

강상형교의 안전도 평가에 관한 연구

A Study on the Safety Assessment of the Steel Box Girder Bridge

채 원 규
Won-Kyu Chai
신구전문대학 토목과

ABSTRACT

In this thesis, the safety assessment of the steel box girder bridge were studied. From the structural analysis results of the steel box girder bridge, bending moment and shear force were calculated, and these element force was applied to the safety assessment of the steel box girder bridge.

1. 서론

교량 구조물은 결함이 한번 발생하면 즉각적인 보수나 교체가 어렵기 때문에 그 기능을 상실하여 효율적인 운송을 불가능하게 한다. 따라서 교량의 안전성을 평가하는 것은 대상 교량의 현 상태를 파악하고 적절한 유지관리를 위한 필수적 사항이다.^{1),2)} 강상형교는 주형의 강재와 슬래브의 콘크리트와의 합성작용에 의해 거동이 복잡하게 일어나기 때문에 안전도 평가가 간단하지 않다.

현재 도로교의 안전도는 도로교가 보유하고 있는 공용내하력에 의해 평가되고 있다. 공용내하력을 산출하기 위해서는 재하시험을 수행하여 실패하중에 의한 실측응력값을 구하여 구조해석에 의한 이론응력값과 비교하여야 하는 복잡한 절차를 거쳐야한다. 그러나 강상형교와 같은 상자형 구조물은 일반적으로 실패하중에 의한 실측응력값이 구조해석에 의한 이론응력값보다 작게 나타나기 때문에, 공용내하력을 구하기 전 단계인 구조해석에 의해 산출되는 기본내하력만을 가지고도 구조물의 안전도를 평가 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구조해석에 의해 산출된 연속 강상형교의 합성전과 합성후의 단면력을 각각 구하여, 이를 토대로 강상형교의 기본내하력을 검토하였으며, 이를 공용내하력과 비교, 검토 하였다.

2. 도로교의 기본내하력

도로교의 기본내하력은 구조해석에 의해 계산된 사하중에 의한 응력과 활하중에 의한 응력에 의해 산출된다. 현재 도로교에 사용되고 있는 허용응력설계법과 강도설계법에 의한 기본내하력은 다음과 같다.^{3),4)}

2.1 허용응력법에 의한 기본내하력

허용응력법에 의한 도로교의 기본내하력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P = \frac{\sigma_a - \sigma_d}{\sigma_{DB}} \times P_{DB}$$

여기서, P 는 허용응력설계법에 의한 기본내하력, σ_a 는 재료의 허용응력, σ_d 는 사하중에 의한 응력, σ_{DB} 는 활하중에 의한 응력, P_{DB} 는 설계활하중이다.

2.2 강도설계법에 의한 기본내하력

강도설계법에 의한 도로교의 기본내하력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P = \frac{\psi \times R_n - \gamma_D \times D}{\gamma_L \times L} \times P_{DB}$$

여기서, P 는 강도설계법에 의한 기본내하력, ψ 는 강도 감소계수, R_n 은 부재의 공칭강도, γ_D 는 사하중에 대한 하중조합계수, D 는 사하중에 의한 강도, γ_L 는 활하중에 대한 하중조합계수, L 은 사하중에 의한 강도, P_{DB} 는 설계활하중이다.

3. 강상형교에 대한 구조해석

본 연구에서는 강상형교에 대한 구조해석의 대상구조물을 준공후 약 5년이 경과된 3경간 연속 강상형교로 하였다.

3.1 개요

본 연구에서는 분석하고자 하는 구조물의 역학적 거동을 정확히 나타내며 상대적으로 해석에 필요한 노력을 줄일 수 있도록 격자해석에 기초하여 구조해석을 수행하였으며, 해석 프로그램은 가장 널리 사용되는 범용 구조해석 프로그램인 SAP 90을 사용하였다.

3.2 해석 모델링 및 단면특성

본 연구의 대상구조물은 3경간 연속 강상형교로서, 교량의 실거동을 파악하기 위하여 연속되는 3경간을 고려하여 총절점수 170개, 총부재수 255개의 격자요소로 모델링하여 구조해석을 실시하였다. 교축방향은 steel box 주형과 공유하는 슬래브를 1개의 거더로 이상화하였으며, 교축직각방향은 가로보와 슬래브를 1개 부재로 이상화하여 횡방향부재로 구성하였다. 지점조건은 구조물의 실제 받침조건에 맞게 힌지 또는 로울러지점으로 모델링하였으며, 모델링은 Fig. 1에 나타내었다.

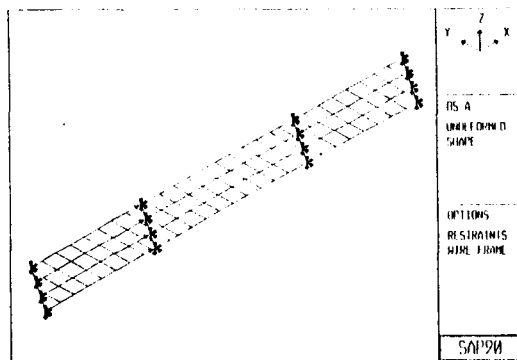


Fig. 1 Modeling of steel box girder bridge.

구조해석에 사용된 재료의 특성치는 도로교 표준시방서 및 원설계도서를 참조하였으며, Table 1에 재료상수를 정리하였다.^{5),6)}

Table 1. Material property.

Slab concrete	Compressive strength	270 kg/cm ²
	Modulus of elasticity	2.46 × 10 ⁵ kg/cm ²
Steel girder	Allowable tensile strength	1900 kg/cm ²
	Modulus of elasticity	2.10 × 10 ⁶ kg/cm ²

교축방향의 강재주형의 경우에는 길이방향에 따라 부재두께의 변화가 있었고 슬래브의 폭이 내측주형과 외측주형에서 다르기 때문에 각기 다른 단면계수를 적용하였으며, 교축직각방향의 거더는 가로보와 슬래브의 횡방향-부재를 적용하였다. Table 2에 계산에 적용한 부재들의 단면상수를 정리하였다.

Table 2. Sectional property.

Size of section [mm]	Location of girder	Moment of inertia [m ⁴]	Torsional inertia [m ⁴ /m]
Upper : 2700 × 12	Outside girder	0.195808	0.137872
Lower : 2700 × 12	Inside girder	0.200031	0.138207
Upper : 2700 × 12	Outside girder	0.225329	0.147055
Lower : 2700 × 16	Inside girder	0.230602	0.147390
Upper : 2700 × 16	Outside girder	0.227043	0.157263
Lower : 2700 × 16	Inside girder	0.232073	0.157599
Upper : 2700 × 20	Outside girder	0.227973	0.171462
Lower : 2700 × 20	Inside girder	0.232234	0.171696
Cross beam + slab	Outside	0.002877	0.000483
	Inside	0.002848	0.000363

3.3 사하중 작용시의 부재력

구조해석을 수행한 결과로서 사하중에 의한 합성전과 합성후의 최대 휨모멘트 값과 전단력값을 각각 Table 3, 4에 나타내었다.

Table 3. Maximum bending moment by dead load.

Girder	Non-composite member [t · m]			Composite member [t · m]		
	Span 1	Pier 1	Span 2	Span 1	Pier 1	Span 2
Outside	407.2	-1158.8	610.3	128.0	-332.9	172.9
Inside	374.5	-1081.2	600.4	79.3	-199.3	128.8

Table 4. Maximum shear force by dead load.

Girder	Non composite member [ton]			Composite member [ton]		
	Span 1	Pier 1	Span 2	Span 1	Pier 1	Span 2
Outside	0.0	167.7	0.0	0.0	45.1	0.0
Inside	0.0	142.6	0.0	0.0	24.0	0.0

3.4 설계활하중 작용시의 부재력

시간중양부와 지점부에 각각 최대 정모멘트와 최대 부모멘트가 발생하도록 설계활하중(DB-24, DL-24)을 재하시켜 휨모멘트와 전단력을 구하였으며, 설계활하중에 의한 최대 휨모멘트값과 최대 전단력값을 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Maximum bending moment and shear force by live load.

Girder	Bending moment [t · m]			Shear force [ton]		
	Span 1	Pier 1	Span 2	Span 1	Pier 1	Span 2
Outside	298.7	-432.0	327.0	21.6	40.9	18.0
Inside	263.6	-372.7	288.6	29.4	45.4	25.7

3.5 설계하중 작용시의 응력 검토

Tables 3~5의 구조해석 결과를 토대로 사하중 및 설계활하중에 의한 강상형교의 휨응력을 정리하여 Table 6에 나타내었으며, 강상형교의 휨응력과 전단응력을 조합한 합성응력을 정리하여 Table 7에 나타내었다.

Table 6. Bending stress by design load.

Girder		M [t · m]	σ_D [kg/cm ²]		σ_L [kg/cm ²]		$\Sigma \sigma$ [kg/cm ²]		Safety
			Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	
Span 1	Outside	833.9	-452	540	-52	257	-504	797	O.K
	Inside	717.4	-408	464	-41	225	-449	689	O.K
Pier 1	Outside	-1923.7	1165	-1209	282	-339	1447	-1548	O.K
	Inside	-1653.2	1012	-1040	239	-292	1251	-1332	O.K
Span 2	Outside	1110.2	-555	650	-57	236	-612	886	O.K
	Inside	1017.8	-537	610	-45	207	-582	817	O.K

[Note : Allowable tensile stress and allowable compressive stress of steel girder is 1900 kg/cm².]

Table 7. Resultant stress by design load.

Girder		σ [kg/cm ²]		τ [kg/cm ²]	Resultant stress $(\sigma/\sigma_{sa})^2 + (\tau/\tau_a)^2$		Safety
		Upper	Lower		Upper	Lower	
Span 1	Outside	-504	797	60	0.07	0.18	O.K
	Inside	-449	689	82	0.06	0.14	O.K
Pier 1	Outside	1447	-1548	705	0.99	1.07	O.K
	Inside	1251	-1332	589	0.72	0.78	O.K
Span 2	Outside	-612	886	50	0.11	0.22	O.K
	Inside	-582	817	19	0.09	0.19	O.K

[Note : Limite value of resultant stress is 1.2.]

4. 강상형교의 기본내하력 산출

4.1 기본내하력 산출

본 연구에서는 3절의 구조해석 결과를 토대로 강상형교 강제 주형에 대한 허용응력법에 의한 기본내하력을 산출하였으며, 그 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. The primary capacity load assessment of the steel box girder bridge.

Girder			Primary capacity load [DB]
Span 1	Outside	Upper flange	$(1900-452)/52 \times 24 = 668.4$
		Lower flange	$(1900-540)/257 \times 24 = 127.0$
	Inside	Upper flange	$(1900-408)/41 \times 24 = 873.4$
		Lower flange	$(1900-464)/225 \times 24 = 153.1$
Pier 1	Outside	Upper flange	$(1900-1165)/282 \times 24 = 62.6$
		Lower flange	$(1900-1209)/339 \times 24 = 49.0$
	Inside	Upper flange	$(1900-1012)/239 \times 24 = 89.3$
		Lower flange	$(1900-1040)/292 \times 24 = 70.8$
Span 2	Outside	Upper flange	$(1900-555)/57 \times 24 = 566.4$
		Lower flange	$(1900-650)/236 \times 24 = 127.2$
	Inside	Upper flange	$(1900-537)/45 \times 24 = 727.0$
		Lower flange	$(1900-610)/207 \times 24 = 149.5$

4.2 기본내하력과 공용내하력의 비교

본 연구에서는 강상형교의 기본내하력을 구하여 공용내하력과 비교하였다. 허용응력법에 의한 공용내하력은 다음과 같은 식으로 산출된다.^{3),4)}

$$P_n = P \times (K_s \times K_t \times K_r \times K_o)$$

여기서, P_n 은 공용내하력, P 는 기본내하력, K_s 는 실측보정계수, K_t 는 교통상태에 따른 보정계수, K_r 은 노면상태에 따른 보정계수, K_o 는 기타 조건에 따른 보정계수이다. 또한 실측보정계수 K_s 는 다음과 같다.

$$K_s = \frac{\text{계산치}}{\text{실측치}} \times \frac{1 + i\text{계산}}{1 + i\text{실측}}$$

실동하중에 의한 실측치에 의해 계산된 대상구조물의 보정계수 값을 나타내면 Table 9와 같다.

본 연구에서는 내하력 평가의 대상구조물이 강상형 구조임을 감안하여 실측치가 계산치에 비교적 접근된 응답비만을 Table 9에 정리하였으며, 안전측(conservative)의 내하력 평가가 이루어질 수 있도록 Table 9에서 산출된 실측보정계수 K_s 값 중 가장 작은값을 선택하여 내하력 평가에 사용하였다. 한편 실측보정계수 K_s 값의 계산시에 사용되는 실측 충격계수는 측정치중 가장 큰 값인 0.104를 사용하였고, 계산 충격계수는 계산치중 가장 작은 값인 0.158을 사용하였다.

Table 9. Corrective factor by field test.

Girder	Member force	Calculated value	Measured value	K_s
Outside (1)	Compressive stress [kg/cm ²]	-22	-11	2.10
	Tensile stress [kg/cm ²]	109	101	1.13
	Displacement [mm]	2.980	2.990	1.05
Inside	Compressive stress [kg/cm ²]	-15	-15	1.05
	Tensile stress [kg/cm ²]	80	59	1.42
	Displacement [mm]	1.970	2.135	0.97
Outside (2)	Compressive stress [kg/cm ²]	-35	-32	1.15
	Tensile stress [kg/cm ²]	173	166	1.09
	Displacement [mm]	4.893	5.380	0.95

Table 9의 결과에서 계산된 실측 보정계수의 최소값은 외측거더의 처짐에 대한 것으로서 0.95로 나타났다. 이 값에 의해 산정된 허용응력법에 의한 공용내하력을 Table 8의 기본내하력과 비교하여 Table 10에 나타내었다.

Table 10. Comparance in the primary capacity load with the carry capacity load.

Girder		Primary capacity load		Carry capacity load	
		Upper flange	Lower flange	Upper flange	Lower flange
Span 1	Outside	DB-668.4	DB-127.0	DB-635.0	DB-120.6
	Inside	DB-873.4	DB-153.1	DB-829.7	DB-145.5
Pier 1	Outside	DB- 62.6	DB- 49.0	DB- 59.5	DB- 46.5
	Inside	DB- 89.3	DB- 70.8	DB- 84.8	DB- 67.3
Span 2	Outside	DB-566.4	DB-127.2	DB-538.1	DB-120.8
	Inside	DB-727.0	DB-149.5	DB-690.6	DB-142.0

Table 10의 강상형교의 기본내하력과 공용내하력의 비교 결과에서, Pier 1의 부모멘트부의 강재 주형 하단부의 기본내하력이 약 DB-49.0, 공용내하력이 약 DB-46.5로서 가장 낮게 나타나 대상 강상형교의 내하력임을 알 수 있으며, 또한 기본내하력과 공용내하력이 큰 차이를 나타내고 있지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 강상형교의 안전도 평가는 구조해석만에 의해서 수행 될 수 있는 기본내하력의 산정 결과가 당초 설계활하중을 초과할 경우, 실동하중에 의한 정적, 동적 실험에 의해서만 산출될 수 있는 공용내하력의 산정없이 기본내하력만에 의해 구조물의 안전도를 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

현재 도로교의 안전도는 도로교가 보유하고 있는 공용내하력에 의해 평가되고 있으며, 공용내하력을 산출하기 위해서는 재하시험을 수행하여 실동하중에 의한 실측응력값을 구하여 구조해석에 의한 이론응력값과 비교하여야 하는 복잡한 절차를 거쳐야 한다.

본 연구에서는 도로교의 안전도 평가시, 강상형교의 경우 일반적으로 실동하중에 의한 실측응력값이 구조해석에 의한 이론응력값보다 작게 나타나기 때문에 구조해석에 의해 산출되는 기본내하력만을 가지고도 구조물의 안전도를 평가 할 수 있도록 강상형교의 기본내하력과 공용내하력을 비교 검토하였다.

본 연구에서는 준공후 약 5년이 경과된 3경간 연속 강상형교를 대상구조물로 하였으며, 분석하고자 하는 구조물의 역학적 거동을 정확히 나타내며 상대적으로 해석에 필요한 노력을 줄일 수 있도록 격자해석에 기초하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석시 시간중양부와 지점부에 각각 최대 정모멘트와 최대 부모멘트가 발생하도록 설계활하중을 재하시켜 휨모멘트와 전단력을 구하였으며, 이를 토대로 강상형교의 기본내하력을 산정하였다.

강상형교의 기본내하력과 공용내하력의 비교 결과에서, P₃의 부모멘트부의 강재 주형 하단부의 기본내하력이 약 DB-49.0, 공용내하력이 약 DB-46.5로서 가장 낮게 나타나 대상 강상형교의 내하력임을 알 수 있으며, 또한 기본내하력과 공용내하력이 큰 차이를 나타내고 있지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 강상형교의 안전도 평가는 구조해석만에 의해서 수행 될 수 있는 기본내하력의 산정 결과가 당초 설계활하중을 초과할 경우, 실동하중에 의한 정적, 동적 실험에 의해서만 산출될 수 있는 공용내하력의 산정없이 기본내하력만에 의해 구조물의 안전도를 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 채 원규, "철근콘크리트 T형교의 안전진단에 관한 연구," 한국산업안전학회 논문집 제 10권 제 1호, 1995년 3월, pp. 50~55.
2. 채 원규, "콘크리트 교량의 안전 진단에 관한 연구," 1994년도 한국산업안전학회 추계 학술 연구 발표회 논문 초록집, 1994년 11월, pp. 191~198.
3. "교량관리체계개선," 건설교통부, 1995년 5월, pp. 501~510.
4. "콘크리트 표준시방서," 사단법인 대한토목학회, 1996년 6월, pp. 326~332.
5. "도로교 표준시방서," 사단법인 대한토목학회, 1996년 5월, pp. 92~96.
6. "도로교 표준시방서," 사단법인 대한토목학회, 1996년 5월, pp. 237~247.