

不同本构模型下建筑荷载对近邻地铁的沉降影响分析

张昊¹,王法²,韩焯²,吕连勋²

(1.北京市轨道交通建设管理有限公司,北京100068;2.北京市勘察设计研究院有限公司,北京100038)

摘要:针对高层建筑施工对近邻地铁隧道产生的影响,采用MC模型及CY模型两种土体本构模型,预测分析新建高层建筑荷载对紧邻地铁区间隧道及周边地表的沉降影响。结果显示,在计算参数均相同的条件下,两种本构模型得到的建筑荷载对周边土体的影响范围是一致的,但是该影响范围内的地表及隧道结构竖向沉降差异较大;根据工程经验,认为CY模型更符合真实情况。

关键词:本构模型;MC模型;CY模型;建筑荷载;地铁隧道;沉降分析

中图分类号:TU47

文献标识码:A

Settlement analysis of metro tunnel caused by building load under different constitutive model

ZHANG Hao¹, WANG Fa², HAN Xuan², LV Lianxun²

(1. Beijing MTR Construction Administration Corporation, Beijing 100068, China;

2. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Urban construction and the development of underground intersection have influence on the normal operation of the subway tunnel. The MC model and the CY model were used to predict and analyses the influence of the new high-rise building load on the settlement of the tunnel adjacent to the subway tunnel. The calculation results show that the two models are consistent with the influence of the building load on the surrounding soil, but it has a great difference between the influence range of the surface and the tunnel structure vertical settlement under the condition of the same other parameters. According to previous engineering experience, CY model is more consistent with the actual.

Key words: Constitutive model; building load; subway tunnel; settlement analysis

随着城市地铁工程的建成通车,地铁周边往往成为商业、住宅等重要项目的聚集地带,越来越多的新建工程兴建于已运行的地铁上方或两侧^[1-2]。由于新建结构荷载的作用,其周边地铁隧道会产生附加沉降,严重时将导致结构开裂、失稳破坏,给地铁运营带来安全隐患^[3-4],因此,有必要研究高层建筑施工对近邻地铁沉降变形的影响。戴宏伟等^[5]建立了地面新近施工荷载对地铁隧道的影响模型,研究了地铁埋深、荷载部位、隧道直径及不同围岩性质对隧道沉降及内力的扰动;杨栋等^[6]采用弹性地基梁法探讨了地面超载对隧道沉降与变形曲率间的关系,并且分析了埋

深、荷载等因素对隧道纵向受力特征的影响规律;闫静雅等^[7]针对上海特殊软粘土中桩基荷载引起近邻区间隧道的位移及内力开展了参数敏感性研究,经过建筑荷载作用下近邻地铁的受力和变形计算,进行了实测结果的对比研究。已有研究成果显示,现阶段预测建筑荷载对地铁隧道的变形影响,数值分析仍是最有效的手段,而其中土体本构模型的选取是预测结果合理与否的关键因素。

1 土体本构模型

选用目前数值计算中应用最多的两种土体本构模型,即摩尔-库伦(MC)模型以及与小应变硬

化模型相似的盖帽屈服面(CY)模型,比较两种土体本构模型的特点及主要计算参数。

1.1 摩尔-库伦(MC)模型

MC模型以莫尔-库伦强度线作为屈服线,通过采用应力洛德角 θ 将模型应用于三维应力空间,屈服面函数一般表示为:

$$f = 6p \sin \phi + q \cdot g(\theta) + 6c \cos \phi = 0 \quad (1)$$

式中: p 为平均主应力; q 为偏差应力; ϕ 为土的内摩擦角; c 为土的粘聚力。

式(1)中 $g(\theta)$ 可表示为:

$$\left. \begin{aligned} g(\theta) &= (\sin \phi - 3) \cos \theta - \sqrt{3} (\sin \phi + 1) \sin \theta \\ \sin \theta &= \frac{\sqrt{3} (\sigma_2 - \sigma_3)}{2q} \\ \cos \theta &= \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{2q} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为大主应力、中主应力和小主应力。

MC模型参数包括:弹性模量、泊松比、粘聚力和摩擦角。

1.2 盖帽屈服面(CY)模型

CY模型是一个应变硬化的土体本构模型,可以用膨胀硬化或软化定律对剪切引起的体积变化作出解释^[8]。

CY模型的盖帽屈服面为椭圆形,剪切屈服面由莫尔-库伦准则确定,剪切屈服面函数为:

$$f = Mp' - q' + Nc \quad (3)$$

式中: M 和 N 分别为与动摩擦角有关的参量; p' 为有效平均主应力; q' 为广义偏应力。

椭圆形盖帽屈服面为:

$$f_c = \frac{q^2}{a^2} + p'^2 - p_c^2 \quad (4)$$

式中: a 为决定椭圆屈服面形状的参数; p_c 为盖帽压力。

采用非关联流动法则,塑性体积应变增量 de^p 与弹性体积应变增量 de^e 之比为常量。CY模型参数包括:粘聚力、摩擦角、压缩模量、回弹模量、剪胀角、泊松比和 K_0 系数。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某紧邻地铁区间的高层建筑,由超高层办公楼、高层办公楼、附属用房及纯地下车库组成,其平面布置如图1所示。

拟建项目的层数分别为:北塔20层,高99.9 m;南塔15层,高76.25 m,裙房2层,高18.55 m;地下室4层,埋深20.75~21.75 m。建筑结构形式分别为:地下为框架-剪力墙结构,地上为框架-筒

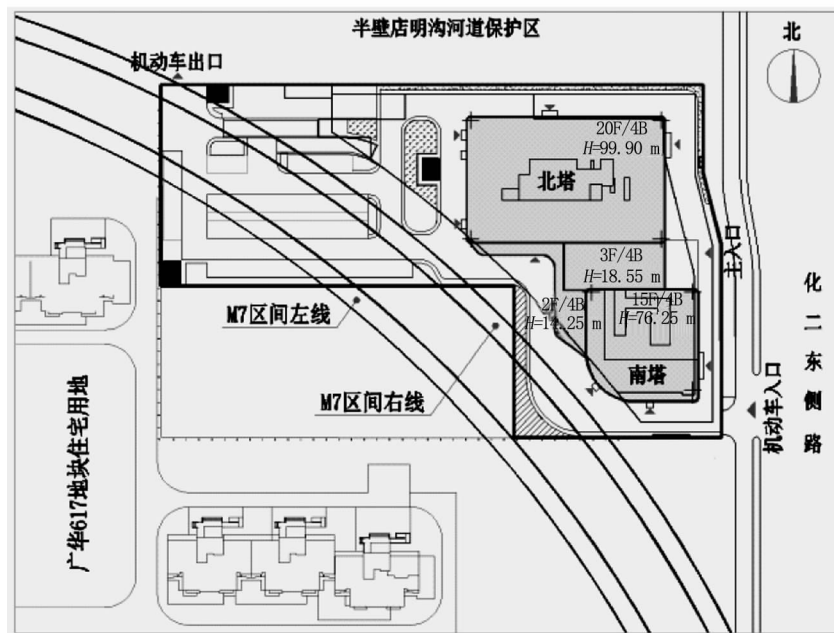


图1 拟建项目建筑平面布置

Fig.1 Construction layout of the proposed project

表 1 拟建项目设计参数表
Tab.1 Design parameters of the proposed project

	北塔		南塔
	核心筒	其他部分	
基础垫层标高/m	-21.75	-21.75	-21.25
桩顶标高/m	-21.9	-21.9	-21.4
桩径/mm	600	600	600
有效桩长/m	24.5	24.5	25
单桩承载力/kN	1 700	1 700	1 700
地基承载力/kPa	650	450	350
桩间距/m	1.6×1.6	1.9×1.9	2.2×2.2
面积置换率	0.110	0.078	0.058
桩数	192	742	417
桩体强度	C30	C30	C30
桩端持力层	中砂、细砂⑧层,局部粉质粘土、粘质粉土⑧2 层		
褥垫层厚度/mm	150		

体结构。根据设计资料,本项目北塔、南塔均采用 CFG 桩复合地基,设计参数见表 1。

个节点。在模型的底面施加竖向约束,侧面施加水平约束。

本项目近邻北京地铁 7 号线百化区间隧道,其中,拟建项目基础筏板与距离较近的左线区间隧道外皮最小水平净距仅约 10.0 m,两者剖面位置关系如图 2 所示。

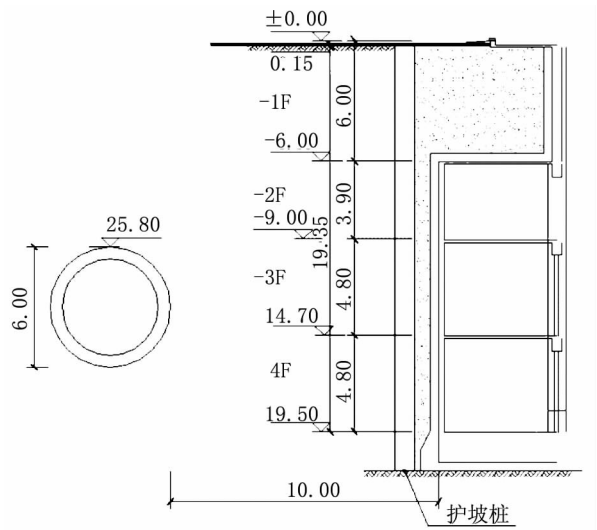


图2 拟建项目与区间隧道的剖面关系 (单位: m)
Fig.2 Profile position between the tunnel and proposed project (Unit: m)

2.2 分析模型

采用岩土数值软件 FLAC^{3D}对超高层建筑荷载引起地基沉降及其对地铁区间隧道结构的变形进行计算,数值模型见图 3。

为了减小边界效应,模型尺寸取 269.1 m × 254.3 m × 100 m,共划分 267 731 个单元、48 010

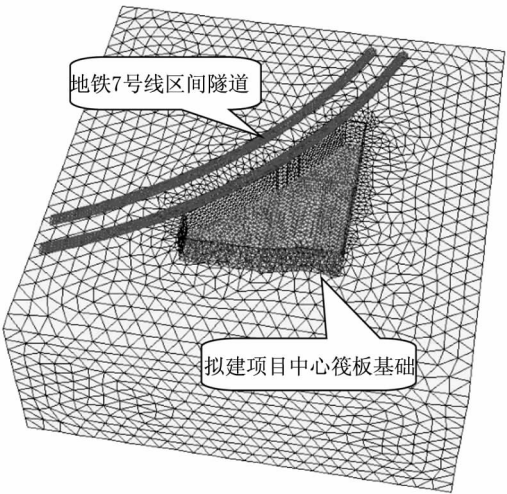


图3 建筑基础与地铁区间的位置关系
Fig.3 Positional relationship between the tunnel and building foundation

根据设计单位提供的基底平均压力标准值确定荷载取值,建筑基底荷载情况如下:北塔核心筒基底压力约 650 kPa,其余部位基底压力约 450 kPa;南塔基底压力约 350 kPa,其余部位基底压力约 100 kPa。

计算过程中,建筑物的基础和区间隧道采用 shell 单元来模拟,通过适当调整 shell 单元的厚度来模拟结构刚度的变化。基坑围护结构(特别是围护桩)对建筑荷载引起的沉降有一定约束作用,本次分析中围护桩采用实体单元进行模拟,其界面效应采用 liner 单元进行模拟。

2.3 土体模型的选取

在建筑荷载及其他计算参数均相同的条件下,对比 MC 模型和 CY 模型两种不同本构模型引起的基础沉降、周边隧道及地表变形差异。拟建项目超高层结构的中心筏板基础以下土体(含 CFG 桩复合地基土体)采用 MC 本构模型;其他部分土体,分别采用 CY 模型和 MC 模型两种土体本构关系(分别为方案 1 和方案 2),如图 4 所示。

根据项目工程勘察报告资料,将工程场地内的地层概化为 20 层,地层参数详见表 2。

2.4 计算结果对比与分析

2.4.1 拟建项目基础沉降分析

图 5 是拟建项目建筑荷载引起的基础沉降分布图,由计算结果可见以下规律:

(1)两种本构模型计算得到的基础沉降最大值均发生在荷载较大的北楼核心筒位置,南楼、群楼和地下车库的沉降量较小;

(2)CY 模型方案计算的最大基础沉降值为 50.04 mm,MC 模型方案计算的最大基础沉降值为

73.79 mm,CY 模型方案的计算值要小于 MC 模型方案。

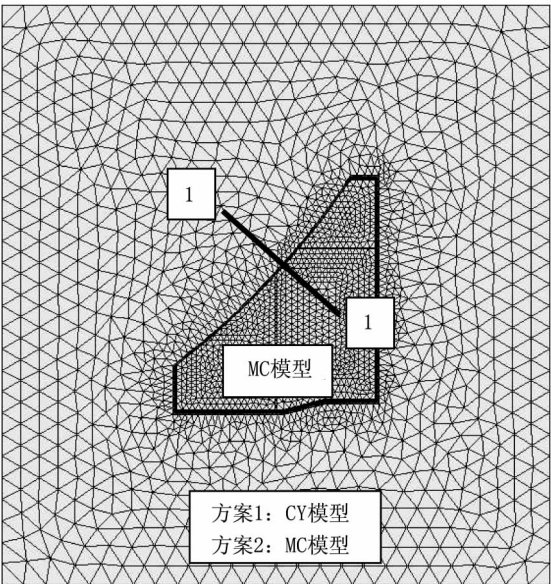


图4 不同计算方案中的土体本构模型
Fig.4 Selection of constitutive model in different numerical scheme

表 2 拟建项目地层参数表
Tab.2 Formation parameter of the proposed project

地层 编号	土层名称	MC 模型和 CY 模型共用参数					CY 模型专用参数		
		厚度 /m	密度 /(g·cm ⁻³)	摩擦角 /°	粘聚力 /kPa	变形模量 /MPa	剪胀角 /°	K ₀	回弹模量 /MPa
01	填土	3.2	1.75	10	0	7	5	0.826	21
02	粘质粉土	1.7	1.94	24	28	12	12	0.593	36
03	粉细砂	1.6	2.00	25	0	25	12.5	0.577	75
04	粘质粉土	3.5	1.98	20	45	7	10	0.658	21
05	粉细砂	5.9	2.05	30	0	40	15	0.500	120
06	圆砾	2.7	2.10	35	0	70	17.5	0.426	210
07	细砂-中砂	2.6	2.08	31	0	45	15.5	0.485	135
08	粉质粘土	4.2	2.02	20	28	16	10	0.658	48
09	细砂-中砂	3.0	2.05	32	0	60	16	0.470	180
10	粉质粘土	1.6	2.03	18	30	15	9	0.691	45
11	细砂-中砂	1.5	2.05	32	0	60	16	0.470	180
12	卵石	3.7	2.10	40	0	110	20	0.357	330
13	粉质粘土	6.8	2.01	21	56	17	10.5	0.642	51
14	细砂-中砂	3.7	2.05	33	0	75	16.5	0.455	225
15	卵石	3.0	2.10	40	0	120	20	0.357	360
16	细砂-中砂	2.4	2.05	33	0	75	16.5	0.455	225
17	粉质粘土	2.8	2.01	16	74	17	8	0.724	51
18	细砂-中砂	3.4	2.05	34	0	90	17	0.441	270
19	重粉质粘土	6.7	1.97	23	52	17	11.5	0.609	51
20	卵石	36.2	2.10	45	0	130	22.5	0.293	390

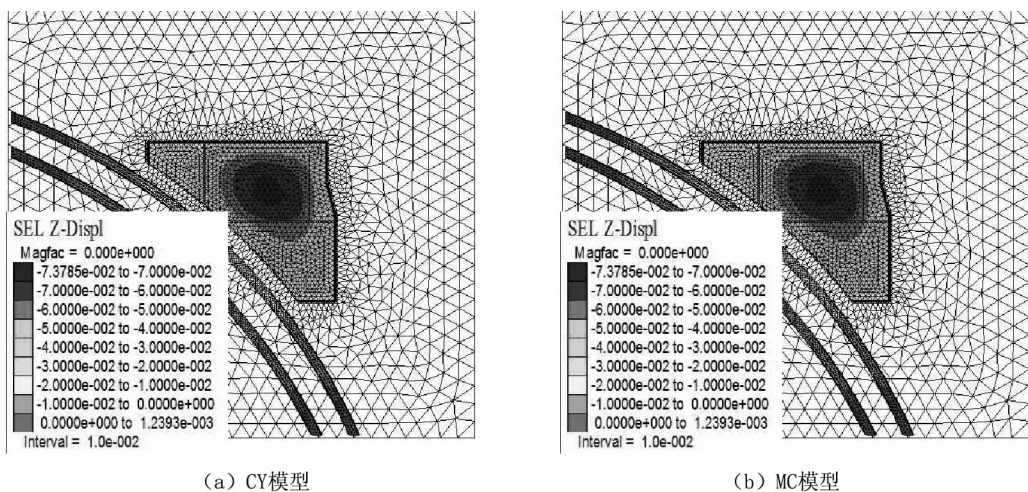


图5 建筑荷载引起的基础沉降

Fig.5 Foundation settlement caused by building load

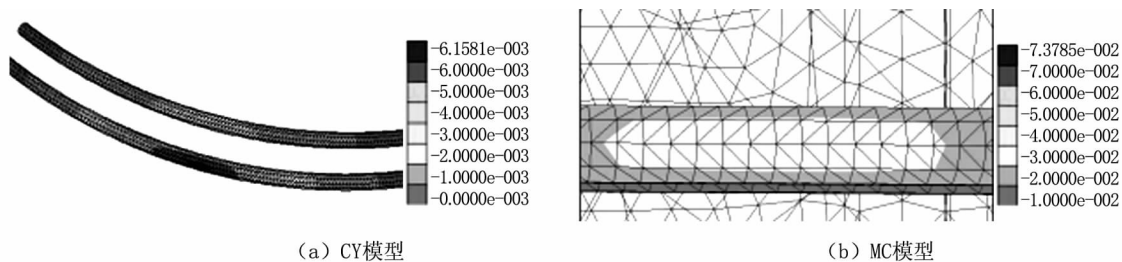


图6 建筑荷载引起的隧道竖向变形

Fig.6 Vertical deformation of the tunnel caused by construction load

2.4.2 建筑荷载对周边地铁变形影响

图6是拟建项目建筑荷载引起临近地铁结构的竖向变形云图,由计算结果可见,两种本构模型对于既有地铁隧道的变形影响差别较大。CY模型方案中距离拟建项目较近的隧道结构受建筑荷载影响最大竖向沉降仅为6.16 mm;而MC模型方案隧道结构最大竖向沉降达到20.40 mm,远大于CY模型的计算值。

2.4.3 拟建项目周边地表变形分析

提取断面1-1上的地表沉降曲线进行分析,如图7所示,由计算结果可见:

(1)两种分析模型中,距离基础外边缘60 m附近的地表沉降均可忽略不计,因此可认为两本构模型计算得到的地面沉降影响范围是一致的,均为3倍的基础埋深。

(2)两种分析模型计算的基础外边缘处地表沉降差别较大:CY模型方案得到的沉降为6.17 mm,而MC模型为30.82 mm。

综合图5—图7分析可见,CY模型计算得到的基础沉降、地铁变形及地表沉降结果均远小于MC本构模型。这是由于采用MC模型方案时,基础边缘部位与土体形成连续介质,建筑荷载影响

的地铁隧道及周边土体变形连续、沉降值较大;采用CY模型使得基础与土体界面部位为非连续介质,引起基础与土体变形不连续,导致建筑荷载引起的周边影响较小。依据北京地区类似工程经验,基础外围土体选择CY模型进行计算,得到结果更为合理。

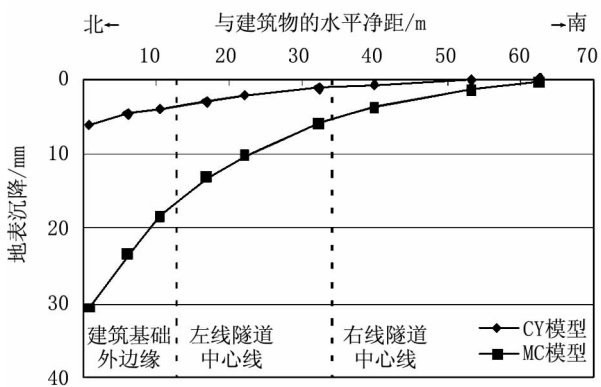


图7 拟建项目周边地表沉降曲线

Fig.7 Surface subsidence around the proposed project

3 结论

拟建建筑周边土体采用MC模型和CY模型,建筑荷载对周边土体的影响范围是一致的;但建

筑荷载对影响范围内的地面及地铁结构的竖向沉降差异较大,CY模型得到的计算结果远小于MC模型。依据北京地区的工程经验,认为基础外围土体选择CY模型更为合理。

参考文献:

- [1]段伟,赵兵帅,陆晓勇,等.地铁隧道全断面监测数据的建模及断面拟合算法的研究[J].勘察科学技术,2016(2):16-19.
- [2]吕连勋,李廷春,陈伟,等.地面超载条件下覆跨比对浅埋隧道稳定性的影响[J].河南大学学报:自然科学版,2015,45(3):373-378.
- [3]王萍.地铁基坑开挖中建筑物差异沉降影响分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):25-28.
- [4]吴秀强.紧邻地铁的建筑深基坑施工变形综合控制技

术研究[J].建筑施工,2014(6):638-640.

- [5]戴宏伟,陈仁朋,陈云敏.地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J].岩土工程学报,2006,28(3):312-316.
- [6]杨栋,黄茂松,钱建固.地面加载对临近软土地铁隧道变形曲率的影响分析[C]//第六届全国青年岩土力学与工程会议暨岩土工程系列学术研讨会论文集.上海,2007,253-256.
- [7]闫静雅,张子新,黄宏伟,等.桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J].岩土力学,2008,29(9):2508-2514.
- [8]张晓婷.摩尔库仑模型与CYsoil模型的计算比较[J].科教文汇,2014(10):68-74.

(责任编辑 王利君)

(上接第16页)性系数逐渐增加,并且呈线性增加的趋势,可以得出加固深度对于稳定性系数的影响与其他因素的相关性较小。

根据以上分析,为了了解浓度为20%的固化剂在添加前后对于稳定系数的影响,选取了加固深度为30cm,比较在三种坡比模型中稳定性系数的增加比例。

表3 稳定性系数增加比例
Tab.3 Coefficient of stability

边坡坡比	未加固	加固后	增加比例
1:1.5	2.710	2.721	0.406%
1:1	2.370	2.381	0.464%
1:0.8	2.200	2.211	0.500%

由表3可以看出,当坡比为1:1.5时,增加比例为0.406%;当坡比为1:0.8时,增加比例为0.500%;当坡比为1:1时,增加比例为0.464%,由此可见,当边坡坡比越小时,即原坡面稳定性系数越小时,加固后稳定性系数增加的比例越小。

4 结论

1)高分子固化剂的加固机理是高分子在坡面固结成膜,植被根系的加固作用将更有利于提高边坡的稳定性。

2)高分子固化剂对土质边坡加固后,会一定程度地提高边坡的稳定性,对于提高边坡稳定性具有积极作用。

3)在相同边坡坡比的情况下,相同的加固深度,固化剂浓度越大,边坡的稳定性系数越大;相同的固化剂浓度,随着加固深度不断增加,稳定性系数呈线性增加。

4)加固深度对于稳定性的影响受其他因素相关性小,而固化剂浓度对于稳定性的影响受本身稳定性系数影响,与其他因素相关性较大。

参考文献:

- [1]周利恩,尚彦,余建新.工程边坡生态防护技术[J].云南农业大学学报,2006,21(4):517-522.
- [2]边博,李磊,周凌辉.砌块式生态护坡实施的生态效应研究[J].环境科学与技术,2014,37(4):26-30.
- [3]沈飞,曹净,曹慧.土壤固化剂的发展现状及其前景展望[J].矿产勘查,2008,(8):62-66.
- [4]李浩,陈小薇,王选仓.环保型改性高分子材料固沙剂实用性能研究[J].科学技术与工程,2014,14(26):144-148.
- [5]柴寿喜,王沛,韩文峰,等.高分子材料固化滨海盐渍土的强度与微结构研究[J].岩土力学,2007,28(6):1067-1072.
- [6]单志杰,张兴昌,赵伟霞,等.EN-1固化剂对土壤抗蚀性的影响[J].水土保持学报,2010,24(5):6-9.
- [7]李建法.新型高分子沙土稳定材料的研制与应用[D].北京:中国林业科学研究院,2003.
- [8]LIU Jiankun, ZHANG Jiangnan, CHEN Mengqiao, et al. Experimental Study on Dynamic Properties of Clay Modified by Aught-Set Solidifying Agent Subjected to Freeze-Thaw Cycles[C]//American Society for Testing and Materials Special Technical Publications, 2013(1568):86-94.
- [9]ATTOM M F, MUNJED M A. Soil stabilization with burned olive waste[J]. Applied Clay Science, 1998, 13(3):219-230.

(责任编辑 李军)