

文章编号:1673-2049(2017)04-0019-07

不同配比下机场高填方边坡重塑土变形特性研究

朱彦鹏^{1,2}, 蒋怀军^{1,2}, 杨校辉^{1,2}, 朱鋈川³, 师占宾^{1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为研究不同配比下某机场高填方边坡重塑土体在最优含水率条件下的压缩变形特性,采用固结仪对40组160个试样进行压缩试验,总结出孔隙比-垂直荷载曲线变化规律。通过分析土体在侧限条件下垂直压应力与垂直压应变关系,拟合出最佳应力-应变曲线公式,并推导出试验土体所符合的本构关系,最后进行沉降预测。结果表明:粉质黏土与红砂岩质量比为2:8的土体压缩性比质量比为4:6的土体压缩性低,更适合做高填方填料;不同配比的土体在各压实度下的应力-应变曲线均符合双曲线函数模型;相对于规范推荐法,采用割线模量法得到的沉降量计算值与实测值更为接近,具有较好的适用性。

关键词:高填方边坡;粉质黏土;红砂岩;变形特性;双曲线模型;割线模量

中图分类号:TU411.5

文献标志码:A

Study of Deformation Characteristics of Remoulded Soil at Airport High Fill Slope Under Different Proportions

ZHU Yan-peng^{1,2}, JIANG Huai-jun^{1,2}, YANG Xiao-hui^{1,2}, ZHU Jun-chuan³, SHI Zhan-bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Third Institute Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In order to study the compression characteristics of remoulded soil in an airport high fill slope under different proportions and the condition of optimum water, the compression test which contained 160 specimens in 40 groups was carried with compression apparatus, and the change rules of void ratio-vertical load curves of soils under lateral confinement condition were summarized. Through analyzing the relation between vertical pressure and vertical strain of remoulded soil, the optimum stress-strain curve formula was fitted, and the constitutive relation suit for the test soil was derived, at last the settlement was forecasted. The results show that the compressibility of remoulded soil with 20% (mass ratio) silty clay and 80% red sandstone is smaller than that of remoulded soil with 40% silty clay and 60% red sandstone, so the former is fit for high fill filler. The pressure-strain curves of remoulded soil under the condition of different mixture ratio and different compactnesses are all suit for hyperbolic function model. Compared to the standard recommendation method, the calculation values of settlement by secant modulus

收稿日期:2017-02-12

基金项目:甘肃省科技重大专项计划项目(1302FKDA030)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhuyp@lut.cn。

method are closer to measured values of settlement, and have better applicability.

Key words: high fill slope; silty clay; red sandstone; deformation characteristic; hyperbola function model; secant modulus

0 引言

中国西部地区多高山、沟壑丘陵,地形地貌、地质条件、气候条件等因素的制约使西部地区城乡发展受到限制,近年来随着西部大开发战略的实施和“平山填沟、上山建城”理念的形成,山地公路和机场的兴建已经成为一种趋势。中国目前有 14 个高原机场,这些机场所处海拔较高,地理环境恶劣,且大多为深挖高填工程。从 20 世纪 70 年代末至今,伴随深挖高填出现的填料选择问题和沉降预测计算问题一直是工程界关注的焦点^[1-3]。在高填方填筑时,填料的选择特别重要,一方面要考虑料源和经济性,另一方面要顾及填料的性质是否可行。根据勘察报告可知,本试验机场挖方区地层岩性为 75% 红砂岩、25% 粉质黏土,考虑到“就地取材、就近平衡”的原则,填方区填料选用优质红砂岩和粉质黏土混合料,严格控制填料含水率和级配。红砂岩是红层软岩^[4-5]的俗称,由泥岩、红砂岩、泥质粉砂岩、泥质细砂岩、泥质砂岩、泥质或砂质页岩等沉积岩类岩石组成,该类岩石的强度因矿物成分和胶结物质的差异而变化颇大,在大气环境下或受干湿循环的作用,岩块可崩解碎裂,颗粒软化,强度降低,工程性质变差。湖南大学对红砂岩的物理力学性能、崩解机理、改性机理及路用性能做过研究,采用特殊措施消除红砂岩的水活性,将红砂岩全部或大部分转变成红砂土,再通过掺料、压实、隔断外界水分等措施,形成密实的不透水路堤,防止红砂岩路基病害发生,并将成果成功应用于高速公路。

在高填方沉降分析中存在大量的不确定因素,这些不确定因素使沉降理论数值计算分析的精确性大为降低,因此对不同的土体选择不同的沉降预测方法尤为重要,目前的沉降预测方法总体上有以经典土力学为基础的传统预测方法、以本构理论为基础的数值计算方法和以实测沉降数据资料为基础的预测法。土体的应力-应变关系表达形式也一直是学术界在探讨的焦点,魏汝龙^[6]在试验的基础上得出软黏土的压缩曲线更符合双曲线特征。刘保健等^[7]根据大量试验资料分析得出重塑黄土在侧限条件下的应力-应变关系用双曲线拟合具有较强的适应性。陈开圣等^[8]在大量室内试验基础上分析认为

压实黄土应力-应变关系可以用幂函数形式表达,而且具有较高的可靠性。黄雪峰等^[9]通过大量试验得出了压实黄土侧限条件下的土体应力-应变关系符合 Gunary 模型,并对不同压实度下的土体工后沉降进行了预测。

目前对于红砂岩和粉质黏土混合土体的应力-应变关系研究较少。本文在已有理论的基础上,将红砂岩与粉质黏土按不同配比混合来消除红砂岩在工程上的病害。通过对红砂岩与粉质黏土混合土体的变形特性研究,讨论影响混合土体变形特性的因素,构造侧限条件下垂直压应力 P_i 与垂直压应变 ϵ_i 的关系,并将试验结果用于高填方工程的沉降预测以指导现场施工显得非常重要,为今后采用类似混合土体作为填方填料时提供理论依据,也为今后混合土体特性研究提供借鉴。

1 试验方案

为了得到粉质黏土与红砂岩在不同配比(质量比)下的重塑土体填料在不同压实度条件下的变形特性与压缩固结变形量,本文试验对不同配比重塑土体进行了室内压缩固结对比试验。试验土体从现场取原状土样,专用试验装置运输至实验室,确保土样物理力学参数不变,分别取粉质黏土与红砂岩的配比为 2:8(后文简称 2:8 配比)和 4:6(后文简称 4:6 配比)的 2 组土样,加水使之达到最优含水率,其中测得 2:8 配比土样的最优含水率为 11.1%,最大干密度为 $2.1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$; 4:6 配比土样的最优含水率为 10%,最大干密度为 $2.03 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$,通过重型击实仪获得压实度 K 分别为 88%, 90%, 93%, 95%, 98% 的 2 组不同配比土样。最后取环刀土样进行固结试验,本文共用 40 组 160 个土样进行了固结试验,试验操作严格按照行业标准^[10]执行,试验方案见表 1。

2 压缩变形特性分析

2.1 压缩变形影响因素

含水率和干密度对土体压缩变形有非常大的影响,在含水率和干密度确定的情况下,孔隙比则是影响土体压缩变形的主要因素,土力学中常用孔隙比 e 和垂直荷载 P 的关系表示侧限压缩模量。

表 1 固结试验方案
Tab. 1 Scheme of Consolidation Test

试验步骤	垂直荷载/kPa
第 1 级加载	12.5
第 2 级加载	25.0
第 3 级加载	50.0
第 4 级加载	100.0
第 5 级加载	200.0

假设土样初始高度为 H_0 , 受压后的高度为 H_i , 则 $H_i = H_0 - \Delta H_i$, ΔH_i 为每级荷载作用下的压缩变形。土体的初始孔隙比为 e_0 , 受压后的孔隙比为 e_i , 根据土颗粒体积和土样横截面面积在受压前后不变这 2 个条件得

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta H_i (1 + e_0)}{H_0} \tag{1}$$

通过大量试验数据绘出土体孔隙比-垂直荷载 (e_i-P_i) 曲线, 如图 1 所示。

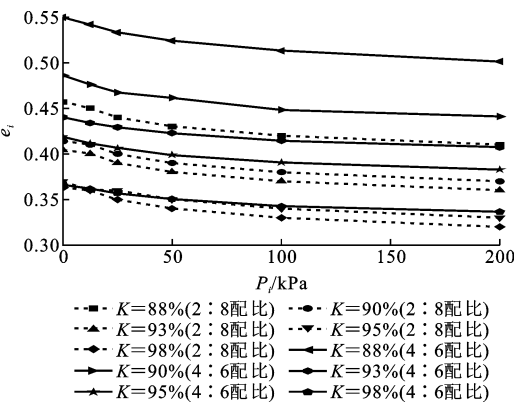


图 1 最优含水率下不同压实度土体的 e_i-P_i 曲线
Fig. 1 e_i-P_i Curves for Different Compactnesses Soils Under Optimum Water

通过对 e_i-P_i 曲线进行拟合分析可知, 2 种配比的土体在各压实度下均符合幂函数 $e_i = aP_i^b$ (a, b 为常数, 且 $a > 0, b < 0$), 限于文章篇幅, 只给出拟合公式, 如表 2 所示。

从图 1 和表 2 可以看出: ①在最优含水率条件下, 2 种配比土体在相同压力下孔隙比总体都随着压实度的增大而减小, 但当压实度相同时, 2 : 8 配比的土体比 4 : 6 配比的土体孔隙比低, 说明 2 : 8 配比土体比 4 : 6 配比土体的压缩性低; ②在最优含水率条件下, 随着垂直压力 P 的增大, 2 种配比土体的切线斜率都减小, 最后趋于恒定值; ③在最优含水率条件下, 2 种配比土体的 e_i-P_i 曲线较平缓, 说明 2 种配比下土体压缩性均较低; ④用幂函数 $e_i = aP_i^b$ 能够很好地拟合上述 e_i-P_i 曲线, 而且 2 : 8 配比土

表 2 采用幂函数拟合的 e_i-P_i 曲线公式
Tab. 2 e_i-P_i Curves Expressed with Power Function

配比	压实度 $K/\%$	拟合公式	相关系数
2 : 8	88	$e_i = 0.49P_i^{-0.034}$	0.999 8
	90	$e_i = 0.45P_i^{-0.037}$	0.999 9
	93	$e_i = 0.44P_i^{-0.038}$	0.999 9
	95	$e_i = 0.40P_i^{-0.033}$	0.991 4
	98	$e_i = 0.40P_i^{-0.042}$	0.999 6
4 : 6	88	$e_i = 0.58P_i^{-0.028}$	0.993 0
	90	$e_i = 0.51P_i^{-0.028}$	0.980 7
	93	$e_i = 0.46P_i^{-0.023}$	0.984 3
	95	$e_i = 0.44P_i^{-0.026}$	0.989 7
	98	$e_i = 0.39P_i^{-0.027}$	0.988 9

体拟合度比 4 : 6 配比土体更高, 拟合效果更佳。

2.2 应力-应变关系

由于土体本身的复杂性和不可预测因素的影响, 相对准确地确定土体应力-应变关系一直是研究的焦点, 刘保健等^[7]从改变试验数据分析方法的角度提出了侧限条件下土体垂直压应变与垂直压力关系的双曲线函数模型, 即

$$\epsilon_i = \frac{P_i}{A + BP_i} \tag{2}$$

式中: ϵ_i 为土样在 i 级荷载作用下的侧限压缩应变; A, B 均为常数。

陈开圣等^[8]在大量室内试验研究的基础上提出了扰动黄土在侧限条件下应力-应变关系的幂函数模型, 即

$$\epsilon_i = K' P_i^{n+1} \tag{3}$$

式中: K', n 均为试验常数。

黄雪峰等^[9]通过大量试验得出了压实黄土侧限条件下土体应力-应变关系符合 Gunary 模型, 即

$$\epsilon_i = P_i / (a + bP_i + c\sqrt{P_i}) \tag{4}$$

式中: c 为常数。

本文在大量试验的基础上以双曲线函数形式拟合出粉质黏土与红砂岩混合土体的 ϵ_i-P_i 的关系公式与曲线, 如图 2 和表 3 所示。

由图 2 的曲线关系和表 3 的曲线拟合公式可以看出, 本文试验土体的应力-应变关系符合公式 (2) 的双曲线函数, 用此函数拟合该试验土体 ϵ_i-P_i 曲线, 相关系数最小达到 0.997 4, 因此用此双曲线函数能够很好地反映该试验土体的实际情况, 故该试验土体的应力-应变关系函数选用公式 (2) 所示的双曲线函数模型。

2.3 割线模量与荷载的关系

刘保健等^[7]定义 $E_i = P_i / \epsilon_i$ 为土体侧限条件下

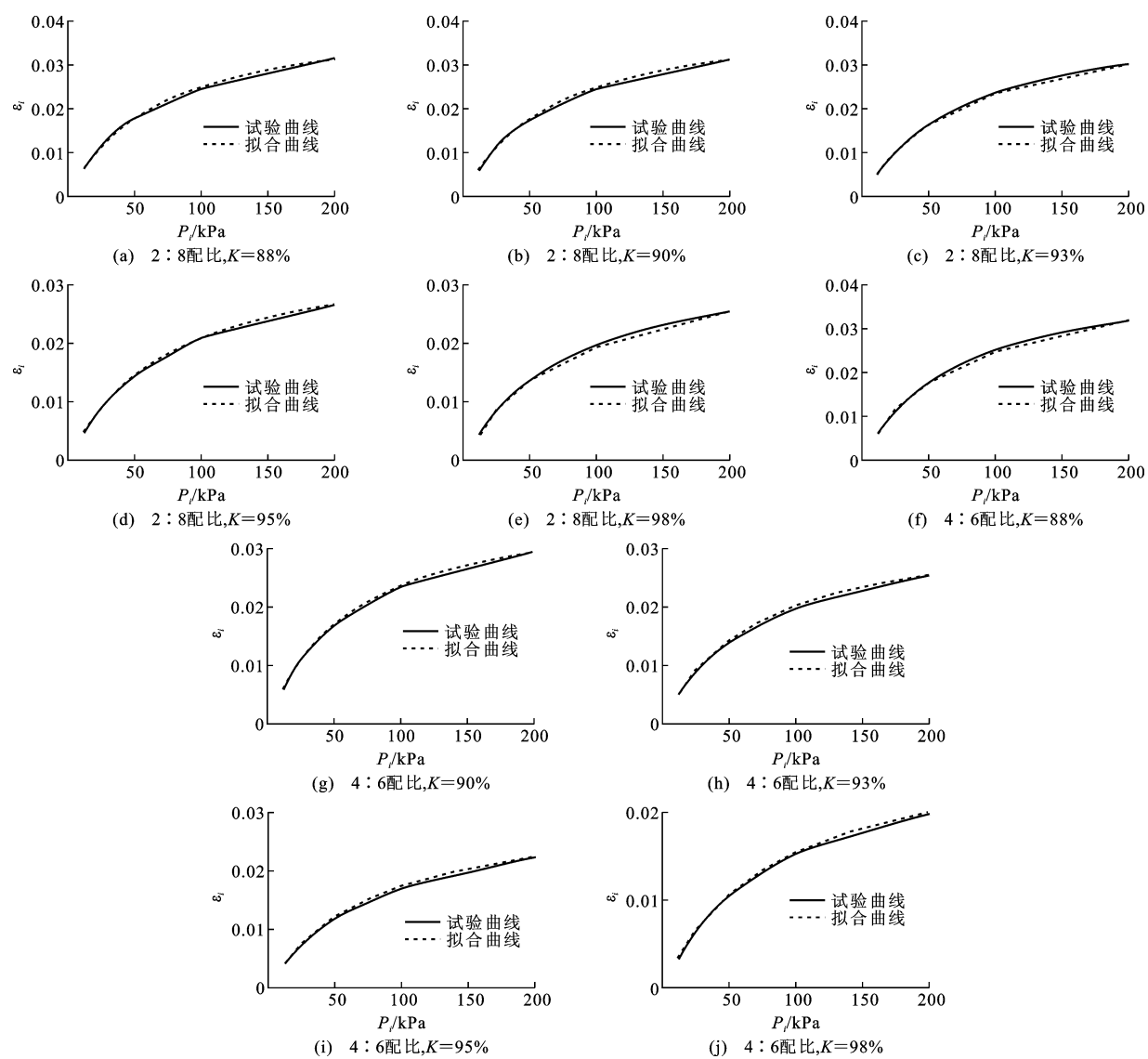


图 2 不同配比、不同压实度土体的 ϵ_i - P_i 曲线

Fig. 2 ϵ_i - P_i Curves for Different Compactnesses and Different Proportions of Soils

表 3 采用双曲线函数拟合的 ϵ_i - P_i 曲线公式

Tab. 3 Fitting Formulas of ϵ_i - P_i Curves Expressed with Hyperbola Function

配比	压实度 $K/\%$	拟合公式	相关系数
2 : 8	88	$\epsilon_i = P_i / (23.951P_i + 1\ 065.4)$	0.998 6
	90	$\epsilon_i = P_i / (23.9P_i + 1\ 638.19)$	0.997 4
	93	$\epsilon_i = P_i / (23.782P_i + 1\ 867.44)$	0.999 0
	95	$\epsilon_i = P_i / (26.966P_i + 2\ 103.4)$	0.998 6
	98	$\epsilon_i = P_i / (28.022P_i + 2\ 281.95)$	0.998 2
4 : 6	88	$\epsilon_i = P_i / (23.179P_i + 1\ 663.62)$	0.997 7
	90	$\epsilon_i = P_i / (25.69P_i + 1\ 651.03)$	0.998 4
	93	$\epsilon_i = P_i / (29.11P_i + 2\ 049.21)$	0.999 4
	95	$\epsilon_i = P_i / (32.08P_i + 2\ 553.46)$	0.999 5
	98	$\epsilon_i = P_i / (35.32P_i + 2\ 974.38)$	0.998 5

的割线模量,由式(2)得

$$E_i = A + BP_i \tag{5}$$

由式(5)得到 E_i - P_i 曲线,如图 3 所示。

对图 3 中 E_i - P_i 曲线进行线性拟合得出不同配比不同压实度下土体的线性表达式,见表 4。

从图 3 和表 4 可以看出:①2 种配比下土体的 E_i - P_i 曲线呈线性关系,2 种配比下截距和割线模量都随着压实度的增大而增大;②2 种配比的土体当压实度相同时,2 : 8 配比的土体比 4 : 6 配比的土体截距和割线模量小,说明 2 : 8 配比下土体的变形量小。

2.4 加载本构模型的构造

在某一特定含水率和压实度条件下,从任意一个荷载 P_i 变到 P_k ($P_i < P_k$) 时,土样的割线模量则由 $E_i = A + BP_i$ 变到 $E_k = A + BP_k$,而由土体侧限

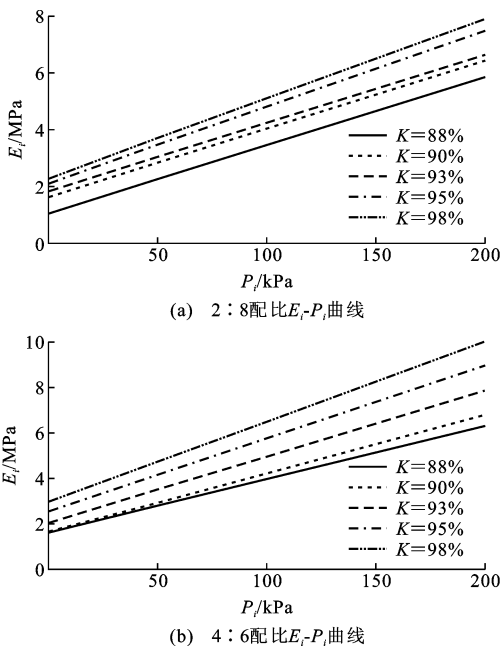


图 3 不同配比、不同压实度土体的 E_i - P_i 曲线

Fig. 3 E_i - P_i Curves for Different Compactnesses and Different Proportions of Soils

表 4 E_i - P_i 曲线线性拟合公式

Tab. 4 Linear Fitting Formulas for E_i - P_i Curves

配比	压实度 $K/\%$	拟合公式
2 : 8	88	$E_i=1\ 065.40+23.95P_i$
	90	$E_i=1\ 638.19+23.90P_i$
	93	$E_i=1\ 867.44+23.78P_i$
	95	$E_i=2\ 103.47+26.97P_i$
	98	$E_i=2\ 281.95+28.02P_i$
4 : 6	88	$E_i=1\ 663.62+23.18P_i$
	90	$E_i=1\ 651.03+25.69P_i$
	93	$E_i=2\ 049.21+29.11P_i$
	95	$E_i=2\ 553.46+32.08P_i$
	98	$E_i=2\ 974.38+35.22P_i$

条件下割线模量的定义 $E_i = P_i / \epsilon_{si}$ 得到 $\epsilon_{si} = P_i / E_i$, 所以在荷载 P_i 和 P_k 下土体的应变分别为 $\epsilon_{si} = P_i / (A + BP_i)$ 和 $\epsilon_{sk} = P_k / (A + BP_k)$, 而由土体的应变公式 $\epsilon_s = \Delta H / h_0$ 得到土体变形量 $\Delta H = \epsilon_s h_0$, 其中 h_0 为土样高度, 进而土体荷载从 P_i 变到 P_k 时的压缩变形量 ΔS_i 为

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= \Delta H_k - \Delta H_i = \epsilon_{sk} h_0 - \epsilon_{si} h_0 = \\ &= \frac{P_k}{A + BP_k} h_0 - \frac{P_i}{A + BP_i} h_0 = \\ &= \frac{A}{E_k E_i} (P_k - P_i) h_0 = \\ &= \frac{A}{E_k E_i} \Delta P_i h_0 \end{aligned}$$

故本文试验土体的本构模型为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{si} &= \frac{P_i}{A + BP_i} \\ E_i &= A + BP_i \\ \Delta S_i &= \frac{A}{E_k E_i} \Delta P_i h_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3 压缩固结沉降预测

对于土体压缩固结沉降的计算已经有很多计算方法,除规范推荐算法外,肖昭然等^[11]提出高斯公式求解法;何思明^[12]提出基于弹塑性理论的修正分层总和法;徐金明等^[13]通过编程使用非线性最小二乘法进行沉降拟合计算;李纲林等^[14]利用室内试验模拟提出室内试验模拟现场有效应力路径算法;刘赅炜等^[15]用半数数值半解析方法对地基沉降进行了预测;潘翔^[16]用改进的 GM(1, 1)模型和改进的灰色 Verhulst 模型进行了地基沉降预测。

本文采用规范推荐法和割线模量法在最优含水率条件下对 2 : 8 配比和 4 : 6 配比且压实度分别为 88%, 90%, 93%, 95%, 98% 的土体进行沉降预测, 并以陇南成州民用机场高填方工程为例, 将以上 2 种沉降预测方法与实际沉降观测结果进行对比分析。

陇南成州民用机场高填方工程最大填方高度达 60 m, 取最大填方高度 $H = 60$ m 为计算高度, 分别用规范推荐法和割线模量法对其进行沉降计算分析, 结果如表 5 所示。

表 5 沉降预测结果

Tab. 5 Result of Settlement Prediction

配比	压实度 $K/\%$	沉降/cm	
		规范推荐法	割线模量法
2 : 8	88	73.56	69.64
	90	64.25	60.22
	93	49.44	46.94
	95	44.13	40.73
	98	36.28	32.68
4 : 6	88	78.39	72.58
	90	72.77	68.36
	93	54.12	51.31
	95	50.49	48.56
	98	39.73	35.54

为了对该机场高填方边坡进行实时健康监测, 通过埋置分层沉降计进行沉降观测, 此高填方边坡填方选用 2 : 8 配比填料, 现选取 1[#] 观测点(编号为 1-1 和 1-2)以及 2[#] 观测点(编号为 2-1 和 2-2)的 4 个观测点数据进行沉降分析, 为避免边坡顶部对沉

降观测的干扰,编号为 1-1 和 2-1 的沉降计埋置深度为 15 m,编号为 1-2 和 2-2 的沉降计埋置深度为 17.2 m,沉降观测数据如图 4 所示。

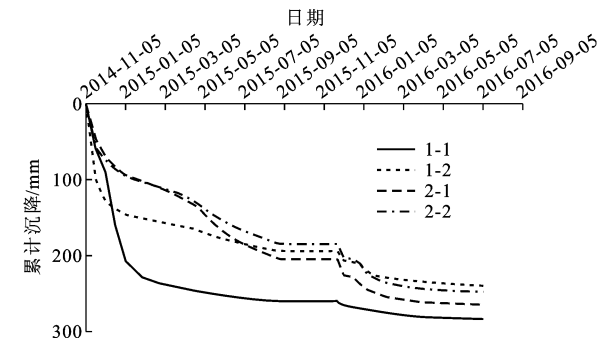


图 4 沉降实测值

Fig. 4 Measured Values of Settlement

由图 4 可以看出:曲线基本趋于平缓,编号 1-1 和 2-1 的沉降计所记录的累计沉降量分别为 283.52 mm 和 263.04 mm,取平均值为 273.28 mm;编号 1-2 和 2-2 的沉降计所记录的累计沉降量分别为 247.84 mm 和 239.68 mm,取平均值为 243.76 mm。由于沉降计所记录的沉降量分别为 15 m 处和 17.2 m 处的累计沉降,对于 15 m 和 17.2 m 以上土体用理论计算的方法得到,由于现场实际填土压实度要求 93% 以上即为合格,故取 2 : 8 配比压实度为 95% 且高度为 17.2 m 的土样,分别用规范推荐法和割线模量法进行沉降量计算,结果分别为 94.32 mm 和 58.84 mm,实测累计沉降可以由 17.2 m 为基准进行推定,推定实测值为 17.2 m 处实测值加 17.2 m 以上土体沉降值,结果如表 6 所示。

表 6 沉降预测值和实测值比较

Tab. 6 Comparison Between Predicted Values and Measured Values of Settlement				
方法	配比	压实度 / %	沉降预测值 / cm	沉降推定实测值 / cm
规范推荐法	2 : 8	95	44.13	36.01
割线模量法	2 : 8	95	40.73	31.56

由表 5、图 4 和表 6 可以分析得出:① 2 种配比下土体的压缩沉降随着压实度的增大而减小;② 与规范推荐法相比,用割线模量法计算的结果略微偏小,与现场实际测量沉降更为接近,因此可以作为沉降预测计算的有效方法;③ 2 : 8 配比土体比 4 : 6 配比土体的压缩性低,与现场实际测量沉降更为接近,因此 2 : 8 配比的土样更适合做高填方填料。

4 结 语

(1)通过粉质黏土与红砂岩按不同比例混合可

以消除红砂岩崩解碎裂、颗粒软化、强度降低和工程性质变差等不良工程特性。

(2)在最优含水率条件下,2 : 8 配比的土体比 4 : 6 配比的土体压缩性低,做高填方填料效果更佳。

(3)粉质黏土和红砂岩按不同配比混合之后,土体在侧限条件下应力-应变关系可以用双曲线函数模型拟合,而且相关系数都在 0.997 4 以上,说明双曲线函数对此混合填料有很好的适应性。

(4)通过对累计沉降预测值和推定实测值的比较,割线模量法能够很好地预测土体沉降量,且与实际值较为接近。

(5)由于本文是在侧限条件下分析应力-应变关系,进而进行土体压缩特性研究,因此试验结论更适合“V”形沟谷填方。

参考文献:

References:

[1] 交通部第二公路勘察设计院.路基[M].北京:人民交通出版社,1996.
The Second Highway Investigation and Design Institute of Ministry of Communication of China. Roadbed [M]. Beijing:China Communications Press,1996.

[2] 陈 涛.山区机场高填方地基变形及稳定性研究[D].郑州:郑州大学,2010.
CHEN Tao. Study on the Characters of Deformation and Stability of High-fill Airport Embankment in Mountainous Areas[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2010.

[3] 黄永强.高速公路路基沉降及路面动力特性研究[D].长沙:中南大学,2010.
HUANG Yong-qiang. Research on the Settlement of Embankment and Mechanism of Pavement for Freeway[D]. Changsha: Central South University,2010.

[4] 赵明华,邓魏宇,曹文贵.红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(3):1-5.
ZHAO Ming-hua,DENG Jin-yu,CAO Wen-gui. Study of the Disintegration Character of Red Sandstone and the Construction Techniques of Red Sandstone Embankment[J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(3):1-5.

[5] 吴益林.红砂岩材料特性及其路基施工技术浅析[J].广东公路交通,2001(增):55-56.
WU Yi-lin. Analysis for Characteristics of Red Sandstone Material and the Roadbed Construction Technology[J]. Guangdong Highway Communications, 2001(S):55-56.

[6] 魏汝龙.直剪固快试验结果的整理和分析[J].地基处

- 理,1999,20(4):15-18.
- WEI Ru-long. Arrangement and Analysis of Direct Shear Test Results[J]. Ground Improvement, 1999, 20(4):15-18.
- [7] 刘保健,张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用[J]. 中国公路学报,1999,12(1):37-41,100.
- LIU Bao-jian,ZHANG Jun-li. Application and Analysing Method for Soil Compression Test[J]. China Journal of Highway and Transport,1999,12(1):37-41,100.
- [8] 陈开圣,沙爱民. 压实黄土变形特性[J]. 岩土力学,2010,31(4):1023-1029.
- CHEN Kai-sheng,SHA Ai-min. Study of Deformation Characteristic of Compacted Loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(4):1023-1029.
- [9] 黄雪峰,孔 洋,李旭东,等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学,2014,35(增2):37-44.
- HUANG Xue-feng,KONG Yang,LI Xu-dong,et al. Study and Application of Deformation Characteristics of Compacted Loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(S2):37-44.
- [10] GB/T 50123—1999,土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—1999,Standard for Soil Test Method [S].
- [11] 肖昭然,吴洪涛,杨 青. 分层总和法计算沉降的改进[J]. 山东建筑工程学院院报,1994,9(2):22-26.
- XIAO Zhao-ran,WU Hong-tao,YANG Qing. Improvement on Layer-wise Summation Method[J]. Journal of Shandong Architectural and Civil Engineering Institute,1994,9(2):22-26.
- [12] 何思明. 基于弹塑性理论的修正分层总和法[J]. 岩土力学,2003,24(1):88-92.
- HE Si-ming. Modified Layer-summation Based on Elastoplastic Theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(1):88-92.
- [13] 徐金明,汤永净. 分层总和法计算沉降的几点改进[J]. 岩土力学,2003,24(4):518-521.
- XU Jin-ming,TANG Yong-jing. Several Promotions on Layerwise Summation Method to Calculate Foundation Settlements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(4):518-521.
- [14] 李纲林,刘祖德,邹 勇,等. 应力路径法在地基沉降计算中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2003,36(6):56-60.
- LI Gang-lin,LIU Zu-de,ZOU Yong,et al. Application of Stress Path Method to Calculation of Ground Settlement[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2003,36(6):56-60.
- [15] 刘赅炜,韩 焯,陈昌彦,等. 高填方路基沉降预测的半数值半解析方法[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(3):491-496.
- LIU Cheng-wei,HAN Xuan,CHEN Chang-yan,et al. A Semi-analytical and Semi-numerical Method for Settlement Prediction to High Filling Embankment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2011,7(3):491-496.
- [16] 潘 翔. 地基沉降预测的两种灰色模型与 Asaoka 法[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(6):1443-1448,1464.
- PAN Xiang. Asaoka Method and Two Grey Models in the Forecast of Groundsill Settlement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013, 9(6):1443-1448,1464.