입체형 램프 구조물의 내하력 평가 사례 연구

채 원 규
신구대학 토목과

1. 서 론

교량 구조물의 일부인 입체시설 램프 구조물은 반경이 작은 곡선형으로 만들어져 있어서 이에 대한 구조해석은 3차원 모델에 의해 수행되어야 하며 원심하중을 고려해야 하는 등 복잡한 양상을 갖는다. 뿐만 아니라 이러한 램프 구조물은 구조물의 특성상 콘크리트 단일구조보다는 대부분 강재와 콘크리트와의 합성구조로 구조부재를 유지하므로 이에 대한 구조안전성 검토는 콘크리트와 강형의 합성전 단계와 합성후 단계에 대하여 각각 수행하여야 하는 여러 가지 절차를 갖고 있다.

본 연구에서는 입체형 램프 구조물의 내하력 평가를 위하여 대상구조물에 대한 구조해석을 수행하는 한편, 실동하중에 의한 재하시험을 수행하여 이들 결과를 실동하중에 의한 실측치와 비교 검토하였다. 실동하중에 의한 재하시험은 정적시험과 동적시험으로 나누어 수행하였으며, 정적 및 동적 실험 결과에 의해 대상구조물의 환산충격계수를 산정하였다. 최종적으로 본 연구에서는 구조해석 결과와 재하시험 결과 등의 자료에 의한 내하력 평가계수를 사용하여 대상 입체 램프 구조물에 대한 내하력을 평가하였으며, 본 연구에서 수행된 입체 램프 구조물에 대한 내하력 평가 사례가 앞으로 수행되는 램프 구조물의 안전도 평가에 대한 자료로 활용되길 기대한다.

2. 대상구조물 현황

본 연구의 대상 램프 구조물의 상부구조 형식은 4경간 연속 합성 박스 거더교로서, 길이는 4@40m=160m이다. 차도 폭은 4.5~5.5m로서 설계 차선수는 1차선이며, 설계하중은 1등교인 DB-24, DL-24로 설계되었다. 한편 본 램프 구조물의 회전반경은 30m이다.

3. 구조해석

3.1 개요

본 연구에서는 입체형 램프 구조물의 내하력 평가의 일환으로 대상구조물에 대한 고정하중 응력과 설계 활하중 응력 및 재하차량에 대한 응력을 산정하기 위하여 구조해석을 수행하였다.

3.2 구조해석 모델링

본 연구에서 수행한 대상 구조물의 모델링은 그림 1, 그림 2와 같다.[1)]

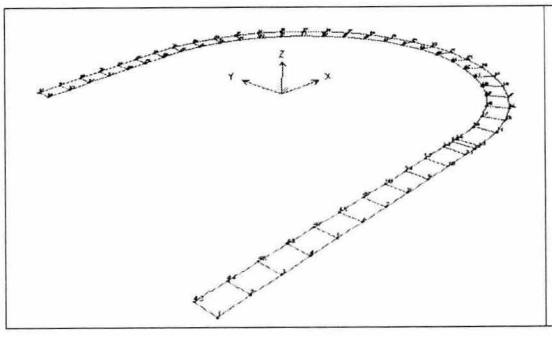

그림 1. 대상 구조물의 모델링.(절점번호)

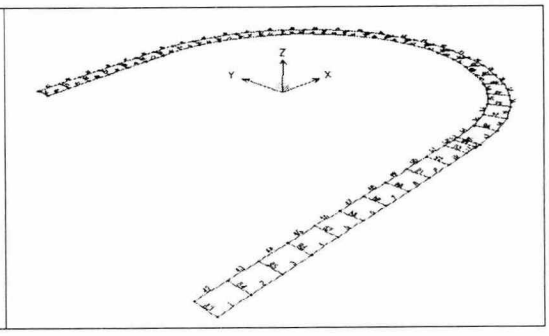

그림 2. 대 상구조물의 모델링.(부재번호)

3.3 구조해석 결과

구조해석에 의한 고정하중 작용시의 처짐과 재하차량하중에 의한 처짐에 대한 결과는 각각 그림 3, 그림 4와 같으며, 각 하중에 대한 휨모멘트에 대한 결과와 전단력에 대한 결과는 각각 그림 5~그림 6, 그림 7~그림 8에 나타내었다.

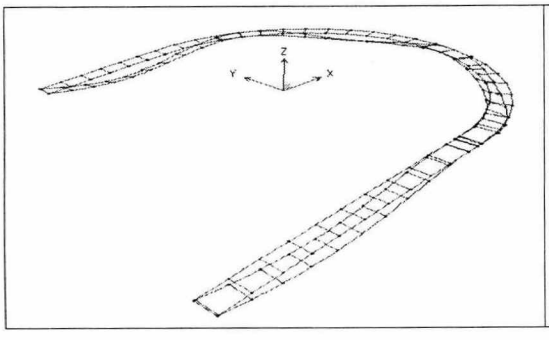

그림 3. 고정하중에 의한 처짐도.

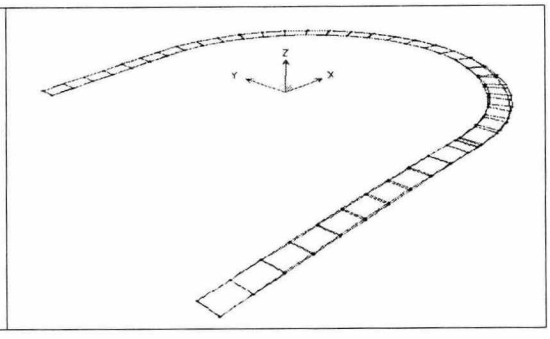

그림 4. 재하차량하중에 의한 처짐도.

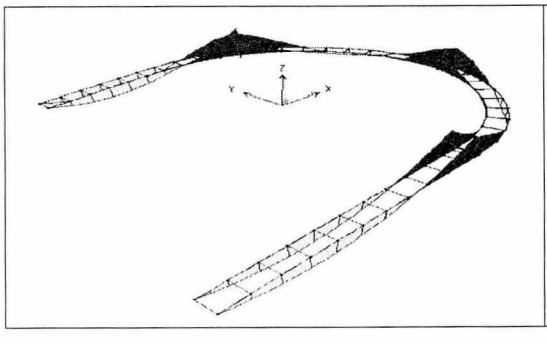

그림 5. 고정하중에 의한 휨모멘트도.

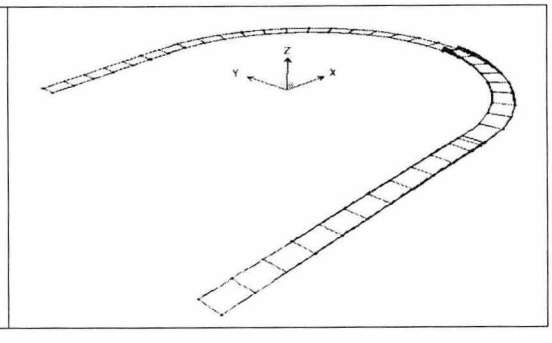

그림 6. 재하차량하중에 의한 휨모멘트도.

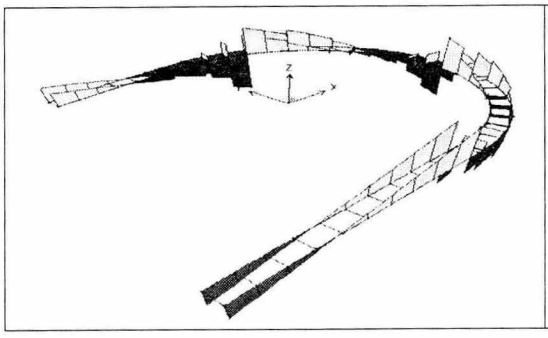

그림 7. 고정하중에 의한 전단력도.

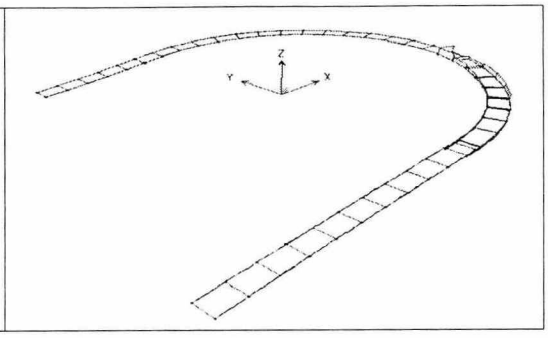

그림 8. 재하차량하중에 의한 전단력도.

3.4 응력 산정 결과

본 연구에서는 구조해석 결과에 의해 각 하중 종류에 따라 처짐, 휨응력 및 전단응력을 산정하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 구조해석 결과에 의한 응력 산정 결과.

하중 종류		구조해석 결과			응력 산정	
		처짐 [mm]	휨모멘트 [tonf·m]	전단력 [tonf]	응력 종류	응력 [kgf/cm^2]
고정하중		32.07	388.7	133.7	휨응력	876.0
활하중	설계하중 (span 1)	12.20	153.5	13.3	휨응력	346.0
	설계하중 (span 2)	13.23	102.6	12.2	휨응력	232.0
	재하차량하중 (L.C 1)	5.09	35.2	-	휨응력	80.0
	재하차량하중 (L.C 2)	10.75	82.8	-	휨응력	186.0
	재하차량하중 (L.C 3)	-	-	15.2	전단응력	60.0
	재하차량하중 (L.C 4)	-	-	19.4	전단응력	76.0

4. 내하력 평가

4.1 내하력 평가 기법

손상된 구조물의 실저항강도와 관련된 손상계수(D_F)와 재하시험에 의한 실 응답비(K)를 명확하게 포함시킨 내하력 평가 기법은 다음과 같은 식으로 표현된다.[2), 3)]

○ 내하율 : $R_F = \frac{P_n}{P_L} = \frac{\sigma_a \cdot D_F - \sigma_d}{\sigma_l} \times \frac{1}{K}$, ○ 공용내하력 : $P_n = P_L \times R_F$

여기서, P_L : 설계활하중, σa : 재료의 허용응력, σ_d : 고정하중 응력, σ_l : 설계활하중에 의한 응력, K : 내하력 보정계수, $K = Ks \times (1 + i_M)$, Ks : 응답비(실측응력 또는 처짐/계산응력 또는 처짐), i_M : 실측 충격계수, D_F : 손상계수이다.

4.2 응답비 산출

본 연구에서는 교량의 결함상태를 포함한 현상태에서의 안전도 판별을 위하여 휨응력 및 처짐에 대하여 실측치와 이론치의 응답비를 산출하여 합성작용계수를 결정하였으며, 이들 결과를 표 2에 각각 나타내었다. 여기서 실측치는 재하시험에 의해 측정된 결과를 나타낸 것이며, 이론치는 재하시험과 동일한 하중상태에서의 구조해석 결과에 의해 계산된 값을 나타낸 것이다.

표 2. 실측치와 이론치의 비교에 의한 합성작용계수(CAF).

단면력	gage 번호	실측치	이론치	응답계수	CAF
휨응력	gage 1	101.4	80.0	1.27	-
	gage 2	68.5	186.0	0.37	0.63
전단응력	gage 4,5,6	2.3	60.0	0.04	0.96
	gage 7,8,9	2.3	76.0	0.03	0.97
처짐	처짐 1	5.86	5.09	1.15	-
	처짐 4	9.13	10.75	0.85	0.15

4.3 동적주행시험 결과

본 연구에서는 동적주행시험 결과를 정적시험 결과와 비교하여 환산충격계수를 산정하였다. 본 연구에서 수행한 동적주행시험으로 측정된 처짐 이력곡선을 각 속도별로 정리하면 그림 9~그림 12와 같다.

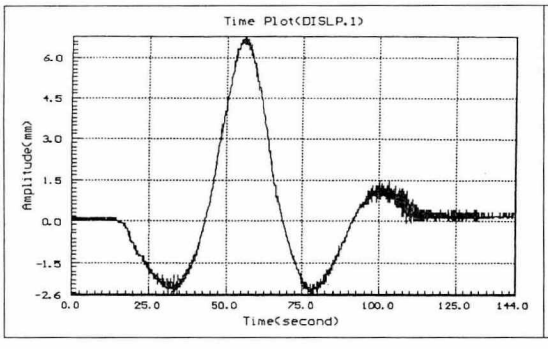

그림 9. 처짐 이력곡선($v = 5km/hr$).

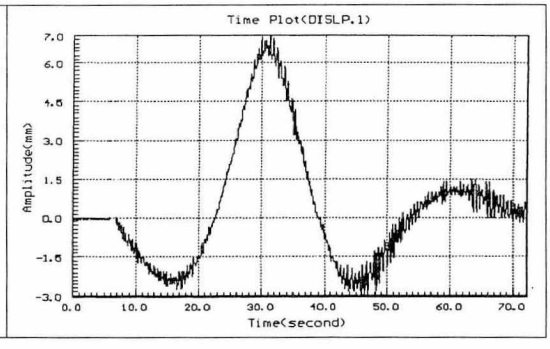

그림 10. 처짐 이력곡선($v = 10km/hr$).

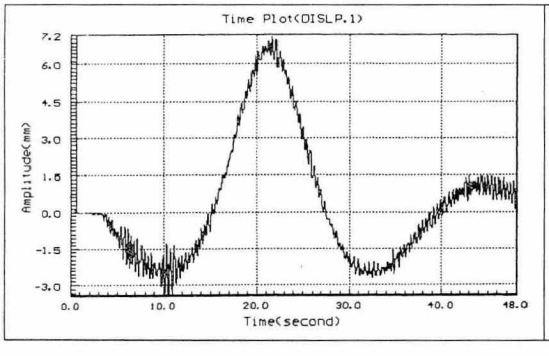

그림 11. 처짐 이력곡선($v = 15km/hr$).

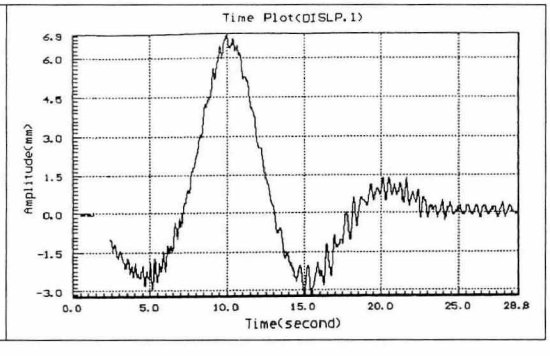

그림 12. 처짐 이력곡선($v = 25km/hr$).

본 연구에서는 동적실험결과를 이용하여 환산충격계수(TIF)를 산정하였다. 환산충격계수의 산정시 5km/hr의 동적 주행을 의사 정적 상태로 보아 10km/hr 이상의 동적 주행시의 측정값을 5km/hr의 동적 주행시의 측정값(의사 정적측정치)과의 비로서 산정한 환산충격계수(TIF-1)와 동적 주행시의 측정값을 정적 측정치를 기준으로 산정한 환산충격계수(TIF-2)를 각각 다음의 표 3에 나타내었다.

표 3. 동적주행시험 처짐 측정결과 및 환산충격계수 비교.

주행속도 (Km/hr)	처짐 [mm]	환산충격계수	
		TIF-1	TIF-2
정적측정치	5.86		
5	6.74	-	0.15
10	7.03	0.04	0.20
15	7.13	0.06	0.22
25	6.90	0.02	0.18
30	7.05	0.05	0.20

표 3의 동적주행시험 결과, 대상 입체 램프 구조물은 주행속도가 증가함에 따라 초기에는 충격계수가 증가하였으며, 시속 15km/hr일 때 가장 큰 충격계수를 발생시킴을 알 수 있다. 이 경우 의사 정적 상태로 산정된 환산충격계수는 0.06으로, 정적 측정값을 기준으로 산정된 환산충격계수인 0.22의 약 30%정도이다.

한편 설계기준에서 제시된 충격계수는 0.187로서 정적 측정치로 산정된 환산충격계수에 근접한 값을 나타내고 있었다.

4.4 내하력 평가

본 연구에서는 기 수행한 구조해석 결과와 실동하중에 의한 재하시험 결과 및 내하력 평가기법에 의해 대상 입체시설 램프의 내하력을 평가하였다. 한편 본 연구에서는 대상 구조물에 대한 내하력 평가시 의사 정적측정치를 사용한 환산충격계수와 정적 측정치를 사용한 환산충격계수를 각각 사용하여 비교, 검토하였으며, 대상구조물이 강교임을 감안하여 허용응력 설계법을 사용하였다.

1) 의사 정적측정치를 사용한 경우의 내하력 평가

○ 내하력 보정계수(K) :

$$\delta_M = 6.74mm,\quad \delta_C = 7.13mm,\quad i_M = 0.06,\quad K = \frac{5.86}{5.09} \times (1 + 0.06) = 1.22$$

○ 손상계수(D_F) : $\omega_D = 1.80Hz,\quad \omega_L = 2.01Hz,\quad D_F = \frac{1.80^2}{2.01^2} = 0.80$

○ 내하율(R_F), 공용내하력(P_n) :

$$\sigma_a = 1900kgf/cm^2,\quad \sigma_d = 876.0kgf/cm^2,\quad \sigma_l = 346.0kgf/cm^2$$

$$R_F = \frac{1900 \times 0.80 - 876.0}{346.0} \times \frac{1}{1.22} = 1.53,\quad P_n = 24 \times 1.53 = DB - 36.7$$

2) 정적 측정치를 사용한 경우의 내하력 평가

○ 내하력 보정계수(K) :

$$\delta_M = 5.86mm,\quad \delta_C = 7.13mm,\quad i_M = 0.22,\quad K = \frac{5.86}{5.09} \times (1 + 0.22) = 1.40$$

○ 내하율(R_F), 공용내하력(P_n) :

$$R_F = \frac{1900 \times 0.80 - 876.0}{346.0} \times \frac{1}{1.40} = 1.33,\qquad P_n = 24 \times 1.33 = DB - 31.9$$

4.5 내하력 평가 결과

본 연구에서 수행한 입체시설 램프의 내하력 평가 결과는 표 4와 같다.

표 4. 내하력 평가 결과.

기준 측정치	환산충격계수	내하률	내하력
의사 정적측정치	0.06	1.53	DB-36.7
정적 측정치	0.22	1.33	DB-31.9

위의 내하력 평가결과, 정적측정치를 사용하여 산정된 내하력은 의사정적상태를 기준으로 한 내하력의 약 87%로 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 입체형 램프 구조물에 대한 내하력 평가를 위하여, 대상 구조물에 대한 구조해석, 실동하중에 의한 재하시험, 내하력 평가계수 산정 등 일련의 내하력 평가를 수행하였다.

구조해석에 의한 이론치와 재하시험에 의한 실측치의 비교 결과, 대상 구조물에 대한 합성작용계수는 처짐의 경우 0.15로 휨응력 및 전단응력에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 동적주행시험 결과, 대상 입체 램프 구조물은 시속 15km/hr 일 때 가장 큰 충격계수를 발생시킴을 알 수 있었으며, 이 경우 의사 정적 상태로 산정된 환산충격계수는 정적 측정치를 기준으로 산정된 환산충격계수의 약 30%정도이었다. 설계기준에서 제시된 충격계수는 정적 측정치로 산정된 환산충격계수에 근접한 값을 나타내고 있었으며, 이는 입체 램프 구조물에 대한 내하력 평가시 정적측정치를 사용하여 산정된 내하력이 상대적으로 신뢰도가 높음을 시사하고 있다.

참고문헌

1. Computer & Structures Inc., "SAP 2000 Nonlinear Structural Analysis", 1999.
2. "콘크리트 표준시방서," 사단법인 대한토목학회, 1996년 5월, pp. 330~332.
3. "교량의 관리체계개선," 건설교통부, 1995년 5월, pp. 490~508.