

成都富水砂卵石地层土体颗粒级配特性与强度分析

张延杰¹, 龚晓南²

(1. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650204; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 成都地铁已开通 13 条线路, 为我国砂卵石地层地铁建设打下良好基础。通过对该地区已有研究中涉及的卵石粒径调查搜集, 并对勘察数据进行统计, 再结合在建隧道区间的取土筛分检验, 得到了可代表成都砂卵石地层特性的砂卵石土样级配, 和满足室内粗粒土试验要求的颗粒级配, 此为成都地铁下穿土层经验总结, 并为富水砂卵石地层的颗粒级配参数选取提供借鉴。

关键词: 砂卵石土; 颗粒级配; 地铁隧道; 抗剪强度

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0368-08

Analysis on strength and characteristics of soil particle gradation in water-rich sandy cobble stratum in Chengdu

ZHANG Yan-jie¹, GONG Xiao-nan²

(1. Yunnan Dianzhong Water Diversion Engineering Co., Ltd., Kunming 650204, Yunan, China;

2. Coastal and Urban Geotechnical Engineering Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Thirteen lines of Chengdu Metro have been put into operation, laying a good foundation for metro construction in sandy cobble stratum. Based on the investigation and collection of pebble particle size involved in the existing research in this area, and also the statistics of the survey data, combined with the soil sampling and screening analysis of the tunnel section under construction, the required samples are obtained. The sandy pebble soil sample represents the sand pebble stratum in Chengdu, and the coarse-grained soil sample meets the requirements of the indoor test. The construction experience of Chengdu Metro is summarized in this paper, and the results can be used as a practical reference for the selection of grain gradation parameters in water-rich sandy cobble stratum.

Key words: sandy cobble stratum; particle gradation; metro tunnel; shear strength

0 引 言

颗粒级配是影响土体渗透性和力学强度的重要因素^[1-3]。砂卵石土颗粒受生成环境的影响, 呈现出不同形态、不同尺寸, 而不同粒度的颗粒介质对其力学性能有很大的影响^[4]。目前国内大范围存在砂卵石地层的地铁城市主要有北京、沈阳、成都地区和处于深层地铁隧道施工的广州地区。其中, 北京地铁隧道砂卵石地层卵石含量50%~70%, 粒径主要分布在20~60 mm区间, 偶见漂石分布, 但基本无地下水; 沈阳地铁砂卵石地层卵石含量5%~20%, 粒径主要分布在20~45 mm区间, 基本无漂石, 地下水位在地表下4.5~10 m^[5]; 随着城市发展

需要和地铁线路的增多, 广州等城市的地铁隧道工程, 在大埋深下的盾构施工中面临穿越砂砾石地层。而成都地区的地铁隧道工程呈现“三高”特点^[6-7]: 地下水位高、卵石含量高、地层强度高, 工程和水文地质特征为其他城市地铁隧道工程所罕见。由于富水砂卵石地层的地质特性, 国外大中型盾构隧道建设中较少见到类似实例分析。基于土质与级配的不同, 关于国外掘进参数的研究规律是否适用于该地层, 也可借鉴国外较为成熟的研究方法, 进行该地层下的掘进参数研究分析。祝林^[8]提到成都地区饱和砂卵石土的内摩擦角为39°, 但并未指明地层形成时期与砂卵石类别。相关研究在数值模拟研究中土体参数的选取上和室内试验得出的

土体物理力学参数是有差异的^[9],并同时以成都地铁2号线站东广场站为研究背景时,在选择物理力学参数值存在较大不同^[10-11]。陈盛金^[12]通过勘探查明的砂卵石层,根据试验发现,地铁2号线部分车站的第四系人工填土层和第四系全新统冲积层砂土、卵石土等均为松散堆积,压缩性高、荷重易变形的特点。

数值分析方面,国内相关研究较多并取得很大进展,包括细粒土层下的有限元分析、粗粒土层下的有限差分软件和离散元分析。室内试验方面,由于砂卵石土(粗粒土)试验操作的复杂性,其试验周期冗长并且试验费用高。成都地铁目前已开通13条线路,开通后成都轨道交通运营总里程将达到558 km,成都地铁在建线路共有10条,截至目前在建线路总长仍超过200 km。因此针对选取具有代表富水砂卵石地层的成都地区确定土体颗粒级配是一项基础性的研究,同时又是一项极其重要的研究。

1 地质和水文条件对隧道施工的影响

1.1 地质条件对地铁隧道施工影响

成都平原处于新华夏系第三沉降带之川西褶皱带的西南缘,为一断陷盆地。成都地铁线路场地内及其附近无影响工程稳定性的不良地质作用,为稳定场地。卵石地层主要分布在第四系全新统冲洪积层(Q₄)和第四系上更新统冲洪积层(Q₃),两种地层均具二元结构。其中Q₄地层上组为褐色黏土,灰黄色粉质黏土、粉土、灰黄-灰色砂土,沉积韵律明显;下组为灰白-褐灰色卵石土,混有20%~40%砂及少量黏性土,常有砂薄层或透镜体,一般分为砂层、圆砾、松散、稍密、中密、密实等亚层。Q₃地层上组为黄-褐黄色黏土,粉质黏土、粉土、砂土,裂隙发育,黏土可具胀缩性;下组为黄灰色卵石土,混砂及黏性土,有砂薄层或透镜体,一般分为砂层、圆砾、松散、稍密、中密、密实等亚层。卵石层按照颗粒大小和密实程度可分为稍密、中密和密实卵石。其中稍密卵石以灰褐色为主,湿-饱和,粒径一般为30~100 mm,成分以岩浆岩为主,磨圆度较好,卵石含量约65%~70%,含少量漂石,充填物为砾石、细砂、中砂,N120动力触探击数7~10击;中密卵石呈黄褐色-黄色,中密,饱和,卵石粒径一般40~100 mm,呈亚圆形,含65%~70%的卵石,充填中砂、砾石和少量黏土,N120修正击数一般为7~10击;密实卵石呈黄-黄褐色,密实,饱和,卵石粒径一般40~100 mm,个别大于

15 cm,呈亚圆形,含70%~80%的卵石,充填中砂、砾石和少量黏土,修正击数大于10击。

砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层,其结构松散、卵石含量高、地下水位高、渗透性强并分布少量漂石。富水砂卵石为主的地层中粒径大于20 mm以上的达到60%~80%,其最大粒径超过300 mm;卵石硬,最高硬度达到230 MPa,盾构刀具破碎土体困难,施工进度慢、刀具磨损严重,换刀频繁;高富水,砂卵石层渗透系数达到18~25 m/d。盾构施工时,既容易流失细颗粒形成空洞,发生砂土坍塌或沙漏,又易造成土压不稳,掘进参数失调,对施工环境造成隐患。

1.2 水文条件对地铁隧道施工影响

成都市属中亚热带湿润气候区,雨量充沛,多年平均气温16.2℃,极端最高气温38.3℃,多年平均降雨量947.0 mm,降雨主要集中在5—9月。

(1) 补给充足:孔隙潜水赋存于细砂、中砂、卵石层中。以成都地铁3号线标段为例,在马鞍北路站—李家沱站区间YDK32+549~YDK32+729范围内为沙河I级阶地,属于侵蚀-堆积地貌。主要受大气降水、地表河水及来自NW方向的侧向地下径流补给,土层孔隙水相互间的水力联系较为紧密,相互补给。

(2) 水位埋深浅:地铁隧道标段基本处于II级阶地区,丰水期地下水位埋深一般3~5 m,水位年变化幅度一般在2~3 m之间。孔隙浅水位年变化幅度为1~3 m,丰水期最高水位埋深约2~4 m,正常水位约3~5 m,因施工降水,稳定水位埋深8~14 m。

(3) 渗透性强:卵石层渗透系数约为18~25 m/d,均属强透水性。

上层滞水水量相对小,对地下工程基本无影响。区间穿越沙河、府河以及洪渠等地表水。沿线河流,尤其是流经市区段落,已受到人为改造,河床深度、流量以及洪水位等均已受到人为控制。孔隙浅水位在砂卵石地层中为强透层。其水量丰富,水位变化不大,对地铁施工影响较大,但不排除区段局部地段有富水条件,储藏有一定裂隙水,对地铁工程产生一定影响。

2 富水砂卵石土力学特性

2.1 地铁隧道下穿地层统计分析

调查成都城市轨道交通地铁1、2、3号线与地铁环线7号线进行勘察分析,调查数据如下:

(1) 1 号线

地铁 1 号线一期工程盾构隧道分为 4 个标段 11 个区间。胡茜^[13] 提到地铁一期工程 Q_3^2 地层分布于桐梓林以北的沿线地带的二级阶地上, 有 Q_4 冲积层分布的地带埋于其下。 Q_3^1 地层分布于桐梓林以南的地铁一期工程沿线地带的二级阶地上, 在桐梓林以北地带, 埋藏于 Q_3^2 地层之下。杨书江等^[14] 提到成都地铁 1 号线试验段工程主要下穿卵石地层, 局部位置穿越细砂层和泥岩层。线路基本沿人民南路中部敷设, 分省体育馆路—倪家桥站区间、倪家桥站—桐梓林站区间、桐梓林站—火车南站站区间 3 个区间。

魏龙海^[15] 通过反复多次调整三轴数值试验模型中的细观参数, 使之与成都地铁 2 号线地铁勘察资料的统计分析结果基本一致。有关研究提到成都地区饱和砂土层的内摩擦角为 39° , 但并未指明地层形成时期与砂卵石类别^[8]。文献[16]提到成都地铁 1 号线一期工程盾构 1 标区间工程盾构施工穿越土层主要为卵石土 (Q_3)。

(2) 2 号线

调查中发现, 在数值模拟研究中土体参数的选取上和室内试验得出的土体物理力学参数是有差异的^[9]。

表 1 和表 2 的数据显示, 两位学者^[10-11] 同时以成都地铁 2 号线站东广场站为研究背景时, 在选择物理力学参数值存在较大的不同。

(3) 3 号线

调查地铁 3 号线的 4 个隧道区间(驷马桥北站—驷马桥站—李家沱站—马鞍北路站)标段的勘

察报告, 得出盾构隧道下穿的砂卵石地层的主要组成情况, 如图 1 所示。

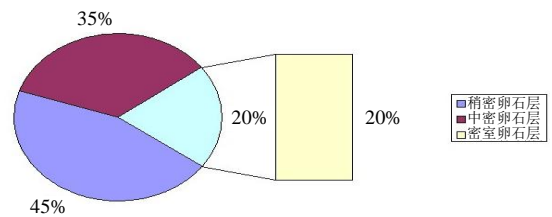


图 1 3 号线隧道区间穿越地层分布图

Fig. 1 Strata distribution map traversed by line 3 tunnel section

(4) 7 号线

对 7 号环线 31 个区间的勘察资料进行调查研, 然后将隧道主要下穿的卵石地层物理力学参数进行统计分析, 得到的抗剪强度值统计情况如表 3 所示。

a) 中密砂卵石地层

中密砂卵石地层的天然状态(以下简称天然)抗剪强度摩擦角值 $\varphi=38^\circ$, 降水后 $\varphi=45^\circ$ 的结果统计中包含 13 个区间, 分别为茶店子路站—花照壁站区间、文化宫站—清江西路站区间、花照壁站—交大路口站区间、交大路口站—九里堤路口站区间、金沙博物馆站—一品天下站区间、九里堤路口站—城北客运中心站区间、清江西路站—金沙博物馆站区间、清水河大桥站—文化宫站区间、神仙树西站—太平园站区间、武侯大道站—清水河站区间、一品天下站—茶店子站区间、八里庄—成都理工大学站区间、川师站—琉璃厂站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=38^\circ$, 降水后 $\varphi=44^\circ$ 的统计有 1 个区间, 为火车北站—驷马桥站区间。

表 1 土层物理力学参数指标^[10]

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer^[10]

层号	土(岩)名称	层厚/m	$\rho/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E_0/MPa	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
①	黏性土	17.0	20.0	8	35	16
②	砂卵石(含黏土)	8.0	21.0	55	5	35
③	泥岩	25.0	23.0	3 000	600	43

表 2 土层物理力学性质指标^[11]

Table 2 Physical and mechanical property indexes of soil layers^[11]

土类名称	层厚/m	$\rho/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	E_0/MPa	μ
①黏性土	7.5	20.0	40	18	13	0.33
②黏性土	10.0	19.5	35	14	8	0.26
砂卵石	7.0	22.0	5	38	20	0.29
强风化泥岩	6.0	21.5	300	30	100	0.25
中风化泥岩	29.5	23.0	600	32	3 000	0.25

表 3 7 号线隧道区间下穿的砂卵石土层的抗剪强度指标
Table 3 Shear strength indexes of sand cobble soil layers under tunnel section of line 7

岩土	天然 $\varphi/(^\circ)$	降水后 $\varphi/(^\circ)$	区间组数
中密砂卵石	38	45	10
密实砂卵石	42	50	10
中密砂卵石	38	44	1
密实砂卵石	46	50	1
中密砂卵石	38	45	2
密实砂卵石	47	52	2
中密砂卵石	35	42	2
密实砂卵石	42	48	2
中密砂卵石	37	42	2
密实砂卵石	42	46	4
中密砂卵石	36	38	1
密实砂卵石	40	50	2
中密砂卵石	38	45	1
密实砂卵石	42	52	1
中密砂卵石均值	37.47	43.95	19
密实砂卵石均值	42.45	49.36	22

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=35^\circ$, 降水后 $\varphi=42^\circ$ 的统计有 2 个区间, 分别为二仙桥站—成都理工大学区间和驷马桥站—八里庄站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=37^\circ$, 降水后 $\varphi=42^\circ$ 的统计有 2 个区间, 分别为驷马桥站—八里庄站区间和东区医院站—二仙桥站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=36^\circ$, 降水后 $\varphi=38^\circ$ 的统计有 1 个区间, 为太平园站—武侯大道站区间。

b) 密实砂卵石地层

密实砂卵石地层的天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=42^\circ$, 降水后 $\varphi=50^\circ$ 的统计有 10 个区间, 分别为茶店子路站—花照壁站区间、文化宫站—清江西路站区间、花照壁站—交大路口站区间、交大路口站—九里堤路口站区间、金沙博物馆站—一品天下站区间、九里堤路口站—城北客运中心站区间、清江西路站—金沙博物馆站区间、清水河大桥站—文化宫站区间、武侯大道站—清水河站区间和一品天下站—茶店子站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=46^\circ$, 降水后 $\varphi=50^\circ$ 的统计有 1 个区间, 为火车北站—驷马桥站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=47^\circ$, 降水后 $\varphi=52^\circ$ 的统计有 2 个区间, 分别为八里庄—成都理工大学站区间和川师站—琉璃厂站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=42^\circ$, 降水后 $\varphi=48^\circ$ 的统计有 2 个区间, 分别为二仙桥站—成都理工大学站区间和驷马桥站—八里庄站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=42^\circ$, 降水后 $\varphi=46^\circ$ 的统计有 4 个区间, 为东区医院站—二仙桥站区间、驷马桥站—八里庄站区间、建材南路站—成都东客站区间和成都东客站—沙河铺站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=40^\circ$, 降水后 $\varphi=50^\circ$ 的统计有 2 个区间, 分别为太平园站—武侯大道站区间和城北客运中心站—火车北站区间。

天然抗剪强度摩擦角值 $\varphi=42^\circ$, 降水后 $\varphi=52^\circ$ 的统计有 1 个区间, 为神仙树西站—太平园站区间。

由于成都地铁近年来施工线路多、施工体量大、工期紧, 而对于盾构穿越地层的土质分析方面仍处于经验理论阶段, 存在摸索性。从地铁 2 号线的研究调查中可以看出, 对于地质的分析仍存在较大差异, 如勘察数据与数值分析数据的差别; 不同学者对于同一工程的地层参数选取也有所不同。通过地铁 3 号线的研究调查, 得到了下穿砂卵石地层的主要地层组成情况。通过地铁 7 号线的研究调查中可以看出, 同一家勘察机构通过理论经验得出的 31 个区间的勘察数据同样存在差异, 这说明砂卵石地层由于级配的较小差别, 在定义土质物理力学特性的表述和判定就存在较大变化; 并且以上砂卵石抗剪强度的统计数据是基于经验公式得出, 有必要开展砂卵石土颗粒级配选定的研究。

2.2 砂卵石土样级配

根据成都地铁隧道下穿地层的统计数据, 现选取具有代表性盾构区间, 即地铁交叉站点的区间, 对其勘察数据中的砂卵石土进行粒径分析, 如火车北站—驷马桥站区间隧道(火车北站为 7 号线与 1 号线交叉车站)穿越砂卵石土的粒度见图 2; 金沙博物馆站—一品天下站区间隧道(一品天下为 7 号线与 2 号线交叉车站)穿越砂卵石土的粒度见图 3; 太平园站—武侯大道站区间隧道(太平园站为 7 号线与 3 号线交叉车站)穿越砂卵石土的粒度见图 4; 清江西路站—文化宫站区间隧道(文化宫站为 7 号线与 4 号线交叉车站)穿越砂卵石土的粒度见图 5。

通过观察图 2~5, 对 83 组砂卵石土样本进行统计。鉴于勘察数据中中密砂卵石土级配的缺失, 选取李家沱站—驷马桥站和驷马桥站—昭觉寺南路站 2 个区间隧道(驷马桥站为 7 号线与 3 号线交叉车站)下穿卵石土进行现场取样分析, 其粒度

分析如图6和图7所示。

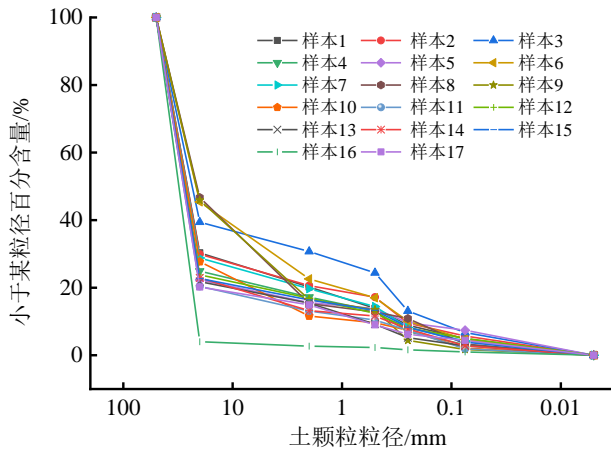


图2 火一驷区间隧道穿砂卵石土 (Q₃) 粒度分析曲线图
 Fig. 2 Grain size curves of Huo-Si section tunnel crossing sandy pebble soil layer (Q₃)

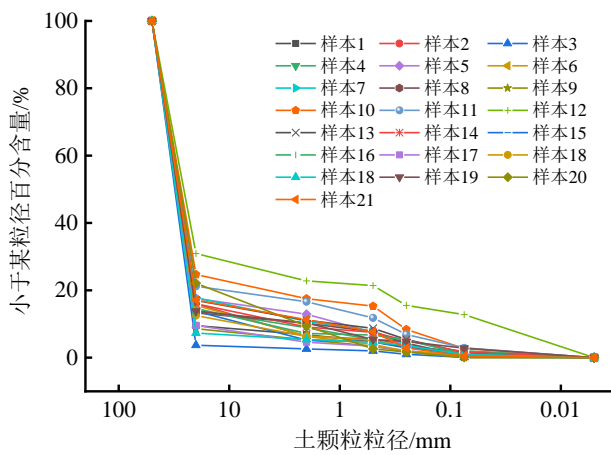


图3 金一一区间隧道穿砂卵石土 (Q₃) 粒度分析曲线图
 Fig. 3 Grain size curves of Jin-Yi section tunnel crossing sandy pebble soil layer (Q₃)

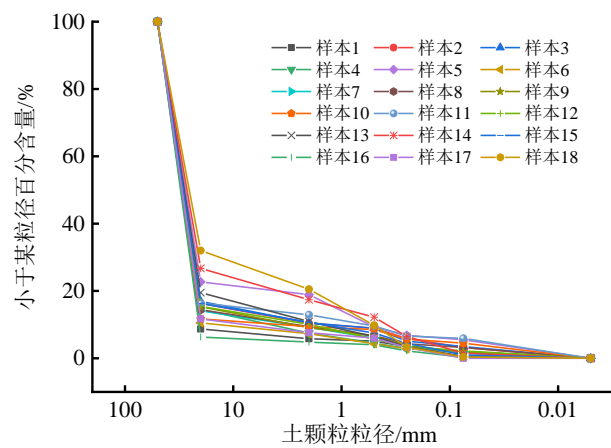


图4 太一武双楠区间隧道穿砂卵石土 (Q₃) 粒度分析曲线图
 Fig. 4 Grain size curves of Tai-Wushuangnan section tunnel crossing sandy pebble soil layer (Q₃)

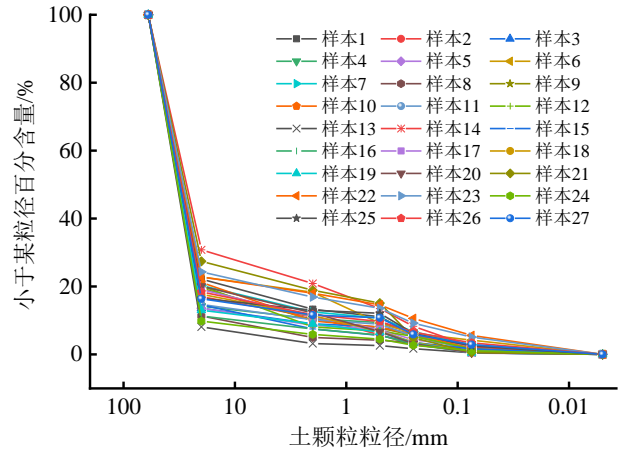


图5 清一文区间隧道穿砂卵石土粒度分析曲线图
 Fig. 5 Grain size curves of Qing-Wen section tunnel crossing sandy pebble soil layer

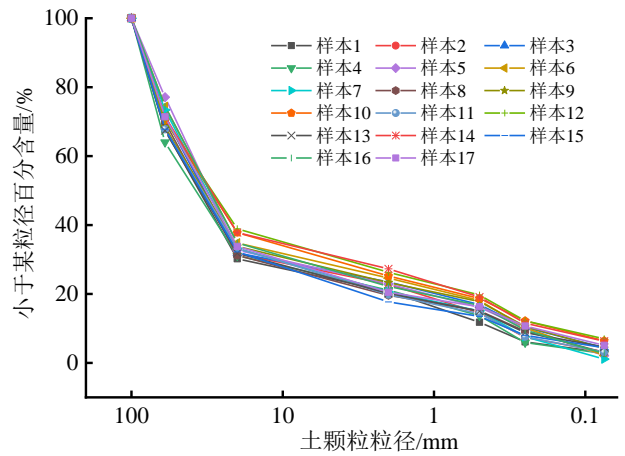


图6 中密砂卵石土粒度分析
 Fig. 6 Grain size analysis of medium dense sand pebble soil

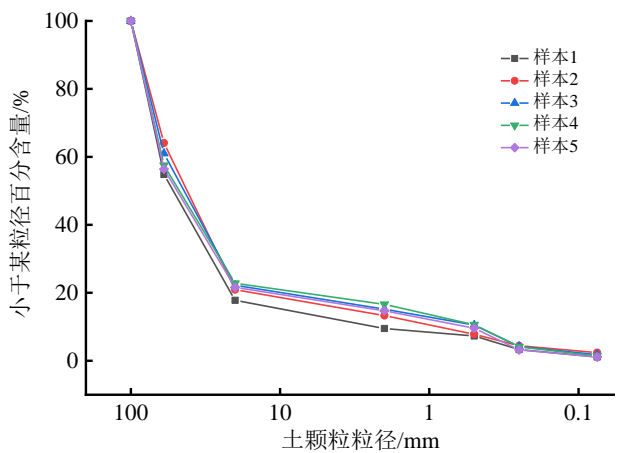


图7 密实砂卵石土 (Q₃) 粒度分析
 Fig. 7 Grain size analysis of dense sand pebble soil (Q₃)

通过对已有研究中涉及的卵石粒径进行调查,对以上勘查数据的统计,再加上在建隧道区间拟开挖区域的取土筛分检验,得到了2组统计砂卵石土平均级配和3组现场勘查土样的平均级配,即卵石

土中的 3 组中密卵石 (级配 1) 和 2 组密实卵石 (级配 2) 平均级配代表值, 每组筛分结果平均值如图 8 所示, 为满足室内试验要求, 采用等量替代法将天然砂卵石土中大于 60 mm 粒径的超径料剔除后的颗粒级配如图 9 所示。

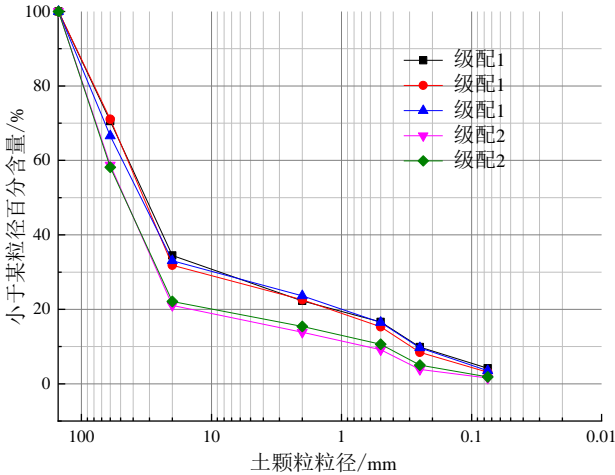


图 8 土粒颗粒级配曲线图

Fig. 8 Gradation curves of soil particle size

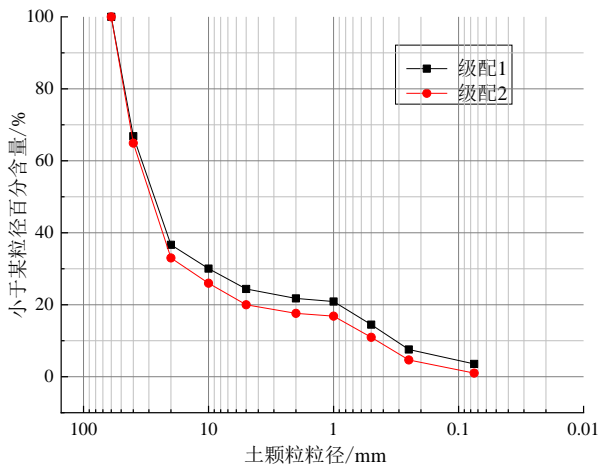


图 9 剔除超径粒后的颗粒级配曲线图

Fig. 9 Particle gradation curves after excluding oversize particles

3 试验验证

(1) 直剪试验

借助大型粗颗粒土直剪系统, 采用应变控制式的平推法直剪试验方法, 取级配 1 (中密卵石土) 配制的重塑土, 圆柱体试件直径 618 mm×500 mm。根据试验条件, 配制级配 1 土样, 轴向荷载级数设定约为 100、200、300、400、500 kPa 五级。

(2) 砂卵石土剪切试验结果与分析

绘制剪应力-剪切位移关系曲线 (见图 10), 求得内摩擦角 ϕ 和咬合力 c (又称黏聚力) [17-20], 见图 11 (a)。得出天然状态下级配 1 土样的 $c=60.93$ kPa,

$\phi=39.03^\circ$ 。按照“将 c 值定为 0”后, 来计算摩擦角, 此时, 轴向应力-剪应力曲线最佳关系曲线见图 11 (b), 计算得出其内摩擦角 ϕ 为 44.26° , 这与勘察数据中砂卵石土降水后的抗剪强度均值相近, 偏差率仅为 0.7%。

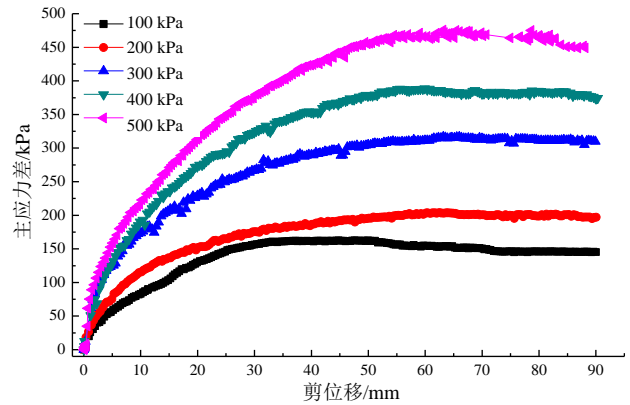
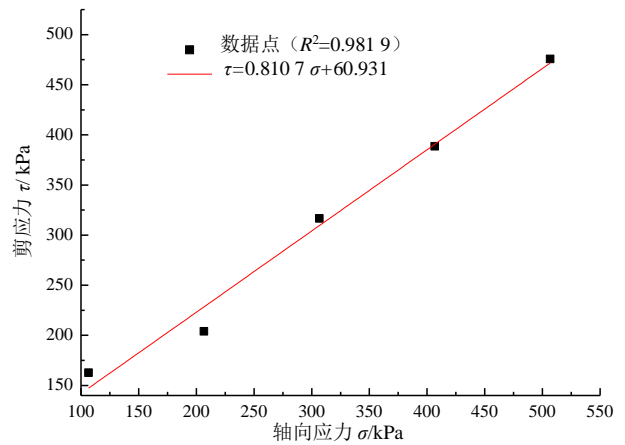
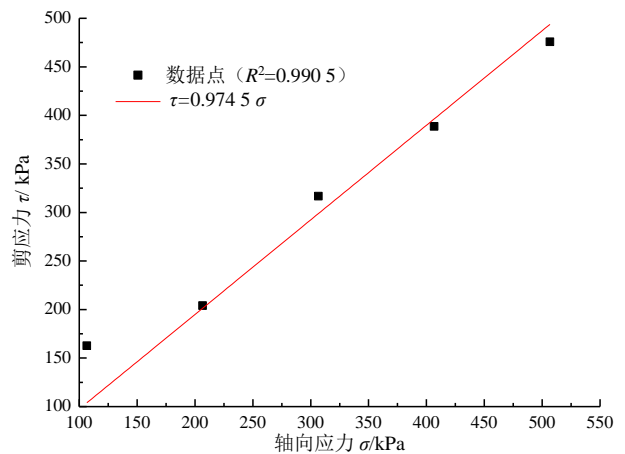


图 10 级配 1 土样在天然风干条件下不同轴压 τ - s 关系曲线

Fig. 10 τ - s relation curves of graded 1 soil samples under different axial pressures under natural air-drying conditions



(a) 拟合曲线 1



(b) 拟合曲线 2

图 11 级配 1 土样在天然风干条件下 τ - σ 关系曲线图

Fig. 11 τ - σ relation curves of graded 1 soil samples under natural air-drying condition

4 结 论

通过对已有研究中涉及的卵石粒径进行调查,对大量勘查数据的统计,再加上在建隧道区间的取土筛分检验,得到了可代表成都砂卵石地层的砂卵石土样级配,和满足室内粗粒土试验要求的颗粒级配。

级配1天然砂卵石土室内大剪试验得到内摩擦角 φ 为 39.03° ,咬合力 c 为 60.93 kPa 。按照“ c 值定为0”的数据处理来计算摩擦角,得出其内摩擦角为 44.26° ,这与勘察数据中砂卵石土降水后的抗剪强度均值相近,验证了级配选取的有效性。

参考文献

- [1] 关辉. 土体标度分布参数与物理力学指标关系[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2019.
GUAN Hui. Relationship between soil scaling parameters and physical and mechanical indexes[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [2] 张德军, 卢世英, 张国栋, 等. 长江南京段砂卵石地层特性研究及盾构施工建议[J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(12): 55-56.
ZHANG De-jun, LU Shi-ying, ZHANG Guo-dong, et al. Study on the characteristics of sand and gravel strata in the Nanjing section of the Yangtze River and suggestions for shield construction[J]. Heilongjiang Jiaotong Keji, 2019, 42(12): 55-56.
- [3] 郭浩阳, 彭国峰, 韩爱民, 等. 复合地层中不同盾构掘进参数下碴土的颗粒特征研究[J]. 隧道建设, 2019, 39(11): 1848-1855.
GUO Hao-yang, PENG Guo-feng, HAN Ai-min, et al. Particle characteristics of muck of composite strata under different shield tunneling parameters[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1848-1855.
- [4] 徐刚, 姚勇, 邓勇军, 等. 砂卵石土颗粒组成对剪切强度的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(5): 51-54.
XU Gang, YAO Yong, DENG Yong-jun, et al. Effects of particle composition of sandy pebble soil on shear strength[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(5): 51-54.
- [5] 晏启祥, 郑代靖, 何川, 等. 富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 713-719.
YAN Qi-xiang, ZHENG Dai-jing, HE Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 713-719.
- [6] 陈中. 成都地铁盾构隧道施工风险分析及策略[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
CHEN Zhong. Risk analysis and strategy of shield tunnel construction in Chengdu metro[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [7] 郑小雪. 砂卵石地层盾构施工对邻近建筑物稳定性影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
ZHENG Xiao-xue. Research on the influence of shield construction in sandy cobble stratum on the stability of adjacent buildings[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [8] 祝林. 地铁振动作用下隧道周围饱和砂卵石土的动力特性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
ZHU Lin. Research on dynamic characteristics of saturated sand and pebble soil around tunnel under metro vibration[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [9] 刘宇. 成都地铁车站深基坑动态施工研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LIU Yu. Research on dynamic construction of deep foundation pit in Chengdu metro station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [10] 吴兵. 成都地区地铁车站深基坑排桩支护结构受力规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
WU Bing. Study on the force law of pile supporting structure in deep foundation pit of subway station in Chengdu area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [11] 陈泽昌. 成都地铁2号线站东广场站基坑监测及位移反分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
CHEN Ze-chang. Foundation pit monitoring and displacement back analysis of station east square station of Chengdu metro line 2[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [12] 陈盛金. 成都地铁春熙路站砂卵石地层深基坑工程变形规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
CHEN Sheng-jin. Research on deformation law of deep

- foundation pit engineering in Chunxi road station of Chengdu metro[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [13] 胡茜. 成都地铁区间隧道盾构法可行性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
HU Qian. Feasibility analysis of shield tunneling method in Chengdu metro section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [14] 杨书江, 孙谋, 洪开荣. 富水砂卵石地层盾构施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [15] 魏龙海. 基于颗粒离散元法的卵石层中成都地铁施工力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
WEI Long-hai. Research on construction mechanics of Chengdu subway in pebble layer based on particle discrete element method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [16] 魏林春. 成都地铁1号线砂卵石地层盾构施工对周围土体扰动影响分析[C]//第四届中国国际隧道工程研讨会论文集, 2009: 489-493.
WEI Lin-chun. Analysis of influence of shield tunnel construction in sandy gravel stratum of Chengdu Metro line 1 on surrounding soil disturbance[C]// Proceedings of the 4th China International Tunnel Engineering Symposium, 2009: 489-493.
- [17] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987(5): 61-67.
GUO Qing-guo. Experimental study on the shear strength characteristics of coarse-grained soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(5): 61-67.
- [18] 陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究[J]. 工程力学, 1994, 11(4): 56-63.
CHEN Xi-zhe. Research on the strength of the coarse grained soil and the interlocking force[J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(4): 56-63.
- [19] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2255-2260.
LI Zhen, XING Yi-chuan. Effects of dry density and fine particle content on shear strength of sand pebble and gravel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2255-2260.
- [20] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 47(4): 728-733.
XU Xiao-feng, WEI Hou-zhen, MENG Qing-shan, et al. Effect of direct shear rate of geotechnical mechanics on strength and deformation characteristics of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 47(4): 728-733.