文章编号：0451－0712(2005)12－0055－04 中图分类号：U443.82 文献标识码：A

公路桥涵台背回填中粗砂相对密实度的质量评定方法研究

刘仰韶，田卿燕，吕建兵

（广东交通集团检测中心 广州市 510800）

摘 要：根据公路桥涵台背回填砂的相对密实度与砂层沉降之间的关系，提出了回填砂的相对密实度是否符合要求的标准值，借助回填砂的相对密实度与轻便触探锤击数之间的经验关系，构建了桥涵台背填砂相对密实度的质量评定方法，为公路桥涵台背填砂的施工质量控制提供了一个可行的方法。

关键词：桥涵台背；砂的相对密实度；标准值；轻便触探；评定方法

《公路路基施工技术规范》(JTJ 033－95)规定，公路桥涵台背回填宜选择砂类土或渗透性好的材料。中粗砂不但透水性好，而且可就地取材，价格低廉，施工方便，因而被广泛用于高速公路的桥涵台背回填，但是对表征台背填砂质量的技术指标——“相对密实度”至今还没有一个合适的评定方法。

本文根据模型及现场荷载试验的结果，对不同砂在不同的相对密实度下的沉降量进行了计算，得出了砂的物理性质及相对密实度对其剩余沉降的影响规律，从满足工程质量要求的角度，提出了判别砂的相对密实度是否符合要求的标准值。然后，应用轻便触探的锤击数与砂的相对密实度的经验关系[1]，并考虑到该检测方法的特点，构建了用轻便触探检测公路桥涵台背填砂的相对密实度的质量检验评定方法。

1 公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度标准值的确定

1.1 公路桥涵台背的沉降分析

在高速公路建设中，桥涵与路基相邻处多采用回填砂结合地基处理的方法来减小与桥涵相邻处的差异沉降，因此，桥头路基的沉降主要由砂土上部碾压土的压缩变形、砂层沉降、砂层下部地基工后沉降3个部分组成。

(1)砂土上部碾压土的压缩变形。

砂层以上的碾压土一般属于95区，根据现行的设计及施工规范，该部分土层的压实度必须大于95%。土层的弹性模量比较大(一般在35～45 MPa)[2]，主要属于弹塑性压缩变形，其变形量很小。同时，由于该部分土层的施工与质量控制与相邻路基相同，其压缩变形不是桥头差异沉降的主要因素。

(2)砂土沉降变形。

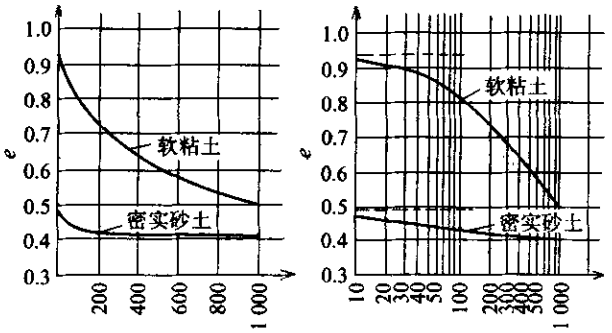
砂土中一般含粘粒较少，不具有可塑性，呈单粒结构，在短时间内即可完成压缩，所以砂土地基的初始沉降与固结沉降是混合在一起的。该类土的物理力学性质主要决定于密实程度：当呈密实状态时，强度较大，是良好的基础，在荷载作用下变形量较小(图1)；呈松散状态时则是一种软弱基础。用其作为桥涵台背的回填料，控制砂的颗粒粒径和密实度非常重要，施工时控制砂的密实度是控制砂体沉降变形的一个关键手段。

(3)砂土下部的地基沉降。

桥涵台背地基一般作为独立项目进行处理。根据设计和施工规范，台背地基必须检测地基承载力，当地基承载力满足设计要求时，可不进行处理；当地基承载力小于设计要求时，应进行适当的处理以达到设计要求。此时的地基沉降应满足设计要求，由于异常原因引起的沉降不是本文考虑的内容。

通过以上分析可知，回填砂的沉降是构成桥头路基工后沉降的主要部分，通过控制回填砂的相

基金项目：广东省交通厅项目(项目编号：2002－013)
收稿日期：2005－06－13



(1) $e\sim p$曲线 (2) $e\sim \lg p$曲线

图 1 土的压缩曲线[3]

对密实度可以达到控制桥头路基工后沉降的目的。

1.2 桥涵台背回填中粗砂的沉降计算

由于采集砂土原状土样十分困难，计算砂土沉降一般根据原位荷载板试验结果来计算沉降。在本项目中，主要根据现场及模型荷载试验结果得到的参数进行沉降计算。根据模型试验及现场台背回填砂的荷载试验数据，可以确定试验过程中不同的砂在不同的相对密实度条件下的变形模量 E_0 和泊松比 μ，然后再根据相应的物理力学参数，计算出不同的砂在不同的相对密实度条件下的沉降值，见表 1。

表 1 砂的变形参数及沉降量

砂类	D_r	变形模量 E_0/MPa	泊松比 μ	容重 kN/m³	沉降量 S/mm
1 号砂 ($M_x=4.17$)	0.54	7.80	0.25	18.0	24.94
	0.70	22.58	0.25	18.0	8.02
	0.81	37.80	0.25	18.0	4.50
	0.89	53.59	0.25	18.0	2.99
2 号砂 ($M_x=2.47$)	0.49	14.46	0.25	18.0	13.0
	0.66	39.69	0.25	18.0	4.25
	0.73	41.70	0.25	18.0	4.02
	0.93	60.15	0.25	18.0	2.60
3 号砂 ($M_x=2.66$)	0.40	22.41	0.25	18.0	8.09
	0.59	30.39	0.25	18.0	5.76
	0.74	45.39	0.25	18.0	3.64
	0.90	68.62	0.25	18.0	2.21
4 号砂 ($M_x=3.36$)	0.48	14.92	0.25	18.0	12.57
	0.62	19.51	0.25	18.0	9.41
	0.76	36.29	0.25	18.0	4.71
	0.93	72.92	0.25	18.0	2.05
现场砂 ($M_x=3.00$)	0.55	20.50	0.35	19.0	10.3
	0.60	24.90	0.35	19.0	8.39
	0.63	26.90	0.35	19.0	7.74
	0.82	38.7	0.35	19.0	5.26

注：模型试验的 4 种砂及现场砂的颗粒组成及物理力学指标请参见文献[1]和文献[4]，现场试验的变形模量是根据相似理论[5]进行压板面积修正后得到的结果。

图 2 为砂的相对密实度 D_r、细度模数 M_x 及沉降量 S 之间的关系曲线。从图中可以看出，基于现场和室内模型试验参数计算得到的沉降量 S 与相对密实度 D_r、细度模数 M_x 均存在一定的关系。由于现场荷载板试验与室内模型试验的工况不同，所以有必要比较 2 种不同试验参数的沉降计算结果，以便找出模型试验与现场荷载板试验结果的规律。

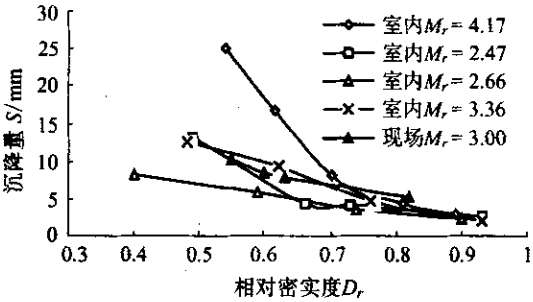


图 2 $D_r\sim M_x\sim S$ 关系

(1)相对密实度 D_r 与沉降量 S 的关系。

相对密实度增加，则砂的沉降减少，当相对密实度增加到 0.75 时，沉降趋于稳定。为了分析相对密实度 D_r 与沉降量 S 的关系，对表 1 中的模型试验 4 号砂与现场试验砂的数据进行非线性回归分析，得到回归方程：

$$S=e^{4.0886-3.1989D_r} \quad (R=0.9530) \tag{1}$$

式中：S 为砂的沉降量，mm；D_r 为砂的相对密实度。

(2)细度模数 M_x 与沉降量 S 的关系。

砂的相对密实度的不同，则砂的细度模数对沉降的影响不同，当相对密实度 $D_r<0.75$ 时，砂的细度模数 M_x 对沉降量 S 的影响较大；当相对密实度 $D_r\geqslant 0.75$ 时，砂的细度模数 M_x 对沉降量 S 的影响较小。因此，现场桥涵台背回填砂的相对密实度宜取 $D_r\geqslant 0.75$，尤其是对于级配不良的回填砂来说。

(3)模型砂及现场砂的沉降对比。

由图 2 可知，现场台背回填砂的沉降规律与室内模型砂的沉降规律基本一致，随相对密实度的增加而减少，且基本介于 3 号砂与 4 号砂之间，符合细度模数对砂的影响规律。由此可见，模型试验数据与现场试验数据一样可以用于砂的沉降计算。

1.3 公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度标准值的确定

由文献[6]和文献[7]得知，桥头与路基相邻处沉降差(俗称“错台”)大于 1.5 cm 时，就会对高速行

驶的汽车产生较大的影响。以三层路面结构体系（沥青混凝土面层厚 0.15 m，模量为 1 100 MPa；稳定层厚 0.45 m，模量为 500 MPa；土基模量为 30 MPa）为例，运用分层总和法，计算得到路表弯沉为 7.7 mm。为将桥台、涵台与路基差异沉降（错台）的大小限制在 1.5 cm 之内，砂层的沉降量应控制在 7.3 mm 范围之内；考虑到砂层下地基的沉降变形，砂层的沉降应控制在更小范围内。根据式（1）计算得，台背回填砂的相对密实度应不小于 0.66。

综上可知，为使砂的剩余沉降受砂的相对密实度 D_r 及砂的细度模数 M_x 影响最小，需将二者的相对密实度评定值取交集，从而得到公路桥涵台背回填中粗砂相对密实度标准值——$D_r \geqslant 0.75$。

2　基于轻便触探的桥涵台背回填中粗砂的检测方法

通过文献[1]、[4]和[5]的理论研究和试验研究，论证了轻便触探对于检测公路桥涵台背回填中砂、粗砂和砾砂的相对密实度的可行性，提出了用轻便触探检测公路桥涵台背回填中砂、粗砂和砾砂的相对密实度的试验方法，从而使轻便触探检测台背回填中粗砂相对密实度的适用范围从细砂以下的土推广到中砂、粗砂和砾砂，从理论上来说是一个突破性进展，有着非常重要的现实意义。

3　基于轻便触探的桥涵台背回填中粗砂的质量评定方法

3.1　砂的相对密实度 D_r 的单值

根据现场实测的轻便触探锤击数与深度数据，经过异常数据处理后，可以用经验公式计算不同深度处砂的相对密实度。在临界深度以上，砂的相对密实度 D_r 可由式（2）计算；在临界深度处及以下，密实度由式（3）计算[1]。

$$D_r = 0.519\,9 + 0.146\,5\,M_x - 0.000\,8\,h + 0.006\,0\,N_{10} - 0.054\,5\,C_u - 0.152\,8\,F \tag{2}$$

$$D_r = -0.105\,7 + 0.208\,0\ln(N_{10L}) \tag{3}$$

式中：D_r 为砂的相对密实度；M_x 为砂的细度模数；h 为轻便触探锥尖入土的深度，$h \leqslant h_{cr}$，cm；N_{10} 为临界深度以上轻便触探的实测锤击数；N_{10L} 为临界深度处轻便触探的实测锤击数；C_u 为砂的不均匀系数；F 为砂的压缩系数。

3.2　异常数据处理

由轻便触探的 N_{10}，计算得到的 D_r 中的异常数据如何判别和删除，异常数据对试验结果分析的影响如何，需要按相应的数学方法和物理概念加以判别和评定。对于某一砂层的 D_r 来讲，其异常数据主要有 3 个来源：

（1）土层中的薄夹层和其他土层间的过渡数据，这些数据不属于所要研究的土层，一般可通过观察分析对其判别和删除；

（2）测试误差，如取样、测试仪器和测试过程所造成的误差；

（3）土的变异性很大，沉积土层难免有小的局部变异，土层中小的局部变异也可能构成异常值。

第 1 种异常数据属于物理方面上的异常数据，在进行分析前应通过经验进行判别和删除，后 2 种则要通过数学方法进行判别和删除。异常数据判别的数学方法主要有 Dixon 法、Chauvenet 法、t 检验法和格鲁布斯（Grubbs）法等，其中采用格鲁布斯（Grubbs）法的检验效果最好。

设每一层（0.6 m 厚为一层）各测点的所有的 D_r 计算值服从正态分布 $D_r \sim N(\mu, \sigma^2)$，其中 μ、σ^2 均未知。D_r 的随机子样为 $D_{r,1}, D_{r,2}, \cdots, D_{r,n}$，$D_{r,1} \leqslant D_{r,2} \leqslant \cdots \leqslant D_{r,n}$，为按大小顺序排列的一组样本值。采用格鲁布斯（Grubbs）法判别数据是否为异常数据，首先以 0.6 m 厚为一层分别按式（4）进行判别：

$$G = \frac{|D_{r,n} - \overline{D}_{r,n}|}{S_n} \tag{4}$$

式中：$D_{r,n}$ 为台背每层各测点待检验的可疑的 D_r；$\overline{D}_{r,n}$ 为台背每层各测点所有的 D_r 单值的平均值；S_n 为各单点值的标准差；n 为单值数量。

运用式（4）对轻便触探试验中的异常值进行评定时，应根据选定的置信度 α（$\alpha = 0.05$）和单值总数量 n 查表得 $G_{\alpha,n}$[13]，如果 $G > G_{\alpha,n}$，则可判定 $D_{r,n}$ 为异常数据。格鲁布斯（Grubbs）法每次只能检查 1 个异常数据，在删除 1 个异常数据以后得到 1 个新的子样 $D_{r,1}, D_{r,2}, \cdots, D_{r,n-1}$，再计算新子样的样本均值和样本标准差，重复以上过程，直到无异常数据为止。

3.3　台背回填中粗砂相对密实度 D_r 的代表值

以 0.6 m 厚为一层分别按式（5）[13]来计算相对密实度代表值：

$$D_{rk} = \overline{D}_r - \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} S \tag{5}$$

式中：D_{rk} 为整个台背回填砂的相对密实度代表值；$\overline{D}_r$ 为台背每层回填砂各测点所有相对密实度单值的平均值；t_α 为 t 分布表中随层数和保证率（或置信度 α）而变的系数，t_α 见文献[14]附表 B，保证率为

95%；S 为各单点值的标准差；n 为单值数量。

3.4 公路桥涵台背回填中粗砂相对密实度的质量评定方法

公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度以整个台背的回填砂为评价单元，相对密实度单点值不少于 6 个，其相对密实度的代表值 D_{rk} 为：

$$D_{rk} \geqslant D_{r0} \tag{6}$$

式中：D_{r0} 为相对密实度的标准值。

当 $D_{rk} \geqslant D_{r0}$，且单点相对密实度 D_{ri} 全部大于等于规定值减 0.03 时，该台背的回填砂密实度合格率为 100%；当 $D_{rk} \geqslant D_{r0}$，且单点相对密实度 D_{ri} 全部大于或等于规定极值（规定值减 0.06）时，按测定值不低于规定值减 0.03 的测点数计算合格率；当 $D_{rk} < D_{r0}$ 或某一单点相对密实度 D_{ri} 小于规定极值时，该台背回填砂的密实度不合格。

4 结语

（1）根据沉降分析，当地基的承载力达到设计要求时，公路桥涵台背回填中粗砂密实度质量问题造成的过大的沉降是桥头差异沉降的主要原因，可以用回填砂的沉降规律来确定回填砂的相对密实度标准值。

（2）综合分析了砂的相对密实度及细度模数对砂的沉降规律的影响，提出了公路桥涵台背回填中粗砂相对密实度的标准值——$D_r \geqslant 0.75$，该标准值可为公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度质量评价提供参照点。

（3）根据公路桥涵台背的施工特点及质量控制要求，提出了一套可行的质量评定方法，为轻便触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度的质量评定提供了理论依据。

参考文献：

[1] 刘仰韶，田卿燕，吕建兵．轻便触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的试验方法研究[J]．公路交通科技，2005，(12)．

[2] JTG D30－2004，公路路基设计规范[S]．

[3] 东南大学，等．土力学[M]．中国建筑工业出版社，2001．

[4] 刘仰韶，田卿燕，吕建兵．轻型动力触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的机理研究[J]．中南大学学报，2005，(10)．

[5] 刘仕顺，吕建兵，田卿燕．公路桥涵台背回填中粗砂的模型试验相似分析[J]．公路与汽运，2005，(6)．

[6] 钱家欢．土力学[M]．南京：河海大学出版社，1988．

[7] 汤光祥，等．高速公路桥头跳车的原因、危害及防治措施[J]．宜春学院学报，2004，26(4)．

[8] JTJ 051－93，公路土工试验规程[S]．

[9] 唐贤强，等．地基工程原位测试技术[M]．北京：中国铁道出版社，1996．

[10] GB 50021－2001，岩土工程勘察规范[S]．

[11] 周筱滨．动力触探[M]．北京：中国铁道出版社，1986．

[12] 吴南群．工程勘察测试数据的可靠性检验[J]．岩土工程学报，1991，(3)．

[13] 邓勃．分析测试数据的统计处理方法[M]．北京：清华大学出版社，1997．

[14] JTG F80/1－2004，公路工程质量检验评定标准（土建部分）[S]．

A Stand on Quality Assessing Method of Relative Density of Back Filled Coarse-Sand Behind Abutments

LIU Yang-shao, *TIAN Qing-yan*, *LU Jian-bing*

(Guangdong Transportation and Communication Testing Center, Guangzhou 510800, China)

Abstract: According to the relations between the relative density of sand and settlements of sand layer in back filling behind abutments, a standard value is put forward in this paper to assess the relative density of sand. On the basis of the empirical relations between blow counts of light dynamic penetration and the relative density of sand, a quality assessing method is set to test the relative density of sand. This study provides a feasible method for construction quality control in back filled sand behind abutments.

Key words: back of abutment; relative density of sand; standard value; light dynamic penetration; assessing method