

재하시험 수행에 관한 적정성 연구 : 콘크리트 교량

A Feasibility Study of Loading Test for Safety Assessment : Concrete Bridges

황진하¹⁾ 안승수^{2)*} 김주한³⁾
Hwang, Jin Ha An, Seoung Su Kim, Ju Han

Abstract

The bridges where serious damages, defects, material degradations, etc. are not found can be presumed to have enough safety for the specified design loads, nevertheless, in many cases the loading carrying capacity is rated through loading tests. The safety specifications and manuals get no further than qualitative instructions for performing loading test or not. Some studies presented the improved appraisal methods for determining the load carrying capacity; however, the feasibility studies for loading test are scarcely carried out. This study examines an existing question, whether the loading tests are necessarily required in the safety assessment or not, and suggests an alternative for that via a statistical analysis for dozens of condition evaluation reports for concrete bridges.

Keywords : Loading tests, Statistical analysis, Load carrying capacity, Safety assessment

1. 서론

공용 교량은 주변환경의 영향, 통행차량의 대형화 및 중량화, 통행량 증가 등으로 인하여 손상 및 열화가 발생하므로 통과하중에 대한 안전성을 평가하기 위하여 내하력평가를 수행한다.

교량의 안전 및 유지관리에 있어서 내하력 평가는 매우 중요한 요소이며 외관조사, 각종 시험 및 구조해석 등을 포함하는 복합적 의사결정문제이다. 내하력을 산정하는 방법은 설계활하중에 내하율을 고려하는 방법과 구조물의 손상, 결함, 재료적인 열화현상 등에 대한 실측자료를 반영하여 내하율을 보정하는 방법이 있다. 전자의 방법은 미국(AASHTO, 1994)과 유럽(CEB, 1998) 등에서 채택하고 있으며, 후자의 방법은 한국(국토해양부, 2010)과 일본 등에서 취하고 있다.

기 수행된 정밀안전진단 결과(한국시설안전공단 FMS, 2010), 심각한 손상, 결함, 열화현상이 없는 교량들은 대부분 설계하중에 대한 안전성을 확보하고 있다. 또한, 1종 시설물의 상태가 보통(C급)이하인 교량은 전체 교량의 3% 미만으로 유지관리 상태가 양호하므로 시설물의

관리자 및 점검자들은 내하력을 평가하는데 있어 재하시험 수행여부를 면밀히 검토해야 한다.

안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량편)(이하 세부지침)(국토해양부, 2010)은 재하시험 수행여부에 대한 안내를 제시하고 있으나, 정성적인 부분이 많아 정밀안전진단시 대부분 재하시험을 수행하고 있다. 예를 들면, “재하시험이 적합하지 않는 경우”는 “상태평가 결과가 양호하고 이론적인 방법으로 평가한 내하력이 관리수준 목표를 상당히 초과하는 경우”, “교량의 심각한 노후화 또는 손상이 진행되어 긴급한 보강이 필요한 경우” 등으로 이것은 재하시험 수행여부에 대한 의사결정에 객관적 기준을 제공하지 못하여 이에 대한 정량적인 기준정립이 필요하다.

불필요한 재하시험은 통과하중에 대한 통행제한으로 인하여 차량정체뿐만 아니라 이용객의 불편 및 편익비용의 손실을 초래한다.

근래 일본 중부지방 건설국에서는 재하시험에 드는 막대한 시간과 비용을 줄이기 위한 새로운 평가방법을 제시하였다. 이 연구에서는 기존에 수행되었던 방법과 달리 재하시험이 수행된 기존 자료를 이용하여 상부구조 형식

1) 정회원, 충북대학교 토목공학부 교수

2) 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 박사수료, 한국시설안전공단

3) 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 박사수료

* Corresponding author : ssan@kistec.or.kr 031-910-4072

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

별로 응답비와 내하율 관계에 기초한 방법을 대상교량에 적용한 결과, 재하시험을 수행하는 교량의 수는 약 70% 감소되었다(渥美滿康 등, 1999).

국내에서도 공용 교량의 재하시험 및 계측을 통한 내하력평가 방법의 개선 방안들에 대한 연구들이 있었으나, 내하력평가를 위한 재하시험 수행에 대한 적합성 연구는 미미한 상태이다(김동용 등, 1999 ; 신재인 등, 2007 ; 이종호 등, 2009 ; 조수진 등, 2007).

본 연구는 1종 시설물 중 콘크리트 교량의 상태평가 등급, 안전율, 내하율 등을 상부구조 형식별로 자료화하고 이에 대한 통계적 분석에 기초한 재하시험 수행의 적정성을 결정하기 위한 새로운 방법을 제시한다.

2. 안전성 평가

2.1 기본 사항

교량의 역학적 거동을 규명하는 방법은 이론적인 방법과 실험적인 방법으로 구분할 수 있다. 이론적인 방법인 구조해석은 교량의 실제 거동을 정확하게 모사할 수 있도록 이상화하고 설계하중을 적용하여 안전율과 내하율을 산정한다. 정밀안전진단 단계에서의 구조해석은 현장 외관조사와 비파괴시험 결과 등을 고려하고 현장여건을 적절하게 반영하여 실시한다. 구조해석 모델링 시 설정한 가정이 성립하지 않으면 교량의 실제 거동은 역학적 거동과 상이할 수 있다. 또한, 재료의 특성 및 부재들의 역학적 특성은 시간이 경과함에 따라 변할 수 있으며, 교량의 시공품질 등에 의한 현재 상태를 구조해석에 정확하게 반영하는 데에는 어려움이 많다(국토해양부, 2010 ; 渥美滿康 등, 1999).

실험적인 방법은 교량에 하중을 작용시키고 작용하중에 의한 교량의 응답을 계측하고 거동을 해석하는 직접적인 방법이다. 이것은 이론적인 방법에 비하여 적용에 시간적으로 큰 제약이 따르게 되며 일반화시킬 수 없기 때문에 비경제적이다.

재하시험은 정해진 규정에 따라 교량의 탄성거동에 영향을 주지 않는 크기로 결정된 하중을 교량의 특정부위에 직접 재하하여 교량을 구성하는 주요 부재들의 실제거동을 관찰 및 계측하는 시험이다(국토해양부, 2010).

재하시험의 결과는 이론적인 방법으로 평가된 교량의 내하력을 보완하는데 적용되며, 대상교량은 내하력평가

목적, 상태평가 및 선행 구조해석 결과를 고려하여 필요 여부를 결정한다(국토해양부, 2010).

2.2 내하력 평가

2.2.1 내하율

내하율은 외관조사와 내구성평가 결과를 반영한 구조해석을 통해 산정한다. 설계단계와 정밀안전진단 시에 실시하는 내하력평가는 기본적으로 도로교 설계기준 및 콘크리트 설계기준에 기초하여 동일한 설계개념(허용응력법, 강도설계법)으로 실시하고 있다(국토해양부, 2010 ; 한국시설안전공단, 2006).

허용응력법

$$\text{내하율}(RF) = \frac{f_a - f_d}{f_l(1+i)} \quad (1)$$

여기서, f_a = 허용응력

f_d = 고정하중에 의한 응력

f_l = 설계 활하중에 의한 응력

i = 도로교 표준시방서에서 제시한 설계 충격계수

강도설계법

$$\text{내하율}(RF) = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l(1+i)} \quad (2)$$

여기서, ϕM_n = 극한 저항모멘트

(강구조물 $\phi = 1.0$, RC·PC구조물의 휨부재 $\phi = 0.85$)

M_d = 고정하중모멘트

M_l = 설계 활하중에 의한 모멘트

γ_l = 활하중 계수 = 2.15

γ_d = 고정하중 계수 = 1.30

i = 도로교 표준시방서에서 제시한 설계 충격계수

2.2.2 공용내하력

내하력 평가는 교량 평가과정의 일부로서 해당 차량을

안전하게 지지할 수 있는 활하중 저항능력을 정량적으로 평가한다. 또한 평가 결과를 교량의 정밀안전진단에 반영하여 통행하중을 설정하고 보수 및 보강공사의 설계 등 교량의 정밀안전진단 및 유지관리업무의 기초자료로 활용한다.

교량의 제원, 재료의 성질, 보수·보강된 상태, 단면결손 등 교량 전체 또는 개별 부재의 현재 상태 등이 공용내하력 평가과정에 반영된다(국토해양부, 2010 ; 한국시설안전공단, 2006).

현재 국내 교량의 공용내하력 P 는 세부지침에 따라 외관조사, 이력조사, 재하시험 등을 고려하여 평가한다. 특히, 대상 교량의 변형률, 처짐, 가속도 등을 측정하여 이론적인 구조해석에 의한 계산값과 비교하여 공용내하력 평가를 수행한다.

이 때, 응답보정계수 K_s 를 구하는 데 필요한 응답비는 여러 연구 결과를 통해 재하차량이 위치한 거더의 응답으로 산정하고 있다(한국시설안전공단, 2006).

$$\begin{aligned} \text{-- 공용내하력}(P) &= K_s \times RF \times P_r \\ &= RF' \times P_r \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } K_s = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$$

$$\text{or } \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$$

RF = 내하율

RF' = 공용내하율

P_r = 설계활하중

2.3 안전성 평가기준

교량의 안전성을 평가하는 데 있어 내하력은 활하중의 여유도로서 하중비에 따라 변동폭이 크게 변하므로 교량의 안전성을 일관되게 평가하는 기준으로 적절하지 못하나, 재하시험에 의한 공용내하력 평가를 실시한 경우에는 그것으로 안전성을 평가한다.

안전율은 허용응력설계법에서는

$$SF(\text{안전율}) = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_{d+l}} \quad (4)$$

Table 1 Grade according to safety factor

grade	criteria
A	SF > 1.0
B	0.9 ≤ SF < 1 (load carrying capacity > design load)
C	0.9 ≤ SF < 1
D	0.75 ≤ SF < 0.9
E	SF < 0.75

강도설계법에서는

$$SF(\text{안전율}) = \frac{\text{설계강도}}{\text{조요강도}} = \frac{\phi M_n}{M_u} \quad (5)$$

에 따라 산정한다(국토해양부, 2010).

3. 통계적 분석 및 평가

3.1 자료의 수집 및 평가

3.1.1 자료의 수집

본 연구에서는 세부지침이 개정된 2003년부터 2009년까지 한국시설안전공단에서 정밀안전진단을 수행한 콘크리트 교량을 대상으로 분석하였다. 그 중에서 공용내하력 평가가 수행되고 빈도수가 많은 PSC B(Prestress Concrete Box Girder)와 PSC I(Prestress Concrete I Girder) 형식의 44개 교량을 선정하였다. 대상 교량은 설계하중이 대부분 DB-24(DL-24)로 된 1등급 교량으로 PSC B 형식 36개, PSC I형식 8개교이다. 분석 대상 교량의 일부를 Table 2에 나타내었으며, 표에서 사용년수는 진단년도를 기준으로 산정하였다.

프리스트레스트 콘크리트 상부구조의 안전율과 내하율은 강도설계법과 허용응력법으로 평가된 결과값 중 작은 값을 적용하였다. 응답보정계수는 하중 재하 방법(load case)중에서 응답이 가장 큰 경우의 계산응답과 실측응답의 비 및 실측 충격계수를 반영하였다. 교량의 상태등급은 상태평가와 안전성평가 중 낮은 등급을 선정하며, 상태평가는 내하력에 미치는 영향이 큰 거더와 바닥판에 대해 정리하였다.

3.1.2 자료의 분석방법

수집된 자료는 통계분석 도구 SPSS를 사용하여 안전

Table 2 Factors and grades for bridges

No.	structural type	span length (m)	construction year	service period	design load	safety factor	rating factor	response adjustment factor	service rating factor	grade of state	
										deck	girder
1	PSC B	50	1993	10	DB-24	2.12	5.84	1.00	5.83	b	b
6	PSC B	50	1987	17	DB-24	1.69	2.68	1.11	2.97	b	b
11	PSC B	50	1989	16	DB-24	1.09	2.20	0.98	2.25	a	b
16	PSC B	40	2006	0	DB-24	1.36	2.17	1.17	2.53	a	a
21	PSC B	50	2006	0	DB-24	1.76	2.99	1.15	3.43	a	a
26	PSC B	95	1985	21	DB-24	0.98	1.02	1.47	1.50	b	b
31	PSC B	50	1993	15	DB-24	2.74	5.49	1.38	7.57	b	c
36	PSC B	50	1991	18	DB-24	1.76	3.37	0.95	3.19	c	c
41	PSC I	30	2005	0	DB-24	1.51	3.04	1.04	3.17	a	a
44	PSC I	30	1982	24	DB-24	1.29	1.72	1.25	2.14	d	b

을, 내하율, 공용내하율 등에 대하여 상부구조 형식별로 분포성향을 분석하였다.

통계분석에 있어, 다수 데이터들과 동떨어진 값들은 분석 결과의 신뢰성을 떨어뜨리게 된다. 따라서 본 연구에서는 수집된 데이터들에서 이러한 값을 식별하여 제외하고 상관분석 등을 수행하였다.

3.2 기존자료의 통계분석

3.2.1 이상치 식별

구조해석을 수행하는 기술자마다 대상구조물의 모델링, 경계조건 등이 다소 상이할 수 있고, 안전율과 내하율이 당초 설계시와 다를 수 있다. 또한 안전율과 내하율이 일정한 값을 가질 수 없으며, 어떤 경우의 데이터는 다른 교량의 데이터보다 상당히 크거나 작은 경우가 있다. 통계학에서 이상치로 기술하는 이러한 값들을 식별하기 위해 상자-수염(box-whisker) 도표를 이용하였다. Tukey (1977)는 데이터에서 사분범위를 이용하여 이상치를 식별하는 방법을 다음과 같이 제시하였다(최규정 등, 2007).

- ① 안쪽 울타리(inner fences) : 각 사분위수에서 사분범위의 1.5배 이내의 거리
 - 아래 안쪽 울타리(lower inner fences)

$$f_L = Q_1 - (\text{사분위범위} \times 1.5)$$
 - 위 안쪽 울타리(upper inner fences)

$$f_U = Q_3 + (\text{사분위범위} \times 1.5)$$
- ② 바깥쪽 울타리(outer fences) : 각 사분위수에서 사분위 범위의 3배 이내의 거리
 - 아래 바깥쪽 울타리(lower outer fences)

$$F_L = Q_1 - (\text{사분위범위} \times 3)$$

- 위 바깥쪽 울타리(upper outer fences)

$$F_U = Q_3 + (\text{사분위범위} \times 3)$$

중간 이상치(mid outlier)는 안쪽 울타리와 바깥쪽 울타리 사이에 있는 측정값을 칭하며, 극단 이상치(extreme outlier)는 바깥쪽 울타리 밖에 있는 측정값을 말한다. 본 연구에서는 다음과 같이 2가지 경우에 대하여 분석을 수행하였다.

- case 1 : 이상치를 포함한 데이터
- case 2 : 이상치를 제외한 데이터

Fig. 1과 Fig. 2는 case 1의 안전율과 내하율에 대한 상자-수염도표를 나타낸 것으로 이상치는 도표의 상단에 * (극단 이상치)와 o (보통 이상치)로 나타난다. 이 값들은 상대적으로 자주 일어나지 않는 극단 값들을 의미한다. 이러한 값들은 발생빈도는 매우 적지만 평균값에 미치는 영향은 크다. 따라서 이상치를 고려하여 정규성 검정을 수행하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

상부구조 형식별로 case 1과 case 2의 안전율과 내하율을 평균의 95% 신뢰구간에 대하여 Shapiro-Wilk (1965)에 의해 고안된 방법으로 수행한 정규성 검정 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. Table 3에서 case 1의 PSC I형식은 유의확률이 0.10으로 유의수준 0.05보다 크므로 정규분포를 따르지만 PSC B 형식은 유의확률이 0.02로 정규분포를 따른다고 볼 수 없다. 그러나 case 2는 PSC B와 PSC I형식의 유의확률이 0.24와 0.10으로 모두 0.05보다 크므로 정규분포를 따른다.

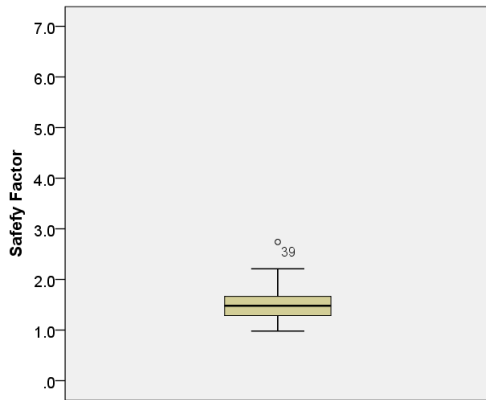


Fig. 1 Box-whisker plot for safety factor

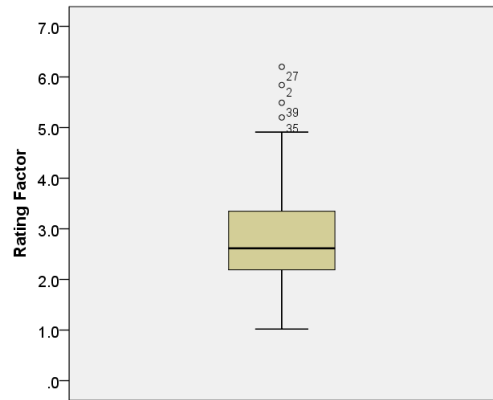


Fig. 2 Box-whisker plot for rating factor

Table 3 Normal distribution test for safety factor

type	case 1			case 2		
	statistic	degree of freedom	significance probability	statistic	degree of freedom	significance probability
PSC B	0.93	36	0.02	0.96	32	0.24
PSC I	0.85	8	0.10	0.85	8	0.10

Table 4 Normal distribution test for rating factor

type	case 1			case 2		
	statistic	degree of freedom	significance probability	statistic	degree of freedom	significance probability
PSC B	0.92	36	0.02	0.96	32	0.29
PSC I	0.97	8	0.93	0.97	8	0.93

3.2.2 기술통계

(1) 내하율과 안전율

기 수행된 보고서에서 상부구조 형식별로 안전율, 내하율, 공용내하율의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 안전율이 내하율보다 상대적으로 작게 나타났으며, 내하율은 재하시험 결과값을 반영한 공용내하율 보다 작게 나타났다. 이것은 공용내하율에 적용되는 응답보정계수가 대부분 1.0을 상회하고 있어 이론 강성보다 실측 강성이 큰 것으로 평가되었기 때문이다.

Fig. 3에서 공용내하율은 내하율의 91~225%에 분포하며 설계하중에 대한 여유도를 확보하고 있는 것으로 분석되었다. 상부구조 형식별 안전율, 내하율, 공용내하율의 분포는 그림에 나타낸 바와 같이 PSC I 형식보다 PSC B 형식의 값이 상당히 넓게 분포하고 있다. 이것은 PSC B 형식 구조물의 강성이 충분히 반영되지 않거나, 내하율이 하중비에 따라 변동이 있음을 나타낸다. 또한, 구조특성도 PSC B 형식이 다른 형식에 비해 복잡하고 해석 모델링 및 조건 설정에 차이가 있다.

(2) 상관분석

안전율과 내하율 및 공용내하율 간의 대략적인 상관성을 알아보기 위하여 이들 변수간의 분포도를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다.

안전율과 내하율의 분포(Fig. 4), 안전율과 공용내하율의 분포(Fig. 5), 내하율과 공용내하율의 분포(Fig. 6)를 살펴보면 내하율과 공용내하율의 분포가 타 분포에 비해 상관성이 높음을 알 수 있다.

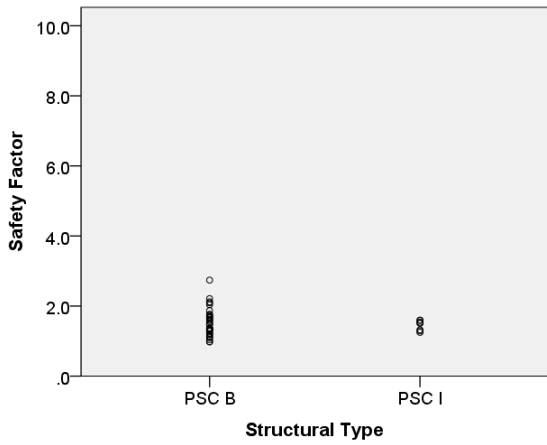
Table 5에는 안전율, 내하율, 공용내하율에 대한 상관분석 결과를 나타내었다. 표에서 내하율과 공용내하율의 상관계수는 0.90으로 두 변수간의 상관성이 다른 변수보다 큰 것으로 분석되었다.

(3) 상태평가등급별 안전율 및 내하율

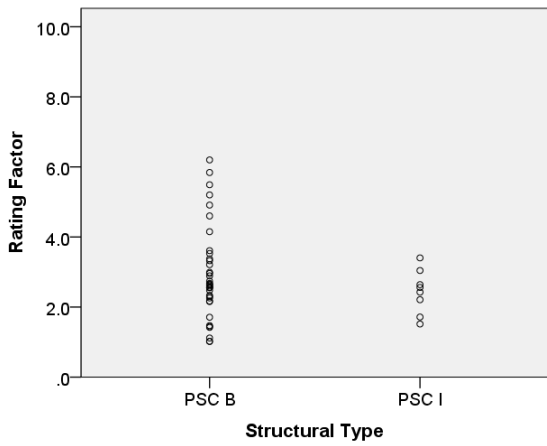
일반적으로 안전율과 내하율은 설계당시 설계하중에 대한 안전성을 확보하기 위하여 1.0 이상의 여유도를 준다. 따라서 외관상태가 양호할 경우 안전율과 내하율은 1.0 이상으로 평가된다.

안전율과 내하율은 개별 부재의 상태에 따라 변동이 있을 수 있으며, 본 연구에서는 안전율과 내하율에 영향이 큰 거더를 대상으로 분석하였다. 거더의 상태등급별 안전율과 내하율의 분포를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 그림에 나타낸 것처럼 거더의 상태등급은 안전율, 내하율과 일정한 경향이 없는 것으로 분석되었다.

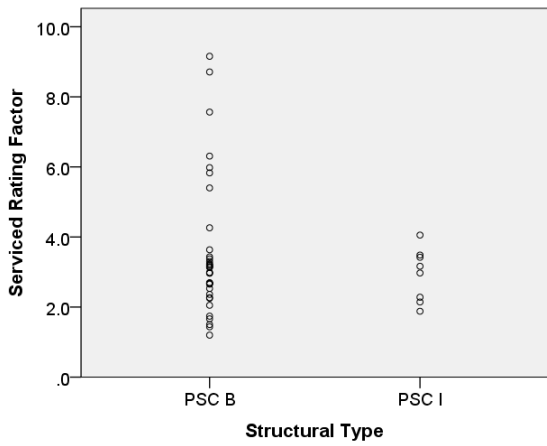
그림에서 거더의 상태등급에 따른 내하율은 분포가 넓게 나타났다. 분석 대상교량은 중대형 교량으로 외관상태가 비교적 양호하고, 안전성 평가에 영향을 줄 만한 손상



(a) Scatter diagram for safety factor



(b) Scatter diagram for rating factor



(c) Scatter diagram for service rating factor

Fig. 3 Scatter diagram according to structural type

및 결함이 별반 발견되지 않았다. 그럼에도 내하율의 분포가 크게 나타난 것은 개별 구조물의 경간장, 미관체고

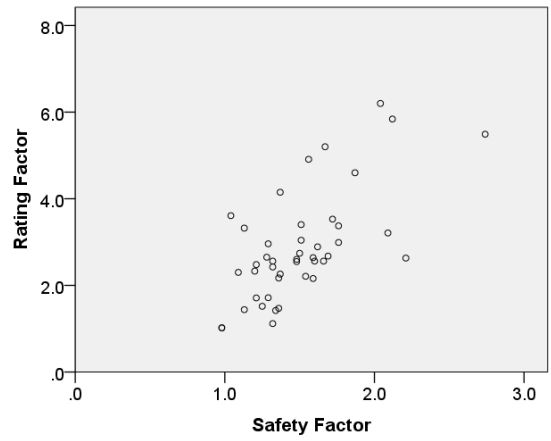


Fig. 4 Scatter diagram for safety factor vs. rating factor

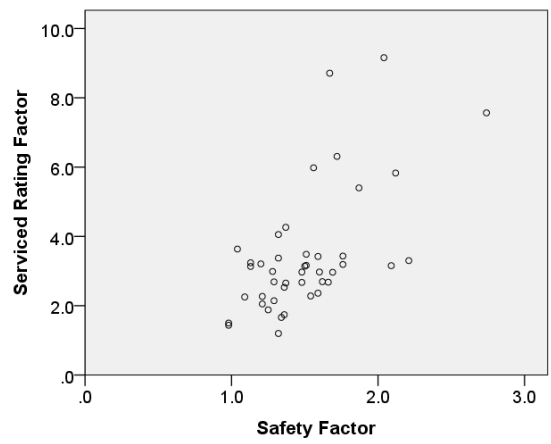


Fig. 5 Scatter diagram for safety factor vs. service rating factor

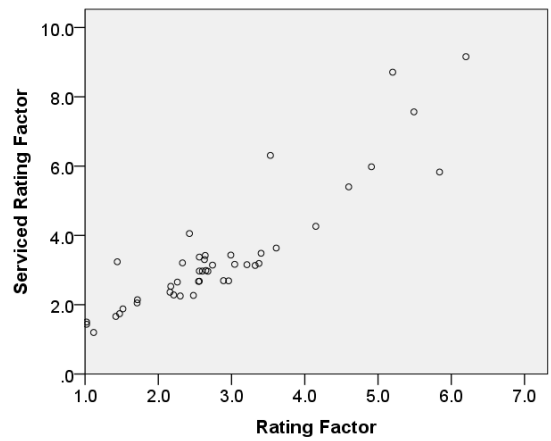


Fig. 6 Scatter diagram for rating factor vs. service rating factor

및 경제성 등의 설계조건이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 5 Correlation analysis between factors

variable	safety factor	rating factor	service rating factor
safety factor	1.00	0.66	0.61
rating factor	0.66	1.00	0.90
service rating factor	0.61	0.90	1.00

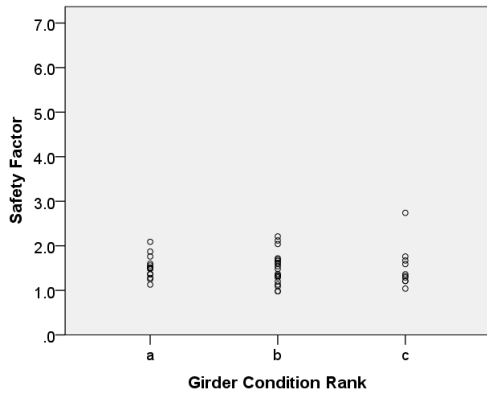


Fig. 7 Scatter diagram for safety factor according to the state grade of girders

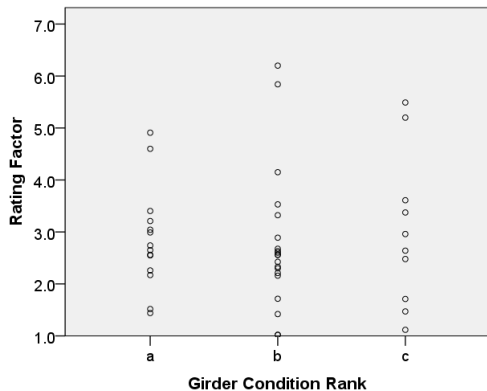


Fig. 8 Scatter diagram for rating factor according to the state grade of girders

3.3 안전율과 내하율의 관리범위 설정

Fig. 1~Fig. 2에 나타낸 바와 같이 이상치를 포함한 안전율과 내하율의 데이터는 산포도가 크기 때문에 그를 배제한 범위 설정이 필요하다.

본 연구에서는 안전율과 내하율의 분포가 정규분포를 따르는 case 2를 이용하여 평균치에 표준편차를 가감한 $\bar{X} \pm s$ 를 관리하한선과 관리상한선으로 하는 관리영역(control range)을 설정하였다. 안전율과 내하율에 대한 관리범위를 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

Table 6 Control range for safety factor

type	mean	standard deviation	$\bar{X} + s$	$\bar{X} - s$
PSC B	1.44	0.30	1.74	1.13
PSC I	1.45	0.14	1.59	1.31

Table 7 Control range for rating factor

type	mean	standard deviation	$\bar{X} + s$	$\bar{X} - s$
PSC B	2.61	0.95	3.56	1.65
PSC I	2.44	0.63	3.07	1.81

여기에서 사용한 신뢰계수 $1 - \alpha$ 는 새로운 시도에 대한 보수적 입장에서 여러 분야 실무에서 가장 자주 이용되며 SPSS에서 기본적으로 주어지는 값이다.

4. 제안 및 적용

앞서 상부구조 형식별로 통계 분석한 결과, 내하율은 활하중에 대한 여유력이 있음을 보여준다. 또한 표본집단으로부터 모집단을 추정할 수 있는 정규성 검정을 수행한 결과 case 2의 안전율과 내하율이 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 이러한 분포를 재하시험 수행여부에 대한 판별에 이용하였다. 교량의 내하력은 거더, 바닥판 및 기타 부재의 결함 및 손상 등에 의한 영향이 있으나, 본 연구에서는 상태평가지 부재별 가중치가 가장 큰 거더의 상태등급을 판별조건으로 적용하였다.

4.1 재하시험 수행여부 판별

상태평가와 안전성평가는 상호 보완 관계가 있으나 이에 대한 관계성을 정량화하는데 한계가 있기 때문에 세부 지침에서는 개별적으로 평가하여 두 평가 중 낮은 등급으로 결정하고 있다.

본 연구에서는 구조물의 상태평가등급과 안전율 및 내하율을 함께 검토하여 재하시험 수행여부를 결정토록 제안한다. 재하시험이 필요한 교량은 다음 두 가지 즉, 거더의 상태등급이 d 등급 이하인 경우와 안전율과 내하율이 관리하한선 이하인 경우이다.

1. GS : d or e
2. SF or RF $\leq \bar{X} - s$

Table 8 Decision criteria and cases for the need of loading test

structural type	number of bridges	d or e	SF or RF $\leq \bar{X} - s$	other cases
PSC B	36	-	9	27
PSC I	8	-	2	6
sum	44	-	11	33

여기서, GS는 상태등급(grade of state)이다.

본 연구에서 상태평가는 해당경간의 상태평가등급을 평가하는데 가중치가 큰 거더를 재하시험 수행여부에 반영하였고 거더의 상태평가등급은 안전등급의 기준을 원용하였다. 세부지침에서 안전등급은 5개로 구분되어 있으며, A, B 등급은 우수 및 양호한 상태를 의미하고 C 등급은 보통, D, E 등급은 미흡 및 불량한 상태이다.

이를 반영하여 거더의 상태평가가 d 등급인 경우는 주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수 보강이 필요하며 사용여부를 결정하여야 하는 상태이므로 재하시험을 수행하여 판별한다. e 등급은 거더의 상태가 심각한 결함으로 인하여 시설물에 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태이므로 재하시험을 수행하지 않는다. 단, 보강 후에는 필요시 재하시험을 실시하여 보강효과를 확인토록 한다. 보수가 필요한 c 등급은 보수가 필요한 상태이므로 상태등급만을 가지고 재하시험 수행여부를 평가하기가 어려우므로 이 경우에는 안전율 또는 내하율이 관리하한선 보다 클 경우 재하시험이 불필요한 것으로 한다.

거더의 상태평가등급이 a, b, c인 경우 안전율 또는 내하율이 형식별 평균값에서 표준편차를 감한 값($\bar{X} - s$) 보다 작으면 내하력의 저하가 우려되므로 재하시험을 수행하는 것으로 한다.

4.2 적용 및 분석

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 44개 콘크리트 교량에 대하여 상부구조 형식별로 안전율과 내하율의 평균과 표준편차를 구하고 평가기준에 적용한 결과를 Table 8에 정리하였다.

효과적인 내하력평가를 위해 재하시험 대상교량을 선정한 결과 44개 중 11개 교량이 재하시험을 수행하는 것으로 평가되었다. 재하시험이 필요한 교량 중에서 안전율 또는 내하율이 관리하한선 이하인 경우는 6개, 안전율과

Table 9 Decision cases for the need of loading test

No.	structural type	safety factor	rating factor	grade	decision
2010-1	PSC B	1.64	2.26	b	unnecessary
2010-2	PSC B	1.05	1.78	b	necessary
2010-3	PSC B	1.29	2.22	b	unnecessary
2010-4	PSC I	1.42	1.28	a	necessary

내하율 모두 관리하한선 이하인 경우는 5개로 나타났다.

2010년에 재하시험을 수행한 콘크리트 4개 교량을 대상으로 본 연구에서 제안한 방법의 적용 결과를 Table 9에 나타내었다. 표에 나타난 것처럼 4개 중 2개 교량은 각각 안전율과 내하율이 관리하한선 이하로 나타나 재하시험이 필요한 것으로 평가되었다.

재하시험이 불필요한 교량은 세부지침상에 제시된 바와 같이 상태평가 결과가 양호하고, 안전율 또는 내하율이 관리수준 목표를 상당히 초과한다.

재하시험이 필요한 경우는 교량의 노후화, 구성재료의 열화와 손상 등을 반영한 상태등급이 d 등급 이하이거나 안전율 또는 내하율이 관리주체가 정한 관리수준 목표 이하인 경우로 교량의 실제 여유 내하력을 평가해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 1종 기설 콘크리트 교량의 상태평가와 안전율 및 내하율 등의 안전 진단 결과를 바탕으로 구조형식별로 통계적 분석을 수행하고 재하시험의 수행여부에 대한 기준을 제시하였다.

- (1) 거더의 상태평가 등급은 안전율, 내하율과 일정한 경향이 없는 것으로 분석되었으며, 이는 분석 대상 교량이 중대형 교량으로 안전성 평가에 영향을 줄 만한 심각한 손상 및 결함이 없는 것에 주로 기인한 것으로 보인다.
- (2) 안전율의 범위는 0.980~2.740, 공용내하율은 1.199~9.517로 내하율의 91~225%로 산정되어 설계하중(DB-24 or DB-18)에 대한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 일부 교량에서 안전율과 내하율이 관리수준 목표를 상당히 초과하고 있음을 확인할 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 제안한 기준에 따라 상부구조에 대한 안전율, 내하율, 상태평가를 근거로 재하시험 수행

여부를 재검토한 결과, 48개소(2010년도 재하시험 수행 4개소 포함) 중 13개 교량만이 재하시험이 필요한 것으로 되었다. 검토대상 교량중 내하율 또는 안전율이 관리하한선 이하인 경우에는 설계하중에 대한 안전성을 확보하고 있더라도 거더 및 슬래브의 강성 저하 우려가 있으므로 재하시험을 통해 정량적으로 공용내하력을 평가해야 한다.

(4) 본 연구에서 제안한 방법은 안전진단 시 기술자 구조물의 건전성을 확인함과 동시에 재하시험 수행여부를 사전 판별함으로써 불필요한 재하시험에 소요되는 사회·경제적 비용이 경감될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 국토해양부, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량편), 국토해양부, 한국시설안전공단, 2010.
2. 김동용, 경갑수, 전준창, 이희현, 장동일, "실측자료의 통계분석에 기초한 도로교 내하력 평가방법의 개선방안", 대한토목학회논문집, 제19권 제1-6호, 1999, pp.847-857.
3. 이종호, 한성호, 신재철, "고속도로 교량의 개선된 안전성 평

가방안을 위한 실측자료에 기초한 공용내하력 평가", 대한토목학회논문집, 제6A호, 2009, pp.297-605.

4. 신재인, 박창호, 이상순, 이병주, "PSC박스 교량의 통행차량에 의한 내하력 평가기법 개선", 한국구조물진단학회지, 제11권 제4호, 2007, pp.147-151.
5. 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방, "상시진동계측에 의한 교량의 공용내하력 평가", 대한토목학회논문집, 제27권 제1A호, 2007, pp.79-89.
6. 최규정, 장인홍, 이장재, 이정화, 이공계를 위한 확률과 통계학, 자유아카데미, 2007.
7. 한국시설안전공단, 교량 내하력평가 매뉴얼, 한국시설안전공단, 2006.
8. 한국시설안전공단, FMS 시설물정보관리 종합시스템, 한국시설안전공단, 2010.
9. 高島春生, 道路橋と實用診斷學(下卷), 現代理工學出版, 1988.
10. 渥美滿康, 古市亨, 羽柴喜彦, "既設橋梁の 25t 車両対応の耐荷力評価法", 橋梁と基礎, 33卷, 7号, 1999, 頁 32-36.
11. AASHTO, Manual for Condition Evaluation of Bridge, 1994.
12. CEB, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Guidances Report, CEB-Bulletine, Nr. 243. Lausanne, 1998.
13. John W. Tukey, Exploratory data analysis, Addison-Wesley, 1977.
14. S. S. Shapiro, M. B. Wilk, "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)", Biometrika, vol. 52, No. 3/4, 1965, pp.591-611.

(접수일자 : 2011년 5월 31일)

(수정일자 : 2011년 7월 28일)

(심사완료일자 : 2011년 8월 5일)

요 지

심각한 손상, 결함, 재료적인 열화현상 등이 발견되지 않은 교량들은 대부분 설계하중에 대한 안전성을 확보하고 있으나, 주기적으로 시행되는 안전진단에서 건전성이 충분히 입증된 경우조차 대부분 재하시험을 수행하고 있다. 재하시험 필요 여부에 대해서 관련 세부지침에서는 정성적인 기술에 머무르고, 일부 연구들이 응답보정계수 산정 등 내하력 평가에 대한 개선 방안들을 제시하고 있으나, 재하시험의 적정성에 대한 연구는 미미하다. 본 연구는 안전진단에서 재하시험의 관행적 수행에 대한 기존의 의문에 대해 검토하고, 기설 콘크리트 교량들의 상태평가와 내하율 산정 자료 등에 대한 통계 분석을 토대로 재하시험 수행 여부를 포함하는 합리적이고 정량적인 절차적 안전진단 대안을 제시하였다.

핵심 용어 : 재하시험, 통계 분석, 내하력, 안전성 평가