

DOI: 10.11779/CJGE2017S2020

# 上海地区软黏土的 OCR 及地质成因

高彦斌<sup>1</sup>, 陈忠清<sup>\*2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 通过覆盖上海地区两种沉积相(滨海平原和湖沼平原) 19 个工程的原位十字板强度  $S_{uFV}$ , 结合国内外研究成果, 对上海 3 个软黏土层的超固结比 OCR 及其地质成因进行了分析。根据强度比  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  ( $\sigma'_{v0}$  为有效上覆压力) 计算 OCR, 给出了 OCR 随深度的变化规律。上海软土整体上处于超固结状态, 浅部具有较大的 OCR 且较为离散(在 1.3~5.0), 随深度的增加 OCR 迅速减小, 超过约 13 m 后维持在一稳定的数值(平均为 1.6)。过去采用室内压缩试验给出的结果显著低估了上海软黏土的 OCR。结合 Hanzawa 和 Tanaka 给出的模型对上海软黏土的强度及超固结地质成因进行了分析, 认为基本符合浅部以胶结作用为主、深部以次压缩为主的特征。浅部的胶结作用变化范围较大而深部的次压缩作用则相对稳定, 并初步给出了正常压缩、胶结作用和次压缩作用对总强度的贡献。

**关键词:** 软黏土; 原位十字板强度; 超固结比; 胶结作用; 次压缩作用

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0079-04

**作者简介:** 高彦斌(1973-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事软土力学特性和软土工程方面的研究工作。E-mail: yanbin\_gao@tongji.edu.cn。

## OCR of Shanghai soft clay and its geological causes

GAO Yan-bin<sup>1</sup>, CHEN Zhong-qing<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** Through the field vane strengths  $S_{uFV}$  of 19 projects involving two sedimentary facies of coastal plain and lacustrine plain in Shanghai and combined with the worldwide research findings, the overconsolidation ratio (OCR) and its geological causes of three Shanghai soft clay layers are analyzed. The OCR is calculated according to strength ratio  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  ( $\sigma'_{v0}$  is the effective overburden pressure), and then its variation with depth is given. The results show that the Shanghai soft clay is overconsolidated in general. The OCR of shallow layers is larger and more discrete (from 1.3 to 5.0). The OCR decreases rapidly with the increase of depth and almost maintains a stable value (1.6 in averages) after 13 m deep. The OCR of Shanghai soft clay is significantly underestimated according to the laboratory compression tests in the past. Based on the model given by Hanzawa and Tanaka, the strength and geological causes of overconsolidation of Shanghai soft clay are analyzed. It is conformed that for the shallow layers of the clay the main cause is the cement effect varying in a wide range, and for deep layers the main cause is the secondary compression effect being in a relatively stable range. The contribution of normal compression, cement effect and secondary compression effect to the total strength of the soft clay is also given.

**Key words:** soft soil; field vane strength; overconsolidation ratio; cement effect; secondary compression effect

## 0 引言

超固结比 OCR 是评价土的固结状态、结构性以及变形和强度特性的一个非常重要的参数。软黏土具有灵敏性, 扰动会导致室内压缩试验测得的 OCR 偏低, 影响对软黏土固结状态的正确评价<sup>[1]</sup>。国外对基于原位十字板强度  $S_{uFV}$  评价软黏土 OCR 的方法进行了大量的研究并取得了丰富的成果。上海地区长期以来主要依靠压缩试验获得软黏土的 OCR, 试验结果存在较大的争议。有人认为上海软黏土的 OCR 接近

1.0<sup>[2]</sup>, 也有人认为上海软黏土和世界其他地区的全新世海相沉积软黏土一样, 超固结比在 1.5 以上<sup>[3-5]</sup>。因此很有必要借助原位测试方法以及国外的相关研究成果, 对上海软黏土 OCR 进行进一步系统的研究, 这是本文的一个目的。近些年来, 软黏土结构性研究受

基金项目: 国家自然科学基金项目(40702051); 浙江省公益技术应用研究计划项目(2016C33052); 绍兴市公益技术应用研究计划项目(2015B70034)

收稿日期: 2017-08-02

\*通讯作者(E-mail: Q\_CHEN\_YK@163.com)

到了国内普遍关注。大量试验结果表明中国沿海地区软黏土的结构性会使其表现出较大的OCR, 但对其地质成因的研究却相对欠缺。借助国外学者在这方面的研究成果来分析上海软黏土OCR的地质成因, 这是本文的第二个目的。

## 1 上海地区浅层软土及收集的资料

上海地区地貌类型主要包括: I-湖沼平原和 II-滨海平原。湖沼平原又根据暗绿色硬土层的分布特点分为 I1 和 I2 两个亚区。II 和 I2 区具有相近的土层分布, 3 个软土层为: 第③层灰色淤泥质粉质黏土层(部分地区有夹砂层)、第④层灰色淤泥质黏土层和第⑤<sub>1</sub>层粉质黏土、黏土层; I1 区只有第③层灰色淤泥质粉质黏土层。软土的埋深大多在 25 m 范围内。本文统计了 19 个工程的勘察数据。其中 13 个位于滨海平原(标号为①~⑬), 3 个位于湖沼平原 I2 区(标号为⑭~⑯), 3 个位于湖沼平原 I1 区(标号为⑰~⑱)。每个工程选取了一个代表性的原位十字板试验孔数据进行分析。

## 2 $S_{uFV}$ 和 $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$ 随着深度的变化

整理得到的 19 个工程的  $S_{uFV} - Z$  关系见图 1 所示。图中近似的给出了 3 个软土层的分界线。 $S_{uFV} - Z$  关系大致可以分为 A, B 两种类型: 类型 A,  $S_{uFV}$  随深度近似线性增大; 类型 B, 浅部约 3~6 m 以内(主要为第③层淤泥质粉质黏土)  $S_{uFV}$  随深度增大而减小, 超过 8~10 m 才近似线性增大。这两种类型同时存在于滨海平原和湖沼平原, 很难判断这两种类型与地貌类型之间的关系。拟合得到的  $S_{uFV} - Z$  线性关系式为

$$S_{uFV} = 2.16Z + 12, \quad (1)$$

这个关系式适用于类型 A 埋深  $Z$  大于 3 m 以及类型 B 埋深  $Z$  大于 8 m。

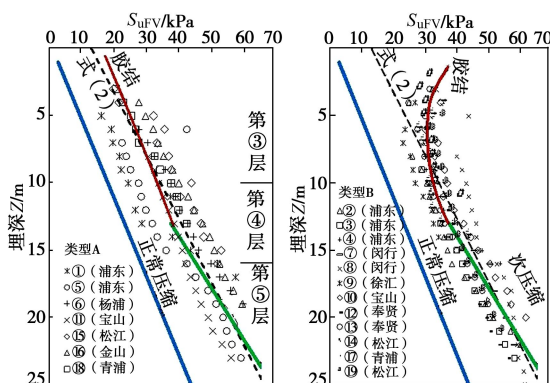


图 1  $S_{uFV}$  随埋深  $Z$  的变化图

Fig. 1 Variation of  $S_{uFV}$  with depth

图 2 是根据图 1 中的数据整理得到的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  随深度的变化。无论是类型 A 还是类型 B,  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  随

埋深  $Z$  的增大均呈现出单调减小的趋势。 $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  在浅部(小于 8~10 m)的第③层中变化范围较大一些, 多在 0.4~0.8 之间, 且类型 B 的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  要比类型 A 略大一些;  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  在深部(大于 8~10 m)的第④层和第⑤<sub>1</sub>层土中则趋于一个稳定的数值, 大多在 0.3~0.4 之间, 与魏道垵和胡中雄<sup>[5]</sup>由 5 个工程资料得到的 0.28~0.5 是接近的。

图 2 中还给出了根据式 1 换算得到的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  随深度的变化曲线。图 1 中  $S_{uFV}$  随深度线性增大的关系可转化为图 2 中  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  随深度的非线性减小的关系。同样表现出深部的拟合效果要优于浅部。

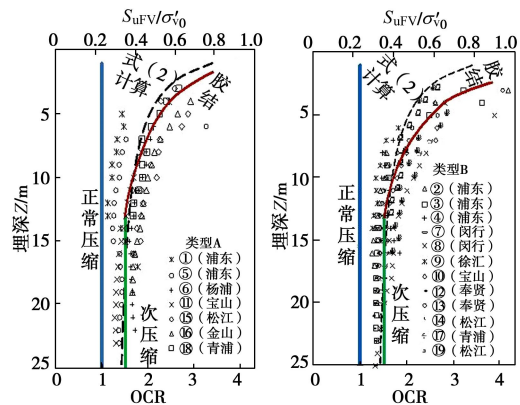


图 2  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  和 OCR 随埋深  $Z$  的变化图

Fig. 2 Variation of  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  with depth

## 3 根据 $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$ 得到的 OCR

天然软黏土的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  与采用压缩试验确定的超固结比 OCR 之间存在如下关系:

$$S_{uFV}/\sigma'_{v0} = (S_{uFV}/\sigma'_{v0})_n \cdot OCR^m \quad (2)$$

式中  $(S_{uFV}/\sigma'_{v0})_n$  为正常固结土的强度比;  $m$  为一个参数。根据 Jamiołkowski 等<sup>[6]</sup>和 Chandler<sup>[7]</sup>的研究, 参数  $m$  的统计值在 0.95~1.0 之间。

Skempton<sup>[8]</sup>对正常固结黏性土  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  和塑性指数  $IP$  的关系就行了研究, 得到的关系如下:

$$S_{uFV}/\sigma'_{v0} = 0.11 + 0.0037IP \quad (3)$$

$S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  随  $IP$  的增大而略微增大, 当塑性指数  $IP=20\sim40$  时,  $(S_{uFV}/\sigma'_{v0})_n \approx 0.23$ 。如取参数  $m=1$ , 则根据式 (3) 可得

$$OCR = 4.31(S_{uFV}/\sigma'_{v0}) \quad (4)$$

这也正是 Mayne 等<sup>[9]</sup>根据世界各地试验数据给出的统计结果, 其相关系数  $r=0.81$ 。表明软黏土的 OCR 与  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  成正比关系。

图 2 中给出了采用式 (4) 求得的两种类型的 OCR 随深度的变化。图 3 则给出了 A, B 两种类型的整体结果, 这两种类型的 OCR 主要区别在浅部, 深部则差别不大。可以看出, 上海地区的软黏土整体具有明显的超固结性, OCR 随深度的增大而减小。在浅部 3~

13 m, OCR 多在 1.3~5.0, 数据离散型大一些; 在深度 13~25 m, OCR 多在 1.2~2.0, 数据离散型较小一些。为了便于工程应用, 以下分别给出了浅部和深部的整体拟合关系式:

$$\text{浅部, } Z < 13 \text{ m, } \text{OCR} = 9Z^{-0.68}, \quad (5a)$$

$$\text{深部, } Z \geq 13 \text{ m, } \text{OCR} = 1.6. \quad (5b)$$

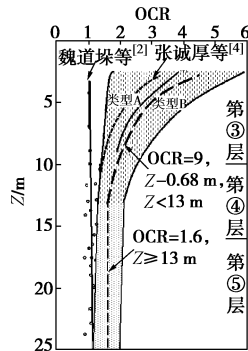


图 3 超固结比 OCR 沿深度的变化

Fig. 3 Variation of OCR with depth

魏道垛等<sup>[2]</sup>曾基于多个场地的软黏土压缩试验数据曲线给出了上海软黏土的 OCR - Z 关系式:

$$\text{OCR} = 0.0046(Z-3)+1.03, \quad (6)$$

他们认为深度 3~25 m 范围内软黏土的 OCR 随深度只有微小的变化, 可近似取 1.08, 基本可当做正常固结土。该关系式也在图 3 中给出。可以看出这个关系式要明显小于本文给出的结果。张诚厚等<sup>[3-4]</sup>和冯铭璋等<sup>[5]</sup>在 20 世纪八、九十年代较早的研究了上海地区以及沿海其他地区软土结构性对压缩特性的影响, 发现“正常压密”的天然软土所表现出来的明显的超固结现象。图 3 中给出了张诚厚<sup>[4]</sup>采用压缩试验得到的上海黄浦江岸边某场地淤泥质黏土的 OCR 随深度的变化曲线, OCR 在 1.4~2.4 之间, 与本文给出的规律比较接近。魏道垛等<sup>[3]</sup>所给出较低的 OCR 可能与取样扰动造成测得的前期固结压力偏低有关。比起容易受取土扰动影响的压缩试验, 图 3 给出的基于 FVT 得到的结果可能更为可靠。

## 4 上海地区软黏土超固结成因

Schmertmann<sup>[10]</sup>等发现世界各地具有一定沉积历史地天然的软黏土的 OCR 约为 1.5~2.5, 这与本文给出的上海软黏土的 OCR 非常接近。目前对天然软黏土超固结成因的定量解释主要有以下两种模式: 一种是 Bjerrum 提出的次压缩作用; 另外一种 Hanzawa 和 Tanaka 提出的次压缩及胶结模式。

### 4.1 Bjerrum 提出的次压缩作用

Bjerrum<sup>[11]</sup>给出了挪威两种软黏土——“新黏土”(new clay)和“老黏土”(aged clay)的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  与  $I_p$  的关系, 见图 4 所示。“新黏土”实际上就是新近沉积的正常固结土, 具有较小的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$ ; “老黏土”

是沉积历史较久的超固结土, 具有较大的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$ 。Bjerrum 认为“老黏土”具有较大的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  归因于次压缩导致的视超固结象, 并提出了次压缩作用对软黏土 OCR 的影响的分析方法

$$\text{OCR} = (t/t_p)^{c_a/c_c}, \quad (7)$$

其中  $t$  为时间,  $t_p$  为主固结结束的时间,  $c_a$  和  $c_c$  分别为次压缩指数和压缩指数。胡中雄<sup>[12]</sup>曾采用这个方法对上海软黏土的 OCR 进行了分析, 当参数  $c_a/c_c$  取 0.034 时, 采用式 (7) 计算得到 2739.72 年 (即一百万天) 的 OCR 为 1.5。这与本文图 3 给出的深度超过 13 m 的 OCR 非常接近, 表明深部的软土的超固结现象可能主要是由于次压缩作用造成的。

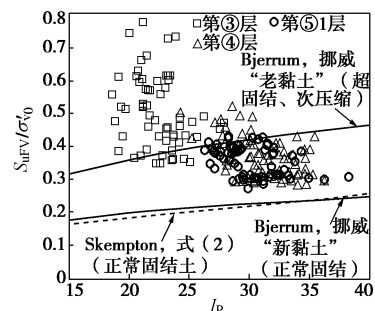


图 4  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  与塑性指数  $I_p$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  and  $I_p$

图 4 给出了上海 3 个软土层的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  与  $I_p$  的关系图, 其中  $I_p$  是测试深度处整个场地的平均值。可以看出, 3 个软土层的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  均明显高出 Skempton 和 Bjerrum 给出的正常固结土的曲线。这意味着这 3 层土属于超固结土。但这 3 个土层的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  并不完全符合 Bjerrum 给出的挪威“老黏土”的关系曲线, 也不存在随着  $I_p$  增大而增大的现象, 反而出现相反的规律。这意味着 Bjerrum 的次压缩导致视超固结的模式并不完全适用于上海的 3 个软土层。

### 4.2 Hanzawa 等提出的次压缩和胶结作用

Hanzawa 等<sup>[13]</sup>对海相沉积软黏土的原位十字板强度的  $S_{uFV} - Z$  和  $S_{uFV}/\sigma'_{v0} - Z$  的关系进行了分析。他们根据土力学理论给出了如图 5 所示的模型, 在次压缩作用的基础上考虑了胶结作用。

图 1 给出的上海软黏土浅部的  $S_{uFV} - Z$  关系并不像图 5 所示的那样呈现出简单的线性增长的模式, 可见实际表现出的胶结作用要更为复杂。而图 2 给出的  $S_{uFV}/\sigma'_{v0} - Z$  关系和 OCR - Z 关系则与图 5 较为一致。Hanzawa 等提出的次压缩及胶结作用模式大致能够解释上海  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  和 OCR 随深度的变化规律。

根据这个模式, 在图 2 和图 3 给出了正常压缩、次压缩和胶结 3 种作用对  $S_{uFV}$  和  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  的影响的平均贡献。对于正常压缩 (OCR=1.0) 有  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}=0.23$ 。对于深部次压缩作用, 取 OCR 平均值 1.6, 即  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}=0.37$ , 次压缩作用对总强度的平均贡献约为

38%。对于浅部的胶结作用,结合强度分布规律大致给出了 A, B 两种类型的胶结作用,以解释浅部强度所表现出来的复杂现象。胶结作用对总强度的贡献随着深度的增加而减小,平均贡献在 43%~85%之间。

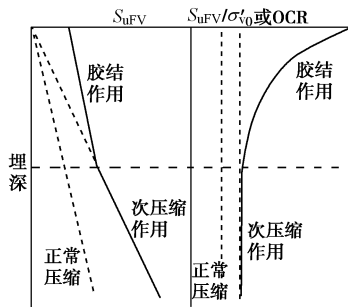


图5 Hanzawa 和 Tanaka 提出的次压缩和胶结作用模式

Fig. 5 Secondary compression and cement effect by Hanzawa and Tanaka

## 5 结 论

本文分析了上海地区滨海平原和湖沼平原的 19 个重要工程项目的原位十字板强度,主要结论如下:

(1) 由  $S_{uFV}/\sigma'_{v0}$  得到上海软黏土的 OCR 在浅部 3~13 m 为 2.0~5.0, 在深度 13~25 m 为 1.2~2.2, 超固结特性不容忽视, 不适合当做正常固结土看待。考虑到中国工程界存在的突出的取土扰动问题, 基于原位测试确定 OCR 的方法在沿海地区值得发展和推广。

(2) 上海软黏土的强度和超固结特征与 Bjerrum 给出的主要受次压缩影响的挪威“老黏土”相差较大, 而符合 Hanzawa 等的次压缩及胶结的模式。不同程度的胶结作用(即结构性)是造成上海浅层土(小于 13 m)超固结的主要因素, 次压缩作用是深层土(大于 13 m)超固结的主要因素。

希望以上成果能够对中国沿海地区软黏土强度、超固结、结构性的认识以及相关理论研究和工程应用有所帮助。作者认为对中国沿海地区表层风化作用的深入研究, 将有助于解释中国沿海不同地区的软黏土所表现出的复杂力学特性。

## 参考文献:

- [1] CHANG M F. Interpretation of overconsolidation ratio from in situ tests in Recent clay deposits in Singapore and Malaysia[J]. Can Geotech J, 1991, 28: 210 - 225.
- [2] 魏道堃, 胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(4): 13 - 22. (WEI Dao-duo, HU Zhong-xiong. Experimental study of preconsolidation pressure and compressibility of Shanghai subsoil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(4): 13 - 22. (in Chinese))
- [3] 张诚厚, 王伯衍, 汪兆京. 上海黄浦江岸边淤泥质黏土的固结状态及强度特性[J]. 水利水运科学研究, 1981, 3(1): 12 - 33. (ZHANG C H, WANG B H, WAN Z J. The consolidated condition and shear strength behavior of soft clay at the bank of Huangpu River, Shanghai [J]. Hydro-science and Engineering, 1981, 3(1): 12 - 33. (in Chinese))
- [4] 张诚厚. 上海黏土的准超压密特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 62 - 69. (ZHANG Cheng-hou. The apparent over consolidated behavior of Shanghai clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(3): 62 - 69. (in Chinese))
- [5] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 95 - 100. (FENG Ming-zhang. Compression curve of soft cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (5): 95 - 100. (in Chinese))
- [6] JAMIOLKOWSKI M, LADD C C, GERMAINE J T, et al. New developments in field and laboratory testing of soils[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985: 57 - 153.
- [7] CHANDLER R J. The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane[C]// Field and Laboratory Studies, ASTM STP 1014, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1988: 13 - 44.
- [8] SKEMPTON A W. Vane tests in the alluvial plain of the River Forth near Grangemouth[J]. Géotechnique, 1948, 1: 111 - 124.
- [9] MAYNE P W, MITCHELL J K. Profiling of over-consolidation ratio in clays by field vane[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(4): 150 - 157.
- [10] SCHMERTMANN J H. The mechanical aging of soils[J]. J Geotech Engineering Div, ASCE, 1991, 117(9): 1288 - 1329.
- [11] BJERRUM L. Problems of soils mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils collapsible, expensive and others[J]. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973, 17(2): 83 - 119.
- [12] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (HU Zhong-xiong. Soil mechanics and environmental geotechnique[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [13] HANZAWA H, TANAKA H. Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 132 - 148.

(本文责编 黄贤沙)