

# 扁铲侧胀试验确定砂土内摩擦角方法研究

魏晋攀<sup>1</sup>, 李瑞园<sup>2</sup>, 容洪流<sup>2\*</sup>, 孙建超<sup>3</sup>

(1. 甘肃省交通勘察规划设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 700030; 2. 广西大学 土木建筑工程学院;  
3. 陕西铁路工程职业技术学院)

**摘要:**砂土的内摩擦角是岩土工程分析和设计中最受关注的参数之一。扁铲侧胀试验(DMT)作为一种快速和准确的原位测试方法,避免了现场取样和室内试样制备过程中对砂土原状结构的扰动和破坏,在确定天然砂土的内摩擦角方面具有明显优势。通过讨论 Marchetti 基于侧胀水平应力指数  $K_D$  建立的扁铲侧胀内摩擦角计算公式,在高质量取样室内试验和自钻式旁压试验基础上,验证扁铲侧胀内摩擦角公式的计算精度。研究表明:当  $K_D \leq 5$  时,内摩擦角计算值偏小,建议修正曲线下限值,该文由此建立砂土内摩擦角修正公式,与收集文献记录中的砂土内摩擦角进行比较,进一步验证了修正公式的可靠性。

**关键词:**扁铲侧胀试验;原状砂土;原位测试;内摩擦角;自钻式旁压试验;室内试验

天然砂土的内摩擦角是岩土工程分析和设计中最受关注的参数之一,在确定桩基承载力、地基承载力和基坑工程分析方面具有举足轻重的作用,确定反映天然状态下砂土的内摩擦角显得尤为重要,一直是岩土工程勘察的重要工作。目前,确定砂土内摩擦角的方法主要为室内试验方法和原位测试方法。由于天然砂土的内摩擦角与土体的天然结构、状态、应力条件等密切相关,当采取室内试验方法时,原状砂土的取样和试样的制备不可避免地对砂土产生了扰动,原位结构性受到破坏。已有研究表明:室内试验确定的土体工程力学特性参数与原位测试方法取得的参数存在一定的差别,特别是对于深层砂土层、应力历史复杂砂层,其力学特性受原位结构性的影响尤为明显。扁铲侧胀试验方法作为一种快速而准确的原位测试方法,对土体扰动小,在保持土体天然状态和原位应力条件下进行测试,与其他原位测试方法相比,准确性更高。

## 1 扁铲侧胀确定砂土内摩擦角的基本理论

Marchetti(1985)利用楔形贯入理论的解析解,建立了采用内摩擦角( $\varphi$ )和侧向应力系数( $K_0$ )表示洁净砂土归一化锥尖阻力( $q_c/v_{o'}$ )的图表。Campanella &

Robertson(1991)将该图表推广到侧胀水平应力指数( $K_D$ ),建立了采用静止侧向应力系数( $K_0$ )和侧胀水平应力指数( $K_D$ )表示的图表,相互关系如图1所示。图中  $\varphi$  值曲线可以表示为:

$$\varphi \approx 37.3^\circ \times \left( \frac{K_D - 0.8}{K_0 + 0.8} \right)^{0.92} \quad (1)$$

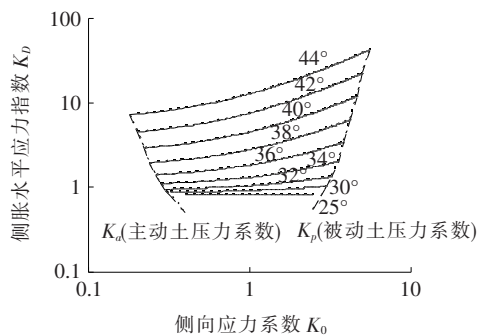


图1 砂土内摩擦角与侧向应力系数  $K_0$  及侧胀水平应力指数  $K_D$  关系图

Marchetti(1997)通过指定3个特定的  $K_0$  条件:  
①  $K_0 = 1 - \sin\varphi$ ; ②  $K_0 = 1$ ; ③  $K_0 = (K_p)^{1/2}$ , 给出了  $\varphi$  和  $K_D$  之间的一系列非线性关系。所得到的曲线如图2所示,这些曲线可采用式(2)~(4)近似表达:

$$\varphi = 28.2^\circ + \frac{K_D - 0.5}{0.074 + 0.063 \cdot (K_D - 0.5)^{0.92}} \quad (2)$$

收稿日期:2020-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51268003)

作者简介:魏晋攀,男,大学本科,高级工程师。E-mail:294363711@qq.com

\* 通信作者:容洪流,男,博士,教授。E-mail:lry199601@163.com

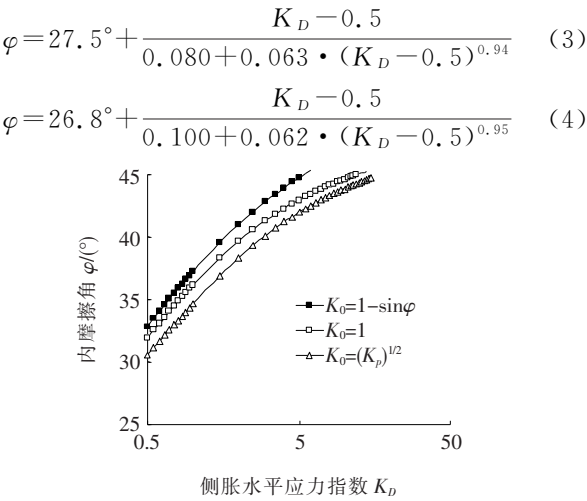


图 2 不同侧向应力状态下砂土内摩擦角与侧胀水平应力指数  $K_D$  关系图

2 不同原位测试方法确定砂土内摩擦角的比较

2.1 工程概况

孟加拉国 PADMA 多用途大桥项目,位于首都达卡西南部,距离达卡西约 40 km。场区地貌为 PADMA 河(恒河)冲积平原,地势平坦,河网密布,地层主要为全新世泛滥平原冲积漫滩,具体性能参数如表 1 所示。

表 1 场区主要地层情况

地层序号	岩土名称	标贯击数/击	层厚/m
Unit 2a&2b	表层混合砂土	$N \leq 10$	0~10.0
Unit2c	粉砂夹粉土	$10 < N \leq 17$	2.0~8.0
Unit2d	粉细砂	$17 < N \leq 32$	3.0~8.0
Unit2e	细砂	$32 < N \leq 50$	3.0~10.0
Unit2f	细砂	$50 \leq N$	未揭穿,>90.0
Unit3	含卵砾石细砂	$110 \leq N$	25.0~30.0
Unit1	超固结黏土	$50 \leq N$	20.0~25.0

地质纵剖面图如 3 所示。由图 3 可知:地层分布较均匀,覆盖层厚度大,主桥桥墩桩底绝对高程为-130.00 m,在桩身范围内深厚砂层受到河床历史演变的影响,应力历史复杂,砂土的原位结构性显著,砂土原状取样需耗费巨大的时间和成本。从表 1 中标贯击数和图 3 地质钻孔纵剖面容易发现,砂层的力学分层在深度方向上连续,在水平方向上起伏小,研究砂土的物理力学性质具有直观的意义。

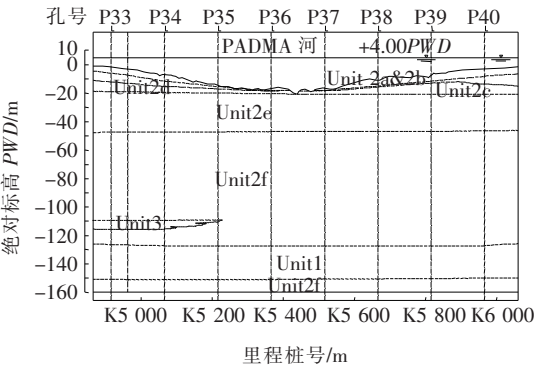


图 3 场区地质纵剖面图

2.2 扁铲侧胀试验结果与自钻式旁压试验、室内三轴试验结果比较

目前,确定砂土内摩擦角较为准确的原位测试方法,主要包括扁铲侧胀试验、自钻式旁压试验,随着取样手段和技术的不断提高,在国外项目中,冷冻法取样、新型凝胶取样、麦氏活塞取样器(Mazier Sampler)技术得到应用,使得室内三轴试验确定原状砂土的内摩擦角变得更加可信。尽管自钻式旁压试验和新型取样技术下室内三轴试验在确定砂土内摩擦角方面的表现优异,但是由于两者操作复杂、成本高昂,在工程应用中利用率较低。这两种试验方法的相关结果可用于检验方程式(4)的下限值。

该文采用原位测试方法和室内三轴试验(CUC)方法对砂土进行了测试。室内三轴试验(CUC)采用了高质量的取样方法,取样器由专业供应商提供的凝胶取样器(Gel-Push Sampler)。将试样在获取和制备过程中对试样的扰动程度降低至最低水平;自钻式旁压试验采用英国剑桥自钻式旁压设备,设备自动采集和程序自动化处理数据,扁铲侧胀试验采用意大利 Marchetti 扁铲侧胀仪器。测试时,在同一钻孔中不同标高进行了扁铲侧胀试验、自钻式旁压试验、凝胶取样,测试结果如图 4、5 所示。扁铲侧胀试验时,将孔内土体预钻并清孔至测试点,测试点间距为 0.3 m,3 个测试点为一组,组与组间隔 5 m;自钻式旁压试验时,将孔内土体预钻并清孔至测试点,测试点长度为 1.0 m,点与点间隔 5 m,并避开扁铲侧胀测试点,以此类推,可测试至绝对高程为-130.00 m。大量试验证明,在钻探清孔时,扁铲侧胀试验和自钻式旁压试验测试点以上应预留土层 0.5~1.0 m,以减少因预钻扰动及应力释放对下部试验段的扰动。

由式(2)~(4)可知:砂土的内摩擦角与侧胀水平应力指数  $K_D$  具有直接关联,图 4 为场区扁铲试验中侧胀水平应力指数  $K_D$  随深度变化关系。从图 4 可以

看出:侧胀水平应力指数  $K_D$  值为 0.2~5.0,大量试验表明,侧胀水平应力指数  $K_D$  在此区间的砂土,扁铲侧胀试验测试的内摩擦角,与自钻式旁压试验、室内三轴试验(CUC)结果相比偏小。图 5 为典型钻孔中不同试验方法获取的砂土内摩擦角对比图。从图 5 可以看出:高质量取样的室内三轴试验(CUC)与自钻式旁压试验的内摩擦角测试结果具有一致性,而扁铲侧胀试验内摩擦角测试结果皆比两者小。因此有必要对侧胀水平应力指数  $K_D \leq 5$  的砂土内摩擦角计算公式进行修正。

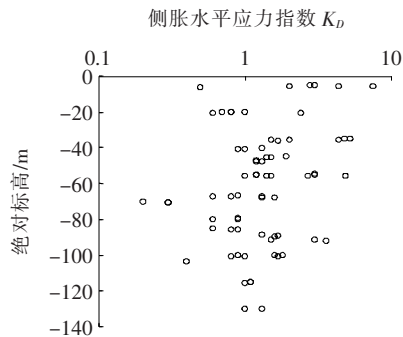


图 4 场区扁铲侧胀水平应力指数  $K_D$  随深度变化关系

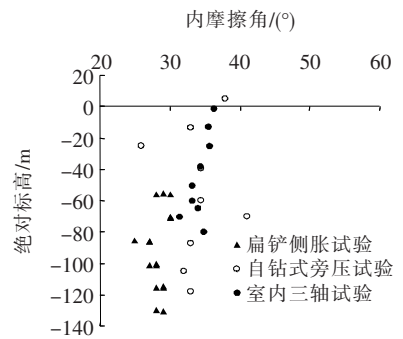


图 5 典型钻孔不同试验方法内摩擦角测试结果对比图

2.3 内摩擦角公式的修正

根据场区自钻式旁压试验、室内三轴试验(CUC)测试内摩擦角对扁铲侧胀试验的计算公式(4)进行修正,具体修正方法为最小二乘法,修正原则为  $K_D > 5$  时,修正公式与式(4)内摩擦角计算值保持相近(误差小于  $0.2^\circ$ ),得出计算式如下:

$$\varphi = 31.5^\circ + 5.35\ln K_D - 0.40\ln^2(K_D) \tag{5}$$

图 6 为扁铲侧胀试验内摩擦角公式下限修正图。由图 6 可知:侧胀水平应力指数  $K_D \leq 5$  时,式(5)确定的砂土内摩擦角下限值与式(4)的计算值相比,有所提升,且其下限值与自钻式旁压试验、室内三轴试验(CUC)测试的内摩擦角下限值基本一致;侧胀水平应力指数  $K_D > 5$  时,式(5)确定的砂土内摩擦角与式(4)计算值保持相近。由此可知,式(5)确定的砂土内摩擦

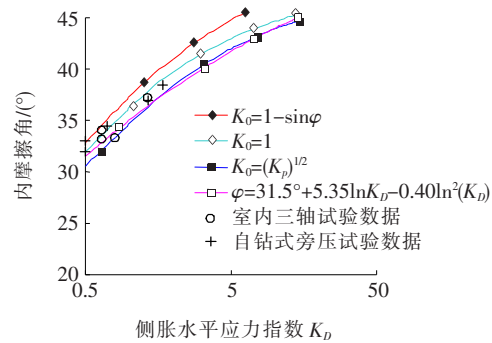


图 6 扁铲侧胀试验内摩擦角公式下限修正

角下限值提供了更为合理的扁铲侧胀试验解释结果。

3 修正公式的验证与分析

收集不同地区采用室内三轴试验、自钻式旁压试验(SBPT)测试砂土内摩擦角的现有文献,如表 2 所示,这些场地同时也进行了扁铲侧胀试验,用于确定砂土内摩擦角与侧胀水平应力指数  $K_D$  的相互关系。室内三轴压缩试验包括各向同性固结不排水试验(CIUC)和各向同性固结排水试验(CIDC)以及剪切前的各向异性固结试验(CAUC,CADC)。

表 2 用 DMT、SBPT 和室内三轴试验测试内摩擦角的文献记录

测试地点	取样来源	内摩擦角测试方法	参考文献
霍尔曼,挪威	河流中	CAUC	文献[12]
		CADC	
		SBPT	
梅西地区,英国	冲积层	CAUC	文献[13]
		CIUC	
波河,意大利	冲积层	SBPT	文献[14]
香港九龙,中国	吹填土	CIUC	文献[15]
		SBPT	
布莱辛顿,爱尔兰	湖成三角洲砂	CIDC	文献[16]
麦当劳农场,英国	冲积层	CIDC	文献[17]

图 7、8 为根据表 2 中收集的文献记录绘制,将不同地区、不同研究人员得出的砂土内摩擦角与修正公式(5)确定的内摩擦角进行比较,结果表明:无论以何种测试方法对修正公式(5)计算值进行评价,其值都大于修正公式(5)确定的内摩擦角下限值。

4 结论

(1) 扁铲侧胀试验方法作为一种快速而准确的原

位测试方法,对土体扰动小,保持土体天然状态和原位应力条件下进行测试,相比较其他原位测试方法,是确定砂土内摩擦角较为准确的方法。

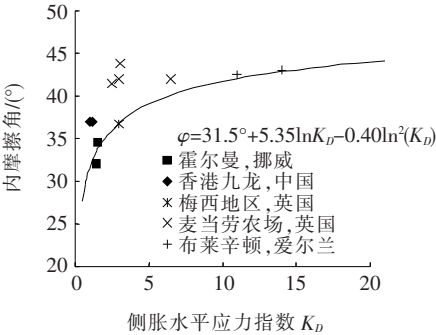


图 7 室内三轴试验确定砂土内摩擦角与修正公式对比

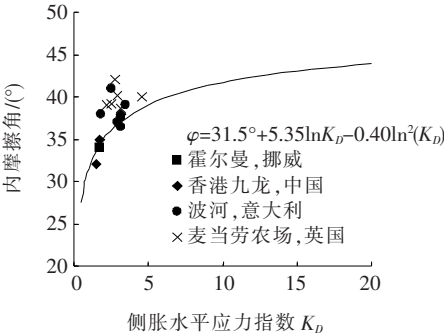


图 8 自钻式旁压试验确定砂土内摩擦角与修正公式对比

(2) 侧胀水平应力指数  $K_D \leq 5$  时,扁铲侧胀试验确定的砂土内摩擦角与室内三轴试验、自钻式旁压试验结果相比偏小,需对扁铲侧胀试验确定的内摩擦角下限值进行修正,建立了修正公式(5)。

(3) 利用修正公式(5),与收集文献记录中的砂土内摩擦角进行比较,进一步验证了公式(5)的合理性和可靠性。

参考文献:

[1] 赵杰. 边坡稳定有限元分析方法中若干应用问题研究 [D]. 大连理工大学博士学位论文,2006.

[2] 郝冬雪. 孔扩张理论研究及自钻式旁压试验数值分析 [D]. 大连理工大学博士学位论文,2008.

[3] Marchetti S, Monaco P, Totani G and Calabrese M. The Flat Dilatometer in Soil Investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC16[C]. Proc. 2nd Intl. Conference on the Flat Dilatometer, Arlington, Virginia,2006: 8—48.

[4] 林之恒,冯涛,孟少伟,等. 砂土内摩擦角与静探锥尖阻力的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报,2018(S2).

[5] Durgunoglu, H. T. and Mitchell, J. K. Static Penetration

Resistance of Soils: I—Analysis; II—Evaluation[J]. In—Situ Measurement of Soil Properties , 1975 ,1:151—189.

[6] Campanella, R. G. and Robertson, P. K. Use and Interpretation of a Research Dilatometer [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28 (1):113—126.

[7] Marchetti, S. The Flat Dilatometer; Design Applications [C]. Proc. Third Intl. Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Soil Mechanics & Foundation Research Laboratory, Egypt, 1997: 423—448.

[8] 任士房,曾洪贤. 基于圆形弹性薄板模型求解扁铲侧胀试验侧向基床系数[J]. 路基工程,2019(3).

[9] 任士房,曾洪贤. 深层孔压静力触探技术的应用与研究 [J]. 工程勘察,2018(4).

[10] Paul M. Peak Friction Angle of Undisturbed Sands Using DMT[C]. Proc. 2nd Intl. Conference on the Flat Dilatometer, Arlington, Virginia,2006: 8—48.

[11] Jamiolkowski, M, LoPresti, D. C. F., Manassero, M. Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from Cone Penetration Test and Flat Dilatometer Test[J]. Soil Behavior and Soft Ground Construction (GSP 119), ASCE, Reston, Virginia, 2001, 5 (32): 201—238.

[12] Lunne, T, Long, M, Forsbert, C. F. Characterization and Engineering Properties of Homen, Dram—men Sand[J]. Characterization & Engineering Properties of Natural Soils, 2003,4(32): 1 121—1 148.

[13] Cruz, I. R. . An Evaluation of Seismic Flat Dilatometer and Lateral Stress Seismic Piezocone[D]. Thesis Master of Applied Science, Civil Engineering, Univ. British Columbia,2009.

[14] Ghionna, V. N. , Jamiolkowski, M, Pedroni, S, et al. Cone Pressuremeter Tests in Po River Sand [J]. The Pressuremeter and its Avenues, 1995, 10(33): 471—480.

[15] Lee, K. M, Shen, C. K, Leung, D. H, et al. Effects of Placement Method on Geotechnical Behavior of Hydraulic fill sands[J]. Geotechnical & Geoenvironmental Engrg, 1999, 125 (10): 832—846.

[16] Doherty, P, Kirwan, L, Gavin, K. and Igoe, D. Soil Properties at the UCD Geotechnical Research Site at Blessington[C]. Proceedings, Bridge and Concrete Research in Ireland. Trinity College Dublin, 2012: 499—509.

[17] Robertson, P. K. In—Situ Testing of Soil with Emphasis on its Application to Liquefaction Assessment[D]. PHD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, 1982.