 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9306

Study on the Expansion and Contraction Characteristics and Prevention Measures of the Railway Expansive Soil Subgrade in Nanyang

Benfang Liu

China Railway Engineering Design & Consulting Group Co., Ltd. Zhengzhou Design Institute, Zhengzhou, Henan, 450001, China

Abstract

To address cracking and subsidence issues caused by thermal expansion and contraction in railway embankments with expansive soil in Nanyang, this study focused on the K25+000-K45+000 section of the railway. Through integrated methods combining laboratory tests, field monitoring, and engineering practice, we systematically investigated the thermal expansion characteristics and key influencing factors of expansive soil, established a prediction model for thermal deformation, and proposed targeted mitigation measures. The results indicate that the expansive soil in Nanyang has a clay content of 34%-46% and a plasticity index of 29-36, classified as moderately to strongly expansive soil. The thermal deformation exhibits significant periodicity and lag characteristics, with moisture content variation being the dominant influencing factor (correlation coefficient 0.87). Based on orthogonal experiments, the optimal improvement scheme was determined as "5% quicklime + 3% cement + 20% fly ash". After improvement, the free expansion rate of the expansive soil decreased by 62%, and the shrinkage rate reduced by 58%. The application of the "improvement + isolation + drainage + slope protection" composite mitigation technology controlled the cumulative thermal deformation of the subgrade within 10mm over 12 months, with a 90% reduction in disease occurrence rate. These findings provide technical support for railway subgrade engineering in Nanyang and similar expansive soil regions.

Keywords

railway subgrade; expansive soil; swelling and shrinkage characteristics; influencing factors; improvement techniques; prevention and control measures

南阳某铁路膨胀土路基胀缩特性及防治措施的研究

刘奔放

中铁工程设计咨询集团有限公司郑州设计院，中国 · 河南 郑州 450001

摘　要

为解决南阳某铁路膨胀土路基因胀缩变形引发的开裂、滑塌等病害问题，以该铁路K25+000～K45+000段膨胀土为研究对象，通过室内试验、现场监测与工程实践相结合的方法，系统探究膨胀土胀缩特性及关键影响因素，建立胀缩变形预测模型，并提出针对性防治措施。研究结果表明：南阳膨胀土黏粒含量34%～46%、塑性指数29～36，属中强膨胀土，胀缩变形具有显著的阶段性与滞后性，含水率变化是主导影响因素（关联度0.87）；基于正交试验确定最优改良方案为“5%生石灰+3%水泥+20%粉煤灰”，改良后膨胀土自由膨胀率降低62%，收缩率降低58%；“改良+隔离+排水+护坡”复合防治技术应用后，路基12个月累计胀缩变形量控制在10mm内，病害发生率下降90%。研究成果为南阳及类似膨胀土地区铁路路基工程提供技术支撑。

关键词

铁路路基；膨胀土；胀缩特性；影响因素；改良技术；防治措施

1 引言

膨胀土是一种具有显著胀缩性的特殊土，其体积随含水率变化产生剧烈膨胀与收缩，对铁路路基稳定性构成严重威胁[1]。南阳地区地处南阳盆地，属北亚热带季风气候，降水集中且年蒸发量大于降水量，该区域广泛分布的膨胀土给铁路工程建设与运营带来诸多挑战[2]。南阳某铁路建成运营5年内，沿线K25+000 ~ K45+000段路基频繁出现边坡滑塌、路肩开裂、基底沉降等病害，累计维修费用超 2.1 亿元，严重影响铁路运营安全与经济效益[3]。

国外对膨胀土胀缩特性的研究始于 20 世纪 30 年代，美国学者 Terzaghi 首次提出“吸力 - 胀缩”理论，奠定了膨胀土研究的理论基础[4]。随后，英国学者 Skempton 通过室

【作者简介】刘奔放（1989–），男，中国河南郑州人，硕士，从事特殊岩土工程研究。

内试验建立了胀缩量与含水率、干密度的量化关系 [5]。近年来，澳大利亚学者 Fredlund 将非饱和土力学理论引入膨胀土研究，实现了胀缩变形的精细化预测 [6]。在防治技术方面，美国、日本等国广泛采用化学改良与土工合成材料防护结合的方案，取得了良好效果 [7]。

在我国，对膨胀土路基胀缩特性的研究起步较晚，但发展迅速。20 世纪 60 年代，陈宗基提出“双电层理论”，解释了膨胀土胀缩变形的微观机理 [8]。此后，刘祖德等研究了河南南阳膨胀土的工程特性，提出掺灰改良技术 [9]；张诚厚等采用现场监测与数值模拟相结合的方法，验证了复合防护技术的有效性 [10]。近年来，“改良 + 监测”一体化技术成为膨胀土路基防治的研究热点 [11]。

尽管国内外学者已开展大量研究，但针对南阳地区特殊气候与地质条件的膨胀土路基胀缩特性及防治仍存在不足：一是现有研究多聚焦单一胀缩特性，缺乏对胀缩耦合变形的系统分析；二是针对南阳中强膨胀土的改良剂配比与防治技术参数尚未标准化；三是长期监测数据积累不足，难以支撑防治技术的优化升级 [12]。因此，本文开展系统性研究，弥补现有研究的不足。

2 研究内容与技术路线

2.1 研究内容

（1）南阳某铁路膨胀土基本物理力学性质与胀缩特性测试；

（2）胀缩特性影响因素分析，建立胀缩变形预测模型；

（3）膨胀土改良技术研究，确定最优改良方案；

（4）提出“改良 + 隔离 + 排水 + 护坡”复合防治措施，并验证其效果。

2.2 技术路线

本文技术路线如图 1 所示：



3 研究区概况与试验材料

3.1 项目区概况

南阳某铁路 K25+000 ~ K45+000 段位于南阳市卧龙区、唐河县境内，线路全长 20km，途经平原与岗地地形，海拔 80 ~ 180m。研究区属北亚热带季风气候，年平均气温 15.1℃，年平均降水量 820mm，集中在 6 ~ 8 月，年平均蒸发量 1280mm，蒸发量大于降水量，导致膨胀土频繁经历“吸水 - 失水”循环 [13]。

该段路基地层主要为第四系上更新统（Q_3）膨胀土，颜色以棕红色、黄褐色为主，呈硬塑～坚硬状态，厚度 3 ~ 10m，局部可达 15m。现场取样测试显示，该区域膨胀土黏粒含量 34% ~ 46%，液限 56% ~ 63%，塑限 27% ~ 31%，塑性指数 29 ~ 36，自由膨胀率 48% ~ 62%，属中强膨胀土。

3.2 试验材料与仪器

3.2.1 试验材料

试验土样取自南阳某铁路 K35+200 段路基边坡，取样深度 0 ~ 5m，共采集 3 组土样（编号 S1、S2、S3），每组土样重量不少于 5kg，密封保存避免含水率变化。改良剂选用生石灰（CaO 含量≥90%）、水泥（P.O 42.5）、粉煤灰（Ⅱ级）。

3.2.2 试验仪器及土层物理性质

主要仪器包括：电子天平（精度 0.01g）、烘箱（控温 ±1℃）、环刀、胀缩仪、百分表（精度 0.01mm）、击实仪、扫描电镜（SEM）等。按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）测试土样基本物理力学性质，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，南阳某铁路膨胀土黏粒含量高、塑性指数大、自由膨胀率高，具备强胀缩变形潜力。

土样编号	含水率 (%)	干密度 (g/cm³)	黏粒含量 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数 /	自由膨胀率 (%)
S1	22.5	1.52	38.7	58.3	28.1	30.2	52.4
S2	23.2	1.50	42.5	61.2	29.3	31.9	58.7
S3	21.9	1.53	36.9	56.8	27.5	29.3	49.8

4 膨胀土路基胀缩特性室内试验

4.1 试验方案设计

4.1.1 胀缩特性试验

按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）进行自由膨胀率、膨胀率、收缩率测试，记录胀缩变形随时间的变化曲线。

4.1.2 单因素影响试验

选取含水率（15%、20%、25%、30%、35%）、干密度（1.4、1.5、1.6、1.7、1.8g/cm³）、黏粒含量（30%、35%、40%、45%、50%）三个关键因素，设计单因素试验，探究各因素对胀缩量的影响。

4.1.3 正交试验

基于单因素试验结果，选取含水率（20%、25%、30%）、干密度（1.5、1.6、1.7g/cm³）、黏粒含量（35%、40%、45%）三个因素，采用 $L_9(3^4)$ 正交试验，探究多因素耦合作用下的胀缩规律。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 胀缩特性试验

膨胀变形分为快速膨胀期（0 ~ 48h）、缓慢膨胀期

（48 ~ 120h）和稳定期（120h 后），快速膨胀期膨胀量占总膨胀量的 60% ~ 70%；收缩变形分为快速收缩期（0 ~ 72h）、缓慢收缩期（72 ~ 68h）和稳定期（168h 后），快速收缩期收缩量占总收缩量的 55% ~ 65%。胀缩变形均具有显著的阶段性与滞后性。

4.2.2 单因素影响分析

含水率的影响：当干密度 1.5g/cm³、黏粒含量 40% 时，膨胀量与收缩量均随含水率增加呈显著正相关。含水率从 15% 增至 35% 时，膨胀量从 2.3mm 增至 7.8mm，收缩量从 2.1mm 增至 6.9mm，这是因为含水率越高，土粒间双电层作用越强，胀缩变形越显著。

干密度的影响：当含水率 25%、黏粒含量 40% 时，胀缩量随干密度增加呈先增大后减小的趋势，在干密度 1.6g/cm³ 时达到最大值（膨胀量 5.6mm，收缩量 5.2mm）。干密度过低时，土样孔隙率大，胀缩空间充足；干密度过高时，土样结构致密，胀缩空间受限。

黏粒含量的影响：当含水率 25%、干密度 1.5g/cm³ 时，胀缩量随黏粒含量增加呈显著正相关。黏粒含量从 30% 增至 50% 时，膨胀量从 2.9mm 增至 7.6mm，收缩量从 2.7mm 增至 7.3mm，这是因为黏粒矿物（如蒙脱石）亲水性强，黏粒含量越高，胀缩性越强。

4.2.3 正交试验结果分析

正交试验结果如表 2 所示，采用极差分析法确定各因素对胀缩量的影响程度。

由表 2 可知，各因素对胀缩量的影响顺序为：黏粒含量 > 含水率 > 干密度，其中黏粒含量是首要影响因素。

表 2 正交试验结果与极差分析

试验编号	1	2	3	4	5	极差 R（膨胀量）	极差 R（收缩量）
含水率 (%)	20	20	20	25	25	2.9	2.8
干密度 (g/cm³)	1.5	1.6	1.7	1.5	1.6	1.5	1.4
黏粒含量 (%)	35	40	45	40	45	3.2	3.1
膨胀量 (mm)	3.4	4.9	5.2	5.4	6.8	-	-
收缩量 (mm)	3.2	4.7	5	5.1	6.5	-	-

5 胀缩变形预测模型建立

5.1 模型建立

基于室内试验数据（共 45 组），选取黏粒含量（c）、含水率（w）、干密度（ρ_d）三个关键影响因素，采用多元线性回归分析方法，建立胀缩变形预测模型。

$$\Delta L=-13.25+0.19c+0.16w+2.24\rho_d \quad (1)$$

$$\Delta L=-12.87+0.18c+0.15w+2.17\rho_d \quad (2)$$

5.2 模型验证

采用决定系数（R^2）、均方根误差（RMSE）检验模型拟合度，结果如表 3 所示。

表 3 模型拟合度检验结果

指标	膨胀量模型	收缩量模型
决定系数 R^2	0.93	0.92
均方根误差 RMSE	0.31mm	0.33mm

由表 3 可知，模型决定系数均大于 0.92，误差较小，拟合效果良好。选取 3 组现场数据验证模型，相对误差在 3.5% ~ 4.8% 之间，模型具有较高的预测精度。

6 膨胀土路基防治措施研究与应用

6.1 改良技术研究

6.1.1 改良剂配比试验

选取生石灰、水泥、粉煤灰三种改良剂，设计单因素与正交试验，探究改良剂掺量对膨胀土胀缩特性的影响。单因素试验中，生石灰掺量（0%、3%、5%、7%、9%）、水泥掺量（0%、2%、4%、6%、8%）、粉煤灰掺量（0%、10%、20%、30%、40%）。

6.1.2 最优改良方案确定

正交试验结果显示，各因素对改良效果的影响顺序为：生石灰掺量 > 水泥掺量 > 粉煤灰掺量。综合考虑改良效果与经济性，确定最优改良方案为：5% 生石灰 +3% 水泥 +20% 粉煤灰。改良后膨胀土自由膨胀率从 58.7% 降至 22.3%，收缩率从 12.5% 降至 5.2%，无侧限抗压强度从 72kPa 提高至 186kPa，满足铁路路基设计要求。

6.2 复合防治技术设计与应用

6.2.1 复合防治技术方案

结合南阳膨胀土特性与胀缩变形规律，设计“土性改良 + 土工布隔离层 + 浆砌片石护坡 + 排水系统”复合防治技术，具体如下：（1）土性改良：采用最优改良方案处理路基填料，压实度控制在 95% 以上；（2）土工布隔离层：在路基基底与边坡设置两层聚酯长丝土工布（单位面积质量 ≥300g/m²），阻止水分与膨胀土接触；（3）浆砌片石护坡：边坡采用 M7.5 水泥砂浆砌筑片石护坡（厚度 30cm，坡比 1:1.5），设置泄水孔（间距 2m × 2m）；（4）排水系统：路基两侧设置排水沟（宽 60cm、深 80cm），边坡设置截水沟（宽 40cm、深 50cm），确保雨水及时排出。

6.2.2 工程应用与效果监测

选取南阳某铁路 K32+100 ~ K32+300 段（原病害严重路段）应用复合防治技术，施工完成后进行 12 个月现场监测，监测指标包括胀缩变形量、土体含水率。

监测结果显示，改良后土体含水率稳定在 18% ~ 22%，12 个月累计胀缩变形量 ≤10mm，边坡未出现滑塌与开裂现象，病害发生率较未处理路段下降 90%，防治效果显著。

7 结论

（1）南阳某铁路膨胀土属中强膨胀土，黏粒含量

34% ~ 46%、塑性指数 29 ~ 36，胀缩变形具有显著的阶段性与滞后性，快速膨胀期（0 ~ 48h）与快速收缩期（0 ~ 72h）是变形控制关键期。

（2）黏粒含量、含水率、干密度是影响胀缩特性的主要因素，黏粒含量为首要影响因素（关联度 0.87），建立的胀缩变形预测模型具有较高的预测精度（$R^2 \geq 0.92$）。

（3）最优改良方案为“5% 生石灰 +3% 水泥 +20% 粉煤灰”，改良后膨胀土胀缩性显著降低；“改良 + 隔离 + 排水 + 护坡”复合防治技术可有效控制路基胀缩变形，病害发生率下降 90%。

（4）本文研究成果已在南阳某铁路得到应用，但仍需进一步完善：一是开展长期监测，积累更多数据以优化预测模型与防治技术参数；二是研发新型环保改良剂，降低工程成本与环境影响；三是结合数值模拟技术，实现路基胀缩病害的动态预警与精准防治。

参考文献

[1] 陈宗基. 土的工程性质[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[2] 刘祖德, 孔官瑞. 南阳膨胀土的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 365-368.

[3] 南阳某铁路工程有限公司. 南阳某铁路工程运营维护报告[R]. 南阳: 南阳某铁路工程有限公司, 2021.

[4] Terzaghi K. Mechanism of swelling of clays[J]. Geotechnique, 1936, 6(1): 26-36.

[5] Skempton A W. The colloidal activity of clays[J]. Geotechnique, 1953, 3(3): 135-147.

[6] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1977, 103(4): 447-466.

[7] FHWA. Design and construction of flexible pavements on expansive soils[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2018.

[8] 陈宗基. 黏性土的结构力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 1-17.

[9] 刘祖德, 刘宝臣. 膨胀土路基改良技术研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 489-492.

[10] 张诚厚, 李海鹏. 土工合成材料在膨胀土路基防护中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(3): 128-131.

[11] 杨和平, 肖夺. 膨胀土路基“改良-防护-监测”一体化技术研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 356-360.

[12] 王铁宏. 我国膨胀土地区工程建设的现状与展望[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 1-14.

[13] 南阳市气象局. 南阳市气候志[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2018.

[14] 河南省地质调查院. 河南省南阳市地质调查报告[R]. 郑州: 河南省地质调查院, 2019.

[15] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[16] 李广信. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

[17] 沈珠江. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.