

预应力工程实例应用手册

(桥梁结构篇)

中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组 主编
中国科学技术咨询服务中心预应力技术联络网

中国建筑工业出版社

预应力工程实例应用手册

(桥梁结构篇)

中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组 主编
中国科学技术咨询服务中心预应力技术联络网

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书为《预应力工程实例应用手册》(房屋建筑篇)的姊妹篇——桥梁结构篇。该书共收集具有代表性的预应力桥梁工程实例 74 篇,其中简支梁板桥 11 篇,悬臂梁桥 1 篇,T形刚构桥 10 篇,连续梁桥 20 篇,刚构桥 9 篇,拱桥 2 篇,斜拉桥 9 篇,悬索桥 2 篇,其它桥 10 篇。这些实例不仅反映了我国当代桥梁结构工程的成就和水平,而且也反映出我国预应力技术的应用已达到国际先进水平。

本书叙述精炼简洁,重点突出,可供桥梁工程设计、施工及科研教学人员参考。

责任编辑:王跃

预应力工程实例应用手册
(桥梁结构篇)

中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组 主编
中国科学技术咨询服务中心预应力技术联络网

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市顺义板桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21³/₄ 字数: 529 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3,600 册 定价: 32.00 元

ISBN 7-112-02876-0
TU.2195 (7989)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换
(邮政编码 100037)

《预应力工程实例应用手册》

(桥梁结构篇) 编辑委员会

主 任: 杜拱辰

副 主 任: 张 琳 罗 玲 史尔毅 陆钦赞 杨世浩

委 员: (按姓氏笔画排列)

王建瑶 王用中 毛锡纯 支国桢 孙国柱
邵厚坤 吴学敏 劳远昌 陈幼璠

主 编: 史尔毅 张 琳

主编单位: 中国科学技术咨询服务中心预应力技术专家组
中国科学技术咨询服务中心预应力技术联络网

目 录

序言 综述

1. 预应力在公路桥梁工程中的应用 1
2. 我国铁路预应力混凝土桥梁的发展 12
3. 预应力混凝土桥梁发展的若干新动向 25

简支梁、板桥

1. 上海市内环线高架路工程 30
2. 专桥 2059 标准梁 34
3. 16~32m 工厂预制超低高度预应力混凝土铁路桥 36
4. 8~16m 先张法部分预应力铁路桥梁 41
5. 开封黄河公路大桥 43
6. 卢阿普拉河大桥 47
7. 浙江瑞安飞云江桥 50
8. 洛阳黄河桥 50m 简支铁路梁 53
9. 灵武铁路黄河特大桥 57
10. 九江长江大桥铁路引桥 40m 预应力混凝土箱梁 61
11. 河南省国道 310 线上王寨河桥 65

悬臂梁桥

12. 旧庄河 1 号桥及孙水河 5 号桥 70

T 形刚构桥

13. 江苏殷渡盐河桥 79
14. 四川石棉大渡河桥 83
15. 广西柳州大桥 86
16. 乌龙江大桥 90
17. 瓦德·迈达尼青尼罗河桥 93
18. 重庆长江大桥 95
19. 四川泸州长江大桥 100
20. 洪山大桥 104
21. 洪塘大桥 107
22. 浙江湖州南浔大桥 110

连续梁桥

23. 包头黄河公路大桥 114
24. 宝中(宝鸡至宁夏中卫)铁路线黄河特大桥 118
25. 山西平顺县曲线连续箱梁桥 123
26. 广珠公路容奇大桥 128
27. 宁波小浹江一号桥 133
28. 吉林省松原市前扶松花江大桥 136
29. 厦门大桥 140
30. 常德沅水大桥 146
31. 上海市吴淞大桥 153
32. 上海市黄浦江奉浦大桥 158
33. 宣城汉江大桥 162
34. 天津市津榆公路东堤头大桥 166
35. 衡广铁路白面石武水大桥 168
36. 南防线钦州茅岭江铁路桥 173
37. 清江 7 号特大桥 175
38. 神朔铁路黄河大桥 178
39. 云南六库怒江大桥 182
40. 京九铁路卫运河特大桥 191
41. 浙江杭州钱江二桥铁路桥 196
42. 广深准高速铁路石龙大桥 200

刚构桥

43. 山东东明黄河公路大桥 204
44. 南昆铁路清水河大桥 210
45. 南昆铁路板其二号桥 213
46. 南昆铁路喜旧溪河大桥 216
47. 虎门大桥辅航道桥 220
48. 黄石长江公路大桥
主桥上部结构 223
49. 浊漳河预应力混凝土斜腿刚构桥 229
50. 江西洪门大桥 233
51. 浙江湖州“五一”桥 237

拱桥

52. 河南嵩县桁架拱桥 241
53. 贵州江界河桥 245

斜拉桥

- 54. 天津永和桥 251
- 55. 蚌埠淮河公路桥 255
- 56. 长沙湘江北大桥 259
- 57. 武汉长江二桥 267
- 58. 吉林市临江门大桥 271
- 59. 广西来宾红水河斜拉桥 276
- 60. 郾阳汉江公路大桥 282
- 61. 上海市黄浦江杨浦大桥主桥 293
- 62. 上海市黄浦江杨浦大桥主塔上塔柱
拉索锚固区段预应力平面设计
与足尺试验 295

悬索桥

- 63. 汕头海湾桥主孔悬索桥的预应力
混凝土加劲梁 301

- 64. 汕头海湾大桥预应力混凝土加劲梁
施工 304

跨线桥、高架桥、立交桥、人行桥

- 65. 通西、京丰两座槽形梁桥 307
- 66. 深圳市铁路高架桥 312
- 67. 天津塘沽滨海大桥 316
- 68. 南京大桥南路高架桥——预应力
混凝土展翅梁桥 319
- 69. 航天立交桥 323
- 70. 北京东便门立交 5 号桥 326
- 71. 王顶堤立交桥 328
- 72. 上海市罗山路立交桥 332
- 73. 广汉飞鸿人行桥 337

其他

- 74. 虎门大桥悬索用的镀锌钢丝 339

综 述

1. 预应力在公路桥梁工程中的应用

史尔毅

我国于 50 年代中期开始修建 PC^① 桥,迄今已有约 40 年历史,起步虽较晚,但发展异常迅速,在设计、施工、理论分析计算、材料工艺设备、试验研究、效益等方面,日新月异,预应力应用技术,已达到相当高的水平。

一、概况

预应力在中国公路桥梁中的应用,按结构体系发展顺序为:(1)简支梁、板桥,(2)T 形刚构桥,(3)悬臂梁桥和连续梁桥,(4)拱桥,(5)连续刚构桥与其它刚构桥,(6)斜拉桥,(7)悬索桥(即吊桥)。

1. 简支梁、板桥:1956 年在北京至周口店公路芦沟桥前哑吧河上修建一座跨径 $L = 20\text{m}$ 装配式后张 PC 简支梁试验桥,为预应力应用于中国公路桥之端。60~70 年代,PC 简支梁、板桥开始取代普通钢筋混凝土桥,修成后张梁桥有:援蒙布东、浙江临海、广东韶关、辽宁石河、陕西耿镇和安康、河南伊洛河、甘肃焦家川、四川涪江、江西于都、吉林半拉山、洛阳黄河等桥。其中洛阳桥 $L = 50\text{m}$,长达 3429m;伊洛河桥为 $L = 52\text{m}$ 鱼腹式梁。板桥有:北京永定河 25 孔 $L = 12.5\text{m}$ 先张空心板桥;用冷拉低炭丝配筋的腰铺桥等。组合梁桥有:福建少筋微弯板与工字梁组合桥;援赞比亚 140 孔 $L = 20\text{m}$ 卢阿普拉河先张槽梁与板组合桥等。

80~90 年代简支梁、板桥有创纪录的发展:浙江飞云江桥跨达 62m;郑州 137 孔 $L = 50\text{m}$ 黄河桥,长达 5549.86m,采群锚预应力体系;开封 108 孔 $L = 50\text{m}$ 黄河桥,采群锚部分预应力(PPC)梁,连续桥面。济南斜拉桥引桥为 51 孔 $L = 30\text{m}$ 先张 PC 槽梁组合箱式简支梁;沈大高速公路上建成 16 孔 $L = 50\text{m}$ 的鱼腹式梁桥等。

简支梁板构造简单、施工方便,量大面广的中、小跨桥常采标准设计图纸施工。公路上虽已有 $L = 8\sim 16\text{m}$ 先张装配空心板, $L = 16\sim 30\text{m}$ 先张装配槽梁, $L = 25\sim 40\text{m}$ 后张 T 梁等标准图,曾大量采用,已逐渐显得陈旧,一些采用 PPC 理论新型群锚高强低松弛钢绞线的后张空心板、箱梁的设计图已经出现,可进一步减小结构尺寸,加大跨径,节约钢材和混凝土,经济效益显著。

① PC—预应力混凝土。

2. T 型刚构桥:桥梁跨度大小是技术水平的一个重要标志,跨度的推进标示桥梁技术的发展。60 年代中期,由于交通建设需要,PC 所能达到的桥跨已不能满足跨越较大江河的功能,因此在发展中小跨同时,1965 年首次采用当时世界正在兴起的悬臂施工法,在江苏淮阴建成一座悬臂拼装剪力铰接式 PCT 型刚构新型实验桥,为大跨 PC 桥的设计施工开辟道路,取得实践经验。1966 年在石棉建成当时最大跨 $L = 84\text{m}$ 的大渡河 T 构桥。1968 年在柳州建成带挂梁静定 T 构桥,首采悬臂浇筑法施工,突破了 $L = 100\text{m}$ 大关;1970 年建成的福建乌龙江桥,在同一桥上采用了悬拼和悬浇二法,将桥跨发展至 144m 。T 构体系桥具有适于悬臂施工,跨越深水急流,避免下部施工困难,不中断通航等优点,在长江大河上屡建不衰,成为修建大跨桥主要桥型之一,悬臂施工法也成为修建各类体系大跨桥的主要方法。

70 年代建成吉安井岗山、山西保德、安徽五河、江苏盱眙、武汉汉江二等多座 T 构桥。其中井岗山桥用冷拉钢筋悬拼建成,由 15 个 T 组成 14 孔 $L = 71\text{m}$,长 1090m ;保德黄河桥为由 6 个 T 组成的 5 孔 $L = 60\text{m}$ 多跨剪力铰接桥;援苏丹 $L = 120\text{m}$ 的青尼罗河桥,将中国 T 构技术传播到国外,赢得信誉。80 年代建成湖北光化、葛洲坝、黑龙江佳木斯、宁夏石嘴山黄河、重庆长江和泸州长江等桥。其中重庆长江大桥,创下 $L = 174\text{m}$ T 构大跨纪录。80~90 年代,在浙江安丰塘、南浔等地建成当时新研制成功高强精轧螺纹粗筋预应力体系的 $L = 60\text{m}$ T 构桥;在宁夏建成青铜峡黄河桥等。

从 70 年代起,T 构向轻型发展,早期建成的桁式 T 构桥有四川江津仁沱桥、湖北黄陵矶($L = 90\text{m}$)等桥。仁沱 T 构悬臂呈半系杆拱状,跨中剪力铰接。80~90 年代福建的洪山上承和洪塘下承桁式 T 构,使轻型化桥跨达 $L = 120\text{m}$ 。

还有用预制梁与墩固结形成的 T 构桥:如 60~70 年代福州闽江桥为 5 孔 $L = 50\text{m}$;吉林前扶桥;辽宁太子河桥;广东珠江桥($L = 24\text{m}$)等。

1975 年,在修建 T 构十年经验的基础上,设计出 $L = 60\text{m}$ 、 70m 、 80m 带挂梁的 PC T 构通用图纸,应用此图纸建成若干座桥梁。

3. 悬臂梁桥:是指上下部构造不固结,墩上设支座的悬臂梁,公路上修建不多,70 年代天津、上海等城市偶有修建。如天津狮子林和北安桥跨达 45m 。80 年代在沈丘沙河上建成三孔带挂梁下承式 PC 桁架悬臂梁桥,跨达 105m 。

4. 连续梁桥:连续梁有弯矩小,刚度大、行车顺适、美观等优点,国外修的较多,施工较难。中国公路大跨 T 构悬臂施工成功后,70 年代在河北洛河修了一座四跨箱形连续梁实验桥,相继建成悬臂施工的兰州黄河桥、先简支后连续的滦河 T 梁桥等。80 年代是修建 PC 连梁桥兴旺时期,建成顶推法施工的广东东莞、湖南沔江、包头黄河、贵州卧龙、广东中堂、柳州二等桥;大型浮吊施工的大块拼装的广东容奇桥;移动模架逐孔连续现浇施工的伊拉克摩苏尔 4 号桥;悬臂施工的江门外海桥,悬浇施工的沙洋汉江、常德沅水、哈尔滨松花江等桥。其中沙洋桥有 6 孔 $L = 111\text{m}$ 、全长 1818m ;常德桥主跨 $L = 120\text{m}$ 为当时之冠。90 年代,连续梁桥式样和长度又有发展:采双支座的乐天溪桥和宜城桥;顶推法施工的山西平顺曲梁桥;分跨为 $8 \times 45 + 8 \times 45 + 12 \times 45 + 10 \times 45 + 8 \times 45\text{m}$ 长 6675m 移动滑模施工的厦门海峡桥;逐孔拼装体外配筋的洪塘滩孔桥,以及创目前连梁桥跨纪录 $L = 154\text{m}$ 的云南六库桥。

5. 刚构桥:包括连续刚构、斜腿刚构与连续刚构—连续梁。将几个 T 构悬臂刚接即成连续刚构,可增强结构稳定行车顺适。1988 年建成的广东洛溪桥主跨为 $65 + 125 + 180 + 110\text{m}$,开 PC 连构之端,创主跨 $L = 180\text{m}$ 亚洲纪录。相继建成湖南津市、沅陵和珠海磨刀门

诸桥。1994 年建成三门峡黄河桥;主跨为 $105 + 4 \times 160 + 105\text{m}$ 六孔一联;即将通车的黄石长江桥, $L = 245\text{m}$ 五孔一联长 1060m , 跨大联长均居世界前列;施工中的虎门大桥辅航道桥, $L = 270\text{m}$, 建成后将成世界同类型最大跨。福建丘墩桥先顶推成连续梁再转换为连续刚构。

江西洪门桥是跨距 60m 的 PC 斜腿刚构桥, 这种型式公路上应用尚少。东明黄河桥主桥为 $75 + 7 \times 120 + 75\text{m}$ 九孔一联的连续刚构—连续梁组合刚构桥, 全长 4142.14m , 将连续刚构演变成新型体系。具有薄壁墩的连构桥, 当墩的柔度可象连续梁支座一样工作时, 为连梁体系, 但较连梁施工容易, 工程量较少。

6. 拱桥: 桁式 PC 拱材料省、自重轻、刚度大、预制装配程度高, 跨越能力强。70 年代, 建成浙江宁海越溪 $L = 75\text{m}$ 拱桥和河南嵩县 9 孔 $L = 50\text{m}$ 连续拱桥。80 年代, 贵州建成长岩桁式组合拱桥, 用简单的扒杆吊机和轧丝锚具预制桁件悬拼而成。这种体系是由桁悬臂与拱桁组合, 经济跨径大为增加, 相继建成的白果沱和剑河诸桥, 跨达 150m 。1995 年又用此式建成江界河桥, 凌空飞架在 270m 高峡谷上, 创 $L = 330\text{m}$ 世界纪录。

早在 50 年代, 预应力已应用于兰新公路新城河系杆拱上, $L = 62.4\text{m}$ 。近来修了一些不同形式 PC 系杆拱桥: 新疆克兰河桥; 芜湖元泽和广东水门无风撑双肋拱桥; 江苏云阳三肋无粘结配筋拱桥等。四川旺苍钢管混凝土肋的 PC 系杆拱, 跨达 112m 。

7. 斜拉桥: 是现代新型预应力桥梁, 它的出现使预应力桥跨产生了极大飞跃。一般将斜拉桥划分为钢的、组合梁的和混凝土的三种, 但确切的说, 斜拉桥乃预应力应用的产物, 要施加预应力来完成。可把斜拉索看做伸出梁外的体外筋, 它施加于梁的压力常被比喻为“免费预应力”。

1975 年中国建成汤溪河和新五两座试验性斜拉桥, 较世界首座现代斜拉桥 Stormsund 晚 20 年, 但中国所建斜拉桥数量之多和跨径之大, 均居世界先列。相继又建成大沽河、火石崖、长兴岛等桥。80 年代为斜拉桥修建鼎盛时期, 梁、塔、索组合形式, 千姿百态: 有刚构梁的涪江桥; 突破二百米关的竖琴式索的泖港桥; A 塔扇索悬浮式的济南黄河桥; 独塔双索面的章镇桥; 独塔单索面的恒丰路桥和重庆石门桥(为 $L = 230\text{m}$ 独塔桥, 证明当时已具有修建 $L > 400\text{m}$ 的双塔斜拉桥能力); 创当时 PC 斜拉桥跨纪录 $L = 260\text{m}$ 的永和桥; 双塔双索面的蚌埠桥; 首采热挤 PE 索的广东九江桥; 首采“半漂浮式”双塔柔墩的珠江四桥; 塔顶有观光厅的西樵山桥; 以及转体施工的金川桥和马迹塘板拉式斜拉桥等。山东东营黄河桥则是中国唯一的钢加劲梁斜拉桥, $L = 288\text{m}$ 。

90 年代是中国斜拉桥飞跃发展时期: 建成双塔单索面 $L = 210\text{m}$ 的长沙湘江北大桥; 半地锚式郧阳汉江桥, 其 $L = 414\text{m}$ 跨较前纪录跳跃了 150 余米; $L = 400\text{m}$ 的武汉二桥; 在建的铜陵和重庆二两座桥, L 均超 400m , 即将竣工。上海南浦创 $L = 423\text{m}$ 、宽 30.51m 、长 8346m 结合梁斜拉桥纪录, 但又被 $L = 602\text{m}$ 的杨浦桥打破, 跳了 179m , 并超过 Annacis 桥 $L = 465\text{m}$ 世界纪录 137m , 居世界首位。淮阴京杭运河桥是边跨为 PC 梁中跨为结合梁的混合式斜拉桥。设计中的伶仃洋桥, 将采边跨为 PC 梁中跨为钢梁 $L = 900\text{m}$ 的斜拉桥, 与法国 Normandie 桥($L = 856\text{m}$)和日本 Tataro 桥($L = 890\text{m}$)为同式。上海也将修混合式斜拉桥, 以便为桥跨达 $1000 \sim 2000\text{m}$ 铺平道路。福建青江 $L = 605\text{m}$ 的钢斜拉桥, 预期在 90 年代建成。

8. 悬索桥: 过去欧美日所建大跨悬索桥(吊桥), 加劲梁均为钢制, 只加拿大曾在 Hudson

Hope 桥中采用过 $L = 207.3\text{m}$ 的混凝土加劲梁。中国在建中的汕头海湾桥,地处台风多发区,经多方比较,选择了抗风性能好的 PC 加劲梁,建成后将创 PC 悬索桥跨世界纪录,拓展了预应力在大桥领域的应用。

9. 旧桥加固:由于荷载标准提高,或一时通过重车、年久失修等原因,大量旧桥加固成为一项重要工程。不少旧桥采用了体外预应力加固,包括石拱桥、双曲拱桥等拱桥桥台,侧墙、沉井等的加固。福建闽江 PC T 构桥因需拓宽并提高载重,曾仿照奥地利 Alm 桥和日本本川端桥先例,采预压钢筋的方法。实践证明,应用预应力加固旧桥,经济效益显著。

10. 其它应用:(1)缆索承重桥梁的 R、C、塔上,个别构件或局部地段需施加预应力。(2)一些桥梁的中墩盖梁,采用了预应力混凝土。(3)上部与下部构造可用预应力固结。(4)浙江飞云江桥、广东亭角桥采用 PC 桩基,亭角 PC 桩身混凝土达 C80,承载力较 R、C、桩高 3~4 倍。(5)丹麦 Lillebaelf 悬索桥,锚碇中使用后张 Dywidag 体系筋锚固缆索。近年其它大跨索桥锚固,也趋于采用预应力技术。(6)公路桥梁构件在预制、运输、安装、合拢、体系转换过程中,常需应用临时预应力。

二、结构设计

设计的基本原则是要达到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、技术与艺术统一。根据批准的方案、技术标准、结构体系拟定构造与尺寸,且与施工方法相适应。

1. 总体布置与构造

(1)简支梁、板桥:用料较 R、C、者少,经济跨径较 R、C、者大,因应用广泛已编制有标准图。并且近来有一些后张大吨位预应力体系 PPC 梁、板设计图纸,更为先进。节省更多材料、跨径加大、高度降低、施工方便、美观增加。

PC 简支梁、板的高跨比一般为 $1/15 \sim 1/20$,低高度者可达 $1/25$ 。为了行车顺适,多跨简支桥可采用连续桥面,减少接缝。开封黄河桥连续桥面长达 450m 。简支梁的经济跨度约达 50m ,飞云江桥为了满足通航要求,加快施工进度,采用 $L = 62\text{m}$,梁距 2.5m ,为国内最大跨。

(2)T 型刚构桥:简支梁再加大跨径,重量将迅速加大而不经济,应与其它体系作技术经济比选。T 型刚构上下部结构固结,上部为从墩顶向两侧伸出的悬臂形成“T”形,经济跨径可从 $50、60\text{m}$ 到 270m 。有双 T 或多 T,T 间可用剪力铰铰接成超静定结构,或设挂梁成静定结构。这种无支座结构最适于采用悬臂对称平衡法施工,盐河、石棉、乌龙江等桥采用分段预制悬拚结构;柳州、重庆、泸州等桥采用分段悬浇施工,施工中悬臂内力基本与运营内力相似。小跨 T 构可采用工字梁或 T 梁悬臂,大跨一般采用变截面箱梁,或如洪山、洪塘二桥采用桁架。T 构间挂梁一般为 $(0.15 \sim 0.4)L$,箱梁支点高度为 $(1/15 \sim 1/20)L$,端高为 $(1/40 \sim 1/60)L$,个别桥达 $1/70$ 。端部和根部设横隔板,中部间距加大或不设横隔板。箱梁可为单室或多室,或设分离式多箱。顶板厚 $20 \sim 40\text{cm}$,腹板及底板视布筋及受力要求变化厚度。由于采用大吨位群锚及扁形群锚体系,近来板厚已可变薄。悬拼块件大小重量常由吊装及运输能力决定,接缝可干可湿,最初曾采用纯干平缝,后多涂环氧树脂成胶缝并设台阶或齿槽,以利定位和抗剪。湿缝为现浇混凝土宽缝,可用来调整线型。最初曾采用箱顶明槽布筋,后改为暗管道,锚于块端顶板加厚部。悬浇施工 T 构,需设计挂篮支承现浇混凝土,桁式 T 构根部高度 $(1/8 \sim 1/10)L$,除节点处,多设计为空心截面,受压弦杆可为非预应力构件。

(3)连续梁桥:连续梁跨盖较广,跨径最大达 200m 左右,中小跨可采用梁、板式,滦河 6 联 $4 \times 40\text{m}$ 桥为先简支后连续设计;滹沱和沙河 50 孔 $L = 20\text{m}$ 及 43 孔 $L = 25\text{m}$ 桥,按 PPC 工字梁加预制板先简支后连续上浇混凝土设计。较大跨径如采用顶推法施工的 $4 \times 65\text{m}$ 包头桥,采用移动模架法的 12 孔一联 $L = 56\text{m}$ 的伊拉克摩苏尔桥和 46 孔 $L = 45\text{m}$ 的厦门桥,都采用等高截面,高为 $(1/12 \sim 1/16)L$,设计要考虑梁内正负弯矩变化。大跨连梁一般采用变高度箱梁,支点高 $(1/15 \sim 1/20)L$,跨中 $(1/30 \sim 1/50)L$ 。 $L = 154\text{m}$ 的六库桥,跨中高 $L/55$ 。悬臂施工时,先将支座临时固定,保持稳定,按合拢顺序作体系转换成桥,设计时应作施工阶段顺序安排。宜城汉江桥设计为双支座,可避免支座临时固定与体系转换。大型浮吊施工的容奇桥,块件稳定是借助一侧临时墩,中部块先简支于墩顶块再连续成桥。接头设在 $0.2L$ 处,与逐跨现浇施工的厦门桥一致。多跨连梁边中跨比在 $0.6 \sim 0.8$ 之间。箱梁由直腹发展为斜腹,由多室发展为单室单箱大悬臂形状,常德桥 4.3m 大悬臂翼缘直腹窄底单箱梁,已可节约不少上下部工程量。

(4)刚构桥:(a)连续刚构由多个 T 构固接形成,可等跨或不等跨,常设计成柔性薄壁双墙墩,适应上部纵移,只在桥台处设挡块。主跨为 $65 + 125 + 180 + 110\text{m}$ 不等跨的洛溪桥,采大吨位 VSL 锚固体系,大悬臂大单箱,不设中横隔,根高 $L/15.35'$ 中高 $L/60$,减轻了自重,梁高及底板厚按二次抛物线变化,双薄壁墩外形美观。三门峡黄河桥,主桥 $L = 160\text{m}$ 六跨连续,边中跨比 0.66 ,也采用大吨位锚单箱大悬臂无中横隔板箱梁,悬臂浇筑施工。且提高混凝土强度等级至 C60,自重大为减轻。湖州“五一”桥为桁式连构,由桁片、中部工梁、预制板、现浇混凝土组成,桁间设横系梁,边中跨桁架干接,桁架与中梁湿接。(b)斜腿刚构桥边中跨比约 0.5 ,腿斜度在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间,肩高约 $L/20$,中高约 $L/40$ 。洪门桥为箱形截面,隅节点处设桁式横梁,对称悬拼施工。预制块间设企缝。斜腿为 RC 箱截面,先铰支后封闭。(c)连续刚构—连续梁桥的中部为连续刚构,边部为连续梁,具有两个体系特性。东明黄河桥按温度分析确定连续长度,边部连梁部分墩上设活动支座,采用变高度箱梁悬臂施工。

(5)拱桥:由上下弦杆、腹杆和中央实腹段组成拱片,再由拱片、横联接系和桥面组成拱桥。一般腹杆采用斜拉杆式,节点为刚性。PC 桁拱以 $L = 50 \sim 80\text{m}$,拱矢比 $1/6 \sim 1/10$ 的无铰拱居多,可单孔或多孔。下弦杆应尽可能接近恒载压力线,呈圆弧或抛物线形。嵩县 9 孔 $L = 50\text{m}$ 连续拱桥,桁段预制实段现浇,每孔两片桁架,桥面为先张空心板,矢比 $1/7$,拱腹为圆弧线,下弦高 60cm ,横向剪刀撑联系。江界河 $L = 330\text{m}$ 桁式组合拱桥由桁式悬臂刚架与桁拱组成,二者上弦先为整体连结,合拢后在离两端适当处断开,作体系转换,在两端形成悬臂桁架,中部为桁拱。悬臂与跨径比为 0.255 ,下弦全孔贯通,高 $L/122.2$ 。杆件为箱形截面,节点也是空心的,由吊重 120t 的人字桅杆吊装预制悬拼施工。

(6)斜拉桥:是新型大跨桥主要型式之一,经济跨已达 900m 。它是由塔支承的斜拉索和斜索拉着的加劲梁,即塔、梁、索组成。按材料、结构体系、拉索布置和塔型不同,种类繁多,式样各异。按材料分为钢、混凝土和结合梁的;按塔型和塔数可分为独柱、双柱、门式、瓶式、倒 Y、A、或菱式(可称为宝石、钻石)等形的独塔或多塔;拉索可布置成幅射、扇形或竖琴式的单索面或双索面(垂直或斜);加劲梁可为板、肋板、工形、箱形;按梁的结构体系则有悬臂、连续、T 构、连构或它们的组合。如塔梁墩固结的铰接或带挂梁的 T 构;刚性墩或柔墩的塔梁墩固结的连构;塔梁分离悬浮式悬臂梁;塔梁固结铰支于墩的连续梁等等。一般多采用双

塔、双索面扇形密索、塔梁分离、连续箱梁的悬浮体系。斜索一般为全部锚于加劲梁的自锚式,个别为部分锚于桥台的半地锚式。为了环境协调增加美观,少数桥采竖琴式索。中国绝大多数斜拉桥为 PC 梁,少数为结合梁、个别为钢梁。最近几座建成的和在建的大跨斜拉桥采用了顶上带独柱下为拐脚墩的菱形塔,空间斜索面和双肋板式梁,可改善受力情况,节约材料,方便施工。不少桥在边孔内设置辅助墩,加强全桥整体刚度,改进塔的受力。杨浦桥因跨大($L = 602\text{m}$)采取钢箱式结合梁,减薄钢板厚度;空间斜索面,加强抗风稳定;塔上锚区四壁设预应力筋,简化构造;采用镀锌丝加 HDPE 套防蚀;包桔黄带增添美感。郾阳桥($L = 414\text{m}$)采用流线形 PC 箱梁,按地形采用半地锚式,边梁外加平衡重式锚台,84% 背索锚在台上。双斜空间索宝石形塔。重庆二桥和铜陵两座长江桥, L 均在 400m 以上,都采用了双肋板式主梁。

斜拉桥边中跨比在 $0.3 \sim 0.5$ 间,桥面上塔高为 $(0.15 \sim 0.3)L$,梁高 $(1/100 \sim 1/350)L$,宽度比 > 8 ,宽跨比 $> 1/20 \sim 1/30$ 。为改善气动性能,永和桥等 PC 梁加了三角形边箱(风嘴)。湘江北桥系单索面桥,要求抗扭刚度大的主梁,采用了高度大流线较好的倒梯形 PC 箱梁。武汉二桥采用分离式 PPC 双箱和悬浮体系,有利抗震及抗纵向力,并设水平支座抗风。南浦桥采用工字钢梁与混凝土板结合梁,开口截面,为解决裂缝问题,在桥板内设置了预应力筋。

(7)悬索桥:汕头海湾 $150 + 452 + 150\text{m}$ 三跨双铰 PC 梁悬索桥,塔及边墩处均设竖向拉压支座,正常时纵向有约束,地震时纵向漂移较大,采用抗风性能好的三室倒机翼式新型流线形箱梁,下边缘呈圆弧形,中高 $L/205$ 。吊点处设实腹横梁,二吊点间设一副横梁,预制的梁段在副横梁处用湿接头连接。

(8)弯、坡、斜桥:有板式、梁式或箱式。不论荷载是否偏心,都产生扭矩,所以采用箱梁有利,设置抗扭横梁十分必要,也可利用支座和配筋偏心抗扭。支座可能产生负反力和各向转动,可根据不同条件选相应支承和支承间距。斜板有可能发生平面转动,要设挡块。曲桥通常为扇形,内外梁受力不同刚度可有差异。

2. 预应力筋布置

预应力筋布置与结构体系、受力情况、构造式样和施工方法有关。(1)简支先张按弯矩配筋,两端加锚固长度,在不需要处隔离或切断。后张 T 梁下部加宽增加有效高度,按弯矩需要从跨中直段逐渐弯起至梁端或梁顶锚固。预弯预应力梁用裸钢梁配筋,省去锚具和设备。开封桥按 PPC 设计,根据预应力度加配非预应力筋。(2)悬臂施工的 T 构,施工配筋大部可满足运营要求,从墩顶对称布置,铰接 T 构配筋在中部下弯抗正弯矩。石棉 T 构桥正弯矩段布普通筋无下弯束。柳州和重庆长江桥,设三向预应力筋,不对称束锚于墩壁,留备用管道。洪山洪塘桁 T,在弦杆及斜杆中设预应力筋。(3)连续梁先简后连施工时,在支点上缘另张负弯矩筋连接;顶推法施工时,正负弯矩变换不定,在顶底板中心布筋,主、导梁用临时束连接。运营阶段要求弯起束,因梁等高正弯矩段较长;逐孔施工时,连续束逐孔接长,贯通全联;悬臂施工时,负弯矩筋下弯,正弯矩筋上弯,用竖筋抗主拉,横梁及桥面板中设横向钢筋。宜城桥无上弯束;六库桥纵向设顶底板束,下弯束和连续束不多,竖筋利用为挂篮锚筋。(4)刚构墩顶段和角隅处布负筋,跨中段布正筋。洛溪桥设三向预应力,纵筋有平弯再竖弯,长达 190m ,大吨位集中锚固;三门峡和东明桥未设下弯束和连续束,顶板内横向采扁锚单层布束,施工方便,板厚减小。(5)桁式结构的拉杆,拱桁实腹段下缘、节点应力集中

区布筋,横向预应力压紧,加强整体性。(6)斜拉桥的 PC 箱梁配筋与连续梁相似,由于拉索提供了压力,只跨中部和后锚索区配筋较多。R、C、塔横梁,锚固区和其它应力集中处部筋加强。湘北桥先期束在悬浇施工中逐段加长,倒 Y 形塔交叉区及墩塔联结区设双向预应力;杨浦桥在墩顶盖梁、塔下横梁、塔上立柱锚区四壁、加劲梁横梁及中跨中部 220m 和边跨端部 133m 预制板中,设置了预应力筋;郧阳桥半地锚桥台顶板及外侧板布了预应力筋;武汉二桥的临时束,合拢后部分释放,压浆作普通筋使用。斜腹板内设无粘粗筋抗拉索竖向分力。(7)汕头 PC 悬索桥沿加劲梁圆弧形底板布横向钢束,下侧翼缘布无粘绞线分布筋。主梁纵向在上翼板内布束,在下翼板顶配体外束。塔上三道横梁节点处布正负弯矩束。(8)弯斜桥按弯矩布束。弯桥预应力筋为了平衡扭矩,可偏心布置,侧压力由防崩箍承受。(9)体外筋和无粘筋:洪塘桥滩孔为 31 孔 $L=40\text{m}$ 拼装式连续梁桥,采 XM 锚体外筋布于箱梁内;洪门斜脚刚构,在梁顶设体外精轧粗筋;沅陵连构桥桥面板内采用无粘筋,无需留孔道,板厚减小。(10)先期束、后期束、永久束和临时束:如容奇桥按预制、运输、吊装及运营各阶段需要不同,布先后期束,连续束和贯通束,分期分批张锚部分钢束。其它体系 PC 桥也都按施工受力情况设临时束,成桥时拆除或部分拆除或加利用。不少桥还预留了备用管道。(11) PC 桥布筋,宜尽量靠近腹板,减少平竖弯曲,采用高强度等级混凝土、钢筋,大吨位锚具,减少钢束,以便缩小构件尺寸、简化构造、方便施工、节约材料、降低造价。

三、理论分析计算

随公路桥梁设计施工进展,PC 结构理论分析计算水平不断提高。1978 年交通部颁布了第一部《公路预应力混凝土桥梁设计规范》,按单一系数极限状态设计理论编制,较前设计时采用的破坏阶段理论规范前进了一步。现行 JTJ023—85 规范,将单一系数改为多系数,以塑性理论为基础作强度极限计算,以弹塑性或弹性理论为基础作正常使用极限计算。

JTJ023—85 规范允许采用部分预应力混凝土(PPC)构件设计,在短期荷载作用下截面受拉边缘允许出现拉应力或裂缝,拉应力不超过规定限值的为 A 类构件,超过者为 B 类。由于 PPC 有节约钢材、降低造价、减少反拱、改善受力性能等优点,在公路桥中逐渐推广应用,如开封简支梁桥,采用预应力度 0.85A 类构件,钢筋造价节约了 50 万元,铺装混凝土节约千余方,韧性加大,安全度提高。其它桥上也采用了 PPC 构件。

预应力桥根据总体布置、比例尺寸、布筋方式和施工方法,对成桥及每个施工阶段体系型式,用相应荷载及荷载组合,进行内力、应力、变形和稳定分析计算。中小桥一般只作静力分析,用冲击系数考虑车辆动力影响,把风视为静荷载作用在桥上。对大跨桥风和地震动力分析十分重要,跨径越大柔性大,要考虑力和变形非线性和整体受力空间性。

广泛使用电子计算机是现代化重要标志,为了应付日益繁难的桥梁结构计算,70 年代后期,在世界技术革命大潮中,中国公路桥梁设计科研单位组成联合会战组,采用有限元法(FEM)编制出“公路桥梁计算综合程序”,广泛应用。近年又基于 FEM 编制了公路桥 CAD 系统(JT—BCAD),可绘制总布置图、作施工阶段计算、输出大桥动力特性和弯坡斜桥及局部应力三维分析结果,实现设计计算绘图一体化。加上国内外许多通用程序和各个桥梁设计中自编的一些专用程序,大大提高了计算的精度和速度,特别是大量重复计算的标准设计和一系列新型大跨 PC 桥的计算,适应了中国桥梁高速发展的需求。

桥梁是由纵横构件组成的整体结构,作用力应由承重构件共同负担,然而空间分析过于复杂,在保证工程精度条件下,往往简化为平面计算乘以横向分布系数,在桥梁实践中,使用

了不同方法计算横向分布系数。

空间计算简化实际是平面加扭转效应,闭口箱梁抗扭刚度较大,PC 桥广泛采用。箱梁计算包括竖向挠度、横向弯曲、自由和约束扭转、畸变、剪滞等部分,中国首批 R、C、箱梁验算和设计中,曾采用薄壁杆件静力学原理算出。常德桥设计采用比拟弹性地基梁解析法和纽玛克数值法计算畸变应力,此应力与活载应力为同一量级,不容忽视。箱梁横向一般采用弹性支承平面框架图式进行分析。

超静定桥可由预应力、混凝土收缩、徐变、墩台不均沉降和温度变化产生次应力,其中收缩、徐变影响较大,分段施工计算工作量庞大。柳州桥采老化理论导出梁端徐变预拱度公式;重庆长江桥,按老化、先天理论和柳州桥简化公式计算后,又用卡尔曼滤波法修正。南浦、杨浦桥结合梁设计中,解决了钢梁与混凝土板间徐变应力分布问题。

收缩规律与徐变相似。体系升降温、日照、骤冷、各构件间温差影响,也可达相当大的数值,不容忽视。东明桥根据温度分析作了桥梁体系选择。超静结构一般均考虑了墩台不均匀沉降影响,如洛溪、东明和三门峡等连构桥,都用等刚度原则,考虑桩土相互作用,将排桩换算成柱来确定全桥分析图式。

蚌埠和郟阳斜拉桥计算了加劲梁在施工中的压曲稳定;武汉二桥验算了塔的稳定;杨浦桥按初始力存在的空间结构稳定理论,发现塔中内力有较大差异。

大跨 PC 桥静力分析虽多采用简化法,但重庆桥还用薄壳结构和组合结构空间程序对箱梁内力、有无中隔板等作了校核;对墩顶部、牛腿和孔洞作了空间分析。江界拱桥设计中,用空间梁元、膜杆梁混合元等多种方法,作了二维和三维分析,得出大跨桁拱正确算法。蚌埠和武汉二斜拉桥在横向也采用空间分析。大跨缆索承重结构的巨大应力集中区点,均采用三维 FEM 计算,并考虑索垂度、初始力及大位移等非线性变化。

大跨桥成桥和施工中抗风稳定性已经得到高度重视,危险的弯扭颤振临界风速与扭弯基频比有关,即与梁的尺寸、形状和重量有关。开口截面的南浦桥为 1.36,带风嘴截面的永和桥为 1.88,倒梯形截面的郟阳桥为 2.9。宽高比大或流线形的扁平梁频比值大比较有利,所以汕头桥采用了倒机翼流线形和重质混凝土矮梁。武汉二和杨浦桥均考虑了施工中长悬臂时的抖振,蚌埠桥计算了疾振临界风速。临界风速可用半经验公式算出,都经过风洞试验检验。

中国公路工程抗震设计规范 JTJ004—89,适用于跨径不大于 150m 的 PC 公路桥,以反应谱理论为基础,但对结构复杂,桥高很大的特大桥,可采用时程分析法。滦河连梁桥位于唐山大地震区,按烈度 10 度设防;永和桥处 8 度区,采浮动体系设弹性挡块消能减震,作了相位差和概率分析,将抗震计算提高到新水平;三门峡桥利用 NERAP 和 SAPS 与 ANSYS 程序,对 $6 \times 160\text{m}$ 连构输入水平及竖向 EL—Centro 波、天津波、Taff 和 GZ 波,进行计算,考虑了行波效应和桩土相互作用;汕头桥采用吸收缓解方式抗震,原则是“大震不倒、中震可修,小震不坏”,按反应谱理论分析。大震塔仍安全,中震梁脱塔飘浮缓解。

四、结构施工

施工方法和材料工艺设备革新是公路预应力桥梁发展的重要因素。

1. 施工方法 桥梁现代化表现为构件标准化、制造工业化、施工机械化。小跨梁板可在工厂预制,一般在桥头预制短距运送,用扒竿、吊车、龙门或架桥机架设。 $L = 62\text{m}$ 的飞云江桥采用 300t 架桥机,加快了架设速度;开封桥多跨长桥,采用架桥机创 20 个月架设完成纪

在 T 构桥设计中引入的悬臂分段对称平衡拼装或浇筑施工法,嗣后在大跨连续梁、连续刚构和斜拉桥中大量采用,极大的促进了桥梁发展。此法对施工与运营内力基本一致的 T 构来讲,最为合适,对其它体系桥尚需先形成 T 构,再经合拢作体系转换,如沙洋、常德、六库等连梁,需先将支座临时固定,才能形成 T 构合拢,放松支座成桥。8 跨 $L = 111\text{m}$ 的沙洋桥是从两边边墩向中墩逐墩逐跨进行合拢,最后中跨合拢,中间经过双悬臂梁、单悬臂梁、两跨连梁、三跨连梁、4 跨连梁等体系转换,最后形成 8 跨连续梁。

中等跨径连续梁桥施工还有先简支后连续、浮吊、顶推、移动模架逐孔浇筑、移动导梁逐孔拼装等。移动模架集脚手和模板于一体,机械化自动化程度较高,五联 46 孔 $L = 45\text{m}$ 的厦门桥,采用平行错位连续浇筑,每孔 10~14 天快速完成。洪塘滩孔采用下导梁逐孔拼装,也可无体系转换完成。顶推法是在桥台处开辟预制场棚,分段预制,逐段联结向对岸推出,沿滑道滑移,落架支座上成桥。有单点或多点单向或双向顶推,可设前后导梁及临时墩。五跨连续 $L = 90\text{m}$ 的容奇桥采用 500t 级浮吊预制安装,设单侧临时墩支撑大型墩顶块件,中部块先简支于顶块牛腿,后联结形成连续。宜城 6 跨 $L = 100\text{m}$ 连梁悬臂施工,因墩顶设双支座可保持稳定,不作临时固结和体系转换。

连续刚构悬臂施工无需支座固定工序,仅作合拢顺序安排。东明桥 $75 + 7 \times 120 + 75\text{m}$ 的连构—连梁有 8 个“T”,分两期完成;先期完成边部有支座的 4 个“T”,后期完成中部 4 个“T”,近岸“T”合拢后,中间五跨一次合拢。合拢前先将两悬臂临时刚接,使两端无纵、横、竖向相对位移,同时用水箱压重,边浇混凝土边放水,保持标高不变。

$L = 330\text{m}$ 的江界河桁式组合拱桥,采用桁架伸臂法安装,用贵州率先设计的可吊 120t 的人字桅杆吊机和吊装工艺,从两岸向河心逐节安装合拢。

斜拉桥施工时,随加劲梁逐段为斜索吊起,梁即得到预压力,同时张拉斜索调准索力及标高。为此,当施工至每监测状态时,进行线形、索力、温度、应力及荷载位置等的观测,跟踪控制。

汕头 PC 悬索桥加劲梁预制时,为了保持橄榄外形,模架特别设计得能使张拉预应力筋时,自重能参加作用。吊装前先预拼。吊装是用缆载吊机从双塔各自向两侧拼梁段,临时连接,待全部到位再浇永久接头,穿束张拉。

施工控制十分重要,大跨预应力桥都有施工监控系统,用实测数据分析误差,修正参数,作下一阶段预测,指导工程进行。设计部门应配合施工现场管理,作屏幕跟踪显示观察,和电子分析计算,发布修正内力和线形数值。

在洛溪连构桥施工中,每一梁段浇筑后,考虑弹性模量、收缩徐变、钢筋松弛、梁段浇筑时间、日照温差、挂篮引起的变位、施工荷载、基础沉降、施工误差等来预测下一待浇梁段标高,保证两臂合拢高度一致,运营时有一定预拱度,其值为 72 个施工阶段挠度总和的反向设置。经过精心设计施工,大跨 PC 桥合拢时一般误差仅数厘米。一些桥将预制块件放置数月,以减小收缩徐变影响。悬臂施工还应注意两侧平衡,有一定稳定安全度,要考虑两侧荷载可能的不对称、风和地震影响及各种不利组合。

2. 材料、工艺、设备 近年来公路预应力桥采用了新材料、新工艺、新设备;提高了建桥技术水平,取得很大经济效益。

(1)材料 主要是钢材与混凝土。预应力钢丝强度已由最初的 1100MPa 提高到 1600/

MPa,冷拉粗筋提高为精轧螺纹粗筋。近年无论大中小桥均趋于采用高强度低松弛钢绞线,国产 7 ϕ 4~7 ϕ 5 丝钢绞线有 ϕ 12~ ϕ 15mm,分为 250 级(1700MPa)和 270 级(1860MPa)。也生产无粘结钢绞线,外层涂建筑脂,包 HDPE。

80~90 年代,常德、洛溪、郑州、开封、厦门、东明等桥采用了高强度低松弛钢绞线;杨浦桥的盖梁、塔横梁、加劲梁、桥板中,都配此钢绞线;汕头加劲梁除配此线外,还配有单根无粘钢绞线,底板上配单根外包 HDPE 套的镀锌钢绞线体外筋。

预应力束防腐关系到桥梁耐久性和寿命,一般用水泥浆压注防护,斜拉索近来多采用直接热挤 PE 材。南浦桥使用国产热挤防护大吨位大节距扭绞索,耐蚀力达世界先进水平;杨浦桥采用镀锌成品索外包 HDPE 套,耐蚀抗风好,外缠桔色带。

三向预应力结构中,多用冷拉粗筋作竖筋,85 年研制成功的精轧全螺纹高强粗筋体系,已得到推广应用。PPC 结构中,还需按预应力度配置非预应力普通钢筋。

公路 PC 桥所用混凝土,已由早期一般 C30~C40 提高到 C50~C60,亭角桥基桩为 C80。为了缓凝早强增加和易性,制作时一般掺高效减水剂。厦门桥处于海水盐雾区,采抗蚀水泥、掺粉煤灰双掺混凝土,增强耐久性。汕头桥用选择水泥、水灰比,采用钢纤维混凝土、涂层、牺牲阳极法,增强抗蚀。

减轻自重对大跨桥有重要意义,发展和应用轻质高强材料仍然是中国预应力公路桥发展途径。

(2)工艺、设备 预应力桥发展,促使工厂对预应力体系开发。50 年代,公路简支梁桥曾采用柯罗夫金锚,60t 单作用千斤顶张拉;60 年代 T 构,采用环销锚 120t 双作用顶张拉,个别桥采用 JM-12 锚用 YC60 双作用穿心顶张拉钢绞线;70 年代多采用弗氏锚双作用或三作用顶张拉 18~24 根 ϕ 5 高强钢丝束,竖向多采用螺丝端杆锚。较特殊的有:冷拉Ⅳ级筋的袁山桥和井岗山桥;采用电热后张法的嵩县连拱桥;采用鱼腹梁自锚式的伊洛河桥;采用 V 级冷轧螺丝锚的安城桁拱桥。个别桥采用了冷拔低碳钢丝,预应芯棒配筋。

80 年代,开发了 XM、QM 群锚,YCD、YCQ 系列千斤顶体系,张拉力达 500t,可用于先后张结构中。1985 年开发的高强精轧粗筋,YG 千斤顶配套体系,具全螺纹任意切断、反复张拉放松和多次接长功能。90 年代,开发出 OVM 和 YM 群锚体系系列,配有 YCW 和 YCT 万能和通用千斤顶,可锚钢丝束和钢绞线束,张拉力达 1200t。这些千斤顶可适用 XM、QM、DM、LZM 及弗氏锚多种锚固体体系的张拉,可分段反复张拉,自锚性能好。锚具中还有扁形群锚、OYM21 型锚具。扁锚适用于薄板。OVM21 型固定端为镦头锚,张拉端为夹片,沅陵桥采用此型认为:可用小吨位完成大吨位张拉,回缩少,镦锚端可整索补拉,钢丝受力均匀。斜拉桥索一般采冷铸镦头锚 LZM,分固定端与张拉端,用 YCW、YCL、YQL 型千斤顶张拉,有连续、反复张拉性能和牵引装置。

近年公路桥梁机械化程度有较大提高,大型架桥机、移动滑模整孔浇筑机、逐孔拼装导梁、大型桅杆吊机等应用增多,悬臂施工挂篮等设备有较多改进。预应力工艺设备,如油泵、联接器、压花机、镦头机、波纹管成型机、穿束机、顶压器等齐全,自动化程度也提高。

公路预应力桥梁由于采用高效材料、机具、预应力体系,施工机械化自动化提高,不但大跨桥自重轻桥跨加大式样翻新,而且量大面广的中小桥,配合 PPC 应用,也发生了重大变化,取得巨大经济效益和社会效益,造价低、质量高、促进当地工农业生产、改善人民生活水平。郑州黄河桥因采用群锚比洛阳桥节约了大量钢材、几百万元造价、简化了施工;开封桥

采用群锚和 PPC, 又比郑州桥多节约了钢材及造价。上海空心板桥采用后张群锚体系比先张粗筋节约大量钢材和造价。洛溪桥采用大吨位锚钢绞线体系后, 比弗锚高强丝体系节约混凝土数千方, 上部构造节约数百万元。

五、结语

经过近 40 年努力, 中国预应力公路桥设计施工总体技术已接近世界水平, 个别还达到或超过, 对中国现代化建设作出了应有贡献。这是社会经济建设的需要, 整个社会科技水平提高, 以及桥梁界从业人员同心协力的成果。正在修建、设计和规划中的许多预应力桥, 构思更加宏伟, 技术更加先进, 预期在深化改革, 扩大开放大好形势下, 预应力应用将进一步促进公路桥梁事业的发展, 为国家繁荣昌盛作出更大的贡献。