

미국의 차세대 내진설계 개념의 발전 동향 Development of Performance-Based Seismic Design in U.S.A.

이한선*
Lee, Han-Seon

허윤섭**
Heo, Yun-Sup

고동우**
Ko, Dong-Woo

ABSTRACT

The objective of this paper is to review the current state of practice in the seismic codes in the U.S.A. and to investigate its trend in the development of performance-based seismic design for the 21st century. This study is supposed to be eventually utilized as a basis material to establish the new seismic code appropriate in our country having the moderate seismic hazard. To do this, the history of the seismic codes in U.S.A. is first briefly investigated and then the critical review on the recent codes is made. Finally, the conceptual framework of the performance-based seismic design and the development of the guideline documents to implement this to the rehabilitation of existing building structures are introduced.

1. 서론

우리나라의 실정에 적합하고 합리적인 건축구조물의 내진설계 개념 또는 철학을 정립하기 위해서는 해외 내진공학 선진국의 내진설계 개념을 파악하고 이를 분석하여 추후 우리나라 차세대 내진설계 개념수립의 기초자료로 활용함이 가장 빠르고 효율적인 접근방법이다. 따라서 우선 미국의 경우에 대하여 연구를 수행하였는데, 본 논문에서는 그의 내진설계 기준과 관련된 기관에 대해서 간략히 소개하고, 미국 내진설계 기준이 역사적으로 어떻게 변화하여 왔는지 살펴보았다. 또한 현행 미국 기준의 문제점을 밝히고, 차세대 내진설계의 개념을 소개하였으며, 차세대 내진 기준 정립을 위한 과도기적인 단계로서 개발된 차세대 내진설계 지침에 대해서 살펴보았다.

2. 미국 내진기준의 변천사

미국에서 내진설계 기준이 성문화된 이후로, 기준은 건축물의 내진성능 관찰, 실험 및 해석에 의한 연구자료에 기초하여 수차 개정되어 왔다. 현재 미국내에서는 아래와 같은 3개의 모델 건물 기준이 사용되고 있다.

* 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원
** 고려대학교 건축공학과 석사과정

- International Conference of Building Officials(ICBO)의 Uniform Building Code (UBC)^{1,2}
- Building Officials and Code Administrators (BOCA)의 National Building Code (NBC)³
- Southern Building Code Congress International(SBCCI)의 Standard Building Code (SBC)⁴

내진설계와 관계된 주요기관에는 앞에서 언급한 것 이외에도 Applied Technology Council (ATC)^{5~8}와 American Society of Civil Engineers (ASCE)⁹, Structural Engineers Association of California (SEAOC)^{10,11}, Building Seismic Safety Council (BSSC)^{12~14}, National Institute of Standards and Technology (NIST), National Earthquake Hazard Reduction Program을 관장하는 Federal Emergency Management Agency (FEMA) 등이 있으며, 이러한 내진규준 및 관련기관들은 서로 밀접한 관계를 맺고 있다. UBC는 주로 미국 서부지역에서 사용되며, SEAOC 규준안과 밀접한 관계를 맺고 발전하여 왔다. NBC는 미국 동부지역에서 주로 사용되며, NEHRP 규준안에 근거를 두고 있다. 이외에도 다음과 같이 모델 규준의 발전에 크게 기여한 규준안들이 있다.

- ATC의 Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings (ATC-3-06)⁵
- ASCE의 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE-7)⁹
- SEAOC의 Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (Blue Book)¹⁰
- BSSC의 NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings (NEHRP Provision)¹²

이러한 규준의 역사적 변천과정을 다음에서 살펴보도록 한다.

1925년 M_s 6.5의 Santa Barbara 지진으로 캘리포니아의 몇몇 시에서 횡하중 계수를 0.20로 규정 한 내진규준을 채택함으로써, 건축물에 대한 내진규준이 캘리포니아에서 본격적으로 시작되었다. 1927년 PCBOC¹에 의해서 UBC가 처음으로 발간되었다. 부록에 내진설계규준을 수록하였으나, 강제 규정은 아니었다. 수평하중 계산식을 제안하였으며, 초기 내진설계규준이 취약한 지반에 대해 설계 횡하중을 증가시키도록 규정하고 있는 것은 주목할 만하다. 1933년 Long Beach 지진은 캘리포니아로 하여금 체계적인 내진설계를 수용하도록 자극하는 계기가 되었으며, 그 여파로, 캘리포니아 주의회는 1933년 5월 Riley령과 Field령을 승인하였다. 1935년에 개정된 UBC 내진설계규준에서는 미 서부 11개 주를 3개의 지진지역(약진, 중진, 강진)으로 분류하고 이에 대해서 최초로 지진지역계수(Z)를 정의하였다. 1943년 Los Angeles시는 C계수를 사용하여 건물의 동적응답을 간접적으로 고려하였다. 1957년에 SEAOC은 캘리포니아에 대한 내진규준 개발을 시작하였으며, 그 결과 1959년에 SEAOC Blue Book을 발행하게 되었다. 구조시스템 형식을 분명하게 고려하여 설계밀면전단력을 계산하고 있다는 점에서 이전의 내진규준과는 크게 다르다. 여기에서 수평하중계수 K는 구조시스템 형식에 대해서 결정되는 값으로 R 또는 R_w의 전신이라는 점에서 주목할 만하다. 그리고 지진지역계수를 사용하지 않았는데, 이것은 캘리포니아를 일정한 지진활동도를 가지고 있는 것으로 가정하였기 때문이다. 이후로도 SEAOC은 계속하여 내진규준안을 개발하여 왔으며, 이 규준안을 ICBO에 제공함으로써 UBC 규준의 발전에 크게 기여하였다. 이러한 SEAOC과 ICBO의 관계는 오늘날까지도 계속되고 있다.

1966년에 Blue Book은 철근콘크리트 연성상세를 도입함으로써, 1927년 이후 내진설계에 있어서 가장 큰 전환점을 제공하였다. 1968 Blue Book은 철골 연성모멘트 저항 공간골조의 설계와 상세에 대해 분명한 요구조건을 제시하였으며, 접합부에서의 능력설계법을 소개하였다. 1971년 San Fernando 지진으로 SEAOC 규준안에 따라 설계된 수많은 현대식 건물들의 성능이 저조하게 나타났다. 그 결과 SEAOC의 노력에 의해, 건물 규준 제정에 필요한 연구를 수행하고 소요 자금을 확보

하기 위해서 비영리 응용연구 재단인 ATC가 설립되었다. 1974 Blue Book은 미국 내진규준에서는 처음으로 횡변위제한을 정량화하였다. 1977년에 National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)이 법률로 제정됨으로써, 내진규준 발전에 커다란 공헌을 하게 되었다. 1970년대 중반에 건물에 대한 내진규준안의 개발을 시작한 ATC는 1978년에 ATC-3-06을 발간하였다. 여기에서는 용도에 따른 건물 분류를 지진재해그룹(seismic hazard exposure group categories)으로 분류하여 정의하고, 전국적 규모의 지진재해도 사용, 탄성 동적해석법, K를 대신한 반응수정계수(R 계수)의 사용, 분명한 층간변위제한, 직교(orthogonal)효과 고려, 허용응력 설계를 대신한 강도설계법, 지반-구조물 상호작용에 대한 규준, 건축·전기·기계 시스템 및 요소에 대한 상세한 내진설계 요구조건 등을 소개함으로써, ATC-3-06은 여러 관점에서 이전의 내진규준과는 크게 다른 새로운 개념을 제시하였다. 또한 변위중폭계수(C_d)와 탄성해석에 의한 층간변위의 곱으로 결정되는 비탄성 층간변위(δ_x)를 제한함으로써 주요시설물의 내진성능을 향상시키고 있으며, 이것은 UBC와 Blue Book에서 중요도계수를 사용해서 설계하중을 증가시키고 있는 것과 대조를 이룬다.

1985년에, BSSC는 전국적인 규모로 사용하기 위한 목적으로 NEHRP 규준안¹²을 발간하였는데, 이 규준과 해설은 ATC-3-06에 기초하였으며, 50년 주기에 대한 초과확률 10%에 기초하여 지진재해도를 작성하였다. 1988 NEHRP 규준안의 해설에서는 설계기준지진과 최대가능(maximum capable)지진을 구분하고 있다. 1988 Blue Book은 ATC-3-06과 1985 NEHRP규준안을 근거로 개발되었으며, 캘리포니아에 대한 지진재해도를 사용하였으며, 허용응력법에 의한 설계 밀면전단력 계산식을 제안하고, 구조적인 비정형성을 정량화하고, 동적해석에 대한 지침을 제공하였으며, 시스템 설계 요구조건을 명확히하고, 주요 건축재료(콘크리트 벽돌, 철골, 목재)에 대해 포괄적인 상세 요구조건을 제시하였다. 1991 UBC는 1988 UBC 및 1990 Blue Book과 동일하며, 1990 Blue Book의 면진 구조물에 대한 내진규준이 도입되었다. 약간의 수정을 통해서 1991 NEHRP 규준안이 개정되었으며, 약진에서 중진에 이르는 지역에 대한 최대가능지진(maximum capable earthquake)을 좀 더 명확하게 묘사하기 위해서, 250년주기에 대한 초과확률 10%에 기초한 지진재해도를 규준에 추가하였다.

1992년 DoD의 Tri-Services Manual¹⁵은 비주요 군사시설의 설계와 시공에 대해서 규정하고 있으며, 이러한 시설에 대한 성능목표와 설계법은 1988 Blue Book과 유사하다. 주요 시설에 대한 내진설계규준은 1986 DoD¹⁶를 참고하도록 하고 있으며, EQ-I와 EQ-II로 나타낸 두가지 수준의 지진동에 대한 2단계 설계를 기본으로 하고 있다. 즉, 50년 주기에서 50%초과 확률을 가진 최대확률 지진(maximum probable earthquake)에 대해서 완전탄성 거동하도록 설계하고, 그 이후에 100년 주기에서 10% 초과확률을 가진 최대예상지진(maximum considerable earthquake)에 대해서 비탄성 수요비 또는 능력스펙트럼법을 사용하여 설계결과를 검토한다. DOE-STD-1020-92 규준¹⁷은 DoE의 구조물, 시스템 및 요소(SSC : structure, system, component)의 내진 해석, 설계 및 평가에 대한 다단계 접근법을 제시하였다. 각 SSC에 대해서 4개의 성능 범주를 규정하고 있으며, 각 성능 목표에 대해서 서로 다른 설계법을 요구함으로써, 단지 한 개의 성능목표(설계기준지진에서의 인명안전)만을 규정하고 있는 UBC 또는 NEHRP 규준안과는 근본적으로 다르다. 또한 UBC에서 내진골조 시스템 내의 모든 요소에 대해서 동일한 R_u 를 사용하고 있는것에 비해, DOE에서는 부재 형태에 따라서 결정되는 비탄성 수요능력비(F_u)를 사용한다는 점이 주목할 만하다.

1994년 Northridge 지진으로 광범위한 지역이 피해를 입었으며, 이 지진으로 용접에 의한 철골 모멘트-골조가 열악한 성능을 가지고 있음이 밝혀졌으며, 대부분의 오래된 비연성 콘크리트 골조 구조물이 파괴되었다. 1994년 NEHRP 규준안의 형식과 내용은 1991 NEHRP 규준안으로 부터 크게 바뀌었다. 주요 변화에는 새로운 내진계수 C_s 및 C_d 소개, 지반특성에 대한 새로운 정의, 골조 시스템에 대한 R 값 수정, 철골 특별 집중가새 골조(와 이에 따른 이중시스템)의 추가, 복합 철골 및 콘크리트 골조 시스템에 관한 내용, 면진 건물에 대한 지침과 해설, 수동 에너지소산 시스템에 대한 예비 지침 및 해설, 건축·기계·전기 요소에 대해 수정, 철골 모멘트 골조 접합부의

성능 요구조건 추가 등이 있다. 1994년에 BOCA, ICBO 및 SBCCI는 공동으로 International Building Code Congress(IBC)를 구성하였으며, 1995년에는 NBC, SBC, UBC 규준을 대신하여 International Building Code(IBC)를 2000년에 발간하기로 합의하였다. 이로 인해서 단일 건물 규준이 모든 지역에 동일하게 적용될 것으로 기대된다. 1997년 UBC는 허용응력설계로 부터 강도 설계법으로 전환함으로써 이전의 규준에 비해 크게 달라졌으며, 근진원 계수(near source factor : N_a , N_v)와 신뢰도/여유도 계수(ρ)등 몇가지 새로운 개념이 도입되었다.

표 1. 미국 내진규준의 변천

년도	특기사항	규준 및 내용
1927	[UBC] 첫 발간 (PCBOC) Long Beach 지진 발생 (캘리포니아)	$F = CW$ C : foundation-dependent factor
1933	[Riley AC1] [City of Los Angeles]	$V = 2\% W_{TOTAL}$ for buildings in California $V = 8\% (W_{DL} + W_{LL})$
1935	[UBC] 지진 지역 계수 도입	$V = 8 - 16\% (W_{DL} + 50\% W_{LL})$ for zone 3 $Z = 1, 2, 4$ in zone 1, 2, 3
1943	[City of Los Angeles] 간접적인 동적 응답 고려	$V = 3.4 - 13\% W_{DL}$ depending on N $C = \frac{0.6}{N + 4.5}$ N : number of stories (≤ 13 stories)
1949	[UBC]	$C = \frac{0.15Z}{N + 4.5}$
1952	[ASCE + SEAOC] 황하중-주기 관계식 최초 제안	$C = \frac{K}{T}$ $K = 0.015$ for buildings and 0.025 for other structures
1957	[SEAOC] 내진 규준 개발 착수	
1959	[SEAOC] Blue Book 초판 구조시스템 형식 최초 고려 (K 계수)	$V = KCW$ $K = 1.33$ (bearing wall), 0.80 (dual system), 0.67 (moment-resisting frame), 1.00 (others) $C = \frac{0.05}{\sqrt{T}}$: define the shape of design response spectrum
1960	[SEAOC] Commentary 첫 발간	
1961	[UBC] 1959 Blue Book 도입	$V = ZKCW$ $Z = 0.25, 0.50, 1.0$ in zone 1, 2, 3
1966	[SEAOC] 철근콘크리트 연성골조에 대한 설계규준 제시 보와 기둥의 전단철근에 대한 능력설계법 제시 보-기둥 접합부 해석법 제시 구조 콘크리트 벽체에 대한 설계규준 최초로 제시	
1971	San Fernando 지진 발생	
1974	[SEAOC] 횡변위 제한 최초로 정량화	$V = ZIKCSW$ $C = \frac{1}{15\sqrt{T}}$
1976	[UBC] 지반계수(S)와 중요도계수(I) 도입 1974 Blue Book의 횡변위제한 도입	$V = ZIKCSW$, ($V = 2 - 18\% W_{DL}$)
1978	[ATC] ATC-3-06 발간 (R 계수 도입)	$V = C, W = \frac{1.2A_s S}{RT^{2/3}}$
1985	[BSSC] NEHRP 규준안 초판	
1988	[SEAOC] ATC-3-06과 1985 NEHRP 수용	$V = \frac{ZIC}{R_w} W = \frac{1.25ZIS}{T^{2/3}R_w} W$ $Z = 0.2 - 0.4$ in California
	[UBC] 대폭 개정 / ATC-3-06 수용 (R 을 대신한 R_w 도입)	$V = \frac{ZIC}{R_w} W$
1989	Loma Prieta 지진 발생 Northridge 지진 발생	
1994	[NEHRP] 1991 NEHRP 대폭 개정	$V = C, W$ $C = \frac{1.2C_u}{RT^{2/3}} \leq \frac{2.5C_u}{R}$
1997	[UBC] 강도 설계법으로 개정	$V = \frac{C_u I}{RT} W$

3. 현행 미국 내진설계 기준의 문제점

이 장에서는 1994 UBC와 NEHRP 기준안 등에서 채택하여 사용하고 있는 현행 설계법을 주요사항 별로 구분하여 그 문제점을 살펴보기로 한다.

지진재해(Earthquake Hazard)

지진에 의해 건축구조물에 발생할 수 있는 잠재적인 재해에는 지진동(shaking), 단층파괴(fault rupture), 지반붕괴(ground failure), 액상화(liquefaction), 부동침하, 산사태, 및 쓰나미(tsunamis) 또는 사이키(seiches) 등이 있으며, 지진동을 제외한 재해에 의해서 인명피해 및 대규모의 경제적 손실을 초래할 수 있음에도 불구하고 대부분의 내진설계기준에서는 지진동에 의한 건물의 손상으로부터 인명안전을 보장하는 데에만 중점을 두고 있다. 따라서 이러한 기타 재해에 대해서도 충분한 관심을 가져야 하며, 계획 및 설계과정에서 이를 분명하게 고려해야 한다.

지진재해 해석(Seismic Hazard Analysis)

설계지진에 대해 예상되는 지진동 특성을 묘사하기 위해서 지진재해 해석을 수행하며, 재해해석 결과를 응답스펙트럼으로 나타낸다. 이러한 설계 응답스펙트럼 작성에는 일반적으로 4가지 기법(표준 스펙트럼, 스펙트럼 응답지도, 확률론적 지진재해 해석, 결정론적 지진재해 해석)이 사용되며, 이러한 해석법은 선형거동 범주내에서 구조물에 대한 지진재해를 묘사한다. 그러나, 건물은 설계지진시 항복하며 어느 정도의 비선형 응답을 보인다. 따라서 현행 해석법으로는 구조물의 비선형 응답에 영향을 줄 수 있는 지반운동의 중요한 특성인 지속시간(duration)과 항복반전 횟수를 묘사하지 못한다.

성능목표 (Performance Objectives)

성능목표는 성능수준과 지진재해수준과 관련되어 정의된다. 즉, 성능수준에는 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지 등이 있으며, 지진재해의 정의에는 설계지진과 최대가능 지진(maximum capable earthquake) 등이 있다. 1994 UBC에서는 건물을 일반적인 건물과 주요 건물로 구분하고 있으며, 일반적인 건물에 대한 성능목표는 ①약진에서 구조재 및 비구조재의 손상 방지, ②중진에서 제한적인 비구조재 손상 허용 및 구조재 손상방지, ③설계지진에서 제한적인 구조 손상 허용(인명안전 보장), ④최대가능 지진에 대한 붕괴방지도이다. 그러나 이러한 정의에는 다음과 같은 문제점들을 내포하고 있다. 첫째, 약진과 중진이 정량적으로 규정되어 있지 않다. 둘째, 설계지진에 대한 인명안전에 초점을 둠으로써, 약진과 중진 및 최대가능 지진에 대한 성능이 달성되었는지를 검토하도록 규정하고 있지 않으며, 경우에 따라서는 이러한 성능목표를 만족시킨다 하더라도 심각한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 또한 UBC에서는 중요도 계수(I)를 사용하여 주요 구조물에 대한 지진재해를 규정하고 있으나, 중요도계수의 역할이 분명하지 않다.

내진골조 시스템의 선정

여유도와 형상을 고려하여 우수한 성능을 확보할 수 있는 골조시스템을 선정해야 한다. 현재, 여유도는 이중시스템에 대한 설계 기준을 통해 간접적으로 정량화되어 있을 뿐이다. 여유도를 가진 내진골조 시스템이 효과적으로 거동하기 위해서는, 시스템을 구성하고 있는 수직 내진골조들의 상대적인 강도(strength)와 강성(stiffness)에 대한 제한규정을 두어야 한다. 현행 설계에서는 형상의 관점에서 구조물을 정형 또는 비정형으로 정성적인 구분을 하고 있으며, 동적해석을 수행하여 계산된 값을 상향조정함으로써 비정형 구조물을 설계하도록 규정하고 있을뿐, 비정형에 대한 정량적인 규제가 이루어지지 않고 있다.

반응수정계수 (Response Modification Factors)

1957년 이후로 미국에서는 반응수정계수를 여러 가지 형태로 내진설계에 사용하여 왔으며, R 계수는 1978년 ATC 3-06에서 처음으로 소개되었다. 그동안 수행된 연구 결과, 다음과 같이 2가지 의문점이 제기되었다. 첫째는 UBC 및 NEHRP 규준안의 반응수정계수 규정값 자체의 신뢰성에 대한 의문이며, 둘째는 주어진 구조시스템의 모든 요소에 대해서 동일한 R 값을 사용하고 있다는 점이다.

간이 해석법 (Simplified Analysis Procedures)

비선형 해석에 의한 보다 정밀한 해석법이 개발되고 있으나, 선형 해석법이 가까운 장래에도 미국 내진설계 규준의 중요한 부분으로 남아 있을 것이다. UBC와 NEHRP 규준안과 같은 현행 내진설계에서 제시하고 있는 정적 횡하중법의 가장 큰 단점은 설계 지진시 매우 큰 비탄성 응답을 나타낼 것으로 가정한 골조 시스템에 대해서 탄성하중에 기초한 해석법을 사용한다는 점이다. 또한 이들 규준은 모두 충격도에 대한 단자유도 시스템의 변위를 크게 과소평가하고 있음이 연구결과 밝혀졌다¹⁸. 즉, 기본 진동주기를 과소평가함으로써 지진 밀면전단력을 최대로 산정하고 있으나 이렇게 함으로써 변위를 과소평가하는 경향이 있다.

구조요소의 모델링

구조요소의 모델링은 설계과정에서 불확실성이 개입될 수 있는 한 예이다. 해석을 수행하기 위해서 설계자는 구조물의 삼차원적인 형상과 요소 특성을 표현할 수 있는 수학적인 모델을 제시해야 한다. 두가지 모두 그 불확실성으로 인해서 해석결과와 신뢰성에 심각한 영향을 미칠수 있음에도 불구하고, 현행규준에서는 설계자의 수학적 모델 개발에 도움을 줄 수 있는 지침이 거의 주어져 있지 않다.

기초설계

기초는 모든 내진골조 시스템에서 필수 불가결한 요소임에도 불구하고, 설계단계에서 크게 관심을 받지 못하고 있다. 현행 기초 설계에서는 건물이 무한한 강성을 가진 기초에 고정되어 있다고 가정하고, 건물의 수학적 모델을 선형 탄성 해석하여 계산된 지진(및 중력)거동에 저항하도록 기초의 상세를 결정하고 있다. 현행 내진규준의 의도는 기초가 설계지진시 탄성거동하도록 하는데 있다. 그러나 현행 설계법을 사용하여 의도된 성능수준을 확보할 수 있을지에 대해서는 확신할 수 없다.

비구조요소의 설계

외부마감재와 내부 간막이와 같은 비구조 요소는 구조물의 횡강성과 등가점성 감쇠를 증가시킬 수 있음에도 불구하고 일반적으로 이러한 비구조 요소의 구조물에 대한 영향이 무시되어 왔다. 또한 비구조 요소는 강진 발생시 인명안전에 심각한 위험을 줄 수 있으나, 규준에서는 설계지진시 구조 골조의 부분적 또는 전체적인 붕괴방지에 초점을 두으로써 이를 충분히 고려하고 있지 않다.

위험도(Risk)와 신뢰도(Reliability)

현행 내진설계는 그 적용이 간단명료하다는 장점을 가지고 있으나, 복잡한 문제를 지나치게 단순화함으로써 많은 문제들이 발생하게 되었다. 지진하중, 응답평가 및 구조적 특성은 모두 확률론적인 성격을 띠고 있으므로, 합리적인 설계를 위해서 이들은 신뢰성 이론에 근거하여 결정되어야 한다. 위험도는 손실(loss)에 대한 노출(exposure)로 정의된다. 전국적인 규모로 사용할 수

있는 표준 내진규준을 개발하기 위해서는 현재의 “일정한 재해(uni form hazard)”가 아닌 “일정한 위험도(uni form risk)”에 기초해야 한다.

4. 차세대 내진규준의 개념

4.1 배경

금세기 초반에서 1970년대까지의 내진 설계는 주로 등가 횡하중 개념에 근거하여 개발되어 왔다. 1970년대에 ATC 3-06 프로젝트는 그 동안의 연구 결과 및 발전사항을 광범위하게 정리하여, 내진 공학의 새로운 방향을 제시하였다. 그러나 1989년 Loma Prieta 지진과 1994년 Northridge 지진 등 최근의 지진에 의한 막대한 경제적 손실로 인해 좀 더 적절하고 예측가능한 성능을 얻을 수 있도록 개선된 내진 설계접근법의 필요성이 대두되었다. 차세대 내진설계규준을 정립하기 위해서는 우선 그 개념을 명확히 제시할 필요가 있으며, 또한 이러한 개념을 건축물 설계에 바로 적용하기에 앞서 과도기적 단계로서의 지침서가 요구된다. 이러한 지침서는 궁극적으로 차세대 내진설계 규준으로 이어져 완성될 것이다(그림 1).

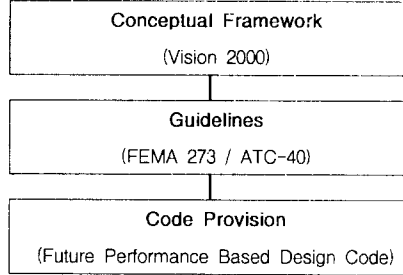


그림 1. 차세대 내진규준 정립과정

예측 가능한 내진 성능을 확보하기 위해서 내진 설계 개념을 재정립해야 할 필요성이 제기됨에 따라, SEAOC은 1992년에 Vision 2000 위원회를 결성하여 성능에 기초한 공학(Perforamnce-Based Engineering : PBE)을 개발하기 시작하였으며, 1995년에 Vision 2000 보고서¹¹를 발간하게 되었다. 이 보고서는 4개 부분으로 이루어져 있으며, Part 2 Conceptual Framework에서 성능에 기초한 내진공학에 대한 개념을 제시하고 있다. 또한 이에 후속하여 ATC-33 프로젝트로 FEMA 273¹³이 개발되었으며, 이 지침서는 FEMA의 지원을 받아 ATC에 의해서 1997년에 NEHRP Guideline으로 발간되었으며, BSSC에서 전체적인 프로그램 관리를 수행하였다. FEMA 273 이외에도 이러한 지침개발로는 ATC 40⁸이 있다.

본 논문에서는 Vision 2000에서 소개하고 있는 성능에 기초한 내진공학의 기본 개념과 FEMA 273의 주요 특징에 대해서 살펴보기로 한다.

4.2 SEAOC Vision 2000¹¹

성능에 기초한 내진 공학은 다음과 같이 예측가능한 내진성능을 가진 구조물을 생산하는데 요구되는 공학의 모든 분야를 총망라한다(그림 2).

- **성능 목표** : 예상 성능수준과 지진재해수준을 서로 연관시켜 정의함으로써 성능목표가 결정되며, Vision 2000에서는 이를 Basic Objective, Essential/Hazardous Objective 및 Safety Critical Objective의 3개의 최소성능목표(그림 3)와 향상된 성능목표(Enhanced Objective)로 정의하였다.
- **대지 적정성 및 설계지반운동** : 발생가능한 모든 지반재해를 고려하여 제안된 구조물에 대한 적합성 여부를 분석한다. 또한 설계 지반운동 수준을 결정한다.
- **설계법** : 개념설계, 예비설계, 최종설계 및 허용여부 검토가 포함된다. 개념설계에서 설계의 주요 방향결정이 이루어지며, 예비설계에서는 기능과 인명안전에 근거하여 요소의 크기를 결정한다. 최종설계에서는 선정된 모든 성능목표를 고려하며, 능력설계법을 사용하여 상세를 결정한다. 각 설계 단계 이후에 성능 목표에 따라 규정된 기준을 만족하는지 확인

한다. 설계법에는 포괄적 설계법, 변위 설계법, 에너지 설계법, 일반적인 힘/강도 설계법, 단순화된 힘강도 설계법, 및 처방식 설계법이 있다. 해석법에는 탄성해석법, 요소에 근거한 탄성해석법(Linear Static Procedure : LSP), 능력스펙트럼 해석법, 및 동적 시간이력 해석법이 있다.

- 품질보증 : 광범위한 설계 검토와 시공품질 보증이 포함되며, 이는 성능에 기초한 공학에서 반드시 수행되어야 한다.
- 건축물 유지관리 : 성능에 기초한 공학은 건축물의 준공과 함께 종결되는 것이 아니다. 단지, 책임소지가 달라질 뿐이며, 건물의 사용수명에 걸쳐서 구조물의 상태, 형상 및 용도에 대한 지속적인 관리가 요구된다.

이상에서 성능에 기초한 내진공학의 개념에 대해서 간략히 살펴보았으며, Vision 2000은 이외에도 성능에 기초한 내진공학과 관련하여 많은 자료들을 수록하고 있다. 이러한 연구결과에 비추어 볼때, Vision 2000은 다음과 같은 의의를 가진다.

- 새 건축물에 대해 사용할 수 있는 일련의 성능수준 정의
- 기준으로 사용할 수 있는 일련의 지진재해 및 설계수준 정의
- 여러 용도를 가진 건물들에 대해서 일관되게 적용할 수 있는 성능목표 정의
- 현재 가용한 기술 및 설계법을 사용하여 일관되게 적용할 수 있는 공학적 방법 제안

4.3 FEMA 273¹³

FEMA 273은 기존 건물의 내진 보수·보강에 대해서 철저한 기술적 기반을 가지고 전국적인 규모로 사용할 수 있는 지침 제공을 주요 목표로 한다. 이 지침서는 1978년 ATC-3-06이 소개된 이후로 지진공학 분야의 설계 기술 발전에 가장 큰 공헌을 하였으며, 이 지침서에서 새롭게 제시된 특징에 대해서 살펴보기로 한다.

내진 성능수준 및 목표

이 지침서에서는 성능수준과 성능목표를 정의하고 의도된 성능을 확보할 수 있도록 분명한 설계방법을 최초로 제시하고 있다. 4개의 성능수준인 붕괴방지, 인명안전, 즉시거주, 및 가동가능

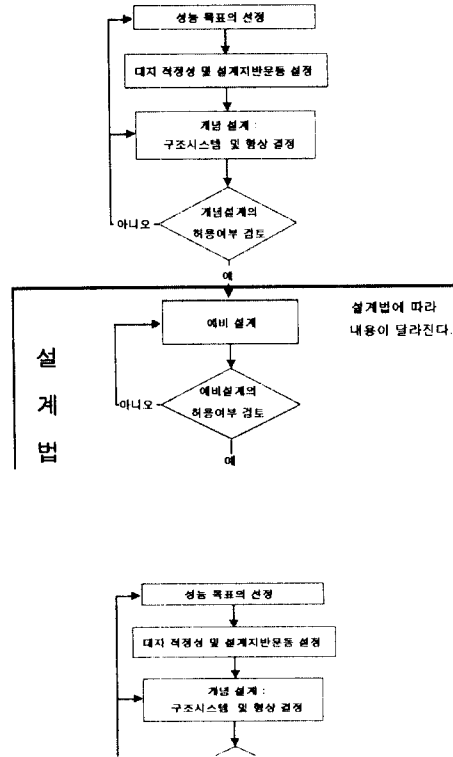


그림 2. PBE의 일반적 방법론

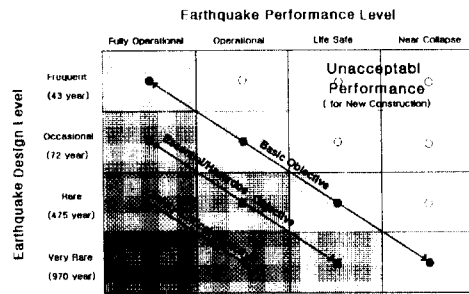


그림 3. 건축물에 대한 성능목표

을 정의하고 있으며, 이들 사이에 제한적 안전과 손상제어의 2개 성능범위를 정의하고 있다. 또한 각 성능수준은 구조 성능수준과 비구조 성능수준으로 이루어져 있으며, 이러한 접근법은 차세대 내진규준에 대한 모범을 보여준다. 지침서에서 추천하고 있는 최소 성능목표는 기본안전목표(Basic Safety Objective: BSO)이다. 건물이 2개의 기준을 만족할 때 BSO를 달성할 수 있다: ① 기본안전지진-1(BSE-1 : 재현주기 475년)발생시 인명안전 성능수준은 구조재 및 비구조재의 거동제어에 의해서 달성된다 ②기본안전지진-2 (BSE-2 : 재현주기 2500년)발생시 붕괴방지 성능수준은 구조재의 거동제어에 의해서 달성된다. 새로운 건축물 설계에 대해서도 이러한 기본안전목표를 적용할 수 있다.

해석법, 평가방법 및 설계법

내진 보수·보강 건물의 체계적인 설계를 위해서 선형 정적, 선형 동적, 비선형 정적, 비선형 동적해석법을 제시하고 있다. 선형 해석법은 새롭게 제시된 변위 지향적인 방법으로 적용이 손쉬우며, 선형 정적 해석법(LSP)은 이미 앞에서 언급하였다. 비선형 정적 해석법은 변위에 근거한 해석법으로 간단한 비선형법을 사용하여 변위를 결정한다. 비선형 동적 해석법은 비선형 시간이력 해석으로 알려져 있으며, 위 방법 중 가장 정밀한 해석법이다. 일반적으로 일방향 가력법(pushover analysis)으로 알려진 비선형 정적해석은 설계 평가에 가장 많이 사용되는 해석법이다. 지침서 본문¹³에는 비선형 거동을 선형거동으로 치환하여 기타 계수를 조정한 방법인 계수법(Coefficient Method)만을 제시하고 있으나, 해설¹⁴에는 이 기법외에 일방향 가력법의 비선형 정적해석 기법과 구조물의 비선형 거동에 따른 에너지 소산을 감쇠계수로 치환한 응답스펙트럼을 이용한 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)이 제시되어 있다. 이러한 방법의 최종 산물은 주어진 지진운동에 대한 옥상층 최대변위이며, 두 가지 방법은 대부분의 경우에 서로 유사한 결과를 제시한다. ATC-40과 1986 DoD는 능력스펙트럼법에 대해서 자세히 기술하고 있다. 이러한 선형 및 비선형 해석법은 내진 해석에서의 근본적인 개선방향을 제시하고 있다.

요소 거동에 대한 정량적인 제한값 제시

요소의 연성수요, 소성힌지 회전각, 및 층간변위비와 같은 해석 결과를 통해 수요(demand)성능을 정량화할 수 있다는 가정에 기초하여 지침서에 성능수준과 성능범위를 정량적으로 제시하고 있다. 마찬가지로 이미 정해진 성능수준을 설계된 구조물이 만족시키고 있는지 각 요소수준에서 확인하기 위해서 각 요소의 강성, 강도, 연성(ductility) 및 회전각의 최대 수용한계값을 또한 표로써 수록하고 있다.

5. 결론

지난 한세기에 걸쳐 내진설계는 간단한 설계개념과 제한된 성능 목표를 가진 초보적인 단계로부터 시작하여 많은 발전을 거듭하여 왔다. 그러나 최근에 예측가능한 성능을 얻을 수 있는 내진설계법에 대한 필요성이 대두되었으며, 이러한 차세대 내진설계규준을 정립하기 위해서는 우선 그 개념이 명확히 제시되어야 하며, 규준적용에 앞서 과도기적 단계로서의 지침서가 제시되어야 한다.

본 논문에서는 이에 근거하여 미국의 내진설계 규준의 변천과 현행 규준의 문제점 및 차세대 내진설계 규준정립을 위해 Vision 2000에서 소개하고 있는 성능에 기초한 내진공학의 기본 개념과 FEMA 273 지침서의 주요 특징에 대해서 소개하였다.

이러한 외국의 사례 조사·분석은 우리나라의 실정에 적합한 규준정립을 위해 기초자료로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 STEPI의 지진대응기술개발과제의 소과제 일부로서 수행되었으며, 이 연구지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. PCBOC(1927, 1935, 1949), Uniform Building Code, Pacific Coast Building Officials Conference, Whittier, California.
2. ICBO(1961, 1967, 1976, 1985, 1988, 1991, 1994, 1997), Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, California.
3. BOCA(1993), National Building Code, Building Officials and Code Administrators, Country Club Hills, IL.
4. SBCCI(1993), Standard Building Code, Southern Building Code Congress International, Birmingham, Alabama.
5. ATC(1978), Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ATC-3-06 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
6. ATC(1995), A critical review of current approaches to earthquake-resistant design, ATC-34 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
7. ATC(1995), Structural Response Modification Factors, ATC-19 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
8. ATC(1996), Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings : Volume 1, 2, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
9. ASCE(1995), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI/ASCE 7-95, American Society of Civil Engineers, New York, New York.
10. SEAOC(1959, 1960, 1966, 1968, 1974, 1988, 1990), Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
11. SEAOC(1995), Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, SEAC Vision 2000 Committee.
12. BSSC(1985, 1988, 1991, 1994), NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
13. BSSC(1996), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, ATC-33 project, BSSC, FEMA 273.
14. BSSC(1996), NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, ATC-33 project, BSSC, FEMA 274.
15. DoD(1992), Seismic Design for Buildings, TM-5-809-10, Departments of the Army, Navy, and Air Force, Washington, D.C.
16. DoD(1986), Seismic Design for Essential Buildings, TM-5-809-10-1, Departments of the Army, Navy, and Air Force, Washington, D.C.
17. DoE(1992), Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, Department of Energy, DOE-STD-1020-92, Draft, Department of Energy, Washington, D.C.
18. Miranda E., V.V. Bertero(1994), Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design, Earthquake Spectra, Vol.10.