文章编号:1674-2974(2024)11-0023-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024104

基于扰动状态概念水泥土桩-土界面强度演化规律研究

陈昌富[1,2†],廖佳卉[1,2],蔡焕[1,2],张嘉睿[1,2],李伟[1,2]
[1. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082]

摘 要:通过设计并制作不同养护龄期(7、14、28、35及60 d)的水泥土桩-土单元体试样,开展水泥土桩-土界面的力学性能试验,测得了各龄期下水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移全过程曲线,并以此建立了水泥土桩-土界面峰值抗剪强度及残余抗剪强度随龄期变化的双曲线型演化模型.同时,开展了与单元体试样同龄期的水泥土桩体材料的单轴和三轴压缩试验以及土体的三轴压缩试验,得到了水泥土桩体的单轴抗压强度和抗剪强度指标(即黏聚力c和内摩擦角φ)随养护龄期的演化规律和演化模型,且试验结果表明水泥土桩-土界面抗剪强度与水泥土桩体单轴抗压强度之间呈线性关系.最后,引入扰动状态概念理论,基于试验结果建立了水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移关系随试样养护龄期的演化模型,该模型计算结果与实测值吻合良好,可为水泥土类桩的荷载传递规律的理论分析和数值模拟提供可靠的计算模型.

关键词:桩;水泥土桩-土界面;单元体试验;扰动状态概念;演化模型
中图分类号:TU473.1 **文献标志码**:A

Research on the Evolution Law of Cemented Soil-Soil Interface Strength Based on the Disturbed State Concept

CHEN Changfu[1,2†],LIAO Jiahui[1,2],CAI Huan[1,2],ZHANG Jiarui[1,2],LI Wei[1,2]
[1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China]

Abstract: Element-scale specimens of cemented soil piles were designed to investigate the mechanical characteristics of the cemented soil-soil interface with different curing ages (i.e.7, 14, 28, 35 and 60 days). The complete curve of shear stress-displacement at the interface between cemented soil piles and soil was measured at different ages. Based on the element-scale test results, a hyperbolic evolution model was proposed to describe the development of interfacial peak shear strength and residual shear strength. Besides, to obtain the variation of compressive strength and shear strength indicators (i.e. cohesion, c and internal friction angle, φ) of cemented soil piles with curing age, uniaxial and triaxial compression tests of cemented soil samples under the same curing ages,

* **收稿日期**:2023-12-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278349,51978254), National Natural Science Foundation of China (52278349,51978254)
作者简介:陈昌富(1963—),男,湖南祁东人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:cfchen@163.com

as well as the triaxial compression tests of soil were carried out, respectively. The results showed that there was a linear relationship between the shear strength of the cemented soil-soil interface and the compressive strength of cemented soil. At last, the constitutive model of the cemented soil-soil interface of the specimen comprising curing age was established according to the experimental results and the disturbed state concept theory. The model fits well with the measured data, which provides a reliable calculation model for the theoretical analysis and numerical simulation in cemented soil pile engineering.

Key words: piles; cemented soil-soil interface; element-scale specimen; disturbed state concept; evolution model

由直径较小的混凝土桩插入到直径较大的水泥土搅拌桩所构成的劲芯水泥土复合桩,凭借其较高的性价比,在地基基础工程中得到了广泛应用[1].实际工程中,桩-土界面的强度(摩阻力)和荷载传递模型是桩基设计的重要依据,因此,国内外众多学者已对其开展了大量的试验和理论研究.

在试验研究方面,Clough 等[2]借助直剪试验研究了土与混凝土接触面的力学特性,并揭示了接触面剪应力与相对位移存在双曲线关系;何杰等[3]、张明义等[4]通过直剪试验得到水泥土桩-土界面强度随着时间增长呈双曲线状增长,这与桩的承载力增长曲线一致;刘方成等[5]通过改进单剪试验装置,对粉质黏土-混凝土接触面进行了循环剪切试验,结果发现其破坏模式主要表现为接触面附近土体自身剪切破坏和接触面滑移破坏.在理论研究方面,国内外学者分别将桩-土界面荷载传递模型假定为线性增长型[6]、双折线型[7-8]、三折线硬化模型[9-10]、三折线软化型[11-12]、双曲线型[13-15]、指数函数型[16-18]来分析桩的受力变形特性,获得了不同工况下的荷载传递规律.

目前,关于水泥土桩-土界面的强度和荷载传递模型的试验研究相对匮乏,而针对水泥土桩-土界面的强度以及剪应力-剪切位移关系随水泥土龄期演化规律的试验研究,迄今为止,国内外文献中尚未有相关报道.

为此,本文通过设计并制作不同养护龄期的水泥土桩-土单元体试样,开展水泥土桩-土界面的力学性能试验,测得了水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移曲线,并获得了界面的峰值抗剪强度和残余抗剪强度随养护龄期的演化规律和演化模型.同时,对与单元体试样同龄期的水泥土桩体材料进行单轴和三轴压缩试验,获得了水泥土桩体的单轴抗压强度和水泥土桩体的三轴抗剪强度指标(即黏聚力 c 和内摩擦角 φ)随养护龄期的演化规律和演化方程,并分析得到了水泥土桩-土界面的抗剪强度与水泥土桩体单轴抗压强度之间的关系.最后,引入扰动状态概念[19-21],构建了水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移关系随试样养护龄期的演化规律和演化模型.

1 试验设计

1.1 试验目的与内容

为研究水泥土桩-土界面剪切强度的演化规律及其与界面两侧材料(水泥土和土体)强度之间的关系,本文在开展不同龄期下水泥土桩-土界面力学性能测试的同时,还进行了土体的三轴压缩试验以及水泥土的单轴压缩和三轴压缩试验,目的如下.

1)通过开展不同龄期下水泥土桩-土界面单元体试样的剪切试验,获得界面的剪应力-剪切位移全过程曲线,引入扰动状态概念,并建立相应的演化模型.

2)通过在制成的不同龄期水泥土桩-土界面单元体试样中取土样进行三轴压缩试验,获得各龄期单元体试样中土坯的抗剪强度指标,验证试样制作的均匀性.

3)通过对不同龄期水泥土桩-土界面单元体试样中水泥土开展单轴压缩和三轴压缩试验,研究水泥土的演化规律和演化模型,同时探讨水泥土桩-土界面剪切强度与水泥土单轴抗压强度之间的关系.

1.2 试验方案

为保证试验的统一性和完整性,单元体试样与水泥土试样的养护龄期均相应设定为 7、14、28、35、60 d,水泥土和土的三轴压缩试验围压均相应设定为 50、100、150、200 kPa.具体试验方案如表 1 所示.

表 1　水泥土桩-土界面试验方案

Tab.1　Test plan for cemented-soil interfacial specimens

试验项目	龄期/d	围压/kPa
水泥土桩-土界面单元体剪切试验	7, 14, 28, 35, 60	—
土体三轴压缩试验、水泥土三轴压缩试验	7	50, 100, 150, 200
	14	50, 100, 150, 200
	28	50, 100, 150, 200
	35	50, 100, 150, 200
	60	50, 100, 150, 200
水泥土单轴压缩试验	7, 14, 28, 35, 60	—

1.3　试验材料

试验用土为湖南省长沙市湘江河漫滩软黏土，其塑限 w_p 为 20.24%、液限 w_L 为 35.05%、含水率 w_n 为 38%，比重 G_s 为 2.60，天然密度 ρ_n 为 2.01 g/cm^3，黏聚力为 30.13 kPa，内摩擦角为 9.26°. 水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥.

2　水泥土桩-土界面强度演化规律试验研究

2.1　试验方法

本文采用课题组提出的锚/桩-土界面摩阻性能单元体试验方法[22-24]，按照表 1 所示试验方案分别对 7、14、28、35、60 d 龄期的水泥土桩-土界面单元体试样进行剪切试验. 试验流程为：确定试样尺寸、制作土坯、钻孔、灌浆及试样养护、加载试验.

1）确定试样尺寸. 基于微段单元体试验原理[22-23]，将试样高度 H 设定为 10 cm，其中桩-土黏结段长度为 7 cm，桩底预留 3 cm 高的空间供水泥土桩在加载时能向下位移并始终保持与土体接触（图 1）. 研究结果表明[25]：对于一般性土，桩受压时桩侧土的剪切变形范围通常为桩径的 4~6 倍. 本文设定单元体试样的直径（即土坯直径）D 为 30 cm、水泥土桩直径 d 为 4.8 cm，即 D=6.25d，因此可忽略边界效应对试验结果的影响.

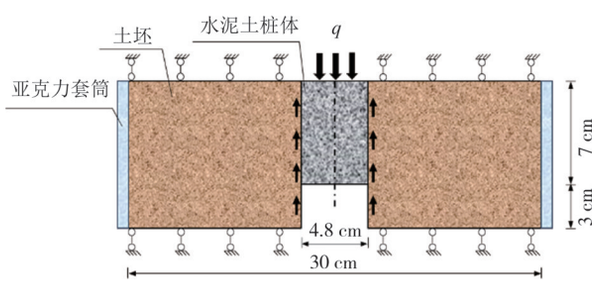


图 1　单元体试样示意图

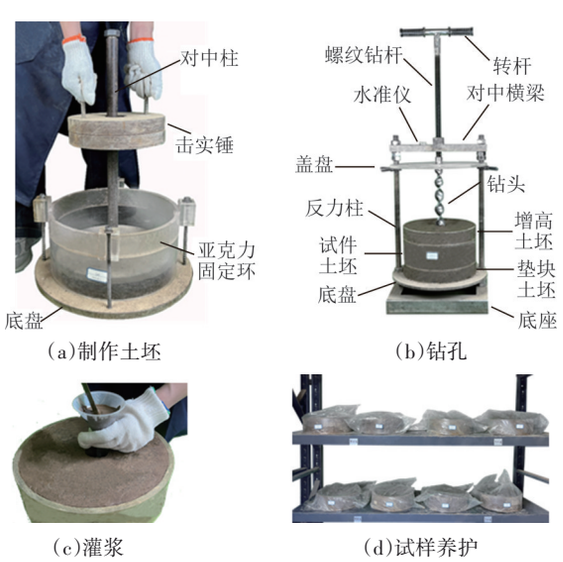
Fig.1　Schematic diagram of element-scale specimen

2）制作土坯[图 2(a)]. 设定试样土坯的含水率为 30%，控制干密度为 1.4 g/cm^3. 采用课题组提出的制样方法[22-24]，对配制好的重塑黏土料按干密度 1.4 g/cm^3 的要求进行分层压实，以此制备土坯.

3）钻孔[图 2(b)]. 将土坯放置到自制的钻孔装置的底盘中间，让土坯与钻杆的中心轴保持一致；转动钻杆，使直径为 48 mm 的钻头以 10 r/min 的速率向下钻土；钻穿土坯后，回转钻杆，提出钻头，便可得到以钻孔方式成孔的试样. 需注意的是，为确保由钻孔所成桩孔的均匀性，钻孔时，需在土坯的上下面各设置高度为 5 cm 的增高土坯，增高土坯与试样土坯之间以塑料薄膜隔离，成孔后即拆除增高土坯.

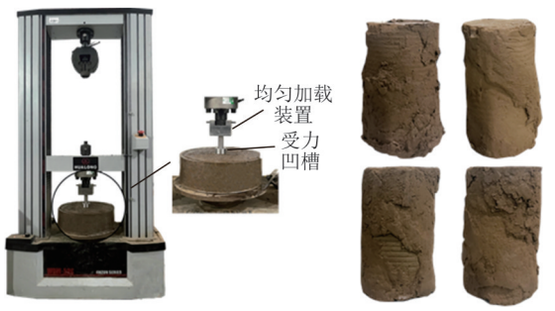
4）灌浆[图 2(c)]及试样养护[图 2(d)]. 按照质量比为水∶灰∶干土=1∶0.375∶1.25 的配合比配制水泥土；将水泥土灌入桩孔中并预留 30 mm 的空段，再用铁丝将其振捣密实；待水泥土初凝后，将试样移至密封袋中养护至表 1 试验方案所设定的龄期.

5）加载试验[图 2(e)]. 将养护至设定龄期的试样倒置放入微机控制的万能试验机中；安装特制的均匀加载装置，并将顶面带球状凹槽与水泥土桩体同直径的传力垫块置于桩顶；由加载控制系统以 1 mm/min 的加载速率对桩顶加载，同时利用自带微机记录并保存荷载-位移结果；当水泥土桩的最大位移量接近 30 mm 时，终止加载. 注意加载时应保证特制加载装置中的球状头加压杆、传力垫块和水泥土桩中心轴保持一致. 试样加载试验后水泥土桩外观如图 2(f)所示.



(a)制作土坯　(b)钻孔

(c)灌浆　(d)试样养护



(e)加载试验 (f)剪切后水泥土桩外观

图 2 剪切试验过程

Fig.2 Process of shear test

2.2 水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移曲线及破坏形态

由 2.1 节所述水泥土桩-土界面单元体剪切试验可得各龄期下桩-土界面剪应力-剪切位移曲线,如图 3 所示.

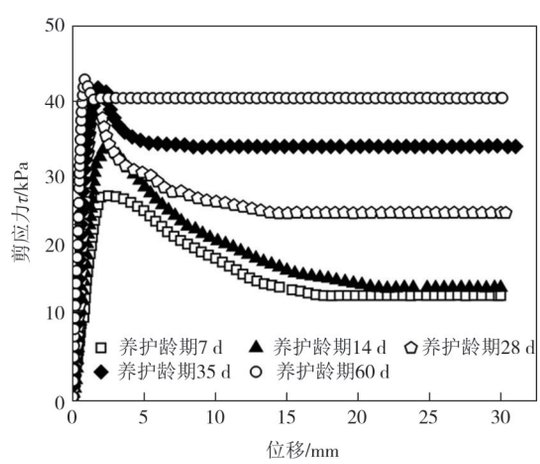


图 3 各龄期下水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移

Fig.3 τ-s curves at the interface between cemented soil piles and soil at different ages

由图 3 可知,水泥土桩-土界面的典型受力变形曲线可归结为图 4 所示形式,大致可分为:弹性变形段(OA)、塑性变形段(AB)、剪切破坏段(BC)和剪切滑移段(CD)4 个阶段. OA 弹性阶段的桩-土界面承受的剪应力随剪切位移呈线性增加,AB 塑性阶段的桩-土界面承受的剪应力则随剪切位移呈非线性增加,直至峰值点 B,而且峰值随试样养护龄期的增加而增大,峰值点的位移在 1.8~2.2 mm 之间. 过峰值点 B 后,因桩-土界面的黏结强度逐渐丧失,界面能承受的剪应力呈非线性降低,直到降至点 C,此后便进入剪切滑移 CD 段,此时界面只剩下摩擦强度,能承受的剪应力趋于相对稳定的值,而且该值随试样养护龄期的增加而增大.

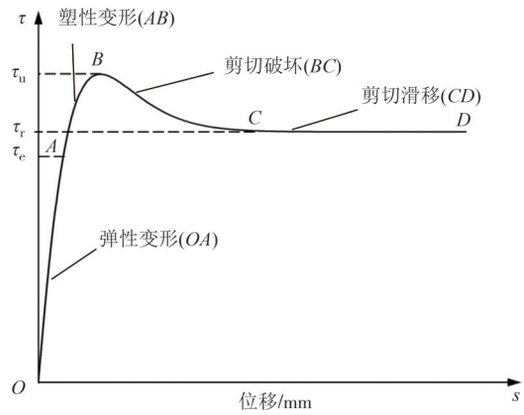


图 4 水泥土桩-土界面典型破坏过程

Fig.4 Typical failure process of cemented soil-soil interface

2.3 水泥土桩-土界面强度的演化规律及演化模型

根据 2.2 节试验结果(图 3),水泥土桩-土界面峰值抗剪强度随龄期的演化规律如图 5 所示. 经回归分析发现,采用如下双曲线函数能很好地拟合界面峰值抗剪强度与试样养护龄期之间的关系(判定系数 R^2=0.997 4):

$$\tau_u = \frac{t}{0.113\,3 + 0.020\,7t} \tag{1}$$

式中:τ_u 为水泥土桩-土界面峰值抗剪强度,kPa;t 为试样养护龄期,d.

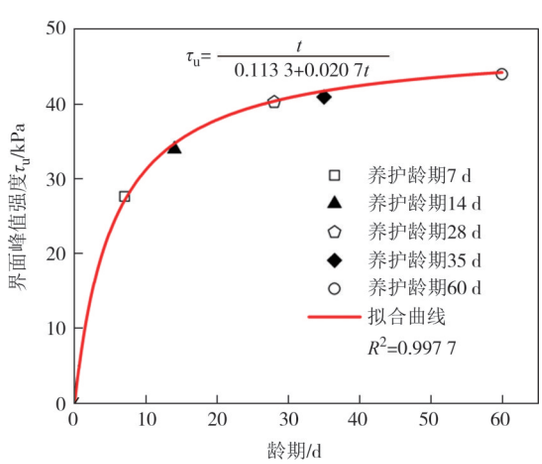


图 5 水泥土桩-土界面峰值强度演化规律

Fig.5 Evolution law of peak strength at cemented soil-soil interface

同时,由 2.2 节试验结果(图 3)可得水泥土桩-土界面的残余抗剪强度(即剪切位移为 20 mm 时对应的剪应力值)随龄期的变化规律如图 6 所示. 同样,回归分析得到界面残余抗剪强度与试样养护龄期呈如下双曲线函数关系(判定系数 R^2=0.967 2):

$$\tau_r = \frac{t}{0.595\,5 + 0.014\,8t} \tag{2}$$

式中:τ_r 为水泥土桩-土界面残余抗剪强度值,kPa.

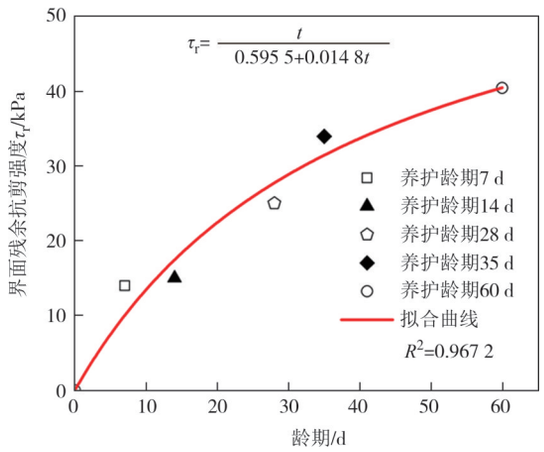


图 6　水泥土桩-土界面残余抗剪强度演化规律

Fig.6　Evolution law of residual strength at cemented soil-soil interface

3　土坯抗剪强度三轴压缩试验研究

3.1　试验方法

分别从养护龄期为 7、14、28、35 和 60 d 的水泥土桩-土界面单元体试样的土坯中各切取一组(4 个)原状土样,试样高为 80 mm、直径为 39.1 mm. 各试验组编号为 S-7 d、S-14 d、S-28 d、S-35 d、S-60 d.

按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用常规三轴压缩试验仪,对每组试样分别在围压 50、100、150、200 kPa 下进行固结排水试验.

3.2　试验结果与分析

由三轴压缩试验测得的各养护龄期下水泥土桩-土界面单元体试样中土坯的抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角如表 2 所示. 对表 2 中各养护龄期试样土坯的抗剪强度指标统计分析发现:黏聚力的变化范围为 27.46~32.91 kPa、极差为 5.45 kPa、均值为 30.13 kPa、变异系数为 0.065;内摩擦角的变化范围 8.14°~10.13°、极差为 1.99°、均值为 9.26°、变异系数为 0.073. 由此证明,本次试验制作的所有土坯变异性小,均匀性好,质量稳定.

4　水泥土桩体强度演化规律试验研究

4.1　水泥土桩体抗剪强度指标演化规律三轴压缩试验研究

4.1.1　试验方法

在制作各养护龄期下水泥土桩-土界面单元体试样中的水泥土桩时,用留出的水泥土同步制作一组(4 个)高 80 mm、直径 39.1 mm 的水泥土圆柱试样,采用常规三轴压缩试验仪分别在围压 50、100、150、200 kPa 下进行不固结不排水三轴压缩试验.

4.1.2　试验结果与分析

由上述三轴压缩试验,测得各养护龄期下水泥土桩体的抗剪强度指标(即黏聚力 c 和内摩擦角 φ),如图 7 所示.

由图 7(a)中试验结果知,试样的养护龄期从 7 d 增加至 60 d,水泥土桩体的黏聚力 c 由 152.43 kPa 逐渐增加至 498.26 kPa,但其增加速率逐渐减小. 回归分析发现,采用双曲函数模型可很好地描述水泥土桩体黏聚力 c 的演化规律,其回归关系式见图 7(a).

图 7(b)试验结果表明,水泥土桩体的内摩擦角 φ 由养护龄期为 7 d 时的 42°逐渐降低至养护龄期为 60 d 的 34°,但在龄期小于 35 d 时降低速率较快,龄期大于 35 d 后降低速率较小. 回归分析发现,水泥土桩体内摩擦角 φ 的演化规律同样符合双曲函数形式,其回归关系式见图 7(b).

4.2　水泥土桩体单轴抗压强度演化规律试验研究

4.2.1　试验方法

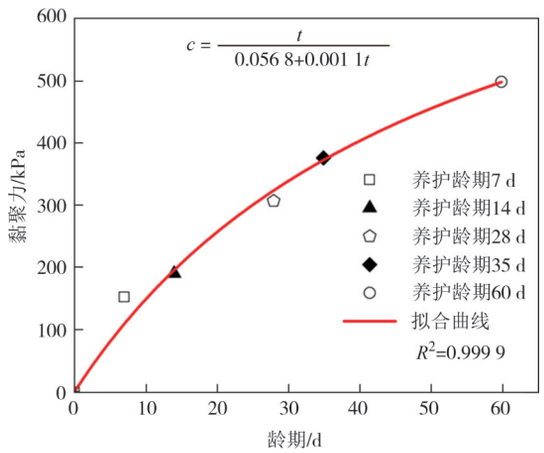
同样,在制作各养护龄期下水泥土桩-土界面单元体试样中的水泥土桩时,采用留出的水泥土,按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011),同步

表 2　土坯三轴压缩试验抗剪强度指标

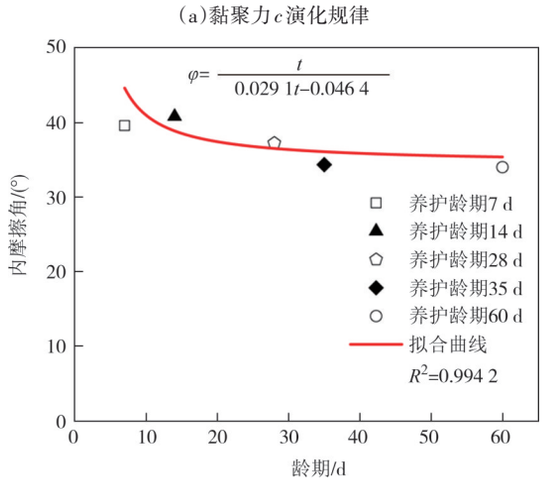
Tab.2　Shear strength indexes of triaxial compression test on soil samples

土坯测试编号	对应试样养护龄期/d	黏聚力			内摩擦角		
		试验值/kPa	均值/kPa	变异系数	试验值/(°)	均值/(°)	变异系数
S-7 d	7	30.21			9.76		
S-14 d	14	28.54			9.09		
S-28 d	28	31.51	30.13	0.065	10.13	9.26	0.073
S-35 d	35	27.46			9.20		
S-60 d	60	32.91			8.14		

制备70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方块试样,并养护至表1所列试验方案设定的龄期,采用万能试验机测量其单轴抗压强度.



(a)黏聚力c演化规律



(b)内摩擦角φ演化规律

图7 水泥土桩体抗剪强度指标演化规律

Fig.7 Evolution law of shear strength indexes of cemented soil piles

4.2.2 试验结果与分析

由水泥土的单轴抗压强度试验,可得到水泥土桩体的单轴抗压强度随龄期的变化关系如图8所示.

对图8所示试验结果进行回归分析,发现水泥土桩体的单轴抗压强度演化规律仍然符合双曲线函数形式(判定系数R^2=0.997 6),其回归关系式为:

$$f_{cu}=\frac{t}{2.815\,6+0.539\,8t} \tag{3}$$

式中:f_{cu}为水泥土桩体单轴抗压强度,MPa.

由图8可知,水泥土桩体的单轴抗压强度演化曲线随试样养护龄期的增长而增长,而且前段(0~14 d)增长较快,中段(14~28 d)增长速率逐渐变缓,后段(28~60 d)几乎没有明显增长.

以养护龄期为14 d时水泥土桩体的单轴抗压强度$f_{cu,14\,d}$为标准,可计算出养护龄期分别为7、28、35、60 d时水泥土桩体的单轴抗压强度$f_{cu,7\,d}$、$f_{cu,28\,d}$、$f_{cu,35\,d}$、$f_{cu,60\,d}$与$f_{cu,14\,d}$的比值分别为0.845 3、1.216 6、1.263 7、1.314 0. 将它们的比值和养护龄期进行回归分析,可得如下双曲线型函数关系式(判定系数R^2=0.997 4):

$$\frac{f_{cu,t}}{f_{cu,14\,d}}=\frac{t}{3.573\,4+0.700\,9t} \tag{4}$$

式中:$f_{cu,t}$为养护龄期为t时水泥土桩体单轴抗压强度值,MPa.

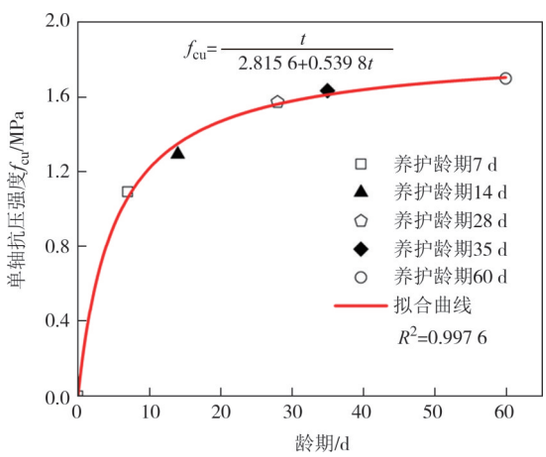


图8 水泥土桩体单轴抗压强度演化规律

Fig.8 Evolution law of uniaxial compressive strength of cemented soil piles

4.3 水泥土桩-土界面的峰值抗剪强度与水泥土桩体单轴抗压强度的关系

图9为各养护龄期下水泥土桩体单轴抗压强度与水泥土桩-土界面峰值抗剪强度之间的试验结果. 经回归分析发现,水泥土桩-土界面的峰值抗剪强度与水泥土桩体单轴抗压强度存在良好的线性关系(判定系数R^2=0.999 8):

$$\tau_u=0.026\,3f_{cu} \tag{5}$$

由式(5)可知,随着养护龄期增加,水泥土桩-土界面的峰值抗剪强度随同龄期的水泥土桩体单轴抗压强度同比增加,其比值为0.026 3.

5 基于扰动状态概念水泥土桩-土界面剪应力-剪切位移关系演化模型

本文引入扰动状态概念(Disturbed State Concept, DSC)理论建立水泥土桩-土界面剪切模型. 根据DSC理论的基本原理[19-21],水泥土桩-土界面剪切模型的基本方程可定义为:

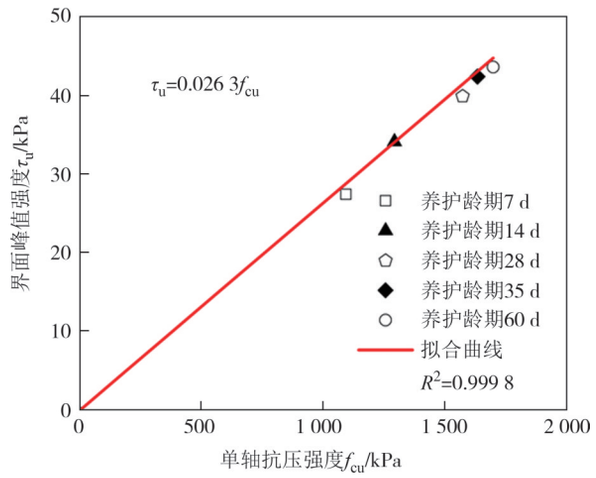


图 9　水泥土桩-土界面峰值强度与水泥土桩体单轴抗压强度关系

Fig.9　Relationship between peak strength of cemented soil piles-soil interface and uniaxial compressive strength of cemented soil piles

$$\tau = (1 - D)\tau_i + D\tau_c \tag{6}$$

式中:τ为实际的水泥土桩-土界面剪应力;D为扰动因子;τ_i为相对完整(Relative Intact,RI)状态单元承担的剪应力;τ_c为完全调整(Fully Adjusted,FA)状态单元承担的剪应力.

水泥土桩-土界面和水泥土桩体材料,在加载初期一般表现为线弹性特征.因此,本文采用如下线性模型来描述RI状态下水泥土桩-土界面力学特性:

$$\tau_i = Gs \tag{7}$$

式中:s为剪切位移;G为初始剪切刚度,通常取0.5%~1%极限剪切位移以下的剪切刚度为初始剪切刚度.

根据试验结果(图3),可得各养护龄期下水泥土桩-土界面的初始剪切刚度G如图10所示.通过回归分析,发现界面初始剪切刚度G与试样养护龄期t之间呈现如下双曲线函数关系:

$$G = \frac{t}{0.110\,4 + 0.021\,0t} \tag{8}$$

进一步地,将式(8)代入式(7)可得RI状态下水泥土桩-土界面剪切演化模型:

$$\tau_i = \frac{t}{0.110\,4 + 0.021\,0t} \cdot s \tag{9}$$

FA状态是指单元的应力状态达到了极限平衡状态.对于水泥土桩-土界面单元,FA状态可视为界面的剪应力达到了残余剪切强度:

$$\tau_c = \tau_r \tag{10}$$

将式(2)代入式(10),可得:

$$\tau_c = \frac{t}{0.595\,5 + 0.014\,8t} \tag{11}$$

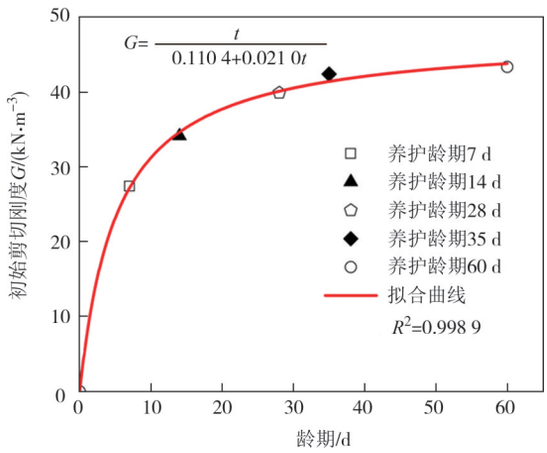


图 10　初始剪切刚度演化规律

Fig.10　Evolution law of initial shear stiffness

扰动因子D反映的是材料或界面受外荷载的扰动程度以及RI状态与FA状态单元的荷载分担比例,D=0~1,D值越大,表示扰动程度越高.本文采用服从韦伯(Weibull)分布的扰动因子D:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{s}{\xi}\right)^{\eta}\right] \tag{12}$$

式中:ξ和η分别为韦伯分布函数的尺度参数和形状参数.

将式(9)、式(11)和式(12)代入式(6),整理可得水泥土桩-土界面剪应力-剪切位移关系的演化模型为:

$$\tau_{(s,t)} = \exp\left[-\left(\frac{s}{\xi}\right)^{\eta}\right] \cdot \frac{t}{0.110\,4 + 0.021\,0t} \cdot s + \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{s}{\xi}\right)^{\eta}\right]\right\} \cdot \frac{t}{0.595\,5 + 0.014\,8t} \tag{13}$$

式(13)中参数ξ和η可根据各养护龄期下水泥土桩-土界面单元体试样的试验数据(图3)回归分析得到,如表3所示.鉴于水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移试验曲线呈现高度的非线性特征,采用常规的等权重最小二乘法难以回归得到能准确刻画试验曲线形态的回归方程,因此,本文采用局部加权最小二乘回归(LWLSR)确定式(14)演化模型中的参数ξ和η. LWLSR的基本原理是对各局部的预测值和观测值之间的误差平方指定特定的权重,通过最小化加权误差平方和来得到回归系数ξ和η[26]:

$$\begin{bmatrix}\xi \\ \eta\end{bmatrix} = \arg\min \sum_{i=1}^{j} w_i(\tau_i - \hat{\tau}_i)^2 \tag{14}$$

式中:w_i是第i个观测点的误差项的权重,反映了观测值对预测值的影响;τ_i和$\hat{\tau}_i$分别表示第i个测得的

和预测的界面剪切应力;j是剪应力-剪切位移曲线上的点的总数.

对表3中模型参数ξ和η进行回归分析,可得其与养护龄期t之间的经验关系如下:

$$\begin{cases}\xi = 3.258\,5\mathrm{e}^{-\frac{t}{71.225\,7}-0.675\,5}+0.132\,5\\ \eta = 0.667\,1+0.010\,2t\end{cases} \tag{15}$$

将式(15)代入式(13),可得水泥土桩-土界面剪应力-剪切位移关系的演化模型为:

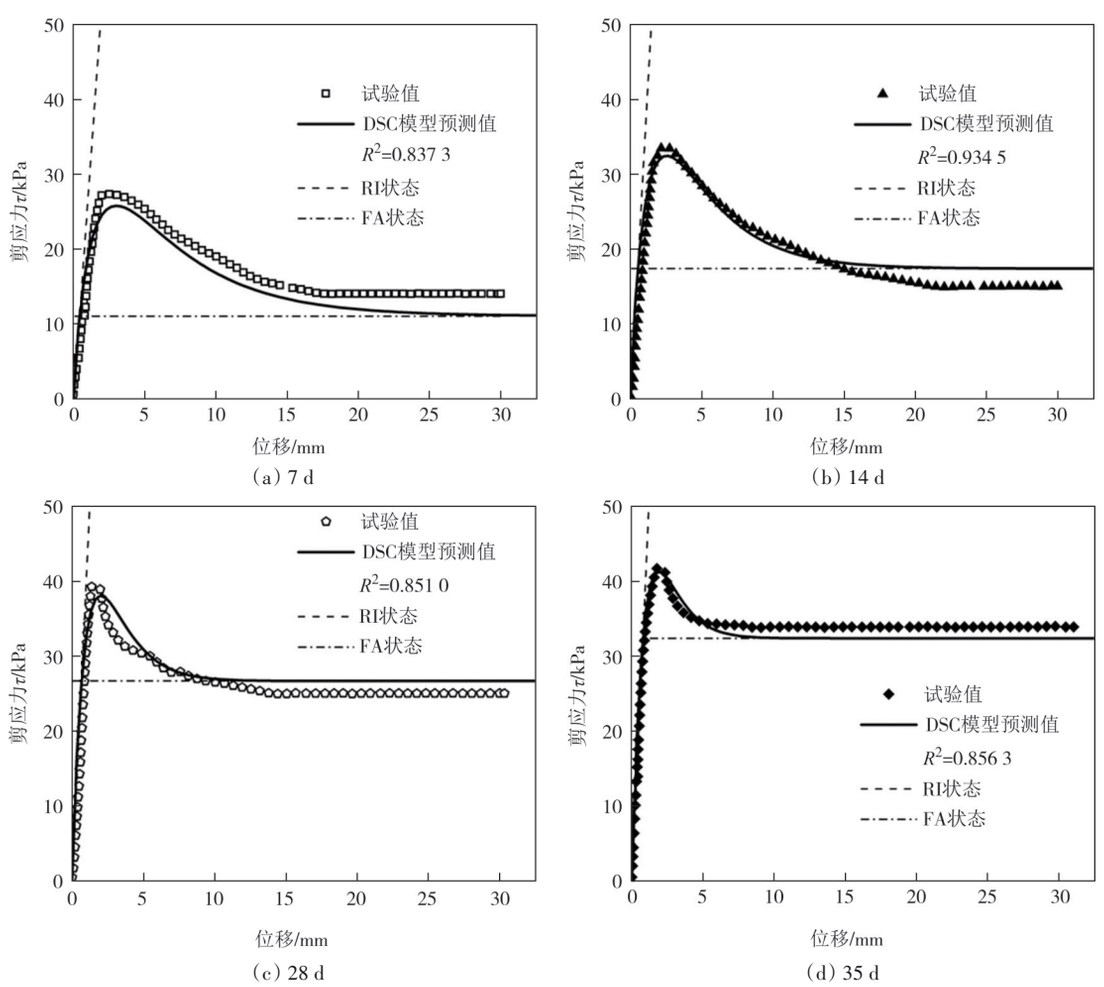
$$\tau_{(s,t)} = \exp\left[-\left(\frac{s}{3.258\,5\exp\left(-\frac{t}{71.225\,7}-0.675\,5\right)+0.132\,5}\right)^{0.667\,1+0.010\,2t}\right]\cdot\frac{t}{0.110\,4+0.021\,0t}\cdot s+\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{s}{3.258\,5\exp\left(-\frac{t}{71.225\,7}-0.675\,5\right)+0.132\,5}\right)^{0.667\,1+0.010\,2t}\right]\right\}\cdot\frac{t}{0.595\,5+0.014\,8t} \tag{16}$$

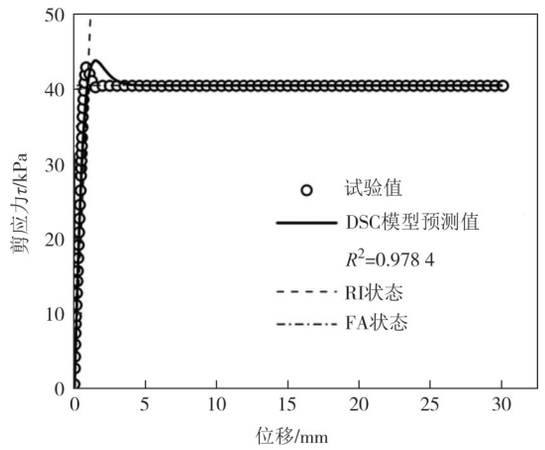
式(16)即为本文建立的水泥土桩-土界面剪应力-位移曲线演化模型.采用式(16)模型对各养护龄期下水泥土桩-土界面剪应力-剪切位移曲线实测结果进行预测(图11),结果表明,计算结果与实测结果吻合良好.

表3 各龄期下DSC模型参数ξ和η值

Tab.3 DSC model parameters ξ and η at different age groups

模型参数	试样养护龄期/d				
	7	14	28	35	60
ξ	1.611 2	1.543 1	1.219 4	1.152 8	0.850 7
η	0.673 1	0.816 7	1.023 9	1.053 7	1.232 4





(e) 60 d

图 11　不同龄期下 DSC 模型预测曲线与实测曲线对比

Fig.11　Comparison between predictions of DSC modeland measurements at different ages

6　结 论

1)开展了养护龄期分别为 7、14、28、35 和 60 d 的水泥土桩-土界面剪切单元体试验,测得了不同养护龄期下水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移曲线,并获得了界面的峰值强度和残余强度随养护龄期的演化规律和演化模型.

2)从水泥土桩-土界面单元体试样的土坯中切取原状土样,并对其进行三轴压缩试验,得到了单元体试样中桩周土体的抗剪强度指标值,结果表明,制作的单元体试样土坯变异性小、均匀性好且质量稳定.

3)对与单元体试样同龄期的水泥土桩体材料进行单轴和三轴压缩试验,获得了水泥土桩体的单轴抗压强度f_{cu}和水泥土桩体的三轴抗剪强度指标(即黏聚力c和内摩擦角φ)随养护龄期的演化规律和演化模型.

4)通过分析各养护龄期下水泥土桩-土界面峰值强度及水泥土桩单轴抗压强度发现,水泥土桩-土界面的抗剪强度与水泥土桩体单轴抗压强度之间存在良好的线性关系.

5)基于水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移全过程试验曲线,引入扰动状态概念,建立了水泥土桩-土界面的剪应力-剪切位移关系随试样养护龄期的演化模型.该模型拟合精度较高,可为水泥土类桩的荷载传递规律的理论分析和数值模拟提供可靠的计算模型.

需注意的是,本文所提出的扰动状态本构模型是基于湘江河漫滩软黏土的单元体界面剪切试验结果而建立的,因此该模型适用于土性与之相似的软黏土情形,对于其他土类情形需进一步研究,但同样可基于单元体界面剪切试验来建立水泥土桩-土界面扰动状态本构模型.

参考文献

[1]　宋义仲,卜发东,程海涛. 新型组合桩:水泥土复合管桩理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:5-8.
SONG Y Z,BU F D,CHENG H T. New type composite pile[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 5-8. (in Chinese)

[2]　CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1971, 97(12):1657-1673.

[3]　何杰, 王忍, 高建喜. 夯实水泥土桩-土界面摩擦特性试验研究[J]. 土工基础,2017,31(2):233-236.
HE J, WANG R, GAO J X. Interface friction characteristics of soil and compacted soil-cement-mixed columns [J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31 (2) : 233-236. (in Chinese)

[4]　张明义,白晓宇,高强,等. 黏性土中桩-土界面受力机制室内试验研究[J]. 岩土力学,2017, 38(8): 2167-2174.
ZHANG M Y, BAI X Y, GAO Q, et al. Experimental study on interfacial bearing mechanism of piles in cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(8):2167-2174.(in Chinese)

[5]　刘方成, 尚守平, 王海东. 粉质黏土-混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1720-1728.
LIU F C,SHANG S P,WANG H D. Study of shear properties of silty clay-concrete interface by simple shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (8) : 1720-1728.(in Chinese)

[6]　KRAFT L M, RAY R P, KAGAWA T. Theoretical t-z curves[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(11): 1543-1561.

[7]　陈龙珠, 梁国钱, 朱金颖, 等. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6):30-38.
CHEN L Z,LIANG G Q,ZHU J Y,et al. Analytical calculation of Axial Loading-Settlement curve of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1994,16(6):30-38.(in Chinese)

[8]　张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆 p-s 曲线的双折线荷载传递解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1072-1076.
ZHANG J, SHANG Y Q, YE B. Analytic calculation of p-s curve of bolts based on bilinear load-transfer function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1072-1076.(in Chinese)

[9] 房卫民, 赵明华, 苏检来. 由沉降量控制桩竖向极限承载力的分析[J]. 中南公路工程,1999,24(2): 25-27.
FANG W M, ZHAO M H, SU J L. Analysis of vertical ultimate bearing capacity of piles controlled by settlement[J]. Central South Highway Engineering, 1999, 24(2): 25-27.(in Chinese)

[10] 陈明中. 群桩沉降计算理论及桩筏基础优化设计研究[D].杭州:浙江大学, 2000.
CHEN M Z. Study on settlement calculation theory of pile groups and optimal design of pile-raft foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.(in Chinese)

[11] 曹汉志. 桩的轴向荷载传递及荷载-沉降曲线的数值计算方法[J]. 岩土工程学报,1986, 8(6): 37-49.
CAO H Z. Axial loading transfer of pile and numberical calculation method of loading-settlement curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 37-49.(in Chinese)

[12] ZHU S M, CHEN C F, CAI H, et al. Analytical modeling for the load-transfer behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile with rigid cap in layer soils[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 144: 104618.

[13] 赵明华, 刘苏, 尹平保, 等. 考虑桩土界面初始临界摩阻力影响的基桩沉降计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3425-3431.
ZHAO M H, LIU S, YIN P B, et al. Settlement calculation method of piles considering effect of initial critical friction on pile-soil interface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3425-3431.(in Chinese)

[14] 陈仁朋, 周万欢, 曹卫平, 等. 改进的桩土界面荷载传递双曲线模型及其在单桩负摩阻力时间效应研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 824-830.
CHEN R P, ZHOU W H, CAO W P, et al. Improved hyperbolic model of load-transfer for pile-soil interface and its application in study of negative friction of single piles considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 824-830.(in Chinese)

[15] WONG K S, TEH C I. Negative skin friction on piles in layered soil deposits [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(6): 457-465.

[16] 余闯, 刘松玉. 考虑桩侧土软化的单桩性状计算分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 133-136.
YU C, LIU S Y. Research on behaviors of single pile considering softening of pile-side soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup.1): 133-136.(in Chinese)

[17] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570-576.
ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 570-576.(in Chinese)

[18] KEZDI A. The bearing capacity of piles and groups [C]// Proceedings of the 4th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. London: Butterworths Scientific Publications, 1957: 25-64.

[19] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Elastoplastic model with damage for strain softening geomaterials[J]. Acta Mechanica, 1987,68(3): 151-170.

[20] DESAI C S, FISHMAN K L. Plasticity-based constitutive model with associated testing for joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991,28(1):15-26.

[21] 吴刚. 工程材料的扰动状态本构模型(Ⅰ):扰动状态概念及其理论基础[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 759-765.
WU G. Disturbed state constitution models of engineering material (Ⅰ)—disturbed state concept and its theory principium [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6):759-765.(in Chinese)

[22] 陈昌富, 梁冠亭, 张根宝, 等. 一种锚或桩与土的界面摩阻性能试验系统及试验方法: CN103940735B[P]. 2016-03-30.
CHEN C F, LIANG G T, ZHANG G B, et al. An interfacially friction performance test systems and test methods anchors or piles and soil:CN103940735B[P]. 2016-03-30.(in Chinese)

[23] 陈昌富,梁冠亭,汤宇,等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1115-1122.
CHEN C F, LIANG G T, TANG Y, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1115-1122.(in Chinese)

[24] 陈昌富, 温永凯, 朱世民. 考虑剪应力水平和土体干密度影响的锚-土界面剪切蠕变模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(9): 1-9.
CHEN C F, WEN Y K, ZHU S M. Creep model for anchor-soil interface considering shear stress and soil dry density[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(9): 1-9.(in Chinese)

[25] 陈祥福. 沉降计算理论及工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2005: 233-234.
CHEN X F. Settlement calculation theory and engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2005: 233-234.(in Chinese)

[26] 柯能, 朱新慧, 王刃, 等. 基于局部加权回归及经验模态分解的地心运动降噪方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(9): 904-908.
KE N, ZHU X H, WANG R, et al. A noise reduction method for geocentric motion based on locally weighted regression and empirical modal decomposition [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(9): 904-908.(in Chinese)