

DOI: 10.11779/CJGE201606002

有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究

应宏伟^{1, 2}, 张金红^{1, 2}, 王小刚^{1, 2}, 李冰河³, 朱伟⁴

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310008; 4. 浙江绿城建筑设计有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 经典的库仑或朗肯土压力理论无法适用有限土体情况下的土压力问题。利用研制的土压力试验模型装置, 进行了一组不同填土宽度的刚性挡墙平动模式室内模型试验, 采用微型土压力盒量测从静止状态到被动极限状态的水平土压力分布的变化, 利用颗粒图像测速技术研究土体内滑裂面发展规律。试验结果表明: 半无限土体情况下的被动土压力大小、分布和合力作用点与库仑被动土压力较为接近。而有限宽度情况下移动挡墙上各深度的被动土压力值均大于库仑被动土压力, 且土体宽度越窄, 挡墙的被动极限位移有增大趋势, 挡墙下部的被动土压力增大更明显, 土压力分布的非线性程度愈高, 被动土压力系数越大, 被动土压力合力作用点明显往墙底移动。随着填土宽度的减小, 填土表面的隆起愈明显, 滑裂面的倾角略有增大。当移动挡墙达到或接近极限状态时, 固定边界上的水平土压力随填土宽度的减小而逐渐增大, 甚至接近库仑被动土压力。

关键词: 模型试验; 有限土体; 被动土压力; 平动模式; 土体变形; 砂土

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)06-0978-09

作者简介: 应宏伟(1971-), 男, 副教授, 主要从事土力学、地下工程等方面的教学和科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils

YING Hong-wei^{1, 2}, ZHANG Jin-hong^{1, 2}, WANG Xiao-gang^{1, 2}, LI Bing-he³, ZHU Wei⁴

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key

Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Province

Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310008, China; 4. Zhejiang Greenton Architectural Design Co., Ltd., Hangzhou
310007, China)

Abstract: It is inappropriate to calculate the earth pressure for finite soils using the classical Coulomb or Rankine earth pressure theory. A series of laboratory model tests with different widths of backfill are conducted for the passive case of a rigid retaining wall subjected to horizontal translation. The change in lateral earth pressure distribution from the at-rest condition to the passive condition is monitored by using a set of pressure cells. The particle image velocimetry technique is employed to observe the development of a failure zone in the soils. The experiment results show that there is a good agreement between the measured earth pressures and the Coulomb's solution in the case of infinite soils. However, the passive earth pressures on the moving retaining wall for finite soils are much more than the Coulomb's solution. With the decrease of the soil width, the limited displacement of the wall under passive state seems to increase, and the passive earth pressures also increase significantly when the heights of the application points of the resultant earth pressure move down gradually. Moreover, with the decrease of the soil width, the heave of the backfill surface increases gradually, the inclination angles of the slip surface increase slightly, and the lateral earth pressures on the fixed boundary also increase gradually.

Key words: model test; finite soil; passive earth pressure; translation mode; soil deformation; sand

0 引言

在边坡挡土墙、基坑支护结构、桥墩基础和承受水平荷载的桩基承台等土工结构的设计计算中, 被动土压力问题至关重要。经典的库仑或朗肯土压力理论均假定挡墙前方土体为半无限体, 而在诸如地铁车站、

市政管道沟槽等狭长基坑、邻近既有地下结构的狭窄基坑或前方临近基岩等固定边界的挡土墙等一些实际

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278462); 浙江省建设科技研究与开发项目

收稿日期: 2015-06-10

工程中, 被动区土体宽度并不能满足半无限体的假定, 这种情况下的被动土压力计算目前尚无成熟的理论可借鉴。

针对土压力问题, 不少学者进行了半无限土体的主动土压力^[1-5]和被动土压力^[6-12]试验研究。试验表明土压力沿挡墙深度分布为非线性分布且与墙体位移和变位模式有很大关系, 对于被动土压力问题墙前的实际滑裂面为曲面。另外 Frydman 等^[13]、Take 等^[14]、Khosravi 等^[15]和朱伟^[16]则对有限土体的主动土压力问题进行了初步模型试验研究, 指出采用经典的库仑或朗肯理论会使挡墙设计偏于保守。Frydman 等^[13]和 Take 等^[14]采用谷仓土压力公式计算距离基岩面很近的挡土墙的主动和静止土压力, 并与离心模型试验结果对比; Khosravi 等^[15]研究了平移模式下从静止状态向主动极限状态的过程中挡墙的水平土压力分布, 并与已有的土拱理论对比, 论证了土拱的存在; 朱伟^[16]利用模型试验研究了填土宽度变化下的刚性挡墙平动模式主动土压力分布和墙后土体变形规律, 并与已有理论解^[17]对比。应宏伟等^[18]基于多道滑裂面模型推导了狭窄基坑平动模式刚性挡墙的被动土压力理论公式, 分析了该况下被动土压力合力、土压力分布及合力作用点位置与经典库仑土压力理论的差别。可见, 已有的试验大多针对半无限土体, 有限宽度土体情况下的试验研究也仅限于主动土压力研究, 对被动土压力问题的试验研究则鲜有见报道。

针对土体变形问题, 已经由简单的色砂线向更精确的 X-ray 技术^[6]和颗粒图像测速技术(PIV)^[15-16, 19-20]过渡。通过 PIV 技术研究刚性挡墙移动过程中土体变形规律的合理性和准确性已经得到论证^[15-16, 20]。

本文采用福建标准砂进行了一组刚性挡墙平动模式室内模型试验, 采用微型土压力盒研究被动区土体宽度变化时, 从静止状态到被动极限状态过程中移动挡墙和固定边界上土压力分布的变化, 利用 PIV 技术研究墙前土体变形、滑裂面发展规律, 试验数据可为有限土体情况下的土压力理论研究提供依据。

1 试验方案

1.1 试验模型

试验模型箱尺寸为 2.1 m(长)×0.82 m(宽)×1.2 m(高), 模型框架由高强度不锈钢焊接而成, 两侧为 20 mm 厚钢化玻璃嵌固在模型箱框架内, 如图 1 所示。

左侧移动挡墙由铝合金板和尼龙板通过螺栓组合, 模拟实际工程中的基坑支护墙或挡土墙, 右侧固定边界由铝合金板、铝合金加固肋和尼龙板通过螺栓组合, 模拟既有地下结构外墙或基岩面等固定边界,

其中尼龙板侧与土体接触, 表面通过不同的处理方式实现不同墙土接触面粗糙程度的模拟。移动挡墙尺寸为 0.8 m(高)×0.8 m(宽)×0.04 m(厚), 填土高度 0.525 m, 挡墙顶部高出土面部分作为移动挡墙和固定边界之间土体由于试验过程中受挤压向上隆起的预留。挡墙两侧边各贴上一软毛窗刷条并涂抹凡士林, 以对其与模型槽正面和背面的钢化玻璃之间的缝隙进行密封和润滑处理。

采用一组共 12 个 CYG712 型土压力盒分别埋设于移动挡墙和固定边界上, 量程 200 kPa, 尺寸 $\Phi 30 \times 16$ mm, 土压力盒埋设于移动挡墙和固定边界上的尼龙板内, 其厚度刚好与尼龙板厚度一致, 土压力盒导线通过尼龙板内孔槽引出, 以保证土压力盒表面与挡墙表面齐平。挡墙结构及土压力盒埋置位置如图 2 所示。

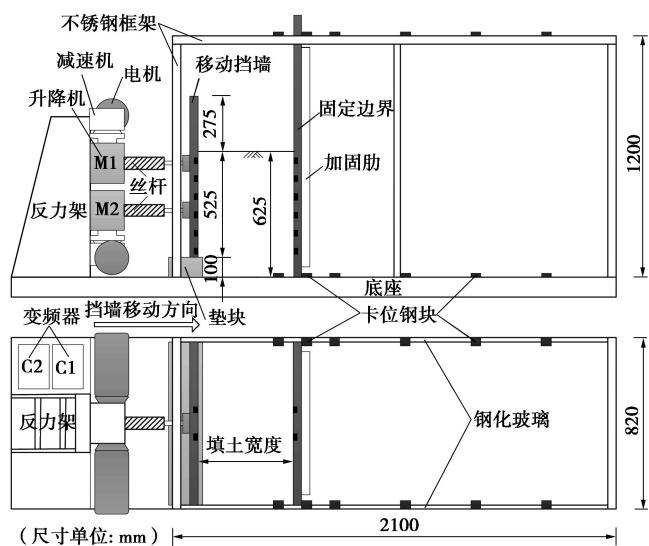


图 1 试验模型箱正视和俯视结构图

Fig. 1 Front and top views of test box

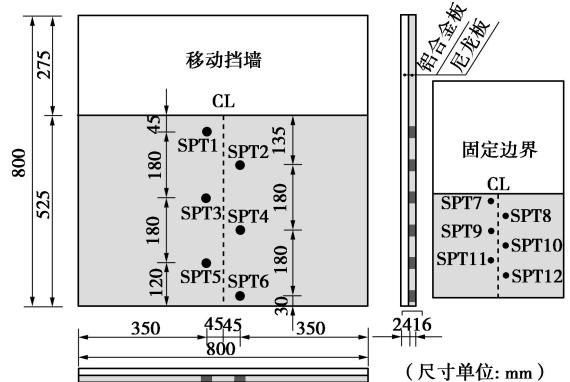


图 2 挡墙结构及土压力盒埋置位置图

Fig. 2 Construction of rigid wall and location of earth pressure cells

在移动挡墙外侧布置两套由三相变频调速电机、

减速机和丝杆升降机组成的加载装置 M1 和 M2 以实现水平加载，并分别由变频器 C1 和 C2 控制调速电机的转速以实现不同的向右移动速度。试验过程中控制水平移动速度为 0.025 mm/s，较低的移动速度能有效的减小挡墙与模型箱之间的摩擦^[15]。为准确控制挡墙的实际位移，采用精度为 0.01 mm，量程为 50 mm 的百分表量测挡墙位移，共设置 3 个百分表（2 个处于同一水平面，其中一个与第 3 个处于同一竖直面），保证 3 个百分表的读数一致进而来保证挡墙的平动。

1.2 试验土样

试验砂土选用福建标准砂，通过人工落雨法制备，参考文献[16]，控制砂土落距 300 mm，落砂速度约 120 g/s，落砂装置移动速度为 30 mm/s，砂土每层层铺 50 mm 直到铺满要求的高度，如图 3 所示。浇制完成的干砂地基的基本参数为：干重度为 14.6 kN/m³，相对密实度为 41%， D_{50} 为 0.17 mm，土粒相对密度为 2.63，最大孔隙比为 0.94，最小孔隙比为 0.60，内摩擦角为 35°。假定土体内摩擦角不随挡墙移动而变化，根据 Loukidis 等^[21]的结论这个假定是合理的，因为最终得到的干砂地基相对密实度为 41%，相对松散，即使在竖向有效应力较低的直剪试验中也未出现峰值剪应力。

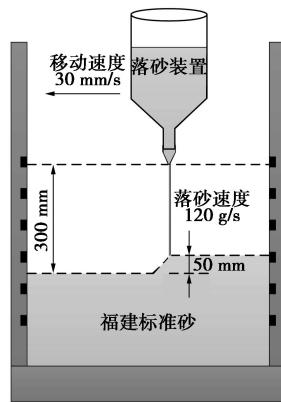


图 3 人工落雨法制备干砂地基模型

Fig. 3 Sample preparation by air pluviation method

1.3 墙土摩擦角的测定

试验中通过对挡墙表面进行处理以实现不同墙体接触面粗糙程度的模拟，分别采用表面粘贴透明胶带和表面粘贴粗砂纸的方法处理移动挡墙和固定边界的尼龙板表面以模拟半粗糙和完全粗糙的墙体表面。采用直剪仪测定墙体摩擦角，试验时将直剪仪下盒内装入直径为 6.18 cm，高为 1 cm（包括表面处理层高度）的尼龙块，上盒内仍装入 1 cm 厚的试验用砂，通过快剪测出试验墙体的墙体摩擦角。经测定移动挡墙表面粘贴透明胶带情况下的墙体摩擦角为 16.57°，固定边界表面粘贴粗砂纸情况下的墙体摩擦角为 34.64°。

1.4 土压力盒的标定

土压力盒的标定采用自制嵌入式土压力盒砂标装置，如图 4 所示。该装置包括反力架系统、嵌入式土压力盒埋设底座、侧壁光滑处理的圆筒、刚柔组合加载板、量力环和固定于顶板上的螺旋千斤顶。土压力盒埋设于底座的预留圆孔中；圆筒内部涂抹凡士林并覆盖一层薄膜以减少土体与侧壁的摩擦；加载板分为三层，上下两层为刚性板，中间层为柔性板；控制作用在螺旋式千斤顶的顶升手杆上的环向的力来控制千斤顶升降杆的升降进而控制千斤顶输出的力。

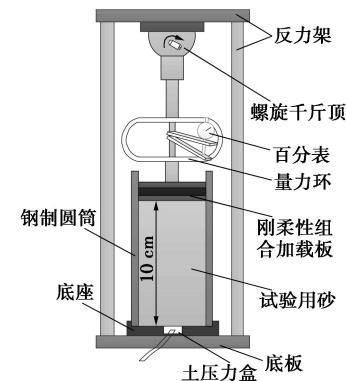


图 4 嵌入式土压力盒砂标装置

Fig. 4 Embedded earth pressure cell calibration arrangement in sand

对本试验采用的土压力盒进行砂标，部分标定结果如图 5 所示，通过与常规水标结果的对比可以看出，加载时，土压力盒在砂土介质中由于土拱效应在相同的压力下输出的电压信号值明显比水标结果小；卸载时，砂标卸载曲线有明显的滞回环，但压力完全卸载后，该现象消失，这和 Take 等^[14]、Talesnick^[22]和 Zhu 等^[23]的结论一致。本试验中土压力盒的标定曲线采用砂标加载曲线。

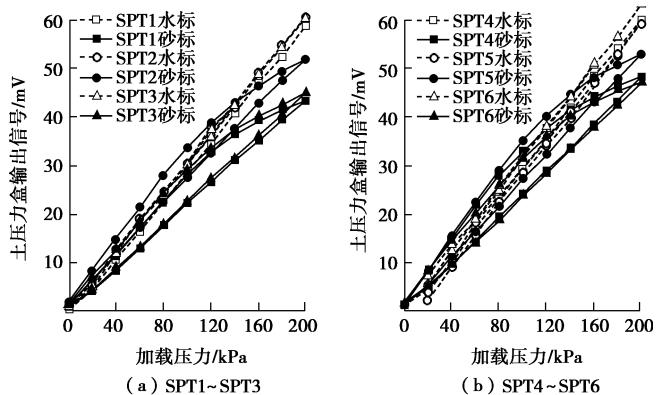


图 5 SPT1~SPT6 砂标结果与水标结果对比

Fig. 5 Comparison between SPT1~SPT6 calibration in sand and in water

1.5 数据采集及 PIV 测试系统

试验过程中当移动挡墙达到某一级位移后停止加载, 用多通道数据采集仪采集土压力盒输出电压。PIV 测试系统包括数码照相机、光源、带已知控制点坐标的土体 PIV 分析区域和 GeoPIV 软件, 数码照相机置于土体正前方, 相机设置为间隔 20 s (即挡墙移动 0.5 mm) 自动拍摄一张照片, 为减小模型箱侧面的反射, 将两片 LED 灯带置于试验区域两侧, 如图 6 所示。

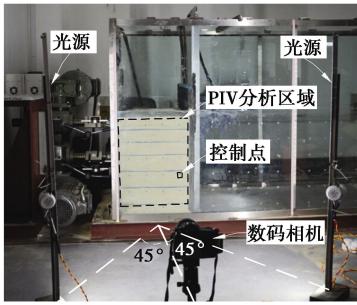


图 6 PIV 测试系统

Fig. 6 PIV test system

1.6 试验安排

针对干砂开展了 6 组对比试验, 每组试验开始前改变右侧固定边界的位置以实现对不同宽度填土的模拟, 具体试验参数见下表 2。定义填土宽度与高度之比为宽高比 n , 按照库仑被动破裂角计算, 有限土体与半无限土体的临界宽高比 $n_{cr}=3.1$, 在 T1 组试验中土体宽度达到 1.75 m 即 $n=10/3$, 可视为半无限土体情况, 符合经典库仑被动土压力理论的基本假设, 其他工况均为有限土体情况。

表 1 试验安排

Table 1 List of test

试验编号	土体高度/m	土体宽度/m	宽高比
T1	0.525	1.75	10/3
T2	0.525	1.40	8/3
T3	0.525	1.05	2
T4	0.525	0.70	4/3
T5	0.525	0.56	16/15
T6	0.525	0.42	4/5

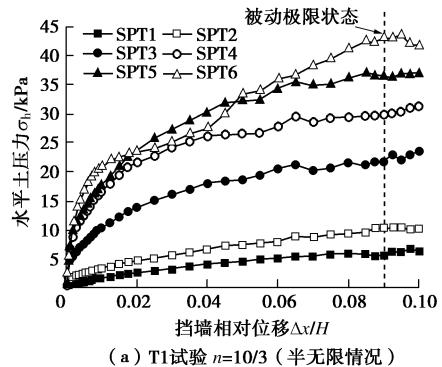
2 试验结果

2.1 移动挡墙上的土压力

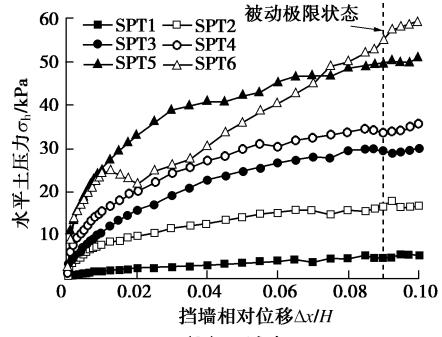
T1~T6 组试验的移动挡墙上的水平土压力随挡墙相对位移 $\Delta x/H$ 的变化如图 7 所示, Δx 代表挡墙从初始位置 (静止土压力状态) 朝向土体平移后的累计位移值, H 为填土面至墙底的高度。

由图 7 可以发现, 当填土宽高比 n 较大 ($n=10/3$, $n=8/3$, $n=2$, $n=4/3$) 时, 在墙体相对位移 $\Delta x/H$ 较小时, 除个别测点外, 移动挡墙上各深度测得的土压力总体上随挡墙位移的增加先急剧增大, 之后增速趋缓, 在 $\Delta x/H$ 达到约 9% 后各深度的土压力均趋于稳定。当

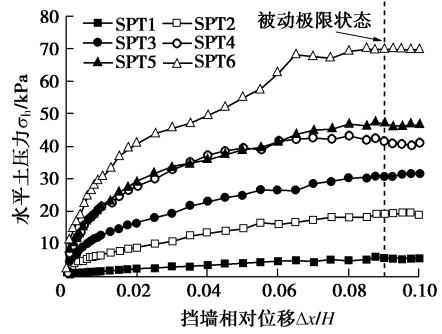
n 较小 ($n=16/15$, $n=4/5$) 时, 挡墙上部的土压力随墙体位移的增加而增大, 在墙体相对位移达到约 9% 时就基本稳定; 而 $n=16/15$ 时的 SPT6 测点、 $n=4/5$ 时的 SPT5, SPT6 测点测得的土压力随挡墙位移的增加近似线性增大, 在墙体相对位移达到本试验装置中的允许墙体最大相对位移 10% 时仍未完全稳定, 表明挡墙底部附近尚有局部区域土体未达到被动极限状态, 后文分析中这两种情况下墙底附近的被动土压力近似取为 $\Delta x/H=10\%$ 对应的土压力值。



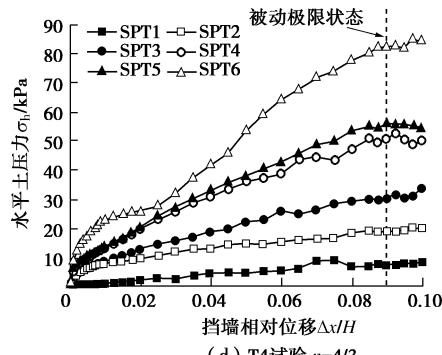
(a) T1试验 $n=10/3$ (半无限情况)



(b) T2试验 $n=8/3$



(c) T3试验 $n=2$



(d) T4试验 $n=4/3$

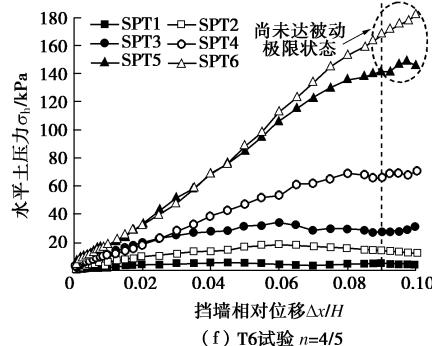
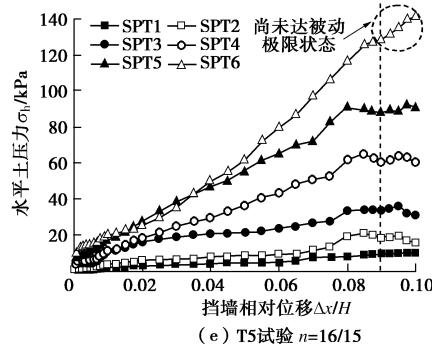


图7 水平土压力随墙体位移的变化曲线

Fig. 7 Changes in lateral earth pressure with wall movement

T1~T6组试验各级位移下移动挡墙上的水平土压力沿挡墙深度分布曲线如图8所示,为便于比较,理论静止土压力分布($\sigma_{h0}=(1-\sin\varphi)\gamma z$)和库仑被动土压力分布也示于图中。在两侧墙体静止的情况下,由于填土过程中土体在自重作用下发生沉降,在挡墙底部附近形成土拱,使挡墙底部的土压力值比线性分布的理论静止土压力值略有减小,这与Khosravi等^[15]结论一致。当挡墙从静止状态开始移动很小距离,土压力就有较大的变化,这是因为土体由静止状态经过微小位移挤密后压力会迅速增大。

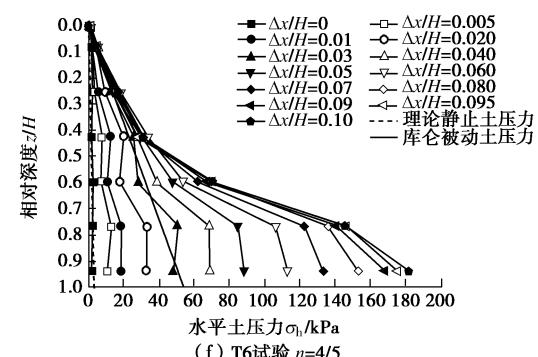
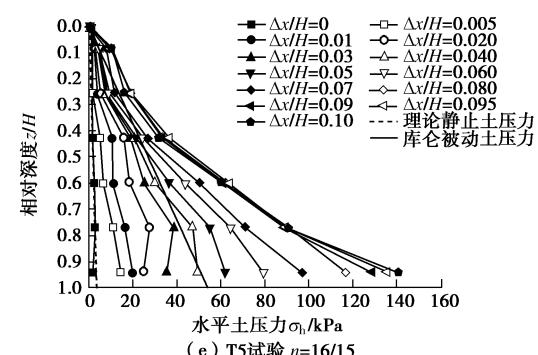
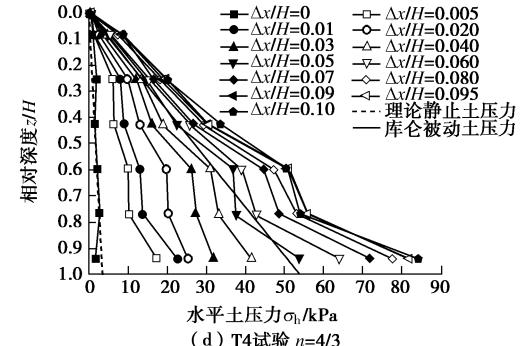
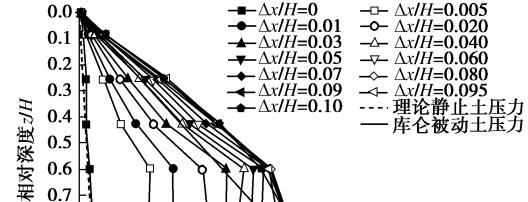
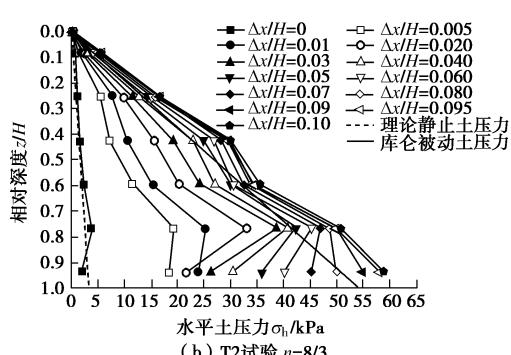
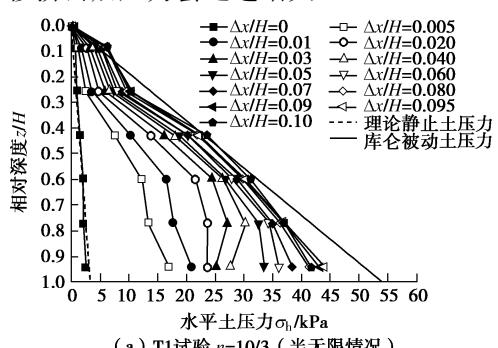


图8 各级位移下挡墙水平土压力沿深度的分布

Fig. 8 Distribution of lateral earth pressures with wall movement

$n=10/3$ 时,属于半无限土体情况,随着挡墙位移的不断增大,土压力近似呈线性分布并不断增大,当墙体位移 $\Delta x/H=9\%$ 时达到被动极限状态,极限土压力与库仑被动土压力较为接近,这与徐日庆等^[11]结论一致,同时验证了本模型试验土压力测试结果的可信度。对于其它有限土体情况,随着移动挡墙位移的增大,土压力逐渐增大并开始呈非线性分布,当达到一定位移后,移动挡墙上各深度的土压力值均超过库仑被动土压力,且 n 越小,随墙体位移的继续增加土压力的

增速越大。

将 T1~T6 等 6 组试验所得达到或接近极限状态下的移动挡墙上的被动土压力对比汇总于图 9, 其中 $n=16/15$ 和 $n=4/5$ 工况采用 $\Delta x/H=10\%$ 时的水平土压力。由图可见, 对于 $n < 10/3$ 的其它有限土体情况, 移动挡墙上各深度的土压力值均大于库仑被动土压力; 随着填土宽高比 n 的减小, 移动挡墙靠底部二分之一深度范围内的被动土压力增大更明显, 土压力分布的非线性程度愈高, 这是由于随着填土宽高比的减小, 固定边界对土体的约束就越强, 下部土体相比较上部而言由于上覆压力更大而更易于挤密所致。

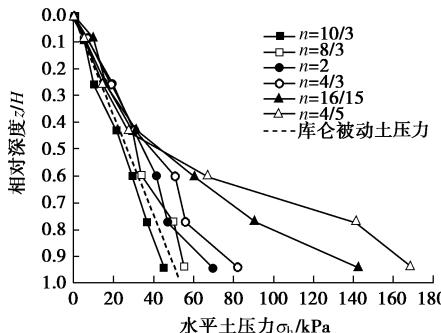


图 9 不同 n 下被动土压力分布

Fig. 9 Distribution of passive earth pressures for different n

定义水平土压力系数为 $K=2P/(\gamma H^2)$, 其中 P 为作用在挡墙上的水平土压力合力, γ 为土体干重度, H 为填土面至墙底的高度。挡墙上的土压力系数 K 与挡墙相对位移 $\Delta x/H$ 关系曲线如图 10 所示。可以发现 K 随着挡墙位移的增大呈非线性增大, 对于半无限土体情况, K 随着墙体位移增大逐渐接近于库仑被动土压力系数; 对于有限土体情况, 当挡墙达到一定位移后, K 超过库仑被动土压力系数, 且随着 n 的减小, 达到极限被动状态时的 K_p 就越大。从该图中可再次看出, 填土宽度对平动模式刚性挡墙的被动极限位移有影响, 对于有限土体, 土体宽度越窄, 墙体的被动极限位移有增大趋势。

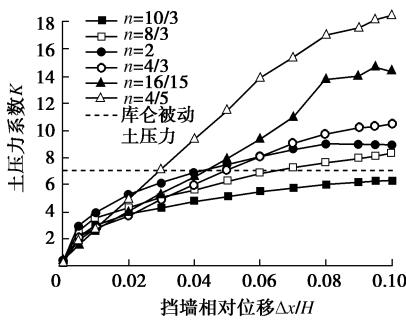


图 10 不同 n 下土压力系数 K 与挡墙位移关系

Fig. 10 Coefficient of earth pressure K with non-dimensional wall displacements for different n

移动挡墙的土压力合力作用点高度 h/H 与墙体相

对位移 $\Delta x/H$ 的关系如图 11 所示。显然, 库仑被动土压力的合力作用点为距墙底为 $1/3$ 墙高处, 而在 $\Delta x/H=0$ (静止土压力状态) 时, 由于填土过程中墙土摩擦引起的土拱效应使底部土压力减小而导致合力作用点高度高于距墙底 $1/3$ 墙高处。对于有限土体情况, 在填土宽高比 n 相对较大 ($n=8/3, n=2, n=4/3$) 时, 随着墙体位移的增大, 达到极限状态时的被动土压力合力作用点位置逐渐稳定, 其作用点高度与半无限土体假定下的库仑被动土压力合力作用点高度相差不大。在 n 较小 ($n=16/15, n=4/5$) 时, 被动土压力合力作用点明显往墙底移动, 这是因为填土宽度较小时, 随着位移的不断增大, 挡墙下部的土压力比上部增大更明显并显著超过库仑土压力所致 (见图 8, 9)。从图中也可发现, 填土宽度较小时土压力合力作用点位置在 $\Delta x/H$ 达到试验允许最大位移值 10% 时同样未完全稳定。

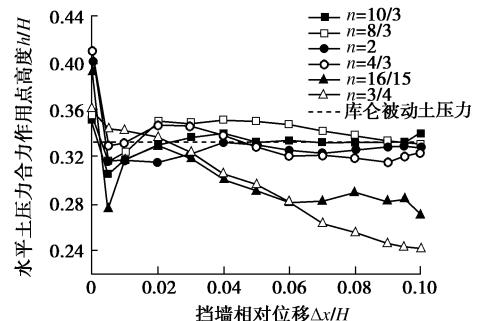


图 11 不同 n 下水平土压力合力作用点高度与挡墙位移关系

Fig. 11 Heights of application points of lateral earth pressures with non-dimensional wall displacements for different n

2.2 土体变形分析

利用颗粒图像测速技术(PIV)和GeoPIV软件^[19-20]分析获得了不同填土宽度下随挡墙位移变化的土体位移场。以 T6 组试验为例, 随挡墙位移变化的土体位移场如图 12 所示。可见随着挡墙位移的增大, 墙前土体位移逐渐增大, 接近极限状态时, 填土表面的土体隆起明显, 移动挡墙墙前土体内大致形成一道从墙踵到与固定边界相交的滑裂面, 土体接近被动破坏状态。

图 13 为不同 n 下其它组试验在达到或接近被动极限状态时的土体位移场。结合图 12 可知, 在达到或接近被动极限状态时, 填土宽度越窄, 填土表面的土体隆起越明显。墙前土体的滑裂面可近似用曲线表示 (图中虚线①所示), 为便于比较分析, 用直线 (图中虚线②所示) 连接曲线的起点和终点简化代替墙前土体滑裂面, 在 $n=10/3$ 时, 土体的滑裂面未发展到固定边界, 此时为半无限土体情况, PIV 分析所得的滑裂面倾角为 22.5° , 略小于库伦理论解的倾角 24.7° ,

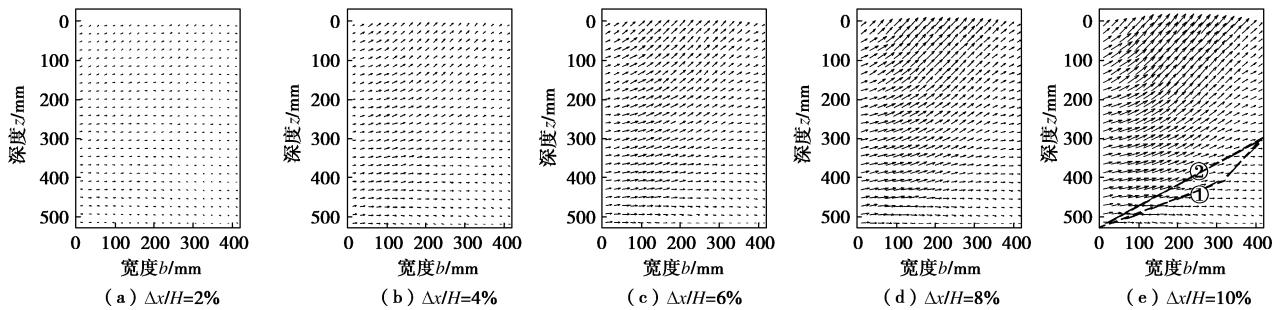
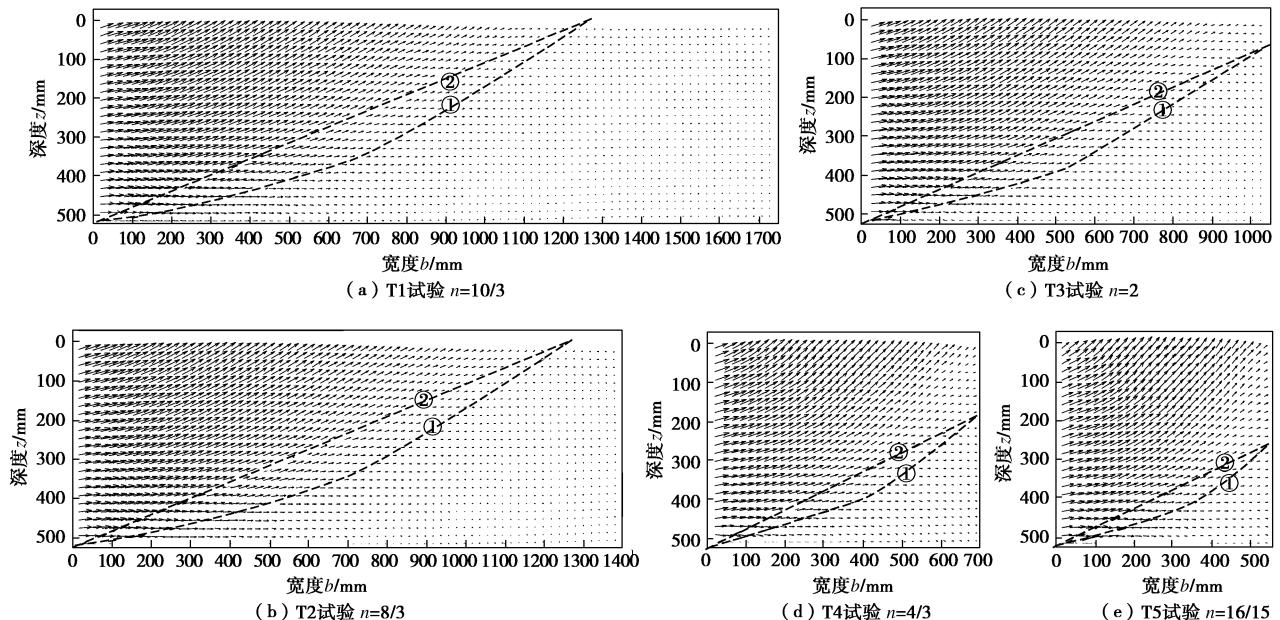


图 12 T6 试验土体位移场随挡墙位移的变化

Fig. 12 Displacement fields with various wall movements for test T6

图 13 不同 n 下被动极限状态土体位移场Fig. 13 Displacement fields under limited displacement of wall under passive state for different n

但误差不大；随着 n 的减小，滑裂面逐渐与固定边界相交。根据图 12、13 获得的各组试验的滑裂面倾角见表 2，可见随着 n 的减小，滑裂面倾角非恒定值，呈现略微增大趋势，与已有的理论分析结果^[18]吻合。

表 2 不同 n 下的土体滑裂面倾角Table 2 Slip surface inclinations for different n

试验编号	宽高比	滑裂面倾角/(°)
T1	10/3	22.5
T2	8/3	22.5
T3	2	23.7
T4	4/3	24.9
T5	16/15	25.8
T6	4/5	26.6

2.3 固定边界上的土压力

图 14 为不同 n 下试验模型右侧固定边界对应挡墙相对位移 $\Delta x/H=10\%$ 时的水平土压力分布，图中水平虚线为 PIV 分析所得的滑裂面与固定边界交点位置，可见 $n=10/3$, $n=8/3$ 时滑裂面未与固定边界相交。

由图可知，随填土宽度的减小，固定边界上的土压力逐渐增大，同时逐渐远离静止土压力并逐渐接近于被动库仑土压力；在 $n=2$, $4/3$, $16/15$ 时，滑裂面与固定边界上交点位置以上部分的水平土压力接近但略小于库仑被动土压力，交点以下部分则明显小于库仑被动土压力；在 $n=4/5$ 时，整个土体深度范围内接近库仑被动土压力。从试验结果可知，实际工程在邻近既有地下结构的开挖狭窄基坑时，应考虑有限宽度土体情况下相邻地下结构上侧压力增大的不利影响。

2.4 关于墙土摩擦角的影响的讨论

移动挡墙和固定边界墙土摩擦角的变化会对试验结果造成一定影响。当固定边界墙土摩擦角减小时，固定边界对于土体的约束作用就减弱，土体可以更容易向上发生位移而减弱移动挡墙移动过程中对土体的压密作用，进而减小试验所测移动挡墙上的土压力值；当移动挡墙墙土摩擦角减小时，一方面由于

土样制备过程形成的土拱减弱而导致填土的竖向应力增大, 另一方面移动挡墙对土体的约束作用减小会减小移动挡墙上的土压力, 故难以确定移动挡墙土摩擦角减小时对其上所测得的土压力的变化。对于移动挡墙和固定边界墙土摩擦角的变化的具体影响需另开展试验研究, 将在另文分析。

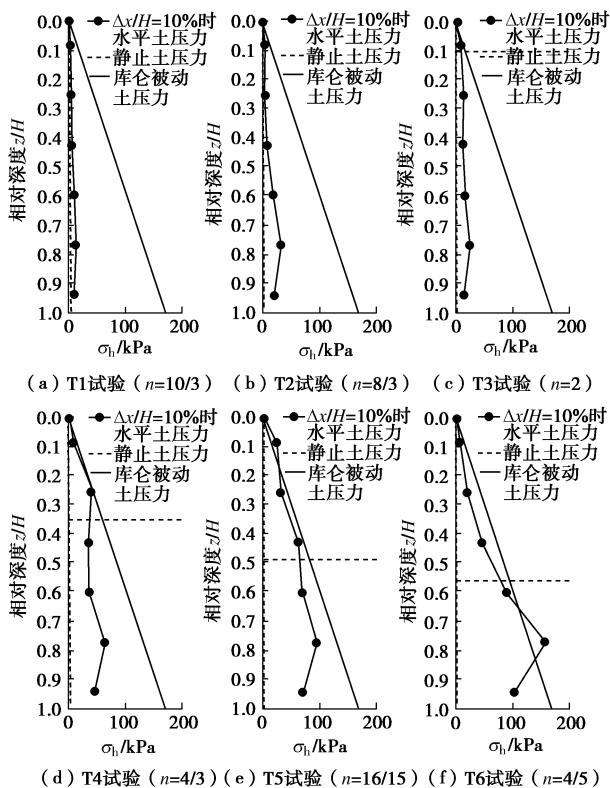


图 14 不同 n 下固定边界上的水平土压力分布

Fig. 14 Distribution of lateral earth pressures under fixed boundary for different n

3 结 论

本文采用福建标准砂进行一系列室内模型试验, 研究了不同填土宽度的有限土体平动模式下刚性挡墙水平土压力分布和墙前土体变形随墙体位移的变化规律, 得到以下 3 点结论。

(1) 填土宽度对移动挡墙各深度的水平土压力随挡墙位移的变化有显著影响。当填土宽度小于半无限条件时, 挡墙上各深度的被动土压力值均大于库仑被动土压力, 且土体宽度越窄, 挡墙的被动极限位移有增大趋势, 挡墙下部的被动土压力增大更明显, 土压力分布的非线性程度愈高, 被动土压力系数越大, 被动土压力合力作用点明显往墙底移动。

(2) 随着移动挡墙位移的增大, 墙前土体位移场逐渐发展, 达到或接近极限状态时形成一道从墙踵到与固定边界相交或贯通土体表面的滑裂面。随着填

土宽度的减小, 填土表面的土体隆起愈明显, 滑裂面的倾角略有增大。

(3) 当移动挡墙达到或接近极限状态时, 固定边界上的水平土压力随填土宽度的减小而逐渐增大, 甚至接近库仑被动土压力。

参 考 文 献:

- [1] TERZAGHI K. Record earth pressure testing machine[J]. Engineering News Record, 1932, **109**(13): 365 - 369.
- [2] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112** (3): 317 - 333.
- [3] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 19 - 26. (ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 - 26. (in Chinese))
- [4] CHANG M. Lateral earth pressures behind rotating walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(4): 498 - 509.
- [5] O'NEAL T S, HAGERTY D J. Earth pressures in confined cohesionless backfill against tall rigid walls: a case history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(8): 1188 - 1197.
- [6] JAMES R G, BRANSBYP L, ROSCOE K H. Experimental and theoretical investigations of a passive earth pressure problem[J]. Géotechnique, 1970, **20**(1): 17 - 37.
- [7] ROSCOE K H. The influence of strains in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1970, **20**(2): 129 - 170.
- [8] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressure with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120** (8): 1307 - 1323.
- [9] KOBAYASHI Y. Laboratory experiments with an oblique pressure wall and rigid plasticity solutions[J]. Soils and Foundations, 1998, **38** (1): 121 - 129.
- [10] FANG Y S, HO Y C, CHEN T J. Passive earth pressure with critical state concept[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128** (8): 651 - 659.
- [11] 徐日庆, 陈页开, 杨仲轩, 等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 569 - 575. (XU Ri-qing, CHEN Ye-kai, YANG Zhong-xuan, et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on a rigid wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 569 - 575. (in Chinese))
- [12] HANNA A M, KHOURY I A. Passive earth pressure of

- overconsolidated cohesionless backfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(8): 978 – 986.
- [13] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressures on retaining walls near rock faces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(6): 586 – 599.
- [14] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**(6): 1220 – 1230.
- [15] KHOSRAVI M H, PIPATPOMGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. Géotechnique, 2013, **63**(12): 1020 – 1028.
- [16] 朱伟. 考虑有限土体及挡墙变位影响的土压力试验与理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (ZHU Wei. Experimental and theoretical study on earth pressures considering limited soils and retaining wall deformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [17] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2011, **30**(1): 2970 – 2978. (YING Hong-wei, HUANG Dong, XIE Xin-yu. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,
- 30**(1): 2970 – 2978. (in Chinese))
- [18] 应宏伟, 郑贝贝, 谢新宇. 狹窄基坑平动模式刚性挡墙被动土压力分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3755 – 3762. (YING Hong-wei, ZHENG Bei-bei, XIE Xin-yu. Study of passive earth pressures against translating rigid retaining walls in narrow excavations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3755 – 3762. (in Chinese))
- [19] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurements using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 619 – 631.
- [20] NIEDOSTATKIEWICZ M, LESNIEWSKA D, TEJCHMAN J. Experimental analysis of shear zone patterns in cohesionless soil for earth pressure problems using particle image velocimetry[J]. Strain, 2011, **47**(S2): 218 – 231.
- [21] LOUKIDIS D, SALGADO R. Active pressure on gravity walls supporting purely frictional soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(1): 78 – 97.
- [22] TALESNICK M. Measuring soil contact pressure on a solid boundary and quantifying soil arching[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(2): 171 – 179.
- [23] ZHU B T, JARDINE R J, FORAY P. The use of miniature soil stress measuring cells in laboratory applications involving stress reversals[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(5): 675 – 688.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548, 国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU, 国内发行代号 28 – 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)