

# 压实黄土的一维次固结特性研究

张卫兵<sup>1,2</sup>, 谢永利<sup>1</sup>, 杨晓华<sup>1</sup>

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 在一系列的一维固结试验的基础上, 探讨了压实黄土的次固结特性, 分析了固结压力、固结时间、加载比和超载预压处理对次固结的影响。试验结果表明: 随着固结压力的变化, 压实黄土的次固结系数表现出与当前应力状态有关的变化规律。当处于正常固结状态时, 次固结系数近似为一常数; 而当超载预压处理后, 次固结系数随超载比和超载作用时间不同而变化。同时, 在正常固结状态时, 次固结系数与压缩指数具有很好的相关性, 且受加载比和作用时间的影响较小。

**关键词:** 压实黄土; 次固结系数; 超载比

**中图分类号:** TU441

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2007)05-0765-04

**作者简介:** 张卫兵(1973-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事公路岩土及特殊土性状及工程应用方面的研究。E-mail: zwb231@126.com。

## Research on 1D secondary consolidation characteristics of compacted loess

ZHANG Wei-bing<sup>1,2</sup>, XIE Yong-li<sup>1</sup>, YANG Xiao-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Institute of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Based on a series of 1D consolidation tests, the characteristics of secondary consolidation of compacted loess were studied and the influence of consolidation pressure, consolidation time, compression index and overload ratio on the coefficient of secondary consolidation was analyzed. It was indicated that with the variation of consolidation pressure, the coefficient of secondary consolidation altered regularly with the variation of stress conditions. In normal consolidation state the coefficient remained approximately a constant value. But when the soil had been preloaded, the coefficient would change with the overload ratio and its duration time. Also, under normal consolidation circumstance, there was a significant correlativity between the coefficient of secondary consolidation and the compression index which would be scarcely influenced by overload ratio and its duration time.

**Key words:** compacted loess; coefficient of secondary consolidation; overload ratio

## 0 引言

已有研究表明: 次固结沉降主要指在有效应力已基本不变的情况下, 土体仍随时间增长而产生的压缩变形。大量扫描电子显微镜的观察结果证实次固结产生的机理为土骨架的蠕变变形<sup>[1]</sup>。次固结变形通常用次固结系数描述, 定义为单位时间对数周期土体孔隙比的变化量, 是计算路基工后沉降量的重要参数。图1为一维固结试验得到的典型的  $e - \lg t$  曲线, 该曲线反映了土体在外界荷载作用下的两个过程: 主固结过程和次固结过程。Buisman 认为在次固结变形阶段, 变形与时间对数基本呈线性关系, 并提出了次固结系数的概念。后来的研究也证实, 在一定时间对数周期内这种线性关系是严格的, 并以  $e - \lg t$  曲线的第二个折线段的斜率作为次固结系数  $C_a$ , 即

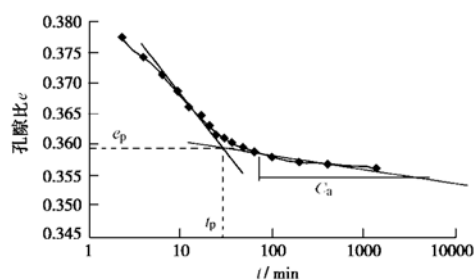


图1 典型一维固结试验曲线

Fig. 1 Typical curve of 1D consolidation tests

$$C_a = -\Delta e / (\lg t - \lg t_p) \quad (1)$$

式中  $\Delta e$  为次固结阶段的孔隙比变化;  $t_p$  为主固结完

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (200231881224)

收稿日期: 2006-04-20

表 1 黄土天然物理力学参数  
Table 1 Physicol mechanical parameters of natural loess

| 地层             | 含水率/% | 天然重度<br>/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 干重度<br>/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 比重   | 孔隙比   | 饱和度<br>/% | 液限<br>/% | 塑限<br>/% | 塑性指数<br>/% |
|----------------|-------|--------------------------------|-------------------------------|------|-------|-----------|----------|----------|------------|
| Q <sub>3</sub> | 22.45 | 18.1                           | 15.09                         | 2.71 | 0.764 | 79.07     | 27.5     | 16.67    | 10.83      |
| Q <sub>2</sub> | 15.65 | 19.7                           | 16.89                         | 2.71 | 0.574 | 33.01     | 29.0     | 17.51    | 11.49      |

成时刻，也被认为是主、次固结的分界时刻； $t$  为次固结量的计算时刻。

目前国内外对软黏土的蠕变特性进行了大量的研究<sup>[2-5]</sup>，然而在陕西、甘肃等西部山区修筑高等级公路时，黄土高填方路堤大量存在，所遇到的多是非饱和和压实黄土。本文根据室内一维固结试验成果，初步分析了压实黄土在一维变形条件下的次固结特性及其影响因素。

1 试验简介

试验用黄土取自陕西禹门口—闫良高速公路闫良区黄土塬开挖路段不同深度处的 Q<sub>2</sub>、Q<sub>3</sub> 黄土，物理力学参数见表 1。试验前将其混合，通过击实试验测得混合后土样的最优含水率约 16%，最大干重度达 18 kN/m<sup>3</sup>。本次试验以该指标为准，按照公路土工试验规程(JTJ051-93)进行制样，试样直径为 8 cm，高为 2 cm。试验共进行 3 组 6 个土样的一维固结试验。其中 I 组两个土样采用逐级加载的方法，加载等级分别为 50，100，200，400，800 kPa，共 5 个等级，除最后一级维持 30 d 外，其他每级维持 24 h。由此分析正常固结情况下压实黄土的次固结变形。II 组两个土样先分别在 400 kPa 下预压 1.5 h 和 24 h，然后卸载至 0 kPa。24 h 后再进行逐级加载固结，加载等级同 I 组。该组试验主要研究超载预压处理对压实黄土次固结变形的影响。III 组的两个土样分别采用不同的加载比和加载时间，从而研究其对压实黄土的次固结的影响。

2 试验结果与分析

2.1 正常固结压实黄土的次固结系数  $C_a$  值

图 2 给出了 I 组两个土样 NC-1 和 NC-2 在各级压力下的一维固结试验曲线。从图中可看出两个土样在各级压力下的次固结阶段的斜率基本相同，呈一组互相平行的直线。这一点说明各级固结压力下次固结系数  $C_a$  很相近。按照 Buisman 的方法对上述两土样的试验曲线进行分析计算得到的  $C_a$  值及其与固结压力的关系见表 2 及图 3。式 (1) 没有考虑固结压力对次固结系数的影响，而本文的试验结果表明这种影响是存在的，文献[6，7]也持同样的观点。由图 3 可看出，次固结系数不仅随着固结压力的变化而变化，且具有一定的规律性，即随着固结压力的增加  $C_a$  逐渐减小并

趋于稳定。但从总体来看，变化幅度不大。上述两土样的  $C_a$  平均值分别为 0.00276 和 0.00265，相差仅为 0.0001。可以认为正常固结情况下压实黄土的  $C_a$  值近似为一常数（取平均值）。

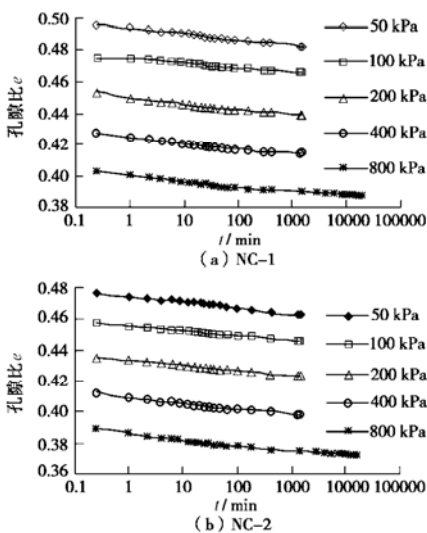


图 2 正常固结压实黄土的固结试验曲线

Fig. 2 Consolidation curves of normally consolidated compacted-loess

表 2 正常固结压实黄土次固结试验结果

Table 2 Results of secondary consolidation for normally consolidated compacted-loess (10<sup>-2</sup>)

| $p/kPa$ | 50   | 100  | 200  | 400  | 800  | 平均值   |
|---------|------|------|------|------|------|-------|
| NC-1    | 0.35 | 0.30 | 0.26 | 0.23 | 0.24 | 0.276 |
| NC-2    | 0.32 | 0.28 | 0.25 | 0.23 | 0.22 | 0.265 |

2.2 超载预压处理后压实黄土的  $C_a$  值<sup>[8-9]</sup>

分别对 II 组土样 PC-1 和 PC-2 进行固结试验：PC-1 先在 400 kPa 下预压，保证在这个时间段内主固结已结束。然后卸载回弹稳定后开始加载进行固结试验。试验加载等级及每级荷载的作用时间与前面的正常固结试验方案相同；PC-2 首先进行 400 kPa 预压，作用 24 h 后卸荷，待稳定后再按同样的方法加载进行固结试验。表 3 给出了该试验的试验结果，图 4 为超载预压处理后两个土样的  $C_a$  值与固结压力的关系。

表 3 超载预压处理后压实黄土次固结试验结果

Table 3 Results of secondary consolidation for preloaded compacted-loess (10<sup>-2</sup>)

| $p/kPa$ | 400  | 50   | 100  | 200  | 400  | 800  |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| PC-1    | 0.25 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.19 | 0.25 |
| PC-2    | 0.23 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.16 | 0.20 |

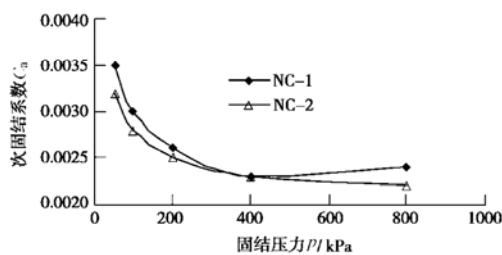


图 3 正常固结压实黄  $p$  与  $C_a$  关系曲线

Fig. 3 Relationship between consolidation pressure  $p$  and  $C_a$  for

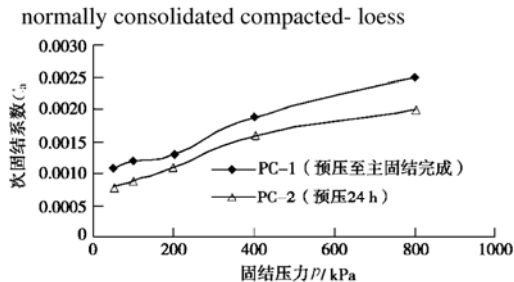


图 4 超载预压处理后压实黄土  $p$  与  $C_a$  的关系

Fig. 4 Relationship between condition pressure  $p$  and  $C_a$  for preloaded compacted loess

由表 3 可看出: 超载预压处理后, 土样的次固结速率有很大的变化。例如 PC-1 经预压处理后在 100 kPa 下的次固结系数较小,  $C_a=0.0012$ , 在 800 kPa 下的次固结系数则相对较大,  $C_a=0.0025$ 。这说明超载预压对压实黄土的次固结特性有很大的影响。从图 4 可看出, 经预压处理后, 当固结压力小于预固结压力 400 kPa 时,  $C_a$  值较小, 随着固结荷载的逐步增大,  $C_a$  值缓慢增加; 当固结压力大于预固结压力 400 kPa 时,  $C_a$  值逐渐接近预压 400 kPa 时的  $C_a$  值。这一点说明超载预压处理在一定压力范围内可以大大减小压实黄土的次固结速率, 而当压力增大至某一值后, 这种处理效应便会消失。

比较两试验结果可看出, 尽管预固结压力相同, 但其作用时间不同对压实黄土的次固结也有一定的影响。这里不妨类比超固结比定义超载比  $\eta=p_{pr}/p_n$  为预固结压力与预压后固结压力的比值,  $p_{pr}$  为预固结压力值,  $p_n$  为预压后的固结压力值。图 5 给出了两个土样预压处理后次固结系数随超载比的变化曲线。可以看出, 随着超载比的增大, 次固结系数减小并趋于稳定。超载预压时间越长, 次固结系数减小的幅度越大。

2.3 次固结系数  $C_a$  与压缩指数  $C_c$  的关系

Mersi 等<sup>[10]</sup>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  $C_a/C_c$  是一个常数。因为次固结系数与压缩指数均与先期固结压力有关, 且两者的变化规律相近, 故这两个指标间有较好的线性关系。从表 4 及图 6 的  $C_a-C_c$  关系来看, 压实黄土的次固结特性也基本符合上述结论。尽管由于制样等原因造成压缩指数有一定的变化范围, 但  $C_a/C_c$  值还是比较接近的,  $C_a/C_c=0.0212\sim$

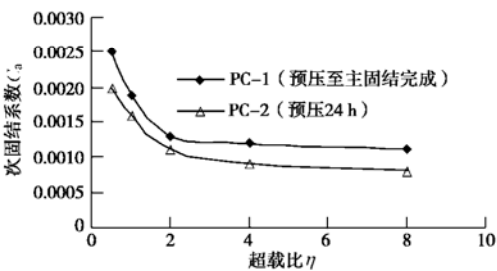


图 5 超载预压处理后压实黄土  $\eta$  与  $C_a$  关系

Fig. 5 Relationship between overload ratio  $\eta$  and  $C_a$  for preloaded compacted loess

0.0225, 平均值为 0.0221, 最大值与最小值相差仅为 0.0004。可以说, 压实黄土的次固结系数与压缩指数的比值  $C_a/C_c$  基本上是一个常数。另外, 次固结系数的传统确定方法工作量大, 且有一定的人为误差。而压缩指数的确定则更简便和准确。因此在实际工程中完全可以采用该经验关系来确定次固结系数。

表 4 次固结系数与压缩指数的关系

Table 4 Relationship between of secondary consolidation and

| compression index |         |        |           |
|-------------------|---------|--------|-----------|
| 土样编号              | $C_a$   | $C_c$  | $C_a/C_c$ |
| NC-1              | 0.00276 | 0.1231 | 0.0224    |
| NC-2              | 0.00265 | 0.1192 | 0.0212    |
| JB-1              | 0.00250 | 0.1121 | 0.0223    |
| JB-2              | 0.00254 | 0.1129 | 0.0225    |

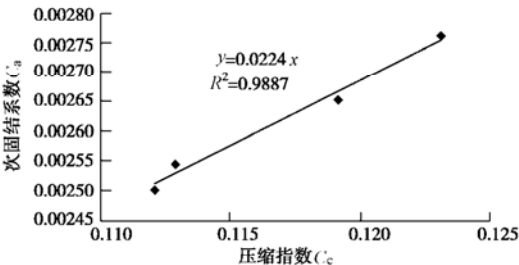


图 6  $C_a-C_c$  关系

Fig. 6 Relationship between  $C_a$  and  $C_c$

2.4 加载比及加载时间对次固结系数  $C_a$  的影响

研究表明, 在固结试验中, 加载比  $\Delta p/p$  以及加载间隔时间  $\Delta t$  的变化都将影响压缩曲线的形状, 从而影响到固结系数  $C_v$  值。而且目前关于这两方面因素对次固结变形影响的研究资料较少。因此, 有必要研究其对次固结系数  $C_a$  的影响。为此, 分别对 III 组土样 JB-1 和 JB-2 采取如下试验方案: JB-1 按照 50, 200, 400, 600, 800 kPa 的顺序加载, 各级荷载作用时间均 24 h; JB-2 按照 50 kPa 下固结 24 h, 100 kPa 下固结 3 d, 200 kPa 下固结 15 d, 400 kPa 下固结 400 min, 800 kPa 下固结 24 h。各试验得到的  $C_a$  值分别如表 5, 6 所示。从表 5 中可看出, 在加载时间相同的情况下, 尽管加载比变化较大, 但  $C_a$  值变化并不显著, 也就是说在正常固结情况下, 加载比对压实黄土的  $C_a$  值几乎

没有影响。从表 6 看,在  $\Delta p/p=1$  时,尽管加载时间变化很大, $C_a$  值却始终接近一恒定值。这也表明在正常固结情况下,不同加载时间对  $C_a$  值影响甚微。

表 5 土样 JB-1 在不同加载比下的  $C_a$  值

Table 5  $C_a$  values with different loading ratios for sample JB-1

| 荷载/kPa | 加载比 $\Delta p/p$ | 荷载作用时间/h | $C_a$ 值 |
|--------|------------------|----------|---------|
| 50     | 3                | 24       | 0.0028  |
| 200    |                  | 24       | 0.0025  |
| 400    | 1                | 24       | 0.0023  |
| 600    | 0.5              | 24       | 0.0024  |
| 800    | 0.33             | 24       | 0.0025  |

表 6 土样 JB-2 在不同加载时间下的  $C_a$  值

Table 6  $C_a$  values with different loading durations for sample JB-2

| 荷载/kPa | 加载比 $\Delta p/p$ | 荷载作用时间 | $C_a$ 值 |
|--------|------------------|--------|---------|
| 50     | 1                | 24h    | 0.0028  |
| 100    | 1                | 3d     | 0.0025  |
| 200    | 1                | 15d    | 0.0023  |
| 400    | 1                | 400min | 0.0027  |
| 800    | 1                | 24h    | 0.0024  |

3 结 论

(1) 压实黄土的次固结系数与固结压力有关。正常固结状态下,随固结压力的增大次固结系数逐渐减小并趋于稳定。总体变化不大,可近似看作一恒定值。

(2) 压实黄土的次固结系数与压缩指数具有很好的线性相关性。其比值  $C_a/C_c$  是一个常数,这一结果所反映的规律可为  $C_a$  的确定提供新的途径。

(3) 超载预压对压实黄土的次固结变形具有显著的影响。次固结系数的减小不仅与超载比有关,而且与超载作用时间有关。

(4) 超载预压处理在一定压力范围内可以大大减小压实黄土的次固结速率,而当压力超过预固结压力值后,这种处理效应便会消失。

(5) 正常固结状态下,加载比及加载时间对压实黄土的次固结系数影响甚微,可忽略不计。

次固结的机理比较复杂,次固结系数的影响因素也较多。而本文所得结论也仅基于有限试样得出。为了能更好地分析由于压实黄土在长期时间荷载作用下的蠕变所引起的黄土高路堤工后沉降,还需进一步加强该方面的试验研究。

参考文献:

[1] 张军辉, 缪林昌, 黄晓明. 连云港软黏土次固结变形研究[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 116 - 119. (ZHANG Jun-hui, MIAO Lin-chang, HUNG Xiao-ming. Study on secondary consolidation deformation of soft clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(1): 116 - 119. (in Chinese))

[2] 雷华阳, 肖树芳. 天津软土的次固结变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 385 - 389. (LEI Hua-yang, XIAO

Shu-fang. Study of secondary consolidation deformation characteristics of soft soil in tianjin[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 385 - 389. (in Chinese))

[3] 张惠明, 徐玉胜, 曾巧玲. 深圳软土变形与工后沉降[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 509 - 514. (ZHANG Hui-ming, XU Yu-sheng, ZENG Qiao-ling. Deformation behavior of shenzhen soft clay and post-construction settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 509 - 514. (in Chinese))

[4] 张洪亮, 胡长顺, 刘保健, 等. 压实石灰黄土力学特性试验[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 13 - 16. (ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun, LIU Bao-jian, et al. Mechanical properties experiment of compacte loess-liime[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 13 - 16. (in Chinese))

[5] 师旭超, 汪 稔, 张在喜. 广西海相淤泥的次固结特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 863 - 865. (SHI Xu-chao, WANG Ren, ZHANG Zai-xi. Study on secondary consolidation properties of Guangxi marine ooze[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 863 - 865. (in Chinese))

[6] CRAWFORD C B. Interpretation of the consolidation tests[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1964, 90(5): 87 - 102.

[7] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142 - 2147. (Cheng Xiao-ping, ZHU Hong-hu, ZHANG Fang-zhi. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142 - 2147. (in Chinese))

[8] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521 - 526. (YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521 - 526. (in Chinese))

[9] 高彦斌, 朱合华, 叶观宝, 等. 饱和软黏土一维此压缩系数  $C_a$  值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 459 - 463. (GAO Yan-bin, ZHU He-hua, YE Guan-bao, et al. The investigation of the coefficient of secondary compression ca in odometer tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 459 - 463. (in Chinese))

[10] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress compressibility interrelationship[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering, 1979, 103(5): 417 - 430.