

응답수정계수와 일반교량의 붕괴방지설계

국 승 규^{1†}

¹부경대학교 토목공학과

Response Modification Factors and No Collapse Design of Typical Bridges

Seung-Kyu Kook^{1†}

¹Department of Civil Engineering, Pukyong Univ., Busan, 48513, Korea

Abstract

The purpose of earthquake resistant design for typical bridges is the 'No Collapse Design' allowing emergency vehicles just after earthquakes. The Roadway Bridge Design Code provides design provisions to carry out such 'No Collapse Design' with a ductile mechanism and response modification factors given for connections and substructure play key role in this procedure. In case of response modification factors for substructure, the Roadway Bridge Design Code provides values considering ductility and redundancy. On the other hand, 'AASHTO LRFD Bridge Design Specifications' provides values considering additionally an artificial factor according to the bridge importance categories divided into critical, essential and others. In this study, a typical bridge with steel bearing connections and reinforced concrete piers is selected and different response modification factors for substructure are applied with design conditions given in the Roadway Bridge Design Code. Based on the comparison study of the design results, supplementary measures are suggested required by applying different response modification factors for substructure.

Keywords : typical bridges, no collapse design, a ductile mechanism, response modification factors, AASHTO LRFD bridge design specifications, importance categories

1. 서 론

일반교량 내진설계의 목적은 강진발생 시 국부적인 손상은 허용하나 낙교는 방지하여 지진발생 직후 긴급차량의 통과를 가능하게 하는 붕괴방지설계(no collapse design)를 수행하는 것이다. 일반교량에서 진동단위를 구성하는 상부구조, 연결부분, 하부구조(교각기둥) 및 기초 중 상부구조와 기초의 손상은 낙교를 유발하여 허용되지 않으므로 하부구조와 연결부분의 손상이 허용된다. 교각기둥의 경우 압축파괴 또는 전단파괴는 낙교를 유발하므로 허용할 수 없고 휨에 의한 기둥단부구역의 항복으로 소성힌지를 형성해야 하며 이에 요구되는 횡철근을 설계하여 연성구조(ductile mechanism)를 구성한다. 반면 강제받침과 같은 연결부분이 파손되는 취성구조

(brittle mechanism)를 구성하는 경우는 전단기 등의 낙교방지장치를 설치하여 붕괴방지설계의 목적은 달성할 수 있으나 상부구조의 파손이 불가피하므로 연성구조에 비해 경제성 측면에서 불리하다. 그러므로 교각기둥 단부구역이 소성힌지를 형성할 수 없는 경우가 아니면 내진설계기준은 기본적으로 연성구조의 구성을 요구하고 있으며 설계방법으로 응답수정계수(response modification factor: R)를 적용하는 스펙트럼 해석법을 제시하고 있다. 스펙트럼해석법은 구조부재의 탄성거동을 가정한 결과를 제시하므로 이 결과를 토대로 교각기둥과 연결부분의 설계강도를 조정하면 교각기둥의 항복이 우선하는 연성구조를 구성할 수 있으며 이 과정에서 설계강도를 조정하는 역할을 담당하는 응답수정계수는 가장 중요한 계수다.

설계기준은 하부구조의 형식 및 연결부분의 위치에 따라 응

[†] Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6075; E-mail: skkook@pknu.ac.kr
Received February 15 2017; Revised February 22 2017;
Accepted February 28 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1 Response modification factor *R*

Substructure	Roadway bridge design code	AASHTO LRFD		
		Importance category		
		Critical	Essential	Others
Wall-type piers-larger dimension	2	1.5	1.5	2.0
Reinforced concrete pile bents • vertical piles only • with batter piles	3	1.5	2.0	3.0
	2	1.5	1.5	2.0
Single columns	3	1.5	2.0	3.0
Steel or composite steel and concrete pile bents • vertical pile only • with batter piles	5	1.5	3.5	5.0
	3	1.5	2.0	3.0
Multiple column bents	5	1.5	3.5	5.0
Connection		All Importance Categories		
Superstructure to abutment	0.8	0.8		
Expansion joints within a span of the superstructure	0.8	0.8		
Column, piers, or pile bents to cap beam or superstructure	1.0	1.0		
Columns or piers to foundations	1.0	1.0		

답수정계수를 Table 1과 같이 제시하고 있으며 하부구조의 경우 도로교설계기준(Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs, 2016)은 연성과 여유력을 반영한 계수로 형식에 따라 하나의 응답수정계수를 적용하도록 제시하고 있으나 AASHTO LRFD 교량설계기준(AASHTO, 2012)은 동일한 형식이라도 교량의 중요도를 핵심, 중요, 일반으로 분류한 인위적 인자를 추가로 고려하여 차등 적용하도록 규정하고 있다. 그러나 두 설계기준 모두 연결부분에 적용하는 응답수정계수는 동일하므로 하부구조 응답수정계수만을 차등 적용하는 경우 설계기준이 의도하는 연성구조의 구성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 검토가 요구된다. 또한 중앙진지역의 설계지진은 강진지역의 1/3 수준이므로 하부구조 응답수정계수를 적용하여 교각기둥 단면을 결정하면 일반설계에서 요구되는 최소 단면을 만족할 수 없는 경우가 발생하며 이러한 경우 실제응답수정계수가 설계기준에서 제시한 응답수정계수와 차이가 나고 이는 차등 적용하는 것과 같은 상황이 된다. 이 연구에서는 일반교량을 선정하고 하부구조 응답수정계수를 차등 적용한 설계결과를 바탕으로 연성구조의 구성여부를 비교, 검토하여 설계기준에 요구되는 보완사항을 제시하고자 한다.

교각으로 원형 교각기둥이다. 스펙트럼해석을 수행하기 위해 범용구조해석프로그램 Midas/Civil(Midas IT, 2010)을 사용하였으며 3차원 해석모델은 Fig. 2와 같이 상판은 플레이트 요소, 강상자형/가로보/캡빔/교각기둥은 보요소로 모델링하고 상부구조 단면의 도심 위치에 배치한 상부구조 요소와 강제받침의 연결 및 강제받침과 캡빔 보요소와의 연결은 무한강성

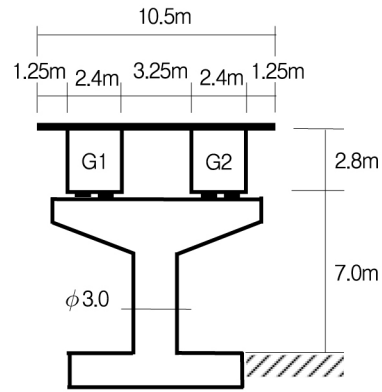


Fig. 1 Section view

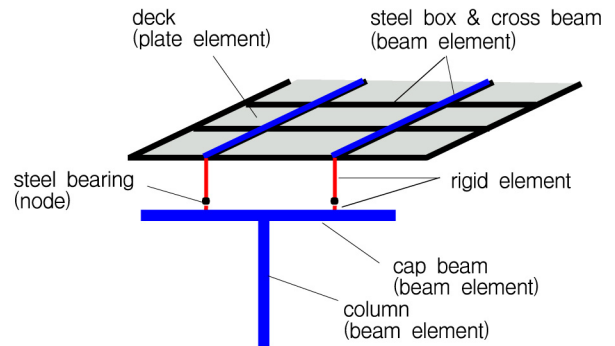


Fig. 2 Spatial model

2. 붕괴방지설계

2.1 해석대상교량

해석대상교량으로 선정한 일반교량은 총연장 265m(50+3@55+50)의 5경간교로 Fig. 1에 제시한 교각위치의 횡단면도와 같이 상부구조는 콘크리트 상판, 2연 강상자형 및 가로보이고 연결부분은 강제받침이며 하부구조는 T형 콘크리트

요소를 사용하였다. 강제받침은 그 위치에 연결된 상/하 구조 부재의 절점(2개)을 배치하고 고정/가동 기능을 반영하여 2개 절점이 구속방향으로만 단면력을 전달하는 것으로 모델링하였으며 경계조건은 교대에 설치된 강제받침을 그 기능에 상응하는 이동/회전 지점, 교각기둥 하단을 고정지점으로 설정하였다.

설계조건으로 중약진지역에 적용하는 도로교설계기준에서 지진구역 I, 내진 I 등급교, 지반종류 II를 설정하였으므로 지진 구역계수 0.11과 위험도계수 1.4에 의해 중력가속도로 정규화한 가속도계수 0.154 및 지반종류 II에 의한 지반계수 1.2가 적용된다. 스펙트럼해석에 고려한 모드 수는 50개이며 교축/교축직각 방향 해석으로 구한 직교지진력은 교축방향이 증가 되는 하중경우 1(교축 100%, 교축직각 30%)과 교축직각 방향이 증가 되는 하중경우 2(교축 30%, 교축직각 100%)로 구분하고 두 경우에 사하중을 조합한 하중조합 1, 2(Load Case 1 & 2; 이하 LC1, LC2)를 구성한다. 고정받침이 설치된 교각에서 강제받침과 교각기둥의 설계에 사용하는 작용력(action force)으로 구한 고정받침의 수평력(H_a)과 교각기둥 하단의 휨모멘트(M_a)는 Table 2와 같다.

Table 2 Action force(analysis bridge)

Load case	Structural member		Action force		
			Longi.	Trans.	Sum
LC1	Steel bearing	H_a (kN)	2511	941	2681
	Pier column	M_a (kN·m)	71104	12833	72253
LC2	Steel bearing	H_a (kN)	879	3006	3132
	Pier column	M_a (kN·m)	21731	36022	42069

강제받침과 교각기둥의 실제 항복강도분포가 산정되면 탄성거동을 가정하여 구한 작용력과의 비교로 연성구조 또는 취성구조를 결정할 수 있다(Kook, 2014). 탄성해석으로 구한 작용력을 사용하므로 콘크리트 교각기둥의 경우는 콘크리트의 균열 이전에 교각기둥 전 단면이 압축응력 상태를 전제하여 강도를 결정한다는 것을 유의해야 한다. 교각기둥 휨모멘트의 실제 항복강도분포 하한과 상한은 각각 설계강도(design strength: M_d)와 초과강도(overstrength: M_o)이고 공칭강도(nominal strength: M_n)를 P-M상관도(Roh, 2005)로 산정하면 도로교설계기준 8.10.2.4(1) 조항에 의해 설계강도 M_d 는 강도감소계수 1.0을 적용하여 결정하므로 공칭강도와 같다. 도로교설계기준 8.10.2.5(5) 조항에 의해 초과강도 M_o 는 식 (1)의 휨초과강도계수 λ_o 와 M_n 의 곱으로 결정되며

식 (1)에서 R 은 실제응답수정계수($R_d = M_o / M_d$)다. Table 3은 $\phi 3.0m$ 교각기둥의 M_d 와 M_o 를 산정하고 Table 2의 작용력 M_a 로 정규화한 강도/작용력 비(M_d / M_a , M_o / M_a)를 제시한 것으로 LC1/LC2의 λ_o (1.328/1.295)는 AASHTO LRFD 교량설계기준 3.10.9.4.3b에 제시된 휨초과강도계수 1.3과 큰 차이는 없다. Fig. 3은 교각기둥의 항복강도분포를 강도/작용력 비를 사용하여 항복범위로 도시한 것이며 LC1/LC2의 경우 각각 설계지진 작용력의 64.4%~85.5%/110.7%~143.3%가 항복이 발생하는 범위라는 것을 제시한다.

$$\lambda_o = 1.25 + 0.05R \quad (1)$$

도로교설계기준은 연성구조를 구성하기 위해 강제받침과 교각기둥의 작용력에 각각 응답수정계수 $R=1$ 과 $R=3$ 을 적용하여 산정한 설계지진력에 설계강도를 맞추도록 규정한 것이므로 강제받침 항복범위의 하한은 1.0(실선), 교각기둥 항복범위의 하한은 0.33(점선)에 근접하도록 조정해야 하며 LC1/LC2 항복범위가 동일할 수는 없으므로 작용력이 크게 산정되는 조합(강제받침 LC2, 교각기둥 LC1)으로 설계를 수행해야 한다. 실제응답수정계수 $R_d=1.55$ 인 해석대상교량은 교각기둥 항복범위의 하한이 0.644로 도로교설계기준을 만족하지 못하며 또한 강제받침의 설계용량(강제받침 항복범위의 하한)을 1.0에 해당하는 설계지진력으로 결정하면 LC1만 연성 구조를 구성한다. LC1/LC2에서 모두 연성구조를 구성하기 위해서는 강제받침의 설계용량을 설계지진력의 143.3%(LC2 교각기둥 항복범위의 상한)에 해당하는 4488kN(=1.433×3132)보다 크게 결정해야 한다.

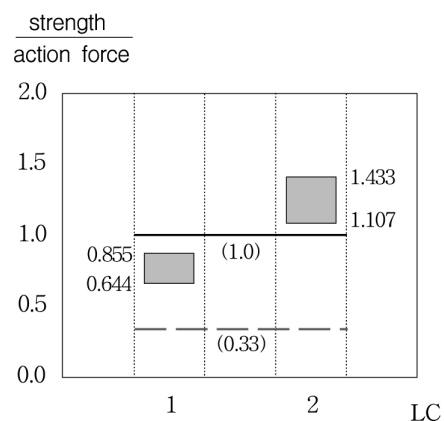


Fig. 3 Yield range of pier column($\phi 3.0m$)

Table 3 Strength / action force ratio(analysis bridge)

ϕ (m)	Load case	M_a (kN·m)	R (-)	M_o / R (kN·m)	M_d (kN·m)	R_d (-)	λ_o (-)	M_o (kN·m)	M_d / M_a (-)	M_o / M_a (-)
3.0	LC1	72253	3	24084	46550	1.55	1.328	61800	0.644	0.855
	LC2	42069		14023		0.90	1.295	60282	1.107	1.433

2.2 응답수정계수의 차등 적용

도로교설계기준에서 제시한 하부구조 응답수정계수 $R=3$ 에 부합하도록 Table 3에서 산정된 교각기둥의 설계강도(M_d) 46550kN·m와 설계지진력(M_a/R) 24084kN·m의 차이를 반영한 시산법을 적용하여 교각기둥 $\phi 3.0\text{m}$ 를 $\phi 2.3\text{m}$ 로 설계변경하고 작용력, R_d 및 강도/작용력 비를 구한 결과는 Table 4와 같다. LC1의 $R_d=2.76$ 은 $R=3$ 에 부합한다고 할 수 있으며 Fig. 4에서 교각기둥 항복범위의 하한이 0.33의 점선에 근접한 것으로 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4는 강제받침의 설계용량을 1.0에 해당하는 설계지진력으로 결정하면 LC1/LC2 모두 연성구조를 구성한다는 것을 제시한다.

AASHTO LRFD 교량설계기준에서 추가로 규정한 하부구조 응답수정계수 $R=2$, $R=1.5$ 를 적용한 설계결과와 $R=3$ 을 적용한 설계결과를 비교, 검토하기 위해 $R=2$ 와 $R=1.5$ 에 대해 동일한 설계과정을 수행하여 교각기둥을 각각 $\phi 2.8\text{m}$, $\phi 3.1\text{m}$ 로 설계변경하고 작용력, R_d 및 강도/작용력 비를 구한 결과는 Table 5와 같고 Fig. 5와 Fig. 6은 교각기둥의 항복범위를 도시한 것이다. Table 5의 R_d 는 1.77($\phi 2.8\text{m}$), 1.43($\phi 3.1\text{m}$)으로 각각 $R=2$, $R=1.5$ 에 부합한다고 할 수

있으며 Fig. 5와 Fig. 6에서 교각기둥 항복범위의 하한이 각각 0.50, 0.67의 점선에 근접한 것으로 확인할 수 있다. 그러나 두 경우 모두 강제받침의 설계용량을 1.0에 해당하는 설계지진력으로 결정하면 LC1의 경우만 연성구조를 구성한다.

하부구조 응답수정계수를 차등 적용하여 내진설계기준에서 의도하는 연성구조에 의한 붕괴방지설계를 수행한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 연성구조를 구성하는 경우 Fig. 4~6에서 확인할 수 있는

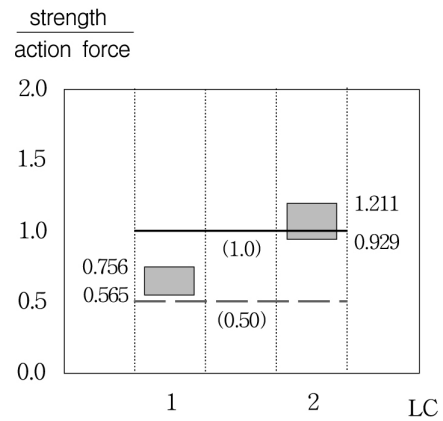


Fig. 5 Yield range of pier column($\phi 2.8\text{m}$)

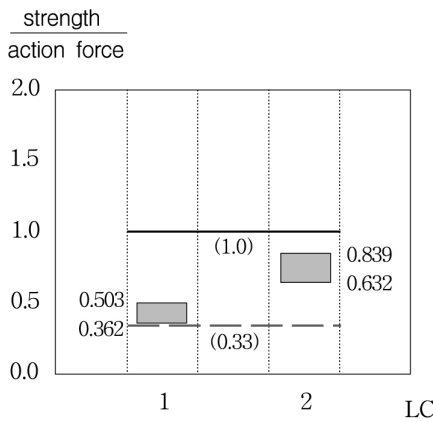


Fig. 4 Yield range of pier column($\phi 2.3\text{m}$)

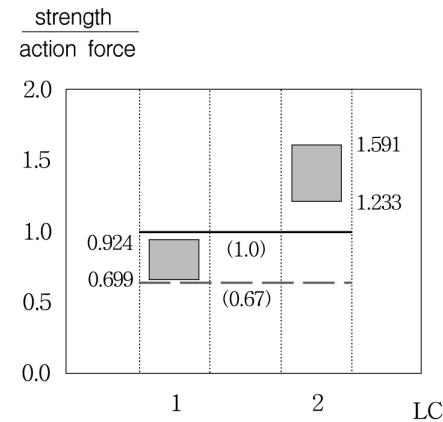


Fig. 6 Yield range of pier column($\phi 3.1\text{m}$)

Table 4 Strength / action force ratio($R=3$)

ϕ (m)	Load case	M_a (kN·m)	R (-)	M_a/R (kN·m)	M_d (kN·m)	R_d (-)	λ_o (-)	M_o (kN·m)	M_d/M_a (-)	M_o/M_a (-)
2.3	LC1	64961	3	21654	23520	2.76	1.388	32646	0.362	0.503
	LC2	37242		1.58		1.329	31258	0.632	0.839	

Table 5 Strength / action force ratio($R=2$, $R=1.5$)

ϕ (m)	Load case	M_a (kN·m)	R (-)	M_a/R (kN·m)	M_d (kN·m)	R_d (-)	λ_o (-)	M_o (kN·m)	M_d/M_a (-)	M_o/M_a (-)
2.8	LC1	69366	2	34683	39200	1.77	1.338	52450	0.565	0.756
	LC2	42205		1.08		1.304	51110	0.929	1.211	
3.1	LC1	73562	1.5	49041	51450	1.43	1.321	67990	0.699	0.924
	LC2	41734		0.81		1.291	66399	1.233	1.591	

Table 6 Required capacity of steel bearing

ϕ (m)	H_u (kN)	R (-)	H_u/R (kN)	M_o/M_a (-)	H_{req} (kN)
2.3	2722	1	2722	0.821	2235
2.8	3206		3206	1.207	3870
3.1	3074		3074	1.603	4928

기능수행수준(탄성거동 영역의 한계)은 LC1 교각기둥 항복범위의 하한이므로 각각 설계지진 작용력의 36.2%, 56.5%, 69.9%가 된다. 그러므로 하부구조 응답수정계수의 차등 적용에 의해 중요한 교량일수록 더 강한 지진에도 정상적인 기능을 수행하도록 기능수행수준을 차별화하는 설계가 수행된다는 것을 확인할 수 있다 (Kook, 2012).

2) Table 6은 연결부분에 $R=1$ 을 적용하여 강제반침의 설계용량으로 구한 설계지진력(H_u/R) 및 Fig. 4~6에서 구한 연성구조에 요구되는 강제반침의 소요용량(H_{req})을 비교한 것이다. ϕ 2.3m의 경우는 설계지진력이 소요용량 이상($H_u/R > H_{req}$)이나 ϕ 2.8m, ϕ 3.1m의 경우는 설계지진력이 소요용량 미만($H_u/R < H_{req}$)이다. 그러므로 하부구조 응답수정계수를 차등 적용하고 연성구조를 구성하기 위해서는 연결부분 응답수정계수의 적절한 차등 적용을 제시하거나 하부구조의 항복범위에 의한 확인 절차를 수행하여 강제반침의 설계용량을 결정해야 한다.

3. 결 론

일반교량의 연성구조에 의한 붕괴방지설계에 사용되는 탄성 해석법인 스펙트럼해석법에서 응답수정계수는 강진발생 시 국부적인 손상을 하부구조에 국한하도록 구조부재의 설계강도를 조정하는 역할을 한다. 하부구조 응답수정계수는 기본적으로

하부구조 형식의 연성과 여유력을 반영한 계수이나 동일한 형식이라도 교량의 중요도를 고려하여 차등 적용하는 계수도 제시되어 있다. 이 연구에서는 일반교량을 대상으로 교량의 중요도 구분에 의해 하부구조 응답수정계수를 차등 적용한 설계결과를 바탕으로 연성구조의 구성여부를 비교, 검토하였다. 하부구조 응답수정계수를 차등 적용하고 연성구조의 구성으로 붕괴방지 설계를 수행하기 위해서는 연결부분 응답수정계수의 적절한 차등 적용 또는 하부구조의 항복범위에 의한 확인 절차를 수행하여 연결부분의 설계강도를 결정하는 조항이 설계기준에 보완되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

AASHTO (2012) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units.
 Kook, S.K. (2012) Serviceability Limit State and Response Modification Factors, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(2), pp.149~154.
 Kook, S.K. (2014) No Collapse Design for Typical Bridges, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(3), pp.163~172.
 Roh, D.O. (2005) RC-Mania Diagram.
 Midas IT (2010) Midas/Civil User Manual, Ver. 6.3.0 (Release no. 1), Midas IT Co. Ltd..
 Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs (2016) Roadway Bridge Design Code, Chapter 8: Earthquake Resistant Design, pp.8-1~8-44.

요 지

일반교량 내진설계의 목적은 지진발생 직후에 긴급차량의 통과를 허용하도록 하는 ‘붕괴방지설계’의 수행이다. 도로교설계 기준은 연성구조를 구성하여 ‘붕괴방지설계’를 수행하는 규정을 제시하고 있으며 이 과정에서 연결부분과 하부구조에 적용하는 응답수정계수가 핵심적인 역할을 한다. 하부구조 응답수정계수의 경우 도로교설계기준은 연성과 여유력을 고려한 계수인 반면 AASHTO LRFD 교량설계기준은 교량의 중요도를 핵심, 중요 및 일반으로 구분한 인위적인 인자를 추가로 반영한 계수를 제시하고 있다. 이 연구에서는 강제반침과 철근콘크리트 교각기둥으로 구성된 일반교량을 선정하고 도로교설계기준의 설계조건과 함께 하부구조 응답수정계수를 차등 적용하는 경우의 설계결과를 비교, 검토하였으며 이로부터 하부구조 응답수정계수의 차등 적용 시 설계기준에 요구되는 보완사항을 제시하였다.

핵심용어 : 일반교량, 붕괴방지설계, 연성구조, 응답수정계수, AASHTO LRFD 교량설계기준, 중요도