

铁路重力式桥墩抗震性能研究

杨 丹

(四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘要: 铁路重力式桥墩因其断面大、只设置了护面钢筋等特点, 因此其配筋率不是很高。高铁重力式桥墩的纵向钢筋配筋率虽然较常规重力式桥墩有较大幅度的改善, 但仍然是一种少筋混凝土结构。少筋混凝土桥墩的受力特性与一般的钢筋混凝土桥墩相比有很大的区别, 主要表现为截面出现裂缝, 导致其受力性能急剧降低。与钢筋混凝土墩柱在地震作用下表现出的能够吸收地震能的延性性能不同, 少筋混凝土墩柱具有较低的延性和较低的耗能性能, 无法直接应用钢筋混凝土结构的延性理论实现“大震不倒”的抗震目的。本文以铁路重力式桥墩为例, 对其抗震性能展开了研究。

关键词: 铁路; 重力式; 桥墩; 抗震性能

一、概述

自改革开放以来, 铁路实现了跨越式的发展。当前, 我国的铁路建设仍处在快速发展的时期, 截止至 2022 年 12 月, 全国铁路营业里程为 15.49 万公里, 其中已经修建和正在修建的高铁将近 2 万公里, 而铁路桥梁是联系铁路交通运输的重要纽带。一般情况下, 铁路桥墩需要具有较大的刚度, 以减少在地震中桥梁上部结构发生的位移, 从而确保震后抢修的及时和铁路行车的顺畅。因此在铁路桥梁工程中, 大量的使用了少筋混凝土重力式桥墩。少筋砼自重型桥墩横截面通常平面尺寸较大、刚度较大、自重较重, 该类桥墩具有大震害、护面钢筋较少、截面配筋率小的特点, 一般配筋率仅为 0.2%~0.5%。由于其延性不足, 在现代抗震设计理论下, 其变形性能较弱, 极易发生震害, 且表现出显著的脆性损伤特性。试验结果表明, 在低周反复荷载下, 钢筋砼墩柱的破坏模式以弯剪为主, 而低周反复荷载下的桩柱则表现出明显的差异。因此, 对于自重少筋混凝土墩柱的抗震设计, 有必要进行针对性的研究。

二、铁路桥墩抗震设计准则及抗震验算指标

(一) 铁路桥墩抗震设计准则

《铁路工程抗震设计规范》(《震规》)将铁路桥梁墩柱按“三级设防、两级设计”的原则确定为基础, 并直接按水平地震最大值 a 进行计算。明确提出了铁道桥梁的抗震性能指标: “小震不坏”, “中震可修”, “大震不倒”。按照《震规》中提出的“三级设防、两级设计”的抗震设计理念, 可以保证其在地震时具有较好的抗震能力。

(二) 铁路重力式桥墩抗震验算指标

1. 少筋混凝土桥墩的界定

结合不同工程要求, 因为工程规定不同, 因此钢筋混凝土桥墩配筋率也明显不同。《震规》要求桥墩主筋的全断面配筋率不得低于 0.5%, 且不得高于 4%, 但该要求没有考虑到桥墩主筋的强度对其截面配筋率的影响。在《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB10092-2017)《桥规》中, 对承压构件截面最小配筋率的要求在表 1 中列出, 其值不得小于该值。可见, 在《桥规》中, 钢筋的强度对桥梁截面配筋有较大的影响。

表 1 《桥规》受压构件的截面最小配筋率

受力类型	钢筋类型	最小配筋率 (%)
全部受力钢筋	HRB300	0.55
	HRB400	0.50
	HRB500	0.45
一侧纵向钢筋	HRB300、HRB400	0.20
	HRB500	0.18

2. 小震时少筋混凝土桥墩的抗震验算指标

《震规》仅就素混凝土桥墩的偏心、强度和稳定性的验算及钢筋混凝土桥墩(配筋率大于 0.5%)强度和稳定性的验算进行了规定, 但对配筋小于 0.5% 的铁路重力式桥墩并无具体要求。所以, 在小地震作用下, 少筋混凝土墩柱的验算问题仍需进一步探讨。

结合实际经验, 本文认为这两种方式都能够用来对少筋混凝土桥墩小震抗震进行验算, 不过目前还只能从理论层面展开, 缺乏必要的试验数据。本文根据国内外有关资料, 提出了一种少筋混凝土墩柱的容许应力法, 并将其与实验数据作了比较, 以证明这种方法是可行的。为使其应用更加简便, 提出了利用该方法反求少筋混凝土墩柱容许合力偏心率的方法。最后, 将少筋混凝土墩柱的验算应用于砌体结构验算中, 并导出验算时的公式, 使其能在简单易行的情况下达到“小震不坏”的设计目的。

3. 大震时少筋混凝土桥墩的抗震验算指标

《震规》仅对 RC 桥墩进行了有限元分析, 并对 RC 桥墩进行了延性验算, 但并没有对 RC 桥墩进行严格的抗震设计。所以, 大震时少筋砼墩柱的验算方法仍需深入探讨。

关于少筋混凝土桥墩在罕遇地震作用下的抗震检验, 以往的研究均采用有限延性检验, 这是因为少筋混凝土桥墩的配筋率偏低, 导致其延性不强。虽然不能作为钢筋混凝土墩柱来验算, 但由于在墩柱中加入了一定数量的钢筋, 因此与素砼墩柱相比, 仍然有一定的延性; 所以, 少筋混凝土桥墩的有限延性指标是在钢筋混凝土桥墩延性指标的基础上折减的, 它给出了配筋率 0.1%~0.5% 的铁路重力式桥墩的位移延性限值, 它在 1.0~4.8 之间进行了线性插值, 但缺乏实验数据的支持。为此, 根据现有的研究成果, 通过对少筋混凝土墩柱进行有限延性分析, 确定了少筋混凝土墩柱有限延性指数; 利用此有限延性指标对少筋混凝土墩柱在大震下的抗震性能进行了检验。

(三) 多遇地震下铁路重力式桥墩抗震验算方法

1. 少筋混凝土桥墩容许合力偏心距的确定方法

(1) 容许应力法计算图式

《铁路桥涵混凝土结构设计规范》对采用容许应力方法进行桥梁承载时, 桥梁承载能力的计算不需要将其与混凝土之间的张力联系起来, 而将张力全部转移到了钢筋上。采用容许应力方法进行弯矩计算时, 还必须符合平面断面假设和弹性本体假设。

(2) 容许合力偏心距的确定方法

针对少筋混凝土桥墩的建设, 首先应该采用容许应力方法确定其容许弯矩 1 M , 再按照规范容许偏心率确定其相应的容许弯矩 2 M , 两者之比为 $12/\text{MM}$, 《震规》中素混凝土桥墩容许偏心率 0.8 S 。

2. 少筋混凝土桥墩偏心距计算公式

(1) 模型桥墩容许合力偏心距计算

该模型桥墩的主要性能指标是：混凝土的抗压强度为 C30。HRB335 钢筋的屈服强度、容许应力和容许压力分别为： $180 \times 1.5 = 270 \text{ MPa}$ 和 $10.0 \times 1.5 = 15 \text{ MPa}$ 。在此基础上，通过考虑纵筋对墩体的增强作用，确定了墩体截面容许合力的偏心率。

表 2 容许合力偏心距分析结果

配筋率 (%)	规范 0.8S 计算弯矩 (KN·m)	容许应力法计算弯矩 (KN·m)	反算容许合力偏心距
0.1	7.95	11.62	1.17S
0.2	7.95	13.42	1.35S
0.3	7.95	15.51	1.56S
0.4	7.95	17.57	1.77S
0.5	7.95	19.60	1.97S

从表 2 中可以看出，在考虑了受拉钢筋作用之后，少筋混凝土桥墩的容许合力偏心率比砌体或混凝土的要高，并且随着配筋率的增加，容许合力偏心率也随之增加。

(2) 容许偏心距计算公式的提出

从表 2 中得到的数据可以看出，配筋率对少筋混凝土墩柱的容许合力偏心率有很大的影响，为此，本项目拟以《震规》中砖、混凝土墩柱等矩形或其他型式的截面的合力偏心率 $e \leq 0.8S$ 为前提，综合考虑配筋率对其的影响，建立少筋混凝土墩柱的容许合力偏心率的计算公式，以便于工程应用。

(3) 容许合力偏心距计算公式中参数 C 的确定

本文以 32 米长双向简支梁桥为实例，给出了其容许荷载作用下的偏心率的计算公式。桥墩断面形状为圆形，断面尺寸为 $200 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$ 。纵筋选用通桥 (2017) 4301 号规范中所用 HRB400 等级钢筋，以 C35 为标准，通过以上分析，计算出在 0.1%~0.5% 范围内，在此基础上，提出了一种新的、适用于高强混凝土桥墩的极限承载力设计方案。

表 3 时速 350km/h 圆端形实体桥墩容许合力偏心距分析结果

配筋率 (%)	规范 0.8S 计算弯矩 (KN·m)	容许应力法计算弯矩 (KN·m)	反算容许合力偏心距
0.1	14248	15103	0.85S
0.2	14248	17211	0.97S
0.3	14248	19437	1.09S
0.4	14248	21691	1.22S
0.5	14248	23943	1.34S

从表 3 可以看出，高铁重力式桥墩的容许合力偏心率随配筋的增加而增大，比《震规》所规定的砖、砼结构的合力偏心率要高得多。随着配筋率的增加，容许合力偏心率系数为线性增加，利用数值分析软件对高速铁路重力式桥墩容许合力偏心率系数 C 与配筋率之间的关系进行了拟合。

(四) 罕遇地震下铁路重力式桥墩抗震验算方法

通过对铁路重力式桥梁的拟静力实验，得出当钢筋混凝土配筋比例为 0.1% 时，只有底部出现一道裂纹，表现出明显的脆性断裂特点。从安全性角度出发，结合当前已有的文献资料，本文认为在轨道交通条件下，配筋小于 0.1% 时，不适合采用延性地震作用下的钢轨自重桥墩。重力式桥墩在配筋 0.5% 以上时，会在墩体上产生多道裂纹，并在墩体底部形成一片塑性区，呈现出延性失效的特点，可以按照延性进行计算。在已有的文献资料中的研究发现，对于具有 0.1%~0.5% 的桥墩，可以按照有限延性进行

设计，对于具有不同配筋率的桥墩，可以采用 1.0~4.8 的线性插值，但缺乏相关的实验数据支持。为了对随着配筋率的提高，桥墩有限位移延性系数的变化趋势进行检验，发现在配筋率 0.2% 到 0.4% 的桥墩，采用第一次屈服法得出的位移延性系数随配筋率增加的变化趋势。

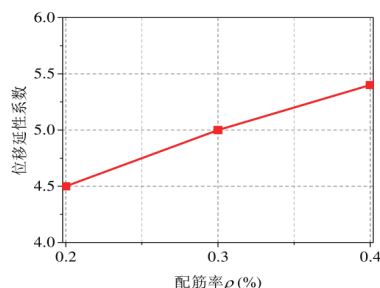


图 5.6 模型桥墩容许位移延性系数随配筋率变化趋势

图 1 模型桥墩容许位移延性系数随配筋率变化趋势

从图 1 可以看出，根据首次屈服法，模型桥墩对桥墩的屈服位移进行计算，得出的位移延性系数随着配筋率的变化，基本上呈现出线性增长，当配筋率为 0.4% 时，桥墩的位移延性系数为 5.4，高于规范规定的 4.8 限值，所以，配筋率 0.4% 的少筋混凝土桥墩可以按照延性进行设计。为使其与规范保持一致，可采用《震规》中最低限值 4.8 来确定其延性，对于配筋 0.4% 以上的墩柱，其延性设计应采用规范最低限值。在考虑位移延性系数的计算方法和模型桥墩试验误差的情况下，将配筋率为 0.2% 的铁路重力式桥墩的容许位移延性系数设定为 4.1。对于配筋为 0.2%~0.4% 的铁路重力式桥墩柱，其容许位移延性系数的下限为 4.1~4.8，可以按有限延性进行设计。

三、铁路重力式桥墩优化配筋设计方案探讨

(一) 墩身底部纵向钢筋加密桥墩设计

为提高铁路重力式桥墩的地震反应能力，笔者认为可以在桥墩下部受压区，仅对桥墩中、上部受压区的纵筋进行加筋，而桥墩下部受压区的纵筋数目不变。这种方法不仅节省了钢筋，而且还增加了墩底塑性区的截面配筋，从而提高了墩底的抗震能力。

(二) 加密高度的确定

在桥墩下部增设纵筋后，桥墩加密区的截面配筋比未加密区的截面配筋大。由于非加密区的横截面配筋比加密区的小，如果纵筋加密区的加密区高度不够，则桥墩有可能在加密区和非加密区的交界处首先出现损伤，导致损伤点的转移，使加密区的桥墩在地震时失效。为防止这一现象的出现，应保证在加劲肋处混凝土裂缝处没有移动，并保证加劲肋处的墩体在加劲肋处比非加劲肋处先屈服。为适应现行桥墩的设计要求，加劲肋的加劲肋高度不宜小于现行规范中的等效塑性区长度。

四、结束语

铁路重力式桥墩的配筋率相对较低，力学性能方面与钢筋混凝土也有明显不同，破坏时未形成明显的塑性铰区。所以，已有的基于等效塑性铰的墩顶变形计算方法无法直接应用于铁路重力式桥墩顶变形计算，亟需对轨道重力式桥墩的墩顶变形计算方法进行深入研究。

参考文献：

- [1] 郭肖东, 陈兴冲, 刘正楠. 施工缝加固后铁路重力式桥墩的抗震性能试验研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2023, 42 (02): 1-6.
- [2] 秦训才, 丁明波, 鲁锦华等. 设置无粘结钢筋铁路重力式桥墩的拟静力试验研究 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31 (06): 134-141.