

기능수행수준과 응답수정계수

Serviceability Limit State and Response Modification Factors

국 승 규†

Kook, Seung-Kyu

요 지

도로교설계기준 내진설계편은 붕괴방지수준의 확보를 설계절차에 의해 규정하고 있는 반면 기능수행수준의 확보에 대한 요구사항은 명확하게 제시하고 있지 않다. 붕괴방지수준의 확보를 위해 기본적으로 제시된 설계방법은 응답수정계수를 사용하는 스펙트럼해석법으로, 기능수행수준은 설계과정에 적용되는 위험도계수와 응답수정계수에 의해 결정 되어진다. 위험도계수는 교량의 중요도에 따라 단순하게 적용할 수 있으나 중약진지역에서의 응답수정계수 적용은 설계조건에 따라 다른 결과를 갖게 된다. 이 연구에서는 중약진지역의 일반 도로교량을 대상으로 내진설계를 수행하여 기능수행수준의 결정과정을 검토하고, 이 결과를 토대로 기능수행수준의 확보와 관련하여 내진설계편에 보완해야 하는 사항을 제시하였다.

핵심용어 : 내진설계편, 기능수행수준, 스펙트럼해석법, 위험도계수, 응답수정계수, 중약진지역

Abstract

While the Earthquake Resistant Design Part of Korean Roadway Bridge Design Code provides design procedures for the No Collapse Requirement, requirements for the Serviceability Limit State are not clearly provided. The basic design method to meet the No Collapse Requirement is the spectrum analysis method using response modification factors and the Serviceability Limit State is determined by both the importance factor and the response modification factor applied in the design procedure. The importance factor can be simply applied according to the bridge importance category, however, in moderate/low seismic regions the application of the response modification factor may bring different result according to design conditions. In this study, for a typical bridge in the moderate/low seismic regions, determination procedures for the Serviceability Limit State are reviewed by carrying out earthquake resistant design and supplementary provisions for the Earthquake Resistant Design Part are identified based on the study results.

Keywords : *Earthquake Resistant Design Part, Serviceability Limit State, spectrum analysis method, importance factor, response modification factors, moderate/low seismic regions*

1. 서 론

현재 교량 구조물에 대한 내진설계가 도입된 후 십년 이상 경과하였으며, 일반교량에 대한 내진설계는 도로교설계기준(국토해양부, 2010) 내진설계편이 기준으로 제시되어 있다. 내진설계편은 붕괴방지수준의 확보, 즉 지진발생 이후 최소한 긴급차량의 통과가 가능하도록 설계하는 것을 그 목적으로 제시하고 있다. 붕괴방지수준의 확보는 연성 또는 취성 파괴메카니즘의 검토에 의해 낙교방지대책이 확인되어야 하며, 경제성을 감안하여 취성보다 연성파괴메카니즘의 구성을

요구하고 있다.

상·하부구조 및 연결부분으로 구성되는 일반교량의 연성 파괴메카니즘은 하부구조(교각기둥)의 연성거동에 의한 소성 힌지 생성과정을 이용, 연결부분과 상부구조에 전달되는 지진하중이 감소하도록 하여 낙교를 방지하는 구조시스템을 의미한다. 이러한 연성파괴메카니즘을 구성하기 위한 기본 설계방법으로 응답수정계수(Response Modification factor: 이하 R-factor)를 적용하는 스펙트럼해석법을 내진설계편은 제시하고 있다.

스펙트럼해석법은 탄성해석법으로 구조부재의 소성거동을

† 책임저자, 정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수
Tel: 051-629-6075 ; Fax: 051-629-6063
E-mail: skkook@pknu.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

표 1 응답수정계수(도로교 설계기준)

하 부 구 조	R
벽식 교각	2
철근콘크리트 말뚝 가구(Bent)	
1. 수직말뚝만 사용한 경우	3
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2
단일 기둥	3
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구	
1. 수직말뚝만 사용한 경우	5
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3
다주 가구	5
연 결 부 분	R
상부구조와 교대	0.8
상부구조의 한 시간내의 신축이음	0.8
기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
기둥 또는 교각과 기초	1.0

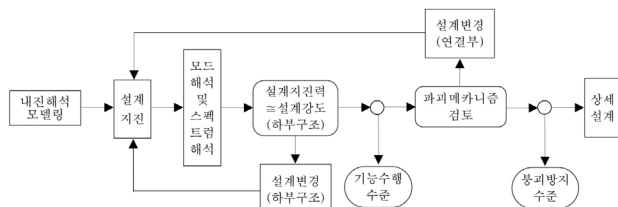


그림 1 일반교량의 내진설계 흐름도

반영하지 못하므로 하부구조와 연결부분의 설계강도를 인위적으로 조정하는 계수, 즉 표 1에 제시되어 있는 응답수정계수로 연결부분보다 하부구조의 항복이 우선하도록 설계강도를 조정하여 연성파괴메카니즘을 확보하고자 하는 것이다. 그러나 응답수정계수의 단순적용만으로는 불충분하므로 구조부재의 초과강도(overstrength)를 고려한 파괴메카니즘의 검토가 요구된다(국승규, 2004). 연성파괴메카니즘이 확보된 경우는 하부구조의 탄성한계가 교량 구조물의 탄성한계가 되고 연결부분의 설계강도는 파괴메카니즘 검토에 의해 결정된다. 이와 같은 설계과정은 그림 1의 흐름도와 같다.

반면 내진설계편은 기능수행수준의 확보에 대한 요구사항은 명시하고 있지 않다. 기능수행수준은 지진 시 교량의 손상정도를 제한하여 지진 발생 이후에도 정상적인 교량기능을 유지하자는 것이다. 즉, 구조적으로는 탄성거동의 한계를 의미하는 것이므로 연성파괴메카니즘의 경우 하부구조의 탄성한계가 된다. 붕괴방지수준과 함께 기능수행수준 또한 지진 발생 이후의 방재측면에서 중요하다. 기능수행수준을 경계로 구조물의 기능과 역할이 다르게 설정되므로 피해복구에 필수적인 주요 간선도로의 교량들이 각기 다른 기능수행수준을 갖는다면 피해복구에 지대한 영향을 주게 된다. 기능수행수준과 관련하여 내진설계편은 교량을 중요도에 따라 I, II등급으로 구분하고 위험도계수를 반영하고 있다. 위험도계수는

표 2 응답수정계수(LRFD Bridge Design Specification)

하 부 구 조	중요도		
	핵심	중요	보통
벽식 교각	1.5	1.5	2.0
철근콘크리트 말뚝 가구(Bent)			
• 수직말뚝만 사용한 경우	1.5	2.0	3.0
• 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5	1.5	2.0
단일 기둥	1.5	2.0	3.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝 가구			
• 수직말뚝만 사용한 경우	1.5	3.5	5.0
• 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	1.5	2.0	3.0
다주 가구	1.5	3.5	5.0
연 결 부 분	모든 중요도		
상부구조와 교대	0.8		
상부구조의 한 시간내의 신축이음	0.8		
기둥, 교각 또는 말뚝 가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0		
기둥 또는 교각과 기초	1.0		

가속도계수의 크기를 조정하며 이는 중요한 교량의 기능수행수준을 높게 설계하는데 그 목적이 있다.

하부구조에 적용하는 응답수정계수는 구조부재의 연성(Ductility)과 여유력(Redundancy)을 고려하여 결정한다. Eurocode 8, Part 2: Bridges(CEN, 1998)는 응답수정계수와 동일한 역할을 하는 거동계수 q 를 제시하고 있으며 구조부재의 소성거동에 의한 에너지소산능력을 바탕으로 연성 및 제한적 연성으로 구분하여 적용하고 있다. 그러나 표 2에 제시되어 있는 LRFD Bridge Design Specification(AASHTO, 2004)에서는 중요도가 높은 교량에 상대적으로 작은 응답수정계수를 적용하도록 규정하고 있다. 연성파괴메카니즘의 경우 하부구조의 탄성한계를 결정하는 역할을 하는 응답수정계수가 차등 적용되면 기능수행수준을 달리 설계하는 결과를 초래한다.

동일한 하부구조에 응답수정계수를 차등 적용한다는 사실은 중앙진지역 교량의 내진설계에도 의미가 있다. 중앙진지역의 경우 내진설계가 아닌 일반설계에서 결정된 하부구조의 최소 설계강도를 응답수정계수에 의해 감소할 수 없는 경우가 발생하기 때문이다. 이러한 경우는 응답수정이 이루어지는 값이 실제응답수정계수가 되고 이로부터 기능수행수준이 결정된다.

이상과 같이 일반교량의 내진설계에서 기능수행수준의 결정에 영향을 갖는 계수는 위험도계수와 응답수정계수이다. 이 연구에서는 중앙진지역 일반교량을 해석대상교량으로 선정, 응답수정계수를 적용하는 스펙트럼해석법을 수행하였다. 이로부터 기능수행수준의 결정에 참여하는 두 계수의 역할을 검토하고 이를 바탕으로 기능수행수준에 대한 설계기준의 보완사항을 제시하고자 한다.

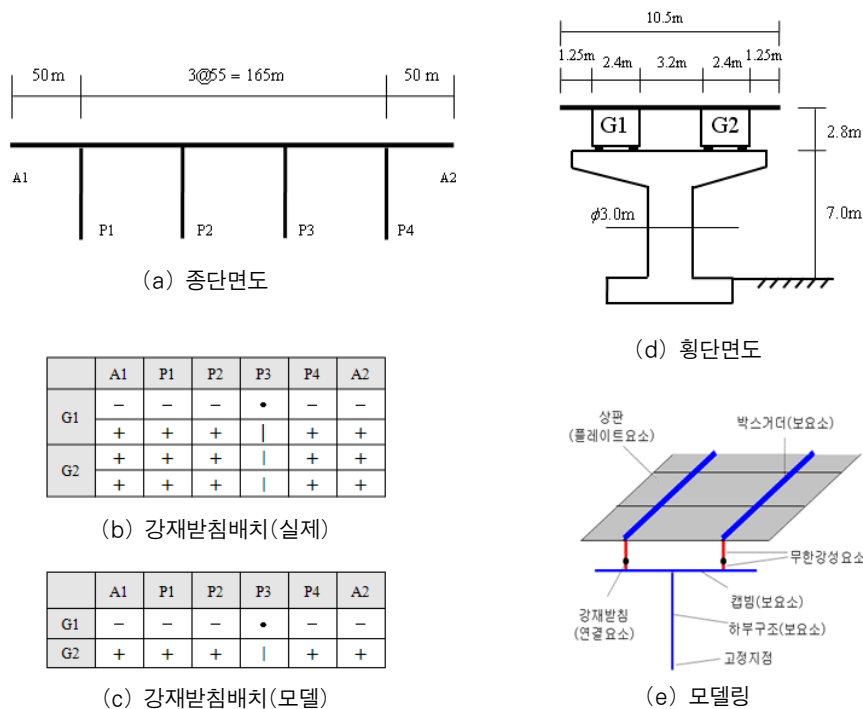


그림 2 해석대상교량

2. 중약진지역 일반교량

2.1 해석대상교량

이 연구에서 중약진지역 일반교량으로 선정한 해석대상교량은 그림 2와 같다. 총연장 265m의 5경간 강상자형교의 종단면도 및 교각위치의 횡단면도는 그림 2(a), (d)와 같고 하부구조는 T형 콘크리트 교각으로 교각기둥은 원형단면(ϕ 3.0m)으로 구성되어 있다. 구조해석프로그램 Midas/Civil (Midas IT, 2001)을 사용하여 그림 2(e)에 제시한 바와 같이 해석모델을 구성하였다(국승규 등, 2002). 상판은 플레이트 요소를 사용하고 강상자형, 크로스빔, 캡빔 및 교각기둥은 보요소를 사용하였다. 상부구조의 중심위치에 상판 플레이트 요소와 강상자형을 보요소로 모델링하여 배치하였으므로, 이들 요소의 절점과 강재받침위치 절점의 연결요소 및 강재받침위치 절점과 캡빔 보요소의 해당 절점과의 연결요소는 무한강성요소를 사용하였다. 따라서 강재받침 배치의 실제와 모델링은 그림 2(b), (c)와 같다. 강재받침의 수평방향 고정/가동 기능은 강재받침위치에서 연결된 절점간의 구속방향으로만 단면력을 전달하도록 모델링하고 교각하부(기초)를 고정단으로 경계조건을 설정하였다.

2.2 내진설계 조건

내진설계 조건은 지진구역 I, 내진 I 등급교, 지반종류 II로

설정하였다. 지진구역계수 0.11, 내진등급에 의해 평균재현주기 1000년에 해당하는 위험도계수 1.4를 적용하여 가속도계수(A)는 0.154, 지반종류 II에 해당하는 지반계수(S) 1.2를 적용하였다.

3. 기능수행수준의 결정

3.1 모드 및 스펙트럼 해석

해석대상교량의 기능수행수준은 응답수정계수를 사용하는 다중모드스펙트럼해석법을 적용한 설계결과로부터 결정된다. 모드해석에는 50개의 모드를 고려하였으며, 교축방향 최저차 모드의 주기 0.54초, 탄성지진응답계수(C_s) 0.335, 질량기여도 42.6% 및 교축직각방향 최저차모드의 주기 0.39초, C_s 0.385, 질량기여도 53.6%를 확인하였다.

내진설계면에서 제시하고 있는 설계지진 시 작용력은 다음과 같이 산정한다. 교축방향 및 교축직각방향 스펙트럼을 적용하여 해석한 결과로부터 구한 탄성지진력(직교지진력)은 하중 경우 1(교축방향 100%+교축직각방향 30%)과 하중 경우 2(교축방향 30%+교축직각방향 100%)로 구분한다. 이와 같이 두 경우로 구분하는 것은 지진하중의 방향과 교량의 두 직교축의 방향이 불일치하는 경우를 감안한 것이다. 두 하중경우와 사하중을 조합, 하중조합 1과 2(Load Case 1 & 2; 이하 LC 1, LC 2)를 구성하여 단면력을 결정한다.

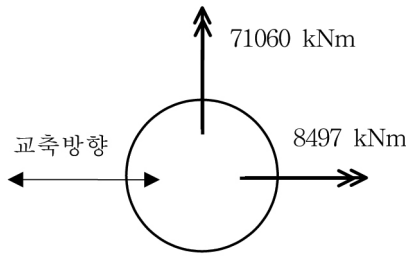


그림 3 P3 교각기둥의 단면력(LC1)

교량의 파괴메카니즘은 두 하중조합에 대해 모두 검토하여야 하며 T형 교각 일반교량의 내진설계에서 검토해야 하는 작용력은 강재받침(연결부분)에 작용하는 수평력과 교각기둥 하부의 모멘트이다. 해석대상교량의 경우 모든 교각기둥에서 구한 하중조합을 검토한 결과, 그림 3과 같이 고정단이 설치된 P3 교각기둥의 하중조합 LC1에서 가장 큰 단면력이 발생하였으며 작용력은 71566kN·m(제곱합평균)로 결정되었다.

3.2 기능수행수준

해석대상교량 교각기둥(Φ3.0m)의 설계강도는 그림 4의 P-M상관도(이석중, 1999)에 제시한 바와 같이 36750kN·m (3750tf·m)로 작용력 71566kN·m의 0.51배이다. 이를 응답수정계수로 환산하면, 즉 실제응답수정계수는 1.95가 되므로 내진설계편에 제시되어 있는 설계응답수정계수 R=3과는 차이가 있다.

단주교각의 경우 연성확보에 요구되는 상세설계가 만족된다면 실제응답수정계수가 최대 3까지 허용된다는 것을 내진설계기준은 제시하고 있다. 그러므로 해석대상교량의 경우 설계응답수정계수 R=3을 적용하면 설계지진력은 23855kN·m가 되고, 이에 상당하는 설계강도를 갖는 교각기둥을 결정하는 작업이 요구된다. 교각기둥의 설계변경을 수행하지 않는

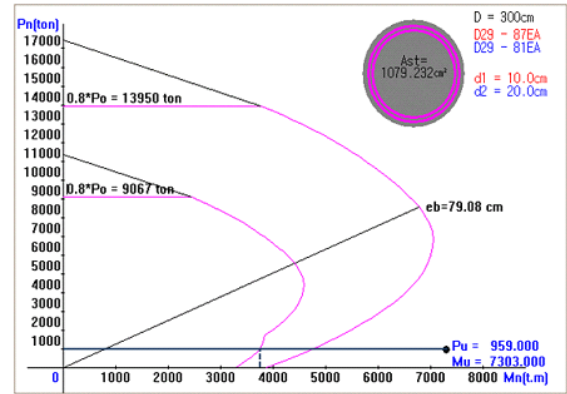


그림 4 P-M상관도(P3 교각기둥 Φ3.0m)

다면 기능수행수준은 설계지진의 0.51배인 0.079g가 된다. 물론 이러한 결론은 연결부분보다 교각기둥의 항복이 우선이라는 전제 하에 성립하며, 또한 설계강도(최소탄성한계)를 기준한 값이므로 기능수행수준은 그 이상, 즉 공칭강도 또는 초과강도(overstrength)까지 예상할 수 있다. 그러나 이러한 항복강도분포는 붕괴방지수준의 결정(파괴메카니즘 검토)에는 반드시 고려하여야 하는 반면, 구조물의 탄성거동한계를 의미하는 기능수행수준의 결정에는 고려할 수 없다.

LRFD Bridge Design Specification은 표 2와 같이 교량의 중요도에 따라 응답수정계수를 달리 적용하도록 하고 있다. 해석대상교량의 경우 중요도에 따라 R=1.5 또는 R=2.0을 적용하면 설계지진력은 47711kN·m 또는 35783kN·m가 되므로 이에 상당하는 설계강도를 갖는 교각기둥을 결정하게 된다. 이와 같이 응답수정계수를 달리 적용하는 경우 (R=1.5, R=2.0 또는 R=3.0)에도 설계응답수정계수에 가장 근접하는 실제응답수정계수를 갖는 교각기둥은 유일하게 결정할 수 있다(국승규, 2009).

그림 5와 표 3은 교각기둥의 단면을 변경하여 구한 작용력, 응답수정계수의 차등적용에 의한 설계지진력 및 설계강도를 정리한 것이다. 그림 5에서 설계지진력과 설계강도의

표 3 응답수정계수의 차등적용

Φ(m)	작용력 ^① (kN·m)	설계지진력 ^② (kN·m)			설계강도 ^③ (kN·m)	기둥단면 결정 ②/③≅1.0			실제응답 수정계수 ①/③=④	기능 수행수준 0.154g/④
		R=3	R=2	R=1.5		R=3	R=2	R=1.5		
2.0	61490	20497	30745	40993	11750	1.74	2.62	3.49	5.23	0.029g
2.3	61687	20562	30844	41125	16660	1.23	1.85	2.47	3.70	0.042g
2.4	62514	20838	31257	41676	18620	1.12	1.68	2.24	3.36	0.046g
2.5	64308	21436	32154	42872	21550	(0.99)	1.49	1.99	(2.98)	(0.052g)
2.7	65758	21919	32879	43839	26950	0.81	1.22	1.63	2.44	0.063g
3.0	71566	23855	35783	47711	36750	0.65	(0.97)	1.30	(1.95)	(0.079g)
3.2	85239	28413	42620	56826	46080	0.62	0.92	1.23	1.85	0.083g
3.5	92071	30690	46036	61381	58800	0.52	0.78	1.04	1.57	0.098g
3.6	92816	30939	46408	61877	62720	0.49	0.74	(0.99)	(1.48)	(0.104g)
3.7	93551	31184	46776	62367	68600	0.45	0.68	0.91	1.36	0.113g

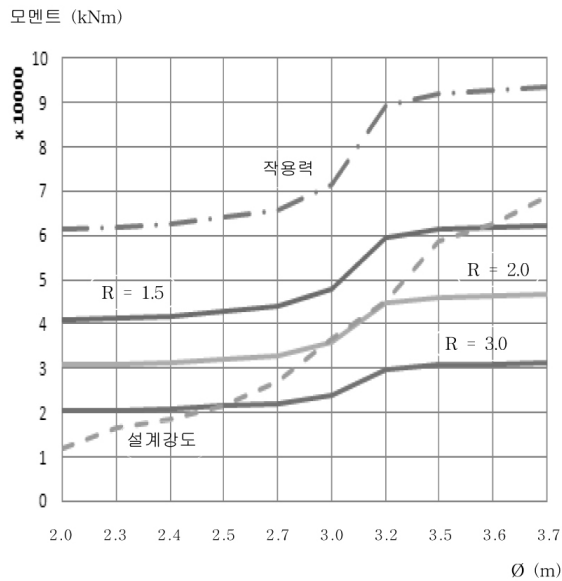


그림 5 응답수정계수와 교각기둥단면(내진등급교)

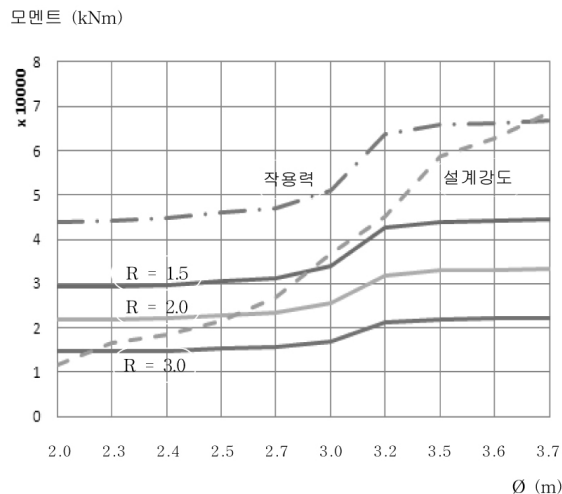


그림 6 응답수정계수와 교각기둥단면(내진II등급교)

교차점이 구하고자 하는 교각기둥의 단면이라는 것을 알 수 있다. 즉, 설계응답수정계수 $R=3.0$ 을 적용하여 구한 설계지진력에 상응하는 교각기둥 단면은 $\phi 2.5\text{m}$, $R=2.0$ 을 적용하면 $\phi 3.0\text{m}$, $R=1.5$ 를 적용하면 $\phi 3.6\text{m}$ 로 결정되며, 표 3에 제시한 바와 같이 각 경우의 실제응답수정계수와 기능수행수준은 각각 2.98, 1.95, 1.48 및 0.052g, 0.079g, 0.104g가 된다.

해석대상교량이 내진II등급 교량으로 분류되는 경우, 즉 위험도계수 1.0을 적용하는 경우의 해석결과는 그림 6과 같다. 설계응답수정계수 $R=3.0$, $R=2.0$, $R=1.5$ 를 적용하여 구한 교각기둥 단면은 $\phi 2.2\text{m}$, $\phi 2.5\text{m}$, $\phi 2.9\text{m}$ 로 결정되고 기능수행수준은 0.038g, 0.052g, 0.074g가 결정된다. 물론, 일반설계에서 $\phi 2.5\text{m}$ 교각기둥이 요구된다면 설계응답수정계수 $R=3.0$ 은 적용할 수 없고 실제응답수정계수 $R=$

2.0에 의해 기능수행수준이 결정된다. 이상과 같은 결과로부터 기능수행수준은 설계에 적용한 위험도계수에 비례하고 실제응답수정계수의 크기에 반비례한다는 것과 두 계수 중 응답수정계수의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

도로교설계기준 내진설계편은 기능수행수준에 대한 기본개념은 명시하고 있으나 관련규정은 제시하고 있지 않다. 기능수행수준은 지진 발생 시 교량의 손상정도 및 발생 이후의 피해복구에 중요한 역할인 정상수준의 차량 통과여부를 좌우하므로 방재측면에서 반드시 고려되어야 한다. 이 연구에서는 중약진지역 일반교량을 해석대상교량으로 선정하고, 내진설계편에 제시된 설계조건과 해석방법으로 내진설계를 수행하였으며, 이 과정으로부터 기능수행수준의 결정에 관여하는 두 계수, 내진등급에 의한 위험도계수와 스펙트럼해석에 적용하는 응답수정계수의 영향을 검토하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다:

- 내진등급에 의한 위험도계수의 적용은 설계지진의 강도를 단순 증가 또는 감소하는 것이다. 설계응답수정계수를 달리 적용하는 것은 하부구조의 설계변경과 함께 기능수행수준을 달리 설계하는 것이므로 동일한 내진등급의 교량이라도 지진발생 시의 거동이 다르게 되며 그 영향은 위험도계수의 영향보다 크다.
- 중약진지역 교량의 경우 일반설계에서 결정된 하부구조의 설계강도를 설계응답수정계수에 의해 감소할 수 없다면 하부구조의 설계강도로 결정되는 실제응답수정계수에 의해 기능수행수준이 결정된다.
- 동일한 기능수행수준을 요구하기 위해서는 가속도계수와 같은 기준이 제시되어야 한다. 이러한 특정기준값은 기술자가 결정할 수 있는 것이 아니므로 교량을 유지관리하는 유관기관의 협의 하에 경제성 및 방재안전성 측면을 고려하여 설정되어야 한다.

참 고 문 헌

- 국토해양부 (2010) 도로교설계기준, pp.6-1~6-41.
 국승규 (2004) II형 교각 교량의 내진설계, 대한토목학회 논문집, 24(5A), pp.879~884.
 국승규 (2009) 중진지역 교량 내진설계와 응답수정계수, 한국전산구조공학회 논문집, 22(1), pp.65~72.
 국승규, 김관배 (2002) 일반도로교의 내진해석모델 개발, 한국지진공학회 논문집, 6(4), pp.1~6.

이석중 (1999) RC Ghost - PM Diagram.

AASHTO (2004) AASHTO LRFD Bridge Design Specification.

CEN (1998) EUROCODE 8, Part 2: Bridges.

Midas IT (2001) Midas/Civil User Manual.

- 논문접수일 2011년 11월 3일
- 논문심사일 2011년 12월 14일
- 게재확정일 2012년 3월 26일