

DOI: 10.11779/CJGE201912006

# 预置管法静力触探检测水泥搅拌桩损伤控制方法研究

李国维<sup>1, 2</sup>, 王苏云<sup>1, 2</sup>, 吴建涛<sup>\*1, 2</sup>, 郑亚坤<sup>1, 3</sup>, Felix Omoro<sup>1, 2</sup>, 侯宇宙<sup>1, 3</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210024;

3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 预置管法静力触探实施水泥搅拌桩完整检测时存在桩体损伤问题。基于模型桩实验和数值模拟方法研究预置管法静力触探检测水泥搅拌桩损伤控制方法。模型桩实验表明, 插管直径影响探头的贯入轨迹, 插管强度影响检测结果的灵敏度; 数值模拟显示, 静力触探贯入插管损伤桩体的程度与插管直径、管壁厚度、桩体强度有关, 与贯入深度、插管强度无关; 静力触探贯入引起的桩体等效塑性应变与插管的直径大小、管壁厚度负相关; 引起的损伤范围与桩体龄期和插管直径负相关, 最大半径随插管直径增大近似为双曲线趋势衰减。现场检测时, 在试桩阶段依据数值模拟预先确定插管尺寸的有效范围, 由现场试验选择确定工程检测用插管的尺寸, 达到控制检测损伤桩体完整性的目标。

**关键词:** 预置插管; 静力触探; 水泥搅拌桩; 有限单元法; 等效塑性应变

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2215-09

**作者简介:** 李国维(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事软基路堤变形和高边坡稳定性等方面的教学与科研工作。

E-mail: lgwnj@163.com。

## Damage control methods for detecting cement mixing piles by static cone penetration tests in reserved tubes

LI Guo-wei<sup>1, 2</sup>, WANG Su-yun<sup>1, 2</sup>, WU Jian-tao<sup>1, 2</sup>, ZHENG Ya-kun<sup>1, 3</sup>, Felix Omoro<sup>1, 2</sup>, HOU Yu-zhou<sup>1, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai

University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The problem of pile damage encountered when using cone penetration test (CPT) in a reserved tube for quality detection testing is addressed. Based on the experimental and numerical models, the damage control methods for CPT in reserved tubes are studied. The results of CPT show that the penetrating path of probe and the sensitivity of detection are influenced by the diameter and strength of the tube. The numerical results show that the damage degree of the pile depends on the diameter and thickness of the tube and strength of the pile, as opposed to the depth of cone penetration and strength of the tube. The equivalent plastic strain of the pile is negatively correlated to the diameter and thickness of the tube. The area of damaged zone is negatively correlated to the age of mixing pile and diameter of the tube. The maximum radius of the damaged area decreases with the increase of the tube diameter. In the field tests, the effective range of the sizes of tubes is determined in advance according to the numerical simulation, and the size of the tubes used in engineering tests are determined by the field tests, so as to achieve the goal of controlling the integrity of the damaged piles.

**Key words:** reserved tube; CPT; cement mixing pile; finite element method; equivalent plastic strain

## 0 引言

预置管法静力触探<sup>[1]</sup>检测搅拌桩成桩质量, 其优点是操作简单、效率高、周期短, 能够连续反映全桩长范围内的强度变化。在成桩过程桩体强度尚未形成时, 在桩体中心插入备检用低强度 PVC 管, 作为备检管道, 待桩体强度达到预定龄期时, 在备检管道内进行静力触探贯入测试, 得到桩体力学特征与贯入锥尖阻力的对应关系, 据此评价桩体的质量分布情况。现

场试验显示, 该技术可以很好地解决探头偏桩问题, 实现完整检测桩体全长的目标。但现场检测时发现, 检测会导致桩头张裂破损情况, 由此损伤了复合地基的承载力水平, 桩头损伤情况如图 1 所示, (a) 为桩

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41472240); 中央高校业务费专项项目 (2015B25514); 广东省交通运输厅科技项目 (201102017)

**收稿日期:** 2019-01-09

**\*通讯作者** (E-mail: jiantao.wu@hhu.edu.cn)

体检测前, (b) 为桩体检测后, 可见桩体及插管都出现了损坏。如何确定桩体损伤的衡量指标, 建立桩体损伤与影响因素间的关系, 是该方法尚待解决的问题, 对于静力触探检测水泥搅拌桩贯入机理的研究也有待进一步深入。

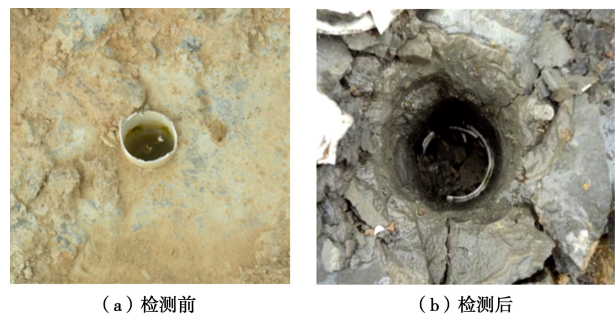


图 1 水泥搅拌桩破坏

Fig. 1 Damage to cement mixing pile

诸多学者对静力触探的贯入机理进行了研究, 其中主要包括模型试验研究、理论研究和数值模拟研究。

模型试验方法用于研究静力触探的贯入过程是有效手段。Kerisel<sup>[2]</sup>和 Mo 等<sup>[3]</sup>分别基于砂土和层状土研究静力触探贯入过程特征; 郑亚坤等<sup>[4]</sup>尝试利用模型试验研究静力触探检测水泥搅拌桩的可行性; 诸多学者依据孔穴扩张理论<sup>[5-8]</sup>、承载力理论<sup>[9-11]</sup>和应变路径法<sup>[12]</sup>, 建立了静力触探贯入土体过程的解析解。

数值模拟用于分析静力触探贯入过程也是一种有效方法。De 等<sup>[13]</sup>模拟探头贯入土体导致塑性破坏的计算方法; Walker 等<sup>[14]</sup>利用 ABAQUS 模拟静力触探贯入过程时发现, 竖向应力对探头系数影响较大; 周健等<sup>[15]</sup>利用 PFC 方法研究锥尖阻力对锥尖尺寸效应的影响, 取得了与试验一致的结果; 耿功巧等<sup>[16]</sup>基于大变形数值模拟方法, 发现孔压静力触探贯入土体过程塑性区面积与探头尺寸正相关。

由此, 模型试验和数值模拟方法可用于研究静力触探贯入土体的行为特征。本文针对预置管法静力触探检测水泥搅拌桩质量时存在的桩体损伤问题, 开展模型桩实验研究, 发现检测损伤桩体的规律, 采用数值模拟方法拟合实验结果, 进一步研究插管尺寸、探头锥尖特征和介质材料性状与桩体损伤程度的关系, 建立预置管法静力触探检测水泥搅拌桩损伤控制的指标和方法。

# 1 研究方法

## 1.1 模型桩实验

### (1) 实验目的及方案

模型实验的目的在于研究插管直径和强度这两个因素对检测结果的影响情况, 在此基础上确立控制检

测桩体损伤的合理方法。模拟的对象是复合地基浅层的部分桩体, 不考虑环境约束力的影响, 研究静力触探检测对桩头完整性的影响。

模型桩结构和截面图如图 2, 桩体中心预留圆孔, 桩体外包成桩模具。模具为两个 PVC 薄壁半圆筒, 耦合成圆柱空筒。制作模型桩时, 模具外缚约束, 在模具内搅拌实验材料, 分层实施, 成型后就地养护。

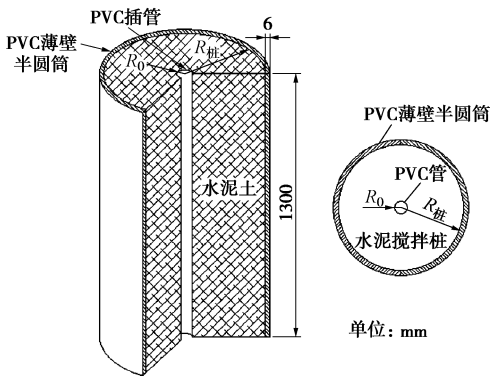


图 2 模型桩结构图

Fig. 2 Structure of model pile

实验所用土样取自广东省江门市境内在建的新(会)台(山)高速公路现场, 物理性指标见表 1, 颗粒分布曲线如图 3。

表 1 土的物理性质指标

定名	$\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$w$ /%	$w_L$ /%	$w_p$ /%	$I_p$	颗粒含量/%	
						0.075~ 0.005	<0.005
高液限黏土	1.51	86.4	65.7	31.6	34.1	44.61	35.61

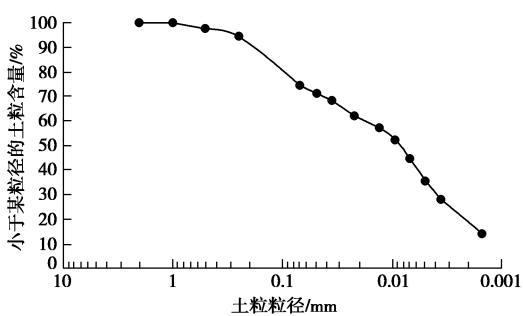


图 3 颗粒分布曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve

实验所用水泥采用复合硅酸盐水泥 (P·C 32.5), 执行标准: GB175—2007, 其基本性质指标见表 2。

表 2 水泥的基本性质指标

种类	等级	初凝时间/min	终凝时间/min	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
PC 复合硅酸盐水泥	32.5	>45	<390	3.0	6.0	13.0	36.0

实验方案中, 设计了 2 种插管直径, 3 种插管强度和 3 个成桩龄期。实验方案见表 3, 各种实验方案的模型桩剖面如图 4。

表 3 实验方案

Table 3 Experimental programs								
实验方案	插管内径/mm	插管壁厚/mm	裸管锥尖阻力/MPa	分节长度/mm	水泥掺入比/%	水灰比	养护龄期/d	模型桩数量/根
I	32	1.35	0.63	1300	15	1 : 1	7	3
							3	3
							14	3
II	40	2.30	2.82	1300	15	1 : 1	3	3
							7	3
							14	3
III	40	1.55	0.45	400	5	3 : 1	3	3
				400	15	1 : 1	7	3
				500	10	1.5 : 1	14	3

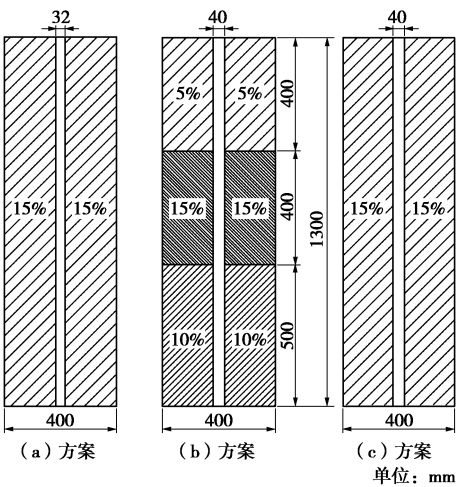


图 4 模型桩剖面图

Fig. 4 Vertical section of model pile

(2) 实验步骤

模型桩制作: 模型桩制作过程在实验池中完成。图 5 (a), (b) 分别为实验装置示意图和实景图, 实验装置包括实验池、模型桩和车载静力触探系统。模具安装在实验池中, 如图 6 (a), 根据分层厚度向模具内倒入扰动软土和水泥浆, 使用搅拌器直接在模具内搅拌均匀, 如图 6 (b), 每层取样制作圆形无侧限抗压强度检测试件 6 枚, 试件直径 7 cm, 高 12 cm。模型桩制作分层厚度 20~30 cm。模具填满后, 在模型桩中心插入端部封闭的插管至桩底, 如图 6 (c), 刮平端面, 覆盖塑膜养护。

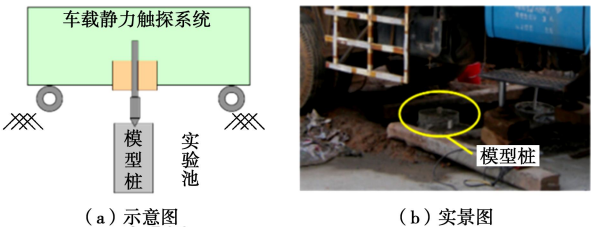


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental facility

静力触探与无侧限抗压强度实验: 待模型桩养护

至规定龄期后, 解除模具外敷约束, 进行静力触探贯入测试, 如图 6 (d) 和 6 (e)。探头直径为 43.7 mm, 贯入速度为 2 cm/s, 同时记录锥尖阻力和侧壁阻力。本实验采用宁波轻工机械制造有限公司制造的 NKC5081TCT 车载静力触探系统。同期进行试件无侧限抗压强度测试, 采用南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪进行。

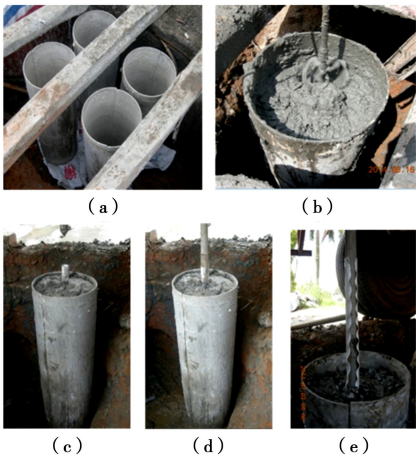


图 6 模型桩制作与检测

Fig. 6 Construction and testing of model pile

1.2 有限元模拟

基于模型桩实验, 利用数值模拟建立三维几何模型, 包括 3 部分: 探头、PVC 插管和桩体。数值模型中, 水泥搅拌桩体及 PVC 插管, 其本构模型采用莫尔库仑弹塑性模型, 材料参数设置列入表 4, 水泥搅拌桩桩体的强度参数来自模型桩实验, 弹性模量参照规范<sup>[17]</sup>确定, PVC 插管参数设置参照文献<sup>[18]</sup>确定。PVC 插管及桩体在探头贯入过程中发生大变形, 模拟过程中不计探头自身变形, 假设为绝对刚体<sup>[19]</sup>, 探头直径为 43.7 mm。

表 4 模型参数设置

Table 4 Model parameters						
方案	直径/mm	$\nu$	内摩擦角/(°)	龄期/d	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa
桩体	400	0.1	21.7	7	124	124
				14	213	213
				2000	124	124
插管	32~40	0.47	20	—	2800~3400	2800~3400

模拟过程采用两个分析步, 第一步用来进行地应力平衡。第二步用来计算探杆贯入, 采用显式动态分析, 定义分析步时间为 75 s, 开启大变形, 贯入深度为 1.5 m, 贯入速率为 2 cm/s, 计算时开启大变形<sup>[13]</sup>。

本模型中 PVC 插管与水泥搅拌桩体具有相同的自由度, 其网络划分不一致但变形连续, 采用绑定约束。探杆与 PVC 插管和桩体之间采用通用接触, 法向



采用硬接触模型，即只有在两物体压紧时才能传递法向压力，两物体之间有间隙时不传递法向压力。切向采用摩擦模型，当接触面处于闭合状态（即有法向接触压力）时，接触面可以传递切向应力<sup>[20]</sup>，设置其摩擦系数为 0.15。

参照 Endra<sup>[21]</sup>结果，当土体元素尺寸小于或等于探头直径的 0.2 倍时，模拟结果更加精确。本模型网格划分时，桩体中心附近网格加密。网格尺寸由内侧 0.01 线性过渡至外侧 0.03，既提高运算准确性，同时也减少运算量。探杆及插管网格划分尺寸恒定为 0.03，模型网格划分如图 7 所示。

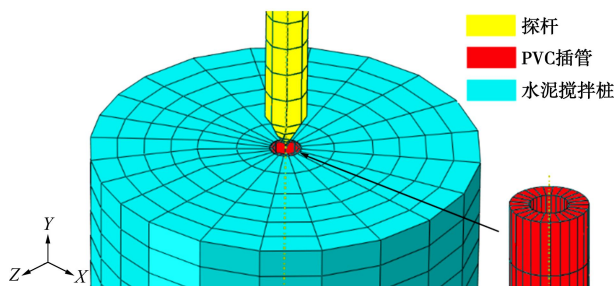


图 7 模型网格划分

Fig. 7 Finite element mesh of model

图 8 为利用数值模拟建立的模型而得出的探头贯入桩体内部时等效塑性应变分布云图，最大值为红色  $14.01 \times 10^{-3} \epsilon$ ，渐变为蓝色最小值  $2.22 \times 10^{-16} \epsilon$ ，可视为 0。探头直径为 43.7 mm，插管内径 30 mm。

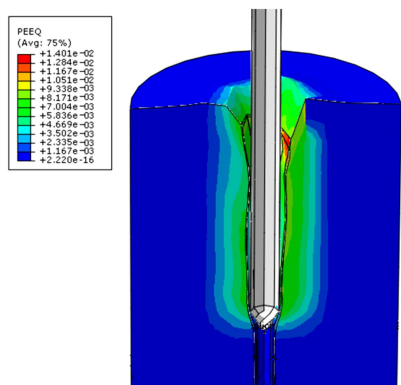


图 8 等效塑性应变等值线云图

Fig. 8 Equivalent plastic zones

2 模型桩预置管法静力触探实验结果

2.1 插管直径对锥尖阻力的影响

比较实验 I 和实验 III 的结果。

图 9 为实验 I 试件的锥尖阻力和无侧限抗压强度沿桩身分布图，插管直径 32 mm，管壁厚度 1.35 mm，裸管锥尖阻力 0.63 MPa。

图 9 显示，锥尖阻力和无侧限抗压强度随深度变

化趋势不相同，静探检测过程无明显异常。探头刺穿插管偏出后将插管挤扁并形成拖曳。由于插管强度较低，7 天龄期桩体强度相对较高，探头偏出后锥尖阻力几乎没有减小的趋势。

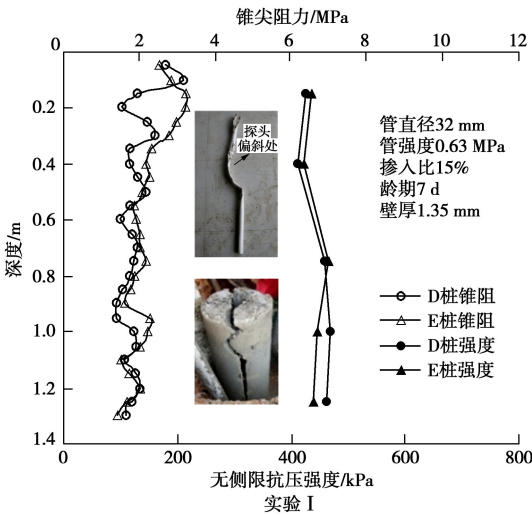


图 9 插管直径 32 mm 试件锥尖阻力与无侧限强度分布

Fig. 9 Variation of cone tip resistance and unconfined compressive strength with depth (tube diameter of 32 mm)

图 10 为实验 III 试件的锥尖阻力和无侧限抗压强度随深度分布图，插管直径 40 mm，强度 0.45 MPa，管壁厚度 1.55 mm。

图 10 显示，插管直径 40 mm 试件的锥尖阻力随龄期、掺入比变化的趋势表现为随龄期和掺入比增大而相应增大，变化趋势相同，保持了和无侧限抗压强度相同的规律，显示了插管的适宜性。试件完成实验后也有桩体开裂现象，但明显小于直径 32 mm 插管的情况，探头也未刺穿插管，试件实验数据全部有效。

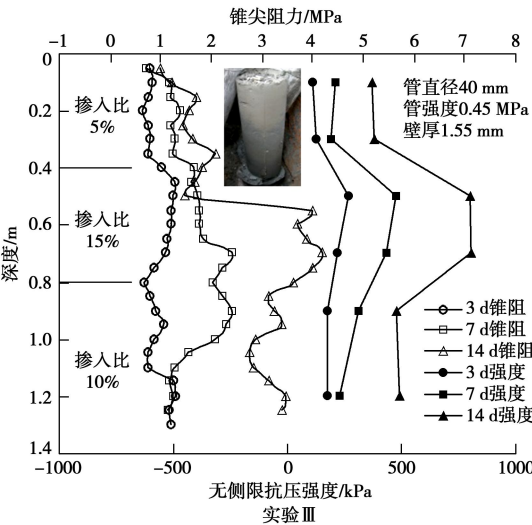


图 10 插管直径 40 mm 试件锥尖阻力与无侧限强度分布

Fig. 10 Variation of cone tip resistance and unconfined compressive strength with depth (tube diameter of 40 mm)

综上, 直径 32 mm 插管的试件贯入实验后桩体开裂严重, 不能保证探头的贯入轨迹, 无论插管强度高, 均不能获得连续的有效检测数据。直径 40 mm 插管的试件表现出了相对稳定的检测结果。

2.2 插管强度对锥尖阻力的影响

比较实验 II 和实验 III 的结果。  
图 11 为实验 II 试件的锥尖阻力与龄期的关系曲线, 插管锥尖阻力 2.82 MPa, 直径 40 mm, 管壁厚度 2.3 mm。

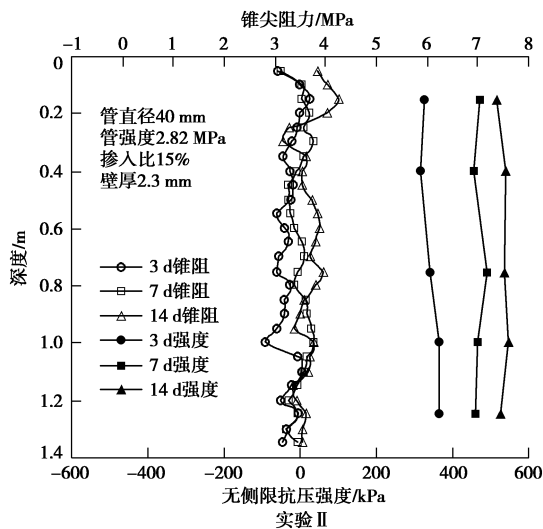


图 11 插管阻力 2.82 MPa 试件锥尖阻力与龄期关系  
Fig. 11 Variation of cone tip resistance with age (tube resistance of 2.82 MPa)

图 11 显示, 锥尖阻力随龄期的变化趋势不明显, 三个龄期的锥尖阻力值差别很小, 而试件的无侧限抗压强度则随龄期增长而增大。

图 11 中试件的插管直径与图 10 中相同, 但图 10 中桩体的锥尖阻力确明显反映出桩体强度的变化, 两图分别代表的两个实验的区别在于, 图 11 代表的实验 II 中试件的插管强度 2.82 MPa 和插管壁厚 2.3 mm, 大于图 10 代表的实验 III 中的插管强度 0.45 MPa 和插管壁厚 1.55 mm。

试件插管强度高, 裸管锥尖阻力大, 在桩体约束环境中可以承担更高的贯入阻力, 而桩体的自身强度影响所占比例过低, 在探头贯入过程中, 桩体强度特征在探头贯入锥尖阻力中难以显著体现。插管强度低, 裸管锥尖阻力小, 与之相比桩体的自身强度影响所占比例大, 因此在探头贯入中锥尖阻力能够明显反映出桩体强度的变化。

试件插管的壁厚影响探头贯入过程中扩孔效应对桩体的影响范围, 如图 12, 探头锥尖直径相同, 插管内径一致, 插管壁厚越大, 探头贯入过程中产生扩孔效应所影响到的桩体范围的厚度越小, 因此, 探头贯

入锥尖阻力所包含的桩体强度特征信息越少。

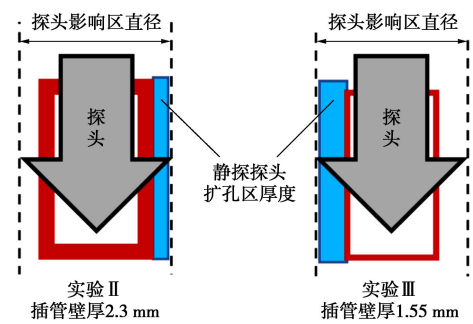


图 12 探头扩孔影响区厚度示意图  
Fig. 12 Thicknesses of influenced area with cone penetration

综上, 预置插管强度和管壁厚度影响探头贯入的锥尖阻力, 插管强度过大会掩盖桩身强度特征, 插管壁厚越大会减少探头挤扩桩体的径向范围, 降低桩体强度的反应程度。由此, 在满足插管需要的条件下, 低强度薄壁插管能更清晰地反映桩体强度的特征。

3 模型桩预置管法静力触探数值模拟

3.1 等效塑性应变与插管直径的关系

等效塑性应变作为材料屈服破坏的一种表征, 可以用来描述材料塑性应变累积的作用<sup>[22]</sup>, 其定义为

$$\bar{\epsilon}_p = \sum \Delta \bar{\epsilon}_p \quad , \quad (1)$$

$$\Delta \bar{\epsilon}_p = \sqrt{(\Delta \epsilon_p)^T (\Delta \epsilon_p)} \quad , \quad (2)$$

其中,  $\bar{\epsilon}_p$  为等效塑性应变,  $\Delta \epsilon_p$  为变形过程中塑性应变的增量,  $\Delta \bar{\epsilon}_p$  为变形过程中等效塑性应变的增量。

等效塑性应变还可以用来确定材料屈服面位置, 文献[22]中采用等效塑性应变达到 90  $\mu\epsilon$  作为混凝土开裂破坏的临界值, 本文根据模型桩实验结果确定桩体发生塑性破坏的判别指标。由模型结果, 实验桩由于探头贯入桩身产生裂缝, 桩体损坏, 模拟得出桩心最外侧等效塑性应变最小值为 60  $\mu\epsilon$ , 考虑到结果安全性, 本文采用等效塑性应变值 60  $\mu\epsilon$  作为桩体破坏的临界值。

改变插管直径, 分别建立相应模型, 计算探头贯入后桩体等效塑性应变的分布, 特征点应变如表 5。

表 5 模拟结果					
Table 5 Results of simulation					
弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	点距桩心/mm	插管内径/mm	最大等效塑性应变/ $10^{-3}\epsilon$
3200	0.47	20	60	32	9.17
				34	7.92
				36	6.80
				38	5.61
				40	4.48

图 13 为不同直径插管的桩体等效塑性应变随深度的变化情况, 等效塑性应变与插管直径的关系总体表现为直径越大, 应变越小。同一插管下, 桩体等效塑性应变随深度的变化不显著, 在模型桩两端因端部几何条件变化而产生的显著变化, 不具有代表性。由此, 插管直径越大, 越有利于控制桩体的损坏, 这与模型桩实验结果相吻合, 即插管直径 40 mm 时模型桩在探头贯入后的开裂程度小于插管直径 32 mm 的情况。

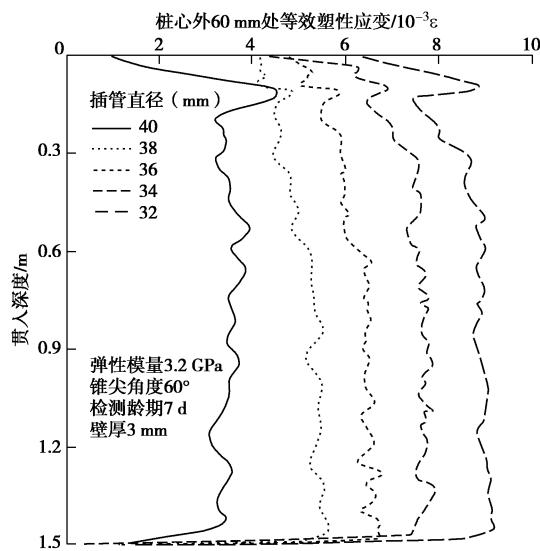


图 13 等效塑性应变与插管直径的关系

Fig. 13 Relationship between equivalent plastic strain and diameter of tube

3.2 等效塑性应变与插管强度的关系

改变预置插管的弹性模量和黏聚力指标, 计算插管强度对桩体等效塑性应变的影响, 数值模型采用的条件参数列入表 6。

表 6 插管参数设置

Table 6 Parameters of tube

直径 /mm	泊松 比	内摩擦 角/(°)	工况 编号	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa
40	0.47	20	①	2800	2800
			②	3000	3000
			③	3200	3200
			④	3400	3400

图 14 为插管壁厚 3 mm 时桩体等效塑性应变与插管强度的关系。图 14 显示, 不同插管强度下桩体等效塑性应变的值变化幅度小于  $10^{-3}$ , 可以认为, 探头贯入插管时, 插管强度对桩体等效塑性应变无显著影响。

在模型桩实验中, 图 11 实验 II 中采用强度高的插管检测到的桩体强度信息少, 说明探头贯入对桩体的影响小。而图 14 显示的数值模拟结果为, 插管强度对桩体等效塑性应变无显著影响。由此, 两个研究结论

是矛盾的。

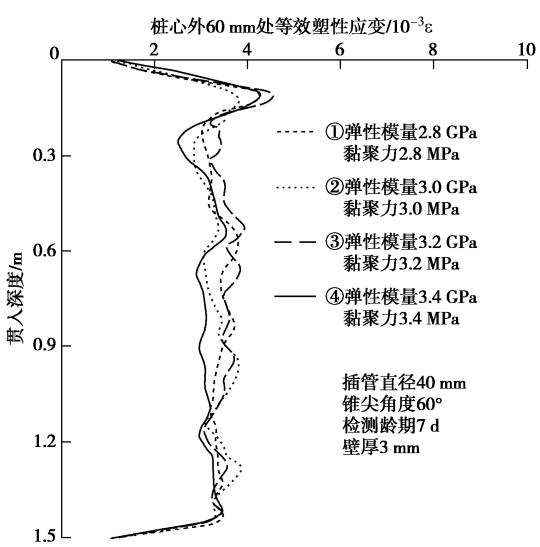


图 14 等效塑性应变与插管强度的关系 (插管厚度 3 mm)  
Fig. 14 Relationship between equivalent plastic strain and strength of tube (with thickness of 3 mm)

图 15 为两种壁厚的插管对应的桩体等效塑性应变的分布情况, 其他条件相同, 插管的强度 3.2 MPa, 内径 40 mm, 贯入锥尖角度  $60^{\circ}$ , 桩体龄期 7 d。图 15 显示, 壁厚 1 mm 插管对应的桩体等效塑性应变大于壁厚 3 mm 的情况, 即壁厚大的插管影响小。

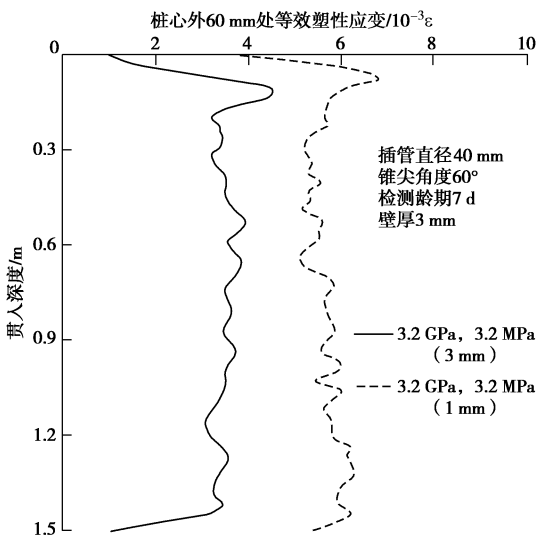


图 15 插管不同壁厚条件下桩体的等效塑性应变比较  
Fig. 15 Comparison of equivalent plastic strains of pile under different thicknesses of PVC tube

在模型桩实验中, 难以实现插管强度相同而壁厚不同的工况实验, 一般是插管的强度和壁厚对应, 高强度插管实际上也是壁厚大的插管。由此, 模型实验中插管强度高的工况探头贯入对桩体的影响特征, 也是插管壁厚大的工况的结果。由此, 从插管壁厚方面考虑, 数值模拟的结果与模型桩实验结果是一致的。

较大的壁厚吸收了探头挤扩桩体的变形的一部分, 由此产生较小的塑性应变。

综上, 静力触探探头贯入模型桩预置插管, 引起的桩体等效塑性应变与插管的强度无显著相关性, 与插管的管壁厚度负相关。

3.3 等效塑性应变与锥尖角度及桩体龄期的关系

改变探头锥尖角度 ( $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ )、桩体检测龄期 (7, 14 d) 建立同系列模型, 龄期通过桩体强度指标体现。图 16 为桩体等效塑性应变与探头锥尖角度及桩体龄期的关系。

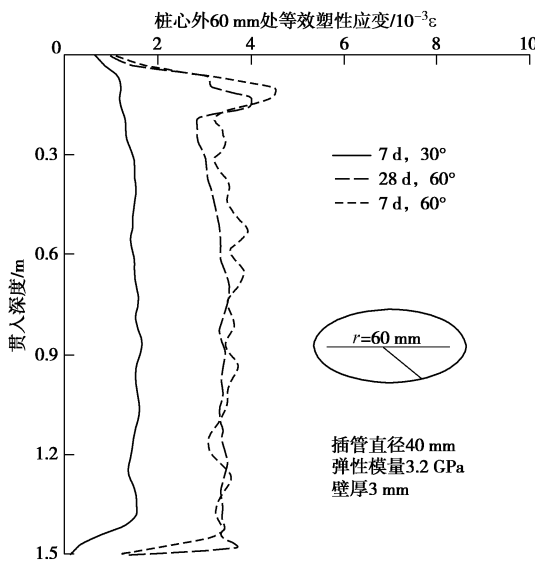


图 16 等效塑性应变与锥尖角度及桩体强度关系图

Fig. 16 Relationship among equivalent plastic strain, angle of cone and strength of cement mixing pile

图 16 显示, 在水泥搅拌桩距桩心 60 mm 的柱面上, 探头贯入桩体产生的等效塑性应变, 锥尖角度  $60^{\circ}$  的值大于  $30^{\circ}$  的值, 桩体龄期 28 d 的值略小于 7 d 的值。

图 17 为桩体等效塑性应变与龄期的关系。图 17 显示, 在探头贯入深度 0.5 m 处的桩体横截面上, 桩体的等效塑性应变随到桩心距离增大而衰减, 龄期 28 d 的值衰减速率略大于 7 d 的值。桩体龄期长对应的强度高, 探头周围近距离的区域桩体的塑性应变大, 导致远离区域应变相对小, 总体影响范围相对小。由此, 图 17 显示的指标变化趋势和图 16 具有一致性。

综上, 静力触探探头贯入模型桩预置插管, 引起的桩体等效塑性应变与探头锥尖的角度显著正相关, 引起的塑性区范围与桩体的龄期有关, 桩体龄期长的强度高, 塑性区范围相对小。

3.4 桩体损伤范围与插管直径的关系

建立不同直径插管的桩体数值模型, 材料参数为龄期 7 d, 锥尖角度  $60^{\circ}$ , 插管弹性模量 3.2 GPa, 壁

厚 3 mm, 计算探头贯入插管后桩体等效塑性应变, 以大于  $60 \mu\epsilon$  为标准, 确定损伤区范围。图 18 为插管直径为 40 mm 模型的桩体内不同柱面上的等效塑性应变分布形式。

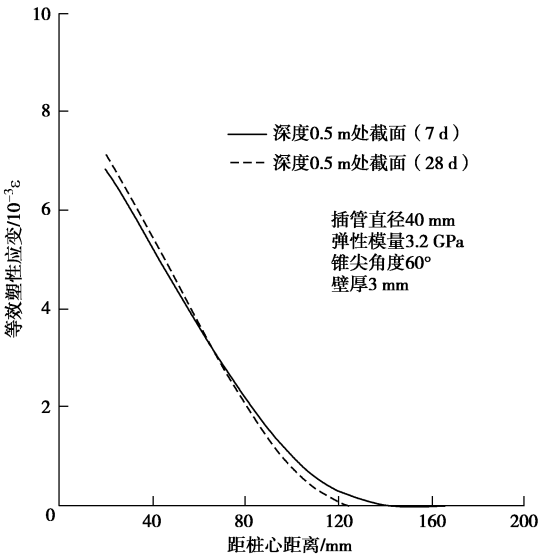


图 17 不同龄期桩体的等效塑性应变与距桩心距离的关系

Fig. 17 Relationship between equivalent plastic strain at different ages and distance from center of cement mixing pile

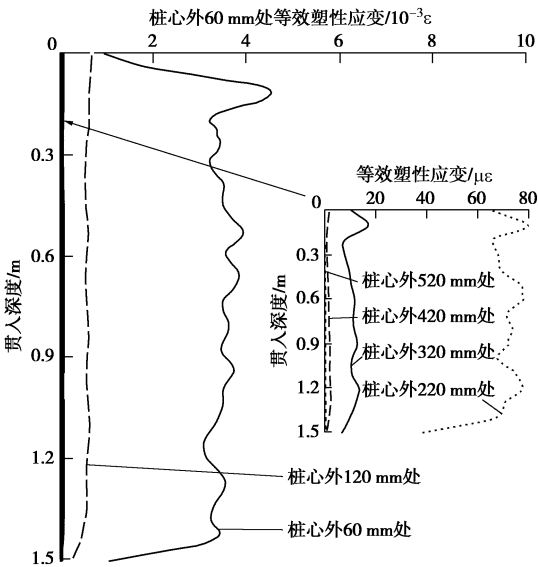


图 18 桩心外不同柱面上桩体等效塑性应变与深度的关系

Fig. 18 Relationship between equivalent plastic strain with different distances from center of pile and depth of penetration

图 18 显示, 桩心外 220 mm 处柱面上的等效塑性应变值近似为  $60 \mu\epsilon$ , 在 220~520 mm 区间内各柱面上的应变值近似为零。图 19 为依据  $60 \mu\epsilon$  标准确定的损伤区界线到桩心距离与插管直径的关系。

图 19 显示, 在深度 0.5, 1.0 m 处桩体横截面上, 等效塑性应变大于  $60 \mu\epsilon$  的点到桩心的距离, 随插管

直径增大而减小,即损伤区范围缩小,这两个截面上的损伤区范围近似相同,说明桩体损伤区界线自上而下的分布形状近似为一个柱面。以柱面上等效塑性应变最大值小于  $60\ \mu\epsilon$  为标准确定柱面的位置,如图 19 中曲线(3),以此柱面作为桩体损伤区边界,则边界以外桩体不存在损伤区。

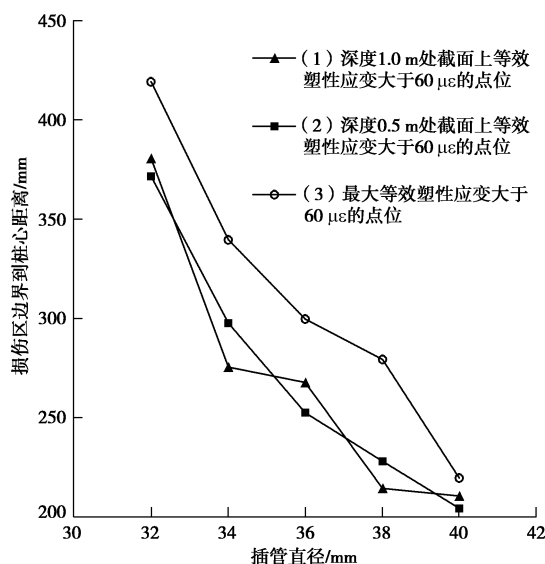


图 19 桩体受影响范围与插管直径的关系

Fig. 19 Relationship between scope of pile influenced and diameter of PVC tube

综上,给定模型下的桩体损伤区近似为圆柱面,最大半径随插管直径增大近似为双曲线趋势衰减,直径 40 mm 插管对应的损伤区半径约为 230 mm。

## 4 结 论

(1) 预置插管尺寸影响静力触探贯入轨迹。模型桩实验表明,水泥搅拌桩检测备用插管直径过小会导致探头贯入后桩体开裂严重,探头偏离预定轨迹至斜出桩体,无法获得连续的有效检测数据。

(2) 预置插管强度和管壁厚度影响检测精度。模型桩实验表明,插管强度过大会掩盖桩身强度特征,壁厚过大会减少探头挤扩桩体的径向范围,降低桩体强度的反应程度。在满足插管需要的条件下,低强度薄壁插管能更清晰地反映桩体强度的特征。

(3) 静力触探贯入插管损伤桩体的程度与插管尺寸有关与贯入深度无关。静力触探贯入引起的桩体等效塑性应变与插管的直径大小负相关,与探头贯入深度无显著相关性。

(4) 静力触探贯入插管损伤桩体的程度与插管强度无关与管壁厚度有关。静力触探探头贯入引起的桩体等效塑性应变与插管的强度无显著相关性,与插管的管壁厚度负相关。

(5) 静力触探贯入插管损伤桩体的程度与桩体强度有关。静力触探探头贯入引起的桩体塑性区范围与桩体的龄期有关,桩体龄期长的强度高,损伤区范围相对小。

(6) 静力触探贯入插管损伤桩体的范围与插管尺寸有关。桩体损伤区近似为圆柱面,最大半径随插管直径增大近似为双曲线趋势衰减。现场检测时,依据数值模拟预先确定满足有效检测的插管尺寸范围,由现场试验选择工程检测用插管的尺寸,达到控制被检测桩体损伤和保证桩体完整性的目标。

## 参考文献:

- [1] 李国维,姜微,吴玉财,等. 预置管法静力触探检测水泥搅拌桩现场试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1289 - 1296. (LI Guo-wei, JIANG Wei, WU Yu-cai, et al. Field tests on detecting cement mixing piles by static cone penetration tests in reserved hole[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1289 - 1296. (in Chinese))
- [2] KERISEL J. Foundations profondes[J]. Ann ITBTP, 1962, 179(3): 32 - 43.
- [3] MO P Q, MARSHALL A M, YU H S. Centrifuge modelling of cone penetration tests in layered soils[J]. Géotechnique, 2015, 65(6): 468 - 481.
- [4] 郑亚坤,李国维,贺冠军. 内置插管静力触探检测水泥搅拌桩试验研究[J]. 河南科学, 2015, 33(4): 592 - 596. (ZHENG Ya-kun, LI Guo-wei, HE Guan-jun. Experimental research on detecting cement mixed piles with built-in pipe by static cone penetration tests[J]. Henan Science, 2015, 33(4): 592 - 596. (in Chinese))
- [5] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1972, 98: 265 - 290.
- [6] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. The effects of pore water pressures on the ultimate bearing capacity of driven piles[C]// Proceedings of 2nd South East Asian Regional Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo, 1970: 385 - 394.
- [7] LADANYI B, JOHNSTON G H. Behavior of circular footings and plate anchors embedded in permafrost[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4): 531-553.
- [8] CHEN J W, JUANG C H. Determination of drained friction angle of sands from CPT[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 374 - 381.
- [9] DURGUNOGLU H T, MITCHELL J K. Static penetration resistance of soils. I-II[C]// Proceedings of the ASCE Spec Conference on In Situ Measurement of Soil Properties. New



- York, 1975: 51 - 89.
- [10] HOULSBY G T, WROTH C P. Determination of undrained strengths by cone penetration tests[C]// Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. 1982: 585 - 90.
- [11] SOKOLOVSKII V V. Statics of granular media[M]. New York: Pergamon Press, 1965.
- [12] BALIGH M M. Strain path method[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1985, **111**(9): 1108 - 1136.
- [13] DE Borst R, VERMEER P A. Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis[J]. Géotechnique, 1984, **34**(2): 199 - 210.
- [14] WALKER J, YU H S. Adaptive finite element analysis of cone penetration in clay[J]. Acta Geotech, 2004, **1**: 43 - 57.
- [15] 周 健, 崔积弘, 贾敏才, 等. 静力触探试验的离散元数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1604 - 1610. (ZHOU Jian, CUI Ji-hong, JIA Min-cai, et al. Numerical simulation of cone penetration test by discrete element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1604 - 1610. (in Chinese))
- [16] 耿功巧, 蔡国军, 段伟宏, 等. 基于大变形有限元的 CPTU 尺寸效应与贯入速率研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 89 - 93. (GENG Gong-qiao, CAI Guo-jun, DUAN Wei-hong, et al. Size effect and penetration rate of CPTU based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 89 - 93. (in Chinese))
- [17] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 金 伟, 刘山生. PVC-U 型材弹性模量测试偏差分析[J]. 中国塑料, 2006, **20**(7): 81 - 85. (JIN Wei, LIU Shan-sheng. Testing deviation analysis of flexile modulus of PVC-U profiles[J]. China Plastics, 2006, **20**(7): 81 - 85. (in Chinese))
- [19] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [20] 费 康, 彭 劼. ABAQUS 岩土工程实例讲解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017. (FEI Kang, PENG Jie. Explanation of examples of geotechnical engineering using ABAQUS[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2017. (in Chinese))
- [21] ENDRA S. Finite element simulation of the cone penetration test in uniform and stratified sand[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2005.
- [22] 顾嘉丰, 任青文. 水工混凝土弥散型裂缝数值模型中开裂判据的研究[J]. 工程力学, 2015, **32**(6): 84 - 91. (GU Jia-feng, REN Qing-wen. Study on hydraulic concrete cracking criterion in smeared crack numerical model[J]. Engineering Mechanics, 2015, **32**(6): 84 - 91. (in Chinese))