

PBD에 근거한 ATC-40의 능력스펙트럼법을 이용한 성능점 산출방법 소개

Introduction of the Performance Point Calculation Using the Capacity Spectrum Method of the ATC-40 Based on PBD



최 병 정*
Choi, Byong-Jeong

1. 서론

지진은 국내뿐만 아니라 세계 각지에서 발생하는 자연재해 중 가장 예측이 어려운 재해이다. 지난 2008년 5월 중국의 쓰촨성¹⁾ 지진은 규모 8.0으로, 쓰촨과 인접한 깐수, 쓰시, 충칭 등 417개 현에 발생하였다. 이 때 발생한 지진으로 사망자 6만 9,196명, 실종 1만 8,379명(잠정 집계), 경제적으로 1500억 위안 등 엄청난 인적·물적 피해가 발생하였다. 반면 일본²⁾의 경우 2011년, 3월 동쪽 해저 20km 부근에서 규모 9.0의 강력한 지진이 발생하였는데 내륙지역의 규모는 7.0 이하였다. 이전에 발생한 비슷한 규모의 고베지진(1995년 1월 규모 7.2) 이후 건축물과 사회 기반시설의 내진설계기준을 강화시켜 지진에 대비한 결과 이번 지진에 대한 직접적인 피해는 적었다. 국

내³⁾의 경우 1978년 규모 5.0의 속리산 지진을 시작으로 1996년 영월지진, 1997년 경주지진, 2004년 울진지진, 2007년 월정사 지진 등 규모 5.0 전후의 지진들이 발생하였다. 잦은 지진의 발생과 규모의 증가로 인해 국내에서는 2008년 지진재해대책법을 수립하여 내진설계를 의무화 하였다. 하지만 2008년도 기준으로 내진설계가 적용된 건축물⁴⁾은 16.3%로 절반도 미치지 못하는 수준으로, 국내 대부분의 건축물들은 지진에 대해 취약하다고 할 수 있다. 따라서 내진설계가 미적용된 건축물들에 대해서는 안전성 확보를 위해, 정확한 내진성능평가를 통한 구조물의 보강이 이루어져야 한다. 내진성능평가는 지진발생에 따른 구조물의 변형 혹은 손상 등 구조물의 상태를 확인하기 위해 실시하는 것으로, 이를 통해 부족한 내진성능을 성능평가에서 요구하는 성능 수준으로 보강하여 지진 발생 시 피해를 방지할 수 있다. 내진성능평가는 PBD(Performance Based

* 정회원, 경기대학교 플랜트건축공학과 교수

Design)에 근거하여 시행되었으며, 국내의 기준은 한국시설안전공단에서 제시한 2011 기준 시설물(건축물) 내진성능 평가요령으로 능력스펙트럼법과 변위계수법을 제시하고 있다. 하지만 국내에서 제시한 능력스펙트럼법과 변위계수법은 국외 기준인 FEMA의 기준이나 ATC-40의 방법을 사용한다고 명시할 뿐 자세한 설명이 없기 때문에 명확하지 않다. 이에 본 기사는 내진성능평가를 수행하기 위해 PBD에 근거한 ATC-40에서 제시하고 있는 능력스펙트럼법 중 A절차를 소개하고자 한다.

2. 성능기반설계(Performance Based Design)

2.1 성능기반설계

PBD(Performance Based Design)는 성능기반설계로 구조물이 요구하는 요구 성능에 맞게 구조물을 설계하는 것으로 내진설계분야에 처음 소개되었으며, 구조물의 보유능력을 평가하기 위해 성능평가가 실시되었다. 구조물의 성능을 설정 후 설계를 하는 것으로, 사용성 및 안전성뿐만 아니라 경제성 및 사회적 환경적 영향을 고려할 수 있다. 또한 구조물의 비탄성영역에서의 연성을 고려하여 구조물의 성능이 성능목표를 만족하는지 평가하고 설계한다. <그림 1>과 같이 ATC-40에서는 구조성능과 비구조성능에 대한 성능수준의 목표를 제시하고 있다.

Nonstructural Performance Levels	Structural Performance Levels					
	SP-1 Immediate Occupancy	SP-2 Damage Control (Range)	SP-3 Life Safety	SP-4 Limited Safety (Range)	SP-5 Structural Stability	SP-6 Not Considered
NP-A Operational	1-A Operational	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B Immediate Occupancy	1-B Immediate Occupancy	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C Life Safety	1-C	2-C	3-C Life Safety	4-C	5-C	6-C
NP-D Hazards Reduced	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E Not Considered	NR	NR	3-E	4-E	5-E Structural Stability	Not Applicable

일반적
포함
 가능
포함

NR

 권장
않는
포함

<그림 1> 건축물의 성능목표

2.2 구조 · 비구조성능수준에 따른 성능목표

건축물의 성능목표를 산정하기 위해서는 구조성능과 비구조성능의 조합으로 성능수준을 산정해야 한다. 성능목표는 건축주의 요구에 의해 설계되며, 정해진 성능목표는 엔지니어링의 분석에 의해 성능목표에 해당하는 구조시스템과 비구조시스템으로 설계한다. ATC-40에서는 목표성능수준에 대해 <그림 1>과 같이 제시하고 있으며, 구조성능수준에 따라 SP-1에서 SP-6까지, 비구조성능수준에 따라 NP-A부터 NP-E까지 분류하고 있다. 구조의 성능수준 SP-1은 즉시 거주(Immediate Occupation) 상태로, 구조의 손상을 무시할 수 있는 정도의 극히 제한적인 피해가 발생하며 건축물의 수평, 수직하중 저항 시스템은 지진 전의 능력과 거의 같은 특성을 유지한 상태이다. SP-2는 피해 조절(Damage Control) 상태로, SP-1(Immediate Occupation)과 SP-3(Life Safety)의 중간 단계이다. SP-1, SP-3, SP-5처럼 명시되어 있지 않지만, 역사적으로 중요한 건축물이나 가치 있는 건축물에 적용한다. SP-3은 인명 안전(Life Safety) 상태로, 지진발생 후 구조의 손상이 발생하지만 부분적으로 또는 전체적으로 여유가 있는 구조시스템들에 의해 건축물의 붕괴를 방지하며, 구조의 피해상태는 SP-5(Structural Stability)에 비해 적으며 구조의 손상은 발생했지만, 인명 피해를 발생하기에는 그 손상은 작다. SP-4는 안전 제한(Limited Safety) 상태로, SP-3(Life Safety)과 SP-5(Structure Stability)의 중간 단계이다. SP-2와 같이 성능수준이 명시되어 있지 않지만, SP-3의 경제적 효과가 없거나 구조의 치명적 결함이 보완되었을 때 사용할 수 있다. SP-5는 구조 안정(Structural Stability) 상태로, 지진의 피해로 횡력에 저항하는 구조시스템의 강성과 강도가 감소하여 지진이 재 발생할 경우 부분적으로 또는 전체적으로 붕괴할 위험이 있다. 하지만 중력하중에 대한 저항은 할 수 있으므로 횡력에 저항하는 구조시스템에 대한 보수 후 사용가능하다. SP-5는 구체적으로 보

호해야 할 대상이 없을 경우 NP-E(Nonstructural Performance Not Considered)와 조합하여 사용한다. SP-6은 고려하지 않는 것(Not Considered)으로, 구조의 성능수준이 아닌 비구조의 지진평가나 새로운 시스템을 도입할 때 사용한다. 비구조성능수준 NP-A는 사용(Operational) 상태로, 건축물 내 설치된 곳에서 지진발생 후에도 이동이 없으며 정상적으로 작동하는데 아무런 문제가 없다. NP-B는 즉시 거주(Immediate Occupancy) 상태로, 지진발생 후 대부분은 제 위치에 있지만 개별적으로 움직이는 비구조물에 의해 작은 피해가 발생하나, 큰 해가 발생하지 않아 정리 후 다시 사용 할 수 있다. NP-C는 인명 안전(Life Safety) 상태로, 비구조물의 발생하는 약간의 피해에 대한 고려는 하지만, 비구조물의 붕괴 또는 구조시스템으로부터의 탈락은 고려하지 않는 상태로, 지진의 피해로 장비나 기계는 교체하거나 고치지 않으면 작동하지 않을 수 있으며, 지진발생동안 비구조물로 인해 발생하는 인명피해 위험은 극히 적다. NP-D는 위험 감소(Reduced Hazard) 상태로, 지진발생 후 비구조시스템의 피해는 발생하지만 붕괴 되거나 구조시스템으로부터 탈락하지 않는다. 하지만 천장 등 무거운 비구조물은 인명피해를 유발할 수도 있다. NP-E는 고려하지 않는 것(Not Considered)으로, 성능수준이 아닌 비구조물을 설계하지 않았을 경우 사용한다. ATC-40에서는 이러한 구조성능과 비구조성능의 조합으로 성능조합을 통해 일반적인 목표에서 권장하지 않는 목표까지 총 29가지의 성능목표를 제시하고 있다. 일반적인 조합방법으로는 1-A, 1-B, 3-C, 5-E 총 4가지가 있다. 1-A는 기능과 관계된 성능수준을 필요로 하는 건축물에 해당하며, 건축물의 구조피해는 제한적으로 발생하여 구조시스템의 수리 없어 사용하는데 있어 건축물의 붕괴위험은 없기 때문에 건축물을 안전하게 사용 할 수 있다. 1-B는 가장 폭넓게 사용하는 필수 설비시설에 관련된 건축물에 해당하며, 건축물을 이용하는 사용자 없이 건축물의 성능

목표를 만족하기는 어렵다. 3-C는 구조의 손상으로 비구조물의 탈락이 발생하며, 그로 인해 약간의 인명피해가 발생할 수 있으며 사용자에 의해 배치된 비구조물들은 통제 할 수 없기 때문에 비구조물들에 의해 화재나 화학적 위험 등 부차적 위험이 발생 할 수도 있다. 5-E는 지진발생으로 인해 건축물의 수직하중에 대한 주요부재 또는 수직하중을 전달하는 시스템만 안정적인 상태이며, 지진이 재 발생 할 경우 횡력에 대해 저항할 구조시스템이 없어 건축물의 붕괴 할 수 있다. 구조의 손상으로 마감, 피복 등 비구조물의 탈락으로 인명피해를 유발 할 수 있기 때문에 매우 신뢰하기 어려운 성능목표이다. 이와 같이 일반적 성능목표조합 외 건축주에 의해 건축물의 선정 가능한 목표 15가지를 제시하고 있으며, 권장하지 않는 조합은 10가지로 제시하고 있다. 권장하지 않는 조합은 강제로 금지시킬 수는 없지만 구조성능과 비구조성능의 불균형으로 권장하지 않는 조합이다.

2.3 기본적인 성능의 목표수준

ATC-40에서는 기본적인 성능목표를 건축물의 성능수준과 지진하중을 기반으로 설정하게 된다. 이러한 기본적인 안전 목표는 하나의 성능 수준으로 정의되는 것이 아니라 이중의 성능 수준으로 정의된다. 지진에 따라 SE(Serviceability EQ), DE(Design EQ), ME(Maximum EQ)로 나누게 되는데 SE는 50년 주기 50% 초과할 지진, DE는 50년 주기 10% 초과할 지진, ME는 50년 주기 5% 초과할 지진을 의미한다. 건축물의 성능수준은 3-C(Life Safety)와 5-E(Structural Stability)이며 다음 <표 1>과 같이 가장 기본적인 조합으로 DE지진일 때 3-C, ME지진일 때 5-E를 가장 기본적인 성능 목표로 제시 하고 있다.

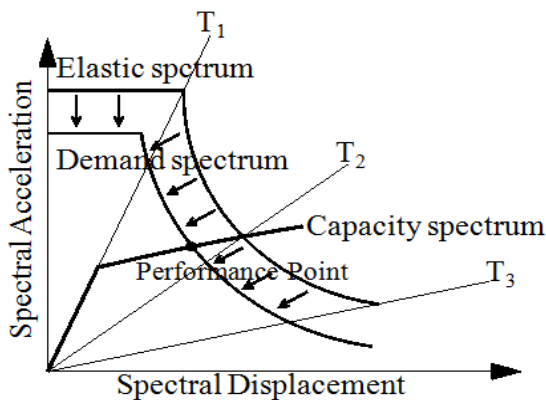
〈표 1〉 기본 안전 성능목표

The Basic Safety Objective				
Building Performance Level				
EQ Ground Motion	Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Structural Sability
SE				
DE			✓	
ME				✓

3. ATC-40의 능력스펙트럼법

3.1 능력스펙트럼법(Capacity Specturm Method)

지진에 의한 구조물의 비탄성 거동을 파악하기 위한 여러 가지 해석방법들이 있으며, 대표적으로 비탄성 시간이력해석법과 능력스펙트럼법이 있다. 비탄성시간이력해석법은 지진해석을 정확하게 할 수 있으나 해석에 많은 시간이 소요되며 해석에 사용할 지반운동을 결정하는 것은 매우 어려운 단점으로 작용하고 있다. 반면에 능력스펙트럼법은 비탄성 거동을 근사적으로 파악이 가능하여 간단하고 쉽게 구조물을 해석 할 수 있다. ATC-40에서 제시한 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)은 1970년대 처음 소개되었으며, 해당 구조물의 비선형 정적해석을 통해 지진하중에 저항하는 밀면전단력(V)와 최상층 변위(δ_{roof}) 그래프인 능력스펙트럼을 산정한 뒤, 해당 지반의 5% 탄성응답스펙트럼 구한다. 능력스

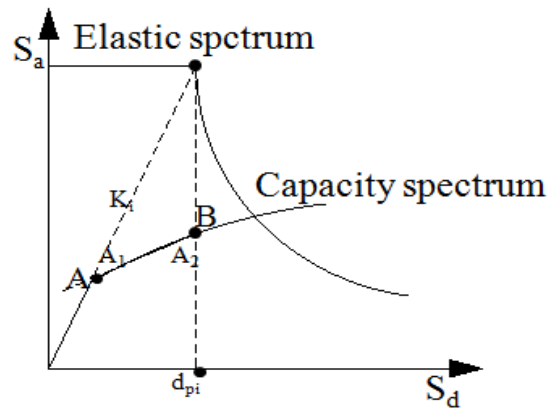


〈그림 2〉 ADRS 그래프

펙트럼과 탄성응답스펙트럼을 이용하여 〈그림 2〉와 같이 가속도(Spectral Acceleration : S_a)와 변위(Spectral Displacement : S_d) 그래프의 ADRS (Acceleration Displacement Response Spectra) 형식으로 변환 한 뒤, 능력스펙트럼과 응답스펙트럼을 하나의 그래프로 겹친 후, 등가감쇠를 이용하여 응답스펙트럼으로부터 요구스펙트럼(Demand Specturm)을 산출한다. 산출한 요구스펙트럼과 능력스펙트럼이 교차하는 변위(S_d) - 가속도(S_a)가 성능점(Performance Point)으로, 구조물이 지진에 응답하는 내력 및 최대변형 능력으로, 지진에 대한 구조물의 손상 정도를 나타내는 중요한 평가지표이다. 능력스펙트럼법을 이용하여 산출한 성능점으로 내진성능평가를 시행하게 되며, 국외기준인 FEMA나 국내기준인 한국시설안전공단에서 제시한 2011 기준 시설물(건축물) 내진성능 평가요령으로 성능수준을 평가 할 수 있다.

3.2 ATC-40의 A절차를 통한 성능점 산출방법

능력스펙트럼법을 분석하는데 ATC-40에서 A절차, B절차, C절차 총 3가지 절차를 제시하고 있다. 이 중 A절차는 다른 절차에 비해 분석이 명확하고 사용자가 쉽게 사용 할 수 있다. A절차를 수행하기 위해 능력스펙트럼과 응답스펙트럼을 ADRS형식으로 변환시킨 후 하나의 그래프로 겹친 다음, ADRS 그래프 중 〈그림 3〉과 같이 건축물에 해당하는 능력스펙트럼의 초기 강성(K_i)을 이용하여 가상의 강성



〈그림 3〉 성능점 가정

4. 결 언

PBD에 근거 하여 수행하는 내진성능평가를 ATC-40에서 제시한 능력스펙트럼법 중 A절차를 이용하여 건축물의 내진성능평가하는 절차에 대해 소개해 보았다. A절차를 통해 구조물의 성능점을 한 번에 찾아내는 경우도 있지만, 그렇지 않을 경우 여러 번 걸쳐 반복적으로 가정하고 찾아야 하는 단점이 있다. 그러나 ATC-40에서 제시한 B절차, C절차에 비해 가장 명확하며, 사용자가 사용하기 쉽다. 능력스펙트럼법 중 A절차를 이용하여 산정한 성능점은 해당구조물의 지진이 발생 하였을 때 최대 변위를 나타내며 이를 통해 건축물이 해당 지진에 대한 잉여력을 확인 할 수 있으며, 지진으로부터 건축물의 피해를 예측 할 수 있다. 산출한 성능점을 기준으로 국외기준인 FEMA나 국내 기준인 한국시설안전공단에서 제시한 2011 기준 시설물(건축물) 내진성능 평가요령 등으로 건축물의 성능수준에 대한 평가를 하게 되며, 제시하는 요구수준에 못 미칠 경우 구조물의 보강을 통해 요구하는 수준까지 구조물의 내진성능을 향상시켜야 한다. 국내에서 내진성능평가를 이미 설계된 건축물의 성능평가를 하기 위해 사용하고 있으며, 부족한 내진성능에 대해서 구조물의 보강을 하고 있다. 따라서 기준에서 제시하는 내진성능평가 절차를 명확히 하여, 정확한 구조물의 성능을 산정하고 부족한 내진성능에 대해서는 보강하는 방법이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.(12첨단도시 D06)

참고문헌

1. 유예진, “중국, 쓰촨 지진 산업피해 현황과 복구사업 추진동향”, 대한무역투자진흥공사, 한국, 2008.
2. 이준, 박내신, “해일 피해와 피난행태의 거시적 분석 : 일본 도호쿠지역 3.11 대지진 사례분석”, 교통기술과 정책, 제10권, 제1호, 2013년 2월, pp.46-52.
3. 한상환, 이한선, “지진과 우리나라의 내진설계”, 대한건축학회, v.52 n.10, 2008년 10월, pp.23-27.
4. 이태형, “내진보강 계획수립방안”, 한국지진공학회 기술강습회, 한국지진공학회, 2010년 2월, pp.22.
5. 최민철, 박대효, “구조물의 성능기반설계를 위한 성능평가방법”, 한국콘크리트학회 2007년도 가을 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, v.19 n.2, 2007년 11월, pp.377-380.
6. 이병국, “성능기반설계에서의 요구성능의 개념 정의 및 필요성”, 한국콘크리트학회 2008년도 춘계 학술발표회, 한국콘크리트학회, v.20 n.1, 2008년 4월, pp.125-128.
7. 이동근, 조소훈, “내진설계를 위한 구조동역학”, 구미서관, 2007.
8. 한국시설안전공단, “기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령”, 국토해양부, 2011.
9. Applied Technology Council(ATC), “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings Volume 1”, California seismic safety commission, California, 1996.
10. Applied Technology Council(ATC), “NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS(FEMA Publication 273)”, Building seismic safety council, Washington D.C, 1997.