

珠三角地区深厚淤泥软土地基处理方式探讨

林国强, 许建军

[中铁二院(广东)港航勘察设计有限责任公司, 广东 广州 510670]

摘要:我国珠三角地区位于东南沿海岸线,属三角洲滨海相~海陆相沉积单元,发育深厚的淤泥类软土,如何正确认识并解决此类软土地基问题是工程建设的重难点。结合南方沿海珠三角地区道路工程的建设经验,对珠三角滨海相~海陆相沉积深厚层软土地基上的地基处理方式、方法进行了分析和探讨,以期分析结论加深设计者对珠三角地区深厚软土特点及其地基处理方法的认知,供同类工程借鉴。

关键词:深厚淤泥;排水固结;等(超)载预压;变形沉降

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0278-04

0 引言

我国幅员辽阔,海岸线纵长,珠三角地区位于东南沿海岸线,属三角洲平原地貌,滨海相~海陆相沉积单元,区内多发育深厚的淤泥类软土,深度浅则20~30 m,深则达50~60 m,淤泥软土具有高含水率、高孔隙比、高压缩性、高触变性等特点,工程性质极差,自重沉降量大,自然固结缓慢。在此沿海地区建造的道路工程,必然需要进行地基处理。常用的软土地基处理方法有,排水固结预压法、砂石桩法、水泥搅拌桩法、CFG桩法、强夯置换法、化学加固法^[1]等等。如何合理地选用最合适、实用的方法对淤泥类软土进行地基处理,提高其承载力、增加土体有效强度和稳定性,减少地基失稳、工后沉降等不良影响,是工程建设的重中之重。有的深厚软土地基上的沿海地区道路工程,在建成后不久工后沉降及差异沉降往往可达30~50 cm,个别工程甚至超过100 cm,差异沉降大,路面高低起伏,称作“波浪路”。软土地基上如何有效解决工后沉降大的问题一直是工程界所关注的关键点,本文结合沿海珠三角地区部分道路工程的地基处理工程实践浅析探讨此问题。

1 地质概况

珠江三角洲区域第四季地层由海相粉砂质淤泥及河流相砂层、砂砾层组成三个明显的韵律层,总厚度大于30 m,最厚达63.7 m。自上而下可划分为灯笼沙组、万顷沙组、横栏组、三角组、西南组及石排组。

(1)灯笼沙组(Q_4^1)

由深灰色粉砂质淤泥、粉砂质黏土组成,平行不整合于万顷沙组之上,厚3~8 m,最厚达28.3 m,为河海混合相,属晚全新世。

(2)万顷沙组(Q_4^2)

底部见红黄色含铁钙质结核的风化黏土,上覆灰黄色中粗砂、深灰色粉砂质淤泥,厚3~5 m,最厚达26.7 m,时代为中全新世晚期。

(3)横栏组(Q_4^3)

以深灰色淤泥平行不整合于三角组之上,由深灰色淤泥、粉砂、中细砂组成,厚5~10 m,最厚16 m,属中全新世早期。

(4)三角组(Q_4^4)

底部花斑状黏土系晚玉木冰期低海面风化时产物。上部河流相砂砾层,厚5~14 m。

(5)西南组(Q_4^5)

该组平行不整合于石排组之上,为深灰色粉砂质黏土或中细砂层,厚5~11 m,为间冰期海侵的滨海相沉积。

(6)石排组(Q_4^6)

系河流相沉积,以黄灰色砂砾或中粗砂为主,不整合覆于下伏基岩之上,厚5~10 m,最厚17 m。

有别于福建、浙江、江苏地区的海相沉积相淤泥渗透性差特点,其径向固结系数一般介于 $(0.5\sim 0.8)\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$,珠江三角洲平原第四系滨海相~海陆相沉积的灯笼组、万顷沙组及横栏组淤泥软土层,具有经过三次海侵、海退的沉积旋回韵律,其特征是淤泥间夹1~2 cm厚度的粉细砂薄层的规律,类似“薄层砂”结构,此特征使得软土的渗透性大大提高,径向固结

收稿日期: 2022-05-18

作者简介: 林国强(1975—),男,本科,高级工程师,从事岩土工程勘察设计与工程管理工作。

系数一般大于 $(1.0\sim1.5)\times10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$,相比提高近 2 倍。

2 地基处理的思路

区域地质揭示,珠江三角洲地区淤泥、淤泥~淤泥质土土层深厚,一般总厚度达 25 m,埋深 30~40 m,其平均含水量达 55%,平均孔隙比达 1.699,平均压缩模量 2.29 MPa,明显是属于高含水率、高孔隙比、高压缩性、高触变性的海陆相沉积软土,工程性极差,工程建设时必须进行地基处理。如何选择经济、有效、实用的地基处理方法,消除软土沉降和提高地基承载力,确保边坡的稳定性是地基处理重点考虑的方向。从地基处理工艺方式的角度,第一,可选择排水固结方式进行处理,如插塑料排水板或砂井+堆载预压、真空预压、真空联合堆载预压等。第二,选

择复合地基方式处理,如 CFG 桩、砂石桩、碎石桩等。第三,选择化学加固法,高压旋喷桩、水泥土搅拌桩、灌浆法等。结合珠三角沿海地区工程地质,淤泥软土深厚、工程性质极差的特点,排水固结法其加固深度大,可达 30m 以上,效果也好,处理到位可有效控制工后沉降、提高软土固结状态,是最经济实用的首择方案。水泥搅拌桩、CFG 桩、砂石桩、碎石桩、高压旋喷桩等均可以处理地基,但在处理深度有所受限,费用也较高,可结合实际情况决定是否选用。

3 几个关键问题的探讨^[1-8]

结合实践经验,对我国南方沿海珠三角地区的道路工程建设地基处理设计、施工的若干问题进行分析 and 探讨。主要压缩性土层的物理力学性指标统计见表 1。

表 1 主要压缩性土层的物理力学性指标统计表

地层名称	含水率 W/%	湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	直接剪试验		固结系数	
				凝聚力 C/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	$C_v/(10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$C_h/(10^{-3}\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
灯笼组 粉质黏土~黏土	25~28	1.80~1.95	0.6~0.9	12~16	8~10	2.1~3.5	2.5~3.8
万顷沙组 淤泥	50~73	1.50~1.62	1.5~2.4	5~8	1.5~2.7	1.0~1.5	1.1~1.8
万顷沙组 淤泥~淤泥质土	45~70	1.55~1.70	1.4~2.1	8~12	1.8~3	1.1~1.7	1.3~2.0
横栏组 淤泥~淤泥质土	40~55	1.58~1.72	1.0~1.7	8~15	1.3~2.0	1.0~1.3	1.0~1.4

3.1 加固模式

目前,工程界对软土地基处理的模式有两种不同的理念。第一种理念是严格按规范设计的理念,即考虑附加应力影响范围内的可压缩层进行沉降预测,根据上部结构对沉降的要求确定加固深度,这是一种严格控制工后沉降的方法,见图 1。按规范规定软土地基沉降变形计算深度按附加应力 σ_z 与自重应力 σ_h 的比值关系确定,即当 $\sigma_z=0.1\sigma_h$ 时的深度 [1]。第二种理念是近年来有些科研者提出的“硬壳层”的设计概念。所谓“硬壳层”是指通过动力固结、置换、化学加固等方式对深厚淤泥软土地基表层一定深度软土(一般 10 m 内)进行加固处理,见图 2。此深度范围的软土工程性质得到很好的改良,承载力大幅提高,地基压缩模量大大提升,与下卧未加固的原状软土压缩模量之比显著增大,所以相当在原状软土上形成一定厚度的“硬壳”,认为可以起到均匀传递应力,减少差异沉降,并提高承载力的目的。这种方法在沿海某码头工程港区道路、南方某机场跑道工程等均有应用。结合珠江三角洲及附近沿海地区工程实践,对两种设计理念处理后的若干工程工后沉降情况进行比较,见表 2。综上,两者之间笔者

更倾向于选择第一种理念,严格按照规范和结构要求设计,控制沉降变形、稳定和承载力。

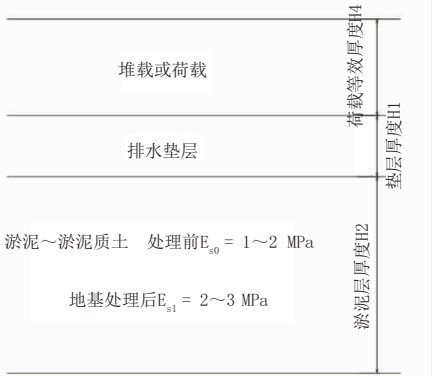


图 1 附加应力控制模式地基处理示意图

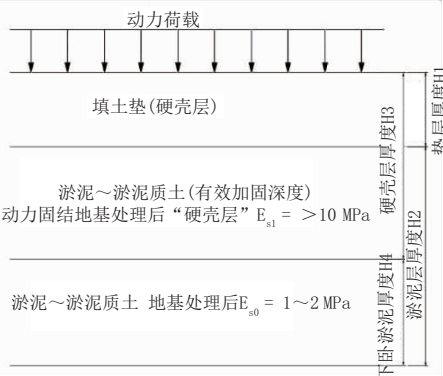


图 2 “硬壳层”模式地基处理示意图

表2 南方沿海及珠三角地区若干工程的工后沉降对比表

项目名称	东莞某码头工程道路工程	南方沿海某机场跑道工程地基处理	广州龙穴岛某道路工程	广州万顷沙某道路工程
淤泥深度/m	20~30	不小于50	25~40	22~30
地基处理方法	电渗降水+强夯	高真空击密	真空预压、堆载预压	真空预压
处理深度/m	不大于10	不大于10	25~40	22~30
竣工后时间/a	5	3	5	5
工后沉降量/cm	20~50	50~100	2~5	1~2

3.2 沉降控制的问题

沉降计算是软土地基处理的一项最关键的计算内容,《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)推荐的方法是e-p曲线分层总和法,主固结沉降 S_c 计算公式如下:

$$S_c = \sum_{k=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta h_i \quad (1)$$

地基处理设计是根据不同的结构和荷载的要求进行工后沉降的控制,计算出主固结沉降 S_c 后再根据软土特性及实际情况按系数 ξ 进行修正,规范^[2]建议 ξ 取1.1~1.4,杨光华^[8]认为 ξ 取大于1数值,综合珠三角地区软土地基处理实践经验,堆载预压地基 ξ 可取1.0~1.4,软土孔隙比大、压缩性大、预压荷载大者取大值,反之取小值。一般地,可把沉降控制在300 mm以内,个别对沉降要求不高的临时道路、堆场,如煤堆场,铁矿石堆场等,可放宽到500 mm或以上。根据沉降计算理论可知,要很好地控制工后沉降量,必须要消除附加应力影响深度范围内厚度 H 软土的自重固结沉降。显然这跟软土的厚度 H 及平均固结度 U 有关,预压法地基处理正是从这个角度考虑,确定塑料排水板深度插多少,进而确定工后沉降的控制满足结构要求的范围值。

在珠三角南沙某道路工程实践中,地基处理工程堆载预压法处理采用等载预压,塑料排水板插板深度插至25 m,底部余超厚度10 m的淤泥未插板。此处理方案有两个影响质量的关键因素,一是等载预压,二是深度近40 m的淤泥插板深度25 m,下卧未处理淤泥厚度达10 m以上,这正是笔者关注的重点问题所在。首先,所谓等载预压即是预压荷载等于路基荷载与路面荷载之和,前者小于后两者之和为欠载预压,大于后两者之和为超载预压。实际工程中由于各种因素,往往要求堆载预压的等效填土高度控制为路床的顶面,卸载后直接进行路面结构层施工。显然,预压稳定卸载时,填土标高基本与路床顶

标高持平,实际上是属于欠载预压,路基荷载和路面荷载都要在卸载后进行加载,对应此部分附加荷载的沉降量将在工后发生。可见,虽然规范也建议等载预压,但实际工程中对等载预压的理解和运用上都存在一定的理解偏差,以至于等载变为欠载。第二,很多以往道路工程均以“插板深度不大于25 m”作为控制,25 m的深度不小,关键在于余下超10 m厚度的淤泥未插板,显然,其必须按 $\sigma_z = 0.1 \sigma_h$ 进行沉降验算。图3中给出插板25 m时的沉降与工后沉降的分析,由图可见当仅插板25 m时,工后沉降超过500 mm。珠三角南沙地区控制插板深度25 m内的部分道路工程竣工后沉降超过500 mm,与理论计算基本吻合。以上两个问题的分析恰好可解释我国沿海地区的某些道路竣工后沉降量和差异沉降量大,路面坑洼不平的原因之一。

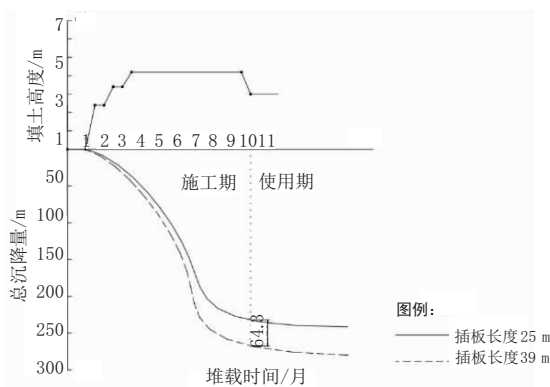


图3 地基处理沉降~时间关系图(单位:cm,m,月)

3.3 固结计算模式

地基土固结度的计算分析是软土地基处理的另一关键计算内容。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)、公路软土地基路堤设计与施工技术细则(JTG/T 031-02—2013)推荐的方法都是改进高木俊介法,公式如下:

$$U_i = \sum_{k=1}^n \frac{q_i}{\sum \Delta p_i} \left[(t_i - t_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t_i} (e^{-\beta t_i} - e^{-\beta t_{i-1}}) \right] \quad (2)$$

式中: q_i 为第 i 级荷载平均加载速率(kPa/d); $\alpha =$

$$\frac{8}{\pi^2}; \beta = \frac{8c_h}{Fd^2e} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}。$$

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (3)$$

$$F_n = \ln(n) - \frac{3}{4} \quad n \geq 15 \quad (4)$$

$$F_s = \left[\frac{k_h}{k_s} - 1 \right] \ln s \quad (5)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L^2}{4} \frac{k_h}{q_w} \quad (6)$$

由上式可知,地基的固结度与加荷荷载、固结时

间、 α 和 β 等有关。其中, α 是常数, 而 β 与竖向和径向固结系数 C_v 和 C_h 、渗透系数 K_h 、井径比 n 、地基软土厚度 H 等密切相关, 是影响地基固结度最关键因素。高长胜^[5]、郭霄等^[6]、赵维炳等^[7]分别提出了按非理想井地基考虑井阻和涂抹作用的地基平均固结度计算方法。规范^[2]亦给出考虑井阻和涂抹作用的简化计算方法, 见式(1)、式(2)。如果按理想井计算, 考虑没有井阻和涂抹作用时, 式(3)中不考虑 F_s 和 F_r , 即 $F=F_n$ 可简化成式(4)计算理想井地基平均固结度。珠三角地区工程案例, 其软土 C_h 约在 $1.40 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, 为较典型的南方沿海三角洲淤泥的特性, 淤泥中夹大量的“薄层砂”, 这种特性大大提高了淤泥的渗透性, 加速了其地基固结的时间。正因如此, 该地区进行排水固结预压处理地基采用塑料排水板

1.0 m 间距, 正方形或正三角形布置方案时, 一般可不考虑砂井的井阻和涂抹作用。表 3 和表 4 所示案例, 当工程中采用排水板 1.0 m 的间距, 正方形布置时, 满载预压 70~90 d 可达到 85%~90%, 实际卸载时间基本与表 4 所示的 T1 时间吻合, 工后沉降、地基承载力基本可满足工程要求。而考虑井阻和涂抹作用时, 涂抹区直径 / 竖井直径的比值可取 $s=2.0 \sim 3.0$, 涂抹区土的水平向渗透系数可取 $K_s=(1/3 \sim 1/5)k_h$ 。可得, 达到相同的固结度需要满载预压时间需要 300 d 以上, 计算结果见表 4。由此可见, 珠三角地区采用排水预压法加固具有“夹层砂”特点的软土时, 可不考虑井阻和涂抹的影响, 其固结时间 T1 较考虑井阻和涂抹作用固结时间 T2 大为缩短, 仅为其 1/5~1/3。

表 3 珠三角地区工程地基平均固结度计算参数表

项目名称	参数名称							
	L 正方形 / cm	$F_{理想}$	$F_{非理想}$	$q_w /$ ($10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$d_w /$ cm	$k_h = 5 k_s /$ ($10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_w /$ ($10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$C_v = C_h /$ ($10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
①广州某集装箱码头道路地基处理	100	2.4	11.1	3.9	4	7.08	5	1.40
②广州某粮食码头道路地基处理	100	2.4	11.2	3.9	4	7.30	5	1.55
③南沙某综合管廊地基处理工程	100	2.4	14.5	3.9	4	11.5	5	1.52
④南沙某道路工程地基处理	100	2.4	14.8	3.9	4	11.9	5	1.94

表 4 珠三角地区工程固结度 U=90%时的固结时间 T

项目名称	①项目	②项目	③项目	④项目	备注
时间 T1/d	80	70	80	90	塑排板正方形布置, 间距
时间 T2/d	390	320	300	330	$L=100 \text{ cm}$

注: T1 为不考虑井阻、涂抹作用时达到 90% 固结度的时间, T2 为考虑井阻、涂抹时达到 90% 固结度的时间。

4 结 语

- (1) 南方沿海珠三角地区淤泥深厚, 排水预压法的地基处理方案是最为可行、经济和有效的处理方案, 可有效提高软土固结状态, 控制工后沉降。
- (2) 针对近期部分学者或工程技术人员提出“硬壳层”模式地基处理方式, 笔者认为这用于沉降控制要求低的工程上是可以尝试的, 但对于淤泥深厚、且沉降要求严格的工程须谨慎。
- (3) 工程中沉降的控制是关键问题, 应根据使用要求进行验算及控制, 若抛离工程实际采取“一刀

切”规定插板深度的设计思路, 其设计也是难言合理, 工后沉降也将无法合理控制。

(4) 南方沿海珠三角地区的淤泥软土常夹有粉细砂薄层, 如“夹薄层砂”的特性, 排水预压法地基处理时, 可不考虑软土的井阻和涂抹的影响, 可大大缩短固结时间, 从实践上具有大大缩短工期的意义。

参考文献:

[1] 龚晓南.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社, 2008.

[2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].

[3] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].

[4] DBJ 15—31—2016, 建筑地基基础设计规范[S].

[5] 高长胜, 汪肇京, 魏汝龙.井阻和涂抹作用在排水板地基设计中的应用[J].水利水运工程学报, 1999(3):213-221.

[6] 郭霄, 谢康和, 吕文晓, 等.井阻随深度和时间变化的竖井地基固结解解析[J].岩土工程学报, 2015, 37(6):996-1001.

[7] 赵维炳, 钱家欢.砂井固结理论应用中的几个问题[J].中国港湾建设, 1988(2):21-28.

[8] 杨光华.地基沉降计算的困难与突破[J].岩土工程学报, 2019, 41(10):1893-1898.