

고층건물의 내진 해석과 설계에서의 제문제

Some Problems in Seismic Analysis and Design for High-rise Buildings



정 하 선*



박 홍 근**

1. 머리말

이 글은 내진 해석과 관련한 복잡한 이론을 소개하려는 것이 아니라 내진 해석과 설계시 고려해야 할 문제, 당면하는 문제점들을 기술하고 또한 우리나라의 현행 내진 설계 규정중 보완이 필요하다고 생각되는 사항에 대해 논의하는데 그 목적이 있다.

2. 지진에 의한 고층건물의 거동^{1,3,4)}

지진은 여러 가지의 주기를 갖는 지진파요소로 구성되어 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 지진계에 기록된 지진 가속도의 이력을 살펴보면 지진의 초기에는 작은 주기의 지진파가 먼저 전달된 후 저주기영역의 큰 가속도 특성을 나타내며 지진 후기에는 고주기영역의 작은 가속도 특성을 나타낸다. 진앙지에서 멀어질 수록 지진파가 감쇄되는데 단주

기 또는 큰 진동수의 지진파가 먼저 감쇄된다. 따라서 진앙지에서 먼 지역일수록 주로 장주기의 지진파가 전달된다.

건축물에 대한 지진력은 지반의 움직임에 의한 구조체의 관성에 의하여 발생한다. 이 관성은 구조물의 질량과 가속도의 곱으로 표현되며, 구조물의 질량과 강성의 크기와 수직적, 수평적 분포에 의하여 영향을 받는다.

건물에 가해지는 지진력은 지진에 의하여 발생되는 구조물의 운동가속도에 의하여 표현되는데 그

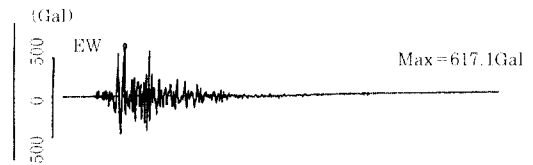


그림 1 일본 고베지진기록 중 일부

* 정회원, 대한주택공사 연구위원, 공학박사

** 정회원, 전우구조기술사사무소 소장, 공학박사

정도는 지진과 구조물의 진동주기의 상관관계에 의하여 구분할 수 있다.

1) 구조물의 주기가 지진의 주기에 비하여 작은 경우, 구조물의 운동이 지반의 운동보다 빠르므로 구조물의 주기가 매우 작다면 구조물의 운동은 무시할 정도이며 구조물이 지반과 함께 같은 운동을 하게 된다. 따라서 지반의 가속도는 구조물의 가속도와 거의 같다.

2) 구조물의 주기가 지반의 주기와 엇비슷한 경우, 구조물의 진동은 지반의 진동과 구조물 자체 진동의 합이 되어, 공진 현상에 의하여 구조물의 가속도는 증가한다.

3) 구조물의 주기가 지반의 주기보다 큰 경우, 지반의 운동이 빠르므로 구조물의 운동에 의한 관성력이 약화된다. 극단적으로 구조물의 주기가 큰 경우 구조물의 상부는 거의 움직이지 않고 지반과 변한 구조물의 하부만 움직이게 되어 구조물의 가속도는 지반 가속도보다 상당히 감소된다.

일반적으로 고층건물의 동적주기는 지반보다 크므로 지반 가속도보다 작은 가속도가 발생하며 따라서 지진에 의한 관성력이 상대적으로 작다. 또한 단주기영역의 초기 지진에 대해서는 영향이 없으며 장주기영역의 후기 지진에 의하여 영향을 받는다. 이 상주기의 지진은 진앙지에서 먼 지역에서도 감쇄 효과가 작으므로 고층건물에 영향을 줄 수 있다. 따라서 고층건물은 저층건물에 비하여 지진에 의한 지역적 영향 범위가 넓다.

건물의 진동은 하부 지반의 영향을 크게 받는데(지반 종류에 따라 지진 계수를 달리하는 배경) 만약 지반의 진동주기가 건물과 같다면 2)항에서 말한 바와 같이 공진에 의하여 건물의 움직임이 증폭될 수 있다. 고층건물이 위치한 지역의 지반이 연약지질이라면 고층건물의 지진력은 증폭될 수 있다. 지진과 건물의 가속도가 일치한다고 하더라도 건물의 운동이 계속하여 증폭되지 않는 데 그 이유는 지진의 지속 시간이 짧고, 여러 가지 주기의 지진과로서 구성되어 있으며, 구조물 자체가 지니고 있는 감쇄능에 의하여 진동이 감소하기 때문이다.

3. 내진설계개념^{3,4)}

고층건물은 수직 방향의 하중뿐 아니라 횡력에 대한 충분한 강성과 강도를 가지고 있어야 한다. 풍하중과 지진 하중은 같은 횡력이지만 하중의 본질과 설계 개념에서 큰 차이를 보이고 있다. 바람은 직접 구조물에 작용하는 하중으로서 그 발생빈도가 많고, 자료가 많아서 예측이 가능하다. 따라서 건물의 사용 기간에 일어날 수 있는 바람에 대하여 설계하는 것을 원칙으로 하며 구조물의 강도 뿐만 아니라 사용성에 대한 설계에 큰 비중을 두고 있다.

반면, 대규모 지진은 발생 빈도가 많지 않아서 기록이 부족하며, 지진은 지역 지반 특성, 구조물의 특성 등에 연관되어 불확실성이 상존한다. 또한 대규모 지진은 막대한 인명과 경제적 손실을 가져올 수 있다. 그러나 건물의 사용기간동안 일어날 가능성이 많지 않은 대규모 지진에 대하여 모든 구조물에 별다른 피해가 없도록 설계하는 것은 비경제적이며, 따라서 건축 설계에 지장을 주지 않고 공사비를 크게 상승시키지 않으면서 대규모의 지진이 발생할 경우 인명 피해와 경제적 손실을 최소한으로 막고자 하는 것이 내진 설계의 개념이다.

대규모 지진에 대하여 연성이 있는 구조물은 부분적으로 구조체에 손상을 입더라도 연성으로 말미암아 지진 에너지를 흡수하여 더 이상의 지진 운동이 구조체에 전달되는 것을 방지하여 구조물의 붕괴를 막을 수 있다. 이러한 점에 착안하여 구조물이 탄성 상태에서 지지하여야 하는 지진력을 구조물의 연성 정도에 따라 감하여 경제적인 설계가 되도록 하며(반응수정계수 R의 적용 배경), 적절한 연성을 확보하기 위하여 부재의 접합부에서 취성파괴가 일어나지 않도록 상세 보강을 한다. 또한 건물 자중에 의한 저항모멘트가 횡하중에 의한 작용모멘트보다 작을 경우 건물의 선도를 일으킬 수 있으므로 이를 방지하는 강도와 강성을 확보한다.

20층을 초과하는 대부분의 고층건물의 설계에서는 설계 풍하중이 설계 지진하중보다 크며, 따라서 구조 부재의 설계는 설계풍하중에 의하여 결정되므로 지진 하중만을 고려한 부재보다 큰 단면이 요구되는데, 여기서 주의하여야 할 점은 실제의 지진 하중은 설계된 부재의 강성과 강도에 비례하므로 그

부재에 작용하는 지진 하중이 부재의 탄성 한계를 넘어 구조물의 비선형기동을 일으킬 수 있다는 점이다. 따라서 설계 지진 하중보다 큰 설계 풍하중에 의하여 부재가 설계되었다고 하더라도 내진 해석을 수행하여 부재가 소성변형을 일으킬 가능성이 있는 부재에 대해서는 충분한 연성 확보가 가능하도록 상세 설계가 이루어져야 한다.

일반적으로 고층건물의 경우 부재가 풍하중에 의하여 설계되었다고 하더라도 그의 집합부 또는 부재 상세는 증가된 설계 지진 하중에 대하여 설계된다.

지진의 발생 빈도가 많은 지역에서는 건물의 사용기간동안 중소 규모의 지진에 의하여 건물 마감, 설비장치 등에 큰 경제적 손실이 발생할 수 있다. 이러한 경제적인 손실을 줄이기 위하여, 대규모 지진을 가상하는 일반적인 설계 지진 하중에 대한 검토에 덧붙여, 보다 작은 규모의 지진에 대하여 건물의 구조체 또는 비구조체의 손상에 대한 건물사용성의 검토가 이루어지며 이러한 사용성검토는 구조물의 탄성 상태에서 이루어진다.

4. 내진설계시 고려 사항^{4,5)}

대규모의 지진은 반드시 구조체의 응력이 집중되는 곳에서 비선형기동을 유발하며, 이러한 부위에서는 현실적으로 연성 거동을 보장할 수 있는 상세의 설계가 이루어지기 어렵다. 이와 같이, 지진은 건물의 구조적 취약부에 심각한 손상을 주므로, 취약한 구조 형식의 응력집중부분에 대한 해석 및 설계를 잘하기보다는 취약성을 일으킬 수 있는 요인이 없는 평면과 입면구조계획이 이루어져야 한다. 건축 평면의 형태는 가능한 한 응력집중이 일어나지 않는 구조물의 형상을 갖도록 설계되어야 한다. 평면은 대칭형으로서 비틀림의 영향을 최소화하고, 수직적으로 주요부재가 단절되지 않고 상부에서 기초까지 연결되도록 하며, 연성이 없는 비구조체 구조체에 연결되어 과도한 응력집중을 일으키지 않도록 주의한다. 내진구조형식의 결정시 주요 고려 사항은 다음과 같다.

4.1 평면 및 입면계획

과거의 지진 피해를 보면 L, T, U형과 같이 날개가 있는 비대칭 평면의 건물이 보다 큰 피해를 입고 있다. 이는 비대칭 평면이 비틀림 진동을 야기시키기 때문이다. 이러한 비대칭 평면을 갖는 건물을 구조적으로 일체가 되게 설계할 경우, 평면이 꺾이는 부위에 응력집중이 일어나며 이에 저항하기 위한 배단이 실제로 불가능한 경우가 대부분이다. 건축 계획상 비대칭 평면이 불가피한 경우에는 지진이음부(seismic joint)를 두어 비대칭 평면을 여러개의 대칭평면으로 분리하고, 이 분리된 각 평면은 독자적인 횡력부담 구조 형식을 갖도록 한다. 지진 이음부는 신축이음(expansion joint)과는 다르며, 이음부의 폭이 정형화된 두 부위의 예상횡변위 합의 2배 이상이어야 하므로 상당히 큰 폭을 갖어야 한다. 대칭평면이라 할 지라도 횡력부담 구조체의 편심배치로 구조물의 질량 중심과 강성 중심이 일치하지 않으면 비틀림 현상이 나타나게 된다. 이러한 경우에도 편심배치된 구조체의 상대편에 구조체를 배치하여 강성 중심과 질량 중심의 편심을 줄여야 한다.

수직적으로도 건물의 높이에 걸쳐 질량과 강성이 고르게 분포하지 않아도 질량이나 강성이 급격히 변화하는 부위에 큰 응력의 집중 현상이 일어나며, 연약층(soft story)이 있는 구조와 높이가 다른 두 부분이 일체화되어 있는 구조가 수직방향 비대칭의 대표적인 예이다.

비대칭 평면이나 입면을 갖는 건물은 동적 해석을 수행하여 취약 부위에 대한 적절한 보강 방법을 강구하여야 하며 가능하면 지진이음부를 두어 구조적 정형화를 유도하는 것이 바람직하다.

4.2 경량시공

구조물의 질량이 클수록 관성에 의한 지진력이 증가한다. 따라서 내진 설계를 위하여 강도 대 중량의 비가 큰 재료를 사용하는 것이 좋다. 특히 슬래브의 경우에는 다이아프램(diaphragm) 외에는 큰 구조적인 역할이 없으므로 경량 재료를 사용하여 수직 하중과 지진력을 줄이며, 따라서 주요구조체

의 크기도 줄일 수 있다. 그러나 각 지역의 기술적, 사회적 조건에 따라 경량 시공이 항상 경제적인 것은 아니며, 고층건물의 바람에 대한 건물의 사용성 설계에는 바닥의 진동 등의 문제로 경량 시공이 유익하지 않을 수도 있다는 사실을 염두에 두어야 한다.

4.3 연성도

대규모 지진에 대하여 구조체의 부분적 손상으로 인한 큰 변형에 대해서도 내력을 유지할 수 있는 연성을 갖도록 하여 인명의 손실을 막고 건물의 피해를 최소한으로 줄이기 위하여 연성이 큰 재료의 사용이나 연성을 유지하는 접합부 또는 부재의 상세 설계가 필수적이다.

골조형 건물의 내진 설계를 위하여 4 내지 6의 연성도(Δ_u / Δ_y , θ_u / θ_y , 등)가 필요하며, 특히 취성을 나타내는 콘크리트는 지진 하중을 견디도록 적절히 철근으로 보강되어야 한다. 구조물의 갑작스러운 붕괴를 막기 위하여 기둥의 취성파괴를 방지하는 것이 중요한데, 콘크리트 기둥의 파괴는 보통 압축력과 휨에 의한 주철근의 좌굴과 피복콘크리트의 탈락이 주요원인이 된다. 압축의 취성파괴를 막기 위하여 기준에서 정하는 범위내의 인장 철근을 배근하며, 휨을 받는 부재에서는 압축 철근의 배치가 부재의 연성증가에 큰 도움을 준다. 그러나 철근 콘크리트 부재의 연성 증가는 스테럽(또는 띠철근)에 의해 콘크리트를 구속시키는 것이 가장 효과적이며 스테럽의 간격이 좁을수록 부재의 연성은 증가한다.

4.4 감쇄

감쇄(damping)는 지진에 의하여 구조체에 일어날 수 있는 진동폭을 줄이고 진동을 급격히 저감시키는 데 큰 역할을 한다. 감쇄는 재료, 접합방법, 비구조재 등에 의하여 영향을 받는데 구체적으로 재료의 점성감쇄, 접합 부분의 마찰감쇄, 부재의 비선형거동으로 인한 이력감쇄, 지반의 비선형거동으로 인한 감쇄 등으로 구분된다. 그러나 구조체로서 감쇄성능을 향상시키는(즉 횡변위를 줄이는) 이체가

지의 방법은 건물이 높아질 수록 비경제적이 되기 때문에 외국에서는 건물의 진동 방향과 반대로 진동하는 매스(mass)를 설치하여 감쇄시키는 방법(TMD, TLD 등), 능동적으로 작동하는 감쇄기를 설치하는 방법 등이 실용화 단계에 있으나, 우리나라에서는 아직 초보적인 연구 단계에 있다.

4.5 부등침하

지진에 의한 수직 부재간의 상대적 변형 차이는 구조물의 안정성에 큰 피해를 줄 수 있다. 이를 방지하기 위하여 기초의 부등침하를 방지하여야 한다. 지진운동은 지반의 다짐 및 액상화를 일으켜서 과도한 침하 및 부등침하를 야기할 수 있다. 이를 방지하는 방안은 기초시공전에 지반의 안정화를 피하거나 암반에 지지하는 파일 기초를 사용하도록 한다. 파일 기초를 사용할 때 수평력에 대한 파일 저항력의 면밀한 검토가 필요하다. 파일의 수평 저항력이 부족한 경우에는 경사 파일을 사용하기도 한다. 내진설계에서는 모든 파일을 지중보로 연결하는 것이 원칙으로 되어 있다.

4.6 우발적인 유효 기둥길이의 감소

흔히 구조 해석이나 설계시 고려되어 있지 않은 계단, 마감벽체, 기둥에 연결된 가새 등의 부재들이 기둥의 층 중간에 연결되어 있는 경우가 있다. 이런 경우 기둥의 유효 길이가 구조 해석시 고려했던 것보다 짧아 지진발생시 기둥에 큰 전단력이 발생하며 전단 내력의 부족에 의한 취성파괴가 기둥과 건물 전체의 안정성에 위협을 줄 수 있다. 지진설계에 고려되지 않은 구조재 또는 비구조재는 적절한 상세를 통하여 기둥과 분리하거나 구조해석시 이러한 기둥의 유효길이 감소를 초래하는 부재들의 배치를 충분히 고려하여야 한다.

4.7 구조체의 분리

인접한 건물들이 지진운동으로 서로 충돌하여 큰 피해가 일어날 수 있다. 이러한 피해를 줄이는 가장 간단한 방법은 인접한 건물사이에 충분한 이격거리

를 두는 것이다. 인접한 두 건물은 각 건물의 진동 모드에 따라 마주보는 상대건물 쪽으로 동시에 진동할 수 있으므로 두 건물의 이격거리는 최소한 각각의 건물의 최대 횡변위 합의 2배 이상이어야 한다.

4.8 횡변위

지진에 의한 구조물의 붕괴는 과도한 횡변형과 이에 따른 건물의 중량에 의한 $P-\Delta$ 효과 또는 2차 진도모멘트에 의하여 일어난다. 따라서 세장한 건물의 설계에 특별한 주의가 필요하다. 그 외에 과도한 횡변형은 건물의 외벽과 같은 마감재의 탈락, 설비의 손상 등 건물의 사용성에 큰 피해를 줄 수 있다. 강한 지진이 예상되는 지역에서는 마감재 또는 설비와 구조체사이에 적절한 지진접합상세를 마련하여야 한다.

5. 구조해석

지진해석에는 (1) 등가 정적 해석과, 동적 해석으로서 (2) 반응 스펙트럼 해석 (3) 시간이력해석 등 3가지의 방법이 사용되고 있다. 저층건물의 해석은 정적 해석으로도 충분하지만 건물의 형태가 비정형이거나, 고층건물과 같이 동적 특성이 강조되는 경우, 구조물의 중요성이 높은 경우에는 동적 해석이 사용되고 있다.

5.1 정적 해석

건물에 작용하는 지진 하중은 본래 변위에 의하여 발생된 구조물의 관성력이므로 정적 해석은 이론상 적합하지 않다. 특히 동적 거동이 중요시되는 고층건물의 경우에는 정확하지 않은 해석과 설계를 초래할 수 있다. 그러나 정적 해석에 사용되는 설계 지진 하중은 과거의 지진에 대한 경험에 의하여 산출된 것이며, 이제까지 등가 정적 해석에 의해 설계된 건물이 정형에 가까운 구조일 경우에는 지진시에도 큰 피해를 보지 않았으며, 동적 해석에 대한 지식이 없이도 쉽게 구조 해석을 수행할 수 있다는 이유 때문에 널리 사용되고 있다. 등가 정적 해석

방법은 구조물이 정형에 가까우며 그 거동이 기본 진동 모드에 지배되어 고차 진동 모드의 영향이 무시할 정도로 작을 때 유효하게 사용할 수 있으나, 건물과 지반간의 상호작용을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 여기서 정형 건물이라 함은 수평적으로 질량과 강성의 분포가 대칭적이고 수직적으로 이들이 등분포되어 있는 경우를 말한다.

5.2 반응 스펙트럼 해석

지진은 동적 운동이므로 시간 이력 해석을 통하여 가장 정확히 건물의 거동을 파악할 수 있다. 그러나, 지진에 대한 자료와 지식의 부족과 지진 자체의 불확실성 등의 이유 때문에 특정한 지역의 특정한 지진에 대한 해석과 설계보다는 그 지역에 일어날 수 있는 가능한 범위의 지진에 대하여 설계하는 것이 보다 바람직한 접근 방법일 수 있다. 이러한 취지에서 발전된 지진 해석 방법이 반응 스펙트럼 해석이다.

모드 해석의 일종인 이 방법에서는 과거 지진의 시간 이력이나 인공적으로 만들어진 지진에 대한 주기별 가속도, 속도, 변위의 최대치를 나타내는 지진 스펙트럼이 구성된다. 이 지진 스펙트럼에 대한 1 자유도(single degree of freedom) 구조의 진동에 의한 동적 특성이 반응 스펙트럼으로서 반영되는데 이 반응 스펙트럼은 지진 스펙트럼보다 큰 값을 나타낸다. 이 반응 스펙트럼은 다시 구조체의 연성을 고려하여 저감된 설계 스펙트럼으로 만들어진다. 설계 스펙트럼은 감쇄율, 지반 조건, 대상 건물의 중요도, 지진의 지속시간 등을 고려하여 보정된다.

많은 자유도를 갖는 구조물의 동적 거동은 모드 해석에 의하여 한 개의 자유도를 갖는 여러 시스템의 동적 거동의 중첩으로 표현할 수 있다. 다시 말하면 한 구조물의 시간영역(time domain) 거동이 주기 영역(frequency domain)으로 전환되어 여러 개의 주기를 갖는 1 자유도 시스템의 시간이력의 조합으로 표현된다. 이 1 자유도의 지진에 대한 최대 반응은 반응 스펙트럼에 의하여 바로 구할 수 있으며 이를 중첩함으로써 대상 구조물의 동적 거동의 최대값을 얻을 수 있다. 이때, 지진의 시간 이력

에 대하여 모든 1 자유도 시스템이 동시에 최대값을 나타내지 않을 것이므로 적절한 구조물의 최대 반응을 얻기 위한 모드 중첩의 방법으로서 흔히 SRSS(square root of the sum of the square) 방법을 사용한다. 모드의 주기가 거의 비슷한 경우에는 비슷한 시기에 최대 반응을 나타낼 수도 있으므로 SRSS를 사용하면 중분치 않은 값을 나타낼 수 있다. 이러한 경우 CQC(complete quadratic combination)를 사용하기도 한다.

반응 스펙트럼의 장점은 지진에 대한 구조물의 시간이력 없이 구조물의 동적거동특성을 설계에 반영할 수 있다는 점이다. 구조 설계에는 구조물의 시간이력이 아닌 최대변위와 그에 상응하는 응력만이 필요하다. 지진에 대한 주기별 최대반응스펙트럼을 제공하여 얻은 1 자유도 시스템의 최대 반응을 단순 조합하여 구조물의 최대 반응을 파악할 수 있다. 반응 스펙트럼 해석의 다른 장점은 정형인 건물에 대해서는 건물의 동적 거동에 큰 영향을 미치는 몇 개의 저차모드의 반응만 중첩하여도 충분히 정확한 해석 결과를 얻을 수 있어서 해석이 간편하다는 점이다. 그러나, 반응 스펙트럼 해석은 단성 거동의 중첩을 가정하는 모드 해석법을 통하여 이루어지며, 따라서 다차원 자유도를 갖는 구조물의 비선형 거동해석에는 사용될 수 없다.

지층 건물에 대한 반응 스펙트럼의 해석에서는 지진 방향 3개 이하의 모드를 사용하면 충분하지만 고층건물의 경우 고차의 모드가 중요한 역할을 하므로 보다 많은 수의 모드를 사용한다. 일반적으로 반응 스펙트럼 해석에서는 진동주기가 0.4초 이상인 모든 모드를 고려하되 고층건물인 경우 층수를 10으로 나눈 값에 1을 더한 만큼의 모드수를 중첩시킨다. 고층건물의 해석에서 많은 경우 모드해석에 의한 건물의 주기는 정적해석에 의한 주기보다 작으며 정적해석에 의한 지진하중보다 작은 지진하중을 나타내게 된다. 이러한 경우에는 등가정적해석법으로 계산된 주기에 1.5를 곱하여 새로 등가정적해석에 의한 밑면 전단력(V_s)을 산정하여 반응스펙트럼해석법에 의한 밑면전단력(V_1)이 이보다 큰 경우에는 반응스펙트럼해석결과를 사용하고, V_s 가 V_1 보다 크면 V_s 로 계산된 모든 결과에 (V_s/V_1)를 곱하여 보정된 값으로 부재설계를 하게 된다.”

5.3 시간이력해석

시간이력해석은 시간영역해석과 진동수영역해석으로 나뉜다. 시간영역해석은 직접적분법 또는 모드해석법을 통하여 이루어질 수 있으나 일반적으로 직접적분법을 이용하고 있다.

진동수영역해석은 불특정한 지진파를 여러개의 정상진동의 조합으로 나타내어 해석하는 방법이다. 지진의 시간영역이력을 푸리에전환을 통하여 진동수 영역으로 바꾸어 해석을 한 후 그 결과를 다시 역전환을 통하여 시간영역으로 바꾸는 방법이다.

직접적분법을 사용하는 시간이력해석은 다른 해석방법과는 달리 비선형 해석에 사용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 현재 비선형 해석으로서 재료의 비선형과 기하학 비선형을 동시에 고려할 수 있는 해석 소프트웨어가 개발되어 있으나 대부분 초모단계에 머물고 있다. 재료의 비선형모델은 휨거동의 연성과 주기하중에 대한 강성의 감쇄를 이상화한 거시적 모델에 머물고 있으며, 좌굴, 전단파괴, 재료와 접합부의 취성파괴는 고려하지 않는다. 다만, 이러한 해석을 통하여 지진에 대한 구조물 각 부위의 필요한 연성도를 파악하는데 도움을 줄 수 있다.

구조물의 동적거동이력을 파악할 수 있고 비선형 해석에도 사용될 수 있는 장점에도 불구하고 시간이력해석이 아직 널리 사용되지 않는 이유는 건물이 위치한 지역에서 계측된 지진의 기록이 있어야 하고 해석을 수행하고 결과를 설계에 반영하는데 전문적인 지식이 필요하기 때문이다. 그러나 구조물의 중요성이 부각되는 원자력 발전소등에는 실제의 지진이력이나 확률 통계적으로 만들어진 인공지진을 이용한 시간이력해석이 사용되고 있다.

5.4 우리나라 내진설계 보문의 필요성

5.4.1 동적해석 대상 건물

현재 우리나라의 내진설계 관련 규정에서는 필요한 경우 동적해석을 수행하도록 요구하고 있으나 그 대상 건물을 명시하지 않아 앞에서 언급한 등가정적 해석의 한계를 넘는 건물에 대해서도 등가정적해석방법을 적용하여 해석과 설계를 수행하는 경우를 많이 발견하게 된다.

등가 정적해석에 의한 밀면 전단력은 대부분 동적 해석방법에 의해 구한 밀면전단력 보다 크며, 이러한 이유로 등가 정적 해석 방법이 건물을 안전측으로 설계하게 하는 방법이라고 생각하는 경향이 있다. 그러나 건물높이 방향에 대한 등가 정적해석에서의 지진하중분포와 동적해석에서의 여러모드의 조합에 의해 결정되는 지진하중분포와는 차이가 있어 등가정적해석이 반드시 안전측의 설계가 되도록 하는 것은 아니다.

외국에서는 다음의 표 1에서와 같이 동적해석을 수행하여야 하는 건물의 범위를 규정하고 있다.

표 1 외국에서의 동적해석 대상건물

국명	높이	비정형	기본주기
뉴질랜드			1.5초 이상
독일		○	
루마니아	10층 이상		
멕시코	60m 이상		
미국(UBC)	73m 이상	○	지반진동주기 0.7초 이상
불가리아			1.5초 이상
이탈리아		○	
이스라엘	50m 이상		1.2초 이상
이태리			1.4초 이상
일본	40m 이상		
인도네시아	40m 이상	○	
일본	60m 이상		
중국	50m 이상	○	
칠레	45m 이상	○	
알라비아		○	
터키	75m 이상	○	
페루	75m 이상		

5.4.2 등가 정적해석시의 밀면 전단력 산정

여러 가지 제한에도 불구하고 현재 우리나라에서 건설되는 많은 건물은 등가정적해석방법에 의해 해석, 설계되고 있다. 현 내진설계규정에 의하면 지진하중에 의한 건물의 밀면전단력은 다음식으로 계산하도록 되어 있다.

$$V = \left(\frac{AICS}{R} \right) \cdot W \quad (1)$$

여기서 V = 밀면전단력

C = 동적해석

A = 지역계수

S = 지반계수

I = 건물의 중요도 계수

R = 반응수정계수

1988년 우리나라에서 내진설계규정을 제정할 당시에는 내진설계가 처음으로 시행되는 것이기 때문에 식(1)과 관련되는 변수들을 가능하면 단순화 시켜 계산이 용이하도록 하였으나 실제로는 이러한 단순화가 오히려 규정을 적용하는데 혼란을 주고 있다. 다음에서는 이들 각 변수들중 사용상 혼란이 커 시급히 보완할 필요성이 있다고 판단되는 두가지 사항에 대하여 살펴보기로 한다.

(가) 건물의 기본진동 주기

현 내진설계규정에 의하면 앞의 동적계수(C)는 다음 식으로 표시된다.

$$C = 1 / (1.2 \sqrt{T}) \quad (2)$$

이 식에서 T는 건물의 기본진동주기를 나타낸다.

현재의 우리나라 내진설계규정에서는 철골모멘트 골조, 철근콘크리트 모멘트 골조 및 기타의 세가지로 구분하여 건물의 기본진동주기 계산식을 제시하고 있다. 여기서 모멘트 골조가 아닌 건물에 적용하도록 되어 있는 세 번째 식은 다음 식과 같이 진동주기가 건물의 고려되는 방향길이의 제곱근의 역수와 비례하도록 되어 있다.

$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{B}} \quad (3)$$

여기서 T = 건물의 기본진동주기 (초)

h_n = 밀면으로부터 작용하는 방향의 건물길이(m)

B = 지진하중이 작용하는 방향으로의 건물길이(m)

식(3)은 그동안 벽식구조로 된 아파트건물에 대표적으로 적용되어 왔으나 최근 다양한 복합구조 형식의 건물이 점점 더 많이 건설됨에 따라 그 사용이 빈번하여 지고 있다. 그러나 이 식은 여러 가지 형식의 복합구조(예 : SRC 기둥과 철골보 형식의 구조, 콘크리트 충전 콘크리트 기둥과 철골혹은 철

근콘크리트 보 구조, 이들 골조와 전단벽이 함께 사용되는 2중골조, 모멘트 골조와 콘크리트 코어가 함께 사용되는 구조 등)의 기본진동주기를 차별없이 확립적으로 계산한다는 문제가 있다. 또한 식(3)의 분모에 포함되어 있는 \sqrt{B} 가 적절한가에 대해 의문이 제기되고 있다. 대한 주택공사에서 기존 아파트에 대해 기본진동주기를 조사한 바에 의하면 세대간 경계벽이 모두 전단벽으로 되어 있는 건물의 단변방향으로 지진하중이 작용할 경우의 기본진동 주기는 식(3)으로 비교적 근사한 예측이 가능하지만 건물의 장변방향 지진하중에 대한 기본진동 주기는 식(3)으로 계산된 값과 큰차이를 보이고 있다.⁶⁹⁾ 미국의 1994년 UBC Code에서는 기본진동주기가 지진이 작용하는 방향의 건물길이가 아니라 전단벽의 길이 함수로 되어 있는 식을 사용하던가 건물의 층 지진하중과 그때의 층 변위를 고려하는 식을 사용하는 방법을 제시하여 앞에서 지적한 문제들을 해결할 수 있는 방법을 택할 수 있도록 하고 있다.⁷⁰⁾

(나) 반응수정계수

반응수정계수(R)는 앞의 4.3에서 설명한 바와 같이 건물의 연성이 크면 지진에너지 흡수능력이 향상되고 건물의 진동이 저감되는 효과가 있기 때문에, 건물의 연성정도에 따라 지진하중에 의한 밀면 전단력을 감소시켜 설계하도를 도입한 개념이다.

이러한 반응 수정계수를 정량적으로 산출하는 방법은, 일부에서 시도되고 있으나, 아직 정립되어 있지 않은 상태이며 과거 지진피해의 정도에 따라 구조재료 및 형식별로 상대적 값으로 규정되는 것이 일반적이다.

현재 우리나라 내진규정에서는 구조형식 및 재료에 따라 반응수정계수를 9종으로 분류하고 있으나 점차 다양한 구조형식이 등장하면서 이중 어느 값을 선택하여야 할 것인지 불명확한 경우가 많이 발생한다. 미국의 현행 UBC Code에서는 우리의 반응수정계수에 해당하는 R_w 를 39종으로 분류하고 있으며 구조형식을 정의하기 어려운 경우에는 실험 결과를 근거로 가장 유사한 구조형식의 R_w 값을 쓰도록 규정하고 있다.

6. 구조해석시의 구조물의 이상화 및 해석시 고려해야 할 사항⁶⁵⁾

6.1 2차원 해석과 3차원 해석

2차원 해석은 3차원으로 되어 있는 실제 구조물을 2차원 평면구조물로 이상화하여 해석하는 방법으로 평면을 서로 평행하는 여러 지역으로 구분하여 이를 병렬 연결하여 구조해석을 수행하는 방법이 많이 쓰이며 구조해석을 간편히 수행할 수 있다는 장점이 있다.¹⁰⁾ 이 때 각 구조부재는 선형요소 및 면부재로 이상화하게 되는데 이때 입체로 되어 있는 구조부재들을 선형 및 평면요소로 어떻게 이상화하고 경계조건을 어떻게 할 것인가가 문제가 된다. 또한 2차원 해석으로는 건물의 비틀림 현상을 알아내기가 어렵다는 단점이 있다.

최근의 급속한 컴퓨터의 발달과 구조해석프로그램의 개발로 3차원 구조해석이 일반화되어 있어 비교적 신뢰성 있는 구조해석결과를 얻을 수 있다. 그러나 건물이 대형, 고층화되고 면요소가 증가할 수록 계산량이 기하급수적으로 증가하게 되고, 3차원 동적해석을 수행하려면 매우 큰 용량의 컴퓨터가 필요하게 된다(선형부재가 대부분인 경우에는 계산 시간이 많이 걸리지만 펜티엄급 P.C로 가능). 계산량이 컴퓨터의 용량을 초과할 경우, 연산량을 줄이기 위하여 구조물을 몇 개의 소규모 구조로 분할하여 해석한 후 그 결과를 조합, 경계조건을 일치화함으로써 전체구조물의 해석결과를 얻는 구조 분할 해석기법(sub-structuring technique)이 쓰인다. 그러나 이 기법을 이용하여 동적해석을 수행할 경우 진동주기가 일정한 값으로 수렴되지 않는 경향이 있다는 문제가 있다. 따라서 면요소를 일반적인 유한요소법에 의한 분할 대신 벽체요소를 사용하여 요소의 수를 단순화 시키는 모델링 기법을 사용하여 계산량을 줄이는 방법이 필요하다.

6.2 평면무한강성 슬래브

슬래브는 건축구조물의 중요한 구조요소로서 평면에 분포하는 구조요소를 수평적으로 일체화하는 작용을 한다. 이러한 슬래브의 평면강성으로 말미

암아 횡력저항요소사이에 원활한 수평력과 비틀림 모멘트의 분담이 이루어져서 구조물의 안정과 횡기동에 큰 도움을 준다.

슬래브의 평면내 강성은 다른 구조재의 강성보다 월등하게 크므로 대부분의 철근콘크리트 슬래브를 평면무한강성으로 가정하여 해석한다. 평면무한강성을 가정할 경우 많은 자유도의 구조물을 그림 2에서 보는 바와 같이 총당 두 수평방향의 자유도와 면내 회전 등 단 3개의 자유도의 기동으로 단순화할 수 있어서 대형의 고층 구조물이라고 할지라도 단순한 형태의 구조모델로 치환할 수 있다. 이러한 총당 3개의 횡변형과 관련된 자유도로 치환하는 과정에서 한 층의 자유도는 상하층의 자유도와 관련이 있는 건축구조의 특성을 적극 이용하면 총당 3개의 횡변형 자유도에 관련된 강성행렬만 남기고 모든 자유도의 강성행렬은 효율적으로 제거할 수 있으며, 질량도 각층에 집중되어 있다고 가정할 수 있으므로 효율적인 동적해석을 수행할 수 있다. 이렇듯 슬래브의 평면무한강성의 가정은 현실적인 구조해석이 가능하도록 하며 복잡한 구조물의 해석을 단순화시켜서 아주 빠른 시간안에 구조해석이 이루어질 수 있도록 한다. 이러한 장점으로 말미암아 많은 구조기술자들이 평면무한강성을 이용하는 구조해석 프로그램을 널리 사용하고 있다.

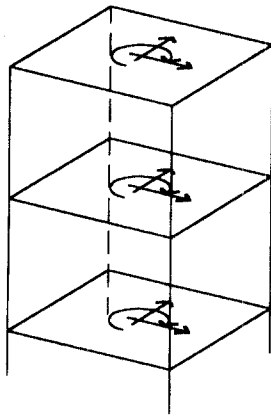


그림 2 평면무한강성의 가정에 따른 자유도의 단순화

그러나 이러한 평면무한강성은 면의 휨모멘트 뿐만 아니라, 인장력 대해서도 무한 강성을 갖는다는 의미는 아니며, 매우 큰 압축력에 대해서도 부재와

슬래브사이의 원활한 압축력의 전달이 의문시된다. 또한 현대건축물은 바닥에 큰 개구부를 두는데 이 경우 평면무한강성의 가정을 유지하기 위해서는 개구부 주위를 보강하는 부재가 충분한 휨 및 축강성을 가져야 하며 이때 개구부에 의하여 발생하는 슬래브의 면내 휨도 고려되어야 한다. 바닥 부재가 그것을 지지하는 수평부재에 충분한 철근의 정착 길이의 확보등 확실한 방법으로 연결되어 있어야 하는 것도 평면무한 강성의 가정을 합리화 하는데 절대적으로 필요한 조건이 된다.

비정형평면의 구조물, 긴 날개를 갖는 평면, 긴평면에서 횡지지구조가 평면의 양단에 위치한 경우, 또는 매우 큰 개구부가 있는 평면에 대해서는 슬래브의 평면무한강성을 사용하지 않으며 면내 유한강성을 갖는 관요소로 이상화하여 발생한 슬래브의 전단과 휨응력을 설계에 반영하도록 한다.

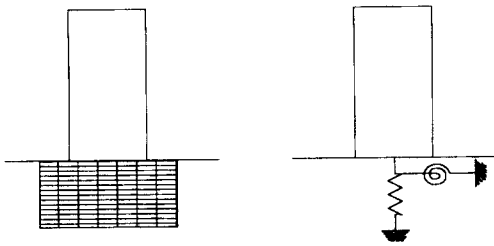
6.3 2차모멘트

고층건물의 해석에서는 과도한 횡변위에 의하여 발생된 2차 전도모멘트에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 $P-\Delta$ 효과를 고려하여야 한다. 대부분의 상용 구조해석프로그램은 이를 고려하는 기능을 포함하고 있다. 그러나 이 기능은 본래 비선형거동인 $P-\Delta$ 효과를 선형거동으로 단순화한 것으로 축력이 구조물의 임계하중에 근접할 경우에는 상당히 오차가 크다는 것에 주의하여 지진에 의한 횡변위 한계에 근접하지 않도록 설계한다. 최근에는 대형구조물의 설계에서 해석 및 설계의 일관소프트웨어를 사용하는 경우가 많다. 그러나 대부분의 프로그램은 대상 구조물이 한방향으로 횡지되어 있고 다른 방향으로의 횡지되어 있지 않은 경우 기동의 횡좌굴길이의 산정에 오류를 범하는 경우가 많음에 주의하여야 한다.

6.4 지반모델

지반이 건축구조물에 미치는 영향은 지반의 진동 및 변형에 대한 영향과 기초저면의 지질과 건물과의 상호작용으로서 구분된다. 지반에 대한 영향은 지반계수를 설계스펙트럼에 적용하여 고려되며, 고

층건물에 대해서 지진하중의 증가를 초래한다. 기초저면의 지질과 구조물의 상호작용의 영향은 구조물의 해석시 지반을 구조물과 함께 이상화하는 방법과 지반의 영향을 고려하여 구조물의 동적특성을 보정하는 방법이 있으나 일반적으로 후자의 방법을 사용한다. 그림 3은 지반의 영향을 고려하기 위한 제반 모델링 기법을 예시한 것이다.



(a) REM(Rigid Element Method) (b) Spring

그림 3 지반의 해석모델 예

7. 맺는말

언제 어느 정도의 강도를 갖는 지진이 발생할 것인가를 예측하는 기술은 현재까지는 없다. 1988년 건물의 내진설계가 의무화될 당시에는 우리 나라에 정말 내진설계가 필요한가에 대한 의문도 제기되었다. 그러나 비록 그 강도는 작지만 심심치 않게 지진의 발생이 보고되고 있고 역사적으로도 16, 17세기경에는 한반도에 지진 활동이 활발했던 것으로 알려져 있어 한반도도 지진에 대한 안전지대라고 할 수는 없다.

우리도 이제는 8년이 넘는 내진설계경험을 갖고 있어 이제는 좀더 신뢰도가 높은 지진하중에 대한 해석과 설계가 이루어져야 할 때라고 생각한다. 내진설계 대상 구조물의 범위도 확대되어야 할 것이

다. 왜 6층 이상(주거 시설은 5층 이상)의 건물만 내진설계를 해야하는가도 경제적인 이유 이외에는 설명하기가 쉽지 않다. 외국의 지진 피해를 보면 가스나 전기 배관의 파괴로 인한 폭발이나 화재에 의한 피해도 매우 심각한데 우리 나라에는 현재 이에 대한 내진설계규정이 마련되어 있지 않다. 이 글에서는 연구 결과의 부족으로 언급하지는 않았지만 기초 형식에 따라 지진 하중에 대한 건물의 반응이 달라지지 않는지, 현재와 같이 3등급으로 지반 상태를 분류하여도 충분한지 등에 대해서도 검토해 볼 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. FEMA, NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings, 1996, 10.
2. R. W. Clough and Joseph Penzien, Dynamics of Structures, Second Ed. McGraw-Hill Co. 1993
3. 건설부, 건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구, 1987
4. B. S. Taranath, Structural Analysis & Design of Tall Buildings, McGraw-Hill Co. 1988
5. Farzad Naeim, The Seismic Design Handbook, Van Nostrand Reinhold, 1989
6. 대한건축학회, 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 1987
7. ICBO, Uniform Building Code-1994, Vol. 2 1994
8. ICBO, Accumulative Supplement to UBC, UMC, UCBC, UHC, UFC, 1996
9. 대한주택공사, 벽식구조 아파트의 고유주기 산정식 제안(Ⅱ), 1994
10. Handbook of Concrete Engineering, ed. by Mark Fintel, Van Nostrand Reinold Co., N.Y. 1985