

改良土含水率对铁路路基压实度影响探究

郭丽丽

中铁二十局集团第四工程有限公司 山东 青岛 266000

摘要：铁路路基的压实度是轨道结构稳定性和列车安全运营的核心保障，而改良土含水率的精准控制是决定压实效果的关键因素。本文通过系统综述国内外研究成果，结合西延铁路XYZQ-15标段（以下简称“案例工程”）的施工数据与工艺实践，深入探讨了含水率对改良土压实性能的作用机理、动态控制策略及其工程经济影响。研究表明：含水率在最优值 $\pm 2\%$ 范围内时，改良土可达到最大压实度（ $K \geq 0.92$ ），而超限含水率（ $\pm 3\%$ ）将导致压实效率下降20%~30%，并引发工后沉降风险。

关键词：改良土；含水率；铁路路基；压实度

引言

铁路路基作为轨道系统的承重基础，其压实度直接影响线路的平顺性、耐久性与维护成本。改良土通过掺入水泥等固化剂，显著提升了土体的力学性能（抗压强度、抗渗性等），但其施工过程中含水率的微小波动可能导致压实效果显著差异。既有研究多聚焦于实验室条件下的含水率优化，但对复杂环境（如多雨、高蒸发地区）下的动态控制策略缺乏系统性分析。本文以《高速铁路路基工程施工质量验收标准》（TB 10751-2018）为技术框架，结合案例工程的实测数据，从材料特性、工艺参数、检测方法及经济成本四个方面，全面解析含水率对压实度的影响机制，为工程实践提供科学依据。

1 文献综述

1.1 改良土的基本特性

改良土，作为一种经过人工处理的土体，是通过在原土中掺入适量水泥、石灰等胶凝材料，并经过一系列物理化学反应而形成的新型土体。这种土体因融入了胶凝材料的特性，而展现出显著的强度提升和水稳性增强的优点^[1]。同时，改良土的施工便捷性也使得其在各类工程中备受青睐，尤其在铁路路基施工中更是得到了广泛的应用。值得注意的是，改良土的性能并非一成不变，它受到多种因素的制约，其中含水率便是影响其压实效果的一个关键因素。含水率的恰当控制，对于确保改良土的工程质量至关重要。

1.2 含水率对改良土压实度的影响机理

1.2.1 含水率与土颗粒间的相互作用

改良土中的土颗粒，通过水分子的作用，会形成一层弱结合水膜。这层水膜在土颗粒间起着润滑和连接的作用，对土颗粒间的相互作用产生着重要影响。当含水

率较低时，土颗粒间的水膜相对较薄，颗粒间的直接接触面积较大，摩擦力相应增大。这种情况下，土颗粒难以形成紧密的排列结构，导致压实度较低。随着含水率的逐渐增加，水膜逐渐增厚，土颗粒间的摩擦力逐渐减小。这使得土颗粒在压实过程中更容易发生相对移动，有利于颗粒的重新排列和紧密堆积^[2]。在适当的含水率下，土颗粒能够形成稳定的结构，从而提高改良土的压实度。然而，当含水率过高时，土颗粒间会形成大量的自由水。这些自由水不仅无法增强颗粒间的连接力，反而会成为颗粒紧密排列的障碍。在压实过程中，自由水会被挤出，形成孔隙，导致压实度下降。

1.2.2 含水率与压实度的关系

压实度是改良土压实过程中的一个重要参数，它反映了压实设备对土颗粒施加的能量，决定了土颗粒的重新排列和紧密堆积程度。在相同的压实度下，不同含水率的改良土其压实效果会存在显著差异。当含水率较低时，由于土颗粒间的摩擦力较大，需要较大的压实度才能克服这种摩擦力，使土颗粒发生相对移动，达到较高的压实度。这不仅增加了施工难度，还可能对压实设备造成损坏。而当含水率适中时，土颗粒间的摩擦力较小，较小的压实度即可使土颗粒发生相对移动，形成紧密的排列结构。这种情况下，改良土的压实度较高，且施工效率也相对较高。然而，当含水率过高时，由于自由水的存在，压实设备在压实过程中难以有效的把作用力和能量传递给土颗粒。大部分压实能量会被自由水吸收和消散，导致压实度下降^[3]。同时，过高的含水率还可能引起改良土的泥化现象，进一步降低压实效果。

2 改良土的特殊性与控制难点

改良土作为一种特殊的工程材料，其特性与控制难

点在工程施工中显得尤为突出，尤其是水泥改良土在压实过程中的技术挑战更为显著。具体来说，水泥改良土的压实过程需要精妙地平衡水化反应与密实这两个关键环节，以确保其工程性能达到设计要求。

首先，就水化反应而言，水泥作为改良土中的关键成分，必须吸收一定量的水分（大约为水泥质量的20%至25%）才能完成充分的水化过程。这一化学反应是水泥改良土获得强度的基础。然而，如果含水率不足，水化反应将无法进行完全，直接导致改良土的强度大幅下降，如表1所示的数据清晰揭示了这一关系^[4]。

其次，水泥改良土的压实工艺根据相关规范的要求，含水率必须严格控制在 $\omega \pm 2\%$ 的范围内。这一严

格的控制范围对施工现场的操作提出了极高的要求。然而，在实际野外施工中，气候条件的变化、运输过程中的水分蒸发或吸收等因素都可能对含水率产生显著影响，使得含水率的波动风险大大增加，从而给施工控制带来了极大的挑战。

最后，检测方法的滞后性也是水泥改良土施工控制中的一个难点。传统的灌砂法检测含水率需要取样并进行烘干处理，整个过程耗时长达2至4小时。这种检测方法的时效性显然无法满足快速指导施工的需求，往往导致施工过程中的调整滞后，影响了改良土的压实质量和工程性能^[5]。

表1 水泥掺量对改良土需水量与强度的影响

水泥掺量 (%)	理论需水量 (%)	实测最优含水率 ω_o (%)	7d无侧限强度 (kPa)
4	8~10	10.5	250
6	12~15	13.8	350
8	16~20	17.2	420

3 案例工程实践与数据分析

3.1 工程概况与施工挑战

西延铁路XYZQ-15标段，坐落于陕西省西安市，年均降水量达600mm，且主要集中在6至9月的雨季，同时年蒸发量高达1200mm。该路基工程全长26.3km，设计时速为350km/h，其中基床底层采用了6%水泥改良土进行填筑。在施工过程中，工程团队面临了多重挑战：气候波动剧烈，单日温差可达15℃，加速了表层水分的蒸发；土源存在差异，取土场土质黏粒含量在5%至15%之间波动，天然含水率则在8%至18%的范围内变化；此外，工期压力巨大，需在短短6个月内完成全部路基填筑，预压期不足易导致工后沉降问题。

3.2 含水率动态控制策略

基于上述挑战，案例工程采用了分阶段的动态控制策略：

3.2.1 拌和阶段精准调控

采用“场拌法+智能监测系统”，拌和站配备了微波含水率检测仪，实时将数据反馈至控制中心。当偏差超过 $\pm 1\%$ 时，系统自动调节喷水量。每批次拌和料均进行3组抽检，确保含水率的均匀性，极差控制在0.5%以内。

3.2.2 摊铺与碾压工艺优化

分层摊铺时，松铺厚度严格控制在25至30cm之间。雨后复工前，使用轻型压路机预压1遍，以排出表层积水。碾压组合按照“静压（1遍）→弱振（2遍）→强振（3遍）→终压（1遍）”的顺序进行，碾压速度不超过4km/h，纵向搭接长度不小于40cm（详见表2）。

表2 碾压工艺参数与目标效果

碾压阶段	压路机类型	速度 (km/h)	遍数	目标效果
静压	22t光轮	1.5~2.0	1	初步密实，封闭表面
弱振	22t振动	2.0~2.5	2	减少孔隙，提升K值
强振	22t振动	2.5~3.0	3	消除深层孔隙，提高K30
终压	22t光轮	1.5~2.0	1	消除轮迹，平整表面

3.2.3 应急处理措施

含水率过低时，采用雾炮车补洒水，每100m²喷水50至80L，并补压2遍。含水率过高时，掺入1%至2%的生石灰粉吸湿，或翻晒至达标后复压。

3.3 检测数据与效果验证

对案例工程中5个典型区段的压实数据进行了统计分

析（详见表3）：

合格区段（含水率在 $\omega = \omega_o \pm 1\%$ 范围内）：满足高速铁路的要求。

超标区段（含水率为 $\omega = \omega_o + 3\%$ ）：K值下降至0.92，且后期需追加0.8%的水泥进行修复，单公里成本增加12万元。

表3 不同含水率区段的压实数据对比

区段	含水率 (%)	压实系数K	K30 (MPa/m)	Evd (MPa)	处理措施
A	12.3 (-1.5)	0.93	175	50	补洒水+追加碾压2遍
B	14.3 (+0.5)	0.97	195	58	无
C	16.8 (+3.0)	0.89	140	42	掺石灰+复压
D	13.5 (-0.3)	0.96	188	56	无
E	14.1 (+0.3)	0.98	198	60	无

3.4 经济与工期影响分析

基于表3的数据，进一步分析了含水率偏差对工程的影响：

直接成本：含水率超标导致每立方米改良土增加费用15至20元（包括材料、人工、机械费用）。按案例工程的填方量120万m³计算，潜在损失高达1800至2400万元。

间接成本：超标区段需延长晾晒时间3至5天，影响后续轨道铺设的进度，日均损失约50万元（包括设备闲置和管理成本）。

质量控制效益：通过智能化监控系统，案例工程将含水率超标率从8.5%降低至2.1%，节约成本约860万元。

4 讨论与创新点

4.1 含水率控制的工程学意义

（1）压实效率：当含水率在 $\omega_0 \pm 1\%$ 范围内时，碾压遍数可减少1至2遍，节省能耗10%至15%。（2）长期性能：合格区段的工后沉降量 $\leq 5\text{mm/年}$ ，而超标区段则达到15mm/年，差异显著。（3）环境适应性：在多雨地区，推荐采用“覆盖养护+快速封闭”的工艺；在干旱地区，则需加强实时监测。

4.2 技术创新与应用

一是智能监控系统：案例工程引入了“拌和站-碾压机联动反馈系统”，通过物联网技术实时传输含水率、压实度等数据，动态调整工艺参数。该系统使超标响应时间从2小时缩短至10分钟，效率提升了90%。

5 结论

本研究通过深入的分析与实践验证，得出了以下核心结论：首先，改良土的含水率控制对于保障路基的压实质量和长期性能至关重要。严格将含水率控制在 $\omega_0 \pm 2\%$ 的范围内。这一结论为高速铁路路基施工提供了明确的含水率控制目标，对于提高路基的承载力和稳定性具有重要意义。其次，智能化监控技术在改良土含水率控制中发挥了重要作用。通过实时监测和反馈含水率数据，智能化监控系统能够有效降低含水率超标率至2%以下，从而节约成本15%~20%。这一技术的应用不仅提高了施工效率，还降低了因含水率超标而引发的额外

修复成本。最后，超标含水率所引发的修复成本与工期延误问题不容忽视。这些后果应被纳入施工风险评估体系，以便在施工前进行充分的评估和准备，确保施工过程的顺利进行。

5.1 建议

基于上述结论，提出以下建议，以期进一步优化改良土路基的施工质量和效率：在工艺层面，应推广“含水率-压实度-强度”多参数协同控制模型。通过综合考虑含水率、压实度和强度等多个参数，可以更加全面地评估路基的施工质量，并优化碾压工艺组合，提高施工效率和质量。在材料层面，应继续研发低敏感性改良土。例如，可以掺入高分子吸水树脂（SAP）、纳米黏土等材料，以降低改良土对含水率的敏感性，提高其在不同气候条件下的稳定性和耐久性^[6]。在管理层面，应建立全生命周期数据平台，实现含水率历史数据的可追溯性。通过收集、整理和分析含水率数据，可以及时发现和解决施工过程中的问题，为后续的施工提供有力的数据支持。同时，数据平台的建立还有助于形成完善的施工质量管理体系，提高整体施工水平。

参考文献

[1]洪向峰,高含水率路基回填土改良施工技术.浙江省,杭州市城市建设基础工程有限公司,2023-04-19.

[2]宁哲哲.路基固化改良中高含水率粉土的应用研究[J].交通世界,2023,(33):58-60.

[3]黄馨平.不同含水率对于黄原胶改良土性能影响研究[J].山西建筑,2023,49(06):114-117.

[4]刘涛.石灰改良膨胀土填料力学特性及施工含水率研究[J].合成材料老化与应用,2022,51(06):93-95.

[5]王斌文,马丽娜,张戎令,等.高速铁路泥岩地基膨胀变形试验及渗透试验研究[J].铁道标准设计.2021,(1).1004-2954.

[6]商拥辉,尹方芳,徐林荣,等.重载铁路水泥改良膨胀土路基动力特性数值研究[J].铁道标准设计.2020,(10).1004-2954.