

第五章 地震作用



日本神户大地震对土木工程结构的破坏

发生日期：1995年1月17日
震源深度：14 km
震级：7.2

破坏的主要原因是
抵抗水平地震力的剪切
抗力不足

地震导致倾覆的城市高架
道路（1969年建成）



5-2

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



由于液化引起地面的下沉

5-3

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



桥梁钢筋混凝土墩的剪切破坏

5-4

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



日本Nishinomiya 港口桥震落的桥跨

5-5

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



由于柱的剪切破坏引起的铁路框架桥的坍塌

5-6

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



铁路钢筋混凝土框架
高架桥的剪切破坏



槽形钢骨钢筋混凝土建筑结构中间层
(第二层)的破坏

5-7

日本神户大地震对土木工程结构的破坏

在日本
HigashiKobe 轮
渡破坏的码头墙



5-8

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



剪压破坏的槽形钢骨
钢筋混凝土柱



破坏的柱基础

5-9

日本神户大地震对土木工程结构的破坏



普通木结构房屋的典型破坏



地震纵向力引起具有桩基础的
钢筋混凝土建筑的倾斜

5-10

日本神户大地震对土木工程结构的破坏

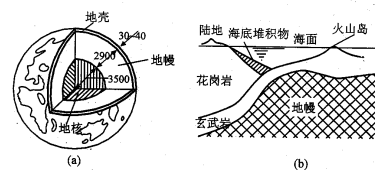


地震破坏的公路

5-11

第一节 地震基本知识

一、地震的类型与成因



地球的构造

5-12

第一节 地震基本知识

1.地震类型

火山地震、陷落地震、构造地震

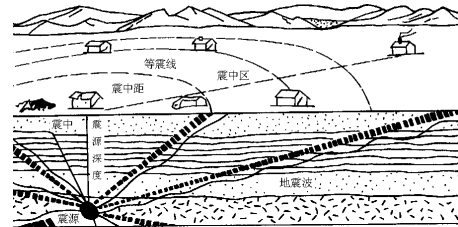
2.构造地震的成因

地幔热对流、地球自转与公转、月球和太阳引力
地幔热对流→地壳岩层变形→应力累积→岩层断裂
→岩层震动→地震

5-13

第一节 地震基本知识

3.地震术语



地震术语示意图

5-14

第一节 地震基本知识

- 震源：即发震点，是指岩层断裂处；
- 震中：指震源正上方的地面地点；
- 震源深度：指震中至震源的距离；
- 震中距：指地面某处到震中的距离。
- 浅源地震 ($h \leq 60\text{km}$)
- 中源地震 ($60 < h \leq 300\text{km}$)
- 深源地震 ($h > 300\text{km}$)

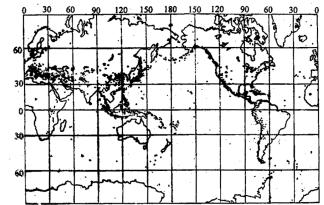
5-15

第一节 地震基本知识

二、地震分布

1.世界地震分布

两大地震带：
环太平洋地震带、
欧亚地震带



公元前2000年~公元1979年世界中大地震分布

5-16

第一节 地震基本知识

1 原因：板块构造理论

1 六大板块

欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印澳板块、南极洲板块。

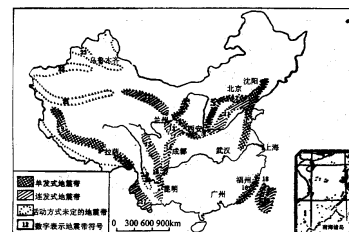
2.中国地震分布

- ① 台湾地区
- ② 喜马拉雅山地区
- ③ 华北地区
- ④ 天山地区
- ⑤ 华北地区
- ⑥ 东南沿海地区

5-17

第一节 地震基本知识

1 中国地震活动区



5-18

第一节 地震基本知识

三、震级与烈度

1. 震级

定义：衡量一次地震规模大小的数量等级。

里氏震级 $M = \lg A$

A: 距震中100km处的最大水平地面位移 (μm)

2. 地震能

$$\lg E = 11.8 + 1.5M$$

一个7级地震，约相当于30枚2万吨TNT的原子弹爆炸所释放的能量。

5-19

第一节 地震基本知识

3. 烈度

定义：某一特定地区遭受一次地震影响的强烈程度。

中国地震烈度表

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害程度		水平加速度 (cm/s ²)	水平速度 (cm/s)
1	无感					
2	室内个别静止中的人感觉					
3	室内少数静止中的人感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
4	室内多数人感觉，室外少数人感觉，少数人梦中惊醒。	门、窗作响		悬挂物明显摆动，器皿作响		

5-20

第一节 地震基本知识

中国地震烈度表(续一)

5	室内普遍感觉。室外多数人感觉。多数人梦中惊醒。	门窗、屋顶、屋架颤动作响，灰土掉落，抹灰出现微细裂缝。		不稳定物翻倒	31 (22-44)	3 (2-4)
6	惊慌失措，仓皇逃出	损坏个别砖瓦掉落，墙体微细裂缝	0-0.1	河岸和松软土出现裂缝，饱和沙层出现喷沙冒水。地面上有的砖烟囱轻度裂缝、掉头	63 (45-89)	6 (5-9)
7	大多数人仓皇逃出	轻度破坏—局部破坏、开裂，但不妨碍使用	0.11-0.30	河岸出现塌方，饱和沙层常见喷沙冒水，松软土上地裂缝较多。大多数砖烟囱中等破坏。	125 (90-177)	13 (10-18)
8	摇晃颠簸，行走困难	中等破坏—结构受损，需要修理	0.31-0.50	干硬土上亦有裂缝。大多数烟囱严重破坏。	250 (178-353)	25 (19-35)

5-21

第一节 地震基本知识

中国地震烈度表(续二)

9	坐立不稳，行动的人可能摔跤	严重破坏—墙体龟裂、局部倒塌，修复困难	0.51-0.70	干硬土上有许多地方出现裂缝，基岩上可能出现裂缝、滑坡、塌方等。砖烟囱出现倒塌。	500 (354-707)	50 (36-71)
10	骑自行车的人会摔倒，处不稳状态的人会排出几尺远，有抛物感	倒塌—大部倒塌，不堪修复	0.71-0.90	山崩和地震断裂出现。基岩上的拱桥破坏。大多数砖烟囱从根部破坏或倒塌。	1000 (708-1414)	100 (72-141)
11		毁灭	0.91-1.0	地震断裂延续很长。山崩常见。基岩上拱桥破坏。		
12				地面剧烈变化，山河改观		

5-22

第一节 地震基本知识

4. 烈度与震级的关系

一次地震只有一个震级，但不同的地点将有不同的烈度。

震中烈度与震级关系：

$$M = 1 + \frac{2}{3} I_0$$

烈度衰减关系：

$$I = I_0 - c \cdot \lg \left(\frac{\Delta}{h} + 1 \right)$$

Δ : 震中距 h : 震源深度

5-23

第一节 地震基本知识

四、地震波与地面运动

1. 地震波

体波：纵波 (P波)、横波 (S波)

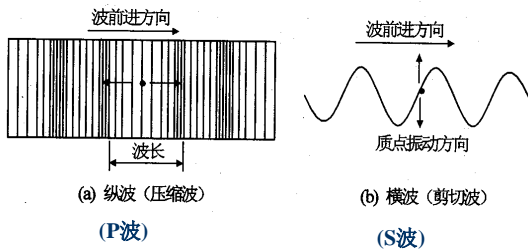
面波：瑞雷波 (R波)、洛夫波 (L波)

各种波特点	P波	S波	R波和L波
波速	快	较快	慢
周期	短	较短	长
振幅	小	较小	大

5-24

第一节 地震基本知识

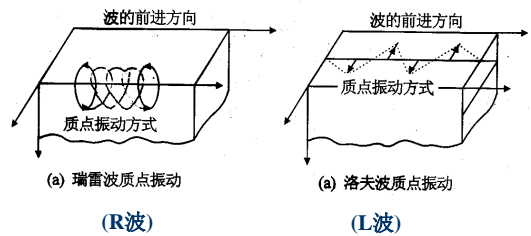
1 体波质点的振动方向



5-25

第一节 地震基本知识

1 面波质点的振动方向

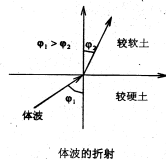


5-26

第一节 地震基本知识

2.地震地面运动

- 对于地面上的某一点，当地震体波到达该点或面波经过该点时，就会引起该点往复运动，此即地震地面运动。
- 因波的折射，体波传播到地面时，其行进方向将近似与地面垂直。



5-27

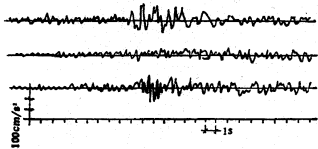
第一节 地震基本知识

- P波 → 上下运动
- S波 → 前后、左右运动
- R波 → 上下、前后运动
- L波 → 左右运动
- 三向地面运动
 - 上下运动：由P波和R波引起
 - 前后运动：由S波和R波引起
 - 左右运动：由S波和L波引起

5-28

第一节 地震基本知识

q 地震地面运动加速度记录



q 地面运动三要素：强度、频谱、强震时间

5-29

第一节 地震基本知识

- q 一般两个方向水平地面运动的强度相等，而竖向地面运动的强度一般小于水平地面运动的强度。
- q 震中附近，体波成分较多，面波成分较少，随着震中距增加，体波成分减少，面波成分增加。

4.地面运动强度与烈度的关系
平均关系

5-30

第一节 地震基本知识

5. 影响地面运动频谱的主要因素

- 两个因素：震中距、场地条件
- 期短的波在有阻尼介质中传播较易衰减
- 场地卓越周期

$$T_g = \frac{4d_{ov}}{v_{sm}}$$

v_{sm} : 场地土平均剪切波速

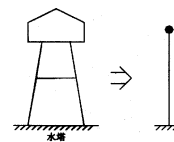
d_{ov} : 场地土覆盖层厚度

5-31

第二节 单质点体系地震作用

1 单质点体系

当结构的质量相对集中在某一个确定位置时，可将结构处理成单质点体系。

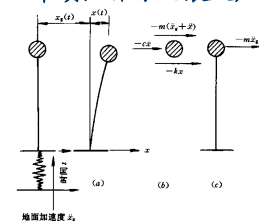


单质点体系简图

5-32

第二节 单质点体系地震作用

1 单质点体系地震反应



质点上三种力:

惯性力 $f_I = -m(\ddot{x}_g + \ddot{x})$

阻尼力 $f_c = -c\dot{x}$

弹性力 $f_k = -kx$

5-33

第二节 单质点体系地震作用

运动方程

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g$$

$$f_I + f_c + f_k = 0 \implies \ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = -\ddot{x}_g$$

$$\frac{k}{m} = W^2 \quad \frac{c}{m} = 2WZ$$

$$\ddot{x} + 2WZ\dot{x} + W^2x = -\ddot{x}_g$$

$$W_D = W\sqrt{1-Z^2}$$

初始条件

$$x(0) = 0 \quad \dot{x}(0) = 0$$

5-34

第二节 单质点体系地震作用

方程的解

$$x(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \left[-\frac{1}{W_D} \sin W_D(t-t) \right] dt$$

$$\dot{x}(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \left[\frac{Z\omega}{W_D} \sin W_D(t-t) - \cos W_D(t-t) \right] dt$$

$$\ddot{x}(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \left[\frac{W^2 - 2Z^2\omega^2}{W_D} \sin W_D(t-t) + 2Z\omega \cos W_D(t-t) \right] dt - \ddot{x}_g(t)$$

5-35

第二节 单质点体系地震作用

Z 值很小时，简化如下

$$x(t) \approx -\frac{1}{W_D} \int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \sin W_D(t-t) dt$$

$$\dot{x}(t) \approx -\int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \cos W_D(t-t) dt$$

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \approx W_D \int_0^t \ddot{x}_g(t) e^{-Z\omega(t-t)} \sin W_D(t-t) dt$$

5-36

第二节 单质点体系地震作用

其中

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{自振圆频率}$$

$$z = \frac{c}{2wm} \quad \text{阻尼比}$$

● 地震作用

△ 定义: 质点的最大惯性力

$$F = m \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right|_{\max}$$

5-37

第二节 单质点体系地震作用

△ 意义: 数学上

$$x \rightarrow x_{\max}$$

$$\therefore \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right| \approx w^2 |x|$$

$$\therefore \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right| \rightarrow \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right|_{\max}$$

即 由运动方程 $\Rightarrow m \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right|_{\max} = k |x|_{\max}$

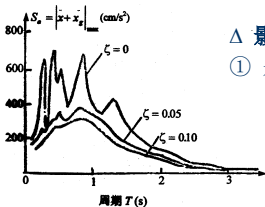
$$F = k |x|_{\max}$$

5-38

第二节 单质点体系地震作用

● 地震反应谱

△ 定义 $S_a = \left| \ddot{x}_g + \ddot{x} \right|_{\max} \quad F = m S_a$



△ 影响因素

① 是 ζ 、 ω 的函数, 一般固定 ζ , 则

$$S_a = S_a(\omega) \text{ 或 } S_a = S_a(T)$$

地震加速度反应谱图(如左示)

5-39

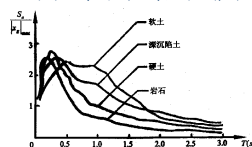
第二节 单质点体系地震作用

② 与 \ddot{x}_g 有关

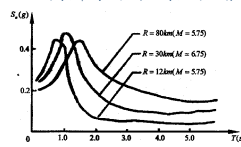
S_a 的大小与 \ddot{x}_g 的幅值成正比

S_a 的形状与 \ddot{x}_g 的主要周期成分有关

不同场地条件的地震反应谱图



不同震中条件的地震反应谱图



5-40

第二节 单质点体系地震作用

● 设计反应谱

用于设计应: ① 规定 \ddot{x}_g 的幅值
② 考虑 \ddot{x}_g 的周期成分
③ 考虑 \ddot{x}_g 的变异性

$$S_a(T) = \frac{S_a(T) \left| \ddot{x}_g \right|_{\max}}{g} = b(T) \bar{k} g \quad \text{地震加速度反应谱}$$

$$b(T) = \frac{S_a(T)}{\left| \ddot{x}_g \right|_{\max}} \quad \text{动力系数}$$

$$\bar{k} = \frac{\left| \ddot{x}_g \right|_{\max}}{g} \quad \text{地震系数}$$

5-41

第二节 单质点体系地震作用

$\left| \ddot{x}_g \right|_{\max}$ 幅值的规定

$$\bar{k} = \frac{\left| \ddot{x}_g \right|_{\max}}{g} \quad \text{地震系数}$$

$$\bar{k} = 0.125 \times 2^{I-7}$$

⊙ I: 基本烈度 (设防烈度)

“小震不坏, 大震不倒”

小震烈度 = 基本烈度 - 1.5

大震烈度 = 基本烈度 + 1

5-42

第二节 单质点体系地震作用

\bar{b}_g 周期成分和变异性

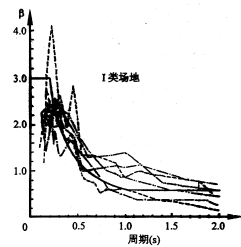
$$b(T) = \frac{S_a(T)}{\bar{b}_g |_{\max}} \quad \text{动力系数}$$

根据场地条件和震中距将地震记录分类，计算每一类记录 $\bar{b}(T)$ 和平均谱 $\bar{b}(T)$

5-43

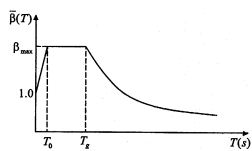
第二节 单质点体系地震作用

- 相近场地及相近震中距的规则化地震反应谱 (不同地震记录)



5-44

第二节 单质点体系地震作用



同类地震记录的平均动力系数谱

$$\bar{b}(T) = b_{\max} \left(\frac{T_g}{T} \right)^{\nu}$$

- * 场地条件: 3~4类 (土的软硬和厚度)
- * 震中距: 近震、远震

5-45

第二节 单质点体系地震作用

- 设计地震作用的计算

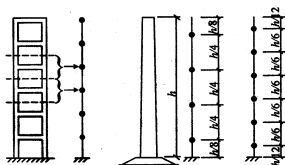
$$F = m S_a(T) = (mg) \bar{b}(T) = G \bar{b}(T) = Ga(T)$$

$$a(T) = \bar{b}(T) \quad \text{地震影响系数}$$

5-46

第三节 多质点体系地震作用

- 多质点体系



(a) 框架的简化 (b) 质量均匀分布结构的简化
多质点体系简图

5-47

第三节 多质点体系地震作用

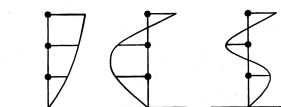
- 多质点体系地震反应

△ 运动方程

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{u}\}$$

△ 自由振动特性

$$\text{频率: } w_1, w_2, \dots, w_n \quad \text{振型: } \{f_1\}, \{f_2\}, \dots, \{f_n\}$$



5-48

第三节 多质点体系地震作用

振型的正交性: $\{f_i\}^T [K] \{f_j\} = 0 \quad i \neq j$

$$\{f_i\}^T [M] \{f_j\} = 0 \quad i \neq j$$

$$[C] = a[M] + b[K], \quad \{f_i\}^T [C] \{f_j\} = 0 \quad i \neq j$$

△ 地震反应的振型分解

$$\{x\} = \sum_{j=1}^n q_j \{f_j\}$$

$$m_j \ddot{q}_j + 2w_j z_j \dot{q}_j + w_j^2 q_j = -g_j \ddot{u}_g$$

$$g_j = \frac{\{f_j\}^T [M] \{1\}}{\{f_j\}^T [M] \{f_j\}}$$

5-49

第三节 多质点体系地震作用

● 振型地震作用

$$\begin{aligned} F_{ji} &= g_j (m_i f_{ji} S_a(T_j)) \\ &= g_j m_i f_{ji} k b(T_j) g \\ &= G g_j f_{ji} a(T_j) \end{aligned}$$

● 振型组合

△ 振型地震作用 → 振型最大反应

△ 振型最大反应不在同一时刻发生

5-50

第三节 多质点体系地震作用

△ 平方和开方法 $S = \sqrt{\sum_{j=1}^n S_j^2}$

△ 结构的低阶振型反应比高阶振型反应大。一般情况下，振型反应随振型阶数的增大而减小。

● 底部剪力法

△ 计算假定

(1) 结构地震反应以第一振型为主，忽略其他振型反应。

5-51

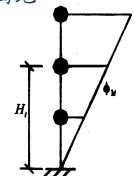
第三节 多质点体系地震作用

(2) 结构第一振型为线性倒三角分布。

则任一质点的振型坐标与该质点离地面的高度成正比，即

$$f_{1i} = c H_i$$

其中， c 为常数



第一振型分布假设

5-52

第三节 多质点体系地震作用

△ 底部剪力

$$F_{EK} = c G_E a(T_1)$$

G_E : 结构总重力荷载

$$c = \frac{3(n+1)}{2(2n+1)}$$

$n=1$ 时, $\alpha=1$;

$n>1$ 时, $\alpha=0.75-0.90$, 可近似取 $\alpha=0.85$ 。

5-53

第三节 多质点体系地震作用

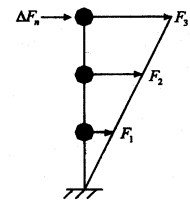
△ 地震作用分布

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{EK}$$

△ 高阶振型影响

$$\Delta F_n = d_n F_{EK}$$

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} (F_{EK} - \Delta F_n)$$



底部剪力法地震作用分布

5-54

计算题

已知一个两层剪切型，如图所示，试分别采用振型分解反应谱法和底部剪力法求该结构在地震作用下的底部最大剪力和顶部最大位移。已知设计反应谱的有关参数为 $T_g=0.2s$ 、 $b=0.9$ 、 $\alpha_{\max}=0.16$ 。



5-55

