



프리텐션 슬래브 구조에서 긴장강선 용접절단순서에 따른 긴장재 및 콘크리트의 응력변화 고찰

문도영¹⁾ · 지광습^{1)*} · 김장호¹⁾ · 김규선²⁾ · 윤만근³⁾

¹⁾고려대학교 건축 · 사회환경공학과 ²⁾한국시설안전공단 ³⁾삼성물산(주) 건설부문

Investigation of Stress Changes in Concrete and Strands according to Cutting Order of the Strands in Pre-tensioned Concrete Slab

Do-Young Moon,¹⁾ Goangseup Zi,^{1)*} Jang-Ho Kim,¹⁾ Gyuseon Kim,²⁾ and Man-Geun Yun³⁾

¹⁾Dept. of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Goyang 411-758, Korea

³⁾Samsung C&T Corporation, Seoul 137-956, Korea

ABSTRACT This study focuses on the effect of the cutting order of prestressing strands on the strain change in the strands and on the state of stress of concrete, experimentally and numerically. In the experiment, strain of strands and of transversal reinforcement were measured for three different cutting orders during detensioning process by using flame-cutting procedure. The experimental results were compared with those obtained from the FE analysis. As a results of the experiment, it is conformed that the cutting order of prestressing strands affected on the strain of strands as well as of transversal reinforcement. The FE analysis gave similar results to those obtained from the experiment. Therefore, the cutting order should be chosen appropriately to when the strands get detensioned.

Keywords : pretension, flame cut, the order of cutting, prestressing strand, detensioning

서 론

지난 동안 국내에서 시공되는 프리텐션부재는 벽체, 바닥판 등 2차 구조부재로써, 상대적으로 그 구조적 중요도가 크지 않았다. 그러나 최근 국내에서는 급속시공과 품질관리의 이점을 최대한 활용하기 위하여 프리텐션 프리캐스트 부재의 활용에 대한 수요가 커지고 있을 뿐 아니라 대형화 되고 있는 현실이다. 예로써, 인천대교의 고가교 구간은 full span launching method (FSLM)에 의하여 가설된다. 이 공법은 50 m의 상부구조가 공장에서 프리텐션 프리캐스트 부재로써 일괄 제작된 후 특수장비(trolley)를 이용하여 이동되고, 현장에 직접 가설된다.¹⁾ 따라서 점점 그 중요도가 증가되는 프리텐션 부재의 제작과 품질관리 등에 대한 보다 근본적인 연구가 필요한 실정이다.

프리텐션 구조 부재 (pretension structural member)에 긴장력을 도입하는 방법은 지연전달방식과 용접절단에 의한 방법이 있다. 지연전달방식은 유압잭을 이용하여 긴장력을 도입하는 방법으로, 긴장재의 배치상황이 유압잭

등의 긴장에 필요한 장비의 도입이 용이한 경우 주로 사용된다. 한편, 용접절단은 산소 용접기를 이용하여 다연선의 긴장재를 절단함으로써 긴장력을 도입하는 방법으로 절단속련도에 의하여 절단시간은 크게 달라질 수 있으나, 숙련공의 경우 긴장재 당 3초 이하의 매우 짧은 시간 안에 긴장재의 절단이 가능하다. 이와 같은 용접절단에 의한 긴장력 도입방식은 긴장재의 배치가 넓게 분포되어 있어 기계의 이용이 불가능하거나 경제성이 현저히 떨어질 때 사용한다.

포스트텐션 구조에서는 긴장력의 도입이 단부에 지압판과 특수한 췌기 등의 정착장치에 의하여 전달됨으로써, 파열력 (bursting force)과 단부의 박리 (spalling)에 의한 콘크리트의 손상이 문제가 된다.²⁾ 그러나 프리텐션 부재에서는 단부의 박리 손상은 무시할 수 있고, 파열력에 의한 손상이 문제가 될 수 있다.³⁾ 또한, 실험 및 해석적 연구를 통해 용접절단 등과 같이 매우 급작스러운 긴장력 도입은 동적충격에 의하여 단부에서 발생하는 수직균열의 원인이 될 수 있음이 제시되었고,^{4,7)} 이와 같은 프리텐션 부재의 긴장력 도입 (detensioning)시 단부 손상의 영향 인자는 긴장재의 반력 프레임부터 부재단부까지의 자유길이, 긴장재의 절단순서, 긴장재 간의 순간격, 직경과 콘크리트의 강도 등인 것으로 보고되고 있다.^{4,14)} 특히, Kannel 등⁷⁾은 I형 보의 실험과 해석적 연구를 통해

*Corresponding author E-mail : g-zi@korea.ac.kr

Received December 30, 2008, Revised May 6, 2009,

Accepted May 19, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

산소 용접기에 의한 급작스런 긴장력 도입에 의하여 I형 보의 단부에 발생할 수 있는 다양한 형태의 균열을 감소시키기 위한 방안을 제시한 바 있다. 또한, 긴장력 도입 중 I형 보의 단부에 발생된 균열은 긴장재가 절단되어 수축변형이 발생하는 부위의 변위를 긴장재가 미절단된 부위가 구속함으로써 발생하는 전단력과 상호작용에 기인한다고 주장하였다. 한편, 긴장재 절단 과정 중에 급작스런 힘의 도입에 의한 직사각형 보의 종방향 균열 발생에 관한 보고가 있으며, 이와 같은 균열은 긴장재의 절단이 완료된 후에는 보이지 않는다고 발표되었다.⁶⁾ 즉, 절단 중 면밀한 관찰이 없이는 균열의 발생을 관측하기 어려우며, 모든 긴장재의 절단 후에는 균열이 단혀 보이지 않지만, 순간적으로 발생하는 변형률은 균열을 발생 시키기에 충분한 것으로 보고하였다.⁶⁾ 그러나 그간의 연구는 전형적인 프리캐스트 제품의 형태, 즉 I형 거더 및 사각형 단면의 프리캐스트 구조부재에 국한되어 있다.

최근 건설되는 PSC 박스 거더형 교량의 경우 다축긴장이 주로 사용된다.¹⁾ 하부슬래브와 웹의 종방향(교축방향) 긴장과 더불어 상부슬래브에는 교축직각방향의 긴장력 도입을 통해 다축의 긴장력이 도입된다. 횡방향의 긴장력은 상부슬래브의 강성 증진과 균열 제어가 가능토록 함으로써, 바닥판의 내구성능을 증진시키고, 쉼틸레버부의 길이를 증가시키는 등 다양한 효과가 입증되고 있다.¹⁵⁾ 이때, 횡방향 긴장재는 교축직각 방향에 대하여 배치되며, 전 경간에 걸쳐 일정한 간격을 갖으며, 1열로 배치된다. 따라서 긴장력의 도입 순서에 따라 국부적인 불균형 모멘트가 발생할 수 있으며, 긴장재 상호 간 변위 구속으로 상기한 바와 같은 긴장력 도입 중 손상 발생 가능성이 존재한다.

본 논문에서는 다수의 긴장재가 배치된 슬래브 형태의 실험체를 다수 제작한 후^{16,17)} 현장에서 실행 가능한 긴장재의 용접절단순서에 따른 긴장재와 횡방향 보강근의 변형률을 계측하였다. 또한, 실험조건에 부합되는 3차원 유한요소해석모델을 구축하고, 긴장재의 용접절단에 의한 순간적인 동적효과를 모델링하여¹¹⁾ 절단순서에 따른 콘크리트의 응력을 고찰하였다. 실험적, 해석적 연구결과는 순간적인 긴장력 도입에 따른 콘크리트의 응력을 예측하고, 특히 긴장순서에 따른 영향분석을 통해 발생 가능한 손상을 미연에 방지할 수 있는 긴장력 도입순서를 결정하는데 기본적인 자료를 제시할 수 있다는 점에서 그 의미가 있다. 논문의 구성은 2장에서 실험의 개요에 대하여 기술하였으며, 3장에서 실험 결과를 요약하였다. 4장에서 유한요소해석과 결과를 제시하였으며, 5장에 결론을 도출하였다.

2. 실험 개요

2.1 상부슬래브 모형 실험체

실험체는 Fig. 1과 같이 $2.2 \times 0.25 \times 4$ (m) 크기로 직경

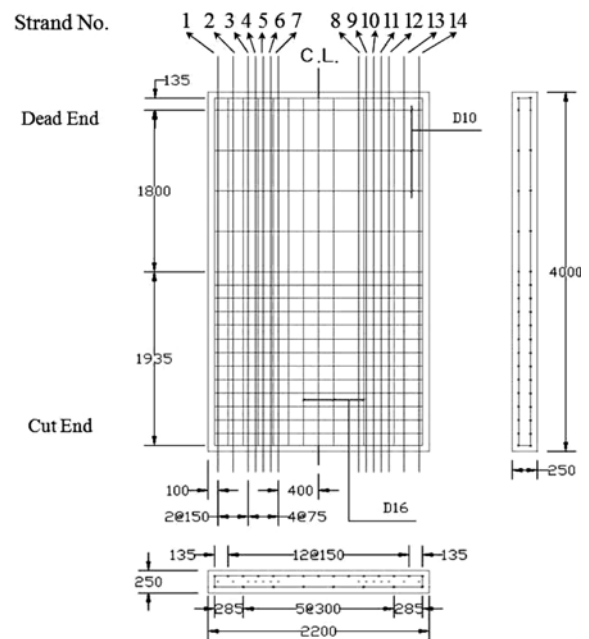


Fig. 1 The lay-out of the test specimen

12.7 mm의 7연선강선 (SWPC 7B) 14개가 75 mm와 150 mm의 간격으로 1열 배치된 슬래브로 하였다. 긴장재는 슬래브의 중앙을 기준으로 대칭으로 배치되었으며, 보강을 위하여 철근이 배근되었다. 특히, 실험체의 중앙부에는 긴장재 간격을 800 mm로 매우 크게 하였다. 실제 PSC 박스 구조물의 설계와 시공 시, 공사 중 임시 출입구와 배수구 등 각종 지장물의 설치로 인하여 균등한 긴장재의 배치가 불가능한 경우에 이와 같이 긴장재 간의 간격이 크게 이격될 수 있다. 그러나 이와 같은 큰 긴장재 간 이격은 긴장재 도입 시 불리하게 작용할 수 있으므로 그 영향을 고찰하기 위하여 800 mm의 간격을 포함하여 실험체를 제작하였다. 긴장력의 도입 방법은 용접절단 방식을 사용하였다. 사용된 콘크리트는 설계강도 45 MPa인 레미콘을 사용하였으며, 긴장력 도입 시 소요강도는 37.5 MPa이다. 양생은 타설 후 초기 17시간동안 약 60도의 온도에서 고온증기양생을 실시하였으며, 이후에는 소용강도에 도달할때까지 습윤양생을 실시하였다. 소요강도 확인을 위해 시험체 타설 후 공시체를 이용한 압축강도 시험을 시행하였으며, 소요강도에 도달한 것으로 확인된 재령 6일에 실험을 수행하였다.

2.2 실험 변수

이 실험에서는 긴장재의 절단순서를 변수로 하였다. 즉, 긴장재를 절단하여 부재에 압축력을 가할 때, 긴장재의 절단순서가 실험체에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 절단순서를 3가지로 다르게 하여 실험을 하였다. 긴장재를 실험체의 중앙에서 외측으로 순차적으로 절단하는 방식을 “A 타입” 절단순서로 명명하였다. 또한, “B 타입”의 절단순서는 외측에서 중앙으로 순차적인 절단을 의미하

며, “C 타입”은 실험체의 중앙에서 외측으로 절단 후 다시 외측에서 중앙 부분으로 절단 하였다 (Fig. 2 참조). 긴장재 번호와 절단순서를 구분하기 위하여 Fig. 2에 표시된 것과 같이 절단순서에는 영문자 C를 붙여 사용하였다.

2.3 실험 방법

Fig. 3은 실험체에 부착된 게이지의 위치를 나타내고 있다. 사용된 게이지는 길이 6 mm의 철근게이지로 3가지 목적을 위하여 사용되었다.

첫 번째는 긴장재에 도입되는 긴장력을 측정하기 위하여 사용된 게이지로 긴장재에서 콘크리트에 매설되지 않고 외부에 노출된 부분에 부착되었다. 긴장력의 측정은 로드셀을 이용한 방법이 일반적이지만, 본 실험에서는 긴장재의 절단이 이루어지는 반대편 고정단부 (dead end)

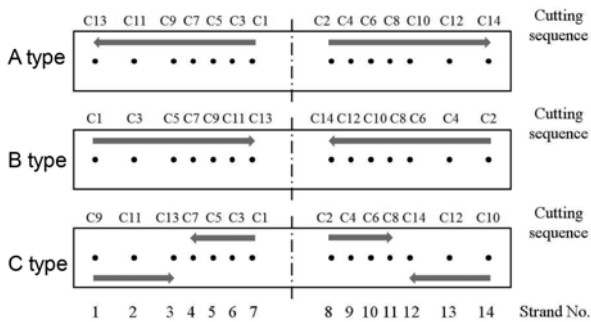


Fig. 2 The three different cutting orders of strands

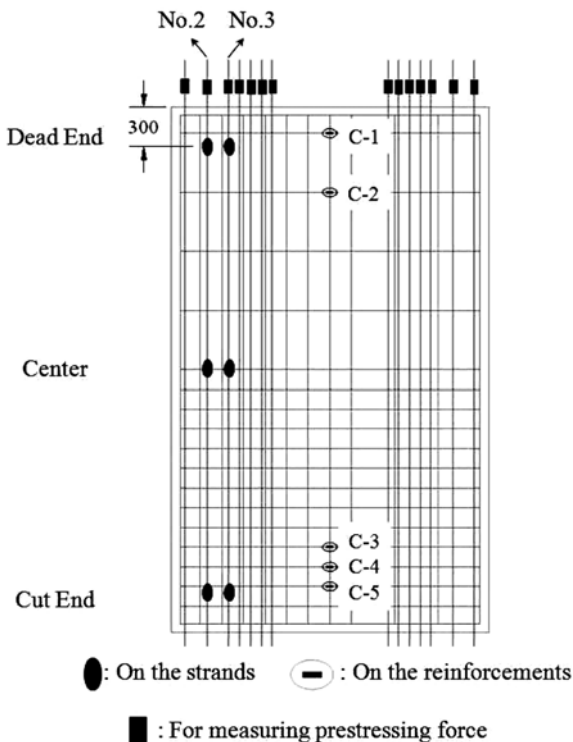


Fig. 3 Measurement location

외측에 노출된 긴장재에 변형률게이지를 두 개 이상 다수 부착해서 긴장-절단의 전 하중 이력 동안 강선의 변형률을 측정함으로써 긴장재에 도입된 긴장력을 추정하였다.^{10,16)} 이는 긴장재의 탄성복원 개념을 이용한 것으로서, 기존의 방법인 로드셀을 이용한 방법을 병용하고, 그 결과를 서로 비교함으로써, 그 신뢰도를 확보하였다. 긴장력은 다음의 식 (1)을 사용하여 평균 변형률의 변화량으로부터 얻어질 수 있다.¹⁰⁾ 또한 식에 사용된 변수들의 설명은 Fig. 4에 나타내었다.

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_h} = \frac{\sigma_c}{\sigma_h} = \frac{N_c/A_c}{N_h/A_h} = \frac{A_c N/A_c}{A_h \cos^2(\beta) N/A_h} = \frac{1}{\cos^2(\beta)} \quad (1)$$

두 번째는 긴장력의 도입 중 긴장력의 변화를 계측하기 위한 것으로서, Fig. 3과 같이 2번과 3번 긴장재의 절단단부 (cut end)와 반대편의 고정단부 (dead end), 실험체의 중앙부 (center)에 총 6개의 게이지가 부착되었다. 게이지는 각각의 단부로부터 300 mm 이격된 위치에 부착되었으며, 7연선 중 표면 3개의 연선에 세밀한 작업을 통해 부착되었다.¹⁰⁾ 세 번째는 긴장력 도입으로 인한 구조체의 횡방향 거동을 고찰하기 위하여 실험체에 횡방향으로 배근된 철근의 표면에 부착된 게이지로 실험체 중앙부의 5개 부분에 부착하였다.¹⁷⁾

Fig. 5는 긴장재 절단 후 전경이다. 도시된 철제 반력 프레임은 선형구조해석을 통해 검증 후 제작하였으며, 긴장재의 절단은 숙련공이 Fig. 2의 절단순서에 따라 산소 용접기를 이용하여 절단하였다. 긴장재 절단에 소요된 시간은 상황에 따라 다르지만, 하나의 긴장재 당 약 4초 정도 소요되었다.

데이터의 수집을 위해 사용된 장비는 동적 데이터 수집장비인 DRA-101C, DRA-107A (Tokyo Sokki)와 정적

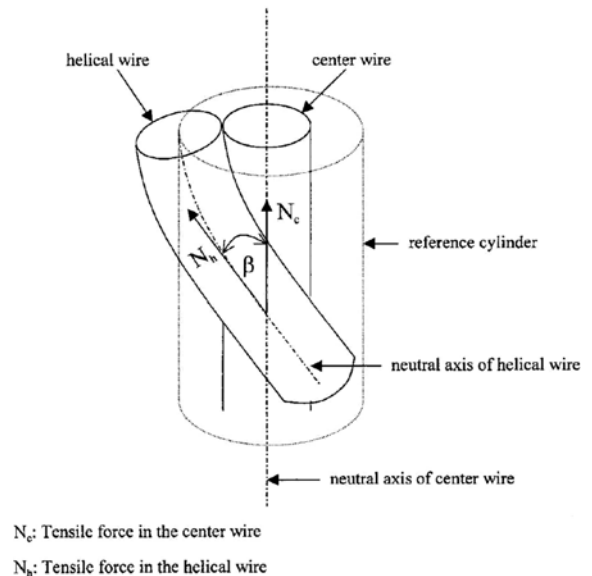


Fig. 4 The geometry of a seven-wire strand¹⁸⁾



Fig. 5 Test scene for the B type specimen

데이터 수집 장비인 UCAM-20PC (Kyowa)가 사용되었다.

3. 실험 결과

3.1 긴장력

Table 1은 긴장재의 긴장력 측정을 위해 강재에 설치된 게이지로부터 획득한 긴장력을 나타내고 있다. 즉, 콘크리트 단부의 외부에 노출된 긴장재에서 측정된 변형률 변화량으로부터 긴장력을 측정하였으며, 총 14개의 긴장재를 절단하는 동안 모든 긴장재의 변형률이 점진적으로 증가함을 확인하였다. 이를 통해 계산한 긴장력은 A 타입 절단순서의 경우 98~113 kN, B 타입의 경우 85~110 kN, C 타입의 경우 95~110 kN으로 나타났다. SWPC 7B의 인장강도가 159 kN/mm을 감안할 때, 도입된 긴장력은 인장강도의 84%에서 90%에 해당된다. 따라서, 실험체당 14

개의 PS 강선에 도입된 긴장력의 평균은 A 타입 슬래브가 가장 큰 것으로 나타났으며, B 타입의 슬래브가 가장 작은 것으로 나타났다.

3.2 절단순서에 따른 지점별 강선 변형률 변화

Figs. 6~9는 A, B, C의 세 가지 절단순서에 대하여 3번 강선에 부착된 게이지로부터 획득된 결과이며, 절단단부 (cut end), 중앙부 (center) 및 고정단부 (dead end)의 결과를 각각 나타내고 있다. 그래프의 종축은 강선 변형률의 손실률 (%)로써, 0~100%는 긴장재를 절단하기 전 긴장된 상태에서의 상태와 긴장상태에서의 긴장재의 변형률이 완전히 회복되어 “0”의 도달하는 것을 각각 의미한다. 또한 횡축은 계측 시간으로 절단순서가 명기되어 있다.

절단단부의 변형률 변화를 살펴보면, A와 C 타입의 경우에는 주변 강선의 절단에 따라 추가적인 인장 변형률

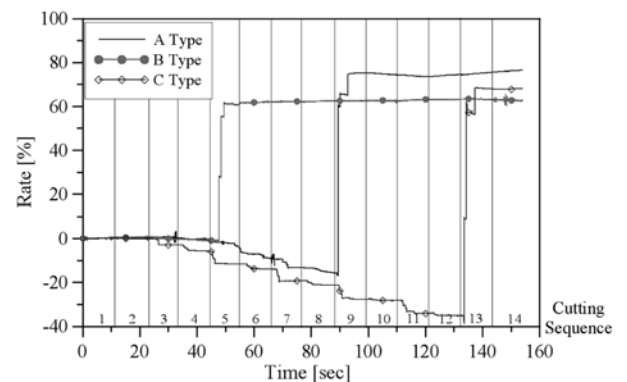


Fig. 6 Strain changes of No.3 strand at the cut-end

Table 1 Measured strain of strands and estimated prestressing force

Strand	A Type		B Type		C Type	
	Strain change ($\times 10^{-6}$)	Prestressing force (kN)	Strain change ($\times 10^{-6}$)	Prestressing force (kN)	Strain change ($\times 10^{-6}$)	Prestressing force (kN)
01	5827	112.44	5416	104.52	5519	106.50
02	5853	112.95	4982	96.14	5569	107.47
03	5549	107.09	5035	97.17	5368	103.59
04	5738	110.72	5278	101.85	5636	108.76
05	5727	110.53	5269	101.68	5299	102.25
06	5506	106.25	5318	102.63	5440	104.98
07	5735	110.68	4410	85.11	5412	104.43
08	5635	108.74	4789	92.42	5383	103.88
09	5467	105.50	4712	90.92	4984	96.18
10	5386	103.93	5508	106.30	4898	94.52
11	5810	112.12	5071	97.87	5000	96.49
12	5556	107.22	5690	109.80	5533	106.76
13	5076	97.96	5313	102.53	5384	103.90
14	5135	99.10	5554	107.18	5682	109.64
Average	5571	108	5168	100	5365	104
Standard deviation	235	47	344	69	236	47

이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면, B 타입의 경우에는 3번 강선의 절단순서가 우선하기 때문에 A와 C 같은 주변 강선의 절단에 의한 추가적인 인장 변형률 발생은 거의 볼 수 없다. 이와 같은 변형은 슬래브가 점진적인 긴장력 도입으로 탄성 수축하고 있음을 감안한다면, 서로 방향이 반대인 변형으로 콘크리트와 긴장재 간의 부착에 큰 영향을 줄 수 있다. 예측 가능한 인장 변형률의 발생 원인은 반력 프레임의 탄성 변형으로 분석됐다. 즉, 콘크리트 타설 전, 긴장재 긴장 시 수반된 반력 프레임의 탄성 변형이 긴장재의 절단이 진행되면서 복원됨으로써, 미절단된 긴장재에 더 큰 긴장력을 가하게 되는 것이 원인으로 판단되며, 그 영향은 절단단부에 집중되는 것으로 확인되었다. 따라서 이 결과를 통해 절단순서에 따른 영향을 직접적으로 평가하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다. 실제 제품의 생산 시 이와 같은 반력 프레임에 의한 강선 간 상호 영향은 상기한 바와 같이 긴장재의 정착 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 주의하여야 한다. 2번 강선에 부착된 게이지에서도 유사한 결과를 얻었다.

한편, 중앙부의 변형률 변화를 살펴보면 (Fig. 7 참고), 긴장력의 손실이 거의 없을 뿐 아니라 긴장재의 절단순서에 따라 무관함을 확인할 수 있다.

또한, 고정단부의 변형률 변화를 살펴보면 (Figs. 8, 9 참고), 6개의 강선 절단 시까지 상대적으로 미소하지만 인장변형률의 증가를 확인할 수 있다. 원인은 절단단부의 인장변형률의 원인과 동일하다고 판단되지만, 영향이 매우 미소하다. 이는 절단단부와 달리 고정단부에서는 반력대의 복원에 의한 영향이 모든 강선으로 분배되기 때문인 것으로 분석할 수 있다. 이후에는 고정단부 2번 강선과 3번 강선 모두 (Figs. 8, 9 참조)에서 6개의 긴장재가 절단된 이후 변형률의 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 절단이 진행됨에 따라 단계적인 변화 양상을 뚜렷하게 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 변화는 점진적인 긴장력 도입으로 인한 전형적인 거동으로 판단할 수 있다. 고정단부의 손실 변형률을 비교할 때, C 타입의 절단순서인 경우 변형률의 손실량이 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

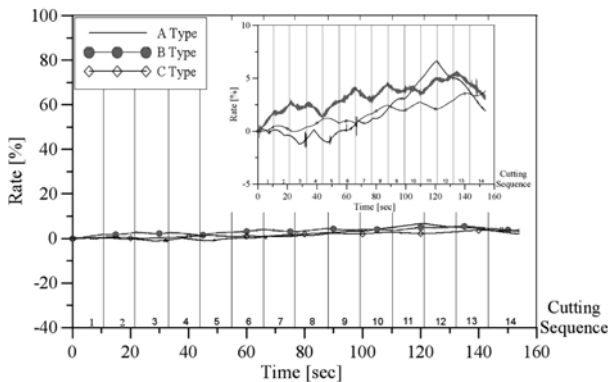


Fig. 7 Strain changes of No.3 strand at center

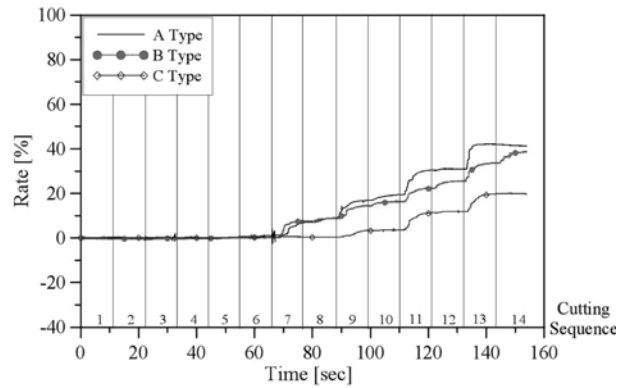


Fig. 8 Strain changes of No. 3 strand at the dead-end

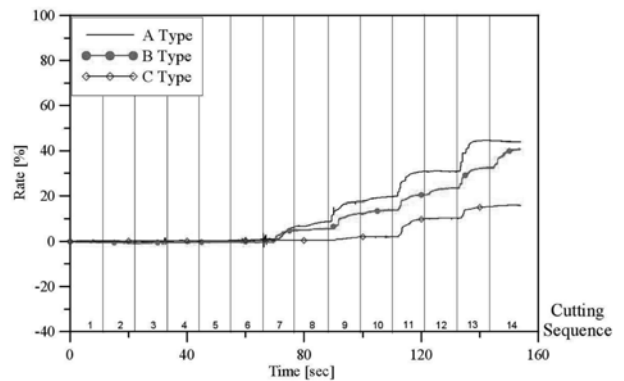


Fig. 9 Strain changes of No. 2 strand at the dead-end

3.3 절단순서에 따른 횡방향 배력철근 변형률 변화

Figs. 10~12는 A, B, C의 세 가지 절단 타입에 대하여 중앙부 횡방향 배력 철근에 부착된 5개의 변형률게이지로부터 획득된 결과를 나타내고 있다. 실험체 게이지명은 중앙부이므로 영문자 “C”와 일련번호로 구분하였다 (Fig. 3참고).

그림을 살펴보면, 강선들의 절단이 진행되면서, 횡방향 배력철근의 변형률이 점차적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. A타입절단의 경우에는 절단이 진행됨에 따라 횡방향철근의 인장변형률이 증가가 상대적으로 급한

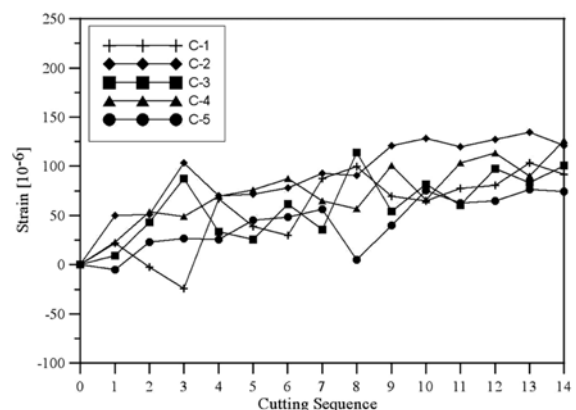


Fig. 10 Strain changes of transversal reinforcement for A type specimen

4. 유한요소해석

4.1 유한요소모델 및 해석변수

상기 실험을 통해 도출된 결과를 확인하고, 긴장재의 절단순서에 따라 콘크리트에 발생하는 응력을 검토하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. ABAQUS Standard Ver. 6.7을 이용하였으며, 시간적분을 위한 Newmark- β 법의 β 와 γ 는 0.25와 0.5를 사용하였다.

해석 모델은 Fig. 13과 같다. 실험체의 강선축방향과 두께방향에 대하여 대칭성을 고려하였으며, 절단단부측의 강성 및 콘크리트의 응력을 고찰하기 위하여 1/8만 모델링 하였다. 따라서 해석모델에는 7개의 긴장재가 배치되었다. 긴장재는 2절점 트러스요소를 사용하였으며, 콘크리트는 8절점 솔리드요소를 사용하여 모델링하였다. 해석의 연속면에 대하여 적절한 대칭 구속조건을 고려하였으며, 강선의 중앙부 끝에서는 종방향 이동을 구속하였다.

4.2 해석 절차 및 방법

긴장력의 도입을 동적으로 모사하기 위해 긴장재에만 온도 변화를 Fig. 14와 같이 도입하였다. 첫 번째 단계에서는 7개의 긴장재에 온도 하중을 이용하여 긴장력을 도입함과 동시에 이에 해당하는 집중 하중을 긴장재의 단

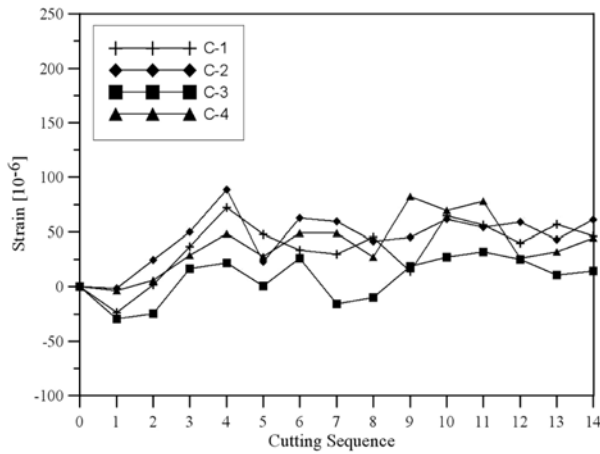


Fig. 11 Strain changes of transversal reinforcement for B type specimen

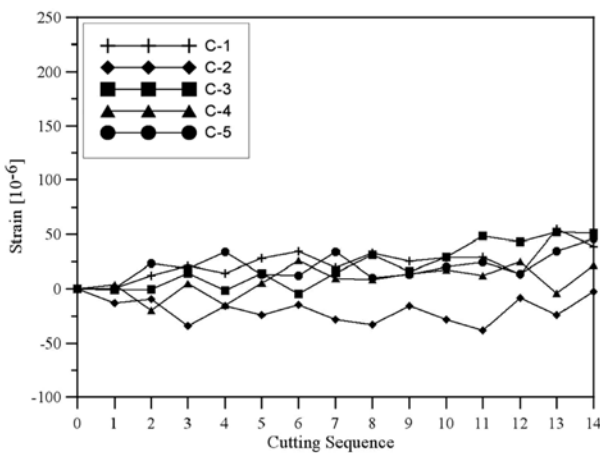


Fig. 12 Strain changes of transversal reinforcement for C type specimen

것을 볼 수 있으며, 최종단계에서 변형률은 약 $75 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ 정도인 것으로 나타났다. 또한 B 및 C 타입 절단의 경우에는 그 증가정도가 상대적으로 완만하며, 최종단계에서의 인장변형률도 $10 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ 으로 크지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 주목할 것은 절단순서에 따라 그 차이가 변화의 경향이 뚜렷한 차이를 나타내지는 않는다는 것이다. 더욱이 절단 과정 중 최종단계의 변형률을 초과하는 등의 현상이 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다. 상기 제시된 배력철근의 변형률의 크기 및 증가양상의 차이는 도입된 긴장력의 차이로 설명될 수 있다. 즉, Table 1에 제시된 바와 같이 도입된 평균 긴장력이 각 절단경우에 대하여 108 kN, 100 kN 및 104 kN으로 약 8% 정도의 차이가 있는 것으로 나타났기 때문이다. 한편, A타입의 경우에 발생한 최대값인 125×10^{-6} 은 콘크리트의 최대 압축 변형률 (0.003)의 4%에 불과하지만 균열 발생이 가능한 직접 인장 변형률 (0.0001)과 휨과괴 강도에 해당하는 변형률 ($0.63 \sqrt{f_{ck}} / E_c \approx 0.00012$) 보다 큰 값이다. 그러나 실험 결과에 의하면 종방향 균열이 발생하지 않았는데, 이것은 실험체에 배근된 다수의 횡방향 철근 등이 균열 폭을 제한하였기 때문인 것으로 판단된다.

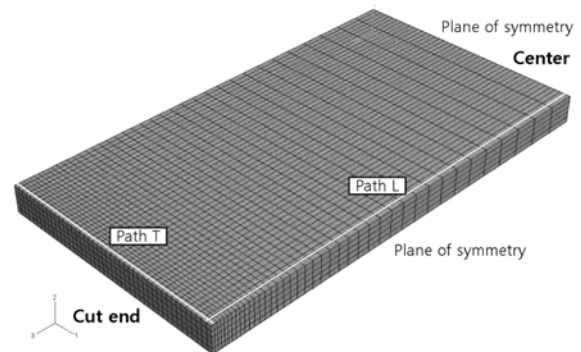


Fig. 13 Mesh for the finite element analysis

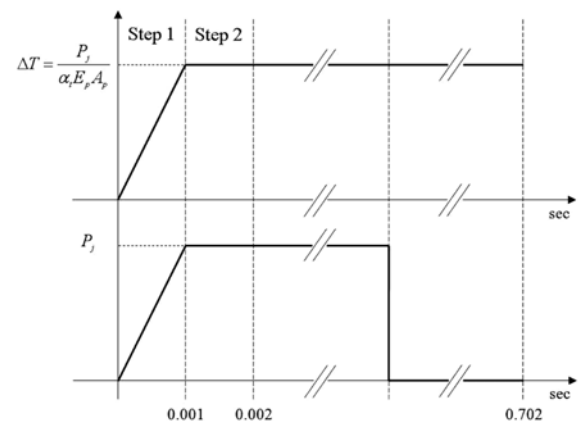


Fig. 14 The loading history for the FEM analysis

부에 적용하여 응력을 상쇄하는 단계로써 0.001초 동안 해석을 수행하였다. 두 번째 단계에서는 하중에 의한 구조물의 응답을 안정화시키기 위하여 첫 번째 단계의 하중을 지속하는 것으로 하여 0.001초 동안 해석을 추가적으로 수행하였다. 이후 세 번째 단계부터는 각 긴장재를 절단순서에 따라 A, B, C로 구분하여 해석을 수행하였다 (Fig. 2 참조). 각 긴장재의 절단을 위한 시간의 간격은 0.1초로 하였다. 각 긴장재의 절단 간격은 해석에 소요되는 시간과 컴퓨터 해석 용량에 크게 영향을 받는다. 따라서 0.1초의 간격은 이 연구에 사용한 컴퓨터의 성능을 고려하여 가능한 최대 시간으로 결정하였다. 따라서 이 해석을 위한 전체 시간은 0.702초로 하였다. 선형 탄성 해석이므로 해석에 고려된 재료의 물성치는 2장에 제시된 것과 같다. 각 강선의 절단에 소요되는 시간은 작업자의 숙련도에 따라 3초에서 8초까지 소요되나, 이 해석에서는 순간적으로 절단이 이루어지는 것으로 가정하고 해석하였다.

4.3 해석 결과

해석 결과는 각 A, B, C의 절단경우에 대하여 Fig. 13에 표시된 “Path T”에 대하여 거리에 따른 콘크리트 표면부의 주인장 응력 (principal stress)을 고찰하였다. 또한, 각 해석 경우에 대하여 긴장재의 배치 방향과 평행한 중방향의 응력 분포를 확인하기 위하여 “path L”의 응력을 고찰하였다 (Fig. 13 참조).

Fig. 15는 모든 해석 경우에 대한 최종 단계 ($T=0.702\text{sec}$) 시점에서, path T의 주응력 결과를 나타내고 있다. 해석 모델에서는 절단순서와 관계없이 최종단계에서의 응력상태는 동일하다. 이는 도입되는 긴장력이 동일하기 때문이다. 그림에 나타난바와 같이, 최종 단계에서의 응력은 2.9 MPa로 중앙부에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4.3.1 A 타입

Fig. 16은 A 타입의 절단순서에 따른 콘크리트 표면 “path T”의 주인장 응력을 나타내고 있다. 그래프의 내부에 표시된 점선은 긴장재의 위치를 표시하며, 상부에

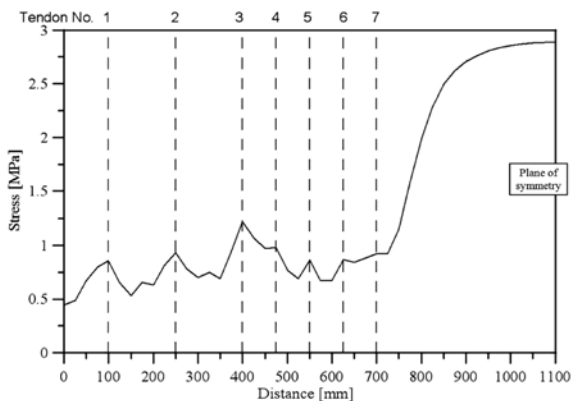


Fig. 15 Principal stress along Path T at the final step

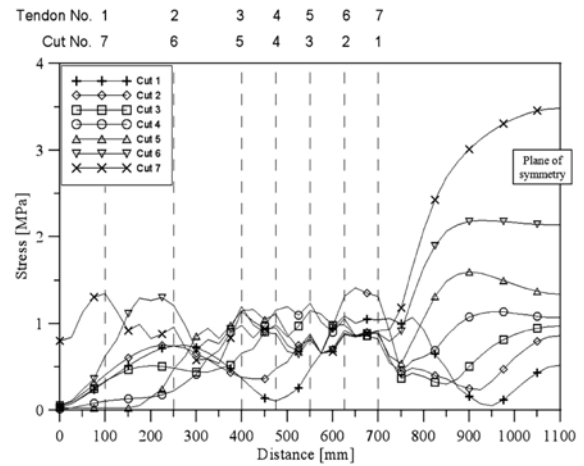


Fig. 16 Principal stress according to cutting order A along Path T

제시된 숫자는 긴장재의 번호와 절단순서를 나타내고 있다. 그림과 같이 각 긴장재 절단 시 해당하는 위치에서의 주인장 응력이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히, Fig. 17의 응력도를 확인해보면, 절단이 진행되면서 긴장재가 배치되지 않은 내부의 주인장 응력이 크게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 긴장재의 절단으로 콘크리트의 외측에 압축력이 순차적으로 도입되면서, 내부는 국부적인 불균형 모멘트에 의하여 인장응력을 받게 되는 것으로 판단된다. 가장 외측에 있는 7번 긴장재 절단 직후 내부의 주인장 응력은 3.49 MPa로 휨파괴 강도 ($=0.63\sqrt{37.5} \approx 3.8 \text{ MPa}$)에 해당하는 값이다. 그러나 이 해석에서 절단 간격이 0.1초, 절단 시간 0초인 점을 감안할 때, 발생하는 응력을 과대평가한 것으로 판단되므로 실제 구조물에서 발생하는 응력은 이보다 작을 것으로 예측된다.

Fig. 18은 긴장재와 평행한 중방향, 즉 “Path L”의 거리에 따른 주인장 응력을 나타내고 있다. 그림과 같이 절단 순서가 진행됨에 따라 인장 응력의 발생 위치가 중앙부로 점차적으로 이동하며, 최종 절단 후에는 단부로부터 400 mm 지점에서 인장응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4.3.2 B 타입

Fig. 19는 B 타입의 절단순서에 따른 콘크리트 표면

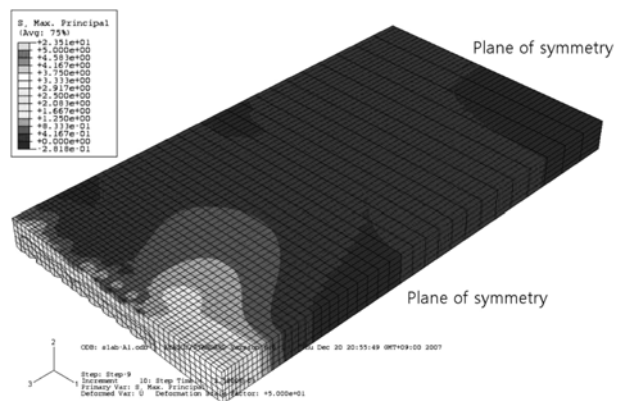


Fig. 17 The contour of the principal stress for type A

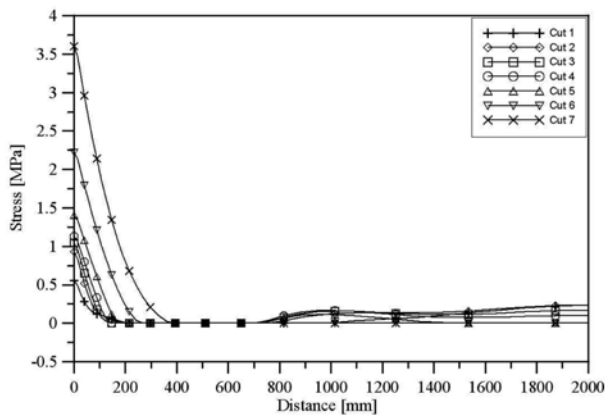


Fig. 18 Principal stress according to cutting order A along Path L

“Path T”의 주인장 응력을 나타내고 있다. 해석 결과는 그림과 같이 슬래브의 외측으로부터 내측으로 전반적으로 주인장 응력이 상승하는 것을 볼 수 있으며, A 타입과 마찬가지로 절단순서 7번의 절단 직후에 내측 중앙부의 주인장 응력이 3.16 MPa로 나타났다. Fig. 20은 최종 긴장재의 절단 직후 콘크리트 표면의 주인장 응력의 분포도를 나타내고 있다. 응력 분포도는 타입 A의 해석

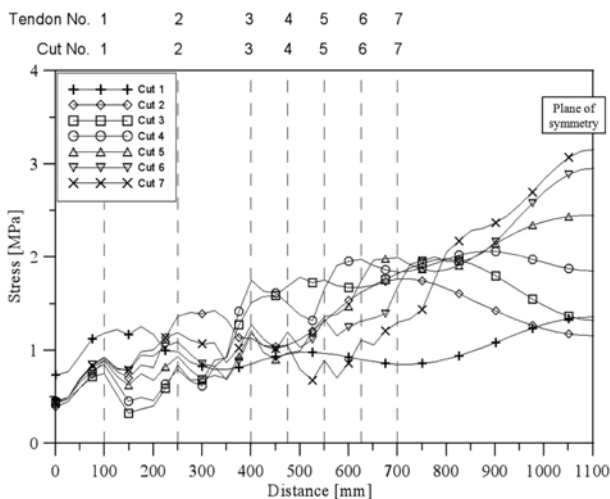


Fig. 19 Principal stress according to cutting order B along Path T

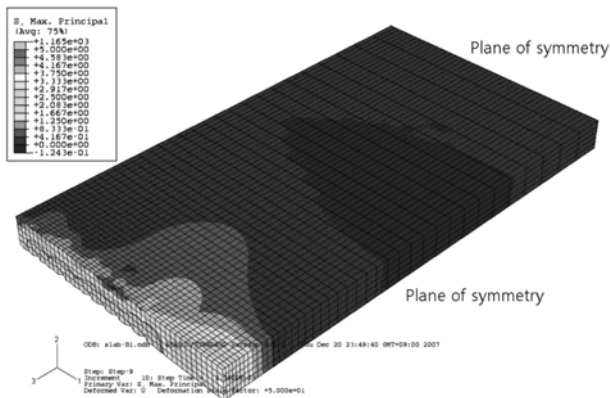


Fig. 20 The contour of the principal stress for type B

결과와 매우 유사하다. 또한, Fig. 21은 긴장재의 절단에 따른 “Path L”의 주인장 응력을 나타내고 있다. A 타입의 절단순서에서는 긴장재의 절단순서에 따라 인장응력의 발생 위치가 늘어나는 양상을 나타냈으나, 본 B 타입의 경우에는 반대로 첫 번째 긴장재의 절단 시 인장응력의 발생 위치가 700 mm로 가장 깊고, 긴장재의 절단순서가 진행됨에 따라 발생 위치가 단부로 진행됨을 알 수 있다. 이는 본 해석 경우의 절단순서가 외측부터 진행됨으로써 콘크리트의 응력이 이를 반영하고 있기 때문이다.

4.3.3 C 타입

Fig. 22는 C 타입의 절단순서에 따른 콘크리트 표면 “Path T”의 주인장 응력을 나타내고 있다. 해석 결과는 상기 A 및 B 타입의 해석 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으나, 주인장 응력의 크기가 크게 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 응력의 발생 위치도 내측 중앙이 아니라 중앙에서부터 200 mm 정도 이격된 위치에서 발생하는 것으로 나타났다. 응력의 크기는 2.82 MPa로 A 타입의 80%에 해당하는 응력만이 발생하

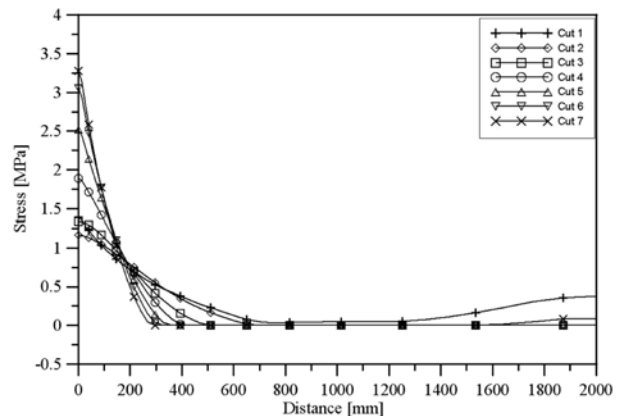


Fig. 21 Principal stress according to cutting order B along Path L

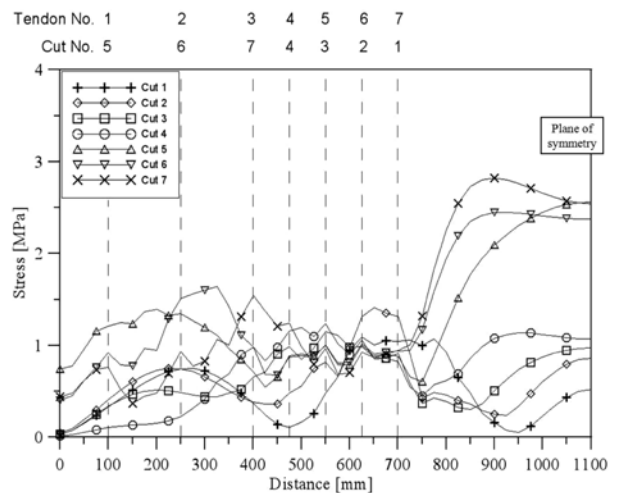


Fig. 22 Principal stress according to cutting order C along Path T

는 것으로 나타났다.

Fig. 23은 최종 긴장재의 절단 후 콘크리트 표면의 주 인장 응력의 분포도를 나타내고 있다. 전반적으로 압축 응력의 분포 부위가 A 및 B 경우에 비하여 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 24는 긴장재의 절단에 따른 긴장재와 평행한 종방향 거리에 따른 주인장 응력을 나타내고 있다. 그림과 같이 인장응력의 발생 위치가 300 mm로 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

강선의 절단순서에 따른 콘크리트의 주응력을 상대적으로 비교하기 위하여 각 해석 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 제시된 “최대능력”이란 강선을 절단하는 과정 중 발생하는 해석단계 중 최대응력을 의미하며, 최종 단계에서의 응력과 구별되어야 한다. 또한 제시된 해석모델의 “step time”은 0.702초의 해석시간 중 최대응력

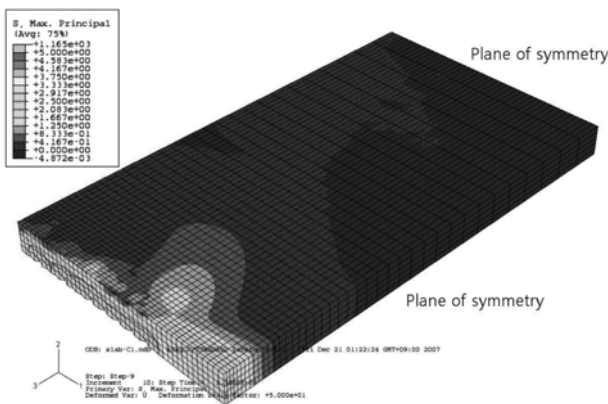


Fig. 23 The contour of the principal stress for type C

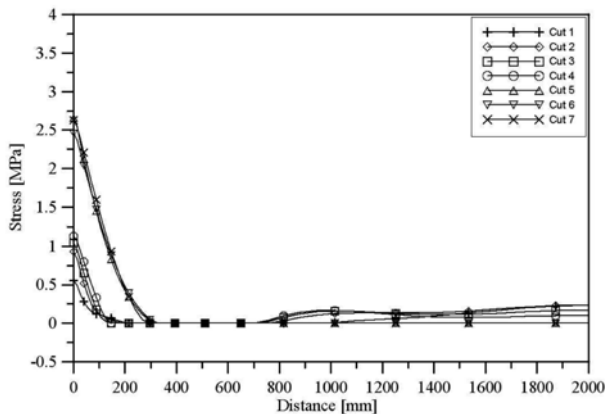


Fig. 24 Principal stress according to cutting order C along Path L

Table 2 Maximum principal stress (at Path T) during cutting the strands

Type	Maximum stress (MPa) during the cutting of strands	Maximum stress at final stage (MPa)	Step time at the maximum stress (sec)
A Type	3.49	2.9MPa	0.6045
B Type	3.16		
C Type	2.82		

이 발생한 시점을 의미한다. 비교 결과, C 타입의 절단 순서, 즉, 절단순서를 한 방향으로 고정하지 않고, 내측으로부터 일부를 절단한 후 다시 외측으로부터 절단한 실험체의 주인장 응력이 최종단계의 주응력인 2.9 MPa 보다도 적은 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 인장응력이 발생하는 위치도 단부에서 300 mm로 가장 적은 범위인 것으로 확인되었다. 따라서 이와 같은 결과로부터 C 타입의 절단순서가 가장 유리한 것으로 판단된다.

4.4 해석 결과와 실험 결과 비교

이번 절에서는 Table 3에 제시된 바와 같이 전달길이 내의 횡방향 철근의 변형을 결과를 선형 탄성 해석 이론에 근거하여 응력으로 환산하여 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과를 실험 결과와 비교하기 위하여 실험과 동일한 방향, 즉, 1번 방향의 응력 (S11)을 검토하였으며 (Fig. 13참조), 이를 표에 제시하였다. 또한, 실험에서 설치된 변형률 게이지의 부착위치와 동일한 위치의 응력을 비교하였다.

횡방향 응력 해석결과는 A 타입과 B 타입의 절단순서 보다는 C 타입의 절단순서인 경우, 절단 과정 중 발생하는 응력이 가장 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 해석모델을 통한 종방향응력의 경향과 실험결과와도 그 경향이 일치하는 것이다.

해석 결과와 실험결과를 비교할 때, 해석에서 발생하는 응력의 수준은 실험 결과의 71~133% 정도로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 간단한 해석모델에는 절단순서에서 긴장강선과 콘크리트의 부착 거동 간의 비선형성이 고려되지 않았기 때문이다. 이와 같은 한계에도 불구하고, 본 해석모델은 다음과 같은 측면에서 매우 의미있는 분석도구로서의 역할을 지니고 있다고 판단된다. 그것은 본 해석모델이 강선이 배치되어 있는 많은 실험체의 중앙부의 강선절단에 따른 콘크리트의 종방향 (강선축방향) 및 횡방향의 응력변화를 제시할 수 있다는 것이다. 따라서, 본 해석모델을 통해 획득한 결과는 대상구조물의 전반적인 응력거동의 경향을 파악하기 위해 사용되는 것이 바람직하다.

5. 결 론

프리텐션 구조에서 긴장강선의 용접 절단순서에 따른 콘크리트 및 강선의 변형과 거동을 고찰하였다. 이를 위

Table 3 Comparisons of results obtained from experiment and FEM analysis

Type	FEM (MPa) [A]	Experiment (MPa) [B]	Ratio (%) [(A/B)×100]
A Type	2.7	3.8	71
B Type	2.3	2.0	115
C Type	2.0	1.5	133

하여 다수의 긴장강선이 배치된 슬래브 실험체를 제작하고, 서로 절단순서를 달리하여 실험하였으며, 긴장력 도입 시 사전에 매입 설치한 게이지를 이용하여 강선 및 보강근의 변형률 변화를 계측·고찰하였다. 또한, 실험 결과의 신뢰를 확보하고, 전반적인 응력분포 상태를 고찰하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다.

- 1) 단부에 위치한 횡방향 보강철근의 변형률 변화를 고찰한 결과, 절단순서에 지속적인 인장변형률의 증가가 확인되었다. 이는 긴장력의 도입으로 실험체의 일부에서는 국부적인 인장응력이 발생할 수 있음을 나타내는 것이다. 그러나, 변수에 따른 데이터의 변화차이가 명확하지 않아 절단순서의 영향이 실험자료를 이용하여 분석하기에는 한계가 있는 것으로 판단되며, 해석모델 등을 이용한 복합적인 분석이 필요하다.
- 2) 또한 실험 결과 획득된 절단단부와 고정단부의 긴장재 변형률 결과에 따르면, 긴장강선의 절단순서는 절단 전후 주변 긴장강선의 변형률에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히 고정단부의 결과에서 C타입의 절단순서인 경우 도입되는 긴장력의 손실이 가장 낮은 경향을 명확히 확인할 수 있었다. C타입의 절단순서는 중앙 부분에서 외측으로 절단한 후 다시 외측에서 중앙 부분으로 절단하는 방법으로 슬래브의 국부적인 탄성 수축 변형을 효과적으로 제한하였기 때문인 것으로 판단할 수 있다.
- 3) 콘크리트부의 응력변화를 분석하기 위하여 실시된 동적 선형유한요소해석 결과, 부착을 고려하지 못하는 등의 한계에도 불구하고, 절단순서에 따른 콘크리트의 응력변화를 효과적으로 제시할 수 있으며, 다소의 차이는 있으나 실험 결과와 일치된 경향을 나타내는 것을 확인하였다.
- 4) 해석 결과에 의하면, 절단순서가 중앙 부분에서 외측으로 절단하는 A 타입인 경우에 내부 긴장재가 배치되지 않은 실험체의 중앙 부위에서 3.49 MPa의 주인장 응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 따라서 A 타입이 가장 불리한 절단순서인 것으로 판단된다. 반면, C 타입의 절단순서가 가장 유리한 것으로 나타났으며, 2.82 MPa정도의 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 본 논문에서 다룬 슬래브에서는 절단순서를 적절히 설계함으로써, 발생하는 응력을 20%정도는 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 저자들은 이에 대해 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신현양, 히로시 오카모토, 박경래, 이충희, “인천대교 FSLM 콘크리트 대블럭 박스 거더 제작 및 가설,” 콘크리트학회지, 19권, 3호, 2007, pp. 31~37.
2. Stone, W. C. and Breen, J. E., “Behavior of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones,” *PCI Journal*, Vol. 29, No. 1, 1984, pp. 64~109.
3. Nanni, A., Tanigaki, M., and Hasuo, K., “Bond Anchorage of Pretensioned FRP Tendon at Force Release,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 10, 1992, pp. 2837~2854.
4. Mirza, J. F. and Tawfik, M. E., “End Cracking in Prestressed Members during Detensioning,” *PCI Journal*, Vol. 23, No. 2, 1978, pp. 66~78.
5. Steinberg, E., Beier, J. T., and Sargand, S., “Effects of Sudden Prestress Force Transfer in Pretensioned Concrete Beams,” *PCI Journal*, Vol. 46, No. 1, 2001, pp. 64~75.
6. Kannel, J., French, C., and Stolarski, H., “Release Methodology of Strands to Reduce End Cracking in Pretensioned Concrete Girders,” *PCI journal*, Vol. 42, No. 1, 1997, pp. 42~54.
7. 오병환, 김의성, “프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달길이 평가 및 영향 인자 연구,” 대한토목학회 논문집, 20권, 6A호, 2000, pp. 945~956.
8. 오병환, 임시내, 최영철, “프리텐션 PSC부재의 전달길이 해석 및 예측에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 3호, 2004, pp. 293~302.
9. 김장호, 문도영, 지광습, 김규선, “긴장재 절단에 따른 프리텐션 부재의 동적 거동 고찰,” 대한토목학회 논문집, 28권, 5A호, 2008, pp. 747~756.
10. 김장호, 문도영, 지광습, 김규선, 박경래, “용접 절단에 의한 긴장력 도입 방법이 프리텐션 부재의 콘크리트 응력에 미치는 영향 분석,” 한국전산구조공학회, 정기학술대회 논문집, 21권, 1호, 2008, pp. 368~373.
11. Russell, B. W. and Burns, N. H., “Measurement Transfer Lengths of 0.5 and 0.6 in. Strands in Pretensioned Concrete,” *PCI Journal*, Vol. 41, No. 5, 1996, pp. 44~65.
12. Oh, B. H. and Kim, E. S., “Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned, Prestressed Concrete Members,” *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 6, 2000, pp. 821~830.
13. Barnes, R. W., Grove, J. W., and Burns, N. H., “Experimental Assessment of Factors Affecting Transfer Length,” *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 740~748.
14. 최영철, Cracking and Ultimate Behavior of Transversely Prestressed Concrete Box Girder Bridges, 서울대학교, 박사학위논문, 2005, pp. 1~5.
15. 지광습, 김장호, 김규선, “프리텐션 콘크리트 구조물의 디텐서닝 거동,” 한국콘크리트학회, 가을학술발표회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 181~184.
16. 문도영, 김장호, 지광습, 김규선, 윤만근, 박경래, “프리텐션 부재의 긴장재 용접 절단순서에 따른 콘크리트 응력 고찰에 관한 연구,” 한국콘크리트학회, 봄학술발표회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 341~344.
17. Chen, H. L. and Wissawapaisai, K., “Measurement of Tensile Forces in a Seven-Wire Prestressing Strand using Stress Waves,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 6, 2001, pp. 599~606.

요 약 이 논문에서는 프리텐션 콘크리트 부재의 제작과정에서 긴장력 도입을 위한 강선의 용접절단순서가 강선 및 콘크리트에 미치는 영향을 실험과 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 실험에서는 다수의 긴장재를 포함한 슬래브 시험체를 제작하였으며, 각각 다른 절단순서에 따른 강선의 변형률 변화와 횡방향 보강 철근의 변형률 변화를 계측하였다. 해석에서는 실험과 동일한 조건에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교·고찰하였다. 연구 결과, 강선의 변형률과 횡방향 보강근의 변형률이 긴장재의 절단순서에 따라 다른 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 또한 이 결과는 해석을 통하여도 검증되었다. 따라서 강선의 절단순서는 강선간의 상대거동과 미절단에 의한 변형 구속 등에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 적절한 절단순서의 조절을 통해 제작과정 중에 발생할 수 있는 균열 등의 손상을 최소화할 수 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 프리텐션, 용접절단, 절단순서, 프리스트레스 긴장재, 긴장력 도입