文章编号：1000－7598－(2008) 08－2183－06

水平荷载下黄土地基单片地下连续墙现场试验研究

宋 章[1]，程谦恭[1]，孟凡超[2]，龚维明[3]

（1. 西南交通大学 土木工程学院，成都 610031；2. 中交公路规划设计院，北京 100010；3. 东南大学 土木工程学院，南京 210096）

摘 要：基于墙顶水平荷载作用下黄土地基中单片地下连续墙的现场试验，分析和研究了地下连续墙的水平受力变形特性，得出了在不同荷载作用下墙身各截面弯矩、水平位移及墙侧土抗力等沿墙深的分布规律。结果表明，在水平荷载下墙体上部的 1/3 段受荷载的影响最为显著，墙身水平位移及转角沿墙深非线性衰减，并随墙顶荷载的增加而增大；墙身弯矩及墙侧土抗力最大值发生在地表以下一定深度范围内，随荷载的增加其最大值及 0 值点沿墙身逐渐向下迁移，且土抗力-位移曲线呈现双曲线的特征；墙体剪力在地表处最大，沿墙身向下呈非线性变化。

关 键 词：地下连续墙；黄土地基；现场试验；土抗力；弯矩

中图分类号：TU 473 **文献标识码：**A

In-situ test study of single diaphragm wall under horizontal loading in loess subgrade

SONG Zhang[1], CHENG Qian-gong[1], MENG Fan-chao[2], GONG Wei-ming[3]

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdou 610031, China; 2. China Communications Highway Planning and Design Institute, Beijing 100010, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on an in-situ test of single diaphragm wall under head horizontal static loading in loess subgrade, the level loading distortion characteristics were analysed and studied, with the increase of head horizontal load, the variation rules along the depth of the different section bending moment, horizontal displacement of diaphragm wall and loess resistance etc. were obtained. The results indicate that the third segment of upside diaphragm wall is influenced distinctly by the head level loading; horizontal displacement and bending angle of diaphragm wall presented nonlinearly decreasing down the depth, and increased with the development of head loading; the maximum values of bending moment of diaphragm wall and loess resistance take place within a range of depth below the earth's surface, the position of maximum and zero values of bending moment and loess resistance transferred gradually down along with diaphragm wall that accompanied with the head level load increasing; and curves of loess resistance –horizontal displacement takes on the properties of hyperbola; the maximum shearing force values of diaphragm wall occured on the surface, and shearing force varied nonlinearly down with the diaphragm wall.

Key words: diaphragm wall; loess subgrade; in-situ test; soil resistance; bending moment

1 引 言

地下连续墙具有整体刚度大、强度高、承载性能好等特点，作为桥梁基础，不仅能承受竖向荷载，而且能很好的承受水平荷载。1979 年日本在东北新干线饭坂街高架桥中，首先将地下连续墙应用于桥梁基础[1]，后在日本得到了广泛的应用，已完成了多种截面形状及尺寸的地下连续墙施工。在我国，地下连续墙载作为桥梁基础首见于宝—中铁路线，但目前还处于试用和研究阶段，且大多被用作桥梁锚碇基础[2, 3]。

水平荷载下地下连续墙的受力实质上是一个复杂的墙土相互作用过程[4–8]。目前虽然对水平荷载作用下墙侧土的摩阻力和土抗力之间关系做过一些定性研究[9–11]，但是，对黄土地基中地下连续墙的水平受力变形特性及其工程应用这方面的资料还鲜

收稿日期：2006-10-30
基金项目：国家自然科学基金项目（No.40172093）；国家杰出青年基金资助（No.40025103）；交通部西部交通科技建设项目（No.200331849457）；西南交通大学 2008 博士研究生创新基金资助。
作者简介：宋章，男，1977 年生，博士研究生，主要从事基础工程方面的研究。E-mail: szhn03@126.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有报道[12]。为此，笔者在国内首次进行了黄土地基中单片地下连续墙的现场水平载荷试验，研究了地下连续墙的水平受力变形机制，探讨了在墙顶各级荷载下墙身的水平变位、弯矩、剪力、转角及墙侧土抗力沿墙深的变化规律。

2 试验区地质概况

水平载荷试验点位于国道 209 线上，地处山西省万荣县高村，该处地貌单元属台塬风积黄土地貌，地形平坦。黄土与古土壤分层沉积，为黄土高原第四纪黄土与古土壤交替沉积的典型地层。试验场地具体地层岩性如图 1 所示。

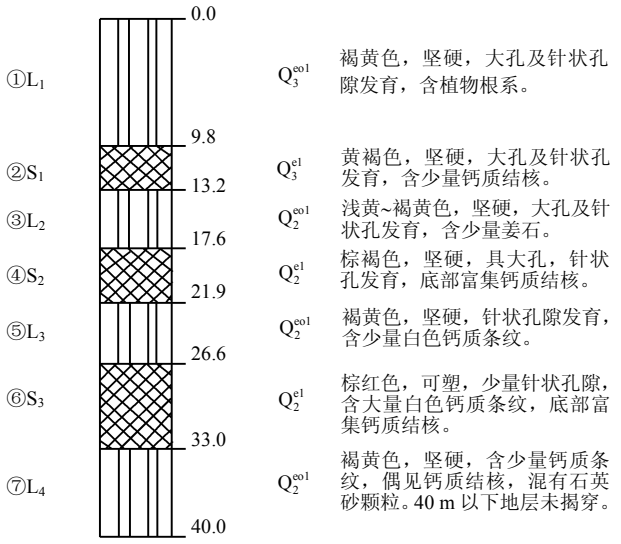


图 1 试验区黄土地层剖面图（单位：m）

Fig.1 Profile of loess stratum in test area (unit: m)

3 试验概述

3.1 现场布置及测试元件布设

试验现场布置及墙身测试元件布设如图 2 所示。水平载荷试验对象为一单片地下连续墙，宽 1.0 m，厚 0.6 m，入土深度为 15.0 m，高出地面 1.0 m。依靠闭合形地下连续墙（3.4 m×3.4 m×15.6 m，厚 0.8 m）提供水平反力。

试验采用 10 只量程为 50 mm 的可调电子位移传感器量测墙顶的水平位移，其中在单片墙正、背面分别距墙顶 0.2 m 和 1.0 m 处，各布设 4 只，量测单片墙顶的水平位移，另外 2 只布设于距反力墙顶 0.3 m 处，用来量测反力墙的位移。在钢筋笼的 20 个测试截面上，对称于墙的正、背面，共布设了 80 个钢筋应变计，测定墙体在墙顶水平荷载作用下的内力变化。布设间距在地表以下 0~6.0 m 段为 0.5 m，6.0 m 以下为 1.0 m。在单片墙横截面的两侧布设了 2 根直径为 70.0 mm，深 16.0 m 的测斜管，与钢筋笼绑扎在一起沉入土中采用测斜仪测试墙身不同深度处在水平荷载作用下的实际变形量。

加载设备量程为 60 MPa 的卧式千斤顶。为保证千斤顶施加的作用力水平通过墙身轴线，千斤顶与墙体接触面处安装了球形铰接。

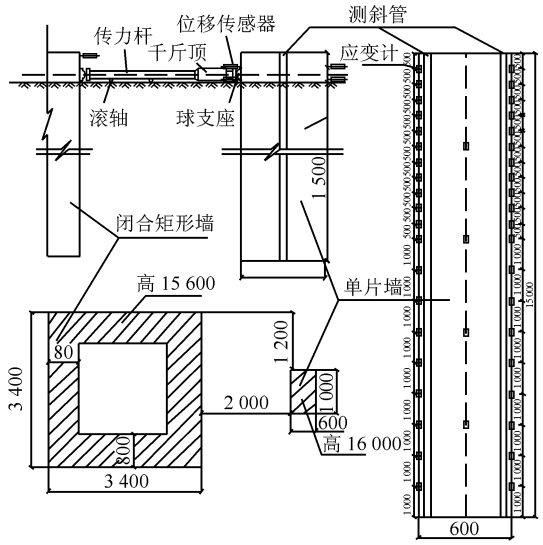


图 2 试验现场及墙身测试元件布设图（单位：mm）

Fig.2 Layout of test field and testing apparatus (unit: mm)

3.2 测试方法

根据《公路桥涵施工技术规范》[13]及现场黄土地层物理力学性质，单片地下连续墙极限承载力预估最大值为 500 kN。加载分级：试验采用单循环分级加载法，每级加载值为预估最大值的 1/15；加载量测：每级加载后在 1 h 内的 1，15，30，45，60 min 测读一次，以后每隔 30 min 测读一次。稳定标准：位移量小于或等于 0.05 mm/h 后再进行下一级加载；终止加载条件：水平力作用点处位移量大于或等于 50.0 mm。钢筋应变计采用数据应变仪自动采集。

4 试验结果分析

整个试验过程中，墙身质量完好，没有开裂。依据壳弯曲理论和惯性矩的定义，由墙身各测试截面处的实测钢筋应变计值，计算墙体各截面间的弯矩：

$$M_i = EI\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{b_0} \qquad (1)$$

式中：$b_0 = 0.5$ m，为拉压、应变测点的间距；E 为试验墙体的弹性模量；I 为墙身全截面对中性轴的惯性矩；ε_s、ε_c 分别为墙身各截面各测点的实测拉、压应变值。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据实测的钢筋应变计数据得到试验墙在各级荷载作用下完整的弯矩分布，如图 3 所示，并整理出试验墙在各级荷载作用下墙顶 Y_t、地表处 Y_0 及墙底 Y_b 的水平位移，最大弯矩 M_{max} 及相应于 M_{max} 距地表的深度 Z_{max}。第一弯矩 0 点距地表的距离 Z_g、地表处墙身的转角 θ_g 及剪力 N_g，见表 1。

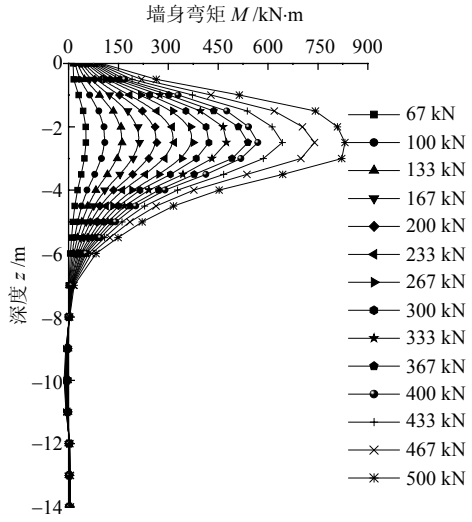


图 3　墙顶各级荷载下墙身实测弯矩-深度曲线

Fig.3　Curves of bend moment with depth under head level loading

5　试验结果分析

5.1　水平承载下墙顶的位移分析

根据布设在试验墙顶的电子位移传感器在各级荷载作用下的实测水平位移值，绘制荷载-墙顶水平位移（H_0-Y_0）曲线，并整理出荷载-水平位移梯度（H_0-$\Delta Y/\Delta H$）曲线，如图 4 和图 5 所示。而反力墙在整个试验过程中的墙顶荷载-水平位移（H_0-Y_0^f）曲线，如图 6 所示。

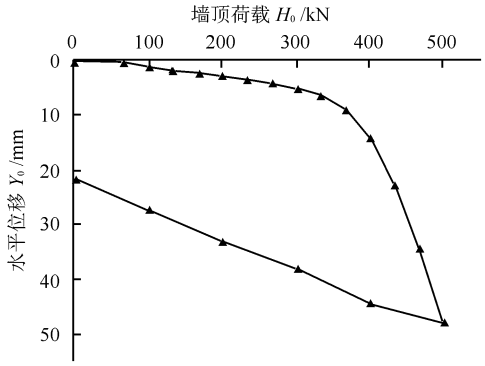


图 4　墙顶荷载-水平位移曲线

Fig.4　Curve of head level load with horizontal displacement

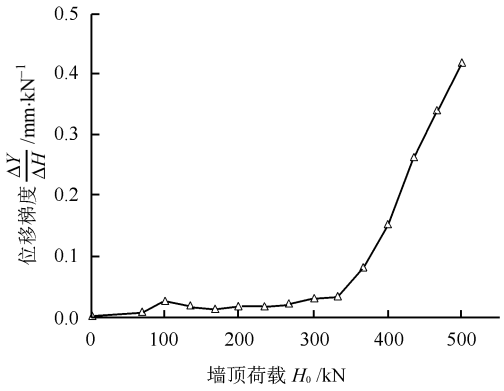


图 5　墙顶荷载-位移梯度曲线

Fig.5　Curve of head level load with ratio of increment of displacement vs load

表 1　试验墙各级荷载下的有关试验数据

Table 1　Test data of diaphragm wall under horizontal loading

荷载	水平位移 /mm			地表处墙身转角	地表处墙身剪力	墙身最大弯矩	Z_{max}	Z_g
/kN	墙顶	墙地表处	墙底	/（°）	/kN	/kN·m	/m	/m
67	0.820 5	0.55	0.008 83	0.022	−67	52.7	2.5	7.25
100	1.641	1.1	0.017 67	0.041	−100	109.2	2.5	7.44
133	2.461 5	1.65	0.026 5	0.060	−133	161.4	2.5	7.55
167	3.282	2.2	0.035 33	0.080	−167	213.6	2.51	7.62
200	4.102 5	2.75	0.044 17	0.102	−200	265.8	2.52	7.68
233	4.923	3.3	0.053	0.128	−233	318.0	2.55	7.75
267	6.02	4.05	0.08	0.154	−267	375.0	2.56	7.82
300	7.968	5.121	0.112	0.198	−300	422.5	2.58	7.88
333	9.927	6.2	0.14	0.274	−333	474.7	2.58	7.95
367	14.185	9.475	0.167	0.353	−367	539.9	2.6	8.23
400	18.596	14.216	0.2	0.450	−400	569.6	2.6	8.33
433	30.423	24.225	0.242	0.576	−433	643.7	2.62	8.45
467	40.024	35.625	−0.021	0.784	−467	740.2	2.65	8.48
500	61.913	49.036	−0.043 5	1.125	−500	831.2	2.7	8.82

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

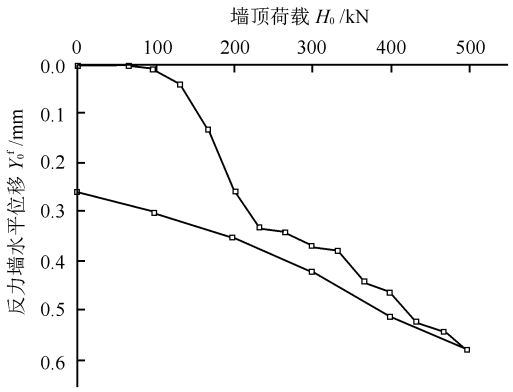


图 6 反力墙顶荷载-水平位移曲线
Fig.6 Curves of head level load with horizontal displacement of fixed diaphragm wall

由图 4 和图 5 得到的墙顶荷载下水平位移有如下特点：（1）从整体上看，墙顶的荷载-位移曲线呈非线性性质。当墙顶加载最大荷载为 500 kN 时，墙前的变形量为 47.94 mm，卸载后墙体产生的残余变形较小，为 21.56 mm。（2）荷载-墙顶位移曲线具有显著的拐点，在较小的墙顶荷载下水平位移曲线近似为线性变化，当荷载超过一定值（333 kN）后，墙前土体进入塑性状态，水平位移急剧增加。（3）根据《建筑桩基技术规范》[14]，图 5 显示第 10 级荷载（367 kN）引起的位移量比前一级荷载（333 kN）有明显的增加，故取其前一级荷载为试验墙的水平临界荷载，即 $H_{cr}=333$ kN，对应的位移量为 6.19 mm。图 4 和图 5 曲线中未出现第 2 拐点，且在整个试验加载过程中墙身混凝土未出现裂缝，墙身质量完好，说明试验墙的水平极限荷载比预估最大值 500 kN 要大。

由图 6 可以看出，反力墙的水平位移曲线呈非线性变化，在最大加载荷载为 500 kN 时位移量很小，仅 0.58 mm，卸载后残余变形量为 0.26 mm，因此可以认为在整个加载过程中反力墙稳定不动。

5.2 墙顶荷载下墙身的水平变位特征

在单片墙截面两侧布设测斜管，测出墙顶各级荷载下墙身的实际水平位移，得到墙身水平位移-深度分布曲线如图 7 所示。由图可见：（1）墙顶各级荷载作用下墙身水平位移随深度逐渐减小，并随水平荷载的增加而增大。墙的水平变位主要发生在墙身上部的 1/3 段，即地面以下 0~5.0 m。墙侧上半部分土体处于塑性发展状态，而下半部分土体基本没有塑性变形，即处于弹性阶段；（2）在墙顶的第 1~9 级荷载作用下墙身水平变位较小，最大值不超过 7.0 mm，随着墙顶荷载的进一步增加，墙身水平位移开始增大，且位移增量逐步增大；（3）随着墙顶荷载的增加，墙身的第一位移 0 点及墙背反位移沿墙身逐渐向下移动。据实测水平位移，第 1～6 级荷载的第 1 位移 0 点位于地面以下 3.4 m 左右；第 7～9 级荷载在 3.8 m 左右；随着荷载的继续增加，墙身水平位移发展较快，且向墙身下段逐渐发展，第 10~12 级荷载的第 1 位移 0 点在 4.75 m 左右处；而最后两级荷载的第 1 位移 0 点位于 5.3 m 左右处。最后两级荷载墙背的反位移较大，位于地表下 5.3～9.6 m 之间，其最后一级反位移最大值达 4.985 mm，位于地表以下 7.5 m 处。

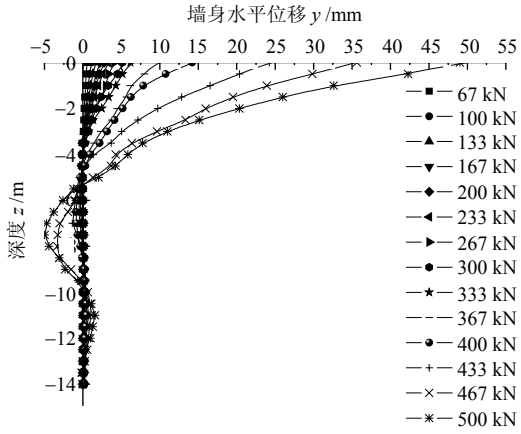


图 7 各级荷载下墙身实测水平位移-深度曲线
Fig.7 Curves of horizontal displacement with depth under level loading

5.3 弯矩、剪力、倾角及土抗力沿墙身的变化关系

从实测的墙顶、墙身水平位移分布情况（图 4 和图 7）看出，整个墙在各级荷载作用下墙顶的残余变形绝对值（0～21.6 mm）都比较小，说明墙身在黄土中的嵌固效应明显，墙底的残余变形一定很小（在墙顶加载荷载为 433 kN 时墙底水平变形最大，也仅 0.242 mm），所测得的墙顶残余变形量主要由黄土的残余变形量和墙顶的残余弯曲所构成，故采用理论试算，可应用如下幂函数对实测散点相拟合的方法处理墙身实测弯矩数据：

$$M(z)=z_0+A\frac{1}{1+\mathrm{e}^{\frac{z-z_c-w_1/2}{w_2}}}\left(1-\frac{1}{1+\mathrm{e}^{\frac{z-z_c-w_1/2}{w_3}}}\right) \quad (2)$$

式中：z_0 为初始值；A 为曲线的峰值点值；z_c 为峰值点对应的 z 值；w_1、w_2、w_3 为大于 0 的实数。经过计算，得到每一级荷载下的实测弯矩 $M_i(z)$ $(i=1, 2, 3, \cdots, 14)$ 曲线函数。

根据实测的墙身弯矩分布图 $M(z)$、墙顶的水

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平位移和墙底的水平位移作为边界条件，式（3）可求出墙身沿深度分布的剪力 $S(z)$、墙侧土抗力 $p(z)$ 和倾角 $\theta(z)$：

$$S(z)=\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}z};\ p(z)=\frac{\mathrm{d}^2M}{\mathrm{d}z^2};\ \theta(z)=\int\frac{M}{EI}\mathrm{d}z \quad (3)$$

从而可以得到试验墙的 S-z、p-z、θ-z 关系曲线，分别见图 8～10，进一步还可得到试验墙的 p-Y 分布曲线，见图 11。

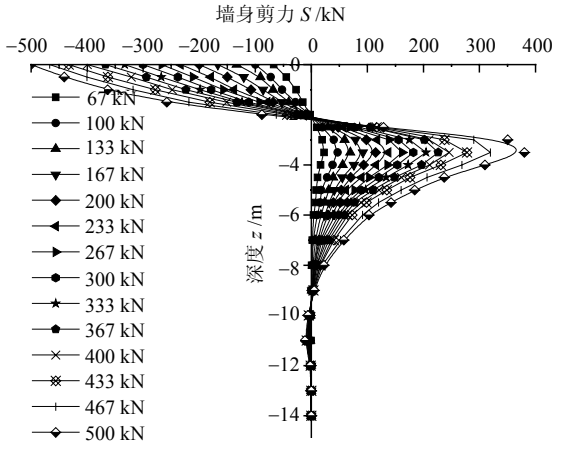


图 8　各级荷载下墙身剪力-深度曲线
Fig.8　Curves of shearing force with depth under level loading

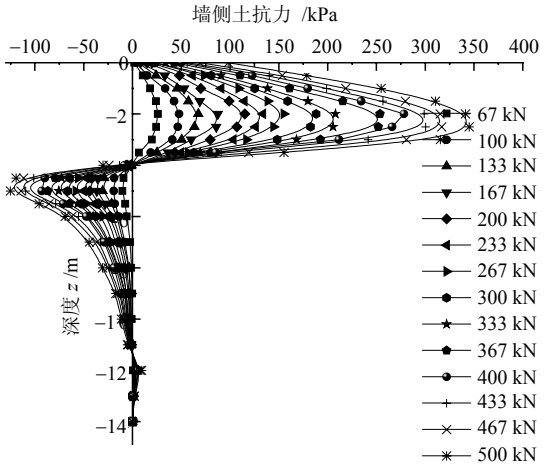


图 9　各级荷载下墙侧土抗力-深度曲线
Fig.9　Curves of loess resistance with depth under level loading

由试验结果（图 3 及图 8～11）得到以下几点认识：（1）图 3 中试验墙的弯矩分布曲线①弯矩沿墙身向下先逐步递增，然后逐步衰减，呈非线性变化，在墙身的下半部分基本趋于 0，说明墙的入土深度完全满足要求；②弯矩随着荷载的增加而增

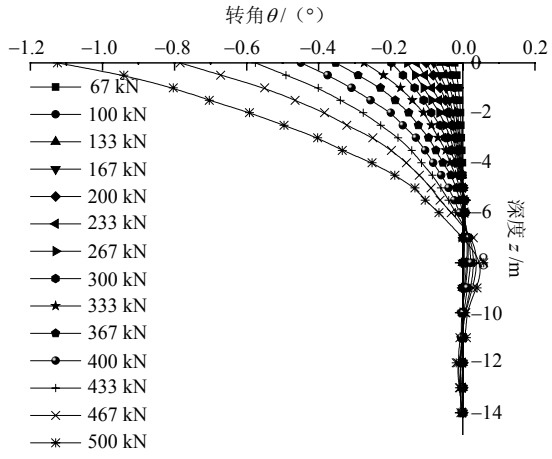


图 10　各级荷载下墙身转角-深度曲线
Fig.10　Curves of bend angle with depth under level loading

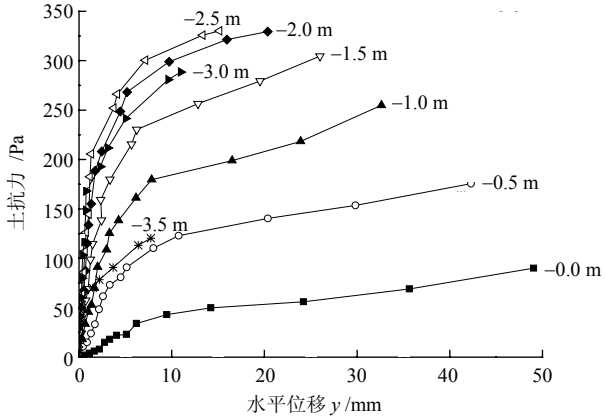


图 11　不同深度处墙侧土抗力-水平位移（p-Y）曲线
Fig.11　Curves of loess resistance with horizontal displacement in different depth

大，且弯矩的增量大体呈增大趋势。土体进入塑性状态后，塑性发展的趋势随墙顶荷载的增加而加快，墙侧土的抗力随着变大，引起弯矩增量变大；③0 弯矩点位于墙身的下半段范围内，弯矩与纵坐标的交点落在墙身 7.25 m 以下，并随着墙顶荷载的增加沿墙身逐步向下移动，见表 1。

（2）由图 8 可知，①墙顶荷载下墙身剪力向下先是一个近似的线性变化过程，达到反向剪力最大值后沿墙深呈非线性衰减，并在地表 9.0 m 以下基本趋于 0。②墙身剪力随墙顶荷载的增加而增大，剪力反向最大值随荷载的增加有向下移动的趋势。

（3）如图 9 可知，①在墙顶荷载作用下墙侧土抗力沿墙身是一个先增大后减小的变化过程，在地表以下 4.0 m 左右出现第 1 个 0 土抗力点，而后再反向增大，在 5.0 m 左右出现反向土抗力最大值，向下又是一个逐渐减小，并趋于 0 的过程。②土抗

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力在地表以下 2.3 m 左右达到最大值，出现这种情况是因为在地表以下 0～2.3 m，随着墙顶荷载的增加，墙侧土向上隆起，土体状态由弹性性状逐渐过渡到塑性发展阶段土中应力部分释放的过程。

（4）由图 10 知，墙身的转角随墙顶荷载的增加而增大，沿墙深迅速减小并趋于 0；与墙身水平位移-深度分布曲线相似，墙顶前 9 级荷载作用下，墙身转角很小，随着荷载进一步增加，转角增量的增加较快。相比而言，最后两级荷载作用下地表以下的 8.0~10.0 m 之间出现了较大的反向转角。

（5）由图 11 可知，其初始切线斜率随地表以下深度呈线性关系增长，而其曲线具有双曲线的特征，在较小荷载作用下 *p-Y* 曲线呈线性规律变化，土抗力随水平位移增加增长较快；随着墙顶荷载的逐级增加，土体由弹性向塑性发展，土抗力的增长随水平变位增加而变慢，呈非线性性质。

6 结 论

通过对水平荷载下黄土地基中单片地下连续墙现场试验结果的分析和计算，得出与弹性长桩承载特性类似的规律[13]，但其水平承载能力、墙身水平变位、墙身的抗弯特性及墙侧土抗力的分布规律具有其独特的分布性状，结论如下：

（1）墙顶水平荷载-位移曲线具有显著的拐点，呈非线性性质。在墙顶荷载达到临界荷载 333 kN 之前，墙顶位移梯度随荷载的增加基本保持不变，而荷载超过临界荷载之后，位移梯度呈急剧变化趋势。试验墙的极限荷载大于 500 kN，卸载后墙体产生的残余变形较小。

（2）墙顶荷载作用下墙身水平位移及转角沿墙深逐渐变小，并随墙顶荷载的增加而增大。

（3）墙的受力及水平变形绝大部分发生在墙身上半部的 1/3 段，故墙身弯矩、剪力、转角及墙侧土抗力也主要发生在墙身上半部分。墙身弯矩及墙侧土抗力在墙顶各级荷载下，是一个先逐渐增大后减小的过程。因地表附近土体的隆起，墙身弯矩及墙侧土抗力最大值发生在地表以下一定深度范围内。

（4）随着墙顶荷载的逐级增加，墙侧土体由弹性性状向塑性性状发展，其塑性区逐步向深部推移，以抵抗荷载的作用，引起墙身弯矩、土抗力的最大值及 0 值点沿墙身向下迁移。

（5）墙的 *p-Y* 曲线具有双曲线的特征。随着墙顶荷载的增加，土抗力-位移由线性性质向非线性转变，并随入土深度的变化而变化。

致射：参加地下连续墙现场试验工作的还有中交公路规划设计院的陈晓东高级工程师，东南大学的缪国军工程师，西南交通大学的文华博士、舒中潘硕士。在此，对他们所做的工作表示诚挚地感谢！

参 考 文 献

[1] 丛蔼森. 地下连续墙的设计施工与运用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2001.

[2] 周建军，饶思礼，张有光，等. 虎门大桥锚碇大型混合基础的设计与施工[J]. 桥梁建设，1995，(2)：44－47.
ZHOU Jian-jun, RAO Si-li, ZHANG You-guang, et al. The design and construction of complicated anchor foundation under Human bridge[J]. **Bridge Construction**, 1995, (2): 44－47.

[3] 郭慧光，孙旻，徐伟. 地墙“巨无霸”——武汉阳逻长江公路大桥 45 m 埋深的南锚碇圆形地下连续墙施工及受力特性分析[J]. 建筑施工，2004，26（3）：188－191.
GUO Hui-guang, SUN Wen, XU Wei. Gigantic slurry wall-analysis of load-bearing properties in construction section of circular slurry wall[J]. **Building Construction**, 2004, 26(3): 188－191.

[4] 劳伟康，周立运，王钊. 大直径柔性钢管嵌岩桩水平承载力试验与理论分析[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23（10）：1 770－1 777.
LAO Wei-kang, ZHOU Li-yun, WANG Zhao. Field test and theoretical an analysis on flexible large-diameter rock-socked steel piles under lateral load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1 770－1 777.

[5] HAJNAL I, MARTON J, REGELE Z. Construction of Diaphragm Walls[M]. Translated by SIMON A B. New York: John Wiley & Sons, 1984.

[6] ZHANG L M, ASCE M. Behavior of laterally loaded large-section barrettes[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(7): 639－648.

[7] BUDKOWSKA B B. Effect of variable location of soil layers on the behaviour of laterally loaded piles－sensitivity analysis[J]. **Computers and Geotechnical**, 1999, 25: 25－43.

[8] BUDKOWSKA B B, SZYMCZAK C. On first variation of extremum values of displacements and internal forces of laterally loaded piles[J]. **Computer & Structures**, 1995, 57(2): 303－307.

下转第 2208 页

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力波作用下不规则洞室衬砌的应力和位移表达式，并以深埋城门洞形洞室衬砌为例，求出了爆破地震波以不同角度作用下，洞室衬砌的应力和振速分布规律，结合混凝土衬砌的抗拉强度，得到了不同情况下衬砌的临界破坏振速，计算结果与试验结果处于同一量级。

参 考 文 献

[1] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. 爆炸与冲击，2002，20（2）：175－181.
LIU Hui. Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blasting [J]. **Explosive and Shock Waves**, 2002, 20(2): 175－181.

[2] 朱瑞赓，李铮. 爆破地震波作用下岩石隧道的临界振动速度[C]//土岩爆破文集（第二辑）. 北京：冶金工业出版社，1983：285－291.
ZHU Rui-geng, LI Zheng. Critical vibration velocity for rock tunnels under the blasting seismic wave[C]//Corpus of Blasting in Soil and Rock. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1983: 285－291.

[3] 陈蕴生，李宁，吕强. 混凝土衬砌的爆振模拟试验研究[J]. 西安理工大学学报，1996，12（1）：47－51.
CHEN Yun-shen, LI Ning, LU Qiang. The concrete lined blasting vibration simulation test[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 1996, 12(1): 47－51.

[4] 周香莲，周光明，王建华. 饱和土中圆形衬砌结构对弹性波的散射[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24（9）：1 572－1 576.
ZHOU Xiang-lian, ZHOU Guang-ming, WANG Jian-hua. Scattering of elastic wave by circular cavity with lining in saturated soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1 572－1 576.

[5] 周香莲，周光明. SH 波对无限介质土中衬砌结构的动应力集中[J]. 岩土力学，2004，25（增刊）：366－368.
ZHOU Xiang-lian，ZHOU Guang-ming. Dynamic stresses concentration of SH wave by cavity with lining in infinite soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.l): 366－368.

[6] Yih-Hsing PAO. Elastic waves in solids[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1983, 50(4): 1 152－1 164.

[7] LIU D K, GAI B Z, TAO G Y. Applications of the method of complex function to dynamic stress concentration[J]. **Wave Motion**, 1982, (4): 293－304.

[8] SHI Shou-xia, HAN Feng, WANG Zhen-qing. The interaction of plane SH-waves and non-circular cavity surfaced with lining in anisotropic media[J]. **Applied Mathematics and Mehanics**, 1996, 17(9): 855－867.

[9] 许红涛，卢文波，蔡联明. 邻近爆破对坝基灌浆帷幕的影响机理研究[J].岩石力学与工程学报，2004，23（8）：1 325－1 329.
XU Hong-tao, LU Wen-bo, CAI Lian-ming. Mechanism study of blast-induced influence on vicinal curtain grouting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1 325－1 329.

[10] 于学馥，郑颖人. 地下洞室围岩稳定分析[M]. 北京：煤炭工业出版社，1983.

[11] 易长平. 爆破振动对地下洞室的影响研究[D]. 武汉：武汉大学，2005.

[12] 卢文波. 新浇基础混凝土爆破安全震动速度的确定[J]. 爆炸与冲击，2002，22（4）：327－332.
LU Wen-bo. Determination of the limit of the safety velocity for Young foundation concrete under blasting vibration loading[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2002, 22(4): 327－332

上接第 2188 页

[9] 孙学先. 黄土地基矩形挖井侧面水平摩阻力试验分析[J]. 兰州铁道学院学报，1997，16（1）：1－5.
SUN Xue-xian. The experimental study of level friction resistance of rectangly-dug well side on loess ground[J]. **Journal of Lanzhou Railway Institute**, 1997, 16(1): 1－5.

[10] 孙学先，崔文监. Q_4 黄土地基地下连续墙水平承载模型试验研究[J]. 兰州铁道学院学报，1995，14（3）：49－55.
SUN Xue-xian, CUI Wen-jian. Horizontal bearing test of the diaphragm wall modle in loess subgrade(Q_4)[J]. **Journal of Lanzhou Railway Institute**, 1995, 14(3): 49－55.

[11] 李涛. 铁路桥梁连续墙挖井基础设计方法的试验研究[J]. 中国铁道科学，1997，18（2）：46－53.
LI Tao. Test and research on the design method for diaphragm wall-type digging well foundation of railway bridge[J]. **China Railway Science**, 1997, 18(2): 46－53.

[12] 于书翰. 黄土地区拱桥桥台人工开挖地下连续墙基础[J]. 西安公路交通大学学报，2000，20（4）：32－35.
YU Shu-han. Manual excavated continuous concrete wall of the arch bridge abutment foundation in the loess region[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 2000, 20(4): 32－35.

[13] 路桥集团第一公路工程局. JTJ041－2000　公路桥涵施工技术规范[S]. 北京：人民交通出版社，2000.

[14] 中国建筑科学研究院. JGJ94－94　建筑桩基技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，1995.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net