

文章编号: 0451-0712(2006)06-0081-06

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

# 人造轻质土在高等级公路上的应用

杨少华, 胡建福, 曾怀武, 王黎明

(浙江省交通规划设计研究院 杭州市 310006)

**摘 要:** 通过人造轻质土在甬(宁波)余(余姚)一级公路余姚洋溪河桥头路堤的实际应用, 介绍其室内配方试验、工程设计、材料选配、施工工艺及现场检测等方面的应用研究情况, 以供同行参考。

**关键词:** 人造轻质土; 软土地基; 工程应用

人造轻质土(亦称泡沫珠混合轻质土)是一种比重介于土与泡沫塑料之间, 并可根据工程需要进行调配的路用材料。它通过减轻上部填土重量来降低地基中的应力水平, 以提高路堤稳定性, 同时减少沉降量, 克服桥头跳车和路基不均匀沉降。

日本在这方面有许多工程上的应用, 我国也有文献对类似材料做了室内试验与分析方面的介绍, 但至今尚无工程实用性研究的先例。

洋溪河桥位于浙江省余姚市甬(宁波)余(余姚)一级公路改建工程第二合同段。由于该桥头路堤填筑高度大、地基软土层厚、软土指标差、施工工期要求紧, 尤其是受桥头路堤两侧建有民房等条件限制, 若采取常用的竖向排水体或桩式复合地基等处理方法, 施工中过大的地基沉降或振动挤土都将对附近民居产生较大影响。因此, 设计提出了采用人造轻质土(Man-made Light Soil, 简称MLS)填筑桥头路基方案, 以解决稳定、沉降、工期、环保等方面的难题, 并获得业主的支持。工程于2004年8月~11月实施完工, 并顺利通车, 至今运行良好。

## 1 人造轻质土室内配方试验

### 1.1 材料及性能指标

根据当地可能取得的材料进行室内配方试验, 是工程设计与施工之前十分必要的工作。为此, 试验选用如下几类材料。

- (1) 细粒土: 黄色, 含风化颗粒粘土, 其性能指标见表1。
- (2) 泡沫珠(球状EPS): 选用15型泡沫珠, 为白

表1 细粒土的物理力学性能

| 液限<br>% | 塑限<br>% | 塑性<br>指数 | 重型击实                       |            | 比重   | 干松装密度<br>kg/m <sup>3</sup> |
|---------|---------|----------|----------------------------|------------|------|----------------------------|
|         |         |          | 最大干密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 最佳含水量<br>% |      |                            |
| 65.6    | 36.0    | 29.6     | 2.004                      | 11.4       | 2.67 | 1 232                      |

色圆形颗粒状, 直径约为5 mm, 密度为20.7 kg/m<sup>3</sup>, 堆积密度为13.40 kg/m<sup>3</sup>。

(3) 粉煤灰和石屑: 其各自的物理力学性能指标见表2。

表2 粉煤灰和石屑的物理力学性能

|  |                            |       |
|--|----------------------------|-------|
| 粉煤灰比重/(g/cm <sup>3</sup> )               |                            | 1.980 |
| 粉煤灰松方密度/(g/cm <sup>3</sup> )             |                            | 0.925 |
| 石屑松方密度/(g/cm <sup>3</sup> )              |                            | 1.445 |
| 粉煤灰: 石屑=30:70, 松方密度/(g/cm <sup>3</sup> ) |                            | 1.470 |
| 粉煤灰: 石屑=20:80                            | 最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 10.0  |
|  | 最佳含水量/%                    | 1.913 |
| 粉煤灰: 石屑=30:70                            | 最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 10.0  |
|  | 最佳含水量/%                    | 1.777 |

### 1.2 泡沫珠混合细粒土试验

(1) 最佳含水量和最佳干密度: 泡沫珠与土配合比为55:45(泡沫珠与土按体积比, 下同), 水泥掺量分别为6%、8%、10%; 以马歇尔击实成型法确定最佳含水量、最大干密度, 击实筒直径为101.6 mm。

(2) 无侧限抗压强度: 按所选的水泥掺量、不同的压实系数静压制作试件, 尺寸为 $\phi$ 100 mm $\times$ 100 mm的圆柱体; 在25℃ $\pm$ 2℃温度下, 保湿养生7 d和28 d, 分别测定其无侧限抗压强度。

(3)承载比(*CBR*):按无侧限抗压强度试验相同的方法制作试件,成型后养生7 d;第8 d放入水槽内,水槽内水面保持在试件顶面以上25 mm,浸水4昼夜,测定土的承载比(*CBR*)。

(4)不固结不排水三轴剪切试验:采用淤泥质土,其天然含水量为60%,液限为65.6%,塑限为36.0%,塑性指数为29.6;样本一按原状土的湿容重重塑成型;样本二为人造轻质土,泡沫珠:土=55:45;样本三为人造轻质土,泡沫珠:土=55:45,水

泥掺量为6%;均采用体积置换法。

(5)拌和与压实特性。

按不同掺配比例、在不同含水量下将泡沫珠与土混合拌和,均发现在小于某含水量时,泡沫珠与土会发生分离(见表3),且重型击实时泡沫珠上浮分离更为显著;当含水量超过某一限值时,拌和较为困难,出现成团现象。这说明泡沫珠混合土存在一个适宜的拌和用水量区间,可以形成一个分散均匀体(见图1)。

表3 泡沫珠混合土的拌和和压实特性

| 击实类型        | 泡沫：土=45：55,水泥剂量8%,重型击实 |       |       |       |      | 泡沫：土=50：50,水泥剂量8%,马歇尔击实 |       |       |       |       |
|-------------|------------------------|-------|-------|-------|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 干密度/(g/cm³) | 1.319                  | 1.295 | 1.165 | 1.061 | —    | 1.196                   | 1.208 | 1.103 | 0.993 | 0.979 |
| 含水量/%       | 14.8                   | 17.3  | 20.0  | 21.6  | 24.0 | 13.6                    | 15.1  | 16.0  | 18.9  | 21.6  |
| 拌和情况        | 拌和分离                   | 拌和均匀  |       |       | 拌和困难 | 拌和分离                    | 拌和均匀  |       |       |       |

| 击实类型        | 泡沫：土=55：45,水泥剂量8%,马歇尔击实 |       |       |       |   | 泡沫：土=55：45,水泥剂量12%,马歇尔击实 |       |       |       |       |
|-------------|-------------------------|-------|-------|-------|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 干密度/(g/cm³) | 0.925                   | 1.084 | 1.002 | 1.005 | — | 1.185                    | 1.003 | 1.123 | 1.076 | 1.045 |
| 含水量/%       | 13.8                    | 16.0  | 17.8  | 18.7  | — | 12.7                     | 14.6  | 15.2  | 17.3  | 19.4  |
| 拌和情况        | 拌和分离                    | 拌和均匀  |       |       | — | 拌和分离                     | 拌和均匀  |       |       |       |

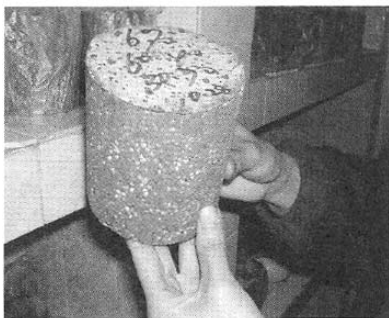


图1 人造轻质土试件

对土闷料后拌和效果较好,采用重型击实时泡沫珠上浮分离比马歇尔方法更为显著,采用重型击实法难以得到最大干密度和最佳含水量,而马歇尔击实方法可以得到最大干密度和最佳含水量。

(6)强度与变形特性。在不同水泥剂量下,马歇尔击实方法可以得到最大干密度和最佳含水量,见表4。

表4 15型泡沫珠混合细粒土最大干密度和最佳含水量

|                            |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 水泥剂量/%                     | 6.0   | 8.0   | 10.0  |
| 最佳含水量/%                    | 17.2  | 16.8  | 16.5  |
| 最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.182 | 1.204 | 1.273 |

表5为15型泡沫珠混合细粒土的强度测定值,由于试件制作均匀性的影响,试验结果虽然存在一定的离散性,但反映出如下规律。

①随着水泥剂量和干密度的增加,无侧限抗压强度呈增大的趋势,28 d强度与7 d强度相比,增幅较大,平均增大了60%以上。6%水泥剂量泡沫珠混合细粒土干密度为1.004 g/cm<sup>3</sup>时,28 d强度为374 kPa,而为1.061 g/cm<sup>3</sup>时,28 d强度为403 kPa。

②不同水泥剂量的泡沫珠混合细粒土试件均会产生回弹,回弹率约为4.7%,在水泥终凝后稳定。平均吸水膨胀量小于0.2%,并小于纯细粒土的膨胀量(0.4%),说明水稳定性比较好。

③泡沫珠混合细粒土的*CBR*随着密度和水泥剂量的增大而趋于增大,虽低于纯细粒土,但均能满足路堤填土的需求。

④淤泥质土掺加55%(体积含量)泡沫珠和6%水泥后,其凝聚力和内摩擦角明显增大,接近于结构性较好的可塑粘土。

⑤泡沫珠混合土典型的抗压变形曲线存在明显的破坏点和直线段(见图2),说明在破坏前经历了弹性变形阶段,其结构性较好。

### 1.3 泡沫珠混合粉煤灰和石屑试验

#### 1.3.1 最佳含水量与最大干密度

表 5 15 型泡沫珠混合细粒土的强度参数

| 15 型泡沫珠混合细粒土掺配比例:泡沫:土= 55:45                            |         |       |       |       |                     |       |       |       |       |       |
|---|---------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 水泥剂量/%  |         | 6.0   |       |       | 8.0                 |       |       | 10.0  |       |       |
| 控制压实系数/%  |         | 90    | 93    | 95    | 90                  | 93    | 95    | 90    | 93    | 95    |
| 实际干密度/(g/cm <sup>3</sup> )                              |         | 1.004 | 1.061 | 1.087 | 1.037               | 1.066 | 1.097 | 1.092 | 1.121 | 1.150 |
| 平均回弹率/%   |         | 4.7   |       |       |                     |       |       |       |       |       |
| 7 d 无侧限抗压强度/kPa   |         | 248   | 260   | 272   | 247                 | 267   | 275   | 316   | 331   | 358   |
| 7 d 无侧限抗压实验破坏变形/mm                                      |         | 3.0   | 4.2   | 4.7   | 4.8                 | 5.0   | 6.2   | 7.4   | 7.5   | 6.3   |
| 28 d 无侧限抗压强度/kPa  |         | 374   | 403   | 491   | 372                 | 406   | 422   | 563   | 629   | 597   |
| 28 d 无侧限抗压实验破坏变形/mm                                     |         | 3.0   | 3.3   | 3.7   | 4.0                 | 5.3   | 4.6   | 3.7   | 4.5   | 4.7   |
| CBR   | 膨胀量/%   | 0.1   | 0.2   | 0.2   | 0.0                 | 0.2   | 0.2   | 0.1   | 0.2   | 0.2   |
|   | CBR 值/% | 11.5  | —     | 12.6  | 11.0                | —     | 15.5  | 15.6  | —     | 15.2  |
| 纯细粒土的 CBR(最佳含水量为 14.1%,最大干密度为 2.004 g/cm <sup>3</sup> ) |         |       |       |       |                     |       |       |       |       |       |
| 压实度 K=90%,CBR=20.5%                                     |         |       |       |       | 压实度 K=95%,CBR=23.5% |       |       |       |       |       |
| 平均膨胀量为 0.4%   |         |       |       |       |                     |       |       |       |       |       |

| 不固结不排水三轴剪切试验             |       |             |       |                     |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------|---------------------|-------|
| 材料组成                     | 搅动土   | 泡沫:土=55: 45 |       | 泡沫:土=55: 45,水泥剂量 6% |       |
| 湿密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.742 | 0.975       | 0.985 | 1.097               | 1.130 |
| 凝聚力/kPa                  | 3.0   | 3.0         | 3.0   | 19.0                | 28.0  |
| 内摩擦角/(°)                 | 0.1   | 0.3         | 0.2   | 4.6                 | 5.3   |

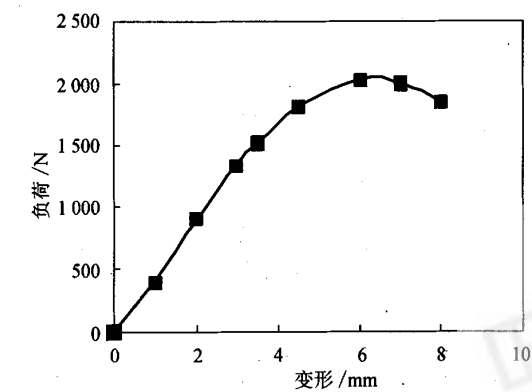


图 2 8 %水泥剂量泡沫珠混合土变形曲线

15 型泡沫珠混合粉煤灰和石屑,采用的掺配比例见表 6。经试验比较可知,振动成型获得的最大干密度比马歇尔击实成型方式更低,小于 1.0 g/cm<sup>3</sup>,如果其强度、变形和水稳定性能适合,那么用于局部软基处理或桥头填土将是可以预期的。因而取用了一种比例,即泡沫珠:(粉煤灰+石屑)=64: 40(体积比),粉煤灰:石屑=30: 70,水泥剂量为 4%,成型干密度为 0.904 g/cm<sup>3</sup>,含水量为 16.2%,并对其强度等性能进行测定(见表 7)。

1.3.2 强度与变形特性

泡沫珠与粉煤灰和石屑混合,并掺加一定量的水泥后,其强度变化规律与泡沫珠混合细粒土类同。

表 6 15 型泡沫珠混合粉煤灰和石屑的压实效果

| 材料名称                    | 粉煤灰:石屑=20: 80 | 粉煤灰:石屑=30: 70 | 泡沫:(粉煤灰+石屑)=60: 40,粉煤灰:石屑=30: 70,水泥剂量 6% | 泡沫:(粉煤灰+石屑)=60: 40,粉煤灰:石屑=20: 80,水泥剂量 4% | 泡沫:(粉煤灰+石屑)=60: 40,粉煤灰:石屑=30: 70,水泥剂量 4% | 泡沫:(粉煤灰+石屑)=55: 45,粉煤灰:石屑=20: 80,水泥剂量 4% | 泡沫:(粉煤灰+石屑)=55: 45,粉煤灰:石屑=30: 70,水泥剂量 4% |
|-------------------------|---------------|---------------|--|--|--|--|--|
| 压实方式                    | 重型击实          | 重型击实          | 振动成型                                     | 马歇尔击实成型                                  |  |  |  |
| 最佳含水量/%                 | 10.0          | 10.0          | 16.3                                     | 12.8                                     | 14.7                                     | 11.6                                     | 14.3                                     |
| 最大干密度/g/cm <sup>3</sup> | 1.913         | 1.777         | 0.889                                    | 1.019                                    | 1.016                                    | 1.137                                    | 1.066                                    |

表 7 15 型泡沫珠混合粉煤灰和石屑的强度和变形参数

| 掺配比例:泡沫:(粉煤灰+石屑)=60:40,粉煤灰:石屑=30:70,水泥剂量4% |           |                |      |               |               |           |
|--|-----------|----------------|------|---------------|---------------|-----------|
| CBR/%                                      |           | 无侧限抗压强度<br>kPa |      | 间接抗拉强度<br>kPa | 抗压回弹模量<br>kPa | 泊松比       |
| 压实系数 95%                                   | 压实系数 100% | 7 d            | 90 d | 90 d          | 90 d          | 90 d 测定   |
| 11.0                                       | 13.1      | 249            | 320  | 15            | 1 390         | 0.29~0.41 |

7 d 试件破坏时总应变为 2.5%

虽然 CBR 值和无侧限抗压强度似乎小于泡沫珠混合细粒土,这是由于振动成型方法、加压重块、试件密度低和接近于紧密堆积状态造成的。

其泊松比接近于无机结合料,破坏时总应变小于泡沫珠混合细粒土,变形曲线更陡,破坏点更明显(图略),说明结构性更强。

#### 1.4 试验结论

(1)泡沫珠混合土掺加一定量的固化剂(水泥)后,只要控制含水量区间并采用了合适的压实方法,可以形成均匀体,且密度大幅减少。

(2)人造轻质土(MLS)的强度远大于公路上荷载传递到路堤的应力,利用人造轻质土的轻质特性处理软土地基是可以预期的。

(3)对于压缩特性和侧向变形宜做进一步的试验研究,作为工程应用,由于材料的差异性,宜进行工点试验。

## 2 人造轻质土在雨余一级公路上的应用

洋溪河东桥头路堤工程所在地域属河谷冲积平原,地势平坦,地基十分软弱,土壤力学性质差,地基极限承载能力约 40 kPa,极限填土高约 2.3 m。当填筑土石混合料时,经计算,桥头路堤稳定安全系数为 0.826,计算工后沉降为 38.7 cm,不能满足《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017-96)的要求。因此,为了确保路堤施工稳定和减少工后沉降量,防止路堤工后不均匀沉降和桥头跳车现象的发生,并克服施工期对桥头路堤两侧民房的影响,经方案比选后确定采用人造轻质土填筑路堤。

### 2.1 人造轻质土路堤设计

#### 2.1.1 路堤纵、横断面布置

根据工程地质及地下水位资料,经沉降及稳定计算,确定 K5+605~K5+700 段为人造轻质土设计路段,详见图 3、图 4。由于人造轻质土是填土路基造价的 6.3 倍,为节约工程造价,除满足路堤稳定及工后沉降要求所必需的人造轻质土填筑高度外,其余部分尽量采用土石混合料填筑,即采用渐变填

筑,具体详见表 8。

#### 2.1.2 桥头搭板设计

桥头引道和桥梁衔接处,由于路面、基层以及部分填土荷重作用,即使设计人造轻质土路堤,桥路的差异沉降仍然存在。因此,为了行车的舒适性,避免桥头跳车现象,在桥头设置搭板是有必要的,如图 3 所示。

#### 2.1.3 护坡设计

路堤两侧需要用粘土包边,以防止泡沫珠的飞散、老化以及其他有害物质的侵蚀,并可作为护坡面植生的基础。包边的粘土层厚度为 100 cm。

#### 2.1.4 排水设计

人造轻质土受到水的侵蚀会产生珠土分离的现象,因此,采取有效的措施防止雨水渗入人造轻质土路堤,及时排除渗入的雨水是十分必要的。设计在施工基面铺设砂层,在两侧主辅车道分隔带中布设排水管网系统,确保路面水的有效排除。

### 2.2 材料选择与配合比

实际工程中根据填高、层位分别采用了泡沫珠+土+水泥、泡沫珠+粉煤灰+水泥、泡沫珠+石屑+水泥等不同的材料组合和配合比。上路堤珠土配合比为 60:40,泡沫珠体积质量为 20 kg/m<sup>3</sup>,水泥掺量为 6%;下路堤珠土比例为 50:50,泡沫珠体积质量为 15 kg/m<sup>3</sup>,水泥掺量为 4.5%。实测干密度在 750~950 kg/m<sup>3</sup> 范围之间变化。

### 2.3 施工工艺

在进行人造轻质土路堤施工前,除了应做好室内配方试验外,还应做好相应的施工前准备工作,如场地清理、基面整平及排水等。人造轻质土路堤的施工程序见图 5。

泡沫珠材料必须满足设计对其密度的要求,宜选择阻燃型材料。人造轻质土宜采用连续式稳定土拌和机制作,无条件时也可采用路拌法,确保生产的连续性,尽量缩短混合土的施工间隔时间,以便于整体养生。原材料添加与拌和时,为防止泡沫珠飞散或上浮,宜对泡沫珠进行预湿处理,并应根据现场气

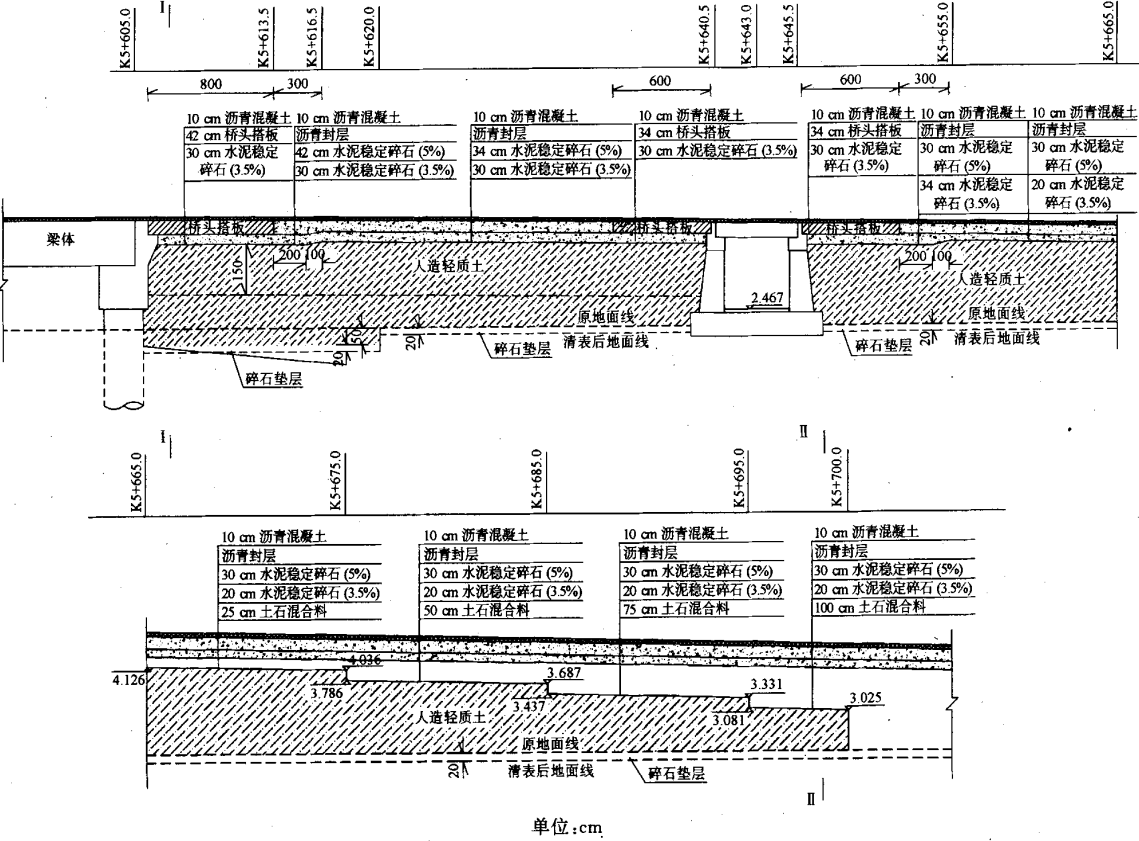


图3 人造轻质土路堤纵断面设计

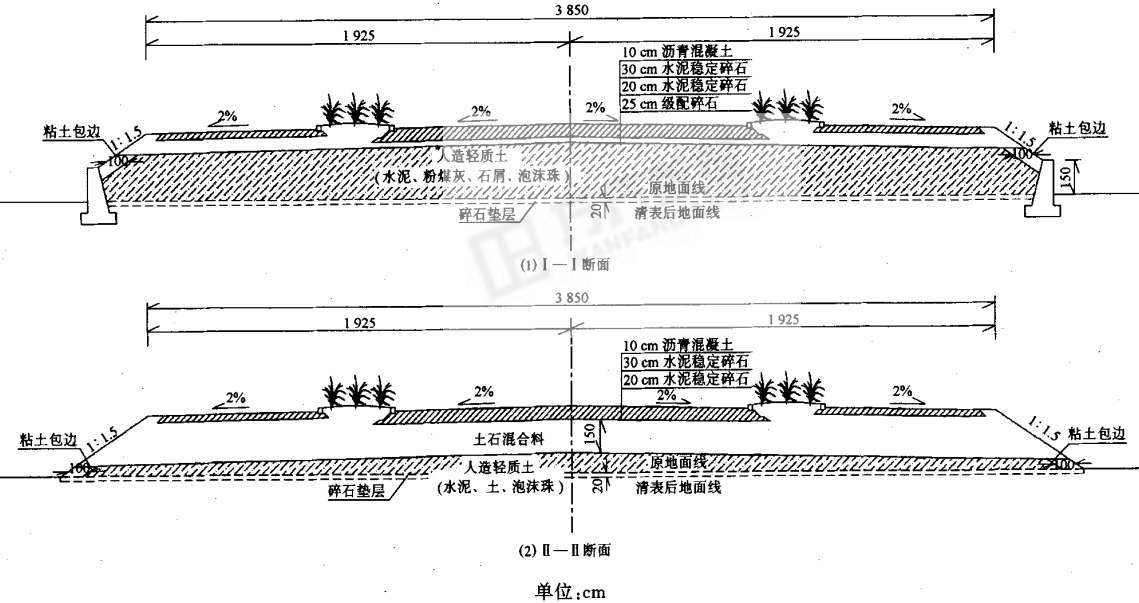


图4 人造轻质土路堤横断面设计

候、原料土的天然含水量等不同情况调整拌和时的加水量。

人造轻质土经拌和均匀后,应采用自卸汽车快速运至工地进行摊铺碾压,避免因运输时间过长而发生泡沫珠飞散现象。

现场摊铺可采用推土机、平地机等,按规定的厚



表 8 人造轻质土路基填筑设计

| 路段里程桩号        | 路面结构厚度<br>cm | 级配碎石厚度<br>cm | 土石混合料厚度<br>cm | 人造轻质土厚度<br>m | 备 注         |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-------------|
| K5+605~K5+620 | 60           | 25           |               | 3.00~2.93    | 换填厚度为 50 cm |
| K5+620~K5+625 | 60           | 25           |               | 2.43~2.41    |             |
| K5+625~K5+630 | 60           |              | 50            | 2.16~2.13    |             |
| K5+630~K5+635 | 60           |              | 75            | 1.88~1.85    |             |
| K5+635~K5+645 | 60           |              | 100           | 1.60~1.53    |             |
| K5+645~K5+655 | 60           |              | 125           | 1.28~1.21    |             |
| K5+655~K5+700 | 60           |              | 150           | 0.96~0.53    |             |

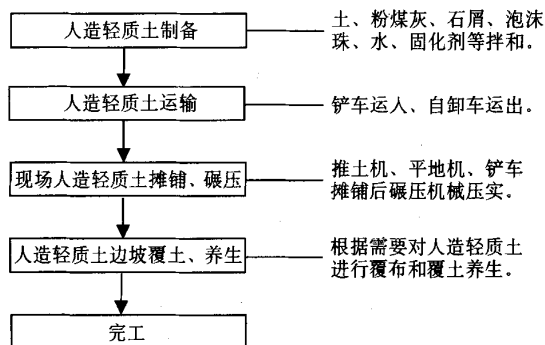


图 5 人造轻质土路堤施工程序

度进行施工,摊铺厚度一般为 30 cm,遇特殊情况时,应通过试铺试压,根据压实效果确定。压实可采用铲车、推土机、压路机等履带式或滚筒式机械设备,当摊铺厚度为 30 cm 时,一般碾压 4 遍可充分见效。

人造轻质土施工后的表面保护非常重要,表面过分干燥会使材料分离,而雨水侵蚀会使固化材料流失。因此,从短期养生目的出发,一般应采用土工布或塑料薄膜覆盖,而要达到施工后的长期防变质要求,则应考虑路堤两侧覆盖粘土植草防护。

#### 2.4 质量控制与试验路观测

人造轻质土由于采用拌和法施工,材料均匀性好,因此平整度、压实度均容易控制,其检测方法与

普通填土路堤相同,无需特殊手段,强度测定待养生期后可采用弯沉仪或承载板进行。为进一步了解人造轻质土路堤的施工期及营运期中的长期变形与稳定特性,在工程施工中,根据设计及课题试验要求,埋设了沉降板、测斜管、土压力盒及应变计等观测仪器,进行现场长期观测。

### 3 结语

人造轻质土在高等级公路上的应用,在浙江省乃至全国均属首次。从甬余一级公路的应用情况来看,通车 10 个月的状况是良好的。由于其施工方便、设备简单、质量容易控制,对于软土地基上的高填方路堤,可有效控制其稳定性和工后沉降,因此具有明显的优点和广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 山田纯男,白井朗. 发泡ビーズ混合軽量土盛土工法[J]. 基础工程,1994,22(10).
- [2] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土的特性[J]. 岩土力学,2001,22(3).
- [3] JTJ 017-96,公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].

## Application of Man-Made Light Soil in High Grade Highway

YANG Shao-hua, HU Jian-fu, ZENG Huai-wu, WANG Li-ming

(Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications, Hangzhou 310006, China)

**Abstract:** According to actual application of man-made light soil in the embankment at bridge head of Yangxihe Bridge of Yong (Ningbo)-Yu (Yuyao) Highway (Grade I), the information on indoor test, engineering design, construction technology and field measurement are offered for reference.

**Key words:** man-made light soil; soft soil subgrade; engineering application