

扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

陈忠清, 吴天宇, 高彦斌, 吕越, 刘帅

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

CHEN Zhongqing, WU Tianyu, GAO Yanbin, LYU Yue, and LIU Shuai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究

A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model

任占强, 宋章, 林棋文, 程谦恭, 刘毅, 邓凯丰, 蒙浩, 涂津 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 132-142

基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology

刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008046

扁铲探头贯入干砂的位移特征试验研究

陈忠清^{1,3}, 吴天宇¹, 高彦斌², 吕越^{1,3}, 刘帅¹

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 扁铲侧胀试验(DMT)已在国内外岩土工程勘察、地基加固效果评价等领域中得到广泛应用。DMT 的测试过程在扁铲探头贯入到测试位置后进行, 因此探头的贯入过程对土体造成的扰动在一定程度上将直接影响测试结果。目前关于扁铲探头的贯入机理, 以及贯入过程可能引起的土体扰动及其对测试结果的影响尚未研究清楚。通过室内模型试验手段, 进行扁铲探头贯入不同初始密实状态下均质干砂的试验研究, 分析了探头贯入过程中产生的土体位移场分布特征。试验结果表明: 扁铲探头的楔形部和膜片所在的侧胀部贯入产生的挤压作用是引起土体变形扰动的主要原因; 探头楔形部的贯入过程表现为向下和向斜侧面挤压土体, 竖向位移量很小, 产生向两侧扩展为主的扁状位移场, 而探头侧胀部的贯入过程主要表现为向两侧面水平向挤压土体, 产生半椭圆状水平位移场且分布范围明显更大, 同时探头侧面表现为一定的剪切作用而产生较窄范围的竖向位移场。另外, 扁铲探头贯入干砂产生的位移场受砂土初始密实状态的影响较小, 主要表现为探头楔形部周围的位移场分布范围随密实度增大而扩大。

关键词: 扁铲侧胀试验; 贯入过程; 位移; 模型试验; 干砂

中图分类号: TU411.93; TU413.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0119-07

An experimental study of the displacement characteristics of dry sand under dilatometer penetration

CHEN Zhongqing^{1,3}, WU Tianyu¹, GAO Yanbin², LYU Yue^{1,3}, LIU Shuai¹

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: The flat dilatometer test (DMT) has been widely used in engineering such as geotechnical engineering investigation and evaluation of ground improvement effect at home and abroad. The test process of DMT is usually carried out after the blade insertion of DMT into test position, so the disturbance caused by the dilatometer penetration process will directly affect test results to a certain extent. However, the mechanism of dilatometer penetration and soil disturbance and its influence on test results caused by penetration process are not yet known. Homogeneous dry sand samples under different initial densities are prepared by the layered plate compaction method with low level rainfall, and several laboratory model tests of dilatometer penetration into these sand samples together with particle image velocimetry (PIV) are carried out to investigate the distribution characteristics of the soil displacement field during the blade penetration process. The test results show that (1) the extrusion effect caused by the penetration of both the wedge part and lateral expansion part of the blade mainly causes soil disturbance. (2) The surrounding soil is squeezed downward and sideward during the penetration of the

收稿日期: 2020-08-17; 修订日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972273); 浙江省公益技术应用研究计划项目(2016C33052)

第一作者: 陈忠清(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为地基处理与工程地质。E-mail: q_chen_yk@163.com

通讯作者: 高彦斌(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为岩土力学特性和岩土工程。E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn

wedge part of blade, resulting in small vertical displacement and a flat displacement field which mainly extends to both sides, while the surrounding soil is squeezed horizontally to the two sides during the penetration of the lateral expansion part of blade, resulting in a semi-elliptical horizontal displacement field with the distribution range being obviously larger, and meanwhile, the shear effect caused by side friction between the blade and soil produce a vertical displacement field with a narrow range. (3) Moreover, the displacement field of dry sand caused by dilatometer blade penetration is less affected by the initial sand density than that by cone probe penetration, and only the distribution range of displacement field around the wedge part of the dilatometer blade expands with the increase of the initial density to some extent.

Keywords: flat dilatometer test (DMT); penetration process; displacement; model test; dry sand

意大利学者 Silvano Marchetti 于 20 世纪 70 年代末发明了扁铲侧胀仪(The flat dilatometer), 主要由扁铲探头、测控箱、气电管路等组成^[1]。扁铲侧胀试验(The flat dilatometer test, 简称 DMT)即是一种利用贯入设备将扁铲探头压入土中, 然后通过气压源向探头内加压, 以获取探头膜片膨胀到指定位移时的压力值(即 p_0 、 p_1 及 p_2 值)。DMT 具有操作便捷、可重复性强、且能获得多个土性参数(如静止侧压力系数 K_0 、超固结比 OCR、压缩模量 M 、内摩擦角 φ 及不排水抗剪强度 C_u 等)的特点。目前扁铲侧胀试验已在 70 多个国家得到工程应用, 并被作为一种标准的原位测试技术列入美国材料与试验协会(ASTM)标准(ASTMD 6635—15)^[2]、欧洲规范 Eurocode(EN 1997—2:2007)^[3]、ISO 标准(ISO 22 476—11:2017(E))^[4] 和中国的《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[5]。

尽管 DMT 在国内外应用广泛, 但是多年来 DMT 的研究主要集中在试验设备及测试方法改进^[6-9]、工程应用研究^[10-12], 而关于扁铲探头贯入过程的研究进展缓慢, 相关报道尚不多见。很明显, DMT 的测试过程是在贯入过程的基础上进行, 而贯入过程产生的土体位移、应力等必将一定程度上影响测试结果, 尤其是直接影响 p_0 值。因此有必要对扁铲探头的贯入机理及贯入过程可能引起的土体扰动范围展开研究。Baligh 等^[13] 比较了不同锥角的楔形贯入器引起的黏土变形, 得到尖角楔形贯入(sharp wedge penetration)引起土体变形小于钝角楔形贯入(blunt wedge penetration)。Huang^[14] 利用数值手段, 进行了任意三维贯入器的应变路径分析, 得到圆锥探头(cone)和扁铲探头(dilatometer)贯入引起的应变场明显不同, 且前者大于后者。Benoit 等^[15] 利用改装的扁铲侧胀仪(instrumented dilatometer)开展了软黏土的原位扁铲侧胀试验, 得到扁铲探头贯入过程产生明显的超孔压, 但小于孔压静力触探试验圆锥探头贯入产生的超孔压。以上研究

均表明, 虽然扁铲探头的尖角(一般为 20°)明显小于圆锥探头的锥角(一般为 60°), 但其贯入过程仍对土体造成一定的扰动效应。Finno^[16] 采用应变路径法(Strain Path Method)对扁铲探头贯入饱和黏性土进行了理论分析, 得到扁铲探头贯入引起的扰动范围(以探头周围土体的破坏区域 failure zone 来反映)为距离探头膜片中心 100~110 mm, 距离探头的侧面 70 mm, 稍小于标准圆锥探头贯入引起的扰动范围(距离圆锥探头 116 mm^[17])。罗松^[18] 采用 ANSYS 软件进行有限元模拟, 将扁铲探头的贯入过程简化为施加一个位移边界条件(位移大小为探头厚度的一半), 得到饱和土体的贯入扰动范围为距离探头 350 mm 左右。

可以看到, 现有的研究主要采用理论解析及数值模拟手段进行了有价值的探索, 但扁铲探头贯入土体过程中产生的位移、应力分布特征及其影响因素(比如土体类型、应力历史和初始密实状态等)仍不清楚, 以及不同条件下贯入过程引起的土体扰动范围也尚未形成明确、统一的认识。本文基于室内模型试验, 开展扁铲探头贯入不同初始密实状态下均质干砂的试验研究, 主要探讨探头贯入过程中产生的位移特征, 为进一步认识扁铲侧胀试验中探头的贯入机理, 以及探头贯入过程的扰动影响提供参考。

1 试验材料及仪器设备

1.1 试验材料

采用厦门 ISO 标准砂(干砂)作为模型试验材料, 颗粒级配曲线如图 1 所示。颗粒粒径为 0.08~2 mm; 最大干密度为 1.88 g/cm^3 , 最小干密度为 1.69 g/cm^3 , 最小孔隙比为 0.41, 最大孔隙比为 0.57, 比重为 2.66。

1.2 仪器设备

(1) 扁铲探头

采用南光地质仪器有限公司生产的扁铲探头, 可

分为连接部、侧胀部及楔形部, 如图 2 所示。探头全长为 240 mm, 宽为 96 mm, 厚 14 mm, 楔形部夹角为 26°, 侧胀部膜片直径 60 mm。探头连接部顶端与钻杆连接头相连, 直径为 38 mm。

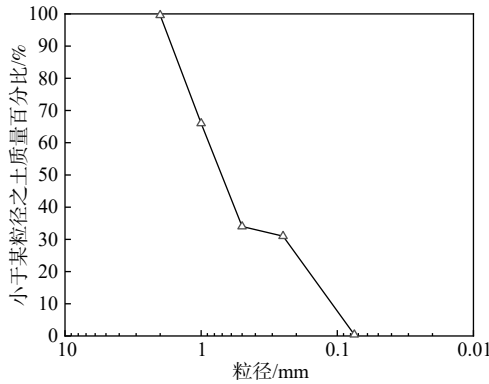


图 1 标准砂颗粒级配曲线
Fig. 1 Particle size curve of the standard sand

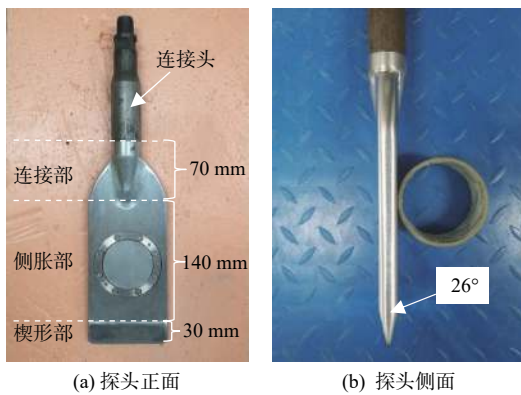


图 2 扁铲侧胀探头
Fig. 2 Blade of flat dilatometer: (a) front of blade and (b) side of blade

(2) 粒子图像测速 (PIV) 系统

粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry, 简称 PIV) 系统由硬件和软件组成, 其中硬件主要包括德国 HSVISION 型高速相机、无频闪照明灯及电脑 (图 3), 软件采用北京立方科技 Micro Vec3 图像控制系统。

(3) 小型静力触探仪

采用单桥探头, 探头锥底直径为 2.52 cm, 锥头截面积为 5 cm², 锥角为 60°, 测试范围 0 ~ 30 MPa (图 4)。

(4) 模型箱及制样装置

模型箱内部长宽高尺寸为 500 mm×500 mm×500 mm, 其中一侧为 10 mm 厚的钢化玻璃。制样箱的尺寸为 495 mm×495 mm×50 mm, 底部按照梅花形开设圆孔, 直径为 5 mm, 中心距 8 mm (图 5)。

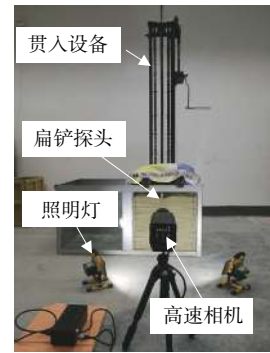


图 3 模型试验照片
Fig. 3 Picture of the model test



图 4 小型静力触探仪的探头
Fig. 4 Probe of small-scale static cone penetrometer

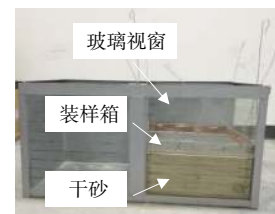


图 5 模型箱及制样装置
Fig. 5 Test box and sample preparation device

2 试验方案及过程

2.1 试验方案

制备不同初始密实状态的均质干砂试样, 开展扁铲探头贯入砂土的模型试验, 并结合 PIV 技术进行图像分析, 探讨扁铲探头贯入过程中砂土颗粒的位移特征, 以及贯入引起的土体扰动范围。试验分组及相关参数如表 1 所示, 3 组试验均进行了平行试验。

表 1 试验分组及相关试验参数

试验编号	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	初始相对密度 D_r	初始密实状态
No.1	1.73	0.25	松散
No.2	1.77	0.44	中密
No.3	1.83	0.75	密实

2.2 试验过程

(1) 砂土试样制备

采用“分层低位落雨+平板压实法”制备干砂试样。分层制样步骤包括：①装样。将按初始密度要求计算出的每层砂土质量均匀装入制样箱中，刮平表面；②低位落雨。将模型箱四周同时慢速提起，并逐渐提升，使砂土沿着制样箱底面的筛孔均匀下落；③平板压实。当土样超出分层设计高度时，利用与模型箱等内框的平板进行均匀压实处理，直至达到规定高度。

对 3 种不同初始密实度要求的砂土试样分别进行平行制样，并利用小型静力触探仪在试样中心位置开展静力触探试验 (CPT)，以检测制样效果，结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，3 种初始密实状态下，2 次平行试验的 CPT 测试结果基本一致，比贯入阻力均随深度增加而逐渐增大，且密实度越大时比贯入阻力也越大。可见，本文采用的干砂试样制备方法具有较好的重复性，可以保证平行试验结果的可靠性。

(2) 探头贯入及图像采集

利用小型 CPT 贯入设备，通过静压方式将扁铲探头沿模型箱中部并紧贴玻璃视窗内侧垂直贯入试样，贯入速率为 20 mm/s。图像采集与探头贯入过程同步，采集速率设置为 40 幅/s，图像分辨率为 1 088×1 008。

3 试验结果与分析

3.1 贯入松砂的位移分布特征

利用 Micro Vec3 软件对扁铲探头贯入前后的图像进行 PIV 计算，得到探头贯入松砂时的土体位移向量分布，进一步利用 Tecplot 软件对 PIV 计算结果进行后处理，得到水平向位移和竖向位移分布云图 (图 7)。

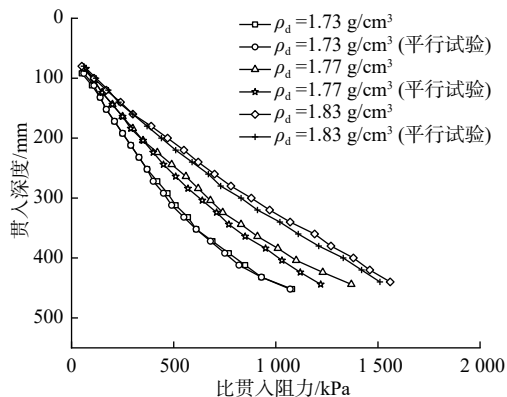


图 6 比贯入阻力随深度的变化曲线

Fig. 6 Variation of specific penetration resistance with depth

从图 7(a)可以看出，探头连接部两侧的土体位移量最大，方向为陡斜向上。探头侧胀部两侧的土体位移呈对称分布，位移量相对较小，方向基本上为缓斜向上，其中膜片以下部分土体发生向缓斜向下方位移。探头楔形部两侧及以下的土体位移量最小，方向为缓斜向下，且楔形部以下的位移向量较不明显。

从图 7(b)可以看出，贯入松砂时的水平位移主要分布在探头侧胀部两侧区域，近似对称分布，以 2 mm 为界的位移分布范围距探头侧壁为 150 ~ 160 mm，以 4 mm 为界则为 70 ~ 80 mm。探头楔形部两侧土体的水平位移较小，不超过 5 mm，楔形部以下土体水平位移不超过 3 mm，以 2 mm 为界的位移分布范围垂直距探头底端为 20 mm。由图 7(c)可得，贯入松砂时的竖向位移主要分布在探头连接部两侧，方向向上，位移量 5 ~ 8 mm。探头侧胀部两侧分布的竖向位移以方向向上为主，最大位移量不到 5 mm，其中膜片对应区域的土体竖向位移量仅为 1 ~ 3 mm。探头楔形部两侧的竖向位移向下，最大位移量不到 3 mm，以 2 mm 为界的分

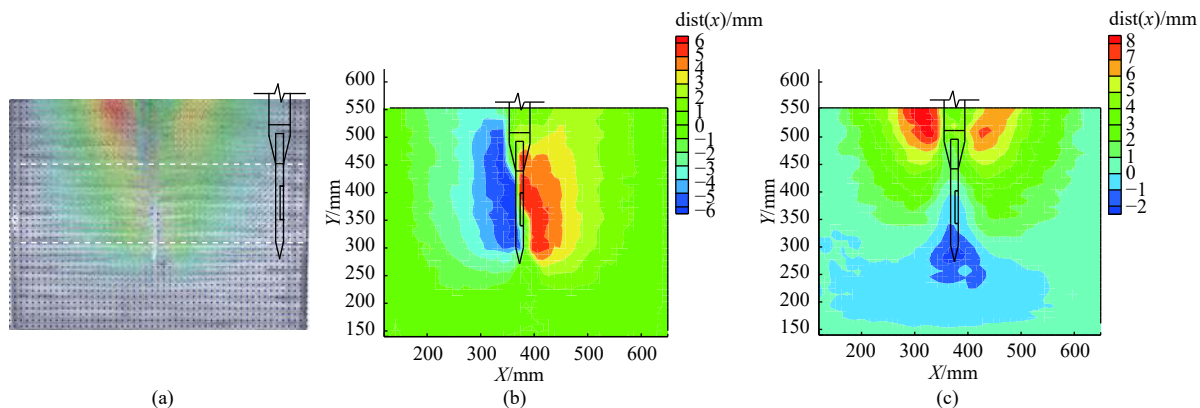


图 7 探头贯入松砂的位移向量 (a) 和水平位移 (b)、竖向位移 (c) 云图分布

Fig. 7 (a) displacement vector distribution and cloud graph of (b) horizontal displacement, (c) vertical displacement after blade insertion into loose sand

布宽度范围不超过 25 mm, 楔形部以下的土体竖向位移均小于 2 mm。

3.2 贯入中密砂的位移分布特征

扁铲探头贯入中密砂时的土体位移向量分布、水

平向位移和竖向位移分布云图如图 8 所示。从图 8(a) 可以看出, 探头贯入中密砂时的土体位移向量分布特征与贯入松砂时接近, 但探头楔形部以下的位移向量相对较明显。

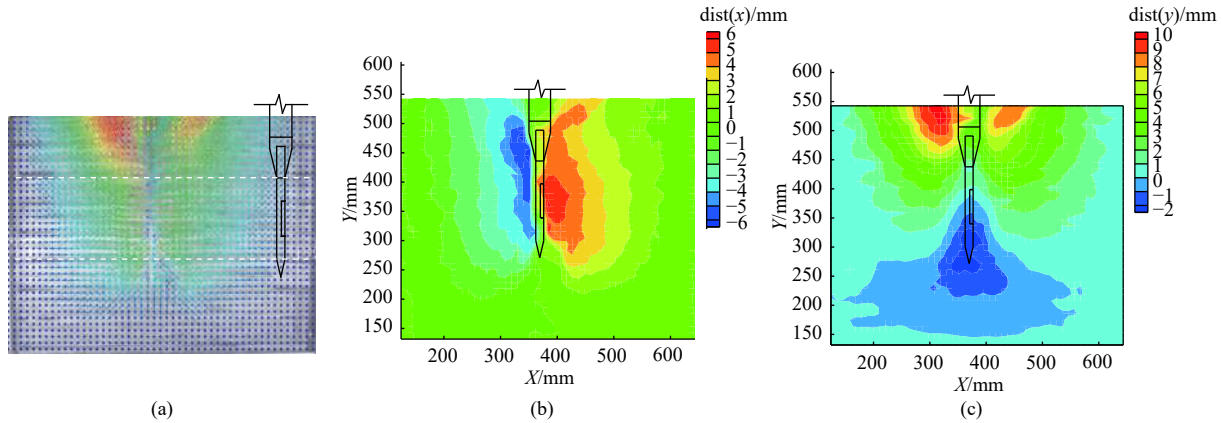


图 8 探头贯入中密砂的位移向量 (a) 水平位移 (b) 和竖向位移 (c) 分布云图

Fig. 8 (a) Displacement vector distribution cloud graph of (b) horizontal displacement and (c) vertical displacement after penetrating medium dense sand

从图 8(b) 可以看出, 水平位移主要分布在探头侧胀部两侧区域, 近似对称分布, 以 2 mm 为界的位移分布范围距探头侧壁亦为 150 ~ 160 mm, 以 4 mm 为界则为 70 ~ 80 mm。探头楔形部两侧土体的水平位移较小, 不超过 5 mm, 楔形部以下土体水平位移不超过 4 mm, 以 2 mm 为界的位移分布范围垂直距探头底端为 30 mm。由图 8(c) 可得, 竖向位移也主要在探头连接部两侧分布, 方向向上, 位移量 5 ~ 10 mm。探头侧胀部两侧分布的竖向位移以方向向上为主, 最大位移量不到 5 mm, 膜片附近的土体竖向位移量仅为 1 ~ 3 mm。探头楔形部两侧的竖向位移向下, 最大位移量不到 3 mm, 楔形

部以下 20 mm 深度范围的土体竖向位移仅为 2 ~ 3 mm, 且宽度范围不超过 60 mm。

3.3 贯入密砂的位移分布特征

扁铲探头贯入密砂时的土体位移向量分布、水平向位移和竖向位移分布云图图 9 所示。从图 9(a) 可以看出, 探头贯入密砂时的土体位移向量分布特征与贯入松砂及中密砂时接近, 但探头楔形部以下的位移向量最为明显。

从图 9(b) 可以看出, 水平位移主要分布在探头侧胀部两侧区域, 近似对称分布, 以 2 mm 为界的位移分布范围距探头侧壁亦为 150 ~ 160 mm, 以 4 mm 为界

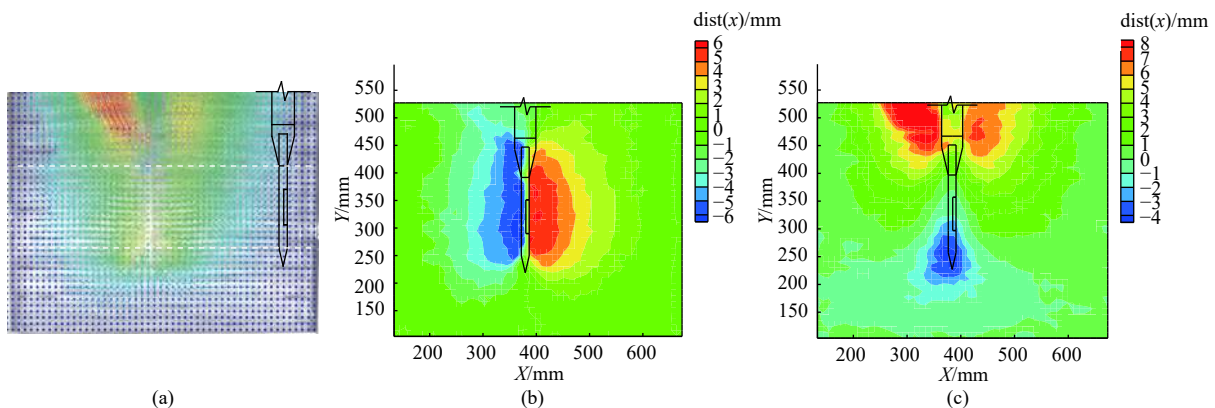


图 9 探头贯入密砂的位移向量 (a) 水平位移 (b) 和竖向位移 (c) 分布云图

Fig. 9 (a) Displacement vector distribution cloud graph of (b) horizontal displacement and (c) vertical displacement after penetrating dense sand

则为 70 ~ 80 mm。探头楔形部两侧土体的水平位移较小, 不超过 5 mm, 楔形部以下土体水平位移不超过 3 mm, 以 2 mm 为界的位移分布范围垂直距探头底端为 25 mm。由图 9(c) 可得, 竖向位移也主要在探头连接部两侧分布, 方向向上, 位移量 5 ~ 8 mm。探头侧胀部两侧分布的竖向位移以方向向上为主, 最大位移量不到 5 mm, 膜片附近的土体竖向位移量仅为 1 ~ 3 mm。探头楔形部两侧的竖向位移向下, 最大位移量达 4 mm, 楔形部以下 25 mm 深度范围的土体竖向位移为 2 ~ 4 mm, 且宽度范围近 90 mm。

3.4 分析与讨论

显然, 扁铲探头贯入不同初始密实状态砂土时的位移分布特征与探头三部分(即连接部、侧胀部、楔形部)的几何外形不同直接相关, 且探头楔形部和侧胀部引起的土体位移将直接影响 DMT 测试结果, 因此也是本文分析的重点。总体上, 随着扁铲探头沿深度逐渐贯入干砂, 探头楔形部周围土体先产生缓斜向下的位移, 主要分布在两侧, 且水平位移的分布范围明显大于竖向位移的分布范围, 而正下方产生的竖向位移量很小。然后, 探头侧胀部两侧土体产生以水平向为主的位移, 基本呈对称分布, 并近似以长轴平行于探头侧面的半椭圆形向外扩散, 同时探头侧面较窄范围的土体产生较明显的斜向下位移。探头连接部贯入时, 两侧明显产生向砂土表面的斜向上位移, 并以竖向位移为主。可见, 贯入过程先表现为楔形部对土体的向下和向斜侧面挤压作用, 然后表现为侧胀部对土体明显的水平向挤压作用, 且探头侧面与土体存在向下摩擦产生的剪切作用, 这与 CPT 锥形探头贯入砂土的离散元数值模拟结果^[19-20]相似, 但不同的是, 由于 DMT 探头的尖角(26°)明显小于 CPT 探头的锥角(60°), 贯入过程引起的土体最大位移未在侧胀部与楔形部的交界处, 而主要分布在膜片附近。另外可得, 扁铲探头连接部未表现出对膜片附近的土体产生挤压作用。

当砂土的初始密实度增大时, 扁铲探头周围的土体位移分布特征相似, 楔形部周围土体的位移分布范围明显扩大, 而探头侧胀部周围土体的位移分布范围基本保持不变。文献 [21] ~ [22] 的模型试验结果指出 CPT 锥形探头贯入不同密实状态的砂土时, 锥头正下方及侧向的位移场影响范围随密实度增大而扩大, 且向两侧显著扩大。可见, 扁铲探头贯入干砂的位移场分布特征及范围受土体初始密实状态的影响相对较小。如果分别以 2 mm 和 4 mm 作为干砂受到扁铲探

头贯入扰动的影响边界, 则扰动影响范围分别为距离探头膜片 150 ~ 160 mm 和 70 ~ 80 mm。

4 结论

(1) 扁铲探头贯入干砂过程产生的土体位移分布特征与探头的几何外形直接相关, 其中探头楔形部和膜片所在的侧胀部贯入产生的挤压作用是引起土体变形扰动的主要原因。

(2) 扁铲探头楔形部的贯入过程表现为向下和向斜侧面挤压土体, 但竖向位移量很小, 产生向两侧扩展为主的扁状位移场, 而侧胀部的贯入过程主要表现为向两侧面水平向挤压土体, 产生分布范围明显更大的半椭圆状水平位移场, 同时探头侧面表现为一定的剪切作用而产生较窄范围的竖向位移场。

(3) 扁铲探头贯入干砂产生的位移场受砂土初始密实状态的影响较小, 主要表现为探头楔形部周围的位移场分布范围随密实度增大而扩大。

参考文献 (References) :

- [1] MARCHETTI S. In situ tests by flat dilatometer[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(GT3, Proc. Paper, 15290): 299 - 321.
- [2] ASTM D 6635—15. Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [3] EN 1997—2: 2007. Eurocode 7: Geotechnical Design—Part 2: Ground Investigation and Testing[S]. CEN European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.
- [4] ISO 22476—11: 2017(E). Geotechnical Investigation and Testing—Field Testing—Part 11: Flat Dilatometer Test[S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [5] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [National Standard of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001(2009) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese)]
- [6] MARCHETTI D. In situ tests by Medusa DMT [C] // Proceedings of Proceedings of the XVII ECSMGE-2019: Geotechnical Engineering foundation of the future, Italian Geotechnical Society, Rome, 2019.
- [7] MARCHETTI D. Dilatometer and seismic dilatometer testing offshore: available experience and new

- developments[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2018, 41(5): 20170378.
- [8] 程健,张丹,刘子文.基于弯曲元的剪切波扁铲侧胀技术可行性试验研究[J].*工程勘察*,2018,46(3):12-16. [CHENG Jian, ZHANG Dan, LIU Ziwen. Feasibility study on flat shovel bulging technique with shear wave based on bending elements[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018, 46(3): 12 - 16. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘学彦,朱定华,袁大军.扁铲侧胀仪的改进及应用[J].*岩土工程学报*,2013,35(7):1375-1380. [LIU Xueyan, ZHU Dinghua, YUAN Dajun. Improvement and application of flat dilatometer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1375 - 1380. (in Chinese with English abstract)]
- [10] MARCHETTI S, MONACO P. Recent improvements in the use, interpretation, and applications of DMT and SDMT in practice[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2018, 41(5): 20170386.
- [11] 杨超,汪稔,傅志斌,等.扁铲侧胀试验在滨海沉积软土中的应用[J].*水文地质工程地质*,2010,37(2):79-82. [YANG Chao, WANG Ren, FU Zhibin, et al. Application of flat Dilatometer Test in littoral deposit soft soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 79 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 徐超,陈忠清,邢皓枫,等.扁铲侧胀试验在地基处理效果评价中的应用[J].*水文地质工程地质*,2009,36(1):100-103. [XU Chao, CHEN Zhongqing, XING Haofeng, et al. Application of flat dilatometer test in evaluation of soft soil foundation improvement[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(1): 100 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BALIGH M M, SCOTT R F. Quasi-static deep penetration in clays[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975, 101(11): 1119 - 1133.
- [14] HUANG A B. Strain-path analyses for arbitrary three-dimensional penetrometers[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1989, 13(5): 551 - 564.
- [15] BENOÎT T J, STETSON K P. Use of an instrumented flat dilatometer in soft varved clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1159 - 1167.
- [16] FINNO R J. Analytical interpretation of dilatometer penetration through saturated cohesive soils[J]. *Geotechnique*, 1993, 43(2): 241 - 254.
- [17] LEVADOUX J N and BALIAH M M. Pore pressures during cone penetrecron in clays[R]. Research report R80-15, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1980.
- [18] 罗松.扁铲侧胀试验机理有限元分析及其在地基处理效果检验中的应用[D].上海:同济大学,2006. [LUO Song. The finite element analysis of the mechanism of DMT and the application of DMT on compaction control[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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 Jihong, JIA Mincai, 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 with English abstract)]
- [20] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30(4): 335 - 361.
- [21] 陈维家,陈映南.砂土静力触探机理分析[J].*岩土工程学报*,1990,12(2):64-72. [CHEN Weijia, CHEN Yingnan. Mechanism analysis of static cone penetration test of sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(2): 64 - 72. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈维家,胡逸群.用白光散斑法定量分析静力触探时土体的位移场[J].*长沙铁道学院学报*,1988,6(4):87-95. [CHEN Weijia, HU Yiqun. Determination of displacement fields of a cone during static-penetration test by white-light speckle photography[J]. *Journal of Changsha Railway Institute*, 1988, 6(4): 87 - 95. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张明霞