

캔틸레버 공법(FCM)에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 시공

Construction of Prestressed Concrete Box Girder Bridges by Free Cantilever Method



변 중 규*

1. 개 요

프리스트레스트 콘크리트교량의 캔틸레버 시공법은 최초 독일을 시발로하여, 프랑스를 비롯한 많은 나라에서 지난 40여년간 발달되어 왔다. 한국에서는 1978년 원효대교 (1978-1981년) 를 효시로 상진대교 (1983-1985년), 청풍교 (1983-1985년) 및 운암교 (1984-1989년), 강동대교 (1989-1992년) 등이 본 공법에 의해 가설되었고, 현재도 시공중이거나 설계중인 교량이 수개소나 있다. 이는 P.S 콘크리트 교량의 장대화에 따른 새로운 시공법으로서 프리스트레스트 콘크리트의 장점을 충분히 응용한 성공적인 시공법이라 하겠다.

또한, 최근에는 프리캐스트 블럭을 이용한 시공법이 실용화되어서 공사비의 절감, 품질관리 향상 및 공기의 대폭적인 단축이 가능하게 되었다. 긴

장재로서는 최초 독일 Dywidag사로 부터의 기술 도입 관계상 PC 강봉을 사용하였으나, 현재는 국내에서 생산되고 있는 PS 강연선을 주로 사용하고 있으며, 교량의 형식도 초기에는 경간중앙에 힌지를 설치한 T-형 라멘교 형식이었으나 최근에는 설계 및 시공의 대부분이 연속교 형식으로 이루어지고 있다.

이러한 FCM 공법에 의한 교량 가설공법은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 지보공이 필요없으므로 형하공간의 제한 조건에 무관하게 작업이 가능하다. 예를 들면, 하천 및 해상의 주운, 도로교통 및 철도의 운행에 지장을 전혀 주지 않으며, 이러한 시공기법은 교각의 높이가 높으면 높을수록 적합한 공법이라 하겠다. 높은 교각의 시공 또한 슬라이딩폼 (Sliding Form) 을 사용함으로써 저렴한 공사비로 완성할 수 있다.

* 정회원, (주)유신설계공단이사, 토목구조기술사

둘째, 주형의 블럭수가 많은 대규모의 다경간 교량인 경우는 제작용장에서 블럭을 제작하여 보다 나은 품질을 얻을 수 있고, 작업의 단순화, 신속화를 기할수 있다. 또한 프리캐스트 블럭이 가설될 때는 건조수축이 상당히 진행된 상태로서 프리스트레스 도입시 콘크리트 강도가 균일하게 되는 이점이 있다.

셋째, 급속시공이 가능하다. 현장타설 캔틸레버 공법으로 1 블럭을 시공 하는데 보통 8-12일이 소요된다. 이 소요일수는 작업차 1 대당의 소요 일수로서 다경간의 장대교량에서는 교각을 중심으로 작업차가 2 대 설치되므로 타공법에 비해 공기 단축이 가능하다.

넷째, 동일 경간장에서 강교보다 공사비가 저렴한 것으로 판명되고 있다.

그러나 캔틸레버 시공법에 의한 프리스트레스 콘크리트 교량의 설계는 시공단계에 따라 구조계가 변화하므로 타 공법의 교량설계에 비해 많은 시간과 노력이 요구된다. 즉, 콘크리트의 건조수축 및 크리프의 영향, 긴장재의 리락세이션(Relaxation) 등을 고려한 슷음 조정 관리와, 주형 연결후의 각종 응력의 재분배 문제등이 그것이다. 따라서 시공중의 교량에서는 다음과 같은 사항에 유의해야 한다.

- 긴장재 배치용 쉬이스(Sheath)의 연속성
- 마찰손실의 정확한 평가
- 그라우팅재의 품질
- 긴장재 정착부의 집중응력 분산
- 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 기인한 2차 응력의 재분배

2. FCM공법의 시공순서

2.1 시공 개요

FCM 시공법에 의해 가설되는 교량의 형식은 T-형 라멘교와 연속교로 대별되는데 시공순서는 큰 차이가 없으므로, 다음 그림 1 과 같이 경간중

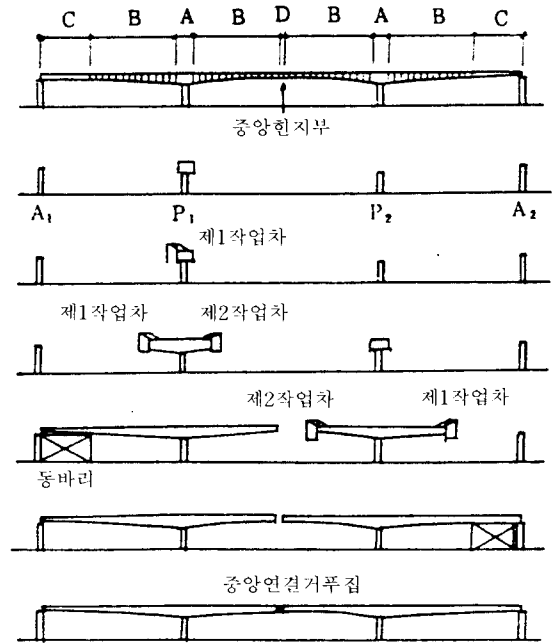


그림 1. FCM 공법 시공 순서도

양에 힌지가 있는 3 경간 연속 라멘교를 실예로 들어 설명하기로 한다.

시공구분은 그림 1과 같이

- ① 구간: 교각 주두부 (Pier Table)
- ② 구간: 캔틸레버부
- ③ 구간: 측경간부
- ④ 구간: 중앙 연결부

이상 4 개의 시공구간으로 나뉘어지며, 이들 시공법을 요약하면 다음과 같다.

1) 최초로 교각부는 지보공상에서 시공한다. 이때 주두부의 시공 규모는 교축방향으로 작업차를 1대 혹은 2대 설치할 수 있도록 하며 대부분 12.0-20m 이내로 시공한다.

2) 완성된 교각부에 작업차를 설치한다. 이때 교각부의 규모에 따라 작업차 2대를 동시에 설치할 수도 있으며, 먼저 작업차 1대 설치후 1개 블럭을 완성하고 작업차를 전진 이동시킨 후에 작업차 1대를 추가로 설치하여 블럭을 완성할 수도 있다.

3) 작업차 2 대가 설치된 후에는 좌우로 균형을

이루면서 캔틸레버 시공부분을 순차적으로 완성해 나간다.

4) 캔틸레버 시공부분 ⑥을 완성한 후 측경간의 지보공 시공부분 ③을 완성한다. 이때 ⑥구간과 ③구간 사이에 길이 2.5-3.0m의 연결 블록을 구분하여 시공하여야 하는데, 이는 ⑥구간의 마지막 블록에서 주 긴장재 인장작업 등의 작업공간이 필요하기 때문이다.

5) 양쪽 측경간부 지보공 시공부분 ③을 완성한다.

6) 최종적으로 특수지보공에 의하여 ④구간을 완성하고서, 교면공과 난간 등의 부대공을 시공하여 교량을 완성한다.

그런데 경간 중앙에 힌지가 없는 연속교인 경우에는 교량의 상 하부가 분리되어 있으므로 본 공법을 적용하기 위해서는 캔틸레버 시공중에 상 하부를 고정시키기 위한 임시 고정설비 (temporary fixity) 가 필요하게 된다. 만일 시공중의 불균형 모멘트 (unbalanced moment)에 대한 교각의 저항 내력이 부족할 경우는 임시용 받침 구조 (temporary support) 를 설치해야 한다. 교각부의 임시용 고정 설비는 다음 그림 2와 같으며, 이들은

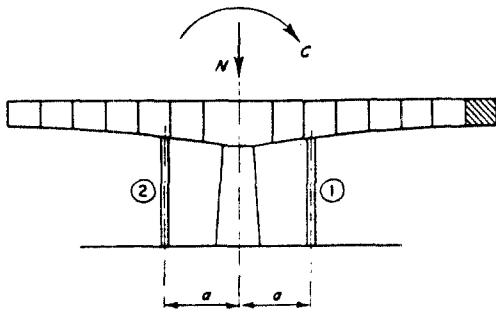


그림 2. 임시용 받침구조

측경간부를 연결한 후에 제거한다.

2.2 주두부 (柱頭部) 블럭시공

○ 교각 상부에 설치되는 주두부 블록 (L=12.0-20.0m)은 작업차를 1대 혹은 2대를 설치할 수 있는 공간 확보는 물론 캔틸레버부 시공시 불균형 모멘트에 저항할 수 있는 임시 고정 장치를 설치할 수 있는 블록으로서 가장 먼저 시공되는 블록이다.

○ 주두부 블록은 지보공상에서 시공되며, 지보공은 교각기초에 직접 지지하는 동바리 지지식 (a), 교각에 H 형강을 매입하는 형강 지지식 (b), 그리고 교각상부에 강제 브라켓을 설치하는 브라켓 지지식 등이 있는데 일반적으로 브라켓을 설치하는 예가 많다. (그림 4).

○ 임시 고정장치는 그림 3과 같이 가받침과 PS 강재로 이루어지는데, PS 강재는 교각시공시 미리 매입해야 하며 일반적으로 PC 강봉을 사용하고, 시공성을 고려하여 중간부에 커플러 (coupler) 를 사용한다. 가받침은 현장타설 콘크리트로서 상 하면에 두꺼운 비닐을 몇 겹 깔아 철거하기 용이한 구조로 시공한다.

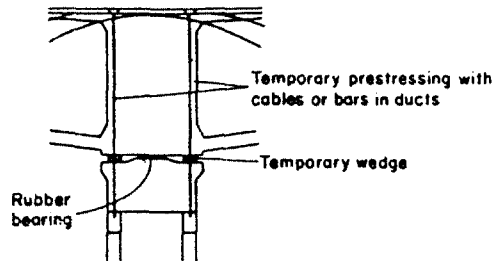
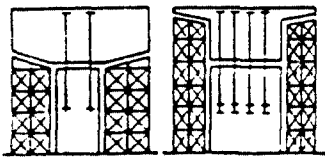
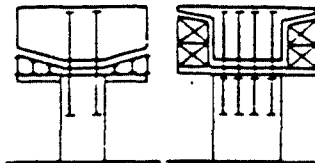


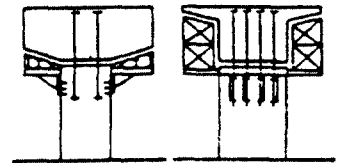
그림 3. 임시용 고정설비



(a) 동바리 지지식



(b) 형강 지지식



(c) 브라켓 지지식

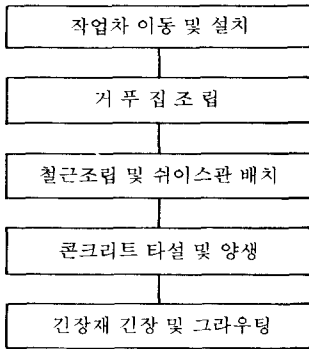
그림 4. 주두부 블록 시공법

2.3 캔틸레버부 시공

○ 주두부 블럭의 시공이 완료되면, 작업차를 1대 혹은 2대 설치하여 작업차에 의해 순차적으로 양쪽으로 각각 1블럭씩 시공해 간다.

○ 작업차를 1대 설치하는 경우는 작업차에 의해 1 블럭을 완성시키고, PS 강재를 긴장하지 않고 작업차를 이동시킨 후 또다른 작업차를 1대 설치해서 반대편 블럭을 완성한후 긴장하며 이후는 양쪽블럭을 동시에 시공한다.

○ 작업차에 의한 캔틸레버부 시공순서는 다음과 같다.



2.3.1 작업차 (Form Traveller)

작업차의 규모는 가설교량의 단면크기에 따라 결정하며, 일반적으로 다음 표 1 과 같다.

표 1. 작업차 규모

| 구 분 | 소 형 | 중 형 | 대 형 |
|-------|-------|-------|--------|
| 중량(t) | 50-60 | 60-80 | 80-110 |
| 주형수 | 2주형 | 3주형 | 4주형 |

작업차의 중요한 장치는 크게 나누어 트러스형상의 메인프레임, 작업차 고정 장치, 주행 장치 등으로 나눌 수 있는데 그 일례를 나타내면 그림 5와 같다.

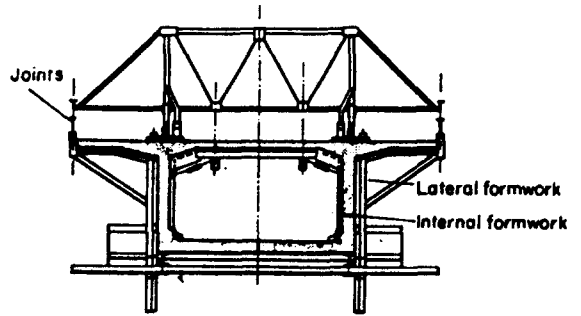
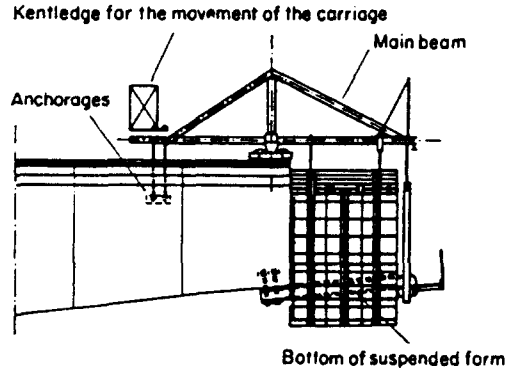
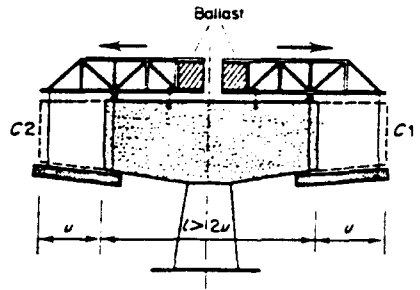


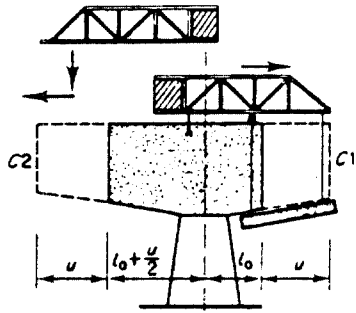
그림 5. 작업차 형상

2.3.2 캔틸레버부 시공

완성된 주두부상에 1대 또는 2대의 작업차를 설치하여 블럭시공을 시행하는데, 공간확보상 작업차를 1대만 먼저 설치할 경우에는 한쪽 블럭을 먼저 시공하고 작업차를 전진시킨 후 제2 작업차를 설치하여 반대쪽 블럭을 시공한다. 작업차 2대가 설치된 후에는 좌우로 균형을 이루면서 동시에 시공한다. (그림 6)



(a) 2대 동시 설치시



(b) 제1 작업차 선행 설치시
그림 6. 작업차 설치 방법

한 블럭의 길이는 보통 3-5m 정도로서 1사이클의 표준공정은 작업차 용량, 거더수, 프리스트레스 도입까지의 양생기간, 가동효율 등에 따라 다르지만 일반적으로 다음 표 2, 표 3과 같다.

표2. 작업차 작업 표준 공정

| | 단위 | 일반형 | 대형 |
|-----|----|-----|-----|
| 2주형 | 일 | 8.0 | 9.0 |
| 3주형 | 일 | 8.5 | |
| 4주형 | 일 | 9 | |

표3. 가동효율을 고려한 실제 공정

| | 단위 | 일반형 | 대형 |
|-----|----|------|-----|
| 2주형 | 일 | 10.0 | 9.0 |
| 3주형 | 일 | 10.5 | |
| 4주형 | 일 | 11.0 | |

작업차의 1사이클 공정은 보통 작업차 이동, 거푸집공, 하상판 배근 및 주긴장재 쉬즈관 배치, 복부 및 상판 배근, 콘크리트 타설, 긴장재 삽입 및 콘크리트 양생, 긴장 및 그라우팅으로 이루어지는데, 이때 각 공정별 고려사항을 열거하면 다음과 같다.

1) 거푸집공

외부거푸집은 목재 또는 강재를 사용하나 내부거푸집은 케이블의 돌기, 복부의 변화 등을 고려하여 목재로 하는 것이 좋다.

2) 철근공

철근은 조립장소에서 블럭별로 어느 정도 조립한 것을 운반 사용하는 것이 좋다.

3) 콘크리트의 품질관리

콘크리트의 품질관리는 압축강도와 슬럼프로 한다. 공시체는 각 블럭마다 매회 채취하여 현장에서 양생한 후, 거푸집 탈형시, 프리스트레스 도입시, 28일 강도 측정시 등에 대해 시험을 행한다.

4) 긴장

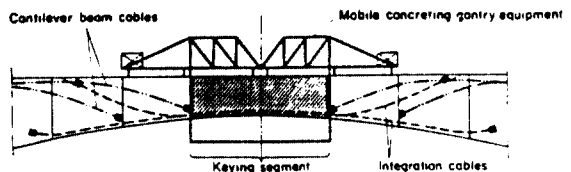
프리스트레싱은 콘크리트의 압축강도가 설계기준에서 정한 PS도입시의 허용강도 이상일 때 행한다. 긴장순서는 일반적으로 연직강봉, 바닥판 횡방향 텐던, 횡형 횡방향 텐던, 주 긴장재의 순으로 한다.

2.4 측경간 지보공부 콘크리트 타설 방법

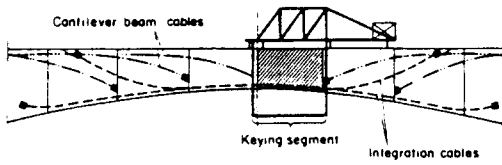
측경간 지보공부의 콘크리트는 일반적으로 양이 많아 일시에 타설하는 것은 곤란하다. 따라서 타설은 수회로 나누어 실시하게 되며, 타설 방법으로는 원칙적으로 지보공 중앙부에서 좌우측으로 순차 타설하는 것이 좋다.

2.5 측경간 및 중앙경간 연결부 시공

캔틸레버 공법에서 연결부는 작업차에 의하는 경우와 작업차 철거후 특수지보공 (Hanging-Staging) 을 설치하여 콘크리트를 타설하는 경우가 있다. 특수지보공 (Hanging-Staging) 의 설계는 캔틸레버부의 온도에 의한 처짐을 계산하여 부재력을 산출하여야 한다. 그림 7에 작업차에 의한 연결예를 나타내었다.



(a) 작업차 2대 이용



(b) 작업차 1대 이용

그림 7. 작업차에 의한 중앙 연결 공법

3. 캠버관리

각각의 캔틸레버 블록은 상이한 시점에서 제작 설치된다. 따라서 프리캐스트 세그먼트에 의한 가설이나 현장타설 방식의 가설을 막론하고 적절한 솟음을 산정하기 위한 정확한 처짐예측이 필수적이다. 구조물이 정정일 경우, 캔틸레버의 처짐은 콘크리트 자중, 작업차 하중, 캔틸레버 프리스트레싱 등에 의해 결정된다. 각각의 캔틸레버 블록이 연속구조로 완성된 후 구조물은 연속단단의 긴장, 작업차의 제거, 임시 지지용 장치 및 임시 고정장치 해체, 교면하중의 재하 등에 의해 추가적인 처짐을 일으킨다. 또한 콘크리트의 크리이프와 긴장력의 손실에 의한 장기처짐이 발생한다. 따라서 적절한 솟음 조정을 위해서는 캔틸레버 시공시 처짐, 연속거더의 단기 처짐 및 장기처짐에 대한 보정이 필요하다.

크리이프에 의한 처짐은 콘크리트의 재질과 시공조건 (온도, 기온등), 하중작용시 재령 (각 블록의 시공 싸이클과 공기) 및 응력레벨 등에 의하여 크게 좌우되기 때문에 예측이 어렵다. 캔틸레버 공법의 경우 엄밀하게는 블록마다 이 크리이프 계수가 상이하므로 실제의 처짐이 반드시 계산결과와 일치하는 것은 아니다. 캔틸레버 시공시의 크리이프에 의한 처짐은 시공 공정을 가정하고, 일반적인 값을 기초로 크리이프 계수를 설정한 후 계산을 하고 있다.

이와 같은 가정을 하는 경우 캔틸레버 길이의 2/3 정도까지의 처짐은 최종적으로 기의 문제가 되지 않으나 캔틸레버 선단의 1/3의 길이에서는

콘크리트의 재령이 적기때문에 실제와 계산 결과가 맞지 않는 것이다. 따라서 캔틸레버 시공 도중에 수회에 걸쳐 기설 블록의 실제의 처짐을 측정해서 콘크리트의 재령과 크리이프 계수의 관계를 검토 하고, 이후의 상향 솟음 량을 수정할 필요가 있다. 특히, 측경간에 있어서는 동바리상에서 시공하는 부분과의 연속에 의한 솟음의 수정이 필요하다. 측경간의 캔틸레버 선단의 Elevation 은 작업차를 철거하고 연속 시공한 후에 생기는 처짐의 하향 솟음을 고려하여야 한다.

또한, 각각의 캔틸레버 블록 시공에 따른 처짐의 예측 및 계산이 특히 복잡하다. 따라서, 시공단계에 따른 각각의 캔틸레버의 연속적인 처짐곡선을 추적할 필요가 있다.

간단한 예를 그림 8에 도시하였는 바, 그림에서 파선은 각 단계에서의 캔틸레버 끝단의 처짐곡선의 포락선을 나타낸다. 이때 각각의 블록의 상대 각도를 $\alpha_1, -\alpha_2$ 등 만큼씩 조정해 나간다면 캔틸레버는 그림 9와 같이 적절한 종단곡선을 만족하게 될 것이다.

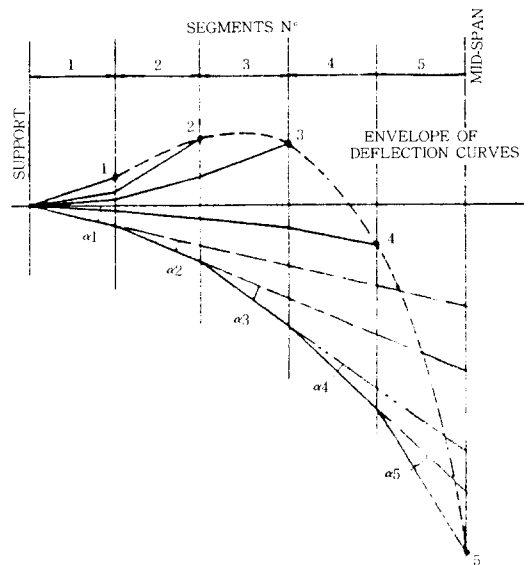


그림 8. 캔틸레버 처짐 곡선

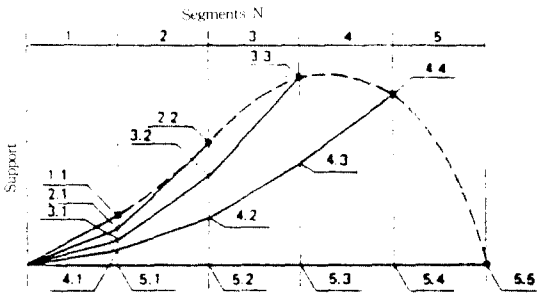


그림 9. 솟음 관리표

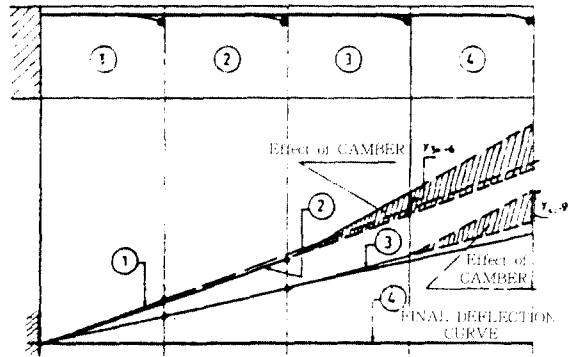


그림 12. 적절한 솟음 시공예

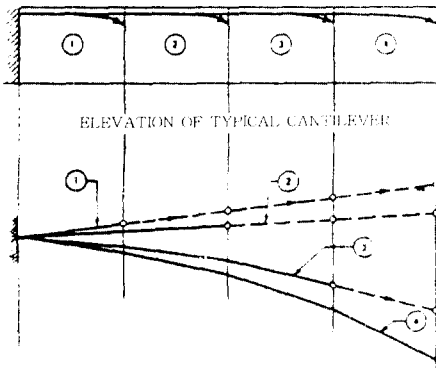


그림 10. 시공단계별 처짐 곡선

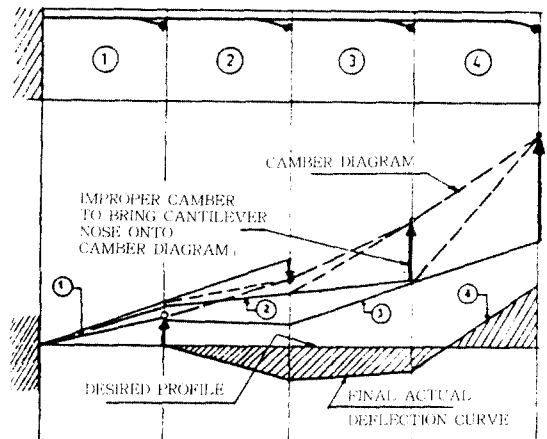


그림 13. 부적절한 솟음 시공예

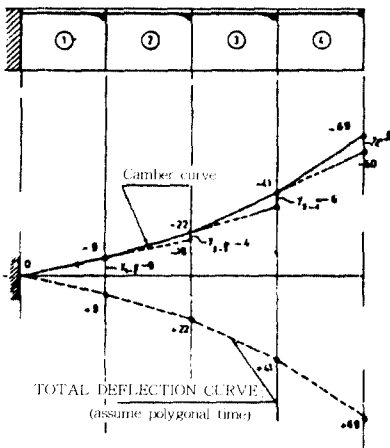


그림 11. 누가치짐곡선-솟음 관계도

그러나, 현장에서 이를 적용하고자 할 때는 그렇게 간단하지가 않다. 예를 들어 그림 10과 같은 4 물리 캔틸레버를 해석할 때, 그림 11의 솟음 Diagram 에서 손쉽게 누가치짐 곡선을 구할 수 있고, 솟음 Diagram 을 적절히 이용한다면 각각의 캔틸레버 단부에서의 편차량 y_1-2 , y_2-3 , y_3-4 등을 구하여 이에 따라 작업차를 셋팅할 수 있다.

그림 12는 솟음 Diagram을 어떻게 이용할 것인가를 보여준다. 이때 중요한 것은 시공전의 캔틸레버 계획고가 솟음 Diagram과 일치하도록 하는 것이다.

그런데, 현장에서는 대체적으로 작업차 선단을 솟음 Diagram에 일치시켜 셋팅하는 경향이 있다. 이때의 시공 결과를 그림 13에 나타내었는 바, 착오를 발견했을 때에는 이미 회복이 불가능하다. 왜냐하면, 캔틸레버의 최종 형상은 전적으로 교각 부근의 솟음의 정확성 여부에 달려있기 때문이다.

4. 결 론

FCM 공법에 의한 현장타설 PC박스거더는 시공공정에 따라 설계되어야 하며, 설계시 가정했던 조건의 변화가 있을 때는 재설계를 하여 즉시 시공에 반영해야 한다. 시공 조건상 많은 수의 불력을 분할 시공해야 하고, 시공중 구조계가 변하는 등 설계가 매우 복잡한 만큼 시공도 정교해야 하

므로 사용되는 각종 자재의 품질관리를 철저히 해야함은 물론 작업차의 하중시험, PS 도입, 그라우팅 및 솟음 관리에 철저를 기해야 한다.

참 고 문 헌

1. 건설기술 연구원, "경제적인 P.S 콘크리트 교량 건설공법에 관한 연구", 1986.
2. Podolny, W. and Muller, J. M., "Construction and design of prestressed concrete segmental bridges", JHON WILEY AND SONS, 1982.
3. Mathivat, J., "The cantilever construction of prestressed concrete bridges", JHON WILEY AND SONS, 1983.
4. 유신설계공단, "신거제대교 실시설계 보고서", 1990.

연구소위원회 가입 안내

가입대상 연구소위원회

- 1) 재료 및 시공분과위원회 산하
 - 내구성 연구소위원회(내구성, 염해, 균열, ARR 등)
 - 구조물 진단 및 보수 연구소위원회
 - 고성능콘크리트 연구소위원회(고강도, 폴리머, 섬유보강 등)
- 2) 구조분과위원회 산하
 - 전산구조해석 및 CAD 연구소위원회
 - 내진설계 연구소위원회
 - 콘크리트교량 연구소위원회
- 3) 제품 및 레미콘 분과 위원회 산하
 - 비파괴 시험 연구소위원회
 - 레미콘 연구소위원회
 - 프리캐스트 콘크리트 연구소위원회

◆ 본 학회는 연구부 연구분과위원회안에 상기와 같이 연구소위원회를 설치하여 위원회 중심의 연구활동을 활성화하기 위하여 회원 여러분의 가입신청을 받고 있으나 희망하시는 소위원회에 가입하시어 학회활동에 참여하여 주시기 바랍니다. 여러 소위원회 동시가입도 가능합니다.

◆ 자세한 사항은 학회사무국으로 문의하시기 바랍니다.