

제 4 장 내진성능 상세평가

4.1 일반사항

4장은 상세평가를 통한 기존 건축물 내진성능평가의 세부 기술적인 사항을 규정한다. 4장에 규정된 평가절차는 선형정적절차, 선형동적절차, 비선형정적절차, 비선형동적절차의 4종류이다. 4.1은 내진성능평가 시 사용될 구조해석모델의 기본적인 요구조건을 규정한다. 4.2는 선형절차의 세부사항을 규정하고 있으며, 4.3과 4.4는 각각 비선형정적절차와 비선형동적절차의 세부사항을 규정한다. 비선형동적절차는 적용 시 특별한 요구조건이 없으나, 선형절차와 비선형정적절차의 경우 구조물 내 비탄성거동의 분포, 비정형성, 주기, 고차모드의 영향 등의 요구조건을 검토하여 만족할 경우에만 적용할 수 있으므로 주의하여야 한다. 4.5는 구조적 특성이 알려지지 않은 일반적이지 않은 구조부재의 강도와 변형특성을 구하기 위한 실험적인 절차에 대해 규정한다. 4.6은 전체 구조물의 성능 판정기준을 규정한다.

이 장에서 규정하는 상세평가는 표 2.1.1에 제시된 성능수준 가운데 구조요소의 성능에 대해서만 평가하며, 비구조요소의 성능수준은 제9장에 따라 평가한다.

[해설]

이 장은 기존 건축물의 상세평가에 사용되는 여러 절차의 기본개념을 제시한다. 3장의 예비평가는 많은 수의 건물을 빠른 시간내에 개략적으로 평가하거나 대상건물에 대한 정보가 불충분할 경우 보수적으로 평가하는 방법이다. 이에 반해 4장의 평가절차는 대상구조물에 대한 충분한 정보를 가지고 본격적으로 내진성능수준을 판단하기 위한 절차이다.

건축구조기준의 사양기반설계규정과 이 요령의 성능기반평가절차의 기본적인 차이는 구조물이 지진하중을 견디기 위해 필요한 연성능력을 구조물 전체로 고려하는가 아니면 부재별로 고려하는가이다. 예를들어 건축구조기준에 의한 구조해석과 4.2의 선형절차는 동일하게 선형해석에 기반하고 있으나 전자는 구조물 전체의 비선형능력인 R값을 고려하여 지진하중 자체를 저감하고 후자는 저감되지 않은 지진하중을 사용하는 대신 부재별 비선형능력을 나타내는 m 계수를 사용하여 부재별로 성능수준을 판정한다. 4.3 또는 4.4의 비선형절차에서는 부재의 항복 혹은 파괴를 해석을 통해 직접적으로 모사하며, 부재별로 부재력(힘지배의 경우) 또는 비탄성 변형량(변형지배의 경우)을 근거로 성능수준을 판정한다. 비선형절차를 적용할 경우, 보다 정확한 내진성능의 파악이 가능하나 부재별 모델링 및 내진성능평가에 더 많은 작업이 필요하다.

4.1.1 모델링

해석모델은 기본적으로 3차원 모델을 사용하여야 하며 건축물 내 질량과 하중, 강성의 공간적 분포를 표현할 수 있어야 한다. 구조요소의 강성은 균열의 영향을 고려한 유효강성이 적용되어야 한다. 또한 조적채움벽과 같은 주요 비구조요소도 건물주기 및 횡력저항에 영향을 미치므로 그 영향을 고려하여야 한다.

4.1.1.1 중력하중

내진성능평가를 위한 중력하중은 고정하중, 활하중, 및 적설하중의 조합으로 구성되며, 선형절차는 식 (4.2.8) 또는 식 (4.2.9), 비선형절차는 식 (4.3.1)에 따라 산정한다. 이 때 활하중은 건축구조기준에서 규정한 용도별 활하중의 25퍼센트를 사용하되 활하중의 저감은 적용하지 않는다. 적설하중은 건축구조기준에서 규정한 적설하중의 20퍼센트를 사용한다.

4.1.1.2 질량

질량은 건축구조기준(KDS 41 17 00)의 식 (7.2-1)에 정의된 유효건물중량을 중력가속도로 나눈 값을 사용한다.

[해설]

건축구조기준에 정의된 유효건물중량은 고정하중과 아래에 기술한 하중을 포함한다.

- ① 창고로 쓰이는 공간에서는 활하중의 최소 25%(공용차고와 개방된 주차장 건물의 경우에 활하중은 포함시킬 필요가 없음.)
- ② 바닥하중에 칸막이벽 하중이 포함될 경우에 칸막이의 실제중량과 0.5kN/m^2 중 큰 값
- ③ 영구설비의 총 하중
- ④ 적설하중이 1.5kN/m^2 을 넘는 평지붕의 경우에는 평지붕 적설하중의 20%.
- ⑤ 옥상정원이나 이와 유사한 곳에서 조경과 이에 관련된 재료의 무게

실무에서는 종종 유효건물중량을 중력하중과 동일한 값 또는 고정하중만을 사용하는 오류를 범한다. 하지만 위에 정의된 대로 고정하중은 하중과 질량 모두 동일하게 적용되나 그 외 하중은 동일하지 않다. 중력하중의 경우 고정하중에 건축구조기준에서 규정한 용도별 활하중의 25%와 적설하중의 20%가 추가되나 유효건물중량의 경우에는 고정하중에 위에 기술한 ①~⑤까지의 하중이 추가된다.

4.1.2 비틀림의 고려방법

선형절차의 경우 우발편심 및 비틀림 모멘트의 동적증폭을 고려하여야 한다.

[해설]

우발편심모멘트 및 비틀림의 동적증폭은 구조부재의 강도와 강성의 불규칙성을 고려하기 위한 것이다. 구조부재의 항복에 의한 강성변화를 고려할 수 있는 비선형해석의 경우 해석모델에 고려하지 않아도 된다.

4.1.3 지하층의 모델링

지하구조의 강성이 지상구조의 강성보다 매우 큰 경우, 지상구조를 분리하여 해석할 수 있다. 그렇지 않은 경우에는 지하구조를 지상구조와 함께 모델링하여야 한다. 지하구조물이 있는 경우의 모델링 및 평가는 8.6에 따른다.

4.1.4 감쇠비

선형절차와 비선형정적절차에서는 다음에 해당하지 않을 경우 5% 감쇠비를 가정한 응답스펙트럼을 사용한다. 비선형 동적절차의 감쇠비는 4.4.5에 따른다.

- (1) 외장재가 없는 구조물의 경우, 감쇠비는 2%로 가정한다.
- (2) 충분한 해석이나 실험에 의해 5%가 아닌 감쇠비 특성이 규명된 경우, 그 값을 사용할 수 있다.

4.1.5 건물 사이의 간격

- (1) 대상건축물과 인접건물은 충돌을 방지하기 위해 최소 간격을 가져야 한다. 식 (4.1.1)은 i 층이 확보하여야 할 최소 간격을 나타낸다.

$$s_i = \sqrt{\Delta_{i1}^2 + \Delta_{i2}^2} \quad (4.1.1)$$

여기서,

Δ_{i1} : 대상 건축물의 i 층에서 고려하는 평가지진에 의해 발생하는 횡변위

Δ_{i2} : 인접 건축물의 해당층에서 고려하는 평가지진에 의해 발생하는 횡변위, 혹은 인접 건물 해당층의 층높이의 0.03배로 볼 수 있다.

s_i 는 대상 건축물의 해당층(i 층) 층높이의 0.04배 보다 클 필요는 없다.

- (2) 단, 인명안전 혹은 붕괴방지의 성능수준 검토 시 두 건물이 동일한 구조형식을 가지고, 각층 바닥 판의 높이가 동일하며, 건물 높이의 차이가 낮은 건물의 높이를 기준으로 50% 이하일 경우 (1)의 규정은 적용하지 않아도 된다.

[해설]

(2)의 규정에 따라 신축줄눈(Expansion joint)이 있다고 하더라도 구조형식과 각 층바닥판의 높이가 동일하며 건물 높이의 차이가 크지 않은 경우 붕괴방지와 인명안전을 검토할 때 신축 줄눈사이의 간격을 검토하지 않아도 된다. 하지만 기능수행 혹은 거주가능의 성능목표를 가질 경우 식 (4.1.1)의 만족여부를 검토하여야 한다. 식 (4.1.1)을 만족하지 못할 경우 더 엄격한 내진보강을 통해 횡변위를 감소시키거나, 신축줄눈 좌우의 구조체를 연결시켜 하나의 구조물이 되도록 하는 방법을 고려할 수 있다.

4.1.6 변형지배거동과 힘지배거동

해석모델에 포함된 모든 부재의 거동은 표 4.1.1에 따라 변형지배거동과 힘지배거동으로 분류한다.

표 4.1.1 변형지배거동과 힘지배거동의 구분

| | 변형지배거동 | 힘지배거동 |
|---|--------------------------------------|---|
| 모멘트 골조의 - 보 - 기둥 - 접합부 | 휨모멘트 휨모멘트 - | 전단력 축력, 전단력 ¹⁾ 전단력 ²⁾ |
| 전단벽 | 휨모멘트, 전단지배형 벽체의 전단력 ³⁾ | 축력, 전단력 |
| 가새골조의 - 가새 - 보 - 기둥 - 전단연결재 | 축력 - - 전단력 | - 축력 축력 축력, 휨모멘트 |
| 접합부 | 축력, 전단력, 휨모멘트 ²⁾ | 축력, 전단력, 휨모멘트 |

- 1) 철골조 모멘트골조에서 전단력은 변형지배거동으로 보는 경우도 있다.
- 2) 철골조에서 접합부의 축력, 전단력, 휨은 변형지배거동으로 보는 경우도 있다.
- 3) 압축력이 $0.15f_{ck}A_g$ 이하인 경우에 한하여 적용한다.

[해설]

힘지배거동은 최대 하중 이후 변형능력이 없는 취성적인 거동이다. 따라서 힘지배거동이 지배적인 구조물인 경우 급격한 붕괴가 발생할 수 있다.

모델링 변수가 제시되어 있는 경우 변형지배거동으로 분류된다. 하지만 철근콘크리트 기둥의 경우 휨모멘트는 P-M1-M2 상관작용에 의해 힘지배인 P에 연동되며, 축력비가 높은 비내진기둥의 경우 사실상 비탄성변형능력을 가지지 못할 경우도 있다. 5장에 제시된 m 계수 및 골격 곡선의 a, b, c 계수에서 $m = 1$ 이거나 $a = 0.0$ 으로서, 연성능력이 없는 경우도 허용기준을 제시하고 있는데, 이러한 경우는 힘지배로 분류하는 것이 안전측일 수도 있다. 즉, 기둥의 경우 높은 축력비의 기준값이 0.6이며, 이 경우 연성능력이 없거나 매우 작은 값이므로 축력비가 0.6 이상이면 힘지배, 그 이하이면 변형지배로 분류할 수도 있다.

4.1.7 1차부재 및 2차부재

모든 부재는 1차부재와 2차부재로 구분한다. 1차부재는 주어진 성능수준을 달성하기 위해 지진력에 저항하는 부재이고 2차부재는 지진력에 대한 저항이 요구되지 않는 부재로 주로 중력하중을 저항하도록 설계된 부재이다. 설계 시 2차부재로 취급되었으나 지진력 작용 시 해당 부재의 파괴가 다른 1차부재의 파괴를 가져올 경우, 그 부재는 1차부재로 보아야 한다.

선형절차를 위한 해석모델에는 1차부재만을 포함시킨다. 2차부재의 횡강성의 합이 1차부재의 강성의 합의 25%를 넘는 경우, 2차부재의 일부를 1차부재로 변경하여 2차부재 횡강성의 합이 1차부재 횡강성합의 25%를 초과하지 않도록 조정하여야 한다. 또한 특정 2차부재가 인접한 1차부재의 하중이나 변위요구량을 증가시킬 경우 그 2차부재를 1차부재로 보고 해석모델에 포함시켜야 한다.

비선형절차에서는 1차부재와 2차부재를 구분하지 않고 모두 모델링한다. 비구조요소의 초기강성이 전체강성의 10%를 초과하거나 층 강도 합의 10%를 초과할 경우, 구조요소로 분류하고 해석모델에 포함시켜야 한다.

1차 또는 2차부재를 선택적으로 분류하여 건축물을 비정형에서 정형으로 바꾸어서는 안 된다

[해설]

2차부재는 지진력에 대해 저항하도록 설계된 부재가 아니므로 지진하중 작용시 1차부재에 비해 강도와 강성의 열화가 심하게 발생한다. 선형해석을 기반으로 하는 선형절차에서는 부재들 사이에 비선형거동이 균일하게 발생하지 않는 경우 평가결과의 신뢰성이 낮아지므로 보수적인 평가를 위해서는 2차부재를 무시하고 1차부재만을 모델링한다. 2차부재의 기여도가 높아서 해석모델에 2차부재를 포함하더라도 선형해석에서는 2차부재들의 조기파괴에 의한 건축물의 비정형 응답을 고려할 수 없다. 따라서 선형절차에서는 2차부재의 횡강성의 합이 1차부재의 강성의 합의 25%를 넘지 않아야 한다는 제한 조건을 설정하였다. 2차부재의 기여도는 해석모델에 2차부재를 포함시키고 해석결과의 변동을 분석하여 확인할 수 있다.

비선형해석의 경우 부재별 강도와 강성의 열화에 의한 효과를 고려할 수 있으므로 1차부재와 2차부재의 구별이 없이 모든 부재를 해석모델에 포함시켜 보다 정확히 평가할 수 있다.

4.1.8 재료강도와 부재강도

부재의 각종 공칭강도는 이 요령에서 특별히 규정하지 않는 한 건축구조기준에 따라 산정된 값을 사용한다. 단, 강도감소계수 ϕ 는 적용하지 않는다.

변형지배거동에서 부재강도는 기대강도를 사용하며, 힘지배거동에서 부재강도는 공칭강도를 사용한다. 콘크리트, 조적조 및 강재의 공칭강도와 기대강도는 각각 5장, 6장 및 7장에 따른다.

. 허용응력을 사용할 경우, 공칭강도는 강재의 경우 허용강도의 1.7배, 조적의 경우 2.5배로 볼 수 있다.

4.2 선형절차

4.2.1 일반사항

선형절차는 4.2.2에 규정된 바와 같이 구조물에 비정형성이 없고 비탄성 거동이 크지 않으며 비교적 균등히 발생하는 경우에만 사용할 수 있다. 비탄성거동의 크기와 분포는 선형절차에 따른 해석을 수행한 후 부재별로 식 (4.2.1)의 DCR을 산정하여 판단한다.

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \quad (4.2.1)$$

여기서,

Q_{UD} : 선형절차의 하중조합에 의해 발생하는 부재력

Q_{CE} : 평균재료강도를 사용하여 산정한 부재의 기대강도

DCR은 부재별로 축력, 휨모멘트, 전단력 등 모든 작용력에 대해 각각 산정한다.

지진하중의 산정 및 해석절차에 따라 선형정적절차와 선형동적절차를 사용할 수 있다. 선형정적절차의 지진하중은 4.2.4에 따른 의사지진력을 사용하며, 선형동적절차는 4.2.5에 규정된 바와 같이 응답스펙트럼해석과 유사하게 각 모드의 영향을 조합하여 구한다.

4.2.2 선형절차의 적용제한

산정된 DCR이 3.0, 혹은 선형절차에서 제시하는 부재의 조건에 따른 m 계수를 초과하는 경우, 아래 항목의 비정형성 중 하나라도 해당된다면 선형절차는 사용할 수 없다.

- (1) 약층 비정형 : 각 방향별로 해당층과 인접층에서 층전단력에 대한 평균DCR의 비율이 125%를 초과하는 경우 약층 비정형에 해당한다. 층전단력에 대한 평균DCR, 즉 \overline{DCR} 은 식 (4.2.2)로 산정한다.

$$\overline{DCR} = \frac{\sum_1^n DCR_i V_i}{\sum_1^n V_i} \quad (4.2.2)$$

여기서,

- DCR_i : i 번째 부재에서 작용하는 모든 작용력에 대해 산정된 DCR 중 가장 큰 값
- V_i : i 번째 부재의 전단내력
- n : 해당층 부재의 수

- (2) 비틀림 강도 비정형 : 각 층의 부재를 강도의 중심점을 기준으로 상하 혹은 좌우로 나눌 때 한쪽 방향에 위치한 부재들의 DCR 값 중 최댓값과 다른 쪽에 위치한 부재들의 DCR 값 중 최댓값의 비율이 1.5를 초과할 경우, 비틀림 강도 비정형에 해당한다. 단, 해당층이 유연한 격막일 경우는 고려하지 않는다.

4.2.3 선형정적절차의 적용 제한

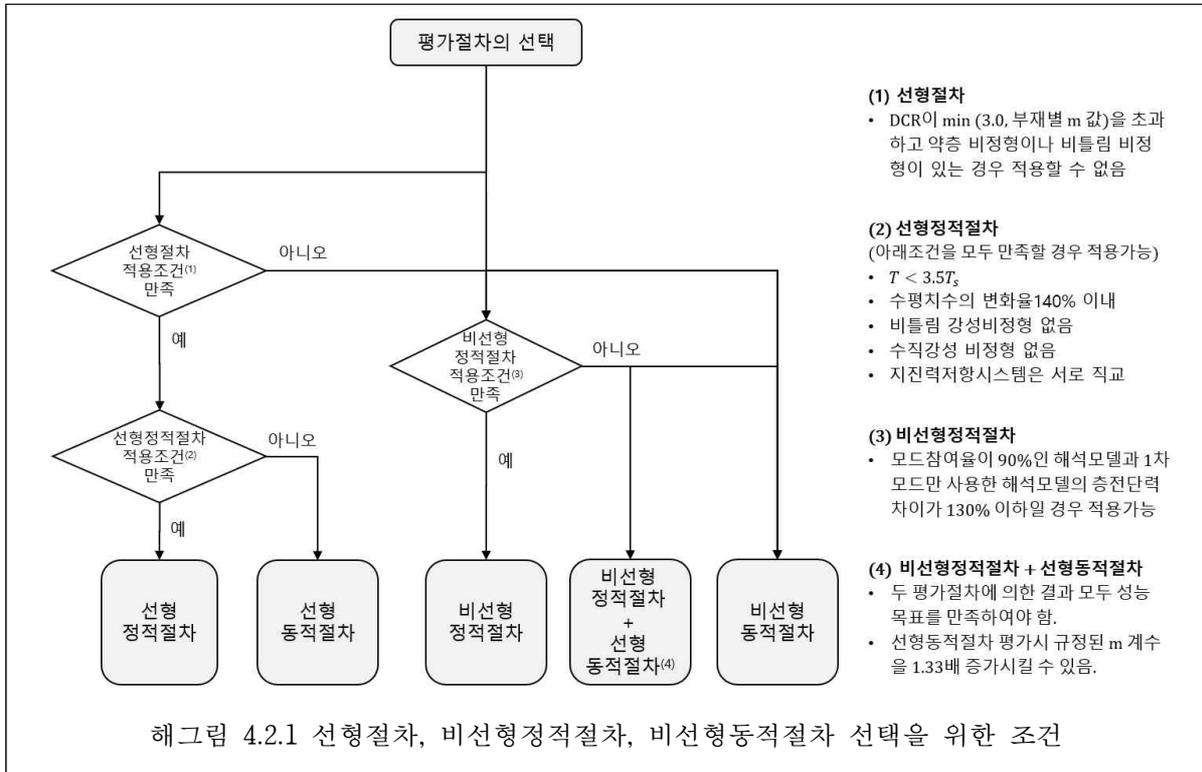
선형정적절차를 사용하기 위해서는 4.2.2의 규정 이외에 아래의 추가적인 제한사항을 검토하여야 한다. 즉, 선형정적절차는 아래 규정 중 하나라도 해당될 경우 적용할 수 없으나, 4.2.2의 규정을 만족할 경우 4.2.5 선형동적절차를 사용할 수 있다.

- (1) 건물의 기본주기 T 가 $3.5T_s$ 보다 큰 경우, ($T_s = S_{X1}/S_{XS}$)
- (2) 한 층의 수평치수가 인접층의 해당 방향 치수의 1.4배를 초과할 경우 (옥탑층은 제외)
- (3) 비틀림 강성 비정형 (임의 층 평면내 임의점에서 최대 변위가 평균변위의 150%를 초과)이 있는 경우
- (4) 수직 강성 비정형 (옥탑층을 제외한 임의 층의 평균 변위각이 인접한 상부층 혹은 하부층의 평균 변위각의 150%를 초과)이 있는 경우
- (5) 직교하지 않는 지진력 저항시스템을 가진 경우

[해설]

4.2 ~ 4.4에 규정된 선형절차, 비선형정적절차, 비선형동적절차는 비선형거동의 분포, 비정형성, 주기, 고차모드의 영향 등의 각 절차별로 규정된 조건을 만족할 경우에만 적용할 수 있다. 해그림 4.2.1은 성능기반평가절차의 선택 시 고려되는 적용조건의 만족 여부를 검토하기 위한 흐름도이다.

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령



4.2.4 선형정적절차

(1) 건축물에 작용하는 수평방향의 의사지진력 V 는 식 (4.2.3)을 사용해 계산한다.

$$V = C S_a W \quad (4.2.3)$$

여기서,

C : 최대 비탄성변위와 선형탄성변위의 보정을 위한 수정계수로 표 4.2.3의 값을 사용한다.

S_a : 고려하는 방향의 건물 기본주기에 해당하는 응답스펙트럼가속도로 2.1에서 규정한 성능목표의 지진위험도에 따라 구한다.

W : 건축구조기준(KDS 41 17 00) 식 (7.2-1)에 정의된 유효건물중량

표 4.2.1 최대 비탄성변위와 선형탄성변위의 보정을 위한 수정계수, C

| 건물의 형식 | 층수 | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4층 이상 |
| 모멘트 골조 | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |
| 전단벽 구조, 가새골조 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.0 |
| 조적조 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

(2) 식 (4.2.3)에 의해 구한 의사지진력은 식 (4.2.4) 및 식 (4.2.5)에 따라 수직으로 분포된다.

$$F_x = C_{vx} V \tag{4.2.4}$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \tag{4.2.5}$$

여기서,

V : 의사지진력

k : 고유주기에 따른 횡력분포계수로 주기가 2.5초 이상일 경우 2.0, 0.5초 이하일 경우 1.0, 그 사이는 선형보간한다.

w_i, w_x : i 층, x 층의 유효중량

h_i, h_x : 밑면으로부터 i 층, x 층까지의 높이

[해설]

내진설계는 설계지진 수준에서 건물의 비선형응답을 허용하는 철학을 근거로 하고 있다. 비선형거동을 하는 경우, 선형거동의 경우보다 작은 크기의 부재력이 발생한다. 따라서 신축건물의 내진설계기준에서는 실제 예상되는 지진하중을 반응수정계수 R 로 나누어 감소시킨 밑면전단력을 사용한 탄성해석을 통해 구한 부재력으로 설계한다. 하지만 감소된 밑면전단력으로 구한 탄성변위는 실제 비선형거동에서 예상되는 변위보다 매우 작게 산정된다. 따라서 변위를 검토하는 경우에는 감소된 밑면전단력으로부터 계산된 변위를 변위증폭계수를 사용하여 증가시킬 필요가 있다.

이에 반해 내진성능평가를 위한 선형절차에서는 비선형 거동을 고려하기 위해 다른 접근 방법을 사용한다. m 계수법에서는 식 (4.2.3)에 정의된 의사지진력을 사용한다. 의사지진력은 비선형거동을 통해 발생하는 최대 비탄성변위와 같은 크기의 탄성변위를 나타내는 지진하중을 의미한다. 따라서 건축구조기준에 규정된 등가정적해석법에서의 밑면전단력 산정식에서 건물의 비탄성변형을 고려하여 부재력을 감소시키는 계수인 반응수정계수와 건물의 중요도에 따라 설정된 중요도계수가 사용되지 않은 것이다. 이때 주기가 짧은 저층구조물의 경우, 실제 비탄성 변위는 반응수정계수와 중요도계수가 사용되지 않은 지진하중 작용 시의 탄성변위에 비해 크게 나타나는 경향이 있으므로 이를 고려하기 위해 표 4.2.1의 수정계수가 사용되었다.

만약 건물이 설계지진 작용 시 선형탄성적인 거동을 하는 경우 의사지진력과 선형절차에 의해 산정된 부재력은 실제 발생하는 부재력과 동일할 것이다. 그러나 일반적으로 건물은 강진시 비탄성적인 거동을 하도록 설계되므로, 이 경우 의사지진력 및 선형절차에 의해 산정된 부재력은 실제 부재력 즉, 부재 항복시의 부재력을 초과할 것이다. 선형절차는 실제 건물의 비선형 거동을 대략적으로 나타내며, 하중 재분배나 다른 비선형 효과를 무시한 것이다. 따라서 부재별로 의사지진력에 의한 부재력의 적정성은 부재의 연성능력을 고려한 m 계수를 사용하여 검토한다.

4.2.5 선형동적절차

선형동적절차의 순서는 다음과 같다.

- (1) 해석모델의 구성 및 고유치 해석
- (2) 각 모드별 평가지진의 가속도응답스펙트럼에 대한 응답 산정
- (3) 응답스펙트럼해석을 통한 모드응답의 조합

응답스펙트럼 해석에 사용되는 구조물의 주기는 구조해석모델의 고유치해석을 통해 구한다. 이 때 구조요소의 강성은 균열의 영향을 고려한 유효강성이 적용되어야 한다. 또한 조적채움벽과 같은 주요 비구조요소도 건물주기에 영향을 미치므로 그 영향을 고려하여야 한다. 하지만 신축건물의 내진설계와 달리 등가정적법으로 구한 밀면전단력과 응답스펙트럼법의 결과를 비교하여 밀면전단력을 등가정적법 이상으로 증가시키는 절차는 적용하지 않는다. **응답스펙트럼해석에 의해 구한 해석결과에도 표 4.2.1의 수정계수 C를 반영하여야 하며, 하중조합 및 허용기준도 동일하게 적용한다.**

모드 응답은 제곱합제곱근(SRSS)이나 완전2차조합(CQC)을 사용하여 조합한다. 각 모드의 주기 차이가 25% 이내일 때에는 CQC를 사용하여야 한다. 응답스펙트럼 해석에서 사용되는 모드의 수는 각 방향별로 참여질량이 최소 90% 이상이 되도록 하여야 한다. 다축가진효과는 4.2.7에 따라서 고려한다. 혹은 다축효과를 고려하기 위해 SRSS를 사용하여 두 직각 방향의 반응을 조합할 수 있지만 CQC는 사용할 수 없다.

[해설]

위의 절차는 건축구조기준의 응답스펙트럼해석법과 유사하다. 그러나 건축구조기준과 달리 해석을 통해 구한 결과를 등가정적하중의 결과와 비교하여 밀면전단력을 보정하지는 않는다. 건축구조기준에서 밀면전단력을 보정하는 이유는 신축건물의 경우 실제 시공시 설계시의 가정 사항과 다르게 건축될 가능성 즉 불확실성을 고려하기 위함이나, 기존 건축물의 경우 충분한 조사를 통해 주기에 영향을 줄 수 있는 요소(조적채움벽 등)의 영향을 비교적 정확히 고려할 수 있기 때문이다.

4.2.6 주기

- (1) 구조물의 고유주기는 이 절의 약산식에 따라 산정하거나, 저항요소의 변형특성과 구조적 특성을 고려한 기타 적절한 방법으로 구할 수 있다. 다만, 기타 적절한 방법에 의하여 산정한 고유주기는 약산식에 따라 구한 근사 기본 진동주기 T_a 에 표 4.2.2의 주기상한계수 C_u 를 곱한 값을 초과할 수 없다.

$$T_a = C_t h_n^x \quad (4.2.6)$$

여기서, $C_t = 0.0466$, $x=0.9$: 철근콘크리트모멘트골조

$C_t = 0.0724$, $x=0.8$: 철골모멘트 골조

$C_t = 0.0731$, $x=0.75$: 철골편심가새 골조 및 철골좌굴방지가새골조

$C_t = 0.0488$, $x=0.75$: 철근콘크리트전단벽구조, 기타골조

h_n = 건축물의 밑면으로부터 최상층까지의 전체높이(m)

강성에 영향을 줄 수 있는 비보강채움벽이 있는 철근콘크리트모멘트골조, 철골모멘트골조는 상기식에 2/3를 곱하여 산정한다. 콘크리트 전단벽체가 주요 횡저항인 시스템은 기타골조의 주기식을 적용한다.

(2) 철근콘크리트와 철골 모멘트저항 골조에서 12층을 넘지 않고 층의 최소높이가 3m 이상일 경우, 근사 고유주기 T_a 는 식 (4.2.7)에 의하여 구할 수 있다.

$$T_a = 0.1N \tag{4.2.7}$$

여기서,

N : 층수

표 4.2.2 주기상한계수, C_u

| S_{X1} | C_u |
|----------|-------|
| 0.4 이상 | 1.4 |
| 0.3 | 1.4 |
| 0.2 | 1.5 |
| 0.15 | 1.6 |
| 0.1 이하 | 1.7 |

S_{X1} 의 중간값에 해당할 경우 주기상한계수 C_u 는 직선보간한다.

[해설]

주기산정식은 건축구조기준과 동일하다.

4.2.7 하중조합 및 다축가진효과

(1) 선형절차 사용 시 중력하중조합에 의한 부재력 Q_G 는 식 (4.2.8)과 식 (4.2.9)로 산정한다.

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L + Q_S) \tag{4.2.8}$$

$$Q_G = 0.9Q_D \tag{4.2.9}$$

여기서,

Q_D : 고정하중에 의한 부재력

Q_L : 건축구조기준에서 규정된 용도별 활하중의 25%에 의한 부재력

Q_S : 건축구조기준에서 규정된 적설하중의 20%에 의한 부재력. 단, 1.5 kN/m² 이하일 경우 무시한다.

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령

(2) 지진하중에 의한 부재력 Q_E 는 다축가진효과를 고려하여 한 방향 지진하중과 직각방향 지진하중의 30%에 의한 부재력을 조합하여 식 (4.2.10)로 산정한다.

$$\begin{aligned} Q_E &= \pm 1.0E_X \pm 0.3E_Y \\ Q_E &= \pm 1.0E_Y \pm 0.3E_X \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

여기서, E_X 와 E_Y 는 각각 x축과 y축 방향의 지진하중이다.

(3) 변형지배거동을 하는 부재의 부재력 (Q_{UD})은 식 (4.2.11)로 산정한다.

$$Q_{UD} = Q_G + Q_E \quad (4.2.11)$$

여기서,

- Q_{UD} : 중력하중과 지진하중의 조합하중에 의한 부재력
- Q_G : 중력하중에 의한 부재력
- Q_E : 지진하중에 의한 부재력

(4) 힘지배거동을 하는 부재의 부재력(Q_{UF})은 식 (4.2.12) 또는 식 (4.2.13)에 의해 산정한다.

$$Q_{UF} = Q_G \pm \frac{\chi Q_E}{CJ} \quad (4.2.12)$$

$$Q_{UF} = Q_G \pm \frac{\chi Q_E}{C} \quad (4.2.13)$$

여기서,

- Q_{UF} : 중력하중과 지진하중의 조합에 의한 부재력
- C : 표 4.2.1에서 정의된 수정계수
- J : 하중전달 감소계수
- χ : 성능수준에 따른 보정계수, J의 값으로 DCR의 최소치를 택한 경우 1.0으로 하고 그렇지 않을 경우 붕괴방지의 성능수준에 대해서는 1.0, 인명안전 혹은 거주가능에 대해서는 1.3을 사용

J는 고려하는 부재의 하중이 횡하중 저항시스템 내의 부재로부터 전달될 때 그 횡하중 저항시스템 부재의 항복에 의해 전달되는 하중이 감소되는 효과를 나타낸다. J의 값은 하중전달경로상 부재의 DCR중 최솟값으로 하거나 지진구역 1일 경우 2.0, 지진구역 2일 경우 1.5로 하며, 거주가능 수준의 검토를 위해서는 1.0로 본다. 하중을 전달하는 횡하중 저항시스템 내의 부재가 항복하지 않을 경우 1.0으로 본다.

[해설]

힘지배거동인 부재력은 극한해석(limit analysis)의 개념을 사용하여 직접적으로 구할 수도 있다. 즉 인접부재의 항복강도를 통해 그 부재에 전달될 수 있는 최대힘을 직접 계산하는 것이다. 예를 들어, 가새접합부에 작용하는 부재력은 가새의 축방향 강도를 넘을 수 없으며, 보의 전단력은 중력에 의한 전단력에다 지진하중에 의해 보단부가 휨항복할 때 발생하는 전단력을 더한 값을 넘을 수 없다. 모멘트 골조에서 기둥의 축력은 그 기둥이 지지하고 있는 보들의 최대전단력을 합한 값이다. 만약 힘지배거동이 발생하기 전에 변형지배거동이 발생한다면 파괴는 발생하지 않는다. 그 이유는 변형지배 부재의 항복이 힘지배 부재에 전달될 수 있는 부재력의 크기를 제한하기 때문이다.

힘지배거동인 부재력과 변형은 식 (4.2.12) 및 (4.2.13)과 같이 식 (4.2.3)의 의사지진력에 의한 부재력과 변형을 CJ 혹은 C로 나누어 평가한다. 식에서 설계지진력을 C로 나누는 것은 비탄성 변위를 계산하기 위해 증폭시켰던 설계지진력을 부재력 계산을 위해 다시 저감시키기 위함이다. 식 (4.2.12)는 인접부재의 항복이 선행하는 경우 힘지배 부재에 전달되는 하중의 최대크기가 제한되는 것을 고려하기 위해 J를 사용하여 설계지진력을 저감시키는 것이다.

ASCE 41-17에서는 인명안전 혹은 거주가능의 성능수준평가지 힘지배거동이 붕괴에 대해 충분한 안전율을 가지도록하기 위해 보정계수 χ 를 추가하였다.

4.2.8 부재별 허용기준

(1) 변형지배거동의 만족여부는 식 (4.2.14)에 따라서 판정한다.

$$Q_{CE} \geq \frac{Q_{UD}}{m} \quad (4.2.14)$$

여기서,

Q_{UD} : 중력하중과 지진하중의 조합에 의한 부재력

m : 부재의 예상 연성능력을 고려한 계수 (m 계수)

Q_{CE} : 기대재료강도를 사용하여 산정한 부재의 기대강도

부재의 변형능력을 고려한 m 계수는 구조시스템에 따라 5장, 6장 및 7장에 표로 제시되어 있다. 이들 표는 변형지배거동에 대한 허용기준이다.

(2) 힘지배거동의 만족여부는 식 (4.2.15)에 따라 판정한다.

$$Q_{CN} \geq Q_{UF} \quad (4.2.15)$$

여기서,

Q_{UF} : 중력하중과 지진하중의 조합에 의한 부재력

Q_{CN} : 공칭재료강도를 사용하여 산정한 부재의 공칭강도

4.3 비선형정적절차

4.3.1 일반사항

비선형정적절차에 사용될 구조해석모델은 이 장에 제시된 방법을 따라서 구축한다.

- (1) 구조해석모델에 포함되는 구조요소는 해당부재의 조건에 따라 5장, 6장 및 7장에 제시된 모델링 변수를 사용하여 모델링하고 해석한 후 부재별 허용기준과의 비교를 통해 부재별 성능수준을 판정한다.
- (2) 비선형정적절차에 사용되는 횡하중의 분포는 구조물의 1차모드가 지배적이라는 가정으로부터 구한 밀면전단력의 수직분포를 사용한다. 따라서 비선형정적 푸시오버해석은 기본적으로 고차모드의 영향이 크지 않은 건물에 사용할 수 있다.
- (3) 고차모드의 영향은 응답스펙트럼법을 사용하여 판정한다. 즉, 각 모드의 참여계수의 합이 전체 질량의 90%인 해석모델과 1차모드만을 사용한 해석모델의 해석 결과를 비교하여 각 층의 층전단력이 130% 이상 차이가 날 경우 **고차모드의 영향이 큰 구조물로 판정한다.**
- (4) 고차모드의 영향이 큰 구조물로 판명된 경우, 비선형정적절차를 적용하기 위해서는 선형동적절차에 따른 해석을 추가로 수행하여 내진성능을 판정해야 한다. 이때 사용되는 **선형동적절차에는 규정된 m 계수를 1.33배 증가시킨 값을 사용하며 두 가지 평가결과 중 불리한 쪽으로 내진성능을 판정한다.**

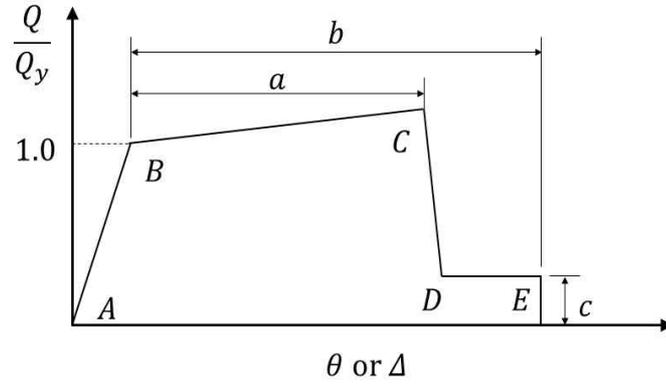
[해설]

비선형정적절차에서는 일반적으로 푸시오버(pushover)해석이라고 알려진 기법, 즉 개별 부재의 재료 비선형 거동특성을 고려하여 시스템의 횡변위를 점차적으로 증가시키면서 부재의 강도와 비선형변형의 관계를 구하는 기법을 사용하여 구조물의 해석을 수행한다.

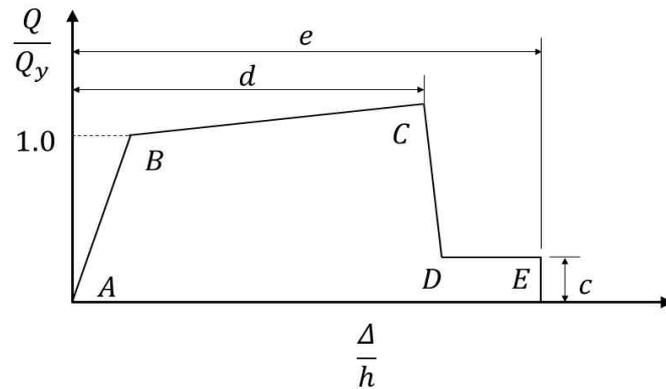
비선형정적 푸시오버해석 결과는 일반적으로 밀면전단력과 최상층 횡변위 또는 유효높이에 대한 횡변위의 비로 나타낸다. 푸시오버 곡선에서 사용되는 횡변위의 기준점(control node)은 최상층의 질량중심점으로 한다.

4.3.2 구조요소의 모델링

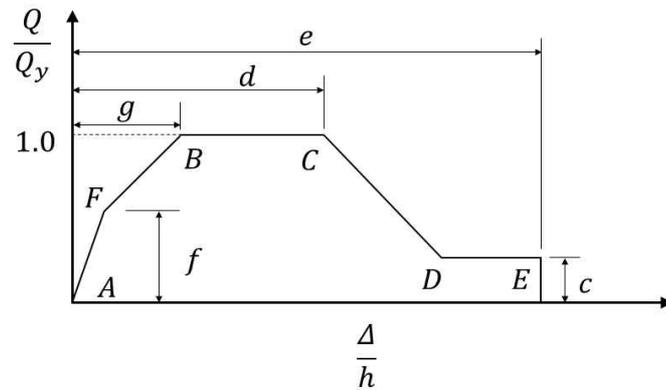
부재의 비선형 힘-변형 관계는 그림 4.3.1과 같이 일반적으로 4개의 직선으로 이루어진 다선형으로 모델링하며, 그림 4.3.1의 (a)와 같이 부재에 따라 변형량의 절대치가 규정된 경우와 그림 4.3.1의 (b), (c)와 같이 각 지점의 위치를 항복변위의 비율로 나타내는 경우가 있다. 부재별 비선형 힘-변형 관계의 정의, 즉 소성힌지의 특성은 각 구조시스템 및 부재의 조건에 따라 5장, 6장 및 7장에 제시된 표를 따른다.



(a) 변형량 기반 다선형



(b) 변형각 기반 다선형-1



(c) 변형각 기반 다선형-2

그림 4.3.1 소성힌지특성모델

4.3.3 횡하중의 수직분포

비선형정적절차에 사용되는 횡하중은 평면적으로 질량의 분포와 비례하며 수직적으로는 1차모드의 형상과 비례하도록 분포시킨다.

4.3.4 하중조합 및 다축가진효과

(1) 비선형해석 절차에서 중력하중 조합에 의한 변형과 부재력 Q_G 은 식 (4.3.1)으로 산정한다.

$$Q_G = Q_D + Q_L + Q_S \quad (4.3.1)$$

여기서,

Q_D : 고정하중에 의한 변형과 부재력

Q_L : 건축구조기준에서 규정된 용도별 활하중의 25%에 의한 변형과 부재력

Q_S : 건축구조기준에서 규정된 적설하중의 20%에 의한 변형과 부재력. 단, 1.5 kN/m^2 이하 일 경우 무시한다.

(2) 다축가진효과는 각각의 방향에 대하여 독립적으로 해석한 뒤 하중효과에 한하여 주방향의 성능점에서의 하중효과에 직교방향 성능점 변위의 30% 변위에서 발생하는 하중 효과를 조합하여 평가함으로써 고려한다. 단, 어떠한 한 방향의 하중이 최대 변형과 부재력을 발생시킬 경우 직교방향의 하중은 고려하지 않아도 된다. 평면 비정형이 있는 경우 반드시 정방향과 부방향으로 가력하는 경우 모두를 고려하여야 한다.

[해설]

완전한 대칭구조물이 아닐 경우 최대효과를 발생시키는 하중의 방향은 일반적으로 파악하기 힘들다. 다축효과는 가력방향이 구조물의 주축과 동일하지 않을 때 발생하는 효과를 고려하기 위한 것으로 비정형 평면일 경우 혹은 여러 지진력저항시스템에 속해 있는 기둥이 있을 경우 고려하여야 하며 100:30의 규칙이 적용된다.

실무적으로 다축가진효과를 고려하기 위해 대상건물의 +X, -X, +Y, -Y 방향의 푸시오버를 각각 수행한 후 각방향 성능점의 100%와 30%에 해당하는 각 조합에 대해 힘지배거동을 조합하고 그 결과를 4.3.6(2)에 따라 평가할 수 있다. 변형지배거동은 제외되므로 기둥의 P-M-M 효과는 고려할 필요가 없으며 주로 기둥의 전단력(예를 들어 X방향으로 가력시 성능점에서의 X방향 전단력과 Y방향으로 가력시 성능점의 30% 수준에서 X방향 전단력의 조합)이 검토대상이 될 것이다.

4.3.5 성능점의 산정

전체 구조물의 성능점은 역량스펙트럼법 또는 변위계수법을 사용하여 산정한 최대요구가속도 및 변위를 나타내는 지점이다.

[해설]

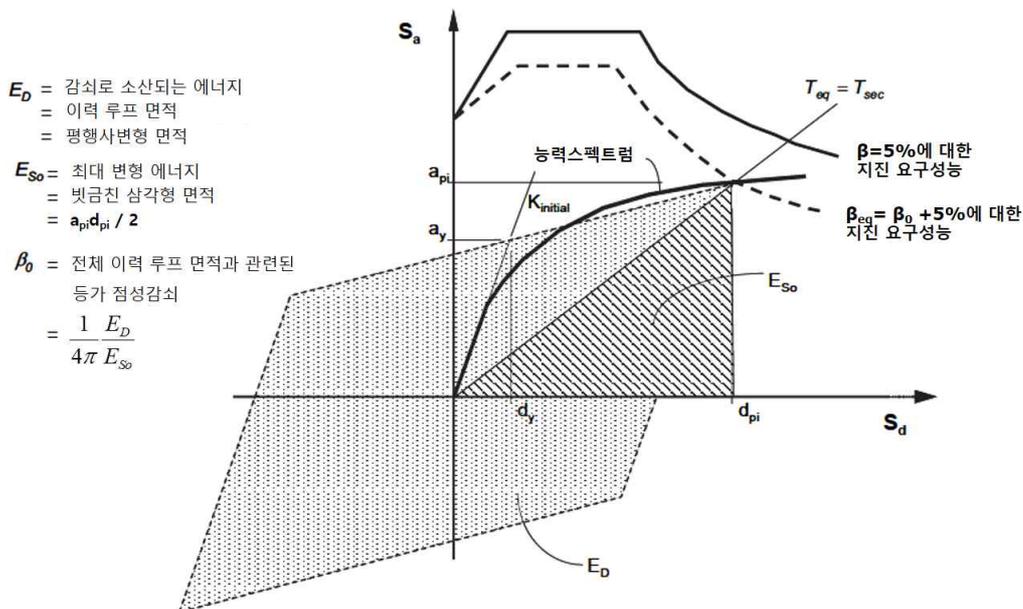
(1) 역량스펙트럼법 : 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM)은 건축물의 횡하중에 대한 저항능력을 비선형 정적해석을 통해 구조물에서의 밀면전단력과 최상층 횡변위(또는 횡변위/유효높이) 곡선의 관계를 산정하고 이를 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 형태의

스펙트럼으로 나타낸다. 그리고 지진의 요구내력을 나타내는 요구스펙트럼도 역시 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위 형태로 나타낸다. 이 두 곡선을 하나의 좌표계로 표현함으로써 요구내력과 구조물의 저항력을 효과적으로 비교할 수 있는 방법이다. 능력스펙트럼과 요구스펙트럼 곡선의 교차점은 주어진 지진에 대한 구조물의 응답을 의미하나, 요구스펙트럼이 탄성응답스펙트럼에 기초한 값이므로 구조물이 비선형 거동을 할 경우 비선형효과에 따른 요구스펙트럼의 감소를 고려하여야 한다. 즉, 역량스펙트럼법은 실제 건물의 비선형거동(최대변위)을 유효주기 T_{eq} 와 등가감쇠비 β_{eq} 를 가진 등가의 단자유도계 선형구조물의 응답으로부터 구하는 것이다(해 그림 4.3.1).

역량스펙트럼법의 절차는 다음과 같다.

- ① 능력스펙트럼의 산정
- ② 요구스펙트럼의 산정
- ③ 성능점의 예측

초기에 사용되는 요구스펙트럼은 5%의 감쇠비를 가지는 선형탄성 설계응답스펙트럼이므로 구조물의 비선형거동의 정도에 따라 유효감쇠비를 구하여 이를 적절히 수정하여야 한다. 따라서 2와 3에서 여러 번의 반복계산을 통해 성능점을 구한다. 성능점의 예측 및 반복과정은 ATC-40의 방법 혹은 이 방법의 문제점을 개선 제안한 FEMA 440의 방법을 사용할 수 있다.



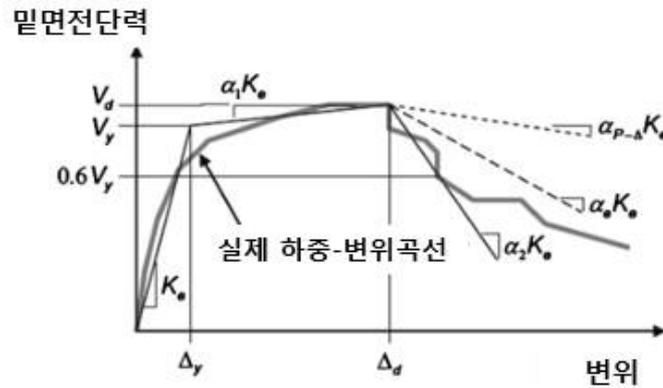
해그림 4.3.1 역량스펙트럼법

(2) 변위계수법 : 변위계수법에서는 지진동을 받는 단자유도모델의 응답에 관한 기존 자료들의 통계치에 근거한 경험적인 수식을 사용하여 지진하중을 받는 구조물의 최상층의 최대 변위를 예측한다. 따라서 변위계수법에서는 비선형정적해석 후에 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위 관계를 스펙트럼 형식으로 변화시키지 않고 비탄성변위를 반복 계산 없이 직접적으로 구할 수

있다는 것이 역량스펙트럼법과의 차이점이다. 변위계수법에서 산정되는 목표변위는 역량스펙트럼법에서의 성능점과 같은 의미를 가진다. 목표변위를 산정하는 순서는 다음과 같다.

① 역량곡선의 이선형화

비선형정적해석에 의해서 산정된 밀면전단력과 최상층 변위 관계를 2개 직선으로 이루어진 변형-응력관계 형태로 이상화시킨다. 탄성구간 이후의 강성(K_s), 유효강성(K_e), 초기강성(K_i)을 산정한 후에 이상화된 2개 직선으로 이루어진 변형-응력관계에서 구조물의 항복변위를 평가한다. K_e 와 K_s 의 교차점이 항복강도(V_y)로 정의되며 항복강도의 60% 지점에서 유효강성(K_e)이 결정된다. 이 과정은 다소의 시행착오를 거쳐야 한다.



해그림 4.3.2 유효강성의 결정

② 유효주기의 산정

유효주기는 탄성해석모델에서 고유치해석으로 구한 기본주기와 역량곡선의 이선형화를 통해 구한 유효강성으로부터 다음과 같이 산정한다.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (\text{해 4.3.1})$$

여기서,

T_i : 탄성해석으로 구한 기본진동주기

K_i : 구조시스템별로 4장과 5장에 기술된 유효강성 및 3장의 모델링 절차에 따라 모델링된 구조물의 탄성 횡강성

K_e : 이선형화를 통해 결정된 유효강성(해그림 4.3.2)

③ 목표변위의 산정

목표변위는 FEMA 440 혹은 ASCE 41 등의 참고문헌에 제시된 수식을 통해 산정할 수 있다. 해식 4.3.2는 FEMA 440에 제시된 수식으로 $C_0 \sim C_3$ 의 여러 계수들은 단자유도와 다자유도시스템에서 최대 변위의 차이, 탄성변위와 비탄성변위의 차이, 강도 저하 및 강성 저하의 효과 등을 고려한 계수이다.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (\text{해 4.3.2})$$

4.3.6 부재별 허용기준

- (1) 변형지배거동의 만족여부는 성능점에서 부재의 비선형변형량과 5장, 6장 및 7장에 표로 제시된 허용기준과의 비교를 통해 판정한다.
- (2) 힘지배거동의 만족여부는 식 (4.3.2)에 따라 판정한다.

$$Q_{CN} \geq \gamma\chi(Q_{UF} - Q_G) + Q_G \quad (4.3.2)$$

여기서,

Q_{UF} : 중력하중과 지진하중의 조합에 의한 성능점 또는 목표변위에서의 힘지배거동의 부재력

Q_G : 중력하중조합에 의한 힘지배거동의 부재력

Q_{CN} : 공칭재료강도를 사용하여 산정한 부재의 공칭강도

χ : 성능수준에 따른 보정계수, 붕괴방지의 성능수준에 대해서는 1.0, 인명안전 혹은 거주가능에 대해서는 1.3을 사용

γ : 하중계수. 수직부재, 전이보 등과 같이 파괴시 여러 경간 혹은 층의 붕괴를 유발하는 부재일 경우 1.3, 단일 경간의 붕괴를 유발하는 부재이거나 타 부재의 붕괴를 유발하지 않는 부재일 경우 1.0을 사용

단, χ 와 γ 의 곱은 1.5를 초과할 필요없다. 또한 전단벽의 전단력을 제외하고, 기대강도가 적용된 구조물 소성해석에 의한 부재력과 중력하중에 의한 부재력의 조합을 통해 산정된 최대 부재력이 부재의 공칭강도보다 낮을 경우 보정계수 및 하중계수를 적용한 요구량의 할증은 적용하지 않아도 된다.

4.4 비선형동적절차

4.4.1 일반사항

- (1) 비선형동적절차는 직접적분법에 의한 비선형 시간이력해석 결과로부터 내진성능을 판정한다. 비선형 시간이력해석의 결과는 지진과 종류에 따라 큰 차이를 보이므로 3쌍 또는 7쌍 이상의 지진파에 대한 해석이 필요하다.
- (2) 탄성해석이나 정적해석 시와 달리 이력감쇠의 효과가 직접적으로 나타나므로 해석모델의 감쇠비는 선형점성감쇠만을 사용한다.
- (3) 비선형 모델링 변수와 성능수준의 해당 값은 비선형정적절차와 동일한 값을 사용할 수 있다.

[해설]

비선형 모델링 주요 변수와 성능수준의 판정을 위해 비선형정적절차의 값을 사용할 수 있으나, 하중의 재하 시와 제거 시, 재가력 시 강도 및 강성의 변화를 고려하는 부재의 이력거동특성을 사용하여야 한다. 비선형 시간이력해석 시 이력특성을 모델링하는 방법은 크게 1) 부재모델에 반복하중 작용횟수, 비선형거동의 크기 등에 따라 성능저하(deterioration)를 직접적으로 고려하는 방법(Ibarra-Krawinkler모델, Takeda모델 등), 2) 성능저하를 고려하지 않으나 적절한

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령

하중프로토콜을 사용한 반복하중 가력실험을 통해 구한 포락선을 사용하여 이력거동을 모델링하는 방법, 3) 단조가력을 통해 구한 포락곡선에 변형단계별로 적절한 계수를 곱해 수정된 곡선을 사용하여 모델링하는 방법, 4) 이력모델에서 강도저하를 고려하지 않고 해석하는 방법의 4가지가 있다.

제시된 방법 중, 방법 1)이 실제 거동을 보다 정확히 해석할 수 있으나 해석모형 및 절차가 복잡하다. 방법 2)와 3)은 유사한 방법으로 반복가력에 따른 성능저하가 발생한 이후 곡선을 사용하므로 성능저하는 간접적으로 고려되는 방법이다. 방법 4)의 경우, 성능저하는 고려되지 않으며, 설정된 변형의 한계를 넘어설 경우 해석 결과에 신뢰성이 없다. 이와 같이 이력모델의 수준에 따라 해석결과의 신뢰성에도 차이가 발생하므로 수준에 맞춘 허용기준의 조정이 필요하다.

4.4.2 하중조합 및 다축가진효과

- (1) 비선형해석 절차를 사용하는 경우, 중력하중은 4.3.4와 동일한 방법으로 결정한다.
- (2) 구조물에 비틀림 비정형성이 있을 경우 반드시 다축가진효과를 고려하여 3차원 해석을 수행하여야 한다.
- (3) 지반운동기록은 설계스펙트럼에 부합되는 3쌍 이상 사용하고, 부재력과 변형량은 각 해석결과의 최대응답 중 가장 큰 값을 사용하여 평가한다.
- (4) 각 지반운동기록 세트는 직교하는 두 방향의 수평성분으로 구성되며, 대상 구조물의 평면상 두 직교축에 적용 시 상호 교대하여 2회 해석한다.
- (5) 지반운동기록을 7쌍 이상 사용하는 경우, 부재력과 변형량은 각 해석결과 최대응답의 평균값을 사용하여 평가한다.

[해설]

ASCE 7-16, ASCE 41-13에서는 활성단층이 가까운 지역에서는 단층에 대한 계층지반운동의 방향성을 고려하도록 하고 있으나, 아직 국내에서는 지반운동기록을 선정하기에 충분한 정도로 일반화된 활성단층 자료가 제시되어 있지 않은 실정으므로 이 규정의 적용은 무리가 있다.

사용하는 지반운동기록의 데이터를 7개 이상 사용하면 평균값으로 설계하도록 규정하고 있으나, 지진파에 따른 응답의 변동성을 고려하기에는 충분하지 않아서 ASCE 41-13에서는 평균값으로 설계하기 위한 지진파의 최소수량을 10개로 규정하였다. 그러나 이 요령에서는 건축구조기준과의 일관성을 유지하기 위해 7개 이상 지진파의 평균값을 사용하는 것으로 규정하였다.

4.4.3 평가용 지진파

3차원해석을 수행하는 경우에 각각의 지반운동은 평면상에서 서로 직교하는 2성분의 쌍으로 구성된다. 개별 지반운동의 성분별로 5% 감쇠비의 응답스펙트럼을 작성하고, 주기별로 제곱합제곱근(SRSS)을 취하여 제곱합제곱근 스펙트럼을 산정하며, 이 제곱합제곱근 스펙트럼들의 평균값이 설계대상 구조물 기본진동주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당되는 주기에 대해서 지반운동기록의 조성 및 생성방법에 따라 다음의 최소응답스펙트럼 가속도 이상 되도록 해야 한다. 지반운동의 크기를 조정하는 경우에는 직교하는 2성분에 대해서 동일한 배율을 적용하여야 한다.

- (1) 해당 구조물이 위치한 지반조건에 해당하는 지진관측소에서 계측된 지반운동기록의 진폭을 조정하여 사용하는 경우에 최소응답스펙트럼 가속도는 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배의 90%로 정한다.

- (2) 해당 구조물이 위치한 지반조건에 해당하는 지진관측소에서 계측된 지반운동기록의 주파수 성분을 조정하여 설계응답스펙트럼에 맞게 생성한 경우에 최소응답스펙트럼 가속도는 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배의 110%로 정한다.
- (3) 해당 구조물이 위치한 지반의 조건이 고려된 부지응답해석을 통해 지진동을 산정할 경우 최소응답스펙트럼 가속도는 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배의 80%로 정한다. 다만, 부지응답해석으로 구해진 지진파의 평균스펙트럼의 최댓값이 설계대상 구조물 기본진동주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당되는 구간 밖에 위치할 경우 최소응답스펙트럼 가속도는 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배의 90%로 정한다. 부지응답해석을 위한 입력 지진파는 표 2.2.3에서 정의하는 S_1 지반조건에서 계측된 지반운동기록을 사용하되 그 제공합계급 스펙트럼들의 평균값은 S_1 지반조건에서 계측된 지반운동기록을 사용하되 그 제공합계급 스펙트럼들의 평균값은 S_1 지반의 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배와 비교하여 가속도 일정구간에서는 80% 이상, 그 외 구간에서는 100% 이상이어야 한다.
- (4) 2차원 해석을 수행하는 경우에는 개별 지반운동에 대해 작성된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균값이 해석을 수행하는 방향의 구조물 고유주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당되는 주기에 대해서 지반운동기록의 조성 및 생성방법에 따라 위 (1)~(3)에 부합하도록 조정한다. 단, 평가지진 가속도응답스펙트럼의 1.3배 대신에 1.0배를 적용한다.

[해설]

지반운동기록은 지진의 규모, 진원거리, 단층 메커니즘, 지반조건 등의 영향을 받고, 같은 지진에서 측정된 지진기록일지라도 관측소에 따라서 크기와 진동수 성분, 지속시간에 차이가 있다. 국내 지진재해도의 근간이 된 내진기준연구(III)를 참조 시 규모 5.0~7.0 사이의 판내부 지진 기록 중 진원까지의 거리가 5 km와 60 km 사이의 원거리 지반운동기록 가운데 관측소의 지반조건이 부합하는 자유장(free-field) 기록을 선택할 것을 권장한다. 또한 동일한 지진에서 계측된 (서로 다른 관측소의) 지반운동기록은 2개 데이터를 초과하여 선택하지 않도록 한다. 그러나 최종적으로 계측파의 선정은 관련전문가와 협의의를 통해 결정하는 것이 바람직하다.

4.4.4 해석모델

- (1) 해석모델은 구조물의 질량과 강성의 공간적 분포를 표현할 수 있어야 한다.
- (2) 서로 독립적이고 직각으로 배치된 횡력 저항시스템을 갖는 정형구조물에 있어서는 독립적인 2차원 모델을 사용할 수 있다. 반면에 서로 독립적이 아닌 저항시스템을 갖는 비정형구조물의 경우에는 각 층별로 평면상의 2직각 방향에 대한 변위와 수직축에 대한 회전을 포함하는 최소한 3개의 자유도를 갖는 3차원 모델을 사용하여야 한다.
- (3) 격막이 횡하중 저항시스템의 수직부재에 비하여 유연한 경우, 해석모델은 격막의 유연성과 동적응답에 미치는 영향을 고려할 수 있는 추가적인 자유도를 포함시켜야 한다.
- (4) 철근콘크리트조와 조적조인 경우에는 균열단면의 영향을 고려하여야 하고, 철골모멘트골조의 변위 산정 시 패널존의 영향을 고려하여야 한다.
- (5) $P-\Delta$ 효과가 큰 경우에는 반드시 이를 고려할 수 있는 모델을 사용하거나 해석 결과에 $P-\Delta$ 효과를 반영하여야 한다.

4.4.5 감쇠비

비선형동적절차에서 사용되는 선형점성감쇠비는 별도의 해석과 실험을 통해 입증되지 않는 경우 3%를 초과하지 않아야 하며, 외장재가 없는 경우에는 1%를 초과할 수 없다. 비선형동적절차에서 구조물의 감쇠는 레일리 감쇠(Rayleigh damping) 혹은 다른 적절한 방법을 사용하여 모델링할 수 있다. 질량과 강성에 비례하는 감쇠비는 다음의 규정을 만족하여야 한다.

- (1) 각 방향 병진모드의 1차모드의 경우, 비선형거동에 의해 예상되는 장주기화($1.5 T_1 \sim 2.0 T_1$)가 있을 경우에도 규정된 선형점성감쇠비를 초과할 수 없다.
- (2) 90% 이상의 질량참여율을 얻기 위해 고려되어야 하는 모드의 선형점성감쇠비는 질량참여율에 기초한 가중평균이 규정된 선형점성감쇠비를 초과할 수 없다.
- (3) 질량참여율의 합이 90%가 되기 위해 사용되는 모드 중 가장 고차모드의 감쇠비는 해석이나 실험에 의해 입증되지 않는 한 1차 병진모드 감쇠비의 8배를 초과하지 않아야 한다.

4.4.6 부재력과 변형량의 산정

4.4.2 (5)에 따른 부재력과 변형량의 평균값 및 최대값의 산정방법은 아래와 같다.

- (1) 방향에 영향을 받지 않는 응답의 경우, 그 평균값은 각 지진파를 사용한 해석 결과에서 절대값의 최대치를 구하고 이들 값의 산술평균으로 한다. 응답의 최대치는 각 지진파를 사용한 해석 결과에서 절대값의 최대치중 최대값으로 한다.
- (2) 방향에 영향을 받는 응답의 경우, 그 평균값은 각 지진파를 사용한 해석 결과에서 최대값과 최소값을 모두 구한 후 각 방향과 축별로 최대값의 평균, 최소값의 평균을 모두 구하여야 한다. 각 구조부재 응답의 최대치는 각 지진파를 사용한 해석 결과에서 최대값과 최소값을 모두 구한 후 각 방향과 축별로 이들 중의 최대값, 최소값을 구한다.

[해설]

방향에 영향을 받는 응답은 정방향과 부방향의 허용기준이 다른 경우이다. 그 예로는 기둥에 작용하는 축압축력과 축인장력, 비대칭으로 배근된 보의 모멘트강도와 소성변형각, 이형전단벽체의 소성변형각, 파운데이션 검토시 건물의 횡변위 등을 들 수 있다.

이에 반해 보의 전단력, 기둥의 각 방향별 전단력, 대칭단면인 기둥과 전단벽의 소성변형각, 비구조요소 검토용 층간변위 등은 방향에 영향을 받지 않는 응답으로 볼 수 있다.

4.4.7 부재별 허용기준

비선형동적절차에서 부재별 허용기준은 비선형정적절차와 동일하다.

4.5 구조실험을 통한 모델링변수 및 허용기준의 선정 절차

강성, 강도, m 계수, 변형능력 등 부재특성에 대한 정보가 없는 부재의 경우 적절한 구조실험을 통해 선형절차 및 비선형절차에 사용될 모델링 주요 변수를 선정하여 성능수준을 판정할 수 있다. 이 절은 이를 위한 구조실험계획, 데이터의 정리, 변형지배 및 힘지배거동의 판정, 그리고 모델링 주요 변수의 선정과 성능수준의 판정절차를 규정한다.

4.5.1 구조실험계획

- (1) 실험체는 평가대상 건물 내 해당 부재와 동일한 단면상세, 지지조건, 및 하중조건을 모사하여야 한다. 가능한 동일한 조건에서 제작한 다수의 실험체는 통계학적인 불확실성으로 실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 동일한 조건에 대한 최소한 3개 실험체를 확보하여야 한다.
- (2) 가력하중은 평가지진력으로 작용하는 응력으로 실험체에 예상되는 최대 변위까지 단계적으로 변위를 증가시키며, 반복하중을 통해 실험체가 횡하중과 중력하중에 의해 완전한 파괴상태에 이를 때까지 수행한다.
- (3) 하중프로토콜은 예상 평가지진파의 특성 및 구조시스템의 대상 부재의 파괴모드에 적합하게 선정하여야 한다.
- (4) 하중변위 관계를 파악할 수 있는 충분한 하중단계를 설정하여야 하며, 실험체의 파괴로 발생하는 에너지 소산량은 지진하중으로 발생하는 실제 부재의 예상하는 에너지 소산량과 비교하여 모델링 주요 변수를 선정하여야 한다.

4.5.2 데이터 정리 및 보고

실험보고서의 데이터는 다음 사항을 포함하여야 한다.

- (1) 실험체 재료 및 기하학적인 특성
- (2) 실험체 세팅 : 지지조건 및 가력장비의 배치, 실험장소 및 시간, 계측장비, 실험수행자의 인적사항, 실험실시 전 실험체 사진 등
- (3) 하중프로토콜 : 하중증분, 하중재하속도, 각 하중단계별 재하시간 등
- (4) 실험상황에 대한 주요 현상 및 실험 단계별 사진 : 탄성구간의 유효강성, 소성구간, 육안으로 확인 가능한 손상 및 발생시점, 횡하중 저항능력의 상실시점, 수직하중 저항능력의 상실시점, 하중-변위 그래프, 특정한 손상단계 시(균열발생이나 항복발생 시점) 실험체 상황, 강성의 변화, 파괴모드의 변화 등에 대한 기술

4.5.3 모델링 주요 변수와 허용기준의 선정

실험 결과로부터 모델링 주요 변수의 선정과 성능수준의 판정절차는 다음과 같다.

- (1) 하중-변위 관계의 이상화
 - ① 반복하중에 따른 하중-변위 곡선의 작성
 - ② 하중-변위 곡선에서 그림 4.5.1과 같이 각 변위단계의 첫 번째 가력시 최대점을 연결한 포락곡선을 작성

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령

- ③ 포락곡선으로부터 그림 4.5.2와 같이 탄성, 소성, 잔류강도를 나타내는 몇 개의 직선으로 이상화된 다중선형 그래프를 작성

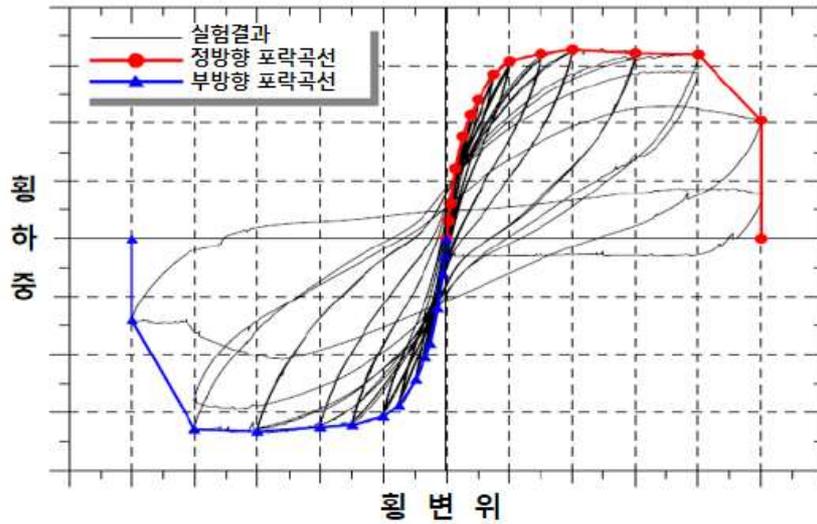


그림 4.5.1 반복하중에 의한 하중-변위곡선으로부터 포락곡선 작성

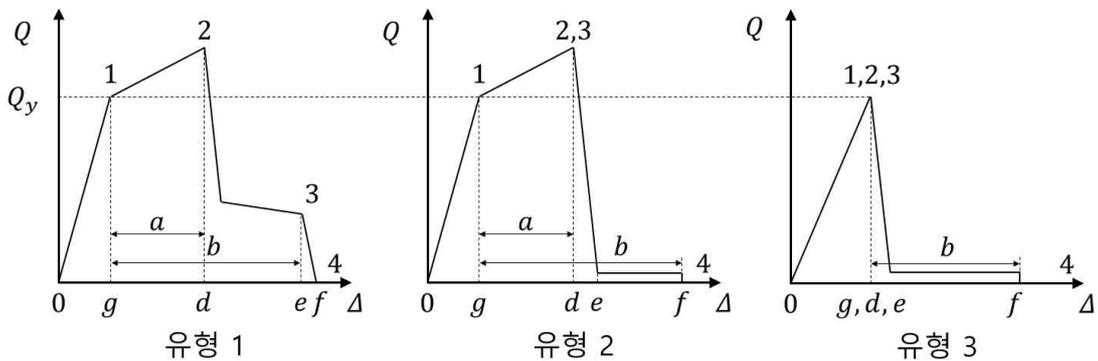


그림 4.5.2 다중선형그래프의 유형

- (2) 각 실험체의 결과로부터 구한 다중선형 그래프로부터 평균 다중선형 그래프를 작성한다. 이 때, 평균 다중선형 그래프의 강성은 각 실험체의 다중선형 그래프 강성의 평균으로 하고, 평균 다중선형 그래프의 각 구간의 시작과 끝점은 값은 개별 다중선형 그래프의 각 구간의 시작과 끝점의 평균값으로 한다.
- (3) 비선형절차에서는 구해진 평균 다중선형 그래프를 그대로 사용하며, 선형절차에 사용될 강성값은 평균 다중선형 그래프의 첫 구간의 강성값을 사용한다.
- (4) 구해진 평균 다중선형 그래프의 형태로부터 실험체의 거동을 변형지배 혹은 힘지배로 판정한다. 다중선형화곡선의 형태는 그림 4.5.2의 유형 1, 유형 2, 혹은 유형 3 중의 하나로 분류할 수 있으며 판정절차는 다음과 같다.
- ① 유형 1은 탄성영역(점 0과 점 1까지), 소성영역(점 1에서 점 3사이), 횡하중 저항능력 상실지점(점 3), 중력하중 저항능력 상실지점(점 4)로 구성되는 연성거동을 나타낸다. 소성영역은 양의

값 혹은 음의 값을 가지는 항복 후 강성(점 1과 2의 기울기) 구간과 최대강도 이후의 잔류강도를 나타내는 강도저하 구간(점 2에서 3까지)으로 구성된다. 1차부재의 경우 $d \geq 2g$ 일 경우 변형지배거동으로 판정하며, 이를 만족하지 못하면 힘지배거동으로 판정한다. 2차부재의 경우 d/g 의 비율과 상관없이 모두 변형지배거동으로 판정한다.

- ② 유형 2는 탄성영역(점 0과 점 1까지)과 소성영역(점 1에서 점 3사이)으로 구성되는 연성거동을 나타낸다. 소성영역은 양의 값 혹은 음의 값을 가지는 항복 후 강성(점 1과 3의 기울기) 구간으로 점 3에서 대부분의 횡하중 저항능력의 잔류강도가 손실되는 경우이다. 중력하중 저항능력의 손실은 점 4에서 발생한다.

1차부재의 경우 소성영역에서 $e \geq 2g$ 를 만족할 경우 변형지배거동으로 판정하며, 이를 만족하지 못하는 경우 힘지배거동으로 판정한다. 2차부재의 경우 $f \geq 2g$ 일 경우 변형지배거동으로 판정하며, 이를 만족하지 못하는 경우 힘지배거동으로 판정한다.

- ③ 유형 3은 취성적인 거동을 나타낸다. 이 경우, 탄성구간(점 0에서 점 1까지) 이후 횡하중 저항능력이 소실되는 점 3이 바로 나타나며, 이후 중력하중 저항능력이 소실되는 점 4가 나타난다. 이러한 거동을 보이는 1차부재는 힘지배거동으로 간주한다. 2차부재의 경우, $f \geq 2g$ 를 만족할 경우 변형지배거동으로 이를 만족하지 못하는 경우 힘지배거동으로 판정한다.

(5) 힘지배거동일 경우의 강도 Q_{CL} 은 일련의 실험체의 강도값의 평균에서 표준편차를 뺀 값으로 한다.

(6) 비선형절차에 사용되는 변형지배거동의 각 성능수준별 허용기준은 그림 4.5.3의 각 지점에 해당하는 변형값으로부터 다음과 같이 구한다.

- ① 거주가능 : 실험체에서 잔류변형이 발생하는 지점에 해당하는 변형, 그러나 인명안전에 해당하는 변형값에 0.67을 곱한 값을 초과할 수 없다.
- ② 인명안전 : 점 E의 변형값에 0.75를 곱한 값
- ③ 붕괴방지 : 점 E의 변형값

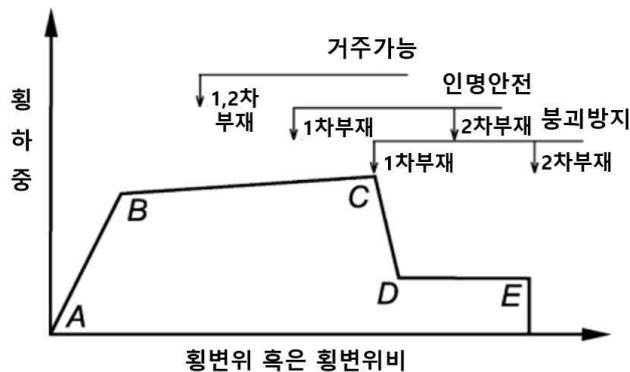


그림 4.5.3 성능수준별 허용기준과 m 계수의 결정

(7) 선형절차에 사용되는 변형지배거동의 각 성능수준별 m 계수는 다음의 절차를 통해 결정한다.

- ① 각 성능수준별 변형값을 다음과 같이 산정한다.
 - 거주가능 : 실험체에서 잔류변형이 발생하는 지점에 해당하는 변형, 그러나 인명안전에 해당하는 변형값에 0.67을 곱한 값을 초과할 수 없다.

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령

- 1차부재의 인명안전 : 점 C의 변형값에 0.75를 곱한 값
 - 1차부재의 붕괴방지 : 점 C의 변형값. 단, 점 E의 변형값에 0.75를 곱한 값을 초과할 수 없다.
 - 2차부재의 인명안전 : 점 E의 변형값에 0.75를 곱한 값
 - 2차부재의 붕괴방지 : 점 E의 변형값
- ② ①에서 구한 변형값을 항복변위(점 B의 변위)에 대한 비율로 나타낸다.
- ③ 각 성능수준의 m 계수는 (7)-②에서 구한 비율에 0.75를 곱한 값으로 한다.
- (8) 비선형동적절차를 사용하는 경우, 부재거동을 모사하기 위해서는 위의 주요 변수 이외에도 재가력 시 거동, 강성과 강도의 저하, 펀칭효과를 고려한 변수가 추가적으로 필요하다. 해석에 사용될 부재의 수학적 모델은 예상되는 변형한계 내의 실험 결과와 유사한 이력곡선과 에너지 소산능력을 가져야 한다. 이 때, 낮은 변형한계와 높은 변형한계에 대한 거동을 구분하여 해석하며 안전측의 결과를 도출하여야 한다.

4.6 성능수준의 판정

전체 구조시스템의 해당 성능목표 만족여부는 다음의 규정을 통해 판정한다.

- (1) 대상구조물이 성능목표에 해당하는 허용층간변형각(표 4.6.1) 및 중력하중저항능력(표 4.6.2) 모두를 만족할 경우 그 성능목표를 만족하는 것으로 본다.
- (2) 내진설계된 구조물의 성능수준별 허용 층간변형각은 표 4.6.1과 같으며 대상건물의 방향별, 층별로 만족여부를 검토한다.

표 4.6.1 내진설계된 구조물의 성능수준별 허용 층간변형각(%)

| 구조시스템 | 내진설계 된 건물 | | |
|--------------------|-----------|------|------|
| | 거주가능 | 인명안전 | 붕괴방지 |
| RC 모멘트골조 | 0.7 | 2 | 3 |
| 조적체움벽이 있는 RC 모멘트골조 | 0.5 | 1 | 1.5 |
| 전단지배형 RC 전단벽 시스템 | 0.25 | 0.5 | 1 |
| 휨지배형 RC 전단벽 시스템 | 0.5 | 1 | 2 |
| 무보강 조적 전단벽 시스템 | 0.3 | 0.6 | 1 |
| 철골골조 | 0.7 | 2.5 | 4 |
| 가새가 있는 철골골조 | 0.5 | 1.5 | 2 |

- (3) 표 4.6.1에서 전단벽시스템 중 휨지배형은 전체높이/길이비(형상비)가 3.0을 초과하는 세장한 벽체, 전단지배형은 형상비가 1.5 미만인 낮은 벽체에 해당하며, 세장한 벽체와 짧은 벽체 사이의 형상비를 가지는 경우 선형보간한다.
- (4) 내진설계되지 않은 건물의 허용층간변형각은 표 4.6.1에 규정된 값들의 70%로 제한한다. 내진설계되지 않은 건물의 경우 내진보강이 이루어졌다 하더라도 변형능력이 제한적인 부재들이 다수 남아있게 되므로 내진보강 이전과 이후의 허용층간변형각 중 불리한 값을 적용한다.

- (5) 대상건축물의 주요 방향별로 사용된 구조시스템이 다른 경우 허용층간변형각은 밀면전단력의 기여도를 통해 표 4.6.1의 값을 선형보간하여 사용한다.
- (6) 중력하중저항능력에 따른 성능수준별 만족기준은 표 4.6.2과 같다. 표 4.6.2에 제시된 해당 성능수준별 중력하중저항능력을 만족할 경우 그 성능수준을 만족하는 것으로 본다. 이때, 해당 성능수준별 중력하중저항능력의 만족여부는 각 방향별 층별로 수행하며, 각 층의 부재는 수직부재와 수평부재로 나누어 평가한다. 부재별 연직하중 분담능력은 수직부재의 경우 축하중, 수평부재의 경우 양단 전단력의 크기를 기준으로 한다. 부재별 연직하중 분담능력 산정시 하중조합은 식 (4.3.1)을 사용한다.

표 4.6.2 성능수준별 중력하중저항능력

| 성능수준 | 판정기준 |
|------|---|
| 거주가능 | 모든 부재가 붕괴방지를 만족하며, 거주가능을 만족하는 부재가 부담하는 중력하중의 합이 전체중력하중의 80% 이상, 혹은 건물의 내진성능목표가 기능수행인 경우 모든 부재가 붕괴방지를 만족하며 거주가능을 만족하지 못하는 부재의 손상이 전체건물의 기능수행을 방해하지 않음을 확인하는 경우 |
| 인명안전 | 모든 부재가 붕괴방지를 만족하며, 인명안전과 거주가능을 만족하는 부재가 부담하는 중력하중의 합이 전체중력하중의 80% 이상 |
| 붕괴방지 | 모든 부재가 붕괴방지를 만족 |

- (7) 변형지배형 거동에 의한 부재의 해당 성능수준의 만족여부는 5장, 6장 및 7장에 규정된 해당 성능수준별 비탄성변형의 허용한계값으로부터 판정한다. 변형지배형 거동은 연성거동을 통해 큰 변형능력을 발휘할 수 있는 휨항복, 인장항복거동을 가리킨다.
- (8) 힘지배형거동의 경우 선형절차에서는 식 (4.2.15)을, 비선형절차에서는 식 (4.3.2)를 만족할 경우 해당 요구성능수준을 만족하는 것으로 본다. 힘지배형 거동은 취성적 파괴를 나타내는 압축거동, 전단거동, 연결부의 파괴 등을 가리킨다.
- (9) 조적채움벽을 가진 모멘트골조에서 조적채움벽이 면내로 파괴되거나 혹은 면외로 전도될 경우 전체 구조물은 거주가능과 인명안전의 성능수준을 만족하지 못하는 것으로 판정한다. 그러나 목표 성능수준이 붕괴방지일 경우, 조적채움벽의 파괴는 전체 건물의 성능수준 판정에 고려하지 않는다.
- (10) 비선형정적해석에서 단일 스텝에서 최대 밀면전단력의 20 퍼센트 이상의 급격한 강도저하가 발생한 이후의 해석결과는 유효하지 않은 것으로 판정한다. 성능점이 유효한 변위를 초과하여 형성되는 경우에 붕괴한 것으로 판정한다.
- (11) 선형절차와 비선형절차에 의한 내진성능수준의 차이가 2단계 이상 나타날 때는 이에 대한 적절한 근거를 제시해야한다.

[해설]

(1) 표 2.1.1에 나타난 바와 같이 건축물 전체의 기능수행은 구조요소의 거주가능, 비구조요소의 기능수행의 조합으로 이루어져 있다. 구조요소의 거주가능을 확인하는 주된 이유는 전체건

기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령

축물의 기능수행의 확인으로 구조요소의 변형에 의해 비구조요소의 기능손상 가능성을 우려한 것이다. 따라서 관련된 비구조요소의 검토를 통해 해당 지진시 비구조요소의 기능유지에 문제가 없음을 직접적으로 확인할 경우 전체건축물은 기능수행으로 판정할 수 있다.

(5) 예를 들어 모멘트골조와 벽구조의 혼합구조일 경우 구조해석을 통하여 평가된 벽구조의 요구 밀면전단력이 총 밀면전단력의 40%라면 벽구조의 밀면전단력 기여도는 40%이고, 모멘트골조의 밀면전단력 기여도는 60%로 결정된다. 비선형정적해석의 경우, 밀면전단력 기여도는 성능점 혹은 목표변위에서의 해석결과로부터 산정한다.

(6) 성능목표별로 지진하중의 크기 다르므로 표 4.6.2는 검토대상 성능수준의 만족여부만을 판정하기 위해 사용된다. 즉, 거주가능에 해당하는 지진하중에 대한 해석결과를 통해 인명안전이나 붕괴방지의 성능수준을 판정할 수 없다.

(9) 역량곡선에서 급격한 강도저하가 발생한 경우, 해석 알고리즘에 따라서 차이가 있을 수 있으나 구조물의 취성과파괴로 인하여 반복해석 과정의 수렴에 문제가 발생했을 가능성이 크며, 따라서 그 이후의 성능곡선은 신뢰하기 어렵다. FEMA 440, ASCE 41 등에서는 최대강도 도달 후 급격하게 강도가 저하되는 영역에서는 비선형 정적해석에 의한 성능점 산정이 동적 불안정성을 고려할 수 없기 때문에 비선형 동적해석을 수행할 필요가 있음을 지적하고 있다.