



饱和软黏土十字板强度的相关性研究

万中喜¹, 刘丹忠²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 长江武汉航道工程局, 湖北 武汉 430000)

摘要: 水运工程地基海相沉积的软黏土地层较多, 软黏土十字板强度指标是进行地基和边坡稳定验算的重要指标, 但在海上进行十字板试验受风浪、潮汐影响, 实施较为困难, 试验数据的相关性研究较少。结合多个港口软黏土十字板测试成果数据, 分析了十字板强度与有效自重应力及标贯击数的相关性, 并建立了相关公式, 对软黏土十字板强度指标的获取和应用具有实用和借鉴意义。

关键词: 软黏土; 十字板强度; 有效自重应力; 标贯击数; 相关性

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0176-05

Correlation study about vane shear strength of saturated soft clay

WAN Zhong-xi¹, LIU Dan-zhong²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Wuhan Yangtze River Waterway Engineering Bureau, Wuhan 430000, China)

Abstract: Marine deposit soft clays are often encountered in marine traffic engineering. Their vane shear strengths are important parameters for verifying stability of foundation and slope. However, the marine vane shear test is affected by many factors, such as wind wave and tide, thus it is difficult to implement. Moreover, related research about test data is limited. Based on the results of the marine vane shear test of soft clays in various harbor locations, correlation between test results and effective gravitational stress and SPT counts is analyzed and corresponding equation is built. This is very useful for the application of the marine field vane shear test to soft clay.

Key words: soft clay; vane shear strength; effective gravitational stress; SPT counts; correlation

海相沉积的软黏土是水运工程常见地层, 软黏土十字板强度指标是进行地基和边坡稳定验算的重要指标^[1], 该指标是在原位地层条件下测出的软黏土不排水抗剪强度, 与室内试验强度指标相比, 它更能反映软黏土层的实际强度, 使软黏土地基设计更能挖掘软黏土强度潜力, 提高设计精度和质量。但水运工程一般位于内河或滨海, 工程勘察涉及水上施工, 十字板原位试验操作复杂, 水上作业受风浪、潮汐等因素影响, 需要固定平台或稳定的操作条件, 试验一般在船载浮式平台上进行, 将十字板固定在钻

孔套管上, 试验时将套管与船载平台脱开, 避免平台波动对十字板试验的影响, 操作较为复杂且效率很低。

据前人研究, 软黏土强度与其它土性指标间存在较好相关性, 如Terzaghi等在著名的《工程实践中的土力学》^[2]给出了软黏土无侧限抗压强度与标贯击数之间的对应关系; 英国建造业研究与信息协会(CIRIA)^[3]给出了三轴不排水强度与标贯击数的关系; 谭再坤^[4]给出了缅甸蒂洛瓦船厂软黏土和天津港软黏土十字板强度与深度的线性关系; 笔者^[5]给出了黄骅港软黏土十字板强度与

收稿日期: 2012-03-23

作者简介: 万中喜(1971—), 男, 高级工程师, 从事水运工程岩土勘察与管理工作。

深度的线性关系; 交通部一航局设研院^[6]建立了软黏土十字板强度与静探比贯入阻力之间的线性关系。

笔者结合国内外多个工程勘察数据, 研究发现十字板强度与土体有效自重应力和标贯击数之

间存在较好的线性相关性, 并建立了相关公式。

1 相关区域软土基本性质

基于水规院完成的多个国内外港口工程项目软土实测数据, 将各区域软土基本性质汇总于表1。

表1 各区域软土基本性质

| 区域 | 软土分布 | 均匀性 | 性质指标 | | | | | 应力历史 | 标贯击数 |
|------|---------------------|---------------------|-------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|------|
| | | | $\omega/\%$ | $\rho/(t \cdot m^{-3})$ | e_0 | I_p | I_L | OCR | N/击 |
| 埃及赛德 | 高程-12~-48 m, 厚约36 m | 顶部夹砂, 中下部较均匀 | 47.6~74.8 | 1.53~1.77 | 1.45~2.20 | 18.2~73.9 | 0.38~0.94 | 1.0 | 3~9 |
| 浙江台州 | 高程0~-30 m, 厚约30 m | 较均匀 | 41.9~68.1 | 1.60~1.83 | 1.24~1.90 | 18.7~25.9 | 1.03~2.20 | 1.0 | |
| 福建宁德 | 高程-28~-50 m, 厚约22 m | 较均匀 | 37.5~48.2 | 1.76~1.87 | 1.03~1.28 | 18.8~26.4 | 0.66~0.99 | 2.0~1.6 | 2~8 |
| 河北黄骅 | 高程0~-12 m, 厚约12 m | 土质不均夹砂斑及粉土薄层 | 34.7~69.6 | 1.55~1.97 | 1.01~1.86 | 11.3~26.6 | 1.01~2.96 | 6.0~1.3 | 1~5 |
| 天津滨海 | 高程0~-14 m, 厚约14 m | 顶部夹砂斑, 底部夹贝壳, 中部较均匀 | 36.4~79.5 | 1.49~1.82 | 1.03~2.12 | 17.1~36.4 | 1.01~2.96 | 0.8 | |
| 连云港 | 高程2~-10 m, 厚约12 m | 中部夹粉土薄层, 土质不均 | 47.3~94.8 | 1.51~1.76 | 1.28~2.54 | 14.5~31.8 | 1.08~3.30 | 1.0 | |
| 大连金州 | 高程-7~-22 m, 厚约15 m | 土质不均, 夹粉土斑 | 35.7~85.4 | 1.53~1.82 | 1.01~2.08 | 10.4~31.1 | 1.01~4.02 | | 1~4 |

2 软黏土十字板强度与有效自重应力相关性

据前人研究成果, 均质软黏土十字板强度与深度存在较好的线性相关性, 相关公式见表2。从表2中可以看出, 不同地区二者相关公式不同, 原因是不同地区软黏土的沉积成因、组成成分、微观结构及应力历史不同。笔者认为主要是有效自重应力和结构强度两个因素决定了不同区域软黏土的强度大小, 即软土十字板强度 C_u 与有效自重应力 G_0 (kPa) 和应力历史指标——超固结比OCR存在相关性。

表2 十字板强度 C_u 与深度 H 的线性关系

| 十字板强度 C_u /kPa-深度 H /m线性关系 | 适用地区 |
|--------------------------------|---------|
| $C_u=2.32H+16.94$ | 缅甸蒂洛瓦地区 |
| $C_u=1.76H+10.40$ | 天津港 |
| $C_u=3.94H+3.85$ | 黄骅港 |

2.1 正常固结土十字板强度与有效自重应力相关性

2.1.1 埃及赛德港软黏土

埃及赛德港位于苏伊士运河出海口、西奈半岛西北角, 场区深度15~50 m分布厚层饱和软黏土, 为正常固结土, 该场区十字板强度 C_u 和对应有效自重应力 G_0 经线性回归存在较好相关性, $C_u=0.316G_0$, 相关系数 $r=0.64$, 见图1。

2.1.2 浙江台州软黏土

浙江台州黄礁岛滨海海域存在厚层软黏土,

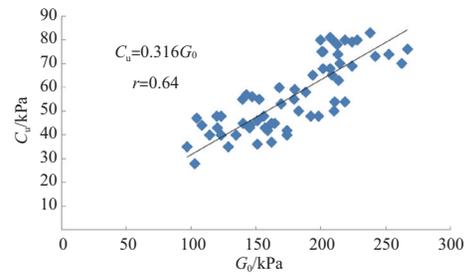


图1 埃及软土十字板强度与有效自重应力相关曲线

厚度达30 m, 属正常固结土, 该场区软黏土十字板强度 C_u 和对应有效自重应力 G_0 经线性回归存在很好相关性, $C_u=0.332G_0$, 相关系数 $r=0.96$, 见图2。

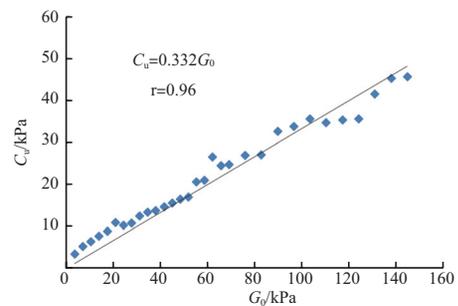


图2 浙江软土十字板强度与有效自重应力相关曲线

2.2 超固结软黏土十字板强度与有效自重应力相关性

2.2.1 福建宁德超固结饱和软黏土

宁德三都澳港区分布超固结软土④₁黏土和④₂黏土, 其超固结比OCR分别为2.0和1.6。经数据

相关性分析,发现十字板强度与土层有效自重应力和超固结比之积存在较好相关性,相关公式为 $C_u=0.308G_0 \times OCR$, 相关系数 $r=0.63$, 见图3。

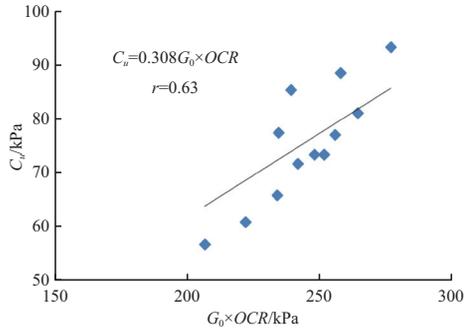


图3 福建软土十字板强度与自重应力和应力历史之积的相关曲线

2.2.2 河北黄骅港区超固结软黏土

河北黄骅港位于渤海湾西海岸,大口河入海口,因其附近海岸属蚀退型海岸,其表层分布的12 m厚软土层属超固结土,其超固结比OCR随深度变化情况见图4,自上而下OCR在6.0~1.3变化^[5]。经统计分析,该软土层十字板强度与有效自重应力和超固结比的乘积具有很好相关性, $C_u=0.382G_0 \times OCR$, 相关系数 $r=0.84$, 见图5。

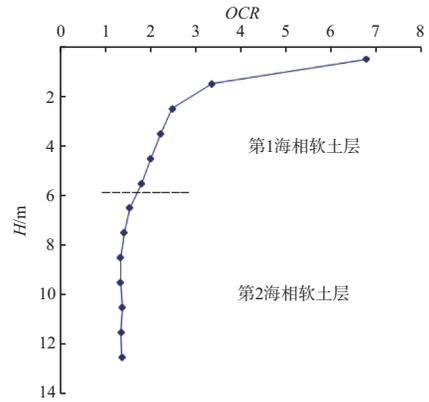


图4 黄骅软土超固结比随深度变化曲线

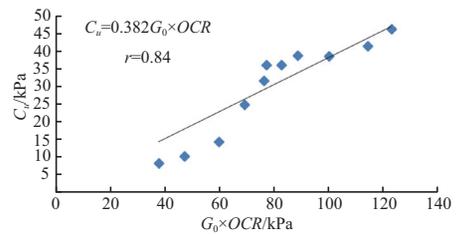


图5 黄骅软土十字板强度与自重应力和超固结比之积的相关曲线

2.3 饱和软黏土十字板强度与有效自重应力相关公式

汇总以上分析结果,相关公式见表3。从表3中可以看出,不同区域软土十字板强度与有效

表3 软土十字板强度与有效自重应力相关公式

| 区域 | 应力历史 | 相关公式 | 推荐公式 |
|-------|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| 埃及赛德港 | 正常固结土, OCR=1 | $C_u=0.316G_0$ | $C_u=0.30G_0 \times OCR$ |
| 浙江台州 | 正常固结土, OCR=1 | $C_u=0.332G_0$ | |
| 福建宁德 | 超固结土, OCR=2.0~1.6 | $C_u=0.308G_0 \times OCR$ | |
| 河北黄骅 | 超固结土, OCR=6.0~1.3 | $C_u=0.382G_0 \times OCR$ | |

自重应力和超固结比之间相关性比较接近,存在的微小差距是因为不同区域之间土质不均匀和人为误差所致,如河北黄骅软土中夹粉土薄层或砂斑,导致十字板数据偏大,考虑工程使用的安全性,推荐较一致性的公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 。

3 软黏土十字板强度与标贯击数的相关性

3.1 埃及赛德软土

埃及赛德港区深度15~50 m分布着厚层饱和软黏土,其十字板强度 C_u 和对应标贯击数 N (N 为实测值) 经线性回归存在较好相关性, $C_u=11.2 N$, 相关系数 $r=0.60$, 见图6。

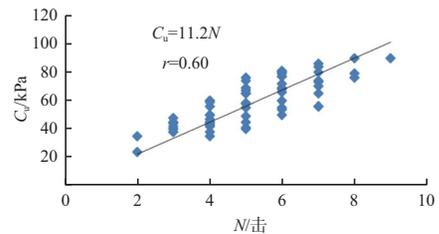


图6 埃及软土十字板强度与标贯击数相关性

3.2 福建宁德软土

福建宁德饱和软黏土十字板强度 C_u 和标贯击数 N 经线性回归分析存在较好相关性, $C_u=12.9 N$, 相关系数 $r=0.91$, 见图7。

3.3 河北黄骅软土

河北黄骅港海域饱和软黏土十字板强度 C_u

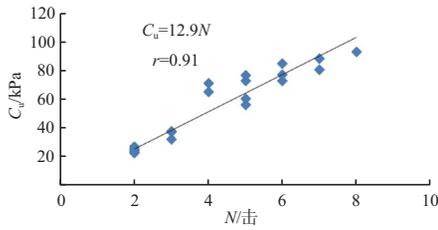


图7 福建宁德软土十字板强度 C_u 与标贯击数 N 相关曲线

和标贯击数 N 经线性回归分析存在较好相关性, $C_u=10.2 N$, 相关系数 $r=0.78$, 见图8。

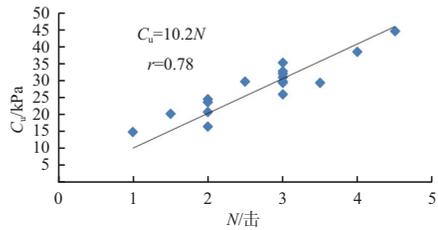


图8 黄骅软土十字板强度 C_u 与标贯击数 N 的相关曲线

3.4 饱和软黏土十字板强度与标贯击数的相关公式

汇总以上3个区域项目数据相关分析结果, 相关公式见表4。从表4中可以看出, 不同区域软土十字板强度与标贯击数之间相关公式比较接近, 存在的微小差距是因为不同区域之间土性差异和人为误差所致, 考虑工程使用的安全性, 推荐较一致性公式 $C_u=10 N$ (N 为实测值)。

表4 不同区域软土十字板强度与标贯击数相关公式

| 区域 | 相关公式 | 推荐公式 |
|-------|-------------|-----------|
| 埃及赛德港 | $C_u=11.2N$ | |
| 福建宁德 | $C_u=12.9N$ | $C_u=10N$ |
| 河北黄骅 | $C_u=10.2N$ | |

4 应用举例及误差分析

水运工程水域勘察项目中, 当原位十字板强度数据较难获取时, 可利用土的有效自重应力或标贯击数估算饱和软黏土的十字板强度 C_u 。

4.1 估算十字板强度

4.1.1 天津软土 (欠固结土)

天津滨海新区高程 -14m 以上广泛分布海相成因软土层, 该软土层 $OCR \approx 0.8$, 属于欠固结土^[5]。以天津某勘察项目指标为例, 利用土层天然有效自重应力与十字板强度相关公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 估算十字板强度, 再跟实测十字板强度进行对比, 结果见图9。图9中显示高程 0 m

以上实测十字板强度偏大, 是因为高程 0 m 以上为吹填土夹砂斑较多所致; 高程 $-12 \sim -14\text{m}$ 位置实测数据偏大, 是因为该深度含贝壳和砂较多所致 (该深度范围为区域贝壳标志层分布范围); 其它深度范围内 (高程 $0 \sim -12\text{m}$) 数据偏差均在 10% 以内。说明用有效自重应力估算十字板强度公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 在该区域是适用的, 也说明该公式适用于欠固结土。

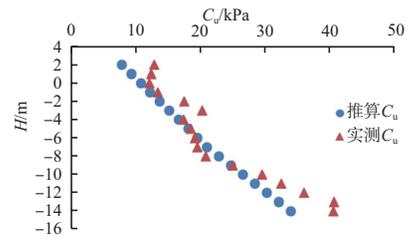


图9 天津软土估算十字板强度与实测强度对比

4.1.2 连云港软土 (正常固结土)

连云港滨海海域高程 -10 m (深度约 12 m) 以上广泛分布海相成因软土层, 该软土层 $OCR \approx 1.0$, 属于正常固结土。以连云港某勘察项目数据为例, 利用土层天然有效自重应力估算十字板强度 (公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$), 再与实测十字板强度进行对比, 结果见图10。图10中显示深度 $2 \sim 6\text{ m}$ 范围实测十字板强度数据同估算数据偏差较大, 是因为夹粉土薄层所致; 其它深度范围估算的十字板强度数据同实测数据很接近, 偏差在 10% 以内。说明用有效自重应力估算十字板公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 在该区域是适用的。

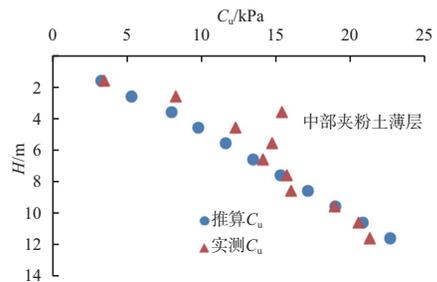


图10 连云港软土估算十字板强度与实测强度对比

4.1.3 大连软土

大连金州湾海域高程 $-10 \sim -20\text{ m}$ 广泛分布软土层, 以该海域某勘察项目为例, 利用临近钻孔软土实测标贯数据和本文公式 $C_u=10N$ 估算十字板强度, 与软土实测十字板强度进行对比, 结果见图

11. 图11中显示软土上部和中部夹粉土斑和砂斑位置实测十字板数据偏大, 土质较均匀位置估算值和实测值比较接近, 偏差小于10%。说明用标贯击数估算软土十字板强度公式在该地区是适用的。

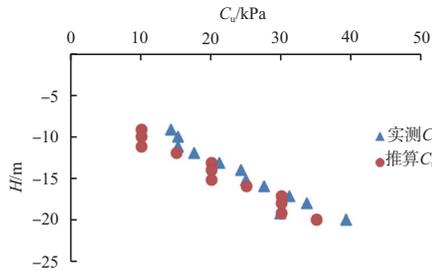


图11 大连软土用标贯击数估算十字板强度与实测强度对比

4.2 公式应用误差分析及注意事项

通过以上对比分析可知, 当软土较均匀时, 用公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 或 $C_u=10N$ 估算的十字板强度与实测值偏差均在10%以内; 当软土土质不均匀时, 或当土的应力历史指标或标贯击数等数据不准确时, 估算的十字板强度跟实测值偏差会较大; 当实测十字板数据不准确时, 也会导致较大偏差, 引起对公式可靠性的怀疑。

软土层的不均匀主要表现在层中夹砂斑、碎贝壳、粉土斑、薄粉土或粉砂层等, 该因素往往导致实测十字板强度值较真值偏大20%~30%, 甚至更大, 不能反映真实软土强度, 若用该值进行设计, 将使工程偏于危险甚至事故发生。

当使用公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 时, 应首先查明软土的应力历史, 尤其对于欠固结和超固结土, 应准确测试软土的前期固结压力, 从而计算出超固结比 OCR 值。当 OCR 值不准时, 将会产生较大偏差。

当使用公式 $C_u=10N$ 时, 应注意标贯击数的准确可靠性, 在软土中进行标贯试验, 国内实际情况是作业班组往往不规范操作甚至编造数据; 对于标贯 <2 击的软土, 标贯击数难以细分, 将导致估算值与实测值偏差较大, 限制了该公式的使用范围。另外国内外标贯设备的规格和测量方法不统一会造成标贯击数的差异^[7], 从而导致十字板强度的估算差异。本文推荐公式 $C_u=10N$ 适用于按国标GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》规定的标贯设备规格和操作方法完成的实测值 N 。

十字板试验受影响因素较多, 尤其在水上船

载浮式平台上进行测试时, 往往操作不当导致十字板实测数据失真, 不能反映土体真实强度, 这种情况下的实测数据跟采用本文公式估算的数据偏差较大。

5 结语

饱和软黏土十字板强度与有效自重应力和标贯击数之间存在较好相关性, 本文推荐的十字板强度相关公式 $C_u=0.30G_0 \times OCR$ 及 $C_u=10N$ 来自于多个水运工程勘察项目分析总结, 估算值与实测值一般偏差在10%以内, 具有实用性, 该公式适用于土质较均匀软土地基。

当工程重要性等级较低或处于工可设计阶段时或现场做十字板条件困难时, 可采用该公式进行估算; 当工程等级较高时或处于施工图设计阶段, 采用该公式估算强度时, 建议使用其它强度参数进行对比验证。

当采用有效自重应力估算十字板强度时, 应注意土层的有效重度和应力历史指标的准确性; 当采用标贯击数估算十字板强度时, 应注意标贯试验的标准和标贯击数 N 值的可靠性。标贯击数公式 $C_u=10N$ 适用于标贯击数 >2 击的软土层, 有条件时, 建议采用上述两种方法估算软土强度, 互相验证。下一步, 笔者将汇总更多水运工程相关勘察设计资料, 对公式进行完善。

参考文献:

- [1] JTS 147-1—2010港口工程地基规范[S].
- [2] Terzaghi K, Peck R B. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York: Wiley, 1948.
- [3] Clayton C R I. The Standard Penetration Test (SPT): Methods and Use[M]. London: CIRIA, 1995: 66.
- [4] 谭再坤. 缅甸蒂洛瓦船厂场区软黏土的工程地质特性[J]. 港工勘察, 2000(4): 27-30.
- [5] 万中喜. 黄骅港软黏土跟天津港软黏土的对比[J]. 港工技术, 2005(2): 47-49.
- [6] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 209.
- [7] 杨文卫. 世界各地标准贯入试验比较和共同问题[J]. 工程勘察, 2008(1): 5-15, 52.

(本文编辑 武亚庆)