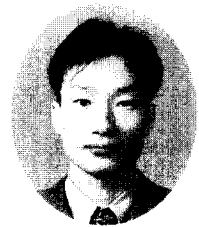


서해대교 FCM교의 해석 및 시공



박종철

1. 서 언

서해대교는 총연장 7.31km, 왕복 6차로의 강합성형 사장교와 콘크리트 상자형교(PSM교 및 FCM교)로 구성된 국내 최대규모의 장대교량으로서, 내풍·내진설계를 비롯한 계측관리시스템을 도입한 첨단교량으로 2000년 12월 완공을 목표로 공사가 한창 진행중이다.

본고에서는 서해대교의 일반사항을 간단히 설명하고 FCM교의 해석 및 시공에 관련한 기술적인 내용을 중심으로 기술하고자 한다

2. 서해대교 공사개요

서해대교의 현재 공사 추진 현황은 전체적으로 약 74%의 공사진도를 보이고 있다. 사장교 구간의 경우 주탑시공은 Pylon 1은 높이 180m중 166m, Pylon 2는 높이 182m중 180m를 시공

완료하였으며, 상판중 일부(길이: 52m, 폭 : 34m, 중량 : 2100톤)를 Heavy Lifting하여 일괄 가설하는 공법으로 Pylon 1 위에 주두부를 거치한 후 케이블 No. 18, 19, 20을 긴장하였고, LL3 강형을 Derrick Crane으로 인양·케이블 No. 17를 긴장한 상태이다. FCM교 구간의 경우 하부공은 시공 완료되었으며, 이동식 거푸집차(Form Traveller)의 작업공간 확보를 위한 상부가설은 46m가 시공되었다. PSM교 구간의 경우 총 4074개의 세그먼트중 3757개가 제작되었으며, 전체 97경간중 74경간의 상부가설이 완료되고 1경간을 가설 중에 있다.

- 교량연장 : 7.310m
 - 사장교 : 990m
 - PSM교 : 5,820m
 - FCM교 : 500m
- 교량폭원 : 31.41m(왕복 6차선)

* 한국도로공사 서해대교건설사업소, 연구원

- 설계속도 : 120km/hr
- 설계하중 : DB24, DL24
- 총사업비 : 6,052억원
- 공사기간 : 1993.11 ~ 2000.12
- 시 행 처 : 한국도로공사
- 책임감리 : 대우엔지니어링(외국-덴마크 COWI사)
- 시공회사 : 대림산업(주), LG건설(주)

표 2 FCM교 공사추진계획

공종	단위	전체수량	기시공	'99계획
기초	기	3	3	-
교각	기/m	3/132	3/132	-
상부	m	500	46	286

표 1 서해대교 공사개요

구 분	사장교*	PSM교	FCM교
연 장	990m	5,820m	500m
주경간장	470m	60m	165m
상부구조	강합성	콘크리트상자형교	장경간 콘크리트 상자형교
하부구조	직접기초	대구경 현장타설 콘크리트 말뚝	

* 사장교 주탑높이 : 182m(5만톤급 선박출입 가능)

3. 서해대교 FCM교

FCM(Free Cantilever Method)에 의한 교량가설은 교각 위에 이동식 거푸집차를 설치하여 교각의 양쪽방향으로 평형을 유지하면서 순차적으로 한분절씩(길이 : 3~4m) 교량상부를 완성시켜 나가는 공법으로 서해대교 FCM교(사진 1)의 경우 한 경간장이 165m이며, 공사추진현황은 표 2와 같다.

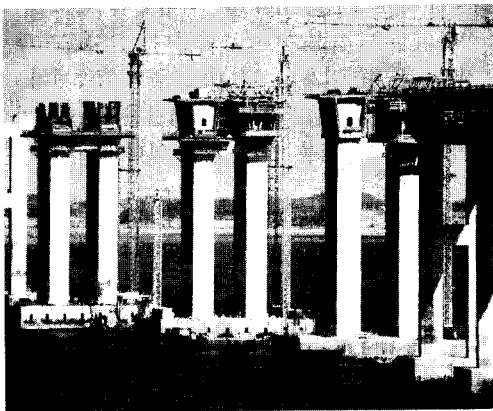


사진 1 FCM교 전경(현재)

3.1 교량형식

교량연장은 500m(85 + 2@165 + 85m). 폭원은 31.4m(상·하행 15.7m×2)인 P.C Box Girder형식의 교량으로 주두부가 교각과 강결된 라멘구조이다.(그림 1, 2)

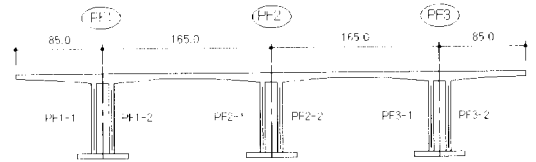


그림 1 FCM교 종단면도

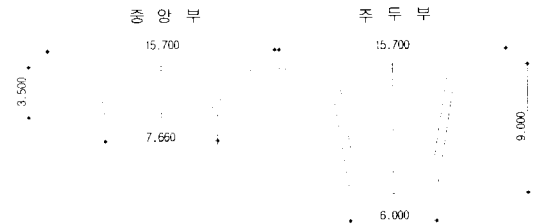


그림 2 FCM교 횡단면도

3.2 사용재료

FCM교 사공시 설계기준강도는 400kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용하였으며, 사용재료는 다음의 표 3에 나타내었다.

- 콘크리트
 - 설계기준강도 : $\sigma_{ck} = 400\text{kg/cm}^2$
 - 초기압축강도 : $\sigma_{ci} = 0.75 \sigma_{ck} = 300\text{kg/cm}^2$

- 철근 : $\sigma_y = 4000\text{kg/cm}^2$
- P.C 강연선
 - 사용기준 : KSD 7002-1988 SWPC 7B
 $-\phi = 15.2\text{mm}(0.6")$
 - 긴장재 : 상부(6-19), 하부(6-22), 횡방향(6-5)
 - 강도 : $\sigma_{py} = 160\text{kg/mm}^2$
 $\sigma_{pu} = 190\text{kg/mm}^2$
 - 허용응력(정착직후) : $0.7\sigma_{pu} = 133\text{kg/cm}^2$
- P.C 강봉
 - 사용기준 : $\phi = 38\text{mm}$
 - 인장강도 : $P_u = 123\text{톤}$

표 3 콘크리트 및 철근 수량 현황

공종		시멘트종별	수량	
			콘크리트(m^3)	철근(톤)
하부공	Footing	350-5종	25,038	8,396
	현장타설말뚝	350-5종	23,419	
교삭공		400-1종	10,777	4,264
		400-5종	1,142	
상부공		400-1종	17,581	3,669
계			77,957	16,329

3.3 종방향 해석

단면력 및 그에 따른 응력의 해석은 다음과 같이 시공단계와 사용하중 재하시의 두단계로 나누어 해석한다.

3.3.1 시공단계별 해석

- Cantilevering Stage
 - 켈틸레버 상태로 시공되는 각 단계별 단면력 및 응력 해석
 - 재하하중 : 세그먼트 자중, 크리프와 건조수축, Form Traveller 하중, 시공단계별 긴장재의 긴장력
- Continuing Stage
 - 각각 완성된 켈틸레버 상태에서 연속교로 구조계가 변화하는 단계

3.3.2 사용하중 재하시

- 2차사하중 재하직후
 - 지속하중 상태에서의 단면력 및 응력 : 자중 + 2차사하중 + 프리스트레스 + 크리프와 건조수축
 - 사용하중 재하시의 단면력 및 응력 : 지속하중 + 활하중 + 지점침하 + 온도하중
- 장기변형 완료후

3.4 횡방향 해석

3.4.1 하중

사하중, 활하중(DB24) 및 세그먼트와 세그먼트가 각을 지고 만나서 발생하는 종방향 Bottom Tendon에 의한 분력도 고려

3.4.2 운하중 분포폭 산정

테크 슬래브를 Web 위치에서 강결(Rigid Support)하고, 슬래브 두께에 따라 변단면을 갖는 유한요소판으로 모델링하여 단면력을 산출한다. 관해석에 의한 결과를 Plane Frame 해석결과와 비교하여 Influence Factor (운하중 Reduction Factor)를 계산하여 박스의 횡방향 프레임 해석시 운하중을 Influence Factor로 감소시켜 재하, 해석한다.

관해석으로부터 구한 최대모멘트를 M이라 하고 프레임해석으로부터 구한 모멘트를 M'라 하면 $M < M'$ 이므로, 분포폭 $Z = M'/M$ 을 계산하여 DB하중을 P/E의 하중으로 감소시켜 프레임해석을 수행한다.

4. FCM교 시공

4.1 대구경 현장타설 말뚝 시공

직경 2500mm인 강관 말뚝을 해저 지반에 향타한후 강관 말뚝 내부를 RCD공법으로 굴착하여 철근망 진입 및 콘크리트($\sigma_{ck} = 350\text{kg/cm}^2$)를 타설하여 기초 말뚝을 시공하였다.(사진 2)

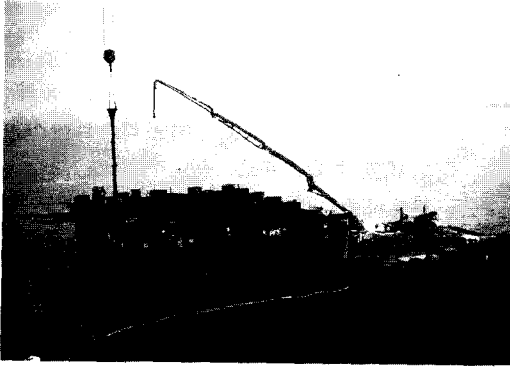


사진 2 대구경 현장타설 말뚝 시공 장면

말뚝 시공순서는 다음과 같다.

(1) Pier 위치 측량

Geodimeter를 사용하여 Pier 위치를 확인한다.

(2) 작업선 이동 및 거치

작업선박(HHI-1200)을 진입시키고, Anchor를 소정의 위치에 투하한다.

(3) Jig Jacket 및 작업발판 설치

작업선의 크레인을 사용하여 Jig Jacket을 Seabed상에 정확히 거치시키고, 4개의 Pin Pile을 증기해머로 지반까지 향타한다. 작업발판을 Jacket 상부에 Pile Guide Hole 위치가 정확하도록 거치하고 Stop Plate를 용접하여 고정시킨다.

(4) 강관 파일 향타

크레인을 사용하여 강관 파일을 Jacket의 정확한 파일 위치에 거치 시키고 트랜스 측량을 통해 연직도를 정확하게 조정하여 향타하며, 약 5m 정도 압입후 연직도의 허용오차를 조사한다.

(5) 토사 및 모래층 굴착

고압 펌프를 작동시켜 파일 내부를 Water Jetting과 함께 Air Lifting을 병행하며, 배출도를 관측해 가면서 풍화암 상단까지 굴착한다.

(6) 풍화암, 연암 및 경암층 굴착

RCD장비(WIRTH, PDA 8118)를 강관 파일 상단에 거치하고, 조립된 Drill Bit와 Rod를 삽입·설치한 후 해수를 공급하면서 계획된 심도까지 굴착을 실시한다. Drill Bit는 Roller Bit Type을 사용하며 직경은 $\phi 2380\text{mm}$ 이다.

(7) 지지층 확인 및 Slime 제거

지반굴착후 바닥에 쌓여있는 Slime 토사 및 암석 부스러기 등 잔유물을 Air Lifting 처리한다.

(8) 철근망 건입 및 콘크리트 타설

조립된 12m 짜리 철근망을 해상운반하여 말뚝 소요 철근길이 만큼 이음조립한다. 주철근 기계이음재는 Bar Grip Coupler를 사용하며, 아연용융 도금($610\text{g}/\text{m}^2$)을 한다. 철근망을 Lifting Frame을 사용하여 건입하며 Air Lifting Pipe로 2차 Slime을 제거한다. 초기 콘크리트 타설시 Tremie Pipe를 굴착바닥과 10~20cm 유지되도록 하며 Plunger를 Tremie Pipe 내부에 밀어 넣고 콘크리트를 계획된 높이까지 타설한다.

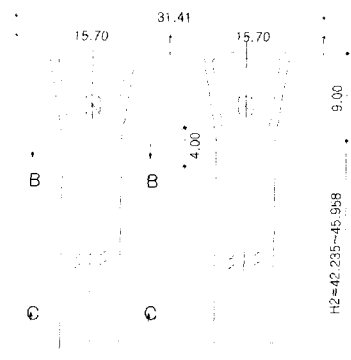
4.2 FCM교 교각 및 CrossBeam 시공

■ 공사규모

- 교각형식 : 철근콘크리트조
- 공법 : Climb Form 공법
- 규격 : $6.0 \times 3.0\text{m}$ (육각형) $\times 42.4 \sim 46.1\text{m}$ (높이)
- 수량 : 기둥부 - 4개/기 $\times 3\text{기} = 12\text{개소}$
Cross Beam - 2개/기 $\times 3\text{기} = 6\text{개소}$

■ 주요 투입 자재

- 콘크리트 : $11,796\text{m}^3$ (400-19-1종)
10m까지 5종으로 사용
- 철근 : 4,256톤 (H16~H51)
- Climbing Form : 2조 (2Pier)
- Bar Grip : 약 14,000개 (H51용)
- 강봉 : 142.6톤 ($\phi 38\text{mm}$)



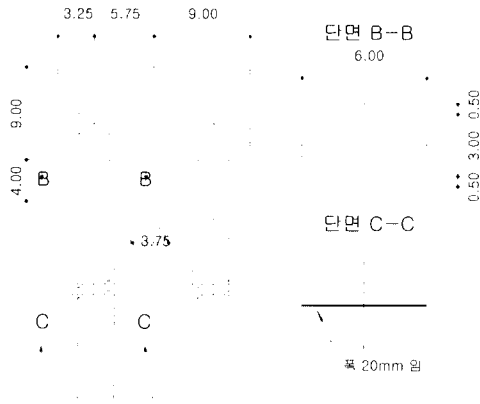


그림 3 교각 입면도 및 측면도

시공 순서 및 방법은 다음과 같다.

(1) 교각 위치 측량

Geodimeter를 사용하여 Reflector를 시준하면서 4개의 교각위치를 Marking한다.

(2) 철근조립

그림 4에서 보는 것처럼 소요길이로 절단한 철근(H51) 한쪽 끝에 Bar Grip Coupler를 1/2 압착 연결한 상태로 작업장소로 이동후 기설치된 주철근(H51)에 Coupler를 삽입한후 잔여부분(1/2)을 압착한다.

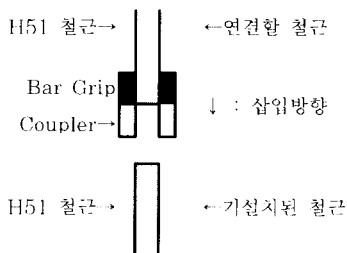


그림 4 Coupler에 의한 철근 연결 방법

(3) Climb Form 설치 및 이동

■ Climb Form 설치

- Wood Girder와 Steel Wale을 조립한후 Finplywood(t = 18mm)을 붙인다.
- 1st Lot 설치시 Bracing을 설치하고 Base Plate를 고정시키기 위하여 Rethreaded Anchor를 설치한다.

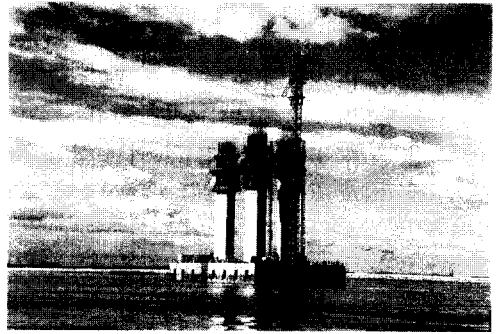


사진 3 Climb Form에 의한 교각 시공

- Climb Form 상단위로부터 45cm 하부에 Climb Bracket을 거치하기 위한 Screw-on Cone (M24/DW20)을 Finplywood에 고정시킨다.
- Form Tie를 설치하고 연직도 조정후 최종인장하고 Bracing을 고정시킨다.
- 3rd Lot부터는 Climb 상부와 Climbing Bracket을 연결한 채로 타워크레인을 사용하여 Lifting-up 작업을 반복하여 계획 고까지 설치작업을 반복 시행한다.
- Climb Form 해체 이동
 - Form Tie와 Climb Form틀을 해체한다.
 - 2nd Lot 작업을 위하여 Climbing Bracket을 기설치된 Screw-on-Cone에 거치시키고 Bolting한다.
 - Climb Form 상부와 Climbing Bracket을 연결시킨다.
 - 연결이 완료되면 설치작업과 동일한 작업 순서를 반복하며 작업을 한다.
- Cross Beam 설치 및 해체
 - 가설작업용 Bracket을 설치하고 Screw Jack (75톤/m) 6개를 Support Bracket과 연결하여 교각 타설시 매입된 Anchor에 거치후 Bolting한다.
 - Main Beam(H800×300×9500) 3개의 양쪽 끝단에 Distribution Beam을 각각 Bolting하여 연결 조립하고, 하부 2개소에 Carrying Beam을 연결한다.
 - Support Beam 거치 작업이 끝나면 바닥거푸집을 그 위에 거치시킨다.
 - 교각 외측에 작업발판 Bracket을 거치한다.

- 철근조립을 하고, 해체는 설치 역순으로 행한다.

■ Cork Board 설치

- 철근조립 및 Climb Form 설치가 완료되면 Cork Board를 철근사이에 삽입하는데 50cm 간격으로 간격재를 끼운다.

(4) 콘크리트 타설

수화열 저감을 위해 Pipe Cooling을 실시하며, 타설전에 배관을 행하도록 한다. 바지선(1500P)에 Agitator Truck 5대를 선적하여 작업장으로 이동하며, 타설시 콘크리트 1층의 타설고가 40~50cm 되도록 한다.

(5) Cross Beam 시공

교각(2nd~11th Lot)까지 철근조립 및 콘크리트타설을 반복하며, EL 41.392m 이상에서는 강봉을 설치한다. Cross Beam의 바닥거푸집, 철근조립, 외부거푸집 순으로 설치후 콘크리트 타설을 한다.

4.3 FCM교 주두부 시공

4.3.1 Supporting System 설치

Spec. Support Bracket을 M64 Anchor Bolt로 고정하고, 상단에 Hydraulic Jack(130톤)과 Distribution Beam(H300×305)을 거치한다. 병렬 연결된 Main Beam(H912×302×18×34)을 그 위에 거치하고 Bolting한다. 교축방향의 교각 외측부의 경우 Spec. HD Bracket을 부착하며, 그 위에 HD Lowering Device(500kN)을 설치한다. Levelling 조정 작업이 완료되면 Cross Beam (H500×200×10×16)을 설치하고 Longitudinal Beam(H200×200)을 종방향으로 거치한다.

4.3.2 System Form

Cross Beam 위에 GT24 Girder를 종방향으로 설치하고 Plywood(t=18mm)로 바닥 Soffit을 설치한다. 먼저 System Form을 벽체 외측만 설치하고 바닥 슬래브의 콘크리트 타설이 완료되면 켄틸레버 바닥 거푸집까지 설치한다. 벽체 철근 조립후 내부 벽체 거푸집을 설치하고 벽체 콘크리트 타설과 양생이 끝난후 내부 벽체 거푸

집을 해체한다. 마지막으로 Spec. Support, GT24 Girder, Plywood를 설치하여 상부슬래브 거푸집을 완성한다.(사진 4)

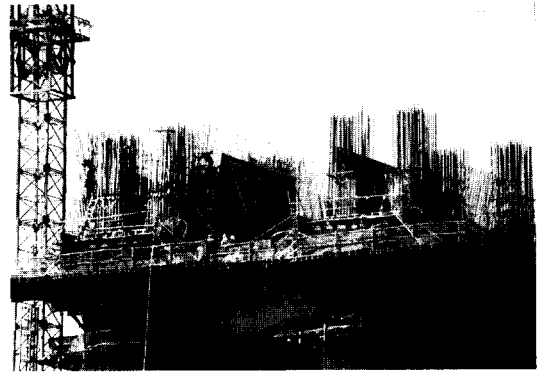


사진 4 System Form에 의한 주두부 시공

4.3.3 강봉조립 및 텐던 조립 설치

■ 수직강봉 조립 및 설치

- 교각부 상단부터 기설치된 강봉(φ38mm)과 Coupler를 사용하여 주두부 바닥슬래브에서 1회 연결하고 콘크리트 타설후 격벽 중간에서 1회 연결된다. 인장정착구는 상부슬래브 밑면에 설치되며, 정착구 부분의 강봉 보강용 철근은 철근의 간섭으로 인하여 한 개씩 보강하기 어려우므로 전체적으로 동시에 보강철근을 설치하도록 한다.

■ 수평강봉 조립 및 설치

- 구조용 강관(D=50.8mm)을 설치하고 강봉을 삽입한다.

■ 강봉인장

- 강봉인장은 콘크리트 설계강도의 0.7배 이상일 때 실시한다.

■ External Tendon 설치

■ 횡방향 텐던 설치

■ 강연선 인장

■ 그라우팅

■ 종방향 텐던 설치

4.3.4 콘크리트 타설

바닥 슬래브와 격벽의 개구부 밑단을 1단계로

타설하고, 벽체와 상부 슬래브의 순으로 타설한다. 타설선과 타워크레인(Lifting Hose를 양중)을 사용하며 최대타설높이는 64.04m이다.

4.4 FCM교 상부공 시공

FCM교의 F/T, 주두부 및 상부공의 시공순서는 다음의 그림 5, 8과 같으며, 상부공의 시공과정을 간단히 설명한다.

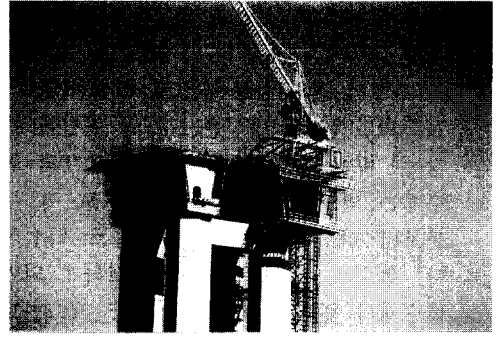


사진 5 Form Traveller에 의한 상부 시공

4.4.1 Form Traveller 조립 및 설치

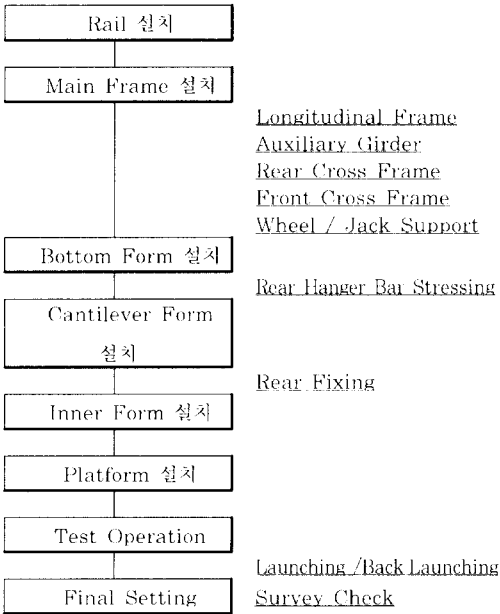


그림 5 Form Traveller 작업 흐름도

- Type 3 (Typical 4.00m Segment) : 5개
- Type 4 (Key Segment 2.00m) : 2개
- 종방향 텐던 설치
- 정착구 설치
- 강연선 설치 및 인장
- 횡방향 인장시 한 세그먼트내의 강연선은 모두 인장하고 새로운 세그먼트를 시공할 경우 접합면에 발생하는 압축변형으로 인하여 새로친 세그먼트는 변형된 형상으로 시공될 수 있다. 그러므로 횡방향 강연시 인장시 기시공된 세그먼트의 최외측 강연선은 그림 6과 같이 새로운 세그먼트를 시공한 후 새 세그먼트의 횡방향 강연선과 함께 긴장하는 것이 변형방지에 유리하다.
- 그라우팅
- 콘크리트 타설
- 슈트를 이용하여 하부플랜지 콘크리트를

4.4.2 Typical Segment 시공(사진 5)

- Form Traveller 운영
 - 콘크리트 강도가 약 100kg/cm^2 정도 이상일 때 Rail Launching을 하고 Level을 조정하여 Launching을 실시한다. Launching후 Hanger Bar를 설치하고 Form Setting을 행한다.
- 철근 가공 및 조립
- 횡방향 텐던 배치
 - Type 1 (Typical 4.00m Segment) : 5개
 - Type 2 (Typical 3.25m Segment) : 4개

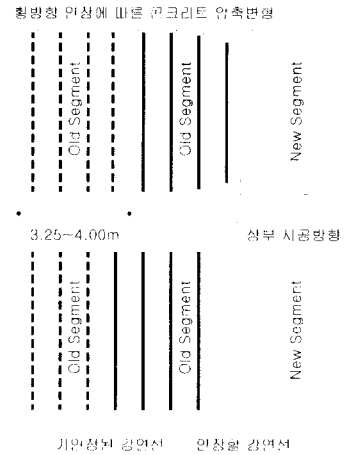


그림 6 횡방향 강연선 인장 방법

먼저 타설하고, 복부와 하부플랜지의 연결 부분, 복부, 켄틸레버부, 바닥판, 바닥판과 복부의 연결 부분 순으로 타설한다.

- 콘크리트의 타설방향은 F/T의 변형이 가장 큰 부분부터 시작한다. 즉, F/T의 현수재는 변형되기 쉬운 부재이므로 이 부분부터 타설하고, 점차 안쪽으로 타설한다. 현수재 부분을 나중에 타설하게 되면 현수재의 변형에 의해서 신·구 세그먼트의 이음부가 벌어질 가능성이 있으므로 현수재 부분의 변형을 미리 발생시키며 이 같은 문제를 해결한다.(그림 7)

■ 슬래브 면 정리 및 양생

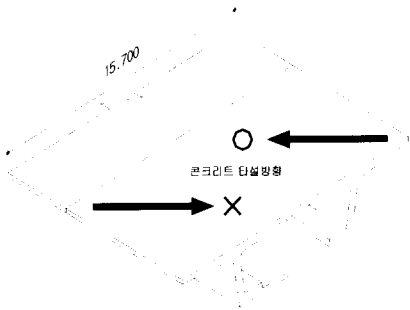


그림 7 FCM교 상부공 콘크리트 타설방향

4.4.3 Camber 관리

■ 적용하중

- 콘크리트의 자중
- 프리스트레싱의 도입
 - 허용응력 : $\sigma_{pa} = 0.70 \sigma_{pu}$ (정착후)
 - 긴장력

상부텐던 0.6"-19 : $P_j = 0.72 \sigma_{pu}$

하부텐던 0.6"-22 : $P_j = 0.75 \sigma_{pu}$

- 크리트 및 건조수축 : 구조계산에 의한 처짐량 산정시 실험치를 보정한 계수를 적용
- F/T(W=80톤)의 자중 및 이동
- 포장 및 난간의 추가하중
- 시공 단계별 구조계산에 의한 캠버계산
- 현장관리에 의한 캠버의 보정
 - F/T의 탄성변형 : $\delta = 6 \sim 16 \text{mm}$
 - 계산과 실제의 처짐차이
 - 측량기준점(T.B.M)의 변화
- 추가 캠버량 산정
 - 계산에 의한 처짐과 실제구조물의 처짐차이를 제거할 목적으로 켄틸레버 완공시까지의 하향처짐량과 Key Seg. 연결시의 상향처짐량의 절대치합의 50%를 추가 캠버량으로 산정하여 적용한다.

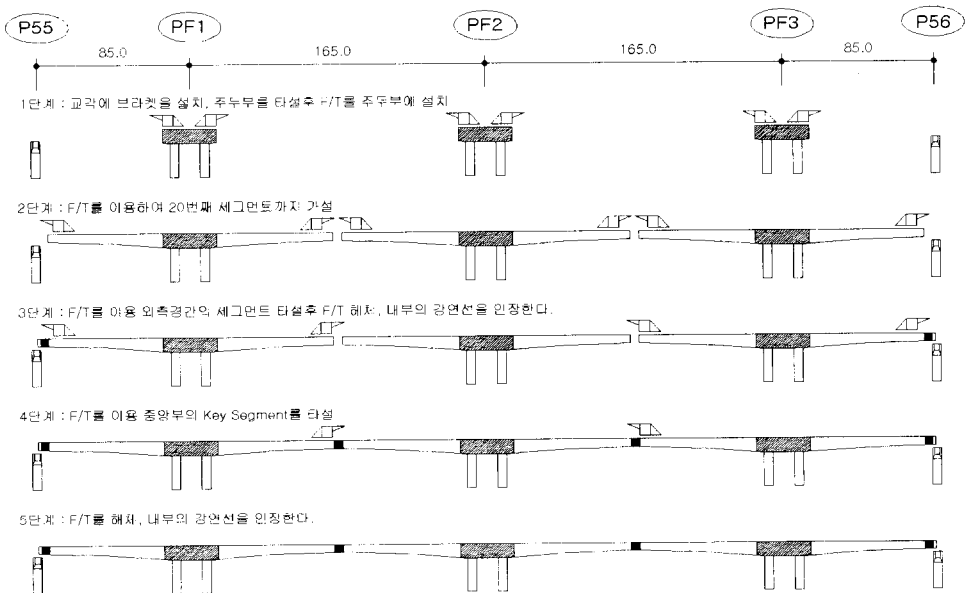


그림 8 FCM교 상부공 시공순서

(4) End 세그먼트 시공

축경간 End 세그먼트의 시공사 F/T의 운용이 현실적으로 어려워 축경간 교각(P55, 56)에 가시시설을 설치하여 End Seg.를 먼저 시공하고 Key Seg.를 연결할 예정이다.(그림 8)

5. 맺음말

본고에서는 서해대교와 관련한 공사개요와 FCM교의 해석 및 시공에 관련한 주요내용을 개략적으로 기술하였다.

국내 최대 규모인 합성형 사장교와 FCM교, PSM교의 시공실적과 경험은 아직 부족한 실정이며, 본 공사를 통한 국내 토목수준의 발전과 기술축적이 상당히 이루어 지리라 본다.

따라서 현장에서 새롭게 도입되는 공법과 신기술 축적 등이 그대로 사장되지 않고, 산·학·연 연계를 통한 지속적인 투자와 연구개발로 발전되길 바라며, 앞으로도 서해대교 공사 진행과 더불어 교량해석 및 시공기술에 관련한 소개가 계속 되길 기대한다.

본고가 교량과 관련한 여러 현장에서 근무하는 토목기술자 뿐만 아니라 서해대교와 같은 특수교량 분야에 많은 관심을 가진 분들께 좋은 참고자료가 되었으면 한다.☞

안 내

본 학회에서는 학회창립 10주년을 맞이하여 1999년 6월부터 학회지와 논문집을 분리하여 발간하게 되었습니다. 또한, 논문의 질과 학회논문집의 국제적 위상을 제고하기 위하여 연2회(1월, 7월)에 걸쳐 영문논문집을 발간하게 되었습니다. 회원들의 많은 성원과 투고를 바랍니다.