

# 地质雷达在高等级公路工程中的应用

潘卫育<sup>1</sup>, 向文俊<sup>1</sup>, 刘朝晖<sup>1</sup>, 冯伯林<sup>2</sup>,  
蔡 辉<sup>2</sup>, 孙典红<sup>2</sup>, 马洪蛟<sup>2</sup>, 何春林<sup>2</sup>

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 河海大学 南京市 210098)

**摘 要:** 地质雷达探测技术是 20 世纪 90 年代为适应高等级公路发展, 进行快速、准确地无损检测高速公路路面及对工程质量进行评定而发展起来的技术。文章叙述了地质雷达探测方法原理及探测图像的解释。通过应用实例说明地质雷达检测技术由于具有无损、快速、简易、精度高的优点, 因此, 作为公路工程施工质量监控, 特别是对高速公路的施工质量监控以及养护具有广泛的应用前景。

**关键词:** 地质雷达; 无损检测; 沥青混凝土; 介电常数

近年来, 随着高等级公路的日益增多, 工程质量愈来愈被人们所重视, 传统的采用钻取芯样来检验路面厚度是否满足设计要求, 作为质量评定依据的方法, 存在很多缺陷, 表现在: 钻取芯样数量少, 密度低, “规范”规定每车道沥青混凝土路面每 200 m 钻取一个芯样, 其代表性差; 钻取芯样劳动强度大, 芯样厚度值用千分尺(或钢尺)读取, 误差大; 采用钻孔取芯法, 在钻孔回填处, 因应力集中或渗水容易导致路面开裂, 以致造成路面破坏, 缩短了道路的使用寿命。

地质雷达无损检测是一种高新技术<sup>[1]</sup>。我们使用的高速多通道地质雷达, 用于高速公路无损检测, 具有数据采集密度高, 采样点距可任意选定, 最小采样点距可达 5 cm, 每扫描采样点数 1 024; 检测速度快, 检测速度一般为 20~40 km/h, 最高可达 80 km/h; 检测精度高, 测量误差 $\leq 3$  mm, 并可自动区别不同材料的界面。地质雷达检测技术可对路面厚度指标作全面实际的评价, 为公路施工管理和维护提供科学依据, 对确保工程质量和延长道路使用寿命起重要作用。如能在路面施工过程中采用地质雷达检测, 对路面厚度施工进行监控, 可显著提高厚度控制水平, 同时, 可挖掘材料节约潜力。地质雷达无损检测技术在高等级公路施工质量监控及维护中具有广泛的应用前景。

## 1 地质雷达检测方法原理

高速公路沥青混凝土路面检测, 采用高速多通道地质雷达, 1 GHz 喇叭型天线等设备。

地质雷达通过向地下发射尖锐脉冲式电磁波和接收其反射回波的方式, 得到直观的地下图像。地下不同物体具有不同的性质, 一般来说, 导电率高, 吸收雷达波强烈, 雷达波通过这些介质, 振幅衰减快; 介电常数大, 雷达波在这种介质中的传播速度小。

公路型 SIR-10H 型高速多通道地质雷达通过一对喇叭型的悬空集能天线, 一个为发射天线, 向地下发射宽频带尖脉冲雷达波(无线电波); 另一个为接收天线, 收集从地下不同界面上反射回来的尖脉冲信号, 然后将这些信号记录下来<sup>[2]</sup>, 如图 1。

每发射一次脉冲, 就接收到一串反射信号, 称为时间系列或扫描记录, 随着天线在地面上方平行移动, 得到无数扫描记录(大约 200 次/s), 合成一张完整的地下透视图像, 如图 2。

研究表明, 引起雷达脉冲反射的主要原因是公路路面各层的介电常数不同, 这是由于各层的物质组成和结构不同而造成的, 如沥青的介电常数通常为 3~5, 混凝土层为 6~12。基于这一点, 我们就能用地质雷达的后处理软件、自动检层软件计算出路面各层的厚度以及由图像分析判断路面底层以下的各种隐患。

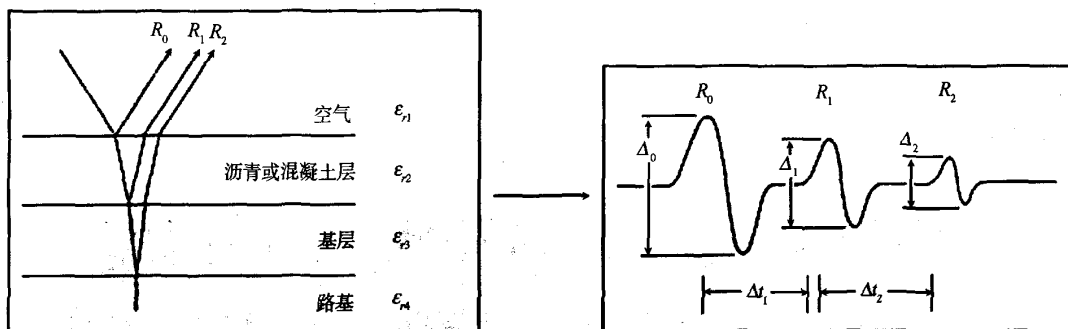


图 1 雷达测厚原理

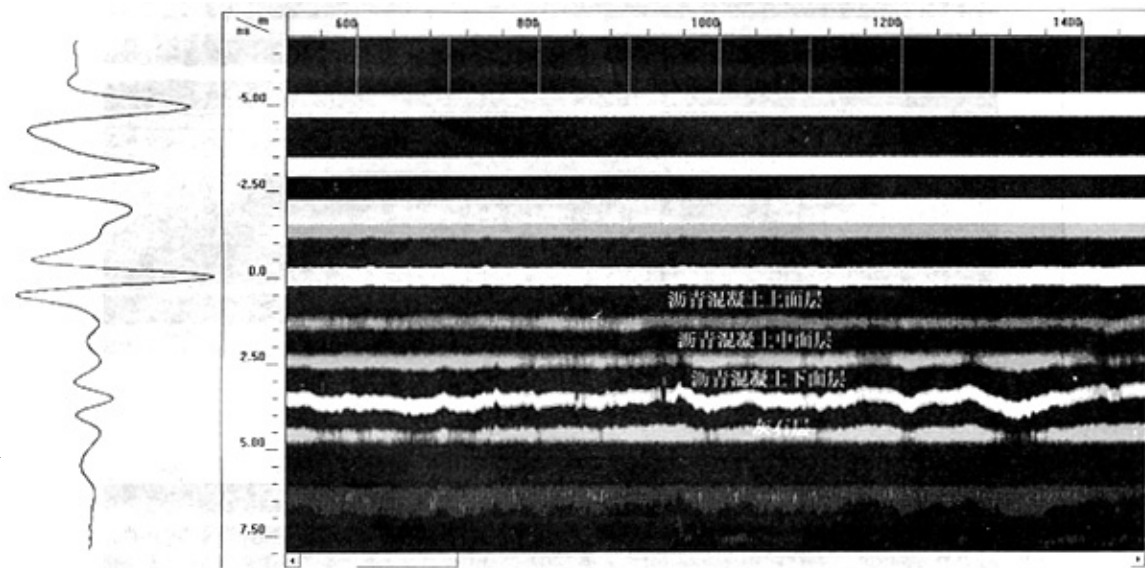


图 2 高速公路路面雷达透视剖面

## (1) 计算路面厚度。

假设发射的起始脉冲振幅为  $A$ , 我们通过在路面上放一块金属板, 由此可以得到反射(全发射)脉冲振幅  $A$ 。拿走金属板, 这时从路面接收到的反射信号振幅为  $A_0$ , 这是从面层反射回来的振幅, 由此可以算出路面的反射系数  $R_0$ :

$$R_0 = A_0/A = (\sqrt{\epsilon_{r1}} - 1)/(\sqrt{\epsilon_{r1}} + 1) \quad (1)$$

从公式(1)可以算出面层的介电常数  $\epsilon_{r1}$ :

$$\epsilon_{r1} = [(1 + R_0)/(1 - R_0)]^2 \quad (2)$$

由此可得雷达波在面层中的传播速度:

$$V_1 = C/\sqrt{\epsilon_{r1}} \quad (3)$$

这里  $C$  为雷达波在空气中的传播速度, 即光速  $C = 30 \text{ cm/ns}$ ,  $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ 。

用此波速及扫描线上面层顶底反射之间的时间

差  $\Delta t_1$ , 就可以计算出面层的厚度:

$$h_1 = \Delta t_1 V_1 / 2 \quad (4)$$

计算出了第 1 层的厚度, 据此还可以计算其下面的第 2 层, 这时候的反射系数要乘一个穿透损失系数  $(1 - R_0^2)$ 。它表示从下面第 2 层底部反射回地面的信号和穿透穿出第 1 层底部界面时的损耗(参见图 1)。所以:

$$A_1/A = R_1(1 - R_0^2) \quad (5)$$

$$R_1 = A_1/A(1 - R_0^2) = A_1 A / (A^2 - A_0^2) \quad (6)$$

同时, 可获得第 2 层(基层)的介电常数  $\epsilon_{r2}$ :

$$\epsilon_{r2} = \epsilon_{r1} [(1 + R_1)/(1 - R_1)]^2 \quad (7)$$

于是, 雷达波在第 2 层中的传播速度为:

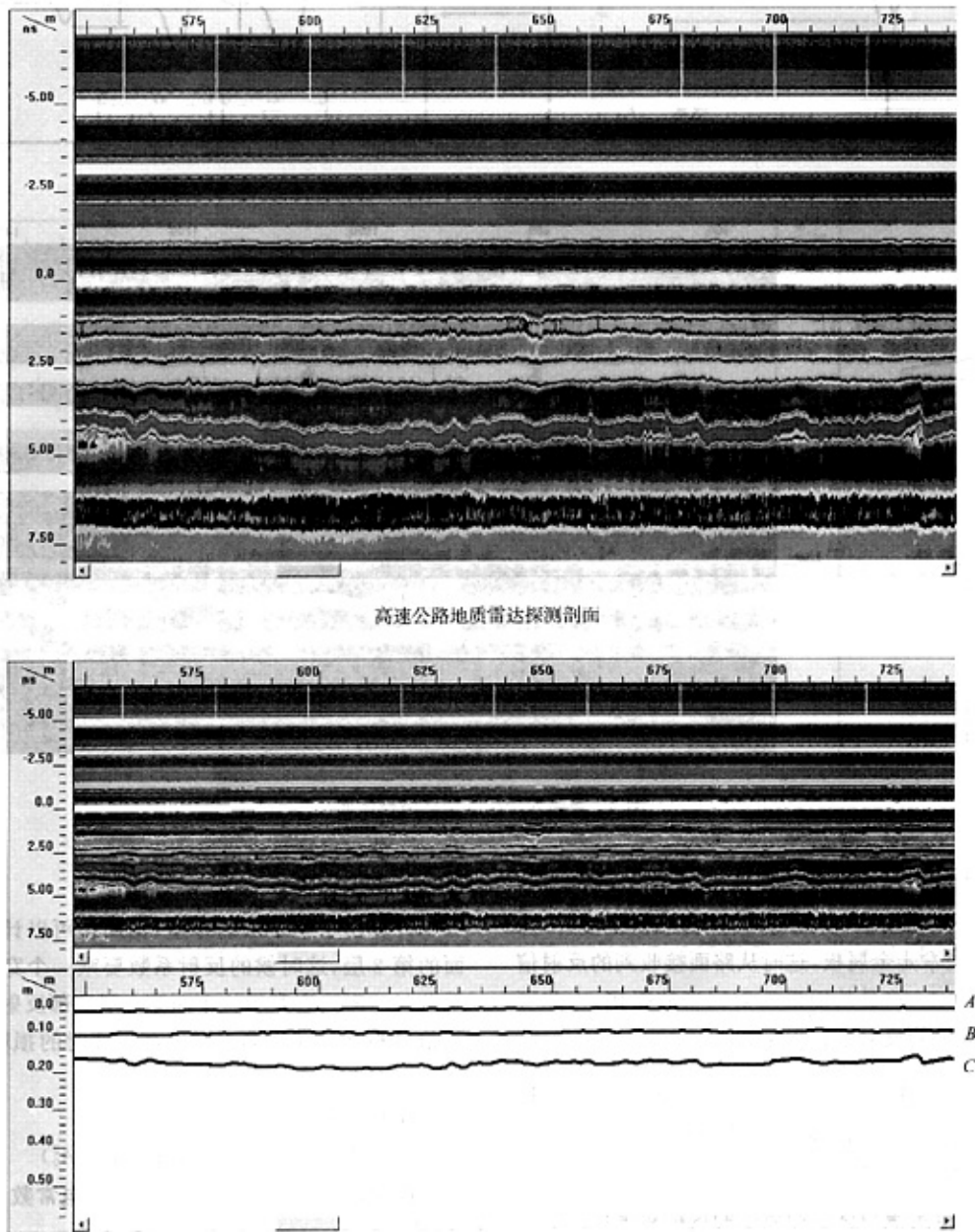
$$V_2 = C/\sqrt{\epsilon_{r2}} \quad (8)$$

最后, 可得到第 2 层的厚度  $h_2$ :

$$h_2=\Delta t_2 \cdot V_2/2 \tag{9}$$

依次类推,可以求出第 3 层、第 4 层的厚度。目前,SIR-10H 型地质雷达的自动分析软件,最多可以自动分辨和求出 7 层厚度。实际上,高等级公路沥

青混凝土路面通常由下、中、上 3 层组成,雷达测试过程中只需分检出 3 层即可。图 3 为宁靖盐高速公路沥青混凝土路面地质雷达探测剖面 and 分层。



注: A. 沥青混凝土上面层底界; B. 沥青混凝土中面层底界; C. 沥青混凝土下面层底界; 以 m 为单位的层厚解释。

地质雷达剖面的自动检层和层厚解释

图 3 宁靖盐高速公路沥青混凝土路面地质雷达探测剖面 and 分层

从图3中可以看出,地质雷达有能力将沥青混凝土路面的不同层较清晰地分出来。

## (2)估计含水量。

面层中的水一般充填在孔隙中。由于空气的介电常数为1,水的介电常数为81,充水后面层的孔隙比可以通过介电常数的升值反映出来,下面是德克萨斯公路研究所推导论证得到面层的介电常数计算公式:

$$\sqrt{\epsilon_b} = \Phi_s \sqrt{\epsilon_s} + \Phi_w \sqrt{\epsilon_w} + \Phi_a \sqrt{\epsilon_a} \quad (10)$$

由此,含水百分比为:

$$\Phi_w \sqrt{\epsilon_w} = \sqrt{\epsilon_b} - \Phi_s \sqrt{\epsilon_s} - \Phi_a \sqrt{\epsilon_a} \quad (11)$$

上式中: $\Phi_s$ 、 $\Phi_w$ 、 $\Phi_a$ 分别为固体物质、水、孔隙的百分比; $\epsilon_b$ 、 $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_w$ 、 $\epsilon_a$ 分别为总介电常数、固体物质、水、空气的介电常数。

## 2 公路路面检测及数据处理分析

### 2.1 公路路面检测

以宁靖盐高速公路试验段沥青混凝土路面下层厚度检测为例。宁靖盐高速公路为双向四车道,沥青混凝土路面下层设计厚度为7 cm。

采用SIR-10H型高速地质雷达(1 GHz喇叭型天线)对沥青混凝土路面下层厚度进行检测,扫描采样点距20 cm,每扫描采样点数1 024点,采样车速20~35 km/h,量程20 ns(双程时间),雷达波波速近似0.105 m/ns,分辨率为0.1 cm。

公路路面检测数据采集过程中,首先要对SIR-10H型地质雷达检测精度进行校核,校核方法如下。

(1)在左、右幅检测路段测线相应桩号钻取芯样,并量取芯样厚度数据。

(2)对检测的雷达波进行后处理和自动检层处理。由于雷达波界面反射波波速、时间差与行程满足以下关系: $h = v \cdot \Delta t / 2$ (式中: $v$ 为速度, $\Delta t$ 为双程旅行时间, $h$ 为某一界面埋深),计算机可精确计算出发射与接收时差。任定一波速可计算出某点的埋深(厚度)或根据 $\Delta t$ 、 $h$ ,计算 $v$ 。

(3)取任意取芯点的厚度数据与雷达相应测点的测试厚度比较,用已知厚度计算雷达波波速。

(4)用已知雷达波波速,分析另外已知点的厚度,最终确定一个适中的波速,使各对比点的误差最小。

(5)用最终波速对其他位置测点的测试厚度进行计算。

最后,通过钻取芯样数据与地质雷达检测数据对比,可得到SIR-10H型地质雷达测试厚度自检误差统计表,如表1。

表1 SIR-10H型地质雷达测厚统计

芯样号	桩号	芯样厚度	雷达测厚	绝对误差	相对误差	备注
		cm	cm	cm	%	
A18	K60+032	6.4	6.4	0.0	0.0	A测线
A28	K60+092	7.4	7.5	0.1	1.3	A测线
A36	K60+140	6.7	6.5	-0.2	-3.0	A测线
B18	K60+032	7.0	6.8	-0.2	-2.8	B测线
B28	K60+092	7.9	7.7	-0.2	-2.5	B测线
B36	K60+140	7.6	7.6	0.0	0.0	B测线
C18	K60+032	8.4	8.1	-0.3	-3.6	C测线
C28	K60+092	8.9	8.6	-0.3	-3.4	C测线
C36	K60+140	8.1	7.9	-0.2	-2.5	C测线

从表1可知,地质雷达实测厚度值与芯样厚度值比较吻合,测量误差较小,其精度满足路面厚度的检测要求。

### 2.2 数据处理分析

根据现场实测的地质雷达探测剖面采用后处理软件和自动检层软件进行数据处理,最后可得到各测点(间距为20 cm)的厚度值。统计方法采用交通部《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059-95)和《公路工程质量检验评定标准》(JTJ 071-98)规定的方法,按20 m一个评价段,分别统计厚度平均值、标准差、变异系数、厚度代表值、最大值和最小值。

## 3 检测精度分析

通过对宁靖盐高速公路试验段沥青混凝土路面下层厚度的地质雷达检测,对检测雷达波进行后处理和自动检层处理,并进行统计分析,最后,得到试验段路面沥青混凝土厚度(下层)雷达检测数据表(段评价),沥青混凝土路面探测剖面 and 分层图。

### (1)地质雷达的检测精度。

为了检验地质雷达的检测精度,在试验段K59+930~K60+140路段布设了A-A、B-B及C-C3条测线,同时每隔6 m钻取芯样(见图4),芯样厚度值由泰州市宁靖盐高速公路指挥部提供。对108个芯样厚度与雷达实测厚度进行对比,见表2。由表2可见,绝对误差 $\leq 5$  mm的有99点,占91.7%,绝对误差 $> 5$  mm的有9点,占8.3%,说明地质雷达的检测精度相当高,地质雷达无损检测方法完全能满足高等级公路路面厚度检测精度的要求。

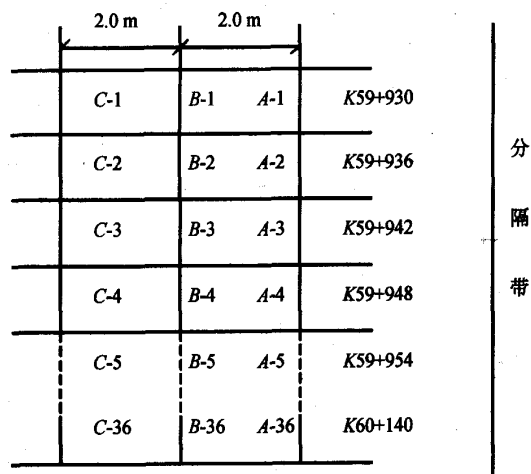


图 4 试验段雷达检测取芯示意

## (2) 地质雷达测厚误差分析。

采用地质雷达检测路面厚度产生误差主要有以下原因：

- ① 仪器采集误差和数据处理中波组拾取误差；
- ② 由于路面沥青混凝土均匀性差异，电磁波波速在被检测层中的变异性引起的误差；
- ③ 由于钻取芯样的孔位与地质雷达测点在实际位置上不完全吻合，从而产生取芯厚度与地质雷达测厚之间的误差。

## 4 结语

(1) SIR-10H 型地质雷达应用于高等级公路路面检测，具有测点密度高、代表性好、精度高、检测速度快，对公路路面无破损等优点，有显著的社会效

表 2 宁靖盐高速公路(泰州)试验段沥青混凝土厚度(下层)雷达测厚与取芯对照

取芯序号	桩号	A-A 测线/cm			B-B 测线/cm			C-C 测线/cm		
		取芯厚度	雷达测厚	绝对误差	取芯厚度	雷达测厚	绝对误差	取芯厚度	雷达测厚	绝对误差
1	K60+930	6.5	6.5	0.0	7.2	7.1	-0.1	8.0	7.7	-0.3
2	K60+936	6.5	6.4	-0.1	7.1	6.8	-0.3	7.4	7.3	-0.1
3	K60+942	7.2	6.4	-0.8	7.2	6.9	-0.3	7.9	7.6	-0.3
4	K60+948	6.7	6.2	-0.5	6.1	6.3	0.2	7.1	6.9	-0.2
5	K60+954	7.3	7.2	-0.1	7.5	7.1	-0.4	7.4	7.4	0.0
6	K60+960	7.8	7.5	-0.3	7.5	7.1	-0.4	8.4	8.2	-0.2
7	K60+966	7.5	7.3	-0.2	7.1	7.2	0.1	8.1	8.1	0.0
8	K60+972	6.6	6.8	0.2	6.5	6.5	0.0	7.6	7.6	0.0
9	K60+978	5.8	5.7	-0.1	5.5	5.4	-0.1	7.1	7.1	0.0
10	K60+984	5.8	5.5	-0.3	5.1	5.9	0.8	7.0	6.8	-0.2
11	K60+990	8.2	7.7	-0.5	8.1	7.8	-0.3	8.0	7.5	-0.5
12	K60+996	7.2	6.8	-0.4	6.6	6.7	0.1	7.8	6.8	-1.0
13	K60+002	6.7	6.6	-0.1	6.6	6.6	0.0	7.5	7.4	-0.1
14	K60+008	8.4	8.2	-0.2	9.2	9.1	-0.1	9.3	8.7	-0.6
15	K60+014	7.3	7.4	0.1	7.5	7.2	-0.3	7.9	7.9	0.0
16	K60+020	8.5	8.2	-0.3	8.5	8.4	-0.1	8.3	8.4	0.1
17	K60+026	8.1	7.4	-0.7	7.8	7.6	-0.2	8.5	8.3	-0.2
18	K60+032	6.4	6.4	0.0	7.0	6.8	-0.2	8.4	8.1	-0.3
19	K60+038	8.2	8.3	0.1	8.9	8.3	-0.6	10.1	9.7	-0.4
20	K60+044	7.5	7.2	-0.3	7.9	7.5	-0.4	9.1	8.9	-0.2
21	K60+050	8.3	7.9	-0.4	8.6	8.2	-0.4	9.3	8.9	-0.4
22	K60+056	8.0	7.7	-0.3	7.8	7.5	-0.3	8.6	7.9	-0.7
23	K60+062	8.4	8.2	-0.2	8.7	8.4	-0.3	8.4	8.6	0.2
24	K60+068	7.5	7.0	-0.5	7.2	7.1	-0.1	7.8	8.0	0.2
25	K60+074	6.9	6.5	-0.4	7.1	6.7	-0.4	8.1	7.9	-0.2
26	K60+080	7.2	7.2	0.0	7.3	7.4	0.1	8.6	8.4	-0.2
27	K60+086	7.0	6.9	-0.1	6.7	6.8	0.1	6.8	6.5	-0.3
28	K60+092	7.4	7.5	0.1	7.9	7.7	-0.2	8.9	8.6	-0.3
29	K60+098	6.9	6.5	-0.4	7.1	7.1	0.0	7.2	6.9	-0.3
30	K60+104	6.4	6.3	-0.1	6.4	6.2	-0.2	6.7	6.9	0.2
31	K60+110	6.5	6.3	-0.2	6.7	6.6	-0.1	7.8	7.5	-0.3
32	K60+116	5.9	5.7	-0.2	6.8	6.2	-0.6	5.9	6.1	0.2
33	K60+122	6.4	6.0	-0.4	6.5	6.8	0.3	6.7	7.0	0.3
34	K60+128	8.1	7.6	-0.5	8.6	8.0	-0.6	8.8	8.5	-0.3
35	K60+134	7.2	6.8	-0.4	7.8	7.5	-0.3	7.8	7.5	-0.3
36	K60+140	6.7	6.5	-0.2	7.6	7.6	0.0	8.1	7.9	-0.2

文章编号: 0451-0712(2004)07-0145-05

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

# 金刚砂混凝土配合比设计及力学性能研究

王瑞燕, 吴国雄, 韩春云

(重庆交通学院道路工程系 重庆市 400074)

**摘 要:** 金刚砂以其良好的耐磨性使得它在工业上得以广泛应用, 但金刚砂在路面使用上仍属少见。能否在金刚砂提高路面的耐磨性的同时, 获得较高的力学强度是值得研究的。以大量试验数据为基础, 对金刚砂混凝土进行了配合比设计和力学性能分析, 以获取具有优良力学特性的金刚砂混凝土。

**关键词:** 金刚砂; 配合比设计; 力学性能

我国含有丰富的天然金刚砂, 每年都生产并出口大量金刚砂产品。良好的耐磨性使得它在工业上得以广泛应用, 但金刚砂在路面使用上仍属少见。金刚砂是质地坚硬和多棱角的结晶体, 又是一种颗粒严密的高强骨料, 具有化学性稳定、强度高、硬度大和耐磨等优点。能否在金刚砂能提高路面的耐磨性的同时, 获得较高的力学强度是值得研究的。要配制较理想的金刚砂混凝土, 首先应选择与基材强度相适应的金刚砂品种, 对不同金刚砂的标号进行试验配比。其次要选择合理的砂率和水灰比, 还需考虑粉煤灰、硅灰和高效减水剂等的影响。本文试图以金刚砂对混凝土力学强度的贡献为出发点, 以大量试验数据为基础, 给出了金刚砂的类型与掺量, 通过对金刚砂混凝土进行配合比设计和力学性能分析, 来获取具有优良力学特性的金刚砂混凝土。

收稿日期: 2004-03-15

益和经济效益。

(2) 应用地质雷达对高等级公路沥青混凝土路面下、中、上 3 层检测, 可根据地质雷达检测结果, 指导下一步施工, 起到对路面厚度的施工监控作用, 可显著提高路面厚度控制水平, 从而确保公路路面施工质量。

(3) 地质雷达测试技术不仅可应用于公路路面厚度检测, 而且能探测路基空洞、疏松、路面疏松、裂隙等缺陷<sup>[3]</sup>。

(4) 地质雷达不仅在公路建设阶段可用于施工

## 1 配合比设计及室内力学试验

混凝土配合比设计, 按《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ 053-94) 进行。采用 28 d 养护龄期测试强度。

### 1.1 设计指标及材料选择

#### 1.1.1 设计指标

本文设计的金刚砂混凝土为半干硬性混凝土, 强度优于普通混凝土。具体设计指标如下: 坍落度 0~30 mm; 设计强度 C35。

#### 1.1.2 选用的原材料

(1) 水泥: 采用重庆地维水泥 P. 0425 号, 按 GB175-92 检测, 28 d 抗压强度 70.37 MPa, 抗折强度 8.47 MPa。

(2) 粉煤灰: 采用重庆珞璜电厂 I 级粉煤灰。

(3) 机制砂: 表观密度 2.69 g/cm<sup>3</sup>, 装填密度

质量监控, 在公路养护阶段, 通过地质雷达检测对制定养护和维修计划也具有参考作用。

## 参考文献:

- [1] 王水强, 等. 市政工程建设中地质雷达的应用[J]. 工程物探, 1998, (2).
- [2] 张高平. SIR-10H 地质雷达在探测溶洞、岩溶分布中的应用效果[J]. 工程物探, 1992, (3).
- [3] 孙朝云. 现代道路交通测试技术、原理与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.