

# 碎石的可压实性及压实对渗透性能的影响

唐正光<sup>1</sup>, 王苏达<sup>1</sup>, 吴培关<sup>1</sup>, 杨智本<sup>2</sup>, 彭祖强<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明, 650224; 2. 玉溪市政规划设计院, 云南 玉溪, 653001;  
3. 昆明大学, 云南 昆明, 650216)

**摘要:** 通过对不同粒径的碎石进行相对密度及在不同密实度和不同级配条件下碎石的渗透试验, 得到了不同条件下碎石的渗透系数. 通过比较其渗透系数表明: 压实对碎石渗透性影响不大, 其结论为碎石渗沟、碎石盲沟、碎石渗井及相关工程的设计、施工提供了依据.

**关键词:** 碎石; 夯实; 相对密度; 渗透系数; 试验

**中图分类号:** TU521.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)05-0061-04

## A Study of Rammability of Crushed Stones and Its Effect on Permeability

TANG Zheng-guang<sup>1</sup>, WANG Su-da<sup>1</sup>, WU Pei-guan<sup>1</sup>,

YANG Zhi-ben<sup>2</sup>, PENG Zu-qiang<sup>3</sup>

( 1. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;  
2. Yuxi Designing Institute of Municipal Administration Planning, Yuxi, Yunnan 653001, China;  
3. Kunming University, Kunming 650216, China )

**Abstract:** Experiments with the relative density and permeability of crushed stones are performed in different conditions. The comparison of the resultant permeability modulus shows that the influence of density on permeability is slight. The results offer a reference basis for the design and construction of sewer, seepage pits, blind shafts and the like.

**Key words:** crushed stone; ramming; relative density; permeability modulus; experiments.

## 0 引言

碎石(无粘性粗粒土)在土木工程中是一种重要的建筑材料,它具有强度高、孔隙率大、渗透性强等特点.在工程中多用于提高地基强度,支撑上部构造,同时,排出地下水,减少地下水对上部构造的危害.但是,碎石在不同工程运用中,对于它的压实度,不同的工程技术人员有不同的看法,如在碎石盲沟施工中,有的工程技术人员认为不需要夯实,夯实会影响其渗透性,而有的工程技术人员认为需要夯实<sup>[1]</sup>,不夯实会使盲沟上部构筑物(如路面)发生沉降变形而破坏.夯实度如何掌握?夯实对碎石的渗透性有何影响?相关规范对此也没有明确界定,也没有相关资料借鉴.实践中,大家都是根据个人经验、理解进行设计、施工.致使工程施工过程中难于统一,对工程的正常使用产生了不同的影响.

碎石(无粘性粗粒土),其密实度不能仅用其孔隙比的大小来衡量.颗粒大小、形状、不均匀系数及粗粒含量不同的两组砂砾石,即使其孔隙比完全相同,可是其密实度有很大差别.因此,应按照实际孔隙比与极限孔隙比的相对关系,即相对密度指标表示其所处的密实状态.带着这些问题,对碎石进行了相对密度及渗透试验,以研究夯实对碎石的体积变化和渗透性能的变化影响,为碎石渗沟、碎石盲沟、碎石渗井及相关工程的设计、施工提供依据.

收稿日期:2005-07-14. 基金项目:国家自然科学基金项目(项目编号:40572159)及云南省自然科学基金项目(项目编号:2001E0001G,2005D0016M)资助.

第一作者简介:唐正光(1969~),男,讲师.主要研究方向:道路,岩土工程. E-mail:tzg1122@163.com

## 1 试验依据、试验仪器及材料

### 1.1 试验依据

本次试验按《土工试验操作规程》(相对密度试验按 SD128—029—87、碎石渗透试验按 SD128—31—87)进行.采用分层木锤夯实法测定碎石的人工夯实密度,采用振动压实法测定碎石的最大干密度,采用松填法测定碎石的最小干密度.垂直渗透仪测定碎石的渗透系数.

### 1.2 试验仪器

XM-300 型相对密度仪、GS-150 型垂直渗透仪

### 1.3 试验粒料

充分风干碎石,粒径:2.5~5 mm,5~10 mm,10~20 mm,20~50 mm 及级配碎石(为以上四种粒径各 8 kg 混合而成的级配碎石)共五组试样的试验.

## 2 碎石压实性能试验

### 2.1 最小干密度测定

采用人工松填灌注法,用铁铲把试样装入试样筒(样筒尺寸为:高  $H = 42$  cm,直径  $R = 30$  cm),松填时,注意使自由下落的距离保持在 2~5 cm 之间,填筑高度距样筒口 10 cm 左右时,用薄铁板把试样刮平,用钢直尺测量试样顶距样筒口的距离并记录,测量时沿筒壁四周测量至少 4 个点,之后取平均值作为  $H_1$ ,则试样高  $h_1 = H - H_1$ ,为降低最小与最大干密度的试验系统误差,采用平行试验,即最小干密度和最大干密度的试验采用同一试样平行进行.

### 2.2 人工木锤夯实填筑的干密度

试样均分 3 层,每层松填厚度大约为 10 cm,人工站立用木锤(重 1.8 kg,锤底面积为 7 cm × 11 cm)分层夯实,每层大约夯实 5 min,这时,碎石已基本密实,不再下沉变化,用薄铁板把试样刮平,用钢直尺测量试样顶距样筒口的距离并记录,测量时沿筒壁四周测量至少 4 个点,之后取平均值作为  $H_3$ ,则试样高  $h_3 = H - H_3$ .

### 2.3 最大干密度测定

把加重圆铁板(重 50 kg,厚 10 cm)放在测试试样上面,随即调节相对密度仪,开动振动台,转速为 300 r/min,振动 5 min,这时,试样体积已无变化,卸出加重板,放入薄铁板用直钢尺测量薄铁板距筒口的距离并记录,测量时沿筒壁四周测量至少 4 个点,之后取平均值作为  $H_2$ ,则此时试样高  $h_2 = H - H_2$ .

### 2.4 相对密度计算<sup>[1]</sup>

最小干密度:  $\rho_{d\min} = m_s / V_c$       最大干密度:  $\rho_{d\max} = m_s / V_s$

人工木锤夯实干密度:  $\rho_{d0} = m_s / V_t$       相对密度:  $D_r = (\rho_{d0} - \rho_{d\min}) / (\rho_{d\max} - \rho_{d\min}) \times \rho_{d\max} / \rho_{d0} \times 100$

$m_s$  为试样质量(g);  $V_c$  为试样松填体积( $\text{cm}^3$ ),  $V_c = \pi \times 15^2 \times h_1$ ;  $V_s$  为试样振动压实后的体积( $\text{cm}^3$ );  $V_s = \pi \times 15^2 \times h_2$ ;  $V_t$  为试样木锤夯实后的体积( $\text{cm}^3$ ),  $V_t = \pi \times 15^2 \times h_3$

表 1 碎石压实性能试验结果汇总比较

Tab.1 Comparison of consequence of experiment on density of crushed stone

项 目	粒 径				级配碎石
	2.5~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	20~50 mm	
最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.721	1.745	1.695	1.735	1.979
最小干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.373	1.386	1.378	1.349	1.691
人工木锤夯实干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.596	1.575	1.582	1.577	1.850
最大干密度 / 最小干密度	1.253	1.259	1.230	1.286	1.170
人工夯实干密度 / 最小干密度	1.162	1.136	1.148	1.169	1.094
相对密度 $D_r$ / %	67.3	60.2	72.1	65.1	59.6

### 3 碎石渗透试验

#### 3.1 试样制备

人工夯实试样制备:在垂直渗透容器内壁套上橡皮膜(厚 2 mm). 安装进出水段,分层装填试料并夯实,每层松填厚度为 10 cm,人工站立用铁锤(重 15 kg,锤面积为 7 cm × 11 cm)分层夯实,每层大约夯实 5 min,这时,碎石已基本密实,不再下沉变化,如此分层装填试料并夯实至预定高度,接上进水管,即可开始试验.

#### 3.2 试样饱和

把装好试样的容器与测压管和水头装置连通,开止水夹,分 2 次逐级提高供水箱水头,第二级提高至  $H_1 = H_2$  出口高程,充分排除容器底部的空气,直至测压管中无气泡为止. 对砂砾石、碎石和卵石,可按试样高度均分,每隔 30 min 提升一级,最后一级水头,宜略高于出水口. 最后,浸泡 12 h 后开始试验.

#### 3.3 试验方法

采用常水头法,其试验水头的坡降为 0.05 ~ 0.5. 肉眼观察,表面应无浑水和无细颗粒跳动. 开动秒表,同时用量筒接取经时间  $t$  由出水口流出的水量  $Q$ ,并记录进出口水头  $h_1$ 、 $h_2$  及水温  $T$ . 如此重复测记不少于 6 次,每次测定的水量,应不少于 20 cm<sup>3</sup>.

#### 3.4 渗透系数 $k_T$ 及 $k_{20}$ 的计算<sup>[2]</sup>

$$k_T = (Q \times L) / (A \times h \times t)$$

$$k_{20} = k_T \times \eta_T / \eta_{20}$$

$L$  为渗径,等于试样高度(cm);  $H$  为渗透水头(cm),等于进口水头  $h_1$  - 出口水头  $h_2$ ;  $A$  为试样断面积(cm<sup>2</sup>),试样筒直径为  $\phi 30$  cm;  $Q$  为时间  $t$  内的渗透水量(cm<sup>3</sup>);  $t$  为时间(s);  $k_T$  为水温为  $T^\circ\text{C}$  时的试样渗透系数(cm/s);  $k_{20}$  为水温为  $20^\circ\text{C}$  时的试样渗透系数(cm/s);  $\eta_T$  为  $T^\circ\text{C}$  时水的动力粘滞系数(kPa/s);  $\eta_{20}$  为  $20^\circ\text{C}$  时水的动力粘滞系数(kPa/s);  $\eta_T / \eta_{20}$  为水温为  $T^\circ\text{C}$  时的粘滞性修正系数,查《土工试验操作规程》(SD128 - 031 - 87) 温度校正系数图得出;孔隙比  $e = (\rho_w \times G_s) / \rho - 1$ ;  $G_s$  为试样(碎石)密度(2.7g/cm<sup>3</sup>);  $\rho_w$  为水的密度(1g/cm<sup>3</sup>);  $\rho$  为试样干密度(1g/cm<sup>3</sup>);

#### 3.5 渗透性试验结果

渗透性试验结果见表 2.

### 4 试验结果及分析

从以上试验结果分析得出:

1) 单级配碎石的最大干密度一般为最小干密度的 1.2 ~ 1.25 倍,即碎石压实后,体积将缩小 20% ~ 25%,如按 60cm × 60 cm 断面计算,如果碎石盲沟不产生侧向变形,则垂直向的变形下沉可达 12 ~ 15 cm. 如果碎石盲沟产生侧向变形,则实际沉陷会比这个数值还大,未夯实的碎石变形将会对上部建筑物产生严重影响. 这说明,在工程运用中,上部有建筑物时,碎石必须进行压实,否则,碎石受其上部荷载影响,体积缩小将引起上部构造的变形破坏,如路面结构层下的碎石盲沟,若不进行压实,将会造成后期路面的沉陷、开裂等破坏.

2) 级配碎石的密度比单级配碎石的密度提高很多. 松填状态约提高 1.23 倍,密实状态约提高 1.15 倍,人工夯实状态约提高 1.17 倍.

3) 碎石(含级配碎石)人工锤击夯实的相对密度一般在 60% ~ 70% 之间,这说明,人工填筑锤击夯实可达到碎石极限压实度的 60% ~ 70%,另外,人工木锤夯实与机械振动夯实相比,人工的夯击力是很小的. 碎石的密实度主要与其颗粒大小、形状、不均匀系数等有关,故碎石密实过程仅为碎石间的重新排列分布,所以不需要太大的夯击力,大的夯击力可使碎石局部挤碎,改变了碎石的形状,从而部分提高了碎石的密实度,不同于土壤(属于三相体)的密实度与压实方式及状态有关. 因此,碎石的压实,最好是机械压实,

若因操作面不足等原因不便进行机械压实,如碎石盲沟、渗沟等,至少应进行人工锤击夯实。

表2 碎石渗透试验结果比较

Tab.2 Comparison of consequence of experiment on permeability of crushed stone

碎石粒径 /mm	填筑 方式	碎石密度 /g · cm <sup>-3</sup>	碎石孔隙比 /%	渗透系数 $k_{20}$ (供水水头 为 53 cm)	渗透系数 $k_{20}$ (供水水头 为 75 cm)	平均渗 透系数 $k_{20}$	碎石松填与 人工夯实之 渗透系数比值
5 ~ 10	松 填	1.338	101.8	47.02	25.70	32.42	4.27
		1.356	99.1	27.28	29.70		
	人工夯实	1.818	48.5	6.97	3.94	7.60	
		1.533	76.1	10.08	9.42		
10 ~ 20	松 填	1.359	98.7	132.61	158.92	126.56	3.00
		1.303	107.2	95.81	118.90		
	人工夯实	1.561	73.0	37.88	44.70	42.23	
		1.571	71.9	46.81	39.52		
20 ~ 50	松 填	1.386	93.4	188.2	225.50	210.56	1.15
		1.298	108.0	191.16	237.38		
	人工夯实	1.603	68.4	191.99	206.47	182.64	
		1.520	77.6	94.34	237.74		
级配碎石	松 填	1.473	83.3	35.25	55.90	41.05	2.23
		1.469	83.8	36.38	36.68		
	人工夯实	1.655	63.1	25.59	18.51	18.43	
		1.653	63.3	15.36	14.25		

4) 碎石渗透系数与碎石粒径成正比. 碎石粒径越大,渗透系数越大;反之,渗透系数越小.

5) 根据碎石渗透试验的结果可得出:粒径为 20 ~ 50 mm 的碎石在松填和人工夯实的条件下,渗透系数变化不大. 一般碎石盲沟、渗沟的碎石粒径为 20 ~ 60 mm,故碎石盲沟、渗沟的碎石可进行夯实,夯实对渗透系数无大的影响. 而粒径为 20 mm 以下碎石在松填和人工夯实的条件下,渗透系数有较大的变化,达 3 倍以上.

6) 密级配碎石的密度比单级配碎石密度提高了,而渗透系数却降低了 10 个数量级,故在工程应用中,若无渗透要求,建议用密级配碎石;若有渗透要求,建议用单级配碎石.

## 5 结 论

1) 上部有建筑物的碎石盲沟、渗井等,碎石填筑时应进行夯实,上部没有建筑物的渗沟、渗井等,碎石填筑时可不进行夯实.

2) 碎石盲沟、渗井等,碎石夯实相对密度应在 60% 以上.

3) 对于由现在常用粒径 20 ~ 60 mm 的碎石材料建成的渗沟、渗井等构造物,夯实对渗透系数有影响,但影响不大.

## 参考文献:

- [1] 胡红卫,王苏达,唐正光. 双连拱隧道中隔墙防排水措施和方法[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2006,31(4):65-67.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 土工试验操作规程(相对密度试验按 SD128—029—87;碎石渗透试验按 SD128—031—87SD)[S]. 北京:水利水电出版社,1995.
- [3] 同济大学. 公路排水设计规范 JTJ018—97[S]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [4] 同济大学. 公路路基路面现场测试规程(JTJ059—95)[S]. 北京:人民交通出版社,1995.
- [5] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.