

文章编号: 1000-7598-(2005) 10-1652-05

双桥静力触探法判别上海薄夹层粘土地基液化研究

张继红¹, 顾国荣²

(1. 上海地固岩土工程有限公司, 上海 200086, 2. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 通过对 11 项典型工程场地进行原位取土及双桥静力触探原位测试分析, 重点研究了上海地区薄层粘性土(或粘质粉土)夹层对液化判别的影响, 统计分析了锥尖阻力 q_c 、摩阻比 R_f 与土层粘粒含量的相关关系, 提出了完全依据双桥静力触探试验的地基液化判别方法, 在工程应用中取得了显著经济效益。

关 键 词: 薄粘性土夹层; 双桥静力触探; 粘粒含量; 液化判别

中图分类号: TU 435.1

文献标识码: A

Study of CPT for liquefaction estimation of sands with thin clay interlayer in Shanghai Area

ZHANG Ji-hong¹, GU Guo-rong²

(1. Shanghai Geo-anchor CO., Ltd., Shanghai 200086, China; 2. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: Based on CPT(q_c , R_f) tests in eleven representative engineering, liquefaction estimation of sandy soils with thin clay interlayer in Shanghai area is studied. It is revealed that there are significant relationship between specific penetration resistance, friction-resistance ratio and soil clay content through statistical analysis of tested data. The liquefaction estimation method based on CPT(q_c , R_f) is given. And its application shows that the method is effective.

Key words: sandy soils with thin clay interlayer; cone penetration test; soil clay content; liquefaction estimation

1 前 言

在地震作用下饱和砂土或砂质粉土中孔隙水压力逐渐上升, 部分或完全抵消土骨架承担的有效应力, 从而使土体承载力降低甚至完全丧失, 发生液化。这种现象往往造成地表喷砂冒水、地裂滑坡和地基不均匀沉降, 危及建筑物的正常使用与安全。如何准确合理地判别地基土的液化及液化危险等级, 一直受到岩土工程界的高度重视。

目前已经提出了一系列评定地基土液化可能性的方法, 如临界孔隙比法、振动稳定密度法、标准贯入试验法、标准爆破沉降量法、临界振动加速度法、抗液化剪应力法、波速法、综合指标法、静力触探法和统计法等^[1~6]。影响土体地震液化的因素有土性条件、初始应力条件、地震作用和排水条件等, 故每种方法都有一定的适用范围, 因此存在试验指标可信度和液化判别精确度问题。

由于双桥静力触探试验可以同时测出锥尖阻力 q_c 值与侧阻力 f_s 值, 不但能较好地反映原位土体的力学性质, 而且能较好的反映土中粘粒含量等物理性质。在试验操作、试验资料稳定性及试验费用等方面与单桥静力触探试验相近, 具有广阔的应用前景。

国外较多地使用双桥静力触探试验, 并直接用于土类划分、土体强度指标计算、液化判别等, 总结了丰富的经验。但国内较多地采用单桥静力触探试验, 并为工程界广泛接受。双桥静力触探试验虽已有所应用, 但对双桥静力触探试验成果的分析与利用不够充分, 需进一步总结经验, 以提高岩土工程技术水平。

本文针对性的选择 11 项典型工程场地进行标准贯入、单桥静力触探、双桥静力触探、孔压静力触探、扁铲侧胀试验。通过多种原位测试技术与室内土工颗粒分实验相结合, 研究地基土液化特性, 重

点研究上海地区薄层粘性土（或粘质粉土）夹层对液化判别的影响，并通过对比分析，研究双桥静力触探试验参数与土层粘粒含量间的关系，提出粘性土薄夹层地区双桥静力触探试验地基液化判别法，并分析了其判别精度。

2 薄层粘性土夹层地基土特性

上海吴淞江故河道在地表以下 15~20 m 深度范围内，沉积了一层饱和松散~稍密的砂质粉土或粉砂（图 1）。该土层砂性较重，沉积年代相对较晚，是需要进行液化可能性与液化危险等级判别的土层。由于上海地区是冲积平原，地基土大多呈成层沉积，一般区域多为粉性土层与粘性土层交错出现，水平层理。不同区域粘性土夹层厚度变化较大，从几厘米到几十厘米不等。由于大量的透水性小的粘性土夹层的存在，形成相对薄隔水层，使土层垂直向的渗透性相对较差，在地震时能有效地隔断或减缓超静孔隙水压力的传递和积聚，对地基抗震是有利的。

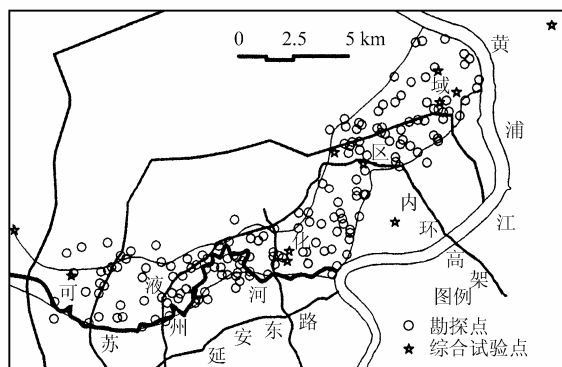


图 1 上海地区吴淞江故河道区域及综合试验点分布图

Fig.1 Representative test locations and drainage basin of Old Wusongjiang River in Shanghai area

在液化判别试验（如标准贯入试验、静力触探试验或扁铲侧胀试验）中广泛分布的薄层粘性土夹层土体强度往往较低，同时由于软弱夹层的存在，影响了砂性土（或砂质粉土）的试验强度，如忽略或对该夹层的有利作用认识不足，液化判别结果将偏于保守。故粘性土夹层的存在，对地基地震液化特性及液化判别精度的影响至关重要。

上海地区的抗震设防烈度，大部分区域属Ⅶ度，设计基本地震加速度为 0.10 g，设计分组为第 1 组。通常采用标准贯入试验或静力触探试验方法进行土层液化可能性判别，并确定相应的液化强度比。由于标准贯入试验成孔直径大小、钻进方式（清水钻进、泥浆护壁和套管护壁等几种工艺）以及取样代

表性等等因素，加之上海地区饱和砂土或砂质粉土层中往往夹有薄层粘性土，导致对于同一土层的试验结果离散性较大。上海地区工程统计资料表明，同一场地、同一土层、同一深度、相邻勘探孔之间标准贯入击数的变异系数达到 30%~50%，甚至更大，因此往往导致判别结果的离散性大且不稳定，这引起了工程界的高度重视。

根据静力触探试验进行液化判别时，判别结果主要通过比贯入阻力 p_s 或锥尖阻力 q_c 与其相应临界值的比较来确定。但如何考虑土层中粘粒含量以及区别粘性土（或粘质粉土）是关键之一，目前的判别方法难以充分反映上海地区土层特定成因条件对液化判别的影响。

3 原位测试

本文针对 11 项工程进行了综合试验研究，试验场地基本覆盖了上海吴淞江故河道区，综合试验工程概况见表 1，综合试验点分布见图 1。

表 1 地基液化判别综合试验工程概况一览表

Table 1 General introduction to representative tests

试验序号	工程名称	工程地点	试验时间/年-月	试验项目孔数			
				标贯	静力触探		扁铲
					单桥	双桥 孔压	
1	某中学	祁连山路	2001-1	14	14		
2	某新村	包头路	2001-7	7		7	7
3	某街坊	民星路	2001-8	3	3		
4	某创业园	中山北路	2001-12	3		3	3
5	某饭店	曲阳路	2002-5	3	2	3	3
6	某地铁线	殷行路	2002-6	3	2		2
7	某街坊	江桥镇	2002-7	8			
8	某扩建工程	民星路	2002-8	6		6	6
9	某博物馆	通北路	2002-10	3		3	3
10	某贵宾楼	富特西一路	2003-4	3	3	3	
11	某小区	虬江路	2002-12	3	3	3	3

本文总计完成试验点数 56 个，试验孔数 153 个，试验深度均超过了 15 m，并进入第④层淤泥质粘土。严格按照试验操作要求，采用钻孔取土与标准贯入试验、静力触探试验（锥尖阻力、锥侧阻力及孔压）、扁铲侧胀试验 3 种原位测试方法。其中 4 项工程在同一试验点同时采用了 3 种原位试验，合计试验点数 17 点，7 项工程在同一试验点同时进行 2 种试验，每个试验点均进行了连续的钻孔取样与室内颗分试验，并进行了对比分析，研究了试验操作方法对液化判别结果的影响。

4 地基液化判别方法研究

上海地区的浅层饱和砂土或饱和砂质粉土层

中, 分布的大量透水性小的粘性土夹层有利于地基抗震, 已经取得上海地区岩土工程界的共识。文献[2]中关于薄层土厚度对液化判别的影响做了较为明确的规定, 如 7.2.2 条指出, 符合下列情况之一时可初判为不液化: 即砂质粉土或粉砂与粘性土互层时, 其粘性土合计厚度达到或超过土层总厚度的 1/3; 在粉性土中粘质粉土占 60 % 以上; 上覆不液化土层厚度超过液化土特征深度 d_0 。

工程实践中如何分析薄层粘性土(及粘质粉土)分布及其对液化判别的影响具有十分重要的工程实用意义。

4.1 粘粒含量测定方法研究

粘粒含量(粒径小于 0.005 mm)是地基土定名的主要依据之一。土层性质对液化判别具有重要影响, 1976 年我国唐山地震以后, 在现场震害调查的基础上进一步对影响饱和粉土液化的各种因素进行了研究, 其中最主要的一点是揭示了土中由于粘土颗粒的存在, 出现标贯击数较低的地区不液化, 而标贯击数高(粘土颗粒少)的地区反而液化的“错位”现象, 说明粘土颗粒对地震液化具有阻滞作用。在我国现行规范(国家及上海市标准)中均考虑了粘粒含量对液化判别的影响^[1~3]。

目前依据标准贯入试验与静力触探试验的液化判别式中, 粘粒含量的测定一般均通过室内土工试验确定。由于上海地区浅层砂质粉土与粉砂层中夹有大量的薄层粘性土, 工程中由于取样的代表性不足, 人为因素对粘粒含量测定结果影响较大, 这是造成液化判别结果离散性大的主要原因之一。

4.2 双桥静力触探试验估算粘粒含量的影响

4.2.1 浅部土层锥尖阻力 q_c 值特征分析

由于上海地区浅层砂质粉土与粉砂成因与沉积年代较近, 双桥静力触探试验指标能在一定程度上反映砂质粉土与粉砂层中粘性土及粘质粉土的分布, 主要表现在以下方面:

(1) 粘性土或粘质粉土的静力触探试验 q_c 平均值较小, 且 q_c 与深度的曲线平滑, 起伏小;

(2) 颗粒均匀的粉砂或砂质粉土, q_c 平均值较大, 且 q_c 与深度的曲线相对起伏较小, 且起伏频率较低, 即曲线中高值与低值间隔距离短;

(3) 当粉砂或砂质粉土中夹有粘性土(或粘质粉土)分布时, 由于粘性土层强度较低对 q_c 值曲线有较大影响, 使得 q_c 平均值一般介于(1)与(2)之间, q_c 与深度曲线起伏大, 起伏频率与软弱土层厚度及夹层数量关系密切, 起伏频率较高, q_c 值相对变化量一般较均匀分布的粉砂或砂质粉土高。

4.2.2 地基液化土层初判

由式(1)计算摩阻比如下:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100 \% \quad (1)$$

式中 R_f 为双桥静力触探试验摩阻比(%); f_s 为双桥静力触探试验锥侧阻力(MPa); q_c 为双桥静力触探试验锥尖阻力(MPa)。

对于上海地区土层, 摩阻比 R_f 随着粘粒含量的增加而增加。各土层摩阻比统计范围值见表 2。由表 2 可以看出, 土中粘粒含量越高, R_f 值越大, q_c 值越小。图 2 中给出了初判可液化区域与不液化区域及其分界线, 同时给出了本文试验点分布。根据图 2, 本次研究统计试验点总数为 202 个, 与依据室内土工试验的可液化土层初判结果相比, 判别结果不同点数 9 个, 相对误差约为 4.5 %。

表 2 上海地区浅层土摩阻比经验值范围
Table 2 Experiential range of R_f of shallow soils in Shanghai

参数	土层名称				
	粉砂	砂质粉土	粘质粉土	粉质粘土	粘土
q_c / MPa	2.5~10.5	1.2~9	0.7~3.5	0.7~2.5	0.4~1.5
R_f / %	0.7~1.2	0.7~1.7	1~2.5	1.6~4.0	1.8~6.0

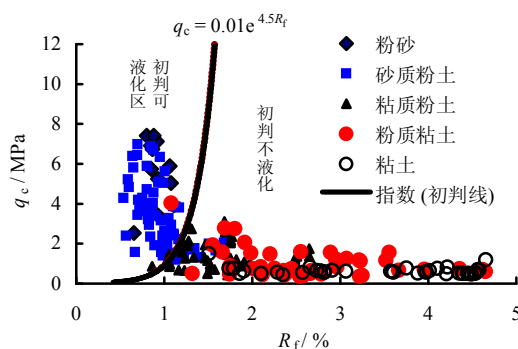


图 2 初判可液化土层分区图

Fig.2 Subarea after the primary liquefaction estimation

4.3 粘性土夹层的判别与计算

摩阻比的变化能较好地反映砂质粉土或粉砂层中粘性土及粘质粉土夹层的分布, 在夹层处, 土体锥端阻力减小, 摩阻比明显增大。可根据式(2)判别初判不液化土层, 亦可根据式(3)计算初判不液化土层的累计厚度。

$$q_c \leq 0.01e^{4.5R_f} \quad (2)$$

$$D_c = \sum d_c(R_f) \quad (3)$$

式中 D_c 为粉砂或砂质粉土地基中粘性土（粘质粉土）夹层的累计厚度； $d_c(R_f)$ 为依据双桥静探不液化夹层的厚度，可根据式（3）确定。

由于上海地区浅层土特定成因条件，这些粘性土（或粘质粉土）夹层往往与粉砂（或砂质粉土）层交错状分布，难以通过划分土层的方法计算其厚度。如果通过连续取土野外鉴别方式确定粘性土（或粘质粉土）夹层厚度，由于鉴别能力的差异，加之施工管理等因素的影响，通过钻孔取土方式计算粘性土（或粘质粉土）薄夹层厚度的可操作性较差，具有较大的局限性，本次综合试验由课题组统一标准对同一试验点的连续钻孔资料进行野外鉴别，拍下了连续的原位取土柱状图，并与静力触探试验成果进行了比较验证发现，由式（3）计算粘性土（或粘质粉土）夹层累计厚度符合工程实际。本文提出的基于双桥静力触探试验累计计算粘性土（或粘质粉土）薄夹层厚度，可操作性强。

4.4 土层摩阻比 R_f 值与粘粒含量的相关性

土层摩阻比与粘粒含量有较好的相关关系。本次试验测定的粘粒含量与 R_f 值关系见图 3。

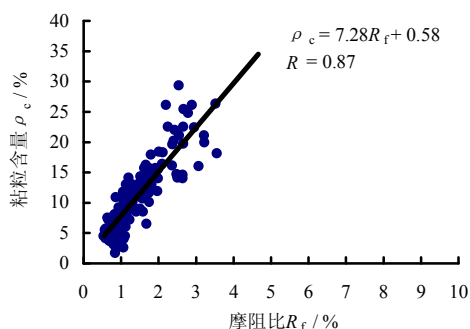


图 3 粘粒含量 ρ_c 与摩阻比 R_f 关系图
Fig.3 Relationship between ρ_c and R_f

根据图 3， ρ_c 与 R_f 存在如式（4）的相关关系。

$$\rho_c = 7.28R_f + 0.58 \quad (4)$$

式中各符号意义同前。

4.5 锥尖阻力临界值计算

双桥触探试验锥尖阻力临界值可按式（5）计算。

$$q_{cr} = q_{c0} \left[1 - 0.06d_s + \frac{(d_s - d_w)}{a + b(d_s - d_w)} \right] \sqrt{\frac{3}{\rho_c(q_c, R_f)}} \quad (5)$$

式中 q_{cr} 为锥尖阻力临界值； q_{c0} 为锥尖阻力标准值，对于Ⅶ度基本地震烈度，可取 q_{c0} 为 2.35 MPa^[2]； $\rho_c(q_c, R_f)$ 为粘粒含量百分率，可根据式（4）估算，其他各符号意义同前。

4.6 液化判别方法精度分析

4.6.1 粘粒含量估算精度分析

本文提出的直接用双桥静力触探试验方法估算粘粒含量，计算值与室内土工试验测出的粘粒含量相比，误差一般可控制的 4 % 以内，相应保证率为 96 %。估算精度及保证率见图 4。

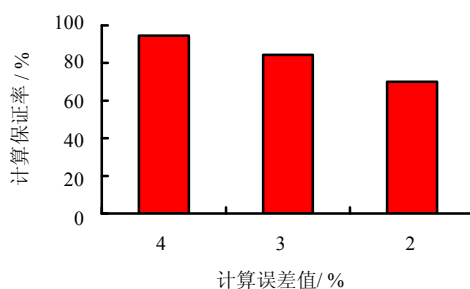


图 4 双桥静力触探试验粘粒含量估算精度分析图
Fig.4 Precision analysis of clay grain content estimation based on CPT

4.7 地基液化判别方法分析与评价

本文提出了用双桥静力触探试验方法估算粘粒含量，并根据土体原位测试强度指标，结合规范与其他原位测试方法，计算了综合试验场地中的单孔液化指数，并将本文方法应用于前文的 11 项工程，各试验场地液化判别结果对比见表 3。

表 3 液化判别结论对比表
Table 3 Liquefaction estimation results contrast

试验工程序号	原勘察报告判别结论	综合试验判别结论
1	严重	中等
2	中等-严重	轻微
3	严重	中等
4	中等	轻微
5	中等	轻微
6		不液化
7	中等	轻微
8	中等-严重	不液化
9	轻微	不液化
10	中等-严重	轻微
11		中等

根据表 3，11 项综合试验判别中的 9 项工程在综合试验前已进行了岩土工程勘察，由于目前液化判别操作及方法的局限性，使得液化判别结果偏于保守，根据地方经验，综合试验判别结果较为合理，并为建设方节约了大量基础建设工程投资。

5 结 语

本文提出了上海薄粘性土夹层地区双桥静力触探试验地基液化判别方法,该方法人为影响因素小,试验可操作性强、重复性好、试验成本低,地基液化判别结果离散性小。测试参数摩阻比 R_f 与土层颗粒组成等物理力学性质有较好的相关性,适合在工程实践中推广应用。由于上海地区无地震液化调查资料,本次研究旨在提高液化判别结果的可操作性与唯一性,本文地基液化判别方法可供有工程经验的其他地区参考使用。

参 考 文 献

- [1] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [2] DGJ08—37—2002. 上海市工程建设规范. 岩土工程勘察规范[S].
- [3] GB 50007—2000. 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90—96.
ZHAO Cheng-gang, YOU Cheng-long. Liquefaction and steady state strength[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 90—96.
- [5] 汪明武, 罗国煜. 最优化法在砂土液化势评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 704—706.
WANG Min-wu, LUO Guo-yu. Application of optimization method to assessment of sand liquefaction potential[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 704—706.
- [6] 沈珠江. 砂土液化分析的散粒体模型[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 742—748.
SHEN Zhu-jiang. A granular medium model for liquefaction analysis of sands[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 742—748.

第二届全球华人岩土工程学术论坛会议纪要

(2005-8-23)

由河海大学主办, 同济大学、法国里尔科技大学、中科院武汉岩土力学研究所、大连理工大学、南洋理工大学、香港大学、名古屋工业大学协办的第二届全球华人岩土工程学术论坛(The 2nd World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering)于2005年8月19~21日在南京召开, 来自美国、澳大利亚、新加坡、法国、英国、日本和中国大陆、香港和台湾等国家和地区的华人专家、学者代表180人参加了论坛。开幕式由大会主席徐卫亚教授主持, 河海大学校长张长宽教授致欢迎辞, 本次论坛执行主席、河海大学岩土工程科学研究所所长刘汉龙教授致开幕词。国际岩石力学学会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会等单位给论坛发来了贺信贺电。

本次论坛于2004年8月开始筹备, 2004年10月发出第一号征文通知, 得到了来自全球各地的华人岩土工程科技工作者的大力支持和响应, 先后收到论文90余篇。经初步审查, 共有94篇学术论文收入论坛论文集, 其中英文论文30余篇, 主要包括了以下6个专题:(1)土力学与基础工程;(2)岩石力学与工程;(3)工程地质与环境;(4)隧道与地下工程;(5)环境岩土工程;(6)岩土工程中的新技术与新材料。论坛之后将论文进行进一步审查, 遴选出精华部分由中国科学出版社出版。

随着我国国民经济的快速发展, 各个领域在岩土工程方面都积累了丰富的实践经验, 也给岩土工程学科提出了许多新的课题。本届论坛将立足于传播海内外华人岩土工程学者的成就, 展望世界岩土工程科学研究的最新进展, 探讨二十一世纪的岩土工程发展趋势以及华人科学工作者的历史使命。论坛的主要宗旨是:(1)加强全球华人岩土工程学者的学术交流, 将海外华人岩土工程学者的最新研究进展及时介绍到中国, 同时也促进海外华人学者对祖国岩土工程建设发展的了解;(2)促进全球华人岩土工程学者之间的联系, 探讨岩土工程研究的重大基础性问题, 提高试验技术装备开发与应用水平, 争取开展联合研究, 增强华人学者在国际岩土工程界的影响。

大会特邀了新加坡楚剑教授、李福豪教授、周顺和教授、台湾黄安斌教授、法国邵建富教授、中国刘汉龙教授、栾茂田教授、冯夏庭教授、殷宗泽教授、勘察大师徐瑞春教授、刘松玉教授、黄宏伟教授、香港张利民教授、岳中琦教授等14位国内外知名专家学者作了特邀报告, 台湾地区秦中天博士、李煜龄教授、澳大利亚孙德安博士、邢会林博士、中国姚仰平教授、黄茂松教授、施斌教授、陈国兴教授、沈水龙教授、日本蒋景彩博士等10多位专家做了主题报告, 这些报告经专家们的精心准备, 反映了目前国内外岩土学科前沿研究课题的最新发展与动态。

论坛期间召开了各与会单位代表联席会议, 对本次大会组织工作、今后的学术交流活动开展等问题进行了深入讨论。并商定下届论坛将在祖国的宝岛台湾作为首选举办地, 香港特区作为候选举办地。

两年一届的全球华人岩土工程学术论坛使我们见到海内外许多老朋友, 也结识了许多新朋友。经过两天的学术交流, 增进了了解, 加深了友谊, 得到了共同提高, 达到了预期目的, 取得了圆满成功。衷心感谢主办和协办单位给大家提供了这样一个交流与相聚的机会。衷心感谢向本届论坛撰写论文的作者以及为本论文集出版而辛勤工作的人员表示最诚挚的谢意。特别感谢河海大学岩土工程研究所全体师生为具体承办本次论坛的论文征集与出版、会议的筹备、组织与召开付出了辛勤的劳动。

(第二届全球华人岩土工程学术论坛组委会)