

内河深水暗流钢围堰施工关键技术研究

陶庭震

(建德市交通发展投资有限公司, 浙江 建德 311600)

摘要:以位于某铁路支线公路的L大桥为研究背景,研究内河深水暗流钢围堰施工关键技术。通过有限元建立该大桥钢围堰模型并设定模型条件,对钢板桩、土层相互作用以及河水水位上涨等展开拟合计算。依据水文地质参数及水流压强,计算钢围堰整体自重、静水压力、水浮力、流水压力等,将结果导入有限元模型,以模拟钢围堰施工过程,并清晰展现其中5种危险施工情况。试验结果表明,平衡前与平衡后土层位移最大值分别是8 736 mm、2 661 mm,该情况符合施工条件;钢围堰Y方向最大位移为76 mm,进行抽水与拆除支撑时位移增大,此时应加强施工安全警惕;钢围堰等效应力随静水压力增大而大幅度增加;钢板桩位移与水位成正比,水位上涨初期钢板桩位移与水位未上涨时相差不大,当水位上涨最高期时,钢板桩承受流水压力增大。

关键词:深水;暗流;钢围堰;施工;技术;有限元

中图分类号:TV551.3

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2021)05-0180-05

0 引言

跨越河流的桥梁,在具体施工中,受河内水流情况复杂、工程施工时间长影响,施工难度较大^[1-3]。由于暗流、地形等情况复杂^[4-5],其中难度最大的是河流水深区域。深水暗流钢围堰施工是桥梁建设的重要环节,钢围堰牢固与否,关系到整个桥梁的安全性^[6-8]。施工团队应综合分析工地实际情况,研究深水钢围堰施工中的各项技术指标,对各种施工危险情况进行控制,保证桥梁发挥最优作用。但现在国内外关于钢围堰施工尚无规范和标准,在实际施工过程中,施工团队仅根据以往相关经验进行施工^[9],因此,施工水平良莠不齐,在多种因素影响下,施工过程中安全事故时有发生^[10-11]。

随着现代科学技术的发展,利用有限元来智能模拟施工形式日益广泛^[12]。有限元可展现施工过程中遇到的问题,为钢围堰施工提供数据依据^[13],并可根据钢围堰荷载状况,有效预防事故发生^[14]。因此有必要通过有限元,对内河深水暗流钢围堰施工关键技术进行研究。

1 内河深水暗流钢围堰施工关键技术

1.1 研究区概况

以位于某铁路支线公路的L大桥为研究背景,

收稿日期:2020-12-04

作者简介:陶庭震(1976—),男,本科,高级工程师,从事路桥工程建设管理工作。

该支线全长11.622 km,该大桥的中心里程为DK15+231.846,桥梁全长1 445.44 m,其桥位通过段隶属于感潮河段的江下游,河道的水流主流线平行于河岸,桥位断面夹角为43°。桥址地表水富足,受大气降水以及潮汐影响显著。依据相关地质勘查结果可知,桥址区附近无区域性活动断裂存在,新构造运动不发育,下伏的不可溶岩类基岩具备较好的稳定性,桥址处于建筑抗震有利地段。

1.2 有限元模型建立

ABAQUS是可以模拟工程的有限元软件,可解决由简单线性分析到复杂非线性问题,分析固体力学结构^[15]。ABAQUS有限元软件主要由单元库和材料库组成,可模拟任何几何形状和各种工程物料性能,如土壤、岩石、复合材料、金属、钢筋混凝土、泡沫等材料。利用ABAQUS可模拟岩土力学、热传导、热电耦合、质量扩散、声学分析等问题^[16]。ABAQUS主求解器模块由ABAQUS/Standard和ABAQUS/Explicit组成,并且具有支持求解器的人机交互前后处理模块ABAQUS/CAE。其应用非常广泛,功能强大^[17]。

1.2.1 模型条件设定

结合四周土体与围堰钢板柱安装过程中力的相互影响,利用有限元构建三维空间模型对钢围堰施工过程进行分析。钢板柱围堰为对称圆柱形,综合过往工程经验,为节省计算步骤并提升计算准确度,取钢围堰三维空间模型的1/4展开计算分析。土体三维有限元模型范围是X向30 m、Y向30 m,垂直方向Z

向 21.6 m,其土层自上而下为淤泥与细圆砾土。为保障计算精确度与计算速度,使用 Tie 约束钢板桩与土体、工字梁,通过调整静水压力大小来解决抽水时的水位降低问题^[18]。

边界条件设置如下:模型分别关于 XOZ 、 YOZ 平面对称的侧面设置相应的对称约束边界条件; XOZ 、 YOZ 剩余 X 向与 Y 向两个侧面设置水平方向位移约束;底部分别设置 X 向、 Y 向、 Z 向垂直水平位移约束;不设置河床表面约束。选择适当钢围堰各个受力构件单元类型来模拟最优钢围堰施工流程;对于钢板桩、工字梁、圆钢管支撑、土体等,模拟分别使用 Shell 单元下的 S4、S4R 和 S4 单元,beam 单元下的 B31 单元,solid 单元下的 C3D8R 单元,以降低应力集中影响,并准确计算钢围堰位移、应力、应变。

三维有限元模型将钢板柱单元、土体单元、内支撑单元分别划分成 5 711 个、127 857 个、7 842 个单元,合计 141 410 个单元。钢围堰四周土体网格实施加密处理,采用 ABAQUS 的网格检查功能,所有网格划分均匀后才可进行下一步。钢围堰三维有限元模型见图 1。

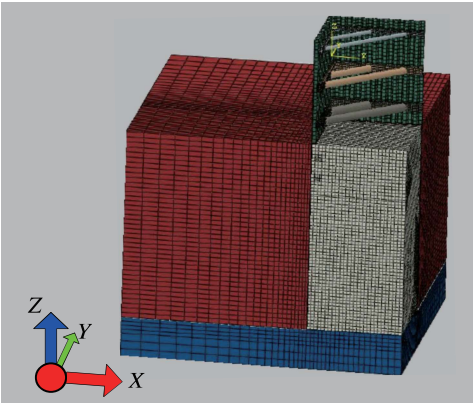


图 1 钢围堰三维有限元模型

1.2.2 水文地质参数及流水压强

钢围堰内支撑与钢板柱的弹性模量、密度、泊松比分别取为 260 GPa、800 kg/m³、0.35,设置 260 MPa 的屈服应力,添加到钢围堰三维有限元模型中,并将 10 个积分点设置在 Shell 的厚度上,该结构模型为最佳弹塑性模型。封底混凝土强度等级为 C25,按照最佳弹性材料展开模拟,其弹性模量、密度、泊松比分别取为 30 GPa、2 600 kg/m³、0.28;厚 60 cm 级配碎石的弹性模量、密度、泊松比分别为 100 GPa、2 600 kg/m³、0.3。使用摩尔-库伦模型模拟土层,土层物理学参数见表 1。受砾土入水后强度减小影响,需降低砾土内摩擦角,将微小的黏聚力添加到砾土中可提升计算收敛性。依据以往施工经验,取变形模

量的 3~5 倍作为土层弹性模量。

表 1 土层物理学参数

参数	淤泥	细圆砾土
容重/(kN·m ⁻³)	17.2	20.7
黏聚力/kPa	7.07	3.00
内摩擦角/(°)	6.22	29.00
膨胀角/(°)	0.2	6.0
弹性模量/MPa	13	85
泊松比	0.35	0.28

1.2.3 施工荷载计算

为获取钢围堰的全方位受力特性,将最不利钢围堰施工情况^[19-20]施加到三维有限元模型中。假设钢围堰位于水深 21.5 m,其所受荷载见表 2。鉴于钢围堰荷载取值标准不一致,将参照相关资料取值。

表 2 钢围堰所受荷载

名称	作用类型	符号
钢板桩、封底与填充混凝土自重	永久	D
静水压力	永久	D
水浮力	永久	B, BP
流水压力	可变	SF

(1)钢板桩自重荷载计算。钢板桩、封底与填充混凝土填充自重标准值计算式为:

$$G_k = \gamma V \tag{1}$$

式中: G_k 为物体自重标准值; γ 为物体材料容重; V 为物体体积。钢材容重 $\gamma_{\text{钢}} = 89.6 \text{ kN/m}^3$,填充混凝土容重 $\gamma_{\text{混凝土}} = 35 \text{ kN/m}^3$ 。

(2)静水压力计算。静水压力以水平方式施加到钢板桩内外两侧,其计算式为:

$$P_{\text{wr}} = \gamma_w H \tag{2}$$

式中: P_{wr} 为计算点的静水压强; γ_w 为水的容重; H 为计算点作用水头。其中钢围堰计算点作用水头取河水最高水位 21.5 m,水的容重取 10.92 kN/m^3 ,由此可知钢围堰外侧所受静水压力为 300.32 kPa。

(3)水浮力计算。水浮力计算式为:

$$F = \gamma_w V_w \quad F = \gamma_w V_w \tag{3}$$

式中: F 为水浮力标准值,kN; V_w 为钢围堰排开水体积,m³。

(4)水流速度计算。水流速度计算式为:

$$v = v_{\text{max}} \left(\frac{h}{H} \right)^n \tag{4}$$

式中: v 为竖直方向任意点处的水流速度,m/s; v_{max} 为

水平面水流速度, m/s; H 为水深, m; h 为任意点处水深, m; n 为常数, 其值大小受水流、河床等因素影响。

(5) 水面流水压力。钢围堰作用于河床上, 河水流速随水深变缓, 水面流水压力标准值计算式为:

$$P=kA\frac{\gamma v_{\max}^2}{2g}$$
 (5)

式中: P 为流水压力标准值, kN; k 为形状阻力系数, 取 1.4; A 为钢围堰排水面积, m²; g 为重力加速度, 取 10.92 m/s²; $v_{\max}$ 为水面水流速度, 取 0.3 m/s。不同形状的 k 值见表 3。

表 3 形状阻力系数

结构形状	k 值
方形	1.6
矩形	1.4
圆形	0.9
尖端形	0.8
圆端形	0.7

流水压力均布力计算示意图见图 2。流水压力荷载集度计算式为:

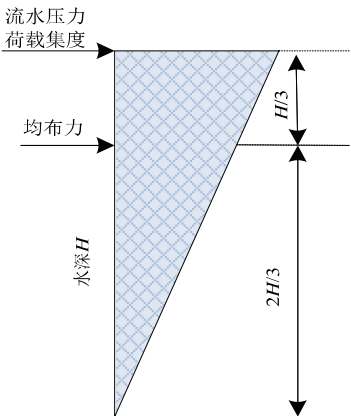


图 2 流水压力均布力计算示意图

$$q=Kb\frac{\gamma v^2}{g}$$
 (6)

式中: q 为流水压力荷载集度, kN/m; b 为迎水面阻水宽度, m; K 为安全系数。

经过计算, 流水压力均布力为 4.87 kN, 分布集度为 0.42 kN/m, 压强为 0.06 kPa。

钢围堰整体滑动、钢围堰底隆起失稳、钢围堰构建嵌固段推移、锚杆拨动、钢围堰结构倾覆与滑移、钢围堰抗浮或抗沉失败、土体渗透破坏等稳定性计算和验算, 应满足以下条件:

$$\frac{R_{kd}}{S_{kd}}\geq K$$
 (7)

式: R_{kd} 表示抗滑力、抗浮力、抗滑力矩、抗倾覆力矩、锚杆极限抗拔承载力等平衡作用标准值组合的效应设计值; S_{kd} 表示抗滑力、抗浮力、抗滑力矩、抗倾覆力矩等不平衡作用标准值组合的效应设计值。

1.2.4 模型加载过程

为提高计算效率与收敛性, 保障计算值精确度, 模拟真实施工流程的模型加载过程分为 12 个步骤(见表 4)。

钢围堰在吸泥、抽水、拆除内支撑等过程时, 因受力增大容易出现变形等情况, 该情况属于危险施工情况。分析表 4 可知, 第 4 步、第 6 步、第 7 步、第 8 步、第 11 步都属于危险施工情况。

2 试验分析

模型加载过程的危险施工情况有第 4 步、第 6 步、第 7 步、第 8 步、第 11 步, 分别用 A、B、C、D、E 代表, 并对其展开分析。

钢板桩围堰平面布置图见图 3。

表 4 施工流程

步骤	流程
1	地应力平衡, 模型初始化状态, 自重应力作用下对土层求解, 将其结果输入三维有限元模型, 可模拟土体沉降后应力状态
2	将静水压力施加到钢围堰上
3	将流水压强施加到钢围堰上, 直至钢围堰到合拢状态
4	使用 modelchange 删除相应单元, 模拟水下吸泥
5	使用 modelchange 激活相应单元, 模拟安装水下第 5、4、3 道内支撑
6	使用 modelchange 激活相应单元, 模拟安装水上第 1 道内支撑
7	使用 modelchange 激活相应单元, 模拟安装水上第 2 道内支撑
8	使用 modelchange 激活相应单元, 模拟水下吸泥到厚 60 cm 级配碎石层底面标高
9	使用 modelchange 激活相应单元, 将厚 60 cm 级配碎石铺至钢围堰底面标高, 浇筑厚 2.6 m 封底砾土, 砾土硬化过程由更改场变量方式模拟
10	模拟钢围堰抽水完成后, 改变静水压力
11	使用 modelchange 删除相应单元, 钢围堰抽水完成后, 将第 5 道内支撑拆除
12	使用 modelchange 激活相应单元, 浇注厚 0.3 m 砾土

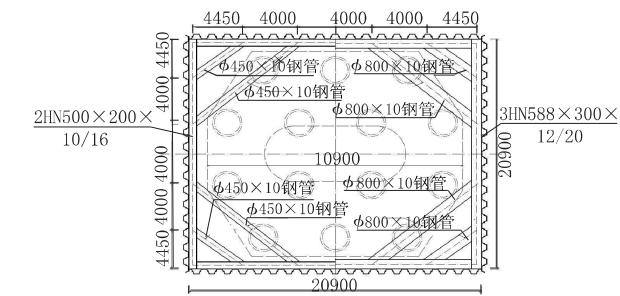


图 3 钢板桩围堰平面布置图(单位:mm)

围堰顶高程为 +5.00 m, 围堰底高程为 -31 m, 封底混凝土强度等级为 C25, 厚度为 3.0 m。由于钢围堰三维有限元模型 Y 方向与 X 方向对称, 本文以 Y 方向为例展开分析。

2.1 地应力平衡分析

将重力作用下的土层受力分布结果导入三维有限元模型, 可得到地应力平衡前后位移图, 见图 4、图 5。

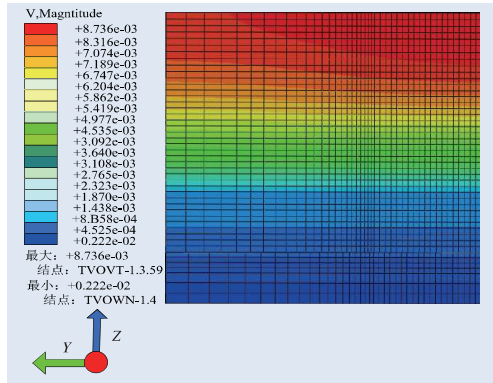


图 4 土层位移(未平衡)(单位:m)

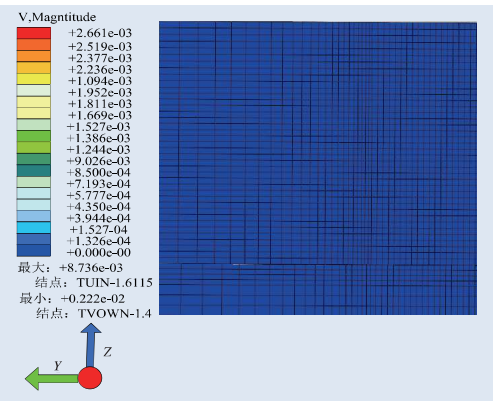


图 5 土层位移(平衡后)(单位:m)

综合分析图 4、图 5 可知, 平衡前与平衡后土层位移最大值分别是 8 736 mm、2 661 mm, 该情况符合施工条件。

2.2 钢板桩分析

钢板桩受水压力与砾土压力作用而发生变形, 其 Y 方向变形分布见图 6。

由图 6 可知, 前期随着水深增加, 钢板桩变形位移增大, 并且由中部开始位移逐渐增大。水下吸泥开

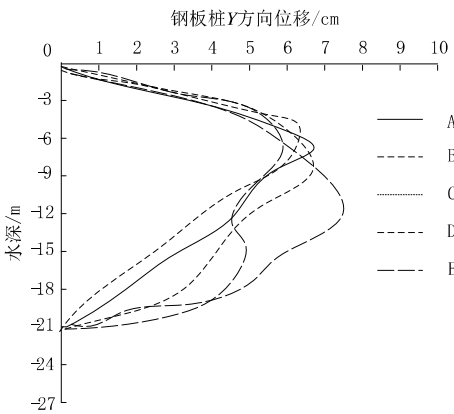


图 6 钢板桩 Y 方向变形分布

始后, 钢板桩位移增大, 当第 1 道支撑与第 2 道支撑安装后, 钢板桩发生位移情况得到改善; 当抽水完成拆除内支撑时, 钢板桩位移增大, 其中钢板桩下部受土体和封底砾土影响, 其位移较中部小。综合几种施工危险情况分析, 钢围堰 Y 方向最大位移为 76 mm, 进行抽水与拆除支撑时位移增大, 此时应加强施工安全警惕, 保护生命财产安全。

钢板桩受材料屈服强度和抗拉性影响, 当钢板桩等效应力大于材料屈服强度时, 变形情况明显, 导致钢围堰安装不牢固; 当钢板桩等效应力大于材料抗拉强度时, 施工过程中会因钢板桩破坏而导致整个钢围堰破坏。钢板桩等效应力见图 7。

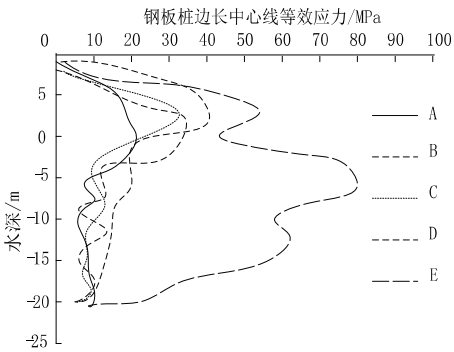


图 7 钢板桩等效应力

由图 7 可知, 钢板桩在施工情况为 A 时, 其等效应力受水深影响较小, 钢板桩受第 1 支撑与第 2 支撑作用影响, 其等效应力变化不大, 而钢板桩下部封底砾土承受更多荷载, 钢板桩等效应力变化不明显。施工情况为 E 时, 内部支撑拆除, 钢围堰所受静水压力增大, 其等效应力也随之大幅度增加。

2.3 水位上涨钢围堰分析

钢围堰设置在内河深水暗流处, 随着水位上涨或下降, 其最高水位差可达数米。因此分析危险施工情况 A 与 D 时, 钢围堰在水位上涨不同阶段的位移与应力情况。钢围堰土层位移结果见表 5。

表5 钢围堰土层位移

时段	Y方向 位移/mm	Y方向 最大位移 所处位置	Z方向 位移/mm	Z方向 最大位移 所处位置
水位 未上涨	4.797	钢围堰外侧 土层顶部	2.150	钢围堰外侧 土层上部
水位 上涨初期	7.596	钢围堰外侧 土层顶部	6.875	钢围堰外侧 土层上部
水位 上涨中期	5.590	钢围堰外侧 土层顶部	6.760	钢围堰外侧 土层上部
水位 上涨最高期	8.420	钢围堰外侧 土层顶部	7.891	钢围堰外侧 土层上部

由表5可知:在水位上涨情况下,Y与Z方向土层位移均有明显变化,尤其在水位上涨初期,土层负荷受水压影响较大;水位上涨与否,Y与Z方向最大位移所处位置始终不变。

当水位上涨时,钢板桩X方向位移情况见表6。

表6 钢板桩X方向位移

时段	钢板桩X方向 最大位移/cm	X方向最大 变形点位置
水位未上涨	1 601	钢板桩中上部 标高约-5 m处
水位上涨初期	1 708	钢板桩中上部 标高约-5 m处
水位上涨中期	3 767	钢板桩中上部 标高约-5 m处
水位上涨最高期	6 552	钢板桩中上部 标高约-5 m处

由表6可知:钢板桩X方向位移与水位成正比,水位上涨初期钢板桩X方向位移与水位未上涨时相差不大,到水位上涨中期和最高期则几乎成倍上涨,因此当水位上涨迅速时,应警惕钢围堰变形情况。

当施工情况为E时,钢围堰位移情况见图8。

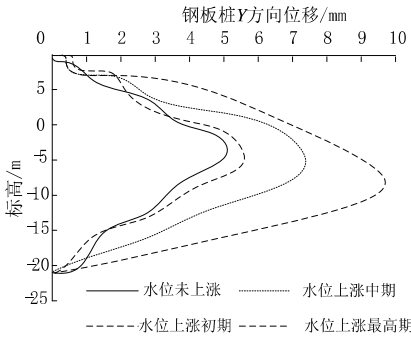


图8 施工情况E时钢围堰位移

由图8可知:施工情况为E时,钢板桩位移随着水位上涨而增加,在水位上涨最高期,钢板桩承受流水压力增大,位移达到10 cm,而水位未上涨与水位上涨初期的钢板桩位移曲线差别较小。

3 结 语

在钢围堰施工过程中,钢板桩位移随水深增加而增加,添加支撑后,位移情况得到改善。钢板桩下部受土体与封底砾土影响,位移较小;钢围堰等效应力与静水压力成正比,当拆除支撑时,其等效应力也随之增大;钢围堰外侧土层位移随水位上涨而增加,但其最大位移所处位置保持不变。因此,运用有限元模型,可有效模拟钢围堰施工中面临的问题,分析每个施工工况中钢板桩桩身的变形和应力分布情况以及围模与内支撑的变形和应力分布情况,确定合理的施工顺序及施工方法,为实际施工提供科学依据。

参考文献:

[1] 耿冰,张景伟,邵新军,等.基于扩大基础设计的桥梁深水基础施工关键技术研究[J].河南科学,2020,38(6):916-923.

[2] 贺文波.高深水区钢板桩围堰逆作法施工技术研究[J].武汉理工大学学报,2018,40(3):59-64.

[3] 戴良军,朱大勇,程涛,等.陡峭岩面双壁钢围堰稳定性分析及风险评估[J].中国公路学报.2020,33(1):120-127,137.

[4] 张延河.深水浅覆盖层区域钢围堰施工技术[J].世界桥梁,2019,47(2):28-32.

[5] 郭佳嘉,余其鑫.一种复杂海况下的哑铃形主墩双壁钢围堰的设计与施工[J].中国港湾建设,2019,39(3):40-44.

[6] 方焘,靳贵龙,付天华.软弱地层中深水基础钢围堰结构施工稳定性分析[J].结构工程师,2018,34(1):138-144.

[7] 庄艳伟,孙明远,张林龙.深水裸岩双壁钢围堰河床开挖的施工方法[J].筑路机械与施工机械化,2020,37(1):107-111.

[8] 郭飞,朱育才,桑宏,等.河边岩溶区大面积钢管桩围堰的施工技术研究[J].特种结构,2019,36(4):96-102.

[9] 左丽,付军,冀荣贤,等.深水条件下自平衡组合式钢围堰设计与现场试验研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):139-146.

[10] 尹玉林,余昌平,艾兵海.深水条件下钢套箱可回收式底板施工技术研究[J].公路,2019,64(6):89-92.

[11] 张红心.复杂海域桥塔墩防撞吊箱围堰施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(5):103-107.

[12] 王会永.双壁钢板桩围堰施工技术与工程运用[J].中外公路,2019,39(1):155-157.

[13] 魏争伟.钢板桩围堰施工水中桩基承台技术[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2017(A01):54-57.

[14] 何良德,王新宇,夏国星,等.深水超长钢板桩围堰受力特性分析[J].水道港口,2019,40(2):64-69.

[15] 夏炼.钢板桩围堰力学性能影响因素研究[J].甘肃科学学报,2019,31(3):92-96,102.

[16] 陈鹰.桥梁深水基础钢管桩围堰受力特性分析[J].铁道建筑,2018,58(9):32-35.

[17] 刘军宏,张小龙.小榄水道桥深水钢板桩围堰施工的关键技术[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(1):267-269.

[18] 张程然,祝兵,张振,等.深水基础哑铃型新型组合围堰结构计算方法研究[J].铁道科学与工程学报,2020(8):1957-1969.

[19] 张东山,李向东.基于填土平台工艺的钢板桩围堰施工[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(2):71-75.

[20] 唐剑,汪泉庆,张晨.郑万高铁汉江特大桥主墩深水围堰施工技术[J].公路交通科技,2018,35(增刊1):150-156.