

특 집

|| 최신 프리스트레스트 콘크리트 ||

건축구조에서 프리스트레스트 콘크리트 활용

- Practical Application of Prestressed Concrete in Building Structures -



문정호*
Moon, Jeong Ho



임재형**
Lim, Jae Hyung



이강철***
Lee, Kang Cheol

1. 서 론

건축 구조물에 프리스트레스트를 도입하는 방법은 우리나라를 제외한 외국에서는 널리 사용되고 있다. 동남아 등지의 나라에서도 프리스트레스트의 도입은 매우 일반화되어 있는 반면에 우리나라의 경우 그 예를 찾기가 매우 어려운 실정이다. 프리스트레스트 콘크리트 구조의 장점에 대한 인식은 공감대를 형성하고 있지만, 적용에 있어서는 매우 소극적인 면이 있다. 이에 대한 주된 이유로는 실 적용 사례의 부족으로 인한 전문가 및 건축주의 기피현상과 함께 구조 안전성에 대한 확신을 가지고 설계 및 시공에 임하지 못하기 때문인 것으로 사료된다.

프리스트레스트의 효율적인 도입을 위해서는 구조계획의 단계에서부터 이를 전제로 한 계획을 수립하여야 한다. 일반 철근 콘크리트 구조나 철골구조로 이미 설계되어 있는 구조를 프리스트레스트 콘크리트 구조로 변경하고자 할 때에는 많은 설계변경과 함께, 효율적으로 이를 사용하기 어려운 문제가 발생하게 된다. 또한 포스트텐션을 도입하는 경우 인접부재로 인한 구조적인 영향과 함께 시공 과정에서 추가적으로 고려할 사항들에 대한 검토가 필요하다. 예를 들면 포스트텐션 도입의 시기와 함께 가설공사 등에도 적절한 고려가 필요하다.

프리스트레스트 콘크리트가 모든 구조형식에 대하여 장점만을 가지고 있지는 않지만, 특정 경우에 대해서는 매우 효율적으로

사용될 수 있다. 따라서 본고에서는 프리스트레스트 콘크리트를 구조물에 효율적으로 적용할 수 있는 방법과 함께 사례를 중심으로 기술하고자 한다. 이를 위하여 프리텐션 공법과 포스트텐션 공법으로 크게 구분하고, 각 공법에서 적절한 예를 중심으로 기술한다. 그리고 가능한 한 기존의 문헌 등에서 쉽게 접할 수 있는 내용은 생략을 하고, 그 이외의 사항들을 중심으로 작성한다.

2. 프리텐션 공법

프리텐션 공법은 콘크리트를 타설하기 전에 긴장재를 먼저 인장시켜 지지대에 고정시키고, 콘크리트를 타설하는 방법이다. 그리고 콘크리트가 굳은 후에 긴장재를 부재의 끝단에서 절단하여 긴장력을 콘크리트에 전달시킨다. 따라서 콘크리트와 긴장재 사이의 부착력에 의해서 콘크리트에 압축응력이 발생하게 된다. 프리텐션 방법은 공사현장에 적용하는 것보다는 주로 공장에서 생산하는 방법으로 많이 사용되고 있다. 따라서 프리텐션에 의한 부재는 단순지지 형태의 부재로 생산되는 것이 일반적이며, 필요에 따라서 부재간의 접합부에 일반철근 등을 사용하여 연속성을 확보하기도 한다.

긴장재는 강선(wire), 강연선(strand), 강봉(bar) 등이 있으며, 직경 12.7 mm 강연선과 15.2 mm 강연선이 주로 사용된다. 건축물에는 대체로 12.7 mm의 강연선이 많이 사용되며, 교량이나 PC 부재의 경우 15.2 mm 강연선을 선호하는 경향도 있다. 그런데 PC 공장에서 부재를 생산할 때, 보통의 철근 대신에 강연선을 사용하는 경우도 있다. <표 1>에는 D25 및 D29 철근,

* 정희원, 한남대학교 건축공학과 교수

** 정희원, 우송공업대학교 건축디자인과 교수

*** 삼연PCE 공장

그리고 12.7 mm 강연선과 15.2 mm 강연선의 단면적과 함께 항복강도를 비교하였다.

표 1. 일반철근과 강연선의 비교

	D25	직경 12.7 mm 강연선	D29	직경 15.2 mm 강연선
단면적 (cm ²)	5.07	0.99	6.42	1.4
강도 (MPa)	400	약 0.95 × 1,890	400	약 0.95 × 1,890

공칭 휨강도에서 일반철근과 강연선에 의한 인장력의 비는 다음과 같이 계산하여 비교할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{A_{ps} f_{ps}}{A_s f_y} \right)_{12.7mm} &= \frac{0.99 \times (0.95 \times 1890)}{5.07 \times 400} \\ &= \frac{1777}{2028} = 0.88 \\ \left(\frac{A_{ps} f_{ps}}{A_s f_y} \right)_{15.2mm} &= \frac{1.4 \times (0.95 \times 1890)}{6.42 \times 400} \\ &= \frac{2514}{2568} = 0.98 \end{aligned}$$

따라서 철근의 강도와 강연선의 강도는 매우 유사함을 알 수 있으므로, 부재의 강도만을 고려한다면 철근 대신 동일한 개수의 강연선을 사용할 수도 있음을 의미한다. 강도에 대한 효율만을 비교하면 직경 15.2 mm의 강연선이 D29 철근의 강도와 더욱 비슷하지만, 단면적에 대한 값으로 환산하면 직경 12.7 mm의 강연선의 효율이 더 높다. 직경 12.7 mm의 강연선의 경우 강연선은 단면적이 철근의 1/5 이하이므로 단위 체적당 무게는 크게 감소하게 된다. 단위 면적(체적)당 인장강도는 대략 강연선이 철근의 4.5배 정도이므로 단위 무게로 거래되는 강재를 고려하면, 강연선의 가격이 철근의 4.5배 이하일 경우 경제성을 가지게 된다. 또한 실제로 이미 설비가 갖추어진 공장의 경우 프리텐션을 위한 공정에 추가되는 비용은 크지 않다. 그리고 콘크리트에 프리스트레스를 도입하는 경우 동일한 개수의 강연선을 사용하더라도 처짐을 효율적으로 제어할 수 있다.

프리텐션을 도입하는 경우 부재 단부에서의 응력이 허용응력을 초과하지 않도록 하기 위하여 고강도의 콘크리트를 사용하거나 단면의 크기를 크게 하는 방법을 사용한다. 왜냐하면 부재의 단부에서는 하중에 의한 모멘트가 없기 때문에 높은 긴장력에 의한 응력이 허용 값을 초과할 수 있기 때문이다. 이 경우 부재 단부에서 긴장재의 편심거리를 작게 할 수도 있지만, 이를 위해서는 높은 인장력을 받고 있는 긴장재에 추가로 높은 수직력을 가한 상태에서 콘크리트를 타설하고 양생하여야 하는 어려움이 있다. 그러나 <그림 1>과 같이 부재 단부의 일정구간에 디본딩(debonding)을 도입할 수 있다. 디본딩이란 긴장재와 콘크리트 사

이의 부착력을 제거하는 것을 의미한다. 따라서 이 구간에서는 프리스트레스의 효과가 나타나지 않기 때문에 허용응력을 초과하는 문제는 발생하지 않는다. 실무적인 면에서 볼 때, 디본딩을 도입하는 것이 더욱 경제적이 될 수 있다.

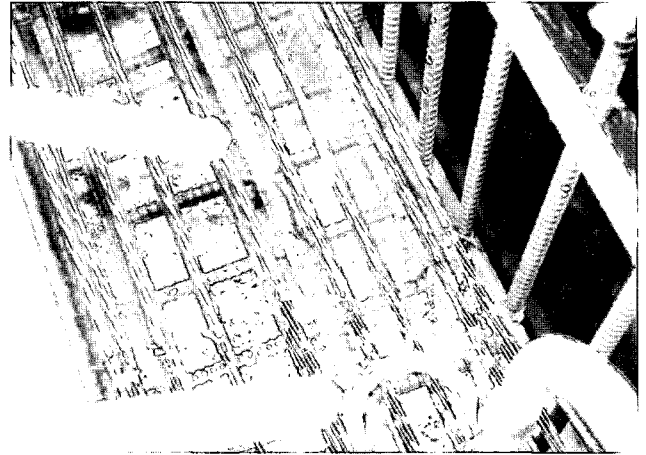


그림 1. 부재 단부에 디본딩을 도입한 경우

3. 포스트텐션 공법

포스트텐션 방법은 콘크리트가 굳은 후에 긴장재를 굳은 콘크리트에 지지하여 긴장시키는 방법이다. 이 때 긴장재를 부재의 끝단에서 정착시키기 위하여 적절한 정착장치를 사용한다. 콘크리트를 타설하기 전에 긴장재를 위한 덕트를 매설하며, 긴장작업 과정에서 마찰저항을 최소화하기 위한 적절한 방법을 사용한다. 그리고 긴장작업이 완료된 후에는 덕트와 긴장재 사이를 그라우트로 채워서 콘크리트와 긴장재가 일체로 작용하게 할 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 그라우트 작업을 하지 않고 긴장재가 덕트 사이에서 자유롭게 움직일 수 있게 하기도 한다. 이는 주로 슬래브에 포스트텐션 공법을 적용할 때 사용된다. 그라우트를 하지 않아도 되므로 덕트의 크기를 작게 할 수 있어 단면 결손을 최소화할 수 있다. 이러한 경우에 사용되는 긴장재를 비부착 긴장재(unbonded tendon)라 하며, 긴장재가 콘크리트와 그라우트에 의해서 부착되는 경우에는 이를 구분하기 위하여 부착 긴장재(bonded tendon)라 한다.

3.1 포스트텐션 슬래브

포스트텐션을 이용하여 슬래브를 설계할 때, 기준에 따르면 평균 선압축응력(average precompression)을 0.85 MPa 이상이 되도록 하고 있으며, 최대 선압축응력은 보의 경우 2.50 Mpa, 슬래브의 경우 2.0 Mpa로 제한하는 것이 경제적인 것이다. 고정 하중을 상쇄(balancing)하게 하는 값으로, 보는 60 ~ 80 %, 슬래브는 80 ~ 110 %를 주로 사용한다. 설계의 순서는 중요한 부재부터 시작한다. 하중을 상쇄시킬 값에 따라 긴장력을 결정한다.

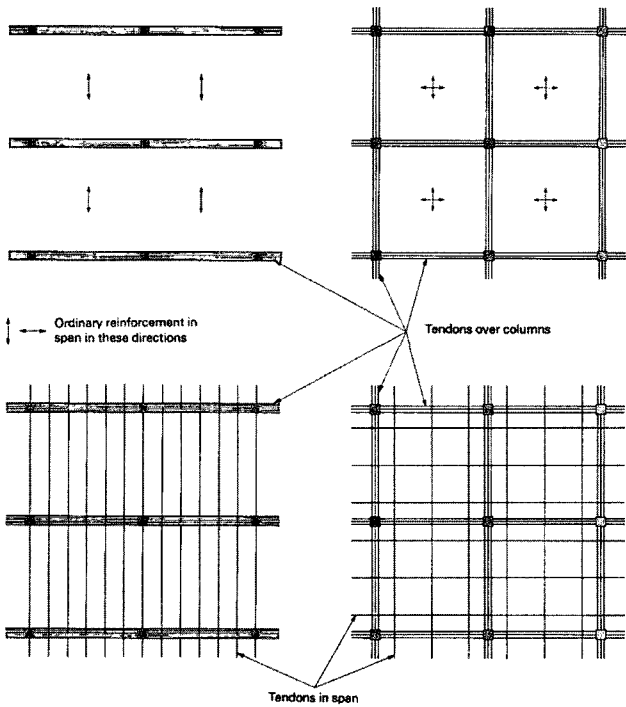


그림 2. 슬래브의 강선 배치

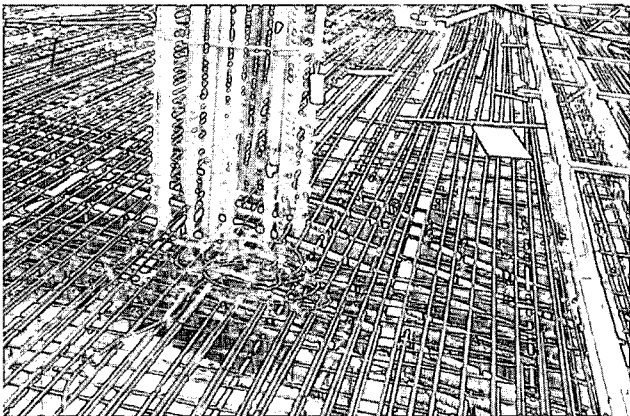


그림 3. 기둥 주변에서의 강선 배치

이 때 가능한 한 편심거리를 크게 하면서 긴장력의 크기를 작게 하여 긴장재의 수를 작게 하며, 연속부재의 전 부재를 동일한 상쇄하중으로 설계하는 것 보다는 효율적으로 비율을 조절하는 것이 필요하다.

〈그림 2〉는 슬래브에 포스트텐션을 도입하는 방법을 나타내었다. 이 중에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 방법은 좌측하단의 그림과 같이 한 방향으로는 집중 배치하고, 다른 방향으로는 분산 배치하는 방법이다. 실험 결과에 따르면 긴장재의 배치에 따른 최대 내력에 있어서의 차이는 거의 동일하지만, 기둥위치에서의 철근과 긴장재 배치를 고려한 시공성(그림 3)의 이유로 좌측 하단과 같은 방법이 주로 사용된다.

또한 플랫 플레이트 구조에 포스트텐션을 도입할 경우 장경간 구조 혹은 층고를 절감할 수 있는 구조로 설계할 수 있으므로 주거용 구조물의 고층화 및 고급화 경향에도 적극 대처가 가능하

다. 또한 균열방지 또는 제어에 의한 횡강성을 증대시킬 수 있다. 따라서 구조시스템의 효율 및 내구성을 향상시키게 된다. 그리고 바닥하중 전달경로를 설계자가 의도하는 방향으로 조정이 가능하므로, 설계자의 의도를 적극적으로 반영할 수 있다는 등의 장점이 있다.

3.2 외부 포스트텐션 공법에 의한 보수 보강

외부 포스트텐션 공법은 신축 구조물에 적용하거나, 혹은 기존 구조물의 보수 보강에 효과적인 공법으로 사용될 수 있다. 즉 구조물의 용도 변경이나 그 밖의 이유로 추가적인 내력을 필요로 하는 경우에도 외부 포스트텐션을 도입할 수 있다. 구조적인 보강을 위하여 사용하는 외부 포스트텐션 공법은 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 보강재의 변형도 분포가 보강전과는 다르게 된다. 〈그림 4(a)〉에서와 같이 단순보에 2점 집중하중이 작용하고 있는 보에서 보강 전 보의 철근에서 발생하는 최대 변형률(그림 4(b))과 비교할 때, 외부 긴장재로 보강한 후 철근의 변형률(그림 4(c))은 감소하며, 감소된 양만큼의 변형률은 외부에 보강한 긴장재에서 발생한다. 따라서 구조적인 손상이 발생한 구조부재는 내력을 회복할 수 있을 뿐 만 아니라, 보강설계조건에 따라서 추가적으로 내력이 증가된다.

외부 포스트텐션 보강 공법은 〈그림 5〉와 같이 보의 측면에 정착단부를 형성하고 보의 중앙에서 절곡하는 형태로 보강하는 방법이 있다. 이러한 보강공법은 프리스트레싱 보강재의 긴장에

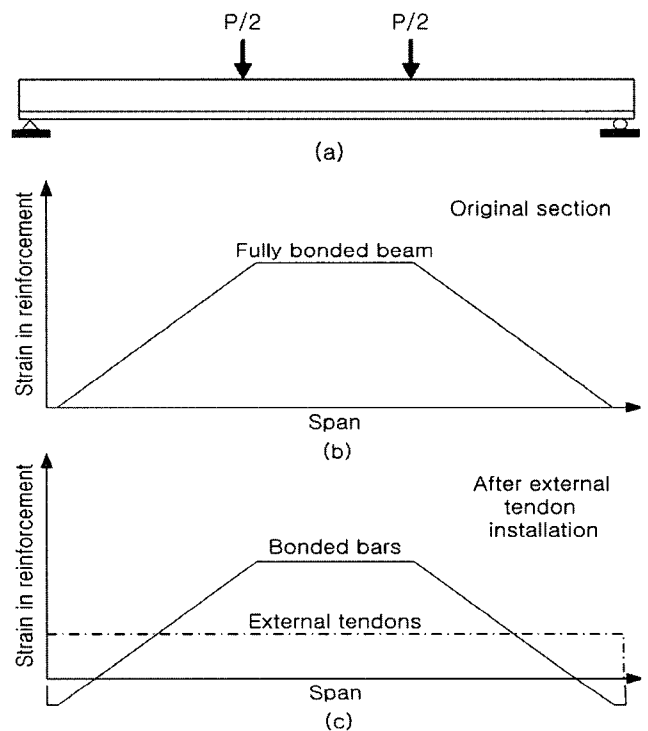
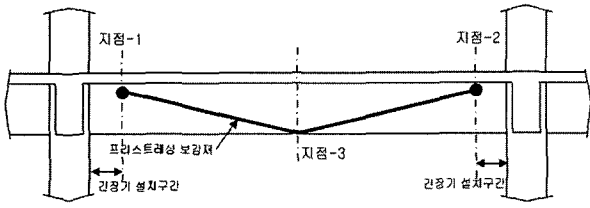


그림 4. 외부 긴장재로의 보강전과 보강후 경간에 따른 보강재의 변형률 분포 상태

해석모델(보 보강)

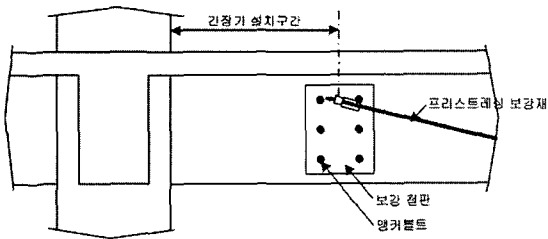


모재의 축력도



보강상세(보 측면)

지점-1 및 지점-2



지점-3

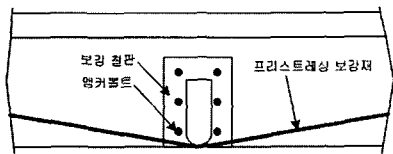
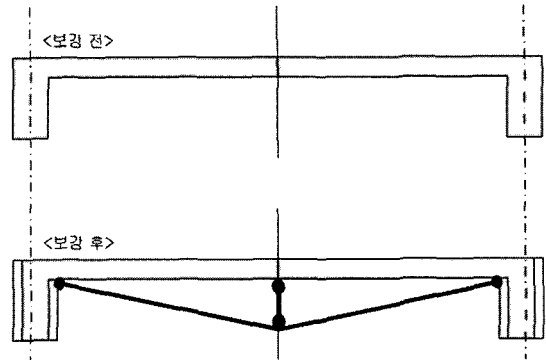


그림 5. 보 옆면에서의 보강

단순지지 부재

: 보강부재에 압축력 발생 \Rightarrow 보강부재의 수축 \Rightarrow 건물의 변형 또는 벽체의 균열 발생



고정단(연속지지) 부재

: 보강부재 단부에 인장력 발생 \Rightarrow 보강부재에 균열 발생

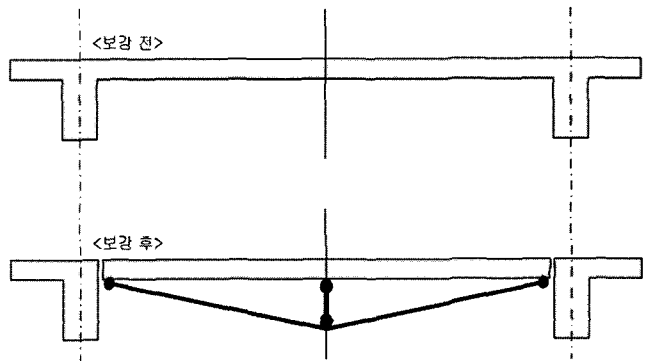


그림 6. 외부 프리스트레싱 보강의 문제점

의한 탄성복원력을 이용하여 보 또는 슬래브가 받고 있는 하중에 의한 응력과 반대되는 방향으로 응력을 작용시켜 응력을 감소시키고, 부재의 내력을 증가시켜 부재의 안정성을 효과적으로 증가시켜주는 공법이다. 그러나 구조체에 프리스트레스를 도입하게 되면, 기 발생된 부재의 변형을 회복하게 함과 동시에 내력도 증진시킬 수 있지만, 프리스트레스로 인한 인장력은 인접부재에 변형을 일으키거나, 인장력이 발생하는 구간에서 슬래브 및 보 등에 균열을 발생시킬 가능성이 있어 매우 주의를 요한다.(그림 6)

그리고 구조체의 일체화 및 연직하중 저항을 위한 프리스트레스의 도입은 프리스트레싱 방법을 사용하고, 프리스트레스 도입 후 긴장재를 부착시킨다. 긴장재는 연속적인 곡선배치로 하며, PPS 공법에서 긴장재를 배치할 쉬스관은 U형의 PC 보를 제작할 때 미리 설치한다. 따라서 현장 타설 콘크리트를 제외한 대부분의 부재를 공장에서 제작함으로써 구조물의 시공성을 증대시키고, 양질의 구조물을 확보할 수 있다.

3.3 PPS(Post-tensioned Precast concrete System) 공법

PPS 공법은 (그림 7)과 같이 기둥은 PC 또는 현장 타설 콘크리트부재, 보는 양층의 무게를 고려한 U형의 PC보, 슬래브는 데크 플레이트나 하프 슬래브 등으로 구성되어 각각의 특성을 효율적으로 조합한 공법이다. PPS 공법에서는 기둥의 지판 위에 U형의 PC 보를 걸친 후, 상부의 철근을 연속 배근하고 덧침 콘크리트를 타설하여, PC보와 기둥을 일체화시킨다. 여기서 기둥의 지판은 폭이 넓은 보를 기둥에 연결하는 작업의 편리함을 위하여 사용된다.

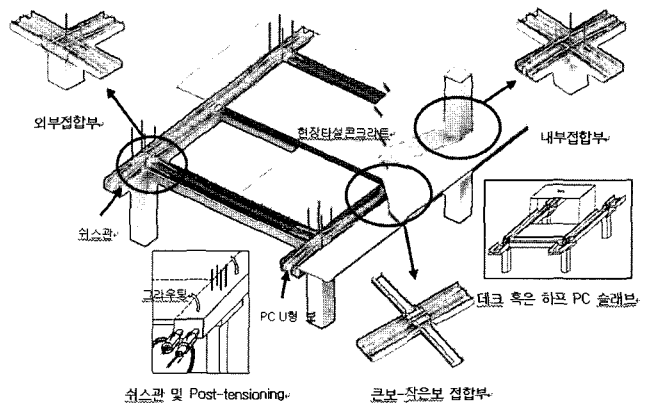
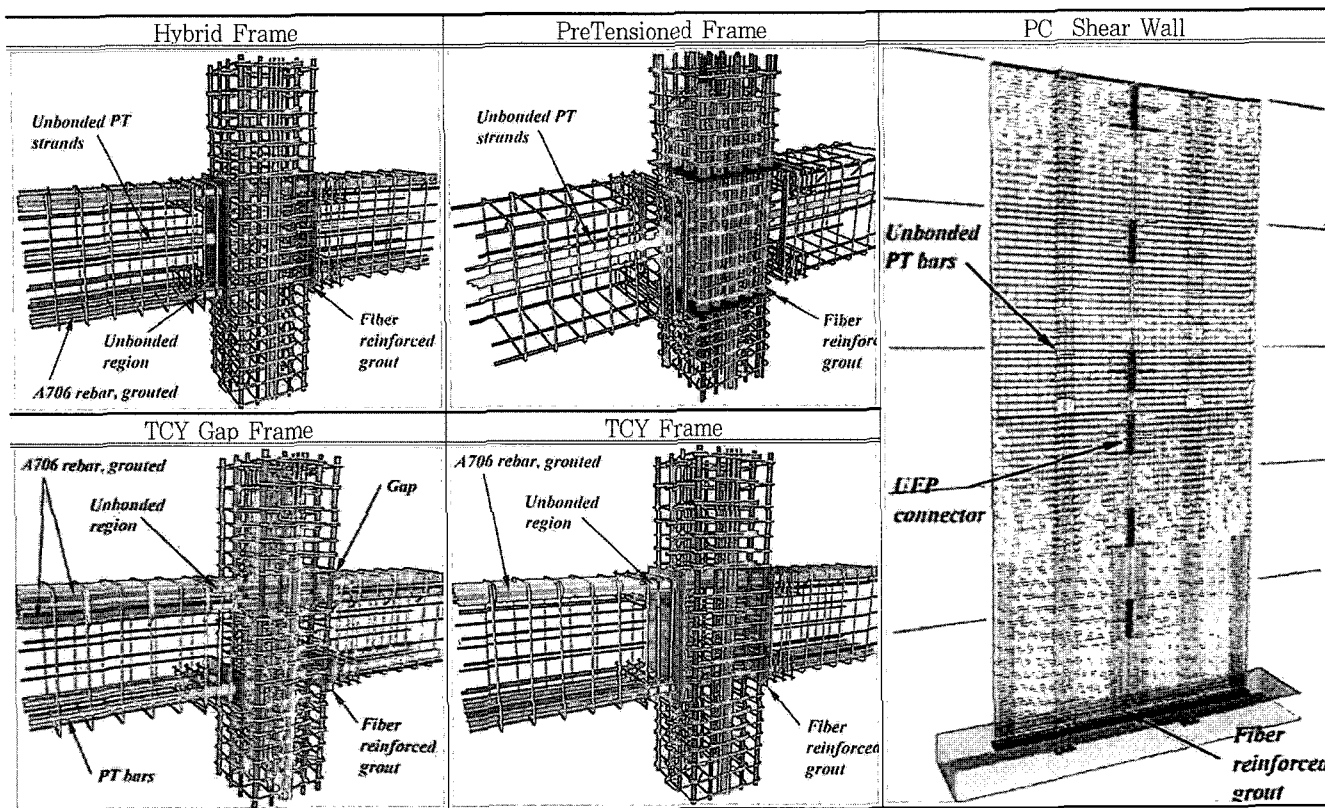


그림 7. PPS 공법의 구성

표 2 PRESS 개발 공법



PPS 공법은 기존의 PC 또는 PSC 구조를 고층화, 대형화의 요구에 맞게 개선한 구조시스템으로써, 특히 PC 구조의 장점을 극대화하면서 내진성능을 발휘할 수 있는 합리적인 구조시스템이다. PPS 공법을 일체식 철근 콘크리트 구조와 비교할 경우, 다음과 같은 특징을 들 수 있다.

- 1) 폭이 넓은 보를 사용하여 층고를 저감함과 함께 프리스트레스를 도입하여 장경간을 만들 수 있다.
- 2) 프리스트레스의 도입과 양층의 무게를 고려하여 제작된 PC 보는 속빈 U자형으로써, 덩침 콘크리트의 타설 공정을 통하여 접합부를 충전함으로써 구조부재의 일체성 확보 및 현장시공 공정을 간소화할 수 있다.
- 3) 긴장재를 곡선으로 배치한 PSC 보에서는 철근 콘크리트 보에 비하여 단면을 작게 할 수 있어서 부재의 자중이 경감된다.
- 4) PSC부재는 프리스트레스에 의해서 설계하중에 의한 처짐을 감소시킬 수 있다.

PPS 공법의 제작 및 시공공정은 크게 공장가공 작업과 현장 작업으로 분류되며, 각 공정에서의 작업내용 및 순서는 다음과 같다.

- 1) 공장가공 작업 : 폭이 넓은 U자형 PC보의 경우 휨 응력에 대한 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등에 따라 최적화

하며, 부재의 자중을 최소화하고, 운송 및 시공의 편리성을 추구한다. 또한 다양한 폭을 가지는 넓은 보의 효율적인 생산을 위하여 초기 부재 설계에서 계획된 기본 몰드로 생산한 후, 폭이 넓어지는 경우 2개의 부재를 조립하는 방법을 사용할 수 있다. 작은 보가 정착되는 단변방향의 보 프리스트레스 도입을 위한 쉬스관 매입과 원활한 작은 보의 정착을 위하여 부재의 각 구간별로 다른 단면을 계획한다. 또한 긴장재의 정착을 위한 쉬스관은 미리 계획된 긴장재의 배치에 따라 부재 생산과정에서 매입한다. 이상의 작업으로 공장에서의 생산가공작업이 완료되면 PC 부재를 현장으로 운반한다.

- 2) 현장조립 작업 : 현장에 반입된 U자형 넓은 보를 기둥 상부의 지판에 설치함으로써 현장 조립작업이 완료된다. 이후 슬래브는 데크나 하프 슬래브를 사용하고 철근 배근을 완료한 후, 접합부 및 슬래브에 콘크리트를 타설한다. 슬래브의 콘크리트 타설 후에는 미리 매입된 쉬스관에 긴장재를 삽입하고, 포스트텐션후 그라우팅 작업을 수행함으로써 시공공정을 완료한다.

3.4 프리캐스트 내진 골조 공법

PRESSS(Precast Seismic Structural System) 연구 프로그램은 10년간의 연구 결과물로 다양한 형태의 프리캐스트 공법

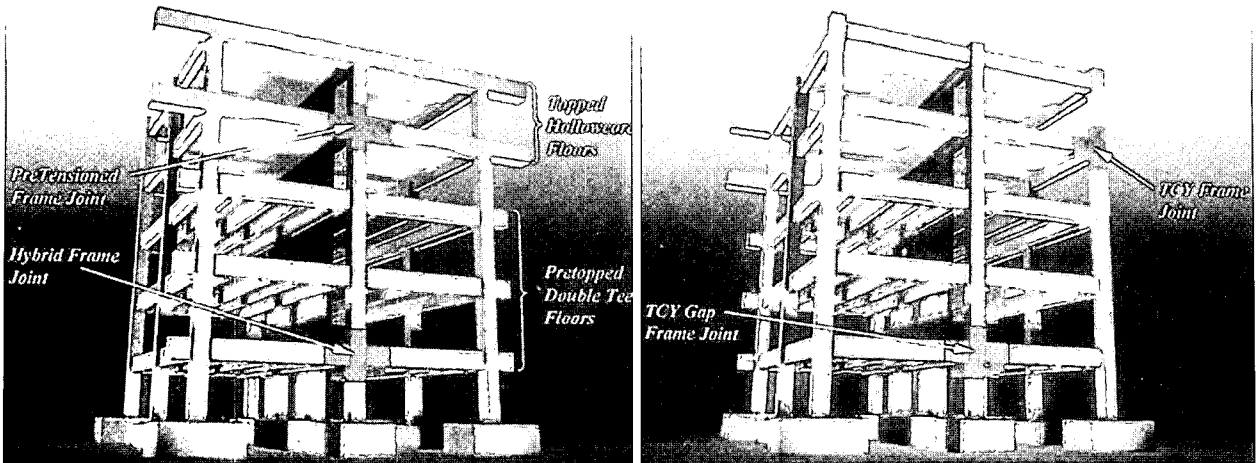


그림 8. 포스트텐션에 의한 PC 부재의 접합

을 제안하였으며, 이들 대부분이 포스트텐션 공법을 사용한다. National Science Foundation(NSF), Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI), 그리고 Precast/Prestressed Concrete Manufacturers Association(PCMAC)의 연구지원에 의해서 UC San Diego에서 실험적 연구를 수행하였다. 연구 대상 공법은 Hybrid Frame, PreTensioned Frame, TCY Gap Frame, TCY Frame, PC PostTensioned Shear Wall 등이며, 이들 공법의 개요는 <표 2>에 나타내었다.

Hybrid 공법은 단면의 중앙을 관통하는 비부착 강연선(unbonded PT strand)를 사용하여 압착하고, 추가적인 휨강도 및 에너지 소산 능력의 확보를 위하여 일반철근을 단면의 상하단에 사용한다. 이 때 철근에서의 응력 집중을 피하기 위하여 부분적으로 비부착 구간(unbonded region)을 설치한다. Pre-Tensioned Frame 공법은 단층높이 건물의 기둥에 보가 연속으로 지나가는 구조에 이상적이며, 중진지역을 주 대상으로 하여 일반철근은 사용하지 않는다. 그리고 TCY Gap Frame과 TCY Frame은 소성힌지가 발생하는 부분을 분산시키고자 하는 공법으로 TCY Gap Frame은 보의 하부에 PT bar를 사용하여 보를 기둥에 압착하는 것이 다르다. PC PostTensioned Shear Wall은 벽체가 횡력에 저항할 수 있도록 비부착 포스트텐션(unbonded post-tensioning)를 이용하여 PC 벽체들을 연결하는 방법을 사용한다. 그리고 벽체사이의 수직 연결 부위는 UFP(U-shaped flexure plate)를 사용하여 UFP가 항복하면서 에너지 소산을 할 수 있도록 한다.

실험적 연구에서는 5층의 건물을 대상으로 실제 크기의 60%로 실험체를 제작하고, 실험의 효율을 높이기 위해서 <그림 8>과 같이 이들 공법을 실험체의 각 부위에 혼합 적용하여 그 거동을 평가하였다. 그 결과 UBC Zone 4 보다 50% 이상 높은 지진 하중에 대하여서도 층간 변위 4.5% 이상의 변위까지 매우 만족스러운 결과를 보였다.

4. 맺는 말

프리스트레스트 콘크리트는 고강도의 재료를 사용한다는 점과 여기에 인장력도 도입하여 사용할 수 있다는 점으로 인하여, 적재 적소에 사용하면 매우 효율이 높은 구조물을 완성할 수 있다. 이러한 예로서 본고에서는 먼저 프리텐션의 경우 일반철근의 대안으로 강연선을 사용하여 경제성 및 사용성을 증대할 수 있는 방법에 대하여 소개하였다. 그리고 포스트텐션의 경우 바닥 슬래브에의 적용, 보수 보강에의 적용, PC와 함께 사용하는 PPS 및 내진골조 등에 대하여 소개하였다.

그러나 본고에서는 프리스트레스트를 효율적으로 사용할 수 있는 가능성의 몇 가지 예만을 소개하였으며, 그 밖의 다른 예는 많은 문헌들에 소개되고 있어 이를 참고하면 보다 많은 예를 접할 수 있을 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. T.Y. Lin and N.H. Burns, "Design Prestressed Concrete Structures," John Wiley & Sons.
2. 삼성물산(주), "PPS 공법의 실용화 기술개발에 관한 연구", 2003. 7.
3. Priestley, M. J. N., Sritharan, S., Conley, J. R., and Pampanin, S., "Preliminary Results and Conclusions from the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building," PCI Journal, Vol.44, No.6, November-December 1999, pp.42~67.
4. Priestley, M. J. N., "The PRESSS Program? Current Status and Proposed Plans for Phase III," PCI Journal, Vol.41, No.2, March-April 1996, pp.22~40.