



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

Innovative Design and  
**Critical Technologies**  
in Practice of  
**River-spanning Bridges**  
in Mountainous Cities

山地城市交通创新实践丛书  
Innovative Practice of Urban  
Transportation in Mountainous Cities

# 山地城市跨江大桥设计 创新和关键技术

任国雷 刘安双 ◇ 编著



重庆大学出版社

## 内容提要

本书针对山地城市的桥梁建设特点,从山地城市跨江桥梁设计理念的创新、施工技术的研发以及工程案例出发,形成了概述、跨江大桥创新综述、特色施工关键技术、结构组合突破极限、依山借势隧道锚碇、人文主题设计思路、多层空间建设理念、山地城市人车协调、中国桥都标志工程9方面的内容。

### 图书在版编目(CIP)数据

山地城市跨江大桥设计创新和关键技术 / 任国雷,  
刘安双编著. --重庆:重庆大学出版社, 2019.10

(山地城市交通创新实践丛书)

ISBN 978-7-5689-0823-8

I. ①山… II. ①任… ②刘… III. ①山区城市—桥  
梁设计 IV. ①U442.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第241079号

## 山地城市交通创新实践丛书 山地城市跨江大桥设计创新和关键技术

Shandi Chengshi Kuajiang Daqiao Sheji Chuangxin he Guanjian Jishu

任国雷 刘安双 编著

策划编辑:雷少波 张慧梓 林青山

责任编辑:肖乾泉 版式设计:黄俊棚

责任校对:郭小梅 责任印制:张 策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185 (中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)

全国新华书店经销

重庆市金雅迪彩色印刷有限公司印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.25 字数:324千

2019年10月第1版 2019年10月第1次印刷

ISBN 978-7-5689-0823-8 定价:128.00元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 丛书编委会

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

杨 进 蒋中贵 狄 谨 李和平

李小荣 任国雷 刘安双 龚华凤

刘雪山 陈晓虎 翁承显 王有为

# 序 一

## FOREWORD

多年在旧金山和重庆的工作与生活，使我与山地城市结下了特别的缘分。这些美丽的山地城市，有着自身的迷人特色：依山而建的建筑，起起落落，错落有致；滨山起居的人群，爬坡上坎，聚聚散散；形形色色的交通，各有特点，别具一格。这些元素汇聚在一起，给山地城市带来了与平原城市不同的韵味。

但是作为一名工程师，在山地城市的工程建设中我又深感不易。特殊的地形地貌，使山地城市的生态系统特别敏感和脆弱，所有建设必须慎之又慎；另外，有限的土地资源受到许多制约，对土地和地形利用需要进行仔细的研究；还有一个挑战就是经济性，山地城市的工程技术措施同比平原城市更多，投资也会更大。在山地城市的各类工程中，交通基础设施的建设受到自然坡度、河道水文、地质条件等边界控制，其复杂性尤为突出。

我和我的团队一直对山地城市交通给予关注并持续实践；特别在以山城重庆为典型代表的中国中西部，我们一直关注如何在山地城市中打造最适合当地条件的交通基础设施。多年的实践经验提示我们，在山地城市交通系统设计中需要重视一些基础工作：一是综合性设计（或者叫总体设计）。多专业的综合协同、更高的格局、更开阔的视角和对未来发展的考虑，才能创作出经得起时间考验的作品。二是创新精神。制约条件越多，就越需要创新。不局限于工程技术，在文化、生态、美学、经济等方面都可以进行创新。三是要多学习，多总结。每个山地城市都有自身的显著特色，相互的交流沟通，不同的思考方式，已有的经验教训，可以使我们更好地建设山地城市。

基于这些考虑，我们对过去的工作进行了总结和提炼。其中的一个阶段性成果是2007年提出的重庆市《城市道路交通规划及路线设计规范》，这是一个法令性质的地方标准；本次出版的这套“山地城市交通创新实践丛书”，核心是我们对工程实践经验的总结。

丛书包括了总体设计、交通规划、快速路、跨江大桥和立交系统等多个方面，介绍了近二十年来我们设计或咨询的大部分重点工程项目，希望能够给各位建设者提供借鉴和参考。

工程是充满成就和遗憾的艺术。在总结的过程中，我们自身也在再反思和再总结，以做到持续提升。相信通过交流和学习，未来的山地城市将会拥有更多高品质和高质量的精品工程。

美国国家工程院院士  
中国工程院外籍院士  
林同棻国际工程咨询（中国）有限公司董事长



2019年10月

## 序 二

### FOREWORD

山地城市由于地理环境的不同,形成了与平原城市迥然不同的城市形态,许多山地城市以其特殊的自然景观、历史底蕴、民俗文化和建筑风格而呈现出独特的魅力。然而,山地城市由于地形、地质复杂或者江河、沟壑的分割,严重制约了城市的发展,与平原城市相比,山地城市的基础设施建设面临着特殊的挑战。在山地城市基础设施建设中,如何保留城市原有的山地风貌,提升和完善城市功能,处理好人口与土地资源的矛盾,克服新旧基础设施改造与扩建的特殊困难,避免地质灾害,减小山地环境的压力,保护生态、彰显特色、保障安全和永续发展,都是必须高度重视的重要问题。

林同棣国际工程咨询(中国)有限公司扎根于巴蜀大地,其优秀的工程师群体大都生活、工作在著名的山地城市重庆,身临其境,对山地城市的发展有独到的感悟。毫无疑问,他们不仅是山地城市建设理论研究的先行者,也是山地城市规划设计实践的探索者。他们结合自己的工程实践,针对重点关键技术问题,对上述问题与挑战进行了深入的研究和思考,攻克了一系列技术难关,在山地城市可持续综合交通规划、山地城市快速路系统规划、山地城市交通设计、山地城市跨江大桥设计、山地城市立交群设计等方面取得了系统的理论与实践成果,并将成果应用于西南地区乃至全国山地城市建设与发展中,极大地丰富了山地城市规划与建设的理论,有力地推动了我国山地城市规划设计的发展,为世界山地城市建设的研究提供了成功的中国范例。

近年来,随着山地城市的快速发展,催生了山地城市交通规划与建设理论,“山地城市交通创新实践丛书”正是山地城市交通基础设施建设理论、技术和工程应用方面的总结。本丛书较为全面地反映了工程师们在工程设计中的先进理念、创新技术和典型案例;既总结成功的经验,也指出存在的问题和教训,其中大多数问题和教训是工程建成后工程师们的进一步思考,从而引导工程师们在反思中前行;既介绍创新理念与设计思考,也提供工程实例,将设计

理论与工程实践紧密结合,既有学术性又有实用性。总之,丛书内容丰富、特色鲜明,表述深入浅出、通俗易懂,可为从事山地城市交通基础设施建设的设计、施工和管理的人员提供借鉴和参考。

中国工程院院士  
重庆大学教授



2019年10月

# 前 言

## PREFACE

江河是人类生存的依赖，也是文明的发源地。傍水而建的山地城镇不断地发展壮大，逐渐形成了城市。我国的山地城市（镇）分布极为广泛，我国的西部地区、中部地区、东南沿海丘陵地区以及沿海岛屿中的城镇，很多都属于山地型城市（镇）。据统计，全国超过一半的县城都属于山地型城市（镇）。

随着人们生活水平的提高、城市规模的扩大及其功能的不断完善，新建、改建和扩建跨江通道已成为城市跨江发展重要的交通节点。这就要求只有合理地规划布局跨江通道，发挥其便捷、迅速、高效、畅通的交通优势，形成多种运输方式有机组合的综合跨江通道体系，才能满足城市日益增长的跨江需求。

特别是跨江大桥作为山地城市交通连接的动脉，既相对便宜又可进行景观打造，已经成为现代化山地城市赖以生存和发展的重要载体，它在山地城市现代化进程中发挥着越来越重要的作用。然而，山地城市建设跨江大桥也很不容易，应从山地形态、江河特征以及城市规划出发，将“山、水、城、桥”完美组合。山地城市跨江桥梁建设具有以下特点：“V”形或“U”形河谷形成不对称地形、地貌；弯道处多，使航道形成主航道偏离河床中心；山地城市地形高差大，大桥跨江时形成了大量的高墩桥结构；跨江桥梁一般多为主干线网连接，由于两岸地形高差变化，形成多层次的路网空间；都市核心区域有星罗棋布的高楼，也有纷繁复杂、参差错落的路网以及纵横交错、盘根错节的地下管网；在城市长期发展过程中的历史文化积淀——老街区，古建筑较多；作为山地居住区户外空间的有机组成部分的步道慢行系统。通过对各种建设因素进行分析、研究，同时借鉴已经修成的市民普遍认可的桥梁，可为山地城市跨江大桥设计创新和关键技术提供一套思路。

本书通过在泸州、重庆等山地城市跨江大桥的新建、改建和扩建过程中，设计理念的创新、施工技术的研发，形成了长联大跨一体化、特色桥型、多层次空间、隧道锚固设计等一批具有山地城市

跨江大桥的设计创新技术和山区桥梁建设时渡洪、城市桥梁超宽结构施工、重大结构运输吊装以及单元件拼装的施工关键技术。

将上述实例汇集总结，希望能使大家面对山地城市跨江大桥设计挑战时，获得一点启示，为以后改建、扩建或新建的桥梁找到更新创新理念和更多的关键技术，为山地城市跨江桥梁建设发展作出贡献。同时，希望对从事城市桥梁建设的同行有所助益。由于作者水平有限，书中难免存在一些错误，恳请各位同行、专家及读者斧正。

感谢编写组成员马振栋、邓宇、卢光明、冉崑、刘亢、漆勇、杨寿忠、陈家勇、乔云强、赵亮、赖亚平、黄东、李岳等为本书付出的辛勤劳动！

在本书的编写过程中，得到了招商局重庆交通科研设计院有限公司、重庆交通大学、重庆建工集团股份有限公司和中铁大桥局集团第八工程有限公司的大力协助，在此一并表示感谢！

最后，向参与本书编写和技术审核的林同棣国际工程咨询（中国）有限公司的专家、同事表示感谢！感谢重庆大学出版社。感谢你们的鼓励、信任和支持。

任国雷 刘安双  
2019年3月于重庆

# 目 录

## CONTENTS

第 1 章 概 述	/ 1
1.1 山地	/ 2
1.2 山区河流	/ 3
1.3 城市建设	/ 7
第 2 章 跨江大桥创新综述	/ 18
2.1 跨江大桥创新	/ 18
2.2 融合创新索辅梁桥	/ 21
2.3 长联大跨一体化设计	/ 25
2.4 特色桥型设计	/ 28
2.5 山地特色多层次空间设计	/ 43
第 3 章 特色施工关键技术	/ 45
3.1 渡洪施工技术	/ 45
3.2 超宽桥梁挂篮施工技术	/ 41
3.3 超大结构的运输、吊装技术	/ 57
3.4 钢主梁的拼装、架设技术	/ 71
第 4 章 结构组合突破极限	/ 87
4.1 重庆石板坡长江大桥复线桥——神奇 第一跨，双妹跃长江	/ 87

4.2	重庆菜园坝长江大桥——瘦身只为山城美，多层次组合效率高	/ 102
第5章	依山借势隧道锚碇	/ 110
5.1	概述	/ 110
5.2	创新理念	/ 116
5.3	桥梁设计	/ 116
5.4	桥梁施工方案	/ 127
第6章	人文主题设计思路	/ 130
6.1	合川涪江一桥——古典传承，风格依然	/ 130
6.2	泸州沱江一桥——古今交融，凤凰涅槃	/ 137
6.3	重庆红岩村嘉陵江大桥——留住城市历史，传承红岩精神	/ 142
第7章	多层空间建设理念	/ 147
7.1	多层桥梁空间设计	/ 147
7.2	多层次桥头接线设计	/ 149
7.3	三层桥构思——重庆郭家沱长江大桥	/ 150
7.4	泸州长江二桥——双层交通分快慢，城市组团添纽带	/ 156
7.5	涪陵乌江二桥螺旋匝道设计	/ 160
第8章	山地城市人车协调	/ 168
8.1	重庆嘉悦嘉陵江大桥——纤纤玉手迎宾客，观光长廊览风景	/ 168
8.2	山地城市桥梁过江步道思考	/ 175
第9章	中国桥都标志工程	/ 183
9.1	重庆两江大桥——独具匠心双子桥，两位一体新标志	/ 184
9.2	重庆朝天门长江大桥——雄伟壮观第一拱，矗立门户望雾都	/ 199
参考文献		/ 213

# 第1章 概述

山地城市自从形成之时就与河流密不可分，山地城市多伴有大的江河。四川泸州从沱江和长江的交汇处逐渐拓展，重庆朝天门则是长江和嘉陵江的汇合口，合川则有渠江、嘉陵江和涪江三江汇合。同时，由于山地、江河、河谷等自然地形的影响，城市不可能集中连片地建设，而是结合地形条件选择相对平坦完整的用地。然而，这些城市中的大江大河将城市分割成两岸三地或更多区域以及多维度的城市立体空间。大江大河的阻隔严重制约了城市的发展，跨江成为这类城市发展的必然规律。

随着我国国民经济和人民生活水平的快速提高，一些大型城市的交通拥堵问题逐渐凸显。城市的交通功能需要提升、完善，尤其是在人口密集的大型城市，原有的跨江桥梁需要改建、扩建，城市发展新区需要新建过江通道。改建、扩建和新建的跨江大桥成为城市“内联”的有机结构，托起城市发展的未来，成了城市发展的脊梁，更好地改善了人们的生活水平。

然而山地建桥不易，山地城市建跨江大桥更不易，其建设受到山地城市地形、地貌、航道等的影响，在选址定点、结构设计、与现有路网的衔接、景观设计、施工技术、管理方式等方面与平原地区的城市桥梁建设有很大的不同。因此，如何在满足桥梁设计“安全、适用、经济和美观”四个基本要素的同时，使得山地城市跨江大桥的安全价值、适用价值、经济价值和美观价值的总和得以提升则需创新。

结合山地城市的建桥特点，总结分析泸州、重庆等地跨江桥梁设计、施工的关键技术，使桥梁结构形式融入自然景观和人文景观，使桥梁这个百年工程更具山地城市特性，或成为一座城市的符号。通过在跨江大桥的设计、施工过程中设计理念的创新、施工技术的研发，形成了长联大跨一体化、特色桥型、多层次空间、隧道锚碇设计等一批具有山地城市跨江大桥的创新技术，总结形成了山地跨江桥梁基础施工、城市桥梁超宽结构施工、重大结构运输吊装以及

桥梁拼装的架桥关键技术。然而，以后还有更多的山地城市跨江桥梁的建设，这种创新还需继续……

## 1.1 山 地

### 1.1.1 地表形态

山地是地貌类型的一种，是具有一定海拔高度和坡度的地貌类型。山地有广义和狭义之分。狭义的山地包括低山、中山、高山、极高山；广义的山地包括山地、丘陵和高原。黄光宇在《山地城市学原理》一书中给出“山地”一个广义的概念，它泛指具有较高的海拔高度与地形起伏的地貌，包括自然地理学上的山地、丘陵和崎岖不平的高原等。按广义的概念，我国山地面积约为 650 万 km<sup>2</sup>。其中，山地面积(包括极高山、高山、中山、低山)占 33%，丘陵面积(包括高丘、低丘)占 10%，高原面积占 26%。

### 1.1.2 山地分布

我国山地面积分布甚广，全国大部分省区都有很大面积的山地分布。就全国而言，有所谓“七山一水二分田”的通俗说法，其中贵州、云南、四川、重庆、福建、广西、陕西、湖南等省区市山地面积都超过了区域总面积的 80%。重庆市有“三分丘陵七分山，真正平地三厘三”，贵州省则有“九山一分田和水”和“地无三尺平”等说法，体现了我国山地面积的基本情况。就是地处长江三角洲和珠江三角洲平原的沿海地区及岛屿，也有很大比例的丘陵山地分布。例如，浙江省就有“七山一水二分田”，广东省也有“六山二水二分田”的说法，只有上海市无山地分布，江苏省、天津市山地面积也很少，只占 4.9%。而地处华北平原地区的北京市山地面积也占了总面积的 65.4%。

### 1.1.3 山地城市

山地城市泛指城市选址和建设在山地地域上的城市。山地城市具有两个方面的自然特征：一是城市修建在坡度大于 50° 的坡地上，其居住、交通、绿化等各项功能都在山体上实现；二是城市虽然修建在平坦的用地上，但周边山体对城市的布局、结构及城市发展影响重大。

山地城市不仅要考虑“坡度”的基本特征与影响，还应考虑作为山地城市的其他

重要特征，如垂直梯度的变化、城市周围的地貌、环境的不同等，这些都会对山地城市的规划与建设带来重要影响。因此，可从以下两个方面定义山地城市的自然特征：

①无论其所处的海拔高度如何，城市修建在坡度大于  $50^\circ$  的起伏不平的坡地上而区别于平原城市，如重庆、兰州、攀枝花、香港、青岛、延安、遵义等。

②城市虽然修建在平坦的用地上，但由于其周围复杂的地形和自然环境条件对城市的布局结构、发展方向和生态环境产生重大影响，如贵阳、昆明、桂林、杭州、烟台等。

我国的山地城市(镇)分布极为广泛，我国的西部地区、中部地区、东南沿海丘陵地区以及沿海岛屿中的城镇，很多都属于山地型城市(镇)。

## 1.2 山区河流

### 1.2.1 水文

#### 1) 水位和流量特征

山区河流的水流来源，洪水期主要是降雨，而枯水期主要是地下水补充。暴雨季节，水位较高，流量较大；少雨季节，水位和流量比较平稳，流量较小，出现比较稳定的枯水期。山区河流汇流地面坡度大，河床狭窄，暴雨很快汇入干流，引起水位暴涨，流量猛增；山区河流纵坡陡峻，水流湍急，能很快宣泄洪水，使水位急剧下降，因而山区河流有明显的暴涨暴落现象，山区河流的水位变幅和流量变幅都很大。2011年4月—2017年3月长江寸滩站水位、流量变化如图1.1所示，可以看出每年在7—9月流量比较大，处于洪水期间，除此之外，此期间还有一个特点就是水位落差、洪水流量变化非常大，如图1.2所示。从图1.3可以看出，2012年7月16日—2012年8月13日水位变化达20多米，然而7月22日到7月24日，两天水位差达到12m。

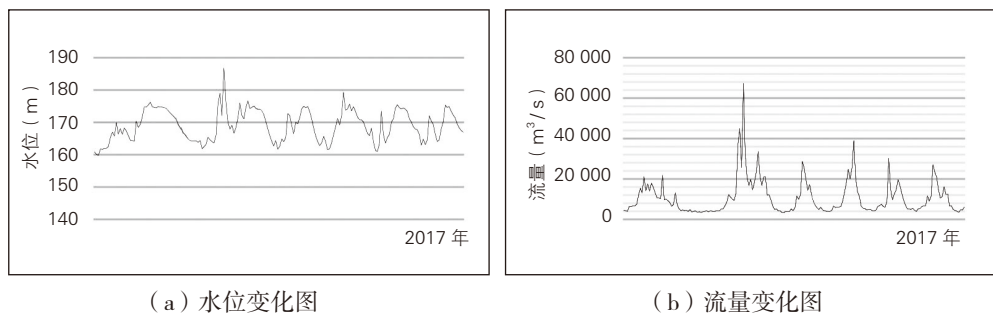


图 1.1 2011 年 4 月—2017 年 3 月长江寸滩站水位、流量变化图

图片来源：根据交通运输部长江航务管理局数据整理而得。

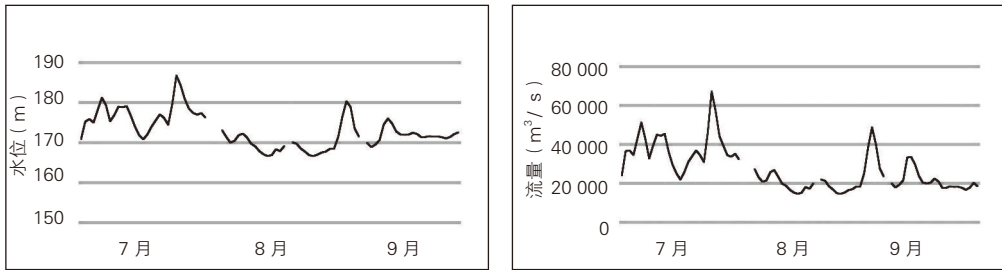


图 1.2 2012 年 7 月—9 月水位、流量变化图

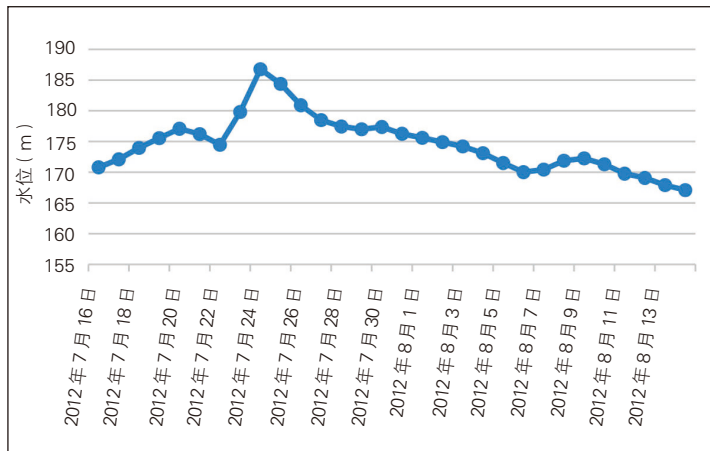


图 1.3 2012 年 7 月 16 日—2012 年 8 月 13 日水位变化图

## 2) 比降特征

山区河流纵坡很陡，因而比降也陡，由于山区河流滩槽相间，所以比降沿程分布很不均匀。在枯水期，深槽水面平稳，比降较小，而滩段水面陡峻，比降很大。山区河流由于有较多的河湾、石梁、石盘、突嘴等，因而也常存在横坡比降，而且数值较大。图 1.4 所示为重庆红岩村嘉陵江大桥附近的礁芭石。



图 1.4 重庆红岩村嘉陵江大桥附近的礁芭石

### 3) 流速特征

山区河流流速普遍较急，滩上流速往往达  $3 \sim 5 \text{ m/s}$ ，由于滩槽相间出现，流速沿程变化很大，有明显的不连续性。在枯水期，滩上流速很大，水流湍急，而深槽水流平稳，流速较小；在洪水期，滩上流速减缓，而深槽流速增大，沿程流速趋于均匀。

## 1.2.2 地形特征

### 1) 河谷地形特征

峡谷河段和宽谷河段是山区河流的基本河型，峡谷河段谷深狭窄，谷底被水流切削较深，谷坡陡峻，甚至两岸高山、峭壁挟持，基岩裸露，谷槽水深，洪、中水位河宽没有多大差异；宽谷河段谷深比较开阔，谷底被水流切削较浅，河床比较宽浅，两岸常有台地，河中常有边滩、江心洲，洪、中、枯水位有明显差异，而且山区河流由于沿途地形、地质构造以及岩性的差异，峡谷河段和宽谷河段相间出现。

### 2) 河床的纵断面特征

山区河流纵断面形态，是呈上陡下缓、突高突低、起伏不平、逐渐向下游倾斜的台阶状。纵向河底起伏不平，致使山区河流浅水河段及深水河段相间，沿程水流极不均匀，深水处水深达几米甚至几十米，而浅水处水深往往不足  $1 \text{ m}$ 。

### 3) 河床平面形态特征

山区河流岸线不规则，两岸经常有石嘴、石梁和乱石堆伸入江中，致使河岸线极不规则，特别是枯水河岸线，河道狭窄，河面时宽时窄，卡口、窄槽、急弯较多。

### 4) 石质河床

山区河流河床主要由基岩和粗粒径的卵石组成。石质河床没有明显的冲淤现象，引起石质河床形态改变，主要是受水流长期的下切和侧蚀，但因石质河床抗冲性能很强，水流下切和侧蚀速度异常缓慢，故石质河床十分稳定。但滑坡、山崩以及溪沟爆发山洪等外部原因，引起局部河段变形却很激烈、频繁。图 1.5 所示为重庆红岩村嘉陵江大桥河床地质纵断面图，右侧为滑坡地带，在修建桥梁时经过专项处理。

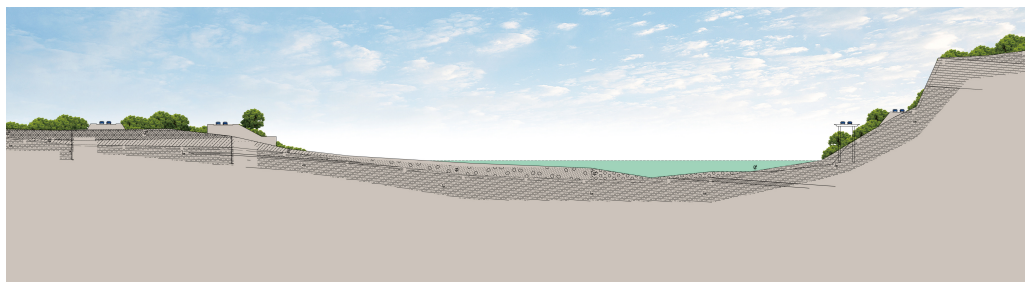


图 1.5 重庆红岩村嘉陵江大桥河床地质纵断面图

### 5) 卵石河床

山区河流也存在一定的由卵石和砂砾组成的较厚覆盖层的卵石河床。卵石经过水流长距离搬运摩擦，表面光滑，没有棱角；卵石河床有明显的冲淤变化现象，但由于卵石粒径大，质量大，卵石河床也相对稳定。

## 1.2.3 航 道

山区河流不但通航里程长，而且广泛分布于我国西南、华南等地，如川江、金沙江、岷江、大渡河、嘉陵江、涪江、乌江、澜沧江、西江上游等。

### 1) 航道条件随水位变幅而发生改变

山区河流因河道多变，洪、枯水间流量的变化导致河道水位的巨大变幅，从而引起航道条件的变化。在弯曲河道中，枯水扫弯、洪水取直的水流特性表现尤为明显，即随着水位变化，河道主流位置及流速将发生变化，从而使船舶适航区域发生变化，船舶须根据水位及水流条件的变化调整航向及航线，以保证安全快捷航行。此外，水位变化对航道尺度的影响最为直接，中、洪水期尺度充足的航道会在枯水期因水深不足而不能行船。水位变化还将导致沿江的航标也需要根据水位变化进行跟踪调整，以引导船舶沿正确的航道行驶。

### 2) 急流险滩影响航行安全

山区河流急流险滩一般位于河流弯道下口和狭窄河谷地段。滩口处凸岸和礁石阻水，水流扫弯，流速较大通常超过  $6 \sim 8 \text{ m/s}$  且分布不均匀，并伴随有泡漩和回流；较长的狭窄河谷地段，洪水期随流量增加、流速增大，在滩口局部形成较大比降。上水船舶常因没有足够的推力去克服水流及坡降阻力，使上行困难；在高流速情况下，下水船舶为保持一定的操控性能，使得下水船舶对岸航速超大，稍有失控将酿成大祸。

重庆红岩村嘉陵江大桥桥区河段位于嘉陵江土湾河段，土湾为汉道石质浅滩，如图 1.6 所示。该滩右岸为凹岸，左岸为岩石大碛坝，坝中有一副槽，为洪水期航道。从平面上看，浅滩所处河段呈胃状，上游进口较窄，河宽约  $270 \text{ m}$ ，江中顺卧两巨大石梁，石梁顶面高程约  $170 \text{ m}$ ，至滩段，江面放宽至  $600 \text{ m}$  左右，其中右岸为枯水河槽，



图 1.6 土湾滩河势示意图