

연속 프리플렉스 거더교의 개선된 시공법과 설계식의 개발

The Development of Improved Construction and Design Method on Continuous Preflex Girder Bridge

구 민 세¹⁾ · 박 영 제²⁾ · 김 훈 희³⁾
Koo, Min Se Park, Young Je Kim, Hun Hee

요 약 : 기존의 연속 프리플렉스 거더교는 내측지점부 바닥판 콘크리트에 압축력을 도입시키기 위해 내측지점을 상승시키고 부모멘트 구간만큼의 바닥판 콘크리트를 타설하고 하강시키는 시공법을 사용하였다. 그러나 상기의 시공법은 장시간의 내측지점 상승 작업과 종곡선의 굴곡 문제 등 여러 가지 시공상 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문은 이러한 문제점을 해소하기 위해 내측지점 및 외측지점을 하강시키는 공정만을 이용한 개선된 연속 프리플렉스 합성형 거더교의 시공법을 제시하였으며, 특정화된 연속 프리플렉스 거더교의 설계 프로그램에만 의존하지 않고 프리플렉스 거더교의 단면을 쉽게 추정할 수 있는 체계화된 설계식을 제시하였다.

ABSTRACT : In the previous construction method of continuous preflex composite girder bridge, we raised the inner support, and cast slab concrete innegative moment section, then lowered it to introduce compressive force in the slab. There were a few problems in the process such as the time required in raising the support and the bending of the camber. Therefore, this paper represents an improved construction method of continuous preflex composite girder by only moving downward the inner and outer supports to figure out problems in previous construction method. This paper proposes a design formula to find a proper cross section of preflex girder.

핵심용어 : 연속 프리플렉스 거더교, 지점 상승·하강, 내측지점, 외측지점, 선압축

KEYWORDS : continuous preflex girder bridge, up-down of supports, internal support, external support, prestress

1. 서론

1.1 연구의 배경

콘크리트와 강재는 토목구조물에서 가장 널리 이용되고 있는 재료로서 각각은 특유의 장점과 단점을 가지고 있으며 이를 효율적으로 이용하는 개념으로 제시된 것이 강합성 구조이다. 이는 인장력에 약한 콘크리트와 주로 앓은 부재를 사용함으로써 좌굴이나 부식 등의 우려가 있는 강재의 문제를 서로 보완해 주는 방향으로 다양한 형태의 구조시스템이 제안되고 널리 사용되어 왔다. 그 중 세계적으로 널리 알려진 프리플렉스 거더교는 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 합성거더교와 같

이 인장축의 콘크리트에 압축력을 도입한 일종의 프리스트레스트 합성거더교로 I형 단면을 갖은 강재 거더에 프리플렉션 하중에 의한 휨 변형을 준 상태에서 하부플랜지를 콘크리트로 피복시킨 후 프리플렉션 하중을 제거함으로써 하부플랜지 콘크리트에 압축력을 도입시킨 구조물이다.

이와 같은 프리플렉스 거더교의 가장 뛰어난 장점은 교량의 형고가 다른 형태의 교량에 비하여 상대적으로 매우 낮아 우리나라의 평야 지대 또는 도심지와 같이 형하공간이 충분하지 못한 지역의 교차지점에 매우 유용하게 사용할 수 있는 점과 교량의 미관이 수려하여 콘크리트 교량에서 볼 수 있는 투박함이 없어 자연과 쉽게 어우러질 수 있는 조형미를 갖출 수 있다는 것이다. 또한 강재 거더 전체가 콘크리트에 의해 피복되어 있

1) 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수, 공학박사
(Tel:032-860-7567, Fax:031-863-2515, E-mail:drkms@chollian.net)
2) 학생회원, 만세코리아, 공학박사(pyj2266@empal.com)
3) 인하대학교 토목공학과 대학원 박사과정(civkim@empal.com)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

으므로 내부식성 및 내구성이 강하다는 장점을 가진다. 그러나 프리플렉스 거더교는 대부분이 단순교 형식에 국한되어 있으며 이를 다경간 교량에 사용시에는 보와 보의 연결부를 신축이음장치로 처리하여 시공하였다. 그러나 이러한 시공법은 받침의 수요가 많이 요구되며 신축이음부에서의 충격으로 인해 차량의 주행감을 저하시키고 교량의 열화현상 촉진 및 신축이음부를 통한 누수 등 지속적인 보수 및 유지관리를 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

따라서 이러한 신축이음부의 문제점을 해결할 수 있는 방법 중의 하나로 그림 1과 같이 단순보 형식으로 제작된 프리플렉스 거더를 가로보와 바닥판만으로 연속 처리하여 시공하는 방법이 제시되고 있다.

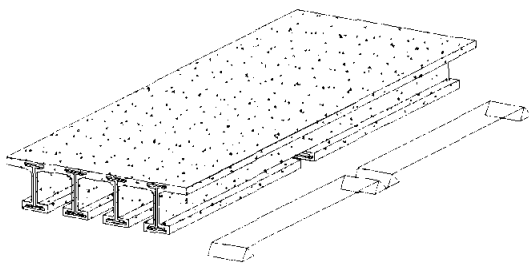


그림 1. 신축이음장치가 없는 단경간 프리플렉스 거더교

그러나 이 시공법은 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 시간에 따른 모멘트 재분배로 인하여 부모멘트 구간의 바닥판에 균열을 야기시킬 수 있으며 실제 설계시에도 부모멘트 발생 구간의 균열을 허용하고 있다(한국도로공사, 2001). 더욱이 이러한 균열은 설계된 연속형 교량을 단순보 또는 단순보에 가까운 거동을 하게 함으로써 정모멘트 구간에 과다한 모멘트를 발생시킴은 물론 처짐 및 진동이 증가하게 되어 사용성과 내구성에 불리한 영향을 미칠 수 있다.

반면에 프리플렉스 거더를 완전 연속화하여 그림 2와 같은 연속교로 하는 경우 단경간 교량에 비해 다음과 같은 이점을 얻게 된다.

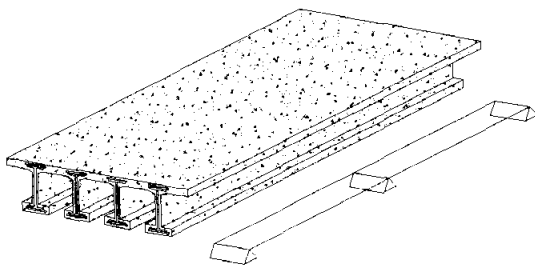


그림 2. 신축이음장치가 없는 연속 프리플렉스 거더교

- (1) 연속보 시스템으로 인해 발생 부재력이 단순보 시스템에 비해 적으므로 단면의 크기를 줄일 수 있어 경제성을 높일 수 있다.
- (2) 활하중에 의한 처짐이 줄어 사용성을 높일 수 있다.
- (3) 신축이음부를 없앴으로 유지보수 비용을 절감시킬 수 있다.
- (4) 단순보 시스템에 비해 내측지점부에 1개의 교좌장치를 사용함으로 구조적 거동을 향상시킬 뿐만 아니라 경제적이다.

1.2 연구의 목적

현재 프리플렉스 거더교의 연속화에 대한 연구는 국내에서 활발히 진행중에 있으며 이 중 단순보 형식으로 제작된 프리플렉스 거더를 교대 및 교각상에 거치, 연결시키고 내측지점의 상승 및 하강을 이용하여 바닥판 콘크리트에 선압축력을 도입시키는 방법(구민세, 1993)이 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 상기의 시공법은 시공기간의 장기화와 종곡선의 굴곡문제로 인한 편법 시공법 등의 문제점 등을 야기시키고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 현재 사용하고 있는 프리플렉스 거더교의 연속화 방법의 문제점을 파악하고, 이를 보완한 개선된 연속화 시공법을 제시하고자 한다. 또한 프리플렉스 거더교를 연속 교량에 적용하게 되면 시공 단계의 증가와 시공 중의 합성단면 및 구조시스템의 상태 변화로 인해 단순보형 교량에 비해 훨씬 더 복잡한 구조거동을 나타내며 그로 인해 이에 대한 구체적인 설계기법이 아직 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 이 연구에서는 앞서 제시한 새로운 연속화 방법과 더불어 이에 따른 프리플렉스 거더교의 단면을 쉽게 추정할 수 있는 간략화된 설계식을 제안하여 초기 설계시 그 단면의 적용여부를 확인할 수 있도록 하고자 한다.

1.3 연구의 범위

프리플렉스 거더교의 개선된 연속화 기법의 개발은 다음과 같은 가정과 범위 내에서 수행된다.

- (1) 연구 대상 교량은 2경간과 3경간 연속의 직선 교량으로 한다.
- (2) 교량의 가로보에 의한 영향은 설계측면에서 안전을 위해 무시한다.
- (3) 합성 거더의 단면은 교량 전 구간에 걸쳐 등단면으로 한다.

2. 본 론

2.1 연속 합성거더교의 성립원리

그림 3은 전형적인 2경간 연속교의 등분포 하중에 의한 모멘트도를 도시한 것으로서, 내측지점에 발생하는 부모멘트는 지간 중앙에 발생하는 정모멘트의 약 1.8배에 달한다. 발생모멘트로 인한 저항단면에서 발생하는 인장응력은 그림 4에 나타낸 바와 같이 저항단면의 중립축에서 부모멘트로 인한 인장

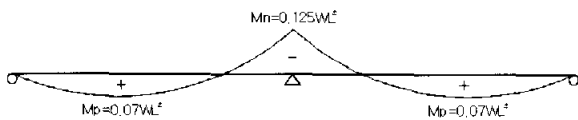


그림 3. 등분포하중에 의한 2경간 연속교의 모멘트도

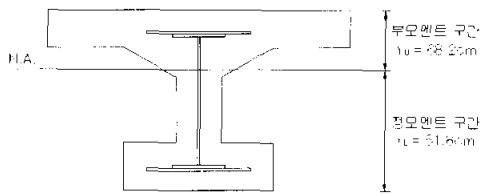


그림 4. 표준단면의 중립축 위치

연까지의 거리 Y_U 와 정모멘트로 인한 인장연까지의 거리 Y_L 에 비례한다. 만약 정모멘트 구간의 하부플랜지 콘크리트와 마찬가지로 부모멘트 구간의 인장측 바닥판 콘크리트에도 압축력을 도입시켜 합성단면으로서 거동을 하게 하여 인장연까지의 거리비 Y_U/Y_L 를 연속교에서 부모멘트에 대한 정모멘트의 비를 1/1.8에 근접시킨다면 연속 합성거더교는 일정한 연단응력을 정모멘트 및 부모멘트 구간에서 갖게 된다. 그러나 연속교에서 발생하는 모멘트 크기만을 근거로 기 제안된 프리플렉스 거더교의 단면을 살펴보면 인장연까지의 거리비가 1/1.3로 산출되어져 연속 프리플렉스 거더교는 일정한 연단응력을 가질 수 없어 연속교로의 성립이 불가능하다. 그러나 활하중 합성거더교인 연속 프리플렉스 거더교는 시공 중에 그 시스템이 변화함으로 단순히 연속교에서 발생하는 모멘트 크기만을 근거로 단면을 가정할 수는 없다. 이는 표 1에 나타낸 바와 같이 강재 거더와 하부플랜지 콘크리트로 이루어진 프리플렉스 거더가 지간부에서는 자체의 자중을 단순 구조시스템에서, 지간부와 내측지점부에서는 복부 및 현치와 바닥판 콘크리트의 자중을 연속 구조시스템에서 저항하기 때문이다. 또한 바닥판 콘크리트까지 합성된 합성단면은 활하중 합성거더로서 2차 고

정하중과 활하중을 연속 구조시스템에서 저항하기 때문이다.

표 1. 각 단면에서의 하중별 구조시스템과 저항단면

구조 시스템	작용하중	저항단면	
지간부	단순보	프리플렉스 거더 자중	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트
	연속보	바닥판 콘크리트 자중	
내측 지점부	연속보	2차 구조물 자중 활하중	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트 + 바닥판 콘크리트
	연속보	바닥판 콘크리트 자중	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트
내측 지점부	연속보	2차 구조물 자중 활하중	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트 + 바닥판 콘크리트
	연속보	바닥판 콘크리트 자중	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트

즉 간단히 요약하면, 프리플렉스 거더의 자중은 연속보 시스템에서 작용하는 것이 아니라 단순보 시스템에서 작용하기 때문에 내측지점에서 발생하는 부모멘트를 추가로 증가시키지 않는다는 것이다. 실제로 주형 간격이 2.1m이며 지간 길이가 30m인 2경간 연속교에서 작용 하중별 발생 모멘트를 나타낸 표 2 및 그림 5를 살펴보면, 내측지점에 발생하는 부모멘트 M_n 에 대한 지간중앙의 정모멘트 M_p 는 1/0.97의 거의 비슷한 비율로 나타난다. 이는 표준단면에 나타난 1/1.3의 인장연 거리비로도 충분히 프리플렉스 거더교를 연속교로 성립시킬 수 있음을 나타내는 것이다. 그러나 이러한 프리플렉스 거더교의 연속교로의 성립 조건은 바닥판 콘크리트에 압축력을 도입시켜 바닥판 콘크리트도 합성단면으로의 거동을 하게 하여야 한다는 것이다.

표 2. 지간 30m 2경간 연속교의 하중별 작용모멘트

구조 시스템	작용 하중	모멘트 ($tf \cdot m$)	
		지간중앙	내측지점
단순보	프리플렉스 거더 중량	120.64	0.00
연속보	바닥판 콘크리트 중량	125.28	-215.44
	포장 등 2차 구조물 중량	23.64	-39.31
	활하중	140.26	-141.77
합계		409.82	-396.52

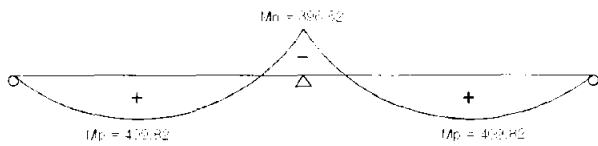


그림 5. 지간 30m 2경간 연속교의 작용 모멘트도 ($tf \cdot m$)

2.2 현행 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법

현재 활발히 사용되고 있는 프리플렉스 거더교의 연속화 방법은 내측지점의 상승 및 하강을 이용한 시공법으로 2경간 연속교와 3경간 연속교의 시공순서도를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 내측지점을 상승 및 하강시켜 내측지점부 바닥판 콘크리트에 압축력을 도입시키는 현행 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법은 내측지점의 상승시 다수의 주형을 거의 동시에 미소량씩 상승시켜야 함으로 장기간의 작업시간과 작업자의 불편을 유발한다. 또한 내측지점부 바닥판 콘크리트만을 선 시공하고 나머지 작업들을 수행함으로써 작업공간의 효율적 사용에 극히 제한을 받는다.

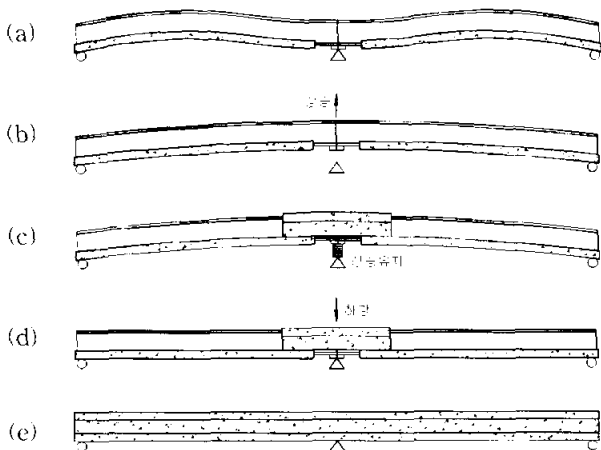


그림 6. 내측지점의 상승·하강을 이용한 2경간 연속 프리플렉스 거더교의 시공순서도

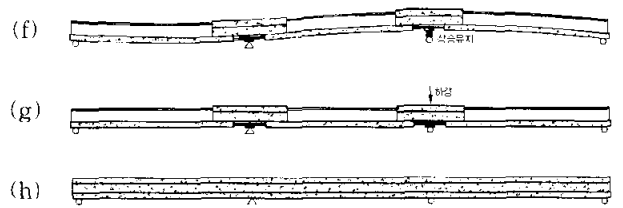
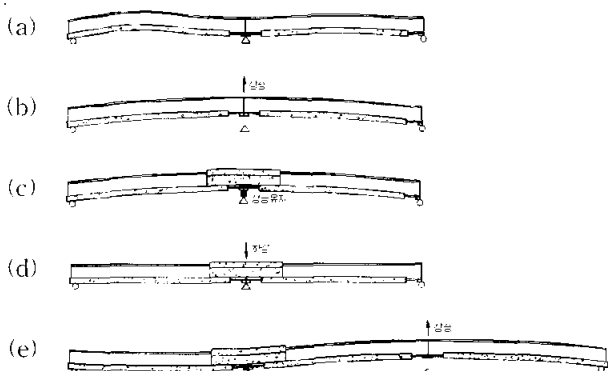


그림 7. 내측지점의 상승·하강을 이용한 3경간 연속 프리플렉스 거더교의 시공순서도

그러나 가장 큰 문제점은 내측지점의 상승량과 하강량의 차이로 인한 교량 종곡선의 굴곡문제이다. 일반적으로 내측지점의 하강량은 상승량보다 적어 그 차이만큼이 잔존하는데 이는 상부 프리플렉스 거더가 교좌장치에 완전히 안착되지 못함을 의미하며 이를 해소하기 위해 그림 8 및 그림 9와 같은 편법을 사용하여야만 한다.

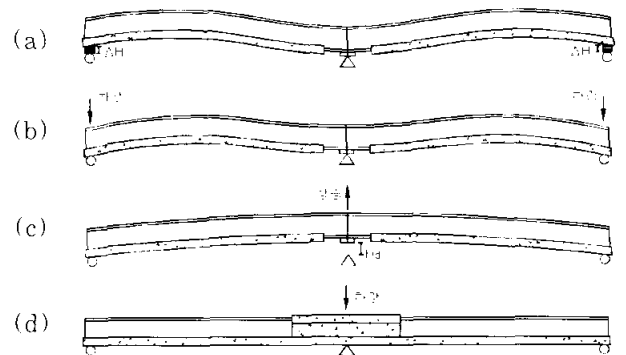


그림 8. 현행 2경간 연속 프리플렉스 거더교의 잔류 상승량 제거 방법

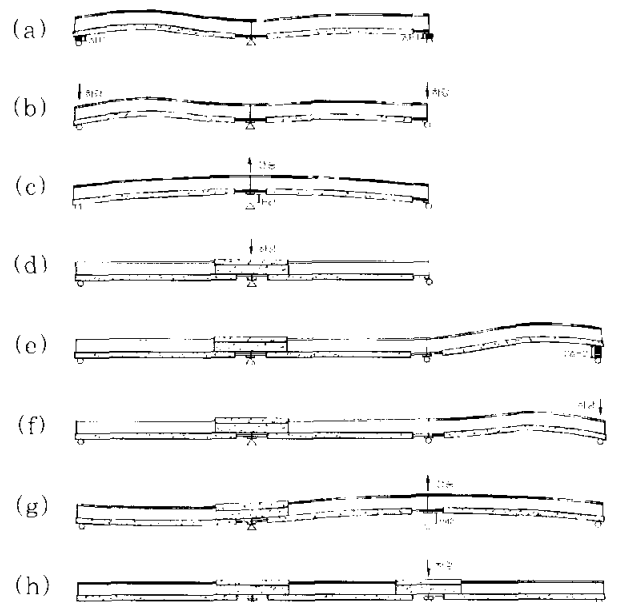


그림 9. 현행 3경간 연속 프리플렉스 거더교의 잔류 상승량 제거 방법

2경간 연속 프리플렉스 거더교를 시공할 경우 그림 8에서와 같이 먼저 양 단부지점에 상승량 H_u 에서 하강량 H_d 를 뺀 $\Delta H (= H_u - H_d)$ 만큼의 거치고임을 설치하고 프리플렉스 거더를 거치하고 연결한 후 제거한다. ΔH 만큼의 거치고임 제거는 ΔH 만큼의 내측지점을 상승시킨 효과를 발생시킨다. 그 후 내측지점을 H_d 만큼 상승 후 하강시켜 마무리한다.

3경간 연속 프리플렉스 거더교의 시공은 그림 9에서 보인 바와 같이 앞에서 설명한 2경간 연속교과 동일한 방법으로 먼저 제1경간과 제2경간을 연속화하고 나머지 제3경간 거더를 거치·연결한다. 이때 제3경간 거더의 연결 전에는 제3경간 단부지점에 제2내측지점의 상승량 H_{u2} 에서 하강량 H_{d2} 를 뺀 $\Delta H2$ 의 2배만큼의 거치고임을 설치하고 거치한다. 그 후 거치고임을 제거하면 제2내측지점에서 $\Delta H2$ 만큼을 상승시킨 효과를 거둘 수 있으며 다시 제2내측지점을 하강량인 H_{d2} 만큼 상승·하강시켜 완성한다.

이렇듯 현재 시공이 이루어지고 있는 상승·하강을 이용한 프리플렉스 거더교의 연속화 방법은 실제 시공성 측면에서 번거로운 문제가 야기되어져 왔으며 이로 인해 공사기간의 지연이 발생되어 왔다.

2.3 개선된 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법

이 연구에서 제안하고자 하는 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법은 현행 시공법에서 발생하는 상승량의 잔류 문제를 해결하고 공기 단축과 시공성을 향상시키고자 하는 것이며 이를 위해 현행 시공법에서의 잔류상승량 문제를 해결하기 위한 편법을 응용한다.

그림 10과 그림 11에 이 연구에서 제시하고자 하는 2경간 및 3경간 프리플렉스 거더교의 개선된 연속화 시공순서를 나타내었으며 표 3에 이의 시공 내용에 따른 저항단면과 구조계를 나타내었다.

이 연구에서 제시한 2경간 및 3경간 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법은 현행 연속화 시공법에서 내측지점을 설계 상승량만큼 상승시키는 것을 외측지점에서 그 상승량만큼의 거치고임을 미리 설치한 후 제거하는 방법으로 대체한다.

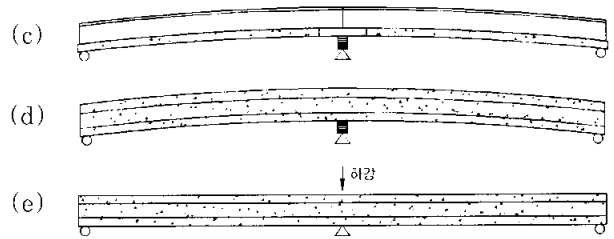


그림 10. 개선된 2경간 연속 프리플렉스 거더교의 시공순서도

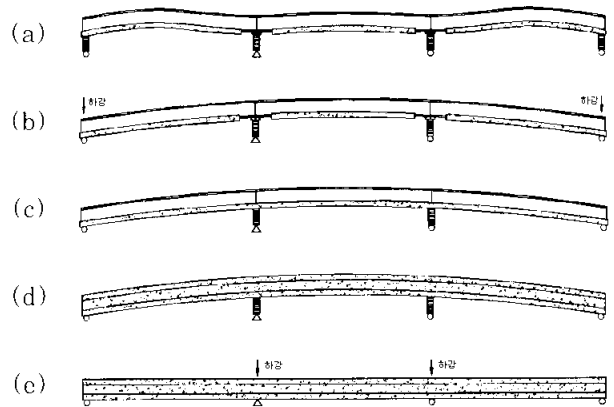
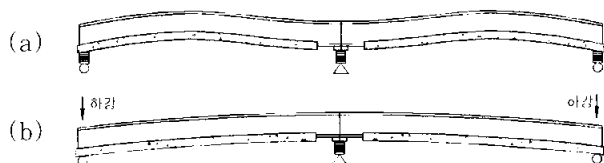


그림 11. 개선된 3경간 연속 프리플렉스 거더교의 시공순서도

표 3. 개선된 연속 프리플렉스 거더교의 시공 내용별 저항단면

시공 단계	시공 내용	저항 단면	구조 시스템
1	강재거더의 프리플렉션	강재거더	단순
2	릴리즈 및 거치고임 설치 후 거치	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트	단순
3	프리플렉스 거더의 연결	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트	연속
4	외측지점 거치고임 제거	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트	연속
5	연결부 하부플랜지 콘크리트 타설 및 바닥판 콘크리트 타설	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트	연속
6	내측지점 거치고임 제거	강재거더 + 하부플랜지 콘크리트, 강재거더 + 하부플랜지 콘크리트 + 바닥판 콘크리트	연속



또한 현행의 연속 시공법에서 내측지점을 상승시킨 후 설계 하강량만큼 하강시켜 바닥판 콘크리트에 압축력을 도입시키는 방법을 내측지점에서 미리 그 하강량만큼의 거치고임을 설치한 후 제거하는 방법으로 대체하여 시공한다. 이 사이에 타설하는 바닥판 콘크리트는 현행 연속화 시공법과는 달리 교량의

전 연장에 걸쳐 한꺼번에 타설함으로써 시공기간을 단축시킬 수 있다.

2.4 개선된 프리플렉스 거더교의 연속화 설계법

프리플렉스 거더교를 연속 교량에 적용하게 되면 시공 단계의 증가와 시공 중의 합성단면 및 구조시스템의 상태 변화로 인해 단순보형 교량에 비해 훨씬 더 복잡한 구조거동을 나타내며 그로 인해 이에 대한 구체적인 설계기법이 아직 확립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 이 연구에서는 앞서 제시한 새로운 연속화 방법과 더불어 이에 따른 프리플렉스 거더교의 단면을 쉽게 추정할 수 있는 간략화된 설계식을 제안하여 초기 설계시 그 단면의 적용여부를 확인할 수 있도록 하고자 한다.

2.4.1 내측지점 하강에 필요한 모멘트 산정

먼저 연속 프리플렉스 거더교의 설계에 있어 가장 주안점을 두어야 할 것은 내측지점부의 바닥판 콘크리트에 도입될 압축응력의 크기이다. 내측지점의 하강에 의해 바닥판 콘크리트에 도입될 압축응력의 크기는 하강 후의 외력인 포장 등 2차 고정하중과 활하중에 의해 결정된다. 또한 도입된 압축응력에 의해서 발생하는 크리프와 건조수축으로 인한 손실량도 반영되어야 한다.

내측지점부 바닥판 콘크리트에는 그림 12와 같이 세 차례의 부재력이 발생한다. 따라서 발생하는 최종응력 f_{slab} 는 식(1)과 같이 산출되며 그 값은 허용인장응력보다는 작거나 같아야 한다.

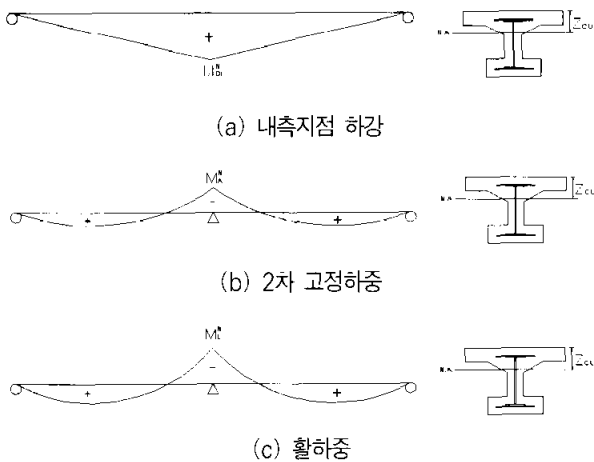


그림 12. 내측지점부 바닥판 콘크리트에 발생하는 모멘트 및 저항단면

$$\begin{aligned}
 f_{slab} &= \frac{M_{DI}^N}{n Z_{CU}}(1-\alpha) + \frac{M_A^N}{n Z_{CU}} + \frac{M_L^N}{n Z_{CU}} \\
 &= \frac{M_{DI}^N}{n Z_{CU}}(1-\alpha) + \frac{1}{n Z_{CU}}(M_A^N + M_L^N) \\
 &= \frac{1}{n Z_{CU}}\{M_{DI}^N(1-\alpha) + M_A^N + M_L^N\} \\
 &\leq f_{all}^U
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서

n : 탄성계수비

α : 내측지점 바닥판 콘크리트에 도입된 압축응력의 손실률

M_{DI}^N : 내측지점 하강에 의한 지점부 모멘트

M_A^N : 2차 고정하중에 의한 지점부 모멘트

M_L^N : 활하중에 의한 지점부 모멘트

Z_{CU} : 합성단면에서 바닥판 콘크리트 상연의 단면계수

f_{slab}^U : 바닥판 콘크리트의 허용인장응력

내측지점부 바닥판 콘크리트의 최종응력이 허용인장응력보다 작거나 같기 위해 필요한 내측지점의 하강에 의한 지점부 모멘트는 다음과 같으며,

$$M_{DI}^N = \frac{1}{1-\alpha}\{n Z_{CU} f_{all}^U - (M_A^N + M_L^N)\}
 \tag{2}$$

$M_A^N + M_L^N$ 는 지간 길이와 거더 간격에 따라 일정하게 고정된 하중이므로 $M_A^N + M_L^N = M_{comp}^N$ 라 놓으면, 식 (2)는 다음과 같이 계산된다.

$$M_{DI}^N = \frac{1}{1-\alpha}(n Z_{CU} f_{all}^U - M_{comp}^N)
 \tag{3}$$

그러나 식 (3)의 내측지점 하강에 의한 모멘트는 바닥판 콘크리트에는 압축응력을 도입시키지만 압축응력이 도입되지 않은 내측지점부의 하부플랜지 콘크리트에는 시공 단계 중 인장응력을 유발시킴으로 하부플랜지 콘크리트의 허용인장응력 이내로 제한이 필요하다. 내측지점 하강에 의해 내측지점부 하부플랜지 콘크리트에 발생하는 응력 f_L 는 다음과 같다.

$$f_L = \frac{M_S^N}{n Z_L} + \frac{M_{DI}^N}{n Z_{CL}} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}}
 \tag{4}$$

여기서

- M_S^N : 바닥판 콘크리트 자중에 의한 지점부 모멘트
- Z_L : 프리플렉스 거더 단면에서 하부플랜지 콘크리트 하연의 단면계수
- Z_{CL} : 합성단면에서 하부플랜지 콘크리트 하연의 단면계수
- f_{ck} : 하부플랜지 콘크리트의 설계압축강도

이때 압축응력이 도입되지 않은 내측지점부 하부플랜지 콘크리트에는 그림 13(a)와 같은 바닥판 콘크리트의 자중에 의한 응력이 누적되어 있음을 고려하여야 한다.

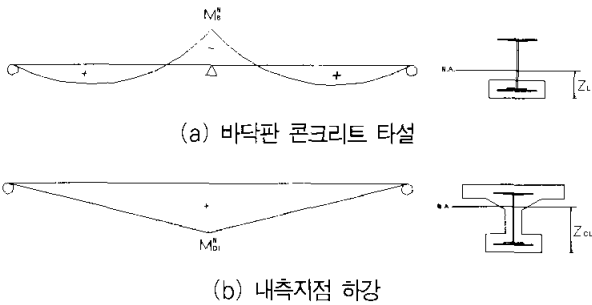


그림 13. 내측지점부 하부플랜지 콘크리트에 발생하는 모멘트 및 저항단면

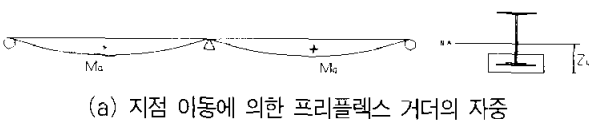
내측지점 하강시 내측지점부 하부플랜지 콘크리트의 허용인장응력을 고려한 내측지점 하강에 의한 모멘트는 다음과 같이 계산되며,

$$M_{DI}^N = n Z_{CU} (1.6\sqrt{f_{ck}}) - \frac{Z_{CL}}{Z_L} M_S^N \quad (5)$$

식 (3)에서 산출한 모멘트와 비교되어 작은 값이 산정되어야 한다.

2.4.2 외측지점 하강에 필요한 모멘트 산정

식 (3)과 식 (5)에 의해 산출된 내측지점 하강에 의한 모멘트는 하부플랜지 콘크리트에 발생하는 인장응력의 산출시 고려되어야 한다. 프리플렉스 거더의 제작 후 시간부 하부플랜지 콘크리트에는 그림 14와 같은 여섯 차례의 부재력이 발생한다.



(a) 지점 이동에 의한 프리플렉스 거더의 자중

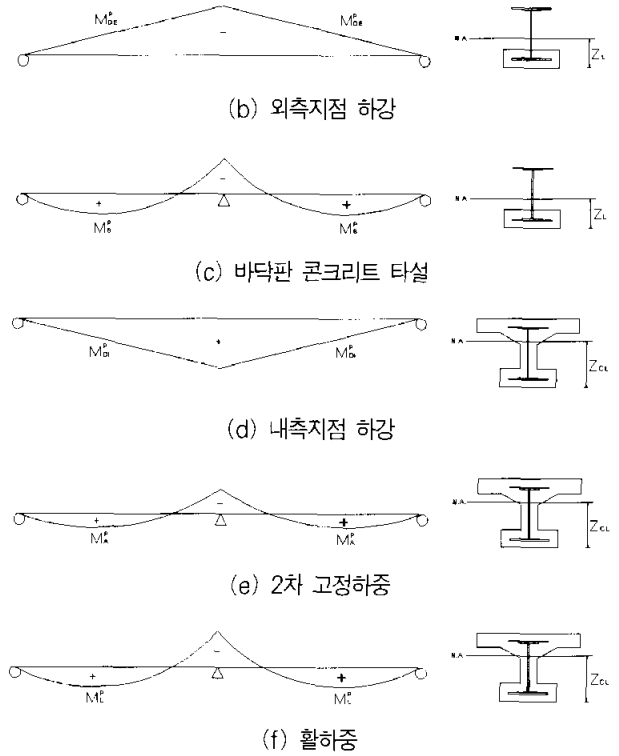


그림 14. 시간부 하부플랜지 콘크리트에 발생하는 모멘트 및 저항단면

따라서 시간부 하부플랜지 콘크리트에 발생하는 최종응력은 다음과 같이 계산되며, 그 값은 허용인장응력보다 작거나 같아야 한다.

$$f_{low} = f_R(1 - \beta) + \frac{1}{n Z_L} (M_{DE}^P + M_G + M_S^P) + \frac{1}{n Z_{CL}} (M_{DI}^P + M_A^P + M_L^P) \leq f_{all}^L \quad (6)$$

여기서

- β : 하부플랜지 콘크리트의 압축응력 손실률
- f_R : 릴리즈에 의해 도입된 하부플랜지 콘크리트의 압축응력
- M_{DE}^P : 외측지점 하강에 의한 시간부 모멘트
- M_G : 단순거치시 프리플렉스 거더의 자중에 의한 추가 시간부 모멘트
- M_S^P : 바닥판 콘크리트 자중에 의한 시간부 모멘트
- M_{DI}^P : 내측지점 하강에 의한 시간부 모멘트
- M_A^P : 2차 고정하중에 의한 시간부 모멘트

M_L^P : 활하중에 의한 지간부 모멘트

f_{all}^L : 하부플랜지 콘크리트의 허용인장응력

M_G 는 제작된 프리플렉스 거더를 교대 및 교각상에 거치시 지점 이동에 의한 프리플렉스 거더의 자중에 의한 모멘트와 릴리즈시의 자중에 의한 모멘트 차이다. 이는 프리플렉스 거더의 제작시 프리플렉스 거더의 교각부 쪽 단부는 휨률을 최소화하여 제 2의 보와 연결을 용이하게 하기 위해 지점을 단부로부터 약 $L/8$ 에 위치시켜 제작하기 때문에 발생되어진다.

내측지점의 하강에 의한 모멘트 M_{DI}^P 는 내측지점부 바닥판 콘크리트에 압축력을 도입하기 위해 선 산정된 모멘트로서 내측지점부 바닥판 콘크리트에 발생하는 모멘트 M_{DI}^N 의 약 $3/8$ 에 해당하며 식 (6)은 다음 식 (7)과 같이 전개된다.

$$f_{low} = f_R(1 - \beta) + \frac{1}{n Z_L} (M_{DE}^P + M_G + M_S^P) + \frac{1}{n Z_{CL}} \left(\frac{3}{8} M_{DI}^N + M_A^P + M_L^P \right) \quad (7)$$

바닥판 콘크리트의 계산과 마찬가지로 식 (7)의 $M_A^P + M_L^P$ 는 지간 길이와 거더 간격에 따라 일정하게 고정된 하중으로 $M_A^P + M_L^P = M_{comp}^P$ 라 놓을 수 있으며, 식 (7)을 정리하여 하부플랜지 콘크리트의 최종응력이 허용인장응력보다 작거나 같기 위해 필요한 외측지점의 하강에 의한 지간부에서의 모멘트는 다음과 같다.

$$M_{DE}^P = n Z_L \{ f_{all}^L - f_R(1 - \beta) \} - \frac{Z_L}{Z_{CL}} \left(\frac{3}{8} M_{DI}^N + M_{comp}^P \right) - (M_G + M_S^P) \quad (8)$$

식 (8)에서 f_R 은 릴리즈에 의해 하부플랜지 콘크리트에 도입된 압축응력으로 순수한 릴리즈 하중에 의한 모멘트 M_{PF} 와 릴리즈시의 임시지점을 고려한 프리플렉스 거더의 자중에 의한 모멘트 M_B 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$f_R = \frac{1}{n Z_L} (M_B - M_{PF}) = \frac{1}{n Z_L} (M_B - f_{all}^{SL} Z_{SL}) \quad (9)$$

여기서

M_{PF} : 프리플렉스 하중에 의한 지간부 모멘트

Z_{SL} : 강재거더 단면에서 강재거더 하연의 단면계수

M_B : 프리플렉스 거더의 자중에 의한 지간부 모멘트

f_{all}^{SL} : 강재거더의 허용인장응력

식(9)에서 릴리즈 하중에 의한 모멘트는 강재거더의 허용인장응력까지 가할 수 있는 프리플렉스 하중에 의해 결정된다.

그러나 외측지점 하강에 의한 모멘트도 그림 15와 같이 추후 타설되는 바닥판 콘크리트 자중과 함께 내측지점부 프리플렉스 거더의 강재 상단에 인장응력을 유발시키기 때문에 제한이 있다.

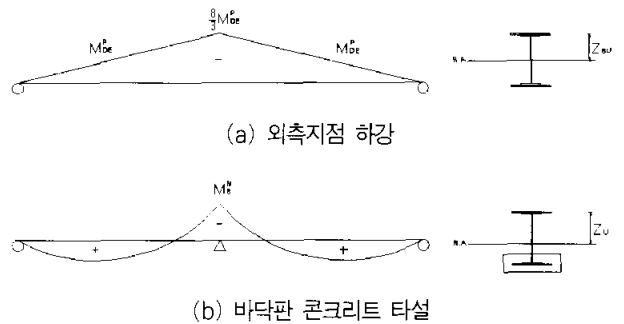


그림 15. 내측지점부 프리플렉스 거더의 강재 상단에 발생하는 모멘트 및 저항단면

외측지점의 하강 및 바닥판 콘크리트의 자중에 의해 내측지점부 프리플렉스 거더의 강재 상단에 발생하는 응력은 다음과 같다.

$$f_{SU} = \frac{1}{Z_{SU}} \left(\frac{8}{3} M_{DE}^P \right) + \frac{M_S^N}{Z_U} \leq 0.8 f_y \quad (10)$$

여기서

M_S^N : 바닥판 콘크리트 자중에 의한 지점부 모멘트

Z_{SU} : 지점부 강재 거더 단면에서 강재 거더 상연의 단면계수

Z_U : 프리플렉스 거더 단면에서 강재 강연의 단면계수

f_y : 강재 거더의 항복강도

외측지점의 하강시 내측지점부 강재 거더의 허용인장응력을 고려한 외측지점 하강에 의한 모멘트는 다음과 같이 계산되며,

$$M_{DE}^P = \frac{3}{8} \left\{ Z_{SU} (0.8 f_y) - \frac{Z_{SU}}{Z_U} M_S^N \right\} \quad (11)$$

식 (8)에서 산출한 모멘트와 비교, 작은 값이 선정되어야 한다.

상기에서 산출한 식 (1)부터 식 (11)까지의 외측지점 하강 및 내측지점 하강에 필요한 모멘트는 2경간 연속교는 물론 3경간 연속교에도 동일하게 적용할 수 있다. 그러나 2경간 연속교와 3경간 연속교에서 산출된 외측지점 및 내측지점 하강에 필요한 모멘트로 인한 처짐량은 각각의 교량 연장이 다르기 때문에 이를 아래와 같이 각각 산출하여야 한다.

2.4.3 지점 하강량 산정

1) 2경간 연속 프리플렉스 거더교

외측지점 및 내측지점 하강에 필요한 모멘트를 유발시키기 위한 내측지점의 하강력 P_{DI}^N 와 외측지점의 하강력 P_{DE}^P 및 산정된 하강력으로 인한 하강량 δ_{DI}^N 및 δ_{DE}^P 는 각각 다음 식 (12), 식 (13), 식 (14) 및 식 (15)과 같다.

$$P_{DI}^N = \frac{2M_{DI}^N}{L} \quad (12)$$

$$P_{DE}^P = \frac{2}{L} \left(\frac{8}{3} M_{DE}^P \right) = \frac{16M_{DE}^P}{3L} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta_{DI}^N &= \frac{P_{DI}^N (2L)^3}{48EI_c} \\ &= \frac{L^3}{6EI_c} \left(\frac{2M_{DI}^N}{L} \right) = \frac{L^2}{3EI_c} (M_{DI}^N) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta_{DE}^P &= \frac{P_{DE}^P (2L)^3}{48EI_b} \\ &= \frac{L^3}{6EI_b} \left(\frac{16M_{DE}^P}{3L} \right) = \frac{8L^2}{9EI_b} (M_{DE}^P) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

δ_{DI}^N : 내측지점 하강량

δ_{DE}^P : 외측지점 하강량

L : 1개 지간의 길이

E : 단면의 탄성계수

I_c : 합성단면의 단면2차 모멘트

I_b : 프리플렉스 거더의 단면2차 모멘트

2) 3경간 연속 프리플렉스 거더교

3경간 연속 프리플렉스 거더교에서 하강에 필요한 모멘트를 유발시키기 위한 내측지점의 하강력 P_{DI}^N 와 외측지점의 하강력 P_{DE}^P 은 각각 다음과 같으며,

$$P_{DI}^N = \frac{M_{DI}^N}{L} \quad (16)$$

$$P_{DE}^P = \frac{1}{L} \left(\frac{8}{3} M_{DE}^P \right) = \frac{8M_{DE}^P}{3L} \quad (17)$$

산정된 하강력으로 인한 하강량 δ_{DI}^N 및 δ_{DE}^P 는 각각 다음과 같다.

$$\delta_{DI}^N = \frac{5P_{DI}^N (3L)^3}{162EI_c} \quad (14)$$

$$= \frac{5L^3}{6EI_c} \left(\frac{M_{DI}^N}{L} \right) = \frac{5L^2}{6EI_c} (M_{DI}^N)$$

$$\begin{aligned} \delta_{DE}^P &= \frac{5P_{DE}^P (3L)^3}{162EI_b} \\ &= \frac{5L^3}{6EI_b} \left(\frac{8M_{DE}^P}{3L} \right) = \frac{20L^2}{9EI_b} (M_{DE}^P) \end{aligned} \quad (15)$$

2.4.4 설계식에 의한 단면 산정

앞에서 제시한 설계식은 연속 프리플렉스 거더교의 시공단계를 고려한 특별한 해석 프로그램의 사용 없이도 일반 설계자가 쉽게 단면을 산출할 수 있도록 한 것이다. 따라서 이 절에서는 제안된 설계식을 총 연장 60m와 교폭 10.44m의 2경간 연속 프리플렉스 거더교의 설계 단면을 산정하는 일련의 과정과 이로 인한 타당한 단면의 선택 요령을 제시하였다.

(1) 부재력 산출

적용될 교량의 연장과 폭을 이용하여 바닥판 콘크리트의 자중과 포장 등 2차 고정하중 및 활하중에 의한 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 산정하였다. 30m 2경간 연속교량에서 바닥판 콘크리트의 자중, 2차 고정하중, 활하중에 의해 발생하는 부재력은 표 4와 같다.

표 4. 외력에 의한 부재력 ($tf \cdot m$)

정모멘트	부재력	부모멘트	부재력
M_S^P	125.28	M_S^N	-215.44
M_A^P	23.64	M_A^N	-39.31
M_L^P	140.26	M_L^N	-141.77

(2) 설계 단면 가정

교량의 현황에 적당한 여러 가지 단면을 가정하고 이의 단면 특성을 산출하였다. 6가지 종류의 단면과 이의 단면특성을 표

5와 표 6에 나타내었으며 각 변수명은 그림 16에서 볼 수 있다. 가정한 단면의 탄성계수 E_s 는 $2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 사용된 콘크리트의 설계기준 압축강도 f_{ck} 는 400 kgf/cm^2 로 강재 거더와 콘크리트의 탄성계수비는 7.5이다. 사용 강재 거더는 SM570으로 이의 항복강도 f_y 는 $4,600 \text{ kgf/cm}^2$ 이다.

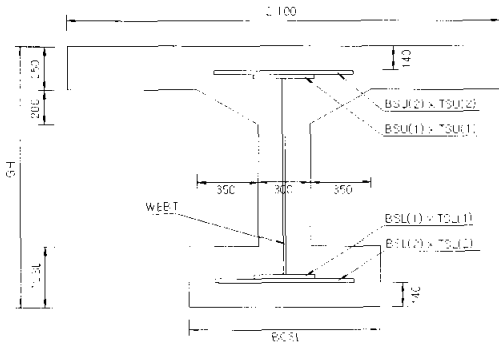


그림 16. 단면의 설계 변수(mm)

표 5. 가정 단면의 제원 (mm)

단면	1	2	3	4	5	6
GH	1,200	1,200	1,300	1,300	1,400	1,400
BSU(2)	600	600	600	600	500	500
TSU(2)	22	20	18	16	14	14
BSU(1)	300	300	300	300	300	300
TSU(1)	22	20	18	16	14	14
BSL(1)	300	300	300	300	300	300
TSL(1)	22	20	18	16	14	14
BSL(2)	600	600	600	600	500	500
TSL(2)	22	20	18	16	14	14
WEFT	15	15	15	15	15	15
BCSL	800	800	800	900	800	900
TCSL	350	350	300	300	300	300

표 6. 가정 단면의 단면특성값

단면	1	2	3
$A_s(\text{cm}^2)$	521	486	466
강재량(ton)	12.07	11.25	10.79
$A_c(\text{cm}^2)$	2,800	2,800	2,400
$Z_{SL}(\text{cm}^3)$	18,371	17,002	17,661
$Z_{SU}(\text{cm}^3)$	18,371	17,002	17,661
$Z_L(\text{cm}^3)$	30,190	28,912	31,325
$Z_U(\text{cm}^3)$	20,005	18,611	19,589
$I_b(\text{cm}^4)$	1,275,396	1,200,186	1,398,063
$Z_{CL}(\text{cm}^3)$	41,902	40,817	42,910
$Z_{CU}(\text{cm}^3)$	59,115	58,036	64,757
$I_c(\text{cm}^4)$	2,942,534	2,875,597	3,355,100

표 6. 가정 단면의 단면특성값 (계속)

단면	4	5	6
$A_s(\text{cm}^2)$	431	384	384
강재량(ton)	9.98	8.89	8.89
$A_c(\text{cm}^2)$	2,800	2,400	2,700
$Z_{SL}(\text{cm}^3)$	16,076	14,692	14,692
$Z_{SU}(\text{cm}^3)$	16,076	14,692	14,692
$Z_L(\text{cm}^3)$	31,628	30,582	32,574
$Z_U(\text{cm}^3)$	18,098	17,009	17,126
$I_b(\text{cm}^4)$	1,335,295	1,377,149	1,414,286
$Z_{CL}(\text{cm}^3)$	44,649	43,958	47,348
$Z_{CU}(\text{cm}^3)$	64,394	68,500	69,539
$I_c(\text{cm}^4)$	3,427,704	3,748,595	3,943,561

(3) 손실률 및 응력 범위 가정

압축력이 도입되는 하부플랜지와 바닥판 콘크리트에서 발생하는 크리프와 건조수축에 의한 선압축력의 손실률 및 최종 사용하중 상태에서 단면에 발생하는 인장응력의 범위를 구조물의 안전성을 고려하여 설계자의 의도에 따라 설정한다. 먼저 이의 가정으로서 바닥판 콘크리트와 하부플랜지 콘크리트에서의 선압축력 손실률을 0.35와 0.6을 사용하였다. 가정한 손실률 및 응력 범위를 표 7에 나타내었다.

표 7 가정된 손실률 및 응력 범위

α 1)	β 2)	f_{all}^{SL} 3) (kgf/cm^2)	f_{all}^U (kgf/cm^2)	f_{all}^L (kgf/cm^2)
0.35	0.60	3,312.0	15.0	15.0

- 1) 바닥판 콘크리트의 선압축력 손실률
- 2) 하부플랜지 콘크리트의 선압축력 손실률
- 3) $f_{all}^{SL} = 0.9 \times 0.8 f_y = 3,312 \text{ kgf/cm}^2$ (대한토목학회, 1996)

(4) 설계식의 적용

앞에서 산출된 부재력과 가정치 및 단면특성 모두를 제시한 설계식에 적용하여 필요한 모멘트와 하강량을 산출하여 표 8에 나타내었다.

표 8. 산출된 부재력 및 하강량

단면	1	2	3	4	5	6
$M_{DI}^N (1)$ ($tf \cdot m$)	174.72	176.58	164.95	165.58	158.47	156.67
$M_{DI}^N (2)$ ($tf \cdot m$)	409.80	411.44	409.04	419.57	422.34	432.04
M_{DI}^N ($tf \cdot m$)	174.72	176.58	164.95	165.58	158.47	156.67
M_{PF} ($tf \cdot m$)	608.45	563.11	584.93	532.44	486.60	486.60
M_B ($tf \cdot m$)	99.08	96.62	86.29	92.77	80.54	87.24
f_R (kgf/cm^2)	-225.0	-215.1	-212.2	-185.4	-177.0	-163.5
M_G ($tf \cdot m$)	21.56	21.02	18.78	20.19	17.52	18.98
$M_{DE}^P (1)$ ($tf \cdot m$)	-74.84	-90.60	-74.59	-94.51	-101.75	-101.45
$M_{DE}^P (2)$ ($tf \cdot m$)	-179.33	-160.82	-170.88	-150.09	-132.96	-133.44
M_{DE}^P ($tf \cdot m$)	-74.84	-90.60	-74.59	-94.52	-101.75	-101.45
$\delta_{DI}^N (cm)$	-8.3	-8.6	-6.9	-6.7	-5.9	-5.5
$\delta_{DE}^P (cm)$	-21.6	-27.8	-19.7	-26.1	-27.2	-26.4

앞에서 표 8은 6가지 종류의 단면 중 중립축으로부터 바닥판 콘크리트 상단까지의 단면계수와 단면이차모멘트가 가장 작은 "단면2"가 내측지점의 하강량을 가장 많이 필요로 함을 보여주고 있다. 또한 하부플랜지 콘크리트에 추가의 압축력을 도입하기 위해 외측지점의 하강량을 비교적 크게 필요로 하는 단면은 "단면2"와 "단면5" 및 "단면6"을 들 수 있다. 이 중 "단면5"와 "단면6"은 "단면2"에 비해 프리플렉스 거더의 단면이차모멘트가 크에도 불구하고 외측지점의 하강량이 큰 것은 강제 거더의 단면이차모멘트가 작아 프리플렉스 하중에 의한 초기 압축력이 "단면2"에 비해서 약 20% 적게 도입되었기 때문이다.

"단면1"의 경우 외측지점 및 내측지점의 하강량이 비교적 다른 단면에 비해 적당하다고 볼 수 있으나 선압축력이 릴리즈시의 허용압축응력($0.6f_{ci}=0.6 \times 0.9 \times 400 = 216.0 kgf/cm^2$) (대한토목학회, 1996)을 초과한다. 이는 하부플랜지 콘크리트 단면에 비해 강제 거더의 단면이 커 프리플렉스 하중이 크게 작용하기 때문이며, 이로 인해 프리플렉스 하중을 적게 작용시키는 것은 단면의 효율적인 사용방법이 아닌 비경제적인 단면 선택이다. 최종 단면의 선택은 교량의 형하공간이 문제가 되는 경우는 형고 1.2m의 "단면2"를 선택하거나 그렇지 않을 경우는 "단면5"를 선택해 강제량과 콘크리트량을 절감하는 것이 합리적인

단면선택이다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존 시공법에서의 내측지점 상승시의 번거로움과 잔류상승량 문제로 인한 시공상의 문제점을 개선할 수 있는 새로운 프리플렉스 거더교의 연속화 시공법과 이의 단면을 쉽게 설계할 수 있는 간략화된 설계식을 제시하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 내측지점을 상승 및 하강시키는 기존의 연속화 방법은 내측지점의 상승시 다수의 주형을 미소량씩 상승시켜야 함으로 장기간의 작업시간과 작업자의 불편함 등을 발생시키는데 반해 본 연구의 시공법은 외측지점 및 내측지점을 모두 하강만시키는 공정으로 개선시킴으로써 상기의 문제점을 종식시켰다.
- (2) 내측지점을 상승 및 하강시키는 기존의 연속화 방법은 상승량과 하강량의 차이로 인한 교량 종곡선의 굴곡문제에 의하여 2경간 연속교의 경우는 3회, 3경간의 경우는 6회의 상승·하강을 실시하여야 하는데 반해 본 연구의 개선된 시공법은 외측지점 및 내측지점을 모두 하강만시키는 공정으로 개선시킴으로써 상기의 문제점을 종식시켰다.
- (3) 내측지점을 상승 및 하강시키는 기존의 연속화 방법은 바닥판 콘크리트의 2차 부분 타설로 시공 공기의 장기화를 유발하였으나 본 연구의 개선된 시공법은 외측지점의 하강 후 바닥판 콘크리트를 1회 한꺼번에 타설함으로써 시공 공기의 단축을 꾀할 수 있다.
- (4) 프리플렉스 거더교는 여러 단계의 복잡한 시공 공정을 거쳐 이루어지는 관계로 특정화된 설계 프로그램만을 이용하여 일부 설계자만이 단면 결정을 하여 왔으나 본 연구에서 제시한 간략화된 설계식을 이용하면 일반 설계자 모두 손쉽게 연속 프리플렉스 거더교의 단면을 추정할 수 있다.
- (5) 본 연구에서는 선압축력에 대한 크리프 및 건조수축으로 인한 손실률을 참고문헌(박국동, 2002)을 이용하여 임의로 가정하였지만 프리플렉스 거더의 선압축력의 손실률은 좀더 세밀한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

구민세(1993) 연속보 구조용 P.S. 합성보와 이를 이용한 P.S. 연속합성보 구조물의 시공법, 대한토목학회 학술발

- 표회 개요집(1), pp.71-74.
- 구민세, 이재혁(1995) 2경간 연속 P.S 연속합성보 교량의 설계에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제7권 제4호, pp. 203-210.
- 구민세, 신현섭(1996) 시공단계를 고려한 2경간 연속 P.S 연속합성보 교량의 최적설계에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제16권 제1-3호, pp.305-315.
- 구민세(1998) 지점 상승·하강 공정을 이용한 단경간 및 연속 합성형 교량의 시공법, 인하대학교 산업과학 기술연구소.
- 구민세, 장성수, 정진일(1998) 2경간 연속 Preflex 합성형교의 최적설계에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제10권 제1호, pp.125-135.
- 구민세, 박영제, 김필식(2001) 지점 재 상승·하강에 의한 3 경간 연속 합성형의 프리스트레싱 효과에 관한 연구, 한국 강구조학회 논문집, 제13권 제4호, pp.433-441.
- 대한토목학회(1996) 도로교표준시방서, 건설교통부
- 대한토목학회(1996) 프리플렉스 합성형 표준시방서 및 동해 설(안)
- 박국동(2002) 장기변형에 따른 프리플렉스 합성형교의 거동, 석사학위논문, 인하대학교
- 한국도로공사(2001) 도로설계요령(3), 한국도로교통협회
- 國土開發技術研究センタ(1997) プレビーム合成げた橋 設計施工指針.
- プレビーム振興會(1997) プレビーム合成げた橋 設計・製作・施工要領書.
- Dobruszkes, A.(1981) Manual for Elastic design of Preflex Beam.
- Watanabe, H. and Maeda, Y.(1984) Application of Preflexed Composite Beams to Continuous Bridges., Univ. of Washington Seattle, Washington, pp.101-109.
- (접수일자 : 2004. 11. 01 / 심사일 2004. 11. 23 / 심사완료일 2005. 3. 18)