

DOI: 10.11779/CJGE2017S2048

# 有明黏土固结特性的应变率效应和应变率取值研究

加 瑞<sup>1, 2</sup>, 雷华阳<sup>1, 2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

**摘 要:** 通过不同应变率下的恒应变速率 (CRS, Constant Rate of Strain) 固结试验研究了应变率对有明黏土固结特性的影响, 通过对比 CRS 固结试验和常规分级加荷 (IL, Incremental Loading) 固结试验的结果, 探讨了 CRS 固结试验中应变率的取值问题。试验结果表明随着应变率的增大, 有明黏土的应力 - 应变曲线向右平行偏移, 应变率增大 10 倍时, 先期固结压力 ( $p_c$ ) 约增长 17%, 正常固结阶段的固结系数 ( $c_v$ ) 约增长 34%; 当应变率为 0.02%/min 时, CRS 固结试验得到的  $p_c$  和  $c_v$  值与 IL 固结试验得到的值基本一致; 通过计算 IL 固结试验中不同应变率时的平均应变率, 发现在正常固结阶段, IL 固结试验中达到 90% 的 24h 应变率时的平均应变率接近于 0.02%/min, 建议 CRS 固结试验中采用的应变率可取为 IL 固结试验中每级固结压力下达到 90% 的 24 h 应变率时的平均应变率的平均值。

**关键词:** 应变率; 固结特性; 先期固结压力; 黏土

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S2 - 0198 - 05

**作者简介:** 加 瑞(1982 - ), 男, 讲师, 主要从事土工试验与原位测试方面的研究工作。E-mail: jiarui@tju.edu.cn。

## Effect of strain rate on consolidation behavior of Ariake clay and selection of the suitable strain rate

JIA Rui<sup>1, 2</sup>, LEI Hua-yang<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The effect of strain rate on the consolidation behavior of Ariake clay is investigated by the constant rate of strain (CRS) consolidation tests under different strain rates, and the suitable strain rate in CRS consolidation tests is discussed based on the comparison results of CRS consolidation tests and routine incremental loading (IL) consolidation tests. The test results show that the stress-strain curves of Ariake clay shift in a parallel manner to the right with the increase of the strain rate. The preconsolidation pressure ( $p_c$ ) increases by about 17% and the coefficient of consolidation ( $c_v$ ) in the virgin consolidation range increases by about 34% respectively with a tenfold increase in the strain rate. The values of  $p_c$  and  $c_v$  from CRS tests with a strain rate of 0.02%/min are comparable to those from IL tests. The average strain rate up to 90% of strain of 24 h in the virgin consolidation range of IL tests is close to 0.02%/min based on the calculation of average strain rates up to different strains in IL consolidation tests. It is suggested that the strain rate in CRS consolidation tests corresponding with the mean value of average strain rate up to 90% of strain of 24 h under different consolidation pressures in IL tests should be adopted.

**Key words:** strain rate; consolidation behavior; preconsolidation pressure; clay

## 0 引 言

固结试验是用来测定土体在一维条件下的变形特性的试验方法, 可为地基沉降计算提供必要的参数。固结试验根据施加荷载的方式可分为分级加荷固结试验和连续加荷固结试验。常规固结试验采用分级加荷法 (IL, Incremental Loading), 通常每级荷载的加荷时间为 24 h, 后一级荷载是前一级荷载的 2 倍。连续加荷固结试验根据试验中控制条件的不同, 可分为恒应变速率试验、恒加荷速率试验、控制水力梯度试验和恒固结梯度试验。其中恒应变速率 (CRS, Constant

Rate of Strain) 固结试验相对于其它连续加荷固结试验具有理论明确和加载方便等优点, 是连续加荷固结试验中最常用的类型, 已被列入了许多国家的土工试验规范中<sup>[1-3]</sup>。常规 IL 固结试验因其理论简明、设备简单、操作方便等优点, 是国内外较为通用的固结试验方法。与常规 IL 固结试验相比, CRS 固结试验的优点是可以大幅缩短试验时间和得到应力 - 应变曲线

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51509181); 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (15JCQNJC43800)

收稿日期: 2017 - 08 - 02

上的连续数据点, 而且可以研究加载速率对土体应力 - 应变曲线的影响。

不同黏土在不同应变率条件下的大量 CRS 固结试验结果表明应变率会影响黏土的应力 - 应变曲线, 随着应变率增加, 应力 - 应变曲线会向右平行偏移, 黏土的先期固结压力会随着应变率的增大而增大<sup>[4-6]</sup>。很多学者进行了如何通过 CRS 固结试验的结果计算固结系数的理论研究, 包括小应变理论<sup>[7]</sup>和大应变理论<sup>[8]</sup>, 也有学者研究了应变率对固结系数的影响, 认为固结系数随应变率的增大而增大<sup>[6]</sup>。

应变率是 CRS 固结试验的一个重要参数, 试验前需要首先设定一个合适的应变率, 许多学者讨论了试验中的最小和最大应变率的取值范围<sup>[9-10]</sup>。为了使 CRS 固结试验的结果与 IL 固结试验的结果基本一致, ASTM D4186—06<sup>[2]</sup>建议试样底部的超孔隙水压力与竖向总应力的比 $u_b/\sigma_v$ 应在 3%~15%之间。日本 JIS 标准<sup>[3]</sup>建议: 土体的塑性指数小于 10 时, 应变率可取为 0.1%/min; 土体的塑性指数大于 10 且小于 40 时, 应变率可取为 0.05%/min; 土体的塑性指数大于 40 时, 应变率可取为 0.01%/min。Mesri 等<sup>[9]</sup>推导出了 CRS 固结试验时试样底部的超孔隙水压力接近 0 时应变率的计算公式, 认为在该应变率下得到的应力 - 应变曲线将与 IL 固结试验主固结完成时的应力 - 应变曲线一致。但在该应变率下进行试验时, 试样底部的超孔隙水压力接近 0, 不能准确计算渗透系数, 而且试验所需时间大于 14 d。最后建议采用该值的 10 倍的应变率进行 CRS 固结试验, 试验的时间可缩短为 2 d 左右, 且所测的超孔隙水压力不是很大且可以用来计算渗透系数。

本文将对不同地点和不同深度的日本有明黏土进行不同应变率下的 CRS 固结试验和 IL 固结试验。研究应变率对有明黏土应力 - 应变曲线、先期固结压力和固结系数的影响; 通过对比不同应变率下的 CRS 固结试验与 IL 固结试验得到的先期固结压力和固结系数, 研究在多大的应变率下, CRS 固结试验可以得到与 IL 固结试验基本一致的结果; 最后探讨如何根据 IL 固结试验中不同阶段的平均应变率确定 CRS 固结试验中的适宜应变率。

# 1 试验装置和方案

## 1.1 黏土土样

在日本有明海沿岸高速公路建设时, 在公路沿线用薄壁取土器采取了大量的不扰动土样进行岩土工程勘察, 本文采用其中 3 个地点不同深度的钻孔土样进行了试验, 试验土样的物理性质指标如表 1 所示。大

部分土样的含水率大于 100%且大于它的液限, 塑性指数大约为 50, 孔隙比大于 2.5, 黏粒含量 ( $<2\ \mu\text{m}$ ) 在 20%~60%之间。土样被运输到实验室后, 土样被从土样管中推出, 然后用石蜡密封并保存在水中用于固结试验的制样。CRS 和 IL 固结试验中试样的高度均为 2 cm, 直径均为 6 cm (面积约为  $28.27\ \text{cm}^2$ )。

表 1 试验黏土土样的物理性质指标

Table 1 Physical index properties of test clay samples						
钻孔	深度 /m	孔隙比	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	黏粒含量/%
BH-1	1~1.9	3.43	129.4	116.7	57.4	36.0
	3~3.9	3.78	141.8	135.4	71.1	35.7
	5~5.9	3.51	132.4	118.5	58.0	29.6
	9~9.9	3.52	133.0	117.2	52.7	43.5
	10~10.9	3.40	128.6	119.8	50.1	32.1
	11~11.9	2.97	112.6	104.9	48.2	31.2
	12~12.9	2.81	105.5	100.8	47.5	26.6
	14~14.9	2.53	95.7	91.2	45.2	23.9
BH-2	16~16.9	2.55	95.1	113.2	48.2	45.0
	3~3.9	3.50	136.4	121.9	50.3	51.5
BH-3	6~6.9	2.81	109.4	104.8	44.3	29.7
	4~4.9	3.61	140.9	130.7	53.2	58.6
	6~6.9	3.45	137.6	122.5	50.7	54.3
	8~8.9	3.22	126.4	108.2	44.2	47.9
	10~10.9	2.58	102.6	97.1	44.9	45.7

## 1.2 试验装置和方法

CRS 固结试验的装置如图 1 所示。试验装置主要包括固结容器、轴向加载装置、反压维持装置、轴向荷载测量装置、变形测量装置以及超孔隙水压力测量装置。试验时首先设定一个应变率, 在此应变率下连续加载至所要求的最大应变, 在整个自动加压过程中只允许在试样的顶部进行单向排水, 同时量测不同时刻的轴向荷载、试样变形量以及试样底部的超孔隙水压力, 为了增加试样的饱和度, 试验过程中保持施加 200 kPa 的反压。通过测量数据可以计算孔隙比和竖向有效应力, 绘制应力 - 应变关系曲线, 推求先期固结压力以及固结系数等力学指标。在 CRS 固结试验中, 假定试样内的超孔隙水压力沿高度是抛物线分布, 则试样中竖向有效应力 $\sigma'_v$ 可由下式计算:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \quad , \quad (1)$$

式中,  $\sigma_v$  为竖向总应力,  $u_b$  为试样底部的超孔隙水压力。固结系数 $c_v$ 可由下式计算:

$$c_v = \frac{\Delta\sigma_v \bar{H}^2}{2\bar{u}_b \Delta t} \quad , \quad (2)$$

式中,  $\Delta\sigma_v$  为  $\Delta t$  时间内竖向总应力的增量,  $\bar{H}$  和  $\bar{u}_b$  分别为  $\Delta t$  时间内的平均试样高度和试样底部的平均超孔隙水压力。

IL 固结试验的压力等级为 9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 157, 314, 628, 1256 kPa, 每级压力下的固结时间为

24 h, 每级压力施加后, 记录 6, 9, 15, 30 s 和 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40 min 以及 1, 1.5, 2, 3, 6, 24 h 的沉降量用于计算固结系数。

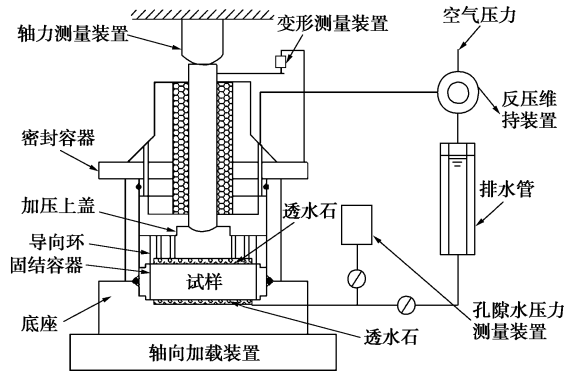


图 1 CRS 固结试验装置

Fig. 1 Sketch of CRS consolidation test device

1.3 试验方案

对采取的 15 个不扰动黏土土样分别进行了 IL 固结试验和应变率为 0.02%/min, 0.05%/min, 0.1%/min 和 0.2%/min 的 CRS 固结试验。为了得到与 IL 固结试验基本一致的结果, ASTM D4186—06<sup>[2]</sup>建议 CRS 固结试验中所选取的应变率应该保证试验中  $u_b/\sigma_v$  在 3%~15% 之间。为了研究有明黏土固结特性的应变率效应, 本文所选取的应变率范围略大于 ASTM 标准中的建议值。

2 试验结果

2.1 应变率对应力 - 应变曲线的影响

图 2 为有明黏土的典型应力 - 应变 - 应变率关系曲线 (BH-1; 5~5.9 m)。可以看到, 在一个指定的应变下, 应变率越大, 竖向有效应力越大。随着应变率的增大, 应力 - 应变曲线向右平行偏移, 这与已有文献中所得的结果一致<sup>[4-6]</sup>。两条曲线基本平行, 指出等速率线模型 (isotache model) 适用于不扰动的有明黏土。

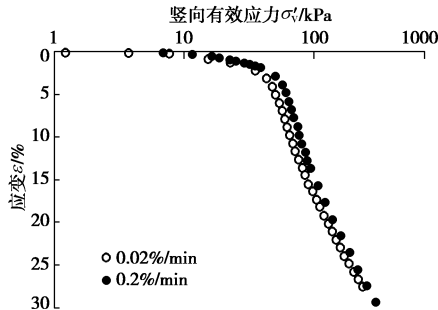


图 2 典型的应力 - 应变 - 应变率关系 (BH-1; 5~5.9 m)

Fig. 2 Typical stress-strain-strain rate relation (BH-1; 5~5.9 m)

2.2 应变率对先期固结压力的影响

采用卡萨格兰德法得到的 15 组土样在不同应变率下的先期固结压力, 经过 0.02%/min 应变率下的先期固结压力正规化后的结果如图 3 所示。图中  $p_c(\epsilon)$  为

某应变率下的先期固结压力,  $p_c(0.02\%/min)$  为应变率为 0.02%/min 时的先期固结压力。可以看出, 在对数坐标下,  $p_c$  随着应变率的增大而增大。线性拟合结果表明应变率增大 10 倍时, 有明黏土的先期固结压力约增长 17%。

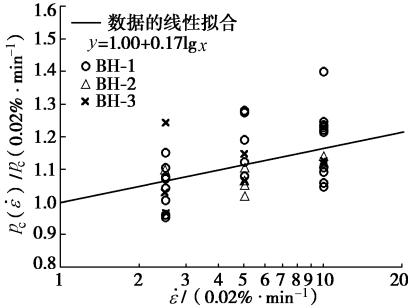


图 3 应变率对先期固结压力的影响

Fig. 3 Effect of strain rate on preconsolidation pressure

2.3 应变率对固结系数的影响

图 4 为 BH-1(5~5.9 m) 的试样在不同应变率下的固结系数 ( $c_v$ ) 与平均竖向有效应力 ( $\sigma'_v$ ) 的关系曲线。可以看到, 虽然在超固结阶段,  $c_v$  值比较离散, 但在正常固结阶段,  $c_v$  值随着应变率的增大而明显增大。

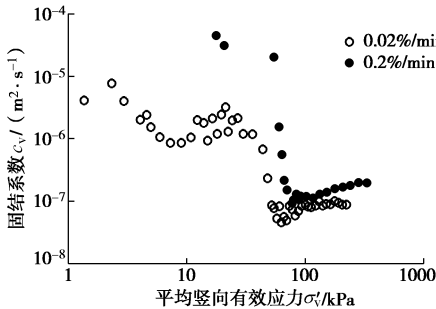


图 4 固结系数 - 应力 - 应变率关系 (BH-1; 5~5.9 m)

Fig. 4  $c_v$ -stress-strain rate relation (BH-1; 5~5.9 m)

在正常固结阶段的同一压力 (100 kPa) 下的 15 组土样在不同应变率下的  $c_v$  值被用来调查应变率对  $c_v$  的影响, 如图 5 所示。图中  $c_v(\epsilon)$  为某应变率下的固结系数,  $c_v(0.02\%/min)$  为应变率为 0.02%/min 时的固结系数。可以看出,  $c_v$  值随着应变率的增大而呈增加的趋势, 线性拟合表明应变率增大 10 倍时, 有明黏土的  $c_v$  值约增长 34%。

2.4 CRS 与 IL 固结试验结果的对比

由上述结果可知, 应变率会影响有明黏土的先期固结压力和固结系数, 选取 CRS 固结试验的应变率时, 一个重要的参考标准是在多大的应变率下, CRS 固结试验可以得到与 IL 固结试验比较接近的结果。图 6 为 CRS 和 IL 固结试验得到的不同地点和不同深度的 15 组土样的  $p_c$  值的对比。可以看到, 当应变率为 0.02%/min 时, CRS 固结试验得到的  $p_c$  值与 IL 固结试验得到的  $p_c$  值基本一致。

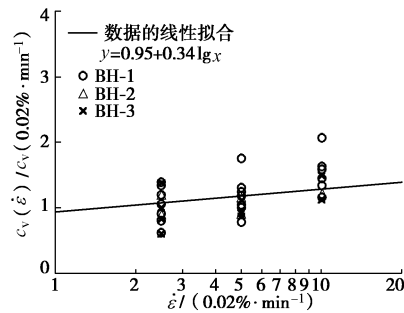


图 5 应变率对固结系数的影响

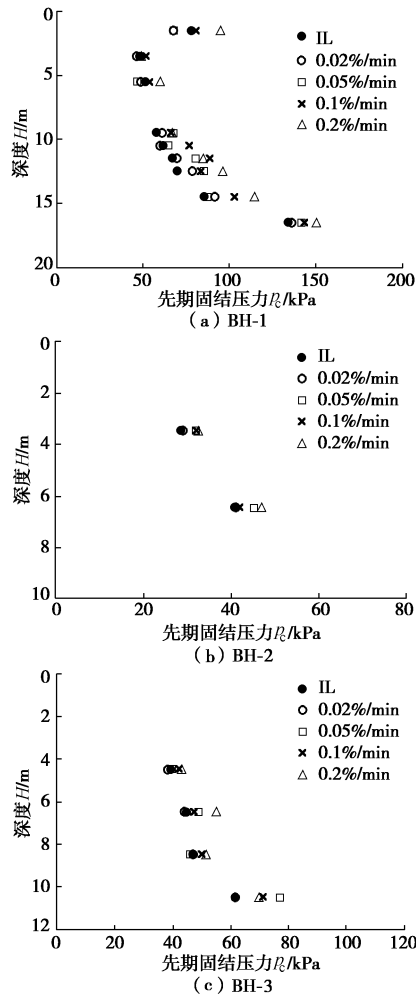
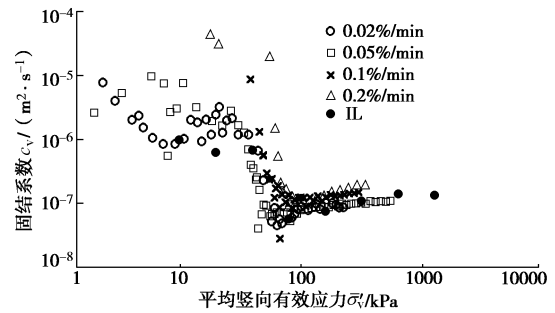
Fig. 5 Effect of strain rate on  $c_v$ 图 6 CRS 和 IL 固结试验所得  $p_c$  值的对比Fig. 6 Comparing values of  $p_c$  from CRS and IL tests

图 7 为 CRS 和 IL 固结试验得到 BH-1 的深度为 5~5.9 m 的土样的  $c_v$  值的对比, 其中 IL 固结试验每级固结压力下的固结系数利用时间平方根法求得。可以看到, 当应变率为 0.02%/min 时, CRS 固结试验得到的  $c_v$  值与 IL 固结试验得到的  $c_v$  值基本一致。所以可以用适当应变率下的 CRS 固结试验代替 IL 固结试验, 而 CRS 固结试验相比于 IL 固结试验, 可以得到应力-应变曲线上的连续数据点, 可以更好地反映应力-应变曲线上非线性段的特性, 而且可以大幅缩短试验时间。

图 7 CRS 和 IL 固结试验所得  $c_v$  值的对比 (BH-1; 5~5.9 m)Fig. 7 Comparing values of  $c_v$  from CRS and IL tests (BH-1; 5~5.9 m)

## 2.5 CRS 固结试验中的应变率取值

CRS 固结试验的主要结果是得到孔隙比与竖向有效应力的关系曲线用来计算主固结沉降的大小, 以及得到孔隙比与渗透系数的关系曲线用来计算主固结沉降的速率。CRS 固结试验中应变率取值应在一个合理的范围内, 因为如果选取的应变率过小, 试样底部的超孔隙水压力将很小, 不能准确计算渗透系数和固结系数; 如果选取的应变率过大, 试样底部的超孔隙水压力将很大, 导致沿试样高度的有效应力分布和变形的极不均匀。关于 CRS 固结试验中的应变率取值, 另一个问题是在多大的应变率下, CRS 固结试验可以得到与 IL 固结试验基本一致的结果。

由图 6 和图 7 可知, 当应变率为 0.02%/min, CRS 固结试验得到的  $p_c$  和  $c_v$  值与 IL 固结试验得到的值基本一致。IL 固结试验中在每级荷载作用下的应变率不断变化, 只能计算某段时间内的平均应变率, 通过每级荷载下的沉降-时间曲线可得到达到某沉降量所需的时间, 进而可计算该时段内的平均应变率。分别计算了 3 个地点的典型代表性试样达到 80%, 90% 和 100% 的 24 h 应变量 (并不是达到固结度的 80%, 90% 及 100%, 因为 24 小时的沉降量可能包含了部分次固结沉降) 时的平均应变率, 如图 8 所示。可以看出, 在正常固结阶段, IL 固结试验中 3 个试样达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率更接近于 0.02%/min。3 个试样每级固结压力下达达到 80% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值分别为 0.076%/min, 0.075%/min 和 0.070%/min; 达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值分别为 0.018%/min, 0.022%/min 和 0.019%/min; 达到 100% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值分别为 0.0041%/min, 0.0043%/min 和 0.0041%/min。也就是说, 每级固结压力下达达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值接近等于 0.02%/min。因此, 如需 CRS 固结试验得到和 IL 固结试验基本一致的  $p_c$  和  $c_v$  值, 建议 CRS 固结试验中采用的应变率可取为 IL 固结试验中每级固结压力下达

到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值。

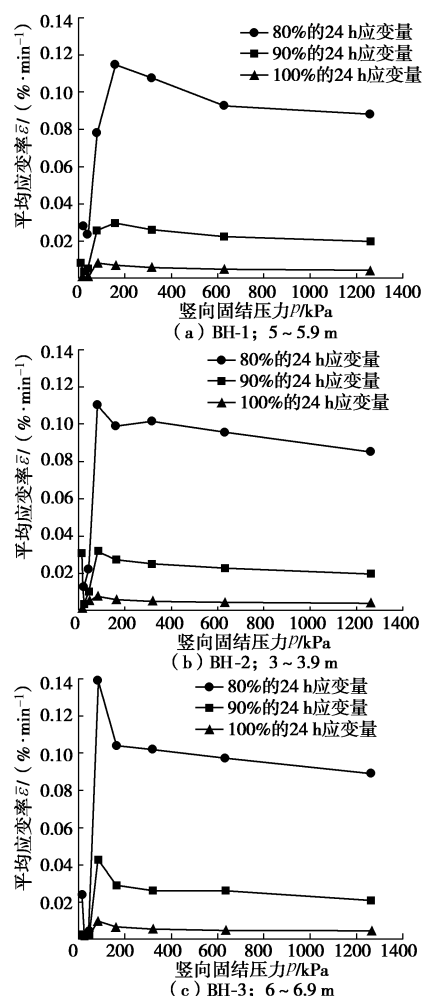


图 8 IL 固结试验达到不同应变量时的平均应变率

Fig. 8 Average strain rates of IL tests up to different strains

### 3 结论与建议

(1) 在一个指定的应变下, 应变率越大, 竖向有效应力越大。随着应变率的增大, 应力 - 应变曲线向右平行偏移。线性拟合表明应变率增大 10 倍时, 有明黏土的先期固结压力 ( $p_c$ ) 约增长 17%。在正常固结阶段, 固结系数 ( $c_v$ ) 随着应变率的增大而增大。线性拟合表明应变率增大 10 倍时, 正常固结阶段下 (100 kPa) 的  $c_v$  值约增长 34%。

(2) 通过对比不同应变率下的 CRS 固结试验与 IL 固结试验得到的  $p_c$  和  $c_v$  值, 发现当应变率为 0.02%/min 时, CRS 固结试验得到的  $p_c$  和  $c_v$  值与 IL 固结试验得到的  $p_c$  和  $c_v$  值基本一致。

(3) 在正常固结阶段, IL 固结试验中达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率接近于 0.02%/min, 且每级固结压力达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值接近等于 0.02%/min。因此, 建议 CRS 固结试验中采用的应变率可取为 IL 固结试验中每级固

结压力下达到 90% 的 24 h 应变量时的平均应变率的平均值。该建议值是通过对比有明黏土的 CRS 和 IL 固结试验结果得到的, 是否适用于其它类型的黏土有待进一步验证。

### 参考文献:

- [1] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [2] ASTM Standard D 4186—06 Standard test method for one-dimensional consolidation properties of saturated cohesive soils using controlled-strain loading[M]// Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [3] JSA (Japanese Standard Association) JIS A 1227. Test method for one-dimensional consolidation properties of soils using constant rate of strain loading[S]. Tokyo: JSA, 2000. (in Japanese)
- [4] GRAHAM J, CROOKS J H A, BELL A L. Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays[J]. Géotechnique, 1983, 33(3): 327 - 340.
- [5] LEROUÉIL S. Tenth Canadian Geotechnical Colloquium: Recent developments in consolidation of natural clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(1): 85 - 107.
- [6] 毛淑欣. 软黏土常速率应变固结压缩试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2012: 48 - 51. (MAO Shu-xin. Experimental investigation on constant rate of strain consolidation test for clays[D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 48 - 51. (in Chinese))
- [7] WISSA A E Z, CHRISTIAN J T, DAVIS E H, et al. Consolidation at constant rate of strain[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(10): 1393 - 413.
- [8] UMEHARA Y, ZEN K. Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 79 - 95.
- [9] MESRI G, FENG T W. Constant rate of strain consolidation testing of soft clays[C]// Proc Marsal Symposium. Mexico City: 49 - 59.
- [10] OZER A T, LAWTON E C, BARTLETT S F. New method to determine proper strain rate for constant rate-of-strain consolidation tests. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(1): 18 - 26.