

긴장재 절단에 따른 프리텐션 부재의 동적 거동 고찰

Dynamic Behavior of Pretensioned Concrete Member during Detensioning

김장호* · 문도영** · 지광습*** · 김규선****

Kim, Jangho · Moon, Do Young · Zi, Goangseup · Kim, Gyuseon

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the effect of the important parameters on the transfer length during the dynamic flame cutting of tendon experimentally. The considered parameters were strand diameter, concrete cover thickness, stirrup, debonding strand and release method. Ten pretensioned concrete beam specimens were cast and tested. Time history curves for the axial strain of tendon were measured by electrical resistance strain gauges mounted on the strands. Experimental results indicated that large dynamic shock effects occurred near cut-end during the sudden release. The prestressing forces are dependent on the parameters above considered. The ratio of residual prestressing forces of 12.7 mm strands is greater than 15.2 mm strands. Using debonding strand and gradual release are more efficient for applying prestressing forces.

Keywords : pretension, prestressing force, dynamic measurement, transfer length

요 지

본 논문에서는 전달길이에 영향을 미치는 인자에 따라 프리텐션 부재가 받는 동적 충격에 의한 영향을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 긴장재의 직경, 콘크리트의 피복 두께, 구속 철근과 비부착 구간의 유무, 긴장력 도입 방식을 변수로 한 10개의 프리텐션 콘크리트 부재를 제작하고, 긴장재에 부착한 전기 저항식 변형률 게이지를 통하여 부재에 긴장력 도입 시 변형률 변화를 동적으로 측정하였다. 실험 결과, 순간 전달 방식으로 긴장력을 도입할 때 절단단부에서 큰 동적 효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 변형률 변화량으로 각 부재의 긴장력을 비교한 결과, 각 인자에 따라 차이가 존재하는 것을 확인했다. 직경 15.2 mm 강선보다 12.7 mm 강선의 잔류 긴장력 비율이 더 컸으며, 75 mm의 콘크리트 피복 두께만으로도 충분한 구속 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다. 구속 철근의 영향은 미미했고, 비부착 구간의 영향으로 잔류 긴장력이 향상되었다. 순간 전달 방식보다 지연 전달 방식으로 긴장력을 도입할 때 긴장력 손실이 적은 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 프리텐션, 프리스트레스 힘, 동적 계측, 전달길이

1. 서 론

프리텐션 방식은 프리스트레스 공법 중 하나로 사전 긴장된 긴장재의 썩기 작용으로 인해 전달길이 내에서 마찰 저항이 발생하고, 마찰 저항에 의한 부착력에 의해 긴장력을 도입하는 방식이다. 따라서 긴장력 도입 시 썩기 작용에 의해 발생하는 파열 응력에 의한 손상이 문제가 된다(Nanni 등, 1992).

전달길이는 프리텐션 부재의 단부 거동을 반영하는 중요 요소 중 하나로서 긴장재에 도입된 긴장력이 마찰에 의하여 유효 프리스트레스 응력에 도달하기 위하여 필요한 부착길이이다. 선행 연구에 따르면 전달길이는 긴장재의 직경, 콘크리트의 피복 두께 및 압축 강도, 구속 철근과 비부착 구

간의 유무, 긴장력 도입 방법, 시간 의존 효과(크리프 및 건조 수축) 등과 같은 변수의 영향을 받는다(오병환과 김의성, 2000; 오병환 등, 2004; Russell and Burns, 1996; Oh and Kim, 2000; Barnes 등, 2003).

전달길이는 다양한 실험 방법으로 도출할 수 있다. 대표적인 방법은 콘크리트 표면 변형률 측정을 통한 95% AMS(average maximum strain) 방법이다(Russell and Burns, 1996). 이는 긴장력을 도입하기 이전과 이후 콘크리트 표면의 변형률 변화를 측정하여 전달길이를 도출하는 방법으로 측정이 간편한 장점이 있다. 하지만 긴장력을 도입하는 과정에서 급작스런 긴장력 도입으로 인해 발생하는 동적 영향의 고찰이 어렵고, 각종 주요 영향 인자에 대한 민감도가 떨어진다. 실제로 현재 사용되고 있는 각종 전달길이 예측식은

*고려대학교 건축·사회환경공학과 대학원 석사과정 (E-mail : tiga00@korea.ac.kr)

**정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 BK21 연구교수 (E-mail : dymoon@naver.com)

***정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (E-mail : g-zi@korea.ac.kr)

****정회원 · 한국시설안전공단 교량실 차장 (E-mail : gskim68@naver.com)

긴장재의 직경과 유효 긴장력에 대한 함수로만 정의되거나 직경과 콘크리트 강도의 함수로 정의되어 있다. 뿐만 아니라, 각 예측식에 의한 전달길이 간 큰 차이를 나타내는 등의 문제가 있다(오병환 등, 2004; Zia and Mostafa, 1977; Cousins 등, 1990; Mitchell 등, 1993; Russell and Burns, 1997).

기존의 정적 계측에 의한 연구 방법인 콘크리트 표면에 부착된 테백 게이지의 정적 계측에 의한 연구 결과에 따르면, 긴장재의 직경이 증가하면 전달길이가 증가하고, 반대로 콘크리트 피복두께가 증가하면 전달길이는 감소하게 된다(오병환과 김의성, 2000; 오병환 등, 2004; Russell and Burns, 1996; Oh and Kim, 2000). 구속 철근이 존재하면 구속 응력의 발현으로 인해 부착력이 증가할 것으로 예측된다. 그러나 Russell and Burns(1996)는 실험을 통하여 긴장력 도입 시 콘크리트 부재 내부에 균열이 발생하지 않으면 구속 철근의 구속 응력이 발현되지 않는 것을 확인하였다. 그럼에도 불구하고 긴장력 도입으로 발생할 수 있는 단부의 손상을 방지하기 위해 구속 철근을 설치해야 한다고 주장하였다. 또한, Russell and Burns(1996)는 비부착 구간을 적용하게 되면 전달길이가 감소하게 된다는 것을 확인하였다. Zia and Mostafa(1977)는 순간 전달(Sudden Release)과 지연 전달(Gradual Release)이 전달길이에 미치는 영향을 분석하였으며, 각 방법에 대한 전달길이 산정식을 각각 따로 제시하였다. 오병환과 김의성(2000), Russell and Burns(1997), Oh and Kim(2000)은 절단단부와 고정단부에서의 전달길이를 비교하여 긴장력 도입 방법에 따른 영향을 간접적으로 비교하였으며, 고정단부보다 절단단부에서 더 큰 전달길이가 유발된다고 보고하였다. 크립 및 건조수축 효과에 의한 시간 의존적 영향으로 콘크리트 부재의 축방향 변형률과 전달길이가 증가한다는 보고가 있다(오병환과 김의성, 2000; Oh and Kim, 2000; Barnes 등, 2003).

한편, Steinberg 등(2001)은 사각 PC 보에 매립형 및 표면 부착형 콘크리트 게이지를 설치하고 동적 계측을 통하여 순간적인 긴장력 도입이 콘크리트의 응력에 미치는 영향을 고찰하였으며, 부재 단부에 육안 관측이 불가능한 균열이 발생할 수 있음을 검증하였다. 또한, Belhadj and Bahai(2001)는 소형 콘크리트 부재에 큰 긴장력이 도입될 때 긴장재와 콘

크리트 사이의 마찰력에 관한 실험에서 긴장재와 콘크리트 표면에 변형률 게이지를 부착하여 긴장재의 급작스런 절단 시 충격에 의해 동적 효과가 발생한다는 것을 확인하였다.

이와 같은 연구 보고에 의하면 용접 절단에 의한 순간 전달 방식을 사용하는 것보다 유압잭을 이용한 지연 전달 방식을 사용하는 것이 유리하다. 실무에서도 지연 전달 방식의 사용 빈도가 높다. 하지만 프리텐션 구조물에서 긴장재를 넓게 배치하고 작업 공간이 협소하여 유압잭을 이용하기 불가능한 상황이거나 경제성이 떨어질 경우에는 순간 전달 방식을 사용하게 된다.

이에 본 연구에서는 순간 전달 방식에 의하여 프리텐션 부재에 긴장력을 도입할 때, 긴장재의 직경, 콘크리트의 피복 두께, 구속 철근과 비부착 구간의 적용 등이 긴장재에 미치는 동적 영향을 실험적으로 고찰하였다. 실험은 프리텐션 부재의 긴장재에 직접 부착한 표면 부착형 변형률 게이지로부터 긴장재의 변형률 변화를 측정하는 방법을 사용하였다. 또한, 긴장력 도입 방식에 의한 영향을 비교하기 위하여 지연 전달 방식의 실험을 수행하였으며, 장기적인 계측을 통하여 크립과 건조수축 등과 같은 시간 의존 효과를 고찰하였다.

한편, 본 연구에서는 실험에서 도출한 최종 변형률 변화량으로 부재에 작용한 긴장력을 산정하여 전달길이에 영향을 미치는 인자에 따라 일정한 지점에 작용하는 긴장력의 크기를 비교하였다. 변형률 변화량으로 도출한 최종 유효 프리스트레스 응력을 통해 전달길이를 고찰하였으며, ACI의 전달길이 산정식과 선행 연구에 의해 제안된 식을 비교 검토하고, 유효한 전달길이 식을 실험을 통해 확인하였다.

2. 실험개요

2.1 실험체 및 실험 재료

프리텐션 콘크리트 부재에 긴장력을 도입할 때 부재가 받는 영향을 확인하기 위하여 150 mm×150 mm×4,000 mm 크기의 부재를 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 2 참조). 실험에 사용된 콘크리트의 설계 압축 강도는 45 MPa이며, 일축 압축 강도 시험을 통해 실험 당일 해당 재령에서의 콘크

Table 1. Test specimens

Type	Strain diameter [mm]	Release method	End reinfor-cement	Cover thickness [mm]	Debonded length [mm]	Compression strength* [MPa]	Comments
2F-N-1	12.7	flame cutting	×	75	0	41.6	measurement of transfer length
2F-N-2	12.7	flame cutting	×	75	0	38.7	long term measurement
2F-S	12.7	flame cutting	○	75	0	38.7	.
5F-N-1	15.2	flame cutting	×	75	0	41.6	measurement of transfer length
5F-N-2	15.2	flame cutting	×	75	0	38.7	long term measurement
5F-W	15.2	flame cutting	×	100	0	38.7	.
5F-D	15.2	flame cutting	×	75	200	38.7	.
5F-SD	15.2	flame cutting	○	75	200	38.7	.
5G-N	15.2	gradual release	×	75	0	38.7	.
5G-D	15.2	gradual release	×	75	200	38.7	.

*The strength was measured just before the test

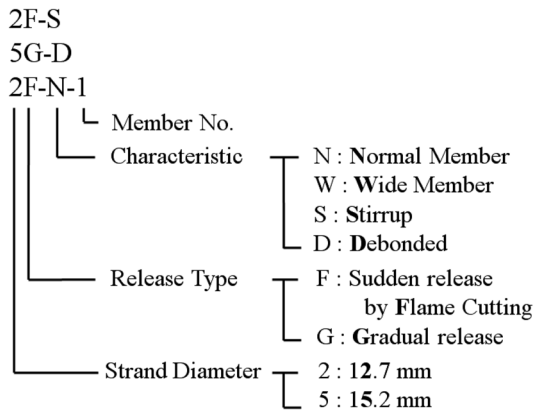


Fig. 1 Design of naming system

리트 압축 강도를 측정하였다. 실험에 사용된 긴장재는 7연 강선인 SWPC 7BN(KS D 7002 : 2002)를 사용하였다.

2.2 실험 변수

본 실험은 긴장재의 직경, 콘크리트의 피복 두께, 구속 철근과 비부착 구간의 유무, 긴장력 도입 방법을 변수로 하였으며, 변수에 따라 총 10개의 실험체에 대하여 실험을 실시하였다. 각 실험체 별 변수는 Table 1에 나타내었으며, 실험체의 명칭은 Fig. 1의 조합에 따른다.

2.3 긴장력 측정

2.3.1 게이지 부착

프리텐션 부재에 긴장력을 도입할 때의 동적 거동을 확인하기 위해서 긴장재에 1 mm 크기의 전기 저항식 변형률 게이지를 부착하여 긴장재의 변형률을 측정하고, 변형률의 변화량으로 긴장력의 변화를 확인하였다. 긴장재에 부착한 변형률 게이지는 한 부재 당 세 지점에 부착하였으며, 부재

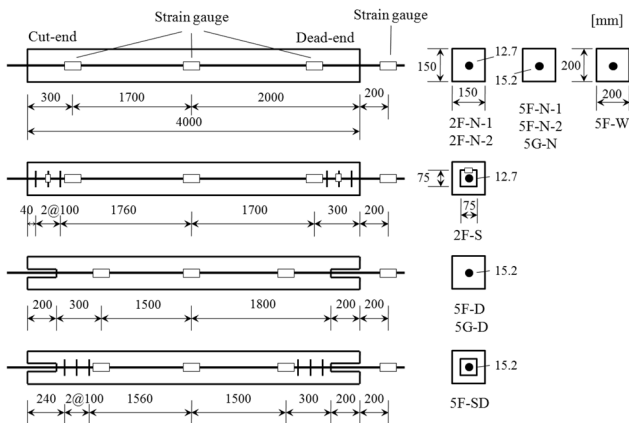


Fig. 2 Location of electrical resistance strain gauges

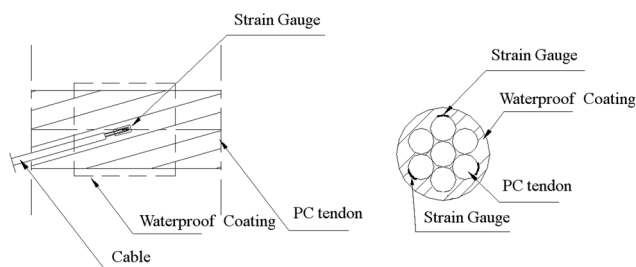


Fig. 3 Attachment of electrical resistance strain gauges

의 중앙부와 양 끝단에서 300 mm 내부에 부착하였다(Fig. 2). 긴장재로 사용한 7연 강선에서 중앙 강선 주변의 6개 나선형 강선 중 2~3개의 강선에 게이지를 부착하여 평균값으로 긴장력을 유추하였다(Fig. 3).

2.3.2 긴장력 측정 방법

한 개의 긴장 프레임에 8개의 부재를 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 4). 긴장력 도입 시 긴장 프레임의 제한된 강성으로 인해 인접 부재에 작용하는 긴장력에 따라 긴장력이 영향을 받을 수 있다. 그러므로 개별 긴장재의 긴장력을 측정하는 것이 바람직하다. 하지만 긴장력 측정을 위해 긴장재 수와 동일한 수의 로드셀을 사용하는 것은 비용이 매우 높으며 비효율적이다. 이에 본 연구에서는 외부 노출 긴장재의 탄성 변형률 복원을 이용한 긴장력 측정 방법(elastic strain recovery : ESR)으로 긴장력을 측정하였다.

긴장재와 같은 강재는 하중이 작용하면 Fig. 5에서와 같이 변형률이 비선형으로 증가하게 된다. 하지만 하중을 제거하면 강재의 탄성 계수와 같은 기울기로 탄성 변형률 복원이 발생한다. 긴장력 도입 시 긴장력 형성에 작용하는 변형률은 총 변형률이 아니라 탄성 변형률만 작용하게 된다. 본 연구에서는 긴장재의 긴장력을 제거하여 프리텐션 부재에 긴장력을 도입하는 순간을 전후로 하여 긴장재의 변형률 변화를 측정하였다.



Fig. 4 Testing members and prestressing frame

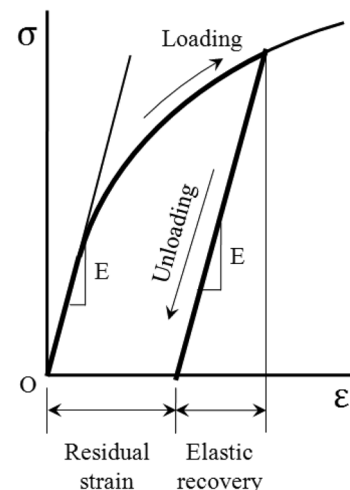


Fig. 5 Stress-strain diagrams illustrating elastic strain recovery

실험에서 긴장재는 각 나선형 강선의 방향이 중심축과 일치하지 않으며 변형을 변화량은 나선형 강선에서 측정하므로 식 (1)에 의하여(Machida and Durelli, 1973; Chen and Wissawapaisal, 2001) 변형을 변화량으로부터 긴장재에 작용한 긴장력을 유추하였다.

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_h} = \frac{f_c}{f_h} = \frac{A_c N / A_c}{A_h \cos^2(\beta) N / A_h} = \frac{1}{\cos^2(\beta)} \quad (1)$$

여기에서 $\beta=12^\circ$, $E=200$ GPa로 가정하였다. 또한, 중앙 강선과 나선형 강선의 직경 차이(소선경 차이)는 0.1 mm로 가정하였다.

2.3.3 동적 데이터 측정

실험은 Tokyo-Sokki 사의 동적 데이터로거, DRA-101C와 DRA-107A를 동시에 사용하여 동적 측정을 하였으며, 사용 가능한 채널수는 각각 10채널씩으로 총 20채널이다. 데이터

로거는 한 번의 실험에서 한 채널 당 최대 496,000개의 데이터를 측정할 수 있으며, 측정 시간 및 주기는 이를 참고로 긴장력 도입 방식에 따라 결정이 되었다. 순간 전달 방식의 경우 긴장재를 절단할 때 절단단부에서 짧은 시간 동안 동적인 긴장력 도입이 예상된다. 이를 최대한 정확히 측정하기 위해서는 데이터의 측정 주기가 짧고 초당 측정 데이터의 수가 많아야 한다. 따라서 본 실험에서는 0.1×10^{-3} sec의 측정 주기로 초당 10,000개의 데이터를 측정하였다. 지연 전달 방식의 경우 긴장력이 서서히 도입되므로 동적 효과가 거의 나타나지 않을 것으로 예상된다. 따라서 측정 주기를 18×10^{-3} sec로 하여 초당 데이터를 약 56개로 줄여서 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 동적 효과

순간 전달에 의해 프리텐션 부재에 긴장력 도입 시, 긴장

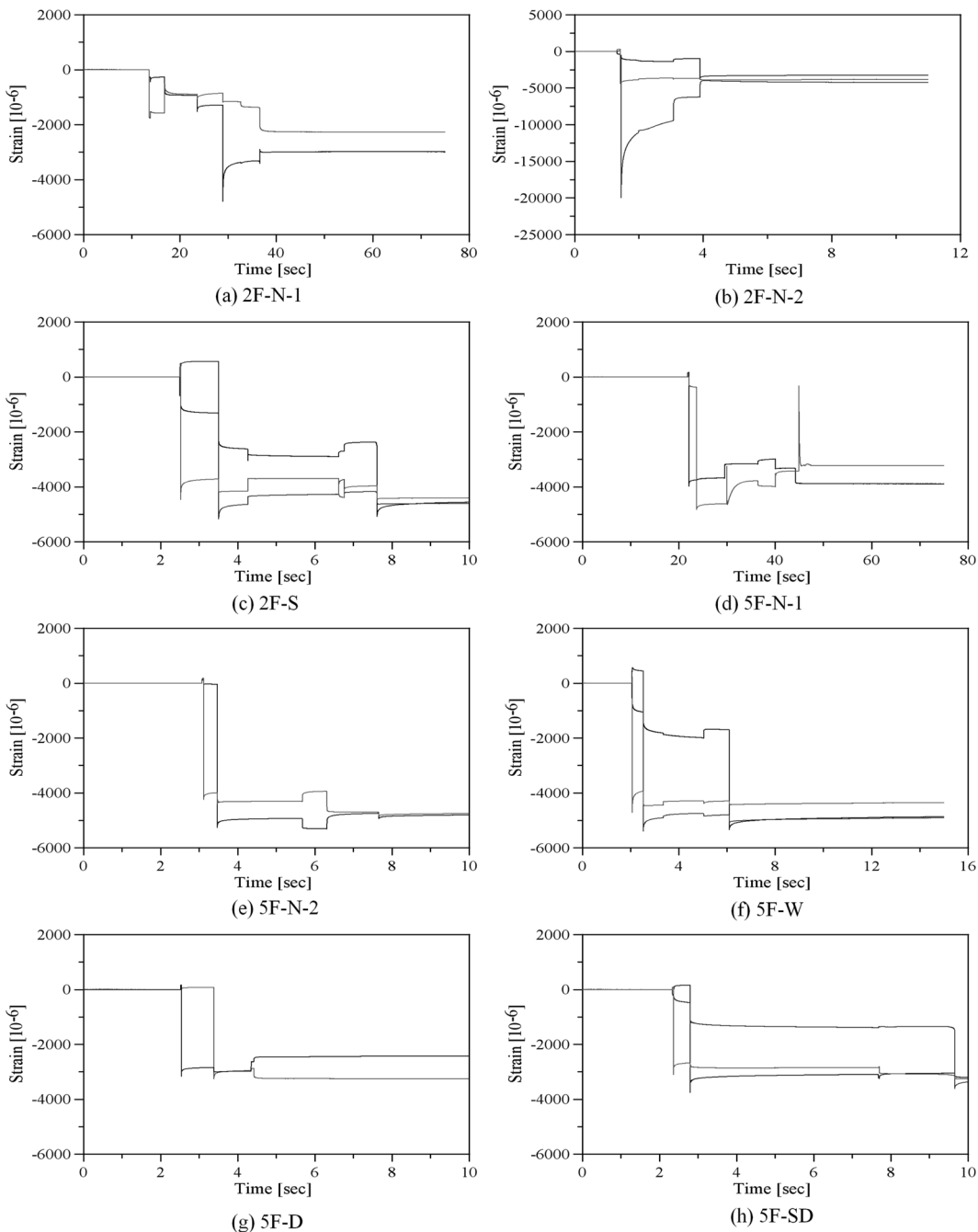


Fig. 6 Dynamic strain change near cut-end during sudden release

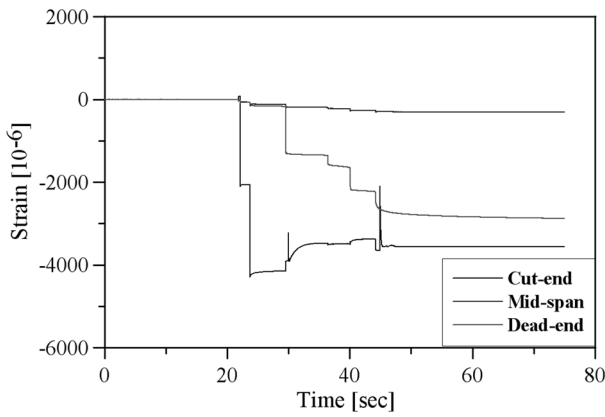


Fig. 7 Dynamic strain change of 5F-N-1 during sudden release

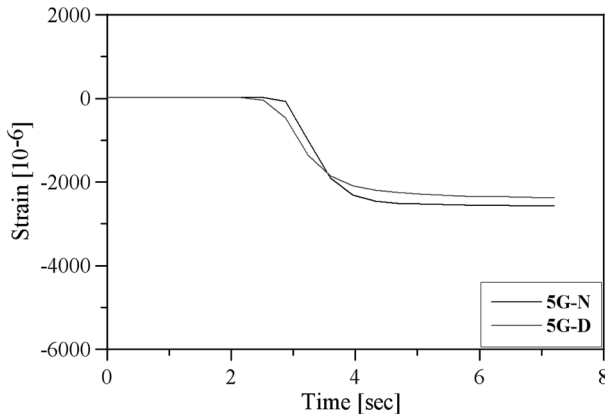


Fig. 8 Dynamic strain change near cut-end during gradual release

재의 용접 절단이 이루어진 부재의 절단단부에서 동적 충격 효과가 발생하였다(Fig. 6). 순간 전달에 의한 긴장력 도입을 위하여 긴장재를 용접 절단할 때에는 긴장재의 7개 강선이 동시에 절단되는 것이 아니라 용접 불꽃에 가까운 강선부터 차례대로 절단된다. 따라서 긴장재를 절단하는 동안 절단단부에서 시간에 따라 측정된 변형률 변화는 각 강선에 따라 큰 차이가 존재한다. 게이지가 부착된 강선의 인접 강선 절단 시에는 응력 재분배로 인해 변형률 변화가 소폭 발생하지만, 게이지가 부착된 강선이 절단될 때에는 상당히 큰 동적 충격 효과가 발생하고 이로 인해 순간적인 압축 변형이 발생한다. 하지만 긴장재의 모든 강선이 절단된 이후의 최종적인 변형률 변화량은 거의 유사하였다.

반면, 절단단부에서 2 m 거리에 위치한 부재의 중앙부와 4 m 거리에 위치한 고정단부에서는 절단단부에서와는 달리 동적 효과의 감소로 인해 3개의 게이지에서 유사한 변형률 변화가 발생하였고, 긴장재의 각 강선을 절단할 때 절단단부에서 나타난 순간적인 압축 변형이 없이 단계적인 긴장력 도입만 관찰이 되었다(Fig. 7).

순간 전달 방식과는 달리 지연 전달 방식에 의한 긴장력 도입 시에는 유압재의 유압 제거로 서서히 긴장력을 도입하기 때문에 동적인 충격은 없다. 따라서 Fig. 8과 같이 긴장력이 정적으로 도입된다. 또한, 7개 강선의 긴장력이 동시에 제거되기 때문에 각 강선에서의 변형률 변화는 유사한 것으로 관찰되었으며, 순간 전달에서 확인된 단계적인 변화는 관찰되지 않았다.

3.2 긴장력 도입에 미치는 영향

프리텐션 부재에 도입된 긴장력을 측정하기 위해 사용된 ESR을 이용하면 변형률 게이지를 통해 측정된 변형률 값으로부터 손실 긴장력을 유추할 수 있다. 또한, 초기 도입 긴장력과 손실 긴장력의 차로 콘크리트 부재 내부에 잔류하는 긴장력을 유추한다. 각 부재의 초기 도입 긴장력의 크기가 다르기 때문에 잔류 긴장력을 직접 비교하는 것은 불가능하므로 초기 도입 긴장력에 대한 잔류 긴장력의 비를 계산하여 각 부재의 잔류 긴장력을 비교하였다.

프리텐션 부재의 중앙부는 긴장력의 전달이 완료된 지점이다. 따라서 ESR에 의한 잔류 긴장력 비율은 모든 부재에서 약 95%의 유사한 값을 보여준다(Table 2). 하지만 절단단부와 고정단부에서는 변형률 게이지의 위치가 전달영역 이내에 존재하기 때문에 부재의 특징에 따라 잔류 긴장력 비율의 차이가 존재한다.

3.2.1 긴장재 직경

긴장재 직경의 차이에 의한 영향은 2F-N-1과 5F-N-1 또는 2F-N-2와 5F-N-2를 비교하여 확인하였다. 고정단부에서는 잔류 긴장력 비율이 거의 유사하였으나 절단단부에서는 15.2 mm 강연선보다 12.7 mm 강연선에서 잔류 긴장력 비율이 약 5~10% 정도 크게 나타났다. 이에 대하여 오병환과 김의성(2000)은 긴장재의 단면적/둘레길이 비율의 상대적인 차이에 의하여 기인하는 것으로 주장하였다. 즉, 15.2 mm 강연선의 단면적이 더 크기 때문에 12.7 mm 강연선보다 더 큰 긴장력이 도입되지만 단면적의 증가에 비해 부착을 발휘할 수 있는 표면적의 비율이 상대적으로 작다. 한편, 긴장재의 직경이 클수록 블리딩의 발생으로 긴장재 하부에 생성되는 공극의 크기가 크게 되어 부착 강도가 감소하며, 이는 긴장재 직경에 따른 긴장력 비율의 차이에 영향을 미치는 다른 원인인 것으로 판단된다.

3.2.2 콘크리트 피복 두께

콘크리트 피복 두께의 차이에 따른 영향은 5F-N-2와 5F-W를 비교하여 확인이 가능하다. 절단단부에서는 콘크리트 피복 두께의 차이에 따른 영향이 거의 보이지 않고, 고정단부에서는 오히려 부재 폭이 150 mm일 때 잔류 긴장력 비율이 약 7% 정도 크게 나타났다. 이는 콘크리트 피복 두께가 증가함에 따라 전달길이가 감소한다는 기존 연구와는 다른 결과이다. 따라서 본 실험에서 사용한 폭 150 mm 이상에서는 콘크리트 피복 두께의 증가가 긴장력 증가에 기여하는 효과가 작다고 판단된다.

3.2.3 구속 철근

구속 철근을 사용하였을 때의 영향을 확인하기 위하여 2F-N-2와 2F-S를 비교하였다. Fig. 9는 2F-S에서 구속 철근의 변형률 변화를 정적 측정된 것으로써 콘크리트 부재에 긴장력이 도입되는 동안 변형률 변화는 미미하다. Russell and Burns(1996)에 따르면 이는 부재 내부에 발생한 균열이 미미하다는 것을 의미하고, 이로 인해 구속 철근의 구속 응력이 발현 되지 않은 것으로 판단된다. 하지만 실험 결과에서 나타나듯이 구속 철근을 설치했을 때보다 구속 철근을

Table 2. Prestressing force of all the members

Type	Position	Initial prestressing force		Force change		Residual force/ Initial force [%]
		Elastic strain change [$\times 10^{-6}$]	Prestressing force [kN]	Strain decrease [$\times 10^{-6}$]	Residual force [kN]	
2F-N-1	Cut-end	5831	112.53	3171	51.34	45.6
	Mid-span			210	108.48	96.4
	Dead-end			2629	61.79	54.9
2F-N-2	Cut-end	5687	109.74	3781	36.78	33.5
	Mid-span			198	105.91	96.5
	Dead-end			2058	70.02	63.8
2F-S	Cut-end	5437	104.92	4524	17.63	16.8
	Mid-span			170	101.64	96.9
	Dead-end			2441	57.82	55.1
5F-N-1	Cut-end	5917	163.80	3560	65.25	39.8
	Mid-span			305	155.34	94.8
	Dead-end			2878	84.13	51.4
5F-N-2	Cut-end	6058	167.68	4778	35.41	21.1
	Mid-span			268	160.25	95.6
	Dead-end			2227	106.03	63.2
5F-W	Cut-end	5911	163.61	4713	33.14	20.3
	Mid-span			149	159.49	97.5
	Dead-end			2591	91.89	56.2
5F-D	Cut-end	5807	160.76	2841	82.13	51.1
	Mid-span			181	155.75	96.9
	Dead-end			1693	113.89	70.9
5F-SD	Cut-end	5534	153.20	3278	62.45	40.8
	Mid-span			241	146.54	95.7
	Dead-end			1719	105.61	68.9
5G-N	Cut-end	5443	150.68	2795	73.32	48.7
	Mid-span			300	142.39	94.5
	Dead-end			2577	79.35	52.7
5G-D	Cut-end	5567	154.10	2755	77.83	50.5
	Mid-span			258	146.94	95.4
	Dead-end			2334	89.48	58.1

설치하지 않았을 때 잔류 긴장력 비율이 9~17% 가량 크게 측정되었으며, 이를 설명하기에는 부족함이 있다. 이는 구속 철근 내부의 폐합 공간이 좁기 때문에 콘크리트 다짐에 영향을 주었기 때문으로 추측된다. 따라서 실제 구조물의 제작 시에도 이를 유의하여야 할 것으로 판단된다.

3.2.4 비부착 구간

5F-N-2와 5F-D를 비교하여 비부착 구간을 적용하였을 때의 영향을 확인한 결과, 비부착 구간의 적용으로 인해 절단 단부에서는 잔류 긴장력 비율이 30% 정도 크게 나타났고, 고정단부에서는 7.6% 정도 크게 나타났다. 따라서 비부착 구간을 적용할 경우 잔류 긴장력이 개선된다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 5G-N과 5G-D에서 절단단부의 초기치 대비 잔류치 차이는 1.9%이었으며, 고정단부는 5.4%이었다. 따라서 지연 전달 방식으로 긴장력을 도입하는 경우에는 비부착 구간을 적용하더라도 잔류 긴장력이 증가하는 등의 경향이

뚜렷하지 않은 것을 확인할 수 있다.

3.2.5 긴장력 도입 방법

긴장력 도입 방법에 따른 영향은 5F-N-2와 5G-N을 비교하여 확인하였다. 절단단부에서의 잔류 긴장력 비율은 순간 전달 방식보다 지연 전달 방식에서 27.5% 가량 큰 값을 갖는 것으로 확인됐다. 따라서 지연 전달보다 순간 전달의 절단단부에서 긴장력 손실이 더 크며 이는 용접 절단 시 동적 긴장력 도입에 의한 충격 때문인 것으로 판단된다. 하지만 고정단부에서의 잔류 긴장력 비율은 절단단부와는 반대로 지연 전달 방식보다 순간 전달 방식에서 10.6% 정도 크다. 이는 예측과 다른 결과이며 정확한 원인 규명을 위해 추가적인 연구가 필요하다.

3.3 시간 의존 효과

2F-N-2와 5F-N-2의 두 개의 부재에 대해서 콘크리트 타

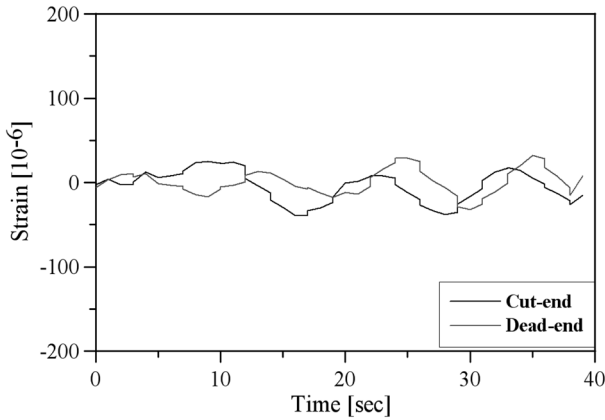


Fig. 9 Static data from strain gauges on the stirrups for 2F-S during release

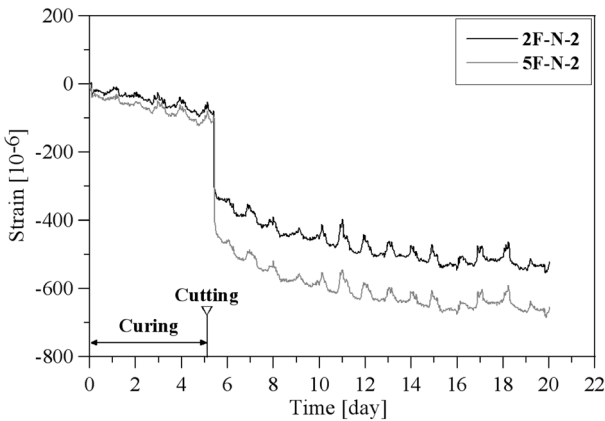


Fig. 10 Static data for gauges on the strand side with respect to time

설 이후 20일 동안 부재 내부의 중앙부에서 장기 계측을 실시하여 긴장재의 압축력에 의해 콘크리트가 받는 시간 의존적 변형 양상을 알아보았다(Fig. 10). 측정 결과, 약 5일 간의 콘크리트를 양생하는 동안과 긴장력을 도입한 이후의 15일 동안에 긴장재의 변형률이 감소하는 것을 확인하였다. 변형률이 감소하는 과정에서 하루를 주기로 변형률이 변화하는 양상을 나타냈다. 이때의 진폭은 약 $50 \mu\epsilon$ 이었으며, 프리텐션 부재가 낮에는 팽창하고 밤에는 수축한다는 것을 확인할 수 있다.

콘크리트 양생 기간 동안에 2F-N-2는 $88 \mu\epsilon$ 만큼 변형률이 감소하였으며, 5F-N-2의 변형률은 $112 \mu\epsilon$ 만큼 감소하였다. 부재의 긴장력 도입 15일 후의 장기 계측 결과에 의하면 시간의 진행에 따라 2F-N-2에서는 $246 \mu\epsilon$, 5F-N-2에서는 $279 \mu\epsilon$ 만큼 감소하였다. 장기 계측 시의 변형률 변화와 이에 따른 긴장력의 변화는 Table 3에 나타내었다. 시

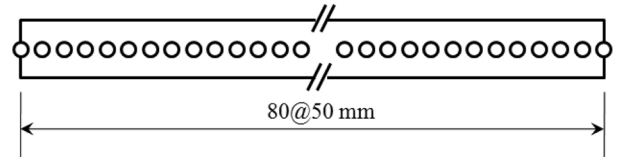


Fig. 11 Location of Demec points

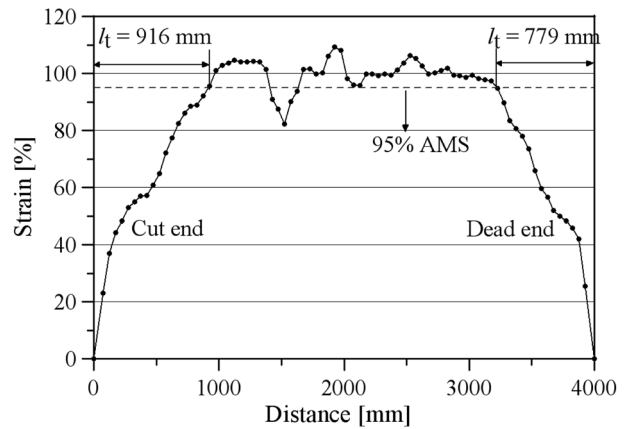


Fig. 12 Strain profile of 2F-N-1

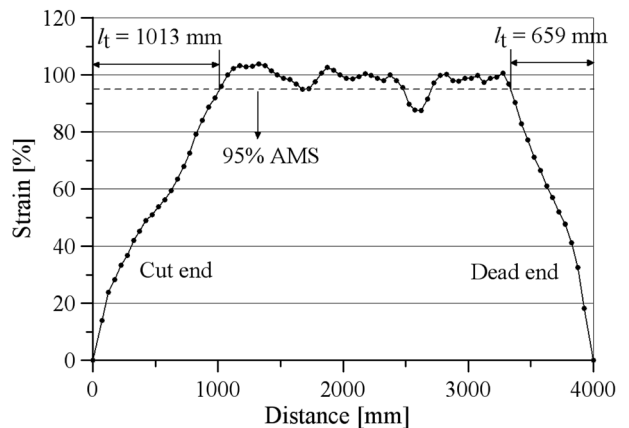


Fig. 13 Strain profile of 5F-N-1

간에 따라 발생하는 프리텐션 부재 내부에서의 긴장재 변형률 감소는 크리프와 건조수축에 기인한 것으로 추정이 가능하고, 이를 통하여 시간 의존적 효과를 확인할 수 있다.

4. 전달길이 고찰

2F-N-1과 5F-N-1의 2개의 부재에 데멕 게이지(Demec gauge)를 사용하여(Fig. 11) 콘크리트 표면 변형률에 의해 전달길이를 측정하고, 직경 12.7 mm인 긴장재와 직경 15.2 mm인 긴장재에서의 전달길이 차이를 비교하였다. 측정오차를 줄이기 위해 0.002 mm 이내의 오차 값으로 3회 측정해

Table 3. Comparison of prestressing force loss with time

		Initial prestressing force [kN]	Strain decrease [$\times 10^{-6}$]	Prestressing force loss [kN]	Force loss/Initial force [%]
2F-N-2 12.7 mm	Curing	109.74	88	1.70	1.55
	Long term		246	4.75	4.33
5F-N-2 15.2 mm	Curing	167.68	112	3.10	1.85
	Long term		279	7.74	4.61

서 평균값을 사용하였다. 전달길이의 도출은 95% AMS(테이터 로저) 방법을 사용하였다. 데멕 게이지는 사용하는 저항 측정 게이지와는 달리 측정자의 수작업에 의해 데멕 포인트 사이의 값을 측정하기 때문에 측정값이 부정확할 수 있는 소지가 있다. 또한, 콘크리트 표면의 거칠기나 데멕 포인트가 콘크리트에 부착되는 정도에 따라 측정값에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 평탄한 구간을 확보하기 위하여 완화 기법(Smoothing technique)을 사용하였다(Russell and Burns, 1996). 또한, 이전의 완화 기법보다 더 정확한 전달길이를 도출하기 위하여 이동최소제곱근사법을 적용한 완화 기법을 사용하였다(Zi 등, 2007). 전달길이를 비교해 보면 절단단부에서 직경 12.7 mm의 전달길이는 916 mm이었으나 직경 15.2 mm의 전달길이는 1013 mm로 97 mm 가량 더 길게 나타났다. 반면, 고정단부의 경우 12.7 mm의 전달길이가 779 mm인 것에 비하여 15.2 mm의 전달길이는 659 mm에 불과하여 120 mm 가량 더 작게 나타났다. 프리텐션 부재의 긴장재에서 전달길이 이내의 동일한 지점에서는 전달 길이가 길수록 긴장력의 크기는 작다. 도출된 전달길이를 긴장력 측정 결과와 비교하면, 절단단부에서는 유사한 경향을 보이지만 고정단부에서는 반대 양상을 보인다. 한편, 완화 기법을 사용했음에도 불구하고 평탄한 구간에서 변형을 변화가 크기 때문에 정확한 전달길이를 도출하는 것이 어렵다.

따라서 전달길이를 이용하는 것보다 프리텐션 부재 내부의 긴장력을 측정하는 것이 더 유리한 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출한 전달길이의 타당성을 확인하기 위하여 ACI 318-08에 규정된 전달길이 공식과 선행 연구에 의한 제안식을 사용하여 전달길이를 계산하고 비교하였다. ACI Code에서는 유효 프리스트레스 응력(f_{se})과 강선의 직경(d_b)만을 고려하여 전달길이를 나타내고 있다. 하지만 전달길이는 다양한 인자의 영향을 받기 때문에 두 개의 인자만을 고려하여 나타내는 것에는 한계가 있다. 이에 선행 연구에서는 다양한 인자를 고려하여 전달길이 식을 제안하였다. Zia and Mostafa(1977)는 강선의 직경과 초기 프리스트레스 응력(f_{pi}), 전달 시의 콘크리트 강도(f'_{ci})를 고려하여 순간 전달과 지연 전달에 따라 다른 전달길이 식을 제안하였다. Cousins 등(1990)은 부착응력(U_t)과 부착계수(B)를 고려하여 유효 프리스트레스 응력과 강선의 직경 및 단면적(A_{ps})에 관한 함수로 전달길이 식을 나타냈으며, Mitchell 등(1993)은 유효 프리스트레스 응력을 대신하여 초기 프리스트레스 응력을 고려하고 전달 시 콘크리트 강도의 제곱근에 비례하는 전달길이 식을 제안하였다. Russell and Burns(1997)는 보수적인 ACI Code의 전달길이 식을 보완하기 위하여 계수를 3/2만큼 크게 적용한 안전 측의 전달길이 식을 제안하였고, 오병환 등(2004)은 유효 프리스트레스 응력, 강선의 직경 외에

Table 4. Various proposed equations for transfer length

Source		Estimate formula	12.7mm		15.2mm	
			Transfer length [mm]	Prediction data/ Experimental data	Transfer [mm]	Prediction data/ Experimental data
Experimental data	Cut-end	-	916	1	1013	1
	Dead-end	-	779	0.85	659	0.65
ACI Code		$l_t = 0.048f_{se}d_b$	685	0.75	819	0.81
Zia and Mostafa (1977)	Sudden release (Cut-end)	$l_t = 1.5 \frac{f_{pi}}{f_{ci}} d_b - 4.6$	529	0.58	644	0.64
	Gradual release (Dead-end)	$l_t = 1.3 \frac{f_{pi}}{f_{ci}} d_b - 2.3$	460	0.59	560	0.85
Cousins et al. (1990)		$l_t = 0.5 \left(\frac{U_t}{B} + \frac{f_{se} A_{ps}}{\pi d_b U_t} \right)$	790	0.86	941	0.93
Mitchell et al. (1993)		$l_t = 0.048 f_{pi} d_b \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{f_{ci}}}$	493	0.54	599	0.59
Russell and Burns(1997)		$l_t = 0.0725 f_{se} d_b$	1035	1.13	1236	1.22
오병환 등(2004)		$l_t = 7.95 \sqrt{f_{se}} \left(\frac{1}{f_c} \right)^{1/3} d_b^{1.3} \left(\frac{1}{C-19.69} + 0.25 \right)$	551	0.60	697	0.69

- l_t = transfer length
- f_{ci} = specified compressive strength of concrete at time of initial prestress (41.6 MPa)
- f_c = specified compressive strength of concrete (45 MPa)
- U_t = plastic transfer bond stress ($0.55 \sqrt{f_{ci}}$ MPa)
- B = bond modulus (81.5×10^{-3} MPa/mm)
- d_b = nominal strand diameter (12.7 mm, 15.2 mm)
- A_{ps} = area of prestressing strand (98.71 mm², 138.7 mm²)
- f_{pi} = initial stress in prestressing strand just after release (1166 MPa, 1183 MPa)
- f_{se} = effective stress in strand after losses (1124 MPa, 1122 MPa)
- C = concrete cover (68.65 mm, 67.4 mm)

콘크리트 압축 강도(f_{ci}) 및 피복 두께(C)까지 고려한 전달길이 식을 제안하였다.

절단단부에서의 전달길이 측정값을 기준으로 각 예측식으로부터 계산된 전달길이 예측값을 비교한 결과(Table 4), Russell and Burns의 제안식에 의한 예측값을 제외한 대부분의 예측값은 측정값보다 작은 결과가 나타남으로써 과대평가된다는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 예측식은 절단단부에서의 전달길이보다 고정단부에서의 전달길이와 더 유사하다는 것을 확인할 수 있고, 따라서 순간 전달 방식보다 지연 전달 방식에서의 전달길이를 예측하기에 더 유리한 것으로 판단된다. 한편, Russell and Burns의 제안식에 의한 예측값은 측정값보다 크게 계산되었으며, 간단하면서 보수적인 전달길이를 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 본 실험에서 도출한 전달길이와 가장 유사한 전달길이 제안식은 Cousins 등이 제안한 전달길이 식인 것으로 확인되었으며, 본 실험의 전달길이 예측은 부착에 의한 영향이 크게 작용하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 프리텐션 콘크리트 부재에 긴장력을 도입할 때 프리텐션 부재가 받는 동적인 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 프리텐션 부재의 긴장재에 직접 부착한 전기 저항식 변형률 게이지를 통하여 긴장력의 크기를 산정하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 외부 노출된 긴장재의 탄성 변형률 복원 개념에 의해 프리텐션 콘크리트 부재에 작용한 긴장력의 크기를 효율적으로 산정하였으며(ESR), 이 방법을 활용하여 부재 내부의 동적 거동을 확인하였다.
2. 용접 절단에 의해 긴장재를 절단하여 프리텐션 부재에 긴장력을 도입할 때, 긴장재의 각 강선의 절단 순서에 따른 차이로 인해 각 긴장재 별로 시간에 따른 변형률 변화에는 차이가 있었으나 최종적인 변형률 변화량은 거의 유사했다. 또한, 절단 시의 충격으로 인해 절단단부에서 큰 동적 효과가 발생하는 것을 확인하였으나 이로 인한 콘크리트 표면의 균열은 발생하지 않았다.
3. 다양한 인자가 부재에 미치는 영향을 고찰하기 위해 긴장재의 직경, 콘크리트의 피복 두께, 구속 철근과 비부착 구간의 유무, 긴장력 도입 방법을 변수로 하여 실험을 수행하였다. 각 부재의 절단단부와 중앙부, 고정단부에서 긴장재의 변형률 손실량을 측정하여 ESR에 의해 잔류 긴장력을 비교하였다. 모든 부재의 중앙부 잔류 긴장력은 95% 이상으로 실험체 간 큰 차이가 없이 안정된 결과를 나타낸 반면, 양 단부의 긴장력은 변수에 따라 큰 차이를 나타냈다. 긴장재의 직경이 큰 경우 긴장재의 단면적/둘레길이 비율의 상대적 차이로 인해 절단단부의 잔류 긴장력이 작은 것으로 나타났다. 콘크리트 피복 두께의 증가에도 불구하고, 잔류 긴장력은 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 75 mm의 콘크리트 피복 두께만으로도 충분한 구속 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다. 구속철근을 배치하는 경우 횡구속으로 긴장력의 증가를 기대하였으나 콘크리트 내부에서 균열이 발생하지 않아 구속응력이 발현

되지 않았으며, 실험 결과 오히려 잔류 긴장력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실험체의 제작 시 구속 철근의 배근으로 인한 다짐 불량이 원인으로 판단된다. 또한, 비부착 구간을 적용하는 경우 잔류 긴장력이 향상되고, 긴장력 도입 방법 중에서 지연 전달은 순간 전달에 비하여 절단단부에서의 잔류 긴장력이 약 30% 정도 향상하는 것을 확인하였다.

4. 장기 거동 계측으로 긴장력의 변화를 검토하였으며 이를 통하여 시간 의존 효과의 영향을 확인하였다. 장기 계측 결과 긴장재의 변형률이 250~280 $\mu\epsilon$ 정도 변화되는 것을 확인하였으며, 이는 크리프와 건조 수축에 기인하는 것으로 판단할 수 있다.
5. 실험체 표면에 부착된 데멕(Demec)게이지를 통해 전달길이를 분석하였으며, 절단단부에서의 전달길이 직경 12.7 mm의 긴장재의 경우 916 mm, 직경 15.2 mm의 긴장재의 경우 1013 mm인 것으로 나타났으며, 고정단부에서는 779 mm, 659 mm로 나타났다. 절단단부의 전달길이 매우 큰 것은 용접 절단에 의한 동적 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단에서 위탁 수행한 ‘프리텐션 구조물의 Detensioning에 따른 단부거동평가’ 용역 및 05첨단융합 B01의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 오병환, 김의성(2000) 프리텐션 프리스트레스드 콘크리트 부재의 전달길이 평가 및 영향 인자 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제20권, 제6-A호, pp. 945-956.
- 오병환, 임시내, 최영철(2004) 프리텐션 PSC부재의 전달길이 해석 및 예측에 관한 연구. **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제16권, 제3호, pp. 293-302.
- 한국표준협회(2002) PC 강선 및 PC 강연선(KS D 7002 : 2002). 한국표준협회.
- ACI Committee 318. (2008) *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Barnes, R.W., Grove, J.W., and Burns, N.H. (2003) Experimental assessment of factors affecting transfer length. *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol. 100, No. 6, pp. 740-748.
- Belhadj, A. and Bahai, H. (2001) Friction-slip: an efficient energy dissipating mechanism for suddenly released prestressing bars. *Engineering Structures*, Elsevier Science Ltd, Vol. 23, pp. 934-944.
- Chen, H.L. and Wissawapaisal, K. (2001) Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strand using stress waves. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, No. 6, pp. 599-606.
- Cousins, T.E., Johnston, D.W., and Zia, P. (1990) Transfer and development length of epoxy coated and uncoated prestressing Strand. *PCI Journal*, The Institute, Vol. 35, No. 4, pp. 92-103.
- Machida, S. and Durelli, A.J. (1973) Response of a strand to axial and torsional displacements. *Journal Mechanical Engineering Science*, Institution of Mechanical Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 241-251.

- Mitchell, D., Cook, W.D., Khan, A.A., and Tham, T. (1993) Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioning strand. *PCI Journal*, The Institute, Vol. 38, No. 3, pp. 52-66.
- Nanni, A., Tanigaki, M., and Hasuo, K. (1992) Bond anchorage of pretensioned FRP tendon at force release. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 118, No. 10, pp. 2837-2854.
- Oh, B.H. and Kim, E.S. (2000) Realistic evaluation of transfer lengths in pretensioned, prestressed concrete members. *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol. 97, No. 6, pp. 821-830.
- Russell, B.W. and Burns, N.H. (1996) Measurement transfer lengths of 0.5 and 0.6 in. strands in pretensioned concrete. *PCI Journal*, The Institute, Vol. 41, No. 5, pp. 44-65.
- Russell, B.W. and Burns, N.H. (1997) Measurement of transfer lengths on pretensioned concrete elements. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, No. 5, pp. 541-549.
- Steinberg, E., Beier, J.T., and Sargand, S. (2001) Effects of sudden prestress force transfer in pretensioned concrete beams. *PCI journal*, The Institute, Vol. 46, No. 1, pp. 64-75.
- Zi, G., Rabczuk, T., and Wall, W. (2007) Extended meshfree methods without branch enrichment for cohesive cracks. *Computational Mechanics*, Springer, Vol. 40, No. 2, pp. 367-382.
- Zia, P. and Mostafa, T. (1977) Development length of prestressing strands. *PCI Journal*, The Institute, Vol. 22, No. 5, pp. 54-65.

(접수일: 2008.6.2/심사일: 2008.6.30/심사완료일: 2008.6.30)