



## 地震의 성격과 建築物 耐震設計에 對하여

The Nature of Earthquake and Earthquake Resistant Building Design

梁 完 守\*  
Yang, Wan-Su

### SYNOPSIS

This paper is to help the structural engineers for a better understanding of "Earthquake" with regard to the nature of earthquake and the effect of earthquake on building structures. This reveals that the damage inflicted upon by earthquake varies with many factors such as : magnitude of earthquake, distance from epicenter, site conditions, building structural characteristics and etc.. It is emphasized that in order to resist very strong earthquake, the ductility demand in the building structure is important, and the proper ductility enables the structure to demonstrate inelastic rotation capacity of the joints and thus the structure may absorb and dissipate the seismic energy.

This also presents a comparison between the current American UBC Code and the Korean Code, and the author expresses some points of concern on each code. Since earthquake almost invariably strikes at times and places, it is suggested that the current Korean Building Code should be revised to enforce more stringent regulation against possible strong earthquake in the Korean peninsula.

#### 1. 地震이란?

地震은 地殼에서 露出되는 巨大한 Energy로 因해 생긴 地表面의 發作적인 震動이다. 地球 内部에는 두께가 20~100Km 두께의 地殼板들이 (약 12개) 멘틀위에 떠있는 상태이다. 이 여러개의 다른 地殼板들이 熱과 Stress로 인해서 서로 엇갈리거나 쪼개지면서 그 餘波로 因해 地表面까지 그 衝擊波長(Shock Wave)이 傳達되

는 것이다(Fig. 1). 이 엇갈림을 Fault라 부르고 또 그 波長을 Seismic Wave라 부른다. 이 Wave들은 이 地震의 震央地(Hypo-Center)에서 地殼과 地表面 사이에 퍼져있는 岩盤의 종류에 따라 각각 다른 速度로 전파된다. 이 地震波는 垂直으로 전파되는 P-Wave와 수평으로 전달되는 S-Wave로 나누기도 한다. 震央地에서 똑바로 垂直으로 전달되는 그 지점을 Epicenter라 부른다.

日本 근방에서는 太平洋 Plate가 Eurasian

Plate 밑에 깔려 계속 密着하고 있다고 한다. California에서는 San Andreass Fault를 따라 또 다른 두 Plate들이 서로 밀고있다. 일반적으로 地震은 Plate 内部에서도, 過去 火山作用으로 인해 弱해진 小規模 斷層 部分에서 일어날 수 있다. 가장 큰 Shock 뒤에는 보통 작은 After-Shock들이 따른다. 일단 Fault가 생기면 이 脆弱部分을 따라 계속 地殼의 벗갈림이 생기기 때문이다.

다음은 建築物을 破壞하는 地震의 힘은 果然 무엇인지 살펴보기로 한다. 事實 地震 그 自體는 힘이 아니고 위에서 言及했듯이 一種의 波長이다. 이 波長이 地表面에 세워진 構造物을 加速시키므로 해서 힘이 生成되는 것이다. 加速度라고 하는 것은 時間에 대한 速度의 變하는 比率를 말한다. 그래서 우리가 잘 알고있는 뉴턴의 제2法則에 의하여 어떤 物體에 加速度를 加하게 되면 힘이 發生하는 것이다. 이것을 式으로 表示하면,

$$F = Ma$$

여기서 F = 힘

M = 構造物의 質量 혹은  $M=W/g$ 로 表示할 수 있으며 W는 構造物의 重量 그리고 g는 重力 加速度

a = 構造物에 加해지는 加速度

이것을 다시 쓰면  $F=W(a/g)$ 라고 表示할 수 있다.

그래서 어느 程度의 힘에 견디는 耐震 設計를 할 것인가 할때 그 크기를 흔히 構造 Engineer들은  $(a/g)$ 로 重力에 대한 比率로 表示하고 있는 것이다. 그러나 地震中 地表面의 震動은 時時刻刻으로 不規則적인 加速度로 建物을 흔들게 되므로 보통 最大加速度(Peak Ground Acceleration)로 地震의 크기를 表示하기도 한다. 이러한 加速度의 概念은 數學的인 것으로 실제 Engineer들이 耐震設計를 할때 考慮하는 地震의 크기를 말하고 흔히 우리가 말하는 地震의 크기

는 다음과 같이 “메그니튜드”와 “진도”로 표시하며 設計目的이 아닌 一般大衆을 위한 表示方法으로 쓰는 것이다.

첫째 “메그니튜드”는 Richter Scale로 表示된 것으로 Seimograpgh에 의해서 測定된 最大 Amplitude에 의해 決定되는 것이다. 이 Richter Scale은 Logarithm으로 나타내며 따라서 메그니튜드 5와 메그니튜드 6은 10배 그리고 5와 7은 100배의 地震 Energy 差異를 나타내게 된다. 그러나 반드시 메그니튜드가 크다고 해서 建物에 被害가 크다고는 할 수 없고 Ground Shaking의 履歷 또 어떤 周波數를 가지고 얼마나 持續되었는지 그 Duration 등에 따라 被害가 달라지게 된다. 여기서 注目할 것은 建物도 構造體의 特性에 따라 그 反應이 각각 다르게 되는 것이다. 자세하 것은 다음 章에서 說明하기도 한다. 다음 “진도”라 하면 각 國家마다 基準이 다르지만, 美國의 경우 Modified Mercalli Intensity Scale로 表示하며 地震당시 地盤의 加速度 크기를 基準으로 建築物의 被害 可能性 程度 및 差異 등을 基準으로 12 等級으로 하여 나타내는 地震 크기 表示方法이다. 따라서 地震 發生 可能地域에 地盤의 地震加速度와 또 建物內의 加速度를 測定하는 器具를 設置하여 이를 測定하게 되는데 이것을 Accelerogram이라 부른다(Fig. 2).

參考로 지난 1995年 1月 17日 일어난 日本 고베의 地震은 그 震央地가 고베港에서 24Km 떨어진 Awaji 섬 그리고 10Km 地中 Fault로서 2~3M 서로 엇갈리는 大地震으로 그 크기는 메그니튜드 7.2로 測定되었다.

## 2. 地震의 歷史的 背景과 豫測

地震은 戰爭, 疾病과 함께 人類 歷史上 人間의 生命을 앗아가는 主要原因이 되어왔다. 갑자기 왔다가 無慈悲하게 人命을 앗아가는 이 地震 被害는 人間이 克服해야할 하나의 大 課題이기

도 하다. 옛날 原始人들은 이 地震을 하늘의 人間에 대한 벌로 생각했다고 한다. 現在도 끊임 없이 地震은 地球 어디에서인가 繼續되고 있다. 어느것은 弱해서 민감한 Seismograph로만 感知된 것도 있고 어느것은 狂暴한 것도 있다. 弱한 地震도 都心地 가까운 곳에 일어나서 큰 被害를 주는가 하면 또 強한 地震도 海底 깊숙히 그리고 陸地에서 멀리 떨어진 곳에서 일어나 아무런 被害가 없기도 한다. 歷史적으로 考察해보면 太平洋 연안일대의 北美, 南美, 日本, 필리핀, 뉴질랜드, 인도네시아 그리고 隣接國家인 中國 러시아 등 곳곳에서 地震이 안 일어난 곳이 거의 없다. 이렇게 人間에게 큰 被害를 주고 곳곳에서 일어나는 地震을 미리 豫測하기 위해 人間은 꾸준히 努力해 오고 있다. 러시아 中國, 日本, 美國 등 자기 自己 方法들을 研究하고 있지만 科學的인 方法으로서는 地盤의 P-Wave Velocity 變動, Magnetic Field 및 Electrical Resistance 등의 變化등을 測定하여 豫측할 수 있다. 또 짐승들의 奇異한 行動을 미루어 地震이 臨迫했음을 알 수 있다고 하지만 이것은 科學的으로 說明하기는 어려울 것이다. 日本에서는 지금까지 地震豫測을 위해 研究費로 약 10억 달러가 사용되었지만 主要地震은 한번도 豫測을 못했다고 한다. 미국의 시사 주간지 "Time" 1월 호에 日本 고베 地震被害를 다루는 글에서 地震에 대해 한마디로 記述된 것을 그 原文으로 紹介하면 다음과 같다. "Earthquakes are unpredictable. They almost invariably strike not only at times but at places nobody expects, and no one quake is exactly like any other."

歷史적으로 地震으로 인한 被害 狀況을 보면 最近 日本 고베市에서 메그니튜드 7.2의 크기로 5000여명의 人命을 앗아간 것을 비롯해 1976년 中國 唐山의 메그니튜드 8.2로 인해 24여만명의 人命被害 등 世界各地에서 地震으로 인해 많은 人命 및 財產被害를 가져왔다(Fig. 3).

一般的으로 被害에 影響을 주는 것으로는 地

震 크기 이외에도 地盤과 構造物의 相互作用에 있어서 地盤과의 Resonance에 의한 增幅作用으로 被害가 增加될 수도 있다. 따라서 高層建物は 軟弱地盤에서 底層建物は 岩盤에서 더 큰 地震의 影響을 받게된다. 또 地盤의 液狀化에 의한 被害도 많이 일어난다. 地震時에 隨伴되는 火災로 인한 被害도 크다. 火災때문에 1906년 San Francisco에서 15,000號가 消失되었고 1923년 日本 Kanto 大 地震으로 인해 Tokyo를 中心으로 447,000號가 消失되었다고 한다. 이번 고베 地震 때의 엄청난 火災 被害를 우리가 직접 TV 畫面을 통해 目擊했었다.

韓半島의 地震은 어떤가?

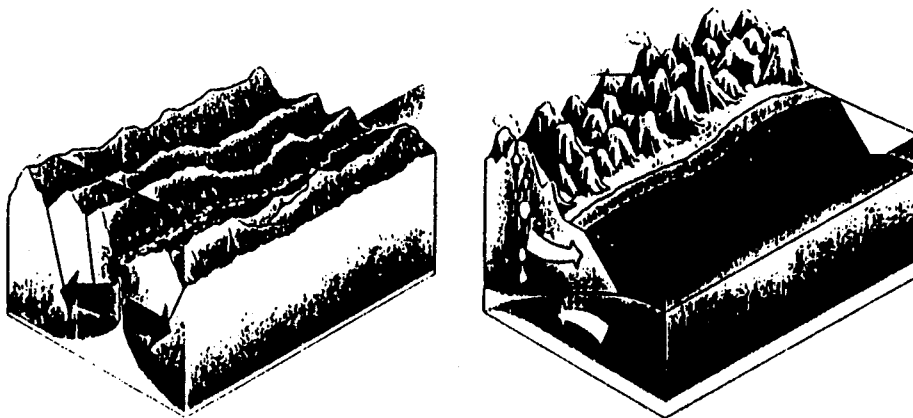
高麗 및 朝鮮王朝 地震史를 보면 개성 강화 서울 수원 및 강원도 지방 등에 強震이 자주 發生했고 被害도 있었다는 記錄이 있다. 한번 지진이 發生했던 地域은 Stress가 蓄積되어 다시 Energy 放出로 인해 地震 發生素地가 있기 때문에 人口가 租密한 서울 등 大道心 地域은 地震 被害防止對策을 講究해야 된다. 最近의 地震 記錄으로서는 홍성에 1978년 메그니튜드 5의 記錄이 있고 被害는 輕微한 것으로 記錄되어 있다.

### 3. 最新 耐震設計法과 先進國의 耐震設計 Codes

그러면 과연 地震은 建築構造物에 어떻게 被害를 주고 또 그 構造物의 反應은 어떠한가 그 樣相을 살펴보자. 構造物 被害樣相은 크게 나누어 우선 震央地에서 얼마나 떨어져 있는가, 地震의 크기는 얼마인가, 岩盤의 性格은 어떤가 그리고 構造物의 構造的 性格은 어떤가에 따라 다르게 된다.

地震의 크기 : 震央地에서 나온 Shock-Wave가 地盤을 加速시키므로 해서 각 地域 地表面에 각각 다른 Shaking이 일어나게 된다.

Site Resonance 現象 : Site의 震動 周波數가



**Spreading Zones**

Rising through rifts in the crust, dense magma from the earth's interior creates a new surface on undersea mountain ranges.

**Subduction Zones**

Forces created when two plates push against each other build mountains and create earthquakes and volcanoes, adding new material to continents.

Fig. 1 Plate Tectonics

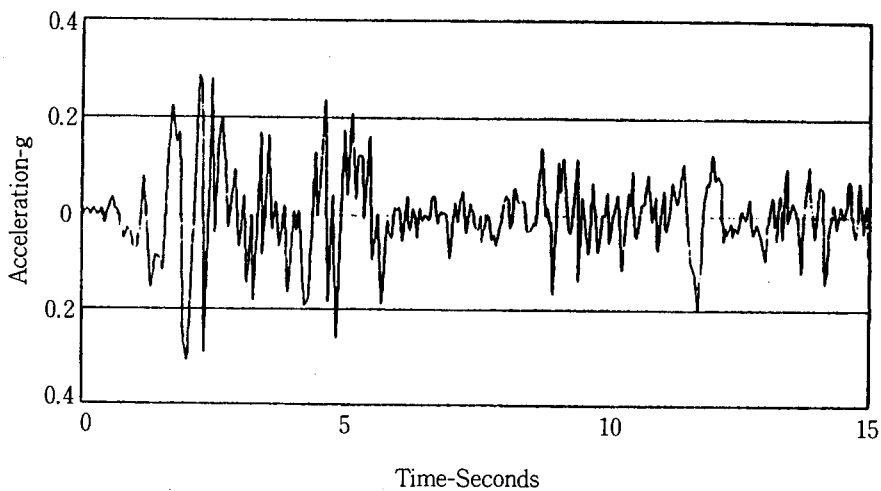


Fig. 2 Ground acceleration recorded at El Centro (N-S component) in El Centro, California, earthquake of 1940.

최근의 대지진 피해

추계액(단위 : 백만 달러)

발생연도	지역	매그니튜드	사망자 수	피해액
1995	일본 고베	7.2	4,800+	30,000+
1994	캘리포니아주 노스리지	6.8	61	20,000
1993	인도 마르하라슈트라	6.4	30,000	280
1990	필리핀 루손	7.7	1,621	2,000
1989	샌프란시스코	6.9	62	6,000
1988	아르메니아 북서부	6.8	55,000	14,000
1985	멕시코 시티	8.1	4,200	4,000
1976	중국唐山	8.2	242,000	5,600
1970	페루 북부	7.7	66,794	500

SOURCE : 1995 WORLD ALMANAC, MUNICH RE, LLOYD'S OF LONDON

Fig. 3 Recent Earthquake Damage Records

建築物의 周波數와 一致하거나 近接할때 일어난 現象으로 破壞의인 結果를 招來할 수 있다.

따라서 岩盤에 設置된 高層建築物은 그만큼 地震에 대한 被害가 底層建築物에 비해 적을 수 있다.

Foundation Types : 基礎의 깊이, Stiffness 등은 地震의 Intensity에 影響을 줄 수 있다.

Ductility : 構造物의 Ductility에 따라 地震에 대한 反應이 다르게 된다.

Damping : 震動 Energy는 構造物 自體內의 内部 Rubbing으로 吸水가 된다. Damping이 큰 構造物은 地震 震動을 빨리 制御시키게 된다.

美國의 빌딩 耐震設計規準을 보면 20여年 前만 해도 地震時 構造物은 應力이 彈性限度 內에 있도록 設計指針이 되어 있었다. 그후 수차례의 地震被害를 겪으면서 그 設計 Philosophy를 彈性에서 非彈性 舉動의 概念으로 바꾸기 시작했다. 다시말해서 強力한 地震地域에서 美國 耐震 Code인 NEHRP와 UBC에 의해 設計된 構造物은 그 舉動이 非彈性的 變形을 이르켜 地震 Energy를 흡수할 수 있는 能力 곧 Ductility를 갖도록 要求하는 것이다. 이러한 能力을 갖지 못하는 構造物은 強力한 地震에 대해서는 崩壞될

수 있어 많은 人命의 被害를 입을 수 있는 것이다. 다시말해서 빌딩 Code의 意圖는 자주 일어나는 輕微한 地震에 대해서는 彈性 舉動으로 支持하여 설비를 포함한 建物內의 모든 施設을 保護하고 頻도가 적으나 아주 狂暴한 地震에 대해서는 構造物에 생기는 應力도 設計應力을 훨씬 超過하며 變形도 非彈性 領域으로 넘어가 Inelastic Energy로 吸水시켜 結局 内部 施設은 損傷될 수 있지만 建物崩壞는 防止하여 人命被害를 막는 것을 窮極目的으로 하는 것이다.

여기서 重要한 것은 Ductility이다. Ductility를 다시 定義하면 “構造物이 崩壞되지 않고 큰 非彈性 變形을 甘受하는 能力”이라고 할 수 있다. Code에 의하면 이 Ductility를 確保하기 위해서는 建築 構造體에 “Special Ductile Moment Frame”이라 부르는 特秀 構造 System을 採用하여야 한다. 單獨으로 採用될 수도 있고 剪斷壁이나 Bracing과 함께 地震을 支持하는 Dual system이 採用되기도 한다.

이처럼 耐震 構造物 設計에 있어 가장 重要한 것은 建築構造物이 變形할 수 있도록 해야 한다는 점이다. 그래서 變形도 非彈性 領域으로 誘導하는 것이 經濟的인 現代의 耐震設計 技術이

다.

Fig. 4는 概略적인 表現이지만 構造物이 彈性으로 舉動한다면  $F_0$ 라는 巨大한 地震 힘을 받을 것이고 건물이 設計地震力  $F_e$ 로 設計되었다면 構造物은 “E”에서 “U”로 變形을 하며 Inelastic Energy로 地震 Energy를 吸收 分散시킬 것이다.

美國 Codes 들에서는 이러한 非彈性 領域 舉動에 대한 解釋을 위해 별도로 Inelastic Analysis를 要求하지 않는다. 그대신에 Force Reduction Factor를 適用하여 解析하고 Joint Detailing에서 Joint Connection이 파괴되지 않고 Inelastic Rotation Capacity를 갖도록 여러 가지 特殊要求條件을 滿足하도록 하는 方法을 쓰고 있다.

또 다른 方法들은 역시 構造物의 非線型 舉動을 誘導하는 것으로 Eccentric Bracing 혹은 Bracing 自體에 Damper를 設置하여 Energy를 分散시키는 것이다. Eccentric Bracing인 경우 地震時에 Link Beam에서 먼저 Plastic Hinge가 생기도록 하여 構造物 全體가 非線形 狀態로 들어가며 이로 因해 建物 震動週期가 급격히 增加되어 Seismic Force의 誘入을 減少시켜 Brittle Failure를 防止할 수 있는 것이다.

다음에는 構造物 Base를 地上에서 分離시키는 Isolation 工法이다. 이 工法은 現在도 많은 實驗을 통해 研究開發 狀態이며 實際 適用한 境遇 지난 1993년 California Northridge 地震때 큰 成功을 거둔 事例가 있다(Fig. 5).

美國 University of California (Berkely)의 Vitelmo V. Bertero 教授는 1989年 메그니튜드 7.1의 Loma Prieta 地震 被害후 研究끝에 “이제 耐震設計는 Energy 吸收 方法으로 對處해야 한다”고 力說했다. 이것을 原文 그대로 옮기면 다음과 같다. “The total energy input can be resisted by the sum of the kinetic energy, the elastic strain energy, and the energy dissipated through plastic deformations, and

the equivalent viscous damping.”

#### 4. 美國 UBC Code와 韓國 耐震 設計規定

耐震 構造物 解析方法은 等價靜的(Static) 方法과 動的解析(Dynamic Analysis) 方法으로 나눌 수 있다. UBC에 의하면 一般의 構造物의 耐震設計는 Static 方法을 適用하여 解析하게 되나 平面이 複雜한 경우나 (非對稱등) Zone 2 지역에서는 240 Feet 이상의 높은 建物 그리고 Zone 3와 4 지역에서는 5層 이상 혹은 建物높이 160 Feet 이상의 建物은 動的 解析을 하도록 規定하고 있다. 動的解析 方法은 여기서는 省略하고 等價靜的(Static) 方法만 紹介하기도 한다.

UBC Code의 等價靜的 Base Shear  $V$ 는 다음과 같이 表示한다.

$$V = (ZIC/R_w) W$$

여기서  $Z$  = Zone Fractor (Zone은 1, 2A, 2B, 3, 4로 분류한다.)

$I$  = Importance Factor

$$C = 1.25 S / (T^{2/3})$$

$S$  = Site coefficient for soil characteristics

$T$  = Fundamental period of vibration, in second, of the structure in the direction under consideration.

$R_w$  = Structural response factor

$W$  = The total seismic dead load

여기서 注目할 것은 각 構造 System에 따라 다른  $R_w$ 의 一種의 Response factor를 使用하여 非彈性解析 概念을 導入한 것이다. 그러나 각 構造시스템 마다 다른  $R_w$  값은 얼마나 信賴도가 있는지는 學者들간에 여러 論難이 많다. 특히 짧은 週期를 갖는 構造物에 適用하기는  $R_w$  값이 너무 크다고하는 批判도 있다. 앞으로 構造物의 必要한 安全 餘力과  $R_w$ 을 使用하므로써

要求되는 Ductility와의 數學的 關係를 明確히 糾明해야 할 것이다.

이 耐震 設計規準은 美國 地震地域 Zone 1 이상의 모든 地域에서 2층 이하의 住居建物を 除外한 모든 建築物에 適用하도록 規定하고 있다.

다음은 韓國 建築構造물의 耐震設計 規定을 살펴보기로 한다.

1986年 12月 改正된 建築法에 의하면 “建築物은 地震에 대해서 安全한 構造를 가져야 한다”고 規定하고 있으며 1988년에 確定된 建築法 施行令 및 施行規則에 의하면 “必要한 境遇 6層 이상 혹은 建物 연면적 10만 M<sup>2</sup> 이상인 建物은 地震에 대한 安全與否를 構造計算에 의하여 確認해야 한다”는 規定이 있다.

韓國 耐震 設計規準은 美國 ATC 方法을 採擇한 것으로 地震위험도에 따라 全國을 地震地域 0, 1, 2 地域으로 分類하여 각각 다른 地域係數를 適用하고 있다. 簡略하게 說明하면 지진 밀면 剪斷力 V는 다음과 같이 表示된다.

$$V = \frac{AICS}{R} W$$

여기서 A = 地域係數

지역 0=0

1=0.08

2=0.12

I = 重要度 係數

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

T = 建物の 基本 震動週期(Second)

$$T = 0.085h_n^{3/4} \text{ (라멘 鐵骨構造)}$$

$$T = 0.06h_n^{3/4} \text{ (라멘 RC 構造)}$$

$$T = 0.09h_n / \sqrt{B} \text{ (기타구조)}$$

$h_n$  = 밀면에서 最上層까지의 建物높이 (M)

B = 地震荷重이 作用하는 방향 밀면에서 的 建物 平面치수(M)

S = 地盤係數

R = 構造시스템 反應係數

W = 建物 重量

여기서 產出된 밀면 剪斷力 V는 各層에 分散시켜 層 地震荷重으로 나누게 되고 이처럼 地震荷重은 各層에 水平力으로 作用시켜 構造物을 解析하게 되며 構造物의 安定性を 確認하는 過程을 거치게 된다. 그러나 前에 言及한것처럼 強力한 地震을 支持하고 特히 人命被害가 일어나지 않도록 하기 위해서는 美國 設計指針 처럼 特別히 構造物의 Ductility 概念과 剪斷補強策을 講究해야 할 것이나 國內 法規에는 아직 그러한 規定이 없어 이를 是正措置 하는 것이 必要하다고 생각된다. 또 現在 6層 이상의 建築物에 適用되는 耐震 設計規程은 實際 強力한 地震이 일어났을때 被害가 크게될 高周波數를 갖는 底層建物에도 그 安定性を 確認하는 耐震設計法이 適用되도록 法規를 強化해야 할 것으로 생각된다.

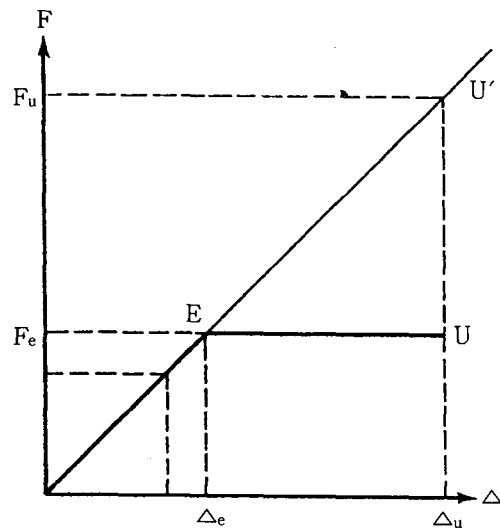
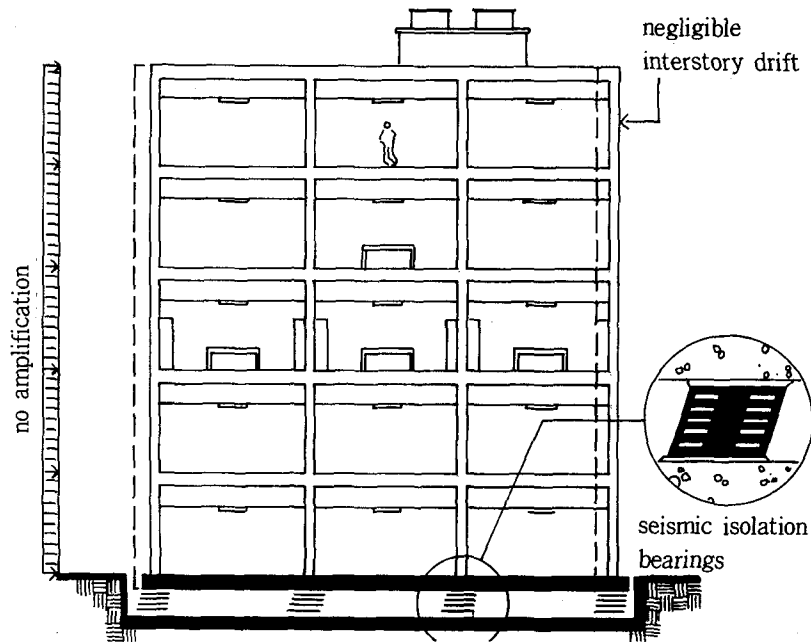


Fig. 4 Idealized earthquake force versus displacement relationship



The deformation pattern of an isolated structure during an earthquake. Movement takes place at the level of the isolators. Floor accelerations are low : the building, its occupants and its loose contents are safe.

Fig. 5 Isolated Structure

## 5. 結 論

豫測하기 어려운 地震으로 부터 被害를 줄이기 위해서는 耐震 設計規程을 強化해야 하고 構造物 耐震設計에서 Ductility의 重要性은 크다. 建築物은 現在뿐만 아니라 後世에 물려주는 遺産이기 때문에 強力한 地震이 가까운 將來에 우리 韓半島에 없을지 모르지만 後世들의 生命과 財産을 保護하기 爲해서라도 지금부터 모든 建築物工事に 徹底한 耐震對策을 講究해야 할 것이다.

## 參考文獻

1. Michael R. Lindeburg(1989), "Seismic Design for Civil Engineer."
2. Farzad Naeim, "The Seismic Design Handbook."
3. Norman B. Green (1981), "Earthquake Resistant Building Design & Construction."
4. Mark Fintel, S.K. Ghosh, "The Structural Fuze : An Inelastic approach to seismic design of building," ASCE-Civil Engineering, 1981.
5. R. O. Hamburger, "Building For Earthquake Survival", Modern Steel Construction, Sept., 1990.
6. Uniform Building Code-1991 Edition
7. S.K. Ghosh, "Earthquake Resistant Concrete Structure, Inelastic Response and Design," ACI SP-127.
8. "Seismic Isolation Update", VOL. 4, Jan., 1990.
9. 堵德鉉, 高在晚 (1992), "耐震工事".