교량받침의 거동특성을 고려한 내하력 평가

Load carrying capacity Evaluation Considering
the Structural Characteristics of Bridge Bearing

박 길 현* 양 승 현**
Park, Kil-Hyun Yang, Seung-Hyun

Abstract

Load carrying capacity evaluation is very important element in maintenance of bridge. There are several reasons about differences in deflection caused by loading test and structural analysis. Especially when we do modeling uniformly without considering real structural characteristics of support, this problem can be more deepened. This computes modification factor high so we may evaluate the load carrying capacity more than fact. In this study, we do structural analysis nearing real structure with negative bending moment of support that computes considering structural characteristics of support, and then evaluate load carrying capacity.

요 지

교량의 내하력평가는 유지관리에 있어서 매우 중요한 요소이다. 재하시험과 구조해석에 의한 처짐이 차이를 보이는 이유는 여러 가지가 있다. 특히, 지점의 실제 거동특성을 고려하지 않고 일률적으로 모델링을 하는 경우에 이러한 문제가 더욱 심화될 수 있다. 이는 응력보정계수를 크게 산정하여 내하력을 실제보다 더 크게 평가할 우려가 있다. 본 연구에서는 지점의 거동특성을 고려하여 산정한 지점의 부모멘트를 이용하여 실제거동에 근접한 구조해석을 실시하야 보다 정확한 내하력을 평가하고자 한다.

Keywords : load carrying capacity, loading test, deflection, modification factor
핵심 용어 : 내하력 평가, 재하시험, 처짐, 응력보정계수

* 정회원, 조선대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 조선대학교 토목공학과 대학원, 박사수료
E-mail : ttury@hanmail.net 011-9608-6991

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량구조물은 시간이 경과함에 따라 교통량의 증가, 차량하중의 대형화 및 교통사고 등으로 인하여 가중되는 손상에 대한 조치, 구조물의 기능 보존, 이용자의 편익과 안전을 도모하기 위하여 유지관리가 요구되고 있다. 정밀 안전진단은 유지관리의 일환으로서 구조물의 건전도를 평가하는데, 이러한 과정을 수행함에 있어서 체계적인 정립이 미흡하고 기술자에 따라 결과의 편차가 크게 나타나는 등 일관성과 정밀도가 결여된 안전진단이 이루어 질 우려가 있다.

내하력 평가는 조사, 시험 및 구조해석 등의 기본자료로부터 기술자의 공학적인 판단까지 요구되는 복잡한 문제로서 외관조사, 재료시험, 재하시험 및 구조해석에 따른 결과와 응력보정계수에 따라 동일 구조물에 대한 내하력이 다르게 산정될 수 있다. 특히, 받침이 없거나 받침손상이 심하여 기능수행이 어려운 노후교량의 경우 상부구조와 하부구조의 직접부착으로 마찰계수가 증가하여 받침의 회전 및 가동이 원활하지 못함으로써 비정상적인 거동을 하게된다. 이러한 교량받침의 거동특성을 고려하지 않고 실시한 구조해석 결과와 재하시험 결과로부터 내하력을 산정할 경우 응력보정계수를 크게 고려하여 교량의 내하력이 과다하게 평가될 수 있다.

본 연구에서는 받침이 없거나 파손으로 기능수행이 어려운 교량지점의 변위에 의한 거동특성을 파악하여 실제거동과 유사한 구조해석을 실시하여 내하력을 산정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 받침의 거동특성과 변위

재하하중에 의한 실제 처짐량과 구조해석에 따른 처짐량과의 차이를 유발하는 원인은 지점의 경계조건, 구조해석 모델링의 차이, 측정위치 및 데이터의 선정, 측정장비의 신뢰성, 재하방법에 따른 오차, 강성계산, 구조물의 국부적 손상, 현장기술자의 기술력, 장비관리 등이 있다.[(2)(3)]

이 중 지점의 경계조건에 따른 원인은 노후교량에서 흔히 나타나는 받침의 미설치 또는 손상으로 인하여 실제 처짐량과 구조해석에 의한 처짐량의 차이가 매우 크게 나타나는 주요 원인이 되기도 한다. Fig. 1과 같은 단순보와 양단고정보의 지간 중앙에 집중하중 P가 작용하는 경우 중앙점의 처짐은 $\frac{Pl^3}{48EI}$와 $\frac{Pl^3}{192EI}$으로 현격한 차이를 나타낸다.

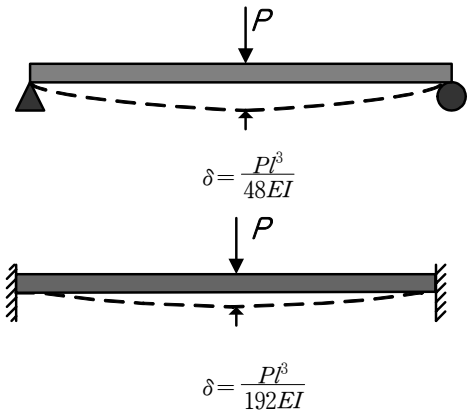


Fig. 1 양단 지지조건에 따른 처짐곡선

받침의 손상이 심하여 기능수행이 어렵거나 받침이 설치되지 않은 교량의 경우 회전이 자유로운 힌지의 거동을 일으키지 않고 힌지와 고정의 중간형태의 거동특성을 나타내는 경우가 있다. 그러나 구조해석을 실시할 경우 단순지지로 간주함으로써 응력보정계수가 지나치게 커져 교량의 내하력을 크게 평가하는 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지점의 거동특성을 정량화하여 지점에 모멘트하중이 작용하는 단순지지형태의 경계조건으로부터 구조해석을 실시하고 그에 따른 재해석을 통하여 내하력을 산정하고자 한다.

3. 받침의 거동특성

3.1 지점모멘트 산정

보요소의 임의의 두점을 선정하고 각 점에 대한 실제 처짐과 구조계산상의 처짐의 차이인 $\Delta\delta$의 겹침의 원리[(6)]를 이용한 (1)식의 연립방정식으로부터 M_A 및 M_B를 산정한다.

여기서, 단면2차모멘트 I는 I_g, I_{cr} 및 I_e중 어느 값을 사용하더라도 그에 따라서 지점모멘트 M_A 및 M_B의 크기가 변하기 때문에 단면2차모멘트의 선택은 연구수행에 있어서 중요한 문제가 되지 않는다. 따라서 단면2차모멘트는 본 연구에 사용된 구조해석 프로그램에서와 같이 총 단면2차모멘트 I_g를 사용하였으며, 탄성계수 E는 콘크리트의 압축강도를 이용한 E_c를 사용하였다. 그러므로 처짐과 상관성을 가지는 단면손상에 따른 단면의 변화, 재료의 강도변화 및 교량받침부의 거동특성을 동시에 고려하여 지점모멘트를 산정하여 구조해석을 실시하므로써 실제 거동과 유사한 구조해석 결과를 얻을 수 있다.

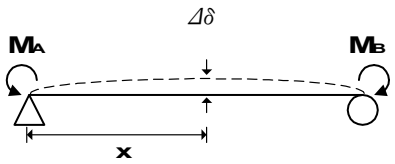


Fig. 2 모멘트하중에 의한 처짐도

$$\Delta\delta = \frac{x}{6EIl}[M_A(2l-x)(l-x) + M_B(l^2-x^2)] \qquad (1)$$

$\Delta\delta$: 구조해석 처짐 - 실제 처짐
E : 콘크리트의 탄성계수
I : 단면2차모멘트 I_g
M_A, M_B : $\Delta\delta$에 의한 지점모멘트

3.2 횡분배영향

3.2.1 횡분배율

단일 보요소의 경우는 횡분배의 영향을 고려할 필요가 없으나 격자구조에서는 가로보를 통하여 횡분배가 일어난다. 횡분배이론[7]에는 격자이론[5], 판이론 등이 있다. 그러나 정밀 안전진단에서는 상용구조해석 프로그램을 이용한 구조해석을 실시하는 것이 일반적이므로 격자이론이나 판이론에 의하여 횡분배를 하였을 경우 결과값이 일치하지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 구조해석 프로그램을 이용하여 횡분배계수를 산정하였다. 임의의 지점에 단위 모멘트하중을 재하시켜 실시한 구조해석결과에서 지점의 휨모멘트를 구함으로써 비교적 쉽게 모멘트하중의 횡분배율을 산정할 수 있다. 4개의 주형을 가진 교량구조물에서는 4×4의 횡분배율 Matrix를 얻을 수 있다.

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

여기서, k_{ij} : 하중분배계수
i : 분담율 측정위치
j : 하중 재하위치

3.2.2 횡분배를 고려한 지점모멘트

격자보의 구조해석을 위하여 (1)의 처짐 차에 의한 지점모멘트 산정식과 (2)의 하중분배율 매트릭스를 이용하여 (3)과 같이 지점모멘트를 산정하여 격자구조해석을 실시함에 있어서 Fig. 3과 같은 모멘트하중과 재하하중을 이용하여 구조해석을 실시한다.

$$\{Mg\} = [K]^{-1}\{Ms\} \qquad (3)$$

[K] : 횡분배율 매트릭스
{Mg} : 격자해석에 의한 지점모멘트
{Ms} : 단일 보요소의 지점모멘트

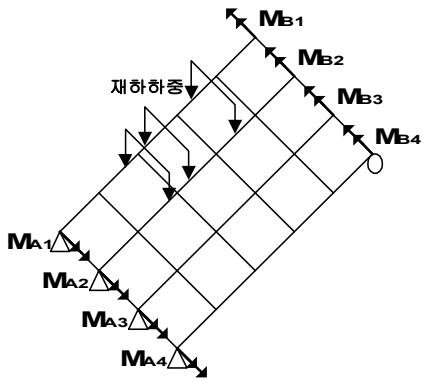


Fig. 3 구조해석 모델링

3.3 내하력 산정

3.3.1 모멘트 계수비 산정

재하차량에 의한 받침의 거동특성을 고려하여 구한 지점모멘트는 DB하중에 의한 지점모멘트로 환산하여 내하력을 산정하기 위하여 모멘트비계수 α를 산정한다.

$$\alpha = M_H / M_F \quad (4)$$

M_H : $\Delta\delta$에 의한 지점모멘트

M_F : 양단 고정인 경우 재하하중에 의한 지점모멘트

재하차량에 의한 지점모멘트를 DB하중에 의한 지점모멘트로 환산하는데 모멘트비계수 α와 양단고정에서 DB하중에 의한 지점모멘트 M_{DB-F}로부터 내하력산정에 이용할 M_{DB-H} 을 산정한다.

$$M_{DB-H} = \alpha \cdot M_{DB-F} \quad (5)$$

M_{DB-H} : 단순지지인 경우 DB하중에 의한 지점모멘트

M_{DB-F} : 양단고정인 경우 DB하중에 의한 지점모멘트

3.3.2 내하력 산정

재료시험, 단면조사 등을 통하여 설계모멘트강도를 산정하고 강도설계법에 의하여 내하율 RF를 구하여 기본 내하력을 산정한다.

기본 내하력으로부터 내하력산정[1]을 위하여 사용되는 보정계수는 처짐 보정계수와 응력 보정계수가 있으나, 처짐에 의한 거동특성으로부터 본 연구를 수행하였기 때문에 처짐보정계수를 사용하였다. 기존의 내하력산정에 사용되는 처짐 보정계수는[8]과 같으나, 본 연구에서는 지점모멘트 산정시 처짐에 관한 보정계수를 고려한 것과 같으므로[9]와 같이 충격계수에 의한 보정계수만을 고려하여 내하력을 산정한다.

$$\text{내하율 } (RF) = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_{l(1+i)}} \quad (6)$$

$$\text{공용내하력 } (P) = K_s \times RF \times P_r \quad (7)$$

$$K_s = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \cdot \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \quad (8)$$

$$K_s = \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \quad (9)$$

4. 현장실험 및 적용

4.1 현장실험

4.1.1 대상교량

대상교량은 Table 1 및 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.

4.1.2 변위계 부착위치

변위계는 지간중앙부와 지간중앙으로부터 3.75m 떨어진 곳의 각 주형 하단에 부착하였다.

Table 1 대상교량 현황

제원	형식	4경간 단순지지 R·C T형교
	설계하중	DB18
	총폭	7.7 m
	유효폭	6.0 m
	교장	15@4 = 60.0m
	교좌장치	미설치
	신축이음	미설치
재료·단면	콘크리트	$f_{ck}=220kg/cm^2$, $E_c=2,224,850t/m^2$
	사용철근	SD30 , D29-8EA
	단면계수	$I_g=0.118m^4$

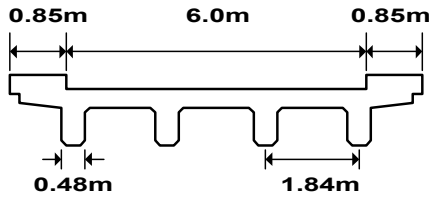
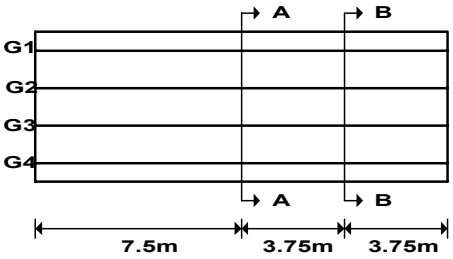


Fig. 4 대상교량의 단면도



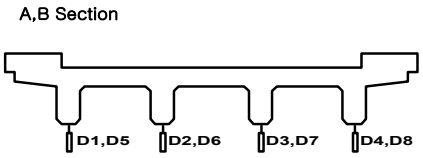


Fig. 5 변위계 부착위치

4.1.3 재하하중 및 재하방법

재하차량은 15ton 덤프트럭에 적재하여 사용하였으며, 재하방법은 중륜을 지간 중앙부에 위치시키고, 재하차량의 좌측 또는 우측의 축하중을 각 주형의 중심선에 재하시켜 정적 재하시험을 실시하였다.

Table 2 재하차량 제원

축 중 (ton)				제 원 (cm)			
전륜	중륜	후륜	총중량	전륜거	전축거	후륜거	후축거
5.12	11.46	10.50	27.08	205	325	180	130

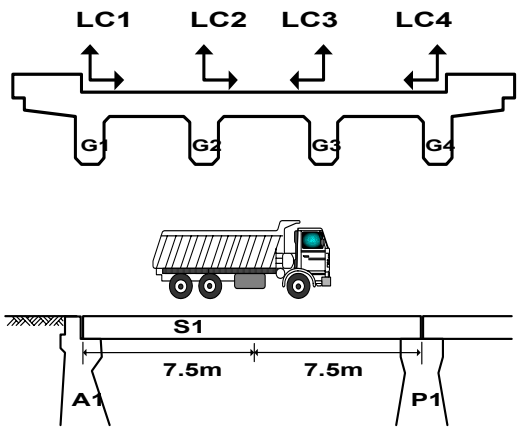


Fig. 6 재하방법

4.2 재하시험 결과 및 분석

재하시험결과 Table 3과 같이 측정처짐과 계산처짐간의 차가 다소 크게 나타났다.

4.2.1 $\Delta\delta$을 이용한 지점모멘트 산정

교량의 제원조사, 재료시험, 재하시험 및 구조해석으로부터 $\Delta\delta$에 의한 지점모멘트를 식(10)을 이용하여 Table 4와 같이 산정하고, 지점모멘트의 횡분배 영향을 고려하여 Table 5와 같이 지점모멘트를 산정하였다.

$$\Delta\delta_{(x=7.5)} = 0.053692M_A + 0.053692M_B \quad (10)$$
$$\Delta\delta_{(x=11.25)} = 0.033558M_A + 0.04698M_B$$

Table 3 재하시험에 의한 처짐

구분		변위(mm)							
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
LC 1	측정값	1.853	1.283	0.985	0.413	1.313	0.905	0.700	0.283
	이론값	2.9	2.15	1.33	0.587	2.0	1.48	0.931	0.416
LC 2	측정값	1.093	1.133	1.368	1.095	0.781	0.813	0.859	0.715
	이론값	1.63	1.85	1.85	1.63	1.15	1.27	1.27	1.15
LC 3	측정값	1.104	1.128	1.38	1.118	0.776	0.808	0.857	0.716
	이론값	1.63	1.85	1.85	1.63	1.15	1.27	1.27	1.15
LC 4	측정값	0.405	0.848	1.466	2.131	0.291	0.602	0.953	1.347
	이론값	0.587	1.33	2.15	2.90	0.416	0.931	1.48	2.0

Table 4 재하하중에 의한 지점모멘트

	G 1		G 2		G 3		G 4	
	M_{A1}	M_{B1}	M_{A2}	M_{B2}	M_{A3}	M_{B3}	M_{A4}	M_{B4}
LC1	-17.07	-2.43	-13.68	-2.47	-5.28	-1.15	-1.43	-1.81
LC2	-7.52	-2.49	-12.69	-0.66	-0.80	-8.18	-2.47	-7.50
LC3	-6.43	-3.37	-12.65	-0.80	-0.47	-8.47	-1.04	-8.49
LC4	-2.55	-0.84	-6.91	-2.07	-5.33	-7.41	-1.48	-12.84

$$K = \begin{bmatrix} 0.966 & 0.020 & 0.007 & 0.007 \\ 0.023 & 0.955 & 0.018 & 0.004 \\ 0.004 & 0.018 & 0.955 & 0.023 \\ 0.007 & 0.007 & 0.020 & 0.966 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Table 5 횡분배를 고려한 지점모멘트

	G 1		G 2		G 3		G 4	
	M_{A1}	M_{B1}	M_{A2}	M_{B2}	M_{A3}	M_{B3}	M_{A4}	M_{B4}
LC1	-17.34	-2.44	-13.80	-2.50	-5.17	-1.10	-1.15	-1.82
LC2	-7.49	-2.45	-13.09	-0.44	-0.50	-8.36	-2.40	-7.57
LC3	-6.38	-3.35	-13.08	-0.56	-0.20	-8.64	-0.93	-8.58
LC4	-2.44	-0.68	-7.07	-1.96	-5.41	-7.40	-1.35	-13.12

4.2.2 처짐의 결과분석

본 연구방법에 의한 지점모멘트를 재하하여 산정한 처짐(연구값), 재하시험에 의한 측정값 및 기존의 구조해석에 의한 이론값을 Fig. 7과 같이 비교하였다. LC1 및 LC4와 같이 외측의 주형에 재하된 경우에는 G4 및 G1과 같이 재하위치의 반대쪽 주형에서의 측정값과 연구값의 편차가 측정값과 이론값의 편차와 비

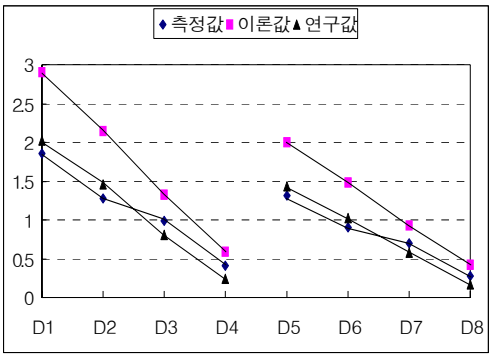


Fig. 7(a) LC1에 의한 처짐

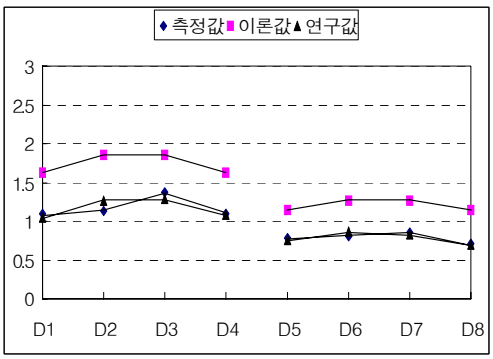


Fig. 7(b) LC2에 의한 처짐

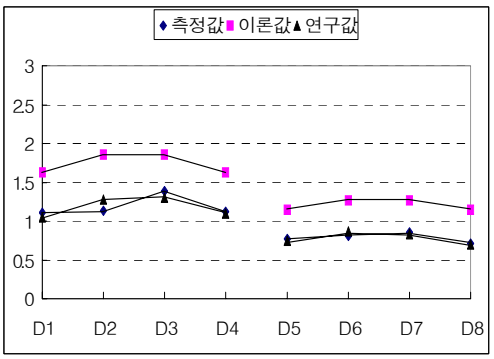


Fig. 7(c) LC3에 의한 처짐

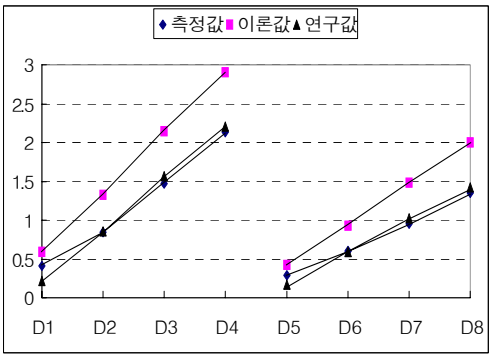


Fig. 7(d) LC4에 의한 처짐

교하여 큰 차이를 보이지 않았으나, LC2 및 LC3와 같이 중앙 주형측에 재하된 경우에는 측정값과 연구값이 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

Fig. 7에 의하면 측정값과 연구값이 유사한 변위특성을 나타내지만 정확하게 일치하지 않는 것은 각 주형의 재료 및 단면의 불균일, 구조적 연속성의 상실[2] 등에 따른 것으로 판단된다.

4.3 내하력 산정

4.3.1 DB하중에 의한 휨모멘트

본 연구에서는 Table 6과 같이 모멘트비 계수 α를 이용하여 재하하중에 의한 지점모멘트를 DB하중에 의한 지점모멘트로 환산하여 Fig. 8과 같이 지점모멘트를 고려하여 DB하중에 의한 휨모멘트도를 얻었다.

Table 6 모멘트비 계수 $\bar{u}$

구분	G 1		G 2		G 3		G 4	
	$\bar{u}_{A1}$	$\bar{u}_{B1}$	$\bar{u}_{A2}$	$\bar{u}_{B2}$	$\bar{u}_{A3}$	$\bar{u}_{B3}$	$\bar{u}_{A4}$	$\bar{u}_{B4}$
LC1	0.711	0.100	0.845	0.153	0.658	0.142	-5.48	-8.67
LC2	0.756	0.250	0.917	0.031	0.035	0.583	0.242	0.772
LC3	0.644	0.341	0.916	0.039	0.014	0.516	0.094	0.875
LC4	-11.62	-3.24	0.899	0.252	0.331	0.452	0.055	0.539

Table 7 DB하중에 대한 지점모멘트

	G1		G2		G3		G4	
	M_{A1}	M_{B1}	M_{A2}	M_{B2}	M_{A3}	M_{B3}	M_{A4}	M_{B4}
DB1	-20.80	-2.15	-17.32	-2.22	-5.51	-0.96	-2.08	-1.56
DB2	-7.69	-2.17	-17.16	-0.39	-0.65	-7.36	-2.46	-6.69
DB3	-6.55	-2.95	-17.14	-0.49	-0.26	-6.52	-0.96	-7.58
DB4	-4.42	-0.58	-7.53	-1.71	-6.79	-6.56	-1.61	-11.57

4.3.2 내하력 산정

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 재하위치에서의 측정값과 연구값은 유사하므로 활하중 휨모멘트 및 응력보정계수는 재하위치에서의 주형에 대한 값을 사용하였으며, 응력보정계수는 충격만을 고려하여 이용하였다.

본 연구는 사하중의 영향은 고려하지 않았는데, 이는 활하중 재하시험에 의한 변위특성으로부터 수행되었으며, 사하중에 의한 정(+)의 휨모멘트에 비하여 지점의 마찰계수 증가에 따른 거동특성을 고려한 지점의 부(-)모멘트는 활하중의 경우에 비해 적게 평가되었기 때문이다.

본 연구방법에 의한 내하력은 기존의 방법에 의한 내하력에 비하여 13~19%정도 감소하였다.

Table 8 기존방법에 의한 내하력 평가

구 분	외 측 부	내 측 부
공칭휨강도 M_n	170.8	170.8
사하중모멘트 M_d	90.76	91.21
활하중모멘트 M_l	34.98	22.43
내하율 RF	0.284	0.433
$K_s = \frac{\delta_{계산}}{\delta_{실측}} \cdot \frac{1+i_{계산}}{1+i_{실측}}$	1.474	1.577
공용내하력 DB	7.5	12.3

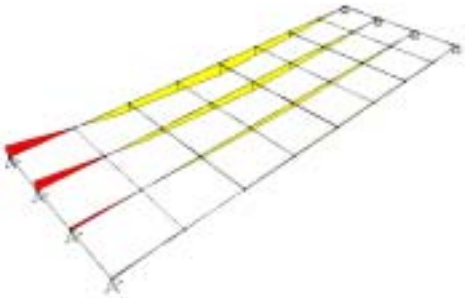


Fig. 8(a) DB1에 의한 휨모멘트도

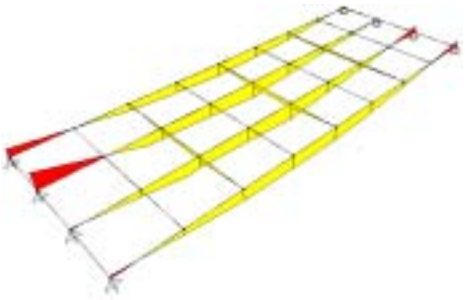


Fig. 8(b) DB2에 의한 휨모멘트도

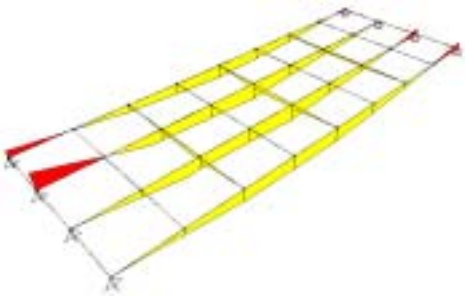


Fig. 8(c) DB3에 의한 휨모멘트도

Fig. 8(d) DB4에 의한 휨모멘트도

Table 9 연구방법에 의한 내하력 평가

구 분	외 측 부	내 측 부
공칭휨강도 M_n	170.8	170.8
사하중모멘트 M_d	90.76	91.21
활하중모멘트 M_l	26.02	16.91
내하율 RF	0.382	0.575
$K_s = \frac{1+i_{계산}}{1+i_{실측}}$	0.942	0.966
공용내하력 DB	6.5	10.0

5. 결 론

본 연구에서는 활하중 재하에 의한 실제 거동특성과 유사한 거동특성을 나타내는 구조해석을 실시하기 위하여 지점의 경계조건, 구조물의 손상에 따른 강성 및 강도 변화를 고려하였으며, 거동특성은 현장실험시 비교적 noise[1]의 영향이 적은 변위특성을 이용하였다. 내하력 산정에 이용되는 응력보정계수는 구조해석과정에서 처짐의 영향을 고려하였으므로 충격의 영향만을 고려한 보정계수로부터 내하력을 산정하였다.

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에 의한 연구값과 재하시험에 의한 측정값은 외측의 주형에 재하 되었을 때 재하위치의 반대쪽 주형의 경우를 제외하고는 거의 일치하는 결과를 나타내었다.
2) 본 연구대상 교량의 내하력은 기존의 방법에 비하여 13%정도 감소하였다. 결국 본 대상교량에 받침을 신설하여 받침의 기능수행[4]이 원활할 경우 내하력이 약 23% 증가하게 된다.
3) 받침손상이 심하여 기능수행이 원활하지 못하거나, 받침이 설치되지 않은 노후교량의 내하력산정은 전문가의 지식과 경험을 토대로 하여 기존 방법과 더불어서 본 연구방법을 사용한다면 보다 다양하고 정밀한 내 하력을 산정할 수 있을 것이다.
4) 본 연구방법을 이용하여 교량받침의 외관상태와 기능 수행도를 고려한 받침의 상태등급을 추정하는데 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 시설안전기술공단, “안전점검 및 정밀안전 진단 세부지침”, 2000.
2. 오병환, 김기수, 신호상, 이응종, “교량구조물 의 개선된 내하력평가기법”, 한국구조물진단학회 제1권 제1호, 1997, 6월, pp.53-64.
3. 구봉근, 신재인, 이상순, “응력보정계수 산정 방법 개선”, 한국구조물진단학회 제5권 제1호, 2001, 1월, pp.169-175.
4. 박창호, 구본성, “교량구조물의 받침교체 효과”, 한국구조물진단학회 제6권 제4호, 2002, 10월, pp.209-217.
5. 한국도로공사, “도로설계실무편람”, 1996.
6. 양창현, “구조역학”, 청문각, 2001.
7. 高島春生, “도로교 횡분배 실용계산법”, 원기술, 1998
8. 김동수, “도로교받침편람”, 과학기술, 1998.
9. 한국토지공사, “교량구조물의 Shoe Setting에 관한 연구”, 1997.
10. 박홍석, 박기태, 이규완, “측정변형율을 이용한 RC구조물의 변위응답 특성분석에 관한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회 제5권 제3호, 2001,7월, pp.173-180.
11. 건설교통부, “교량 정밀안전진단 및 통과 허용하중산정기법 개선”, 1999.
12. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 건설교통부, 2000.
13. AASHTO, "Manual for Codition Evaluation of Bridge", 1994.
14. Demetrios E. Tonias, "Bridge Engineering : Design, Rebabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridge", 1994.
15. Narendra Taly, "Design of Modern High- way Bridge", 1998.

(접수일자 : 2003년 9월 3일)