

DOI: 10.11779/CJGE2023S20037

静动力荷载作用下路基粗粒料力学特性试验研究

杨 峰¹, 王伟斌¹, 谢志伟², 马一跃¹, 吕玺琳²

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 粗粒土因其良好的力学性能被广泛应用于路基建设中, 但长期荷载作用下填料的变形严重影响了道路结构的安全运营。为了揭示典型路基应力水平及交通荷载条件下粗粒土的变形及强度演化, 开展了一系列粗粒土填料静动力学特性试验, 并进一步分析了静动力作用下填料破碎特征及差异。研究表明, 低围压情况下, 较小的轴向应变就可以使材料达到峰值应力状态, 且围压的增加可显著提升填料峰值强度。不同围压下, 填料在剪切过程中均出现剪胀现象, 其中围压小于 300 kPa 试样的最终体应变均大于 0。在动力试验中, 填料轴向累积应变在相同加载次数下随着动偏应力的增加而增大, 随围压的增加而减小, 且前 500 次加载所造成的轴向应变占总应变的 80%。静动力作用下的填料颗粒破碎形式存在差异, 静荷载作用下的颗粒破碎主要以边角及整体断裂为主, 而动荷载下主要以表面研磨和边角轻微断裂为主。

关键词: 粗粒土填料; 应力应变关系; 循环响应; 累积沉降; 颗粒破碎

中图分类号: TU411; TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0247-06

作者简介: 杨 峰(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事道路、隧道、桥梁现场施工管理等工作。E-mail: 747683667@qq.com。

Experimental study on mechanical characteristics of coarse-grained materials of subgrade under static-dynamic loading

YANG Feng¹, WANG Weibing¹, XIE Zhiwei², MA Yiyue¹, LÜ Xilin²

(1. Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The coarse-grained soil is widely used as the filling materials in subgrade construction due to its excellent mechanical properties. However, the significant deformation of the filling materials caused by long-term loading severely impacts the safe operation of the roadbed structures. In order to reveal the deformation and strength evolution of the coarse-grained soil under typical subgrade stress levels and traffic loading conditions, a series of static-dynamic characteristic tests on the coarse-grained soil are conducted. Furthermore, an in-depth analysis is performed on the differences in the breakage characteristics under static-dynamic loading. The research indicates that under low confining pressure, a smaller axial strain can reach the peak stress state, and the increase in the confining pressure can significantly enhance the peak strength of the filling materials. Under different confining pressures, the fill materials exhibit shear expansion during the shearing process, with the final volumetric strain of samples under the confining pressures less than 300 kPa all exceeding 0. In the dynamic tests, the axial accumulation of the filling materials increases with the dynamic deviator stress, decreases with the confining pressure under the same load cycles, and the axial strain generated by the first 500 loading cycles constitutes 80% of the total strain. The particle breakage pattern in the filling materials under static and dynamic loading differs significantly. Under static loading, the particle breakage primarily occurs in the form of edge fractures and overall rupture. Conversely, under dynamic loading, it predominantly involves surface abrasion and slight edge fractures.

Key words: coarse-grained soil; stress-strain relationship; cyclic response; accumulated strain; particle breakage

0 引言

因具备优良的力学性能, 粗粒土作为路基回填材料被广泛应用。作为道路结构主要的受力部件, 路基不仅要承担道路上覆静荷载, 还受到交通荷载的长期冲击作用。而在上覆静动荷载的作用下, 路基填料受

力变化复杂, 长期作用会导致路基变形持续发展。总体而言, 土颗粒之间持续的相互移动及破碎是填料力

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1433123); 广西重点研发计划项目(AB22080032)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者 (E-mail: zhiweixie1963@163.com)

学性能的衰减及发生体积变形的根本原因。因此,从颗粒破碎角度分析粗粒土路基填料力学性能及长期累积变形特性是十分必要。

针对粗粒土路基静动力特性,国内外学者利用室内试验^[1-2]、数值模拟^[3-4]、物理模型及原位试验^[5-6]等方式开展了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果。如 Trinh 等^[7]利用大三轴仪对路基下部受污染粗粒土力学性能进行了分析,并得出压实含水率越低,材料抗剪强度越高的结论。Harkness 等^[8]利用离散元通过三维多边形代替道砟,提出了一种新的接触定义,有效解决了不同围压下细观参数无法统一的问题。Liu 等^[9]设计了一个模型试验装置来研究外荷对道床内颗粒运动的影响,研究发现水平平移和旋转是道砟颗粒在循环荷载作用下的重要运动模式。但这些研究仅关注于粗粒材料在不同环境因素、加载条件及细观颗粒影响下的力学特性,并未考虑不同加载条件下颗粒破碎特性及其对材料强度及变形的影响。

本文模拟典型路基所处应力水平和长期交通荷载的作用,采用美国 GCTS 公司生产的 STX-600 大型三轴仪(图 1)对粗粒土材料进行了排水条件下的静力剪切及循环加载试验,分析了围压、应力水平等因素对粗粒土填料力学特性及颗粒破碎的影响,并进一步分析了颗粒破碎对填料强度及累积变形的影响。

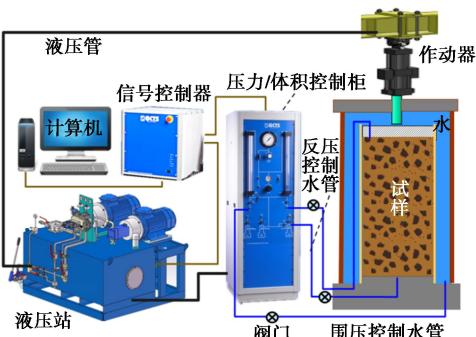


图 1 STX-600 大型动静三轴仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of STX-600 large-scale static-dynamic triaxial apparatus

1 试验材料及方案

试验用料取自浙江宁杭某路基施工现场,为了分析现场实际填料力学特性,选取不同区域填料进行开挖打包,并利用隔潮性包装材料密封运输以保证其天然含水量不变。获取的填料颗粒尺寸差异较大,粒径范围为 0.075~60 mm,其中粗粒以高棱角型砂岩粒为主,试样级配累计曲线如图 2 所示。通过室内试验获取材料的基本物理参数如下: $\rho_{\max} = 2.35 \text{ g/cm}^3$, $w = 4.31\%$, $d_{50} = 7.1 \text{ mm}$, $C_u = 13.77$, $C_c = 1.35$,粗颗粒含量为 57%。

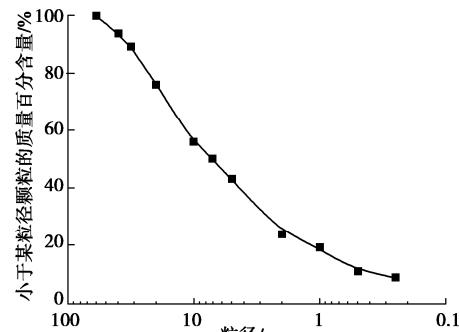


图 2 试样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of test sample

考虑到实际工程中路基填料埋深较浅,采用精度较高的液压控制大型三轴仪,对 300 mm×600 mm 标准圆柱体试样进行系列试验。制样采用分层击实法,分 6 层击实,每层目标厚度 100 mm^[10]。同时,为保证试样均匀及击实能量一致,夯实锤均从同一相对高度下落^[11]。考虑《公路路基设计规范》^[12]《铁路路基设计规范》^[13]等相关要求,系列试验压实度均保证在 95% 左右。

本研究共进行 15 组三轴试验,其中静力试验 6 组,动力试验 9 组,方案如表 1 所示。同时,对试验前后颗粒级配进行了分析,以分析不同荷载下颗粒破碎行为差异。静力试验中,通过控制顶部压盘以恒定速度 (0.1%/min) 对试样进行加载,在轴向应变达到 15% 时停止试验。在动力试验中,在 10000 次加载循环下分析动偏应力 q^{ampl} 和围压 σ_3 对粗粒料累积应变及回弹模量的影响,试样均进行等压固结,采用频率为 1 Hz 的半正弦波进行动力加载。

表 1 粗粒土力学特性分析试验方案

Table 1 Schemes of analysis of mechanical properties of soil-rock mixtures

试验编号	σ_3 / kPa	$q^{\text{ampl}} / \text{kPa}$	N
SL1	20	—	—
SL2	40	—	—
SL3	60	—	—
SH1	100	—	—
SH2	200	—	—
SH3	300	—	—
D1	20	20, 60, 100	10000
D2	40	20, 60, 100	10000
D3	60	20, 60, 100	10000

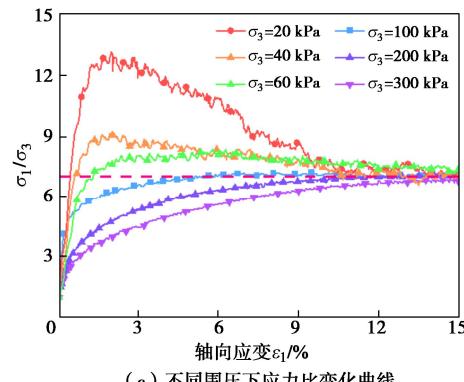
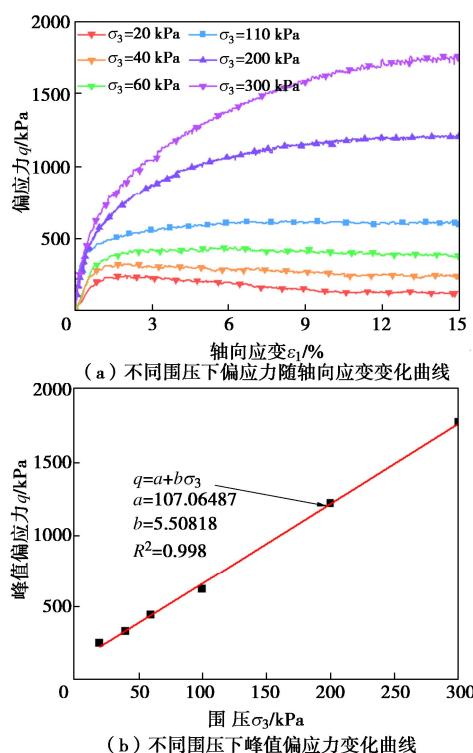
2 静力试验结果及分析

采用了两组围压 (SL、SH) 进行对比试验,以模拟表层及深层路基填料侧向应力水平,不同围压下排水剪切试验结果如图 3 所示。不同围压下试样的轴向偏应力均呈现出随轴向应变先增大后减小/稳定的趋势。但不同围压下竖向偏应力达到稳定状态或峰值状态时对应轴向应变存在明显差异,整体上呈现出随围

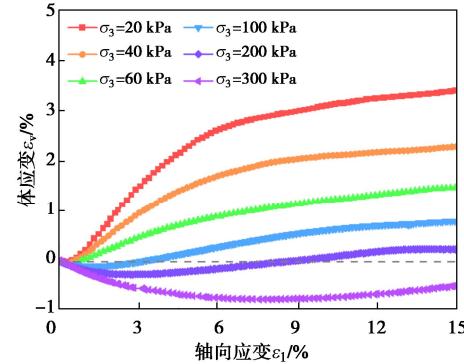
压的增加而增大的趋势。如围压 20 kPa 时, 轴向应变在 1.6% 时偏应力处于峰值状态, 而围压 300 kPa 时, 轴向应变达到 13% 偏应力才缓慢趋于稳定。不同条件下粗粒土应力应变关系均出现应变软化现象, 但软化趋势随围压的增加而减弱, 在围压 300 kPa 时试样的软化现象已不明显。不同条件下试样峰值偏应力值随着围压变化情况如图 3 (b) 所示, 可以发现峰值偏应力基本呈现出随围压增加线性增长的发展趋势。

不同围压下填料主应力比 σ_1/σ_3 随轴向应变变化曲线如图 3 (c) 所示。可以发现高低围压下曲线发展趋势存在明显的差异, 低围压下主应力随轴向应变先快速增长, 再衰减直至稳定, 而高围压下曲线则是呈缓慢增长直至稳定的发展规律。整体而言, 相同轴向应变下的材料主应力随围压的增加而减小, 但最终趋于稳定, 其值约为 7。

对比分析图 3 (d) 可以发现, 试样在典型路基侧向应力水平范围内的体应变均表现为先剪缩后剪胀的发展趋势。低围压下试样的最小体应变均高-0.15%。而高围压条件下试样的最小体应变随围压增加减小明显, 300 kPa 围压下的最小体应变达到了-0.8%。这表明围压的增加限制了颗粒的滑移, 使试样持续处于压缩状态。此外, 试样在不同条件下的剪胀程度随围压的增加而减弱, 且低围压试样的剪胀远远大于高围压。从图 3 (d) 可以看出, 除围压 300 kPa 试样, 其余试样最终体积均大于初始状态, 这表明粗粒土材料在路基应力水平范围内的静载作用下, 其最终多呈剪胀状态且受围压影响较大。



(c) 不同围压下应力比变化曲线



(d) 不同围压下体应变随轴向应变变化曲线

图 3 不同围压下排水剪切试验结果

Fig. 3 Results of drained shear tests under different confining pressures

为研究粗粒土填料强度特性, 采用 Mohr-Coulomb 准则对不同围压下大三轴静力剪切结果进行分析, 得出 20~300 kPa 围压下材料的黏聚力和内摩擦角分别是 $c=20.9$ kPa, $\varphi=47.2^\circ$ 。

3 动力试验结果及分析

3.1 累积塑性应变

通常而言, 填料的总应变 ε_1 是由累积塑性应变 $\varepsilon_1^{\text{acc}}$ 和弹性应变 $\varepsilon_1^{\text{ampl}}$ 组成, 如图 4 所示。可以发现, 随着加载次数的增加, 材料的塑性累积应变从开始的迅速增加逐渐过渡到稳定增长阶段, 且弹性应变在初期的波动后也逐渐趋于稳定。图 5 显示了不同条件下材料累积轴向应变的发展趋势, 可以看出各影响因素下材料的轴向累积应变在初期的迅速增长后均逐渐稳定, 且所有试验均处于安定理论的塑性安定或塑性蠕变状态^[14]。在相同动偏应力下, 粗粒土的累积轴向应变随着围压的增加不断减小, 而相同围压下, 累积轴向应变则随着动偏应力的增加而增大。由于循环试验是在相对较小的应变范围内完成的, 可以发现材料的循环响应主要表现为剪切收缩, 这与静力试验中发生的剪切膨胀有很大的差距。

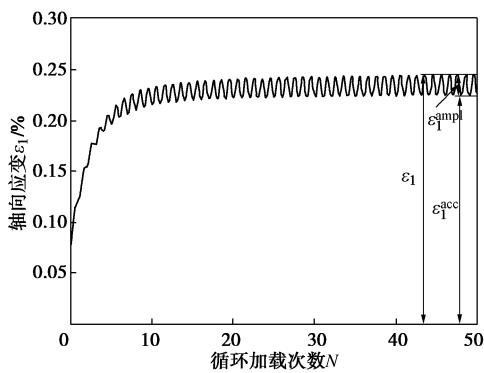


图 4 弹性应变和累积塑性应变示意图

Fig. 4 Schematic of resilient and plastic accumulated axial strains

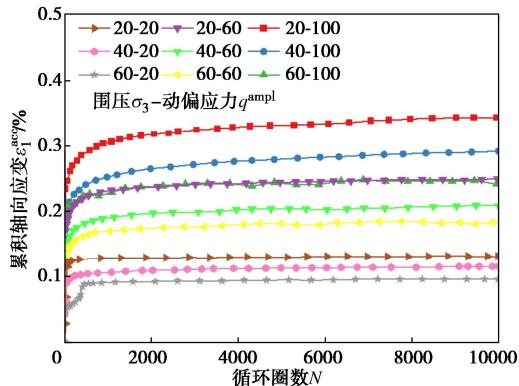
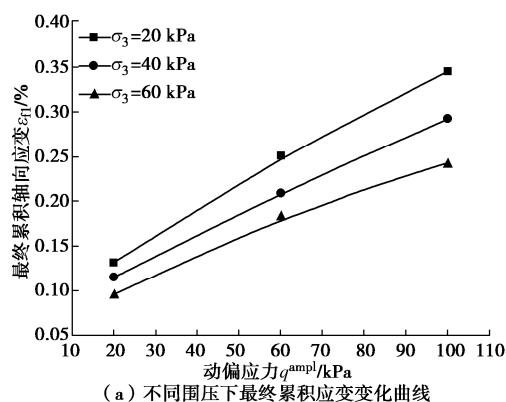


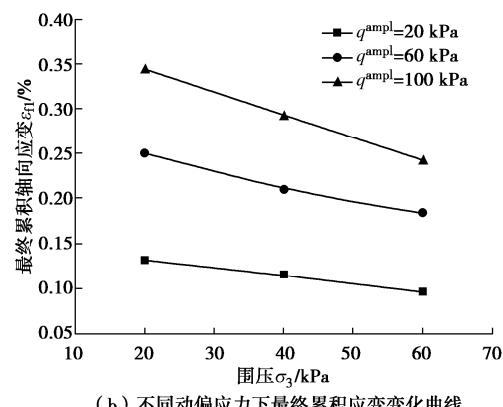
图 5 不同条件下轴向累积应变随循环次数发展曲线

Fig. 5 Accumulated axial strain versus number of cycles under different conditions

材料的长期循环响应可以通过最终累积轴向应变进行定量分析, 如图 6 所示。可以发现, 不同条件下填料最终累积轴向应变均随着动偏应力的增加而增加, 且围压越小, 最终累积轴向应变数值越大, 其增长速率越快, 如在动偏应力 60~100 kPa 下, 材料在 20 kPa 围压时的累积轴向应变增量比 60 kPa 围压多了 60% 左右。相同动偏应力下, 材料的最终累积轴向应变则随着围压的增加不断减小, 且动偏应力越大, 最终累积轴向应变随围压的增加, 其减小速率越快。试验结果验证了路基变形程度主要是因为车辆载荷大小的影响以及交通荷载对路基填料的塑性变形影响随深度不断衰减这一结论。



(a) 不同围压下最终累积应变变化曲线



(b) 不同动偏应力下最终累积应变变化曲线

图 6 不同条件下最终累积轴向应变变化情况

Fig. 6 Variation of accumulated axial strain under different conditions

3.2 回弹模量分析

作为评价道路填料刚度的重要指标, 材料的回弹模量 $M_r = q^{ampl} / \varepsilon_1^{plastic}$ 一直是研究的重点。图 7 绘制了长期循环荷载下材料的回弹模量变化情况, 以分析围压及动偏应力对 M_r 的影响。可以发现, 不同加载条件下材料的回弹模量在几个周期加载后均逐渐稳定。相同围压下, 动偏应力越大材料整体回弹模量越高, 且随着动偏应力的增加, 回弹模量的增长速率不断减小。对于相同动偏应力, 材料的回弹模量存在类似的发展趋势, 即随着围压的增加不断增大, 这表明较大的围压限制了材料变形, 使得填料竖向弹性变形得到较好的控制。

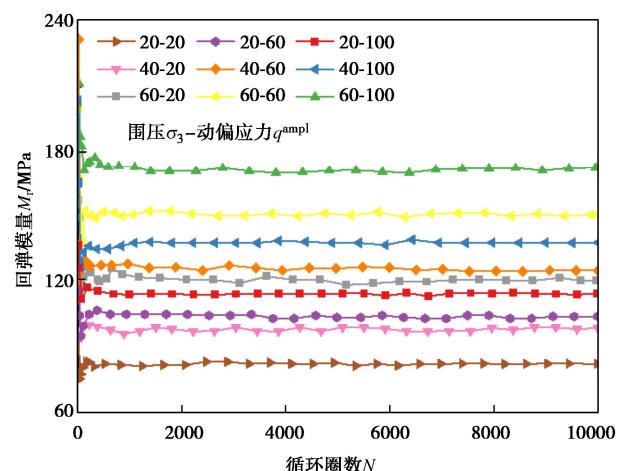


图 7 不同条件下回弹模量变化情况

Fig. 7 Variation of resilient modulus under different conditions

材料在 10000 次加载后的最终回弹模量如图 8 所示, 可以发现相同围压下材料的最终回弹模量随着动偏应力的增加而增大, 但增长速率在不断减小。而在相同动偏应力下, 材料最终回弹模量同样是随着围压的增加而增大, 但其增长速率则是不断增大。

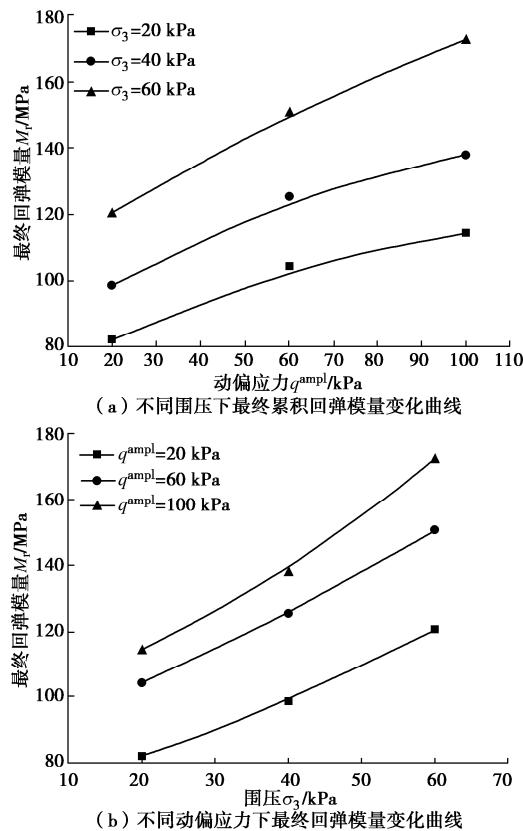


图 8 不同条件下最终回弹模量变化情况

Fig. 8 Variation of final resilient modulus under different conditions

4 颗粒破碎特性分析

4.1 试验后颗粒破碎特征

颗粒破碎不仅改变材料级配, 还会弱化材料强度, 影响结构的稳定性。为分析不同加载条件下粗粒土颗粒破碎情况, 对静力试验及部分动力试验 ($\sigma_3=20$ kPa) 加载前后材料的各粒组含量变化情况进行筛选分析。由图 9 可以看出, 静动荷载下粗粒土材料均出现了颗粒破碎现象, 但加载形式的差异导致了颗粒破碎区间的不同。静力荷载下, 颗粒破碎主要发生在 10 mm 粒径以上颗粒, 含量增加的粒径区间主要为 1 mm~10 mm, 这是因为静力荷载作用下材料的颗粒破碎主要为棱角断裂并存在少量的研磨现象。同时可以发现, 在静力试验中各粒径颗粒破碎程度是随着围压的增加而增加的, 这主要是因为较高的围压对颗粒移动限制程度更高, 从而造成更多的棱角断裂现象。在动力试验中, 材料发生颗粒破碎的粒组范围较广, 增加的粒径组主要发生在细粒范围 (小于 2 mm)。这是因为颗粒在循环荷载的长期作用下不断地移动翻转, 而在此过程中, 颗粒移动会产生持续地研磨破碎现象。整体而言, 动力荷载作用下材料的细颗粒含量的增长程度随着动偏应力的增加而加大。

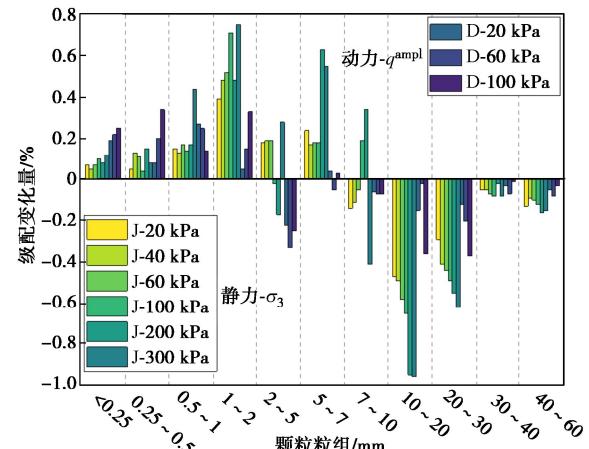


图 9 不同条件下试验前后颗粒含量变化情况

Fig. 9 Variation in particle content of materials before and after tests under different conditions

4.2 颗粒破碎分析

为量化分析粗粒土在不同加载条件下的颗粒破碎情况, 采用 Marsal 提出的颗粒破碎指标进行分析, 其计算原理是试验前后各筛分粒组百分含量之差的绝对值之和^[15], 其具体表达式如下:

$$B_g = \sum_{k=1}^n |W_k| \quad (1)$$

式中, W_k 表示材料某一粒组在试验前后的颗粒含量之差。

由图 10 可以发现, 颗粒破碎指标随着围压、动偏应力的增加均呈现线性增长趋势。但静力试验的破碎增长速率更快。对材料破碎行为进行分析可知, 围压增加使得颗粒移动和旋转受到了更大的约束, 因此在外力作用下颗粒棱角破碎不断增加; 同时, 动偏应力的增加也使颗粒间的接触力升高, 进而导致颗粒的裂纹和缺陷不断扩展, 最后在长期的加载下, 颗粒不断发生研磨破碎。

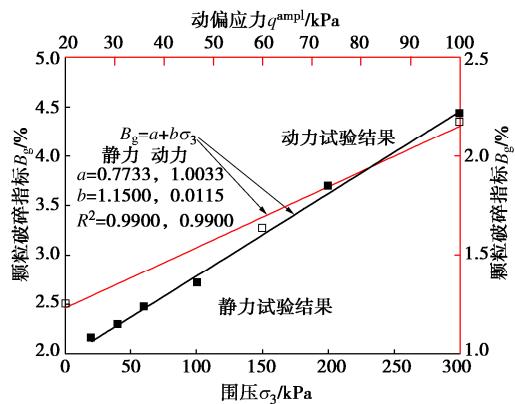
图 10 颗粒破碎指标与围压和 q^ampl 关系曲线

Fig. 10 Curves of relationship between B_g and σ_3 or q^ampl

5 结 论

基于静动荷载下粗粒土大三轴试验, 研究了不同

应力水平下粗粒土应力-应变行为及材料剪胀性变化规律。同时针对粗粒土路基所受交通荷载特点,进一步分析了围压和循环偏应力对粗粒土长期累积变形的影响。并对比分析了不同荷载下粗粒土的颗粒破碎行为及其在不同条件下的发展规律。主要结论如下:

(1) 静力剪切试验中,粗粒土峰值强度随围压呈现线性增长的发展趋势,同时,粗粒土在不同条件下均存在明显的剪切膨胀现象。

(2) 循环剪切条件下,粗粒土累积应变及最终累积应变均与动偏应力呈现正相关而与围压呈现负相关关系。相同条件下,粗粒土回弹模量均随着动偏应力或围压的增加而增加。

(3) 不同加载条件下粗粒土颗粒破碎形式不一,静力加载下,颗粒破碎以棱角断裂为主;而长期动载导致的颗粒研磨破碎更多。粗粒土颗粒破碎指标随围压、动偏应力的增加均呈现线性增长的发展趋势。

参考文献:

- [1] SEIF EL DINE B, DUPLA J C, FRANK R, et al. Mechanical characterization of matrix coarse-grained soils with a large-sized triaxial device[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(4): 425-438.
- [2] 吕玺琳, 程博文, 张甲峰, 等. 含水率对土石混合料力学特性影响试验研究[J]. 地基处理, 2023, **5**(2): 97-104. (LÜ Xilin, CHENG Bowen, ZHANG Jiafeng, et al. Experimental study on the influence of moisture content on the mechanical properties of soil-rock mixture[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, **5**(2): 97-104. (in Chinese))
- [3] XU M, HONG J T, SONG E X. DEM study on the effect of particle breakage on the macro- and micro-behavior of rockfill sheared along different stress paths[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **89**: 113-127.
- [4] 吕玺琳, 马一跃, 徐柯锋, 等. 含砾量对土石混合料力学特性影响离散元模拟[J]. 路基工程, 2022(4): 19-23. (LÜ Xilin, MA Yiyue, XU Kefeng, et al. Discrete element simulation of influence of gravel content on mechanical properties of soil-rock mixture[J]. Subgrade Engineering, 2022(4): 19-23. (in Chinese))
- [5] ZHANG Z L, XU W J, XIA W, et al. Large-scale in-situ test for mechanical characterization of soil-rock mixture used in an embankment dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, **86**: 317-322.
- [6] 吕玺琳, 庞博, 朱长根, 等. 桩承式路堤桩土荷载分担特性物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊2): 50-53. (LÜ Xilin, PANG Bo, ZHU Changgen, et al. Physical model tests on load-sharing characteristics of piles and soils in pile-supported embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S2): 50-53. (in Chinese))
- [7] TRINH V N, TANG A M, CUI Y J, et al. Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests[J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(3): 511-523.
- [8] HARKNESS J, ZERVOS A, LE PEN L, et al. Discrete element simulation of railway ballast: modelling cell pressure effects in triaxial tests [J]. Granular Matter, 2016, **18**(3): 65.
- [9] LIU S S, HUANG H, QIU T, et al. Effect of geogrid on railroad ballast particle movement[J]. Transportation Geotechnics, 2016, **9**: 110-122.
- [10] CAO Z G, CHEN J Y, CAI Y Q, et al. Long-term behavior of clay-fouled unbound granular materials subjected to cyclic loadings with different frequencies[J]. Engineering Geology, 2018, **243**: 118-127.
- [11] CAI Y Q, CHEN J Y, CAO Z G, et al. Influence of grain gradation on permanent strain of unbound granular materials under low confining pressure and high-cycle loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(3): 04017156.
- [12] 公路路基设计规范: JTGD30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTGD30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [13] 铁路路基设计规范: TB10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. (Code for Design of Railway Earth Structure: TB10001—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese))
- [14] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLLOIDIS T. Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, **25**(12): 967-979.
- [15] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, **93**(2): 27-43.

(编校: 明经平)