



同济大学土木工程防灾国家重点实验室、桥梁工程系

高等结构动力学

——之第十一讲

桥梁地震振动作用

主讲教师：葛耀君 教授、博士



1. 桥梁抗震设计现状

1.1 国内外规范

- ◆ 美国AASHTO规范：跨径150m以下桥梁
- ◆ EUROCODE 8：梁桥和斜拉桥(拱桥和悬索桥除外)
- ◆ 日本道路桥规范：跨径200m以下桥梁
- ◆ 本四联络桥规范：悬索桥(20年历史)
- ◆ 我国公路桥规范：跨径150m以下桥梁
- ◆ 我国铁路桥梁：专门研究



1. 桥梁抗震设计现状(续)

1.2 桥梁震害分析

➤ 上部结构影响

直接破坏不大；主要是其它部位破坏引起的牵连破坏

➤ 支承连接震害

直接破坏常见；造成力的传递方式改变

➤ 下部结构破坏

主要直接破坏；水平地震力作用为主



1. 桥梁抗震设计现状(续)

1.3 引起震害原因

➤ 地震问题

砂土液化、地基下沉、岸坡滑移或开裂

➤ 结构问题

形式、构造或连接措施不当引起的落梁

➤ 地震力分布问题

桥梁各支承点的地面运动不一致

➤ 设计问题

墩柱本身抗震能力不足造成的破坏



2. 桥梁抗震设计实用方法

- ◆ 武腾清三原则：“小震不坏、中震可修、大震不倒”
- ◆ 我国建筑工程规范：三个裂纹水平和二个震级阶段

2.1 桥梁抗震概念设计(方案设计阶段)

- (1) 结构动力性能分析
- (2) 反应谱方法估算地震反应
- (3) 判定是否能够通过配筋或其它构造抗震
- (4) 评判抗震结构体系优劣



2. 桥梁抗震设计实用方法(续)

2.2 桥梁延性抗震设计

(1) 塑性铰配筋设计

增强横向钢筋—约束砦、保证延性和纵向钢筋不屈曲

(2) 抗震能力分析验算

a) 地震动输入的确定

b) 正常使用极限状态抗震验算

c) 可修复破坏极限状态抗弯验算

d) 抗剪强度验算



2. 桥梁抗震设计实用方法(续)

2.3 桥梁减、隔震设计

- (1) 桥梁墩柱较刚性
- (2) 桥梁布置不规范、有可能导致不均匀受力
- (3) 地震能量主要集中在高频区时



3. 桥梁地震反应分析

3.1 确定合适的地震输入

➤ 实际地震输入

相对位移功率谱： $S_d(\xi, \omega)$

相对速度功率谱： $S_v(\xi, \omega)$

绝对加速度功率谱： $S_a(\xi, \omega)$

➤ 模拟地震输入

伪速度功率谱： $S_{pv}(\xi, \omega) = \left[\int_0^t \ddot{v}_g(\tau) \sin \omega(t - \tau) \exp[-\xi \omega(t - \tau)] d\tau \right]^2$

相应位移功率谱： $S_d(\xi, \omega) = \frac{1}{\omega} S_{pv}(\xi, \omega)$

相应加速度功率谱： $S_a(\xi, \omega) = \omega S_{pv}(\xi, \omega)$



3.1 确定合适的地震输入(续)

➤ 响应谱影响因素

$$S = S(SM, GC, ED, FD, M, SC, \xi, T)$$

SM — 地震谱数值，未知

GC — 地震谱形状，未知

ED 、 FD 和 M — 地震谱密度水平，通常可以忽略

SC — 地基土对地震谱影响

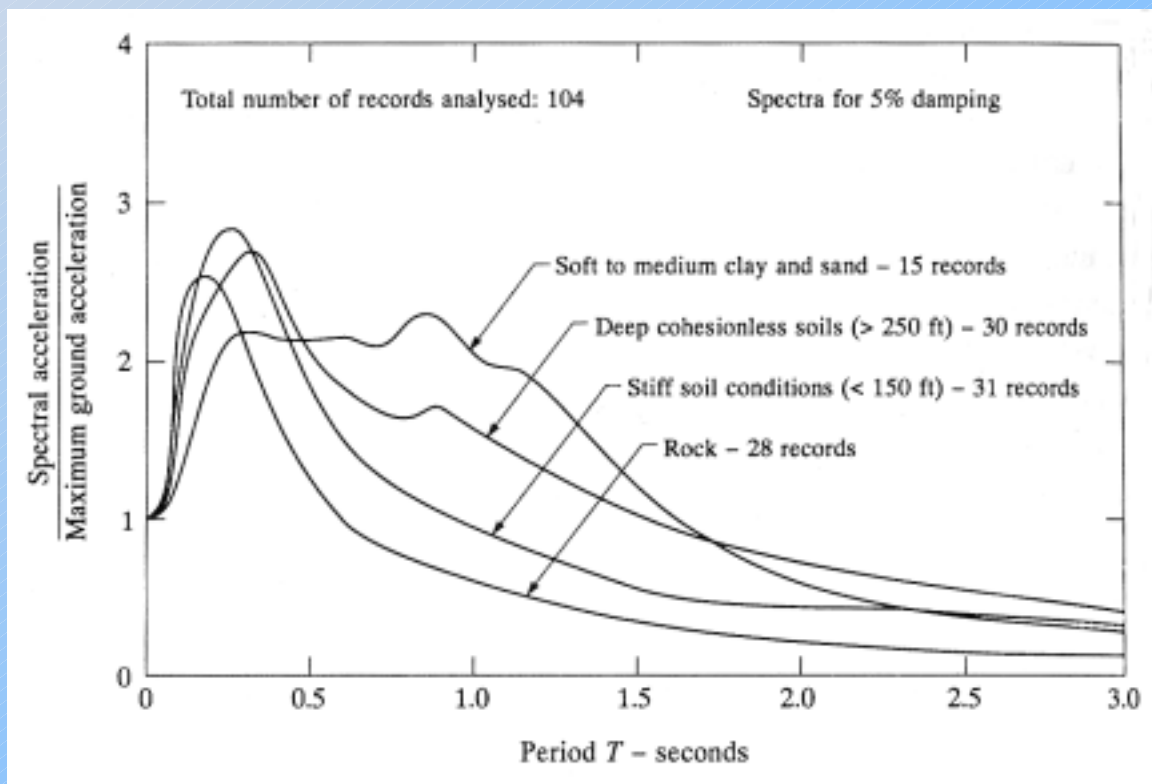
ξ — 阻尼比

T — 周期



3.1 确定合适的地震输入(续)

➤ 响应谱简化 $S = S(SC, \xi, T)$



结论：地震土越硬，卓越周期越小，带宽越小



3. 桥梁地震反应分析(续)

3.2 建立系统的数学模型

➤ 振动方程

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_s \\ \ddot{\delta}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sg} \\ C_{gs} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_s \\ \dot{\delta}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sg} \\ K_{gs} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

➤ 增量形式

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{\delta}_s \\ \Delta \ddot{\delta}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sg} \\ C_{gs} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{\delta}_s \\ \Delta \dot{\delta}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sg} \\ K_{gs} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta_s \\ \Delta \delta_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta \ddot{\delta}_s \\ \Delta \ddot{\delta}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{ss}(t + \Delta t) \\ \ddot{\delta}_{gg}(t + \Delta t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{ss}(t) \\ \ddot{\delta}_{gg}(t) \end{Bmatrix}$$



3.2 建立系统的数学模型(续)

➤ 解耦方程

令：

$$\begin{Bmatrix} \Delta \delta_s \\ \Delta \delta_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_{vs} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta \delta_{ps} \\ \Delta \delta_g \end{Bmatrix}$$

引用静力平衡方程： $[K_{ss}] \{\Delta \delta_{ps}\} + [K_{sg}] \{\Delta \delta_g\} = \{0\}$

$$[M_{ss}] \{\Delta \ddot{\delta}_{vs}\} + [C_{ss}] \{\Delta \dot{\delta}_{vs}\} + [K_{ss}] \{\Delta \delta_{vs}\} = \{\Delta p(t)\} + \{p^T(t)\}$$

$$\{\Delta p(t)\} = -[M_{ss}] \{\Delta \ddot{\delta}_{ps}\} - ([C_{ss}] \{\Delta \dot{\delta}_{ps}\} + [C_{sg}] \{\Delta \dot{\delta}_g\})$$

$$\{p^T(t)\} = \{p(t)\} - [M_{ss}] \{\Delta \ddot{\delta}_{vs}(t)\} - [C_{ss}] \{\Delta \dot{\delta}_{vs}(t)\} - \{F^e(t)\}$$



3.桥梁地震反应分析(续)

3.3 选择有效的求解方法

➤ 地震反应分析中的非线性问题

钢筋砼塑性梁柱单元

非线性支座单元

非线性挡块单元

非比例阻尼矩阵

➤ 逐步积分法求解

龙格—库塔法

Newmak- 法

Wilson- 法

➤ 多方向一致激励线性反应谱分析



4. 桥梁抗震能力验算

4.1 钢筋砼墩柱抗弯能力验算

- 截面强度
- 曲率延伸率
- 最大塑性转角

4.2 钢筋砼墩柱抗剪能力验算

- 混凝土抗剪
- 轴向力抗剪
- 横向力钢筋抗剪



4. 桥梁抗震能力验算(续)

4.3 支承连接构件抗震验算

- 支座： 剪切应变，抗滑稳定性
- 挡块： 抗剪验算

4.4 抗震能力验算思路

- (1) 重视结构动力概念设计，选择理想抗震结构体系
- (2) 重视结构延性抗震，用能力设计思路进行抗震设计
- (3) 重视支承连接构件设计
- (4) 重视减、隔震措施，提高结构抗震能力



5. 概率性地震反应分析

- ◆ 概率性线性地震反应分析
- ◆ 各态平稳随机过程
- ◆ 自相关函数、功率谱密度、概率分布
- ◆ 概率性非线性地震反应分析



小结

桥梁地震反应分析

确定合适的地震输入

实际地震波输入

模拟地震波输入

建立系统的数学模型

分步计算增量方程

静力平衡解耦方程

选择有效的求解方法

非线性地震时程分析

逐步积分法求解

桥梁抗震能力验算

钢筋砼墩柱抗弯能力验算

钢筋砼墩柱抗剪能力验算

支承连接构件抗震验算

抗震能力验算一体系、延性、连接、减隔震



同济大学土木工程防灾国家重点实验室、桥梁工程系

下周同一时间再见!