

文章编号: 1000-7598-(2009) 01-0152-05

竖向荷载下矩形闭合地下连续墙 桥梁基础群墙效应研究

文 华¹, 程谦恭¹, 陈晓东², 孟凡超²

(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)

摘 要: 矩形闭合地下连续墙基础(简称闭合墙基础)是一种新型的桥梁基础。通过室内模型试验,对闭合墙基础的群墙效率、沉降比等进行了研究,同时探讨了闭合墙墙间距(即内侧边长)对群墙效应的影响。试验中采用了 2 组不同截面尺寸的模型墙,其中 A 组模型墙边长小于 B 组模型墙,墙厚和墙高均相同。试验研究表明,闭合墙与单片墙在相同沉降下的荷载比一般都大于 1, B 组闭合墙荷载比和群墙效率均大于 A 组闭合墙;闭合墙与单片墙在相同墙顶应力下的位移比和沉降比基本都大于 1, A 组闭合墙位移比大于 B 组闭合墙。在保持墙厚和墙高不变的情况下,适当增大闭合墙基础的内侧边长可以有效地提高群墙效率和承载性能,从而获得更好的经济效益。

关 键 词: 矩形闭合地下连续墙; 群墙效应; 群墙效率; 沉降比; 墙间距

中图分类号: TU 476⁺.2

文献标识码: A

Research on wall group effect of rectangular closed diaphragm wall as bridge foundation under vertical loading

WEN Hua¹, CHENG Qian-gong¹, CHEN Xiao-dong², MENG Fan-chao²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Highway Planning and Design Institute, Beijing 100010, China)

Abstract: Rectangular closed diaphragm wall foundation is a new type of bridge foundation. Wall group efficiency and settlement ratio and influence of wall spacing on wall group effect were studied through a model test. There were two groups of model walls in the test, all of the walls had same thickness and height, but side length of model walls in group A was less than that in group B. It was observed that the load ratio of closed diaphragm wall and single diaphragm wall with the same settlement was always large than 1; further more, the load ratio and wall group efficiency of closed diaphragm wall B was more larger than closed diaphragm wall A. The settlement ratio of closed diaphragm wall and single diaphragm wall with the same head pressure was also large than 1; and the settlement of closed diaphragm wall A was more larger than closed diaphragm wall B. Enlarging the wall spacing was a effective measure to improve the wall group efficiency and load-bearing capacity with the same wall thickness and wall height. Then better economic benefits would be obtained.

Key words: rectangular closed diaphragm wall; wall group effect; wall group efficiency; settlement ratio; wall spacing

1 引 言

所谓矩形闭合地下连续墙桥梁基础(以下简称闭合墙基础)就是相邻的地下墙体采用刚性接头连接,形成平面闭合的矩形框架并设置顶板(承台)的基础形式^[1],如图 1 所示。从结构型式看,闭合墙基础可以看作由 4 片单片墙基础经刚性连接而

成。自 1979 年日本在东北新干线高架桥工程中首次采用地连墙基础以来,闭合地下连续墙基础在日本得到了迅速的发展^[2-6]。在我国,地下连续墙一般多用于基坑围护结构和防渗结构^[2],也有一些工程将地下连续作为建筑物主体结构的一部分来使用^[7-9]。然而,将闭合墙基础用作承受竖向荷载的桥梁基础,才刚刚起步^[10-11]。尽管在虎门大桥^[12]

收稿日期: 2007-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40172093); 国家杰出青年基金(No. 40025103); 交通部西部交通建设科技项目基金(No. 200331849457); 西南交通大学 2008 年博士研究生创新基金资助项目。

作者简介: 文华,男,1978 年生,博士研究生,从事特殊土与基础工程方面的研究。E-mail: wenhua189@163.com

和武汉阳逻大桥^[13]等桥梁工程中采用了地下连续墙作为锚碇基础,但这并不是真正意义上的地连墙基础^[14],因为在这些基础中地连墙的作用主要是作为基坑施工期间的支护结构。

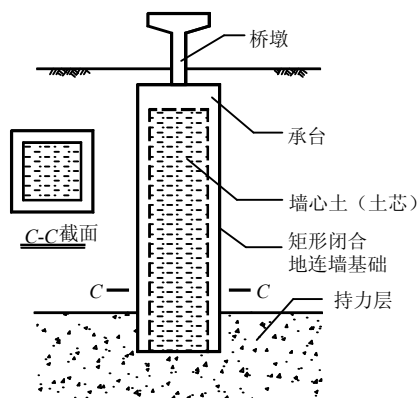


图1 矩形闭合地连墙桥梁基础示意图
Fig.1 Sketch of closed diaphragm wall foundation

由于墙内土芯的存在,矩形闭合墙基础的荷载传递机制和承载性状变得十分复杂。对于竖向荷载作用下的摩擦型闭合墙基础,基础顶部大部分荷载通过墙侧摩阻力传布到墙内、外侧以及墙端土层中。随着墙端的贯入变形和墙身的弹性压缩,承台底也产生一定的土反力,分担一部分荷载,其余荷载由墙端土层承受,这一特性使得承台底面土、墙内侧土、墙外侧土以及墙端土都参与工作,形成承台-墙-土相互影响共同作用,闭合墙的工作性状趋于复杂。组成闭合墙的任一片墙,其工作性状明显不同于独立单片墙,闭合墙承载力将不等于4片独立单片墙承载力的简单叠加,沉降特性也不同于单片墙基础,这就是闭合墙基础的“群墙效应”。然而,对于闭合墙基础的群墙效应问题的研究,在国内外相关领域还未见报道。

为此,笔者进行了针对闭合墙桥梁基础的室内模型试验,对闭合墙基础群墙效率、沉降比等内容进行研究。

2 模型试验概况

为了研究群墙效应,在模型槽里同时设置了一个单片墙模型和一个闭合墙模型,采用2个杠杆分别加载,进行对比性试验。此外,为考查土芯截面大小(即闭合墙内侧边长大小)对群桩效应的影响,制作了2组不同截面尺寸的单片墙和闭合墙模型,先后进行了竖向荷载试验。

2.1 模型墙

模型墙材料采用厚32 mm的有机玻璃板材加工

而成,其中A组单片墙的截面尺寸为280 mm×32 mm,B组单片墙的截面尺寸为380 mm×32 mm,墙高均为770 mm。矩形闭合墙截面为“回”字型。A组闭合墙外侧截面尺寸为280 mm×280 mm,B组闭合墙外侧截面尺寸为380 mm×380 mm,墙高均为720 mm。

为增加表面粗糙度,在有机玻璃模型墙表面均匀地粘一层细砂粒。

2.2 模型土

采用从山西万荣采集的Q₄扰动黄土作为模型土。模型墙入土深度均为720 mm,墙底土层总厚720 mm,密度控制在1.5 g/cm³。墙侧土层总厚720 mm,密度控制在1.4 g/cm³。

2.3 墙顶位移量测

在单片墙顶和闭合墙顶各布设了2只30 mm量程的百分表,量测墙顶的位移。

2.4 加载装置

模型墙的加载装置采用简单易操作的杠杆加载(图2),杠杆由10号工字钢制成,荷载采用10 kg等重铸铁砝码,砝码盘用厚10 mm钢板制成。



图2 试验装置图
Fig.2 Sketch of test set

3 试验结果分析

3.1 荷载-沉降关系分析

(1) 单片墙与闭合墙的荷载-沉降特性

图3为2组地连墙荷载-沉降关系曲线,可见2组Q-s曲线均呈陡降型,破坏特征点十分明显,而闭合墙的荷载-沉降关系曲线呈缓变型,2组闭合墙的抗沉降性能要远远好于单片墙。单片墙中,B组单片墙的Q-s曲线几乎与A组单片墙重合,而其承载力较之A组单片墙提高很小。B组闭合墙的承载力则比A组闭合墙提高了很多,由图3可以看出,就相同位移对应的荷载而言,B组闭合墙大于A组闭合墙,而且随着沉降的增大,荷载差也在不断增大。

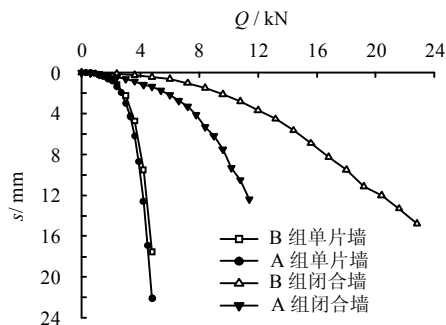


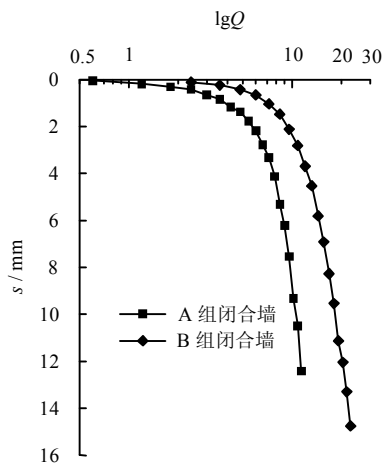
图3 2组地连墙荷载-沉降关系曲线之比较

Fig.3 Load-settlement curves comparison of diaphragm walls

(2) 极限承载力的确定

由图3可知,单片墙的 $Q-s$ 曲线呈陡降型,破坏特征点十分明显,因而参照单桩竖向极限承载力确定方法^[15],取A组单片墙的极限荷载为3.9 kN, B组单片墙的极限荷载为4.2 kN。

由于闭合墙的 $Q-s$ 曲线为缓变型,没有明显的陡降段,因此结合 $s-\lg Q$ 曲线^[16]确定闭合墙的极限荷载。由图4所示的 $s-\lg Q$ 曲线并综合考虑沉降等因素,确定A组闭合墙极限荷载为9.6 kN, B组闭合墙极限荷载为18 kN。

图4 2组闭合墙 $s-\lg Q$ 关系曲线Fig.4 The $s-\lg Q$ curves of closed diaphragm walls

3.2 相同沉降下的荷载比与群墙效率分析

表1列出了每组单片墙与闭合墙在相同沉降下的荷载及其比值(Q_B/Q_D ,下标B代表闭合墙,D代表单片墙)。在A组地连墙中,当沉降为0.05 mm时,闭合墙承担的荷载为0.6 kN,小于单片墙的荷载,荷载比小于1。随着沉降的增加,闭合墙的内摩阻力、端阻力和承台土反力逐渐发挥,闭合墙的承载能力不断增强,所承担的荷载不断增大,且增大的幅度明显大于单片墙,荷载比也由0.8增至2.4。

表1 地连墙相同沉降下的荷载比
Table 1 Load ratio of diaphragm walls with the same settlement

组别	沉降量 /mm	单片墙荷载 /kN	闭合墙荷载 /kN	荷载比 /%
A	0.05	0.7	0.6	0.8
	0.20	1.1	1.3	1.1
	0.50	1.7	2.6	1.5
	1.00	2.2	3.9	1.8
	3.00	3.0	6.8	2.3
	6.00	3.6	8.8	2.5
	9.00	3.9	10.0	2.6
	10.00	4.3	10.5	2.5
	12.00	4.7	11.3	2.4
	0.15	1.2	2.8	2.3
B	0.40	1.7	4.7	2.7
	1.00	2.3	7.1	3.1
	2.00	2.9	9.4	3.3
	4.00	3.5	12.4	3.5
	6.00	3.8	14.7	3.9
	10.00	4.2	18.4	4.3
	12.00	4.4	20.3	4.6
	14.00	4.5	22.2	4.9

B组地连墙中闭合墙在相同沉降下对应的荷载值始终大于单片墙,荷载比由2.3变化至4.9,明显大于A组地连墙的荷载比,原因是,B组闭合墙土芯截面尺寸为31.6 mm×31.6 mm大于A组闭合墙的土芯21.6 mm×21.6 mm,其土芯截面积是A组闭合墙土芯面积的2.14倍,截面尺寸大使得相对的两片墙间距增大,有利于内摩阻力的发挥,而土芯截面积的增大使得承台土反力增大,因此B组闭合墙的承载能力较之A组闭合墙有很大的提高。

群墙效率 η 按下式计算:

$$\eta = \frac{Q_{uB}}{4Q_{uD}} \quad (1)$$

式中: Q_{uB} 为闭合墙的极限荷载; Q_{uD} 为单片墙的极限荷载。

表2列出了2组地连墙的极限荷载和闭合墙的群墙效率。A组闭合墙的群墙效率为0.61,而B组闭合墙的群墙效率为1.07,不难看出,B组闭合墙的承载效率高于A组闭合墙。由于B组闭合墙的内边长增大,闭合墙的墙间距(两两相对的墙的间距)增大,有效地促进了内摩阻力和承台土反力的发挥,使得组成闭合墙的每一片墙在闭合墙基础的工作条件下发挥的程度明显好于A组闭合墙。

从极限承载力和相应的基础体积(在实际工程中一般指混凝土方量)来看,A组闭合墙的极限承载力是A组单片墙的2.46倍,而基础体积是单片墙的3.54倍,可见A组闭合墙的承载效能不太理想;

B组闭合墙的极限承载力是B组单片墙的4.29倍，基础体积是单片墙的3.66倍。相比之下，B组闭合墙的承载效能较高。

表2 2组闭合墙的群墙效率

Table 2 Group effect coefficient of closed diaphragm walls

组别	单片墙极限荷载 / kN	闭合墙极限荷载 / kN	群墙效率
A	3.9	9.6	0.61
B	4.2	18.0	1.07

由以上分析可知，闭合墙基础的承载效能与墙内土芯的大小有着直接的关系，在保持墙厚和墙高不变的情况下，适当增大内侧边长可以有效地提高群墙效率和承载性能，从而获得更好的经济效益。

3.3 相同应力下的位移与沉降比分析

表3列出了每组单片墙与闭合墙在相同墙顶应力下的墙顶位移及其比值(s_B/s_D)。为了方便与单片墙进行比较，假定闭合墙基础的总荷载全部由墙体承担，则闭合墙的墙顶应力为

$$\sigma = \frac{Q_B}{A_B} \quad (2)$$

式中： Q_B 为闭合墙的总荷载； A_B 为闭合墙的横截面积。

表3 地连墙相同应力下的位移比

Table 3 Settlement ratio of diaphragm walls with the same press

组别	应力 / kPa	单片墙位移 / mm	闭合墙位移 / mm	位移比
A	50	0.015	0.26	17.90
	75	0.036	0.42	11.30
	100	0.090	0.72	8.00
	150	0.290	1.37	4.70
	200	0.570	2.53	4.40
	250	1.060	4.41	4.20
	300	1.940	7.37	3.80
	350	3.600	11.50	3.20
	400	6.190		
	100	0.160	0.37	2.30
B	125	0.300	0.57	1.93
	150	0.460	0.88	1.90
	175	0.840	1.26	1.50
	200	1.240	1.75	1.40
	250	2.430	3.06	1.26
	300	5.140	4.68	0.90
	350	10.300	6.91	0.70
	400	18.100	9.50	0.50

由表3可知，A组闭合墙在相同墙顶应力下的位移比由17.9变化至3.2，虽然逐渐减小，但仍然

大于1，其原因是，当闭合墙内边长小即墙间距较小时，由于相邻与相对墙的内侧摩阻力传递给墙芯土的应力发生重叠，加之承台对内侧摩阻力的削弱效应，致使墙内侧摩阻力不能充分发挥。此外墙端阻力对墙底土体产生的应力也出现重叠，因此，在相同的墙顶应力下闭合墙产生的墙顶位移大于单片墙。

B组闭合墙虽然也存在应力重叠的现象，但墙间距的增大减小了应力重叠的程度，随着荷载的增加，内摩阻力逐步发挥，承台土反力分担荷载的比例也在增大，加之承台对墙端阻力的增强效应，因此B组闭合墙的位移比较之A组闭合墙要小得多，甚至在墙顶应力大于300 kPa以后，位移比小于1。

表4为闭合墙沉降比。闭合墙沉降比 ζ 用以表示在荷载相当（例如同为极限荷载或设计荷载）的条件下，闭合墙沉降量 s_B 比单片墙沉降量 s_D 增大的幅度，按下式计算：

$$\zeta = \frac{s_B}{s_D} \quad (3)$$

由表4知，除了A组闭合墙在极限荷载时的沉降比小于1外，其他情况下的沉降比均大于1，可见闭合墙沉降一般都超过单片墙。

表4 地连墙的沉降比

Table 4 Settlement ratio of diaphragm walls

组别	极限荷载时			设计荷载时		
	单片墙 沉降 / mm	闭合墙 沉降 / mm	沉降比	单片墙 沉降 / mm	闭合墙 沉降 / mm	沉降比
A	8.90	7.54	0.850	0.68	1.38	2.03
B	9.51	9.53	1.002	0.81	1.80	2.25

4 结 论

通过对闭合墙基础模型试验结果的分析可以得到几点结论：

(1) 由于承台底面土、墙内侧土、墙外侧土以及墙端土都参与工作，形成承台-墙-土相互影响共同作用，闭合墙的工作性状趋于复杂。组成闭合墙的任一片墙，其工作性状明显不同于独立单片墙，闭合墙承载力将不等于4片独立单片墙承载力的简单叠加，沉降特性也不同于单片墙基础。

(2) 闭合墙与单片墙在相同沉降下的荷载比一般都大于1，其中B组闭合墙由于墙间距增大，有效地促进了内摩阻力和承台土反力的发挥，其荷载比和群墙效率均大于A组闭合墙。

(3) 由于应力重叠和内摩阻力不能充分发挥等原因，闭合墙与单片墙在相同墙顶应力下的位移比

和沉降比基本都大于1, 其中A组闭合墙由于墙间距较小, 应力重叠更为突出, 因此其位移比大于B组闭合墙。

(4) 在保持墙厚和墙高不变的情况下, 适当增大闭合墙基础的内侧边长可以有效地提高群墙效率和承载性能, 从而获得更好的经济效益。

参考文献

- [1] 许黎明. 一种新的桥梁基础型式——地下连续墙基础[J]. 国外桥梁, 1995, (3): 230—234.
XU Li-ming. A new type of foundation: Diaphragm wall foundation[J]. *World Bridge*, 1995, (3): 230—234.
- [2] 丛葛森. 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.
- [3] 海野隆哉, 大植英亮. 地下連続壁の井筒設計法と現場水平載荷試験[J]. 土木技術, 1980, 36(5): 48—57.
- [4] 浅野勝博, 高橋幸浩, 小笠原令和. 鉄道橋基礎的設計例: 連壁剛体基礎[J]. 基礎工, 1982, 10(12): 70—77.
- [5] 松橋数保, 高橋将徳. 道路橋における地下連壁井筒基礎の設計[J]. 基礎工, 1984, 12(12): 74—80.
- [6] 曲尾理三郎, 藤岡繁樹. 東北新干線王子南部高架橋連壁剛体基礎工事[J]. 土木技術, 1984, 39(5): 40—51.
- [7] 王卫东. 地下连续墙的沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 122—125.
WANG Wei-dong. The method to calculate the settlement of the diaphragm wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(1): 122—125.
- [8] 唐孟雄. 高层建筑与承重地下连续墙及桩箱(筏)基础共同作用研究[博士学位论文D]. 上海: 同济大学, 1996.
- [9] 刘兴旺. 地下连续墙围护和承重结构内力变形及承载机制分析[博士学位论文D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘明虎, 付宇文. 井筒式地下连续墙基础设计及应用[J]. 公路, 2006, (5): 52—56.
LIU Ming-hu, FU Yu-wen. Design and application of closed diaphragm wall foundation[J]. *Highway*, 2006, (5): 52—56.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [16] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

上接第151页

(5) 钙质砂地基中土压力随深度急剧衰减, 荷载的有效影响深度为2~3倍基础宽度, 随着荷载的增大, 土压力逐渐传递到更深的土层。

参考文献

- [1] 孙宗勋. 南沙群岛工程地质环境分区与珊瑚礁工程地质特性研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2001.
- [2] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299—308.
SHAN Hua-gang, WANG Ren. Development of study of pile in calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 299—308.
- [3] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389—1392.
HEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(9): 1389—1392.
- [4] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [5] 李建国. 波浪荷载作用下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [6] 吕海波, 汪稔, 孔令伟. 钙质土破碎原因的细观分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增1): 890—892.
LÜ Hai-bo, WANG Ran, KONG Ling-wei. Preliminary mesoscopic analysis of factors of breakage calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Sup. 1): 890—892.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.