



循环荷载作用下饱和土石混合料侧限变形 试验研究

何锋¹, 徐勇清¹, 胡盛亮¹, 李海潮², 童晨曦³, 赵伟⁴, 陈欣⁵, 肖敏华⁵

(1. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 南昌 330038; 2. 中国民航大学 交通科学与工程
学院, 天津 300300; 3. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 4. 中铁二局集团有限公司, 成都
610036; 5. 南昌市建设投资集团有限公司, 南昌 330038)

摘要: 土石混合料是山区机场建设过程中较为常用的道基填料, 在循环荷载作用下会产生累积变形, 由此产生的不均匀沉降会导致上部基础结构的稳定性下降。为揭示循环荷载作用下土石混合料的累积变形规律, 开展饱和土石混合料的侧限动态压缩试验, 分析块石含量和固结压力作用下试样的累积变形量随循环荷载加载次数的变化规律, 并且建立相应的数学模型。结果表明, 在相同块石含量下, 增大固结压力会导致试样的最大累积轴向变形量增大, 其增长幅度会随着块石含量增大而明显加快。饱和土石混合料的变形曲线大体上可分为两个阶段: 在循环荷载作用初期, 试样的轴向变形会随着加载次数增大而快速累积, 但随着试样被逐渐压密, 试样的变形曲线将呈现出缓慢增长的趋势。在此基础上, 提出能描述土石混合料在循环荷载作用下累积变形规律的简单数学模型, 将拟合结果与试验结果进行对比, 发现两者具有较好的相关性。此外, 还分析了循环荷载作用下饱和土石混合料试样内部超孔隙水压随时间的变化规律, 以及超孔隙水压的快速形成和缓慢消散过程。

关键词: 土石混合料; 循环荷载; 侧限压缩; 变形; 超孔隙水压力

中图分类号: TU433; U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Experimental study on the deformation of saturated soil-rock mixture under cyclic loading under confined conditions

HE Feng¹, XU Yongqing¹, HU Shengliang¹, LI Haichao², TONG Chenxi³,
ZHAO Wei⁴, CHEN Xin⁵, XIAO Minhua⁵

(1. Nanchang Urban Planning & Design Institute Group Co., Ltd, Nanchang 330038, P. R. China; 2. Transportation Science and Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China; 4. China Railway Erju, Co., Ltd, Chengdu 610036, P. R. China; 5. Nanchang Construction Investment Group Co., Ltd, Nanchang 330038, P. R. China)

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 天津市教委科研计划(XJ2022009601); 中央高校基本科研业务费(3122025044)

作者简介: 何锋(1976-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事道路工程研究, E-mail: 1354119240@qq.com。

胡盛亮(通信作者), 男, 高级工程师, E-mail: husljxnc@163.com。

Received: 2025-04-09

Foundation items: Tianjin Municipal Education Commission Scientific Research Plan Project (No. XJ2022009601); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 3122025044)

Author brief: HE Feng(1976-), professor-level senior engineer, main research interest: road engineering, E-mail: 1354119240@qq.com.

HU Shengliang (corresponding author), senior engineer, husljxnc@163.com.

Abstract: Soil and rock mixtures are commonly used as subgrade fill materials for mountain airports. When subjected to cyclic loading, they experience cumulative deformation, leading to uneven settlements that can compromise the stability of the upper foundation. To understand this deformation pattern, a series of dynamic compression tests was conducted on soil and rock mixtures. The study analyzed how the specimen's cumulative deformation changed with the number of cyclic loads across different stone contents and confining pressures, and it developed a corresponding mathematical model. Results showed that, at a fixed stone content, higher confining pressure resulted in greater maximum axial cumulative deformation, with the rate of increase accelerating as stone content increased. The deformation curve typically has two phases: an initial rapid accumulation of axial deformation during cyclic loading, followed by a slower growth as the specimen densifies. Based on these findings, a simple model describing the law of cumulative deformation was proposed, which aligned well with experimental data. The study also examined how excess pore water pressure in saturated specimens evolves during cyclic loading, noting its rapid buildup and slow dissipation.

Keywords: soil-rock mixtures; cyclic loading; confined compression; deformation; excess pore water pressure

山区支线机场多采用削山填谷和就地取材的建造方式,机场道基主要填料为土石混合料,级配碎石含量对道基在长期服役过程中产生的累积变形规律有显著影响^[1-3]。道基变形累积将导致道面结构下不均匀沉降甚至开裂,严重影响跑道的适航性。因此,有必要开展循环荷载作用下饱和土石混合料的动力特性研究,为道基差异沉降控制提供必要依据。

凌道盛等^[4]指出飞机起降过程中主起落架移动荷载引起的跑道道基土体循环动应力是导致跑道沉降和差异沉降的主要原因。对于山区机场,由于土石混合填料道基具有结构松散、孔隙率大、强度低等特点,其工程力学性质受级配碎石含量和分布等因素影响,道基具有更复杂的动力响应。为研究土石混合料的强度和变形特性,涂义亮等^[5-6]综合运用室内大型直剪试验、颗粒标记观察试验和颗粒筛分试验等方法,分析了含石量和颗粒破碎对土石混合料强度的影响规律,发现土石混合料的强度准则具有非线性特点,与级配碎石形成的骨架效应有关,其黏聚力会随着含石量增大而减小,但内摩擦角和非线性参数则增大,揭示了其宏观剪破坏机理;张敏超等^[7]、薛亚东等^[8]也开展了类似研究,取得了有益的成果。杨忠平等^[9]讨论了含石量对土石混合料的水力侵蚀分异特征的作用机制,发现碎石颗粒形成的骨架效应会对水力通道的演变规律产生影响。在动力特性方面,黄锋等^[10]采用 KTL DYN 伺服电机控制式动三轴试验系统探究了分级动荷载作用下土石混合料的滞回曲线的形态特征,考虑了含石量、含水率、固结应力比和加载频率等因素的影响。此外,Wang 等^[11]、Sun 等^[12]采用动三轴试验分别考虑了加载速率和冻融循环等因素对土石混合料动力学特性的影响。

不同于常规的直剪试验和三轴压缩试验,机场道基通常具有更复杂的地质条件和加载条件。有必要结合现场监测结果和模型试验进一步揭示由土石混合料填筑道基的累积变形规律。对此,杨校辉等^[13]针对具有不同初始含水率和干密度的土石混合料进行直剪和压缩试验,分析了其力学参数变异性对土石混填高填方体的沉降变形规律的影响。魏迎奇等^[14]根据土石混填强夯加固的大型现场振动速度测试结果,分析了质点振速和波形在强夯过程的传播和衰减规律,发现土石料在强夯作用下土体内部仅存在冲击波和振动波两种形态,提出了强夯起始加固临界振速的概念。李泽闯等^[15]模拟了土石路堤动力碾压过程,提出新的压实质量控制方法。在机理研究方面,刘大鹏等^[16]指出土石混合料的累积塑性应变会随初始静偏压和循环荷载增大而增大,但围压、加载频率和固结比则会导致其变形量减小。余虔等^[17]根据不同区域机场道基粉土的累积塑性应变发展规律,提出新的预测模型并将其用于机场道基长期服役性能评估。杨奇等^[18]也开展了间歇循环荷载作用下饱和砂土累积塑性变形及孔压特性研究,并给出合理的数学模型。

现有研究成果并未充分反映循环荷载作用下块石含量和荷载幅值等因素对土石混合料变形规律的耦合作用,对于饱和试样内部超孔隙水压演变规律的认识也存在不足。为此,笔者采用自主研发的侧限动态压缩仪,对土石混合料的饱和土柱试样开展循环加载试验,探究不同固结压力条件下含石量对其累积轴向变形规律,分析土石混合料的骨架效应及其内部超孔隙水压演变规律,提出新的累积变形预测模型。

1 土石混合料的侧限动态压缩试验

1.1 试验设备

试验设备为自主研发的侧限动态压缩仪,由反力架、试样桶、水箱、伺服加载电机和数据采集系统等部件组成。如图 1 所示,四立柱结构的反力架上部顶板安装有行程为 150 mm 的伺服电机用于施加循环荷载,其连接的加载板上安装有高精度幅轮式应力传感器和 LVDT 位移传感器,控制该伺服电机的全数字伺服控制器位于反力架底部。侧限动态压缩仪能够施加的最大轴向荷载为 10 kN,加载波形包括正弦波、三角形波等不同形态,最大加载频率为 5 Hz。试样桶材质为双层有机玻璃,直径和高度分别为 20 cm 和 40 cm,两端分别连接独立水箱,通过恒压水泵和流量传感器能够实现上下补水功能。

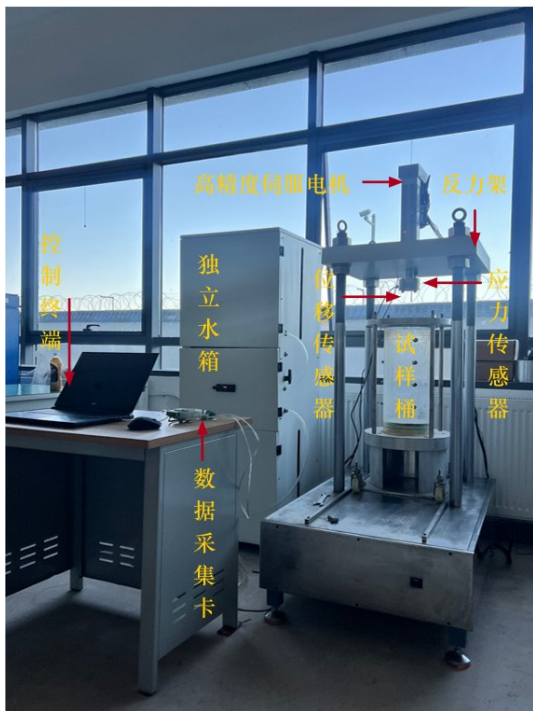


图 1 侧限动态压缩仪实体图

Fig.1 The confined dynamic compression apparatus

侧限动态压缩仪的加载由两部分组成,首先采用应力控制方法在试样顶部施加 10 kPa 的预压,使得加载板和试样均匀接触,两者之间会保留一定的间隙,因此试样的上表面处于部分排水条件。其次,对试样施加固结压力,达到指定大小后施加循环荷载,在试验过程中可以调整动应力幅值和加载频率。通过连接在加载装置上的幅轮式应力传感器和 LVDT 位移计可以采集试样的应力-应变曲线,借助试样桶周身布置的孔压计、土压力盒和加速度传感器可以实时监测试样的动力响应。该设备的试验原理如图 2 所示。

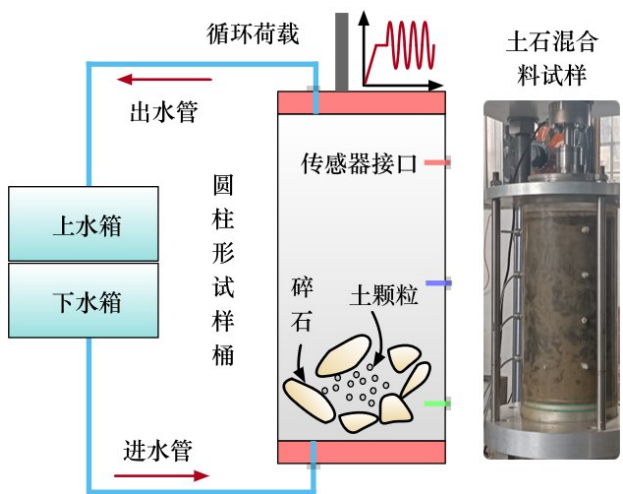


图 2 侧限动态压缩仪的试验原理

Fig.2 Test principle of the confined dynamic compression apparatus

1.2 对照组试验

为验证该设备的有效性,首先针对某机场飞行区的土样开展对照组试验,采用标准制样方法制备两组相同的饱和试样。根据机场飞行区道面影响区的设计规范要求,选择饱和素土试样的压实度为 94%,基于快剪试验得到其黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 分别为 22.3 kPa 和 31.2°,对应的剪切-位移曲线如图 3 所示,土体的基本物理性质指标则如表 1 所示。

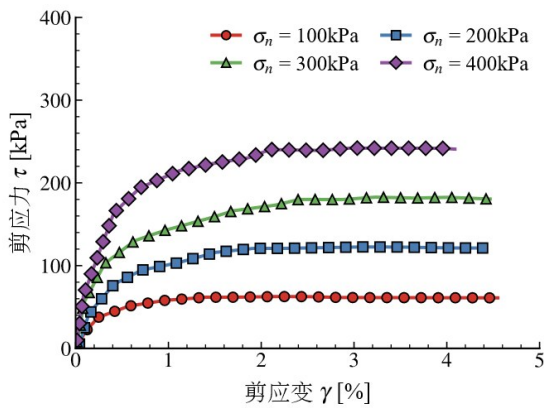


图 3 取自某机场飞行区的黏土的直剪试验结果

Fig.3 Direct shear test data on clay taken from the flight area of a certain airport

表 1 取自某机场飞行区的黏土的基本物理性质

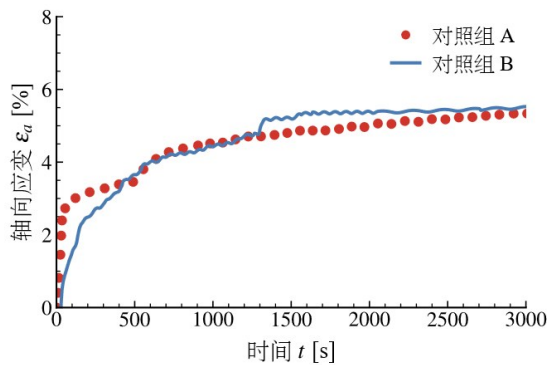
Table 1 Basic properties of the soil taken from the flight area of an airport

最大干密度 $\rho_d/(g/m^3)$	比重 G_s	液限 $I_w/\%$	塑限 $I_p/\%$
1.86	2.68	23.2	7.2

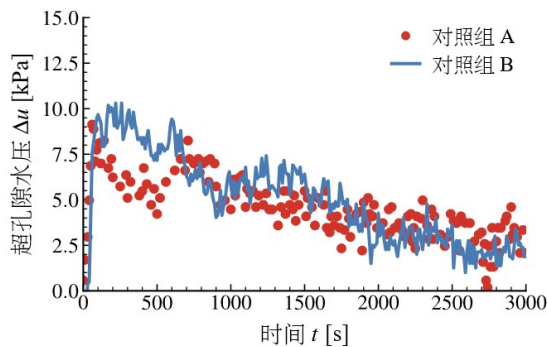
飞机在起降和滑行过程中会对机场道基施加动荷载,凌道盛等^[4]采用动力响应半解析有限单元法分析飞机主起落架移动荷载作用下道基的动力

响应特征发现,对于B747-400和A380-800两种客机机型,道基浅层土体竖向正应力沿横向呈倒锅底形分布,竖向正应力可达60 kPa,荷载影响深度达13 m。另一方面,余虔等^[17]的研究表明,在竖向循环荷载作用下机场道基的变形深度主要集中在0~5 m,对应的土压力为0~90 kPa,并且指出飞机起降和滑行引起的动荷载近似地满足正弦波加载形式,振动频率与飞机型号和滑行速度有关。笔者在侧限动态压缩试验过程中首先对两组饱和素土试样施加60 kPa的固结压力,然后选择2 Hz的正弦波形对试样进行循环加载,动力幅值设定为30 kPa,试验停止条件为循环次数达到8000次或者轴向应变超过10%。

试验结果如图4所示。由图4可见,在相同加载条件下,对照组试样的轴向应变随时间变化规律基本相同,最大轴向应变分别约为4.8%和4.76%,如图4(a)所示。在加载初始阶段,饱和试样的累积轴向应变会迅速增长,但随着循环荷载振动次数增大,其增长速率会逐渐减小,这与试样被压密有关。另一方面,根据图4(b),即使试样上端处于部分排水状态(与试样接触的加载板留有小孔),在循环荷



(a) 轴向应变



(b) 超孔隙水压

图4 侧限动态压缩仪的A、B对照组试验结果对比

Fig.4 Comparison of test results between Groups A and B using the confined dynamic compression apparatus

载作用下试样内部也会产生超孔隙水压,水压力计埋设于试样高度30 cm处,并通过预留孔与外部数据采集仪连接。当试样在加载初期发生显著轴向变形时,超孔隙水压也会快速增长,而在试样变形速率减小阶段,超孔隙水压也会逐渐消散,会随着加载时间增大而减小。

图5给出了该饱和试样在高度为10 cm处采集到土压力随加载时间的变化规律,为了测试设备的可靠性,持续加载至15 000 s。可以看出,在相同高度处,A、B对照组试样在稳定状态下的土压力约为40 kPa。根据施明泽等^[19]的研究,常规有机玻璃的弹性模量约为3 GPa,试样对试样桶内壁施加的径向应力引起的桶壁变形量很小,因此,在试验过程可以认为试样始终处于侧限压缩状态,仅发生轴向变形。

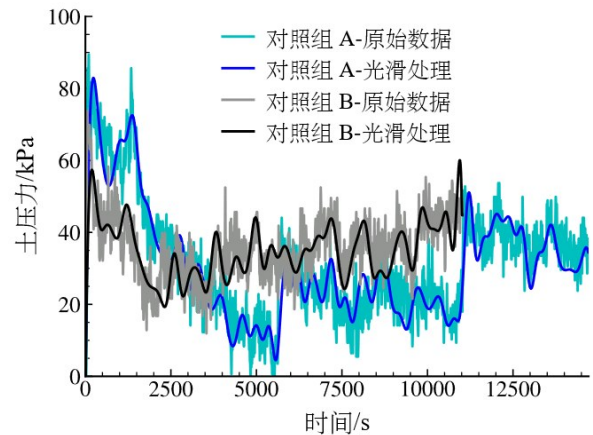


图5 饱和土样高度为10 cm处土压力变化规律

Fig.5 Evolution of soil pressure at a height of 10 cm in the saturated soil sample

对照组试验结果表明,该粗粒土侧限动态压缩仪具有良好的加载稳定性和数据采集精度,能满足本文的试验需求。

1.3 试验方案

土石混合料是山区机场建设中较为常用的道基填料,块石颗粒会形成土骨架起到支撑作用,随着部分块石颗粒在荷载作用下发生滑移或偏转,周围土体会发生局部剪切破坏,导致土石混合料具有复杂的表观力学行为。根据现有研究成果,可以将5 mm作为区分细粒土和块石的阈值,并且当块石含量为25%~75%时,土石相互作用会对土石混合料的强度和变形特性产生显著影响^[20-22]。为此,在饱和素土试样中采用级配碎石进行等质量替换,得到含石量 ω 分别为10%、20%、30%、50%的土石混合料,对应的级配曲线如图6所示。级配碎石由中强风化的泥岩和砂岩组成,泥岩矿物成分主要以石

英、斜长石、云母、蒙脱石等为主,砂岩矿物成分主要为石英和斜长石。块石颗粒最大粒径为 6 cm 左右,试验装置试样桶的直径为 20 cm,高度为 40 cm,最大颗粒粒径和试样桶直径之间的比值小于 0.2,满足试验需求^[23-24]。

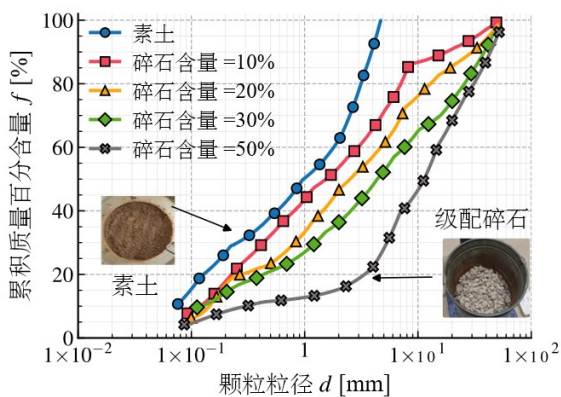


图 6 不同含石量条件下土石混合料的粒径分布曲线
Fig.6 Particle size distribution curves of the soil-rock mixture under different rock particle contents

土石混合料的侧限动态压缩试验方案如表 2 所示,具有不同含石量的试样的密实度均为 94%,制样方法根据《土工试验方法标准》^[25]采用分层击实法,首先将素土和碎石进行混合,用喷壶将水均匀喷洒在混合料表面,然后进行装样并击实至指定密实度,最后进行刮毛处理并重复上述过程。制样结束后从下往上注水排出试样中的空气,然后静止 48 h 使之达到均匀饱和状态。试验过程中首先在试样顶部施加 10 kPa 的预压,待加载板和试样完全接触后分别施加 60、90、120、150、180 kPa 的固结应力 σ_0 ,然后施加正弦波形的循环荷载(见图 7),动力幅值 σ_d 为 30 kPa,加载频率为 2 Hz,当循环次数达到 8000 次或轴向应变 ϵ_a 超过 10% 时停止试验。

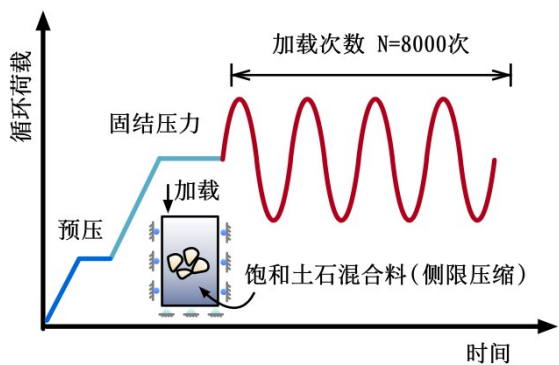


图 7 循环荷载施加方法
Fig.7 Method for applying cyclic loading

1.4 试验结果

图 8 给出了不同块石含量和固结压力条件下饱和土石混合料在循环荷载作用下累积轴向应变随

表 2 土石混合料的侧限动态压缩试验方案
Table 2 Test scheme for the confined dynamic compression test of soil-rock mixture materials

含石量 ω / %	密实度 D_r / %	动应力幅值 σ_d / kPa	频率 f / Hz	固结应力 σ_0 / kPa
10	94	30	2	60、90、120、150、180
20	94	30	2	60、90、120、150、180
30	94	30	2	60、90、120、150、180
50	94	30	2	60、90、120、150、180

加载次数的变化规律。根据试验结果,可以将其简单区分为快速增长和缓慢增长两个阶段。在侧限动态压缩试验前期,饱和土石混合料试样会在较短时间内产生显著的轴向变形,但随着加载次数增大,其累积轴向应变增长速率将逐渐减小,试样逐渐趋于密实状态。此外,图 8 中部分试样的累积轴向应变曲线在循环加载后期呈现出锯齿状波动,这可能与其内部块石分布不均匀有关。

整理试验结果可以得到不同含石量条件下饱和试样的最大累积轴向应变 $\epsilon_{a,max}$ 随固结应力 σ_0 的变化规律,如图 9 所示。由图 9 可以看出,增大固结应力会导致试样的变形量明显增大。当含石量 ω 为 10% 时,当 σ_0 分别为 60、90、120、150 kPa 时, $\epsilon_{a,max}$ 分别为 7.3%、7.6%、7.9%、8.9%,虽整体呈增长规律,但变化并不明显。另一方面,随着含石量增大,碎石的骨架效应逐渐增强,导致相同固结应力条件下试样的累积轴向应变会随之减小。在相同固结应力条件下饱和试样的最大累积塑性应变会随着块石含量增大而减小。例如,当 σ_0 等于 60 kPa 时,含石量 ω 分别为 10% 和 50% 对应的 $\epsilon_{a,max}$ 为 7.3% 和 1.43%,减小幅度为 80.4%。值得注意的是,对于含石量为 30% 和 50% 这两种情况,饱和试样的最大累积轴向应变会随着固结应力增大而快速增长,这或许与试样过程中的密实度控制有关。另一方面,该现象也可能与土骨架亚稳定结构破坏有关,当块石含量较小时块石颗粒分布于土体中,相互间较少接触,在循环荷载作用下变形主要与块石周围土体的剪切破坏有关。但随着块石含量增加,尽管其相互接触形成的骨架效应会起到增强作用,导致相同应力水平下试样的累积变形量减小,但在循环荷载的作用下土骨架更易发生破坏,随着固结应力增大,荷载影响深度增加将加速该破坏过程。

图 10 给出了不同固结压力条件下饱和土石混合料试样的最大累积轴向应变随含石量变化规律。由图 10 可以看出,其整体随着含石量增大呈下降趋势,但下降速率会逐渐减小。

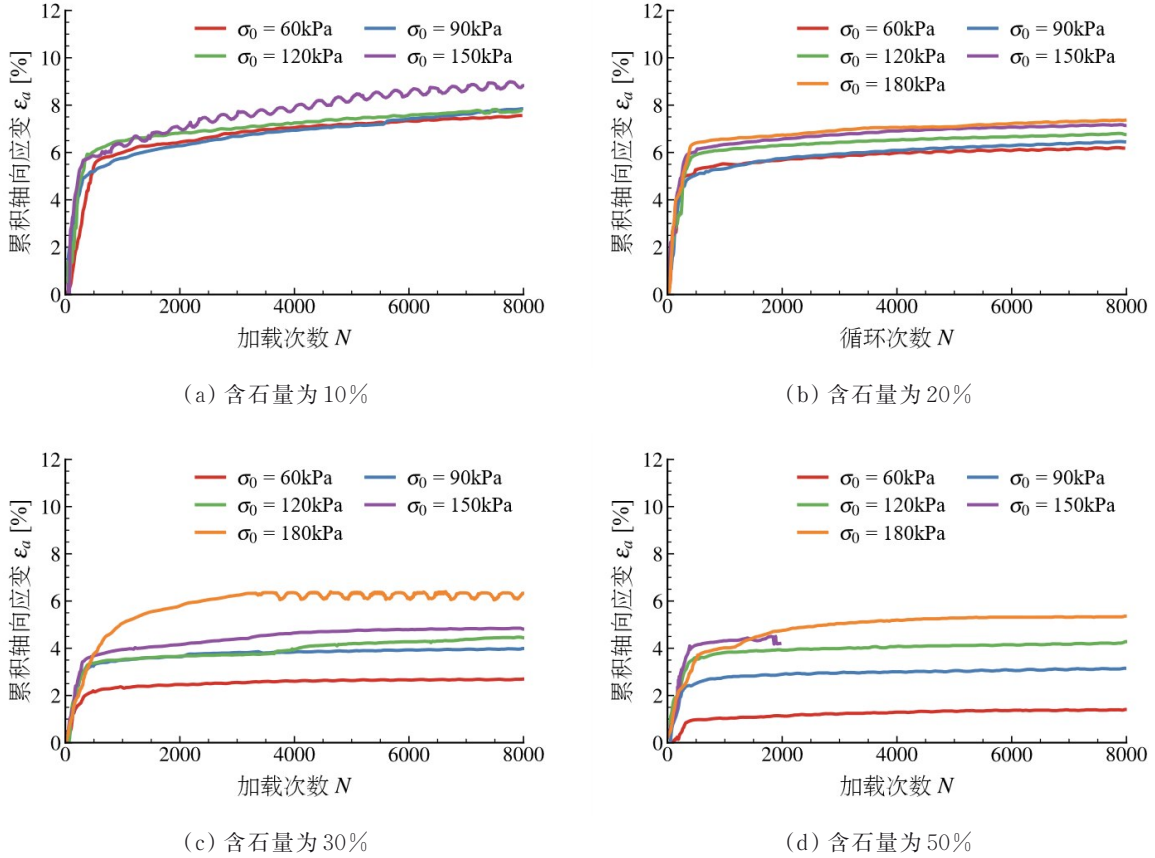


图 8 不同含石量条件下土石混合料饱和试样的侧限动态压缩试验结果

Fig.8 Test data for the saturated soil-rock mixture samples during dynamic compression under varying rock particle contents

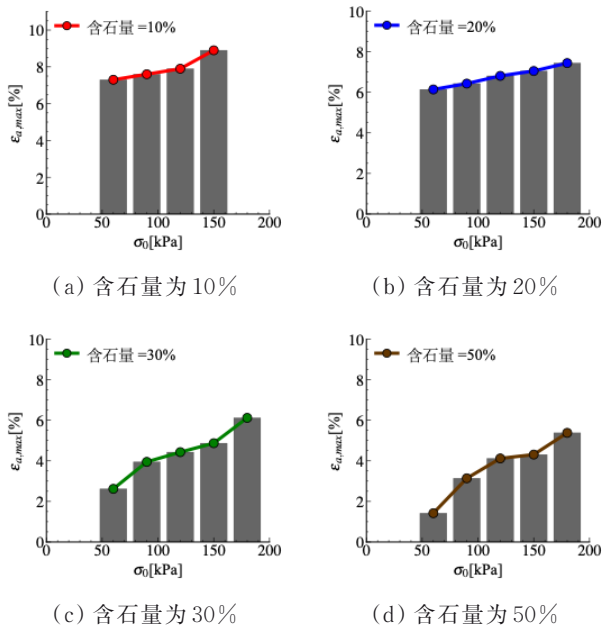
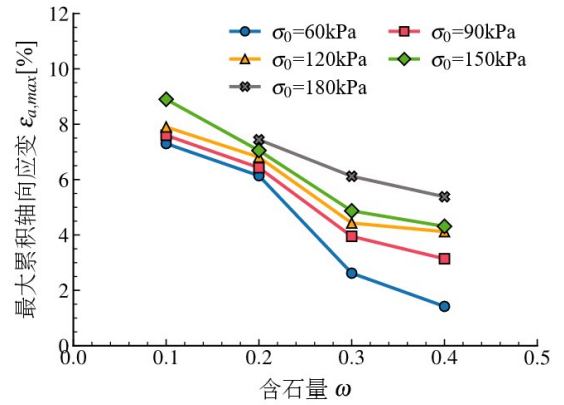


图 9 不同石粒含量和固结压力条件下土石混合料饱和试样的最大累积轴向应变

Fig.9 Maximum accumulated axial strain of saturated soil-rock mixture samples under varying rock particle contents and consolidation pressures

图 10 饱和试样的最大累积轴向应变随含石量变化规律
Fig.10 Evolution of the Maximum accumulated axial strain of saturated samples against the rock particle contents

2 土石混合料侧限压缩模型

2.1 数学模型

为了描述土石混合料累积轴向应变随加载次数变化规律, Pumphrey 等^[26]、Tang 等^[27]和 Salour 等^[28]根据砂土路基动力特性提出了累积变形预测模型。假定 ϵ_a 和 N 之间满足经验表达式

$$\epsilon_a = \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_0} \right)^m \frac{N}{a + bN} \quad (1)$$

式中: m 为与固结压力 σ_0 和动应力幅值 σ_d 有关的材料; a 、 b 为与加载次数 N 有关的材料参数。

采用最小二乘法由土石混合料的侧限动态压缩试验结果标定式(1)包含的材料参数。图11给出了试验测得的饱和试样的最大累积轴向应变和模型预测结果对比。由图11可以看出,该预测模型能较好地反映饱和土石混合料试样在循环荷载作用下的变形规律,计算得到的最大累积轴向应变 $\epsilon_{a,max}^{fit}$ 和 $\epsilon_{a,max}^{exp}$ 试验结果基本接近,对应的材料参数如表3所示。

图12给出了式(1)对饱和土石混合料试样的侧限动态压缩试验结果的拟合结果。图12表明该预测模型具有良好实用性。

2.2 超孔隙水压变化规律

试验结果表明,在循环荷载作用下碎石含量和固结压力会对土石混合料的变形规律产生影响。土石混合料饱和试样中分布的级配碎石颗粒会形成骨架效应,如图13所示,该骨架效应会导致试样

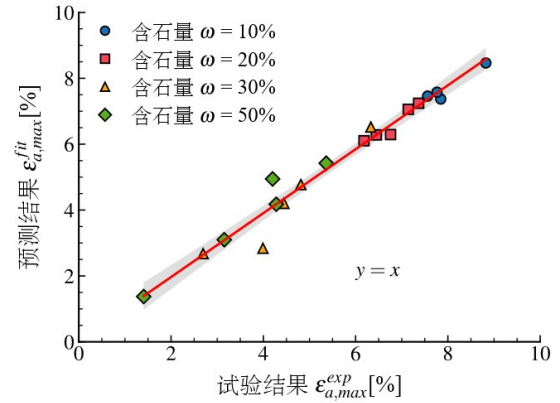
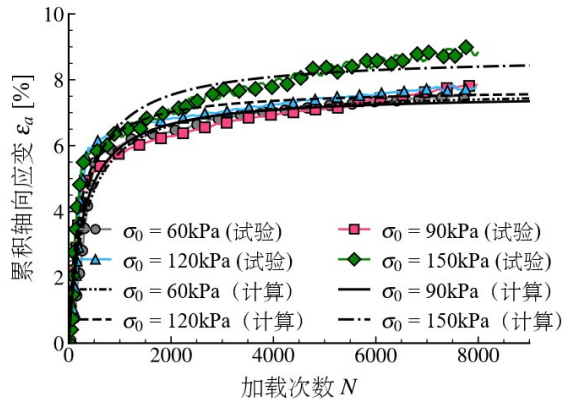


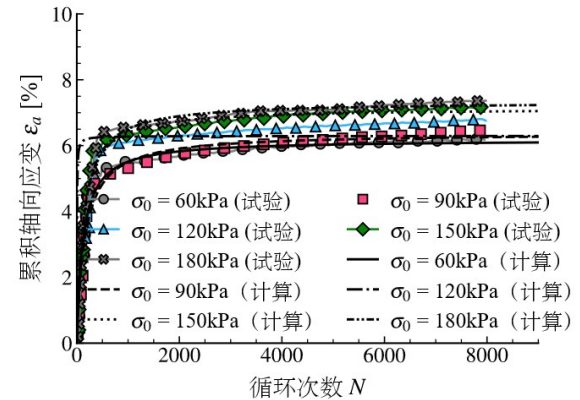
图11 模型预测结果和试验结果对比

Fig.11 Comparison between the predicted and measured data

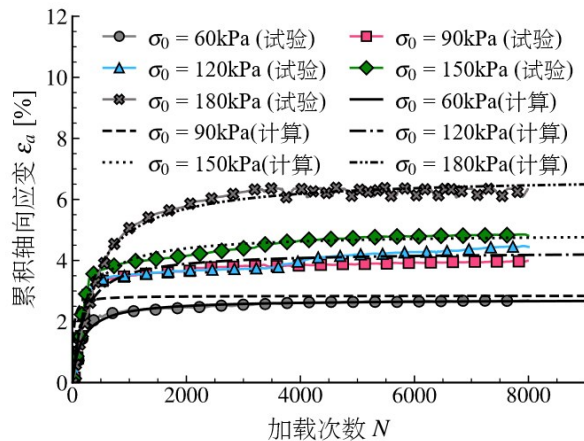
的动弹性模量增大,在相同固结压力条件下其变形量会显著减小。但在高应力条件下,试样内部将产生更大的超孔隙水压,碎石骨架中的土颗粒会逐渐流失,导致其支撑作用逐渐减弱。因此,随着固结压力逐渐增大,土石混合料饱和试样的最大轴向累



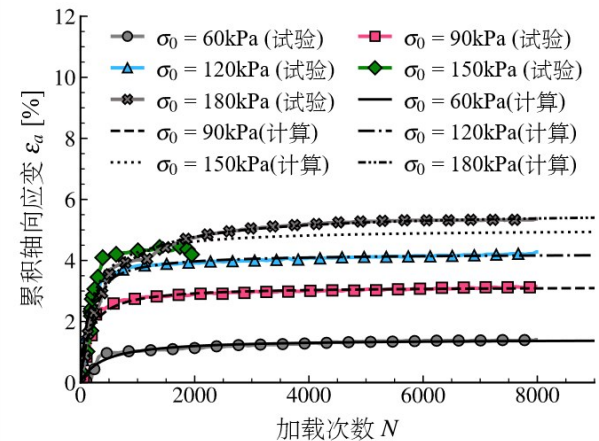
(a) 含石量为10%



(b) 含石量为20%



(c) 含石量为30%



(d) 含石量为50%

图12 不同含石量条件下土石混合料饱和试样的侧限动态压缩试验结果和预测结果对比

Fig.12 Comparison between the measured and predicted data for the saturated soil-rock mixture samples during dynamic compression under varying rock particle contents

表 3 变形预测模型材料参数

Table 3 Parameters of the accumulated deformation prediction model

含石量	固结压力/kPa	参数 m	参数 a	参数 b	相关性 R^2
0.1	60	2.37	8.27	0.025	0.954
	90	1.57	6.43	0.023	0.909
	120	1.31	4.19	0.021	0.929
	150	1.01	7.12	0.022	0.870
0.2	60	1.34	7.71	0.064	0.937
	90	1.19	6.79	0.042	0.947
	120	1.23	5.32	0.012	0.956
	150	0.75	4.91	0.042	0.963
	180	0.72	4.73	0.037	0.945
0.3	60	2.98	7.86	0.047	0.964
	90	1.27	7.57	0.026	0.876
	120	1.15	9.57	0.047	0.824
	150	1.31	5.53	0.025	0.937
	180	1.42	4.28	0.011	0.971
0.5	60	4.89	9.07	0.024	0.916
	90	1.69	7.72	0.049	0.947
	120	1.05	7.25	0.055	0.966
	150	1.13	5.74	0.032	0.882
	190	1.41	4.62	0.013	0.992

积应变增速会明显加快。这也表明,对于以土石混合料为主要填筑材料的高填方体,其沉降变形主要与自重有关,作用其表面的交通循环荷载将起到叠加作用,在估算山区支线机场高填方体沉降变形量时区分两者之间的差异并揭示其内在机理,将有助于提升计算精度。对此。

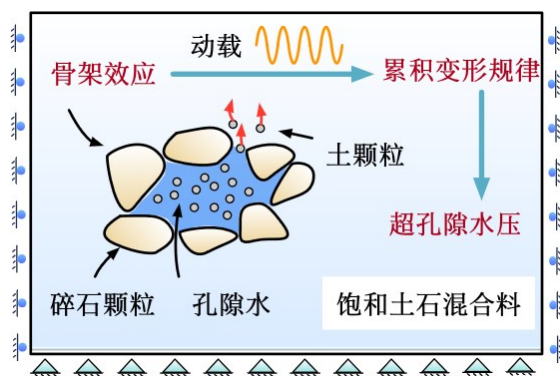


图 13 碎石的骨架效应对土石混合料变形规律影响机制

Fig.13 Influence mechanism of the skeleton effect of graded crushed stone on the deformation law of soil-rock mixture

另一方面,对于含石量为 50% 的土石混合料饱和试样,在不同固结压力条件下,位于高度 30 cm 处的孔压传感器测得的超孔隙水压随加载时间变化规律如图 14 所示。由图 14 可以看出,超孔隙水压的峰值大体上会随着固结压力增大而增大,在侧限

动态压缩过程中试样的上表面处于部分排水条件,超孔隙水压达到最大值后会逐渐消散。不过,由于级配碎石颗粒在空间上的不均匀分布会影响土石混合中水力通道的变化规律,动孔压试验结果具有较大离散性,其内在演变规律也有待进一步探究。

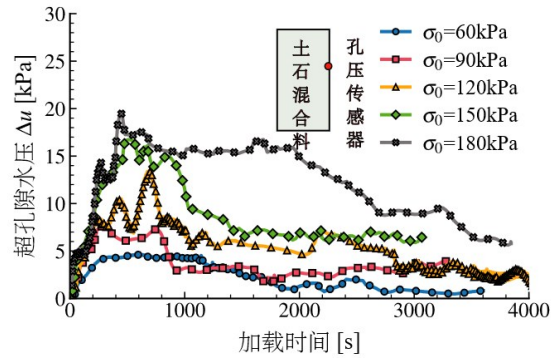


图 14 土石混合料饱和试样中超孔隙水压随时间变化规律

Fig.14 Evolution of the excess pore water pressure with loading time over saturated soil-rock mixture samples

3 结论

采用自主研发设备开展了饱和土石混合料的侧限动态压缩试验,分析了块石含量和固结压力对其累积变形规律的影响,以及试样内部超孔隙水压的演变规律。主要结论有:

1) 试验装置采用高精度伺服控制系统在试样上表面施加循环荷载,通过对照组试验初步验证了该设备的稳定性和数据采集精度,发现饱和黏土试样的轴向位移会随着加载时间逐渐增大并趋于稳定,对应的超孔隙水压则会在达到峰值后逐渐消散。

2) 在循环荷载作用初期,饱和土石混合料试样的累积轴向应变会随着加载次数增加快速增长,但随着试样被逐渐压密,增长速率在后续加载过程中逐渐减小。此外,试样的最大累积变形量会随着固结压力增大而增大,增长幅度会随着块石含量增加呈上升趋势,试样的超孔隙水压的演变规律也会有所差异。

3) 提出新的数学模型来描述不同块石含量和固结压力对饱和土石混合料在循环荷载作用下的累积变形规律,模型计算结果与试验结果较为接近,发现试样的最大累积变形量会随着固结压力增大而增大,但增大块石含量反而会减小。

参考文献

[1] WANG Y, LI X, ZHENG B. Stress-strain behavior of soil-rock mixture at medium strain rates-Response to seismic dynamic loading [J]. Soil Dynamics and Earth-

- quake Engineering, 2017, 93: 7-17.
- [2] 麻志刚, 肖建章, 吴帅峰, 等. 高填方土石混合料的工程特性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023(增刊 1): 366-371.
- MA Z G, XIAO J Z, WU S F, et al. Analysis of soil-rock mixture engineering characteristics of airport high fill [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023(Sup 1): 366-371. (in Chinese)
- [3] 边宏光, 王顺, 马海善, 等. 基于随机场理论的土石混合体边坡稳定性[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 162-170.
- BIAN H G, WANG S, MA H S, et al. Stability of soil-rock mixture slopes based on random field theory [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 162-170. (in Chinese)
- [4] 凌道盛, 王云龙, 赵云, 等. 飞机主起落架移动荷载作用下道基动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 64-73.
- LING D S, WANG Y L, ZHAO Y, et al. Dynamic response of subgrade under moving loads of main landing gears [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 64-73. (in Chinese)
- [5] 涂义亮, 刘新荣, 任青阳, 等. 含石量和颗粒破碎对土石混合物强度的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3919-3928.
- TU Y L, LIU X R, REN Q Y, et al. Effects of rock contents and particle breakage on strength characteristics of soil-rock aggregate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3919-3928. (in Chinese)
- [6] 涂义亮, 李璐珊, 方忠, 等. 块石形状对土石混合物宏观观剪力学特性的影响[J]. 工程力学, 2025, 42(6): 126-136, 163.
- TU Y L, LI L S, FANG Z, et al. Effect of rock block shape on macro-meso-shear mechanical properties of soil-rock mixture [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(6): 126-136, 163. (in Chinese)
- [7] 张敏超, 刘新荣, 王鹏, 等. 不同含石量下泥岩土石混合物剪切特性及微观破坏机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 17-26.
- ZHANG M C, LIU X R, WANG P, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 17-26. (in Chinese)
- [8] 薛亚东, 刘忠强, 黄宏伟. 砂砾石混合物抗剪强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012(6): 75-79.
- XUE Y D, LIU Z Q, HUANG H W. Experimental analysis on shear strength characteristics of sand-gravel mixtures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012(6): 75-79. (in Chinese)
- [9] 杨忠平, 李勇华, 李诗琪, 等. 不同含石率土石混合物水力侵蚀分异特征及机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 133-145.
- YANG Z P, LI Y H, LI S Q, et al. Differentiation characteristics and mechanism of hydraulic erosion of soil-rock mixtures with different rock contents [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 133-145. (in Chinese)
- [10] 黄锋, 米吉龙, 杨永浩, 等. 分级动荷载下土石混合体滞回曲线形态特征试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 674-684.
- HUANG F, MI J L, YANG Y H, et al. Morphological characteristics of hysteretic curves of soil-rock mixture under stepped axial cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 674-684. (in Chinese)
- [11] WANG S N, GAO X Q, MA W, et al. Experimental study on static and dynamic characteristics of geopolymer-stabilized coarse-grained soils [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(2): 717-739.
- [12] SUN K, LI Z Q, LI L, et al. Study on cumulative plastic deformation and resistivity-based damage evolution of frozen soil-rock mixtures under cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 194: 109374.
- [13] 杨校辉, 朱彦鹏, 郭楠. 高填方土石混合物强度与变形特性及沉降预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1780-1790.
- YANG X H, ZHU Y P, GUO N. Strength and deformation characteristic of soil-rock mixture and settlement prediction in high filled projects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1780-1790. (in Chinese)
- [14] 魏迎奇, 蔡红, 吴帅峰, 等. 高填方土石混合物强夯振动响应及加固机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 237-240.
- WEI Y Q, CAI H, WU S F, et al. Vibration response and reinforcement mechanism of high-fill soil-stone mixtures by dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 237-240. (in Chinese)
- [15] 李泽闯, 程培峰, 胡志文, 等. 土石路堤压实质量控制与碾压动力响应模拟分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 33-41.
- LI Z C, CHENG P F, HU Z W, et al. Compaction quality control and rolling dynamic response simulation analysis of earth-rock embankment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 33-41. (in Chinese)
- [16] 刘大鹏, 杨晓华, 王婧, 等. 砾类土在循环荷载作用下的变形影响因素试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 68-72.
- LIU D P, YANG X H, WANG J, et al. Study on

- influence factors of gravel soil accumulative deformation under cyclic loading [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(4): 68-72. (in Chinese)
- [17] 余虔, 曹正龙, 寇璟媛, 等. 不同区域粉土累积塑性应变预测模型[J]. *公路交通科技*, 2024, 20(7): 56-64.
YU Q, CAO Z L, KOU J Y, et al. Cumulative plastic strain prediction model for silt in different regions [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2024, 20(7): 56-64. (in Chinese)
- [18] 杨奇, 王晓雅, 聂如松, 等. 间歇循环荷载作用下饱和砂土累积塑性变形及孔压特性研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(6): 1671-1682, 1694.
YANG Q, WANG X Y, NIE R S, et al. Characteristics of the cumulative plastic deformation and pore water pressure of saturated sand under cyclic intermittent loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1671-1682, 1694. (in Chinese)
- [19] 施明泽, 卢锡如. 有机玻璃受拉与受压弹性常数的测定及其与剪切弹性模量的关系[J]. *理化检验 物理分册*, 1991, 27(3): 42-43.
SHI M Z, LU X R. Determination of elastic constants of PMMA in tension and compression and its relationship with shear elastic modulus [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing))*, 1991, 27(3): 42-43. (in Chinese)
- [20] 张献民, 吕耀志, 董倩, 等. 基于弹性波理论的土石混填地基压实质量评价研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 2051-2057.
ZHANG X M, LÜ Y Z, DONG Q, et al. Evaluating compaction quality of soil-rock mixture based on theory of elastic waves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(11): 2051-2057. (in Chinese)
- [21] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体-基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1947-1954.
YANG Z P, JIANG Y W, LI S Q, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1947-1954. (in Chinese)
- [22] 王涛, 刘斯宏, 宋迎俊, 等. 基于骨架孔隙比的土石混料强度变形特性[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2973-2983.
WANG T, LIU S H, SONG Y J, et al. Strength and deformation characteristics of soil-rock mixtures using skeleton void ratio [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 2973-2983. (in Chinese)
- [23] 蔡正银, 李小梅, 关云飞, 等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(5): 923-929.
CAI Z Y, LI X M, GUAN Y F, et al. Particle breakage rules of rockfill materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(5): 923-929. (in Chinese)
- [24] 蔡迎春, 郑元勋, 刘忠玉, 等. 飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 2863-2868.
CAI Y C, ZHENG Y X, LIU Z Y, et al. Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2863-2868. (in Chinese)
- [25] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [26] PUMPHREY JR N D, LENTZ R W. Deformation analyses of Florida highway subgrade sand subjected to repeated load triaxial tests [M]// *Transportation Research Board. Geotechnical Engineering*, 1986, 1089: 49-56.
- [27] TANG L, YAN M H, LING X Z, et al. Dynamic behaviours of railway's base course materials subjected to long-term low-level cyclic loading: Experimental study and empirical model [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(6): 537-545.
- [28] SALOUR F, ERLINGSSON S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multi-stage RLT tests [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(3): 236-246.

(编辑 XXX)