

DOI: 10.11779/CJGE2024S20035

纤维地聚物复合改良粗粒填料动力变形特性试验研究

王盛年¹, 谷雷雷², 吴志坚^{*1}, 崔晓艳¹, 薛钦培¹, 徐鑫磊³, 旦东³

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏南京 211816; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024; 3. 中国安能集团第三工程局有限公司重庆分公司, 重庆 401320)

摘要: 纤维地聚物复合改良可提升粗粒填料强度、刚度等性能, 减小受长期动载作用引发的累积塑性变形。通过抗压强度试验探讨地聚物理想组分设计及其与纤维在土中的最佳配比, 然后开展纤维地聚物复合改良粗粒填料抗压、循环加载卸载试验, 分析块石含量、应力水平对其累积变形特性和破坏模式的影响。结果表明: 地聚物中偏高岭土、硅酸钠和生石灰最佳质量比为 3.6:1:0.8, 三者在土中最优掺量为 15%, 纤维最佳掺量和长度为 0.4% 和 12 mm; 纤维地聚物复合改良粗粒填料抗压强度随块石含量呈先增后减再增变化, 块石含量 30% 时其力学性能最好; 纤维地聚物复合改良粗粒填料动力累积应变速率随循环加载次数增加呈先快后慢再快发展, 随块石含量、荷载水平提高, 裂隙数量和扩展速率增加明显, 破坏模式由剪切滑移向竖向劈裂转变。研究成果可为纤维地聚物复合改良粗粒填料动力特性认知和工程应用提供参考。

关键词: 粗粒填料; 地聚物; 纤维; 动力变形特性; 破坏模式

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0183-06

作者简介: 王盛年(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特殊土静动力特性与工程应用方面研究工作。E-mail: shengnian.wang@njtech.edu.cn。

Dynamic deformation characteristics of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers

WANG Shengnian¹, GU Leilei², WU Zhijian¹, CUI Xiaoyan¹, XUE Qinpei¹, XU Xinlei³, DAN Dong³

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. CCCC First Highway

Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100024, China; 3. Chongqing Branch of China Anneng Group Third Engineering Bureau Co., Ltd., Chongqing 401320, China)

Abstract: The utilization of fiber and geopolymers to stabilize coarse-grained fillers can enhance their engineering performances such as strength and rigidity, and reduce the cumulative plastic deformation caused by long-term dynamic loadings. In this study, a series of unconfined compression tests are conducted to investigate the ideal material composition design of metakaolin-based geopolymers and the optimal mixing ratio of fiber and geopolymers for soil stabilization. Then, the unconfined compressive strength and cyclic loading/unloading tests on fiber and metakaolin-based geopolymers stabilized coarse-grained fillers are carried out. Their cumulative deformation characteristics and failure modes affected by rock content and loading stress level are discussed. The results show that the ideal mixing ratio of metakaolin, Na₂SiO₃, and CaO for preparing geopolymers is 3.6:1:0.8, and their optimal dosage for soil stabilization is 15%. The optimal content and length of basalt fiber are 0.4% and 12 mm, respectively. The compressive strength of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers increases first, then decreases, and then increases with the rock block content. Their best mechanical performances are achieved when the rock block content is 30%. The cumulative strain rate of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers increases first, then slowly, and then rapidly as the number of cycles increases. With the increase of the rock block content and loading stress level, the number and propagation rate of cracks increase significantly, and the failure mode of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers changes from shear-slip to vertical splitting. This study can provide references for the dynamic cognition and engineering application of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers.

Key words: coarse-grained filler; geopolymers; fiber; dynamic deformation characteristic; failure mode

基金项目: 国家自然科学基金项目(42330704; 41902282); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022605)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者(E-mail: zhijianlz@163.com)

0 引言

填料品质直接关乎高铁路基长期稳定性，是决定路基工程服役性能可靠的关键因素^[1]。优质粗粒填料具有高刚、高强、高抗水蚀等优点，是高铁路基优选材料。然而，高铁沿线场地条件复杂多变，天然填料往往存在级配不良、工程性能不满足现行规范要求等缺陷，使得土方工程成本大幅增加，不利工程总成本控制。若能将沿线不良粗粒填料改良为优良填料，不仅可有效缓解优质填料短缺困境，亦能从资源节约、工期缩短、成本降低等多方面提高工程建设可实施性。

当前，路基填料性能改良方式主要包括物理改良和化学固化。其中，物理改良主要是通过改变填料颗粒级配构成，使其在压实过程中更易密实，改善结构稳定性，从而提升填料强度和刚度。如王晓明等^[2]发现，添加细粒土和粉煤灰可提高路基密实度和强度；石熊等^[3]指出，填料级配改良可使压实系数、变形模量等更易符合规范要求。尽管物理改良可操作性强、成本低廉，然而其对土体性能提高幅度却有限。化学改良是在填料中使用添加剂，借助新生化学物质改变填料内部结构，从而改善填料力学性能和整体性。如陈乐求等^[4]发现，水泥改良泥质板岩粗粒填料动强度、刚度将显著提高；Zhang 等^[5]指出，掺入 8%以上偏高岭土基地聚物稳定土干缩开裂变形较水泥土大幅降低；一些学者则探讨了水泥稳定土在路基基层中的应用可行性^[6-7]。在改良粗粒填料动力累积应变发展规律研究方面，Cerni 等^[8]、Rahman 等^[9]研究了加载次数、应变速率等对填料累积应变的影响；Li 等^[10]探讨了土性、应力状态对填料累积应变的影响；Lentz 等^[11]指出，土体干密度越大，孔隙越小，从而可获得较大刚度、抗变形能力；周文权等^[12]发现，动载作用下土体刚度变化与振次、围压关系密切；郑可扬等^[13]、张生等^[14]探究了粗粒填料累积变形与荷载次数间的关系；刘宝等^[15]发现，含水率、荷载作用次数等对填料累积变形特性有重要影响。上述研究可为改良粗粒填料特性研究提供有利参考。

以纤维地聚物复合改良粗粒填料为研究对象，借助室内试验探讨了地聚物理想组分设计，分析了其与纤维在土中的最优配比，并通过抗压和循环加卸载试验研究了纤维地聚物复合改良粗粒填料累积变形特性和破坏模式受块石含量和应力水平的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1) 粗粒填料

试验所用粗粒填料由级配碎石和细粒土配制而成，其中，细粒土为过 2 mm 筛黄褐色粉质黏土，天然密度为 2.685 g/cm³，液限为 34%，塑限为 18%，最优含水率为 12%，最大干密度为 1.7 g/cm³；碎石为灰岩颗粒，取自南京蛇鹿采石场，天然密度为 2150 g/m³。

(2) 地聚物

试验所用地聚物前驱体为白色粉体偏高岭土，其 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量超 95%，颗粒粒径为 1250 目；碱激发剂为硅酸钠（Na₂SiO₃）和生石灰（CaO）粉体混合物，两者均为化学纯、粒径小于 1 mm。

(3) 纤维材料

试验所用纤维为束状单丝玄武岩纤维，其密度为 2650 kg/m³，抗拉强度大于 2.0 GPa，长度规格为 3, 6, 9, 12, 15, 18 m。

1.2 试验仪器

试验选用微机控制电子万能试验机开展。该仪器最大工作频率 50.0 Hz，最大试验力 20 kN，变形测量精度为 ±0.5%，恒力、恒变形、恒位移控制范围为 0.2%~100%FS (FS 为满量程)，调速范围为 0.001~500 mm/min，速控精度为 ±1% (0.001~10 mm/min)。

1.3 试验方案

试验分两步进行：一是通过抗压强度试验确定地聚物和纤维理想配比设计，二是通过纤维地聚物复合改良粗粒填料抗压、循环加卸载试验探讨块石含量、应力水平对其动力累积变形规律和破坏模式的影响。

(1) 纤维地聚物复合改良细粒填料试验

纤维地聚物复合改良细粒填料性能研究采用抗压强度试验展开，试验加载速率为 1.0 mm/min。

a) 地聚物组分配比试验。首先，固定偏高岭土与碱激发剂质量比为 2:1，按 Na₂SiO₃ 和 CaO 质量分别 1:0.6, 1:0.72, 1:0.75, 1:0.8, 1:0.82, 1:0.83, 1:0.84, 1:0.85 确定两者最佳比例，然后保持 Na₂SiO₃ 和 CaO 不变，按偏高岭土与碱激发剂质量为 2:0.6, 2:0.8, 2:1, 2:1.2, 2:1.4, 2:1.6 确定偏高岭土与碱激发剂最佳掺比。测试试样直径为 10 mm，高为 20 mm，水胶比固定为 0.4。每组方案 3 个样，标准养护 7 d。

b) 地聚物改良土配合比试验。设计地聚物用量为干土质量的 10%, 12%, 14%, 15%, 16%, 18%，以确定其最佳用量。测试试样直径为 39.1 mm、高为 80 mm，按黏土最优含水率+2%考虑用水量，每组方案 3 个样，标准养护 7 d。

c) 纤维地聚物复合改良土配比试验。首先，固定纤维长度为 12 mm，设计掺量为 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%，以确定最佳掺量，然后，固定纤维掺量，设计长度 3, 6, 9, 15, 18 mm，以确定最佳长度。

测试试样尺寸和用水量同地聚物改良土方案, 每组方案 3 个样, 标准养护 7 d。

(2) 纤维地聚物复合改良粗粒填料试验

受仪器尺寸限制, 粗粒填料试样碎石最大粒径控制在 20 mm 以下。通过图 1 所示等效曲线制备级配碎石, 然后按块石体积占比 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 制备粗粒填料试样。地聚物和纤维用量以干粉砂土量为参考, 按照最佳设计确定, 用水量按岩块吸水 1%、粉砂土最优含水率+2% 考虑。测试试样直径 100 mm, 高 200 mm, 标准养护 7 d。测试时, 先开展单轴抗压强度试验, 再开展不同应力水平 (SR, 抗压强度 30%, 45%, 60%, 75%) 循环加载卸载试验。为方便表达, 采用缩写字符表示不同工况, 如 “RC10SR30” 表示块石含量 10%, 应力水平为抗压强度 30%。

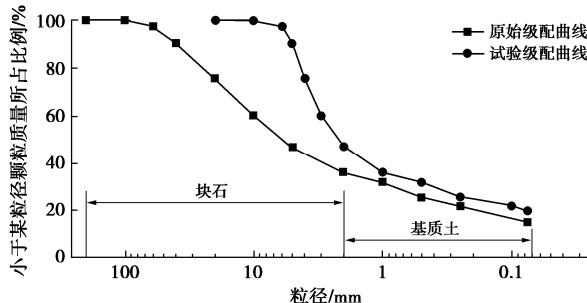


图 1 粗粒填料级配设计

Fig. 1 Gradation design of coarse-grained filler

1.4 试样制备

纤维地聚物复合改良细、粗粒填料试样制备均采用分层击实法。具体实施时, 先按照方案设计确定材料用量, 干混均匀后, 再将水分多次混入, 充分拌合, 最后再将混合物分四次倒入内径与试样尺寸相同圆柱形模具。每次装样前将已压实试样表面刮毛, 以确保层间连接良好。制样结束后, 将试样编号并放入标准养护环境静置 24 h, 拆模, 再标准养护至目标龄期。

2 试验结果与分析

2.1 地聚物组分配比分析

图 2 给出了不同 Na_2SiO_3 和 CaO 质量比下的地聚物抗压强度变化。可知, 随 Na_2SiO_3 和 CaO 摹比减小, 地聚物抗压强度呈先增后减变化。究其缘由可能是, 当 Na_2SiO_3 和 CaO 质量比较大时, 二者形成的碱性环境不能保证偏高岭土中硅铝酸盐充分解缩聚; 当 Na_2SiO_3 和 CaO 质量比较小时, 尽管二者形成的碱性环境可使地聚物反应充分, 但过量 CaO 将导致土体内 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 富存, 抗压强度因此不增反降。总体来看,

当 Na_2SiO_3 和 CaO 质量比为 1:0.82 时地聚物抗压强度最佳, 保守起见, 二者摳比取 1:0.8。图 2 同时给出了不同偏高岭土与碱激发剂下的地聚物抗压强度变化。可知, 随偏高岭土与碱激发剂质量比减小, 地聚物抗压强度同样呈先增后减变化, 当且仅当二者质量比为 2:1 时, 地聚物抗压强度最大。综上, 地聚物中偏高岭土: 硅酸钠: 生石灰最佳质量比为 3.6:1:0.8。

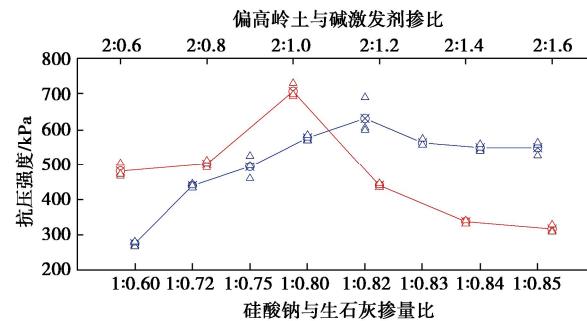


图 2 地聚物抗压强度

Fig. 2 Compressive strengths of geopolymer

2.2 地聚物改良土配合比设计

图 3 为不同地聚物摳量改良土的抗压强度变化。可知, 随地聚物摳量增加, 改良土抗压强度呈先增后减变化, 当且仅当地聚物摳量 15% 时, 改良土抗压强度达到最优。这可能是, 当地聚物摳量小于 15% 时, 地聚物反应可使土体完整性、密实性不断提升, 土体性能因此不断增强; 但当地聚物摳量大于 15% 时, Na_2SiO_3 与 CaO 反应放热强烈, 同时其早期水化凝胶沉积可能会阻碍地聚物反应, 改良土强度因此不增反减。综上, 改良土中地聚物最优摳量为 15%。

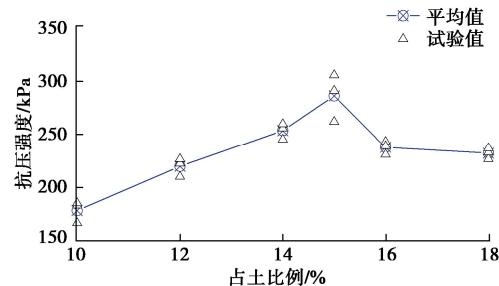


图 3 不同地聚物摳量改良土抗压强度

Fig. 3 Compressive strengths of silty sands with different geopolymers contents

2.3 玄武岩纤维最优配比分析

图 4 给出了不同纤维配比下纤维地聚物复合改良土的抗压强度变化。可知, 随纤维摳量和长度增加, 复合改良土抗压强度均呈先增后减变化, 当且仅当纤维摳量 0.4%、长度 12 mm 时, 复合改良土抗压强度达到最优。其缘由可能是, 当纤维长度和摳量过小时, 土体难以发挥其加筋作用; 当纤维长度和摳量增加到

一定程度后, 纤维比表面积提升给土体和纤维提供了更强的界面相互作用, 力学性能从而得以改善; 当纤维长度和掺量过高时, 纤维易出现聚集、结团现象, 导致内部孕育大量不连续面, 抗压强度因此不佳。

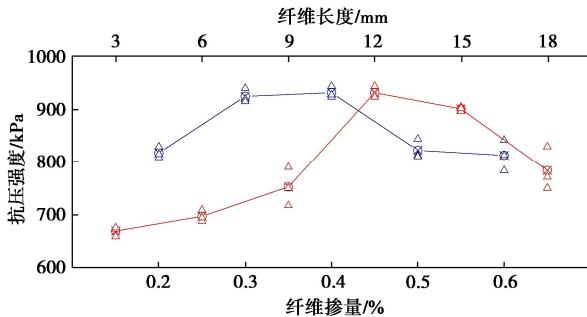


图 4 纤维地聚物复合改良土抗压强度曲线

Fig. 4 Compressive strengths of geopolymer-stabilized silty sands with different fiber contents and lengths

2.4 复合改良粗粒填料强度演变

图 5 为不同块石含量纤维地聚物复合改良粗粒填料抗压应力-应变关系曲线。可知, 复合改良粗粒填料抗压强度和切向刚度均随块石含量增加呈先增后减再增变化。当块石含量从 10% 增加到 30% 时, 填料内部块石骨架作用增强, 其抗压强度、刚度因此不断增大; 当块石含量从 30% 增加到 40% 时, 土-岩接触面增多, 由于粗粒填料受荷破坏总是率先发生于土石接触面, 抗压强度因此不增反降; 当块石含量超过 40% 后, 块石间咬合作用成为填料所受荷载主要承担者, 其在很大程度阻碍了填料内部裂纹扩展, 胶结基质亦在一定程度抑制了损伤发展, 力学性能因此再次提升^[16-17]。

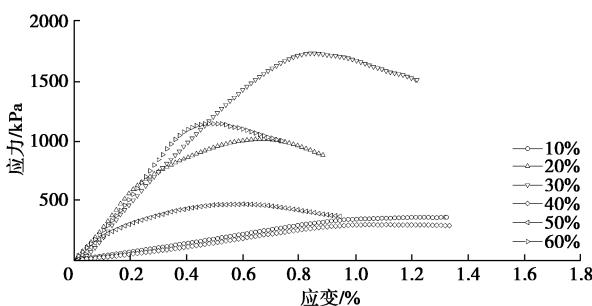


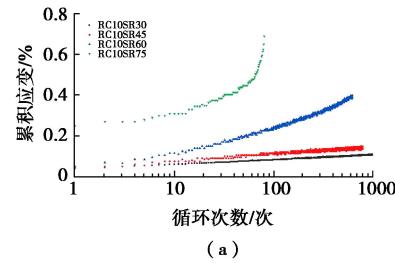
图 5 不同块石含量纤维地聚物改良粗粒填料抗压强度

Fig. 5 Compressive strengths of fiber and geopolymer-modified coarse-grained fillers with different rock block contents

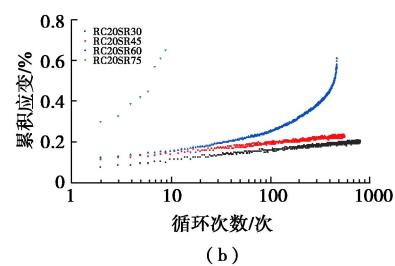
2.5 复合改良粗粒填料动力变形演化

取加卸载滞回圈应力-应变拐点处应变值作为每循环累积塑性应变。图 6 为不同块石含量纤维地聚物复合改良粗粒填料的动力累积应变曲线。可知, 复合

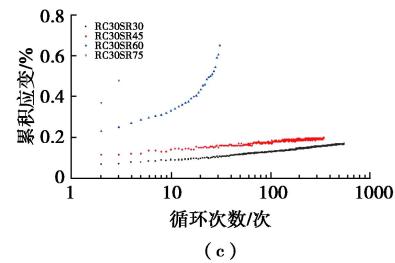
改良粗粒填料动力累积应变速率随循环加卸载次数增加呈先快后慢再快发展。在循环加卸载初期试样因压密原因应变增长快速, 当循环加卸载次数超过一定值后, 试样不可控塑性变形加剧。总体上, 复合改良粗粒填料初始累积应变随块石含量增加而减小, 荷载水平越高, 其破坏时循环加卸载次数越小。试验结果显示, 当 $SR \geq 0.6$ 时复合改良粗粒填料累积塑性应变变化加快, 其发展趋势由稳定型转向破坏型。



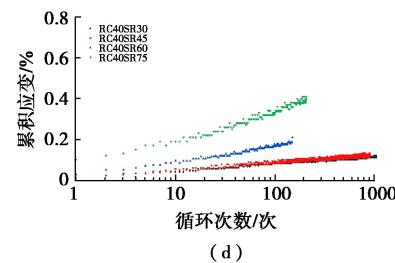
(a)



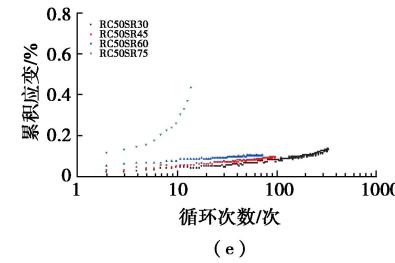
(b)



(c)



(d)



(e)

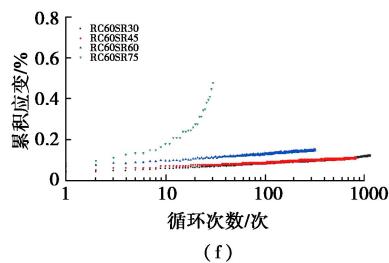


图 6 纤维地聚物复合改良粗粒填料累积应变曲线
Fig. 6 Curves of cumulative plastic strain of fiber and geopolymers-stabilized coarse grained fillers

2.6 复合改良粗粒填料动力破坏模式

图 7 为不同块石含量、应力水平和循环加卸载次数下纤维地聚物复合改良粗粒填料试样的破坏形态。可知, 随块石含量增加, 试样剪胀效应增强, 随应力水平和循环加卸载次数增加, 试样累积变形不断发展, 裂隙数量增加明显, 当进入破坏阶段后, 裂隙迅速扩展, 导致填料发生破坏。总体上, 随块石含量、荷载水平提高, 裂隙数量和扩展速率增加明显, 破坏模式由剪切滑移破坏向竖向劈裂破坏转变。

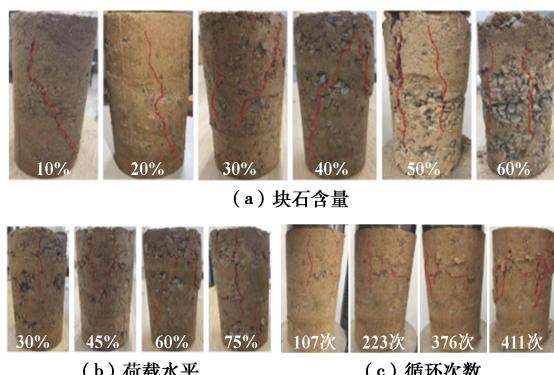


图 7 纤维地聚物复合改良粗粒填料变形破坏演变
Fig. 7 Failure evolution of fiber and geopolymers-stabilized coarse-grained fillers

3 结 论

为厘清纤维地聚物复合改良填料动力变形特性, 通过系列抗压强度试验探讨了不同影响因素条件下的纤维地聚物复合改良填料配比设计、强度变形演化和破坏模式研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 地聚物中偏高岭土、 Na_2SiO_3 、 CaO 最佳质量配比为 3.6 : 1 : 0.8, 其在土中的最佳掺量为 15%; 玄武岩纤维最佳掺量为 0.4%, 长度为 12 mm。

(2) 纤维地聚物复合改良粗粒填料抗压强度随块石含量增加呈先增后减再增变化, 当块石含量为 30% 时, 其抗压强度最大, 抵抗变形能力最好。

(3) 纤维地聚物复合改良粗粒填料初始累积应变

随块石含量增加而减小, 随荷载水平越高, 其破坏时加卸载次数越小; 纤维地聚物复合改良粗粒填料破坏模式随块石含量增加由剪切滑移向竖向劈裂转变。

参考文献:

- [1] 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 645-660. (Zhai Wanming, Zhao Chunfa, Xia He, et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 645-660. (in Chinese))
- [2] 王晓明. 客运专线路基填料改良试验研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 24-27. (Wang Xiaoming. Experimental study on improvement of filling material for subgrade of Harbin-Dalian passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 24-27. (in Chinese))
- [3] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 高速铁路粗粒土填料级配改良试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 3964-3969. (Shi Xiong, Zhang Jiasheng, Liu Bei, et al. Test of high-speed railway coarse grained filler of improved particle size distribution[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 3964-3969. (in Chinese))
- [4] 陈乐求, 张家生, 陈俊桦, 等. 水泥改良泥质板岩粗粒土的静动力特性试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1903-1910. (Chen Leiqiu, Zhang Jiasheng, Chen Junhua, et al. Testing of static and dynamic strength properties of cement-improved argillaceous-slate coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1903-1910. (in Chinese))
- [5] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, et al. Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1468-1478.
- [6] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1156-1160. (Yang Guangqing. Study of dynamic performance of cement-improved soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1156-1160. (in Chinese))
- [7] Huang Y C, Chen J, Tian A R, et al. Mechanical properties of fiber and cement reinforced heavy metal-contaminated soils as roadbed filling[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 2003-2016.
- [8] Cerni G, Cardone F, Virgili A, et al. Characterisation of

- permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading[J]. Construction and Building Materials, 2012, **28**(1): 79-87.
- [9] RAHMAN M S, ERLINGSSON S. Modelling the moisture dependent permanent deformation behavior of unbound granular materials[J]. Procedia Engineering, 2016, **143**: 921-928.
- [10] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(12): 1006-1013.
- [11] XIE L Y, XU H, WANG D J. Constitutive equation of damaged material under cyclic loading[M]//Advances in Engineering Plasticity and its Applications. Amsterdam: Elsevier, 1993: 371-376.
- [12] 周文权, 冷伍明, 刘文勤, 等. 低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 415-423. (ZHOU Wenquan, LENG Wuming, LIU Wenjie, et al. Dynamic behavior and backbone curve model of saturated coarse-grained soil under cyclic loading and low confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 415-423. (in Chinese))
- [13] 郑可扬, 肖源杰, 王萌, 等. 循环移动轮载下粗粒土路基填料永久变形特性及安定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(9): 1930-1943. (ZHENG Keyang, XIAO Yuanjie, WANG Meng, et al. Permanent deformation characteristics and shakedown analysis of coarse-grained embankment materials under moving wheel loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(9): 1930-1943. (in Chinese))
- [14] 李扬波, 张家生, 朱志辉, 等. CRTSIII型板式无砟轨道下路基的累积变形[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, **47**(3): 135-142. (LI Yangbo, ZHANG Jiasheng, ZHU Zhihui, et al. Accumulative deformation of subgrade under CRTS III slab track[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, **47**(3): 135-142. (in Chinese))
- [15] 刘宝, PHAM D P, 苏谦, 等. 不同含水状态下基床级配碎石填料变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1365-1372. (LIU Bao, PHONG P D, SU Qian, et al. Deformation characteristics of subgrade graded gravel with different water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1365-1372. (in Chinese))
- [16] 王宇, 李晓, 李守定, 等. 单轴压缩条件下土石混合体开裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊1): 3541-3552. (WANG Yu, LI Xiao, LI Shouding, et al. Cracking deformation characteristics for rock and soil aggregate under uniaxial compressive test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3541-3552. (in Chinese))
- [17] 金磊, 曾亚武, 张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 141-149. (JIN Lei, ZENG Yawu, ZHANG Sen. Large scale triaxial tests on effects of rock block proportion and shape on mechanical properties of cemented soil-rock mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 141-149. (in Chinese))

(编校: 孙振远)