井筒式地下连续墙基础竖向承载特性试验研究

陈晓东[1]，龚维明[2]，孟凡超[1]，李 涛[2]
(1.中交公路规划设计院有限公司，北京 100010；2.东南大学土木工程学院，江苏 南京 210096)

摘 要：井筒式地下连续墙基础是一种较为新颖的深基础形式。为研究其竖向承载特性，在国内首次采用自平衡法对黄土地区某桥梁的井筒式地下连续墙基础进行了现场静载试验。通过对试验数据分析，得出了地下连续墙基础的竖向承载力、侧摩阻力及端阻力的发挥特性。试验和分析结果为工程设计提供了重要依据。

关键词：地下连续墙基础；自平衡法；竖向荷载；极限承载力；侧摩阻力；端阻力
中图分类号：TU476 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)11－1665－05

作者简介：陈晓东(1968－)，男， 辽宁省铁岭人，高级工程师，硕士，主要从事特大型桥梁工程地质勘察。E-mail: chenxiaodongsir@vip.sina.com。

Test on vertical bearing behavior of shaft diaphragm wall foundation

CHEN Xiao-dong[1], GONG Wei-ming[2], MENG Fan-chao[1], LI Tao[2]
(1. China Highway Planning and Design Institute Consultants, Inc, Beijing 100010, China; 2. College of Civil Engineering，Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The diaphragm wall foundation is a new kind of foundation. To study vertical bearing behavior of the foundation, a shaft diaphragm wall foundation of bridge in loess area was tested for bearing capacity by use of the self-balanced method. The method was used for the first time in China. By analyzing test data, the vertical bearing capacity, lateral friction and tip resistance of the diaphragm wall foundation were studied. The test data and results were very important to design.

Key words: diaphragm wall foundation; self-balanced method; vertical load; ultimate bearing capacity; side resistance; tip resistance

0 引 言

通常情况下，地下连续墙作为防渗墙或挡土墙使用。而将其直接作为结构的深基础，同时承受竖向和水平荷载，则是基础工程中较新颖的做法。这样不仅可以代替桩基础，也可以代替沉井基础。它与其它深基础形式相比，有侧摩阻力大、刚性大、断面形式多样、施工安全便利、社会效益和经济效益较好等优点。地下连续墙基础虽然具有许多优点，但1979年才在日本首次应用于实际工程，在我国少量应用于大型桥梁、高耸建筑物、超高层楼房的基础工程中[1]。理论研究不够深入，相关资料较为缺乏。而我国广大的黄土地区土层壁立性好，垂直开挖方便，易于进行地下连续墙基础的施工。针对这种情况，交通部于2003年成立了“黄土地区大跨度桥梁地下连续墙和箱型基础的应用研究”课题组，对其进行专题研究。

地下连续墙基础的断面形式比较灵活，可以是闭合的井筒式，也可以是非闭合的壁式。课题组对黄土地区一井筒式地下连续墙基础进行了现场静载试验，研究其竖向承载特性，为设计提供资料。

关于地下连续墙基础的现场静载试验，国内外在20世纪90年代已开展了一些。铁道部第一勘测设计院在宝中铁路建设过程中，曾在Q_3黄土地区对井筒式地下连续墙基础进行过小尺寸模型试验，采用了锚桩法加载[2]。日本在东京至名古屋第二高速公路东海大府高架桥工程中，对其壁式地下连续墙基础（壁板桩）采用了与自平衡法类似的O-cell法进行了现场静载试验[1]。Urkkada Technology公司的Bengt H. Fellenius等在菲律宾马尼拉也曾对一根28 m长的壁板桩做过O-cell法静载试验[3]。由于本次井筒式地下连续墙基础断面尺寸较大，极限承载力高，采用传统加载方法在墙顶加载相当困难，故课题组采用自平衡法进行加载。本次试验是国内首次采用自平衡法对井筒式地下连续墙基础进行现场静载试验，研究荷载传递机理，为设计提供参考。

基金项目：交通部西部交通建设科技项目
收稿日期：2006－10－20

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

表 1 主要土层概况

Table 1 Status of principal strata

层号	土层名称	层厚/m	天然含水率 w/%	天然密度 ρ/(g·cm^{-3})	极限侧阻力 $[\tau_i]$/kPa	容许承载力 $[\sigma_0]$/kPa
②	黄土（以亚黏土为主）	8.00	19.1	1.72	30	120
③	黄土（以亚黏土为主）	6.85	21.8	1.73	50	200

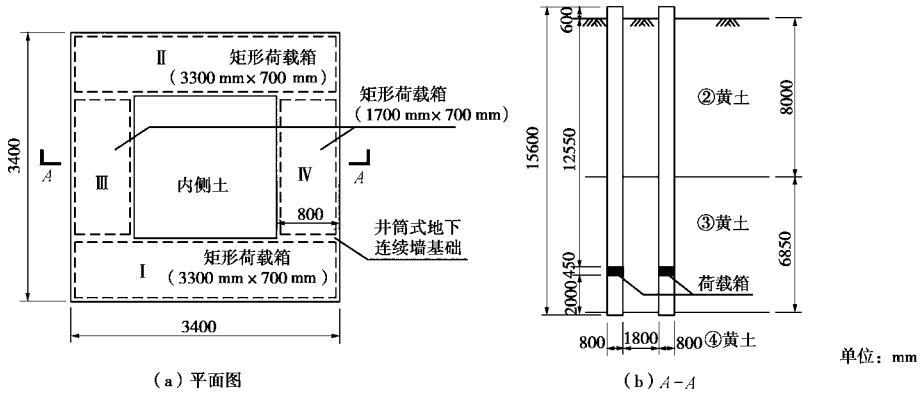


图 1 井筒式地下连续墙基础示意图

Fig. 1 Shaft diaphragm wall foundation

1 工程概况

1.1 依托工程简介

试验依托工程为国道 209 线河津－临猗一级公路上某跨线桥梁，上部为斜腿钢架拱桥，跨度约 50 m，基础形式采用井筒式地下连续墙基础。桥址区地处晋陕边界，属关中黄土地区（Ⅲ区）。

1.2 地下连续墙基础概况

该桥梁设计基础为井筒式地下连续墙基础，断面尺寸 7000 mm×7000 mm，墙厚 800 mm，墙高 18000 mm。由于其承载力太大，试验难以进行，故将实际基础进行一定比例的缩小进行现场载荷试验。根据施工条件，缩小断面尺寸 3400 mm×3400 mm，墙厚 800 mm，墙高 15600 mm，其中埋深 15000 mm，墙顶露出地面 600 mm，如图 1 所示。墙身混凝土强度等级为 C25，实测弹性模量为 34.0 GPa。

施工采用洛阳铲成槽，单片墙施工顺序如图 1 所示。先对单片墙Ⅰ成槽，同时将矩形荷载箱（加载装置）与上、下段墙的钢筋笼焊接牢固，将钢筋笼与荷载箱入槽就位，随即浇筑混凝土，完成单片墙Ⅰ的施工。在单片墙Ⅰ混凝土开始浇筑的同时，对单片墙Ⅱ成槽。待单片墙Ⅰ、Ⅱ施工完成后，以相同工序施工单片墙Ⅲ、Ⅳ。相邻两片墙之间刚性连接。

1.3 土层概况

试验场地位于桥址区，地层主要为第四系上更新统风积黄土，以亚黏土为主。主要土层概况见表 1。

2 试验情况

2.1 加载装置及量测元件布设情况

试验采用自平衡法加载，其原理详见文献[4]。在墙身中距端部 2 m 处埋设 4 个矩形荷载箱，2 个尺寸为 3300 mm×700 mm，另 2 个尺寸为 1700 mm×700 mm，高均为 450 mm，布置见图 1，单个矩形荷载箱见图 2。为保证 4 个荷载箱的位移同步，在地面处将对应的 4 根油管并作 1 根，利用高压油泵通过 1 根油管同时向 4 个荷载箱加压。

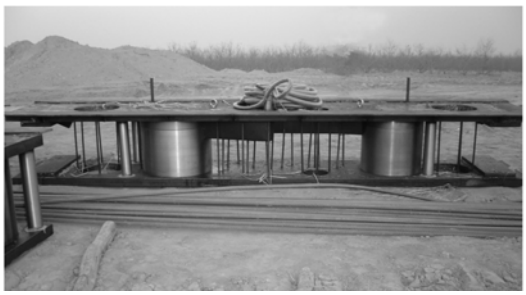


图 2 矩形荷载箱

Fig. 2 Rectangular load cell

在地下连续墙每片墙身中预埋 2 根声测管，用于超声波检测。在地下连续墙墙顶布置 12 只位移传感器，通过磁性表座固定在基准钢梁上。4 只用于量测荷载箱顶板的向上位移，4 只用于量测荷载箱底板的向下位移，通过伸至地面的位移杆量测；4 只用于量测墙顶向上位移。在地下连续墙内、外侧土中埋设 4 只土沉降标，并布置 4 只位移传感器，2 只用于量测

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

墙体内侧土的位移，2 只用于量测墙体外侧土的位移。共布置位移传感器 16 只。在地下连续墙墙身中布置钢筋应变计，用于量测墙身截面应变，得到墙身轴力，以推算分层侧摩阻力。共布置 7 个量测断面，间隔 2 m，每个断面埋设 8 只，共 56 只。量测元件布设情况见图 3，现场测试情况见图 4。

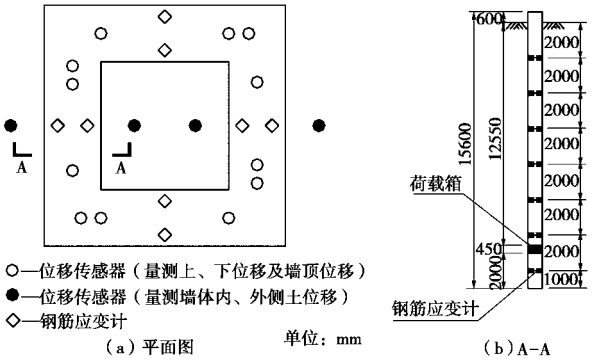


图 3 量测元件布设图

Fig. 3 Arrangement of measuring elements



图 4 现场情况

Fig. 4 Field situation

2.2　承载力预估及试验过程

日本设计指南在设计地下井筒式连续墙基础时考虑内侧土柱的侧摩阻力。而文献[2]通过试验则得出“内侧土柱对承载力贡献很小，在设计时可不计内侧土柱作用，按空心基础建立计算模型”的结论。文献[1]也按不计内侧土柱侧摩阻力的保守算法进行设计。

针对上述情况，课题组分 2 种情况预估地下连续墙竖向极限承载力。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTJ024-85）[5]，墙底土的极限端阻力

$$\sigma_{\mathrm{R}}=2m_0\lambda\{[\sigma_0]+k_2\gamma_2(h-3)\}$$
$$=2\times1\times0.70\times[200+1.5\times17.3\times(15-3)]=715.96\ \mathrm{kPa}。$$

根据表 1 及工程地质勘察报告，估算地下连续墙竖向极限承载力如下：

不计内侧摩阻力，

$Q_{\mathrm{u}}=13.6\times(8\times30+7\times50)+8.32\times715.96=13981\ \mathrm{kN}$；

视内侧摩阻力同外侧摩阻力，

$Q_{\mathrm{u}}=20.8\times(8\times30+7\times50)+8.32\times715.96=18229\ \mathrm{kN}$。

为确保测出极限承载力，课题组决定将最大加载值放大至 50000 kN，每级加载值为预估极限加载值的 1/15，第 1 级加载值为 2 倍荷载分级。加载时采用慢速维持荷载法，每级加载后第 1 h 内在 5，15，30，45，60 min 时测读一次，以后每隔 30 min 测读一次。每级加载下沉量，在 1 h 内如不大于 0.1 mm 即可认为稳定。整个试验过程正常。

试验前对地下连续墙墙身混凝土质量和完整性进行了超声波检测。

试验过程中，加载至第 9 级荷载（2×16670 kN）时，下位移急剧增大，很难稳定，且该级的位移量远远大于上一级位移量的 5 倍，根据《桩承载力自平衡测试技术规程》（DB32/T291—99）[6]，取前一级加载值 15000 kN 为下段墙的极限承载力。随后测试仅以上段墙位移是否稳定进行加载判断。加载至第 11 级荷载（2×20000 kN）时，荷载箱向上位移达到 29 mm，加载值已接近荷载箱能力，顶板与底板相对位移已接近荷载箱最大行程 220 mm 极限，故终止加载。上段墙取前一级加载值 18330 kN 为极限承载力。

3　试验分析

3.1　位移分析

根据位移传感器采集的数据，绘出测试 $Q-s$ 曲线及土位移曲线如图 5 和 6 所示。由图 5 可知，下段墙加载曲线呈陡变型，而上段墙加载曲线呈缓变型，表明下段墙侧摩阻力及端阻力已发挥至极限，而上段墙侧摩阻力尚未完全发挥。由图 6 可知，墙体内、外侧上部土层在加载过程中均有所上抬，但位移均比墙顶位移小，且内侧土上抬量大于外侧土。

3.2　初步确定竖向极限承载力

根据文献[6]，桩竖向抗压极限承载力 Q_{uk} 可按下式计算

$$Q_{\mathrm{uk}}=\frac{Q_{\mathrm{u}}^{+}-G_{\mathrm{p}}}{\lambda}+Q_{\mathrm{u}}^{-}\quad 。\qquad(1)$$

表 2 极限侧阻力、极限端阻力地质报告提供值与实测值的比较

Table 2 Comparison between reported and measured values of ultimate lateral friction and tip resistance

层号	土层名称	地质报告极限侧阻力[τ_i]/kPa	地质报告极限端阻力[σ_{R}]/kPa	实测极限侧阻力[τ_i]/kPa	实测极限端阻力[σ_{R}]/kPa
②	黄土	30	—	74.7	—
③	黄土（荷载箱上部）	50	—		—
③	黄土（荷载箱下部）	50	716	85.1	1377

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

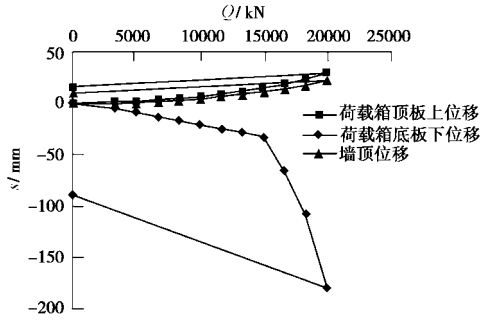


图 5 测试 $Q-s$ 曲线

Fig. 5 $Q-s$ curves in test

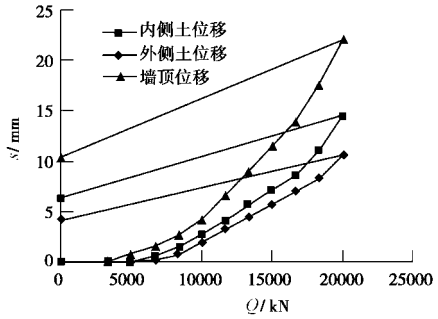


图 6 土位移曲线

Fig.6 Settlement curves of soil

式中，Q_u^+，Q_u^- 为上、下段桩极限承载力实测值；G_p 为荷载箱上部桩自重；λ 为系数，对于本工程黄土 $\lambda=0.8$。本文采用上述方法进行初步计算。

荷载箱上段墙竖向承载力为 $\dfrac{18330-13.15\times\left(3.4^2-1.8^2\right)\times 25}{0.8}=19494$ kN，上段墙平均极限侧摩阻为 $\dfrac{19494}{12.55\times\left(3.4+1.8\right)\times 4}=74.7$ kPa，基础竖向抗压极限承载力 $Q_{uk}=19494+15000=34494$ kN。

由计算结果可知，实测极限承载力约为计算值的 1.8 倍，上段墙平均侧阻比地质报告提供值大。

3.3 钢筋应变计数据分析

根据每个断面的 4 只钢筋应变计的读数，取其平均值ε，近似认为钢筋与混凝土应变相同，进而可按式（2）求得地下连续墙墙身截面轴力

$$P=\varepsilon\left(E_sA_s+E_cA_c\right), \tag{2}$$

式中，E_sA_s，E_cA_c 分别为钢筋和混凝土的刚度。根据轴力分布情况，即可推得墙侧摩阻力分布情况，由此得到轴力分布曲线、侧摩阻力分布曲线、侧摩阻力－变位曲线、端阻力－变位曲线，分别见图 7～10。由图 8 和 9 可知，下端墙的侧摩阻力发挥比较充分。根据前面的计算结果及实测数据，可得主要土层极限侧阻力、极限端阻力地质报告提供值与实测值的比较情况，见表 2 所示。

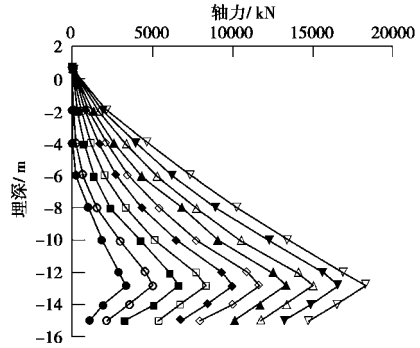


图 7 轴力分布曲线

Fig. 7 Distribution of axial force

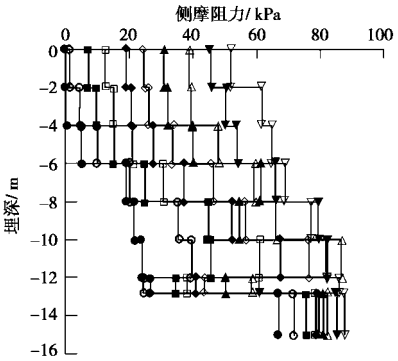


图 8 侧摩阻力分布曲线

Fig. 8 Distribution of lateral friction

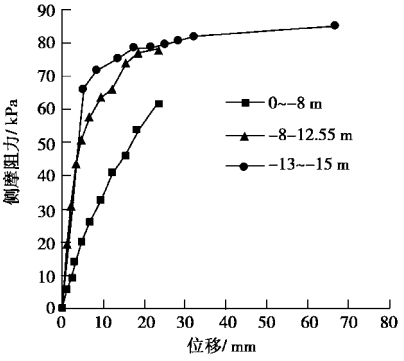


图 9 侧摩阻力－变位曲线

Fig. 9 Curves of lateral friction and displacement

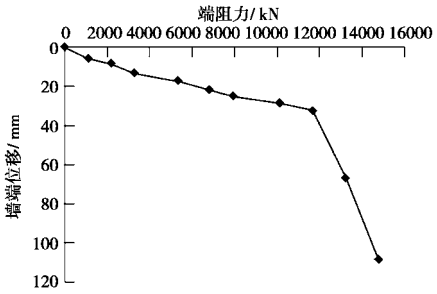


图 10 端阻力－变位曲线

Fig. 10 Curves of resistance and displacement of tip

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

3.4　向传统静载试验结果的等效转换

为更好地研究地下连续墙基础的竖向承载特性，需将自平衡法测试得到的结果等效转化为传统静载试验的结果。根据前面得到的轴力和侧摩阻力的分布曲线，利用侧摩阻力与变位量的关系、荷载箱荷载与向下变位量的关系，通过荷载传递解析方法，可求得墙顶荷载对应的荷载－沉降关系。等效转换的墙顶$Q-s$曲线见图11，在等效墙顶荷载作用下侧摩阻力和端阻力的发挥比例见图12。

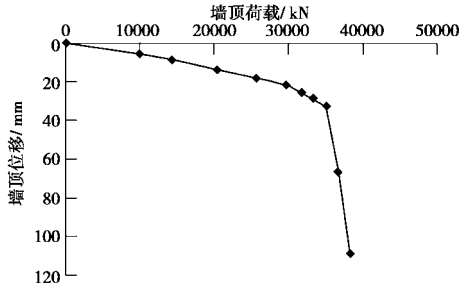


图 11 等效墙顶 $Q-s$ 曲线

Fig. 11 Equivalent $Q-s$ curve on top of in wall

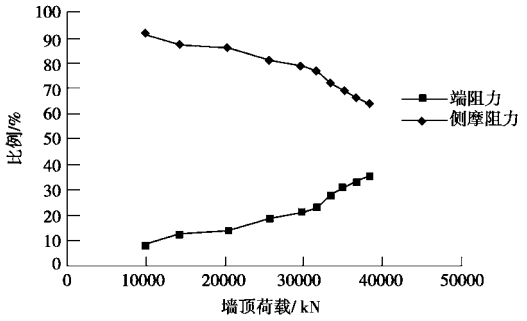


图 12 侧摩阻力和端阻力发挥比例

Fig. 12 Ratio of lateral friction and tip resistance

由图 11 可知，等效转换 $Q-s$ 曲线呈陡变型，据其可确定地下连续墙基础的竖向抗压极限承载力为 35047 kN，与前述根据式（1）所确定的值相近。由图 12 可知，地下连续墙基础在正常工作荷载作用下，竖向承载力主要由侧摩阻力提供，随着荷载不断增大，侧摩阻力所占比例下降，端阻力所占比例提高。如墙顶荷载为 9859 kN 时，侧摩阻力占 91%，端阻力占 9%；墙顶荷载为极限承载力 35047 kN 时，侧摩阻力占 69%，端阻力占 31%。运营状态下，侧摩阻力对地下连续墙基础竖向承载力起主要贡献作用。

4　结　　论

（1）本次静载试验是为了研究某一实际桥梁工程井筒式地下连续墙基础的竖向承载特性而进行的，采用自平衡法进行加载。这是国内首次采用自平衡法对井筒式地下连续墙基础进行现场载荷试验研究。试验过程较为顺利，实测数据为设计提供了重要资料。

（2）通过试验得到地下连续墙基础的极限承载力大大超过预估承载力，满足了设计的要求，研究结果表明，地下连续墙基础竖向承载力主要由侧摩阻力提供，其侧摩阻力较大，极限承载力较高，在黄土地区较为适用，适于作为桥梁的基础形式。

（3）此次试验没有将墙体内、外侧摩阻力发挥情况区分开来，对研究内侧土柱对承载力的贡献情况带来了些困难。而这个问题一直也是地下连续墙基础设计中的一个核心问题。因此，对于井筒式地下连续墙基础侧摩阻力的试验研究还有待改进，以明确内侧摩阻力的发挥性状。

参考文献：

[1] 丛蔼森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 323－326. (CONG Ge-sen. Design construction and application of diaphragm wall[M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 2000: 323－326. (in Chinese))

[2] 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. (in Chinese))

[3] FELLENIUS Bengt H, ALTAEE Ameir, KULESZA Richard, et al. O-cell testing and FE analysis of 28-m-deep barrette in Manila, Philippines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(7): 566－575.

[4] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 薛国亚. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, **23**(1): 82－88. (GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, XUE Guo-ya. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. Journal of Building Structures, 2002, **23**(1): 82－88. (in Chinese))

[5] JTJ024—85 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (JTJ024—85 Specifications for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: People's Communications Press, 1998. (in Chinese))

[6] DB32/T291—99 桩承载力自平衡测试技术规程[S]. 1999. (DB32/T291—99 Regulation for the measurement of the pile bearing capacity with self-balancing method[S]. 1999. (in Chinese))

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