

교통특성을 고려한 강도로교의 피로수명 평가 방안

Fatigue Life Estimation Method Considering Traffic Properties for Steel Highway Girder Bridge

이 희 현¹⁾ · 경 갑 수²⁾ · 전 준 창³⁾
Lee, Hee Hyun Kyung, Kab Soo Jeon, Jun Chang

요 약 : 장기간 동안 활하중의 반복재하로 인한 응력누적에 의해 발생하는 피로현상은 강교량의 내구수명을 지배하는 주요 인자중 하나이다. 본 논문은 차량 주행시 동적효과가 비교적 크게 일어나는 일반적인 중소규모의 플레이트 거더교를 대상으로 피로수명에 영향을 미치는 교통하중의 특성을 검토하였다. 검토결과, 피로수명은 시간교통량과 대형차 혼입율이 증가할수록 짧아지고, 교통하중특성의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이러한 검토결과를 토대로 피로수명에 영향을 주는 교통하중의 특성을 대표할 수 있는 새로운 파라미터를 제시하고, 그 유용성을 확인하였다.

ABSTRACT : The fatigue phenomenon, which is induced by stress accumulation due to the repeated loading of vehicles in the long term, is one of the main factors of the span of life of a steel bridge. In this paper, the effects of traffic properties on the fatigue life of ordinary short- and medium-span steel plate girder bridges that are exposed to relatively large dynamic effects are investigated. From the analysis, it was known that the fatigue life of the bridge becomes shorter with increasing traffic volume and number of large vehicles, and is affected by the weights of the vehicles. Based on the analysis results, a new parameter that can represent the traffic property that affects the fatigue life of the subject bridge is suggested, and the validity of the parameter is confirmed.

핵심용어 : 강도로교, 피로, 피로수명, 하중특성, 등가하중

KEYWORDS : steel highway bridge, fatigue, fatigue life, loading property, equivalent load

1. 서론

트럭 등 활하중의 반복에 의한 응력누적으로 발생하는 피로 현상은 강교량의 수명을 지배하는 주요 요인이다. 피로가 특히 문제가 되는 용접구조가 1960년대부터 우리나라 도로교에 적용되기 시작하였다는 사실을 상기해 볼 때, 이들 교량에서 피로로 인한 문제가 발생할 가능성이 높아지고 있다는 것은 쉽게 유추할 수 있으며, 실제 피로균열 사례도 국내외에서 보고되고 있다(권순철 등, 2008; 한국시설안전공단, 2001; 한국시설안전공단, 2006; 森猛 등, 2004; Kyung 등, 2007).

일반적으로 피로로 인한 손상은 중차량 교통량이 많은 교량에서 발생할 가능성이 높은 것으로 알려져 있으므로(日本建設省土木研究所, 1988), 어떤 교통하중 조건하에서 피로가 문제가 되기 쉬우며, 또한 피로수명을 지배하는 교통하중 특성은 어떠한지 명확히 밝히는 것이 향후 강교량의 유지관리를 위한 정책수립에 유효하리라 사료된다.

본 논문은 중차량 주행시 동적효과가 비교적 크게 일어나는 일반적인 중소규모의 플레이트 거더교를 대상으로 차량하중, 차중구성비 및 시간교통량을 파라미터(parameter)로 하여 Monte-Carlo법에 따라 자동차 하중열을 시뮬레이션하고 피로수명해석을 실시하였으며, 이로부터 교통하중특성이 피로수명에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 이러한 교통하중특성을 대표하여 피로수명평가에 널리 활용될 수 있는 새로운 파라미터를 제시하고 그 유용성에 대해 검토하였다.

2. 해석방법

2.1 대상교량 및 이음상세

본 연구에서 대상으로 하는 교량은 그림 1과 같이 I형 단면을 갖는 단순 및 3경간 연속 플레이트 거더교이다. 일반적으로 강교량에는 다양한 용접이음 존재하므로 피로균열이 발생할

1) 교신저자. 씨티씨(주) 대표이사
(Tel. 031-477-5182, Fax. 031-477-5185, E-mail : lhh@ctceng.co.kr)

2) 한국해양대학교 토목환경공학부 교수(kyungks@hhu.ac.kr)

3) 씨티씨(주) 상무(jcj@ctceng.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

것으로 예상되는 위치, 즉, 피로수명을 계산하여야 할 위치도 다수 발생될 수 있다. 그러나 본 논문에서는, 피로수명 계산 위치를 설계상 가장 큰 응력이 발생할 것으로 예상되는 위치, 즉, 단순교의 경우 지간중앙, 연속교의 경우 측경간 중앙의 인장플랜지로 하고, 그 위치에 그림 2와 같이 일본의 JSSC지침(日本鋼構造協會, 1993)에 의한 G등급(반복횟수 2×10^6 회)에 대한 기본허용피로응력범위 : 50MPa, 국내 설계기준의 경우 다재하경로 E등급의 반복횟수 2×10^6 회에 대한 기본허용피로응력범위 : 56MPa)의 구조상세가 존재하는 것으로 가정하여 피로수명을 계산하였다. 표 1은 일본 도로교시방서(日本道路協會, 2002a)에 따라 설계된 본 연구대상 교량의 단면 및 재료특성을 보여 준다. 표 1의 단면2차모멘트는 피로수명을 계산하는 위치에서 강재의 허용응력대비 설계응력이 95~98%가 되도록 결정된 값이다.

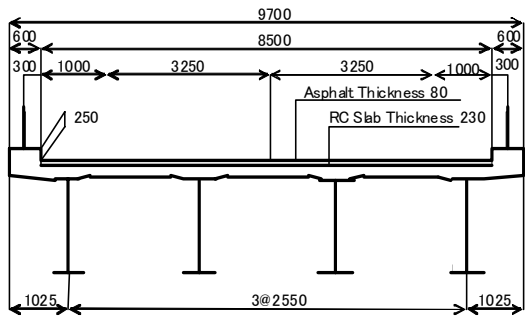


그림 1. 연구대상 플레이트 거더교의 횡단면도 (단위 : mm)

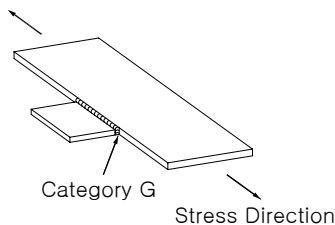


그림 2. JSSC의 피로등급 G에 해당하는 구조상세의 예 (플랜지에 용접된 거시트 플레이트)

표 1. 해석대상교량의 재료 및 단면특성

형 식	지간길이 (m)	강 종	단면2차모멘트 (m ⁴)	
단순 플레이트 거더교	30	SM490Y	외측 거더	0.026
			내측 거더	0.023
단순 플레이트 거더교	50	SM490Y	외측 거더	0.099
			내측 거더	0.091
3경간 연속 플레이트 거더교*	50	SM490Y	외측 거더	0.062
			내측 거더	0.057

*연속교의 경우, 중앙경간의 길이이며, 경간비는 1:1:1, 단면2차모멘트는 측경간 중앙부의 값이다.

2.2 교통하중 실태조사

도로 위를 주행하는 자동차의 종류는 매우 다양하여 이들 모두를 고려하여 피로수명을 평가하는 것은 상당한 시간과 비용이 소모될 뿐만 아니라 큰 의미도 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 차량에 대한 분류 및 차량별 하중 특성에 대한 정보가 제공되어 있는 일본 건설성의 분류를 사용하여 연구대상 교량의 피로수명을 평가하였다(日本建設省土木研究所, 1988; Miki 등, 1985).

표 2에 본 연구에서 사용한 8가지 형식의 차량 제원 및 중량 분포를 나타내었다. 표 3과 표 4에 일본의 6개 국도에서 조사된 차량을 표 2에 따라 분류하여 각 차종의 중량과 구성비를 나타내었다. 표 3과 표 4의 No.7은 차종별 중량이 대수정규분포를 따른다는 가정하에 1984년 일본국토교통성이 아리아케(有明)에서의 실측결과를 재정리한 것으로서 이 자료는 일본의 강도로교 피로설계지침(日本道路協會, 2002b)에도 사용되고 있다.

조사된 차량 중량의 빈도분포에 관한 자료의 일례는 그림 3과 같다. 그림에서 실선은 차량의 중량이 한 개 또는 두 개의 피크치를 갖는 대수정규분포를 따른다고 가정하여 작성한 것이다. 그림에서 대형트럭은 한 개의 피크치를 갖지만 덤프트럭은 공차시와 적재시의 중량 차이로 인해 두 개의 피크치를 갖는다는 것을 알 수 있다.

한편, 측정위치에 따른 차량별 중량차이를 조사하기 위하여 표 3의 등가중량은 식(1)과 같이 계산하였다. 이 표로부터 동일형식의 차량이라도 노선의 위치 및 특성에 따라 등가중량의 편차가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

$$P_{ei} = \sqrt[3]{\frac{\sum (P_i^3 \times n_i)}{\sum n_i}} \quad (1)$$

여기서, P_i 및 n_i 는 각 차량의 중량과 빈도를 각각 의미한다.

차로당 시간교통량(본 논문에는 vehi./h로도 표기함)은 측정위치별로 차이가 있지만 130~720대로 조사되어, 교통량이 피로수명에 미치는 영향을 조사하기 위해 1차로당 시간교통량을 500~1,500vehi./h로 변화시키면서 검토하였다.

한편, 본 논문에서는 교통하중특성이 피로수명에 미치는 영향을 파악하고 피로수명을 적절히 평가할 수 있는 파라미터를 도출하기 위하여 대형차 혼입율, 대형차 구성비, 차량중량 및 시간교통량을 변화시키면서 표 5와 같이 총 267종류의 교통하중 모델을 작성하였다. 상세한 교통하중모델은 문헌(李熙賢, 2007)에 제시되어 있다.

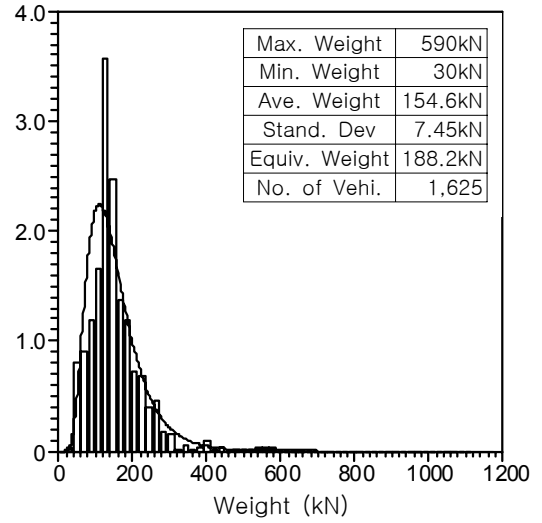
표 2. 차량 제원 및 중량분포

구분	차량종류	차량 제원 및 중량분포
소형차	승용차 (C)	 폭원(m) : 1.50 1축 : 50.2% 2축 : 49.8%
	소형트럭 (ST)	 폭원(m) : 1.40 1축 : 23.9% 2축 : 76.1%
대형차	중형트럭 (MT)	 폭원(m) : 1.50 1축 : 19.5% 2축 : 80.5%
	대형트럭 (LT)	 폭원(m) : 1.95 1축 : 14.1% 2축 : 54.8% 3축 : 31.1%
	덤프트럭 (LD)	 폭원(m) : 1.95 1축 : 11.7% 2축 : 44.3% 3축 : 44.0%
	탱크로리 (TR)	 폭원(m) : 1.95 1축 : 13.7% 2축 : 54.2% 3축 : 32.1%
	세미 트레일러 (TT)	 폭원(m) : 2.05 1축 : 6.4% 2축 : 18.5% 3축 : 18.3% 4축 : 29.4% 5축 : 27.4%
	버스 (BS)	 폭원(m) : 2.0 1축 : 37.1% 2축 : 62.9%

표 4. 차종구성비 (단위 : %)

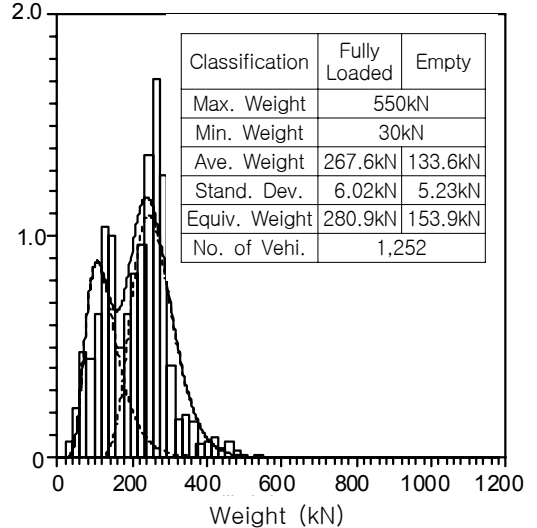
구분	소형차		대형차						중차량 (MT ~BS)
	C	ST	MT	LT	LD	TR	TT	BS	
No.1	39.10	11.90	21.10	11.00	8.50	1.50	5.30	1.60	49.0
No.2	57.51	10.21	14.13	10.84	1.74	2.41	2.80	0.37	32.3
No.3	63.04	5.64	8.80	13.42	3.15	3.18	2.21	0.56	31.3
No.4	83.70	3.30	5.10	2.60	1.80	1.50	1.70	0.30	13.0
No.5	74.30	7.04	8.75	3.66	3.55	0.78	1.23	0.68	18.7
No.6	81.00	9.60	4.90	1.90	1.30	0.60	0.10	0.60	9.4
No.7	55.10	12.40	13.10	10.30	3.00	1.70	3.40	1.00	32.5

No. of Vehicles ($\times 10^2$)



(a) 대형트럭

No. of Vehicles ($\times 10^2$)



(b) 덤프트럭

그림 3. 차량중량 히스토그램의 예

표 5. 교통하중모델의 예

교통하중 모델	구성비	차량 중량	교통량 (veh./lane/hr)	비고
1	표 4의 No.1	표 3의 No.1	616	실측치
2	표 4의 No.2	표 3의 No.2	535	실측치
⋮				
266	표 4의 No.7	표 3의 No.7	1,500	교통량의 영향 고려
267	표 4의 No.7	표 3의 No.7	1,000	참고문헌(日本道路協會, 2002b) 자료 인용

표 3. 차량 중량의 실측결과 (단위 : kN)

구 분	C	ST	MT	LT	LD		TR		TT	BS	
					적재시	공차시	적재시	공차시			
No.1 (1992 ^{1*} , Ariake ^{2*})	최대중량	110	130	390	590	550		310		910	210
	최소중량	10	10	30	30	30		30		50	30
	평균중량	30.1	42.7	62.4	154.6	267.6	13.36	242.6	100.2	269.3	84.2
	표준편차	5.9	14.0	25.8	74.5	60.2	5.23	35.8	29.1	143.8	46.8
	등가중량	31.3	47.2	74.3	188.2	280.9	15.39	243.0	108.6	332.2	99.0
No.2 (1984 ^{1*} , Kumagaya ^{2*})	최대중량	50	130	190	490	470		370		730	190
	최소중량	10	10	10	30	50		30		70	30
	평균중량	10.8	30.9	72.5	166.0	330.3	143.9	267.9	159.7	249.9	103.2
	표준편차	4.3	17.4	29.2	61.7	68.3	47.8	40.2	55.4	103.5	42.2
	등가중량	15.0	40.1	82.5	187.9	334.8	159.7	271.7	176.2	288.7	109.3
No.3 (1992 ^{1*} , Iwaki ^{2*})	최대중량	50	110	310	590	530		410		730	170
	최소중량	10	10	10	10	30		10		90	30
	평균중량	26.1	32.4	70.9	204.4	297.9	132.2	229.0	128.2	284.4	63.5
	표준편차	8.2	12.4	35.6	78.5	75.3	54.8	52.5	41.8	131.9	53.6
	등가중량	28.0	37.1	88.0	232.6	312.9	154.7	239.6	141.8	329.2	82.8
No.4 (1992 ^{1*} , Chiba ^{2*})	최대중량	90	130	210	930	770		310		1,130	170
	최소중량	10	10	10	10	50		30		70	30
	평균중량	19.8	33.4	62.2	168.7	409.0	125.6	224.2	111.6	354.9	98.8
	표준편차	10.3	14.8	26.3	89.0	107.9	35.9	35.2	22.2	215.3	34.0
	등가중량	25.9	39.8	72.8	214.6	432.8	135.9	227.3	116.0	442.9	103.2
No.5 (1992 ^{1*} , Souka ^{2*})	최대중량	110	130	270	670	750		410		830	150
	최소중량	10	10	10	30	50		30		70	30
	평균중량	19.5	32.6	59.4	194.0	469.6	138.2	229.4	105.7	297.3	82.1
	표준편차	10.5	13.1	25.2	109.9	93.1	50.4	54.1	31.6	169.6	37.8
	등가중량	26.3	37.9	70.1	243.0	484.4	156.8	240.3	115.2	357.0	86.6
No.6 (1987 ^{1*} , Yahato ^{2*})	최대중량	50	130	170	430	370		330		610	190
	최소중량	30	30	30	30	50		50		70	30
	평균중량	31.2	45.0	65.3	152.5	328.7	148.2	175.0	84.0	181.4	95.2
	표준편차	5.0	14.8	25.7	72.9	26.6	59.1	70.7	32.2	106.0	37.4
	등가중량	34.9	51.9	74.8	179.6	326.4	167.7	186.7	99.7	232.8	103.3
No.7	최대중량	31	126	183	452	619		337		865	187
	최소중량	2.0	10	16	38	54		39		51	68
	평균중량	13.0	36.2	61.9	167.5	196.2		138.2		247.8	138.4
	표준편차	3.6	103.1	25.0	62.9	95.4		63.1		129.2	24.1

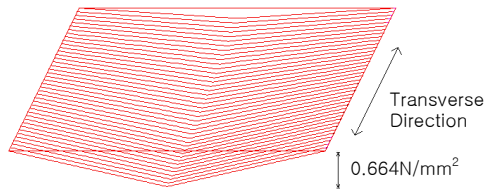
1* : 실측년도, 2* : 실측 도로명

2.3 피로수명 해석방법

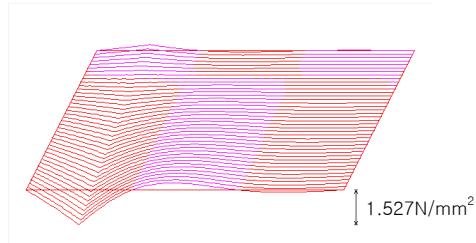
피로하중은 앞절에서 언급한 차량 형식, 중량, 구성비 및 시간당 교통량의 불규칙변수(random variables)에 대해 총 267종류의 교통하중모델을 이용하여 Monte Carlo법에 따라 시뮬레이션하였다(한국강구조학회, 1998; Miki 등, 1985; 森猛 등, 1995). 이때 변동응력은 응력에 대한 영향면을 이용하여 계산하였으며, 차량은 왕복 2차로 교량 위를 50km/h의 일정한 속도로 서로 마주보는 방향으로 진행하도록 하였다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 표 1의 단순교 외측 거더 중앙점과 3경간 연속교의 측경간 외측 거더 중앙점의 응력 영향면을 나타낸 것이다. 응력 영향면이란 영향선의 집합체로서 영향면의 중거

는 9.81kN(1tonf)의 집중하중이 교량의 종·횡방향으로 주행할 때 계산된 응력값이다.

교량부재에 발생하는 실제 응력은 여러 요인에 의해 해석치보다 작은 것이 일반적이므로 본 논문에서는 이것을 구조해석계수(structural analysis factor)라 정의하고 모든 교량에 대해 0.8을 적용하였다(日本鋼構造協會, 1993). 그리고 피로수명 계산시에는 차량이 주행할 때 발생하는 진동의 영향도 고려하여야 하므로 본 논문에서는 일반 구조해석시 사용하는 충격계수의 1/2를 적용하여 진동의 영향도 포함되도록 하였다(日本道路協會, 2002b). 그림 5는 시뮬레이션된 교통흐름과 이를 이용하여 계산된 응력이력의 일례를 보여준다.



(a) 단순교 외측 거더의 중앙점



(b) 3경간 연속교의 측경간 외측 거더의 중앙점

그림 4. 외측 거더 인장플랜지의 영향면 예

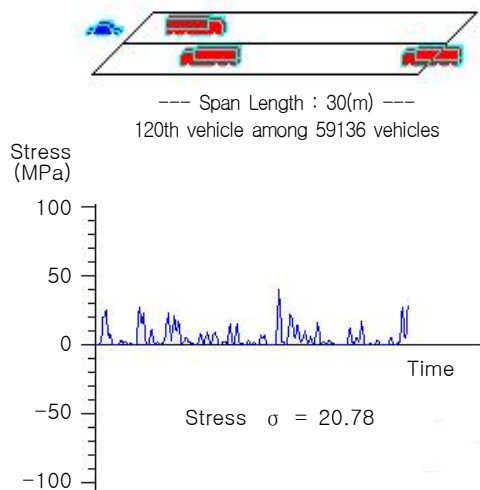


그림 5. 시뮬레이션된 교통흐름과 이에 의한 응력이력의 예

본 논문에서는 안전측 평가를 위해 하한치(threshold level) 이하의 응력도 피로균열을 성장시키는데 기여할 수 있다고 가정하여 수정 Miner 법칙을 사용하여 일본의 JSSC 지침(日本鋼構造協會, 1993)에 따라 피로수명을 계산하였다. 피로수명을 계산하기 위해 먼저 4일 동안의 응력이력을 시뮬레이션하고 이를 Rain Flow Counting Method에 따라 통계정리한 응력빈도히스토그램을 작성한 후 식(2)를 적용하였다. 森猛 등(1995)의 연구에 의하면 4일 미만 동안 시뮬레이션된 응력이력을 사용하는 경우 계산된 수명에 다소의 오차가 포함될 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$N(\text{year}) = \frac{(4/365) \cdot 2.0 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_f^3}{\sum \Delta \sigma_i^3 n_i} \quad (2)$$

여기서, $\Delta \sigma_f$: 2×10^6 회에 대한 기본허용피로응력범위

$\Delta \sigma_i$: 4일간의 응력범위빈도분포도를 구성하는 각 응력범위

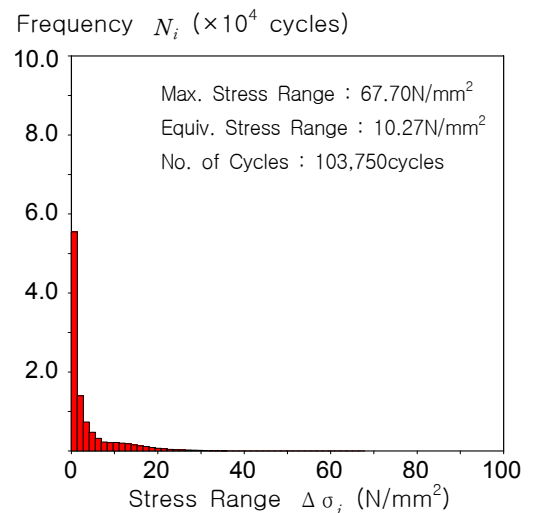
n_i : $\Delta \sigma_i$ 의 빈도

3. 피로수명 해석결과

3.1 응력범위빈도분포

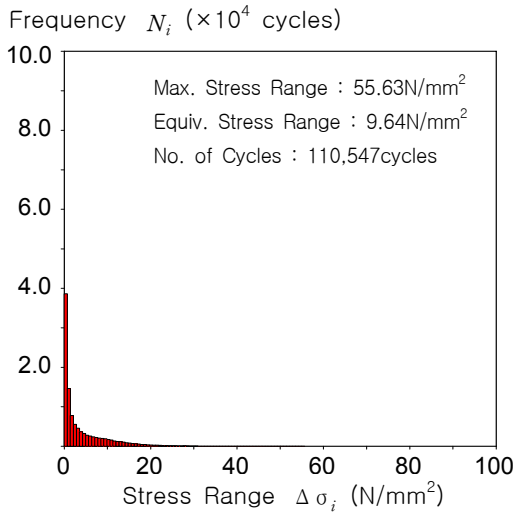
그림 6은 표 3과 표 4에 나타난 No.7의 교통하중특성과 시간당 교통량 1,000대인 경우의 교통하중조건하에서 작성된 단순 플레이트 거더교의 응력빈도분포도의 일례를 보여 준다. 그림의 (a)는 외측 거더, (b)는 내측 거더에 대한 것이며, 그림에는 4일간의 변동응력해석으로부터 구한 최대응력범위, 등가응력범위 및 반복횟수도 나타내었다. 그리고 반복횟수가 작고 응력범위는 높은 구간의 빈도분포를 알기 쉽게 나타내기 위해 종축의 응력반복횟수를 대수로 나타낸 것이 그림 6의 (c)와 (d)이다.

이 그림들로부터 응력범위빈도분포는 지수분포의 형상을 나타내고, 낮은 응력범위의 빈도는 매우 높고, 높은 응력범위의 빈도는 매우 낮다는 것을 알 수 있다. 그리고 외측 거더의 응력범위와 빈도가 내측 거더에 비해 높아서 외측 거더의 피로수명은 내측 거더보다 짧을 것이라는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 외측 거더의 피로수명에 대해서만 고찰한다. 이와 같은 경향은 다른 교통하중조건 및 연속교에서도 동일하게 나타났다(李熙賢, 2007).

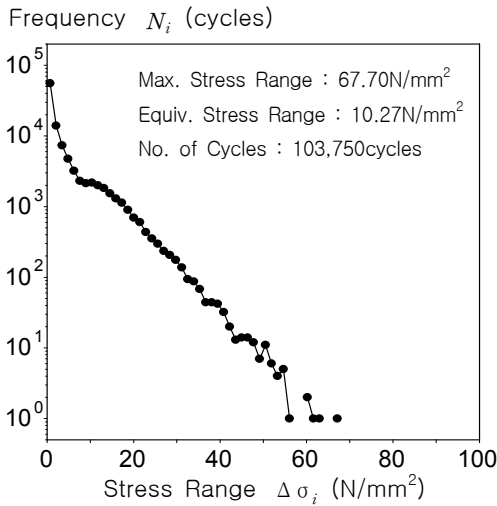


(a) 외측 거더

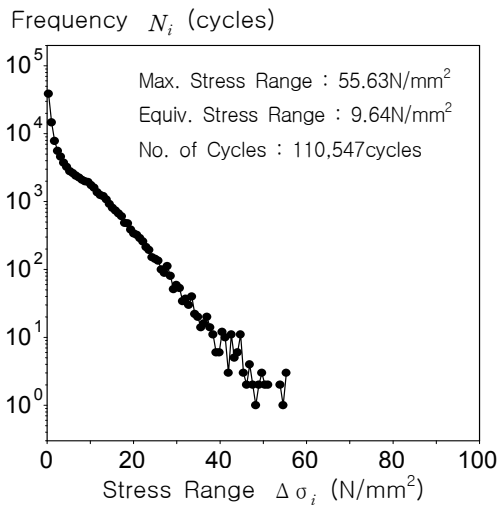
그림 6. 단순교의 응력범위빈도분포의 예(계속)



(b) 내측 거더



(c) 외측 거더 - 로그 스케일



(d) 외측 거더 - 로그 스케일

그림 6. 단순교의 응력범위빈도분포의 예

3.2 시간교통량의 영향

그림 7은 표 3과 표 4에 나타난 No.7의 교통하중특성에 대해 대형차 혼입율을 10%, 20%, 27%, 30%, 40%, 50%로 변화시켜 가며 계산한 단순 플레이트 거더교(지간길이 30m)의 피로수명과 시간교통량의 관계이다. 여기서, 혼입율 27%는 실측치의 평균값이다. 시간교통량이 증가함에 따라 피로수명은 짧아지며, 시간교통량이 1,000veh./h 및 1,500veh./h일 때의 피로수명은 500veh./h인 경우에 대해 각각 0.46~0.5배, 0.30~0.32배 정도이다.

3.3 대형차 혼입율의 영향

그림 8은 표 3과 표 4에 나타난 No.7의 교통하중특성에 대해 시간교통량이 500~1,500veh./h로 변화할 때 단순 플레이트 거더교(지간길이 30m)의 피로수명과 대형차 혼입율의 관계를 보여 준다. 피로수명은 시간교통량에 관계없이 대형차 혼입율이 증가할수록 짧아짐을 알 수 있다.

3.4 차량하중의 영향

그림 9는 단순 플레이트 거더교(지간길이 30m)에서 시간교통량을 달리할 때 피로수명과 교통하중특성의 관계를 보여 준다. 그림의 교통하중특성번호는 표 3의 실측 교통하중특성에 해당하는 번호이다. 그리고 그림 9의 (a)와 (b)는 각각 대형차 혼입율이 27%와 50%일 때의 관계이다. 이 그림으로부터 피로수명은 교통하중특성의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

Fatigue Life (year)

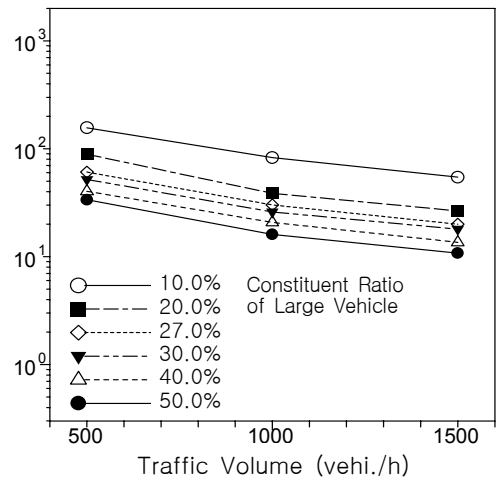


그림 7. 피로수명과 시간교통량의 관계

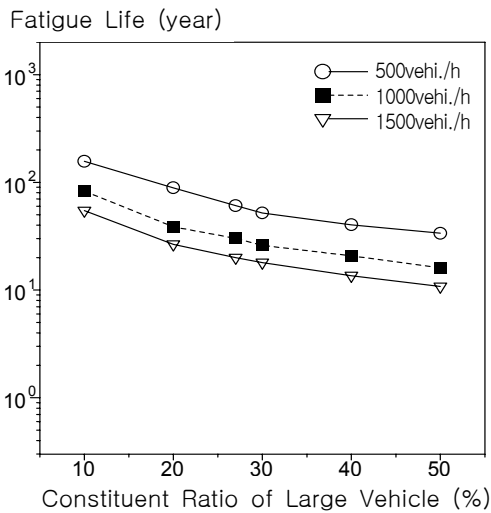
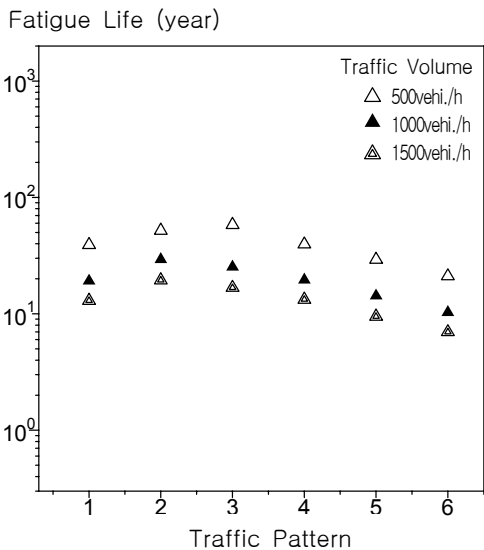
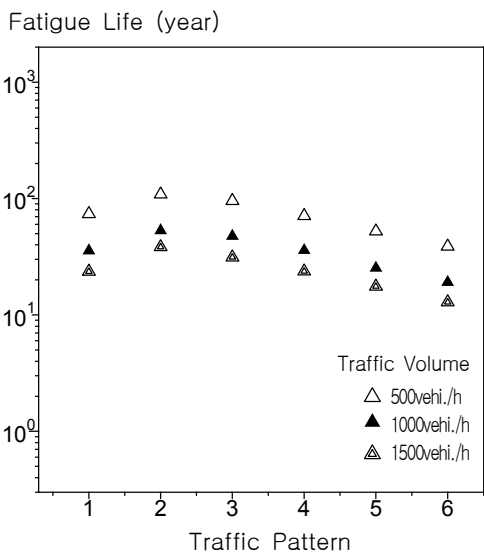


그림 8. 피로수명과 대형차 혼입율의 관계



(a) 대형차 혼입율 27.0%



(a) 대형차 혼입율 50.0%

그림 9. 피로수명과 교통하중특성의 관계

4. 피로수명 평가를 위한 파라미터 제시

앞 절에서는 차량의 중량과 구성비 및 시간교통량을 교통하중특성으로 하여 그들이 피로수명에 미치는 영향을 검토하였다. 그러나 교통하중특성과 피로수명의 관계가 명확하게 주어지지 않아 피로수명을 추정하는데 다소 어려움이 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 먼저 단순 플레이트 거더교(지간길이 50m)를 대상으로 교통하중특성의 대표치를 도출하여 피로수명을 용이하게 추정하는 방법에 대해 검토하였다. 또한, 도출된 대표치가 다른 구조형식 및 재원을 갖는 교량의 피로수명 산출에도 적용될 수 있는지에 대해 검토하였다.

4.1 대형차 통과횟수

대형차 통과횟수(total no. of large vehicles)란 교량의 피로수명에 도달할 때까지 교량을 통과하는 대형차의 총 댓수로서 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{Total No. of Large Vehicles} &= \text{Fatigue Life } N \times \text{ADTT} \times 365 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ADTT는 일 평균 대형차 교통량(average daily truck traffic)이다. 이 식에 본 연구에서 산출한 피로수명을 대입하여 대형차 통과횟수를 계산하고 교통량에 따른 대형차 통과횟수와 대형차 혼입율의 관계를 구하면 그림 10과 같다. 이 그림으로부터 대형차 통과횟수는 거의 일정하므로, 대형차 통과횟수에 의해 대형차 혼입율과 시간교통량이 피로수명에 미치는 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

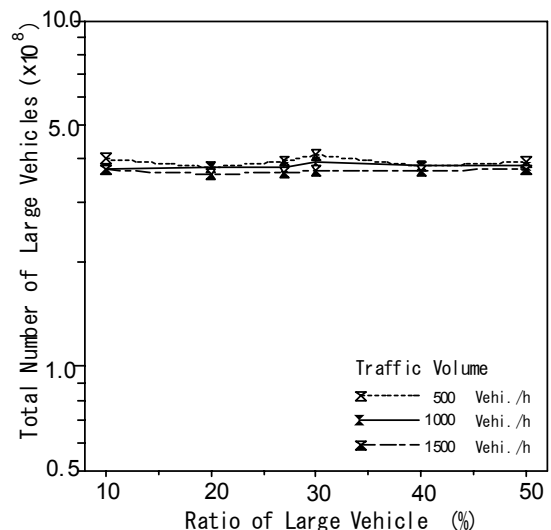


그림 10. 대형차 통과횟수와 대형차 혼입율의 관계

4.2 대형차 증가하중

4.1절에서 시간교통량과 대형차 혼입율의 영향은 대형차 통과횟수로 나타낼 수 있음을 보았다. 그러나 시간교통량과 대형차 혼입율이 동일한 경우에도 대형차 구성비 및 차량하중이 상이하면 피로수명이 크게 달라지므로 이들 두 가지 교통하중특성을 다음과 같이 대형차 증가하중(equivalent load of large vehicles)으로 표시해 보았다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Equivalent Load of Large Vehicle } P_e \\
 & = \sqrt[3]{\Sigma(P_{ei}^3 \times \text{Constituent Ratio of Each Large Vehicle})}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서, P_{ei} 는 소형차 및 대형차를 포함한 전체형식 차량에 대한 증가하중으로서 식(1)과 같이 정의된다. 그림 11은 대형차 혼입율이 27%일 경우의 피로수명과 대형차 증가하중의 관계를 보여 준다. 피로수명은 교통량에 따라 크게 다르고, 대형차의 증가하중이 커질수록 짧아진다. 따라서 교통량 차이에 의한 피로수명의 차이를 줄이기 위하여 대형차 통과횟수와 증가하중의 관계를 그림 12에 나타내었다. 이 그림으로부터 대형차 증가하중과 대형차 통과횟수의 관계는 근사적으로 하나의 직선으로 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

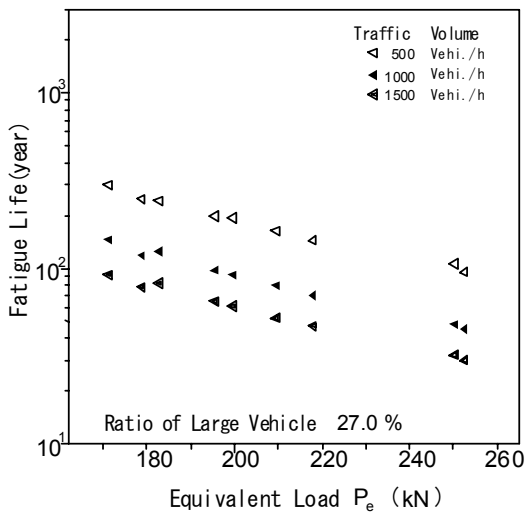


그림 11. 피로수명과 대형차 증가하중의 관계

그림 13은 표 5에 나타난 총 267개 교통하중특성에 대하여 대형차 통과횟수와 대형차 증가하중의 관계를 나타낸 것으로서 교통하중특성에 관계없이 두 인자의 관계는 근사적으로 하나의 직선으로 표기될 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 대형차 증가하중은 피로수명을 추정하는데 용이하게 이용될 수 있을 것

으로 판단된다. 그림의 실선은 증가하중을 독립변수로 하여 최소자승법에 의해 유도한 증가하중과 대형차 통과횟수의 관계이며, 그 기울기는 약 -3이다. 한편, 피로수명은 응력의 3승에 반비례하고, 대형차 통과횟수는 피로수명에 비례하기 때문에 대형차 통과횟수는 증가하중의 3승에 반비례하게 된다.

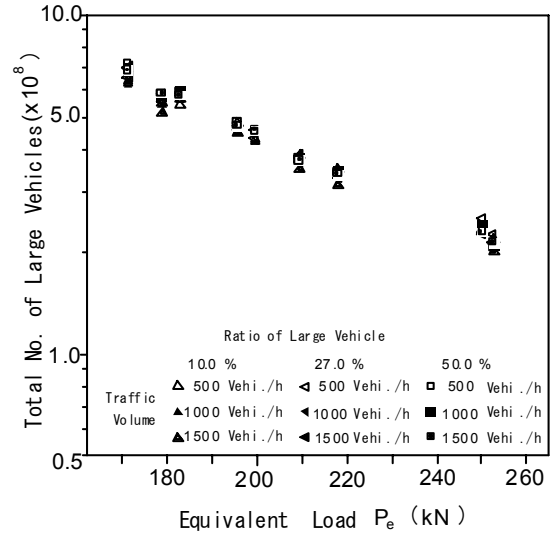


그림 12. 대형차 통과횟수와 대형차 증가하중의 관계

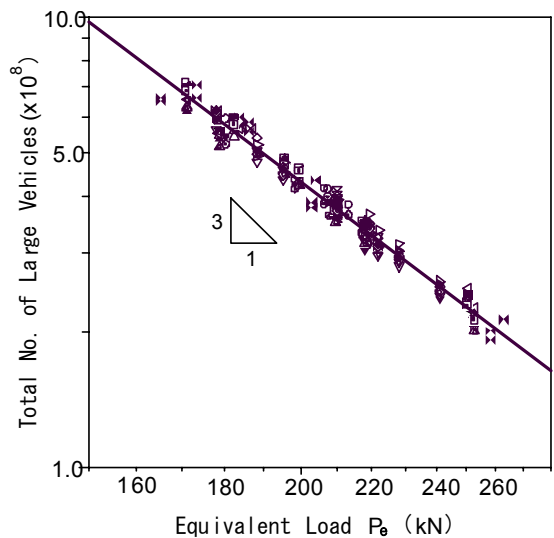


그림 13. 본 연구의 모든 교통량 자료를 이용하여 분석한 대형차 통과횟수와 대형차 증가하중의 관계

4.3 수정증가하중

4.2절에서는 차량하중을 대표하는 파라미터로서 대형차 증가하중을 제안하였다. 그러나 대형차 증가하중은 교량 위를 여러 대의 차량이 동시에 재하되는 것을 고려할 수 없는 문제가 있다. 일반적으로 여러 대의 차량이 동시에 재하되는 경우에

발생하는 응력은 단일 차량이 통과할 때 발생하는 응력에 비해 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 식(5)와 같이 동시재하의 영향을 고려하기 위하여 등가하중에 활중계수(동시재하계수)와 차량의 진동에 의한 영향을 고려하기 위한 충격계수를 곱하여 이것을 수정등가하중(modified equivalent load)이라 정의하고 피로수명과의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Modified Equivalent Load } P_{ec} \\ = P_e \times \text{Simultaneous Loading Factor} \\ \times \text{Impact Factor} \end{aligned} \quad (5)$$

본 논문에서 동시재하계수는 식(6)에 나타난 井上史崇(2000)이 제시한 2차로에 대한 동시재하계수 산정식을 사용하여 산출하였다. 한편, 충격계수는 일본의 강도교 피로설계 지침(日本道路協會, 2002b)의 규정에 따라 도로교에 대한 충격계수의 50%를 적용하였다.

$$\gamma_2 = a \cdot b \cdot \{ \text{Log}(NS_2/0.1) \} + 1.0 \quad (6)$$

여기서, $a = 0.0780 \beta^{0.2914}$

b : 차로응력비

NS_2 : 2차로 평균 동시재하대수

β : 대형차 혼입률

그림 14는 총 267개 교통하중특성에 대한 대형차 통과횟수와 수정등가하중의 관계를 나타내었다. 그림의 실선은 수정등가하중을 독립변수로 하여 최소자승법에 의해 유도한 수정등가하중과 대형차 통과횟수의 관계를 나타내는 것으로서 기울기는 -3이다.

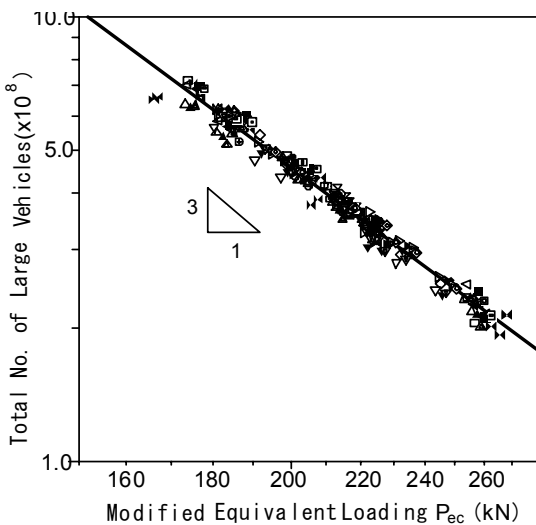
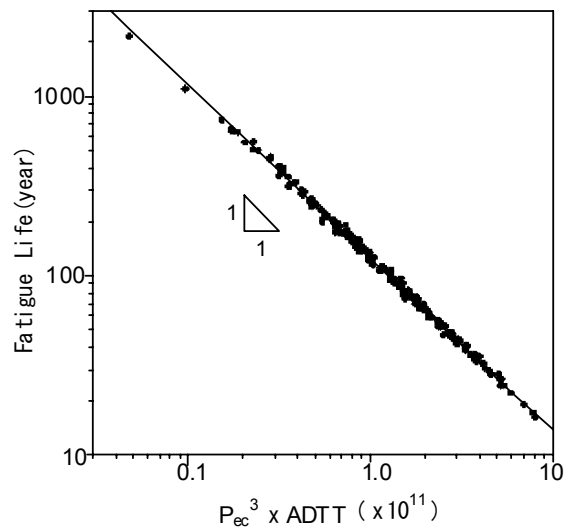


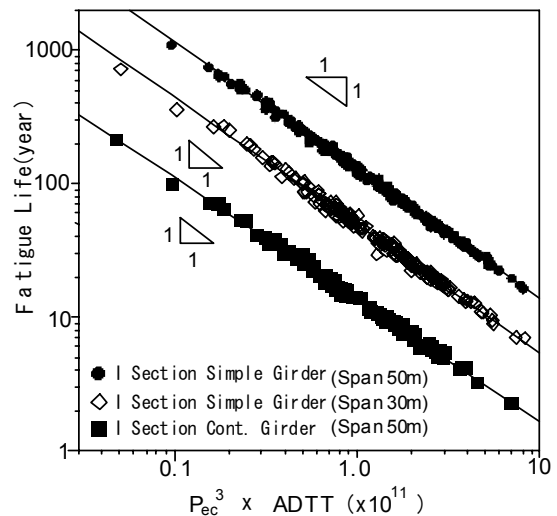
그림 14. 동시재하계수 및 충격계수를 고려한 대형차 통과횟수와 수정등가하중의 관계

4.4 교통하중의 특성을 고려한 피로수명 추정법

앞에서 대형차 통과횟수와 수정등가하중의 관계는 기울기 -3의 직선으로 표현됨을 알았다. 또한, 대형차 통과횟수는 일 평균 대형차 교통량(ADTT)의 함수로 나타낼 수 있으므로 본 논문에서는 교통하중의 특성을 고려하여 피로수명을 정리할 수 있는 파라미터로서 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 를 제안한다. 그림 15(a)는 피로수명과 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 의 관계를 나타낸 것으로서 피로수명은 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 와 거의 직선관계를 갖는다는 것을 알 수 있다. 그림의 실선은 양 대수지 상에서 최소자승법으로 구한 기울기 -1의 직선이다.



(a) 지간길이 50m의 단순 플레이트 거더교



(b) 모든 해석대상 교량

그림 15. 피로수명과 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 의 관계

한편, 그림 15(a)는 시간길이가 50m의 단순 플레이트 거더교에 대한 해석결과이므로, 이러한 관계가 시간길이가 다른 단순교와 연속교에도 적용가능한지에 대해 검토하였다. 그림 15(b)에 본 연구에서 고려한 모든 해석대상 교량의 피로수명과 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 의 관계를 나타내었다. 이 그림으로부터 3개의 직선은 양 대수지 상에서 모두 기울기가 -1이고 평행하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 중소규모의 단순 및 연속 플레이트 거더교를 대상으로 교통하중특성을 고려한 피로수명 평가방법에 대해 검토하고, 교통하중특성을 고려하여 피로수명을 용이하게 추정할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 논문으로부터 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 교통하중의 특성을 대표할 수 있는 파라미터는 $P_{ec}^3 \times ADTT$ 이고, 강교량의 피로수명은 양 대수지 상에서 이 파라미터와 비례관계에 있다.
- (2) 강교량의 피로수명은 시간교통량과 대형차 혼입율 등 교통하중특성의 영향을 크게 받으므로 합리적인 피로수명 추정을 위해서는 세밀한 교통하중 실태조사가 선행되어야 한다.
- (3) 거더형식 교량의 경우, 외측 거더의 응력범위와 빈도가 내측 거더에 비해 높아서 외측 거더의 피로수명은 내측 거더보다 짧다.
- (4) 피로수명은 발생응력의 3승에 반비례하고, 대형차 통과횟수는 피로수명에 비례하므로 대형차 통과횟수는 등가하중의 3승에 반비례한다.

본 논문에서 피로수명은 일본의 피로설계지침에 명시된 피로등급 G를 대상으로 수정 Miner 법칙을 사용하여 평가하였다. 등급이 다른 구조상세의 피로수명은 G등급의 피로수명과 (G등급의 기본허용피로응력범위/각 피로등급의 기본허용피로응력범위)³의 곱으로 구할 수 있을 것이다.

본 논문에서 제시된 교통하중의 특성을 대표하는 파라미터는 향후 강교량의 피로수명을 추정하고 유지관리정책을 수립하는

데 널리 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

권순철, 경갑수, 김대용, 이해성(2008) 실동이력에 기초한 곡선 거더교의 피로균열 특성 및 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제1A호, pp.1-13.

한국강구조학회(1998) 광안대로(현수교) 설계도 검토, 응력해석 및 시방·검사지침에 관한 연구.

한국시설안전공단(2001) N대교 정밀안전진단보고서.

한국시설안전공단(2006) N대교 정밀안전진단보고서.

日本鋼構造協會(1993) 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説, 技芸堂出版.

日本建設省土木研究所(1988) 既設橋梁の耐久性評價・向上技術に關する調査研究, 土木研究所資料, 第2682號

日本道路協會(2002a) 道路橋示方書・同解説(共通編・鋼橋編), 丸善

日本道路協會(2002b) 鋼道路橋の疲勞設計指針, 丸善.

井上史崇(2000) 車線應力比を考慮した複數車線道路橋の疲勞荷重・同時載荷係數の檢討, 法政大學大學院, 建設工學專攻, 修士論文.

森猛, 梶原仁, 長谷川洋介(1995) JSSC指針に基づく鋼構造物の疲勞安全性照査プログラムの開發とその應用, 日本鋼構造論文集, 第2巻, 第8號, pp.37-45.

森猛, 李熙賢, 慶甲秀(2004) 中小2車線鋼道路橋の構造特性を考慮した疲勞壽命評價パラメータの檢討, 日本土木學會構造工學論文集, 第50A巻, pp.825-834.

李熙賢(2007) 桁形式鋼道路橋の疲勞壽命評價法と疲勞設計用衝擊係數の檢討, 法政大學審査博士學位論文.

Kyung, K.S., Lee, H.H., Jeon, J.C., and Kwon, S.C. (2007) Cause and Characteristics of Fatigue Crack at Welded Joint of Curved Girder Bridge, *Proc. Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridge*, Japan, pp.281-295.

Miki, C., Goto, Y., Mori, T., and Yoshida, H. (1985) Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, *Journal of Structural Engineering*, No.356, pp.37-46.

(접수일자 : 2009. 12. 7 / 심사일 2009. 12. 21 / 게재확정일 2010. 5. 25)