

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.012

基于声波无损检测的特殊锚杆质量影响因素

张建清¹ 吴继敏² 彭 冈¹ 陆二男¹ 陈 敏¹

(1.长江工程地球物理勘测武汉有限公司 湖北 武汉 430010 ;2.河海大学科学研究院 江苏 南京 210098)

摘要 :设置三峡右岸地下电站工程需要的特殊锚杆 ,通过该锚杆试验段的声波无损检测 ,采用统计学和回归分析方法 ,研究了锚杆系统外延端长度、异常设置的位置以及不同施工工艺对锚杆质量的影响 .定性和定量分析结果表明 :锚杆的注浆密实度能满足试验要求 ,锚杆外延端长度越小 ,锚杆注浆密实度检测精度越高 ,可以根据外延端的不同长度 ,利用线性模型进行修正 ;带弯头外延端长度与锚杆检测注浆密实度基本呈线性相关 ;异常设置的检测结果与实际吻合 .

关键词 :地下电站 ;特殊锚杆 ;声波无损检测 ;密实度 ;锚杆长度检测

中图分类号 :TU753 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)02-0179-06

三峡右岸地下电站是一个纵横相连、立体交叉、体型复杂的庞大地下工程 .由于主厂房埋深较浅并局部围岩偏薄 ,且厂房顶拱存在 F_{22} 、 F_{84} 等断层带影响 ,因此保证大跨度(岩锚梁以上开挖宽度为 32.6 m)厂房顶拱施工安全、控制围岩变形尤为重要 .为确保主厂房工程安全 ,地下电站主厂房系统岩体支护体系设计采用系统砂浆锚杆及预应力锚杆等支护形式 ,根据水工结构等需要 ,尾水系统采用设自由段并带直角弯钩的砂浆特殊锚杆 .

锚杆系统属于隐蔽性工程 ,其注浆密实度直接与地下工程岩体支护体系长期、安全、稳定运行有关 .锚杆注浆不密实可导致锚杆在地下水及空气的综合作用下锈蚀(或腐蚀)破坏 ,以致地下工程岩体支护体系失效 ,影响枢纽工程的安全运行^[1-2] .特殊锚杆锚固形式(如外延端过长、带弯头等)工后如何检测以保证施工质量 ,是目前需要研究的应用问题 .工程常用的拉拔力检测 ,由于不能反映锚杆锚固施工注浆密实度 ,已经较少采用 ,而逐渐代之以声波无损检测技术^[3-4] .本文针对三峡右岸地下电站工程采用的特殊锚杆锚固形式 ,通过影响无损检测成果因素的检测与分析^[5-7] ,将无损检测与剖杆检验结果进行对比 ,以验证声波无损检测锚杆注浆密实度的可靠性 .

1 检测原理

锚杆锚固质量无损检测采用声频应力波法 .其原理如下^[8-10] .

图 1 中的锚杆外端面上 ,由发射换能器入射一瞬时脉冲 ,由接收换能器接收反射信号再传到仪器 .

当杆中截面面积或材料性质发生变化时 ,入射波将在该截面上发生反射和透射 .其反射波和透射波幅值的大小与截面面积及波阻抗相对变化的程度有关 .当锚杆、砂浆和围岩浇灌均匀、密实时 ,三者之间的波阻抗差异不大 ,因此大部分能量透射出去 ,只有少部分能量反射回来 .当砂浆浇灌不均匀、不密实时 ,则在砂浆中的空隙处呈现出强的波阻抗差异 ,表现为在原有的信号波形上叠加了反射波信号 ,反射波能量大大增强 .通过分析反射波与入射波之间的能量关系 ,可以判断出锚固体系的密实程度 .同时 ,当应力波遇到锚固缺陷时 ,原有的振动发生变化 ,表现为在缺陷处产生

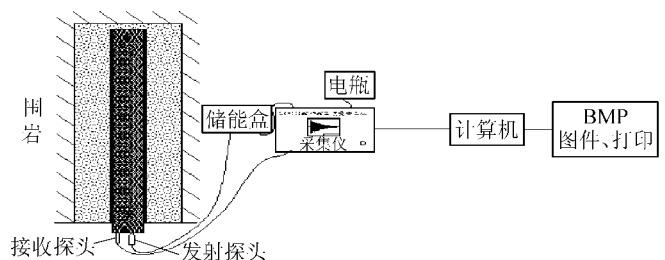


图 1 锚杆质量检测示意图

Fig. 1 Quality tests on bolts

收稿日期 :2008-04-03

基金项目 :国家科技支撑计划(2006BAB04A06)、国家自然科学基金、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金(50539110)

作者简介 :张建清(1965 —)男 ,浙江金华人 ,高级工程师 ,硕士 ,主要从事工程物探研究 .

了相位突变,因此可以通过分析反射波的相位变化位置判断出锚固缺陷。

2 试验设计

试验检测所用仪器为 LX-10E 型锚杆锚固质量检测仪,主机配套设备包括信号发射电缆线和接收电缆线各 1 根,发射探头和接收探头各 1 个,储能盒和电瓶各 1 个。检测时采用的主要作业技术指标如下:(a)采样点长度字节 3.0 kB;(b)采样频率 250.0 kHz;(c)采样电压 150.0~250.0 V;(d)信号触发方式为发射机同步触发。

根据 GB 50086—2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》的规定^[11],并参照国内其他工程标准,将锚杆的注浆密实度(指锚杆与围岩之间实际充填水泥砂浆的体积与锚杆孔总体积(不包括锚杆体积)的比值)检测结果按以下标准进行分级评价。(a)A 级:注浆密实度大于或等于 90%,质量评价为优良。(b)B 级:注浆密实度大于或等于 80%,但小于 90%,且最大空腔端长度不大于 5 cm,质量评价为合格。(c)C 级:注浆密实度小于 80%,质量评价为不合格。

试验检测交通洞外 8 组 24 根锚杆,其规格、施工工艺、外延端长度及异常情况见表 1。

表 1 锚杆规格、施工工艺、外延端长度和异常的设置

Table 1 Dimensions, construction technologies, extension length and abnormal setting locations for bolts

编号	锚杆规格		施工工艺	外延端长度/cm	异常设置
	直径/mm	设计长度/m			
I-1	32	9	先插后注	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
I-2	32	9	先插后注	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
I-3	32	9	先插后注	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
II-4	32	9	先注后插	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
II-5	32	9	先注后插	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
II-6	32	9	先注后插	100	外延端长度按 80 cm、60 cm、40 cm、20 cm 分别检测
III-7	32	9	先注后插	20	中端设变径段,长度不一
III-8	32	9	先注后插	20	中端设变径段,长度不一
III-9	32	9	先注后插	20	中端设变径段,长度不一
IV-10	32	9	先注后插	20	底端均设有 5 cm 厚度的高密海绵
IV-11	32	9	先注后插	20	底端均设有 5 cm 厚度的高密海绵
IV-12	32	9	先注后插	20	底端均设有 5 cm 厚度的高密海绵
V-13	32	9	先注后插	20	锚杆内设置自由端,起始位置 4.9 m
V-14	32	9	先注后插	20	锚杆内设置自由端,起始位置 4.1 m
V-15	32	9	先注后插	20	锚杆内设置自由端,起始位置 3.3 m
VI-16	32	9	先注后插	20	底端异常 210 cm
VI-17	32	9	先注后插	20	底端异常 390 cm
VI-18	32	9	先注后插	20	底端异常 530 cm
VII-19	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m,带自由段
VII-20	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m,带自由段
VII-21	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m,带自由段
VIII-22	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m
VIII-23	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m
VIII-24	32	7	先注后插	135	弯头 0.5 m

3 检测结果与评价

3.1 锚杆锚固质量检测与评价

根据检测的波形、相位规律及反射信号强烈程度等(图 2)判断锚杆锚固的质量,对比剖杆结果,确定质量评价结果,见表 2(参照表 1 的异常设置部分)。

a. 第 I 组 3 根锚杆检测结果所表现出的特征几近相同,随着外延端长度递减,原始波形越规则,反射能量越小,检测波形中瞬时相位谱所呈现的规律性逐渐加强,检测结果无明显差异,质量为优良。

b. 第 II 组 3 根锚杆检测结果同第 I 组,说明在施工工艺方面,先插后注或先注后插,波形、相位等特征无明显差别。

c. 第 III 组 3 根锚杆分别从原始波形约 3.7 m 开始反射波幅显著增强,检测波形中相位谱在该处有明显突变点,推测该处为波阻抗变化界面。

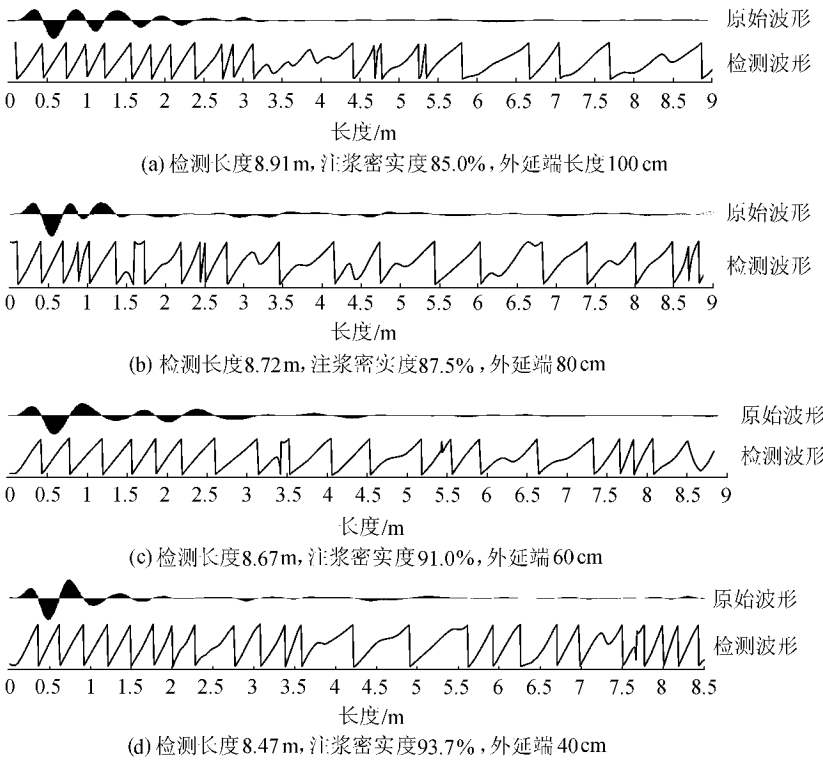


图 2 I-3 锚杆检测波形、相位规律及反射信号

Fig. 2 Sonic wave shapes , phase laws and reflecting signals for bolt I-3

表 2 锚杆锚固质量检测结果评价

Table 2 Test results for bolts

编号	检 测 结 果	剖 杆 结 果	注浆密实度/%	评价
I-1	波形规则 相位谱规律性强	砂浆表面有气泡 未见大的缺陷	97.2	优良
I-2	波形规则 相位谱规律性强	砂浆表面有气泡 未见大的缺陷	95.6	优良
I-3	波形规则 相位谱规律性强	砂浆表面有气泡 未见大的缺陷	94.3	优良
II-4	约 7.6 m 处相位有畸变点	II-4 约 7.6 m 始 0.5 m 范围内一侧砂浆	96.5	优良
II-5	波形规则 相位谱规律性强	欠饱满,砂浆表面有气泡 未见大的缺陷	96.8	优良
II-6	波形规则 相位谱规律性强	欠饱满,砂浆表面有气泡 未见大的缺陷	95.0	优良
III-7	约 3.7 m 处反射波幅增强	3.7 m 处为变径段起点,密实度小于 90%	81.2	合格
III-8	相位谱有明显突变点	3.7 m 处为变径段起点,密实度小于 90%	82.7	合格
III-9	相位谱有明显突变点	3.6 m 处为变径段起点,密实度小于 90%	83.6	合格
IV-10	波形规则 相位谱规律性强	杆底设有 5 cm 厚的海绵,砂浆表面	91.6	优良
IV-11	底端呈低频较强反射	分布有少许气孔 未见大的缺陷	92.4	优良
IV-12	杆底设有纸板等物	分布有少许气孔 未见大的缺陷	91.7	优良
V-13	约 5.0 m 处反射增强,自由段起点	4.9 m 处为自由段起点 未见大的缺陷	94.5	优良
V-14	约 3.7 m 处反射增强,判断为自由段起点;约 2.0 m 处反射增强 相位有奇变点,推测该处存在缺陷	4.1 m 处为自由段起点 2.0 m 处存在一约 4.0 cm × 1.5 cm × 1.0 cm 的空腔,砂浆表面有少许气孔 未见大的缺陷	91.2	优良 优良
V-15	约 3.2 m 处反射信号增强,判断该处为自由段起点	3.3 m 处为自由段起点;砂浆表面有少许气孔 未见大的缺陷	94.1	优良
VI-16	判断 2.0 m 处为自由段终点	2.3 m 处为自由段终点 未见大的缺陷	92.0	优良
VI-17	判断 4.0 m 处为自由段终点	4.1 m 处为自由段终点 未见大的缺陷	91.8	优良
VI-18	判断 6.0 m 处为自由段终点	5.5 m 处为自由段终点 未见大的缺陷	91.0	优良
VII-19	波形规则,规律性强	自由段长 0.5 m,砂浆表面有少许气泡	94.2	优良
VII-20	检测自由段长度为 0.6 m	未见大的缺陷	93.9	优良
VII-21	检测自由段长度为 0.6 m	未见大的缺陷	95.4	优良
VIII-22	波形规则,规律性强	砂浆表面有少许气泡 未见大的缺陷	95.7	优良
VIII-23	波形规则,规律性强	砂浆表面有少许气泡 未见大的缺陷	96.4	优良
VIII-24	波形规则,规律性强	砂浆表面有少许气泡 未见大的缺陷	95.4	优良

注 表中注浆密实度值为锚杆外延端长度为 20 cm 时的检测值。

d. 第 IV 组 3 根锚杆原始波形整体较规则,入射信号强,反射信号弱,检测波形中相位谱除个别部位有突

变外,规律性较强,底端反射起跳很干脆,幅值较大,初步判断该组锚杆底部设有纸板或塑料等物使波阻抗差异明显.检测结果无明显差异,质量为优良.

e.第Ⅴ组3根锚杆分别约在原始波形在5.0 m 3.7 m 2.0 m之前入射信号强,反射信号弱且有规律地衰减,推测该处为波阻抗变化面,检测结果无明显差异,质量均为优良.

f.第Ⅵ组3根锚杆分别在原始波形约2.0 m 4.0 m 6.0 m之前入射信号强,反射信号较强,波形较规则,该处后反射信号增强且有规律地衰减.推测该处为波阻抗变化面,即杆中自由段之终点.检测结果无明显差异,质量均为优良.

g.第Ⅶ组3根锚杆根据原始波形检测结果,其表现出的特征几近相同,检测结果无明显差异,质量为优良.

h.第Ⅷ组3根锚在原始波形上基本同第Ⅶ组锚杆.第Ⅷ组锚杆的注浆密实度均在98%左右,检测结果无明显差异,质量为优良.

3.2 外延端长度对锚杆注浆密实度检测结果影响

对第Ⅰ,Ⅱ组锚杆进行检测,分外延端长100 cm 80 cm 60 cm 40 cm 20 cm各检测1次,检测结果见表3.

从表3可以看出,外延端长度直接影响锚杆的检测注浆密实度,即外延端长度越长,测得的锚杆注浆密实度误差越大,其相关关系基本具线性特征.线性相关分析的结果及长度截为0时线性模型值的误差见表4.

表4 第Ⅰ,Ⅱ组锚杆外延端长度与锚杆检测注浆密实度的线性关系

Table 4 Result of linear relationship between test and extension lengths for group I and II						
编号	斜率	截距值/%	相关系数	F统计值	注浆密实度实际值/%	绝对误差/%
I-1	-0.134	99.51	0.971	48.71	97.0	2.59
I-2	-0.127	98.44	0.995	29.69	99.8	1.36
I-3	-0.124	97.74	0.981	74.52	98.6	0.87
II-4	-0.125	99.43	0.998	63.92	98.0	1.46
II-5	-0.124	99.19	0.943	23.96	98.6	0.60
II-6	-0.103	97.81	0.964	38.83	98.8	1.00

注:表中绝对误差为长度截为0时线性模型值的绝对误差.

表4说明,外延端长度与锚杆检测注浆密实度呈线性相关,相关系数在0.943以上,平均值的相关系数达0.998;F统计值在23.96以上,均大于相应的临界值10.13(显著性水平为0.05).检测结果通过模型计算的注浆密实度与实际值相比,相对误差在2.59%以内,即锚杆外延端长度在100 cm内时,可以利用表4中的线性模型(平均值或总平均值)进行修正.根据这2组锚杆长度检测结果并结合锚杆注浆密实度的检测结果,说明在施工工艺上,先插后注或先注后插无明显区别,这与文献[12]得到的结论存在一定差别.

3.3 异常段起始位置检测结果

第Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ组锚杆主要检测异常段起始位置,检测结果见表5.第Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ组锚杆规格的示意图见图3.

表5显示,对异常段起始位置的检测基本满足规定的要求.第Ⅲ组锚杆的检测值与实际值基本无误差;第Ⅴ组锚杆的检测值与实际值的相对误差在9.76%以内;第Ⅵ组锚杆检测值与实际值的相对误差在13.04%以内.

3.4 带弯头外延端长度对锚杆注浆密实度检测结果的影响

第Ⅶ,Ⅷ组锚杆的设置均带0.5 m的弯头,第Ⅶ组锚杆的外延端长度为135 cm,第Ⅷ组锚杆的外延端长为135 cm.首次检测后,截成80 cm和20 cm各检测1次,检测结果见表6.锚杆规格(Ⅶ-19)示意图见图4.

表3 第Ⅰ,Ⅱ组锚杆注浆密实度检测结果

Table 3 Tests of compactness of bolts for group I and II						
编号	不同外延端长度时锚杆 注浆密实度检测结果/%					实际值/ %
	100 cm	80 cm	60 cm	40 cm	20 cm	
I-1	86.0	88.5	93.0	92.8	97.2	97.0
I-2	85.6	88.0	91.5	93.4	95.6	99.8
I-3	85.0	87.5	91.0	93.7	94.3	98.6
II-4	87.0	89.5	92.1	94.0	96.5	98.0
II-5	88.2	87.0	92.4	94.5	96.8	98.6
II-6	87.6	88.6	92.8	94.3	95.0	98.8

表5 异常段起始位置检测结果

Table 5 Starting location of abnormal segment					
锚杆 编号	异常段起始位置/m		锚杆 编号	异常段起始位置/m	
	检测值	实际值		检测值	实际值
III-7	3.7	3.7	V-15	3.2	3.3
III-8	3.7	3.7	VI-16	2.0	2.3
III-9	3.7	3.6	VI-17	4.0	4.1
V-13	5.0	4.9	VI-18	6.0	5.5
V-14	3.7	4.1			

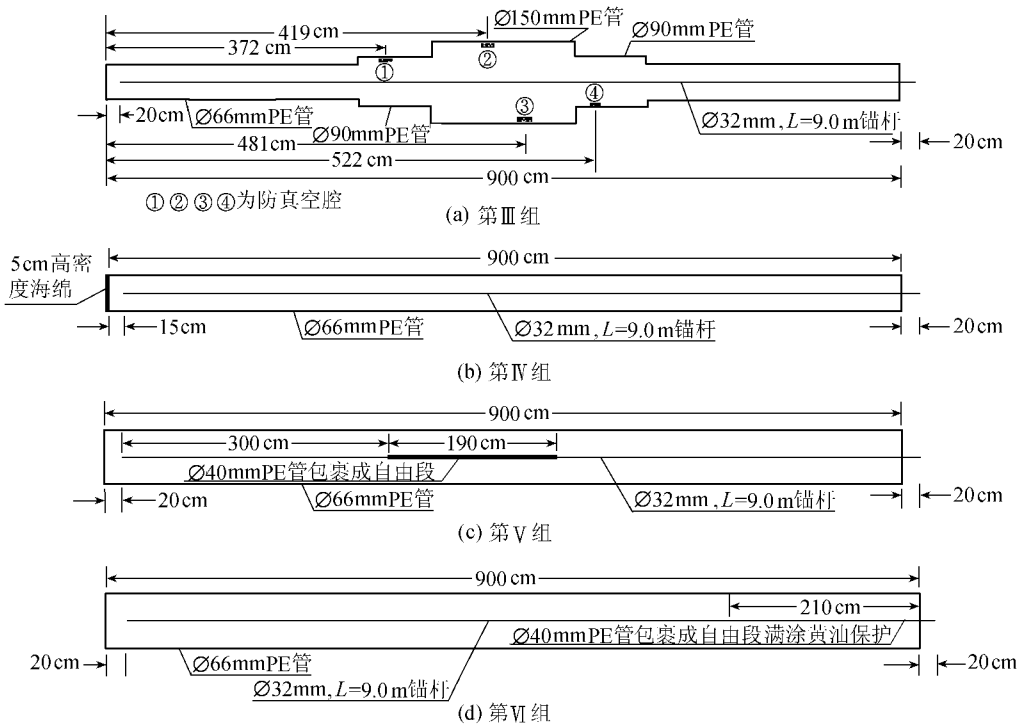


图 3 第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组锚杆规格示意图

Fig. 3 Dimensions for bolts (group Ⅲ , Ⅳ , Ⅴ and Ⅵ)

表 6 第Ⅶ、Ⅷ组锚杆注浆密实度检测结果

Table 6 Tests of compactness of bolts for group Ⅶ and Ⅷ

编号	不同外延端长度时锚杆注浆密实度检测结果/%			实际值/ %
	135 cm	80 cm	20 cm	
Ⅶ-19	85.3	87.5	94.2	98.0
Ⅶ-20	86.9	89.0	93.9	98.7
Ⅶ-21	86.3	88.8	95.4	98.6
Ⅷ-22	87.2	92.0	95.8	98.3
Ⅷ-23	85.1	94.0	96.4	98.9
Ⅷ-24	86.5	91.0	95.4	98.1

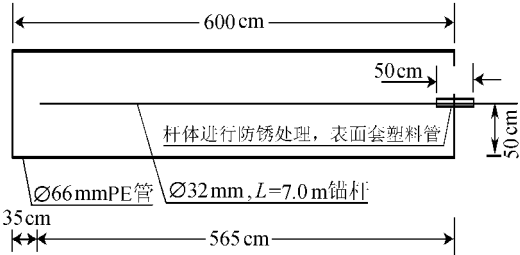


图 4 Ⅶ-19 锚杆规格示意图

Fig. 4 Dimensions of bolts (Ⅶ-19)

从表 6 可以看出,带弯头外延端长度直接影响锚杆的检测注浆密实度,即带弯头外延端长度越长,测得的锚杆注浆密实度误差越大。线性相关分析结果及长度截为 0 时线性模型值的误差见表 7。

表 7 第Ⅶ、Ⅷ组锚杆外延端注浆密实度与锚杆检测长度的线性关系

Table 7 Results of linear relationship between test and extension lengths for group Ⅶ、Ⅷ

编号	斜率	截距值/%	相关系数	F 统计值	注浆密实度实际值/%	绝对误差/%
Ⅶ-19	-0.078	95.10	0.967	14.26	98.0	2.96
Ⅶ-20	-0.061	94.73	0.980	23.88	98.7	4.02
Ⅶ-21	-0.080	96.40	0.974	18.34	98.6	2.23
Ⅷ-22	-0.066	97.19	0.999	19.48	98.3	1.13
Ⅷ-23	-0.088	99.17	0.962	12.44	98.9	0.27
Ⅷ-24	-0.068	96.66	0.999	69.57	98.1	1.47

由表 7 可见,带弯头外延端长度与锚杆检测注浆密实度基本呈线性相关,相关系数在 0.962 以上,相关系数最大值达 0.999 以上。检测结果通过模型计算的注浆密实度与实际值相比,相对误差在 4.02% 以内(和表 4 相比,属同类设置锚杆),带弯头外延端长度检测的线性模型的斜率小于不带弯头的斜率(后者平均是前者的 1.68 倍),说明外延端带弯头后对检测注浆密实度的影响更大。通过第Ⅶ组与第Ⅷ组锚杆的检测结果比较,第Ⅶ组锚杆的模型误差大于第Ⅷ组锚杆的模型误差(前者平均是后者的 1.56 倍),说明带弯头外延端对检测注浆密实度有较大影响,而且带弯头的外延端越长,对检测注浆密实度的影响越大。

4 结 论

- a. 声波无损检测锚杆的注浆密实度基本能满足试验要求.除第Ⅲ组锚杆锚固质量评价为合格外,其余各组锚杆锚固质量均评价为优良,与实际情况吻合.
- b. 锚杆外延端长度的变化产生系统检测误差较明显,锚杆外延端长度越小,锚杆注浆密实度检测精度越高.第Ⅰ,Ⅱ组将外延端按20 cm逐级割短检测,随锚杆外延长度的减小,检测精度呈线性规律性的递增,即可以根据外延端的不同长度,利用线性模型进行修正.
- c. 当锚杆内部设模拟空腔或自由段时,第一处缺陷的反射信号较为准确,但其后的缺陷信号易被第一处缺陷的反射信号所湮没,并产生较大的检测误差.
- d. 带弯头外延端长度与锚杆检测注浆密实度基本呈线性相关.外延端带弯头后对锚杆检测注浆密实度的影响比不带弯头更大,且带弯头的外延端越长,对锚杆检测注浆密实度的影响越大.
- e. 按现有的锚杆施工工艺,无论是先注浆还是先插杆,对注浆密实度、锚杆长度检测无明显差别.

致谢:中国长江三峡工程开发总公司、宜昌青云水利水电联营公司地下电站项目部、三峡发展地下电站监理部以及试验课题组相关人员.

参考文献:

- [1] 吴斌,孙雅欣,何存富,等.全长黏结型锚杆高频超声导波检测应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):397-403.
- [2] 陈武,朱赞义,黄衢南高速公路隧道锚杆锚固质量无损检测技术及应用[J].工程建设与设计,2007,2:73-75.
- [3] 钟宏伟,胡祥云,熊永红,等.锚杆锚固质量声波检测技术的现状分析[J].工程地球物理学报,2005,2(1):50-55.
- [4] 李义,刘海峰,王富春.锚杆锚固状态参数无损检测及其应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1741-1744.
- [5] 朱自强,何现启.全长锚杆的无损检测研究[J].工程地球物理学报,2005,2(5):330-334.
- [6] 张昌锁,李义,赵阳升,等.锚杆锚固质量无损检测中的激发波研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1240-1245.
- [7] 朱国维,彭苏萍,王怀秀.高频应力波检测锚固密实状况的试验研究[J].岩土力学,2002,23(6):787-791.
- [8] SCHMITT D P, MICHEL B. Full-wave acoustic logging: synthetic micro-seismograms and frequency-wave number analysis[J]. Geophysics, 1985, 50(11):1756-1778.
- [9] ALSHAIKH I A, TURHAN D, MENG I Y. Transient waves in viscoelastic cylindrical layered media[J]. European Journal of Mechanics, A Solids, 2002, 21: 811-830.
- [10] 刘盛东,张平松.工程锚杆锚固质量动测技术[J].地球物理学进展,2004,19(3):687-572.
- [11] GB50086—2001,锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [12] 曾龙翔.江垭枢纽引水发电系统综述[J].人民长江,2000,31(4):3-5.

Factors in quality of special bolts based on sonic non-destructive detection

ZHANG Jian-qing¹, WU Ji-min², PENG Gang¹, LU Er-nan¹, CHEN Min¹

(1. Wuhan Changjiang Engineering Geophysical Exploration Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Sonic non-destructive detection of special bolts was carried out under the request of the Three Gorges right bank underground power station. The effects of the extension length, the abnormal setting location and different construction technologies of the bolt system on the quality of bolts were studied using the statistical and regressive methods. The results of qualitative and quantitative analyses show that grouting compactness of the bolts meets the engineering requirements; the smaller the extension length of the bolts, the higher the precision, and the extension length can be corrected using the linear regressive method according to different requirements; generally, the extension length with crooks linearly relates to the test length of the bolts; and the abnormal setting test location is in accordance with the actual one.

Key words: underground power station; special bolts; sonic non-destructive detection; compactness; bolt length test