

# 塑料套管混凝土桩挤土效应的非侵入可视化研究

齐昌广<sup>1</sup>, 左殿军<sup>2</sup>, 刘干斌<sup>1</sup>, 郑荣跃<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 岩土工程研究中心, 天津 300456)

**摘要:** 结合透明土、粒子图像测速(PIV)和近景摄影测量3种技术, 研究塑料套管混凝土桩(TC桩)的挤土效应, 并对周围土体的变形规律进行探讨, 且与传统静压桩打设引起的土体变形进行对比。试验结果表明: 圆锥桩尖引起的最大变形量相比平底桩尖的降低了40%; 而在平底桩尖TC桩的成桩过程中, 影响区域扩展到了远离桩体中心线11倍桩径处, 而对于圆锥桩尖, 则为6倍桩径; 沉管上拔引起的土体移动主要发生在上拔前期, 对于圆锥桩尖TC桩, 其沉管上拔过程引起的最大位移量和影响区域分别约为平底桩尖的57%和33%, 然而, 在TC桩成桩过程中, 沉管打设是引起土体变形的主导因素, 沉管上拔引起的土体恢复变形较小; 在与TC桩沉管直径相同条件下, 传统静压桩打设引起的土体变形量与TC桩的相一致, 然而其影响区域略小。

**关键词:** 桩基工程; 塑料套管混凝土桩; 透明土; 非侵入可视化; 挤土效应; 粒子图像测速(PIV)

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2017)09 - 2333 - 08

## Non-intrusively visualization on squeezing effect of plastic tube cast-in-place concrete piles

QI Changguang<sup>1</sup>, ZUO Dianjun<sup>2</sup>, LIU Ganbin<sup>1</sup>, ZHENG Rongyue<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Geotechnical Engineering Research Centre, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The squeezing effect of plastic tube cast-in-place concrete piles(TC pile) was investigated by combining with three technologies of transparent soil, particle image velocimetry(PIV) and close-range photogrammetry. The soil deformations caused by TC pile installation were explored and compared with those induced by conventionally jacked pile. The test results show that the maximum displacement caused by casing jacking for expanded-conical-base pile is decreased by 40% compared with that for expanded-flat-base pile. The affected zone extends as far as 11 times the radius of pile shaft at the surface in the case of the flat shoe, whereas in the case of the conical shoe, the affected zone up to 6 times the radius of pile shaft from the pile centerline. The soil movement caused by casing extraction occurs mainly in the early stage of extraction. The maximum displacement and affected zone caused by casing extraction for the conical base are about 57% and 33% of those for the flat base respectively. However, during the jacking of TC pile, the casing driving is the dominant factor causing the soil deformation, while the recovery of soil deformation caused by casing extraction is small. The displacements generated by jacking a conventional pile with the same diameter is consistent with those induced by TC pile installation, but its affected zone is slightly smaller.

**收稿日期:** 2016 - 07 - 21; **修回日期:** 2016 - 08 - 16

**基金项目:** 宁波市自然科学基金资助项目(2017A610317); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS160101, TKS160109)

Supported by the Natural Science Foundation of Ningbo(Grant No. 2017A610317) and Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Public Research Institutes(Grant Nos. TKS160101 and TKS160109)

**作者简介:** 齐昌广(1986 -), 男, 2014年于河海大学岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事基础工程、地基处理、透明土和岩土物理模拟试验等方面的教学与研究工作。E-mail: qichanguang@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0935

**Key words:** pile foundation; plastic tube cast-in-place concrete pile; transparent soil; non-intrusive visualization; squeezing effect; particle image velocimetry(PIV)

# 1 引言

为适应我国软土地区车辆流动性逐步扩大的需求，公路建设得到了迅猛发展，一种可以控制公路沉降的桩型——塑料套管混凝土桩(简称 TC 桩)，得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。TC 桩是由预先打设在地基中的塑料套管内浇注混凝土组成的，桩身塑料套管的直径一般为 0.16 m，其尾部是一个扩大的预制桩尖，直径为 0.3 m，桩体长度在 12~20 m 范围，TC 桩的特殊构造决定了其特殊的成桩过程，图 1 展示了 TC 桩的构造及其成桩过程<sup>[4]</sup>。

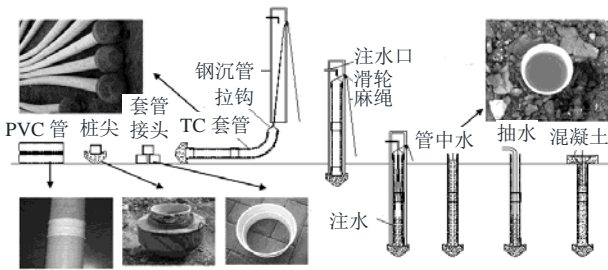


图 1 TC 桩的成桩过程<sup>[4]</sup>  
Fig.1 Process of TC pile installation<sup>[4]</sup>

从图 1 可以看出，TC 桩的成桩过程分为沉管打设和上拔 2 个部分，在沉管打设过程中，桩身和桩周土之间形成了一个间隙，而在传统桩体施工中，没有该种间隙的存在。然而，在沉管上拔过程中，周围土体则会逐步填补该间隙，该种间隙的形成和填补对 TC 桩的侧摩阻力造成一定的损失。现场试验表明，TC 桩的极限承载力为 150~200 kN<sup>[5-6]</sup>，但是，关于 TC 桩成桩过程中沉管打设和上拔引起的周围内部土体的运动规律问题仍未解决。

当前，由于传统试验土体不透明性，导致无法在模型试验中连续观测到 TC 桩施工引起的周围内部土体的变形特性。随着透明土的出现，克服了上述难题，透明土的组成(透明的固体颗粒 + 折射率相匹配的孔隙溶液)如图 2<sup>[7]</sup>所示。

此外，S. Sadek 等<sup>[8]</sup>发展了一个非介入测量透明土内部变形的系统，并逐步形成了非侵入可视化模拟试验技术<sup>[9-10]</sup>。本文将借助该技术，利用数码相机近距离拍摄下透明土 - 结构物相互作用过程，并采用 D. White 等<sup>[11]</sup>发展的粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, 简称 PIV)软件“Geo-PIV”对图

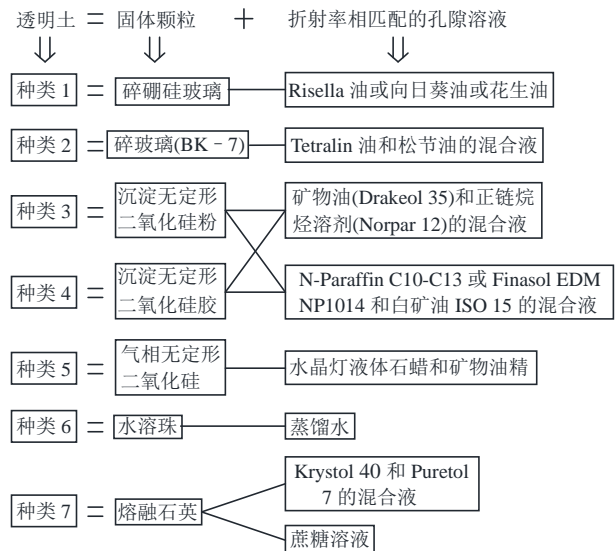


图 2 透明土的组成<sup>[7]</sup>  
Fig.2 Compositions of transparent soil<sup>[7]</sup>

像进行分析处理，从而获得 TC 桩成桩过程中沉管打设和上拔引起的周围内部土体的运动规律。

本研究的目的是利用透明土和数字图像处理所形成的非侵入可视化模拟试验技术，研究 TC 桩成桩过程中沉管打设和上拔引起的周围内部土体的运动规律及桩土相互作用问题，并对比研究了圆锥桩尖和平底桩尖对土体变形的影响，此外，还对比了 TC 桩与传统静压桩成桩过程中周围内部土体变形的差异。

## 2 非侵入可视化模拟试验

### 2.1 透明土的配置

试验中所采用的固体颗粒为熔融石英，折射率为 1.459，平均粒径  $d_{50}$  为 0.42 mm，而所采用的孔隙液体为 Kystol 40 和 Puretol 7 在 21 °C 的环境下按照质量比为 1 : 2.9 进行混合的溶液，二者的特性可参考齐昌广等<sup>[7, 12-13]</sup>。配置好的透明土模型如图 3 所示。



图 3 透过 51 mm 厚的透明土模型看到的图画  
Fig.3 Picture seen through 51 mm thick transparent soil model

### 2.2 TC 桩模型制作

模型桩的制作参照实际的 TC 桩进行比例缩放，根据 J. D. Murff<sup>[14]</sup>相似理论，模拟试验中的桩土相对刚度与原型中的要保持一致，因此，引入参数  $\pi_3$ ，其计算公式为

$$\pi_3 = \frac{\pi D l^2 k_s}{A_p E_p} \quad (1)$$

式中： $D$ ， $l$ ， $A_p$  和  $E_p$  分别为模型或原型桩体的直径、长度、截面积和弹性模量； $k_s$  为土体刚度。相似性的原理是指模拟试验中的  $\pi_3$  值要等于原型试验中的。引入比例系数  $m$ ，使得  $mD_{模型}=D_{原型}$ ， $mL_{模型}=L_{原型}$  和  $m(k_s/E_p)_{模型}=(k_s/E_p)_{原型}$ ，则式(1)的值可保持不变。

本次试验中通过采用低强度的塑材模拟原型 TC 桩和调整透明土的相对密度控制土体刚度，来满足式(1)的要求。模型桩采用 Garolite - 9 制作，其弹性模量为  $1.17 \times 10^4$  MPa，模型桩的长度为 175 mm，嵌入土体的长度为 65 mm，直径为 6.35 mm，对应的  $n$  值为 25，因此可模拟的原型 TC 桩的直径为 0.16 m，而模拟的原型嵌入深度仅为 1.8 m。此外，试验中制作了 2 种不同的形式的扩大桩尖，即平底桩尖和  $60^\circ$  的圆锥桩尖。扩大桩尖的直径均为 2 倍的桩身直径，即为 12.7 mm，记扩大桩尖的半径为  $R$ 。模型沉管采用的是外直径 12.7 mm、壁厚 1.6 mm 和长度 190 mm 的钢管。

### 2.3 试验装置和步骤

本次试验中采用的模型槽的尺寸为：长  $L_1=203$  mm、宽  $L_2=51$  mm、高  $H=114$  mm。试验设备如图 4 所示，75 mW 的 HeNe 激光器通过线发生器激光束转变为激光面，激光面投射在模型槽的中央位置，通过与透明土的散射作用形成散斑场。模型桩采用型号为 LACT12P - 12V - 5 线性制动器进行打设和沉管上拔，模型桩和沉管的轴线重合且位于散斑场中。试验中照片的采集使用可提供 2 400 万像素照片的尼康 D3200 进行拍摄。相机镜头轴线与散斑场垂直度的调节按照 Q. Ni 等<sup>[15]</sup>的方法进行。

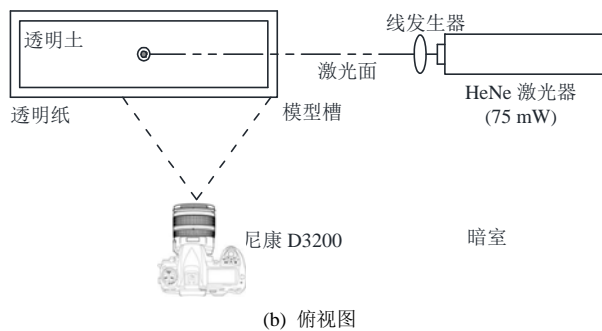


图 4 TC 桩成桩模拟的透明土试验装置

Fig.4 Apparatus of transparent test for simulation of TC pile installation

### 2.4 试验内容

本文总共进行了 5 次试验，试验信息如表 1 所示。试验 T1 和 T2 模拟 TC 桩的沉管打设和上拔过程，试验 T3~T5 是为了进行对比研究。试验过程采用位移控制的模式。模型桩体的一次静压量为 0.6~0.7 mm，并采用反馈电路来控制记录线性制动装置的移动，每静压一次就采用相机记录下当前的图像。TC 桩的沉管打设和上拔的 2 个过程中分别各记录了大约 70 张图片。

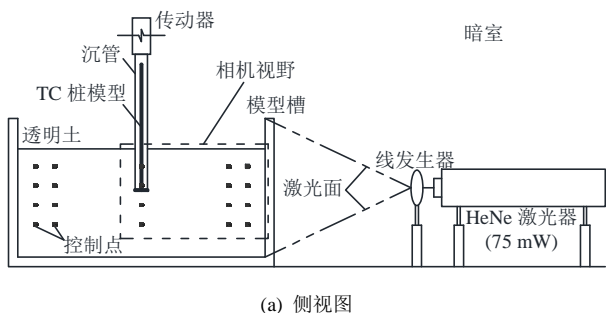
表 1 成桩模拟的透明土模型试验汇总

Table 1 Summary of transparent soil model tests for installation simulation of pile

试验编号	桩尖类型	沉管打设	沉管打设深度	桩体的深度	试样的相对密度/%	桩身半径/mm	桩尖半径/mm	相机拍摄距离/mm
T1 - EF-C	扩大平底	是	6.6R	6.75R	70	3.175	6.35	275
T2 - EC-C	扩大圆锥	是	6.0R	7.7R	68	3.175	6.35	275
T3 - C	圆锥	否	-	7.7R	58	3.175	3.175	275
T4 - F	平底	否	-	6.75R	60	3.175	6.35	275
T5 - C	圆锥	否	-	7.7R	64	6.35	6.35	275

### 2.5 数字图像处理办法

本试验中的数字图像处理方法是粒子图像测速 (PIV)，它是借助 D. White 等<sup>[11]</sup>研发的 Geo-PIV 实现的。本试验同步结合 Geo-PIV 和近景摄影技术对 TC 桩沉管打设和上拔过程中引起的土体变形进行了捕捉和拍摄，通过 Geo-PIV 分析图像得到土体变形的运动规律。在进行 Geo-PIV 计算前，需对关心区域划分成网格状的审讯窗口，如图 5 所示，单位审讯窗口的大小为 64 Pixel×64 Pixel，图 5 中关心区域内划分的审讯窗口共有 2 624 个。



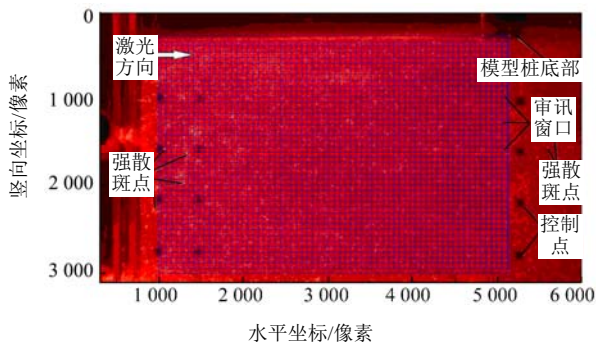


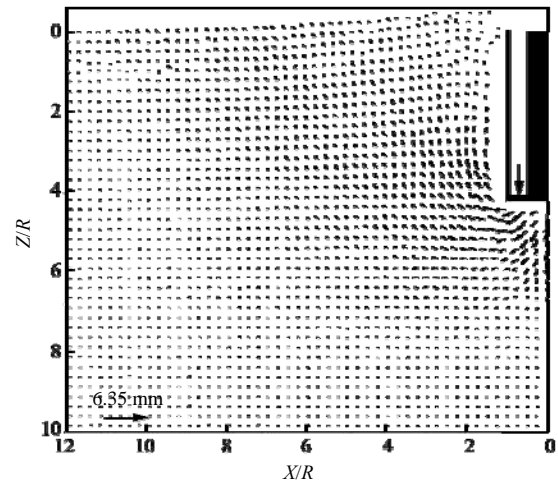
图5 PIV 审讯窗口的典型网格划分

Fig.5 Typical mesh generation of PIV interrogation windows

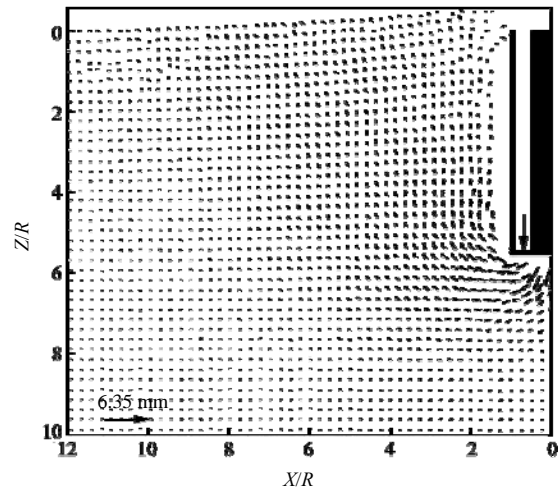
### 3 试验结果分析

#### 3.1 沉管静压引起的位移增量和累积量

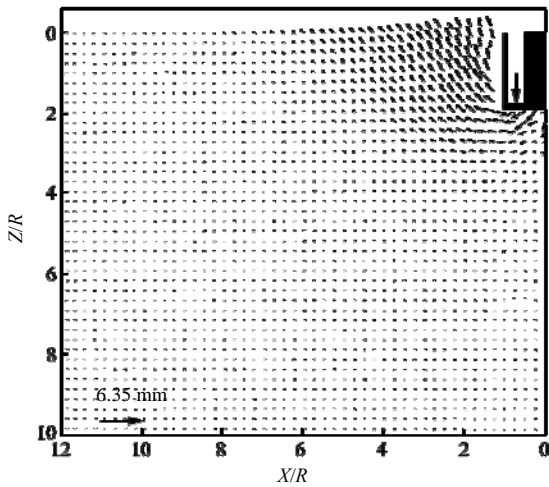
扩大平底桩尖的 TC 桩在沉管静压下引起的不同阶段的土体位移向量的增量和累积量分别如图 6, 7 所示。图中左下角所示的示例向量的大小等于沉管半径( $R = 6.35 \text{ mm}$ )。整个关心区域通过除以沉管半径  $R$  进行了归一化处理。在沉管静压初始阶段, 沉管附近处的土体单元表现出偏离沉管并向上移动



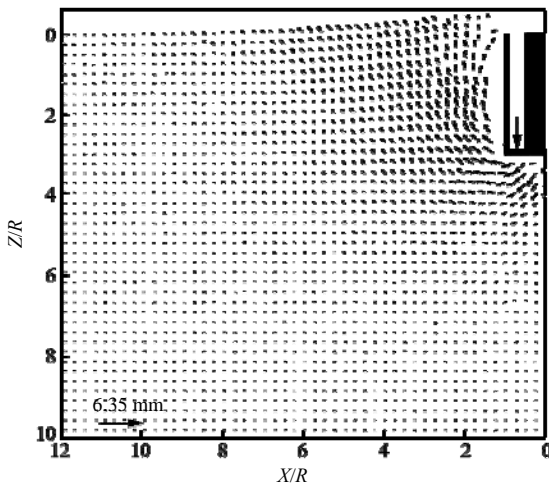
(c) 从 2.85R 打设至 4.1R



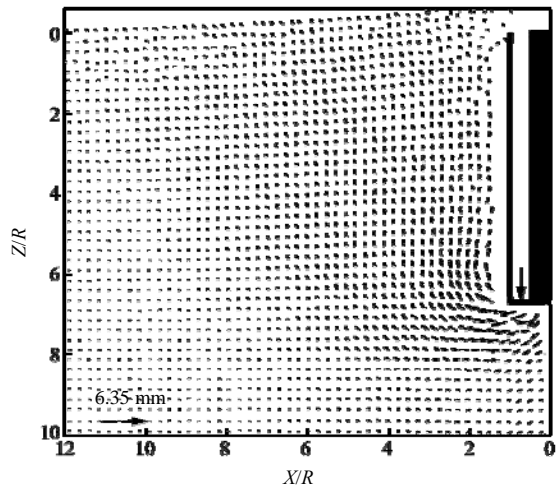
(d) 从 4.1R 打设至 5.35R



(a) 从 0.75R 打设至 1.75R



(b) 从 1.75R 打设至 2.85R



(e) 从 5.35R 打设至 6.6R

图 6 试验 T1 - EF-C 中沉管打设引起的位移向量增量

Fig.6 Incremental displacement vectors as casing is jacked

的趋势; 随着沉管静压深度的增加, 该种趋势变为向上移动, 但静压对表面隆起的影响逐步减弱, 相反地, 水平向的移动却增强; 桩尖下的土体单元在各阶段均呈现出向下移动的趋势, 与经典的一般承载力破坏相似。



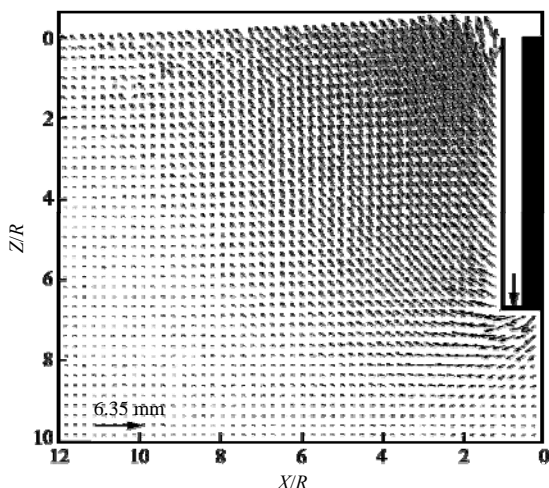


图 7 试验 T1 - EF-C 中沉管从  $-0.15R$  打设至  $6.6R$  引起的位移向量累积量

Fig.7 Cumulative displacement vectors as casing is jacked from  $-0.15R$  to  $6.6R$  for test T1 - EF-C

扩大圆锥桩尖的 TC 桩的沉管静压引起的土体单元的累积位移如图 8 所示。结合图 7 和 8，在挤土量接近相同的情况下，可以看出：在桩周处，平底桩尖 TC 桩的静压引起的土体位移相比圆锥桩尖的要大很多；在桩尖处，平底桩尖引起的土体单元的位移量远大于圆锥桩尖的。图 7 和 8 所示位移场的进一步对比揭示：圆锥桩尖处的向下位移量相比扩大平底桩尖在很大程度上得到了缓解；与平底桩尖相比，圆锥桩尖 TC 桩的沉管打设引起的水平向总体位移较低，进一步表明圆锥状的桩尖可减小桩体的静压过程对周围土体的扰动。

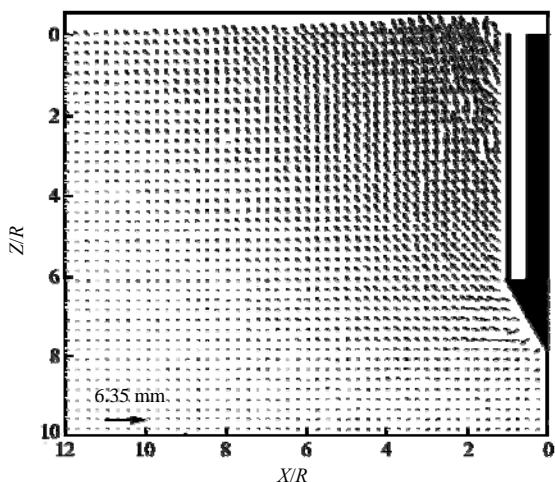
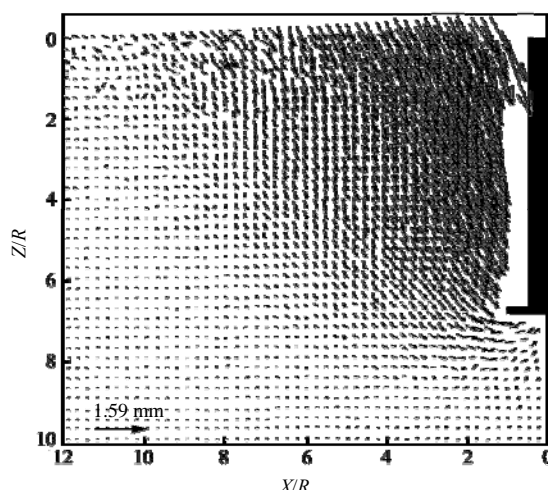


图 8 试验 T2 - EC-C 中沉管从  $-1.75R$  打设至  $6.0R$  引起的位移向量累积量

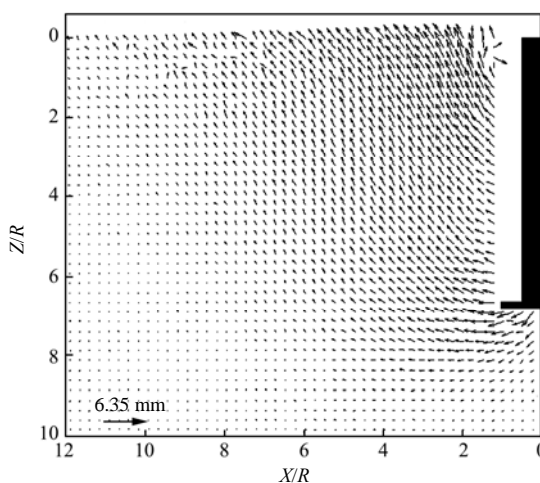
Fig.8 Cumulative displacement vectors caused as casing is jacked from  $-1.75R$  to  $6.0R$  for test T2 - EC-C

### 3.2 沉管上拔引起的位移量

带有扩大圆锥桩尖的 TC 桩在沉管上拔过程中引起的土体单元的累积位移向量如图 9(a)所示，而净位移向量则如图 9(b)所示，图 10 中的整个关心区



(a) 沉管从  $6.6R$  上拔至  $-0.15R$  引起的位移向量累积量



(b) 上拔完成后的净位移向量

图 9 试验 T2 - EC-C 中位移向量

Fig.9 Displacement vectors for test T2 - EC-C

域通过除以沉管半径  $R$  进行了归一化处理。然而，由于位移量较小，故图 9(a)中的位移向量均放大了 4 倍，也就是说图 9(a)右下角所示的示例向量的大小为  $1/4R = 1.59 \text{ mm}$ 。对于图 9(a)，其最大位移量约为平底桩尖的 50%，同时影响区域也减小了约 2/3，影响区域在表面处仅延伸至距桩中心线  $4R$  处，而对于平底桩尖则为  $11R$ ，这主要是由不同形状的桩尖引起的挤土效应间的差异造成的，平底桩尖相对圆锥桩尖引起了更大的土体扰动。平底桩尖和圆锥桩尖的净位移向量同时表明：TC 桩体的沉管打设对周围土体的影响起主导作用。对于桩侧和桩端来说，TC 桩体的沉管打设和上拔的净效应不同。在桩侧，沉管上拔引起的残余位移将会削弱侧摩阻力的发挥，C. G. Qi 等<sup>[5-6]</sup>的计算研究和现场试验也已表明，TC 桩的侧阻力对传统桩体相比存在一定的损失。然而，在桩端，在平底桩尖下观测到了明显较大的净位移，同时伴随着较大的塑性应变，从而会引起端阻力的削减。

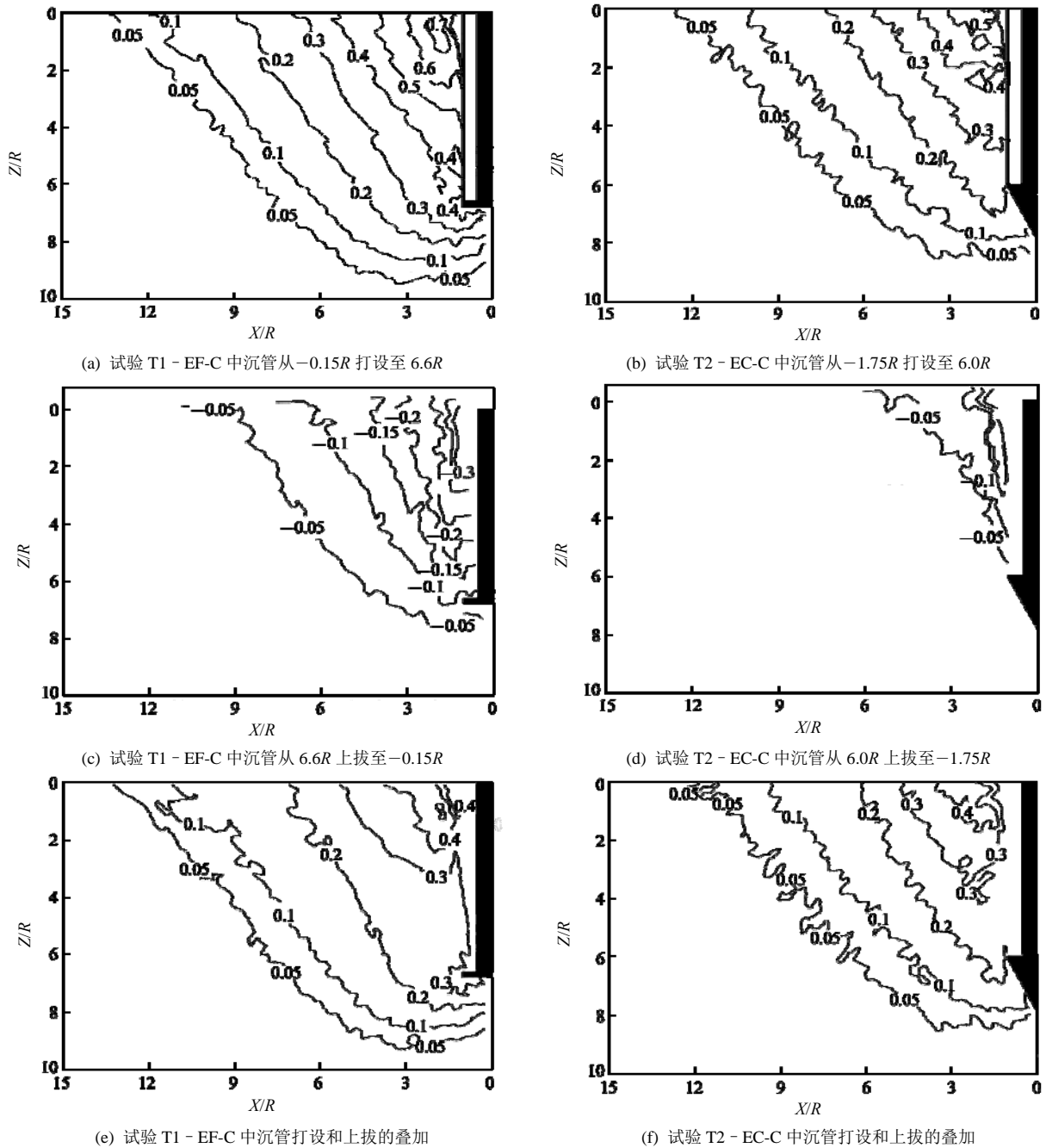


图 10 利用沉管半径  $R$  进行归一化后的总体位移等值线图

Fig.10 Contours of total displacement normalized by pile base radius  $R$  in casing movement

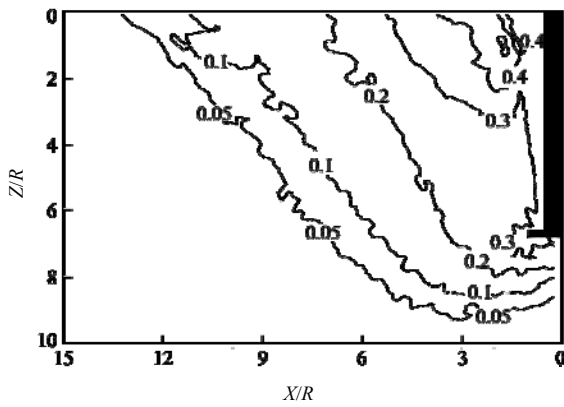
### 3.3 位移等值线

为了量化 TC 桩周围土体变形区域，制作了如图 10 所示的利用沉管半径  $R$  进行归一化后的位移等值线图，图中包括了三部分：TC 桩沉管静压、TC 桩沉管上拔和二者组合的净效应。很明显，平底桩尖的影响区域要大于圆锥桩尖的。在 TC 桩沉管静压过程中，平底桩尖对应的最大位移值比圆锥桩尖的高出 40%，相对应地，在 TC 桩沉管上拔过程中，圆锥桩尖的对的影响区域远小于平底桩尖的。桩周围的表面隆起在沉管上拔后有所减小，但是在较远

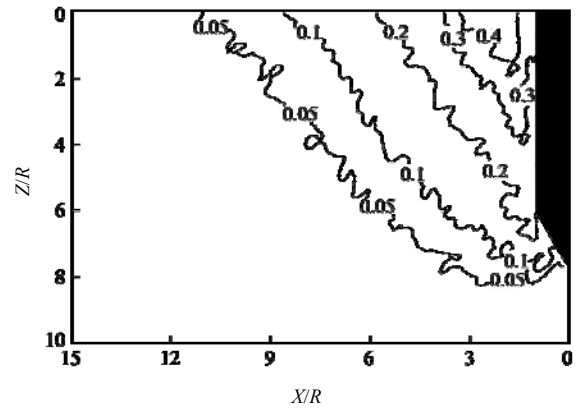
距离处的隆起减小量不明显，这主要是由沉管打设产生的被动压力和沉管上拔产生的主动压力之间的差异引起的。

## 4 TC 桩与传统静压桩的对比

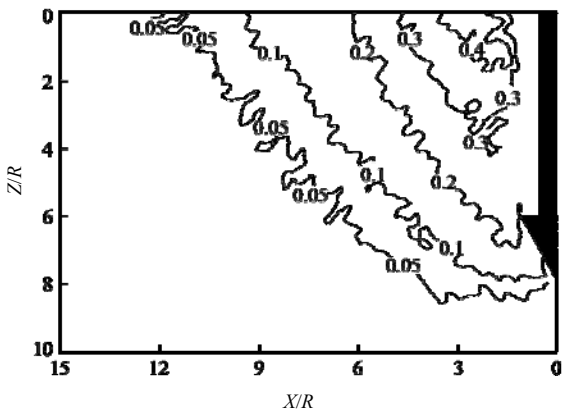
采用对比试验的方法研究了 TC 桩施工方法对桩周土体单元净位移的影响，对比试验如表 1 所示，T3 - C, T4 - F 和 T5 - C 试验为传统的静压打设，未采用沉管进行打设和上拔。5 个试验的对比如图 11



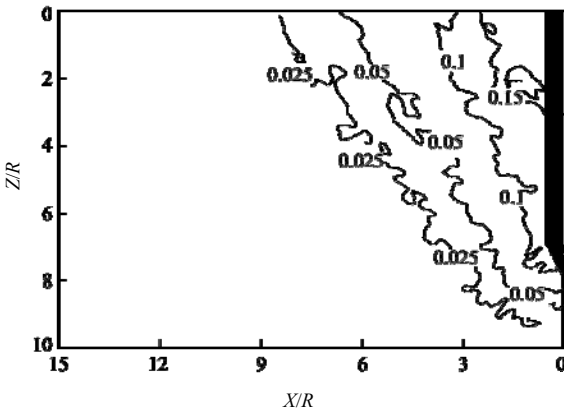
(a) 试验 T1 - EF-C



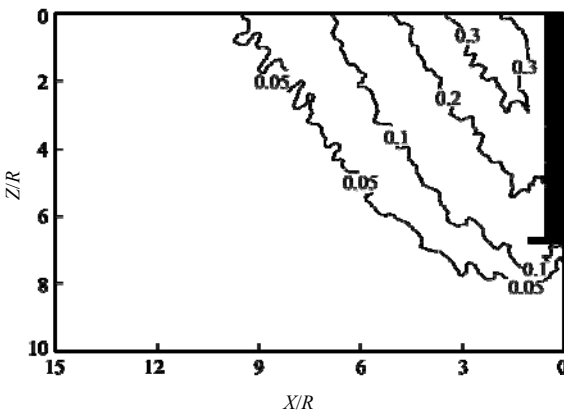
(e) 试验 T5 - C



(b) 试验 T2 - EC-C



(c) 试验 T3 - C



(d) 试验 T4 - F

图 11 净位移等值线分布

Fig.11 Distribution of net displacement contours

所示，从图中可以得出如下结论：

(1) 图 11(e)为与 TC 桩桩尖直径相同的带有圆锥桩尖的传统桩体，未采用沉管辅助静压引起的周围土体位移的等值线图。对比图 11(e)和(b)发现，二者的净位移等值线图大多相近，这是由于土体在桩体静压过程中发生了较大的塑性变形但恢复量较小造成的。在沉管上拔时，桩侧附近形成土体回流现象，以填充沉管和 TC 桩体间的缝隙，土体回流在一定程度上可能会造成桩侧摩擦力的损失，而且这种损失已在齐昌广等<sup>[4-6]</sup>的计算分析中得到了证实。

(2) 图 11(c)为与 TC 桩桩身直径相同的传统的未带有扩大头桩体，在静压时引起的净位移等值线图。对比图 11(c)和(b)可以看出，传统的未带有扩大头桩体静压时对土体的扰动要远小于 TC 桩，这主要是由前者的挤土量较小造成的。

(3) 图 11(d)为与 TC 桩外形的相同的传统扩大平底桩尖桩，在未采用沉管辅助静压时引起的位移等值线图。对比图 11(d)和(a)发现，各位移等值线的轮廓相似，但是前者的影响区域比 TC 桩小，尤其是在桩侧处。

### 5 结 论

(1) TC 桩成桩引起的土体变形反应明显受到桩尖形状的影响，圆锥桩尖引起的最大变形量相比平底桩尖的降低了 40%；而在平底桩尖 TC 桩的成桩过程中，影响区域扩展到了远离桩体中心线 11 倍桩径处，而对于圆锥桩尖，则为 6 倍桩径。

(2) 沉管上拔引起的土体移动主要发生在前

期,对于圆锥桩尖 TC 桩,其沉管上拔过程引起的最大位移量和影响区域分别约为平底桩尖的 57% 和 33%,然而,TC 桩施工过程中沉管打设是引起土体变形的主导因素,沉管上拔引起的土体恢复变形较小,相比圆锥桩尖的 TC 桩,在平底桩尖的 TC 桩中测量到了更多的沉管上拔后的残余位移。

(3) 在与 TC 桩沉管直径相同条件下,传统静压桩打设引起的土体变形量与 TC 桩的相一致,然而其影响区域略小。

(4) 对于圆锥和平底桩尖 TC 桩,尽管在沉管打设和上拔过程中表现出不同的水平向和竖向位移场,但是其最终的净位移场的形状类似。

此外,上述结论是仅通过透明土模型试验所得的,没有考虑到透明土的本构特性对试验结果的影响,该方面的初步研究可参考 Y. Xiao 等<sup>[16-17]</sup>。

### 参考文献(References):

- [1] 陈永辉,齐昌广,王新泉,等.塑料套管混凝土桩单桩承载特性研究[J].中国公路学报,2012,25(3):51-59.(CHEN Yonghui, QI Changguang, WANG Xinquan, et al. Research on bearing performance of plastic tube cast-in-place single pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 51-59.(in Chinese))
- [2] CHEN Y H, QI C G, XU H Y, et al. Field test research on embankment supported by plastic tube cast-in-place concrete piles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(4): 1359-1368.
- [3] 齐昌广,刘干斌,陈永辉,等.塑料套管管侧前注浆桩承载特性的现场试验研究[J].岩土力学,2015,36(8):2377-2385.(QI Changguang, LIU Ganbin, CHEN Yonghui, et al. Field testing on the bearing characteristics of plastic tube cast-in-place concrete pile with shaft pre-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2377-2385.(in Chinese))
- [4] 齐昌广,陈永辉,王新泉,等.塑料套管混凝土桩的承载力时间效应研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1635-1643.(QI Changguang, CHEN Yonghui, WANG Xinquan, et al. Time effect of bearing capacity of plastic tube cast-in-place concrete piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1635-1643.(in Chinese))
- [5] QI C G, CHEN Y H, ISKANDER M. Field load tests on plastic tube cast-in-place concrete piles[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2016, 169(GI1): 9-21.
- [6] QI C G, LIU G B, WANG Y, et al. A design method for plastic tube cast-in-place concrete pile considering cavity contraction and its validation[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69(9): 262-271.
- [7] 齐昌广,陈永辉,王新泉,等.细长桩屈曲的透明土物理模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):838-848.(QI Changguang, CHEN Yonghui, WANG Xinquan, et al. Physical modelling experiment on buckling of slender piles in transparent soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 838-848.(in Chinese))
- [8] SADEK S, ISKANDER M, LIU J. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 2003, 17(2): 88-96.
- [9] 孔纲强,曹兆虎,周航,等.水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J].土木工程学报,2015,48(5):83-89.(KONG Gangqiang, CAO Zhaohu, ZHOU Hang, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of enlarged wedge-shaped pile using transparent soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 83-89.(in Chinese))
- [10] 曹兆虎,孔纲强,刘汉龙,等.基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(8):1564-1568.(CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1564-1568.(in Chinese))
- [11] WHITE D, TAKE W, BOLTON M. Soil deformation measurement using particle image velocimetry(PIV) and photogrammetry[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
- [12] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2011, 34(6): 590-601.
- [13] GUZMAN I L, ISKANDER M, SUESCUN E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(2): 187-206.
- [14] MURFF J D. Response of axially loaded piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(3): 356-360.
- [15] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Geotechnique, 2010, 60(2): 121-132.
- [16] XIAO Y, SUN Y, YIN F, et al. Constitutive modeling for transparent granular soils[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2017, 17(7): 04016150.
- [17] XIAO Y, YIN F, LIU H, et al. Model tests on soil movement during the installation of piles in transparent granular soil[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2017, 17(4): 06016027.