2017년도 연구용역보고서

안전성 강화를 위한 내진설계 및 성능평가 방법론 비교 분석

- 2017. 9. -

이 연구는 국회예산정책처의 연구용역사업으로 수행된 것으로서, 보고서의 내용은 연구용역사업을 수행한 연구자의 개인 의견이며, 국회예산정책처의 공식 견해가 아님을 알려드립니다.

연구책임자

㈜마이다스아이티 박 종 열 상무

목차

1. 연구개요 ---------- 1

2. 내진설계기준 발전 배경 ---------- 3

3. 지진해석 종류와 원리 ---------- 19

4. 건축구조물 지진해석 및 경제성 분석---------- 33

5. 지반계수 선정의 적정성---------- 60

6. 교량구조물의 내진성능평가---------- 69

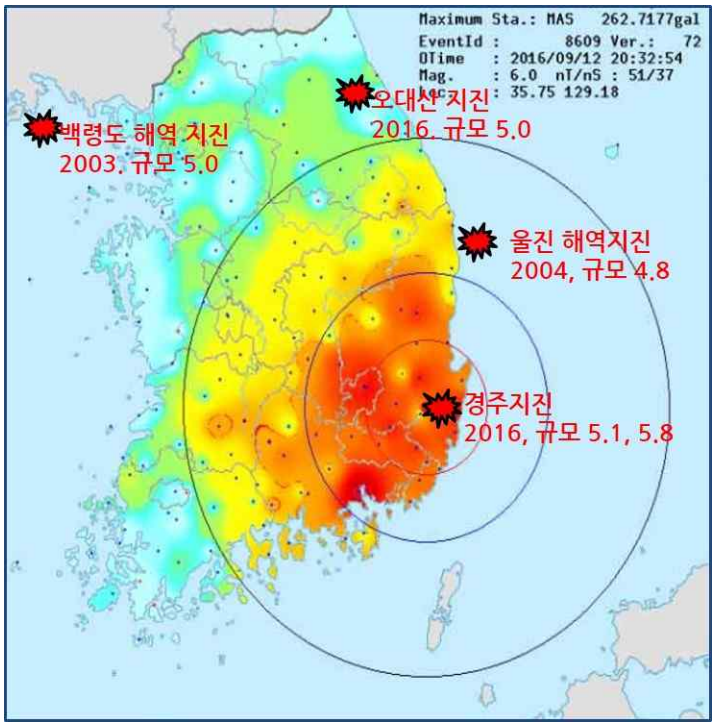
참고문헌---------- 84

1. 연구개요

가. 개요 및 필요성

□ 2003년 규모 5.0의 백령도 해역지진을 비롯하여 2016년 규모 5.1과 5.8의 경주지진까지 2000년 이후에 규모 5.0을 상회하는 지진의 빈도가 잦아지고 있다.

□ 과거 한반도의 지질학적 특성 및 기록을 분석하여 이웃한 일본에 비해 상대적으로 지진에 대한 안전구역으로 인식되어 왔으나 최근에는 일부 학자들의 경우 한반도에도 규모 7.0이상의 지진 발생 가능성을 제시하고 있는 상황이다.



[그림 1.1 2000년 이후 국내 주요 지진 발생 현황]

□ 이러한 상황변동에 따라 지진에 대한 국민적 관심과 불안감이 증가하고 있는 실정이며 지진발생시 대규모 인명피해 및 재산피해를 초래할 뿐만 아니라 국가 경제와 안보에 직접적으로 영향을 미치는 사회간접시설 및 에너지 생산설비에 대한 내진설계 및 내진보강의 필요성이 갑작스럽게 증

가하고 있다.

□ 이처럼 정부도 지진재해 관리를 위해 관련 예산을 증액하고 내진설계 및 보강 대상 범위를 확대 추진하고 있으나 구조물 또는 시설별로 내진설계에 대한 기준이 통합적이지 않고 내진설계를 수행하는 기술자의 기술수준의 편차가 크고 이로 인해 기술자들간의 이견이 발생하여 경제적이고 안정적인 내진설계가 이뤄지지 않고 있는 실정이다.

- ○ 2017년에 국민안전처는 내진설계 대상 구조물별 또는 관리주체별로 각각 별도로 제시되어 있던 내진설계기준간의 혼선을 방지하고자 [내진설계기준 공통 적용사항]을 발표하였다.
- ○ 그러나 구조물의 응답(가속도, 변위, 부재력)에 가장 큰 영향을 미치는 설계지진 산정방법 및 규모에 대한 이견이 있는 상황이며, 실무를 수행하는 기술자들에게 널리 보급되지 않은 상황에서 기술자들은 과거의 설계기준이나 각각 편의대로 해석하여 내진설계를 수행하고 있는 실정이다.
- ○ 더불어 신규 터널, 댐, 방폐장, 원자력 발전소 및 교량 등에 대한 내진설계는 국내와 다소 상황이 상이한 외국기준을 차용하거나 세세한 기준이 제시되어 있지 않는 등 관련 규정 정비가 미흡하고 구조물의 독단적인 동적거동 뿐만 아니라 구조물과 지반과의 상호거동을 분석해야 하나 관련된 해석 기술이 낙후되어 효율적으로 이뤄지지 않는 문제점도 발생하고 있다.

□ 지진시 국민의 안전을 확보하기 위해 정부에서 관련 정책을 조속히 수행해야하나 앞서 정리한 것과 같이 관련 기준이 미흡하고, 기술자들의 기술수준 및 해석기술의 정도차이가 심하여 관련분야 재정지출에 대한 효율성이 다소 낮다는 우려가 제기되고 있다.

□ 사회간접시설에 대한 내진설계 및 내진보강은 정책적으로 필요한 사항이나 관련 기준에 대한 적절한 검토 및 정비가 필요하며 내진설계와 관련된 해석방법과 기술에 대한 충분한 검토가 우선적으로 수행되어 안정적이고 경제적인 내진설계와 내진보강이 이뤄져야 한다.

□ 합리적이고 경제적인 내진설계와 내진보강이 이뤄질 수 있도록 지진시 구조물의 동적거동을 분석하는 방법과 성능기반내진설계 방법을 구체적으로 비교/분석하고자 하는 것이 본 연구의 기본 목적이다.

2. 내진설계기준 발전 배경

가. 개요

□ 내진설계와 관련하여 기원을 명확히 언급하기는 논란의 여지가 있으나, 내진설계와 관련하여 언급되는 많은 지진들 중 항상 첫 번째로 거론되는 것은 1906년 미국의 San Francisco 지진이다. 당시 내진설계라는 개념조차 제대로 정립이 안 된 상태였고 건물물이 지진이라는 자연현상에 대하여 견딜 수 있도록 설계에 반영할 수 있는 방법이 30(psf)정도의 풍하중으로 대치하여 고려했을 뿐이다. 이후 UBC(Uniform Building Code)가 1927년에 처음 등장하였고 이때 당시 지진하중에 대하여 고려하는 방법은 구조물 자중의 7.5%~10% 정도를 횡하중으로 반영하는 것이었다. 현재 전 세계의 내진설기준에 막대한 영향을 미치는 캘리포니아 구조기술자협회(SEAOC – Structural Engineers Association of California)에서 1959년에 발간한 “Recommended Lateral Force Requirements and Commentary”가 소정의 형식을 갖춘 지진관련 기준으로 간주할 수 있다. 현행 국내 설계기준은 미국 기준을 근간으로 마련되었고 향후 개정도 미국 기준을 근간으로 진행될 것이므로 미국과 국내 설계기준의 개정 방향은 다음 절에서 상세히 정리하기로 한다.

□ 현행 내진설계의 목적 및 철학은 자주 일어날 수 있는 작은 지진에 대해서는 아무런 피해가 발생하지 않아야 하며 즉시 거주가 가능해야 하며 아주 드물게 일어나는 큰 지진에 대해서는 구조적인 피해가 발생하더라도 붕괴를 방지하도록 되어 있다. 현행 국내 내진설계기준에서 제시하는 지진하중의 재현주기는 500년이므로 중간규모 정도라고 할 수 있으며 지역계수 0.11을 적용하면 리히터규모 5.5~6.0 정도의 범위이며 지진이 자주 발생하는 지역에서는 규모 6.5의 중간 규모의 지진에 해당한다. 설계지진하중에 대해서는 인명안전(Life Safety)이라는 설계 목표를 만족시키는 것이 가장 중요한 개념이다. 그러므로 구조부재의 피해와 손상은 방지하는 것을 목적으로 구체적인 항목들과 내진상세들이 정해질 수 있다.

[표 2.1 내진설계 목표]

지진하중 구분		재현주기 및 지진의 규모	설계목표	성능 수준
Minor Earthquake	자주 일어날 수 있는 작은 지진	50년, 100년 M < 4.0	아무런 피해가 없도록 설계	즉시 거주
Moderate Earthquake	가끔 일어날 수 있는 중간 지진	250년, 500년 4.0 < M < 6.5	비구조재의 피해 발생은 허용, 구조재의 피해는 방지	기능 수행 인명 안전
Major Earthquake	아주 드물게 일어나는 큰 지진	1000년, 2500년 6.5 < M	구조적인 피해가 발생하더라도 건물의 붕괴는 방지	붕괴 방지

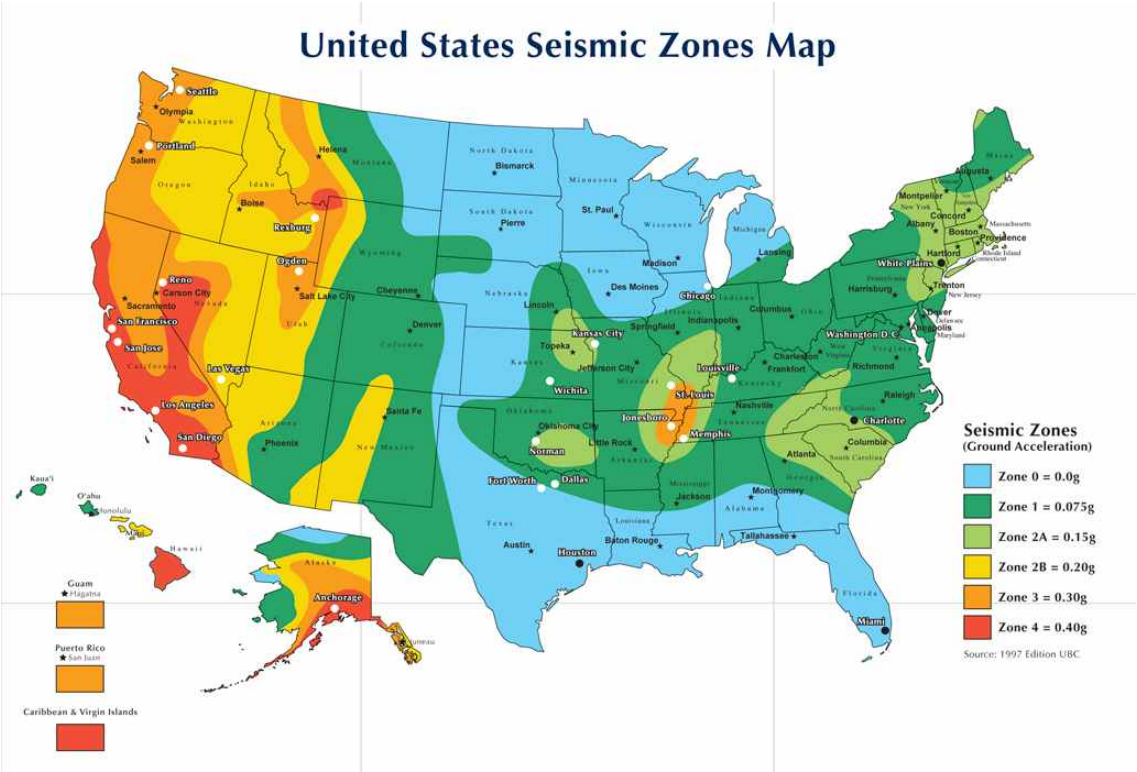
□ 그리고 또 하나의 절대적인 부분이 경제성을 고려하는 것이다. 경제성을 무시한 내진설계는 설계의 의미를 갖기 어렵다. 결과적으로 내진설계는 구조설계 전체적인 안정성과 경제성을 모두 확보해야만 한다.

나. 미국 내진설계기준

□ 내진설계의 내용과 원리를 이해하고 국내 내진설계의 향후 개정방향을 예측하기 위해서 미국 내진설계기준을 간단히 정리하였다.

□ 아래 그림은 미국에서 적용되고 있는 각 지역별 내진설계 기준 현황으로서 IBC 기준이전이 1999년까지 적용되었으며 지진재해도는 미국 설계기준에서 통용되고 있다. 미국의 건축물 설계기준에서 가장 큰 영향력을 발휘하는 3개의 모델코드는 UBC, NBC, SBC로서, 이 3개의 코드는 각기 다른 지역에서 독립적으로 개정되고 발전되어 왔다.

□ 미시시피강을 기준으로 서부지역에서는 ICBO(International Conference of Building Officials)가 주관한 UBC가 적용이 되고, 동부지역에서는 BOCA(Building Officials and Code Administrations)에서 발간한 NBC, 남부지역에서는 SBCCI(Southern Building Code Congress International)의 SBC가 설계기준으로 이용되고 있다.



[그림 2.1 미국 Seismic Hazard Zone Map]

1) UBC(Uniform Building Code)

- UBC의 첫 번째 출간은 1929년 ICBO의 전신인 Pacific Coast Building Officials에 의해 이루어졌다. 여기서 내진설계기준은 비강제적 부속규정(Nonmandatory Appendix)에 포함되었고 정식기준으로 인정된 것은 1973년부터이다. 이후 UBC 내진설계 규정은 1971년 발생한 San Francisco 지진에서 얻은 교훈을 반영하여 대폭 수정되었다.
- 1971년 San Francisco 지진의 교훈은 다음과 같다.

  ① 연약지층에 의해 지진력이 증폭되므로 매우 위험하다.

  ② 병원 건물의 경우 구조적인 손상이 적어도 비구조적인 요소가 손상이 발생할 경우 기능을 정상적으로 수행할 수 없다.

  ③ 지반의 특성에 따라서 지진하중이 다르게 작용한다.

  이를 통해 연약층에 대한 중요성을 인식하였고 중요한 건물에 대하여 본격적으로 중요도 계수를 적용하였으며 지반계수의 분류가 처음으로 도입되는 계기가 마련되었다.
- 1974년 SEAOC 코드(통상 Blue Book이라 일컬음)에서 지진하중을 밑면전단

력으로 변환하는 기본적인 개념들이 현재 우리가 접하는 방식과 유사하게 정의되었기에 본격적인 내진설계기준의 출현으로 간주할 수 있다. 2년 뒤 1976년 “Blue Book”과 동일한 공식을 가지고 UBC-1976이 탄생하였다. 1976년부터 UBC는 SEAOC 코드의 내용을 그대로 반영하기 시작한다. 단지 미국 전지역에 적용하기 위해서는 SEAOC 코드의 지진구역에 대한 지역계수만 조정하였다.

- UBC 기준의 내용은 1971년 San Fermando지진, 1985년 Mexico지진의 영향을 반영하여 연약지반에 대한 지반계수를 반영하여 UBC-1988에서 크게 바뀌고, UBC-1994까지 허용응력설계 개념을 사용하다가 UBC-1997부터 대폭적으로 설계개념과 내용이 변화되면서 새로운 면모를 보이게 된다.

2) ATC (Applied Technology Council)

- ATC는 SEAOC 산하의 비영리단체이다. 1976년에 발행된 UBC 내진설계 규정은 San Fernado 지진에서 얻은 교훈을 반영하여 많은 개정이 이루어졌지만 좀 더 체계적이고 합리적인 내진설계 과정을 정립해야 할 필요성이 강하게 제기되었다. SEAOC은 내진설계기준의 발전을 위한 제반사항을 전담할 비영리단체인 ATC를 1971년에 설립하였다. 이 단체는 미국 전체를 대표하는 주요 공학관련기관의 저명한 지진공학자들과 실무자들로 연구팀을 구성하고 관련 프로젝트를 수행하였다. 그리고 1978년에 전 세계 내진설계기준에 막대한 영향을 끼친 ATC-3-06 Report “Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Building”을 출간하였다.
- 현재 국제지진공학협회(IAEE – the International Association for Earthquake Engineering)에 2000년 등록된 내진설계기준 보유국은 47개국으로 각국의 내진설계기준에 지대한 영향을 미쳤으며 ATC-30-06의 의미는 다음과 같다.
  ① 허용응력 설계법(Allowable Stress Design)에 바탕을 둔 당시의 내진설계기준과 달리 극한강도설계법(Ultimiate Strength Design)에 바탕을 둔 최초 내진설계 기준을 제안함
  ② 지진위험도(Seimic Risk)에 대한 통계학적 접근을 통하여 설계지반운동(Design Ground Motion)을 규정한 전국적 규모의 지진위험도(Seismic Hazard Map)을 사용함
  ③ 탄성동적해석법에 대한 절차와 방법을 제안하였으며, 진동주기 산정시이 건물 높의 3/4제곱승에 비례한다는 식이 처음으로 등장하였으며 동적계수

산정식에서 진동주기의 2/3제곱승이 최초로 적용됨

④ 최초로 응답수정계수(Response Modification Factor)를 도입하여 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 거동을 규정함.

⑤ 지진재해그룹이라는 개념을 도입하여 건물의 용도에 따라서 지진위험도 노출그룹(Seismic Hazard Exposure Groups)으로 분류함

⑥ 명확한 층간변위 제한을 제시함

⑦ 지진의 2방향 작용에 따른 직교효과에 대한 영향을 검토함

⑧ 지반과 구조물의 상호작용에 대한 설계 조항 및 기준을 정립함

⑨ 건축, 전기, 기계장치와 같은 비구조 요소에 대한 상세한 내진설계 요구조건을 규정함

⑩ 이 외에도 특별한 내진상세 및 많은 실험과 실제 지진기록에 근거한 방대한 자료가 포함되어 있어 내진설계기준의 모태가 될 수 있는 원동력이 됨

3) NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program)

- UBC는 캘리포니아 지역에서 발생한 많은 지진에 대한 경험과 지진공학 분야 연구의 발전을 바탕으로 지속적인 개정작업을 이루면서 발전해 나갔다. UBC는 각 지방정부의 설계기준에 매우 큰 영향을 미쳤지만 주로 미국 서부지역에 국한된 것이었다. 미국의 동부지역과 남부지역은 각각 NBC와 SBC모델코드를 채택하고 있었으며 이들 내진설계기준은 1980년 후반까지 UBC의 초창기 버전이 1973년 이전의 내용에 기초하여 적용하고 있었다.
- FEMA(Federal Emergency Management Agency-연방재난관리청)는 대규모 재해나 비상사태 등의 위기에 관한 선도적인 관리역활을 하는 미국 연방기관으로서 국가적인 재해운영전략, 조절정책 그리고 각종 프로그램과 훈련모델을 제공하는 대통령 직속기관이다. 1961년 국방성 산하에 미방위청 설치를 시작하여 1979년 카터 대통령 당시 직속기관인 연방재난관리청으로 독립하였다. 1
- 1980년대 초반에 FEMA는 대형 프로젝트인 NEHRP(National Earthquake Hazard Reduction Program)를 착수하고 미국 전역의 통일된 내진설계기준을 개발하기 시작한다. 이 작업은 FEMA의 지원하에 Buiding Seismic Safety Council(BSS)이 수행하여 NEHRP-1985 기준을 발간하였다. 이 기준은 ATC-03-06 보고서에 바탕을 두고 있었으며 UBC의 개정주기와 동일한 3년을 주기로 개정판을 발간하였다. NEHRP 기준은 지속적인 개정판의 발간에도 불구하고 상당한 기간동안 3개의 모델코드인 UBC, NBC, SBC에 적용이 되지

않았으나 1993년 처음으로 NBC와 SBC의 내진설계기준에 도입되었다. UBC는 1988년 이미 ATC-3-06 보고서를 바탕으로 내진설계기준을 상당히 개정한 상태였기 때문에 NEHRP 기준을 도입하는 별도의 과정을 거치지 않았다.

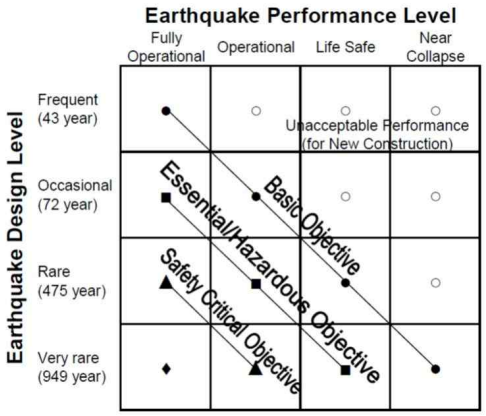
- 1955년 ICBO, BOCA 및 늊챠는 하나의 통일된 모델코드를 만드는데 합의하였고, 이를 위하여 International Code Council(ICC)을 창설하고 International Building Code(IBC)를 발간하기로 한다.

4) IBC (International Building Code)

- IBC-2000은 앞서도 설명하였듯이 모델코드의 통합작업을 통하여 2000년 1월에 새천년 기념사업으로 선포가 되었다. 내용의 근간은 NEHRP-1997이다. 현재까지 미국지진공학의 발전과 변화를 대변하고 있다고 볼 수 있는 기준이다.
- 1989년 미국에서 발생한 Loma Prieta 지진은 단순하게 설계지진에 대하여 인명안전 수준만을 만족시키는 현행 내진설계 철학에 문제를 제기한 시발점이 되었다. 그래서 내진설계기준에서 설계지진의 수준(Design Earthquake Level)에 따라 여러 가지 성능수준(Performance Level)을 만족시킬 수 있는 내진설계기준으로 전환해야 한다는 필요성이 제기가 되었다. 실제 1989년 Loma Prieta 지진은 내진설계기준에서 제시하는 지반가속도의 25%~50%에 해당하는 규모임에도 불구하고 샌프란시스코 도심을 흔든 이 지진으로 말미암아 70억 달러에 달하는 경제적 피해를 유발하였다. 그리고 1994년 Northridge 지진의 경우에도 인명의 피해는 크지 않았으나 200억 달러에 달하는 경제적 피해가 발생하여 현행 내진설계기준의 기본적인 철학과 개념을 새롭게 정립해야 할 필요성이 제기된 것이다.
- 당시 내진설계 기술로 설계된 건축물에서 인명피해에 대한 문제는 크지 않지만 경제적 피해는 매우 심각하게 발생할 수 있다는 것을 깨달았다. 또한 중간규모의 지진시에 발생하는 경제적 손실을 사회가 받아들일 수 있는 수준으로 낮추기 위해서 성능기초 설계법에 대한 연구가 시작되었다. 1992년 SEAOC은 설계지진의 수준에 따라 다양한 성능수준을 만족시킬 수 있는 새로운 개념의 내진설계법을 제시하기 위하여 VISION 2000 Committee를 구성하였으며, 1995년 Vision 2000 Performance Based Seismic Engineering of Buildings 보고서를 발간하였다.
- VISION 2000 프로젝트에서 제시된 내진성능 설계법에서는 설계지진의 수준을 재현주기로 고려하여 4등급으로 분류하였다. 그리고 내진성능 수준 또한 4

가지 (Fully Operational, Functional, Life Safety, Near Collapse)로 구분한다. 각 건축물은 용도 혹은 중요도에 따라서 ① Safety Critical Facilities ② Essential or Hazardous Facilities ③ Basic Facilities 의 3가지 그룹 중의 하나로 분류되는데 이 3가지 그룹별로 설계지진이 수준에 따라 가져야 하는 최소의 성능수준과 성능목표가 제시된다.

○ SEAOC의 VISION 2000 프로젝트에서 제시된 이러한 성능기초 설계법에 대한 개념은 NEHRP-1997과 IBC-2000에 도입되었다. NEHRP와 IBC에서는 앞에서 서술한 개념과 같이 설계지진의 수준에 따른 여러 가지 내진성능 목표를 직접적으로 제시한 것이 아니며, 한 가지 수준의 지반 운동에 대한 내진설계기준만을 규정하고 있다. 그러나 이 기준에 의거하여 내진설계가 수행된 건물은 지반운동의 수준에 따른 다양한 내진성능 요건에 부합할 것으로 기대할 수 있다는 것이 새로운 발상의 도입이었다. 그것이 다름 아닌 IBC-2000에서의 설계진진에 대한 정의이다.



SEAOC Vision 2000 recommended seismic performance objectives for buildings

○ IBC-2000에서는 설계수준을 3가지로 구분한다.

① Frequent Earthquake – 50년간 초과확률 50%

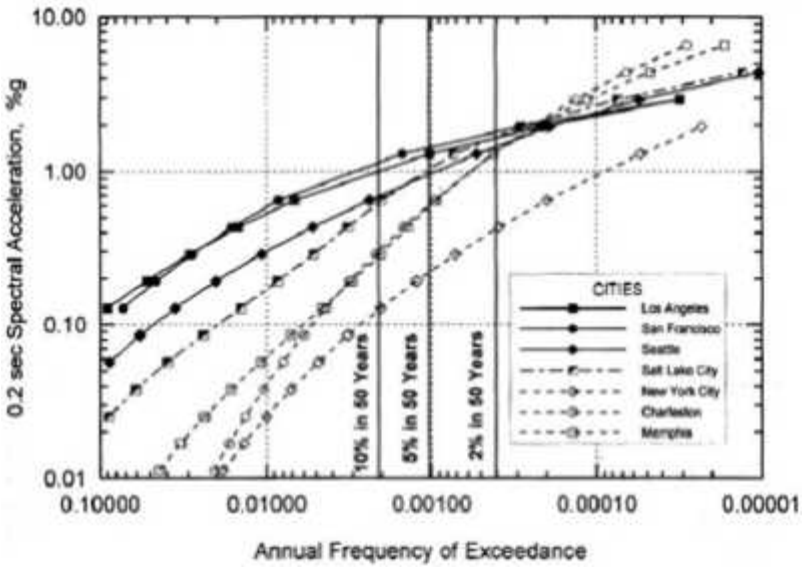
② Design Earthquake – Maximum Considered Earthquake의 2/3

③ Maximum Considered Earthquake(MCE) - 50년간 초과확률 2%

IBC-2000으로부터 설계기준의 정의가 바뀌었다는 것은 매우 조목할 만한 일이다. IBC-2000에서는 MCE Gound Motion Map을 통하여 내진설계에 적용되는 지반운동의 수준을 정의하고 있다. 여기에서 MCE란 구조물의 내진설계시 합리적으로 적용 할 수 있는 최대 수준의 지진을 의미한다. 50년간 2%의 초과확률(재현주기 2475년)을 기준으로 하고 있다. 지금까지 대부분의 내진설계 기준들에서는 50년간 10%의 초과확률을 가진 지반운동에 대하여 “Life Safety”를 목표로 설정하고 있었다. 그러나 IBC-2000에서는 50년간 2%의 초

과확률을 가진 지반운동에 대해 “Collapse Prevention”을 내진설계의 목표로 하고 있으며, MCE Ground Motion의 2/3수준에 해당하는 지반운동을 설계 지반운동으로 규정하고 있다.

○ IBC-2000에서 과거 내진설계 기준의 설계지반운동보다 재현주기가 훨씬 더 큰 MCE 지반운동에 대해서 “Collapse Prevention”을 내진설계의 목표로 설정한 이유는 미국 전역에 걸쳐 균등한 내진안전성을 확보하기 위함이었다. 그림 2.2는 초과확률에 따른 최대 지반가속도 변화의 특성을 지역에 따라 표현한 것으로 구조물이 50년간 초과확률 10%의 최대 지반가속도를 기준으로 설계할 경우 더 높은 수준의 지반운동에 대한 내진 안전성이 지역에 따라 차이가 나타난다. 즉, 동부지역의 내진 안전성이 서부지역에 비해서 현저하게 감소한다. 이와 같은 지역에 따른 내진 안전성의 차이를 최소화하기 위해서 50년간 2% 초과 확률의 MCE Ground Motion에 대해서 “Collapse Prevention”을 내진설계의 목표로 설정한 것이다. 그리고 VISION 2000에서와 비슷한 개념으로 내진성능 수준을 4가지(Operational, Immediate Occupancy, Life Safety, Near Collapse)로 분류하였다.



[그림 2.2 초과확률에 따른 최대지반가속도의 변화 – IBC-2000]

다. 국내 내진설계기준

1) 1987년 내진설계 지침서 작성에 관한 연구 (KS-1988)

○ 국내 내진설계기준이 탄생하게 된 계기 중 하나로 1985년 멕시코 지진을

들 수 있다. 멕시코 지진은 1986년 13회 멕시코 월드컵을 앞 둔지 10개월 전에 발생하여 수도인 멕시코시티를 쑥대밭으로 만들어 버렸다. 리히터 규모 8.0이 넘는 대규모 지진으로 8,000여명의 사망자가 생긴 엄청난 지진이었고 지진공학의 역사에 중대한 영향을 미친 유명한 지진으로 연약지반에서 지진이 증폭될 수 있다는 교훈을 남겼다. UBC-1985 수정판에서부터 지반계수 2.0이 도입된 계기가 되었다.

○ 멕시코 지진이후 국내에서 탄생한 것이 "내진설계 지침서 작성에 관한 연구"로서 건축물 내진설계 관련 기준이다. 1987년 12월에 당시 건설부와 대한건축학회에서 제정하여 공표하였고 1988년부터 적용되기 시작하였다. 1987년 연구보고서에서 1988년부터는 건축물 하중기준에 내진설계 관련 규정이 포함되어 강제조항으로 적용하도록 하였다. 1988년 1월에 시행된 건축법 시행령에서부터 필요한 경우에는 지진에 대한 안전여부를 구조계산에 의해 확인하도록 요구하고 개정된 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에서 세부사항을 규정하였다.

○ 2000년 개정안이 나오기까지 12년 동안 사용되어 왔으며 UBC-1985기준과 ATC-3-06 기준을 적절하게 우리나라 환경에 맞게 수정하였으며 주요한 내용은 다음과 같다.

① 지진위험도 설정에 있어서 ATC개념인 각 지역에서 50년에 발생확률이 10%를 초과하는 지진에 의한 지반가속도 개념을 도입하였다. ATC에서 사용하였던 최대지반가속도는 자료가 부족하고 예상되는 지진규모와 지반상태를 고려하여 포함하지 않았으며 우리나라에서 발생한 지진에 관한 자료 중에서 그나마 신빙성이 높은 조선시대의 역사지진과 당시 계측한 계기지진을 참고하여 지진위험도를 설정하고 우리나라 지진구역을 3등급으로 나누었다. 남한 지역은 구역1(0.02), 구역2(1.2)의 2개 등급으로 나누었다.

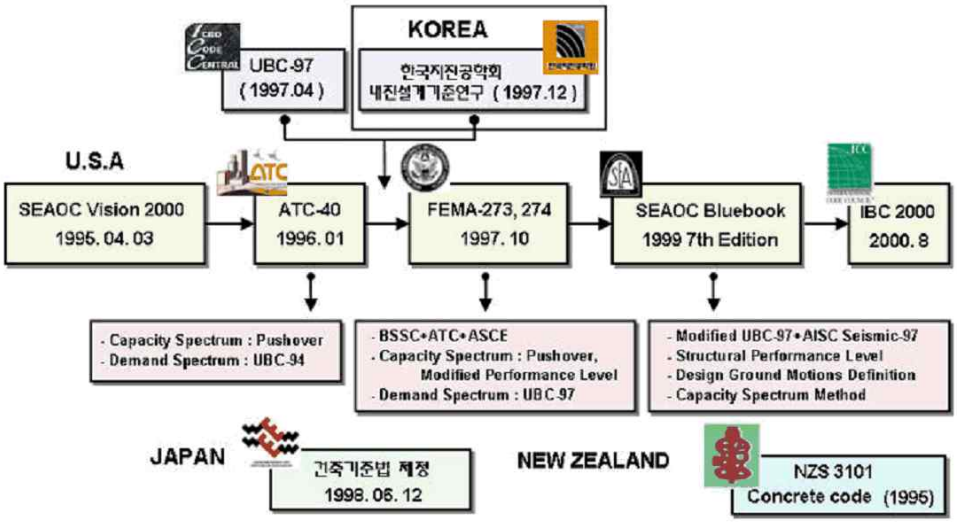
② 건축물의 동적특성을 정의하는 부분에서는 기본 진동주기 산정식에 동역학 이론과 실제 계측에 의한 경험에 근거를 둔 ATC-3-06 식을 도입하였다. 그러나 구조물의 진동주기 함수인 동적계수 산정식에서는 ATC가 시간(T)의 2/3 제곱승에 비례하는 것과는 달리 우리나라는 당시 UBC 기준의 T의 1/2제곱승에 비례하는 형식을 채택하였다. 제곱승의 값이 클수록 장주기 영역에서의 스펙트럼이 더 크게 평가하는 결과를 보인다. 이는 층

수가 높은 고층건물에 대한 고려, 고차모드의 영향 고려, 장주기 구조물의 P-⊿와 같은 불안정성의 영향 고려 등의 이유에서이다.

③ 다음은 응답수정계수의 도입이다. 당시 UBC-1985에서는 K계수를 수평력 계수라고 해서 각 시스템별로 다르게 적용하였으며 이론적인 근거보다는 경험에 바탕을 둔 계수였다. 구조재료에 대한 연성(ductility)이 제대로 고려되지 못하는 문제가 있었지만 당시까지 경험이 축적된 방법이었으므로 UBC에서는 계속해서 사용하고 있었던 것이다. 반면에 ATC-3-06은 극한강도설계 개념에 근거를 둔 응답수정계수를 사용하고 있엇다. 구조물의 비선형 동적거동에 대한 연구결과와 전문가들의 의견을 수렴하여 제안된 계수였다. 동역학적 이론에 근거를 두고 있었으며 구조재료에 따른 연성을 반영할 수 있다는 장점이 있었기 때문에 K계수 대신 R계수를 도입하게 되었던 것이다. 그러나 KS-1988는 근본적으로 허용응력설계법에 기초하여 제정된 기준이었기 때문에 ATC-3-06의 응답수정계수(R)과 비교하여 보면 대략 60~80% 정도의 수준으로 작게 평가되어 있다. 그만큼 지진하중을 허용응력 설계법에서는 크게 평가한다는 의미이다. 이와 같이 허용응력 설계법에 개념과 근거를 둔 응답수정계수는 UBC-1988, 1991, 1994, KS-1988 및 2000 기준에 반영이 된다.

2) 1997년 내진설계 상위개념에 관한 내진설계기준연구 (EESK-1997)

○ 1994년 미국의 Northridge 지진과 1995년 일본의 Kobe 지진은 전세계적으로 차세대 내진설계에 대한 필요성 제기의 신호탄이었다. 그림 2.3에서 보다시피 지진공학과 내진설계의 선진국이라고 할 수 있는 미국, 일본, 뉴질랜드 등은 당시 그 나라으 ㅣ내진설계 기준 개정에 대한 필요성을 강하게 인식하고 밀레니엄 시대를 대비하 새로운 철학의 내진설계기준 정립에 박차를 가하게 된다. 가장 빠르게 움직인 나라가 미국이었다. 1995년 SEAOC Vision 2000 PBSE 보고서를 출간하였고 계속적인 설계기준 연구를 통하여 발전을 거듭한 결과 마침내 IBC-2000을 탄생시켰던 것이다.



[그림 2.3 내진설계기준연구 탄생 배경(1997.12)]

○ 사단법인 한국지진공학회와 한국건설기술연구원은 1997년 12월에 내진설계기준연구(II) 내진설계성능기준과 경제성 평가라는 연구보고서를 발표하게 된다. 이 기준은 모든 시설물들에 적용할 수 있는 성능기준의 개념을 도입하고 향후 내진설계기준의 방향을 정립한다는 것이 목적이었으며 특징은 다음과 같다.

① 구조물의 중요도에 따른 3가지 내진등급의 구분

② 구조물의 2가지 성능수준(기능수행수준, 붕괴방지수준)의 결정

③ 평균재현주기에 따른 6가지 지반운동 설정 (50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년)

④ 표준설계응답스펙트럼으로 UBC-1997 채택

3) 2000년 건축물 하중기준 및 해설 (KS-2000)

○ EESK-1997을 상위개념으로 하여 이를 수용하는 것을 권장하는 내용으로 KS-1988 대비 변경된 내용은 다음과 같다.

① 밑면전단력 산정식 변화 : 밑면전단력 산정식이 UBC-1994와 거의 흡사한 형태로 변경되었다

② 지역계수 변화 : 지역계수가 0.12에서 0.11로 0.08에서 0.07로 감소하였으며 지진 I구역과 II구역을 시와 도로 세분화하였다.

③ 중요도 계수 변화 : 1994년부터 교량의 내진설계에서 적용하고 있었던 성능기준에 근거한 특등급, 1등급, 2등급 정의를 빌어서 중요도(특), 중요도(1), 중요도(2)라고 이름 붙이고 15층 이상의 아파트는 중요도(특)으로 규정하여 계수가 1.5로 격상되어 지진시 안전성을 확보토록 규정하였다.

④ 전단벽식 구조물의 기본주기 산정식 추가 : KS-2000에서는 진동주기 산정식에서 콘크리트 전단벽에 대한 식이 처음으로 도입되었다.

⑤ 응답수정계수의 변화 : 12년 동안 고수되어 왔던 내력벽 방식의 응답수정계수 3.5가 사라졌다.

⑥ 지반계수의 추가 : KS-1998에서 지반 1,2,3으로 구분되었던 것이 새롭게 계수 2.0으로 평가되는 지반 4가 추가 되었다. 1985년 멕시코 지진의 영향을 받아 UBC-1985, 1988에서 반영된 사항이었으며 연약한 매립지 지반의 경우에는 지진하중이 증폭될 수 있다는 효과를 반영하기 위한 조치였다. 우리나라 해변가 지역인 부산, 울산 그리고 서해안 일부 지역에서는 대부분의 지반이 해안가 매립지 형태이므로 지반 4에 해당되어 지진하중이 종전보다 50% 증가하는 결과를 낳게 되었다.

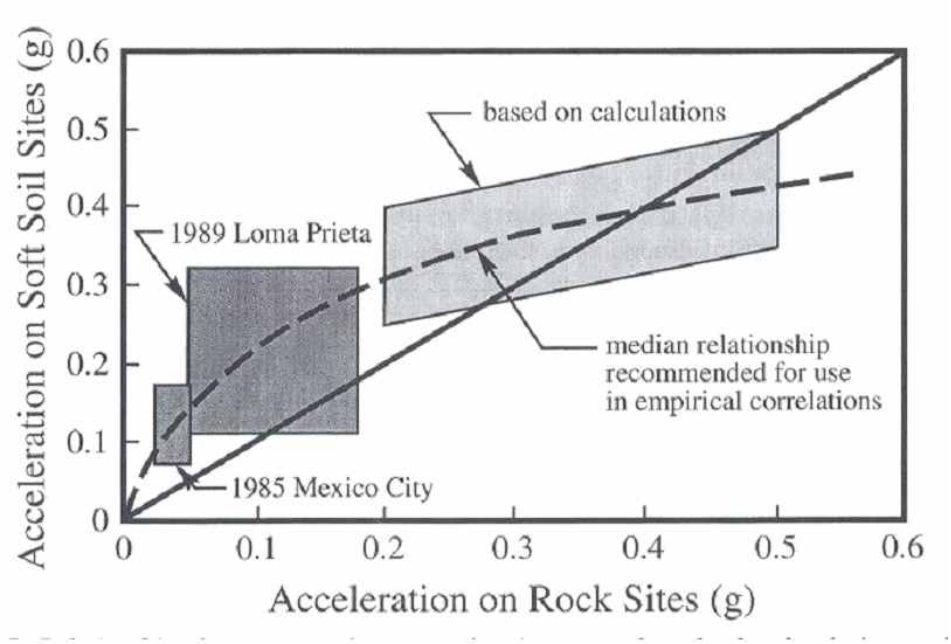
4) 2005년 건축구조기준

ㅇ 대한건축학회는 앞서 언급하였듯이 2000년 내진설계기준을 일부 개정하였으나 대형지진(Northridge지진, Kobe지진 등)을 겪으면서 획기적으로 발전한 선진 외국의 내진공학과 당시 국내에서 시도되는 다양한 구조형식의 구조시스템을 수용하기에는 부족한 점이 많았다. 이러한 필요성에 의해 IBC-2000의 내진설계개념을 대폭 수용하되 국내의 현실적인 상황을 고려하여 내진설계기준을 일부 수정하였다.

① 설계지진의 재정의 : IBC-2000이전의 설계지진은 재현주기 500년으로 지반운동을 기준으로 표현하였지만 IBC-2000에는 재현주기 2400년 지진의 2/3을 설계지진으로 정하고 지반가속도 대신 건물의 응답가속도를 대상으로 하였다.

② 지반등급의 재정의와 지진하중의 변화 : 1985년 멕시코시티와 1989년 Loma Prieta 지진의 지반 내부의 지진기록을 분석한 결과 지반 가속도는 암반에서의 지진 가속도 크기와 그 상부 지반의 특성에 따라 비선형적으로 변함이 밝혀졌다. 그림 2.4에서 보는 바와 같이 낮은 암반 최대 가속도에서는 그 상부의 부드러운 지반에서 몇 배로 증폭될 수 있지만, 높은 암

반 최대 가속도수준에서는 보다 작게 증폭하거나, 오히려 감소할 수 있음을 알 수 있다.



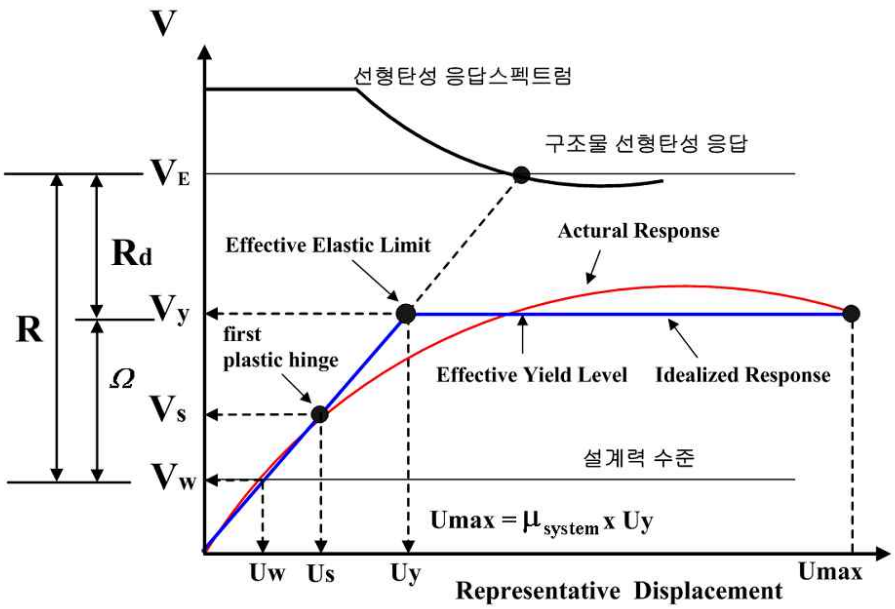
[그림 2.4 암반과 연약지반에서 최대지반 가속도 비교]

KBC-2005에서 도입된 지반계수는 이와 같은 새로운 내용을 반영한 것으로 지표 상부 30m에 대한 지반 특성에 따라 결정되며, 지반 특성은 전단파 속도, 표준관입시험, 비배수 전단 강도 등에 따라 결정된다.

③ 내진설계 범주 : 지진시 건물이 받게 되는 최대가속도와 건물의 용도 혹은 중요성을 가늠하는 내진등급에 따라 설계와 해석시 다른 수준의 요구사항이 적용된다. 이를 위해 내진설계범주라는 개념을 도입하였으며 이는 성능에 기초한 내진설계를 적용한 것을 의미한다.

④ 초과강도계수와 구조시스템 제한 : 일반적으로 구조요소는 예상되는 설계지진동을 대표하는 비탄성스펙트럼에 해당하는 지진력에 대해 선형 탄성해석결과 얻어진 내부 힘의 분포를 바탕으로 설계된다. 그러나, 극심한 수준의 지진동이 발생할 경우 구조물 내에서 생성되는 내부 힘과 변형은 구조물이 항복하기 시작하는 점을 훨씬 넘어서 좌굴하거나 비탄성적으로 거동하게 된다. 만약 구조물이 적절한 수준의 연성, 정형성 및 연속성을 갖도록 상세 설계된다면 감소된 하중에 의하여 구조물을 탄성설계 하여도 구조물은 충분히 그 성능에 도달할 수 있다. 이와 같은 개념에서 그림 2.5에서 보듯이 설계지진에 의해 실제로 생성되는 탄성횡력을 응답수정계수

(R)로 나누어 훨씬 감소된 지진력에서 구조물이 1차 항복점을 넘어서 변형하지 않도록 설계하는 접근법이 탄생하게 되었다.



[그림 2.5 응답수정계수(R)을 이용한 지진하중의 저감]

이와 같은 설계가 가능하게 된 배경은 설계된 지진력 저항시스템이 어느 정도 여유도를 갖추고 있음을 고려한 것으로 이 여유도는 첫 소성힌지의 형성과 같은 "의미있는 항복수준"을 훨씬 상회하는 초과강도를 얻을 수 있음을 뜻한다. 단, 이와 같은 초과강도는 구조물이 완전한 붕괴메커니즘에 도달함에 있어 구조물의 다른 부분도 소성화 되어야 한다는 전체를 바탕으로 하고 있다.

응답수정계수는 기본적으로 구조물이 전적으로 선형탄성 반응을 할 경우에 주어진 지진등에서 달성하게 되는 힘과 실제 설계력에 대한 비를 나타낸다. 이것은 그림 2.5에서 보듯이 연성감소계수 Rd와 초과강도계수 Ω로 구분할 수 있다.

Rd는 응답수정계수(R) 중에서 구조물의 비탄성 거동으로 인한 지진 응답의 감소를 나타내는 부분이다. 이것은 시스템과 재료의 전체적인 연성에 비례한 값으로써 낮은 연성수준의 시스템에 대해서는 1.2이고 높은 연성수준에 대해서는 3.4에 이른다. 구조물이 항복하면 비탄성적으로 변하기 시작하면서 구조물의 고유주기는 증가하게 되고 강도 수요는 감소하게 된다. 더욱이 비탄성 거동은 점성감쇠 효과로 인하여 상당한 양의 에너지 소

산을 초래한다. 따라서 적절하게 설계된 구조물이 탄성 지진력의 수요보다 훨씬 낮은 강도를 가지고도 설계지진동에서 만족스러운 성능을 나타나게 되는 것이다.

응답수정계수 결정에 있어서 가장 중요한 것은 구조물의 연성능력이지만 또 한 가지 영향을 미치는 것은 구조물의 초과강도이다. 초과강도계수는 Ω는 재료와 구조시스템의 영향을 받는다. 설계 지진하중은 시스템에서 가장 큰 응력을 받는 요소의 첫 번째 항복에 의하여 결정되기 때문이지만, 실제 건물이 저항하는 최대 하중수준은 계속적인 힌지의 형성과 가새의 항복 그리고 전단벽의 항복 또는 균열 등이 발생한 후에도 저항할 수 있기 땜에 초기 항복값 보다 높다. 또한 설계시 사용되는 재료의 강도는 실제 사용된 재료의 평균 강도보다 현저히 작은 값으로 설계되기 때문에 구조물의 강도는 설계시 예측한 강도보다 큰 값을 보일 수 있다. 여러 가지 재료와 시스템의 조합을 통하여 이와 같은 초과강도를 구한 결과 초과강도 Ω는 2.5에서부터 4.5에 이르는 것으로 알려져 있다.

⑤ KBC-2005에서는 내진설계범주 A,B에 해당하는 구조물의 경우 등가정적해석법, 또는 그보다 정밀한 해석법으로 구조물 해석을 수행하도록 하고 있고, 내진설계범주 C와 D인 건물에 대해서는 건물의 높이와 비정형성에 따라 동적해석을 수행해야 하는 건물을 구분하고 있다.

해석방법과 마찬가지로 구조요소의 설계에 있어서 내진설계범주와 비정형성에 따라 지진의 방향성의 고려방법과 우발편심 고려시 비틀림증폭계수의 포함여부를 정하고 있다. 특히 내진설계범주 C이상이면서 비틀림비정형인 건물의 경우, 특별히 비틀림 증폭계수를 사용하여 강성중심과 질량중심 사이의 편심을 증폭시켜주도록 하고 있다. KBC 2005에서는 조적채움벽과 같이 강성이 큰 비구조요소의 지진반응시 구조적 역할을 고려할 것과 지진저항시스템에 포함되지 않는 건물골조 시스템 중의 골조 부분에 대해서 지진에 의한 변형을 고려해서 설계토록 요구하고 있다.

5) 2009년 건축구조기준

○ 건축물에 영구히 설치되는 전기,가스,수도,통신설비와 같은 비구조요소는 건축물의 하중을 지탱하는 요소는 아니지만 지진 등으로 파괴됐을 경우 2차 피해를 유발 수 있으므로 비구조요소에 대해서도 내진설계 기준이 신설되었다.

6) 2016년 건축구조기준

- ‘지진과 태풍 또는 다른 비상시의 긴급대피수용시설로 지정한 건축물’이 건물 중요도(특) 대상에 추가 되었습니다. 또한, 기존 미국기준의 지반특성에 따른 지반종류에서 우리나라 지반특성을 반영한 분류 및 지반증폭계수가 수정되고 세분화되었습니다.
- 성능설계법이 신설되어 추가되었으며 이에 따라 초고층·대공간·중요시설물 등에 비탄성해석을 이용, 보다 정확한 해석이 고려되고 다양한 성능수준을 만족할 수 있게 되었습니다.
- 지진격리장치 및 댐퍼와 같은 감쇠시스템을 이용하여 지진시 구조물의 전달되는 지진력의 규모를 줄이거나 연성을 키우는 새로운 방법들이 개발되면서 이와 관련하여 면진구조물과 감쇠시스템 적용 구조물의 내진설계 조항이 신설되었습니다.

라. 결론

□ 내진설계기준은 지진하중 발생, 지진하중의 전달 및 이로 인해 발생하는 구조물의 응답에 대한 불확실성이 여타의 하중들에 비해 크므로 비교적 근래에 들어 체계적인 기준이 지진에 의해 재산과 인명피해가 발생하는 국가들을 중심으로 발전되어 왔다.

□ 국내의 경우 상대적으로 지진안전지대라는 인식이 보편적이어서 지진하중을 규모가 큰 수평력으로 변환하여 보수적으로 설계하는 방법과 선형탄성해석을 수행하는 방법을 일반적으로 적용하여 왔다.

□ 그러나 전세계적으로 지진의 발생 빈도가 증가하고 지진의 규모 또한 증가하면서 구조물의 선형탄성거동을 전제로 구조물의 안전성을 확보하는 설계법은 매우 보수적인 설계를 유도하거나 이로 인해 강성이 증가함에 따라 오히려 구조물의 안전성 확보가 어려운 상황이 발생하게 되었다. 이를 해결하기 위해 구조물의 유연도(Ductility) 및 구조물 소성거동 발생시 비선형 거동을 고려하는 내진설계방법의 개발이 이어지고 있다.

□ 현재는 신설 또는 기존 구조물의 소유자가 요구하는 성능에 맞춰 해당하는 지진에 저항할 수 있는 구조물을 설계 또는 평가하는 성능기반내진설계와 성능기반내진평가가 진행되고 있다. 이러한 설계 및 평가를 수행하기 위해 구조물의 비선형 거동을 해석하고 파악하는 것이 매우 중요하다.

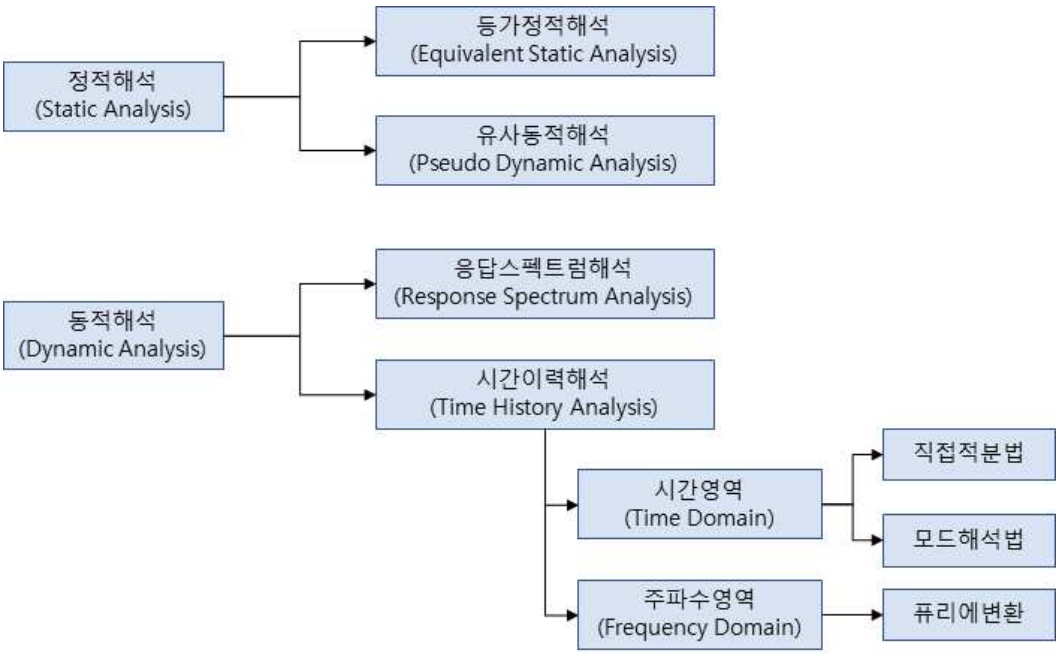
3. 지진해석 종류와 원리

가. 개요

□ 건축물에 대한 지진해석 방법은 매우 다양하다. 이것을 크게 분류하면 선형 지진해석과 비선형 지진해석으로 구분할 수 있다. 선형 해석과 비선형 해석에 대한 개념적인 차이는 성능에 기초한 내진설계에서 적용하고 있는 비선형 해석을 이해하는데 핵심적인 부분이다. 본 보고서에서는 지진해석의 종류를 살펴보고 각 해석방법의 원칙과 특징에 대해서 간단히 정리하도록 한다.

나. 선형 지진해석

□ 선형지진해석은 그림 3.1과 같이 크게 정적해석과 동적해석으로 구분할 수 있다.



[그림 3.1 선형탄성 지진해석의 종류]

1) 등가정적해석 (Equivalent Static Analysis)

○ 건축물에 작용하는 지진하중은 지반의 움직임에 의한 구조물의 상대변위와 구조물 질량의 상호작용에 의하여 발생하는 관성력이다. 이러한 동적인 특성을 실무단계에서는 파악하기 힘들고 지진하중 자체를 정확하게 정량적으로

나타내는 것이 불가능하기 때문에 내진설계에서는 구조물 전체 중량에 대한 비율로서 지진하중을 횡하중으로 간주하는 방법을 고려하여 왔다.

- 등가정적해석이란 말 그대로 동적인 특성을 포함하고 있는 지진하중을 등가의 정적하중으로 치환을 하여 정적해석을 수행하겠다는 의미이다. 등가의 지진하중은 건축물의 동적특성, 특히 진동주기에 따라서 관성력의 크기를 가정하고 그 분포는 구조물의 높이에 따라서 적절하게 분배하는 방식을 택한다. 관성력의 크기와 분포를 가정하기 때문에 이 해석은 일반적으로 거동예측이 가능해야 한다. 그러므로 구조물의 강성과 질량의 분포가 수직적으로 또는 수평적으로 균일한 정형구조물이나 고차모드의 영향을 덜 받는 저층 구조물에 주로 적용할 수 있다.
- 일반적으로 구조물의 동적거동은 1차모드가 지배적이라고 할 수 있다. 고유치해석에 의한 질량참여율을 확인하면 지진하중의 가력방향에 대한 그 방향의 질량참여율이 1차모드에서 90%이상 기여를 한다면 이 해석법은 유효하다고 생각한다. 근사적으로 지진하중을 산정할 수 있고 해석방법이 단순하기 때문에 대부분의 내진설계기준에서 제시하고 있는 방법이다. 당연한 이야기겠지만 부정확성을 포함할 수 있는 확률이 높기 때문에 이 해석법은 지진하중을 과대평가하는 경향이 있다.
- 등가정적해석은 구조물의 예비평가 단계에서 활용할 수 있는 방법이라고 생각한다. 대부분의 경우에는 등가정적해석법에 의한 결과보다 동적해석인 응답스펙트럼해섭법에 의한 결과가 변위, 층전단력 및 구조재가 받는 응력 등에서 작게 평가되지만 때에 따라서는 구조물의 일부분에서 응답스펙트럼해석법에 의한 결과가 더 크게 나타나는 경우가 발생한다. 구조물이 비정형인 경우에 주로 볼 수 있는 현상이다.

2) 응답스펙트럼해석 (Response Spectrum Analysis)

- 응답스펙트럼 해석은 다자유도 구조물의 거동에 대하여 모드 분리를 통하여 여러 개의 단자유도 시스템에 대한 모드로 분리한 후에 단자유도 시스템들의 최대 응답을 미리 마련해 놓은 응답스펙트럼을 이용하여 쉽게 구한 다음 이를 조합하여 다자유도 시스템의 최대 응답을 구하는 해석이다.
- 이 해석 방법은 특정 지진에 대한 시간이력을 필요로 하지 않고 보편적으로 사용할 수 있는 설계기준인 설계스펙트럼을 사용할 수 있으며 주요한 모드의 조합만으로도 비교적 정확한 최대응답을 구할 수 있기 때문에 내진설계를 위

한 지진해석으로서는 가장 보편적으로 상요되고 있는 동적해석법이다. 그러므로 각 나라에서 적용하고 있는 대부분의 내진설계기준에서는 이 방법에 의한 지진해석을 추천하고 있다. 구조물의 진동주기와 진동모드 형상을 제대로 고려할 수 있는 때문에 비정형구조물이나 고층 건문에 대해서도 정확한 해석결과를 얻을 수 있다는 장점이 있기 때문이다.

- 그러나, 응답스펙트럼해석은 구조요소를 이용하여 해석모델을 사용하는 경우에 실제 구조물보다 진동주기를 과대평가하는 경향이 있다. 주지하다시피 해석모델에서 고려할 수 없는 계단실이나 비구조체에 의한 강성효과 그리고 실제 강막 가정으로 처리되는 슬래브의 강성효과 등이 해석모델에서는 제외되기 때문이다. 실제로 비구조체 요소를 모델링에 반영할 수 있으므로 이를 반영하지 않고 구조해석시 항상 실제보다 진동주기가 과대평가 된다고 말하는 것은 부적절하다.
- 진동주기에 대한 과대평가는 지진하중을 과소평가할 수 잇기 때문에 지진응답 역시 과소평가될 수 있다. 이렇나 현상을 방지하고자 하는 것이 바로 설계기준에서의 보정계수 도입이다. 등가정적해석에 의한 밑면전단력과의 비교를 통하여 보정을 하는데 이때의 등가정적 밑면전단력은 진동주기를 의도적으로 크게 하여 다소 작게 산정한다. 우리나라 기준의 경우에는 산식에 의한 진동주기에 정형인 경우는 50%를 크게 하고 비정형인 경우에는 20%를 크게 하여 밑면전단력을 계산한다.
- 사실 동적해석 결과를 믿고 싶지만 왠지 미심쩍은 면이 있기에 다소 안전하다고 판단되는 등가정적하중만큼 보정하자는 의도이다. 그것도 그냥 등가정적하중에 의한 밑면전단력을 사용하면 보정계수가 너무 크게 평가되기 때문에 진동주기를 좀 더 키운 다음 보정계수를 키우는 방법을 사용한다.
- 이러한 방법은 내진설계기준마다 조금씩 다른다. 1.2배 또는 1.5배 진동주기를 키워 주는 것은 우리나라 방식이다. 합리적인 근거나 이유는 다소 부족하다. ATC 3-06에선느 정형과 비정형 구조물의 구분 없이 1.4배를 제시하며 UBC-97에서는 정형구조물의 경우에는 동저해석에 의한 밑면전단력은 등가정적해석의 절차에 따라서 밑면전단력의 90%보다 작아서는 안 되고 비정형구조물의 경우에는 등가정적해석에 의한 밑면전단력과 같거나 그 이상이어야 한다는 내용이다.
- 구조물의 동적해석에 대한 결과는 각각의 진동모드에 동적거동을 SRSS 또는 CQC등의 방법에 의하여 조합하며 모든 해석 결과는 절대치로 표현된다. 모든

응답에 대한 부호의 개념이 사라지게 되는 것이다. 이러한 동적해석 결과는 양 또는 음의 부호를 가지고 고정하중과 적재하중에 의한 해석결과와 조합되어야 하므로 부재설계를 수행하는 구조기술자들에게 많은 어려움을 주고 있다. 실제로 설계를 수행하고 있는 구조기술자는 자중과 적재하중에 대한 정적해석 결과와 지진하중에 대한 동적해석 결과를 따로 산출하여 기술자의 판단에 의해 이들을 조합하는 방법을 사용하곤 한다.

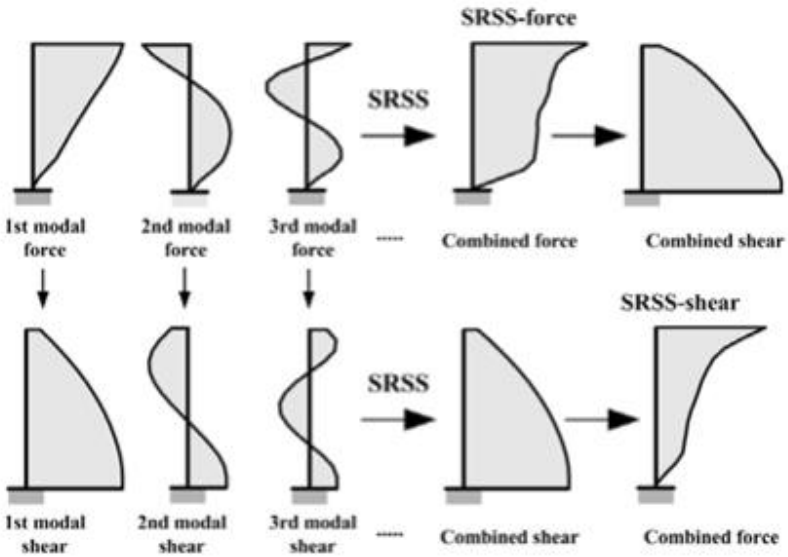
- 구조해석 프로그램과 전산기기의 발달로 응답스펙트럼 해석법을 이용하여 지진해석을 수행하는 것이 보편화 되었다. 그러나 이 해석법에서도 아직까지 해결하지 못한 문제점들이 많다. 예를 들면, 주축(Principal Axis) 문제, 양방향 지진에 대한 직교효과, 직교효과를 고려한 하중조합, 동적해석에서의 우발편심모멘트 등이 있다.

3) 유사동적해석 (Pseudo Dynamic Analysis)

- 응답스펙트럼해석법에서는 각각의 진동모드에 대하여 지진이 미치는 영향을 산출하고 이들을 적절하게 조합하여 구조물의 최대응답을 산정한다. 이때 여러 가지 진동모드에 대한 구조물의 응답을 하나로 조합하는 과정에서 모든 응답은 부호를 잃어버리고 절대값으로 표시된다. 이것은 특정한 부재에서 발생하는 한가지 부재력만을 생각한다면 양과 음의 값은 아무런 문제가 되지 않는다. 그러나 구조물의 내진설계를 위하여 축력, 전단력, 휨모멘트 등 여러 가지의 부재력에 관하여 고정하중과 적재하중에 대한 정적해석 결과와 지진해석에 의한 동적해석 결과를 조합하는 과정을 따져보면 동적해석 의한 결과가 절대값으로 표현되는 것은 모순임을 알 수 있다.
- 휨모멘트에 대한 조합의 경우에 기둥에서 발생하는 휨모멘트 크기는 알 수 있지만 방향을 알 수 없어서 현실적이지 못한 결과가 나타날 수 있다. 또한 축력과 휨모멘트의 조합에서는 지진하중에 의한 부재력과 중력하중에 의한 부재력을 조합할 때에 축력의 크기는 정해져 있지만 축력이 작용하는 방향이 압축력인지 인장력인지 알 수 없다. 수많은 하중조합조건에서 부재력의 조합결과에 대하여 단면설계를 위한 가장 불리한 경우를 판단하여 반영해야 하는 어려움이 있다. 이러한 문제점에 대한 대안으로 2000년 대한건축학회 “건축물 하중기준 및 해설”의 제6장 지진하중 해설부분에 보면 유사동적해석법을 제시하고 있다.
- 건축구조물에서 횡방향으로 하중이 작용할 경우에 각 부재에서 발생하는 휨

모멘트의 크기는 주로 층전단력의 크기에 의하여 결정되며 기둥에 작용하는 축력의 크기는 전도모멘트의 크기에 의하여 결정된다. 각 층의 전도모멘트의 크기는 그 층의 전단력과 바닥에서 그 층까지의 높이를 곱합으로써 얻어진다. 즉, 기둥에 작용하는 축력의 크기도 층전단력에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그러므로 지진해석에 의한 구조물의 지진응답 특히, 부재력을 산정하는데 있어서 층전단력은 절대적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 응답스펙트럼해석법에서 SRSS 형태에 의한 층지진하중은 부재력에서 발생하는 부호의 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

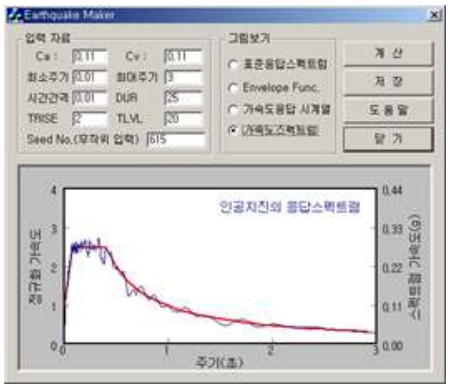
- 핵심은 바로 정적해석에서 사용할 수 있는 새로운 층분포하중을 구하자는 것인데 구하는 방법이 바로 응답스펙트럼 해석에 의한 층전단력 분포를 이용하자는 것이 유사동적해석법에서 가장 중요한 내용이다. 그림 3.2에서 살펴보면 층하중을 SRSS 조합하여 산정한 하중과 각 모드별 층전단력을 조합한 층전단력에서 산정된 층하중은 다른 하중 분포형상을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 응답스펙트럼해석에 의하여 나타나는 층전단력은 바로 모드별 전단력의 조합인 Combined Shear 부분이다. 이 층단력의 차를 이용하여 층분포하중을 역으로 계산할 수 있다. 즉, 이러한 층분포하중을 이용하여 정적해석을 수행하면 응답스펙 해석에 의한 층전단력 분포와 동일한 층전단력을 얻을 수 있다.



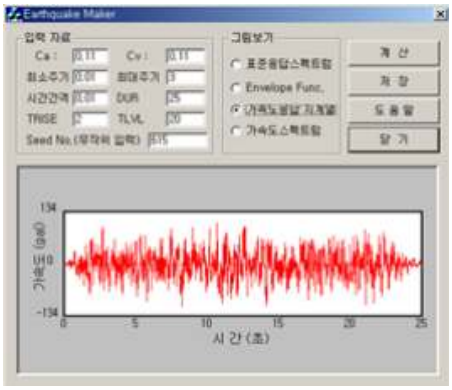
[그림 3.2 유사동적해석법에 의한 층분포하중의 산정]

4) 시간이력해석 (Time History Analysis)

- 구조물의 지진해석을 위해서 사용할 수 있는 여러 가지의 해석방법 중에서 가장 정확한 결과를 주는 방법이다. 지진에 의한 구조물의 거동이 시간에 따라서 어떻게 변하는가를 상세하게 계산할 수 있다. 구조물의 동적거동 특성인 질량에 의한 관성력, 감쇠에 의한 감쇠력, 강성에 의한 탄성복원력과 지진하중의 특성을 정확하게 고려할 수 있는 이 해석법은 계산량이 방대하여 해석에 소요되는 시간이 지나치게 길어지는 경우가 발생한다. 실제 각 나라의 내진설계기준에서는 시간이력해석법을 사용하도록 제시하고 있다. UBC-97의 경우 지진해석을 수행하기 위해 원칙적으로 대상 부지에서 계측된 시간이력을 사용해야 하지만 필요시에는 대상 부지에서 기대되는 시간이력과 유사하다고 판단되는 다른 지역의 계측기록을 사용할 수 있으며 인공가속도 시간이력을 사용할 수 있다고 언급하고 있다.
- 인공가속도 시간이력이라는 것은 지반특성, 지진원에 대한 발진기구의 특성 및 전파경로, 부지의 국지적인 영향 등을 고려한 응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다. 인공가속도 시간이력을 이용하여 지진해석을 수행하는 것에 대해 ① 국내에는 시간이력해석을 수행하기 위해 적합한 지진데이타가 없으며 설사 있다하더라도 선택하기가 어렵다. ② 시간이력해석시 구조물 각 부재에서 발생하는 부재력의 최대치들은 동시에 발생하지 않으므로 가장 불리한 경우에 대해서 수 많은 경우에 대해 부재 설계를 수행해야 한다. 그러므로 보수적인 측면에서 등가정적해석법이나 응답스펙트럼 해석을 이용하는 것이 효율적이다. 라는 의견도 존재한다.
- 그러나, 국내에서 적용 가능한 가속도 시간이력 데이터는 외국에서 발생한 많은 역사적 지진파들 중에서 우리나라 지반의 특성과 비슷한 가속도 시간이력 데이터를 수집하여 확률적으로 통계 처리하는 방법으로 통해 획득이 가능하다. 물론 구조기술자들이 이러한 데이터를 수집하여 확률 통계적으로 처리하는 것은 어려운 일이므로 학회 차원에서 수행해야 하는 한다.
- 또 한가지 방법은 지반특성, 지진원에 대한 발진기구의 특성 및 전파경로, 부지의 국지적인 영향 등을 고려한 응답스펙트럼과 잘 부합하도록 인공지진파를 생성하는 방법이다. 인공지진파를 생성하는 방법은 ① 응답스펙트럼에 부합하는 지진파를 랜덤 진동론에 의하여 작성하는 방법 ② 진원, 전달경로 및 부지특성을 종합적으로 모델링하고 랜덤 진동론을 이용하는 추계학적 방법으로 얼마든지 생성이 가능하다.



[그림 3.3 목표 응답스펙트럼 형상]



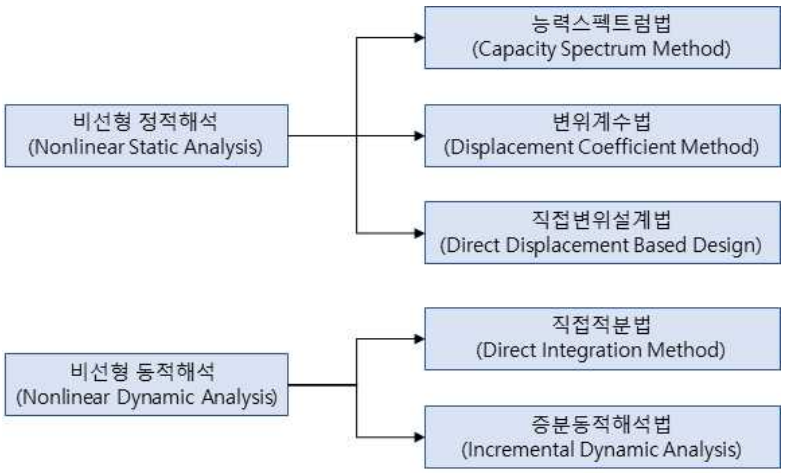
[그림 3.4 인공 가속도 시간이력 생성]

- 시간이력해석은 앞서 기 언급한 해석방법보다 이론적으로 정확하다는 것은 이론의 여지가 없다. 또한 시간이력해석을 수행하면 등가정적해석이나 응답스펙트럼해석에서 고려하지 못하는 지진응답들을 획득할 수 있는 장점이 있다. 물론 선형탄성이라는 한계는 있지만 특정한 부재에서의 지진응답은 등가정적 및 응답스펙트럼 해석에 의한 지진응답을 훨씬 초과하는 경우가 발생한다는 것이다. 특히 주요부재나 국부적으로 지진에 의한 손상을 정밀하게 평가해야 하는 층에 대해서는 반드시 검토할 필요가 있다.
- 응답스펙트럼해석이 동적해석이라고 할지라도 이 해석법은 구조물의 동적특성만을 반영한 것이지 지진하중의 동적특성은 해석상에 반영할 수 없다. 앞서도 언급했듯이 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공 지진파는 무수히 많이 생성할 수 있으며 각각의 지진파마다 시간영역 측면에서 서로 다른 동적특성을 반영하기 때문이다. 구조물의 동적특성과 지진하중의 동적특성이 일치하는 경우 공진과 같은 동적으로 구조물에 치명적인 거동이 발생할 수 있다. 그리고 각 질량에 작용하는 관성력의 방향이 구조물의 1차 모드와 같이 일치하는 경우에는 밑면전단력은 단순한 모든 관성력의 합이 되지만, 각 질량에 작용하는 관성력의 방향이 고차모드에서처럼 서로 다를 때에는 서로 상쇄되는 부분이 존재하며 밑면전단력이 줄어 들게 된다. 이러한 현상들은 각 모드응답을 SRSS 조합하여 합산하는 응답스펙트럼해석에서는 얻을 수 없는 효과이다.
- 그러므로 질량과 질량간에 작용하는 관성력의 차이이며 질량간의 상대변위에 의하여 계산되는 층전단력은 충분히 시간이력해석과 응답스펙트럼해서 사이에서는 차이가 발생할 수 있다. 관성력의 방향에 따라서 서로 상쇄되는 부분이 존재한다는 것이다. 그러므로 안정성에 대한 정밀 평가를 위해서는 특히

중요한 구조물에 대한 국부적 실계를 위해서 시간이력해석은 매우 유효하게 적용할 수 있는 해석수단이라고 판단된다.

다. 비선형 지진해석(Nonlinear Seismic Analysis)

□ 비선형 지진해석은 그림 3.5와 같이 크게 정적해석과 동적해석으로 구분할 수 있다. 비선형 해석의 종류는 매우 다양하고 적용되는 분야에 따라서 세분화 될 수 있으므로 아래의 구분은 건축물에서 적용할 수 있는 비선형 지진해석에 대해야 대략적으로 분류한 것이다.



[그림 3.5 비선형 지진해석의 종류]

□ 지진의 규모가 클수록 구조물과 각 부재는 비선형 거동을 보이기 때문에 정확한 지진응답을 구하기 위해서는 비선형 해석이 필수적이다. 건축구조물은 작용하는 지진하중은 정확히 예측할 수 있는 성질이 아니다. 그렇다고 모든 구조물에 대하여 선형 탄성적으로 거동하도록 설계한다는 것 자체는 경제적으로 매우 비효율적이다. 그러므로 건축구조물에 대한 대부분의 설계개념은 사용성이 요구하는 정도의 하중까지는 선형 탄성거동이 보장되도록 하며, 그 이상의 특별한 하중의 경우에는 비선형 또는 비탄성 영역에서의 거동을 허용하도록 설계할 필요가 있다는 것이다.

□ 비선형 해석은 해석적으로 고려해야 하는 사항들이 매우 많으며 해석시간 역시 매우 길며 지진응답에 대한 내용분석과 설계에 적용할 수 있는 구체적인 방법들이 거의 제시되어 있지 않다. 또한 해석시 많은 가정의 도입이 필요하기 때문에

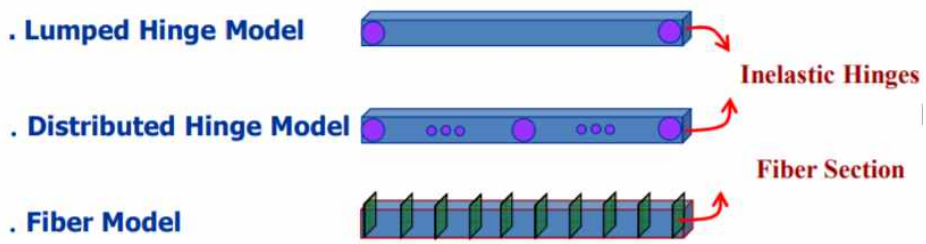
해석적 결과가 실제 구조물의 비선형 거동과 정확하게 일치한다고 말하기가 어렵기에 구조기술자들이 실무에 적용하는 것에 부담을 갖는 경우가 있으나 이미 미국의 비롯한 선진국의 경우 보편화되어 효과적으로 평가할 수 있는 방법을 고민하는 단계이다.

□ 더군다나 이후 언급하겠지만 대상 건물의 내진성능 평가를 통해 소요의 목표를 달성하고 건축주의 요구사항을 만족시키기 위해서 비선형 해석은 더 이상 선택사항이 아니라고 말할 수 있다.

1) 비선형 동적해석(Nonlinear Dynamic Analysis)

○ 각 부재의 비선형 거동을 반영하면서 실제의 지진이력에 대하여 시간대 별로 구조물의 동적 이력특성을 구하는 방법이다. 비선형 지진해석은 기본적으로 모드의 분리 및 중첩의 원리가 적용되지 않으므로 미분방정식에 대하여 시간대별로 적분을 수행하여 응답을 구하는 직접적분법을 사용해야 한다.

○ 특정한 입력지진운동에 대한 응답을 구하는 것으로 대상지점에 있어서 지진운동의 세기, 지속시간, 진동수성분, 시공간적인 변화와 같은 불확정적인 요소를 많이 포함하고 있다. 이것은 지진공학의 근본적인 불확실성에 대한 문제이다. 또 한가지 비선형 지진해석에서 어려운 부분이 바로 부재의 비선형 이력특성을 정의하는 부분이다. 각 부재의 이력특성은 재료의 비선형 특성을 고려하여 모멘트-곡률 또는 모멘트-회전각 관계로 정의해야 한다. 그러므로 입력데이타를 작성하기 위해서는 부재단면에 대한 해석이 내부적 또는 외부적으로 선행되어야 한다. 각 부재에 대한 정확한 지진거동은 많은 연구들에 의하여 해석적으로 또는 실험적으로 규명하여 왔다. 이러한 연구 및 실험에 의하여 경험적인 이력특성 모델들이 제시되어 있고 또는 더욱 더 정확한 해석을 위하여 Fiber 요소의 사용과 같은 접근 방법도 제시되어 있다.



[그림 3.6 비선형 해석 요소 모델]

- 비선형 동적해석을 수행하면 얻을 수 있는 해석결과들은 여러 가지고 있다. 이중에서 선형시간이력해석에서는 평가할 수 없는 항목들이 바로 구조물의 비선형 능력 또는 요구연성비, 이력특성, 소성힌지, 에너지 응답 등일 것이다. 약간은 낯설은 단어들이지만 지진공학과 내진설계의 근본적인 이론과 원리를 구성하고 있는 핵심적인 요소이다. 현재 내진설계기준에서 제시하는 많은 사항들은 대부분 비선형 지진해석과 실험 등에 근거한 역학적이고 해석적인 접근과 이에 따른 전문가들의 경험적인 견해를 바탕으로 정해진 것이다. 특히 건축물의 시스템 변수 중의 하나인 응답수정계수는 비선형 지진해석과는 너무나도 밀접한 관련성을 가지고 있다는 것은 주지하는 사실이다.
- 현재 미국, 일본 및 뉴질랜드와 같은 소위 지진공학 연구의 선진국에서는 실무 적용의 내진설계단계에서 비선형 동적해석을 활용하는 경우도 있으며 현재 국내 내진설계 기술력과 현격한 격차를 보이고 있다. 이들은 지진공학의 근본적인 문제를 따진다. 설계하고자 하는 구조물이 지진에 대하여 제대로 거동할 수 있는지를 분석한다. 지진에 대한 구조물의 거동 평가라는 것이 지진해석에 의한 요구량의 예측과 함께 특정재료와 특정단면의 구조물이 보유하고 있는 능력(Capacity)를 제대로 평가할 수 있어야 한다는 의미이다. 다시 말하면, 밑면전단력, 층전단력 및 전도모멘트는 그러한 크기의 힘이 발생될 때 구조물에 상당하는 저항능력이 있는지를 검토할 수 있어야 한다. 또한 변위에 대해서도 구조물에 발생하는 크기를 수용할 수 있는지, 비선형의 경우에 소성힌지의 회전능력이 동적해석에 의한 변위응답의 크기를 수용할 수 있는지를 알아야 한다는 것을 의미한다. 이미 뉴질랜드에서는 이와 같은 소성메카니즘의 대한 설계 철학을 반영한 내진역량설계법이 실무에서도 흔하게 적용하고 있으며 이에 대한 내용 역시 내진설계기준에 충실히 반영되어 있다.

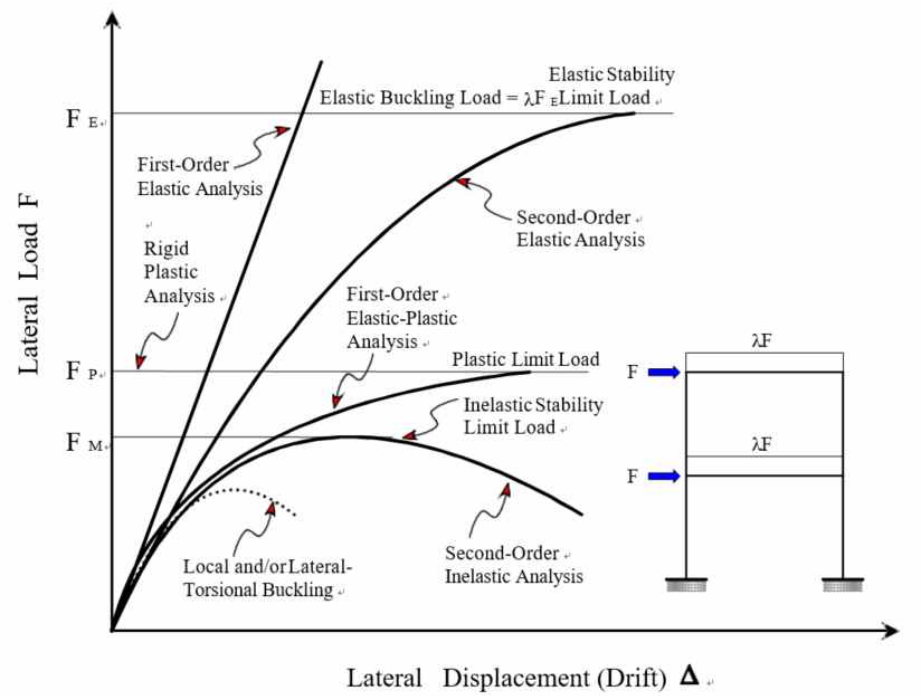
2) 비선형 정적해석(Nonlinear Static Analysis)

- 비선형 동적해석을 수행하는데 있어 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 비선형 동적해석보다 간편하고 쉽게 실무자들이 접근할 수 있는 비선형 해석방법(Pushover 해석법)이 적극적으로 활용하게 되었다. 이 해석은 실험에서도 일방향 가력실험이라고 해서 적용해 오고 있던 방법이다. 부재의 항복이후에 대한 이력특성을 정의하여 해석에 적용한다는 의미에서 비선형 해석이며 시간 변수와 무관하다는 의미에서 정적해석이다. 시간이라는 변수와 무관하다는 말은 구조물의 질량에 의하여 발생하는 관성력과 감쇠에 의한 감

쇠력은 해석에 반영되지 않으며 응답 결과에는 포함되지 않는다는 것을 의미한다. 바로 이점이 Pushover해석의 단점이라고 할 수 있다.

○ Pushover 해석은 일명 소성힌지법(Plastic Hinge Method)이라고 한다. 이 방법은 재료의 연성과 구조물의 부정적성을 해석에 반영하여 구조물의 비탄성 거동을 해석하는 가장 일반적인 방법이다.

○ Pushover 해석법의 메커니즘을 간략히 서술하면 다음과 같다. 부정정 구조물에서는 부재의 어느 한 부분의 응력이 항복점에 도달하면, 그 절점은 항복함으로써 하중을 더 증가시켜도 항복점 응력이 거의 일정한 응력상태에 있지만 항복점에 도달하지 않은 다른 절점은 탄성범위내에 존재한다. 구조시스템은 응력의 재분배에 의하여 불안정 상태에 도달할 때까지 하중을 지지할 여력을 가지기 때문에 하중의 증분에 따라서 구조물의 비선형 거동을 효과적으로 파악할 수 있다. 아래 그림 3.7은 구조물에 대한 Pushover 해석을 수행함으로써 얻을 수 있는 하중과 변위와의 관계를 표현한 것이다. Pushover 해석에는 다양한 방법이 존재하며 어떠한 해석조건을 적용하느냐에 따라서 하중-변위 관계의 유형 또한 여러 가지 형태로 나타난다.



[그림 3.7 Pushover 해석에 의한 구조물의 하중-변위 관계]

○ 재료의 연성과 구조물의 부정정성을 이용하여 시스템이 불안정 상태에 도달하기까지의 거동을 효과적으로 파악할 수 있기 때문에 구조물의 소성거동과 파괴메커니즘에 대한 분석이 가능하다.

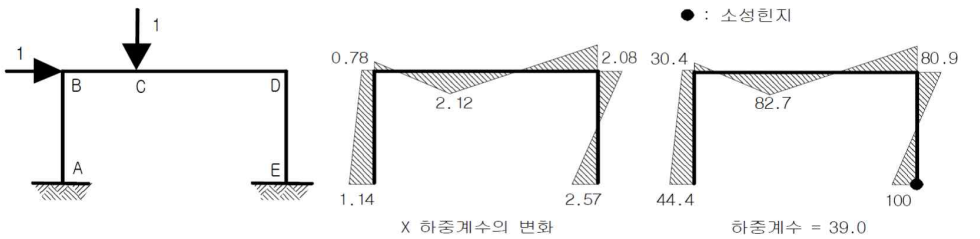
○ Pushover 해석의 가장 기본적인 개념을 예제를 이용하여 설명하면 다음과 같다. 구조물의 모든 부재들이 항복할 때까지 계속해서 하중을 증가시킨다는 의미로 각 단계별로 하중과 변위관계에 대한 선형탄성해석을 순차적으로 수행한다고 이해하면 된다. 대상 모델은 역학적으로 3차원 부정적 구조물이다. 소성해석에서 고려해야 하는 3가지 조건은 다음과 같다.

① 평형조건 : 외력에 의한 하중과 각 부재에서 발생하는 내력의 합은 항상 동일하다.

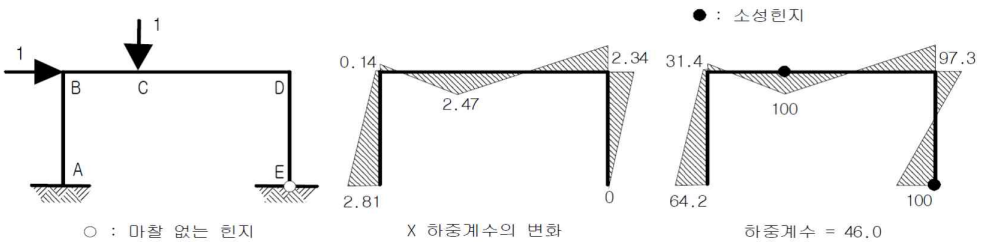
② 항복조건 : 가정된 부재의 항복조건을 만족하면 더 이상 부재는 힘을 받지 못하고 다른 부재로 재분배한다.

③ 파괴조건 : 구조물은 '부정정차수 + 1'개의 소성힌지가 발생하면 파괴된다.

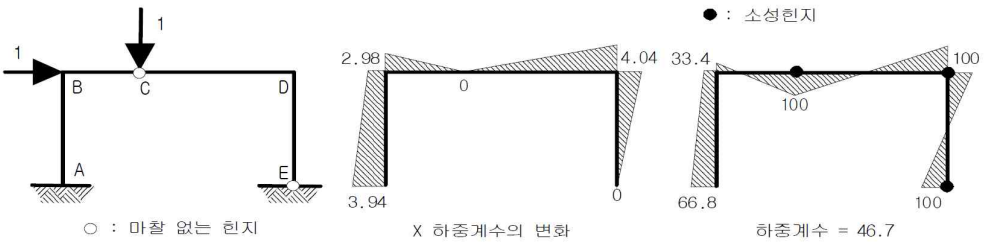
각 단계별로 하중계수를 구하고 소성힌지의 분포에 따라서 힘의 흐림이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 4단계에서 4번째 소성힌지가 발생할 때 강성행력이 '0'이 되고 구조물이 파괴된다. 이때의 최종적인 하중계수 λ=50이 된다. 이때의 하중이 붕괴하중(Collapse Load)이라고 할 수 있다.



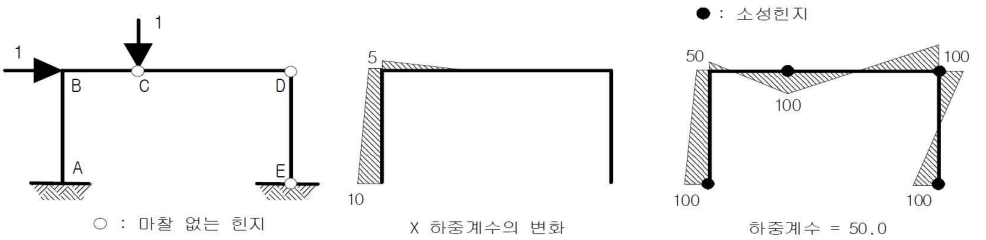
(a) 1단계 해석



(b) 2단계 해석



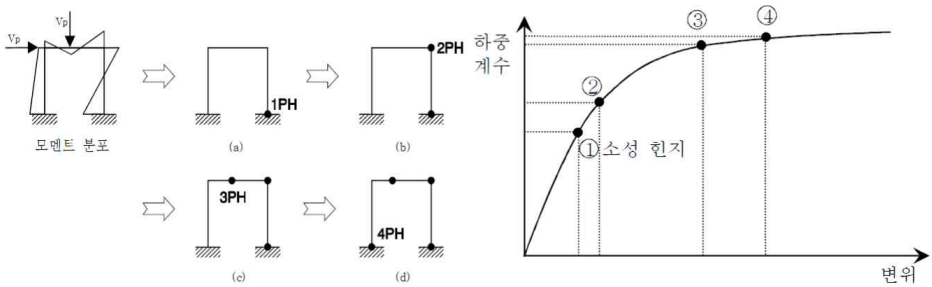
(c) 3단계 해석



(d) 4단계 해석

[그림 3.8 하중증분 해석에 의한 골조의 파괴메커니즘]

○ 그림 3.8는 이러한 순차적 소성힌지 발생에 의한 골조의 하중과 변위사이의 관계를 나타낸 것이다. 소성이론의 3가지 조건 중에서 파괴조건은 실제 구조물에서는 그대로 적용될 수 없다. 무한 부정정차수를 가지는 건축물이 '부정정차수 + 1'개의 소성힌지 발생할 때에 파괴되지는 않기 때문이다. 바로 파괴메커니즘이라는 것이 존재하기 때문이다. 건축물의 경우에는 보와 기둥의 파괴, 접합부의 파괴 및 복합적인 파괴에 의하여 붕괴될 수 있다.



[그림 3.9 골조의 소성힌지 발생과정 및 하중-변위 관계]

○ 성능에 기초한 내진설계에서 Pushover해석은 핵심적인 역할을 하며 구조물이 보유하고 있는 능력(Capacity)과 고려하는 지진하중의 대한 요구(Demand) 정도를 매우 효과적으로 비교할 수 있기 때문에 내진성능평가 분야에서 실무적인 적용이 가능하다.

라. 결론

□ 지금까지 지진해석의 종류와 원리에 대해서 개괄적으로 정리를 하였다. 지진해석은 지진과 구조물의 동적특성에 대한 이해가 증가하고 정확한 거동분석의 요구가 높아지면서 선형해석에서 비선형해석으로 그리고 정적해석에서 동적해석으로 지속적으로 발전하고 있다.

□ 지진설계시 기본적인 입력자료인 지진에 대한 불확실성이 큰 상태에서 구조물의 동적응답의 불확실성을 최소화하여 구조물의 안전성을 확보하는 것이 내진설계의 기본적인 목적이다. 이에 더불어 요구하는 성능을 경제적인 방법으로 확보해야하는 합리적인 방법을 찾는 것이 내진해석 방법의 발전 이유라고 판단된다.

□ 전산해석 기법 및 관련 소프트웨어의 발전으로 과거의 보수적이고 적용이 쉬운 해석방법에서 지진이라는 극한하중 상태에서 단계별로 변동하는 구조물의 비선형성을 반영하는 해석방법으로의 전환은 당연한 것으로 판단된다.

□ 더구나, 건축물이 고층화되고 다양한 건축재료와 다양한 입면형태를 갖는 구조물을 경제적으로 설계하기 위해서 구조물의 내진설계와 내진성능평가시 비선형 해석을 통한 구조물의 동적거동을 정확히 파악하는 것은 반드시 필요하다고 판단된다.

4. 건축구조물 지진해석 및 경제성 분석

□ 본 장에서는 비선형 지진해석이 반영되는 성능에 기초한 내진설계 철학의 개념과 배경을 설명하고 비선형해석의 필요성을 검토해 본다.

가. 비선형 지진해석의 개념

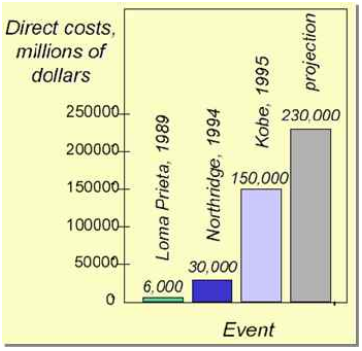
□ 앞서 언급하였듯이 지진해석은 항상 지진공학과 내진설계의 불확실성을 기반으로 이루어지기 때문에 그 응답에 대한 분석과 평가가 어렵다. 그러나 지진공학과 내진설계의 태생이 구조물의 비선형 거동과 관련되어 있기 때문에 실무에 적용이 가능한 범위와 정도는 알아 둘 필요가 있다.

□ 이미, 미국과 일본과 같은 지진공학과 내진설계분야의 선진국이라고 할 수 있는 나라에서는 비선형 지진해석 대한 인식과 상황은 우리와 전혀 다르다. 큰 지진이 발생하지 않는 나라이므로 선형탄성해석만 수행하는 것은 지진공학과 내진설계의 근본적인 목적인 인명의 안전과 재산 보호 즉, 안정성과 경제성을 고려한 설계수행에 부합되지 않는다. 지진공학과 내진설계의 근본적인 목적달성을 위해서 더 정확한 지진해석을 수행해야 한다는 Newmark교수의 말을 상기할 필요가 있다.

□ 최근 지진공학 분야에서 이루어지고 있는 내진설계 경향은 구조물의 사용년한 동안 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물의 실질적인 거동을 예측하고 보다 효과적으로 내진성능을 분석하는 것이다. 지진이 발생하였을 경우에 실제 구조물의 성능을 명확히게 보장하도록 설계하고, 여러 단계의 지반운동 수준에 대하여 일련이 성능목표를 달성하도록 유도하는 것이 차세대 내진설계 철학의 기본개념이라 할 수 있다.

□ 이러한 설계 개념이 도입되기 시작한 것은 1994년 미국 Northridge 지진과 1995년 일본 Kobe지진 이후이며, 전 세계적으로 많은 연구가 진행되었고 다양한 실무 분야에 적용이 되고 있다. 전통적인 내진설계기준에 따라서 설계된 구조물은 인명피해방지라는 설계목표는 만족하였지만, 구조 및 비구조요소의 손상으로 인하여 막대한 경제적 손실이 발생하였다. 이후 1999년 Izmit지진과 Chi-Chi지진에 대한 경험은 지진공학에 대한 급속한 지식

의 증가에도 불구하고 현행 내진설계의 신뢰성에 대한 문제와 더불어 구조물의 내진설계시 여전히 많은 불확실성이 존재한다는 사실을 알리는 결정적인 계기가 되었다. 그 중심적인 논쟁의 대상이 되었던 것이 바로 구조물에 대한 선형탄성 지진해석의 한계에 대한 부분이었다.



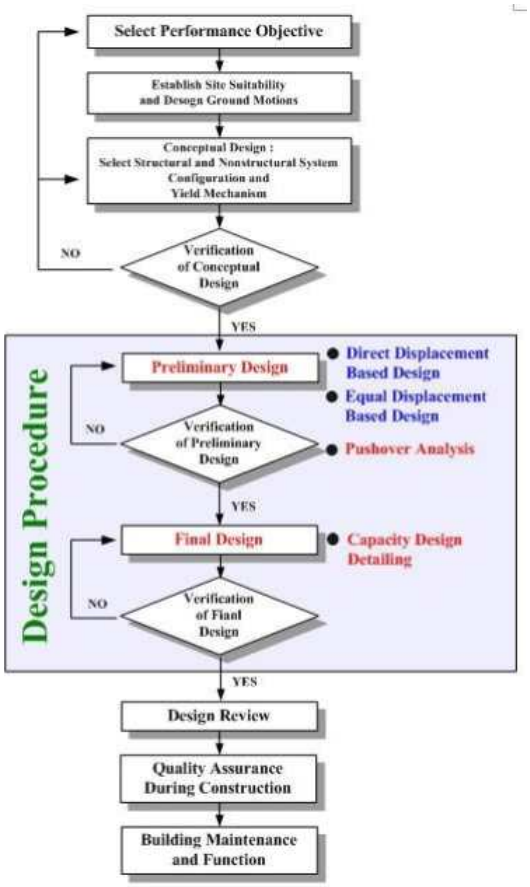
(a) Northridge (1994, USA) (b) Kobe (1995, Japan) (c) Chi-Chi (1999, Taiwan)

[그림 4.1 건축구조물 피해 사례]

나. 성능에 기초한 내진설계

□ 성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design-PBSD)는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 모든 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 차세대 개념의 내진설계 철학이다. 대상 부지에서 예상되는 여러 단계의 지반운동 수준에 대하여 구조물이 일련의 성능목표를 달성하도록 다단계의 내진성능 수준을 채택하고 있다. 이 철학은 그림에서 보는 바와 같이 규정된 위험도 수준 내에서 예측 가능하고 제어 가능한 내진성능을 가진 구조물을 설계하는 모든 과정을 포함한다. 성능에 기초한 내진설계 분야에서는 대상 구조물의 성능목표(Performance objective)를 성능수준(Performance Level)과 발생 가능한 지반운동의 예상수준에 대한 조합으로 정의한다. 구조물에 대한 성능을 위험도와 신뢰도 범위 내에서 예상할 수 있는 확률적인 성격으로 규정하고 4가지 구조물의 성능수준과 지반운동 수준을 고려함으로써 성능목표를 평가한다. 성능목표를 달성하기 위해서는 구조물의 비선형 지

진응답을 직접적으로 다루어야 한다.



□ 성능에 기초한 내진설계에서는 기본 철학으로 역량설계(Capacity Design) 원리를 채택하고 있다. 역량설계법은 불확정적인 특성을 가지는 지반운동에 대하여 구조물이 설계자의 의도대로 안전하게 거동하도록 유도하는 설계법이다.

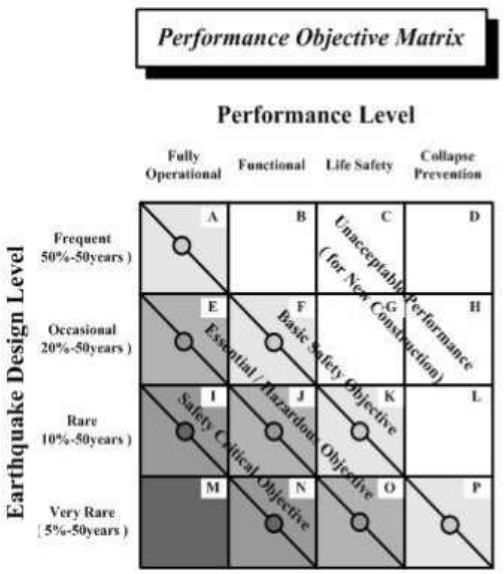
□ 구조물에 발생 가능한 붕괴메카니즘 중에서 가장 효율적인 에너지 소산능력 또는 연성능력을 가지는 메카니즘을 선택하여 구조물이 이와 같이 거동하도록 각 부재의 강도와 연성을 조절함으로써 전체 시스템의 거동양상을 명확하게 평가한다는 것이 핵심 개념이다. 역량설계법은 뉴질랜드에서 처음 개발되어 소개되었으며, 유럽 및 캐나다 등의 내진설계에서 널리 사용되고 있다.

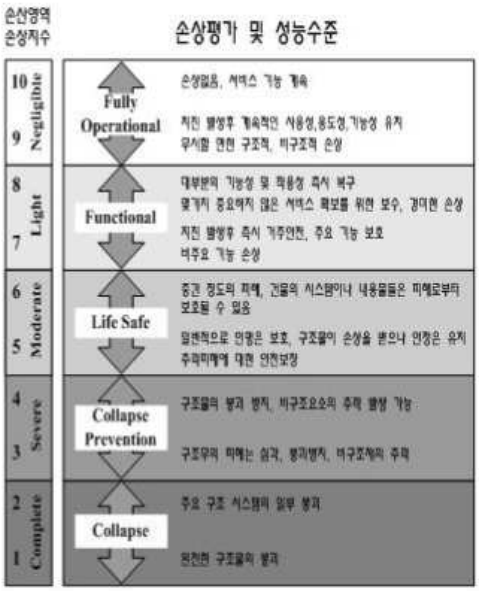
□ 성능에 기초한 내진설계에선느 설계 과정에서 반드시 비선형 지진해석이 도입되어야 하며, 다양한 지반운동 수준에 대하여 성능목표가 달성되어야 한다. 성능목표가 K 또는 P인 경우는 500년 재현주기를 가지는 설계지진하중에 대하여 인명안전수준을 유지해야하며, 2400년 재현주기를 가지는 하중에 대해서는 붕괴방지수준을 유지해야 한다. 이것은 현행 내진설계철학의 전통적인 개념과 동일한 의미이다. 그러나 성능에 기초한 내진설계에서는 성능목표에 따라서 다양한 지진하중과 구조물의 성능수준을 만족해야 하는 다단계 성능수준을 요구하고 있다.

[표 4.1 성능목표 – FEMA 273, 1997]

지진하중	재현주기	초과확률	구조물의 성능수준			
			완전 기능	기능 수행	인명 안전	붕괴 방지
Frequent Level	100년	50%/50년	A	B	C	D
Occasional Level	200년	20%/50년	E	F	G	H
Rare Level	500년	10%/50년	I	J	K	L
Very Rare Level	2400년	2%/50년	M	N	O	P

□ 지진하중의 수준별로 구조물의 손상을 정량적으로 평가함으로써 안전에 대한 신뢰성을 확보하여 구조물의 피해와 보수/보강시 발생하는 비용을 최소화하는 것이 성능에 기초한 내진설계의 목표라고 할 수 있다.





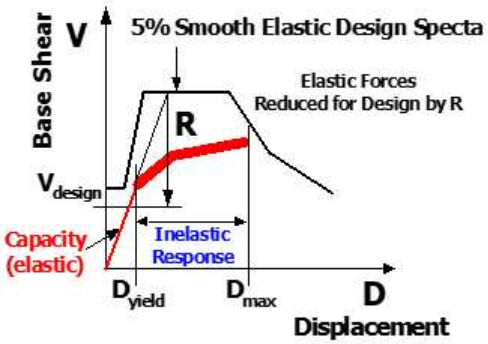
[그림 4.2 성능목표 매트릭스] [그림 4.3 손상상태 및 성능수준]

1) 성능에 기초한 내진설계 원리

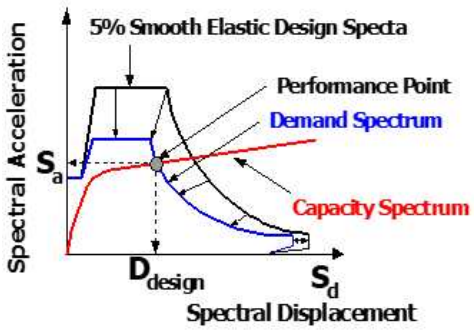
○ 일반적인 내진설계법에서 지진하중을 고려하는 방법은 그림 4.4와 같은 방법이 주로 사용된다. 이 개념은 응답수정계수(R)를 통하여 설계하중을 낮게 산정하고, 구조물은 설계하중 이상의 강도를 갖도록 하는 것이다. 여기서 응답수정계수를 사용하는 이유는 지진하중에 대하여 비선형 영역에

서 발생할 수 잇는 구조물의 에너지 흡수능력을 고려하기 위한 것이며, 이러한 설계법은 지진하중을 주요변수로써 고려하기 때문에 하중기반 설계(Force-Based Design)라고 할 수 있다.

○ 그러나 임의적이고 불확실한 특성을 가지는 응답수정계수를 사용한다는 점에서 응답에 대한 신뢰성이 떨어지며, 강도의 단순한 비교만을 통해서는 실제적인 구조물의 거동을 예측하기가 매우 어렵다는 단점이 존재한다. 또한 구성 부재의 강도만으로 구조물 전체의 강도 및 변형도를 산정할 수 없기 때문에 결과적으로 구조물의 성능이 명확하게 파악되지 않은 상태로 설계 될 가능성이 높다.



[그림 4.4 전통적인 내진설계법]

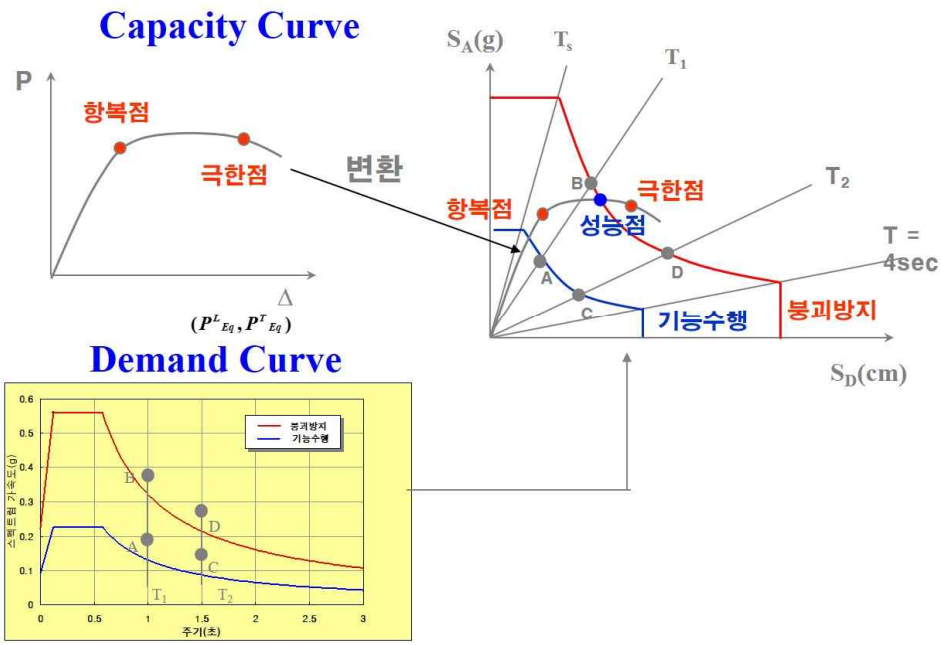


[그림 4.5 성능에 기초한 내진설계법]

○ 성능에 기초한 내진설계에서는 사용자 혹은 건축주, 그리고 설계자가 구조물의 목표성능을 미리 설정하게 된다. 즉, 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고, 이를 달성할 수 있도록 하는 것이다. 에너지 흡수정도에 따라서 구조물의 거동이 달라지기 때문에 파괴에 이를때까지 구조물의 변형성능을 예측할 수 있어야 하며 이것은 그림 4.5과 같이 구조물의 비선형 해석을 통해서만 가능하다. 성능에 기초한 내진설계에서는 성능평가의 대상을 구조물의 손상과 직접적인 연관성이 있는 변위로써 평가하기 때문에 이를 변위기반설계(Displacement-Based Design)라고 할 수 있다.

○ 구조물의 변형성능을 평가하기 위한 하나의 방법으로 Pushover해석을 수행하며 구조물의 하중과 변형에 대한 능력곡선과 지진하중에 대한 요구곡선을 서로 비교함으로써 보유내력을 평가할 수 있다. 두 개의 곡선이 교차되는 점을 산정할 수 있으며, 이점은 대상구조물이 산정된 지진하중에 대

하여 발휘할 수 있는 비선형 최대내력 및 변위를 의미한다. 이 교차점이 목표성능의 범위에 존재하면 목표가 달성되었다고 할 수 있다.



[그림 4.6 Capacity Spectrum – Capacity Curve – Demand Curve 관계]

다. 비선형 지진해석의 원리

□ 지진하중을 받는 건축물의 지진응답과 내진성능을 정확하게 평가하기 위해서는 연성(Ductility) 요구도(Demand)의 산정과 건축물의 연성도 능력(Capacity)에 대한 예측이 매우 중요하다. 건축물의 연성도 능력은 구조부재에 대하여 실험적으로 평가되지만 연성요구도는 구조물의 비선형 지진해석에 의하여 산정될 수 있다. 비선형 지진해석에 의한 연성요구도를 평가하는 방법으로는 비선형 정적해석과 비선형 동적해석(시간이력해석)이 있다.

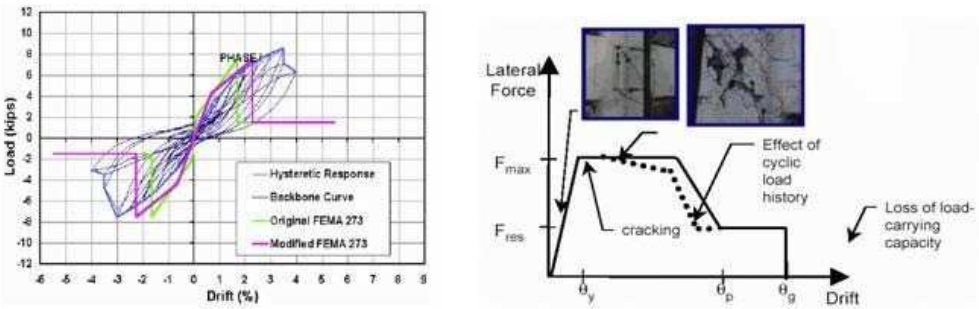
1) 비선형 정적해석법

○ 이 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 시스템의 안정 한계상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법으로서 앞절에서도 언급하였듯이 Pushover해석이라고 한다. 비선형 정적해석을 이용하여 구조물의 저항능력을 산정하고 요구되는 지진하중의 수준

과 직접 비교함으로써 비선형 지진응답과 내진성능을 매우 효과적으로 평가할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 즉, 지진하중을 받는 구조물이 안전하게 저항하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다는 지진방정식 "역량(Capacity) > 요구(Demand)"을 가장 효과적으로 파악할 수 있는 해석적 방법이다. 일반적으로 Pushover 해석에서 고려해야 하는 주요 사항들은 다음과 같다.

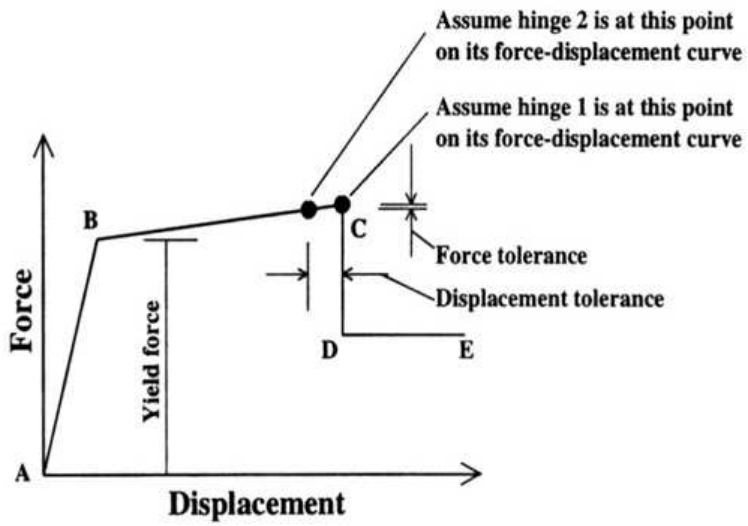
① 단면의 비선형 거동 특성

부재의 단면에 대한 해석을 수행하면 모멘트와 곡률 또는 모멘트와 회전각에 대한 관계를 산정할 수 있다.



[그림 4.7 반복하중을 받는 부재 이력거동의 이상화 과정]

재료의 응력-변형율 특성과 단면에서의 철근 배근 상태, 그리고 부재의 기하학적 특성 및 자중인 축하중을 고려하면 구조물의 힘과 변위관계를 역학적으로 유도할 수 있다.



[그림 4.8 부재이력거동의 특성]

ATC-40(1996)과 FEMA-273(1997)에서는 반복하중을 받는 철근 콘크리트 부재에 대한 실험을 통하여 이력특성을 규명하고 확률적으로 분석을 수행하여 실무자들이 실용적으로 사용할 수 있는 부재의 이력거동을 그림 4.8와 같이 제시하고 있다.

철근콘크리트 재료의 경우 각 단계별로 발생하는 특성은 부재에 대한 소성화 과정을 합리적으로 묘사할 수 있어야 한다. 균열상태, 인장철근 항복, 콘크리트 박리, 극한 한계상태에서의 내력 저하 등이 이력특성에 표현되어야 정확한 거동을 평가할 수 있다. 각 단계별 특성은 그림 4.8와 표 4.2과 같다.

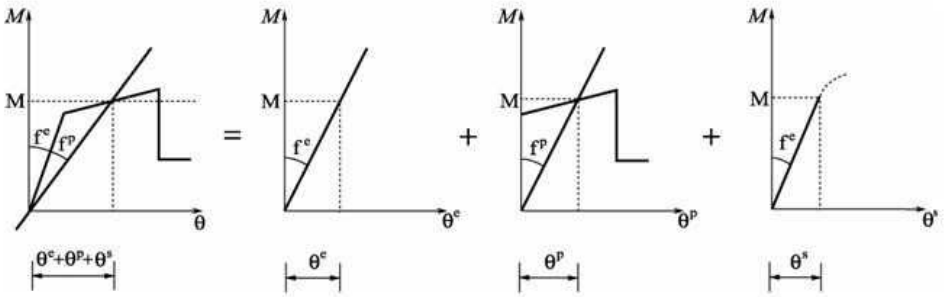
[표 4.2 각 단계별 이력거동의 특성 및 내용]

구분	이력거동내용
Point A	하중이 재하되지 않은 상태
Slope A-B	부재의 초기강성(initial stiffness) 상태 구간, 재료특성, 부재치수 철근량, 경계조건, 응력과 변형수준에 따라 결정. 균열상태 포함
Point B	공칭항복강도(nominal yield strength) 상태
Slope B-C	변형경화(strain hardening) 구간, 일반적으로 초기강성의 5-10%를 가지며 인접한 부재와의 내력 재분배에 중요한 영향을 미침
Point C	공칭강도(nominal strength), 부재내력에서 강도저하가 시작되는 시점 극한한계 상태로 볼 수 있으며, 소성힌지 영역에서 횡구속 철근의 파괴
Drop C-D	부재의 초기파괴(initial failure)상태, 철근콘크리트 부재의 경우에 주철근이 파단(fracture)되거나 콘크리트가 파손(spalling)되는 상태, 철골부재의 경우에 전단내력이 급격하게 감소
Zero D-E	잔류저항(residual resistance) 상태, 공칭강도의 20% 수준에서 저항
Point E	최대변형능력, 중력하중을 더 이상 받을 수 없는 상태

② 하중과 변위 비선형 관계

구조물을 구성하는 각각의 부재에서 발생하는 비선형 거동은 요소법 특성을 고려하여 하중과 변위, 축력과 모멘트, 전단력과 전단변형, 비틀림과 비

틀림 변형 관계를 반영해야 한다. 일반적으로 Pushover 해석에서는 해석의 간편함을 위하여 특정한 위치에서만 소성거동이 발생하도록 가정하는 집중형 Point Hinge Model을 사용한다. 한 절점에서 발생하는 부재의 변형각은 탄성 휨 변형각, 소성 휨 변형각과 전단에 의한 변형각의 합으로 나타낸다.



[그림 4.9 유연도법에 의한 모멘트와 변형각의 관계]

③ 해석 방법의 결정

일정한 방향으로 단조증가 형태의 하중을 이용하는 Pushover 해석은 구조물의 응답상태를 제어하는 방식에 따라서 하중제어와 변위제어 방식으로 구분할 수 있다. 하중제어는 구조물에서 발생하는 내력한계를 미리 가정하고 하중증분법을 이용하여 힘과 변위관계를 파악하는 것이며, 변위제어는 구조물에서 예상되는 목표변위를 가정하고 설정된 목표변위를 달성할 수 있도록 단계별 변위를 제어함으로써 힘과 변위관계에 대한 거동을 파악하는 것이다.

2) 비선형 시간이력해석법

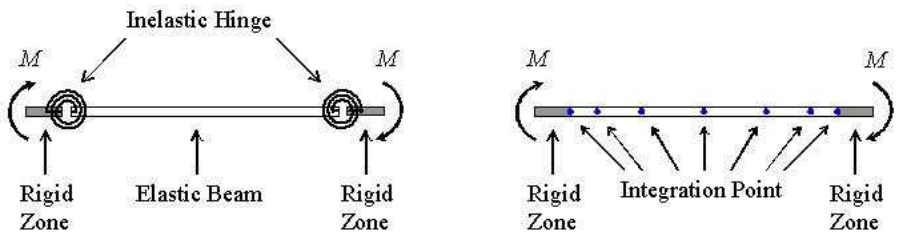
- 비선형 시간이력해석은 건축구조물의 내진성능을 정밀하게 평가하는 기법으로서 부재의 비선형 특성과 하중의 시간의존적인 특성을 반영할 수 있는 가장 발전적인 방법이다.
- 건축구조물에 대한 보다 정확한 요구내력 산정과 정밀한 내진성능 평가는 비선형 시간이력해석을 이용하여 수행할 수 있다. Pushover해석의 원리는 근본적으로 정적해석에 기초한다. 즉, 구조물의 힘과 변위만의 응답특성을 비선형으로 표현하고 있지만, 질량에 의한 구조물의 관성력이나 감쇠에 의한 감쇠력은 이러한 해석에서는 반영될 수 없다. 또한 Pushover해석은 한방향에 대하여 일률적으로 증가하는 하중을 사용하기 때문에 지진하중과 같은 불규칙한 반

복하중에 의하여 발생하는 거동의 특성을 원칙적으로 표현하지 못한다. 즉 Pushover해석은 구조물에서 하중의 재분배를 이용한 순차적인 붕괴메카니즘만을 나타내지만, 실제 구조물의 거동양상은 매우 불규칙적이며 다양한 메커니즘에 의하여 소성화가 진행될 수 있다.

- 이러한 Pushover해석의 단점을 보완하고 결과에 대한 검증을 위하여 비선형 시간이력해석을 사용할 수 있다.
- 일반적으로 비선형 시간이력 해석에는 직접적분법(Direct Integratio Method)이 적용되며, 각 시간 간격에서의 변위 증분을 구하여 누적하는 방식으로 수행된다. 각각의 시간 간격 내에서 부재의 강성이 변화함에 따라 발생하는 불평형력이 해소될 때까지 반복해석을 수행해야 한다. 대표적인 직접적분법에는 Newmark-β법, Wilson-θ법 등이 있으며, 수치반복법에는 Arc-Length법, Newton-Rapson법 등이 있다.

① 비선형 힌지의 특성

실제 지진하중과 같은 반복하중을 받는 구조물에서 발생하는 소성거동은 부재 길이에서의 모멘트 분배와 변화양상에 따라서 소성힌지의 위치와 특성 또한 변하게 된다. 이러한 거동을 반영하기 위해서는 집중형 모델이 아니라 분산형 모델을 사용해야 한다. 아래 그림 4.10는 두 가지 모델에 대한 개념을 나타낸 것이다. 분산형 힌지모델의 경우에는 유연도법에 의하여 정식화되며 부재내력 분포와 변형형상이 실제 거동과 거의 일치하기 때문에 보다 높은 정확성을 확보할 수 있다. 휨변형의 경우에 모멘트와 회전각의 관계로 소성힌지특성을 정의하며 소성힌지의 유연도는 단면 및 재료의 비선형 특성을 이용하여 파악할 수 있는 이력모델에 의하여 평가할 수 있다.

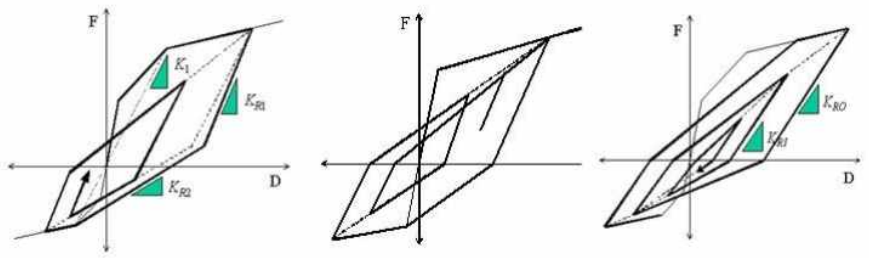


[그림 4.10 비선형 힌지모델의 개념 및 비교]

② 비선형 이력모델의 특성

비선형 이력모델은 단면 혹은 재료의 특성에서 파악할 수 있는 항복강도,

강성 및 강도의 저감정도를 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우에 어떠한 방식으로 변화하는가를 평가함으로써 정의할 수 있다. 하중과 변형에 대한 이동경로를 지정하기 위하여 일반적으로 하중의 재하(Loading), 비재하(Unloading), 재재하(Reloading)의 상태를 고려한다. 그림 4.11는 철근콘크리트 구조물에서 사용되는 대표적인 이력모델을 나타낸다.



(a) 강성저감 삼선형 이력모델 (b) Clough 이력모델 (c) Takeda 이력모델

[그림 4.11 대표적인 일축힌지 이력모델]

③ 지진하중의 선택

지진하중은 부지에서 계측된 시간이력을 사용하는 것이 원칙이지만 필요시에는 고려되는 지반의 특성과 유사한 3개의 가속도시간이력을 이용하고 최대응답으로 설계하거나, 7개의 가속도시간이력을 이용하고 평균응답으로 설계할 수 있다. 또한 성능목표에 해당하는 응답스펙트럼과 잘 부합하는 인공 가속도 시간이력 이용이 가능하다.

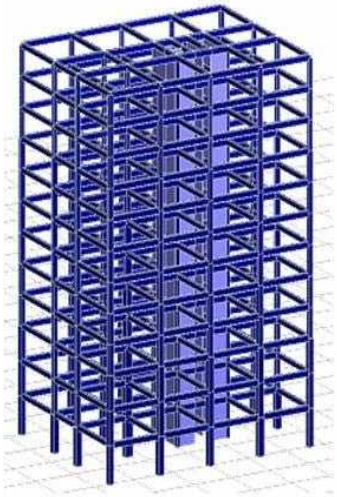
3) 선형지진해석과 비선형지진해석의 응답 차이

- 선형지진해석과 비선형지진해석의 응답차이를 분석하기 위해 동일한 건축물에 대해 현재 실무에서 보편적으로 많이 사용하고 있는 등가정적해석과 응답스펙트럼해석을 수행하였다.
- 동일한 구조물에 대해 등가정적 해석, 선형탄성 응답스펙트럼해석 및 비선형정적해석을 수행하여 각각의 응답을 비교하였다.
- 우선 등가정적 해석과 선형탄성 응답스펙트럼해석을 통해 응답치를 비교하였다.

① 대상 구조물 개요

내진성능평가 대상이 되는 기존 구조물은 그림 4.12과 같은 이중골조방식의 12층 철근 콘크리트 구조물이다.

건물위치	서울특별시
구조형식	철근콘크리트조(지상 12층)
건물용도	판매시설(1F~3F) 업무시설(4F~12F)
구 조 시스템	이중골조방식 철근콘크리트 모멘트 연성 골조와 전단벽의 조합
사용재료	콘크리트 : fck = 24MPa 철 근 : fy = 400MPa
적용기준	KBC2016

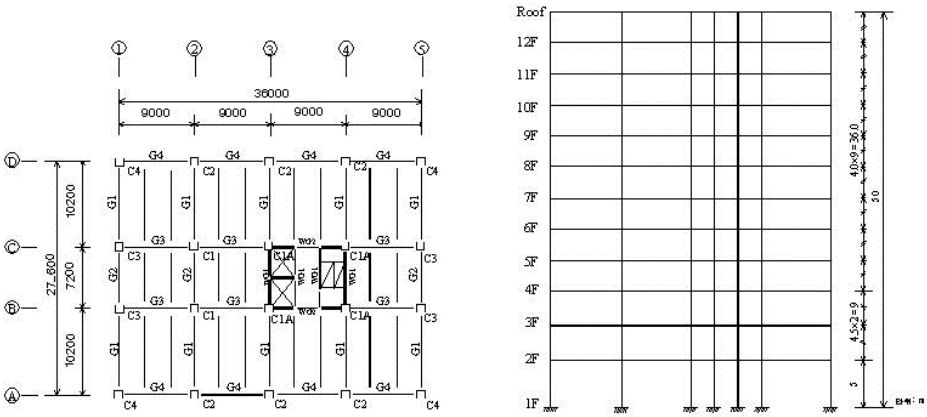


② 특기사항

- 건물의 바닥슬래브는 하중으로 고려하고 구조모델에서는 제외하였으며, 슬래브의 강막(Rigid Diaphragm)효과에 의한 기구학적 구속조건으로 고려하였다.
- 바닥판을 지지하는 작은보는 중력방향의 하중만을 전달하고, 구조물의 횡적거동에는 영향을 미치지 않으므로 해석모델에서는 제외하였다. 작은보의 자중과 중력하준 전달은 바닥하중 입력시 고려하였다.
- 지하구조물은 횡력에 영향을 받지 않고 지진시 지반과 함께 거동하는 것으로 가정하여 해석모델에서는 제외하였다.

③ 골조도

- 대상 구조물의 평면 및 입면에 대한 골조도는 다음과 같다.



[그림 4.12 대상구조물 평면도 및 입면도]

• 대상 구조물 주요 부재의 단면 치수는 다음과 같다.

[표 4.3 보 부재 제원]

부재명	G1	G2	G3
단면치수(mm)	400 x 700	400 x 700	600 x 800
부재명	G4	WG1	WG2
단면 치수	500 x 800	400 x 700	600 x 800

[표 4.4 벽체 부재 제원]

부재명	코어 벽체
단면치수(mm)	Thk. 200

[표 4.5 기둥 부재]

부재명	1F	2F~3F	4F~5F
C1	1000 x 1300	1000 x 1200	1000 x 1000
C1A	700 x 700	700 x 700	600 x 600
C2	1000 x 1000	900 x 1000	800 x 800
C3	1000 x 1000	800 x 800	800 x 800
C4	900 x 900	900 x 900	800 x 800

부재명	6F~7F	8F~9F	10F~12F
C1	800 x 1000	800 x 800	600 x 600
C1A	500 x 600	500 x 600	500 x 600
C2	600 x 800	600 x 800	600 x 600
C3	600 x 800	600 x 800	600 x 700
C4	600 x 800	600 x 800	600 x 700

④ 적용하중

- 모델에 적용되는 하중은 실의 용도와 마감의 종류에 따라 상세히 구분되어야 하지만, 본 예제에서는 해석의 편의를 위해 표 4.6와 같이 대표적인 하중만을 적용하였다.

[표 4.6 적용하중]

용도	판매시설	업무시설	지붕
층	2F~3F	4F~12F	Roof
고정하중	460	400	530
적재하중	400	250	200

- Case – 1 : 등가정적 해석시 적용 조건

지진계수	내용	지진계수	내용
지역계수	A=0.11	반응수정 계수	R=5.5(이중골조)
중요도계수	I=1.2(도시지역)	건물의 높이	Hn=50m
지반계수	S=1.2	건물의 폭	36m x 27.6m

- Case – 2 : 선형탄성 응답스펙트럼해석시 적용 조건

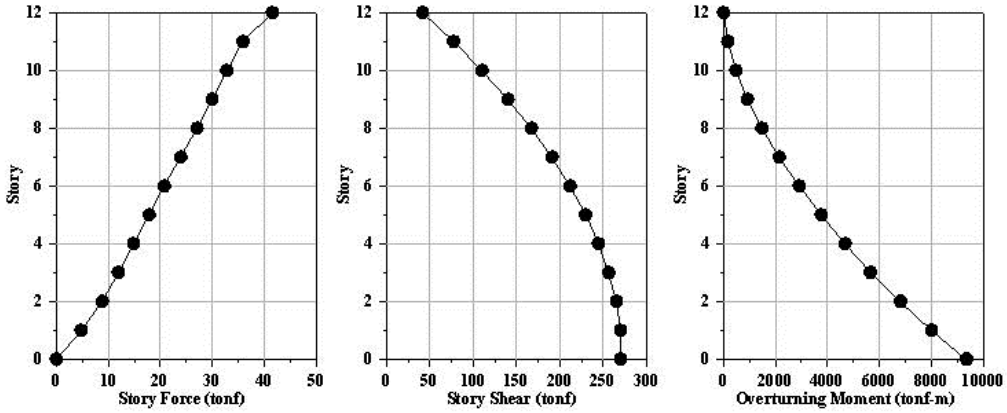
지진계수	내용	지진계수	내용
지역계수	A=0.11	반응수정 계수	R=5.5(이중골조)
중요도계수	I=1.2(도시지역)	지반계수	S=1.2
동적계수	$V/W = AI_EC/R$ $C = S/(1.2T^{1/2}) \leq 1.75$		

- Case – 3 : 비선형 정적해석시 적용 조건

지진구분	설계지진계수	재현주기	성능목표
EQ-1수준	A = 0.11 S = 1.2	500년	현행 내진설계기준 설계지진
EQ-2수준	Ca = 0.130 Cv = 0.180	500년	붕괴방지수준 내진 2등급
EQ-3수준	Ca = 0.182 Cv = 0.252	1000년	붕괴방지수준 내진1등급
EQ-4수준	Ca = 0.260 Cv = 0.360	2400년	붕괴방지수준 내진 특등급

⑤ 선형해석

- 등가정적해석과 응답스펙트럼해석 기능을 이용하여 지진해석을 수행하고 이에 대한 선형탄성 지진응답을 분석하였다.
- 등가정적해석 : 현행 내진설계기준에서 제시하는 등가정적해석법에 따라서 밑면전단력을 산정한 후에 각 측에서의 층하중, 층전단력 그리고 층전도모멘트는 그림 4.13과 같다.



(a) 층하중 분포 (b) 층전단력 분포 (c) 층전도모멘트 분포

[그림 4.13 등가정적해석에 의한 지진하중 및 응답]

- 응답스펙트럼해석 : 구조물에 대한 응답스펙트럼 해석을 수행하기 위해서 고유치해석을 20차모드까지 수행하였다. 주요 저차모드에 대한 모드형상은 그림 4.14과 같다.

(a) 1차 모드형상(T=1.6261초) (b) 2차 모드형상(T=1.3059초) (c) 3차 모드형상(T=1.2733초)

[그림 4.14 대상 구조물 주요 저차모드형상]

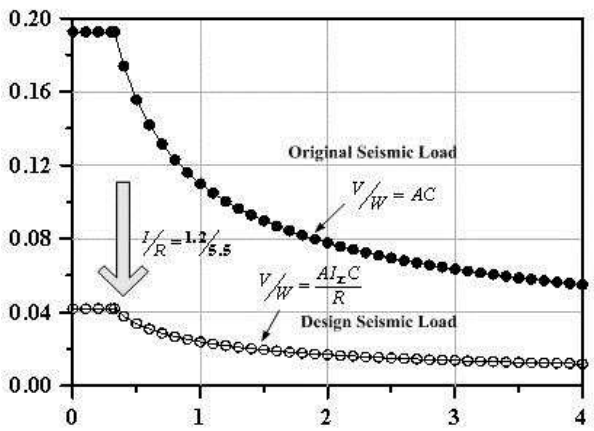
- 응답스펙트럼해석 결과 예제구조물의 1차모드는 코아부분 전단벽에서의 질량편심으로 인하여 비틀림 형상을 나타내었다. 일반적으로 건축구조물

의 경우 평면상에서 좌우대칭이며 질량과 강성이 균일하게 배치되는 경우는 거의 없으며 구조물의 휨강성 대비 비틂강성이 상대적으로 작은 경우가 많아 1차모드와 같이 주요 저차모드에서 비틀림 모드가 먼저 발생하는 경우가 일반적이다. 이 구조물은 평면에서의 질량 저항편심으로 인하여 평면 비정형성을 나타낸다고 평가할 수 있다. 각 모드별 진동주기와 질량참여율은 표 4.7과 같다.

[표 4.7 모드별 진동주기와 질량참여율]

모드	진동주기(초)	모드별 질량참여율(%)		
		X방향	Y방향	Z방향
1차	1.6216	0.01	33.45	**41.77**
2차	1.3059	0.06	**34.64**	35.85
3차	1.2733	**74.59**	0.01	0.05
4차	0.5116	0.00	3.27	8.27
5차	0.3881	13.69	0.00	0.01
…	…	…	…	…
19차	0.0679	0.95	0.00	0.00
20차	0.0653	0.01	1.29	0.20
합계		**98.61**	**98.52**	**99.26**

- 구조물 고유치 해석은 각 방향에 대해 누적질량참여율이 90%이상을 나타낼 수 있는 모드까지 포함해야하며 각 방향 모드별 최대 질량 참여율을 나타내는 모드가 해당 방향에 대해 주요 모드이다.
- 실제 지진하중과 구조물의 연성능력 및 중요도를 고려하여 설계에서 반영하는 지진하중을 그림 4.15에 비교하였다.



[그림 4.15 응답스펙트럼 지진하중]

- 현행 내진설계 기준에서는 구조물의 재료 및 시스템에 따라서 연성능력

을 가정한 응답수정계수를 이용하여 실제 탄성적으로 거동하는데 필요한 강도보다 훨씬 낮은 정도로 지진력을 감소시킴으로써 비탄성 지진응답을 근사적으로 평가하고 있다. 그러므로 설계지진력은 응답수정계수에 의하여 감소된 탄성응답스펙트럼으로부터 산정된다. 선형탄성 범위내에서 구조물의 비탄성 거동을 예측하고 감소된 지진하중 응답을 산정한 후에 각 부재는 가정한 연성능력을 발휘하기 위해서는 내진상세를 반드시 확보해야 한다. 그러나 현행 기준에서 제시하고 있는 응답수정계수는 구조물이 심한 항복상태에 도달하여도 부가적인 저항능력이 있다는 것을 고려하여 경험적으로 개발한 것이다.

- 응답수정계수는 구조물이 연성능력(Ductility Capacity)뿐만 아니라 초과강도 (Overstrength), 감쇠특성 및 잉여도(Redundancy)를 반영하기 위한 것이다. 일반적인 구조시스템을 대상으로 과거 지진발생 따른 피해와 거동특성을 고려한 내용을 바탕으로 결정한 계수로써 이론 및 실험적인 산정근거는 미약한 상황이다. ATC-19(1995) 및 ATC-34(1995) 보고서에서는 응답수정계수에 대한 문제점을 다음과 같이 지적하고 있다.
  - 구조물의 높이가 다르더라도 같은 형식의 구조시스템은 동일한 응답수정계수(R) 값을 사용한다.
  - 내진설계기준에서의 R값은 구조물의 실제 연성능력, 감쇠특성 및 초과강도에 따른 영향을 분명하게 고려하고 있지 않다.
  - 지반조건에 따른 영향을 고려할 수 있는 형태로 되어 있지 않다.

⑥ 지진응답의 비교 및 분석

- 등가정적해석과 응답스펙트럼해석을 선형해석 측면에서 수행한 결과 밑면전단력을 비교하면 다음과 같다.

해석 방법		밑면전단력 (kN)
등가정적해석	X Dir.	2,700
	Y Dir.	2,700
응답스펙트럼해석	X Dir.	1,826
	Y Dir.	1,288

- 보정계수 산정
  - 산식에 의한 진동 주기 : $T = 0.0488 \times h^{3/4}$

$= 0.0488 \times 50^{3/4} = 0.9176$ sec

- 보정주기 : $T_m = 1.2 \times 0.9176 = 1.1011$ sec
- 정적 밑면전단력 : $C = S/(1.2 \times T^{1/2})$

$= 1.2/(1.2 \times 1.1011^{1/2}) = 0.9529$

$V = (AI_EC/R) \times W$

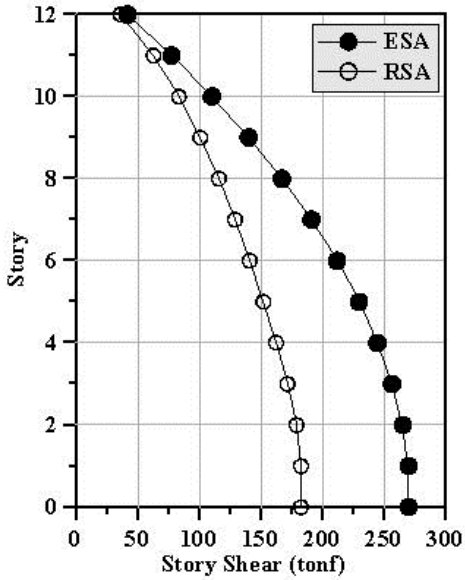
$= (0.11 \times 1.2 \times 0.9529 / 5.5) \times 107779.4$

$= 2465$ kN

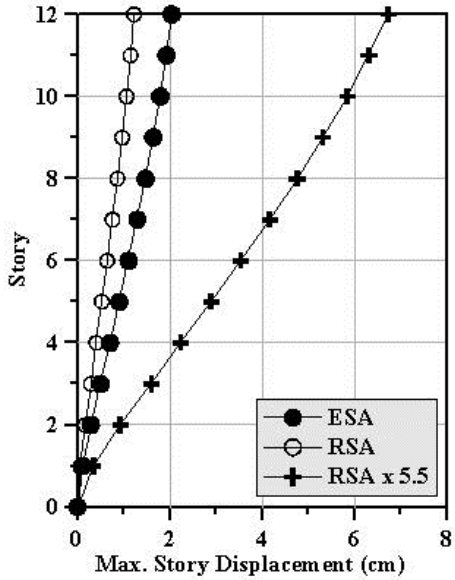
- 각 방향별 보정계수 : SFx = 2465 / 1826 = 1.35

SFy = 2465 / 1288 = 1.91

• 등가정적해석과 응답스펙트럼해석에 의한 밑면전단력과 최대 층변위를 그림 4.16과 그림 4.17에 나타내었다.



[그림 4.16 밑면전단력 비교]



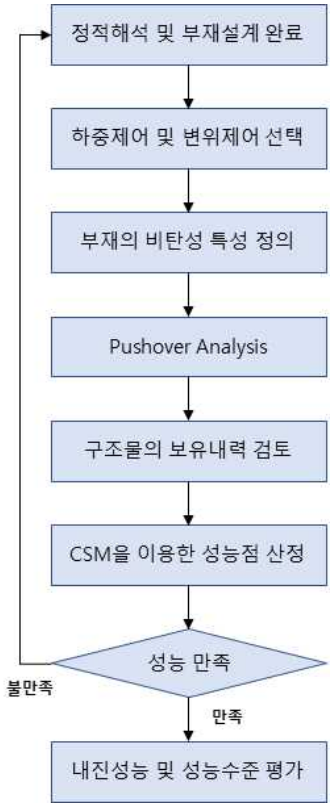
[그림 4.17 최대 층변위 비교]

4) 비선형 정적해석(Pushover) 해석

○ 비선형 정적해석인 Pushover해석을 이용하여 구조물의 보유능력을 산정하고 역량스펙트럼법(CSM-Capacity Spectrum Method)의 원리를 적용하여 구조물의 비선형 최대변형과 요구내력을 평가하였다. 예제 구조물에 대한 전체적인 내진성능평가 정차는 그림 4.18와 같다.

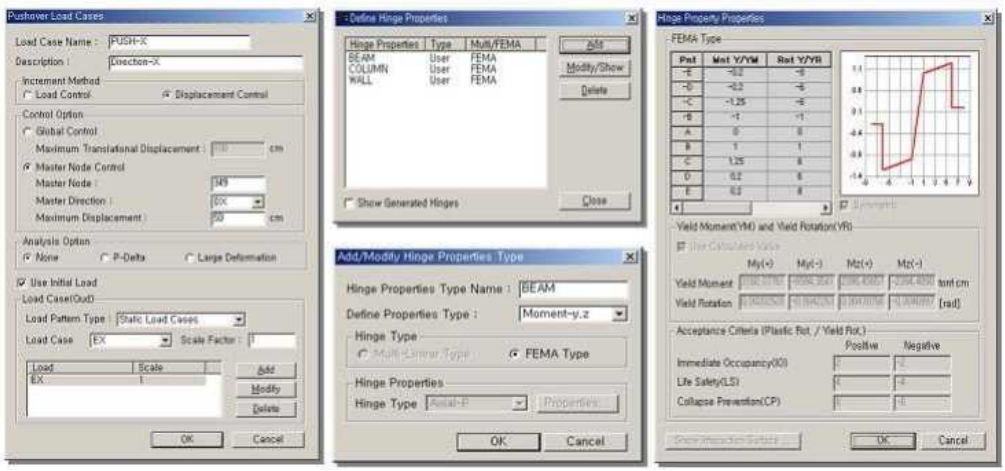
○ Pushover 해석을 수행하기 위해서는 먼저 대상 건물이 설계가 되어 있는 상태에서 해석 방법을 결정하고 부재에 대한 비선형 특성을 정의해야 한다. 성능에 기초한 내진설계시 하중제어와 변위제어 방식을 모두 사용할 수 있으나 일

반적으로 변위제어방법에 의하여 내진성능을 평가하므로 본 과제에서도 변위제어방법을 이용하여 수행하였다.



[그림 4.18 내진성능 평가 절차]

○ FEMA-273에서 제공하고 있는 모멘트-회전각 관계를 이용하여 비선형특성을 정의하였다. 그림 4.19은 해석방법과 부재 소성힌지 특성을 나타낸 것이다.



[그림 4.19 주요 고려사항]

○ Pushover 해석을 수행한 후에 구조물의 각 측에서 발생하는 변위와 밑면전단력과의 관계를 그림 4.20에서 표현하였다. 구조물의 능력곡선은 최상층변위와

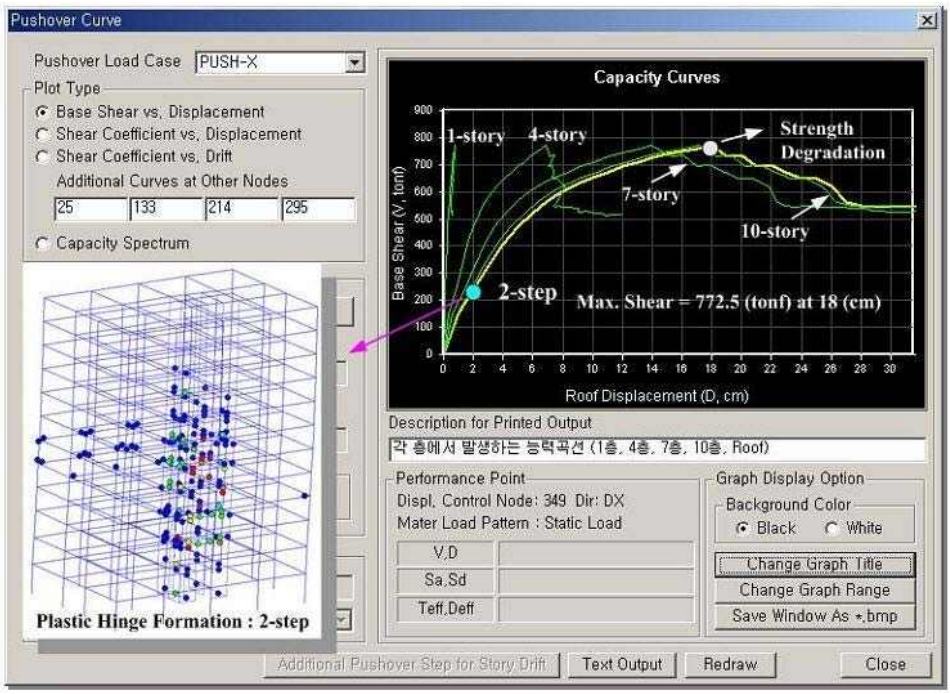
밑면전단력과의 관계를 의미한다. 각 부재의 이력특성을 FEMA 형식으로 고려하였기 때문에 구조물의 비선형 변형과정과 내력저하에 따른 강성 및 강도 감소 현상을 매우 효과적으로 파악할 수 있다.

○ 대상구조물의 역량곡선은 다자유도 시스템에서의 거동이며, 지진하중에 의한 응답스펙트럼과 서로 비교하기 위해서는 단자유도 시스템의 역량스펙트럼의 형태로 전환해야 한다. 시스템 전환은 다음 관계식을 이용한다.

$$S_a = \frac{V}{\alpha^k M} \qquad S_d = \frac{D}{\Gamma^k \phi^k} \qquad \text{(식. 5.1)}$$

모드참여계수 $\Gamma^k = \dfrac{\sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jk}}{\sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jk}^2}$ 유효질량계수 $\alpha^k = \dfrac{\left(\sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jk}\right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{N} m_j\right)\sum_{j=1}^{N} m_j \phi_{jk}^2}$ (식. 5.2)

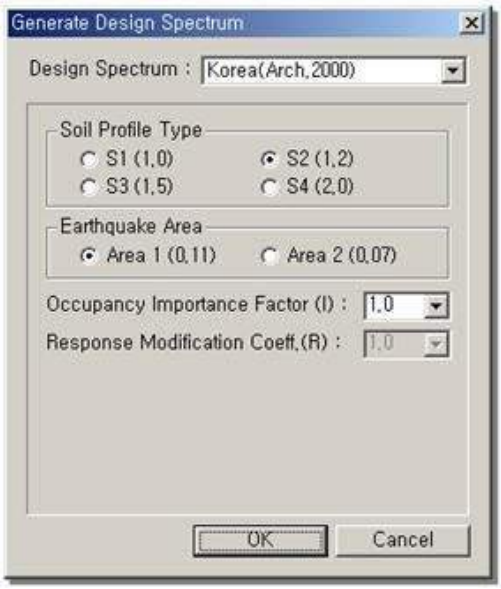
○ 아래 그림 4.20는 구조물의 역량곡선으로 구조물의 비선형 거동 특성을 확인할 수 있다. 각 부재에 대한 항복점은 평가할 수 있지만 구조물 전체 시스템 수준에서의 항복점은 파악하기가 힘들다. 구조물의 최대 강도를 파악할 수 있고 내력저하 현상을 확인할 수 있으며 그 때의 변위를 평가할 수 있다.



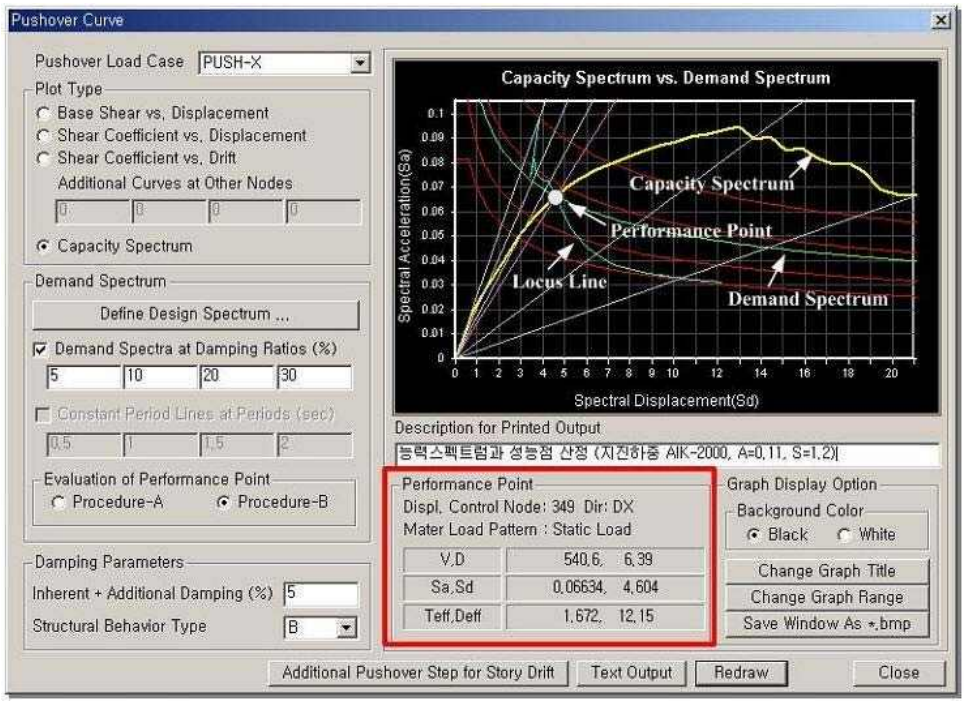
[그림 4.20 구조물의 역량곡선(Capacity Curve)]

○ 고려하는 지진하중은 앞서 언급하였듯이 지진계수로 A=0.11, S=1.2를 적용하여 설계응답스펙트럼을 작성하였다. 기준에서 제시한 설계응답스펙트럼은 재

현주기 500년 지진하중이다. 본 과제에서는 구조물의 역량스펙트럼(Capacity Spectrum)과 지진하중에 의한 요구스펙트럼(Demand Spectrum)이 교차하는 성능점을 ATC-40의 Procedure-B 방법에 의한 반복과정을 거쳐 그림 4.21와 같이 평가하고 각 재현주기별 하중을 고려하여 성능점을 산정하였다.

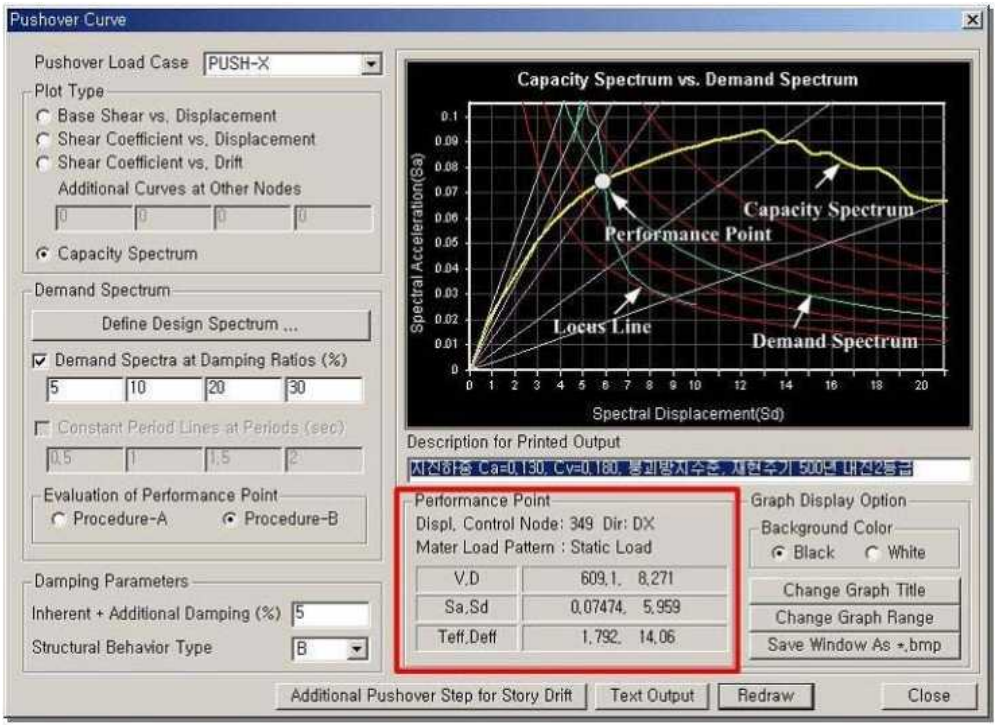


○ 대상 구조물의 최대비선형 변형은 6.39cm이며, 최대요구내력은 5,406kN로 평가되었다. 즉, 이 변위와 내력은 대상 구조물이 앞서 언급한 설계지진하중을 받았을 때 발휘할 수 있는 최대 비선형 변위와 요구내력을 의미한다. 비선형 거동을 하기 때문에 구조물 감쇠는 5%에서 12.15%로 증가하였으며, 진동주기 또한 구조물 강성의 저하로 인하여 탄성주기인 1.62(초)에서 1.67(초)로 약간 증가하였다.

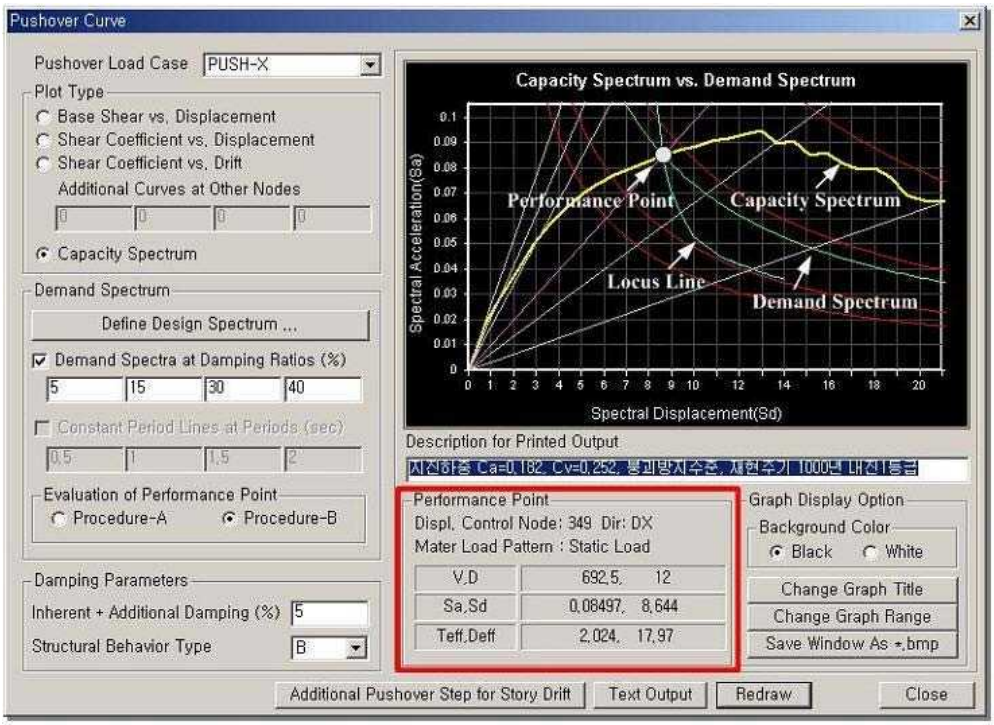


[그림 4.21 역량스펙트럼과 성능점 비교]

○ 각각의 성능목표(내진 2등급, 내진 1등급 및 내진 특등급)에 대한 비선형정적해석 결과는 다음과 같다.



[그림 4.22 지진하중(Ca=0.130, Cv=0.180)에 대한 성능점]



[그림 4.23 지진하중(Ca=0.182, Cv=0.252)에 대한 성능점]

5) 선형 및 비선형 지진해석 결과 비교

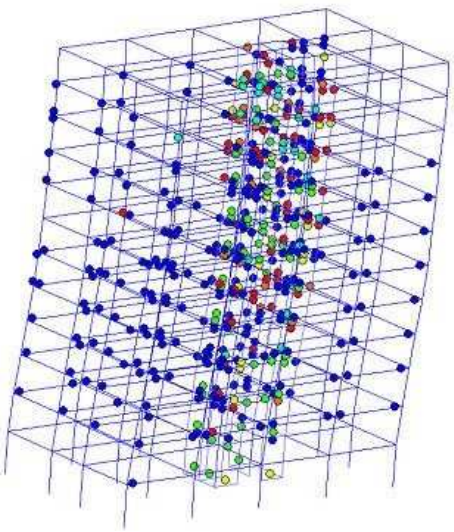
○ 비선형 정적해석을 이용하여 각 지진하중 별로 대상구조물의 성능점을 평가

하였다. 고려한 지진하중 수준에 따른 구조물의 비선형 응답을 비교하면 표 4.8과 같다.

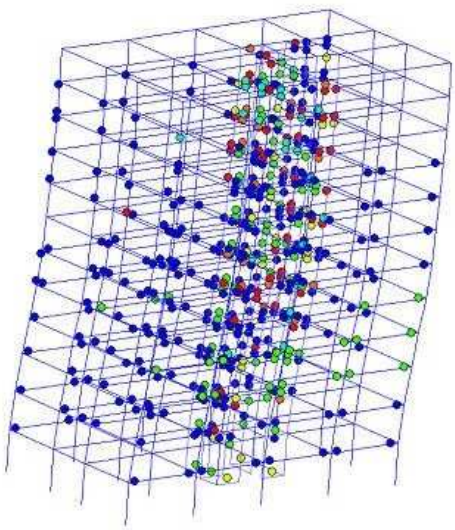
[표 4.8 해석방법에 따른 시스템 수준의 지진응답 – X dir.]

해석방법	지진하중		최대 변위 (cm)	최대 내력 (kN)	유효 감쇠 (%)	유효 주기 (sec)
등가정적	재현주기 500년	A=0.11 S=1.2	1.22 (6.72)	1,826 (8,369)	5.00	1.622
응답 스펙트럼	EQ-1 500년	A=0.11 S=1.2	6.39	5,406	12.15	1.672
	EQ-2 500년	Ca=0.130 Cv=0.180	8.27	6,091	14.06	1.792
비선형 해석 (Pushover)	EQ-3 1000년	Ca=0.182 Cv=0.252	12.00	6,925	17.97	2.024
	EQ-4 2400년	Ca=0.260 Cv=0.360	18.38	7,560	23.33	2.398

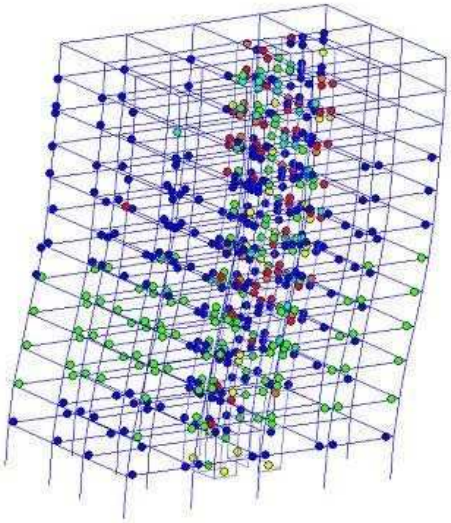
○ 비선형 정적해석을 수행하고 각 부재에서 발생하는 단계별 소성힌지분포를 파악하면 다음과 같다.



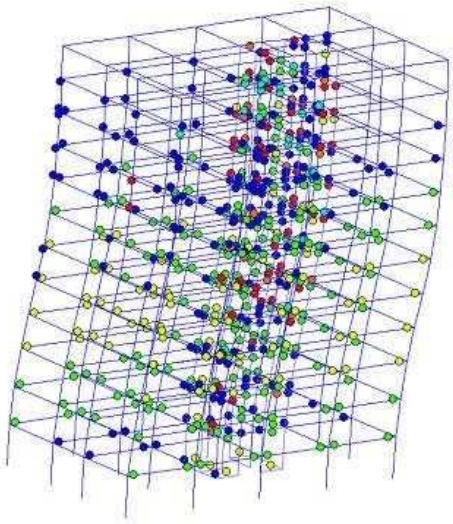
(a) EQ-1, Step 6



(b) EQ-2, Step 8]



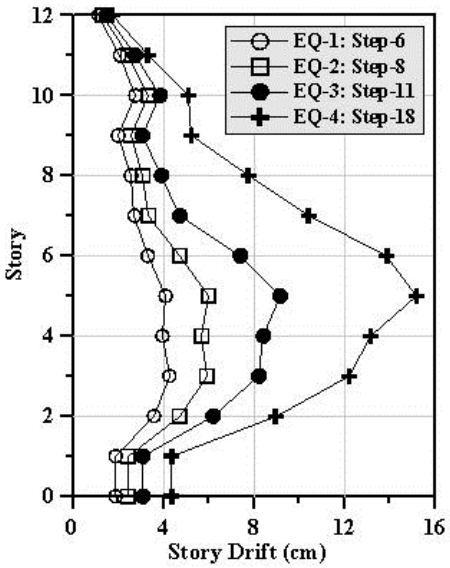
(c) EQ-3, Step 11



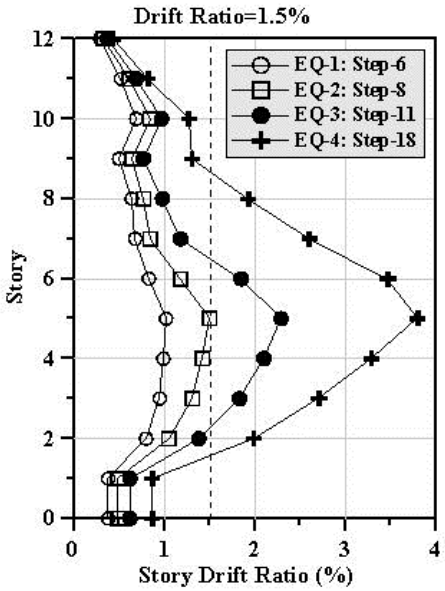
(d) EQ-4, Step 18]

[그림 4.24 각 지진하중의 성능점 스텝에서의 소성힌지 분포 비교 – X dir.]

○ 성능에 기초한 내진설계에서 구조물의 내진성능을 평가할 때에 가장 중요하게 생각하는 변수가 바로 각 측에서 발생하는 비선형 층간변위이다. 각 층의 층간변위 및 층간변위각은 구조물의 비선형 변형의 정도와 파괴메카니즘과 직접 연과되는 변수로써 지진하중에 의하여 구조물이 어느 정도 손상을 입었는지를 가장 효과적으로 판단할 수 있게 한다. 그림 4.25 및 그림 4.26은 지진하중별 비선형 층간변위와 층간변위각을 비교한 것이다.



[그림 4.25 비선형 층간변위 비교]



[그림 4.26 비선형 층간변위각 비교]

○ 앞서 언급한 내진성능수준에 따른 설계거동한계에 의하여 각 지진하중에 의하여 발생하는 비선형 층간변위각을 이용하면 시스템의 상태 및 성능수준을 평가할 수 있다. 대상구조물에 대한 각 지진하중 별 요구 성능수준을 평가하면 표 4.9과 같다.

[표 4.9 지진하중별 내진성능 수준]

지진 하중	지진수준	내진성능수준			내진성능 판정
		밑면전단력	최대변위	최대변위각	
EQ-1	Design Level	5,460 kN	6.39 cm	1.02 %	1.622
EQ-2	Design Level	6.091 kN	8.27 cm	1.50 %	1.672
EQ-3	Rare Level	6,925 kN	12.00 cm	2.29 %	1.792
EQ-4	Very Rare Level	7,560 kN	18.38 cm	3.80 %	2.024

6) 내진성능평가 획득 결과

○ 아래 표 4.10 및 표 4.11은 인명안전과 붕괴방지 성능수준에 대하여 구조물이 어떻게 거동할 것인지에 대한 평가이다. 비선형 지진해석을 수행하면 구조물의 응답을 분석함으로써 이러한 구체적이고 상세한 정보를 확보할 수 있으며 이에 대한 효과적인 내진대책을 수립할 수 있다는 것이 가장 큰 장점일 것이다.

[표 4.10 인명안전 성능수준에 대한 거동 평가 (EQ-2)]

수직저항부재	피해수준은 보통, 자중을 견딜 수 있는 충분한 성능
횡력지지부재	잉여강도와 강성 감소, 기능 발휘
비구조재	보통 또는 심각한 피해가 있지만 이탈될 위험 없음
피난시스템	피난 통로에 심각한 피해 없음, 엘리베이터 불능
보수정도	보수가능하지만 일정기간 건물 사용 불가

RC 골조	주부재 : 보의 광범위한 손상, 피복탈락, 연성기둥의 전단균열 및 접합부 균열 0.3mm 이하 부부재 : 연성부재의 광범위한 힌지생성, 비연성기둥의 이음부 파괴, 단주 손상
전단벽	주부재 : 제한된 철근 좌굴, 경계부재 강도저하, 개구부 주위손상, 커플링 보 균열 발생 부부재 : 주요한 휨과 전단균열, 접합부 미끄러짐, 경계부의 심각한 손상, 일부 파괴

[표 4.11 붕괴방지 성능수준에 대한 거동 평가 (EQ-3)]

수직저항부재	피해수준은 심각, 자중에 대해서는 지지가능
횡력지지부재	잉여강도와 강성 감소, 층 붕괴메커니즘은 없지만 상당한 영구층간변위 발생, 부부재 완전파괴
비구조재	심각한 피해 발생, 이탈될 수 있는 위험 존재
피난시스템	피난에 방해를 받을 수 있음
보수정도	가능하지만 비현실적임
RC 골조	주부재 : 연성부재의 광범위한 균열, 단주의 심각한 손상, 비연성 기둥의 파괴 부부재 : 광범위한 재료 이탈, 심각한 접합부 파괴, 철근 일부 좌굴 발생
전단벽	주부재 : 상당한 휨과 전단균열, 접합부 미끄러짐, 커플링 보 파괴 부부재 : 전단벽 붕괴

라. 검토 결과

□ 붕괴수준에 해당하는 규모의 지진 발생시 선형 탄성해석으로 구조물을 설계하는 것은 구조물의 실제거동을 반영할 수 없으며 부정확한 구조물의 거동을 근간으로 부재설계를 수행하므로 지진시 구조물의 안전성을 확신할 수 없다.

□ 그러므로, 구조물의 비선형 거동에 따른 연성도, 유효감쇠계수의 변화 및 구조물 동특성의 변화를 고려하여 구조물을 안전적이며 경제적으로 설계를 수행해야 하며 이것이 구조물 성능에 기초한 지진설계의 기본 철학이다.

□ 건축물을 대상으로 비교해석을 수행한 결과 단순 선형 탄성해석시 구조물의 내력

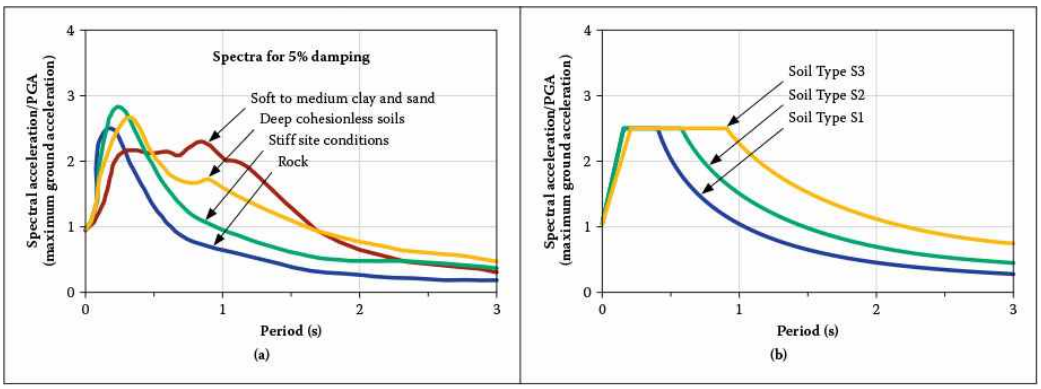
은 8,369kN으로 실제 비선형해석을 통해 정확히 산정한 내력 5,406kN에 비해 155% 크게 산정되었으므로 실제 지진시 단면강성 증대로 갑작스런 파괴가 발생하는 등의 문제가 발생하여 안전성 확보가 어려우며, 단순히 응답수정계수(R)값을 적용한 경우에는 1,826kN으로 비선형 해석 결과에 비해 34%에 불과한 내력이 발생하므로 굉장히 비경제적인 설계가 유도될 수 있음을 알 수 있다.

□ 비선형 해석을 통해 재현주기 2400년에 대해 지진해석을 수행한 결과 최대변위는 18.38cm이고 최대 내력은 7,560kN으로서 단순 선형탄성해석시 산정된 구조물 내력보다도 적게 산정되므로 붕괴방지수준을 고려해도 경제적인 설계가 가능하다.

□ 내진성능평가는 원하는 목표수준에 따른 설계지진을 합리적으로 선정하여 지진시 요구되는 성능에 맞춰 구조물의 필요한 성능을 확보할 수 있다는 점에서 단순히 구조물의 안전성을 확보하기 위해 선형탄성해석을 통한 내진설계에 비해 경제적이다. 이러한 내진성능설계 및 내진성능평가의 기본 개념에 맞춰 효과적인 내진대책을 수립하기 위해서 비선형 해석의 적용은 필수적이다.

5. 지반계수 선정의 적정성

□ 지진해석은 본질적으로 불확실성이 큰 분야이나 지반계수는 다른 어떤 항목보다도 이론의 여지가 많은 부분이다. 많은 기술자들이 의문을 제기하고 아직까지도 내진설계기준에서도 명확하게 정립되어 있지 않다. 지진 발생시 구조물이 위치한 지반의 성질에 따라서 구조물의 거동은 상당한 차이가 발생한다. 1971년 미국의 San Fernando 지진이 발생하기 전까지의 지진기록은 대부분 충적토(Alluvium)에서 측정된 것으로 이를 이용하여 작성한 과거 기준들의 설계응답스펙트럼은 지반조건이 무시된 것이었다. 그러나 1976년 Seed에 의해서 연구된 아래의 그림 5.1으로 인하여 응답스펙트럼은 지반의 성질에 따라서 달라질 수 있다는 것이 확인되었다.

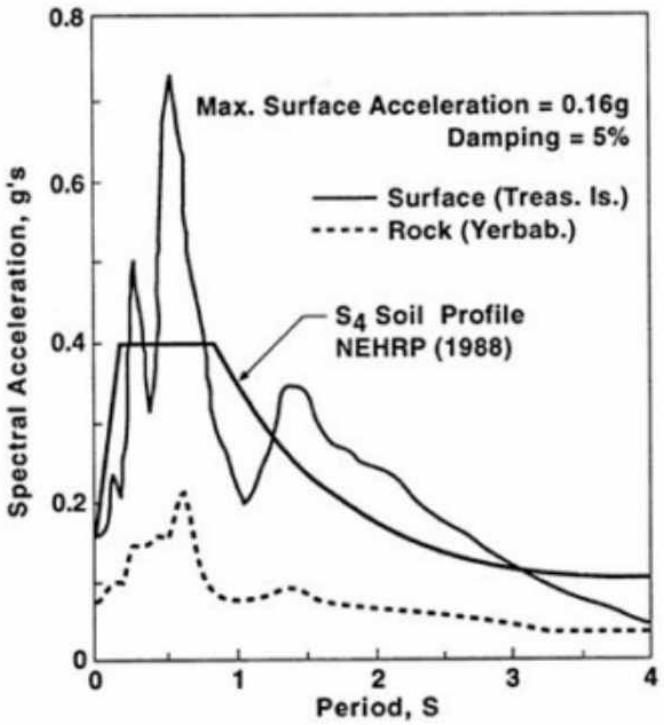


[그림 5.1 지반에 따른 평균 가속도 스펙트럼 및 설계 스펙트럼 (Seed et al, 1976)

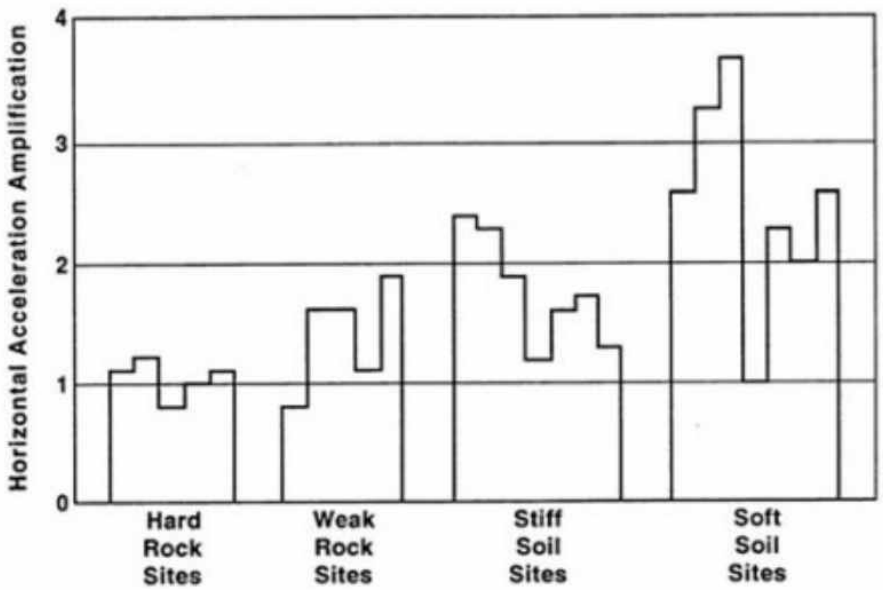
□ 지반조건에 따라서 지반이 상부구조물에 미치는 영향은 구조물의 주기와 직접적인 관계가 있다. 지반자체의 고유주기와 구조물의 고유주기가 일치하는 공진현상이 발생할 수도 있다. 그러나 구조물의 하부에 놓이는 지반은 대부분 균일하지 않은 상태여서 지반의 동적특성을 평가하는데 큰 어려움이 존재한다. 그러므로 지반계수에 대한 결정은 매우 신중해야 한다.

□ 지반계수라는 것이 암반의 경우에 1.0을 적용하고 암반보다 연약한 지반은 그 정도에 따라서 20%, 50%의 큰 지반계수를 적용한다. 그리고 1985년 멕시코지진과 1989년 미국 Loma prieta 지진 이후에 연약지반에서 지진파의 증폭 및 지반의 액상화로 인해 구조물에 큰 피해가 발생하는 것을 확인하였으며 이에 대한 연구가 수행되었다. 이후 연약한 지반에 대한 지반계수가 추가되고 계측자료 분석을 통해 연약한 지반의 계수는 암반으로 형성된 지반의 2배로 결정하였다

□ 아래 그림 5.2에서 Loma Prieta 지진시 암반지역인 Yerba Buena Isalnd와 연약지반인 Treasure Island에서 측정된 응답스펙트럼을 나타냈으며 S4 설계 스펙트럼과 이를 비교하였다. 또한 그림 5.3에 해안가 지역의 지반상태에 따른 가속도 증폭을 함수형태로 나타내였다.



[그림 5.2 지반특성에 따른 가속도 스펙트럼 – Loma Prieta]



[그림 5.3 지반특성에 따른 가속도 증폭 (Borcherdt and Glassmoyer, 1992)]

가. 국내기준 비교

□ 국내 구조물 지진설계와 관련해서 건축구조기준(KBC-2016), 도로교설계기준-2014 및 도로교설계기준-케이블교량편 부분개정에 지반분류가 정의되어 있다. 각 기준별로 여타 지진계수 및 내진설계법의 상세한 차이점은 논외로 하고 국내 지반의 분류 기준을 비교하면 다음과 같다.

1) 지반의 분류

○ 도로교 설계기준(한계상태설계법)에서는 그림 5.4에서 보는 바와 같이 지표면 아래 30m 토층에 대해서 전단파속도를 기준으로 5개의 지반으로 분류하였다. 지반종류 I은 경암지반과 보통암지반으로 전단파속도가 760m/s이상인 경우로 세분하지 않았다.

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30 m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치[(1)])	비배수전단강도(kPa)
Ⅰ	경암지반 보통암지반	760 이상	–	–
Ⅱ	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	〉50	〉100
Ⅲ	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
Ⅳ	연약한 토사지반	180미만	〈15	〈50
Ⅴ	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주: (1) 비점착성 토층만을 고려한 평균 N치

[그림 5.4 도로교 설계기준(한계상태설계법)]

○ 도로교 설계기준(케이블교량 부분개정)에서는 그림 5.5에서 보는 바와 같이 지표면 아래 30m 토층에 대해서 전단파속도를 기준으로 6개 지반으로 분류하였는데 이는 경암지반과 보통암지반을 구분하였기 때문이다.

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30 m에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치)	비배수전단강도 (kPa)
S_A	경암지반	> 1500		-
S_B	보통암지반	760 ~ 1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360 ~ 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100
S_E	연약한 토사지반	<180	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

[그림 5.5 도로교 설계기준(케이블 교량 부분개정)]

○ 건축구조기준에서는 그림 5.6에서 보는 바와 같이 평균지반특성이라고 언급하였으며 통상적으로 지표면에서 30m깊이까지의 지반특성을 고려한다. 내진설계기준연구 II(1997)에 따라 지반을 6개로 분류하나 Sf 지반은 설계기준에서 제외시켜 전단파속도를 기준으로 5개 지반으로 분류하였다. 도로교설계기준기준(케이블교량부분개정)과 마찬가지로 경함지반과 보통암지반을 전단파속도 1500m/s를 기준으로 분류하였다.

지반 종류	지반종류의 호 칭	상부30m에 대한 평균지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N}$(타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\bar{s}_u$ ($\times 10^{-3}$MPa)
S_A	경암 지반	1,500 초과	–	–
S_B	보통암 지반	760에서 1,500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

[그림 5.6 건축구조기준]

○ 국내 구조물 관련 설계기준은 기본적으로 지표면 아래 30m에 존재하는 지반의 특성을 평균하여 적용하는 것은 동일하다. 다만, 교량구조물이 깊은 기초를 적용하거나 건축물의 지하층이 보통암지반 이상의 기반암에 기초한 경우 지반특성은 기반암의 특성을 따르며 기초나 건물지하층 주변의 지층의 영향을 수평방향스프링으로 적용하는 것이 일반적이다.

○ 국내 기준에 있어서 가장 큰 차이점은 전단파 속도가 1500m/s 이상인 경우 경암지반으로 구분하는 경우와 구분하지 않는 경우라 할 수 있다. 보통암과 경암을 구분하는 경우 설계 응답 스펙트럼 산정시 미치는 영향은 추가가 검토해 보았다.

2) 지반 계수

○ 도로교 설계기준(한계상태설계법)에서는 그림 5.5에서 보는 바와 같이 지반종류 I인 경우 지반계수(S)는 1.0을 적용하였다. 재현주기 500년의 경우 위험도계수는 1이고 지진구역을 I로 가정하였을 경우 지진구역계수는 0.11이다. 그러므로 지진가속도계수는 지진구역계수(=0.11)에 위험도계수(=1)를 곱하여 산정하면 0.11이며 지반종류 I인 경우 지반계수는 1.0이므로 변동이 없다.

지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

[그림 5.5 지반종류에 따른 지반계수]

○ 도로교설계기준(케이블교량 부분개정)의 경우 전단파속도(=1500m/s)를 기준으로 보통암과 경암을 구분하여 지반을 세분화하였으나 그 외 지반 분류의 기준이 되는 전단파 속도는 도로교설계기준과 동일하다. 여기서 지반종류에 따른 지진가속도계수 및 지진속도계수를 그림 5.6과 같이 제시하고 있다.

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08
S_D	0.16	0.11
S_E	0.22	0.17

(a) 지진가속도계수

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.18	0.11
S_D	0.23	0.16
S_E	0.37	0.23

(b) 지진속도계수

[그림 5.6 지반종류에 따른 지진가속도계수 및 지진속도계수]

○ 지반종류가 S_B인 경우 보통암으로서 지진가속도계수 및 지진속도계수는 0.11로서 도로교설계기준(한계상태설계법)에서 산정한 지진가속도계수와 동일하다. 지반의 전단파속도가 1500m/s를 초과하여 경암인 경우 오히려 지진가속도계수와 지진속도계수는 0.09로 변경되어 약 19%정도 감소됨을 알 수 있다.

○ 건축구조설계기준에서도 보통암과 경암을 구분하였으며 단주기 지반증폭계수(F_a)와 1초주기 증폭계수(F_v)를 다음 그림 5.7 및 5.8과 같이 제시하였다. 여기

서도 보통암인 경우(S_B)를 1.0으로 기준으로 하고 경암인 경우 20%정도 감소시켜 0.8을 제시하고 있다. 이는 도로교설계기준(케이블교량 부분개정)과 유사하다고 판단된다.

지반종류	지진지역		
	$S_a \leq 0.25$	$S_a = 0.50$	$S_a = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3
* $S_a = 2.5S$, S_a의 중간값에 대하여는 직선보간한다.			

[그림 5.7 단주기 지반증폭계수]

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.7	1.6	1.5
S_D	2.4	2.0	1.8
S_E	3.5	3.2	2.8
* S의 중간값에 대하여는 직선보간한다.			

[그림 5.8 1초주기 지반증폭계수]

3) 결론

- 국내 내진설계기준은 전단파속도 1500m/s를 기준으로 경암과 보통암을 구분하는 경우과 구분하지 않는 경우가 있으나 그 외 지반특성은 동일하게 구분하고 있다.
- 경암과 보통암의 구분여부와 상관없이 지반계수는 보통암을 기준으로 하고 있으며 경암인 경우 오히려 가속도계수가 19~20%정도 감소함을 알 수 있다.
- 앞서 언급하였듯이 Loma prieta지진이후 연약지반에서 지진력이 증폭되는 것을 고려하여 2.0배의 계수를 적용하였다. 국내의 경우 도로교설계기준의 경우 지반종류를 고려하여 2.0배를 증가시켰으나 도로교설계기준(케이블교량 부분개정)의 경우는 2.2배 건축구조기준은 2.5배를 가속도계수측면에서 증가시켰음을 알 수 있다. 가속도계수를 증가시킨 측면만을 감안할 때 국내 설계기준의 경우 다소 보수적인 지진설계를 유도하고 있음을 알 수 있다.

나. 지반조사

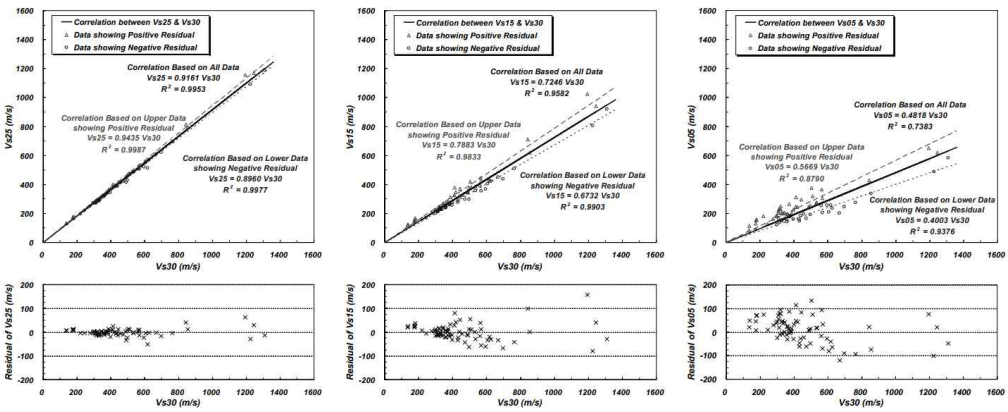
□ 앞서 언급하였듯이 지반의 분류에 따라 가속도계수는 설계기준에 따라 2.0배에서 2.5배까지 변화하며 지반의 분류는 전단파속도에 따라 구분하고 있다. 전단파 속도는 압축파속도(Compressional wave velocity, V_p)와 함께 현장에서 다양한 지구물리탐사 기법들을 적용하여 측정할 수 있는 체적파속도이며(Sun and Mok, 2006), 이 두 속도를 토대로 포아송비를 결정할 수 있다. 또한, 전단파속도로는 대상 지반재료의 밀도를 함께 고려하여 전단탄성계수를 산정할 수 있다. 일반적으로 지진시 지반을 매질로 하여 전파되는 여러 지진파 성분 중 초기에 도달하는 압축파보다는 암반이나 토사와 같은 고체 매질을 통해 전파하는 전단파나 이어지는 표면파에 의한 지반 및 구조물의 피해가 주류를 이룬다. 지반공학이나 지진공학 관점에서는 현장 탄성파시험 기법은 무엇보다도 우선적으로 지반 매질의 전단파속도를 결정하가 위해 활용하고 있다. (Sun et al., 2006b). 특히 국내를 포함한 국외 주요 내진설계 기준들에서 30m까지의 평균전단파속도를 지반운동 결정을 위한 부지조건 분류의 변수로 이용하고 있다.

□ 전단파속도를 획득할 수 있는 현장 원위치 시험은 비파괴 시험, 시추공 탄성파 시험, 그리고 관입 탄성파 시험으로 구분된다. (Kim et al. 2005). 넓은 의미에서는 관입 방법의 경우 시추공 방법에 포함시킬 수 있다. 경제적 측면을 논외로 하게 되면, 이러한 시험 기법들 중에서 가장 객관적 신뢰도가 높으며 다양하고 직관적인 정보를 제공할 수 있는 것이 바로 시추공 탄성파 시험이다. 시추공 탄성파 시험으로는 크로스홀(Crosshole) 및 다운홀(Downhole) 탄성파 시험이 대표적이다. 이러한 시험법을 이용하여 '국내 암반지층의 전단파속도에 근거한 지진공학적 기반암 결정' (선창국, 2014)과 같은 연구들이 수행되었다.

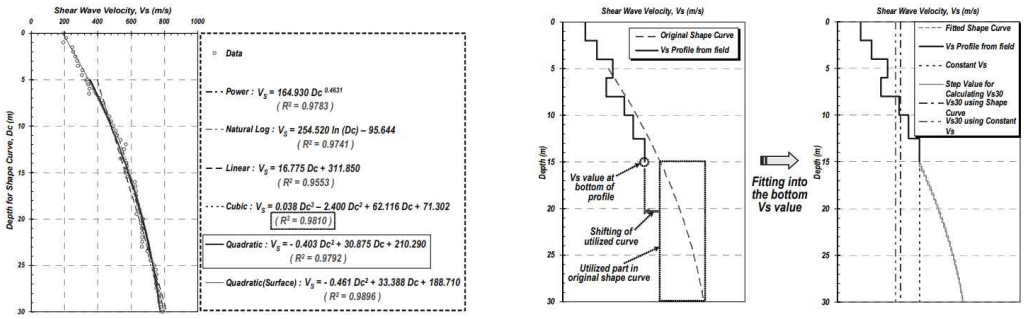
□ 이처럼 지반 동적 특성 평가 및 그에 따른 부지 효과 평가의 일환으로 해외에서는 전단파속도(Vs) 분포의 합리적 결정을 위한 여러 현장 탄성파 시험 기법들이 개발되어 왔으며, 최근 국내에서도 기존 기법의 도입 및 활용과 더불어 국내 현장 여건을 고려한 기법 개선 및 장비 개발이 이루어 지고 있다. 실제, 현장에서 이러한 탄성파 기법들을 통해 Vs를 평가하고자 할 경우 현행 내진 설계기준의 지표면으로부터 지하 30m 까지의 평균 전단파속도(Vs30)을 결정하기 위해서는 최소 30m까지의 Vs 분포가 확보되어야 한다. 그러나 현장에서 소정 심도까지의 시험 수행 과정 중에는 불완전한 시험 환경 조성으로 인한 방해 변수가 존재할 수 있다. 뿐만 아니라 선정된 현장 시험 기법 및 장비에 따라 특정 지반 조건과 특정

심도 범위에서는 그 적용성이 제한적일 수 있다. 특히, 최근 지반 조사 기법들의 복합적 적용을 통한 지반 특성의 종합 결정을 위하여 기존의 현장 탄성파 기법 이외의 하이브리드 현장시험 기법(Hybrid in-situ testing technique)인 탄성파 피에조콘 관입시험(SCPTu)이나 탄성파 딜라토미터 시험(SDMT)등의 수행이 급속도로 활성화되고 있으며, 이를 통한 Vs 획득의 경우 관입 시험의 조건상 적용 심도의 제한적 상황은 상존하게 된다.

□ 이와 같은 복합적 이유로 인해 현장 탄성파 시험으로부터 구한 국내의 Vs 분포 자료 중에는 지표면부터 30m이상까지 그 값이 완전히 결정되지 못한 자료가 종종 발견된다. 국내뿐만 아니라 미국이나 일본과 같은 해외에서도 30m까지의 전체 Vs 분포가 확보되지 못한 자료는 매우 광범위하게 산재되어 있다. 현행 내진설계기준에 근거한 지진 지반 운동을 결정하기 위해서는 지반 분류 기준 변수인 Vs30의 산정이 요구되므로 이러한 30m 미만 얕은 심도 분포 자료들은 활용 가치를 상실할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 얕은 심도 전단파속도 분포 자료를 활용한 Vs30 결정 기법이 제시되어 있다.



[그림 5.9 Vs30과 Vs25, Vs15 및 Vs5의 상관관계 예시]



(a) 국내 깊이별 전단파속도 분포 형상 함수 (b) 형상함수를 이용한 전단파속도 분포 작성

[그림 5.10 전단파속도 분포 형상 함수 및 전단파 속도 분포 작성 예시]

다. 검토 결과

□ 국내 구조물 관련 설계기준 - 건축구조기준, 도로교설계기준 및 도로교설계기준(케이블교량 부분개정) -의 지반분류와 관련된 내용을 비교 검토한 결과 지반분류는 전단파속도를 기준으로 분류되며 기본적인 분류체계는 동일하다고 판단된다.

□ 전단파속도 1500m/s를 기준으로 경암과 보통암을 구분하는 경우와 구분하지 않는 경우가 있으나 모두 보통암을 기준으로 연약지반의 증폭을 고려하여 연약한 지반일수록 가속도계수를 2.0배에서 2.5배까지 증가시키는 방식은 동일하며, 다만 경암인 경우 가속도계수를 보통암 대비하여 약 19% ~ 20% 감소시키고 있다. 이는 설계지진의 규모를 감소시키는 효과가 있으므로 전단파속도를 기준으로 경암과 보통암을 분류하는 것은 보수적으로 안전측 설계를 유도하는 것보다는 단단한 기반암에 기초가 위치할 경우 부지효과(Site effect)를 최소화함으로써 경제성을 고려하고자 한 것으로 판단된다.

□ 국내외 설계기준은 기본적으로 지표면 이하 30m 지반의 평균적인 지반특성을 감안하도록 되어 있으며 지반의 특성은 전단파속도를 기준으로 하므로 탄성파시험을 통해 정확한 지반특성을 파악하는 것이 필수적이다. 다만, 지하 30m까지 탄성파시험을 수행하는 것이 현실적으로 어렵고 경우에 따라 결과의 신뢰성이 확보되지 않는 경우가 있으므로 국내외에서 30m 이하의 지반에 대한 탄성파시험을 통해 30m 이상 깊이의 전단파속도를 추정하는 기법이 개발되어 있으므로 이에 대한 적극적인 활용 및 기존 수행된 연구에 대한 적정성 검토가 병행되어야 한다고 판단된다.

6. 교량 구조물의 내진성능설계

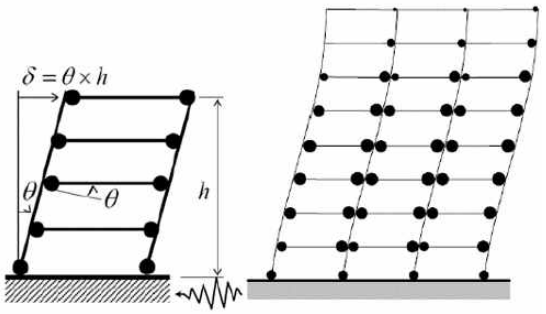
□ 건축구조물과 더불어 주요 구조물인 교량 구조물에 대해 응답수정계수법과 연성도내진설계법을 함께 적용하여 성능기반 내진설계를 수행하였다. 이를 통해 교량구조물에 대한 성능기반 내진설계에 대한 개략적인 과정과 특징을 확인하고 응답수정계수법과 연성도내진설계법 적용시 경제성을 비교 검토해 보고자 한다.

□ 교량구조물은 도로교 설계기준에 의거하여 지진시 안전성 확보를 하도록 하고 있으며, 설계기준에 제시된 내진설계 기준의 기본개념의 주요 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

- ㅇ 인명피해를 최소화한다.
- ㅇ 지진시 교량 부재들의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지한다.
- ㅇ 지진시 가능한 교량의 기본 기능은 발휘할 수 있게 한다.
- ㅇ 교량의 정상수명 기간내에 설계지진력이 발생할 가능성은 희박하다.
- ㅇ 이 규정을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.
- ㅇ 이러한 기본 개념을 구현하기 위해서는 낙교방지가 확보되어야 하며 낙교방지는 가능하며 교각의 연성거동에 의한 연성파괴메커니즘을 유도하여 확보하고, 그렇지 않은 경우 낙교방지 대책(전단키, 변위구속장치 등)을 제시하여 확보하여야 한다. 또한, 필요한 경우 지진격리시스템을 설치할 수 있다.

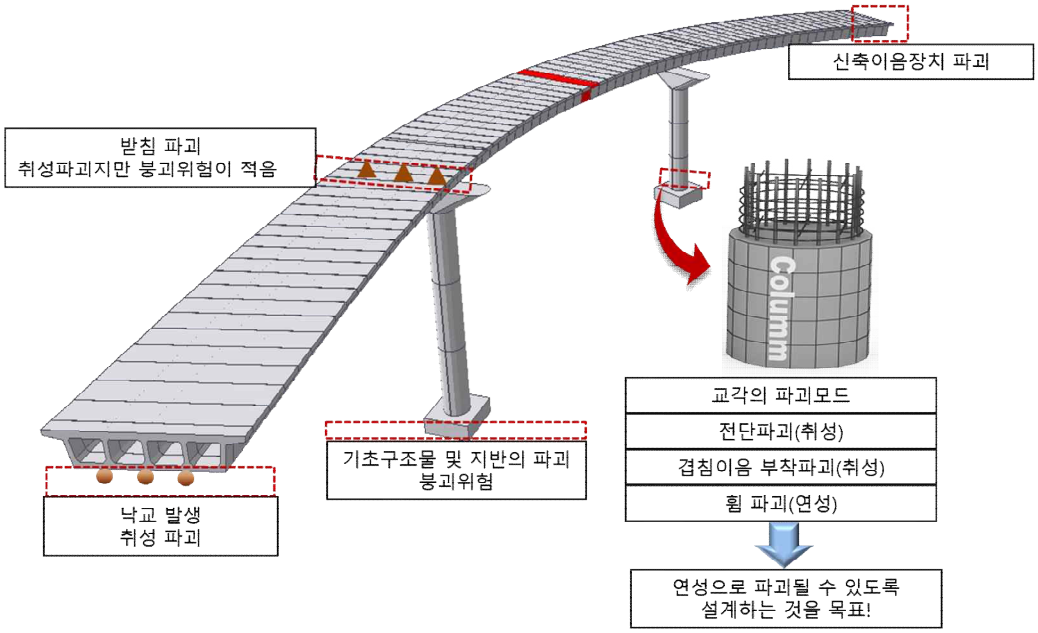
□ 구조물의 내진설계 개념은 목표로 하는 설계지진 수준에서 붕괴를 방지하는 것인데 구체적으로 구조물의 용도에 따라, 구조물 기능, 보수의 용이성 등을 고려하여 내진 구조시스템을 결정해야 한다. 교량구조물은 건축구조물과 달리 차량통행을 목적으로 하므로 도로구조물이 상부에 위치하고 이를 지지하는 하부구조물로 구성되어 있어 건축구조물과 교량구조물은 지진시 거동이 상이하다.

□ 빌딩구조물의 경우 강성이 큰 기둥과 강성이 상대적으로 약한 보로 구성되어 있으므로 큰 규모의 지진발생시 보 양단에 소성힌지가 발생토록 하여 구조계의 연성능력을 활용함으로써 구조물 전체의 갑작스런 붕괴를 방지하고

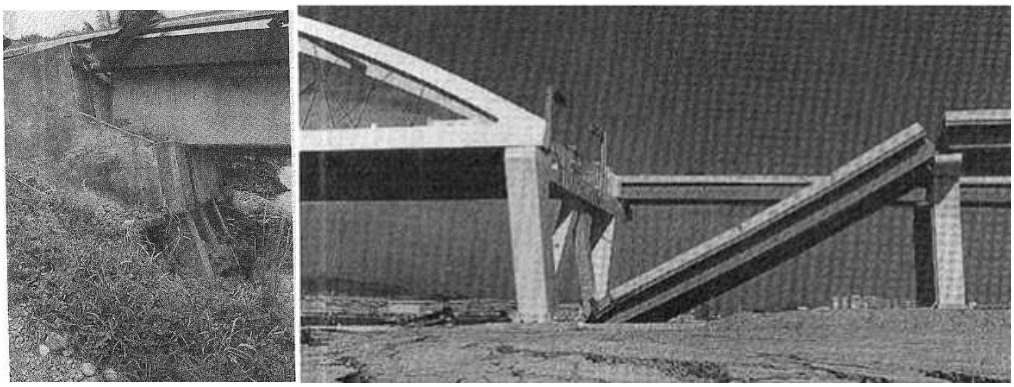


대피시간을 확보하도록 한다. 그러나 다수의 보 부재에서 연속적으로 소성힌지가 발생하고 이로 인해 구조계 전체적인 비선형성이 발생하므로 비선형 거동을 예측하기가 어려운 문제가 있다.

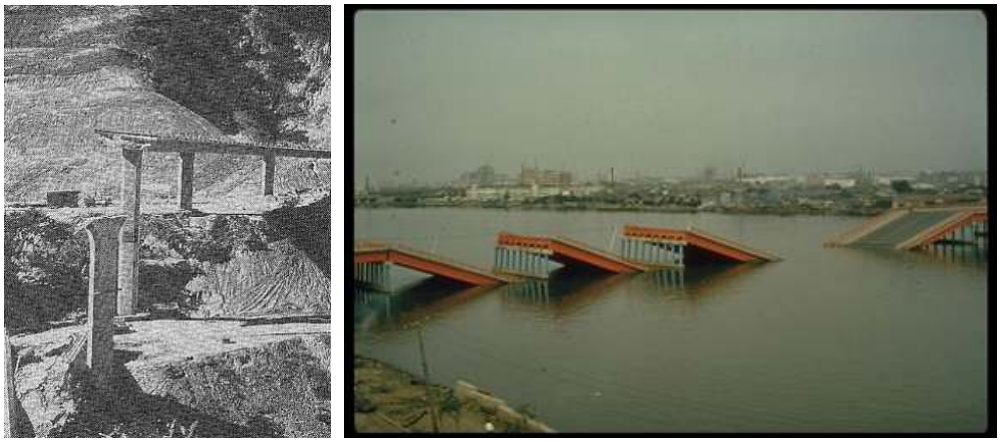
□ 교량구조물의 경우 강성이 약한 기둥과 강성이 상대적 큰 거더로 구성되어 있으므로 기둥 단부에서 소성힌지가 발생하며 기둥의 연성능력을 활용하고 있다. 건축구조물에 비해 지진시 구조물의 거동이 명확하므로 비선형 거동을 비교적 예측하기 쉽다. 지진시 주요 구조부재의 파괴형태 및 위치를 특징지을 수 있다. 지진시 대표적인 위험요소 및 파괴형태를 나타내면 그림 6.1과 같다.



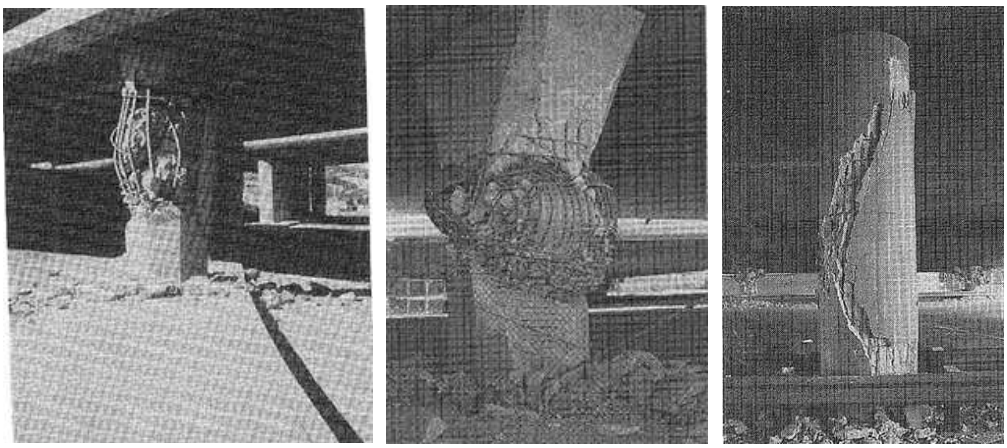
[그림 6.1 지진시 파괴형태]



[그림 6.2 교대 및 교각 기초 침하 및 액상화에 의한 낙교 사례]



[그림 6.3 연단거리 부족에 의한 낙교]



[그림 6.4 교각의 전단파괴]

□ 사례에서 보는 바와 같이 지진시 교량의 파괴는 하부구조(교각)의 거동과 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며 지진시 구조물 동적거동에 영향을 미치는 가장 중요한 구조부재이다. 그러므로 성능에 기초한 내진설계시 하부구조인 교각에 대해서 지진시 안전성 확보방안 및 그에 따른 경제성 차이를 비교하였다.

가. 교량의 내진설계

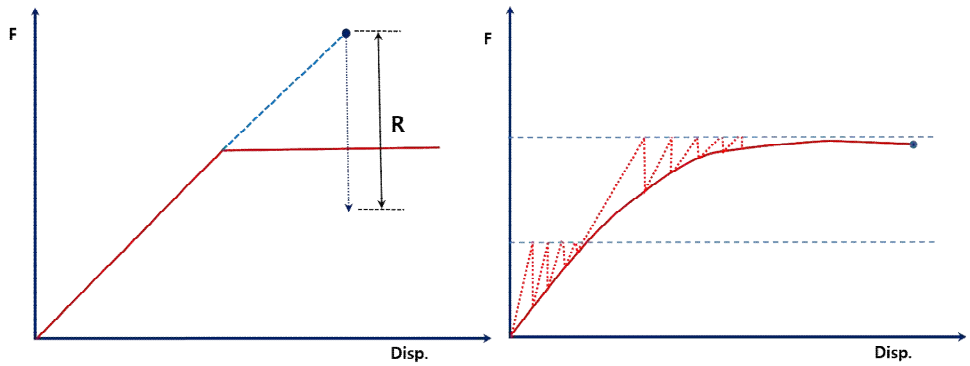
□ 최근 국내/외 내진설계기준에서 교량의 내진설계 방법은 힘-기반 설계(Force-Based Design), 변위-기반 설계(Displacement-Based Design) 및 연성도 내진설계(Ductility-Based)로 요약될 수 있다.

1) 힘-기반 설계(Force Based Design)

- 대부분의 설계기준에서 채택하고 있는 가속도 응답 스펙트럼을 기준으로 연성도를 간접적으로 고려하는 설계법이다. 이 설계법에서는 완전연성 설계개념을 적용하여 위치별 응답수정계수를 상수로 적용하는 것이 일반적이다.
- 응답수정계수는 앞서 내진설계개념에서 언급하였듯이 경험적으로 결정된 상수(단일기둥 말뚝가구 R=3, 다주가구 R=5)를 적용한다. 아래 그림 6.5에서 보는 바와 같이 구조물의 탄성응답을 응답수정계수(R)로 나누어 소성거동시 구조물의 응답을 산정하는 방법이다.

2) 변위-기반 설계(Displacement Based Design)

- 설계기준에서 아직 완전하게 적용하는 방법은 아니지만 변위 응답스펙트럼을 기준으로 설계하는 방법으로써 상대적으로 힘 기반 설계법보다 더 합리적인 내진설계법으로 평가받고 있으나 적용에 있어서 높은 수준의 지식을 요구하는 등 기술적인 어려움으로 널리 적용되지 못하고 있는 상황이다.
- 힘-기반 설계가 지진시 구조물에 발생하는 단면력을 고려하였다면, 변위-기반 설계는 지진시 구조물에 발생하는 변위에 초점을 맞춘 것으로 항복시 구조적 요소 및 비구조적 요소의 변위 증폭 등 실질적인 구조물의 변위를 획득함으로써 보수적으로 설계를 수행하는 방법이다.



(a) 힘-기반 설계 개념 (b) 변위-기반 설계 개념

[그림 6.5 힘-기반 설계와 변위-기반 설계 개념]

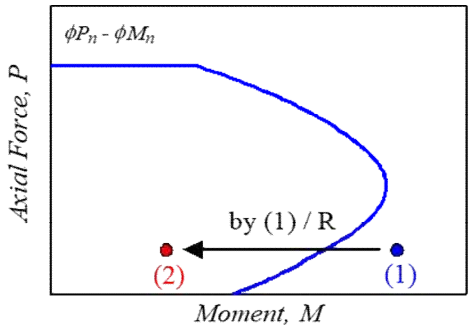
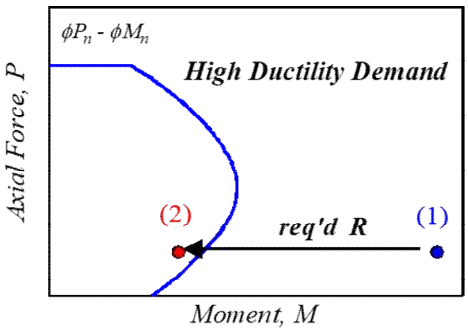
3) 연성도 내진설계(Ductility Based Design)

- 도로교 설계기준(2010) 부록과 도로교 한계상태설계법에 채택된 설계법으로서 힘-기반 설계와 변위-기반 설계를 복합한 방법이며 연성도를 직접적으로

고려하는 합리적인 방법이다.

○ 힘-기반 설계법과 같이 완전연성 설계법이 아니라 한정 연성(Limited Ductility) 설계법을 적용하므로 응답수정계수(R)가 상수가 아닌 변수이다. 응답수정계수 적용시와 연성도 내진설계 적용시 차이점을 표 6.1에 간단히 나타내었다.

[표 6.1 응답수정계수 vs 연성도 내진설계]

응답수정계수 적용	연성도 내진설계
	
• 완전연성설계 수행 • 경험적으로 정의된 R값 적용 • 완전연성 심부구속 철근식 적용	• 한정연성설계 수행 • 변수로 산정된 소요 R값 적용 • 합리적인 심부구속 철근식 적용

나. 내진설계를 통한 경제성 분석

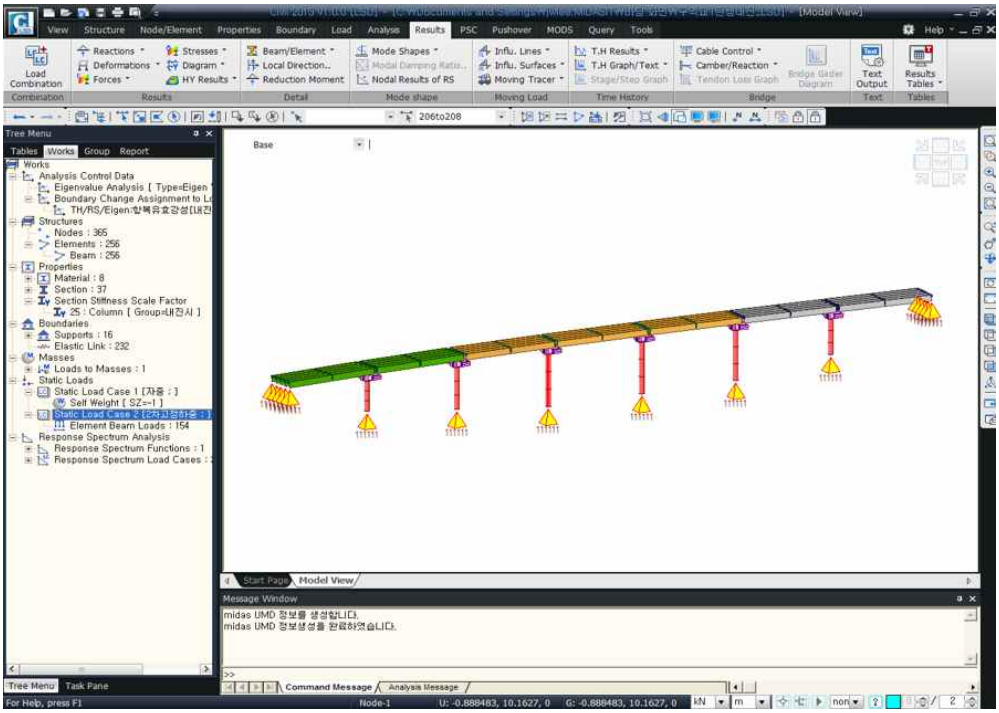
□ 동일한 교량 구조물에 대해 탄성설계, 연성도 내진설계 및 응답수정계법 적용시 단면안정성 확보여부 및 심부구속 철근량을 산정해 보고자 한다. 이를 통해 설계법간의 차이점 및 경제성을 분석하였다.

1) 대상 구조물

○ 대상 구조물의 형식, 제원 및 내진설계 조건은 다음과 같다.

- 상부구조 : 7경간 연속 PSC Beam교
- 지간구성 : 7@35.0m = 245.0m
- 교량폭원 : 10.19m
- 적용하중 : 구조물 자중 및 2차 고정하중(20kN/m)
- PSC Beam 강도 : fck = 40MPa

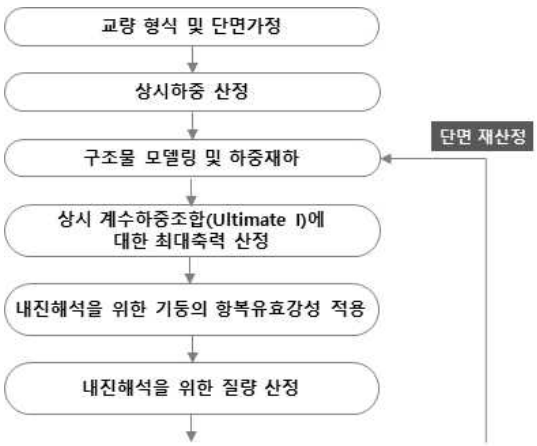
- 교각 강도 : fck = 27MPa
- 내진등급 : 1등급교 (지진구역 I, 구역계수 = 0.11, 위험도 계수 = 1.4)
- 지반조건 : S = 1.2 (지반종류 II)
- 응답수정계수 : 모멘트 R = 3 / 축력 및 전단력 R = 1

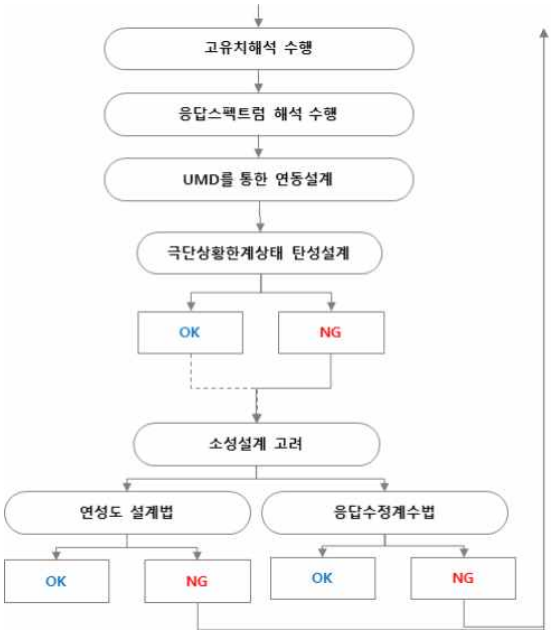


[그림 6.6 대상 구조물 모델링]

2) 내진설계 순서

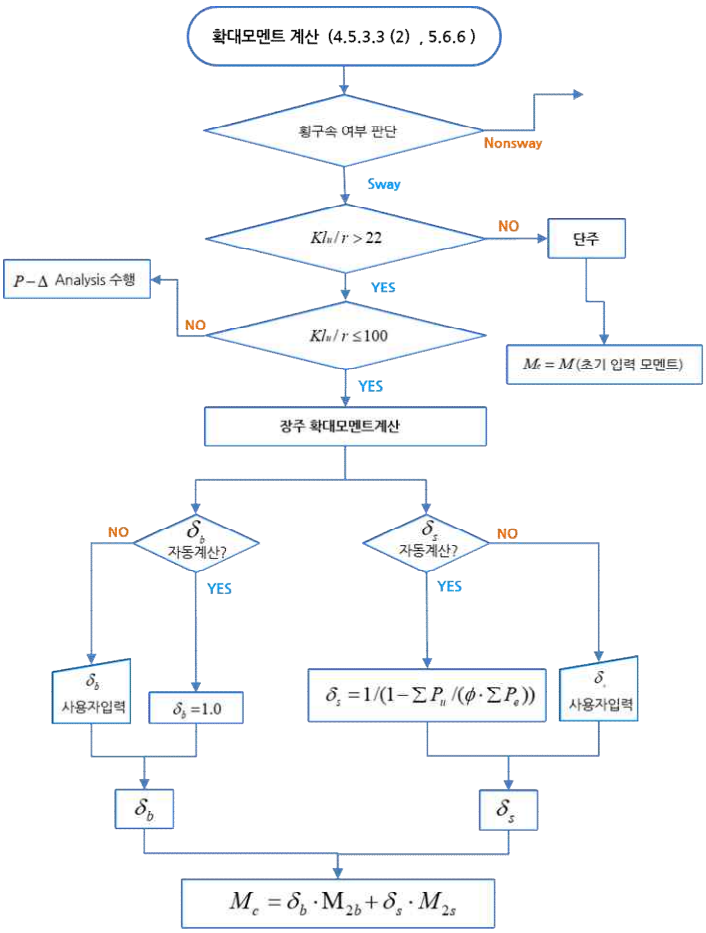
○ 대상 구조물(교각)에 대해 극단상황한계상태에 대한 탄성설계, 소성설계(연성도 설계법, 응답수정계수법) 순서는 다음과 같다.



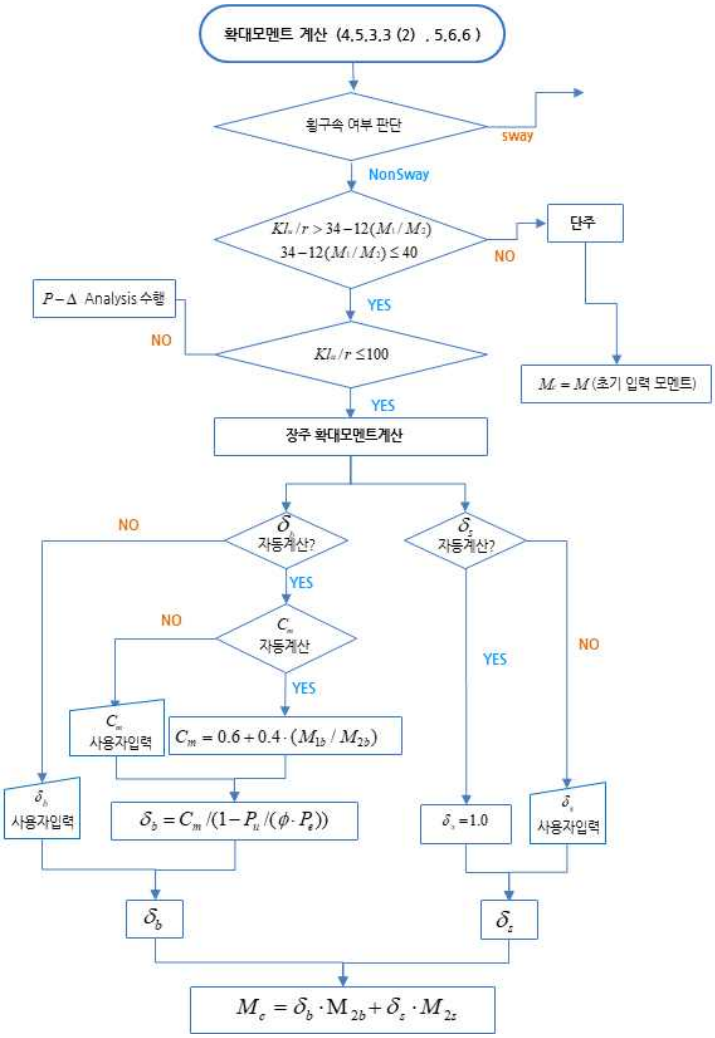


[그림 6.7 교각의 내진설계 순서도]

○ 극단상황상태시 기둥의 탄성 내진설계 순서도는 다음과 같다.

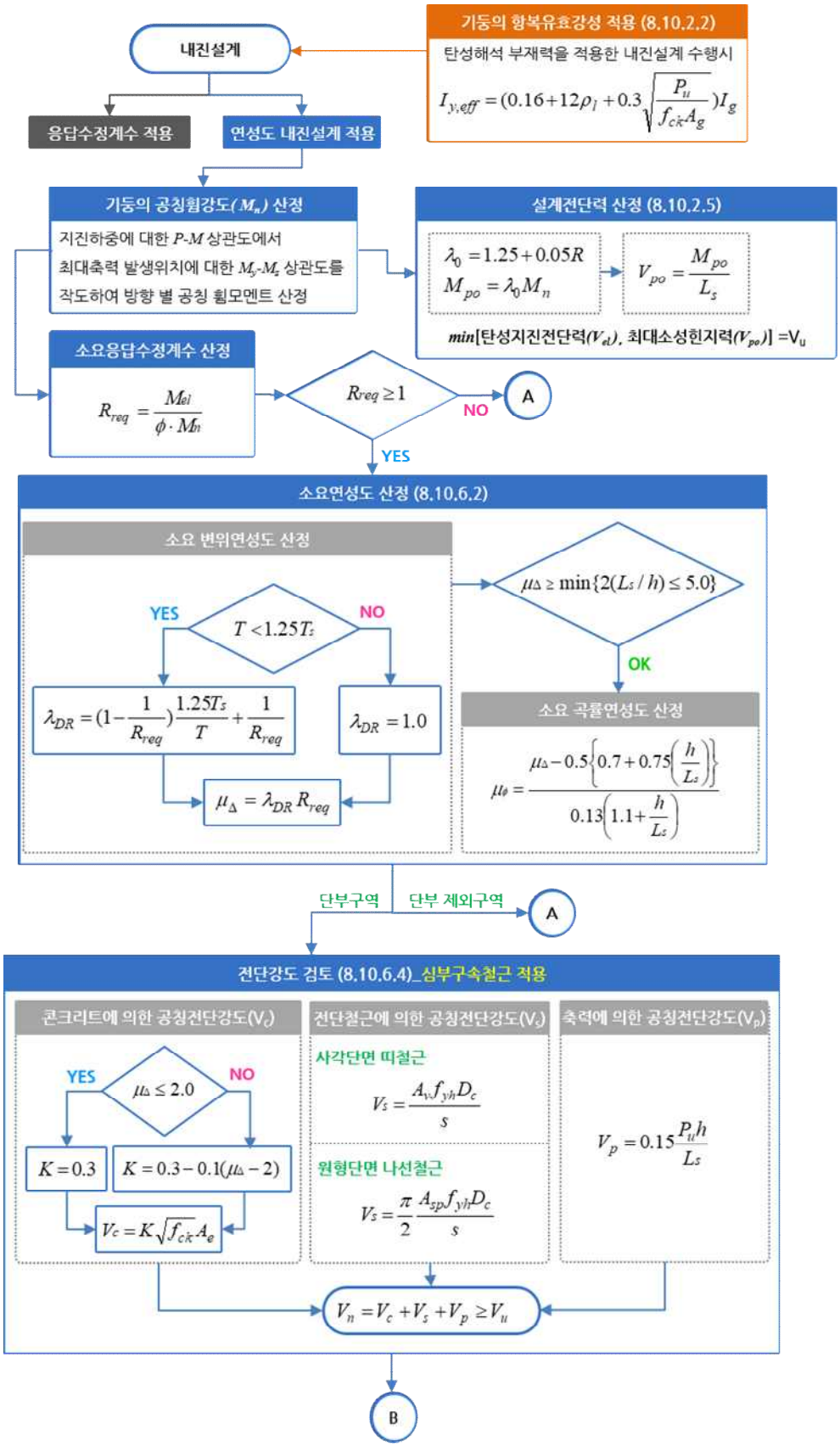


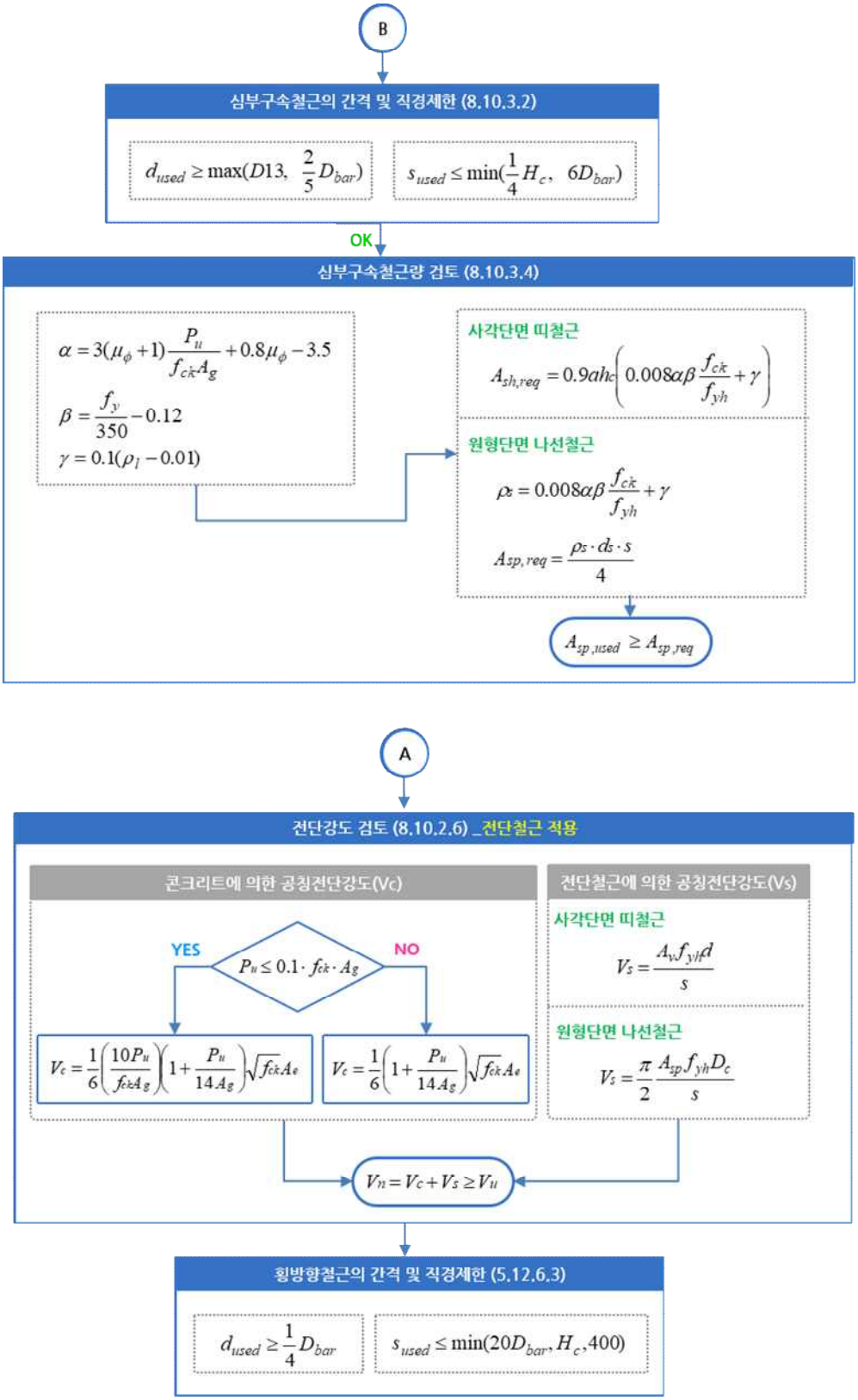
[그림 6.8 탄성 내진설계 순서도 - (비횡구속)]



[그림 6.9 탄성 내진설계 순서도 - (횡구속)]

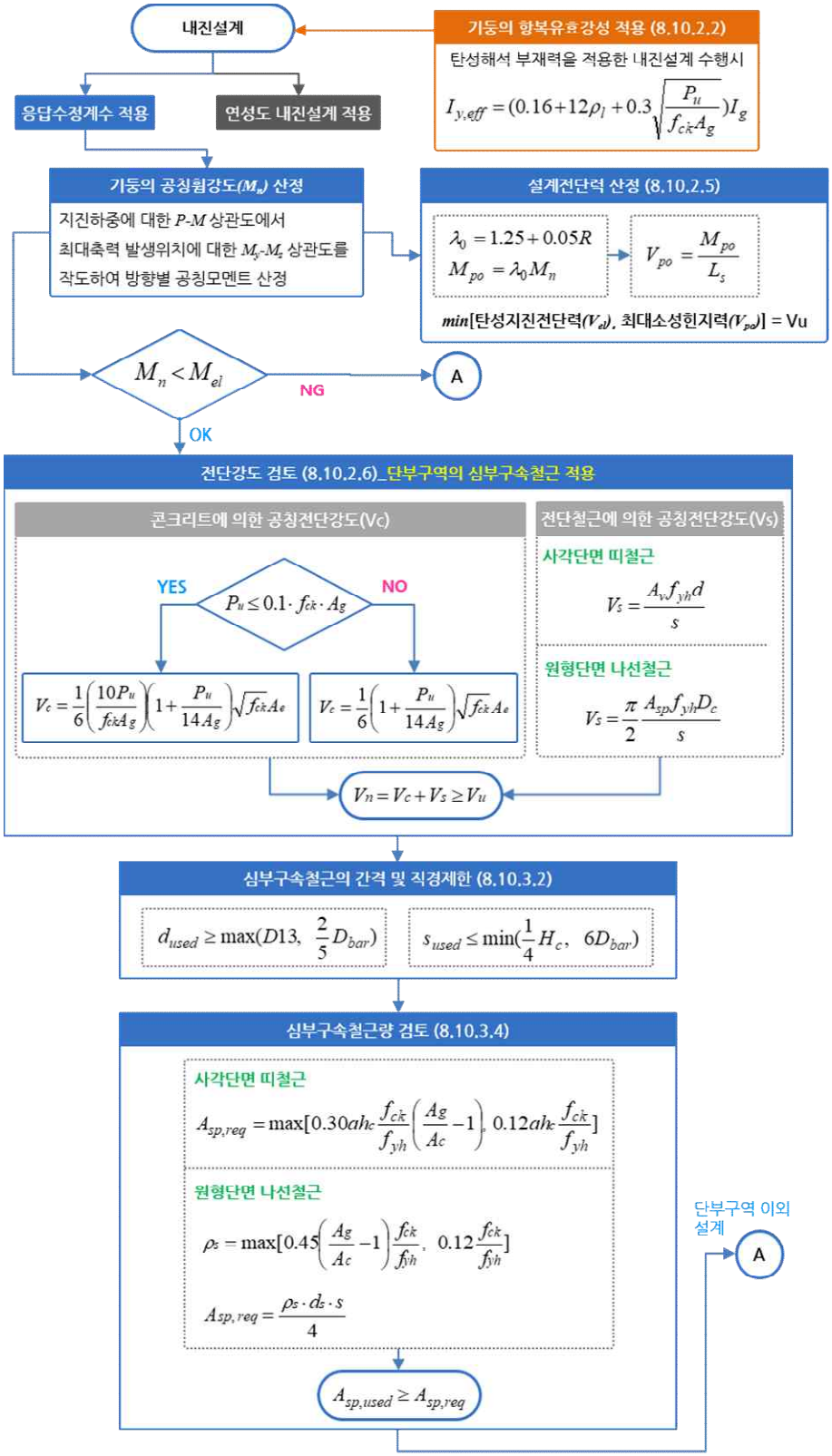
○ 극단상황한계상태시 기둥의 연성도 내진설계 순서도

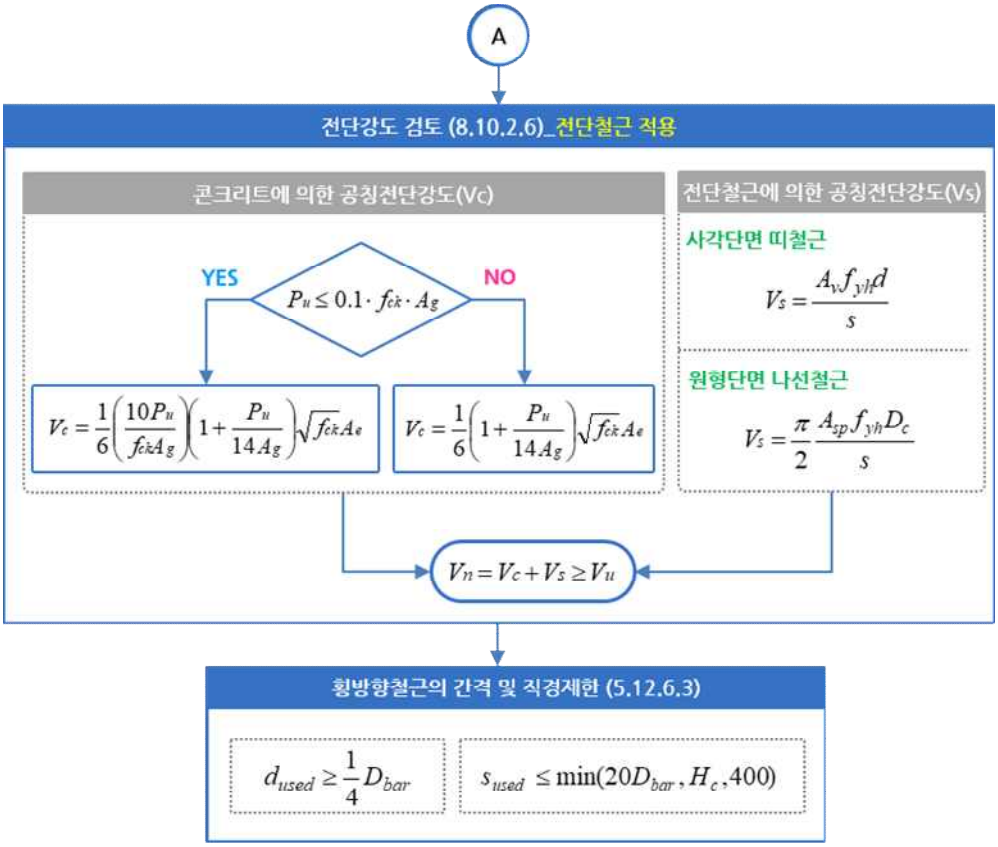




[그림 6.10 연성도 내진설계 순서도]

○ 극단상황한계상태시 기둥의 소성 내진설계(응답수정계수) 순서도

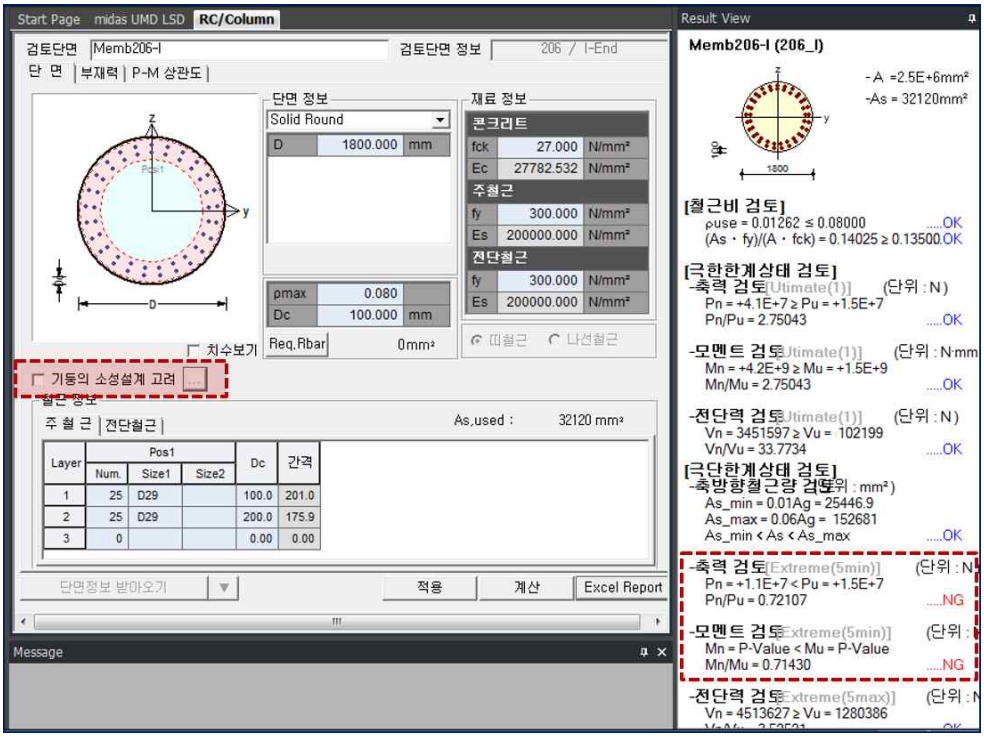




[그림 6.11 응답수정계수 적용 소성 설계법]

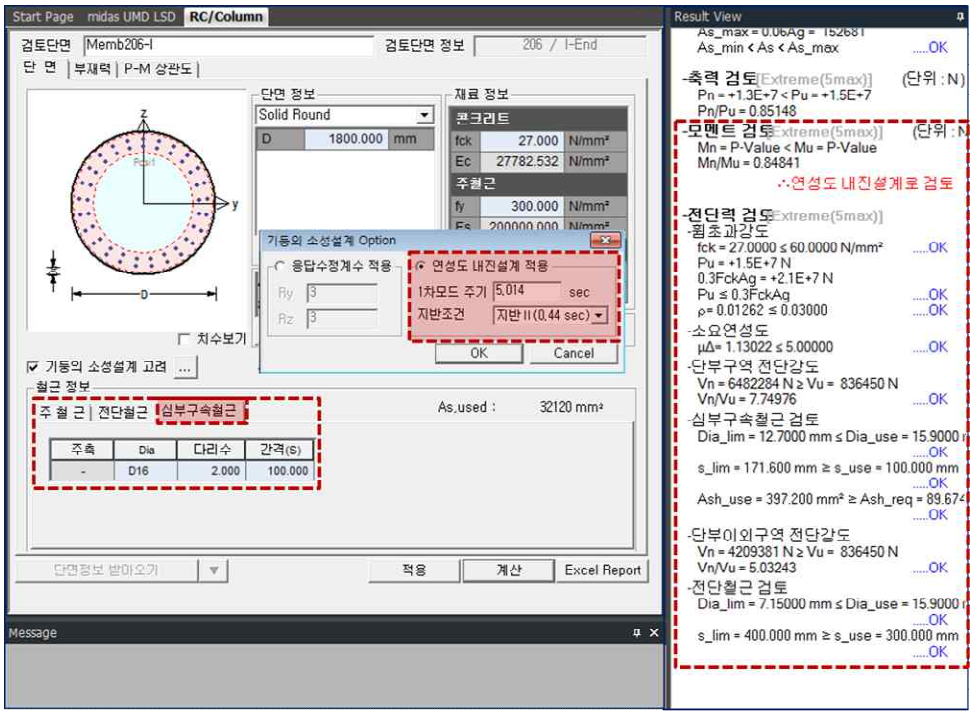
3) 내진설계 결과

- 기둥의 소성거동을 고려하지 않고 교각에 대해 탄성설계를 수행한 결과 극한한상태에서 축력, 모멘트 및 전단력에 대해 소요의 저항강도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 그러나 극단한계상태에서는 축방향 철근량 및 전단력 검토 결과 관련 규정을 만족하나 축력 및 모멘트에 대해서는 소요 강도를 확보하고 있지 않음을 알 수 있다.
- 이를 만족시키기 위해 교각 단면을 증가시키거나 추가적으로 철근을 배근하여 소요의 강성을 확보시킬 수 있으나 이는 극단한계상태에서도 교각이 탄성거동하도록 하는 것으로 비경제적인 설계를 유도하며 교각의 강성이 증가할 경우 교각과 상부구조를 연결하는 받침에 오히려 큰 전단력을 유발시키며 지진시 받침의 급작스런 파괴로 상부구조의 낙교등이 발생할 수 있으므로 큰 규모의 지진 발생시 구조물 거동이 바람직하지 않다. 그러므로 교각의 연성을 고려한 소성설계를 수행할 필요가 있다.



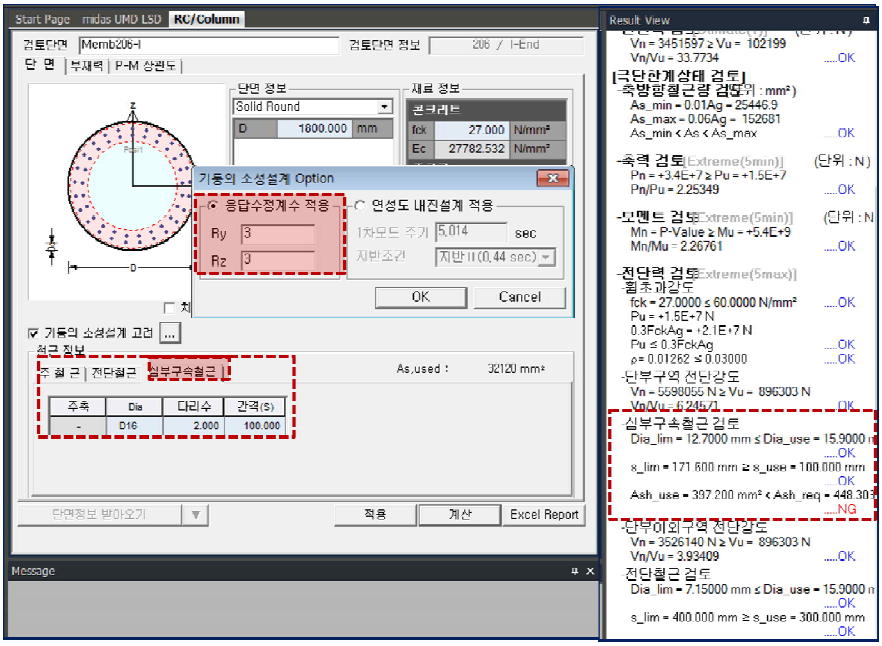
[그림 6.10 탄성 내진설계 결과]

○ 교각의 연성도를 고려한 소성설계를 수행한 결과는 그림 6.11과 같다. 심부구속철근(D16mm)를 배근시 관련 규정을 만족함을 알 수 있다.

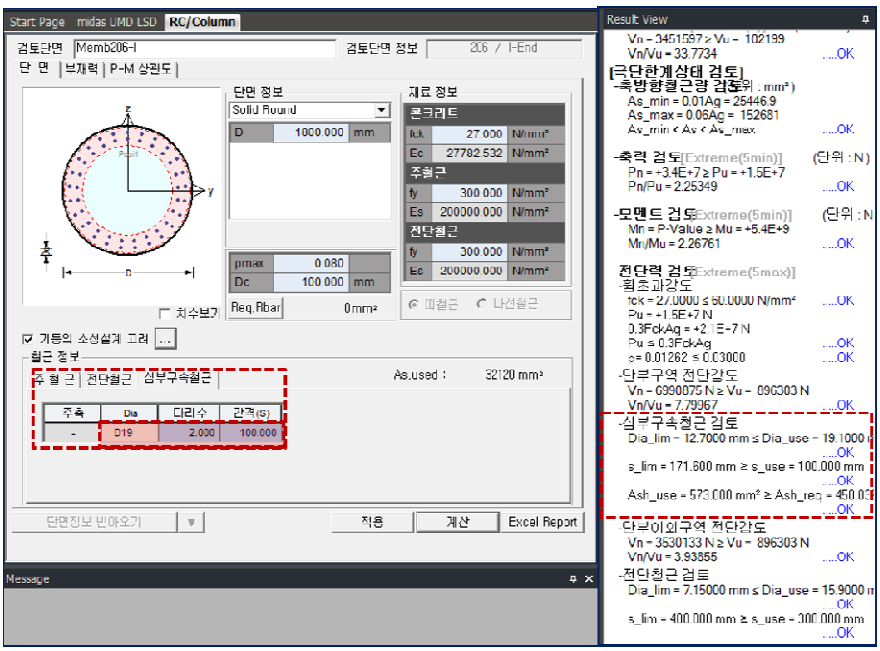


[그림 6.11 연성도 내진해석 결과]

○ 추가적으로 설계기준에 상수로 제시된 응답수정계수를 적용하여 소성설계를 수행할 경우 심부구속철근으로 배근한 철근의 직경을 16mm에서 19mm로 상향 시켜야 관련 규정을 만족함을 알 수 있다. 결과적으로 구조물의 실제 동적 거동을 고려하지 않고 경험적으로 일관되게 제시된 응답수정계수를 적용할 경우 경우에 따라 과도한 심부구속 철근이 배근될 가능성이 있다.



(a) 심부구속 철근 16mm 적용시



(a) 심부구속 철근 19mm 적용시

[그림 6.12 응답수정계수 적용 내진해석 결과]

다. 검토결과

□ 교량구조물의 경우 지진시 건물구조물과는 대별되는 동적거동의 특성이 있음을 알 수 있다. 큰 규모의 지진 발생시 교량구조물의 질량이 대부분 집중되어 있는 상부구조물의 관성력에 의해 하부구조(교각, 기둥)에 전단 또는 휨모멘트에 의한 파괴가 유발된다. 지진시 탄성범위내에서 하부구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 단면증가가 필요하므로 비경제적인 설계를 유발할 수 있다. 설사 물량 증가가 크지 않더라도 하부구조물의 강성이 증가할 경우 하부구조와 상부구조를 연결하는 받침에 큰 수평력이 발생하여 받침부의 파손과 이로 인한 상부구조물의 낙교를 유발할 수 있다. 이러한 파손 형태는 막대한 규모의 인명과 재산손실을 유발할 수 있고 구조물 복구에 상당한 시간이 필요하거나 복구 자체가 불가능 할 수 있다.

□ 반면에 연성설계 수행시 과도한 단면증가를 방지할 수 있고 하부구조물에 변형이나 손상이 발생할 수 있으나 갑작스런 구조물 붕괴를 방지할 수 있고 대피에 필요한 시간을 확보할 수 있으며 지진 이후 구조물 보수 및 기능 회복에 상대적으로 적은 시간을 필요로 하므로 바람직한 설계방향이라고 판단된다.

□ 연성설계를 수행하는 방법은 기존 설계기준에서 제시하고 있는 상수형태의 응답수정계수를 적용하는 방법과 비선형해석을 수행하여 구조물의 연성도를 고려한 내진설계를 수행할 수 있다. 하부구조물의 동적특성을 구분하지 않고 상수형태의 응답수정계수를 일괄적으로 반영하는 것보다 동적거동시 발생하는 비선형성을 반영한 내진설계 수행시 심부구속 철근을 최적화 할 수 있는 장점이 있음을 상기 예제를 통해 확인할 수 있었다.

참고문헌

American Society of Civil Engineers, ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings Other Structures, ASCE, Reston, Va., 2005a.

American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specificatons for LRFD Seismic Bridge DEsign, 2nd ed., AASHTO, Washington, D.C., 2011

American Society of Civil Engineers, ASCE 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE, Reston, Va., 2006.

Ascheim,m, M. and E. Black, "Yield Point Spectra for Seismic Design and Rehabilitation," Earthquake Spectra, Vol. 16, No.2, 2000, pp.317-336.

Applied Technology Council, ATC40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC, Redwood City, Calif., 1996.

Federal Emergency Management Agency, FEMA 283-Performance Based Seismic Design of Buildings-An Action Plan, FEMA, Washington, D.C., 1996.

Federal Emergency Management Agency, FEMA 273-NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA, Washington, D.C., 1997.

Bhruguli Gandhi et al., International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 1 Issue 5, July-2012, Performance Based Seismic Design of Reinforced Concrete Bridge.

M J N Priestley, 12WCEE 2000, Performance Based Seismic Design, 2000.

National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Synthesis 440, Performance-Based Seismic Bridge Design-A Synthesis of Highway Practice, 2013.

Unified Facilities Criteria, UFC 3-301-01, 1 June 2013, Structural Engineering

Unified Facilities Criteria, UFC 3-310-04, 1 June 2013, Seismic Desing of Buildings

Unified Facilities Criteria, UFC 1-200-01, 20 June 2016, DoD Building Code

Vitelmo V. Bertero, 12WCEE 2000, Performance Based Seismic Engineering; Conventional Vs. Innovative Approaches, 2000.

Yousef Bozorgnia, Vitelmo V. Berero, Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering

대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 2016

㈜마이다스아이티, 구조기술강좌, 건축물의 지진해석과 내진성능평가에 관한 이야기

㈜마이다스아이티, 제163회 MIDAS 기술강좌, Midas Gen 비선형시간이력해석을 이용한 내진성능평가 실무사례 및 해외프로그램 비교

㈜마이다스아이티, Civil 2017을 활용한 한계상태설계법(2015)

선창국, The Journal of Engineering Geology, Vol.24, No.2, June, 2014, pp.273-281, 국내 암반지층의 전단파속도에 근거한 지진공학적 기반암 결정

선창국, 정충기, 김동수, 한국지진공학회 논문집, 제 11권 제1호 (통권 제53호), 2007년 2월, pp. 45~57, 얕은 심도 전단파속도 분포를 이용한 30m 심도 평균 전단파속도의 결정

한국도로교통협회, 도로교설계기준(한계상태설계법), 2014

한국도로교통협회, 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편, 2014