

KBC 2016에 따른 감쇠시스템 적용 구조물의 내진설계

Seismic Design of Building Structures with Damping Systems in accordance with KBC 2016

1. 서론

감쇠시스템을 적용한 구조물의 내진설계 규정이 2016년에 건축구조기준(이하 KBC 2016)에 도입되었다. 해당 규정은 감쇠장치의 진동저감 성능뿐만 아니라 주변 부재 및 지진력 저항 시스템의 구조설계를 중요한 비중으로 다루고 있다.

KBC 2016에서는 비선형시간이력해석을 통해 감쇠장치의 거동 및 성능을 직접적으로 파악하도록 요구하고 있다. 비선형시간이력해석은 감쇠장치나 구조물의 비선형 거동을 상세하게 파악할 수 있다는 장점이 있으나 모델링의 난이도가 높고, 컴퓨터 기술의 발전에도 불구하고 해석시간이 많이 소요되며, 해석결과를 구조설계에 반영하기도 쉽지 않다. 결과적으로 비선형시간이력해석을 이용하게 되면 모델 수정과 해석을 반복하는 시행착오법에 의해 설계를 수행하기가 어렵게 된다.

따라서 본고에서는 감쇠장치의 초기설계단계에서 지진응답저감 성능을 적절히 예측하여 설계파라미터를 결정할 수 있는 설계절차를 제시하고 설계예제를 통해 검증하였다.

2. KBC2016 감쇠시스템 적용 구조물 내진설계

2.1 감쇠시스템

감쇠시스템은 구조물의 지진하중을 저감하는 것을 목적으로 하며 감쇠장치로부터 구조물의 기초와 지진력저항시스템에 하중을 전달하는 구조요소를 모두 포함하는 구조체를 말한다. 감쇠장치는 장치 양 단부의 상대적 움직임에 따라 에너지를 소산시키는 구조요소이며 감쇠장치를 설치하기 위해 필요한 핀, 볼트, 거싯 플레이트, 가새 등의 부재들을 모두 포함한다. 감쇠장치는 지진력저항시스템에 별개의 구조체로 설치될 수도 있으며 지진력저항시스템과 중복되게 설치될 수 있다. 그림 1은 감쇠장치가 연결된 모습을 나타낸다.

감쇠시스템을 구성하는 구성요소들은 감쇠장치에 유발되는 힘을 포함한 설계 하중에 대하여 비탄성변형이 발생하지 않도록 탄성상태를 유지할 수 있게 설계하여 감쇠장치가 정상적인 작동을 할 수 있도록 하여야 한다. 유발되는 감쇠장치의 힘은 강도저감계수나 반응수정계수로 보정하지 않고 감쇠장치 특성의 변동폭을 고려한 1.15배의 힘을 적용한다. 또한 감쇠장치는 최대예상지진에 대하여 파단되지 않도록 설계되어야 한다.



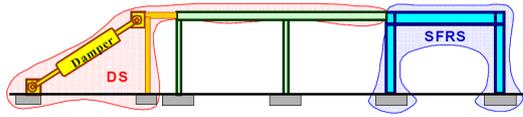
박지훈

인천대학교 도시건축학부 부교수

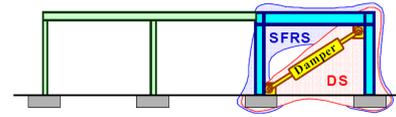


전성하

인천대학교 건축학과 박사과정



(a) 지진력저항시스템 외부에 설치된 감쇠시스템



(b) 지진력시스템 내부에 설치된 감쇠시스템

그림 1 지진력저항시스템(SFRS)과 감쇠시스템(DS)의 구성 예 (BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, FEMA 450)

2.2 지진력저항시스템

감쇠시스템이 적용되는 구조물은 각각의 방향에 건축구조기준에서 제시된 지진력저항시스템을 보유하여야 한다. 감쇠장치의 설치가 용이하고 국내의 중저층 철골구조물에서 가장 흔하게 사용되는 지진력저항시스템은 모멘트 저항골조시스템이다.

감쇠시스템이 적용된 구조물은 지진력저항시스템 단독으로 만족하는 설계 지진하중에 의한 밀면전단력 V_{min} 을 보유해야 한다. V_{min} 은 식 (1, 2)에 의하여 산정한다.

$$V_{min} = \eta V \quad (1)$$

$$\eta \geq 0.75 \quad (2)$$

여기서, V 는 등가정적설계법에 의한 밀면전단력이며, η 는 감쇠장치의 감쇠성능에 따라 구조물에 작용하는 하중이 저감되는 정도를 고려한 예상감쇠보정계수이다.

예상감쇠보정계수에 따라 정해진 설계지진 하중을 만족하는 지진력저항시스템은 건축구조 기준의 강도설계기준을 적용하며 지진하중과 연직하중의 조합하중으로 평가하여야 한다.

2.3 감쇠성능

설계된 지진력저항시스템의 최소 밀면전단력 V_{min} 의 결정에 적용된 예상감쇠보정계수 η 는 식 (3)에 나타난 감쇠보정계수 보다 작지 않아야 한다.

$$\eta_h = \frac{V_h}{V_{he}} \quad (3)$$

여기서, V_h 는 설계지진에 대하여 감쇠장치가 적용된 구조해석모델의 3차원 시간이력해석에 의해 결정된 감쇠시스템 적용 구조물의 밀면 전단력이며, V_{he} 는 V_h 와 동일한 절차를 따르되, 감쇠장치의 하중-변위관계에서 속도의존적

성분은 제거하고 변위의존적 성분을 유효강성으로 치환하여 얻어진 밀면전단력이다.

3. 구조해석 절차

3.1 탄성해석모델 구성

예상감쇠보정계수 η 에 의한 등가정적지진하중을 만족하는 구조물을 설계한 뒤 내진등급에 따른 허용층간변위의 만족여부를 확인한다. 허용층간변위를 만족하지 못하는 경우 감쇠시스템을 적용하여 내진설계 절차를 진행한다.

3.2 목표 감쇠비 산정

목표 감쇠비를 산정하기 위하여 등가정적지진하중으로 설계된 구조물의 감쇠비를 일정하게 증가시켜 가면서 층간변위 및 밀면전단력이 목표치에 도달할 때까지 반복 해석한다. 층간변위 및 밀면전단력은 7개의 지진파를 사용하여 비선형시간이력해석을 통한 평균응답으로 한다. 목표 밀면전단력 V 는 예상감쇠보정계수 η 에 의해 결정되며 설계된 구조물의 하중강도비(DCR: Demand Capacity Ratio)에 의해 보정한다.

구조물의 감쇠비는 임계감쇠의 5%보다 큰 값을 취할 수 없으며 임계감쇠는 구조물의 비탄성거동에 의한 강성변화를 반영해야 한다. 본 연구에서는 구조물의 감쇠비를 5%로 적용하여 해석을 진행하였다. 목표감쇠비 β_{mD} 는 식 (4)에 따라 산정한다.

$$\beta_{mD} = \beta_{IH} + \beta_v \quad (4)$$

여기서, β_{IH} 는 구조물 고유감쇠(Inherent Damping)와 구조물 이력감쇠(Hysteretic Damping)의 합한 값을 말하며, β_v 는 감쇠시스템에 의한 감쇠비이다.

3.3 감쇠장치 설계

추가로 필요한 감쇠비를 구현하기 위하여 감쇠장치의 특

성인 강도 및 강성을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 TADAS 시스템의 변위의존형 감쇠장치를 사용하였으며 그림 2~3에 감쇠장치의 특성에 대하여 나타내었다.

산정된 추가 감쇠비 β_v 를 통해 ASCE 7-10 18.6에 의하여 감쇠장치에 필요한 에너지소산량을 계산할 수 있다.

3.4 주기변화를 고려한 감쇠장치 재설계

감쇠장치를 포함한 구조물과 포함하지 않은 구조물의 주기 차이로 인하여 밀면전단력과 층간변위 응답을 수정하여 감쇠장치를 재설계해야 한다. 주기변화량은 설계된 감쇠장치의 활선강성을 반영하여 고유치해석을 수행한다. 재설계 과정은 다음과 같으며 그림 4는 재설계과정에 대한 개념도를 나타낸다.

- (1) 초기 밀면전단력 목표치 V_1/V_o 에서 설계된 감쇠장치로 인해 구조물의 주기가 감소하여 감소한 주기의 비율만큼 층간변위 응답을 수정
- (2) 감쇠장치의 변형이 감소함에 따라 줄어드는 에너지 소산량의 비율만큼 감쇠비를 감소하여 최종 변위응답 D_3/D_o 을 산정
- (3) 최종 변위응답에 따른 감쇠장치의 주기변화량에 따라 밀면전단력 응답을 수정한다.
- (4) 감쇠보정계수를 만족할 때까지 (1)~(3)과정을 반복하며 예상감쇠보정계수를 만족할 시 비선형시간이력해석을 진행하여 확인한다.

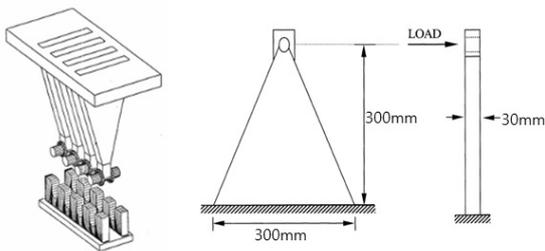


그림 2 TADAS 시스템

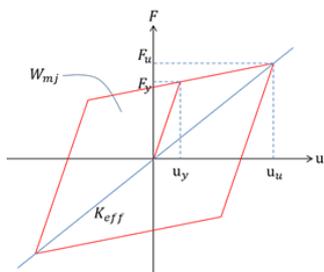


그림 3 감쇠장치 주요속성

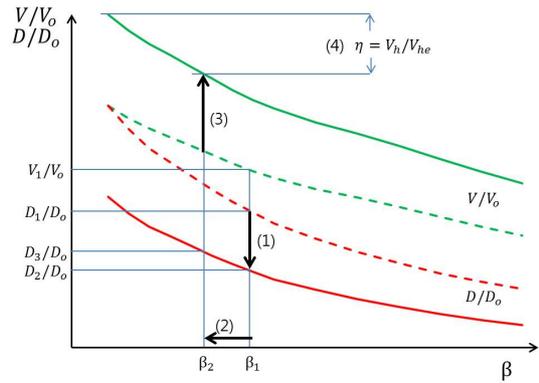


그림 4 감쇠장치 재설계 과정

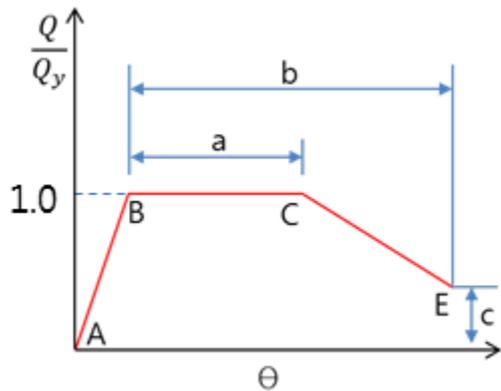


그림 5 ASCE 41-13기동 및 보의 해석 모델

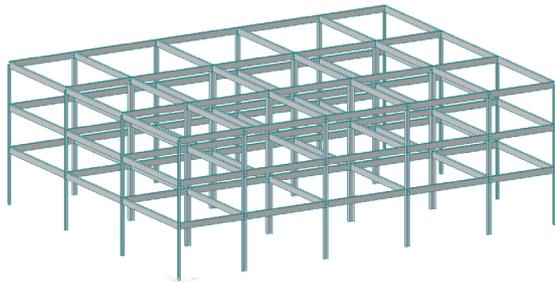
3.5 구조물 해석 모델

비선형시간이력해석 수행을 위해 철골모멘트골조의 기동 및 보의 해석모델은 ASCE41-13에서 제시하고 있는 해석모델을 적용하였다. 그림 5는 해석모델의 하중변위관계를 나타내었다.

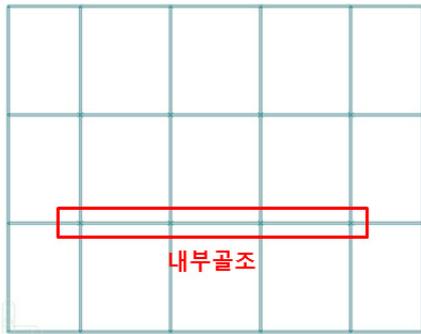
4. 설계 예제

4.1 구조물의 설계

예제 건물은 3층 5경간의 철골모멘트골조로 국내 건축 구조기준(KBC 2016)에 의거하여 설계되었으며 지진구역은 I, 내진등급은 ‘특’으로 중요도계수 1.5를 사용하였다. 지반 종류는 Sd지반을 적용하였고 지진력 저항시스템은 보통모멘트골조를 사용하였다. 내진등급 ‘특’을 적용하였으므로 허용층간변위는 1.0%로 제한된다. 구조물의 고정하중과 활하중은 각각 5kN/m^2 , 3.5kN/m^2 으로 모든 층에 동일하게 적용하였다. 그림 6은 설계된 건물의 3차원 모습 및 평면도를



(a) 3차원 예제 건물



(b) 예제 건물 평면도

그림 6 예제 건물

나타내며, 그림 7은 구조해석에 사용될 모멘트골조의 입면도를 나타낸다. 해석대상 골조의 경간은 7.5m이며 1층과 2, 3층의 층고는 각각 4.5m, 3.5m를 적용하였다.

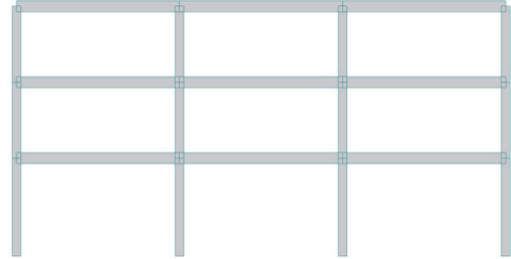
감쇠보정계수 η 를 0.75로 적용하여 설계지진하중을 정하였으며 부재의 하중강도비는 0.95로 설계하였다. 설계된 골조의 기둥과 보의 각각 H 394 × 405 × 18/18(SM490), H 506 × 201 × 11/19(SM490)를 사용하여 전층에 동일하게 적용하였다. 하중강도비와 감쇠보정계수에 따라 목표감쇠능은 0.79로 산정하였다. 정적해석을 통한 층간변위비가 1층에서 1.32%로 나타나 허용층간변위 1.0%를 만족하지 못하여 감쇠장치가 필요한 것으로 나타났다.

감쇠시스템은 감쇠장치와 가새를 사용하였으며 3경간 중 중앙에 설치하였다. 감쇠시스템의 설치 모습을 그림 7(b)에 나타내었으며, 가새 부재는 200 × 200 × 8/12(SM490)을 사용하였다.

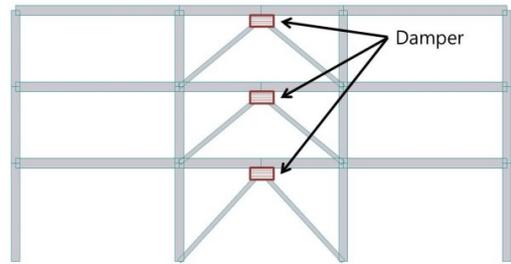
4.2 감쇠장치 설계

목표감쇠비를 얻고자 감쇠시스템이 적용되지 않은 골조의 감쇠비를 일정량 증가시키면서 해석하여 밀면전단력 및 층간변위 응답을 확인하였다. 각 응답은 그림 8에 나타내었다.

주기변화에 따른 층간변위응답을 수정해준 뒤 수정된 층



(a) 지진력저항시스템



(b) 지진력저항시스템 및 감쇠시스템

그림 7 해석대상 골조 입면도

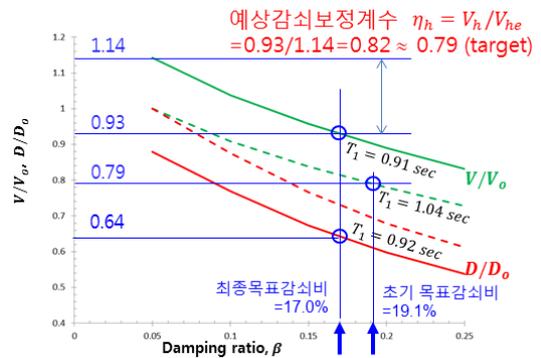


그림 8 밀면전단력 및 층간변위 응답

간변위응답에 따라 감소된 변위량만큼 감쇠장치의 에너지를 줄여 감쇠비를 재산정한 결과 감쇠비는 17.0%로 나타났으며 주기는 0.91초로 수정되었다.

최종목표감쇠비는 17.0%로 원구조물의 감쇠비인 5%를 제외한 12.0% 감쇠비에 따라 감쇠장치를 설계하였다. 감쇠장치는 총 에너지소산량을 층별로 분배하여 설계하였으며 각 층의 적용되는 감쇠장치의 비율은 층 전단력의 비율로 산정하였다. 감쇠장치의 항복후 강성비는 0.02를 사용하였으며 감쇠장치의 최종특성은 그림 9에 나타내었다.

4.3 해석결과에 따른 허용기준 검토

최종목표감쇠비 17.0%에 따른 감쇠장치 특성을 적용하여 비선형동적해석을 수행하였으며, 해석결과를 KBC2016

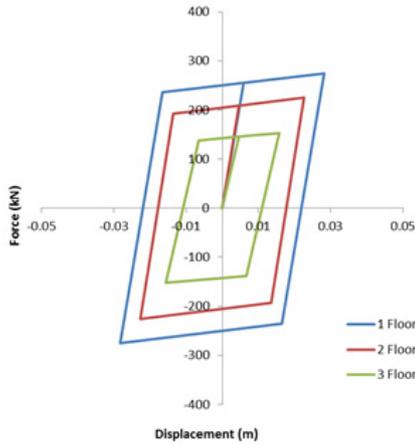


그림 9 최종 감쇠장치 특성

허용기준에 따라 검토하였다.

예상감쇠보정계수는 0.79이며 주기변화를 통해 수정된 응답그래프를 통해 얻은 감쇠성능은 0.82로 예상치에 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 비선형시간이력해석 결과에서 얻어진 감쇠성능은 0.79로 예상감쇠성능을 만족하는 것으로 나타났다.

내진등급 ‘특’인 경우 건축구조기준에서의 허용층간변위는 1.0%로 감쇠장치 적용 시 1층에서의 최대층간변위는 약 0.6% 성능을 만족하는 것으로 나타났다.

KBC2016에서는 감쇠시스템을 구성하는 구조요소들은 지진하중과 감쇠장치에 유발되는 힘을 포함한 하중에 대해 모두 탄성이어야 한다. 감쇠장치에 유발되는 힘은 감쇠장치 특성의 변동폭을 고려하여 1.15배를 한다. 그림 10은 각 부재의 내력 Q_n 과 하중 Q_u 의 비를 나타내며 해석결과 모든 부재는 탄성인 것으로 나타났다. 해석결과 패널존 회전각과 항복회전각 비율이 1.22로 나타나 패널존은 항복한 것으로 나타났으며 이에 대한 패널존에 대한 보강이 필요한 것으로 나타났다.

최대지진하중응답에 대하여 댐퍼의 파단여부를 확인하기 위하여 건축구조기준에 의한 1.5배의 지반운동에 대해 해석한 결과 최대 41.20mm의 층간변위가 발생하였다. 감쇠장치의 최대 변형은 60.29mm로 감쇠기는 최대지진하중에도 감쇠성능을 유지하는 것으로 나타났다.

5. 결론

KBC 2016에 수록된 감쇠시스템의 설계규정은 감쇠장치 뿐만 아니라 이를 주구조물에 연결하고 하중을 전달하는 부재들과 지진력 저항시스템의 전반적인 설계 요구조건을 제시

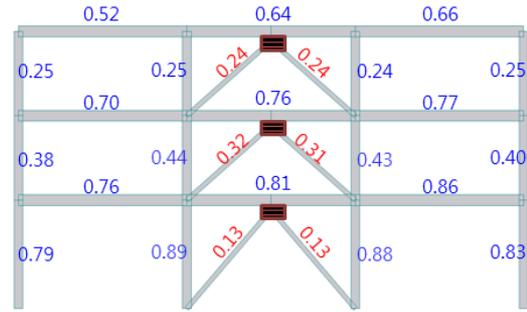


그림 10 각 부재의 강도비(Q_u/Q_n)

하고 있다는 점이 중요한 의미를 가진다. 본고에서는 개정된 KBC2016의 감쇠시스템을 적용한 철골모멘트골조의 내진설계 절차를 제안하고 비선형시간이력해석을 통해 검증하였다.

설계 예제의 해석결과로부터 지진하중과 감쇠장치에 유발되는 힘에 대하여 감쇠시스템을 구성하는 구조요소들은 모두 탄성상태를 유지하는 것으로 나타나 댐퍼가 정상적으로 작동할 수 있는 것으로 나타났으며, 최대지진하중에 대하여 댐퍼의 변위를 검토한 결과 댐퍼는 파단되지 않고 최대지진하중에 대해서도 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한 감쇠성능목표인 감쇠보정계수 및 층간변위를 모두 만족하였다. 따라서 제안된 내진설계 절차를 통하여 KBC 2016에서 요구하고 있는 설계조건들을 충족하면서 효율적인 내진설계가 가능할 것으로 판단된다.

References

1. ASCE/SEI 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2010.
2. ASCE/SEI 41-13, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2013.
3. Ramirez, Oscar M., et al., Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems, 2001.
4. Ahn, J. K., Lee, C. H., Seismic design of mid-to-low rise steel moment frames based on available connection rotation capacity, Journal of Korean Society of Steel Construction 19(6), pp.715-723, 2007.
5. Kim, T. W., Seismic Design of Low-rise Steel Moment Frames in Korea, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea 15(1), pp.11-18, 2011.