

DOI: 10.7672/sgjs2026130098

基坑双排管桩与盖板接头承载特性试验研究

徐梓舒^{1,2}

(1. 广东省建设工程质量安全检测总站有限公司, 广东 广州 510500;

2. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500)

[摘要] 珠江三角洲某双排管桩基坑支护结构,在基坑开挖过程中发现盖板出现沿基坑边线方向开展的裂缝。为深入研究基坑开挖后双排管桩与盖板相互影响的承载特性、开裂原因及裂缝控制措施,采用缩尺模型试验进行研究,并根据不同荷载工况及提出的改良措施,分析了管桩与盖板连接处的应力分布和变化规律,探讨盖板开裂的原因。研究表明:管桩顶部与盖板连接位置强度较弱,应力峰值分别出现在管桩与盖板连接处的前侧表面与上方表面。盖板开裂的直接原因在于管桩结构发生较大变形,由节点连接处传递变形迫使盖板开裂;通过调整管桩桩顶锚入盖板深度与采用暗梁钢筋布置两项改良措施,可起到有效降低应力、控制裂缝的作用。

[关键词] 基坑;软土;管桩;盖板;试验;应力;变形

[中图分类号] TU318

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0098-08

Experimental Study on Bearing Characteristics of Double-row Pipe Pile and Cover Joint in Foundation Excavation

XU Zishu^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Construction Engineering Quality and Safety Inspection Terminal Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510500, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510500, China)

Abstract: A double-row pipe pile foundation excavation supporting structure in the Pearl River Delta was found to have cracks along the edge of the foundation excavation during its excavation. To further study the bearing characteristics, cracking causes, and crack control measures of the interaction between the double-row pipe pile and the cover plate after the excavation of the foundation excavation, the scale model test was used to study the project. According to the different load conditions and the proposed improvement measures, the stress distribution and variation law of the connection between the pipe pile and the cover plate were analyzed, and the cause of the cover plate cracking was discussed. The results indicate that the strength of the connection between the top of the pipe pile and the cover plate is weak, and the peak stress appears on the front surface and the upper surface of the connection between the pipe pile and the cover plate, respectively. The direct reason for the cracking of the cover plate is that the pipe pile structure has a large deformation, and the deformation transmitted by the joint connection forces the cover plate to crack. The stress can be effectively reduced and the cracks can be controlled by adjusting the depth of the top anchor of the pipe pile into the cover plate and using the arrangement of the hidden beam reinforcement.

Keywords: foundation excavation; soft soil; pipe piles; cover plates; tests; stress; deformation

0 引言

近年来,双排桩-盖板复合支护体系作为基坑工

程的关键支护形式,其技术优势已得到工程实践的充分验证。该体系通过双排桩与现浇盖板形成空间协同受力机制,兼具整体刚度优异、施工便捷性强、工期效益显著等优点,同时具备平面布局灵活性与复合支护适应性,可有效控制基坑变形并保障

[作者简介] 徐梓舒,硕士,助理工程师, E-mail: xuzishu1021@163.com

[收稿日期] 2025-11-13

工程安全^[1-2]。值得关注的是,当前双排桩支护体系中预制混凝土管桩的应用比例持续攀升,相较于传统钢筋混凝土灌注桩,具有施工速度快、效率高、施工现场环境良好、设计趋于成熟、配套设备齐全以及成桩质量好等显著技术优势,相关研究体系亦趋于完善^[3-7]。在软弱土层或复杂荷载工况下,基坑工程常面临显著的变形控制难题,支护体系易出现应力集中现象,进而导致支护结构局部失稳或盖板开裂等工程风险^[8]。尽管学界已针对双排桩支护体系开展参数化研究,但现有成果多聚焦于排距优化、桩径比选、桩长设计等宏观参数分析,对关键节点的力学机理研究仍存在明显不足^[9-10]。桩-板节点作为支护体系中的薄弱环节和内力传递枢纽,其构造合理性直接决定结构整体性能,工程实践表明,节点区的设计缺陷常引发盖板开裂等工程病害,这对支护体系的可靠性构成严重威胁^[11-12]。然而,现有文献对双排桩支护体系中预制管桩与现浇盖板连接节点的力学特性研究仍较为匮乏,相关理论体系亟待完善。

在基坑工程实践中,采用双排管桩-盖板复合支护体系时,发现当受周边附加荷载作用时,现浇盖板易产生沿基坑边线方向延伸的贯通性裂缝,如图1所示。这种结构性损伤不仅显著削弱支护体系的整体刚度,更对基坑稳定性构成严重威胁。目前盖板开裂的具体原因尚未明晰,需要提出针对性的措施进行改良优化。



图1 盖板开裂
Fig. 1 Cover cracking

为了探讨上述裂缝出现的原因和改良措施,本文依托某基坑工程案例,基于模型试验原理,通过室内模型试验,重点研究双排管桩与盖板接头承载特性,探讨管桩与盖板结构接头的节点受力机理及盖板开裂的具体原因,调整管桩桩顶锚入盖板深度和管桩与盖板间钢筋的布置形式,将改良前后结果进行对比,综合分析双排桩支护结构改良后的裂缝控制效果,从而为深基坑工程双排桩设计与施工提供理论与试验参考。

1 双排管桩-盖板模型试验

1.1 工程概况

该基坑工程场地位于广州沿海软土地区,地层

主要由高压缩性淤泥质土层构成,地下水位埋深较浅,属于典型软土基坑工程。支护体系采用双排管桩-盖板复合结构,选取基坑工程内超载及出现裂缝的区域作为研究段;支护管桩采用沿基坑边线方向间距 1.2m、沿基坑边线垂直方向间距 1.8m 的矩形矩阵布置模式,形成具有空间协同效应的支护网格体系。基坑开挖深度 4.5m,选用 PHC600(130) AB 型高强预应力混凝土管桩作为主要受力构件,现浇钢筋混凝土盖板厚 600mm,桩-板连接节点采用标准化构造设计,桩顶嵌入盖板 100mm 并设置双向交叉钢筋网,如图 2 所示。

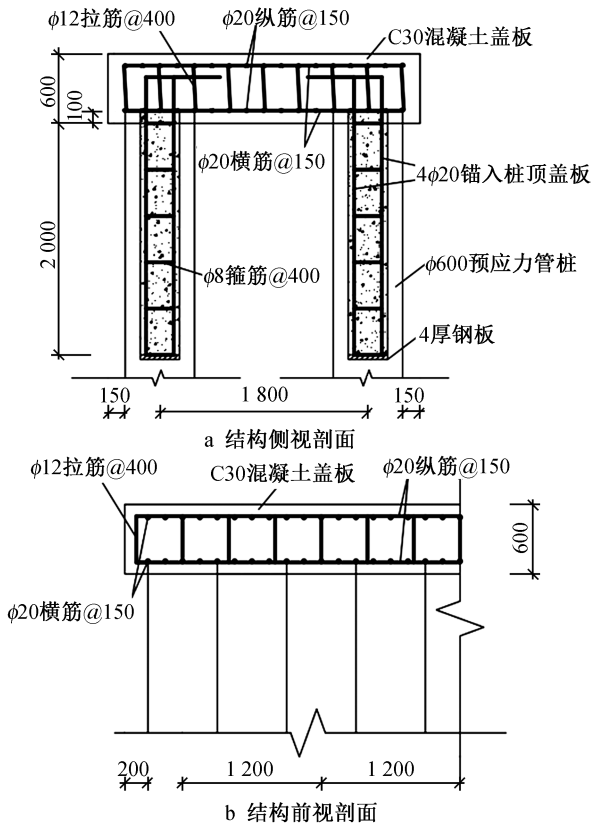


图2 双排管桩-盖板连接
Fig. 2 Double-row pipe pile-cover connection

1.2 改良措施

根据经验分析,管桩与盖板的连接情况不同于普通灌注桩,管桩在作为支护桩与盖板相连接时,首先是支护桩与盖板的混凝土强度等级不同,管桩桩身混凝土强度等级为 C80,盖板混凝土强度等级仅为 C30,差异较大。由于管桩与盖板的强度不匹配,当前排管桩受力带动盖板发生相同的变形时,强度较大的管桩不会产生裂缝破坏,强度较小的盖板会发生开裂。

其次管桩与盖板连接的接头受力和混凝土桩与盖板的锚固不一样,管桩下面是空心,一般只在

接头附近2m放钢筋笼插筋,锚入盖板再浇筑混凝土,并通过混凝土与管桩内壁的摩擦传力,以此共同作用。管桩与盖板的连接相对薄弱,无法如混凝土灌注桩般彻底锚固以增强混凝土与钢筋的连接,使连接的两者能共同工作以承担各种应力。

因此针对上述原因,可以采取以下措施:①增大管桩锚入盖板深度,已知严重受拉区域主要分布在盖板与前排管桩相连接的沿盖板厚度方向0~0.2m处,仅将管桩桩顶锚入盖板0.1m深度难以保证管桩与盖板稳固、安全连接,故应加深管桩桩顶锚入盖板深度达到0.2m及以上,增大管桩与盖板的接触面积,加强管桩与盖板的连接,减小连接因素的影响;②重新布置钢筋,设置管桩桩顶锚入盖板深度达0.2m时,钢筋已难以按原方式进行布置,结合盖板及钢筋受力分析,盖板前表面拉应力值较大,且为了进一步控制桩顶位移及增加盖板结构的刚度,在前、后排桩的前后侧及上方配置沿基坑长度方向分布的箍筋;为了保证盖板抗扭强度,将无法照常布置的钢筋设置在两桩之间并配以箍筋组成暗梁(AL1),具体布置形式如图3所示。 h 为管桩锚入盖板深度,为了确定最合适的深度,采用同种钢筋布置形式分别模拟0.2、0.3、0.4m时的结构受力状态。

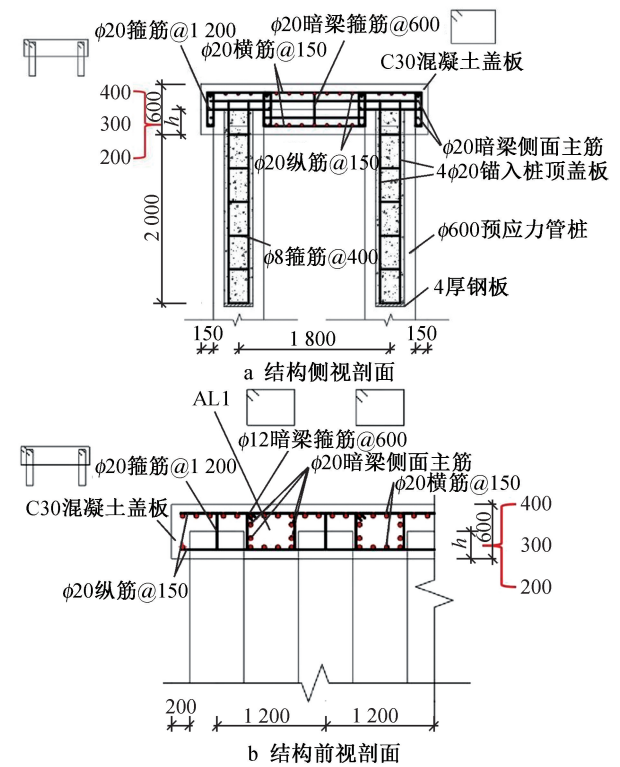


图3 改良后的双排管桩-盖板连接

Fig. 3 Optimized double-row pipe pile-cover connection

1.3 模型试验设计

考虑边界效应的影响,基坑双排桩外侧宽度一般取基坑开挖深度的2~3倍,深度一般取开挖深度的2~4倍^[13],并且此次分析重点是管桩与盖板之间的接头承载特性,本文取支护结构外侧的岩土体宽度为14m,深度取14m,基坑总开挖深度为4.5m,整体土层均视为均质软土,管桩采用10m桩长,为反映周边环境对基坑的影响,把传至地基中的建筑荷载等效加到地表,取最大15kPa的荷载作用于基坑周边地面。根据试验模型箱的设计尺寸1100mm×350mm×720mm及研究重点,确定模型试验的几何相似比 $C_L=1:20$,弹性模量相似比 $C_E=1:20$ 。

软土具有比较特殊的力学性质,在以往软土相似材料的研究中,很难找到一种材料可以同时很好地模拟其压缩模量、摩擦角、黏聚力等多个参数^[14-16]。由于该模型试验的主要关注点在于双排管桩与盖板结构,还原工程中管桩与盖板的强度差异,试验土层受到的荷载能够对支护结构产生相似的效果即可,且该软土本身的压缩模量已很低,鉴于此及综合考虑试验装置限制和试验数据的规律需求,试验采用源于工程现场的软土,仅对土层几何尺寸进行相似缩放,土体物理力学性质指标如表1所示。

表1 土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil						
土体	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	黏聚力 c /kPa	泊松比 μ	含水率 w /%
软土	15.5	2.5	8	10	0.32	56.7

此外,通过公式 $P=F/S$ 可知, P 为超载土层表面所受到的压强荷载, F 为超载土层表面上方堆载物向下产生的合力, S 为超载的土层表面面积,与缩尺后的土层几何尺寸相同,因此在荷载相似比值与对应的土体压缩模量相似比值保持一致,可获得与完全按相似关系缩尺时相似的试验效果,保证试验结果的准确性。

原型盖板混凝土强度等级为C30,为达到按相似比缩尺后的弹性模量及抗拉压强度,参考相关文献配置与混凝土C30相似材料的方法及配合比^[17-19],采用高强石膏、重晶石粉、河砂、水等材料配制相似材料,配合比为:高强石膏:重晶石粉:河砂:水=1:2.2:1.2:1.3。绘制轴心抗压强度应力应变曲线,并与C30混凝土缩尺应力应变曲线对比(见图4),图中相似材料峰值压应变 $\varepsilon=1.62 \times 10^{-3}$,处于规范规定的混凝土峰值压应变 ε 变化范

围内($1.5\times10^{-3}\sim2.5\times10^{-3}$)。C30 混凝土模型与原型的力学参数如表 2 所示。

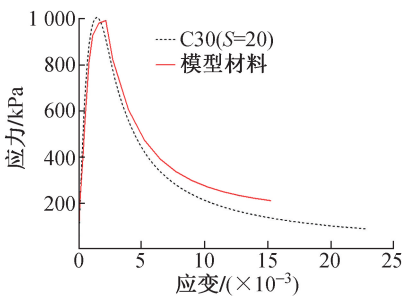


图 4 应力-应变全曲线对比

Fig. 4 Comparison of full stress-strain curves

表 2 C30 混凝土模型与原型的力学参数				
Table 2 Mechanical parameters of C30 concrete model and prototype				
材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	抗压强度/ kPa	抗拉强度/ kPa
原型	2.40	30	20 100	2 010
理论值	2.40	1.50	1 005	100.5
相似材料	2.36	1.47	987.1	110
偏差/%	-1.6	-2.0	-1.7	9.5

双排管桩模型前后排模型桩均采用弹性模量为 2 200MPa 的普通亚克力管,PHC 预应力混凝土管桩采用 C80 混凝土,弹性模量取值为 38 000MPa。亚克力模型桩与实际桩体弹性模量比值约为 1 : 17,与本次试验相似比例 1 : 20 极为接近。在定制管桩模型时,在距管桩模型一头 105~120mm 处设置亚克力底板,以代替实际工程中管桩距盖板约 2m 处所用的钢板,具体支护桩模型如图 5 所示。

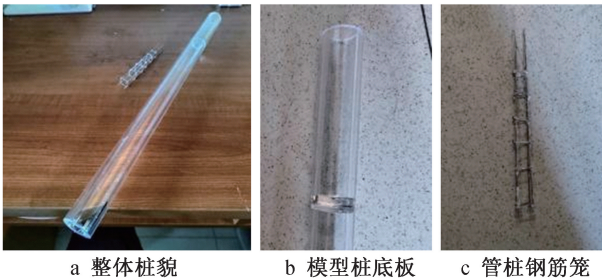


图 5 桩及钢筋模型

Fig. 5 Pile and rebar modeling

盖板内部及管桩连接处钢筋采用镀锌钢丝模拟。考虑到过细钢丝的支撑性较差,且本模型试验重点在于盖板与管桩结构,故选择在不影响整体结构强度的前提下,最小直径的钢丝制作所需的钢筋模型,以盖板底部钢筋和钢筋笼为例,如图 5c 所示。

1.4 方案设计

为了更好地观察采用改良措施前后双排管桩

与盖板支护结构的受力变化,本试验采用了具有针对性的改良前后对比试验设计,即将改良前后管桩与盖板的接头连接方式设置为 4 个对比组:①未改良组采用管桩锚入盖板 0.1m、钢筋常规布置方式;②改良 I 组采用管桩锚入盖板 0.2m、重新设计钢筋布置方式;③改良 II 组采用管桩锚入盖板 0.3m、重新设计钢筋布置方式;④改良 III 组采用管桩锚入盖板 0.4m、重新设计钢筋布置方式。

本次试验方案基于确定的相似比 $C_L=20,C_E=20$,在考虑几何、物理、荷载相似以及边界和约束条件相似等主要条件基本一致的前提下模拟工程实际。每组试验采用 5,10,15kPa 对基坑土层逐级加载,加载至最高荷载后,对基坑开挖 4 层,每层深度为 0.1,0.1,0.1,0.15m,总计 0.45m(对应实际基坑深度 4.5m)。试验方案如图 6 所示。

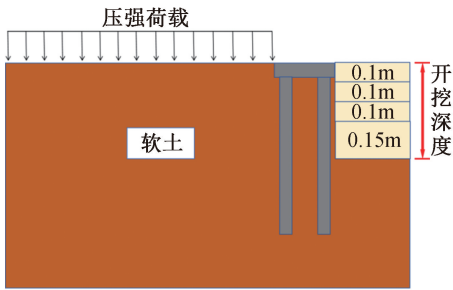


图 6 模型试验工况

Fig. 6 Model test conditions

1.5 试验装置及开挖工况

由于开裂位置出现在盖板表面,故将应变片对称粘贴于盖板前、上表面及前后排管桩两侧,具体布设方式如图 7 所示。试验过程中考虑到常规的自动液压加载设备无法提供大面积均匀荷载,本试验使用 2.5kg 的砖块均匀堆积加载。试验主要采用的测量系统为 DHDAS 动态信号采集分析系统,以及配套的测量设备如电阻应变采集箱、位移计等进行数据采集。

模型结构预先制作好后,放入模型箱内填土,为保证试验过程中土体均匀,每组试验填土分 5 次进行并夯实,填埋至标高后,进行堆载预压,分 4 步开挖,为了减少开挖对土层及模型桩的扰动,采用抹泥刀分层剥离开挖。每一开挖步完毕后,待模型桩变形达到稳定标准时,采集桩身应变及桩顶水平位移。双排桩模型试验过程如图 8 所示。

2 模型试验结果及分析

2.1 盖板结构裂缝分析

经过 4 组模型试验发现,在模拟基坑加载及开挖结束后,只有未改良组模型结构出现异常情况,

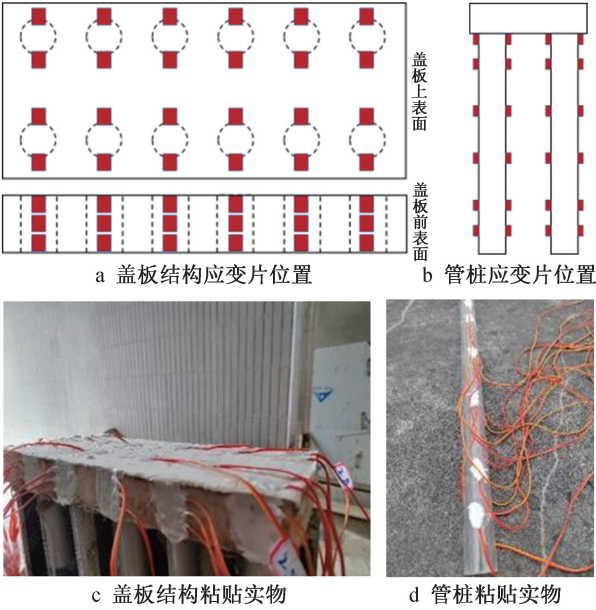


图 7 管桩应变片布置

Fig. 7 Layout of pipe pile strain gage

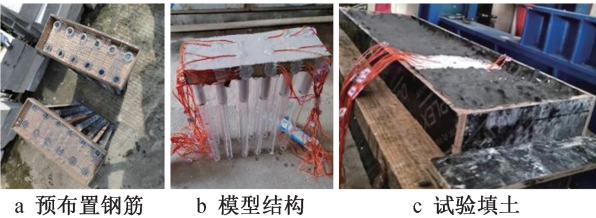


图 8 双排桩模型试验过程

Fig. 8 Test process of double-row pile model

在盖板前表面距底部 6mm 处出现沿基坑长度方向的细长水平裂缝。裂缝长度约为 45mm,出现位置处于管桩与盖板连接范围内,与实际工程中情况相近。大量实际工程调查研究资料表明,钢筋混凝土结构形成裂缝的主要原因可归结为两类:外荷载(动、静荷载)与变形,其中仅有 20% 的裂缝是由荷载引起的,其余部分均由结构变形导致^[20]。由于荷载并未直接作用在模型结构上,土体也未与盖板前表面直接接触,因此可推断该裂缝是由结构变形引起的。结构在受到约束和限制后会产生内应力,当应力超过结构的承受范围时,会出现裂缝以满足结构的变形需求,使内应力得到释放^[21]。这种裂缝出现于混凝土表面,裂缝深度一般从构件表面延伸至构件内,会严重损害结构的耐久性,削弱支护结构的承载、支护能力,同时可能造成应力集中,出现裂缝进一步扩大或结构突变情况,极大影响基坑支护结构的安全性。其他试验组都未出现此类裂缝,这说明通过加深管桩与盖板的连接深度以及重新设计钢筋等措施加强两者之间的连接,对于确保结构

安全具有明显效果。

2.2 盖板结构应力分析

通过将应变片测量的数据转化为应变,可根据盖板结构相似材料的力学参数计算结构应力值。

对盖板结构应力分布的测量分为盖板前表面(面向基坑开挖侧)与盖板上表面,其参照应变片布置可获得盖板前表面由底部至顶部、盖板上表面由前侧至后侧的应力数据,如图 9 所示。

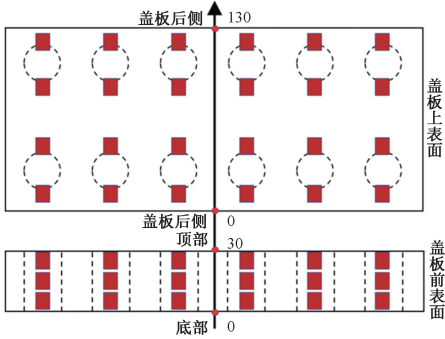


图 9 应力数据测量位置参照

Fig. 9 Stress data measurement location reference

2.2.1 盖板前表面

试验盖板前表面拉应力如图 10 所示。分析图 10 可知,从加载至完全开挖,未改良组与改良 I 组盖板前表面的最大拉应力值均出现在距底部 5mm 处(原型 0.1m 处),而改良 II 组与改良 III 组盖板前表面的最大应力值均出现在距底部 15mm 处(原型 0.3m 处),可见盖板前表面应力分布受管桩嵌入盖板深度影响。最大拉应力值处最易产生裂缝损坏且均出现在管桩顶部与盖板连接处,即管桩嵌入盖板深度位置,说明管桩顶部与盖板连接位置强度较弱。

未改良组最大拉应力值一直大于采取改良措施后的 3 组模型,未改良组最大拉应力值范围为 56.1~115.5kPa,改良 I 组除了基坑完全开挖时最大拉应力值达到了 75.7kPa 外,在其余步骤基本均稳定在 40~50kPa,改良 II、III 组最大拉应力值基本持续稳定在 20~40kPa。管桩嵌入盖板深度越深,则盖板前表面最大拉应力值越低,直至趋于稳定。

随着加载后基坑逐级开挖,未改良组与改良 I 组盖板前表面最大拉应力值逐级增加,在基坑完全开挖后达到最大 107.5kPa。改良 II 组与改良 III 组盖板拉应力值相对稳定,波动起伏小,甚至在开挖后有所降低。可见管桩嵌入盖板深度达到盖板厚度一半时能够有效抑制盖板开裂。

2.2.2 盖板上表面

试验盖板上表面拉应力如图 11 所示。分析图

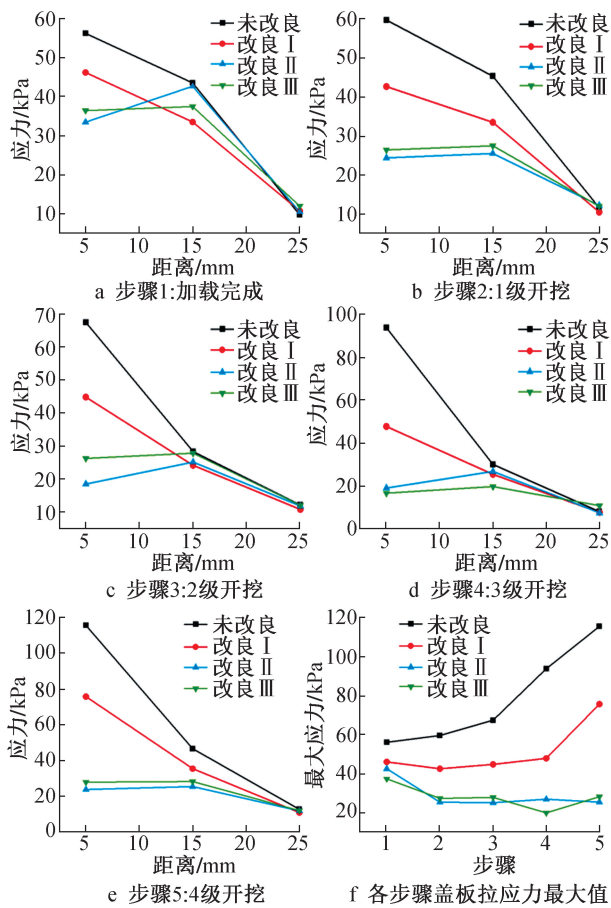


图 10 试验盖板前表面拉应力

Fig. 10 Tensile stress of the front surface of the test cover plate

11 可知,在加载步骤盖板上表面拉应力峰值基本集中在距盖板前侧 90mm 处,在基坑逐级开挖后拉应力峰值迁移至距盖板前侧 40mm 处,二者位置分别位于后、前管桩上方近中部处,拉应力峰值在 64~91kPa 范围内,其余位置拉应力值始终保持在 2~20kPa 的较低状态,可见在管桩与盖板连接处上方表面较易产生破坏。

在加载步骤时各模型组盖板上表面基本就已出现各步骤中的最大拉应力值,在之后的基坑开挖过程中,各模型组的拉应力峰值一直稳定在一定范围内,波动起伏较小。未改良组与改良Ⅲ组最大拉应力值处于 90~100kPa,改良Ⅰ组与改良Ⅱ组最大拉应力值处于 64~77kPa,形成明显的 2 个区间部分。由此可见,采取改良措施后可显著削弱盖板上表面拉应力峰值,拉应力峰值平均约降低 30%,但当盖板锚入深度过深时便会增大盖板上表面拉应力,改良效果消失甚至加剧损坏。

2.3 盖板结构位移分析

桩身水平位移可在弯矩的基础上通过差分法计算获得^[22],但由于各组桩身水平位移趋势相同

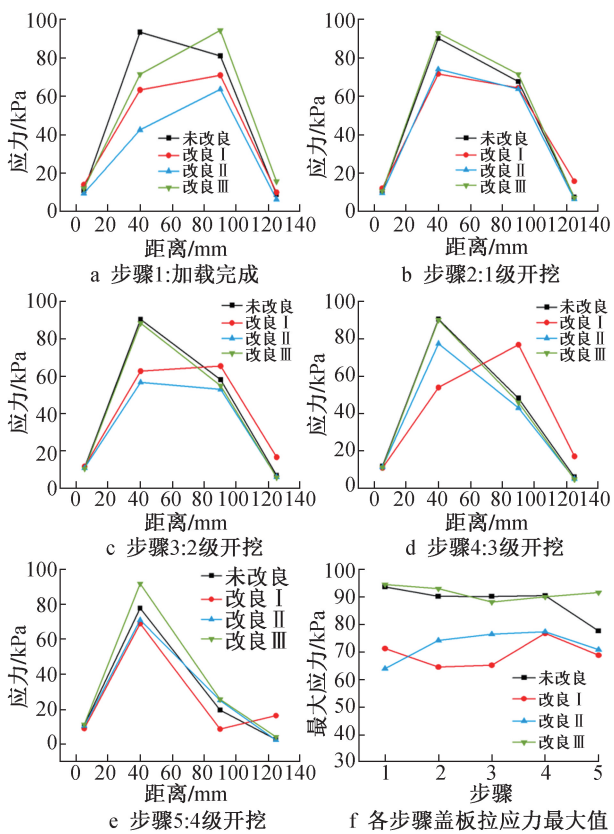


图 11 试验盖板上表面拉应力

Fig. 11 Tensile stress of the upper surface of the test cover plate

(桩底至桩顶间水平位移值逐渐递增,幅度无大变化)、各组位移值无明显差异,且整体结构最大水平位移均在桩顶盖板处,因此结构位移分析主要包括桩顶盖板水平位移及盖板前后侧竖向位移差,二者数据皆是通过位移计测量获得,如图 12 所示。

由图 12a 可知,桩顶盖板水平位移随着基坑逐级开挖而增大,在基坑完全开挖时达到最大值,由于 4 级开挖深度较大,水平位移增幅相比于其他步骤明显升高,水平位移达到 2.08~2.23mm,同时,在各个步骤中各组模型结构水平位移差距不大,最大差距为 0.16mm,可见管桩锚入盖板深度对结构水平位移无明显影响。

结合图 12b 分析可知,盖板前后侧竖向位移与桩顶盖板水平位移呈正相关,桩顶盖板水平位移达到最大时,盖板前后侧竖向位移亦达到最大值。由于在初始加载步骤中盖板前后侧竖向位移产生差值,从而导致在步骤 1 时盖板上表面拉应力分布呈现中间高、盖板前后两边低的态势,并一直持续至基坑开挖结束。

3 结语

本文以广州市某基坑工程为例,采用模型试验

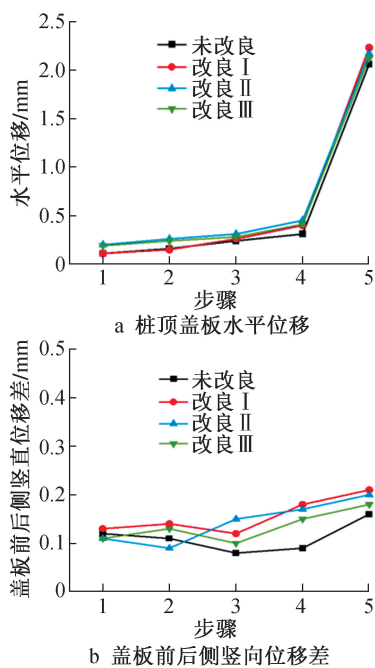


图 12 结构位移

Fig. 12 Structural displacement

的方法具体分析了双排管桩-盖板支护结构在基坑施工过程中引发的结构开裂、变形等工程问题。通过对双排管桩与盖板连接处承载性能、周边建筑不同工况荷载下管桩与盖板连接处的应力变化范围、分布规律进行分析,得到以下结论。

1)未采用改良措施(管桩锚入盖板深度为 0.1m 且采用原钢筋布置形式)的模型结构在距盖板底部 6mm 处出现由结构变形导致的水平裂缝。加深管桩与盖板的连接深度以及重新设计钢筋布置等改良措施加强两者之间的连接,可有效抑制裂缝产生。

2)管桩顶部与盖板连接位置强度较弱,应力峰值分别出现在管桩与盖板连接处的前侧与上方表面。改良措施确有成效,前表面应力大小及分布与上表面应力值大小受管桩嵌入盖板深度影响,当管桩锚入盖板深度 0.3m 时(改良 II 组),盖板前表面最大应力值下降约 75%,盖板上表面最大应力值下降 26%,盖板应力状态为最佳。故在采用双排桩-盖板复合支护体系的软土基坑支护工程中,建议管桩锚入盖板深度为 0.3m。

3)管桩锚入盖板深度对盖板结构前后侧竖向位移差、水平位移无明显影响。水平位移与竖向位移差随着基坑开挖逐级增大,分别是导致盖板前表面与上表面应力分布的原因,即支护桩变形是迫使盖板开裂的直接原因。受土体特点或基坑周边荷载等因素影响主动土压力过大,迫使支护桩产生较

大变形,并且由于管桩与盖板的强度等级差异、连接方式等因素,最终导致盖板出现沿基坑边线方向开展的裂缝。

参考文献:

[1] 邱朗. 深基坑双排桩支护结构设计研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(11): 187-188.
QIU L. Study on design of double-row pile supporting structure in deep foundation pit[J]. Engineering and technological research, 2021, 6(11): 187-188.

[2] 何珊珊. 软土中双排桩支护结构体系受力分析与计算研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HE S S. Mechanical analysis and calculation of double-row pile supporting structure system in soft soil[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[3] 胡玉银, 陈建兰. 桩端后注浆 PHC 管桩原理及工程应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(13): 93-98.
HU Y Y, CHEN J L. Mechanism and application of pile-end post-grouting PHC pipe pile[J]. Construction technology, 2024, 53(13): 93-98.

[4] MGURUMA H. Improving the flexural ductility of pretensioned high strength spun concrete piles by lateral confining of concrete[C]// New Zealand: Wairakei, 1987.

[5] OOI P S K, CHANG B K F, WANG S H. Simplified lateral load analyses of fixed-head piles and pile groups[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130(11): 1140-1151.

[6] 王彬, 郭昭胜, 贺武斌, 等. 界面状态对 PHC 管桩填芯抗拔承载性能影响试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(19): 103-108.
WANG B, GUO Z S, HE W B, et al. Experimental study on influence of interface state on pull-out bearing capacity of PHC pipe piles[J]. Construction technology, 2023, 52(19): 103-108.

[7] 杨凯. 深厚软土地区 PHC 管桩内支撑支护工作性状研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021.
YANG K. Study on the working characteristics of PHC pipe pile internal bracing in deep soft soil area[D]. Hengyang: University of South China, 2021.

[8] 赵鹏飞, 王泽希, 方成全, 等. 双排桩支护下软土深基坑开挖的变形分析与控制[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 1087-1094.
ZHAO P F, WANG Z X, FANG C Q, et al. Analysis and control of deformation of deep foundation pit excavation in soft soils supported by double-row piles[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1): 1087-1094.

[9] 张瑞程. 新型斜撑-排桩基坑支护体系工程应用分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(12): 162-166.
ZHANG R C. Engineering application analysis for new type of slant support-row pile foundation excavation support system[J]. Construction technology, 2024, 53(12): 162-166.

[10] 丁洪元, 昌钰, 陈斌. 软土深基坑双排桩支护结构的影响因素分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 105-109.
DING H Y, CHANG Y, CHEN B. Factors affecting double-row piles in deep soft soil foundation[J]. Journal of Yangtze River

Scientific Research Institute,2015,32(5):105-109.

[11] 陈达. SMW 双排桩基坑支护设计及应用[J]. 广东土木与建筑,2020,27(11):27-30.

CHEN D. Design and application of SMW double-row-piles foundation pit support [J]. Guangdong architecture civil engineering,2020,27(11):27-30.

[12] LIN P,LIU P,ANKIT G,et al. Deformation monitoring analysis and numerical simulation in a deep foundation pit [J]. Soil mechanics and foundation engineering,2021,58(1):56-62.

[13] 秦四清,万林海,汤天鹏,等. 深基坑工程优化设计[M]. 北京:地震出版社,1998.

QIN S Q,WAN L H,TANG T P,et al. Optimal design of deep foundation pit engineering [M]. Beijing: Seismological Press,1998.

[14] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. 铁道学报,2018,40(6):127-135.

HUANG D W,ZHOU S H,FENG Q S,et al. Scaled model test design for interaction between shield tunnel and stratum [J]. Journal of the China railway society,2018,40(6):127-135.

[15] ZHAI W Z,CHAPMAN D,ZHANG D M,et al. Experimental study on the effectiveness of strengthening over-deformed segmental tunnel lining by steel plates [J]. Tunnelling and underground space technology,2020,104:103530.

[16] 汤智钧. 基坑开挖对近接地铁高架嵌岩桥桩影响的模型试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.

TANG Z J. Model test study on the influence of foundation pit excavation on rock-socketed bridge piles adjacent to subway viaduct [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2022.

[17] 王鸿儒,赵密,钟紫蓝,等. 跨断层隧洞拟静力缩尺试验相似材料研究[J]. 工程力学,2022,39(6):21-30,145.

WANG H R,ZHAO M,ZHONG Z L,et al. Similar materials for quasi-static scaled tests of fault-crossing tunnels[J]. Engineering mechanics,2022,39(6):21-30,145.

[18] 陶连金,侯森,赵旭,等. 不同仰坡度数的山岭隧道洞口段动力响应振动台试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(S1):91-98.

TAO L J,HOU S,ZHAO X,et al. Large-scale shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel with different gradients of upward slope[J]. Rock and soil mechanics,2014,35(S1):91-98.

[19] 闫高明,申玉生,高波,等. 穿越黏滑断层分段接头隧道模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(11):4450-4458.

YAN G M,SHEN Y S,GAO B,et al. Experimental study of stick-slip fault crossing segmental tunnels with joints[J]. Rock and soil mechanics,2019,40(11):4450-4458.

[20] 鞠丽艳. 混凝土裂缝抑制措施的研究进展[J]. 混凝土,2002(5):11-14.

JU L Y. Studying progress of measures of restrain concrete crack [J]. Concrete,2002(5):11-14.

[21] 周拓. 筏板基础大体积混凝土温度发展规律与裂缝防控[J]. 施工技术(中英文),2024,53(16):67-72.

ZHOU T. Temperature development law and crack prevention and control of mass concrete of raft foundation [J]. Construction technology,2024,53(16):67-72.

[22] 徐江,马宜安,邓会元,等. 桩顶既有荷载下大直径柔性桩承载特性数值模拟研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(19):34-40.

XU J,MA Y A,DENG H Y,et al. Numerical analysis on bearing capacity of flexible pile with large diameter under existing load on pile top[J]. Construction technology,2025,54(19):34-40.