

# 强夯再压实技术在渝邻路高填方路堤中的应用

王春梅<sup>1</sup>, 胡继龙<sup>2</sup>, 侯岩峰<sup>3</sup>

(1. 重庆渝邻高速公路有限公司, 重庆 400060; 2. 重庆交通大学 重庆 400074;  
3. 河北部长高速公路建设处, 河北 邯郸市 056000)

**摘要:**以重庆渝邻高速公路常见的泥岩、砂岩和页岩土石混填路堤为研究对象,通过强夯试验研究确定强夯再压实的夯击参数及质量控制标准,用以指导渝邻路高填方路堤的施工并达到预期加固效果。

**关键词:**土石混填路堤; 路基沉降; 强夯再压实; 加固处治

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-716X(2007)02-0097-04

## Application of Re-dynamic Compaction Technique to High Embankment of Yu-Lin Expressway

WANG Chun-mei<sup>1</sup>, HU Ji-long<sup>2</sup>, HOU Yan-feng<sup>3</sup>

(1. Chongqing Yulin Expressway Co., Ltd, Chongqing 400060, China;  
2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
3. Hebei Han-Chang Expressway Construction Department, Handan 056000, China)

**Abstract:** The soil and rock aggregate mixture embankment, filled with the mudstone, sandstone and shale which are common in Chongqing, is expounded as the research elements. The test ascertains the tamping parameter and standard of re-dynamic compaction after heavy tamping, so as to instruct the construction of Chongqing Yu-Lin Expressway and achieve the expected results.

**Key words:** soil and rock aggregate mixture embankment; settlement of subgrade; re-dynamic compaction; compaction treatment

西南地区多属山岭重丘区,高填方路堤分布广泛,路堤工后差异性沉降现象普遍存在。

路堤工后沉降需较长时间完成,但公路修筑工期有限,如何寻找可行方法,在较短工期内减少或消除工后沉降,保证路基稳定,减少路面早期病害,对我国西南地区修筑高速公路有着极为重要意义。

本文以重庆渝邻高速公路常见的泥岩、砂岩和页岩土石混填路堤为研究对象,首次采用强夯再压实技术对已基本填筑成形的填方路基进行加固再压实处治,研究此技术对减少路堤沉降的影响及对路面结构稳定性的影响,在此基础上总结出强夯再压实的夯击参数及质量控制指标,用以指导渝邻路填方路段的强夯施工,以期达到预期加固效果。

## 1 强夯压实试验

强夯法的许多设计参数还是经验性的,影响因素复杂,为验证设计参数并符合预定目标,常在正式施工前试夯。本文以渝邻路 K193+070~K193+220 左半填半挖段为试验段,进行了强夯试验研究。试验段共划分为4个20 m×10 m 试验区,点位采用三角形布置,相邻夯点中心距离为3 m,隔点不隔行施工。

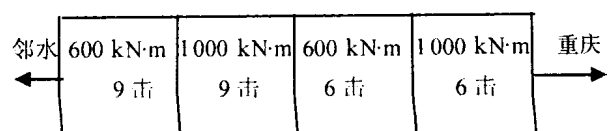


图1 试验分区

### 1.1 强夯前后填料表面的密实度检测

收稿日期:2006-03-13;修订日期:2006-03-24

作者简介:王春梅(1973-),女,江西高安人,工程师,硕士生,主要从事高速公路建设管理工作。

可看出,强夯后填料密实度提高了 1.5% ~ 5%. 该路段形成时间较长,其表面密实度已达到较高水平.

表1 强夯试验前试验区密实度检测结果

| 取样桩号    | 夯点1   | 夯点2   | 夯点3   | 夯点4   |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 取样位置    | 左6 m  | 左3 m  | 左6 m  | 左9 m  |
| 湿密度     | 20.71 | 21.43 | 21.12 | 21.60 |
| 综合含水量/% | 4.92  | 5.45  | 5.17  | 4.73  |

| 取样桩号    | 夯点1   | 夯点2   | 夯点3   | 夯点4   |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 取样位置    | 左6 m  | 左3 m  | 左6 m  | 左9 m  |
| 湿密度     | 21.64 | 22.10 | 21.82 | 21.95 |
| 综合含水量/% | 4.80  | 5.63  | 4.62  | 4.97  |

### 1.2 动力标贯检测

对每个试验区在压实前采用 120 kg 锤检测填料 0 ~ 7 m 的标准贯入击数. 检测结果表明:

- 1) 强夯施工可以改善填料的密实特性, 填料的最小标贯击数一般由 2 ~ 3 击提高到 5 击以上.
- 2) 600 kN · m 夯能的影响深度约为 4 m, 而 1 000 kN · m 夯能的影响深度可达 5 ~ 6 m. 分别采用 6 击与 9 击进行施工后, 影响深度及压实效果无明显差异, 故 6 击是较合适的夯击次数.
- 3) 渝邻高速公路采用 1 000 kN · m 夯能的单坑夯沉量一般在 30 ~ 50 cm, 按照强夯施工的有效加固深度 5 m 考虑, 可平均提高压实效果 10% 左右.

根据动力标贯检测可断定: 强夯是一种提高路基基层压实效果, 消除压实质量隐患的有效手段.

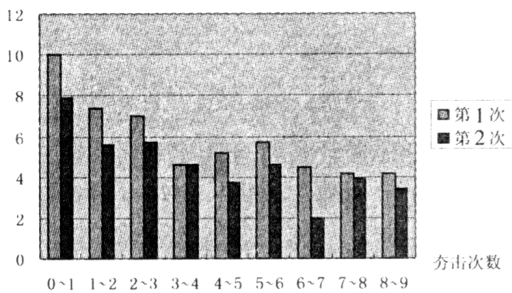


图2 600 kN · m 夯能夯沉量曲线

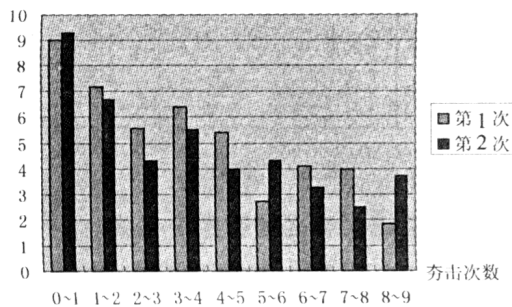


图3 1 000 kN · m 夯能夯沉量曲线

### 1.3 不同夯能的单锤夯击试验

在现场进行了 2 次 1000 kN · m 夯能与 600 kN · m 夯能的单锤平行试验, 对每种夯能, 均夯击 9 次, 每夯击一次, 检测被夯土体的沉降量.

试验表明, 强夯可使填料产生一定程度的沉降, 通常开始几击的沉降量较大, 随着夯击次数的增加, 其夯沉量逐渐趋于稳定. 无论是 1 000 kN · m 夯能还是 600 kN · m 夯能, 填料在夯击 5 ~ 6 次后基本能达到沉降差小于 5 cm 的要求.

对压实填料的夯坑和夯坑周围土体的部分沉降观测结果如下图:

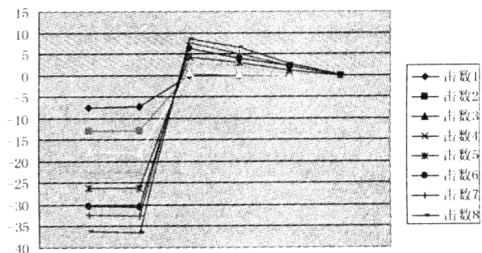


图4 夯锤为 60 kN 时夯击与沉降关系

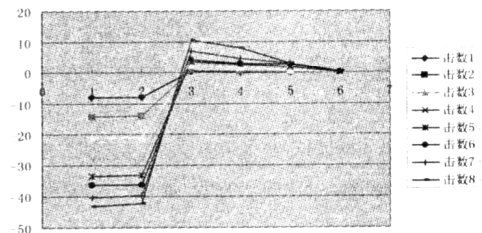


图5 夯锤为 60 kN 时夯击与沉降关系

(注: 点 1 为夯锤中心, 点 2 为夯坑边缘, 3 至 6 点距坑边缘分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m)

从图 4、图 5 中可以看出, 对 100 kN 和 60 kN 的锤落高 10 m 时, 最佳夯击次数均为 6 次, 100 kN 锤的夯沉量大于 60 kN 锤的夯沉量. 路基夯沉量在 30 ~ 50 cm. 强夯后夯坑主要为垂直变形. 夯坑周围隆起量不大 (小于 10.5 cm). 从夯坑沉降看, 在夯击 5 ~ 6 次后, 坑底变形逐渐趋缓, 坑周边隆起量开始增加. 这也说明对压实填料较为合适的夯击次数是 5 ~ 6 次.

综合夯沉量试验结果可认定, 对于渝邻路已基本压实成形的填方路段, 在进行强夯再压实时, 采用 1 000 kN · m 夯能, 夯击 6 次左右是可行的.

## 2 渝邻高速公路路基强夯再压实施工

### 2.1 施工原则

- 1) 对于较高的填方 (填高 15 m 以上), 地形良好时, 在距路基顶面 3 ~ 5 m 处夯实;
- 2) 对于填方高度 10 ~ 15 m 的填方, 在段落内具

有斜坡路段和半填半挖路段等情况而在 3~5 m 处无法强夯时,在 90 区顶面夯实;

3)对于较为严重的半填半挖和斜坡地段,一般在 95 区顶面进行夯实;

4)对于较高的桥头路堤(桥背填土高度大于 5 m),在 93 区顶面进行夯实。

### 2.2 结构物附近的强夯问题

由于强夯施工所产生的振动对邻近构造物有不利影响,笔者采用开挖防震沟的方法截断部分夯击时产生的震动波,防震沟的尺寸为宽 1.0 m 深,2.0 m。CDJ-P38 型水平速度传感器对强夯的表面波速进行了测定,结果表明:在同样条件下,有截断沟时测点的振动速度是无截断沟的 1/3,应力截断沟的减振作用非常明显。

## 3 填料强度及变形特性分析

### 3.1 填料的最大干密度试验

试验采用  $\phi 15\text{cm}$  筒,重型击实,  $D_{\text{max}} = 38\text{ mm}$  和  $\phi 28\text{ cm}$  筒,重型击实,  $D_{\text{max}} = 60\text{ mm}$  2 种方法。

表 3 岩石单轴抗压强度试验结果/MPa

| 岩石名称 | 湿抗压强度 | 干抗压强度 | 软化系数 |
|------|-------|-------|------|
| 泥页岩  | 8.4   | 15.2  | 0.55 |
| 砂岩   | 31.8  | 45.7  | 0.69 |

从填料最大干密度试验结果可知,随着粗粒填料含量(即含石量)的增加,填料最佳含水量降低,填料的干密度增大,同等条件下砂岩的最大干密度大于泥岩,说明砂岩抗压缩性能优于泥岩。

表 4 泥页岩最大干密度试验结果

| 序号 | 岩石级配            | 最佳含水量/% | 最大干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|----|-----------------|---------|--|
| 1  | 粗料(20~38 mm)90% | 6.2     | 22.2                                   |
| 2  | 粗料(20~38 mm)90% | 6.2     | 22.5                                   |
| 3  | 粗料(20~38 mm)70% | 7.0     | 22.1                                   |
| 4  | 粗料(20~38 mm)70% | 6.5     | 22.3                                   |
| 5  | 粗料(20~38 mm)40% | 7.6     | 22.2                                   |
| 6  | 粗料(20~38 mm)40% | 8.1     | 21.9                                   |

表 5 砂岩最大干密度试验结果

| 序号 | 岩石级配            | 最佳含水量/% | 最大干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ |
|----|-----------------|---------|--|
| 1  | 粗料(20~38 mm)60% | 5.8     | 21.6                                   |
| 2  | 粗料(20~38 mm)60% | 6.2     | 21.9                                   |
| 3  | 粗料(20~38 mm)40% | 7.0     | 21.4                                   |
| 4  | 粗料(20~38 mm)40% | 6.5     | 21.6                                   |
| 5  | 粗料(20~38 mm)20% | 6.9     | 21.1                                   |
| 6  | 粗料(20~38 mm)20% | 8.1     | 21.4                                   |

### 3.2 粗粒填料的变形特性(大型压缩试验)

表 6 不同压实度砂岩填料的压缩试验结果

| 填料类型 | 压实度/% | 孔隙比   |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      |       | 0     | 200   | 400   | 600   | 800   |
| 砂岩   | 87    | 0.390 | 0.384 | 0.379 | 0.373 | 0.365 |
|      | 92    | 0.317 | 0.313 | 0.310 | 0.306 | 0.302 |
|      | 96    | 0.251 | 0.248 | 0.246 | 0.243 | 0.240 |
| 泥岩   | 87    | 0.421 | 0.408 | 0.397 | 0.387 | 0.378 |
|      | 91    | 0.364 | 0.358 | 0.353 | 0.348 | 0.341 |
|      | 95    | 0.298 | 0.293 | 0.289 | 0.285 | 0.281 |

从不同压实度、不同填料的大型压缩试验结果分析,在同等条件下,随着压力的增大,泥岩的孔隙比下降幅度明显大于砂岩,可见砂岩的抗变形特性明显优于泥岩。从粗粒填料(泥岩、砂岩)与细粒填料(页岩风化土、砂类土、粉质土)的压缩曲线对比可看出,粗粒填料抗变形特性优于细粒填料。在一定范围内,填料含石量越高,其工后沉降变形量越小。

### 3.3 典型填料的三轴试验

表 7 典型填料三轴试验结果

| 填料类型  | 土石比例  | 试件密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 抗剪强度  |               |
|-------|-------|---------------------------------------|-------|---------------|
|       |       |                                       | C/kPa | $\phi/^\circ$ |
| 砂岩混合料 | 40:60 | 19.03                                 | 54.5  | 25.9          |
|       |       | 19.97                                 | 81.0  | 30.8          |
| 泥岩混合料 | 40:60 | 20.65                                 | 72.0  | 33.8          |
|       |       | 19.00                                 | 34.1  | 26.5          |
|       |       | 20.03                                 | 73.3  | 28.4          |
|       |       | 20.61                                 | 58.5  | 31.6          |

从结果分析,对反映填料力学特性的参数  $c$ (内粘聚力)和  $\phi$ (抗剪系数),砂岩普遍优于泥岩。

### 3.4 细粒填料的变形特性分析

表 8 细粒填料固结试验成果

| 填料类型  | 压实度/% | 孔隙比   |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |       | 0     | 50    | 100   | 200   | 300   | 400   |
| 页岩风化土 | 88    | 0.502 | 0.485 | 0.476 | 0.467 | 0.46  | 0.454 |
|       | 93    | 0.428 | 0.416 | 0.412 | 0.407 | 0.402 | 0.397 |
|       | 97    | 0.372 | 0.365 | 0.361 | 0.358 | 0.354 | 0.351 |
| 砂类土   | 91    | 0.529 | 0.517 | 0.51  | 0.5   | 0.493 | 0.487 |
|       | 95    | 0.432 | 0.422 | 0.417 | 0.411 | 0.406 | 0.402 |
|       | 99    | 0.404 | 0.397 | 0.393 | 0.389 | 0.386 | 0.384 |
| 粉质粘土  | 91    | 0.535 | 0.524 | 0.517 | 0.510 | 0.503 | 0.496 |
|       | 95    | 0.47  | 0.459 | 0.454 | 0.449 | 0.444 | 0.441 |
|       | 98    | 0.43  | 0.423 | 0.42  | 0.416 | 0.413 | 0.411 |

从不同压实度填料的大型压缩试验结果分析,在同等条件下,随着压力的增大,泥岩的孔隙比下降幅度明显大于砂岩,可见砂岩的抗变形特性明显优

于泥岩.从粗粒填料(泥岩、砂岩)与细粒填料(页岩风化土、砂类土、粉质土)的压缩曲线对比可看出,粗粒填料抗变形特性优于细粒填料.

### 4 填方路堤自身沉降计算分析

#### 4.1 土石混填比例对路堤自身沉降的影响

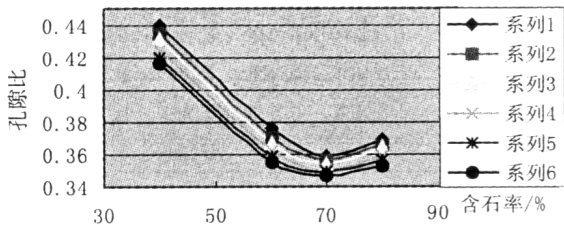


图6 填料含石率与孔隙比变化关系曲线

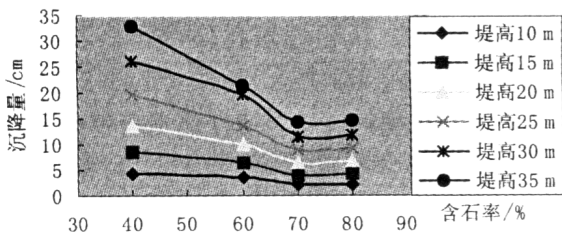


图7 填料含石率与工后沉降量变化关系曲线

可以看出,填料的压缩特性与工后沉降有相同规律:随着含石量增加,填料自身压缩量和工后沉降量逐渐减少,在含石量达到70%左右时,土石混合填料压缩性最小,当含石量超过70%,则填料压缩性开始反弹.

#### 4.2 不同类型不同填高填料的工后沉降

表9 不同类型不同填高填料计算工后沉降

| 填料类型 | 压实度/% | 不同高度的工后沉降值/cm |       |       |       |       |       |
|------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      |       | 10 m          | 15 m  | 20 m  | 25 m  | 30 m  | 35 m  |
| 砂岩   | 0.87  | 2.29          | 4.28  | 6.46  | 8.71  | 10.93 | 13.19 |
|      | 0.92  | 1.58          | 2.92  | 4.36  | 5.83  | 7.29  | 8.72  |
|      | 0.96  | 1.25          | 2.31  | 3.45  | 4.60  | 5.75  | 6.87  |
| 泥岩   | 0.87  | 5.38          | 10.29 | 15.90 | 21.98 | 28.36 | 34.91 |
|      | 0.91  | 2.77          | 5.37  | 8.41  | 11.75 | 15.30 | 18.99 |
|      | 0.95  | 2.37          | 4.53  | 7.02  | 9.72  | 12.56 | 15.48 |
| 粉质粘土 | 0.91  | 6.50          | 12.68 | 20.02 | 28.24 | 37.14 | 46.56 |
|      | 0.95  | 5.23          | 9.91  | 15.28 | 21.13 | 27.34 | 33.79 |
|      | 0.98  | 3.59          | 6.83  | 10.57 | 14.67 | 19.02 | 23.56 |
| 砂类土  | 0.91  | 5.68          | 10.53 | 15.80 | 21.20 | 26.60 | 31.91 |
|      | 0.95  | 4.43          | 8.06  | 11.89 | 15.75 | 19.54 | 23.20 |
|      | 0.99  | 3.11          | 5.61  | 8.24  | 10.87 | 13.45 | 15.92 |
| 风化土  | 17.84 | 7.71          | 14.39 | 21.81 | 29.64 | 37.67 | 45.76 |
|      | 18.76 | 4.98          | 9.20  | 13.83 | 18.68 | 23.61 | 28.54 |
|      | 19.53 | 3.7           | 7.00  | 10.64 | 14.51 | 18.48 | 22.50 |

从上表工后沉降可以看到以下特点:

1)同一类型填料,压实度越高,其工后沉降越

小,提高路基压实度可以有效减少路基工后沉降.

2)对不同类型填料,土石混合填料的工后沉降小于土类填料,这是因为填料本身强度较高,且土石混填料的排水固结速率一般要快于土类填料.

3)路堤越高,其填料自身沉降越大.压实度超过90%的填料,在填高小于10 m时,工后沉降一般小于5 cm,可不考虑工后沉降影响,但当填高大于10 m时,路堤自身压缩量不容忽视.

### 5 强夯再实对路堤工后沉降的影响

从现场试验可以看出,强夯再压实的影响深度一般在5 m左右,渝邻路强夯一般在填度10 m以上的地段进行,不会影响到地基的沉降.笔者对渝邻路不同填高工况的路基进行了1层及多层强夯的有限元计算分析,分析结果如表10.

表10 有限元分析强夯前后路堤顶面沉降变化

| 工况   | 堤顶沉降量/cm |      |      |
|------|----------|------|------|
|      | 10 m     | 20 m | 30 m |
| 强夯前  | 6.4      | 15.0 | 29.0 |
| 顶部强夯 | 6.0      | 14.0 | 26.0 |
| 多次强夯 | 5.2      | 11.3 | 18.6 |

可以看出,对于只在路基顶面进行强夯的情况,由于其影响深度有限,强夯再压实对于工后沉降减少的作用相当有限.即:强夯再压实的主要功能不在于减少路基工后沉降,但多次强夯则可以有效减少工后沉降.在一些高速公路高填方路堤施工中,为了提高压实效果,减少工后沉降,采取了每隔几m(一般4~6 m)进行一遍强夯,这样,整个路堤都得到加强,可以有效减少路堤自身的工后沉降.

### 6 强夯再压实对路面结构的影响

根据相关文献资料,对强夯前后不同土基强度情况下的路面累计当量轴次进行了分析.

表11 土基模量提高前后累计当量轴次

| 项目     | 符号 | 土基模量       | 土基模量       |
|--------|----|------------|------------|
|        |    | 36 MPa     | 66 MPa     |
| 设计弯沉值  | Ls | 21.6       | 17.1       |
| 公路等级系数 | Ac | 1          | 1          |
| 面层类型系数 | As | 1          | 1          |
| 基层类型系数 | Ab | 1          | 1          |
| 当量轴次   | Ne | 16 538 172 | 53 183 351 |

计算结果表明,土基模量提高后,路面在设计年限内一个车道上累计当量轴次数可大大提高,亦可说土基模量提高可大大延长路面的使用寿命.由于强夯再压实可以有效提高路基顶部的整体强度,因

(下转第109页)