

文章编号: 1000 - 7598 - (2006) 09 - 1622 - 06

中膨胀土 CMA 改性室内试验研究

余 颂, 陈善雄, 许锡昌, 余 飞

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: CMA 是一种新型膨胀土生态改性剂, 依托合(肥)一六(安)一叶(集)高速公路工程, 对 CMA 改性后中膨胀土的基本物理性质、击实特性、胀缩特性、力学特性等进行了 3 种配方的室内对比试验研究。结果表明, 中膨胀土经 CMA 改性后, 其自由膨胀率由改性前的 71 % 下降到 20 % 左右, 液限和塑性指数也显著降低, 亲水能力大幅度下降; 胶粒含量明显下降, 粉粒含量增加, 说明改性后粒度组成已接近粉土; 各项胀缩性指标较改性前也有大幅度下降, 无荷膨胀率约为改性前的 2 %, 膨胀力约为改性前的 5 %; 改性土的 CBR 值可达 50 %, 浸水变形不到 1 %; 在非饱和和饱水状态下, 改性土都具有较高的抗剪强度和无侧限抗压强度, 说明改性后其水稳定性较好。经对比分析, 认为 1[#]配方改性效果最好, 较适用于合肥膨胀土的改性处理。

关 键 词: 中膨胀土; CMA; 改性剂; 配方

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Laboratory test study on CMA-treated expansive soils

YU Song, CHEN Shan-xiong, XU Xi-chang, YU Fei

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: As a kind of new ecological modifier, CMA has good application prospect. Based on Hefei—Luan—Yeji Expressway Project, laboratory comparative tests on basic physical, compacted, swelling-shrinkage and mechanical characteristics of CMA-treated expansive soils have been carried out. Compared with unmodified sample, the free swelling ratio of the modified samples lowers from 71 % to about 20 %; its liquid limit and plastic index also decrease obviously; hydrophilic nature falls down by a wide range as well as micelle content, but silt content increases sharply. The results also indicate that index for swelling-shrinkage property has reduced, swelling ratio without load is 2 %—3 % and swelling power is 5 % of those without modifying. The value of CBR reaches 50 % and deformation is small when soaked; soils have a high shear strength and unconfined compressive strength whether saturated or not, and possess better water stability. Conclusion can be drawn that CMA can change the properties of expansive soils notably and the first formula is suitable for Hefei expansive soils for its good treating effect.

Key words: middle expansive soils; CMA; ecological modifier; formula

1 引 言

膨胀土是颗粒高分散、成分以黏土矿物为主、对环境的湿热变化敏感的高塑性黏土, 是一种典型的非均匀三相介质。土质干湿效应明显, 吸水时, 土体膨胀、软化, 强度下降; 失水后土体收缩, 随之产生裂隙。裂隙的存在破坏了土体的整体性, 降低了土体的强度, 同时为雨水的侵入和土中水分的蒸发开了方便之门, 于是天气的变化进一步导致了土中含水量的波动和胀缩现象的反复发生, 因此其工程性质极差^[1~4]。当其用作路基填料时, 需要进行

改良处理。目前膨胀土主要采用石灰进行改良^[2, 5], 膨胀土掺灰后产生新的胶结物, 黏粒含量降低, 能将膨胀土改性为非膨胀土。但这种方法对环境的污染大, 而且施工难度大。

近年来, 武汉中财科贸公司开发研制出一种新的膨胀土改性剂(CMA), 为探讨该改性剂在合肥地区膨胀土处治问题中的可行性, 依托合(肥)一六(安)一叶(集)高速公路, 选取典型中膨胀土进行系统的室内改性试验研究, 希望能对合肥中膨胀土的处治有所借鉴。

收稿日期: 2005-06-24

作者简介: 余颂, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 主要从事非饱和土工程性质的研究。Email: songy615@163.com.

2 CMA 改性剂简介

CMA(changing the Montmorillonite's Absorbent) 改性剂应用于膨胀土地基与边坡的治理时能起到较好的效果, 其原理是利用改性剂和少量石灰掺配成水溶液, 水分子被离解成 H^+ 和 OH^- , 从而与膨胀土表面吸附的阳离子进行交换, 使吸附在土粒上的水化学键破坏形成自由水, 使石灰土形成键状和网状结构, 以加快反应和离子交换, 水分通过重力、蒸发和压实作用排出, 减弱膨胀土的膨胀势能, 改变膨胀土颗粒胶结特性, 从而提高土体的抗剪强度, 永久地改变膨胀土属性, 将膨胀土改性为非膨胀土。CMA 与其它的胶合材料不同, 自身与土粒并不结合, 且具有再生功能, 它与膨胀土作用时其总量并不减少, 功效也不会随着时间的推移而逐渐减弱, 相反, 只要膨胀土中有水分, 它的功效就会继续下去, 这种作用是永久的、不可逆的。

CMA 改性剂为中性水溶液, 其 PH 值界于 6~7 之间, 无腐蚀性, 无污染, 能解决膨胀土的水稳定性问题, 增加土的强度, 并大幅度降低工程造价, 简化了施工工序, 施工时只须将改性剂洒入膨胀土表面即可, 施工性好, 工期短。

3 土样采集和试验说明

土样采集于合—六一叶高速公路 k44+020 桩号附近(安徽省肥西县), 取土深度 0.3~0.5 m, 为棕黄色黏土, 自然状态下呈半坚硬状态, 滑感较强, 肉眼可看到少量的钙质结核。

室内土工试验按《公路土工试验规程》(JTJ051-93)^[6] 进行, 击实试验采用重型击实试验法(锤质量 4.5 kg, 落高 45 cm, 每层 98 击), 备样采用干土法(土不重复使用), 加州承载比(CBR)试验、无侧限抗压强度试验采用绍兴路友公路仪器厂生产的 LD- 型路强仪, 直剪试验采用应变控制式四联直剪仪。

4 膨胀土填料物理力学性质

对取回的土样进行了基本特性试验, 其物理性质指标见表 1。

表 1 表明: 该土样自由膨胀率、液限、塑性指数、<0.002 mm 胶粒含量均较高, 根据《公路路基设计规范》(JTJ D30-2004)^[5] 推荐的分类标准, 综合判定其为典型中膨胀土。

对该土样还进行了击实试验、胀缩性试验和力

学性质试验, 胀缩性试验采用环刀(面积 30 cm²、高 2 cm)压实样, 将风干土配置到最优含水量附近, 闷一天后采用静压法将一定质量的土样在制模器内压实至最大干密度对应的状态。力学性质试验包括 CBR 试验、饱水非饱水状态下的无侧限抗压强度试验和直接剪切试验, 以上结果见表 2~表 5 所示。

从表 2 可以看出, 该土样在最优含水量附近压实至最大干密度对应的状态时, 膨胀性极强, 如不加处理直接用于填筑路堤, 虽然压实度可以达到要求, 但存在着极大的遇水膨胀变形危害, 干燥时亦会产生一定的收缩变形, 其工程性质极其恶劣。

表 3 试验结果表明: 该土样具有较强的吸水膨胀软化特性, 因其具有较大的膨胀潜势, 在低含水量条件下, 浸水膨胀后土样结构将发生严重破坏, 强度指标会大幅度降低; 在高含水量条件下, 尽管浸水膨胀量很低, 但其压实度也很低, 在较高和较低含水量条件下, 其 CBR 值均低于 3%, 不能满足路基对填料的强度要求^[5,7]。

分析表 4, 表 5 可以发现, 压实中膨胀土饱水时强度衰减幅度大, 水稳定性很差。若用于填筑路堤, 需要对该膨胀土进行改性处理, 或对堤身采取适当的防护措施如包边, 以达到防水、防风化的目的。

5 中膨胀土 CMA 改性试验

针对压实中膨胀土胀缩变形严重以及浸水强度衰减幅度大这一特点, 对该土样进行了 3 种不同配比的 CMA 改性试验, 以探讨改性土的基本物性、击实特性、胀缩特性、力学特性, 进而确定适合本地区的 CMA 改性配方。

5.1 改性土的基本物理性质

改性后土样的基本物理性质指标见表 6。

从表 6 可以看出, 自由膨胀率从改性前的 71% 下降到 20% 左右, 已不具备膨胀土的基本特征; 塑性指标相对于改性前有明显的改善, 液限含水量降低显著(降低 6.7%~11.4%), 塑限含水量明显升高(升高 7.7%~10.1%), 塑性指数最高从改性前的 40.4 降低到 21.3, 可见其亲水性能已大幅度下降; 就颗粒分析试验的结果来看, <0.002 mm 的胶粒含量明显减少(分别从 40% 减至 24%, 18%, 19%), 而 0.074~0.005 mm 的粉粒含量增加(从 48.8% 增至 59.3%, 65.3%, 61.3%), 表明改性后土的胶粒含量下降, 粉粒含量增加, 膨胀土改性后粉土化, 其分散性较好, 活动性和亲水性较低, 改性效果明显。

表1 膨胀土物性指标

Table 1 Indexes for physical characteristics of expansive soils

类别	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p	颗粒分析粒径大小及含量/%			土定名
					0.074~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	
棕黄色土	71	68.2	27.8	40.4	48.8	10	40	CH

表2 压实膨胀土胀缩性指标

Table 2 Indexes for swelling-shrinkage of compacted expansive soils

土类	含水量 /%	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	无荷膨胀率 /%	50 kPa 下膨胀率 /%	膨胀力 /kPa	收缩系数	体缩率 /%	缩限 /%	胀缩总率 /%
中膨胀土	19.2	1.74	28.1	6.6	433	0.35	9.4	9.0	6.6

注：胀缩总率计算中取工作系数 K 为 0.78。

表3 膨胀土 CBR 试验结果

Table 3 Results of CBR tests for expansive soils

类别	浸泡前		浸泡后		膨胀量 /%	CBR /%
	含水量 /%	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	含水量 /%	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$		
中膨胀土	19.2	1.737	22.8	1.673	3.9	2.7
	28.5	1.479	28.8	1.466	0.9	2.5

表4 压实膨胀土直接剪切试验结果

Table 4 Results of direct shear tests for compacted expansive soils

土类	含水量 /%	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	不同垂直压力下的剪应力/kPa				抗剪强度指标		说明
			25	50	75	100	c /kPa	φ /°	
中膨胀土	19.2	1.74	224.6	264.6	253.2	280.1	216.9	31.8	未饱和
	34.3	1.39	19.6	28.9	33.4	39.0	14.6	14.1	饱和

表5 压实膨胀土无侧限抗压强度指标

Table 5 Indexes for unconfined compressive strength of compacted expansive soils

土类	含水量 /%	干密度 / $g \cdot cm^{-3}$	无侧限抗压强度 /kPa	饱和无侧限抗压强度 /kPa	软化系数
中膨胀土	19.2	1.74	973.6	29.1	0.03

注：软化系数定义为饱水后与饱水前的无侧限抗压强度的比值。

表6 改性土基本性质指标

Table 6 Indexes for characteristics of CMA-treated expansive soils

土类	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p	颗粒分析粒径大小及含量/%		
					0.074~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm
改1 [#]	21	56.8	35.5	21.3	59.3	14	24
改2 [#]	22	58.9	36.2	22.7	65.3	13	18
改3 [#]	19	61.5	37.9	23.6	61.3	12	19

5.2 改性土的击实特性

对改性土进行了重型击实试验，为全面把握膨胀土改良前后最大干密度和最优含水量变化规律，同时给出了改性前的击实试验结果。改性前后的击实曲线如图1，对应指标如表7所示。

由以上图表可知，3种改性土的最优含水量较改性前均有不同程度提高，最大干密度明显降低，这是因为改性后土体颗粒联结减弱，很难压实到改

性前的密实状态，并且这种状态需要在含水量较高、土体联结稍强时获得。

5.3 改性土的胀缩特性

改性土的胀缩性试验内容和方法同前，由于压实土的胀缩性与含水量和干密度密切相关，故表8给出了最佳含水量和最大干密度对应条件下压实改性土的胀缩性指标。

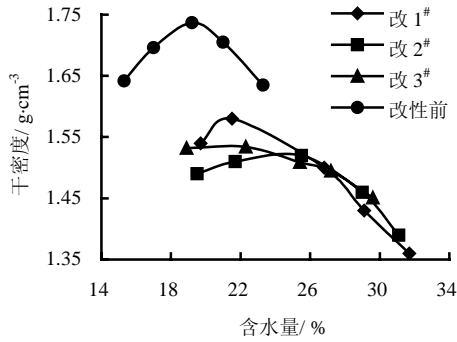


图 1 改性前后干密度与含水量变化关系
Fig.1 Relation between dry density and water content before and after changing properties

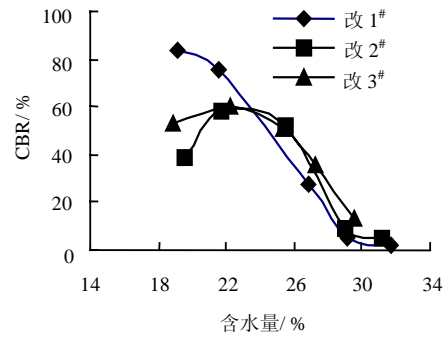


图 2 改性土 CBR 与起始含水量变化关系
Fig.2 Relation between CBR and initial water content of CMA-treated soils

表 7 CMA 改性土的击实特性指标
Table 7 Indexes for compacted behaviors for CMA-treated soils

土类	最优含水量 / %	最大干密度 / g · cm ⁻³
素土	19.2	1.74
改 1#	22.3	1.58
改 2#	24.5	1.52
改 3#	22.3	1.53

表 8 改性稳定土胀缩特性指标

Table 8 Indexes of swelling-shrinkage behaviors for soils stabilized with CMA

改性配方	含水量 / %	无荷膨胀率 / %	有荷膨胀率 / %	膨胀力 / kPa	收缩系数	体缩率 / %	缩限 / %	胀缩总率 / %
改 1#	22.3	0.45	-0.12	—	0.10	4.0	5.5	-0.12
改 2#	24.5	0.75	-0.20	33	0.14	5.7	8.6	-0.20
改 3#	22.3	0.43	-0.23	23	0.14	7.2	9.2	-0.23

注：胀缩总率计算中取工作系数 K 为 0.78。

从表 8 可以看出，同样处于最优含水量和最大干密度条件下，3 种改性土的各项胀缩性指标较改性前均有大幅度下降，无荷膨胀率锐减为改性前的 2%，有荷膨胀率变为负值，膨胀力约为改性前的 5%，其他收缩指标均有不同程度的降低。可见 CMA 改性剂使膨胀土的胀缩性大幅度降低，工程性质得到很大程度的改善，水稳定性增强。

5.4 改性土的力学特性

(1) CBR 特性

为了解 3 种改性土的 CBR 值随含水量变化的规律、浸水前后强度衰减情况及水稳定性，开展了不同含水量下的 CBR 试验，试验结果见图 2、3 和表 9。

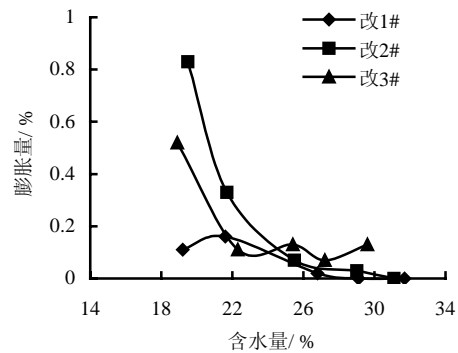


图 3 改性土膨胀量与起始含水量变化关系
Fig.3 Relation between swelling ratio and initial water content of CMA-treated soils

表 9 三种改性土 CBR 试验结果
Table 9 The results of CBR tests for three CMA-treated soils

类别	浸泡前		浸泡后		膨胀量 / %	CBR / %
	含水量 / %	干密度 / g · cm ⁻³	含水量 / %	干密度 / g · cm ⁻³		
改性土 1	19.7	1.544	22.8	1.543	0.11	83.4
	21.6	1.578	22.9	1.576	0.16	76.0
	26.8	1.496	27.5	1.496	0.02	27.4
	29.1	1.428	29.8	1.428	0	4.7
改性土 2	19.5	1.490	27.1	1.485	0.83	39.2
	21.7	1.506	25.3	1.494	0.33	58.4
	25.5	1.521	26.2	1.520	0.07	52.0
	29.0	1.462	29.9	1.461	0.03	9.2
改性土 3	31.1	1.395	31.9	1.395	0	5.0
	18.9	1.532	27.1	1.524	0.52	52.9
	22.3	1.534	27.3	1.533	0.11	60.3
	25.4	1.509	27.9	1.508	0.13	51.0
	27.2	1.495	28.4	1.494	0.07	35.9

从表 9 可以看出：

① 3 种 CMA 改性土的 CBR 值随含水量变化曲线类似于对应的击实曲线，最优含水量与 CBR 最大值对应的含水量相差较小，说明改性后，压实

度要求和强度 (CBR) 要求可以达到一致;

② 土样 CBR 值有较大的提高, 最优含水量条件下其 CBR 值超过 50%, 当含水量在最优含水量 $\pm 5\%$ 范围内进行碾压时, 均可满足填筑上下路床的要求;

③ 改性土的吸水膨胀率低于 1%, 相对于改性前土样明显减小, 说明 CMA 改性土的水稳定性较好。当起始含水量较低时 ($< 22\%$), 由于吸力较大, 浸水后含水量有一定程度的增长; 但起始含水量上升到最优含水量以后, 浸水前后含水量变化不大 ($< 1\%$), 干密度变化很小。当起始含水量超过最优含水量 5% 时, CBR 值急剧减小, 这是由于过高的含水量降低了改性剂的浓度, 影响了改性效果。

所以, 现场进行 CMA 改性时, 应避免在填土含水量较高条件下喷洒 CMA 改性剂。

(2) 改性土的抗剪强度特性

对改性土抗剪强度特性的研究通过采用压制样进行不同垂直压力下直接快剪试验 (饱水、非饱水状态) 来完成, 土样制备采用风干土配置到最优含水量, 闷料 1 d 后压实到最大干密度。表 10 给出了直接剪切试验结果。

表 10 CMA 改性土直接快剪试验结果

Table 10 Direct shear test results of CMA-treated soils

土类	不同垂直压力下的剪应力 / kPa				抗剪强度指标		说明
	25	50	75	100	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$	
改 1 [#]	161.7	164.0	169.1	169.8	158.9	6.7	未饱和
	103.6	120.6	140.5	165.2	81.3	39.3	饱和
改 2 [#]	77.0	86.8	126.2	137.7	51.7	41.5	未饱和
	26.9	82.0	104.8	126.2	34.8	50.8	饱和
改 3 [#]	58.1	115.8	138.2	144.5	43.7	48.4	未饱和
	68.2	84.4	126.2	119.3	50.8	38.0	饱和

从表 10 可以看出, 3 种改性土的抗剪强度在饱水后下降幅度不大, 说明其水稳定性好, 遇水后强度不会发生明显的衰减。

(3) 改性土的无侧限抗压强度特性

对 3 种改性土进行了无侧限抗压强度试验, 试验仍取饱水非饱水两种状态, 以确定改性土浸水后强度衰减程度, 试验结果见表 11。

表 11 CMA 改性土无侧限抗压强度指标

Table 11 Indexes for unconfined compressive strength of CMA-treated soils

CMA 配方	含水量 / %	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	无侧限抗压强度 / kPa	饱和和无侧限抗压强度 / kPa	软化系数
改 1 [#]	22.3	1.58	532.6	332.9	0.63
改 2 [#]	24.5	1.52	289.8	210.7	0.73
改 3 [#]	26.2	1.62	602.2	161.1	0.27

表 11 说明, 改性土的无侧限抗压强度在饱水后不会大幅度下降, 改性土的水稳定性好, 遇水强度不会发生明显的衰减。

5.5 膨胀土 CMA 改性配合比建议

从以上讨论可以看出:

(1) 经 CMA 改性后 3 种改性土的液限降低, 塑限增加的幅度较大, 相应塑性指数明显减小, 自由膨胀率也明显减小, 细粒、黏粒含量减少, 最佳含水量增大, 最大干容重降低, 且改性土的胀缩性指标都有明显减小, 说明 3 种改性配比均可起到较好的改性作用;

(2) 相比较而言, 在最优含水量条件下, 改 1[#] 的 CBR 值最大, CBR 膨胀量最小, 而改 2[#] 的 CBR 膨胀量相对较大; 改 3[#] 饱水后无侧限抗压强度下降较多, 湿化崩解现象较突出。综合考虑各项指标, 我们认为改 1[#] 配方适用于本地区中膨胀土改性, 尤其适于路基和路堑边坡的防护; 当用于中膨胀土改性填筑时, 压实含水量按最优含水量 $\pm 3\%$ 控制为宜。

所以, 通过室内试验可以看出, 改 1[#] 配方更适用于合—六—叶高速公路膨胀地区的膨胀土改性。

6 结 论

通过开展系统的室内试验研究, 对 CMA 改性土的基本物理特性、压实特性、胀缩特性、强度特性进行了探讨, 得出以下几个方面的结论:

(1) 改性土吸附水的能力减小, 膨胀潜能明显减弱。

(2) CMA 改性后, 最优含水量较改性前有不同程度提高, 最大干密度降低。

(3) 改性土土体胀缩变形减小, 工程性质得到较大程度的改善。

(4) 改性土的 CBR 值随含水量变化曲线类似于击实曲线, 最优含水量条件下其 CBR 值均大于 50%, 其吸水膨胀率相对于改性前土样明显减小。最优含水量与 CBR 最大值对应的含水量相差较小, 说明改性后压实度要求和强度 (CBR) 要求可以达到一致。

(5) 当起始含水量超过最优含水量 5% 时, CBR 值急剧减小, 这是由于过高的含水量降低了改性剂的浓度, 影响了改性效果。所以, 现场进行 CMA 改性时, 应避免在填土含水量较高条件下喷洒 CMA 改性剂。

(6) CMA 改性中膨胀土的抗剪强度、无侧限抗压强度试验表明, 改性土具有较高的强度, 且饱

水后其强度衰减较小, 具有较高的浸水强度。可见 CMA 改性中膨胀土具有良好的水稳定性。

(7) 综合考虑各项指标, 我们认为改 1[#]配方适用于本地区中膨胀土改性; 当用于中膨胀土改性填筑时, 压实含水量按最优含水量 $\pm 3\%$ 控制为宜。

致谢: CMA 的改性工作得到了武汉中财科贸公司的大力支持, 在这里表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [2] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土工程特性及其石灰改

性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊): 9—12.

CHEN Shan-xiong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental research on engineering properties of expansive soil and lime stabilized soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(Supp.): 9—12.

- [3] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 9.
- [4] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [5] JTG D30-2004, 公路路基设计规范[S].
- [6] JTJ 051-93, 公路土工试验规程[S].
- [7] 郭兴伦, 秦诗平. 膨胀土作为路堤填料的应用探讨[J]. 交通科技与经济, 2004, (6): 13—14.
GUO Xing-lun, QING Shi-ping. Discussion of Application of Expanding Soil to the Road Bank Padding[J]. **Technology & Economy in Areas of Communications**, 2004, (6): 13—14.

上接第 1621 页

参 考 文 献

- [1] 刘祖德, 俞季民. 地基应力解除法的基本原理和工程实践效果[A]. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1991.
- [2] 王擎忠. 浅论软土地基中带桩基多层建筑倾斜纠偏技术[J]. 建筑技术开发, 1998, 25(2): 18—21.
WANG Qing-zhong. A correction technique for sloped multistoried buildings with pile foundation on soft ground[J]. **Building Technique Development**, 1998, 25(2): 18—21.
- [3] 杨敏, 朱碧堂. 堆载下土体侧移及对邻桩作用的有限元分析[J]. 上海: 同济大学学报, 2003, 31(7): 772—

777.

YANG Min, ZHU Bi-tang. Finite element method used in modeling lateral soil movement due to surcharge loads and its effect on adjacent piles[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(7): 772—777.

- [4] 魏焕卫, 杨敏. 大面积堆载情况下邻桩的有限元分析[J]. 工业建筑, 2000, 30(8): 30—33.
WEI Huang-wei, YANG Min. Finite element analysis of adjacent pile under extensive accumulation[J]. **Industrial Construction**, 2000, 30(8): 30—33.
- [5] Bransby M F, Springman S M. 3D finite element modelling of pile groups adjacent to surcharge loads[J]. **Computers and Geotechnics**, 1996, 19(4): 301—324.