강합성교 설계 최적화 방안

제공처 : 한국도로공사 기술심사처

출처 : 2013년도 고속도로 설계 실무자료집(2014, 한국도로공사)

1. 일반현황

(1) 국내의 강합성교량 설계는 강재재료비 상승에 따라 강재량을 최소화하려는 설계 경향(대형부재 두께 축소, 소형부재 증가)

(2) 소형부재 증가시 제작비가 증가됨에 따라 강재량과 제작비를 고려한 합리적인 강교 구조 최적화 방안을 검토코자 함

(2.1) 대형부재 : 플랜지, 복부판

(2.2)소형부재 : 종・횡리브, 보강재, 다이아프램 등

2. 현황 및 문제점

2.1 강교 관련 그간 추진경위

(1) 개구제형 강합성교 적용 검토(2002)

(1.1) 정모멘트구간 상부플랜지를 생략한 개단면 강합성교 형식

(2) 소수주형 판형교 적용검토(2003)

(2.1) 후판과 고강도 강재 및 장지간 바닥판 적용을 통한 주형의 수와 보강재량 최소화

(3) 강도로교 설계 합리화 방안(2004)

(3.1) 강교의 합리적인 설계를 위한 가이드라인 제시

(3.1.1) 강교의 단위 면적당 표준 중량 제안, 중량 약 5~10% 절감

(3.2) 부재별 제원 최적화 및 보강재 등 간격 및 개수 표준화

(3.2.1) 종방향 보강재 5개, 횡방향 보강재 간격 1.25m 등

(4) 강교제작 단가 조정 시행(2006)

(4.1) 부재의 크기(대형, 소형), 용접방식에 따른 교량 특성 반영

(5) 교량구조용 압연강재(HSB) 적용 검토(2008)

(5.1) 강교 설계시 HSB 500~600 적용 방안 제시

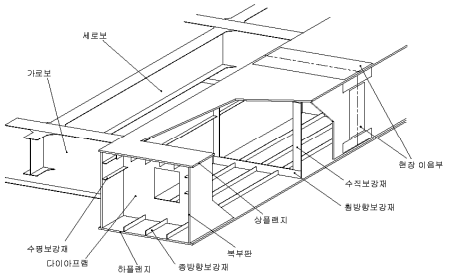
(5.2) 형고 0.2~0.3m 축소, 공사비 6~7% 절감

2.2 현 실태 및 문제점

2.2.1 현 실태

2.2.1.1 강교 보강재 설계 현황

(1) 보강재 명칭 및 구조적 역할



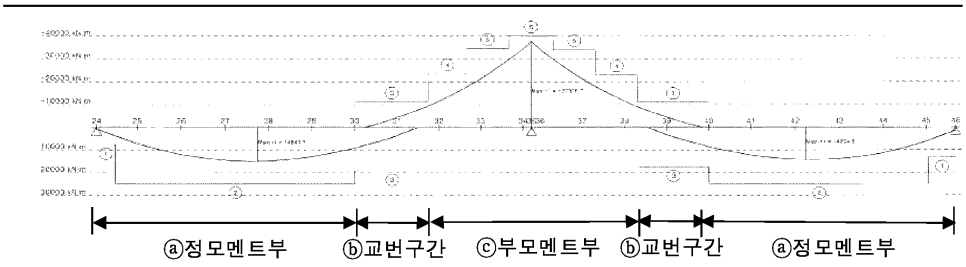
- 플랜지 종방향 보강재
  ☞ 플랜지의 압축좌굴 방지
- 플랜지 횡방향 보강재
  ☞ 종방향 보강재의 횡방향 압축좌굴 방지
- 수직보강재
  ☞ 복부판 및 수평보강재 좌굴 방지

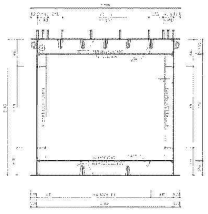
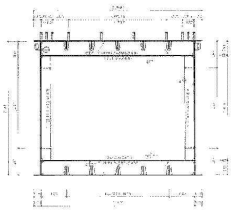
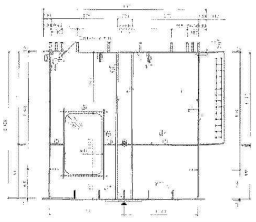
(2) 보강재 배치 현황

구 분	상부플랜지		하부플랜지		웹
	종방향	횡방향	종방향	횡방향	수직보강재
정모멘트부ⓐ	5ea	1.25m	2ea	2.50m	1.25m
교 번 구 간ⓑ	5ea	1.25m	5ea	1.25m	1.25m
부모멘트부ⓒ	2ea	2.50m	5ea	1.25m	1.25m

(2.1) 박스거더 폭 2400mm~2800mm 정도의 교량에 대한 조사결과

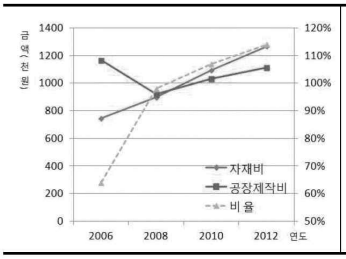
(3) 구간별 보강재 배치도



ⓐ 정모멘트부	ⓑ 교번구간	ⓒ 부모멘트부
		

2.2.1.2 강교 제작비용 대비 강재 자재비 지속증가

(1) 자재비/제작비 비율 : 종래 64%에서 114% 수준



[단위 : 천원/ton]

구 분	2006	2008	2010	2012
자재비	746	900	1,097	1,267
공장제작비	1,166	922	1,032	1,115
비 율	64%	98%	107%	114%

2.2.1.3 소형부재(보강재 등)의 비율이 증가할수록 강교 제작단가 증가

(1) 제작비 단가 구성 : 노무비 + 재료비 + 제경비 + 시공상세도

(1.1) 부재 종류(대형・소형) 및 용접길이와 연계하여 산정

(2) 소형부재 비율 증가시 대형부재에 비해 제작노무비 증가

(2.1) (철판공) 3.32배 증가, (용접공) 추가 발생

(3) 강교 공장 제작단가 구성 (2012년도)

구 분	계	제작재료비	제작노무비	제경비 (노무비x0.6)	시공상세도
단 가 (천원/ton)	1,115	96	595	357	67
비 율(%)	100	8.6	53.4	32.0	6.0

(4) 강교 제작단가 산정(표준품셈)

(ton당)

구 분	제작 및 조립(철판공)		용접(용접공)		가조립 (철공)
	대형부재	소형부재	맞댐	필렛	
박스거더	1.00	3.32	1.26	0.69	0.75

☞ 톤당 품 환산공수 산정(인/ton)

{(대형부재품×대형부재비중)+(소형부재품×소형부재비중)}

+ {(맞댐용접품×톤당맞댐용접길이)+(필렛용접품×톤당 필렛용접길이)}/10

+ 가조립품

2.2.2 문제점

(1) 『강도로교 설계 합리화』 (2004)에서 제시된 보강재 배치 간격의 일률적 적용으로 소형부재 및 용접장 증가에 따른 제작비 증가

(1.1) 부재별 제작 조건 현황(강도로교 설계 합리화 대상교량 분석)

구 분	대형부재	소형부재	비 고
중량비	63.6% (295ton)	30.4% (141ton)	기타 : 6.0% (28ton)
용접길이비	13.9% (2,195m)	85.8% (13,499m)	기타 : 0.3% (42m)

(1.1.1) (대형부재) 상·하 플랜지 및 웹 (소형부재) 보강재, 가로보, Splice 등

(2) 강재량을 최소화하려는 설계경향

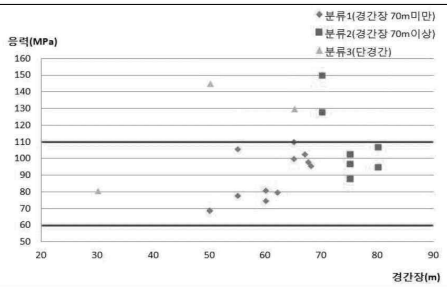
(2.1) 대형부재 두께를 최소화하여 강재량을 줄이려는 설계경향으로 상대적으로 보강재 비중 증가

(2.2) 보강재 등 소형부재 비중이 클수록 부재 제작 및 조립 단가 증가

(3) 바닥판 타설단계 발생응력 대비 허용응력 과다

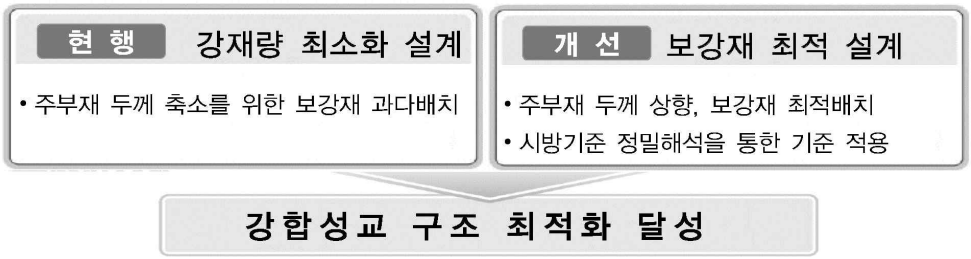
(3.1) 일시적인 비합성 거동상태에서 압축플랜지 좌굴을 고려한 허용 응력이 압축 응력에 비해 여유가 많으므로 보강재 수량 축소 가능

구 분	발생 압축응력 (f_c,MPa)	허용 압축응력(f_{ca},MPa)		f_c/f_{ca} × 100 (%)
		플랜지두께	응력범위	
응력값	60~110	t=10mm	101~153	60~70
		t=12mm	142~185	42~60

가설 중 최대 압축응력 분석결과	대상교량 및 분석 조건
	● 대상교량 : 부산외곽순환선 22개 교량 ● 최대지간장 : 45~85m ● 종방향 보강재 : 5EA ☞ 단경간의 경우 동일지간의 연속교에 비해 구조계 특성상 압축응력이 크게 발생

3. 개선내용

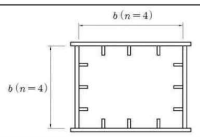
3.1 개선방향



3.2 압축 플랜지 최소두께 및 가설중 허용응력 할증 검토

(1) 압축 플랜지 최소두께

【도로교 설계기준(2010)】
3.4.2.3 (압축응력을 받는 보강된 판) 가설시에만 일시적으로 압축응력을 받는 경우의 판두께는 $t \geq \frac{b}{80in}$ 을 만족시켜야 한다



n = 종방향 보강재에 의해 구분되는 패널 수
b = 보강된 판의 두께(mm)
i = 응력구배계수

(1.1) 상부 압축플랜지는 바닥판과 합성후에는 좌굴이 발생치 않으므로 가설시에만 일시적으로 압축응력을 받는 경우에 해당

구 분	현 행	개 선
압축플랜지 최소두께	$t \geq \frac{b}{33in} \sim \frac{b}{59in}$	$t \geq \frac{b}{80in}$

(2) 가설중 허용응력 할증 적용

【도로교 설계기준(2010)】
3.9.3 (허용응력) 하중의 조합을 고려하는 경우 강재 주거더의 허용응력 증가 가능, 가설시 하중에 대해서는 허용응력 25% 증가

(2.1) 도로교 설계기준에 따라 가설시 하중에 대해서는 허용응력 증가

구 분	현 행	개 선
가설시 허용응력 할증	1.0	1.25

3.3 종방향 보강재 간격확대 및 플랜지 폭원 검토

(1) 종방향 보강재 소요 수량 검토

(1.1) 지간장 45~70m의 일반적인 강교에 발생되는 통상적인 응력범위 60Mpa~110Mpa를 만족하는 보강재 배치

구 분		국부좌굴을 고려한 허용응력 (25%할증, Mpa)			
		n=3	n=4	n=5	n=6
B=2,600mm	t=10mm	36.6	65.1	101.7	148.8
	t=12mm	52.7	93.7	148.8	195.8
	t=14mm	71.7	127.6	189.1	229.3
B=2,400mm	t=10mm	42.9	76.4	119.4	170.5
	t=12mm	61.9	110.0	170.5	213.8
	t=14mm	84.2	151.9	207.6	244.8
B=2,200mm	t=10mm	51.1	90.9	144.5	192.2
	t=12mm	73.6	130.9	192.2	231.9
	t=14mm	100.2	175.1	226.2	260.3
B=2,000mm	t=10mm	61.9	110.0	170.5	213.8
	t=12mm	89.1	159.7	213.8	249.9
	t=14mm	121.3	198.4	244.8	275.7

※ n=보강재에 의해 분할되는 압축플랜지 패널수, HSB500 강재 기준

(1.1.1) 일반적인 조건하에 종방향 보강재는 3개 배치가 적정

(2) 압축 플랜지 최적 폭원 산정 검토

(2.1) 웹 및 플랜지 두께가 일정한 상태에서 폭원 감소만큼 형고 증가시 단면2차모멘트는 약 15~30% 증가, 발생응력 약 5~20% 감소

구 분	A(mm2)	y_{su}(mm)	I(mm4)	fc(Mpa)
2,500x2,200x12x14x12 ($BxHxt_uxt_bxt_w$)	136,720	1,112	2,132E+10	51.24
2,300x2,400x12x14x12 ($BxHxt_uxt_bxt_w$)	136,320	1,208	2,767E+10	42.89
증가율	▼ 0.3%	△ 8.63%	△ 29.8%	▼ 16.3%

※ 일반적인 박스거더 단면 예시로 폭원 및 높이 변경시에도 유사한 경향

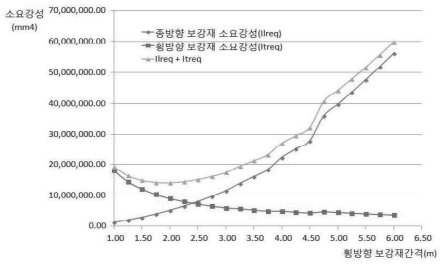
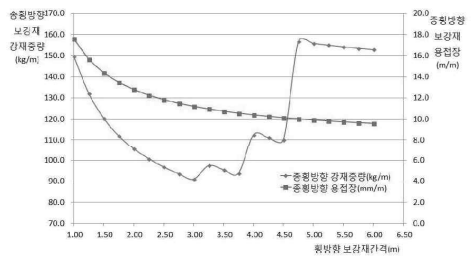
(2.1.1) 하부통과 조건, 미관 및 보강재 개수 등을 고려하면 플랜지 폭원은 2,400mm 이하로 적용하는 것이 유리

3.4 기타 보강재 간격 및 전단연결재 배치 검토

(1) 횡방향 보강재 배치 검토

(1.1) 횡방향 보강재 간격 약 2.0~3.0m에서 소요강성, 단위m당 강재 중량 및 용접길이 최적화

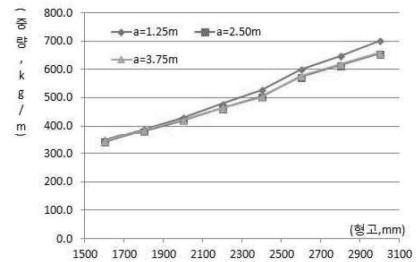
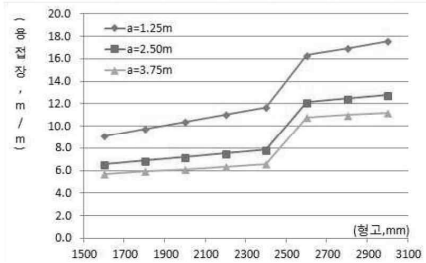
(1.2) 횡방향 보강재와 다이아프램 간격이 일치될 경우 횡방향 보강재는 불필요하며 가장 경제적인 설계가 가능하나, 그 간의 설계실적 등을 고려하여 다이아프램 사이에 최소 1개소 배치

소요강성 (종방향,횡방향보강재)	강재중량 및 용접장 (종방향+횡방향보강재)
	

※ 압축플랜지 폭 2,400㎜, 두께 12㎜, 종방향 보강재 수량 3ea 조건이며 다이아프램 무시

(2) 수직보강재 배치 검토

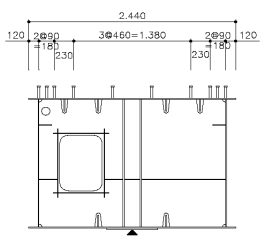
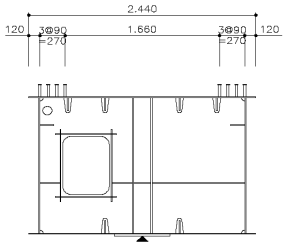
(2.1) 수직보강재 간격 확대에 따른 강중차이는 크지 않으나, 용접길이는 박스거더 단위 m당 약 30% 감소

강재중량(수직·수평보강재+웹)	용접길이(수직 및 수평보강재)
	

※ 웹두께 12㎜ 적용, 형고 2.4m 이상시 수평보강재 2단 배치

(3) 전단연결재 배치 검토

(3.1) 전단연결재 배치 방식

횡방향 등간격 배치	수평전단력이 집중되는 위치에 배치
	
·횡방향 플랜지 전폭에 걸쳐 바닥판과 합성거동 보장 ·플랜지 국부좌굴 방지 효과적	·수평전단력에 효율적인 저항 ·플랜지 전단면에 걸쳐 합성거동 보장 미흡

(3.2) AASHTO LRFD(2010) 6.11.10-Shear Connectors에 따르면 플랜지 폭에 걸쳐 일정간격으로 배치 권장

> Shear connectors on box flanges are best distributed uniformly across the flange width to ensure composite action of the entire flange with the concrete

3.5 경제성 비교

(1) 시험설계 결과

(1.1) 제작단가 평균 10% 절감, 강구조물 전체공사비 3~5% 절감

구 분		교량1 (부산외곽선 백길교)	교량2 (강교 설계 합리화 교량)
강 재 자재비	당 초	1,217천원/ton	1,170천원/ton
	변 경	1,213천원/ton	1,170천원/ton
	증 감	4천원/ton (감 0.4%)	-
제작비	당 초	1,107천원/ton	1,149천원/ton
	변 경	1,042천원/ton	947천원/ton
	증 감	65천원 (감 5.8%)	202천원/ton (감17.6%)

3.6 개선방안

3.6.1 적용대상 교량

(1) 경간장 35~70m 정도의 연속교 및 50m 이내 단경간 교량으로 가설중 상부 압축플랜지 응력범위 110Mpa 이하

(2) 상부 압축플랜지와 콘크리트 바닥판 전폭에 걸쳐 일체화된 경우 적용

3.6.2 상부 압축플랜지 최소두께 및 허용응력 할증 적용

(1) 가설시 일시적인 하중상태를 고려하여 적용 기준 완화

구 분	현 행	개 선
압축플랜지 최소두께	$t \geq \frac{b}{33in} \sim \frac{b}{59in}$	$t \geq \frac{b}{80in}$
허용응력 할증	1.0	1.25

3.6.3 보강재 배치 개선

구 분		현 행	개 선
플랜지 제원		폭 : 2,400~2,600 두께 : 기본 10mm	폭 : 2,200~2,400 두께 : 기본 12mm
종방향 보강재	상부압축	기본 5개	기본 3개
	하부압축	기본 5개	좌동(검토 후 축소)
	인 장 부	기본 2개	좌동(검토 후 축소)
횡방향 및 수직보강재		기본 1.25m	기본 2.50m(지점부 제외)

(1) 구조 해석결과 및 보강재 배치 연속성을 고려하여 플랜지 폭원, 두께, 보강재 수량 등 조정 후 최적 단면 선정

3.6.4 전단연결재 배치

(1) 전단력이 집중되는 웹상부에 약 60%내외, 플랜지 내부에 40% 정도 등간격 배치하며, 설계 최대 · 최소 간격 만족토록 배치

(2) 플랜지 전폭에 배치된 전단연결재 수량이 소요 수량 이상

4. 결론

4.1 기대효과

(1) 제작비 절감에 따른 경제성 향상

(1.1) 강교 제작비 단가의 약 10% 축소

(1.2) 강구조물 전체 공사비의 약 3~5% 절감

(2) 보강재 축소에 따른 시공 및 유지관리 용이

(2.1) 부재 절단, 용접장 감소에 따라 시공성 향상

(2.2) 강교 도장 면적 감소 효과

(2.3) 용접에 의한 열변형, 잔류응력 발생 등 최소화

4.2 적용방안

(1) 공사중인 노선

(1.1) 강합성교량이 없는 공구에서 설계변경 등으로 강교신설이 발생되는 공구 : 공사시행부서 판단 후 적용

(2) 설계중인 노선 : 본 방침 적용

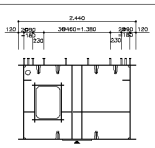
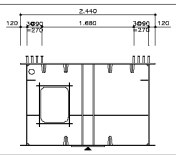
(3) 기타사항

(3.1) 한계상태설계법 확대적용 시까지 허용응력 설계법에 의해 설계하는 강합성 상자형교에 적용

(3.2) 한계상태설계법 확대적용 이후 동 형식의 교량 설계시 보강재 배치에 관한 기본 방향은 본 방침 적용

5. 기타

5.1 강합성교 설계최적화 방안 설계 자문 결과

<table>
<tr><th>주요 자문내용</th><th colspan="3">위 원 명</th></tr>
<tr><td rowspan="4">보강재 최적화 설계방향
(종리브 5개→3개)</td><td>이성철</td><td>이원철</td><td>정재훈</td></tr>
<tr><td>타당
(보강재 과다배치는 설계관행)</td><td>타당
(강재중량 절감 및 보강재 축소 타당)</td><td>타당</td></tr>
<tr><td colspan="2">엄종욱</td><td>민영택</td></tr>
<tr><td colspan="2">타당</td><td>타당</td></tr>
<tr><td rowspan="4">압축플랜지 최소두께 규정
<table><tr><th>현 행</th><th>개 선</th></tr><tr><td>$t \geq \frac{b}{33in} \sim \frac{b}{59in}$</td><td>$t \geq \frac{b}{80in}$</td></tr></table></td><td>이성철</td><td>이원철</td><td>정재훈</td></tr>
<tr><td>타당
(보강재 과다배치는 설계관행)</td><td>타당</td><td>타당</td></tr>
<tr><td colspan="2">엄종욱</td><td>민영택</td></tr>
<tr><td colspan="2">타당</td><td>타당</td></tr>
<tr><td rowspan="4">허용응력 할증
<table><tr><th>현 행</th><th>개 선</th></tr><tr><td>1.0</td><td>1.25</td></tr></table></td><td>이성철</td><td>이원철</td><td>정재훈</td></tr>
<tr><td>타당
(설계업체 교육 및 홍보 필요)</td><td>타당</td><td>타당</td></tr>
<tr><td colspan="2">엄종욱</td><td>민영택</td></tr>
<tr><td colspan="2">타당</td><td>타당</td></tr>
<tr><td rowspan="4">전단연결재 배치
<table><tr><th>횡방향 등간격 배치</th><th>수평전단력이 집중되는 위치에 배치</th></tr><tr><td></td><td></td></tr></table></td><td>이성철</td><td>이원철</td><td>정재훈</td></tr>
<tr><td>-</td><td>등간격
(플랜지 국부좌굴 방지고려)</td><td>등간격
(역학적으로 효율적이라고 판단)</td></tr>
<tr><td colspan="2">엄종욱</td><td>민영택</td></tr>
<tr><td colspan="2">등간격</td><td>등간격</td></tr>
</table>

☞ 전체적으로 본 방침에 대한 자문의견은 타당한 것으로 결론