

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S2.035

# 花岗岩残积土填料路用工程特性室内试验研究

尹 松<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 杨爱武<sup>3</sup>, 穆 坤<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, 湖北 武汉 430071; 2. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007;  
3. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300381)

**摘 要:** 为了研究花岗岩残积土的路用工程特性, 通过击实试验、承载比 CBR 试验、固结试验以及室内基床系数试验分析了该类材料压实性能及基本力学特性, 对压实度为 92% 的最优含水率和饱和压实土样进行了循环加载试验, 研究了动力荷载作用下土体的变形特性。结果表明, 花岗岩残积土在  $K$  为 91% ~ 97% 时压实功效率较高, 提高压实度对于增强土体局部抗变形能力较为有效; 采用室内三轴法得到的基床系数  $K_{30}$  值为 188.25 MPa/m; 最优含水率下花岗岩残积土动力变形稳定性较好, 但含水率增加会大幅度增加土体塑性变形, 降低土的动弹性模量, 不利于变形稳定。所以作为路堤填料, 应考虑作为受气候与动荷载影响较小的下路堤备用填料, 作为铁路路堤本体及公路上、下路路床填料, 应在进行土性改良且满足要求的论证基础上取舍。研究成果可为花岗岩残积土填料的工程应用及土体改良提供技术参考。

**关 键 词:** 花岗岩残积土; 承载比试验 (CBR); 基床系数; 含水率; 累积塑性应变; 动弹性模量

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 增 2 - 0287 - 07

## Indoor experimental study of road performance of granite residual soil for subgrade filling materials

YIN Song<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, YANG Ai-wu<sup>3</sup>, MU Kun<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University, Zhengzhou, Henan 450007, China;  
3. Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chenjian University, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** In order to research the road performance of granite residual soil subgrade filling materials, compaction characteristics and mechanical properties of compacted residual soil are researched by using compaction test, California bearing ratio (CBR) test consolidation test and indoor test method for coefficient of subgrade reaction. The deformation properties of the soil under dynamic loads are studied by using cyclic loading test on the optimum moisture content and saturated samples. The results show that compaction works more efficiently with  $K$  of 91%-97% for granite residual soil. Improving the degree of compaction is effective to enhance the local deformation resistance of the soil.  $K_{30}$  was obtained from indoor triaxial test, and the value is 188.25 MPa/m. The dynamic stability of granite residual soil is comparatively well under the optimum moisture content. However the plastic deformation increases substantially and dynamic elastic modulus reduced with water content increasing. The increasing water content is not conducive to the deformation stability of the soil. So as filling materials, it shall be considered as spare materials of embankment which suffers low effect of environment. If used as subgrade body and highway roadbed, shall be modified and making choice based on the requirements of deformation. This study may provide technical reference for the construction process of granite residual soil as embankment filling and soil conditioning.

**Keywords:** granite residual soil; California bearing ratio (CBR) test; subgrade coefficient  $K_{30}$ ; moisture content; cumulative plastic strain; dynamic elastic modulus

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41372314); 中国科学院科技服务网络计划项目 (No.KFJ-EW-STS-122)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41372314) and Service Network of Science and Technology Plan Projects, Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-122).

第一作者简介: 尹松, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事特殊土力学及其工程特性研究。E-mail: ysong87@yahoo.com

通讯作者: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

## 1 引言

我国的轨道交通及高速公路工程一直是国家交通事业发展的重点,路基在服役期内应保证线路平顺的要求。路基填料一般选用力学状态较好的碎石、砾石等粗粒材料或物理力学性质较好的细粒土<sup>[1]</sup>。随着我国经济建设的快速发展,工程量逐年增加,工程范围逐步推广,工程建设不得不面对大量开山碎石、沿河取石以满足优质土石方需求和合理处置大量不符合填料标准的废弃料两大难题,如果能深入研究废弃料土体工程特性,在满足工程要求的前提下拓宽填料的适用范围将有利于节约工程成本,满足环境保护和可持续发展的总体要求,具有一定的研究价值。

花岗岩残积土在我国南方地区分布广泛,天然状态下表现出不良物理特性和良好力学特性好的异常组合,属区域性特殊土,对其进行工程应用一直受到研究者关注的重点<sup>[2]</sup>。通过文献资料及规范<sup>[1,3]</sup>要求可知,花岗岩残积土属D组填料,不宜直接填筑路基本体;规范中对细粒土填料的分组主要是依据土体的塑性指数,没有考虑土体粗粒组含量的影响。王仲锦等<sup>[1]</sup>通过对铁路路基填料分类的深化研究,考虑了粗粒对细粒土填料的影响,将含砂高液限黏土细分为D1组料,认为较普通D组填料性质好。基于强度影响机制,杨广庆等<sup>[4]</sup>对多组填料进行物理、力学试验发现,在标准试验方法和相同的试验条件下黏粒组矿物成分、颗粒曲线分布情况及

黏粉比对同塑性指数土体的土的承载比 CBR 值影响较大。陈晓平等<sup>[5]</sup>开展物理特性和剪切强度特征的试验研究表明,花岗岩残积土兼具高液限土和粗粒土的特征,认识其基本特性需考虑粗粒含量的影响。在工程应用方面,刘鑫等<sup>[6]</sup>通过室内及现场填筑试验研究得到了高液限黏土和含砂高液限黏土可用于公路路堤直接填筑,但要控制填筑深度的结论。

花岗岩残积土虽为高液限土质,但粗粒含量多,粗粒料的增加有益于抑制土体水敏性,提高土体强度及刚度特性,从填料分类角度分析该类填料性能优于D组料。目前对其工程应用的研究主要集中在物理与路用性能研究,针对交通荷载的实际特点,综合考虑填料静力学指标及循环荷载作用下土体动力特性的研究较少,对于花岗岩残积土工程特性的认识仍具有较大研究空间。

本文结合路堤填料的实际应力状态,从路用性能和不同富水条件下土体动力变形特性两方面研究花岗岩残积土的路用工程特性,为该类材料作为路堤填料的工程应用提供技术积累。

## 2 土样性质及研究方法

### 2.1 土样

试验土样取自广东省台山市水步镇境内,取样场地为花岗岩残积土区丘陵地貌,取土深度为2.0~4.0 m,根据铁路工程土工试验规程<sup>[7]</sup>得到的土样基本物理力学指标见表1,级配曲线如图1所示。

表1 花岗岩残积土的物理力学特性指标

Table 1 Physico-mechanical characteristic parameters of granite residual soil

土粒相对密度 $G_s$	天然密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	天然含水率 $w / \%$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 $I_p$	自由膨胀率 $\delta_e / \%$	无侧限抗压强度 $q_u / \text{kPa}$	颗粒(mm)组成 / %			
								细砾 $> 2$	砂粒 $0.075 \sim 2$	粉粒 $0.075 \sim 0.005$	黏粒 $< 0.005$
2.77	1.86	30.2	69.9	38.3	31.6	13.1	179.64	13.5	25.5	29.6	31.4

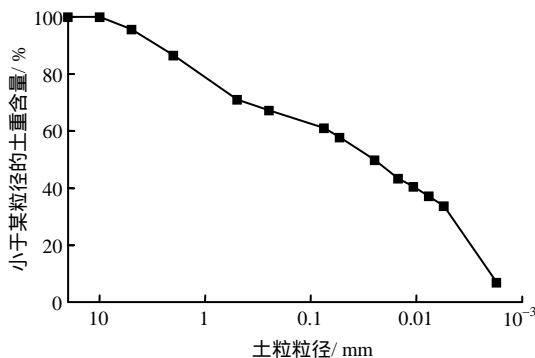


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curve

从图1可以看出,试样具有天然含水率大,液塑限高,自由膨胀率小的特点通过级配曲线及物性指标可知,属含砂高液限黏土,  $C_u > 10$ ,颗粒分布范围较大,但  $C_c < 1$ ,存在间断级配,颗粒分布呈现“两头多,中间少”的特点。

表2为土样矿物成分。试样主要成分为黏土矿

表2 花岗岩残积土的矿物成分

Table 2 Mineral compositions of residual soil

石英	黄铁矿	三水铝石	黏土矿物总量	黏土总量 / %	
/%	/%	/%	/%	高岭石	伊利石
8	2	3	87	95	5

物和石英，含少量黄铁矿及三水铝石，其中黏土矿物主要为高岭石，含量达 95%。

### 2.2 研究方法

本研究从两方面分析压实花岗岩残积土的路用工程特性，一方面是根据规范要求，通过击实试验、压缩试验、CBR 试验及基床系数试验认识压实土的路用特性，另一方面是通过模拟列车荷载对最优含水率及饱和状态下压实度为 92% 的土体进行循环加载试验，分析含水率及动应力幅值对压实土动力变形特性的影响。

## 3 花岗岩残积土路用性能试验与分析

### 3.1 击实特性

对重塑后混合均匀的花岗岩残积土进行标准重型击实试验<sup>[7]</sup>，试验曲线如图 2 所示。结合表 1 可以发现，重塑花岗岩残积土的最优含水率明显低于塑限，更直观地反映了常规液塑限试验方法（仅考虑颗粒粒径  $d < 0.5 \text{ mm}$ ）得到的土样稠度指标不能真实体现残积土的天然稠度状态，应考虑粗粒含量对土体物理特征的影响。

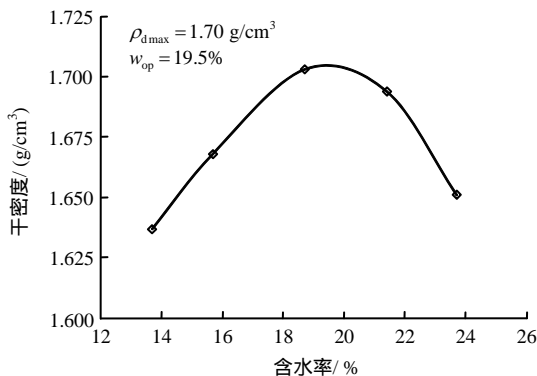


图 2 花岗岩残积土击实试验曲线  
Fig.2 Compacting curves of granite residual soil

### 3.2 加州承载比 CBR 特征

CBR 值一直作为公路路基性能评价指标，能够体现试样中部分土体与整体之间产生相对变形，反映土样抗局部剪切强度。对于铁路工程，由于试验探头尺寸与道碴尺寸相近，试验过程与道碴或表层碎石在列车振动荷载作用下挤陷入路基受力状态相近，作为铁路路基施工质量检测手段也比较合理，日本也曾使用 CBR 值检测铁路路基质量<sup>[8]</sup>。本文采用重型击实法制备试件，研究土样在 30、50、98 击 3 种击实数下土体 CBR 值的变化规律，3 种击实功作用下土体的压实度  $K = 91\%、97\%、100\%$ <sup>[8]</sup>。单位压力与贯入量的相关关系及 CBR 值随压实度

的递增关系如图 3、4 所示。从图中可以看出，花岗岩残积土在不同击实功作用下物理力学状态差异较大，干密度  $\rho_d$  在 30 ~ 50 击作用下增幅较大，50 ~ 98 击时较小，说明该类土压实特性较好， $K = 91\% \sim 97\%$  时压实功效率较高，容易达到压实度控制标准。从 CBR 值随压实度的递增关系可以看出，CBR 值随压实度近似线性增大，从局部抗剪切性能角度讲，提高压实度对于提高土体抗变形能力较为有效。压实土 CBR 值符合高速、一级公路路基上、下路床填筑要求<sup>[9]</sup>。

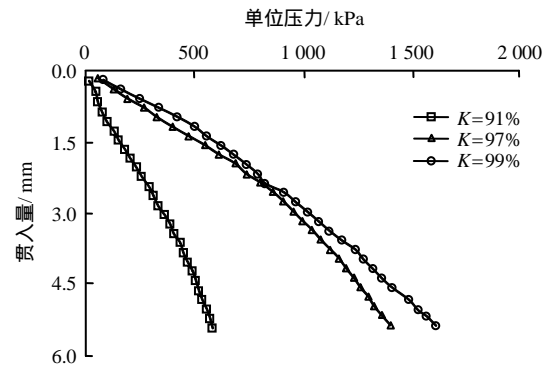


图 3 单位压力与贯入量相关关系  
Fig.3 Relationships between specific pressure and amount of pressure penetration

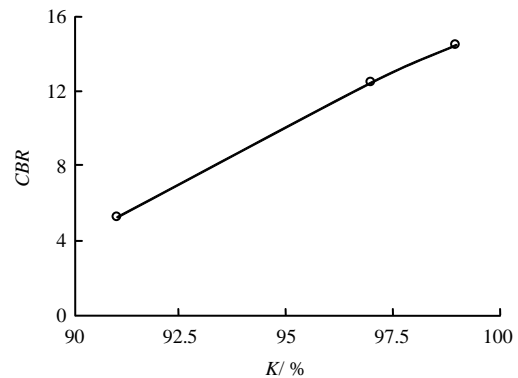


图 4 CBR 值随压实度的递增关系  
Fig.4 Relationship between CBR value with compactness

### 3.3 花岗岩残积土压缩特性

由于路基及车辆自重荷载产生的压缩变形为路基工后沉降的重要组成部分，尤其是将对较高路堤条件下路基自身的压实变形不可忽视，为研究花岗岩残积土压实后的变形特性，对  $K = 90\%、92\%、95\%$  的压实土体进行固结试验<sup>[7]</sup>，得到了土体的压缩性指标及孔隙比和单位变形量随单位荷载的变化关系，见表 3 和图 5。分析可知，在压实过程中，随着荷载的增加，孔隙率减小，单位变形量逐渐增大，轴向应力与轴向变形呈指数关系。压实残积土当  $K = 92\%$  时接近低压缩性土，压实后不易沉降；

随压实度的增加土样压缩模量逐渐增大， $K = 90\% \sim 92\%$ 期间增幅较明显，随压实度继续增加，增幅较小，工程中应根据实际路基填筑高度及工程质量要求，合理选取压实标准，保证工程的安全性及经济性。

表3 花岗岩残积土固结试验结果

Table 3 Consolidation test results of granite residual soil

含水率 w/ %	压实度 K/ %	压缩系数 $a_{s1-2} / \text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2} / \text{MPa}$
	90	0.23	7.78
19.5	92	0.15	11.36
	95	0.12	13.45

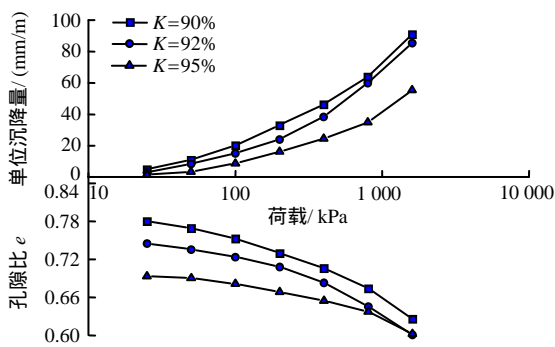


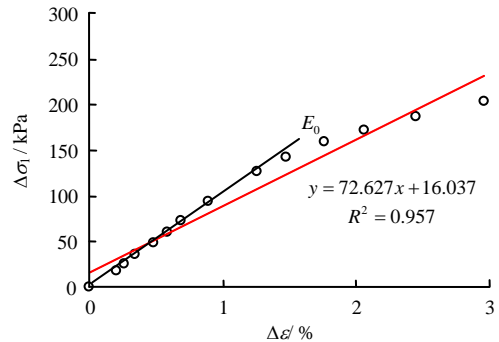
图5 荷载、单位沉降量及孔隙比关系  
Fig.5 Relationships among load, unit settlement and void ratio

### 3.4 室内基床系数

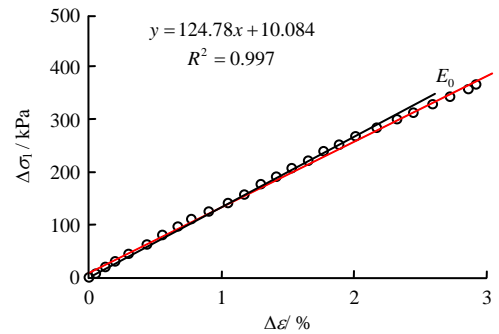
基床系数  $K_{30}$  是我国和日本等国对铁路路基质量评价的重要指标，指采用直径为 30 cm 的荷载板进行荷载试验，即单位面积压力除以荷载板相应的下沉量 (MPa/m)，计算中选用的沉降量为 0.125 cm<sup>[3]</sup>。本文借鉴规范<sup>[10]</sup>推荐的基床系数室内测试方法，采用英国 GDS 应力路径三轴仪测试土体基床系数，各项性能符合试验要求。试验中对土样进行  $K_0$  固结，其中  $\sigma_1 = 100 \text{ kPa}$ ， $K_0 = 0.5$ 。在围压增量  $\Delta\sigma_3$  与轴向应力增量  $\Delta\sigma_1$  比为  $n = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1 = 0.1、0.2、0.3$  三个应力路径下进行固结排水试验，应力-应变关系如图 6 所示。由图中可知，当  $n=0.2$  时应力增量与应变增量曲线的线性相关性较好 ( $R^2 = 0.997$ )， $\Delta\varepsilon$  小于 3% 时应力应变关系曲线与初始模量线近乎重合，符合现场基床系数测试过程中的应力状态。取  $n=0.2$ ，初始切线模量为所得室内基床系数， $K_{30} = 188.25 \text{ MPa/m}$ 。

虽然国内对于室内三轴测试基床系数的方法已在多地区采用，而且利用三轴法模拟现场  $K_{30}$  原位平板载荷试验的试验原理也是以后发展的方向，但

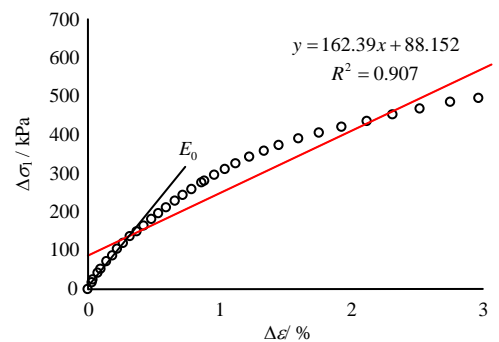
是通过大量的数据统计分析表明，虽然室内试验得到的基床系数满足高速铁路路堤本体基床系数  $k_{30} 90 \sim 130 \text{ MPa/m}$  的指标要求，由于试验条件、试验尺寸及试验工况的差距，三轴割线法比原位载荷板试验结果偏大，仍需深入研究并进行大量的经验积累，以便对试验结果合理修正<sup>[9]</sup>。



(a)  $\Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1 = 0.1$



(b)  $\Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1 = 0.2$



(c)  $\Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1 = 0.3$

图6 应力-应变关系

Fig.6 Stress-strain relationships

## 4 花岗岩残积土动力变形特性

本试验采用美国 GCTS 公司生产的动态空心圆柱扭剪仪，结合室内试验模拟交通荷载的波形函数相关研究成果<sup>[11]</sup>，采用图 7 函数模拟轴向加载波形，对压实度为 92% 的土体进行最优含水率 ( $\sigma_d = 20、30、40 \text{ kPa}$ ) 和极端饱和 ( $\sigma_d = 20、30、40 \text{ kPa}$ )

条件下的 6 组试样进行循环加载试验。饱和通过抽真空饱和后反压饱和，饱和系数  $B > 95\%$ ，加载频率  $f = 2 \text{ Hz}$ 。试验得到了土样的累积塑性应变发展规律、变形随振动次数的衰减规律、各振次下累积应变与动应力幅值间的相关关系及各应力幅值下的动弹性模量。

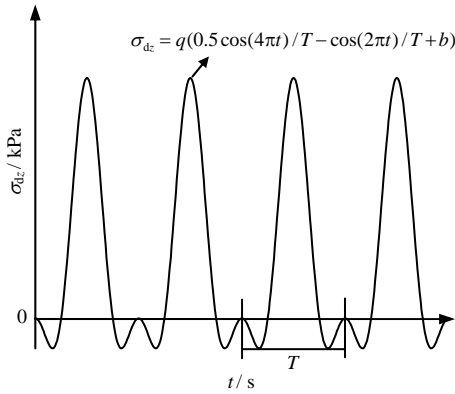


图 7 加载波形  
Fig.7 Loading waveform

#### 4.1 累积塑性应变发展规律

图 8 为最优含水率  $w_{op}$  和  $w = 26.4\%$  (极端饱和状态) 压实花岗岩残积土在  $\sigma_3 = 20 \text{ kPa}$ ， $\sigma_d = 20 \sim 50 \text{ kPa}$  应力状态下的累积塑性应变  $\epsilon_a$  随荷载作用次数  $N$  的发展规律。从图中可以看出，两种含水率下土样  $\epsilon_a$  发展趋势相近，但相同作用次数下  $\epsilon_a$  值差异较大，且  $w_{op}$  土样在动应力幅值  $\sigma_d = 20 \sim 40 \text{ kPa}$  下的  $\epsilon_a$  随荷载作用次数  $N$  增加趋于稳定，当  $w = 26.4\%$  时有微小发展的趋势。所以，作为路堤填料此类土体累积变形特性受湿热环境影响明显，应考虑作为受气候与动荷载影响较小的下路堤备用填料，作为铁路路堤本体及公路上、下路路床填料，应在进行土性改良且满足要求的论证基础上取舍。

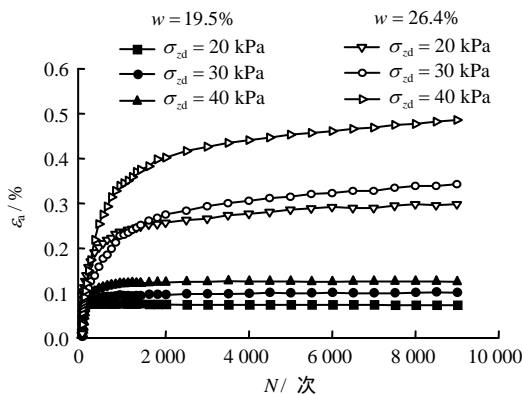
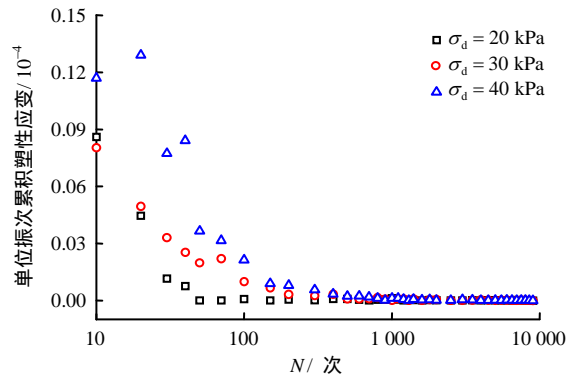
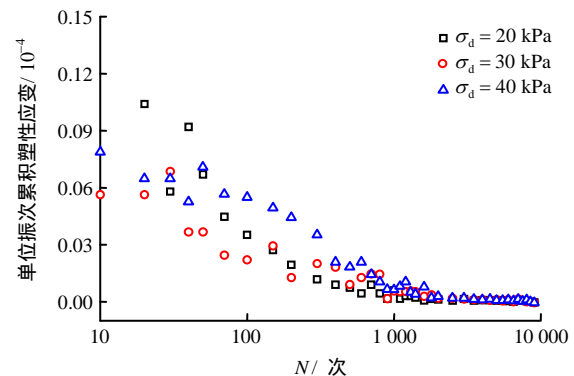


图 8  $\epsilon_a$ - $N$  关系曲线  
Fig.8 Relationships between  $\epsilon_a$  and  $N$

单位振次累积塑性应变可反映土的变形发展速率，图 9 为各试验条件下土样的  $\epsilon_a$  发展速率曲线。从图中可以看出，饱和条件下单位振次累积塑性应变随作用次数衰减较为缓慢，即使在  $N > 3 \text{ 000}$  次时，变形虽已趋于稳定，但仍有微小发展； $w_{op}$  下土样变形随作用次数衰减较快，尤其是  $\sigma_d = 20 \text{ kPa}$  时， $N < 100$  次时单位振次累积塑性应变已衰减接近于 0，在较高应力幅值  $\sigma_d = 40 \text{ kPa}$  下， $N < 1 \text{ 000}$  次时也已达到变形稳定，所以相同加载条件下此类土体增湿，不但累积塑性应变值较大，而且变形不易于稳定，进行工程应用时应考虑水环境对动力变形特性的影响。



(a)  $w = 19.5\%$



(b)  $w = 26.4\%$

#### 图 9 单位振次累积塑性应变与振次关系

Fig.9 Relationships between cumulative plastic strain of unit vibration and  $N$

图 10 为不同加载周期累积应变值  $\epsilon_a$  与动应力幅值  $\sigma_d$  的相关关系。分析可知，不同湿化条件下压实土的  $\epsilon_a$  随  $\sigma_d$  的增长关系不同，当  $N > 100$  次时，最佳含水率时土样  $\epsilon_a$  随  $\sigma_d$  表现出先快后缓的趋势，而高含水率时土样  $\epsilon_a$  随  $\sigma_d$  呈先缓后快趋势增大。另外，通过不同作用次数土的  $\sigma_d$  -  $\epsilon_a$  关系也可看出，

高含水率土样在相同应力幅值时,  $N = 100 \sim 9\ 000$  次荷载作用下  $\varepsilon_a$  差异较大, 进一步说明了增湿不利于土体变形稳定, 对于该类土体路基施工及运营期间, 应注意潮湿环境与动力荷载对土体塑性变形的影响。

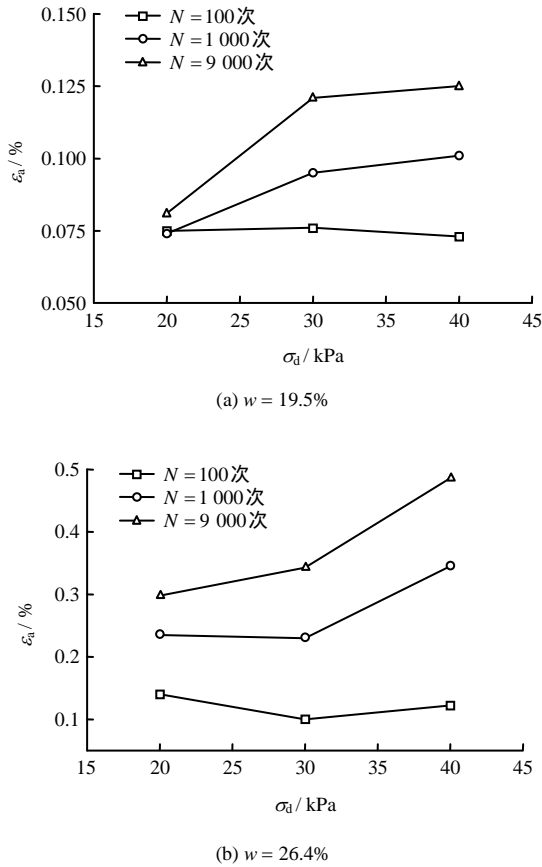


图 10  $\sigma_d \sim \varepsilon_a$  关系曲线  
Fig.10 Relationships between  $\sigma_d$  and  $\varepsilon_a$

#### 4.2 动弹性模量

由于路基受到列车荷载的动力作用表现出动态变形行为, 动弹性模量  $E_d$  可全面地、直接地反映路基的质量和状态, 是描述路基动态特性的重要指标, 其大小与填土类别、含水率、密实度、强度及应力状态等参数有关。为了分析含水率、动应力幅值对压实花岗岩残积土动弹性模量的影响, 给出了不同应力幅值下土体动弹性模量与荷载作用次数的相关关系, 如图 11 所示。可以看出, 含水率对土体  $E_d$  值影响较大, 饱和后  $E_d$  值骤减。低含水率下  $\sigma_d$  对  $E_d$  影响较大, 饱和时各应力幅值下  $E_d$  差异较小。

### 5 结论

(1) 花岗岩残积土的最优含水率明显低于塑限, 粗粒含量对土体稠度指标存在影响。当  $K =$

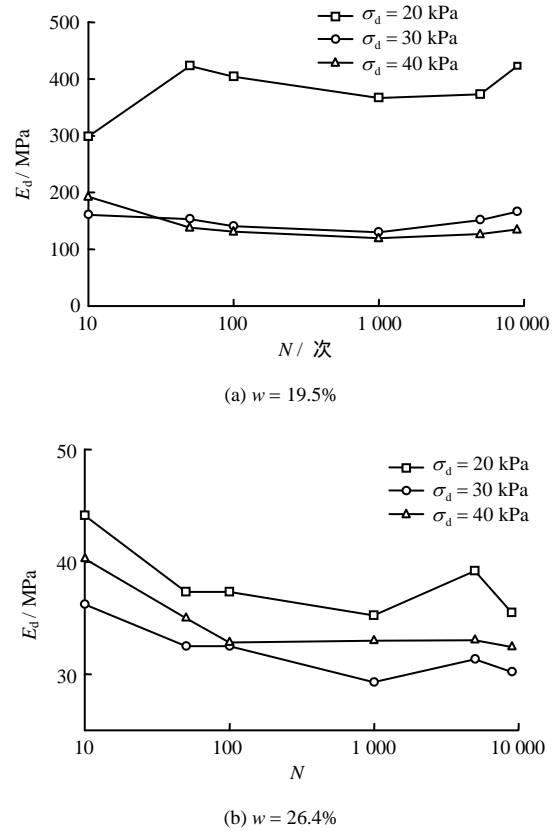


图 11  $E_d \sim N$  关系  
Fig.11 Relationships between  $E_d$  and  $N$

91% ~ 97% 时压实功效率较高, 压实土  $CBR$  值符合高速、一级公路路基上、下路床填筑要求。提高压实度对于提高土体抗变形能力较为有效; 当  $K = 92\%$  时, 压实土接近于低压缩性土, 压实后不易沉降, 不同压实度区间压缩模量增幅差异较大, 对花岗岩残积土填料进行工程应用时应根据路基实际填筑高度及工程质量要求, 合理选取压实标准, 保证工程的安全性及经济性。

(2) 采用室内三轴方法, 通过取  $n = 0.2$  时应力增量与应变增量曲线初始切线模量得到基床系数  $K_{30} = 188.25$  MPa/m, 虽满足高速铁路路堤本体指标要求, 但由于试验的物理力学条件的差异, 仍需深入分析研究, 以便对试验结果合理修正。

(3) 最优含水率下土体动力变形稳定性较好, 但含水率增大会大幅度增加塑性变形且不利于变形稳定, 应考虑作为受气候与动荷载影响较小的下路堤备用填料, 作为铁路路堤本体及公路上、下路路床填料, 应在进行土性改良且满足要求的论证基础上取舍。

(4) 含水率对土的动弹性模量  $E_{ed}$  值影响较大, 饱和后  $E_{ed}$  骤减。低含水率下动应力幅值  $\sigma_d$  对  $E_{ed}$  影响较大, 饱和时各应力幅值下  $E_d$  差异较小。

## 参考文献

- [1] 王仲锦, 张千里, 叶阳升. 铁路路基填料分类深化研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 13 - 20.  
WANG Zhong-jin, ZHANG Qian-li, YE Yang-sheng. In-depth study on the classification of filling for railway subgrade[J]. **China Railway Science**, 2012, 33(2): 13 - 20.
- [2] 尹松, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 688 - 695.  
YIN Song, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, et al. Experimental study on the in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 688 - 695.
- [3] 铁道第一勘察设计院. TB 10001-2005 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.  
Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10001-2005 Code for design on subgrade of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [4] 杨广庆, 高民欢, 张新宇. 高速公路路基填料承载比影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 97 - 100.  
YANG Guang-qing, GAO Min-huan, ZHANG Xin-yu. Study on influence factors of california bearing ratio (CBR) of expressway subgrade materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(1): 97 - 100.
- [5] 陈晓平, 周秋娟, 蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 901 - 908.  
CHEN Xiao-ping, ZHOU Qiu-juan, CAI Xiao-ying. Physical properties and shear strength characteristics of high liquid limit granite residual soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(6): 901 - 908.
- [6] 刘鑫, 洪宝宁. 高液限土工程特性与路堤填筑方案[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 436 - 443.  
LIU Xin, HONG Bao-ning. Engineering characteristics and construction schemes of high liquid limit soil in embankment filling[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2011, 39(4): 436 - 443.
- [7] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. TB 10102-2010 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.  
China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd. TB 10102-2010 Code for soil test of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [8] 但汉成, 李亮, 胡萍, 等. 风化软岩填筑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.  
DAN Han-cheng, LI Liang, HU Ping, et al. Interior experimental study on compaction engineering characteristics of weathered-soft-rock subgrade filling materials[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2009, 31(4): 75 - 81.
- [9] 中交第二公路勘察设计院. JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
CCC Second Highway Consullanis Co., Ltd. JTG D30-2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [10] 北京市规划委员会. GB 50307-2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
Beijing Municipal Planning Commission of Urban Planning. GB 50307-2012 Code for geotechnical investigations of urban rail transit[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [11] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和软黏土累积变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1790 - 1798.  
QIAN Jian-gu, WANG Yong-gang, ZHANG Jia-feng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1790 - 1798.