



珠江三角洲入海口软土次固结系数特性研究

廖先斌, 祝刘文, 黄 雄

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 为了查明珠江三角洲入海口软土次固结系数变化特征, 为港珠澳大桥岛隧工程提供精细化的沉降设计指标提供基础, 通过采取I级不扰动软土样, 进行室内分类试验和单向固结试验, 获取相应的物理、变形指标, 分析次固结系数随荷载变化特征, 研究次固结系数与前期固结压力、压缩指数、含水量和塑性指数的相关性。结果显示, 次固结系数随着含水量的增加、塑性指数的增大呈线性增长; 次固结系数与压缩指数的比值在正常固结下并非是一个常数; 次固结系数在前期固结压力前, 值小, 随着加荷递增, 固结系数也增加; 前期固结压力之后, 主要随着加荷递增, 次固结系数呈由大变小的趋势。经过研究, 掌握了珠江三角洲入海口正常固结软土的次固结系数变化规律, 建立了次固结系数与相关物理力学指标相关关系, 为珠三角软土变形计算提供了地区性的指导作用。

关键词: 珠江三角洲; 软土; 次固结系数; 前期固结压力; 单向固结试验

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0069-06

On coefficient of secondary consolidation of soft clay at estuary of the Pearl river delta

LIAO Xian-bin, ZHU Liu-wen, HUANG Xiong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In order to indentify the variation characteristics of the coefficient of secondary consolidation of soft clay at the estuary of the Pearl river delta, and provide a basis on the precise parameters of the settlement design for the tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge island, we carry out a classification test and consolidation test on the undisturbed samples of grade I, so as to obtain the relative physical and settlement parameters, analyze the characteristics of the coefficient of secondary consolidation with load changes, and study the correlation between the coefficient of secondary consolidation, preconsolidation pressure, compression index, water content and plasticity index. The results show that the coefficient of secondary consolidation increases linearly with the increase of water content, plasticity index; the ratio of the coefficient of secondary consolidation and compression index is not a constant in the normal consolidation; the coefficient of secondary consolidation is small and increases with the load growth before loading is less than the preconsolidation pressure, it is from large to small with the load growth after loading is more than the preconsolidation pressure. This research ascertains the variation characteristics of the coefficient of secondary consolidation, founds the correlation of coefficient of secondary consolidation and related physical and mechanical indexes, and forms a regional guidance for the deformation calculation of soft clay at Pearl River Delta.

Key words: the Pearl river delta; soft clay; coefficient of secondary consolidation; preconsolidation pressure; consolidation test

港珠澳大桥岛隧一带发育厚层的软土(淤泥及淤泥质土), 含水量大, 塑性指数高, 次固结

变形影响大。为了确保可靠及合理的次固结系数利用于岛隧沉降设计, 有必要对场区软土的次固

收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 廖先斌(1971—), 男, 高级工程师, 从事工程地质研究工作。

结系数进行研究,对比次固结系数与物理力学指标的相关性,查明次固结系数在不同荷载下的变化规律。

次固结是指在超静孔隙水压力基本消散,有效压力基本稳定后,因土粒表面的结合水膜蠕变及土粒结构重新排列等引起的较为缓慢的变形。自从1936年Buisman根据次固结沉降的大小与时间的关系在半对数纸上接近于直线的试验结果首次提出了次固结系数 $C\alpha$ 的概念以来,先后有众多中外学者对次固结系数进行了研究^[1-22],确定了次固结系数计算公式,提出了次固结系数与物理力学指标的相关公式,分析了次固结系数在前期固结压力前与前期固结压力后的变化特征。由于以上学者的研究并未涉及到珠三角入海口,为了精细化分析港珠澳大桥岛隧一带软土的次固结系数,岛隧勘察时选用了代表性的软土一级原状样进行室内高压固结试验,试验获得了物理指标、压缩固结指标(前期固结压力、压缩指数、不同荷载下的次固结系数),分析了次固结系数与前期固结压力、压缩指数和物理指标的关系,总结了珠江三角洲入海口一带的软土次固结系数变化特征。

1 试验原理

中国的现行标准及规范^[1-3]均未见有次固结系数测定的内容,仅在工程地质手册第4版^[4]第4篇地基评价与计算的第四章地基变形验算指出次固结系数可由室内压缩试验求出,按半对数作图,当主固结完成后,次固结压缩的量值与时间之间的关系近似为一直线,但并未具体说明如何进行试验测定次固结系数。

从国际上发行的标准及规范来看,英国标准(BS) BS 1377-5—1990^[5]对次固结系数的测定有详细的描述,试验主要测定主固结完成之后,从时间1 000~10 000 min之间的应变量,即次固结系数,公式如下所示:

$$C\alpha = (\delta_{H_s}) / H_0 \quad (1)$$

式中: $C\alpha$ 为次固结系数; δ_{H_s} 为时间1 000~10 000 min的变形量; H_0 为试样的初始高度,20 mm。

主固结与次固结的关系如图1时间对数固结曲线所示。采用BS 1377-5—1990对次固结系数测定的方法进行研究(图1)。

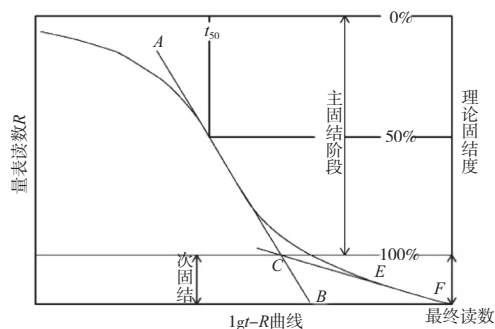


图1 固结曲线（时间对数法）

2 试验方案

2.1 试验样品

研究港珠澳大桥岛隧一带发育的厚层软土,选用上覆自重应力基本相同(即同样深度)的8个样品,样品深度如表1所示。样品采用国际上最先进的软土取样器——固定活塞薄壁取土器采取,样品从土层中取出后,在现场用蜡封、胶布缠,在运送回实验室时用泡沫减震,在实验室内按现场相应上下位置进行放置,扰动少,原状性好。

表1 软土样品物理指标

样品编号	样品深度/m	含水量 W %	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比 e	干密度 ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	液限 W_L	塑限 W_p	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
B9-U5	4.8	52.1	1.69	1.403	1.11	49.4	26.7	22.7	1.12
TCB12-U6	5.7	65	1.6	1.805	0.97	60.5	28.4	32.1	1.14
TCB14-U6	5.8	44.7	1.71	1.276	1.18	45.4	22.8	22.6	0.97
TCB31-U5	4.8	79.1	1.51	2.238	0.84	64.4	28.3	36.1	1.41
TCB35-U5	4.8	69.6	1.58	1.877	0.93	66.3	26.4	39.9	1.08
TCB37-U5	4.8	67.7	1.59	1.827	0.95	62.0	26.8	35.2	1.16
TCB39-U5	4.8	70.2	1.50	1.901	0.88	57.9	25.3	32.6	1.38
TCB41-U6	4.9	70.2	1.57	1.916	0.92	64.3	26.5	37.8	1.16

2.2 试验内容

2.2.1 常规物理试验

对上述样品分别进行含水量、密度、比重、液塑限、颗粒分析等试验,获得的代表性物理指标如表1所示。

2.2.2 单向固结试验

为了确保试验的代表性,采用的固结试验样品直径为68.1 mm,高度为20 mm,在整个单向固结试验过程中,试样全部处于饱和状态,试验采用不卸载的方法,施加荷载从小到大分别为6,

12, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1 600和3 200 kPa。每级荷载施加后,数据采集系统按以下时间记录沉降数据:0, 10, 20, 30, 40, 50 s; 1, 2, 4, 8, 15, 30 min; 1, 2, 4, 8, 24 h, 24 h后由于软件系统没有数据记录,改为人工采集沉降数据,每间隔24 h记录1次,一直到时间10 000 min。

通过试验,获得一系列试验数据,获得的指标包括前期固结压力、压缩指数,不同荷载下的次固结系数等(表2, 3)。

表2 单向固结试验结果

样品编号	样品深度/m	前期固结压力 P_c /kPa	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	超固结比OCR	压缩指数 C_c
TCB9-U5	4.8	34	1.69	1.03	0.42
TCB12-U6	5.7	32	1.60	0.94	0.81
TCB14-U6	5.8	38	1.71	0.93	0.49
TCB31-U5	4.8	20	1.51	0.82	0.76
TCB35-U5	4.8	34	1.58	1.22	0.86
TCB37-U5	4.8	28	1.59	0.99	0.63
TCB39-U5	4.8	21	1.50	0.88	0.61
TCB41-U6	4.9	25	1.57	0.90	0.70

表3 单向固结试验代表性次固结系数

试验荷载 P /kPa	次固结系数
6	0.001 768
12	0.002 152
25	0.004 225
50	0.008 625
100	0.007 474
200	0.006 635
400	0.005 630
800	0.005 205
1 600	0.004 590
3 200	0.003 766

3 试验成果分析

从试验的结果来看,软土总体上含水量、液限、塑性指数及液性指数大,天然密度小,含水量超过了液限,孔隙比超过了1.5,超固结比在1左右,岩性主要为淤泥,总体上呈正常固结状态。下面就土的物理力学性质与次固结系数的关系进行分析。

3.1 次固结系数与物理指标的相关性分析

含水量能够反应颗粒之间结合水膜的厚度大小,塑性指数本质上反映了黏性土的黏滞流动

性,这2个物理指标对土的蠕变具有明显的影响,本研究进行了次固结系数与以上2个物理指标的相关性分析。

3.1.1 次固结系数与含水量相关性分析

利用不同荷载下获得的相应次固结系数,研究分析了正常固结软黏土在天然上覆压力下的次固结系数与天然含水量的关系,如图2所示。从图2可总结出含水量与次固结系数的相关公式:

$$Ca=0.009W \quad (2)$$

式中: Ca 为正常固结软黏土天然上覆有效应力下的次固结系数; W 为天然含水量。

从图及公式可以明显看出,次固结系数与含水量呈线性递增关系。随着含水量的增加,次固结系数增大,这也从侧面说明了含水量大,结合水分膜厚度相对较大,相对易发生蠕变,产生的次固结系数必然增大。因为相关系数相对较小($R=0.67$),此公式可作为粗略估算天然状态下正常固结软黏土的次固结系数公式进行利用。

这个公式和赵维炳等^[6]1997年提出的用天然含水量估计 Ca 公式 $Ca=0.018W$ 不同,由于本次研

究得到的此关系式前提条件并未在赵维炳的关系式中有提及, 因此建议两者比较性有待研究(图2)。

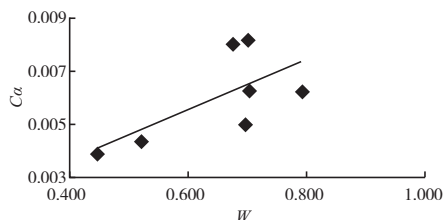


图2 含水量(W)与次固结系数($C\alpha$)的关系曲线

3.1.2 次固结系数与塑性指数的相关性分析

本研究分析了正常固结软黏土在天然上覆压力下的次固结系数与塑性指数的关系, 如图3所示。从图3可总结出塑性指数与次固结系数的相关公式:

$$C\alpha = 0.000\ 241 I_p - 0.001\ 382 \quad (3)$$

式中: $C\alpha$ 为正常固结软黏土天然上覆有效应力下的次固结系数; I_p 为塑性指数。

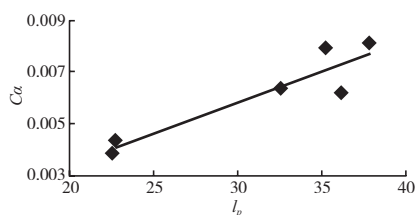


图3 塑性指数(I_p)与次固结系数($C\alpha$)关系曲线

从图和公式可以明显看出, 随着塑性指数的增加, 次固结系数是呈线性增大的, 这也从侧面说明了塑性指数越大, 结合水膜厚度也越大, 相对易发生蠕变, 产生的次固结系数必然增大。因为相关性相对较好, $R=0.92$, 上述公式可作为判断天然状态下正常固结软黏土次固结系数进行利用。

这种变化特征与1998年Sekiguchi和2001年白冰等^[7]推导的是一致的, 所不同的是线性公式各自推导形成的斜率和截距有所不同, 这估计与各自研究时采用的不同力学条件有较大的关系, 有待进一步研究。

3.2 次固结系数随荷载变化的特征

根据代表性的固结试验结果, 软土在4.8 m深度的前期固结压力是28 kPa, 不同荷载下的次固结系数如表3所示, 两者形成的关系曲线如图4所示。

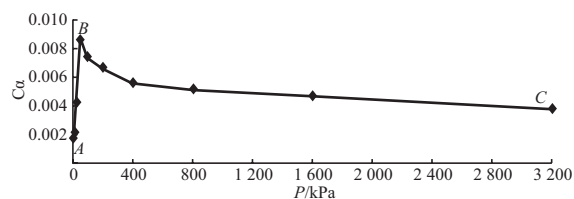


图4 荷载(P)与次固结系数($C\alpha$)关系曲线

从图4可以看出, 施加荷载在前期固结压力之前, 即压力屈服之前, 所获得的次固结系数极小, 如A点所示。这也说明超固结土的极好的结构性阻止了结合水膜的蠕变。随着施加荷载的增加, 土的结构性阻止结合水膜蠕变的能力减弱, 次固系数逐渐增大。在施加荷载超过了前期固结压力后, 土的结构性重新发生了变化, 结合水膜蠕变的能力加强, 次固结系数达到了一大值。如图B点所示。经过B点后, 土体逐渐随着荷载的增加压密、压实, 结合水膜厚度变薄, 土的蠕变能力也逐渐减弱, 次固结系数也往小的方向发展。在较大荷载如3 200 kPa下, 次固结系数趋近于一个近不变的常数。如C点所示。这种总体发展趋势与大多数学者^[8-13]的研究是一致的。

但本研究仍有一些与前人不一致的地方。主要表现在:

1) 出现次固结系数峰值的地方并不是前期固结压力之处, 而是在前期固结压力之后的某一处, 这一点2009年朱俊高^[14]也曾定性的提到过;

2) 在正常固结状态下, 次固结系数并不表现为一个定值, 而是随着荷载的加大, 呈现变小的特征, 但变化幅度不大。

3.3 次固结系数($C\alpha$)与压缩指数(C_c)的相关性分析

1977年, Mesri等^[15]总结了22种黏土的次固结试验结果后发现, 对于同一种原状土, 次固结系数与压缩指数的比值 $C\alpha/C_c$ 是一个常数。我国一些学者如高彦斌^[16]、张军辉^[17]、陈晓平等^[18]的研究也认为正常固结的软黏土 $C\alpha/C_c$ 是可近似看作常数。

但是从本研究来看, 珠三角洲入海口正常固结软黏土不同荷载下 $C\alpha$ 并不是一个常数。通过分析8个样品不同荷载下软黏土的 $C\alpha$ 变化特征, 分析了荷载与次固结系数变化关系(图4), 次固

结系数在正常固结状态下随着荷载的增加不断减小,并最终趋于稳定。这说明了在不同荷载下,软土的内部结构是存在不同的,也造成次固结系数的差异。最终在大荷载下,软土内部结构趋于稳定,次固结系数的变化逐渐固定化,形成了近相似的次固结系数,此时 Ca/Cc 是可近似看作一个常数。因此在大荷载下,本次研究可以得到与Mesri、高彦斌、张军辉及陈晓平等大概一致的结果。

3.4 次固结系数峰值处荷载与前期固结压力对应关系

利用本研究样品进行固结试验获得的前期固结压力,以及次固结系数峰值处荷载,绘制次固结系数峰值对应的荷载与前期固结压力关系曲线(图5)。图上显示,软黏土的前期固结压力与次固结系数峰值对应的荷载呈线性递增的关系,相关性 $R=0.75$,相关性较好。线性关系公式如下:

$$P_i = 0.551P_c + 37.80 \quad (4)$$

式中: P_i 为次固系数峰值处荷载(kPa); P_c 为前期固结压力(kPa)。

此式可以作为评价软黏土次固结系数峰值对应的荷载来运用。

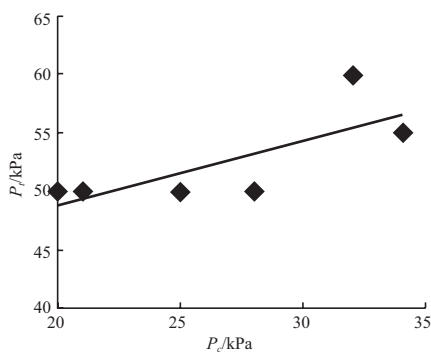


图5 前期固结压力(P_c)与次固结系数峰值处荷载(P_i)的关系曲线

3.5 压力屈服后次固结系数的变化特征

殷宗泽等^[8]、张惠明等^[9]认为,当荷载超过前期固结压力,处于正常固结状态时,次固结系数与荷载无关。本次研究分析了8个样品的在正常固结状态下次固结系数与荷载的关系。如图6所示,次固结系数是随着荷载的增加而逐渐减小的,随着荷载的加大,变化趋势减小并趋于稳

定。这一观点总体上与Mesri^[10]、曾玲玲^[10]、余湘娟等^[11]的研究一致。利用图8分析,可建立正常固结软土次固结系数与加荷的关系公式如下:

$$Ca = 0.019P^{-0.19} \quad (6)$$

式(6)相关系数 $R=0.88$,相关性好,此公式可以作为正常固结软黏土次固结系数在不同上覆荷载下的推导公式。

3.6 软黏土次固结变形分析

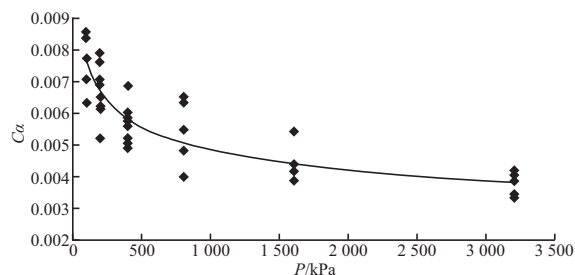


图6 正常固结软黏土次固结系数与荷载的关系曲线

从图4及表3可以分析,当荷载小于前期固结压力时,由于土的结构强度未受破坏,制约了土颗粒之间结合水膜的蠕变,使得次固结系数极小,这也从侧面间接说明了硬黏土由于前期固结压力大,上覆基础压力小,可以忽略次固结的影响,不考虑次固结变形。

当荷载达到前期固结压力后,处于正常固结状态,土颗粒间的结构性破坏,结合水膜的蠕变因为制约减小而加速增加,次固结系数也加速增大,特别是对那些含水量大、塑性指数高的软黏土,特别应考虑次固结变形。

当荷载进一步增大时,土粒压密了,结合水膜的厚度减小,蠕变能力减小,次固结系数降低,但仍高于前期固结压力前的次固结系数。应适时考虑次固结变形。

4 结论

1) 珠江三角洲入海口软土所受荷载小于前期固结压力时,即压力屈服前,土的结构性阻碍了结合水膜的蠕变,次固结系数极小;随着加荷的增大,结合水膜的蠕变开始增大,次固结系数也增大;当荷载位于前期固结压力附近时,并出现压力屈服时,土的结构性出现了重新排列,结合

水膜的蠕变受土的结构性影响小,次固结系数将达到峰值;随着加荷的继续增大,土体压密,结合水膜厚度减小,蠕变减弱,在大荷载下,将趋于相对稳定值。这种总体变化趋势与绝大多数学者在其它地区的研究一致。

2) 压力屈服后,次固结系数并不是一个定值,与压缩指数的比值也就无法等于一个常数了,这与其它地区的前人研究是不一致的。因此,在珠江三角洲入海口运用软土次固结系数时,应根据实际的外荷作用进行室内次固结试验,才能获得反映符合设计的次固结系数指标。

3) 正常固结软土随着含水量的增加、塑性指数的增大,在天然上覆压力下次固结系数呈线性增大。

4) 次固结系数峰值并不是出现在前期固结压力处,而是出现在超过前期固结压力,在与前期固结压力呈线性增长的更大荷载处。

5) 本研究提供的精细的次固结系数分析评估成果,为港珠澳岛隧工程软土沉降严谨及合理计算打下了基础,为珠江三角洲入海口软土次固结变形研究提供了依据,为不同地区次固结系数研究提供了参考。

6) 由于本研究仅对软土层,主要是淤泥进行研究,对于非软土,特别是硬土,本研究成果仅可作为参考,运用时应结合非软土本身的特点进行研究分析。

参考文献:

- [1] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [2] SL 237—1999 土工试验规程[S].
- [3] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [4] 常士骠,张苏民,项勃. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 372—373.
- [5] BS 1377-5:1990 Methods of test for soils for civil engineering purposes[S].
- [6] 赵维炳,施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997.

- [7] 白冰,周健. 饱和软黏土的塑性指数对其压缩变形参数的影响[J]. 水利学报, 2001 (11): 51—55.
- [8] 殷宗泽,张海波,朱俊高. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报. 2003, 25(5): 521—526.
- [9] 张惠明,徐玉胜,曾巧玲. 深圳软土变形特性与工后沉降[J]. 岩土工程报, 2002, 24(4): 509—514.
- [10] 曾玲玲,刘松玉,洪振舜. 天然沉积软黏土的次固结变形机理分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1 042—1 046.
- [11] 余湘娟,殷宗泽,董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程报, 2007, 29(6): 913—916.
- [12] 侯晓亮,赵晓豹,李晓昭. 南京河西地区软土次固结特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009 (5): 888—892.
- [13] Mosleh A Al-Shanrani. Application of the $CaP C_c$ concept to secondary compression of sabkha soils[J]. Can Geotech J, 1998, 35: 15—26.
- [14] 朱俊高,冯志刚. 反复荷载作用下软土次固结特性试验研究[J]. 岩土工程报, 2009, 3(3): 341—345.
- [15] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. Geotechnical Engineering: ASCE, 1977, 103(5): 417—430.
- [16] 高彦斌,朱合华,叶观宝. 饱和软黏土一维次压缩系数 Ca 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 456—463.
- [17] 张军辉,缪林昌. 连云港软黏土次固结变形研究[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 116—120.
- [18] 陈晓平,朱鸿鹄. 软土变形失效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 142—2 147.
- [19] 陈宗基. 固结及次固结时间效应的单维问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1—3.
- [20] Bjerrum L. Embankments on soft ground [J]. ASCE, 1972:1—54.
- [21] 徐珊,陈有亮,赵重兴. 单向压缩状态下上海地区软土的蠕变变形与次固结特性研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 495—501.
- [22] 田淑娟,王新中,张米军. 测定土的次固结系数及方法[J]. 水科学与工程技术, 2010(3): 52—53.

(本文编辑 郭雪珍)