

정적 및 동적 제약조건을 고려한 고속철도 교량의 최적화 설계 Optimal Design of High-Speed Railway Bridges Considering Static and Dynamic Constraints

안 예 준* 신 영 석** 신 동 구***
Ahn, Ye-Jun Shin, Yung-Seok Shin, Dong-Ku

ABSTRACT

Plate girder bridges for the Korean high-speed railway are optimally designed. Static and dynamic constraints are all considered. The design variables are the thicknesses and the lengths of the plates that are used to form I-shaped main girders with variable cross-sections. And the objective function is the steel weight of a main girder. A C++ based design program is developed; this program interfaces with a FORTRAN based optimization program ADS. From the results of optimal design for various span lengths, it is observed that the deck vertical acceleration is one of the most important constraints in a special range of the span length. From a parametric study, sensitivity of the optimal design to static as well as dynamic constraints are presented.

1. 서 론

구조물의 최적설계는 수학적 계획법에 근거하여 구조물의 시공 경비 또는 중량 등을 최소로 감소시킬 수 있는 합리적인 방법이다. 또한 초기 단면을 가정하고 그에 따른 구조해석을 실시한 후 제약조건을 만족하도록 단면을 수정하는 재래의 시행 착오적 설계 방법에 비하여 매우 경제적인 설계 방법이기 때문에 각 분야에서 활발한 연구가 진행중이다. 토목 구조물의 경우 트러스 구조물⁽¹⁾, 보 구조물⁽²⁾, 뼈대 구조물⁽³⁾ 등의 기본 구조물과 교량과 같은 대형 구조물에 최적설계 기법을 적용한 연구사례가 다수 보고되고 있다.

고속 철도 교량의 경우 일반 도로교나 철도교와는 다른 여러 가지 설계조건이 제시되고 있는데, 그로 인하여 발생할 수 있는 특별한 설계결과에 대한 자료가 부족한 실정이다. 예로 고속철도의 열차하중은 설계속도가 220~400km/h로서 일반 도로교나 철도교에 비하여 상대적으로 매우 빠르고 매우 큰 집중하중이 연속적으로 교량에 작용하기 때문에 설계 시 동적인 해석이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 정적 및 동적 제약조건을 고려하여 고속철도 강합성 교량의 주부재를 최적 설계하였다. I빔 형태로 이루어진 주형의 부재치수를 설계변수로 선정하고 주형의 총 강재량을 목적함수화 하였으며, 고속철도 강교량 및 합성형교량 설계표준시방서(안)⁽⁴⁾과 BRDM⁽⁵⁾에 제시된 각 설계 조건을 제약조건으로 선정하여 최적 설계 문제를 구성하였다. 객체 지향적 언어⁽⁶⁾인 C++언어를 사용하여 정적 및 동적 구조해석을 수행하였으며, 최적 설계 프로그램은 FORTRAN으로 작성된 ADS(Automated Design synthesis)⁽⁷⁾를 정적으로 연계하여 사용하였다. 이와 같이

* 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

** 아주대학교 건설교통공학과 부교수

*** 명지대학교 환경·토목공학부 부교수

개발된 최적설계 프로그램을 이용하여 지간장의 변화에 따른 설계 결과 및 동적 제약조건의 민감도를 분석하였으며 종방향에 대하여 단면이 변하는 경우와 균일한 단면을 사용한 설계를 비교·검토하였다.

2. 최적설계 정식화

본 연구에서는 그림 1의 횡단면도와 그림 2의 평면도와 같은 형태의 고속철도 강합성 교량을 최적설계 대상 구조물로 선정하였다. 주형의 간격을 그림 1과 같이 6.5m로 고정하고 레일 중심간 간격을 5m로 가정하여 슬래브를 설계한 후 주부재인 주형에 관하여 최적 설계 문제를 적용하였다.

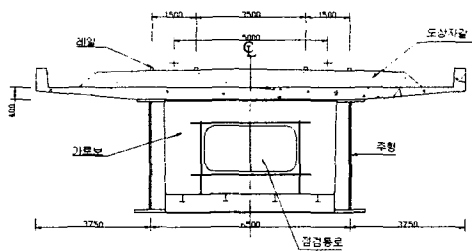


그림 1 횡단면도(단위:mm)

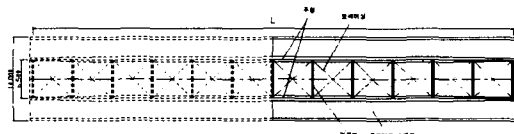


그림 2 평면도(단위:mm)

2.1 설계변수 및 목적함수

본 최적설계 문제에서는 그림 3에서 보이는 바와 같이 주형의 복부 폭과 높이 그리고 상·하부 플랜지의 폭과 두께를 설계변수로 정식화하였다. 주형은 그림 4에서 보이는 바와 같이 시공성을 고려하여 3개의 변단면에 대한 설계가 가능하도록 하였기 때문에 주형 변단면의 개수가 증가함에 따라 설계변수가 증가하게 된다. 이때 복부의 두께와 높이는 일정하게 하였기 때문에 3개의 변단면인 경우 설계변수는 14개인 설계문제가 된다.

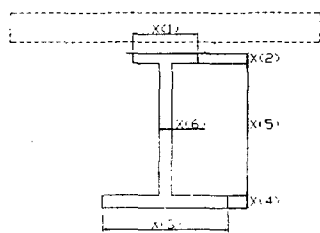


그림 3 설계변수

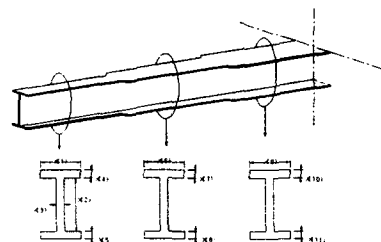


그림 4 변단면에 따른 설계 변수 증가

목적함수는 식 (1)과 같이 주형의 강재량을 최소화시키는 문제이다.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n (A_{i(x)} \times L_i) \quad (1)$$

여기서, $A_{i(x)}$: 주형의 i 부분 단면적, L_i : 주형의 i 부분 길이

2.2 제약조건

대상교량에 적용한 제약조건은 고속철도 강교량 및 합성형교량 설계표준시방서(안), Bridge Design Manual(BRDM)의 기준에 따라 작성하였다. 제약조건은 다음 표 1에 나타난바와 같이 부재의 폭·두께비 기준, 허용응력조건, 피로응력조건, 합성응력 조건, 정적 처짐 조건 및 동적 조건 등으로 나뉜다.

표 1 제약 조건 설명

구분	제약조건	기호설명	
폭 두 께 비 조 건	복부의 폭·두께비	$G(1) = \frac{(b/t)_w}{(t/t)_0} - 1 \leq 0$	$(b/t)_w$: 복부판의 폭·두께비 $(b/t)_0$: 고속철도 시방서에 규정된 각 부재의 최대폭·두께비
	중립축이 강형내에 위치할 조건	$G(2) = \frac{d_{sw}}{d_v} - 1 \leq 0$	d_{sw} : 슬래브 상단에서 상부 플랜지까지의 거리 d_v : 슬래브 상단에서 합성단면의 중립축까지의 거리
	압축 플랜지의 폭·두께비	$G(3) = \frac{(b/t)_{cf}}{(b/t)_0} - 1 \leq 0$	$(b/t)_{cf}$: 압축플랜지 자유돌출부의 폭·두께비
	인장 플랜지의 폭·두께비	$G(4) = \frac{(b/t)_{tf}}{(b/t)_0} - 1 \leq 0$	$(b/t)_{tf}$: 인장플랜지 자유돌출부의 폭·두께비
허 용 응 력 조 건	슬래브 상단의 허용압축응력	$G(5) \sim G(8) = \sigma_{cu} / \sigma_{ca} - 1 \leq 0$	σ_{cu} : 슬래브 상단의 압축응력 σ_{ca} : 콘크리트의 허용 압축응력
	상부 플랜지의 허용압축응력	$G(9) \sim G(13) = \sigma_{su} / \sigma_{sa} - 1 \leq 0$	σ_{su} : 상부 플랜지의 압축응력 σ_{sa} : 강재의 허용응력
	하부 플랜지의 허용인장응력	$G(14) \sim G(18) = \sigma_{st} / \sigma_{sa} - 1 \leq 0$	σ_{st} : 하부 플랜지의 인장응력
	강형의 허용 전단응력	$G(19) = \tau / \tau_a - 1 \leq 0$	τ : 복부의 전단응력 τ_a : 강재의 허용 전단응력
피 로 응 력 조 건	압축 피로 허용응력	$G(20) = \frac{\sigma_{cmax} - \sigma_{cmin}}{\sigma_{fa}} - 1 \leq 0$	$\sigma_{cmax}, \sigma_{cmin}$: 압축플랜지 수직응력의 최대치 및 최소치 σ_{fa} : 휨 모멘트에 의한 피로 허용응력
	인장 피로 허용응력	$G(21) = \frac{\sigma_{tmax} - \sigma_{tmin}}{\sigma_{fa}} - 1 \leq 0$	$\sigma_{tmax}, \sigma_{tmin}$: 인장플랜지 수직응력의 최대치 및 최소치
	전단 피로 허용응력	$G(22) = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{fa}} - 1 \leq 0$	τ_{max}, τ_{min} : 전단응력의 최대치 및 최소치 τ_{fa} : 전단 피로 허용응력
합성 응력 조건		$G(23) \sim G(26)$ $= \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2} - 1.1 \leq 0$	σ : 작용 휨응력 σ_a : 허용 휨응력
주형의 정적 처짐 조건		$G(27) = \delta_s / \delta_a - 1 \leq 0$	δ_s : 주형의 정적처짐 δ_a : 지간장/1700
동 적 제 약 조 건	동적 처짐	$G(28) = \delta_d / \delta_a - 1 \leq 0$	δ_d : 주형의 동적처짐
	단부회전각	$G(29) = \theta_e / \theta_a - 1 \leq 0$	θ_e : 주형 단부에서의 회전각 θ_a : 허용 회전각
	진동 가속도	$G(30) = a / 0.35g - 1 \leq 0$	a : 교형의 진동 가속도 g : 중력가속도

부재의 폭·두께비에 관한 제약조건은 부재가 매우 얇아져 좌굴에 취약하게 되는 것을 방지하기 위함이다. G(1)은 복부의 폭 두께비를 제한함으로써 복부 좌굴을 방지한다. G(2)는 합성단면의 중립축이 강형내에 위치하게 함으로써 콘크리트 슬래브 하부에 인장응력이 발생하지 않도록 한다. G(3)과 G(4)는 상하부 플랜지의 국부좌굴이 발생하지 않도록 한다. G(5)~G(19)의 제약조건은 허용응력 설계 조건에 관한 제약조건들로서 주형과 슬래브의 합성전과 합성후, 크립, 건조수축 및 온도차에 대한 합성응력에 대한 제약조건들이다. G(5)~

G(8)에서 동일한 제약조건이 4번 사용된 이유는 합성후 사하중과 활하중, 크립과 건조수축, ±운도차의 4가지 하중조합에 대하여 동일한 단면에 적용하였기 때문이다. G(9)~G(18)은 강형의 경우이기 때문에 슬래브가 구조적인 역할을 하지 못하는 합성전 하중조합을 추가로 고려하였다.

고속철도의 경우열차하중에 의한 응력변동과 그 반복의 영향이 크기 때문에 교량부재의 피로파괴에 대한 안전을 고려하여야 한다. G(20)과 G(21)은 압축과 인장에 대한 피로허용응력 제약조건이다. G(22)은 전단에 대한 피로허용응력 제약조건이다. 본 연구에서 적용되는 주형과 같은 판형구조물은 휨모멘트에 의한 수직응력 σ 와 전단력에 의한 전단응력 τ 각각에 대해서 검토함은 물론 양자의 합성응력에 대해서도 반드시 검토하여야 한다. G(23)~G(26)은 각 하중조합 경우에 대한 합성응력 제약조건이다. 합성응력에 관한 검토방법으로는 타원식에 의한 방법, 주 응력식에 의한 방법등이 있지만 BRDM에 근거하여 타원식에 의한 방법을 선택하였다. G(27)은 정적인 처짐에 관한 제약조건이다. 처짐 성질은 열차의 주행 안정성, 승차감, 레일응력등에 큰 영향을 주기 때문에 고속철도의 경우 일반 철도교와 도로교에 비하여 더욱 엄격한 규정을 적용하고 있다. 때문에 본 연구에서는 주형의 처짐 계산시 Timoshenko의 빔이론을 적용하여 전단변형에 따른 정확한 처짐량을 계산하여 제약조건에 적용하였다. G(28)~G(30)은 동적인 제약조건이다.

3. 동적 제약조건

동적 해석방법은 모드 중첩법(modal superposition method)⁽⁸⁾을 사용하였으며, 대상 교량을 단순 지지된 보로 가정하면 시스템 수직 변위 $y(x,t)$ 는 진동 모우드 $\phi_n(x)$ 와 시간함수 $q_n(t)$ 의 합성으로 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (2)$$

고속철도 열차는 220~380km/h의 고속으로 주행하지만 전체 주행 가능 속도에 대하여 동적인 해석을 하는 것은 매우 어렵다. 때문에 교량에 공진현상을 유발하는 임계속도를 우선적으로 검토해야 한다. 임계속도 V_{cr} 는 교량의 고유진동수(natural frequency) ω 와 열차 하중군의 간격 d 를 이용하여 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$V_{cr} = 3.6 \times d \times \omega \text{ (km/h)} \quad (3)$$

시간장이 짧아지는 경우 식 (3)에 제시한 임계속도는 실제 열차의 주행속도보다 빨라지게 된다. 이러한 경우 공진과 유사한 현상을 일으키는 부 임계속도를 검토하여야 하며 부 임계속도는 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 또한 공진이 감소하는 현상⁽⁹⁾에 의하여 임계속도보다 최대 주행속도에서 가장 큰 동적 응답이 발생할 수 있으므로 최대 주행속도를 검토하여야 한다.

$$V_{cr} = \frac{3.6 \times d \times \omega}{i}, \quad i=2,3,\dots \quad (4)$$

4. 최적 설계 예

본 최적설계 문제에서는 최적화 기법⁽¹⁰⁾⁻⁽¹¹⁾으로 수정된 유용방향법(modified method of feasible direction)을 사용하였으며, 민감도 해석을 위한 경우 증대 라그랑지법(augmented lagrange multiplier method)을 전락 기법으로 하는 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)법을 사용하였다. 1방향 탐색기법은 황금분할법(golden section method)과 경우에 따라, 다항식 보간법(polynomial interpolation method)을 사용하였다. 설계에 사용된 물성치는 콘크리트 2.5(t/m), 강재 7.85(t/m), 도상 1.9(t/m), 궤도 0.634(t/m)의 단위중량을 사용하

였으며, 사용된 강재는 SWS490으로 하였다. 수평보강재는 1단으로 배치하고 궤도 중심간의 간격은 5m, 주형간의 간격은 6.5m로 하였다.

4.1 지간장에 따른 최적 설계

지간장을 20~70m까지 변화하며 최적설계를 수행 한 결과 표2와 같은 결과를 얻었다.

표 2 지간장에 따른 설계 단면 (단위: cm)

명칭 \ 지간장	20m	30m	40m	50m	60m	70m
복부 높이	294.0	370.5	442.5	519	702.7	798.2
복부 두께	1.2	1.5	1.8	2.1	2.8	3.2
상부 플랜지 폭	33.0	39.1	44.8	49.1	47.1	68.0
상부 플랜지 두께	3.0	3.7	4.1	4.5	4.4	7.5
하부 플랜지 폭	37.2	61.4	79.1	89.9	78.7	68.0
하부 플랜지 두께	3.4	4.0	5.0	5.9	5.1	5.3
활성화 제약조건	1,2,9,25	1,2,25,26	1,2,9,26,30	1,8,9,12	1,8,9	1,8

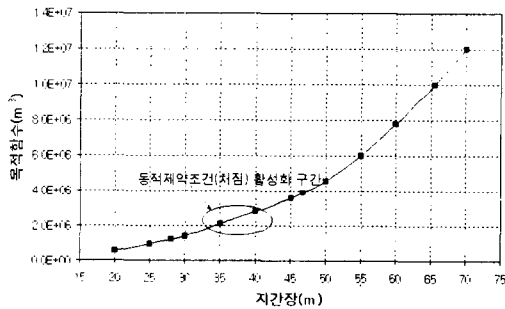


그림 5 지간장에 따른 설계 결과

설계를 지배함을 알 수 있다. 지간장을 세분화하여 10m 단위로 나누어 설계한 결과를 그림 5에 나타내었다. 35~40m 구간은 동적제약조건인 G(30)가속도 조건이 활성화 된 구간이다. 30m이하의 구간은 공진현상을 검토하기 위한 임계속도가 열차의 주행 가능 속도인 380km/h를 상회하기 때문에 부임계속도시의 동적응답을 제약조건으로 사용하였다. 때문에 최대 동적 응답의 감소가 발생하여 동적 제약조건이 비 활성화되었다.

4.2 변단면의 효율성

일반적으로 교량을 설계하는 경우 횡단면을 종방향에 대하여 균일하게 설계하는 것 보다 변단면으로 설계 하는 것이 효율적이다. 이러한 변단면의 효율성을 검토하기 위하여 표 2의 결과중 지간장 40m 교량을 그림 6과 같이 변단면으로 분할하여 최적설계 한 후 균일 단면과 비교하였다. 2개의 변단면은 x_1 과 x_2 를 1:1로 3개의 변단면은 x_1, x_2, x_3 의 비를 6:7:7로 분할하여 설계하였다.

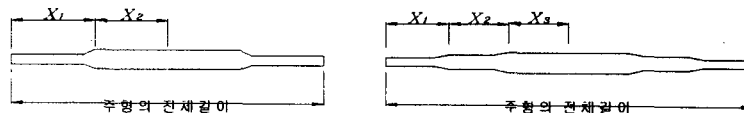


그림 6 변단면의 단면 분할비

표 3 변단면의 최적 설계 결과(지간장:40m)

(단위:cm)

	균일 단면	2개 변단면		3개 변단면		
		제1단면	제2단면	제1단면	제2단면	제3단면
복부 높이	442.5	473.3		447.0		
복부 두께	1.8	1.9		1.8		
상부 플랜지 폭	44.8	38.5	42.7	34.8	40.1	44.6
상부플랜지두께	4.1	3.5	3.9	3.3	4.0	4.1
하부 플랜지 폭	79.1	41.9	55.1	31.8	53.0	62.5
하부플랜지두께	5.0	4.1	5.5	3.1	5.2	5.6
활성화 제약조건	1,2,9,26,30	1,2,3,16,17,55		1,4,23,24,25,49,80		
목적함수(cm ³)	2.72E+6	2.57E+6		2.41E+6		

균일한 단면으로 설계한 결과에 비하여 2개 변단면으로 설계한 경우 목적함수가 5.5% 감소하였으며, 3개의 변단면으로 설계한 경우 균일한 단면에 비하여 목적함수가 11.4% 감소하였다. 교량의 종방향 응력변화에 따라 변단면으로 설계하는 것이 효율적임을 알 수 있다. 3가지 경우 모두 가속도 제약조건과 복부 폭두께비 제약조건이 활성화 되었다. 3개 변단면 설계의 경우 각 단면의 합성전 상부플랜지의 좌굴압축응력인 G(23), G(24), G(25)와 제3단면에서 합성전+합성후+크립+건조수축+온도 하중조합상태의 하부플랜지 인장응력 제약조건인 G(49)가 활성화 되었다. 단면을 분할하여 설계함으로써 좀더 효율적인 설계결과를 얻을 수 있었다.

4.3 복부 폭·두께비의 민감도

표2에 제시한 결과에서 지간장이 길어질수록 복부의 높이가 매우 거대해짐을 알 수 있는데 이것은 주위환경에 의한 시공성을 고려하지 않았기 때문이다. 실제로 복부의 높이는 교량의 가설 위치와 시공 방법에 따라 항상 제약을 받게 되므로 설계자는 복부의 높이를 임의로 제한해야 한다.

표 4 복부 높이를 제한한 설계 결과(지간장:50m)

(단위:cm)

명칭 \ 복부높이	519	450	425	400	375	350
복부 높이	519.0	450	425	400	375	350
복부 두께	2.1	1.8	1.7	1.7	2.4	2.4
상부 플랜지 폭	49.1	67.5	66.0	82.4	65.6	88.5
상부플랜지두께	4.5	6.8	8.0	8.0	11.4	8.9
하부 플랜지 폭	89.8	97.2	95.6	104.4	101.0	157.4
하부플랜지두께	5.9	7.4	9.5	9.6	11.1	11.4
활성화 제약조건	1,8,9,12	1,8,26	1,8,26,27	8,26,27	8	8

표 4는 표2의 최적 설계결과중 지간장 50m의 대상교량에 대하여 복부의 높이를 450~350cm까지 25cm 간격으로 제한하며 최적 설계한 결과이다. 복부의 높이를 제한할수록 활성화 제약조건이 줄어들어 비합리적인 설계임을 알 수 있다. G(8)슬래브 압축응력은 항상 활성화되고 있다. G(27)정적 처짐 제약조건이 부분적으로 활성화됨으로서 복부의 높이를 제한하는 경우 정적 처짐이 중요한 설계 요소가 되었다.

그림 7에서 임의의 설계변수를 제한하는 경우 목적함수는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 519cm로 복부의 높이를 제한하지 않은 경우와 350cm로 복부의 높이를 제한한 경우 목적함수는 88%증가하였다.

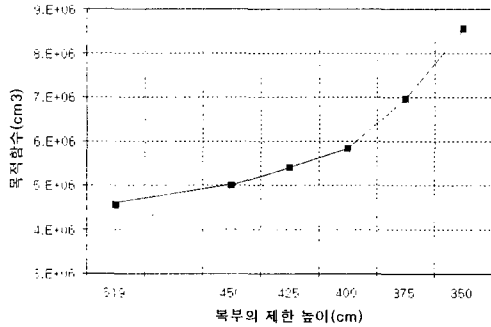


그림 7 복부높이 제한에 따른 목적함수 변화

동적 설계조건에 가장 민감한 것으로 판단되는 지간장 35m의 대상교량에 대하여 가속도 조건을 제외한 경우와 허용 가속도를 0.35g로 한 경우 및 허용가속도를 10% 감소시켜 0.315g로 설계 한 결과를 나타낸 것이다.

4.2 동적 제약조건의 민감도

진행하는 차량하중에 의한 교량의 동특성 해석은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 때문에 고속철도 교량과 같이 설계 시 동특성 해석이 반드시 필요한 경우 동적 제약조건의 민감도를 관찰하여 설계에 적용할 필요가 있다. 동적 제약조건은 동적 치짐, 단부 회전각, 진동가속도의 3가지를 검토하도록 규정하고 있지만 본 최종설계 결과를 검토한 결과 치짐과 회전각 제약조건은 활성화되지 않는 것으로 나타나 가속도 조건만을 변화해보며 최적설계를 수행하였다. 다음 표 5는 그림 3의 결과 중

표 5 동적 제약조건 변화에 따른 설계 결과(지간장:35m) (단위: cm)

명칭 \ 지간장	가속도 제약조건을 제외한 설계결과	가속도 제약조건을 포함한 설계 결과	가속도 제약조건을 10%감소시킨 결과
복부 높이	408.6	420.4	439.9
복부 두께	1.6	1.7	1.8
상부 플랜지 폭	42.1	41.0	45.3
상부 플랜지 두께	3.8	3.9	6.8
하부 플랜지 폭	71.0	67.2	81.3
하부 플랜지 두께	4.4	4.2	6.9
활성화 제약조건	1, 2, 3, 9, 26	1, 9, 26, 30	1, 30
목적함수 (cm³)	2.00E+6	2.10E+6	2.87E+6

가속도 제약조건을 제외한 설계는 포함한 설계에 비하여 목적함수가 4.8%감소하였으며, 허용 가속도를 10%감소시킨 경우는 목적함수가 36.7% 증가하였다. 역시 가속도 제약조건이 활성화 된 40m 지간장의 설계 경우는 가속도를 제외한 경우에 목적함수가 단지 1%감소하였으며, 허용가속도를 10% 감소시킨 경우 8%의 목적함수 증가가 관찰되었다. 35m와 40m의 지간장외에서는 가속도 제약조건의 활성화를 관찰할 수 없었다. 지간장이 약 35~40m인 경우 가속도 제약조건이 매우 중요한 설계 요소임을 알 수 있으며, 설계 시 동적 해석을 반드시 수행해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 고속철도 강합성 교량의 최적설계를 수행하였다. 해석적인 방법을 통하여 정적 구조해석을 수행하고 모달해석법을 사용하여 동적 구조해석을 수행함으로써 최적설계 문제를 정식화하였다. 지간장과 복부의 높이를 변화하며 설계 결과를 분석하였으며, 정적 및 동적 제약조건을 구분하여 최적 설계를 수행하고 동적 제약조건의 민감도를 관찰하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 2주형 구조의 고속철도 강합성 교량의 설계 시 슬래브의 경우 크립, 건조수축, 온도차를 고려한 압축응

력이 중요한 설계 요소이며, 강형의 경우 합성응력과 상부플랜지의 합성전 좌굴 허용응력에 대한 검토가 선행되어야 한다.

(2) 복부의 높이를 임의로 제한하는 경우 비효율적인 설계가 되며, 제한 폭이 클수록 소요 강재량은 급격히 증가한다. 또한 일반적인 교량에 비하여 교형의 정적 처짐 제약이 $L/1700$ 으로 엄격한 고속철도 교량은 비효율적인 단면일 경우 처짐 제약조건에 취약한 것으로 나타났다.

(3) 동적인 설계제약조건 중 처짐과 단부회전각 조건은 설계를 지배하지 않으며 교형의 수직 진동가속도 조건이 가장 중요한 설계 요소로서 판명되었다. 가속도 제약조건은 시간장 약 35~40m 구간에서 활성화 되었다. 약 35m보다 짧은 시간장에서는 임계속도가 열차의 주행속도를 상회하기 때문에 부 임계속도를 설계에 적용하여 저속의 설계속도를 사용하기 때문에 최대 가속도 응답이 감소하게 되며, 반대로 시간장이 40m 이상 증가하는 경우 또한 최대 가속도 응답이 감소하는 데, 이는 교량의 고유진동수가 낮아지기 때문이다.

(4) 균일한 단면의 주형에 비하여 변단면의 개수를 늘릴수록 합리적인 설계가 가능하다. 변단면으로 설계하는 경우도 시간장이 35~40m인 구간은 가속도 제약조건이 전체 설계를 지배하였으며, 지점부근에서는 합성전 좌굴압축응력이 활성화되었고 중앙단면에서는 크립, 건조수축을 고려한 하부 플랜지의 인장응력이 활성화되었다.

참고문헌

1. 이규원, 변근주, 황학주(1980), "SUMT법에 의한 강재 트러스의 최적설계에 관한 연구," 대한 토목학회, 제 28권 제4호, pp. 119~130.
2. 박문호, 김시철, 김상진(1998), "신뢰성 해석에 의한 I형 합성보의 최적설계," 대한토목학회, 학술발표회 논문집, pp. 425~428.
3. McCuchem, W. T. (1970), "A General Formulation for the Optimum Design of Framed Structures," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Ill.
4. "고속철도 강교량 및 합성형교량 설계표준시방서 해설(안)," 고속전철 사업기획단, 1991.
5. "Bridge Design Manual(BRDM) Final Report," SYSTRA, 1995.
6. 장창두, 심우승(1996), "객체지향 모델링 개념을 이용한 이차원 구조물의 유한요소 자동 생성에 관한 연구," 한국전산구조공학회, 학술발표회 논문집, 제10권, pp. 79~85.
7. Vanderplaats, G. N. (1984), "ADS-a Fortran Program for Automated Design Synthesis, Version 1.10," NASA CR 172460.
8. Paz, M. (1980). "Structural Dynamics", Van Nostrand Reinhold Co.
9. Yang, Y. B. and Yau, J. D. and Hsu, L. C. (1997), "Vibration of Simple Beams Due to Trains Moving at High Speeds," Engineering Structures, Elsevier, Vol. 19, No. 11, pp. 936-944.
10. Vanderplaatts, G. N. (1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill Co., New York, N.Y.
11. Rao, S. S. (1996), "Engineering Optimization," Wiley-Interscience, New York, N.Y.