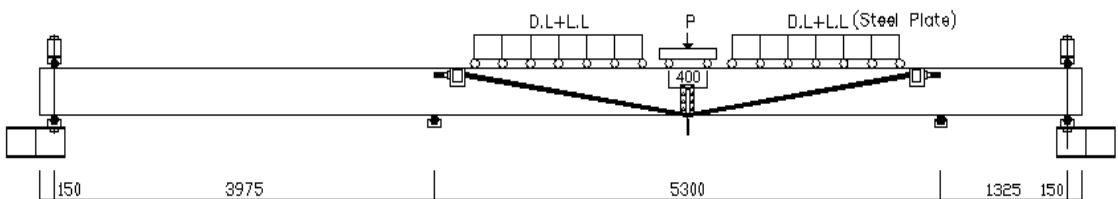


Fig. 6 시험체의 설치상황 및 재하조건

4. 실험결과 및 분석

4.1 아웃케이블공법 적용성 평가

공법 적용성 평가를 위하여 아웃케이블공법에 의하여 보강된 부재의 보강효과를 확인하는 실험과정에서 나타난 문제점을 분석하였다. 프리스트레싱을 위한 정착구(Wedge)의 경우 초기 긴장력 도입시 긴장기의 장치에 따라 나사산이 뭉그러지는 파괴가 발생하였다. 따라서 정착구는 1회 사용을 원칙으로 하며 나사산이 뭉그러지지 않도록 긴장장치를 선택하여야 함을 알 수 있었다. 또한 초기긴장력 도입 시 긴장장치 및 긴장재의 길이에 따라 정착손실량의 정도가 다르기 때문에 사용 긴장기의 특성을 명확하게 파악하고 긴장장치 및 긴장재의 길이에 따른 정착손실량을 사전에 명확하게 결정한 후 긴장력을 도입하여야 할 것으로 판단되었다.

4.2 파괴양상

Fig. 8은 보의 측면에 #6 3연선($A_{ps}=0.1982\text{cm}^2$) 긴장재 4개로 기존 포스트텐션 공법에 의해 보강한 CB-SP 연속보 시험체의 파괴양상을 나타낸 것이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 기존 외부 포스트텐션 공법으로 보강하기 전에 예상파괴하중의 60%로 선재하(Preloading) 하였으며 14.01 kN의 하중이 작용하였을 때 최대휨모멘트가 발생하는 보 단부지점의 상단에서 초기휨균열이 발생하였다. 휨균열 발생 이후 하중이 증가됨에 따라

점차적으로 균열이 양쪽 단부에서 집중적으로 발생하였으며, 중앙부 하단에서도 미세균열이 발생하였다. 보강한 후 하중이 181.05 kN에 도달하였을 때 단부 상단의 인장철근이 항복하였고, 단부 상단의 균열폭이 넓어졌으며, 균열은 급작스럽게 하부로 진전하였다. 인장철근 항복 이후 하중이 증가됨에 따라 중앙부 하부에서 발생한 휨균열은 상단까지 진전하였다. 최종적으로 하중이 237.07kN에 도달하였을 때 단부의 상부에서 인장파괴 되었다.

Fig. 9는 보의 측면에 #6 3연선($A_{ps}=0.1982\text{cm}^2$) 긴장재 4개로 아웃케이블 공법에 의해 보강한 CB-SB 연속보 시험체의 파괴양상을 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 아웃케이블공법으로 보강하기 전에 예상파괴하중의 60%로 선재하하였으며 16.86kN의 하중이 작용하였을 때 최대휨모멘트가 발생하는 보 단부지점의 상단에서 초기휨균열이 발생하였다. 휨균열 발생 이후 하중이 증가됨에 따라 점차적으로 균열이 양쪽 단부에서 집중적으로 발생하였으며 중앙부 하단에서도 미세균열이 발생하였다. 보강한 후 하중이 164.2kN에 도달하였을 때 단부 상단의 인장철근은 항복하였고, 단부 상단의 균열폭이 넓어졌으며 균열은 급작스럽게 하부로 진전하였다. 그러나, CB-SP시험체에 비하여 경간 전체에 걸쳐 휨균열의 수가 적게 나타났다. 인장철근 항복 이후 하중이 증가됨에 따라 중앙부 하부에서 발생한 휨균열은 상단까지 진전하였다. 최종적으로 하중이 270.6 kN에 도달하였을 때 단부의 상부에서 인장파괴 및 압축연단에서 콘크리트의 압축파괴가 동시에 발생하였다.



Fig. 8 CB-SP시험체의 파괴상황 (기존공법)



Fig. 9 CB-SB시험체의 파괴상황 (아웃케이블공법)

4.3 휨거동 특성

Fig. 10~13은 각각 보강방법에 따른 연속보의 하중-변위 관계 곡선, 긴장재의 응력분포, 매입된 주철근의 변형률, 그리고, 콘크리트의 변형률을 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 CB-SP시험체의 경우, 초기 휨균열이 37.05kN에서 발생하였으며 초기 휨균열 발생시 강성은 0.68로 나타났다. 초기 휨균열 발생 후 강성이 감소하는 경향을 보였으며 181.5kN에서 철근이 항복하였다. 철근 항복시 강성은 0.64로 초기휨균열 발생 시 강성에 비해 5.88% 감소하였다. 철근항복 이후 부재는 강성이 급격하게 감소하였고 완만한 내력상승을 보이다가 최대하중 237.06kN에 도달한 후에 내력이 급격하게 감소하며 콘크리트 압축연단에서 압괴파

괴가 발생하는 취성적인 경향을 보였다. 한편, CB-SB 시험체의 경우는 초기휨균열 시 강성 및 철근 항복시 강성은 CB-SP시험체에 비하여 0.90배 범위로 나타났고, 항복하중은 9.56% 정도 감소하였지만, 초기휨균열 시 하중 및 최대하중은 각각 21.68%, 14.09%증가하는 것으로 나타났다. 그러나 전반적인 실험결과에 의하면 두 공법에 의한 보강효과는 동일한 결과를 나타내고 있다고 판단된다. Fig. 12로부터 CB-SB시험체의 철근압축변형도가 현저히 작음을 알 수가 있었다.

5. 결론

기존 포스트텐션공법과 아웃케이블공법의 구조성능에 대한 평가를 주목적으로 한 본 연구를 통하여 다음과

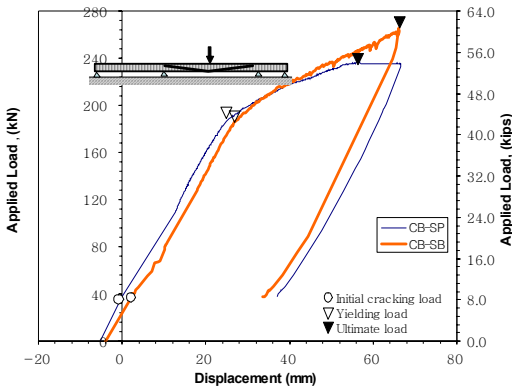


Fig. 10 연속보 시험체의 하중-변위 곡선

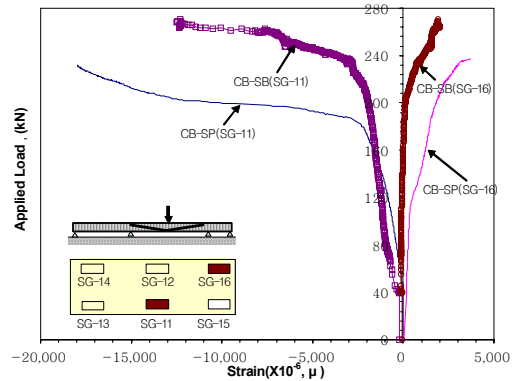


Fig. 12. 철근의 하중-변형률 곡선

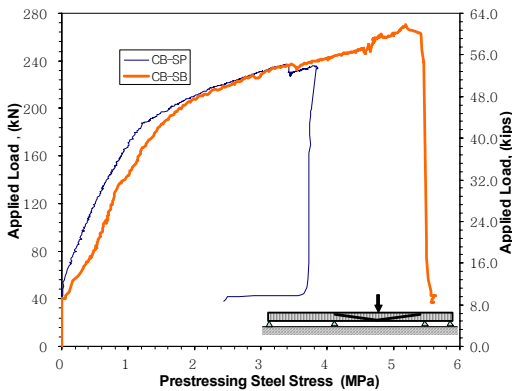


Fig. 11 연속보 시험체의 하중-응력 곡선

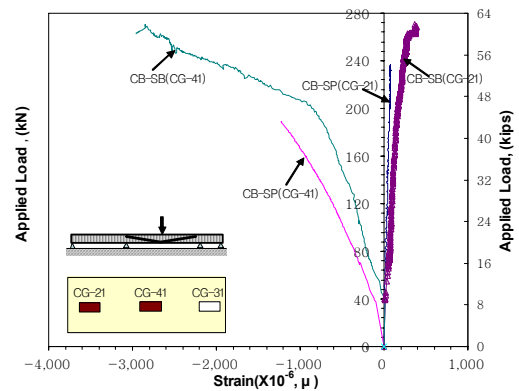


Fig. 13 콘크리트의 하중-변형률 곡선

같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 포스트텐션에 의하여 보강한 경우와 아웃케이블공법에 의하여 보강한 경우에서의 주요 파괴모드는 균열이 고르고 넓게 분포한 휨파괴로써 시험체의 형태나 보강방법과는 무관하게 기존의 철근콘크리트 구조에서와 비슷한 휨 파괴의 형태를 나타냈다.
- 2) 아웃케이블공법은 긴장력에 의한 압축력이 발생하지 않도록 하는 공법으로 철근의 압축병현도가 현저히 작음을 알 수 있었다. 또한, 초기휨균열 시 강성 및 철근항복 시 강성, 항복하중, 최대하중에서도 기존 포스트텐션공법과 동일한 결과를 보였다.
- 3) 아웃케이블공법의 적용에 있어 긴장재를 부재의 중앙에서 지지하는 새들의 정착장치(세트앵커)가 뽑히지 않도록 주의해야 하며 초기 긴장력을 도입할 때 긴장장치나 긴장재의 길이에 따라 정착손실 발생의 정도가 다르기 때문에 사용 긴장기의 특성을 명확하게 파악하고, 긴장기 및 긴장재의 길이에 따른 정착손실의 양을 사전에 명확하게 결정된 후 긴장력을 도입하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 (주)보우 텍카보닉스 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국구조물진단학회, “Bow공법에 의해 보강된 휨부재의 보강효과 연구”, (사)한국구조물진단학회, 2004.
2. 한병찬, 윤현도, 박완신, 황선경, 임재형, 문정호, “철근콘크리트 연속보에서 부분프리스트레스 도입에 의한 휨보강 효과에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표 논문집, 2004, pp. 31-38.
3. 한국콘크리트학회 · 대한건축학회, “건설교통부 제정 콘크리트구조설계기준”, 기문당, 1999.
4. ACI committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete(318-95) and Commentary (ACIR-99).” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999.
5. Machida Atsuhiko, Bamrungwong Chakree, “Flexural Behaviour of Two-Span Partially Continuous Prestressed Concrete Beam with External Tendons.”, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Colloquium, Concrete Model Code for Asia, Structural Concrete : Design, Materials and Construction, and Maintenance, Puket -Thailand, March 17-18 1999, pp. 191-196.
6. A. Ghallab and A. W. Beeby, “Deflection of prestressed concrete beams externally strengthened using Parafil ropes”, Magazine of Concrete Research, Vol.55. No.1, Feb. 2003, pp. 1-17.
7. J. Cairns and S. F. A. Rafeeqi, “Analysis of reinforced concrete beams strengthened by external unbonded bars.”, Magazine of Concrete Research, Vol.54. No.2, Apr. 2002, pp. 141-153.
8. Freyermuth, C. L., “Rational application of the elongation tolerance for post-tensioning tendons.” ACI Journal, Nov.-Dec., 1991, pp 730-737.
9. Park, R., “Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing State of the Art Report,” Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, V. VII, Tokyo-Kyoto, Japan. Aug. 1988, pp. 605-616.
10. Abrams, D., “Laboratory Definitions of Behavior for Structural Components and Building Systems,” Earthquake-Resistance Concrete Structures: Inelastic Response and Design, SP-127, S. Ghosh, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1991, pp. 91-152.

(접수일자 : 2005년 4월 15일)