

강합성 2-거더교의 가로보 배치 간격 및 소요 휨강성에 관한 연구

A Study on the Spacing and Required Flexural Rigidity of Cross Beams in Composite Two-Steel Girder Bridges

박 용 명¹⁾ · 조 현 준²⁾ · 황 민 오³⁾
Park, Yong Myung · Cho, Hyun Joon · Hwang, Min Oh

요 약 : 본 논문에서는 수직 및 수평 브레이싱을 생략하고 I-형 거더를 가로보만으로 연결한 강합성 2-거더교에서 가로보의 적정 배치 간격 및 소요 휨강성의 산정을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지간 40m의 단순교와 40+50+40m의 2차로 연속교를 예제교량으로 시산 설계하였다. 본 교량에 대해 중간가로보의 배치 간격과 휨강성을 매개변수로 하여 합성전·후 고정하중, 활하중, 풍하중 및 지진하중에 대한 해석을 수행하고 설계하중조합에 대한 응력 및 활하중 분배효과를 분석하였다. 한편, 강제 거더와 가로보의 격자구조에 대해 합성전 고정하중을 고려한 재료-기하 비선형해석으로부터 횡비틀림 좌굴강도를 평가하였다. 이상의 해석 결과를 토대로 지점부 및 중간가로보의 적정 배치 간격과 소요 휨강성을 제안하였다.

ABSTRACT : A study on the evaluation of proper spacing and required flexural rigidity of cross beams in composite two I-section steel girder bridges without a lateral and sway bracing system was performed. Specifically, a 2-lane, 40-m simple span bridge and a 3-span continuous (40+50+40m) bridge were designed, and structural analyses under dead load before and after composite, live, wind, and seismic loads were performed using spacing and flexural rigidity of cross beams as parameters. Through parametric analysis, the effect on the stresses due to the combination of loads and live load distribution was investigated. In addition, material and geometric nonlinear analyses under dead load before composite were performed to evaluate the lateral buckling strength of the steel girders and cross beams. Based on the results of such analyses, the proper spacing and flexural rigidity of cross beams at intermediate points and supports were proposed.

핵 심 용 어 : 강합성 2-거더교, 가로보 배치간격, 가로보 휨강성, 횡좌굴 강도

KEYWORDS : composite 2-steel girder bridge, spacing of cross beam, flexural rigidity of cross beam, lateral buckling strength

1. 서 론

강합성 거더교는 강제거더와 콘크리트 바닥판을 합성함으로써 두 재료의 장점을 살린 효율적인 교량형식이다. 플레이트거더교와 관련하여 국내의 도로교설계기준(2000)에서는 풍하중, 지진하중 등의 수평력에 저항하기 위해 수평 및 수직 브레이싱을 반드시 설치하도록 규정하고 있고, 이 때 수직 브레이싱의 간격은 6m 이내로 제한하고 있다. 또한 바닥판이 3개

이상의 거더로 지지되는 경우 하중분배가로보를 20m 이내로 설치하도록 규정하고 있으나, 소요 휨강성에 대한 명확한 규정이 제시되어 있지 않으며 더욱이 거더가 2개인 경우에는 배치 간격에 관한 적절한 규정이 없는 실정이다.

근래의 연구에 의하면 하부 수평브레이싱을 생략하여도 교량의 전체 거동에는 큰 차이가 없는 것으로 나타 났고(大塚勝 등, 1993) 수직브레이싱도 I-단면의 가로보로 대치하는 등의 강교량 합리화가 활발히 이루어지고 있다(坂井藤一 등,

1) 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과, 조교수
(Tel. 051-510-2350, Fax. 051-513-9596, E-mail : ympk@pusan.ac.kr)
2) 부산대학교 공과대학 토목공학과 대학원, 박사과정 (hjcho@pusan.ac.kr)
3) 정회원, (재)포항산업과학연구원 강구조연구소, 선임연구원(mohwang@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1995). 이러한 브레이싱 시스템의 생략으로 인하여 하중의 흐름이 거더와 가로보만으로 분배되기 때문에 거더뿐 아니라 가로보의 휨강성과 배치간격이 중요한 역할을 하게 된다. 최근에 들어 플레이트거더교의 하중 분배 영향에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있지만(정광모 등, 1999; 용환선 등, 2001; 제성훈 등, 2001; 박용명 등, 2002; Tarhini and Frederick, 1992; Eom and Nowak, 2001) 2-거더교에서 가로보의 휨강성과 적정 배치 간격의 상호 관계에 대한 연구 실적은 드문 실정이다.

본 논문에서는 수평 및 수직 브레이싱을 생략하고 거더는 I-단면 가로보만으로 연결한 강합성 2-거더교를 대상으로 가로보의 적정 배치 간격과 소요 휨강성의 상관 관계에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지간이 40m인 단순교와 40+50+40m의 연속교를 시산 설계한 후, 대상교량에 대해 가로보의 배치 간격과 가로보의 휨강성을 매개변수로 하여 합성 전·후 고정하중, 활하중, 풍하중 및 지진하중을 포함하여 해석하고 가로보 응력과 활하중 분배효과를 분석하였다.

또한, 시공중 횡비틀림 좌굴에 대한 안정성 검토를 위해 가로보의 휨강성과 배치 간격에 따라 강재 거더와 가로보의 격자 모델을 구축하고 합성전 고정하중을 고려한 재료 및 기하 비선형해석을 수행하여 거더의 횡비틀림 좌굴강도를 평가하였다.

이상의 설계하중에 대한 가로보의 응력 검토와 거더의 횡비틀림 좌굴강도 평가의 두가지 국면에 대한 해석으로부터 수평 및 수직 브레이싱이 생략되고 가로보만으로 연결된 2-거더교의 적정 가로보 배치간격과 소요 휨강성을 제안하였다.

2. 설계하중에 대한 해석

2.1 해석 대상 교량의 제원 및 매개변수

2.1.1 교량 제원

본 연구에서 사용한 예제 교량의 제원은 강합성 2-거더교 형식에서 일반적으로 적용될 수 있는 지간 및 교폭을 고려하여 다음과 같이 설정하였다.

- 단순교 : 40m(그림 1)
- 연속교 : 40+50+40m(그림 2)
- 교폭 : 10.2m (2차로)
- 교량등급 : 도로교 1등급
- 설계활하중 : DB-24 및 DL-24
- 거더의 개수 : 2본(거더간격 5.4m)
- 사용 재료 : 거더(SM490), 가로보(SM490)

콘크리트 ($f_{ck} = 270 \text{ kgf/cm}^2$)

- 콘크리트 바닥판 두께 : 34cm

예제 교량에 대해 거더 복부판의 높이는 단순교의 경우 2.8m, 연속교의 경우 3.0m로 하였으며, 복부판의 두께는 수평보강재가 없는 경우 최소복부판 두께 규정을 감안하여 단순교는 24mm, 연속교는 25mm로 하였다. 한편, 플랜지의 폭은 단순교의 경우 700mm, 연속교의 경우 750mm으로 설정하였다. 플랜지의 두께 결정을 위한 시산 설계시 바닥판의 크리프와 건조수축 등의 하중을 고려하지 않은 관계로 휨응력은 도로설계기준에 준하는 허용응력의 80% 이내로 하였고 조합응력비는 1.0 수준(≤ 1.2)으로 하였다. 이에 따라 전단응력의 허용치를 60% 이내가 되도록 예제 교량을 설계하였으며, 이로부터 결정된 거더의 상·하부 플랜지의 두께는 표 1과 같다.

표 1. 강재 거더 상·하부 플랜지의 두께 (단위 : mm)

Section	단순교		연속교	
	Upper	Lower	Upper	Lower
①	25	30	25	25
②	28	40	28	30
③	32	50	25	25
④	35	55	30	35
⑤	-	-	45	55

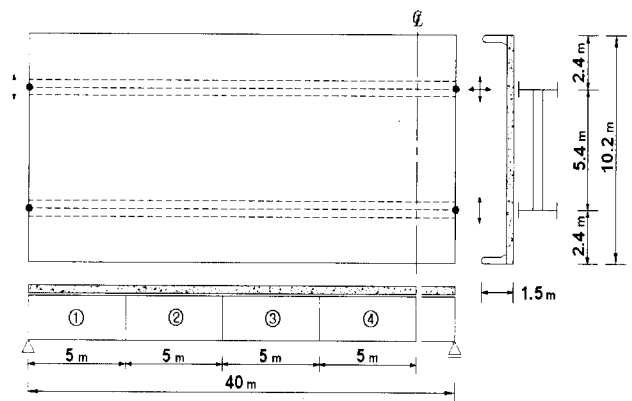


그림 1. 단순교 제원 (40m)

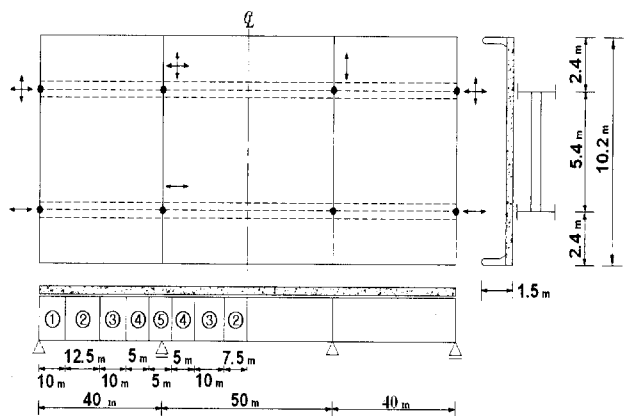


그림 2. 연속교 제원 (40+50+40m)

한편, 교량받침 지지 조건은 그림 1 및 그림 2에 보인 바와 같이 일반적인 고정-가동 지지조건을 고려하였다. 그림에서 화살표는 해당 방향으로 가동 조건임을 뜻한다.

2.1.2 가로보 매개변수

매개변수는 중간가로보의 배치 간격과 휨강성으로 하고 가로보는 1-단면으로 하였다. 먼저, 가로보의 배치 간격은 단순교와 연속교에 대해 배치간격비가 지간의 1/2, 1/4, 1/8(단, 연속교의 중앙경간은 1/10)로 배치된 경우에 대해 고려하였으며, 이는 중간가로보가 각각 1, 3, 7(연속교 중앙경간은 9)개가 배치된 것에 해당된다.

한편, 가로보의 휨강성 변수로는 주거더 북부판 높이 대비 가로보 북부판의 높이(이하 북판고비)가 30, 40, 50%인 세 가지 경우를 고려하였다. 세가지 형태의 가로보 제원은 표 2와 같다. 표 2에서 거더/가로보의 휨강성비는 표 1의 강재 거더의 평균 휨강성 대비 가로보의 휨강성 비를 의미한다. 또한, 단순교와 연속교의 단부가로보 및 내부지점가로보는 표 2에서 C-type 가로보를 모두 적용하기로 한다.

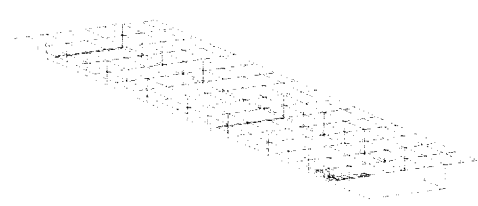
표 2. 가로보의 제원 및 배치간격 (단위 : mm)

구분	Type	H_w	t_w	b_{flk}	t_{flk}	북판고비 (%)	거더/가로보 휨강성비
단 순 교	A	840	9	240	12	30	1/98
	B	1120	12	320	16	40	1/31
	C	1400	15	400	20	50	1/13
연 속 교	A	900	10	260	13	30	1/83
	B	1200	13	340	17	40	1/27
	C	1500	16	430	22	50	1/11

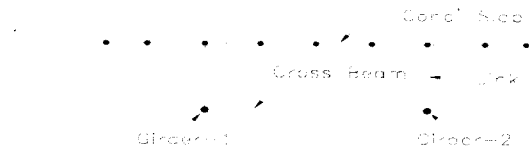
2.2 전산해석 모델

전산해석은 MIDAS/GEN을 사용하였으며 그림 3과 같이 콘크리트 바닥판과 강재 거더 및 가로보를 일정한 간격의 보요소로 단순화한 3차원 뼈대모델을 사용하였다. 이러한 3차원 뼈대모델은 평면격자 모델(Hambly, 1991)에 비해 정확한 해석이 가능함이 입증되었다(정광모 등, 1999).

그림 3의 모델에서 강재 거더와 바닥판은 강철 링크로 연결하였고 가로보는 거더 북부판의 중간에 배치되는 것으로 하였다. 가로보의 배치 위치에 따른 연구(坂井藤一, 1997)에 의하면 거더의 상단, 중단, 하단 중 중단과 하단 사이에 배치되는 것이 가장 유리하나, 중단에 배치된 경우와 별 차이가 없는 것으로 밝혀져 본 연구에서는 거더 중간에 배치하는 것으로 하였다.



(a) 전산모델형상



(b) 단면도

그림 3. 3차원 뼈대모델(단순교 40m, 중간가로보 1개배치 예)

2.3 설계하중에 대한 해석

2.3.1 주하중

가로보의 배치 간격과 휨강성의 변화에 따른 거동 분석을 위해 합성전 및 합성후 고정하중, 그리고 활하중에 대해 각각 해석을 수행하였다. 활하중은 도로교설계기준에 따라 DB-24 또는 DL-24 하중을 고려하였으며 횡방향으로는 그림 4에 보인 바와 같이 좌측으로부터 각각 1, 2, 3차로 재하 상태를 고려하였고 종방향으로는 영향선을 이용하여 대상 교량에 최대 응력이 발생하도록 재하하였다. 연속교의 경우 활하중은 각각 측경간 재하, 중앙경간 재하 경우와 내부지점 부모멘트 최대를 위한 측경간 및 중앙경간에 재하한 경우를 고려하였다.

활하중은 그림 3의 격자로 모델링한 바닥판에 재하하였으며 차륜하중이 바닥판에 해당하는 격자 보요소에 작용하지 않고 임의의 위치에 작용하는 경우에는 인접한 보요소의 절점에 등가절점하중으로 치환하여 재하하였다(Eom and Nowak, 2001).

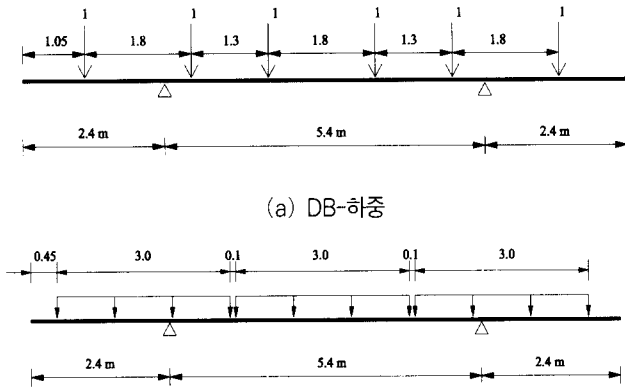
2.3.2 부하중

수평 및 수직 브레이싱의 생략으로 인한 대상 교량의 횡하중에 의한 가로보의 응력을 분석하기 위해 풍하중과 지진하중을 고려하였다. 풍하중은 도로교설계기준에 따라 산정하였으며 단순교는 1.50 tf/m, 연속교는 1.56 tf/m를 교축방향으로 재하하였다. 지진하중은 교축방향과 교축직각방향의 설계지진하중(지진구역 I, 내진1등급)을 고려하여 응답스펙트럼해석법으로 수행하였다.

2.3.3 하중조합 경우

설계하중에 대한 가로보의 응력 검토를 위해 고려한 하중조합 경우는 다음과 같다.

- ① 고정하중(D)+활하중(DB 또는 DL 1, 2, 3차로)
- ② 고정하중(D)+풍하중(W)
- ③ 고정하중(D)+지진하중(EQ)



(a) DB-하중
(b) DL-하중
그림 4. 활하중 횡방향 재하

2.4 단부 및 중간가로보의 응력 검토

2.4.1 단순교

앞의 2.3.3의 하중조합에 대해 중간가로보의 배치간격비가 1/4인 경우 단순교의 단부 및 중간가로보(경간 중앙)의 응력은 표 3과 같다. 표 3의 응력은 허용응력증가계수를 고려하지 않은 값이며, 이를 고려할 경우 단부가로보는 고정하중+지진하중(D+EQ)이, 중간가로보는 고정하중+차로하중(D+DL)의 경우가 지배적임을 알 수 있다. 여기서, 지진하중은 교축직각방향 탄성지진력에 교축방향으로 30%의 탄성지진력을 합산한 경우이고, 차로하중은 2차로 재하 경우이다.

한편, 중간가로보의 휨강성 및 배치간격에 따른 단부가로보의 응력은 그림 5(하중조합 D+EQ)와 같고, 중간가로보의 응력은 그림 6(하중조합 D+DL)과 같다. 그림 5와 6에서 휨축은 지간 대비 중간가로보의 배치간격비이다.

그림 5로부터 중간가로보의 배치간격이 좁아질수록 단부가로보의 응력은 조금 줄어들지만 중간가로보의 휨강성 변화(A, B, C-type)에 따른 응력의 변동은 미미함을 알 수 있다. 한편, 그림 6은 경간 중앙 위치의 중간가로보 응력으로서 가장 휨강성이 작은 A-type을 1개만 배치한 경우(배치간격비 1/2)에도 허용응력을 충분히 만족하였으며 중간가로보 배치간격비가 줄어들수록, 그리고 휨강성이 증가할수록 중간가로보의 응력은 감소하는 현상을 보였다.

이상으로부터 2-거더 단순교의 경우, 단부가로보는 주거더 대비 복판고비가 50% 수준인 단면이면 충분하고, 중간가로보는 휨강성이 가장 적은 A-type 단면(복판고비 30% 수준)을 1개만 배치(배치간격비 1/2)하여도 허용응력 측면에서는 가

능한 것으로 나타났다.

표 3. 단순교 가로보 응력(배치간격비 1/4, 단위 : kgf/cm²)

하중조합	중간가로보 형태	단부가로보	중간가로보
D+DL	A-type	183.7	116.8
	B-type	183.1	81.2
	C-type	182.6	55.2
D+W	A-type	203.5	133.8
	B-type	203.5	87.7
	C-type	203.4	58.7
D+EQ	A-type	788.2	133.5
	B-type	789.0	105.3
	C-type	790.1	68.5

주) 허용응력증가계수를 고려하지 않은 값

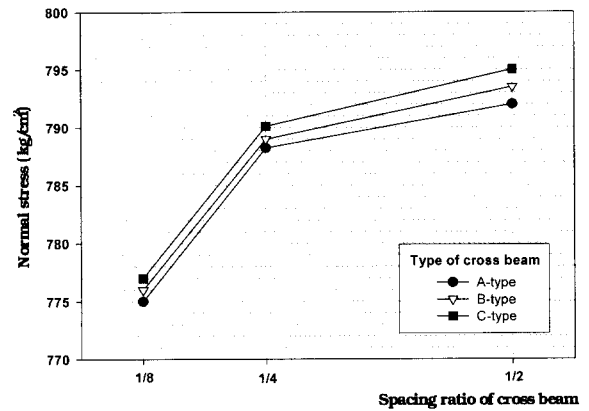


그림 5. 단순교 단부가로보의 응력 (D+EQ)

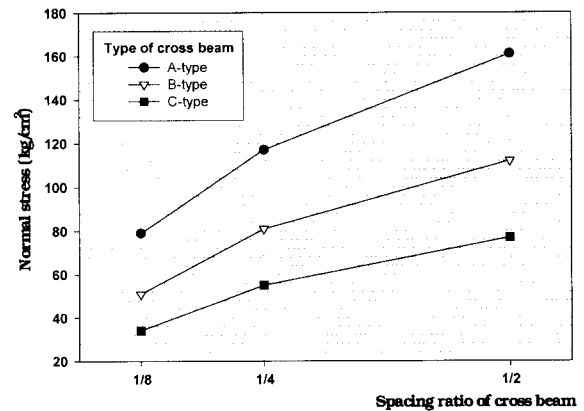


그림 6. 단순교 중간가로보의 응력 (D+DL)

2.4.2 연속교

중간가로보의 배치간격비가 1/4인 경우에 대해 연속교의 단부 가로보, 내부지점 가로보 및 중간가로보(중앙경간 중앙 위치)의 응력은 표 4와 같다. 표 4의 응력은 허용응력증가계수를 고려하지 않은 값이며, 단순교에서와 유사하게 이를 고려할 경우 단부가로보와 내부지점가로보는 고정하중+지진하중

(D+EQ)이, 중간가로보는 고정하중+차로하중(D+DL)의 경우가 지배적임을 알 수 있다. 여기서, 지진하중은 2.4.1 단순교에서 기술한 바와 같고, 차로하중은 측경간 및 중앙경간 2차로 재하 상태 중 큰 응력값이다.

중간가로보의 휨강성 및 배치간격에 따른 단부가로보 및 내부지점 가로보의 응력은 그림 7 및 8(하중조합 D+EQ)과 같고, 중간가로보의 응력은 그림 9(하중조합 D+DL)와 같다.

그림 7로부터 중간가로보의 휨강성과 배치간격비에 따라 단부가로보의 응력은 변하지만 차이는 그다지 크지 않다. 그림 8로부터 중간가로보의 배치간격이 촘촘할수록 내부지점가로보의 응력은 줄어들지만 중간가로보의 휨강성 변화에는 응력의 변동이 극히 적음을 알 수 있다. 한편, 그림 9는 중앙경간 중앙에서의 중간가로보 응력으로서 단순교의 경우와 마찬가지로 가로보 배치간격비가 줄어들수록, 그리고 휨강성이 증가할수록 중간가로보의 응력은 감소하는 현상을 보였다.

따라서, 2-거더 연속교의 경우에도 단부 및 내부지점 가로보는 주거더 대비 복판고비가 50% 수준이면 충분하고, 중간가로보는 휨강성이 가장 적은 A-type 단면(복판고비 30% 수준)을 1개만 배치(배치간격비 1/2)하여도 허용응력 측면에서는 가능한 것으로 나타났다.

표 4. 연속교 가로보 응력(배치간격비 1/4, 단위 : kgf/cm²)

하중조합	중간가로보 형태	단부가로보	내부지점 가로보	중간가로보
D+DL	A-type	150.4	120.1	120.4
	B-type	150.2	118.1	78.8
	C-type	150.0	116.9	55.2
D+W	A-type	158.4	390.5	126.3
	B-type	157.4	387.8	79.7
	C-type	156.8	386.2	52.2
D+EQ	A-type	621.4	935.2	112.1
	B-type	625.7	925.1	86.6
	C-type	629.7	931.5	64.9

주) 허용응력증가계수를 고려하지 않은 값

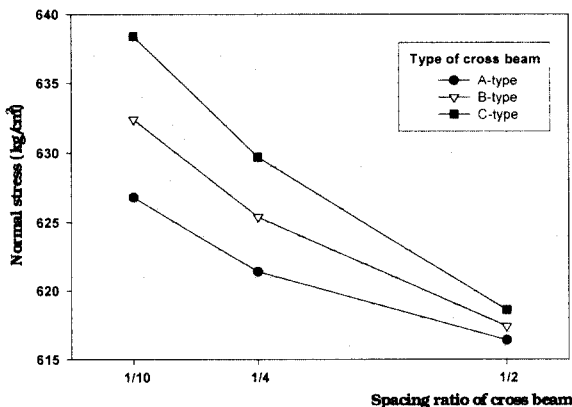


그림 7. 연속교 단부가로보의 응력(D+EQ)

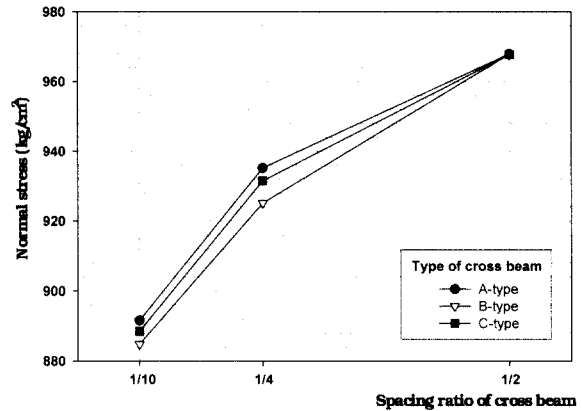


그림 8. 연속교 내부지점가로보의 응력(D+EQ)

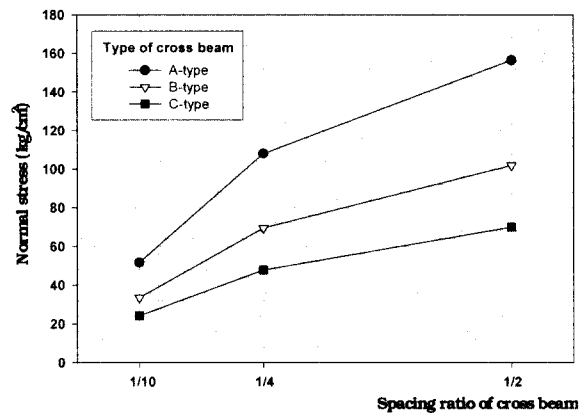


그림 9. 연속교 중간가로보의 응력(D+DL)

2.5 처짐 검토

중간가로보의 배치간격 및 휨강성에 따른 2-거더교의 처짐은 표 5와 같다. 본 표로부터 단순교 및 연속교 모두 차로하중을 3차로에 모두 재하한 경우가 가장 큰 처짐을 보이며 현행 도로교설계기준의 허용처짐량(본 예에서 단순교는 8cm, 연속교는 10cm)을 충분히 만족한다.

한편, 2차로 편재하 경우에도 중간가로보의 배치에 따른 처짐의 차이는 거의 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 뒤의 3장에서 기술하였듯이 2-거더교에서는 중간가로보의 배치에 따른 하중의 횡분배 효과는 거의 영향이 없음을 의미한다.

2.6 동적 특성의 비교

중간가로보의 배치간격 및 휨강성에 따른 2-거더교의 동적 거동 특성 평가를 위해 고유치해석을 수행하였다. 참고로 연속교에서 지배적인 첫 번째 연직진동모드 및 수평처짐+비틀림 모드 형태는 그림 10과 같다.

한편, 각 경우별 고유주기는 표 6과 같다. 표 6으로부터 단순교와 연속교 모두 중간가로보 배치간격 및 휨강성의 변화에

대해 고유주기의 차이는 미소하며, 따라서 상부구조의 전체 강성 및 동적 특성의 변화에도 큰 차이는 예상되지 않는다.

표 5. 처짐 (단위 : cm)

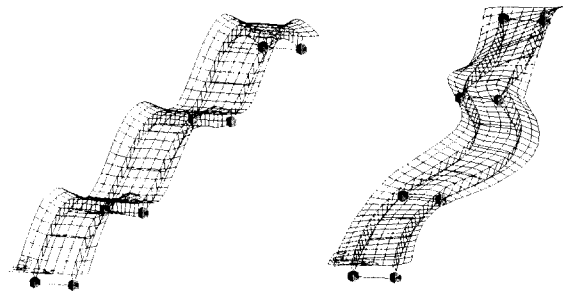
구분	중간가로보 형태	중간가로보 배치간격비	차로하중 2차로 재하	차로하중 3차로 재하
단 순 교	A-type	1/2	1.3623	1.3977
		1/4	1.3618	1.3978
		1/8	1.3598	1.3978
	B-type	1/2	1.3605	1.3978
		1/4	1.3599	1.3979
		1/8	1.3573	1.3979
	C-type	1/2	1.3594	1.3979
		1/4	1.3586	1.3979
		1/8	1.3555	1.3979
연 속 교	A-type	1/2	1.4724	1.5050
		1/4	1.4710	1.5050
		1/8(1/10)	1.4682	1.5050
	B-type	1/2	1.4711	1.5051
		1/4	1.4690	1.5051
		1/8(1/10)	1.4656	1.5051
	C-type	1/2	1.4703	1.5051
		1/4	1.4676	1.5051
		1/8(1/10)	1.4635	1.5050

주) (1/10)은 연속교의 중앙경간의 가로보 배치간격비

표 6. 동적 고유주기 (단위 : sec)

구분	중간가로보 형태	중간가로보 배치간격비	연직처짐 모드 주기	수평+비틀림 모드 주기
단 순 교	A-type	1/2	0.3559	0.1949
		1/4	0.3554	0.1943
		1/8	0.3559	0.1937
	B-type	1/2	0.3559	0.1946
		1/4	0.3558	0.1939
		1/8	0.3571	0.1934
	C-type	1/2	0.3561	0.1945
		1/4	0.3564	0.1939
		1/8	0.3587	0.1938
연 속 교	A-type	1/2	0.2497	0.2283
		1/4	0.2483	0.2280
		1/8(1/10)	0.2483	0.2268
	B-type	1/2	0.2497	0.2282
		1/4	0.2485	0.2279
		1/8(1/10)	0.2492	0.2266
	C-type	1/2	0.2497	0.2283
		1/4	0.2489	0.2281
		1/8(1/10)	0.2504	0.2272

주) (1/10)은 연속교의 중앙경간의 가로보 배치간격비



(a) 연직처짐 모드 (b) 수평처짐+비틀림 모드

그림 10. 진동 모드 형태(연속교 예)

3. 활하중에 대한 거더 하중분배 효과

3.1 하중분배계수 및 하중분배율

단순교 및 연속교에 대해 중간가로보 배치간격비가 지간의 1/2, 1/4, 1/8(연속교 중앙경간은 1/10)이고 휨강성은 표 2의 A, B, C-type의 세가지 경우에 대해 활하중 분배효과를 분석하였다. 활하중에 의한 하중분배 효과는 차륜하중(DB 하중)에 대해서는 다음 식의 하중분배계수(distribution factor, 정광모 등, 1999; Tarhini and Frederick, 1992; Eom and Nowak, 2001)를 사용하여 일반적으로 평가한다.

$$DF = \frac{M_{G, \max}}{M_{1, \max}} \quad (1)$$

여기서, $M_{G, \max}$: 실제 차륜하중 재하 상태에서 대상 거더에 발생하는 최대 휨모멘트, $M_{1, \max}$: 한열의 차륜하중에 의해 단일거더(single beam)에서 발생하는 최대 휨모멘트이다.

한편, 차로하중(DL 하중)에 대해서는 하중분배 효과의 상대 비교를 위해 본 연구에서는 하중분배율(distribution ratio)을 다음과 같이 정의하였다.

$$DR = \frac{M_{G, \max}}{\sum M_G} \quad (2)$$

여기서, $M_{G, \max}$: 실제 차로하중 재하 상태에서 대상 거더에 발생하는 최대 휨모멘트, $\sum M_G$: 실제 차로하중 재하 상태에서 발생하는 2개 거더의 휨모멘트의 합이다.

3.2 가로보 배치간격비에 따른 하중분배 효과

가로보의 배치간격비에 따른 하중분배 효과의 분석 결과는 다음과 같다. 먼저, 가로보의 휨강성이 B-type이고 2차로 재

하인 경우, DB 하중이 재하된 단순교에서 가로보 배치간격에 따른 경간 중앙에서의 하중분배계수(DF)는 그림 11과 같고, DL 하중을 재하한 연속교의 중앙 경간 및 내부지점부의 하중분배율(DR)은 그림 12 및 13과 같다. 그림 11~13에서 CB-1/2, CB-1/4, CB-1/8(연속교 중앙경간은 CB-1/10)은 각각 중간가로보 배치간격비가 지간의 1/2, 1/4, 1/8(연속교 중앙경간은 1/10)에 해당된다.

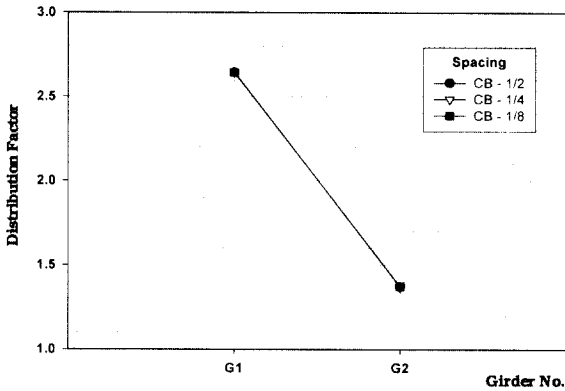


그림 11. 배치간격비에 따른 단순교 경간중앙에서의 하중분배계수 (DB 2차로 재하, 가로보-B-type)

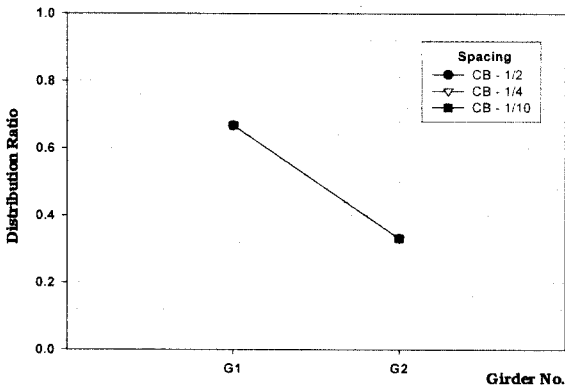


그림 12. 배치간격비에 따른 연속교 중앙경간에서의 하중분배율 (DL 2차로 재하, 가로보-B-type)

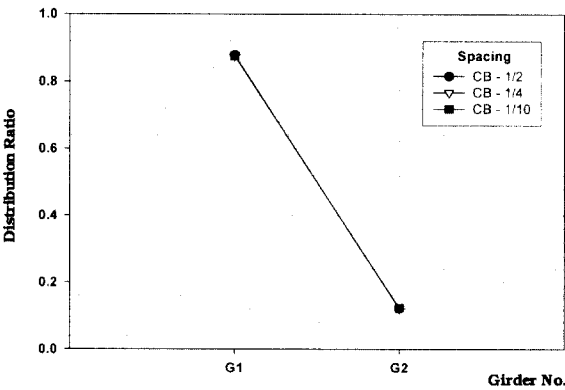


그림 13. 배치간격비에 따른 연속교 내부지점에서의 하중분배율 (DL 2차로 재하, 가로보-B-type)

이들 그림으로부터 단순교와 연속교 모두 중간가로보의 배치간격과 활하중 형태(DB 및 DL)에 관계없이 하중분배 효과는 거의 차이가 없음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 재하 차로수에 관계없이 유사한 경향을 보였다.

3.3 가로보 휨강성에 따른 하중분배 효과

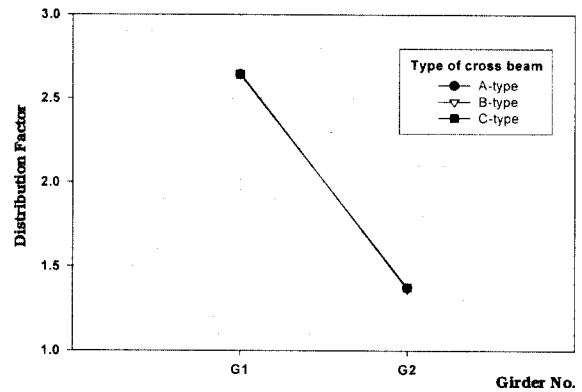


그림 14. 가로보 휨강성에 따른 단순교 경간중앙에서의 하중분배계수 (DB 2차로 재하, 배치간격비 1/4)

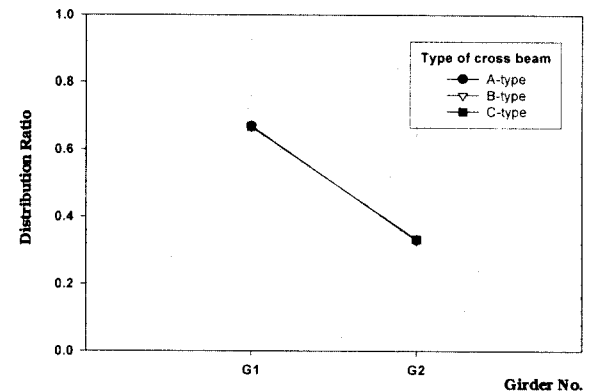


그림 15. 가로보 휨강성에 따른 연속교 중앙경간에서의 하중분배율 (DL 2차로 재하, 배치간격비 1/4)

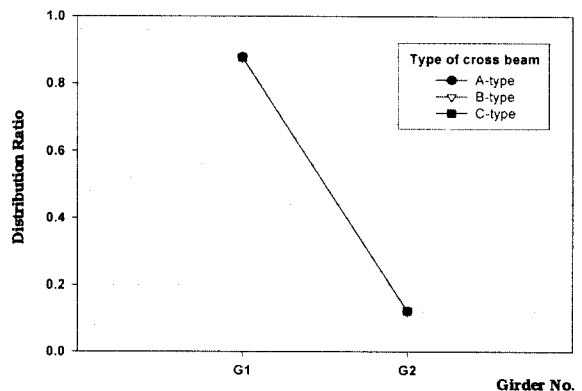


그림 16. 가로보 휨강성에 따른 연속교 내부지점에서의 하중분배율 (DL 2차로 재하, 배치간격비 1/4)

한편, 가로보의 배치간격비가 1/4인 경우 중간가로보의 휨강성 변화에 따른 단순교의 하중분배계수는 그림 14에, 연속교의 중앙 경간 및 내부지점에서의 하중분배율은 그림 15 및 16에 보인 바와 같다.

이들 그림으로부터 중간가로보의 휨강성 변화에 따른 하중분배효과도 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

이상으로부터 가로보의 배치간격 및 휨강성의 변화에 대해 활하중 분배효과에는 거의 영향이 없는데, 이는 2-거더교가 다주형 거더교와 달리 그림 17에 보인 바와 같이 임의 위치의 단면에서 볼 때 편재하 하중에 대해서 상부구조가 강제회전 형태와 유사한 거동을 보이는 특성에 따른 것으로 판단된다.

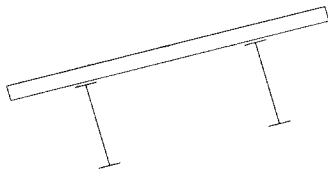


그림 17. 2-거더교의 강제회전 거동

4. 거더의 횡비틀림 좌굴강도 평가

서두에서 기술한 바와 같이 현재 국내 도로교설계기준에서는 2-거더교에 대한 가로보의 배치간격 및 휨강성에 대한 규정이 없다. 따라서, 2-거더교의 가로보 휨강성 및 배치간격의 결정을 위해서는 완성계의 설계하중조합에 대한 응력분석과 더불어 콘크리트 바닥판 시공시 재하되는 고정하중에 대해 중간가로보가 거더의 횡좌굴 지지점으로서의 역할을 하기 위해 필요한 휨강성의 평가가 필요하다.

가로보의 배치 간격에 따른 거더의 횡비틀림 좌굴 내하력을 평가하기 위해 강제 거더와 가로보의 격자 구조에 대해 횡비틀림 좌굴 해석을 수행하였다. 해석 모델은 거더를 2.5m 간격으로 분할하고 가로보는 2개 보요소로 모델링하였으며, 거더의 수평방향 초기 처짐을 $(L/1000) \sin$ 반파(半波) 형상으로 가정하였다.

하중은 강제 거더의 자중을 재하한 후 콘크리트 바닥판 고정하중을 종국 상태에 도달할 때까지 재하하여 재료 및 기하비선형 해석을 수행하였다. 재료 모델은 완전소성모델을 사용하였으며, 전산프로그램은 ABAQUS를 사용하였다.

각 경우별 비선형 해석으로부터 얻은 단순교 및 연속교에 대한 종국내하력 결과는 그림 18 및 19와 같다. 그림에서 $\alpha = P_u/P_d$ 로서 P_d 는 콘크리트 바닥판 고정하중의 크기이고, P_u 는 비선형 해석으로부터 구한 종국 하중강도이다. 한편, 연속교에서 중간가로보가 A-type이고 배치간격비가

1/4인 경우의 하중계수(α)-횡방향 처짐 곡선은 그림 20과 같다.

그림 18과 19로부터 동일 배치간격비에 대해 휨강성이 증가할수록 종국강도는 증가하나, 이보다는 배치간격비가 종국강도에 지배적임을 알 수 있다.

먼저, 단순교에서 중간가로보의 배치간격에 따른 좌굴 형상은 그림 21과 같다. 배치간격비에 따른 종국상태 도달 과정을 분석하면 가로보 배치간격비가 1/2인 경우에는 단부가로보의 항복 후 거더의 횡좌굴이 발생하였고, 배치간격비 1/4인 경우에는 거더의 항복 이후 인접 중간가로보가 항복하여 종국상태에 이르렀다. 이에 비해 배치간격비가 1/8인 경우에는 거더의 횡좌굴은 발생하지 않고 거더의 재료항복으로 인해 종국상태에 이르렀다.

한편, 연속교의 중간가로보 배치간격에 따른 좌굴 형상은 그림 22와 같다. 연속교에서는 가로보의 배치간격비가 1/2인 경우에는 측경간 거더의 항복후 단부가로보의 항복으로 종국상태에 이르렀다. 배치간격비 1/4의 경우에는 측경간 거더의 항복 후 인접 중간가로보의 항복으로 종국상태에 이르렀으며, 배치간격비가 1/8의 경우에는 단순교와 마찬가지로 횡좌굴은 발생하지 않고 거더의 재료항복으로 인해 종국상태에 이르렀다.

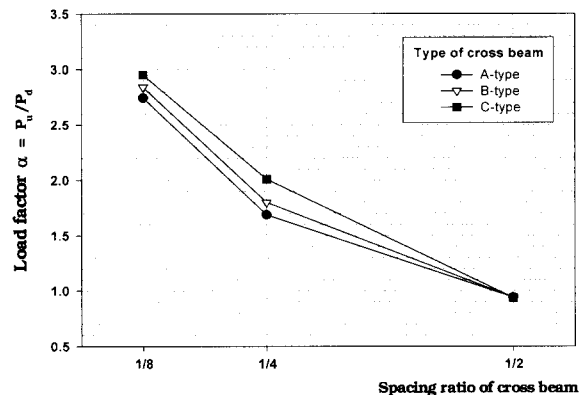


그림 18. 단순교 횡비틀림 좌굴강도

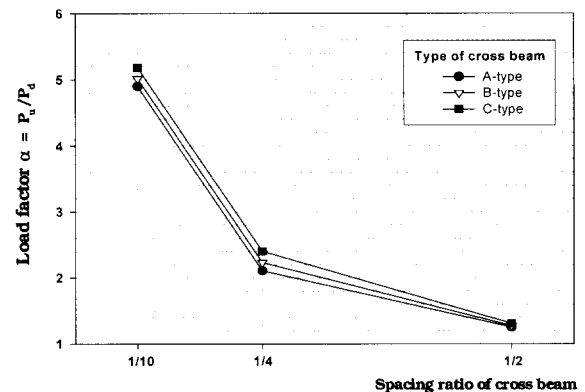


그림 19. 연속교 횡비틀림 좌굴강도

이상의 횡좌굴 해석 결과로부터 합성전 고정하중에 대해 거더의 횡좌굴에 대한 안전율을 1.7로 설정하였을 때 단순교와 연속교 모두 가로보의 배치간격비를 지간의 1/4로 한 경우 단순교에서는 B-type 이상(그림 18), 연속교는 A-type 이상(그림 19)의 휨강성이 필요한 것으로 나타났다. 반면에 배치간격비를 1/2로 한 경우에는 단순교 및 연속교 모두 C-type 중간가로보를 적용하여도 횡좌굴에 대한 안전율 1.7을 만족하지 못하였다.

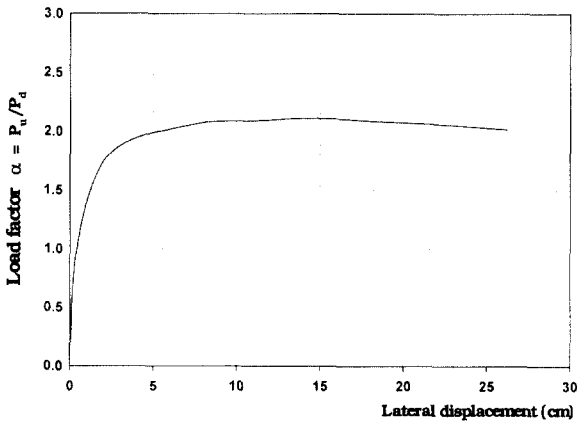
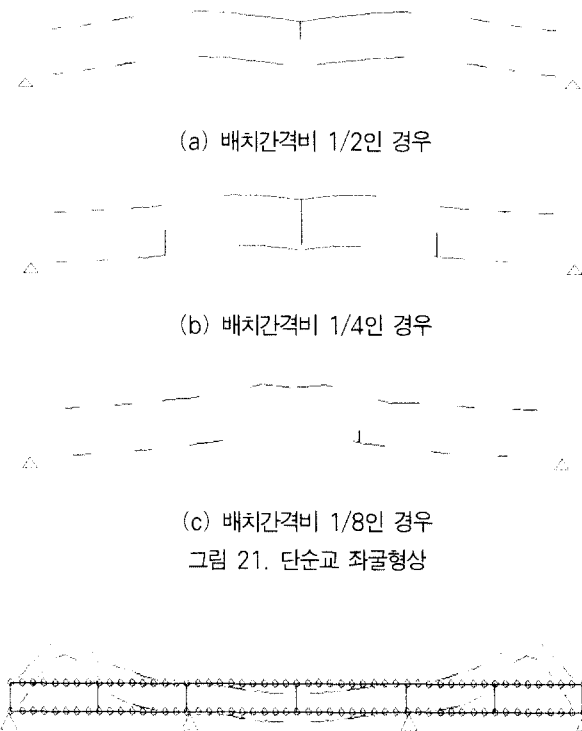


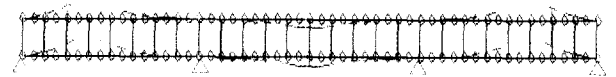
그림 20. 하중-처짐선도(연속교, 가로보 A-type, 배치간격비=1/4)



(a) 배치간격비 1/2인 경우



(b) 배치간격비 1/4인 경우



(c) 배치간격비 1/8(중앙경간은 1/10)인 경우

그림 22. 연속교 좌굴형상

5. 가로보의 배치간격 및 소요 휨강성 분석

거더를 I-단면 형태의 가로보만으로 연결한 단순 및 연속 2-거더교에서 가로보의 배치간격과 휨강성을 매개변수로 하여 설계하중조합에 대한 응력분석과 거더의 횡비틀림 좌굴강도 평가의 두가지 국면 해석으로부터 도출된 가로보의 소요 휨강성 및 배치간격을 요약하면 표 7과 같다.

먼저, 설계하중에 대한 허용응력 및 활하중 분배 측면에서 중간가로보의 배치간격비는 단순교와 연속교 모두 지간의 1/2 정도, 즉, 지간 40m의 단순교는 20m, 40+50+40m의 3경간 연속교에서 측경간은 20m, 중앙경간은 25m까지 가능함을 알 수 있었다. 그리고, 단순교 및 연속교의 단부가로보와 내부지점 가로보는 거더 대비 복판고비가 50%인 단면이면 충분한 것으로 나타났다. 또한, 단부 및 지점부 가로보의 응력은 중간 가로보의 배치간격에는 다소간 영향을 받으나 휨강성의 변화에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다.

표 7. 가로보의 소요 휨강성 및 배치간격

매개변수		해석 경우	① 허용응력	② 횡좌굴	소요 휨강성 및 배치간격
			및 하중분배	강도	
중간 가로보	단순교	복판고비	30 %	40 % 이상	40 % 이상
		배치간격비	1/2	1/4	1/4
	연속교	복판고비	30 %	30 %	30 %
		배치간격비	1/2	1/4	1/4
단부 가로보	단순교	복판고비	50 %	-	50 %
	연속교	복판고비	50 %	-	50 %
내부지점가로보 (연속교)		복판고비	50 %	-	50 %

한편, 합성전 고정하중에 대한 거더의 횡좌굴 해석결과로부터 횡좌굴에 대한 안전율을 1.7로 설정하였을 때 단순교와 연속교 모두 중간가로보의 배치간격비는 지간의 1/4 정도, 즉 단순교는 10m, 연속교에서는 측경간은 10m, 중앙경간은 12.5m 정도까지 가능하며, 중간가로보의 휨강성은 단순교의 경우 복판고비가 최소 40%(B-type) 이상, 연속교의 경우 30% (A-type) 이상의 휨강성이 필요한 것으로 분석되었다.

이상으로부터 중간가로보의 소요 휨강성 및 배치간격은 완성계보다는 시공단계의 합성전 고정하중에 의한 거더의 횡비틀림 좌굴이 지배적인 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 강합성 2-거더교에서 가로보의 적정 배치간격과 소요 휨강성의 결정을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지간이 40m인 단순교와 40+50+40m인 3경간 연속교에 대해 가로보의 배치간격과 휨강성을 매개변수로 하여 설계하중 조합에 대한 응력분석 및 시공중 거더의 횡비틀림 좌굴강도를 평가하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단순교 및 연속교에서 거더의 활하중 분배효과는 중간 가로보의 배치간격 및 휨강성의 변화에 대해 거의 차이가 없었으며 동적 고유주기도 이들 변수에 거의 영향을 받지 않았다.
- (2) 설계하중에 대한 허용응력 측면에서 단순교와 연속교 모두 중간가로보의 배치간격비는 지간의 1/2 정도, 휨강성은 주거더 대비 복판고비가 30%인 단면으로 가능하였다.
- (3) 단순교와 연속교의 단부가로보 및 내부지점 가로보는 모두 복판고비가 50% 정도의 단면이면 가능한 것으로 분석되었다.
- (4) 거더의 횡비틀림 좌굴에 대한 안전성 확보를 위해서는 중간가로보의 휨강성이 단순교는 복판고비 최소 40%, 연속교는 30% 수준의 단면이 필요하며, 배치간격은 지간의 1/4 간격이면 가능한 것으로 분석되었다.

따라서, 중간가로보의 배치간격 및 소요 휨강성은 합성전 고정하중에 의한 거더의 횡비틀림 좌굴이 지배적인 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 향후 2-거더교의 설계시 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지원과제 "승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발"(과제번호 02산학연F02-01)의 일부로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박용명, 백승용, 황민오(2002) 강합성 플레이트거더교의 가로보 배치에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제6호, pp.691~699.
- 용환선, 김석태, 최수영(2001) 합성 2주형교의 하중분배거동에 미치는 가로보 효과에 관한 연구, 2001년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp.25~30.
- 정광모, 윤희택, 김문영(1999) 평면격자 해석기법에 의한 합성형 판형교의 하중분배 특성, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제11권, 제5호, pp.507~517.
- 제성훈, 이제형, 박영근, 배두병(2001) 플레이트 거더교의 하중분배계수 산정방법 비교 연구, 2001년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회.
- 한국도로교통협회(2000) 도로교설계기준.
- 大塚勝, 竹中裕文, 佐藤哲也, 和地輝雄(1993) 下横構を省略したプレートガーダー橋の提案, 橋梁と基礎, No.93-11, pp.33~39.
- 坂井藤一, 長井正嗣, 八部順一(1995) フランスの鋼・コンクリート合成2主桁橋梁の設計指針, 橋梁と基礎, No.95-3, pp.33~41.
- 坂井藤一, 大垣賀津雄, 八部順一, 橋本晴智(1997) 合成2主桁橋の横桁配置に関する研究, 橋梁と基礎, No.97-3, pp.33~41.
- Cao, L. C. and Shing, P. B.(1999) Simplified analysis method for slab-on-girder highways bridge decks, *J. struct. Div., ASCE*, Vol.125, No.1, pp.49~59.
- Eom, J.S. and Nowak, A.S.(2001) Live load distribution for steel girder bridges, *J. of Bridge Eng., ASCE*, Vol. 6, No. 6, pp.489~497.
- Hambly, E.C.(1991) *Bridge Deck Behavior*, 2nd ed., E & FN SPON
- Tarhini, K. M. and Frederick, G. R.,(1992) Wheel load distribution in I-girder highway Bridges, *J. Struct. Div., ASCE*, Vol.118, No.5, pp.1285~1294.

(접수일자 : 2003. 7. 25 / 심사일 2003. 9. 5 /
심사완료일 2004. 2. 2)