

# 扁铲侧胀仪的改进及应用

刘学彦<sup>1,2</sup>, 朱定华<sup>3</sup>, 袁大军<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044;  
3. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 由于具有对土体扰动小、试验点连续、能较好地反映原位土的力学性质等优点, 扁铲侧胀试验被越来越广泛应用于实际工程。但是, 在扁铲侧胀试验测定过程中, 加压速率等因素对试验结果有一定影响, 这些因素对试验结果影响程度多大, 测试结果误差如何衡量和修正却无从给出, 而且扁铲侧胀试验不能直接测定孔隙水压力。为此, 添加微型位移传感器和孔压传感器, 对传统扁铲侧胀仪进行改进, 成为孔压位移扁铲侧胀仪 (pore pressure and displacement flat dilatometer)。使得扁铲试验具有自校准功能并兼备孔压测定功能。介绍了孔压位移扁铲侧胀试验的原理、过程和方法, 并分析了孔压位移扁铲侧胀试验与传统扁铲侧胀试验的异同。通过与传统扁铲的对比试验得出, 孔压位移扁铲侧胀试验测试结果更加稳定、准确, 并首次在纬三路试验场地通过孔压位移扁铲侧胀试验确定了原位静止土压力, 进行了成功应用。

**关键词:** 孔压位移扁铲侧胀仪; 自校准; 孔隙水压力; 对比试验; 原位静止土压力

**中图分类号:** TU415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)07-1375-06

**作者简介:** 刘学彦(1985-), 男, 河南汝南人, 博士研究生, 主要从事泥水盾构隧道和掘进土力学方面的研究工作。  
E-mail: happyhome-liu@163.com。

## Improvement and application of flat dilatometer

LIU Xue-yan<sup>1,2</sup>, ZHU Ding-hua<sup>3</sup>, YUAN Da-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** With the advantages of little soil disturbance, good continuity of the test data and good prediction of mechanical properties of in-situ soil, flat dilatometer tests have been used in more and more projects. But the rate of pressurization and other factors bring errors to the test results in flat dilatometer tests, and it's difficult to evaluate the error and give the emendatory results. The pore water pressure cannot be measured directly by the flat dilatometer tests. Thus, the micro-displacement and pore pressure sensors are installed on the flat dilatometer to make it change into the pore pressure and displacement flat dilatometer. It can regulate the results by itself and measure pore pressure directly. The principle, method and procedure of the pore pressure and displacement flat dilatometer tests are introduced. The differences between the pore pressure and displacement flat dilatometer tests and the flat dilatometer tests are also given. The results measured in the pore pressure and displacement flat dilatometer tests are more accurate and stable by comparing with these of the flat dilatometer tests. The in-situ lateral earth pressures in the test field of Weisan Road are measured in the pore pressure and displacement flat dilatometer tests for the first application.

**Key words:** PDDMT; result regulation by itself; pore pressure; comparative test; in-situ lateral earth pressure

## 0 引言

扁铲侧胀试验 (flat dilatometer test), 简称 DMT, 由意大利 Marchetti 创立<sup>[1]</sup>以来, 各国学者将扁铲侧胀试验应用于岩土工程实践, 并进行了大量的研究工作, 如 Finno<sup>[2]</sup>给出了扁铲贯入过程的三维数值解, 如速度场、应变场和应力场。Kamei 等<sup>[3]</sup>介绍了扁铲侧胀试验在日本的应用并探讨了不排水剪切强度的估值

计算。徐超等<sup>[4]</sup>介绍了扁铲侧胀试验在上海软土地基评价中的应用, 向先超等<sup>[5]</sup>把扁铲侧胀试验用于软基处理评价。这些研究补充和完善了 Marchetti 最初提出的试验方法和参数评价所采用的经验关系式, 使得扁

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878015, 51178027)

收稿日期: 2012-10-22

铲侧胀试验应用得到了迅速推广。目前,扁铲侧胀试验已被 40 多个国家广泛应用,并被收为美国材料与试验协会的推荐方法和欧洲标准<sup>[6]</sup>,中国《岩土工程勘察规范》<sup>[7]</sup>和《铁路工程地质原位测试规程》<sup>[8]</sup>也制定了扁铲侧胀试验的行业标准。

扁铲侧胀试验是采用静力(或锤击动力)把一扁铲形探头贯入到土体中某一预定深度,然后通过加压系统加压使扁铲探头侧面的膜片侧向扩张,测定土体在不同膨胀位移时的侧向压力。但是,在测定过程中,加压速率对试验结果有一定影响,罗松<sup>[9]</sup>提出获得 A 值和 B 值的时间间隔在 20~25 s 之间,电气管路长度大于 25 m 时还要延长。加压速率对试验结果影响程度多大,测试结果误差如何衡量和修正却无从给出。同时,扁铲侧胀仪不能直接测定在饱和黏土贯入过程中引起的超孔隙水压力及其消散过程,为了分析该过程,则需要借助其他分析手段。如涂启柱<sup>[10]</sup>研究了孔压消散与  $P_2$  之间的关系,并提出运用  $P_2$  估算水平固结系数的方法。为进一步提高测量结果的精度和直接测定超孔隙水压力及其消散过程,对传统扁铲侧胀仪进行改进,安装微型位移传感器和孔压传感器,并应用于南京纬三路过江通道工程原位地应力测定,把测得的水平静止土压力应用于现场劈裂试验。

### 1 扁铲侧胀仪的改进

扁铲试验时,整个膨胀过程膜片的最大变形量为 1.1 mm,变形较小,因而可将膜片变形和土体变形均视为弹性过程,土压力与膜片位移的关系如图 1 所示。由试验测得 A, B, C 值,根据图 1 几何关系,可得土体压力值  $P_0, P_1, P_2$  的表达式:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= B - Z_m - \Delta B, \\ P_0 &= 1.05(A - Z_m + \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B), \\ P_2 &= C - Z_m + \Delta A. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, A 为匀速加压膜片距基座 0.05 mm 的压力值;  $\Delta A$  为实验后标定值 A'' 与实验前标定值 A' 之间的差值; B 为匀速加压膜片距基座 1.10 mm 的压力值;  $\Delta B$  为实验后标定值 B'' 与实验前标定值 B' 之间的差值; C 为匀速减压膜片距基座 0.05 mm 的压力值;  $P_0$  为膜片在基座时即无侧向位移时所受的土体压力;  $P_1$  为膜片鼓胀距基座 1.10 mm 时的土体压力;  $P_2$  为膜片回缩到距基座 0.05 mm 时的土体压力;  $Z_m$  为压力表在大气压下的零读数。

由  $P_0, P_1$  和  $P_2$  的值,通过式 (2) ~ (5) 可获得 4 个扁铲侧胀试验的基本参数:扁胀模量  $E_D$ 、材料指数  $I_D$ 、水平应力指数  $K_D$  和孔隙水压力指数  $U_D$ 。在获得四种基本参数的基础上可以进行土的分类、计算超固结比、静止土压力系数、抗剪强度、竖向压缩模量、水平固结系数和水平渗透系数,从而进行工程应用。

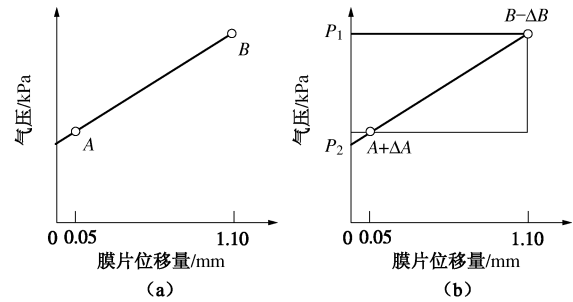


图 1 土压力与膜片位移的关系示意图

Fig. 1 Relationship between earth pressure and membrane displacement

$$E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (2)$$

$$I_D = (P_1 - P_0)/(P_0 - u_0) \quad (3)$$

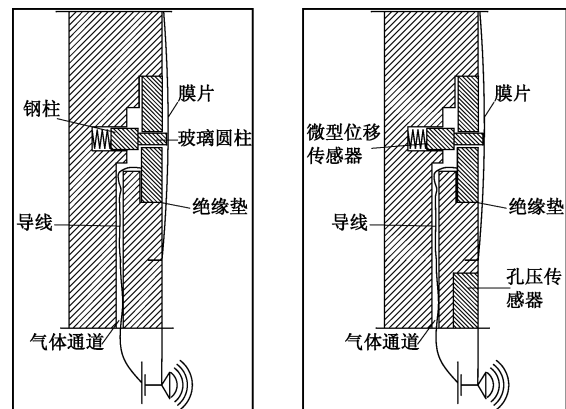
式中,  $u_0$  为静孔隙水压力。

$$K_D = (P_0 - u_0)/\sigma'_{v0} \quad (4)$$

式中,  $\sigma'_{v0}$  为上覆土竖向有效土压力。

$$U_D = (P_2 - P_0)/(P_0 - u_0) \quad (5)$$

由此分析得出,众多工程应用的基础就是准确测定 A, B 的值和孔隙水压力  $u_0$ , 并且保证 A, B 的值为线性关系。由于传统扁铲试验只测定鼓胀位移 0.05 mm 的气压 A 值和鼓胀位移 1.1 mm 的气压 B 值,所以 A 值和 B 值自然为“线性关系”。但是,按照扁铲侧胀试验的原理, A 值和 B 值是所在直线上的两点。只有增加测点,才能验证扁铲侧胀过程的线性关系以及 A 值和 B 值是否为直线上的两点。为此,安装微型位移传感器对传统扁铲进行改进,由只测定 A 值和 B 值变为测定 A 值和 B 值所在直线上 12 点值的改进型扁铲侧胀仪,这 12 点包括 A 值和 B 值。为了测定孔隙水压力  $u_0$ , 增加孔压传感器,成为孔压位移扁铲侧胀仪 (the pressure and displacement flat dilatometer test), 设计如图 2 所示,简称 PDDMT。其中,考虑到探头压入密砂层或者超固结黏土中可能引起负超孔隙水压力,要求传感器能测负值;由于试验时,孔隙水压力变化很快,要求孔压传感器有较高的灵敏性。



(a) 传统扁铲 (b) 改进型扁铲

图 2 改进型扁铲与传统扁铲工作原理对比示意图

Fig. 2 Comparison of working principles between improved flat dilatometer and traditional flat dilatometer

### 2 孔压位移扁铲侧胀试验

与传统扁铲试验相同的是, 孔压位移扁铲侧胀试验之前要进行标定。不同的是, 传统扁铲仪的标定是为了克服膜片自身刚度对试验结果的影响, 通过标定可以确定膜片的标定值  $\Delta A$  和  $\Delta B$ ; 而 PDDMT 的标定包括孔压传感器标定和膜片鼓胀位移气压标定。孔压传感器的标定与传统孔压传感器的标定一致, 主要是确定孔压传感器的初值。为使用方便, 对传感器进行施压, 标定其微机显示值如图 3。膜片鼓胀位移气压标定可以得到大气压下不同膜片位移的气压值和电压值。标定使用气压表和位移计, 如图 4 (a) 所示。标定时, 向扁铲内部缓慢加压, 使膜片缓慢鼓胀, 记录位移值、气压值和电压值如图 4 (b) 所示。

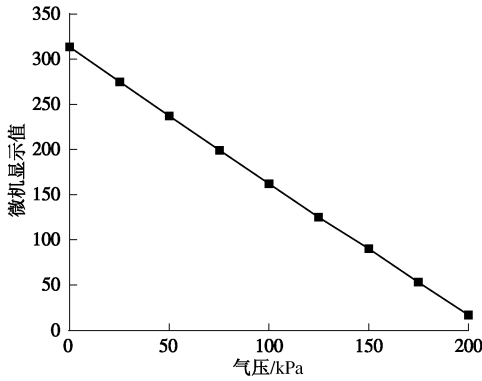


图 3 孔压传感器标定

Fig. 3 Calibration of pore pressure sensor



(a) 膜片标定示意图

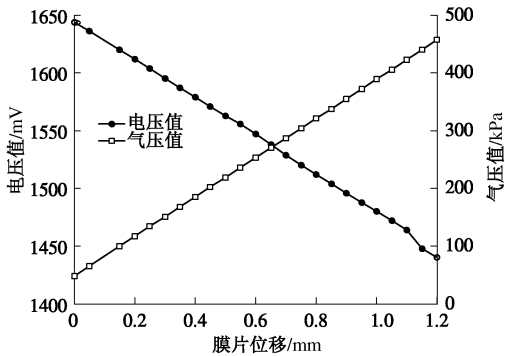


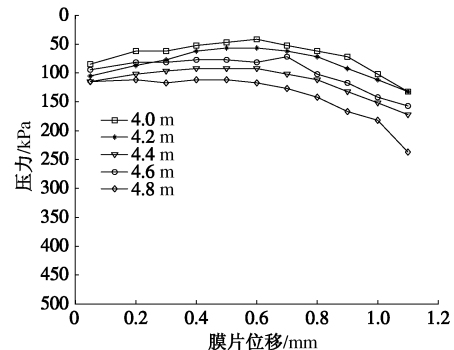
图 4 膜片位移传感器标定

Fig. 4 Calibration of membrane displacement sensor

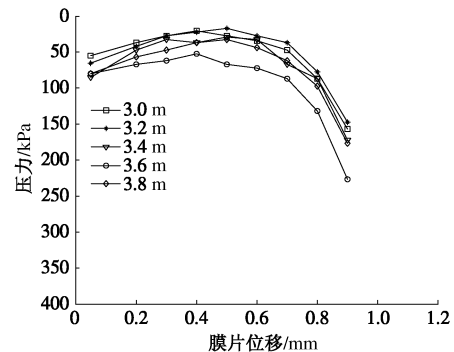
为了验证孔压位移扁铲侧胀仪的试验特性, 选择

纬三路现场劈裂试验场地, 同时进行 PDDMT 和 DMT。如图 5 所示, 孔压位移扁铲侧胀试验, 不仅给出了 0.05 mm 膜片位移和 1.10 mm 膜片位移下的压力值, 还给出了其他膜片位移下的压力值。其中,  $A_1$  孔的膜片鼓胀过程为 21 s,  $B_2$  孔的膜片鼓胀过程为 10 s。可以看出,  $A_1$  孔的测量值基本上在一条直线上, 符合扁铲侧胀试验的基本假设;  $B_2$  孔由于膜片鼓胀较快, 其测量值已经明显不在一条直线上。与传统扁铲侧胀试验相比, 孔压位移扁铲侧胀仪能够对测得数据进行自校验, 使得扁铲侧胀试验测得数据的精度大大增加。

如图 5 (a) 所示, 为了减少单个数据带来的误差, 可以进行线性回归, 从而求出  $P_0$  和  $P_1$ , 进行进一步的分析。由于本次试验是孔压位移扁铲侧胀研制后的首次应用, 其测得数据有限。经过大量应用后, 可以确定测量值是否可用, 比如当线性相关系数大于 0.8 时可用, 否则需要重新测定等。所以本次进行线性回归的意义不大, 便不再进行, 只是对如图 5 (b) 所示的数据进行舍弃。同时, 如果该土体在 1.1 mm 的变形过程中, 其应力应变过程确实不是线弹性过程, 那么孔压位移扁铲侧胀仪也能够显示其应力应变曲线, 为进一步的分析打下基础。



(a)  $A_1$  孔 4.0~4.8 m 压力测定



(b)  $B_2$  孔 3.0~3.8 m 压力测定

图 5 孔压位移扁铲侧胀试验数据示例

Fig. 5 Results of pore pressure and displacement flat dilatometer tests

如图 6 所示, 由于孔压位移扁铲仪添加了孔压传感器, 使得其具有测定孔隙水压力的功能。从图 6 可以看出, 由于试验场地为淤泥质粉质黏土地层, 其超孔隙水压力消散较为缓慢。

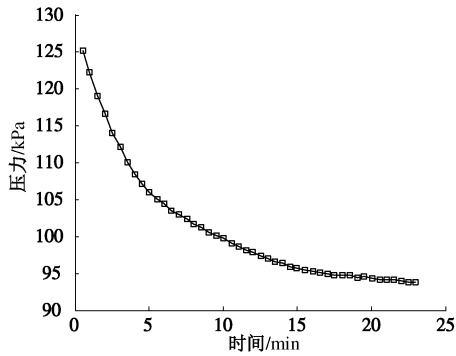


图 6 B<sub>3</sub> 孔 8.0 m 深处超孔隙水压力消散过程

Fig. 6 Dissipation process of excess pore pressure of B<sub>3</sub> hole at depth of 8.0 m

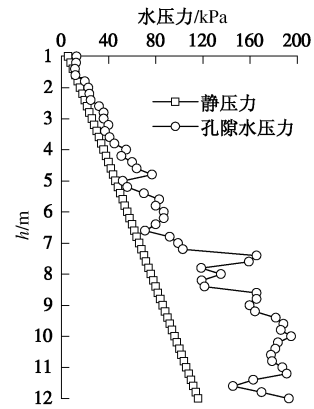


图 8 A<sub>1</sub> 孔孔压位移扁铲侧胀试验孔压测定

Fig. 8 Pore pressure results of A<sub>1</sub> hole with PDDMT

### 3 PDDMT 与 DMT 的对比较验证

选择纬三路现场劈裂试验场地，同时进行 PDDMT 和 DMT。试验结果运用式 (1) ~ (4) 进行计算后，得出扁胀模量  $E_D$ 、材料指数  $I_D$ 、水平应力指数  $K_D$  随深度的变化如图 7 所示。可以看出，在把握气压施加速率均衡稳定的条件下，PDDMT 与 DMT 所得结果基本一致，但 PDDMT 测量值更加稳定。而且，PDDMT 可以直接测量应力测试处孔隙水压力，如图 8 所示，为进一步进行数据分析打下基础。

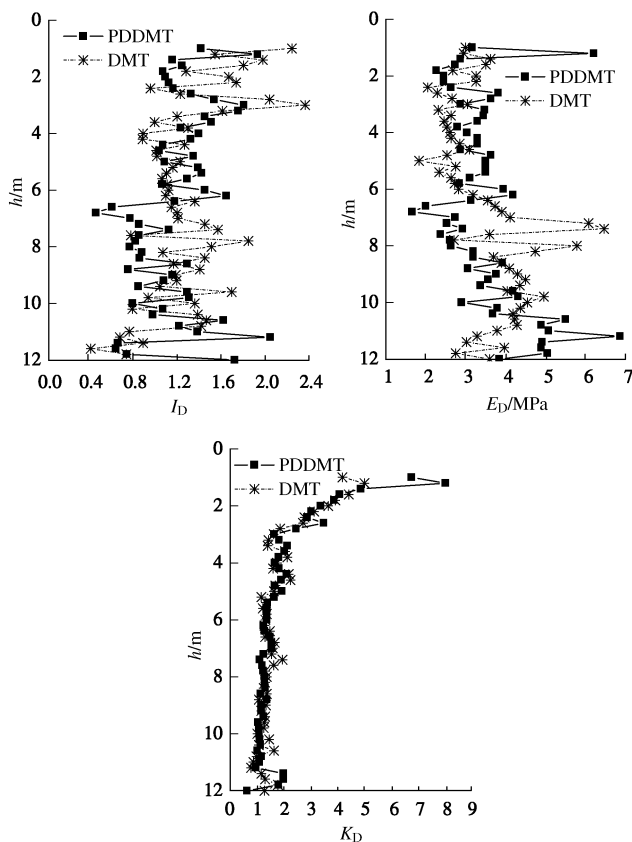


图 7 A<sub>1</sub> 孔改进型扁铲侧胀试验与传统型扁铲侧胀试验结果对比

Fig. 7 Comparison of results between PDDMT and DMT of A<sub>1</sub> hole

### 4 孔压位移扁铲侧胀试验的应用

由于现场泥水劈裂试验的劈裂压力与地层水平静止侧压力有着密切的关系<sup>[11]</sup>。为了更加准确地确定地层水平静止侧压力，运用孔压位移扁铲侧胀试验直接进行原位测定。试验共进行两组，一组 3 个孔，深度分别为 5, 10, 15m。为了使测试深度覆盖试验深度，实测深度为 6, 11, 12 m，其中 12 m 测量深度是由于仪器管线长度限制。

根据实测数据，运用式 (4) 和表 1 中公式，可以计算出水平静止侧压力系数，从而可以得出水平静止侧压力。由于本试验场地为长江漫滩淤泥质粉质黏土，属于新黏土，且由图 7 得出  $I_D$  在 1.2 左右，且  $K_D$  基本上小于 4。所以选择 Marchetti 推荐公式  $K_0 = (K_D/1.5)^{0.47} - 0.6$  和 Lunne T 等推荐式  $K_0 = 0.34(K_D)^{0.54}$  进行计算。由于试验场地为单一淤泥质粉质黏土，只列出 A 组试验结果，如图 9~11 所示。

表 1 水平静止侧压力系数计算式<sup>[6, 12-14]</sup>

Table 1 Formula for calculating lateral pressure coefficient

文献	公式	使用范围
Marchetti <sup>[11]</sup>	$K_0 = (K_D/1.5)^{0.47} - 0.6$	软土，且 $I_D \leq 1.2$
Lacasse 等 <sup>[13]</sup>	$K_0 = 0.34(K_D)^m$ $0.44 \leq m \leq 0.64$	$K_D \leq 4$ ，且当为高塑性时取 $m = 0.44$ ，当为低塑性时，取 $m = 0.64$
Lunne 等 <sup>[14]</sup>	$K_0 = \begin{cases} 0.34(K_D)^{0.54} \\ 0.68(K_D)^{0.54} \end{cases}$	当 $S_u/\sigma'_{v0} \leq 0.5$ ，新黏土， $K_0 = 0.34(K_D)^{0.54}$ ；当 $S_u/\sigma'_{v0} \geq 0.8$ ，老黏土； $K_0 = 0.68(K_D)^{0.54}$
陈国民	$K_0 = 0.34(K_D)^{0.54} - 0.06K_D$	$K_D > 4$ ，上海软土

注： $S_u$  为不排水剪切强度， $S_u = 0.22 \cdot \sigma'_{v0} \cdot (0.5K_D)^{1.25}$ ；其中， $\sigma'_{v0}$  为竖向有效应力。

从图 9~11 可以看出，Marchetti 推荐公式计算结

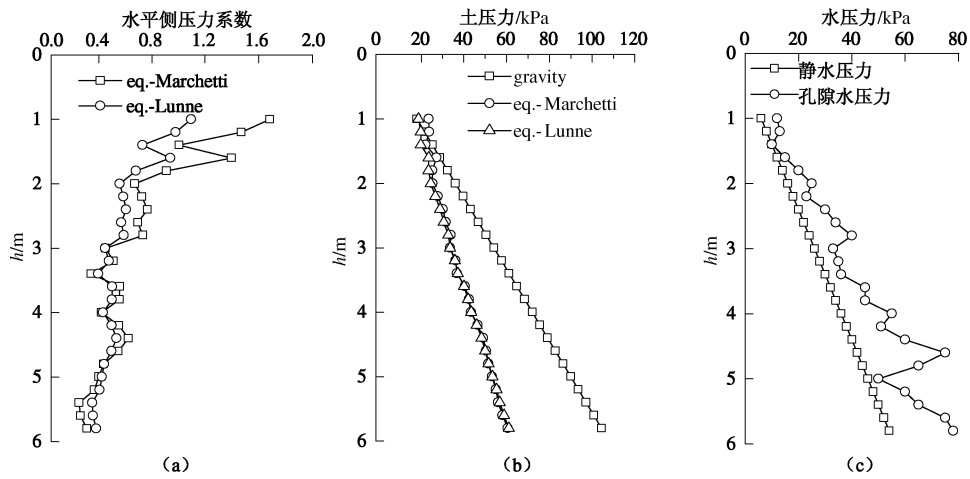


图 9 A<sub>3</sub> 孔静止侧向土压力、孔隙水压力随深度变化图

Fig. 9 Variation of lateral earth pressure and pore pressure of A<sub>3</sub> hole with depth

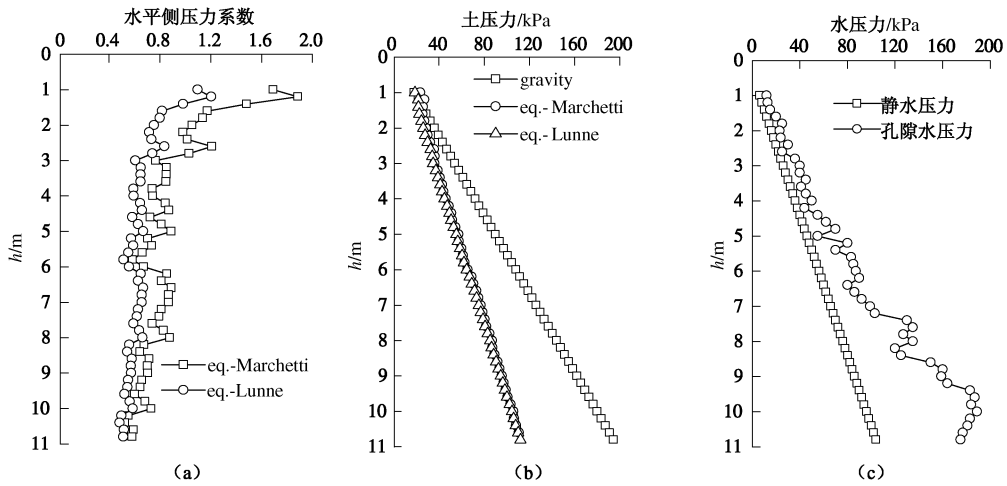


图 10 A<sub>2</sub> 孔静止侧向土压力、孔隙水压力随深度变化图

Fig. 10 Variation of lateral earth pressure and pore pressure of A<sub>2</sub> hole with depth

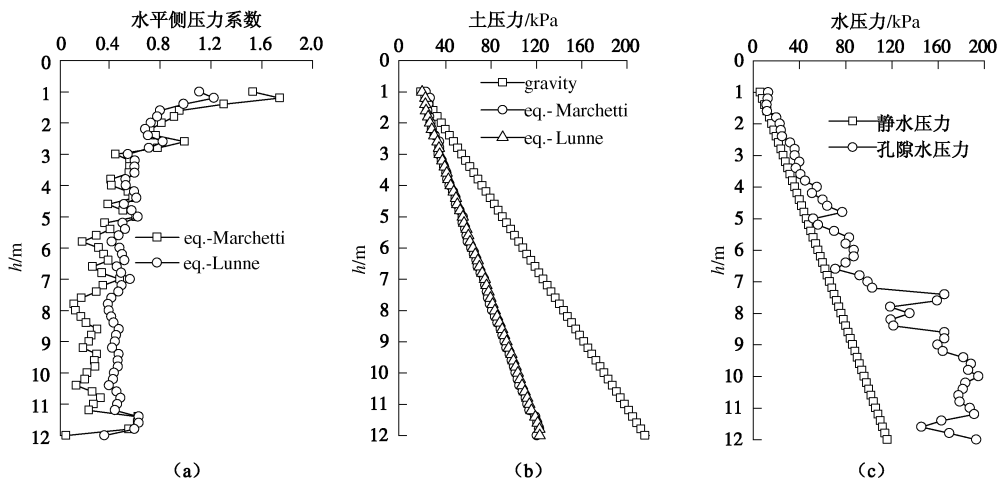


图 11 A<sub>1</sub> 孔静止侧向土压力、孔隙水压力随深度变化图

Fig. 11 Variation of lateral earth pressure and pore pressure of A<sub>1</sub> hole with depth

果离散性较大,而 Lunne 推荐公式计算结果较为稳定。测定侧压力系数基本在 0.4~0.8 之间。靠近地面的侧压力系数较大,甚至超过了 1.0,而地面 3 m 以下基本为 0.45 左右。从  $K_D$  的定义可以看出,公式计算出

的  $K_0$  为有效值,而总应力侧压力系数  $K_0$  为 0.6 左右。具体来说, A<sub>3</sub> 孔的总应力侧压力系数为 0.60, 5 m 处侧向水土压力为 54 kPa; A<sub>2</sub> 孔的总应力侧压力系数为 0.60, 10 m 处侧向水土压力为 108 kPa; A<sub>1</sub> 孔的总应

力侧压力系数为 0.58, 15 m 处侧向水土压力估算为 157 kPa。这些数据的取得为下一步进行劈裂试验打下基础。

## 5 结 论

为了更加准确地测定原位地应力, 在传统扁铲侧胀仪的基础上, 增加了微型位移传感器和孔压传感器, 成为孔压位移扁铲侧胀仪。并进行了 PDDMT 和 DMT 的对比试验, 实现了 PDDMT 试验的首次应用, 得出了以下结论:

(1) 孔压位移扁铲侧胀仪在原有扁铲侧胀仪的基础上增加了微型位移传感器, 使得扁铲侧胀仪能够测量并分析数据  $A$  值、 $B$  值所在直线上的 12 个数据点, 从而使得扁铲侧胀仪具有自校准功能。

(2) 孔压位移扁铲侧胀仪在原有扁铲侧胀仪添加了孔压传感器, 使得扁铲侧胀仪能够直接测量孔隙水压力。

(3) 通过对比试验, 可以看出, 孔压位移扁铲侧胀仪比传统扁铲侧胀仪更加稳定、准确; 并且可以直接反映孔压随深度的变化。

(4) 把孔压位移扁铲侧胀仪应用到了纬三路现场劈裂试验当中, 为进一步进行现场劈裂试验提供了原位测试得出的水平静止土压力。

(5) 由于孔压位移扁铲侧胀仪刚研制出来, 只进行了首次应用, 因此, 需要在大量应用的基础上确定测试  $A$  值、 $B$  值可用性的标准。并且, 由于测量数据的大量增加, 使得现场试验非常繁重, 需要自动化采集设备来使得孔压位移扁铲侧胀仪更加便于实用。

### 参考文献:

[1] MARCHETTI S. A new in-situ test for the measurement of horizontal soil deformability[J]. In-Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, 1975, 2: 225 - 259.

[2] FINNO R. J. Analytical interpretation of dilatometer penetration through saturated cohesive soils[J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 241 - 254.

[3] KAMEI T, IWASAKI K. Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a flat dilatometer[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(2): 111 - 116.

[4] 徐超, 罗松, 董天林, 等. 扁铲侧胀试验在软土地基评价中的应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1633 - 1636. (XU Chao, LUO Song, DONG Tian-lin, et al. Application of dilatometer test to evaluation of soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1633 - 1636. (in Chinese))

[5] 向先超, 汪稔, 朱长歧. 软基处理中的扁铲侧胀试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1849 - 1852. (XIANG Xian-chao, WANG Ren, ZHU Chang-qi. DMT study on soft ground treatment of Xiamen Haicang Road[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1849 - 1852. (in Chinese))

[6] 陈国民. 扁铲侧胀试验及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 177 - 183. (CHEN Guo-min. Flat dilatometer test and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 177 - 183. (in Chinese))

[7] GB\_50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB\_50021 — 2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))

[8] TB10018—2003 铁路工程地质原位测试规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2003. (TB10018—2003 Code for in-situ measurement of railway engineering geology[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese))

[9] 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.

[10] 涂启柱. DMTC 消散试验探求软黏土固结系数研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 948 - 953. (TU Qi-zhu. Determination of consolidation coefficient for soft clay from DMTC dissipation tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 948 - 953.

[11] 袁大军, 黄清飞, 李兴高, 等. 盾构掘进黏土地层泥水劈裂伸展现象研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 712 - 716. (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, LI Xing-gao, et al. Hydraulic fracture extending during slurry shield tunneling in cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 712 - 716 (in Chinese))

[12] MARCHETTI S. In situ tests by flat dilatometer[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 106: 299 - 321.

[13] LACASSE S, LUNNE T. Calibration of dilatometer correlations[C]// Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1. Orlando, 1988, 1: 539 - 548.

[14] LUNNE T, POWELL J J M., HAUGE E A, et al. Correlation of dilatometer readings with lateral stress in clays[C]// Dynamic Testing of Aggregates and Soils and Lateral Stress Measurements. Washington, 1990: 183 - 193.