

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.004

吹填人工岛软基处理及围堰变形监测分析

匡一成¹,杨铠波^{2*},尹平保²,王杰²

(1.保利长大工程有限公司,广东 广州 511430;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工岛采用柔性土工管袋围堰,用作临时工程的筑岛施工,这在离岸填海筑岛工程中较为罕见,亟待开展现场监测试验以分析其稳定性。该人工岛采用水上水泥搅拌桩+土工管袋修筑围堰,并通过堆载预压+塑料排水板的方法进行地基处理,岛体基础采用水上水泥搅拌桩进行软基处理。西锚碇人工岛塑料排水板地基处理区域沉降量以及围堰深层水平位移现场监测结果表明:采用塑料排水板地基处理后,该区域沉降量和沉降速率显著增加,监测时间共计265 d,期间地基最大沉降量为2 194 mm;水上水泥搅拌桩处理区域,其沉降速率均明显小于塑料排水板处理区,该区域地基最大沉降量约为195 mm;围堰深层水平位移和前端原泥面累计水平位移量均变化稳定,各方向围堰整体向外侧偏移,累计水平位移最大330 mm;施工过程中西锚碇人工岛岛体基本处于稳定状态,说明采用柔性土工管袋围堰,可有效进行离岸人工岛填筑,且稳定性得到保证。

关键词:地基处理;土工管袋围堰;现场监测;塑料排水板;水上水泥搅拌桩

中图分类号:U416.1+6

文献标志码:A

0 引言

近年来,随着“深化粤港澳合作,推进大湾区建设”国家战略项目的持续推进,众多跨江通道、跨海大桥陆续加快建设进度^[1]。深圳至中山跨江通道(简称深中通道)作为世界上首例集成海底沉管隧道、跨海桥梁、人工岛及水下互通的交通要道,跨越深圳和中山两地^[2-3]。伶仃洋大桥是深中通道的主通航孔桥,位于珠江入海口内,为全离岸结构,其锚碇基础工程需进行海上人工筑岛建设。塑料排水板堆载预压作为常用的地基处理方法,在软基处理工程中得到广泛应用^[5]。然而,对于离岸桥梁锚碇基础工程,其地基处理效果、地基固结沉降及围堰变形对离岸人工岛稳定性的影响,还有待深入研究。

对于塑料排水板堆载预压处理软土地基,许多学者进行了研究,如:港珠澳大桥东人工岛地基处理,采用局部开挖换填和井点降水联合塑料排水板堆载预压方案加固深厚软土地基,加速岛内地基土

体固结以减少工后残余沉降取得较好效果^[6]。马旭等^[7]通过总结港珠澳大桥西人工岛外海超厚回填砂段的软基处理施工工艺,对塑料排水板在预压施工过程中的各种影响因素进行定性和定量分析;彭扬发等^[8]基于饱和软土的竖向和水平向固结理论,推导了排水板地基表面双向排水固结层厚度的近似计算公式;张军舰等^[9]以强夯法为基础,设计了浅层、深层竖向排水和水平排水的复杂地层整体接力排水系统;刘热强等^[10]针对场地内夹杂岸堤、塘埂和人行道路网的软土地基处理,提出了塑料排水板和袋装砂井联合堆载预压加固大面积复杂深厚海相软基的方法;高会强等^[11]以传统的负压下砂井固结方程的解析解为基础,研究塑料排水板的通水量变化对加固深度的影响;黄朝焯^[12]通过对比塑料排水板不同等效直径计算式,提出了二维固结模型下精度更高的等效直径计算式;董超强等^[13]针对霞浦县滩涂地区某超软土地基工程,在Plaxis二维有限元软件中将塑料排水板分别用排水线和Chai的二维等效方法进行简化并做了相应的数值模拟分析。综上所述,对于塑

收稿日期:2023-05-03

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(编号:20A001);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(编号:18ZDXK12);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20220876)

作者简介:匡一成,男,大学本科,工程师.E-mail:1014449215@qq.com

*通信作者:杨铠波,男,博士研究生.E-mail:kuailebozai@csust.edu.cn

料排水板软基处理的研究多针对公路、岸堤以及滩涂等陆地地区,其与离岸海上地基处理有较大差别。

本文依托深中通道伶仃洋大桥西锚碇基础工程,采用土工管袋筑岛,区别于港珠澳桥的钢圆筒围堰筑岛以及近海筑岛工程。首先结合竖向排水体地基固结理论,对人工岛固结度进行计算;然后,计算得到人工岛地基最终沉降量;最后,对西锚碇人工岛塑料排水板地基处理区域沉降量以及围堰深层水平位移进行现场监测试验,并对监测数据进行分析以判断岛体稳定性。

1 西锚碇人工岛筑岛及沉降计算

1.1 土工管袋围堰筑岛

伶仃洋大桥西锚碇人工岛,采用水上水泥搅拌桩+土工管袋修筑围堰(图1),并通过堆载预压+塑料排水板的方法进行地基处理^[14]。岛体基础采用水上水泥搅拌桩(DCM)进行软基处理,DCM处理范围



图1 土工管袋围堰筑岛

为人工岛护岸前沿线及拌和楼料仓区,DCM桩直径2.3 m,间距4.8 m,呈三角形布置,平均桩长17.5 m,桩体进入粗砂层顶面且穿透淤泥软弱土层底面以下不少于2 m。土工管袋其纵向、横向宽条抗拉强度分别为90 kN/m和120 kN/m,围堰外边坡斜率采用1:2,由土工管袋形成堰体岛壁,堰体内部吹填中粗砂。堤顶设置土工管袋防浪墙,堤前防护结构采用砂肋软体排+格宾笼块石护底的组合形式。岛体内部除拌和楼料仓区以外的范围采用塑料排水板进行加速固结处理,排水板平均插入长度25.6 m,进入粗砂层不小于0.5 m。西锚碇人工岛地基处理如图1所示。

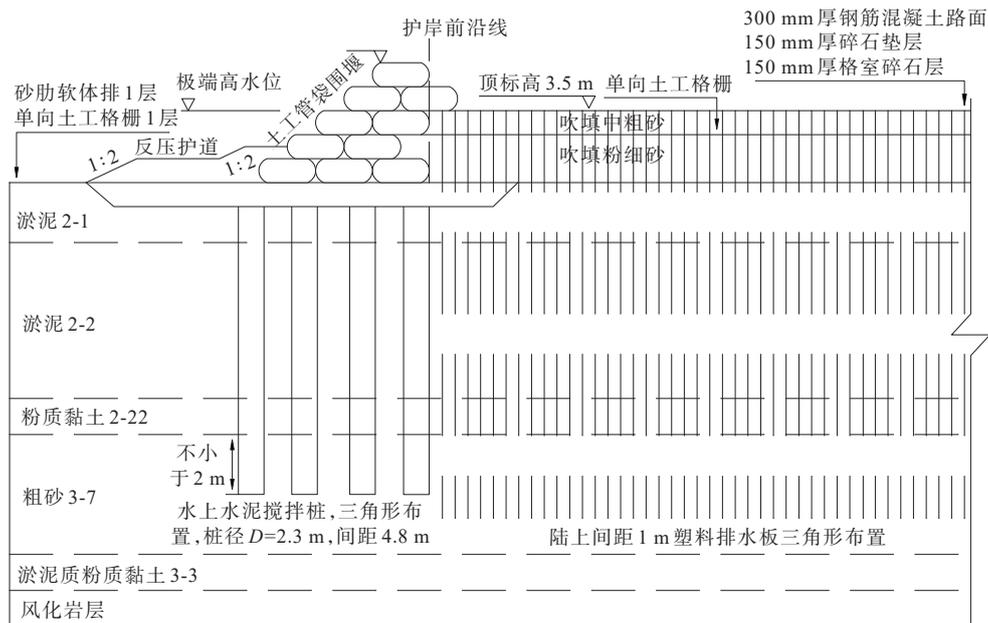


图2 西锚碇人工岛筑岛地基处理示意图

1.2 人工岛地质条件

人工岛工程场地钻孔揭示的各土层性质为:淤泥2-1厚4.4 m,淤泥2-2厚12.3 m,粉质黏土2-22厚2.4 m,粗砂3-7厚11.7 m,淤泥质粉质黏土3-3厚2.5 m,其下为全风化与中风化岩,土层力学计算参数如表1所示。工程区域极端高水位标高+3.21 m,场

地地下水由松散岩类承压水和基岩裂隙水组成。

1.3 人工岛地基固结度及沉降计算

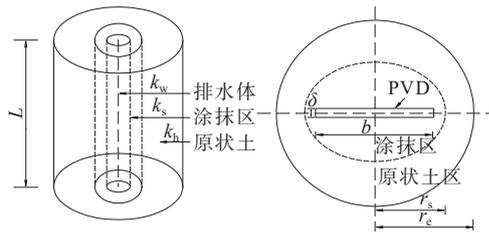
为避免人工岛岛体施工期固结沉降量过大,需对塑料排水板地基沉降量进行计算,以指导施工及分析地基固结度。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)采用含竖向排水体地基固结度计算方法,

典型的PVD地基处理计算固结模型如图3所示^[15]。

表1 土层力学计算参数

土层名称	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)	$E_s/$ MPa	$k_v/$ (10^{-6} $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_h/$ (10^{-6} $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
淤泥2-1	15.8	4.7	2.8	1.98	0.54	0.72
淤泥2-2	16.1	5.8	3.2	1.91	0.30	0.47
粉质黏土 2-22	19.5	18.6	14.8	5.68	8.08	10.43
粗砂3-7	20.4	9.9	32.5	15.50	6 132	6 132
淤泥质粉质 黏土3-3	18.1	17.6	8.0	3.83	0.40	0.56

注: E_s 为弹性模量; k_v 、 k_h 分别为土层竖向、水平向渗透系数。



注: L 为塑料排水板计算长度; b 、 δ 分别为塑料排水板截面宽度和厚度; r_e 为塑料排水板有效排水半径。

图3 PVD地基处理固结模型示意图

在土体固结过程中,其周围形成了一个半径为 r_s 的涂抹区。PVD预压地基处理固结度计算表达式为:

$$U_r = 1 - e^{-\beta t} \quad (1)$$

式中: U_r 为地基土径向固结度; t 为时间(d); e 为自然对数; β 为相关系数,表达式为:

$$\beta = \frac{8C_h}{Fd_e^2} \quad (2)$$

$$C_h = \frac{k_h(1+e_0)}{\gamma_w a} \quad (3)$$

$$F = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln\left(\frac{n}{s}\right) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \left(\frac{n^2 - s^2}{n^2}\right) \ln s \quad (4)$$

式中: d_e 为塑料排水板有效排水直径, $d_e=1.13l$,其中 l 为塑料排水板间距; C_h 为土层水平向固结系数; k_h 为土层水平向渗透系数; e_0 为天然孔隙比; a 为土体压缩系数; γ_w 为水的重度; n 为井径比,等于 d_e/d_w ,其中 d_w 为塑料排水板当量换算直径, $d_w=2(b+\delta)/\pi$; k_s 为涂抹区土的渗透系数; s 为涂抹区直径 d_s (为 $2r_s$)与 d_w 之

比,可取2.0~3.0; k_w 为排水体渗透系数。

人工岛地基最终沉降量 S 计算式^[16]为:

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \lg R_{OCR} + \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \left(\frac{p}{p_c} \right) \quad (5)$$

式中: C_c 为压缩指数; C_c 为再压缩指数; H 为土层厚度; R_{OCR} 为超固结比; p_c 为先期固结压力; p 为施加荷载后的有效应力。

2 西锚碇人工岛筑岛现场监测

深中通道西锚碇人工岛采用土工管袋围堰筑岛,其作为临时工程在施工完成后需要拆除回收。因此,人工岛围堰稳定状态和岛体沉降趋势,是判断人工岛稳定性的关键。为确保围堰体稳定性,对西锚碇人工岛施工期的塑料排水板处理区域(DB01~DB02)、水上水泥搅拌桩处理区域(DB03~DB05)以及围堰深层水平位移(CX01~CX05)实施施工期监测,具体监测点布置如图4所示。

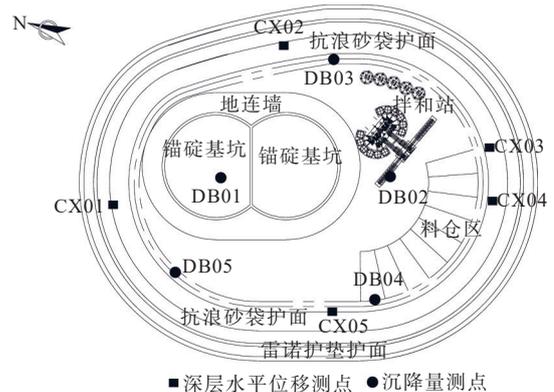


图4 西锚碇人工岛监测点布置图

人工岛岛体沉降量和沉降速率实测结果如图5所示。由图5可知:随着塑料排水板插打施工,地基沉降速率显著增加,地基沉降量急剧增大;当塑料排水板插打施工完成后100 d时,沉降速率逐渐减弱,约150 d后,地基沉降基本处于稳定,监测时间共计265 d,监测期间塑料排水板处理地基的最大沉降量为2 194 mm。

地质勘察结果显示:淤泥2-1与淤泥2-2的先期固结压力 p_c 分别为50 kPa与65 kPa,压缩指数 C_c 分别为0.450与0.546,超固结比 R_{OCR} 分别为1.66和1.03。通过计算得到沉降稳定后地基沉降量及固结度随深度的变化曲线如图6所示。由图6可知:场地

中淤泥层沉降量占地基总沉降量的90%以上,其他土层沉降量不足地基总沉降量的10%;淤泥层的固结度可达95%以上,以下土层的固结度均可达85%

以上,说明采用塑料排水板处理淤泥层可有效加速地基的固结沉降。

水上水泥搅拌桩处理区域监测结果如图7所示。

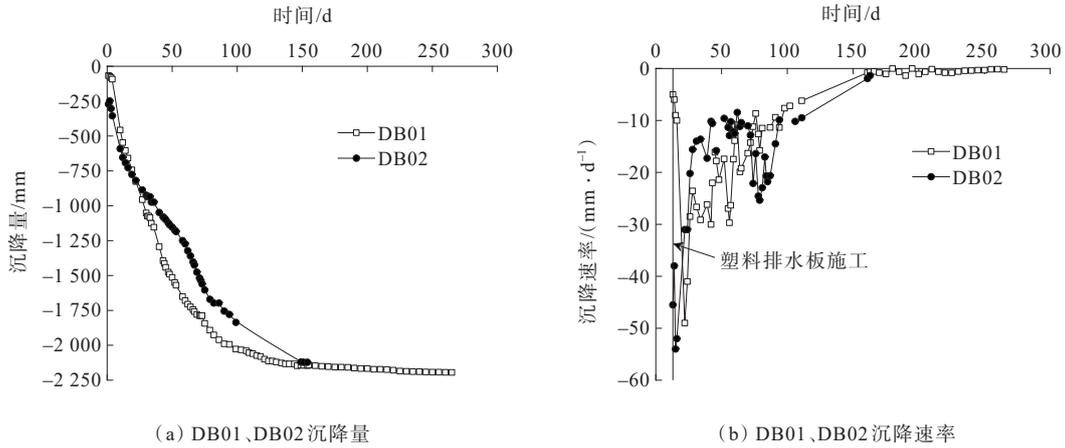


图5 塑料排水板区域监测结果

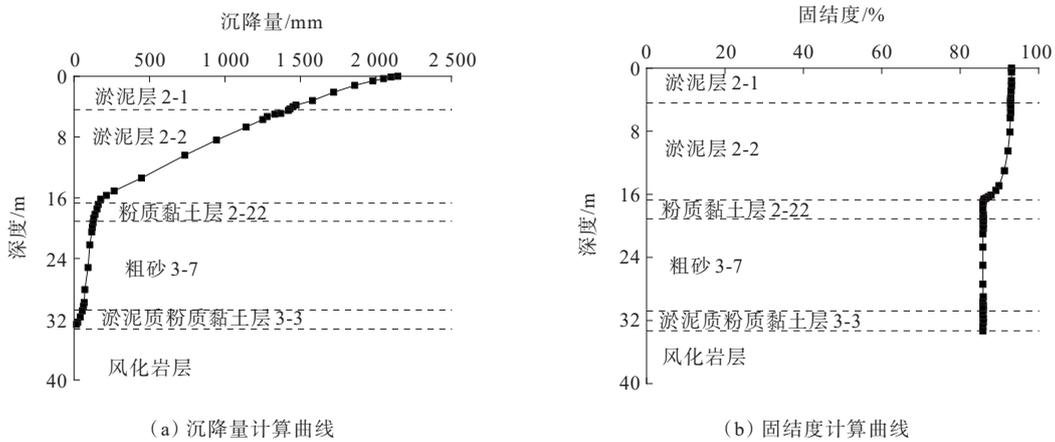


图6 地基沉降量与固结度沿深度变化曲线

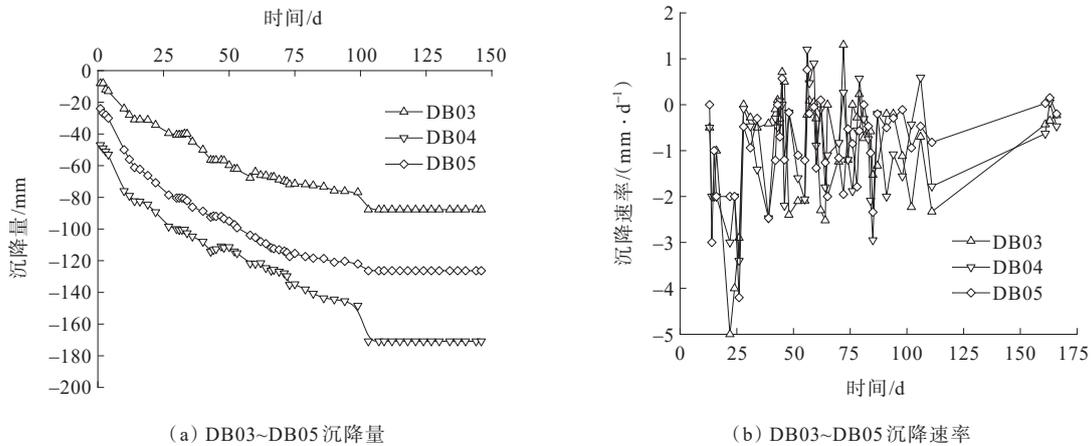


图7 水上水泥搅拌桩处理区域监测结果

由图7可以发现:水泥搅拌桩处理区域的沉降量随时间增加呈非线性增大,且其前期沉降量增幅较大,而后基本保持不变。水泥搅拌桩处理区域的沉

降速率约为2 mm/d,明显小于塑料排水板区域;该区域地基最大沉降量约为195 mm,同样远小于塑料排水板区域的沉降(约为2194 mm)。由此可见,采用

水泥搅拌桩,可提高围堰地基的承载力和稳定性,经其处理后的地基沉降量小,加固效果非常明显。而采用塑料排水板的目的在于加速围堰地基的排水固结,主要为后期锚碇基坑施工提供较稳定的施工场地,防止基坑开挖出现过量沉降及水平变形。总体来说,监测期间人工岛岛体和围堰的变形均在可控范围之内,说明这两种地基处理方式均合理可行。

围堰稳定性主要由外围的深层水平位移控制,人工岛的筑岛顺序为:先利用土工管袋修筑围堰,再在岛内吹填土,然后在岛内进行地基处理。由于土工管袋围堰修筑先于岛内吹填土施工,故围堰深层水平位移监测始于2019年7月初,监测数据截止于2020年10月初,其中监测值为正表示向岛内偏移,为负表示向岛外偏移。由于人工岛围堰深层水平位移变化规律较为相似,本文仅给出测点CX01~CX05的部分监测结果,如图8所示;围堰前端原泥面处的累计水平位移曲线如图9所示。

由图8、9可知:

(1) 2019年7月初至8月底,围堰深层水平位移和前端原泥面处的累计水平位移量均增幅较大,其主要原因是该时间段正在进行围堰管袋充填和岛内吹填砂施工,导致围堰整体向外侧偏移;其中,CX02和CX05测点的累计水平位移量大于其他测点,这是因为岛内吹填砂置于岛体两侧,即测点CX02和CX05附近,从而造成围堰向岛外偏移,其累计水平位移量达240 mm左右,而其余测点的偏移量均不足120 mm。

(2) 2019年10月初至12月中旬,围堰出现较大水平位移,其原因是岛内预应力管桩、深层搅拌桩施工以及吹填砂等施工产生挤土效应,导致管袋围堰向外侧变形较大;其中,测点CX01和CX03的累计水平位移变化较为一致,其增幅约为40 mm;测点CX04的累计水平位移则由80 mm增大至160 mm;相对而言,测点CX02的累计水平位移变化较小;而测点CX05的累积水平位移达330 mm,且出现明显的突变,其原因是测点CX05附近有钢筋临时堆放和

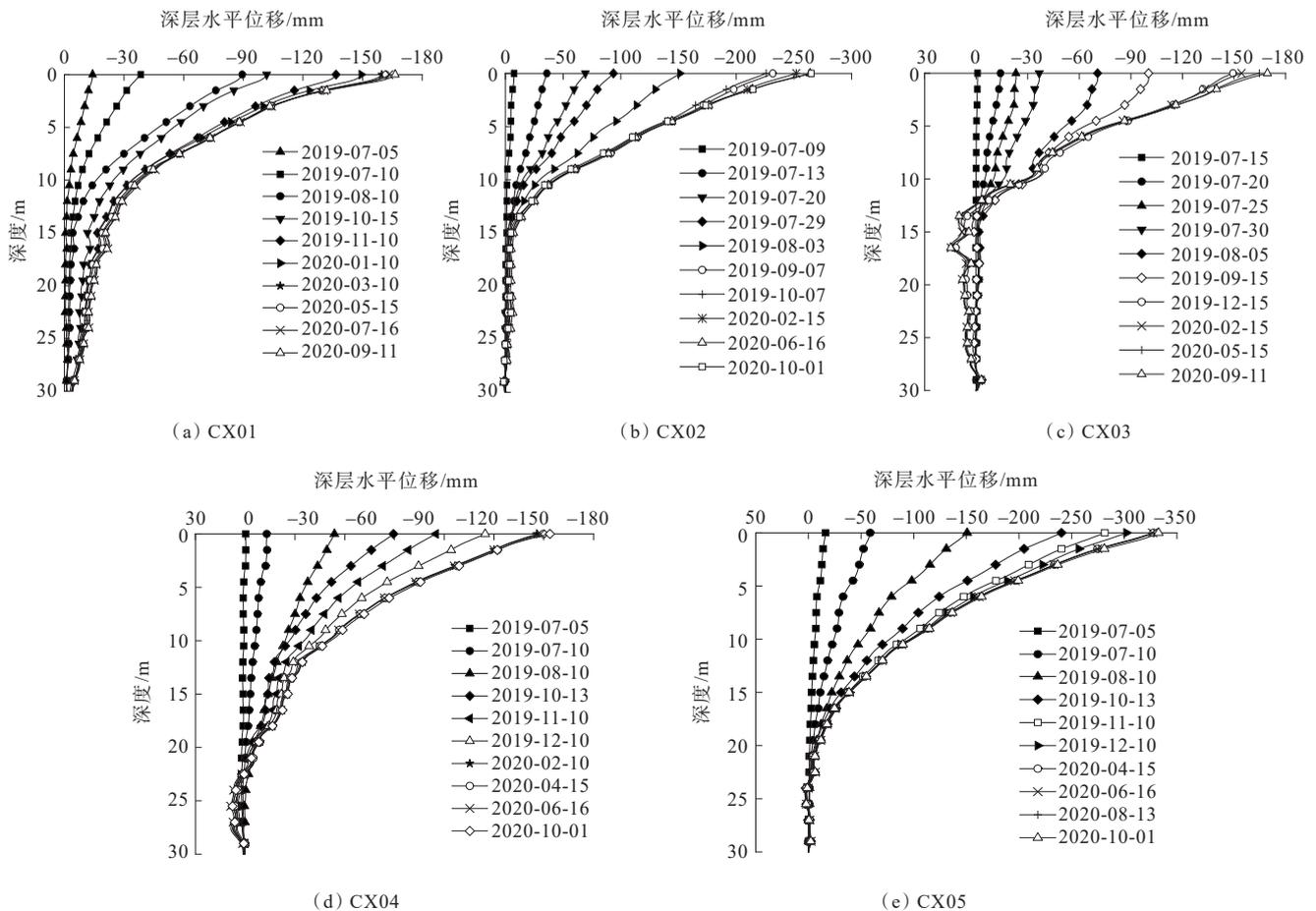


图8 人工岛围堰深层水平位移

重型机械停放,从而导致该处累计水平位移显著增大,但其他测点的水平位移显著低于该点。

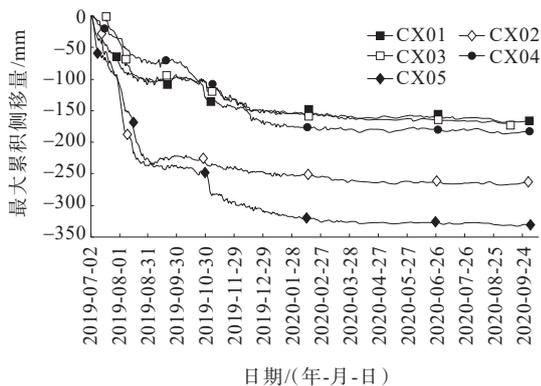


图9 围堰前端原泥面处累计水平位移

(3) 2020年1月后,围堰前端原泥面处的累计水平位移变形基本趋于稳定,可认为围堰处于稳定状态。

总体来说,人工岛围堰的稳定性受搅拌桩施工、岛内填筑施工以及施工堆载等影响较为显著,围堰整体向外侧偏移,施工期间应尽量避免在岛内长期集中堆载,以减少对围堰稳定性的影响。

3 结论

本文主要以竖向排水体地基固结理论为基础,对人工岛沉降量和固结度进行计算,并结合深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工岛地基及围堰变形监测结果,开展地基变形及稳定性分析。得出以下主要结论:

(1) 人工岛地基中淤泥层沉降量占地基总沉降量的90%以上,地基沉降主要由淤泥层控制;上部淤泥层的固结度可达95%以上,以下其他土层的固结度约为85%。

(2) 塑料排水板插打施工后,地基沉降速率显著增加,地基沉降量急剧增大而后减小;采用塑料排水板 and 水泥搅拌桩处理吹填软基效果较好,人工岛地基变形可控。

(3) 人工岛施工期围堰深层水平位移和前端原泥面处累计水平位移量均变化较大;岛内吹填施工和堆载导致围堰局部向岛外偏移且偏移量较大,但围堰整体偏移量在可控范围内。

(4) 总体来说,人工岛施工过程中岛体基本处于稳定状态,采用土工管袋围堰,可为离岸人工岛修筑及岛内施工提供有效的安全保障。

参考文献:

- [1] 吴玲正.深中通道项目桥梁设计方案及主要技术难点[J].中外公路,2021,41(2):189-192.
- [2] 宋神友,陈伟乐,金文良,等.深中通道工程关键技术及挑战[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):143-152.
- [3] 黄厚卿,李冕,刘建波.深中通道伶仃洋大桥东锚碇筑岛围堰施工方案优化[J].桥梁建设,2020,50(6):104-109.
- [4] LEE J J, BASNETT C R, MUHAMMAD S. Staged embankment construction in soft clay and slope failure impacted by wick drain local kinking: Case study[C]//In IFCEE 2018:357-369.
- [5] 王德怀.深埋式承台钢板桩围堰设计与施工关键技术[J].中外公路,2021,41(3):130-134.
- [6] 李建宇,王征亮,林佑高,等.饱和回填砂及深厚软土地基同步加固技术在港珠澳大桥人工岛中的应用[J].中国港湾建设,2019,39(11):52-57.
- [7] 马旭,冀晋,陈三洋.港珠澳大桥西人工岛超厚回填砂上超长度塑料排水板打设工艺[J].公路,2018,63(8):1-5.
- [8] 彭扬发,周洋,王宁波,等.塑料排水板地基变形的简易计算方法[J].铁道科学与工程学报,2022,19(7):1898-1907.
- [9] 张军舰,李鹏,殷坤宇,等.基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(1):117-125.
- [10] 刘热强,蒋建清.海相软土地基的塑料排水板和袋装砂并联合堆载预压加固方法[J].公路,2015,60(4):42-49.
- [11] 高会强,莫海鸿.考虑通水量影响的塑料排水板加固深度的理论研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3337-3342.
- [12] 黄朝焯.塑料排水板处理地基非线性固结计算研究[J].岩土力学,2019,40(12):4819-4827.
- [13] 董超强,苗雨,钱志创.塑料排水板处理超软土地基的数值模拟分析[J].土木工程与管理学报,2018,35(1):110-116.
- [14] 王晓佳,贺炜.伶仃洋大桥西锚碇筑岛施工柔性围堰结构稳定性研究[J].桥梁建设,2021,51(2):85-90.
- [15] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [16] 李玲玲.砂井地基平面问题的变形计算和有限元分析[D].杭州:浙江大学,2002.