

교량 내하력 평가사례의 비교 고찰 및 분석

Compare and Analysis of the Cases of Load Capacity Evaluation of Existing Bridges

오 병환*, 신 호상**, 한 승환**, 이 상민***, 이 태규***

Oh, B. H., Shin, H. S., Han, S. H., Lee, S. M., Lee, T. K.

요 약

본 연구에서는 현재 각 연구기관에서 실시되고 있는 기존 교량의 내하력 평가사례들을 비교 분석하고, 이에 따른 문제점을 도출하여 보다 합리적인 교량 내하력 평가기법을 제시하고자 한다. 내하력 평가내용 중 외관조사 방법, 정적 및 동적 재하시험 및 결과분석, 대상교량의 구조해석 및 최종 내하력 평가 방법에 따라 분석하고 이에 따른 각 연구기관별 수행 방법의 차이를 기술하고 문제점을 도출하여 개선된 내하력 평가기법의 방향을 제시하고자 한다. 분석결과 실측치와 해석치 사이에 차이가 많이 존재하고 평가방법도 일관성이 결여되어 있는 것으로 나타나고 있다.

1. 서론

최근 들어 성수대교의 붕괴사고 이후 일반인들의 교량에 대한 관심이 높아지고 있다. 지금까지 건설부 주관하에 전국에 산재한 국도상 주요 교량에 대한 내하력 평가를 실시해오고 있다. 지금까지 수행된 교량 내하력 판정 결과를 살펴보면 교량의 노후화, 차량하중의 증가, 차량형상의 변화, 통행량의 증가와 같은 요인들을 합리적으로 고려해줄지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 내하력 평가방법을 비교분석하여, 각 방법의 특징과 문제점을 살펴본 뒤 향후 보다 합리적이고 일관성있는 교량 내하력 판정법을 제안하는데 그 목적이 있다.

2. 외관조사 및 재료 강도 추정

2.1 외관조사

외관조사에서 현재 사용되고 있는 평가기준은 크게 3가지로 분류된다. 서울시와 토목학회에서 93년도에 서울시 주요구조물에 대한 1-2차 안전진단시 제정한 평가기준에서 사용하는 방법은 교량을 크게 11개 부위로 분류한 뒤, 각 부위별로 발생가능한 일화상태를 구분하여, 이들 일화상태별로 A,B,C,D의 4개 등급으로 분류상교량의 외관상태를 분류하는 방법이다. 건설기술연구소에서 최근 제정된 외관조사 평가기준

에서 사용하는 방법은 교량을 크게 17개 부위로 분류한 뒤 A,B,C,D,E의 5개 등급으로 구분하여 대상교량을 평가하는 방법이다. 또 다른 평가기관의 방법은 토목학회에서 제정된 방법과 유사하나 교량의 부위를 10개로 구분하여 각 열화상태별로 C,B,A,AA의 4개 등급으로 구분하여 대상교량의 외관상태를 평가하는 방법이다. 이들 방법은 대체적으로 비슷한 상태의 외관상태 등급을 사용하고 있으나 보다 합리적인 교량관리를 위해서는 일관성 있는 방법에 의한 외관상태 조사가 필요하다고 판단된다. 미국 뉴욕시의 경우 평가등급을 10개로 분류하여 외관상태를 파악하고 있고, 프랑스의 경우 결함정도에 따라 B,C,D,E,F의 5개 등급으로 분류하고 있다. 평가등급이 많을수록 인접한 평가등급의 기준이 모호해지는 단점이 있으므로 4-5개 정도의 평가등급이 적절한 것으로 판단된다.

2.2 재료강도 추정

교량의 저항능력을 산정하기 위한 기본 작업으로서, 교량의 기하학적 형상 및 구조단면도의 작성을 위한 실측작업과 재료의 강도추정작업이 있다. 대상교량이 P/C 거더교의 경우 강선의 종류, 강선수, 강선단면적, 강선의 배치도 및 긴장력은 내하력 판정시 중요한 자료이나, 도면이 없는 경우는 이들 자료를 전혀 알 수 없어 유사한 교량의 표준단면을 이용하여 추정하는 방법을 사용하고 있는 실정이다. 재료의 강도를 추정하는 방법은 주로 콘크리트의 경우, 슈미트햄

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 쌍용중앙연구소 선임연구원

머타격 반발치를 이용한 압축강도 추정방법과, 코아작업을 통하여 채취된 시편을 재료시험기를 이용하여 압축강도를 추정하는 방법이 있다. 강재의 경우 특별한 시험없이, 사용된 강재의 인장강도를 추정하는데 있어서 제작된 기간에 주로 사용되었다고 추정되는 강재의 인장강도로 대체하고 있다. 비파괴 검사에서 추정되는 강도는 오차가 크기 때문에 정밀한 추정작업이 요구된다.

3. 내하력 평가를 위한 재하시험

3.1 정적 재하 시험

대상 교량별의 상태에 따라 재하경우 및 재하 위치가 다르지만, 거더가 있는 교량의 경우, 정적 재하시험의 위치와 경우는 최대 휨모멘트가 발생하는 지점에서 각 거더별로 시험차량을 재하하여 최대 처짐과 변형도를 측정하고, 최대 전단력이 발생하는 지점에 시험차량을 재하하여 최대 전단변형을 측정한다. 설치되는 게이지의 위치는 주로 거더와 상판슬래브의 합성작용을 측정하는 곳, 각 거더별로 분배정도를 알아보기 위한 곳, 최대 전단 및 휨에 대한 변형도 및 처짐을 측정하는 곳이다. 각 측정점에서 측정된 측정치와 교량의 각 해석방법에 의해 계산된 계산치와의 비교를 수행하여 내하력 판정의 기초 자료로 사용한다.

3.2 동적 재하 시험

동적 재하시험에서 사용되는 재하위치, 재하경우 및 측정위치는 보통 정적 재하시험과 동일하게 사용하고 있고, 속도별로 시험차량을 이동시켜 이에 따른 각종의 자료들을 측정한다. 설치된 가속도계를 이용하여 속도별 대상교량의 고유진동수를 측정하여 각 해석방법에 의해 계산된 고유진동수와 비교를 수행하여 내하력 판정의 기초자료로 사용한다.

4. 내하력평가 이론

본 연구는 각 연구기관에서 수행한 교량의 내하력 평가사례들을 살펴보고 현행 내하력 판정방법의 문제점을 살펴본 뒤, 교량의 내하력을 보다 정확히 예측할 수 있는 방법을 모색하는데 있다.

4.1 내하력 평가 절차

현재 사용되는 내하력 평가순서는 각 연구기관별로 대체적으로 유사하다. 내하력 평가순서

를 간략히 소개하면 다음 그림1과 같다.

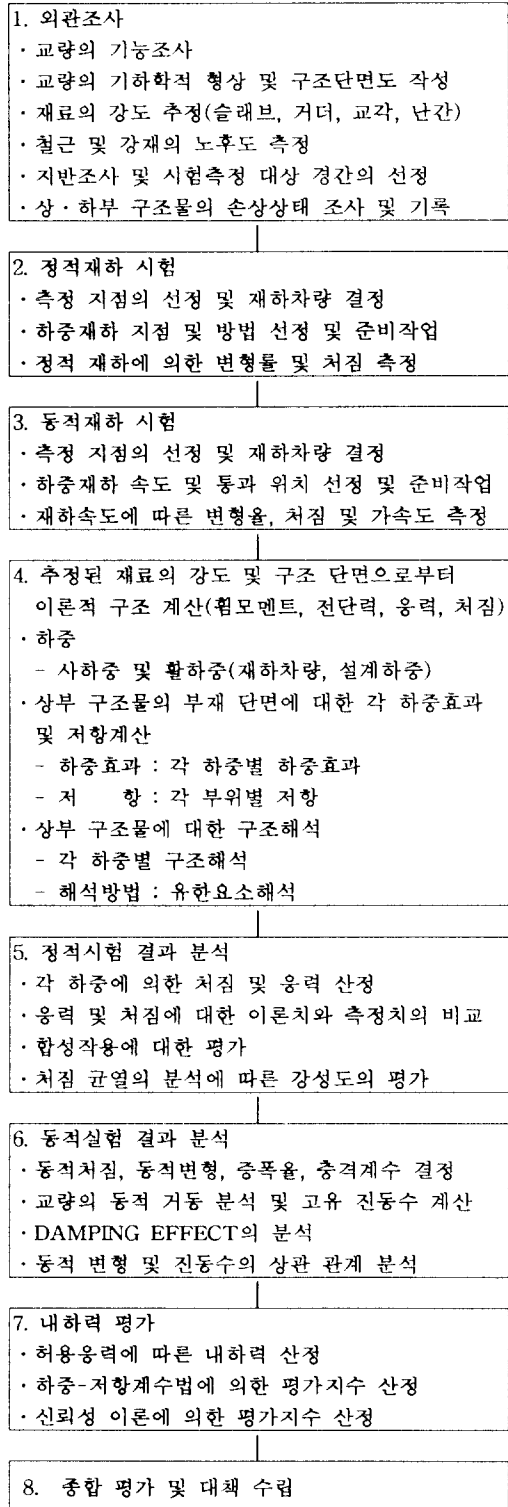


그림 1 교량의 안전평가 절차

4.2 허용응력이론(WSD)에 의한 내하력 판정

본 방법을 간략히 살펴보면 다음과 같다. 추정된 재료의 강도, 측정된 단면치수 등을 이용하여 사하중, 활하중에 대한 각 하중효과를 계산한 뒤, 이로부터 사하중응력, 활하중응력응력을 구한다. 계산된 응력을 이용하여 기본 내하력을 계산한다. 이를 식으로 나타내면 식1과 같다. 이 기본내하력에 식2와 같이 적절한 보정계수를 곱하여 최종내하력을 계산하는 방법이다.

$$\text{기본내하력} : P = \frac{\sigma_a - \sigma_D}{\sigma_L(1+I)} \quad \text{--- 식1}$$

공용내하력 :

$$P' = P \times K_s \times K_r \times K_l \times K_o \quad \text{--- 식2}$$

여기서, σ_a 는 재료의 허용응력, σ_D 는 사하중에 의한 응력, σ_L 는 표준설계하중에 의한 활하중응력, I 는 충격계수, K_s 는 응력보정계수(= $\frac{\epsilon(\text{계산})}{\epsilon(\text{실측})} \times \frac{(1+I)(\text{계산})}{(1+I)(\text{실측})}$)이고, K_r 은 노면상

태에 다른 보정계수, K_l 는 교통상태에 따른 보정계수, K_o 는 기타조건에 따른 보정계수이다. 이 방법은 강교에서는 어느 정도 타당하지만 콘크리트교에서는 실제의 내하력을 추정하는데 문제점을 가지고 있다고 알려져 있다. 현재 국내에서는 이들 보정계수 값들이 정착되지 않은 상태이다.

4.3 하중-저항계수이론(LRFD)에 의한 내하력 판정

구조물의 상태에 따른 손상상태와 통행차량에 의해 발생하는 활하중효과가 다르기 때문에 이들을 합리적으로 고려하는 방법으로 각 하중효과별로 관련된 인자들로 구성된 평가방정식을 구성한 뒤 이를 토대로 목표 신뢰성 수준을 결정한다. 한계상태 감정을 통해서 다양한 강도와 활하중 범주에 대해서 목표신뢰성 수준을 만족하는 저항계수와 사하중 및 활하중 계수를 결정하여 평가계수에 의해 내하력을 평가하는 방법이다. 평가계수의 기본식은 식3과 같다.

$$\text{평가계수} : RF = \frac{\phi R_n - \gamma_D D}{\gamma_L L(1.0+I)} \quad \text{--- 식3}$$

여기서 ϕ 는 단면의 손상을 고려한 저항감소 계수(손상계수)이고, R_n 은 부재의 공칭저항, γ_D

는 사하중계수, D 는 부재 단면의 자중으로 인한 사하중 모멘트 효과, γ_L 는 활하중계수, L 은 평가차량에 의해서 교량 지간상에서 발생하는 공칭 활하중효과이다. 현재 각 계수들은 연구기관별로 서로 다른 값들을 사용하고 있다. 이들 계수값을 살펴보면 표1과 같다.

4.4 신뢰성지수에 의한 내하력판정

노후 교량 안전평가시 필요한 하중크기와 구조물의 강도등은 확실하게 알 수 있는 확정론적 변수들이 아니다. 이들 재료특성, 단면치수 및 작용하중등의 각종 불확정 변수에 대한 통계자료를 이용하여 기존 교량의 저항능력과 하중효과와의 확률밀도함수를 도출하고 이를 토대로 공용기간동안 발생 가능한 모든 파괴모드에 대하여 안전 또는 파괴확률을 추정하는 방법이다. 안전과 파괴의 경계상태를 한계상태를 규정하고 교량에 작용하는 하중 및 부재단면 저항의 불확실량을 합리적으로 고려한 후 신뢰성지수를 산정한다. 신뢰성지수는 아래 식4와 같다. 계산된 신뢰성지수 β 가 교량의 요구안전도 수준인 목표 신뢰성지수 β_o 보다 작지 않을 경우에는 구조물이 설계공용하중에 대해 충분한 내하력을 보유하고 있다고 판단하는 방법이다.

$$\text{신뢰성지수} : \beta = \frac{\text{한계상태방정식의 평균값}}{\text{한계상태방정식의 표준편차}} \quad \text{--- 식4}$$

표2에서 D_F 는 노후손상계수(= K_D/K_I),

$N_R = MFPD$, M 은 재료강도 관련 불확실량 변수, F 는 제작시공 관련 불확실량 변수, P 는 해석, 모델링 관련 불확실량 변수, D 는 노후손상도 추정 관련 불확실량 변수, C_D, C_L 각각 사하중 및 트럭하중의 작용외력에 대한 노후손상 구조물의 추정강성도 의해 해석된 영향계수, D_n, L_n 는 각각 공칭사하중 및 트럭하중, K 는 응답비(= $K_s(1+I)$), K_s 는 측정 응력 대 계산응력의 비, I 는 계산 또는 실측 충격계수, N_D, N_L 은 D_n, L_n 을 측정하는데 있어서의 불확실량 및 실제하중에 대한 편기를 조정하기 위한 각 보정계수, $N_D(=D_s L_D)$ 는 사하중을 작용력으로 해석하는데 수반하는 불확실량(D_s)과 랜덤사하중 변량(L_D), $N_L(=P_s P_T L_p)$ 은 활하중을 작용력으로 변환하는데 수반되는 불확실량(P_s)과 시험측정과정의 불확실량(P_T)과 랜덤활하중 변량(L_p)이며, $C'D$ 는 하중강도를 하중효과로 변환시켜줄때 요

구되는 상수, A_i 는 각 변수의 불확실량(확률적 특성)을 나타내주는 변수이고, D_i 는 교량부재의 사하중을 구성하는 각 변수의 하중강도, a 는 하중을 하중효과로 변환시켜 주는 하중변환계수, m 은 트럭 하중효과비, W_{60} 은 통행 차량의 대표 중량, H 는 차량간격 영향계수, g 는 하중분배 계수를 나타낸다.

현재 국내의 교량 관리체계에 의하면 각 교량들에 대한 단면저항능력, 사하중효과 및 활하중효과의 한계상태방정식의 불확정변수에 관련된 통계학적 데이터의 축적이 거의 전무한 상태이다. 본 방법의 효율성을 높이기 위해서는 기존 교량에 대한 전반적인 통계학적 데이터의 축적이 절대적으로 필요하다.

5. 내하력 평가의 비교 고찰 및 문제점 분석

상기에서 살펴본 각 내하력 평가방법을 비교해 본 결과, WSD에 의한 방법은 평가자의 개인적인 성향에 따른 최종 내하력치가 크게 차이가 날 수 있는 단점이 있음을 알 수 있다. 그러나 이 방법에서는 외관조사와 재하시험의 결과를 내하력 평가시 고려할 수 있다. 기존의 내하력 평가결과 응력보정 계수값이 1보다 크게 나오면 대상 교량은 redundancy가 있다고 볼 수 있으나 공용하중은 기본내하력보다 낮게 계산된 것을 알 수 있다. 충분한 redundancy가 보장된 것으로 보이는 일부 교량에 대해 재건설등의 결과판정이 나온 경우도 있다. 이상에서 살펴본 바에 의하면 WSD에 의한 방법에 대해 보다 합리적인 개선이 필요한 것으로 판단된다. 또한 LRFD방법의 경우 앞에서 살펴본 바와 같이 각 연구기간별로 반 경험적인 계수값들을 서로 다르게 사용하고 있음을 알 수 있다. 일련의 합리적인 계수 산정을 위한 개선된 방법이 요구된다.

6. 향후 개선 방향

이상에서 살펴본 바로 교량의 안전과, 합리적인 관리를 위해서는 내하력 평가에 있어서의 통일된 방법이 절실히 요구된다. 외관조사 평가시 제시된 방법들의 통일, 혹은 보다 효율적인 평가방법의 개발을 통해 일관성 있는 외관조사가 수행되어야 한다. 여기서 축적된 자료를 이용하여, 내하력 판정에 사용되는 평가계수의 정립이 필요하다. 측정된 자료들을 종합하여 내하력 평가시 미국, 캐나다, 유럽 등지에서 사용하고 있고, 국내의 일부 연구기관에서 개발중인 신뢰성

이론에 의한 내하력 평가방법의 개발을 통해 보다 합리적인 내하력 평가가 필요하다. 이 방법의 효율성을 높이기 위한 국내 교량의 각 하중효과의 한계방정식에 관련된 불확정변수들에 대한 통계학적 자료 및 교량 형식별 저항의 한계방정식에 필요한 통계학적 자료의 구축이 필요하다.

7. 결론

이상과 같이 살펴본 내하력 평가 방법과 순서 및 이에 적용되는 계수들을 살펴볼 때 여러 연구기관에서 수행되고 있는 내하력 평가는 일관성 있는 기준없이 자기 연구결과에 의존하여 수행되고 있음을 알 수 있다. 현행 허용응력이론에 의한 내하력판정방법은 판정자의 개인적인 성향에 따라(구조해석모델링, 외관조사의 결과 판정계수) 내하력 수준이 차이가 심하게 날 수 있고 구조물의 내하력을 판정하기에는 여러가지 변동성을 충분히 고려할 수 없기 때문에, 본 방법의 유효성에 대한 재검토가 필요하다고 판단된다. 하중-저항계수이론에 의한 방법 또한 각 연구기관별로 서로 다른 공칭저항감소계수, 사하중효과계수, 활하중효과계수를 사용하고 있어 현 국내 교량 상태에 맞는 계수들이 사용이 요구된다. 이에 따라 선진 외국에서와 일부 연구기관에서 연구중인 신뢰성이론에 입각한 합리적인 내하력 평가기법의 개발이 절실히 요구된다.

참 고 문 헌

1. 건설부, '건설연구자료(교량내하력 조사)', 1968~1980
2. 건설부, 국립건설시험소, "교량내하력 조사(구조물 안전도 연구)", 1987~1994
3. 정철현, "교량구조물이 합리적인 설계하중 및 설계기준 개발", 서울대학교 토목공학과 공학박사학위논문, 1993
4. 조효남외 2명, "구조신뢰성 방법에 의한 도로교의 내하력 평가에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집, 제7권, 제2호, 1987
5. 진주 국토유지 건설사무소, "거제대교 및 삼계교 안전도 검사 용역 최종보고서", 1992
6. R. A. Imbsen, "Strength Evaluation of Existing Reinforced Concrete Bridges", NRCHP Report 292
7. F. Moses and D. Verma, "Load Capacity Evaluation of Existing Bridges", NRCHP Report 301

표1 각 연구기관별 사용하는 각종 계수값

연구기관	교량 형식 구분	하중종류	저항 감소 계수(φ)	사하중계수(γ_d)	활하중계수(γ_d)	
A기관	없음	없음	손상상태별구분 0.94~0.57	1.20	일트력 통행량	
					2,000	1.51
					8,000	1.66
	16,000	1.84				
B기관	RC교	형식별로 구분하나 계수값은 동일	공용하중	0.85	1.20	2.00
	강교					
	PC교					
C기관	콘크리트 강재		없음	0.80	1.15	1.80
	1.10					

표2 연구기관별 적용 신뢰성이론

	B기관	A기관
한계상태 방정식	$G(R, S_i) = R_i + \sum_{i=1}^n S_i$	$G = R - DD - LL$
저항모형	$R = R_n \cdot D_F \cdot N_R$	현장측정빈도, 유지보수 유·무, 지항의 하중특성
사하중효과모형	$C_D \cdot D_n \cdot N_D$	$C'_D \sum A_i \cdot D_i$
활하중효과 모형	$C_L \cdot L_n \cdot K \cdot N_L$	$a \cdot m \cdot W_{.95} \cdot H \cdot g \cdot (1+I)$

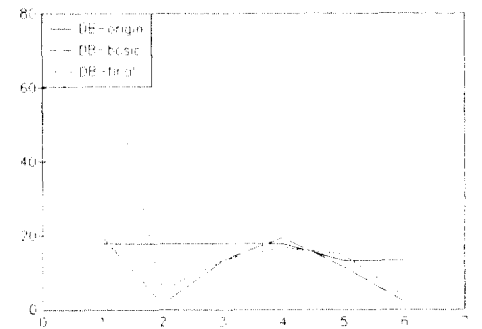
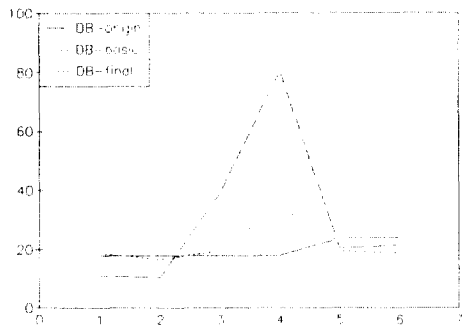
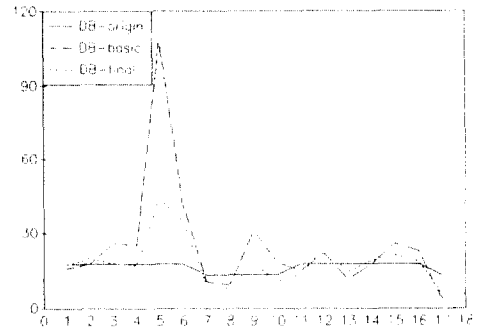
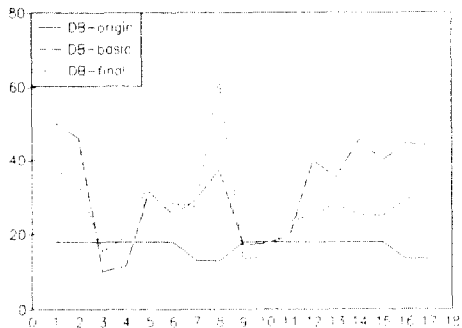


그림2 허용응력이론에 의한 내하력 평가방법에 따른 교량 형식별 내하관정 비교