

阳新高速公路黄河特大桥主桥设计

李宏亮¹, 徐珂², 刘海阳², 李卫国³, 金攀³, 魏勇³, 王超⁴

(1. 河南濮泽高速公路有限公司, 河南 濮阳 457000; 2. 中国河南财经政法大学;

3. 河南省第二公路工程有限公司; 4. 郑州交通建设投资有限公司)

摘要:濮阳至湖北阳新高速公路黄河特大桥全长 8 127 m, 根据河南省和山东省高速公路网规划及总体走向, 经防洪评价和影响论证, 规划黄河桥为Ⅳ级航道, 双向通航不小于 90 m, 单向通航不小于 45 m。由于黄河属于典型游荡性河段, 冲刷大, 桥位处最大冲刷达到 21 m, 桩长最大达到 100 m, 增加了抗震设防难度。因此, 经桥式方案比选, 结合抗震措施, 拟建新桥选用结构刚度好、抗震能力强的预应力混凝土箱梁桥式, 采用上、下行分离式桥梁。预应力混凝土连续梁桥在内陆河桥建设中, 具有很强的竞争优势, 是一种广泛使用的桥型。

关键词: 预应力混凝土箱梁; 连续梁桥; 桥位、桥式方案比选; 抗震设防; 结构设计

阳新高速公路黄河特大桥主桥长 2 240 m, 最大联长 1 120 m, 全桥共分 36 联。大桥跨径布置形式为 $(80+8\times120+80)$ m + $(80+8\times120+80)$ m 的预应力混凝土箱梁桥。这在同类桥梁中不多见, 且位于高烈度地区, 抗震设防难度大。考虑该黄河特大桥桥位、桥跨受控因素较多, 黄河特大桥桥位选择需满足河南省和山东省高速公路网规划及总体走向要求, 符合黄河水利、水文特点, 再加上主桥位河段为典型游荡性河段, 主河槽摆动大, 选择合适的桥梁形式是该项目的重点, 通过多种桥梁形式比较得到最优方案, 达到综合效益最优。

1 工程概况

阳新高速公路黄河特大桥全长 8.127 km, 时速 120 km/h。其中河南省境内 4.864 km, 山东省境内 3.263 km。孔跨布置为: 20×30 m + $(75+130+75)$ m + 55×50 m + $2\times(80+8\times120+80)$ m + 25×50 m + $(75+130+75)$ m + 24×30 m。其中: 北堤外引桥: 孔跨布置为 20 孔 30 m, 结合结构受力与行车舒适性两方面考虑, 分为 5 联, 每联为 4 孔 30 m。

推广过程中还存在诸多问题与困难, 完全实现桥梁工程全生命周期的 BIM 技术应用是一个长期的过程, 需要各阶段各参与方的通力配合与共同创造。但可以预见, 随着国家行业政策和技术的发展及软硬件的升级, BIM 的推广应用一定具有更加广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 关伟, 王奎涛. 浮山县丞相河特大桥桥型方案研究[J]. 山西交通科技, 2018(2).
- [2] 孙建诚, 蒋浩鹏, 朱双哈. 基于 BIM 技术的三维公路模型设计探讨[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019(1).

- [3] 汪彬. 建筑信息模型(BIM)在桥梁工程上的应用研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2015.
- [4] 王丽园, 陈楚江, 余飞. 基于 BIM 的公路勘察设计与实践[J]. 中外公路, 2016(3).
- [5] 元宇, 刘震豪, 史国刚, 等. 公路工程信息模型分类与编码现状分析[J]. 中国公路, 2018(9).
- [6] DB32/T 3503—2019 公路工程信息模型分类和编码规则[S].
- [7] 杨震卿, 宋萍萍, 宁娟利, 等. BIM 标准在企业中的应用与意义[J]. 建筑技术, 2016(8).
- [8] JTG F80/1—2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程[S].

收稿日期: 2021-03-30(修改稿)

基金项目: 河南省科技攻关项目(编号: 212102310289)

作者简介: 李宏亮, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: lihongguang369168@126.com

2 黄河特大桥主要技术参数标准

该工程黄河大桥设计使用年限为100年,工程结构的耐久性影响结构的正常使用,科学设计是确保耐久性的重要环节。黄河特大桥主要技术参数标准如下:

- (1) 设计荷载:公路—I级。
- (2) 设计洪水频率:特大桥 1/300。
- (3) 桥梁耐久性设计:结构物上部采用Ⅰ类环境,下部采用Ⅱ类环境。
- (4) 弹性模量: 1.95×10^5 MPa。
- (5) 张拉控制应力:1 395 MPa。
- (6) 抗拉强度设计值:1 260 MPa。

该工程作为高速公路跨黄河大桥,合理设计可以保护环境,节约资源。

3 桥位、桥式方案选择

黄河特大桥的桥位选择,在综合考虑各方面因素的基础上,制定了以下原则:①应符合区域高速公路网规划及总体走向要求,力求获得最佳的运输经济效益;②与濮阳市城市总体规划及该地区路网构架建设协调一致;③应有利于黄河抢险交通及黄河防洪工程的运用和管理,以及环保治理规划及其他(如国土、风景、文物)诸多因素。

3.1 桥位与主桥孔跨选择

3.1.1 黄河大桥桥位选择

桥位选择应考虑上下游黄河大桥合理分布,项目区内 K33+794~K41+275 路段两侧,河岸冲刷较严重,坍岸问题比较严峻,拟建新桥位处于典型游荡性河段,主河槽摆动大,决堤泛滥风险几率较高。因此,自1975年河道整治工程建成后,以连山寺工程联坝上延线与桥轴线交点为左岸起点,随着河槽逐步归顺,桥位河段的河势趋于稳定。依据河工动床模型试验结果及防洪影响评价,桥梁结构磁流变阻尼器半主动控制减震研究,强震作用下黄河特大桥减隔震体系振动台试验等,确定拟建桥桥位河段的主桥设计2联: $2 \times (80 + 8 \times 120 + 80)$ m = $2 \times 1\,120$ m;引桥设计:孔跨布置为25孔50 m,共分7联,孔距50 m。大桥工程技术要求黄河大桥桥位高村到陶城铺河段容许桥梁间距不小于5 km,K(坐标,下同)线桥位距上游 G106 东明黄河大桥 14.8 km,距下游规划 S304 黄河大桥 12 km;AK(A

坐标,AK 坐标距,下同)线桥位距上游 G106 东明黄河大桥 13 km,距下游规划 S304 黄河大桥 13.8 km。因此两个桥位都满足要求。

3.1.2 桥址所处河道的稳定性

主桥选址 K 线桥位和 AK 线桥位都位于张阎楼工程和连山寺工程之间,K 线桥位与治导线夹角为 4° ,AK 线桥位与治导线夹角为 2° ,满足要求。

3.1.3 高速路网的良好衔接

黄河特大桥建设工程起点接濮范高速公路,路线向南,分 K 线与 AK 线。AK 线于濮阳市晁庄北上跨黄河北大堤,路线偏东南,于菏泽市牡丹区西李庄集乡高寨村西南跨越黄河南大堤,满足向南接荷宝高速公路要求。

3.2 主桥桥式方案比选

3.2.1 连续梁桥方案对比

项目主桥全长 2 240 m,桥宽为 1×35.06 m,主墩实际高度为 15~30 m,联长又长又多,连续刚构桥较难适应。因此桥型方案选择主要考虑连续梁桥和部分斜拉桥,连续梁桥方案中又对预应力混凝土箱梁和波形钢腹板箱梁进行对比。对于内陆河大跨度桥梁而言,预应力混凝土连续梁桥无疑是最佳选择。基于此,以下对 3 种主要桥式方案进行研究比较。

(1) 方案 1。主桥桥跨布置为 $2 \times (80 + 8 \times 120 + 80)$ m,预应力混凝土连续梁桥设计。

(2) 方案 2。主桥桥跨布置为 $2 \times (80 + 8 \times 120 + 80)$ m,波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥设计。

(3) 方案 3。主桥桥跨布置为 $2 \times (80.5 + 7 \times 137 + 80.5)$ m,预应力混凝土部分斜拉桥设计,采用整幅式桥面。

3.2.2 3 种主桥桥式方案比选

3 个桥型的主桥长度和跨径组合数量相同,经分析比较 3 种方案各有优缺点。方案 1 优点为设计施工经验成熟、后期维护量小、造价较低。缺点为:梁体略显笨重、上部重量大、不利于结构抗震,跨径大则跨中存在下挠风险;方案 2 和方案 3 优点为梁体优雅舒展、轻盈美观、上部重量轻,有利于结构抗震、解决了腹板开裂问题,耐久性好、工期短。缺点为:新型结构,缺少熟练施工队伍、存在后期换索和涂装问题。3 种方案综合比较见表 1。

综合表 1 的 3 种桥式方案跨径布置研究,最终采用方案 1 跨径组合: $2 \times (80 + 8 \times 120 + 80)$ m 的预应力混凝土梁式桥。

表 1 3 种桥式方案比较

| 方案 | 造价/ 万元 | 景观效果 | 结构整体刚度 | 施工难度 | 工期/ 月 | 后期养护重点 |
|-----------------|-----------|------|-----------------------------|-----------|----------|-------------|
| 预应力混凝土组合梁桥 | 84 560 | 略显笨重 | 上部重量大,不利于结构抗震,存在跨中下挠,膈板开裂风险 | 成熟 | 42 | 维护量小 |
| 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥 | 84 048 | 轻盈美观 | 上部重量轻,有利于结构抗震,耐久性好 | 缺少熟练施工队伍 | 41 | 存在后期换索和涂装问题 |
| 预应力混凝土矮塔斜拉桥 | 88 100 | 气势雄伟 | 需要加宽桥面 | 较成熟,施工较繁琐 | 43 | 存在后期换索问题 |

4 结构设计

考虑阳新高速公路黄河特大桥其桥位处黄河河段,属于典型的游荡性河流,桥位、桥跨受控因素较多。故此,阳新高速公路濮阳段黄河大桥河道范围内梁底高程均大于防洪要求的梁底高程 66.93 m;跨左、右岸大堤处设计最低梁底高程分别为 72.92、72.80 m;主桥最低梁底高程为 72.05 m,高于通航要求的最低梁底高程 71.93 m,满足通航要求。

根据大桥各部分的孔跨布置、分联情况、结构形式,并综合考虑堤内外引桥之间的相互匹配及便于施工的原则,结合黄河特大型桥梁抗震设防的要求,确定了濮阳至湖北阳新高速公路黄河特大桥 8 127 m 总体布置,黄河桥由小桩号向大桩号方向依次由北堤外引桥、北跨大堤桥、北堤内引桥、主桥、南堤内引桥、南跨大堤桥、南堤外引桥 7 部分组成,共计 36 联,设 37 道伸缩缝。依据黄河特大型桥梁耐久性与安全性要求和河道管理规定,阳新高速公路濮阳段黄河大桥桥位断面堤防设防流量为 20 000 m³/s,相应现状断面洪水位为 60.97 m,2067 年设计洪水位为 65.00 m。与此相对应,阳新高速公路濮阳段黄河大桥左岸大堤~右岸大堤孔跨布置为(75+130+75) m+55×50 m+(80+8×120+80) m+(80+8×120+80) m+25×50 m+(75+130+75) m,设计主桥长 2 240 m,基本满足主河槽摆动宽度要求。主桥孔跨为 120 m(配跨 80 m),两岸滩地孔跨为 50 m,桥梁孔跨布置基本满足河段防洪、防凌要求。

4.1 减隔震试验

目前,现有研究多是分析流速和含砂量对混凝土的冲蚀规律,忽略桥墩构型对含砂水流流态的影响。为满足黄河特大型桥梁抗震设防目标的要求,在开展隔震桥墩支座减震试验的前提下,同期还进行了高烈度

地区大跨长联预应力混凝土连续梁桥减隔震技术研究。该试验桥墩模型采用与原型桥墩相同的材料制作,模型混凝土为 C50,钢筋采用 HRB335 钢筋,桥墩支座构造按照 9 度设计,经比较相似关系以及原桥墩的荷载试验分析,得到不同隔震方式对桥墩墩顶加速度、桥面加速度、墩顶位移、桥面位移、桥墩墩顶剪力、桥墩墩底剪力、墩底混凝土应变和墩底钢筋应变的影响。表 2 为强震作用下黄河特大桥减隔震体系振动台相似比试验数据。

表 2 强震作用下黄河特大桥减隔震体系振动台相似比试验数据

| 参数 | 相似系数符号 | 计算公式 | 相似比 |
|------|--------------|---------------------------|-----------|
| 尺寸 | S_L | | 1/50 |
| 弹性模量 | S_E | | 1.0 |
| 加速度 | S_a | | 1/0.4 |
| 质量 | S_m | $S_m = S_E S_L^2 / S_a$ | 1/250 |
| 时间 | S_t | $S_t = (S_L / S_a)^{0.5}$ | 0.2 |
| 频率 | S_f | $S_f = 1 / S_t$ | 5.0 |
| 速度 | S_V | $S_V = (S_L S_a)^{0.5}$ | 0.5 |
| 位移 | S_u | $S_u = S_L$ | 1/50 |
| 应力 | S_σ | $S_\sigma = S_E$ | 1.0 |
| 应变 | S_ϵ | $S_\epsilon = 1$ | 1.0 |
| 力 | S_F | $S_F = S_E S_L^2$ | 1/2 500 |
| 刚度 | S_k | $S_k = S_E S_L$ | 1/50 |
| 密度 | S_ρ | $S_\rho = S_m / S_L^3$ | 4.0 |
| 能量 | S_{EN} | $S_{EN} = S_E S_L^3$ | 1/125 000 |
| 阻尼系数 | S_c | $S_c = 1$ | 1.0 |

4.2 模型建立

利用 BIM 技术进行协同设计,建立有限元计算模型如图 1 所示。

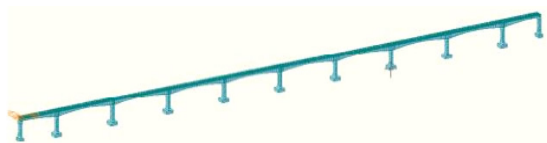


图1 主桥有限元模型

图1主桥采用“m”法(m 值按3倍考虑)计算得到承台底刚度矩阵,并将此刚度矩阵作用于该模型中承台底的边界条件。跨大堤桥采用土弹簧模拟桩土效应。

摩擦摆支座边界采用一般链接模拟。基于摩擦摆支座荷载一位移滞回曲线(图2)校核计算方案,在计算精度满足要求的前提下,确定流固耦合计算方法,分析桥墩和承台的冲蚀损失。

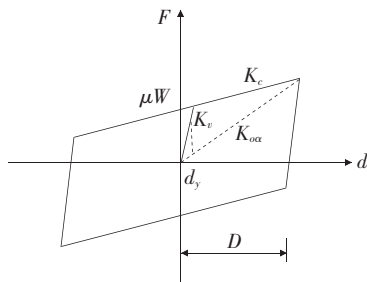


图2 摩擦摆支座荷载一位移滞回曲线

4.3 抗震计算

跨大堤桥计算模型采用 Midas/Civil(V8.3.5)建模,采用“m”法(m 值按3倍考虑)计算桩基弹簧刚度。

图3为使用阶段正截面混凝土压应力验算,根据 Midas 结果计算波形钢腹板最大剪应力为 $143 \text{ MPa} < 155 \text{ MPa}$ 。基础、盖梁、梁体以及墩柱的抗剪能力的保护结构设计,经使用阶段正截面混凝土压应力验算,各项计算结果均满足工程要求。

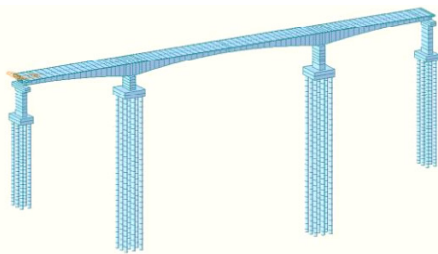


图3 使用阶段正截面混凝土压应力验算

4.4 下挠机理

周期荷载作用下大跨连续梁长期下挠机理研究,采用 $1:100$ 的模型试验,在振动周期(50 Hz)荷载作用下,定期连续观测混凝土应变(徐变)、预应力钢筋应

力(松弛)、预应力筋滑动、挠度、基频等参数,理清连续梁长期下挠的原因及机理,分析该类桥型病害(底板、腹板开裂)成因(考虑设计改进措施,对比验证)。因为混凝土材料组成直接关系到桥梁耐久性及安全性,所以对截面突变、拟对角隅、应力集中部位及锚固块等部位进行合理的构造配筋,以免发生裂缝。

5 结语

由于受线路走向和桥位限制,阳新高速公路濮阳段黄河大桥建成后桥位下游附近一定程度上将会改变水流流态和水流方向,可能引起主流向左摆动。依据桥位、桥式方案选择比对,拟建新桥桥位选在阳新高速公路濮阳段主桥左侧(马海村、段寨村之间),位于黄河水文站下游 22 km , AK 线桥位与治导线夹角为 2° ,其桥梁走向与河道流路基本正交,桥位满足选址设计要求。按照“技术先进、安全可靠、适用耐久、经济合理、美观和有利环保”的要求,该桥主桥的跨径与布跨特点,重点考虑预应力混凝土连续梁桥、波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥和部分斜拉桥 3 个方案。

跨黄河大跨长联连续梁桥防冲抗震研究试验表明,桥墩减隔震效果是确保黄河特大桥寿命及安全的关键。主桥与跨大堤桥的引桥桥梁上、下部结构之间,通过减隔震支座连接,以达到隔震与耗能的作用,确保结构在使用年限的寿命安全。同时,主桥上部结构采用变截面连续梁,流线形箱梁增加了桥梁的轻盈感。下部结构采用薄壁空心墩,桥墩侧面呈圆弧状,上下部侧面平曲结合,局部对比,既不失新意又和谐统一。

参考文献:

- [1] 陈进昌,金令,郭煜. 郑济高铁黄河特大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2020(3).
- [2] 翟家瑞. 黄河上桥梁建设防洪方面的几个主要技术问题[J]. 人民黄河,2006(10).
- [3] 贺耀北,邵旭东,龚斌,等. 官新高速公路马路口资水大桥主梁方案比选[J]. 桥梁建设,2019(6).
- [4] 赵彬强. 武汉市姑嫂树路跨铁路桥设计方案比选[J]. 桥梁建设,2015(2).
- [5] 詹建辉,彭晓彬. 大跨度组合梁斜拉桥结构设计方案研究[J]. 桥梁建设,2016(4).
- [6] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] 赵人达,贾毅,占玉林,等. 强震区多跨长联连续梁桥减隔震设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2018(5).