

DMTC 消散试验探求软黏土固结系数研究

涂启柱

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 基于扁铲侧胀试验(DMT)的基本原理, 简要地介绍了利用DMT的C值消散试验求解水平向固结系数的理论与方法。结合商丘—合肥—杭州(商合杭)铁路工程湖州试验段与上海—南通(沪通)铁路工程常熟试验段的DMTC消散试验进行了实例分析研究。结果表明: DMTC消散试验与孔压静探消散试验获取水平向固结系数较为接近, 二者在均质土层中相关性较好, 在非均质土层中相关性较差; 与DMTC消散试验及孔压静探消散试验获取的水平向固结系数相比, 室内试验获取的水平向固结系数明显偏小, 与其他研究者的成果一致。

关键词: 铁路工程; 扁铲侧胀试验; 软黏土; DMTC消散试验; 水平向固结系数

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)05-0948-06

作者简介: 涂启柱(1982-), 男, 安徽宣城人, 硕士, 助理工程师, 主要从事于地质路基设计与研究工作。E-mail: 277142342@qq.com。

Determination of consolidation coefficient for soft clay from DMTC dissipation tests

TU Qi-zhu

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the flat dilatometer test (DMT) theory, the method for deriving the coefficient of horizontal consolidation from DMTC dissipation tests is introduced. The DMTC test results of saturated soft clay ground in Shangqiu-Hefei-Hangzhou railway and Shanghai-Nantong railway are presented, and the coefficient of horizontal consolidation is obtained from the DMTC dissipation data. The results of the coefficient of horizontal consolidation are compared with CPTU dissipation test data and laboratory odometer test data. The comparison shows that the coefficients of horizontal consolidation determined by DMTC tests and CPTU tests are very close. The correlation is good for homogeneous soil, but bad for non-homogeneous soil. The coefficients of horizontal consolidation from laboratory odometer tests are smaller than those obtained by DMTC and CPTU tests, as reported by other researchers.

Key words: railway engineering; flat dilatometer test; soft clay; DMTC dissipation test; coefficient of horizontal consolidation

0 引言

扁铲侧胀试验(简称DMT试验), 是由意大利Silvano Marchetti于1980年创立^[1], 由于该仪器操作简单、重复性好、人为影响因素小、且较经济, 故在国内外工程实践中得到了广泛的应用, 并先后列入ASTM(1986)推荐方法和欧洲Eurocode 7(1997)规范, 铁道部也制定了DMT应用的行业标准^[2]。最近30 a, 国外学者对利用DMT消散试验估算土层固结系数有了一定的研究。在软黏土中, DMT板头所受的水平向应力 σ_h 很重要的一部分是孔隙水压力 u , σ_h 的衰减在很大程度上与 u 的衰减是一致的。在逻辑上 σ_h 与水平向固结系数 C_h 至少存在一个近似的关系。而且值得注意的是: 固结系数的定义没有要求被测的量一定是孔

隙水压力 u (例如: 单轴压缩试验, 根据一维固结理论, 把沉降速率与竖向固结系数 C_v 建立联系), 而且根据 σ_h 的衰减曲线得到 C_h 的想法并不是什么很新的想法, Clarke等^[3]在对旁压试验的应用研究中就提出了该方法, Carter等^[4]进一步研究得到了圆柱形探头受到水平向总应力衰减的理论解。

尽管与孔压静力触探(CPTU)相比, DMT没有孔压元件直接测试超孔压的消散特性, 但是DMT与CPTU相比有其独特的优势: DMT不存在关于孔压过滤单元的相关问题, 如涂抹效应、不饱和问题、堵塞问题等, 而且DMT“控制消散土体体积”的平均应变

比孔压静探的小,对土体的扰动小。

所以,利用 DMTC 消散试验测试土体固结特性日益受到学者与岩土工程师的重视。

1 DMTC 消散试验测试技术

1.1 DMT 试验设备

DMT 试验设备是由测量系统、贯入系统和压力源 3 部分组成。测量系统包括侧胀板头、气-电管路、测控箱、率定装置;贯入系统包括主机、探杆(或钻杆)和附属工具;压力源可采用普通或特制氮气瓶。侧胀板头(图 1)由高强度不锈钢煅制而成,一面装有一片可膨胀的直径为 60 mm 的圆形钢质膜片,膜片一般厚度为 0.2 mm。侧胀板头通过穿在杆内的一根柔性气-电管路和地面上的控制箱相连接,由压缩气体控制膜片松胀量,膜片的横向位移由膜片内侧中心点处的传感元件通过仪表测定。

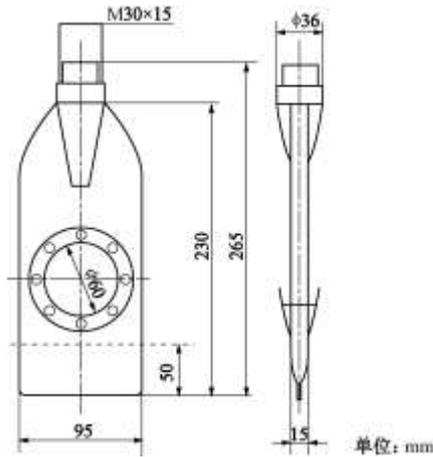


图 1 DMT 板头外形图

Fig. 1 Profile of flat dilatometer blade

1.2 DMTC 消散试验

为了保证 DMT 侧胀板头的匀速贯入,贯入系统采用液压活塞控制,贯入速率为 2 cm/s。贯入到预定的试验深度后停止贯入,在不同的时间点(如 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 min 等)按照 A-B-C 正常的操作顺序读取压力值 C ,一直到 C 值接近稳定后才能结束消散试验。之后,继续贯入至下一个试验深度,开始另一次 DMTC 消散试验。

2 利用 DMTC 消散试验获取软黏土固结系数

2.1 DMT 贯入产生的孔隙水压力

Campanella 等^[5]根据试验发现,在黏土中 DMT 贯入产生很高的超孔隙水压力,而且 DMT 测得的 p_2 值(C 值根据膜片刚度的修正值)与 DMT 贯入时产

生的总孔隙水压力近似相等。Robertson 等^[6]及其他学者的进一步研究支持这个试验结果:DMT 测得的 p_2 值约等于 DMT 贯入时产生的总孔隙水压力。Schmertmann^[7]认为这种结果可能会出现在软黏土和中度硬黏土中,而不会出现在高超固结黏土中。Powell 等^[8]认为在高超固结土中 p_2 值不能准确地反映孔隙水压力,在硬黏土中进行测试发现 p_2 值取决于 DMT 测试过程(例如,测试时间和读取 B 值时过分膨胀的程度)。向先超等^[9]认为 DMT 测得的 C 值实际上包括孔隙水压力和土回弹侧压力,在软黏土中由于土回弹侧压力远小于孔隙水压力, p_2 近似的等于孔隙水压力,但在强度较高的土中,由于土回弹的侧压力较大, p_2 不能可靠地表示孔隙水压力。

2.2 DMTC (p_2) 消散曲线

Robertson 等^[6]对 DMTC (p_2) 消散曲线与 CPTU 孔压消散曲线比较发现,二者在形状上是一致的,但 p_2 归一化消散曲线的消散速率慢于 CPTU 归一化孔压消散曲线, p_2 消散速率慢的原因可能与 DMT 板头是 2 维平板形状有关。Lutenegger 等^[10]比较了 CPTU 孔压消散曲线、DMT 贯入产生的孔压消散曲线及 p_2 消散曲线,发现尽管这些曲线在时间上有一定的位移,但是所有曲线的形状是相同的, p_2 压力消散曲线与 DMT 贯入时产生孔压消散曲线能够很好地匹配。

因此,如果 p_2 近似等于 DMT 贯入产生的总孔隙水压力,那么 p_2 随时间的消散应该能近似地追踪总孔隙水压力随时间的消散过程,从而可以根据 p_2 消散曲线来计算固结系数。

2.3 DMTC 消散试验计算固结系数方法

Robertson 等^[6]通过对 DMTC 消散曲线与 CPTU 孔压理论消散曲线(Torstensson^[11])的比较,提出了 DMTC 方法确定水平向固结系数 C_h 具体步骤如下:①绘制 $p_2 - \lg t$ 曲线;②确定消散时间 t ;③使用式(1)计算水平向固结系数 C_h :

$$C_h = (T \cdot R^2) / t \quad (1)$$

式中 T 为时间因数; t 为消散时间; R 为 DMT 板头的等效半径。

Schmertmann^[7]结合众多学者的研究成果(Baligh 等^[12]、Gupta^[13]、Lutenegger^[10]、Robertson 等^[6])提出了利用 DMTC 消散试验计算 C_h 的方法:①绘制 $C - \sqrt{t}$ 曲线;②确定消散 50% 的时间 t_{50} ;③使用(1)式计算 C_h 。

等效半径 R 是与扁铲截面面积相等的圆柱形截面半径,按照扁铲的标准尺寸计算 $R=21.30$ mm。Schmertmann^[7]与 Lutenegger 等^[14]认为利用 24 mm 作为 DMTC 消散试验的等效半径计算 C_h 与 CPTU 孔压

消散得到 C_h 结果相近, 因此建议该方法使用的等效半径为 $R^2=600 \text{ mm}^2$ 。

T 时间因数取决于刚度指数 I_r , $I_r=G/c_u$, G 为土的剪切模量, c_u 为土的不排水抗剪强度, 可以根据表 1 取值^[13]。

表 1 时间因数

Table 1 Values of time factor T

I_r	100	200	300	400
T_{50}	1.1	1.5	2.0	2.7
T_{30}	0.47	0.59	0.72	0.89

本文采用 Schmertmann 提出的 DMTC 消散试验计算土体水平向固结系数 C_h 的方法, 获取试验场地原位的 C_h 。

3 DMTC 消散试验计算固结系数工程实例

3.1 工程实例——商合杭铁路工程

(1) 试验场地概述

商合杭铁路经过太湖湖积平原, 沿线地势低平, 水系发育, 浅部新近沉积的湖积相软土层分布广泛。试验场地位于商合杭铁路湖州试验段 CK694+400 与 CK694+800 里程断面。试验场地地层分为①耕植土; ②-1 淤泥质粉质黏土, ②-2 淤泥; ③黏土等(见图 2、3)。在 CK694+400 与 CK694+800 里程断面各布置了一个 DMTC 与 CPTU 消散试验孔, 每个试验孔沿深度布置 6 个消散点, 且均布置在②-1 淤泥质粉质黏土与②-2 淤泥层中, 并利用薄壁取土器钻孔取样进行室内试验(见表 2), 由表 2 可以发现试验场地的软土层(②-1 淤泥质粉质黏土与②-2 淤泥)具有含水率高、压缩性大、强度低、天然孔隙比大等特征。

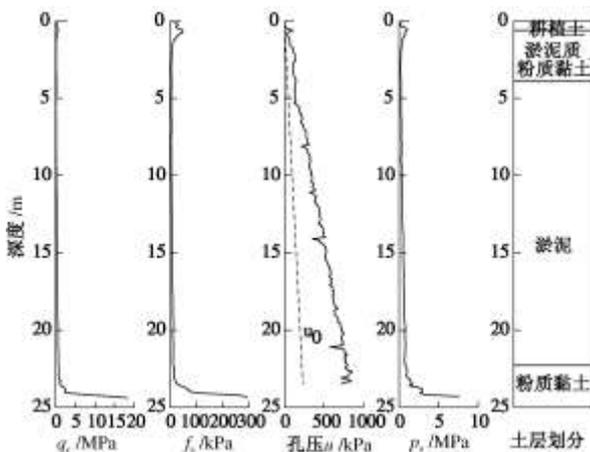


图 2 商合杭铁路(湖州)试验场地静力触探曲线图

Fig. 2 Curves of cone penetration tests on Shangqiu-Hefei-Hangzhou railway (Huzhou) site

(2) DMTC 消散曲线与孔压静探消散曲线比较

DMTC 消散试验计算 C_h 的方法借鉴了孔压静探(CPTU)的孔压消散理论, 因此有必要对 DMTC 与孔压静探归一化消散曲线进行比较(见图 3)。从图 3 中可以看出, 孔压静探(u_1)与 DMTC(p_2)归一化消散曲线在形状上是一致的, 不同之处在于 DMTC(p_2)的消散速率慢于孔压静探(u_1 , 孔压过滤元件位于锥面)的消散速率, 这可能是由于 DMT 板头是平板二维结构, 而孔压静探探头是圆柱三维结构造成的, 这与国外学者的研究结果是一致的^[5,9], 从而进一步证明可以借鉴孔压静探孔压消散理论利用 DMTC 消散曲线计算 C_h 。

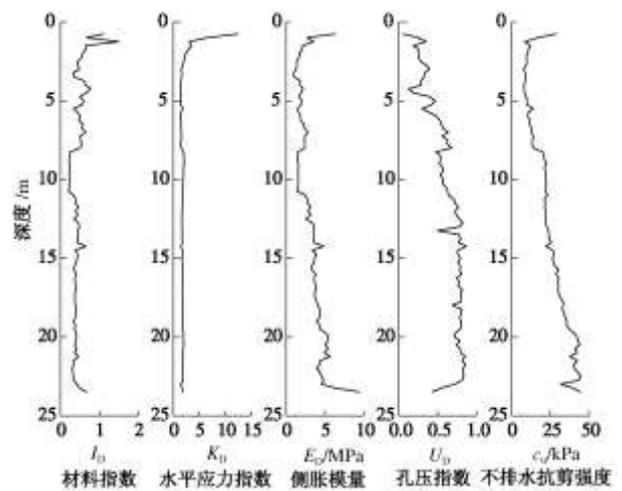


图 3 商合杭铁路(湖州)试验场地 DMT 试验曲线图

Fig. 3 Curves of flat dilatometer tests on Shangqiu-Hefei-Hangzhou railway (Huzhou) sites

(3) 计算结果分析

为了从多方面验证 DMTC 消散试验获取饱和软黏土 C_h 的可靠性, DMTC 消散试验、孔压静探消散试验及取样进行室内固结试验的深度布置相同, 具体结果见表 3。并对不同试验方法获取的 C_h 进行线性拟合分析, 见图 5, 6。

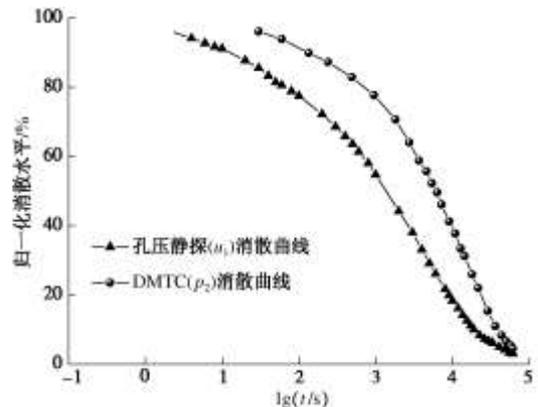


图 4 孔压静探 (u_1) 与 DMTC (p_2) 归一化消散曲线比较图

Fig. 4 Comparison of curves between normalized pore pressure dissipation and DMTC dissipation

表 2 商合杭铁路（湖州）试验场地软黏土的主要物理力学性质指标

Table 2 Main physico-mechanical indexes of soft clay in Shangqiu-Hefei-Hangzhou railway (Huzhou) site

土层	取值	γ /(kN m^{-3})	w /%	e	G_s	W_p /%	I_p	I_L	a_{1-2} / MPa^{-1}	E_{s1-2} / MPa
淤泥质粉质黏土	最大值	17.60	66.20	1.82	2.76	23.70	25.10	2.23	1.49	2.36
	最小值	16.00	44.80	1.24	2.72	20.30	12.80	1.58	0.86	1.63
	均值	16.95	55.88	1.53	2.74	22.00	18.75	1.87	1.17	1.99
淤泥	最大值	17.30	57.40	1.59	2.76	26.90	24.30	2.17	1.65	1.97
	最小值	16.60	48.20	1.34	2.73	19.30	14.10	1.25	1.17	1.39
	均值	16.85	54.24	1.51	2.74	22.96	19.93	1.61	1.33	1.72

表 3 不同试验方法获取 C_h 汇总表

Table 3 Values of horizontal consolidation coefficient C_h measured by different tests

里程	试验深度 /m	$10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$		
		DMTC C_{h-DMTC}	CPTU $C_{h-孔压静探}$	室内试验 C_{h-Lab}
CK694+400	5.25	11.524	8.724	—
	8	13.761	7.035	3.170
	11	1.923	1.471	0.816
	14	1.667	1.288	0.482
	17	1.633	1.203	0.312
	21	1.191	0.926	1.024
CK694+800	6.25	2.094	2.373	0.390
	9	5.562	3.965	1.075
	12	2.242	2.512	0.593
	15	1.811	1.578	0.540
	18	1.699	1.847	0.577
	22	2.462	1.767	0.716

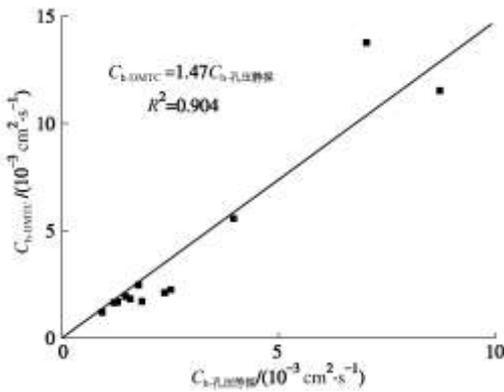


图 5 C_{h-DMTC} 与 $C_{h-孔压静探}$ 线性拟合图

Fig. 5 Linear fitting between horizontal consolidation coefficients measured by DMTC and CPTU tests

从对比分析的结果可以看出，DMTC 与孔压静探获取的 C_h 较为接近，且二者的相关性也较好；但室内试验与 DMTC、孔压静探获取的 C_h 相比，室内试验获取的 C_h 明显偏小，且较离散，这一点与其他研究者的结论^[15-17]是一致的。这可能是由于土样受扰动、土样小、代表性差、土样脱离原位状态等原因造成的。

3.2 工程实例——沪通铁路工程

(1) 试验场地概述

沪通铁路经过长江冲积平原，沿线河漫滩相软土层分布广泛。试验场地位于沪通铁路常熟试验段

DK70+220 里程断面。试验场地地层分为：①耕植土；②-1 淤泥（局部夹薄粉砂层），②-2 淤泥质粉质黏土（局部夹薄粉砂层）；③黏土等（见图 7，8）。在 DK70+220 里程断面分别布置一个 DMTC 与 CPTU 消散试验孔，每个试验孔沿深度布置 7 个消散点，且均布置在②-1 淤泥与②-2 淤泥质粉质黏土层中。

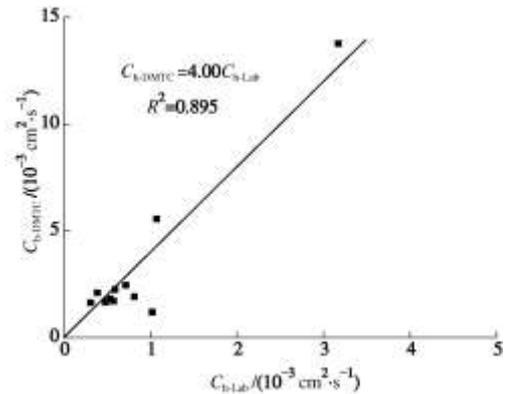


图 6 C_{h-DMTC} 与 C_{h-Lab} 线性拟合图

Fig. 6 Linear fitting between horizontal consolidation coefficients measured by DMTC tests and laboratory odometer tests

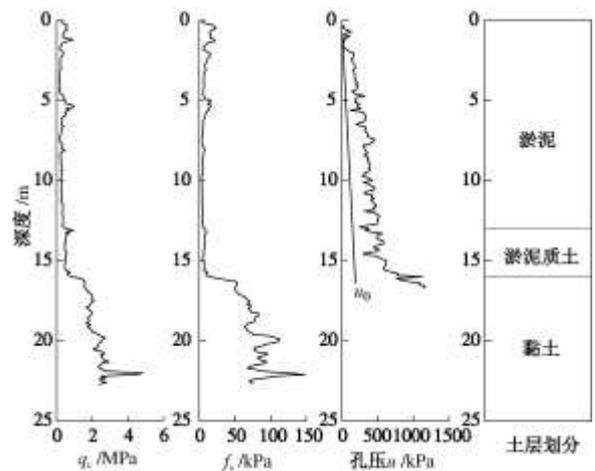


图 7 沪通铁路（常熟）试验场地静力触探曲线图

Fig. 7 Curves of cone penetration tests on Shanghai-Nantong railway (Changshu) site

(2) 计算结果分析

DMTC 与孔压静探消散试验获取的 C_h 见表 4。并对不同试验方法获取的 C_h 进行线性拟合分析, 见图 9。

表 4 DMTC 与孔压静探消散试验获取 C_h 汇总表

Table 4 Values of horizontal consolidation coefficient C_h measured by DMTC and CPTU dissipation tests $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$

试验里程	试验深度/m	$C_{h\text{-DMTC}}$	$C_{h\text{-孔压静探}}$
DK70+220	4	9.30	6.25
	6	8.74	8.67
	8	7.50	4.48
	10	7.14	8.33
	12	9.57	10.67
	14	19.41	15.22
	16	10.82	6.60

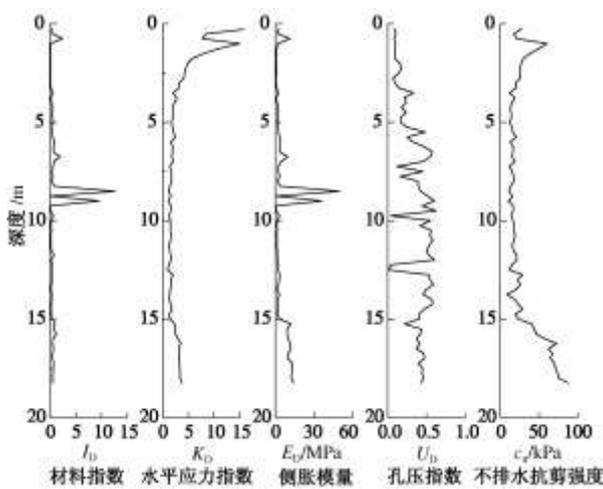


图 8 沪通铁路(常熟)试验场地 DMT 试验曲线图

Fig. 8 Curves of flat dilatometer tests on Shanghai-Nantong railway (Changshu) site

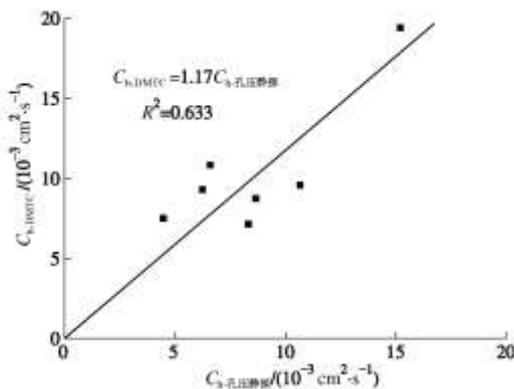


图 9 $C_{h\text{-DMTC}}$ 与 $C_{h\text{-孔压静探}}$ 线性拟合图

Fig. 9 Linear fitting between horizontal consolidation coefficients measured by DMTC and CPTU tests

从对比分析的结果可以看出, DMTC 与孔压静探获取的 C_h 较为接近, 但二者的相关性较差。这可能是因为试验场地第四纪沉积层为长江河漫滩相软土层,

土质不均且局部夹薄粉砂层, 孔压静探测试孔压消散的土层厚度只有 5 mm (孔压元件的厚度), 反映的是孔隙与裂隙中孔压 u 的消散过程, 获取的 C_h 离散性较大, 而 DMTC 消散试验获得的消散曲线反映的是与 DMT 膜片 ($D=60 \text{ mm}$) 接触土体孔压 u 均值 (孔隙与裂隙中孔压的均值) 的消散过程, 获取的 C_h 离散性较小。

当进行沉降计算时, 需要的是土层的平均固结度, 因此利用 DMTC 消散试验获取较厚土层平均的 C_h 计算沉降有利于提高沉降的计算精度。

4 结 论

(1) DMT 试验操作简单、重复性好、人为影响因素小。与孔压静力触探 (CPTU) 相比, DMT 不存在关于孔压过滤单元的相关问题, 如涂抹效应、不饱和问题、堵塞问题等等, 而且 DMT 对土体的扰动较小。

(2) 孔压静探 (u_1) 与 DMTC (p_2) 归一化消散曲线在形状上是一致的, 不同之处在于 DMTC (p_2) 的消散速率慢于孔压静探 (u_1) 的消散速率。

(3) 根据商合杭铁路湖州试验场地与沪通铁路常熟试验场地的试验结果表明: ①在饱和软黏土中, DMTC 与孔压静探获取的 C_h 较为接近。②在均质土层中, DMTC 与孔压静探获取的 C_h 相关性较好; 但是在非均质土层中, 由于孔压静探获取的是薄土层的 C_h , 反映了土层的细节, 离散性较大, 而 DMTC 获取的 C_h 是较厚土层的均值, 离散性较小。③室内试验获取的 C_h 明显偏小, 且与 DMTC 获取的 C_h 相关性较差, 这可能是由于土样受扰动、土样小、代表性差、土样脱离原位状态等原因造成的。

(4) 相对于孔压静探, 利用 DMTC 消散试验获取较厚土层平均的 C_h 计算沉降有利于提高沉降的计算精度。

参考文献:

[1] MARCHETTI S. In situ tests by flat dilatometer[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, 106(3): 299 - 321.

[2] 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))

[3] CLARKE B G, CARTER J P, WROTH C P. In situ determination of the consolidation characteristics of saturated clays[C]// Proc 7th European Conf Soil Mech Found Eng,

- 1979: 207 - 213.
- [4] CARTER J P, RANDOLPH M F, WROTH C P. Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity[J]. *Number Anal Methods Geomech*, 1979(3): 305 - 322.
- [5] CAMPANELLA R G, ROBERTSON P K, GILLESPIE D G, et al. Recent developments in in-situ testing of soils[C]// *Proc XIICSMFE*, S Francisco, 1985(2): 849 - 854.
- [6] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Excess pore pressures and the flat dilatometer test[C]// *Proc ISOPT-1*, Florida, 1988(1): 567 - 676.
- [7] SCHMERTMANN J H. The coefficient of consolidation obtained from p_2 dissipation in the DMT[C]// *Geotechnical conference sponsored by the Pennsylvania Dept of transportation (PennDOT)*, 1988.
- [8] POWELL J J M, UGLOW I M. The interpretation of the march-etti dilatometer test in UK soils[C]// *Proc ISOPT-1*, Orlando, FL(USA), 1988(1): 567 - 576.
- [9] 向先超, 汪 稔, 朱长歧. 软基处理中的扁铲侧胀试验研究[J]. *岩土力学学报*, 2005, **26**(11): 1849 - 1852. (XIANG Xian-chao, WANG Ren, ZHU Chang-qi. DMT study on soft ground treatment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(11): 1849 - 1852. (in Chinese))
- [10] LUTENEGGER A J. Current status of the Marchetti dilatometer test[J]. *Special Lecture, Proc ISOPT-1*, Orlando, FL, 1988(1): 137 - 155.
- [11] TORSTENSSON B A. The pore pressure probe[M]. Norway: *Pro Geoteknikkdagen*, 1977: 1 - 151.
- [12] BALIGH M M, LEVADOUX J N. Consolidation after Undrain- ed Piezocone Penetration[J]. *ASCE, Journal GE*, 1986(112): 727 - 745.
- [13] GUPTA R C. Determination of the in situ coefficients of consolidation and permeability of submerged soils using electrical piezoprobe sounding[D]. Gainesville: University of Florida, 1983.
- [14] LUTENEGGER A J, KABIR M G. Pore pressure generated by two penetrometers in clay[R]. NY: Dept of CEE Report No.87-2, Clarkson University, Potsdam, 1987.
- [15] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于 CPTU 测试的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(4): 846 - 852. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of Lianyungang marine clay based on Piezocone penetration test[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(4): 846 - 852. (in Chinese))
- [16] 孟高头, 王四海, 张德波. 用孔压静力触探求固结系数的研究[J]. *地球科学*, 2001, **26**(1): 93 - 98. (MENG Gao-tou, WANG Si-hai, ZHANG De-bo. Determination of consolidation coefficient by Piezo-cone penetration test[J]. *Earth Science*, 2001, **26**(1): 93 - 98. (in Chinese))
- [17] 黄康理, 张诚厚. 利用孔压静力触探(CPTU)测定宁波软黏土的固结系数[J]. *水利水运科学研究*, 1997(4): 358 - 365. (HANG Kang-li, ZHANG Cheng-hou. Consolidation coefficient of Ningbo soft clay determined from piezocone penetration test (CPTU) [J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1997(4): 358 - 365. (in Chinese))