Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2026, 15(11), 77-86
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2026.1511259

Hans汉斯

复合固化剂改良路基弃土力学性能与耐久性试验研究

陈军炜

上海城建市政工程(集团)有限公司，上海

收稿日期：2026年10月25日；录用日期：2026年11月17日；发布日期：2026年11月26日

摘　要

针对公路工程大量挖方弃土难以直接用作路基填料、弃土外运占地且砂石资源日趋紧张的问题，以某高速公路粉质黏土弃土为对象，采用水泥、粉煤灰与液体离子型固化剂构建复合固化体系，通过击实、无侧限抗压强度、应力－应变、浸水水稳、干湿循环、CBR及回弹模量等系统试验，研究了固化剂掺量与养护龄期对固化土力学性能和耐久性的影响规律，并探讨了其强度形成机理。结果表明：复合固化土28 d无侧限抗压强度达3.05 MPa，约为素土的6.8倍，90 d仍持续增长；粉煤灰的火山灰反应主要贡献后期强度，液体固化剂通过离子交换促进土粒絮凝并激发胶凝反应，使水稳系数由单掺水泥的0.77提高到0.88，5次干湿循环后强度保留率由0.70提高到0.81；浸水CBR由素土的3.1%提高到76%，回弹模量达128 MPa，可满足公路各结构层路基填料要求。研究成果为工程弃土的资源化路基利用提供了配合比依据与技术支撑。

关键词

路基填料，固化土，复合固化剂，无侧限抗压强度，水稳定性，耐久性

Experimental Study on Mechanical Properties and Durability of Subgrade Waste Soil Stabilized by Composite Curing Agent

Junwei Chen

Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: October 25, 2026; accepted: November 17, 2026; published: November 26, 2026

文章引用: 陈军炜. 复合固化剂改良路基弃土力学性能与耐久性试验研究[J]. 土木工程, 2026, 15(11): 77-86.
DOI: 10.12677/hjce.2026.1511259

Abstract

In addressing the problems that large quantities of excavated waste soil in highway engineering are difficult to use directly as subgrade fill material, that off-site disposal of spoil occupies land, and that sand and gravel resources are becoming increasingly scarce, this study took the silty clay spoil from an expressway as the research object and established a composite stabilization system composed of cement, fly ash, and a liquid ionic curing agent. Through systematic tests including compaction, unconfined compressive strength, stress-strain, water stability after immersion, wetting-drying cycles, CBR, and resilient modulus, the effects of curing agent dosage and curing age on the mechanical properties and durability of the stabilized soil were investigated, and the strength formation mechanism was discussed. The results show that the 28-day unconfined compressive strength of the composite stabilized soil reached 3.05 MPa, approximately 6.8 times that of plain soil, and continued to increase at 90 days. The pozzolanic reaction of fly ash mainly contributed to the later strength. The liquid curing agent promoted the flocculation of soil particles through ion exchange and stimulated cementitious reactions, increasing the water stability coefficient from 0.77 for soil stabilized with cement alone to 0.88, and increasing the strength retention rate after five wetting-drying cycles from 0.70 to 0.81. The soaked CBR increased from 3.1% for plain soil to 76%, and the resilient modulus reached 128 MPa, meeting the requirements for subgrade fill materials for various structural layers of highways. The research results provide a mix proportion basis and technical support for the resource utilization of engineering spoil as subgrade material.

Keywords

Subgrade Fill, Stabilized Soil, Composite Curing Agent, Unconfined Compressive Strength, Water Stability, Durability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

公路工程建设会产生大量挖方弃土，这类弃土往往含水率高、塑性指数大、强度低、水稳定性差，直接用作路基填料难以满足压实度与承载力要求，通常需外运弃置。而多地对河道与山体砂石开采实行限制乃至禁采，合格填料供应紧张、价格持续上涨，弃土大规模堆放又占用土地、破坏生态。因此就地将工程弃土改良为满足路基技术要求的填筑材料，已成为道路工程领域需要解决的现实问题[1]-[3]。

固化土技术通过在原状土中掺入少量水泥、粉煤灰等胶凝材料并辅以化学固化剂，借助水化、火山灰反应及离子交换等物理化学作用激发土体活性，使松散土粒胶结成整体，从而显著提高土体强度、水稳定性和耐久性，并可大量消纳弃土、减少砂石用量，已在软基处理、底基层填筑等场合得到应用[4] [5]。国内外针对土体固化改良技术已积累了较为丰富的研究成果，国外现有研究围绕石灰、水泥、粉煤灰及各类工业废渣固化土体的力学特性、胀缩变形规律与微观结构演化机制开展了系统探索，验证了无机胶凝材料及固废复合体系在提升土体强度、改善水稳性能、优化孔隙结构方面的改良效果[6]-[8]。国内相关研究也逐步聚焦于软黏土、淤泥土等特殊路基土的固化处置与工程应用，在废弃土体资源化利用、复合固化材料配比优化及路基填筑适用性等方面形成了完善的理论与技术支撑体系[9] [10]。但已有研究多集

中于单一水泥或石灰固化及底基层应用，针对路基填料这一用量最大、对水稳与干湿循环耐久性要求更高的场合，关于水泥、粉煤灰与液体离子固化剂多元复合体系的掺量优化、长期强度演变及耐久性的系统研究仍显不足，粉煤灰与液体固化剂的协同增强机理也有待深化。

因此，本文以上海某高速公路粉质黏土弃土为研究对象，构建“水泥–粉煤灰–液体离子固化剂”复合固化体系，通过重型击实、无侧限抗压强度、应力–应变、浸水水稳、干湿循环、CBR 及回弹模量等一系列试验，系统考察固化剂掺量与养护龄期对固化土力学性能和耐久性的影响，确定适用于路基填料的推荐配合比，并结合水化与离子交换作用探讨其强度形成机理，为工程弃土的资源化路基利用提供试验依据和技术参考。

2. 试验材料

2.1. 试验用土

试验用土取自某高速公路路基工程的挖方弃土，外观呈黄褐色，天然状态下含水率偏高、黏性较大。依据试验规程对其进行颗粒分析、界限含水率、击实及承载比等试验[11]，基本物理性质指标见表1。

Table 1. Basic physical property indices of the test soil
表 1. 试验用土基本物理性质指标

指标	数值	指标	数值
天然含水率 w/%	21.6	土粒相对密度 G_s	2.71
液限 w_L/%	41.8	塑限 w_P/%	22.4
塑性指数 I_P	19.4	砂粒质量分数/%	18.5
粉粒质量分数/%	56.2	黏粒质量分数/%	25.3
最大干密度/(g/cm^3)	1.83	最佳含水率/%	14.8
浸水 CBR/%	3.1	回弹模量/MPa	26

从表 1 可知，试验用土天然含水率高、遇水易软化，直接填筑路基存在承载力不足和水稳隐患，须经固化改良后方可使用。

2.2. 固化材料

胶凝材料采用 PO 42.5 级普通硅酸盐水泥，早期强度较高、水化反应充分，是固化土强度的主要来源，掺合料采用 F 类II级粉煤灰，细度和烧失量满足路用要求，其富含的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 可在碱性环境中发生火山灰反应，用于改善固化土的后期强度与微观结构。化学激发材料采用市售液体离子型土壤固化剂，棕褐色液体，施工前兑水稀释后喷洒，主要通过离子交换减薄黏粒结合水膜、促进土粒絮凝团聚，并对水化反应有一定激发作用。

2.3. 配合比设计

以单掺水泥固化土为基础考察水泥掺量的影响，再依次掺入粉煤灰和液体固化剂，研究多元复合的增强效果。各固化材料掺量均按占干土质量的百分比计，共设计 6 组配合比，其中 S0 为素土对照组，C3、C4、C5 用于确定水泥合理掺量，C4F10 考察粉煤灰作用，C4F10L 为三元复合方案，液体固化剂掺量取 0.02%。具体配合比见表 2。

Table 2. Mix proportion design scheme for stabilized soil
表 2. 固化土配合比设计方案

编号	水泥/%	粉煤灰/%	液体固化剂/%	备注
S0	0	0	0	素土对照
C3	3	0	0	单掺水泥
C4	4	0	0	单掺水泥
C5	5	0	0	单掺水泥
C4F10	4	10	0	水泥－粉煤灰
C4F10L	4	10	0.02	复合固化

3. 试验结果与分析

3.1. 击实特性

按试验规程制作试件[11]，通过重型击实试验测定各组混合料在不同含水率下的干密度，试验结果如图 1 所示。

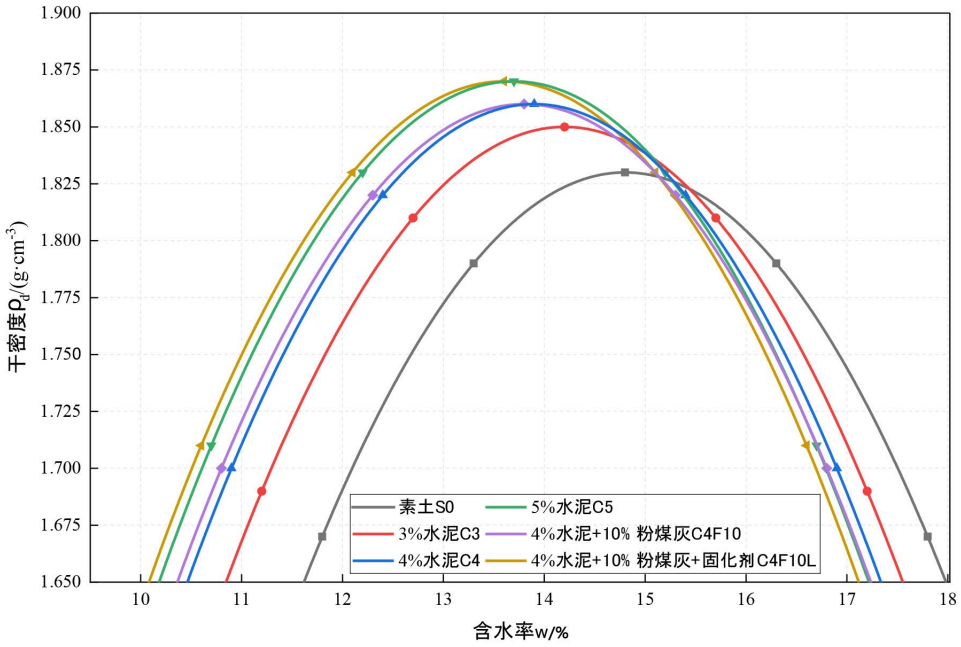

Figure 1. Compaction curves of stabilized soil for each group
图 1. 各组固化土的击实曲线图

如图 1 所示，各组固化土的干密度均随含水率增大呈先升后降的规律，曲线峰值对应最佳含水率与最大干密度。素土最佳含水率为 14.8%、最大干密度为 1.83 g/cm^3，掺入固化材料后各组最佳含水率降至 13.6%~14.2%、最大干密度提高到 1.85~1.87 g/cm^3，其中 C4F10L 分别为 13.6%和 1.87 g/cm^3。这是由于水泥和粉煤灰较粗颗粒填充孔隙、改善级配，液体固化剂的离子交换又压缩双电层、减薄结合水膜，促使土粒絮凝、更易压密。最佳含水率整体下降，使高含水率弃土施工时的翻拌晾晒工作量相应减小，对路基施工有利。

3.2. 无侧限抗压强度

试样采用静压法成型，分别测定 6 组配合比试样在 3、7、28、60、90 d 龄期的无侧限抗压强度，试验结果如图 2 所示。

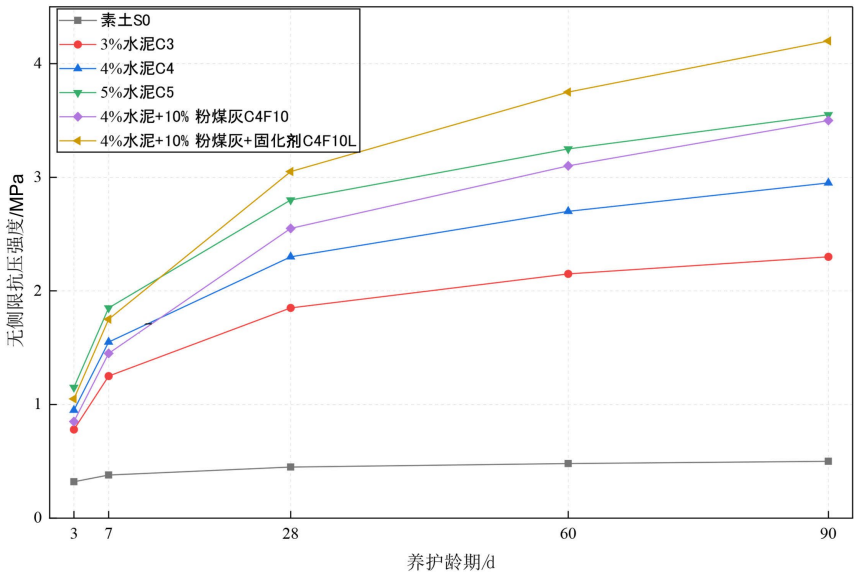

Figure 2. Curves of unconfined compressive strength of stabilized soil versus curing age for each group
图 2. 各组固化土无侧限抗压强度随龄期变化曲线图

如图 2 所示，素土强度始终很低，28 d 仅为 0.45 MPa 且基本不再增长。掺入固化材料后各组强度显著提高，并表现出明显的龄期效应。C4F10L 的 3、7、28、60、90 d 强度分别为 1.05、1.75、3.05、3.75、4.20 MPa，28 d 约为素土的 6.8 倍。强度在 7 d 以内增长最快，对应水泥快速水化、早期胶结结构快速形成。7 d 后增速放缓但仍持续发展，表明固化土具有良好的后期强度储备。

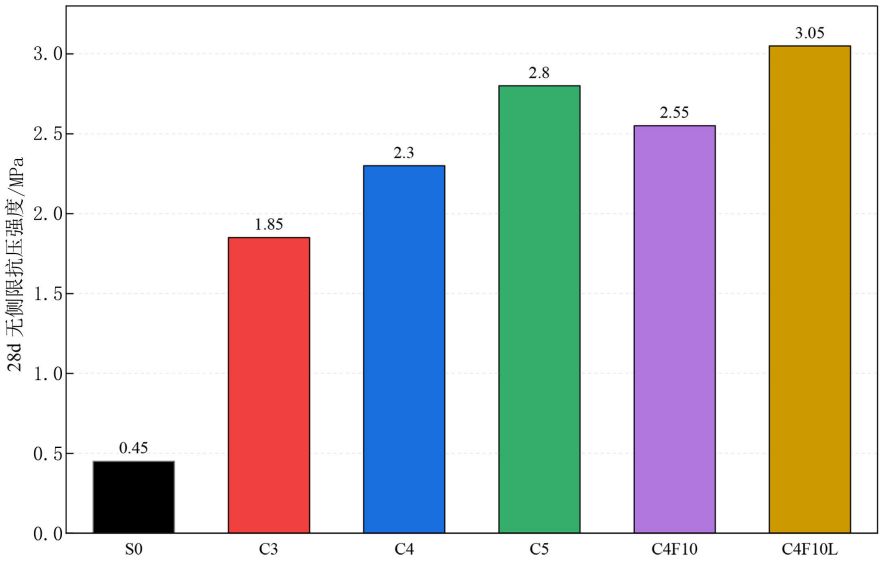

Figure 3. Comparison of 28 d unconfined compressive strength of stabilized soil with different mix proportions
图 3. 不同配合比固化土 28 d 无侧限抗压强度对比

为直观比较固化剂掺量与组成的影响，将各组 28 d 强度绘于图 3。

如图 3 所示，单掺水泥时 28 d 强度随水泥掺量近似线性增加，C3、C4、C5 分别为 1.85、2.30、2.80 MPa，掺量每提高 1 个百分点强度约增加 0.4~0.5 MPa。C4F10 早期(3 d)强度略低于 C5，但 28 d 达 2.55 MPa、已超过 C4，60 d 后接近 C5 水平，原因在于粉煤灰早期主要起微集料填充作用，后期在水泥水化析出的 $Ca(OH)_2$ 激发下发生火山灰反应、生成附加胶凝产物，使后期强度持续增长。再掺 0.02%液体固化剂后，C4F10L 的 28 d 强度进一步增至 3.05 MPa、较 C4F10 提高 0.50 MPa，且各龄期均为各组最高，说明三者协同增强效果显著。综合强度与经济性，水泥掺量过高既不经济又易增大脆性，C4F10L 在强度与经济性之间综合表现最优。

3.3. 水稳定性

路基长期处于地下水与大气降水交替作用的环境中，水稳定性是衡量固化土能否用作路基填料的关键。对 28 d 龄期试样进行浸水试验，试验结果见表 3。

Table 3. Water stability test results of stabilized soil for each group (28 d)
表 3. 各组固化土水稳定性试验结果(28 d)

编号	标准养护强度/MPa	浸水强度/MPa	水稳系数 K
S0	0.45 ± 0.04	0.16(崩解)	0.35
C3	1.85 ± 0.10	1.35 ± 0.08	0.73
C4	2.30 ± 0.12	1.78 ± 0.10	0.77
C5	2.80 ± 0.14	2.20 ± 0.12	0.79
C4F10	2.55 ± 0.13	2.05 ± 0.11	0.80
C4F10L	3.05 ± 0.15	2.68 ± 0.14	0.88

由表 3 可知，素土浸水后迅速软化、局部崩解，水稳系数仅为 0.35。单掺水泥后水稳系数提高到 0.73~0.79，C4F10 为 0.80，复合固化土 C4F10L 进一步提高到 0.88、浸水强度达 2.68 MPa。水稳性的改善源于水化胶凝产物对孔隙和裂隙的充填胶结、阻断了水分侵入与迁移通道，而液体固化剂促使黏粒絮凝、亲水性减弱，进一步抑制了遇水软化。复合固化土水稳系数明显高于单掺水泥土，浸水条件下仍能稳定保持强度，可适应路基长期受水的服役环境。

3.4. 干湿循环耐久性

为评价固化土路基在反复降雨–蒸发条件下的长期耐久性，以 28 d 强度为基准，对 6 组配合比开展 7 次干湿循环试验，试验结果见表 4。耐循环系数随循环次数变化过程如图 4 所示。

Table 4. Performance comparison of stabilized soil in different groups after 7 wetting-drying cycles
表 4. 各组固化土 7 次干湿循环后性能对比

编号	7 次循环后强度/MPa	耐循环系数	质量损失率/%
S0	浸水崩解	—	—
C3	1.02 ± 0.07	0.55	6.8 ± 0.4
C4	1.40 ± 0.08	0.61	5.5 ± 0.3
C5	1.85 ± 0.10	0.66	4.8 ± 0.3
C4F10	1.76 ± 0.09	0.69	4.0 ± 0.2
C4F10L	2.23 ± 0.12	0.73	2.7 ± 0.2

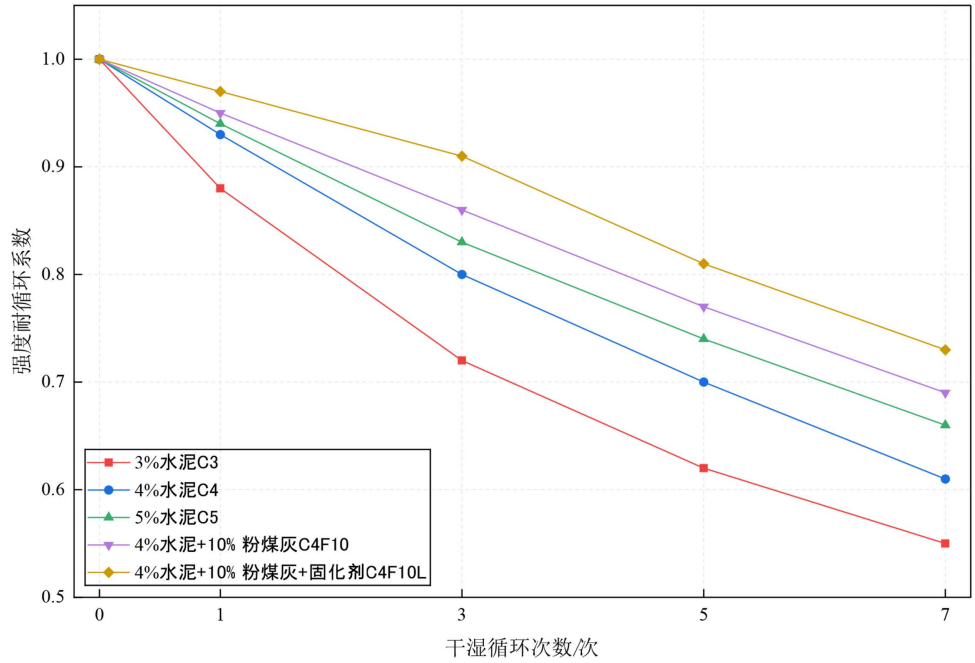

Figure 4. Variation of strength cycle resistance coefficient of stabilized soil in different groups with the number of wetting-drying cycles
图 4. 各组固化土强度耐循环系数随干湿循环次数变化图

由表 4 和图 4 可知，素土浸水后崩解无法承受干湿交替。单掺水泥各组 7 次循环后耐循环系数为 0.55~0.66、质量损失率 4.8%~6.8%，掺粉煤灰后 C4F10 耐循环系数提高到 0.69，复合固化土 C4F10L 进一步达 0.73、质量损失率仅 2.7%，均明显优于单掺水泥土。其中 C4F10L 衰减速率最慢，5 次循环后耐循环系数仍达 0.81。干湿交替引起体积胀缩、产生微裂隙并溶蚀胶结物导致强度衰减，复合体系中二次水化产物与絮凝结构使孔隙更细、整体性更好，故抗反复干湿能力更强、长期耐久性更优。

3.5. CBR 与回弹模量

CBR 和回弹模量是路基填料承载力与刚度控制的核心指标，对素土及各组固化土测试浸水 4 d 后的 CBR 和回弹模量，试验结果见表 5。

Table 5. Test results of CBR and resilient modulus of stabilized soil
表 5. 固化土 CBR 与回弹模量试验结果

编号	浸水 CBR/%	回弹模量/MPa	路基适用性
S0	3.1 ± 0.3	26 ± 2	仅可用于下路堤
C3	28 ± 1.8	65 ± 4	满足各结构层
C4	42 ± 2.1	85 ± 5	满足各结构层
C5	58 ± 2.4	105 ± 6	满足各结构层
C4F10	55 ± 2.3	102 ± 5	满足各结构层
C4F10L	76 ± 2.8	128 ± 7	满足各结构层

由表 5 可知，素土 CBR 仅为 3.1%、回弹模量 26 MPa，仅能勉强满足下路堤要求、无法用于路床部

位。经固化处理后指标大幅提升 C3、C4、C5 的 CBR 分别为 28%、42%、58%，回弹模量分别为 65、85、105 MPa，C4F10 为 55%和 102 MPa，C4F10L 的 CBR 高达 76%、回弹模量达 128 MPa，分别为素土的 24.5 倍和 4.9 倍。对照 JTG D30—2015 [12]上路床 CBR 不小于 8%的规定，各组固化土承载力均满足要求。综合击实、无侧限抗压强度、水稳、干湿循环及 CBR 等各项试验结果，C4F10L 在力学性能与耐久性方面均表现最优，确定为路基弃土固化的推荐配合比。

3.6. 应力－应变关系

基于上述试验确定 C4F10L 为推荐配合比，进一步对其开展 7、28、60 d 龄期的应力－应变试验，试验结果如图 5 所示。

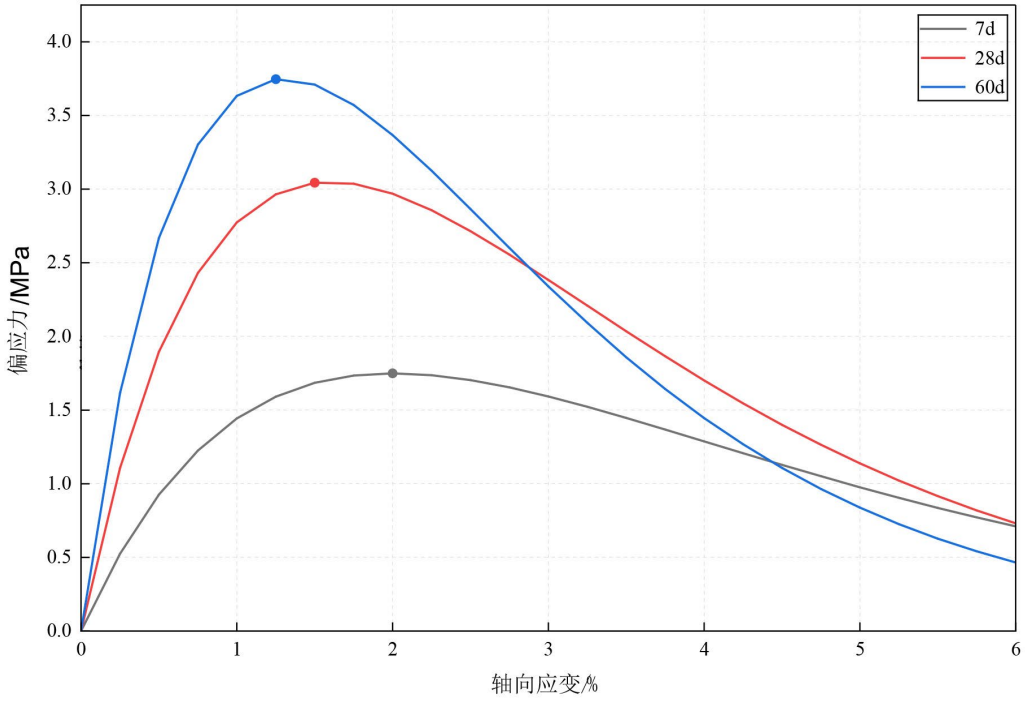

Figure 5. Stress-strain curves of composite stabilized soil C4F10L at different curing ages
图 5. 复合固化土 C4F10L 不同龄期的应力－应变曲线

如图 5 所示，各龄期曲线形态相近，均表现出明显的应变软化特征，加载初期应力随应变近似线性增长、曲线斜率随龄期增大，说明变形模量不断提高。达到峰值后应力迅速下降，试样发生脆性破坏并保留一定残余强度。随养护龄期由 7 d 延长至 60 d，峰值应力由 1.75 MPa 增大到 3.75 MPa，而峰值对应的轴向应变由约 2.0%减小到 1.3%。这表明随水化与火山灰反应进行，胶结结构日趋致密、刚性增强，承载力提高的同时塑性下降、脆性趋于明显。工程应用中应注意对长龄期固化土路基做好防裂与保湿养护，必要时通过控制胶凝材料掺量协调强度与抗裂性能。

3.7. 技术经济性与环境影响初步评估

以推荐配比 C4F10L 为研究对象，从材料成本、资源环境效益开展初步评估，不同处置方案对比见表 6。固化土最大干密度取 1.87 g/cm^3，即每立方米固化土干土质量约 1870 kg，市场参考价格 PO42.5 水泥 420 元/t，F-II粉煤灰 130 元/t，液体离子固化剂 12,000 元/t。

Table 6. Techno-economic-environmental comparison of different subgrade treatment schemes
表 6. 不同路基处置方案技术-经济-环境对比

方案	材料直接成本/(元·m^{-3})	资源与环境特点	备注
弃土外运 + 外购合格填料	130	占用弃土场土地；运输能耗碳排放高；消耗砂石矿产资源	传统方案
单掺 5%水泥改良弃土	39.48	耐久性较差，长期服役风险较高	材料成本低，水稳、干湿循环性能弱
复合固化 C4F10L	60.22	就地消纳挖方弃土，消纳工业固废粉煤灰；减少外运及砂石开采	-

由表 6 可知，就地复合固化方案相较于“弃土外运 + 外购填料”方案材料成本优势显著。对比单掺水泥改良，材料直接成本有所上升，但水稳与干湿循环耐久性大幅提升，全生命周期效益更优。从资源环境角度，该技术可就地消纳工程弃土，节约弃土征地，减少渣土运输燃油消耗与碳排放，同时消耗粉煤灰工业固废，降低砂石开采带来的生态扰动。需要说明，固化土孔隙液呈碱性，液体固化剂含可溶性盐类，在地下水长期淋滤条件下存在离子浸出风险，临近水源、农田敏感区域使用前，应按照固体废物浸出毒性相关标准完成浸出液检测，达标后方可工程应用。

4. 固化土强度形成机理

复合固化土强度与耐久性的提升，是水泥水化、粉煤灰火山灰反应和液体固化剂离子交换共同作用的结果，可概括为胶结、填充与团聚三方面的协同，具体如下：

(1) 水泥的水化胶结作用：水泥遇水水化生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、水化铝酸钙、钙矾石(AFt)并析出 $Ca(OH)_2$。C-S-H 凝胶和钙矾石以网状、针棒状晶体包裹并连接相邻土粒，在颗粒接触处形成胶结结点将松散土粒联结为具有骨架强度的整体，这是固化土早期强度的主要来源，随水化产物不断增多孔隙被逐步充填、土体趋于密实。

(2) 粉煤灰的火山灰反应与微集料填充作用：粉煤灰中的玻璃态活性 SiO_2、Al_2O_3 在 $Ca(OH)_2$ 碱性激发下发生火山灰反应，消耗 $Ca(OH)_2$ 并生成附加的 C-S-H、C-A-H 凝胶，使胶凝产物在养护中后期持续增多，这正是掺粉煤灰固化土早期强度偏低、28 d 以后快速增长并接近高掺量水泥土的根本原因。其光滑致密的微珠同时填充于土粒与水化产物之间，改善颗粒级配、细化孔隙进一步提高了结构致密性和水稳定性。

(3) 液体固化剂的离子交换与絮凝激发作用：粉质黏土黏粒表面带负电并吸附较厚结合水膜，土粒分散、亲水、易塑。固化剂溶解释放的高价阳离子可置换土粒表面的低价阳离子，压缩扩散双电层、减薄结合水膜，促使土粒絮凝成团，既降低塑性和最佳含水率、提高可压实性，又使土粒接触更紧密，为水化胶结提供良好结构基础，其活性组分对水泥水化和粉煤灰火山灰反应还有一定催化作用。在胶结、填充与团聚共同作用下，固化土内部形成“土粒－粉煤灰微珠－水化胶凝产物”相互嵌锁、孔隙显著细化的致密结构，水分侵入和裂隙扩展受到抑制，从而在宏观上表现为强度、水稳定性与干湿循环耐久性的全面提升。

5. 结论

本文以上海某高速公路粉质黏土弃土为研究对象，构建水泥－粉煤灰－液体离子固化剂复合固化体系，通过击实、无侧限抗压强度、应力－应变、水稳、干湿循环、CBR 及回弹模量等系统试验，研究了固化土的力学性能与耐久性，并揭示了其强度形成机理，主要得到以下结论。

(1) 粉质黏土弃土天然含水率高、塑性指数大，浸水 CBR 仅 3.1%，不能直接满足路床填料要求。采

用水泥、粉煤灰与液体离子固化剂复合固化后，最佳含水率由 14.8%降至 13.6%，最大干密度由 1.83 提高到 1.87 g/cm^3，可压实性和高含水率条件下的施工适应性得到改善。

(2) 固化土无侧限抗压强度随水泥掺量近似线性增加，并具有显著的龄期效应。粉煤灰早期贡献小、后期增强明显，液体固化剂与二者协同作用使强度进一步提高。推荐配合比 C4F10L 的 28 d 强度达 3.05 MPa，约为素土的 6.8 倍，90 d 达 4.20 MPa。

(3) 复合固化显著改善了固化土的耐久性。C4F10L 水稳系数达 0.88，5 次干湿循环后强度耐循环系数为 0.81、质量损失率仅 1.6%，均明显优于单掺水泥土。浸水 CBR 达 76%、回弹模量达 128 MPa，分别为素土的 24.5 倍和 4.9 倍，可满足公路各结构层路基填料要求。

(4) 复合固化土的增强源于水泥水化胶结、粉煤灰火山灰反应与微集料填充、液体固化剂离子交换絮凝的协同作用，三者共同形成致密嵌锁的微观结构。技术经济评估表明，就地复合固化相比传统外运－外购填料方案具备成本优势，可节约土地、降低运输能耗与碳排放。敏感区域工程应用前应开展浸出毒性检测，防范地下水环境污染风险。该复合固化方案能就地消纳工程弃土、减少砂石用量，具有良好的技术、经济与环境效益，可为路基弃土资源化利用提供参考。后续可结合冻融循环、现场试验段长期观测及微观测试进一步验证其工程适用性。

参考文献

[1] 景啸. 建筑弃土在道路工程中资源化利用关键技术[J]. 城市道桥与防洪, 2021(4): 34-38+11.

[2] 廖雄飞, 王婧, 张璟泓. 工程弃土的陆域回填再利用技术[J]. 水运工程, 2021(7): 185-191.

[3] 张赛, 章剑青, 尚石磊, 等. 南京长江漫滩废弃粉土改良用作路基填料的室内试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 33-40.

[4] 李飞, 赵琦, 芮雅峰, 等. 流态固化土性能影响规律及固化机理研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2026, 43(4): 58-71.

[5] 赵丽娜, 李文博, 陈伟, 等. 离子固化剂改性黄土强度演化及水稳定性研究[J]. 甘肃科学学报, 2025, 37(3): 87-94.

[6] Nan, J., Chang, D., Liu, J., Chen, H., Lee, J. and Kim, S.Y. (2024) Investigation on the Microstructural Characteristics of Lime-Stabilized Soil after Freeze-Thaw Cycles. *Transportation Geotechnics*, **44**, Article 101175. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101175

[7] Nadeem, M., Ullah, S., Khan, M.A., Chen, S., Q. Alkahtani, M., Mursaleen, M., *et al.* (2024) Performance Evaluation and Microstructural Assessment of Industrial Solid Waste as Sustainable Additives for Expansive Soil. *Advances in Civil Engineering*, **2024**, Article ID: 2397249. https://doi.org/10.1155/2024/2397249

[8] Chabrat, N., Cuisinier, O. and Masrouri, F. (2023) *In Situ* Alteration of the Hydro-Mechanical Behaviour of a Compacted Stabilised Expansive Soil. *Geotechnics*, **3**, 921-936. https://doi.org/10.3390/geotechnics3030049

[9] 徐亮, 唐彤芝, 白兰兰, 等. 就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 109-116.

[10] 徐日庆, 朱坤垅, 黄伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 167-174.

[11] JTG 3430-2020 公路土工试验规程[S]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/glj/202008/P020250429570491355211.pdf, 2026-11-19.

[12] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. https://d.wanfangdata.com.cn/standard/Ch9TdGFuZGFyZE5ld1NvbHI5Uz-IwMjYxMTE5MTU1MDQ3EgxKVEcgRDMwLTIwMTUaCHR5YTJvMzNq, 2015-02-15.