

文章编号: 0451-0712(2006)02-0073-04

中图分类号: U412.22

文献标识码: B

公路软基次固结及其工程意义探讨

刘增贤

(广东省公路建设有限公司 广州市 510600)

摘要: 从排水问题入手,在对次固结的定义、变形机理以及次固结的影响因素进行了探讨的基础上,结合次固结的工程意义,对主、次固结的区分以及室内次固结系数应用于实际工程的适用性等问题进行了论述,有助于对次固结问题及公路软基工后沉降问题的进一步认识。

关键词: 公路; 软基; 变形; 次固结

随着 20 世纪 90 年代后我国已建成高速公路的陆续投入使用,公路软基工后沉降问题日益得到重视。作为公路软基变形特别是工后变形的重要组成部分,次固结问题的研究有了长足的进步,取得了一批富有建设性的成果,但由于次固结问题的复杂性,要清楚地揭示次固结的本质并有效地计算、预测次固结变形量,还有很多工作要做。

在高含水量、深厚软土上建设的高速公路路基,工后沉降往往较大,其中次固结的影响不可忽视,甚至相当多的专家把工后沉降的主要原因归结为次固结沉降。倪一鸿分析了京津塘高速公路次固结变形^[1],认为次固结占总沉降的 9%~13%。张诚厚等认为沪宁高速公路次固结占总沉降的 5%^[2],杭州高速公路软基试验段得出的结论是次固结与瞬时沉降占总沉降的 10%~40% 左右。王盛源对深圳某地基加固工程计算次固结变形量后认为,主固结可以较快结束,次固结占总沉降的 20% 左右^[3]。张迎春、刘吉福等对珠三角某高速公路软基采用粘弹性模型计算的次固结达到了总沉降的 32%^[4]。不同专家对于不同工程的次固结分析计算有着较大的差别。由于公路桥头等部位对于软基差异沉降非常敏感,次固结变形机理及变形预测对工程有很大的实际意义。

虽然认识到次固结的重要性,但对次固结的含义、主固结与次固结的区分方法、次固结的影响及评估还没有统一的认识。本文是在前人的基础上对这一问题做进一步的探讨。

1 次固结的排水问题

1.1 次固结是排水固结

次固结现象是在土的固结过程中发现的,在对软土的次固结现象的研究过程中,对次固结有多种定义方式,几乎每种定义方式都与主、次固结的区分问题密切相关。土的主固结是排水固结,其变形速率与排水速率相一致是研究者的共识,与此相反,次固结过程中水的作用却有很多争议。

在多个次固结的定义方式中,部分描述了土中水的作用,但认识程度有所不同。陈仲颐^[5]给次固结的定义是:在主固结过程(超静孔隙水压力消散过程)结束以后,在有效应力不变的情况下,土的骨架仍随时间继续发生变形,这种变形与孔隙水排出的速率无关,而是取决于土骨架本身的蠕变性质。钱家欢^[6]认为,次固结是有效应力已经基本上不变、但土的体积仍随时间增长而发生的压缩。在次固结过程中,实际上也有微小的超静孔隙水压力存在,驱使水在土粒之间流动。但由于次固结进行得极慢,水的流动速度是很小的,上述超静孔隙水压力小到无法测量。所以,次固结的体积变化速率与孔隙水从土流出的速率无关,与土层的厚度也无关。

在饱和软土中如果忽略孤立气泡的作用,则只有固、液两相。在某一单元体内,固体颗粒的密实以排水为前提,不排出水,固体颗粒就没有变形的空间,因此次固结过程应该是一个排水的过程。由地下水动力学可知:水的流动即使非常缓慢,也必须有水势差。如果土中存在水势差,则只能是软土内部存在

超静孔隙水压力。在这一点上,笔者同意钱家欢先生的观点,次固结过程中实际上也有微小的超静孔隙水压力存在,驱使水在土颗粒之间流动,只是水的流速极小,上述孔隙水压力小到无法测量。这种微小孔压的测量应是一个仪器方面的技术问题。

施建勇等人^[7]在常规压缩仪的基础上研制了可测量土样底部孔压的压缩仪,使用这种压缩仪测得在固结试验曲线上确定的主固结完成点上,土样底部的孔压并未完全消散,剩余的孔压约为所加荷载的3%~8%。

1.2 土的骨架蠕变速率与排水速率一致

软土的蠕变即是软土在恒定的应力作用下变形随时间增长的现象,有关次固结的文献均认为次固结是由软土的蠕变引起的,其变形速率与水分排出的速率无关。在饱和软土的单元体中,仅有土骨架及土中水2个组成部分,在忽略土颗粒及水的弹性变形基础上,土骨架的任何压缩变形都与水密切相关,土骨架再微小的变形都必须以同样体积水的排出为前提。因此,饱和软土的次固结不但是排水的,其变形量同主固结一样,取决于排水量的大小,土的骨架蠕变的速率与排水速率是一致的。

2 次固结的机理

软土中的水可分为强结合水、弱结合水及重力水3种赋存形式。强结合水(又称吸附水)受到土颗粒的强烈吸引,水分子排列紧密,其密度平均达 2 g/cm^3 左右,不能流动。弱结合水处于强结合水的外层,受到固相表面的引力比强结合水弱,结合水区别于普通液态水的最大特征是具有抗剪强度,结合水的抗剪强度由内层向外层逐渐减弱。当施加的外力超过其抗剪强度时,外层结合水发生流动,施加的外力愈大,发生流动的水层厚度也加大。

天然土中的孔隙类型可以划分为大孔隙($d > 40\ 000\ \text{\AA}$)、中孔隙($d = 4\ 000 \sim 40\ 000\ \text{\AA}$)、次小孔隙($d = 1\ 000 \sim 4\ 000\ \text{\AA}$)、小孔隙($d = 400 \sim 1\ 000\ \text{\AA}$)、微孔隙($d < 400\ \text{\AA}$)。其中微孔隙中的水不参与固结过程,软土在固结过程中,土体中的重力水在超静孔隙水压力作用下被排出来,孔隙不断变小,中孔隙逐渐变为次孔隙、小孔隙,土体的含水量很快降至液限左右;土孔隙中的自由重力水越来越少,土中的水转变为以结合水为主的类型;距土颗粒较远的弱结合水开始排出,由于结合水具有一定的抗剪强度和粘滞性,在同样的超静孔隙水压力下,排水速度变

小。表1为房后国等^[8]利用海相软土所得出的孔隙变化特征。

表1 不同压力下软土中的孔隙分布特征

| 压力/kPa | 各孔隙所占比例/% | | | | |
|--------|-----------|------|------|------|------|
| | 大孔隙 | 中孔隙 | 次孔隙 | 小孔隙 | 微孔隙 |
| 0 | 3.9 | 54.7 | 5.8 | 2.8 | 32.8 |
| 150 | 4.2 | 1.5 | 57.1 | 2.7 | 34.5 |
| 270 | 5.0 | 5.6 | 14.9 | 44.5 | 35 |
| 400 | 0 | 3.0 | 9.6 | 51.9 | 35.5 |

软土的固结排水过程中,较大的孔隙通道起主导作用。由于软土的孔隙率及孔隙直径不断下降,软土的渗透系数不断减小。如表1中软土在150 kPa的压力下,主要孔隙由中孔隙变为次孔隙,孔隙直径减小了4倍以上。由管流理论可知,不考虑管路的侧壁摩阻力,直径减小4倍后软土的渗透系数将减少16倍以上。渗透系数的变小,使软土中的重力水及弱结合水的排水速率都变得缓慢。

在次固结变形阶段,亦即主固结后期,超静孔隙水压力已基本消散完毕,利用残余的、绝对值很小的超静孔隙水压力,驱动具有一定抗剪强度及粘滞性的结合水通过渗透系数已变小的管路排出,排水速度、排水量应该很小。

因此,长期固结试验中 $e-\lg t$ 曲线上出现拐点是超静孔隙水压力消散、土中结合水的作用及土的渗透系数降低等3种因素复合而成。

从次固结的机理上讲,次固结实际上是主固结的后期阶段,两者并没有明显的分界,两者在加载后同时发生。在前期以主固结变形为主,后期以次固结变形为主。主固结与次固结的大部分性质是相同的,次固结应该与附加应力有关,可以通过超载预压来减少次固结变形^[9];次固结系数应该是随时间逐渐变小。次固结系数主要与以下因素有关。

(1)组成软土的矿物成分、粘粒含量及矿物成分对次固结有显著的影响,粘粒含量越多,粘粒矿物的比表面积越大,软土中结合水含量越高,因而次固结系数越大,在土样固结实验中就会越早显现次固结的性质。

(2)孔隙比及含水量。土的孔隙比及含水量越大,结合水含量越高,次固结系数也越大。

(3)孔隙的特征及均匀程度。土中较小的孔隙比重较大时,次固结系数较大。在孔隙的等效孔径一定时,不同大小的孔隙分布越均匀,次固结系数越大。

(4) 应力大小。应力越大,超静孔隙水压力越高,次固结系数越大。

3 次固结的工程意义探讨

在公路路堤的施工加载过程中,软土路基的沉降主要是由主固结引起的。但在公路建成通车之后,主固结已基本完成,次固结变形所占的比例大为提高。因此,次固结的工程意义一般与工后沉降^[1,3]联系在一起。

3.1 室内固结试验区分主、次固结方法在实际工程中的适用性

要明晰地讨论次固结在工后沉降中发挥的作用,则需界定实际工程中主、次固结的界限。室内长期固结试验中,一般以 $e \sim \lg t$ 曲线或 $e \sim \lg t$ 曲线上的拐点区分主、次固结,并把这一方法推广到实际工程之中。工程中由于成序列的孔隙比 e 值难以取得,因此多用 $S \sim \lg t$ 曲线。

室内试验时,土样厚度小,排水距离短,土在固结压力下基本同时达到次固结状态,因此 $e \sim \lg t$ 曲线上的拐点是清晰且唯一的。在实际工程中,软土厚度的影响不能忽视,深部软土由于排水距离较长主固结速率较慢,在浅部软土主固结基本完成时,深部软土主固结度可能只有50%,在 $S \sim \lg t$ 曲线上的拐点有不清晰或不唯一的情况。

图1为广珠高速公路坦尾互通软基段的 $S \sim \lg t$ 曲线。坦尾互通软基段观测时间较长,共1 040 d。利用全部数据从图1中可以求出主固结完成的时间 A 为398 d,其对应的次固结变形量为33.6 cm,占总变形量的10%。由图1可以直观地看出,拐点以后每点的切线斜率是不断下降的,切线的斜率与截取的观测时间长度有关,观测时间越长,斜率越低。假定观测时间为768 d,截取768 d的观测资料参与计算,则求得 A' 为319 d,相应的次固结量为53.1 cm,占总变形量的17.2%。与1 040 d的计算结果相比,次固结变形量增加了20 cm。

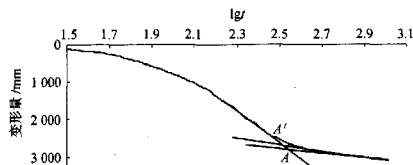


图1 广珠高速公路坦尾互通软基段 $S \sim \lg t$ 曲线

运用同一观测点的数据,仅是数据序列长度不同,得出的次固结变形量相差近60%,可见室内区分主、次固结的方法在工程中不是十分有效。同时也说明在处理深厚软土的工程中,不存在有代表性的主、次固结分界时间点。

3.2 室内固结试验的次固结系数应用于工程的适用性

次固结现象不能在工程中直观地观测,因此只能用室内试验求得的次固结系数分析评价实际工程的次固结变形,但忽略室内试验与实际工程的尺度效应,可能使次固结变形的评价严重脱离工程实践。

进行固结试验时,固结压力一般取100 kPa、200 kPa至400 kPa,在施加100 kPa的固结压力时相当于5.5 m的填土高度,而软基上路堤常见填土高度在3~4 m之间,因此,室内试验的附加应力一般比实际工程大。

固结试验时,试样厚度较小(一般为2 cm),排水距离短、超静孔隙水压力高,因而排水速率非常快,其排水速率是实际软土的几千到上万倍。在强大的固结压力下,土中的自由重力水很快被排出,随之弱结合水开始迁移,变形进入次固结状态。如文献[9]中采用200 kPa固结压力对珠江三角洲软土进行固结试验,最终土样含水量下降到液限以下10%左右。因此,室内试验的次固结系数处于较高的水平。

软土加固过程中,固结压力较室内小,而排水距离则长得多,虽然软土的强度指标大为提高,但含水量的降低并不十分显著,加固后的软土含水量还是大于其天然液限,加固后期软土仍是处于排出自由重力水的阶段,未进入次固结变形阶段。软土变形速率的减小可能是由于孔隙水压力的消散及渗透系数的降低造成的。

忽略室内试验与实际工程固结条件及固结过程的差别,直接用室内固结系数评价工程,将导致对次固结的过高估计。

3.3 深部软土固结的滞后性

利用太沙基一维固结理论评价软土固结变形时,一个基本假定是附加应力范围内软土是同时固结的。实际上,软土的固结变形并不符合这一假定,深部的软土固结存在滞后性。

深部软土固结的滞后性,主要是由于附加应力向深部传递时,存在滞后及深部软土排水距离较长这2个原因造成的。

施建勇等^[7]在进行室内固结试验时,注意到即

便是小尺寸的室内土样,土样底部的孔压也存在明显的滞后。李榴芬等发现,同样的压力及压缩时间,高度较大的土样,其变形比例较小。土样高度增加2倍时,其变形比例减小了1倍。通过分层沉降对实际软土固结变形的观测也发现了深部软土的变形滞后问题。

图2为广珠高速公路试验段某断面深层沉降组成图。从图2可以看出,浅部5m以上软土固结较快,在初期其变形比例不断上升,至160d达到最高点,占总变形量的34.5%;其后固结速率相对降低,比例也逐渐降低,至300d降至32.6%。5~15m深处软土所占的变形比例一直处于下降状态。15m深度以下软土固结速率一直处于上升状态,变形比例从初期的5%上升到15%。

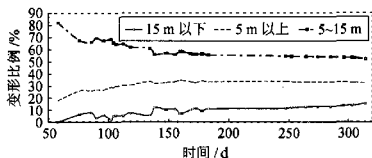


图2 广珠高速公路试验段深层沉降组成

由于忽略了软土深部主固结的滞后性,忽略了室内固结试验求得的次固结系数在实际软土加固中的适用性,把软土 $S \sim \lg t$ 曲线上的拐点当作主、次固结的分界点,因此在软土变形分析中把部分主固结看成次固结,从而夸大了次固结的作用。

由于次固结变形速率非常小,在工后主固结、次固结并存的情况下,次固结变形的影响可以忽略不计,至少对公路软土地基处理可以忽略不计。

4 结语

软土的次固结是一种排水面结,次固结过程中土中存在微小、难以测定的超静孔隙水压力,次固结

变形速率与土中水的排出速率是一致的。次固结实际上是主固结后期特征的反映。

在固结后期,超静孔隙水压力基本消散完毕,渗透系数逐渐变小,软土的次固结特征是由于土中结合水的作用,超静孔隙水的消散以及渗透系数的变化引起的。次固结系数不是常数,在附加应力下,次固结系数随时间的增长不断变小。

室内固结试验的次固结系数应用于实际工程时需考虑其适用性。深部软土的固结较浅部软土具有滞后性,深厚软土层在固结过程中没有一个唯一不变的主、次固结分界点。在公路工后沉降中,未处理软土层及深部软土的主固结是主要的组成成分,次固结变形影响很小。

参考文献:

- [1] 倪一鸿. 公路荷载下软土路基次固结[J]. 公路, 1999, (10).
- [2] 张诚厚. 高速公路软基处理[M]. 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 王盛源. 饱和黏性土主固结与次固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1992, (9).
- [4] 张迎春, 刘吉福, 魏金霞. 砂井地基主、次固结度分析[J]. 水运工程, 2003, (8).
- [5] 陈仲颐. 土力学[M]. 清华大学出版社, 1994.
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 中国水利水电出版社, 1980.
- [7] 施建勇, 等. 固结试验及其相关问题的讨论[J]. 河海大学学报, 2004, (3).
- [8] 房后国, 等. 海积软土排水固结机理分析[J]. 吉林大学学报, 2005, (3).
- [9] 李榴芬, 朱建民. 珠江三角洲软土固结试验[J]. 广西师院学报, 2001, (3).
- [10] E W Brand, 等. 软黏土工程学[M]. 中国铁道出版社, 1991.
- [11] 梅国雄, 等. 固结试验的数学描述[J]. 岩土力学, 2004, (10).

四川今年高速公路通车里程将达1 801 km

在“十一五”规划的第一年,四川省交通部门计划在2006年投入73亿元用于重点公路建设,力争建成宜宾至水富、南充绕城西段高速公路,使全省高速公路通车里程达到1 801 km,并将在年底实现全省高速公路主骨架项目全部开工,使高速公路在建规模达到1 674 km。

“十一五”期间,四川省将建设总规模为21个项目计2 106 km的高速公路,预计到2007年,四川省高速公路通车里程可达2 026 km,2010年达到3 160 km,从而实现该省19个市州中的15个20万人口以上的城市通高速公路。