

# 高含水率黏土改良技术与改良土的力学性质研究进展

吴志刚<sup>1</sup>, 王保田<sup>2,3</sup>

- (1. 中国人民武装警察部队水电总队第五支队, 江苏 常州 213031;  
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学道路与铁路工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 介绍高含水率黏土在交通工程和水利工程中的应用情况和改良方法, 对石灰和水泥改良高含水率黏土的成果进行重点总结, 在总结大量成功应用和理论成果的基础上, 建议水利学科的研究者和设计者关注高含水率黏土成功应用成果, 为改良高含水率黏土在水利工程中的应用打下基础。

**关键词:** 高含水率黏土; 土壤改良技术; 路基

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2010)S1-0166-04

## 1 高含水率黏土填筑路基研究进展

改革开放以来, 我国公路建设已进入了速度快、规模大、活力旺的鼎盛时期, 随着公路建设在全国各地的迅猛发展, 一些新建公路开放交通 1~2 年就出现了坑槽、车辙、沉陷、抗滑性不足等早期破坏现象。究其原因, 除了设计、材料性能等方面的原因外, 路基工程质量是重要的原因之一。决定路基工程质量的主要因素是路基压实度<sup>[1-2]</sup>, 而路基压实受诸多因素的影响, 例如土的含水率、碾压层的厚度、压实机具的类型和功能、碾压遍数以及地基的强度等, 但最主要的还是路基填料的质量。要减少工后沉降, 除了要保证路基的施工质量外, 更重要的是保证路基填料的质量。实际观测表明, 采用优质、级配良好的粗粒土可以大幅度减少路基的工后沉降。但是, 众多公路工程特别是乡村公路和低等级公路, 为了节约成本, 需要就地取材, 因而高含水率黏土等不良土都被用做路基填料。

高含水率黏土由于土质颗粒细、持水能力强、含水率高、承载力低、稳定性差、渗透性低、含水率难以降低, 容易变形。施工时土块很难破碎, 碾压时常常出现“弹簧”现象, 无法压实, 竣工后在行车荷载的作用下, 极易导致路基、路面沉陷、变形、失稳。根据现行路基设计施工规范, 高含水率黏土无法满足施工要求<sup>[3-4]</sup>。然而, 换填优质填料费工费时, 工程造价较高, 特别是对低等级道路和施工临时道路, 基本没

有选择填料的余地。压实成型的高含水率黏土路基, 表面极易失水干缩, 形成干缩裂缝, 一旦有雨水渗入, 将会使压实成型的土路基达不到压实度要求。因此, 高含水率黏土改良技术研究已经成为公路建设的关键技术问题。

高含水率黏土的改良方法有许多种, 按其技术措施的不同可分为: 机械方法(如压实)、物理方法(如改善水温状况)、加入掺加剂(粒料、黏土、盐溶液、有机结合料、无机结合料、高分子化合物及其他化学添加剂)和其他方法(如热处理、电化学加固)等<sup>[5-7]</sup>。对于高含水率黏土的改良, 主要是加入掺加剂进行处理: ①掺加盐溶液。通过离子交换, 降低溶液的蒸汽压力, 降低冰点和提高表面张力, 改善土的结构, 提高黏聚力, 改善抗冻性, 达到加固土体的目的。②掺加无机结合料。利用结合料自身以及结合料与土之间的各种化学反应, 在土体中形成网状晶体, 把土粒和土的粒团连接成整体, 来提高土的强度、刚度和稳定性, 达到加固土体的目的。③掺加有机结合料。利用各种低稠度的沥青、煤沥青或沥青乳液与天然状态的土(不加热)拌和, 依靠沥青与土粒间的各种吸附过程以及在自然因素作用下沥青的“稠化”过程, 使土体具有良好的黏弹性和结构可恢复性, 达到加固土体的目的。④掺加高分子合成树脂。通过单体在土中发生聚合反应, 形成高度稳定的高聚合物, 高聚合物与土粒之间由于物理、化学作用而形成坚强稳定的键合, 以达到加固的目的。

⑤热处理。在高温作用下使土的性质和成分发生根本的不可逆的变化,获得较高的水稳定性和力学强度以达到加固土体的目的。⑥电化学加固。土体在长时间直流电的作用下发生一系列变化,使土的性质改变,稳定性提高,达到加固土体的目的。⑦综合加固。在采用某种加固方法的同时掺入另外1种添加剂以改善反应作用条件,从而可以显著提高加固效果。具体加固方法的选择应根据工程结构的使用要求、结构物对加固的要求(强度、刚度、稳定性)、掺加剂或材料的供应情况、施工条件及当地的土性质等进行详细的技术经济比较后确定。

我国工程实践表明,对高含水率黏土的改良最经济有效的方法是在土体中掺入石灰、粉煤灰、水泥等材料,提高土体的工程性能指标。改良土中的石灰、粉煤灰、水泥和石灰或水泥粉煤灰称为无机结合料,在国外称为水硬性结合料<sup>[8]</sup>。我国公路、水利和建筑部门将此类改良土称为稳定土或固化土,将无机结合料或土壤固化剂与土相互拌和而成的混合物称为固化类混合料,简称混合料<sup>[6-7]</sup>。近几年,高含水率黏土的改良在工程中发展较快,石灰、水泥改良的石灰土、水泥土、石灰水泥土以及二灰土(石灰粉煤灰改良土、水泥粉煤灰改良土)等已在公路和其他部门大量使用,积累了丰富的经验。这些改良土具有较高的抗压强度,且强度和模量随龄期不断增长,具有良好的稳定性<sup>[8]</sup>。我国也在实际工程中引入了NCS的应用<sup>[6]</sup>。无机结合料改良土比改良前的土料在工程技术性能方面均有不同程度的改善和提高。这主要表现在:①吸水,降低土的塑性,改善土的力学性能,增大土的凝聚力和内摩擦角,有效地提高了土的抗剪强度,改善了土的承载力、固结特性和压实性。②改善了土的水稳性、抗冻性和耐干湿循环能力等耐久性。③土的强度和耐久性随着时间的延续不断增长。④提高了最优含水率,使高含水率黏土在掺入改良剂后就能达到碾压含水率的范围。⑤石灰类固化剂掺入土中,增加了土的渗透性,土体孔隙增大,更容易晾干,在较短时间内就可以压实。此外,石灰改良土施工技术较为成熟,使用成本较低。由于上述诸多优点,无机结合料改良土技术在公路建设中得到了广泛应用,取得了很好的经济效益和社会效益。

国外从20世纪初就开始了对改良土的研究和应用。1906年美国进行了改良土的初次尝试,并开展了采用水泥、沥青及一些化学制品对土进行改良的系列研究。1915年美国佛罗里达一位铺路承包人在修筑奥克街时,无意识地创造了世界上首次应用水泥改良土的实例,他用犁将从海湾挖出的贝壳

和砂子、水泥混合在一起,并用10t蒸汽压路机将表面压实。30年代,美国在铺筑道路和机场跑道方面,已使用了约1.9亿 $\text{m}^3$ 水泥改良土。经济发达国家在20世纪初由于兴建道路工程的需要,就开始关注改良稳定土的研究和应用。在第二次世界大战期间,由于修建机场跑道和许多次要道路的需要,水泥改良稳定土得到了进一步发展。在20世纪40年代,改良土技术得到普遍认同并在50~60年代以后广泛应用于机场和道路工程中。美国材料试验协会ASTM还以D-18将水泥改良土试验标准编订在工程土壤规程中<sup>[8-9]</sup>,这样就抓住了水泥改良土材料的主要特性,统一了试验方法,并为推广应用提供了科学的依据。当时已有改良土混合料的含水率与密实度关系、压实改良土干湿循环、冻融循环和用改良土抗折试件断裂段测定抗压强度等试验方法,这些方法至今仍是研究和评价改良土性质的重要依据。50年代初,美国曾经在邦奈(Bonny)水库土坝采用水泥改良土做护坡材料试验,10年后取样检验发现,材料强度比28d龄期强度增长了一倍,而且各层水泥改良土之间结合得较牢固。由于试验结果是肯定的,所以到70年代中期,美国各地已有55座水库大坝采用了水泥改良土护坡,其工程量达160万 $\text{m}^3$ ,其中加州卡斯介克坝坝高达102m。在印度这样的发展中国家,改良土材料的应用亦很广泛,不仅用于筑路、防渗、护坡,还用于修建民房。印度1948年在旁遮普邦修筑了4000幢水泥改良土民房,水泥掺量为25%,建筑物经多年使用后情况良好,特别是保温和防潮性能较好。印度混凝土刊物还报道过有的国家在水泥改良土中配上竹筋,制成竹筋水泥改良土,应用于门楣、窗楣等处<sup>[10-12]</sup>。非洲一些国家,如赞比亚、安哥拉、肯尼亚等国也大量使用水泥改良土作为基层和底基层填料,修筑了上千公里的沥青面层公路。据英国道路研究所调查,水泥掺量为3%~8%的水泥改良土只有肯尼亚一些道路基层的使用情况较差,破坏比例达20%~40%,出现了裂缝、剥落和变形,其他国家的道路使用情况均良好。可见,世界上无论是发达国家还是发展中国家,都十分重视改良土这种价廉质优的地方建筑材料。改良土作为一种稳定固化土,由于其相对较好的承载力和抗剪能力,主要用于承受抗弯作用的道路和机场跑道的基层和底基层,以及建筑物的地基处理。

根据土的不同类型,并经过多年实践应用的检验,国外采用的改良土结合料一般是水泥、石灰、粉煤灰、石膏、沥青和焦油等。近些年来,随着科学技术水平的不断提高和环境保护要求的日渐严格,许多新型的改良土材料纷纷涌现,各种添加剂如早强

剂、减水剂、分散剂以及某些有机高分子材料、甚至生物制剂等,都大量应用到改良土材料中,从而大幅度提高了土的强度和耐久性,增加了土质的适用范围,减少了环境污染,并降低了施工的难度和使用成本。这进一步促进了改良土材料在各个领域的发展和应

用。石灰改良土作路基填料,是近几年修筑高速公路、高速铁路过程中迅速发展起来的一种路基施工技术。日本、美国及西欧一些国家一直在开展这方面的研究工作。国外有关研究石灰改良土静力特性的报道很多,近10年来石灰改良土静力特性方面的研究成果有:Bhattacharya<sup>[13]</sup>研究了石灰对黏土及其常见矿物成分高岭土、蒙脱石、石英等的工程力学性质的改良作用,Sauer<sup>[14]</sup>等研究了经石灰处理后的有机质软土的力学和硬化特征和冻融特性;对冻融条件下石灰改良土的动变形特性进行探讨,试验结果表明:反复冻结和融化严重影响着石灰土的动强度与动变形特性,甚至造成道路结构中的石灰稳定层产生拉伸破坏,路基填料呈现出颗粒材料的特征。Akoto等<sup>[15]</sup>通过循环三轴试验确定石灰改良红土的弹性及黏弹性参数,分析了动荷载、含水率、养生时间、掺灰比对回弹模量的影响。由试验结果可知:掺灰比越大、养生时间越长,回弹模量越大,含水率、动荷载增大,回弹模量减少。Hoyos等<sup>[16]</sup>利用共振柱试验对经过化学稳定处理的、含有大量硫酸盐膨胀土的动力特性进行了研究。

在我国20世纪20年代,石灰土就已被大规模地用作筑路材料,但一般用作路面底基层,在路基施工中很少使用。用石灰改良土作路基填料,是近几年修筑公路过程中迅速发展起来的路基施工技术。石灰土已被广泛用于修筑高等级公路的路基,如广靖高速、宁靖盐高速、通启高速、宁杭高速、宁淮高速、苏嘉杭高速及锡太一级公路等高等级公路的路基均由石灰土分层填筑而成。石灰土填筑的路基整体性强、承载力高、刚度大、水稳性好,为建成高质量公路创造了先决条件。实践证明,用石灰改良土填筑路基对减少工后沉降,保证路基稳定,避免路基病害起了很重要的作用。利用石灰土处理不良地基取得了令人满意的成果,但其在交通动荷载作用下的变形特性及强度特性的研究尚不成熟,理论研究远远落后于实际工程应用。

我国在利用石灰改良土作路基填料方面做了很多探索性的工作,利用石灰处理膨胀土、淤泥质软土等特殊地基也取得了令人满意的成果。在石灰土工程力学特性的研究上,我国学者做了许多前沿性的工作。徐勇等<sup>[17]</sup>通过重型击实试验和无侧限抗压强

度试验,研究了不同石灰掺入量及不同养护时间对石灰土的最大干密度、最优含水率及无侧限抗压强度的影响,确定了作为铁路路基填料石灰土的最佳石灰配比及养护时间。曾阳生等<sup>[18]</sup>利用动三轴仪模拟列车荷载作用下铁路路基基床内的受力状态,对由2种不同膨胀土构成的石灰土进行了动变形与动强度的试验研究,分析了石灰改良土技术治理裂土基床病害的可行性,并提出了最佳灰土配合比。王保田等<sup>[19-20]</sup>结合宁淮高速公路建设中的膨胀土改性问题,系统研究了石灰改良土的物理力学性质、动力疲劳特性、水稳定性和微观结构特性。杨志强等<sup>[22]</sup>对石灰改性土的物理力学性质进行了试验研究,提出石灰改性土在工程应用的可行性,并从微观机理上进行了初步探讨。雷胜友等<sup>[23-24]</sup>通过室内模拟试验探讨了使用加筋的办法来抑制膨胀土的胀缩性。

虽然国内外对石灰改良土的静力特性都进行过许多研究,也取得了许多研究成果。但各种研究成果都具有明显的地域性特点,改良对象(素土)的物理力学性质也存在很大的差异,针对不同类型的素土,上述研究成果能否适用,仍需检验。

## 2 高含水率黏土填筑堤坝的研究进展

中国利用土石材料修堤筑坝历史悠久,可以上溯到公元前六世纪。但是按现代筑坝技术修建土石坝,还是从19世纪30年代修建的甘肃鸳鸯坝开始的。

软土在我国沿海一带分布很广,如渤海湾及天津塘沽、长江三角洲、浙江三角洲、珠江三角洲以及福建省的沿海地区都存在海相或湖相沉积的软土,为有机质和矿物质的综合物。它具有松软、孔隙比大、压缩性高和强度低的特点,其厚度由数米至数十米不等,但在同一地区厚度变化不太大,土层呈带状分布。贵州、云南省的某些地区还存在山地型的软土,呈泥灰岩、炭质页岩、泥砂质页岩等风化产物与地表的有机物质经水流搬运,沉积于低洼处,经过长期饱水软化或间有微生物作用而形成。沉积的类型以坡洪积、湖沉积和冲积为主。其特点是分布面积不大,但厚度变化很大。

软土在我国有相当大的分布范围。由于软土地基的压缩性高,渗透性低,固结变形持续时间长,所以软土坝基土坝的稳定性分析成了工程设计中的主要问题。稳定性包括渗透稳定、边坡抗滑稳定和坝基稳定3个方面。坝基稳定又包括抗滑和沉降稳定。坝基的沉降变形和抗滑稳定是有内在联系的,坝基强度发挥伴随着变形,而变形大小又受强度控制,坝基破坏常常与沉降和滑动变形相伴。坝基沉

降是由土体受压固结造成的,坝基滑动是土层抗剪强度不足所致,它们不仅取决于土的种类和状态,还与土的边界条件、排水条件和承受荷载方式有关。对于软基,研究变形与考虑强度稳定具有同等意义,甚至更为重要,因为蠕变往往是软土坝基破坏的主要形式。土坝的设计理论和方法随着土力学理论及电子计算机技术的发展有所提高,但仍脱离不了经验范畴。软土坝基土坝稳定性工程施工工艺的影响也是不可忽视的。清基开挖、施工措施、施工速率以及施工安全监测等方面都是施工工艺控制的重要方面。具体施工方法不同往往决定工程的成败。高含水率软土在水利工程中广泛用于江河湖堤填筑与作为抢险材料在汛期使用,而土坝坝体填筑通常严格控制碾压质量和坝料含水率,高含水率黏性土不能直接用作筑坝材料。目前对利用改良高含水率黏土筑坝的研究成果还较少。

实际上,一方面,无论是河堤修建与增高,还是土石坝工程清基,都在河道开挖或地基开挖过程中产生大量高含水率黏土,水利工程中基本将这些土料作为不可用材料废弃或仅作为堤后培土使用。另一方面,筑堤和土石坝心墙填筑需要大量的低渗透性和强度较高的填料。现有系统研究成果表明,经过适当改良的高含水率黏土比天然黏土材料具有更好的力学特性,渗透性低,力学强度高,蠕变小,整体板结性好。若能在水利行业进行深入研究,将对高含水率黏土综合利用,减少废弃土料,保护环境和形成性能良好的改良土防渗材料等方面形成综合效益。

### 3 结 论

a. 高含水率黏土在各种等级的道路工程中被广泛应用,当工程等级高,要求严格时工程上常对高含水率黏土进行改良以后再使用。

b. 高含水率黏土在水利工程中通常不能直接作为填筑材料,仅在防汛抢险期间才有使用,但系统研究其改良技术在水利工程中还没有展开,在土料日益紧张和技术不断成熟基础上,水利行业应尽早展开研究高含水率黏土的改良利用技术。

### 参考文献:

[1] JTJ034—2000 公路路面基层施工技术规范[S].  
 [2] JTJ013—1995 公路路基设计规范[S].  
 [3] 张登良. 加固土原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.  
 [4] 邹燕妮. 广深准高速铁路路基工程的技术标准及设计特点[J]. 路基工程, 1994(2): 50-51.  
 [5] 张登良, 徐永明, 沙爱民. 石灰、粉煤灰稳定土的早强试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 1995(1): 17-19.

[6] 杨世基, 吴立坚. NCS 固化材料加固湿软地基与高含水率黏土路基[M]. 上海: 上海大学出版社, 1998.  
 [7] 薛航. 生石灰粉与 NCS 处治过湿土的对比试验研究[J]. 公路交通科技, 2000(7): 54-56.  
 [8] OSULA D O A. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. Engineering Geology, 1996, 42(1): 71-80.  
 [9] LOCAT J, TREMBKAY H, LEROUEIL S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 654-669.  
 [10] RAJASEKARAN G, NARASIMHA R S. Compressibility behavior of lime-treated marine clay[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(5): 545-559.  
 [11] PORBAHA A. Geotextile reinforced lime treated cohesive soil retaining wall[J]. Geosynthetic International, 1996, 3(3): 447-452.  
 [12] Al-Abdul Wahhab HI, ASI I. M. Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid area[J]. Building and Environment, 1997, 32(3): 271-279.  
 [13] BHATTACHARYA P G. Fatigue test set-up for lime soil mixture[J]. Journal of the institution of Engineering, Part C: Civil Engineering Division, 1987, 68(3): 130-135.  
 [14] SAUER E K, WEIMER N F. Deformation of lime modified clay after freeze-thaw[J]. Transportation Engineering journal, 1978, 104(2): 201-212.  
 [15] AKOTO B K A, SINGH G. Behavior of lime-stabilized laterite under repeated loading[J]. Australian Road Research, 1986, 16(4): 259-267.  
 [16] HOYOS L R, PUPPALA A J, CHAINUWAT P. Dynamic properties of chemically stabilized sulfate clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2): 153-162.  
 [17] 徐勇, 张婉琴. 石灰土作为路基填料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增1): 57-64.  
 [18] 曾阳生, 张佩知. 石灰改良膨胀土的动力特性[J]. 长沙铁道学院学报, 1992, 10(3): 9-14.  
 [19] 王保田, 张福海, 张文慧. 改良膨胀土施工技术与改良土的性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3157-3161.  
 [20] 王保田, 武良金, 向文俊, 等. 改良膨胀土筑堤技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 87-90.  
 [21] 王保田, 张福海. 改良膨胀土筑堤压实度控制标准研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 198-201.  
 [22] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. 岩土力学, 1991, 9(3): 11-23.  
 [23] 雷胜友, 丁万涛. 加筋纤维抑制膨胀土膨胀性的试验[J]. 岩土工程学报, 2005(4): 482-485.  
 [24] 惠会清, 雷胜友. 膨胀土膨胀机理及其改良(抑制)方法的研究综述[J]. 公路交通科技, 2005(52): 90-92.

(收稿日期 2010-03-01 编辑 方宇彤)