부분 긴장과 해제를 이용한 연속화 과정에서의 긴장력 조절

Control of Prestressing Forces in a Splicing Method using the Partial Post-tensioning and Releasing Procedure

이 환 우† 김 광 양*
Lee, Hwan-Woo Kim, Kwang-Yang
(논문접수일 : 2001년 6월 28일 ; 심사종료일 : 2002년 5월 20일)

요 지

부재의 일정구간에 설치된 긴장재의 긴장작업과 이미 긴장되어 있는 상태의 긴장재를 이완시키므로써 의도적으로 유도되는 2차 모멘트를 이용한 새로운 연속화 공법이 개발되었다. 본 공법에서는 이들 긴장재의 긴장과 이완공정이 가장 핵심이 되는 작업이 되며, 실용적인 측면에서는 그 크기와 순서를 결정하는 것이 주된 과제가 될 것이다. 본 논문에서는 이 과정에서 필요한 최적의 긴장과 이완 비율의 조절 과정에 관하여 연구하였다. 그 결과, 긴장작업과 이완작업은 먼저 긴장작업부터 시작하여 3단계에 걸쳐 점진적으로 실시하는 것이 구조의 안전과 시공성을 위해 타당한 방법으로 나타났다. 그리고, 민감도 분석을 통하여 결정되는 선행 긴장작업의 긴장력 크기는 최소와 최대의 비율범위를 동시에 만족하는 값으로 결정되어야 하나, 시공의 효율성을 위해서 필요할 때는 최소 긴장비율만을 하한치로 하여 결정하여도 큰 문제는 없다.

핵심용어 : 연속화공법, 2차 모멘트, 긴장과 이완기법, 긴장력의 조정, 점진적 진행

Abstract

A new splicing technique by the secondary moment which is intentionally induced by the tensioning effect of continuous tendons and the releasing effect of temporary beam tendons was developed. The tensioning and releasing works are essential and the decisions of the magnitude and order about them may be important engineering problems in this technique. In this paper, it was studied for the practically optimum procedure of the tensioning and releasing works. As the result, it is concluded that the gradual progress through the three stages is reasonable for the procedure and the tensioning work have to precede the releasing work. Additionally, the magnitude of preceding tensioning force should be obtained by the sensitivity analysis and the minimum limit is more critical than the maximum limit.

Keywords : *New splicing method, Secondary moment, Tensioning and releasing technique, Control of prestressing force, Gradual progress*

† 책임저자, 정회원 · 부경대학교 공과대학 건설공학부 (토목공학과) 부교수
전화: 051-620-1452; Fax: 051-628-2231
E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr
* 정회원 · 부경대학교 공과대학 건설공학부(토목공학과) 박사과정 구조기술사

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

중소 교량을 대상으로 한 주형단면의 성능개선과 함께 주형가설을 위한 새로운 공법의 개발연구가 활발히 진행되고 있다.[1)~7)] 그림 1은 경간길이 30m~45m 정도의 다경간 교량에서, 적절한 형고를 유지할 수 있고, 단순보 프리캐스트 거더교에서와 같은 용이한 시공성을 확보할 수 있다는 장점으로 제안한 새로운 연속화공법[7)]의 시공절차를 보여주고 있다.

제안된 연속화공법의 역학적 특징과 장점은 기존의 연속화공법들과 달리 활하중뿐만 아니라 프리캐스트 거더의 자중까지도 연속구조체의 상태로 만드는 데에 있다. 여기서, 처음에 단순보 상태로 설치된 거더가 원래부터 연속된 구조로 만들어 진 것과 같은 상태로 변화될 수 있는 것은 그림 2에서 보는바와 같이 연속화 시공단계(그림 1(e))에서 의도적으로 유발[7)]되는 2차 모멘트의 영향이다.

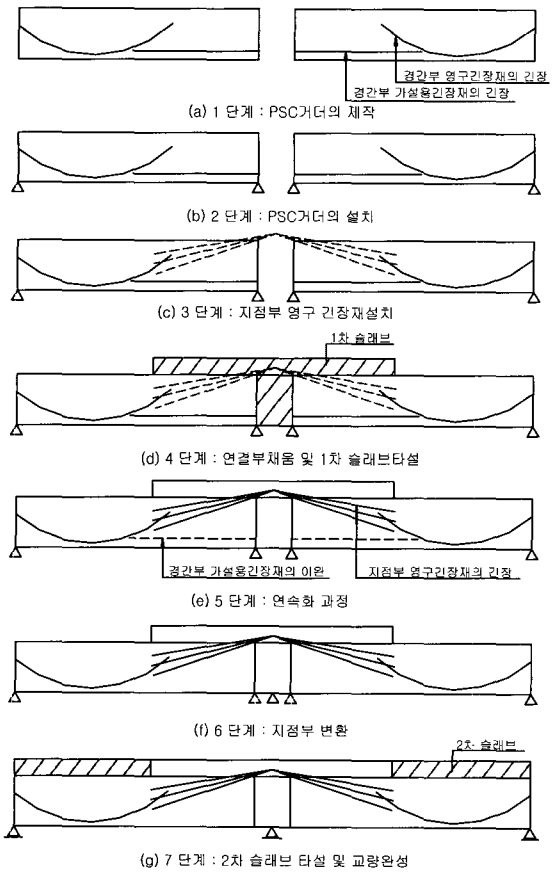


그림 1 단순 U형 프리캐스트 프리스트레스트 거더의 연속화 과정

표 1 U형 PSC 거더의 연속화의 과정

단계	시 공 과 정
1	U형의 프리캐스트 거더3),8)를 제작하고 경간부 영구긴장재와 경간부 가설용긴장재를 설치, 긴장, 정착한다(단순보상태).
2	교각위에 U형 PSC거더를 설치한다(단순보상태).
3	PSC거더를 가설한 단순상태에서 연결부와 1차 슬래브의 철근을 배근하고 양측거더를 연속화할 지점부 영구긴장재를 설치한다.
4	양측거더의 연결부에 채움콘크리트와 1차 슬래브 콘크리트 타설한다.
5	연속화 작업단계로서 지점부 영구긴장재를 통하여 긴장력을 지점부에 전달함과 동시에 1단계에서 긴장 되었던 경간부 가설용긴장재를 이완한다. 이때 긴장과 이완작업은 PSC거더의 허용응력 범위내에서 균형을 이루며 단계적으로 이루어져야 한다.
6	교각부에서 지지된 교좌장치를 단순보 상태의 위치에서 연속보 상태의 위치로 변환시킨다.
7	1차슬래브 구간을 제외한 슬래브 콘크리트가 2차로 타설 완료되고 이 단계에서 교량이 완성된다.

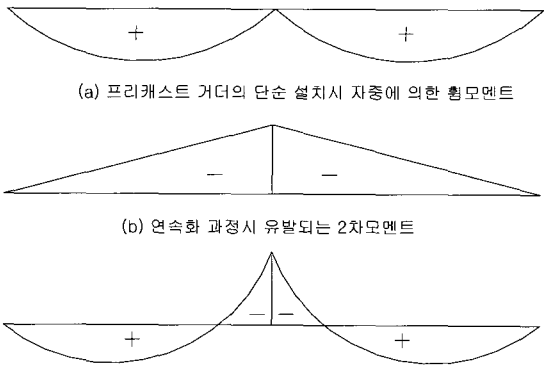


그림 2 연속화에 의한 휨모멘트의 변화

연속화단계에서는 그림 1(a)의 프리캐스트 부재 제작과정에서 이미 설치, 긴장된 경간부 가설용긴장재를 이완시키는 동시에 그림 1(c)단계에서 배치된 지점부 영구긴장재를 긴장시키는 작업이 수행된다. 그런데, 그림 1(e)의 연속화단계에서의 긴장재들의 긴장과 이완작업이 동시에 이루어진다는 것은 현실적으로 불가능한 시공작업이다. 따라서 실제 시공과정에서는 긴장작업과 이완작업 중 어느 것이든지 먼저 우선되어야 할 것이다. 그러나, 제안된 공법의 연속화 단계에서 수행되는 각 긴장재들에 대한 긴장과 이완은 상호 보완적인

역할이 있으므로, 각기 따로 분리하여 수행할 경우 연속화과정에서 각 부재단면에서의 응력변화가 급속히 일어나 어느 순간에는 허용값을 초과할 우려가 있다.

본 논문에서는 수치예제를 통하여 제안된 공법의 연속화과정에서 나타나는 긴장과 이완작업에 따른 휨응력을 중심으로 한 영향을 분석하고 현실적인 긴장력 조절방법을 예시하고자 한다.

2. 연속화 과정의 응력변화

2.1 예제 및 구조해석

교량의 경간길이별, 제안된 연속화공법의 최적단면 결정에 관한 연구결과[8]에서 그림 3과 같은 40m 교량을 채택하여 본 논문의 수치예제로 이용하였다. 여기서, 콘크리트 및 긴장재의 재료특성치는 표 2와 같이 가정하였다.

구조해석은 RM-SPACEFRAME[9]을 이용하여 그림 1의 시공절차에 따라 시간의존적 재료성질(건조수축, 크리프, 릴렉세이션)을 고려하여 수행하였다. 그리고, 시공완료 후에는 DB24, DL24 하중과 온도변화(±5℃) 및 지점침하(±10mm)에 대한 구조해석을 수행하였다.

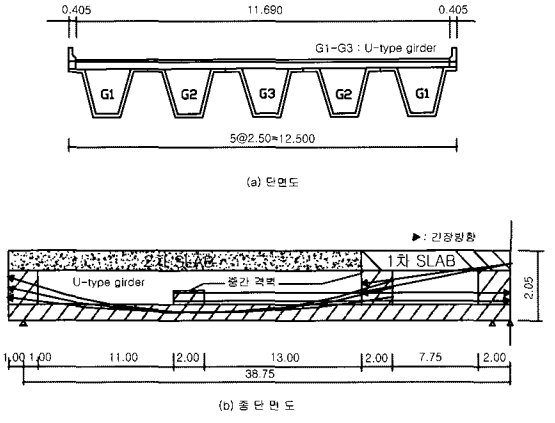


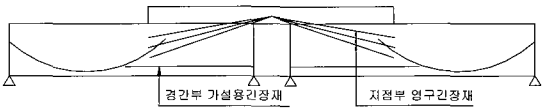
그림 3 예제 교량의 일반도

2.2 긴장 후 이완하는 경우

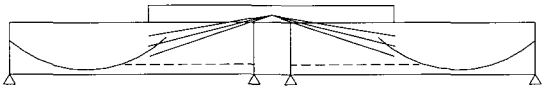
먼저, 그림 1(e)의 연속화 과정을 세부적으로 그림 4와 같이 지점부 영구긴장재를 먼저 모두 긴장한 후 경간부 가설용긴장재를 이완하는 2단계의 분리된 시공과정으로 나누어 검토하였다. 그림 5는 긴장단계(5-1단계)

표 2 재료 특성치

구 분		재 료 특 성
콘크리트	U형 거더	$f_{ck}=400kg/cm^2$ $f_{ci}=400kg/cm^2$
	1차 Slab	$f_{ck}=270kg/cm^2$ $f_{ci}=270kg/cm^2$
	2차 Slab	$f_{ck}=270kg/cm^2$
긴 장 재	경간부 영구 긴장재	6-ϕ12.7×13EA $f_{pj}=12,800\,kg/cm^2$
	가설용 긴장재	5-ϕ15.2×12EA $f_{pj}=12,800kg/cm^2$
	지점부 영구 긴장재	6-ϕ15.2×12EA $f_{pj}=12,800kg/cm^2$
	μ, k	$\mu=0.25/rad.$ $k=0.0050/m$ Relaxation = 5%



(1) 5-1단계 : 지점부 영구긴장재의 긴장



(2) 5-2단계 : 경간부 가설용긴장재의 이완

그림 4 5단계 연속화 과정의 분리(긴장 후 이완)

에서의 U형 거더상단, 하단 그리고 슬래브상단의 휨응력이고, 그 다음에 경간부 가설용긴장재의 이완까지 모두 마쳤을 때의(5-2단계)의 휨응력은 그림 6과 같다. 연속화된 교량이 좌우 대칭인 2경간 이므로 그림 5와 6에는 좌측경간의 결과만 나타내었다. 즉, 요소번호 1번 부재는 거더의 시점쪽 지점부재이고, 요소번호 36번은 연속화된 교량의 중간 교각 지점의 부재이다. 그리고 점선은 허용응력[10]을 의미한다.

그림 5를 보면 중간 교각 지점부의 U형 거더 하단에서 허용인장응력을 초과하는 것을 알 수 있다. 이는 지점부 영구긴장재의 긴장에 의한 1차 모멘트(정모멘트)의 영향이 중간 교각 지점부에서는 2차모멘트(부모멘트)보다 크다는 것을 의미한다. 따라서 경간부 가설용긴장재의 이완에 의한 2차 모멘트를 증가시키거나, 지점부 영구긴장재의 긴장력을 적게하여 1차 모멘트의 발생을 감소시키는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

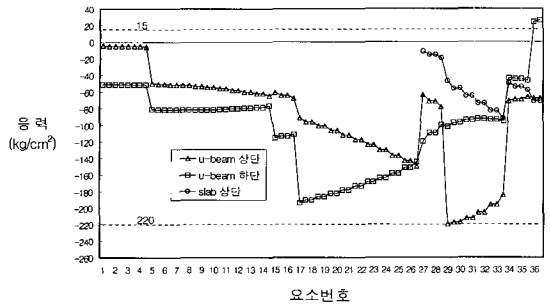


그림 5 해석 5-1단계(긴장)의 휨응력 분포도

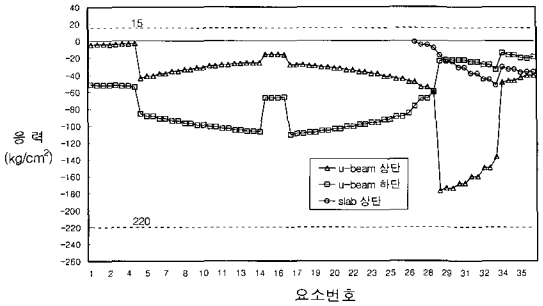


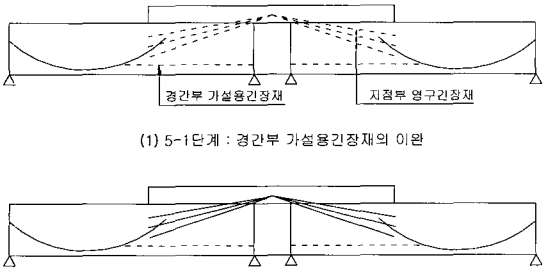
그림 6 해석5-2단계(이완)의 휨응력 분포도

2.3 이완 후 긴장하는 경우

이번에는 그림 4와는 역순으로 그림 7과 같이 경간부 가설용긴장재를 먼저 이완한 후 지점부 영구긴장재를 긴장하여 연속화가 이루어 지는 경우이다. 해석결과, 이완단계(5-1단계)에서의 각 부분의 응력은 그림 8과 같이 나타났고, 긴장 후(5-2단계)의 응력상태는 그림 9와 같이 얻어졌다.

그림 8에서 보는 바와 같이 구간에 따라 U형 거더 상단, 하단 그리고 슬래브 상단 모두 허용응력을 초과함을 알 수 있다. 슬래브 상단과 U형 거더 상단의 경우는 경간부 가설용긴장재의 이완에 의한 2차 모멘트(부모멘트)의 영향으로 상단부에 인장응력이 발생되기 때문이다. 따라서, 지점부 영구긴장재의 긴장에 의한 프리스트레싱력과 1차 모멘트(정모멘트)를 발생시키거나, 경간부 가설용긴장재의 이완을 부분적으로 실행하여 이때 발생하는 2차 모멘트의 영향을 줄여야 한다는 것을 의미한다.

또한 U형 거더 하단부의 경우는, 경간부 가설용긴장재의 이완에 의한 2차 모멘트의 압축응력 증가보다, 경간부 가설용긴장재가 주고 있던 1차모멘트의 감소에 의한 압축응력의 감소가 크기 때문이다. 따라서 지점부 영구긴장재를 긴장시켜, 압축력 및 2차 모멘트에 의한 압축응력을 발생시키거나, 경간부 가설용긴장재를 부분적으로 이완하여 부모멘트(1차 모멘트)의 감소를 줄여야 한다.



(1) 5-1단계 : 경간부 가설용긴장재의 이완

(2) 5-2단계 : 지점부 영구긴장재의 긴장

그림 7 5단계 연속화 과정의 분리(이완 후 긴장)

3. 시공순서 결정

2.2절과 2.3절에서 살펴 본 바와 같이 긴장 후 이완작업을 하든지, 또는 이완 후 긴장작업을 하든지 모두 어느 한 공정을 완료한 후에 다음 공정을 실시할 수

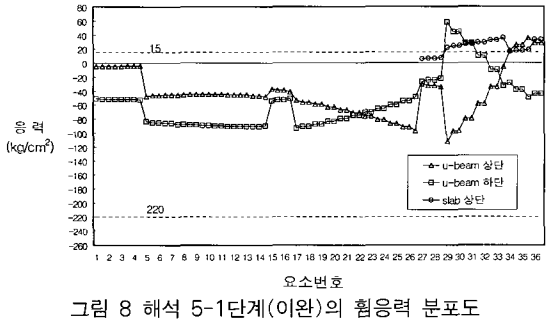


그림 8 해석 5-1단계(이완)의 휨응력 분포도

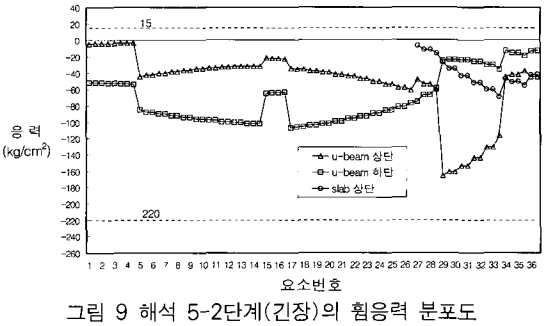


그림 9 해석 5-2단계(긴장)의 휨응력 분포도

는 없다는 것이 확인되었다. 따라서 연속화 공정에서 긴장과 이완작업은 점진적으로 실시되어야 한다.

이 장에서는 긴장작업과 이완작업 중 어느 것을 선행작업으로 하는 것이 유리한 지, 그리고 그 크기는 얼마나 해야 하는지 등에 관한 결정과정에 대하여 논하고자 한다.

3.1 긴장작업 선행시

그림 10은 지점부 영구긴장재의 최초 긴장력을 설계긴장력 대비 0%, 10%, 50%, 100%의 비율로 긴장한다고 가정한 경우의 응력상태이다.

그림 4에서와 같이 지점부 영구긴장재의 긴장을 선행하였을 때 그림 10(a)의 U형 거더상단과 그림 10(c)의 슬래브상단은 긴장비율을 아무리 달리하여도 허용응력을 초과하지 않음을 알 수 있다. 그러나 그림 10(b)에서 보는바와 같이 중간 지점부 U형 거더의 하단은 긴장비율에 따라 허용응력을 초과하는 경우가 있음을 알 수 있다. 한편, 이때의 작용 긴장력과 부재의 휨응력은 서로 선형적인 관계에 있다. 따라서 휨응력을 초과하는 위험단면에서 허용응력을 초과하지 않는 긴장비율은 다음 식(1)에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$P_{\max} = \frac{A-S}{D} \times 10 \qquad (1)$$

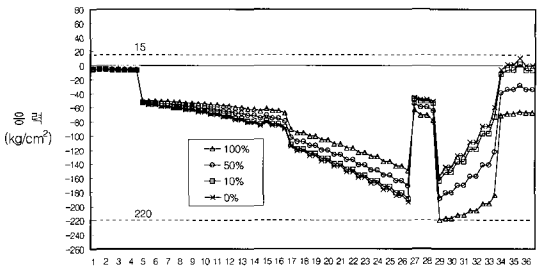
여기서,

$P_{\max}$: 설계긴장력 대비 최대 긴장율(%)
A : 단면의 허용인장응력(kg/cm^2)
S : 지점부 영구긴장재를 긴장하지 않았을 때의 부재 응력(kg/cm^2)
D : 긴장재의 최대 가능 긴장력 대비 10% 긴장할 때의 부재의 응력증가량(kg/cm^2)

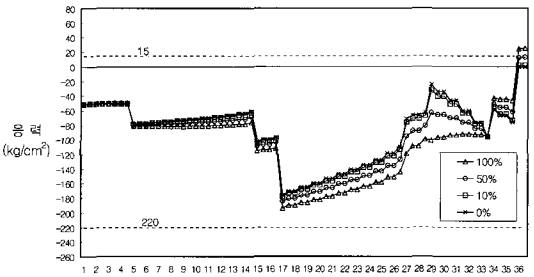
예제 교량의 경우, 위험 단면들을 식(1)에 따라 계산한 결과 최대 긴장율은 58.22%로 결정되었다.

3.2 이완작업 선행시

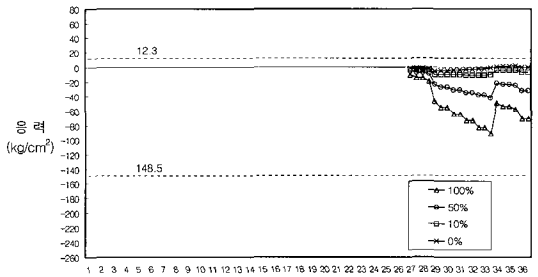
이번에는 경간부 가설용긴장재의 이완작업을 선행하는 경우이다. 그림1(a)의 PSC 부재 제작단계에서 긴장하였던 긴장력 대비 각 각 0%, 10%, 50%, 100% 비율로 이완시켜가며 해석하였다. 즉, 이완비율 100%는 단 한번에 경간부 가설용긴장재의 모든 긴장력을 이



(a) U형거더 상단



(b) U형거더 하단



(c) 슬래브 상단

그림 10 긴장작업 선행시의 휨응력 분포도

완시킨다는 의미이다. 그림 11은 이완비율에 따른 부재의 휨응력상태를 나타내고 있다. 그림 11로부터 이완부터 하였을 때는 이완비율에 따라 3.1절의 긴장부터의 선행 작업시보다 많은 단면들에서 위험하게 될 수 있음을 알 수 있다.

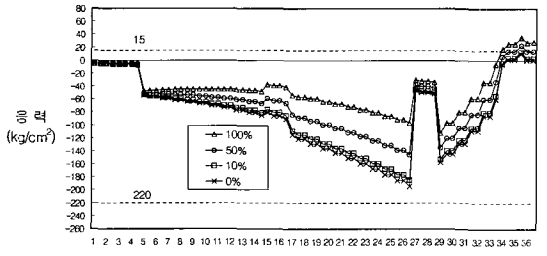
한편, 최대 이완비율의 결정도 최대 긴장비율의 결정방법과 같은 개념으로 식(2)에 의해 구할 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{A-S}{D} \times 10 \qquad (2)$$

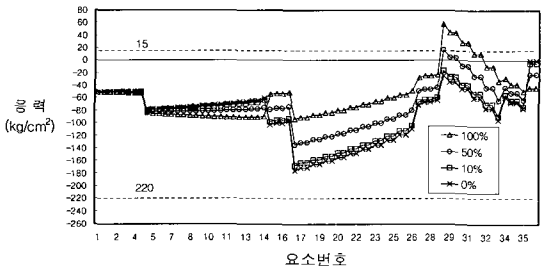
여기서,

R_{max} : 잔존 긴장력 대비 최대 이완비율(%)
A : 허용인장응력(kg/cm^2)
S : 경간부 가설용긴장재를 이완하지 않았을 때의 부재 응력(kg/cm^2)
D : 이완비율 10% 증가시 부재의 응력증가량 (kg/cm^2)

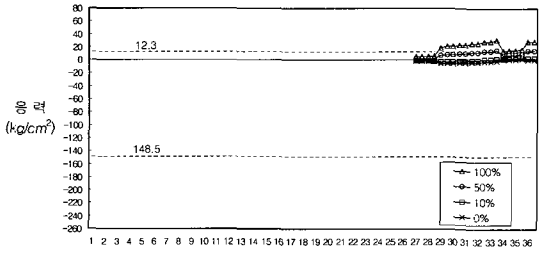
위험 단면들을 식(2)에 따라 분석한 결과 최대 이완율은 17.68%로 매우 적었다. 이것은 허용값을 만족하는 이완비율의 변화폭이 작기 때문에 이완작업을 선행할 경우에 이완과 긴장작업의 횟수가 매우 많아져야 한다는 것을 의미한다. 따라서 연속화 단계에서의 선행 작업은 긴장을 먼저 하는 것이 구조적으로 유리함을 알 수 있다.



(a) U형거더 상단



(b) U형거더 하단



(c) 슬래브 상단

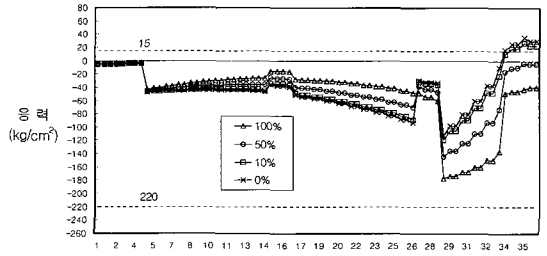
그림 11 이완작업 선행시의 휨응력 분포도

4. 최적의 긴장율과 이완율의 결정과정

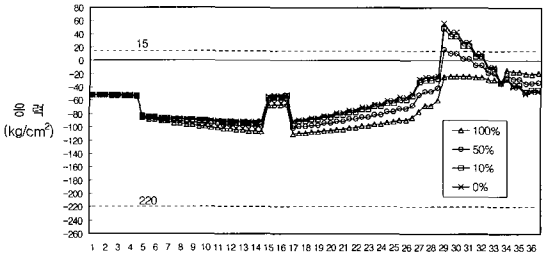
4.1 긴장율 결정

긴장작업 선행시의 최대 긴장율은 3.1절에서 58.22%로 결정되었다. 최초 긴장단계만을 생각한다면 최소긴장율에 대한 제한은 의미가 없다. 그러나 다음 단계인 이완단계에서 시공의 편의성을 고려하여 경간부 가설용 긴장재를 한번에 100% 이완하기 위해서는 긴장단계에서의 최소 긴장율이 요구된다.

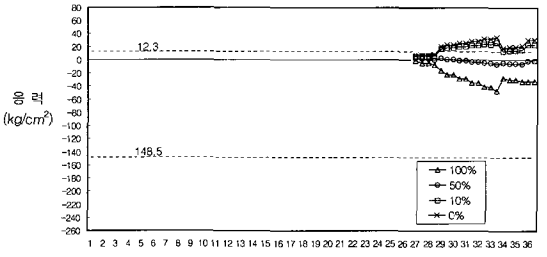
그림 12는 초기 긴장비율을 변화시키며 100%이완시켰을 때, 각 단면의 응력상태를 나타내고 있다. 이들 값을 식(1), (2)의 개념에 따라 분석한 결과, 긴장후 100%이완 시켰을 때 위험단면들이 발생되지 않기



(a) U형거더 상단



(b) U형거더 하단



(c) 슬래브 상단

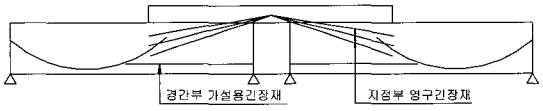
그림 12 긴장율 변화에 따른 5-2단계의 휨응력 분포도

위한 최소 긴장율은 51.86%로 확인되었다. 따라서 이론적으로는 첫 번째 긴장단계에서는 결정된 최소 긴장율(51.86%)과 최대 긴장력(58.22%) 이내에서 긴장하면 응력은 100% 이완단계에서도 허용치 이내가 된다. 그러나 최소 긴장율과 최대 긴장율의 차이가 근소한 관계로 긴장비율의 결정은 현실적으로 매우 민감하다. 그렇지만 최소 긴장비율을 만족하지 못할 경우는 그림 12(b)에서 보는 바와 같이 거더의 지점이 아닌 경간부에서 위험할 뿐 아니라 초과값의 크기도 그림 10의 최대 긴장율을 만족하지 못할 때보다도 크다는 것을 알 수 있다.

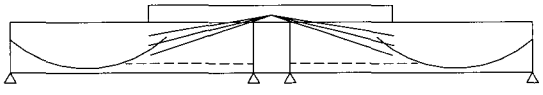
이상의 결과로 부터 최소긴장비율 이상의 긴장은 필수적임을 알 수 있다. 한편, 최대 긴장비율 이상의 비율이 적용되면 2.2절에서 설명한 바와 같이 지점 연결부 하단에서 인장응력이 허용응력을 초과하게 된다. 그러나, 이는 연속화 시공단계일때에만 발생하는 일시적인 위험 단면이다. 따라서 시공이 계속 수행되면 추가 사하중에 의해 부모멘트가 증가하여 안전측이 되는 단면들이 되므로 최대 긴장력 비율의 위배는 큰 문제가 되지 않을 것이다.

4.2 점진적 긴장과 이완의 최적화 결정

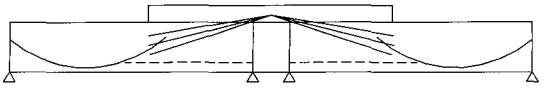
제안된 연속화 공법에서의 연속화 단계는 현실적으로 그림 13에서와 같이 총 3단계에 걸쳐 점진적으로 수행되어져야 하는 것을 알았다. 즉, 최소 긴장비율과 최대 긴장비율을 만족하는 긴장비율을 적용하여 우선적으로 지점부 영구긴장재를 긴장 한 후, 경간부 가설용긴장재의 잔존 긴장력을 100% 이완한다. 다음 단계로 다시 지점부 영구 긴장재의 나머지 긴장비율을 긴장한다.



(1) 5-1단계 : 지점부 영구긴장재의 부분긴장



(2) 5-2단계 : 경간부 가설용긴장재의 이완



(3) 5-3단계 : 지점부 영구긴장재의 긴장

그림 13 5단계 연속화 과정의 3단계 분리

본 논문의 예제에서는 최초 긴장비율을 최소 값(51.86%)과 최대 값(58.22%)을 만족하는 55%로 채택하였다. 그림 14~16은 연속화 단계에서 응력변화를 나타낸 것이고, 그림 17~19는 연속화단계 이후의 시공완료단계와 사용단계에서의 응력상태다.

그림 14~19에서 보는 바와 같이 연속화단계와 최종단계, 사용단계를 거치는 동안에 모든 단면들의 응력은 허용응력 이내에 있는 것을 알 수 있다. 특히 연속화 과정에서 문제가 되는 중간 교각부 U형 거더 하단부는 시공단계가 지남에 따라 압축측으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

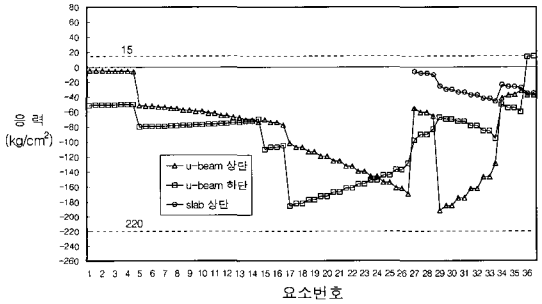


그림 14 해석 5-1단계 종방향 휨응력 분포도(부분 긴장)

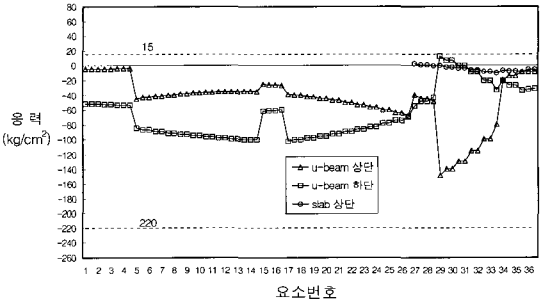


그림 15 해석 5-2단계 종방향 휨응력 분포도(이완)

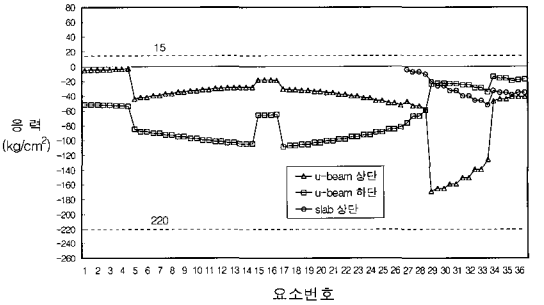


그림 16 해석 5-3단계 종방향 휨응력 분포도(긴장)

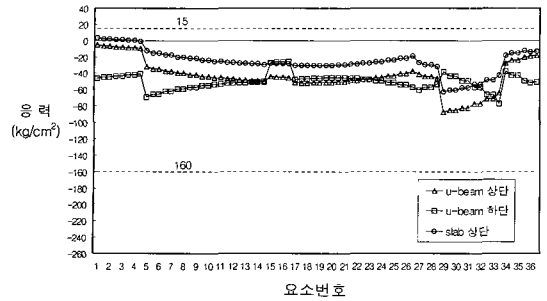


그림 17 시공단계 완료후의 종방향 휨응력 분포도

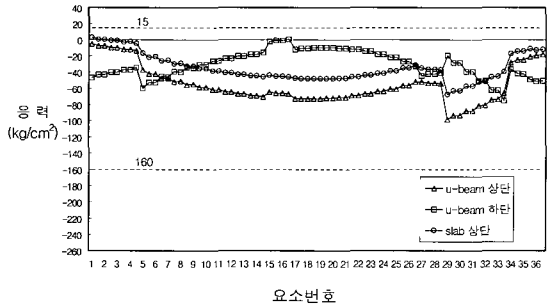


그림 18 사용단계에서의 종방향 휨응력 분포도(정모멘트 최대시)

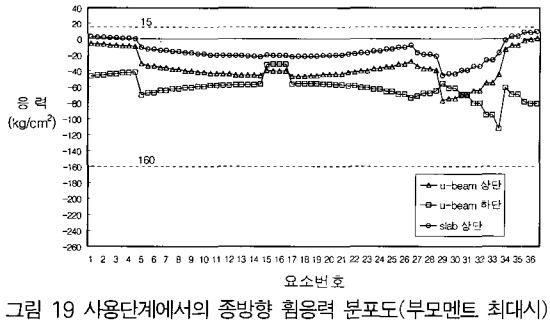


그림 19 사용단계에서의 종방향 휨응력 분포도(부모멘트 최대시)

그러나, 그림 19에서 보는 바와 같이 중간지점부의 채움 콘크리트 부분에서는 허용응력 이내이지만 미소한 인장응력이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 이 부분을 적절히 보강하여 준다면, 현재 가정한 긴장재량을 더욱 감소시킬 수도 있으며, 연속화 단계에서 긴장작업과 이완작업을 각 각 한번에 실시하여 시공과정을 간편하게 하는 등, 구조적인 성능을 크게 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

경간길이 40m의 교량을 대상으로 새로운 연속화 공법의 연속화 과정을 분석하였다. 그 결과, 연속화 과정은 지점부 영구긴장재의 긴장과 경간부 가설용 긴장재의 이완작업 중, 긴장단계를 선행작업으로 하여 부분긴장→완전이완→나머지 긴장의 3단계 작업절차에 의해 점진적으로 수행하는 것이 최적인 절차로 분석되었다. 또한, 부분긴장단계의 긴장력은 민감도 분석을 통해 얻어지는 최소, 최대의 긴장비율 모두를 만족하여야 하지만, 시공성을 위해 필요하다면, 최소 긴장비율 만을 하한치로 하여 결정하여도 구조적 안전에는 큰 문제는 없을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 (재)부경대학발전기금 연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다. 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Abdel-Karim, A. M. and Tadros, M. K., *State-of-The-Art Of Precast/Prestre-ssed Concrete Spliced-Girder Bridges*, PCI, 1995
2. Tadros, M.K., Ficenec, J.A., Einea A. and Holdsworth, S., "A New Technique to Create Continuity in Prestressed Concrete Members," *J. of PCI*, Vol. 38, No. 5, 1993, pp.30~37
3. Ralls, M. L., Ybanez, L. and Panak, J. J., "The New Texas U-Beam Bridges an Aesthetic and Economical Design Solution," *J. of PCI*, Vol. 38, No. 5, 1993, pp.20~29
4. 정원기, 윤석구, 이형준, 이규정, "고강도 콘크리트를 적용한 장경간 PC Beam 교량의 개발," 대한토목학회 가을학술발표회논문집, 1997, pp.355~358
5. 구민세, 신동기, 이재혁, "2경간 P.S. 연속합성보 구조물의 설계에 관한 연구," 대한토목학회 가을학술발표회논문집, 1994, pp.169~172
6. 곽효경, 서영재, 정찬묵, 박영하 ,"연속 PSC-Beam 교량의 지점부 균열제어,"한국전산구조공학회논문집, 제12권 제2호, 1999, pp.201~214
7. 이환우, 곽효경, 김광양, "2차모멘트를 이용하여 연

속화된 U형 PSC 교량의 휨거동," 대한토목학회논문집, 제20권 제5-A호, 2000, pp.805~812
8. 이환우, 곽효경, 송영용, "부분 포스트텐션닝 방법에 의해 연속화된 교량의 주형단면," 한국콘크리트학회논문집, 제12권 제6호, 2000, pp.43~50
9. TDV, RM-SPACEFRAME Rev 5.70, Austria, 1996
10. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000