한국소음진동공학회지 제 5 권 제 1 호, pp. 6~10, 1995.

지진의 성질과 내진설계

홍 갑 표
(연세대학교 건축공학과)

1. 머 리 말

최근 일본 고베에서 발생한 지진에 따른 구조물의 피해를 보고, 국내에서도 많은 구조전문가들이 현장을 방문하여 건물의 피해정도와 양상을 파악하였다. 그리고 구조물에 대한 내진설계의 중요성을 새삼 깨닫게 되었다. 이와 관련하여, 국내에서는 1987년에 제정된 내진설계에 대한 규준를 강화해야 한다는 의견이 제시되고 있다. 본 글에서는 지진의 기본적인 성질, 지진파의 특성, 스펙트럼 및 내진설계에 대하여 언급하고자 한다.

2. 지진의 기본적인 성질

2.1 지진파의 종류와 성질

지진은 지구를 구성하는 암석이 어떤 원인에 의해 급격하게 파괴를 일으켜 발생하는 자연적인 현상이다. 지진에 의해 유발되는 진동을 지진하중이라 부르며, 지진과 지진하중의 용어는 구별되어 사용된다.

지진을 일으키는 암석의 파괴영역에서, 그 파괴현상이 최초로 시작된 지중의 점을 진원(震源)이라 한다. 이 지중깊이를 진원깊이라고 부르며, 진원에서 지표에 대하여 수직으로 만나는 점을 진앙이라 부른다. 또, 진원, 진앙과 어떤 관측점사이의 거리를 각각 진원거리, 진앙거리라고 부른다(그림 1).

진원에서 발생한 지진파는 사방으로 전달되어, 다양한 전달경로로 지표에 도착하게 된다. 지진파는 전달경로, 매질의 종류, 형상 등에 의해, 복잡하게 변화하여, 각각의 관측점의 특징을 갖는 지진하중이 된다. 내진공학에서 중요한 지진파는 그림 2와 같이 크게 나눌 수 있다. P파는 최초에 도착하는 파이며, 종파(縱波)라고도 부른다. P파는 물리적으로는 소밀파(疎密波), 압축파이며 전달방향에 평행하게 진동하여 전달된다. S파는 P파 이후에 도착하는 파이며, 물리적으로는 전단파, 비틀림파이다. S파는 전달방향에 수직으로 진동하여 전달되기 때문에, 횡파라고도 부른다. 이 가운데 수평성분만을 갖는 S파와, 연직성분과 수평성분을 갖는 S파로 분류하여, 각각 SH파, SV파라 부른다. P파, S파의 간단한 전달모형을 그림 3에 나타내었다.

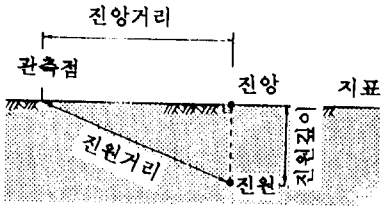

그림 1 지진 진원

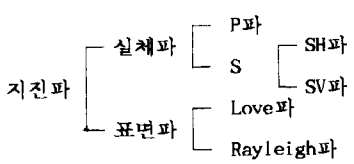

그림 2 지진파의 종류

P파, S파의 전달속도 V_p, V_s는 전달매질의 탄성계수에 의해 결정되며, 다음 식과 같다.

$$V_p\sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (1)$$

$$V_s=\sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

여기서, E : 탄성계수 , G : 전단탄성계수, ν : 포와송비, ρ : 밀도이다. 식 (1)과 식 (2)로 부터 $V_p > V_s$임을 알 수 있다.

P파, S파는 전달매질이 탄성체라면, 매질의 내부로 깊이 전달된다. 이 때문에 이러한 파를 실체파라 부르고 있지만, 지중의 매질에는 많은 불연속면이 존재하기 때문에 이러한 불연속면에 의해 실체파는 반사, 굴절, 증폭, 감쇠 등의

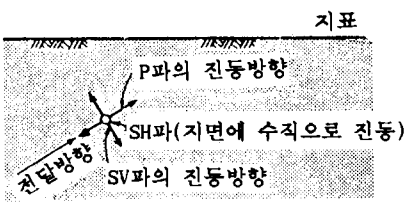

그림 3 실체파의 전달모형

복잡한 작용을 받게 된다. 이와 같은 P파, S파의 매질불연속면에서의 반사, 굴절은 빛의 경우와 마찬가지로 Snell의 법칙을 따른다.

일반적으로 지표로 부터 지중으로 내려갈수록 지구매질의 탄성계수는 커지기 때문에 Snell의 법칙에 의해, 지중의 진원에서 발생한 실체파는, 그림 4에서 처럼, 지표면 근처에서는 수직으로 입사하는 경향이 강하다.

한편, 매질의 불연속면에서 실체파의 반사, 굴절현상은 특수한 전달형태를 갖는 특별한 파를 발생시킨다. 지표면의 근처에 에너지가 집중되어 지표면에 연하여 진행되는 파가 발생되는데 이를 표면파라 부른다. 표면파는 Love파와 Rayleigh파로 크게 구별된다. Love파는 SH파가 지표와 지중의 지층경계면사이에서 완전반사를 반복하여 일으킬 때 지표면에 연하여

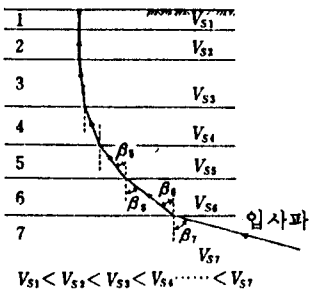

그림 4 실체파 입사각의 변화

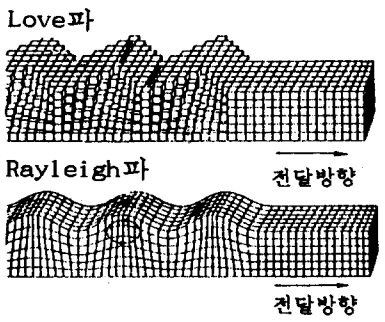

그림 5 Love파와 Rayleigh파의 전달모형

진행하는 파이다. Rayleigh파는 P파, SV파가 Love파와 마찬가지로 완전반사를 일으켜 발생하는 표면파이다. 따라서 Love파는 전달방향에 수직한 수평변위성분만을 가지고 있으며, Rayleigh파는 전달방향에 평행한 수평변위성분과 연직변위성분을 갖는다. Love파와 Rayleigh파의 전달모형은 그림 5에 나타내었다.

2.2 지진의 규모와 진도

(1) 지진의 크기와 지진하중의 강약

지진은 지각의 복잡한 파괴에 의해 일어나는 현상이기 때문에, 지진의 규모를 정확하게 표현하는 것은 대단이 어려운 일이다. 이와 같이 복잡한 물리현상인 지진의 크고 작음을 간단히 나타내는 수치로서, 규모(Magnitude[M])라는 척도를 사용하고 있다. 한편, 동일한 규모의 지진에서도, 장소에 따라 지진하중의 강약은 크게 다르다. 어떤 지점의 지진하중의 강약을 간단히 나타내는 척도로서는 진도(Intensity[I])를 사용하고 있다. 진도는 지진하중의 기계적 관측으로 부터 결정되는 것은 아니며, 인간의 감각, 각종 물체 구조물의 거동으로 부터 결정되며, 이 결정기준도 국가마다 틀리다. 예를 들어, 일본에서는 기상청 진도(JMA진도)가 사용되며, 구미에서는 수정 머켈리 진도(MM진도)가 사용된다. 국내

표 1 수정 머켈리 진도

진 도	일어나는 현상
I	민감한 기구에 의해 감지된다.
II	구조물의 상층에 있는 소수의 사람들에 의해서 느껴진다.
III	실내에서 느낄 수 있으며, 지진으로 인식하지 못할 수도 있다.
IV	실내에서는 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 흙이나 석회등이 떨어지며 굴뚝이 피해를 입는다.
VII	보통 구조물은 일부 피해를 입는다. 운전중인 사람이 느낄 수 있다.
VIII	무거운 가구가 넘어지며 굴뚝, 벽 등이 무너진다. 자동차의 운전에 지장을 받는다.
IX	잘 설계된 구조물이 기울어지고, 일반 구조물에 큰 피해를 주고 일부 붕괴된다. 땅은 금이 가고 지하 파이프가 부러진다.
X	대부분의 목조 구조물이 피해를 입고 석조구조물이 무너진다. 땅은 심하게 금이가고, 철로가 휘어진다. 산사태가 일어난다.
XI	잘 설계된 일부구조물이 남아있고, 각종 교량이 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.

에서는 구미에서 사용하는 수정 머켈리 진도를 사용하고 있다. 전자는 0~7의 8단계, 후자는 12단계로 나누어지며, 이것은 1대1로 대응되지 않기 때문에, 국내 및 구미의 지진과 일본의 지진에 있어서, 지진하중의 강약을 진도로 비교할 경우에는 주의가 필요하다.

한편, 공학분야에서는, 지진하중의 강약을 나타내는 하나의 파라메타로서 지진하중의 가속도 a와 중력가속도 g의 비 a/g가 사용된다.

(2) 규모의 종류

진앙거리, 지반조건의 차이를 합리적으로 고려하여, 지진하중의 진폭의 크기로 부터, 지진의 규모를 간접적으로 표현할 수 있는 방법을 고안하였다. 이것이 지진의 규모, 즉 Magnitude를 나타내는 방법인 것이다.

지진의 규모를 최초로 결정한 것은 Richter라는 사람이다. Richter는 특별한 변위계에 기록된 지진기록의 최대진폭 A와 진앙거리 Δ의 관계를 조사하여, $\log_{10}A$와 Δ의 관계는 지진에 관련된다는 것을 알아 내었다. 규모 M은 진앙거리 Δ (km)에서 최대변위진폭 $A(\mu m)$에 의해 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$M=\log_{10}A+k\log_{10}\Delta+c \quad (3)$$

여기서, k, c는 정수(定數)이다.

표 2 규모와 진도의 관계(Richter, 1958)

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

Richter의 규모 M은 진앙거리 $\Delta<600$km의 진원인 지진을 대상으로 한 것이며, 현재는 이를 Richter Local Magnitude(M_L)라 부르고 있다.

규모 M은 지진의 규모를 간단히 나타내는 파라메타이며, 물리적 현상으로서 지진의 크기를 충분히 나타낼 수 있는 것은 아니다. 그러나 정확성이 떨어지는 결점을 가지고 있지만, Magnitude는 지금까지 대부분의 지진에 대해서 규로를 결정하는 데 오랫동안 사용되었으며, 간단한 물리량이지만 실무적으로는 유효한 파라메타이다. 따라서 공학분야에서는 Magnitude 를 각종 지진하중 특성을 기술하는 데 사용되고 있다.

(3) 국내의 지진활동

역사 지진은 국내의 고대문학이나 중앙행정의 문헌에서 발견된 것으로 일본인 지진학자 와다 쓰나시로(和田維四郎)와 무샤 긴끼찌(茂者金吉)에 의해 1912년과 1949년에 처음으로 이 작업이 실시되었다. 이 두 학자는 모두 우리나라의 고대문헌에서 실제로 지진발생 사항을 찾아 그 내용을 발표하였다. 그들이 이용한 지진 기록문헌은 삼국사기, 증보문헌비고, 고셜사, 구조보감, 풍운기, 이조열성실록, 승정원일기, 일성록 등이다.

역사 지진은 15세기에서 18세기 사이에 활발하였으며, 20세기초까지는 지진의 활동이 미약하였다. 그러나 최근에 다시 지진활동이 활발해지기 시작하였다고 볼 수 있으며 이는 1968년 동해에서 발생한 지진($M=5.4$), 1978년, 속리산과 홍성의 지진 등에 의해 알 수 있다.

현재 국내지진기록은 기상청에서 디지탈신호로 기록되고 있으며, 국내 일부 학자들도 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 일반인들의 기상청 자료 획득은 쉽지않은 실정이다.

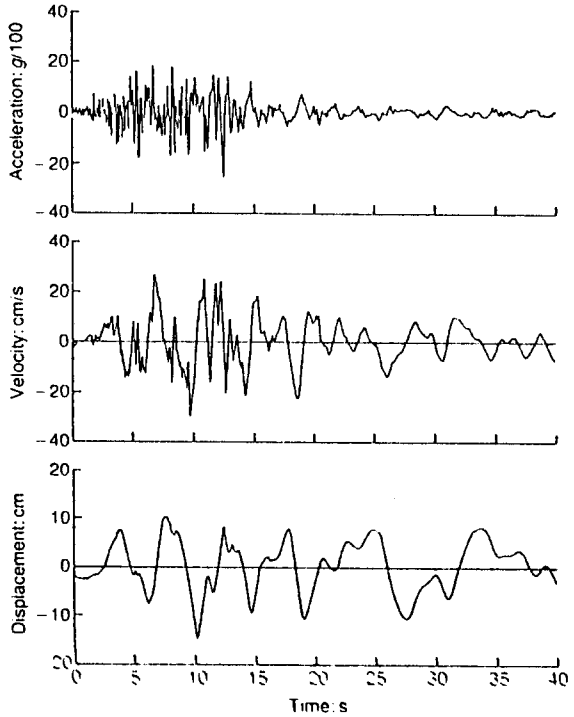

그림 6 강지진 운동의 시간이력

3. 지진하중에 의한 지반운동

그림 6은 시간에 대한 지진의 변위, 속도, 가속도의 시간이력을 나타낸 것이다. 가속도이력은 강진운동에 의해 기록된 것이며, 속도와 변위는 이를 적분해 그린 것이다. 이것은 가장 단순한 형태의 기록이면서, 이 지진에 대한 정보를 준다. 시간이력에 있어서 중요한 파라메타는 강진기록의 최대치(peak value)와 지속시간(duration time)이다. 지진의 기록은 0.02초 또는 0.01초 간격으로 기록되는 것이 보통이다.

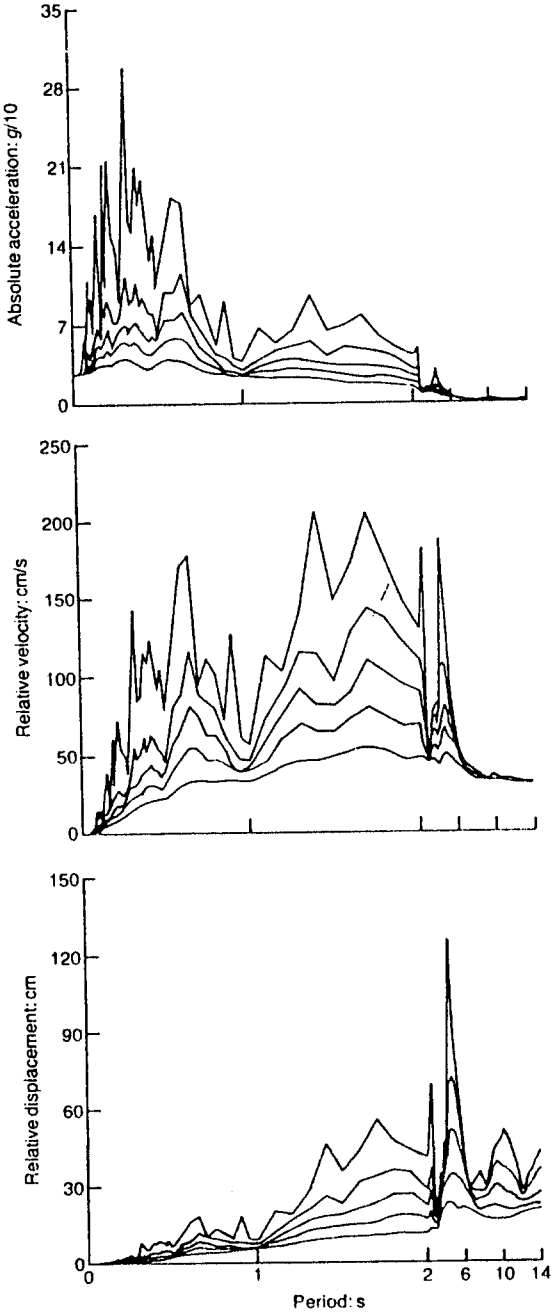

그림 7 응답스펙트럼(San Fernando earthquake, 9 February 1971)

시간이력에 대한 대안으로, 진동수영역의 그림, 즉 스펙트럼(spectrum)이 사용된다. 각 스펙트럼은 하나의 시간이력에 대한 것을 나타내는 것이다. 스펙트럼에 많는 종류가 있지만 대개, 푸리에(Fourier) 스펙트럼, 응답(Response) 스펙트럼, 파워(Power) 스펙트럼이 사용된다.

응답스펙트럼은 1자유도의 스프링-질량-감쇠 시스템의 최대 변위, 속도, 가속도를 이 시스템의 고유진동수에 대하여 표시한 것이다. 감쇠값에 따라 최대값을 연결해 나타낸 것이 그림 7이다. 각각의 시간이력에 대한 응답스펙트럼이 존재하지만, 이 역변환은 인정되지 않는다. 그것은 각 응답스펙트럼에 상응하는 시간이력은 무한히 존재하기 때문이다.

푸리에 스펙트럼은 푸리에 해석에 의해 구한 기록의 진동수 성분을 나타낸 것이며, 파워 스펙트럼은 흔히 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectrum Density)라고 하는 것이며, 직접 푸리에 스펙트럼으로부터 구한다.

설계를 목적으로 하는 스펙트럼은 부드러운 곡선으로 나타내기 위해 대개 기록을 평균하며 그림 8과 같은 설계응답스펙트럼을 나타낼 수 있다.

4. 내진설계

건축구조물에 작용하는 횡하중은 풍하중과 지진하중이다. 그러나 풍하중은 구조물의 구조적 성질보다는 구조물의 외형에 많은 영향을 받는 반면에 지진하중은 관성력에 의해 좌우되므로 구조물의 동적특성에 많은 영향을 받는다. 또한 대부분의 건축구조물은 사용년한 동안에 예상되는 최대의 풍하중에 근접하는 강한 바람을 경험하게 되

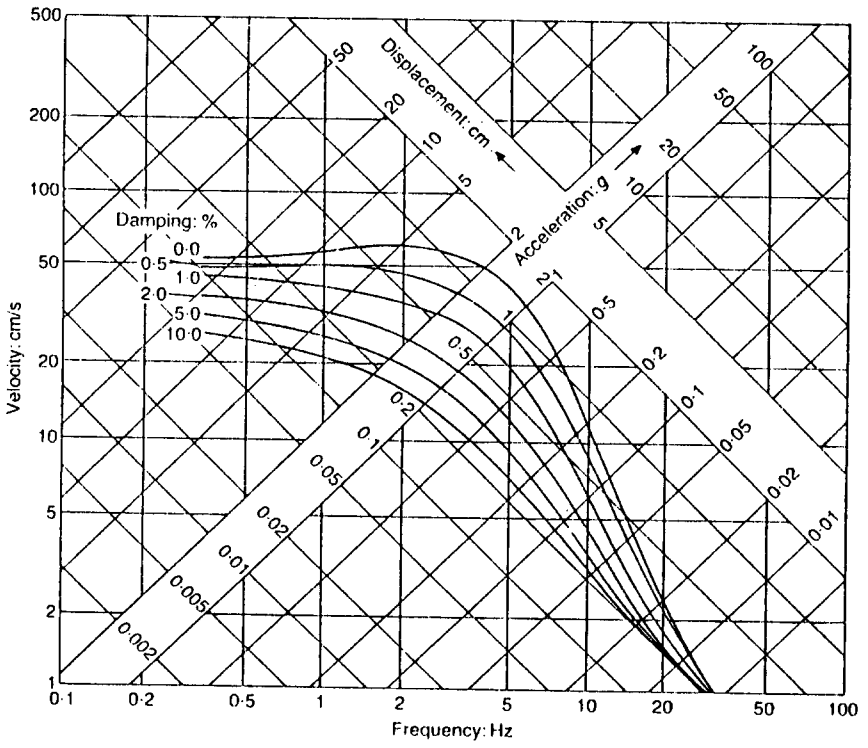

그림 8 설계응답스펙트럼

나, 예상되는 최대의 지진을 경험하는 건축구조물은 드물다. 이는 아주 큰 지진의 재현주기는 수십년에서 수백년에 이르고 있기 때문이다. 따라서 지진하중을 고려할 때는 사용건축물의 중요도에 대한 고려가 필요하다.

또한 내진설계시에는 경제적인 면을 고려하여 다음의 세가지 원칙을 따르고 있다.

(1) 자주 일어날 수 있는 약한 지진에 대해서는 아무런 피해가 없도록 한다.

(2) 가끔씩 일어나는 중간 정도의 지진에 대해서는 약간의 건축적인 피해는 있어도 구조적인 피해는 발생하지 않아서 보수후에 건축구조물이 다시 사용될 수 있도록 한다.

(3) 아주 드물게 일어나는 큰 지진에 대해서는 구조적인 피해가 발생하더라도 붕괴되지 않도록 한다.

내진설계시에는 3장에서 언급한 설계스펙트럼을 이용하는 데, 구조물의 단자유도화, 탄성 스펙트럼의 설정, 지반조건의 고려, 비선형거동과 감쇠효과, 진동주기의 영향, 구조물의 중요도 등을 고려하여 작성된 스펙트럼을 사용한다(그림 8 참조).

5. 맺 음 말

본 글에서는 지진에 대한 일반적인 성질과 내진설계시 고려되어야 할 사항에 대하여 알아보았다. 점점 고층화되어가는 건축구조물에 대한 내진설계의 필요성이 더욱 커지고 있는 때에, 발생한 일본 고베지진의 피해는 국내의 건축구조 학자와 전문가에 큰 영향을 주었을 것으로 생각된다. 예를 들어, 콘크리트 건물의 설계시 기둥의 대근(hoop)의 중요성이 드러났으며, 질량이 무거운 건물이 관성력을 더 많이 받게 되어 큰 피해가 발생한 것을 알 수 있었다.

구조물의 재료적인 성질의 변화와 구조시스템의 변화를 이용한 내진설계에 대한 연구가 더욱 활발히 진행될 것으로 생각되며, 또한 지진에 따른 건물의 진동을 조절하기 위한 진동제어분야도 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

(1) 日本土木學會, 動的解析과 耐震設計, 技報堂, 1989

(2) 金昭九, 地震學-地球內部의 物理學, 博英社, 1987

(3) N.M. Newmark, E.Rosenblueth, Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1971

(4) D.Key, Earthquake Design Practice for Buildings, Thomas Telford. 1988

(5) 한국동력자원연구소, 한반도의 지진위험도, 1983

(6) Shunzo Okamoto, Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, 1984

(7) Robert L.Wiegel, Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1970

(8) 한국전산구조공학회, 구조물의 내진설계 기법, 1992