

济南北跨桥隧工程技术系列丛书

凤凰黄河大桥 建造关键技术

许为民 © 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

济南北跨桥隧工程技术系列丛书（凤凰桥）

编委会

主 编 许为民

副主编 李盘山 王德怀

编委（按姓名拼音排序）

常付平 陈 亮 丁 宁 付 斌 弓 正 郭继凯 韩景磊

何 畏 贺 宁 江建秋 姜宏丽 李春林 李翠娟 李革新

李 鲁 李 鹏 李文豪 刘春晖 刘春香 刘春祥 刘松梅

罗 栋 米晓婷 牛凯悦 欧光鲲 齐珍珍 任雅辉 苏秀丽

孙海涛 孙世强 唐茂林 陶延军 王 彬 王德怀 王 冬

王 栋 王 伟（男） 王 伟（女） 王宇峰 吴在雄

徐 静 徐艳艳 易善德 尹 慧 尤 田 张国平 张国瑞

张洪金 张玲玲 张 宇 张玉奇 张元凯 赵世超 钟建敏

周 宁 朱如俊

前言 Preface

“黄河西来决昆仑，咆哮万里触龙门。”这首出自李白的诗句精准地将我国母亲河——黄河的汹涌描写了出来。千百年来，我国人民不断尝试着征服黄河这一条九曲黄龙。20世纪60年代末，山东境内第一座跨黄河大桥——平阴黄河大桥在极为艰苦的条件下成功建设。到今天，本书的主角——济南凤凰黄河大桥的成功建设，其间几十年的沧海桑田标志着一代又一代的路桥人艰苦奋斗的身影。

济南黄河凤凰大桥由山东省济南城市建设集团投资，上海市政总院设计，中交二航局、中铁宝桥集团有限公司联袂建造。经过多年的研究与建设，于2022年1月18日通车运营，推动了济南市向北发展的进程，也表现了济南人民与时俱进、大气开放的精神。

济南凤凰黄河大桥工程长度约为6.683 km，项目总投资约63.27亿元人民币，是目前世界上同类型桥梁中跨径最大、宽度最大的桥梁。大桥分为跨南水北调东明渠和邯胶（邯济、胶济）铁路联络线的跨线引桥和跨黄河段桥梁。大桥跨黄河段桥梁由主桥、水中引桥、跨大堤引桥、陆上引桥四部分组成；主桥采用三塔四跨自锚式悬索桥主桥，总长约1332 m，按照双向八车道一级公路设计，设计速度高达60 km/h，大桥公轨合建，采用“公轨同层，轨道居中”的设计方案。

济南凤凰黄河大桥的施工技术克服了当地不良的地质条件、超宽超重的大悬臂钢箱梁顶推施工难、空间索面主缆线形控制难等一系列建设难题，在建设过程中采用了多项先进工艺技术。这些先进的工艺技术依托济南凤凰黄河大桥的工程建设凝结成了值得行业内参考的共性技术，形成了具有鲜明特色的大跨悬索桥建设的管理与技术成果，提高了我国在黄河流域与不良地质条件下的桥梁建设技术，增强了我国在国际桥梁建设领域的竞争力与认可度。

本书着重介绍了济南凤凰黄河大桥设计、施工、监控三个方面关键技术的创新与应用，以期为即将规划建设的同类型桥梁或其他类似工程提供有益的借鉴，为我国建设桥梁强国、交通强国贡献出自己的力量。

限于编者水平，书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

2022年8月27日

目录 Contents

第 1 章 绪 论

1.1 项目背景.....	002
1.2 项目区域路网现状与规划.....	002
1.3 自然地理环境.....	005
1.4 项目建成的意义.....	014

第 2 章 全线桥涵设计概况

2.1 桥梁总体设计.....	017
2.2 主桥设计概况.....	022
2.3 水中引桥设计概况.....	029
2.4 跨大堤引桥设计概况.....	031
2.5 陆上引桥设计概况.....	033
2.6 本章小结.....	035

第 3 章 三塔自锚式悬索桥结构设计

3.1 凤凰桥总体布置.....	037
3.2 空间缆索系统.....	038
3.3 钢-混组合加劲梁.....	055
3.4 钢-混组合结构混合桥塔.....	064
3.5 下部结构.....	069
3.6 本章小结.....	073

第 4 章 三塔自锚式悬索桥上部结构施工方案

4.1 桥塔施工	075
4.2 缆索系统施工	089
4.3 加劲梁与桥面板施工	102
4.4 本章小结	120

第 5 章 主桥下部结构施工方案

5.1 钻孔桩施工	123
5.2 承台施工	130
5.3 墩柱施工	143
5.4 本章小结	151

第 6 章 钢箱梁智能化-实时化顶推关键技术

6.1 钢箱梁双向顶推提梁站	153
6.2 智能化全自动顶推施工技术	154
6.3 信息化钢箱梁顶推实时监控	155
6.4 本章小结	155

第 7 章 三塔自锚式悬索桥上部结构施工监控技术

7.1 总体概况	158
7.2 上部结构施工监控方案	160
7.3 施工监控方案计算	169
7.4 A 形桥塔施工监控	197
7.5 空间主缆架设施工监控	200
7.6 索夹吊索安装控制	210
7.7 主梁成桥应力与线形	216
7.8 本章小结	217

附表	218
----	-----

参考文献	219
------	-----

Chapter 1

第 1 章 绪 论

1.1 项目背景

2021年10月8日，中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》，将济南定位在国家战略发展大局、生态文明建设全局、区域协调发展布局中的高点，并提出“支持济南建设新旧动能转换起步区”，赋予了济南前所未有的战略牵引力、政策推动力和发展支撑力。济南的发展迎来了新的曙光。

新中国成立后，济南市始终是中国东部沿海经济大省——山东省的省会，是全国副省级城市之一、环渤海地区南翼的中心城市，是全省的政治、经济、文化、教育、交通和科技中心，是山东半岛城市群和济南都市圈的核心城市。作为我国历史文化名城之一，济南又别名泉城，以泉水遍布、清冽甘美闻名于世。境内有趵突泉、黑虎泉、珍珠泉、五龙潭、百脉泉五大泉群，大明湖、千佛山等文化遗址，自然风景秀丽，名胜古迹众多。在行政区划上，济南辖历下、市中、槐荫、天桥、历城、长清、章丘、济阳、莱芜、钢城十区和平阴、商河二县。截至2020年7月，全市常住人口921万，户籍人口806.7万。如此庞大的人口基数不仅给济南市的发展带来了无穷的潜力，同时也带来了巨大的挑战。

早在2003年，济南就提出北跨战略，希望进一步拓展城市空间。而北跨意味着将面临跨越黄河这一条巨龙的阻碍，因此在2006年也得到了“在近期济南市不宜在北部地区进行大规模的开发建设，而应以加强跨河交通、防洪等基础设施建设为主”的发展意见。

为了加快北跨战略的实施，济南在黄河流域大兴土木，先后修建了建邦黄河大桥、济南黄河大桥等工程，为北跨战略奠定了坚实的基础。但随着人口基数的不断膨胀，交通运输压力也越来越大。目前在济南境内，沟通黄河北岸的通道基本集中在市区中部，东西两边通道偏少，交通拥堵严重，黄河南北过河交通压力极大。因此在黄河上建立大型过河通道成为北跨战略的重中之重。

在强烈的交通需求之下，济南凤凰黄河大桥得以批准立项建设。济南凤凰黄河大桥的建设体现了济南向北发展的艰辛历程，同时也是济南“携河跨北”发展战略的重要一环。济南凤凰黄河大桥的建设意味着经过19年的漫长等待，济南市的北跨战略终于迎来了发布与呼应，济南的城市建设从“大明湖时代”迈向了“黄河时代”，意义重大。

1.2 项目区域路网现状与规划

1.2.1 区域路网现状

济南凤凰黄河大桥坐落在黄河河道之上，东起荷花路，上跨黄河河道，西至G220国道。项目区域内道路网发达，与本项目相关的主要道路有青银高速公路、济广高速

公路、济乐高速公路、国道 G220、国道 G104，如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 沿线现有道路一览表

序号	道路名称	横向交叉道路概况	备注
1	青银高速公路	既有高速公路，双向 6 车道，路基宽度 40 m，设计速度 120 km/h，沥青混凝土路面，路况良好	
2	济广高速公路	既有高速公路，双向 4 车道，路基宽度 25 m，设计速度 120 km/h，沥青混凝土路面，路况良好	
3	济乐高速公路	既有高速公路，路基宽度 35 m，双向 6 车道，设计速度 120 km/h	
4	国道 G220	既有一级公路，路基宽度 34 m，双向 6 车道，设计速度 80 km/h	
5	国道 G104	既有公路，双向 2~6 车道，设计速度 40~100 km/h	东段升级改造

凤凰黄河大桥的建成不仅对完善区域规划路网、提高路网运输能力、改善区域交通出行环境有着巨大作用，且对推动济南新旧动能转换起步区的建设、拓展城市发展空间以及带动沿河经济的发展有着重要意义。

1.2.2 跨黄河通道现状

济南地处黄河下游，黄河济南段全长 183 km，上起平阴县东阿镇，下至济阳区仁凤镇。在济南凤凰黄河大桥建成前，黄河以北地区与济南市区跨黄通道共有 10 处，包括京沪高铁、津浦铁路 2 座铁路桥，建邦黄河大桥、济南黄河大桥、济南黄河三桥、济阳黄河大桥 4 座公路桥，以及泺口浮桥、章丘胡家岸浮桥、东郊浮桥、东城浮桥 4 座浮桥，另外 2 座桥梁正在建设中。

而未来济南市将形成 27 处黄河通道布局，主城区过黄通道间距缩短到平均 3 km，在所有黄河沿线城市中居首位，为深入推动黄河流域生态保护和高质量发展提供了坚实的交通保障。

1.2.3 存在的问题

1. 区域内部路网发展不够完善，制约经济社会发展

在项目影响区域内的主骨架路网中，南北以青银高速公路、国道 104 等为主线，东西以济广高速公路、国道 G220 为主线。济南市路网虽然形成了一定规模，但是还不够完善，尤其是黄河南北两岸近河区域路网稀疏，规划路网尚未形成。济南市的南北向联系由于受到黄河等自然条件的限制，尽管区域内拥有济南黄河三桥、济南黄河大桥，但是与黄河北岸的联系仍然缺少必要的交通通道，阻碍了济南向黄河北岸发展的

步伐，从而制约了黄河以北地区区域经济社会的发展。

2. 现有桥梁承受较大交通压力，难以满足未来交通需求

目前区域内济南市与黄河以北地区的联系主要是济南黄河三桥和济南黄河大桥。由于济南黄河三桥承担过境交通，黄河两岸间的交通主要依赖济南黄河大桥。随着济南市经济社会的快速发展，以及“携河发展”理念的贯彻，济南市势必大力发展黄河以北地区。城市发展，交通先行，跨黄河两岸的交通量将有较快的增长，这势必给现状跨黄河大桥造成较大的交通压力。从现状桥梁运营结果看，已然出现常态化拥堵现象，影响了交通通行能力的发挥，难以满足未来交通需求，进而会制约经济社会的发展。

3. 黄河北岸地区开发缺少有效便利的道路交通支持

济南市黄河北岸整体还是“处女地”，拥有较大发展潜力，而由于区域内两岸沟通的城市桥梁仅有济南黄河大桥，交通出行极为不便，缺少直接便利的跨黄河通道，制约了黄河北岸地区的发展。

1.2.4 区域路网规划

根据《济南市国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》内容，为了拓展城市发展空间和加速黄河北地区崛起，变“跨河发展”为“携河发展”，促进黄河以“城中河”功能定位融入城市发展格局，就需要调整黄河北岸现有国道布局，适当提高跨河交通设施规划密度，大力发展跨河公共交通。同时要健全基础设施体系就需要坚持基础性、先导性、战略性方向，突出智能化、网络化、现代化，加快构建功能完善、立体衔接、便捷高效、安全可靠的基础设施体系，为经济社会发展提供有力支撑。

首先要构建综合交通体系，结合区域性物流中心建设，完善对外交通网络，构建以济南为中心，连接京津冀、长三角、中原地区和山东半岛的综合交通网络，强化全国性路网枢纽作用。铁路，进一步优化济南铁路枢纽布局，逐步形成“客内货外”运输格局，抓好济青高铁、石济客专、济郑客专、聊泰铁路以及城际铁路等重点项目，积极推进济（南）昆（明）国家对内对外大通道建设，“十三五”时期新增铁路营业里程 200 km。实施公路安全生命防护工程，推进济青高速扩容、济南至东营高速、济南至泰安高速、青兰高速济南段、绕城高速大东环及西环线、济乐高速南延等项目建设，抓好长清黄河大桥、济齐黄河大桥、济章黄河大桥等项目建设，新建和改扩建高速公路 189 km，新建和改建普通国省道 165 km。加快农村公路建设步伐，提高等级水平和通达能力，完成农村公路建设改造 1600 km。航空，实施济南机场北指廊及第二平滑道、西航站区和西飞行区项目，增强区域集散功能，积极开辟国内外航线，到 2020 年旅客吞吐能力达到 1500 万人次、货邮吞吐能力 15 万吨，规划建设商河通用航空产业基地。

水运，加强水源调度和航道整治，积极推进小清河、徒骇河通（复）航。

根据“十三五”交通运输规划，2020年，济南公路网总里程达到13 658 km，省会城市群经济圈形成“1小时交通圈”，建成市域“一环十射”高速公路网，国省干线道路等级不断提高，农村公路通达所有建制村和新型农村社区，公路路面质量显著提高。积极推进小清河济南段复航工程，中心城区公共交通站点500 m全覆盖，形成能力充分、结构合理、衔接一体、养护水平全省领先的基础设施网络。

保障更有力、服务更优质、设施更完善的城际客运网络全覆盖，城市公交出行占机动化出行总量的60%以上，构建以快速公共交通（BRT）为骨干、常规公交为主体、慢行交通为延伸的一体化城市交通体系，基本实现城乡客运一体化，所有建制村基本通客运班车，镇村公交全覆盖。安全监管和应急能力显著增强，安全运营水平显著提升。人才素养和精神文明建设水平显著提升，交通运输法治能力显著增强。

根据济南市城市综合交通体系规划等，主要客运枢纽包括济南站、济南西站、新东站、遥墙机场，货运枢纽包括董家镇、桑梓店、董家庄。济南市域内铁路分为高铁、城际、普铁三层次，铁路线网规划为“十四射二十九线”。公路网规划“二环十一射”高速及国省道，以济南为起点向全省辐射。规划“三横四纵”快速路系统、“六横十四纵”主干路系统。同步完善次干路系统，并在不同功能区域给出不同指标的支路网。

1.2.5 拟建项目与路网关系

目前与黄河北岸沟通的过黄通道主要集中在市区中部，东西两侧过黄通道偏少，导致黄河南北过河交通压力极大，市民出行时间较长。济南凤凰黄河大桥凤凰路北延跨黄河通道位于济南市中心城区东北部，大桥设计为双向八车道，具有较强的通行能力，同时本项目沿线有邯济、胶济铁路联络线以及城市轨道交通，通过本通道的建设，各国省干线及市政路网可快捷地到达新东站，使城市道路、公路与铁路形成整体网络，大大提高其交通运输能力。根据规划要求，本通道需预留轨道交通远期一起跨越黄河的可实施性。因此，本项目总体布置方案需充分考虑轨道交通的影响，并做好其远期实施的可行性。

1.3 自然地理环境

1.3.1 地形、地貌

济南市位于山东省的中部，地理位置介于北纬 $36^{\circ}02'$ ~ $37^{\circ}54'$ 、东经 $116^{\circ}21'$ ~ $117^{\circ}93'$ ，南依泰山，北跨黄河，地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上，地势南高北低。地形可分为三带：北部临黄带、中部山前平原带、南部丘陵山区带。

北部有燕山期侵入的灰长岩体分布，形成华山、确山、卧牛山等孤山；中部为山前倾斜平原，绝对高程一般为 25~50 m；南部为绵延起伏的山区，泰山山脉走向近东西，山势陡峻，深沟峡谷，绝对高程为 500~600 m，最高峰为南部西营镇梯子山，地面标高 975.8 m。低境内有黄河、小清河、海河三大水系，属暖温带大陆性季风气候区。四季分明，日照充足。

按地貌成因可将济南市分为三个主要地貌单元，即侵蚀低山、剥蚀丘陵和堆积平原。侵蚀低山区，主要由泰山群变质岩组成，海拔 500~988.8 m，切割深度为 200~500 m，主要分布在长清、历城、章丘的南部和章丘的东北部；剥蚀丘陵区，主要由寒武系、奥陶系组成，海拔 50~500 m，切割深度在 200 m 以内，分布在侵蚀低山区的外围，山麓分布有残积物、坡积物；堆积平原区，由山前冲积、洪积形成的倾斜平原和黄河冲击形成的平原组成，同时分布有辉长岩体形成的一些规模不大的零星山体，如华山等，主要分布在剥蚀丘陵区的外缘，地形较为平坦。

凤凰黄河大桥位于济南市黄河干流上，地貌上属黄河冲积平原，地形较为平坦，高程处于 23.73~31.42 m。

黄河右岸（南岸）大堤外侧地形较平坦，地表多民居、鱼塘、林地、耕地等，高程处于 20.01~33.40 m；右岸（南岸）大堤为堤顶沿黄公路，高程为 35.20 m 左右，大堤外侧为淤背区，宽 100~120 m，为杨树林地，高程为 32.36~33.49 m。

两黄河大堤以内的滩地多为耕地、林地，大堤之间距离约 2 290 m，高程为 23.27~29.65 m。黄河流向自西流向东，河床（主河槽）宽度约 617 m。两侧漫滩宽窄不一：右岸宽 702~972 m，为耕地、林地及少量藕塘；左岸宽 796~1000 m，为耕地、林地。

黄河左岸（北岸）大堤外侧地形较平坦，地表多耕地等，高程处于 20.43~31.38 m；左岸（北岸）大堤为堤顶沿黄公路，高程为 35.25~35.36 m。

1.3.2 工程地质条件

1. 工程地质概况

由于济南市三个地形带的掩体和土体工程地质特性差异较大，可按照地形地貌特征以及相应区域岩土的物理力学特征等，对济南市进行工程地质分区，可分为中南部低山丘陵工程地质区与中北部冲积平原工程地质区。本工程项目位于中北部冲积平原工程地质区。

根据勘探及地质测绘资料，工程区勘探深度范围内的地层主要为第四系覆盖层，上部为第四系全新统冲积物（ Q_4^{al} ）、冲洪积物（ Q_4^{al+pl} ）；下部为新近系上新统冲洪积物（ Q_3^{al+pl} ），岩性为粉砂、粉土及粉质黏土，分布较稳定；表层多覆盖人工堆积（ Q_4^m ）的杂填土、素填土、冲填土等。

2. 区域地质构造背景

济南市在大地构造位置上处于华北板块 (I 级), 其中南部的鲁中隆起区属于鲁西隆起的一部分, 北部济阳拗陷区属于华北拗陷的一部分 (II 级)。区域上是一个以古生代海相及海陆交互相地层为主体的单斜构造, 倾向 N 至 NE。

测区位于鲁中隆起北翼单斜构造体北端与济阳拗陷相接的中间过渡地带。场区南部分布有寒武系的页岩、灰岩与奥陶系的灰岩等岩体, 北部为辉长岩-闪长岩侵入体, 是受中生代燕山期构造运动影响, 在白垩纪早期发生的较大规模中~基性岩浆, 以岩盖形式侵入单斜的奥陶系灰岩中形成的。在经历了漫长的风化剥蚀作用后, 济南北部的辉长岩-闪长岩侵入体大部分直接被第四系覆盖隐伏于地下, 少数火山口处的岩体以低山残丘的形式出露地面。而在济南南部仍多以侵入体的形式存在于灰岩中。受新生代喜马拉雅运动影响, 在其初期阶段南部地区隆起, 缺失了新近系, 进入第四系后局部下降并接受了卵石、黏性土和粉土等松散堆积物, 全新世以来南部局部地带又趋向上升, 第四系厚度一般小于 30.0 m, 而北部受济阳拗陷的控制持续下降, 形成的第四系厚度往往大于 80.0 m。

3. 拟建场区主要断裂及活动性

测区西部约 1 000 m 的泺口西村处有隐伏的千佛山断裂通过, 断裂走向 NNW, 倾向 SW, 倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 垂直断距为 100 ~ 400 m, 断裂破碎带宽 5 ~ 20 m, 据省地震局的最新研究资料, 为非全新世活动断裂。

4. 工程地质条件评价

测区为黄河冲洪积平原与山前冲洪积倾斜平原叠交地带, 局部微地貌单元系黄河河床, 地形较平坦, 第四系覆盖层厚度较大, 主要为第四系全新统 (Q_4) 冲洪积黏土、粉质黏土、粉土和新近系上新统 (Q_3) 黏土、粉质黏土、粉土和中砂。第四系全新统人工填土、黏土、粉质黏土、粉土为松软土, 孔隙比大, 含水率高, 压缩性高, 承载力低, 需要采用换填或加固处理。测区内无不良地质。

1.3.3 河道条件

济南市域内水文主要为河流、湖泊、水库以及泉水。市内地表水系有三个, 分别为黄河、小清河以及海河。黄河主流与其支流属于过境河流, 而小清河属于济南市本土河流。市内主干河流总长约为 1 048 km, 平均河网密度约为 13%。

1. 河道概况

黄河下游泺口至利津河道为 1855 年 (清咸丰五年) 黄河在河南省兰考县铜瓦厢决口夺大清河改道后形成。经过多年的治理, 已基本成为工程控制的弯曲性河段, 在两

岸险工、控导工程共同作用下,河湾不能自由发展,摆动幅度相对不大,是黄河治理较好、较稳定的河段。冻口—利津河段河道长 176.0 km,堤距 600~5 100 m,河槽宽 400~1 200 m,河床平均纵比降为 1.0‰,河道弯曲系数为 1.08。桥位断面所在后张庄至传辛庄险工河段河道长 27.6 km,堤距 650~3 000 m,河槽宽 300~900 m,滩地宽 150~2 250 m,河道纵比降为 1.0‰,河道弯曲系数为 1.1,是典型的工程控制的弯曲性河段,水流基本受控于险工、控导工程,随流量大小的改变河势上提下挫。

从长时间看,黄河水少沙多,河床逐年淤积抬高,是著名的“地上悬河”。20 世纪 80 年代以来,由于漫滩洪水减少,致使主槽淤积多,滩地相对淤积较少,逐渐形成“二级悬河”。桥位河段滩面一般高出背河地面 3~5 m,嫩滩高于二滩,滩面横比降约为 1/600,且附近断面有明显的堤河。1965—1973 年、1986—1999 年两时期该河段曾发生明显的淤积,河槽淤积抬高使平滩流量减少,遇中常洪水就漫滩。如 1996 年,冻口站流量 3 000 m³/s 时就发生了漫滩;2002 年黄河小浪底水库首次调水调沙试验,冻口站 2 000 m³/s 流量嫩滩即开始漫水。经过 2002—2015 年的调水调沙,平滩流量明显增加。2009 年调水调沙期间,该河段上下游水文站最大流量分别达到 3 800 m³/s(冻口水文站)和 3 730 m³/s(利津水文站),未出现漫滩现象。

2. 河道演变

(1) 河道历史演变。

桥位处附近河段河道为 1855 年黄河在铜瓦厢决口夺大清河后而形成的。改道初期,因黄河来水来沙多,原大清河河道难以容纳,河床发生剧烈冲淤变化,河势变化较大,多处发生自然截弯。河槽逐渐淤积抬高后,河势发生游荡,也常有局部突然的变化。以后由于工程约束控制作用逐渐增大,限制了河湾自然发育,来水来沙条件及河势虽有变化,但主槽基本保持了现在的河道轮廓。

拟建工程所在地后张庄—传辛庄河段,长 27.61 km,是受河道整治工程控制的弯曲性河道,两岸险工、控导工程鳞次栉比,整治工程密度较大,现有险工 9 处、控导工程 7 处,计坝岸 406 段,工程长度 19.38 km。除后张庄险工始建于 1925 年外,其余 8 处险工均始建于 1911 年以前。这些险工当时为防御局部堤段被水淘刷,顺堤线走向抢险而成。新中国成立后,为增加险工的控导能力,在其上下首次增设新的坝岸,并调整了部分坝的布置,形成目前的险工规模;同时为防止滩岸坍塌,固定中水河槽,配合险工控导主流,根据河势的变化,1950 年后逐步修建、完善控导工程,使之与险工互相配合,逐步缩小主流的摆动范围,使得该河段的流路已基本得到控制。

(2) 河道横断面变化。

为了解黄河下游河道河势演化、河道冲淤幅度及分布,1951 年以后陆续开展了淤积断面测量工作,并于 1965 年开始对下游河道断面测验进行了调整和对测量时间进行了统一部署;为提高小浪底水库投入运用后黄河下游河道冲淤量计算精度,1998 年后

对下游测验断面陆续新增许多测验测量,桥位河段后张庄至传辛庄段共分布有14个测验断面,其中后张庄、霍家溜、王家梨行及传辛庄4个断面观测序列较长,时间长达50年。拟建桥位选址位于霍家溜与王家梨行两黄河河道断面之间,霍家溜和王家梨行两统测断面均处于控制性节点束窄段,受弯道水流的作用,其河道横断面形态,水流结构及河床演变等与过渡段有一定差异。

(3) 平面变化趋势分析。

黄河下游艾山至利津河段,属弯曲型河段,两岸堤距较窄,河道平均比降在1‰左右。该段通过大规模的治理,逐步建成了“上拦下排、两岸分滞”的防洪工程体系,先后进行了4次大堤加高,开展了河道整治工程,有效控制了河势摆动范围。虽然局部河段的河势仍会有不同程度的变化,但从长远看,随着河道整治工程的不断完善,黄河下游河段的河势将进一步得到控制,河道将趋于稳定。

经分析拟建大桥所处的后张庄至传辛庄河段(长27.61 km),桥位断面附近河势较稳定,主溜线摆动较小,桥位处1980年以来的汛末主溜线最大摆幅为100 m、汛期洪水主溜线摆幅最大为150 m。桥位断面相邻上、下游的后张庄、霍家溜和王家梨行断面主河槽最大宽度分别为460 m、440 m和691 m,线位上距周孟控导、霍家溜险工、云家控导工程很近,下离河套险工、史家坞控导、陈孟圈险工不远,受两岸工程控制,河势基本稳定,摆幅相对较小。

综合上述对主流线、断面套汇、滩唇位置及水边线的变化等分析结果,桥位河段主槽宽度为850 m。

1.3.4 水文条件

1. 暴雨特征

黄河下游洪水主要由暴雨形成,分别来自河口—龙门区间(简称河龙间)、龙门—三门峡区间(简称龙三间)和三门峡—花园口区间(简称三花间)这三个地区。

河龙间属于干旱或半干旱地区,暴雨强度大,历时较短,洪水具有峰高量小的特性。龙三间的暴雨特性与河龙间相似,但由于受到秦岭的影响,暴雨发生的频次较多,历时较长,洪水为矮胖型。三花间属于湿润或半湿润地区,暴雨强度大,一次暴雨的历时一般为2~3 d,最长历时达5 d。以三花间来水为主的洪水,具有洪水涨势猛、洪峰高、洪量集中、含沙量不大、洪水预见期短等特点,对黄河下游防洪威胁最为严重。小浪底水库建成后,和三门峡水库等联合运用,大大降低了各种洪水的威胁,更有力地保障了黄河下游的防洪安全。目前仅小浪底—花园口区间(简称小花间)的洪水控制作用较弱。

2. 洪水来源及特点

黄河洪水来源可分为五个地区,即上游的兰州以上地区,中游的河口镇至龙门区

间、龙门至三门峡区间、三门峡至花园口区间及下游的汶河流域。上游洪水由于降雨特性及远离下游之故，仅形成下游较大洪水的基流，对长历时洪水的洪量有一定影响。黄河花园口以下为地上河，仅有金堤河和大汶河汇入，洪水来量不大。由此可见，中游地区是黄河洪水的主要来源区。

黄河流域面积大，上中下游各区的气候特性和暴雨特性各不相同，故各区所发生的洪水并不同时遭遇。黄河下游的大洪水和特大洪水都是由中游的山陕区间、泾洛渭河和三花区间三个地区来水为主形成的。三个地区来水的不同组合，组成花园口站三种类型的洪水。一是以三门峡以上的山陕区间和泾洛渭河来水为主、三花区间来水较少的洪水，也称“上大型”洪水，其特点是洪峰高、洪量大、含沙量高，如1843年陕县（三门峡）洪峰 $36\,000\text{ m}^3/\text{s}$ （调查值）和1933年陕县洪峰 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ （实测）的洪水。二是以三门峡以下的三花区间干支流来水为主、三门峡以上来水较少的洪水，也称“下大型”洪水，其特点是洪水涨势猛，洪峰高，洪量集中，含沙量不大，洪水预见期短，如1761年花园口洪峰 $32\,000\text{ m}^3/\text{s}$ （调查值）和1958年洪峰 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ （实测）的大洪水。三是以三门峡以上的泾洛渭和三花区间共同来水组成的洪水，也称“上下较大型”洪水，其特点是洪峰较低、历时较长，含沙量较小，如1957年和1964年洪水。

3. 设计洪水

黄河洪水按其成因分为暴雨洪水和冰凌洪水。暴雨洪水主要由暴雨所形成，多发生在7—9月；冰凌洪水主要由冰凌阻塞河道引起，多发生在12月至来年的3月。设计洪水以暴雨洪水为依据。

小浪底水库投入运用后黄河下游抗御洪水的能力显著增强，与三门峡、陆浑及故县水库联合运用，可将花园口百年一遇洪水洪峰流量由 $29\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 削减至 $15\,700\text{ m}^3/\text{s}$ ，经下游宽河道削减，到达孙口站洪峰流量为 $13\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ，利用东平湖分洪 $3\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ，洪水即可排泄入海。四库联合运用后，可将花园口断面千年一遇洪水洪峰流量 $42\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 削减到 $22\,600\text{ m}^3/\text{s}$ （即花园口设防流量 $22\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的重现期达到千年一遇），经过下游滩区河道削减，到达孙口站的洪峰流量不超过 $18\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ，利用东平湖、北金堤滞洪区分洪后，即可排泄入海。

小浪底水库运用后，对以三门峡以上来水为主的“上大型”洪水可以起到有效的拦蓄作用，如对1933年型洪水，小浪底水库投入运用后，在不使用东平湖分洪的情况下，可以使艾山以下河段设防流量出现的概率超过百年一遇；但对于以三花间来水为主的“下大型”洪水，当小花间来水比例较高时，小浪底水库通过控制小浪底以上洪水，对下游洪水只能起到一定的削减作用，如对1982年型洪水，小浪底水库作用后，在不使用黄河下游分洪区分洪的情况下，可使艾山以下河段设防流量出现的概率达到30年一遇。

艾山水文站位于泺口水文站上游 101.84 km, 根据防洪调度预案, 当艾山以上遇到 10 000 m³/s 大洪水时, 东平湖分洪区等要进行分洪、滞洪, 控制艾山站 30 年一遇及以上不同频率洪水的流量均为 10 000 m³/s。洪水向下游演进过程中, 考虑到长清、平阴山区支流加水 1 000 m³/s, 则黄河下游泺口水文站 30 年一遇以上不同频率设计流量均为 11 000 m³/s。黄河下游泺口水文站不同频率设计洪水如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 小浪底运用后黄河下游泺口水文站不同频率洪水 单位: m³/s

设计频率	10 年	30 年	100 年	300 年	1000 年	设防
洪峰流量	9 600	11 000	11 000	11 000	11 000	11 000

桥位断面位于泺口水文站断面下游 16.7 km, 其间没有支流汇入, 故桥位河段的不同频率设计洪水可视为与上游泺口水文站相同。其不同频率设计洪水如表 1.3-1。拟建大桥 300 年一遇设计洪水流量为 11 000 m³/s, 十年一遇设计洪水流量为 9 600 m³/s。泺口、桥位断面 2000 年和 2017 年水位-流量关系如表 1.3-2、表 1.3-3 所示。

表 1.3-2 泺口、桥位断面 2000 年水位-流量关系

流量/(m ³ /s)		3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	9 600	10 000	11 000
水位 /m	泺口	29.92	30.57	31.12	31.62	32.12	32.62	33.12	33.42	33.62	34.12
	桥位	28.25	28.9	29.45	29.95	30.45	30.95	31.45	31.75	31.95	32.45

表 1.3-3 泺口、桥位断面 2017 年水位-流量关系

流量/(m ³ /s)		3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	9 600	10 000	11 000
水位 /m	泺口	28.37	29.36	30.27	31.00	31.59	32.09	32.59	32.89	33.09	33.59
	桥位	26.70	27.69	28.60	29.33	29.92	30.42	30.92	31.22	31.42	31.92

4. 壅水高度

大桥建设时, 位于河道内的桥墩占据了河道断面部分过流面积, 使过水面积减小, 从而造成桥位断面上游水面升高, 形成桥前壅水。桥轴线法线与主流线夹角为 0°。凤凰路北延跨黄河大桥桥位断面设防 11 000 m³/s、十年一遇、4 000 m³/s 时最大壅水高度分别为 0.22 m、0.20 m、0.03 m。桥前壅水曲线长度分别为 4 400 m、4 000 m、600 m。

5. 波浪高度

波浪高度按照《公路勘测规范》(JTG C10—2007) 计算得到凤凰路北延跨黄河大桥桥位处波浪高度为 1.75 m。

6. 冲刷深度

凤凰路北延跨黄河大桥桥位断面的冲刷包括河床自然演变冲刷、一般冲刷和局部冲刷三部分。发生设防流量 11 000 m³/s 洪水时, 桥位断面总冲刷水深采用上述三类冲

刷的最大计算值进行叠加计算, 如表 1.3-4。即主河槽冲刷后最大水深为 29.90 m, 最低冲刷线高程为 2.02 m; 滩区冲刷后最大水深为 21.25 m, 最低冲刷线高程为 10.67 m。

表 1.3-4 11 000 m³/s 洪水条件下主河槽和滩地冲刷计算结果 单位: m

位置	2017 年 设防水位 (m)	自然冲刷 深度 (m)	一般冲刷 后水深 (m)	局部冲刷 深度 (m)	冲刷后最 大水深 (m)	最低冲刷 线点高程 (m)	深泓点 高程 (m)
主河槽	31.92	2.04	18.13	9.73	29.90	2.02	20.95
滩地		0	13.84	7.41	21.25	10.67	26.25

7. 冰凌

黄河凌汛灾害是山东省严重的自然灾害之一。凌汛灾害的发生主要受河道地理位置、河道形态、气温及流量、流速等因素的影响。黄河下游河道由西南趋向东北, 由于河道纬度的差异, 导致下段平均气温比上段低 3~4 °C。下段封河早、开河晚、冰层厚, 上段封河晚、开河早、冰层薄。封河时易形成冰塞阻塞河道, 壅高水位, 漫滩受灾。开河时上段先开河, 冰水齐下, 而下段冰层固封, 在弯曲河段或在宽河道向窄河道过渡段容易发生冰凌插塞堆积, 严重时形成冰坝, 阻塞水流, 致使水位急涨而发生漫滩。凌汛突发性强、发展快, 抢护困难, 容易造成失事。

据历史资料不完全统计, 自 1883 年至 1936 年的 54 年中, 山东省有 21 年凌汛决口, 口门 40 处, 平均五年两决口。新中国成立以来的凌汛也比较严重, 1950—2007 年黄河封冻的年份有 49 年, 12 年出现两封两开, 4 年出现三封三开, 封河历时最长达 86 d, 封冻河段最长 703 km, 封冻最上端达河南荥阳汜水河口, 全河段最大冰量 1.42 亿立方米, 河槽蓄水增量最多达 8.85 亿立方米。尤其是 1951 和 1955 年凌汛开河期, 分别在利津王庄、五庄形成冰坝, 冰坝上游数十千米冰积如山, 水位猛涨, 大堤堤顶出水 0.4~1.0 m, 有的堤段堤顶出水仅 0.1~0.3 m。由于堤防薄弱, 抢护困难, 造成决口失事, 淹没利津、沾化、滨县土地约 887 km², 受灾人口 26 万余。近年来, 由于黄河冬季偏暖、水量小, 加上三门峡和小浪底水库的调节运用, 黄河下游凌情有所减轻。但由于河道主河槽淤积抬高严重, 滩槽差减小, 加剧了“二级悬河”的不利局面, 凌汛威胁依然存在。如 1992—1993 年凌汛期, 封河河段水位普遍抬高 1.5 m 左右, 纪冯以下部分河段漫滩, 大堤偎水深 1 m 左右, 淹地约 81.5 km², 胜利油田有 38 口油井和 5 口水井被围困, 被迫停产近一个月, 造成很大的经济损失。

在黄河上建桥, 桥孔的跨度除满足大洪水期间主河槽和滩地共同行洪外, 还要满足凌汛期流冰的要求, 避免产生卡冰阻水。若桥孔跨度过大, 会增加桥梁建设投资; 若桥孔跨度过小, 则凌汛期易造成较大冰块卡冰或流冰受阻, 形成冰塞冰坝, 壅高水位, 危及堤防和大桥安全; 或当桥位以上冰塞冰坝下滑时, 因冰量大, 易再次在大桥上卡冰壅水, 形成新的冰坝。因此, 选择合适的桥孔跨度, 对确保黄河防凌和黄河