

DOI: 10.7672/sgjs2024210109

基于加州承载比的改性路基土路面铺装厚度与 施工深度优化研究

周明浩

(北京市市政一建设工程有限公司, 北京 100083)

[摘要] 基于加州承载比开展改性路基土路面铺装厚度与施工深度优化研究, 制备3种不同质量比(25%膨胀土+75%高岭土、35%膨胀土+65%高岭土、75%膨胀土+25%高岭土)路基土, 并对路基土进行化学处理(20%水泥+8%石灰), 通过阿特伯格极限试验、普罗克特压实试验、加州承载比试验和膨胀试验, 研究路基土工程特性。研究表明, 未改性路基土液限、塑限、塑性指数、含水率和膨胀率均随着膨胀土含量的增加有所提高; 未改性路基土加州承载比不满足规范限值要求, 改性路基土加州承载比明显增大, 满足道路工程建设要求; 改性路基土减小了路面铺装厚度和施工深度, 其中25%膨胀土+75%高岭土改性路基土路面铺装厚度和施工深度均最小, 分别为30, 80mm。道路工程建设过程中遇到膨胀土路基时, 优先采用化学稳定剂进行处理而非拆除更换, 并在施工过程中密切监控路基土关键指标, 特别是在多雨地区加强排水设计, 确保道路的长期稳定性和耐久性。

[关键词] 道路; 路基; 承载比; 膨胀率; 铺装厚度; 施工深度

[中图分类号] TU997

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0109-05

Research on the Optimization of Pavement Thickness and Construction Depth of Modified Subgrade Soil Based on the California Bearing Ratio

ZHOU Minghao

(Beijing No. 1 Municipal Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: This study conducts research on the optimization of pavement thickness and construction depth of modified subgrade soil based on the California bearing ratio (CBR). Three types of subgrade soils with different quality ratios were prepared, which are 25% expansive soil + 75% kaolin, 35% expansive soil + 65% kaolin, 75% expansive soil + 25% kaolin, and chemically treated with a mixture of 20% cement and 8% lime. The engineering properties of the subgrade soil were studied through Atterberg limit tests, Proctor compaction tests, California bearing ratio tests, and expansion tests. The research results show that the liquid limit, plastic limit, plasticity index, moisture content and expansion rate of unmodified subgrade soil all increase with the increase of expansive soil content. The California bearing ratio of unmodified subgrade soil does not meet the specification requirements, while that of modified subgrade soil significantly increases, meeting the requirements of road construction. The modified subgrade soil reduces the pavement thickness and construction depth, with the mixture of 25% expansive soil + 75% kaolin having the smallest pavement thickness and construction depth, both at 30mm and 80mm respectively. In road construction, when encountering expansive soil subgrade, it is preferred to use chemical stabilizers for treatment rather than removal and replacement. During construction, closely monitor key indicators of subgrade soil, especially in rainy areas, strengthen drainage design to ensure the long-term stability and durability of the road.

Keywords: road; subgrade; load bearing ratio; expansion rate; pavement thickness; construction depth

0 引言

膨胀土路基中的膨胀土吸水后会膨胀,失水后会收缩,导致路面结构出现不均匀沉降、开裂等问题,且膨胀土路基引起的道路损害修复成本高^[1]。化学路基稳定为改善膨胀土路基的有效技术,包括添加不同类型的外加剂,如石灰和水泥等,作为黏结剂稳定土壤^[2]。化学黏结剂的加入改变了土壤颗粒级配和物理合成过程,促进了阳离子交换,从而导致膨胀土壤颗粒絮凝和团聚^[3]。水泥在水化过程中产生水化硅酸钙的胶凝产物,可以与路基土颗粒结合,从而提高了路基土强度。石灰可改变土壤的水分和密度,同时会发生石灰土反应,该反应会释放胶凝产物(水化硅酸钙和水化铝酸钙),从而增加路基强度^[4]。已有研究表明,在化学稳定道路路基过程中,当稳定剂与土壤内部的水发生反应时,膨胀土路基抗剪强度提高,导致土壤刚度增加^[5]。在路基稳定过程中,以10%,15%,20%的质量比向路基土中加入水泥可提高路基土承载力^[6],向路基土中添加6%~12%石灰可提高其工程特性^[7]。

在道路施工过程中,路面工程施工成本较高,尤其是处理膨胀性路基时^[8-9]。路基加州承载比会影响路面铺装厚度和施工深度,从而影响路面工程总成本。为此,本研究使用实验室人工合成路基材料(膨胀土+高岭土),根据材料加州承载比对路面铺装厚度和施工深度进行了优化。

1 原材料

本研究使用的人工合成路基材料由未经处理的膨胀土和不同百分比的高岭土混合而成,使用的化学稳定剂为普通硅酸盐水泥和生石灰。原材料物理性质如表1所示,化学成分如表2所示。

表1 原材料物理性质

Table 1 Physical properties of raw materials

项目	膨胀土	高岭土
液限/%	308	57
塑限/%	51	26
20℃密度/(kg·m ⁻³)	2.52	2.46
最大干密度/(kN·m ⁻³)	11.35	14.37
自然含水率/%	13.9	27.6

表2 原材料化学成分

Table 2 Chemical composition of raw materials

原材料	质量含量/%									烧失量/%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	
膨胀土	62.01	22.09	3.36	0.28	2.56	0.72	—	—	2.62	5.59
高岭土	49.10	35.40	0.92	—	0.38	0.26	2.09	—	0.21	11.60
水泥	22.60	4.90	2.50	—	3.09	63.12	—	2.28	—	0.82
石灰	3.36	0.28	0.18	—	0.52	89.13	0.07	2.02	—	—

2 试验方法

对未进行化学处理的路基土进行了阿特伯格极限试验和普罗克特压实试验,以确定各组路基土在不同含水量下的膨胀行为、特征和强度。对进行化学处理的改性膨胀土和未进行化学处理的膨胀土进行了加州承载比试验,以确定处理后的膨胀土作为道路路基材料时的强度和承载力。

将膨胀土和高岭土按不同土壤质量比例进行混合,形成3种路基土,如表3所示。根据土壤质量确定改性路基土水泥和石灰添加量,其中水泥添加量为20%,石灰添加量为8%。

表3 试样膨胀土和高岭土含量

Table 3 Proportions of expansive soil and kaolin in samples

试样编号	膨胀土和高岭土含量(质量比)
SSK1	25%膨胀土+75%高岭土
SSK2	35%膨胀土+65%高岭土
SSK3	75%膨胀土+25%高岭土

2.1 阿特伯格极限试验

阿特伯格极限试验可测定土壤液限、塑限和塑性指数,这些指标反映了不同水分条件下土壤状态变化,是评价土壤工程性质的重要参数。取一定量土样放在液限仪的杯中,加水调整至软糊状,使用标准工具进行切割,记录闭合距与含水量的关系。取约15g土样,逐渐加入少量水使其可塑化,并用手掌搓制土条,当土条断裂时即达到塑限,测定此时含水量。重复试验,取多个样本的试验结果平均值。塑性指数通过液限减去塑限获得。

2.2 普罗克特压实试验

普罗克特压实试验可测定土壤最佳含水量及最大干密度。首先准备干样品,测定初始含水量;然后将样品与不同量的水混合,制备不同含水量的试样,将各组试样装入模具中进行压实,测定其干密度;最后绘制压实曲线,确定最大干密度及对应的最佳含水率。

2.3 加州承载比试验

加州承载比试验是评价道路路基材料强度和

承载力的贯入试验。加州承载比影响道路设计参数、整体厚度和成本,是重要的设计和施工参数。总样品质量为 4kg,根据普罗克特压实试验中获得的未经处理路基土最佳含水率,逐渐加入一定量的水,混合后形成均匀的混合物。将均匀混合的路基土(4kg)分为三等份,使用 2.5kg 压实锤进行分层压实,每层击实 62 次。压实完成后利用托盘刀修剪压实的路基土,使其与模具上边缘完全平齐。将压实的路基土材料与模具和底座称重并记录数值。对于未改性路基土,压实完成后直接进行加州承载比测试。对于改性路基土,在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的室温下养护,测试养护 7,28d 的加州承载比。为了模拟膨胀土路基在洪水发生时的最不利情况,制备以上相同的试样,完全浸入水中浸泡 96h 后进行加州承载比测试。

2.4 膨胀试验

采用线性膨胀测量法测试未改性和改性路基土膨胀行为。使用基本膨胀固结仪测量路基土膨胀率,该装置包括直径 2.42mm 的不锈钢压实环、2 块多孔石、2.87kPa 的加载砝码和刻度盘。在最佳含水率状态下进行测试,未改性路基土压实后立即进行膨胀测试,无须养护。处理后的路基土利用保鲜膜包裹,在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的室温下养护 7d,然后进行膨胀测试。在 28d 内每天记录膨胀率,并对数据进行分析,以确定试样膨胀势。

3 试验结果与分析

3.1 未改性路基土

1) 液限、塑限和塑性指数

阿特伯格极限试验得到未改性路基土试样液限、塑限和塑性指数如图 1 所示。由图 1 可知,SSK3 试样液限、塑限和塑性指数最大,其次为 SSK2 试样,SSK1 试样液限、塑限和塑性指数最小,这主要与膨胀土含量有关,膨胀土具有较强的膨胀性和较高的塑性,能够吸收大量水分。因此,随着膨胀土含量的增大,试样塑性逐渐增强。

2) 含水率与干密度

普罗克特压实试验所得未改性路基土试样含水率与干密度关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知,SSK3 试样最佳含水率最大,SSK1 试样最佳含水率次之,SSK2 试样最佳含水率最小。

3) 加州承载比

未改性路基土未浸泡和浸泡 96h 的加州承载比测试结果如图 3 所示。由图 3 可知,浸泡前、后 SSK3 试样加州承载比均达到了最大值,分别为 9.2%,1.9%;浸泡前、后 SSK1 试样加州承载比最

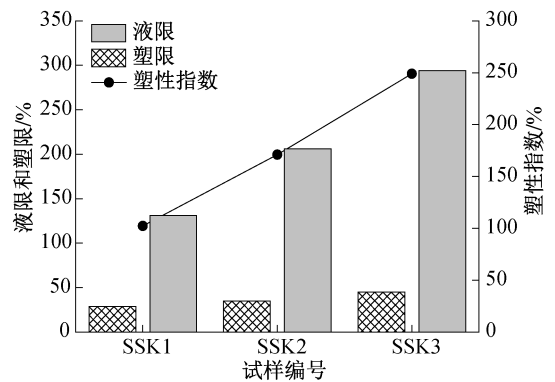


图 1 未改性路基土试样液限、塑限和塑性指数

Fig. 1 Liquid limit, plastic limit and plasticity index of unmodified subgrade soil samples

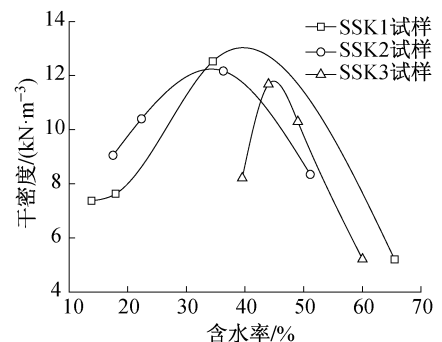


图 2 未改性路基土试样含水率与干密度关系曲线
Fig. 2 Relationship curves between moisture content and dry density of unmodified subgrade soil samples

小,分别为 6.3%,0.8%。由试验结果可知,试样中膨胀土含量越高,其加州承载比越大,这是由于膨胀土虽具有较高的收缩膨胀势,但其承载力较高,在混合物中加入高岭土会影响膨胀土天然高承载力。

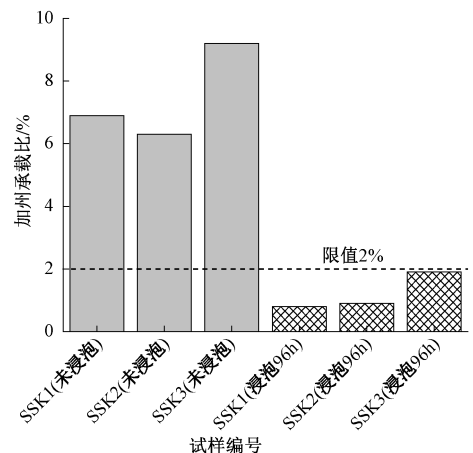


图 3 未改性路基土试样加州承载比
Fig. 3 California bearing ratios of unmodified subgrade soil samples

根据《公路路基设计规范》要求,路基土加州承载比 $\geq 2\%$,本研究 3 组路基土试样未浸泡时的加州承载比均满足要求。但浸泡 96h 后,3 组路基土试样加州承载比均 $< 2\%$ 。因此,未改性路基土不能直接用于道路铺设。

4) 膨胀率

未改性路基土膨胀率随时间变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,未改性路基土 1d 后开始出现明显的膨胀,其中 SSK1,SSK2 试样持续膨胀 14d 后基本不再膨胀,SSK3 试样持续膨胀 6d 后基本不再膨胀。SSK3 试样膨胀率最高,为 56.45%;SSK1 试样膨胀率最低,为 36.26%。这表明随着膨胀土含量的增加,未改性路基土膨胀率逐渐增大。根据规范要求,路基土膨胀率超过 2.5%时,需进行处理或移除更换。因此,本研究未改性路基土不符合道路工程路基材料使用标准。

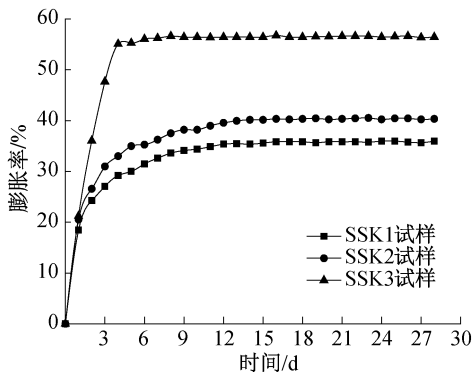


图 4 未改性路基土试样膨胀率

Fig. 4 Expansion rates of unmodified subgrade soil samples

3.2 改性路基土

1) 加州承载比

改性路基土试样未浸泡养护 7,28d 和浸泡 96h 的加州承载比测试结果如图 5 所示。由图 5 可知,未浸泡养护 28d 时,SSK1 试样加州承载比最大,为 106%;其次为 SSK2 试样,其加州承载比为 92%;SSK3 试样加州承载比最小,为 78%。未浸泡养护 7d 时试样加州承载比变化规律与养护 28d 时基本一致。这表明改性路基土加州承载比随着膨胀土含量的增加而降低,这是由于膨胀土天然高承载力在稳定过程中会受到石灰和水泥添加的影响。因此,化学处理后膨胀土含量最高的 SSK3 试样加州承载比最小。改性路基土未浸泡养护 28d 时,与未改性路基土相比(见图 3),SSK1,SSK2,SSK3 试样加州承载比分别增大了 15.8,12.3,7.5 倍,可知改性路基土承载力显著增加。改性路基土在水中浸泡 96h 后,其加州承载比较未改性路基土明显增加,超出规范规定

的加州承载比限值要求。因此,水泥和石灰具有提高膨胀性道路路基材料承载力的作用。

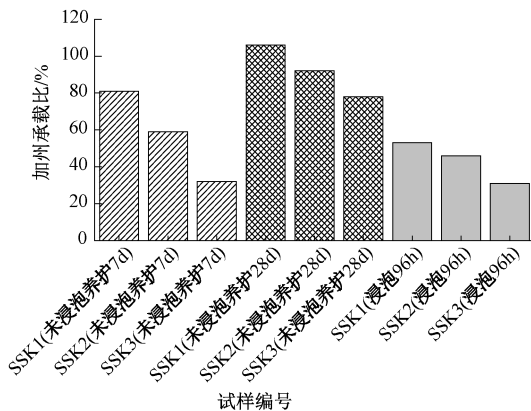


图 5 改性路基土试样加州承载比

Fig. 5 California bearing ratios of modified subgrade soil samples

2) 膨胀率

改性路基土膨胀率随时间变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,与未改性路基土相比,改性路基土 1d 后快速膨胀,但膨胀率较低。改性路基土膨胀率随时间变化趋势与未改性路基土一致,随着膨胀土含量的增加,改性路基土膨胀率逐渐增大。SSK3 试样膨胀率最大,为 0.20%。本研究改性路基土膨胀率低于膨胀率限值(2.5%),因此,改性路基土符合道路工程路基材料使用标准。

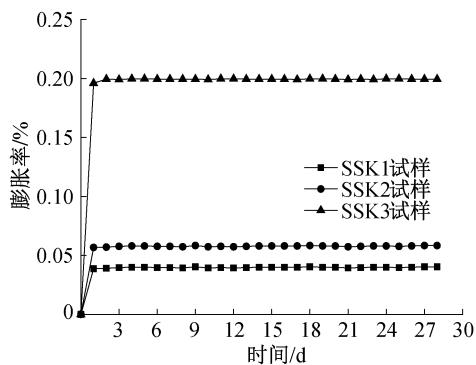


图 6 改性路基土试样膨胀率

Fig. 6 Expansion rates of modified subgrade soil samples

4 路面铺装厚度和施工深度优化

利用本研究获得的加州承载比对路面铺装厚度进行优化,路面荷载按照重型交通进行设计,取 4 500kN。改性和未改性路基土试样路面铺装厚度如图 7 所示。当路基土加州承载比较高时,路基材料能够承受更大的荷载而不发生变形或破坏,因此,所需的路面铺装厚度可相应减小,以达到节约成本和材料的目的。由图 7 可知,未改性路基土 SSK1 试样加州承载比最小,因此其路面铺装厚度最大,为 336mm。

养护 28d 时改性路基土 SSK1 试样加州承载比最大,因此其路面铺装厚度最小,为 30mm。

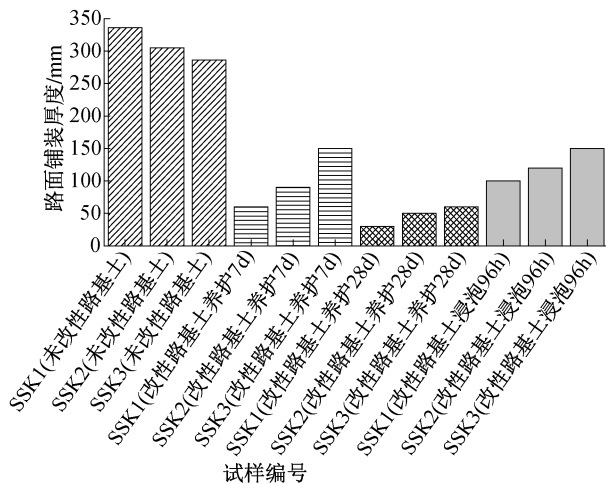


图7 改性和未改性路基土试样路面铺装厚度

Fig. 7 Pavement thickness of modified and unmodified subgrade soil samples

改性和未改性路基土试样施工深度如图 8 所示。由图 8 可知,与路面铺装厚度相同,未改性路基土试样施工深度随着加州承载比的增大而减小。在 4 500kN 重型交通荷载作用下,未改性路基土 SSK1 试样加州承载比仅为 6.3%,其施工深度最大,为 396mm。改性路基土 SSK1 试样养护 28d 时加州承载比为 106%,其施工深度最小,为 80mm。

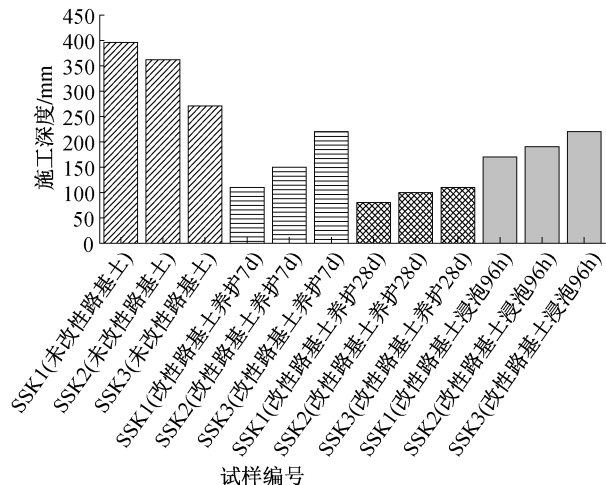


图8 改性和未改性路基土试样施工深度

Fig. 8 Construction depth of modified and unmodified subgrade soil samples

5 工程建议

在道路工程建设过程中,根据本研究试验参数和结果,施工时应特别注意路基材料配合比,尤其是膨胀土和高岭土的比例及化学稳定剂的使用。施工过程中应密切监控路基土液限、塑限、含水率和膨胀率等,确保其符合规范要求。施工时应使用

重型压实设备,以确保路基土达到最大干密度,同时注意加州承载比的变化。考虑环境因素,特别是在多雨地区,应加强排水设计,防止水分积聚导致路基土强度下降。施工技术和设备的选择也应考虑路基土膨胀特性,避免施工过程中的过度扰动。

6 结语

1)随着路基土中膨胀土含量的增加,未改性路基土液限、塑限、塑性指数、含水率和膨胀率均有所提高。未改性路基土膨胀率超过了规定的限值(2.5%),不适用于道路工程建设。进行化学处理(20%水泥+8%石灰)的改性路基土膨胀率较未改性路基土大幅度降低,稳定值均低于膨胀率限值,满足道路工程建设要求。

2)未改性路基土加州承载比随着膨胀土含量的增加而增大,而改性路基土加州承载比随着膨胀土含量的降低而增大。未改性路基土水中浸泡 96h 后加州承载比快速下降,低于规范要求的限值(2%),不适用于道路工程建设。改性路基土浸泡 96h 后加州承载比虽有下降趋势,但远高于规范要求的限值,满足道路工程建设要求。

3)随着未改性路基土加州承载比的增加,路面铺装厚度和施工深度均逐渐减小。未改性路基土 SSK1 试样加州承载比最小,其路面铺装厚度和施工深度均最大。养护 28d 时改性路基土 SSK1 试样加州承载比最大,其路面铺装厚度和施工深度最小。

4)在道路工程建设过程中遇到膨胀土路基时,应采用化学稳定剂进行处理,以降低膨胀率至规定限值以下,并提升加州承载比,确保道路结构稳定性和耐久性,有利于提升工程性能,并通过减小路面铺装厚度和施工深度有效降低了建设成本。同时,建议施工过程中严格监控土壤指标,并采取适当措施适应环境条件,如在湿润地区加强排水设计,以维护路基土的长期稳定性。

参考文献:

- [1] 于冬,刘鹏,杨果林,等.无砟轨道路基膨胀变形对路基动力特性的影响研究[J].施工技术(中英文),2022,51(20):98-103.
YU D, LIU P, YANG G L, et al. Effect of ballastless track subgrade expansion on the dynamic characteristics of subgrade [J]. Construction technology, 2022, 51(20):98-103.
- [2] 李新鹏.高速公路石灰改良膨胀土路基施工技术研究[J].工程建设与设计,2023(11):226-228.
LI X P. Research on construction technology of lime improvement for expansive soil subgrade in expressway [J]. Construction & design for engineering, 2023(11):226-228.

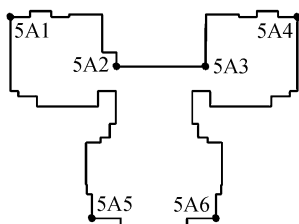


图6 测点布置

Fig. 6 Layout of measuring points

表2 关键测点监测值与计算值对比

Table 2 Comparison between the measured values and the calculated values of key measuring points

楼层数/ 层	测点 编号	施工步 CS16		施工步 CS26	
		监测值/ mm	计算值/ mm	监测值/ mm	计算值/ mm
14	5A1	0.20	0.24	0.24	0.26
	5A3	0.35	0.21	0.40	0.25
	5A4	0.33	0.20	0.38	0.23
	5A6	0.31	0.25	0.41	0.24

4 结语

停建工程在续建过程中,由于混凝土收缩、徐变和钢筋锈蚀等问题易导致结构变形,采取有效的防护措施并及时修补对于确保工程结构安全至关重要,通过采用激光扫描、无人机监测等技术可更精确地评估高层建筑施工变形情况。本文对高层建筑停建续建施工变形规律进行了研究,主要分析了结构组划分层数和停工时间对结构竖向变形的影响。已建结构收缩变形>弹性变形>徐变变形,由于续建结构混凝土收缩、徐变未充分发展,其弹性变形>收缩变形>徐变变形。结构组划分层数越多,高层建筑竖向变形曲线越不平缓。停工对高层建筑竖向变形造成一定影响,新旧楼层结合处竖向变

形发生突变。

参考文献:

- [1] 陈海洲,王玉岭,刘进贵,等.超高层钢结构建筑的施工模拟技术理论和方法[J].建筑结构,2011,41(S1):821-824.
CHEN H Z, WANG Y L, LIU J G, et al. The theory and method of construction simulation technology for super high-rise steel structure buildings [J]. Building structure, 2011, 41 (S1): 821-824.
- [2] 曾昭华,吕艳斌,李朝良,等.异形超高层建筑徐变分析研究[J].施工技术,2023,52(23):139-142,154.
ZENG Z H, LÜ Y B, LI Z L, et al. Creep deformation analysis study on special-shaped tall buildings [J]. Construction technology, 2023, 52(23): 139-142, 154.
- [3] 杨仁孟,陈兆荣,王森,等.高层建筑结构在竖向荷载作用下楼板面内应力分析和工程实例[J].建筑结构,2017,47(1):17-22.
YANG R M, CHEN Z R, WANG S, et al. Stress analysis and engineering examples of high-rise building structures under vertical loads on floor slabs [J]. Building structure, 2017, 47 (1): 17-22.
- [4] 魏琰,王森,陈兆荣,等.高层建筑结构在水平荷载作用下楼板应力分析与设计[J].建筑结构,2017,47(1):10-16.
WEI L, WANG S, CHEN Z R, et al. Stress analysis and design of floor slabs in high-rise building structures under horizontal loads [J]. Building structure, 2017, 47 (1): 10-16.
- [5] KWAK H G, KIM J K. Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences [J]. Building and environment, 2006, 41(10):1423-1434.
- [6] 陈祖军,宁宏翔.高层住宅建筑若干关键施工技术的研究与应用[J].施工技术(中英文),2023,52(17):74-78.
CHEN Z J, NING H X. Research and application of key construction techniques for high-rise residential buildings [J]. Construction technology, 2023, 52(17): 74-78.
- [7] 佟克龙.高层塔楼超大跨度超高空间连体钢结构设计与施工关键技术[J].施工技术(中英文),2023,52(8):45-50,67.
TONG K L. Design and construction key technology of super-large-span and ultra-high spatial connected steel structure of high-rise tower [J]. Construction technology, 2023, 52 (8): 45-50, 67.

(上接第113页)

- [3] 舒明旺.混合再生沥青混合料路基土工程特性研究[J].施工技术(中英文),2024,53(9):28-33.
SHU M W. Research on engineering properties of recycled asphalt mixture subgrade soil [J]. Construction technology, 2024, 53(9):28-33.
- [4] 刘博明.石灰改良膨胀土路基施工技术在高速公路中的应用[J].交通世界,2021(31):93-94.
LIU B M. Application of lime improvement for expansive soil subgrade construction technology in expressway [J]. Transpo world, 2021(31): 93-94.
- [5] 张新东,张陆山.高炉矿渣-石灰复合改良膨胀土工程特性试验研究[J].施工技术(中英文),2023,52(10):55-58.
ZHANG X D, ZHANG L S. Experimental study on engineering properties of blast furnace slag-lime composite improvement for expansive soil [J]. Construction technology, 2023, 52(10): 55-58.
- [6] 郭志明.水泥改良膨胀土在路基工程中的应用[J].建筑技术,2023,54(15):1875-1879.

- GUO Z M. Application of cement improvement for expansive soil in subgrade engineering [J]. Architecture technology, 2023, 54 (15): 1875-1879.
- [7] 郑磊.石灰改良膨胀土路基施工技术研究[J].工程与建设,2022,36(2):406-408.
ZHENG L. Research on construction technology of lime improvement for expansive soil subgrade [J]. Engineering and construction, 2022, 36(2): 406-408.
- [8] 丁志平,王亮亮.高速铁路膨胀土路堑基床排水系统研究[J].施工技术(中英文),2021,50(17):69-73.
DING Z P, WANG L L. Research on seepage prevention and drainage system of expansive soil cutting foundation bed for high-speed railway [J]. Construction technology, 2021, 50(17): 69-73.
- [9] 田世宽,张海波.某高速公路膨胀土路基病害分析及处治措施[J].施工技术,2014,43(17):119-122.
TIAN S K, ZHANG H B. Analysis and treatment measures of expansive soil subgrade disease in a certain expressway [J]. Construction technology, 2014, 43(17): 119-122.