

변위기반설계법에 의한 교량 내진설계의 비교연구 A Comparative Study on Displacement-Based Seismic Design Method of Bridge Structures

주정훈*

조양희**

Ju, Jeong hun

Joe, Yang Hee

ABSTRACT

Most of seismic designs of major structures up to now have been performed by the traditional "force-based design" approaches. However, they are not so efficient to evaluate the structural deformations by potential nonlinear behaviors which are directly related with the damages or performance levels during earthquakes. Lately, based on this situation, various kinds of new seismic design approaches based on the deformation, which is called "displacement-based design" procedures, have been proposed. In this paper, most of detail techniques and procedures of the new design methods in the literature are comparatively reviewed and evaluated first, followed by a series of design examples of typical bridge structures. Comparing the results with those of the existing force-based design, the improved levels of performance and economy of the displacement-based seismic design have been validated.

1. 서론

탄성설계방법으로 시작한 구조물의 내진설계는 지진발생의 불확실성 및 대형지진하중에 의한 구조물의 과다설계 등과 같은 이유로 인해 구조물의 비선형거동을 고려하는 경제적인 설계의 필요성이 제기되었다. 이를 위해서는 동역학적 개념에 근거한 비선형시간이력해석을 수행하여 지진 시 구조물의 비선형거동을 예측하는 것이 합리적이거나, 그 실용적 적용에 있어 많은 어려움이 뒤따른다.

이러한 이유 때문에 비선형거동을 실용적으로도 간편하게 적용할 수 있는 연성도(μ)에 따른 응답수정계수(R) 혹은 비탄성응답스펙트럼 등과 같은 개념이 도입되었다. 그러나 이 방법들은 모두 지진력(힘)에 기초한 것으로서 실제적인 지진거동 예측에 한계점을 지니고 있으며, 예측된 응답변위는 실제와 많은 차이를 보이게 된다. 특히 최근에 주목받고 있는 성능기초개념에서 볼 때, 지진력만으로

* (주)수성엔지니어링 구조부

** 인천대학교 교수

지진에 대한 구조물의 전체적인 성능 혹은 손상을 평가하는 것은 상대적으로 큰 불확실성을 지니고 있다.

구조물의 비선형거동에 대한 고려와 목표성능 구현이라는 두 가지 목적을 동시에 달성하기 위하여 현재 여러 가지 방법이 제시되고 있으며, 그 중의 한 방법이 변위기반설계법(displacement-based design method)이다. 기존의 힘기반설계법(force-based design method)에서는 지진력과 그에 의한 하중을 주요설계인자로 하여 설계가 수행되는데 비해, 변위기반설계법에서는 지진 시 예측되는 변위를 주요설계인자로 하여 구조물을 설계하는 방법이다. 따라서 힘기반설계법에 비하여 상대적으로 정확한 비선형거동을 고려할 수 있으며, 구조물의 성능 즉 손상정도가 변위에 의해 쉽게 파악된다는 점을 고려하면 변위기반설계법이 보다 합리적인 설계방법이라 할 수 있다.

외국의 일부 국가에서는 이에 대해 설계기준 상에서 개념적으로 요구하고는 있으나, 실용적인 절차나 방법이 아직 구체적으로 개발되어 있지 못한 상황이며, 특히 국내의 경우 건축물에 대해서는 적용이 어느 정도 고려되고 있으나 교량에 대해서는 지극히 초보적인 단계에 머물러 있는 수준이다.

구조물에 대한 내진설계 초점이 과거의 재료나 구조요소에서 벗어나 전체시스템의 성능을 나타내는 변위로 옮겨가고 있다. 따라서 이 연구에서는 이를 반영한 변위기반설계법의 개념과 내용을 제시하고, 교량에 관하여 이제까지 연구된 방법들의 적용절차 및 방법을 비교, 검토한 다음 이들 각 방법을 대표적인 교량에 적용하여 설계하고, 그 결과를 비교하였다. 이를 통하여 향후 교량의 내진설계 시 변위기반설계법의 적용에 대한 합리성과 실용성을 제시하고자 한다.

2. 교량의 내진설계 현황

초기에 수행된 교량의 내진설계(건설교통부, 1992)는 등가정적해석을 바탕으로 하여 이루어졌다. 이것은 지진 시 발생하는 지반의 최대가속도에 교량의 질량을 곱하여 계산된 힘을 구조물에 정적수평력으로 작용시키는 방법으로서, 교량이 이 힘에 대해서 견딜 수 있도록 단면을 설계하였다. 그러나 인류문명의 발전과 함께 원자력발전소 등과 같이 대단히 높은 중요도를 지닌 구조물의 건설이 요구됨에 따라 보다 정밀한 수준의 내진설계방법이 필요하게 되었다. 이것은 동적해석에 의하여 수행된 해석결과를 바탕으로 한 설계법으로서, 지진 시 구조물의 동적거동을 설계단계에서 고려하는 방법이다. 현행 도로교설계기준(건설교통부, 2005)에서는 동적거동특성을 약식으로 고려하는 선형탄성모드 해석에 의한 단일모드스펙트럼해석법이나 다중모드스펙트럼해석법의 사용을 허용하고 있다.

이러한 해석들은 지진 시 발생하는 지진력을 구하는 방법으로서 이후 응답수정계수에 의해 최종적인 지진력을 산정하도록 되어있다. 응답수정계수란 대상 교량에 대해 변위연성도를 확보하고, 지진에너지를 흡수할 수 있도록 하기 위한 것이다. 그리하여 고정하중이나 활하중 등과 같은 일반하중에 대해서는 완전한 탄성거동을 할 수 있도록 하는 반면, 지진하중과 같이 비교적 큰 규모의 하중에 대해서는 비선형거동을 유도하는 것이다.

이와 같은 현재의 국내교량의 내진설계방법은 지진하중보다 더 큰 단면력을 갖도록 하는 힘기반 설계법에 근거한 것으로서, 힘에 대해 구조물의 성능을 예측하고 설계하는 방법이다.

3. 변위기반설계법

3.1 개념

현재 일반적으로 채택되고 있는 힘기반설계법은 지진하중에 대해 대상 구조물의 선형탄성응답을 가정하고 탄성재료특성을 이용하여 해석을 수행함으로써 단면력을 구한 후, 그 단면력에 견딜 수 있도록 부재를 설계한다. 즉 지진하중에 의해 발생하는 단면력을 구하는 것이 가장 핵심적인 과정이 된다. 힘기반설계법에서의 변위는 설계 시 직접적인 영향을 미치지 않고, 구조물의 사용성 한계 등을 위한 검토대상으로서 부차적인 요소에 지나지 않는다.

그러나 변위기반설계법에서는 하중을 포함한 각 설계 인자들의 결정에 있어 변위가 가장 큰 역할을 한다. 구조물의 목표성능과 비탄성거동에서는 힘보다 변위가 더 지배적이므로, 내진설계에 필요한 설계인자들을 변위와 관련시켜야 할 필요가 있다. 따라서 힘기반설계법에서 가장 중요한 가속도 응답스펙트럼은 변위기반설계법에서 큰 의미를 지니지 못한다. 이보다는 변위를 직접적으로 나타낼 수 있는 변위응답스펙트럼이 보다 중요하다. 그리고 강성을 비롯한 다른 내진설계인자들 역시 변위를 통하여 설계에 반영된다. 결국 변위기반설계과정에 있어 가장 큰 주요 인자는 변위이고, 그 목표 또한 주어진 지진하중 하에서 대상구조물이 정해진 변위범위 내에서 거동하도록 유도한다. 즉, 변위를 기초로 하는 설계법인 변위기반설계법은 지진하중 작용 시 이러한 구조물의 성능을 판단하는데 있어 변위와 관련된 양을 직접적으로 사용하는 내진설계 방법이다.

3.2 종류

변위기반설계법에 의해 구조물의 내진설계를 수행하는 경우, 상대적 정밀해석에 의한 비선형시간 이력해석법을 사용하는 것이 정해에 보다 가까운 설계결과를 제공하나 복잡한 계산과 많은 시간이 소요되는 등의 단점이 있다. 따라서 변위기반 설계법은 설계과정에서 변위의 역할에 따라 크게 다음과 같은 세 가지의 실용적 방법으로 분류될 수 있으며, 각 방법별로 제안된 세부 방법은 다음과 같다 (FIB, 2003).

- 변위계산법(displacement-calculation based method) : 역량스펙트럼방법, 초기강도변위제어법
- 반복변위법 (iterative deformation-specification based method) : 목표주기설계법
- 직접변위법(direct displacement-specification based method)
: 직접변위기반설계법, 항복점스펙트럼방법, SEAOC방법, 비탄성스펙트럼방법

변위계산법은 우선 대상구조물의 예상되는 최대변위를 계산한 다음, 예상최대변위를 초과하는 변위에 견딜 수 있도록 구조물의 세부적인 설계를 수행하는 방법이다. 반복변위법은 먼저 목표변위를 선택하여, 이를 기준으로 구조물을 설계하는 방법이다. 여기서 대상구조물의 계산된 최대변위는 반드시 규정된 목표변위보다 작아야 한다. 이를 위해서는 구조물 시스템 및 단면특성을 변경할 필요가 있으며, 전체적으로는 결국 반복적인 설계과정이 요구된다. 이에 비해서 직접변위법은 미리 정의된 한계변위를 설계의 시작점으로 사용하고, 설계과정의 마지막에는 설계지진에 의한 한계변위를 만족시키는 구조물의 단면저항능력이 계산된다.

이 연구에서는 이들 방법 중 비교적 교량의 변위기반설계에 효율적으로 적용이 가능한 직접변위

기반설계법, 역량스펙트럼방법, 비탄성스펙트럼방법, 비선형시간이력해석법 등에 대한 실용적인 적용 방법 및 절차를 비교, 분석하였다.

3.2.1 직접변위기반설계법

Kowalsky 등(Kowalsky, et al., 1995)에 의해 제안된 방법으로서, 단자유도시스템에 대한 손상을 변형률에 의한 변위한계로 나타냄으로써 지진하중에 대해 의도된 한계상태를 얻을 수 있도록 구조물을 설계하는 방법이다. 탄성설계응답스펙트럼을 이용하며, 가정된 목표변위가 설계 시 직접적으로 고려된다. 또한 반복수행 시 각 감쇠비에 따른 변위응답스펙트럼의 작성이 필수적으로, 이를 통하여 목표변위에 적합한 구조물의 유효주기를 구하는 것이 가능하다.

3.2.2 비탄성스펙트럼방법

Chopra와 Goel(Chopra & Goel, 2001)에 의해 제안된 방법으로서, 전반적인 과정은 직접변위기반설계법과 유사하다. 그러나 등가의 치환된 탄성시스템에 대하여 탄성설계응답스펙트럼을 사용하는 직접변위기반설계법과는 달리 비탄성설계응답스펙트럼을 사용함으로써 실제 지진발생 시 비탄성거동과 그로 인한 최대변위를 보다 정확하게 예측할 수 있다.

3.2.3 역량스펙트럼방법

이 방법은 Freeman(1978)이 제안한 요구 및 역량스펙트럼을 이용하는 건축물의 성능평가를 위한 방법을 Chopra 등이 소성응답스펙트럼의 영역으로 확대한 방법으로서 미국의 ATC(Applied Technology Council, 1996)과 FEMA(Federal Emergency Management Agency, 1997)등에서 채택하고 있는 방법이다. 이 방법은 구조물의 기초전단력과 횡변위에 관한 정적비선형해석결과를 가속도-변위 형식으로 된 지반운동의 응답스펙트럼에 겹쳐 나타냄으로써 대상구조물의 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가할 수 있도록 하였다.

3.2.4 비선형시간이력해석법

철근콘크리트는 탄성재료인 철근과 소성재료인 콘크리트가 일체가 되어 외력에 저항하는 구조체이다. 따라서 이 방법은 지진발생 시 이러한 두 재료의 비선형특성을 모두 반영하는 정밀해석인 비선형시간이력해석을 통해 이루어진다. 이 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 비선형거동해석이 가능한 전산프로그램 DRAIN-3DX(Prakash, et al., 1994)를 사용하여 비선형시간이력해석을 수행하였다. DRAIN-3DX는 철근콘크리트 구조물의 3차원 동적비선형해석 프로그램으로서, 단면을 섬유요소로 모델링하고 각 위치의 섬유요소를 재료특성에 따라 정의하여 구조물의 재료비선형성을 고려할 수 있다.

3.3 실용성 분석

직접변위기반설계법은 설계인자인 변위를 설계 시 직접적으로 고려하는 방법으로서 변위기반설계법의 개념을 가장 충실히 담고 있는 방법이다. 한편 역량스펙트럼방법의 핵심은 지진에 의한 요구량과 단자유도계 구조물의 역량을 ADRS(acceleration-displacement response spectrum)라는 하나의 축척된 응답스펙트럼을 이용하는 방법이다. 또, 비탄성스펙트럼방법은 직접변위기반설계법에 대한

비탄성설계스펙트럼의 적용을 보여주기 위한 것으로서 그 전체적인 과정은 직접변위기반설계법과 유사하다. 다음의 표 1은 이러한 변위기반설계법들에 대하여 각 방법이 가지는 특징과 장점 및 단점을 비교한 것이다.

표 1. 각 변위기반설계법의 비교

종류	특징	장점	단점
직접변위기반설계법	변위의 역할 증대	빠른 수행속도	감쇠비에 따른 변위응답스펙트럼의 반복적작성
역량스펙트럼방법	ADRS 사용	적용과정이 비교적 간단	응답스펙트럼에 대한 형식변환의 번거로움
비탄성스펙트럼방법	비탄성변위응답스펙트럼의 사용	직접변위기반설계법에 대해 개선된 방법	연성도에 따른 비탄성변위응답스펙트럼의 반복적작성
비선형시간이력 해석법	비선형 시간이력해석수행	신뢰성 있는 결과 제공	복잡한 계산 과정 및 과도한 시간 소요

4. 변위기반설계법의 적용성 평가

앞에서 설명한 변위기반설계법 중에서 직접변위기반설계법, 역량스펙트럼법, 비탄성스펙트럼방법 등의 실용적 적용성을 평가하기 위하여 대표적인 3경간 철근콘크리트 연속교를 대상으로 각 방법을 적용하여 내진설계를 수행하고, 그 결과를 서로 비교하였다. 또한 이들 결과들을 상대적으로 정해인 비선형시간이력해석을 통한 변위기반설계 결과와 비교, 분석하였다. 한편 동일한 조건으로 우리나라 도로교내진설계기준에서 제시하고 있는 방법인 힘기반설계법을 이용하여 교량을 설계하고, 그 결과를 변위기반설계 결과와 비교하였다.

4.1 대상구조물

설계에 사용된 대상구조물은 그림 1과 그림 2에 보인 것과 같은 3경간 철근콘크리트 연속교의 고정받침교각을 대상으로 하였으며 그 구체적인 재료 및 단면 특성 등은 표 2와 같다.

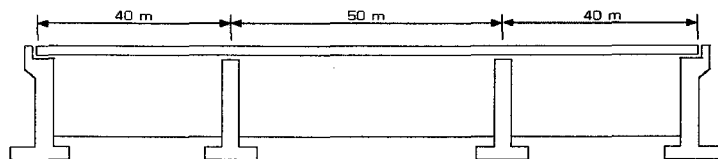


그림 1. 설계에 사용된 교량

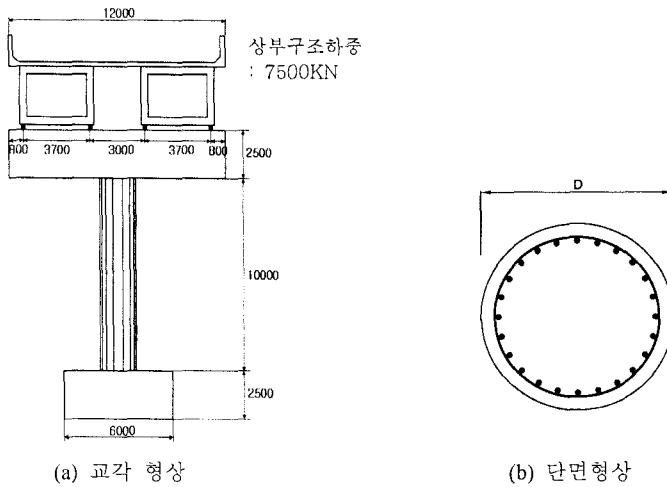


그림 2. 설계에 사용된 교각의 단면형상 및 재원

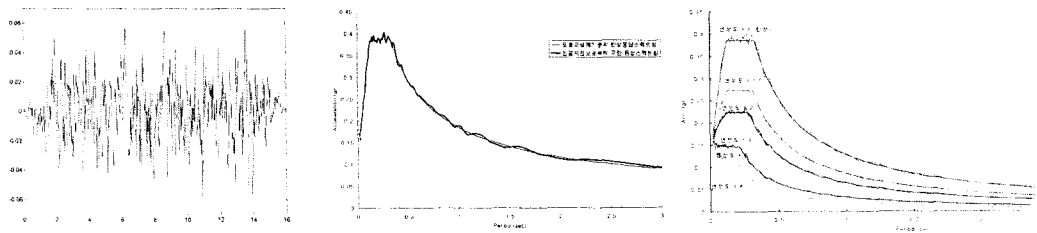
표 2. 대상구조물의 모델특성

재료특성	콘크리트	압축강도(f_{ck})	24 MPa
		탄성계수(E_c)	23.2 GPa
		단위중량	2.5 tonf/m ³
	철근	항복강도(f_y)	400 MPa
		탄성계수(E_s)	200 GPa
		피복두께	100 mm

4.2 입력운동

입력운동으로는 현행 도로교설계기준에서 제시한 설계응답스펙트럼인 탄성설계응답스펙트럼과 이에 부합되는 비탄성설계응답스펙트럼 및 인공시간이력을 사용하였다. 여기서 지반조건은 지반종류 I, 지진구역 I, 재현주기 1000년(내진I등급), 최대지반가속도 0.154g로 가정하였다.

이 때, 인공시간이력은 전산프로그램 SIMQKE(MIT, 1976)를 이용하여 생성하였으며, 비탄성설계응답스펙트럼은 Newmark와 Hall이 제시한 비탄성설계응답스펙트럼 작성방법(Chopra, 1995)을 사용하여 작성하였다(그림 3참조).



(a) 가속도시간이력 (b) 탄성응답스펙트럼 (c) 비탄성설계응답스펙트럼

그림 3. 설계에 사용된 가속도시간이력과 설계응답스펙트럼

4.3 평가방법

이 연구에서는 교량의 고정반침교각을 대상으로, 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 힘기반 설계법과 앞서 검토된 변위기반설계법을 이용하여 교각단면을 설계하고 그 결과를 비교하였다. 이 때 사용된 변위기반설계법으로는 직접변위기반설계법, 비탄성스펙트럼방법, 역랑스펙트럼법을 선택하여 사용하였으며, 이 결과들을 비선형시간이력해석법에 의한 설계결과와 비교하였다.

설계 시 목표변위는 항복변위와 소성회전각에 의한 변위의 합으로 설정하였으며(Chopra & Goel, 2001), 교각에 작용하는 축하중으로는 교량의 바닥판 자중과 코핑의 자중 및 1/2의 교각 자중을 합하여 고정하중으로 작용시켰다. 그리고 각 설계법에 대하여 동일한 초기조건을 적용함으로써 설계결과를 상호 비교, 평가할 수 있도록 하였다.

교각의 비선형거동을 고려하기 위하여, 콘크리트의 재료특성은 Desayi와 Krishnan (Neville, 1997)이 제안한 식을 사용하였고, 기둥의 심부구속효과를 고려하기 위하여 Priestley 등(Priestley, et al., 1996)이 제안한 식을 사용하였다. 이 때 사용된 교각의 탄성강성과 항복후강성의 비는 0.05를 사용하였다. 또한 각 방법에 의해 도출된 하중을 이용하여 최종적으로 나온 설계결과를 파악하는데 용이하도록 기둥의 직경을 가능한 한 동일하게 가정하였으며, 설계결과의 차이를 철근양의 차이로 나타낼 수 있도록 하였다.

4.4 설계 결과 및 분석

표 3에서 보듯이 기존의 힘기반설계결과보다 변위기반설계법에 의한 결과가, 상대적으로 가장 정확한 결과를 주는 비선형시간이력해석법에 의한 설계결과에 근접하고 있다. 이는 변위기반설계법이 힘기반설계법에 비하여 보다 합리적으로 구조물의 비선형거동을 고려함으로써 경제적인 설계결과를 준다는 사실을 나타내고 있다. 또한 제안된 근사법에 의하여 수행된 변위기반설계법 중 비탄성스펙트럼방법이 상대적으로 정해에 가장 가까운 결과를 준다는 사실을 알 수 있다. 한편 역랑스펙트럼방법에 의한 결과는 비선형시간이력해석법에 의한 결과보다도 더 낮은 수치를 보이고 있는데, 이것은 이선형(bi-linear)모델을 대상으로 만들어진 역랑스펙트럼방법의 성능점 산정방법이 부적절함을 나타낸다.

표 3. 각 방법에 의한 설계 결과

종류		축력 (KN)	모멘트 (KN·m)	교각직경 (m)	철근비 (%)	
힘기반설계법		9400	11600	2	1.264	
변위기반 설계법	근사법	직접 변위기반설계법	8740	4897.88	1.4	2.58
		역랑 스펙트럼방법	8540	1364.48	1.2	1.826
		비탄성 스펙트럼방법	8740	3942.91	1.4	1.961
	정해법	비선형 시간이력해석법	8740	3319	1.4	1.393

5. 결론

이 연구에서는 최근 그 실용성이 증대되고 있는 교량의 변위기반설계법에 대한 필요성을 제기하였다. 이를 위하여 변위기반설계법의 배경 및 기술현황을 분석하였고, 현재 제시되어 있는 각 방법들의 기술적 내용과 적용 과정 및 실제 설계에의 적용결과 등을 분석, 비교하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 변위기반설계법은 기존의 힘기반설계법에 비하여 교량의 손상정도와 직접 관련이 있는 변위를 직접 설계에 고려함으로써 경제적인 내진설계가 가능하다.
- ② 현재 제시되어 있는 변위기반설계법 중 비탄성스펙트럼방법이 가장 신뢰성이 큰 설계 결과를 주는 한편, 역량스펙트럼방법의 경우 그 적용과정이 비교적 간단하여 실용적인 반면에, 그 결과가 실제보다 과소평가됨으로써 여타의 방법에 비해 상대적으로 낮은 신뢰성을 보인다.
- ③ 향후 변위기반설계법에 관한 이론 및 실용적인 연구 활성화를 통해 국내설계기준의 개선 및 이를 적용하는 실용적 설계가 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부(1992), 도로교표준시방서, 내진설계편.
2. 건설교통부(2005), 도로교설계기준, 내진설계편.
3. Applied Technology Council(1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report ATC-40.
4. Chopra, A. K. and Goel, R. K.(2001), "Direct Displacement-Based Design : Use of Inelastic vs. Elastic Design Spectra", Earthquake Spectra 17(1), pp. 47-65.
5. Chopra, A. K.(1995), Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
6. FEMA(1997), NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building, Report FEMA-274, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., May.
7. FIB(International Federation for Structural Concrete)(2003), Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Building.
8. Freeman, S. A.(1978), Prediction of Response of Concrete Building to Severe Earthquake Motion, ACI Special Publication, SP-55.
9. Kowalsky, M. J., Priestley, M. J. N. and MacRae, G. A.(1995), "Displacement-Based Design of RC Bridge Columns in Seismic Regions", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 24, pp. 1623-1643.
10. MIT(1976), A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation.
11. Neville, A. M.(1997), Properties of Concrete, 4th & Final Ed., John Wiley & Sons.
12. Prakash, V., Powell, G. H. and Cambell, S.(1994), DRAIN-3DX Base Program Description and User Guide, U. C. Berkeley.
13. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M.(1996), Seismic Design and Retrofit of Bridge Structures, John Wiley & Sons, New York.