

装配式地连墙力学性能分析及应用范围研究

谢锡荣¹, 苏凤阳², 李瑛^{1*}, 刘兴旺¹, 童星¹

(1. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 杭州市地铁集团有限责任公司, 浙江 杭州 310003)

摘要: 渠式切割装配式地下连续墙较传统现浇地连墙施工对周边环境影响小, 在基坑工程中的应用越来越多。基坑开挖过程中, 必须控制围护结构的变形, 以保护邻近地铁。为研究渠式切割装配式地下连续墙的力学性能和在邻近地铁深基坑工程中的应用, 采用数值模拟手段建立了板桩-接头荷载结构模型, 分析了板桩的力学性能; 基于平面应变计算方法探讨了渠式切割装配式地下连续墙在邻近地铁深基坑工程中的适用性, 提出其工程应用范围, 结合工程实例验证了其合理性。结果表明, 渠式切割装配式地下连续墙的力学性能与地连墙有相似性, 当板桩变形小于 30 mm 时, 其变形控制能力优于等厚度地连墙; 数值分析结果与工程实测结果有较好的一致性, 所提的工程应用范围较为合理。本文的研究成果对杭州软土地区邻近地铁设施的深基坑工程的设计和施工有一定指导意义。

关键词: 渠式切割装配式地下连续墙; 有限元; 邻近地铁; 适用范围; 力学性能

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0323-09

Study on mechanical properties and application scope of trench cutting assembled diaphragm wall

XIE Xi-rong¹, SU Feng-yang², LI Ying^{1*}, LIU Xing-wang¹, TONG Xing¹

(1. Zhejiang Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310003, Zhejiang, China)

Abstract: Compared with the traditional diaphragm wall, the construction of the trench cutting assembled diaphragm wall has less impact on the surrounding environment. It is widely used in foundation pit engineering. During the excavation of foundation pit, the deformation of retaining structure must be controlled to protect the adjacent metro. In order to study the mechanical properties of the trench cutting assembled diaphragm wall and its application in the deep foundation pit engineering near the metro, the sheet pile joint load structure model was developed by means of numerical simulation, and the mechanical properties of sheet pile were analyzed. Based on the plane strain calculation method, the applicability of the trench cutting assembled diaphragm wall in the deep foundation pit engineering of adjacent metro was discussed. The scope of its engineering application was proposed, and its rationality was verified with an engineering example. The results show that the mechanical properties of the trench cutting assembled diaphragm wall are similar to those of the diaphragm wall. When the deformation of the sheet pile is less than 30 mm, its deformation control ability is stronger than that of the diaphragm wall with equal thickness. The numerical analysis results are in good agreement with the actual observed results. And the proposed engineering application scope is reasonable. The research results of this article have certain guiding significance for the design and construction of deep foundation pit engineering adjacent to metro in soft soil area in Hangzhou.

Key words: trench cutting assembled diaphragm wall; finite element analysis; adjacent to metro; scope of application; mechanical property

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 住房和城乡建设部科技项目(2020K154); 浙江省建设科研项目(2021K220)。

作者简介: 谢锡荣(1995—), 男, 浙江台州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事基坑围护结构设计方面的研究。E-mail: 461745298@qq.com。

*通信作者: 李瑛(1985—), 男, 江西九江人, 正高级工程师, 工学博士, 主要从事基坑围护结构设计和土力学原理研究。

E-mail: liying3104@163.com。

0 引言

随着城市地下轨道交通的迅速发展,城市规划建设逐渐由环境区域型向以公共交通为导向的开发模式(TOD)转变,故近些年来,邻近地铁设施的深基坑工程数量日益增加。由于地铁结构变形控制严格,若基坑围护措施控制不当,易对地铁运营安全造成威胁。目前,地下连续墙广泛应用于软土地区地铁车站、隧道等深大基坑工程中,但随着基坑工程“智能、高效、绿色、低碳”^[1]发展理念的逐步落实,地下连续墙施工的各种问题也日益凸显,主要表现为以下5点:(1)成槽过程需要采用大量泥浆护壁,废弃泥浆排放困难而对环境保护造成压力;(2)现场施工工序复杂,需要较大施工场地,施工时间长;(3)成墙施工过程对邻近地基具有一定的扰动;(4)水下灌注混凝土质量难以控制,容易产生夹泥、堵管甚至断墙现象,存在接缝渗漏水隐患;(5)预埋筋位置不易控制,施工不当易造成墙体鼓包、脱开、露筋等病害。尽管不少学者^[2-4]对预制地下连续墙展开了深入研究,但仍无法很好地解决墙身接缝渗漏水严重、接头处理复杂以及墙体适用性等关键技术问题。鉴于此,渠式切割装配式地下连续墙应运而生,即在渠式切割水泥土连续墙(Trench Cutting Re-mixing Deep Wall, TRD)内插入混凝土预制板材,且预制板材间可靠连接,形成集挡土与截水功能于一体的新型钢筋混凝土地下连续墙^[2],简称TAD墙。相较于传统地下连续墙,渠式切割装配式地下连续墙规避或消除了前者的一些弊端。现场原位试验^[5]证明,这种新型支护型式成墙施工期间对周边环境影响小,截水性能好,施工效率高,质量便于控制,成墙后变形控制能力强,已在不少工程实践中得到应用^[6]。

运营地铁的结构变形控制指标为mm级,而杭州软土地区运营地铁隧道的变形普遍控制在5mm以内^[7],基坑工程施工对邻近地铁设施的保护要求高,安全风险大。围护体系的控制变形能力直接决定了基坑开挖对周边环境的影响。传统地下连续墙刚度大、控制变形能力强,但其工程成本高,成墙施工期间易对地铁设施周边地层产生扰动,如墙体施工质量控制不当,易增加地铁设施变形的风险^[8-9]。为保障地铁正常运行,降低邻近地铁基坑施工对周边环境的影响,进一步控制工程成本,有必要进一步探讨渠式切割装配式地下连续墙在邻近地铁设施基坑工程的适用性。

本文采用数值模拟手段建立板桩-接头荷载结构模型,分析TAD墙的力学性能,根据板桩的受力变形特征,基于平面应变计算方法探讨TAD支护技术在邻近地铁深基坑工程中的适用性,并结合工程实例验证应用范围的合理性。

1 渠式切割装配式地下连续墙简介

1.1 构造

渠式切割装配式地下连续墙厚度一般为600~850mm。混凝土预制板材通常采用离心法工艺制作,常用的混凝土强度等级为C80,板材长度一般不超过15m,截面型式如图1所示,为减少自重,宜中间留洞,内径为200~340mm。板材钢筋分为预应力钢筋和非预应力钢筋,预应力钢筋采用预应力混凝土用钢棒,非预应力钢筋采用热轧带肋钢筋,箍筋采用低碳钢热轧圆盘条或混凝土制品用冷拔低碳钢丝。混凝土预制板材竖向连接时在端部设有端板,端板钢材通常采用Q235B,相邻混凝土预制板材连接时通过凹榫对齐,并通过高压灌浆填充空腔以提高接头防水性能。

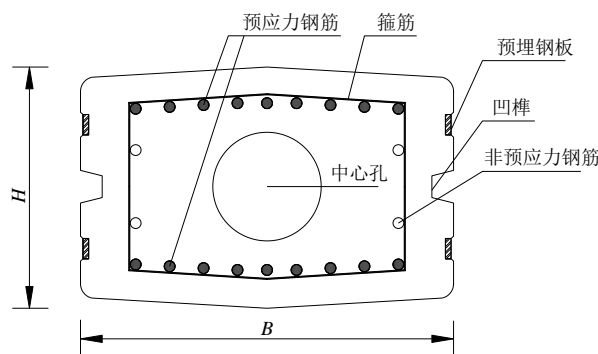


图1 混凝土预制板材截面

Fig. 1 Section of prefabricated reinforced-concrete slab

1.2 特点

渠式切割装配式地下连续墙有以下工程特点^[10]:

(1) 节约用地。在渠式切割水泥土连续墙内插入混凝土预制板材,集挡土与截水性能于一体,尤其在邻近地铁工程中,可增加基坑与地铁间的水平净距。

(2) 施工高效。混凝土预制板材可与TRD墙同步施工,较传统地下连续墙工艺显著节省工期。

(3) 成墙施工对周边环境影响小。TRD工法施工过程采用混合泥浆护壁,其重度远大于传统地下连续墙的护壁泥浆。混凝土预制板材插入速率可控,较传统地下连续墙现浇混凝土施工的扰动小。

(4) 墙体性能好。挡土结构的强度和刚度主要由混凝土预制板材提供, 混凝土预制板材工厂化生产, 质量易控制。截水有两道防线, 首道是 TRD 工法形成的水泥土连续墙, 其优异的截水性能已在工程实践中得到验证; 第二道是接缝经过防水处理的预制板材。

(5) 经济性好。混凝土预制板材工厂批量生产, 避免了现场绑扎钢筋笼的施工流程, 在人工、材料、运输等方面均可节省工程成本。

2 力学性能分析

2.1 计算模型

为研究渠式切割装配式地下连续墙的力学性能, 采用有限元数值模拟软件 Midas FEA NX 进行深入分析。根据支护结构受力特征, 建立沿板桩延

长方向的“三板式”计算模型, 如图 2 (a) 所示, 计算模型由混凝土板桩、钢筋、连接接头组成, 基坑开挖深度按 6 m 考虑。板桩长 9 m, 截面尺寸为 400 mm (H) × 900 mm (B), 内径为 300 mm, 采用实体单元模拟, 通过几何截面扩展形成。预应力钢筋根据板桩受力按背 (迎) 土面纵向排布, 背土面钢筋为 11Φ12.6, 迎土面钢筋为 11Φ9.0, 均采用钢束单元模拟。非预应力钢筋和箍筋为 Φ8@200 mm, 采用桁架单元模拟, 非同钢束线等通过装配嵌入到板桩实体。通过施加“质点-刚性连接-虚拟梁-约束”的边界条件, 模拟板桩延长方向的约束行为, 消除边界应力集中影响。为进一步考虑被动区土体与支护结构的相互作用, 在板桩内侧施加法向和切向弹簧约束, 以软土地区为例, 基床系数取 $k_s=5\ 500\ \text{kN/m}^3$ [11]。外部荷载以静止土压力的形式施加于板桩迎土面。计算模型网格采用四面体单元划分, 如图 2 (b) 所示。

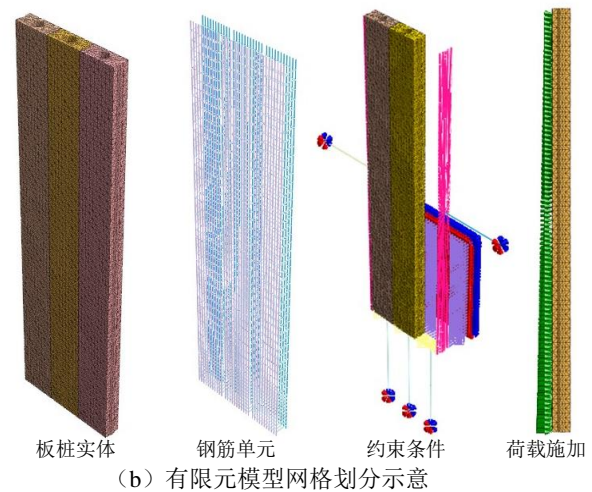
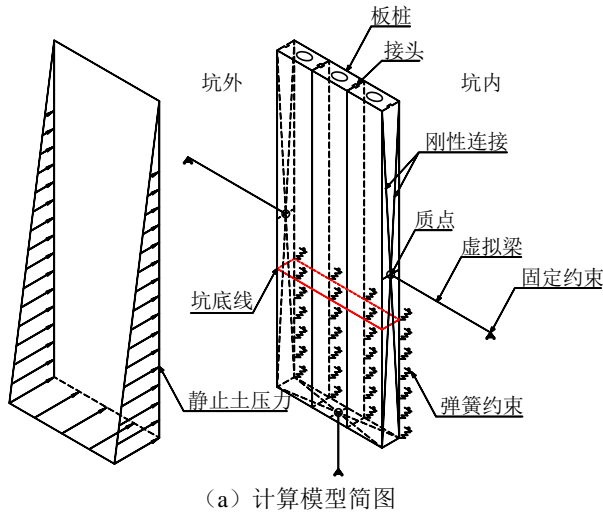


图 2 计算模型及边界条件

Fig. 2 Calculation model and corresponding boundary conditions

2.2 本构模型

为真实反映混凝土预制板桩的受力变形特征, 采用混凝土弥散开裂本构模型定义板桩在荷载作用下的力学行为, 本构参数取值参照张君等 [12-13] 和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) [14] 对混凝土断裂参数的研究成果, 如表 1 所示, 描述混凝土脆性的特征长度 l_{ch} 按式 (1) 计算:

$$l_{ch} = E_c G_f / f_t^2 \quad (1)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量, MPa; G_f 为混凝土 I 型断裂能, N/m; f_t 为混凝土轴心抗拉强度标准值, MPa。

钢筋单元采用双折线本构模型, 即认为钢材达到抗拉强度后, 应力不再增加, 材料本构参数如表 2 所示。

表 1 弥散裂缝本构模型参数

Table 1 Model parameters of smeared cracking model				
E_c /MPa	G_f /(N·m ⁻¹)	特征长度 l_{ch} /m	f_t /MPa	f_c /MPa
38 000	200	0.78	3.11	50.2

注: 表中 f_c 为混凝土轴心抗压强度标准值。

表 2 钢筋材料参数

Table 2 Material parameters of different types of steel				
钢材种类	公称直径/ mm	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
PCB-1080	9.0	2×10^5	1 080	1 230
PCB-1570	12.6	2×10^5	1 420	1 570
HRB400	8.0	2×10^5	400	540

由于板桩凹榫接头处存在混凝土与混凝土间的相互挤压、摩擦的作用, 为考虑这种沿接触面法

(切)向的力学行为,故将接头简化处理,采用库伦摩擦本构定义接头的接触特性,定义如式(2)所示:

$$\tau=c+\mu p=c+\sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: τ 为接触面剪应力, kPa; μ 为摩擦系数; p 为接触面法向应力, kPa; c 为接触黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, $^{\circ}$; σ 为接触面正应力, kPa。

这里以混凝土的抗拉强度标准值代替黏结强度,混凝土面与面间的摩擦系数 μ 一般取 0.6~0.8^[14],考虑到接头的连接特性,故取 0.6,即内摩擦角为 30°,接触面法(切)向刚度按式(3)计算,切向刚度取法向刚度的 0.01 倍,参数详表 3:

$$k=E_c/L \quad (3)$$

式中: k 为接触面刚度, kN/m³; L 为有效单元计算宽度(按网格单元尺寸计算), m。

表 3 库伦摩擦接触本构参数^[15]

Table 3 Parameters of the Coulomb frictional contact model

$k_n/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_t/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	f_{tm}/MPa
1 368×10 ⁶	1 368×10 ⁴	3.11	30	1.80

注:表中 k_n 为法向刚度模量; k_t 为切向刚度模量; f_{tm} 为接触面极限抗拉强度,实际为界面最大等效剪应力,该值可近似取 *mises* 等效应力/1.73。

2.3 板桩工作力学性能对比分析

采用分级加载的方式对板桩施加强制位移,计算得到板桩的荷载(F)-位移(u)曲线如图 3 所示。由图可知,现浇地下连续墙在荷载作用下的位移变化趋势基本与戴国亮等^[16]模拟的井筒式地下连续墙单面墙试验结果一致,表明采用上述本构参数计算可较好地反映板桩在荷载作用下的力学行为。加载初期, $u < 5$ mm 时,板桩变形呈线弹性发展;随着荷载增加,板桩混凝土进入塑性状态,并逐渐出现开裂现象,混凝土进入带裂缝工作状态,荷载-位移曲线斜率不断减小。对比等厚度现浇地连墙的计算结果可知,板桩的极限承载力为 230 kN,与地连墙的极限承载力 320 kN 相差不大,表明板桩有较好的承载能力。 $u < 30$ mm 时,相同荷载作用下的板桩变形小于地连墙变形,证明板桩在该阈值内的控制变形能力要强于地连墙; $u > 30$ mm 时,随着荷载的增加,板桩变形发展迅速,此时地连墙的控制变形能力要强于板桩。

2.4 板桩变形发展规律

为研究板桩的变形、裂缝发展及接头的相对位

移在荷载作用下的变化规律,加载限值至 4 倍静止土压力,荷载作用下的板桩变形和裂缝发展情况如图 4 所示。

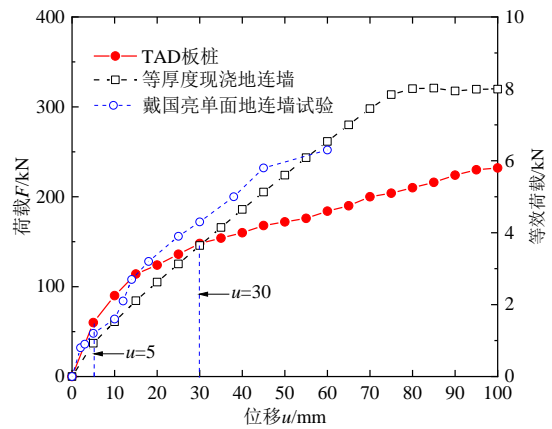


图 3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves

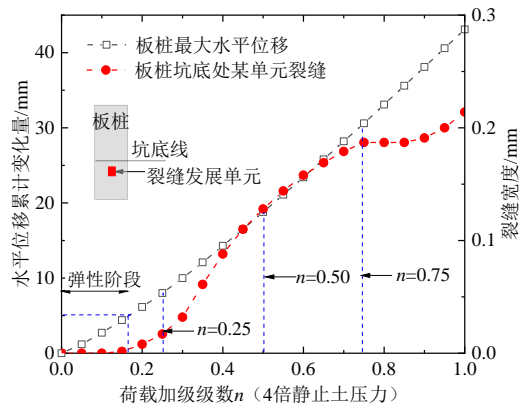


图 4 荷载作用下板桩变形情况

Fig. 4 Deformation of sheet pile under loading

随着荷载的增加,板桩最大水平位移近似呈双折线型增加,板桩坑底某单元的裂缝宽度呈先增加后趋于平缓再增加的发展趋势。加载级数 $n < 0.15$ 时,板桩处于弹性变形阶段,最大水平位移小于 5 mm,无裂缝发展;加载级数 $n=0.25$,即原静止土压力作用下时,板桩最大水平位移为 8 mm,裂缝微弱发展;加载级数 $n=0.5$ 时,板桩最大水平位移为 20 mm,裂缝宽度快速增至 0.12 mm,变形仍可控;荷载进一步增加时,由于其余范围的板桩混凝土加速开裂,故坑底处该单元的裂缝无进一步发展,直至加载极限时,裂缝重新开始迅速发展。原静止土压力作用下的板桩接头相对位移和张开宽度均小于 0.5 mm,接触力仅为 3 MPa,接头处受力相对安全,但存在渗漏水风险。

上述分析表明,对于开挖深度为 6 m 的基坑,板桩能最大限度地发挥自身的控制变形能力;若基坑挖深增加,水土压力增大的情况下,控制板桩水平变形小于 30 mm,仍有应用空间。

3 适用范围

3.1 计算模型

渠式切割装配式地下连续墙的力学性能分析表明,在一定条件下前者较传统地下连续墙有更好的控制变形能力,因此进一步探讨 TAD 支护技术在邻近地铁深基坑工程中的适用性。采用有限元软件建立“地层-TAD 墙-地铁隧道”的二维平面应变计算模型,研究基坑开挖深度和围护结构退界距离对地铁隧道的变形影响,计算模型如图 5 所示。模型中围护结构为 TAD 墙结合钢筋混凝土支撑,其中 TAD 墙、盾构隧道等采用板单元模拟,材料为线弹性,隧道的混凝土强度等级为 C50,板桩为 C80,钢筋混凝土支撑采用锚定杆模拟,墙土接触采用 Goodman 单元模拟。

黄栩等^[17]基于二维平面应变模型分析了接头刚度对分节预制地连墙整体刚度和变形控制能力的影响,计算结果显示,接头越趋近于理想铰,预制地连墙整体刚度越弱,而对于塑性铰接头,预制

地连墙的整体刚度和控制变形能力随接头刚度增加或降低变化不大,故计算中未对装配式地连墙整体刚度进行折减,即忽略接头刚度对整体刚度的影响,计算结果对装配式地连墙适用范围的影响较小。

计算模型中场地地层由上至下为①₁杂填土、②₂黏质粉土、③淤泥质粉质黏土、④₁粉质黏土、⑤₁圆砾、⑥全风化花岗岩,为杭州典型软土地质条件,故采用考虑土体小应变行为的 HSS 本构模型, HSS 模型参数取值参照廖凯龙等^[18]基于杭州软黏土地区的研究成果,其已被证明能较好地适用杭州软土地层,土层物理力学性质指标如表 4 所示。

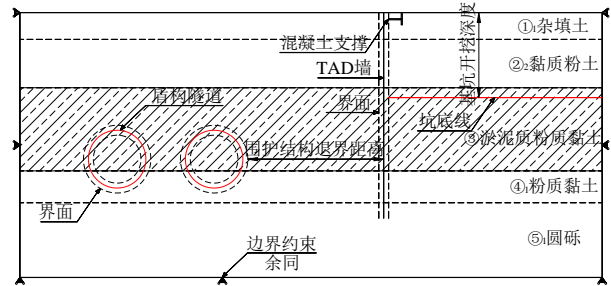


图 5 二维有限元计算模型

Fig. 5 Two-dimensional finite element calculation model

表 4 地基土主要物理力学性质指标

Table 4 Physical and mechanical properties of foundation soil

土层	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	固结快剪峰值指标		E_s/MPa	E_{50}/MPa	$E_{\text{oed}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$
		c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$						
① ₁	22.5	10.0	12.5	5.0	5.0	5.0	15.0	50.0	1.0×10^{-4}
② ₂	18.6	8.6	25.9	7.0	7.0	5.6	35.0	56.0	2.0×10^{-4}
③	17.3	10.1	8.5	3.0	3.0	4.5	30.0	50.0	2.0×10^{-4}
④ ₁	19.0	40.3	16.0	6.3	6.3	8.2	50.4	90.0	2.0×10^{-4}
⑤ ₁	(20.5)	(2.0)	(30.0)	18.0	18.0	18.0	54.0	200.0	2.0×10^{-4}
⑥	18.6	30.9	12.7	5.0	5.0	5.0	20.0	80.0	1.0×10^{-4}

注:表中()内为经验值; E_s 为地基土压缩模量; E_{50} 为割线模量; E_{oed} 为固结压缩模量; E_{ur} 为卸载再加载模量; G_0 为初始剪切模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减为 0.7 倍初始剪切模量时对应的剪应变。

3.2 应用范围探讨

板桩截面尺寸取 400 mm×900 mm 和 600 mm×900 mm 两种,采用控制变量法分析基坑开挖深度和围护结构退界距离对邻近地铁隧道的变形影响,分别取以下两种典型工况:

(1) 1 层地下室,基坑开挖深度 6 m, 1 道混凝土支撑;

(2) 2 层地下室,基坑开挖深度 10 m, 2 道混凝土支撑。

其余边界条件均一致,计算忽略了桩墙施工对地铁隧道的影响。由于杭州软土地区运营地铁隧道的变形普遍控制在 5 mm 以内,考虑到德信空港项

目、德寿宫遗址项目^[6] TAD 墙施工对周边环境的影响在 2~5 mm 之间,加之隧道埋深较深,两者水平净距较大,桩墙施工的影响性可进一步折减,故假定桩墙施工引起的隧道变形约为 1 mm,同时在分析中对该工况变形予以考虑。

图 6 为设 1 层地下室时的隧道结构变形与围护结构退界关系曲线,由图可知,围护结构与盾构隧道水平净距大于 10 m 时,随着净距的增加,隧道水平位移和竖向位移近似呈线性减小,支护刚度增加可进一步缩小基坑围护结构的退界。

为满足隧道 5 mm 的变形控制要求,对于围护结构采用 TAD 墙的 1 层地下室基坑工程,当板桩

厚度为 400 mm 时,地下室退界距离应大于 16 m;板桩厚度为 600 mm 时,地下室退界距离应大于 14 m。该工况下围护结构最大水平位移约 15 mm,板桩变形已超过弹性极限,局部已产生裂缝。

同理,由图 7 可知,设 2 层地下室时,为满足盾构隧道的变形控制要求,当板桩厚度为 600 mm 和 400 mm 时,地下室退界距离应分别大于 26 m 和 28 m。该工况下围护结构最大水平位移约 36 mm,板桩局部裂缝宽度已超过 0.2 mm。

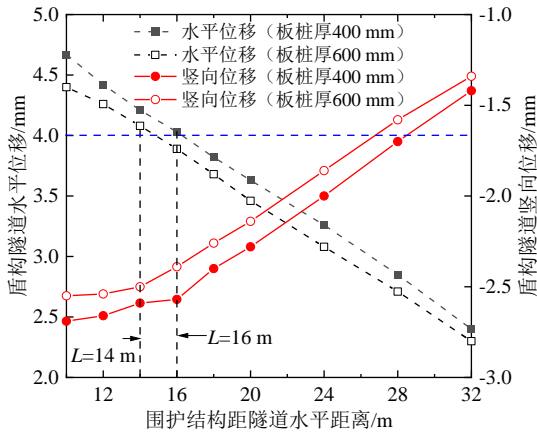


图 6 隧道变形与围护结构退界关系 (1 层地下室)

Fig. 6 Relationship between tunnel deformation and boundary retreat of retaining structure (one-storey basement)

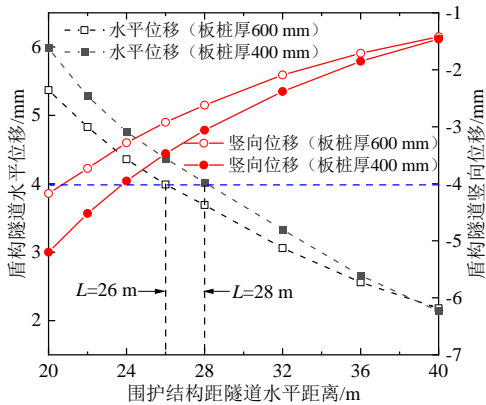


图 7 隧道变形与围护结构退界关系 (2 层地下室)

Fig. 7 Relationship between tunnel deformation and boundary retreat of retaining structure (two-storey basement)

4 工程实例

TAD 支护技术已成功应用于不少杭州软土地区工程项目。本节以邻近地铁设施的景新文体综合大楼项目为典型案例具体分析。

项目位于杭州市富阳区,场地北侧为文居街,东侧为先行田径场基坑,西侧为金桥北路,金桥北路下有已运营的杭州地铁 6 号线公望街站—桂花西路站区间盾构隧道,隧道外径 6.2 m,埋深约 17.63~

18.80 m。项目整体设 1 层地下室,基坑平面面积约 4 200 m²,周长 347 m,基坑开挖深度为 6.05 m,基础形式为桩筏基础。邻地铁侧基坑围护结构采用渠式切割装配式地下连续墙 (TAD) 结合一道钢筋混凝土水平内支撑,板桩长 21.0 m,截面尺寸为 400 mm×900 mm。基坑围护外边线距隧道左、右线的最小水平净距分别为 27.0 m 和 41.0 m,工程与地铁设施的平面相对关系如图 8 所示,支护典型剖面详见图 9。场地地层分布如 3.1 节所述,地下水位埋深 0.80~2.30 m,承压水对工程影响较小。

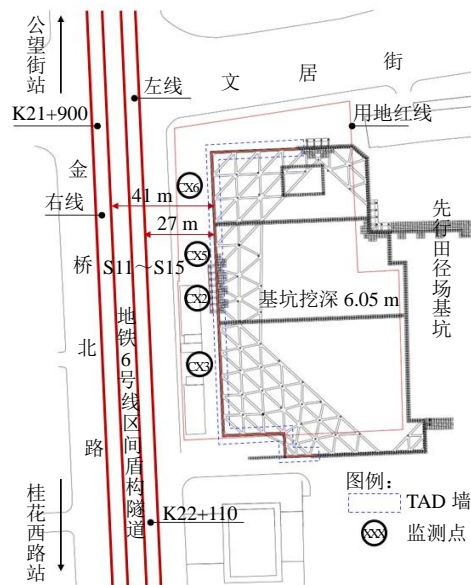


图 8 本工程与地铁设施平面关系图

Fig. 8 Relationship between the foundation pit and metro system

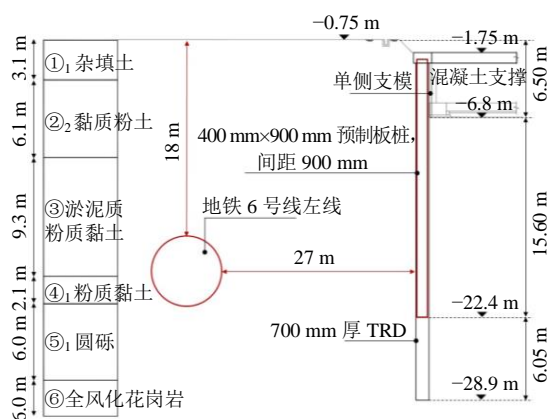


图 9 支护结构典型剖面图

Fig. 9 Typical section of foundation pit support structure

图 10 为基坑开挖至坑底时的邻地铁侧基坑深层土体水平位移和地表沉降监测情况,由图可知,基坑开挖至坑底时最大深层土体水平位移约 10~15 mm,最大地表沉降约 10.6 mm,与有限元计算结果基本一致,证明采用有限元手段分析的合理性。

基坑施工期间, 对地铁隧道采用了自动化监测, 对应里程号为 K21+900~K22+100。图 11 反映了 TAD 成墙施工过程中地铁隧道的变形情况, 由图可知, 相较于 TAD 成墙施工前, 成墙施工完成后隧道水平位移增加约 0.5 mm, 径向收敛增加约 1.0 mm, 表明 TAD 成墙施工对周边环境的影响较小, 与 3.2 节假定一致。

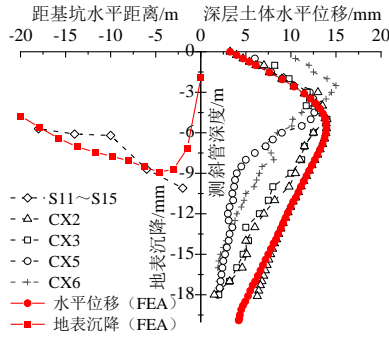
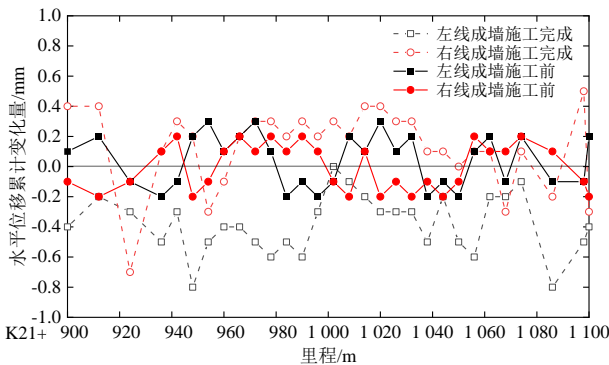
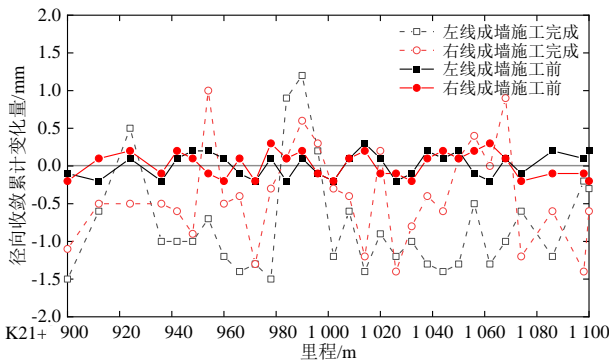


图 10 基坑变形与有限元计算结果对比情况

Fig. 10 Comparison of foundation pit deformation and finite element calculation results



(a) 地铁隧道水平位移累计变化量



(b) 地铁隧道径向收敛累计变化量

图 11 TAD 成墙施工过程中地铁隧道变形

Fig. 11 Deformation of metro tunnel during TAD construction

本项目基坑开挖完成时, 地铁隧道最大竖向位移为 2.8 mm, 表现为隆起, 最大水平位移为 1.0 mm, 径向收敛为 -1.2 mm, 均满足地铁 5 mm 的控制要求。监测结果表明, TAD 支护技术可满足深基坑施

工对邻近地铁结构的变形控制要求, 也进一步证明本文提出的 TAD 支护技术适用范围是合理的。

5 结 论

本文从板桩的变形、承载力及接头的相对变形等方面对渠式切割装配式地下连续墙的力学性能进行研究分析, 根据板桩的受力特征, 探讨了 TAD 支护技术在邻近地铁深基坑工程中的适用性, 结合应用工程证明了给定范围较为合理。主要得出以下结论:

(1) 板桩承载力与等厚度现浇地连墙相差不多, 变形小于 30 mm 时, 板桩的控制变形能力要强于地下连续墙; 变形大于 30 mm 时, 控制变形能力不如地下连续墙。

(2) 以黏土、淤泥质土等软黏土为主的杭州软土地区的邻近地铁隧道深基坑工程采用 TAD 墙作围护结构时的工程应用条件为: 基坑开挖深度小于 6 m, 地下室退界距离应大于 16 m; 基坑开挖深度小于 10 m, 退界距离应大于 28 m。增加支护刚度可进一步缩小基坑围护结构的退界距离, 对于地质条件更好、周边环境保护要求更低的地下工程, 可进一步缩小两者的水平净距。

(3) 应用工程监测分析表明, TAD 成墙施工期间对周边环境的扰动小, 控制变形能力较好, 进一步证明了采用有限元计算的合理性, 提出的工程应用范围具有借鉴意义。

笔者计划进一步研究不同地质条件下的 TAD 支护型式在邻近地铁设施基坑工程中的适用性, 探讨 HSS 本构模型参数取值对其适用范围的影响。

参考文献

[1] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36, 201.
ZHENG Gang. Method and application of deformation control of excavations in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36, 201.

[2] 王琼. 预制地下连续墙在高层建筑中的应用[J]. 施工技术, 2000, 29(1): 43, 42.
WANG Qiong. Application of prefabricated underground continuous wall in high-rise building[J]. Construction Technology, 2000, 29(1): 43, 42.

[3] 李子安, 孙宝利, 赵锡明. 深基坑地下连续墙预制混凝土接头浅析[J]. 施工技术, 2011, 40(增刊 1): 127-129.
LI Zi-an, SUN Bao-li, ZHAO Xi-ming. Analysis of

- precast concrete joint for diaphragm wall in deep foundation excavation[J]. *Construction Technology*, 2011, 40(S1): 127-129.
- [4] 银霞, 袁昌, 李栋伟, 等. 新型预制地下连续墙接头力学与抗渗性能研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(9): 99-102.
YIN Xia, YUAN Chang, LI Dong-wei, et al. Study on mechanical property and impermeability of new precast diaphragm wall joint[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(9): 99-102.
- [5] 洪哲明, 俞峰, 陈鑫, 等. 渠式切割装配式地下墙围护开挖环境影响原位试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(增刊 2): 942-950.
HONG Zhe-ming, YU Feng, CHEN Xin, et al. In-situ tests on the environmental effect of excavation supported by trench cutting assembled diaphragm wall[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(S2): 942-950.
- [6] 李瑛, 李淳学, 马永华, 等. 德寿宫遗址展示工程永久防渗墙的研究与应用[J]. *地基处理*, 2022, 4(1): 58-64.
LI Ying, LI Chun-xue, MA Yong-hua, et al. Research and application of permanent cutoff wall in Deshou Palace site[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(1): 58-64.
- [7] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB 33/T 1139—2017[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical Code for Protection of Urban Rail Transit Structures: DB 33/T 1139—2017[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2017.
- [8] 孙长军, 张顶立, 刘井学, 等. 北京地铁车站地连墙支护结构受力变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊 1): 78-83.
SUN Chang-jun, ZHANG Ding-li, LIU Jing-xue, et al. Mechanical and deformation characteristics of diaphragm wall system of Beijing metro station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(S1): 78-83.
- [9] 陈保国, 闫腾飞, 王程鹏, 等. 深基坑地连墙支护体系协调变形规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(10): 3289-3299.
CHEN Bao-guo, YAN Teng-fei, WANG Cheng-peng, et al. Experimental study on compatible deformation of diaphragm wall support system for deep foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3289-3299.
- [10] 刘兴旺, 潘黎芳, 李瑛, 等. 渠式切割装配式地下连续墙设计与施工技术[J]. *地基处理*, 2019, 1(3): 53-57.
LIU Xing-wang, PAN Li-fang, LI Ying, et al. Design and construction technology of trench cutting assembled diaphragm wall[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(3): 53-57.
- [11] 张春进, 陈斌, 姚燕明, 等. 软土基床系数三轴试验法测定及分析[J]. *宁波大学学报: 理工版*, 2016, 29(1): 108-112.
ZHANG Chun-jin, CHEN Bin, YAO Yan-ming, et al. Experiment and analysis on subgrade coefficient of soft soil using triaxial test method[J]. *Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition*, 2016, 29(1): 108-112.
- [12] 张君, 王林, 孙明, 等. 粗细骨料比例和水泥石强度对混凝土断裂参数的影响[J]. *工程力学*, 2004, 21(1): 136-142.
ZHANG Jun, WANG Lin, SUN Ming, et al. Effect of coarse/fine aggregate ratio and cement matrix strength on fracture parameters of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(1): 136-142.
- [13] 张君, 刘骞. 基于三点弯曲实验的混凝土抗拉软化关系的求解方法[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(3): 268-274.
ZHANG Jun, LIU Qian. A method to solve tension softening relationship of concrete from the three-point bending test[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(3): 268-274.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010 — 2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [15] 王超飞, 霍治澎, 魏弦. 风机基础中钢-混凝土间的接触有限元模拟[J]. *陕西理工学院学报: 自然科学版*, 2014, 30(5): 21-24.
WANG Chao-fei, HUO Zhi-peng, WEI Xian. Contact finite element analysis between steel and concrete in wind turbine foundation[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology: Natural Science Edition*, 2014, 30(5): 21-24.
- [16] 戴国亮, 龚维明, 周香琴, 等. 单室井筒式地下连续墙水平承载力试验与计算方法研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(9): 67-73.
DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, ZHOU Xiang-qin, et

- al. Experiment and analysis on horizontal bearing capacity of single-chamber closed diaphragm wall[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(9): 67-73.
- [17] 黄栩, 刘小荣, 刘念武. 分节预制地连墙结构基坑稳定与结构受力研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(增刊 1): 491-497.
- HUANG Xu, LIU Xiao-rong, LIU Nian-wu. Research on the stability of excavation and structural behavior for segmental pre-cast diaphragm wall structure[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S1): 491-497.
- [18] 廖凯龙, 童磊, 黄博, 等. 杭州地区基坑开挖数值分析中土体 HSS 模型参数的研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(增刊 2): 97-101.
- LIAO Kai-long, TONG Lei, HUANG Bo, et al. Study of parameters of HSS model used in numerical analysis of excavation in Hangzhou area[J]. *Building Science*, 2016, 32(S2): 97-101.

【简 讯】

岩土工程西湖论坛（2023）：城市地下空间开发中岩土工程新进展（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2023）拟定于 2023 年 10 月 20—22 日在杭州花家山庄召开。

近年来，城市地下空间开发和利用在我国发展很快，许多岩土工程新理论、新技术和新方法在城市地下空间开发建设中得到应用和发展，也有不少技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进城市地下空间开发中岩土工程技术的进一步发展和提高，更好地为我国城市化建设服务，本次会议主题设定为“城市地下空间开发中岩土工程新进展”。

本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第 7 册《城市地下空间开发中岩土工程新进展》，并在中国建筑工业出版社出版。

岩土工程西湖论坛组委会

联系人：宋秀英

0571-88208775, xysong2020@163.com

www.geo-forum.cn