

花瓶墩空间受力分析及配筋设计研究

李茂文

(南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

摘要: 为了研究花瓶墩的空间受力特性,依托某大跨现浇连续桥梁,对其下部花瓶墩建立了线性实体有限元模型,分析了花瓶墩横向力在不同应力途径下的分布规律。同时,对花瓶墩横向配筋设计和裂缝分布进行了研究,基于材料非线性建立了钢筋混凝土开裂模型,横向配筋由线性实体模型中计算的拉杆力得出,非线性模型计算结果表明配筋能够满足规范要求,采用规范拉压杆模型配筋时过于保守,因此建议对空间异型花瓶墩采用有限元法计算配筋。花瓶墩裂缝分布主要集中在墩顶中间混凝土开槽位置处,建议对该部分增设构造钢筋,研究结果可供相关工程参考。

关键词: 桥梁工程;花瓶墩;裂缝模拟;有限元分析;材料非线性;拉压杆模型

中图分类号: U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)10-0103-05

0 引言

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,城市桥梁建设中对景观的要求越来越高。桥梁除了需要满足通行安全功能外,还需要实现外观上的和谐优美^[1]。为了满足桥梁美学的需要,城市桥梁下部结构开始往优美、纤细的方向发展,花瓶墩、Y形墩、T形墩和V形墩开始广泛应用于工程建设中^[2]。花瓶墩由于造型优美且下部空间占用小,有利于城市地面空间的利用,因而得到了广泛的应用。由于花瓶墩属于空间三维异形结构,其受力较为复杂,平截面假定不再适用,其施工和设计难度较高^[3]。同时,由于花瓶墩墩顶横向间距往往较底部墩身更宽,在支座传递的上部结构荷载下,墩身混凝土会产生较大的横向拉力,结构受力路径不明确,设计计算较为困难。

目前花瓶墩的主要计算理论是采用“拉压杆模型”。该模型是一种桁架模型^[4]。我国公路桥梁规范中也采用了该模型用于对桥墩的计算^[5],但其针对不同结构的花瓶墩误差较大,多偏于保守,设计时往往还需要进一步优化结果。国内大多学者采用实体有限元模型对花瓶墩进行优化计算,保证结构的受力安全符合要求^[6-7]。花瓶墩受力研究十分重要,否则配筋不合理会产生结构性裂缝,从而危害桥梁安全。

本文结合某大跨现浇连续桥梁工程,对其下部结构花瓶墩进行计算分析,建立了实体有限元模型,研究了桥墩在不同路径下的应力分布规律和受力特性。同时对结构的配筋进行了验算,建立了花瓶墩非线性模型,研究了花瓶墩横向配筋数量和裂缝分布状态,为以后类似桥墩的设计提供参考。

1 工程概况

本项目上部结构为 50 m+80 m+50 m=180 m 的现浇连续梁,桥墩墩号为 P10#~P13#,桥墩高度 6.83~15.0 m,主桥桥面宽 24.5~27.5 m,截面为单箱四室箱梁,支点断面梁高 5 m,跨中断面梁高 2.5 m。花瓶墩采用 C40 混凝土,承台厚度为 3 m,P10#、P13#墩承台顺桥向宽度为 6.3 m,承台横桥向宽度为 7.9 m;P11#、P12#墩承台顺桥向宽度为 8.2 m,承台横桥向宽度为 13.2 m。P10#、P13#墩为 4 根 $\phi 1.8$ m 钻孔灌注桩,P11#、P12#墩为 6 根 $\phi 2.0$ m 钻孔灌注桩,桩长 30 m。

本文选取了最不利的桥墩进行计算,主要计算 P12#墩,桥墩底部为哑铃型截面,墩身底部 9 m,顶部扩头至 11.8 m,顶部支座间距为 8 m。桥墩结构具体如图 1~图 3 所示。

2 花瓶墩空间受力分析

2.1 有限元模型

为了进一步研究花瓶墩的受力特性,本文采用 Midas FEA 有限元分析软件建立实体模型。花瓶墩几何模型和网格划分如图 4 所示。为了使计算结果更为精

收稿日期: 2022-11-14

作者简介: 李茂文(1984—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计与研究工作。

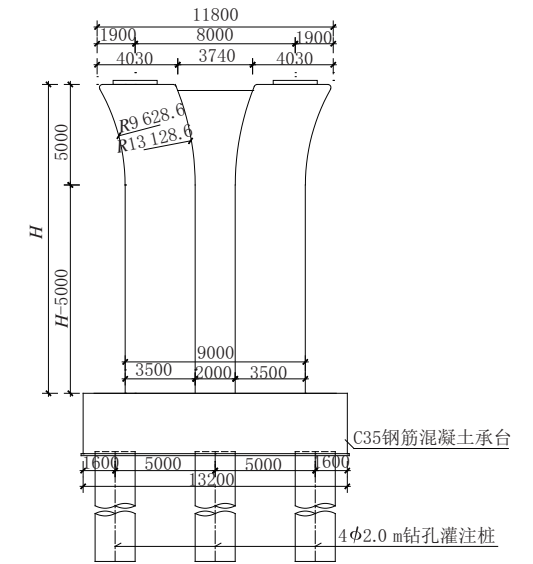


图1 桥墩立面布置示意图(单位:mm)

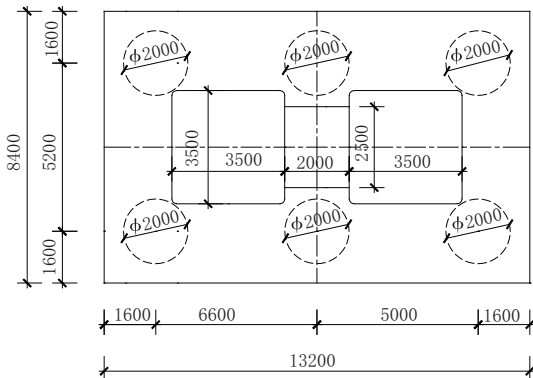


图2 桥墩墩底平面布置示意图(单位:mm)

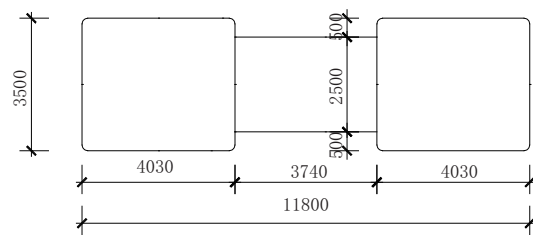


图3 桥墩墩顶平面布置示意图(单位:mm)

确,网格均采用六面体网格。模型中采用节点荷载施加上部结构传递的内力,节点选取支座中心点,并将该点和支座平面所有节点刚性连接模拟支座均匀加载。

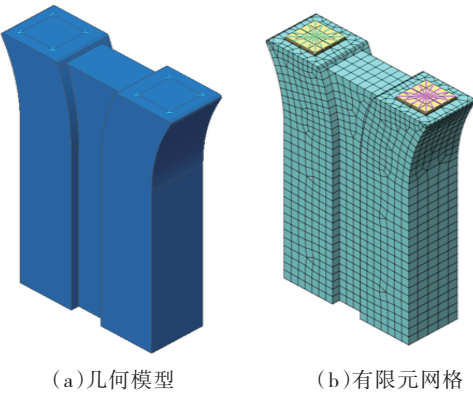


图4 桥墩实体有限元示意图

本文计算墩顶的荷载时,建立了桥梁整体杆系模型,并提取了成桥状态下的上部恒载、汽车荷载和支座沉降等工况的荷载,纵向制动力取单个支座 $R=1\ 250\ \text{kN}$,同时实体模型中考虑温度效应的影响。各个工况荷载如表1所示。

表1 桥墩各工况竖向支反力			单位:kN
支座位置	上部恒载	支座沉降	活载
左支座	41 703.8	978.7	5 312.4
右支座	33 151.1	107.4	4 464.2

为了研究花瓶墩在荷载作用下截面位置的应力变化规律,根据花瓶墩的受力特点,其混凝土横向拉力较大。为了详细反映横向受力特性,本文选取了两条应力路径,分别是桥墩沿竖向中心线和桥墩中间沿桥梁纵向方向线。模型坐标轴如图5所示, X 轴为横桥向方向, Y 轴为纵桥向方向, Z 轴为竖向;坐标系原点位于墩底中心处,具体如图5所示。

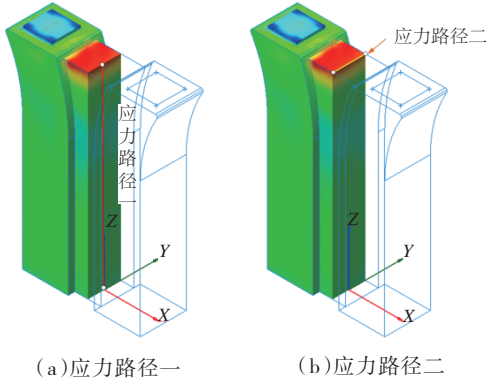


图5 桥墩应力结果输出路径示意图

2.2 结果分析

本文分别计算了桥墩在基本组合和频遇组合下的结果,具体如图6所示。

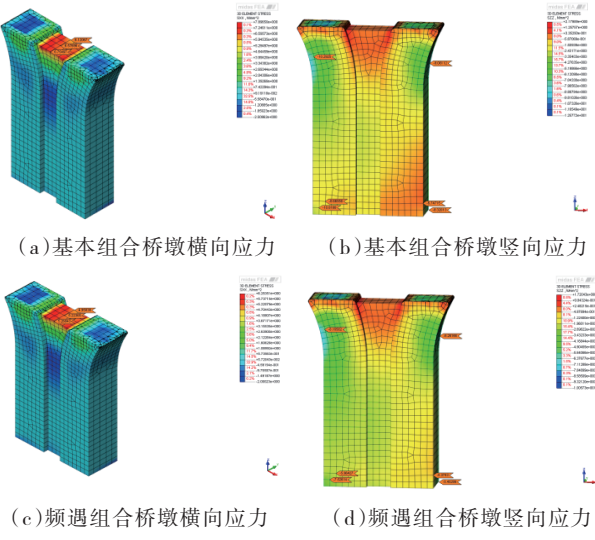


图6 桥墩应力计算结果(单位:MPa)

由图6分析可知,在基本组合效应下,桥墩的横向应力最大出现在墩顶中部位位置,最大拉应力有6.75 MPa;桥墩竖向应力较大位置出现在桥墩的圆弧段的外侧和墩底处,圆弧段处压应力为10.29 MPa,墩底处压应力为10.82 MPa。在频遇组合效应下,墩顶中部位位置最大拉应力有5.27 MPa;桥墩竖向应力较大位置出现在桥墩的圆弧段的外侧和墩底处,圆弧段处压应力为8.16 MPa,墩底处压应力为7.52 MPa。由此可知,花瓶墩墩顶的拉应力远超C40混凝土的抗拉设计强度,需要对该部位进行配筋设计,混凝土的压应力均没有超过抗压强度标准值的一半,因此花瓶墩的抗压强度满足要求。

分别提取基本组合和频遇组合路径一和路径二的应力结果,具体如图7、图8所示。

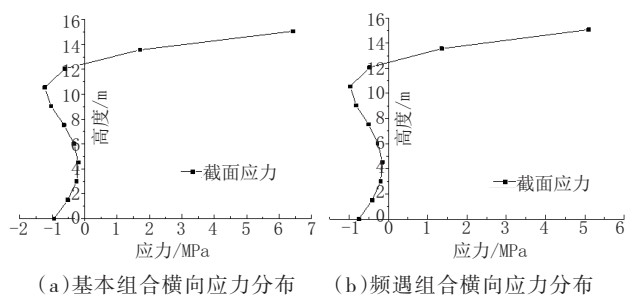


图7 混凝土横向应力沿路径一的分布(单位:MPa)

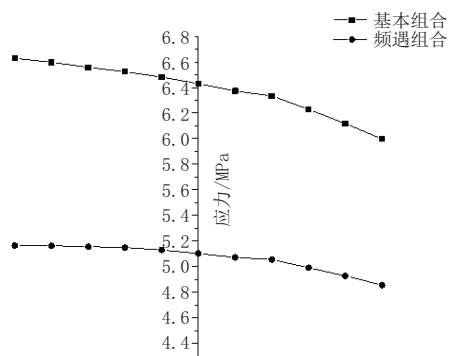


图8 混凝土横向应力沿路径二的分布(单位:MPa)

由图7可知,路径一下应力的分布由墩顶的受拉到墩底的受压,可以看出其受拉区域较小,受压区域较大,其受拉受压高度比约为1:4。基本组合下其最大拉应力为6.42 MPa,最大压应力为1.23 MPa;频遇组合下其最大拉应力为5.1 MPa,最大压应力为0.98 MPa。

由图8可知,路径二下应力的分布呈线性分布的状态,基本可以拟合成一条斜线。基本组合下应力由6.63 MPa变化至5.99 MPa,频遇组合下应力由5.17 MPa变化至4.86 MPa。其横向分布呈沿着纵向降低的主要原因与纵向的制动力有关,制动力产生的弯矩造成了横向应力呈线性分布。

3 花瓶墩合理配筋设计

3.1 概述

从上文的分析中可知,本项目的花瓶墩墩顶频遇组合下横向拉应力最高可达5.17 MPa,需要在墩顶进行配筋设计。进行配筋设计时,需要对钢筋的配筋量进行初步估计。同时需要采用非线性分析模型,考虑混凝土的开裂并模拟裂缝。

由规范^[5]可知,C40混凝土的抗拉设计强度为1.65 MPa。出于保守考虑,认为抗拉强度大于该应力的混凝土均已经开裂。此时开裂混凝土不工作,混凝土处拉力转为钢筋承受,由图7进行线性内插得到开裂混凝土的截面范围,具体如图9所示。

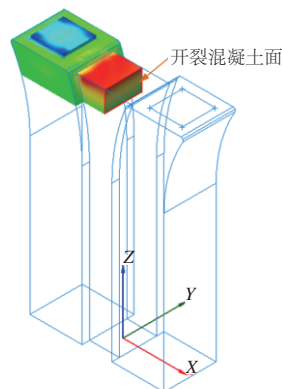


图9 墩顶开裂混凝土截面范围示意图

在有限元中对开裂混凝土截面进行积分,计算可得基本组合下载面轴拉力为15 012.81 kN,频遇组合下载拉力为11 720.05 kN。

由规范^[5]6.4.3的裂缝计算公式估算钢筋应力,具体如下:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.36+1.7\rho_{te}} \right)$$

钢筋应力公式如下所示:

$$\sigma_{ss} = \frac{W_{cr} E_s (0.36+1.7\rho_{te})}{C_1 C_2 C_3 (c+d)}$$

其中 $W_{cr}=0.2$ mm, $E_s=2.0 \times 10^5$ MPa, $\rho_{te}=0.1$, $c=50$ mm, $d=32$ mm, 计算可得:

$$\sigma_{ss}=157.21 \text{ MPa}$$

由此估算钢筋根数为:

$$n = \frac{N}{\sigma_{ss} A_s} = \frac{11\,720.05 \times 1\,000}{157.21 \times 804.2} \approx 92$$

由规范^[5]8.4.7节拉压杆模型估算钢筋量,具体计算公式如下:

$$\gamma_0 T_{l,d} \leq f_{sd} A_s$$

$$T_{l,d} = 0.45 F_d \left(\frac{2s-b'}{h} \right)$$

$$\gamma_0 T_{l,d} = 1.1 \times 0.45 \times 57\,908.5 \times \left(\frac{2 \times 8 - 9}{5} \right) \approx 40\,130.59 \text{ kN}$$

钢筋根数计算如下:

$$n = \frac{\gamma_0 T_{l,d}}{f_{sd} A_s} = \frac{40\,130.59 \times 1\,000}{330 \times 804.2} \approx 152$$

由上初步估算可知,有限元计算结果和规范计算配筋量差距较大,规范配筋量较实体有限元高 64%。究其原因,主要是规范^[5]8.4.7 节中花瓶墩模型和本文中的花瓶墩结构形式并不完全一致,采用拉压杆模型计算时,其实际内力分布有较大误差,且规范计算的钢筋布置都十分困难,因此本文初步非线性分析时采用实体分析计算的配筋,本次模型中配置 4 层 $\phi 32$ 受拉钢筋,每层 23 根。具体布置如图 10 所示。

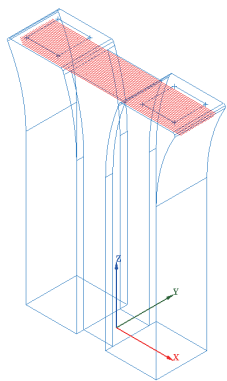


图 10 花瓶墩墩顶横向钢筋配筋示意图

3.2 有限元非线性分析

在考虑钢筋的非线性有限元实体模型中,需要选取合适的裂缝模型。目前常见的混凝土裂缝模型有三种,分别是弥散裂缝模型、离散裂缝模型和断裂力学模型^[8]。基于本文的研究对象,考虑到结构特点和计算时间成本,选取弥散裂缝模型进行计算。该模型将混凝土处理成各向异性材料,通过混凝土本构变化进而模拟裂缝的影响,即当混凝土某单元应力超过设定的开裂应力,则认为该处混凝土失效,此时只需调整材料本构关系即可。

本文中混凝土的本构分为受压本构和受拉本构,其受压本构按照规范采用,受拉本构采用脆性本构,达到抗拉强度即认为混凝土失效,钢筋本构则采用理想弹塑性结构。具体本构如图 11、图 12 所示。

3.3 非线性模型分析结果

裂缝计算时,荷载组合采用频遇组合进行,裂缝分布如图 13 所示。

由图 13 可知,裂缝的分布主要集中在墩顶中间部位,且主要集中在中间混凝土和两侧混凝土交接面处,墩身下部基本没有裂缝。因此,建议在交接处除了横向钢筋,还需要配置一些构造钢筋,防止此处

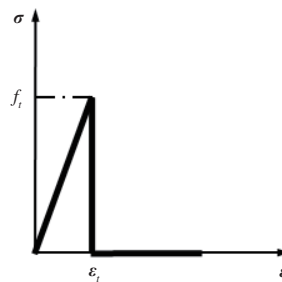


图 11 混凝土受拉本构

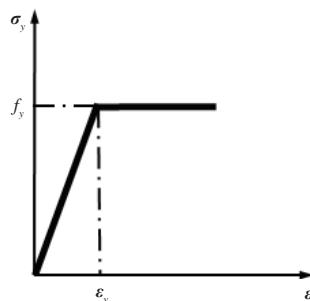


图 12 普通钢筋本构

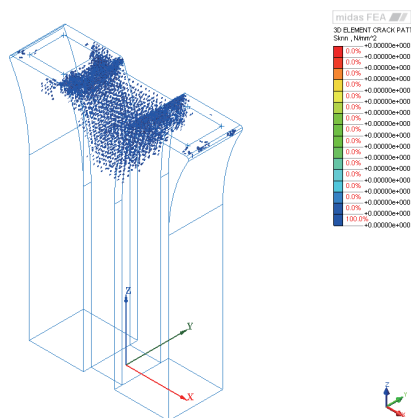


图 13 花瓶墩裂缝分布示意图

混凝土的崩裂。

钢筋应力的计算结果如图 14 所示。

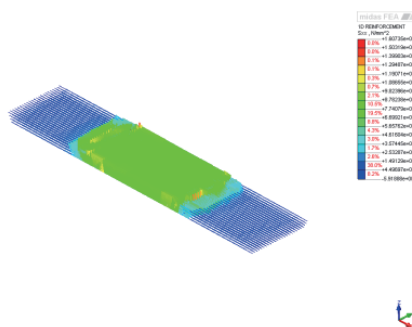


图 14 钢筋应力示意图(单位:MPa)

由图 14 可知,钢筋应力分布为中间应力大两边应力小。这反映了中间部位混凝土在荷载作用下首先开裂退出工作,随后拉力由钢筋承担。钢筋的最大应力为 139.90 MPa。

根据规范^[5]的裂缝计算公式可得:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.36+1.7\rho_{te}} \right) = 0.178 \text{ mm} \leq 0.2 \text{ mm}$$

由此计算可知,裂缝计算结果满足规范要求,说明配筋结果合理,具有可参考性。而根据规范拉压杆模型的配筋更为保守,不宜采用。

由图 15 分析可知,在频遇组合效应下,墩顶中部位置处混凝土的拉应力基本降低为 0,说明此时的钢筋承担了全部的拉力,混凝土的压应力比未配钢筋时应力有所降低。这表明混凝土开裂后,内力发生了重分布,可以认为花瓶墩安全满足要求。

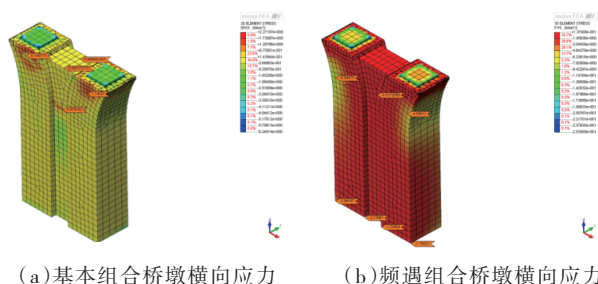


图 15 桥墩非线性模型应力计算结果(单位:MPa)

4 结 论

本文依托某大跨现浇连续桥梁工程,对其下部结构花瓶墩受力进行了分析。通过建立实体有限元模型,对其配筋设计和裂缝分布进行了研究,得到以下结论:

(1)花瓶墩主要受拉部位为墩顶中间部位,受拉范围为墩高的 1/5 范围,且受拉区域拉应力远大于混

凝土抗拉强度,受压区压应力则很小。

(2)基于实体有限元分析结果计算的受拉钢筋数量和规范拉压杆模型计算结果相比,规范更为保守。

(3)非线性分析表明,裂缝分布主要集中在桥墩中间混凝土和两侧混凝土交接面处,该部位需要增设构造钢筋,防止裂缝过大和混凝土崩裂。

(4)混凝土开裂后,横向拉力由混凝土转嫁给钢筋承受,混凝土内力发生重分布,有利于桥墩的受力。

综上所述,采用实体有限元线性和非线性分析相结合,可以有效分析花瓶墩的受力规律。相比于规范,实体有限元计算结果更为精确,建议采用实体模型进行优化计算。

参考文献:

- [1] 梁艳,何畏,唐茂林.桥梁美学 2019 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):8.
- [2] 卢钢.花瓶形钢筋混凝土薄壁墩设计讨论[J].市政技术,2013,31(2):4.
- [3] 周正富,史光军.预应力系杆在花瓶形桥墩中的应用[J].公路,2017,62(6):3.
- [4] 邵卓民.钢筋砼结构统一理论(下)[J].建筑结构,1992(3):5.
- [5] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 李新平,周晶,张勇.薄壁花瓶墩的拉力计算实用方法[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(2):6.
- [7] 葛占钊,胡国海,张耀元,等.桥梁柱式盖梁内力分析的有限元方法[J].公路,2008(1):5.
- [8] 龙渝川,张楚汉,周元德.基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂比较研究[J].工程力学,2008,25(3):5.

(上接第 98 页)

大变小,但均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》限值(0.150 mm)要求。

7 结 语

(1)对于桥面标高受限且受波浪力影响的环岛桥梁设计,须保证桥梁结构在设计年限内满足使用功能。

(2)主梁采用锅底型断面、立柱采用圆柱形排架墩,可以有效地解决波浪力对桥梁结构的影响,为环岛低桥位海上桥梁的设计提供了参考。

(3)采用墩梁固结体系,避免了后期养护成本。

(4)对于受波浪力桥梁设计,上部结构应尽量采取加大梁体自重、缩小跨径、增加受力钢筋等措施。

(5)进行低桥位环岛跨海桥梁设计时,需合理设计联长,边墩建议采用柔度较大的排架墩。

参考文献:

- [1] 李建强.矮墩连续刚构桥设计要点分析[J].广东土木与建筑,2020,27(1):68-70.
- [2] 徐峰俊.横琴新区环岛西路二期及环岛西路至长隆绕行大横琴山道项目波浪专题报告[R].广州:珠江水利委员会珠江水利科学研究院,2019.