

文章编号: 1002-0268 (2004) 12-0066-03

# 高桥墩桥梁抗震分析方法

马健中<sup>1,2</sup>

(1. 山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030012; 2 同济大学桥梁系, 上海 200092)

**摘要:** 近年来, 在我国西部高烈度地震区出现了许多高墩桥梁, 在强地震作用下高桥墩桥梁的反应与低桥墩桥梁相比具有明显的非线性行为, 其中包括几何非线性和材料非线性, 但是在现行规范中对高桥墩桥梁的抗震分析没有具体规定。本文总结了高桥墩桥梁的地震反应特点, 以及高桥墩在地震作用下非线性行为的作用原理, 并在此基础上系统总结基于弹塑性桥墩模型的地震反应分析过程, 为以后此类高墩桥梁的地震反应分析提供可以借鉴的方法。

**关键词:** 高桥墩; 地震反应; 非线性; 弹塑性

**中图分类号:** U448 215

**文献标识码:** A

## The Method of Aseismic Analysis for High-rise Pier Bridge

MA Jian-zhong

(1. The Communications Survey &amp; Design Institute of Shanxi Province, Shanxi Taiyuan 030012, China;

2 Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In recent years, a lot of high-rise bridge piers appear in the highly seismic region in the west of our country. The high-rise pier represents obviously non-linear behavior comparing with low pier bridge under strong earthquake, including geometry nonlinearity and material nonlinearity. But aseismic analysis of the high-rise pier bridge is not defined in the current code norm. This paper has summarized the feature of seismic response for high-rise pier and summarized analytic process basing on the pier model of plasticity. And this analysis method for the high-rise pier will be a good example for analysis.

**Key words:** High-rise bridge pier; Seismic response; Non-linearity; Elasto-plasticity

## 0 概述

山西是个多山的省份, 铁路和公路在山区跨越深谷最好的形式就是高墩桥梁。近年来, 山西修建了很多高墩桥梁, 侯月铁路浹河特大桥跨河谷的 10 个桥墩为主桥墩, 平均高度为 60m, 其中有 6 个墩的墩身高度高于 60m, 2 个墩高于 70m。10 个主桥墩均设计为刚度大、整体受力好、圬工少、重量轻的壁厚为 30~40cm 的钢筋混凝土双线圆端形薄壁空心墩。仁义河特大桥位于山西灵石县南关镇东约 13km 的道阡村西, 于公路测设里程 K87~185+K88~270 之间跨越仁义河, 为上、下行分离的 2 座独立桥, 且分别与隧道相接。该桥系山西省祁县临汾高速公路上的主要桥梁之一, 为该公路灵石至霍州段跨度最大、高度最

高的桥梁, 最高桥墩为 73.5m。以后随着高等级公路建设的加快, 高桥墩的应用还会越来越多。我国的西北和西南部地区是高烈度的地震区域, 在这个地区的高墩桥梁在高烈度的地震作用下, 将会呈现出不同于其它地区的特性, 高墩桥梁的兴建给抗震设计带来了新的课题。

## 1 高墩抗震的特点

现在国内外缺乏高桥墩经受地震的经验, 故受震害后修复困难。因此, 对高墩梁桥进行准确的地震反应分析, 并由此提出针对高墩的抗震设计方法是十分必要的。

高桥墩墩体自重大, 墩顶还要承载巨大的上部结构和车辆活载, 形成一个承受水平作用力, 特别是对

抗震不利的倒摆式结构。如图 1 所示。

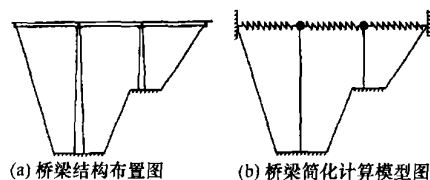


图 1 高墩结构计算模型

在纵向地震动条件下, 作为一个整体的耦连体系, 当桥墩的高度不太大, 相邻桥墩变化又不太急剧时, 仅考虑体系的基本振型 (第一类振型中的最低振型) 反应已有足够的精度。当桥墩的高度较大时, 则除了基本振型以外, 还要逐墩分别考虑第二类振型的影响。对于特高桥墩, 而且相邻墩的高度变化又特别显著时, 则其它的高振型的影响可能成为不可忽略的因素。

大量的桥梁震害表明: 造成桥梁破坏的主要原因是由于地震使桥梁产生的沿桥轴线的纵向水平振动和横向水平振动。为了承受巨大的水平地震作用, 不得不加大墩体的截面, 而加大墩体的截面, 通常又会增大地震惯性力, 减少由于增大截面所取得的实际效果, 形成一个恶性的闭合循环。当墩高和地震烈度增大到一定限度时, 甚至出现加大截面变得无效反而有害的情况。

另外, 随着大量的宏观震害调查和理论研究的不断深入, 人们逐渐认识到, 当结构形式接近空间体系时, 地震运动具有的多维性使得结构的地震反应也呈现出空间特性。对于象高桥墩这样的几何非线性非常明显的结构, 这种特性表现得尤为突出, 它受地震动竖向加速度分量的影响很明显。因此, 需要对结构进行空间地震反应分析才能得出结构精确的地震反应。多点地震输入和地基基础的土-结相互作用对高墩大跨桥梁的影响更加突出。地基土对基础的约束作用一般用弹簧来模拟, 基础弹性变形对上部结构内力和变形将产生不可忽略的影响。

## 2 高墩抗震存在的问题

### 2.1 现有规范的不足

在进行高墩桥梁抗震分析时, 最常用的分析方法仍然是反应谱法, 但是在现行的《公路工程抗震设计规范》中有个综合影响系数  $C_z$ , 用来调整理论计算与抗震经验之间的差距, 使抗震计算结果乘以综合影响系数后与震害区调查的实际情况一致。但是当桥墩高于 30m 时, 没有列出相应的综合影响系数。因此高墩的反应谱分析计算的高墩反应就存在一定的人为

因素。在规范中综合影响系数主要考虑的是墩本身是具有弹塑性的, 在地震作用下存在着延性耗能的可能, 材料的非线性是影响综合影响系数的主要因素。但是规范中对综合影响系数的选取过于笼统, 不能较为准确的考虑墩截面的材料和配筋情况。

### 2.2 几何非线性

高墩在纵向水平地震力作用下产生水平变位, 而使作用在墩顶上的上部结构的重力荷载以及墩身自身的重力荷载产生了偏心, 在桥墩内将引起二次内力和变形 (称  $P-\Delta$  效应)。由于竖向地震力的影响, 这种  $P-\Delta$  效应将加大而使高墩进一步处于不利状态。为安全起见, 进行高墩抗震计算时, 应该计入此  $P-\Delta$  效应引起的内力和变形。

### 2.3 桥墩的弹塑性

结构在强烈地震作用下, 大部分将进入弹塑性变形阶段, 与弹性变形相比, 过大的塑性变形会使结构开裂, 混凝土脱落, 甚至破坏。但另一方面, 由于弹塑性阶段的结构刚度降低, 结构自振周期增大, 改变了结构的地震反应特性, 非弹性的不可恢复变形可以耗散输入的地震能量, 从而减小地震对结构的作用。在非线状态下, 结构是否破坏将取决于塑性变形能力或耗散能量的能力, 而不取决于强度, 强度条件并不能恰当地估价结构的抗震能力。如何有效地利用结构非线性变形的耗能能力, 同时结构又不会产生过大的强度损失和过大的塑性变形, 避免开裂太大而不易修复或破坏, 就必须对结构的弹塑性变形特性及破坏机理作深入的研究, 进行结构延性抗震设计, 以减轻甚至避免震害的产生。

由于桥梁结构的塑性变形主要集中在桥墩等下部结构上, 桥梁结构的抗震性能与墩柱的动力性能直接相关, 所以研究墩柱的动力性能对研究全桥结构的弹塑性地震反应来说是非常重要的。对于高桥墩来说, 在强震作用下其墩身承受的弯矩特别大, 常发生以弯曲为主的塑性变形。由于墩高和轴力的影响, 截面沿墩高方向变化较大, 因此弯矩-曲率关系也是变化的, 整个桥墩需要使用多个不同的弯矩-曲率关系。由于截面的变化及截面轴压比的变化使得塑性铰不一定产生在墩底, 其位置难以判断; 桥墩在横向地震作用下的力很大时, 由于几何非线性的影响, 使得难以计算墩身内力。

## 3 弹塑性抗震分析方法

### 3.1 弹塑性分析模型

用弹性反应谱进行高墩的地震反应分析已经不能

满足抗震的要求, 因为弹性反应谱方法是建立在线性范围内的, 对于高墩这样非线性非常明显的结构来说, 再用弹性反应谱法来进行地震反应分析是存在一定缺陷的, 在某些情况下甚至得出的是错误的结果。因此要了解地震时桥墩的真实受力状况, 必须研究桥墩在地震作用下的弹塑性反应。

对于钢筋混凝土墩柱的弹塑性分析, 现有的各种方法和模型粗细不同, 难度和实际效果也大不一样。越精细的模型, 所要求的计算量和存储量大, 数值计算的难度也大, 结果的稳定性也差。反之, 简单易行的方法却往往能得到稳定合理的结果。由于地震动本身是随机的, 而混凝土材料的离散性又比较大, 因此在地震反应分析中过分追求精度没有多大意义。对实际桥梁工程进行弹塑性地震反应分析时, 基于屈服面的弹塑性分析模型能正确把握墩柱的整体弹塑性性能, 是目前比较实用的一种分析方法。

对空间的钢筋混凝土墩柱进行弹塑性分析时, 一般都采用屈服面的概念进行截面工作状态的判别和弹塑性切线刚度的推导。所谓的屈服面, 就是屈服强度  $P_u$ ,  $M_{yu}$  和  $M_{zu}$  之间的相互作用面。根据屈服面的定义, 如截面的内力坐标  $(P, M_y, M_z)$  位于屈服面之内, 表明截面处于弹性状态; 如位于屈服面上, 表明截面正好屈服; 如位于屈服面之外, 表明截面已进入塑性工作状态。这种基于屈服面的模型相对比较直观, 也易于理解, 数值计算的工作量和难度也较小, 比较容易得到正确、合理的结果。

### 3.2 弹塑性分析过程

弹塑性结构地震反应分析的基本思路可分为数值积分。反应值叠加和刚度修正三个基本步骤。

结构在多维地震波作用下的一般动力方程为

$$[M][\ddot{\mathbf{q}}] + [C][\dot{\mathbf{q}}] + [K][\mathbf{q}] = -[M]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{q}}_g(t) \quad (1)$$

考虑结构的弹塑性行为时将动力方程(1)改为

$$[M][\ddot{\mathbf{q}}] + [C][\dot{\mathbf{q}}] + \{F\} = -[M]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{q}}_g(t) \quad (2)$$

式中,  $\{F\}$  为弹塑性恢复力向量代替弹性分析过程中的弹性力向量  $[K]\{\mathbf{q}\}$ , 结构在时刻  $i+1$  的反应可用时刻  $i$  的反应叠加一个线性增量的方式给出

$$\{F_{i+1}\} = \{F_{i+1}\} + [\bar{K}_i]\{\Delta u\} \quad (3)$$

式中, 矩阵  $[\bar{K}_i]$  为增量刚度矩阵, 随结构受力和变形状

态不同而改变。

因此可以写出结构非线性动力增量方程

$$[M]\{\Delta\ddot{u}\} + [C]\{\Delta\dot{u}\} + \{\bar{K}\}\{\Delta u\} = -[M]\{\Delta\ddot{u}_g\} \quad (4)$$

利用动力分析的逐步积分法, 就可以进行结构弹塑性地震反应分析的计算。

在采用数值分析方法时, 结构线弹性地震反应分析与非线性地震反应分析的主要区别在于刚度矩阵是否可变。对于弹塑性反应分析计算, 在每一步增量反应计算之前, 要先修正矩阵  $[\bar{K}]$  中各个元素的量值, 这一构成称为刚度修正。

## 4 总结

对于高桥墩, 分析过程不同于一般桥梁结构, 高墩在强震作用下墩身承受的弯矩特别大, 常发生以弯曲为主的塑性变形。由于高桥墩在地震作用下具有明显的非线性特征, 因此规范中的线弹性反应谱分析已不能满足高桥墩抗震分析的要求, 需要有一种可以考虑桥墩非线性特征的分析方法来代替反应谱分析, 弹塑性结构地震反应分析是一种桥梁结构在强震作用下重要的分析方法。这种方法的关键是确定构件的恢复力模型。

### 参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 普瑞斯特雷, 等. 桥梁抗震设计与加固 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [4] 卓卫东, 范立础. 从震害教训中反思我国桥梁抗震设计现状 [J]. 福州大学学报, 1999 (6): 7-10.
- [5] Shinji Tanimura, et al. Dynamic Failure of Structures Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000 (24): 583-596.
- [6] 李睿, 宁晓骏, 叶燎原, 李新乐. 高墩梁桥的地震反应分析 [J]. 昆明理工大学学报, 2001 (10): 86-89.
- [7] R A Dameron, V P Sobash, I P Lam. Nonlinear Seismic Analysis of Bridge Structures: Foundation-soil Representation and Ground Motion Input [J]. Computer and Structure, 1997, 24 (5/6): 1251-1269.
- [8] 屈爱平, 高淑英, 梁-墩-桩基的动力特性研究 [J]. 西南交通大学学报, 2001, 36 (6): 641-644.