



# 基于地质雷达探测的抛石量计算方法

朱瑞虎<sup>1,2</sup>, 郑金海<sup>1,2</sup>, 傅月波<sup>3</sup>

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 浙江省第二测绘院, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 基于地质雷达抛石施工效果探测基础提出了一种抛石量计算方法, 并分步对该方法进行详细说明; 同时以连云港某路基施工项目为例, 采用基于地质雷达探测抛石量计算方法进行抛石量计算; 总结了工程中常用的抛石量计算方法及其特点; 对基于地质雷达探测抛石量计算方法优势和局限性进行了分析, 并提出相对介电常数的确定方法及注意事项。

**关键词:** 地质雷达; 相对介电常数; 工程量

**中图分类号:** U 416; U 656

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)11-0025-04

## Calculation method of riprap quantity based on GPR detection

ZHU Rui-hu<sup>1,2</sup>, ZHENG Jin-hai<sup>1,2</sup>, FU Yue-bo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. The Second Surveying and Mapping Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** This paper proposes a kind of engineering riprap quantity calculation method based on ground penetrating radar(GPR) detection. The method is described in detail step by step. In the meantime, an example of riprap quantity calculation is quoted in Lianyungang city, China. At last, calculation methods and characteristics of engineering riprap quantity are summarized. The advantages and limitations of calculating method based on GPR to detect the ripped-rock are analyzed, and the method for determining the relative dielectric constant and the consideration are put forward.

**Keywords:** GPR; relative dielectric constant; engineering riprap quantity

抛石填筑、爆破挤淤作为软基处理的施工方法广泛用于道路、围堰、防波堤等工程, 在此类工程中往往需要消耗大量的抛石, 抛石方量的计算是竣工结算中的一个难题<sup>[1]</sup>。随着物探技术的飞速发展, 地质雷达已开始应用于海堤抛石检测, 如宋华等<sup>[2]</sup>通过模型试验证明地质雷达可以有效识别海堤的抛石底界, 朱瑞虎等<sup>[3]</sup>通过雷达探测与钻孔的验证论述了雷达检测海堤施工效果的实用性和可靠性。本文在雷达探测抛石施工效果的基础上, 提出了一种精确实用、经济高效的抛石量计算方法。

## 1 地质雷达探测原理

地质雷达的探测原理是通过天线向地下发射高频脉冲电磁波, 当其遇到地下不均匀体或界面时会反射一部分电磁波回来, 雷达主机通过对此部分的反射波进行适时接收和处理, 达到探测识别地下目标物的目的。具体来说, 高频电磁波以宽频带短脉冲形式, 通过发射天线被定向送入地下, 由于地下介质往往具有不同的物理特性, 如介质的介电性、导电性及导磁性的差异, 因而对电磁波具有不同的波阻抗, 进入地下的电磁波在穿过地下各地层或管线等目标体时, 由于界面两

收稿日期: 2016-04-15

作者简介: 朱瑞虎(1983—), 男, 硕士, 实验师, 从事港口结构检测、地基处理相关实验研究工作。

侧的波阻抗不同，电磁波在介质的界面上会发生反射和折射，反射回地面的电磁波由接收天线接收。高频电磁波在介质中传播时，其传播路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的介电性质及几何形态而变化。因此，从接收到的雷达反射回波走时、幅度及波形资料，可以推断地下介质或管线的埋深与类型。

电磁波在特定介质中的传播速度是不变的，因此根据地质雷达记录上的接受到地下反射波的时间  $t$ ，即可据下式计算出地质界面的深度  $H$ ：

$$H = vt/2 \tag{1}$$

式中： $H$  为目标层深度； $v$  为电磁波在地下介质中的传播速度，其大小由下式表示：

$$v = c/\sqrt{\varepsilon} \tag{2}$$

式中： $c$  是电磁波在大气中的传播速度，约为  $3 \times 10^5$  km/s； $\varepsilon$  为介质相对介电常数，取决于地下各层构成物质的介电常数。

由地质雷达的探测原理可知，相对介电常数是地质雷达探测数据分析中的一个重要物理量，它与探测介质的材料属性及含水率密切相关。当已知相对介电常数  $\varepsilon$  时即可根据地质雷达接受到地下反射波的时间  $t$  计算地质界面深度。

## 2 基于雷达探测工程抛石量评估方法

本文提出了一种基于雷达探测的抛石量评估方法，该方法破坏性小、分辨率高且成本低，同时估算出的抛石体积结果较为准确。该方法用到的地质雷达探测技术和 CAD 操作技术均成熟且易于操作，因此具有较广阔的应用前景。该方法主要包含以下几个步骤：

1) 确定抛石相对介电常数。根据现场已知目标体深度或钻孔资料，即可反算确定相对介电常数值  $\varepsilon$ ，相对介电常数值  $\varepsilon$  确定后即可根据雷达探测情况确定地质深度。

2) 地质雷达探测。在需要确定雷达抛石量的工程段内布设测线，进行雷达探测，通常是按照固定间距布设一定数量的横断面，然后在各横断面进行雷达探测。

3) 地质雷达图像解译。将探测得到的地质雷达图像进行处理分析，最终对数据进行综合解译，圈出抛石体分布区域。

4) 雷达图像 CAD 处理，将步骤 3 解译过的地质雷达成果图等比例放入 CAD 中，根据雷达探测结果标出抛石体的边界线，并通过 CAD 得到抛石面积。

5) 计算抛石体积，根据各断面抛石面积以及各断面间距，计算得到相应段的实际抛石体积。如，假设抛石区域头尾各探测一个断面，整个探测工程区域共有  $j$  个抛石断面，各自面积为  $A_i (j \geq i \geq 1)$ ，两个断面之间的间距为  $L_i (j-1 \geq i \geq 1)$ ，则整个探测工程区域抛石体体积  $V$  为：

$$V = \sum_{i=1}^{j-1} \left( \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \cdot L_i \right) \tag{3}$$

## 3 应用案例

为了解江苏连云港某路基工程施工效果并对该路面设计宽度下方抛石量进行估算，河海大学对该路段进行了雷达探测。该路基本长约 5.33 km，路面宽度为 28.5 m，路基为淤泥层和粉质黏土层，承载力较差，路基施工采用抛石填筑路基方法。本次探测沿长度方向全程布设横断面，断面间距设为 20 m，地质雷达探测测点间距为 40 cm。图 1 是实施案例中横断面测线布置。



图 1 横断面测线布置 (单位: m)

以道路里程号 ZK0+000 ~ ZK0+200 为例进行抛石量计算，具体步骤如下：

1) 根据钻孔资料中的已知深度计算 ZK0+000 ~ ZK0+200 工程段内相对介电常数为 14。具体操作如下：在探测区域 ZK0+000 ~ ZK0+200 内，取一钻孔位置进行地质雷达探测；将钻孔处地质

雷达接收到地下反射波的时间  $t$  和钻孔资料中的抛石深度  $H$  代入式(1)、(2), 即可算得该路基工程探测区域抛石相对介电常数  $\varepsilon$  为 14。

2) 在 ZK0+000~ZK0+200 段内每隔 20 m 布设一个横断面进行地质雷达探测, 即分别在 ZK0+000、ZK0+020、…、ZK0+200 处沿横断面进行地质雷达探测。

3) 将得到的地质雷达成果图进行处理, 并根据实际情况和经验对数据进行综合解译, 圈出抛石体分布区域, 其中 ZK0+020 断面解译后的成果见图 2。

4) 将图 2 导入 CAD 中, 见图 3。图中半径为 10 m 的圆半径与雷达图中 10 m 标记线正好重合, 说明该图像为等比例导入。此时沿雷达图中抛石边界画出多段线闭合区域, 该闭合区域面积即为该断面处抛石面积(图 3)。

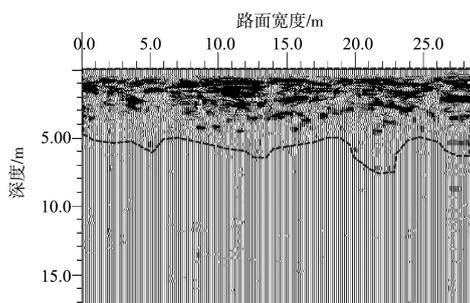


图 2 ZK0+020 断面处雷达探测效果

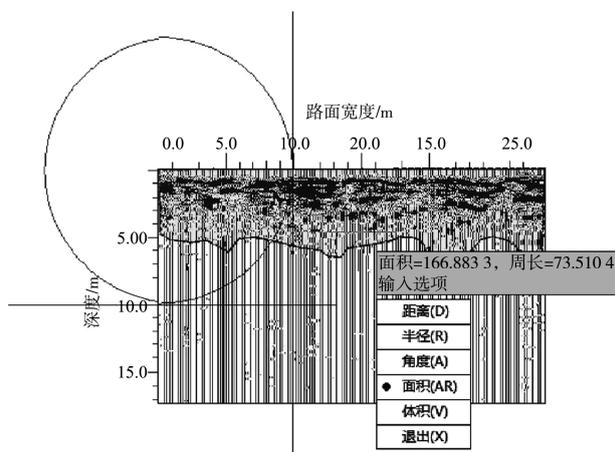


图 3 等比例导入 CAD 的 ZK0+020 断面处雷达探测效果

5) 依次得到 11 个断面 ZK0+000、ZK0+020、…、ZK0+200 处抛石体断面面积(表 1), 由各断

面面积及断面间距 20 m, 计算得到该工程段的抛石体积为 34 893.70 m<sup>3</sup>。

表 1 ZK0+000~ZK0+200 段各断面面积及抛石总体积

断面里程号	抛石断面面积/m <sup>2</sup>	总体积/m <sup>3</sup>
ZK0+000	159.03	
ZK0+020	166.88	
ZK0+040	211.77	
ZK0+060	166.38	
ZK0+080	173.57	
ZK0+100	155.50	34 893.70
ZK0+120	171.45	
ZK0+140	164.45	
ZK0+160	189.12	
ZK0+180	178.71	
ZK0+200	174.68	

具体地, 本实例选取的探测区域 ZK0+000~ZK0+200 内共有 11 个抛石断面, 各自面积为  $A_i$  ( $1 \leq i \leq 11$ ), 每两个断面之间的间距均为 20 m, 则探测区域 ZK0+000~ZK0+200 内抛石体体积  $V$  为:

$$V = \sum_{i=1}^{10} \left( \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \times 20 \right) \quad (4)$$

## 4 抛石工程量计算方法及特点

### 4.1 传统抛石量计算方法及特点

#### 1) 体积平衡法。

体积平衡法<sup>[4-5]</sup>主要是根据进场石料的方量来计算抛石的方量。通常有称质量法和量方法。称质量法主要是根据石料运输车辆到达指定地点后, 在监理工程师的监督下, 对石料进行过磅称质量, 并设专人根据抽磅结果和石料质量消除虚吨位后, 根据抛石密度计算抛石体积; 量方法是石料到达工地指定地点后, 在监理工程师监督下, 对石料堆体长宽高进行多次测量取平均值计算石料方量, 并设专人视空隙率大小和石质情况核扣方量。

体积平衡法是应用最早最直接的抛石方量统计方法, 该方法统计抛石量的主要缺陷在于一方面观测结果受人为主观意识影响大, 计量人员可能受施工方等外界因素影响, 在方量“扣多少”问题上存在一定的随意性, 这主要依靠现场计量

人员的职业素质；另一方面，工程中抛石量的需求很大需要运石车多次运输，因此单次石量测算误差累计到最后的误差很大。

## 2) 钻孔探测法。

钻孔探测法主要是在抛石施工结束后，在路基上选择布设横断面进行钻孔探测抛石深度，断面间距一般选择在100~500 m，每个断面布置1~3个钻孔，全断面布置3个钻孔的断面数不少于纵断面数的一般。通过钻孔探摸揭示抛石深度，并深入下卧层不小于2 m深。

钻孔探摸可以直接探测出钻孔点的抛石深度并了解施工效果，该方法的缺陷是：一方面钻孔周期长且钻孔成本很高，极大增加了工程造价；另一方面钻孔数量有限，不能充分了解全面施工效果，根据钻孔点抛石深度计算抛石量误差较大。

## 3) 测量法。

测量法抛石量计算主要是根据施工前后地形测量结合沉降观测进行抛石量测算。该方法的缺陷是：一方面在于在软基现场施工测点布设及测量工作的难度较大；另一方面是抛石施工对沉降观测点破坏严重，从而引起测量数据误差导致抛石量测算的误差较大。

## 4.2 基于地质雷达探测工程抛石量计算方法特点

本文介绍的地质雷达探测法其优点在于能够根据地质雷达探测图像对整个断面施工效果进行了解同时计算抛石量。在地质雷达探测过程中可以同时结合纵断面的探测对深度变化较大的地方进行加密探测，通过地质雷达横纵断面的布设对工程施工情况有了全面三维的了解，突破了钻孔法和沉降观测中以点代面的局限性。

地质雷达探测方法比较成熟，但一直没有广泛应用于工程抛石量探测主要是有以下原因：

1) 地质雷达探测属于物探方法，物探方法本身具有一定的模糊性和多解性，此方法以前主要用于对地层探测及地下目标体探测，要应用于抛石计量需要从业者具有专业的雷达知识和丰富的雷达抛石探测经验，对从业人员的专业素质要求较高。

2) 相对介电常数是确定雷达深度的关键参数，由于抛石的不均匀性和含水率情况不同，即使同一工程也会出现不同介电常数，因此需要多个钻孔资料进行相对介电常数确定工作，对于长度较大的工程可以分段确定介电常数。根据与钻孔资料验证来看，相对介电常数在仔细校对后对抛石量的计算误差较小。

## 5 结语

1) 基于地质雷达抛石探测提出了一种抛石量计算方法，并分步对该方法进行详细说明。

2) 以连云港某路基施工项目为例，采用基于地质雷达探测抛石量计算方法进行了抛石量计算，表明了该方法的实用性。

3) 介绍了工程中常用的抛石量计算方法及其特点，便于从业人员根据工程特点选择合适的抛石计算方法；对基于地质雷达探测抛石量计算方法优势和局限性进行分析，并提出了该方法关键参数-相对介电常数的确定方法及注意事项。

4) 基于地质雷达探测抛石量计算方法其理论已成熟且方法本身并不复杂，该方法的准确性更依赖于从业人员的专业素质，包括对雷达图像中抛石范围的判定、相对介电常数的选取及对工程及地质情况的熟悉等。

## 参考文献：

- [1] 马一,张俊锋.航道工程水下抛石计量控制分析[J].水运工程,2014(11):123-126.
- [2] 宋华,王立忠.海堤探地雷达探测模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2 826-2 833.
- [3] 朱瑞虎,郑金海,杨永清.地质雷达在海堤围堰爆破挤淤施工效果检测中的应用[J].水运工程,2015(11):30-51.
- [4] 丰文意.水利工程抛石工程测量定位浅析[J].建材技术与应用,2013(2):47-49.
- [5] 李先炳.水下抛石施工质量控制及质量评定[J].人民长江,2002,33(8):35-50.

(本文编辑 武亚庆)