

현장 실험을 통한 상판분절 P.C 교량의 정착부 응력 분석 Experimental Study of Anchor Zone of Externally Prestressed Segmental Bridge

이 성우¹⁾ 배 두병²⁾ 지 기 환³⁾ 정 남 석⁴⁾
Lee, Sung Woo Bae, Doobyong Jee, Kee Hwan Jung, Nam Suk

ABSTRACT

During the construction of externally prestressed 7-span continuous segmental bridge, cracks beyond permissible limit were found at anchor zone of expansion joint segment. To eliminate this problem, tension side of diaphragm was prestressed by post-tensioning bars in vertical and horizontal direction. To investigate this remedy is acceptable, stresses of reinforcing bars and concrete surface were measured for the real structure in the field. The measurement was performed through each step of prestressing sequence during construction. Also to investigate stresses induced by live load, static load test was performed and the results was analyzed. In this paper it will be presented the procedure and results for this experimental study along with comparison with analytical study.

1. 서론

최근 국내에 신 공법으로 도입된 precast 상판분절(segmental) 방식의 P.C box 교량건설이 공법의 우수성과 효율성으로 인해 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 그중 external prestressing 방식의 segmental 교량은 극히 최근에 도입되어 현재 일부 현장에서 시공되고 있다. 그러나 이러한 교량에 대한 설계와 시공에 대한 기술 축적이 완전히 이루어져 있지 않은 관계로 시공도중 예기치 못한 문제점들이 발생되어 그에 대한 보다 엄밀한 분석이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 현재 시공되고 있는 external prestressing 방식의 precast segmental 7경간 연속 P.C box 교량의 tendon 정착부인 expansion joint segment에 바람직하지 못한 균열이 발생됨에 따라^[1] 이에 관련된 현장 실험을 통한 정착부 응력 분석을 수행 하게 되었다. [3] P/T bar로 보강된 expansion joint segment에 콘크리트 타설전 철근 및 콘크리트에 strain gage를 부설하고 prestressing도입 단계 별로 응력을 측정하였다. 또한 차량이 이 segment의 인장부 diaphragm의 응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 segment를 포함하는 1 경간에 대해 정적 재하시험을 수행하였다. 본 논문에서는 연구수행 절차와 분석된 결과의 일부를 기술 하고자 한다.

2. 현장 실험

2.1 실험 개요 및 gage 부설

대상 교량은 그림 1과 같이 external prestressing이 도입되어 있고 이 종방향 tendon은 각 교각의 pier segment 양측에 정착되어 있고 7경간이 끝나는 부분에는 exp. j. 면에 정착되어 있다. 그림 2에는 exp. j. seg.의 횡단면도를 보여 주고 있다. 이 교량의 시공도중 7경간에 대한 종방향 prestressing을 도입한 후 exp. j. seg.의 인장부 격벽에 바람직하지 못한 균열이 발생되었다. 균열은 개구부 모서리에서 가장 큰 폭으로 나타났으며 전반적으로 횡방향으로 발생하였

- 1) 정회원, 국민대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수, 공학박사
- 2) 정회원, 국민대학교 공과대학 토목환경공학과 전임강사, 공학박사
- 3) 정회원, 국민대학교 구조안전연구소 연구원, 공학석사
- 4) 정회원, 국민대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정

다. 이 균열을 억제 하기 위하여 종방향 prestressing 도입전에 수직 및 수평 방향의 P/T bar로 prestressing을 가하여 보강하였다.^[2] 본 연구에서는 P/T bar로 보강된 exp. j. seg.에 대해 prestressing 단계 별로 정착부 응력을 보다 엄밀히 분석하고 P/T bar 보강 효과를 검증하기 위해 prestressing 도입 단계별 현장 계측을 수행하였다. 또한 완공후 차량이 segment의 인장부 diaphragm의 응력에 미치는 영향을 검토하기 위해 차량 재하시험을 실시하였다. Gage의 부설은 콘크리트 타설전 철근과 콘크리트에 전기 저항식 strain gage를 부설하고 콘크리트 타설 후, 표면에 strain gage를 부착하였다. 그림 4에는 대상 정착부 segment에 대한 gage 부설면의 sketch를 보여 주고 있다. 보강전 균열도^[1] 등을 참고로 그림 4의 각면에 총 49개소에 부착하였다. 그림 3 및 그림 5 ~8에는 각 gage 부설면에 따른 gage 부설위치와 gage index를 보여 주고 있다.

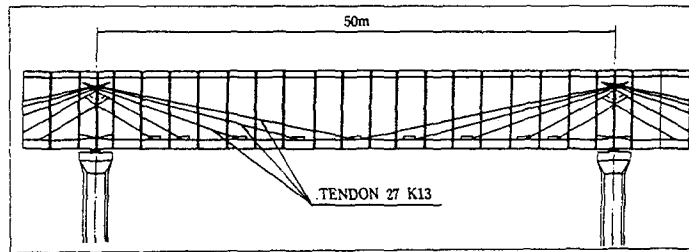


그림 1 전형적인 경간의 external prestressing 종 단면도

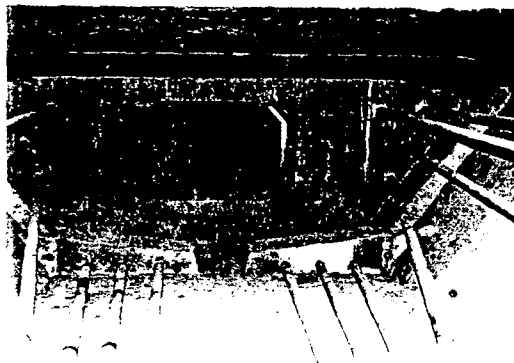


그림 2 Expansion joint segment의 external tendon 모습

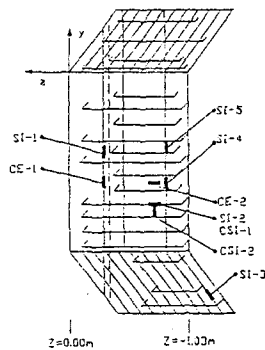


그림 3 Face ②면의 gage 부설위치

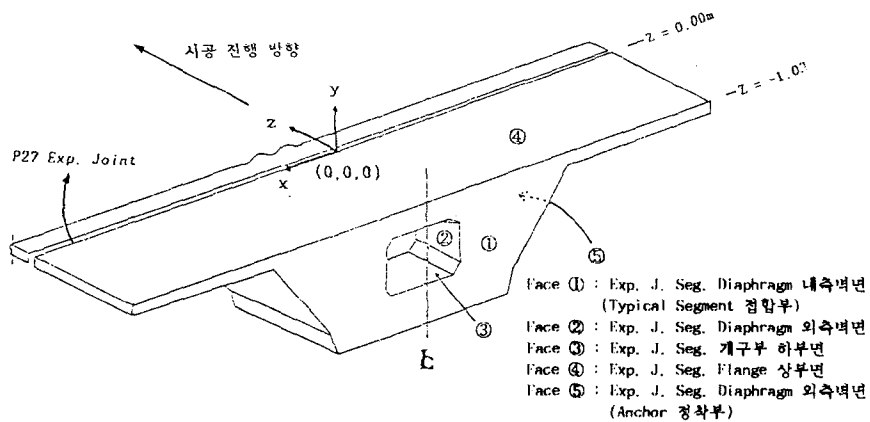


그림 4 Expansion joint segment 게이지 부설면 sketch

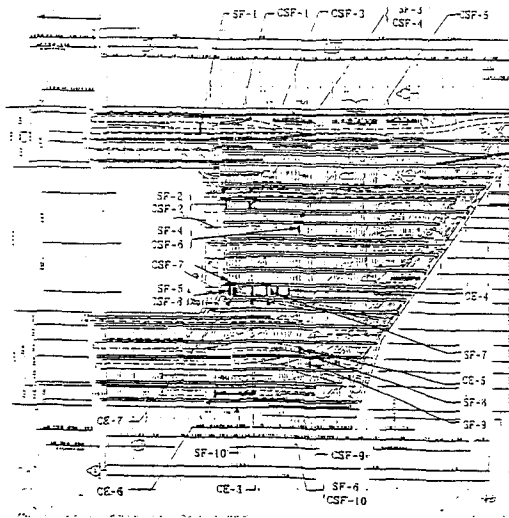


그림 5 Face ①면의 gage 부설위치

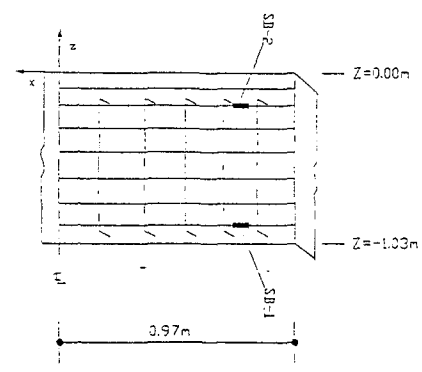


그림 6 Face ③면의 gage 부설위치

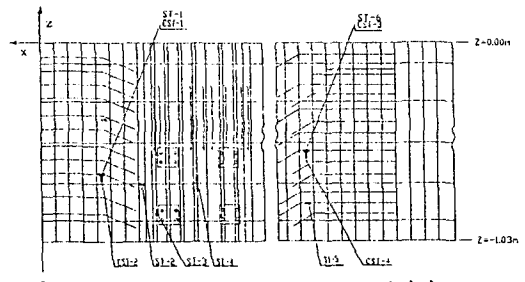


그림 7 Face ④면의 gage 부설위치

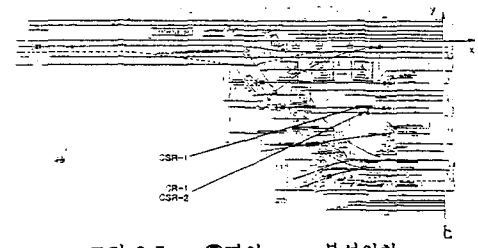


그림 8 Face ⑤면의 gage 부설위치

2.2 Prestressing 도입 단계별 계측

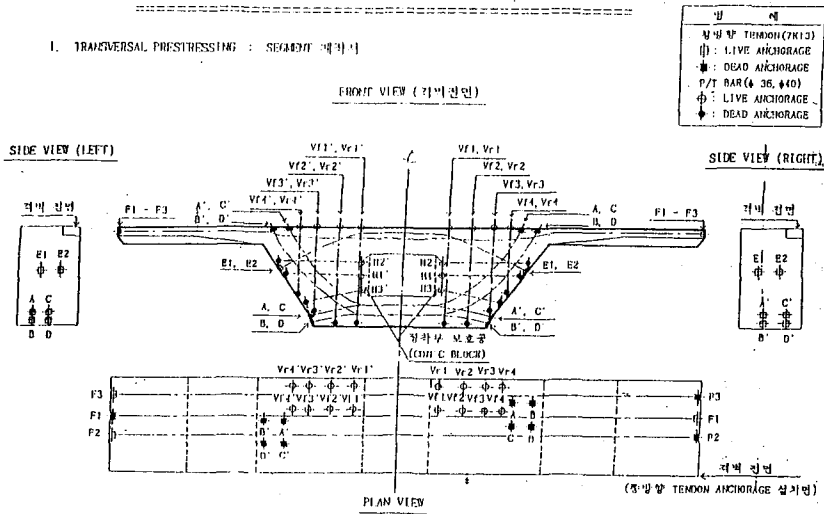
그림 9와 그림 10에는 횡방향과 종방향 prestress tendon 위치 및 번호와 prestressing 도입 단계를 보여주고 있다. 횡방향 prestressing의 도입은 segment 거치전 제작장에서 8단계에 걸쳐 실시하였고 도입 단계 별로 계측을 실시하였다. 종방향 prestressing 도입은 segment 거치 후에 7단계에 걸쳐 실시 하였고, 횡방향 종방향 총 15 단계에 걸쳐 실시하였다. 그림 11에서는 각 gage에 대한 prestressing 도입 단계별 누적 응력에 대한 계측 결과를 보여 주고 있다. 이들은 계측된 결과의 일부분으로 전형적인 현상만을 보여주고 있는 그림들이다. 도표의 x축은 그림 9과 그림 10의 prestressing 도입 단계를 나타내고 있고, y축은 strain gage의 변형율을 응력값으로 환산하여 누적한 값을 나타내고 있다. 실선은 P/T bar가 보강된 segment에 대한 실측값이고 점선은 P/T bar가 보강 되지 않은 경우의 추정치를 나타내고 있으며 도표의 상호 비교를 통해 P/T bar 보강 효과를 알 수 있다.

그림 11 (a)의 점선 도표에서 알 수 있듯이 face ①에서 횡 방향 prestressing의 영향(단계 8까지)은 개구부 측벽에는 거의 영향을 미치지 않고 있고 제 9단계 부터의 종방향 prestressing에는 인장응력을 받게된다. 그림의 직선에서 보여 주듯이 이 인장응력은 P/T bar 보강으로 크게 줄어들고 있음을 알 수 있고 최종 인장응력이 184 kg/cm² 밖에 되지 않아 철근량을 크게 줄여 줄 수 있음을 알 수 있다.

그림 11 (b)에는 face ① 개구부 상단에서 인장응력을 최대로 받는 부분에 대한 콘크리트 표면 응력을 보여주고 있다. 이 도표에서는 P/T bar 긴장으로 인하여 극부적인 응력이 발생하

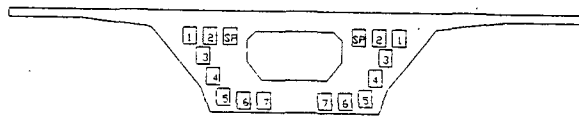
EXPANSION SEGMENT(제 제직) PRESTRESSING SEQUENCE

1. TRANSVERSAL PRESTRESSING : SEQUENCE 계획서



도입 단계	Prestressing 도입 Tendon
1	횡 방향 F1, F2, F3
2	횡 방향
3	수직 방향 P/T Bar
4	수평 방향 P/T Bar
5	횡 방향 E1, E2
6	횡 방향 B, D
7	횡 방향 A, C
8	수직 방향 외부 P/T Bar

그림 9 횡 방향 prestressing 위치 및 도입단계



Tendon Prestressing Sequence : L1 → R1 → P/T Bar → L3 → R3 → L4 → R4 → L7 → R7 → LAUNCHING TRUSS 이동 → L2 → R2 → L5 → R5 → L6 → R6
(주 : L:Left side Tendon, R:Right side Tendon)

도입 단계	Prestressing 도입 Tendon
9	종 방향 1
10	종 방향 3
11	종 방향 4
12	종 방향 7
13	종 방향 2
14	종 방향 5
15	종 방향 6

그림 10 종 방향 prestressing 위치 및 도입단계

로 보강되지 않았을 경우 단순히 P/T bar prestressing 단계를 생략하여 응력을 추정할 수 없을 것으로 판단되어 점선 도표는 도시하지 않았다. 이 도표에서 알 수 있듯이 이 부분은 P/T bar 보강을 하고서도 횡방향 prestressing으로 인해(단계 8까지) 63 kg/cm²의 인장응력이 발생하며 종방향 prestressing을 완료한 후에는 누계 93 kg/cm²의 인장응력으로 계속 되었다. 이러한 계측값들은 참고문헌 [2]에서 추정된 콘크리트 균열응력 42 kg/cm²보다 크게 초과하나 실제 prestressing 도입 당시에는 균열이 발생되지 않아 P/T bar 보강이 구조적인 균열을 억제 한다는 면에서 효과적이라고 평가 되었으며 이 경우 구조적인 안전성 확보는 물론 사용성(serviceability)에도 문제가 없을 것으로 판단 되었다.

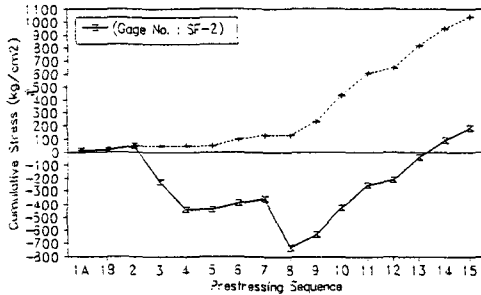
그림 11 (c)에는 face ① 개구부 하단에서 종방향 prestressing 도입 단계에 대해서만 인장 응력을 최대로 받는 부분에 대한 콘크리트 표면 응력을 보여 주고 있다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 종방향 prestressing만으로도 최종적으로 59 kg/cm²의 인장응력을 받고 있는 것을 알 수 있어 P/T bar 보강이 되지 않은 당초 설계인 경우 상단부에서와 마찬가지로 상당한 인장응력으로 콘크리트 표면에 균열을 유발할 수 있었음을 유추할 수 있으며 역시 P/T bar 보강으로 이를 효과적으로 억제할 수 있었음을 알 수 있다.

그림 11 (d)에는 face ② 개구부 전면 중앙부 철근 gage에 대한 응력을 보여 주고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 횡방향 prestressing은 거의 영향을 미치지 않고 종방향 prestressing 도입시 인장응력을 발생 시킨다. 점선 도표와 비교해 볼때 역시 P/T bar 보강이 인장응력을 상당히 감소 시켜줄 수 있다.

그림 11 (e)에는 face ② 개구부 전면 중앙부 콘크리트 표면 gage에 대한 응력상태를 보여 주고 있다. 이 부분은 횡방향 prestressing 도입시 인장응력을 61 kg/cm² 발생 시키고 있으며 종방향 prestressing에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이 부분 역시 P/T bar 보강되지 않았을 경우 큰 인장응력이 발생될 것으로 유추되어 균열을 발생시킬 수 있었을 것으로 추정되며 실제 상황도 보강전에 이 부분에 균열이 관찰되었다.

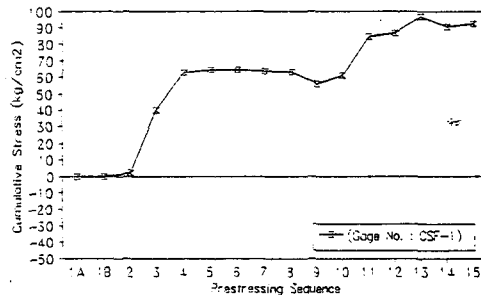
그림 11 (f)에는 face ③ 개구부 하부 철근 gage에 대한 응력상태를 보여 주고 있다. 이 부분은 횡방향 prestressing 도입으로 압축응력이 발생하여 활하중 재하시 유리하게 작용하도록 하는 것을 알 수 있다. 종방향 prestressing 도입으로 더욱 압축응력을 받게 됨을 알 수 있다. 그러나 점선 비교를 통해 보면 P/T bar 도입으로 최종 압축응력이 줄어들어 다소 불리하게 됨을 알 수 있다.

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



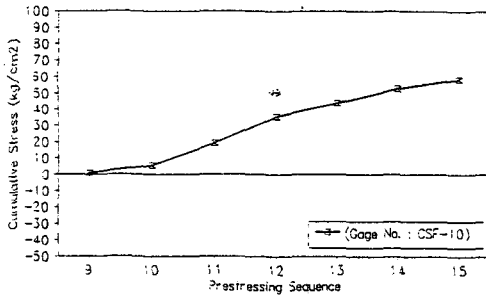
(a) SF-2, Face ① 개구부 상단 철근 gage

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



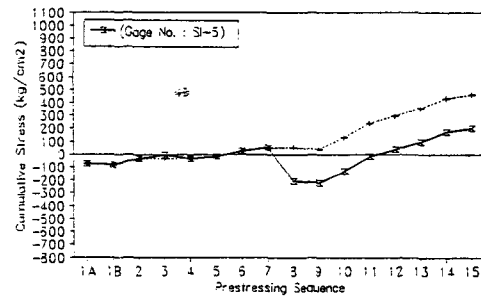
(b) CSF-1, Face ① 개구부 상단 콘크리트 표면 gage

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



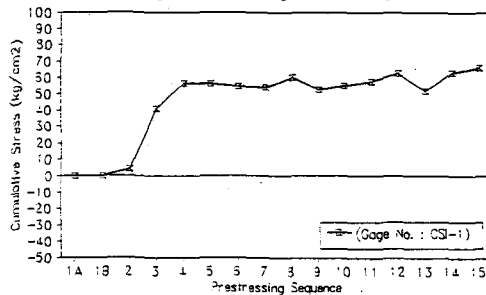
(c) CSF-10, Face ① 개구부 하단 콘크리트 표면 gage

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



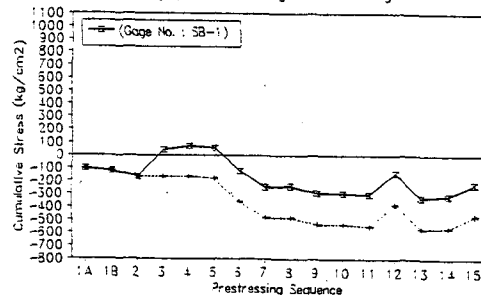
(d) SI-5, Face ② 개구부 전면 중앙부 철근 gage

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



(e) CSI-1, Face ② 개구부 전면 중앙부 콘크리트 표면 gage

Measured Stress(P27 Exp.J.Seg)
Gangbyun 1-1 Segmental Bridge



(f) SB-1, Face ③ 개구부 하부 철근 gage

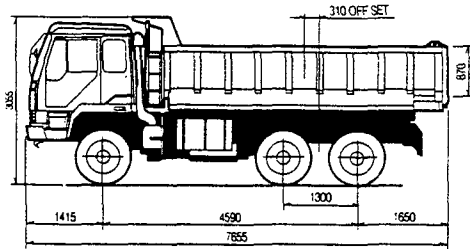
그림 11 Prestressing 도입 단계별로 측정된 누적 응력도표

2.3 정적 재하 실험

교량 완성 후 차량 통과시 exp. j. seg.의 인장축 diaphragm에 발생할 추가 응력에 대한 영향을 분석하기 위해 exp. j. seg.를 포함한 한 공간에 대해 정적 재하시험을 수행하였다. 그림 12에는 시험차량 제원을 보여주고 있으며 시험 차량의 총 중량이 36.70 ton 이므로 DB 24(총 중량 43.2 ton) 설계 하중에 대한 환산 계수는 1.18이다. 이 환산계수를 실측된 응력값에 곱하여 설계 차량 재하로 인한 영향을 분석하였다.

그림 13에는 시험차량 재하위치 중 단면도와 평면도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 차량은 지점부(㉠열), 지간 1/4지점(㉡열) 및 지간 중앙부(㉢열)에 재하 하였다.

표 1에는 재하 시험 결과의 일부를 보여주고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 차량재하로 인한 발생응력은 미소하여 exp. j. seg.에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 다만 데이터 분석 결과 발생응력은 미소하나 지점부와 지간 중앙부 재하시 미치는 영향은 분석 가능하였다. 대부분의 gage에서 지점부 재하에 대해서는 prestressing 도입 완료 후 인장부에서는 인장응력이 감소되는 유리한 경향을 나타내었고, 지간 중앙부 재하시에는 인장응력이 증가되는 불리한 경향을 나타내었다. 다만, 콘크리트 gage CE-7 및 CSF-1에서 지점부 재하시 인장응력이 추가로 발생하여 균열에 대해 다소 불리한 영향을 줄 수 있으나 그 크기가 미소하여 구조적인 안전성에는 차량 재하로 인해 별도의 문제를 제기 하지 않을 것으로 평가 되었다.



DB 24(총 중량 43.2 톤)

5.69톤 16.04톤 14.07톤
총 36.70톤

$$\text{환산 계수} = \frac{43.20}{36.70} = 1.18$$

그림 12 시험차량 제원 및 DB 24 환산 계수

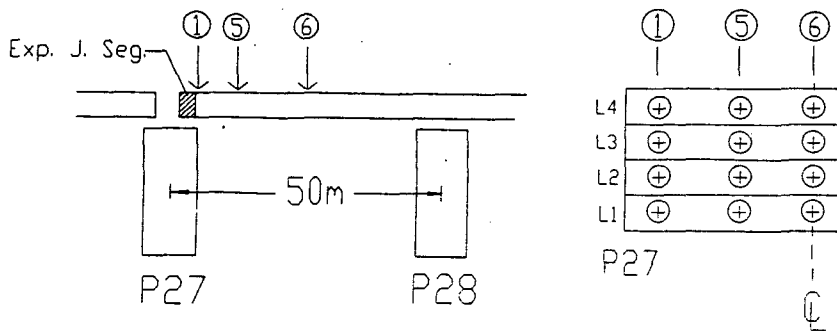


그림 13 시험차량 재하위치 중 단면도 및 평면도

표 1 재하 시험으로 인한 응력 계측치(kg/cm²)

GAGE No.	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	SF-5	SF-6	SF-7	SF-8	SF-9	SF-10	SI-1	SI-2	SI-3	SI-4	SI-5	SB-1	SB-2	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4	ST-5	ST-6	SR-1		
㉠열 응력	-75	-15	-17	-4	12	-19	2	-48	10	-52	-35	-8	10	-15	-44	-21	0	6	79	48	27	320	241	-17		
㉡열 응력	0	4	8	2	-4	-8	2	-17	4	-21	-8	4	-21	8	5	-31	0	4	15	10	8	-12	-4	-4		
GAGE No.	CE-1	CE-2	CE-3	CE-4	CE-5	CE-6	CE-7	CSF-1	CSF-2	CSF-3	CSF-4	CSF-5	CSF-6	CSF-7	CSF-8	CSF-9	CSF-10	CSI-1	CSI-2	CST-1	CST-2	CST-3	CST-4	CSR-1	CSR-2	
㉠열 응력	0	-1	0	-1	0	1	1	1	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	-2	0	-2	1	10	-1	0	0
㉡열 응력	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	0	0	0	

3. 구조해석 결과 비교검토

정착부에 대한 구조해석은 유한요소법을 통하여 엄밀히 분석할 수 있으며^[4, 5, 6] 본 연구에서는 기 제공된 구조계산서^[2]를 토대로 하여 실제 계측값과 비교 검토하였다. 해석 Modeling에 있어서 일반적으로 P. C box 교량의 경우(web anchor 정착)에는 prestressing의 응력 천이 구간을 P. C box의 높이(이 경우 3m)로 보고 설계하므로 해석 모델에는 이를 준해 exp. j. seg. 1.03m와 typical seg. 2.77m(총 길이 3.8m)만을 반영하여 구조해석을 실시한 후 exp. j. seg.의 격벽부에 발생하는 응력을 구하였다. 그림 6에는 해석모델을 보여주고 있고 그림 7에는 exp. j. seg.의 인장 측면의 face ①면(그림 2참조)에 부설한 철근과 콘크리트 gage 부설 위치를 해석결과인 stress contour에 도시한 모습이다. 그림 13에서 보여 주듯이 계측치와 해석치를 비교해본 결과 본 논문에는 수록하지 않았으나 상당한 차이가 남을 알 수 있어 구조 계산시 사용된 유한요소 해석모델이 실제거동을 반영하는데 적절하지 못한 것으로 사료되어 정착부 응력분석을 위한 적합한 해석모델의 개발이 필요함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 후속으로 현재 적합한 해석모델 개발을 진행하고 있다.

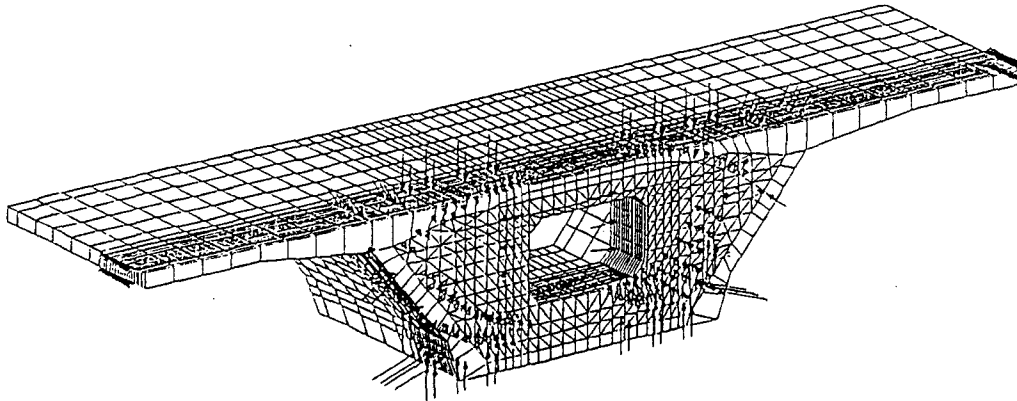
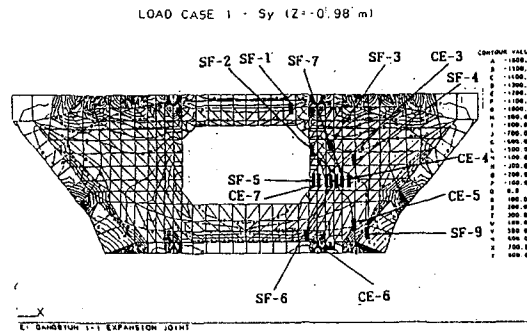


그림 14 해석 모델



Gage 부설면	Face ①													
	GAGE ID	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	SF-5	SF-6	SF-7	SF-9	CE-3	CE-4	CE-5	CE-6	CE-7
응력 (kg/cm ²)														
해석치 (kg/cm ²)	-42.75	28.5	-28.5	-14.25	171	171	51.3	-142.5	30	15	2	10	40	
계측치 (kg/cm ²)	248.88	183.6	281.52	191.76	401.88	298	337	122	58.36	35.45	9.31	10.74	52.28	

그림 15 Face ①면에 대한 계측치와 해석치의 비교 분석

4. 결론

본 연구에서는 현재 시공되고 있는 precast segmental P.C box 교량의 정착부인 exp. j. seg.에 대해 현장실험을 통하여 prestressing 도입 단계 별로 응력분석을 수행하고 균열 억제를 위하여 보강한 P/T bar의 효과를 분석하였다. 연구 결과 prestressing 도입 단계 별로 응력변화를 엄밀하게 분석할 수 있어 정착부의 실제 거동을 보다 확실하게 파악하여 향후 설계에 반영할 수 있는 계기를 마련하였으며, P/T bar 보강이 콘크리트의 격벽부 인장측의 균열을 효과적으로 억제할 수 있는 방안임을 검증하였다. 또한 재하시험을 통해 분석한 결과 차량재하로 인한 diaphragm에 추가 응력발생은 미소하여 거의 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었다. 한편 구조 계산시 사용된 유한요소 해석결과와 계측결과를 비교해 본 결과 상당한 차이가 남을 알 수 있어 정착부 응력 분석을 위한 적합한 해석모델의 개발이 필요함을 알 수 있었다.

5. 참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, "강변도시고속도로 1공구 Precast Segmental 교량구조 검토", 1993
2. 한국종합기술개발공사, "강변도시고속도로 제1공구 건설공사 구조(최종보완) 계산서", 1993
3. 이 성우, 배 두병, "강변도시고속도로 제 1공구 PRECAST SEGMENTAL 교량의 실용력 측정을 통한 안전성 분석에 관한 연구", 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서 KMU/SSRC-94/04, 1994
4. PTI, "Precast Segmental Box Girder Bridge Manual," 1978
5. 건설부, "콘크리트 교량 가설 특수 공법 설계·시공·유지·관리 지침", 1994
6. AASHTO, "Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridge," 1989