

# 三黎高速强至中风化板岩路基填筑技术研究

詹永祥<sup>1</sup>, 姚海林<sup>1</sup>, 张静波<sup>2</sup>, 吴万平<sup>2</sup>, 冉小兵<sup>3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉市 430071;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司 武汉市 430056;

3. 贵州高速公路集团有限公司 贵阳市 550004)

**摘要:** 针对三黎高速沿线遇到的大量强至中风化板岩,通过压实试验、崩解试验及 CBR 强度试验研究,表明强至中风化板岩填料具有良好的压实性能,但其抵抗干湿循环及自然风化崩解能力较差, CBR 值随浸水时间及干湿循环次数的增加而逐渐减小。随后开展了强至中风化板岩路基现场碾压试验研究,采用压实度、沉降差、 $E_{vd}$  以及  $K_{30}$  等多种方法对路基压实质量进行检测,探讨不同碾压机械、铺土厚度以及碾压遍数等施工参数组合对压实效果的影响,得到适用于依托工程路基填筑的施工工艺参数及质量控制标准;提出强至中风化板岩路基压实质量控制应以沉降差为主,并结合施工工艺参数来控制,同时用  $K_{30}$ 、 $E_{vd}$  检测等手段来配合。该法可为类似软岩路基的质量控制、检测和评价提供参考。

**关键词:** 强至中风化板岩; 路基; 填筑试验; 压实质量

板岩是由粉砂岩、黏土岩等经区域变质作用或高温高压作用形成的,其特殊性表现为板状构造,既具有变质岩特点又具沉积岩特点,是一种变质浅、变形强烈但基本保留原生沉积构造的成层有序的特殊岩体。这种岩体的胶结能力一般较差,极易风化,风化后岩石强度有较大幅度降低。由于其粒径超出了现行路基施工技术规范的范围,现行公路规范都没有明确其施工工艺及压实质量控制标准。使用其作为路堤填料,这些大颗粒软弱岩石填料如何压实,施工质量如何保证,压实质量如何检测,路基遇水后强度和稳定性能不能得到保证等都是问题。

目前在风化板岩路基方面已取得了一定的研究进展,如在铁路工程建设方面,熊跃华<sup>[1]</sup>、郑明新<sup>[2]</sup>、颜文<sup>[3]</sup>、卿启湘<sup>[4-5]</sup>、但汉成<sup>[6]</sup>、陈湘亮<sup>[7]</sup>等以武广客运专线为背景,对风化板岩作路基填料的路用性进行了系统研究,通过室内力学试验和现场碾压试验初步确定了该风化料作为铁路路基填料的可行性。在公路工程建设方面,周雷刚<sup>[8]</sup>以十天高速公路千枚岩、板岩填料为研究对象,通过室内试验和现场试验分析软岩原岩及填料的物理、力学特性,对其

能否作为路基填料进行了论证。

但由于不同地区风化岩路用性能有着明显差异,数据缺乏可比性,若照搬以上研究成果,显然是不可取的。本文以贵州省三穗~黎平高速公路(简称三黎高速)工程为依托,通过室内试验及现场铺筑试验段法,提出强至中风化板岩填筑路基的施工工艺、质量控制方法及标准,以指导三黎高速风化板岩路基设计与施工,并为贵州省软岩路基填筑技术提供重要参考。

## 1 强至中风化板岩工程特性

### 1.1 压实特性

现场调研发现,强至中风化板岩填料的碾压压实度与含水量关系不大,碾压时对含水量不敏感,这一特性和硬质岩块填料相似。由于强至中风化板岩属于土石混填,填料的粒径分布范围广,并且大粒径颗粒含量很高,而《公路土工试验规程》(JTJ E40-2007)中击实试验规定的标准击实筒的尺寸仅为  $\phi 152 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ ,填料允许最大粒径为 40 mm,适用于细粒土,试验结果有可能不能控制土石混填

基金项目:国家重点基础研究发展规划“973”项目,项目编号 2013CB036405;国家自然科学基金项目,项目编号 41402317、41472290;贵州省交通运输厅科技项目,项目编号 2014-122-007

收稿日期:2015-09-14

路基施工压实质量。为满足强至中风化板岩路基施工质量控制的要求,本次试验采用表面振动压实仪测试其最大干密度。

为了使室内试验成果能够直接用于现场路堤的设计与施工,室内试验所使用的粒料与现场填料级配保持一致,试验料取自现场碾压试验段,试验按《公路土工试验规程》(JTJ E40—2007)规定进行,试筒采用内径 280 mm 大筒,试料采用现场湿土料进行,最大粒径不超过 60 mm。试验得到强至中风化板岩最大干密度平均值为  $2.1 \text{ g/cm}^3$ 。

风化板岩填料压实前后的颗粒分析结果如图 1 所示。压实作用对 5 mm 以上的粒组的含量影响显著,其颗粒破碎比例较大,总的趋势是压实使粗颗粒破碎,进而使次一级粒组含量比例相对增加。可见,粗颗粒破碎后,在压实过程中粒组含量比例重新分布,从而使风化板岩填料的自我结构得到改良,有利于路堤施工压实。

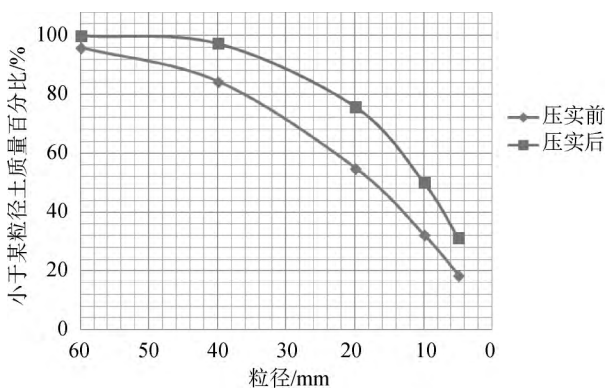


图 1 风化板岩填料压实前后颗粒分布曲线

由此认为,风化板岩填料在击实或压密过程中具有比较显著的颗粒破碎现象,具有较好的压实性能。击实或压密作用改变了风化板岩填料的粒度组成,使其颗粒级配状况得到自我改良,提高了碾压密实的工程效果。因此,风化板岩的颗粒破碎特性有利于其作为路堤填筑材料。

## 1.2 崩解特性

为了研究强至中风化板岩崩解特性,可采用以下 3 种崩解试验方法。

### (1) 人工干湿循环崩解试验。

首先将代表性岩块置于托盘内,放入  $105^\circ\text{C}$  烘箱内进行烘干不少于 12 h。烘干并冷却至室温后,将其放入容器加水淹没浸泡 24 h,至此完成 1 个干湿循环。重复上述烘干、冷却、浸泡过程,完成多个干湿循环。

### (2) 自然干湿循环风化崩解。

在现场选取有代表性的岩块,定期观测其在日晒、雨淋等自然条件循环作用下风化崩解情况。

### (3) 室内崩解试验。

室内浸水崩解试验的具体方法与步骤如下:

① 随机取接近立方体岩块试样若干块,将这些试样置于实验室托盘内,放入烘箱内,在  $105^\circ\text{C}$  恒温下进行烘干不少于 12 h;

② 烘干后的试样在干燥器内冷却至室温后,放入容器内,在容器内注入清水淹没试样;

③ 记录试样开始崩解时间,并观察试样在不同浸水时间的崩解碎裂情况。

不同方法的崩解试验结果表明,放在室内的板岩岩块,20 d 后仅在表层出现少量的微裂纹,整体结构性未破坏,没有发生风化崩解现象,见图 2。但经过浸水、烘干、再浸水等多次干湿循环后,试样整体性最终被破坏,可见板岩崩解可在干湿循环的条件下发生,见图 3。在现场弃土场选取有代表性的岩块,观测其在日晒、雨淋等自然条件循环作用下的风化崩解情况,半年时间完整岩样几乎全部风化崩解成碎块状土,强度急速下降,见图 4。



图 2 室内崩解(20 d)

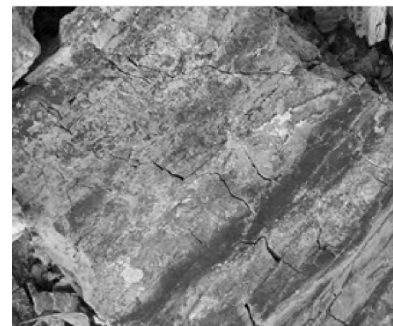


图 3 人工干湿循环崩解(干湿循环 3 次)

由此可见,板岩室内耐崩解性较强,但在自然干湿循环和人工干湿循环条件下,其抗风化能力和抗水性均差。尤其在日晒、雨淋等自然循环作用下,强



图 4 室外风化崩解成碎块状土

度急速下降,易破碎,在施工方法不正确的情况下,是一种路用性能较差的填料。

### 1.3 耐崩解性试验

耐崩解性是评价软岩工程性质稳定性必须考虑的一个指标,在贵州所处的自然环境中,风化板岩作为路基填料保持其强度和稳定性尤为重要。按照《公路工程岩石试验规程》(JTG E41-2005),耐崩解试验要求的岩石为浑圆块状,风化板岩填料不符合试验条件。为了测试风化板岩在干湿循环作用下的耐崩解性,对风化板岩进行了室内干湿循环筛分试验。

试验方法:将板岩填料在 105℃ 烘干至恒重,在干燥器内冷却至室温后,过 2 mm 孔筛,称重,然后将填料放进清水浸泡 24 h。再将填料烘干至恒重,在干燥器内冷却至室温后,过 2 mm 孔筛。此为 1 次循环。根据需要确定循环次数,然后按照下列公式进行风化板岩填料崩解率的计算:

$$P_{dn} = 100\% - I_{dn} \tag{1}$$

$$I_{dn} = \frac{m_n - m_0}{m_s - m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中:  $P_{dn}$  为填料  $n$  次循环崩解率,%;  $I_{dn}$  为填料  $n$  次循环耐崩解性指数,%;  $m_0$  为 2 mm 筛的干重,g;  $m_s$  为 2 mm 筛与原试样烘干质量的和,g;  $m_n$  为 2 mm 筛与第  $n$  次循环后残留试样烘干质量的和,g。

在路基料场取回的样品中,随机取强至中风化板岩填料 2 组,每组质量约 5 kg。2 组同时开始试验。不同干湿循环次数下强至中风化板岩耐崩解性指数如图 5 所示。

由干湿循环试验结果可以看出:随着试验的进行,风化板岩崩解率是在不断增大的。风化板岩的崩解速率呈开始慢、中间快、后期又慢的趋势。随着干湿循环次数的增加,崩解在持续进行,完全崩解时间较长,因此很难对风化板岩进行预崩解处理,在施工方法不正确的情况下会给路基后期沉降带来一定隐患。

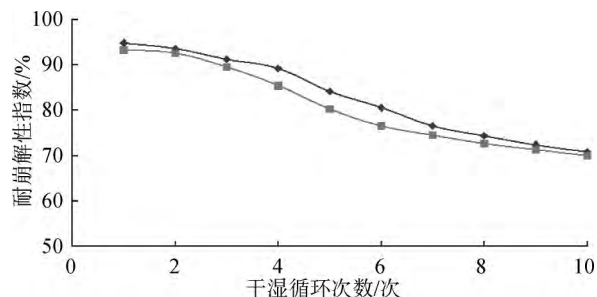


图 5 不同干湿循环次数下风化板岩耐崩解性指数

### 1.4 CBR 试验

根据路基填筑要求,路基填料必须具有一定强度。加州承载比(CBR)可以反映填料的局部抗剪强度与水稳定性,是保证路基长期浸泡在水中而填料结构不被破坏的技术依据之一,已作为一项重要指标在公路路基填料的选择中得到广泛应用。按《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)中规定方法,进行承载比(CBR)试验。试样分 3 层击实,每层击数为 98 次。试样填料最大粒径不超过 40 mm。

#### (1)不同浸水时间下 CBR 变化规律。

考虑浸水时间对 CBR 值的影响,分为不浸水、浸水 2 d、浸水 4 d 及浸水 6 d 等 4 种工况。不同浸水时间下的 CBR 值如图 6 所示。

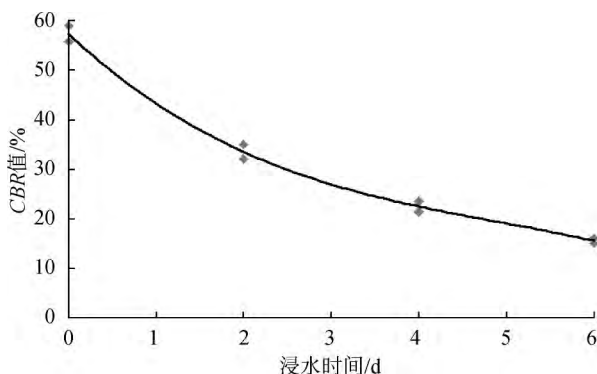


图 6 不同浸水时间下 CBR 值

试验结果表明,CBR 值受浸水时间的影响较大,未浸水试样 CBR 值比浸水试样 CBR 值大很多,试样浸水后 CBR 值会随着浸水时间的增长而近似呈线性降低。风化板岩浸水 4 d 后的 CBR 值满足规范中的相关规定。但随着浸水时间的增加,CBR 值还会进一步降低,说明风化板岩填料虽经压实,但仍具有原岩浸水极易软化、强度降低的特点,在实际应用中必须加强坡面防护及路基排水措施,以抵御雨水的侵蚀。需要强调的是,风化板岩填料不能直接用于浸水地区路堤的填筑。

#### (2)干湿循环 CBR 试验。

为研究不同循环次数下风化板岩试样的强度指标,以此来反映干湿循环条件下风化板岩的强度变化规律,进行了风化板岩0次、1次、3次、5次、7次干湿循环。

干湿循环过程:1次干湿循环试验包括浸水饱和及风干失水两个过程。试样制备完成后让试样底部浸水,让试样在毛细作用下饱和,然后逐步升高水位直至试样全部浸入水面以下为止,让试样在水下浸泡4 d(或7 d)后,完成浸水饱和过程(0次干湿循环);浸水饱和后将试样从水中取出,放于阴凉处,通过控制质量的方法使试样风干至其含水率为制样含水率,完成风干失水过程,继续浸水饱和处理(此为干湿循环1次)。重复上述过程,依次完成不同干湿循环次数的CBR试验。不同干湿循环次数下的CBR值如图7所示。

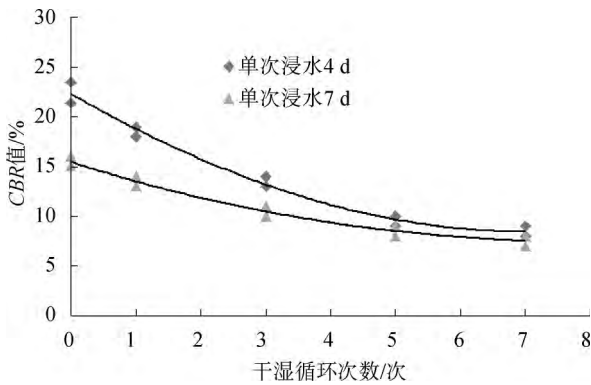


图7 不同干湿循环次数下 CBR 值

通过各次循环后的CBR结果可以看出,随着干湿循环次数的增加,试样的CBR值逐渐降低,单次浸水4 d时,在干湿循环5次之前降低幅度较大,干湿循环5次之后降低幅度较小并趋于稳定;单次浸水7 d时,在干湿循环3次之前降低幅度较大,干湿循环3次之后降低幅度较小并趋于稳定;在经历干湿循环后,试样的CBR值能满足路基填料的最小强度要求。

## 2 现场碾压试验

现场碾压试验段长100 m,填方设计厚度15 m,填料为路堑边坡开挖下来的强至中风化板岩。碾压试验工况如表1所示。

试验前,首先把试验场地基础用推土机和压路机进行整平、加固处理,使其达到足够的压实度和强度。填筑试验所用的材料,在料场开采后,用自卸卡车运至试验场地内,然后用推土机等设备整平,个别

表1 现场碾压工况

碾压机械吨位/t	填土厚度/cm	含水率	碾压方式
22	40、50、60	天然	1次静压 + N次低速大振
26	50、60、70	天然	1次静压 + N次低速大振
32	60、80、100	天然	1次静压 + N次低速大振

不平整处,人工配合用细料找平,对直径超过20 cm的超大粒径块石进行剔除或二次破碎。对强至中风化板岩填料粒径建议:最大粒径为10~15 cm,个别最大粒径不宜大于20 cm,且大块率小于15%。

碾压时,先静压1遍,然后采用低速度大振幅纵向进退式进行振动碾压,压路机往返一次记为一遍完整碾压。每遍碾压时,横向之间要求约有20 cm左右的搭接宽度。对每种试验工况,碾压完毕后要进行质量检测,具体检测项目如表2所示。

表2 路基质量检测方法

项目	检测时碾压遍数	检测方法
压实度	振2、4、6遍	灌砂法
沉降差	静压1遍,振2、4、6遍	精密水准仪法
地基系数 $K_{30}$	振4、6遍	$K_{30}$ 平板测试仪
动态变形模量 $E_{vd}$	静压1遍,振2、4、6遍	动态变形模量测试仪

### 2.1 松铺厚度影响

(1)松铺厚度和干密度的关系。

以22 t振动压路机为例,不同铺土厚度下干密度与碾压遍数的关系,如图8和图9所示。

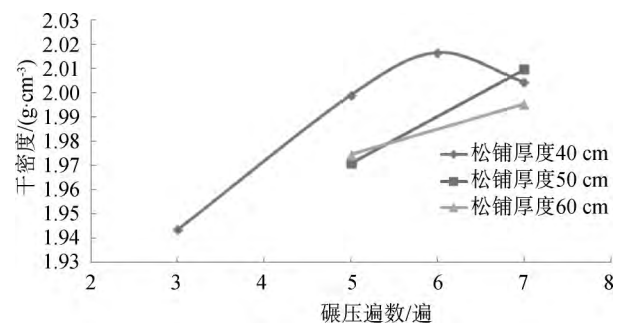


图8 不同松铺厚度下干密度与碾压遍数关系

从图8和图9中可以看出,在相同的压实条件下,铺土厚度越小,干密度越大。对相同的铺土厚度,试验结果也表明,同一摊铺层沿深度方向,越往上部干密度越大,越往下部干密度越小。所以减小

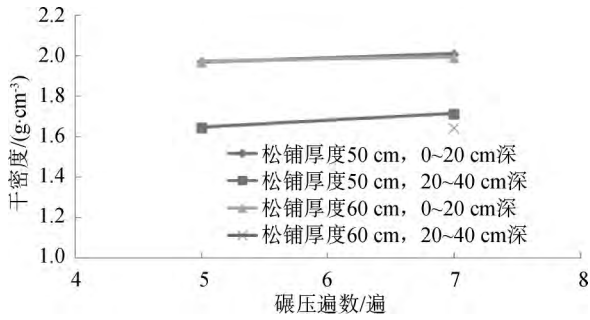


图 9 不同深度处干密度情况

铺土厚度有利于提高填筑体的压实效果,但并不是铺土厚度越小越好。铺土厚度的选择受很多因素影响,首先就是最大粒径的影响。《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)规定,填土的厚度不小于最大粒径的 1.5 倍。如果厚度太小,很难保持摊铺平整,反而影响压实效果;另外一个关键的问题是经济因素,对不同的铺土厚度的填筑层,经过一定的碾压遍数即能达到设计所要求的压实效果,铺土厚度当然应该取成本较低那一种。

采用 22 t 压路机碾压,松铺厚度为 40 cm 时碾压 5 遍后表层(0~20 cm 范围)干密度为 2.017 g/cm<sup>3</sup>,室内振动压实试验得到的最大干密度为 2.1 g/cm<sup>3</sup>,表层压实度可以达到 96 区设计标准,碾压 7 遍时表层压实度为 95.4%;松铺厚度 50 cm 时,碾压 7 遍后表层的压实度为 95.6%,而 20~40 cm 深范围的压实度为 81.7%;松铺厚度 60 cm 时,碾压 7 遍时表层的压实度为 95%,而 20~40 cm 深范围的压实度仅为 78.3%。可见,22 t 压路机在松铺厚度为 50、60 cm 时深部压实度较低。

强至中风化板岩填料在采用灌砂法进行干密度测试时,个别测点测得的干密度值偏大,接近甚至超过室内试验得到的最大干密度,测试值往往离散性较大。所以,建议不用干密度来控制碾压效果。

(2) 松铺厚度与沉降差的关系。

从图 10 可以看出,松铺厚度越大,沉降量就越大,沉降差与碾压遍数之间呈幂函数衰减,相关关系式可以表示为  $y = a \cdot x^b$  (式中:  $y$  为沉降差;  $x$  为碾压遍数;  $a, b$  为试验待定系数)。采用 22 t 压路机,松铺厚度为 40、50 cm 时,5 遍和 7 遍之间的沉降差约为 5 mm;松铺厚度为 60 cm 时,5 遍和 7 遍之间的沉降差约为 10 mm。

(3) 松铺厚度与动态变形模量  $E_{vd}$  关系。

从图 11 可以看出,松铺厚度越大,相同碾压遍数下  $E_{vd}$  值就越小。不同厚度下的  $E_{vd}$  与碾压遍数

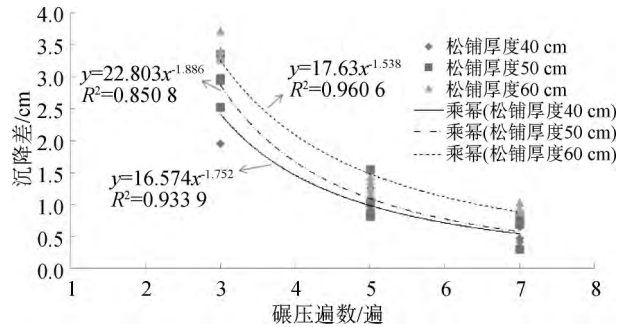


图 10 不同松铺厚度下沉降差与碾压遍数关系

之间呈幂函数增长,相关关系式可以表示为  $y = a \cdot x^b$  (式中:  $y$  为  $E_{vd}$  值;  $x$  为碾压遍数;  $a, b$  为试验待定系数)。

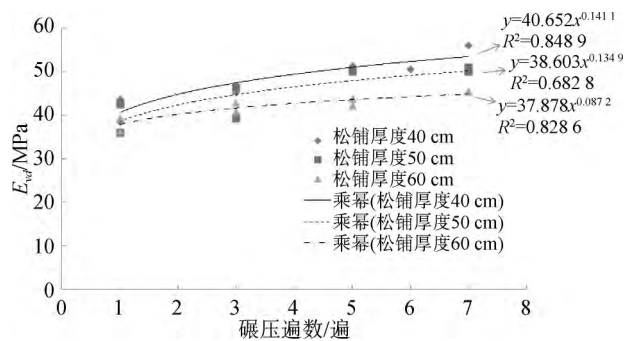


图 11 不同松铺厚度下  $E_{vd}$  与碾压遍数关系

2.2 压实吨位影响

(1) 干密度。

从图 12 可以看出,压路机吨位对松铺厚度范围内压实度影响较大,26 t 压路机碾压后,不仅表层压实度得到提高,而且 20~40 cm 深层范围内的压实度明显高于 22 t 压路机。这表明大吨位压路机振动碾压影响深度更深,可以提高整个摊铺厚度范围内填料的压实度,压实效果显著。26 t 压路机碾压试验结束后,刨挖至摊铺层底部,结果如图 13 所示。深层填料刨挖时难易程度和表层几乎一样,岩块间孔隙充填紧密,说明深层填料也得到了充分压实。

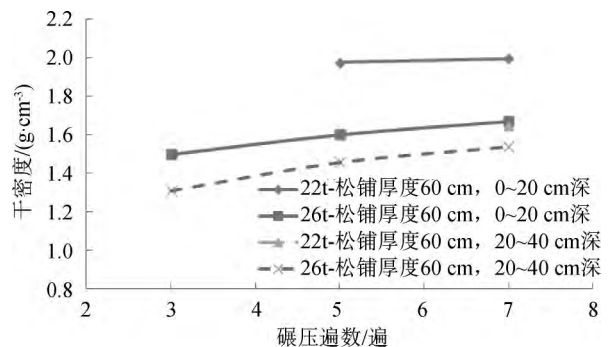


图 12 压路机吨位对干密度影响



图 13 碾压后刨挖路基

(2) 沉降差。

从图 14 可以看出,相同松铺厚度 60 cm 时,相比小吨位压路机,随碾压遍数的增大,大吨位压路机相邻两遍的碾压沉降差衰减更快,碾压沉降量更大。从总的沉降量判断,大吨位压路机碾压效果优于小吨位压路机。

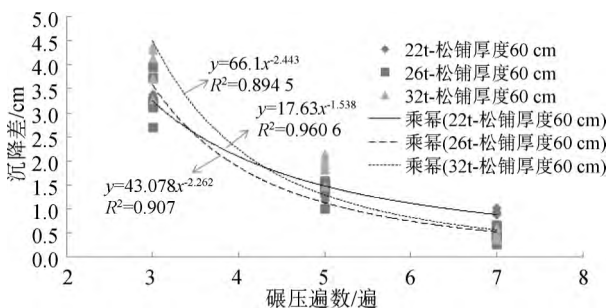


图 14 压路机吨位对沉降差影响

(3)  $E_{vd}$ 。

从图 15 可以看出,相同松铺厚度为 60 cm 时,与 22 t 压路机相比,26 t 和 32 t 压路机碾压后的  $E_{vd}$  强度值反而变小。一般情况下,在填料、含水率及松铺厚度相同的情况下,碾压机械的功率越大,压实效果越好。但是压路机的单位压力,一旦超过了填料的最大强度,不仅会浪费人力物力,还会造成级配料粉化、离析现象,损害路基强度,影响工程的整体质量。

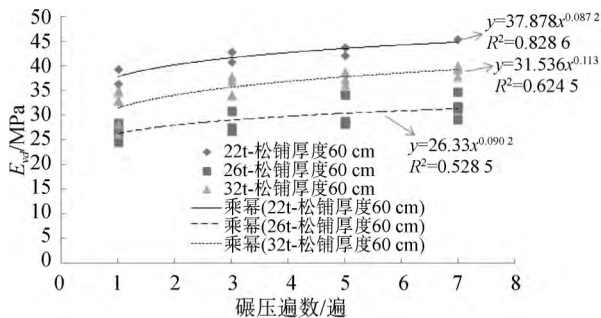


图 15 压路机吨位对  $E_{vd}$  影响

因此,填料类型决定碾压机具的型号。因风化板岩强度低,受碾压机械破碎作用,表层颗粒被压路机碾压破碎比较明显,填筑层由上至下颗粒由细变粗,尤其表层 1~2 cm 基本碾压破碎呈粉末状(见图 16),主要以细颗粒为主,受雨水浸泡后表层立即发生“泥化”,形成路基的软弱层。在下一层填筑前应对其表层 1~2 cm 的部分进行铲除。



图 16 32 t 压路机碾压后表层粉化

2.3  $E_{vd}$  与  $K_{30}$  相关关系

大量研究表明,地基系数  $K_{30}$  与动态变形模量  $E_{vd}$  之间有着良好的线性相关性,相关关系式可以表达为  $y=a \cdot x+b$  (式中:  $y$  为  $K_{30}$  值;  $x$  为  $E_{vd}$  值;  $a$ 、 $b$  为试验待定系数)。本次试验再次验证了两者之间具有很强的线性相关性,见图 17。即便是同一种填料,由于不同吨位的压路机碾压后的颗粒破碎程度不同,碾压后填料  $E_{vd}$  和  $K_{30}$  之间的相关性公式待定系数并不同,但两者之间的线性相关性不会改变。

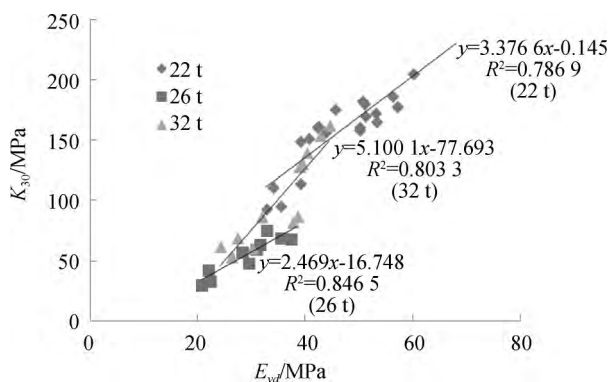


图 17  $E_{vd}$  与  $K_{30}$  相关关系

3 结语

(1) 风化板岩抵抗干湿循环及自然风化崩解能力较差, CBR 值随浸水时间及干湿循环次数增大而

减小,在实际应用中必须加强坡面防护及路基排水措施。

(2)碾压试验表明,松铺厚度越大,碾压后得到的压实度越小,沉降差(量)越大, $K_{30}$ 、 $E_{vd}$ 越小。

(3)一般碾压机械吨位越大,压实度越高、沉降量越大,压实后路基强度越高。但针对板岩类软岩填料,大吨位压路机碾压过程中,填料破碎程度较大,会造成级配料粉化、离析现象,损害路基强度,影响工程的整体质量,因此填料类型决定碾压机具型号的选择。

(4)地基系数  $K_{30}$  与动态变形模量  $E_{vd}$  之间有着良好的线性相关性,即便相同填料时碾压吨位不同,使两者之间的相关关系式有所不同,但两者之间的线性相关性不会改变。

(5)强至中风化板岩干密度测试具有很大的离散性,建议不用压实度来控制碾压效果。质量控制应以沉降差为主,并结合施工参数(铺土厚度、压实机械、碾压遍数等)来控制,同时用  $K_{30}$ 、 $E_{vd}$  检测等

手段来配合。

参考文献:

[1] 熊跃华,刁心宏,郑明新. 软岩填筑路基模型试验研究[J]. 华东交通大学学报,2004,21(4):15-18.

[2] 郑明新,方焘,刁心宏,等. 风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(增):53-56.

[3] 颜文,周丰峻,郑明新. 长衡段软岩水理特性研究[J]. 华东交通大学学报,2005,22(2):15-17.

[4] 卿启湘,王永和,李光耀,等. 软岩填筑高速铁路路堤的室内试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(7):1119-1123.

[5] 卿启湘,王永和,赵明华. 软岩填料的长期沉降变形特性及分析[J]. 岩土工程技术,2002,20(6):282-286.

[6] 但汉成,李亮,胡萍,等. 风化软岩路基填料击实工程特性室内试验研究[J]. 铁道学报,2009,31(4):75-81.

[7] 陈湘亮,王永和,王灿辉. 泥质板岩改良土击实试验响应因素分析[J]. 湖南城市学院学报:自然科学版,2010,19(3):8-11.

[8] 周雷刚. 高速公路强风化千枚岩路基填筑技术研究[D]. 西安:长安大学,2012.

## Research on the Filling Technology of Embankment with Strong to Moderate Weathered Slate in Sansui-Liping Eexpressway

ZHAN Yong-xiang<sup>1</sup>, YAO Hai-lin<sup>1</sup>, ZHANG Jing-bo<sup>2</sup>, WU Wan-ping<sup>2</sup>, RAN Xiao-bing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China; 3. Guizhou Expressway Group Co. Ltd., Guiyang 550004, China)

**Abstract:** In view of the fact that a large amount of strong to moderate weathered slate are found along Sansui-Liping expressway, compaction test, disintegration test and CBR strength test of the filling are studied. The results indicate that the strong to moderate weathered slate is provided with better compaction property, but the anti-disintegration ability is poor under the condition of dry-wet circulation and natural weathering, and its CBR value gradually decreases with the increasing of the dry-wet cycles. Then the field roller compaction test of embankment with strong to moderate weathered slate is studied. On the basis of the test, the influence of different rolling machine, thickness of soil rolling, and the combination of construction parameters with the compaction effect are discussed. The optimal technological parameters and quality control specification of the given project are found by contrast tests for which various detection methods such as degree of compaction, compaction settlement,  $E_{vd}$  and  $K_{30}$  are adopted. Compaction quality control method of strong to moderate weathered slate is put forward, namely, differential settlement is given priority, but construction technological parameters must be considered and the  $K_{30}$ ,  $E_{vd}$  detection means can be coordinated at the same time. The method may provide reference for the quality control, quality check, quality evaluation of soft rock subgrade.

**Key words:** strong to moderate weathered slate; embankment; filling test; compaction quality