

내진설계의 성능 기준화

Performance-Based Seismic Design

김재관*

Kim, Jae Kwan

ABSTRACT

The fundamental philosophy underlying the seismic design of structures and systems are evolving into the performance based concept. The background and current status of this development in other countries are briefly summarized. The new code system which consists of two level seismic design criteria will be introduced. The implementation of the performance based design concepts in the criteria will be explained.

1. 서 론

역사 기록에 의하면 우리 나라에서는 삼국시대 이래 구조물 피해를 수반한 강진이 약 40회 이상 발생하였고, 특히 15-17세기 기간에는 지진 활동이 매우 활발하였었다고 한다. 그 후 지진 활동이 다소 낮아졌으나, 최근 홍성 지진(1978년), 백령도 지진(1995년), 영월 지진(1996년), 경주 지진(1997)과 같은 중소규모의 지진 활동이 다시 증가하는 경향에 비추어 볼 때 인명과 사회-경제 시스템에 큰 피해를 초래할 수 있는 대규모 지진이 가까운 장래에 발생할 가능성은 상존하고 있다고 하겠다.

최근 10여 년간에 세계 각지에서 발생한 강진으로 인한 대표적인 피해 사례를 조사 분석한 결과에 의하면 지진 피해 규모는 지진에 대한 사회 전체의 준비 태세와 내진 설계 기술의 수준 및 시공의 정밀도에 따라서 큰 차이가 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이와 같은 사실은 1988년 Armenia 지진의 경우 내진 설계 부재와 부실한 시공에 의하여 최소한 25,000명 이상의 사망자가 발생한 반면, Armenia 지진보다 규모가 컸던(에너지는 약 2배 이상) 1989년의 Loma Prieta, California 지진에 의해서는 62명의 사망자밖에 발생하지 않았다는 사실이 증명하고 있다. 지진 재해를 경감시키고 대비하는 방법에는 지진예측, 조기경보와 신속대응시스템의 구축과 내진설계등 여러 가지 방법이 있으나 그 중에서 항구적이고도 신뢰성이 높은 것은 구조물과 시스템을 내진설계하는 것이다.

내진설계기술은 최근에 급속하게 발전하여 대규모 구조물과 시스템을 강진에도 안전하도록 설계하고 건설하는 것이 가능하게 되었다. 그러나 내진설계기준은 시설별로 독자적으로 작성되고 통일된 원칙에 근거하지 않은 상태에서 작성되고 수정되어 왔기 때문에 많은 문제점을 내포하고 있었다. 이러한 상태를 개선하기 위하여 미국과 일본에서는 성능에 기초한 새로운 설계개념과 코드체계에 대한 연구를 시작하였고 그 결과로서 향후 3-10년내에 성능에 기초한 새로운 설계기준에 따라서 설계하게 될 것으로 예상된다. 우리나라에서는 많은 시설들이 내진설계기준을 갖고 있지 못한 상태였으며, 한국지진공학회에서는 건교부의 위탁으로 현재 새로 내진설계기준을 개발하는 연구를 수행하고 있다. 한국지진공학회는 외국의 현황과 국제적

* 서울대학교 조교수, 정회원

인 동향 및 앞으로 우리나라 산업발전등을 검토하여 새로운 내진설계 기준을 성능기준과 기술기준으로 이원화하는 체계를 제시하였으며, 상위 기준인 성능기준은 일부 시설의 경우 현재 최종 심의 단계에 있다.

이 논고에서는 먼저 이러한 세계적인 발전 현황을 개괄한 다음, 우리나라에서 앞으로 채택하고자 하는 코드체계에 관하여 설명하기로 한다.

2. 미국의 현황

현재 미국에서는 일관된 원칙없이 단편적으로 개발되어 지난 30년간 사용되어오던 내진설계 기준들을 재검토하고 이들을 전면 대체할 수 있는 새로운 개념에 기초한 차세대 내진설계 절차와 Code에 관한 연구를 이미 1990년도에 시작하였으며 현재 그 대강의 윤곽을 드러내고 있다. 차세대 기준의 개발을 위한 연구의 대표적인 예로서는 다음을 들 수 있다.

- ATC(Applied Technology Council)
 - ATC-34 Critical Code issues, Development of Next Generation Seismic Design Approaches for Buildings
- SEAOC(Structural Engineers Association of California)
 - Vision 2000 Committee: Performance Based Seismic Engineering of Buildings

새로운 내진설계 개념에서는 지진이 발생하였을 때 실제 구조물의 성적, 즉, 성능을 명확하게 보장하도록 설계하는 방향으로 나아가고 있다. 구조물의 성능도 단일한 단계의 지반진동 수준에 대한 평가에서 여러 단계 지반운동수준에 대하여 일련의 성능목표를 달성하도록 설계하는 이른바, 다단계 내진성능수준(Multi-Level Performance Level)의 채택이 유력하여지고 있다. 기존의 내진설계기준의 기본개념은 그 기준에 따라서 설계된 구조물이 지진하중 작용하에서 다음과 같이 거동하는 것을 보장하자는 데 있었다:

- 자주 발생하는 작은 크기의 지진에 의해서는 구조물에 비구조적 피해도 발생하지 않으며;
- 가끔 발생하는 중간 크기의 지진에 의해서는 비구조재에 손상은 발생할 수 있으나 구조적 손상은 발생하지 않도록 하고;
- 드물게 발생하는 큰 규모의 지진의 경우에는 구조물이 붕괴하거나 중대한 손상이 발생하는 것을 방지할 수 있도록 한다.

위의 설계 원칙은 일견 3단계의 성능 목표를 갖고 있고, 이를 충족시킬 수 있도록 설계한다는 것을 뜻하고 있는 것 처럼 보여진다. 그러나 실제 설계에서는 단일수준의 설계지진만 사용되어 마지막 단계의 성능목표를 충족시키도록 설계하고 있다. 여기서 묵시적으로 전제되고 있는 것은 첫째와 두번째 요건도 자동적으로 만족될 것이라는 기대이다. 그러나, 최근 지진에서 (Northridge 지진 등) 구조물이 이러한 기대와는 다르게 거동하여 엄청난 경제적 손실이 초래되었다. 이러한 사실로부터 여러 수준의 성능요구조건을 모두 만족시킬 수 있도록 구조물을 설계하고자 하는 이른바, 성능에 기초한 설계법(Performance-Based Design)이 도입되기 시작하였다. 성능에 기초한 설계법은 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴도 방지할 뿐 아니라 작은 지진에서도 기능 수행에 관한 성능요구조건을 만족시킬 수 있도록 설계하고자 하는 설계 개념이고, 성능목표를 설정함에 있어서 확률의 개념을 도입하고 있다. 그리고 이 성능기초설계법에서는 내진역량(Seismic Capacity)을 Ductility나 Energy 흡수능력으로 평가하고자 하며, 따라서 종래에 사용되어 오던 강도(Strength) 접근법보다는 오히려 Ductility나 Energy 흡수능력

을 잘 표현할 수 있는 변형/변위 접근법의 사용이 적극 고려되고있다.

이러한 성능기초설계법은 미국 California주의 도로국(Caltrans)에서 기존 교량의 내진성능을 향상시킬 때 1992년부터 적용을 시작하였다. Caltrans에서는 세가지 수준의 성능목표를 동시에 만족시키도록 요구하고 있으며, 성능평가를 위해서는 기능평가지진(Functional Evaluation Earthquake)과 안전평가지진(Safety Evaluation Earthquake)의 두가지 수준의 설계지반운동이 사용되고 있다. 안전평가지진은 장대교량에 있어서는 Maximum Probable Earthquake, 일반교량의 경우에는 Maximum Credible Earthquake가 사용되고 있다. 즉, 장대교량의 경우에는 부지고유 지진재해도를 확률적 기법에 의하여 평가하도록 요구하고 있다.

현재 미국에서는 이러한 차세대 내진설계기준에 대한 논의가 NEHRP를 중심으로하여 국가적 차원에서 본격적으로 진행되고 있으며, 장차 5년에서 10년내에 통일된 성능에 기초한 설계기준이 완성되어 적용될 것으로 전망하고 있다.

3. 유럽의 현황

Commission of the European Communities (CEC)는 유럽공동체에 공통으로 적용할 수 있는 설계기준을 European Committee for Standardization으로 하여금 1990년부터 개발하도록 하였으며 1998년에는 Eurocode 8이라고 불리는 Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures의 발간을 목표로 하고 있다. Eurocode 8은 기본적으로 성능에 기초한 설계개념과 신뢰도 개념을 근간으로 하여 개발되고 있다.

이 Code 의 내용은 2 parts로 다음과 같이 구성되어 있다.

- The Principle(원칙)
 - No alternative is allowed
 - General statement and requirements
- The application rules
 - Principle을 따르고 그 요구사항을 만족하기 위한 Rules

4. 일본의 현황

4.1 내진성능향상에 관한 기술 검토

Hyogo-ken Nanbu 지진을 계기로 현행 내진설계기준의 타당성을 검토하고 필요한 사항은 개정할 목적으로 건축과 토목분야 전문가로 구성된 검토위원회가 건설성에 설치되어 다음 사항들을 검토하기 시작하였다:

- 구조물의 내진 안전성에 관련한 기술 과제
- 내진 설계의 기본 자세

구조물의 내진 안전성에 관련한 기술 과제에서는 다음 사항에 관한 검토가 필요한 것으로 인식되었다,

- 설계지반운동의 설정방법
- 지진응답 평가 및 설계법

내진 설계의 기본 자세 에 관해서는 다음 사항들을 검토할 계획이다.

- 성능규정화에 관한 검토
 - 국가 제정 상세 기술 규정은 기술 혁신의 장애 요인
 - 방법에 관한 규정으로부터 성능 규정으로의 이행

- 건축구조 분야에서 검토 시작
- 활단층등의 지진재해도에 관한 정보의 취급
- 내진설계기준의 획리적인 조정에 관한 검토
 - 여러 시설의 내진 설계 기준 상호 조정
 - 지반진동수준, 표현방법의 통일
 - 시설별 성능규정의 조화

4.2 건축물 설계 기준의 성능 기준화 검토

일본의 건축분야에서는 종래의 허용응력 설계법을 폐기하고 미국과 같은 성능기초설계개념을 도입한 새로운 설계기준을 채택하고자 연구를 수행하여 오고 있다. 그뿐 아니라, 건축물의 설계를 국가기관에서 엄격히 규제하던 지금까지의 제도 자체를 완전히 개혁하여 성능에 기초한 설계개념에 적합한 제도를 새로 도입하는 것을 적극 고려하고 있다. 이러한 움직임은 WTO체제하에는 장차 성능에 기초한 설계기준이 국제 표준이 될 것으로 예상하기 때문이다.

- 배경
 - 시대적 상황의 변화
 - 선택의 다양성의 확대
 - WTO 체제 대비 및 국제 협조
 - 안전성의 확보
 - 현행 건축 기준법 체제하에서는 상세 규정 추적 불가능
 - 국가 제정 상세 기술 규정은 기술 혁신의 장애 요인
- 건축물 설계기준의 성능 기준화
 - 성능 항목, 성능 수준, 성능 평가 방법 규정
 - 법의 테두리에서는 성능 요구 사항만을 규정
 - 성능 목표를 달성하는 기술에 관한 기준등은 표준서, 지방서에서 규정
 - 성능목표를 달성하는 기술과 방법에 관해서는 선택의 자유

5. 내진설계와 기준의 앞으로의 발전 방향

미국, 유럽 및 일본에서 진행되고 있는 내진설계방법과 내진설계기준에 관한 연구동향을 분석하고 시장 개방의 국제적인 추세에 미루어 볼때 미래의 내진설계법과 와 내진설계기준은 다음과 같은 방향으로 발전하리라고 판단된다.

- WTO의 이념의 실현
 - 성능 기준
 - 국가별로 특수하게 요구되는 사항
 - 하중 조건, 성능 요구 사항
 - 사회, 환경 관련 요구사항
 - 기술적 사항
 - 국제적으로 공통되는 자연 과학적 공학적 분야
 - 성능 목표를 달성하는 기술에 관한 지방서와 표준서
 - 대안 선택의 자유 보장
- 미래 지향적인 발전적 규제 체제
 - 상품의 규격에 관한 상세 규정 탈피
 - 상품의 품질에 관한 요구 사항 명시
 - 상품 제작 방법과 구체적인 기술은 선택의 자유를 보장하여 기술 발전 유도

- 국제적 시장 개방에 적극 대비
- 사회 전체의 체계적인 내진 안전성 확보
 - 사회-경제 시스템을 지지하는 구조물과 기반 시설의 조화롭고 체계적인 내진 성능 확보
 - 구조물과 시설물별 내진 성능의 명확한 규정
 - 사회의 전반적인 구조물과 기반 시설의 내진 성능 체계 구성
 - 지진 하중의 수준과 표현 방법에 통일성 부여
 - 내진설계의 기본원칙과 접근법에 통일성 부여

6. 우리나라 내진설계기준의 기본 골격

사회 전체의 체계적인 내진안전성을 확보하고 성능에 대한 요구사항을 기술적인 사항과 분리하기 위해서는 내진설계기준을 성능기준과 기술기준으로 구분하여 성능기준은 법으로 제정하고 기술기준은 선택사항으로 규정하므로써 내진성능 목표도 달성함과 아울러 기술의 개방 및 발전의 길을 열어두는 것이 바람직하다고 판단되어 지진 공학회가 목표하는 내진설계와 기준의 형태를 다음과 같이 결정하였다.

- 내진 설계 기준의 이원화[그림 1 참조]
 - 성능 기준(상위 개념 내진 설계 기준)
 - 중앙 부처의 장이 규칙으로 제정
 - 대안 선택의 여지가 없음
 - 국가별로 특수하게 요구되는 사항
 - 하중 조건, 성능 요구 사항
 - 사회, 환경 관련 요구사항
 - 기술 기준(하위 개념 내진 설계 기준)
 - 관련 학회나 협회에서 연구 작성
 - 국제적으로 공통되는 자연 과학적, 공학적 분야
 - 성능 목표를 달성 하는 기술에 관한 시방서와 표준서
 - 대안 선택의 자유 보장
- 성능 기준에 체계성과 통일성 부여
 - 성능 수준 개념과 설정 방법 통일
 - 구조물과 시설물의 상호 관련성을 고려한 성능 수준과 성능 목표의 체계적인 설정
 - 지진 응답 해석과 내진 설계의 기본적인 원칙과 접근법에 공통성 부여
 - 지진 하중의 수준과 표현 방법에 통일성 부여
 - 내진설계의 기본원칙과 접근법에 통일성 부여
- 품질보증
 - 설계, 시공, 운영의 3단계 에서의 성능 보장을 위한 품질 관리
 - 문제 발생시 책임 소재를 명백하게 판단할 수 있는 장치 마련
- 미래 지향적인 발전적 기준
 - 다단계 성능 수준 규정[그림2 참조]
 - 기술의 발전과 창의성을 고취할 수 있도록 기술 선택의 자유 보장
 - 지진응답의 계측, 보관, 전파로 기술의 개발과 개선 유도

상기 이원화된 내진설계기준을 단기간에 개발하는 것은 합리적이 아니므로 우선 상위개념의 성능기준을 시설물별로 통일된 원칙과 형식에 근거하여 작성을 하고 시간이 필요한 시설물, 구조물별 기술기준은 추후에 개발하기로 하였다. 이 연구에서는 따라서 상위개념의 성능

기준개발을 목표로 하고 있으며, 그 구성항목은 다음과 같다.

- 성능 기준(상위 개념 내진 설계 기준)의 구성 항목
 - 시설물의 분류와 등급설정
 - 등급별 설계기능 목표 규정
 - 설계지반운동 수준 및 표현방법 제시
 - 설계거동한계 규정
 - 기본적인 내진설계 방법과 절차 규정
 - 기본적인 지진해석 방법과 절차 규정
 - 품질보증에 대한 기본적인 사항 규정
 - 준거 시방서와 표준서 제시
 - 지진응답계측에 관한 요구사항과 방법 제시

7. 결 론

성능에 기초한 내진설계로의 발전 현황에 관하여 개괄한 후 현재 한국지진공학회에서 연구하고 있으며, 우리나라에서 앞으로 채택하고자 하는 코드체계에 관하여 설명하였다. 한국지진공학회에서 제시하는 시설별 성능기준은 신뢰도나, 수용할 수 있는 위험도등에 관하여 충분한 연구와 토의 과정을 거치지 못한 채 단기간에 작성되었기 때문에 향후 여유를 가지고 연구하여 반드시 수정 보완될 필요가 있다. 이원화된 내진 설계 기준에서는 성능 기준뿐 아니라, 성능을 달성할 수 있는 기술적 방법, 즉, 기술기준이 갖추어져야 일반 기술자들이 이에 의거하여 설계를 할 수 있게 될 것이다. 성능에 기초한 설계는 기술자들에 대하여 고도의 기술력과 창의력을 요구하고 있다. 따라서 끊임없는 자기 개발과 교육의 기회가 충분히 주어질 필요가 있다. 새로이 제시하는 설계기준에서는 설계 단계에서 뿐 아니라, 시공과 운영단계에서도 품질관리를 엄격하게 하고, 사후에 책임 소재를 명확하게 판단할 수 있도록 장치를 마련할 것을 요구하고 있다. 따라서 새로운 기준 체계하에서는 설계기술도 발전할 뿐 아니라, 건설과 유지관리의 품질도 현저하게 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

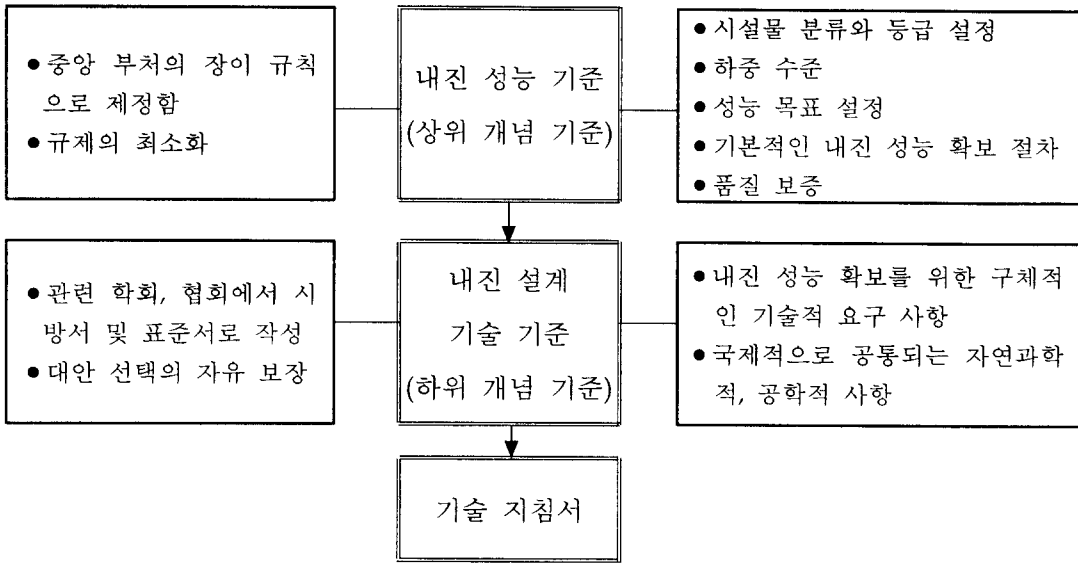


그림 1. 내진설계 기준 체계

설계지진	성능수준 재현주기	기능수행	붕괴방지
	100년	II 등급	
500년	I 등급	II 등급	
1000년	특 등급	(II 등급) I 등급	
2400년		(I 등급) 특 등급	
4800년		특 등급	

그림 2. 내진설계 성능목표