



# 强震区碎石桩复合地基抗液化效果评价方法

朱明星<sup>1,2,3</sup>, 刘军<sup>1,4</sup>, 陈平山<sup>1,2,3</sup>, 梁小丛<sup>1,2,3</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;  
2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;  
4. 广州港湾工程质量检测有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 碎石桩法作为常用的抗液化地基处理技术, 目前国内现行规范在碎石桩设计及检测验收阶段均只考虑碎石桩对桩间土密实作用, 而忽略其排水及减震抗液化作用。强震区地基抗液化要求高, 采用碎石桩处理若仅考虑对桩间土密实作用, 将导致碎石桩面积置换率较高, 造成工程的浪费。针对国内外缺乏碎石桩复合地基综合抗液化效果检测与评价方法现状, 基于碎石桩复合地基密实、排水、减震三大抗液化作用计算公式, 提炼了碎石桩复合地基抗液化效果评估核心要素, 提出三大抗液化作用的评价方法。结合工程实例, 提出了强震区碎石桩复合地基抗液化效果检测验收流程及综合评价方法, 可为碎石桩加固类似地基的抗液化效果检测与评价提供参考。

**关键词:** 碎石桩复合地基; 密实; 排水; 减震; 抗液化; 效果评价方法

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0190-08

## Evaluation method of anti-liquefaction effect of stone column composite foundation in strong earthquake areas

ZHU Mingxing<sup>1,2,3</sup>, LIU Jun<sup>1,4</sup>, CHEN Pingshan<sup>1,2,3</sup>, LIANG Xiaocong<sup>1,2,3</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Institute Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;

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

4. Guangzhou Harbor Engineering Quality Examination Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** The stone column method is a widely used anti-liquefaction foundation treatment technology. Currently, existing Chinese specifications mainly consider the effect of stone columns on the densification of soil between columns in the design and testing and acceptance phases of the stone column, while ignoring the drainage effect and shear stress redistribution effects on anti-liquefaction. In the strong earthquake area, the requirement for an anti-liquefaction foundation is high. If the stone column treatment only considers the effect of densification of soil between columns, it will lead to a high replacement rate of stone columns and cause engineering waste. In view of the lack of testing and evaluation methods for the comprehensive anti-liquefaction effect of stone column composite foundation in China and abroad, this paper refines the core elements of the evaluation for the anti-liquefaction effect of stone column composite foundation and proposes the evaluation methods for each of the three major anti-liquefaction effects based on the calculation formulae for the three major anti-liquefaction effects of stone column composite foundation, namely densification, drainage, and shear stress redistribution. Combining with engineering examples, the paper

收稿日期: 2023-03-02

作者简介: 朱明星(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事地基抗液化、软基处理、基坑支护等方面的设计及科学  
研究工作。

also puts forward the process of testing and acceptance of the anti-liquefaction effect of stone column composite foundation in strong earthquake areas and the comprehensive evaluation method, which can provide a reference for the testing and evaluation of the anti-liquefaction effect of similar foundation reinforced by stone columns.

**Keywords:** stone column composite foundation; densification; drainage; shear stress redistribution; anti-liquefaction; effect evaluation method

碎石桩法作为常用的地基处理手段之一, 最初用于加固黏性土地基, 随后在可液化地基工程中也得到广泛应用。但在实际工程中, 如何检测及评估碎石桩复合地基的综合抗液化效果, 仍未得到很好的解决。

目前, 国内与碎石桩抗液化设计及检测相关的标准 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》与 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》对碎石桩复合地基均只考虑碎石桩对桩间土密实作用, 且仅对桩间土进行检测, 以此评估碎石桩对桩间土密实抗液化效果。然而, 国内外学者何广讷<sup>[1]</sup>、Baez<sup>[2]</sup>、Kramer<sup>[3]</sup>等指出, 碎石桩对可液化地基的抗液化效果不仅体现在对桩间土的挤

密作用, 还体现在桩体排水减压及桩体减震作用。目前对碎石桩复合地基抗液化效果的评估仍主要集中在对桩间土相对密度的检测, 对桩体排水及综合抗液化效果的检测与评价缺乏系统研究。

## 1 碎石桩复合地基抗液化效果评价核心要素与检测方法

碎石桩复合地基抗液化效果主要体现在对桩间土密实、桩体排水和桩体减震作用 3 方面。Baez 指出可液化土体一般为砂土、粉土或者砂土粉土组合, 由于可液化地基的类别不同, 碎石桩三大抗液化作用所占权重也不同, 见表 1。

表 1 碎石桩加固不同类型可液化地基三大抗液化作用权重

抗液化作用	纯净砂	粉土质砂 (细粒含量<15%或 CPT 摩阻比 $Fr < 1.5\%$ )	粉土质砂 (细粒含量 $\geq 15\%$ 或 CPT 摩阻比 $Fr \geq 1.5\%$ )	无塑性粉土
密实作用	**	*	—	—
排水作用	**	*	*	—
减震作用	*	*	**	**

注: “\*”表示 3 种抗液化作用对碎石桩综合抗液化效果的贡献权重, “\*”越多表示该抗液化作用所占贡献权重越大; CPT 为静力触探试验。

碎石桩复合地基抗液化效果检测的难点在于没有直接的检测手段或单一指标可以证明已施工碎石桩满足设计抗液化准则, 但基于碎石桩复合地基三大抗液化机理, 分别对各抗液化作用进行单独评价, 并根据可液化地基类别选取抗液化作用相应的检验方法, 得到任一可液化地基的抗液化效果检测及综合评价方法。

### 1.1 抗液化效果评价核心要素

针对不同抗液化作用, 国外学者提出了相应的设计和评估计算公式, 通过选取典型公式, 提炼分项抗液化作用计算公式中的各个参数, 得到碎石桩复合地基的综合抗液化效果评估核

心要素见表 2。

由表 2 可知, 碎石桩复合地基综合抗液化评估核心要素(加固效果检测参数)分为两大类: 1) 桩体参数: 桩长、桩径、桩位、桩体水平渗透系数、桩体密实度; 2) 桩间土参数: 土体相对密度、土体水平渗透系数。

当按“排水为主、挤密为辅”理念设计施工的碎石桩进行抗液化效果综合评估时, 土体水平渗透系数和体积压缩系数采用加固后的参数已考虑密实抗液化作用, 此时只需检测桩间土的相对密度, 无需额外测定其水平渗透系数和体积压缩系数。

表 2 碎石桩复合地基抗液化效果评估核心要素

抗液化作用	评估计算公式	计算参数	评估核心要素说明
密实作用 NCEER 法 <sup>[4]</sup>	震级标定系数 MSF	与震级 $M_W$ 相关	
	土层循环抗力比 CRR	通过标准贯入、静力触探的贯入指标或波速试验的剪切波速计算得到, 与土体相对密度密切相关	
	应力折减系数 $r_d$	土层深度的线性函数	
	等效循环剪切次数 $N_{eq}$	地震动参数	
	地震作用持时 $t_d$	地震动参数	
排水作用 Seed & Booker <sup>[5]</sup>	土体液化所需震次 $N_l$	与土体相对密度密切相关, 由标准贯入试验锤击数通过经验图表选取	
	有效桩径 $D_e$	与碎石桩平面布置形式及桩间距有关	
	桩径 $D_w$	检测实际桩径	
	土体水平渗透系数 $k_h$	通过与桩间土相对密度经验公式换算得到	
	土体水平固结系数 $C_h$	由土体水平渗透系数 $k_h$ 和体积压缩系数 $m_v$ (通过土体标贯锤击数换算) 换算得到	
减震作用 Priebe 法 <sup>[6]</sup>	排水通道长度 $H$	通过检测实际桩长得到	
	桩体水平渗透系数 $k_w$	通过现场取样做室内水头试验测定或通过填料级配估算	
	面积置换率 $m$	与桩径、桩间距及桩体平面布置形式有关	
	碎石桩内摩擦角 $\varphi_c$	由桩体密实度表征或通过经验取值	

## 1.2 抗液化效果核心要素检测方法

### 1.2.1 桩体检测方法

作为碎石桩施工过程质量控制关键参数和工后检测验收核心要素, 桩长、桩径、桩位(桩间距)、填料量通常通过校核现场施工记录进行验收评估。桩长决定竖向有效排水通道长度, 由桩顶实测高程减去桩底实测高程得到。桩径、桩位(桩间距)决定碎石桩复合地基面积置换率, 通常取施工后平均桩径, 地基浅表层也可通过开挖量测方式获取; 实际桩位(桩间距)通过全站仪或 GPS 仪量测。填料量与桩长、桩径密切相关, 可通过读取现场填料称重系统记录数据获取。

桩体水平渗透系数影响(超)孔压消散速率, 提高桩体渗透系数对降低场地超孔压比峰值有显著效果。施工后桩体渗透性难以在现场单独测定, 但可通过现场原位钻孔取样后开展室内渗透试验测得, 或对所取样品开展颗粒试验得到材料级配后通过经验公式(如 Hansen 公式)估算。碎石桩体材料渗透系数一般为  $0.1 \sim 10.0 \text{ cm/s}$ , 与材料级配密切相关。工程实践中, 由于施工后不便测定桩体渗透性, 因此通过过程控制桩体材料质量及成桩质量, 以保证桩体的良好渗透性。

桩体密实度影响桩体的渗透性及桩体强度,

国内通常采用重型或超重型圆锥动力触探试验(DPT)对其进行检测。

### 1.2.2 桩间土检测方法

碎石桩施工后桩间土渗透系数难以在现场单独测定, 但可通过原位钻孔取样, 开展室内渗透试验测定或通过颗粒试验获取级配后通过经验公式估算。

对于砂性土地基密实度检测, 国内外广泛采用原位测试方法, 主要包括: 标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)和波速测试(如剪切波速法、瑞雷波法)。

此外, 有学者建立了砂性土渗透系数与其相对密度的经验关系, 因此对于强震区碎石桩复合地基抗液化评估桩间土参数可只检测其相对密度。

## 2 碎石桩三大抗液化作用评价

### 2.1 桩体排水作用评价

碎石桩体排水作用发挥主要取决于桩长、桩径、填料量及桩体渗透系数(主要由桩体材料质量决定)。填料质量通过施工过程中进行定期或定量抽检, 检测其级配、细颗粒含量、洛杉矶磨耗值等指标是否满足相应设计要求, 属过程控制参数, 因此对碎石桩体排水作用的评价主要聚焦

于评估施工后碎石桩的实际桩长、桩径和填料量是否满足相应设计要求。对于采用自动施工管理控制系统的碎石桩项目, 施工后桩长、桩径和填料量可通过自动化施工成果记录进行校核验收评价。

## 2.2 桩间土密实作用评价

碎石桩法地基处理工程实践中, 根据桩间土密实度最小设计目标值通过经验公式转换为现场测试指标目标值(如 SPT- $N$ 、CPT- $q_c$ 、波速测试- $v_s$ ), 建立基于原位测试指标的密实度验收曲线, 将施工后桩间土实测原位指标与验收曲线设计目标值进行比较, 以此评价碎石桩对桩间土密实作用。

### 2.2.1 桩间土检测点位置模式

桩间土密实度检测点的检测平面位置模式包括中心单点检测法、中心两点检测法(分为两种情况)和综合点位检测法 3 种, 见图 1。

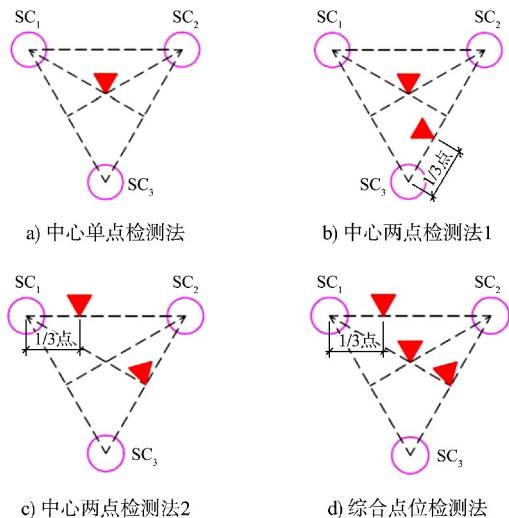


图 1 三角形布桩的桩间土密实度检测点位置模式

中心单点检测法只检测由碎石桩位组成的等边三角形或正方形中心处桩间土, 见图 1a)。中心两点检测法分两种情况, 一种是检测桩位等边三角形或正方形的中心点及其中一条边的 1/3 等分点处, 见图 1b); 另一种是检测一条边的中点处及另一条边远离该中点处的 1/3 等分点处, 见图 1c), 这两种细分情况最终均以两个检测点同一深度处原位测试指标的算术平均值作为目标检测区域的

验收结果。综合点位检测法先检测桩位等边三角形或正方形的中心处桩间土, 若该中心点处桩间土密实度满足设计要求, 则无需继续检测, 否则, 需进一步检测一条边中点处及另一条边远离该中点处的 1/3 等分点处, 见图 1d), 并赋予 1/2 点处及 1/3 点处不同权重, 见式(1), 最终以这两个检测点的加权平均值  $N_{wa}$  作为目标检测区域的验收结果。

$$N_{wa} = 0.6N_{1/2} + 0.4N_{1/3} \quad (1)$$

式中:  $N_{1/2}$  为碎石桩三角形一条边 1/2 点处的实测标贯击数;  $N_{1/3}$  为碎石桩三角形另一条边 1/3 点处的实测标贯击数;  $N_{wa}$  为加权平均标贯击数。

### 2.2.2 桩间土密实度验收曲线建立方法

#### 2.2.2.1 基于 SPT 建立密实度验收曲线

在砂性土密实度与 SPT 锤击数诸多经验转换公式中, 最为广泛使用的是 Idriss 和 Boulanger<sup>[7]</sup>提出的公式如下:

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (2)$$

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S \quad (3)$$

式中:  $D_R$  为砂性土密实度,  $N$  为实测标准贯入锤击数,  $(N_1)_{60}$  为实测标贯击数  $N$  经 60% 能量传递率等因素修正的归一化参数,  $C_N$  为基于上覆地层有效应力的归一化系数,  $C_E$  为探锤能量比( $E_R$ )修正系数,  $C_B$  为钻孔直径修正系数,  $C_R$  为钻杆长度修正系数,  $C_S$  为取样器有无内衬的修正系数。修正系数  $C_E$  通过对实际使用的标贯锤进行能量率定试验获取, 其余修正系数可参考 Idriss 和 Boulanger<sup>[8]</sup> Table 3。

通过公式(2)和(3), 桩间土密实度设计值  $D_R$  转换为  $(N_1)_{60}$ , 考虑各修正系数反算得到不同深度所需原始标贯  $N$  值, 绘制地基处理设计深度范围内  $N$  值曲线即可得到基于 SPT 的桩间土密实度验收曲线。

#### 2.2.2.2 基于 CPT 建立密实度验收曲线

工程上也广泛采用 CPT 检测砂土密实度。其中, 基于 CPT 计算砂土密实度的常用经验公式:

$$D_R = 0.478 q_{c1N}^{0.264} - 1.063 \quad (4)$$

$$q_{c1N} = \frac{q_{c1}}{p_a} \quad (5)$$

$$q_{c1N} = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.5} q_c \quad (6)$$

式中:  $D_R$  为砂性土密实度;  $q_c$  为现场 CPT 实测锥尖端阻力, kPa;  $p_a$  为大气压强, 1 atm = 100 kPa;  $\sigma'_v$  为有效上覆应力, kPa;  $q_{c1}$  为经数值为 1 个标准大气压的有效上覆应力修正的锥尖阻力, kPa;  $q_{c1N}$  为经有效上覆应力修正的无量纲归一化锥尖阻力。

### 2.2.2.3 基于剪切波速 $v_s$ 建立密实度验收曲线

剪切波速是描述土体的重要参数, 通过剪切波速  $v_s$  建立与砂土密实度的转换关系。 $v_s$  与  $D_R$  最常用的经验转换公式由 Karray 和 Lefebvre<sup>[9]</sup> 提出:

$$v_{s1} = 25.8 \sqrt{D_R + 25} \quad (7)$$

$$v_{s1} = v_s \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25} \quad (8)$$

式中:  $v_s$  为剪切波速, m/s;  $D_R$  为砂性土密实度, %;  $p_a$  为大气压强, 1 atm = 100 kPa;  $\sigma'_v$  为有效上覆应力, kPa;  $v_{s1}$  为经数值为 1 个标准大气压的有效上覆应力修正的剪切波速, m/s。

### 2.3 桩体减震作用评价

根据桩体减震抗液化计算公式, 桩体减震作用的评价在于评估施工后碎石桩内摩擦角及复合地基面积置换率。碎石桩复合地基面积置换率通过施工过程控制桩径、桩位和桩间距, 实际检测评估时可取设计值。工程中碎石桩内摩擦角的测定相对困难, 但与桩体密实度有关, 可通过 DPT 检测桩体密实度估算桩体内摩擦角, 也可根据碎石材料级配选取桩体内摩擦角经验值( $38^\circ \sim 42^\circ$ )。根据复合地基面积置换率和碎石桩内摩擦角, 可计算碎石桩复合地基在地震作用下桩体减震作用的折减系数, 进而评价桩体减震抗液化作用。

## 3 工程案例应用

### 3.1 工程地质条件

根据地勘报告, 南亚某港口项目码头后方回填陆域地基处理深度范围主要为吹填层和原状地层。其中, 吹填层为初始状态松散-中密的约 5 m 厚珊瑚礁砂砾层, 细颗粒含量控制在 15% 以内。原状地层主要为海相沉积的粉土质或含粉土珊瑚礁砂砾层③, 分③<sub>1a</sub> 和③<sub>1b</sub> 两个亚层, 层③<sub>1a</sub> 非常松散-松散、局部中密, 平均标贯击数 7 击, 细颗粒含量为 2%~45%; 层③<sub>1b</sub> 中密、局部密实, 平均标贯击数 18 击, 细颗粒含量为 1%~48%。

### 3.2 抗液化设计方案及验收准则

根据项目技术规格书, 地基土需满足抗液化安全系数  $\geq 1.1$  (陆域设计地震地表 PGA 为 0.515g, 设计地震均值震级为 6.8 级)。因项目原状地层含有大量高细粒松散珊瑚礁砂砾层, 传统基于密实加固原理的抗液化设计方案存在较大验收风险, 最终决定采用“排水为主、挤密为辅”的碎石桩抗液化设计方案。

陆域碎石桩采用正三角形布置, 设计桩长多数为 15 m, 面积置换率为 10.1%~14.5%, 桩径 0.8~0.9 m, 桩间距 2.0~2.6 m, 满足抗液化设计要求的最小面积置换率为 10.1%。

地基经碎石桩处理后, 桩体排水功能及对桩间土密实作用均需满足相应验收要求, 其中吹填层和原状粒类土经地基处理后需满足密实度  $Dr \geq 50\%$ 。

### 3.3 碎石桩抗液化效果检测与综合评价

#### 3.3.1 桩体排水功能检测评价

根据表 2 桩体排水作用评估核心要素, 施工后对碎石桩桩长、桩径和填料量 3 个参数进行检测。一定区域范围的碎石桩整体排水功能验收评价流程见图 2。以项目陆域碎石桩试验区 TA8 为例, 该试验区整体排水功能验收评价见表 3。

由表 3 可知, 试验区 TA8 所有碎石桩的桩长、桩径和填料量均满足相应验收要求, 表明该试验区碎石桩桩体整体排水功能满足设计要求, 验收通过。

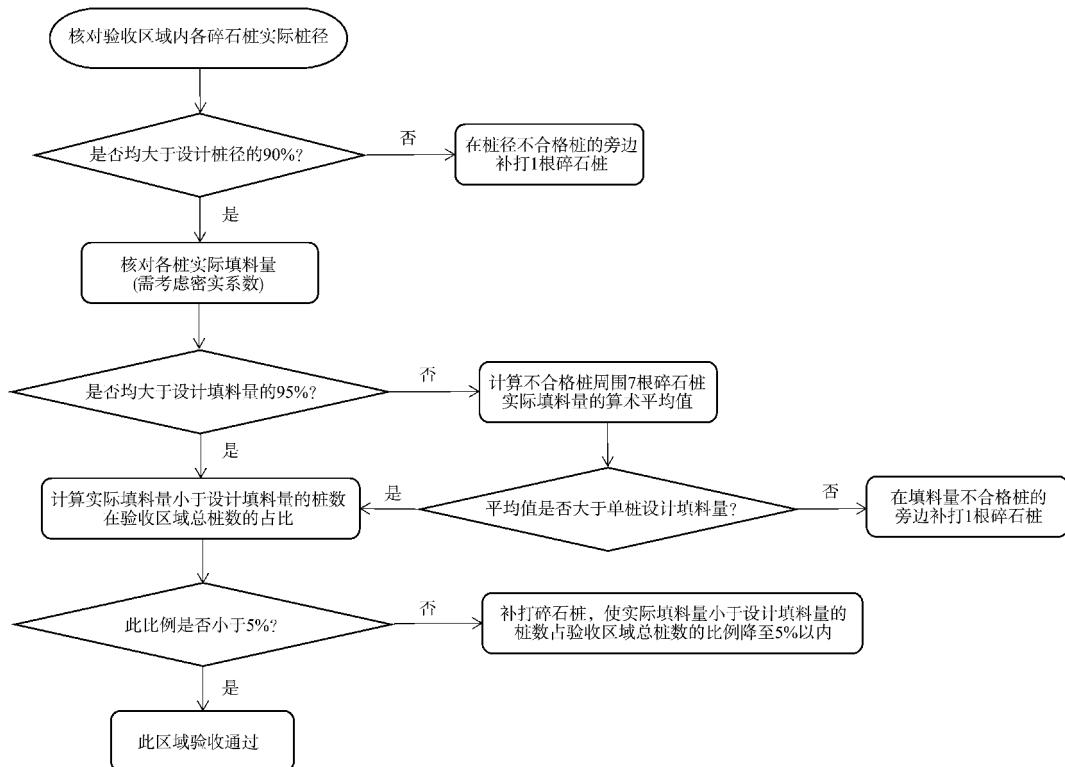


图 2 南亚某项目碎石桩排水功能验收评价流程

表 3 南亚某项目试验区 TA8 碎石桩整体排水功能验收评价

桩号	桩底高程			桩径		密实填料量			综合评价满足 (是/否)
	设计值/ m	实际值/ m	满足 (是/否)	设计值/0.9 倍 设计值/m	满足 (是/否)	设计值/0.95 倍 设计值/m <sup>3</sup>	实际值/ m <sup>3</sup>	满足 (是/否)	
TA8-1	-9.00	-9.20	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	10.35	是	是
TA8-2	-9.00	-9.01	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	9.05	是	是
TA8-3	-9.00	-9.00	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	8.01	是	是
TA8-4	-9.00	-9.04	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	14.88	是	是
TA8-5	-9.00	-9.05	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	9.02	是	是
TA8-6	-9.00	-9.27	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	8.36	是	是
TA8-7	-9.00	-9.00	是	0.80/0.72	是	7.56/7.18	10.12	是	是

### 3.3.2 桩间土密实效果检测评价

采用 SPT 检测碎石桩处理后桩间土密实度, 检测模式采用综合点位检测法。项目碎石桩复合地基桩间土密实抗液化效果验收评价流程见图 3。

以项目试验区 TA8 为例, 该区域碎石桩桩间土密实效果检测验收评估见图 4。为积累更多检测数据, 分析碎石桩对桩间土不同位置处密实效果,

除对中心 CP 点位 (Post-TA8-1) 进行检测评估外 (CP 点已满足验收要求), 对 1/2 (Post-TA8-2) 和 1/3 (Post-TA8-3) 等分点处也进行了检测和评估。

综合表 3、图 4 检测验收评价结果, 可知试验区 TA8 桩间土密实效果检测以及综合抗液化效果均满足设计验收要求。

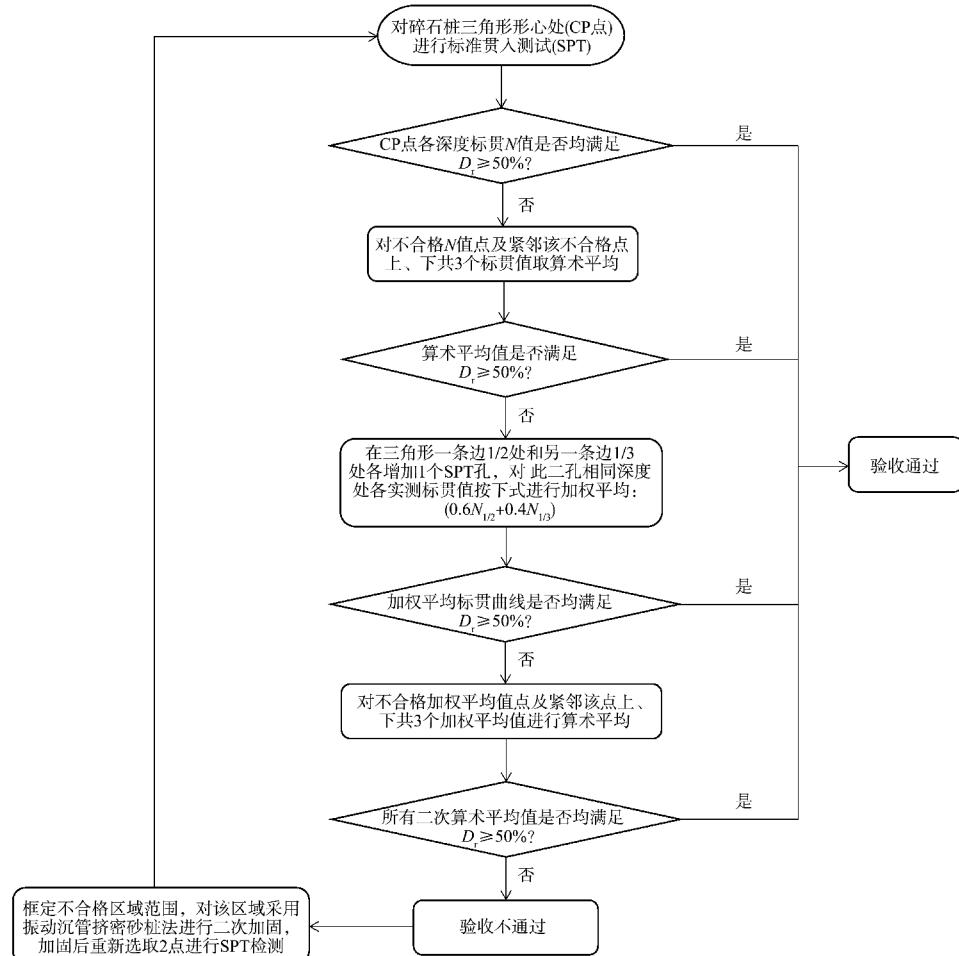


图 3 南亚某项目碎石桩桩间土密实效果检测验收流程

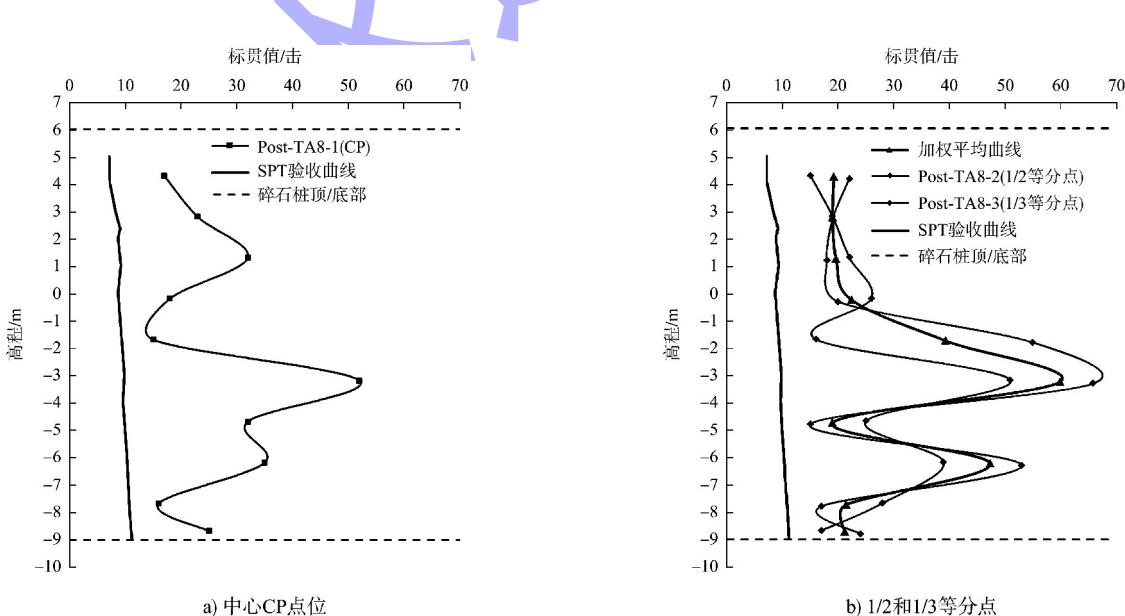


图 4 南亚某项目试验区 TA8 碎石桩桩间土密实效果验收评价

## 4 结论

1) 碎石桩复合地基抗液化效果应综合考虑桩体排水、桩体减震及对桩间土密实 3 方面作用。基于三大抗液化作用, 提炼了强震区碎石桩复合地基的抗液化效果评估核心要素, 包括桩体参数(桩长、桩径、桩位、桩体渗透系数、桩体密实度)和桩间土参数(土体密实度、土体渗透系数)。

2) 碎石桩排水抗液化效果主要通过检测碎石桩桩长、桩径及填料量 3 个参数进行验收评价, 密实抗液化效果通过检测桩间土实测原位指标(SPT- $N$ 、CPT- $q_c$ 、波速测试- $v_s$ )与桩间土密实度验收曲线比较进行评价, 减震抗液化效果通过检测桩体密实度换算桩土刚度比进行评价。

3) 基于南亚某项目提出的强震区碎石桩复合地基抗液化效果检测验收流程和综合评价方法, 对类似可液化地基采用碎石桩方案的抗液化效果检测与评价具有借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 何广讷. 振冲碎石桩复合地基液化势的判别 [C]//辽宁省土木建筑学会, 沈阳市土木建筑学会. 2000 年辽宁省暨沈阳市工程结构学术会议. 沈阳: [出版者不详], 2000: 387-392.
- [2] BAEZ J I. A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1995.
- [3] KRAMER S. Geotechnical earthquake engineering [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [4] YOUD T L, IDRISI I M. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils [J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 2001, 127(4): 297-313.
- [5] SEED H B, BOOKER J R. Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103 (7): 757-768.
- [6] PRIEB H J. The design of vibro replacement [J]. Ground engineering, 1995, 28(10): 31.
- [7] IDRISI I M, BOULANGER R W. SPT-based liquefaction triggering procedures [R]. Davis: University of California, 2010.
- [8] IDRISI I M, BOULANGER R W. Soil liquefaction during earthquakes [M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [9] KARRY M, LEFEBVRE G. Significance and evaluation of Poisson's ratio in Rayleigh wave testing [J]. Canadian geotechnical journal, 2008, 45(5): 624-635.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 170 页)

- [2] 彭焱森. 既有高速公路桥下深厚淤泥地层筑岛关键技术 [J]. 中国港湾建设, 2022, 42(6): 66-70.
- [3] 戴国亮, 黄挺, 龚维明, 等. 边载作用下砂土桩基负摩阻力试验 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 1-7.
- [4] 杜仕朝, 康春霞, 刘晓东, 等. 软土地区公路路基沉降对临近桥梁结构受力影响 [J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 180-186.
- [5] 赵晓波. 堆载作用下邻近复合地基的力学性状研究 [D]. 唐山: 河北联合大学, 2013.
- [6] 李志伟, 杨建学, 俞伟, 等. 软土地基堆载对桥梁桩基影响及保护分析 [J]. 工程建设与设计, 2016(7): 81-85.

- [7] 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.
- [8] 池恒天, 吴振宇, 刘小志. 基于 Midas GTS NX 土的三种本构模型工程应用实例 [J]. 岩土工程技术, 2020, 34(3): 143-149.
- [9] 董志良, 刘嘉, 朱幸科, 等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用 [J]. 水运工程, 2013(5): 168-175.
- [10] 李彩彩, 杨洁. 天津滨海地区吹填造陆工程中吹填量分析 [J]. 海河水利, 2012(3): 50-51, 57.

(本文编辑 王璁)