

# 深厚软弱地基建坝的地基处理

殷德顺<sup>1,2</sup>, 王保田<sup>2</sup>, 郭兴文<sup>1</sup>

(1. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:**在深厚软土地基上,是不允许建设挡水坝这样的大荷载建筑物的,随着地基处理技术的发展,人们已经可以解决许多原来不可能的问题。以达开水电站为例,研究了在深厚软弱地基上筑土石坝和混凝土面板坝的问题,通过有限元分析,说明在合理进行地基处理的条件下,在深厚软土地基上是可以兴建 25 m 的土石坝和面板坝,而建土石坝更加稳妥。

**关键词:**深厚软粘土;土石坝;面板坝;有限元;地基处理

**中图分类号:**TV223 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2008)05-0028-05

**Ground Treatment of Dam Built on Thick and Soft Groundsill/YIN De-shun<sup>1,2</sup>, WANG Bao-tian<sup>2</sup>, GUO Xing-wen<sup>1</sup>**  
(1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** Generally speaking, dam can't be built on thick and soft groundsill. But nowadays, with the development of technique in ground treatment, many impossible engineering problems were worked out. Based on example, the paper mainly approached how to treat thick and soft groundsill on which earth-rock dam or concrete face rockfill dam was build; the results from FEM showed that 25m of these two kinds of dam may be built on thick and soft groundsill if the groundsill was well treated, but earth-rock dam was better.

**Key words:** thick and soft groundsill; earth-rock dam; concrete face rockfill dam; finite element method(FEM); ground treatment

## 0 引言

最近几年我国水利建设发展迅速,原来规划的地方都已经建坝,国家面临新一轮的坝址规划。而我国沿海、内河两岸和湖泊地区广泛分布软土,厚度可达几十米甚至上百米,深厚软弱地基上能否修建像水坝这样的大荷载建筑物是一个有待研究的问题。随着地基处理技术的发展以及新材料的不断出现,很多过去的“禁区”都被打破,在国内复合地基处理方法中,振冲碎石桩法、水泥搅拌桩法以及现浇薄壁管桩(PCC)已经成功处理了很多软土地基,许多大型建筑物得以建造。这些技术既能够解决水坝变形不协调的问题,又能够增加国家坝址规划的备选条件。

在水利工程的诸多坝型中,土石心墙坝和混凝土面板堆石坝具有可利用当地材料筑坝、造价较低、施工方法简单等优点,在我国水利水电资源开发过程中有着重要的地位。当然,土石坝在施工和运行过程中也会出现滑坡、渗透以及水力劈裂等问题,而造成这些问题的原因之一就是由于在坝的横断面上

坝身、坝基各部位变形的不协调所引起<sup>[1,2]</sup>。而钢筋混凝土面板对基础沉陷很敏感,当坝基有缺陷时,要重视坝基的处理。如果深厚软弱地基上修筑以上 2 种坝,则需要对地基进行处理,处理的效果如何是广大科技和工程人员关心的问题<sup>[3,4]</sup>。

本文将结合云南达开电站,通过有限元模拟,探讨在深厚软弱层地基上建设土石心墙坝和混凝土面板堆石坝的地基处理方法,以及处理效果。

## 1 达开水电站的基本地质情况及问题

达开水电站位于云南省宣威市境内的革香河上。钻探结果表明,所选的马家坝坝址的左右坝肩为强~弱风化基岩。

一级阶地:0~2.9 m 为褐红色粘土,为灰岩红土化作用及冲积形成,2.9~20.95 m 为灰黑色、深灰色粘土,为长期静水环境沉积形成,20.95 m 以深为弱风化白云质灰岩。

河漫滩:0~5.2 m 为砂卵石层,为现代河流冲积物,5.2~55.1 m 为灰黑色、深灰色粘土。

收稿日期:2007-06-18

基金项目:河海大学创新基金项目(编号:2006407911),水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心开放研究基金资助项目(编号:S0702)

作者简介:殷德顺(1972-),男(汉族),山东莱州人,河海大学讲师,在职博士研究生,岩土工程专业,从事基础力学教学和土的本构模型及基本理论研究工作, www.ismm.ac.cn/yindeshun, yindeshun@hhu.edu.cn。

河床钻孔 ZK205 揭示:0~9 m 为砂卵石层,为现代河流冲积物,9~80.9 m 为灰黑色、深灰色粘土、夹砂卵石透镜体。

基本地质情况如图 1 所示。

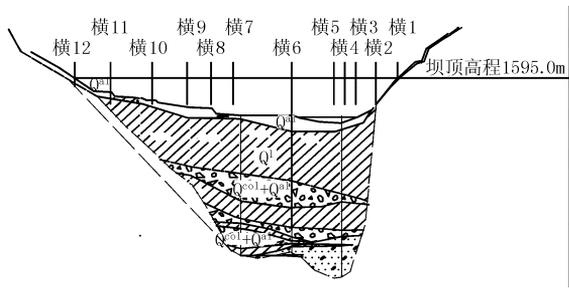


图 1 坝址位置地质图

在河床松散堆积层厚度超过 80 m 的地基上修筑坝将面临巨大挑战。主要工程地质问题是:

- (1) 挖除全部松散堆积层是不经济的,且不现实;
- (2) 若在巨厚松散层上筑坝,要求地基承载力达到 400 kPa 以上,坝基稳定是没有保证的,这已经被多座土坝施工期发生坝基滑动所证明<sup>[2]</sup>;
- (3) 软土地基处理方法的有效深度不能达到 80 m;
- (4) 河床部分有厚度最大达 9 m 左右的砂卵石层,该层为强透水介质,坝基防渗的问题比较突出。

经研究认为,在这样的地基上直接建坝是不能满足变形要求的,需要进行合理的地基处理。

## 2 深厚软弱地基的处理

### 2.1 深厚河床松散堆积层利用的可能性分析

根据达开水电站的规模和现场河谷自然条件,只能选用当地材料坝。按照钻孔揭示的河床堆积层情况,河床松散堆积层结构简单,主要为 3 层:上部 0~9 m 为砂卵石层,该层为新近河流冲积物,密度较低,渗透性强,但可以利用振冲法使其密实,同时

对于砂卵石层以下的粘质粉土层也可以用振冲碎石桩或水泥搅拌桩加固,提高其承载力;中上部平均深度约 20 m,最大深度 30 m 为可塑状灰黑色、深灰色粘质粉土,标准贯入击数为 7~8 击,按照建筑地基设计规范,本层承载力标准值 190 kPa 左右,压缩性中等偏高,是复合地基主要的处理对象;中下部为最大深度达 60 m 的硬塑粘质粉土、夹砂卵石透镜体,其中粘质粉土的平均标准贯入击数约 16 击,本层承载力标准值约 440 kPa,本层压缩性较低,强度高,渗透性低,是当地材料坝可资利用的持力层和良好的相对隔水层,对于高度 25 m 的土石坝,本层承载力完全能满足要求,其压缩性也较小,能作为坝基持力层。

对于粘质粉土地基,水泥搅拌桩和碎石桩都是可选的效果好的地基加固方法。国内复合地基处理方法中,振冲碎石桩法已经成功处理了 40 m 左右的软土地基<sup>[6]</sup>,水泥搅拌桩法已经成功处理了 30 m 的软粘土地基<sup>[7-10]</sup>。本工程可采用这 2 种组合地基处理方法加固表层砂卵石层和中部的可塑状灰黑色、深灰色粘质粉土。通过合理设计,使地基成为变模量复合地基,适应土石坝不同区域对地基承载力不同要求的需要,保证地基沉降较均匀,改善土石坝的变形和应力分布。

用土工格栅等新材料对坝体加筋,可控制变形较大条件下坝体的应力,减小坝体的变形。这些措施的综合利用,能够满足本工程土石坝设计要求,保证工程顺利建成。

### 2.2 土石心墙坝地基处理方案

如果在深厚软弱地基上建设土石心墙坝需要在防渗、承载等方面进行考虑,本文研究所选的土石坝标准坝型见图 2。为了安全,选择坝体最大高度 25 m,其中坝顶高程为 1595.0 m。为了达到建坝的要求,对于不同的区域采取了不同的地基处理方法。

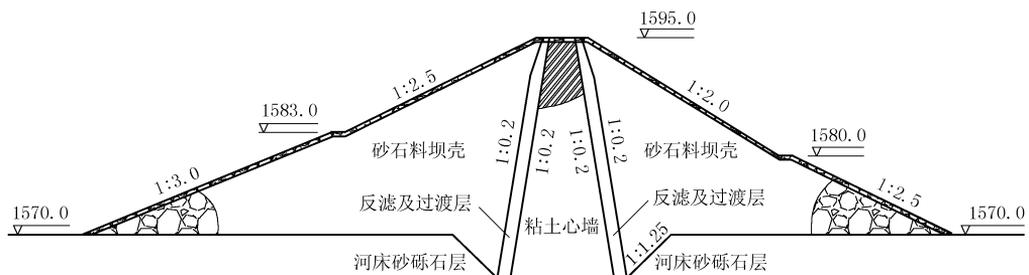


图 2 坝体标准横断面图

### 2.2.1 心墙区地基处理方案

土石坝粘土心墙是挡水的关键建筑结构,要求有可靠的防渗特性。为了加强坝基防渗,结合软粘土地基处理,心墙区以下河床砂卵石覆盖层全部挖除;卵石覆盖层以深,心墙区压缩性较高的粘质粉土层加固与防渗措施采用水泥搅拌桩,为了防止粘土地基中的薄层透镜体状砂土层发生渗透破坏,在两侧各布置 2 排连续搅拌桩防渗墙,其它区域搅拌桩采用等边三角形布置,桩距 1.50 m。搅拌桩长 20 ~ 25 m,依据压缩性较高的粘质粉土层分布厚度调整。

### 2.2.2 其他区域的地基处理

为了降低工程造价,充分利用天然地基,减少开挖工程量。仅铲除河床地表耕植层,采用振动沉管碎石桩对河床砂卵石层和第一层压缩性较高的粘质粉土层进行处理。振动沉管碎石桩的套管外径 60 cm,采用复打法成桩,设计桩径 80 cm。碎石桩平面上采用等边三角形布置。在坝高较大的区域,碎石桩间距 1.50 m,并用体积含量 6% ~ 8% 的水泥浆与碎石拌和,形成水泥碎石桩;在坝高较小的区域,碎石桩间距 2.0 m。碎石桩设计桩径 80 cm,沉管直径 60 cm,采用复打法成桩工艺。土石坝软弱土地基处理剖面布置见图 3。

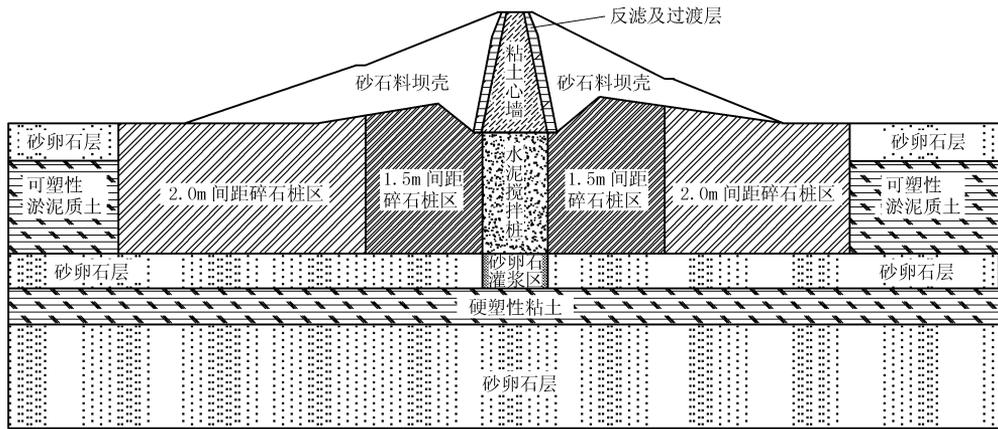


图 3 地基处理布置剖面图

### 2.3 钢筋混凝土面板坝地基处理方案

与土石心墙坝一样,本次研究的钢筋混凝土面板坝坝高也是取 25 m 标准坝型(见图 4)。相对于土石心墙坝,钢筋混凝土面板坝的关键部位在于坝趾,所以对于面板坝趾板区的河床砂卵石覆盖层开挖,卵石覆盖层以下的粘质粉土层采用水泥搅拌桩,具体的处理措施与土石坝心墙区相同;趾板区以外的区域也采用类似土石坝其它的处理方案。具体处理见图 5。

### 3 三维非线性有限元计算结果及分析

由于土石料和软弱土地基具有明显的非线性特性<sup>[5]</sup>,为了较好地反映这种特性,本计算的有限元分析采用参数少,试验资料丰富,能较好地反映土体非线性特性的 Duncan - Chang 模型。对于土石坝粘土心墙与过渡料的接触面以及混凝土面板与垫层之间设置 Goodman 接触单元。混凝土面板缝、周边缝设置接缝连接单元。计算所用参数见表 1。有限元三维网格图见图 6。

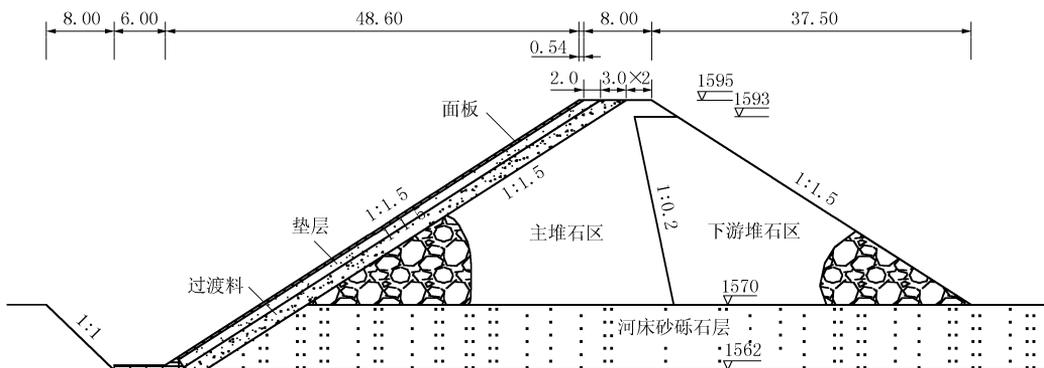


图 4 坝体标准横断面图

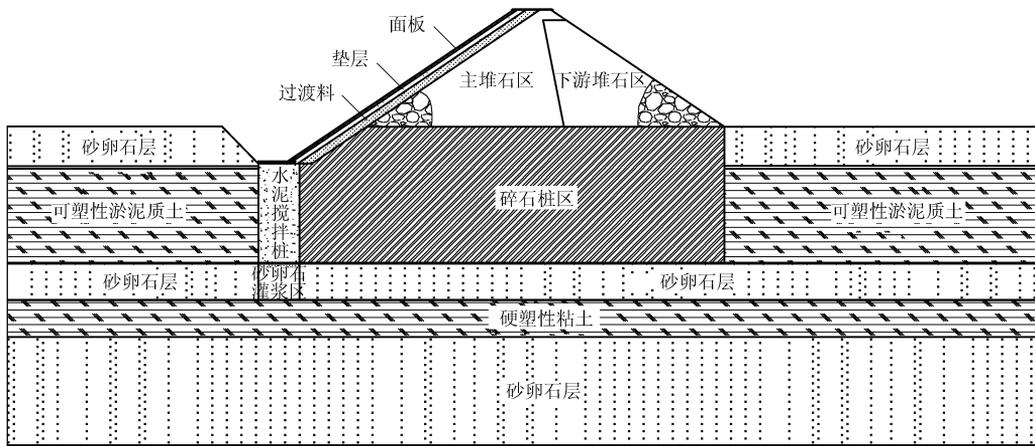


图 5 地基处理布置剖面图

表 1 土石坝材料 E-μ 模型参数

材料类型	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c / \text{kPa}$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$k$	$n$	$R_f$	$G$	$F$	$D$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	$k_{ur}$	
土石坝体	粘土心墙	19.1	60.0	20	300	0.50	0.75	0.35	0.08	4.0	0	500
	过渡料	20.5	0.0	48	750	0.45	0.72	0.46	0.26	5.0	8	1300
	坝壳料	22.0	0.0	50	800	0.42	0.72	0.48	0.26	5.5	8.5	1500
面板坝体	垫层料	22.0	0.0	51	1050	0.354	0.71	0.43	0.24	5.0	7	2210
	过渡料	21.0	0.0	54	940	0.350	0.85	0.45	0.25	5.5	13	1980
	主堆石	20.5	0.0	54	720	0.303	0.80	0.44	0.20	5.2	13.5	1600
地基	下游堆石	20.5	0.0	52	700	0.340	0.75	0.45	0.25	5.6	8	1500
	水泥搅拌桩区	18.0	50.0	15	320	0.32	0.75	0.32	0.06	4.5	0	550
	砂卵石灌浆区	21.0	0.0	50	750	0.40	0.70	0.40	0.15	5.0	8	1300
	间距 1.5 m 碎石桩区	19.0	20.0	18	260	0.40	0.76	0.38	0.20	5.5	0	520
	间距 2.0 m 碎石桩区	18.5	18.0	14	200	0.40	0.78	0.40	0.22	6.0	0	400
	砂卵石	21.0	0.0	50	750	0.40	0.70	0.40	0.15	5.0	8	1300
	可塑状淤泥质土	16.0	40.0	8	120	0.60	0.82	0.45	0.10	2.6	0	280
硬塑状粘土	16.0	60.0	12	260	0.52	0.78	0.42	0.11	3.2	0	450	

表 2 有限元计算的坝体坝基最大位移、应力值

状态	水平方向位移 /m	竖直方向位移 /m	第一主应力 /MPa	第三主应力 /MPa
竣工期	0.17 / -0.16	0.03 / -0.76	0.86	0.48
蓄水期	0.04 / -0.48	0.08 / -0.91	1.03	0.66

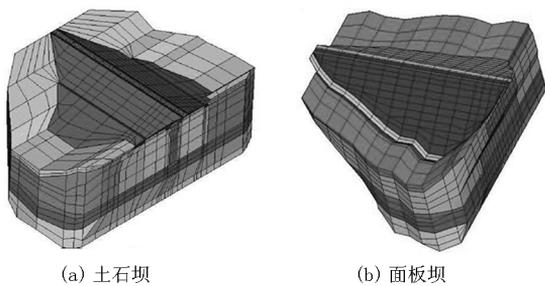


图 6 三维有限元网格剖分图

三维有限元计算结果经计算机处理后,输出各个断面的位移等值线图 and 应力等值线图。有限元计算模拟了大坝分期施工与分期蓄水的填筑过程,因此结果按竣工期与正常蓄水位工况整理。

### 3.1 土石坝坝体和软弱土地基模拟结果

经过有限元模拟竣工期与正常蓄水的土石坝坝体坝基最大位移和应力值见表 2。表中的水平位移以向上游为正,竖直位移以向上为正。

从有限元计算所得的粘土心墙坝坝体与地基的

变形与应力的结果来看,在变形和应力等值线图上,没有出现异常区,应力水平较低,蓄水期变形,施工与蓄水后总的变形和坝高的比值在土石坝一般规律范围内,表明采用 25 m 的土石坝设计方案是可行的。

### 3.2 面板坝坝体和软弱土地基模拟结果

钢筋混凝土面板坝的三维有限元计算结果分为坝基、坝体、面板等区域整理,结果见表 3。

从有限元分析结果看,面板坝在施工期和蓄水期的坝体及坝基位移满足面板坝的要求。坝体和地基内的应力水平都较低,不会发生破坏。混凝土面板变形数值都在常规范围内,面板在蓄水后,底部局部区域和右岸出现了较大拉应力区,最大拉应力值

表 3 有限元计算的面板坝应力位移

状 态		竣工期	蓄水期	
地基及坝体 位移/cm	水平向	向上游 向下游	13.61 11.43	1.33 15.85
	竖直向	向下	46.59	49.68
	第一主应力	压	737.95	793.66
地基及坝体 应力/kPa	第三主应力	压	388.27	447.44
	挠度	向坝内	1.17	25.31
面板位移/ cm	坝轴向	向左岸 向右岸	0.21 0.18	1.30 1.31
	面板应力/ kPa	坝坡向	压应力 拉应力	200.71 32.09
周边缝/mm		坝轴向	压应力 拉应力	88.93 109.97
	面板缝/mm	垂直坝坡向错动		0.10
沿缝长向错动			1.10	3.70
拉/压			0.80/0.60	5.10/5.20
周边缝/mm	垂直坝坡向错动		0.40	0.50
	沿缝长向错动		0.90	5.60
	拉/压		0.1/0.8	9.40/0.0

为 1303 kPa, 应予以重视。面板缝与周边缝 3 个方向的位移不大, 满足要求。

总之, 通过有限元模拟, 可以发现, 在建 25 m 低坝的基础上, 无论是土石心墙坝和混凝土面板石坝都能在经过处理的深厚软弱土地层上修建, 但相比之下, 建筑土石心墙坝更加可靠一些, 因为混凝土面板坝在模拟中出现的面板拉应力是一个不利因素。

#### 4 结语

达开水电站坝址深厚软弱土层厚度超过 80 m, 只能利用软弱土层作为挡水坝地基, 本文选取土石心墙坝和混凝土面板坝 2 种坝型, 在现有的地基处

(上接第 27 页)

#### 5 结语

(1) 刀盘是盾构机掘进的重要设备, 应采取各种措施减小其磨损。值得注意的是, 前期勘察或土体加固过程中, 有可能掉入钻头、钻杆等金属构件, 如果这种情况发生, 则必须将其打捞出来, 避免盾构机的非正常磨损。

(2) 刀盘及其刀具在砾砂层中磨损严重, 呈现周边磨损量大, 内部磨损小的特点。这就提醒我们应该对刀盘外周及其边缘侧板进行加强处理, 以提高刀盘的使用寿命, 减少修复次数。

(3) 对刀盘本体进行耐磨层堆焊, 在刀盘外缘

理技术的基础上, 采用混凝土搅拌桩和碎石桩等措施对深厚软弱地基进行处理, 通过有限元模拟发现: 在地基处理的情况下, 深厚软弱地基上可以建设 25 m 的土石心墙坝和混凝土面板坝。通过进一步比较还能发现建筑土石心墙坝更加稳妥。

当然, 本文的结论是建立在设计单位提供的最基本的试验资料基础上给出的, 对坝体材料还应增加一些试验资料, 以确定出更合理的计算参数, 使计算结果更加符合实际。

#### 参考文献:

- [1] 郭诚谦, 陈慧远. 土石坝[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [2] 顾淦臣, 束一鸣, 沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [4] 蒋国澄, 赵增凯. 中国的高混凝土面板堆石坝[A]. 国际大坝会议——混凝土面板堆石坝国际研讨会论文集[C]. 北京: 2000. 1-17.
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [6] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
- [7] 龚晓南. 深层搅拌法在我国的发展[A]. 龚晓南. 深层搅拌法设计、施工经验交流论文集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1993. 1-9.
- [8] 郭志业, 詹佩耀. 深层水泥搅拌桩复合地基沉降计算[A]. 龚晓南. 深层搅拌法设计、施工经验交流论文集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1993. 65-70.
- [9] 陈云敏. 温州机场站坪及联络道扩建工程软土地基搅拌桩处理试验报告[R]. 浙江大学岩土工程研究所, 1997.
- [10] 陈云敏, 等. 水泥搅拌桩静荷载试验研究与探讨[A]. 第二届结构与地基国际学术研讨会论文集[C]. 香港: 1997.

加焊高强度的耐磨钢板, 提高了刀盘的使用寿命, 节省了工程投资。需要指出的是, 刀盘焊接修复需要采取合理的焊接工艺和保证良好的焊接质量。

#### 参考文献:

- [1] 邹积波, 朱华锋. 盾构机刀盘的应急修复[J]. 工程机械与维修, 2003, (6): 95-96.
- [2] 蒙先君, 章龙管, 阳晓玲. 盾构刀盘洞内维修实例及评议[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(5): 65-72.
- [3] 蒙先君. 复合式土压平衡盾构机刀盘常见故障(损坏)原因分析及解决措施[J]. 隧道建设, 2004, 24(2): 61-66.
- [4] 何其平. 土压平衡盾构刀盘结构探讨[J]. 工程机械, 2003, (11): 10-16.
- [5] 尹立孟. 60CrMnMo 槽型辊的埋弧堆焊修复[J]. 焊接, 2002, (11): 43-44.