

doi:10.3969/j. issn. 1006-8023. 2022. 06. 016

牙四公路路基水泥搅拌桩承载力影响因素研究

张宏祥, 王捷

(东北林业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 水泥搅拌桩在公路软基处理过程中, 能够改善基础强度, 显著提升软基的承载力。为研究水泥搅拌桩单桩承载力影响因素, 进一步优化软土地基加固设计和处理提供指导, 以牙克石至四平公路新站至大安嫩江大桥段工程为依托, 运用有限元建模分析, 同时结合载荷试验与无侧限抗压试验的结果, 研究土体种类、养护龄期和水泥掺入量等因素对水泥搅拌桩单桩承载力的影响。结果表明, 粉细砂强度略高于黑土并且优于粉土和细砂的强度; 在当量配合比处于 55~65 kg 时承载力随着配合比的增加而增加; 当养护龄期为 3~28 d 时, 承载力变化情况与养护龄期成正比。有限元模拟验证了以上结果, 该研究可为实际工程施工提供理论支撑。

关键词: 水泥搅拌桩; 载荷试验; 无侧限抗压试验; 承载力分析; 有限元模拟

中图分类号:U416

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2022)06-0124-06

Study on Influencing Factors of Bearing Capacity of Cement Mixing Piles in Yasi Highway Subgrade

ZHANG Hongxiang, WANG Jie

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Cement mixing pile can improve the foundation strength and the bearing capacity of soft foundation in the process of soft foundation treatment. In order to study the influencing factors of single pile bearing capacity of cement mixing pile, and to provide guidance for further optimization of soft soil foundation reinforcement design and treatment, based on the Yakeshi-Siping highway New Station to Da'an Nenjiang Bridge project, finite element modeling analysis was used, combined with the results based on load test and unconfined compression test, the influence of soil type, curing age and cement content on the bearing capacity of single cement mixing pile was studied. The results showed that the strength of fine sand was slightly higher than that of black soil and better than that of silt and fine sand. When the equivalent proportion was between 55 kg and 65 kg, the bearing capacity increased with the increase of the proportion. When the curing age was 3~28 days, the variation of bearing capacity was proportional to the curing age. Finite element simulation verified the above results, which can provide theoretical support for practical engineering construction.

Keywords: Cement mixing pile; load test; unconfined compression test; bearing capacity analysis; finite element simulation

0 引言

近年来, 随着经济的高速增长及“一带一路”带来的发展机遇, 中国的基础设施建设规模有了显著的提高。无论公路铁路还是港区堆场, 都不可避免地会遇到软弱地基的处理加固问题。水泥土搅拌

桩是一种利用特殊的深层搅拌机械将固化剂水泥和土体强制搅拌在一起, 从而起到加固地基作用的桩体, 其在施工时无震动、无噪声、无污染且造价低, 因此得到了广泛的应用。由于施工时采用的配合比、养护时间以及地质条件的不同, 水泥搅拌桩的承载特性也不尽相同。

在有关水泥搅拌桩承载力影响因素的研究方面, 赵利平等^[1]通过对钻孔附近的静载试验数据进行分析, 发现减小地基沉降需要进行设计变更时, 需优先考虑改变桩间距, 其次调整褥垫层厚度; 马时冬^[2]研究得出桩土应力比 n 与荷载 P 的关系; 马克生等^[3]通过对试桩做单桩和复合地基静载力载荷试验得出使用载荷下单桩复合地基的安全系数大于 2; 厉有轩^[4]运用 ANSYS 有限元软件计算出水泥土搅拌桩复合地基承载力值, 再通过计算公式和

收稿日期:2021-11-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费(DL12CB03)

第一作者简介: 张宏祥, 博士, 副教授。研究方向为桥梁工程方向。E-mail: ldzhxldz@163.com

引文格式: 张宏祥, 王捷. 牙四公路路基水泥搅拌桩承载力影响因素研究[J]. 森林工程, 2022, 38(6):124-129.

ZHANG H X, WANG J. Study on influence factors of bearing capacity of cement mixing pile in Yasi highway subgrade [J]. Forest Engineering, 2022, 38(6):124-129.

修正公式,进一步验证修正公式的精确性、合理性;郑斌^[5]通过有限元分析法验证各土层的正应力和剪应力;李恩瀚^[6]根据对加芯水泥搅拌桩的单桩破坏形式进行分析并得出了单桩破坏形式与单桩承载力关系,进而推算得出复合地基承载力的计算公式,但针对土样、当量配合比和养护龄期的条件分析和研究较少且不够全面。

笔者在前人研究的基础上,通过载荷试验与无侧限抗压试验,并运用有限元建模分析,对土样、配合比和龄期等影响水泥搅拌桩承载力的因素进行研究,该研究对试验条件的控制和优化及对指导水泥搅拌桩的施工具有重要意义。

1 工程简介

1.1 工程地质概况

本项目路段位于牙四公路新站至大安嫩江大桥段工程,距肇源县新站镇岔格岱村西侧约3.14 km,长度为712 m。设计为填土路基,一般路段路基最小填土高度应不低于1.6 m,全段路堤最大填土高度为8.7 m,路基边坡1:1.5,路基顶面宽度为25.5 m,其中行车道4 m×3.75 m、硬路肩2 m×3 m、路缘带2 m×0.5 m、中央分隔带2.0 m、土路肩2 m×0.75 m。设计为填土路基,路段地貌单元为松嫩冲积平原,地表为防洪大坝内的鱼塘,水量较大,施工期间地表经人工回填平整,地形平坦。路段为软土路基,承载能力低,路基稳定性差,采用水泥搅拌桩复合地基为其加固。

1.2 工程概况及试验

为满足道路等基础设施使用要求,本试验桩径采用0.5 m,桩间距为1.5 m,桩布置方式为梅花正三角形,地基设计承载力特征值为120 kPa,最大试验荷载为500 kN。运用取芯法^[7]和慢速维持荷载法^[8]进行检测,如图1所示。



图1 试验钻机及试样

Fig. 1 Test rig and sample

取芯法是用钻机钻取芯样以检测桩长、桩身缺陷、桩身强度、均匀性和连续性,判定桩身质量的方法。水泥土搅拌桩成桩质量是评价施工后所形成的水泥土搅拌桩桩体强度、完整性和均匀性的指标。

2 试验结果及分析

2.1 室内试验结果及分析

现场试验钻机一共取了黑土、细砂、粉土和粉细砂4种土体,对每种土体分别做了当量配合比为55、60、65 kg的试块,分别养护7 d和28 d,然后进行无侧限抗压试验^[9-11]。无侧限抗压试验条件如图2所示,试验结果见表1—表3。



图2 无侧限抗压试验

Fig. 2 Unconfined compression test

表1 当量配合比为55 kg试块试验数据汇总表

Tab. 1 55 kg of equivalent mix ratio test block test data summary table

土类 Soil type	7 d 力峰值/kN 7 days peak force	28 d 力峰值/kN 28 days peak force
黑土 Black soil	5.216 5.333 6.233	10.092 11.930 12.840
细砂 Fine sand	3.031 2.883 3.215	9.840 9.087 9.684
粉土 Silt	5.434 5.774 6.214	12.220 12.540 12.863
粉细砂 Silty sand	7.808 8.983 8.021	18.313 18.820 18.690

表2 当量配合比为60 kg试块试验数据汇总表

Tab. 2 60 kg of equivalent mix ratio test block test data summary table

土类 Soil type	7 d 力峰值/kN 7 days peak force	28 d 力峰值/kN 28 days peak force
黑土 Black soil	7.201	15.940
	7.063	16.960
细砂 Fine sand	7.834	15.170
	5.978	9.745
粉土 Silt	5.621	9.773
	5.876	10.752
粉细砂 Silty sand	5.599	14.290
	5.182	15.760
粉细砂 Silty sand	7.574	15.180
	8.821	16.560
粉细砂 Silty sand	8.031	16.190
	8.442	16.990

由表1—表3可以得出,3种当量配合比试块整体力峰值由大到小为:当量配合比为65 kg试块、当量配合比为60 kg试块、当量配合比为55 kg试块;当处于同一当量配合比和龄期情况下,力峰值由高到低排序为粉细砂、黑土、粉土、细砂;在同一当量配合比和土类情况下,土的力峰值随龄期的增长而增长。

表3 当量配合比为65 kg试块试验数据汇总表

Tab. 3 65 kg of equivalent mix ratio block test data summary table

土类 Soil type	7 d 力峰值/kN 7 days peak force	28 d 力峰值/kN 28 days peak force
黑土 Black soil	7.930	23.190
	10.585	22.680
细砂 Fine sand	9.788	23.730
	5.793	12.052
粉土 Silt	5.682	12.655
	5.674	12.188
粉土 Silt	6.495	18.490
	7.558	18.590
粉细砂 Silty sand	7.281	17.840
	7.552	26.000
粉细砂 Silty sand	7.908	25.100
	7.244	25.080

2.2 载荷试验结果及分析

现场进行单桩竖向静载荷试验,采用慢速维持荷载法,按《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)的有关规定进行。静载荷试验是评价单桩承载力最为直观和可靠的方法,其除了考虑到地基土的支承能力,也计人了桩身材料强度对承载力的影响。现场横断面示意图如图3所示,平面示意图如图4所示。

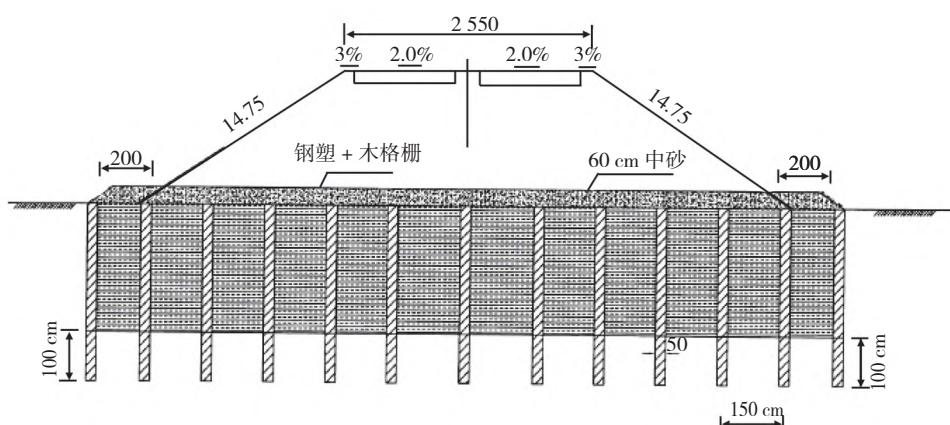


图3 横断面示意图

Fig. 3 Cross-sectional diagram

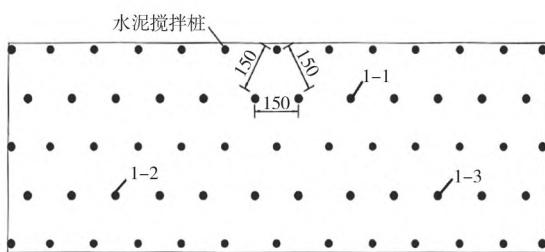


图4 平面示意图(cm)

Fig. 4 Plane diagram(cm)

本文选取现场实验的1-1、1-2和1-3桩进行单桩承载力分析,并对3个桩采取有限元建模和计算,承载力情况见表4。

3 模型的建立与验证

本文采用国际大型通用有限元ABAQUS^[12-16]软件进行建模和计算,建模时对实际工程进行了简化。三维有限元模型如图5所示,Z轴为深度方向且竖直向下为负。模型网格划分以八节点六面体单元(C3D8)为主,共划分单元25 404个、节点37 790个。

表4 现场检测成果汇总表

Tab. 4 Summary of on-site test results

桩号 Pile no.	检测日期 Test date	最大加载/kN The largest load	加载结束时沉降/mm Corresponding settlement at the end of loading	Q-s 曲线说明 Q-s curve description	复合地基承载力/kN Bearing capacity of composite foundation
1-1	2021. 6. 15	400	12. 18	直线型	400
1-2	2021. 6. 25	400	16. 76	直线型	400
1-3	2021. 6. 5	400	9. 96	直线型	400

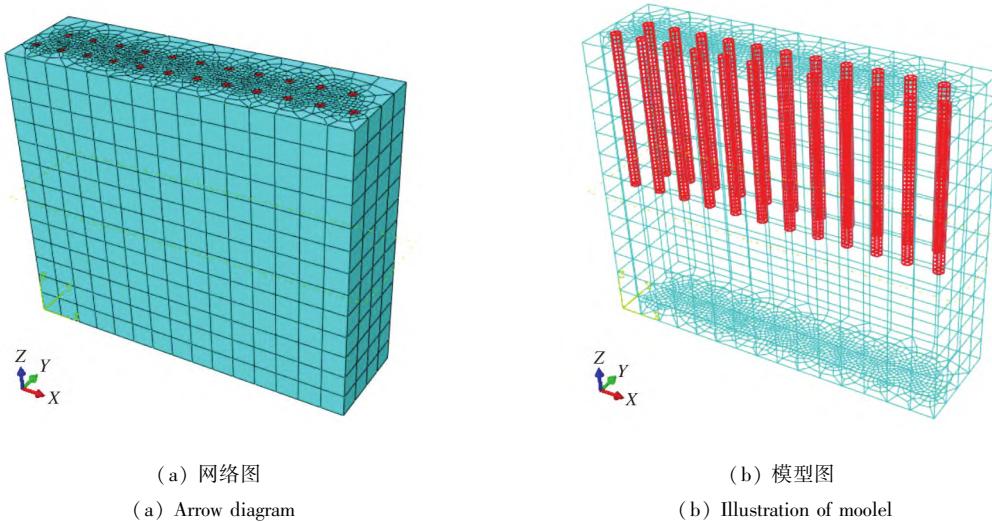


图5 水泥搅拌桩加固地基模型图

Fig. 5 Model drawing of foundation reinforced by cement mixing pile

模型底部约束为全部自由度,侧面约束为法向自由度。

土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,其参数少,容易获得,概念简单又能反映土的摩擦性

材料的特性,该本构模型揭示了土与金属等材料的一个本质区别,抗剪强度与围压有关。桩体采用线弹性模型,参数取值见表5。

表5 模型参数

Tab. 5 Model parameters

材料 Material	密度/(t·m ⁻³) Density	层厚/m Thick	杨氏模量/MPa Young's modulus	泊松比 Poisson's ratio	黏聚力/kPa Cohesion	摩擦角(φ)/(°) Friction Angle
素填土 Grain filling	1. 6	8	40	0. 2	20	28
黏土 Clay	1. 8	7	60	0. 22	35	39
桩 Pile	2. 5	8	20 000	0. 30	-	-

因桩体与土体材料的刚度相差悬殊,因此在荷载作用下会表现出剪切脱离等不同于连续体的变形。本文依据库仑摩擦定律来模拟二者接触面之间的力学行为,法向设定为刚性接触,切向设定为摩擦接触,摩擦系数取值为 $\tan(0.75\varphi)$ 。

因模型存在接触,因此地应力平衡时采用导入 ODB 法^[17-18]。平衡结果如图 6 所示。

根据现场试验的实际加载情况,模型中对群桩中的单桩进行加压,计算完毕后将桩顶端节点竖向应力的平均值作为桩顶端应力代表值,乘以桩横截面面积之后绘制荷载沉降曲线,如图 7 所示。

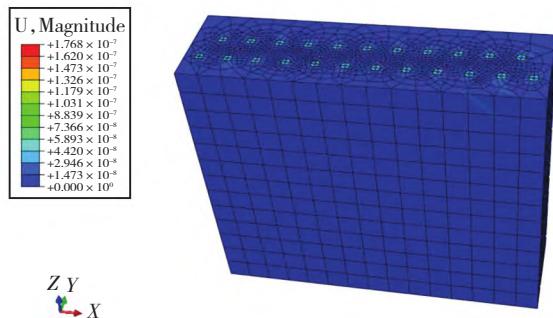


图6 地应力平衡结果

Fig. 6 Results of ground stress balance

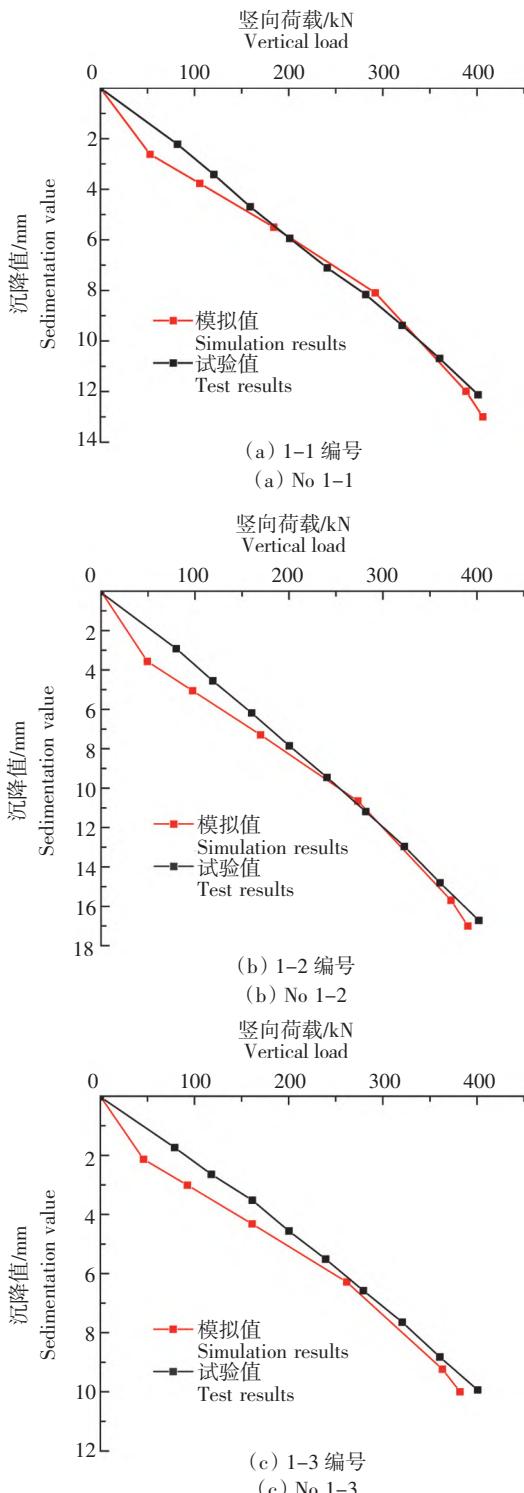


图 7 承载力曲线

Fig. 7 Bearing capacity curve

由图 7 可以看出,模型模拟的结果与实际试验结果较为吻合,表明本文模型是正确和适用的,限于篇幅,以下仅仅采用粉土对不同当量配合比和养护龄期进行模拟和对比,结果如图 8—图 9 所示。

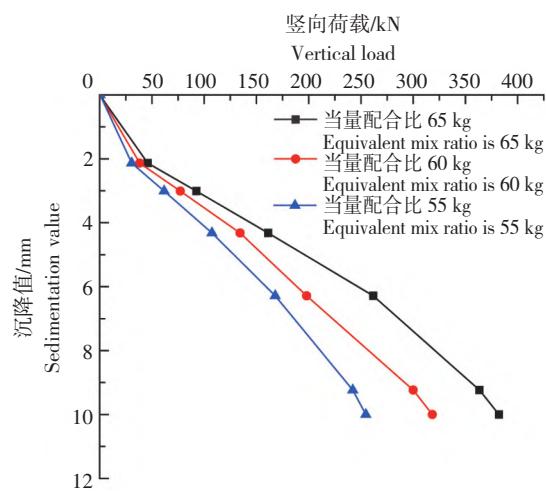


图 8 不同当量配合比承载力曲线

Fig. 8 Bearing capacity curve of different equivalent mix ratio

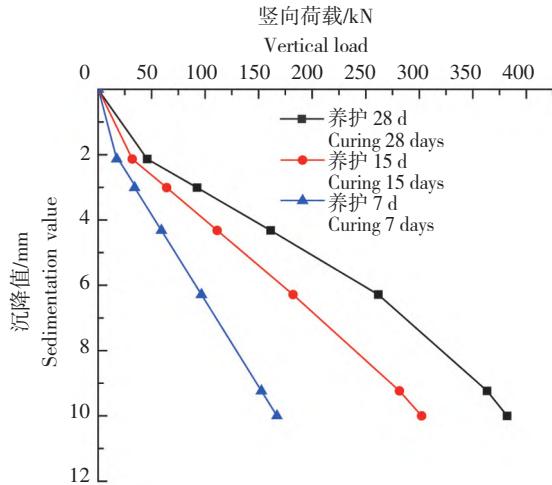


图 9 不同养护龄期承载力曲线

Fig. 9 Bearing capacity curve of different curing days

由图 8 可以看出,在一定范围内,当量配合比越大,水泥搅拌桩的承载力越高,并且在沉降初期承载力的差别不大,后期差异比较明显;由图 9 可以看出,养护时间越长,桩体的强度越大,最终桩体的承载力越高,并且养护 7 d 和 15 d 时的强度差异要大于养护 15 d 和 28 d 时的强度差异,表面水泥混凝土桩承载力随着养护龄期的增长有加速增长的趋势,因此在实际工程中要严格把控当量配合比和养护龄期。

4 结论

水泥搅拌桩广泛应用于各种工程,对其设计、配合比和施工工艺的要求也越来越高。水泥搅拌

桩的承载力受到诸多因素的影响,本文采用室内试验和数值模拟的方法,对不同土体、养护的龄期和水泥掺入量3种条件下的承载力进行了分析研究,结论如下。

(1)其他条件一定时,粉细砂在无侧限加载条件下的峰值略高于黑土,并且优于粉土和细砂。

(2)在当量配合比处于55~65 kg时承载力随着配合比的增加而增加,并且增加的幅度大致一致。

(3)当养护龄期处于3~28 d时,承载力变化情况与养护龄期成正比,且其强度呈加速增长的状态。

(4)数值分析结果和试验结果较为吻合,并且能反映不同影响因素的变化规律,但是做了较多简化,后续还需要更进一步的分析。

【参考文献】

- [1] 赵利平,龙晓鹏,黄筱云.水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):30~36,70.
ZHAO L P, LONG X P, HUANG X Y. Settlement analysis of composite foundation of soil-cement mixing pile[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 30~36, 70.
- [2] 马时冬.水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J].土木工程学报,2002,35(2):48~51.
MA S D. Test on pile soil stress ratio of composite foundation with cement-soil pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35 (2): 48~51.
- [3] 马克生,梁仁旺,白晓红.水泥搅拌桩复合地基承载力的试验确定[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2652~2654.
MA K S, LIANG R W, BAI X H. Determination of bearing capacity of deep cement mixing composite foundation by test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2652~2654.
- [4] 厉有轩.水泥土搅拌桩复合地基承载力计算的研究[D].广州:广州大学,2015.
LI Y X. Study on the calculation of bearing capacity of composite foundation with cement-soil mixing piles[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [5] 郑斌.某工程软土路基处理技术研究[D].大连:大连理工大学,2015.
ZHENG B. The soft soil foundation treating technology research of an engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [6] 李恩瀚.加芯水泥搅拌桩复合地基承载力的分析[D].广州:华南理工大学,2018.
LI E H. Analysis of bearing capacity of compound foundation with cored cement mixing piles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [7] 莫建昌.钻芯法在混凝土桩质量检测中的应用分析[J].广东建材,2021,37(10):28~29,62.
MO J C. Application analysis of core drilling method in quality inspection of concrete piles [J]. Guangdong Building Materials, 2021, 37(10): 28~29, 62.
- [8] 张荆晶,夏张琦.基于不同后注浆方法的桥梁桩基沉降分析[J].建筑技术,2017,48(3):233~235.
ZHANG J J, XIA Z Q. Settlement analysis of bridge piles based on different post-grouted methods [J]. Architecture Technology, 2017, 48(3): 233~235.
- [9] 王许诺,杨平,鲍俊安,等.冻结水泥土无侧限抗压试验研究[J].水文地质工程地质,2013,40(3):79~83.
WANG X N, YANG P, BAO J N, et al. Test research on unconfined compressive strength of freezing cement soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 79~83.
- [10] 郭根胜,张飞.基于无侧限抗压强度水泥稳定碎石风积沙基层配比研究[J].科学技术与工程,2018,18(20):326~331.
GUO G S, ZHANG F. Study on the proportion of cement stabilized macadam aeolian sand base based on unconfined compressive strength [J]. Science, Technology and Engineering, 2018, 18 (20): 326~331.
- [11] 高建喜,何杰,王忍.小龄期夯实水泥土无侧限抗压强度试验研究[J].土工基础,2017,31(6):762~765.
GAO J X, HE J, WANG R. Experimental study on unconfined compressive strength of compacted cement-soil at a young age [J]. Geotechnical Foundation, 2017, 31(6): 762~765.
- [12] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS[J]. Engineering Structures, 2015, 98: 38~48.
- [13] GIORDANO A, MELE E, DE LUCA A. Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study[J]. Engineering Structures, 2002, 24(8): 1057~1069.
- [14] OUDJENE M, BEN-AYED L. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method[J]. Engineering Structures, 2008, 30(6): 1782~1788.
- [15] 刘凯,徐晓美,张磊,等.动态荷载作用下半刚性沥青路面动力响应研究[J].森林工程,2019,35(2):82~86, 92.
LIU K, XU X M, ZHANG L, et al. Research on dynamic response of semi-rigid asphalt pavement under dynamic load [J]. Forest Engineering, 2019, 35(2): 82~86, 92.
- [16] 孙景路,李欣欣,王正君,等.新型预制U型渠结构的数值模拟分析[J].森林工程,2017,33(5):113~116.
SUN J L, LI X X, WANG Z J, et al. Numerical simulation analysis of new precast U channel[J]. Forest Engineering, 2017, 33 (5): 113~116.
- [17] 胡长明,袁一力,梅源,等.基于ABAQUS的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J].现代隧道技术,2018,55(4):76~86.
HU C M, YUAN Y L, MEI Y, et al. Initial geo-stress balance method for the finite-element model using the stratum-structure method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 76~86.
- [18] STEPANOVA N, TOLSTANOVA G, NEPOMNYASHCHII V, et al. Fc 044the long-term effects of acute kidney injury on intestinal oxalate-degrading bacteria in rats[J]. Nephrology Dialysis Transplantation, 2021, 36(Supplement_1): gfab119. 004.