

新型固化剂改良黄土研究现状及展望

巩多有¹, 党振锋², 王建东²

¹兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

²中铁二十一局集团第四工程有限公司, 青海 西宁

收稿日期: 2022年7月29日; 录用日期: 2022年8月9日; 发布日期: 2022年8月24日

摘要

为了探究新型固化剂改良黄土研究现状, 将素黄土和传统固化剂, 如: 水泥、石灰、粉煤灰以及新型固化材料, 如: SH、LD系列等对黄土改良效果进行比较, 通过室内土工试验探究黄土在不同压实度、养护龄期、掺入量条件下对其物理力学性能的影响, 总结发现新型固化材料在改良黄土物理力学性能、施工工艺、工程成本等方面具有明显效果; 同时, 与素黄土相比, 新型固化剂作用后黄土边坡抗冲刷性能得到明显提高。新型固化材料的探索和研发, 对黄土地区建设具有现实意义。

关键词

新型固化剂, 黄土, 室内土工试验, 龄期

Research Status and Prospect of New Curing Agent for Loess Improvement

Duoyou Gong¹, Zhenfeng Dang², Jiandong Wang²

¹School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²The Fourth Engineering Co., Ltd., China Railway 21st Bureau Group, Xining Qinghai

Received: Jul. 29th, 2022; accepted: Aug. 9th, 2022; published: Aug. 24th, 2022

Abstract

In order to explore the research status of new curing agents for loess improvement, the plain loess and traditional curing agents, such as cement, lime, fly ash and new curing materials, such as: SH, LD series and so on carrying on the comparison to loess improved effect, through the indoor test to explore the loess in different degree of compaction, curing age, adding quantity on its physical and mechanical performance, it was concluded that new curing materials in improved physical and mechanical properties of loess, construction technology, project cost, etc. has an obvious ef-

fect; at the same time, compared with plain loess, the anti-erosion performance of loess slope after the new curing agent is significantly improved. The research and development of new curing materials have practical significance for the construction of the loess region.

Keywords

New Curing Agent, Loess, Laboratory Geotechnical Test, Age

Copyright © 2022 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

黄土为第四纪时期形成的一类沉积物，其形状较为松散，早期，我们国家诸多研究者像刘东生等对于黄土的定义、分类以及分布提出了自己的看法[1] [2]。黄土在全世界分布广泛，其在亚洲和欧洲部分区域、北美洲、南美洲都有分布，但只在南美洲有零星黄土分布，全世界分布面积中有 1.3×10^7 平方公里被黄土覆盖，占全球陆地总面积的 9.3% 以上[3]。我国黄土面积约为 64 万平方公里，是世界上分布最广泛的地区，主要分布在西北、华北和东北等干旱或半干旱地区，分布面积约为 63 万平方公里，占到世界黄土面积约 4.9%，约占我国陆地面积的 6.3% [4]。而我国西北地区黄土地层厚度大、发育好、分布连续，黄土表现特性较为典型。而西北地区原状黄土具有强水敏性、动力易损性以及显著的湿陷性和压缩性，导致该地区黄土的抗压和抗剪性能较差。黄土的特殊性使得地区地质灾害频发，如山体滑坡、黄土湿陷、地面液化等[5]，对该地区工程建设产生了很多问题，如地基基础不均匀沉降而导致的建筑物倾斜开裂、路基沉陷等[6]，在某种程度上限制了建造行业的发展，而西北地区以黄土作为地基在其上覆盖建筑物仍占有很大比例，因此国内外研究者一直在努力研究黄土，对其进行改良以使其满足工程建设条件。随着科学技术以及工业化生产的快速发展，探究新型的固化剂去改良黄土越来越得到黄土研究者的青睐，据此，笔者认为有必要对其进行总结，从而进一步探索黄土的工程性质并充分利用黄土对工程建设以及国家推动区域经济发展具有重要意义。

2. 国内外黄土研究的发展

地壳表层的土是在地质历史上进过复杂的变化形成的。土的结构性是指构成土体的颗粒的形状、大小、表面特征、定量的比例关系、空间上的排列状态以及骨架颗粒与胶结物的胶结形式，空隙的形态、大小、数量以及分布情况[7]。土是颗粒状态的松散堆积物，从细观上看土是三相物质，包括固相、液相以及气相，但其在特殊情况下是两相物质，如干土、饱和土。土的形成到土体的形成，通常要经历许多工程地质、力学、物理、化学、物理化学方面的变化，如重力作用、搬运、构造活动、风化、沉积作用、胶结作用、重结晶作用、固结、压密作用等。以上各种作用并不是孤立的，是相互交织、相互影响、互为因果、周而复始、循环无限的过程。

黄土一词在我国公元前 78 年的文献中已正式使用。黄土是我国劳动人民对黄色松散土状堆积物的总称。黄土的成因，自 19 世纪后半期以来，中外学者进行了大量的考察和研究工作，认识逐步趋向一致。认为中国黄土高原的黄土和其他地区的黄土是风成的，是风力地质作用造成的沉积物或堆积物。另一方面也有苏联研究者强调的水成黄土，如河流两岸河漫滩及低级阶地上的黄土，山前平原上洪积的黄土。

因此,有人把水成黄土称为次生黄土或黄土状土。也有坡积成因的黄土,黄土有一定的土壤化进程[8]。

2.1. 黄土性能试验研究

有关黄土自身性能相关试验,国内外学者做了大量的研究,通过以室内试验、施工现场试验、模型试验等形式来更好地研究黄土,其中,2014年肖东辉[9][10]通过黄土冻融循环试验,探究在季节性冻土区,冻结和融化现象下,黄土孔隙率变化规律以及冻融循环条件对黄土渗透性变化的影响。针对这一现象进行了原状土及重塑土的冻融循环试验和冻融循环后的渗透试验。发现冻融循环作用通过改变黄土颗粒和孔隙的大小影响土体的密度和孔隙率,进而影响土体的渗透性;重塑黄土的渗透系数在 $4.91 \times 10^{-4} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1} \sim 1.52 \times 10^{-3} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化,而原状黄土的渗透系数在 $6.01 \times 10^{-5} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1} \sim 7.13 \times 10^{-4} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化,而且重塑黄土的渗透性始终大于原状黄土。通过对比渗透系数的变化曲线与压汞实验获得的孔隙率的变化曲线,进而印证了随着冻融次数的增加黄土的孔隙率先减小,后增大,然后趋于稳定的变化规律。2015年韦锋[11]利用非饱和土四联直剪仪和改进型非饱和土三轴仪进行了一系列的非饱和土直剪和各向等压加载以及三轴收缩试验,以非饱和原状 Q3 黄土及其重塑土为研究对象,来探究结构性对黄土强度特性和屈服应力及屈服吸力的影响。通过试验结果分析得到:原状 Q3 黄土具有较强的结构性,抵抗外力破坏的能力较强,重塑土颗粒间结构较松散,因此,重塑土的抵抗外力的能力较差,进而使原状土的抗剪强度要高于重塑土的抗剪强度,特别是在低吸力和高含水率的条件下表现得更加明显;原状黄土的屈服应力和屈服吸力均大于重塑土,在 P-S 平面上原状土的弹性区要大于重塑土;原状黄土与重塑黄土屈服应力之差随着吸力的增大而呈现出线性增长趋势;在试样屈服前,原状黄土变形要小于重塑土,这是由于原状土有较强的结构性,但是在试样屈服后,两种土变形相近。研究结果为建立结构性模型提供了试验参照,更为黄土地区工程建设提供了数据参考。王萌[12]采用应变控制式三轴仪对不同含水率、不同干密度条件下的重塑黄土进行了常规三轴剪切试验,通过试验来研究含水率及干密度对青海地区非饱和黄土抗剪强度的影响。重塑非饱和黄土试样当干密度较小时,主应力差-应变曲线呈现应变硬化;在干密度较大时,主应力差-应变曲线出现应变软化,表现不是十分明显,随着含水率的逐步增加,变形曲线以应变硬化为主,应变软化逐渐减小直至消失;含水率的变化对土样破坏的影响远大于干密度对其影响。重塑黄土黏聚力均随其干密度的增大而增大;在不同含水率条件下,重塑黄土内摩擦角随着干密度的增大而增大;随着含水率的增大,干密度变化相同值,对黏聚力的变化范围从 88.92 KPa 减小到 19.42 KPa,其幅度超过 78%,内摩擦角从 0.25 度增大到 4.46 度,表明含水率对重塑黄土黏聚力的影响较大,而对内摩擦角的影响较小。叶万军[13]通过热参数这一重要指标,对不同含水率、干密度黄土试样,使用 Test Protocol Hot Disk TPS 2500S 型热常数分析仪,在常温下进行热参数试验,研究黄土热参数随含水率及干密度的变化规律。得出随着土样含水率的增大,黄土试样的导热系数和比热容也随之增大基本呈线性增长趋势;黄土试样含水率一定时,随着土样干密度增大,其导热系数、比热容及热扩散系数也随之增大;当含水率控制到较低时,热扩散系数随含水率的增大而增大;但是当达到一定含水率时,热扩散系数反而随含水率的增大而减小;通过继续增大含水率,热扩散系数基本趋于稳定;含水率一定时,不同地区黄土的热参数与其干密度呈正相关。含水率要优于干密度对黄土热参数的影响程度。对于涉及黄土热工计算,热参数的选取可根据土体含水率及干密度动态选取。2019年王力[14]等通过自制负压湿筛装置筛取出不同黏粒含量的黄土试样,采用静压法将不同黏粒含量的黄土试样制成干密度相同但含水率不同的试样,对其进行直接剪切试验。进行不同黏粒含量对黄土抗剪强度影响的试验,通过研究结果发现:随着试样含水率的增大,不同黏粒含量试样其黏聚力均表现为先增大后减小的趋势,尤其是在含水率 14%左右达到最大值,而试样的内摩擦角均呈现出线性下降的变化规律;伴随着黏粒含量的增长,不同含水率试样其黏聚力均呈现出增大的变化趋势,而试样内摩擦角呈现出先减小后增大的变化趋势。通

过其微观结构解释了黏粒含量对黄土抗剪强度的影响机制，并可依据孔隙比加以量化研究。

通过探究黄土基本性能指标如，黄土孔隙率、粘聚力、内摩擦角、渗透性、抗剪强度等随土样含水率以及干密度的变化规律，为后续新材料改良黄土提供理论指导依据。

2.2. 石灰改良黄土试验研究现状

改良湿陷性黄土的方法主要有物理改良和化学改良。但由于物理方法对部分已建构筑物的改良不具有操作性，因此，采用化学方法对黄土进行固化改良。李振[15]选取兰州地区黄土进行试验，通过探究不同百分比石灰掺入量和不同养护龄期条件下4个阶段(水的滋润阶段、石灰初始混合阶段、养护阶段以及生石灰改良黄土击实阶段)含水率的测量、击实试验、下落锥试验、崩解试验和水化学性质测试，得出改良黄土最优含水率与石灰掺入量及养护龄期成正比，相反，最大干密度与石灰掺入量及养护龄期成反比；孔隙比随石灰掺入量增加先增大后减小，随养护龄期先减小后增大；塑、液限及塑性指数随石灰掺入量增加而增大，塑限随养护龄期增加而增大明显，液限不明显，塑性指数先增大后减小；试样养护7d的崩解时间随石灰掺入量的增加而增加，当生石灰掺入量为3%时，有最大的崩解时间，原因是此时渗透性最大。陆召松[16]探究了不同因素对湿陷性黄土强度的影响。试验首先对湿陷性黄土的物理性质、矿物成分等进行了测试，随后对石灰处治后的黄土进行了无侧限抗压强度试验，获得了不同灰土比和不同初始含水率条件下的压实湿陷性黄土的强度特征和破坏模式。在压实度为88%时，黄土试样的无侧限抗压强度并不随灰土比的增加而增加；当压实度为96%时，灰土比增大，试样无侧限抗压强度也随之增大；压实湿陷性黄土的初始含水率与无侧限抗压强度总体呈现负相关趋势，但当初始含水率达到最优含水率并且在偏湿状态下，其无侧限抗压强度最大，再增大初始含水率则会使无侧限抗压强度呈现出急剧下降的趋势。工程中采用石灰改良湿陷性黄土施工时，宜在稍湿的情况下进行压实，但含水率不应超过最优含水率的3%。牡丹[17]结合工程实际，通过室内试验，得出在黄土中掺入4%石灰可以明显改善黄土粒径级配的效果，粗颗粒量达到最大；塑性指数在4%条件下最大；压缩系数最小，压缩模量最大；随着石灰含量的增加，改良黄土的无侧限抗压强度不同程度增大；通过实际工程试验验证4%石灰掺量可以较好地改善黄土路基沉降，降低沉降量。谢潇等[18]借助直剪试验、压汞试验及扫描电镜测试，通过将不同百分比生石灰掺入黄土进行改良，对比分析了重塑黄土及石灰改良土的强度特征、孔隙分布特征、扫描电镜结果及微观机制变化规律，侧重对石灰改良黄土的微观机理进行了分析。强度方面：随着石灰掺量的增加，改良土的抗剪参数出现先增大后减小的变化趋势，在石灰掺量达到8%左右时，改良土的抗剪强度最大，其中粘聚力较重塑黄土提高了5倍。孔隙特征方面：随着石灰掺量的增加，改良黄土中的中孔隙减少非常明显，较重塑黄土最多减小约87%，小孔隙和微孔隙占比增加，较重塑黄土分别约为28%~75%、17%~84%。微观结构方面：石灰掺入与黄土产生物理化学反应，改变了颗粒间的连接方式，2%~8%石灰掺量反应最为明显，颗粒间产生较多的结晶胶结产物，填充了土中不稳定孔隙，使改良土整体性更强，石灰水化胶结产物附着在颗粒表面增大了颗粒间粗糙程度，使得土体更加稳定，土体强度得到提升。Li Ping 等[19]通过生石灰的掺入对黄土强度和水稳定性方面的研究，采用在不同生石灰掺入量、含水量、压实次数和浸泡次数等条件下进行了CBR试验。对实验结果进行分析发现，生石灰掺入黄土后，土颗粒间的摩擦阻力随着接触力的减小而减小，但结晶盐膜的粘聚力增强，掺生石灰试样的压实度低于黄土试样；随着生石灰掺入量的增加，黄土强度和水稳定性在浸水初期可能会降低，直到黄土微观结构从微观胶结转移后才会明显改善，同时，混合溶液中离子交换、胶结、凝固、碳化作用下的半胶结结构变为全胶结结构；与现场工程实践结合，对所选取的6个试验段的CBR试验结果进行分析，3%石灰掺入量达到工程要求，并通过双线性回归方程验证其现场测试结果的精确性。周建基[20]分别设定浸水饱和和未浸水两种极限状态，通过控制石灰掺入量为3%，5%，7%，9%和15%的改良黄土进行固结试验，分析不

同掺灰比对改良黄土性能的影响,其中当掺灰比为0%~7%时,改良黄土压缩系数、渗透系数先降低后升高,当掺灰比为7%时,改良黄土的压缩系数最低,渗透系数降至最小值 3.07×10^{-7} cm/s,基本不发生湿陷;同时,7%石灰掺入量对黄土改良性能最好,且能够完全满足路基各种指标要求,建议石灰改良黄土最佳掺量为7%。

研究发现,粉煤灰、石灰或粉煤灰-石灰可在一定程度上改善黄土强度特性;但是石灰也存在着十分明显的干缩及温缩特性,容易导致道路基层开裂,其适用性不如水泥稳定土,所以相关学者着手去研究水泥改良黄土的整体效果。

2.3. 水泥改良黄土研究现状

水泥是目前使用最多、最广泛的固化剂,因其具有高强度、高致密性等优点。在湿陷性黄土地区也常用水泥作为固化剂来对湿陷性黄土地基进行加固,并取得了良好的效果。刘潇敏等[21]采用在不同水泥配合比条件下,通过一系列室内土工试验,得出随着水泥配合比的逐步增大,改良黄土液限及塑限值均呈现为非线性增长趋势;同时,随着水泥配合比的逐步增大,改良土的压缩系数逐渐减小,而压缩模量逐渐增大,无侧限抗压强度逐渐增大。最后得出改良土可以满足高速铁路路基填料设计要求,并建议水泥掺入量宜为5%~6%。王任杰[22]确定了水泥掺入量和龄期为影响因素,通过开展相应的室内试验,研究发现水泥掺入后改良黄土的击实性能要优于重塑土。分析其原因,水泥的掺入使得土样最优含水率逐渐增大,最大干密度逐渐降低;同时,可以有效改善其收缩性,通过试验结果分析黄土的线缩率、体缩率、收缩系数和缩限均随水泥掺入量增加而逐渐降低;在掺入量较低和龄期较短的条件下,改良黄土也具备优秀的抗崩解性能,在这期间土体渗透系数变化明显,随着养护龄期的逐步增长土体的渗透性改良效果减弱;建议采用干法拌和,首先使其土料达到最优含水率,其次再掺入水泥争取在1 h内拌和压实完成,这样能使水泥改良黄土达到最佳的压实效果和力学性能。房军[23]以宝兰客运专线某隧道黄土为背景,以黄土拉压强度为研究重点,通过室内试验手段,对所取黄土进行无侧限抗压强度、轴向劈裂试验及单轴拉伸试验,将含水率和压实度为影响因素来分析两者对重塑黄土及水泥改良黄土强度特性的影响,对其改良效果进行了量化分析。对比分析改良后黄土抗拉强度较重塑黄土提高了12倍,抗压强度提高了18倍,改良效果非常明显。闫爱军[24]通过对杨凌土场的黄土状土在水泥、养护龄期条件下改良成效的研究,采用相关室内定量试验进行定量分析,主要借助液塑限试验、击实试验以及快速直剪试验3种常规土工试验方法。通过液塑限试验发现将定量水泥掺和比与黄土拌合可以改变黄土状土原来的颗粒级配,进而改善黄土状土的物理力学特性;击实试验下水泥掺和比的增加使得最优含水率得到增大,但其土样的最大干密度变化不明显;在直剪试验条件下,不同配比水泥土在不同龄期强度指标变化不同,掺和比一定时,水泥土强度随着龄期的增长而增加,其中当掺和比为6%~7%范围时强度变化较为明显;建议宜选用6%的水泥掺和比。曾庆伟[25]通过与实际工程为背景,室内试验与工程实践相结合的方式对湿陷性黄土进行水泥改良,借助液塑限试验、击实试验、抗剪强度试验、抗压强度试验及CBR试验等室内试验。通过试验结果选取4%水泥改良黄土路基填料进行试验段填筑压实工艺和检测试验以及对试验段中压实度、现场取芯、松铺系数及沉降观测、弯沉测试等各种指标进行了测试和结果分析,得出黄土经4%水泥改良后应用于工程现场实际,各方面性能指标均能满足施工规范要求。瞿海洋等[26]研究发现通过采用合理的施工工序进行路拌法水泥对黄土改良后,黄土更易压实,此外试验得出改良黄土的饱和无侧限抗压强度(UCS)达到原状黄土的2倍以上且随着养护龄期增加而增长。通过试验结果表明水泥的掺入量使得黄土的液塑限及击实特性得到提高,CBR值显著提高并随水泥掺量的增加而增大,且随击实次数增加,承载比呈上升趋势,水泥掺量的增加使得其湿陷系数减小,黄土湿陷减弱直到不再具有湿陷性,通过上述试验使黄土的工程性质得到明显改善。

2.4. 考虑延迟时间对改良土性能影响的研究现状

传统改良方法由来已久,其中研究者对水泥改良方法探索较多,随着科学技术的飞速发展,更深层次的研究显得极为重要,部分学者开始探究水泥改良黄土后延迟效应对试验结果分析和现场施工指导所产生的影响。史存林[27][28]通过现场击实试验、无侧限抗压强度试验,探究在延迟时间水泥改良土的施工质量控制与延迟时间有直接关系,石灰、粉煤灰改良土也与延迟时间有关。国外对水泥改良土的击实标准和方法,一般采用轻型击实标准,采用重型击实标准时是根据现场碾压情况,试验室的击实试验应延迟滞后一定的时间。我国铁路客运专线建设的水泥改良土试验可以借鉴其击实标准和方法。通过水泥改良土的延迟时间对击实干密度影响的试验,以及延迟时间对7天的无侧限抗压强度影响的试验,可以具体了解现场不同水泥、不同土质经改良处理后的工程特性,就如同混凝土的配合比试验。根据水泥改良土的设计配合比并通过试验,确定延迟后水泥改良土的无侧限抗压强度是否满足设计要求。建议郑西铁路客运专线在水泥改良土施工前,采用重型击实标准,对所用水泥和土料进行延迟时间与击实干密度的试验,以及延迟时间与7天的无侧限抗压强度的试验。根据试验结果确定合理的延迟最大干密度,科学管理和控制施工质量。柳墩利[29]研究郑西铁路客运专线部分路段出现工后地基系数、动态变形模量、变形模量等力学指标均满足要求而压实系数达不到设计要求的现象,就这一工程问题进行了大量的室内击实试验、击实延迟试验及现场试验,对试验结果分析发现,随着击实延迟时间增长水泥改良土的最大干密度降低,而最优含水率增加,这一现象与改良土的加固机理有关;采用与施工现场不符的击实延迟时间获得的最大干密度来控制压实标准,导致压实系数达不到设计要求,鉴于此现象,建议现场施工应提高工作效率在水泥初凝前碾压完,应根据现场碾压延迟时间去控制室内击实延迟时间,通过得到的最大干密度来控制压实标准较为合理。付兵先[30][31]通过制作冻融循环模型箱来模拟路基冻融循环过程,对水泥改良低液限粉土进行动三轴试验,对试验结果分析得出,冻融循环次数、延迟时间及荷载循环次数对动强度均有影响,其中延迟时间较冻融循环次数和荷载循环次数对动强度的影响更明显;荷载和冻融循环次数一定的条件下,屈服应变随延迟时间增加而增加,动弹性模量随延迟时间增加其衰减程度也增大,最终趋于稳定值;改良土的孔隙水压力随应变的增加而增大,当轴向应变值超过 10^{-3} 时土体内产生孔隙水压力固其可作为临界门槛应变值,在改良土路基设计中,该值可作为设计参考值。张国然[32]以京沈客运专线路基试验段为研究对象,探究水泥改良土在击实条件下的最大干密度、7d无侧限抗压强度与延迟时间之间的关系以及在延迟时间条件下对施工工艺的优化。对试验结果进行分析表明,在不同延迟时间(1h,2h,3h,4h,5h,6h)条件下,发现延迟时间大于等于3h后随着延迟时间的增加,改良土的最大干密度和压实系数逐渐降低,但最后趋于一个稳定值;随着延迟时间的增长改良土的7d无侧限抗压强度呈逐渐降低趋势,其中延迟时间为5h时的无侧限抗压强度较1h损失约25%;同时,通过现场试验结果提出改良土经拌和、平整、碾压等过程总耗时在3h以内,2h为最佳控制时间。

结合上面水泥改良黄土及其延迟效应的相关文献,我们可以发现通过一定掺量的水泥改良后,土体的抗渗性、抗冻性和无侧限抗压强度均有很大的提高;同时水泥的掺入减弱了黄土的水敏感性,改善其湿陷性,但水泥也存在成本高、高水灰比、固结时间长等缺陷。

2.5. 其他新型固化剂改良土试验研究现状

随着我国科学技术不断发展和国家西部计划不断向前推进,为提高黄土改良的综合效果,国内外在新型改良剂研发、已有的改良方法改进方面做了不少研究。张金良等[33]通过以矿渣、石膏为活性物质,以水泥和成岩剂为碱性激发剂自主研发了新型固化材料,并采用自主研发的抗冲刷试验设备,以素黄土为对照组,考虑龄期、压实度以及掺量的影响,对新型固化剂改良黄土进行抗冲刷试验。研究表明:与

素黄土相比, 新型固化剂改良黄土的抗冲刷性能明显提高, 抗冲刷强度提高了约 492 倍; 新型固化剂改良黄土的抗冲刷性能随龄期、压实度、掺量的增大而增强, 其中抗冲刷性能与掺量的增大呈正相关; 改良后抗冲刷性能技术指标能够满足土坝过流而不溃决的要求, 可用于淤地坝建设。郭维等[34]研究工业生产固体废物之一的磷石膏, 通过室内试验, 控制掺入量和养护龄期两个影响因素, 分别对水泥改良黄土和磷石膏改良黄土、磷石膏 - 水泥改良黄土进行试验, 对其结果进行对比分析, 其中磷石膏 - 水泥改良黄土的抗压强度、抗渗性能、抗冻性能及抗水能力均优于水泥改良黄土和磷石膏改良黄土, 且在多次冻融循环条件下前者强度损失最小, 综合其性能表现, 在长期汇水地面和暴雨集中的环境下更宜采用磷石膏 - 水泥改良黄土方法; 同时, 通过 XRD 衍射试验和 SEM 电镜扫描试验, 发现磷石膏 - 水泥改良黄土中伊利石和绿泥石含量明显降低, 但方解石含量增加, 改良黄土的微观结构发生了较大变化, 相较于重塑黄土其大孔隙减少, 孔隙度降低, 架空结构得到改善, 钙矾石增多, 颗粒间胶结作用更强, 在使改良后土体性能得到很大提升的同时降低成本且减少了固体废物对环境的污染。王生俊[35]通过借助微观结构分析、强度优选试验、软化试验、崩解试验、抗冻试验对 LD 系列(LD-1[#], 2[#], 3[#], 4[#])岩土胶结剂固化黄土的工程性质进行了系统的试验研究, 并对不同胶结剂掺量、干容重、含水率等影响因素条件下固化黄土强度的变化进行了分析。对试验结果分析表明, 其中 LD-3[#], 4[#]胶结剂固化黄土后使其水稳性和抗冻性有了很明显的提升, 特别地, 由于 LD-4[#]胶结剂粘度小, 可灌性好, 更适用于黄土灌浆加固。王银梅等[36] [37] [38] [39] [40]通过自行研制的新型固化材料 SH 对宁夏中卫腾格里沙漠沙和兰州黄土进行改良试验, 发现改良后强度受 SH 掺量、干密度及龄期影响, SH 对沙改良主要为物理作用, 而黄土为多相成分其固化机理比较复杂, 改良后沙的抗剪强度得到大幅提升且沙与黄土的抗压强度大大提高; 随之做了一些室内土工试验, 随 SH 掺量的增加改良后黄土抗压强度在一定范围内呈非线性增大, 试样长期浸水后不发生崩解, 与水泥改良黄土对比分析, 水泥用量大且产生强度较低、抗冻融能力较差; 其次通过尝试采用现代分析方法, 如 FTIR 和 SEM 等, 对其结果分析, 发现 SH 掺入黄土产生了离子交换、氢键、吸附和絮凝等物理化学作用, 使 SH 与黄土颗粒表面发生交联, 形成具有膜性能的网络; 同时, SH 能够对黄土边坡坡面抗冲刷性明显增强, 随着掺量增大, 抗冲刷性能也得到增强, 进一步发现 SH 固化植草技术对提高边坡坡面抗冲刷性较单纯的 SH 固化黄土更具优势, SH 不会抑制植物生长, 化学与生态结合防护效果更好; 通过研究在冻融循环条件下 SH 改良黄土抗冻融效果, 发现 SH 掺量越高, 抗压强度损失率越小且质量损失率越低, 试样完整性越好, SH 掺量为 14% 时, 在经历 15 次冻融循环后仍然可以提高黄土抗压强度及抗剪强度指标, 建议在冻融环境下 SH 掺量取 14% 为佳。葛菲[41]通过在黄土中掺入水泥、硅微粉作为固化材料, 对不同掺量, 不同龄期条件下试样进行直接剪切强度试验, 分析发现, 在黄土中单加硅微粉其强度变化不明显, 但水泥改良黄土条件下加入硅微粉其改良土黏聚力大幅提高, 内摩擦角随硅微粉掺比增加呈先增后减的变化规律; 水泥改良黄土中宜掺入 10% 左右硅微粉效果最佳。李磊[42]对硅微粉改良黄土借助直接剪切试验、渗透试验、常规三轴试验, 发现硅微粉与水泥混合改良黄土的效果是最好的, 且在相同改良效果下, 硅微粉可以替代部分水泥, 减少水泥用量, 降低成本且减少水泥污染, 建议采用 5% 硅微粉与 3% 水泥组合; 同时, 渗透系数均随掺入比与压实度的增加而减小; 常规三轴试验得到的黄土结构性参数均随掺入比、围压、初始含水量的增大而减小; 最后通过结构性参数校正后的常规三轴试验的应力应变关系曲线, 引入双曲线拟合, 将结构性参数引入邓肯 - 张模型中进行修正, 通过计算得到的参数值进行了趋势分析。刘钊钊等[43] [44] [45] [46]以工业副产品木质素作为改良材料加入黄土中, 基于常规物理性质、静力特性、水理性质、动力特性、扫描电镜测试和 X 射线衍射测试试验以及制样拌和方法等进行综合分析, 研究了不同掺量木质素改良黄土的基本物理性质、强度变化、持水性及水稳性、微细观结构特性和矿物成分、加固机理。对其结果分析表明, 随着木质素掺量的增加, 改良黄

土比重持续下降，液限减小，塑限小幅增大，塑性指数明显下降；无侧限抗压强度随着木质素的增加呈先增大后减小趋势，随龄期的增加而逐渐增加，28d 且掺量 1% 组合抗压强度最好；1% 木质素掺量时改良黄土抗剪强度最大；1%~2% 掺量的改良黄土表现出优良的抗崩解性，水稳性与持水能力最好；黄土中加入木质素后，木质素中细小颗粒对孔隙进行有效填充并增强颗粒间的胶结强度，提升了黄土整体强度；通过对木质素改良黄土采用稀释拌和法与直接拌和法两种拌和方法后进行无侧限抗压强度试验，得出稀释拌和法结果更加稳定，能更好的反映木质素掺量变化对改良黄土试样强度的影响。

通过上述文献资料，将不同区域黄土及不同种类黄土与水泥、石灰、粉煤灰等传统固化剂以及新型固化材料 SH、LD、磷石膏、木质素等进行改良，为满足工程设计要求在不同固化剂掺量比、龄期和压实度，以及干湿循环、冻融循环等特殊环境条件下，不同改良材料与黄土结合后，其对原有土体微观孔隙有效填充度不同，进而颗粒间胶结程度也有差异，土体改良后强度和压缩性能变化较大。为了更好地研究黄土需要进行全面而深入的试验研究。

3. 现有改良方法及其局限性

Table 1. Different improvement methods of loess

表 1. 黄土不同改良方法

改良方法	物理	化学	生物
具体形式	置换、加筋、强夯等	水泥、石灰等传统材料；SH、LD 系列等新型固化材料	细菌、真菌等微生物；植物改良
改良机理	增加土体压实度，减少土体孔隙	与土体颗粒发生化学反应，形成新的胶结物	微生物新陈代谢产物与土颗粒结合，形成稳定土体
应用范围	较为广泛	广泛	较少
效果分析	不彻底、对已有建筑物不具有可操作性	改良效果好、但部分材料具有成本高、污染环境的缺点	改良效果好、环境友好型改良方法，但成本很高，需要更深入的开发研究

从表 1 可以看出，改良黄土研究方法主要有物理方法、化学方法以及生物方法三大类[47]，其中物理和化学改良方法较多，以此来研究各种添加剂对改良后土体工程性能的影响[48]。物理改良主要是通过土体置换、加筋、强夯、挤密桩等方法使得土体大孔隙和孔隙水减少，进而使土体压实度增强来达到改良效果。相反，化学改良是通过向黄土中添加掺合料并与土体内颗粒矿物成分发生较为复杂的一系列反应，之后形成更加稳定的新型土体胶结材料，以此来改变原有的土性参数及工程性质，如水泥、石灰、粉煤灰、硅微粉等。生物改良方法有微生物改良法及植物改良法，其中微生物改良法是土体中存在大量的细菌、真菌等微生物，通过进行新陈代谢作用将分泌的有机物黏液和聚合物，附着在土粒的表面上，让颗粒间黏结在一起，从而改变土体结构，改善土体的物理力学性能[49]；植物改良方法是通过植物根茎的生长在地表以下产生盘根错节的效果，减少水土流失对表层土及深层土起到稳定及加固作用，增强土体的整体性。

综合比较分析，化学改良方法是最常用的。虽然物理改良是最直接有效的改良方法，但其存在较多问题。第一，改良效果是短暂性及不彻底的；第二，置换法置换出大量废土，对工程建设周边生态环境造成破坏的同时大幅提高了工程建设成本；第三，强夯法对弱膨胀土有效果，适用性较差；第四，物理方法对部分已建构筑物的改良不具有操作性。生物改良是一种环保、高效的改良技术，随着生态环境问

题越来越突出,生物改良技术越来越受到研究人员的青睐,但目前仍处于理论分析及试验研究阶段,土体加固中适用于各种粒径的砂土,而粉土和粘性土运用较少,生物改良成本较高,经济性差,产生效果所持续的时间长,不及传统方法见效快,无法弥补前期强度的缺失[47]。

虽然化学改良方法能够从实质上改变黄土的工程特性且改良效果较好,但部分方法也存在污染环境、经济成本较高等问题,但其较物理和生物方法研究在国内外成熟度较高且工程适用性较强,为了弥补传统的固化剂改良效果的不足之处,对进一步研究新型固化方法具有重要意义。

4. 结语

对于目前黄土研究现状而言,笔者认为有以下几个方面有待深入研究:

1) 我国大面积地区被大量黄土覆盖,在常规改良方法研究黄土的基础上去探索新型固化剂材料改良效果,在能够满足工程设计要求条件下,减少环境污染、降低成本是未来黄土改良研究的必然趋势,具有很高的研究价值。

2) 两种或多种方法综合运用。单一改良方法存在局限性,应重视多种方法联合使用效果;由于黄土分布产生的地域性差异,开发适用性广的改良方法具有重要意义。

3) 重视工程实际应用效果。实验室的研究成果往往与工程实践效果存在差异,在理论指导实践的基础上,更要强化实践的效果,以工程实际为主体,反过来推动理论的进步,只有这样,才能将试验成果更好地应用于工程中来指导施工。

参考文献

- [1] 刘东生,等. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] 刘东生,等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] 姜亚玲. 黄土结构性与非饱和特性关系研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020. <https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2020.000501>
- [4] 刘海龙. 西峰及洛川黄土剖面地层击实特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [5] 王念秦, 罗东海, 姚勇, 陈效星, 杨建国. 马兰黄土动强度及其微结构变化实验[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 467-471.
- [6] 李凤起, 姚建平, 赵冬生, 陈耕野. 黄土湿陷性与黄土粉煤灰石灰混合料试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(2): 111-113.
- [7] 田堪良, 马俊, 李永红. 黄土结构性量化参数的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(z1): 3179-3184.
- [8] 赵环. 晋南地区黄土的湿陷性分区及其岩土特性评价[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [9] 肖东辉, 冯文杰, 张泽. 冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 907-912.
- [10] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 明姣, 王强. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1192-1198.
- [11] 韦锋, 姚志华, 陈正汉, 苏立海, 鲍亮亮, 李加贵. 结构性对非饱和 Q₃ 黄土强度和屈服特性的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2551-2559. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2015.09.015>
- [12] 王萌, 张吾渝, 常立君, 罗传庆. 含水率和干密度对青海重塑黄土强度影响研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 5-11. <https://doi.org/10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2016.02.002>
- [13] 叶万军, 董西好, 杨更社, 陈强, 彭瑞奇, 刘宽. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 656-662. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2017.03.006>
- [14] 王力, 李喜安, 洪勃, 杜少少, 张航泊, 赵宁. 黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 179-185.
- [15] 李振. 生石灰改良黄土物理化学性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [16] 陆召松, 赵光红, 朱齐林, 徐鹏飞, 陈龙. 灰土比与初始含水率对湿陷性黄土强度的影响[J]. 交通世界(上旬刊), 2020(3): 72-74. <https://doi.org/10.16248/j.cnki.11-3723/u.2020.07.034>

- [17] 牡丹. 石灰改良高速公路黄土路基的工程应用[J]. 山东交通科技, 2016(3): 68-70+76.
- [18] 谢潇, 王璐瑶, 邓乐娟, 张国伟. 生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 193-199.
- [19] Li, P., Li, H.S., Liu, H.Q. and Wang, X.L. (2010) Application for Quick Lime Improving Strength of Loess Subgrade. *Advanced Materials Research*, **168-170**, 2678-2682. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.2678>
- [20] 周建基, 梁收运, 张帆宇, 吴万炯, 严旭德. 石灰改良黄土的工程特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 105-108.
- [21] 刘潇敏, 何小亮. 水泥改良黄土力学特性试验研究[J]. 地下水, 2011, 33(5): 147-149.
- [22] 王任杰. 水泥改良黄土的工程特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021. <https://doi.org/10.27204/d.cnki.glzhu.2021.001148>
- [23] 房军, 梁庆国, 贺谱, 王丽丽. 兰州水泥改良黄土拉压强度对比试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10): 81-85.
- [24] 闫爱军. 水泥改良黄土状土的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 225-228.
- [25] 曾庆伟, 孙海秀, 王丽娜. 水泥改良黄土在公路工程中的应用研究[J]. 公路, 2017, 62(7): 272-275.
- [26] 瞿海洋. 水泥改良黄土物理和力学特性试验研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3): 35-39.
- [27] 史存林, 石新桥, 王庆林. 水泥改良土击实方法的分析与研究[J]. 铁道工程学报, 2007(z1): 147-149+181.
- [28] 史存林. 郑西铁路客运专线路基水泥改良土击实标准的研究[J]. 中国铁路, 2007(11): 20-23. <https://doi.org/10.19549/j.issn.1001-683x.2007.11.007>
- [29] 柳墩利, 赵有明. 击实延迟时间对水泥改良土压实系数影响的研究[J]. 铁道建筑, 2008(8): 91-94.
- [30] 付兵先, 张千里, 史存林, 马伟斌. 冻融循环条件下延迟时间对水泥改良低液限粉土动力特性影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 9-15.
- [31] 付兵先. 高速列车作用下水泥改良粉土路基的动力特性研究[D]: [博士学位论文]. 中国铁道科学研究院, 2011.
- [32] 张国然, 张栋, 曾帅, 陈锋, 王仲锦. 基于延迟时间的水泥改良土试验研究及施工工艺优化[J]. 铁道建筑, 2021, 61(5): 80-82.
- [33] 张金良, 邓伟杰, 李禄禄, 张广禹, 盖永岗. 新型固化剂改良黄土抗冲刷性能试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 84-89. <https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2022039>
- [34] 郭维. 铁路既有线路基湿陷性黄土改良加固材料研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [35] 王生俊, 韩文峰, 王银梅. LD 岩土胶结剂加固黄土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(z2): 2888-2893.
- [36] 王银梅, 韩文峰, 谏文武. SH 加固沙和黄土强度的试验研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会成立 25 周年纪念会. 北京: 科学出版社, 2004: 339-342.
- [37] 王银梅, 韩文峰, 谏文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩石力学, 2004, 25(11): 1761-1765. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2004.11.018>
- [38] 王银梅, 杨重存, 谏文武, 韩文峰. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2554-2559.
- [39] 王银梅, 徐鹏飞. 新型高分子材料固化黄土边坡的抗冲刷试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 92-96. <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.13>
- [40] 徐鹏飞, 李泽莹, 王银梅, 董岩. 冻融循环对新型高分子材料 SH 固化黄土力学特性的影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 137-141.
- [41] 葛菲, 巨玉文, 蒋宗耀, 张伟龙. 水泥硅微粉改良黄土的抗剪强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6565-6569.
- [42] 李磊. 硅微粉改良黄土的力学特性及结构性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [43] 刘钊钊, 高中南, 马紫娟, 刘富强, 梁收运, 钟秀梅. 木质素改良黄土孔隙细观特征研究[C]//2019 年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 工程地质学报, 2019: 566-573. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2019.014767>
- [44] 刘钊钊. 木质素改良黄土力学特性及加固机理研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020. <https://doi.org/10.27204/d.cnki.glzhu.2020.000617>
- [45] 刘钊钊, 王谦, 钟秀梅, 刘富强, 梁收运, 高中南. 木质素改良黄土的持水性和水稳性[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2582-2592. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0416>
- [46] 高中南, 王谦, 赵乘程, 郑龙, 马紫娟, 钟秀梅. 制样拌和方法对木质素纤维改良黄土强度的影响[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 930-934.

-
- [47] 鲍捷, 申春妮, 方祥位, 雷宇龙. 膨胀土地基改良方法研究进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2019(5): 98-104.
- [48] 肖翔, 胡冬冬, 何小丽, 刘之葵. 改良土的研究现状及展望[J]. 土工基础, 2021, 35(3): 359-364.
- [49] 吴尚彬, 贾苍琴, 王贵和. 微生物土体改良技术研究综述[J/OL]. 桂林理工大学学报: 1-15.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20220510.1131.002.html>, 2022-07-05.