

DOI: 10.11779/CJGE2014S2026

# “两墙合一”地下连续墙竖向承载力设计计算研究

孙 峰, 徐杨青, 张婧雯

(中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** “两墙合一”地下连续墙作为超深基坑的一种支护方法越来越多的得到广泛应用。当其兼作承重结构时, 必须对地下连续墙的竖向承载力值进行预估和计算, 目前这方面的理论尚不成熟。以武汉某超深基坑工程为例, 结合现场静力载荷试验和后期主体结构沉降监测结果, 分析探讨了地下连续墙竖向极限承载力的计算方法, 以及计算中尺寸效应系数的选取。其方法可供类似基坑及基础设计参考。

**关键词:** 深基坑; 地下连续墙; 承载力

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0154-05

**作者简介:** 孙 峰 (1981-), 男, 工学学士, 工程师, 主要从事岩土工程设计、研究、施工和咨询工作。E-mail: 5699343@qq.com。

## Design and calculation of vertical bearing capacity of diaphragm wall

SUN Feng, XU Yang-qing, ZHANG Jing-wen

(Wuhan Design & Research institute Co., Ltd. of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** The diaphragm wall of "Two walls in one" as a support method for deep foundation pits is increasingly widely used. When it use as supporting structure, its vertical bearing capacity should be predicated and calculated. Taking an excavation in Wuhan project as an example, combining the field monitoring results of static load tests are combined with the post-settlement calculation method of main structures to analyzed the vertical ultimate bearing capacity of the diaphragm wall, and the size effect coefficient is calculated and selected. The proposed method can be used for design of similar excavations and foundations.

**Key words:** deep foundation pit; diaphragm wall; vertical bearing capacity

## 0 引言

以“两墙合一”地下连续墙作为深基坑支护方式的工程中, 若地下连续墙“存在”主体结构, 地下连续墙的设计计算除需要满足深基坑支护体系和地下室外墙的安全和使用要求外, 同时还应考虑利用地下连续墙代替部分工程桩承担建筑物自身的竖向荷载。这样的设计理念可以充分利用“两墙合一”地下连续墙的自身工程特性, 在大大缩短工期的同时节约工程造价。

但在实际设计过程中, 由于没有足够的经验积累和理论依据, 设计人员常常无法找到一种合适的计算方法来确定地下连续墙的极限承载力。本文阐述的相关计算方法首先是根据地下连续墙本身的结构特点, 将单片的地下连续墙看成是一根工程桩。由于单片地下连续墙的截面通常为长方形, 长宽比一般不小于3, 且其截面积一般远远大于目前通常研究的圆形桩及方形桩。因此必须选取较为合理的尺寸效应系数进修正。文中按截面面积等效的方法, 将长方形的地下连续墙截面等效为相应尺寸的圆形桩再根据 JGJ94—2008

《建筑桩基技术规范》桩体的极限承载力相关计算方式进行计算。本文以此为理论依据, 以武汉市某超深基坑设计计算、现场试验数据及主体结构后期监测资料为例, 提出地下连续墙竖向承载力的计算方法, 其对今后的相关理论研究和设计计算具有较大的指导意义。

## 1 工程概况

工程地点位于武汉市汉口中心城区, 建筑物主楼地上48层, 附楼6层。主楼及附楼下设三层地下室。基坑周长360 m, 开挖面积约8000 m<sup>2</sup>, 开挖深度12.5~15.6 m。基坑支护采用“两墙合一”地下连续墙+三道环形混凝土内支撑的支护方式。地下连续墙厚度800~1000 mm, 墙底均采用后压浆固化处理。地下连续墙在基坑东侧(EF段)和西侧(GI段)分别于上部的6层附楼相接, 主楼未与地下连续墙相接。

## 2 工程地质条件

场地地貌单元属长江一级阶地, 地势较平坦, 地面周边标高在 20.2~20.9 m 之间。与基坑支护工程有关的上部主要地层及参数见表 1。

表 1 主要地层及计算参数

Table 1 Parameters of soils

土层名称	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	c /kPa	$\varphi$ /(°)	$q_{sik}$ /kPa
(1)杂填土	18.5	8	18	20
(2)素填土	17.7	12	8	16
(1-3)淤泥	—	—	—	10
(2-1)黏性土	17.8	16	8	32
(2-2)淤泥	16.5	8	4	10
(2-3)淤泥质粉质黏土	17.4	13	7	20
(2-4)粉质黏土夹粉土	17.8	16	14	34
(3)粉砂、粉土与粉质黏土	17.8	8	22	36
(3a)粉砂	18.6	0	28	30
(4-1)粉砂	18.9	0	33	44
(4-2)粉砂	19.3	0	35	56

## 3 地连墙试验段极限承载力估算及现场静力载荷试验结果与分析

分别取 1000 厚地下连续墙地连墙试验段 GI-S 及 800 厚地下连续墙地连墙试验段 EF-S 段进行估算, 地连墙试验段的宽度均为 5.5 m。

地下连续墙墙底承载力估算根据《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 中 5.3.10 计算, 其中各土层的极限侧阻力标准值根据工程勘察报告中侧阻力特征值及乘以 2 得到(其中 1 层杂填土、2 层素填土、1~3 层淤泥取经验值), 由于在详细勘察阶段只考虑了主体结构工程桩的桩端持力层的极限端阻力标准值, 而未考虑地下连续墙墙端所处的 4-1 及 4-2 层粉砂层的桩端极限端阻力标准值, 因此在计算中该值根据《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 中表 5.3.5-2 得到。4-1 及 4-2 层粉砂层的极限端阻力标准值均取 650 kPa。

### (1) 地连墙试验段极限承载力标准值估算

GI 段地下连续墙极限承载力估算。GI 段地连墙试验段截面尺寸为 1.0 m×5.5 m, 地连墙试验段深度为 28.5 m, 墙端持力层为 4-1 层粉砂。计算地层概化见图 1。

假设将截面尺寸为 1.0 m×5.5 m 的墙体按面积等效为  $d=2.646$  m 直径的圆形桩。效应系数为  $\psi_{si}=\psi_p(0.8/d)^{1/3}=0.671$ 。

由于墙端采用了后压浆工艺处理, 后压浆影响侧阻力范围为桩端以上 12 m。故墙体极限承载力标准值为  $Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{gsk}+Q_{gpk}=u\sum\psi_{si}q_{sjk}l_j+u\sum\psi_{si}\beta_{si}q_{sik}l_{gi}+\psi_p\beta_pq_{pk}A_p=149871.75$  kN。



图 1 GI 段地层概化图

Fig. 1 Profile of soil section GI

EF 段地下连续墙极限承载力估算。EF 段地连墙试验段截面尺寸为 0.8 m×5.5 m, 地连墙试验段深度为 25.0 m, 墙端持力层为 4-2 层粉砂。计算地层概化见图 2。



图 2 EF 段地层概化图

Fig. 2 Profile of soil section EF

假设将截面尺寸为 0.8 m×5.5 m 的墙体按面积等

效为  $d=2.368\text{ m}$  直径的圆形桩。尺寸效应系数为  $\psi_{si} = \psi_p(0.8/d)^{1/3} = 0.697$ 。

由于墙端采用了后压浆工艺处理, 后压浆影响侧阻力范围为桩端以上 12 m。故墙体极限承载力标准值为  $Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} = u \sum \psi_{si} q_{sjk} l_j + u \sum \Psi_{si} \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \psi_p \beta_p q_{pk} A_p = 13642.99\text{ kN}$ 。

## (2) 现场静力载荷试验结果及分析

现场试验采用慢速维持荷载法, 用电动油泵逐级加载。地连墙试验段 EF - S 第一级加载量为 2000 kN, 以后每级加载量为 1000 kN。地连墙试验段 GI - S 第一级加载量为 3240 kN, 以后每级加载量为 1620 kN, 当总荷载超过计算极限承载力一级且地连墙试验段没有发生破坏, 停止加载并进行回弹试验。最终地连墙试验段 GI-S 的加载量为 16200 kN, 地连墙试验段 EF - S 加载量为 14000 kN。

地连墙试验段 GI - S 的试验  $Q - S$  曲线见图 3,  $S - lgt$  曲线见图 4。地连墙试验段 EF - S 的试验  $Q - S$  曲线见图 5,  $S - lgt$  曲线见图 6。

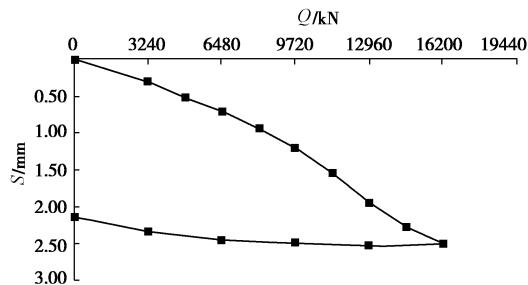


图 3 地连墙试验段 GI - S 试验  $Q - S$  曲线图

Fig. 3  $Q - S$  curves of soil section GI - S

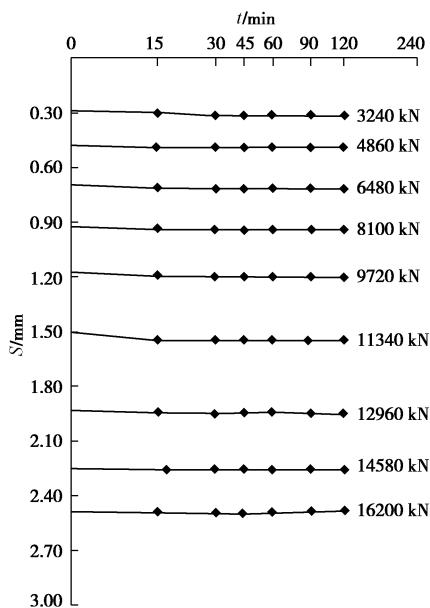


图 4 地连墙试验段 GI - S 试验  $S - lgt$  曲线

Fig. 4  $S - lgt$  curves of soil section GI - S

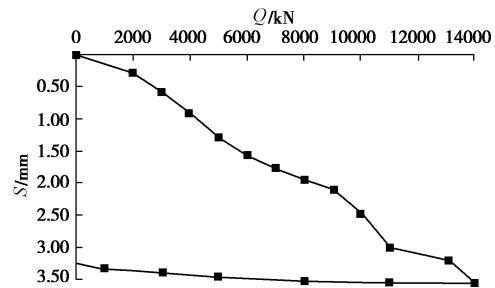


图 5 地连墙试验段 EF - S 试验  $Q - S$  曲线图

Fig. 5  $Q - S$  curves of soil section EF - S

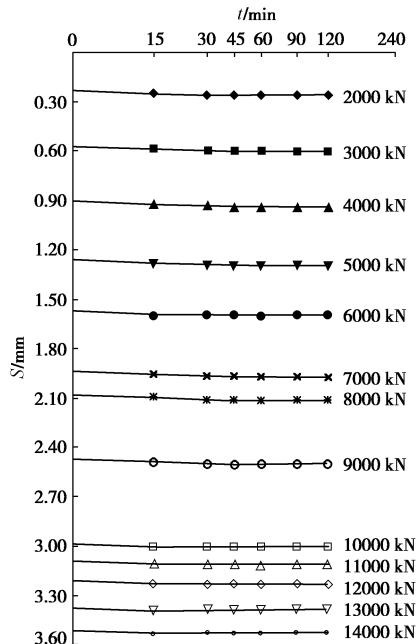


图 6 地连墙试验段 EF - S 试验  $S - lgt$  曲线

Fig. 6  $S - lgt$  curves of soil section EF - S

通过试验结果不难看出, 两副地连墙试验段在逐级加载超过估算极限荷载的过程中, 沉降量随荷载的增加较为平缓。墙体的最终沉降量满足建筑桩基沉降的允许变形值。结果证明采用截面等效后按目前的《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 选取尺寸效应系数并按单桩极限承载力计算地下连续墙极限承载力标准值是可行的。但通过试验数据同时可以看出, 地连墙试验段达到预算极限承载力标准值后仍能继续承受荷载而未破坏。这与计算中选取的极限侧摩阻力标准值、极限端阻力标准值以及后压浆效应增强系数偏于保守有关。

## 4 墙底承载力估算及后期监测结果分析

根据地连墙试验段估算及现场静载实验结果, 按估算地连墙试验段时计算方法对地下室形成后的地下连续墙承载力进行计算, 并对建筑物形成后墙体所受荷载进行复核计算。本工程“两墙合一”地下连续墙

各墙幅之间采用的连接形式为工字钢接头, 除个别异型墙外, 绝大多数墙体的施工幅宽均为 5.5 m。工字钢接头抗弯强度大, 但相对于墙身来说竖向抗剪切能力较差。基于以上特点, 设计计算墙体本身极限承载力时可将整段的地下连续墙当成以 5.5 m 幅宽为单位的多根相互“依靠”的工程桩。

需要指出的是, 与地连墙试验段有所不同, “两墙合一”连续墙在地下室形成后, 在开挖深度范围内只有外侧一面“迎土”, 故计算该部分墙体的侧摩阻力时, 只考虑“迎土”面部分侧摩阻力。

GI 段所在的区域地下室开挖深度 13.5 m。其每 5.5 m 幅宽地下连续墙极限承载力标准值如下:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} = u \sum \psi_{si} q_{sjk} l_j + u \sum \psi_{si} \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \psi_p \beta_p q_{pk} A_p = 12800.13 \text{ kN}.$$

GI 段地下连续墙墙长 37.8 m。墙体在底板位置共受 6 个(柱)点荷载。通过力的扩散作用传至墙底后可简化为线荷载, 即每延米地下连续墙底所受荷载。计算中取两边柱荷载的 1/2。计算结果简图见图 7。

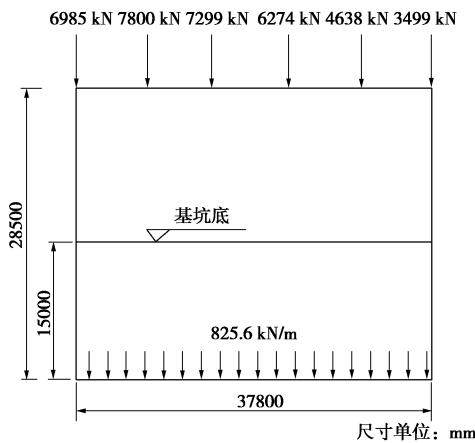


图 7 GI 段墙底荷载计算结果简图

Fig. 7 Calculated results of load at wall bottom of soil section GI

地下室部分地下连续墙(厚度 1.0 m)比原剪力墙(厚度 0.35 m)增加荷载为 219.38 kN/m。

同时根据《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 中 5.2.2 式计算( $K=2$ ): 可得  $R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} = 6400.07 \text{ kN}$ ,  $R_a > (825.6 \text{ kN} + 219.38 \text{ kN}) \times 5.5 \text{ m} = 5747.39 \text{ kN}$ , 满足承载力要求。

EF 段所在的区域地下室开挖深度 12.5 m 其每 5.5 m 幅宽地下连续墙的极限承载力标准值如下:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} = u \sum \psi_{si} q_{sjk} l_j + u \sum \psi_{si} \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \psi_p \beta_p q_{pk} A_p = 11243.04 \text{ kN}.$$

EF 段地下连续墙墙长 59.5 m。墙体在底板位置共受 9 个(柱)点荷载。通过力的扩散作用传至墙底后可简化为线荷载, 即每延米地下连续墙底所受荷载。计算中取两边柱荷载的 1/2。计算结果简图见图 8。

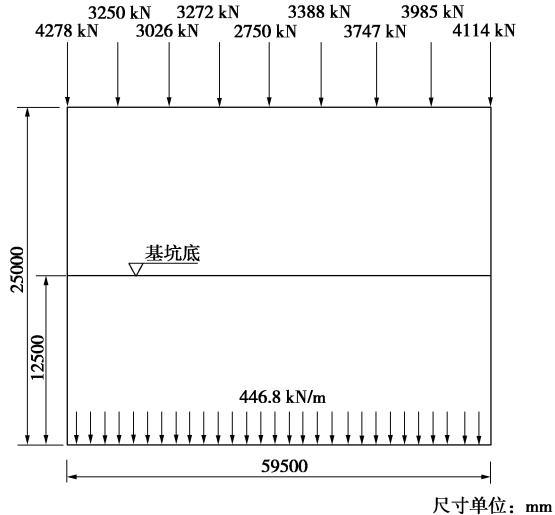


图 8 EF 段墙底荷载计算结果简图

Fig. 7 Calculated results of load at wall bottom of soil section EF

地下室部分地下连续墙(厚度 0.8 m)比原剪力墙(厚度 0.35 m)增加荷载为: 140.63 kN。

同时根据《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 中 5.2.2 式计算( $K=2$ )可得  $R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} = 11243.04/2 = 5621.52 \text{ kN}$ ,  $R_a > (446.8 \text{ kN} + 140.63 \text{ kN}) \times 5.5 \text{ m} = 3230.87 \text{ kN}$ , 满足承载力要求。

该工程地下连续墙所承受的上部建筑物荷载均来自 6 层附楼, 在附楼布设 8 个沉降观测点进行主体建筑物监测。2012 年 7 月 22 日开始对附楼进行第 1 次观测, 到 2013 年 12 月 2 日进行了第 13 次观测, 共提交阶段性监测成果 13 次。其中附楼以地下连续墙作为基础的 GI 段及 EF 段所在位置相对应的监测点分别为#2 和#7 监测点。以上监测点的 13 次监测成果见图 9。

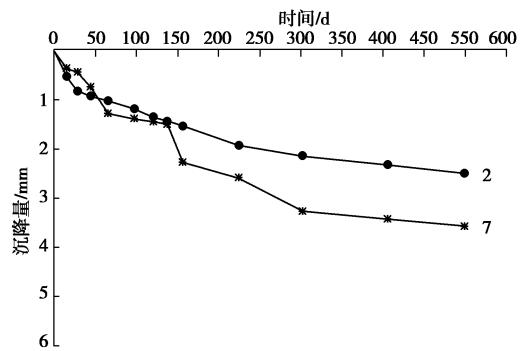


图 9 沉降量与时间关系曲线图

Fig. 9 Relationship between settlement and time

从监测结果来看, 498 d 后#2 监测点的最大沉降量为 2.49 mm, #7 监测点的最大沉降量为 3.57 mm, 总沉降量均较小。从第 11~13 次的监测数据来看#2 监测点的平均沉降速率为 0.0018 mm/d, #7 监测点的平均沉降速率为 0.0016 mm/d, 其沉降速率均远小于 0.04 mm/d 的稳定标准。由此可判断建筑物沉降已经稳定。

文中所阐述的计算方法可用于实际设计计算。

## 5 结 论

(1)本文通过地连墙试验段极限承载力标准值估算结合现场静力载荷试验数据及地下室形成后墙体承载力复核计算结合后期主体监测数据分析证明将矩形截面的地下连续墙按面积等效为大直径圆形桩体后按

《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 选取尺寸效应系数并按单桩极限承载力计算地下连续墙极限承载力在目前没有其它较为成熟的折减计算公式的情况下是可以用于实际设计计算的。

(2)由于本次进行的地下连续墙竖向抗压静载试验并不是破坏性试验,由试验结果可看出,加压荷载达到计算极限承载力后,墙体仍能继续承受荷载而未破坏。其中一部分原因是估算过程中选取的极限侧摩阻力标准值、极限端阻力建立值以及后压浆效应增强系数偏于保守。另一部分原因是由于本文采用的计算方法是用地下连续墙长方形截面按面积等效圆形桩截面计算尺寸效应系数的。但从理论上讲,当桩截面面积一定的情况下,边长以圆形最小,正方形次之,长方形最大,故在使用相同混凝土量条件下,长方形桩侧面积最大、正方形次之、圆形最小<sup>[4]</sup>。文中尺寸效应系数的计算未考虑此因素的影响因此计算的极限侧阻力偏小。

(3)同时应该注意到的是,作为地连墙试验段的

单幅地下连续墙是“四面迎土”的,而工程实际当中,地下连续墙体在地下空间中是以多副相连形成整体的。其形成的“多墙效应”会对其承载力产生怎样的影响到底有多大,采用怎样的方法计算,有待进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [2] GB50007—2002 建筑地基基础设计规范 [S]. 2002. (GB50007—2002 Code for design of building foundations[S]. 2002. (in Chinese))
- [3] 李桂花, 周生华, 周纪煜, 等. 地下连续墙垂直承载力现场试验研究[J]. 同济大学学报, 1993, 21(4): 575 - 580. (LI Gui-hua, ZHOU Sheng-hua, ZHOU Ji-yu, et al. Vertical bearing test of the diaphragm wall[J]. Journal of Tongji University, 1993, 21(4): 575 - 580. (in Chinese))
- [4] 蒋建平, 高广运. 地下连续墙竖向承载性能和承载力预测[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(11): 1699 - 1705. (JIANG Jian-ping, GAO Guang-yun. Bearing behaviors and prediction of vertical bearing capacity of deep diaphragm wall[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(11): 1699 - 1705. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)