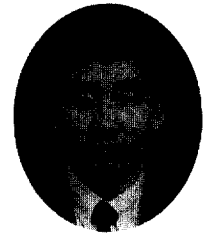


특 집

최근 내진설계 개념의 발전동향

우리나라 내진설계 기준의 상위 개념

The Upper Concept of the Korean Seismic Design



한상환*

〈편집자주〉

우리나라에서는 1988년의 건축 시방서와 1992년의 도로교 표준시방서에 내진설계규정이 처음 도입된 후로 거의 10년이 흘렀으며 1997년 10월에는 지진에 대한 자연재해대책법이 처음으로 법정재해로 지정된바 있다. 외국의 경우는 거의 3년마다 내진설계기준이 개정되고 있고, 특히 1994년 미국 노스리지 지진과 1995년 일본의 그베지진을 기점으로 하여 대대적인 내진설계법의 발전과 기준개정 작업이 활발히 진행되고 있다. 또한 우리나라에서도 1997년 건설교통부에서 개별 구조형식에 대한 내진규정이 아닌 댐, 터널, 공항, 항만 등에 이르기까지 전체 시설물에 대한 내진설계기준이 체계화되고 있다. 본 특집은 이러한 국내외의 내진설계기법과 기준의 발전동향을 소개하고 나아가 내진설계와 관련된 구조실무자와 연구자 여러분께 작으나마 도움이 되기위해 쓰여졌다.

(특집주간: 고려대학교 건축공학과 부교수 이한선)

1. 서 언

일반적으로 지진이 발생하지 않는 것으로 인식되어 있는 한반도에서도 역사적으로 많은 지진활동기록이 있다. 우리 나라에서는 1970년부터 지진에 대한 계기관측을 시작한 이래, 1978년 9월 규모 5.2의 속리산지진, 같은 해 10월 규모 5.0의 홍성지진, 1996년 12월 13일 규모 4.5의 영월지진이 기록되었다. 기상청 통계에 의하면 1996년 우리 나라의 연간 지진발생빈도는 34회에 이르는 것을 보고하고 있다. 표 1에는 1978년에서 1995년까지 국내 계측지진의 규모에 따른 발생빈도가 나타나 있다. 또한 1996년의 우리 나라의 지진발생현황을 그림 1에 나타내었다. 이러한 지진발생으로 인하여 국내에서는 지진에 대한 구조물의 안전성 확보에 대한 관심이 높아져 가고 있다.

* 정희원, 한양대학교 공과대학 건축공학부

우리 나라에서는 홍성 지진이후 국내의 지진위험도를 인지하게 되어 건설부에서 건축구조물에 대한 내진설계 기준 작성 준비를 하게 되었고, 1988년에는 내진설계 지침을 발간하였다. 이 지침은 미국의 ATC 3-06과 UBC의 내진설계 방법을 기초로 하고 있다. 우리 나라의 실정은 미국이나 일본과는 다르고, 지진에 대한 위험도가 작은 편이다. 또한 지진에 대한 기록도 매우 미흡하여 지진력을 산정하는 방법에는 많은 불확실한 요소가 있다고 할 수 있다.

우리기준의 기초가 된 ATC3-06은 미국과 많은 나라에서 그 방법과 설계 계수들의 큰 변화 없이 현재까지 사용하고 있다. 하지만 최근에 잇따른 지진에 의한 구조물 피해에 관한 보고서들은 현행 내진 기준들이 여러 가지 문제점이 있음을 지적하고 있다.

표 1 국내 계속지진의 규모(magnitude) 및 발생빈도 ('978~1995)

규모(magnitude)	빈도 (frequency)	발생횟수/년	비 고
6.5 < M < 7.0	-	-	발생가능 한계범위
6.0 < M	4	0.2	
5.0 < M	19	1.1	
4.0 < M	133	7.4	
3.0 < M	152	8.4	
합계	308회/18년	17.1	

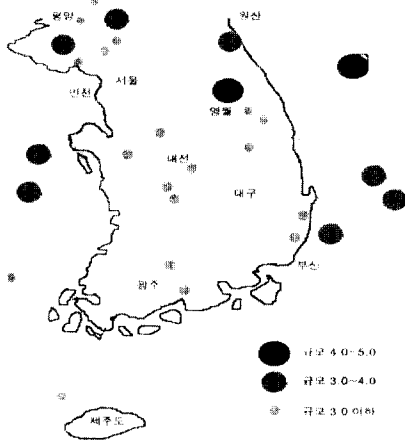


그림 1 1996년 지진발생현황도

특히 미국에서 발생한 1992년 Loma Prieta 지진과 1994년 발생한 Northridge 지진에서 내진 설계 기준에 따라 설계된 구조물들은 구조적 손상으로 인한 큰 인명 피해는 미소하였다. 이는 현행 기준의 거동의 목표인 인명피해 방지라는 측면에서는 매우 적합한 것임을 알 수 있다. 하지만 구조적 손상으로 인한 그 피해 정도를 환산해보면 1992년 Loma Prieta 경우는 7조원에 달했고, 1997년 Northridge 지진에서는 60조원 가량 되었다고 보도되어 있다. 이는 구조물의 거동이 인명은 보호하고 있지만 만족스러운 것이 아님을 알 수 있다.

1960년에 발행한 SEAOC "Blue Book" 해설에 보면 기준의 목표는 다음과 같이 기술되어 있다.

- 1) 작은 지진에 대해서는 어떤 손상도 있어서는 안된다.
- 2) 중간크기의 지진에 대해서는 비구조재의 손상은 예상할 수 있으나 구조재의 손상은 없어야 한다.
- 3) 큰 지진에 대해서는 구조재의 손상은 예상할 수 있으나 인명의 피해를 주어서는 안된다.

하지만 내진기준을 제정할 당시 현재 사용하는 재현주기가 475년인 지진하중을 가지고 건물을 설계할 경우 위의 기준의 세 가지 목표가 만족하게 될 것으로 예상한 것이 착오라고 할 수 있다. 즉 재현주기가 475년인 큰 지진에 대하여 만족하게 설계를 하면 자동적으로 작거나 중간정도의 크기를 가진 지진에 대해서도 만족할 것이라는 예상이 잘못된 것이라는 것이 최근의 지진으로부터 얻어진 경험이라 할 수 있다.

따라서 성능을 기초로 한 설계 방법(Performance-Based Design)이 제안되고, 이는 많은 구조설계자와 학자들에게 큰 공감을 얻었다. ATC에서는 1994년 Vision 2000 위원회를 새로 구성하여 거동특성을 기초로 한 차세대 설계법을 개발하게 되었고, 1995년에는 1차 제안된 설계법이 나왔다.

대부분의 구조 설계자들은 대상건물 구조 설계 시 건물의 수명동안 찾아올 다양한 지진에 대하여 설계된 구조물이 어떻게 거동할지 예측하기 힘들다. 이는 내진 설계 기준이 구조물 거동에 대한 투명성이 결여된 것으로 결론 내릴 수 있다. 성능을 기초로 한 설계법에서는 구조설계자에게

이런 투명성을 줄 수 있어 설계한 건물이 주어진 지진에 대하여 어떻게 예측을 할 지를 예상할 수 있도록 한다. 간략하게 성능을 기초로 한 설계방법을 설명한다면 기존의 설계 기준이 475년의 재현 주기를 가진 설계지진하중 하나에 대하여 설계하는 것에 반하여 성능을 기초로 한 설계 방법에서는 고려하는 지역에서 발생할 수 있는 다양한 크기의 지진에 대하여 구조물의 설계 거동 수준을 정하여 이에 만족하도록 설계하는 것이다. 그림 2에 그 개념이 간략하게 나타나 있다.

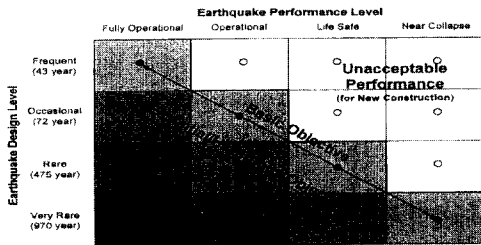


그림 2 PBSD 개념도 (Vision 2000, ATC)

2. 우리나라 내진설계 상위 기준의 기본 개념 및 구성내용

이 기준은 지진으로 인한 지반운동에 대하여 건축물을 설계 및 시공할 수 있게 하기 위한 최소한의 규정이라 할 수 있다. 기준의 일반적인 목적은 모든 건축물이 지진전후로 인명에 대한 위험도를 최소화하고, 상주인구가 많은 건축물은 일반적인 건축물에 비하여 향상된 내진성능을 보유하게 하고, 중요한 건축물은 그 기능이 마비되지 않게 하는 것이다.

상위기준에는 크게 (1) 시설물의 분류와 등급 설정, (2) 등급별 설계 기능 목표 규정, (3) 설계지반운동 수준 및 표현 방법 제시, (4) 설계 거동한계 규정, (5) 기본적인 내진설계 방법과 절차 규정, (6) 품질 보증에 대한 기본적인 사항 규정에 관한 내용을 포함하고 있다.

3. 시설물의 분류와 등급 설정

시설물의 분류는 재료에 따라 횡력저항시스템에 따라 나누는 것이 일반적이며, 시설물의 등급

은 화재 및 안전성을 고려하여 그 손상에 대한 위험정도에 따라 결정하고 있다. 초기에는 시설물의 등급을 인명손상에 대한 내진 안전성을 기초로 분류하여왔는데, 이러한 분류법을 사용한 대표적인 예가 1973 Uniform Building Code이다. 그 후 인명 손상에 대한 문제뿐만 아니라 지진발생 후의 복원, 보수, 가동상태 등을 고려해야 할 필요성을 인식하여 그 분류를 아래와 같이 다양하게 정해놓고 있다. 특히 현재 기준에서 시설물의 분류는 지진발생 후 가동해야하거나, 손상시 그 사회적 영향이 큰 시설물에 대한 고려를 하여 분류하고 있다.

3.1 건축물의 분류

건축물의 분류는 사용재료에 따라 철골조, 철근 콘크리트조, 목조, 조적조 등으로 나눈다. 건축물을 구조방식별로 분류하면 내력벽방식, 모멘트골조방식, 이중골조방식, 건물골조방식, 연직캔틸레버 구조방식과 이에 포함되지 않는 기타구조 방식으로 나눌 수 있다.

3.2 건축물의 등급

우리 나라 상위기준에서는 건축물의 등급을 건축물의 중요도에 따라 내진 특등급, 내진 1등급, 내진 2등급으로 분류하고 있다. 내진 특등급 건축물은 폭발성 물질을 보관하는 건축물이나 시설물과 방송국을 포함하고, 내진 1등급 건축물은 지진 후 피해복구를 위해 필요한 중요 건축물과 지진 발생시 거주자나 사용자에게 큰 피해를 줄 수 있는 건축물을 포함하고, 내진 2등급 건축물은 내진 특등급과 1등급에 포함되지 않은 건축물이라고 할 수 있다. 여러 용도로 사용되는 건축물이 2개 이상의 등급에 해당할 경우 가장 높은 등급을 적용하는 것을 원칙으로 한다.

4. 등급별 설계 기능 목표

설계 기능의 목표는 고려하는 지역의 지진의 크기에 따라 정할 수 있다. 설계 기능 목표는 내진등급별 성능수준으로 표현할 수 있다.

건축물의 등급별 성능수준은 지진의 크기 와 관련하여 정해야 한다. 우리 나라 상위기준에서 고려하는 두 개의 성능수준은 기능수행수준 (Operational Level)과 붕괴방지수준(Collapse Prevention Level)이다.

건축물의 기능수행수준은 지진발생시 건축물이 제 기능을 수행하고, 거주자나 사용자의 안전을 위협하지 않는 수준이다. 붕괴방지구준은 지진으로 인한 건축물이 손상은 예상할 수 있으나 그로 인한 전체적인 붕괴가 발생하지 않는 성능수준이다.

5. 설계지반진동 수준 및 표현방법 제시

상위기준에서는 설계 지반운동 수준은 해당지역의 지진 재현주기에 따라 정의한 100년(10년에 초과확률 10%), 200년(20년에 초과확률 10%), 500년(50년에 초과확률 10%), 1000년(100년에 초과확률 10%), 2400년(200년에 초과확률 10%)의 지진 지반운동 다섯 가지로 표현하고 있다. 또한 상위기준에서는 다음에서 열거한 방법으로 설계지반운동을 표현하고 있다.

5.1 설계응답스펙트럼

설계용 지진 응답스펙트럼으로 선형탄성 설계 응답스펙트럼(SLEDRS: Smoothed Linear Elastic Design Response Spectrum)과 비선형 설계 응답스펙트럼(SIDRS: Smoothed Inelastic Design Response Spectrum)을 사용할 수 있다. 이러한 응답 스펙트럼은 내진 등급별로 요구되는 지진 재현주기에 따라 산정한다.

5.2 지역특성 고려한 지진 응답 스펙트럼

연약지반에 내진등급이 높은 건축물을 설계할 경우 지역 특성에 맞는 설계 응답 스펙트럼은 지진의 재현주기를 고려하여 산정한다.

5.3 지진 가속도-시간 이력곡선 (Ground Acceleration Time History)

실제 지진기록(time history)이나 인공적으로 발생한 지진기록(artificial earthquake time history) 을 사용할 수 있는데 적어도 4개이상의 지진기록을 사용해야한다. 실제 지진기록사용시 지진기록의 선형탄성 응답스펙트럼 평균값이 재현주기가 고려된 선형탄성 설계 응답스펙트럼 (SLEDRS: Smoothed Linear Elastic Design Response Spectrum)과 유사해야함을 고려하여 선택한다.

5.4 설계지반운동의 수평성분과 수직성분

설계지반운동의 수평 2축 성분은 그 크기와 특성이 동일하다고 가정할 수 있고, 수직방향성분은 그 크기가 수평방향성분의 3분의 2로 가정할 수 있다.

5.5 지진운동계수와 지진재해도 (Seismic Hazard Map)

설계기준을 개발하기 위하여 설계지진운동의 그 강도를 표현하기 위하여 일반적으로 두 개의 변수를 사용하는데, 이들은 유효지반가속도(EPA), Aa 와 유효지반속도(EPV), Av이다. EPA와 EPV는 SLRES를 만들 때 사용되는 정상화 계수 (Normalizing Factor)라고 할 수 있다. EPA는 주기가 0.1초에서 0.5초인 경우 스펙트럼 축과 비례하게 되고, EPV 는 주기가 약 1초되는 부분에서 스펙트럼 축과 비례하게 된다. 적절한 주기 구간 내에서 5%의 감쇠율을 가진 SLRES의 값과 EPA 와 EPV 값의 비는 2.5가된다. 따라서 SLRES에서 EPA와 EPV를 구하기 위해서는 스펙트럼 값을 2.5로 나누어야 한다(그림 3). 따라서 EPA와 EPV 는 최대지반가속도와 최대지반속도와 비례하는 값이라 할 수 있고 그 값들이 같을 필요는 없다. 이들 값들은 지진의 경로, 지진운동 경과시간, 구조물의 주기 등에 따라 영향을 받고 그 영향에 대한 두 값의 변화가 다르기 때문에 EPA와 EPV 모두를 고려함이 바람직하다. Aa는 EPA에서 중력가속도 값을 제한 것이고 Av는 EPV를 현실적으로 동력학적인 내진설계에 사용할 수 있도록 속도에 관계한 가속도 값

으로 바꾼 것이다. 표 2에는 EPV와 Av의 관계가 나타나 있다.

표 2 EPV 와 Av의 관계

EPV(cm/sec)	Av
30.48	0.4
15.25	0.2
7.62	0.1
3.81	0.05

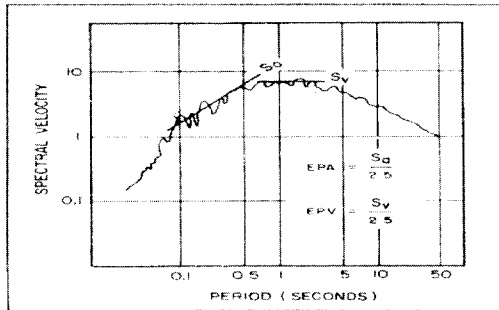


그림 3 반응 스펙트럼으로부터 EPA와 EPV를 얻는 방법을 보여주는 개략적인 도해

지진위험지도는 Aa와 Av에 대하여 그릴 수 있다. 같은 위험수위를 가진 지역을 등고선으로 묶은 후 Aa와 Av의 감쇠를 고려하여 다시 등고선을 작성해 나가는 방법으로 만들 수 있다. 특히 몇몇 연구자들에 의하여 지역특성에 따른 EPA와 EPV의 거리에 따른 감쇠관계를 유도해 내었다. 또한 지진기록이 작은 지역에서는 MMI (Modified Mecalli Intensity)의 기록을 이용할 수 있다. MMI의 거리에 따른 감쇠관계와 EPV, EPA와의 관계를 유도해 냄으로써 지진기록이 없는 곳에서도 지진위험 지도를 작성할 수 있다. 이렇게 동일 위험도를 가진 등고선을 그리는 방법을 동일 위험도해석(Uniform Hazard Analysis)라고 한다. 일반적으로 Aa지도보다 Av지도가 지진크기를 더 크게 나타내는 것이 일반적이다.

6. 설계거동한계 규정

기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 설계거동한계는 다음과 같다.

기능수행수준(Operational Level)은 지진발생 후에도 건축물이 제 기능을 수행할 수 있는 수준으로 거주자나 사용자의 안전을 위협해서는 안 된다. 각 성능 수준에 대한 구체적인 거동한계는 건축 재료와 횡력저항 시스템에 따라 그 차이가 있으므로 상세한 부분의 기능수행수준은 해당하는 건축기술기준을 따른다.

붕괴방지수준(Collapse Prevention Level)은 지진으로 인한 건축물의 손상이 심각하더라도 붕괴되지 않는 성능수준이다. 주요부재들의 부분적인 붕괴는 예상할 수 있다. 붕괴방지수준에서 구조물은 탄성한계를 넘어서 거동하게 되므로 충분한 연성과 잉여성(Redundancy)이 확보되어야 한다. 구체적인 거동한계는 건축 재료별 횡력저항 시스템별로 그 차이가 있으므로 상세한 부분의 붕괴방지수준은 해당하는 건축기술기준을 따라야 한다.

건축물의 내진등급별 성능수준은 지진의 크기와 관련되어 있다. 표 3에는 이 기준이 내진등급별 고려해야하는 설계용 지진과 그에 대한 성능수준이 나타나 있다.

표 3 내진등급별 설계지진과 내진성능 수준

	기능수행수준	붕괴방지수준
내진 2등급	100년	500년
내진 1등급	200년	1000년
내진 특등급	500년	2400년

7. 기본적인 내진설계 방법 및 절차

건축물 내진설계는 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대하여 건축 기술기준에서 정한 요구조건인 설계거동한계를 만족시키도록 해석을 실시한 후 설계하여야 한다. 상위기준에서는 다음과 같이 해석방법을 각 수준에 대하여 기술하고 있다.

7.1 기능수행수준

1) 기본적인 내진해석 방법은 선형탄성해석을 통하여 강도와 변위의 건축기준 요구 조건을 만족시켜야 한다. 건축기준에서 제시하는 특정한 형상 및 규모를 가진 건축물에 대해서는 입력지반 운동의 수평 2축방향 성분과 수직성분을 고려해야 한다.

2) 사용할 수 있는 해석 방법은 등가정적해석(Equivalent Lateral Force Procedure), 고려된 방향으로 총당 1 자유도를 가지는 모드해석법(Modal analysis procedure), 총당 두 개 이상의 자유도를 가지는 모드해석법(Modal analysis procedure)이 있다. 해석 방법의 선택은 건축 기술기준에 제시된 바에 따라야 한다.

7.2 붕괴방지수준

1) 구조물이 탄성한계를 넘어 비탄성 상태의 거동을 하게 되므로 강도와 연성을 동시에 평가할 수 있는 방법이 사용되어야 한다.

2) 붕괴방지수준의 설계거동한계를 평가할 때 탄성해석방법을 사용할 수 있는데 이를 위해서는 건축기준에서 제시된 합리적인 반응수정계수를 이용하여 해석결과를 수정하여야 한다. 또한 고려된 방향으로 총당 1 자유도를 가진 비선형 응답해석법(Inelastic response history analysis), 총당 두 개이상의 자유도를 가진 비선형 응답해석법(Inelastic response history analysis), 비선형 Pushover 해석법 등이 사용될 수 있다. 해석 방법의 선택은 건축 기술기준에 제시된 바에 따라야 한다.

8. 소 결

본 원고는 한국지진공학회와 한국건설기술 연구원이 수행한 내진설계기준연구를 기초로 한 것이다. 이 연구에서 우리 나라의 상위기준의 방향을 성능을 기초로 한 설계법을 채택한 것은 매우 시기 적절한 것이라 할 수 있다. 특히 미국과 일본이 이미 성능을 기초로 한 설계법 개발을 착수한 상태이고 국제기준인 ISO의 내진설계부분

(ISO3010)도 성능을 기초로 한 설계방법을 채택하고 있다. 하지만 이를 현행 설계에 적용하기에는 다소 시급한 부분이 있다고 할 수 있다. 상위기준에서 지진하중과 그에 대한 거동목표(Performance Objectives)는 정하고 있지만 거동목표에 대한 시스템과 부재의 한계상태(Limit States)는 자세하게 언급하고 있지 않다. 이런 부분에 관련한 많은 연구가 시급하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구, 1997.12
2. 건설교통부, 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 1987.
3. ICBO, Uniform Building Code, International Conference on Building Officials, Whittier, California, 1994.
4. ICBO, Uniform Building Code, International Conference on Building Officials, Whittier, California, 1997.
5. ATC, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, Applied Technology Council Report ATC 3-06, 2nd Printing, Palo Alto, California, 1984.
6. SEAOC, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Seismology Committee, Structural Engineering Association of California, Sacramento, California, 1959, 1988.
7. SEAOC, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Vision 2000 Committee, Structural Engineering Association of California, Sacramento, California, 1995.
8. BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, Building Seismic Safety Council, National Hazard Reduction Program Report, Washington, D.C., 1994.8 