

이동거푸집에 의한 콘크리트 사장교의 보강형의 기계화 시공

Erection of Concrete Stiffening Girder Using Form Traveller



구희웅**
Hee-Woong Koo



조서경*
Seo-Kyung Cho



민병제***
Pyong-Je Min

1. 머리말

Edge girder형식의 콘크리트 사장교는 시공성과 경제성 측면에서 주목할 만한 장대교량 형식이다. 여수시 우회도로에 위치한 제2돌산대교는 국내 최초 Edge girder형식의 콘크리트 사장교로 시공 중이며(그림 1), 자중이 크기 때문에 시공 중 보강형에 불리한 응력이 유발될 가능성이 많아 기존 교량에서 이에 대한 대책을 고려해 왔다.

시공 중에는 부재를 지지하는 이동거푸집(F/T, form traveller), 크레인, 케이블 가설장비 등이 필요하며, 지속적으로 철근 배근과 케이블 긴장 작업이 이루어지므로 계획된 시공주기(erection cycle)에 의해 보강형을 시공하게 된다. 이러한 과정에서 주기적으로 변동되는 하중 조건에 의해 보강형에는 큰 응력이 발생할 수 있으며, 허용 응력을 초과하는 경우에 균열이 발생할 수도 있다. 가장 우려되는 것은, 양생 전 콘크리트를 이동거푸집에 의해 캔틸레버 상태로 지지하는 경우에, 타설지점 10m 정

도 후방의 세그먼트 상부에서 발생할 수 있는 부모멘트 균열이다. 비교적 보강형 중량이 작은 강합성형 사장교에서도 이러한 부모멘트 균열의 우려가 있어, 서해대교, 삼천포대교의 가설 크레인 계획 시, 이를 반영한 사례가 있다.

이동거푸집의 중량이나 형상, 지지 방법 등을 조정함으로써 이러한 균열의 발생을 억제할 수 있다. <그림 2>는 보강형 FCM시공 사진이며, 이동거푸집 후방의 보강형 부모멘트를 억제하기 위해 킹포스트(kingpost)케이블에 의한 인장력을 도입하여 보강형에 정모멘트를 가하고 있는 모습이다. 본 기사에서는 사장교 시공 중 부모멘트 저감을 위한 다양한 이동거푸집 계획에 대해 설명하고자 한다.

2. 콘크리트 사장교 보강형 시공 시 고려 사항

사장재는 보강형의 자중을 축력에 의해 직접적으로 지지하는 부재로서, 재료를 최소화하는 장점이 있는 반면에 사장재 정착단간 거리가 조금만 변해도 큰 장력 변화를 초래할 수 있다. 또한 사장교 중앙경간의 경우, 보강형은 매우 유연한 상태로 케이블에 의해 직접적으로 지지되므로, 장력 변화에 의해 중앙부의 처짐이 크게 발생할 수 있다. 이것은 콘크리트와 같이 크



그림 1. 제2돌산대교 조감도

* 정회원, 대림산업(주) 특수교량팀 과장
koohw@daelim.co.kr

** 대림산업(주) 특수교량팀 부장

*** 대림산업(주) 여수시우회도로 현장 소장



그림 2. FCM공법에 의한 콘크리트 사장교 시공(Siak교, 인도네시아)

리프나 건조 수축에 의한 길이 변화가 장시간에 걸쳐 발생하는 보강형의 경우 사장재의 장력결정시 불리한 점이 될 수 있다. 그러나 합성형교에 비해 콘크리트 사장교에서는 합성작용에 의해 발생하는 모멘트가 유발되지 않으며, 현장타설 시 캠버 등을 조정하여 시공 기간 발생하는 크리프와 건조 수축에 대해서 관리가 가능한 장점도 있다.

보강형 시공시, 타설 하중에 의해 이전의 굳은 콘크리트에 균열이 발생할 수 있고, 콘크리트 재료 특성 변동에 의한 형상관리 및 장기 거동 추정에 어려움이 있다. 시공을 위해 가설 단계별 변위 또는 캠버, 장력 변화 등을 매뉴얼 화하여 상황에 대처하도록 하고 있으며, 매 단계별 보강형의 레벨 측량, 장력 측정 결과를 피드백하여 형상관리를 한다. 이러한 시공매뉴얼 작성에서 고려할 사항으로는 부모멘트의 제한, 케이블 장력의 허용치, 교량 상판 응력, 시공 단계별 변위의 최소화, 장력 조정 단계 최소화, 주탑 좌우 장력차이 저감, 키세그먼트의 정확한 접합 등이 있다.

〈그림 3〉은 제2돌산대교의 보강형 시공 개념도를 나타내고 있으며, 일반적인 이동거푸집의 개념도가 추가로 제시되었다. 이동거푸집은 미리 설치된 파이프에 강봉을 설치하여 고정하며, 상판에 고정된 이동용 보위를 미끄러지며 이동한다. 원 설계에서 제시한 시공방안은 이동거푸집의 규모와 케이블 장력 조정을 고려하여 edge girder와 가로보·슬래브를 2단계로 나누어 시공하며, 거더가 양생되면, 전면에 사장재를 설치하고, 이후 가로보와 슬래브를 타설한 다음, 케이블 장력 조정, 다음 단계로의 F/T이동 및 설치의 순으로 시공이 이루어진다. 거더의 타설 하중과 이동거푸집의 자중에 의해 이동거푸집 후방 고정점에 반력이 생기고 이로 인해 보강형에 부모멘트가 유발된다. F/T

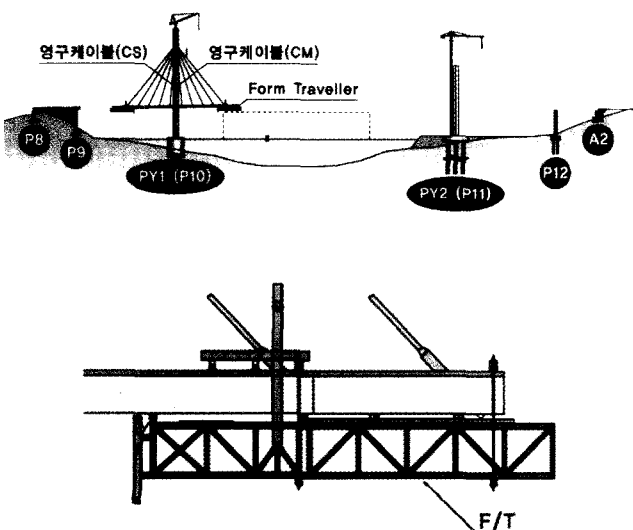


그림 3. FCM공법에 의한 제2돌산대교 보강형 시공

후방의 반반력을 다소라도 감소시키려면 F/T후반부 길이를 길게 하면 되며, 시공 중 거더와 F/T후방 지지부 사이에 인장이 발생하는 경우가 있으므로 강봉으로 긴결하여야 한다.

3. 가설 하중에 의한 부모멘트 저감 방안

시공 중 부모멘트 문제를 해결하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 보강형 세그먼트와 이동거푸집 중량의 배분을 조정하는 방법이다. 이것은 인도의 Yamuna교에서 사용한 방법으로서, 이동거푸집의 무게중심이 이전 세그의 케이블 위치보다 후방에 위치하기 때문에 이동거푸집 자중에 의한 부모멘트 영향이 작다. 이와 같은 중량 배분은 〈그림 4〉에서 보는 바와 같이, 종방향 거더는 이동거푸집의 전면에서 타설하고 가로보 및 슬래브는 후방에서 타설하기 때문에 가능하다.

둘째는 〈그림 5〉와 같이, 이동거푸집 전면에 사장재를 매달아 캔틸레버 거동이 발생하지 않도록 하는 것이다. 드물게 가설용 케이블을 이동거푸집 전면에 매다는 경우도 있으나, 보통의 경우, 영구 사장재를 임시로 이동거푸집에 정착시킨 다음, 콘크리트가 경화되면 케이블 장력을 전이시키는 방법을 사용한다.

영구 사장재를 임시로 정착시키는 방법에는 이동거푸집에 임

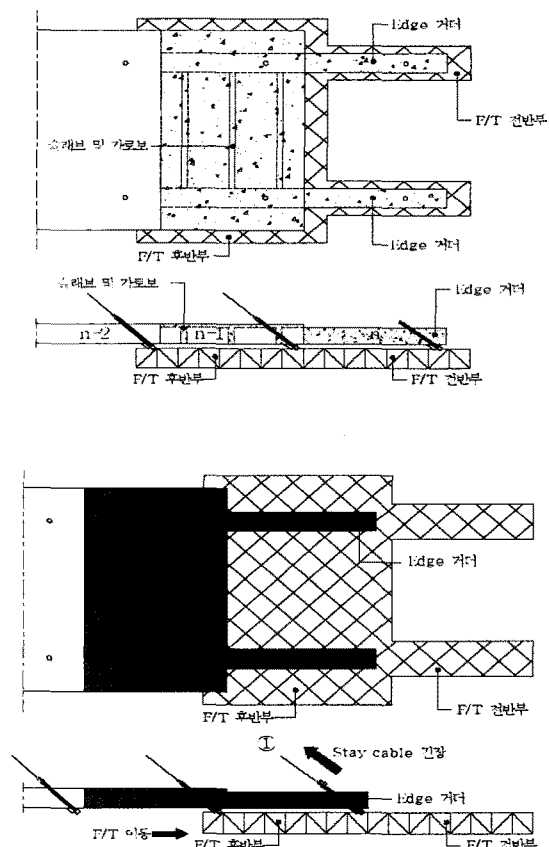


그림 4. 인도 Yamuna교의 이동거푸집 사례

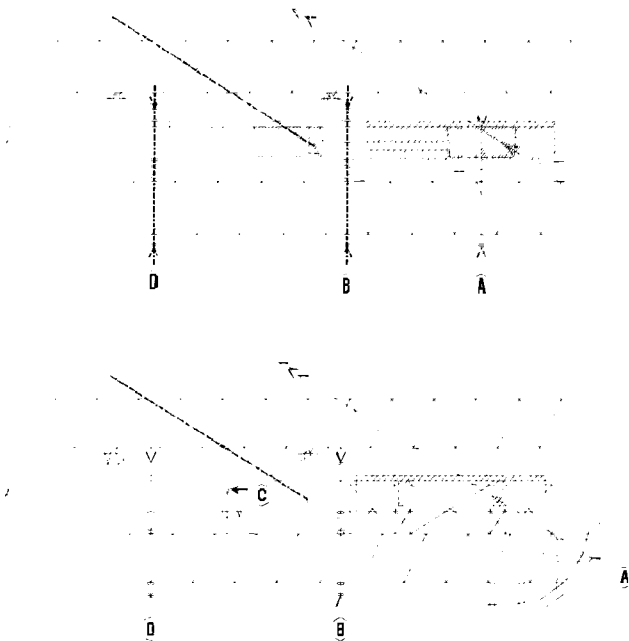


그림 5. 이동거푸집 전면에 사장재를 설치하는 방법

시 정착구를 두는 방법과, PC 정착 블록을 이동거푸집에 볼트로 고정하는 방법이 있다. 두 방법 모두 크기의 차이는 있지만, 케이블 정착부는 PC로 제작하는 경우가 일반적이다. 앵커블록의 크기에 따라, 케이블에 의해 도입되는 보강형 방향의 축력을 별도의 스트럿이나 이동거푸집을 통해 이전 세그먼트에 전달하는 방법이 다양하게 고안되고 있다. 사장재별 설치 각도가 다르므로 이동거푸집에 임시로 정착하는 각이 달라지는데, 이에 대한 대처 방안으로 이동거푸집의 정착구가 회전할 수 있게 하거나, 정착하는 위치에 따라 정착판의 각도가 달라지도록 프레임을 설치하는 방법 등이 있다. <그림 6>은 앵커헤드의 나사산에 너트로 연결하는 임시 정착장치를 보이고 있다. 사장재 정착부를 강봉으로 거푸집에 연결시키며, 정착부가 수평이동 및 회전이 가능하여 정착 위치에 순응할 수 있다. 케이블 정착부의 PC부재를 크게 하여 이동거푸집에 볼트로 고정시키면, 임시 정착구에 사장재를 정착할 필요가 없어 장력 조정 절차는 간단하지만, 사장재에 의해 발생하는 보강형 방향의 축력을 전달할 스트럿을 설치하여야 하고, 무거운 PC부재를 설치할 크레인의 비용 문제가 생긴다.

그밖에 PS텐던에 의해 부모멘트에 의한 균열을 제어할 것을 생각해 볼 수 있으나, 연속화 텐던은 사장교 보강형의 폐합 후, 중앙경간 등에서 인장력이 발생하지 않고 연속성이 확보되도록 하는 것이 그 목적이며, 텐던의 위치가 단면의 중앙부에 있기 때문에 효과가 크지 않으며, 매 세그 시공 단계마다 정착구나 커플러를 사용해야 하는 문제가 있다. 앞의 <그림 2>는 킹포스트(kingpost)를 이용하여 이동거푸집 후방에 정모멘트를

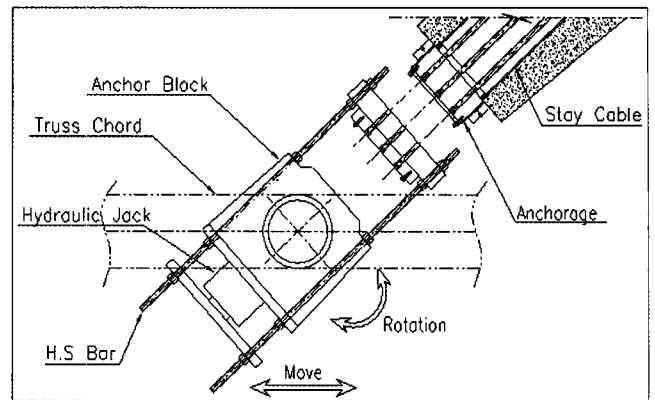


그림 6. 이동거푸집 사장재 임시 정착구 상세

추가함으로써 부모멘트를 저감하는 시공 사진인데, 이러한 시공법에서는 킹포스트(kingpost)나 강선을 정착할 정착구를 보강형 상판에 미리 설치하는 문제와 시공 중 정모멘트가 커지는 단계에서는 긴장력을 풀어야 하는 등의 운용상의 번거로움이 있다. 뿐만 아니라 보강형 상판의 킹포스트(kingpost)용 강선 정착구 부위는 부모멘트에 취약하므로 추가로 외부 긴장에 의한 프리스트레스를 도입하여야 한다.

인도 Yamuna교의 사례와 같이 이동 거푸집 무게중심 및 타설 위치 등을 조정하여 부모멘트 영향을 줄이는 방법은 효과적이지만, 이의 전제가 되는 사항은 인위적으로 사장재 장력을 조정하지 않아야 하고, 장력 조정이나 시공단계 최소화하여야 한다는 것이다. 이것은 공기나 시공성 때문이다. 이동거푸집 전면에 사장재를 매다는 방법에는, 앵커블록 크기에 따라 별도의 크레인 비용 및 제작장 문제가 생길 수 있으며, 사장재 장력을 경화된 콘크리트로 이전시키는 과정이 복잡할 수 있다. 이 경우, 케이블을 이동거푸집 전면에 매달기 때문에, 콘크리트 타설 하중이 커도 보강형에 미치는 영향이 작아서, 거더·가보보·슬래브를 한번에 타설할 수 있으므로 공기와 시공 관리 측면에서 상당히 유리할 수 있다.

4. 검토 대상 교량

여주시 관내 국도대체 우회도로 건설 공사 중, 돌산읍 우두리와 여주시 중화동을 연결하는 제2돌산대교를 시공 중이며, 본 구간의 국도 17호선 교통 혼잡을 해소하고, 전라남도 동남부의 물동량 수송기여, 지역 개발 촉진 및 국도 균형 발전을 도모하고자 계획되었다. 원안은 중앙경간 150m인 중로형 아치 트러스교로 계획되었으나 대안 설계 중, 현장타설 콘크리트($f_{ck} = 40$ MPa) 사장교로 변경되었으며, 여기서 채택한 단면 형식은, 200~400m정도의 중앙 경간을 가진 중소형 사장교로서는 경제적인 것으로 나타나 근래에 시공된 교량이 다수 있다.

콘크리트 박스형 사장교의 경우, 한강 상의 올림픽대교가 있으나 edge girder형식으로는 국내에서 최초로 시공된다. 박스형 상판의 경우 복잡한 형상 때문에 과다한 가설비용이 필요하여 개단면을 가진 상판을 채택할 필요가 있다. 이러한 목적으로 2면으로 배치된 사장재를 정착할 두 개의 종방향 뼈대를 배치하고, 여러 개의 횡방향 보로 연결하는 방안을 적용한 것이다. 중앙경간장은 230 m로서 대수심 구간을 피하여 기초를 설치하기 용이하며, 콘크리트의 특성상 시공비가 저렴하며 유지관리 측면에서 유리하다. <그림 7>에서 보는 바와 같이 보강형은 폭이 24 m 정도이며, 풍하중에 대한 저항성을 높이기 위해 외측에서 1.5 m, 중앙부에서는 1.7 m로 변하는 경사진 형상을 가지고 있다. 종방향 뼈대를 연결하는 4.5 m 간격의 가로보 위에 25 cm 두께의 콘크리트 슬래브를 두었다.

5. 저감 방안별 구조 해석 결과 분석

이동거푸집 형상에 따른 거푸집 중량, 타설 하중, 등에 의한 시공 단계별 보강형의 단면력은 상세한 시공단계해석을 통해 구하게 되지만, 여기서는 검토할 시공 상태를 다음과 같이 3가지로 간략하게 분류하고 이에 따른 보강형의 부모멘트를 산정해 보았다(그림 8).

- 일반적인 캔틸레버 시공방법을 적용한 이동거푸집(그림 3). 거더와 가로보·슬래브의 2단계 타설과정 중, 거더 타설 직후의 부모멘트가 가장 크다.
- Yamuna교에서 사용한 이동거푸집. 거더 타설 직후 가장 큰 부모멘트가 발생하지만, 이동거푸집 자체 무게중심이 이전 세그 내에 위치하여 부모멘트를 크게 유발하지 않는다.
- 이동거푸집의 전면에 케이블 설치(그림 6). 사장재 설치

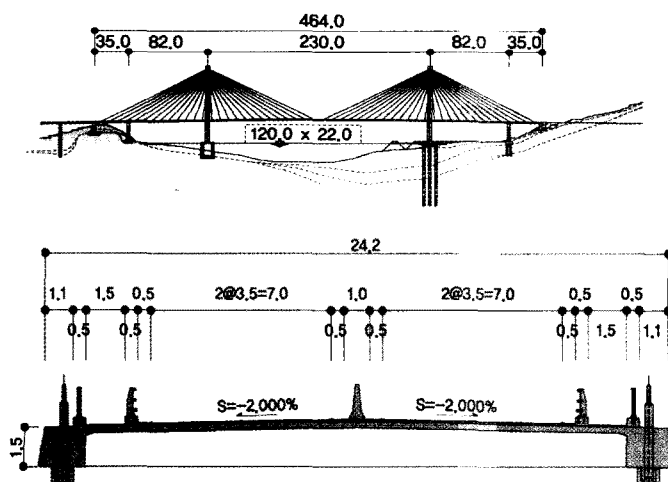
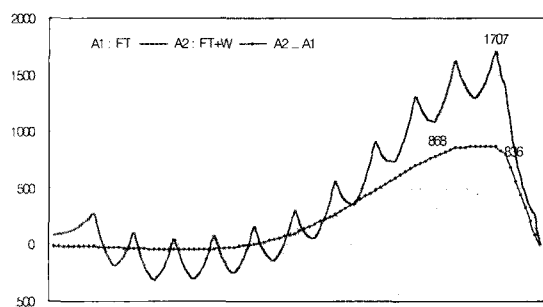
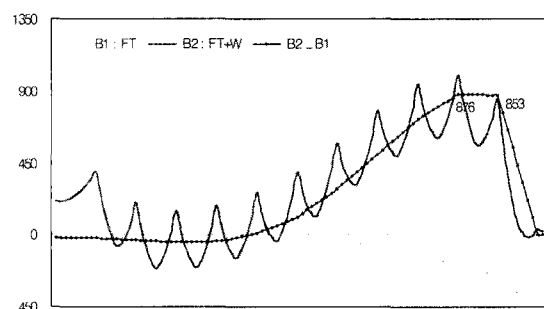


그림 7. 교량 제원(지간 구성, 보강형 단면도, 주탑)



(a) A의 경우

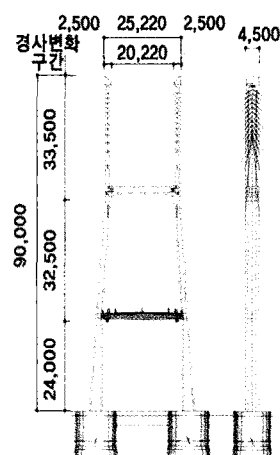


(b) B의 경우

그림 8. 이동거푸집(FT) 설치 직후, 콘크리트 거더 타설(W)시 보강형 모멘트(tf·m) 및 이들의 차이

직전에, 거푸집 중량에 의한 모멘트가 가장 크다. 이동거푸집 중량은 부대 장비 등을 고려하여 일반적인 경우보다 20%정도 증가된다고 가정한다.

제2돌산대교 보강형 세그먼트를 FCM공법에 의해 우측으로 연결해 나가는 과정에 대해 검토하였으며, A와 B의 경우에 대한 이동거푸집 설치 직후, 거더(13번째 세그먼트 시공 중) 콘크리트 타설 직후의 보강형 모멘트와 이들의 차이를 그림 8에 나



타내었다. 그래프에서, A)의 경우는 이동거푸집 자중과 거더 타설 하중에 의한 부모멘트가 조절되지 않고 있으며, 시공 중 균열 발생 우려가 크고 변위도 크게 발생하므로 시공관리 측면에서 불리하다. B)의 경우는, 타설 하중에 의한 부모멘트는 저감되지 않지만, 이동거푸집 자중에 의해서는 오히려 정모멘트가 발생하여 부모멘트가 상대적으로 작다. C)의 경우는 타설 하중에 의한 모멘트는 제어가 되지만, 이동거푸집에 의한 모멘트는 케이블을 설치하기 전까지는 파악할 수 없다. B)의 경우와 A)의 A1을 1.2배 한 C)의 경우는 부모멘트 크기가 비슷할 것으로 판단된다.

6. 부모멘트 저감 시공 예

위에서 해석한 결과에 의하면, 부모멘트를 발생시키는 하중인, 이동거푸집 자중과 콘크리트 타설 하중 중에서, 적어도 하나는 제어를 하여야만 이전 세그먼트의 부모멘트 균열을 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 위에서는 시공과정 중에서 위험할 것으로 판단되는 대표적인 상태에 대해서만 검토하였으며, 실제 시공 중에는 케이블 가설 장비, 타설 장비, 철근 조립, 단계별 케이블 장력 조정 문제 등의 연관된 문제들이 많이 있다. 결국은 가설 단계별 공정을 정의하고 이에 대한 시뮬레이션 해석을 통해 적합성을 판단해야 한다. 이를 위해 제2돌산대교의 보강형 가설을 위한 이동거푸집을 <그림 9>와 같은 형상으로 하여, 다음과 같은 9개의 단계로 한 세그먼트를 시공하는 것으로 가정한다. ① 이동거푸집 설치, ② 철근 배근, ③ 사장재 25% 장력 도입, ④ 보강형 50% 콘크리트 타설, ⑤ 장력 추가 도입, ⑥ 잔여 50% 콘크리트 타설, ⑦ 장력 50%까지 도입, ⑧ 양생 후 사장재의 이동거푸집 정착부 이완, ⑨ 전체 장력 도입. 이것은 해석을 위해 가설단계를 단순화한 것이며, 가설장비를 보강형에 고정하기 위한 강봉의 정착구 설치, 사장재 Guide Pipe 설치,

보강형 연속화 텐던 스위스 배치 등의 세부 공정이 추가된다. 9개의 단계로 가정한 시공 단계도 많아 보이지만, 장력조정은 3단계로 실시하며, 장력에 따른 보강형의 모멘트는 ①~②, ③, ④~⑦, ⑧~⑨의 4단계로 큰 차이를 보인다.

<그림 9>에서 보는 바와 같이 이동거푸집 각부의 중량 및 배치를 이전의 사례들을 기초로 정하였으며, 제2돌산대교 대안설계에서 가정한 값보다 20% 증가된 168 ton의 이동거푸집 중량에, 가이드 파이프 가설을 위한 회전 크레인의 중량 2.0 ton을 전면에 추가하였다. 이동거푸집은 앞의 <그림 3>과 같은 일반적인 경우에 비하여 지지점이 후방으로 이동되어 상향반력이 약간 감소하며, 케이블을 전면에 매달아 콘크리트 타설 시, 캔틸레버 거동을 최대한 억제하도록 하였다.

범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.7을 사용하였으며, 사장재는 대변위에 의한 장력변화를 고려할 수 있는 현수선 요소로 모델링되었다. 13번째 세그먼트를 시공하는 과정에 대한 것이며, ⑦번째 시공단계의 전체 타설 후 50%장력이 도입된 상태에 대한 모델링 및 부재모멘트를 <그림 10>에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이동거푸집은 별도의 보조소로 나타내고, 가설하중은 거푸집 상부에 재하하였으며, 사장재의 초기 장력을 매 단계별로 조정하여 각각 해석을 수행하였다.

위에서 제시한 시공 단계 중, ①~②, ③, ④~⑦, ⑧~⑨

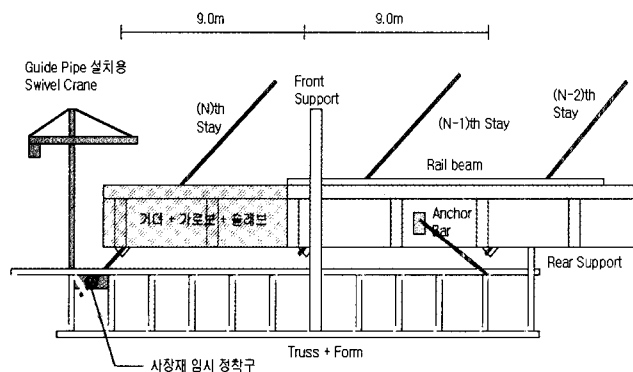


그림 9. 부모멘트 저감 방안 적용: 영구케이블을 임시로 이동거푸집 전면에 정착.

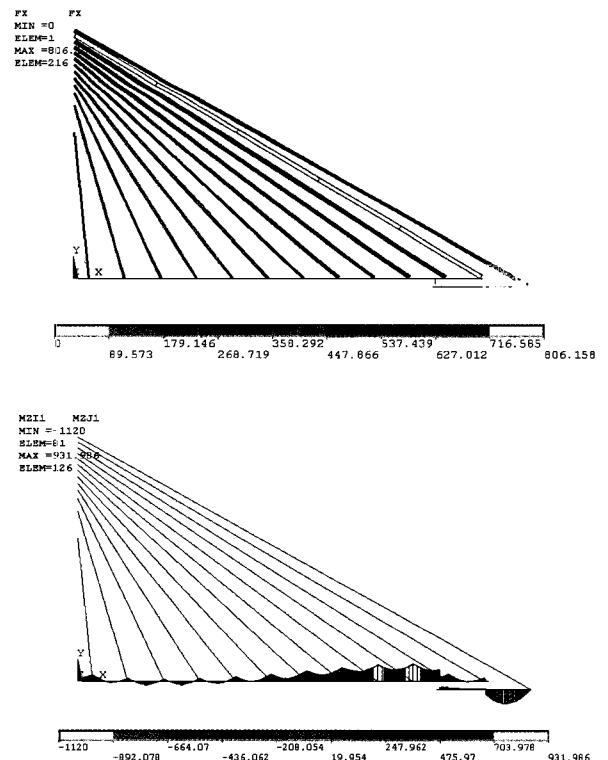


그림 10. 해석 모델(사장재 장력, 거푸집하중) 및 해석결과 모멘트(tf.m)

의 작업이 완료된 상태에 대해서 각각 해석을 수행하였으며, 단계별 보강형의 모멘트를 <그림 11>의 그래프에 나타내었다.

해석 결과에 의하면, 보강형 전체를 타설하고 전면의 사장재에 50% 장력을 도입한 상태에서 부모멘트가 가장 큰 것으로 나타나며, 5절에서 이동거푸집의 전면에 사장재를 설치하기 전에 가장 클 것으로 예상했던 것과는 약간 다른 결과를 보이고 있다. 이것은 이동거푸집 전면의 사장재 장력을 충분히 도입할 수 없는 여건에서 기인한 것으로, 만약 거더를 양생하여 사장재의 장력을 50% 이상 도입할 수 있다면 상황은 달라질 것이다. 여기서와 같이, 단계별로 장력을 조정하지만 한번에 보강형 콘크리트를 타설하는 경우라면, 이동거푸집의 부재력을 고려하여 충분한 장력을 도입할 수 없으므로 다소의 부모멘트는 발생한다. 여기서 제시한 시공과정의 장점은, 이동거푸집의 전면에 임시로 정착된 사장재의 장력을 증가시키면서 시공하므로, 보강형에 단계별로 유발될 수 있는 정·부모멘트를 효과적으로 제어할 수 있으며, 이동거푸집이 캔틸레버로서 거동하는 것이 아니라 전면이 사장재에 의해 지지되기 때문에 보강형을 두 단계로 나누어 타설하지 않아도 된다는 것이다. 이와 같은 이동거푸집 계획은 공기를 단축하는데 가장 효과적인 것으로 판단된다.

7. 맺음말

콘크리트 사장교는 값싸고 유지관리상 강점을 가진 재료 특성 때문에 중소형 사장교에 많이 적용되고 있으며, 보강형을 현장타설 콘크리트로 시공하면 대형크레인이 불필요하므로 육상의 계곡이나 협곡 등에서도 시공이 가능한 장점이 있다. 보강형은 시공 중 하중이 지배적이며, 이동거푸집의 안전과 효율성이 공사의 성패를 좌우한다고 할 수 있다. 위에서 제2돌산대교 보강형 시공을 위해, 여러 가지 이동거푸집의 특성을 고찰하고, 이것의 형상과 기능에 따라 발생할 수 있는 부모멘트 결과를 제시하였으며, 시공 예로써, 보강형 전면에 사장재를 매다는 경우에 대해 시공단계별 가정하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 제시한 저감 방안들은 보강형에 생기는 시공 중 부모멘트를 효과적으로 저감할 수 있으며, 영구사장재를 임시로 이동거푸집에 고정하는 방법에서는 보강거더와 바닥판을 일체로 타설함으로써 공기와 비용을 크게 절감할 수 있음을 알았다. 콘크리트 사장교 시공 시에는 보강형의 부모멘트를 저감할 수 있는 적극적인 조치가 필요하며, 이에 수반되는 시공 주기, 장비, 장력 조정 등의 문제를 종합적으로 검토하여 이동거푸집 계획을 수립해야 할 것으로 판단된다. ■

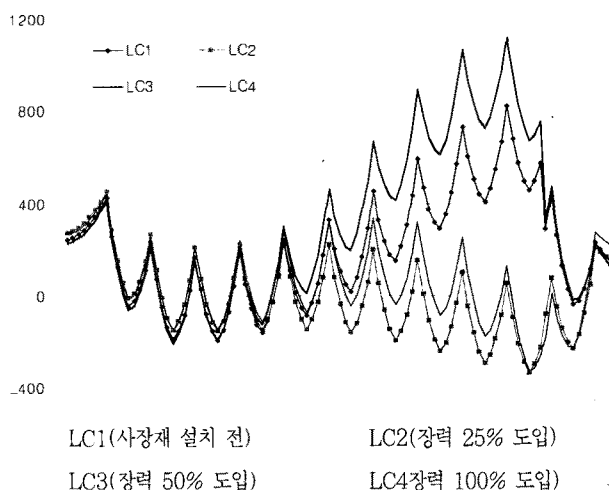


그림 11. FCM시공 단계별 모멘트(tf.m)

참고 문헌

1. 여수시관내 국도대체 우회도로(우두-중화)건설공사 구조계산서, 대림산업(주), 2005. 8.
2. 삼천포대교 시공단계해석 보고서, 대림산업(주) 창선-삼천포 교량 기술지원팀, 2000.
3. Chang, S. P., Cho, S. K., "Geometry Control for Composite Cable-Stayed Bridges", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1999, Vol. 3.
4. M. Virlogeux, T. Kretz, J. M. Lacombe, SETRA, Chalon Sur Saone Northern Bridge Project, A middle span stay cable bridge, AFPC, 1990.
5. M. Marchetti, B. Lecinq, Stay adjustment : from design perspective to on site practice, *Preceedings of IABSE conference*, 1999.
6. Han Dajian, Su Cheng, "Construction Control of the Yamen Cable-Stayed Bridge", South China Uni. of Technology, Research Report, 2002.
7. A. Bruer, H. Pircherx, H. Bokan, "Computer Based Optimising of the Tensioning of Cable-Stayed Bridges", *Preceedings of IABSE conference*, 1999.
8. H. S. Svensson, E. Jordet, "The Concrete Cable-stayed Hegeland Bridge in Norway", *Civil Engineering*, 1996, Vol. 114.
9. 박찬수, 김태홍, 임덕기, 이정환, 인도 야무나 콘크리트 사장교의 선형관리 시스템 개발 및 적용에 관한 연구(Form Traveler를 이용한 FCM공법), (사)대한토목학회 정기학술발표회, 2004.
10. J. R. Tao, D. J. Jang, M. Tang, "Construction of The My Thuan Bridge", *Preceedings of IABSE conference*, 2001.