

提高岩体完整性指数

计算成果准确率

青岛市勘察测绘研究院锐意精勘 QC 小组活动报告



目 录

1、QC小组简介	1
2、选题背景	2
3、现状调查	2
4、确定QC活动目标	2
4.1 目标设定	5
4.2 目标可行性分析	5
5、原因分析	6
6、要因确认	7
7、制定对策	11
8、对策实施	12
8.1 对策一实施	12
8.2 对策二实施	16
9、QC活动效果检查	18
9.1 依托工程实践检查	18
9.2 专家评审检验	19
9.3 效益分析	19
10、巩固措施及标准化推广应用	20
11、总结回顾及下一步打算	21
11.1 总结回顾	21
11.2 今后打算	22

1、QC 小组简介

青岛市勘察测绘研究院锐意精勘 QC 小组由 11 人组成，全部都是从事城市轨道交通项目、工业与民用建筑建设项目岩土工程勘察设计的专业技术人员。小组中有一名成员为中国勘察设计协会 QC 小组活动诊断师。QC 小组简况表如表 1-1 所示。

表 1-1 QC 小组简况表

课题名称		提高岩体完整性指数计算成果准确率					
小组名称		青岛市勘察测绘研究院锐意精勘 QC 小组					
成立时间		2015 年 3 月		注册登记号		QDKCY-QC2015-001	
小组人数		11 人		重新注册时间		2017 年 2 月	
活动时间		2017 年 9~12 月		活动次数		8	
课题类型		攻关型		活动出勤率		98%	
序号	姓名	性别	年龄	文化程度	职称/职务	组内职务	组内职责
1	何松	男	37	硕士	工程师	组长	全面组织领导，制定 QC 活动计划
2	冀东	男	31	博士	高级工程师/中设协 QC 小组活动诊断师	副组长	QC 活动方案编制，活动指导
3	王泽勇	男	30	硕士	工程师	组员	原因分析，要因确认，资料编写
4	孙玺	男	32	硕士	工程师	组员	对策实施，信息反馈，资料校核
5	孙波	男	37	本科	工程师	组员	对策实施，信息反馈，效果检查
6	魏嘉新	男	35	本科	工程师	组员	组织协调，现状调查，要因确认
7	王伟	男	37	本科	工程师	组员	现状调查，要因确认，对策实施
8	李云鹏	男	32	本科	工程师	组员	要因确认，收集记录，成果整理
9	仇革	男	30	本科	工程师	组员	对策实施，信息反馈，效果检查
10	刘元贤	女	35	本科	助理工程师	组员	要因确认，对策实施，信息反馈
11	邵铖	男	34	本科	工程师	组员	组织协调，要因确认
获奖情况		开展的“提高繁华街区地铁勘察成果精度”课题获 2017 年度国家工程建设（勘察设计）优秀 QC 成果二等奖 开展的“提高复杂地质条件下勘察钻孔一次合格率”课题获 2016 年度山东省工程建设（勘察设计）优秀 QC 成果二等奖					

2、选题背景

岩体完整性指数是表征岩体完整程度的地质术语，其物理含义是岩体相对于完整岩石的完整程度。岩体完整性指数是通过获取岩体和岩块的纵波速度进行计算得到的。岩体内存在的各种结构面及充填物质使得弹性波在岩体内的传播速度降低，岩体弹性纵波速度反映了由于岩体的不完整性而降低了的物理力学性质；岩块则认为基本上不包含明显的结构面，测得的岩块的弹性纵波速度反映的是完整岩石的物理力学性质。岩体完整性指数是一个与岩体质量等级和强度有关的参数。

许多工程岩体质量等级评价方法中，都将岩体完整性指数作为计算岩体质量等级的一个重要指标。如式(2-1)、(2-2)所示，我国现行的《工程岩体分级标准》中将岩体完整性指数作为计算岩体质量指标 BQ 的 2 个参数之一；《水利水电工程地质勘察规范》中坝基和围岩工程地质分类都将岩体完整性指数作为一个重要指标。

$$BQ = 100 + 3R_c + 250K_v \quad (2-1)$$

$$K_v = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}}\right)^2 \quad (2-2)$$

式中： BQ —岩体基本质量指标； R_c —岩石饱和单轴抗压强度； K_v —岩体完整性指数，精确至 0.01； V_{pm} —岩体纵波速度(m/s)； V_{pr} —岩块纵波速度(m/s)；

大量工程实践经验及文献研究都表明，岩体完整性指数是岩体工程特性研究和工程岩体质量等级评价中的一个重要参数。合理确定和应用岩体完整性指数对准确划分岩体完整程度，正确评价工程岩体质量等级至关重要。由于岩体中包含各种结构面，其纵波速度应小于岩块的纵波速度，理论上讲，岩体完整性指数不应大于 1，然而，在实际工作中采用声波测井资料计算岩体完整性指数 K_v 时，常会出现大于 1 的情况。当这种情况出现较为频繁时，将造成计算的岩体完整性指数不能真实地反映岩体的完整程度，进而影响岩体质量等级的准确评价，造成岩体围岩分级结果偏好，增加地下建设工程中的安全隐患风险，不利于项目工期、造价目标的实现。

为此，青岛市勘察测绘研究院锐意精勘 QC 小组，以承担的青岛城市轨道交通岩土工程勘察项目为依托，拟通过开展攻关型 QC 课题提高岩体完整性指数计算成果准确率，使岩体基本质量指标计算结果更加符合实际工程地质条件，为地铁隧道围岩分级提供更为准确的依据，降低后期建设过程中的围岩变更率。

3、现状调查

为调查岩体完整性指数计算成果准确率现状，经QC小组的讨论后，组织成员专门对近年来青岛市多条地铁线路的岩土工程勘察报告中岩体完整性指数计算成果进行了调查，统计分析其可靠程度（以 K_v 大于 1 为异常指标阈值），并制成了情况调查表如表 3-1 所示。


表 3-1 青岛地区地铁勘察项目 K_v 计算结果大于 1 情况调查表

项目名称	隧道穿过主要围岩特性	声波测井资料计算的 K_v 大于 1 的发生率
2 号线海川路站	以中~微风化花岗岩为主, 穿插发育微风化煌斑岩	35%
3 号线万年泉路站	以微风化花岗岩为主	27%
3 号线河万区间	以微风化花岗岩为主	22%
3 号线泉李区间	以微风化花岗岩为主	20%
3 号线君峰路站	以微风化花岗岩为主	23%
4 号线错埠岭站	以中~微风化花岗岩为主, 穿插发育微风化煌斑岩	23%
11 号线科辽区间	以中等~微风化花岗岩为主, 穿插发育微风化煌斑岩	40%
K_v 大于 1 的平均发生率		27%

小组成员对调查过程中发现的几个典型 K_v 大于 1 且与现场情况不符存在异常的情况进行了统计, 并制成了统计表如表 3-2 所示:

表 3-2 青岛地区地铁勘察项目 K_v 计算结果大于 1 情况调查表

项目名称	勘察钻探取芯照片	K_v 的计算情况
青岛地铁 3 号线 泉李区间		ZX129 号孔, 13.9-15m 为微风化花岗岩, 测得岩块 $V_{pr}=2773$ m/s, 岩体 $V_{pm}=4160$ m/s, 计算 $K_v=2.25>1$; 与现场实际情况差异大。
青岛地铁 4 号线 错埠岭站		Z3-SCB-19 号孔, 24.0-24.2m 为微风化花岗岩, 测得岩块 $V_{pr}=2592$ m/s, 岩体 $V_{pm}=3999$ m/s, 计算 $K_v=2.38>1$; 与现场实际情况差异大。

项目名称	勘察钻探取芯照片	K_v 的计算情况
青岛地铁 4 号线 错埠岭站		ZE-SCB-19 号孔, 39.0-39.5m 为微风化花岗岩, 测岩芯 $V_{pr}=4000$ m/s, 岩体 $V_{pm}=4545$ m/s, 计算 $K_v=1.29>1$; 与现场实际情 况差异较大。

由表 3-1 及 3-2 可知, 岩体完整性指数计算中声波测井资料计算的 K_v 大于 1 的发生率约为 27%, 且其中相当一部分与勘察钻探取芯及后期现场验洞查勘的情况不符。这说明岩体的完整性指数计算结果准确率较低, 进而可能导致勘察成果的可靠性及准确性无法满足业主、设计单位及施工单位等地铁建设项目各相关方的预期要求。

为了进一步分析岩体完整性指数计算准确率较低的原因, 小组成员对收集到的 319 个完整性指数计算成果的数值异常原因进行了调查, 经过统计整理, 制成了影响因素统计表 (表 3-3) 与排列图 (图 3-1)。

表 3-3 岩体完整性指数计算结果准确率低的影响因素统计表

序号	影响因素	频数 (次)	频率	累计
1	岩块波速测试结果不准确	239	74.92%	74.92%
2	岩体波速测试结果不准确	47	14.73%	89.66%
3	试验岩块代表性不足	14	4.39%	94.04%
4	试验岩块形状尺寸不规范	9	2.82%	96.87%
5	岩块波速测试过程不规范	7	2.19%	99.06%
6	其他因素	3	0.94%	100%
合计		319	100%	

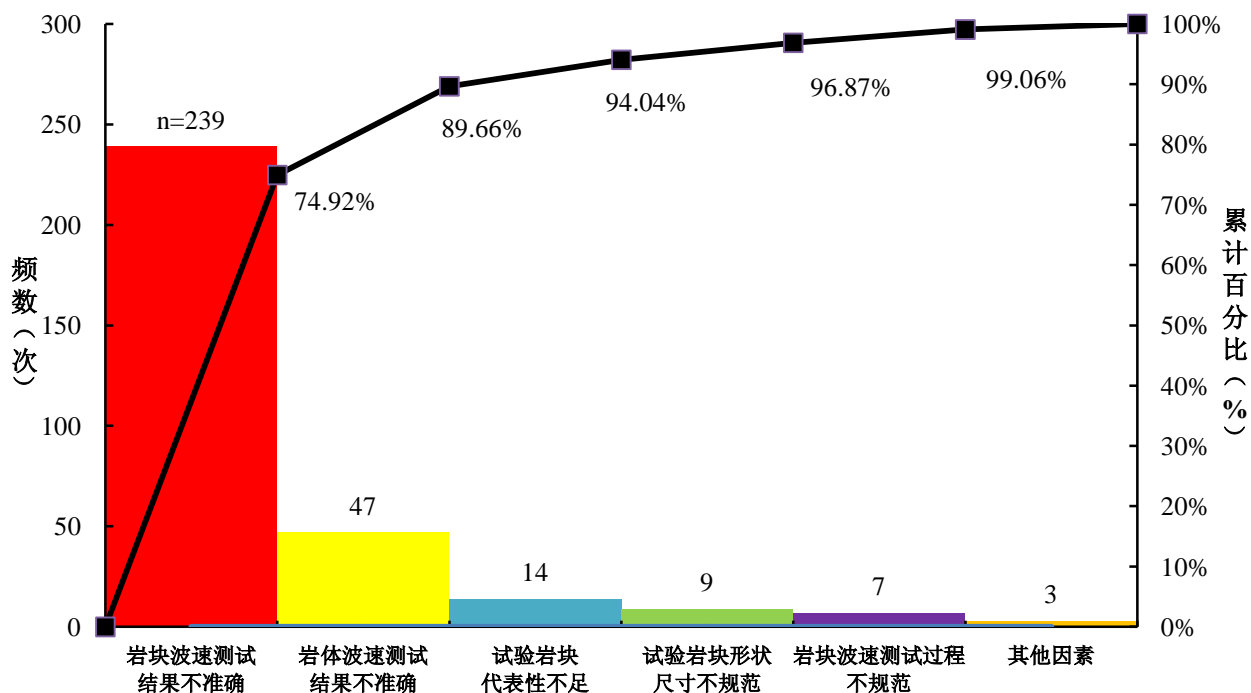


图 3-1 岩体完整性指数计算准确率低的影响因素排列图

由表 3-3 及图 3-1 可以看出，“岩块波速测试结果不准确”是造成完整性指数计算成果准确率低的主要症结所在。

4、确定 QC 活动目标

4.1 目标设定

为提高地铁隧道围岩分级的准确度，减少地铁隧道建设的安全隐患风险，需要提高岩体完整性指数 K_v 计算结果准确率。根据青岛市勘察测绘研究院地铁勘察项目部与院总工办、质检站等技术质量管理部门的要求：将岩体完整性指数 K_v 计算值大于 1 的发生率控制在 10% 以内。故 QC 小组成员将活动目标设定为：岩体完整性指数 K_v 计算值大于 1 的发生率不超过 10%。目标设定图如图 4-1 所示。

4.2 目标可行性分析

经调查分析，导致岩体完整性指数 K_v 计算值大于 1 的主要原因是岩块波速测试结果不准确，该因素占比接近 75%。岩块波速的测试结果与人员、测试方法、现场环境、岩块试件、仪器设备等数个因素有关，这些因素在一定程度上均属于可控因素。因此本次 QC 小组设定的活动目标：岩体完整性指数 K_v 计算值大于 1 的发生率不超过 10%，是可以实现的。

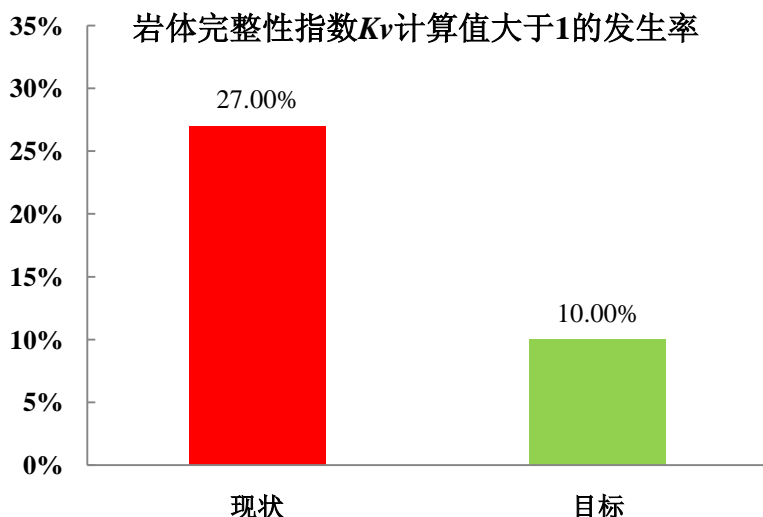


图 4-1 QC 小组活动目标设定图

5、原因分析

针对现状调查中存在的主要问题及活动目标，QC 小组广泛收集了有关岩块声波波速测试方面的资料，并组织进行了多次分析论证，围绕“岩块波速测试结果不准确”这一主要症结，利用因果分析图进行了原因分析，共找到了 7 个末端因素，并制成了因素分析图如图 5-1 所示。

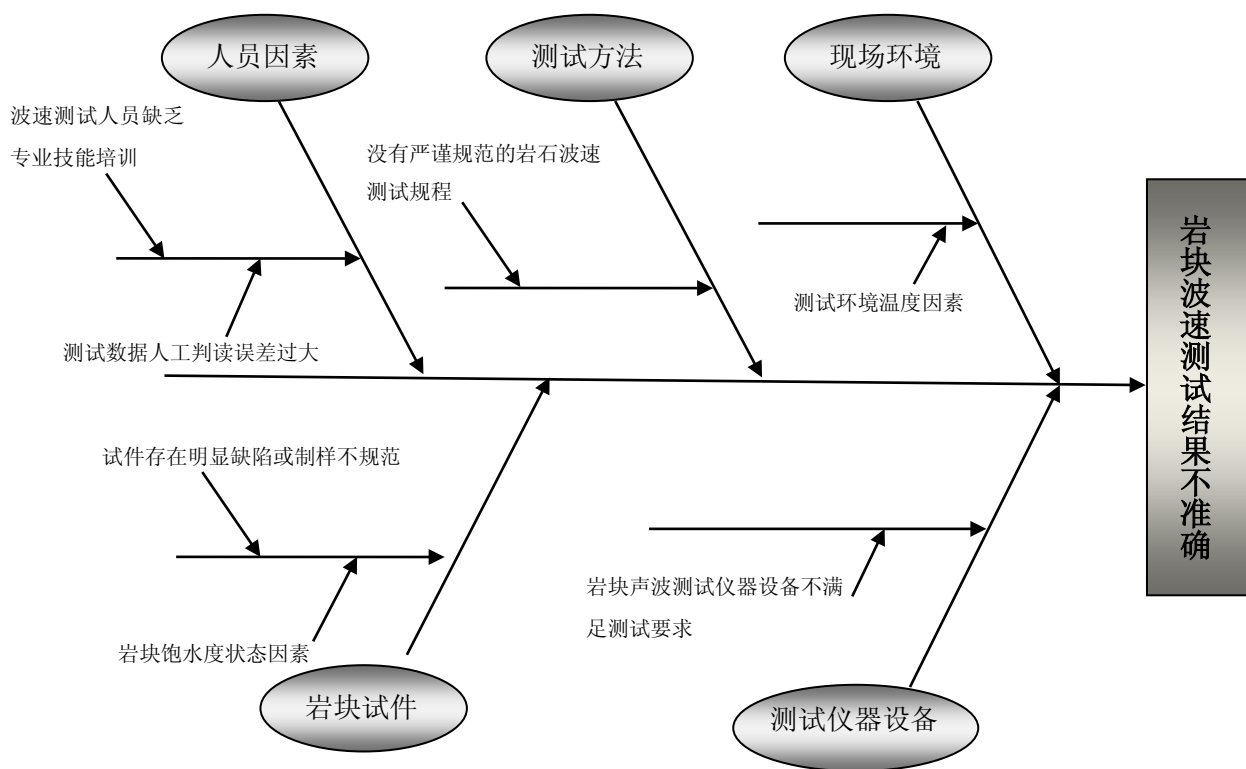
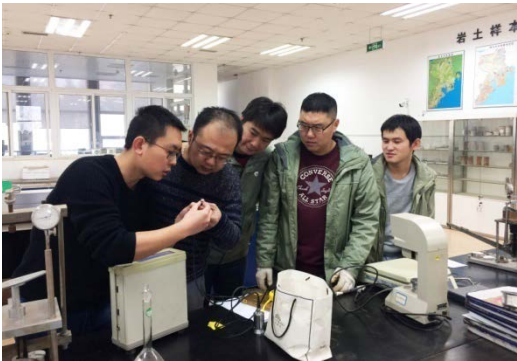



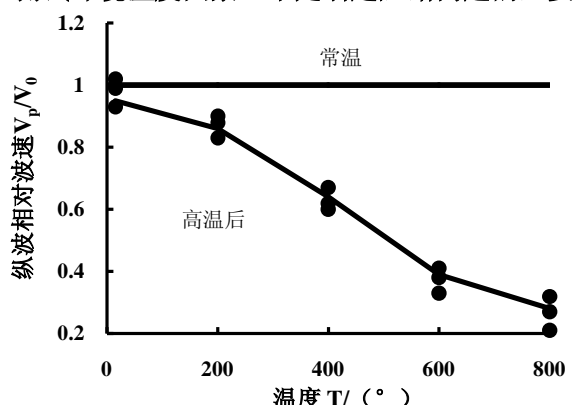

图 5-1 因果分析图



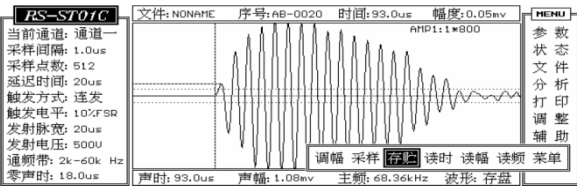
6、要因确认


针对原因分析中确认的 7 个末端因素，QC 小组经会议研究，通过现场调查、查阅文献、对比分析等手段，对 7 个末端因素进行了逐一的调查、取证和分析，并制成了要因确认表。通过调查分析，最终确定了 2 个要因。具体情况如表 6-1 所示。

表 6-1 要因确认表

序号	因素	确认方法	判断标准	验证结果	验证人	要因判断
1	波速测试人员缺乏专业培训	现场抽查、考核评分	考核成绩大于 85 分	<p>小组成员对波速测试试验人员综合技能情况进行了抽查，对国家有关标准规范、操作规程、仪器性能等的掌握了解情况进行考核测试，随机抽查了 3 名试验测试人员并进行考核评分（60-70 分为合格，70-85 分为良，85-100 分为优秀），测试结果 3 人成绩均达到优秀。同时现场查看了试验人员的实际操作水平，均能规范流畅地开展试验工作。</p> <p>由此可见，波速测试试验人员都接受了系统的专业技术培训，“波速测试人员缺乏专业技能培训”不是引起症结问题的主要原因。</p> 	魏嘉新、孙玺	非要因
2	岩块饱水状态因素	查阅文献、对比分析	不同饱水度状态岩块波速测试结果差异值大于 10%	<p>为了分析岩块处于不同饱水度状态对声波速度的影响特征，小组成员检索查阅了《饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究》、《饱水大理岩的波速变化特性研究》、《饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究》等文献，发现包括大理岩、砂岩、花岗岩等岩石的岩块声波速度与岩石的饱水度具有较为明显的非线性、非单调关系，处于不同饱水度状态下的岩块声波波速差异值一般可达 10~20%，最大差异值可达 30%；同一岩块，在不同的饱水度状态下进行声波波速测试，其测试结果差异值将会是非常明显的；如果没有明确统一的在何种饱水状态下对岩块进行测试的标准，在计算岩体完整性指数 K_v 时，该差异将被进一步放大。由此可见，“岩块饱水度状态因素”是引起症结问题的主要原因。</p>	何松、冀东、王泽勇	要因

序号	因素	确认方法	判断标准	验证结果	验证人	要因判断
						
3	测试环境温度因素	查阅文献、现场调查	波速测试结果相差值大于 5%	<p>小组成员查阅了《花岗岩经历不同高温后纵波波速分析》、《高温作用下花岗岩的声发射特征研究》等文献，发现只有经历高温后（200° 后），花岗岩的纵波波速才会出现较为显著的下降。由于岩石的波速测试一般在试验室内环境中进行，测试温度一般在 15°~30° 之间，测试环境温度差一般不超过 20°，该温差变幅对花岗岩等岩石的纵波波速影响非常有限，测试结果差值一般不超过 1~2%。由此可见，“测试环境温度因素”不是引起症结问题的主要原因。</p>  <p style="text-align: center;">花岗岩纵波波速相对值与温度的关系</p>	孙波、刘元贤	非要因
4	试件在显缺陷或试样规范	现场确认、统计分析	有明显缺陷、制备不规范试样发生率小于 5%	<p>小组成员对岩石波速测试试验中的岩石试件的情况进行了现场调查，重点调查了岩石试件是否存在有明显的裂隙、试件制备尺寸是否满足规范要求，并对检查结果进行了汇总分析。通过分析，发现岩石试件的选择、制备都比较规范，岩石试件一般不存在显著的节理裂隙缺陷，具有较好的代表性；试件的制备也较为规范标准，切口平整光滑。有明显缺陷、制备不规范试样的发生率一般小于 2%。由此可见，“试件存在明显缺陷或制样不规范”不是引起症结问题的主要原因。</p>  <p style="text-align: center;">岩块试件的选择制备都较为规范</p>	王伟、李云鹏	非要因

序号	因素	确认方法	判断标准	验证结果	验证人	要因判断
5	岩块声波测试设备满测要求不足	现场确认、对比规范要求	是否定期对仪器设备进行检定和保养、精度是否满足规范要求	<p>小组成员对岩块声波测试试验所使用的 RS-ST01C 型非金属声波检测仪的仪器精度、定期检定及维护保养情况进行了调查，得到以下结果：</p> <p>1、RS-ST01C 型非金属声波检测仪的声时测量精度为 μs 级，精度可达到 $0.1 \mu s$。发射换能器的发射频率符合《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266-2013）之 5.1.6 条款的要求。</p>  <p>2、测试用的声波检测仪均定期送至湖北省计量测试技术研究院进行计量标准器具的标定检验，所有设备仪器经检验结果合格且出具正式检定证书后才能应用于岩块的声波测试试验。</p>  <p>3、在声波检测仪的日常使用中，实验室安排了专人负责对仪器进行检修与保养，并定期对配套的信号收发探头进行标定测试。标定方法为对标准标号的混凝土块标准件进行波速测试。如发现工作异常则会立刻采取纠偏措施或者更换信号收发探头，直至检测仪恢复正常工作状态为止。</p> <p>由此可见，用于岩块声波速度测试用的检测仪及配套设备都按照规定进行定期检定与维修保养，测试精度等指标皆满足国标规范的要求，“岩块声波测试仪器设备不满足测试要求”不是引起症结问题的主要原因。</p>	孙玺、冀东	非要因
6	测试数据人工判读误差过大	现场调查、对比分析	归一化偏差 E_n 值小于 0.5	<p>岩块波速测试中，当出现判读不稳定的情况时，需人工调整自动判读门限、延迟时间、曲线平移、采样间隔等设置，以期正确判读声参数。由于该项调整具有一定的主观性，不同测试人的调整会有一定差异，从而影响测试结果。</p> 	何松、邵铨	非要因

序号	因素	确认方法	判断标准	验证结果	验证人	要因判断										
				<p>小组成员选取 6 块波形复杂岩块，选取 3 名波速测试试验人员进行比对试验，测试结果显示不同测试人测得的岩芯波速归一化偏差E_n值介于 0~0.3 之间，可以满足检测精度要求。同时，小组成员了解到院检测中心实验室每年会开展 2 次岩块波速测试比对试验，其中既有实验室内部人员之间的比对试验，也有我院实验室同外单位实验室之间的比对，可以保证测试误差在允许范围内。</p>  <p>由此可见，“测试数据人工判读误差”不是引起症结问题的主要原因。</p>												
7	没有严谨的岩石波速测试规程	现场调查、对比分析	测试结果误差大于 5%	<p>小组成员调查了院检测中心实验室岩石波速测试中执行的规程标准的情况。通过调查了解发现，波速试验测试人员一般依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013)之“5.1 岩块声速测试”条款的内容进行测试。</p> <p>根据大量的测试实践经验，上述规范虽然能科学的指导波速测试试验的开展，但规范内的有关条款内容较为笼统，对具体试验流程、操作事项的针对性不强，如试件尺寸、耦合剂用量、同一试件测量次数及平均值问题、零延时的确认频次等问题都没有准确的要求及交代。为此，小组成员根据上述因素可能对岩石波速测试成果造成的误差情况进行了测试试验及统计，并制成了统计表如下：</p> <p style="text-align: center;">波速测试操作规程误差因素分析统计表</p> <table border="1" data-bbox="555 1709 1219 1868"> <thead> <tr> <th>误差值</th> <th>耦合剂用量</th> <th>试件尺寸及换能器与试件贴合情况</th> <th>仪器系统零延时确认</th> <th>多次测量取平均值与单次测量结果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5~10%</td> <td>5~10%</td> <td>5~20%</td> <td>5~20%</td> <td>5~10%</td> </tr> </tbody> </table> <p>由统计表可知，由此操作规程的问题，对岩石波速测试结果可能造成的误差一般可达到 5-10%，部分因素甚至超过 10%。由此可见，“没有严谨规范的岩石波速测试规程”是引起症结问题的主要原因。</p>	误差值	耦合剂用量	试件尺寸及换能器与试件贴合情况	仪器系统零延时确认	多次测量取平均值与单次测量结果	5~10%	5~10%	5~20%	5~20%	5~10%	冀东、孙玺、魏嘉新	要因
误差值	耦合剂用量	试件尺寸及换能器与试件贴合情况	仪器系统零延时确认	多次测量取平均值与单次测量结果												
5~10%	5~10%	5~20%	5~20%	5~10%												

综上所述，QC 小组成员确定造成“岩块波速测量结果不准确”发生的主要原因因为：

要因找到了!!!

- 1、岩块饱水度状态因素
- 2、没有严谨规范的岩块波速测试规程

7、制定对策

要因确认后，QC 小组成员依据“5W1H”原则进行了分析讨论，制定了对策表如下所示（表 7-1）。

表 7-1 对策表

序号	要因	对策	目标	措施	地点	完成时间	责任人
1	岩块饱水度状态因素	通过试验揭示青岛地区典型岩块波速与饱水度的演化关系；对 K_v 指数的计算提出科学建议	充分揭示饱水度对青岛地区典型岩块的纵波波速影响规律；提出 K_v 指数的计算中岩块纵波速度的选用标准建议	1、制定不同饱水度状态下青岛地区典型岩性岩块的纵波波速试验方案，并有针对性地进行声波测试试验； 2、对试验数据成果进行整理分析，研究饱水度对青岛地区典型岩块的纵波波速影响规律； 3、基于试验成果及相关研究文献资料，对 K_v 指数的计算、计算用岩块纵波速度的选用标准提出指导意见，提高计算结果准确率。	岩土实验室内	2017年11月	何松，孙波，李云鹏，邵铖
2	没有严谨规范的岩块波速测试规程	制定可科学规范指导岩块声波速度测试的试验操作规程	规程科学规范，有较强的指导性和可操作性，降低约 30-50% 由操作因素造成的误差	1、在经过充分调研以及大量试验经验积累的基础上，制定岩块声波速度测试的操作规程的初稿，并征求意见； 2、通过收集反馈意见以及试验操作验证，对操作规程初稿进行完善，最终得到可科学规范指导岩块声波速度测试试验的操作规程； 3、应用于日常的岩块波速测试试验中，保证测试成果准确可靠。	岩土实验室内	2017年11月	冀东，孙玺，王泽勇，魏嘉新

8、对策实施

8.1 对策一实施

岩石是一种特殊的地质材料，在岩石内部分布着各种微裂纹、裂隙、孔隙、空洞及层理构造等，使其具有构造上的非均质性和力学上的各向异性。为了保证试验数据的准确性和严谨性，本次试验选取青岛地区典型的、具有代表性岩石-中粗粒花岗岩。试验中共选取了 6 个岩样 QC2-1—QC2-6，岩样照片如图 8-1 所示。试件的岩矿鉴定光片照片如图 8-2 所示。



图 8-1 青岛地区典型中粗粒花岗岩试验试件照片

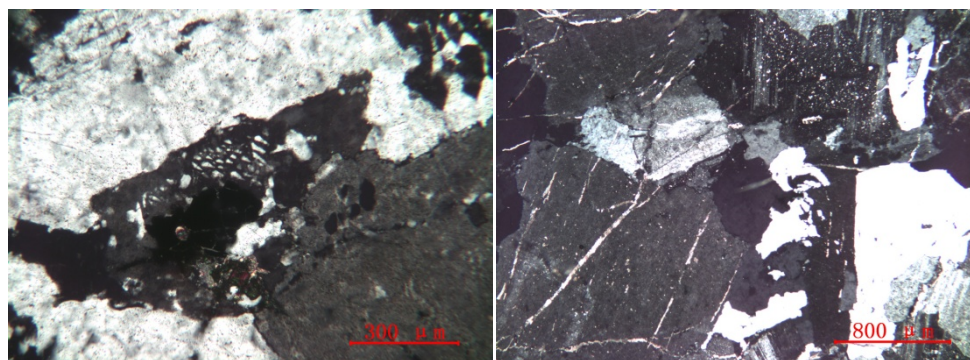


图 8-2 花岗岩试件光片鉴定照片

为了比较完整的研究含水率与纵波波速的相关性，综合参照以往类似试验经验，设计了风干测试流程，测试岩样径向、轴向纵波波速。首先将岩样进行饱和处理，测试岩样质量和径向、横向纵波波速。然后将岩样放置于室内自然干燥，每隔一段时间（12 小时左右）测试岩样质量和径向、横向纵波波速，直至岩样质量和波速基本趋于稳定，之后对岩样进行强制烘干处理，记录岩样质量和径向、横向纵波波速。

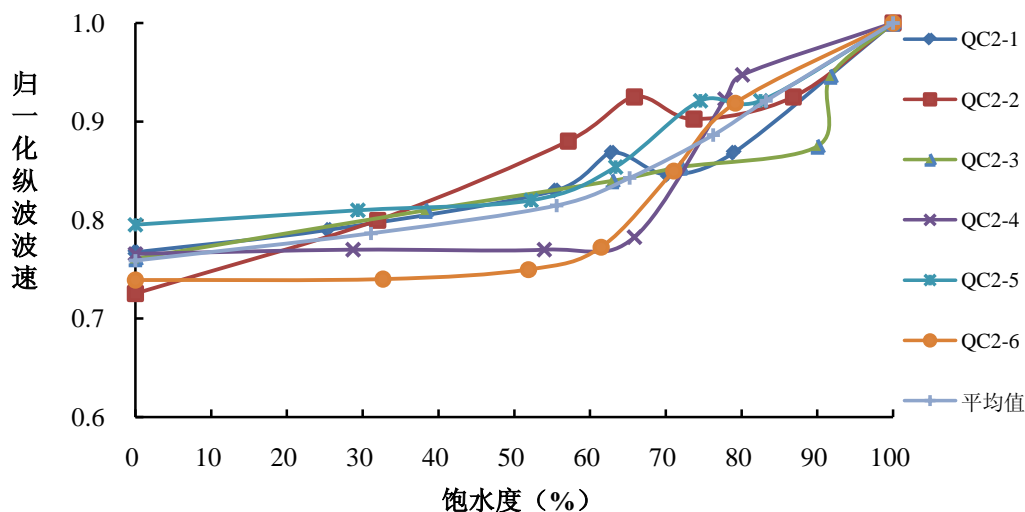
经过小组成员进行了历时近 15 天的试验，得到了花岗岩岩块试件自强制饱水后，经历自然干燥，直至强制烘干后，花岗岩试件由饱和状态至干燥状态过程中径向及轴向纵波波速的变化情况。干燥和饱和状态下，岩块试件的纵波波速以及饱和含水率情况如表 8-1 所示：

表 8-1 饱和及干燥状态下岩样纵波波速试验结果统计表

岩样编号	饱和纵波波速 ($m \cdot s^{-1}$)		干燥纵波波速 ($m \cdot s^{-1}$)		饱水后纵波波速增量 (%)		饱和含水率 (%)
	径向	轴向	径向	轴向	径向	轴向	
QC2-1	3435.2	4383.8	2636.3	3402.4	30.30	28.84	0.59
QC2-2	3036.2	4256.8	2202.7	3351.1	37.84	27.03	0.68
QC2-3	3239.4	4011.8	2464.8	3247.6	31.43	23.53	0.62
QC2-4	3151.1	4067.2	2413.6	3323.2	30.56	22.39	0.58
QC2-5	3245.1	4084.3	2581.4	3248.9	25.71	25.71	0.59
QC2-6	3360.0	3797.4	2483.5	3195.6	35.29	18.83	0.58

从表 8-1 可以看出，饱和、干燥状态下，岩样的径向、轴向纵波波速存在明显的各向异性。与轴向纵波波速相比，径向纵波波速相对较小。定义各向异性指数 $\gamma = v_{//} / v_{\perp}$ ，其中 $v_{//}$ 为轴向纵波波速， v_{\perp} 为径向纵波波速， γ 越大岩样各向异性越明显，反之，则越弱。饱和、干燥状态下，岩样的纵波波速各向异性指数分别为 1.27 和 1.34，饱水后，岩样纵波波速的各向异性特征略有减小。

根据不同饱水度状态下岩块的纵波速度，小组成员制作了纵波波速与岩样饱水度关系趋势图，岩块试件径向纵波速度与饱水度关系的趋势图如图 8-3 所示；岩块试件横向纵波速度与饱水度关系的趋势图如图 8-4 所示。



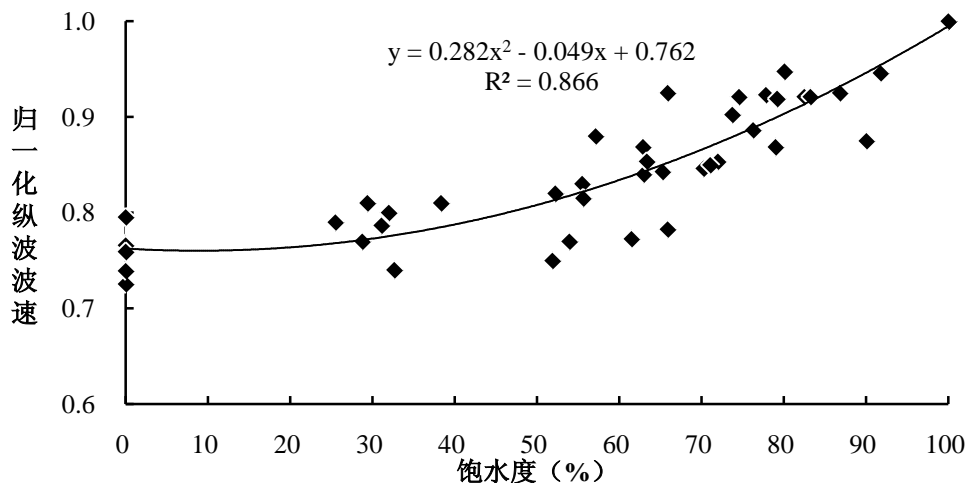


图 8-3 岩块径向纵波波速与饱水度关系趋势图

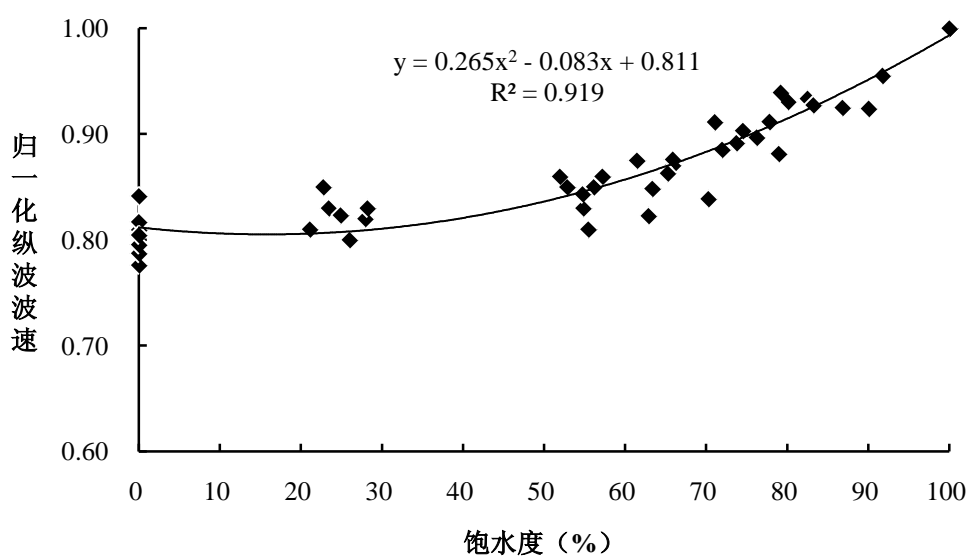
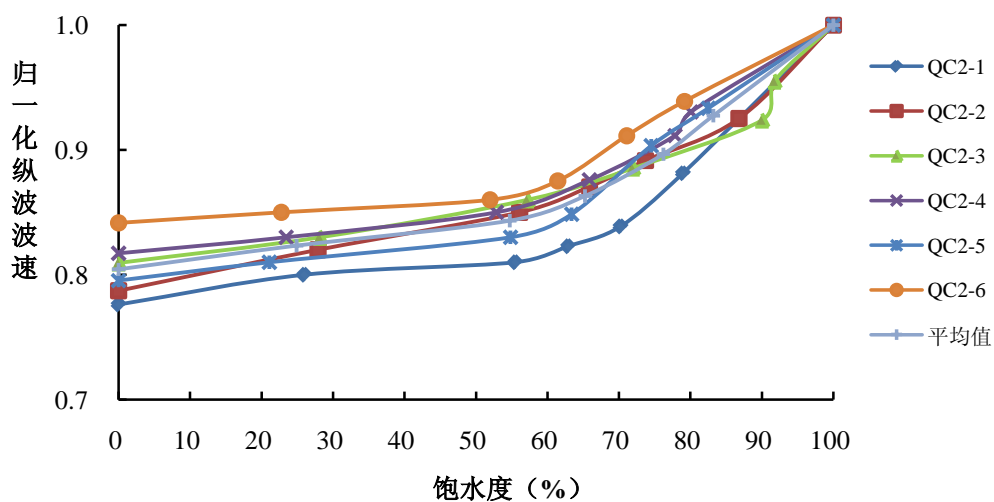


图 8-4 岩块轴向纵波波速与饱水度关系趋势图

综合分析表 8-1、图 8-3 和图 8-4 可以看出：随着岩样饱水度的增加，岩样的径向纵波波速、轴向纵波波速整体呈增加趋势，且饱水度在 0%-50% 时，纵波波速增加较缓，饱水度在 50%-100% 时，纵波波速增加较快，二者可以用二次函数很好的拟合。完全饱水后，岩样的径向纵波波速增加了 25.71%-37.84%，均值为 31.86%；岩样的轴向纵波波速增加了 18.83%-28.84%，均值为 24.39%。总体来看，饱水度对岩样纵波波速影响较大（ $\text{Max}=37.84\%$ ），且对岩样径向纵波波速影响更显著。

对岩样风干过程中的含水率和波速进行归一化处理（测试结果表明，当岩样完全饱和时，对应纵波波速最快，以此为标准进行归一化整理），得到风干过程中岩样径向纵波波速、轴向纵波波速和饱水度变化关系曲线如图 4 所示。从图 8-4 中可以看出，风干过程中，随着饱水度的减小，岩样的纵波波速总体呈现出减小的变化趋势，岩样径向纵波波速和轴向纵波波速变化规律大体一致，但在饱水度 50%-70% 时存在一定的差别。岩样纵波波速与含水率关系曲线可以明显的分为 2 个阶段：

阶段 1：饱水状态至饱水度 50% 左右，对于岩样的径向纵波波速总体呈非线性趋势快速减小，归一化的纵波波速均值（本文中特殊说明都为均值）为 0.82，相对于饱和状态减少了 18% 左右，对于岩样的轴向纵波波速总体呈线性趋势快速减小，归一化的纵波波速为 0.84，相对于饱和状态减少了 16% 左右。

阶段 2：饱水度从 50% 逐步降低至 0%（烘干状态），岩样纵波波速呈现出缓慢减小的趋势，其中岩样的径向纵波波速和轴向纵波波速归一化的波速分别为 0.76、0.80，相对于饱和状态分别减小了 6%、4%。

关于含孔隙的岩石介质在饱水状态下的波速变化规律，不同的学者提出了不同的物理模型，应用较多的如 Berryman 自洽理论、gas pocket 模型等，应该这些模型可以较好的解释饱水状态下波速的总体变化规律。本次试验中，当岩样饱水度由 100% 下降至 50% 左右的阶段，岩样孔隙和矿物颗粒间的自由水首先逸出，岩样内部孔隙空间迅速增大，导致岩样纵波波速迅速减小。但饱水度在 60%-70% 之间时，岩样径向纵波波速出现缓慢增加的趋势，这是由于孔壁和矿物颗粒表面的吸附水逐步减少，岩样的弹性模量逐步恢复，等效密度逐步降低，宏观上就表现为纵波波速缓慢增加。饱水度从 50% 到自然风干，直至强制烘干，吸附水的脱离过程是比较缓慢的，岩样内部孔隙空间缓慢增大，岩样纵波波速表现出缓慢减小。

由此可见，青岛地区具有典型代表意义的花岗岩，其饱水状态对其岩块纵波波速的影响甚大，在含水岩样纵波波速与强度、变形参数的相关性分级以及力学试验结果的对比分析中，必须详细考虑试验过程、试件所处的状态以及测试环境，尽可能保持一致。

在青岛地区岩土工程勘察实践中，计算 K_v 指数中的岩体纵波速度 V_{pm} ，一般通过钻孔声波测井在饱和状态下测定岩体的纵波速度；而岩块纵波速度 V_{pr} 一般采用勘探钻孔岩芯，在饱水度较低甚至近于干燥状态下测定。根据小组成员此次的研究成果，上述情况可能会造成 K_v 指数的计算结果出现较大的误差，计算出的岩体完整性指数很可能会大于 1。

为此，在今后的 K_v 指数的计算中，必须明确规定计算 K_v 指数的岩体及岩块波速必须是处于相同饱水状态下测定的，即测定波速所选用的岩块应与岩体处于相同的饱水状态。

8.2 对策二实施

由于《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013)之“5.1 岩块声波速度测试”中内容有关于波速测试试验操作流程的规定较为笼统，对具体试验流程、操作事项的指导针对性不强，如试件尺寸、耦合剂用量、同一试件测量次数及平均值问题、零延时的确认频次等问题都没有明确的规定及要求。为此，小组成员在经过充分调研以及大量试验经验积累的基础上，初步制定了岩块声波速度测试的操作规程，并在反复试验过程中进行了不断的完善，最终得到可科学规范指导岩块声波速度测试试验的操作规程如下：

1、声波检测仪在进行试验前，应按照《声波检定仪测定规程》(JJG 990-2004)所规定的要求，在规范规定的合理期限内送检，确保仪器的精度以及各方面性能良好，满足试验测试要求。

发射换能器的发射频率应符合下式要求：

$$f \geq \frac{2v_p}{D} \tag{8-1}$$

式中： f —发射换能器发射频率(Hz)； v_p —岩石纵波速度(m/s)； D —试件的直径(m)

2、测试用试验样品的选择应注重工程代表性，优先选用节理不发育或较发育的岩块进行测试，同时应尽可能避免选择使用节理发育或非常发育的岩块进行试验，为了使声波测试探头与试验岩块之间能更好地耦合，宜将测试用岩块切割加工成标准的圆柱体或立方体；当对测试结果精度要求较高时，则必须将岩块切割加工成标准的圆柱体或立方体，以便探头与岩芯间能够充分平整接触。

3、测试前应对声波检测仪及声波探头等配件进行连接测试，检查仪器设备是否存在故障或者异常，排除仪器设备存在带病工作的可能。

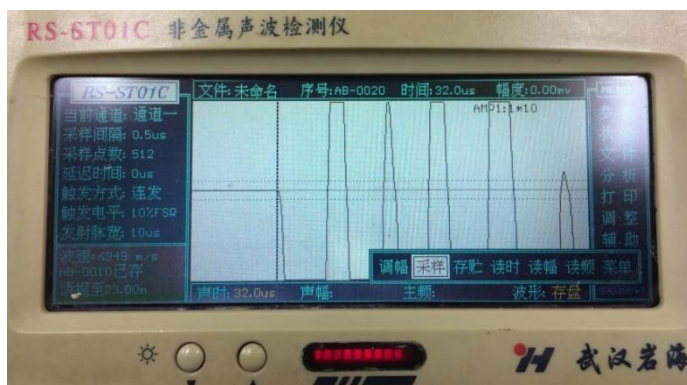


图 8-5 声波检测仪测试参数设置界面

4、测试前宜将通道设置和屏幕显示进行合理规范设置。为便于波形判读，宜将屏幕显示设置为单屏显示；**通道口设置应与接入的探头通道口相对应。**

5、采样率设定。为了细化声时判读单元，提高声时判读精度，应在确保波形完整性好、辨识度高的前提下，将采样率控制在较小的范围内，对于青岛地区常见的较硬岩~坚硬岩岩块试件，一般将采样率设置为 $0.5\sim 1.0ms$ 为宜。

6、延迟时间设定。为了使屏幕区间内显示更为完整的波形图像，同时确保波形起跳点更为清晰准确，**应将延迟时间设置为 0。**

7、零延时的校对设定。具体参数的确定可查阅声波检测仪的说明书或咨询仪器生产厂家，结合试验室环境进行设定。通过仪器调整及参数设置，宜将收发探头的对准零延时调整为零。若经多次设置校对后，仪器系统的零延时仍不归零，**则应做好记录。**

为提高测试精度，保证数据的准确性，测试不同的岩块前，**应重新测试系统的仪器系统的零延时。**

8、试验开始前应在与声波检测仪配套使用的声波发射与接收探头上分别涂抹耦合剂（以黄油或凡士林为宜）。为了保证理想的耦合效果，涂抹耦合剂时应均匀涂抹，同时确保探头各个部位的耦合剂厚度适中。耦合剂的正确用量示意图如图 8-6 所示：



图 8-6 耦合剂用量示意图

9、测试过程中，应对换能施加不小于 $0.05MPa$ 的压力，测读声波在试件中传播的时间。

10、仪器操作人员应在获取清晰且完整稳定的波形后确定起跳点，并进行数据采集，记录声时。

11、声时记录准确后应使用游标卡尺量测透射声波旅行距离，并准确记录。测试距离应准确至 1mm，时间应准确至 0.1μs。

12、测试成果整理应符合下列要求：

岩石纵波速度应按下列式计算：

$$v_p = \frac{L}{t_p - t_0} \quad (8-2)$$

$$v_p = \frac{L_2 - L_1}{t_{p2} - t_{p1}} \quad (8-3)$$

式中： v_p —岩石纵波速度(m/s)； L —发射、接收换能器中心间的距离(m)； t_p —直透法纵波的传播时间(s)； t_0 —仪器系统的零延时(s)； $L_1(L_2)$ —平透法发射换能器至第一（二）个接收换能器两中心的距离(m)； t_{p1} —平透法发射换能器至第一个接收换能器纵波的传播时间(s)； t_{p2} —平透法发射换能器至第二个接收换能器纵波的传播时间(s)。

计算值应取三位有效数字。

9、QC 活动效果检查

9.1 依托工程项目实践检查

项目完成后，QC小组通过现场实践检查，调查统计了在勘察中运用本次QC活动成果的青岛新建地铁项目M6、M8、M14号线中随机挑选的7工点的岩体完整性指数 K_v 计算情况（图9-1）。

截止至2018年3月，统计已经收集到的工程资料，声波测井资料计算的 K_v 大于1的发生率约为6%。小组活动达到并超过了预期目标，圆满完成了QC小组活动任务（图9-2）。



图 9-1 对 QC 活动成果进行实践检查

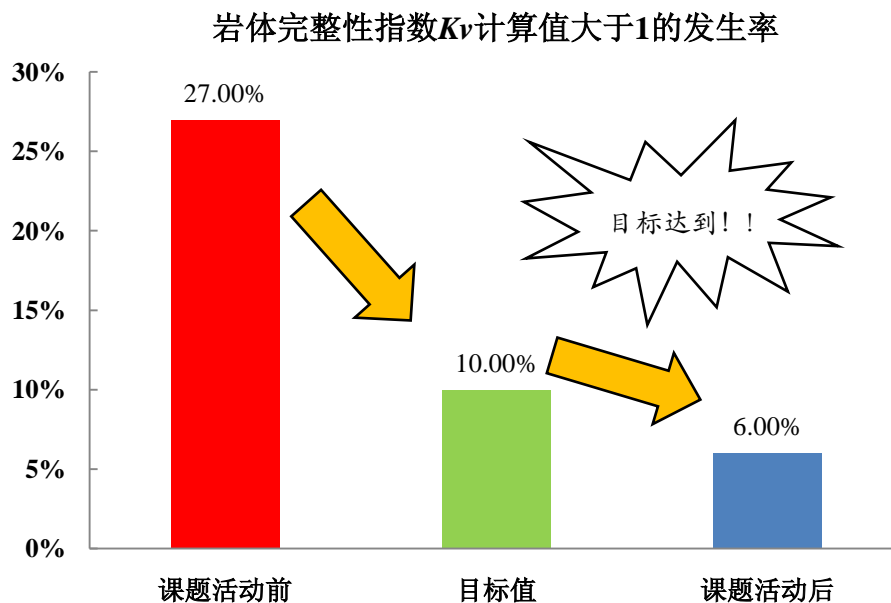


图 9-2 活动前后目标值对比图

9.2 专家评审检验

QC小组邀请了行业内的专家对QC活动取得的技术成果进行了评审，专家一致认为QC活动取得的成果可以使得岩块波速测试结果更为准确，提高岩体完整性指数 K_v 的计算准确率，为计算岩体基本质量指标提供科学依据；QC小组活动取得的技术成果可有效提高地铁隧道围岩分级的准确度，减少地铁隧道建设的安全隐患风险，对类似工程的勘察工作具有很好的借鉴与指导作用，具有较好的工程实践应用价值。QC活动成果的专家评审意见详见附件成果效益证明材料。

9.3 效益分析

1、直接经济效益

QC活动前，声波测井资料计算的 K_v 值大于1的发生率约为27%（即 K_v 值计算错误率约为27%），QC活动后，错误率降至6%，地铁隧道围岩分级变更次数也随之下降。由于岩块波速测试结果偏低会导致岩体完整性指数 K_v 值偏高，从而使勘察阶段划分的围岩分级偏好。在开挖后，实际揭露出较差的围岩时就会导致围岩分级变更。围岩由好向差进行变更会增加支护造价的5%~25%甚至更高。在当前地铁每公里建设费用已达7亿以上的情况下，本次QC小组活动的经济效益是显著的。

2、工期效益

当围岩分级变更发生时，需要由施工单位根据现场情况提出变更申请，然后由业主、设计、勘察、施工、咨询等多单位赴现场查勘，组织会议达成变更意见后，再由设计单位重新出施工图，通过审查后再交由施工单位施工，同时施工单位提前准备的施工物料可能作废，施工计划被迫调整。每次围岩分级变更至少会额外增加约3~5

天工期，如果变化很大则难以估量。

3、社会效益

地铁隧道施工中由于支护强度不够带来的垮塌事故极易导致群死群伤，围岩划分的准确与否对施工安全影响极为关键。本次 QC 活动可以提高地铁隧道围岩分级的准确度，则减少地铁隧道建设的安全隐患风险。围岩分级正确时，一方面可以保证地铁隧道的稳定，另一方面可以让施工单位有针对性治理施工安全隐患；当围岩分级划分不正确，尤其是围岩分级错误的偏好时，则大大增加了隧道垮塌的可能性，并让施工单位极易在没有充分准备的情况下遭遇严重事故，从而导致严重后果。

4、技术效益

通过本次 QC 活动，提高了小组内专业技术人员及实验室人员对岩块波速测试的认识和数据准确率，提高了岩体完整性指数 K_v 的计算准确率，为后续类似勘察工作具有重要的指导意义，对其他单位也有较大的借鉴价值，同时也得到了建设单位、设计单位及施工单位的认可。

5、其他效益

增加了小组成员之间的团结协作精神，增强了小组成员攻克技术难题的信心，培养了一批攻克技术难题的技术骨干。

10、巩固措施及标准化推广应用

通过本次 QC 小组活动，我们摸索制定出了一系列提高岩体完整性指数计算结果准确率的措施和方法，且经过工程实际验证是可行的。QC 小组活动结束后，为了巩固小组课题成绩，便于后续的推广应用，小组成员对成果进行了总结，通过广泛讨论，采取的巩固措施及推广应用工作如下：

(1) 对 QC 活动课题成果进行宣贯与应用推广。QC 小组于 2017 年 12 月至 2018 年 1 月期间先后召开了 2 次宣贯会议，传达宣讲本次 QC 活动过程及取得的成果经验，共有近 90 余名岩土工程勘察设计专业技术人员参加了培训学习（图 10-1）。

(2) 依据效果检查，小组将对策表里的具体措施落实到了岩土实验室岩块声波速度测试试验中，编制了青岛市勘察测绘研究院作业指导书《岩块声波速度测试试验操作指导手册》，科学指导后续岩块声波速度测试试验工作的开展（图 10-2、10-3）。作业指导书的具体内容详见附件成果效益证明材料。

(3) 撰写了题为《饱水度对青岛地区典型花岗岩纵波波速影响的试验研究》的论文，目前该论文已经通过了核心期刊编辑部的初审。



图 10-1 成果发布宣贯的情况



图 10-2 编制试验操作指导手册

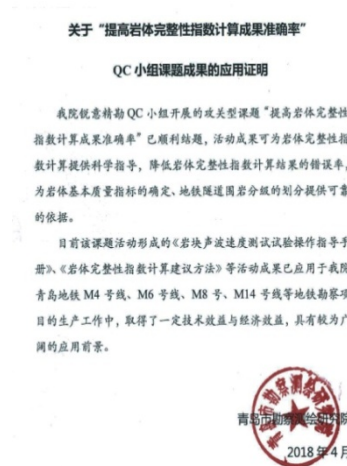


图 10-3 QC 活动成果应用情况证明

11、总结回顾及下一步打算

11.1 总结回顾

本次 QC 活动课题有效地改善了采用声波测井资料计算岩体完整性指数 K_v 时常大于 1 的问题，使得计算得到的岩体完整性指数更为准确，能够更加真实地反映岩体的完整程度，进而能够更准确地评价岩体质量和划分地铁隧道围岩分级。通过活动的开展，增强了小组的创新意识、质量意识，提高了小组成员按 PDCA 循环进行课题攻关，解决实际问题的能力，大家的团队精神、进取精神和现场组织能力等几个方面也都有了长足进步，QC 活动前后的自我评价表与自我评价雷达图如表 11-1 与图 11-1 所示。

表 11-1 自我评价表

项目	自我评价 (分)		评分基准
	活动前	活动后	
创新意识	6	9	
质量意识	8	9	
团队精神	7	10	
进取精神	7	9	
岩块波速测试技能	6	9	
QC 工具应用技巧	5	8	
试验方案策划能力	7	9	
应对问题能力	6	8	

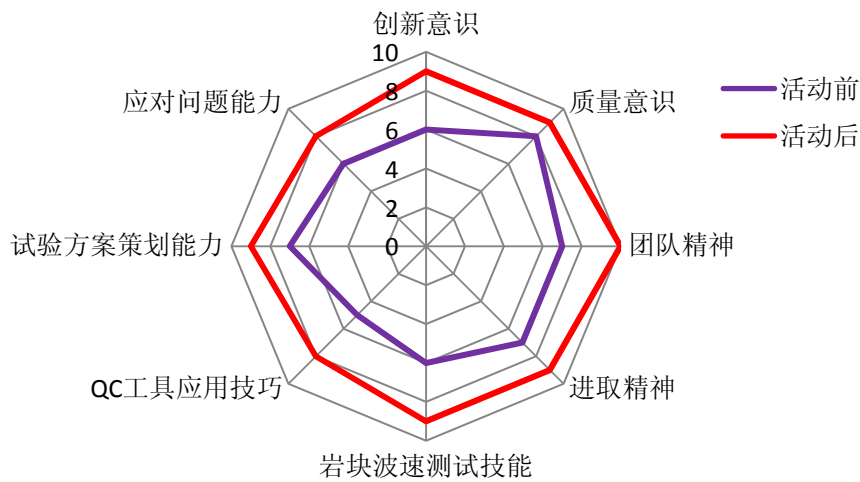


图 11-1 自我评价雷达图

11.2 今后打算

(1) 将 QC 活动成果推广应用于青岛地区今后的轨道交通勘察项目中，提高岩体完整性指数计算成果的准确率，进而确保围岩分级结果的准确度，提高勘察工作质量，满足地铁建设项目各相关方的需求。

(2) 总结本次 QC 活动的成果，在《工程地质学报》、《城市勘测》等国家核心期刊上发表学术论文 1~2 篇。

(3) 推进 QC 成果的宣传培训工作，计划再开展培训会议 2~3 次，让更多的岩土工程勘察设计专业技术人员了解本次活动取得的有关岩体完整性指数计算方面的技术成果及 QC 小组活动的知识。

(4) 计划在下一步工作中继续开展 QC 小组活动，解决生产项目中遇到的新困难。在本次活动的现状调查中，“岩体波速测试结果不准确”也是造成“完整性指数计算成果准确率不理想”的原因之一。小组成员下一步计划围绕“提高声波测井岩体波速测试成果准确度”方面开展 QC 小组课题研究工作。

参考文献

- [1] 冀东, 何松, 邵铖, 等. 青岛地铁勘察技术手段分析及发展对策建议[J]. 城市勘测, 2016, (2): 161-164, 171.
- [2] 工程岩体试验方法标准 GB/T50266-2013[S].北京: 中国计划出版社, 2013.
- [3] 工程岩体分级标准 GB/T50218-2014[S].北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] 王昊, 高志飞, 赵国斌. 利用 Kv 值进行岩体完整性划分的研究[J].水利水电工程设计, 2009, 28(4):48-49.
- [5] 段世委, 许仙娥. 岩体完整性指数确定及应用中的几个问题探讨[J].工程地质学报, 2013, 21(4):548-553.
- [6] 施行觉, 徐果明, 靳平, 等. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究[J].地球物理学报, 1995, (增 1): 281-287.
- [7] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J].地球物理学报, 2006, 49(3): 908-914.
- [8] 城市轨道交通岩土工程勘察规范 (GB50307-2012) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [9] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 823-828.
- [10] 邓涛, 韩文峰, 保翰章. 饱水大理岩的波速变化特性研究[J].岩石力学与工程学报, 2000, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 823-828.
- [11] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测[J].岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 89-92.
- [12] 翟松韬, 吴刚, 张渊, 罗春泳, 李玉寿.高温作用下花岗岩的声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(01):126-134.
- [13]支乐鹏, 许金余, 刘军忠, 刘石, 陈腾飞.花岗岩高温后的超声特性及力学性能研究[J].地下空间与工程学报, 2012, 8(04):716-721.
- [14]闫治国, 朱合华, 邓涛, 曾令军, 姚坚, 强健.三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究[J].岩土工程学报, 2006(11):2010-2014.
- [15]杜守继, 马明, 陈浩华, 邱一平.花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J].岩石力学与工程学报, 2003(11):1803-1806.
- [16]周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 823-828
- [17] 刘永勤. 城市轨道交通岩土工程勘察的特点[J]. 工程勘察, 2008, S1:13-15.
- [18] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [19] 邓华峰, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625-1632.