

引用本文:陈宝春,王晨辉,薛俊青,等.中国无伸缩缝桥梁调查与分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):13-21.

CHEN Bao-chun, WANG Chen-hui, XUE Jun-qing, et al. Investigation and Analysis of Jointless Bridges in China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 13-21.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05064

中国无伸缩缝桥梁调查与分析

陈宝春,王晨辉,薛俊青,黄福云

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:无伸缩缝桥梁(无缝桥)取消了伸缩装置(伸缩缝),从根本上免除了伸缩装置带来的病害与维修更换问题,具有良好经济和社会效应。针对中国无缝桥的建设趋势、应用类型、区域分布、桥长、上部与下部结构、引板等情况开展调查与分析。结果表明:截至 2022 年 5 月,中国已建成无缝桥 70 座;无缝桥在经济发达国家应用广泛,但在中国还处于起步阶段;中国无缝桥修建数量不断增加,2010 年开始增速加快,整体桥的应用比例上升;无缝桥应用省份不断扩大,新增在严寒地区的应用;无缝桥以中小跨径桥梁为主,总长不长,在多跨桥中应用较多;上部结构以混凝土空心板为主;下部结构中,柱式埋置式桥台在各种无缝桥中均有较多的应用,且整体桥较多采用薄壁轻型桥台,半整体桥和延伸桥面板桥较多采用重力式桥台,桥墩以混凝土桩柱式为主,引板主要采用面板式引板;今后应增加无缝桥的应用数量和地区,加大整体桥的推广力度和无缝化改造的研究与应用,扩大无缝桥的跨径、桥长、曲率半径、斜交角的应用范围,推动中国无缝桥技术的进步。

关键词:桥梁工程;无缝桥;统计分析;现状;发展方向

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0013-09

Investigation and Analysis of Jointless Bridges in China

CHEN Bao-chun, WANG Chen-hui, XUE Jun-qing, HUANG Fu-yun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The jointless bridge cancels the expansion device (expansion joint), fundamentally eliminates the diseases and maintenance replacement problems caused by the expansion device, and has good economic and social effects. Investigation and analysis were carried out on the construction trend, application type, regional distribution, bridge length, upper and lower structures, and approach slab of jointless bridges in China. The results show that China has built 70 jointless bridges by the end of March 2022. Jointless bridge is widely used in developed countries, but it is still in the start stage in China. The number of jointless bridge in China is increasing, the growth rate has accelerated since 2010, and the application proportion of the integral abutment bridge has increased. Jointless bridges have been built in more provinces, and new applications can be found in severe cold area. Existing jointless bridges are mainly small and medium span bridges with a short total length, and most of the jointless bridges are multi-span

收稿日期:2022-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51508103,51578161);陕西省交通科技项目(14-20K)

作者简介:陈宝春(1958-),男,福建罗源人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn.

通信作者:薛俊青(1985-),男,福平潭人,副研究员,工学博士,E-mail:junqing.xue@fzu.edu.cn.

bridges. The superstructure is mainly concrete hollow slab. For the substructure, spill-through abutment with column stub is widely used in various jointless bridges. The thin-walled light type abutment is mainly used in integral abutment bridges. The gravity abutment is mainly used in semi-integral abutment bridges and deck-extension jointless bridges. The concrete pile-extension pier is mainly chosen as the piers. Grade flat approach slab is the most used type of approach slab. In the future, it is suggested to increase the number and application regions of jointless bridges, strengthen the promotion of integral abutment bridges and the research and application of jointless retrofitting, expand the application scope of the span, total length, curvature radius and skew angle of jointless bridges, and promote the development of jointless bridge technology in China.

Key words: bridge engineering; jointless bridge; statistical analysis; state of art; development direction

0 引言

无缝桥取消了伸缩装置(伸缩缝),从根本上免除了伸缩装置带来的病害与维修更换问题,具有改善行车条件,提高桥梁使用寿命,减少养护维修费用等优点。无缝桥的关键在于取消桥台处的伸缩缝。根据所采用的桥台类型不同,常见的无缝梁桥可分为整体桥、半整体桥和延伸桥面板桥 3 种形式^[1]。无缝结构还可被应用于其他桥梁结构形式的桥梁中,如无缝拱桥。本文调查范围为前述 3 种主要类型无缝梁桥。

无缝桥在经济发达国家(如美国、加拿大、英国、日本等)应用广泛,其中在美国应用最多^[1-2]。为促进其应用与发展,美国联邦公路署分别于 1985 年、1995 年、2004 年和 2009 年对无缝桥进行全国性调查,其中 2004 年调查数据显示,全美约有 9 000 座整体桥、4 000 座半整体桥、3 900 座延伸桥面板桥^[1],可见 3 种无缝桥在美国应用均较为成熟。

中国自 20 世纪末开始进行现代无缝桥的研究与应用并取得了重要进展,但无缝桥数量偏少,尚未大面积推广应用^[3]。文献[3]首次对截至 2016 年中国无缝桥建设情况进行了调查,但是调查中缺少对无缝桥上下部结构及引板等具体类型的统计分析,再加上近几年中国无缝桥发展速度有所加快,已有调查滞后于中国无缝桥的发展现状,不能全面反映各结构参数的应用特点。为此本文收集了中国无缝桥的最新建设情况,并对其进行统计分析。

1 应用概况

1.1 建设趋势

截至 2022 年 5 月,中国已建无缝桥 70 座(表 1),

比文献[3]所收集截至 2016 年 4 月的 40 座增加了 30 座,其中 2016 年至今新建无缝桥 21 座,文献[3]未统计的有 9 座。中国无缝桥随时间增长的修建总数曲线如图 1 所示。分析可知,中国无缝桥的数量总体上呈增长趋势;2010 年开始增速加快,每年新建无缝桥平均数量为 4~5 座。

分析无缝桥建成时间(图 2)发现,2010 年以前,中国无缝桥的建成时间呈非连续状,这些无缝桥多为科研项目的依托工程,从而形成明显的时间段;2010 年至今,中国无缝桥修建数量连续增加。近几年,相关技术指南与标准的颁布^[4-6]为中国无缝桥的快速发展提供了条件。

从总量上看,中国目前已建无缝桥仅 70 座。交通运输部 2020 年的统计资料显示,中国共有公路桥梁 91.28 万座,其中中小桥梁 78.64 万座^[7],无缝桥仅占中小桥梁的 0.009% 和全部桥梁的 0.008%。美国联邦公路署 2004 年的调查显示,美国共建成无缝桥 16 900 余座,占全部桥梁的 2.9%^[8]。美国 2004 年无缝桥的总数与相对数分别为中国的 241 倍和 363 倍。相比较而言,中国无缝桥的研究与应用起步较晚,且无论是总数还是相对数均太少。

1.2 无缝桥类型

无缝桥的类型主要有整体桥、半整体桥和延伸桥面板桥。其中,整体桥的整体性和可持续性最好,在美国、欧洲、澳洲等无缝桥中应用最多。美国的 16 900 余座无缝桥中,约 9 000 座为整体桥,占比 53%^[7]。美国 2009 年对整体桥的调查发现,有 41 个州应用整体桥,其中有 8 个州的整体桥数量超过 1 000 座^[9]。

中国和美国无缝桥类型比例如图 3 所示。分析可知,中国的两次调查结果中,应用最少的都是整体

表 1 中国已建和在建无缝桥统计

Table 1 Statistics of Jointless Bridges Built and Building in China

序号	桥名	建成年份	地区	类型	总跨径/m	跨数	上部结构	下部结构	引板
1	益常高速跨线天桥	1998	湖南益阳	半整体桥	56.00	3	连续梁	薄壁轻型桥台	
2	堡镇港桥	1999	上海	延伸桥面板桥	68.00	5	空心板,桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	面板式
3	四九桥	2000	广东清远	整体桥	50.00	4	钢筋混凝土实心板、连续刚构	薄壁轻型桥台、桩基础	斜理入式
4	李贯河桥	2000	河南周口	延伸桥面板桥	48.00	3	预应力混凝土空心板、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	斜理入式
5	石龙河桥	2000	河南平顶山	延伸桥面板桥	64.00	4	预应力混凝土空心板、桥面连续	重力式 U 形桥台、桩基础	斜理入式
6	上坂桥	2004	福建泉州	整体桥	120.00	4	预应力混凝土连续 T 梁	重力式 U 形桥台、桩基础	面板式
7	那角桥	2005	广西南宁	延伸桥面板桥	80.00	4	预应力混凝土连续梁	一侧重力式、一侧轻型桥台	斜理入式
8	大水町桥	2005	湖南衡阳	延伸桥面板桥	64.00	4	预应力混凝土空心板、桥面连续	薄壁轻型桥台、桩基础	面板式
9	大浦互通 D 匝道桥	2005	湖南衡阳	延伸桥面板桥	75.00	3	预应力混凝土空心板、桥面连续	肋式桥台、扩大基础	面板式
10	龙塘桥	2006	广东清远	延伸桥面板桥	109.25	10	钢筋混凝土 1 型梁、桥面连续	重力式 U 形桥台	斜理入式
11	石羊江桥	2006	云南新平	半整体桥	122.00	6	钢筋混凝土 T 梁、桥面连续	重力式 U 形桥台、桩基础	面板式
12	北河泾桥	2008	江苏苏州	半整体桥	48.00	3	预应力混凝土空心板、桥面连续	组合式桥台、桩基础	斜理入式
13	富裕工业园桥	2009	黑龙江齐齐哈尔	整体桥	64.00	4	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
14	上海龚家滨桥	2009	上海	整体桥	40.00	3	连续刚构	薄壁轻型桥台、桩基础	
15	预备河桥	2009	山东滨州	整体桥	60.00	3	预应力混凝土空心板	桩基础	
16	新郭勤中桥	2010	内蒙古自治区	半整体式	80.00	4	预应力混凝土连续箱梁	肋式桥台、桩基础	面板式
17	河口中桥	2010	广西田林	延伸桥面板桥	80.00	4	预应力混凝土连续箱梁	重力式 U 形桥台、扩大基础	面板式
18	扣门小桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	16.00	1	预应力混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
19	旭颐小桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	10.00	1	钢筋混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
20	新圩小桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	16.00	1	预应力混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
21	墟罗小桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	10.00	1	钢筋混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
22	念克中桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	20.00	1	预应力混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
23	那迈小桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	10.00	1	钢筋混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
24	板塘中桥	2010	广西南明	延伸桥面板桥	32.00	2	预应力混凝土空心板	重力式 U 形桥台	面板式
25	李河村桥	2010	云南昆明	延伸桥面板桥	80.00	4	预应力混凝土空心板连续梁	肋式桥台、桩基础	面板式
26	兴隆一号桥	2010	云南昆明	延伸桥面板桥	60.00	3	预应力混凝土空心板、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	面板式
27	小海口桥	2010	云南昆明	半整体桥	160.00	8	预应力混凝土空心、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	面板式
28	钱泾河桥	2010	江苏苏州	半整体桥	39.00	3	钢筋混凝土空心板、桥面连续	组合式桥台	斜理入式
29	苏虞张快速化 1 号辅道桥	2010	江苏苏州	半整体桥	39.00	3	钢筋混凝土空心板、桥面连续	组合式桥台	斜理入式
30	苏虞张快速化 2 号辅道桥	2010	江苏苏州	半整体桥	39.00	3	钢筋混凝土空心板、桥面连续	组合式桥台	斜理入式
31	金家岭河 2 号桥	2011	浙江绍兴	整体桥	60.00	3	预应力空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
32	大江沿村 2 号桥	2011	浙江绍兴	整体桥	39.00	3	预应力空心板	桩基础	面板式
33	排洪沟中桥	2012	宁夏银川	延伸桥面板桥	80.00	4	预应力混凝土连续箱梁	肋式桥台、桩基础	面板式
34	贯边桥	2012	浙江湖州	半整体桥	112.00	7	预应力混凝土空心板、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	面板式
35	知识大道立交桥	2012	广东广州	整体桥	50.00	2	钢筋混凝土箱梁桥	薄壁轻型桥台、桩基础	面板式

统表 1

序号	桥名	建成年份	地区	类型	总跨径/m	跨数	上部结构	下部结构	引板
36	宁宿徐高速公路小桥	2013	江苏	半整体桥	1.00	1	预应力混凝土空心板		面板式
37	英武路严家桥	2014	江苏泰州	半整体桥	20.00	1	预应力混凝土空心板	组合式桥台	斜埋入式
38	十里桥	2014	福建漳州	延伸桥面板桥	96.00	6	预应力混凝土空心板、简支改连续	重力式桥台、扩大基础	面板式
39	锦浦桥	2014	福建漳州	整体桥	48.00	3	预应力混凝土连续箱梁	桩柱式桥台、桩基础	面板式
40	南三路桥	2014	河北邯郸	延伸桥面板桥	90.00	3	预应力混凝土连续箱梁	桩柱式桥台、桩基础	面板式
41	马义线桥	2014	河北邯郸	延伸桥面板桥	60.00	3	预应力混凝土连续箱梁	桩柱式桥台、桩基础	面板式
42	枷楠一号桥	2014	福建泉州	半整体桥	80.00	4	预应力混凝土空心板连续梁	桩柱式桥台、桩基础	面板式
43	沙洲西路桥	2014	江苏张家港	半整体桥	20.00	1	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	Z形
44	息塘桥	2014	浙江湖州	延伸桥面板桥	29.30	3	耐候工字钢-混凝土板叠合梁、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	面板式
45	张庄路桥	2015	江苏泰州	半整体桥	20.00	1	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	
46	草荡新桥	2015	浙江湖州	延伸桥面板桥	36.00	7	耐候工字钢-混凝土板叠合梁、桥面连续	桩柱式桥台、桩基础	
47	英武南路中桥	2016	江苏泰州	半整体桥	42.00	3	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	斜埋入式
48	柳东桥	2016	福建宁德	延伸桥面板桥	47.40	2	预应力混凝土连续箱梁	重力式 U形桥台、桩基础	
49	吉山二桥	2017	福建福州	延伸桥面板桥	25.00	1	钢筋混凝土空心板	薄壁轻型桥台、桩基础	面板式
50	田后桥	2017	福建罗源	延伸桥面板	16.00	1	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
51	潘墩路小桥	2017	福建福州	延伸桥面板桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	薄壁轻型桥台、桩基础	
52	马峦立交桥	2018	广东深圳	整体桥	90.00	3	预应力混凝土连续箱梁	薄壁轻型桥台、桩基础	Z形
53	马新庄小桥	2018	陕西榆林	整体桥	6.00	1	钢筋混凝土实心板	薄壁轻型桥台、扩大基础	面板式
54	南堡子沟小桥	2018	陕西宝鸡	半整体桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	重力式桥台、扩大基础	面板式
55	范家沟小桥	2018	陕西汉中	半整体桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	重力式桥台、扩大基础	面板式
56	两亭河小桥	2018	陕西宝鸡	延伸桥面板桥	52.00	4	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
57	羊引关小桥	2018	陕西宝鸡	延伸桥面板桥	26.00	2	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
58	五王殿小桥	2018	陕西宝鸡	延伸桥面板桥	26.00	2	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台、桩基础	面板式
59	宁波东部新城某桥	2018	浙江宁波	整体桥	33.00	3	预应力混凝土空心板	薄壁轻型桥台、桩基础	面板式
60	红军新桥	2019	浙江湖州	整体桥	45.00	3	耐候工字钢-混凝土组合连续梁	桩基础	
61	东瑶里桥	2019	浙江湖州	整体桥	21.00	1	耐候工字钢-混凝土组合梁	桩基础	
62	北刘屋桥	2019	浙江湖州	整体桥	36.00	3	耐候工字钢-混凝土组合连续梁	桩柱式桥台、桩基础	面板式
63	金昌河桥	2020	上海	整体桥	53.00	2	连续钢箱桥梁	薄壁轻型桥台、桩基础	斜埋入式
64	碾子沟小桥	2020	陕西咸阳	半整体桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	重力式桥台、扩大基础	面板式
65	西坡小桥	2020	陕西咸阳	半整体桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	重力式桥台、扩大基础	面板式
66	老沟渠小桥	2020	陕西宝鸡	半整体桥	13.00	1	预应力混凝土空心板	重力式桥台、扩大基础	面板式
67	环岛路人行绿道 1 # 桥	2020	福建平潭	整体桥	112.00	3	箱梁桥	薄壁轻型桥台、桩基础	
68	环岛路人行绿道 2 # 桥	2020	福建平潭	整体桥	20.00	1	箱梁桥	薄壁轻型桥台、桩基础	
69	环岛路人行绿道 3 # 桥	2020	福建平潭	整体桥	20.00	1	箱梁桥	薄壁轻型桥台、桩基础	
70	桑茶快速路东延线子工程	2021	广东东莞	整体桥	160.00	6	预应力混凝土连续箱梁	薄壁轻型桥台、桩基础	Z形
71	兴姜河路 1 号桥	设计完成	江苏泰州	半整体桥	48.00	3	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	
72	兴姜河路 2 号桥	设计完成	江苏泰州	半整体桥	60.00	3	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	
73	兴姜河路 3 号桥	设计完成	江苏泰州	半整体桥	16.00	1	预应力混凝土空心板	桩柱式桥台	

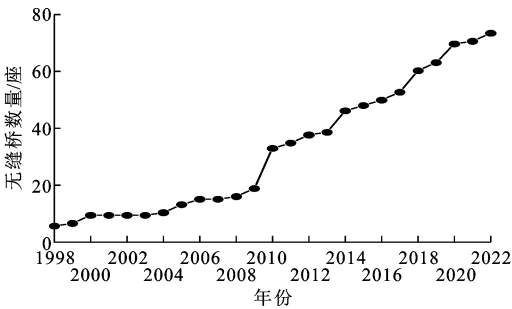


图 1 无缝桥数量增长趋势

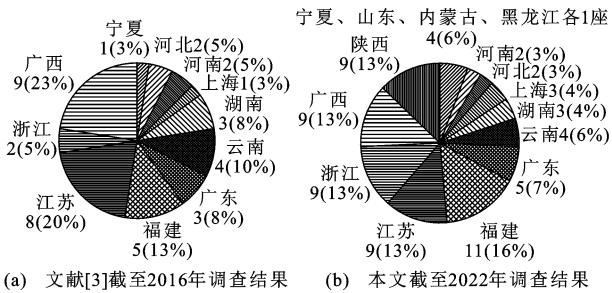


图 4 中国无缝桥应用省份统计

Fig. 4 Statistics of Provinces with Jointless Bridges in China

根据文献[10]中的全国气候分区,中国不同温度区域的无缝桥统计如图 5 所示。从图 5 可以看出,位于温热地区的无缝桥数量最多,为 54 座,占比 77%,其次是寒冷地区,为 14 座,占比 20%,严寒地区的无缝桥数量最少,仅 2 座,占比 3%。图 6 为不同类型无缝桥的温度区域分布。分析可知,3 种类型无缝桥均主要修建在温热地区,寒冷地区较少,严寒地区最少,与无缝桥总体分布情形相似。寒冷地区主要应用的桥型为延伸桥面板桥和半整体桥,较少修建整体桥,这主要是因为寒冷地区温差较大,对桥梁纵向变形能力要求较高,在中国无缝桥发展初期,采用纵向变形能力更强的延伸桥面板桥和半整体桥是恰当的。严寒地区仅有的 2 座无缝桥分别为整体桥和半整体桥。由于无缝桥可避免化冰盐对伸缩装置、支座和下部结构的腐蚀,在寒冷或严寒地区建设无缝桥可明显提高桥梁的耐久性。然而,这些地区温差大,桥梁纵桥向胀缩量,需要开展无缝桥的适应性专题研究,从而推动无缝桥在寒冷或严寒地区的应用。福州大学和长安大学的多位学者已开展适用于无缝桥的有效温度和竖向温度梯度研究,但仍需进一步开展相关研究。

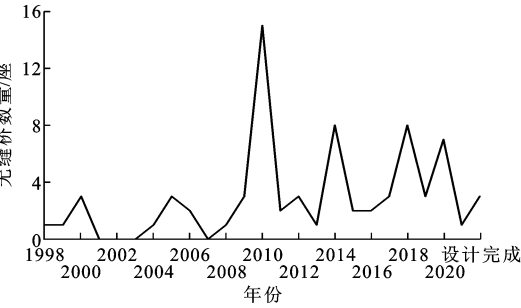


图 2 无缝桥建成时间

Fig. 2 Completion Years of Jointless Bridges

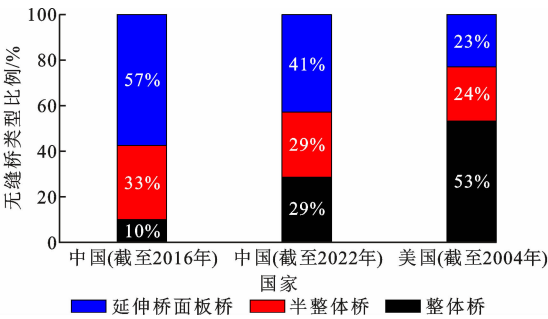


图 3 中国和美国无缝桥类型比例统计

Fig. 3 Statistics of Proportion of Different Types of Jointless Bridges in China and the United States

桥。本次调查的 70 座无缝桥中,整体桥为 20 座,占比 29%,较 2016 年调查的占比 10%^[3]有较大提升,但与美国 2004 年调查的整体桥占比 53%相比还是差距较大。

1.3 区域分布

中国无缝桥应用省份如图 4 所示。分析可知,截至 2022 年,中国 15 个省份、直辖市或自治区建有无缝桥,较 2016 年调查的 11 个省份^[3],新增了黑龙江、宁夏、山东、内蒙古 4 个省份或自治区,表明中国无缝桥的应用地域在扩大,总体上以中部和南部为主,在北方的应用较少。与美国 2009 年调查^[8]的 41 个州建有整体桥,占比 82%相比,中国无缝桥的应用地域明显偏少。

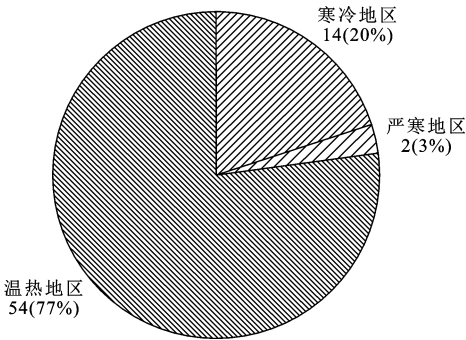


图 5 不同温度区域无缝桥数量统计

Fig. 5 Statistics of Number of Jointless Bridges in Different Temperature Regions

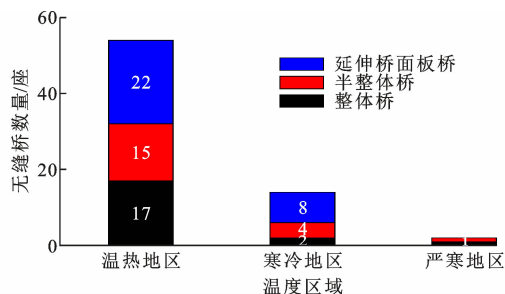


图6 不同温度区域的各类型无缝桥数量统计

Fig. 6 Statistics of Number of Jointless Bridges with Different Types in Different Temperature Regions

1.4 桥长与跨数

1.4.1 桥长

无缝桥的应用受桥长影响较大,受跨径影响较小。桥长为多跨跨径总长,简称总长。不同类型无缝桥的总长与数量关系如图7所示。总长小于100 m的中小桥有63座,占比90%,是中国无缝桥的主要应用对象;大于100 m以上的桥梁仅7座,占比10%。整体桥在总长20~50 m的范围内应用最多;半整体桥在总长20 m以内应用最多;延伸桥面板桥在总长50~100 m的范围内应用最多。

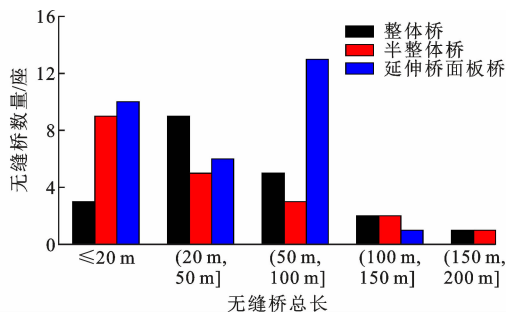


图7 无缝桥总长与数量的关系

Fig. 7 Relationship Between Total Length and Number of Jointless Bridges

1.4.2 跨数

无缝桥的跨数与数量关系如图8所示,其中,单跨无缝桥23座,占比33%,其余47座(占比67%)为多跨无缝桥。可见中国的无缝桥以多跨桥为主。在多跨桥中,3跨与4跨的无缝桥数量较多,分别为23座和12座,占比33%和17%;其次是2跨与6跨,分别为5座和3座,占比7%和4%;5跨、7跨、8跨、10跨均为1座,各占比1%。跨数最多的无缝桥是广东清远的龙塘桥,上部结构为 $2 \times 11.4 \text{ m} + 11.1 \text{ m} + 11.65 \text{ m} + 4 \times 9.15 \text{ m} + 2 \times 13.55 \text{ m}$ 的钢筋混凝土I型梁,相邻两跨主梁的梁肋间加设连接钢板,桥面连续^[11]。

分析无缝桥的跨数与总长关系(图9)发现,二

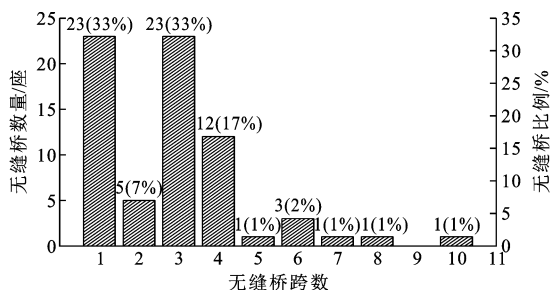


图8 无缝桥跨数与数量的关系

Fig. 8 Relationship Between Number of Span and Number of Jointless Bridges

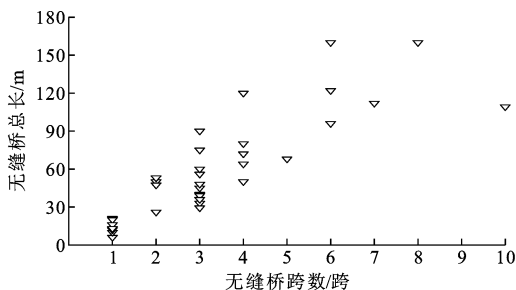


图9 无缝桥跨数与总长的关系

Fig. 9 Relationship Between Number of Span and Total Length of Jointless Bridges

者呈明显的正相关关系,说明中国总长较长的无缝桥主要为多跨桥,这与国外的情形相似。

2 结 构

2.1 上部结构

70座无缝桥中上部结构为空心板和实心板的分别有44座和2座,占比66%,其余为T梁、小箱梁和箱梁,这与中国无缝桥的应用以中小跨径桥梁为主密切相关。根据桥梁的平面线形分类,70座无缝桥中,直桥为45座,占比64%;弯桥为8座,斜桥为15座,弯斜桥为2座,共占比36%。其中,弯桥的圆曲线半径在109~7 000 m范围内,斜桥的交角在 $3.65^\circ \sim 45^\circ$ 范围内。弯、斜无缝桥的纵桥向变形受到约束时,会产生沿径向的变形或转动,需要特殊的结构考虑与处理^[12-13]。中国的无缝桥应用仍处于起步阶段,在弯、斜桥中的应用不多,且曲率半径较大,斜交角较小。今后应加大弯、斜无缝桥的研究和经验积累,从而将无缝桥应用到更多的弯、斜桥中。

在上部结构材料方面,已知材料的64座桥中,采用预应力混凝土主梁和钢筋混凝土主梁的无缝桥分别为46座和12座,占比91%,另有5座和1座分别采用钢-混凝土组合主梁和钢主梁,各占比8%和2%。无缝桥上部结构材料应用以混凝土为主,这与

中国公路中小桥梁以混凝土主梁为主的现状相适应。

2.2 桥台与基础

根据桥台与台后填土的关系,桥台主要有全挡土、埋置式和其他三大类^[14]。中国不同桥台类型的无缝桥数量统计如图 10 所示。在 65 座已知桥台类型的无缝桥中,采用全挡土桥台中的重力式桥台和薄壁轻型桥台的无缝桥分别为 19.5 座(占比 30%)和 14.5 座(占比 22%);采用埋置式桥台中的柱式桥台和肋式桥台的无缝桥分别为 21 座(占比 32%)和 5 座(占比 8%);采用其他类中的组合式桥台的无缝桥为 5 座(占比 8%)。显然,采用重力式桥台和柱式埋置式桥台的无缝桥数量最多。上述数量中,0.5 座是指某座桥中的一侧采用了该类型桥台。

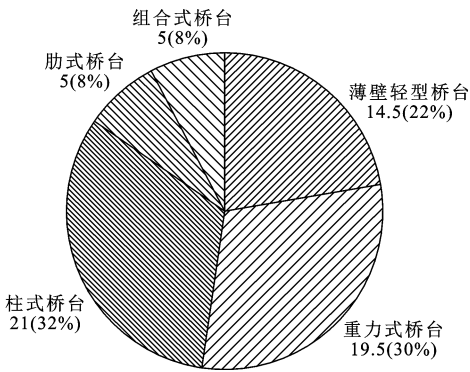


图 10 不同桥台类型的无缝桥数量统计

Fig. 10 Statistics of Number of Jointless Bridges with Different Abutment Types

3 种无缝桥中不同类型桥台数量统计如图 11 所示。在 16 座整体桥中,采用薄壁轻型桥台和柱式桥台的整体桥为 15 座,占比 94%,前者台身柔度较大,后者采用桩基础,基础柔度较大;只有 1 座跨径为 6 m 的单跨桥采用刚度较大的重力式桥台。重力式桥台和柱式桥台在半整体桥和延伸桥面板桥中应用较多,分别为 12 座(占比 63%)和 23.5 座(占比 78%)。薄壁轻型桥台由于变形能力较强,适用于整体桥;重力式桥台的变形能力较弱,适用于上下部结构不固接的半整体桥和延伸桥面板桥;柱式桥台的刚度与基础密切相关,适应于各种类型无缝桥;肋式桥台和组合式桥台在中国无缝桥中应用较少。

中国无缝桥的桥台基础以混凝土桩为主,在已知基础形式的 48 座桥中有 39 座,占比 81%;另有 9 座采用扩大基础,占比 19%。桩基础具有一定的柔度,适用于不同类型的无缝桥;扩大基础刚度较大,变形能力较弱,因此主要应用于半整体桥和延伸桥面板桥。

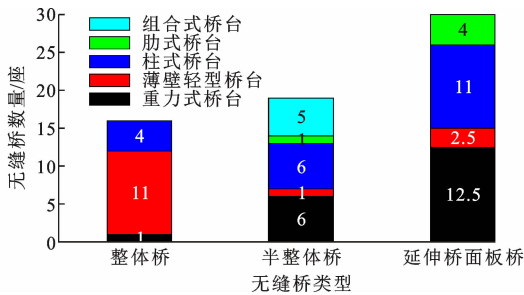


图 11 3 种无缝桥中不同类型桥台数量统计

Fig. 11 Statistics of Number of Different Abutment Types in Three Kinds of Jointless Bridges

针对无缝桥台-桩-土相互作用,福州大学、浙江工业大学和清华大学的多位学者已开展研究,但仍需进一步开展相关研究。

2.3 多跨无缝桥的桥墩与主梁结构

在 47 座多跨无缝桥中,已知桥墩结构形式的有 44 座,其中采用桩柱式桥墩的多跨无缝桥为 41 座,占比 93%,采用重力式墩和空心墩的多跨无缝桥分别为 2 座和 1 座,各占比 5%和 2%。

根据相邻主梁之间连接方式的不同,多跨无缝桥可分为结构连续桥和仅桥面连续桥。根据桥墩与主梁连接方式的不同,结构连续桥可分为连续梁桥、连续刚构桥和连续半刚构桥^[1]。分析不同连接方式的多跨无缝桥数量统计(图 12)可知,在 43 座已知相邻主梁之间及桥墩与主梁之间连接方式的多跨无缝桥中,仅桥面连续桥和连续梁桥各为 18 座,二者总占比 84%;连续半刚构桥和连续刚构桥分别为 3 座和 4 座,各占比 7%和 9%。

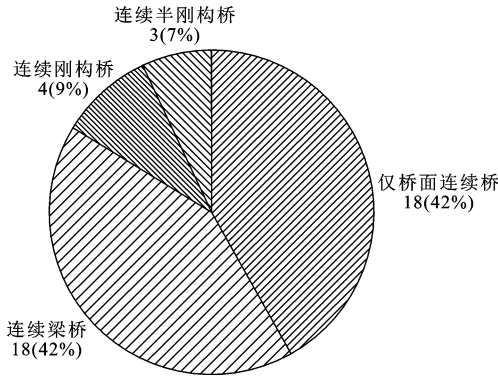


图 12 不同连接方式的多跨无缝桥数量统计

Fig. 12 Statistics of Multi-span Jointless Bridge Numbers with Different Connection Types

分析不同桥跨连接形式的多跨无缝桥的数量(图 13)可知,仅桥面连续桥只应用于延伸桥面板桥(11 座)和半整体桥(7 座)。从机理角度出发,仅桥面连续桥不适用于整体桥。因为整体桥的桥台与上

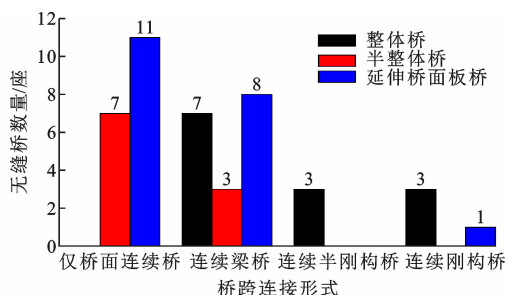


图 13 不同桥跨连接形式的多跨无缝桥数量统计

Fig. 13 Statistics of Number of Multi-span Jointless

Bridge with Different Connection Types

部结构连成整体,桥台对主梁的纵桥向胀缩变形约束很大,变形将集中于桥面板连续部分,使其成为易损部位。仅桥面连续桥的桥面连续构造处受力复杂,易出现开裂等病害。为此,已开展在该处采用抗拉性能较强的混凝土如纤维增强混凝土^[15]、高延性纤维混凝土(ECC)^[16]和超高性能混凝土(UHPC)的应用研究。其中 UHPC 的应用方面取得突破,已应用于美国的多座无缝桥中。

多跨无缝桥的主梁宜尽可能采用连续结构。于是做成连续梁还是连续刚构,主要视桥墩的柔度。当桥墩较刚时,宜采用连续梁。从图 13 可以看出,连续梁桥在 3 种无缝桥中均有应用,总数达到 18 座,而连续刚构桥仅为 4 座。这是因为大部分无缝桥的跨径和墩高均较小,桥墩刚度较大,不适于采用连续刚构。为加强上下部结构的连接,有 3 座多跨无缝桥采用半刚构的形式。

2.4 引板

无缝桥的引板由有缝桥的搭板发展而来。除了保证桥梁与接线道路之间过渡平稳、防止桥头跳车作用外,它还可把主梁纵桥向胀缩变形“引到”其末端与道路相接处,故称为引板。从其与台后填土的位置和形式来看,主要有面板式、平埋入式、斜埋入式和 Z 形引板。文献[17]对中国 43 座无缝桥的引板信息进行统计发现,中国无缝桥引板以面板式引板为主,为 29 座,占比 67%;其次是埋入式引板,为 12 座,占比 28%;采用 Z 形引板的无缝桥有 2 座,占比 5%。

本文统计的不同引板类型的无缝桥数量(59 座)如图 14 所示。采用面板式引板的无缝桥为 43 座,占比 73%;采用斜埋入式引板的无缝桥为 13 座,占比 22%;采用 Z 形引板的无缝桥为 3 座,占比 5%。总体情况与文献[17]相同,具体数据有所不同。

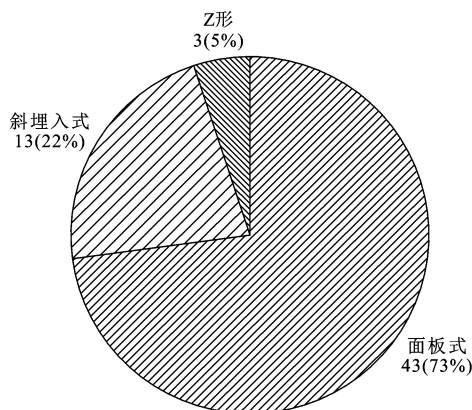


图 14 不同引板类型的无缝桥数量统计

Fig. 14 Statistics of Number of Jointless Bridge with

Different Approach Slab Types

采用面板式引板的无缝桥数量最多,这与中国无缝桥通常建造在采用水泥混凝土路面的一般公路与城市道路中有关。在以沥青路面为主的高速公路中,可采用埋入式引板。今后应加强埋入式引板的研究,为在高速公路中应用无缝桥打下理论基础;同时,Z 形引板作为一种适应能力更强的新型引板,具有较好的性能,还要继续研究,扩大应用。福州大学和湖南大学多位学者已开展各种形式的无缝桥引板研究,但仍需进一步开展相关研究。

3 结 语

(1)中国无缝桥修建数量不断增加,2010 年之后增速加快;整体桥的应用比例不断上升;应用省份不断扩大,新增在北方严寒地区的应用;无缝桥以中小跨径为主,总长不长,在多跨桥中应用较多。

(2)中国无缝桥的上部结构以混凝土空心板为主;下部结构中,柱式埋置式桥台在各种无缝桥中均有较多的应用,且整体桥较多采用薄壁轻型桥台,半整体桥和延伸桥面板桥较多采用重力式桥台;桥墩以混凝土桩柱式为主;引板主要采用面板式引板。

(3)中国无缝桥的研究与应用起步较晚,但近年来在无缝桥标准、学术交流、实际应用等方面均取得明显进展。在适用于无缝桥的有效温度和竖向温度梯度取值、无缝桥台-桩-土相互作用和引板类型方面已开展研究,提出多项技术创新。随着中国交通基础设施可持续发展战略的实施,无缝桥这种少维护的桥梁必然得到越来越多的应用。今后应不断增加无缝桥的应用数量以及在不同省份和地区(尤其是北方寒冷地区)的应用,使其为更多的工程师和管理者所认识和接受,成为可常规应用的桥梁形式;继续加大整体桥的推广力度,扩大应用的跨径、桥

长、曲率半径、斜交角的范围,加强既有桥梁无缝化改造的研究与应用,不断推动中国无缝桥技术的发展。

参考文献:

References:

- [1] 陈宝春,庄一舟,黄福云.无伸缩缝桥梁[M].2版.北京:人民交通出版社,2019.
CHEN Bao-chun, ZHUANG Yi-zhou, HUANG Fu-yun. Jointless Bridges [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [2] BURKE JR M P. Integral & Semi-integral Bridges [M]. Oxford: Wiley-blackwell, 2009.
- [3] 陈宝春,付 磊,庄一舟,等.中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J].中外公路,2018,38(1):87-95.
CHEN Bao-chun, FU Cui, ZHUANG Yi-zhou, et al. The Application Status and Development Strategy of Jointless Bridges in China [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 87-95.
- [4] 公路无伸缩缝桥梁技术规程: T/CECS G; D60-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
Technical Specification for Highway Jointless Bridges: T/CECS G; D60-01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [5] 公路无伸缩缝桥梁技术规程: DB13/T 2482—2017[S].石家庄:河北省交通运输厅,2017.
Technical Specifications for Highway Jointless Bridges: DB13/T 2482—2017 [S]. Shijiazhuang: Transportation Department of Hebei Province, 2017.
- [6] 福建省城市无伸缩缝桥梁技术规程: DBJ/T 13-265-2017[S].福州:福建省住房和城乡建设厅,2017.
Technical Specifications for Municipal Jointless Bridges in Fujian Province: DBJ/T 13-265-2017 [S]. Fuzhou: Department of Housing and Urban-rural Development of Fujian Province, 2017.
- [7] 中华人民共和国交通运输部.2020年我国交通运输行业发展统计公报发布[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):963.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Announcement of the Statistical Communique on the Development of China's Transportation Industry in 2020 [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 963.
- [8] MARURI R F, PETRO S. Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB) 2004 Survey Summary [C]// West Virginia University. Integral Abutment and Jointless Bridges (IAJB 2005). Baltimore: West Virginia University, 2005: 12-29.
- [9] PARASCHOS A, AMDE A. A Survey on the Status of Use, Problems, and Costs Associated with Integral Abutment Bridges [R]. Washington DC: FHWA, 2010.
- [10] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [11] 金晓勤,邵旭东.半整体式全无缝桥梁研究[J].土木工程学报,2009,42(9):68-73.
JIN Xiao-qin, SHAO Xu-dong. A Study of Fully Jointless Bridge-approach System with Semi-integral Abutment [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 68-73.
- [12] RAZZAQ M K, SENNAH K, GHRIB F. Effect of Sequence of Construction on the Moment Distribution of Skewed Integral Abutment Bridges [C]// BRISEGHELLA B. Proceeding of the 1st International Symposium on Jointless & Sustainable Bridges. Fuzhou: Fuzhou University, 2016: 42-53.
- [13] 许 震,罗小烨,卢 琪,等.整体式弯桥试设计研究[J].建筑科学与工程学报,2019,36(6):104-111.
XU Zhen, LUO Xiao-ye, LU Qi, et al. Trial-design Study on Integral Curved Bridge [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(6): 104-111.
- [14] 陈宝春,苏家战,赵 秋,等.桥梁工程[M].4版.北京:人民交通出版社,2022.
CHEN Bao-chun, SU Jia-zhan, ZHAO Qiu, et al. Bridge Engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2022.
- [15] HONG Y S. Analysis and Design of Link Slabs in Jointless Bridges with Fibre-reinforced Concrete [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2014.
- [16] HOU M J, HU K X, YU J T, et al. Experimental Study on Ultra-high ductility Cementitious Composites Applied to Link Slabs for Jointless Bridge Decks [J]. Composite Structures, 2018, 204: 167-177.
- [17] BRISEGHELLA Bruno, 唐玉凤, 薛俊青, 等.无伸缩缝桥梁引板研究综述[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(2):209-216.
BRISEGHELLA Bruno, TANG Yu-feng, XUE Jun-qing, et al. Review of Research on Approach Slabs in Jointless Bridges [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 209-216.