

扁铲侧胀试验检测地基处理效果

刘 晶<sup>1</sup>, 袁灿勤<sup>1</sup>, 刘建胜<sup>2</sup>

(1. 南京工业大学土木工程学院, 江苏南京 210009; 2. 烟台建源建筑装饰有限公司, 山东烟台 264400)

摘要: 扁铲侧胀试验(DMT)在岩土工程中已经获得广泛应用, 尝试了用其检测地基处理的效果。在南京龙潭港三期工程中, 采用强夯法进行地基处理, 并应用DMT结合静力触探试验来检测地基处理的效果。试验结果表明, DMT具有操作简单快捷、对土体扰动小、测试参数多等优点。通过比较强夯前后竖向排水侧限模量MDMT及其与比贯入阻力 $p_s$ 之比的变化, 发现经过强夯处理后, MDMT和MDMT/ $p_s$ 均增加约1.5~2.0倍, 表明扁铲侧胀试验在检验地基处理效果方面较其他试验作用更加明显。

关键词: 扁铲侧胀试验; 地基处理; 强夯法; 侧限模量

中图分类号: Tu413 文献标识码: A 文章编号: 1671-7627(2008)04-0074-05

Application of flat dilatometer test in verifying ground treatment effect

LIU Jing<sup>1</sup>, YUAN Can-qin<sup>1</sup>, LIU Jian-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Yantai Jianyuan Architecture and Decoration Ltd, Yantai 264400, China)

Abstract: Flat dilatometer test (DMT) was widely used in geoenvironment to verify ground treatment effect. Dynamic compaction was applied in the third stage of LongTan Port project in Nanjing for ground treatment, DMT and static penetration test were used for verifying the effect of ground treatment. The results reflect that DMT is simple to be operated, has less disturbance in soil and obtains more parameters exactly. By comparing vertically drained and laterally constrained modulus MDMT with ratios of specific penetration resistance  $P_s$  to it (MDMT) before and after dynamic compactions, it was found that MDMT and MDMT/ $P_s$  increase about 1.5 to 2.0 times after dynamic compaction. Comparing with other in-situ tests, DMT plays a more effective role in verifying ground treatment effect.

Key words: DMT; ground treatment; dynamic compaction; laterally confined module

扁铲侧胀试验(DMT)由意大利学者 Marchetti 教授于 20 世纪 70 年代发明的一种原位测试技术, 并在 1980 年对其试验原理、仪器设备、试验方法、岩土参数分析及其具体工程应用进行了详细的阐述<sup>[1]</sup>, 此后各国学者相继将扁铲侧胀试验应用于本国的岩土工程实践并展开了大量的研究工作, 对 Marchetti 教授最初提出的试验方法和参数评价所采用的经验关系式进行了补充和完善。国内学者陈国民<sup>[2-3]</sup>最先对扁铲侧胀试验展开了研究, 并将其应

用于上海地区的一些实际工程中。

## 1 扁铲侧胀试验的特点、仪器和数据整理

### 1.1 扁铲侧胀试验的特点及应用范围

扁铲侧胀试验作为一种原位测试方法, 主要具有以下特点: 操作简便快速、重复性好、经济、人为影响因素小; 可以得到近乎连续的地层剖面; 一次试验能获得多个参数; 试验结果与土工参数相关联; 对土

收稿日期: 2008-02-28

作者简介: 刘 晶(1984—), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 主要研究方向为岩土工程勘察与测试技术;  
袁灿勤(联系人), 副教授, E-mail: Yuancqin@163.com.



体的扰动小,准确性更好.扁铲侧胀试验适用于素填土、软土、一般黏性土、粉土和中密的砂土,当采用加强型的膜片时也可应用于密实的砂土,但不适用于含砾土层.

### 1.2 试验仪器与试验过程

扁铲侧胀试验仪器的基本组成及布置如图1所示.扁铲铲形插板长约230 mm,宽约95 mm,厚约15 mm,底部为一顶角为20°的楔形体,高约40 mm.铲头的中间有一直径为60 mm的圆形膜片,膜厚约为0.2 mm.由一根穿在杆内的柔性气电管路使插板和地面上的控制箱相连接,插板采用静力触探设备或液压钻机压入土中.

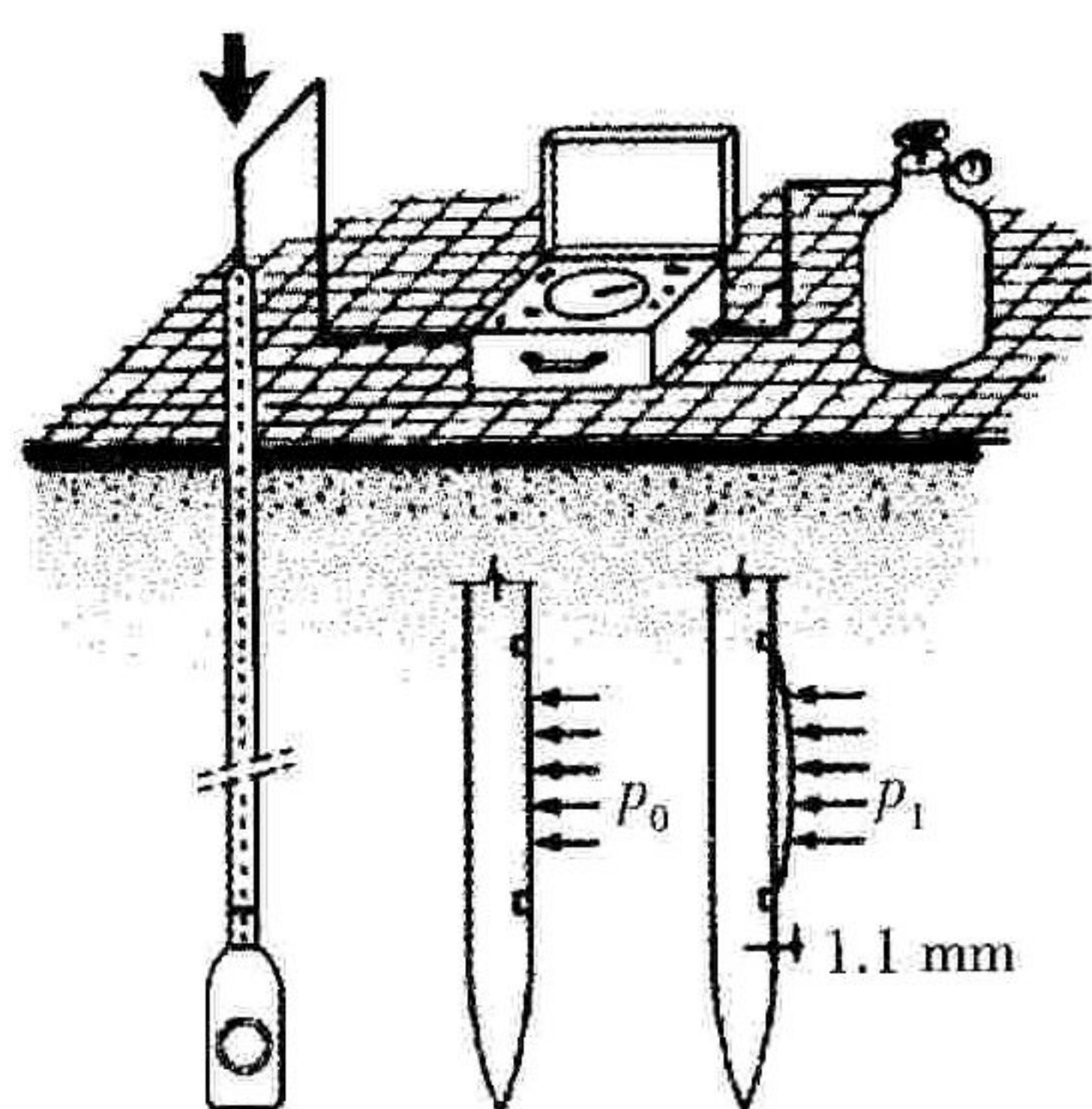


图1 扁铲试验仪器组成及布置

Fig. 1 General layout and equipment composition of the flat dilatometer test

试验过程中,将插板压入土中预定试验深度,加压使膜片膨胀并用压力表或测力数字仪测量气压;当膜片回复到位移量为0.05 mm的初始位置时,测定压力  $A$  (初始读数),再使膜片移动1.1 mm的位置,测定此时的压力  $B$ .然后降低气压,当膜片回缩到初始扩张时的位置,测定此时气压值  $C$  (回复初始读数).一个深度的试验完成后,将插板压入下一个试验深度,继续进行试验,试验点的间距为0.2 m.

### 1.3 试验数据处理

读数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  经过率定修正后,可转化为  $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ .其中: $p_0$ 为初始侧压力; $p_1$ 为1.1 mm位移时膨胀侧压力; $p_2$ 为终止侧压力(回复初始状态侧压力).通过  $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ 可获得以下4个DMT指数.

$$\text{土性指数: } I_D = p_1 p_0 / (p_0 - U_0)$$

$$\text{水平应力指数: } K_D = (p_0 - U_0) / \sigma'_{v_0}$$

$$\text{侧胀模量: } E_D = 34.7(p_1 - p_0)$$

$$\text{孔隙压力指数: } U_D = (p_2 - U_0) / (p_0 - U_0)$$

式中: $U_0$ 为静水压力; $\sigma'_{v_0}$ 为有效上覆土压力.

## 2 应用DMT检测思路和理论基础

应用扁铲侧胀试验检测地基处理的效果主要通过处理前后试验结果的对比,由竖向排水侧限模量  $M_{DMT}$  的显著增加来反映<sup>[4]</sup>.

根据 Marchetti 教授的定义<sup>[4]</sup>,  $M_{DMT}$  为受限制的竖向排水的在  $\sigma'_{v_0}$  处的割线模量,与室内固结试验得到的固结模量  $E_{oed} = 1/m_v$  是一致的.  $M_{DMT}$  可由扁铲模量  $E_D$  乘上一个修正系数  $R_M$  得到,而  $R_M$  是一个与土性指数  $I_D$  和水平应力指数  $K_D$  相关的函数,即  $R_M = f(I_D, K_D)$ .

采用如下 Marchetti 公式计算  $M_{DMT}$ .

$$M_{DMT} = R_M E_D$$

当  $I_D \leq 0.6$  时,  $R_M = 0.14 + 2.36 \lg K_D$ ;

当  $0.6 < I_D < 3$  时,  $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \lg K_D$ ,

其中,  $R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6)$ ;

当  $3 \leq I_D \leq 10$  时,  $R_M = 0.5 + 2 \lg K_D$ ;

当  $I_D > 10$  时,  $R_M = 0.32 + 2.18 \lg K_D$ ;

当  $R_M < 0.85$  时,取  $R_M = 0.85$ .

由于取样对土体的扰动较大,室内固结试验得到的固结模量  $E_{oed}$  通常较  $M_{DMT}$  要小,扁铲侧胀试验为原位试验,土层的扰动的影响大大减小.载荷试验是在表层土进行的原位试验,对土层内部的情况反映不够,而静力触探试验主要反映了垂直向土层的变化情况,缺乏对水平向土层的信息的反映,而且圆锥形探头产生的拱效应较扁铲插板对土层的扰动更大,因此用扁铲侧胀试验来检验地基处理的效果是更为有效的方法,并且在  $M_{DMT}$  中还包含了土层的土性指数 ( $I_D$ ) 和应力历史 ( $K_D$ ) 的信息,所以参数  $M_{DMT}$  更能反映出地基处理后的效果.

## 3 工程实例

### 3.1 国外学者的应用

Schmertmann 等<sup>[5]</sup> 在一个经过强夯处理后的电厂现场,进行了大量的静力触探试验和扁铲侧胀试验来检验效果,该场地土层主要为砂土,试验结果显示锥头阻力  $q_c$  和  $M_{DMT}$  均有明显地增加,而  $M_{DMT}$  的增加量大约是  $q_c$  增加量的2倍. Jendeby<sup>[6]</sup> 在松散砂土场地经过深层夯实前后,也采用静力触探试验和扁铲侧胀试验来检测地基处理的效果,同样发现了



$q_c$  和  $M_{DMT}$  的明显增加,但  $M_{DMT}$  的增加速率更快,与 Schmertmann 的结果相似. Pasqualini 等<sup>[7]</sup> 在检验地基经过振动处理后的效果时,用扁铲侧胀试验甚至可以清楚地检测到对土层边缘的影响,而静力触探试验却无法反映出这一效果. 以上所有结论都清楚地说明扁铲侧胀试验对于土中应力和密实度的变化非常敏感,用以检验地基处理的效果更好.

### 3.2 本文应用实例

#### 3.2.1 应用工程概况

南京港龙潭港区三期工程位于长江南京河段八卦洲的下游、南岸河口上游1.2 km处,港区内地貌单元单一,属于长江漫滩. 后方主要为铁矿石通用堆场和粉矿专用堆场,堆场采用斗轮堆取料机作业,最大轮压为300 kN,设计堆货荷载为250 KPa,因此对地基承载力和不均匀沉降都有一定要求,根据一期工程的建设经验,需要对表层填土和下卧软弱层进行地基处理.

该场地天然地基土的主要物理力学性质指标见表1. 根据本工程的地质条件和使用要求,堆场区采

用强夯法加固地基. 强夯法加固粉质黏土地基,具有技术可行、加固效果显著、设备简单、施工方便、经济易行等优点,通过强夯可使浅部影响深度范围内地基土体形成密实状态,提高地基承载力、减少地基的不均匀沉降.

#### 3.2.2 检验方案的选择

实际工程中检验地基处理效果的常用方法有: 钻探取样、载荷试验、静力触探试验和标贯试验等,主要目的是检验场地的承载力和沉降量是否达到设计的要求,实际应用时多采用综合判别的方法以提高准确性. 本次工程采用了扁铲侧胀试验结合静力触探试验的方法来检测强夯处理后的效果.

本工程共设2组试验区,A、B、D、F区为强夯法加固地基,C、E区为水泥土搅拌桩加固地基,其中D区完成了3个扁铲侧胀试验孔,夯后2个试验孔,夯前1个试验孔,夯前孔在试验区外;F区完成了2个扁铲侧胀试验孔,夯前夯后各1个试验孔. 试验孔深度为7.0~9.0 m,每间距20 cm读数.

表1 天然地基各土层的物理力学性质指标

Table 1 The physical and mechanic property indexes of nature foundation soil in various layers

土层	土名	$w(\text{水})/\%$	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_d$	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s,1-2}/\text{MPa}$
①—2	素填土	29.9	1.90	0.873	22.5	0.53	0.448	4.54
②—2	粉质黏土	33.0	1.89	0.922	13.3	0.86	0.450	4.57
③	淤泥质粉质黏土	40.9	1.80	1.129	13.1	1.44	0.667	3.38
③—2	黏质粉土	34.2	1.88	0.928	9.2		0.373	5.44
④—1	粉砂	30.0	1.87	0.926			0.207	10.50

#### 3.2.3 扁铲侧胀试验数据分析

图2和图3分别为强夯处理前后试验D区和F区竖向排水侧限模量  $M_{DMT}$  和其与比贯入阻力  $p_s$  之比  $M_{DMT}/p_s$  的对比散点图,由图2和3可以看出,夯后距离地表较近的粉质黏土层和黏质粉土层经过强夯处理后,  $M_{DMT}$  值均有明显提高,但试验F区地表下1.60~4.00 m的土层经过强夯处理后的  $M_{DMT}$  较夯前的要小些,其原因可能是该区域土层为淤泥质粉质黏土层,在强夯的作用下,淤泥质粉质黏土的结构已经破坏,其试验强度并没得到完全恢复.

夯后  $M_{DMT}/p_s$  的比值也明显大于夯前,说明  $M_{DMT}$  对水平应力的敏感程度比  $p_s$  更高. 由于粉砂层贯入阻力较大,获得数据较少,故不作统计分析. 此

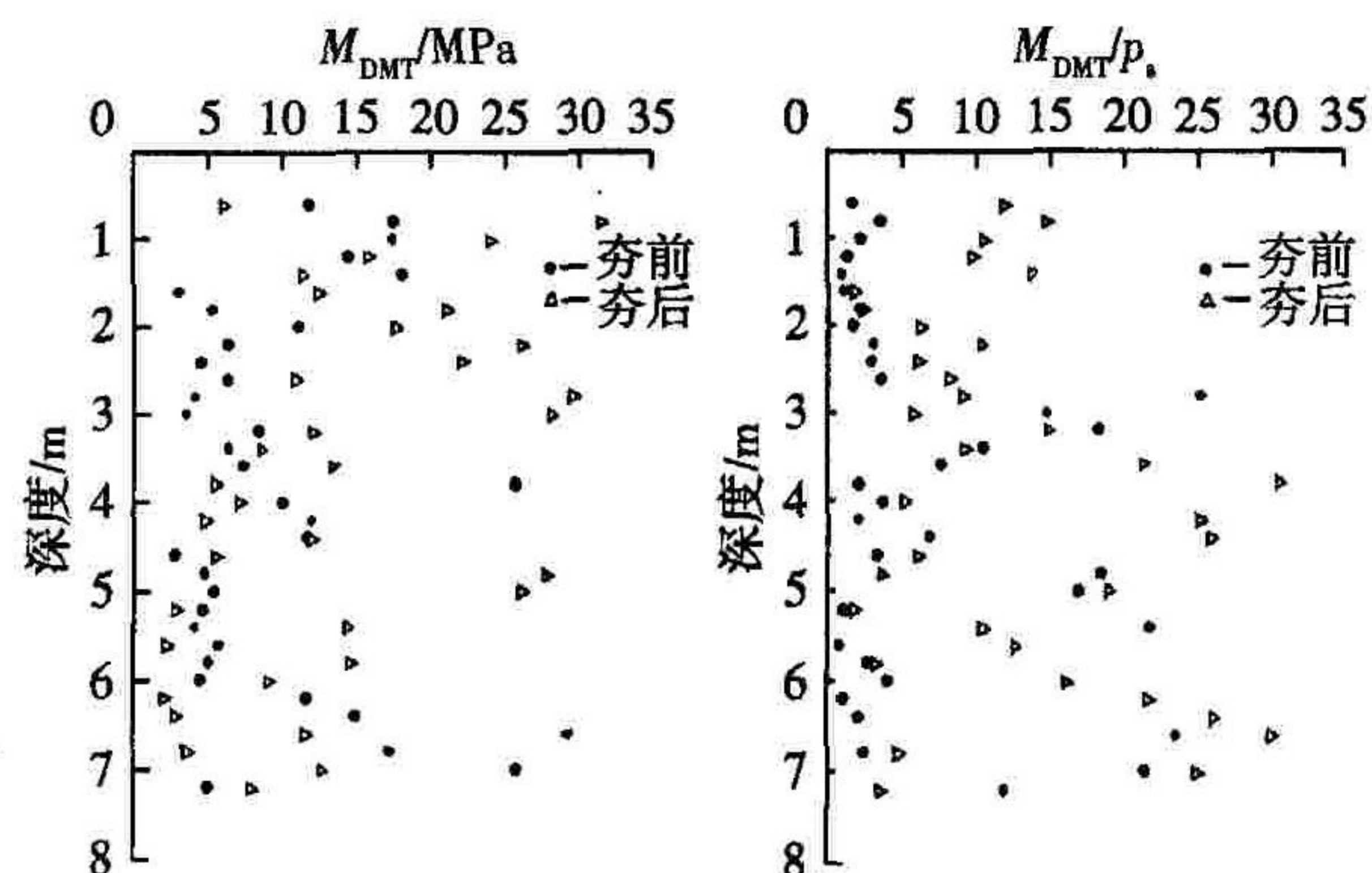


图2 试验D区强夯前后  $M_{DMT}$  及  $M_{DMT}/p_s$  的变化

Fig. 2 Changes of  $M_{DMT}$  and  $M_{DMT}/p_s$  before and after dynamic compaction in district D



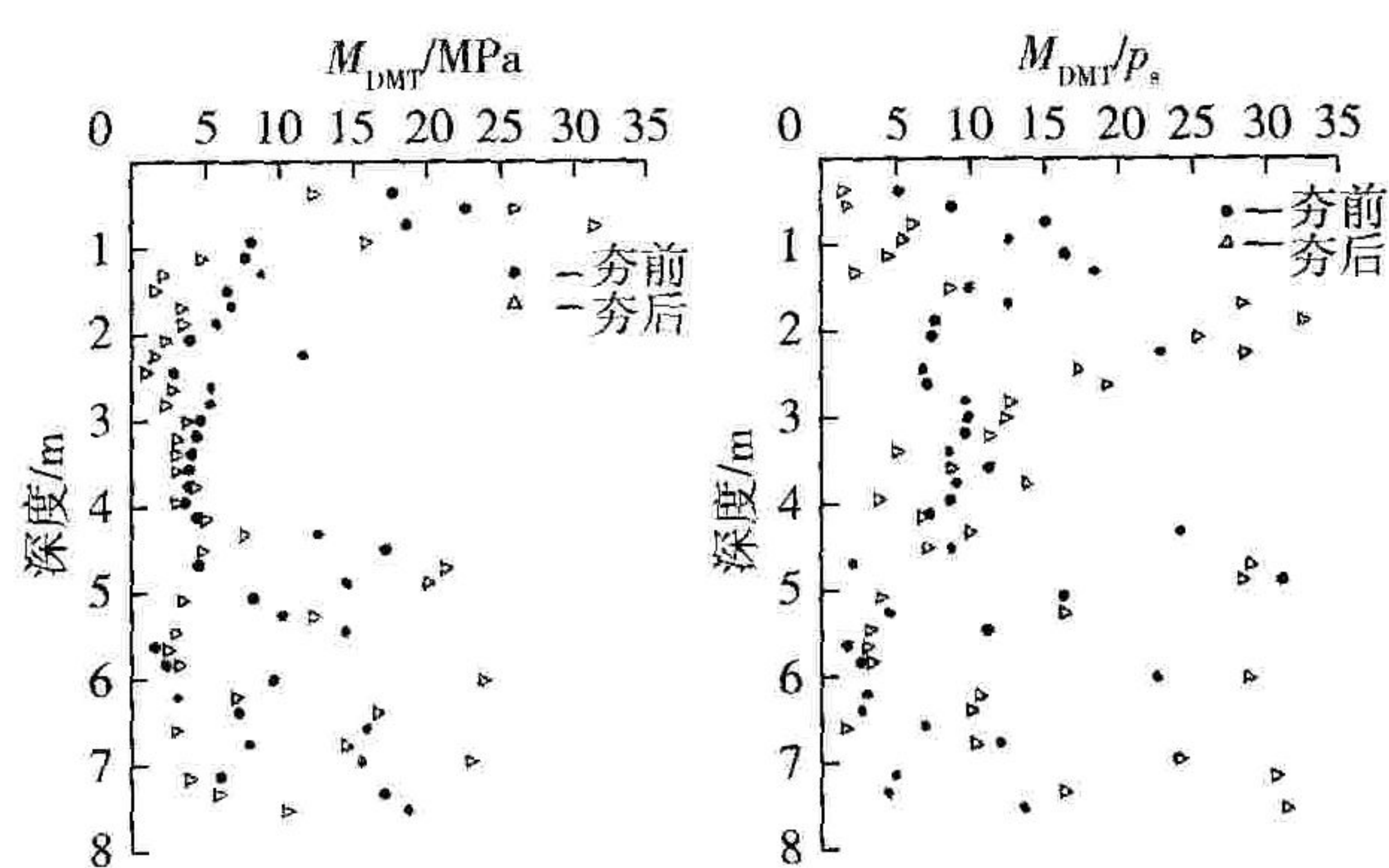


图3 试验 F 区强夯前后  $M_{DMT}$  及  $M_{DMT}/p_s$  的变化

Fig. 3 Changes of  $M_{DMT}$  and  $M_{DMT}/p_s$  before and after dynamic compaction in district F

外随着深度增加,强夯的效果有逐渐减弱的趋势。

图4和图5分别为试验D区和F区在强夯处理前后的静力触探曲线的对比.由图4、5可以看出:经过强夯处理前后土体强度随深度的变化规律与扁铲侧胀试验基本是一致的;3.0 m以上的浅层土经过强夯处理后,测试参数发生了显著的变化,本工程中为粉质黏土层,从静探曲线上可以看出其比贯入阻力  $p_s$  有了大幅度地提高;但地表3.0 m以下土层的测试参数几乎是一致的,没有明显反映出地基处理前后土层强度的变化情况;而扁铲侧胀试验的竖向排水侧限模量  $M_{DMT}$  却较为清晰地反映了深层土体在强夯处理前后的强度变化。

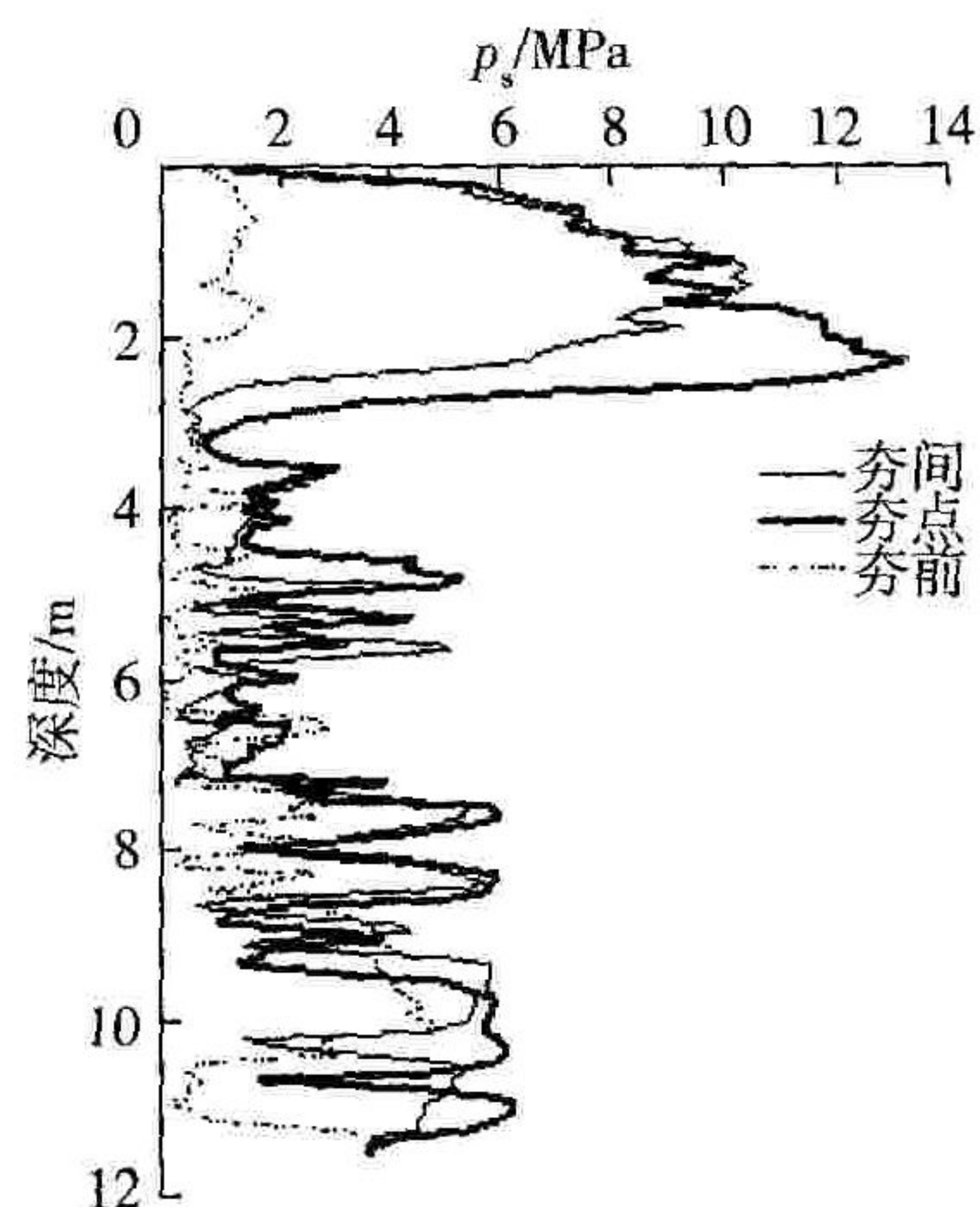


图4 试验 D 区强夯前后比贯入阻力  $p_s$  的变化

Fig. 4 Changes of specific penetration resistance  $p_s$  before and after dynamic compaction in District D

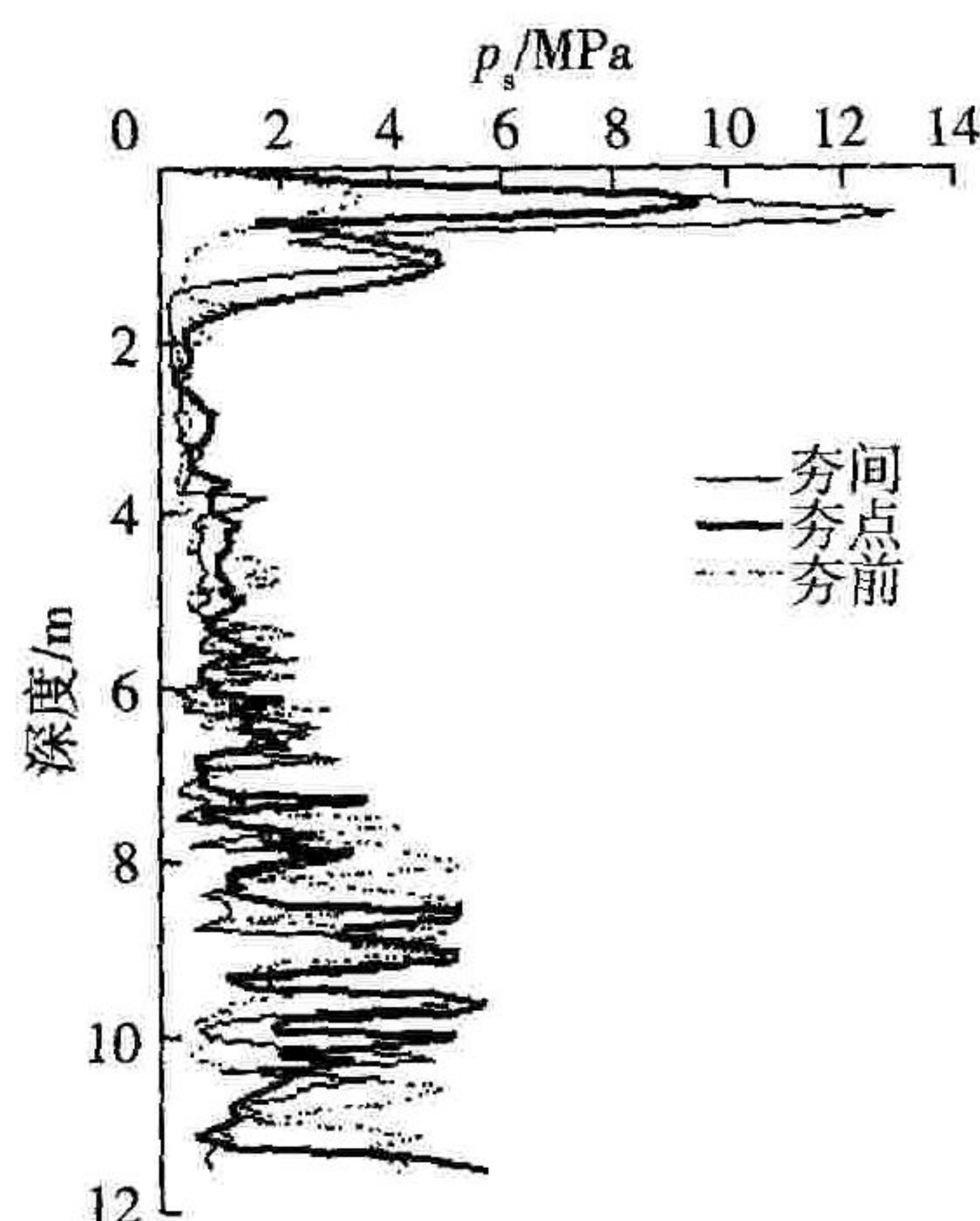


图5 试验 F 区强夯前后比贯入阻力  $p_s$  的变化

Fig. 5 Changes of penetration resistance  $p_s$  before and after dynamic compaction in district F

量  $M_{DMT}$  和其与比贯入阻力之比  $M_{DMT}/p_s$  平均值的对比情况.由表2可以看出:通过强夯处理前后的对比,试验D区的  $M_{DMT}$  提高了1.56倍,而试验F区的  $M_{DMT}$  提高了1.39倍;试验D区  $M_{DMT}/p_s$  提高了1.49倍,而试验F区  $M_{DMT}/p_s$  提高了1.88倍.以上结果表明,扁铲侧胀试验用来检测地基处理的效果非常明显。

表2 强夯处理前后参数的对比

Table 2 The comparison of parameters before and after dynamic compaction

试验区	$M_{DMT}/MPa$		$M_{DMT}/p_s$	
	夯前	夯后	夯前	夯后
D 区	8.79	13.72	11.67	17.33
F 区	9.27	12.92	10.12	18.99

### 4 结 论

扁铲侧胀试验在工程实践中已经获得了广泛的应用<sup>[8-13]</sup>,例如用来划分场地的土层、估计浅基础的沉降和液化的判别等等,但用来检测地基处理的效果还不多见.强夯法是地基处理时经常采用的方法,主要是以冲击型动力荷载,使土中的孔隙减小,土体变得密实,从而提高地基土的强度.本文通过研究扁铲参数竖向排水侧限模量  $M_{DMT}$ ,该参数与土性指数  $I_D$  和应力历史  $K_D$  密切相关,较好地反映了土体密实度和应力的变化情况,通过比较强夯前后  $M_{DMT}$  与比贯入阻力之比  $M_{DMT}/p_s$  的变化,发现经过强夯

表2为经过计算所得的各土层竖向排水侧限模



处理后竖向排水侧限模量  $M_{DMT}$  有明显增加,而且大致为静探参数比贯入阻力  $p_s$  的 1.5~2.0 倍.由此可见,用扁铲侧胀试验来检测地基处理的效果是一种行之有效的办法.本文仅做了初步的探讨,还需更多的工程实践来检验.

#### 参考文献:

- [1] Marchetti S. In situ tests by flat dilatometer[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, 106:299-321.
- [2] 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 Guomin. Flat dilatometer test and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2):177-183.
- [3] 陈国民. 扁铲侧胀试验及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程师, 2001, 13(2):20-26.  
Chen Guomin. The flat dilatometer test and application in the geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineer, 2001, 13(2):20-26.
- [4] Marchetti S, Monaco P, Totani G, et al. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigation[R]. Bali, Indonesia: American Society for Testing and Materials, 2001.
- [5] Schmertmann J H, Baker W, Gupta R, et al. CPT/DMT quality control of ground modification at a power plant; proc in situ'86, ASCE spec conf on use of in situ tests in geotechn engineering [C]. Virginia Tech: ASCE Geotechn, 1986:985-1001.
- [6] Jendebly L. Deep compaction by vibrowing; nordic geotechnical meeting[C]. [S. l.]: NGM, 1992:19-24.
- [7] Pasqualini E, Rosi C. Experiences from a vibroflotation treatment [C]// Proc Annual Meeting of the Geotechn. Rome: National Research Council Group, 1993: 237-240.
- [8] 徐超, 罗松, 董天林, 等. 扁铲侧胀试验在软土地基评价中应用研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10):1633-1636.  
Xu Chao, Luo Song, Dong Tianlin, et al. Application of dilatometer test to evaluation of soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10):1633-1636.
- [9] 李雄威, 蒋刚, 朱定华, 等. 扁铲侧胀原位测试的应用与探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12):2118-2122.  
Li Xiongwei, Jiang Gang, Zhu Dinghua, et al. Application and discussion of DMT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12):2118-2122.
- [10] 陈新民, 殷芳, 严三保, 等. 苏通大桥岩土特性的扁铲侧胀试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5):87-91.  
Chen Xinmin, Ying Fang, Yan Sanbao, et al. An in-situ test study of soil properties using DMT for Suzhou-Nantong bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5):87-91.
- [11] 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 Xianchao, Wang Nan, Zhu Changqi. DMT study on soft ground treatment of Xiamen Haicang Road[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1849-1852.
- [12] 唐世栋, 林国华. 上海地区扁铲侧胀试验与其它试验结果的相关性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(3):392-396.  
Tang Shidong, Lin Guohua. Study on correlation of results between flat dilatometer test and other in-situ tests in Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3):392-396.
- [13] 建设部综合勘察研究设计院. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.