

多幅竖向拼接预制预应力地连墙围护分析研究\*

胡坚尉

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘 要:** 预制预应力地连墙是一种新型的结构形式,且符合预制装配式的发展方向,其研究具有重大的意义。但单幅预制预应力地连墙长度过长,施工很不方便且成本巨大。将预制预应力地连墙分为竖向多幅,选取上海地区典型地质,对多幅竖向拼接的预制预应力地连墙在多变量下进行有限元模拟分析,在围护墙体自身变形、受力及周边环境保护等方面进行了系统的比较分析。结果表明,在多幅地连墙的合适部位施加预应力,能有效地减小围护墙体变形,且施加预应力越大,控制效果越明显,同时,地连墙上空心率对地连墙变形影响不大。研究结果有利于将来预制预应力地连墙的推广运用。

**关键词:** 地下连续墙;预应力;预制;多幅;竖向拼接;变形

中图分类号: TU473.2      文献标识码: A      文章编号: 1673-0836(2018)03-0786-06

Analysis on Multiple Vertical Connected Precast and Prestressed Diaphragm Wall

Hu Jianwei

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (group) Co. Ltd., Shanghai 200092, P.R. China)

**Abstract:** The precast and prestressed diaphragm wall is a new type of structural form, which is in line with the development direction of prefabricated assembly and it is significative to be researched. But the length of single precast prestressed diaphragm wall is often too long, which brings a lot of inconvenience to the transportation and hoisting of the wall and limits the development of precast diaphragm wall in a large extent. The precast and prestressed diaphragm wall is divided into multiple vertical pieces under the typical geological conditions of Shanghai area, and pieces of the vertical splicing wall under the multi variables is calculated under finite element. The deformation, force, the surrounding environmental protection conditions of the system are analyzed comparatively. The paper shows that the prestress can effectively reduce the deformation of the wall, and the larger the prestressing force is, the more obvious the control effect is. At the same time, the hollow rate in the wall has little effect on the deformation of the diaphragm wall, which favors extension and application of precast and prestressed diaphragm wall in the future.

**Keywords:** diaphragm wall; prestress; precast; multiple; vertical splicing; deformation

0 引言

近年来,地下连续墙在基坑围护上的运用越来越多,地连墙技术在成熟的同时也存在着很多问题。目前预制地连墙已在基坑工程中有 所运

用<sup>[1]</sup>,且也有相关预应力技术运用在支撑方面<sup>[2]</sup>,所以相对而言,预制预应力地连墙会具有更多优势,且绿色环保。因此,对预制预应力地连墙的研究具有重要的意义。但地下连续墙常用于深基坑,地连墙本身长度往往过长,施工不便<sup>[1]</sup>且价格昂

\* 收稿日期:2017-11-30(修改稿)  
作者简介:胡坚尉(1981-),男,上海人,工学硕士,高工,主要从事岩土工程和地下工程设计与研究工作。  
E-mail:tempyu@163.com

贵,导致目前预制地连墙运用不多。如能解决上述问题,则可以减小单幅地连墙的长度及重量,方便施工,从根本上解决预制地连墙推广的难度,有利于地连墙技术的发展。

### 1 地质介绍

由于上海地区地质较为稳定,但土质较全国其他地区差很多,且建筑物地下层数较多,基坑开挖深度较深,因此在沿海地区具有典型性。本次计算选取上海典型地质剖面,场地地基土由饱和黏性土、粉性土及砂土组成,其中第③和第④层土厚度较大,土质较差,土内摩擦角和黏聚力均在 15 以内。

### 2 参数设置

#### 2.1 土体、荷载模拟

采用通用有限元分析软件 Midas GTS 对基坑开挖及回填过程进行有限元数值模拟,计算基坑工程开挖对自身及周边环境的影响。

单元模拟:采用 Schanz<sup>[3]</sup> 提出的硬化土(hardening soil, HS)本构模型模拟土体,该模型为等向硬化弹塑性模型<sup>[4]</sup>。

采用梁单元<sup>[5]</sup>模拟围护结构,采用桁架单元模拟支撑及楼板。沿基坑边线不同块预制地下连续墙之间拟采取升浆法树根桩接头<sup>[6]</sup>的方式。

边界情况:模型底部约束水平及竖向位移<sup>[7]</sup>,地表自由,模型两侧的侧向位移为零。

#### 2.2 预应力分幅

以常规地下 3 层结构为例,开挖深度为 15 m,地下连续墙长度为 34 m。为了便于运输及吊装,同时考虑到支撑与围护墙体系的稳定性,本文将 34 m 地连墙在竖向分为 3 片,每一幅长度在 10 m 左右,各幅地连墙之间采用铰接连接。对 3 幅地连墙分别施加预应力并进行组合,从而分析预应力施加在不同位置的地连墙上对控制变形的影响。

#### 2.3 预应力模拟

后张法<sup>[8]</sup>:工作原理不同于先张法<sup>[9]</sup>,后张法采用预应力钢绞线,每延米布置  $\phi 60$  mm 四孔道,孔道内放置 2 根  $\phi 21.6$  预应力筋,极限强度标准值为 1 860 MPa。经初步计算可知,预应力筋张拉控制应力为 1 120 MPa,预应力损失为 310 MPa,偏心距为 310 mm,施工工况中最大支撑间距为 8 m。根据荷载平衡法原理<sup>[10]</sup>,等效均布荷载为:

$$q = \frac{8M}{l^2} = \frac{8 \times 334.5}{8^2} = 41.8 \text{ kN/m/m} \quad (1)$$

式中:取  $q=40 \text{ kN/m/m}$ 。

本次计算分别选取 40、12、24、32 kN/m/m 4 种预应力。

#### 2.4 空心率设计

由于是工厂预制,为了方便运输及吊放,同时考虑经济性等因素,预制地连墙通常设计成空心截面。空心截面大致型式如图 1。

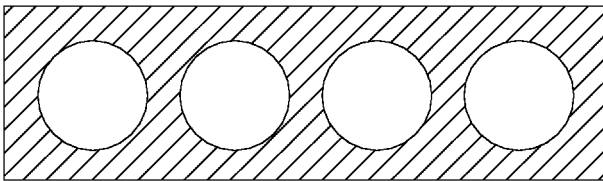


图 1 预制地连墙典型截面图

Fig. 1 Typical section of precast and prestressed diaphragm wall

本次计算分别选取 10%、20% 和 30% 3 种空心率。

#### 2.5 施工工况模拟

基坑开挖施工共有 11 个施工工况,其中第(7)工况施工第 3 道支撑并挖至坑底,第(8)工况浇筑地下室底板并拆除第 3 道支撑,以及第(10)工况浇筑地下一层楼板并拆除第一道支撑,是 3 个特殊工况,围护内力及变形均较大,因此计算选取(7)工况的位移内力值、(8)工况的内力值以及(10)工况的变形值作为分析对象。

### 3 计算过程

#### 3.1 模型

如图 2~5 所示。

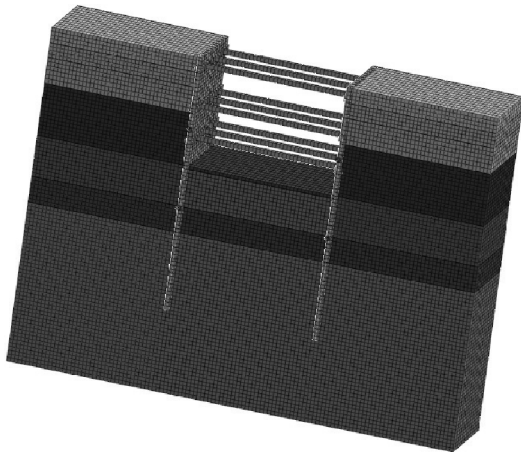


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

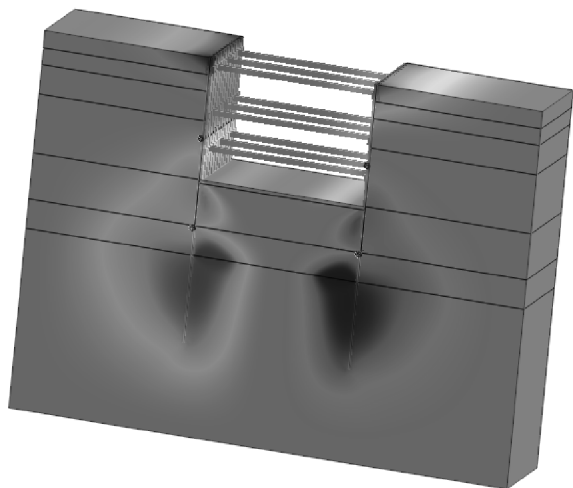


图 3 开挖至基底时总变形

Fig. 3 Total deformation when excavation to bottom

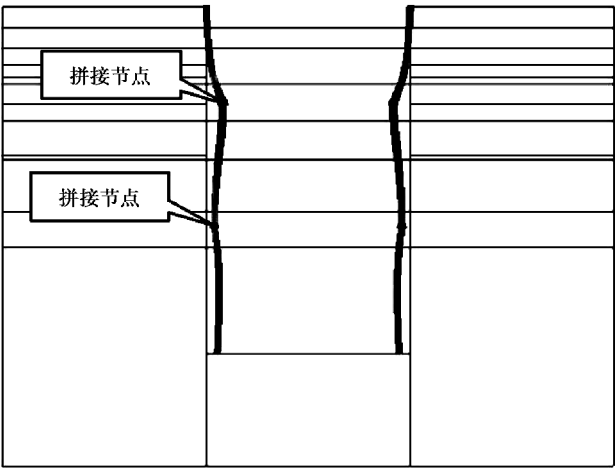


图 4 围护墙变形(开挖至坑底)

Fig. 4 Deformation of the wall(excavation to the bottom)

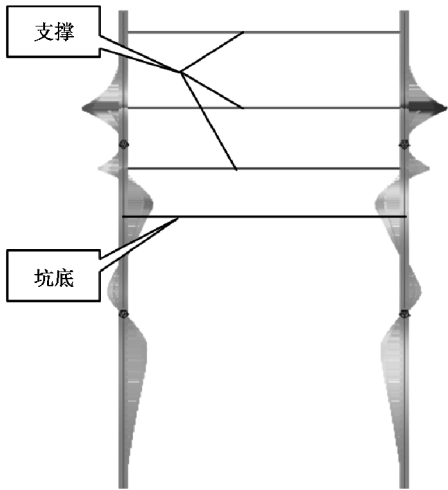


图 5 围护墙弯矩(开挖至坑底)

Fig. 5 Bending moment of the wall(excavation to the bottom)

3.2 计算结果

3.2.1 计算结果 1

由于地连墙的变形主要发生在坑底及以上部位,因此,对 3 幅地连墙中的上面和中间两幅地连墙施加预应力,围护墙体自身变形及内力计算成果整理见表 2(其中  $h$  为基坑挖深)。

表 2 施加预应力的围护墙计算成果统计(1)

Table 2 Statistical calculation results of prestressed retaining wall (1)

围护墙	施工 工况	墙体 位移 /mm	一半开挖	$M_x$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
			深度处 地表 沉降/mm	
常规地下 连续墙	工况(7) <sup>[7]</sup>	31.1	25.3	615.3
	工况 (8)+(10)	33.0	28.8	939.4
预制预应力 力地连墙	工况(7)	24.3 (-21.8%)	15.8 (-37.5%)	477.4 (-22.4%)
	工况 (8)+(10)	28.3 (-14.2%)	24.1 (-16.3%)	1016.9 (+8.2%)

注:1.预制预应力地连墙在竖向分为 3 片,至下而上分别为下幅、中幅和上幅。中、上两幅施加预应力等效为 40 kN/m。  
2.地连墙均为 600 mm 厚,竖向均设 3 道支撑。  
3.( )内数据为预应力地连墙相比较常规地连墙的优化程度,其中负号为优化。

(1)在围护墙体自身变形方面,表 2 中预应力地连墙较常规地连墙在开挖至基底时减少了 21.8%的变形,在拆撑工况减少了 14.2%的变形。由计算结果可知,相比较常规地连墙,施加了预应力的多幅竖向拼接预制地连墙在围护墙体自身变形上能起到很好的控制作用。

(2)在 0.5 倍基坑开挖距离处地表竖向位移方面,表 2 中预应力地连墙较常规地连墙在开挖至基底时减少了 37.5%的变形,在拆撑工况减少了 16.3%的变形。由计算结果可知,施加了预应力的多幅竖向拼接预制地连墙在周边环境变形上能起到很好的控制作用。

(3)在围护墙体弯矩值方面,受预应力的作用、施工工况及连接处铰接的多重影响,墙体弯矩

变化较为复杂。在开挖至基坑底部时,预应力地连墙相比较常规地连墙围护墙体的弯矩值有所减小,但在拆撑工况,预应力地连墙的弯矩值不减反增。

3.2.2 计算成果 2

为了减小施工成本,接下来模型仅对中间一幅地连墙<sup>[11]</sup>施加 4 种不同程度的预应力,其余上下两幅不施加预应力,具体成果整理见表 3。

表 3 施加预应力的围护墙计算成果统计(2)

Table 3 Statistical calculation results of prestressed retaining wall (2)				
围护墙	施工 工况	墙体 位移 /mm	一半开挖 深度处 地表 沉降/mm	$M_x$ / (kN·m)
常规地 下连续墙	工况 (7)	见表 2		
	工况 (8)+(10)	见表 2		
预制预应力 地连墙,第 2 幅施加预应力 等效为 40 kN/m	工况 (7)	21.6 (-30.5%)	18.7 (-26.1%)	514.9 (-16.3%)
	工况 (8)+(10)	28.2 (-14.5%)	23.7 (-17.7%)	1067.3 (+13.6%)
预制预应力 地连墙,第 2 幅施加预应力 等效为 32 kN/m	工况 (7)	23.1 (-25.7%)	21.4 (-15.4%)	546.1 (-11.2%)
	工况 (8)+(10)	30.2 (-8.5%)	26.2 (-9.0%)	1113.9 (+18.6%)
预制预应力 地连墙,第 2 幅施加预应力 等效为 24 kN/m	工况 (7)	25.4 (-18.3%)	22.7 (-10.3%)	576.4 (-6.3%)
	工况 (8)+(10)	32.1 (-2.7%)	27.8 (-3.5%)	1160.1 (+23.4%)
预制预应力 地连墙,第 2 幅施加预应力 等效为 12 kN/m	工况 (7)	27.2 (-12.5%)	24.1 (-4.7%)	605.2 (-1.6%)
	工况 (8)+(10)	32.7 (-0.9%)	28.4 (-1.4%)	1210 (+28.8%)

注:1.预制地下连续墙在竖向分为 3 片,至上而下分别为第 1、第 2 和第 3 幅。其中第 1 和第 2 幅施加预应力等效为 40 kN/m。  
2.地连墙均为 600 mm 厚,竖向均设 3 道支撑。  
3.( ) 内为优化程度,负号为优化。

将上表相关内容进行整理,如图 6、图 7 所示:

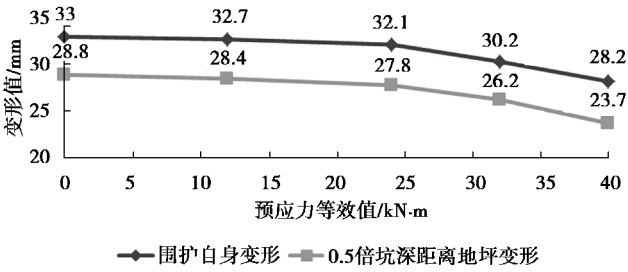


图 6 预应力等效值与围护变形及环境变形关系图

Fig. 6 Relationship of wall deformation and the prestress equivalent value, surrounding deformation

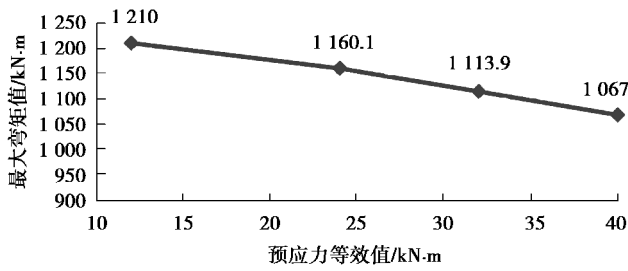


图 7 预应力等效值与地连墙弯矩值关系图

Fig. 7 Relationship between the prestress equivalent value of the wall and the bending moment

(1)由表 3 可知,在控制变形方面,仅在中间一幅地连墙上施加预应力与在上下两幅地连墙上同时施加预应力的效果差别不大,在围护墙体自身变形和周边环境变形上都能起到很好的控制作用。

(2)由表 3 及图 7 可知,在相同墙厚、相同支撑的情况下,在中间幅地连墙上施加的预应力越大,地连墙自身的变形及周边环境的变形就越小。当预应力等效值超过 24 kN/m 时,施加的预应力大小对变形控制效果明显。当预应力等效值为 40 kN/m,工况为开挖至基底时,围护自身变形减小了 30.5%,0.5 倍基坑开挖距离处地表变形减小了 26.1%;工况为拆撑工况时,围护自身变形减小了 14.5%,0.5 倍基坑开挖距离处地表变形减小了 17.7%。

(3)由表 3 及图 8 可知,受上下两幅地连墙之间的铰接连接影响,施加了预应力的地连墙弯矩最大值出现在支撑处。这点不同于常规地连墙最大弯矩值出现在跨中的情况,且弯矩值较常规地连墙大,但施加的预应力值越小,弯矩值越大,且基本呈线性关系。

3.2.3 计算成果 3

考虑到空心率对地连墙运输、吊装及成本控制的影响,模型选取了 3 种不同程度的空心率进行计算比较,具体成果整理见表 4。



表 4 施加预应力的围护墙计算成果统计(3)

Table 4 Statistical calculation results of prestressed retaining wall (3)

围护墙	施工 工况	墙体 位移 /mm	一半开挖 深度处 地表 沉降/mm	$M_x$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
预制预应力地连墙, 墙体无空心率	工况(7) <sup>[7]</sup>	21.6	18.7	514.9
	工况(8)+(10)	28.2	23.7	1067.3
预制预应力地连墙,墙体空心率为 10%	工况(7) <sup>[7]</sup>	21.6 (0.0%)	19.9 (+6.4%)	513.3 (-0.3%)
	工况(8)+(10)	28.3 (-0.4%)	24.6 (+3.8%)	1063.5 (-0.4%)
预制预应力地连墙, 墙体空心率为 20%	工况(7)	21.7 (+0.4%)	19.9 (+6.4%)	507.8 (-1.4%)
	工况(8)+(10)	28.7 (+1.8%)	24.7 (+4.2%)	1050.8 (-1.5%)
预制预应力地连墙, 墙体空心率为 30%	工况(7)	21.8 (+0.9%)	19.9 (+6.4%)	499.1 (-3.1%)
	工况(8)+(10)	29.3 (+3.9%)	24.9 (+5.1%)	1030.9 (-3.4%)

注:1.预制地下连续墙在竖向分为 3 片,至上而下分别为第 1、第 2 和第 3 幅。其中第 1 和第 2 幅施加预应力等效为 40 kN/m。

2.地连墙均为 600 mm 厚,竖向均设 3 道支撑。

3.预应力墙均在中幅施加预应力等效为 40 kN/m。

4.( ) 内为优化程度,负号为优化。

将上表相关内容进行整理,如图 8、图 9 所示。

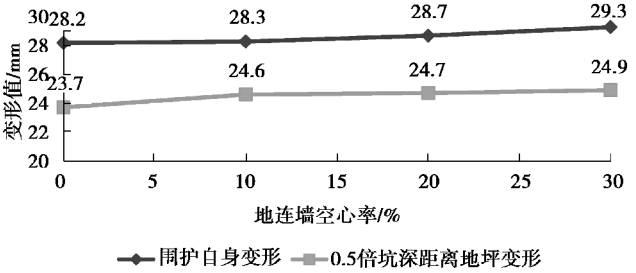


图 8 地连墙空心率与围护变形及环境变形关系图

Fig. 8 Relationship between ground wall hollow rate and prestress equivalent value of the wall

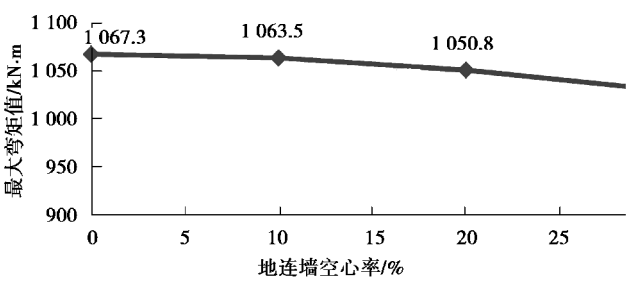


图 9 地连墙空心率大小与弯矩值关系图

Fig. 9 Relationship between the hollow ratio of the wall and the bending moment

(1)由表 4 及图 8 可知,在相同墙厚、相同支撑和相同预应力的情况下,空心率越大,围护自身及周边环境变形越大,但总的增幅不大,说明围护及环境变形值受地连墙空心率的影响并不大。

(2)根据表 4 及图 9 可知,地连墙空心率越大,围护墙最大弯矩值越小,但总的降幅不大,说明地连墙的空心率大小对围护墙弯矩影响并不明显。

### 4 结论

(1)相比较常规地连墙,施加了预应力的多幅竖向拼接预制地连墙在围护墙体自身变形及环境变形上能起到很好的控制作用。

(2)施加了预应力的地下连续墙弯矩较常规地连墙有所增大,因此,施加了预应力以后,围护墙体的配筋有所增大。如采取一定的措施,在以变形控制为主的基坑施工阶段发挥预应力作用,但在地下结构施工结束并回填土完毕以后消除预应力作用,可以减小预应力引起的弯矩增加的问题,在地连墙的配筋方面起到优化的作用。

(3)在控制变形方面,仅在坑底对应那一幅地连墙上施加预应力与在上下两幅地连墙上同时施加预应力的效果差别不大,在围护墙体自身变形和周边环境变形上都能起到很好的控制作用。在地连墙上施加的预应力越大,地连墙自身的变形、周边环境的变形就越小。

(4)施加了预应力的地连墙弯矩最大值出现在支撑处,且弯矩值较常规地连墙大,但施加的预应力值越小,弯矩值越大,且基本呈线性关系。

(5)在相同墙厚、相同支撑和相同预应力的情况下,空心率越大,围护自身及周边环境变形越大,

但围护墙最大弯矩值越小,总体变化都不大。

5 建议

由上述结论可知,在相同墙厚、相同支撑的情况下,对坑底对应的那一幅地连墙施加预应力,可有效地减小围护自身及周边环境变形,且增加配筋不多。在预应力正常施加的前提下,将地连墙做成具有一定空心率的墙体,对变形控制的影响很小。因此,带有一定空心率的多幅竖向拼接预制预应力地连墙不仅能有效控制围护自身及周边环境变形,还能有效减小混凝土用量,减轻墙体重量,方便运输和吊装,节约工程造价,是将来地下连续墙基坑围护设计与施工的新方向。

参考文献(References)

[1] 周蓉峰.地下停车库的预制地下连续墙施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 32 ( 3 ) : 225-226. ( Zhou Rongfeng. Construction technology for prefabricated diaphragm wall of underground parking lot [ J ]. Building Construction, 2010, 32 ( 3 ) : 225-226. ( in Chinese ) )

[2] 裴捷,赵元,李建清,等.预应力控制大基坑中的水平位移[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 ( 1 ) : 103-107. ( Pei Jie, Zhao Yuan, Li Jianqing, et al. Control of horizontal displacement of large foundation pit in Prestressed [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 7 ( 11 ) : 103-107. ( in Chinese ) )

[3] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The hardening soil model-formulation and verification [ A ] // Amsterdam, Balkema; Beyond 2000 in Computational Geotechnics [ C ]. 1999; 25-27.

[4] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数据分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31 ( 1 ) : 260-264. ( Xu Zhonghua, Wang Weidong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 ( 1 ) : 260-264. ( in Chinese ) )

[5] 陈友亮,李林,刘井学.某深基坑地下连续墙开挖变形有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4 ( 2 ) :

320-324. ( Cheng Youliang, Li lin, Liu Jingxue. Finite element analysis of the underground retaining wall of a deep foundation excavation [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4 ( 2 ) : 320-324. ( in Chinese ) )

[6] 王卫东,邸国恩,黄绍铭.预制地下连续墙技术的研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 ( 4 ) : 569-573. ( Wang Weidong, Di Guoen, Huang Shaoming. Study and application of precast diaphragm wall [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 ( 4 ) : 569-573. ( in Chinese ) )

[7] 胡坚尉.预制预应力地连墙围护受力及变形分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12 ( 1 ) : 275-280. ( Hu Jianwei. Analysis on the stress and deformation of precast and prestressed diaphragm wall [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 ( 1 ) : 275-280. ( in Chinese ) )

[8] 陶学康.后张预应力混凝土设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. ( Tao Xuetang. Post tensioning concrete design manual [ M ]. Beijing: China Building Industry Press, 1998. ( in Chinese ) )

[9] 房贞政.预应力结构理论[M]. 北京: 中国建筑书店有限责任公司, 2014. ( Fang Zhengzhen. Prestressed structure theory [ M ]. Beijing: Limited Liability Company of China Construction Bookstore, 2014. ( in Chinese ) )

[10] 林同炎, Bunrs N H, 预应力混凝土结构设计(第三版, 路湛沁, 等译) [ M ]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. ( Lin Tongyan, Bunrs N H, Prestressed concrete structure design ( The third Edition, Lu Zhanqin, et al, translated ) [ M ]. Beijing: China Railway Press, 1983. ( in Chinese ) )

[11] 冯虎,刘国彬,张伟立.上海地区超深基坑工程地下连续墙的变形特性[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 ( 1 ) : 151-156. ( Feng Hu, Liu Guobin, Zhang Weili. Dformation properties of diaphragm walls associated with excavation of ultra-deep foundation pits in Shanghai [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6 ( 1 ) : 151-156. ( in Chinese ) )