

지진과 재해 Earthquake and Disaster



김 상 효*

1. 지진현상

인간의 의지와 관계없이 自然的으로 발생하는 災害중에서 地震現像(seismicity)은 가장 심각한 인명 및 재산 피해를 초래하는 災害이다. 최근에 발생한 대규모 지진재해로는 1976년 중국 당산地震에서 공식적인 통계는 없지만 약 50만~75만명이 사망한 것으로 추정되며, 1985년에 발생한 멕시코 지진에서는 4,700명 사망, 1,500명 행방 불명의 인명피해를 초래하였다. 1988년에는 구소련의 Armenia에서 지진이 발생하여 비공식 통계로 4~5만이 사망한 것으로 보고되었는데 이는 지진영향권내에 거주하던 인구 20만명의 20~25%에 이르는 막대한 피해였다.

지진들 중에는 발생한 강도에 비하여 엄청난 재난을 가져온 지진들이 많이 있는데, 그 주요 원인은 이들 지진이 발생한 지역에서 최근에는 지진활동이 거의 발견되지 않아 지진에 대한 대비가 제대로 되어 있지 않았기 때문이다. 이러한 재난의 대표적인 경우가 위에서 언급한 중국의 당산지진이나 구소련의 Armenia地震이다. 즉, 이들 지진의 強度는 약간의 내진대책을 통하여 피해규모를 현격히 줄일 수 있는 수준이었다.

지진은 주로 地殼變動이나 火山爆發에 의해 발생하게 되는 데, 기록에 남아있는 주요지진들은 대부분 地殼變動 現像에 의해 발생되었다. 地殼變動에 의한 地震발생은 탄성반발설(elastic rebound theory)에 의해 설명될 수 있다. 이는 그림 1에서와 같이 이웃한 지각이 서로 다른 방향으로 작용하는 外力을 받을 경우 相對的인 變形이 점차 증대하다 地質學的으로 가장 약한 地殼部인 斷層(fault)에서 破쇄되며, 이 때 變形중에 축적되었던 彈性에너지가 波動에너지로 변하며 地震現像을 일으킨다. 이러한 現像은 우리가 나무저를 휘어서 부러뜨릴 때 쉽게 관찰할 수 있다. 地震에서 震源(focus)이란 斷層帶에서 최초의 破쇄가 시작된 지각부의 위치를 말하며, 震央(epicenter)은 이의 수직상방의 지표면의 위치이다(그림 2).

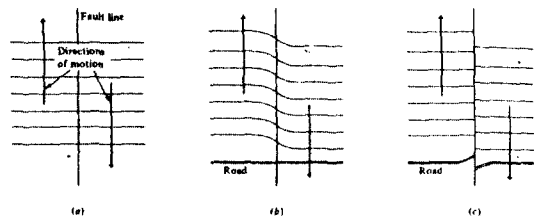


그림 1 탄성반발설

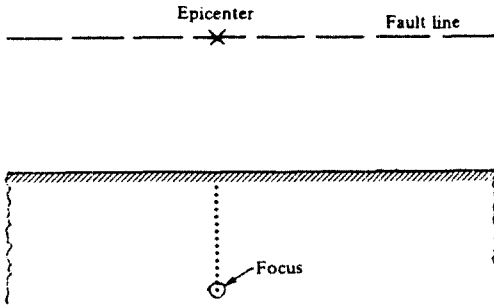


그림 2 진원 및 진앙

단층의 종류에는 그 발생 유형에 따라 正斷層(normal fault), 逆斷層(reverse fault) 및 주향이동단층(strike-slip fault) 등으로 구분할 수 있는데, 그림 3은 地殼變動의 종류와 이를 발생시키는 外力의 다양한 종류를 보여주고 있다. 그림에서 굵은 화살표는 外力의 작용방향을, 가는 화살표는 斷層帶를 중심으로 한 地殼의 이동방향을 보여준다.

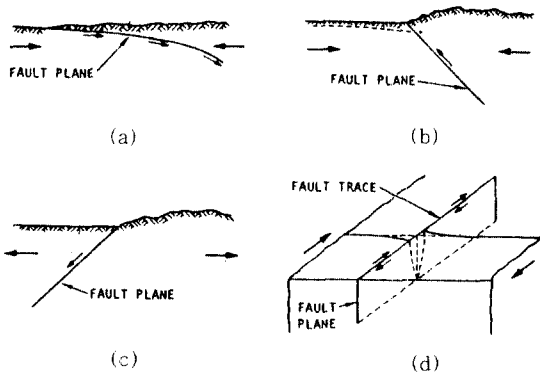


그림 3 다양한 형태의 지각변동

그림 3에서 (a)는 壓縮力을 받아 좌측의 地殼部가 우측의 地殼 밑으로 沈降하는 현상으로 版構造論(plate tectonics)에서 주로 海底版과 大陸版 사이에서 나타나며, 1964년에 발생한 Alaska 지진이 대표적이다. (b)는 逆斷層, (c)는 正斷層을 나타내며, (d)는 주향이동단층으로 미국 서부 해안지역의 주요 단층인 San Andreas 斷層帶가 대표적인 것이다. 이러한 단층활동에 의해 발생하는 地震波의 특성은 단층발생형태와 밀접한 관계

를 가지나, 震央으로부터 멀어질수록 그 영향은 작아지게 된다.

단층활동을 일으키는 地殼移動의 원인은 版構造論에 의해 설명될 수 있는데, 이에 의하면 지구의 외각이 13개의 版으로 구성되어 있으며(그림 4), 이들 판들의 相對的인 운동에 의해 版境界面의 단층대에서 지진현상(interplate seismicity)이 발생하며, 중국이나 한국에서 발생하는 版内部의 地震(intraplate seismicity)도 이에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 전 세계에서 발생하는 지진의 대부분(총 放出에너지의 98% 수준)은 版境界地震이며, 나머지가 版内部地震이다. 세계적으로 주요 地震帶를 형성하는 版은 Pacific 版, North America 版, Eurasia 版 등이 있으며, 유명한 환태평양 地震帶(Circum-Pacific belt)는 Pacific 版 주변의 斷層帶를 말한다.

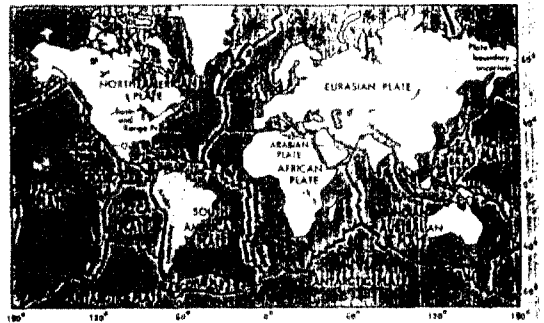


그림 4 판의 구성

2. 지진파와 지진규모

斷層帶에서 放出되는 波動에너지는 地震波의 형태로 전달되는 데, 地震波는 크게 실체파(body waves)와 표면파(surface waves)로 구분된다. 실체파에는 P파(longitudinal compression wave)와 S파(transverse shear wave)가 있으며, 파의 진행속도는 P파가 S파보다 빠르다. 따라서 P파가 S파보다 먼저 도달하게 된다.

표면파는 지표면을 따라 전달되며, 일반적으로 週期도 길고 먼거리까지 전달되어 구조적인 관점에서 중요한 지진파이다. 長大橋梁등에서는 특히 이러한 長週期的 표면파가 중요하다. 표면파에는

Love파와 Rayleigh 파가 있다.

지진의 강도를 定量的으로 표시하는 방법에는 일반적으로 規模(magnitude)와 震度(intensity)가 있는데, 규모는 방출된 波動에너지의 尺度이며, 震度は 지진에 의한 지면진동의 尺度이다. 따라서 동일한 지진에 있어서도 진도는 지역적으로 달라지며 일반적으로 진앙으로부터의 거리에 비례하여 낮아진다.

지진규모에는 여러가지 종류가 이용되는 데, 대표적인 것이 Richter 규모(M_L)이다. Richter 규모는 표준 Wood-Anderson 형 地震計로 측정되며, 다른 地震計로 측정된 지진파는 補正하여 이용된다.

앞에서 설명하였듯이 지진파는 波動特性이 다른 여러가지 파로 구성되어 있어 진앙으로부터 상당한 거리가 떨어진 지역에서는 P파, S파 및 표면파 등이 완전히 분리되어 도달하게 되며, 地震波記錄에서도 이들을 분리할 수 있다. 따라서 표면파 규모(M_S), 실체파 규모(m_b) 등이 지진의 강도를 표시하기 위해 이용되는 데, 이러한 규모들은 각기 서로 다른 값들을 보이게 된다. M_S 규모는 $M=6\sim 6.5$ 에서 M_L 규모와 같은 값을 가지도록 되어 있어, 대규모 지진($M \geq 7$)에서는 주로 M_S 규모가, 中規模 지진에서는 M_L 규모가 적용된다. 예를 들어 1906년의 샌프란시스코 지진은 $M_S \approx 8.3$ 인 반면에 $M_L \approx 6.9$ 로 큰 차이를 보이고 있다.

캘리포니아 지역에서 발생한 지진에 있어 방출 에너지와 규모의 관계는

$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (1)$$

이며, 따라서 규모가 1 크게 되면 방출에너지는 32배 가량 증가한 것이다. 여기서 E의 단위는 erg이다. 참고로 1 megaton 폭탄은 약 5×10^{22} ergs의 에너지를 방출하며, 규모 7.3 지진은 약 50 megaton의 폭탄과 같은 에너지를 가지고 있다.

震度에는 세계적으로 널리 이용되는 수정머켈리 震度(Modified Mercalli Intensity, MMI 또는 MM震度)와 일본에서 이용되는 일본 기상청 진도(JMA진도), 소련의 MSK진도 등이 있다. MM진도는 1931년 미국에서 제시된 것으로 12등

급(I-Ⅻ)으로 구성되어 있다. 1931년 이전에는 10등급으로 된 Rossi-Forel震度(RF震度)가 널리 이용되었다. JMA震度は 8등급(0-Ⅶ)으로 구성되었으며, MSK 震度は MM震度和 유사하게 12등급으로 분류되어 있다.

앞에서 언급하였듯이 震度は 지표면의 振動效果를 나타내는 것으로 사람들이 느끼는 진동의 수준이나 構造物의 피해정도에 의해 결정된다. 따라서 震度は 지표면 가속도나 규모와 상관관계를 가지게 되며, 우리나라의 耐震設計標準들이 제시하고 있는 최대지반 가속도 0.12g(또는 0.14g)는 MM震度로 Ⅶ등급에 해당되며, JMA 震度 V등급에 해당한다.

震度和 規模사이의 관계는 캘리포니아에서 발생한 지진에 있어

$$M = 1 + \frac{2}{3} I \quad (2)$$

으로 분석되었다.

지진재해의 수준을 결정하는 지진파의 특성에는 규모나 진도외에도 최대지반가속도(peak ground acceleration), 강진기간(strong motion duration), 지진파의 진동수(frequency)성분, 유효최대지반가속도(effective PGA) 등이 있으며, 地震의 發生頻度도 중요한 요소이다.

3. 지진발생 및 피해사례

연간 전세계적인 지진발생빈도를 살펴보면 평균적으로 규모 8 이상이 2회, 규모 7 이상이 20회 정도이며, 규모 6 이상은 100회, 규모 5 이상은 3,000회 정도 발생한다. 이러한 지진은 주로 版境界面에서 발생하는 지진으로, 그 중에서도 Pacific 版 주위의 환태평양 지진대에서 深發地震(deep earthquake : 震源깊이 70km 이상)의 거의 전부를, 淺發地震(shallow earthquake : 震源깊이 70km 미만)에 의한 地震에너지의 75%정도를 방출한다. Eurasia版 경계를 따라 지중해에서 그리이스, 터어키, 히말라야, 인도네시아로 이어지는 지진대에서는 전세계 천발지진에 의한 地震에너지의 약 23% 정도가 방출된다. 그러나 歷史地震에서는 많은 수의 대규모 版內部地震이 발견

되며, 최근에는 중국의 당산地震, Armenia 지진 등이 版内部 혹은 版境界에서 상당한 거리에서 발생하였다.

版構造論과 彈性反撥說 등에 근거하여 지진발생의 특성을 분석하면, 지진발생의 주기설은 쉽게 이해된다. 또한 지진발생의 週期가 길어질수록 축적되는 彈性에너지가 커지게 되며, 이는 대규모의 지진발생을 예고한다고 할 수 있다. 따라서 우리나라와 같이 과거 역사지진기록이 발견되는 지역에서는 장기간의 地震潛伏期가 오히려 불행한 재해를 예고한다고 할 수 있다. 그림 5는 Asia (Eurasia 版 境界地域)에서의 지진발생의 週期성을 보여주는 것이다. 그림 5에서 큰 원은 $M \geq 8.0$, 작은 원은 $8.0 > M \geq 7.7$ 의 지진규모를 나타낸다.

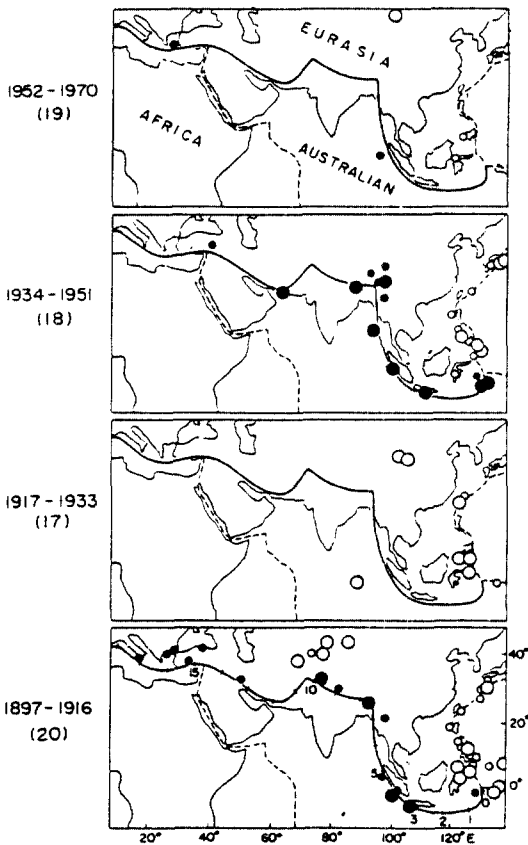


그림 5 지진발생의 주기성

지진에 의한 인명 및 재산 피해는 여러가지 원인으로 발생하게 되는 데, 주요 피해원인은 지표

면의 振動에 의한 구조물의 붕괴이며, 이외에도 산사태, Tsunami 등에 의한 피해가 크다. 특히 지진에 의해 야기된 Tsunami에 의한 해안지방의 피해는 매우 심각하며, 1896년 일본 동해에서 발생한 지진에 의한 Tsunami의 波高는 25~35m까지 되어 26,000명의 인명피해를 가져왔다. 최근에는 지난 92년 12월 인도네시아 Flores섬에서 발생한 지진($M_s=7.5$)에 의한 Tsunami는 파고가 25m에 이르고, 3,500명의 인명피해를 가져왔다. 1883년 인도네시아의 Krakatau 화산 폭발에 의해 Sunda 海峡에 발생한 Tsunami는 파고가 40m에 이른 것으로 기록되어 있다.

세계적으로 막대한 인명 및 재산피해를 가져온 今世紀에 발생한 지진들을 살펴보면 가장 유명한 것이 1906년 4월 18일에 미국에서 발생한 샌프란시스코 지진이다. 이 지진의 진앙은 Pacific 版과 North America 版 사이에 위치한 San Andrea 地震帶이며, 규모 8.3으로 2,500명의 사망자와 막대한 재산피해를 기록하였는데, 구조물 붕괴에 의한 직접적인 피해보다 이에 의해 발생한 화재에 의한 간접적인 재산피해가 컸다. 이와 유사한 사례로 1923년 9월 1일 발생하여 143,000명의 인명피해를 기록한 일본의 관동지진에서도 재산피해의 90%가 화재에 의한 피해였다. 1908년 Italy에서 발생한 Messina-Reggio 지진에서는 16만명이 사망한 것으로 기록되었다.

비교적 최근에 발생한 지진재해로는 1906년 Morocco의 Agadir 지진에서 12,000명, 1976년 중국의 당산지진에서 75만명이 사망한 것이다. 이외에도 1976년 Guatemala(20,000명), 1978년 Iran(19,000명), 1980년 Algiers(10,000명), 1980년 Italy(3,000명), 1985년 Mexico(4,700명), 1988년 구소련의 Armenia(50,000명)등에서 많은 인명피해가 보고되었다.

1985년 9월 19일 오전 7시 18분에 발생한 멕시코지진은 North America 판과 Cocos 판 사이에 멕시코 서남해안을 따라 형성된 San Andreas 地震帶를 震央으로 하여, 주요 피해지역인 멕시코시로부터 230 mile(약 400km)정도 떨어져 있음에도 불구하고 막대한 인명피해(4,700명 사망, 30,000명 부상, 1,500 행방불명)와 재산피해를 가져왔다

(사진 1). 지진규모는 1차지진이 7.8이며, 1차 지진 발생 36시간후에 발생한 2차지진이 7.3이었다. 이 지진대는 해양판인 Cocos 版이 大陸版인 North America 版 밑으로 沈降하는 地殼變動으로 그림 3(a)와 같으며, Cocos 版의 이동 속도는 매년 5-10cm정도로써 이 지진으로 약 3m 정도 이동한 것으로 조사되었다. 이 지역도 지진발생이 매

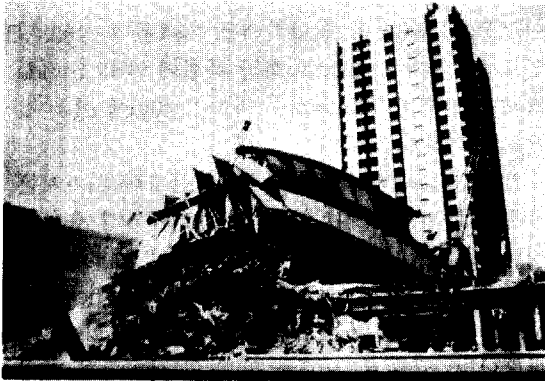


사진 1 멕시코시 지진피해

우 빈번하여 금세기 들어 지진규모 7.8 이상의 지진이 11회 발생한 것으로 기록되어 있다.

1989년 10월 17일 미국 캘리포니아에서 발생한 Loma Prieta 지진은 지진규모 7.1로 67명의 사망자와 2,400 여명의 부상자 및 56억불(US)의 直接的인 재산피해를 기록하였으며, 지진재해에 의한 間接的인 經濟損失은 직접적인 피해액의 2.5배 수준인 것으로 추정되었다. 이 지진의 震央은 San Andreas 地震帶로 샌프란시스코시의 남쪽에 위치한 San Jose시와 Santa Cruz시 사이이다. Loma Prieta 지진에 의한 주요 구조물의 피해는 埋立地域인 샌프란시스코시 북동부 해안지역의 주택가에서 발생한 건물피해와 Oakland 시의 2층 고가도로인 I-880이 1 mile 이상 붕괴된 것과 샌프란시스코시와 Oakland시를 연결하는 주요교량인 Bay교(2층구조)의 50ft 길이의 2층 床版이 1층床版 위로 추락한 것 등이다. 이번 지진의 대부분의 인명피해를 가져온 I-880 고가도로는 1971년 San Fernando 지진 이후 1973년에 개정된 미국 캘리포니아 교통국(CALTRANS) 도로교 耐震規準(1975년에 AASHTO에 의해 보완 채택됨)이

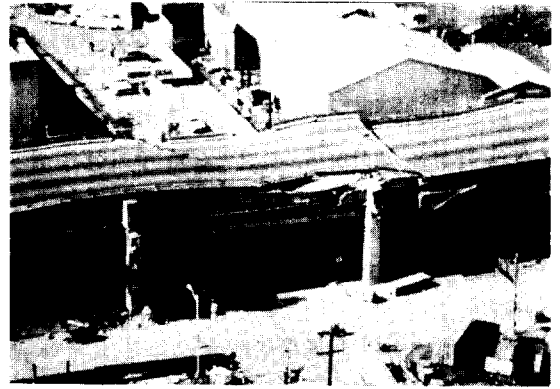


사진 2 Loma Prieta 지진피해(고가도로)

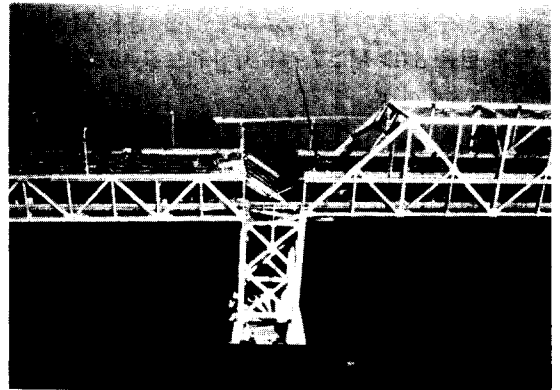


사진 3 Loma Prieta 지진피해(Bay교)

채택되기 이전에 건설된 도로교로써, 그 이후에도 보강조치가 취해지지 않은 구조물이다. 사진 2는 I-880 고가도로의 피해상황을 보여주며, 사진 3은 Bay 교의 추락한 상판을 보여주고 있다.

Loma Prieta 지진이 비록 상당한 인명피해와 재산피해를 초래하였으나, 이보다 1년정도 앞서 발생한 구소련의 아르메니아 지진과 비교하면 耐震設計의 중요성과 이에 따른 피해감소효과를 질실히 알 수 있다. 즉 Loma Prieta 지진의 규모는 7.1로 아르메니아 지진의 규모 6.8에 비하여 방출 에너지가 2배가량 됨에도 불구하고 그 피해정도는 비교할 수 없을 정도이다. 인명피해를 비교하면 아르메니아 지진에서는 지진영향권의 거주인구 20만명의 20~25%에 해당하는 4~5만명이 사망하였으나, 샌프란시스코 지역에서는 500만명 이상의 거주인구중에서 불과 67명이 사망하였다. 아르

메니아 지역에서는 건축물의 약 40% 가량이 파괴된 반면에 샌프란시스코 지역에서는 일부 매립지에 건설된 건축물들의 피해가 있었다. 또한 샌프란시스코 지역에서는 1971년 샌프란시스코 지진 이후에 개정된 건축구조물 및 도로교 耐震設計規準에 의하여 설계 또는 보강된 구조물에서는 거의 피해가 발생하지 않았다. 1971년의 San Fernando 지진은 규모 6.4의 지진이였다.

Armenia 지진에서 특기할 사항은 극심한 건축물 피해에 반하여, 도로교의 손상은 거의 발생하지 않았는데 이는 이 지역이 구 소련의 국경과 인접한 지역인 관계로 도로교의 설계시에 탱크 등의 중량이 큰 군용차량을 고려한 결과로 알려져 있다.

4. 국내 지진역사와 위험도

우리나라는 Eurasia 版 내부에 위치하여 版내부 지진활동의 범주에 속하며, 중국에서 발생하는 지진들과 비슷한 특성을 가진다. 版내부지진의 특성은 지진활동이 매우 불규칙적이라는 것이다.

우리나라의 歷史地震資料를 살펴보면 한반도에서도 지진활동이 매우 활발하였던 것을 알 수 있다. 역사지진은 삼국사기, 고려사, 고려사절요, 이조실록, 증보문헌비고, 승정원일기 등에 수록된 사료들을 분석하여 정리되는데, 삼국시대와 같은 인구가 적고, 분포가 일부 지역에 집중되어 있던 시기에는 누락되거나 감지되지 못한 기록들이 많았던 것으로 사료된다. 이러한 판단은 삼국시대의 역사지진이 주로 경주, 평양, 한산(현재 서울), 부여, 공주 등에서 발생한 것으로부터 알 수 있다.

삼국시대에는 MM震度 Ⅶ 이상의 지진만도 16회 발생하였다. 이 중 인명피해가 큰 지진은 779년의 경주지진으로 100여명이 사망한 것으로 기록되어 있으며, 이는 현재까지 한반도에서 인명피해가 가장 큰 지진이다. 사료에 의하면 고려시대에도 총 170회의 지진이 기록되었으며, 조선시대 이후에도 1600회 이상되며 MM震度 Ⅶ 이상만도 176회에 이른다. 특히 15세기부터 18세기에 걸쳐 이례적으로 활발한 지진활동을 보였다. 즉, 이 기간 중 총 1518회가 발생하여, 매년 4회의 높은 발생빈

도였다. 이 기간 중에는 군발지진도 기록되었는데, 이는 1565년 9월 6일 평안도 祥源에서 발생하여 1566년 1월 26일 까지 총 99회의 비슷한 규모의 지진이 기록되었다.

18세기 이후 20세기초반까지 지진활동이 약화되었다가 최근 지진활동이 재개되는 경향을 보이고 있다. 이러한 地震靜止期(seismic gap)현상은 앞에서 설명한 彈性反撥說의 관점에서 지각에 變形에너지가 계속 축적되는 기간으로 볼 수 있다. 즉 우리나라는 판의 내부에 위치하여 地殼構造가 비교적 안정되어 있고, 따라서 外力에 의해 축적될 수 있는 變形에너지의 수준이 높기 때문에 版境界에 위치한 지역보다 地震靜止期가 길며 지진활동이 불규칙하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 地震靜止期가 길다는 것은 향후 활발한 지진발생을 예고하는 것이라고 할 수 있다.

今世紀에 발생한 지진으로는 1936년 7월 3일 지리산의 쌍계사 부근에서 발생한 지진(M=5.3), 1968년 9월 6일 동해에서 발생한 지진(M=5.4), 1978년 9월 15일 속리산에서 발생한 지진(M=5.2) 및 1978년 10월 7일 충남 홍성에서 발생한 지진(M=5.0) 등이 있다. 최근에 발생한 지진들은 비교적 인구가 밀집하지 않은 지역에서 발생하여 별다른 피해가 없었으며, 1978년 홍성지진에서는 지역별 진도가 일본기상청진도로 다음과 같았다.

- 強震(V) : 홍성
- 中震(Ⅳ) : 당진, 서산, 예산, 대천, 보령
- 弱震(Ⅲ)~輕震(Ⅱ) : 대전, 전주
- 微震(Ⅰ) : 서울, 청주, 광주, 부산
- 無感(0) : 춘천, 대구

홍성지진의 피해는 크지 않았으나, 한반도의 지진위험성에 관한 국민적인 관심을 일으키는 계기가 되었으며, 그 이후 構造物的 耐震設計에 관한 연구가 활발해지기 시작하였다.

국내의 耐震設計規準은 1987년 건축구조물에 대하여 적용되기 시작하였으며, 도로교에서는 1992년 부터 관련 설계기준에 포함되었다. 따라서 현재 사용되고 있는 구조물의 대부분이 지진하중에 대한 대책이 마련되지 않은 상태이다.

5. 결 언

앞에서 언급한 Armenia 지진과 Loma Prieta 지진을 경험하면서 내진설계의 필요성을 절감할 수 있으며, 적절한 내진 대책이 마련되지 않을 경우에 발생할 수 있는 엄청난 피해를 쉽게 예상할 수 있다. 특히 Loma Prieta 地震時에 대부분의 인명피해를 발생시킨 고가도로(I-880)의 붕괴를 보며, 대부분이 단순교 형식인 우리나라 도로교들의 내진성능을 예측할 수 있었다. 또한 1970년대부터 1980년대에 건설된 아파트들의 주구조형식인 벽식구조는 내진성능이 매우 떨어져 향후 지진발생 시 엄청난 재난을 예고하고 있는 것 같다. 특히 국내의 아파트들은 다른 사무실용 건물과 달리 난방 문제 때문에 固定荷重(dead load)이 積載荷重(live load)에 비하여 매우 크며, 따라서 地震荷重이 크게 된다.

향후 새로이 건설되는 구조물의 합리적인 내진 설계는 물론이고, 기존 구조물에 대한 내진 보강 대책이 시급히 마련되어야 한다. 또한 현행 건축 구조물에 있어 내진설계가 요구되는 대상이 모든 공동주택으로 확대 적용되어야 할 것이다. 현행 規準에서 6층 이상에만 적용하도록 한 것은 지진 재해의 위험도에 근거한 것이 아니라, 갑작스런 적용으로 내진설계 경험이 부족한 실무자들의 혼란을 줄이기 위한 것이었다.

지진재해는 자연발생적 재난이지만 적절한 대비를 통하여 인명 및 재산 피해를 감소시킬 수 있다. 반면에 자연재난에 대한 두려움을 갖지 못하

고 대책이 소홀한 경우에는 엄청난 인명 및 재산 피해를 가져온다. Armenia 지진과 같이 인명피해가 영향권내에 거주하는 주민의 20% 수준이 될 수 있으며, 이러한 불행한 재난이 인구가 밀집한 서울지역에서 발생한다면 그 결과는 상상할 수 없는 수준일 것이며, 국가기능이 마비될 것이다. 耐震設計에 따른 구조적인 추가비용은 실제로 전체 공사비에 있어서 매우 작은 부분이며, 경우에 따라서는 실제 공사비의 증가가 없이도 構造시스템의 개선을 통해 耐震性能을 향상시킬 수 있다. 또한 추가적인 경비는 구조물 사용자의 생명과 재산에 대한 보험료와 같은 것으로 지진재난의 가공할 결과를 감안할 때 충분히 투자 가치가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이기화, 김소구 등, 建築物의 耐震構造 및 防災基準에 관한 연구, 건설부 보고서, 1981.1.
2. Housner, G.W., and Jennings, P.C., Earthquake Design Criteria, Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
3. Algermissen, S.T., An Introduction To The Seismicity of The United States, Earthquake Engineering Research Institute, 1983.
4. Mogi, K., Earthquake Prediction, Academic Press.
5. 이동근, “우리나라의 地震危險도와 構造물의 耐震設計”, 한국강구조학회 학회지 제3권 제2호, 1991.
6. 