

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0080-12

引用格式: 赵立财, 马骞, 黄海峰, 等. 建筑垃圾掺量和碾压方式对改良粉土路基变形特性的影响[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 80-91.

Citation: Zhao Licai, Ma Qian, Huang Haifeng, et al. Influence of construction waste content and rolling methods on deformation characteristics of improved silt subgrade[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 80-91.

建筑垃圾掺量和碾压方式对改良粉土路基 变形特性的影响

赵立财^{1,2,3,4}, 马 骞⁵, 黄海峰⁶, 谢 亮², 院 龙⁴

- (1. 中铁十九局集团有限公司 第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136;
2. 西藏职业技术学院 建筑工程学院, 西藏 拉萨 850000;
3. 云南民族大学 云南省建筑数字与节能技术工程研究中心, 云南 昆明 650500;
4. 新疆应用职业技术学院 建筑工程学院, 新疆维吾尔自治区 奎屯 833200;
5. 蜀道投资集团有限责任公司 四川蜀道轨道交通集团有限责任公司, 四川 成都 610063;
6. 蜀道投资集团有限责任公司 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 针对黄河冲积粉土压实成型困难、路基填筑质量难以保障的工程难题, 提出利用城市废弃建筑垃圾对粉土路基进行物理改良的技术方案。通过室内土工试验, 研究建筑垃圾掺量对黄河冲积粉土物理力学性能的影响规律, 揭示建筑垃圾改良粉土路基的作用机制。在此基础上, 依托新建西安至安康高速铁路路基工程, 构建集成等效移动荷载子程序的三维动力学有限元模型, 并结合现场监测数据, 分析动载作用下改良路基的变形演化规律和压实机理。结果表明: 掺入表面粗糙的建筑垃圾颗粒能够有效重塑粉土内部结构, 形成受力骨架, 显著提升其内摩擦角和抗压缩变形能力; 综合考量路基性能和施工效率, 确定 20% 建筑垃圾掺量 (以破碎混凝土为主)、40 cm 松铺厚度并辅以“低速多强振”组合的最佳压实工艺, 通过大振幅产生的深层冲击效应克服粗骨料间的摩擦阻力, 从而确保路基整体压实质量。该研究成果可为特殊土路基压实难题提供工艺参考。

关键词: 建筑垃圾; 改良粉土; 路基变形; 土工试验; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: U238

文献标识码:

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.06

黄河中下游冲积粉土由河流携带上游黄土经搬运、冲积淤积形成, 属第四系全新统细粒土, 具有粉粒含量高、级配不良、塑性指数低、黏聚力差、易液化等特点^[1]。大量工程实践表明, 粉土的特殊工程性质和遇水不稳定性极易引发翻浆冒泥、路面开裂等路基病害, 严重影响路基长期服役性能。为改善粉土路基工程性质, 学界开展了大量固化剂改良研究。固化剂按材料类型可分为无机类、有机类和生物酶类 3 大类。无机类中, 石灰和水泥是最早应用于粉土改良的材料^[2-5], 石灰通过离子交换

与火山灰反应改善土体的液限与塑性指数, 水泥则依靠水化产物的胶结作用显著增强土体的抗压强度; 然而, 两者对渗透性的改善均有限, 其长期耐久性亦受碳化因素制约。矿渣、钢渣、活性氧化镁等工业副产物类固化剂^[6-8]因兼具固废资源化利用价值而受到关注, 但其改良效果对原料粒径分布与化学活性较为敏感。有机类固化剂如乳化沥青^[9]、橡胶^[10]、木质素^[11]和纤维^[12]等可在韧性和抗裂性方面弥补无机类固化剂的不足, 但成本较高、施工工艺复杂。生物酶类以微生物诱导碳酸钙

收稿日期: 2026-01-15; 修订日期: 2026-07-21

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目 (XLYC2007146)

第一作者: 赵立财 (1985—), 男, 辽宁盖州人, 正高级工程师, 博士。E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com

通讯作者: 马 骞 (1987—), 男, 四川南充人, 高级工程师。E-mail: 479650990@qq.com

沉淀 (Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)^[13] 和酶诱导碳酸钙沉淀 (Enzyme Induced Carbonate Precipitation, EICP)^[14] 技术在绿色改良领域展现出良好前景,但规模化应用仍面临反应条件苛刻、成本偏高等瓶颈。

近年来,随着建筑垃圾产生量逐年攀升,其堆放带来的土地占用和环境污染问题日益突出,资源化利用已成为工程领域的重要议题。研究表明,建筑垃圾再生骨料级配良好、渗透性与砂土相当,具备作为路基改良掺料的材料条件。在建筑垃圾改良膨胀土方面,雒思琦等^[15]和肖军华等^[16]研究表明,建筑垃圾单掺或与石灰复合掺入均可有效抑制膨胀土胀缩变形,提升其抗剪强度和水稳定性。在建筑垃圾改良软土方面,史小萌等^[17]将建筑垃圾再生材料用于软土地基,可显著改善承载力并减少工后沉降。在建筑垃圾黄土改良方面,Wang等^[18]发现适量掺入建筑垃圾能弥补黄土级配缺陷,提升路基最大干密度和承载比。

填筑压实是路基施工的核心工序,振动压路机因兼具静载和动载作用而被广泛应用。关于压实机理,韦张林等^[19]、付佳佳等^[20]和张艺等^[21]分别从剪应力超限、共振效应和循环荷载3个视角进行了阐释,但各研究间尚未形成统一理论框架。在压实参数影响方面,商拥辉等^[22]分析了振动时长对千枚岩路基压实效果的影响,建立了压实度与松铺厚度、碾压遍数之间的关系,并指出碾压速度对填石路基压实效果影响最为显著,其后依次为碾压遍数、激振频率和压路机自重。

综上所述,建筑垃圾改良土体的机理主要体现在骨架填充、级配优化和界面摩擦增强3个层面,但现有成果多集中于膨胀土和软土,针对建筑垃圾改良黄河冲积粉土的研究仍十分有限,已有成果在改良机理阐释和最优掺量确定方面尚不充分。现阶段关于建筑垃圾改良黄河冲积粉土压实变形特性的研究尚显不足,尤其在最优掺量确定、压实参数优化及其多因素交互作用等方面仍有待深入探讨。基于此,本文依托新建西安至安康高速铁路路基工程,采用室内试验与有限元数值模拟相结合的方法,研究建筑垃圾掺量、静压与振动2种碾压方式、不同松铺厚度和碾压速度等因素对路基动力响应的影响规律。同时,针对掺入比为20%的改良粉土路基碾压组合方式进行了分析,研究成果可为建筑垃圾改良黄河冲积粉土的工程推广提供理论依据和实践参考。

1 建筑垃圾改良粉土试验及结果

本文依托工程为新建西安至安康高速铁路正线路基工程。路基基床由表层与底层2部分组成,其中基床表层厚0.5 m,基床底层厚2.3 m。基床表层采用级配碎石填筑,基床底层采用A、B组填料填筑,填料最大粒径不大于60 mm,粒径级配满足压实性能要求。路线起终点均位于冲洪积倾斜平原地区,地形较为平坦,沿线岩性以黄土状粉土、粉土及粉质黏土为主,上部粉土层多呈松散至稍密状。综合考虑征地范围限制和填挖平衡需求,部分路段因优质筑路材料匮乏,不得不就地取材,采用周边粉土进行路基填筑施工。

1.1 试验材料

试验所用黄河冲积粉土取自项目K6+120里程位置,干燥状态时表现较为松散,遇水后则表现出一定黏性,保水性较差。土样经碾碎、过筛、烘干处理后状态如图1所示,基本物性参数见表1,颗粒级配情况如图2所示。



图1 试验用粉土

表1 试验土样基本物性参数

液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	天然含水率/%
26.1	17.2	8.9	2.7	12.3

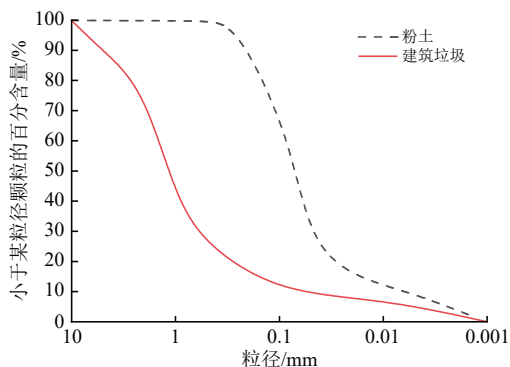


图2 试验用粉土和建筑垃圾颗粒级配累计曲线

试验所用建筑垃圾取自郑州市某建筑工地,成分以混凝土为主,筛选经破碎机处理后的粒径为1~2 mm的颗粒作为试验掺料,如图2所示,其表观密度为 $2.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,颗粒级配如图3所示。



图3 试验用建筑垃圾

由图2可知:试验所用黄河冲积粉土粒径小于0.25 mm的粉土颗粒占比98.9%,其中粒径在0.05~0.25 mm之间的粉粒占比超过75%,粒径小于0.005 mm的黏粒占比为9.3%,基本不存在粒径在0.25~2 mm之间的颗粒,推测试验所用黄河冲积粉土粒径较为集中,表观松散且不稳定,粒径小于0.002 mm的颗粒含量相对较少是造成试样用土成型困难且施工现场难以压实的直接原因;建筑垃圾粒径大于0.1 mm的颗粒占比为92.5%,同时粒径在0.1~5 mm之间颗粒占比超过了80%,级配不良。

1.2 建筑垃圾改良粉土试样

试验中定义掺比为建筑垃圾质量与黄河冲积粉土质量之比。将试验所用黄河冲积粉土和建筑垃圾依据土工试验方法标准制备4组试样。

(1) 试样A: 单纯粉土试样, 不参加建筑垃圾。

(2) 试样B1: 在黄河冲积粉土中掺加10%的建筑垃圾, 并混合搅拌均匀。

(3) 试样B2: 在黄河冲积粉土中掺加20%的建筑垃圾, 并混合搅拌均匀。

(4) 试样B3: 在黄河冲积粉土中掺加40%的建筑垃圾, 并混合搅拌均匀。

1.3 建筑垃圾掺比对改良土压实性能的影响

压实性能测试主要采用轻型击实仪完成。具体操作步骤如下:

(1) 称取一定量粉土试样, 在击实筒内分3层倒土并分层整平击实;

(2) 当击实桶内土体达到定位高度后, 采用液压千斤顶从筒内推出试样;

(3) 在试样中心处定量取2次土, 平行测定其含水率, 同时记录数据。

绘制各组试样的击实曲线, 如图4所示。

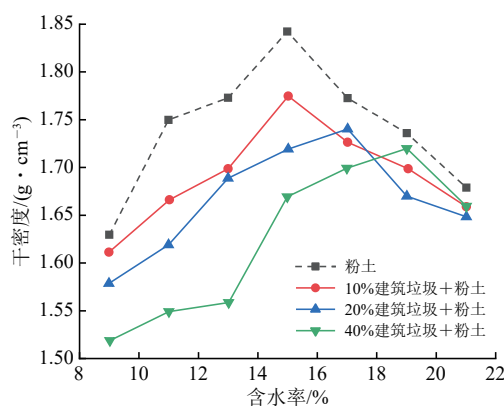


图4 不同建筑垃圾掺比试样的击实曲线

图5为各组试样最佳含水率(柱状图)和最大干密度(点线图)。

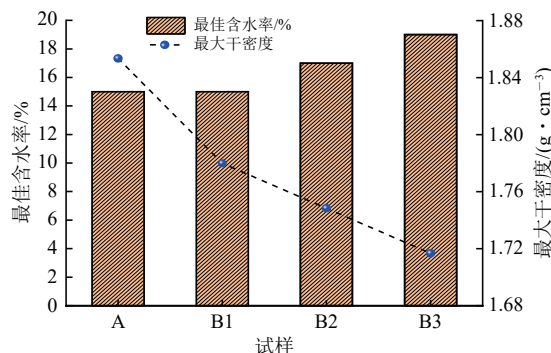


图5 各组试样最佳含水率和最大干密度

由图4和图5可知: 单纯粉土试样A的最佳含水率为15%, 最大干密度为 $1.84 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 对于掺入建筑垃圾的粉土试样B1, B2和B3, 其最佳含水率均不低于单纯粉土试样, 而最大干密度均小于单纯粉土试样; 建筑垃圾掺量增加, 改良粉土试样的最佳含水率随之升高, 最大干密度则随之降低; 粉土中掺入10%建筑垃圾对试样的最佳含水率影响较小, 而掺入20%和40%建筑垃圾后, 试样的最佳含水率均明显提高。

针对粉土中掺入重骨料反而使其干密度降低的现象, 究其原因是试验所用建筑垃圾多为破碎混凝土, 颗粒呈棱角状、表面粗糙且级配不良, 将其掺入粉土后, 粗颗粒在土体内部形成了骨架, 在规定的轻型击实功作用下, 粗颗粒间的粗糙咬合作用难以被完全打破, 导致混合料内部无法像纯细粒粉土

那样排列紧密，宏观孔隙率随掺量增加而增大，因此改良土的最大干密度呈现出随掺量增加而轻微下降的趋势。

通常来说，为达到最佳压实效果，需要将填筑材料控制在最佳含水量，故在采用黄河冲积粉土进行路基填筑期间，若其天然状态的含水率大于最佳含水率，可掺加不小于 20% 的建筑垃圾进行原状土改良，以规避翻晒、加入稳定剂等方式延长工期且增加施工成本的问题。

1.4 建筑垃圾掺比对改良土压缩性能的影响

采用单杠杆固结仪进行标准固结试验，研究改良土压缩性能。具体操作步骤如下。

- (1) 采用环刀进行取样，并装样。
- (2) 待百分表归零后按 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 和 1 600 kPa 共 8 个等级进行逐级加载，同时记录百分表读数，各级荷载作用下需保证土样固结 24 h。
- (3) 加载结束后，绘制各组试样压缩曲线，并计算相对应的压缩指标。

各组试样的压缩曲线和压缩指标分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知：各组试样的孔隙比均随固结压力的增大而降低，4 组试样孔隙比前期均先出现陡降段，之后降低速度逐渐变缓，并且有趋于稳定的趋势。

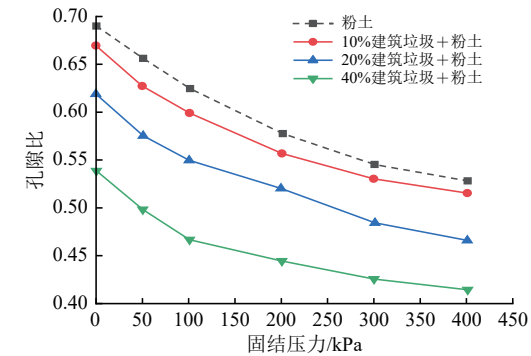


图 6 不同建筑垃圾配比情况下改良粉土压缩曲线

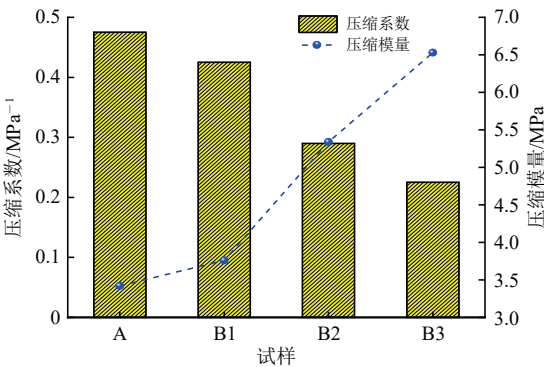


图 7 各组试样压缩系数和压缩模量

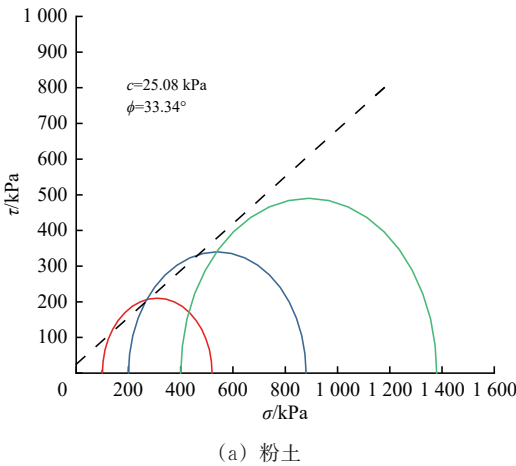
由图 7 可知：在固结压力为 100~200 kPa 范围内，4 组试样压缩系数均在 0.1~0.5 MPa⁻¹ 之间，说明均为中压缩性土；与单纯粉土试样 A 相比，掺入建筑垃圾的粉土试样 B1、B2 和 B3 的压缩系数均有所减小，与之对应，压缩模量则均相应增大。由此可见，掺入建筑垃圾能够改善黄河冲积粉土的压缩性能，主要表现为压缩系数降低，压缩模量增大，即土体压缩性减弱。对于高填方路基或对变形控制要求较高的路基工程，可采用掺入建筑垃圾的方法降低路基填料的压缩性，从而提高路基的抗压缩变形能力。

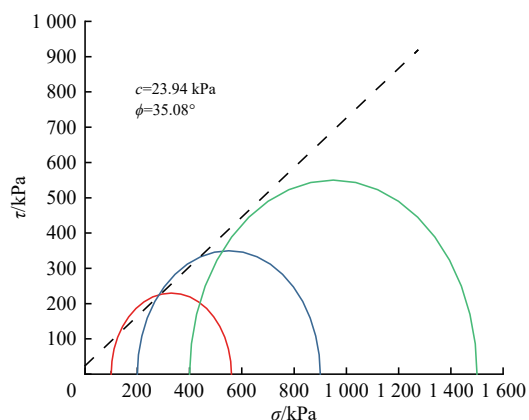
1.5 建筑垃圾掺比对改良土抗剪性能的影响

采用岩土数字系统（Geotechnical Digital Systems, GDS）应力路径三轴仪对改良土试样进行抗剪性能测试。具体操作步骤如下。

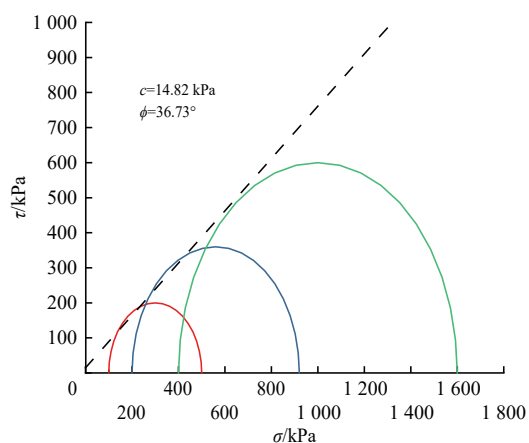
- (1) 试样搅拌均匀后静置 24 h，采用击实制样法制备重塑试样。
- (2) 将制备好的试样在饱和器内装样，然后放入真空缸内进行真空饱和。
- (3) 对试样开展三轴固结不排水剪切试验，涉及分级反压饱和、在初始有效围压为 100, 200 和 400 kPa 条件下进行各向等压固结和剪切速率为 0.1%·min⁻¹ 的不排水剪切操作，当试样破坏或轴向应变达到 20% 时停止，测试和记录相应的应力 σ -应变 τ 曲线。

限于篇幅，结合 TB 10102—2023《铁路工程土工试验规程》和各组试样的应力-应变曲线，在统一取轴向应变为 12% 时所对应的偏应力作为破坏偏差应力情况下，得到各组试样的强度包络线，如图 8 所示，并结合 Mohr-Columb 强度准则计算各组试样的抗剪强度指标，即内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 。

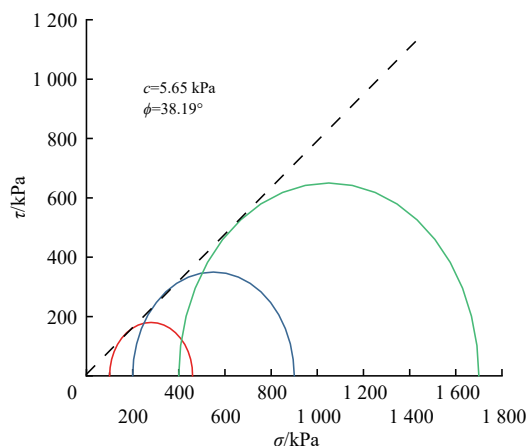




(b) 10% 建筑垃圾+粉土



(c) 20% 建筑垃圾+粉土



(d) 40% 建筑垃圾+粉土

图8 各组试样的莫尔圆及强度包线

由图8可知:单纯粉土试样黏聚力为25.08 kPa,内摩擦角为33.34°,经建筑垃圾按10%,20%和40%掺入比依次改良粉土时,其黏聚力依次降为23.94,14.82和5.65 kPa,而内摩擦角则依次增为35.08°,36.73°和38.19°。究其原因,细粒土的黏聚力取决于土粒间的各种物理化学作用力,单纯粉土试样A的初始黏聚力较大,而当掺入颗粒较粗(粒径1~2 mm)的建筑垃圾后,扰动并破坏了细

粒土的初始黏聚力,导致土体结构中黏聚力明显下降。对于掺入以破碎混凝土为主的建筑垃圾粉土试样B1,B2和B3来说,其摩擦强度主要由建筑垃圾颗粒之间、建筑垃圾颗粒与黄河冲击粉土颗粒之间的滑动摩擦力及咬合摩擦力构成。由于建筑垃圾颗粒形状多呈棱角状,圆润度不高,自身摩擦角较大,故改良土样中较多的粗粒导致咬合摩擦力增大。

2 路基振动压实数值模拟

2.1 数值模型及计算参数

依托通用有限元软件平台建立三维动力学计算模型,模型尺寸:有限元区域中X,Y和Z方向分别取13,10和15 m,其中Y方向为振动压路机行驶方向。模型外侧(四周及底部)无限元区域(采用CIN3D8单元)厚度均为2 m。模型上部设置一定厚度的松铺层,下部全按地基土考虑。由于模型除顶面自由外,其他5个面均设置无限元边界,故模型不再设置位移边界条件。

文献[21]指出,当摩擦角大于22°时,土体单元宜采用Mohr-Coulomb本构模型;当摩擦角小于等于22°时土体单元宜采用Drucker-Prager本构模型。模型采用线性8节点缩减积分单元C3D8R进行网格划分,网格密度自边界向振动碾压区域逐渐增大,共划分52 754个C3D8R实体单元,数值模型及网格划分如图9所示。

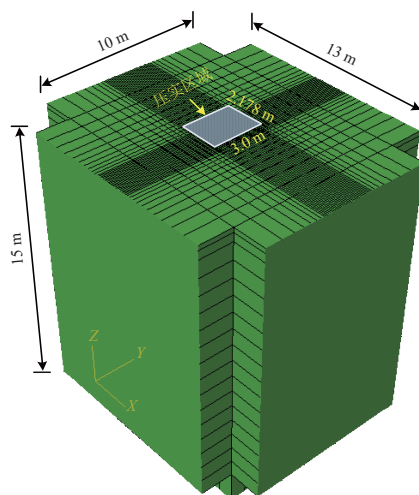


图9 有限元模型及网格划分

为消除网格畸变对计算结果的影响,在正式计算前开展网格敏感性校核:分别建立3种不同外围网格过渡密度的模型进行对比分析。结果表明,当

核心碾压区网格尺寸固定为0.1 m时,进一步细化外围网格后,中心监测点竖向位移的计算偏差不超过2%,表明当前网格方案能够在保证计算精度的同时兼顾计算效率。

假设路基改良填筑粉土符合 Mohr-Coulomb 本构关系,其基本物理力学参数见表2。

表2 改良填筑粉土材料 Mohr-Coulomb 本构模型参数

建筑垃圾 掺比/%	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
0	18.4	25.08	33.34	13.68	0.33
10	17.7	23.94	35.08	15.04	0.32
20	17.4	14.82	36.73	21.36	0.30
40	17.1	5.65	38.19	26.12	0.30

黏聚力与内摩擦角取自本文室内三轴剪切试验结果,重度由室内轻型击实试验确定,弹性模量则根据单杠杆固结试验所得压缩模量结合经验式(1)换算得到。地基土体按弹性材料考虑,重度取 $18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量取 40 MPa,泊松比取 0.28。

$$E_0 = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} E_s \quad (1)$$

式中: E_0 为无侧限条件下的弹性模量, MPa; E_s 为压缩模量(完全侧限条件下竖向应力增量与竖向应变增量之比,由室内固结试验确定), MPa; μ 为泊松比。

2.2 振动压实荷载

项目施工现场采用 YZ14JC 型单钢轮振动压路机对填料进行压实作业,机械相关技术参数如图 10 所示。为提高计算效率和简化计算过程,将压路机钢轮等效为可移动的振动压实荷载,利用有限元计算平台的 VDLOAD 子程序实现,将激振力转化为随时间变化的正弦等效动荷载,直接动态施加于土体表面的矩形接地过渡区域。振动压实荷载由静载和动载 2 部分叠加而成。静载主要由前轮自重 G 引起;动载则由钢轮内偏心块高速旋转所产生的

离心力引起,其随时间的变化规律可近似简化为正弦函数形式。参照文献 [21],振动压路机施加于地面的总荷载 F 可表示为

$$F = G + m\omega^2 r \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: F 为激振力或总荷载, kN; G 为静载,即振动前轮的自重, kN; m 为振动前轮的质量, kg; ω 为振动前轮的角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$,其值等于 2π 与振动频率 f 的乘积,其中振动频率取 28 Hz; r 为偏心距, m; t 为荷载作用时间, s。

振动前轮与地面接触,荷载主要作用在已压实区域和即将压实区域之间的过渡地带,该接触区域宽度又称接地宽度 S ,其值等于振动前轮半径 R 与轮阻角 β 正弦值的乘积,即

$$S = R \sin \beta \quad (3)$$

轮阻角 β 通常不大于填土内摩擦角。因此,振动前轮与地面的接触总面积 A 为

$$A = BR \sin \beta \quad (4)$$

式中: B 为振动轮横宽,取 2.178 m,

本文依据 Q-CR 9127-2018《铁路路基设计规范》取接地宽度 $S=0.285 \text{ m}$ 。

在数值模拟中,通过速度与计算时间步长的乘积确定振动压路机在各时刻移动到的位置。由于荷载计算结果有可能存在负值,而实际工况中振动轮不会对土体产生向上的拉拔作用,因此在编制 VDLOAD 荷载子程序时,将所有小于 0 kN 的荷载自动置零,视为该时段内无荷载施加。在时间参量方面,记单次完整的碾压循环耗时为 T 。若压实作业区的有效长度为 L' ,则压路机在该区段内的实际运行时间为

$$T' = \frac{L'}{V} \quad (5)$$

式中: L' 为压实作业区的有效长度, m; V 为振动压路机的行驶速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; T' 为压路机在有效长度 L' 范围内的实际运行时间, s。

则 2 次相邻碾压之间的间歇时长 t_g 为

$$t_g = T - T' \quad (6)$$

式中: T 为单次碾压的循环周期, s。

由此可见,循环周期 T 由实际运行时间 T' 与间歇时长 t_g 2 部分组成。在整个模拟过程中,已完成的碾压遍数 N 取决于 t 与 T 的比值,可利用向下取整函数表示为

$$N = \text{int}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (7)$$

据此可得当前碾压周期内的荷载作用时长 t_d 为

前轮质量: 6.7 t
后轮质量: 7.3 t
振动频率: 28 Hz
激振力 F_0 : 271/137 kN
振动轮直径 R : 1.523 m
振动轮宽度 B : 2.178 m
轮阻角 β : $\leq$ 内摩擦角 ϕ
接地宽度 S : 0.285 m

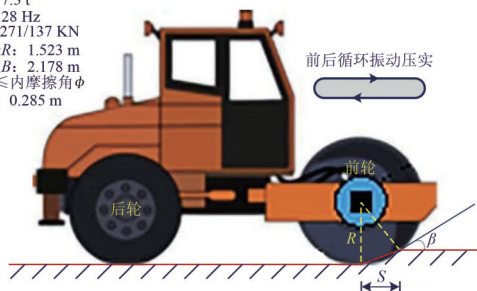


图 10 振动压路机行驶原理与参数示意图

$$t_d = t - NT \quad (8)$$

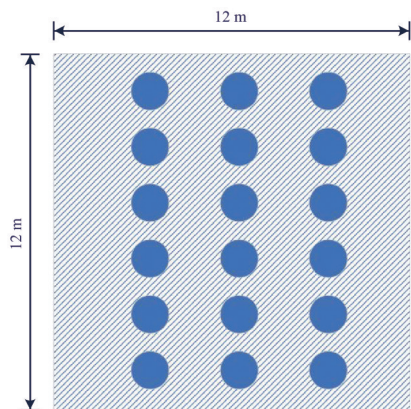
对应的瞬时行驶位移 s_d 为

$$s_d = Vt_d \quad (9)$$

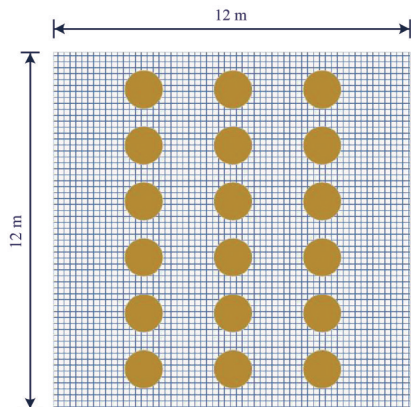
子程序通过实时提取该位移,逐步更新振动轮在有限元网格上的空间坐标,动态确定当前时刻的等效受荷面域,从而实现对连续振动碾压工况的模拟。

3 现场测区布置及数值模拟方案

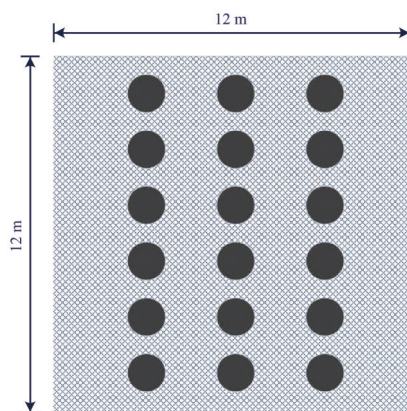
在项目现场设置试验段(4个边长均为12 m的监测区域),开展路基填筑压实试验。均匀布置测点,每完成1遍碾压进行1次沉降数据采集,通过对比松铺层在压实期间的现场试验和数值模拟沉降,验证数值模拟的可靠性。4个监测区域的填筑材料分别为粉土、掺加10%、20%和40%建筑垃圾的粉土,4个监测区域布置情况如图11所示。与之对应的数值模拟计算区域如图9所示,为提高计算效率,碾压区域尺寸为3 m×2.17 m。相应的,为简化计算,模拟期间将车速按0.5、1.0和2.0 m·s⁻¹共3级设置,其均可被3整除。



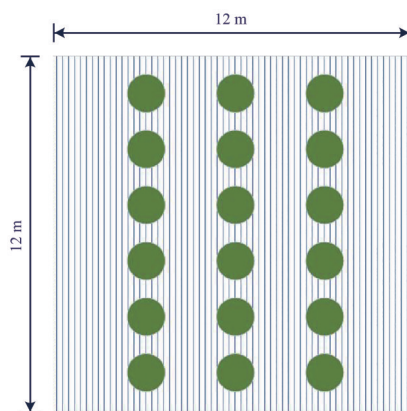
(a) 粉土测区



(b) 掺10%建筑垃圾粉土测区



(c) 掺20%建筑垃圾粉土测区



(d) 掺40%建筑垃圾粉土测区

各测区测点 ● ● ● ●

图11 监测区域布置

现场试验松铺厚度设置为40 cm,碾压速度按1 m·s⁻¹控制,碾压遍数为6。需要特别说明的是,本文所提到的碾压遍数均指“单向1次”,而非“往返1次”,即“单向1次碾压”指的是压路机在空间上沿路线纵向匀速驶过测区1趟。结合现场方案,设置数值模拟方案如下。

(1) 选取建筑垃圾掺比分别为0, 10%, 20%和40%的粉土填筑料,碾压速度取1.0 m·s⁻¹、激振力取137 kN,进行不同压实遍数现场试验数值模拟计算。

(2) 选取掺加20%建筑垃圾的粉土填筑料,激振力取137 kN,进行0.5, 1.0和2.0 m·s⁻¹共3种碾压速度下填筑区域位移的数值模拟计算。

(3) 选取掺加20%建筑垃圾的粉土填筑料,碾压速度取1.0 m·s⁻¹、激振力取271 kN强振条件下,进行1静1强4弱、1静2强3弱、1静3强2弱和1静4强1弱共4种碾压组合时填筑区域竖向应力和位移的数值模拟计算,确定最优碾压组合。

4 模拟结果

4.1 路基土体压实情况

限于篇幅,仅针对掺入20%建筑垃圾的粉土填料模拟结果进行分析。图12给出了设定车速 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,经历18 s往复碾压,监测点(图9压实区域中心靠右,距XOZ面0.5 m)竖向位移随振动压实历时变化曲线。由图12可知:监测点竖向位移随振动压路机的反复循环碾压,沉降呈整体增加的趋势,且当压路机行驶至监测点位置时,竖向位移出现激增现象,但又很快发生弹性恢复。需要特别说明的是,反复循环碾压指的是时间维度上的“反复循环作用”,即振动压路机在单向1次碾压期间,压路机钢轮内的偏心块正以28 Hz的频率高速旋转,使得其正下方的土体连续不断地承受了数十次的高频动力冲击。

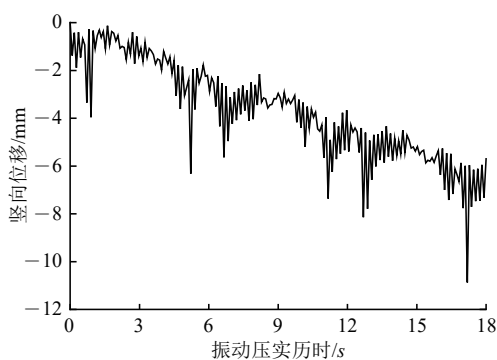


图12 掺入20%建筑垃圾的粉土填料竖向位移模拟结果

图13给出了图13中3~6 s时间段内3.0, 4.5 s和6.0 s 3个典型时刻的压实区域竖向位移云图。

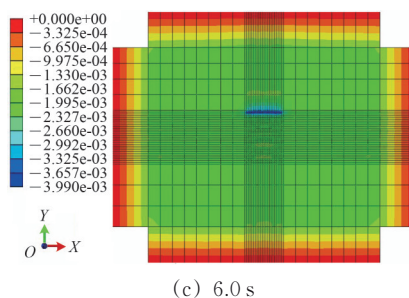
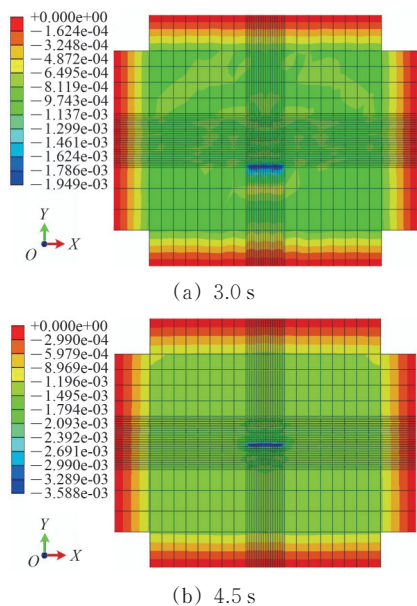


图13 3个典型时刻压实区域竖向位移云图

由图13可知:在3.0和6.0 s时刻,碾压轮(2.178 m×0.285 m)分别位于设置碾压区域的两侧边界处,最大竖向位移绝对值约为2~4 mm;而在4.5 s时刻,碾压轮位于碾压区域的中心位置,此时最大竖向位移绝对值约为3.6 mm。

4.2 路基沉降现场监测和数值模拟对比

图14给出了不同掺比情况下压实层竖向位移的模拟结果和实测结果。由图14可知:在设定的40 cm松铺厚度条件下,无论是现场试验,还是数值模拟,不同掺比建筑垃圾粉土填筑料的松铺层沉降曲线形状均较为类似,即建筑垃圾不同掺比时,松铺层竖向位移均随碾压遍数增加而逐渐增大,且累加变化曲线在后期有逐渐稳定的趋势,各掺比情况下的现场试验结果与数值模拟结果均相差较小,说明数值模拟所采用的本构模型及相关参数取值的选取均合理。同时也可以发现,现场试验结果略大于数值模拟,究其原因,数值模拟建立的有限元模型四周虽然设置了吸收应力波的无限元边界CIN3D8,由于该单元自身具有一定的法向刚度,在一定程度上约束了外围土体的水平侧向膨胀变形,使其仅能发生近似1维竖向压缩;而现场试验段路基两侧是按设计坡比进行放坡处理,处于相对自由的无约束状态,在振动荷载作用下容易发生横向扩展变形。二者在位移模式上的本质差异是导致现场

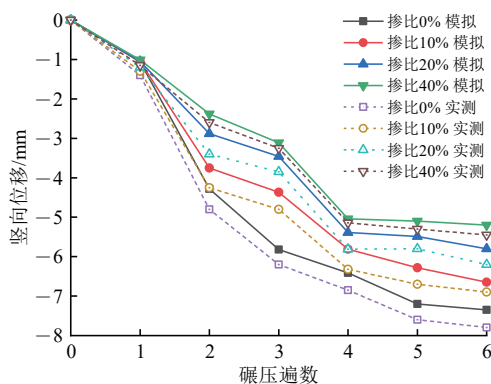


图14 不同掺比情况下竖向位移模拟和实测结果

实测沉降大于数值模拟结果的主要原因。另外,从曲线中也可以发现,当建筑垃圾掺比为20%时,该类填料的控沉效果明显优于10%情况,且在提高20%达到40%掺比后,沉降减小幅值并不大,同时结合前文建筑垃圾掺比20%时填筑料含水率最佳,因此推荐采用20%掺比作为本项目的最佳掺比。

图15给出了不同车速前提下,相同压实遍数时路基监测点竖向位移随振动压实历时变化曲线。

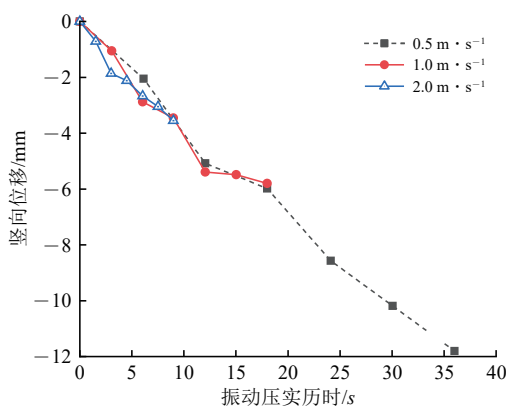


图15 振动压路机不同行驶速度下路基压实竖向位移时程曲线

由图15可知:车速越小,相同压实遍数情况下,路基顶部沉降越大,即获得的压实度越高。其原因是:振动压路机速度越大,尽管很快能完成1遍压实,但对应的振动轮内部偏心块产生的激振力次数却明显少于低速工况,这势必导致压实效果减弱。鉴于此,在施工中需遵循的核心原则是,在确保压实质量的基础上调控碾压速度,若为提升效率而加快碾压,则需选用激振力更强的压路设备,以此平衡效率与质量的关系,最终保证压实度符合标准。

图16为不同碾压组合情况下,路基监测点竖

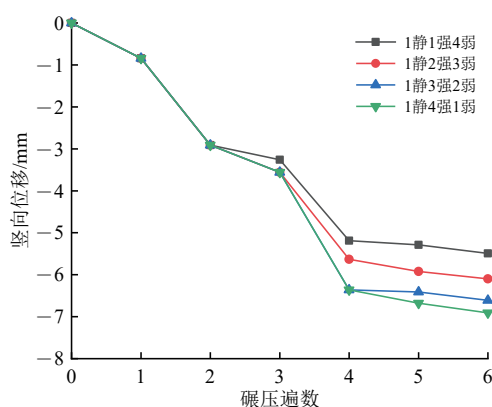


图16 不同碾压组合下路基竖向位移时程曲线

向位移随碾压遍数的变化曲线。

由图16可知:在碾压6遍的前提下,强振次数越多,最终竖向位移越大,可使压实度得到明显提高。这主要是因为,大振幅的强振可有效提供压实能量,实现深层压实,即大振幅意味着振动夯锤的位移大,能产生强大的冲击能量。这种能量可以有效地传递到铺层深处,克服颗粒间的内摩擦力和咬合力,使深层填料重新排列达到密实,这是提高整体压实度的关键阶段。而弱振则可有效破碎表面个别松动的骨料,填平微小的空隙,消除大振幅碾压可能产生的表面微小波纹,使层顶平整密实,为下层填筑或路面施工提供良好基础。

5 结 论

(1) 建筑垃圾的掺入弥补了黄河冲积粉土的力学缺陷。破碎混凝土为主的粗颗粒在细粒粉土中构建了有效的受力骨架,虽削弱了初始黏聚力,但通过增强咬合摩擦力显著提升了内摩擦角,大幅降低了填料压缩性,将其用于提升路基的稳定性具有可行性。随着建筑垃圾掺量的增加,改良粉土的压缩性能显著改善,力学特征表现为黏聚力递减而抗剪强度显著增强。

(2) 基于室内物理力学指标演变与现场变形控制效果的双重验证,明确了20%为最佳建筑垃圾掺比。该掺量不仅在路基控沉效果上存在明显拐点优势,且能有效调节原生粉土的最佳含水率,降低施工期间的翻晒或换填成本,为沿线筑路材料匮乏问题提供了一种具有显著经济效益的替代选择。

(3) 基于VDLOAD子程序建立的三维动力有限元模型,再现了压路机高频循环冲击下土体的动力响应过程。模拟与现场实测结果的对比揭示,实际无约束放坡路基在振动荷载下伴随不可忽视的侧向膨胀挤出效应,这为实际工程中路基边缘压实质量的强化控制提供了理论依据。

(4) 确定了建筑垃圾改良路基的最优压实作业工艺:在40 cm松铺厚度条件下,通过降低压路机行驶速度增加单位区域内的夯击能量输入时长;在压实工序组合上应侧重增加强振频次,利用大振幅产生的深层冲击力克服粗骨料间的摩擦阻力,以确保路基整体快速达到规范要求的压实度。

参 考 文 献

- [1] 方明镜,郭超宇,罗诚,等.过湿冰水堆积土路基振动压实变形特性研究[J].武汉理工大学学报,2024,46(3):76-85.
Fang Mingjing, Guo Chaoyu, Luo Cheng, et al. Vibration compaction deformation characteristics of over-wet glacial deposit soil subgrade[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(3): 76-85.
- [2] 章定文,刘文俊,侯爵,等.循环湿化条件下粉土联合石灰改良弱膨胀土的动力累积变形特性[J].交通运输工程学报,2025,25(4):71-79.
Zhang Dingwen, Liu Wenjun, Hou Jue, et al. Dynamic cumulative deformation characteristics of weak expansive soil improved by silt and lime under cyclic wetting[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(4): 71-79.
- [3] 朱江江,罗强,詹学启,等.全风化软质岩改良土铁路路基填料应用研究[J].铁道工程学报,2021,38(5):25-30.
Zhu Jiangjiang, Luo Qiang, Zhan Xueqi, et al. Study of application of completely weathered soft rock improved soil for railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(5): 25-30.
- [4] Dai Xingxian, Song Yang, Zhang Ze, et al. Investigation of shear properties and particle breakage characteristics of construction waste as roadbed fill material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(2): 04024524.
- [5] 李国勋,张艳美,马丁,等.纤维对纳米二氧化硅石灰改良粉土力学性质的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(2):37-44.
Li Guoxun, Zhang Yanmei, Ma Ding, et al. Mechanical properties of nano-silica and lime stabilized silt reinforced by fiber[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 37-44.
- [6] 蔡光华,刘松玉,曹菁菁.活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J].土木工程学报,2017,50(5):105-113,128.
Cai Guanghua, Liu Songyu, Cao Jingjing, et al. Research on micro-mechanism of carbonated reactive MgO-stabilized silt[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 105-113, 128.
- [7] Guo Guoqing, Liu Songyu, Du Guangyin, et al. Hydraulic conductivity characteristics of carbonated reactive magnesia-treated silt[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(6): 3033-3047.
- [8] Mozejko C A, Francisca F M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239(4): 117901.
- [9] 樊亮,周圣杰,侯佳林,等.黄河淤积粉土的两种复合稳定方案与性能对比[J].长江科学院院报,2021,38(12):118-124.
Fan Liang, Zhou Shengjie, Hou Jialin, et al. Composite stabilization of silty soil near the yellow river: two methods and performance comparison[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 118-124.
- [10] 孙兆云,韦金城,王林,等.烧结法赤泥-沥青粉固化剂稳定粉土的路用性能研究[J].工程科学与技术,2021,53(4):101-109.
Sun Zhaoyun, Wei Jincheng, Wang Lin, et al. Study on road performance of stabilized silt with sintering red mud-asphalt powder curing agent[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 101-109.
- [11] 刘松玉,张涛,蔡国军.工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J].中国公路学报,2018,31(3):1-11.
Liu Songyu, Zhang Tao, Cai Guojun. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 1-11.
- [12] 吴伟军,丁北斗,张鲲鹏.矿渣基凝胶材料固化粉土路基填料的路用性能研究与应用[J].硅酸盐通报,2025,44(10):3747-3760.
Wu Weijun, Ding Beidou, Zhang Kunpeng. Road performance research and application of stabilized silt subgrade with slag-based cementitious materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(10): 3747-3760.
- [13] Zhang Tao, Liu Songyu, Zhan Hongbin, et al. Durability of silty soil stabilized with recycled lignin for sustainable engineering materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119293.
- [14] Vakili A H, Ghasemi J, Bin Selamat M R, et al. Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193: 405-415.
- [15] 雒思琦,杨涛.水泥、石灰改良建筑垃圾的击实性能试验研究[J].粉煤灰综合利用,2022,36(6):87-94.

- Luo Siqi, Yang Tao. Experimental study on the compaction performance of cement and lime amended construction waste [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2022, 36(6): 87-94.
- [16] 肖军华,孙思齐,白英琦,等.基于离散元法的路基不均匀沉降对道床状态影响分析[J].中国铁道科学,2026,47(1): 69-79.
- Xiao Junhua, Sun Siqi, Bai Yingqi, et al. Effect of subgrade differential settlement on the state of ballast bed based on discrete element method[J]. China Railway Science, 2026, 47(1): 69-79.
- [17] 史小萌,徐功博,蔡国庆,等.铁路路基压实施工知识图谱构建与检索增强方法[J].中国铁道科学,2025,46(6):44-54.
- Shi Xiaomeng, Xu Gongbo, Cai Guoqing, et al. Knowledge graph establishment and retrieval-augmented method for railway subgrade compaction construction[J]. China Railway Science, 2025, 46(6): 44-54.
- [18] Wang Qingzhou, Kong Liying, Tseng Minglang, et al. Solid waste material reuse analysis: filling the road subgrade with riverway silt and sediment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(23): 35096-35109.
- [19] 韦张林,赵志峰.微生物注浆加固海相粉土的均匀性和强度研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(10):869-874.
- Wei Zhanglin, Zhao Zhifeng. Study on uniformity and strength of marine silt reinforced by microbially injecting [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(10): 869-874.
- [20] 付佳佳,姜朋明,纵岗,等.微生物拌和固化海相粉土的抗压强度试验研究[J].人民长江,2021, 52(1):167-172,189.
- Fu Jiajia, Jiang Pengming, Zong Gang, et al. Experimental study on compressive strength of solidified marinesilty soil mixed with microorganism[J]. Yangtze River, 2021, 52(1): 167-172, 189.
- [21] 张艺,李永强,章定文,等.粉土改良膨胀土的路用性能与现场试验[J].岩土力学,2023,44(10):2942-2952.
- Zhang Yi, Li Yongqiang, Zhang Dingwen, et al. Road performance and field test of expansive soil improved by silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2942-2952.
- [22] 商拥辉,徐林荣,刘维正,等.重载铁路改良土和A组填料过渡段的动力特性[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(6): 2128-2136.
- Shang Yonghui, Xu Linrong, Liu Weizheng, et al. Dynamic features of transition section between improved soil and a-filled of heavy-haul railway[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2021, 51(6): 2128-2136.

Influence of construction waste content and rolling methods on deformation characteristics of improved silt subgrade

Zhao Licai^{1,2,3,4}, Ma Qian⁵, Huang Haifeng⁶, Xie Liang², Yuan Long⁴

(1. The Third Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group Corporation Limited,

Shenyang Liaoning 110136, China;

2. School of Architectural Engineering, Xizang Vocational Technical College, Lhasa Tibet 850000, China;

3. Yunnan Provincial Department of Education Engineering Research Center for Building Digital and Energy Saving Technology, Yunnan Minzu University, Kunming Yunnan 650500, China;

4. School of Construction Engineering, Xinjiang Applied Vocational Technical College, Kuitun Xinjiang 833200, China;

5. Sichuan Shudao Rail Transit Group Co., Ltd., Shudao Investment Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610063, China;

6. Sichuan Expressway Construction and Development Group Co., Ltd., Shudao Investment Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: To address the engineering challenges of difficult compaction and molding of Yellow River alluvial silt and the difficulty in guaranteeing subgrade filling quality, a technical solution utilizing urban waste construction waste for the physical improvement of silt subgrade is proposed. Through laboratory geotechnical tests, the influence of construction waste contents on the physico-mechanical properties of Yellow River alluvial silt is investigated, and the mechanism of construction waste improving silt subgrade is revealed. On this basis,

relying on the subgrade engineering of the newly built Xi'an-Ankang High Speed Railway, a three-dimensional dynamic finite element model integrating an equivalent moving load subroutine is constructed. Combined with on-site monitoring data, the deformation evolution laws and compaction mechanism of the improved subgrade under dynamic loading are analyzed. The results indicate that incorporating rough-surfaced construction waste particles can effectively reshape the internal structure of the silt, form a load-bearing skeleton, and significantly enhance its internal friction angle and resistance to compressive deformation. Comprehensively considering subgrade performance and construction efficiency, the optimal compaction process is determined to be a 20% construction waste content (mainly crushed concrete), a 40 cm loose paving thickness, supplemented by a "low speed and multiple strong vibrations" combination. The deep impact effect generated by large amplitude overcomes the frictional resistance between coarse aggregates, thereby ensuring the overall compaction quality of the subgrade. The research results can provide a technical reference for compaction issues of special soil subgrades.

Key words: Construction waste; Improved silt; Subgrade deformation; Geotechnical test; Numerical simulation; Field monitoring

(责任编辑 吴 彬)