浅海滩涂区超软土地基加固施工关键技术

王彬，翟永贞
（中交一航局第一工程有限公司）

摘　要：为有效解决浅海滩涂区超软土地基承载能力低、稳定性差、沉降量大等工程难题，依托印尼某海堤高速公路项目，提出并应用“竹桩竹排筏板+分阶段堆载预压+竖向塑料排水板”联合加固技术，有效解决了传统软基处理技术的局限性，显著提升软土地基承载力和稳定性，有效控制了施工期与运营期沉降，施工效率高、材料环保、成本优势明显，整体施工过程安全可控。该技术已在印尼成功应用，具有良好的推广应用前景。

关键词：浅海滩涂区；超软土地基；竹桩竹排筏板；堆载预压；塑料排水板；地基加固

0　引言

浅海滩涂区海堤工程通常需要横跨水深 0.5~2.5 m 的浅滩海域，其海床下多为抗剪强度低、压缩性高、埋置深度达 35~40 m 的深厚软黏土层。此类软基在施工前期地基承载能力一般较小、稳定性较差，施工期及运营期易产生较大的沉降，不仅影响施工安全，还会产生工程质量隐患。

针对超软土地基加固，国内外已发展出排水固结法（如塑料排水板堆载预压）、振冲法、深层搅拌法等物理加固技术，以及水泥、石灰注入等化学加固方法。在浅海滩涂这类环境敏感、承载力极低的区域，传统重型机械进场困难，高能耗、高碳排放的工艺面临日益严格的环保挑战。近年来，采用天然材料进行软土加固成为研究热点，竹材因其抗拉强度高、生长周期短、成本低廉且环境友好，被视为理想的土工合成材料替代品。例如，党发宁等[1]研究了竹子作为抗拉筋材加固软土路堤的可行性；宋育霖等[2]通过 Plaxis 有限元分析，验证了竹桩–竹排垫层体系在软土路基中的受力与变形特性。然而，现有研究多集中于单一功能应用或理论分析，将竹桩、竹排系统性地与分级堆载、竖向排水板相结合，用于处理埋深超过 30 m 的浅海超软土地基，并形成成熟施工工艺的研究尚属空白。主要技术难题包括：水下竹桩精确定位与高效打设，大面积竹排水上快速绑扎与整体性控制等。

为有效填补上述空白并解决相关技术难题，本文依托印尼某海堤高速公路项目，创新性提出“竹桩竹排筏板+分阶段堆载预压+竖向塑料排水板”联合加固施工关键技术，目的在于系统解决超软土地基承载力、稳定性与沉降控制难题，降低施工安全风险与运营质量风险。

1　工程概况

印尼某海堤高速公路项目位于印尼中爪哇省三宝垄市，整体呈东西走向，设计为双向四车道，设计时速 80 km/h，主要施工内容为：391 m 高架桥、6.0 km 海堤高速公路、收费站 1 座、服务区 1 个以及配套的排水工程与交通工程等。项目典型断面如图 1 所示。

根据地质勘察报告，拟建场地范围地表下分

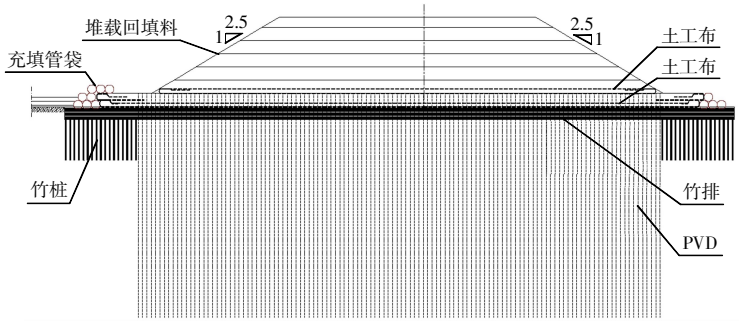


图 1　项目典型断面图

布着厚度大、埋置深的软黏土层，其不排水抗剪强度低、压缩性高。该层软土平均厚度介于 30~40 m，是导致地基承载力不足和稳定性问题的关键地质因素。

2　技术适用范围及原理

2.1　技术适用范围

浅海滩涂区超软土地基加固施工关键技术适用于浅滩海域软土埋置深、厚度大、分布范围广、不排水抗剪强度低、对初期施工荷载的地基稳定性及承载力要求较高、施工期及运营期沉降标准高的软土地基加固处理。

2.2　技术原理

浅海滩涂区超软土地基加固施工关键技术总体采用“竹桩竹排筏板+分阶段堆载预压+竖向塑料排水板”的原理进行软基加固处理。

1）竹桩竹排筏板施工技术原理

在路堤填筑前铺设竹子组成的竹桩竹排系统，可作为抗拉筋材代替传统土工材料进行软土路堤加固[1]。竹桩以方形布置于边坡两侧，利用竹子抗拉强度高、可塑性好的特点，作为点对点锚杆单元。竹排采用尼龙绳绑扎毛竹节点及接长，形成整体筏板，接头采用错搭接以保证整体受力性能。该体系构成类似“加筋土”的复合受力体系，可均匀分散填土荷载，有效限制地基土体的侧向变形，提升地基原位承载能力和稳定性[2]。

2）分阶段堆载预压施工技术原理

软土地基不排水抗剪强度低，一次性堆载或填筑过快易导致失稳。采用分阶段堆载预压，逐级施加荷载，可以使软土地基在逐级加载过程中缓慢排水固结，承载能力逐步提升，确保每级荷载下的路基稳定性满足要求[3]。

3）竖向塑料排水板施工技术原理

在软土路基中设置竖向超长塑料排水板，可在软土内部形成高效竖向排水通道，缩短孔隙水排水路径，将天然条件下较长的排水路径转变为较短的径向排水路径，从而加快孔隙水压力消散。在分阶段堆载预压作用下，软土中的孔隙水通过排水板快速排出，促进地基土体固结，提高土体有效应力、地基承载力及抗剪强度[4]。同时，竖向塑料排水板与分级堆载预压形成协同作用，可有效控制工后沉降及差异沉降，降低路基失稳风险，提高软基处理效率，提升固结度，缩短地基处理周期。

3　关键施工技术

3.1　总体施工工艺流程

总体施工工艺流程如下：施工准备→竹桩施工→第 1—第 2 层竹排平台施工→第 3—第 13 层竹排施工→土工布施工→充填管袋施工→第 1 阶段回填砂施工→竖向排水板打设→水平排水板铺设→第 2—第 6 阶段堆载回填施工。

3.2　竹桩施工

1）竹桩制作与运输

使用竹子制作简易绑扎支架，将 7 根竹子置于支架上，人工利用张紧器配合尼龙绳进行绑扎制作。竹桩制作区配置 25 t 汽车吊，成品经吊车转运至运输平台，再由交通船运至施工区域。

2）竹桩定位架制作

制作 10 m×10 m 竹桩定位架，其左右侧设浮筒支撑，定位孔两侧用 10 号槽钢焊接桁架加固，定位架与方驳通过工字钢焊接固定，共设 3 道。定位孔高 1.2 m，上口直径 0.6 m，下口直径 0.55 m，壁厚 4.0 mm。

3）竹桩定位与打设

竹桩打设采用方驳（1 000 t）吊机（50 t）组配合沉桩定位架打设工艺。采用平底驳将方驳拖至指定的位置（粗定位）抛锚，调整锚缆长度，根据定位架角点坐标通过 GPS 进行精确定位。沉桩前测量海床标高，在 3.5 m 高锤体上标记沉设位置以控制桩底标高。履带吊配合吊带一次性吊起 4 根竹桩，人工辅助将竹桩放入定位架钢圆筒内，3 人以 120°夹角拉设防晃绳调整垂直度。随后用吊机起吊 3 t 定制锤，依靠锤重将竹桩打设至设计标高。竹桩打设如图 2 所示。

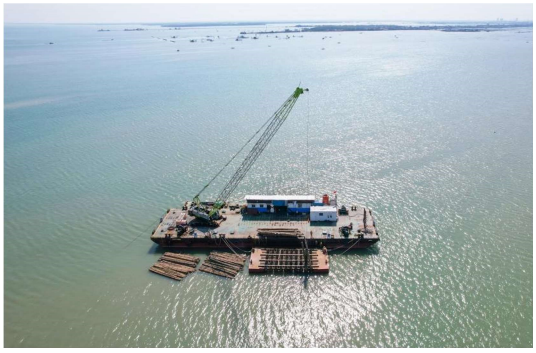


图 2　竹桩打设施工图

3.3　竹排施工

1）原竹打孔

将原竹在两端距端头 19 cm 和 21 cm 进行打

孔，并穿入 ϕ6 mm 塑料管及 ϕ4 mm 尼龙绳，打孔后的原竹每 10 根捆成一簇，便于转运。

2）绑扎方式

为保证竹排的整体强度及刚度，竹子接头对接连接绑扎需保证相邻竹子接头错开至少 2 m。相邻层每个交叉节点采用 ϕ8 mm 尼龙绳单向“/”形绑扎，隔层交叉节点采用 ϕ8 mm 尼龙绳进行“X”形绑扎。相邻层及隔层绑扎示意如图 3 所示。

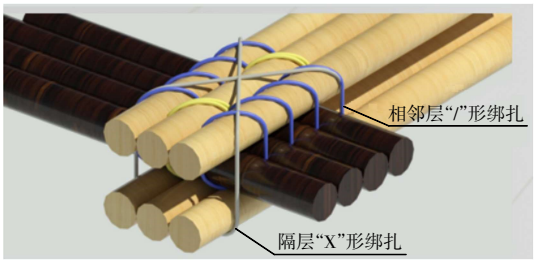


图 3　相邻层及隔层绑扎示意图

3）竹排绑扎

第 1 层和第 2 层为 8 m×8 m 的单元块，采用陆上绑扎、水上拼接工艺。第 3—第 13 层采用现场水上绑扎工艺。近岸位置竹排加工场地进行绑扎平台标准块的制作，平台为倾斜状（角度约 45°），前低后高，便于入水。首块标准块完成后人工推入水中，由交通船拖至近岸区域。将 4 个标准块拼接绑扎成 16 m×16 m 的块体单元，拖运至施工区，采用 GPS 精确定位，并在四角打入双拼 40 号槽钢临时锚固。后续标准块与该单元纵横向拼接，形成稳定的海上作业平台。标准块对接如图 4 所示。待第 1—第 2 层竹排平台完成一个区段后，进行第 3—第 13 层竹排绑扎。采用相同时间间隔施工，并以流水施工方式直至竹排全部完成。

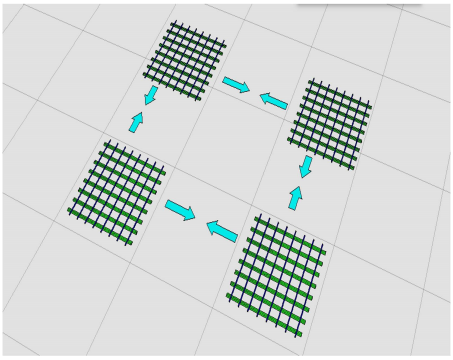


图 4　标准块对接示意图

3.4　土工布施工

第 1 层土工布：交通船运输至竹排海侧边缘，与竹排临时锚固后，人工滚铺由海侧向陆侧连续完成。第 2 层土工布：回填砂填筑至标高+1.2 m 后，人工滚铺，铺设前拉线定位，过程中及时调整，防止倾斜、褶皱。第 3 层土工布：第 2 层土工布铺设完成后，回填至少 50 cm 厚砂，采用由后向前推填，避免土工布发生移位或褶皱。回填至+1.7 m 标高后，完成排水板打设与铺设，再进行第 3 层土工布铺设。第 4 层土工布：回填砂填筑至+2.0 m 后，铺设方法同第 2 层。

3.5　充填管袋施工

1）袋体铺设

砂袋安排在低潮期展开，四侧用绳索固定于定位钢管上，防止漂移。固定后复测位置并检查牢固性。充砂前先向袋内充水，使其就位，以保证充填均匀饱满。

2）制作储砂坑

储砂坑布置于第 1 层回填砂上，间距 160 m，尺寸为 20 m×15 m×1.5 m，在坑壁四周布置吨包袋围护加固，在运砂车卸料位置铺设 10 mm 厚钢板防止破坏路基。施工时以挖掘机喂砂，并通过高压水泵从海中取水注入坑内。储砂坑布置如图 5 所示。

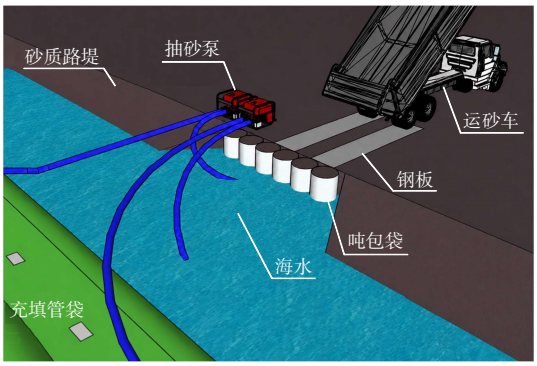


图 5　储砂坑布置图

3）充填管袋

将输砂管插入袖口灌砂，充填时及时调整管口方向，先从四角开始均匀充灌，实时检查袋体位置与形状，符合要求后正常充填。采用由两端向中间的顺序，逐袋充填并检查平整度与饱满度，合格后方可进行下一袋充灌。控制充填饱满度与厚度，若一次未达设计高度，待砂袋初步固结后进行二次或多次补填，直至达标。充填完成后扎紧袖口。应自下而上分层充填，下层袋体滤水固结未达 70%前，不得充填上层。充灌压力控制在

0.2~0.3 MPa，压力过低易导致填料沉积，过高易造成袋体爆裂。

3.6　排水板施工

1）桩位放样

排水板打设点位应位于竹排间隙内。施工前采用无人机倾斜摄影技术采集竹排实际位置数据，与排水板点位图对比，必要时调整点位以确保准确打入。放样时以竹签和布条标记。

2）插板机移机定位

插板机按放线位置就位，插板管与桩位同心。为扩散荷载、防止机械下陷，在施工平台与设备下方铺设路基箱，铺设前整平作业面，确保路基箱平稳放置，避免设备移动或倾斜。

3）装排水板管靴

整盘排水板置于定制转盘上，防止扭结、断裂或撕膜。插板机就位后提升桩管，排水板沿管穿入，提升至一定高度后安装桩靴，准备打设。

4）竖向排水板打设

打设前检查套管垂直度，偏差不大于 1.5%。启动设备打设至设计底标高。接长时剥开滤膜，板芯对插搭接，搭接长度不小于 300 mm，包紧滤膜后用大号订书钉钉接。

5）上拔桩管并切割排水板

插管达底标高后上拔，桩管出地面 1.3 m 以上时切割排水板。上拔时观察回带情况，回带长度应小于 500 mm，超标时在旁侧 200 mm 内补打 1 根，回带根数不超过总根数的 5%。

6）横向排水板连接

竖向排水板打设完成后，用订书机连接纵横向排水板，搭接长度不小于 30 cm。横向排水板端头应超出边坡坡脚至少 1 m，确保排水通畅。

3.7　堆载回填施工

1）回填砂施工

第 1—第 2 阶段为回填砂施工，采用推填的方式进行，材料卸车后使用推土机和挖掘机进行布料，回填过程中确保竹排翘起的坡度不大于 10%（约 5.7°）。施工过程中不需要分层碾压，在第 2 阶段顶部采用快速深层压实工艺进行压实。

2）精选料回填施工

第 3—第 6 阶段为精选料回填施工，采用羊脚碾和压路机按照 20 cm/层进行分层压实处理，碾压遵循先轻后重、先慢后快的原则，从两侧向中间，纵向进退式进行，每次碾压重叠 1/2 轮宽。

4　质量控制标准及措施

工程质量控制标准依据 *Special Specification: Package Toll Road Development of Semarang Demak 1B*[5]执行，主要从材料质量、施工工艺及过程监测 3 个方面进行控制。形成“材料检验—工艺控制—监测反馈”相结合的质量保证体系。

4.1　材料与结构连接质量控制

竹桩、竹排及土工布施工质量控制主要涉及材料性能、结构连接及铺设质量。原竹的长度、直径及绑扎形式应符合设计要求，竹桩平面位置偏差应满足相关技术标准；竹排节点绑扎质量直接影响整体结构完整性与稳定性。施工前检验进场毛竹的直径、顺直度及外观缺陷，控制尼龙绳规格与绑扎质量，保证竹桩、竹排连接牢固，避免施工扰动及风浪荷载作用下发生松脱或变形。土工布铺设质量主要取决于搭接长度、铺设完整性及施工期防护效果，铺设过程中应避免材料拖拽、破损及过度褶皱，控制暴露时间，并在横向搭接部位采取砂袋压护措施，减少潮汐、风浪等外部因素引起的移位和损伤，确保铺设连续、完整。

4.2　施工工艺与工序精度控制

充填管袋、竖向排水板及路堤回填施工质量控制重点在于施工参数、工序精度及填筑过程稳定性。充填管袋质量受砂料性质、充填压力、袋体尺寸及充填均匀性影响，需对袋体制作、运输、铺设和充填等环节进行全过程控制，减少袋体破损老化及局部充填不均；破损部位应及时修补或更换，充填完成后对袋体边缘采取砂垫层回填压护，提高袋体完整性和铺设稳定性。竖向排水板施工质量主要体现在打设位置、垂直度、打设深度及接头连接质量，施工中宜采用具备打设深度和垂直度自动监测功能的设备，提高施工精度，同时避免排水板扭结、断裂及滤膜破损，保证排水通道连续性，充分发挥径向排水固结作用。路堤回填质量与填料性质、分层填筑厚度、压实效果及加载方式密切相关，回填砂和精选料应满足材料质量要求，不得含有影响填筑性能的有机杂质；施工中应遵循分层填筑、分级加载原则，控制松铺厚度、压实度、填筑高程及边坡坡度，并结合地基固结情况合理确定加载速率和堆载静置时间，降低不均匀沉降及路堤失稳风险。

4.3　过程监测与反馈控制

分级加载过程中，应持续监测路堤坡顶和坡

脚位移变化，掌握路堤变形发展趋势，为加载过程中的稳定性评价提供依据。堆载施工期间应加强对各类埋设监测仪器的保护，确保监测数据连续、可靠。通过材料检验、施工过程控制与监测反馈相结合的质量控制方法，提高各分项工程施工质量，保障软土地基处理及路堤填筑整体稳定性，并为后期沉降控制提供基础。

5　效益分析

1）经济效益

超软土地基加固技术相对于传统真空联合堆载预压工艺，减少黏土帷幕墙、两侧临时道路等项目施工，节约了施工成本。根据测算，本项目总计可节约 8 500 万元，具有良好的经济效益。

2）社会效益

超软土地基加固技术的成功应用打破了目前国际上常用软基处理方案的局限性，可为印尼存在类似问题的爪哇岛北岸沿海城市提供解决方案，为类似工程提供参考，起到良好的示范作用。

3）环保效益

竹桩竹排体系采用天然毛竹作为施工材料，用于浅海滩涂区地基处理无环境污染风险。同时竹子生长固碳能力强，并替代传统建材降低碳排放，绿色低碳效益显著。

6　结语

本文研究成果有效解决了浅海滩涂区域原位不排水抗剪强度低、初始承载能力小、难以满足初期施工荷载对地基稳定性及承载力要求的难题，以及分布范围广、体量大的软土高填方路基堆载不均匀沉降的难题，突破了传统软基处理工艺在同类工况下的适用局限性。该技术在保障工程质量的同时，显著节约了施工成本，降低了施工安全风险，具有良好的经济效益、社会效益与环保效益。研究过程中形成了多项科技成果与专利，技术成熟可靠，为类似工程推广应用提供了有力支撑，推广应用前景广阔。

参考文献：

[1] 党发宁，刘海伟，王学武. 竹子作为抗拉筋材加固软土路堤的应用研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(S2)：44–48.

[2] 宋育霖，王成生. 基于 Plaxis 对软土路基竹桩–竹排垫层有限元分析[J]. 港口航道与近海工程，2024，61(4)：63–66.

[3] 袁威. 分级加载条件下软土地基固结特性及沉降规律研究[D]. 郑州：华北水利水电大学，2021.

[4] 罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法加固软基机理分析及固结沉降研究[D]. 长沙：中南大学，2014.

[5] Special Specification：Package toll road development of semarang demak 1B[S].