



基于国内外规范文献对比分析的 碎石桩地基处理设计参数确定

李汉渤^{1,2}, 梁小丛^{2,3}, 徐雄¹, 井阳¹, 朱明星³

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要:选取国内外4本常用碎石桩设计规范和文献,即美国联邦公路局规范、欧洲常用的设计参考文献以及国内的《建筑地基处理技术规范》《水运工程地基设计规范》,分别从碎石桩适用性分析、桩体材料级配要求、碎石桩设计参数等方面进行对比分析,并依托东帝汶Tibar港工程,对比采用不同规范和文献时碎石桩地基处理设计参数的确定过程。结果表明,适用性分析方法方面,欧美规范和文献提供了量化级配分析表,国内规范仅提供定性分析;桩体材料级配确定方面,欧美规范和文献均提供了典型级配曲线,而国内规范仅提供原则性规定;桩径和桩间距确定方面,欧美规范和文献均提供了经验关系设计图,而国内规范仅提供适用的范围值。

关键词:碎石桩;设计参数确定;对比分析;东帝汶Tibar港工程

中图分类号: TU 473.1; U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0202-07

Determination of design parameters for foundation treatment of stone columns based on comparative analysis of domestic and foreign codes and reference

LI Han-bo^{1,2}, LIANG Xiao-cong^{2,3}, XU Xiong¹, JING Yang¹, ZHU Ming-xing³

(1.Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

3.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: We select four commonly used domestic and foreign codes and reference for stone column design, i.e., the codes of the Federal Highway Administration(U.S.), the common design reference in Europe, the Chinese codes *Technical Code for Ground Treatment of Buildings* and *Code for Foundation Design on Port and Waterway Engineering*, and conduct a comparative analysis from the aspects including the applicability of stone columns, the grading requirements of column material, and the design parameters of stone columns. In addition, this study compares the determination process of design parameters for foundation treatment of stone columns with the aforementioned codes and reference on the basis of the Tibar Port project in East Timor. The results reveal that regarding applicability analysis, the foreign code and reference provide quantitative grading analysis tables, while domestic codes only provide qualitative analysis. For the determination of column material grading, the foreign code and reference present typical grading curves, while domestic codes only introduce regulations in principle. For the

收稿日期: 2021-09-10

作者简介: 李汉渤(1964—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事港口与航道、水利、隧道、高速公路与桥梁工程的施工技术管理和科研。

column diameter and spacing determination, the foreign code and reference provide empirical relationship design diagrams, while domestic codes only give applicable range values.

Keywords: stone column; determination of design parameter; comparative analysis; Tibar Port project in East Timor

碎石桩在国内的《水运工程地基设计规范》^[1]中又称振冲碎石桩或置换砂石桩。参照欧美常用的文献^[2]，振冲置换工艺可分为非挤土成孔 (vibro replacement) 和挤土方式成孔 (vibro displacement)。非挤土成孔主要包含采用顶部喂料振冲湿法 (vibro flotation) 成孔碎石桩及采用反螺旋钻机成孔的夯扩碎石桩 (rammed aggregate columns) 等；挤土方式成孔则主要包含采用底部喂料振冲干法 (vibro probe) 成孔的碎石桩及采用振动沉管 (virbo casing) 成孔的砂桩 (sand compaction column)。由上可见，不同规范和文献对于碎石桩命名不同，主要是从成桩工艺以及桩体材料两方面进行界定。

碎石桩为利用振冲器在软弱或者松散土地基中振冲成孔，再在孔内分批填入碎石等坚硬材料而形成桩体，桩体和原来的黏性土构成复合地基^[3]。目前国内外对于碎石桩的承载机理^[4]、成桩工艺^[5-6]等方面研究较多，但有关于碎石桩地基处理设计参数确定原则国内外对比研究则较少。因此开展国内外碎石桩地基处理设计参数对比，可为完善国内规范碎石桩法相关设计条文奠定基础，同时为开展海外地基处理工程提供参考。

1 碎石桩法地基处理设计流程

综合对比国内外振冲碎石桩常用的设计规范和地基处理工程设计资料，其设计流程基本相同，均是根据地基承载力、沉降、抗液化设计指标换算出相应的置换率，如果是倾斜场地还有稳定性要求，再根据稳定性换算置换率。首先考虑满足所有设计指标的获取设计置换率，其次根据设计置换率开展碎石桩地基处理设计，设计流程见图 1。

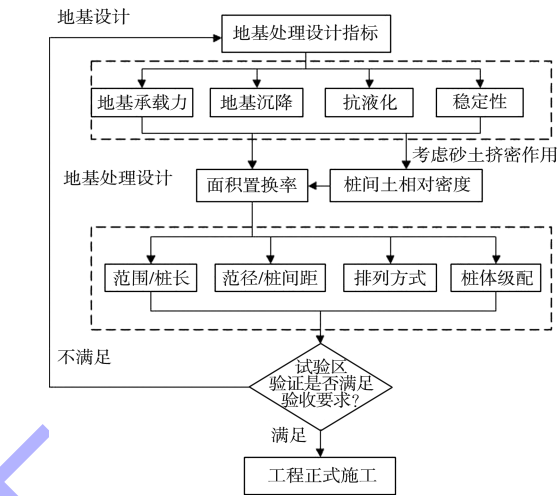


图 1 振冲碎石桩地基处理设计流程

由设计流程可知，地基设计计算时主要分为两大流程：第 1 步为开展地基设计，根据地基设计指标计算碎石桩复合地基面积置换率，如果是考虑了桩间土振密作用的砂土地场，换算得到的面积置换率还应满足桩间土相对密度要求；第 2 步为基于目标碎石桩置换率，开展地基处理相关参数设计，分别确定碎石桩处理范围、处理深度、桩体材料级配、桩间距和桩径等设计参数。以下从第 2 步的碎石桩地基处理参数确定方法差异进行对比分析。

2 地基处理设计参数确定方法对比分析

2.1 国内外规范和文献的选取

国内外碎石桩地基处理设计的基本理论为复合地基的散体桩理论，选取国内的《建筑地基处理技术规范》^[7]《水运工程地基设计规范》以及美国联邦公路局规范 FHWA/RD-83/026^[8]、欧洲常用的设计参考文献 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* ^[9] 进行对比。

2.2 适用性规定对比

振冲碎石桩主要用于黏土、粉土、饱和黄土、人工填土等黏性土地基的处理，也可用于砂土等无黏性土。当在砂土地基采用碎石桩时，考虑的主要是振冲挤密效果，当在黏性土中则主要考虑的是置换效果。由于碎石桩是散体桩，当黏性土的强度越低时，其对填料的侧向约束力越小，沉桩过程越容易造成桩体过粗。如果黏性土强度降低到一定的程度时，将导致无法对碎石桩体提供足够的侧向约束力，导致成桩失败。

2.2.1 国外规范和文献

FHWA/RD-83/026 的第 7 章提到，碎石桩适用范围广泛，可用于细颗粒土的粉土、黏土以及粗颗粒土的粉土质砂、砂和碎石土，并提供了振冲密实和振冲置换适用的不同土颗粒级配分区，见图 2。

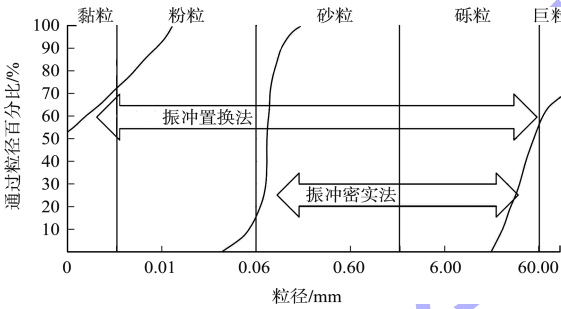


图 2 FHWA/RD-83/026 提供的级配分区

可以看出，振冲置换法适用场地范围较广，而振冲密实法仅适用粗颗粒土中，且仅适用于细粒含量小于 15%。当细粒大于 15%时，应考虑采用振冲置换法(碎石桩法)，此时碎石桩不仅起到置换作用还有部分挤密效果。

当场地为细颗粒土时，振冲密实法已不适用，应采用振冲置换法进行地基处理，但并非所有黏性土中均适用，当软黏土无侧限抗剪强度小于 7 kPa 时，或软土灵敏度大于 5 时，碎石桩法已不适用。且软黏土的无侧限抗剪强度小于 19 kPa 时，如采用振冲置换法还应重点考虑振冲碎石桩成孔时的坍塌性、施工设备和桩土之间相互作用等因素。

Ground Improvement by Deep Vibratory Methods 也提供了振冲密实和振冲置换法适用的不同土颗粒级配分区，见图 3。

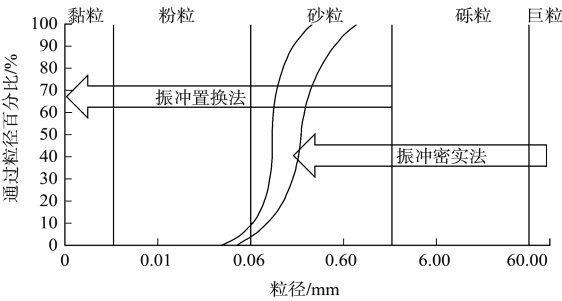


图 3 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 提供的级配分区

可以看出，相比于美国联邦公路局规范，*Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 还提供了过渡区分布区间，且文献中提到无填料振冲密实法仅适用于粗颗粒土中细粒含量小于 12% 时。当处理场地为黏性土地基时，碎石桩仅适用于处理不排水抗剪强度应大于 15 kPa 的黏性土，且当不排水抗剪强度 C_u 在 15~30 kPa 时，应考虑采用非挤土成孔湿法而不是挤土方式成孔干法施工。主要是由于其孔内泥浆液的循环和护壁作用，适用于相对更软弱的地层，而干法成孔过程主要依靠自身稳定性，其适用不排水抗剪强度相对更高的地层。

2.2.2 国内规范

《建筑地基处理技术规范》7.2 节规定：1) 振冲碎石桩适用于松散砂土、粉土、粉质黏土、素填土、杂填土等地基；2) 对于处理不排水抗剪强度小于 20 kPa 的饱和黏性土，应在施工前通过现场试验确定其适用性；3) 对于无填料振冲密实法，只适用于黏粒含量不大于 10% 的中砂、粗砂地基。

《水运工程地基设计规范》表 8.1.2 规定：振冲置换适用于砂土、粉土、粉质黏土、素填土和杂填土，对于不排水抗剪强度小于 20 kPa 的饱和黏性土，应通过现场试验确定其适用性。

综上对比分析可知，国内外规范和文献差异主要体现为：1) 国外规范和文献提供了振冲置换和振冲密实法量化的级配分区图，而国内规范只罗列

适用的土类; 2) 对于粗颗粒土, 国外规范和文献规定当细粒(美国联邦公路局规范的细粒为粒径小于 0.075 mm 的土粒, *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 的细粒为粒径小于 0.063 mm 的土粒)含量大于 12% 时, 振冲密实法已不适用须采用振冲置换法, 而国内的《建筑地基处理技术规范》给出了振冲置换法适用于黏粒含量不大于 10% 的中砂、粗砂地基(黏粒为小于 0.005 mm 的土粒); 3) 对于细粒土, 美国联邦公路局规范规定适用于不排水抗剪强度大于 7 kPa, *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 则规定适用于不排水抗剪强度大于 15 kPa; 国内规范则相对保守, 规定当不排水抗剪强度小于 20 kPa 的饱和黏性土, 应通过现场试验确定其适用性。

2.3 桩体材料级配确定原则

2.3.1 国外规范和文献

参照 FHWA/RD-83/026 的建议, 碎石桩石料级配一般考虑以下原则: 1) 满足经济性且须考虑供应的可行性; 2) 粒径大小要满足碎石快速下落的要求。规范中给出了碎石桩地基处理工程中常用到的 4 种粒径级配, 见表 1。

| 筛孔尺寸/mm | 表 1 碎石桩粒级级配 | | | |
|---------|---------------|-----|--------|--------|
| | 通过筛分粒径质量百分比/% | | | |
| | 一类 | 二类 | 三类 | 四类 |
| 101.6 | - | - | 100 | - |
| 88.9 | - | - | 90~100 | - |
| 76.2 | 90~100 | - | - | - |
| 63.5 | - | - | 25~100 | 100 |
| 50.8 | 40~90 | 100 | - | 65~100 |
| 38.1 | - | - | 0~60 | - |
| 25.4 | - | 2 | - | 20~100 |
| 19.1 | 0~10 | - | 0~10 | 10~55 |
| 12.7 | 0~5 | - | 0~5 | 0~5 |

对于一般工程而言, 建议采用一或二类级配; 对于非常软的有机质土地基, 且要满足快速施工的需求, 建议采用二类级配, 如效果较差, 则建议更换为三类级配; 如现场缺乏大粒径碎石, 则可建议参照二和四类级配。如周边土层越软, 为了减少对周边地层的挤压, 造成桩基扩大, 则应选择颗粒越小的级配。当软土层的抗剪强度小于 12 kPa, 为了保证周边土体提供足够的侧限力,

应采用小颗粒占比大的级配, 即选用砂粒粒径级含量高的级配, 且配套的施工工艺采用孔底出料方式或直接采用砂桩。

Ground Improvement by Deep Vibratory Methods 对碎石桩级配的建议, 碎石桩在考虑地震液化过程设计中应具备比较高的渗透性, 可参考碎石桩作为抗震液化排水通道的级配选取标准, 具体为 $20d_{15} < D_{15} < 9d_{85}$ (d_{15} 、 d_{85} 分别为地基土中小于某筛分所占比例分别为 15%、85% 对应的粒径; D_{15} 为碎石桩中比例小于 15% 对应的筛分粒径)。当碎石桩作为地震过程中有效的排水通道, 建议采用表 2 的级配。

| 表 2 碎石桩石料级配 | | | | |
|-------------|------|--------|-------|------|
| 粒径/mm | 50.0 | 25.4 | 12.7 | 4.75 |
| 通过粒径百分比/% | 100 | 90~100 | 10~80 | ≤5 |

当采用湿法的振冲置换的石料级配, 一般采用 30~60 mm 粒径相对较粗的碎石便于其从孔口顺利落入孔底。当地层为砂性土, 可采用相对均匀的碎石料, 在成桩过程中, 原地层中的颗粒相对较细的砂料会进入桩体的碎石地层, 慢慢形成级配较好桩体; 如采用干法孔底进料方式成孔, 一般采用较小的粒径(10~40 mm), 便于颗粒顺利通过供料管道。

2.3.2 国内规范

《建筑地基处理技术规范》7.2 节规定, 桩体材料可采用含泥量不大于 5% 的碎石、卵石、矿渣或其他性能稳定硬质材料不宜使用风化易碎的石料。采用 30 kW 振冲器, 填料粒径宜为 20~80 mm; 采用 55 kW 振冲器, 填料粒径宜为 30~100 mm; 采用 75 kW 振冲器, 填料粒径宜为 40~150 mm。

《水运工程地基设计规范》8.11 节规定与《建筑地基处理技术规范》的规定大似相同, 不同的是《水运工程地基设计规范》规定了采用 130 kW 振冲器的填料粒径范围为 50~200 mm。

综上对比可知, 国外规范和文献均给出了具体的碎石桩体级配曲线, FHWA/RD-83/026 针对不同土层给出了 4 组典型级配曲线, 而 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 对碎石桩作为排水抗液化通道工况提供了 1 组典型级配曲

线，可实践性强。国内规范仅是针对桩体材料含泥量以及不同功率振冲器适用的粒径范围给出原则性规定，具体设计则依赖工程师的经验。

2.4 桩间距和桩径确定原则

2.4.1 桩径确定

国内外规范和文献均明确桩径宜根据成桩设备、成桩工艺以及地基土的情况确定，且给出桩径范围，不同的是 FHWA/RD-83/026 给出的碎石桩的桩径为 0.5~1.2 m，《建筑地基处理技术规范》给出桩径范围为 0.8~1.2 m，《水运工程地基设计规范》给出桩径范围为 0.8~1.5 m。

2.4.2 桩间距确定

对于黏性土地基，无需考虑桩间土振密效果，可参照复合地基原理，基于设计置换率 a_s 和桩径 d_c 计算桩间距，公式为：

$$a_s = A_c/A_e = C (d_c/s)^2 \tag{1}$$

式中： A_c 为等效单元体桩体面积(m^2)； A_e 为等效单元体面积(m^2)； s 为相邻桩中心间距(m)； C 为相关系数，正方形排列取 0.785，正三角形排列取 0.907。

对于砂土地基，如地基处理设计时考虑碎石桩成桩过程对桩间土挤密效果，则换算得到面积置换率还应满足桩间土相对密度要求。根据桩间土相对密度确定碎石桩置换率关系，国内规范无相关规定，而 FHWA/RD-83/026 则提供适用于细粒含量小于 15% 的挤密效果经验图，见图 4。可以看出，根据土层细粒含量分布可估算桩间土振密后相对密度和标贯击数。

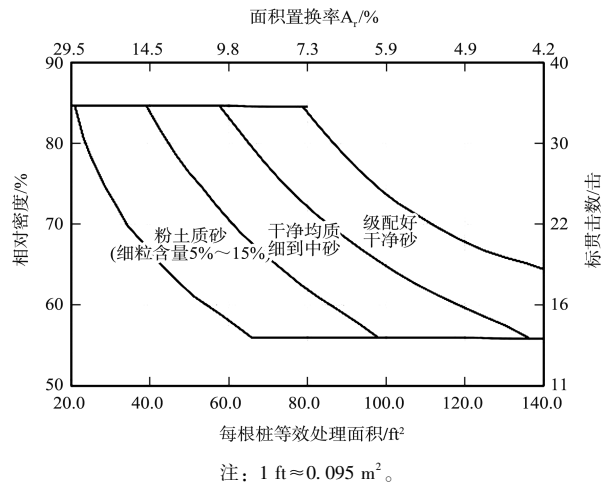


图 4 FHWA/RD-83/026 提供的振冲碎石桩挤密效果经验关系

综上对比分析可知：对于桩径的确定，国内外规范和文献根据现行采用的设备均给出了相应的桩径范围；对于桩间距确定，当为黏性土地，不考虑桩间土挤密效果，可根据置换率和桩径换算桩间距。当为考虑桩间土振密效果砂土地，须进一步确定设计置换率是否满足桩间土振密要求，可参照 FHWA/RD-83/026 提供的经验关系进行初步设计。

2.5 加固深度及范围确定原则

2.5.1 国外规范和文献

FHWA/RD-83/026 对于地基处理加固范围和面积没有相关规定，对于加固深度，应根据沉降、稳定性以及抗液化等设计指标确定。*Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 建议如果承载力、稳定性已满足要求，地基处理面积一般取基础面积，如有抗震要求，可往外延伸 2/3 的桩长宽度。对于加固深度，应根据沉降、稳定性以及抗液化等设计指标确定。

2.5.2 国内规范

对于加固范围要求，《建筑地基处理技术规范》规定，宜在基础外围扩大 1~3 排桩；对于可液化地基，基础外缘扩大宽度不小于可液化土层厚度的 1/2，且不应小于 5 m。《水运工程地基设计规范》则规定，宜在基础外围扩大 2~3 排桩；当软土较厚时，应通过计算确定扩大排数；对于可液化地基，应扩大 2~4 排，扩大宽度不小于可液化土层厚度的 1/2，且不应小于 5 m。

对于桩长的要求，《建筑地基处理技术规范》及《水运工程地基设计规范》均规定：当相对硬层较浅，按照硬层埋深确定；当相对硬层埋深较大，按照地基变形允许值确定；对于可液化地基，宜按照处理液化的深度确定；桩长不宜小于 4 m。不同的是对于稳定性控制工程，《建筑地基处理技术规范》要求至少进入最危险滑动面以下 2 m 深度，而《水运工程地基设计规范》要求至少 3 m。

综上对比可知，对于有限基础的地基加固范围，国内外规范和文献对于可液化地基范围均进行了相应的规定，不同的是 *Ground Improvement*

by *Deep Vibratory Methods* 建议往基础外延伸 2/3 桩长的宽度, 国内规范是要求不小于可液化土层厚度的 1/2, 且不应小于 5 m。对于加固桩长方面, 国内外规范和文献均要求根据变形、稳定性以及抗液化设计指标进行验算, 同时国内规范对于碎石桩抗滑稳定性方面要求至少进入滑动面以下 2~3 m 深度。

3 实际工程应用

3.1 工程概况

东帝汶 Tibar 港位于东帝汶岛, 根据现场地勘报告揭露, 原地层主要为海相、陆相交互沉积的珊瑚礁砂层, 表层吹填厚度为 5~6 m 的珊瑚礁砂层。原地层加固地基处理范围内主要为海相沉积的③_I层, 分为③_{Ia}、③_{Ib}、③_{Ic}共 3 个亚层。其中③_{Ia}层状态为非常松散-松散, 局部分布中密状态珊瑚礁石砂砾层, 平均标贯击数 7 击, 细粒含量 19%(小于 0.075 mm); ③_{Ib}层则为中密局部密实状态的珊瑚礁石砂砾层, 平均标贯击数 18 击, 平均细粒含量 19%; ③_{Ic}层为含砂砾质粉土和黏土互层。地基抗液化处理深度为 15 m, 深度范围内主要为③_{Ia}和③_{Ib}层, 局部个别位置夹含③_{Ic}层。参照项目地基处理设计报告, 码头后方回填区地震加速度 0.53g, 大于国内 4 级地震烈度, 属于高地震烈度区, 地基处理主要控制指标为抗液化设计指标。

3.2 适用性分析

工程场地为砂土地基, 根据国内外规范和文献, 碎石桩法均适用, 但如果场地为低细粒含量的纯净砂土地基, 采用无填料振冲密实法提高地基密实度相对更经济。因此须进一步分析确定振冲密实法适用性。参照 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 分别将③_{Ia}和③_{Ib}层级配曲线绘制于级配分区图内, 见图 5。可以看出, 工程场地的级配曲线分布范围较宽, 大部分级配曲线均分布在振冲置换区间, 说明如采用无填料振冲密实法, 由于较高的细粒含量导致密实过程超孔压产生, 影响土颗粒密实效果。

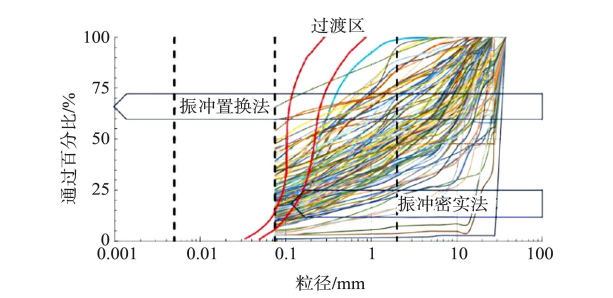


图 5 地基处理方法适用性分析

3.3 设计参数确定

3.3.1 置换率

参照工程的设计文件, 采用碎石桩排水抗液化要求需满足置换率为 10.1%~15.7%, 且对桩间土提出须满足 50% 相对密度的要求。根据图 4 可知, 10.1% 置换率对于细粒含量 5%~15% 区间砂土对应的相对密度约 58%(取下限值对应细粒含量 15%), 考虑到依工程场地细粒含量偏高, 平均 19%, 处理后密实效果相对较差, 经初步评估, 对于最小设计置换率 10.1% 可满足桩间土相对密度 50% 的设计要求, 须结合现场试验做进一步验证。

3.3.2 桩间土和桩径

工程采用功率 180 kW 的底部出料振冲器, 成桩直径范围为 900~1 200 mm, 为了确保桩间土挤密效果, 对于回填区陆域碎石桩采用正三角形布置, 桩间土和理论桩径参数选取见表 3。

表 3 碎石桩设计参数

| 地基处理分区 | 桩径/m | 桩间距/m | 置换率/% |
|--------|------|-------|-------|
| A | 1.0 | 2.4 | 15.7 |
| B | 1.0 | 2.4 | 15.7 |
| C | 0.8 | 2.0 | 14.5 |
| D | 0.8 | 2.4 | 10.1 |
| | 0.9 | 2.6 | 10.9 |
| F | 0.8 | 2.0 | 14.5 |

3.3.3 加固范围和深度

由于地基处理为吹填大面积加固处理, 加固面积为整个码头后方回填场地以及边坡护岸区域。地基处理加固范围平面分区和加固深度典型剖面见图 6。

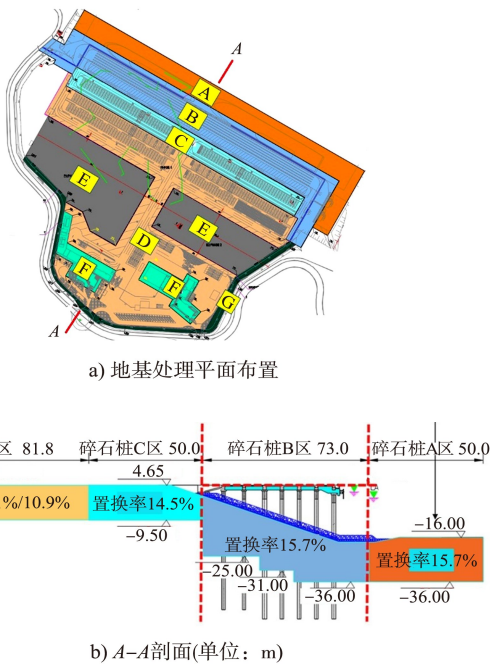


图 6 地基处理加固范围平面分区和加固深度典型剖面

对于陆域 C 和 D 区加固深度为 15 m，主要由抗液化设计指标控制，而非沉降指标控制。对于护岸区域碎石桩，底高程主要采用阶梯型分布高程范围-36.00~-22.00 m，其中护岸坡脚区域底高程均为-36.00 m，涉及桩长范围 15.00~24.00 m，主要由地震作用下稳定性以及抗液化设计指标进行控制。

4 结论

1) 对于砂土地基碎石桩振冲的适用性，FHWA/RD-83/026 及 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 均提供了级配曲线分区表，明确区分振冲密实和振冲碎石桩所适用的砂土级配，而国内规范未提供相关的量化分析；对于黏性土地基，碎石桩适用的最小不排水抗剪强度，国内规范建议为 20 kPa，*Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 建议为 15 kPa，FHWA/RD-83/026 建议为 7 kPa。

2) 关于桩体材料级配确定，FHWA/RD-83/026 针对不同土层给出了 4 组典型级配曲线，而 *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods* 对碎石桩作为排水抗液化通道工况提供了 1 组典型级

配曲线，可实践性强。国内规范仅提供原则性规定，具体设计依赖工程师的经验。

3) 关于桩径确定，国内外规范和文献根据现行采用的设备均给出了相应的桩径范围；关于桩间距的确定，理论上可由复合地基理论由置换率、桩径换算，对于考虑桩间土振密效果的砂土地基，可根据 FHWA/RD-83/026 提供的经验关系分析图进行初步设计。

4) 关于加固范围，国内外规范和文献对于有限面积基础加固范围均给出须往外延伸的要求；而加固深度方面，国内外规范和文献均要求根据变形、稳定性以及抗液化设计指标进行验算；另外国内规范针对抗滑稳定性要求至少进入滑动面以下 2~3 m 深度。

参考文献：

[1] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

[2] HAN J. Principles and practice of ground improvement[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[3] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[4] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

[5] 张蓓, 杨晓杰, 刘洋, 等. 大直径碎石桩软土成桩工艺研究[J]. 施工技术, 2012, 41(18): 109-112.

[6] 韩冉冉, 王海鹏, 刘横财. 底出料振冲碎石桩水下施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 29-31, 34.

[7] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[8] BARKSDALE R D, BACHUS R C. Design and construction of stone columns, volume I: FHWA/RD-83/026[S]. Washington: Federal Highway Administration, 1983.

[9] KIRSCH K, KIRSCH F. Ground improvement by deep vibratory methods[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.