

文章编号:1673-2049(2012)04-0120-07

# 垫层法处理大厚度填土地基时地基缺陷的影响

米海珍, 归娜

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为对巨厚(10 m 以上)人工堆填土地基处理时土层可能存在缺陷的影响进行评价,并采用三维有限元方法进行了数值模拟。以基底位移为影响结果,考虑以下几个因素:缺陷类型(位置、面积)、基础形式、荷载大小、垫层厚度。结果表明:筏板基础在基础形式中最优;缺陷面积相同时,缺陷分布越集中对垫层的危害越大;增加垫层厚度是有效的方法,但增大到一定值时效果有所下降,因此建议将改善垫层材料的整体性(强度、刚度)作为首要因素考虑。

**关键词:**地基缺陷;灰土垫层;基础形式;筏板基础;大厚度填土

**中图分类号:**TU473.2

**文献标志码:**A

## Influences of Foundation Defect on Large Thickness Fill Soil Foundation by Using Cushion Method

MI Hai-zhen, GUI Na

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** To assess the influence of potential defect on giant thick artificial filled soil foundation, the numerical simulation was carried out by using finite element method. The cushion bottom displacement was chosen as influence result, then the following factors including defect types (position, area), foundation form, load size and cushion thickness were considered. Results show that the raft foundation is the best in the all forms; the cushion get more unstable with additional concentration of the defect distribution. Although increasing cushion thickness is an effective method, the effect can reduced when the cushion thickness beyond a certain value. Therefore, authors suggest that the integrity (strength, stiffness) of cushion material can be considered as primary factor.

**Key words:** foundation defect; lime-soil cushion; foundation form; raft foundation; large thickness fill soil

## 0 引言

甘肃兰州某学校在一人工堆填土地基上兴建了1栋5层教学楼和2栋学生宿舍楼。该堆填土地基原始地貌为一小沟,宽约70 m,呈V字型,深度为12~19 m,在20多年间被堆填成平地,其中的堆填物较为混杂,有挖填的素土、部分建筑垃圾和少量生活垃圾。在选择基础形式时首先考虑了桩基,之后

由于成桩的困难及费用问题未采用,改用浅基础形式,该形式要求换填,换填时人工堆填土厚度太大,全部挖除不仅存在费用问题,并且倾倒塌所都无法解决,最后采用部分挖除后做垫层处理。教学楼采用筏板基础,其下垫层由2.0 m厚的二八灰土和2.4 m厚的素土(粉土)2层构成(由基底向下);2栋学生宿舍楼采用十字交叉基础,其下垫层为2.0 m厚的灰土和6.0 m厚的素土(粉土)2层构成。2栋

收稿日期:2012-06-07

作者简介:米海珍(1956-),男,甘肃镇原人,教授,工学博士,E-mail:mihaizhen@126.com。

学生宿舍楼(至今 8 年)正常使用,而教学楼在建成数月后即出现了地基下沉导致上部结构有大约 3° 的倾斜,此后对该地基进行灌浆加固处理,现在正常使用。

在城市建设规模扩大的情况下,类似的地基问题虽不普遍,但也时有出现<sup>[1-15]</sup>。对多层建筑而言,如果采用垫层法就必须考虑其安全性和经济性。从上面的例子可以看出学生宿舍楼的修建是成功的,但教学楼出现了地基下沉问题。处理这类问题一是加厚垫层,二是增强基础的整体性,需要考虑基础形式、垫层厚度和材料、荷载大小及垫层下地基的缺陷(位置、面积)等因素对基底(即垫层顶面)位移的影响。鉴于此,本文中笔者对该问题利用数值分析的方法进行探讨,希望得到一些规律,以便为实际工程提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 地基状况

当巨厚的杂填土地地不能全部挖除而采用垫层时,其下很难保证土质的均匀性,且极可能由于固结不均或垃圾土自身腐化形成不平的下垫面(即一些坑凹),将其称为缺陷。缺陷具有不同分布形状和不同面积,为方便分析,笔者将各种缺陷总结成 3 种最不利情形,见图 1,图 1 中阴影部分表示缺陷位置。用  $A$  表示缺陷面积,用  $S$  表示垫层底面面积, $f_1$  为 I 类缺陷宽度, $f_2, f_3$  分别为 II 类缺陷两端宽度, $f_4, f_5$  分别为 III 类缺陷长度和宽度。

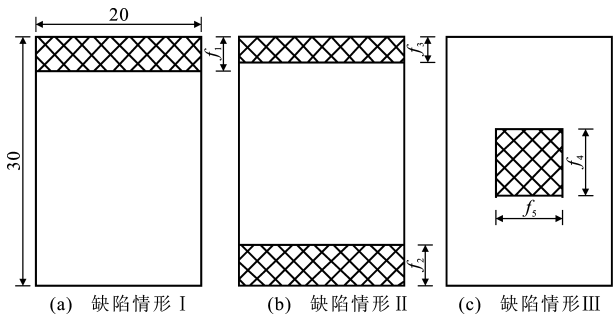


图 1 地基缺陷情形(单位:mm)

Fig. 1 Situations of Foundation Defect (Unit:mm)

### 1.2 基础形式及荷载

此种情形下的建筑物只能是多层,模拟 5~10 层建筑的总荷载  $N$ ,  $N$  的取值分别为 54, 63, 72, 81, 90, 99 MN, 共 6 级。基础形式选取了条形、十字交叉基础及筏板 3 种浅基础形式。

### 1.3 垫层设计及计算参数

垫层设为 2 层,下层为素土层,上层为灰土层,

二八灰土或三七灰土甚至水泥土均可。所有性质取决于其物理参数,本文中选用二八灰土。垫层尺寸为素土层厚度 3.0 m,二八灰土垫层厚度分别为 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 m,探讨不同厚度下垫层对消除层面位移的效果。参考文献[1],选取灰土及素土的物理力学参数,如表 1 所示,其中, $\rho$  为土体密度, $E$  为弹性模量, $\varphi$  为土的内摩擦角, $c$  为粘聚力, $\mu$  为泊松比。

表 1 垫层材料参数

Tab. 1 Cushion Material Parameters

参数	$\mu$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$c/\text{kPa}$	$E/\text{MPa}$
二八灰土	0.30	1.64	34.0	180	20
素土(夯实)	0.35	1.80	27.8	60	11

### 1.4 计算理论

选取理想弹塑性体作为灰土的本构模型,屈服条件采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。屈服函数  $f$  的表达式为

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin(\varphi) + \sqrt{J_2} \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) + \sqrt{\frac{J_2}{3}} \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) - c \cos(\varphi) = 0 \quad (1)$$

ADINA 有限元软件中模型通过屈服面在偏平面上外接 Mohr-Coulomb 不等角六边形确定了屈服函数  $f_{\text{MC}}$

$$f_{\text{MC}} = I_1 \sin(\varphi) + \frac{1}{2} \{ 3[1 - \sin(\varphi)] \sin(\theta) + \sqrt{3}[3 + \sin(\varphi)] \cos(\theta) \} \sqrt{J_2} - 3c \quad (2)$$

式中: $\theta = \frac{1}{3} \arccos(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}})$ ;  $I_1$  为应力第一不变量;  $J_2$  为偏应力第二不变量;  $J_3$  为偏应力第三不变量。

边界条件按如下情形给定:垫层顶面为应力边界条件,受基础的压力作用;四侧面为平动约束,底面地基完整部分为平动约束,缺陷部分为应力条件。

单元类型为三维实体单元。在模型网格划分时采用映射网格划分法,对每个网格单元体进行 8 节点六面体划分。计算工作中最多单元数为 4 800 个,最少单元数为 3 000 个。

## 2 计算结果

以垫层顶面(基底)向下  $z$  方向位移最大值  $\delta_{\text{max}}$  为参考量,选取缺陷类型和面积、荷载、基础形式及灰土垫层厚度作为变化参数。选取 2 m 厚的灰土垫层计算结果,通过各种情形下  $\delta_{\text{max}}$  与缺陷面积  $A$

和建筑荷载  $N$  之间的函数关系,来讨论基础形式的优劣以及不同缺陷位置对位移的影响。由计算结果可知,随着缺陷面积  $A$  和建筑荷载  $N$  的增大, $\delta_{\max}$  也随之增大,并且从位移云图可以看出, $\delta_{\max}$  均出现在缺陷上方对应处。

通过回归分析可知, $A$  与  $\delta_{\max}$  的关系可由下式表示

$$\delta_{\max}=aA^2+bA+c \tag{3}$$

$N$  与  $\delta_{\max}$  呈线性变化,其关系式为

$$\delta_{\max}=dN+e \tag{4}$$

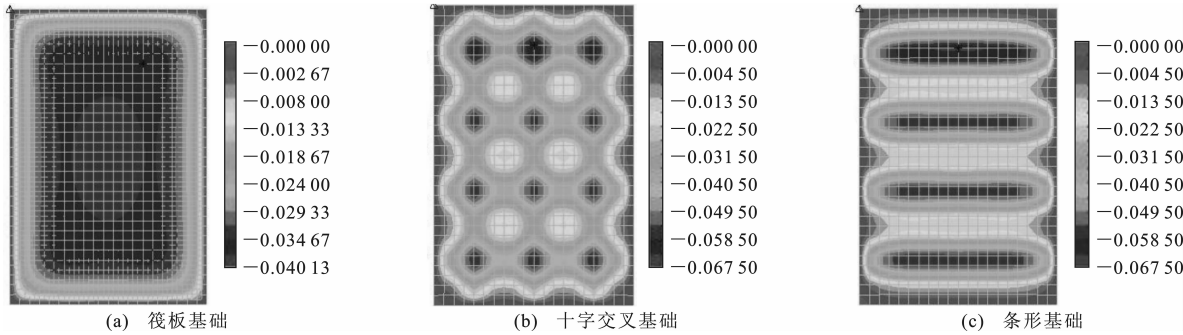


图 2 I 类缺陷下的垫层位移云图(单位:mm)

Fig. 2 Cushion Displacement Nephograms Under Defect I (Unit:mm)

对于图 3(a),(b)来说, $\delta_{\max}=a_1A^2+b_1A+c_1$ ,对于图 3(c),(d)来说, $\delta_{\max}=d_1N+e_1$ ,其中  $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$  的具体取值见表 2,3。由此可知,采用筏板基础的  $\delta_{\max}$  对  $N$  和  $A$  的变化最不敏感,条形基础的  $\delta_{\max}$  对 2 种参数的变化最敏感。

整理计算结果可知,在 3 种缺陷位置下,采用筏板基础的垫层  $\delta_{\max}$  始终是最小的,并且对  $N$  和  $A$  的变化最不敏感的是筏板基础下的垫层,最敏感的是条形基础下的垫层。同时可以发现  $N \geq 72 \text{ MN}, A \geq 0.166 \text{ 7S}$  后,采用条形基础和十字交叉基础的  $\delta_{\max}$  增幅变快;而在此之前,采用条形基础和十字交叉基础的垫层位移相差不大,几乎相等。可以判定,筏板基础是对垫层的稳定性最有利的基础形式。究其原因,是由于筏板基础刚度大、整体性强,压应力  $\sigma_z$  较为均匀。

2.2 不同缺陷类型的对比

筏板基础的垫层在  $N$  和  $A$  相同的情况下,处于不同缺陷情形的位移云图如图 4 所示。从图 4 可以看出,II 类缺陷下的垫层位移最小,III 类缺陷下的垫层位移最大。

图 5 为筏板基础下的垫层在  $N$  和  $A$  不同的情况下计算的部分结果。采取与上面相同的方法分析不同缺陷情况对垫层位移场的影响,以及  $N$  和  $A$  的变

式中: $a, b, c, d, e$  均为常数。

将垫层在 3 类缺陷情况下  $z$  方向位移  $\delta_{\max}$  的变化趋势整理成图、表,对比并确定不同情况下垫层位移对  $N$  和  $A$  变化的敏感性。

2.1 基础形式的优劣

在  $N$  和  $A$  相同的情况下,处于 I 类缺陷下的垫层位移云图如图 2 所示,其他情形的部分结果以坐标曲线的形式在图 3 中给出,以阐明 3 种基础形式的优劣以及  $N$  和  $A$  变化对不同基础形式下的垫层位移场的影响。

化对 3 种缺陷情形下的垫层位移场的影响。

由图 5(a),(b)可知, $\delta_{\max}=a_2A^2+b_2A+c_2$ ,由图 5(c),(d)可知, $\delta_{\max}=d_2N+e_2$ ,其中  $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2$  的具体取值见表 4 及表 5。根据计算结果对数据进行分析归纳,处于 II 类缺陷的  $\delta_{\max}$  始终最小,III 类缺陷的  $\delta_{\max}$  始终最大,同时对  $N$  和  $A$  的变化最不敏感,因此 II 类缺陷是对垫层危害最小的情况。

$\delta_{\max}$  在 III 类缺陷下比 I 类缺陷下要大,但当  $N > 81 \text{ MN}$  后,处于 I 类缺陷的垫层先于 III 类缺陷情况破坏,所以实际上 I 类缺陷对垫层危害最大。从力学理论上分析,这是由于处于 I, II, III 这 3 种缺陷的垫层均受偏心荷载作用,将模型简化后可以认为,缺陷 I 的力臂最大,缺陷 II 次之,缺陷 III 最小。

2.3 灰土垫层厚度对  $\delta_{\max}$  的影响

为探讨灰土垫层厚度  $h$  对  $\delta_{\max}$  的影响,将  $\delta_{\max}$  随  $h$  的变化分别绘制成在相同荷载  $N$  和相同缺陷面积  $A$  情况下的曲线图。选取部分筏板基础下  $\delta_{\max}$  随垫层厚度的发展曲线来演示整个变化,如图 6 所示。

由图 6(a),(b)可以看出,在  $A$  相同的情况下, $h$  与  $\delta_{\max}$  总体呈线性变化, $\delta_{\max}=a_3h+b_3$ ,其中  $a_3, b_3$  的具体取值见表 6。随着  $A$  的增大, $a_3$  由大于 0 逐渐变为小于 0,意味着  $h$  的增加同时也增加了  $\delta_{\max}$ ,说明土层自重亦有相当的影响,当  $A$  达到一定值后, $\delta_{\max}$

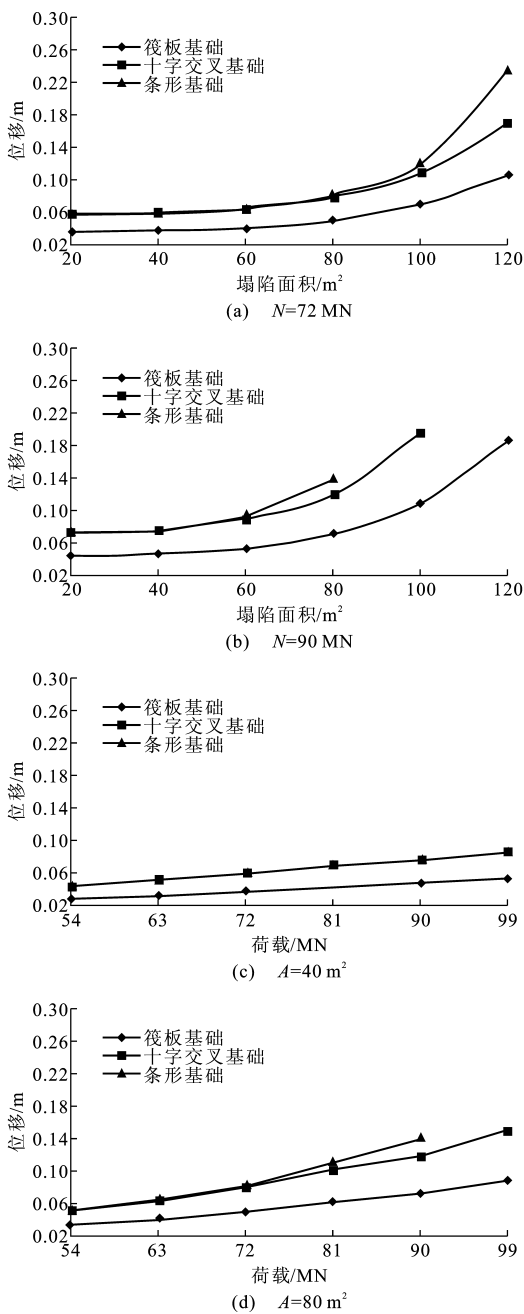


图 3 I 类缺陷下的位移发展曲线

Fig. 3 Displacement Development Curves Under Defect I

表 2  $a_1, b_1, c_1$  的取值

Tab. 2 Values of  $a_1, b_1, c_1$

图名	图 3(a)			图 3(b)		
	筏板基础	十字交叉基础	条形基础	筏板基础	十字交叉基础	条形基础
$a_1$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
$b_1$	-0.000 9	-0.001 5	-0.002 8	-0.001 8	-0.002 1	-0.001 7
$c_1$	0.051 3	0.085 4	0.109 7	0.078 5	0.108 0	0.095 9

泥土。

该工程问题是笔者近几年所遇到的,通过所举工程实例可以看出,既有成功的例子(学生宿舍楼)

亦有失败的例子(教学楼)。以上的认识仅是规律性的,模拟计算工作由于受各种因素(边界条件、荷载作用形式、材料模型和参数等)影响,又无一定数量

表 3  $d_1, e_1$  的取值  
Tab.3 Values of  $d_1, e_1$

图名	图 3(c)			图 3(d)		
基础类型	筏板基础	十字交叉基础	条形基础	筏板基础	十字交叉基础	条形基础
$d_1$	$6\times 10^{-7}$	$9\times 10^{-7}$	$1\times 10^{-6}$	$1\times 10^{-6}$	$2\times 10^{-6}$	$2\times 10^{-6}$
$e_1$	-0.004 6	-0.008 0	-0.010 2	-0.035 5	-0.072 1	-0.091 0

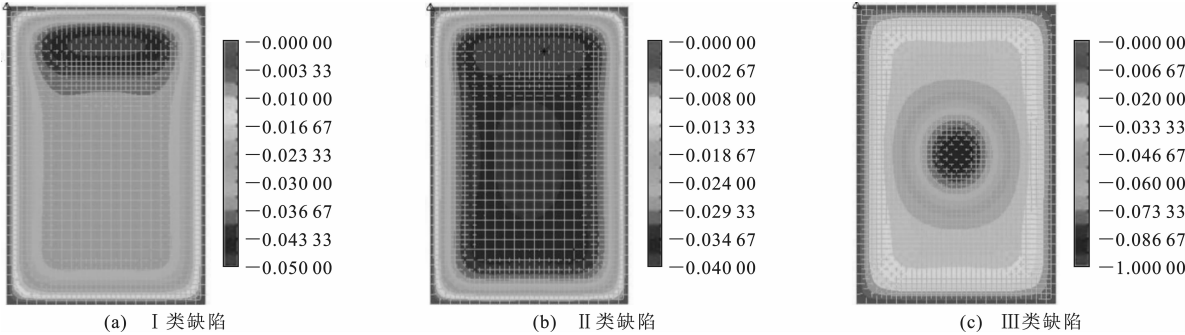


图 4 筏板基础下垫层在不同缺陷类型下的位移云图(单位:mm)  
Fig.4 Displacement Nephograms of Raft Foundations Varied with Defect Types (Unit:mm)

表 4  $a_2, b_2, c_2$  的取值  
Tab.2 Values of  $a_2, b_2, c_2$

图名	图 5(a)			图 5(b)		
缺陷类别	I	II	III	I	II	III
$a_2$	$2\times 10^{-5}$	$1\times 10^{-5}$	$2\times 10^{-5}$	$2\times 10^{-5}$	$2\times 10^{-5}$	$4\times 10^{-5}$
$b_2$	-0.001 3	-0.001 5	-0.000 8	-0.001 4	-0.002 2	-0.001 4
$c_2$	0.034 8	0.034 8	0.034 8	0.058 0	0.056 0	0.056 7

表 5  $d_2, e_2$  的取值  
Tab.3 Values of  $d_2, e_2$

图名	图 3(c)			图 3(d)		
缺陷类别	I	II	III	I	II	III
$d_2$	$8\times 10^{-7}$	$6\times 10^{-7}$	$1\times 10^{-6}$	$2\times 10^{-6}$	$1\times 10^{-6}$	$4\times 10^{-6}$
$e_2$	-0.014 2	-0.004 6	-0.024 0	-0.079 6	-0.035 5	-0.169 4

表 6  $a_3, b_3$  的取值  
Tab.6 Values of  $a_3, b_3$

图名	图 6(a)						图 6(b)					
N/MN	54	63	72	81	90	99	54	63	72	81	90	99
$a_3$	0.004 00	0.004 60	0.005 30	0.005 90	0.006 30	0.006 60	0.000 04	-0.001 40	-0.004 10	-0.010 40	-0.018 50	-0.019 20
$b_3$	0.018 5	0.022 2	0.026 0	0.030 7	0.034 2	0.039 1	0.032 3	0.042 8	0.057 8	0.083 5	0.111 2	0.126 0

表 7  $x$  的取值  
Tab.7 Values of  $x$

缺陷类别	不同基础形式的 $x$ 取值		
	筏板基础	十字交叉基础	条形基础
I	13.33	10.00	7
II	16.67	13.33	0
III	10.00	0.00	0

的工程实例验证,故不敢妄断其定量结果,但相信定性规律是正确的,以便为今后的工程实践提供一个依据。

参考文献:  
References:

[1] 米海珍,胡燕妮. 兰州石灰土工程性质的试验研究[J]. 建筑科学,2009,25(1):55-58.  
MI Hai-zhen,HU Yan-ni. Experimental Study on Engineering Property of Lime-loess in Lanzhou [J]. Building Science,2009,25(1):55-58.

[2] 刘有科. 灰土强度影响因素及其本构关系的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.  
LIU You-ke. Reaserch on the Influence Factors in

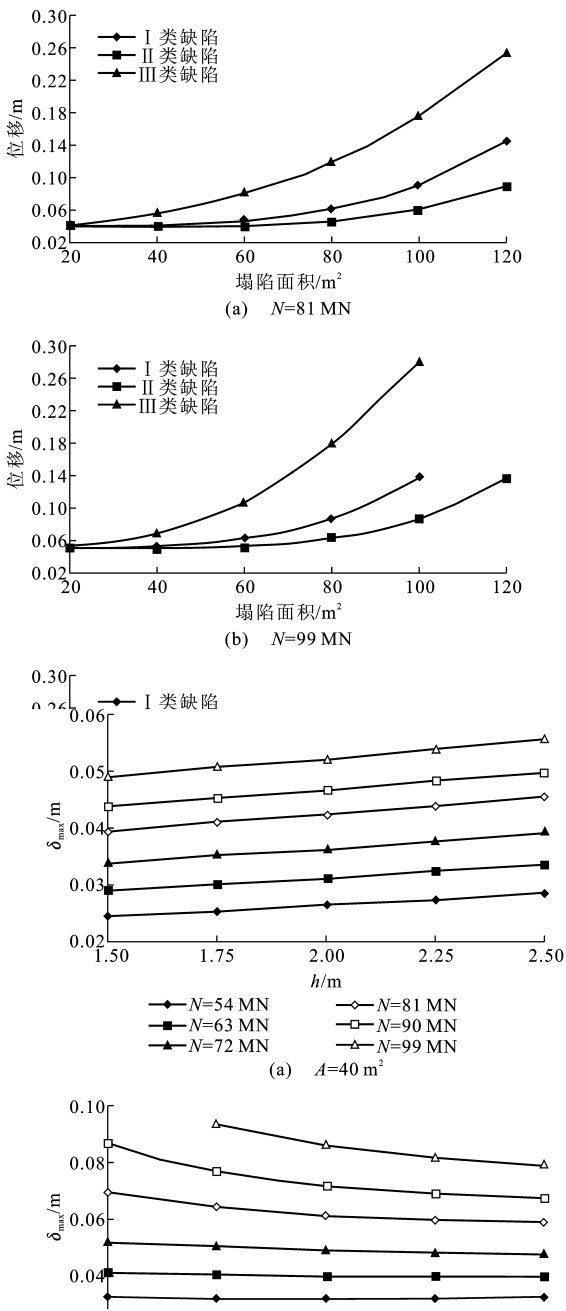


图 5 筏板基础在不同缺陷类型下的位移发展曲线

Fig. 5 Displacement Development Curves of Raft Foundations Under Different Defect Types

Strength and the Constitutive Relationship of Lime-loess[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2004.

[ 3 ] 韩晓雷, 郅彬, 郭志勇, 等. 灰土强度影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 667-669.  
HAN Xiao-lei, ZHI bin, GUO Zhi-yong, et al. Research on the Principal Factors in Strength of the Lime-loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 667-669.

[ 4 ] 胡德华, 庄芸. 换填垫层地基强度与设计研究[J].

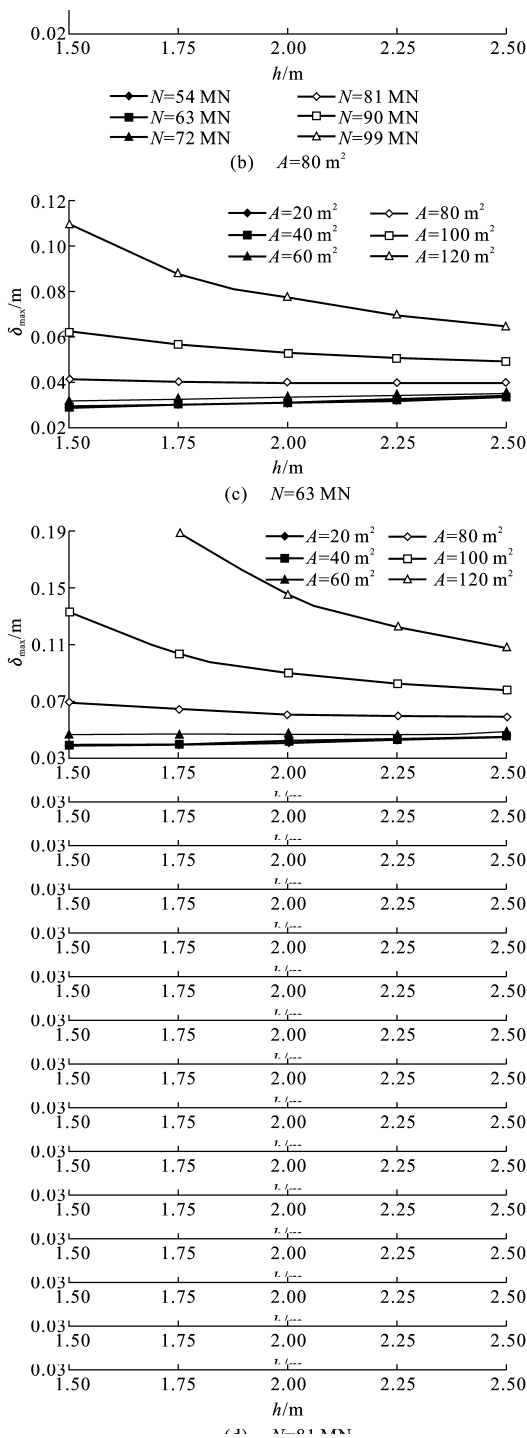


图 6 筏板基础在 I 类缺陷下  $\delta_{max}$  随  $h$  的发展曲线

Fig. 6 Development Curves of  $\delta_{max}$  vs  $h$  of Raft Foundation Under Defect I

土工基础, 2010, 24(1): 44-46, 54.

HU De-hua, ZHUANG Yun. Strength of Replaced Cushion and Its Design[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(1): 44-46, 54.

[ 5 ] 王国强, 钟轩明, 单灿灿, 等. 修正后的换土垫层厚度简化计算法[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(6): 905-908.

- WANG Guo-qiang, ZHONG Xuan-ming, SHAN Cancan, et al. Revision of the Predigested Method for Calculating the Thickness of the Replacement Underlayer [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(6): 905-908.
- [6] 《地基处理手册》编委会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.  
Editorial Committee of *Foundation Treatment Manual*. Foundation Treatment Manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1988.
- [7] 扈胜霞, 张伯平, 吕廷波. 黄土灰土地基的质量控制指标试验研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 131-135.  
HU Sheng-xia, ZHANG Bo-ping, LU Ting-bo. Preliminary Study of Quality Control Indexes of Lime-soil Foundation [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2002, 30(2): 131-135.
- [8] 米海珍, 朱浩稳, 王 昊. 三轴试验下二八灰土强度的变化规律[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 117-120.  
MI Hai-zhen, ZHU Hao-wen, WANG hao. Variation Pattern of Strength of 2 : 8 Lime-soil Based on Its Triaxial Test [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4): 117-120.
- [9] 赵明华, 张 玲, 邹新军, 等. 土工格室-碎石桩双向增强复合地基研究进展[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 1-9.  
ZHAO Ming-hua, ZHANG Ling, ZOU Xin-jun, et al. Research Progress in Two-direction Reinforced Composite Foundation Formed by Geocell Reinforced Mattress and Gravel Piles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 1-9.
- [10] 张兴强, 梁艳平, 梁英慧. 交通荷载作用下软土地基的土工格栅加筋效应分析[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 1-5.  
ZHANG Xing-qiang, LIANG Yan-ping, LIANG Ying-hui. Analysis of Geogrid Reinforced Effect of Soft Ground Under Traffic Loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 1-5.
- [11] 胡新民. 粉喷和浆喷水泥桩加固软土地基的力学特性[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(6): 42-44.  
HU Xin-min. Mechanical Characteristics of Soft Soil Foundation Reinforced with Powder-jetting and Grout-jetting Cement Piles [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(6): 42-44.
- [12] 余 亮, 张友利. 海滩围垦区现浇箱梁满堂支架的地基承载处理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(10): 58-60, 63.  
YU Liang, ZHANG You-li. Foundation Bearing Treatment of Cast-in-place Box Beam Full Framing in Enclave Tideland for Cultivation Zone [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(10): 58-60, 63.
- [13] 赵仙茹. 软土地基上旧路拓宽高路堤全过程沉降预测[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(9): 40-42.  
ZHAO Xian-ru. Settlement Prediction in Whole Process of High Embankment Broadening on Soft Soil Foundation [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(9): 40-42.
- [14] 龙四春, 邓联军. 软基道路工程施工控制与测量数据分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(10): 51-53.  
LONG Si-chun, DENG Lian-jun. Construction Control and Survey Data Analysis of Weak Subgrade [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(10): 51-53.
- [15] 樊世群. 强夯法在杂填土施工中参数的确定[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(7): 45-47.  
FAN Shi-qun. Determination of Parameters in Miscellaneous Fill Construction by Heavy Tamping Method [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(7): 45-47.