

DOI: 10.11779/CJGE2014S2007

钢板桩围堰设计的土压力计算方法探讨

汤劲松^{1, 2}, 熊保林^{1, 2}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为了分析作用在钢板桩围堰上的土压力大小, 以新建阜阳至六安铁路颍河特大桥深水基础钢板桩围堰施工实践为例, 通过建立钢板桩、内支撑和土体相互作用的三维整体有限元模型, 分析了钢板桩围堰施工过程中土体的应力状态、土压力大小及其发展变化规律。研究结果表明: 钢板桩围堰施工过程中, 周围土体没有达到极限平衡状态; 作用在钢板桩围堰外侧的土压力介于主动土压力和静止土压力之间, 并靠近静止土压力; 而作用在钢板桩围堰内侧的土压力介于静止土压力和被动土压力之间, 并靠近静止土压力; 考虑到钢板桩围堰工作状态的土压力难以准确确定, 建议设计计算时钢板桩围堰内外土压力均采用静止土压力, 计算结果偏于安全。

关键词: 桥梁工程; 钢板桩围堰; 土压力; 数值模拟; 深水基础

中图分类号: TU43; U443.162; U445.556 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0036-06

作者简介: 汤劲松(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: tangjssjz@163.com。

Method for earth pressure in design of steel sheet pile cofferdam

TANG Jin-song^{1, 2}, XIONG Bao-lin^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to analyze the earth pressure acting on steel sheet pile cofferdam, the construction practice of deep-water foundation at Yinghe River Bridge of newly-built Fuyang-Lu'an Railway is investigated. Three-dimensional finite element model is established considering the interaction among steel sheet pile, internal bracing and soil layer. The values and change rules of earth pressure are analyzed during the construction process of steel sheet pile cofferdam. The results show that the surrounding soil does not reach limit equilibrium state during the construction process of steel sheet pile cofferdam. The value of earth pressure on the outer steel sheet pile cofferdam is between the active earth pressure and the static earth pressure, which is close to the static earth pressure. The value of earth pressure on the inner steel sheet pile cofferdam is between the passive earth pressure and the static earth pressure, which is close to the static earth pressure. The earth pressure on steel sheet pile is suggested to use the static earth pressure because it is difficult to accurately determined under working condition. The suggestion will make the design results be safer.

Key words: bridge engineering; steel sheet pile cofferdam; earth pressure; numerical simulation; deep-water foundation

0 引言

在桥梁深水基础施工过程中, 承台的施工需要在无水环境下进行, 作为临时结构的防水围堰是必不可少的辅助施工措施。钢板桩围堰具有施工速度快、经济效益好、可重复利用等特点, 被广泛应用于深水基础承台施工的围堰工程^[1-2]。目前的钢板桩围堰设计计算中, 大多采用土体与围堰结构分离的简化计算方法, 作用在钢板桩围堰外侧的土压力通常采用朗肯主动土压力, 而作用在钢板桩围堰内侧的土压力通常采用朗肯被动土压力^[3-4]; 也有建议钢板桩围堰外侧土压力采用静止土压力, 内侧土压力采用朗肯被动土压力进行

计算^[5]。

根据主动土压力和被动土压力的概念, 当钢板桩的水平位移达到一定数量, 钢板桩围堰内外土体的应力状态处于极限平衡状态时, 作用在钢板桩上的土压力才是主动土压力或被动土压力。而实际问题是, 一方面, 钢板桩围堰工作状态的桩身水平位移不大, 围堰内外土体没有达到极限平衡状态; 另一方面, 即使桩身水平位移使得钢板桩围堰外侧的土体处于主动极限平衡状态, 而同样大小的位移也不会使得钢板桩围

堰内侧的土体达到被动极限平衡状态。因此，钢板桩围堰设计过程中的简化计算方法，假设作用在钢板桩围堰上的土压力分别为主动土压力和被动土压力，与实际情况不符。

本文以新建阜阳至六安铁路颍河特大桥钢板桩围堰施工实践为例,通过建立钢板桩、内支撑和土体相互作用的三维整体有限元模型,分析了钢板桩围堰施工过程中土体的应力状态、土压力大小及其发展变化规律,并对钢板桩围堰设计计算中土压力的简化计算方法进行探讨。

1 钢板桩围堰设计概况

新建阜阳至六安铁路颍河特大桥位于安徽省阜阳市境内,设计采用一联(70+120+70)m连续梁跨越颍河主航道,主墩基础为20根 $\phi 2.0$ m群桩基础,承台平面尺寸为24.6m×19.3m;考虑通航要求采用低桩承台,承台底面标高分别为11.36m和11.37m,主墩河床面标高分别为19.3m和16.6m。

根据地质勘察报告, 主墩处主要地层岩性特征自上而下分别为粉砂, 下覆粉质黏土和粉土交替分布。除粉砂层下第一层粉质黏土软塑、局部硬塑外, 其他粉质黏土呈硬塑状。

通过对钢板桩围堰、双壁钢围堰和钢筋混凝土围堰等多种围堰结构型式的技术经济比选,钢板桩围堰以其施工速度快、效率高、成本低、止水效果满足要求等特点,成为颍河特大桥深水基础低桩承台施工之首选方案。

颍河特大桥深水基础钢板桩围堰设计为矩形, 平面尺寸为 $28.0\text{ m} \times 22.4\text{ m}$, 如图 1 所示 (图中尺寸单位为 mm)。采用拉森 IV 型钢板桩, 设计长度为 30.0 m ,

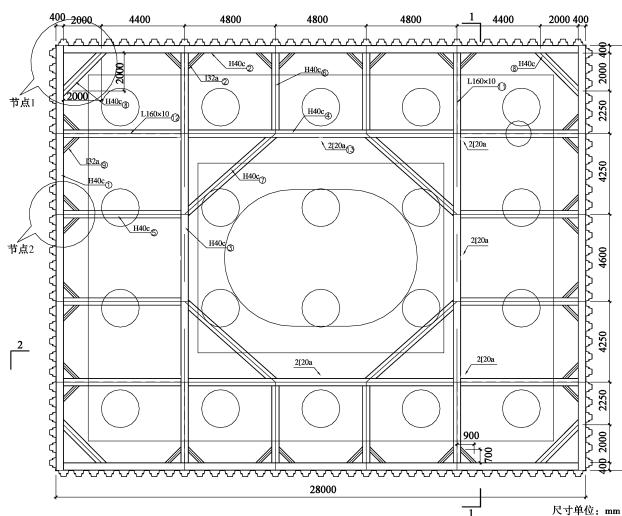


图 1 钢板桩围堰平面布置图

Fig. 1 Plane arrangement of steel sheet pile cofferdam

钢板桩桩顶标高为 28.36 m。围堰从上到下设 6 道支撑, 第一道、第二道和第三道围檩与内支撑均由单排 H 型钢 H40c 组成, 支撑中心线标高分别为 27.46, 24.46 和 21.46 m; 第四道、第五道和第六道围檩及内支撑均由双拼 H 型钢 2H40c 组成, 支撑中心线标高分别为 18.66, 15.86 和 13.36 m。在上部 5 道支撑之间设置剪刀撑(角钢 $\angle 160 \times 10$) 和竖撑 2 [20a], 将各道支撑连成整体, 以提高钢板桩围堰的整体刚度。其设计断面如图 2 所示, 图中除标高单位为 m 外, 其它尺寸单位为 mm^[6-8]。

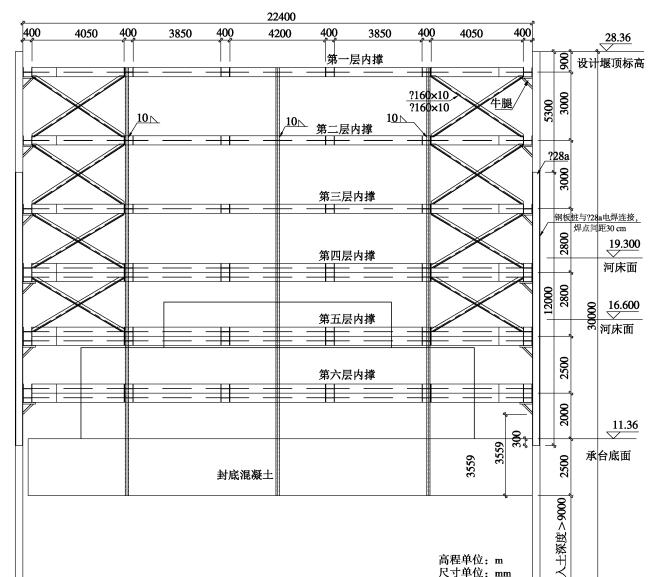


图 2 钢板桩围堰 1-1 断面图

Fig. 2 Section 1-1 of steel sheet pile cofferdam

2 数值模拟方案

2.1 分析模型的建立

为了分析钢板桩围堰施工过程中周围土体的应力状态和土压力变化规律,应该建立关于钢板桩、内支撑和土体之间共同作用的三维整体有限元模型。考虑到围堰开挖对周围土体的影响,建立土体模型时,模型的侧面边界到钢板桩的距离不小于围堰开挖深度的3倍,土体三维有限元模型的边界范围如下:以钢板桩围堰的长度方向为X方向,取为196 m,以钢板桩围堰的宽度方向为Z方向,取为190 m,以钢板桩围堰的深度方向为Y方向,取为40 m。根据地质勘察报告,将土体的计算模型从上到下划分为9层。有限元模型共划分单元113520个,其中土体单元104080个,钢板桩单元7112个,围檩和内支撑单元2328个。考虑桩土相互作用的钢板桩围堰三维整体有限元模型如图3所示^[6-8]。

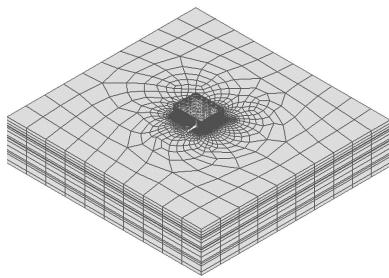


图 3 钢板桩围堰三维整体有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model for steel sheet pile cofferdam

计算过程中,钢板桩采用ANSYS软件中壳单元shell63来模拟,围檩、内支撑、剪刀撑和竖撑均采用梁单元beam188进行模拟,土体采用三维实体单元solid45来模拟。

计算采用的边界条件为:模型的侧面边界受到水平位移约束;模型的下部边界受到竖向位移约束;河床表面为自由边界,不受任何约束。

对土体在自重应力条件下进行求解,得到模型的初始状态;再设置钢板桩进行稳定求解,得到钢板桩插打合龙以后的状态;然后对位移清零。在模拟抽水吸泥施加各道支撑时,采用ANSYS软件生死单元功能按照各道支撑的施工顺序,依次激活各道支撑,实现对支撑的模拟。根据现场施工情况,每一道支撑是在钢板桩水平位移发生以后施加上去的,通过改变节点坐标来模拟。抽水引起的水位变化采用水压力施加给钢板桩来计算,吸泥开挖采用土单元的生死功能来模拟。

2.2 计算参数的确定

计算过程中,土体采用弹塑性模型,并服从Drucker-Prager破坏准则。土体的物理力学参数根据地质勘察报告的数据选取,如表1所示。

表1 土体的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

层号	岩性	重度 /(kN·m ⁻³)	饱和重度 /(kN·m ⁻³)	浮重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)	变形模量 /MPa	泊松比
① ₃₁	粉砂	19.1	19.10	9.10	0	22.0	8.10	0.28
② ₁₁	粉质黏土	19.4	19.60	9.60	34.6	14.3	3.77	0.30
② ₂	粉土	19.8	19.82	9.82	15.9	14.3	3.45	0.31
④ ₁	粉质黏土	19.6	19.76	9.76	37.9	13.1	3.75	0.33
④ ₂	粉土	19.9	20.20	10.20	10.6	23.6	6.60	0.32
⑤ ₁	粉质黏土	19.8	19.89	9.89	36.8	14.9	4.07	0.34
⑤ ₁ _夹	粉土	20.3	20.53	10.53	6.0	33.7	5.34	0.31
⑤ ₂	粉土	20.3	19.90	9.90	24.4	23.7	4.67	0.31
⑤ ₃₁	粉砂	19.1	19.10	9.10	0	22.0	8.10	0.28

钢板桩、围檩和内支撑采用理想线弹性模型,弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3。由于钢板桩之间的缝隙以摩擦力控制,根据以往经验,围堰的刚度按复合桩墙的刚度折减50%与实际情况较为吻合^[9-10],这时,可将钢板桩的弹性模量取为原来的一半,即为105 GPa。拉森IV型钢板桩截面模量为2037 cm³,设计应力容许值为200 MPa;围檩和内支撑采用钢材材质为Q235B,设计应力容许值为145 MPa。

C20垫层混凝土也假设为线弹性模型,根据《混凝土结构设计规范GB50010—2002》^[11]的规定,其弹性模量取为25.5 GPa,泊松比取为0.2。

2.3 施工步骤的模拟

颍河特大桥#46墩河床面标高为19.3 m,位于围堰的第三道支撑和第四道支撑之间。在逐层抽水吸泥并施加内支撑到第六道支撑后,继续抽水吸泥开挖到承台底面以下0.5 m,灌注C20混凝土0.5 m作为垫层,干法施工承台。具体的施工工序如下:

(1) 钢板桩顶面标高为28.3 m,钢板桩插打完毕后,围堰外水位标高为24.4 m。安装第一道内支撑,支撑中心线标高27.46 m。安装好第一道内支撑后,围堰内抽水至标高23.6 m处;此时,围堰外水位为24.4 m,为第一工况。

(2) 安装第二道内支撑及剪刀撑和竖撑,支撑中心线标高为24.46 m。安装好第二道内支撑后,围堰内抽水至标高20.6 m处;此时,围堰外水位为24.4 m,为第二工况。

(3) 安装第三道内支撑及剪刀撑和竖撑,支撑中心线标高为21.46 m。安装好第三道内支撑后,围堰内抽水并吸泥开挖至标高17.8 m处;此时,围堰外水位为24.7 m,为第三工况。

(4) 安装第四道内支撑及剪刀撑和竖撑, 支撑中心线标高为 18.66 m。安装好第四道内支撑后, 围堰内抽水并吸泥开挖至标高 15.0 m 处; 此时, 围堰外水位为 24.4 m, 为第四工况。

(5) 安装第五道内支撑及剪刀撑和竖撑, 支撑中心线标高为 15.86 m。安装好第五道内支撑后, 围堰内抽水并吸泥开挖至标高 12.5 m 处; 此时, 围堰外水位为 24.6 m, 为第五工况。

(6) 安装第六道内支撑, 支撑中心线标高为 13.36 m。安装好第六道内支撑后, 围堰内抽水并吸泥开挖至标高 10.86 m 处, 施工垫层混凝土, 厚度为 0.5 m; 此时, 围堰外水位为 24.3 m, 为第六工况。

(7) 垫层混凝土施工完毕后, 进行承台下半部分浇筑施工。当承台下半部分施工完毕后, 往承台与钢板桩围堰之间的间隙填砂夹石至标高 12.96 m 处, 在支撑对应位置砂夹石上浇筑 0.4 m 厚、1.5 m 宽的 C20 混凝土; 当混凝土强度达到 100% 后, 拆除第六道支撑的外露部分, 拆除后继续在承台与钢板桩围堰之间的间隙填砂夹石至标高 15.36 m, 拆除第五道支撑的内部斜撑杆, 然后进行上部承台的钢筋绑扎和混凝土浇筑。此时, 围堰外水位为 24.3 m, 为第七工况。

3 计算结果分析

3.1 钢板桩围堰内外土体应力状态分析

为判断土体是否发生剪切破坏, 需要通过分析各种工况下大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 的关系。根据土体极限平衡理论和莫尔库仑破坏准则, 对应于小主应力 σ_3 的破坏大主应力 σ_{1f} 公式为

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)。 \quad (1)$$

有限元计算结果可以得到土体单元的大主应力

表 2 不同工况下土体的主应力值以及对应于小主应力的破坏大主应力

Table 2 Principal stresses of soil layers and failure major principal stress corresponding to minor principal stress

工况	主应力最大值	小主应力 σ_3 /kPa	大主应力 σ_1 /kPa	对应于小主应力 σ_3 的破坏大主应力 σ_{1f} /kPa
第一工况	小主应力的最小值	95.13	193.15	230.40
	大主应力的最大值	123.42	262.02	299.12
第二工况	小主应力的最小值	91.38	185.54	221.02
	大主应力的最大值	118.31	251.15	286.53
第三工况	小主应力的最小值	90.44	183.63	219.47
	大主应力的最大值	119.34	253.40	289.84
第四工况	小主应力的最小值	90.04	182.80	220.02
	大主应力的最大值	117.04	248.55	286.02
第五工况	小主应力的最小值	180.45	316.26	357.41
	大主应力的最大值	231.39	421.59	459.34
第六工况	小主应力的最小值	190.71	333.68	387.06
	大主应力的最大值	232.75	426.17	481.56
第七工况	小主应力的最小值	159.49	280.64	334.42
	大主应力的最大值	180.82	306.47	360.82

σ_1 值和小主应力 σ_3 值, 考虑两种主应力的极值, 分别对应于大主应力最大值和小主应力最小值。根据上式, 计算得到不同工况下土体破坏时, 对应于小主应力 σ_3 的破坏大主应力 σ_{1f} 值, 结果如表 2 所示。对比不同工况下土体的计算大主应力 σ_1 值与破坏大主应力 σ_{1f} 值可知, 土体都没有发生剪切破坏, 这反映了钢板桩围堰工作状态的土压力没有达到极限平衡状态。

3.2 不同工况条件下土压力计算结果分析

钢板桩围堰在受到水土压力共同作用时, 向内发生变形。当钢板桩变形较大, 外侧土体达到抗剪强度时, 作用在钢板桩外侧的土压力就是主动土压力, 采用朗肯土压力理论, 主动土压力计算公式为

$$p_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)。 \quad (2)$$

而钢板桩内侧土体达到抗剪强度时, 作用在钢板桩内侧的土压力就是被动土压力, 采用朗肯土压力理论, 被动土压力计算公式为

$$p_p = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)。 \quad (3)$$

为便于比较, 还计算了静止土压力, 其计算公式为

$$p_0 = \gamma z (1 - \sin \varphi)。 \quad (4)$$

有限元软件计算的钢板桩围堰短边中线外侧土压力与朗肯主动土压力和静止土压力计算结果对比如图 4 所示, 围堰内侧土压力与朗肯被动土压力和静止土压力计算结果对比如图 5 所示。

图 4 可知, 通过三维整体有限元模型计算得到的外部土压力随埋深基本成曲线分布, 大小位于静止土压力和主动土压力之间, 并靠近静止土压力。这是由于施工过程中钢板桩变形较小, 土压力基本还是侧土压力造成的。计算结果同时表明, 不同工况对土压力

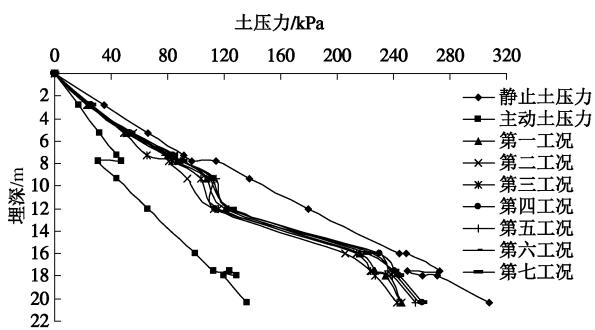


图4 钢板桩围堰外侧土压力

Fig. 4 Earth pressure outside steel sheet pile cofferdam

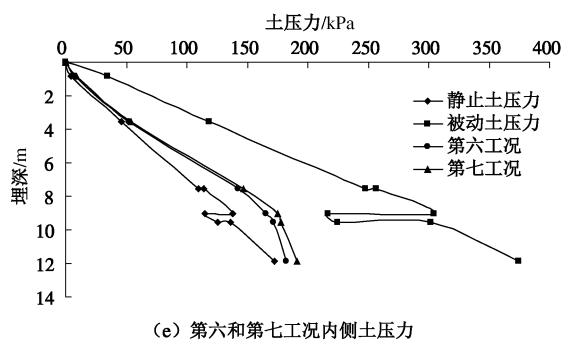
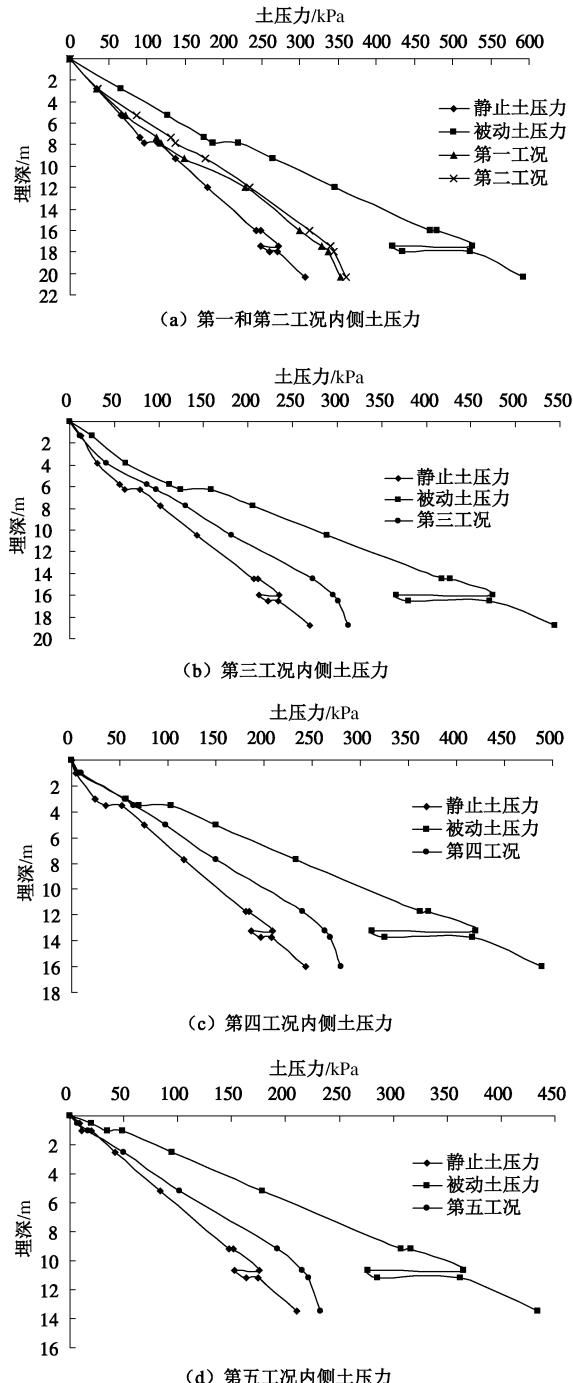


图5 钢板桩围堰内侧土压力

Fig. 5 Earth pressure inside steel sheet pile cofferdam

的影响不大,因为不同工况下土体变形变化不大。传统的设计计算方法都假设钢板桩外部土压力为主动土压力,与埋深成线性关系。但由于外部土体的变形没有达到极限平衡状态,所以钢板桩外部土压力不可能完全处于主动土压力,而应该比主动土压力偏大;并且土压力随埋深不会呈直线分布,与桩身变形有关。

由图5可以发现,有限元计算得到的内部土压力随埋深也成曲线分布,基本上都靠近静止土压力,这也与土体变形较小有关。传统的设计计算都假设钢板桩内部土压力为被动土压力,与埋深成线性关系,按朗肯被动土压力公式进行计算。但由于钢板桩围堰变形较小,内部土体不可能完全达到被动极限平衡状态,所以围堰内部土压力应该比被动土压力要小。从另一方面来说,即使钢板桩的变形使得其外部土体达到主动极限平衡状态,同样大小的变形量也不会使得钢板桩围堰内部土压力达到被动极限平衡状态。

综上所述,由于钢板桩围堰在施工过程中的变形较小,使得土体的变形也相应较小,因此,作用在钢板桩上的土压力接近于静止土压力。而钢板桩围堰的简化设计计算都假设作用在钢板桩的土压力为朗肯主动土压力和朗肯被动土压力,与实际情况有较大的出入。上述模拟分析的结果表明,简化计算采用的土压力比实际作用在钢板桩上的土压力要小,使得设计结果偏不安全。考虑到钢板桩围堰工作状态的土压力大小难以准确确定,建议在钢板桩围堰设计时,土压力的计算可采用静止土压力,计算结果偏于安全。

4 结 论

(1)钢板桩围堰内外土压力与土体深度之间成曲线分布的关系,并且不同工况条件下的土压力值变化不是很大,这与施工过程中土体的变形变化不大有关。

(2)由于在钢板桩围堰施工过程中,土体的变形量较小,没有达到主动土压力或者被动土压力所需的变形量,所以数值计算得到的土压力比较接近静止土压力。考虑到土压力的大小难以准确确定,建议在钢

板桩围堰简化设计时, 土压力的计算可采用静止土压力, 计算结果偏于安全。

(3) 常规的钢板桩围堰设计计算都假设作用在钢板桩的土压力为朗肯主动土压力和朗肯被动土压力, 与实际情况有较大的出入。常规设计方法采用的朗肯土压力比实际作用在钢板桩上的土压力要小, 使得设计结果偏不安全。

参考文献:

- [1] 李迎九. 钢板桩围堰施工技术[J]. 桥梁建设, 2011, 41(2): 76 - 79, 84. (LI Ying-jiu. Construction techniques of steel sheet pile cofferdams[J]. Bridge Construction, 2011, 41(2): 76 - 79, 84. (in Chinese))
- [2] 张骏. 桥梁深水基础钢板桩围堰受力分析与应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 74 - 81. (ZHANG Jun. Force condition analysis and application of steel sheet pile cofferdam for bridge deepwater foundation[J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 74 - 81. (in Chinese))
- [3] 蔡忠泽. 顺德水道特大桥深水钢板桩围堰设计与施工[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 65 - 68. (CAI Zhong-ze. Design and construction of steel slab pile cofferdam in deep water for shunde channel super large bridge[J]. Railway Standard Design, 2011(10): 65 - 68. (in Chinese))
- [4] 刘跃武. 拉森钢板桩围堰在海河春意桥水中墩施工中的应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(增刊 1): 112 - 115. (LIU Yue-wu. Application of Larssen piling cofferdams to construction of In-Water Piers of Chunyi Bridge over Haihe River[J]. Bridge Construction, 2012, 42(S1): 112 - 115. (in Chinese))
- [5] 陈长明. 强涌潮地区拉森 VI 型钢板桩围堰施工计算[J]. 桥梁建设, 2009(5): 49 - 52. (CHEN Chang-ming. Calculation for construction of Larssen VI steel sheet pile cofferdam in strong tidal bore area[J]. Bridge Construction, 2009(5): 49 - 52. (in Chinese))
- [6] 汤劲松, 熊保林. 深水基础大规模超长钢板桩围堰施工过
- 程安全性分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 32 - 39. (TANG Jin-song, XIONG Bao-lin. Analysis on safety during construction process for large-scale and super-long steel sheet pile cofferdam of deepwater foundation[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 32 - 39. (in Chinese))
- [7] 汤劲松, 朱延翰. 特殊地质条件下超长钢板桩插打施工技术[J]. 施工技术, 2012, 41(16): 115 - 117. (TANG Jin-song, ZHU Yan-han. Piling construction of super-long steel sheet pile under special geological condition[J]. Construction Technology, 2012, 41(16): 115 - 117. (in Chinese))
- [8] 张骏. 超长钢板桩围堰合理内支撑施工方案[J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2012, 25(2): 19 - 24. (ZHANG Jun. Reasonable construction scheme of internal bracing for super-long steel sheet pile cofferdam[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2012, 25(2): 19 - 24. (in Chinese))
- [9] 骆冠勇, 曹洪, 潘泓, 等. 新光大桥桥墩钢板桩围堰的优化设计与监测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 124 - 129. (LUO Guan-yong, CAO Hong, PAN Hong, et al. Optimal design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of Xinguang Bridge[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2006, 34(2): 124 - 129. (in Chinese))
- [10] 潘泓, 曹洪, 尹一鸣. 广州猎德大桥钢板桩围堰的设计与监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2242 - 2248. (PAN Hong, CAO Hong, YIN Yi-ming. Design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of Liede Bridge in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2242 - 2248. (in Chinese))
- [11] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 2002. (GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. 2002. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)