

基于软土主、次固结研究沉降预测模型

朱进

江苏兆信工程项目管理有限公司

摘要：软土地基工后沉降根据孔隙水排出机理分为主、次固结沉降，简单地将主、次固结沉降按时间顺序分开研究不符合实际情况。为更准确地预测软土地基工后沉降，本文从土骨架构造状态出发，提出了单元块和表达“锁水作用”的土颗粒间链作用的概念。根据黏粒间、黏粒与粉粒间和粉粒间链作用的强弱，分析出主固结变形的过程，提出了主固结沉降的发展趋势。通过分析黏粒间链作用强的单元块的变形过程，得出次固结变形的演变趋势。进而对主、次固结沉降发生阶段进行了划分，探索了影响主、次固结沉降的因素，推导了主、次固结沉降随时间变化的曲线形状，可知总固结沉降全过程的曲线形状为S型，并以此提出了反正切沉降预测曲线模型。算例表明，该预测模型在预测天然软土地基沉降、复合地基沉降方面，与实际监测沉降数据吻合度高，可以很好地预测软基沉降全过程，具有适应性较广、精度较高、稳定性好的特点。

关键词：微观变形机理；单元块；固结沉降预测；软土路基；曲线拟合

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.19.024

一、研究背景

地基沉降是软土地区地质灾害的主要类型之一，工后沉降根据孔隙水排出机理分为主、次固结沉降。目前，固结沉降计算方法主要有两种：一为太沙基固结理论、比奥固结理论等固结理论和邓肯张模型、粘弹性模型等本构模型，二为曲线拟合（主要有双曲线法、指数曲线法、生长曲线法、星野法等）、神经网络和灰色理论等根据实测数据推演沉降随时间变化的发展规律^[1-2]。

然而，软土具有含水量大、压缩性高、透水性差和蠕变性、触变性特点，且其取样易扰动，因而软土沉降本构模型以及通过室内外试验确定的物理力学参数存有较大的不确定性，精准预测软土地基工后沉降还是很困难的。通过实际监测沉降数据反演确定沉降预测模型以计算工后沉降的反分析方法随改扩建项目的增多而得到了发展。且其采用室内外试验数据反演预测结果的精确度远高于本构模型预测结果，方法适用范围广、精确度高特点^[3]。

本文依据土骨架构造状态提出了单元块、土颗粒间链作用以在微观层面上分析主、次固结沉降发生机理，对主、次固结沉降发生阶段进行了划分，探索了影响主、次固结沉降因素，推导了主、次固结沉降随时间变化的曲线形状，可知总固结沉降全过程的曲线形状为S型，以此提出了反正切沉降预测曲线模型。经实际沉降数据检验，可以很好地预测软基沉降全过程，具有适应性较广、精度较高、稳定性好的特点。

二、主、次固结沉降机理

（一）软土单元块

软土可近似视为饱和土，是由土颗粒、孔隙水组成的二相体，在外部荷载作用下，土颗粒、孔隙水本身压缩量可忽略不计，土体变形的过程就是孔隙水排出的过程。为从微观方面分析孔隙水排出过程，本文根据土骨架的构造状态，将由土颗粒围成的“封闭区域”定义为单元块。那么土体孔隙水排出的过程在微观上为单元块孔隙水排出的过程。

由于水、氢键作用、水的粘滞性等作用使得孔隙水难以被排出，对单元块起到的“锁水作用”，视做土颗粒间存在“链”与土颗粒形成封闭区域。链作用强弱有：黏粒间>黏粒与粉粒间>粉粒间，而且黏粒间的链作用受结合水、氢键作用、水的粘滞性、土粒相距距离等影响也存在强弱区分，由链作用强的黏粒组成的单元体，在固结变形过程，单元体表现为一个整体，不发生孔隙水排出，在分析扣除这部分的单元体。由链作用一般的黏粒组成的单元体，在固结变形过程中，单元体在前期阶段，受到超孔隙水压力不足以排出孔隙水，随着固结变形的发展，局部超孔隙水压力增加，超过链作用时孔隙水被排出。由链作用弱的黏粒组成的单元体，链作用较弱，在超孔隙水压力作用下孔隙水逐渐被排出。如图2单元块构造图。可知：

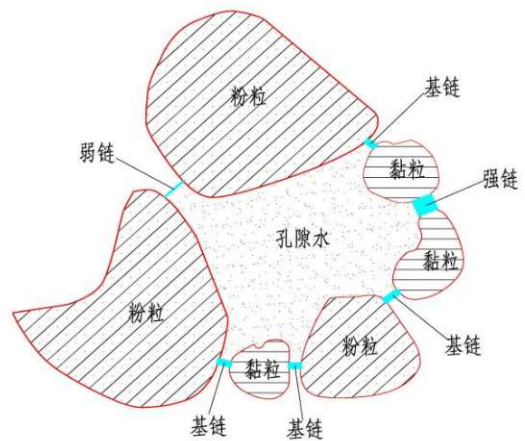


图1 单元块构造图

① 外部荷载作用的瞬间，土骨架还没来得及变形，外部荷载作用在孔隙水上，产生初始超静孔隙水压力。随后在孔隙水压力差作用下，土颗粒间“链”被破坏，孔隙水沿着单元块土颗粒间空隙排出，土颗粒逐渐承担外部荷载，超静孔隙水压力逐渐消散，引起的变形为主固结沉降。

根据链作用大小，固结变形过程弱链先断裂、基链次之、由链作用弱的黏粒组成的单元体后断裂，部分由链作用一般的黏粒组成的单元体最后断裂，对于软土黏粒数量、含量远大于粉粒数量、含量，不难推得链数量与链的作用强度近似呈正态分布，孔隙水排出随时间的

变化呈S型，可知主固结沉降曲线。

② 非均质体的单元块在外部荷载作用下，部分单元块缺陷部位产生应力集中而孔隙水压力将增加，达到一定程度后，土颗粒间“链”被破坏，孔隙水沿着单元块土颗粒间空隙排出，单元块稳定性加强，超静孔隙水压力逐渐消散，引起的变形为次固结沉降。

单元块的缺陷部位随着单元块被压密、土颗粒间作用力增加，应力集中现象越强烈，孔隙水压力越大。此过程主要受由链作用一般的黏粒组成的单元体控制，与主固结类似，链数量与链的作用强度近似呈正态分布，可推得次固结沉降曲线也呈S型。

③ 在宏观上体现：主固结为外部荷载作用下初始超静孔隙水压力消散，土颗粒逐渐承担外部荷载的过程；次固结为外部荷载作用下产生的土骨架结构缺陷逐渐修复的过程。

(二) 主、次固结全过程

本文将主、次固结演变全过程划分为如下四个阶段，如图3所示：

① 初始阶段：主固结沉降增幅逐渐增大，次固结尚未开始。以初始超静孔隙水压力破坏弱链、基链为主，开始有黏粒间作用弱的链开始断裂。

② 加速阶段：主固结沉降近似呈直线，次固结沉降增幅逐渐增大。以初始超静孔隙水压力破坏基链为主，且数量较稳定，黏粒作用弱的链断裂数量急剧增加，黏粒作用一般的链开始出现断裂。

③ 稳定阶段：主固结沉降增幅逐渐降低，次固结沉降近似呈直线，初始超静孔隙水压力逐渐消散结束，黏粒作用弱的链断裂趋势呈稳定状态，黏粒作用一般的链断裂趋势逐渐明显。

④ 结束阶段：主固结沉降可视为已结束，次固结沉降由直线向增幅降低转变，进而趋于稳定。黏粒作用弱的链超孔隙水压力基本消散，黏粒作用一般的链断裂趋势呈稳定状态，并在一定较长时间后，由于缺陷修复结束，土体结构稳定后次固结也结束。

三、沉降预测模型

(一) 沉降预测模型推导

经上述论述可知，主固结沉降变化速率呈“钟型”，变化曲线呈S型，且只受超静孔隙水压力场、土颗粒间链作用大小影响，在统计上符合正态分布，考虑到正态函数的不定积分是一个非初等函数，本文选取反正切模型简化，主固结沉降预测曲线为：

$$S = a * \arctan(bt - c) + a * \arctan(c)$$

次固结演变过程的假设：次固结开始于加速阶段；在稳定阶段开始步入“直线段”。以偏离拐点斜率10%以内均视为曲线的直线段，可求解得：

$$x \in \{c - 0.333/b, c + 0.333/b\}$$

由此可获取次固结沉降预测曲线，但公式复杂难以进行沉降曲线拟合、预测。考虑到次固结沉降与主固结在时间存在错位、软土次固结沉降一般占20%左右，可见，总沉降仍为S型曲线，但初始阶段与稳定、结束阶段的曲线变化幅度不同，提出了反正切沉降预测修正模

型为：

$$S = A \arctan(Bt^C - D) + A \arctan(D)$$

A、D控制最终总沉降的大小为 $A * \pi / 2 - A \arctan(D)$ ；B控制沉降预测曲线的弯曲程度，C控制沉降预测曲线弯曲的速率；B、C、D控制初始阶段、加速阶段、稳定阶段、结束阶段的划分时间。

(二) 预测模型比较

本文依据朱志铎的《软土路基全过程沉降预测的Logistic模型应用研究》，严东方的《Richards生长曲线模型在PCC桩复合地基沉降预测中的应用》论文中提供的数据，采用本文提出的反正切沉降预测模型数据拟合（如图2、3），发现反正切沉降预测模型对S型固结沉降—时间曲线可以有效预测，采用复合地基处理后的固结沉降—时间曲线同样预测效果较好。与其他固结沉降预测模型相比，具有预测精度高、参数物理意义明确、适应范围广等优点。

① S型固结沉降曲线

拟合曲线公式为：

$$S = 91.4314 * \arctan(0.0609 * t^{0.7972} - 3.7918) - 91.4314 * \arctan(-3.7918)$$

相关系数为0.99881。（0.9976）

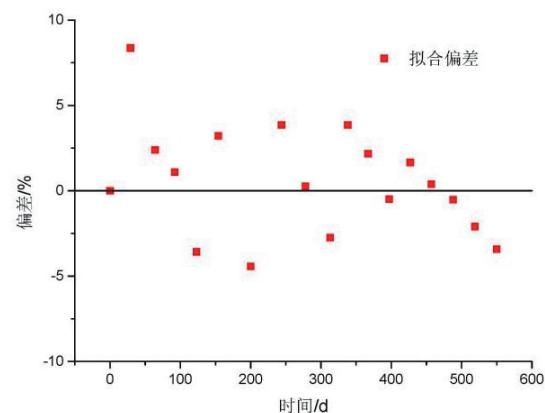


图2 S型固结沉降曲线数据回归分析

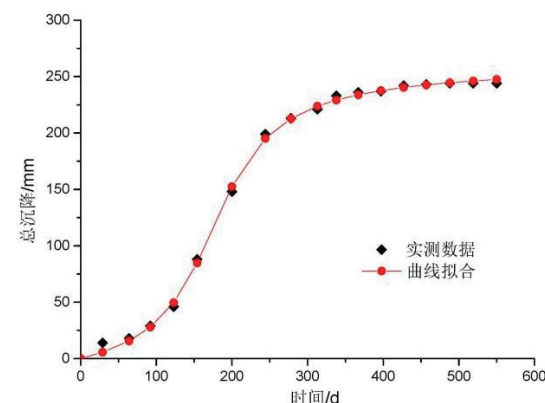


图3 S型固结沉降曲线与拟合曲线

② 复合地基固结沉降曲线

拟合曲线公式为：

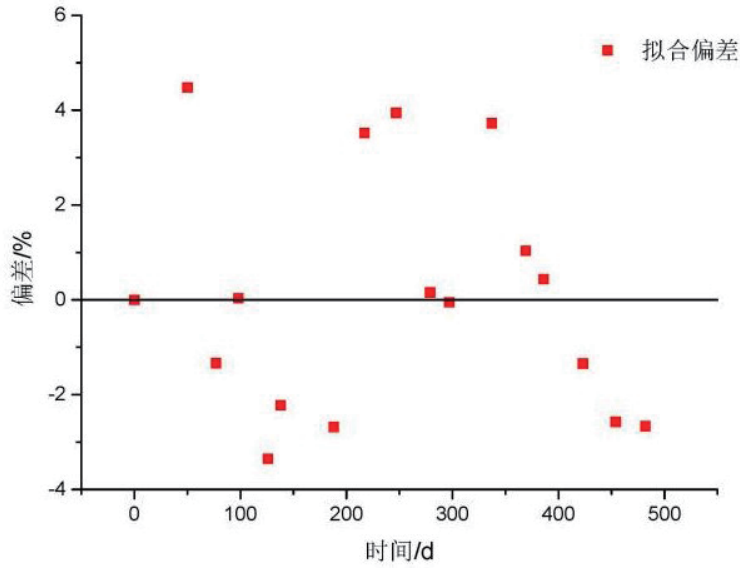


图4 复合地基固结沉降曲线数据回归分析

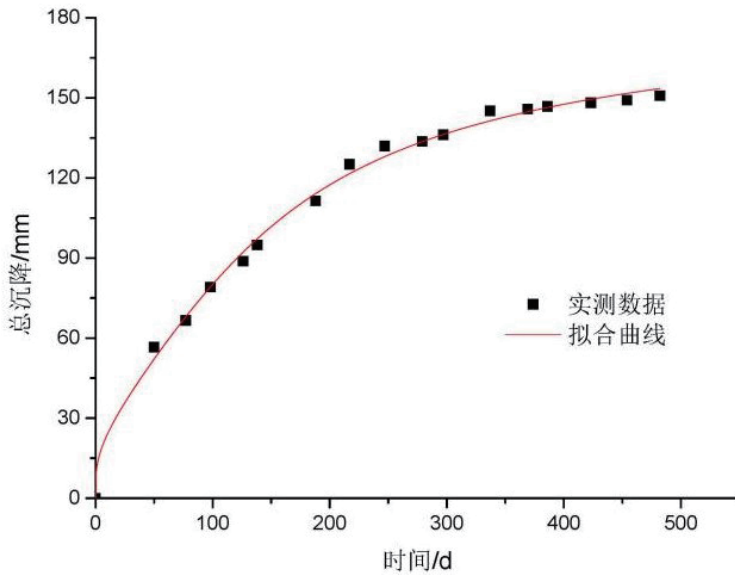


图5 复合地基固结沉降曲线与拟合曲线

$$S = 68.6411 * \arctan(2.9971 * t^{0.1365} - 5.8603)$$

$$- 68.6411 * \arctan(- 5.8603)$$

相关系数为0.99569。

四、结论

(1) 本文提出了单元块、链，从微观上分析了主、次固结沉降的发生机理，及固结沉降随时间受链影响的内容。

(2) 以主固结沉降为主导，将S型固结沉降—时间曲线分为4个阶段。并提出了反正切沉降预测模型，经实际监测数据检验，具有预测精度高、参数物理意义

明确、适应范围广等优点。

参考文献

- [1] 张冲, 刘钢, 赵明志, 等. 成宜高速某浅层软土上路堤填筑的稳定性分析[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 19-25.
- [2] 陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清. 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 138-145.
- [3] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土次固结特性及机理分析[J]. 岩土工程学报, 2015(08): 40-48.