

프리트스레스를 단계적으로 도입하는 PSC I형 거더의 설계에 관한 연구

A Study on the Design Method for PSC I Girders
with additional Prestress

한만엽* 김양현** 진경석***
Han, Man-Yup Kim, Yang-Hyun Jin, Kyung-Suk

ABSTRACT

It is required efficient section shape like bulb-tee girders with high strength concrete to construct long span bridges economically. However, the typical design method for PSC I-girders include bulb-tees, the concrete girder prestressed only one time at same time.

But in this paper, new design method prestress increases as each load-stress stage. The incrementally prestressed concrete(IPC) girders can reduce the required area of girder section and extend span length by additional prestress.

So it is able to construct long span bridges economically by using IPC girders.

1. 서론

PSC I형 거더를 이용한 교량의 설계 및 시공이 간편하며 유지보수비용 또한 적절하여 시공성 및 경제성을 두루 갖춘 교량의 상부구조에 널리 채택되고 있다. 그러나 최근 급증하는 교통량에 대응하는 장경간 교량에 대하여, 재래식 PSC I형 거더는 부재의 치수 제약 때문에 국내에서는 경간 30m 이하의 단순교에만 채택되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 PSC I형 거더의 설계법을 개선하여 설계경간을 증가시키고 단면 높이를 감소시켜, 장경간 교량을 경제적으로 건설할 수 있는 방안에 대하여 살펴보았다.

2. 기존 PSC I형 거더와 벌브티 거더의 특징

1950년대 중반에 교량의 주형으로 개발된 PSC 거더의 초기 형상은 그림 1에서 나타난 것과 같이 상부가 하부보다 약간 작은 I형 단면을 지녔다. 당시에는 고강도 콘크리트를 생산하기 어려웠으므로 긴상재가 배치되는 하부플랜지의 면적이 상부보다 더 커야만 했다.

* 정회원, 아주대학교 토목공학과 부교수
** (주)정석엔지니어링 SOC 사업부
*** 정회원, 아주대학교 대학원 토목공학과 석사과정

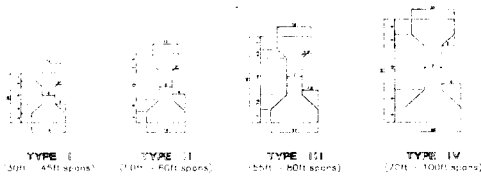


그림 1 AASHTO 거더의 초기형상



그림 2 발전된 거더형상

재료의 강도가 향상됨에 따라 휨응력에 효율적으로 저항할 수 있는 형상으로 단면이 개선되었으며, 특히 1980년대 이후 현재까지도 개발되어지고 있는 변보타 거더의 경우 하중에 의한 휨응력과 이에 저항하는 프리스트레스에 대하여 최적의 효율을 가지도록 설계되어지고 있다. 그림 2 에서 살펴보면, AASHTO 거더의 후기단면인 Type V는 상부플랜지의 폭이 하부플랜지보다 넓고, 하부플랜지의 단면적을 증가시켜 더 많은 긴장재를 수용할 수 있도록 하였다. PCI BT 거더는 단순교에 적합한 프리텐션 부재가 되도록 날렵한 단면을 지닌다. 최근에 개발된 NEBT 거더는 단순교와 연속교에 모두 적용 가능하며 프리텐션 긴장재와 포스트텐션 쉬스를 모두 수용할 수 있도록 하부플랜지가 PCI BT 거더에 비해 더욱 두툼해진 형상으로 발전되었다.

3. 합성형교의 설계방법 개선

PSC I형 거더의 기존 설계방법에 대한 취약점을 극복하기 위하여 각 시공 단계별, 즉 마다관 콘크리트의 합성 유무에 따라 프리스트레스를 나누어 도입하는 방안을 제시하였다.

3.1. 비합성단면

다음 그림 3 에서는 비합성단면의 시공 단계별 응력 상태를 나타내었다.

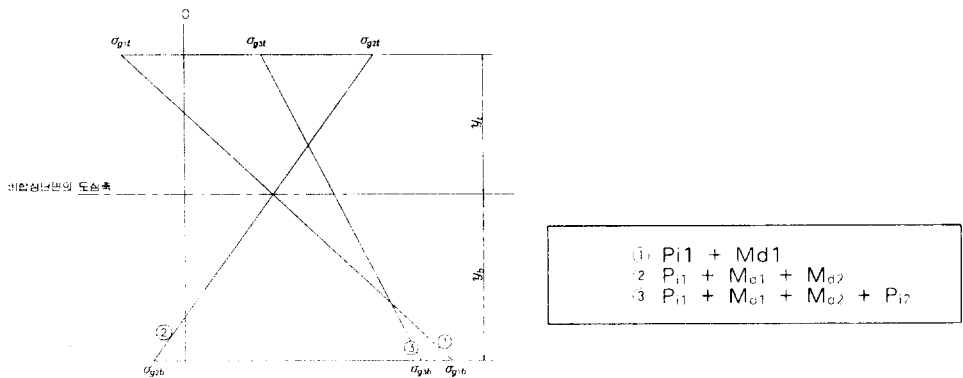


그림 3 개선된 설계법에 의한 비합성단면의 하중-응력 분포도

3.1.1. 1차 긴장력 도입

직선 ①은 처음 프리스트레스를 도입하는 단계의 응력 분포를 나타낸 것이다. 이 단계에서는 부재의 자중에 의한 휨응력이 존재하므로, 휨응력과 프리스트레스는 합성된다. 또한 거더 상하선의 응력 σ_{gt} 및 하

응력 σ_{01} 은 허용응력 설계 개념에 의한 세례식 방법과 동일하게 계산할 수 있다. 계산된 응력은 각각 전장력 도입을 콘크리트의 허용 인장응력 σ_{ti} 와 허용 압축응력 σ_{ci} 사이의 값이어야 한다. 이 때 단면의 높이를 적절히 낮추면 전 단면을 압축에 대하여 유효하도록 설계할 수 있다.

3.1.2. 바닥판 타설 직후

적설 2와 같이 개선된 설계법에 의한 바닥판 콘크리트 타설 직후 단면의 응력 분포 양상이다. 단면의 높이를 낮추면 편심거리와 도심거리가 짧아져 거더의 상하연에서 바닥판 하중에 의한 응력의 변화가 매우 커진다.

바닥판 콘크리트는 타설 직후이므로 아직 구조적인 거동을 하지 못하고 단지 하중으로만 작용하게 된다. 결국 이 단계의 응력은 가. 에서 구한 σ_{01} 에 바닥판 콘크리트의 사하중모멘트 M_{0b} 에 의한 휨응력을 더한 값이다.

3.1.3. 추가프리스트레스 도입

적설 2와 같이 개선된 설계법에서는 바닥판 콘크리트 타설만으로도 이미 거더의 상연 응력이 콘크리트의 허용압축응력에 접근하고 있다. 이 상태에서는 거더가 더 이상 하중을 받을 수 없으므로, 긴장력을 추가로 도입하여 거더 상연의 압축응력을 감소시켜야 한다. 적설 3은 계산된 단면의 응력 분포를 나타낸 것이다. 2차 긴장력에 의한 프리스트레스로 인하여 거더의 상연 및 하연 모두 허용응력에 대한 여유를 확보할 수 있으므로 교면사하중 및 활하중에 의한 휨응력에 지향할 수 있다.

3.2. 합성단면

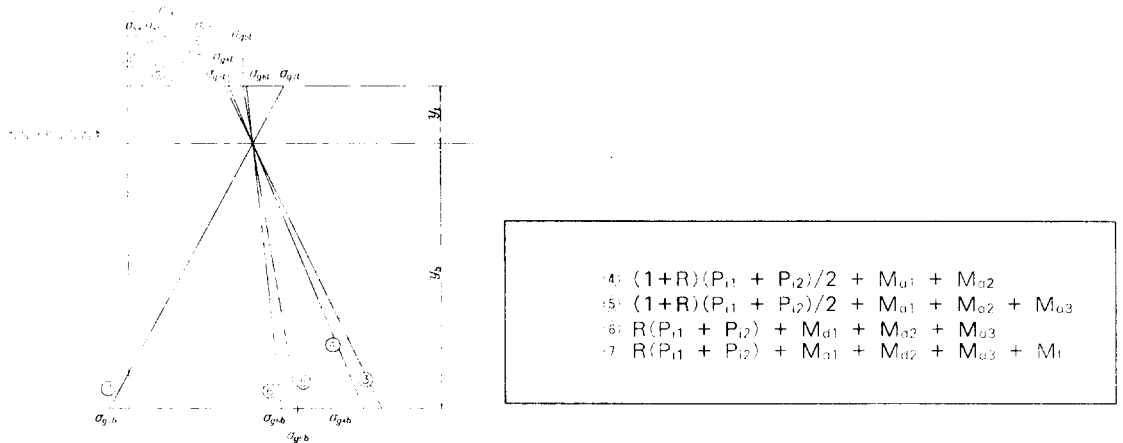


그림 4 개선된 설계법에 의한 합성단면의 하중-응력 분포도

3.2.1. 시공 도중의 긴장력 손실

긴장력의 장기손실 중 약 50% 정도가 4주 이내, 바닥판 콘크리트가 굳는 동안의 시간에 일어난다. 총 장기손실에 대한 긴장력의 유효율을 R 이라 하면, 2회에 걸친 긴장력의 잔류량은 $(1+R)(P_{11} + P_{12})/2$ 이 될 것이다. 여기서 1차 및 2차 긴장력 사이에는 손실에 관한 시간적 차이는 없는 것으로 본다. 그러므로, 거더의 응력은 그림 4의 직선 4와 같이 분포하게 된다. 이 때부터 굳은 후의 바닥판 콘크리트에 의해 거더는 합성단면으로 거동하며 도심축, 단면계수 등의 설계변수도 합성단면에 대한 설계변수를 사용한다.

3.2.2. 교면사하중

직선 ④와 같은 단계에서 포장, 연석, 방호벽 등과 같은 교면사하중에 의한 휨모멘트 M_{di} 으로 인하여 발생하는 휨응력이 합성되면 합성단면의 응력 분포는 직선 ⑤와 같다.

3.2.3. 사용단계 직선

교량 시공이 완료된 후 활하중이 재하되기 직전에 긴장력의 시간적 손실이 모두 완료된 것으로 보면, 긴장력의 최종 손실로 인하여 거더 하연의 압축응력은 약간 감소하며 거더 상연의 압축응력은 약간 증가하게 될 것이다. 이 상태의 응력 분포는 직선 ⑥과 같다.

3.2.4. 활하중 재하되는 사용단계

중격을 포함한 전 설계활하중이 재하되는 단계에서는, 직선 ⑦에서 알 수 있는 것처럼 이미 충분한 프리스트레스가 도입되었으므로 초과하중이 재하되어도 부재가 인장파괴를 일으키지는 않는다. 결국 활하중 재하 단계의 응력을 검토해 보면 부재가 과보강으로 설계되었음을 알 수 있다. 결과적으로, 교량의 사용단계에서 초과하중이 재하되지 않는 한 부재 중앙 단면 응력은 직선 ⑥과 직선 ⑦ 범위 내에 존재한다.

이상 설명한 개선된 설계법을 요약하면, 우선 작은 형고를 지나는 거더에 1차 긴장력을 도입한다. 1차 긴장력에 의한 프리스트레스는 거더 및 바닥판의 자중에 의한 휨모멘트만을 지지하게 되므로, 부재의 단면 높이를 낮출 수 있으므로 사하중을 크게 감소시킬 수 있다. 바닥판 타설 직후 가해지는 2차 긴장력은 교면사하중 및 활하중 모멘트에 저항할 수 있는 프리스트레스를 도입하는데 기여하게 된다. 결국 프리스트레스를 한꺼번에 도입하지 않고, 각 시공 단계별로 하중-응력 관계에 대하여 적절한 만큼의 프리스트레스를 도입하여 단면의 높이를 줄일 수 있도록 하는 것이 개선된 설계방법의 기본 개념이다.

4. 개선된 설계법의 적용 결과

4.1 거더의 단면 선정

거더의 단면 형상은 해외의 벌브티 설계 경향을 참고하여 상부플랜지폭 120cm, 하부플랜지폭 90cm, 복부폭 19cm로 정하였다. 거더의 총 높이는 설계지간, 교량의 등급, 재료의 강도, 거더 간격 등의 설계조건 변화에 따라 결정되는 변수이다. 기타 설계변수들은 국내 시방규정에 적합하도록 설정하였다. 그림 5 는 지간 중앙부의 단면 형상을 나타내었다.

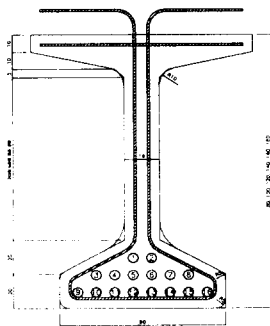


그림 5 중앙부 단면

전단플랜지 밑에 두께	5.0cm
전단플랜지의 최대 치폭	1.5cm
웨스트의 외경	6.0cm
웨스트의 내경	5.8cm
웨스트 중심간 수평간격	10.0cm
웨스트 중심간 수직간격	10.0cm

표 1 비교를 위한 설계 조건

설계기준강도	500kg/cm ²
긴장력 도입시 강도	350kg/cm ²
긴장재의 재원	0.5"(12.7mm) 저탄력세이션강
설계활하중	HS20 (=DB18)

4.2 외국 벌브티 거더와의 비교

비교를 위한 설계 조건은 표 1 과 같으며, 거더의 성능을 비교하기 위하여 각각 비슷한 단면 높이를 지닌 거더를 교량의 휨부재로 채택했을 때 적용 가능한 설계지간을 검토하였다. 단면의 높이 1.4m 와 1.8cm로 하여 각 부재의 최대 경간 길이를 그림 6 과 그림 7 에 나타내었다.

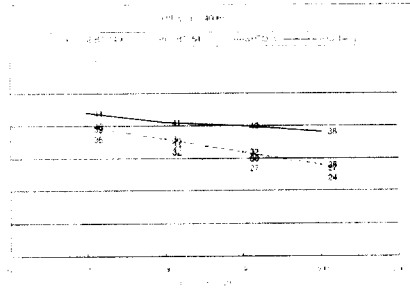


그림 6 단면높이 1.40m 비교

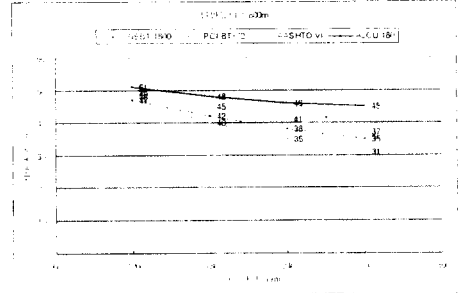


그림 7 단면높이 1.80m 비교

동일한 단면 높이를 지닌 거더들의 간격을 변화시킬 때 적용할 수 있는 최대 지간을 비교하여 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 개선된 설계법을 적용한 경우 2m 에서 17m 까지 경간을 더 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 개선된 설계법을 이용하면 거더를 장경간화할 수 있다. (2) 거더 간격이 넓어질수록 개선된 설계법에 의한 부재의 최대경간과 캐래식 설계법에 의한 최대경간의 격차가 벌어진다. 따라서 부재의 개수를 줄일 수 있어 경제적인 교량 시공을 기대할 수 있다.

4.3 거더의 간격에 따른 최대 경간

동일한 거더 콘크리트의 강도에 대해 거더의 간격별로 부재의 치수를 변화시킬 때 적용 가능한 최대 경간을 비교하였다. 거더의 높이를 80cm부터 180cm 까지 20cm 간격으로 증가시키면서 설계를 수행한 결과를 그림 8 과 그림 9 에 나타내었다.

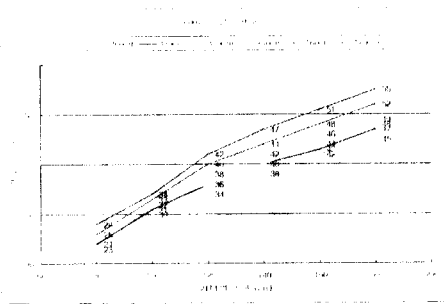


그림 8 각 거더 간격별 최대 경간 비교 (600강도)

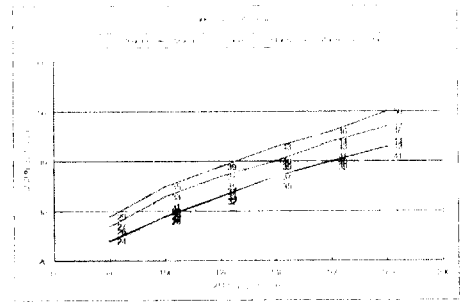


그림 9 각 거더 간격별 최대 경간 비교 (500강도)

거더의 간격이 좁은 경우에 더 긴 경간을 확보할 수 있는 것으로 나타났는데, 동일한 콘크리트의 강도에 대하여 거더의 치수가 낮은 경우보다 높은 경우에 최대경간의 차이는 더욱 크게 나타났다.

4.4 콘크리트의 강도에 따른 최대 경간

동일한 거더 간격에 대하여 거더 콘크리트의 강도별로 부재의 치수를 변화시킬 때 적용 가능한 최대 경간을 비교하였다. 설계조건은 4.3 과 같으며, 바닥판 콘크리트의 강도는 280kg/cm^2 으로 동일한 조건을 적용하였다. 거더 콘크리트의 강도를 500kg/cm^2 , 600kg/cm^2 , 700kg/cm^2 로 변화시키면서 설계를 수행한 결과를 그림 10 과 그림 11 에 나타내었다. 거더의 높이가 120cm 이상인 경우에는 모두 거더 콘크리트의 설계기준강도가 클수록 최대 경간도 큰 값을 나타낸다.

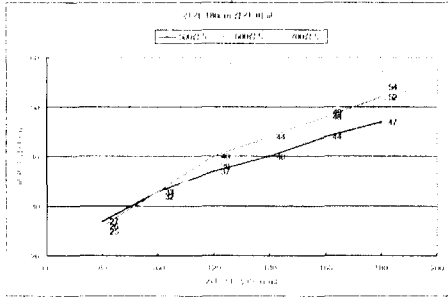


그림 10 콘크리트 강도별 최대경간 비교
(거더간격 180cm)

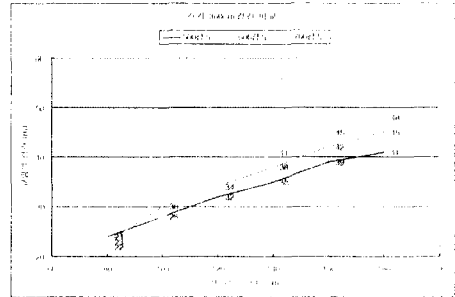


그림 11 콘크리트 강도별 최대경간 비교
(거더간격 360cm)

5. 결론

허용응력 설계개념에 토대를 둔 기존 설계 방법에서는 단 1회에 걸쳐 프리스트레스를 도입하여 전 설계 하중에 저항할 수 있도록 하였으나, 이러한 방법은 지간이 길어질수록 부재의 높이를 증가시켜야 한다는 단점이 있었다. 이러한 단점을 개선하기 위하여, 교량의 시공 단계별로 프리스트레스를 단계적으로 도입하여 소요 편심거리를 감소시켜 부재의 단면 치수를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. 이렇게 하여 장경간 교량의 설계에서 활하중보다 큰 비중을 차지하는 사하중의 영향을 감소시킬 수 있게 되었다.

이러한 방법을 응력 효율이 높은 단면에 적용하게 될 경우 거더의 한계지간을 증가시킬 수 있으며 거더의 간격을 넓히는 등 경제적으로 매우 유리한 횡부재를 설계할 수 있게 된다.

6. 참고문헌

1. Richard M. Barker and Jay A. Puckett, "Design of Highway Bridges", 1997.
2. Collins, M.P. and D. Mitchell, "Prestressed Concrete Structures", 1991.
3. Nawy, E. G., "Prestressed Concrete : A Fundamental Approach", 1989.
4. Alexander, K. B., Seraderian, R. L., & Culmo, M. P., "Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder", PCI Journal, Nov.-Dec. 1997.
5. Kathryn L. Geren, "Optimization of Precast/Pre-stressed Concrete Bridge I-Girders", 1992.
6. PCI Committee on Bridges, "State-of-the-Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced I-Girder Bridges", 1995
7. Francis J. Jacques, "Study of Long Span Pre-stressed Concrete Bridge Girder", PCI Journal, Mar-Apr 1991.