

【工程应用】

碳中和、碳达峰中秸秆降解排水技术的应用 与刚柔复合厚壳层地基的关系

常雷¹, 李学丰², 苏开敏³, 张利⁴, 王玉华⁵, 李楷兵⁶, 李德光⁷

(1. 深圳厚坤软岩科技有限公司, 广东 深圳 518031; 2. 宁夏大学 固体力学研究所 宁夏 银川 750021;
3. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 4. 河南省水利勘察设计院有限公司, 河南 郑州 450016;
5. 河南省水利第一工程局, 河南 郑州 450016; 6. 北京楷泰建设工程有限公司, 北京 102218;
7. 江苏中联路基工程有限公司, 江苏 建湖 224700)

摘要: 在深厚软基及吹填造地上采用环保型秸秆可降解排水板替代塑料排水板进行真空预压施工时, 每年可节约生产塑料排水板原材料聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP) 混合原材料 1.4~1.5 亿吨, 每年可避免向大气排放约 6 800 亿立方米的 CO₂ 气体。环保型秸秆降解排水板主要原材料为农田里废弃的秸秆原料, 通过晾晒、烘干、粉碎切割、产生小于 1 cm 长的秸秆纤维绒与固体热融胶、少量锯木纤维、少量椰壳纤维等混合料, 再投放到螺旋热融挤压设备中搅拌软化后挤出秸秆排水板板芯成品, 后续再热融黏合上双面防淤堵滤膜层, 最终形成工程上能用的整体式秸秆降解排水板。采用秸秆降解排水板处理后的深厚软基, 可彻底解决塑料排水板处理软地基后继续排水的困局, 在真空预压施工验收完 1 年后其板芯纤维分子结构链逐渐被生物菌分解断链使排水通道失去排水功能, 同时还避免了水泥搅拌桩施工时易缠桩及植入预制管桩时易被拉扯桩而影响整体成桩质量的问题。当深厚软基地基承载力特征值处理后达到 ≥ 70 kPa 以上、工后沉降值 ≤ 15 cm 时, 深厚软基厚壳层再按《复合地基技术规范》^[1] 的要求, 设计出植入大直径 $\geq \Phi 1\ 000$ mm 的水泥土或薄壁刚性复合疏桩的长度、间距, 桩土协同后形成以刚性体为主、柔性体为辅的刚柔复合厚壳层复合地基, 其具有整体承载力高、沉降小 (可控)、差异沉降小 (可控)、整体稳定、整体抗水平推力大、造价低、工期短等优点, 不仅能提供地基承载力极限值为 500~1 000 kPa, 还能为投资方节约综合成本 20% 以上。

关键词: 秸秆降解排水技术; 刚柔复合厚壳层技术; 桩土协同作用; 纯柔性厚壳层; 大直径复合桩
中图分类号: TU44 **文献标识码:** A **文献编号:** 2096-7195(2022)S-0144-08

Relationship between the application of straw degradation drainage technology in carbon neutrality and emission peak and rigid flexible thick shell foundation

CHANG Lei¹, LI Xue-feng², SU Kai-min³, ZHANG Li⁴, WANG Yu-hua⁵, LI Kai-bing⁶, LI De-guang⁷

(1. Shenzhen Houkun Soft Rock Technology Co., Ltd., Shenzhen 518031, Guangdong, China;
2. Institute of Solid Mechanics, Ningxia University, Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia 750021, Yinchuan, China;
3. Yunnan Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Kunming 650041, Yunnan, China;
4. Henan Water Resources Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China;
5. Henan First Water Conservancy Engineering Bureau, Zhengzhou 450016, Henan, China;
6. Beijing Kaitai Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 102218, China;
7. Jiangsu Zhonglian Subgrade Engineering Co., Ltd., Jianhu 224700, Jiangsu, China)

Abstract: When using environmental friendly straw degradable drainage board instead of plastic drainage board for vacuum preloading construction on deep soft foundation and hydraulic reclamation land, 140-150 million tons of mixed raw materials of polyethylene (PE) and polypropylene (PP) can be saved every year, and about 680 billion cubic meters of CO₂ gas can be avoided from being discharged into the atmosphere every year. The main raw material of environment-

收稿日期: 2022-03-06

作者简介: 常雷 (1963—), 男, 辽宁抚顺人, 岩土高级工程师, 主要从事深厚软基础的科研、专利研发、顾问、施工、创新研究工作。
E-mail: z_b_j007@126.com。

friendly straw degradation drainage board is "straw raw material discarded in farmland". Through sun-cure, crushing and cutting, the mixture of straw fiber velvet less than 1cm long and solid hot-melt glue, a small amount of sawn fiber and a small amount of coconut shell fiber is produced. Then put into the spiral hot-melt extrusion equipment to stir and soften and extrude the finished product of straw drainage board core. After reheating and thawing, the double-sided anti silting filter membrane layer is bonded to form an integral straw degradation drainage board that can be used in engineering. The deep soft foundation treated with straw degradation drainage board can completely solve the dilemma of continuous drainage after the plastic drainage board is used to treat the soft foundation. One year after the acceptance of vacuum preloading construction, the molecular structure chain of the core fiber is gradually broken down by biological bacteria, resulting in the loss of drainage function of the drainage channel. In addition, it also avoids the problems that the cement mixing pile is easy to wrap the pile during construction and the pile is easy to be pulled when the precast pipe pile is implanted, which will affect the overall pile quality. When the characteristic value of bearing capacity of deep soft foundation is greater than or equal to 70 kPa after treatment and the post construction settlement value is less than or equal to 15 cm, the length and spacing of cement soil or thin-wall rigid composite sparse pile with large diameter of $\geq \Phi 1\ 000$ mm are designed for the thick shell of deep soft foundation according to the requirements of technical code for composite foundation^[1]. After pile-soil cooperation, rigid body is formed. The rigid flexible composite thick shell composite foundation supplemented by flexible body has the advantages of high overall bearing capacity, small settlement (controllable), small differential settlement (controllable), overall stability, large overall horizontal thrust resistance, low cost and short construction period. It can not only provide the limit value of foundation bearing capacity of 500-1 000 kPa, but also save more than 20% of the comprehensive cost for the investor.

Key words: straw degradation and drainage technology; rigid-flexible composite thick shell technology; pile-soil synergy; pure flexible thick shell; large-diameter composite piles

0 引言

随着基础建设及软地基处理项目持续发展, 在处理 10 m 及以上深厚软弱地基处理时^[2], 往往采用真空预压法施工处理。全球每年要消耗掉宽 10 cm 的塑料排水板约 15 亿延米长, 生产塑料排水板消耗大量的化石原材料, 生产过程又严重污染环境。

碳中和、碳达峰不能是一句空话。2018 年响应习近平主席“绿水青山就是金山银山”的号召, 科技人员潜心研发, 生产出世界级“环保型秸秆降解排水产品”。采用秸秆降解排水产品替代现有的塑料排水板产品, 最大的特点就是减少 CO₂ 气体的排放量, 可降解, 解决了“深厚软基真空预压塑料排水板处理后继续排水的困局”, 也能消除水泥搅拌桩易被塑料排水板缠桩及植入预制管桩时易影响成桩质量的困局。

科技人员经过大量试验和实践, 总结出了一套可行的方法, 依据现场实际地质条件变化和现有规范^[1,3-4] 动态去创新、设计、指导施工。先用秸秆降解排水技术进行深厚软基处理, 使地基承载力特征值 ≥ 70 kPa 时, 再植入大直径刚性复合桩^[5], 两者叠加协同形成大直径刚柔复合厚壳层复合地基, 达到地基承载力特征值 200~500 kPa, 工后沉降 \leq

15 cm (可控)、差异沉降 $\leq 1/800$ (可控稳定) 范围, 达到整体稳定、整体抗水平推力大、造价低、工期短的效果。

1 为碳中和、碳达峰做出的贡献

1.1 深厚软基处理中采用塑料排水板的隐患

采用塑料排水板处理深厚软基^[6-7], 打入地下 100 年才能降解, 是典型的白色污染源, 工后塑料排水板因不能降解仍继续排水, 沉降的隐患长期不能消除, 其后再采用水泥搅拌桩施工时水泥搅拌桩转头、转杆易被塑料排水板缠住影响施工, 植入预制管桩时因塑料排水板的存在, 易拉扯桩而影响周边已施工好的预制管桩的垂直度, 进而影响桩的承载力的发挥。

1.2 深厚软基处理中采用低碳、环保型秸秆降解排水板的好处

采用低碳、环保型秸秆降解排水板处理深厚软基, 在真空预压施工验收完 1 年后, 因地下生物菌对秸秆排水板板芯纤维分子链逐渐分解, 使板芯纤维分子链断开而失去原有排水通道, 从而彻底消除了传统排水施工后继续排水、再沉降的隐患, 同时还可避免水泥搅拌桩施工时易缠桩及植入预制管

桩时易被拉扯桩而影响整体成桩质量的难题。

由于低碳、环保型秸秆降解排水板芯的生产需要消耗大量的农田植物秸秆原材料,除可减少因农后焚烧秸秆而排放出大量的 CO_2 气体外,又可增加农民的附加收入。据统计全球每年需 10 cm 宽、15 亿延米长的塑料排水板。生产塑料排水板需消耗聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP) 混合原材料为 1.4~1.5 亿吨。生产 1 吨聚乙烯 (PE) 原材料,整个流程会排放出约 9 倍的 CO_2 气体,即为 6 413.4~6 871.5 亿立方的 CO_2 气体。采用低碳、环保型秸秆降解排水板板芯替代现有传统塑料排水板板芯生产排水板在质量、功能、效果未减的前提下,可避免每年向大气排放约 6 800 亿立方的 CO_2 气体。这种“废物再利用”项目可为碳中和、碳达峰做出力所能及的贡献。

2 低碳环保型秸秆降解排水技术

2.1 秸秆降解排水技术

秸秆降解排水技术是成功研发出的一款世界级无污染、环保型植物秸秆可降解排水板板芯,自主研发的世界级秸秆降解排水板板芯自动化生产线设备见图 1。320 型秸秆排水板生产线设备国内专利申请号[201910688340.0];秸秆排水板国内专利申请号 [201921390185.6]、[202130008624.9]、[202130008586.7]、[201930385742.4];秸秆排水板国际专利申请号[P00201912513]。



图 1 320 型秸秆排水板生产线设备现场图

Fig. 1 Field picture of model 320 straw drainage board production line equipment

2.2 环保型秸秆降解排水板主要原材料及产品

环保型秸秆降解排水板主要原材料为“农田里废弃的秸秆原材料”,通过晾晒、烘干使秸秆原材料含水率 $\leq 5\%$ 时,通过高速粉碎机切割产生 < 1 cm 秸秆纤维绒,见图 2,与固体热融胶、少量松木锯木纤维、少量椰壳纤维等拌和混合后,输入到长 5 m 的螺旋搅拌、热融、推进传输设备中把秸秆混合原材料挤出,再通过特制双辊轮反向转动挤压出具有正反面设有口琴状齿型的板芯成品,见图 3。

通过专用热融设备,使低碳、环保型秸秆排水板板芯与大孔径防淤堵滤膜层融合在一起,形成具有抗压、抗弯、抗折、强度大、整体型的排水板,见图 4。



图 2 秸秆排水板秸秆原材料及粉碎后短绒纤维图

Fig. 2 Raw materials of straw drainage board and short fiber after crushing



图 3 环保型秸秆排水板板芯图

Fig. 3 Core board of environmental protection straw drainage board



图 4 秸秆可降解大孔径热融整体排水板图

Fig. 4 Straw degradable large aperture hot melt integrated drainage board

2.3 环保型秸秆降解排水板与塑料排水板对比

全球在深厚软基处理工程中采用环保型秸秆降解排水板替代塑料排水板进行空预压法施工,每年可减少 CO_2 气体排放量约 6 800 亿立方。打入软弱土层的秸秆降解排水板,早期具有很好的排水功能,真空预压施工处理验收完 1 年后,秸秆自身纤维分子链因地下生物菌的作用下分解,使秸秆纤维分子链断链,破坏了原有排水通道而失去排水功能,从而彻底解决了传统排水板加固地基工后继续排水、继续沉降的隐患,同时也避免了水泥搅拌桩施工时塑料排水板易缠桩的困局。

低碳、环保型秸秆降解排水板的降解检测报告送检样品为秸秆板,有机碳含量为 63.86%。参比材料为薄层色谱级纤维素,白色粉末,粒径 $20 \mu\text{m}$,有机碳含量为 43.90%。堆肥采用蛭石法。堆肥专用菌种活化后,接种到蛭石并活化 96 h,然后开始堆肥。本试验堆肥开始日期为 2019 年 10 月 20 日。

试验降解天数 45 d, 纤维素生物分解率为 72.4%, 送检样生物分解率为 54.1%。堆肥试验的生物分解曲线见图 5。

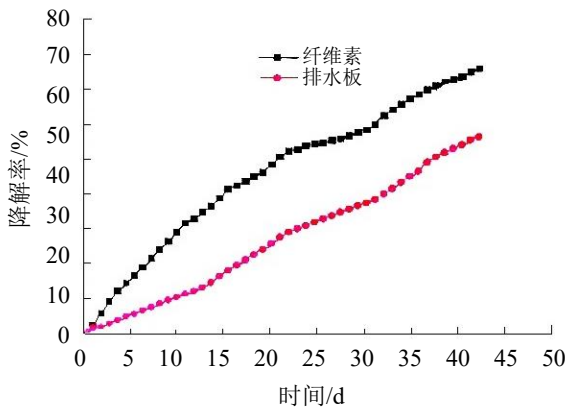


图 5 堆肥试验的生物分解曲线

Fig. 5 Biodegradation curve of compost test

低碳、环保型秸秆降解排水板的排水性能检测报告见表 1, 检测结果符合委托方的技术指标要求。

表 1 秸秆降解排水板排水性能

Table 1 Drainage performance of straw degradation drainage board

试验项目	单位	检测值	技术指标	判定
厚度	mm	4.10	≥ 4.0	符合
宽度	mm	101.80	100 ± 2	符合
抗拉强度	kN/整宽	1.87	≥ 1.5	符合
伸长率	%	5.50	≥ 4	符合
纵向通水量	cm^3/s	45.50	≥ 40	符合
厚度	mm	0.39	—	—
PLA 纵向干态抗拉强度 (伸长率 10%时)	N/cm	30.7	≥ 25	符合
热 横向湿态抗拉强度 (伸长率 15%时)	N/cm	24.2	≥ 20	符合
膜 垂直渗透系数	cm/s	8.76×10^{-3}	$\geq 5 \times 10^{-3}$	符合
等效孔径 O_{95}	mm	0.082	0.07~0.12	符合

3 深厚软基淤泥土地基承载力特征值处理到 90 kPa 以上

3.1 新近疏浚吹填超软基土

新近的疏浚吹填软基土含水率均在 200%以上, 其地基承载力为 0 kPa, 颗粒以蒙脱石 (微晶) 和伊利石为主, 蒙脱石颗粒以超细出名, 其吸水率极高, 软基处理排水困难。

3.2 原位深厚软基淤泥土

常见的原位深厚软基淤泥土, 含水率在 60%~100%, 从表面看都属于淤泥, 其实原位深厚软基淤泥土分为 2 种, 上层淤泥土, 在施工过程中, 必须把它打穿打透, 下层是有结构性的淤泥土, 是原位强风化未扰动过的软泥土, 视上部附加荷载大小而定, 可以打穿也可以不打穿, 可作为浅层复合地基持力层使用, 如图 6 所示。



图 6 常见的原位深厚软基淤泥土图

Fig. 6 Common in-situ silt of deep soft foundation

3.3 深厚软基满足土木工程的指标

纯柔性地基承载力特征值在 40~50 kPa、工后沉降 ≤ 50 cm 值时, 仅能满足现场工程机械、材料运输车承载力使用; 纯柔性地基承载力特征值达到 ≥ 70 kPa、工后沉降 ≤ 20 cm 值时, 可满足 5 层轻型厂房承载力使用; 再植入刚性桩协同作用, 形成稳定的刚柔复合厚壳层, 其地基承载力特征值可达 250~500 kPa。

3.4 深厚软基未处理就桩基施工失败的案例

如图 7 所示, 左边这张图是某工地基坑施工, 因基坑及周围的深厚软基未处理就开始桩基支护施工, 边开挖边移位, 导致 2 亿的工程损失。右边这张图是某复合地基桩基施工, 深厚软基未处理就施工, 使施工过程中大面积出现桩基 45° 的倾斜破坏 (水平推力造成的)。



图 7 深厚软基未处理就桩基施工导致失败的案例图

Fig. 7 Construction failure of pile foundation due to untreated deep soft soil

3.5 吹填土及深厚软基中水与土的关系

吹填疏浚土及深厚软基土中 60%~400% 的空间为水, 其中, 自由水为 60%~70%; 吸附水为

20%~30%；结晶结合水为5%左右。海滨深厚软基处理滨淤泥的黏土矿物以蒙脱石（微晶）和伊利石为主，湖河淤泥则是以高岭石和伊利石为主包含有机质。只有把深厚软基土中的自由水、吸附水排除掉，才能控制工后的复合地基沉降（沉降值小、差异沉降值小），避免复合地基位移、滑坡、垮塌事件的发生。

3.6 深厚软基秸秆降解排水技术的真空预压应用机理

低碳、环保型秸秆降解排水系统施工原理，由两部分组成。第一部分：传统的排水系统处理软基，与塑料排水板真空预压排水机理一样只能把深厚软基中60%~70%的自由水排出来。第二部分：为高能量渗透排水独立系统，软基处理施工前已预埋在薄膜下，在第一部分系统处理软基，固结度达到80%时，启动第二部分排水系统，其原理就是在第二部分排水系统中加入多孔介质液体，形成雾状加气泵入深厚软基中使雾状气体在深厚软基中扩散（灰色部分的秸秆降解排水系统），把软基中还藏有20%~30%的吸附水分离出排除掉，见图8。

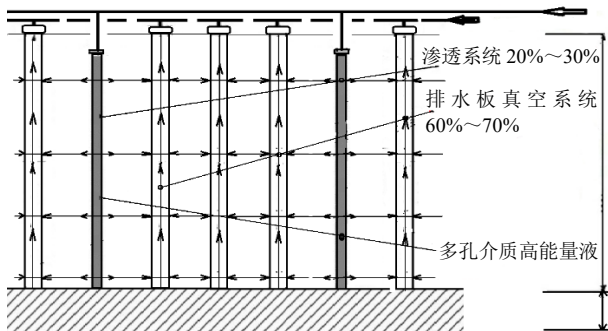


图8 高能量高渗透秸秆降解排水真空预压施工原理图

Fig. 8 Construction of vacuum preloading and drainage

3.7 采用环保型高能量高渗透秸秆降解排水系统处理疏浚吹填土及原位深厚软基土的效果

疏浚海泥吹填施工后，其原位面的承载力为0~1 kPa，需先铺设浮板式工作面提供人工插板平台形成浅层厚壳层后，再采用无沙环保型高能量高渗透秸秆降解排水系统法对疏浚海泥深层软基进行处理。经过机械打板、真空、加气液、主动排水，最终形成纯柔性厚壳软基层，见图9。

暴雨后已处理的深厚软基开挖面屹立不倒，可直接当模板面使用，节省工期和造价。其处理后的地基承载力特征值可达90 kPa以上，工后沉降小于15 cm。若想把外来水破坏掉已处理好的深厚软基，首先外来水能量要达到1.6 MPa以上，才有可能把原处理后的深厚软基土破坏掉，见图10。



图9 环保型高能量高渗透秸秆降解大孔径排水真空预压后的现场图

Fig. 9 Field test of drainage and vacuum preloading

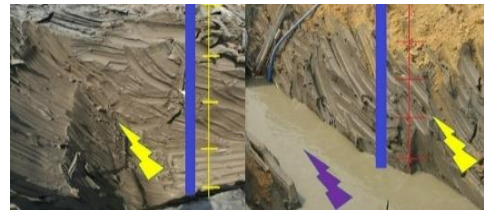


图10 深厚软基处理后特大暴雨之后开挖面屹立不倒图

Fig. 10 Excavation in treated area remains standing after the heavy rain

4 深厚软基中桩与桩间土的协同作用

4.1 土木工程对深厚软基复合地基承载力特征值一般要求150~500 kPa

在深厚软基、吹填造地上建造港口、堆载码头、高速公路、高铁、市政道路、机场路基时，需占用大片土地建设。如何利用开发好深厚软基土原位的资源，已成为广大科技工作者重要的工作。当上述生地交给设计单位进行方案设计时，设计人员将依据不同工程的使用功能、依据原位的地质勘探报告、依据现有规范^[2-4]进行地基承载力、桩长、桩距、数量、抗沉降、抗拔、稳定性进行最优方案比选设计时，就会提出工后复合地基承载力特征值达到150~500 kPa的指标，工后沉降达到≤20 cm的指标要求。

4.2 对深厚软基地基承载力特征值达标的要求

采用低碳、环保型高能量高渗透秸秆降解排水双系统技术对疏浚吹填软泥土及原位深厚软基淤泥土处理时，第一步通过主动排水系统先把深厚淤泥中含有60%~70%的自由水排出掉，使地基处理特征值达到50~60 kPa；第二步再采用高能量高渗透排水系统把深厚淤泥中藏有20%~30%的吸附水及有机水转为自由水后排出掉，使地基处理特征值达到70~120 kPa，工后沉降达到≤20 cm指标要求，才能有效发挥桩土协同作用。

4.3 在纯柔性深厚软基厚壳层中植入大直径刚性桩当深厚软基地基处理后地基承载力特征值≥

70 kPa、工后沉降 ≤ 20 cm 时, 植入非挤土桩或少挤土桩刚性桩并打透软基层时, 多项工程案例已证明桩与桩间土间具备协同联动效果, 其形成的大直径刚柔复合厚壳层复合地基承载力特征值在 200~500 kPa, 工后沉降在 3~100 mm。大直径刚柔复合厚壳层工作原理如 11 所示。

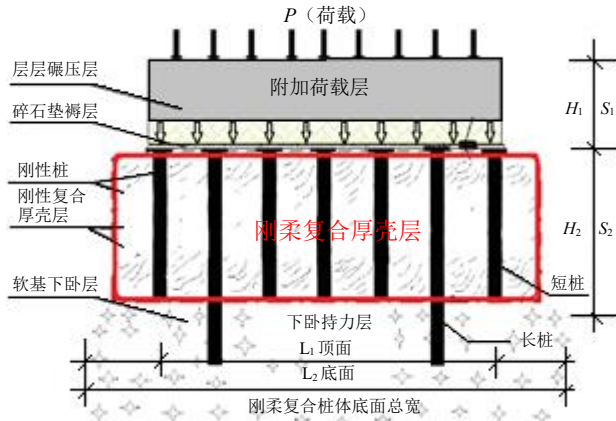


图 11 大直径刚柔复合厚壳层工作原理图

Fig. 11 Working principle of large diameter rigid flexible composite thick shell

4.4 大直径刚柔复合厚壳层形成后的作用

大直径刚柔复合地基厚壳层形成后起到有序传递合理分配上部荷载、承上启下纽带作用, 大直径刚性复合桩承受着 80%以上的竖向压力和水平推力, 桩间土承受着 10%~20%的竖向压力和水平推力, 通过土拱及碎石褥垫层的受力分配作用, 从而避免了桩间土因超荷载带来的不利影响、导致复合地基沉降和差异沉降过大、移位和垮塌事件的发生。这就是纯柔性厚壳层地基承载力特征值 ≥ 70 kPa、工后沉降 ≤ 20 cm 后, 再植入大直径刚性复合桩形成刚柔复合厚壳层复合地基的魅力所在。

4.5 大直径刚柔复合厚壳层工程应用案例

大直径刚柔复合厚壳层技术的应用: 工程案例位于广东省经济最活跃的珠江三角洲, 该高速公路深厚软基层是国道主干线广州绕城公路九江至小

塘段项目, 简称西二环段(南段), 其跨越的主要河流有河清河、樵北涌、北江及其支流南砂涌。该工程项目处于珠江三角洲水网发达区域, 沿线两旁多为底洼水塘鱼塘之类, 地质复杂多变。深厚软基密布全线软基段达 20 km, 最深软基处达 18~20 m, 复合地基之桩基顶上填土高度达 6~8 m。本工程施工顺序是: 先处理深厚软基, 其竖向平面排水点间距为 80 cm \times 80 cm, 处理深度为 20 m, 见图 12。工程原位深厚软基、原位地貌地质现场见图 13。K13+180 段地基土物理力学性质指标见表 2。

4.6 大直径刚性复合桩及桩帽盖板的设置

深厚软基处理后的地基承载力特征值 ≥ 70 kPa 且工后沉降 ≤ 20 cm 时, 再用大直径 $\Phi 1000$ mm 刚性复合桩对深厚软基进行承载力加强处理, 桩与桩中心间距设计为 3.5 m \times 3.5 m, 桩长 20 m, 呈正三角形梅花式满堂红布置, 桩身标号为 C20 素混凝土, 如图 14 所示。

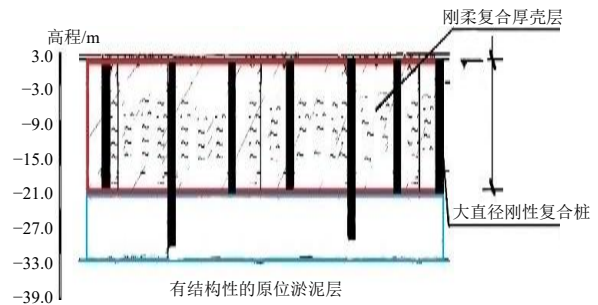


图 12 深厚软基原位刚柔复合厚壳层剖面图

Fig. 12 Section of in-situ rigid flexible composite thick shell of deep soft foundation



图 13 深厚软基原位、原貌地质现场及土样

Fig. 13 In situ map of deep soft foundation and original soil sample

表 2 K13+180 段地基土物理力学性质指标

Table 2 Physical and mechanical property index of foundation soil in K13 + 180 section

编号	土层名称	层厚/m	含水量/%	密度/ (g/m ³)	孔隙比	饱和度/%	压缩系数	压缩模量/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗剪强度/ kPa	地基土承 载力/kPa
1	人工填土	0.8	38.2	1.82	1.02	100	0.243	7.90	7.00	10	40
2	亚黏土	3.0	45.9	1.70	1.28	95	0.773	2.70	3.40	20	100
3	淤泥	18.4	69.8	1.55	1.90	100	1.820	1.36	3.40	10	50
4	亚黏土	1.3	44.4	1.74	1.21	98	0.683	3.01	16.20	30	130
5	中砂	1.0	20.0	1.99	0.66	—	—	11.60	30.00	50	180

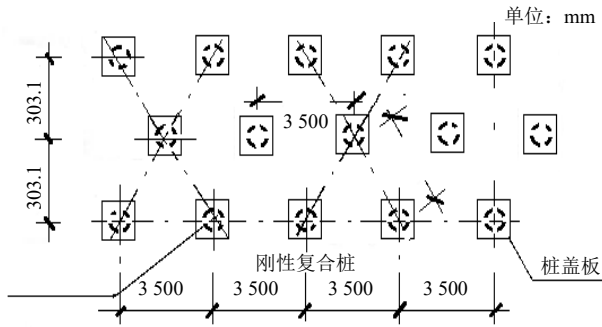


图 14 大直径刚性复合桩施工布置图

Fig. 14 Construction layout of large diameter rigid composite pile

桩帽尺寸设计为 150 cm×150 cm×20 cm、标号为 C25 的双层钢筋网混凝土现浇盖板,其主要作用是协同刚性桩承接复合地基 80%以上的垂直荷载,协同板上铺设的碎石褥垫层及回填夯实碾压土层形成土拱,来降低桩间土因超荷载带来的不利影响,桩帽盖板见图 15。



图 15 大直径刚性复合疏桩桩顶桩帽盖板

Fig. 15 Cover plate at the top of large diameter rigid composite sparse pile

4.7 大直径刚性复合桩原位测试检验数据

大直径刚性复合桩原位单桩竖向抗压静载试验报告数据,见图 16。刚柔复合厚壳层复合地基原位现场检测后的荷载变化与桩底及桩间土应力变化曲线及测斜管、分层沉降关系曲线见图 17、图 18。

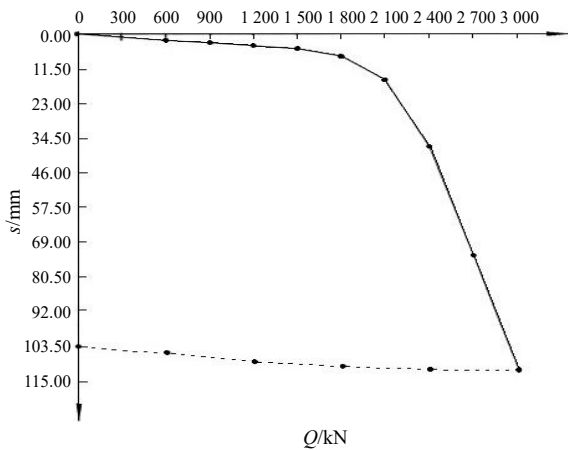
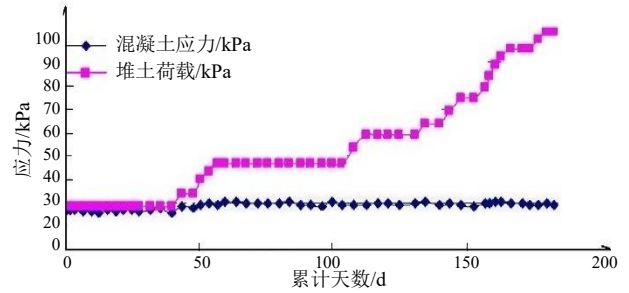
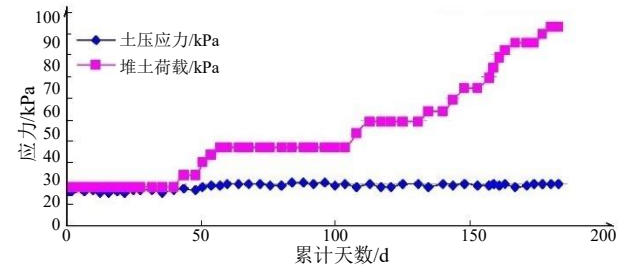


图 16 大直径单桩竖向抗压静载试验数据曲线

Fig. 16 Vertical compressive static load test of large diameter single pile



(a) 桩底端钢筋计应力曲线随堆土荷载变化图



(b) 桩间土应力变化与堆土荷载变化曲线图

图 17 附加荷载变化与桩底及桩间土应力变化曲线

Fig. 17 Variation of additional load and soil stress at pile bottom and between piles

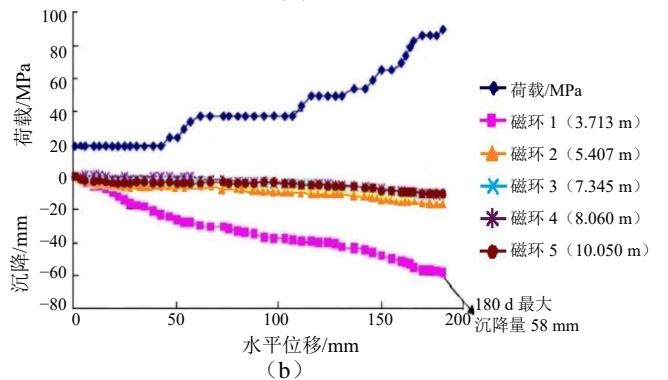
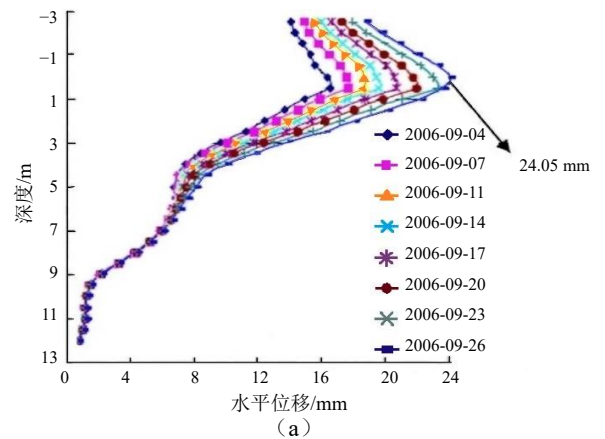


图 18 附加荷载变化与刚性复合厚壳层沉降变化曲线

Fig. 18 Variation of additional load and settlement of rigid composite thick shell

5 结论

5.1 桩与土不协同将导致软基础整体移位等后果在深厚软基应用上,业主往往为了省钱、赶工

期而违背科学设计规律, 强行“指挥”设计人员边设计、边施工, 未处理或处理后的地基承载力特征值未达到 ≥ 70 kPa时, 大量直接植入挤扩桩来做桩基础, 因桩基施工时产生的强大应力扩散到土中, 对桩周软基土产生剪切破坏给后续工程及使用带来巨大的隐型影响。在众多深厚软基中采用直径 ≤ 400 mm 桩、密桩、群桩形成的“复合地基”, 严格意义讲不能称为“复合地基”, 如同田间插葱模式只管自己, 其就是简单的物理相加原理, 不具备桩土有效协同效果, 其中采用的桩有管桩、CFG 桩、水泥土搅拌桩、碎石桩等直径均 ≤ 400 mm 的挤扩桩, 这种“复合地基”工后承载力虽然满足工程的要求, 在正常加载使用一段时间后沉降和差异沉降就会逐渐变大, 究其原因就是桩土不协同各自为政, 所以说这是一种假象的“复合地基”, 要引起高度重视, 后续还会出现整体移位、滑坡、垮塌事件的发生。

5.2 采用低碳、环保型秸秆降解排水技术的意义

采用低碳、环保型秸秆降解排水板处理深厚软基, 除具有良好的排水功能外, 每年能节约为生产塑料排水板而消耗掉的化石原材料 1.4~1.5 亿吨, 能减少 6 413.4~6871.5 亿立方 CO_2 气体的排放量。在真空预压施工验收完 1 年后, 插入地下的秸秆降解排水板纤维分子链被生物酶逐渐分解, 纤维分子链断掉后原有的排水通道消失, 工后不再继续排水, 刚柔复合厚壳层复合地基处于稳定状态。这项低碳、环保产业技术的应用也能为碳中和、碳达峰做出“自己的贡献”。

5.3 刚柔复合厚壳层复合地基技术应用的领域

刚柔复合厚壳层复合地基技术, 广泛应用在港口、煤码头、货运堆场、高速公路高填方路基、机场路基及货运场、海边石化储油基地、核电路基及货运场, 此技术提供质量稳定、安全、新型、环保、综合成本低、“0”伤亡的技术和工艺。为投资方节省综合成本 20% 以上, 减少淤泥施工出土量 50%、“变废为宝”、是典型的绿色环保技术及施工工艺。

参考文献

[1] 浙江省住房和城乡建设厅. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban-

rural Development. Technical Code for Composite Foundation GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[2] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
GONG Xiao-nan. Guide for Design and Construction of Composite Foundation[M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.

[3] 中华人民共和国交通部. 公路软土地基路堤设计与施工技术规范: JTJ017—96[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Code for Design and Construction of Embankment on Highway Soft Ground: JTJ017—96[S]. Beijing: People's Communication Press, 1997.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程: JGJ/T 213—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. Technical Code for Cast-in-Place Concrete Large Diameter Pipe Pile Composite Foundation: JGJ/T 213—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.

[5] 常雷. 刚性复合地基桩在软基处理中的研究及工程应用[J]. 广东公路交通, 2013(6): 43.
CHANG Lei. Research and engineering application of rigid composite foundation in soft foundation treatment [J]. Guangdong Highway Transportation, 2013(6): 43.

[6] 常雷, 刘根. 深厚软基复合地基中桩与土的协调作用及工程应用[C]//第十六届全国地基处理学术讨论会. 重庆, 2020.
CHANG Lei, LIU Gen. Coordination between pile and soil in deep soft foundation composite foundation and its engineering application[C]//The 16th National Symposium on Foundation Treatment. Chongqing, 2020.

[7] 常雷, 李德光, 袁国清. 秸秆(降解)排水板技术及后桩间土与工程桩的协同应用[C]//工程排水与加固技术及港口工程理论与实践. 北京, 2020.
CHANG Lei, LI De-guang, YUAN Guo-qing. Straw (degradable) drainage board technology and the collaborative application of soil between rear piles and engineering piles[C]//Engineering Drainage and Reinforcement Technology and Port Engineering Theory and Practice. Beijing, 2020.