

文章编号: 1000-7598(2012)01-0220-07

基于三维数值模拟的深基坑隔断墙优化设计

应宏伟^{1,2}, 李涛^{1,2}, 王文芳^{1,2}

(1. 浙江大学 土木工程学系, 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 作为一种保护邻近建筑物的措施, 隔断墙已经开始在深基坑工程中应用, 但目前对其有关参数的设计还缺乏理论指导。以某软土地区深大基坑实例为背景, 利用有限元分析软件 ABAQUS, 建立三维有限元分析模型, 土体采用修正剑桥模型, 模拟开挖实际工况, 深入分析了隔断墙各设计参数对保护基坑邻近建筑物效果的影响, 邻近建筑物沉降计算值和实测值验证了隔断墙参数优化分析结果的合理性。研究表明: 地表位移、建筑物的横向角变量和围护墙最大位移随着隔断墙深度的增加而逐渐减小, 但建筑物横向角变量的减小幅度趋缓, 隔断墙存在一合理深度; 随着隔断墙的位置逐渐从基坑侧壁向邻近建筑物移动, 隔断墙外侧地表横向和纵向沉降以及纵向不均匀沉降均减小, 建筑物的横向角变量也明显减小。理论上, 隔断墙越靠近邻近建筑物, 保护建筑物的效果越好; 隔断墙的平面设置范围对于邻近建筑的保护效果也有着明显的影响, 一般情况下可以取邻近建筑物的范围作为隔墙的合理设置范围; 隔断墙刚度对地表位移和建筑物角变量影响不大, 实际工程中宜取中等刚度的隔断墙。

关键词: 隔墙; 三维有限元; 优化设计; 邻近建筑物

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Optimization design of partition wall in deep excavations based on 3-D numerical simulation

YING Hong-wei^{1,2}, LI Tao^{1,2}, WANG Wen-fang^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. MOE Key Laboratory of Soft Soil and Environmental Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As a technique for protecting adjacent buildings, partition wall has got an application to deep pit engineering. However the design of its parameters still lacks theoretical guidance. Based on a large-scale deep pit case, a 3-D finite element model is presented using the software ABAQUS. The behavior of soil is assumed to conform to modified Cam-clay model; and the actual construction sequence is simulated. Parameters relevant to the partition wall are analyzed in detail. The calculated and measured settlements of the adjacent building demonstrate the rationality of the optimization analysis of these parameters. It is shown that the ground surface displacements, the transverse angular distortions of the building and the maximum horizontal displacements of the retaining wall decrease with the increase of the partition wall depth. Nevertheless, the rate of the decrease of transverse angular distortions tends to be small if the partition wall depth is greater than a certain value. Thus there exists a reasonable depth for the partition wall. As the partition wall moves toward the adjacent building, the transverse and lengthways ground settlements, the differential settlements as well as the transverse angular distortions of the building decrease. Theoretically, the closer the partition wall is to the adjacent building, the better its effects are. The installation plane range of the partition wall also has significant influence on the adjacent buildings. Usually the range of the protected building can be the appropriate range of the partition wall. It is also shown that the stiffness of the partition wall does not affect the surface settlements and the angular distortions of adjacent building significantly, a medium-stiffness partition wall is sufficient to meet the engineering demands.

Key words: partition wall; 3-D finite elements; optimization design; adjacent building

1 引言

基坑工程多在城市建筑物密集地带进行, 土方

开挖改变了基坑周围土体的应力状态, 引起地表位移和地层损失, 必然会对周围环境产生影响, 文献[1-7]采用有限元等数值方法分析了基坑开挖对

收稿日期: 2010-06-14

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(No. 2008BAJ06B00); 浙江省重点创新团队支持计划资助项目(No. 2009R50050)。

第一作者简介: 应宏伟, 男, 1971年生, 博士, 副教授, 主要从事软黏土力学与地基处理、土工数值分析、地下工程的教学与科研工作。

E-mail: ice898@zju.edu.cn

周围建(构)筑物的影响,研究的环境对象包括既有建筑物、桩基、地下管线、隧道、地铁等。欧章煜等^[8]给出了基坑开挖对周围建筑影响程度的定量衡量方法。文献^[9-10]介绍了保护坑外邻近建筑物的基坑工程实例,通过在围护墙和保护建筑之间设置钻孔灌注桩墙或 SMW 工法墙(称为隔断墙或隔离桩),取得较好的保护效果。隔断墙已经在实际工程中开始应用,但目前对其设计还缺乏理论指导。翟杰群等^[11]通过二维有限元分析,初步得出了隔离桩的桩长、隔离桩结构形式对隔离桩效果的影响规律,但未能考虑隔断墙设置位置、范围等更全面因素的影响。从近年来深开挖课题的研究进展来看,已经逐渐从早期的二维分析转变到更真实的三维分析^[12-13]。本文针对杭州某软土地区深大基坑实例,利用有限元分析软件 ABAQUS,建立三维有限元分析模型,土体采用修正剑桥模型,模拟开挖实际工况,分析了隔断墙深度、设置位置和范围、墙体刚度等设计参数对保护基坑邻近建筑物效果的影响,为隔断墙保护邻近建筑物的优化设计提供依据。

2 工程概况

某深基坑工程设 3 层地下室,基坑大面积开挖深度为 14.85~17.35 m,基坑平面大致呈正方形,边长约 120 m,采用密排大直径钻孔灌注排桩墙结合 3 层钢筋混凝土内支撑作为支护结构,场地地基主要土层为厚达 30 m 的淤泥质黏土。本文以西北角基坑范围作为研究对象,开挖深度为 15.15 m,支护桩桩径为 1.10 m,桩中心间距为 1.25 m,桩端深度为 36 m。设 3 层水平内支撑,按从上至下逐层开挖至各层支撑底面,再施工该层内支撑的原则,共分 4 个工况开挖,各步开挖深度及支撑设置如图 1 所示。图中虚线表示每个工况的相应开挖面,箭头表示支撑位置,支撑点在每步开挖面上方 0.45 m 处。

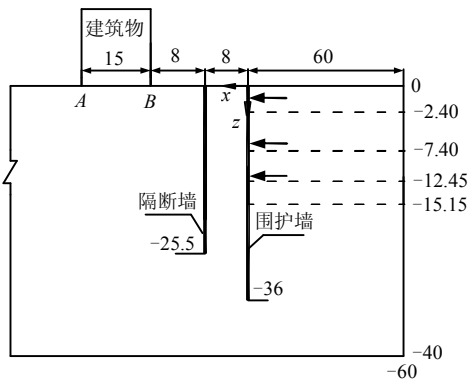


图1 基坑剖面及开挖顺序图(单位:m)

Fig.1 Cross-section and excavation sequence of pit (unit: m)

基坑外部有一浅基础建筑物,假定平面尺寸为 40 m×15 m,距基坑侧壁 16 m。为保护该建筑物,在基坑围护墙和建筑物之间设置隔断墙。基坑、隔断墙与既有建筑物的平面和剖面位置见图 1、2。

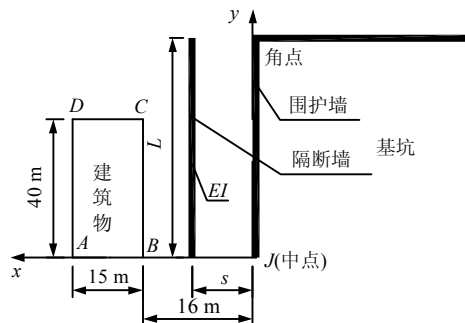


图2 围护墙、隔断墙及邻近建筑物平面示意图

Fig.2 Layout of retaining wall, partition wall and adjacent building

3 有限元分析模型

以前述基坑实例为背景,采用 ABAQUS 软件建立三维有限元分析模型,利用对称性取 1/4 基坑及周围土体作为分析对象,模型网格见图 3。

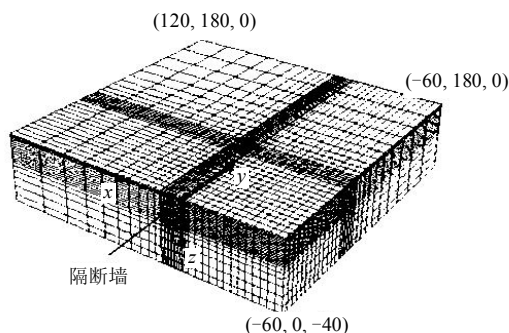


图3 三维有限元网格图(单位:m)

Fig.3 3D finite element mesh (unit: m)

3.1 基本假定

(1) 假定开挖过程历时较短,且地基土为透水性较差的软黏土,故采用总应力法分析,不考虑土的固结和渗流的影响;

(2) 不考虑围护墙和隔断墙施工对地基初始应力场的影响;

(3) 忽略建筑物荷载对地基初始应力和基础刚度对开挖引起的建筑物沉降的影响;

(4) 为简化分析,有限元模拟时仅模拟实际施工过程中的开挖工况,而未计算基础施工完成之后的临时支撑拆除和换撑等工况。

3.2 单元类型与计算参数

土体采用 C3D8R 单元(三维实体 8 节点缩减

积分单元)。排桩墙简化为 0.80 m 厚地连墙, 采用 C3D8I 单元 (六面体 8 节点实体非协调单元), 可以更好地模拟墙体的弯曲变形。假定隔断墙为地下连续墙, 采用 Shell 单元。围护墙和土体之间设接触面, 接触面采用硬接触, 允许相互错动, 但不允许主面和从面节点之间的相互嵌入, 接触面只可以传递压力, 不能传递拉力。隔断墙和土体之间始终紧密接触, 不存在相互滑动。

地基土体简化为单一均质土层, 采用修正剑桥模型; 围护墙、支撑、隔断墙假设为线弹性体。土体、围护墙、隔断墙、支撑的计算参数见表 1、2。

表 1 土体有限元计算参数
Table 1 Soil parameters for FEM

γ (kN/m ³)	λ	κ	M	β	K	μ	e_0	c /kPa	φ /(°)	E /MPa
19	0.42	0.022	0.52	0.85	0.9	0.35	1.2	10	10	3.0

表 2 支撑、围护墙及隔断墙计算参数
Table 2 Parameters for props, retaining wall and partition wall

线弹性体	γ / (kN/m ³)	μ	E / GPa
支撑	24	0.17	30
围护墙	24	0.17	28
隔断墙	24	0.17	28

4 计算结果与分析

隔断墙的主要设计参数有: 隔断墙深度 h 、隔断墙与围护墙的水平距离 s 、隔断墙的平面设置范围 L 、隔断墙刚度 EI , 各参数的意义见图 1、2。在基本算例中取 $h=25.5$ m, $s=8$ m, $L=60$ m, 墙厚取 0.74 m。以下分析中, 计算工况均指开挖至最终基底面工况。

4.1 隔断墙深度的影响

不同隔断墙深度情况下, 开挖至最终基底时基坑中部 ($y=0$) 的坑外横向地表位移见图 4。可以看出, 最大地表位移随隔断墙深度的增加而逐渐减小, 随着隔断墙的加深, 地表位移曲线的拐点越来越明显。地表最大沉降发生的位置随隔断墙的加深有外移趋势, 但最大沉降值逐渐减小。从该图也可看出, 隔断墙深度对地表沉降的影响比对地表水平位移的影响更明显。

坑外纵向地表沉降随隔断墙深度的变化见图 5。由图可知, 随着隔断墙的逐渐加深, 同一纵向剖面地表沉降也在逐渐减小, 而且基坑中部地表沉降的减小幅度要比角部显著。这表明, 隔断墙越深, 坑外纵向地表沉降越均匀。

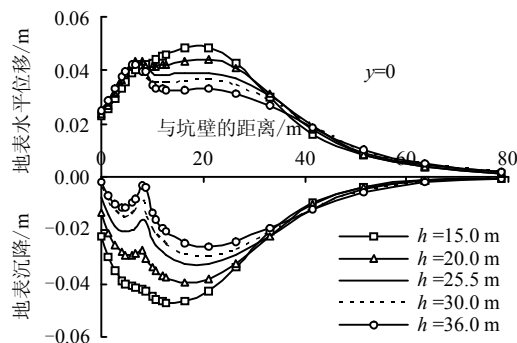


图 4 隔断墙深度对坑外横向地表位移的影响
Fig.4 Effect of depths of partition wall on transverse surface displacements behind retaining wall

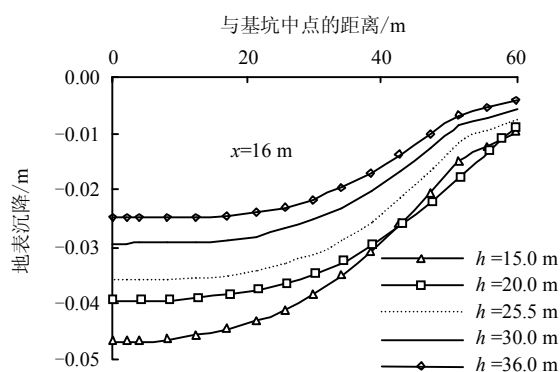


图 5 隔断墙深度对坑外纵向地表沉降($x=16$ m)的影响
Fig.5 Effect of depths of partition wall on lengthways surface settlements behind retaining wall

基坑开挖后建筑物基础将发生倾斜, 如图 6 所示, 设开挖前建筑物基础 4 个角点所在位置为 A 、 B 、 C 、 D , 开挖导致基础发生沉降后角点位置相应变为 E 、 F 、 G 、 H , 记 α 、 β 、 γ 、 δ 分别为 EF 、 GH 、 HE 、 FG 与水平面的夹角, 这些角度定义为建筑物的角变量, 而角变量的大小可作为衡量建筑物基础发生沉降后的损害程度^[13]。

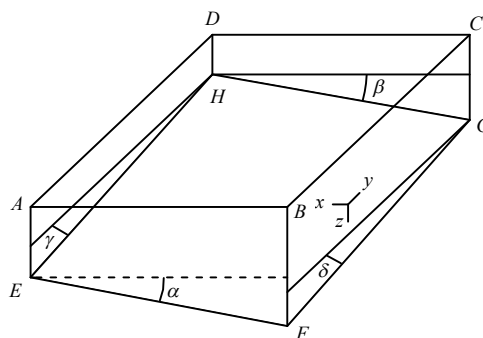


图 6 邻近建筑物角变量示意图
Fig.6 Sketch of angular distortions of adjacent building

开挖完成后邻近建筑物的角变量随隔断墙深度 h 的变化如图 7 所示。显然, 建筑物的角变量随

着 h 的增大而逐渐减小, 其中横向 (沿 x 轴方向) 角变量减小程度更明显, 这表明隔断墙的设置可以明显减小建筑物的损坏, 同时也可以发现, 建筑物角变量随隔断墙深度 h 的增加而减小的幅度并不是一直不变的, 在 $h > 25.5$ m 以后, 其减小幅度逐渐变缓, 因此, 从建筑物角变量的角度考虑, 可以认为, 案例中 $h = 25.5$ m 是隔断墙的合理深度。

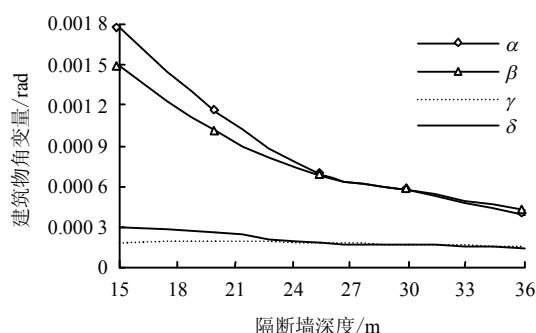


图7 邻近建筑物角变量随隔断墙深度的变化
Fig.7 Effect of depths of partition wall on angular distortions of adjacent building

图8显示了图2中的B、J两点的深层水平位移随隔断墙深度 h 变化的两组曲线。随着 h 的增加, 发生在开挖面深度附近的围护墙最大水平位移逐渐减小, 说明隔断墙的“遮拦”效果随着 h 的增加而增强; 邻近建筑物的B点下方地基浅层 (约10 m深度以上) 的水平位移随着 h 的增加也有明显的减小, 而深层 (约12 m以下) 土体的侧移量却略有增加。

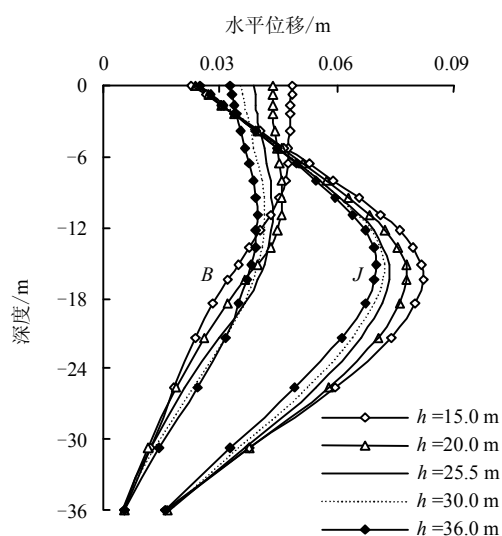


图8 隔断墙深度对围护墙和隔断墙外土体的水平位移沿深度分布的影响
Fig.8 Effect of depths of partition wall on horizontal displacements of retaining wall and ground behind partition wall

4.2 隔断墙位置的影响

不同隔断墙位置情况下, 基坑中部 ($y = 0$) 的坑外横向地表位移的分布见图9。随着隔断墙与围护墙水平距离 s 的增大, 隔断墙外侧地表水平位移和竖向位移均有一定程度的减小, 其中地表沉降的减小幅度更明显。

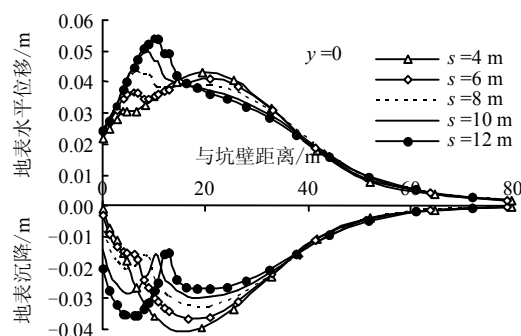


图9 隔断墙位置对坑外横向地表位移的影响
Fig.9 Effect of position of partition wall on transverse surface displacements behind retaining wall

坑外纵向地表沉降分布随隔断墙位置 s 的变化见图10。随着隔断墙逐渐远离围护墙而靠近邻近建筑物, 坑外地表纵向地表沉降逐渐减小, 越靠近基坑中点, 地表沉降减小越明显, 表明沿纵向地表的不均匀沉降逐渐减小。

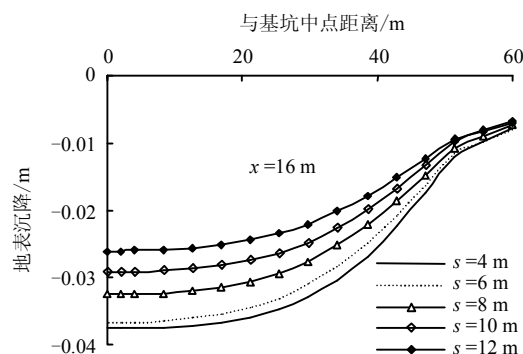


图10 隔断墙位置对坑外纵向地表沉降的影响
Fig.10 Effect of position of the partition wall on lengthways surface settlements behind retaining wall

邻近建筑物角变量随隔断墙位置 s 的变化见图11。由图可以看出, 相比纵向角变量而言, 建筑物的横向角变量随着 s 的增大而减小更明显, 而且其减小幅度并未随着 s 的增大而衰减, 说明在理论上隔断墙越靠近邻近建筑物, 控制建筑物角变量的效果越好。

由图12可以看出, 隔断墙位置的变化对围护墙J点 (见图2) 的水平位移没有明显影响, 但可以明显减小隔断墙外B点 (见图2) 深层 (6~18 m深度范围) 土体的水平位移。

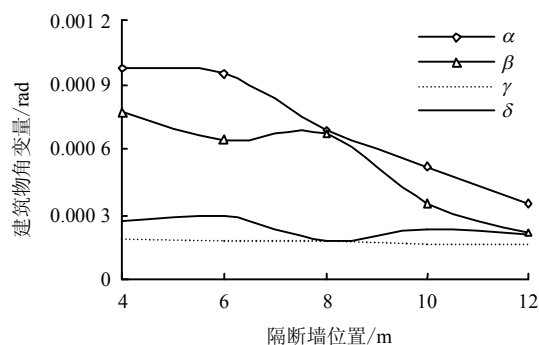


图 11 邻近建筑物角变量随隔断墙位置 s 的变化
Fig.11 Effect of position of partition wall on angular distortions of adjacent building

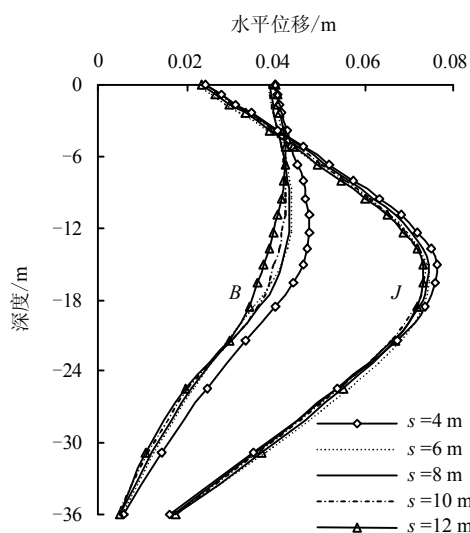


图 12 隔断墙位置对围护墙和坑外土体水平位移沿深度分布的影响
Fig.12 Effect of position of partition wall on horizontal displacements of retaining wall and ground behind partition wall

4.3 隔断墙平面设置范围的影响

不同隔断墙平面设置范围 L 情况下, 坑外横向地表沉降的分布见图 13、14。由图可以看出, 随着隔断墙范围逐渐向基坑角部延伸, 基坑中部 ($y=0$) 的横向地表沉降略有减小, 而靠近基坑角部 ($y=40$ m) 的横向地表沉降减小更明显。

不同隔断墙平面设置范围 L 情况下, 坑外纵向地表沉降的分布见图 15。由图可知, 当隔断墙设置范围较小时 (如 $L=20$ m), 坑外纵向地表沉降分布曲线明显有别于其他情形, 在隔断墙设置范围和基坑角部之间的区域出现地表沉降偏大的现象; 而当 L 增大至 40 m 时, 纵向地表沉降分布与基坑范围全部设置隔断墙情况 ($L=60$ m) 相似, 但沉降值略大。

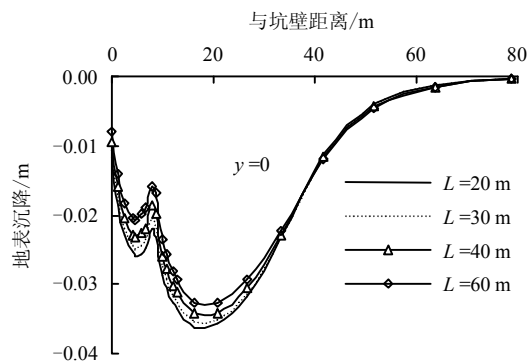


图 13 隔断墙平面设置范围对坑外横向地表沉降的影响
Fig.13 Effect of installation plane range of partition wall on transverse surface settlements behind retaining wall

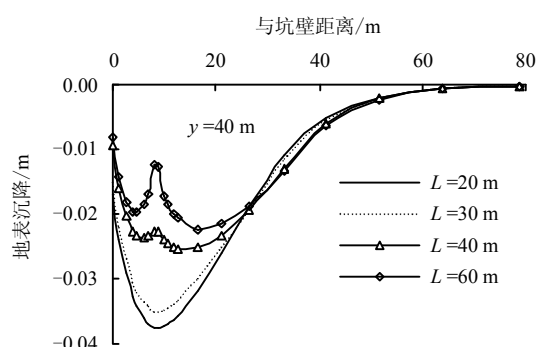


图 14 隔断墙平面设置范围对坑外横向地表沉降的影响
Fig.14 Effect of installation plane range of partition wall on transverse surface settlements behind retaining wall

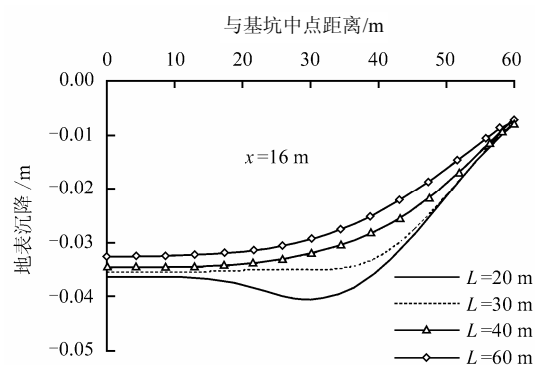


图 15 隔断墙平面设置范围对坑外纵向地表位移的影响
Fig.15 Effect of installation plane range of partition wall on lengthways surface settlements behind retaining wall

邻近建筑物角变量随 L 的变化见图 16。由图可知, 在基坑中部的建筑物的横向角变量 α 和外侧的纵向角变量 γ 基本不受 L 的变化影响, 而邻近建筑 CD 边的横向角变量 β 受 L 的影响最大。当 $L > 40$ m 后, 各角变量趋向定值。从本文算例来看, 隔断墙的合理设置范围一般取邻近建筑物的范围 (本文案例为 $L=40$ m) 即可。

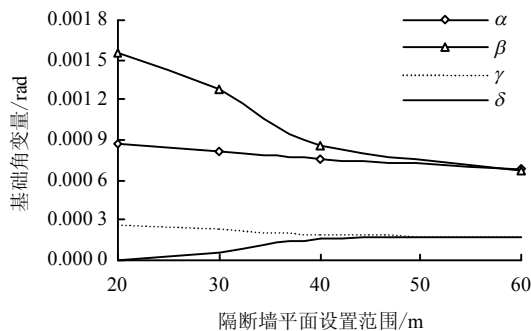


图 16 邻近建筑物角变量随隔断墙平面设置范围的变化
Fig.16 Effect of installation plane range of partition wall on angular distortions of adjacent building

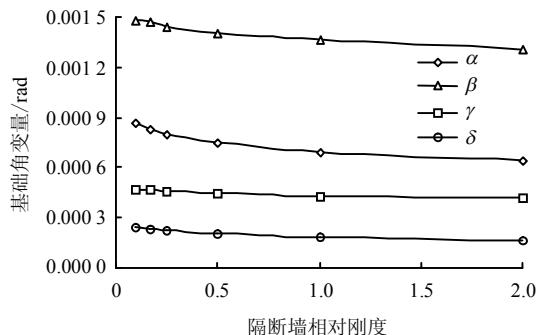


图 19 邻近建筑物角变量随隔断墙刚度的变化
Fig.19 Effect of stiffness of partition wall on angular distortions of adjacent building

4.4 隔断墙刚度的影响

由图 17、18 可以看出,随着隔断墙刚度的增加,坑外地表的横向沉降和纵向沉降也有所减小,但隔断墙刚度变化了 20 倍,而最大地表沉降仅降低了 13.9%, 隔断墙的刚度对地表沉降影响不明显。

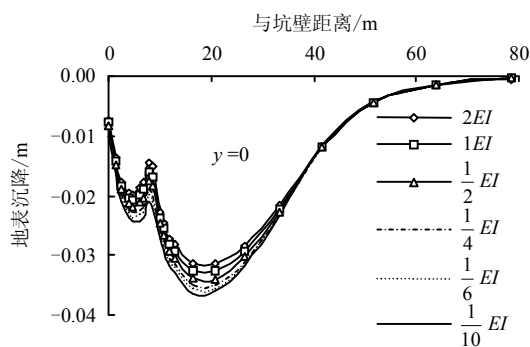


图 17 隔断墙刚度对坑外横向地表沉降的影响
Fig.17 Effect of stiffness of partition wall on transverse surface settlements behind retaining wall

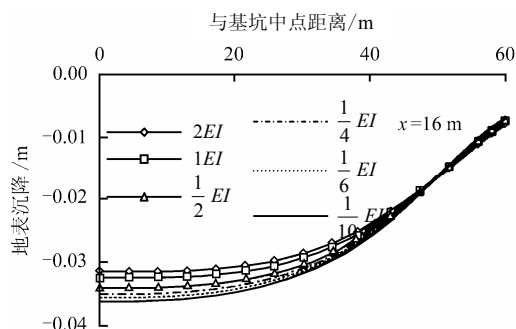


图 18 隔断墙刚度对坑外纵向地表 ($x=16$ m) 沉降的影响
Fig.18 Effect of stiffness of partition wall on lengthways surface settlements behind retaining wall ($x=16$ m)

由图 19 可以看出,随着隔断墙相对刚度 EI_x/EI (EI_x 为当前算例隔断墙的刚度) 的增大,建筑物的角变量变化很小,因此,在实际工程中,从隔断墙的保护效果和经济角度出发,设置中等刚度的隔断墙即可。

5 工程应用效果

将上述隔断墙参数的优化分析结果应用于实际工程时,考虑施工场地的具体情况,调整了隔断墙与围护墙的水平距离 s ,在围护墙外 3.5 m 处设置隔断墙,隔断墙采用直径为 0.85 m、间距为 0.6 m 的三轴水泥搅拌桩内插 700 mm×300 mm 型钢,深度为 25.5 m,平面设置范围为邻近建筑物范围。

以工程实际的地基土层分布、隔断墙设计参数建立三维有限元模型,土方开挖全部完成时邻近建筑物上典型沉降点的计算值和实测值见表 3^[14]。从表中数据可看出,设置隔断墙后建筑物的沉降计算值与实测值在分布上比较吻合,在数值上也比较接近,深厚软黏土中深开挖引起的邻近建筑物的沉降被抑制在可接受范围内,说明前述基于三维有限元数值模拟的隔断墙参数的优化分析结果是合理的,基坑施工期间该邻近建筑物未受到明显影响。

表 3 邻近建筑物沉降的计算值和实测值
Table 3 Calculated and measured settlements of adjacent building

沉降观测点	沉降计算值/mm	沉降实测值/mm
S17	53.3	44.0
S16	9.7	16.0
S15	0.8	10.0
S12	32.9	38.0
S13	4.2	17.0
S14	0.6	4.0

6 结 论

(1) 随着隔断墙深度 h 的增加,基坑坑外横向和纵向地表沉降明显减小,围护墙的最大水平位移和坑外土体的浅层水平位移也逐渐减小,建筑物横向角变量随 h 的增加而减小的幅度渐趋变缓,存在一个合理深度。

(2) 随着隔断墙的位置逐渐从基坑侧壁附近向邻近建筑物移动, 隔断墙外侧地表横向和纵向沉降以及纵向不均匀沉降均减小, 建筑物的横向角变量也明显减小, 但其减小幅度并未随着 s 的增大而衰减, 在理论上隔断墙越靠近邻近建筑物, 保护建筑物的效果越好。

(3) 随着隔断墙范围逐渐向基坑角部延伸, 基坑中部的横向地表沉降略有减小, 而靠近基坑角部的横向地表沉降减小更明显。一般情况下隔断墙的合理设置范围可以取邻近建筑物的范围。

(4) 隔断墙刚度对于坑外地表位移、建筑物的角变量影响不明显, 从隔断墙的保护效果和经济角度出发, 实际工程中宜设置中等刚度的隔断墙。

参考文献

- [1] 李进军, 王卫东, 邸国恩, 等. 基坑开挖对临近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 623—629.
LI Jin-jun, WANG Wei-dong, DI Guo-en, et al. Analysis of the influence of excavation engineering on additional deformation of adjacent buildings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 623—629.
- [2] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 临近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373—1380.
ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Response of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1373—1380.
- [3] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638—643.
ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 638—643.
- [4] 王浩然, 王卫东, 徐中华. 基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1512—1517.
WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Three dimensional analysis of the influence of deep excavation on adjacent building[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(Supp.2): 1512—1517.
- [5] 徐立明. 近距离基坑开挖对下方既有隧道的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1603—1607.
XU Li-ming. Three dimensional analysis of the influence of deep excavation on adjacent building[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(Supp.2): 1603—1611.
- [6] 海明雷, 孙玉永, 王炳龙. 深大基坑开挖对邻近地铁站影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 26(1): 7—11.
HAI Ming-lei, SUN Yu-yong, WANG Bing-long. On deformation influence of deep excavation adjacent to subway station[J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2008, 26(1): 7—11.
- [7] 李大勇, 龚晓南, 张土乔. 软土地基深基坑周围地下管线保护措施数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 736—740.
LI Da-yong, GONG Xiao-nan, ZHANG Tu-qiao. Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(6): 736—740.
- [8] 欧章煜, 谢百钧. 深开挖邻产保护之探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 509—517.
OU Chang-yu, HSIEH Pio-go. Building protection measures in deep excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(Supp.): 509—517.
- [9] 王海军. 深基坑开挖对周边居民房的保护技术[J]. 山西建筑, 2009, 35(20): 96—97.
WANG Hai-jun. Protection technology of deep foundation pit excavation on surrounding residence house[J]. **Shanxi Architecture**, 2009, 35(20): 96—97.
- [10] 陈瑞阳. 地铁车站深基坑施工中対邻近建筑物的保护[J]. 铁道建筑, 2002, (10): 11—13.
CHEN Rui-yang. Protection on the adjacent structures during the process of subway station construction[J]. **Railway Construction**, 2002, (10): 11—13.
- [11] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 162—166.
ZHAI Jie-qun, JIA Jian, XIE Xiao-lin. Practice of partition wall in the building protection projects near deep excavation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(1): 162—166.
- [12] ZDRAVKOVIC L, POTTS D M. Modeling of a 3D excavation in finite element analysis[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(7): 497—513.
- [13] OU C Y, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(5): 337—345.
- [14] 应宏伟, 李涛, 杨永文, 等. 深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果与工程应用分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1124—1128.
YING Hong-wei, LI Tao, YANG Yong-wen, et al. Analysis of effect and application of partition walls in protecting adjacent building from deep excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1124—1128.