

不同含水率下石灰改良红层泥岩土的力学特性试验研究

李俊峰

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为掌握不同含水率下石灰改良黔张常高铁地区红层泥岩的力学特性,对红层泥岩及其石灰改良土进行了击实试验,随后考虑最优含水率和饱和含水率进行了无侧限抗压, CBR, 直剪等力学试验,结果表明:随石灰掺量增加,改良红层泥岩的最优含水率逐渐增大,而最大干密度则逐渐减小。石灰对红层泥岩土的强度和承载力有显著改善,但改善效果与红层泥岩土自身的含水率有关。饱和状态下,石灰掺量增加,对 CBR 值和黏聚力改善的效果越好,但对无侧限抗压强度和内摩擦角改善效果的增幅不如前者明显;最优含水率下,石灰掺量越高,无侧限抗压强度、黏聚力和 CBR 值逐渐增加,但对内摩擦角的改善效果并不明显,且当石灰掺量超过 6% 时,其内摩擦角略有减小。最终推荐利用石灰改良黔张常地区红层泥岩时最优掺比为 6%。

关键词:红层泥岩;石灰改良土;力学特性;黔张常铁路

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)04-0181-05

0 引言

红层泥岩在我国各地均有分布,尤其在华中及西南地区面积较广,且以裸露型为主^[1-2],大量土工构筑物如铁路、公路等均要穿越红层泥岩地区,从而不可避免地要使用红层泥岩作为建筑材料。红层泥岩的工程性能较差,具有强度低,遇水易软化^[3],易崩解^[4]等不良特性。此外,一些地区的红层泥岩还含有膨胀矿物如蒙脱石、伊利石等,因而具有一定膨胀性^[5]。为解决此问题,常用一些改良剂如弱风化泥岩,石灰,水泥,粉煤灰等对红层泥岩进行改良以提升其强度和承载力,并取得了丰富的成果^[6-9]。不同改良剂的改良效果有所不同,如对于具有膨胀性的红层泥岩,石灰和水泥抑制其膨胀性的效果相对较好,而粉煤灰的改良效果不如前者理想^[10]。此外,不同地区的红层泥岩的自身性质也有所不同,因而改良效果也不尽相同。如四川地区红层泥岩的最优含水率约为 9%,而兰州地区则为 16%,其膨胀性和液塑限也低于兰州地区^[11-13]。因此,红层泥岩自身的工程特性具有较强的环境敏感性和地域敏感性。在黔张常高铁路线穿越的湘西北地区,其红层地质非常复杂,该地区红层地质大多形成于白垩系,且人工活动非常

频繁,开挖边坡较多^[14-16]。在长期地质构造及水汽循环作用下,裸露的红层边坡风化程度非常严重,并且已出现了部分边坡滑坡的工程案例^[17],因而开展该地区红层泥岩的改良研究是非常必要的。

目前而言,改良湘西北地区红层泥岩的相关研究较少,对其他地区的红层泥岩及的改良则大多集中在工程特性如强度^[18],崩解性^[19],膨胀性^[20]等指标,而对于红层泥岩自身含水率对改良效果的研究则不多。在湘西北地区,由于降雨较为集中,红层泥岩路基含水率呈现不断上升的趋势,而含水率增加对红层泥岩的强度就有非常的不利影响^[21]。

因而,在不同含水率下,掺入多少的石灰能够取得何种改善结果,这也是一个需要掌握的问题。从工程和黔张常高铁实际的水文地质环境出发,本文首先对不同掺量下石灰改良红层泥岩土进行了击实试验,以确定其最大干密度和最优含水率。随后,对压实度 95% 条件下最优含水率和饱和含水率的改良红层泥岩土进行了无侧限抗压, CBR 和直剪试验,分析了石灰掺量对改良红层泥岩土强度和承载力的影响,评价了石灰改良红层泥岩土强度和承载力的效果,并最终推荐了最佳的石灰掺量。

1 试验材料

试验材料取自黔张常高速铁路某路基边坡表层,泥岩土外观呈棕红色,具有一定黏性。由于风化作用,

收稿日期: 2020-10-20

作者简介: 李俊峰(1981—),男,学士,高级工程师,从事路桥设计研究工作。

泥岩土内部结构完全破坏,形态呈颗粒状,其天然含水率为 18.5%,自由膨胀率为 55%,其他指标见表 1。

表 1 强风化泥岩土的基本物理指标

天然含水率 /%	比重	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	压缩指数 C_c
22.5	2.69	33.7	16.8	16.9	0.051

由于红层泥岩土具有较高的崩解性,工程上一般作预崩解处理,在实际使用时其颗粒粒径较小^[21]。因而首先将所取红层泥岩土风干 60 d,使其处于低含水率状态,随后利用碎土机粉碎块状泥岩土,过筛,取粒径小于 2 mm 颗粒。再次风干 30 d 后,测定含水率,并按风干样配制指定含水率的试样。随后,按素土,掺 3% 石灰,掺 6% 石灰和掺 9% 石灰制作试样并进行击实,无侧限抗压, CBR 和直剪试验。其中,用于无侧限抗压强度的试样为圆柱样,直径 50 mm,高度 100 mm。用于直剪强度的试样为环刀样,直径 61.8 mm,高度 20 mm。试验过程遵守《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的各项规定。

2 试验方案及结果

2.1 击实试验

首先进行击实试验以确定不同石灰掺量的改良红层泥岩土的最大干密度和最优含水率。将风干红层泥岩土与指定掺量的石灰混合,搅拌均匀,利用喷水法使试样达到指定含水率含水率并闷料 24 h。待水分均匀分布后进行重型击实试验,按 5 层击实,每层 56 击,完成后计算各试样的含水率和干密度,结果见图 1 和图 2。

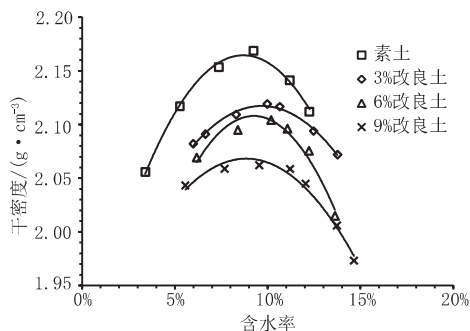


图 1 击实试验结果

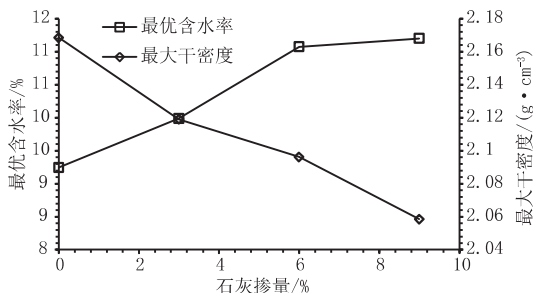


图 2 最大干密度和最优含水率随石灰掺量的关系

从击实试验结果可以看出,随石灰掺量增加,改良红层泥岩土的击实曲线逐渐往右下方移动,其最优含水率逐渐增加,且高于素土的最优含水率;而最大干密度则逐渐减小,且小于素土的最小干密度,这与其他地区改良红层泥岩土的击实特性相符^[10,21]。这是由于掺入石灰后,发生水化反应,从而使改良土击实需要更多水。石灰水化后又与土粒作用,形成凝絮体,从而增大改良土的颗粒,更难以压实。因而在恒定压实功下,石灰掺量越多,其最大干密度反而越小。

2.2 无侧限抗压试验

确定改良红层泥岩土的最大干密度和最优含水率后,按压实度 $K=95\%$ 和最优含水率配制试样,并在标准条件下养护 7 d。养护完成后,将部分试样抽气饱和,饱和样完成后用保鲜膜包裹试样密封静置 8 h 使水分均匀分布,在保鲜膜上洒适量水分以防止试样脱水,随后进行无侧限抗压试验,结果见图 3 ~ 图 5。

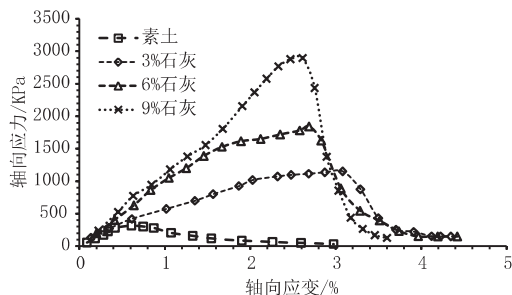


图 3 最优含水率下石灰改良全风化泥岩土无侧限抗压轴向应力-应变图

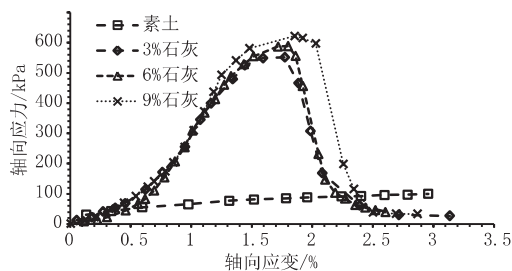


图 4 饱和状态下石灰改良全风化泥岩土无侧限抗压轴向应力-应变图

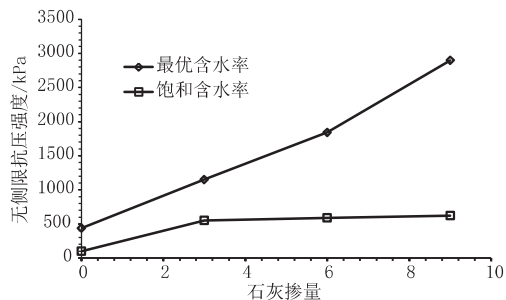


图 5 无侧限抗压强度随石灰掺量的关系

从无侧限抗压试验的结果看以看出,当泥岩土处于最优含水率状态时,无论是素土还是改良图都具有应变软化特性,即应力首先随应变增加而增加,当应变超过一定值时,强度急剧衰减。随着石灰掺量增加,改良红层泥岩土的应变软化特性越发明显。最优含水率状态下,红层泥岩土的无侧限抗压强度远高于饱和状态,且随着石灰掺量的增加,无侧限抗压强度也逐渐增加。当石灰掺量为 9% 时,其无侧限抗压强度为 2 896 kPa,约为素土的 6.62 倍,因此,掺入石灰能显著提高红层泥岩土的无侧限抗压强度

当泥岩土处于饱和状态下,素土的应力 - 应变曲线呈硬化特性,而掺入石灰后,改良红层泥岩土又呈软化特性。其原因在石灰的水化物在土颗粒间形成了胶结物,阻止土颗粒间的滑移和相对错动,从而在宏观上提高了土体的抗压强度;但随着应变超过一定值时,胶结物逐渐破坏失效,土体的强度迅速衰减,从而导致饱和的改良红层泥岩土应变特性与素土有所不同。饱和状态下,改良红层泥岩土的无侧限抗压强度较素土同样有明显提升,但随石灰掺量增加,其提升效果则并不显著。如石灰掺量为 3% 时,其强度提升了 450 kPa,而石灰掺量提升至 9% 时,其无侧限抗压强度相较于石灰掺量 3% 的情况只额外提升了 70 kPa,这于最优含水率状态下有所区别。这一试验结果可能是饱和样含水率较高,而过多水分存在本身就会劣化胶结材料,使其强度降低;此外,抽气饱和这一过程也会对土体结构产生影响,从而也使胶结材料发生劣化,因而强度提升并不高。

2.3 CBR 试验

按 $K=95\%$,含水率为最优含水率制作试,将制好的试样浸水 4 d 使其充分膨胀,随后进行 CBR 试验,试验结果见图 6 和图 7。

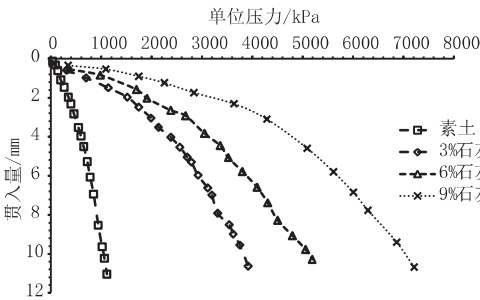


图 6 不同石灰掺量的贯入曲线图

目前对高速铁路而言,其 CBR 值并无明确规定,因此其要求可参照《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)对高速公路路基 CBR 值的规定。从 CBR 试验的结果可以看出,掺入石灰能很好的改善

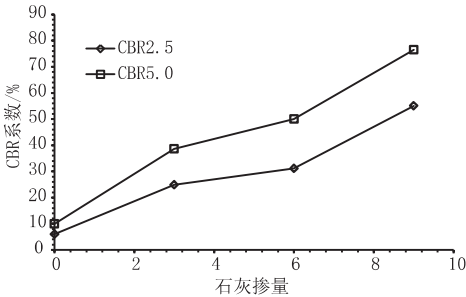


图 7 CBR 随石灰掺量的关系

红层泥岩土的 CBR 值,且掺入量越高,改良土的 CBR 值也越高。素土的 CBR2.5 系数只有 6%,不满足规范要求,而掺入 3%,6%,9% 石灰后,其 CBR 值分别提高到 25%,31%和 55%,显著提升了路基的承载能力。

2.4 直剪试验

为掌握含水率及石灰掺量对改良红层泥岩土的影响,对饱和含水率和最优含水率状态下的改良红层泥岩土进行了直剪试验,共进行了 40 组。试验上覆正压力为 25 kPa,50 kPa,100 kPa,150 kPa 和 200 kPa。试验制样方法与无侧限抗压试验一致,测量结果见图 8 和图 9,计算结果见图 10 和图 11。

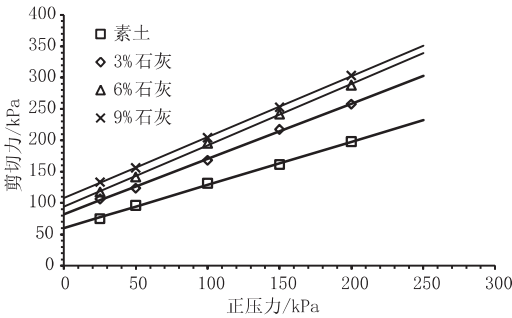


图 8 最优含水率下石灰改良全风化泥岩土 的抗剪强度线

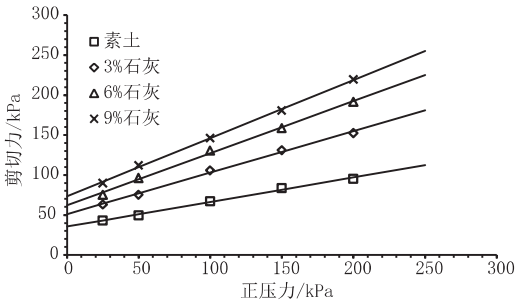


图 9 饱和状态下石灰改良全风化泥岩土 的抗剪强度线

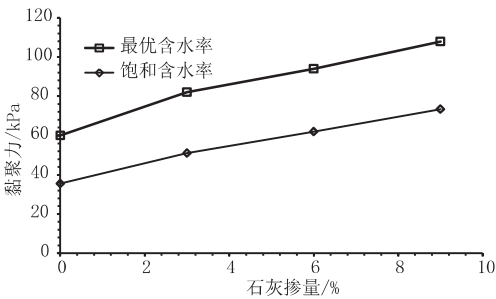


图 10 黏聚力随石灰掺量的关系

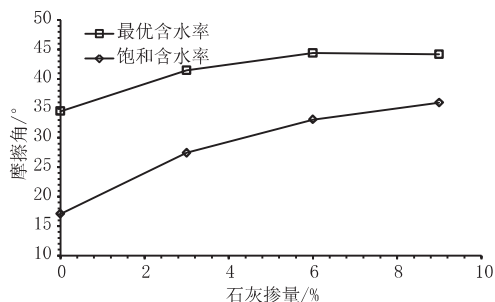


图 11 内摩擦角随石灰掺量的关系

从直剪试验结果来看,最优含水率红层泥岩土の抗剪强度远高于饱和状态下的红层泥岩土,这一结果与其他地区红层泥岩の试验结果是相符的^[10]。红层泥岩土の抗剪强度对含水率十分敏感,因而在降雨集中的黔张常铁路地区,做好红层边坡の防水措施是十分必要の。掺入石灰后,改良红层泥岩土の抗剪强度有所增加,这是因为石灰中の碱性钙质物与红层泥岩中の活性硅和活性铝等物质发生了化学反应并产生了硅酸钙和硅酸铝,加强了土颗粒间的黏结,使多个较小土粒形成团聚体,从宏观上增加了其摩擦角和黏聚力。

不同含水率下,石灰改良红层泥岩剪切强度的效果也不尽相同。饱和含水率状态下,改良红层泥岩土の黏聚力表现为随石灰掺量增加而增加的趋势,且增加的速率并无放缓趋势。当石灰掺量为 9% 时,改良红层泥岩の黏聚力增加了近一倍,这说明掺入石灰后形成的胶结物是能提供土体的黏聚力的来源之一。改良红层泥岩土の摩擦角同样表现为随石灰掺量增加而增加的趋势,但石灰掺量增加,摩擦角增加的速率明显放缓,当石灰掺量为 9% 时,内摩擦角相较于掺量 3% 的改良土只增加了 30% 左右。由于粒间水膜的存在,土颗粒间的摩擦机制相较于黏聚力的形成要复杂一些,当含水率较大时,粒间水膜较厚,在团聚体间及团聚体内部颗粒间起到润滑作用,因此石灰增加对改良红层泥岩土内摩擦角の改善不如黏聚力明显。最优含水率状态下,掺入石灰对红层泥岩土の黏聚力同样有显著提升,且增速同样较快,当石灰掺量为 9% 时,改良红层泥岩土の黏聚力提升了约 80%。然而,对于内摩擦角而言,掺入石灰后的变化规律则并非单调的。改良红层泥岩土在初始掺量为 3% 时相较素土有明显提升,但随着石灰掺量增加,其增速明显放缓。当石灰掺量为 6% 时,其内摩擦角相较于掺量 6% 的情况略有减小。这是因为掺入石灰需要大量水分与较长的时间发生化学反应,当水

分不够而掺入石灰量又过多时,一部分石灰首先与土体结合形成凝絮体,阻止了其余石灰颗粒继续发生反应,而剩余较多的小石灰颗粒在团聚体及团聚体内部胶结物间,在剪切力作用下反而对颗粒间的摩擦产生润滑作用,因而对内摩擦角产生不利效果。

从上述试验结果来看,掺入石灰对红层泥岩土の强度及承载力均有明显提升,提升效果则受土体自身含水率和石灰掺量所影响。考虑到饱和状态下石灰掺量增加对无侧限抗压强度和内摩擦角提升并不显著,同时考虑到最优含水率下过量石灰对红层泥岩土内摩擦角の改善有抑制作用,因此推荐用石灰改良红层泥岩土时,掺量为 6%。

3 结论

本文利用石灰对黔张常高铁地区的红层泥岩土进行了改良,并对改良土进行了一系列力学试验,分析了不同力学指标的改良效果,确定了最优石灰掺比,主要结论如下:

(1)随石灰掺量增加,改良红层泥岩土の击实曲线逐渐往右下方移动,其最优含水率逐渐增加,且高于素土的最优含水率;而最大干密度则逐渐减小,且小于素土的最小干密度。

(2)最优含水率状态下,红层泥岩土の无侧限抗压强度远高于饱和状态,掺入石灰能显著提高红层泥岩土の无侧限抗压强度,且随着石灰掺量的增加,无侧限抗压强度也逐渐增加。饱和状态下,改良红层泥岩土の无侧限抗压强度较素土同样有明显提升,但随石灰掺量增加,其提升效果则并不显著。

(3)红层泥岩素土の CBR2.5 系数只有 6%,不满足规范要求,掺入石灰能很好的改善红层泥岩土の CBR 值,且掺入量越高,改良土の CBR 值也越高,因此石灰改良红层泥岩土显著提升了路基的承载能力。

(4)饱和状态下,改良红层泥岩土の黏聚力表现为随石灰掺量增加而增加的趋势,且增加的速率并无放缓趋势,摩擦角同样表现为随石灰掺量增加而增加的趋势,石灰掺量增加,摩擦角增加的速率明显放缓;最优含水率状态下,石灰对红层泥岩土黏聚力的改良效果与饱和状态相似,但石灰掺量超过 6% 时,其内摩擦角略有减小,最终推荐用石灰改良红层泥岩土时,掺量为 6%。

参考文献:

[1] 潘志新,彭华.国内外红层分布及其地貌发育の对比研究[J].地理科

学,2015,35(12):1575-1584.

[2] 郭永春,谢强,文江泉.我国红层分布特征及主要工程地质问题[J].水文地质工程地质,2007(6):67-71.

[3] 谢小帅,陈华松,肖欣宏,等.水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究[J].工程地质学报,2019,27(05):966-972.

[4] Qi J. Sui W. et al . Slaking Process and Mechanisms Under Static Wetting and Drying Cycles Slaking Tests in a Red Strata Mudstone[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2015, 33(4):959-972.

[5] 钟志彬,李安洪,邓荣贵,等.川中红层泥岩时效膨胀变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(1):76-86.

[6] 徐鹏,蒋关鲁,任世杰,等.红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):678-683,692.

[7] 徐华,张毅博,张杰,等.富水红层路基碎石改良填料力学特性试验研究[J].铁道工程学报,2017,34(11):9-13.

[8] 杨俊,刘子豪,张国栋,等.复合方法改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1069-1076.

[9] 周宇,李国玉,武红娟,等.石灰改良红层无侧限抗压强度试验研究[J/OL]. 冰川冻土:1-12[2020-08-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20200522.1914.008.html>.

[10] 祝艳波,余宏明,杨艳霞,等.红层泥岩改良土特性室内试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):425-432.

[11] 王鹏,余云燕,包得祥,等.甘肃红层泥岩填料物理力学特性的试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(2):522-529.

[12] 包得祥,余云燕,杨克诚.兰州地区含盐红层泥岩土水特征曲线研究[J].兰州交通大学学报,2019,38(5):25-34.

[13] 胡安华,蒋关鲁,王智猛,等.高速铁路路基红层泥岩填料力学特性试验研究[J].铁道工程学报,2008(2):21-25.

[14] 罗冠枝,陈全明,王国卫.湖南省沅麻盆地红层区地质灾害发育特征及成灾规律分析[J].地质灾害与环境保护,2017,28(3):19-24.

[15] 李金城.黔张常铁路环境敏感区铁路选线[J].铁道工程学报,2016,33(10):10-14,44.

[16] 刘卫斌. 张家界地区不稳定斜坡及滑坡对黔张常铁路选线的影响研究[J].铁道标准设计,2014,58(9):1-5.

[17] 杨德宏. 黔张常铁路白垩系红层滑坡成因分析及防治建议[J/OL]. 铁道标准设计:1-7[2020-08-20].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.201911200003>.

[18] 钱普舟,曹青霞,魏定邦,等.聚合物水泥加固红层泥岩性能研究[J].公路工程,2016,41(6):194-198,213.

[19] 张丹,陈安强,刘刚才.紫色泥岩水热条件下崩解过程的分维特性[J].岩土力学,2012,33(5):1341-1346.

[20] 钟志彬,李安洪,邓荣贵,等.高速铁路红层软岩路基时效上拱变形机制研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):327-340.

[21] 王智猛. 红层泥岩及其改良土填筑高速铁路路基适应性及工程技术研究[D].陕西西安:西南交通大学,2009.

(上接第 162 页)

(4)每个工作区域必须有指定的工程师和专职的质量检查员,以确保始终在质量检查员的严格监督下进行施工工作,质量检查员对质量有否决权。

(5)严格执行“三检制度”。团队之间必须审查流程移交。团队通过自我评估后,执行特殊测试并填写“质量控制评估表”。在对隐蔽项目进行内部检查合格之后,监理工程师将再次检查隐蔽项目。只有在批准签名后,才能执行下一个过程。监理和设计师提出的问题应予以解决。

(6)完善检测设备,做好原材料检查,使之始终处于受控状态。严格执行三级验证系统,并接受监视和检查以确保结构的正确尺度。根据招标文件的要求,应在实验室建立足够的测试设施和人员。

(7)对关键技术进行实时指导,监督质量的实施,抓好施工控制。

5 结 语

施工技术是一个庞大的系统,随着时代的进步,施工技术取得了快速的发展,施工技术的合理性对于施工进度如期完成,方案的经济合理性有着十分重要的影响。本文以外环运河综合整治工程为例,通过对该项目从最开始的工况介绍,再到项目的施工方案设计,施工资源量的计算,施工进度安排,以及施工的保障进行一整套研究,对于该项目的顺利施工能够起到指导作用,同时希望给同类型的运河治理施工提供可行性的参考依据。