

지진해석과 내진설계

Seismic Analysis and Design of Structures



이 동 근*

1. 지진과 구조물

1.1 지진활동

지진은 지구내부의 복잡한 움직임에 의하여 지각이 급격하게 진동하게 되는 현상으로, 지구내부의 움직임이 지반의 운동에너지로 변환된 것이다.

이러한 지진은 지진대라고 불리는 특정지역에 집중적으로 발생한다. 이 지진대는 판구조이론(plate tectonics)에 의해 설명될 수 있다. 판구조이론은 지구의 외각은 두께 100km 정도의 10여개의 판으로 구성되어 있으며, 이러한 판들이 지구내부의 에너지의 차이에 의해 움직이고, 이러한 판의 움직임에 따라 판의 경계에서 암석이 파쇄되며 이것이 지진으로 나타난다는 것이다. 이와 같은 판의 경계가 지진대와 일치하며, 일본이나 미국의 캘리포니아 등의 빈번한 지진활동도 이러한 판의 움직임에 의한 것이라 할 수 있고 이러한 지진활동을 판경계 지진활동이라 부른다.

지각변동에 의해 판이 엇갈린 단층(fault)은 지질학적으로 약하기 때문에 상대적으로 움직임이

많고, 이러한 움직임에 의해 지진파의 진동을 유발시키며, 전세계적으로 발생하는 대부분의 지진활동이 기존의 단층에서 이루어진다. 그러나 지진은 중국이나 우리나라와 같은 판의 내부에서도 발생하며 이러한 지진활동을 판내부 지진활동이라 부른다.

지진을 정량적으로 분석하기 위해 지진의 크기는 보통 두가지 척도 즉 규모(magnitude)와 진도(intensity)로 표현한다. 진도는 지진에 의한 지면의 진동효과에 의하여 구분되며 12단계의 진도를 사용하는 수정 머칼리 진도(Modified Mercalli Intensity, MMI)와 8단계의 진도계급을 사용하는 일본기상청(JMA)진도 등이 있다. 진도는 지면의 진동효과를 기준으로 하므로 일반적으로 진앙근처에서 가장 크고 진앙에서 멀수록 작아진다. 이에 비하여 규모는 지진이 발생했을 때 지진파의 파동으로 방출된 총 에너지를 기준으로 하기 때문에 하나의 지진에 대해 하나의 값을 가진다.

일반적으로 리히터규모(Richter Scale, RM)가 공학적으로 널리 사용되며, 규모가 1 증가함에 따라 지진에너지는 대략 30배씩 증가하게 되는데 전 세계적으로 리히터규모 8 이상의 지진은 2회, 7 이

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

표 1 수정머칼리진도(MMI)

진도	일어나는 현상
I	민감한 기구에 의해 감지된다.
II	구조물의 상층에 있는 소수의 사람들에 의해서 느껴진다.
III	침내에서 느낄 수 있으며, 지진으로 인식하지 못할 수도 있다.
IV	침내에서는 대부분 느낄 수 있으나 실외에서는 일부 느낄 수 있다. 창문, 그릇이나 문이 흔들리고 정지하고 있는 자동차가 흔들린다.
V	거의 모든 사람들이 느끼며, 잠자는 사람을 깨운다. 약간의 그릇과 창문이 깨진다.
VI	모두가 느끼며 놀라서 실외로 나온다. 벽의 흠이나 석회 등이 떨어지며 골뚝이 피해를 입는다.
VII	보통 구조물은 일부 피해를 입는다. 운전중인 사람이 느낄 수 있다.
VIII	무거운 가구가 넘어지며 골뚝, 벽 등이 무너진다. 자동차의 운전제자장을 받는다.
IX	잘 설계된 구조물이 기울어지고, 일반구조물에 큰 피해를 주고 일부 붕괴된다. 땅은 금이가고 지하 파이프가 부러진다.
X	대부분의 목조 구조물이 피해를 입고 석조구조물이 무너진다. 땅은 심하게 금이 가고, 철로가 휘어진다. 산사태가 일어난다.
XI	잘 설계된 일부구조물이 남아있고, 다리가 부서지고, 땅에 넓은 균열이 간다. 지하 파이프가 완전히 부서지고 산사태가 일어나며 철로가 심하게 휘어진다.
XII	전면적인 피해가 발생하며, 지표면의 흔들림이 육안으로 보인다. 시야와 수평선이 뒤틀리고 물체가 하늘로 던져진다.

표 2 규모와 진도(리히터 : 1958)

Magnitude (RM)	Max. Intensity (MMI)
2	I - II
3	III
4	V
5	VI - VII
6	VII - VIII
7	IX - X
8	XI

상의 지진은 20여회가 매년 발생하고 있다. 수정머칼리진도의 특징을 표1에 나타내었고 표2에는 수정머칼리진도와 리히터규모를 비교하였다.

1.2 지진에 의한 구조물의 피해

1.2.1 구조물의 피해 원인

지진에 의한 피해로는 구조물의 파손이나 붕괴 혹은 구조물의 피해에 부차적으로 발생하는 화재, 교통 및 통신망의 두절, 급수관이나 가스관의 파손 등이 있다. 일반적으로 부차적으로 일어나는

피해는 구조물의 내진설계와 지진 발생시에 신속한 대응으로 어느 정도 예방할 수가 있다. 지진에 의한 구조물의 피해 원인을 살펴보면 다음과 같다.

1) 기둥의 취성파괴(brittle failure) : 지진의 진동기간이 긴 경우에 축방향 철근 간격이 너무 작거나 후프철근의 간격이 클 때 발생한다.

2) 구조물의 비대칭성 : 구조물의 질량이나 강성이 비대칭인 경우 비틀림의 발생으로 파괴가 일어나기 쉽다.

3) 짧은 기둥 : 조적벽이나 깊이가 큰 보에 의해 기둥의 변형구간이 짧아지면 연결부위에서 파괴가 일어나기 쉽다.

4) 인접층 강성의 급격한 변화 : 강성의 급격한 변화는 응력집중을 초래하여 파괴를 유발한다.

5) 좌굴 : 주로 철골구조물의 경우 축하중의 과다에 의한 부재의 좌굴이나 국부좌굴 등에 의해서 피해가 발생할 수 있다.

6) P-delta 효과 : 중력방향의 하중이 크고 구조물의 유연성이 큰 경우 P-delta 효과에 의한 구조물의 피해가 발생할 수 있다.

7) Soft story : 구조물의 하부를 상부에 비해 강성이 작게 설계했을 경우 하부의 파괴가 발생할 수 있다.

8) 부등침하 : 지반의 부등침하는 직접적인 피해 뿐만 아니라 구조물의 거동에 비대칭성을 유발하여 피해를 초래할 수 있다.

9) 구조물과 지반의 상호작용 : 지반의 고유진동수가 구조물의 고유진동수와 비슷할 경우 공진현상에 의해 피해가 증가하며, 연약지반에서는 고층건물이 암반에서는 저층건물이 더 크게 지진의 영향을 받는다.

10) 지반의 액화현상(liquefaction) : 지반이 모래질일 때 발생하는 현상으로 지내력이 순간적으로 감소하여 구조물의 전도 등의 피해를 유발한다.

11) 앞선 지진의 피해 : 과거의 지진에 의한 피해를 제대로 보수하지 않았을 경우 피해가 일어나기 쉽다.

12) 부실한 설계 및 시공 : 지진의 효과를 제대로 고려하지 않고 설계를 하거나 부실한 시공을

하게 되면 많은 피해를 가져올 수 있다.

13) 기타 : 구조설계시 고려하지 않은 비내력벽, 계단 및 과도한 질량이 구조물의 동적거동을 변화시켜 파괴가 일어날 수 있다. 또한 구조물간의 충돌, 지진의 전파과정에서 연약지반에 의한 지진파의 증폭현상 등에 의해 구조물의 피해를 유발할 수 있다.

1.2.2 각종 지진피해 사례

미국에서 발생한 지진을 중심으로 지진의 규모와 지진피해상황을 살펴보면 다음과 같다.

1) San Francisco 지진(1906년) : 미국 California의 San Francisco에서 일어났으며 규모가 8.3(RM), 강진지속시간이 1분 정도로 측정되었다. 화재로 인한 피해가 극심하였고 2500명의 인명피해가 있었으며, 연약지반에 의한 피해도 많이 발생하였다.

2) Santa Barbara 지진(1925년) : 미국 California의 Santa Barbara에서 일어난 지진으로 규모가 6.3(RM)이었다. 조적조 구조물이 많은 피해를 입었으며, 철근 콘크리트 구조물이 목조 구조물보다 많은 피해를 입었다.

3) Long Beach 지진(1933년) : 미국 California의 Long Beach에서 일어난 지진으로 규모가 6.3(RM)으로 조적조가 많은 피해를 입었으며, 공공 건물 및 상업용 건물이 피해가 심했다.

4) Imperial Valley 지진(1940년) : 미국 California의 Imperial Valley에서 일어난 지진으로 규모가 7.1(RM)으로 건물의 80% 정도가 피해를 입었다.

5) Alaskan 지진(1964년) : 미국 Alaska의 Anchorage에서 일어난 지진으로 규모가 6.4(RM)이었으며 지속시간이 3분 정도였다. 내진설계 규정에 의해 설계된 건물들이 많은 피해를 입었으며, 지반의 액화현상에 의한 산사태의 피해가 심했다. 이 지진으로 131명이 사망하였고 5억불의 재산피해가 발생했다. 또한 멀리 떨어진 하와이에서도 해일에 의한 피해가 있었다.

6) Niigata 지진(1964년) : 일본의 Niigata에서 일어난 지진으로 규모가 7.3(RM)이었으며, 이 지진에 의한 대부분의 피해는 지반의 액화현상에 의

해 일어났으며, 26명이 사망하였고 3천여채의 집이 파괴되었다.

7) San Fernando 지진(1971년) : 미국 California의 San Fernando에서 일어난 지진으로 규모는 6.4(RM)이었고 지속시간은 12초였으며, 최대 지진가속도가 1.25g였다. 66명이 사망하였고, 10억불 정도의 재산피해가 발생하였고, 이 지진으로 UBC의 내진설계기준에 중요도계수를 도입했다.

8) 당산지진(1976년) : 중국의 당산에서 발생한 지진으로 규모가 7.8(RM)의 주진과 규모가 6.9(RM)인 후속지진이 있었다. 이 지진으로 주거시설의 98%, 산업용 건물의 90%의 파괴를 보였으며 약 65만명이 사망했다.

9) Mexico 지진(1985년) : Mexico에서 일어난 지진으로 규모가 8.1(RM)이었으며, 진앙은 Mexico City로부터 250마일 떨어진 태평양 연안의 해안도시 Lazaro Cardenas 앞바다였다. 진원에서의 강진 지속시간은 길지 않았으나 Mexico City의 지반특성으로 지반운동이 약 3분 동안이나 계속되었다. 이 지진으로 1만여명이 사망하였고 800여동의 건물 파괴 및 50억불의 재산피해가 발생하여 국가 경제가 치명적인 타격을 입었다.

10) Armenia 지진(1988년) : 구소련의 Armenia에서 발생한 지진으로 규모가 6.9(RM)이었다. 이 지진으로 Leninakan시의 반 이상의 구조물이 파괴되었고, 25000명이 사망하였으며, 142억불의 피해가 발생했다.

11) Santa Cruz(Loma Prieta) 지진(1989년) : 미국 California의 Santa Cruz부근에서 발생한 지진으로 규모가 6.9(RM)이었고 지속시간은 약 10초였다. 연약지반과 화재에 의한 피해가 있었고, 67명이 사망했고 2435명이 부상당했으며, 100억불의 재산피해가 발생하였다. 그러나 이 지진은 규모에 비해 구조물에는 큰 피해를 주지 않았다. 이것은 내진설계기준의 강화와 신속한 대응에 의한 것이었으며, 내진설계의 중요성이 확인되었다.

12) 이집트 지진(1992년) : 이집트에서 발생한 지진으로 규모가 5.9(RM)이었고 지속시간은 20초였다. 카이로의 학교, 상가건물 및 아파트가 500여채 파손되었고 550여명이 사망하였다.

13) 인도네시아 지진(1992년) : 마우메레시에서 발생하였으며 규모가 6.8(RM)이었다. 이 지진으로 마우메레시의 90%의 건물이 파괴되었고 1500여명이 사망하였으며, Tsunami에 의한 피해가 매우 심했다.

14) 홍성지진(1978년) : 충청남도 홍성지역에서 발생한 지진으로 규모가 약 5(RM)이고 강진기간이 약 14초였다. 2명의 부상자가 발생하였으며 관공서와 학교 건물이 다소 피해를 입었으며, 재산 피해는 4억원에 달하였다.

1.3 내진설계의 필요성

앞에서 언급한 지진피해 사례들로부터 세계적으로 지진피해의 심각성과 Santa Cruz 지진(1989)이 비슷한 규모의 Armania 지진(1988)이나 인도네시아 지진(1992)에 비하여 피해가 매우 적은 것을 알 수 있다. 즉 내진설계가 발전된 San Francisco는 대형 구조물이 밀집한 지역임에도 불구하고 적은 피해가 발생했으며, 대부분의 피해도 과거에 안전성에 대한 문제가 제기된 구조물에서 발생했다. 반면에 Armenia나 인도네시아는 지진에 대한 인식이 부족해 많은 인명과 재산의 손실을 입었다. 이와 같은 예로부터 내진설계의 중요성을 알 수 있다.

일반적으로 구조물의 설계에서 고려되는 하중으로는 크게 중력하중에 의한 수직하중과 풍하중과 지진하중에 의한 수평하중으로 나눌 수 있다. 수평하중은 풍하중의 영향이 통상 지진하중의 영향보다 중요할 수 있지만 지진하중과 풍하중은 그 성질에 있어서 큰 차이가 있으므로 간과할 수 없다. 풍하중은 대체로 바람방향의 외관과 외벽의 면적에만 관계가 있으나, 지진하중은 구조물의 외형보다는 구조물의 동적특성인 각 층의 질량이나 강성에 따른 관성력이며 지반에 따라 크게 달라질 수 있으므로 풍하중에 대해 안전한 구조물도 지진하중에는 취약한 경우가 많다.

지진의 발생빈도가 적고 강도가 약한 우리나라는 외국의 지진들과 직접적인 관계는 없지만, 지진에 대한 대비책을 세운 경우와 그렇지 않은 경우는 지진발생시 피해에 많은 차이가 있을 것이

다. 그리고 과거의 지진 기록들과 최근의 빈번한 지진발생 기록으로부터 우리나라가 지진에 대해 절대 안전하지만은 않다는 것을 알 수 있다. 실제로 1976년 중국의 당산지진이 발생하기전 그곳은 지진위험도가 낮은 지역으로 판단되어 대부분의 구조물이 내진설계를 하지 않았고, 결과로서 모든 구조물이 파괴되었으며 약 65만명의 인명피해가 발생한 것으로 발표되었다. 특히 지진에 대한 예측은 현재도 불가능하다. 그러므로 구조물의 고층화와 밀집화 현상이 점점 심화되고 있는 우리나라에서도 건설부가 1988년에 건축물에 대한 내진설계 기준을 제정하여 시행하고 있다.

내진설계는 국민의 안전과 재산의 보호를 위하여 필요한 것이지만 또 다른 한 면으로는 국내 구조기술자들의 내진설계능력의 향상을 도모하여 건설사업의 국제건설시장에서의 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 구조물의 내진설계

2.1 기본개념 및 일반원칙

내진설계는 지진에 의한 구조물과 인명의 피해를 방지하는 것을 목표로 한다. 지진에 대한 구조물의 거동은 구조물의 강성, 강도 및 변형능력과 관계 등으로 매우 복잡하며, 비탄성 거동을 하는 경우에는 하중의 반복특성 등에 따라 동적거동이 달라지기 때문에 거동의 예측이 힘들어진다. 또한 지진의 성질이나 강도 등에 대한 예측은 현재까지도 해답을 얻지 못하고 있다. 따라서 과거의 지진기록과 지반의 성질 등을 기초로 지진의 강도를 예측하고 구조물을 설계하여야 한다. 그러나 재현주기가 긴 강한 지진에 대해서도 구조물의 피해를 방지하고 절대 안전하게 구조물을 설계하는 것은 건설비의 과도한 증가로 경제적으로 타당하지 않다. 따라서 내진설계에서는 다음 세가지의 기본원칙에 따라 경제적인 구조물을 설계한다.

1) 재현주기가 짧은 약한 지진에 대해서는 탄성적으로 거동하고 구조적인 피해가 없어야 한다.

2) 보통의 지진에 대해서는 미소한 구조적 손상과 약간의 비구조적 손상을 허용한다.

3) 재현주기가 긴 강한 지진에 대해서는 구조적인 손상은 허용하지만 전체적인 붕괴는 방지되어야 한다.

즉 지진이 작용하는 동안이나 지진발생 후에도 구조물의 안전성은 유지되어야 한다. 따라서 구조물은 강한 지진에 대해서 구조물의 일부 부재에 비탄성거동을 허용하여 지진에너지를 흡수하고 소산시킬 수 있도록 충분한 연성을 가지며, 중요한 구조부재보다는 구조물의 안전성을 해치지 않는 구조부재에 비탄성 변형이 일어나도록 설계하는 것이 중요하다.

2.2 구조형태 및 구조재료

내진성이 강한 이상적인 구조형태는 없지만 다음과 같은 일반적인 원칙에 따라 설계하는 것이 지진에 대해 유리한 거동을 한다.

1) 구조물이 단순하고 질량이나 강성의 분포가 대칭이어야 한다.

2) 구조물의 높이·폭의 비나 길이가 극단적으로 크지 않고, 높이에 비해 평면이 너무 넓지 않아야 한다.

3) 강도의 분포가 균일하면서 연속적이며, 급격한 변화가 없어야 한다.

4) 수직부재(기둥)보다는 수평부재(보)가 먼저 비탄성변형을 해야 한다.

내진성이 큰 구조재료는 높은 연성과 무게에 비해 높은 강성을 가지며, 균질성(homogeneity)이 있어야 하고, 연결(connection)이 쉬워야 한다.

2.3 지진해석

지진해석방법에는 등가정적해석법과 동적해석법이 있으며, 해석방법의 선택은 해당구조물의 설계에 대한 요구사항, 내진설계의 수준 및 경제적

표 3 해석방법선택의 기본개념

대상 구조물	적용 해석 방법
소형, 간단한 구조물	1. 등가정적해석 2. 응답스펙터럼해석
↓	
대형, 복잡한 구조물	3. 모드중첩법에 의한 시각력해석 4. 직접적분법에 의한 시각력해석

인 이유 등으로 어느 한 방법만을 제시할 수 없지만 구조물이 작은 것에서 큰 것으로, 형태가 간단한 것에서 복잡한 것으로 또한 구조물의 중요도가 증가함에 따라 더 정밀한 해석방법을 사용하는 것이 일반적이다(표 3 참조).

2.4 구조물의 내진설계

구조물의 내진설계에 포함되는 사항을 열거하면 다음과 같다.

1) 일반사항

- 구조물의 용도, 위치, 구조방식, 지반의 특성 등 구조설계에 필요한 일반사항 결정

- 구조설계 기준

2) 설계하중의 산정

- 자중, 적재하중, 풍하중, 토압, 수압 및 기타 하중

3) 지진하중의 산정(등가정적해석법)

- 지진구역(지역계수: A)

- 건물의 중요도(중요도계수: I)

- 지반의 종류(지반계수: S)

- 구조방식(반응수정계수: R)

- 기본진동주기(T) 및 동적계수(C)

- 건물의 전 중량(W)

- 밀면전단력(V)

- 총 지진력, 총 전단력, 전도모멘트

4) 질량중심의 산정

- 구조물 전체의 자중의 중심을 산정한다.

5) 골조, 전단벽 등의 강성 산정

6) 편심 및 비틀림의 산정

- 질량중심과 강성으로부터 편심을 구하고 우발편심거리를 더하여 비틀림을 산정한다.

7) 분담수평력의 산정

- 골조 및 전단벽 등의 수평력 분담률을 산정

하고, 각 층별 분담 수평력을 산정한다.

8) 구조해석

- 각종 하중작용에 의한 구조해석을 실시한다. 지진하중에 의한 수평변위를 산정하고 층간변위를 검토한다.

9) 부재 단면의 설계

- 부재 단면이 요구되는 연성 능력을 갖도록 구조상세에 세심한 배려를 하여야 한다.

10) 구조제한 및 세칙에 대한 검토

- 구조계산에 의하여 산정된 각종 부재의 단면 및 배근 등에 대해서 내진구조 기준에 부합되는지 검토한다.

3. 등가정적해석법

3.1 등가정적해석법의 기본원리

등가정적해석법이란 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 전환한 후에 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법이다. 이 방법은 인접한 부재의 강성이 비슷하며 인접층의 강성과 질량에 큰 변화가 없고 구조물이 평면 또는 입면상 대칭을 이루는 정형구조물을 대상으로 하며, 구조물의 동적 특성이 특이한 비정형구조물에 대해서는 정확도가 떨어진다. 이 방법은 근사해석법이지만 동적해석을 이용하여 구조물의 거동을 예측하기 위해서는 많은 노력이 필요하고, 정형구조물이 지진에 대해 유리한 거동을 하기 때문에 대부분의 구조물을 정형이 되도록 설계하기 때문에 실제 많이 이용될 수 있다. 이와 같은 등가정적해석법은 다음과 같은 조건에 부합되면 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다.

- 1) 구조물은 정형이거나 정형에 가깝다.
- 2) 구조물의 거동은 기본진동모드에 지배적인 영향을 받는다.
- 3) 고차진동모드의 영향은 크지 않으며 기본진동모드에 의한 영향을 일부 수정함으로써 고려될

수 있다.

- 4) 구조물의 거동은 탄성범위 안에서 일어난다.
- 5) 구조물과 지반의 상호작용은 무시한다.

3.2 등가정적해석법의 개요

3.2.1 밀면전단력의 산정

등가정적해석법은 동적특성을 가진 지진하중을 등가의 정적하중으로 변환하여 정적해석을 수행한다. 먼저 구조물의 동적특성과 총 중량에 비례하는 밀면전단력을 구하고 이 밀면전단력으로부터 구조물의 각 층에 작용하는 층지진하중을 구한다. 그러므로 구조물에 대한 내진설계에서는 밀면전단력의 결정이 가장 중요한 과정의 하나이다. 밀면전단력은 구조물의 위치, 구조물의 용도, 고유진동주기, 구조방식, 유효중량 및 지반의 성질 등을 고려하여 다음식과 같이 산출된다.

$$V = \frac{AISC}{R} W \tag{1}$$

여기서 V = 밀면전단력, A = 지역계수, I = 중요도계수, C = 동적계수, S = 지반계수, R = 반송수정계수, W = 구조물의 유효중량을 의미한다. 위의 식에서 각각의 계수들을 결정하기 위하여 고려된 사항은 다음과 같다.

3.2.2 지역계수(A)

내진설계를 위해서는 각 지역에 따른 지진 위험도를 알아야 한다. 따라서 각 지역에서 예상되는 최대지반가속도, 최대지반속도 및 지진의 발생빈도에 따라 지진구역을 설정하고 지진위험도를 설정해 두고 있다.

3.2.3 중요도계수(I)

지진발생시 모든 구조물이 피해를 입지 않도록 설계하는 것은 합리적이지 못하다. 따라서 구조물의 사회적, 경제적 중요성에 따라 내진설계에서 고려할 지진의 정도에 차이를 둬으로써 구조물이 경제성과 내진안전성을 동시에 만족하도록 한다.

3.2.4 동적계수(C)

지진이 발생하여 구조물이 진동할 때의 구조물의 동적 영향을 등가의 정적 영향으로 바꾸어주기 위하여 사용하며 일반구조물의 경우 내진설계를 위하여 설계용스펙트럼을 이용한다. 구조물의 층수가 증가하면 기본진동주기가 길어지고, 진동주기가 길수록 구조물의 거동에 영향을 주는 진동모드의 수가 늘어나게 되므로 단자유도시스템을 이용하여 구한 반응스펙트럼에 근거한 설계용스펙트럼의 적용이 부정확하게 되고, 진동주기가 긴 구조물은 유연성이 큰 경향을 보이기 때문에 비선형거동의 가능성이 있다. 이러한 영향때문에 동적계수의 성질은 구조물의 진동주기가 길 때에는 진동주기에 반비례하는 경향이 있지만 다음식과 같이 진동주기의 제곱근에 반비례하는 설계용스펙트럼을 사용한다.

$$C = \frac{1}{1.2\sqrt{T}} \leq 1.5 \quad (2)$$

여기서 기본진동주기 T는 각 구조형식에 따른 아래의 규정에 의한 각 구조형식에 따른 아래의 근사식을 이용하거나 고유치해석법에 의한 값을 이용한다.

1) 모멘트골조인 경우의 철골구조

$$T = 0.085h_n^{3/4}$$

2) 모멘트골조인 경우의 철근콘크리트 구조

$$T = 0.06h_n^{3/4}$$

3) 위 1), 2)를 제외한 구조

$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{B}}$$

고유치해석법에 의하여 구한 기본진동주기가 규정에 의해 근사적으로 구한 기본진동주기의 1.2를 곱한 값을 초과하는 경우 그 1.2를 곱한 값을 사용한다.

3.2.5 지반계수(S)

지반의 성질에 따라 지진의 영향이 달라지는 것을 고려하기 위하여 사용하는 데 단단한 지반을 기준으로 연약한 지반에 대해서 증가된 값을 사용

한다. 유연한 지반에서 기본진동주기가 짧은 구조물의 경우에 설계용스펙트럼의 값이 과대평가되는 것을 방지하기 위하여 동적계수와 지반계수의 곱을 1.75로 제한하고 있다.

3.2.6 반응수정계수(R)

구조물의 내진설계에 필요한 지진하중을 산정할 때 재현주기가 긴 큰 규모의 지진에 대해서도 피해가 발생하지 않도록 설계하는 것은 경제적이 못하므로 큰 지진에 대해 구조물에 비탄성거동을 유도함으로써 경제적인 설계가 되게 한다. 이러한 목적으로 반응수정계수가 사용되며 구조물의 비탄성거동에 대한 연구결과를 토대로 ATC에서 처음 사용되었다. 이 계수는 구조물의 연성(ductility)이 클수록 큰 값을 가지며, 구조방식과 구조재료에 따라 달라진다.

3.2.7 구조물의 유효중량(W)

구조물의 유효중량은 구조물의 전체 자중과 건축설비의 하중을 포함한다.

3.2.8 층지진하중(F_x)의 산정

층지진하중은 계산된 밀면전단력을 각 층에 분배하여 구한다. 각 층의 층지진하중은 각 층의 중량과 진동모드의 영향을 고려하여 다음식과 같이 결정되며, 결국 높은 층일수록 층지진하중은 커지게 되고, 층지진하중의 합은 밀면전단력과 같다.

$$F_x = \left(\frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^m W_i h_i^k} \right) V \quad (3)$$

여기서 W_i , $W_x = i, x$ 층의 구조물 중량, h_i , $h_x =$ 구조물 밀면으로부터 i, x 층까지의 높이이며, k 는 구조물의 기본진동주기에 따라 달라진다.

3.2.9 층전단력(V_x)의 산정

층전단력은 그 층의 상부에 작용하는 층지진하중의 합으로 다음식과 같이 구해진다.

$$V_x = \sum_{i=x}^m F_i \quad (4)$$

4. 동적해석법

4.1 동적해석법

우리나라의 내진설계기준에는 동적해석법에 대한 언급이 전혀 없으나 구조물이 고층 혹은 비정형인 경우와 중요한 구조물인 경우 등가정적해석법에 의한 지진해석결과를 내진설계에 이용하는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 이와 같은 구조물의 내진설계에서는 구조물의 동적거동을 보다 정확히 예측할 수 있는 동적해석법을 이용한다.

지진하중에 의한 구조물의 동적거동을 나타내는 데 사용되는 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{U}_g\} \quad (5)$$

여기서 $[M]$ = 질량행렬, $[C]$ = 감쇠행렬, $[K]$ = 강성행렬, u = 변위벡터 이고 \ddot{u}_g = 지반가속도이다. 동적해석은 궁극적으로 식(5)와 같은 운동방정식의 해를 구하는 것으로 방정식의 해를 구하기 위해서는 첫째로 직접 수치해석을 행하는 방법(직접적분법, direct integration method)과 둘째로 식(5)를 서로 독립적인 미분방정식으로 변환하고 각 모드에 대한 결과를 중첩하는 방법(모드중첩법, mode superposition method)이 있으며, 이 방법은 다시 시간영역해석과 주파수영역해석으로 나눌 수 있으며, 내진설계에서 실용적으로 이용될 수 있는 방법은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 응답스펙트럼해석법(modal analysis 혹은 spectrum analysis method)

- 시각력해석법(time history analysis method)
 - o. 모드중첩법(modal superposition method)
 - o. 직접적분법(direct integration method)

4.2 직접적분법에 의한 시각력해석

직접적분법은 미분방정식으로 나타내어지는 구조물의 운동방정식을 수치적인 방법으로 적분하여 해를 구하여 구조물의 거동을 알아내는 방법으로 입력하중은 지반운동의 가속도기록(accelerogram)으로 주어진다. 가속도기록은 설계용으로 제안된 인공지진을 이용하거나 과거의

지진기록을 이용하기도 한다. 이 방법은 운동방정식을 짧은 시간간격에 대하여 단계적으로 구조물의 시간에 따른 거동을 구하는 방법이다.

수치적으로 직접적분하는 해법은 운동방정식을 푸는 과정에서 현재 시간 t 에서의 평형식으로 해를 구하는 외연적(explicit) 적분방법과 시간 $t + \Delta t$ 에서의 평형식으로 해를 구하는 내재적(implicit) 적분방법으로 구분된다. 대체로 내재적 방법은 시간간격을 크게 할 수 있지만 한 단계의 해를 구하는 데 계산량이 많이 요구되고, 외연적 방법은 한 단계의 해를 구하는 데 계산량은 많이 필요로 하지 않지만 시간간격을 작게 하여야 한다.

이 방법들은 지진에 대한 구조물의 동적거동을 가장 정확하게 예측할 수 있지만 가속도의 초기치를 가정해야 하고, 각각의 시간간격에 대해 가속도의 변화에 대한 가정이 필요하다. 이에 따른 오차를 줄이기 위해서는 짧은 시간간격이 요구되고 계산량이 많이 필요하기 때문에 비경제적이다. 그러므로 이 방법은 주로 비선형 거동을 구하는 데 이용된다.

4.3 모드중첩법에 의한 시각력해석

이 해석방법은 구조물의 운동방정식의 해를 직접적분법으로 구하는 데는 많은 계산량이 필요하므로 동적거동을 효율적으로 구하기 위하여 각 모드에 대하여 독립적인 미분방정식으로 변환하여 각 모드에 대한 시각력해석을 하는 것을 말한다. 이 모드 중첩법은 구조물의 각 모드의 직교성(orthogonality)에 따라 각 고유진동모드에서의 거동을 다른 모드와 독립적으로 구해질 수 있고, 각 모드에서의 거동을 조합하여 전체 거동을 결정할 수 있다는 사실을 근거로 한다.

운동방정식 (5)를 선형좌표변환 $\{u\} = [\phi] \{q\}$ 을 사용하여 고유진동모드 좌표계로 표현하면 다음 식과 같다.

$$m_i \ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + k_i q_i = Q_i \quad (6)$$

여기서 $m_i = \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}$, $k_i = \{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\}$, $c_i = \{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}$, $Q_i = \{\phi_i\}^T [M] \{\ddot{U}_g\}$ 이고, ϕ_i 는 i 번째 고유

진동모드를 나타낸다. 식(6)을 질량 m_i 로 나누어 정리하면 i 번째 모드의 자유진동수(ω_i)와 감쇠율(ξ_i)로 표현될 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = Q_i/m_i = -\Gamma_i\ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

여기서 Γ_i 는 i 번째모드의 모드참여계수(modal participation factor)라 하며 각 모드에 대한 하중 크기의 의미를 가진다. 그리고 각 모드가 구조물의 응답(밀면전단력, 전도모멘트 등)에 미치는 영향을 나타내는 질량참여계수(γ_i , mass participation factor)는 다음과 같다.

$$\gamma_i = \frac{\left(\sum_{k=1}^n m_k \phi_{ki}\right)^2}{\sum_{k=1}^n m_k \phi_{ki}^2} \quad (8)$$

이 질량참여계수를 전 모드에 대하여 합하면 지진하중이 작용하는 방향의 질량의 합이 된다.

모드중첩법으로 구조물 응답의 시각력을 구하려면 식(7)의 각 모드에 대해 구성되는 단자유도 운동방정식으로부터 응답의 시각력, $q_i(t)$,을 구한 후 각 모드에서의 값을 조합하여 전체응답의 시각력, $u_i(t)$ 을 구한다. 이 방법에서 모든 모드에서의 응답을 중첩키면 정확한 응답의 시각력을 구할 수 있다. 그러나 이 방법의 장점은 각 모드로부터 구성되는 단자유도계에 대한 독립적인 해석이 가능하므로 동적거동을 지배하는 몇개의 저차진동모드에 대한 해석만으로 정확해에 근접한 해를 얻을 수 있다는 점이다. 그러나 이 방법은 각 모드를 중첩하여 해를 구하기 때문에 선형탄성해석에 한정되고, 비선형해석에는 사용될 수 없다.

4.4 응답스펙트럼해석법

4.4.1 응답스펙트럼해석법

일반적으로 지진기록은 같은 지역이라도 다양하고 우연성을 내포하므로 구조물의 거동을 예측할 때 어느 한 지진기록만을 사용하기 보다는 지진에 대한 믿을만한 기록과 정보를 총망라한 지진기록을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 지진의

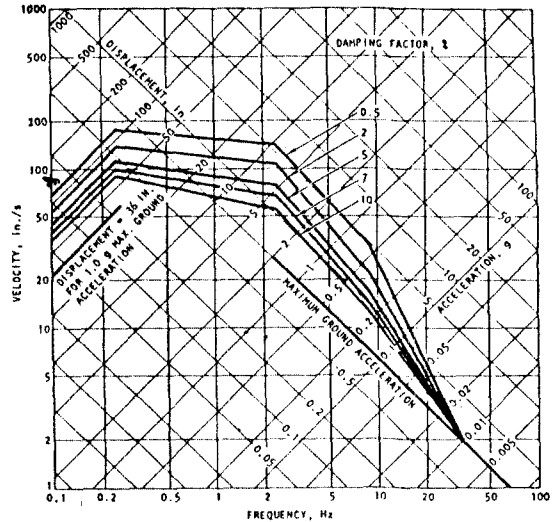


그림 1 지진에 대한 설계응답 스펙트럼의 예 (NRC Regulatory Guide 1.60)

자료는 그림 1과 같은 설계용 응답스펙트럼(design response spectrum)의 형태로 통계적 방법으로 정리되어 지진의 특성을 나타내게 되는데 이 스펙트럼은 주어진 지진기록에 대해 모든 단자유도 시스템의 진동주기(또는 진동수)에 따른 최대 응답(변위, 속도 및 가속도)을 나타낸다. 이 스펙트럼은 단자유도 구조물을 사용하여 구한 것이지만 모드중첩의 원리에 의해 다자유도 구조물의 경우에도 근사적으로 적용될 수 있다.

응답스펙트럼 해석법으로 구조물의 지진하중에 대한 동적해석을 수행하고 응답의 최대치를 구하기 위해서는 먼저 구조물의 진동주기와 모드형태를 구하고 그 주기에 해당하는 응답스펙트럼의 값을 입력하중으로 사용한다. 그리고 이 값을 각 모드별로 모드참여계수로 조정하여 전체 모드에 대해 중첩한다. 모드별 구조물의 최대변위를 구하는 방법을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{u\}_{i, max} = \{\phi_i\} q_{i, max} = \{\phi_i\} \Gamma_i S_d(\xi_i, \omega_i) \quad (9)$$

여기서 $S_d(\xi_i, \omega_i)$ 는 변위의 응답스펙트럼이다. 일반적으로 각 모드의 거동을 중첩할 경우 다음식과 같이 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares)방법에 의하여 근사적으로 구한다.

$$r_{max} = (r_{1,max}^2 + r_{2,max}^2 + \dots + r_{n,max}^2)^{1/2} \quad (10)$$

여기서 r 은 i 번째 모드에 의한 변위, 속도, 가속도, 힘, 모멘트 등이다. 그러나 인접한 진동모드의 고유진동수가 비슷한 경우에는 약간 수정된 방법을 이용하여야 한다.

응답스펙트럼 해석법은 지진에 대한 구조물의 응답의 최대치만을 구하고자 할 때에는 가장 효율적이며, 실제 구조설계는 이들 최대치에 의해서 이루어지기 때문에 구조물의 동적해석법으로 가장 많이 쓰인다.

4.4.2 내진설계기준을 고려한 설계스펙트럼해석법

이 방법은 내진설계기준에서 규정하는 설계용 스펙트럼을 입력스펙트럼으로 사용하여 해석하는 방법으로 우리나라 내진설계 기준에는 동적해석 방법에 대한 규정이 없다. 그러나 등가정적해석법을 적용하기 곤란한 비정형구조물이나 고층 구조물에는 구조물의 동적특성이 고려된 설계스펙트럼해석법을 적용하는 것이 바람직하다.

1) 해석모델과 진동모드

구조물은 각 층에서 횡방향으로 하나의 수평자유도만을 가지는 2차원 해석모델로 모형화 하고, 각 층에서 자유도방향으로 집중질량을 사용한다. 해석 시에 진동모드를 모두 사용하면 정확성이 높은 해석 결과를 얻을 수 있으나 처음 몇 개의 저차모드가 동적거동에 지배적인 영향을 미치므로 해석에 필요한 노력을 줄이기 위해 정확성을 해치지 않는 범위에서 몇개의 모드만을 선택적으로 사용한다. 각각의 방향에 대한 해석에서 사용할 최소한의 진동모드 수는 편의상 아래에서 정하는 모드수 중에서 큰 값을 사용한다.

- 적어도 3개의 진동모드(단, 2층 이하의 경우에는 층수 만큼의 모드)
- 진동주기가 0.4초 이상인 모든 진동모드
- 고층구조물인 경우 층수를 10으로 나눈 수보다 하나 더 많은 모드

2) 밀면전단력(V_m)의 산정

등가정적해석법에 사용되는 밀면전단력 산정공식 ($AICSW/R$)으로부터 m 번째 모드에 대한 밀면전단력, V_m 은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$V_m = S_{am} W_m \quad (11)$$

$$S_{am} = AIC_m S/R \quad (12)$$

여기서 $C_m (=1/1.2\sqrt{T_m} \leq 1.5)$ 은 동적계수, $W_m (= (\sum_{i=1}^n W_i \phi_{im})^2 / \sum_{i=1}^n W_i \phi_{im}^2)$ 은 모드별 유효중량이고 n 은 자유도수를 의미한다.

3) 층지진하중(F_{im})의 산정

각 모드별 층지진하중은 다음식으로 구한다.

$$F_{im} = \frac{W_i \phi_{im}}{\sum_{j=1}^n W_j \phi_{jm}} V_m \quad (13)$$

4) 모드별 최대 층 변위(δ_{im})의 산정

각 층의 모드별 최대변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{im} = \frac{g T_m^2 F_{im}}{4\pi^2 W_i} \quad (14)$$

여기서 구한 층변위는 구조물의 연성거동을 고려하여 감소된 설계용스펙트럼에 의한 탄성해석결과이므로 설계용 층변위는 다음과 같이 반응수정계수(R)를 곱하여 사용한다.

$$\delta_{im} = R \delta_{im} \quad (15)$$

5) 층간변위(Δ_{im}), 층전단력(V_{im}) 및 전도모멘트(M_{im})의 산정

각 모드에 대한 인접층의 층간변위는 인접층간의 변위의 차이이며, 각 층에 대한 모드별 전도모멘트와 층전단력은 모드별 층하중을 이용하여 정역학적으로 구한다.

6) 해석결과의 조합

구조물의 내진설계를 위하여 사용되는 밀면전단력, 층전단력, 층지진하중, 층변위 및 층간변위 등은 각 모드에 의해 구해지는 값들을 SRSS방법에 의해 조합한다. 그러나 진동모드의 진동주기가 비슷한 경우 실제 구조물의 거동을 과소평가하는 경우가 생기게 된다. 따라서 설계용으로 조합된 밀면전단력(V_i)을 등가정적 해석법에서 사용한 진동주기를 1.5배한 진동주기를 사용하여 구한 밀면전단력(V_j)과 비교하여 조합된 밀면전단력이 작은 경우에는 모든 계산 결과(변위, 모멘트, 전단력 등)에 V_j/V_i 를 곱하여 밀면전단력을 V_i 와 같도록 증가시켜 줄 필요가 있다. 또 V_j 는 등가정적해석법에 의한 밀면전단력보다 클 필요는 없다.

5. 맺는 글

앞에서 언급한 지진해석과 내진설계에 대한 기본적인 내용은 1988년부터 시행되는 우리나라 내진설계기준과 이 기준의 제정을 위한 연구보고서(참고문헌 1)에 기초하여 작성하였다. 현재 우리나라 건축물의 내진설계기준은 등가정적해석법에 기초하고 있으며, 동적해석법에 대한 규정은 없으

나 참고문헌 1에 수록된 내용을 적용하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

1. 건설부, 건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구, 제 1 권, 1987.
2. 건설부, 내진설계 지침서 작성에 관한 연구, 1987.
3. 한국과학기술원, 건축물의 내진설계 이론 및 기법, 1988.
4. 한국전산구조공학회, 구조물의 내진설계 기법, 1992.
5. 기상청, 1978-1992 지진관측보고, 1992.
6. 동력자원연구소, 한반도의 지진위험도, 1983.
7. Applied Technology Council, "Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings," National Bureau of Standards, Special Publication 510, ATC Publication ATC3-06, 1978.
8. Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1988.
9. N. M. Newmark and W. J. Hall, "Earthquake spectra and design," Earthquake Engineering Research Institute, 1982. □

1993년도

가을학술발표회 및 정기총회 개최 안내

본 학회의 1993년도 가을학술발표회 및 정기총회를 아래와 같이 개최하고자 하오니 회원들의 많은 논문 및 시공사례 발표를 바랍니다.

- 개최일 : 1993년 11월 6일(토)
- 장 소 : 전남대학교
- 발표논문계획서 제출 마감일 : 1993년 10월 5일(화)
- 발표논문 제출 마감일 : 1993년 10월 20일(수)

자세한 내용은 학회사무국(543-1916, 545-0199)으로 문의하시기 바랍니다.