

中国连续刚构桥的调查与分析

王会利¹, 谢常领¹, 秦泗凤², 涂可瑜¹

(1.大连理工大学 桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116023; 2.大连大学 材料破坏力学数值试验研究中心)

摘要: 该文统计了1988—2016年间中国建成的连续刚构桥,共收集到349座。从总体上分析了其区域分布状况、建设趋势和跨径范围。以公路桥和铁路桥为主,分别分析了墩顶主梁高度和跨中主梁高度与跨径的关系,还统计了主梁、主墩等构造参数以及设计时速和混凝土标号等方面的设计指标。

关键词: 连续刚构桥; 跨高比; 构造参数

1 概述

连续刚构桥采用墩梁固结的形式,不设支座,节省了支座制造、养护和更换的费用;由于墩梁共同参与工作,与相同跨径的连续梁桥相比,跨中弯矩减小,可以进一步减小跨中梁高,减轻主梁自重;成桥状态和施工过程中受力一致无需体系转换,适合采用悬臂施工法,适用于跨越高山峡谷、深水河流;连续刚构桥结构整体性能好、抗震能力强、抗扭潜力大,桥体具有简洁明快等特点。但是,其对温度变化、混凝土收缩、徐变等比较敏感,桥墩需要考虑采用一定的防撞措施。

中国于1988年建成第一座大跨度连续刚构桥——广东洛溪大桥,近30年来,连续刚构桥在中国发展迅速。据统计,全球跨径排名前10的连续刚构桥中有5座在中国,分别是石板坡复线桥(330 m)、北盘江大桥(290 m)、虎门大桥辅航道桥(270 m)、苏通大桥辅桥(268 m)和沅江红河大桥(265 m),其中位于重庆的石板坡复线桥,主跨330 m,在同类桥梁中主跨排名第一。位于贵州省的赫章特大桥,主墩高达195 m,在同类型的桥中墩高排名亚洲第一;湖北腊八斤特大桥、龙潭河大桥主墩也分别达到了182.64、178 m。中国在连续刚构桥的设计和施工中积累了丰富的经验,具有很高的技术水平。

5 结论

通过对连续箱梁桥采用普通橡胶支座和 ϵ 型钢阻尼减震支座两种方案在地震作用下的受力性能分析,得出以下结论:

(1) 采用 ϵ 型钢阻尼减震支座方案使地震作用下桥梁各墩柱内力重新分布,减小了桥梁各墩柱内力,同时大大减小了桥梁梁端位移。

(2) ϵ 型钢阻尼减震支座的滞回曲线饱满,呈纺锤形(梭形),说明 ϵ 型钢阻尼支座具有良好的滞回耗能性能。

(3) 采用 ϵ 型钢阻尼减震支座可明显减小桥梁墩柱的内力,顺桥向隔震率接近50%,横桥向隔震率为20%~40%,说明在连续箱梁桥中采用 ϵ 型钢阻尼减

震支座的减震效果明显。

参考文献:

- [1] 陈列,胡京涛.桥梁减隔震技术[M].北京:中国铁道出版社,2014.
- [2] 刘军,宁响亮,李文斌,等.弹塑性钢阻尼元件在桥梁减震中的应用[J].铁道建筑,2012(2).
- [3] 李世珩,陈彦北,胡宇新,等.E型钢阻尼器及其在桥梁工程中的应用[J].铁道建筑,2012(1).
- [4] 郭磊,李建中,范立础.大跨度连续梁桥减隔震设计研究[J].土木工程学报,2006,39(3).
- [5] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [6] 刘军,律伟,张小锋,等. ϵ 型钢阻尼器滞回疲劳性能分析及试验[J].铁道建筑,2016(9).
- [7] JT/T 843-2012 公路桥梁弹塑性钢减震支座[S].

收稿日期:2018-06-16

作者简介:王会利,男,博士,副教授.E-mail:wanghuili@dlut.edu.cn

该文在收集大量连续刚构桥资料的基础上,梳理了中国连续刚构桥的建设和分布情况,并从跨径、墩顶梁高、跨中梁高、主墩等方面对这种桥型的设计参数进行分析和总结,以期为连续刚构桥的设计和研究提供一定的参考。

2 建设和分布状况

该文统计的对象为 1988—2016 年中国建成的连

续刚构桥(不包括 T 形刚构和整体式连续刚构),共收集到桥梁 349 座,其中由于部分桥梁的数据不全,因此在后面的分析中以已知该参数的桥梁为分析对象。由于港澳台地区的资料相对缺乏,故统计的数据主要来自中国大陆 31 个省级行政区。由于篇幅所限,该文未一一列出所参考的文献资料,仅给出了部分桥例的简要概况如表 1 所示。

图 1 为中国连续刚构桥新建量以及保有量随时间的增长关系。2002 年以前中国连续刚构桥的建设比

表 1 部分连续刚构桥的概况

桥名	建造年代	所在省市	桥梁类型	设计速度/(km·h ⁻¹)	跨径分布/m	墩顶梁高/m	跨中梁高/m	梁底曲线幕次	主梁形式
重庆石板坡复线桥	2006	重庆市	公路桥	60	88+4×138+330+133.8	16	4.5	2	单箱单室
贵州北盘江特大桥	2013	贵州省	公路桥	80	82.5+220+290+220+82.5	14	5.2	1.75	单箱单室
虎门大桥辅航道桥	1997	广东省	公路桥	120	150+270+150	14.8	5	2	单箱单室
苏通长江大桥辅桥	2007	江苏省	公路桥	100	140+268+140	15	4.5	1.6	单箱单室
云南红河大桥	2003	云南省	公路桥	60	58+182+265+194+70	14.5	5	1.5	单箱单室
宁德下白石大桥	2003	福建省	公路桥	80	145+2×260+145	14	4.2	1.6	单箱单室
四川汉源大树大渡河大桥	2009	四川省	公路桥	30	133+255+133	16	4	1.5	单箱单室
泸州长江二桥	2000	四川省	公路桥	60	145+252+54.75	14	4	1.75	单箱单室
马鞍石嘉陵江大桥	2001	重庆市	公路桥	60	146+3×250+146	13.7	4.2	2	单箱单室
柏溪金沙江大桥	2005	四川省	公路桥	80	140+249+140	15	4.2	1.5	单箱单室
黄石长江公路大桥	1995	湖北省	公路桥	100	162.5+3×245+162.5	13	4.1	2	单箱单室
贵州六广河大桥	2001	贵州省	公路桥	60	145.1+240+145.1	13.4	4.1	1.5	单箱单室
牛角坪特大桥	2009	陕西省	铁路桥	140	100+192+100	13.5	7.2	2	单箱单室
南江特大桥	2014	贵州省	铁路桥	160	92+176+92	12.8	6.6	2	单箱单室
渝怀铁路黄草乌江大桥	2006	重庆市	铁路桥	160	96+168+96	11	5.5	2	单箱单室
宁波大榭岛跨海大桥	2000	浙江省	公铁两用桥	—	123.6+170+123.6	10.75	4.75	圆	单箱双室
岔河特大桥	2014	贵州省	铁路桥	350	88+168+88	12	6	2	单箱单室
靖边县跨河口庙水库特大桥	2009	陕西省	铁路桥	200	96+168+96	11.6	6	2	单箱单室
温福铁路田螺河大桥	2009	福建省	铁路桥	200	88+160+88	9.8	5	1.8	单箱单室
宁德白马河大桥	2009	福建省	铁路桥	160	80+3×145+80	8.8	4.5	1.8	单箱单室
渝利铁路蔡家沟双线特大桥	2011	重庆市	铁路桥	200	80+3×144+80	11	6	圆	单箱单室
泸州长江铁路大桥	2004	四川省	铁路桥	160	84.5+3×144+84.5	10	5	圆	单箱单室
纵目沟特大桥	2014	陕西省	铁路桥	120	78+2×136+78	10	5	1.8	单箱单室
清河沟特大桥	2008	山西省	铁路桥	160	78+3×34+78	9.3	4.8	1.8	单箱单室
叙大铁路三槽湾大桥	2014	四川省	铁路桥	80	68+128+68	8.8	4.4	2	单箱单室
渝怀铁路涪陵乌江大桥	2003	重庆市	铁路桥	120	66+128+66	8.8	4.4	圆	单箱单室
宜万铁路渡口河特大桥	2010	湖北省	铁路桥	160	72+128+72	9.2	4.2	圆	单箱单室

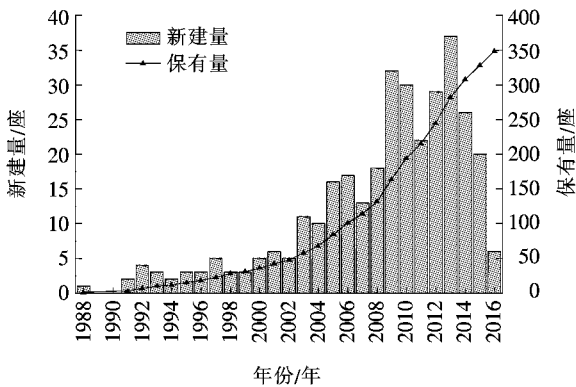


图1 连续刚构桥梁新建量和保有量

较平稳,以每年5座左右的新建量增加,而从2003年开始,新建量激增,尤其是2010年以来平均年增长率在25座左右,这与2000年以来国家大力发展交通运输业以及2008年金融危机以来较大规模的交通基础设施建设趋势有关,如此快的增长速度也说明了连续刚构这种桥型具有很大的优势和适用性。在中国大陆31个省级行政区中,连续刚构桥在其中的26个行政区(占比84%)中分布,主要集中在贵州(90座)、重庆(67座)、陕西(33座)、四川(31座)、湖北(29座)、湖南(16座)6省区,共分布267座,占总数的73.4%,这些地区处于青藏高原和帕米尔高原向长江中下游地区平原的过渡地带,系云贵高原和黄土高原的所在地,多高山峡谷,适合连续刚构桥的跨越。

3 数量及跨径

由统计分析知:在349座连续刚构桥中,公路桥梁占比81.09%(283座),铁路桥梁占比14.04%(49座),市政桥梁占比4.01%(14座),公铁两用桥占比0.86%(3座)。不同跨径范围内公路桥和铁路桥数量统计如图2所示。由于连续刚构桥中的市政桥和公铁两用桥数量较少,不具有统计意义,在此不予说明,以下篇幅也不在分析之列。

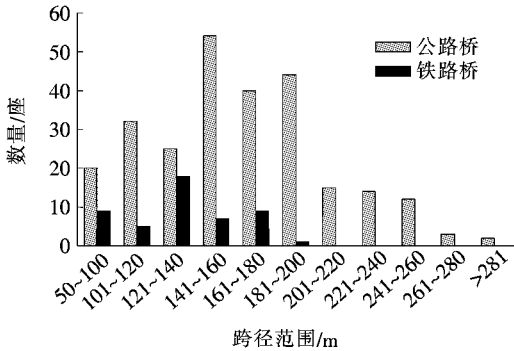


图2 不同跨径范围内公路桥和铁路桥数量统计

4 设计指标

4.1 设计速度

公路桥和铁路桥设计速度统计如图3、4所示。

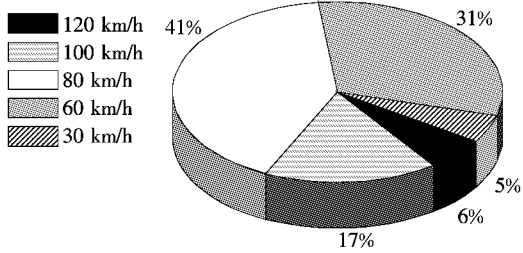


图3 公路桥的设计速度统计

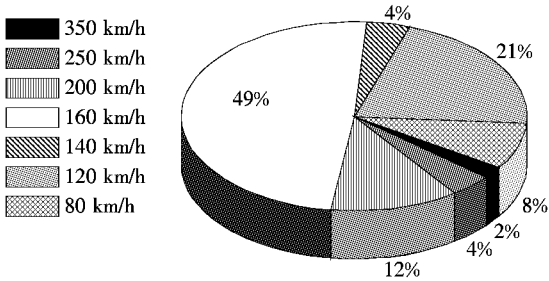


图4 铁路桥的设计速度统计

4.2 混凝土指标

公路桥和铁路桥混凝土指标统计结果如表2所示。

表2 混凝土指标统计结果

桥梁类型	结构分类	混凝土标号	桥数/座	百分比/%
铁路桥	上部结构	C50	20	41
		C55	21	43
		C60	8	16
	下部结构	C30	6	12
		C35	16	33
		C40	25	51
		C55	2	2
		C45	6	3
公路桥	上部结构	C50	78	38
		C55	66	32
		C60	48	23
		C65	9	4
		C30	9	4
	下部结构	C40	87	42
		C45	5	3
		C50	83	40
		C55	23	11

5 主梁结构参数

在 349 座桥梁中,有 345 座的主梁为混凝土箱梁,占比 98.85%。283 座公路桥梁中,主梁为单箱双室的 2 座,占比 0.71%;单箱单室的 281 座,占比 99.29%。3 座公铁两用桥主梁全部为单箱双室。14 座市政桥和 49 座铁路桥梁主梁全部为单箱单室。鉴于此,该文主梁结构参数分析中,主要研究 281 座单箱单室公路桥和 49 座单箱单室铁路桥。

5.1 梁底曲线参数

连续刚构桥梁底曲线形式的选择可以减轻结构的自重,优化结构受力性能,同时也是桥梁美的一种体现。在此次统计中,有关梁底曲线的数据共 137 个,其中铁路桥 32 个,公路桥 105 个,从图 5 中可以看出:连续刚构铁路桥和公路桥都采用了抛物线和圆曲线的形式,其特点也不尽相同。

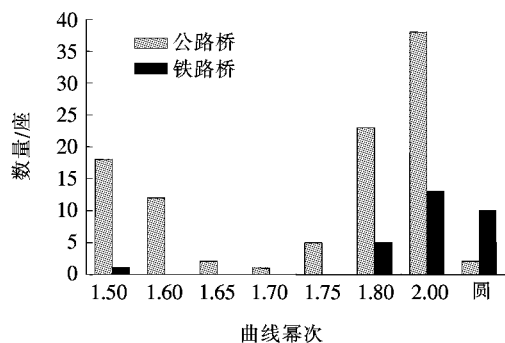


图 5 公路桥和铁路桥梁底曲线统计

抛物线的一般方程为:

$$y = ax^n \quad (1)$$

由图 6 统计结果可知:铁路桥梁最常采用 1.8 次和 2 次抛物线以及圆曲线。由图 7 可知:公路桥梁较多采用 1.5、1.8 和 2 次抛物线。公路桥和铁路桥梁底曲线的不同主要是因为承受的荷载不同。

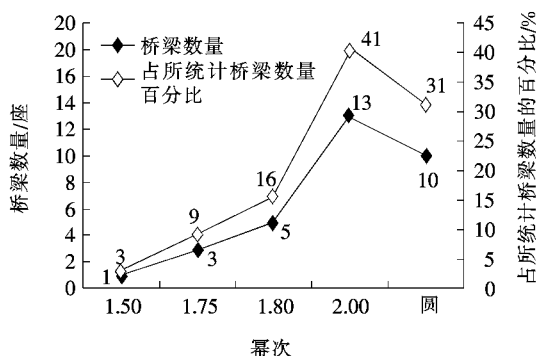


图 6 铁路桥梁底曲线

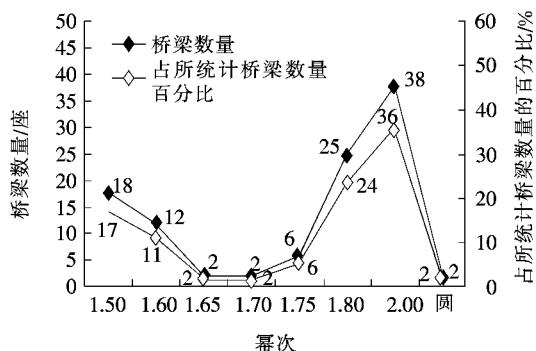


图 7 连续刚构公路桥梁底曲线形式

5.2 墩顶主梁高跨比

在此次统计分析中,关于主梁高跨比的有效数据共 158 个,其中公路桥梁 123 座,铁路桥梁 35 座。由图 8 可以看出:铁路桥梁连续刚构墩顶梁高和跨径的关系呈线性关系,拟合方程如下:

$$y = 0.0511x + 2.5364 \quad (2)$$

相关系数达到了 0.8183,具有较高的可信度。

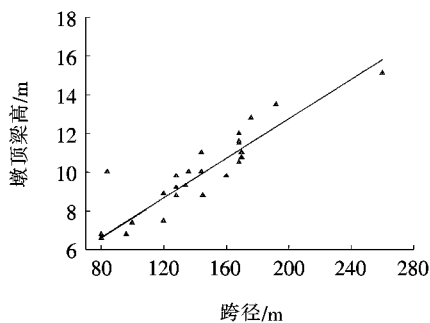


图 8 铁路桥墩顶主梁高跨比

由图 9 可以看出:连续刚构公路桥梁墩顶梁高和跨径的关系呈现非线性关系,拟合曲线方程如下:

$$y = 9.807 \ln x - 40.241 \quad (3)$$

相关系数达到了 0.8838,具有较高的可信度。在进行连续刚构公路桥和铁路桥设计时,墩顶梁高可参考此统计关系。

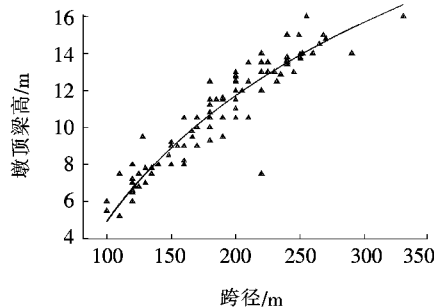


图 9 公路桥墩顶主梁跨高比

5.3 跨中主梁高跨比

对于公路桥梁跨中梁高和主跨的关系,由统计数据生成的散点(图 10)拟合曲线后方程如下:

$$y = 0.1371x^{0.624} \quad (4)$$

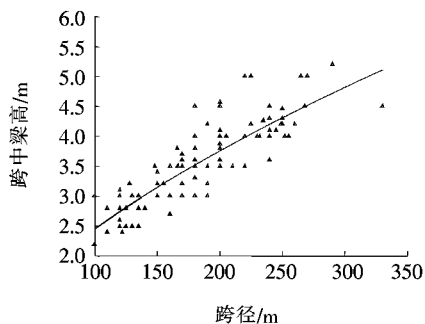


图 10 公路桥跨中主梁跨高比

相关系数为 0.733 4。并且由图 10 可知:公路桥跨中梁高最小取 2 m 以上,并随着主跨跨径的增大跨中梁高也相应增大,但是增幅有放缓的趋势,特别是跨径达到 300 m 左右,主梁跨中多采用钢箱梁、混凝土波形钢腹板组合梁,或者采用新材料比如高强轻质混凝土,以减小主梁自重增大跨度,相应的跨中梁高增幅不明显。

铁路桥跨中梁高与主跨跨径拟合成的曲线方程如下:

$$y = 0.016x + 2.5623 \quad (5)$$

相关系数为 0.305 1,相关性较差。由图 11 可知:铁路桥跨中梁高最小为 2.5 m 以上。

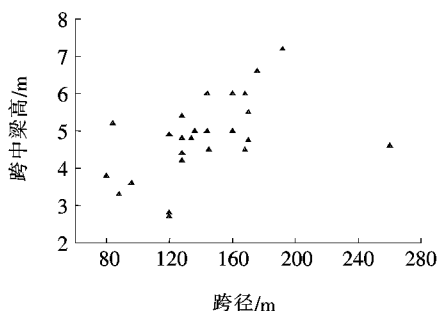


图 11 铁路桥跨中主梁跨高比

连续刚构公路桥和铁路桥数据比较后知,在相同跨径下,连续刚构铁路桥梁跨中主梁高度要大于公路桥主梁跨中高度。

5.4 底板厚度

连续刚构公路桥墩顶底板厚度和墩顶梁高的关系如图 12 所示,呈幂函数的关系。

$$y = 0.2271x^{0.6918} \quad (6)$$

相关系数 0.626,在进行结构设计时可作为参考。

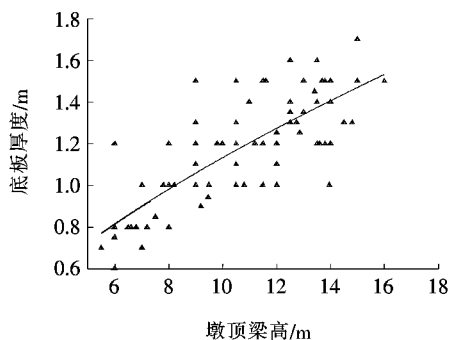


图 12 公路桥墩顶梁高和底板厚度的关系

连续刚构公路桥跨中梁高和跨中底板厚度的关系如图 13 所示,拟合曲线后,相关性较差,但是图 13 显示跨中底板厚度集中在 25~35 cm 之间。

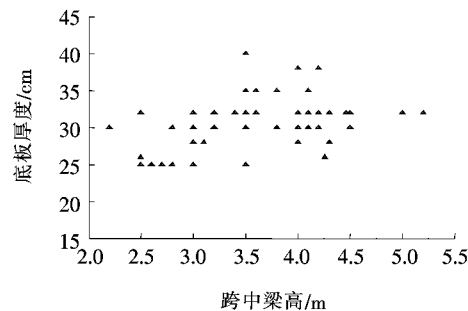


图 13 公路桥跨中梁高和底板厚度的关系

连续刚构铁路桥梁梁高和厚度未发现明显关系,但从统计数据,墩顶底板厚度为 80~120 cm,跨中底板厚度为 35~55 cm,并且在相同跨径下,铁路桥梁的底板厚度大于公路桥梁底板厚度。

5.5 顶板厚度

连续刚构公路桥梁跨中顶板和跨中梁高拟合曲线关系不明显,由图 14 可知跨中顶板的厚度为 25~30 cm。

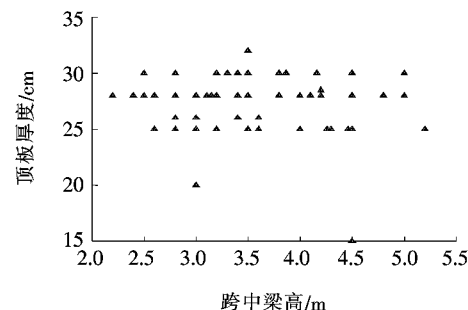


图 14 公路桥跨中梁高和跨中顶板厚度的关系

连续刚构公路桥梁墩顶主梁顶板厚度与墩顶梁高拟合曲线关系不明显,由图 15 可知:墩顶主梁顶板多集中在 25、45、50 cm 这 3 个厚度上。

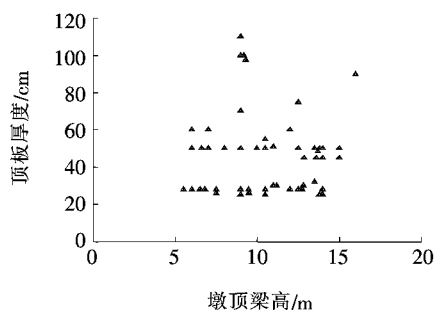


图 15 公路桥墩顶梁高和顶板厚度的关系

统计分析连续刚构铁路桥梁梁高和顶板未有明显关系,主梁顶板厚度为 50 cm 左右。

6 桥墩

在此项统计中有公路桥 105 座,铁路桥 41 座。不同桥墩类型数量及占比见表 3。由表 3 可知:铁路桥和公路桥都较多地采用了双肢薄壁墩,双肢间净距:铁路桥一般取 6~8 m,壁厚 1.2~1.5 m;公路桥一般取 4~9 m,壁厚 0.5~0.8 m。

表 3 不同桥墩类型数量及占比

桥墩类型	公路桥梁		铁路桥梁	
	数量/座	占比/%	数量/座	占比/%
双肢薄壁空心墩	54	51.5	19	46.4
单肢实心墩	10	9.5	6	14.6
单肢空心墩	6	5.7	2	4.9
双肢实心墩	35	33.3	14	34.1

7 结论

(1) 连续刚构桥在中国主要分布在贵州(90 座)、重庆(67 座)、陕西(33 座)、四川(31 座)、湖北(29 座)、湖南(16 座)6 省区,共 267 座,占总数的 73.4%。从 2003 年开始,中国连续刚构桥增长迅速,尤其是 2010 年以来平均每年以 25 座的速度增长。

(2) 在统计的 349 座桥梁中,主要是公路桥(283 座)和铁路桥(49 座),公路桥的跨径多集中在 100~200 m,铁路桥的跨径多集中在 100~150 m。

(3) 连续刚构公路桥上部结构多采用 C50 和 C55

混凝土,下部结构多采用 C40 和 C50 混凝土;铁路桥上部结构多采用 C50 和 C55 混凝土,下部结构多采用 C35 和 C40 混凝土。

(4) 公路桥主梁多采用单箱单室,占比 99.29%,梁底曲线多采用 1.5 次、1.8 次和 2 次抛物线;铁路桥主梁全部采用单箱单室截面,梁底曲线常采用 1.8 次和 2 次抛物线以及圆曲线。

(5) 铁路桥墩顶梁高与跨径呈线性关系,关系式为 $y=0.0511x+2.5364$,跨中梁高为 2.5 m 以上,墩顶主梁底板厚度为 80~120 cm,跨中主梁底板厚度为 35~55 cm,顶板厚度为 50 cm 左右。

(6) 连续刚构公路桥墩顶梁高和跨径的关系呈现非线性关系,拟合曲线方程为 $y=9.807\ln x-40.241$;公路桥梁跨中梁高和主跨关系式为 $y=0.1371x^{0.624}$ 。跨中主梁底板厚度多集中在 25~35 cm 之间;跨中主梁顶板厚度为 25~30 cm 之间;墩顶主梁顶板多集中在 25、45、50 cm 这 3 个厚度上。

(7) 连续刚构铁路桥和公路桥都较多地采用了双肢薄壁墩,双肢间净距:铁路桥一般取 6~8 m,壁厚 1.2~1.5 m;公路桥一般取 4~9 m,壁厚 0.5~0.8 m。

参考文献:

- [1] 杨高中,杨征宇,周军生,等.连续刚构桥在我国的应用和发展[J].桥梁,1998(6).
- [2] 吴亮秦,李黎.大跨连续刚构桥高墩有效计算长度研究[J].公路,2015(10).
- [3] 杨高中,孙国柱,李扬海.洛溪大桥主桥设计[J].公路,1987(4).
- [4] 邓文中,代彤.重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J].桥梁建设,2006(6).
- [5] 徐略勤,彭元诚,周水兴.空腹式连续刚构桥跨径与根部梁高的经济取值研究[J].世界桥梁,2017(3).
- [6] 刘刚亮.虎门大桥辅航道桥悬臂施工中的温度影响[J].公路,1998(5).
- [7] 文武松.苏通大桥辅桥连续刚构施工控制[J].桥梁建设,2008(4).
- [8] 杨光强,何飞.赫章特大桥 195 m 超高墩构造设计[J].中外公路,2014(2).
- [9] 王毅,程波,谢波,等.钢管混凝土叠合柱屈曲分析及施工技术研究[J].世界桥梁,2014(4).
- [10] 李小国,沈典栋,王解军,等.大跨连续刚构桥箱梁横向温度效应分析[J].公路工程,2011(2).