

预应力混凝土V形刚构桥设计与优化分析

任伟平 王春寒 *通讯作者

中远交科设计咨询有限公司

摘要: 德阳市华强沟水库环湖路跨湖桥为一座40+3×60+40m预应力混凝土V形刚构, 该桥结构外形轻巧美观, 线条圆润流畅, 桥梁造型与周围环境完美结合。相比常规连续刚构桥梁, V形斜腿减小了结构的计算跨径, 对跨中和支点的弯矩峰值进行了削弱, 因而可降低梁体高度并节约造价; 但对于跨数较多的V形刚构, 因超静定结构的约束增加, 导致桥梁结构受收缩徐变、温度等作用的影响增大, 反而会导致结构工程规模的增加, 故设计V形刚构时, 需综合考虑各项因素, 保证结构的受力合理的同时减少不必要的材料浪费。本文主要通过华强沟水库环湖路跨湖桥进行受力分析, 验证了设置剪力铰的合理性, 为后续同类工程提供经验借鉴。

关键词: V形刚构; 超静定结构; 剪力铰; 预应力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.14.088

一、桥梁概况

华强沟水库位于旌阳区双东镇高华强村和尚湾, 是目前德阳市区最大的湖泊, 其主要功能是城市供水和生态涵养。新建华强沟水库环湖马拉松赛道位于德阳主城区北, 连接东一环路北段, 赛道全长约24公里, 宽8米。环湖路跨湖桥作为专为华强沟水库环湖马拉松赛道项目特意规划设计的桥梁, 将环湖马拉松赛道的跑道长度一分为二, 形成一个12.7公里的小环线, 桥梁采用40+3×60+40m预应力混凝土V形刚构, 桥梁全长274m。

二、桥梁设计简介

(一) 设计特点

V形刚构由连续刚构演变而来, 其构造特点与连续刚构类似, 将连续刚构的立柱设计成V形, 即为V形刚构, 其受力模式是一个多跨连续梁和刚构的混合结构体系, 兼有斜腿刚构和梁的力学特点。其根部梁高(含V形托架在内)一般为连续刚构的2~2.5倍。V形刚构的桥墩一般采用单柱, 梁体及托架杆件一般采用箱型截面或实体截面。由于V形斜腿减小了主梁的跨度, 相比连续刚构, 从受力上来说, V形刚构将梁体负弯矩峰值降低1倍以上, 将跨中正弯矩亦可降低1倍。同时该桥型上

部结构刚度较大, 使得梁底挠度减小, 内利在相邻孔跨之间分布均匀, 减少材料的用量, 降低工程造价。

V形墩的构造特点使得该桥型既有梁的特征, 也有拱的特点。如前面所述, V形墩的使用可将上部梁体的正负弯矩峰值降低, 节约工程规模, 但受力状态相比连续刚构也发生了较大变化。V形刚构要求斜腿刚度不宜过大, 以免过分影响主梁的内力。对于墩高较低、跨数较多的V形刚构, 在自重、预应力、收缩徐变、温度、汽车活载等外部荷载或作用的影响下, 会使得墩底会产生较大的水平力及弯矩, 因而将造成下部基础的工程规模大大增加, 因此设计过程中应采取合理的措施进行优化设计, 减少不必要的工程浪费。

(二) 技术标准

1. 设计荷载: 公路-I级。
2. 桥面宽度: 桥面宽度: 0.5(防撞护栏)+4.5(车行道)+0.5m(防撞护栏)=5.5m。
3. 设计洪水频率: 大桥1/100。
4. 抗震设防: 地震动峰值加速度为0.1g, 抗震设防分类C类, 抗震措施等级二级。
5. 环境类别: I类, 水中采用磨蚀环境VII类;
6. 结构设计安全等级: 一级;
7. 桥涵结构设计基准期: 100年;
8. 桥涵设计使用年限: 100年, 附属可更换部件20年;

(三) 上部结构

上部结构采用斜腿刚构箱梁, 跨径为40+3×60+40m, 跨中箱梁梁高2m, 桥墩处箱梁梁高1.5m, 桥墩处箱梁至墩顶高9m。箱梁顶底板厚25cm, 斜腿与箱梁连接处倒圆角。梁底曲线变化采用二次抛物线, 梁底曲线方程为 $y=x^2/10608\text{cm}$ 。

为减小超静定结构因收缩徐变、温度等作用的不利影响, 节约工程造价, 经分析计算, 在桥梁中间跨设置剪力铰, 形成两个带悬臂的门式刚构, 但相邻两悬臂具备互相联系的构造, 特点是只承受传递剪力而不承受传递弯矩, 在竖向荷载作用下两侧结构可以共同受力, 相邻悬臂的端点挠度一致, 还可保证相邻悬臂能自由伸缩和转动。

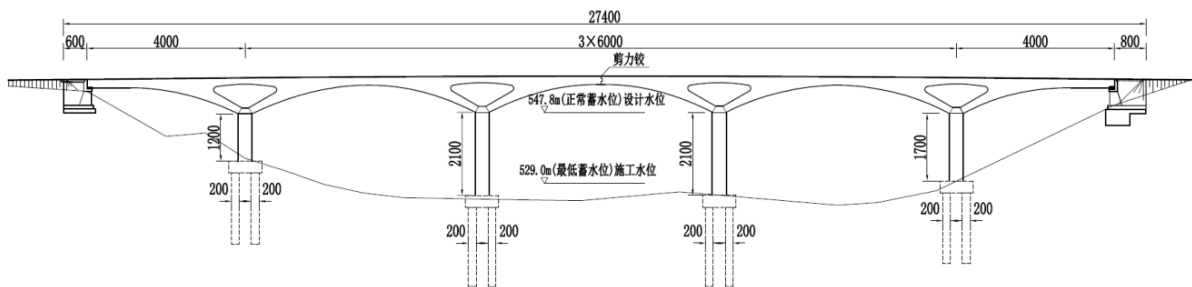


图1 桥梁立面布置 (单位: cm)

(四) 下部结构

桥墩均采用矩形空心墩，承台桩基础，墩身与斜腿刚接。桥墩尺寸 $3.5 \times 3.5\text{m}$ ，壁厚 0.5m ，承台厚度 3m ，桩径 2.0m ，现浇施工。桥台采用重力式桥台扩大基础。

(五) 施工方案

1. 施工准备

桩基及承台在水库蓄水前施工，进场后完成三通一平，做好施工桩基准备工作。

2. 下部结构施工

1) 桩基施工：桩基采用机械成孔；2) 栈桥平台施工：桩基施工完成后开展栈桥基础及钢管桩施工；3) 承台施工：承台采用明挖基础，现场浇筑混凝土施工；4) 墩身施工：采用翻模法或者爬模法施工；5) 桥台施工：明挖基础，现场浇筑混凝土施工。

3. 上部结构施工

1) 上部施工准备：桩基施工完成后开展栈桥平台施工，并完成边跨斜坡处支架基础处理；2) 支架搭设：箱梁支架采用满堂支架，搭设支架安装模板并完成支架预压；3) 箱梁采用满堂支架施工：a、浇筑边跨（第1、5跨）及中跨（第2、4跨）非合龙段箱梁混凝土并养生；b、张拉腹板钢束BW1、BW2、ZW1、ZW2，完成后张拉底板钢束WD1、ZD1并压浆；c、施工第2、4跨合龙段并养生完成后张拉钢束T1及ZD1、ZD2；d、施工第3跨合龙段及剪力铰，箱梁梁体施工完成；4) 支架拆除：第3跨合龙段及剪力铰强度达到要求后拆除自上而下顺序拆除支架；5) 栈桥平台拆除：栈桥由中心向两岸拆除。

4. 附属施工

完成桥梁铺装、排水、伸缩缝及护栏施工。

三、结构体系优化对比分析

本桥为5跨连续结构，最大墩高为 21m ，最小墩高为 12m ，为高次超静定结构，在外力作用下，梁体及墩身的内力分配及变化复杂。对单跨V形刚构桥来说，为9次超静定结构，每增加一孔就增加6次超静定。超静定次数过多，墩身高度较低，温度作用、收缩徐变等产生的影响增大。为降低桥梁由于跨度较多、墩身高度较低带来的不利影响，减小下部工程规模，节约工程造价，经多方面结构优化对比分析计算，本桥于中间跨设置剪力铰，形成两个带悬臂的门式刚构，减少了超静定次数，大大减小了下部结构的工程规模。

为对比设置剪力铰进行结构体系优化前后桥梁结构内力的区别，分别计算两种情况下结构的内力。

(一) 主要计算参数

计算模型采用三维空间模型，各部位均采用梁单元进行模拟，通过释放梁端约束来模拟剪力铰的设置。主要计算参数如下：

1. 环境的年平均相对湿度取 80% ；

2. 钢筋混凝土：重力密度 $\gamma=26.0\text{kN/m}^3$ ，C50混凝土的弹性模量 $E_c=3.45 \times 10^4\text{MPa}$ ；

3. 预应力钢筋：弹性模量 $E_p=1.95 \times 10^5\text{MPa}$ ，松弛

率 $\rho=0.035$ ，松弛系数 $\zeta=0.3$ ；

4. 锚具：锚具变形、钢筋回缩按 6mm （一端）计算；塑料波纹管摩阻系数 $\mu=0.2$ ，偏差系数 $k=0.0015$ ；

5. 竖向梯度温度效应：按《公路桥涵设计通用规范》JTG D60—2015规定取值；

6. 整体升温按照 $+25^\circ\text{C}$ 计算，整体降温按照 -25°C 计算；

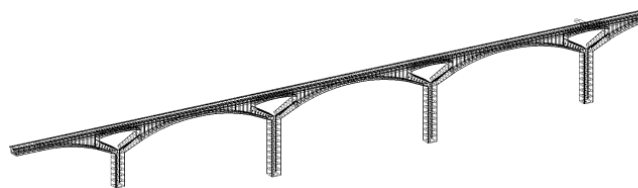


图2 空间有限元模型

(二) 主要计算结果

本桥设置剪力铰后，由连续结构变成两个带悬臂的门式刚构，由于结构体系发生了变化，结构内力的分布也相应发生了变化，各荷载作用下最不利截面的位置也不尽相同。本次计算分析，主要对梁体（包含斜腿）及桥墩的内力计算结果进行分析，验证剪力铰设置的合理性。

1. 梁体内力分析对比

分别计算剪力铰设置前后梁体内最不利弯矩和剪力值，计算结果如表1所示。

计算表明，若不设置剪力铰，恒载作用下，梁体正负弯矩峰值分别增加了 17.3% 和 32.8% ；汽车活载作用下，正弯矩峰值变化不大，负弯矩峰值则减少了 40.1% ；但收缩徐变产生的正负弯矩峰值分别增加了 66.8% 和 73.4% ；同样，温度作用使得梁体内的弯矩极大地增加，特别是整体升降温，均使得梁体内的弯矩峰值绝对值增加了 73.4% 。

剪力效应变化同样明显，若不设置剪力铰，恒载作用下，梁体正负剪力峰值分别增加了 17.3% 和 17.1% ；汽车活载作用下，剪力变化不大；但收缩徐变产生的正负剪力峰值分别增加了 87.8% 和 77.9% ；而温度作用下，梯度温度产生的剪力变化值不大，但整体升降温却使得梁体内的剪力峰值绝对值增加了 85.3% 。

2. 桥墩内力分析对比

分别计算剪力铰设置前后桥墩内的最不利弯矩和剪力值，计算结果如表2所示。

计算表明，若不设置剪力铰，恒载作用下，桥墩正负弯矩峰值分别增加了 55.4% 和 47.8% ；汽车活载作用下，正弯矩变化不大；但收缩徐变产生的正负弯矩峰值分别增加了 78.7% 和 72.2% ；同样，温度作用使得梁体内的弯矩极大地增加，特别是整体升降温，使得桥墩内的正负弯矩峰值分别增大了 122.9% 及 127.9% 。

对于剪力效应，若不设置剪力铰，恒载作用下，桥墩正剪力峰值减少了 77.4% ，但负剪力峰值增加了 70.0% ，但恒载对桥墩产生的剪力值基数较小；汽车活载作用下，剪力值变化不大，正剪力峰值增加了

表1 设铰前后梁体弯矩及剪力计算结果

荷载	梁体M _{max} (kN.m)			梁体M _{min} (kN.m)			梁体Q _{max} (kN)			梁体Q _{min} (kN)		
	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)
恒载	13693	16559	17.3	-11748	-17479	32.8	1863	2253	17.3	-1877	-2265	17.1
收缩徐变	3235	9757	66.8	-3901	-14649	73.4	126	1029	87.8	-219	-989	77.9
汽车荷载	4732	4758	0.5	-12913	-9219	-40.1	1159	1134	-2.2	-1163	-1139	-2.1
梯度升温	6325	7403	14.6	-1136	-2068	45.1	258	269	3.9	-255	-239	-7.0
梯度降温	568	1034	45.1	-3163	-3702	14.6	128	119	-7.0	-129	-134	3.9
整体升温	6615	24885	73.4	-4915	-15391	68.1	421	1620	74.0	-245	-1666	85.3
整体降温	4915	15391	68.1	-6615	-24885	73.4	245	1666	85.3	-421	-1620	74.0

表2 设铰前后桥墩弯矩及剪力计算结果

荷载	桥墩M _{max} (kN.m)			桥墩M _{min} (kN.m)			桥墩Q _{max} (kN)			桥墩Q _{min} (kN)		
	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)	设铰	未设铰	Δ (%)
恒载	9521	21344	55.4	-11128	-21315	47.8	878	495	-77.4	-617	-2055	70.0
收缩徐变	7383	34661	78.7	-9444	-34023	72.2	538	2481	78.3	-538	-3233	83.4
汽车荷载	7145	6730	-6.2	-6933	-6706	-3.4	734	852	13.9	-734	-714	-2.9
梯度升温	1719	5974	71.2	-1599	-5551	71.2	78	623	87.5	-78	-499	84.4
梯度降温	800	2776	71.2	-859	-2987	71.2	39	250	84.4	-39	-312	87.5
整体升温	15908	55911	71.5	-12806	-57009	77.5	881	5241	83.2	-881	-4025	78.1
整体降温	12806	-55911	122.9	-15908	57009	127.9	881	4025	78.1	-881	-5241	83.2

13.9%，负剪力峰值减少了2.9%，同样剪力值基数较小；但收缩徐变产生的正负剪力峰值分别增加了78.3%和83.4%；同样，温度作用使得桥墩内的剪力极大地增加，特别是梯度温度，均使得桥墩内的正负剪力峰值绝对值增大了87.5%。

3. 结论

通过上述对比分析，剪力铰的设置，使得梁体及桥墩的内力数值及分配发生了较大的改变，虽然由于各荷载作用产生的内力效应峰值所处的截面位置不同，但剪力铰的设置极大地减少了内力峰值，特别是极大的减小了收缩徐变、温度作用产生的效应。

计算结果表明，未设置剪力铰前，承载能力极限状态作用基本组合下，梁体最大弯矩及剪力发生在第4跨3#墩斜腿支点处，弯矩数值为-107139.2kN.m，剪力数值为-10059.4kN；桥墩最大弯矩及剪力发生在1#墩墩底，弯矩数值为137442.5 kN.m，剪力数值为-12996.6 kN。

设置剪力铰后，承载能力极限状态作用基本组合下，梁体最大弯矩发生在第1跨1#墩斜腿支点处，弯矩数值为76827.4kN.m，梁体最大剪力发生在第2跨1#墩斜腿支点处，剪力数值为-7667.2kN；桥墩最大弯矩发生在2#墩墩底，数值为-47748.2 kN.m，桥墩最大剪力发生在1#墩墩底，数值为-3587.6 kN。

对比两种结构体系，设置剪力铰后，荷载组合后梁体最不利截面最大弯矩减少了28.3%，最大剪力减少了23.8%；桥墩最不利截面最大弯矩减少了65.3%，最大剪力减少了72.4%。可见，剪力铰大大减小了梁体及桥墩的内力，特别是对于下部结构的优化作用十分明显，极大地减少了所需的基础工程规模，验证了设置剪力铰的

合理性。

结语

V形刚构桥作为连续刚构的演化桥型，是一个多跨连续梁和刚构的混合结构体系，兼有斜腿刚构和梁的力学特点。该桥型结构外观轻巧，线条流畅，美观大气，在具有景观要求的桥梁设计中较多采用。但由于该桥型结构为多次超静定结构，跨度、跨数、桥墩刚度等因素对其影响越加明显，设计中应采用合理的设计措施对结构进行优化。本文通过对华强沟水库环湖路跨湖桥两种结构体系的计算，对比分析了桥梁结构设置剪力铰前后在恒载、收缩徐变、活载、温度等作用下的内力区别，并列出了承载能力极限状态下的主要计算成果，验证了设置剪力铰的合理性。

参考文献

[1] 刘效尧, 徐岳. 梁桥(第二版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
 [2] 肖汝城. 桥梁结构体系 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
 [3] 郭威. 多跨拱形V墩刚构桥梁设计及影响因素分析[J]. 福建交通科技. 2021(07): 61-64+74.
 [4] 王少峰, 宋丽, 郭忆. 多跨连续V形刚构桥设计分析[J]. 山西建筑. 2010, 36(14): 316-317
 [5] 施文杰, 杨友安. 多跨拱形V墩连续刚构桥设计及影响参数分析[J]. 现代交通技术. 2014, 11(05): 19-22+61.
 作者简介: 任伟平(1978-), 男, 汉族, 工学博士, 高级工程师, 从事道路和桥梁的设计和科研工作。
 通讯作者: 王春寒(1980-), 男, 汉族, 工学硕士, 高级工程师, 从事道路和桥梁的设计工作。