

不同类型土质填料的注浆固化效果对比分析

刘聚凯¹, 韩世亮², 张晓明³

(1.安丘市水利事业发展中心,山东 安丘 262100;2.安丘市下株梧水库运营维护中心,山东 安丘 262100;
3.山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心,山东 济南 250100)

【摘要】农田道路及水利工程大坝坝顶道路承受车辆荷载及水分、温度等外界环境的反复作用,路面极易产生裂缝、沉陷等病害。固化土注浆技术因施工便捷在道路加固中得到广泛应用。文章选取砂土、粉土及黏土3种典型土质,基于不同水泥掺量、压实度、养护时间等参数进行了室内压缩模量试验,分析了水泥浆液的固化效果。结果表明:掺入水泥浆液可显著提高土体强度,且处理砂土路基的应用效果明显优于粉土和黏土;砂土路基的最佳水泥掺量约为7%,粉土和黏土路基的最佳水泥掺量约为5%~6%;为满足行车荷载要求,土体注浆处理后的最小养护龄期为7 d。

【关键词】土质路基;注浆固化;回弹模量;固化效果

【中图分类号】U416.1

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-04-0021-05

Comparative Analysis on Grouting Solidification Effect of Different Soil Fillers

LIU Jukai¹, HAN Shiliang², ZHANG Xiaoming³

(1. Water Resources Development Center of Anqiu City, Anqiu, Shandong 262100, China; 2. Xiazhuwu Reservoir Operation and Maintenance Center of Anqiu City, Anqiu, Shandong 262100, China; 3. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: Farmland roads and dam crest roads are subjected to repeated vehicle loads as well as external environmental effects such as moisture and temperature, which easily induce pavement diseases such as cracks and subsidence. Solidified soil grouting technology has been widely applied in road reinforcement due to its convenient construction. Three typical soils, namely sand, silt and clay, were selected. Indoor compression modulus tests were carried out under different parameters including cement content, compaction degree and curing time to analyze the solidification effect of cement slurry. The results show that the addition of cement slurry can significantly improve soil strength, and the application effect on sand subgrade is obviously superior to that on silt and clay. The optimal cement content for sand subgrade is about 7%, while that for silt and clay subgrades is approximately 5%~6%. To meet the requirements of traffic load, the minimum curing age after soil grouting treatment is 7 days.

Key words: Soil subgrade; Grouting solidification; Resilience modulus; Solidification effect

农田道路及水利工程大坝坝顶道路受车辆荷载及水分、温度等外界环境的反复作用,路面极易产生各类病害,包括但不限于车辙、裂缝、沉陷等。当路面发生病害问题时,若未及时采取养护措施,病害会进一步发展,从而导致路面基层空洞、路基下沉等结构性问题^[1-2]。针对此类病害可采用注浆养护技术^[3],通过向病害区域内填充、渗透浆液材料,将路基中的空气排出并形成固化土,以起到补强路基的目的^[4]。文章通过室内试

验,分析了水泥掺入比、压实度等因素对不同土质固化后回弹模量的影响,揭示了不同土质的加固处理效果及养护时间,可为工程实践提供依据。

1 试验方案

1.1 试验材料与工况设计

注浆材料为 P.O 42.5 水泥,水灰比选取注浆

收稿日期:2025-10-20

作者简介:刘聚凯(1986—),男,工程师

常用的 1:1, 实验室分别将佳含水率条件下的砂土、粉土、黏土作为注浆介质,在压实度分别为 80%、85%、90%, 水泥掺量分别为 0%、3%、5%、7%、9%条件下,通过测定注浆体在 3 d、7 d 和 28 d 龄期时的回弹模量,评判注浆效果。

1.2 注浆体回弹试验流程

试验装置选用内径为 10 cm,高度为 12.7 cm 的 A 类击实桶,回弹装置为杠杆压力仪,具体试验流程如下:

1) 试样制备与养护。根据不同水泥掺量计算水泥用量,并将称量好的水泥加入水中,边加边用玻璃棒搅拌,直至形成均匀无颗粒的水泥净浆;在搅拌锅中称取一份湿土,将制备好的水泥浆液全部倒入土中,搅拌机低速拌合 30 s,暂停刮边,再高速拌合 60 s,直至形成颜色均匀的固化土混合物;模具内壁涂一薄层脱模剂并将混合物分层装入试模,刮去多余土样,使试样与试模两端齐平,用保鲜膜立即包裹试模两端,防止水分蒸发;将试样放入标准养护室进行养护,24 h 后脱模并养护至设定龄期。

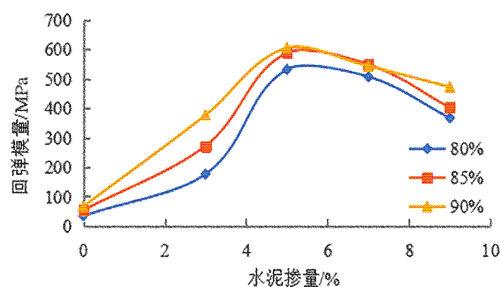
2) 回弹模量测定。试样上方放置刚性承载板,在承载板上安装位移传感器,测量板的中心沉降,通过杠杆压力计向承载板施加垂直荷载;施加 0.01 MPa 初始压力,稳压 30 s 用于消除接触间隙,卸载压力至零并记录位移传感器读数;利用公式计算确定各级加载荷载数值,该试验各级荷载分别为 19.26 kPa、46.78 kPa、93.55 kPa、140.33 kPa、187.11 kPa,在每级荷载稳压 1 min 后读取位移传感器读数,卸载阶段与加载阶段选取相同数值直至荷载归零并记录每级回弹变形量;试验测得的回弹模量变形以单位压力为横坐标,回弹变形为纵坐标,绘制单位压力-回弹变形曲线并取线性段计算模量。为消除试验误差,每组试件开展 3 组平行试验并取平均数值作为最终回弹模量。

2 试验结果及分析

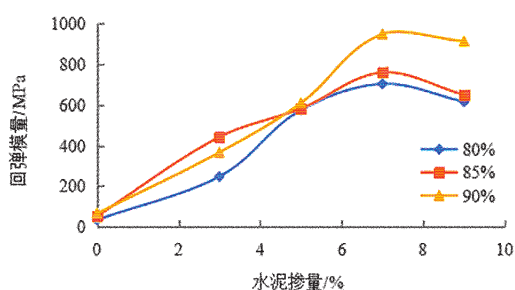
2.1 固化砂土试验结果及分析

图 1 为砂土注浆体在不同龄期随水泥掺量变化时回弹模量的数值。由图 1 可知,在砂土中掺入水泥浆液可以有效增强其回弹模量。当养护龄期为 3 d 时,水泥掺量为 5% 时固化土强度最

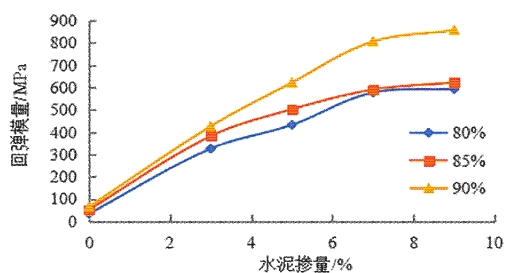
高,但随龄期增加,对应最大强度的水泥掺量也随之增加,如 7 d 养护龄期对应的最优掺入比为 7%,28 d 龄期则为 9%。



(a) 3 d 龄期



(b) 7 d 龄期



(c) 28 d 龄期

图 1 固化砂土回弹模量随水泥掺量变化趋势

分析原因为水泥浆液注入土体内部后会在压力的作用下渗透入土体的孔隙中,置换出空气与自由水,降低土体的孔隙率且浆液固化后可形成刚性的网络骨架与砂土颗粒相互咬合,显著提升土体的整体性;另一方面水泥产生水化反应,可产生胶结作用,使得砂土颗粒在空间呈现网状结构,提升其回弹强度,当水泥掺量超过临界值后,土体内部的水灰比失衡导致水化度显著降低,从而表现出注浆体的早期强度下降。

图 2 为不同水泥掺量条件下砂土回弹模量随养护龄期的变化趋势。由图 2 可知,在相同水泥掺量条件下,砂土注浆体的回弹模量随着养护时间增加在前 3 d 呈现直线增长趋势,直至第 7 d 达到基本稳定;水泥掺量大于 3% 时,养护初期(龄期为 3 d)的注浆体砂土压实度对其回弹模量的影

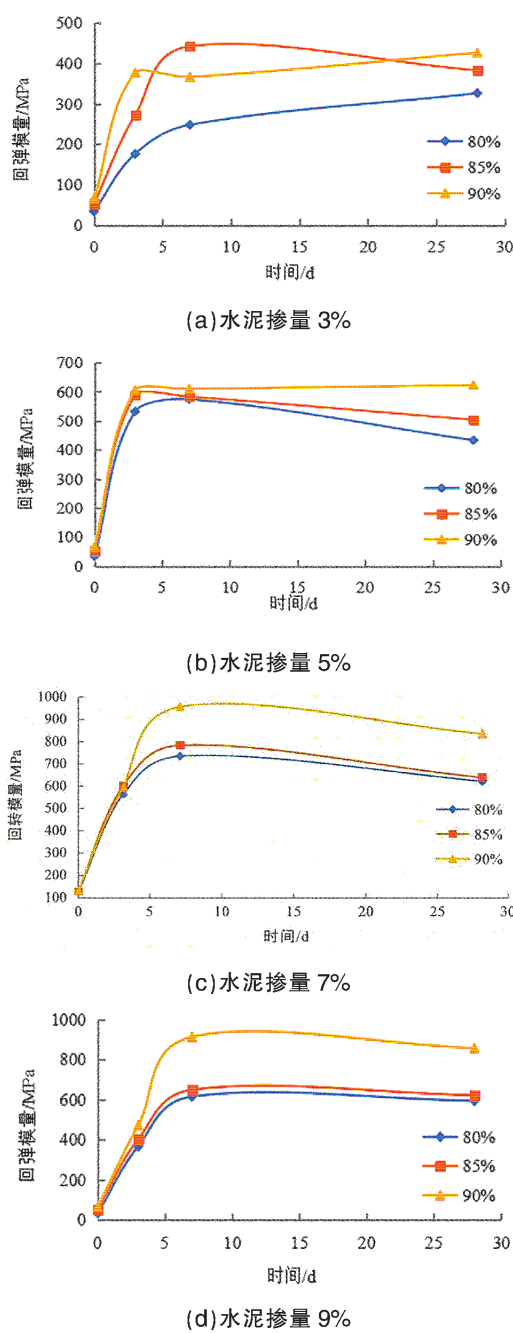


图 2 固化砂土回弹模量随龄期变化趋势

响不大,不同压实条件下的砂土注浆体回弹模量相似,但随养护时间增加,其回弹模量出现显著差异,砂土压实度为 90%的注浆体回弹模量明显强于其他压实度土体。

试验结果表明:砂土路基经注浆处理后的养护龄期最少为 7 d,而且砂土路基在较高压实度(90%)条件下的加固效果要明显优于低压实度(80%、85%)条件,可对处理区域进行夯击处理。

2.2 固化粉土试验结果及分析

图 3 为不同水泥掺量对粉土回弹模量的影

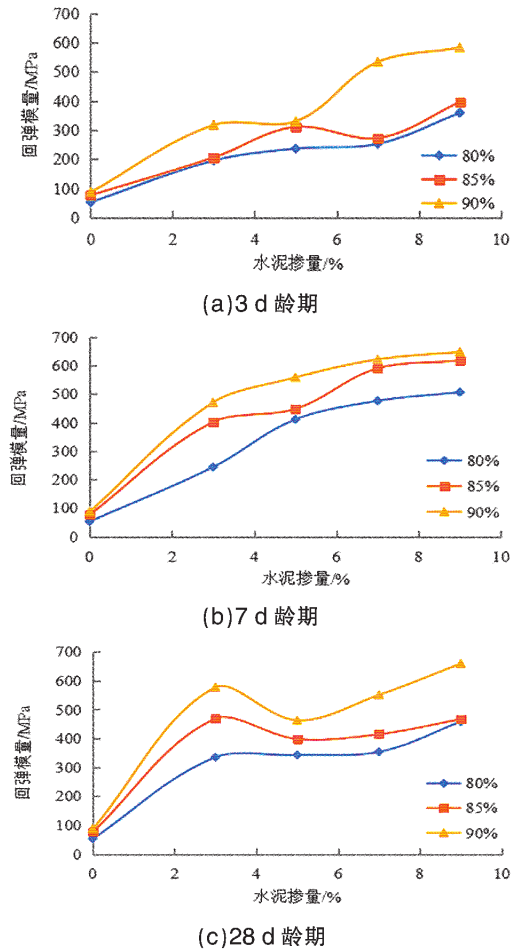
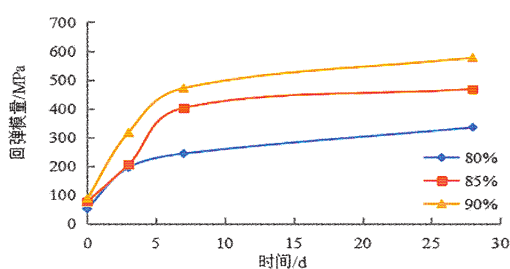


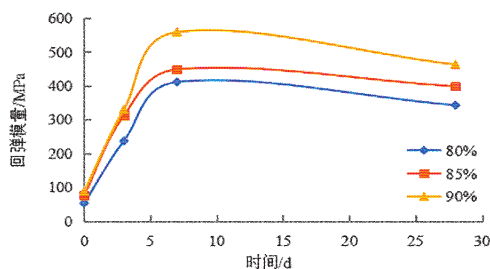
图 3 固化粉土回弹模量随水泥掺量变化趋势

响趋势。由图 3 可知,粉土中注入水泥浆料后不同压实度条件的土体回弹模量均得到不同程度的提升,且水泥掺量低于 3%时各龄期的粉土注浆体回弹模量均呈现随水泥浆液掺量的增大而快速增长趋势;随水泥掺量增加达到 5%~6%时,粉土不同龄期的回弹模量开始趋于稳定。试验结果表明:粉土中掺入不同剂量的水泥浆液可以提高粉土路基的回弹模量,且按掺入的水泥剂量计算,最佳掺量约为 5%~6%。

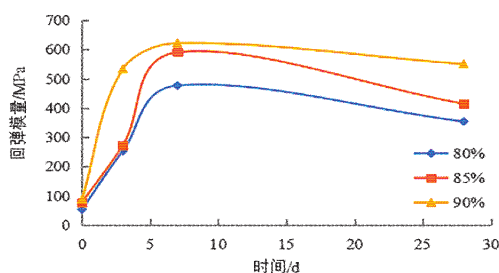
图 4 为固化粉土回弹模量随养护龄期的变化趋势。由图 4 可知,在相同水泥浆液掺量条件下,粉土注浆体的回弹模量随养护龄期增加,在养护前 3 d 注浆体回弹强度快速增加,7 d 后趋于稳定;且养护初期不同压实度粉土注浆体的回弹模量相差不大,但随养护时间增长,压实度的影响逐渐显现,表现为压实度较高的土体回弹模量的增幅大于压实度较低的土体,尤其是 90%压实度的土体的回弹模量要明显高于 80%和 85%压实度的土体。粉土路基经注浆处理后的养护龄



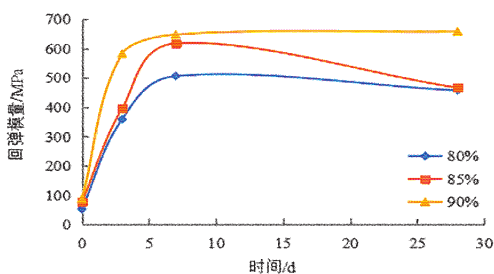
(a) 水泥掺量 3%



(b) 水泥掺量 5%



(c) 水泥掺量 7%



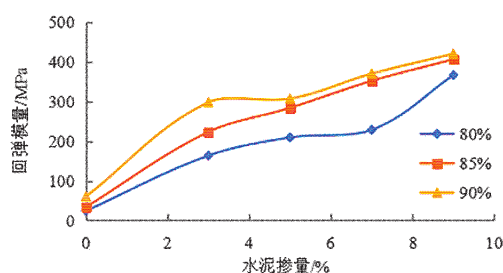
(d) 水泥掺量 9%

图 4 固化粉土回弹模量随龄期变化趋势

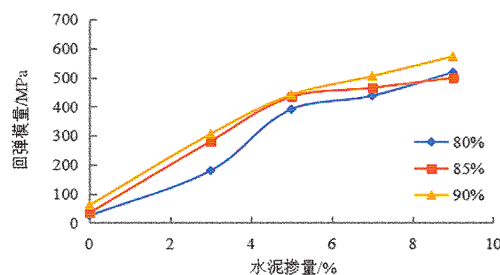
期最少为 7 d;粉土在较高压实度(90%)条件下的加固效果显著优于低压实度(80%、85%)条件下的加固效果。

2.3 固化黏土试验结果及分析

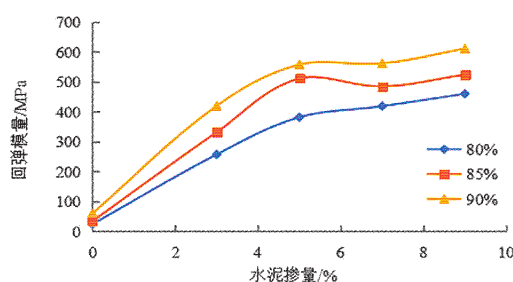
图 5 为黏土注浆体在不同水泥掺量条件下回弹模量的变化趋势,分析图 5 可知在掺入不同剂量的水泥浆液后,不同压实度的黏土回弹模量均得到不同程度的提高;当水泥掺量低于 3%时,黏土注浆体各龄期的回弹模量随水泥掺量增大呈快速增长趋势;水泥掺量增加达到 5%~6%时,黏土注浆体不同龄期的回弹模量开始趋于稳定。



(a) 3 d 龄期



(b) 7 d 龄期



(c) 28 d 龄期

图 5 固化黏土回弹模量随水泥掺量变化趋势

试验结果表明:在黏土中掺入不同剂量的水泥浆液可以提高黏土路基的回弹模量,最佳掺灰量约为 5%~6%。

图 6 为不同水泥掺量条件下黏土注浆体回弹模量随养护龄期的变化趋势。由图 6 可知,相同水泥掺量条件,黏土注浆体的回弹模量随龄期增长,早期也呈快速增长,约在第 7 d 达到稳定,压实度较小的试件甚至出现小幅的下降;养护初期不同压实度的黏土注浆体回弹模量相差不大,但随着养护龄期延长,不同压实度的土体之间,回弹模量的差值逐渐增大,压实度较高的土体回弹模量的增幅要大于压实度较低的土体,特别是 90%压实度的土体的回弹模量要明显高于 80%和 85%压实度的土体。试验结果表明:基于黏土路基的回弹模量考虑,黏土路基经注浆处治后的养生龄期最少为 7 d;黏土在较高压实度(90%)条件下的加固效果要明显优于低压实度(80%、85%)条件下的加固效果。

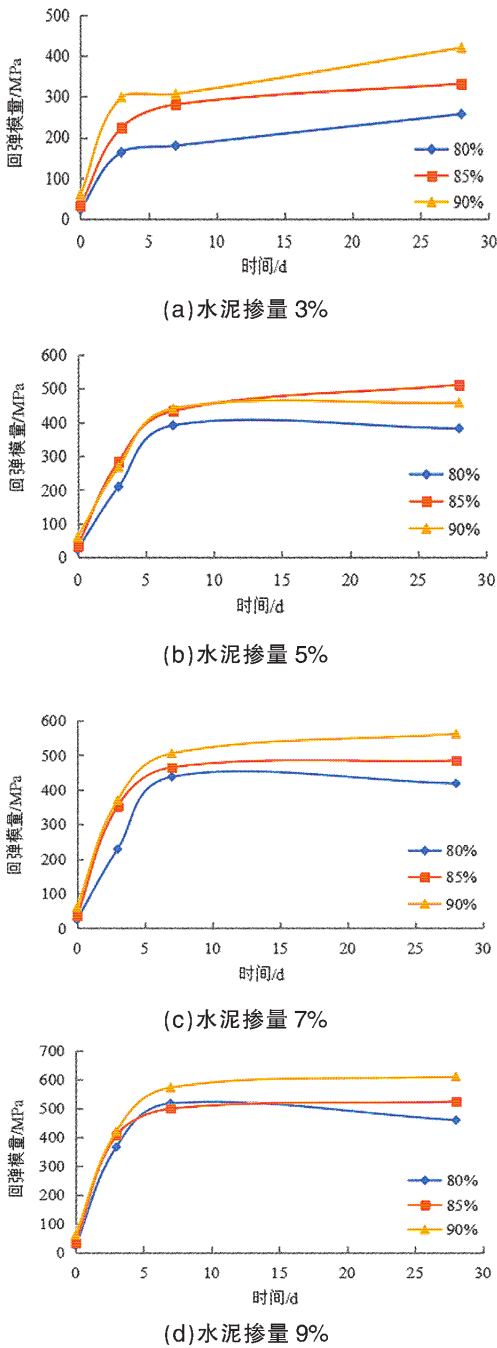


图 6 固化黏土回弹模量随龄期变化趋势

2.4 不同土质的加固效果对比

为分析阀管注浆技术对于不同土质的适用性,针对不同土质掺入相同水泥浆料,对其养护 7 d 后的材料性能进行对比,试验结果如图 7 所示。由图 7 可知,砂土、粉土、黏土 3 种土质在水泥浆料的掺入量达到 7% 以后,加固效果趋于稳定;在养护龄期方面,7 d 以后 3 种土质的回弹模量基本不再增加,因此,选取 3 种土质水泥掺量为 7% 时的 7 d 回弹模量值进行材料性能对比,并分析周化效果的差异。

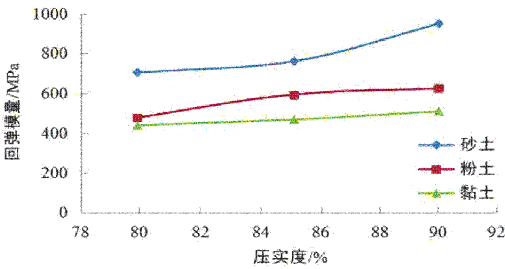


图 7 不同土质固化养护 7 d 时固化土回弹模量对比图

由图 7 可知,7% 的水泥掺量对 3 种不同土质的加固效果具有较为明显的差别,具体表现为砂土最高,其次为粉土和黏土。分析原因,土体固化强度由两部分组成,一是水泥结石体强度,二是土颗粒的骨架效应。砂土因粒径及硬度均较大,在固化土中更容易发挥颗粒骨架作用,因此其抵抗变形的能力更强。再进一步比较土体压实度的影响,可知压实度越高,固化土回弹模量随之增大。然而,进一步比较土质类型,砂土压实度对回弹模量的影响明显大于粉土和黏土,后面两种土质压实度为 85% 和 90% 时对应的回弹模量基本相同,处理效果不明显。

3 结 论

- 1) 在素土中掺入不同剂量的水泥浆液可以提高砂土、粉土、黏土 3 种不同土质路基的支撑强度,其中砂土路基的最佳水泥掺量约为 7%,粉土和黏土路基的最佳水泥掺量约为 5%~6%。
- 2) 基于不同土质路基的回弹模量考虑,砂土、粉土、黏土 3 种不同土质路基经注浆处理后的养护龄期最小为 7 d,土体压实度越高,处理效果越明显。
- 3) 砂土路基的固化效果要明显优于粉土和黏土,更适用于采用注浆加固手段进行固化处理。

参考文献

[1] 游洪臣.公路桥梁工程软土地基加固施工技术的应用[J].工程机械与维修,2025(4):95-97.
[2] 李才华.公路路基病害成因分析及整治措施研究[J].交通科技与管理,2025,6(9):49-51.
[3] 龚琳惠.钢花管注浆技术在公路软土路基病害治理中的应用[J].交通世界,2025(9):48-50.
[4] 胡俊杰.袖阀管注浆套壳料配比优化及微观结构分析[J].铁道建筑,2025,65(3):120-125.

(责任编辑 崔春梅)