

考虑锯齿状节理的桩岩界面模型试验研究

赵明华[†], 夏柏杨, 赵衡

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对嵌岩灌注桩嵌入软弱岩层的工况, 考虑成桩过程中桩岩界面的剪胀效应, 采用常法向刚度边界条件(CNS)模拟软岩对桩身的侧向变形约束, 开展了模拟桩岩界面侧阻力发挥的室内大尺寸直剪模型试验. 将桩-岩接触面的粗糙体简化为规则的三角形锯齿, 根据不同的半波长分别制作了砂岩和混凝土试样, 得到了剪切荷载、剪切位移、法向荷载和法向位移之间的关系曲线. 试验结果表明, 软岩锯齿的法向剪胀角随着剪切位移的增加呈非线性减小, 且界面抗剪强度的发挥与法向约束刚度、粗糙体半波长和剪切位移等密切相关; 同时, 在考虑软岩表面锯齿的弹性压缩对界面剪胀角影响的基础上, 采用幂函数拟合了软岩抗剪强度的经验关系式. 最后, 将试验结果与现有理论模型结果对比, 表明了现有模型忽略桩岩界面剪胀角的非线性变化将高估嵌岩灌注桩侧阻力的发挥, 这在实际工程中将偏于不安全.

关键词: 桩基础; 破坏; 桩岩界面; 大尺寸直剪试验; 常法向刚度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Laboratory Testing Study on Concrete-rock Interface with Sawtooth Joint

ZHAO Minghua[†], XIA Boyang, ZHAO Heng

(Geotechnical Engineering Institute, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In consideration of the weak rock conditions of rock-socketed piles and taking the dilatancy of the interface into account, the constant normal stiffness conditions (CNS) were applied to simulate the lateral constraints provided by weak rock, and laboratory model tests were conducted to inquire the mobilization of the side resistance. The asperity of the concrete-rock interface can be idealized as regular sawtooth asperities, and sandstone and concrete specimens were manufactured with different half-chord lengths, respectively. The relevant measurements were observed, such as shear load, shear displacement, normal load and normal displacement. In addition, the observations showed that the dilatancy angle of the interface gradually decreased with the development of shear displacement. The shear strength of interface is closely related with the normal constant stiffness and the half chord of the rough body as well as the shear displacement. Based on the consideration of elastic compression of the asperity, the empirical relationship for the shear strength of weak rock was fitted by power functions. On the other hand, the observations were compared with the predictions of an existing theoretical model, and it was shown that the theoretical model can overestimate the side resistance of the rock-socketed piles, due to the disregard of nonlinear variation of the dilatancy angle.

Key words: pile foundations; failure; concrete-rock interface; large scale direct shear tests; constant normal stiffness

* 收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478178, 51608540), National Natural Science Foundation of China (51478178, 51608540); 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室 2018 年开放基金资助项目, Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, 2018

作者简介: 赵明华(1956—), 男, 湖南洞口人, 湖南大学教授, 博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: mhzhaohd@21cn.com

嵌岩灌注桩因其承载能力强、基础沉降及不均匀沉降小、抗震性能优越、桩端受外部因素影响小等优点,在桥梁桩基等工程中受到广泛重视.我国公路桥涵设计规范将嵌岩桩归类为完全的端承桩来进行设计计算^[1].然而,近年来国内外学者大量的试验调查以及对混凝土-岩石接触面的深入研究表明,嵌岩灌注桩的承载特性与嵌岩深度密切相关^[2-4].随着嵌岩深度增加,其轴向荷载传递越来越接近摩擦桩^[5-6].因此,研究嵌岩段侧阻力的发挥程度对嵌岩灌注桩的初步设计有显著意义.

近年来,国内外学者针对嵌岩桩侧阻力的发挥以及轴向荷载传递规律展开了大量的模型试验与理论研究.例如,董平等^[7]基于桩岩间剪胀理论,提出嵌岩深度比应根据桩长采用不同的设计原则.在此基础上,赵明华等^[8]认为软岩界面中凸起的粗糙体在剪切破坏过程中将沿曲线滑动面破坏,利用滑移线场解建立了新的桩岩界面剪切函数.朱珍德等^[9]建立了均方根法,测算了桩岩界面轮廓的分形维数,并采用不同粗糙度的剖面形式进行常法向应力的剪切强度试验,体现了两相介质粗糙度对剪切变形特性以及破坏机制的影响.此外,国外学者也进行了大量的室内模型试验.例如,Kodikara等^[10]采用不同规格的三角形锯齿模拟桩岩界面的粗糙体,分别进行了常法向应力和常法向刚度试验,得到了规则三角状锯齿表现为脆性破坏,而非规则锯齿表现出延性破坏的结论.Gu等^[11]通过对规则三角状锯齿和不同分形维数的不规则桩岩界面进行剪切试验,讨论了初始法向压力、围岩刚度、剪胀角对剪切特性的影响.

由于桩岩接触面与岩石节理具有一定程度的相似性,早期的岩石节理直剪试验多用于模拟岩质边坡的滑动过程.在滑动过程中,剪切面的上部荷载一般为恒定,因此,其边界条件为常法向荷载,即直剪过程中法向荷载保持不变.然而,对于嵌岩桩而言,由于在施工过程中钻孔过程所形成的岩壁粗糙面,决定了剪切面非平面的特性,沿着混凝土-岩石接触面凸起的粗糙体产生的剪切位移将使法向约束应力也随之变化.为此,Johnston等^[12]提出了常法向刚度的边界条件来模拟此过程.然而,无论是基于常法向应力(CNL)还是常法向刚度(CNS)的直剪试验,在理论计算时大都将破坏前的试样表面的起伏粗糙体假设为不可压缩的刚性体,因而将试样的法向位移与剪切位移假定为简单的线性关系.实际上,剪切过程中法向应力的增加将进一步地压缩凸起粗糙体并导致实际界面剪胀角的降低.尤其当嵌岩桩所处的围

岩为软岩时,较大的可压缩性使得该现象更加显著.因此,在研究嵌岩灌注桩的轴向荷载传递特性时有必要充分考虑桩岩界面的非线性法向约束行为.

为此,本文拟通过一系列混凝土-岩石常法向刚度直剪试验,调查桩岩界面的剪切力学行为,特别是剪切过程中粗糙体剪胀效应对抗剪强度的影响以及软岩锯齿对混凝土的法向非线性约束行为.在整理试验结果的基础上,拟提出一种半经验的方法对桩岩界面的侧阻力发挥进行更合理的预测.

1 试验原理

嵌岩灌注桩在成桩施工过程中,钻孔形成的软岩岩壁会形成起伏的不规则粗糙界面;当浇筑混凝土时,将会在桩岩界面上形成相互咬合的接触面,如图1(a)所示.施加竖向荷载后桩身产生沉降,混凝土与岩体表面沿着岩壁滑动产生剪切位移;在垂直于接触面的方向上,桩身与岩壁的凸起体产生空隙,迫使围岩向外撑开,产生法向膨胀位移,称之为剪胀,如图1(b)所示.为了便于理论分析,本文假定软岩凸起的粗糙体为规则的三角形锯齿状,由于围岩不会无限侧向膨胀,于是垂直于接触面的法向应力增量 σ 逐渐增加,从而导致接触面上的剪应力 τ 增加.若桩身沉降进一步增加,则法向应力增量 σ 和剪应力 τ 进一步增大,与此同时,桩-岩界面的接触面积逐渐减小.当剪应力超过软岩锯齿抗剪强度时,凸起体被剪断破坏,孔径不再增大,进入滑移阶段,如图1(c)所示.以上就是描述桩岩界面剪切行为的两阶段(剪胀-剪断)破坏模式.

根据厚壁圆筒的弹性理论解,假设洞壁发生 δ_r 的法向位移,则法向应力增量 δ_σ 可用式(1)表达:

$$\delta_\sigma = \frac{E_r}{1 + \nu_r} \frac{E_r}{r} = \delta_r K. \quad (1)$$

式中: E_r 为岩体弹性模量; r 为桩半径; δ_r 为桩半径增量; δ_σ 为法向应力增量; ν_r 为岩石泊松比.

Johnston等^[12]指出,对于嵌岩桩而言,围岩径向增量 δ_r 与桩径 r 相比十分小,岩石在微小的径向变形下是弹性变形,即周围岩石的法向刚度为一个定值,即 K 为常数:

$$\frac{\delta_\sigma}{\delta_r} = \frac{E_r}{(1 + \nu_r)r} = K = \text{Cons}. \quad (2)$$

式中: K 为围岩的法向刚度.

根据式(2)可知, K 为常量,于是法向应力增量与围岩径向膨胀呈线性关系.这种桩岩界面的相对

位移和应力受常法向刚度条件控制. 常法向刚度条件对嵌岩桩的桩侧摩阻力的发展, 以及桩身位移荷载的特性有相当大的影响, 常法向刚度的条件更加贴近实际工程中嵌岩桩的工作特点, 因而, 在嵌岩桩的设计和施工过程中, 应该予以足够的重视.

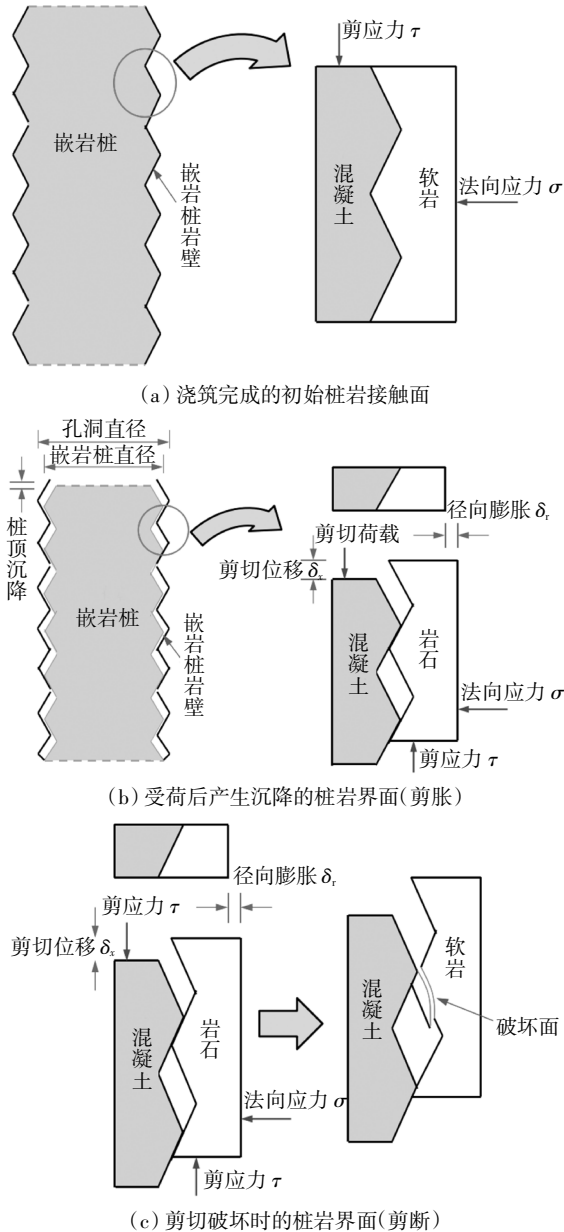


图 1 典型的两阶段桩岩界面锯齿剪切破坏模式
Fig.1 Sketch of drilled shaft socketed in weak rocks

2 试样制备及试验方法

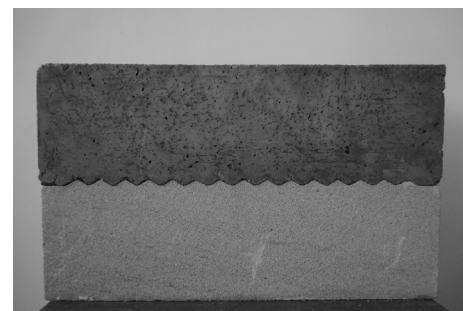
为研究混凝土-岩石剪切过程中刚度的变化对剪切性能的影响, 作者进行了一系列工况下的混凝土-岩石两相介质的常法向刚度直剪试验. 试验采用湖南省某高速公路桥梁桩基现场钻取的砂岩, 由常规三轴试验测得砂岩的各项指标见表 1.

表 1 砂岩的工程性质

Tab.1 Summary of engineering properties of sandstone

岩样	$\varphi_v/(^\circ)$	E/GPa	ν	$\phi/(^\circ)$	c/kPa
砂岩	30	2.23	0.32	26	1 700

利用岩石切割机制作尺寸为 $340\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的长方体砂岩试样, 其中起伏锯齿段为 300 mm , 试样两侧各有 20 mm 的光滑平面, 以减少试验中可能对试样端侧锯齿产生应力集中的不利影响. 试样根据半波长长度分为两种, 分别为 $\lambda = 10\text{ mm}$ 和 $\lambda = 7.5\text{ mm}$, 起伏角均为 30° . 制作混凝土试块时, 将砂岩试样接触面朝上, 并在其表面铺一层紧贴的塑料薄膜, 随后置于预制的浇筑模具底部, 以其砂岩的锯齿面作为混凝土模具底面, 在其上浇筑混凝土. 在浇筑的过程中分层填料, 充分搅拌, 振捣, 使混凝土充分填充在砂岩锯齿间并接触紧密, 同时接触面之间预先放置的塑料薄膜保证混凝土不与砂岩发生黏结. 24 h 后拆模, 之后进行 28 d 的混凝土养护. 为了使混凝土在浇筑过程中与砂岩锯齿接触更为贴合, 本文选用最大粒径小于 5 mm 的碎石子作为骨料填充, 水泥采用 #42.5 普通硅酸盐水泥, 沙子采用细砂, 采用 C30 混凝土配合比, 配合比为 $1:0.42:1.21:2.83$. 最终混凝土试件与砂岩试件之间形成了相互咬合的接触面, 养护完成后, 砂岩和混凝土的试件照片如图 2 所示.



(a) 半波长 $\lambda=10\text{ mm}$ 的试样



(b) 半波长 $\lambda=7.5\text{ mm}$ 的试样

图 2 混凝土和软岩接触面试样

Fig.2 Concrete and soft rock contact specimens

试验仪器为湖南大学自主改造的岩石大尺寸直剪仪. 水平和法向的加载装置采用富力通达多通道协调系统加载, 并在法向加载伺服作动器端部附加了一个弹簧盒, 弹簧盒最多可并联 8 根弹簧提供法向刚度, 试验前对弹簧进行标定, 获得其实际弹簧刚度. 在法向伺服作动器施加一定初始应力后, 施加剪切荷载, 由于剪胀效应导致弹簧盒受到压缩变形, 通过弹簧变形所提供的反力来模拟桩-岩接触面中的法向刚度条件. 法向弹簧盒如图 3 所示, 仪器示意图如图 4 所示. 试验人员可直接观察试验进程, 并在一旁架设高清摄影机, 记录全程接触面变化情况并作分析.



图 3 试验法向弹簧

Fig.3 Experiment normal spring

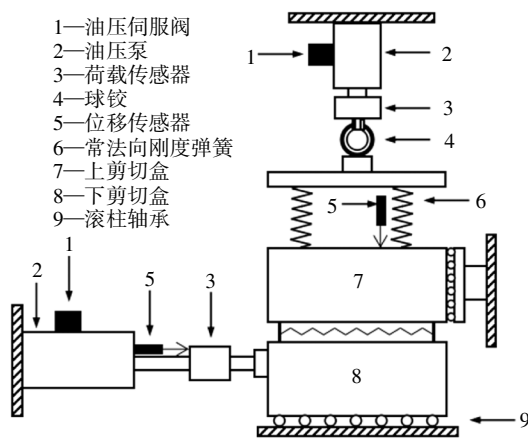


图 4 仪器示意图

Fig.4 Schematic diagram of CNS direct shear apparatus

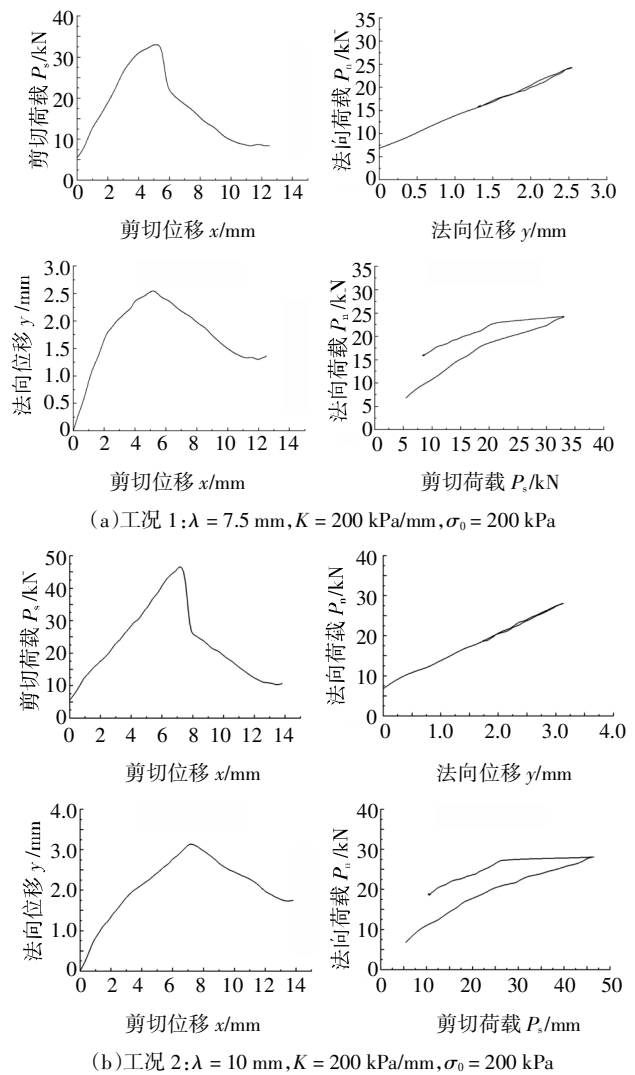
本试验采用水平剪切方式, 采用不同弹簧组合, 使弹簧盒刚度分别接近 $K = 200 \text{ kPa/mm}$ 和 $K = 400 \text{ kPa/mm}$, 试件在初始法向应力 $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$ 和不同法向刚度的工况下进行剪切试验. 试验中, 将混凝土和砂岩试样置于剪切盒内, 并使法向加载与剪切加载的作用力方向通过预定剪切面的几何中心. 根据

ASTM (D5607—08) 规程^[13], 试验实行分步加载, 首先, 法向作动器对试件以 10 kPa/min 的恒定速率施加法向荷载至 200 kPa 后停止加载并保持; 然后, 启动水平作动器, 以恒定的剪切速率 0.5 mm/min 施加剪切荷载, 同时在电脑终端观察剪切荷载-剪切位移曲线, 当剪切荷载达到峰后稳定状态时(即残余剪切强度)终止加载.

3 试验结果与分析

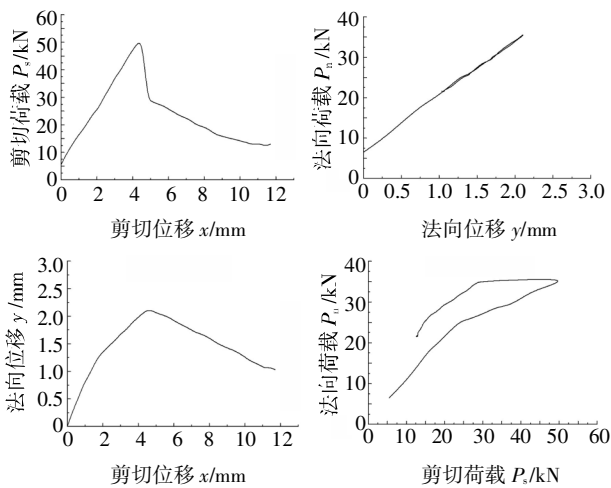
3.1 试验结果

软岩-混凝土常法向刚度剪切试验分别记录剪切荷载-水平位移、法向位移-水平位移、法向荷载-剪切荷载、法向荷载-法向位移的数值, 如图 5 所示. 剪切完成后的砂岩和混凝土试件照片如图 6 所示.

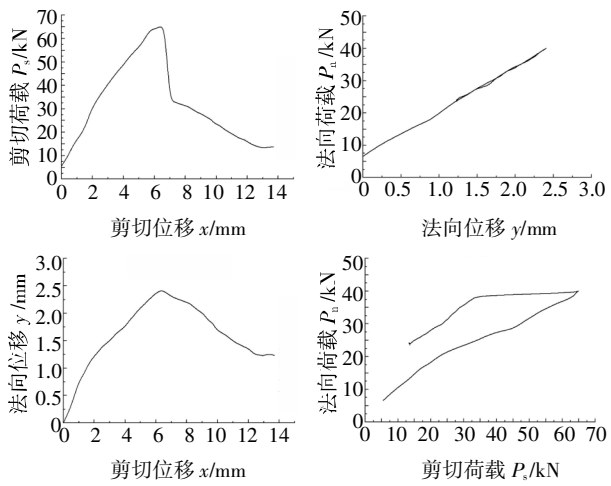


(a) 工况 1: $\lambda = 7.5 \text{ mm}$, $K = 200 \text{ kPa/mm}$, $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$

(b) 工况 2: $\lambda = 10 \text{ mm}$, $K = 200 \text{ kPa/mm}$, $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$



(c)工况 3: $\lambda = 7.5 \text{ mm}$, $K = 400 \text{ kPa/mm}$, $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$



(d)工况 4: $\lambda = 10 \text{ mm}$, $K = 400 \text{ kPa/mm}$, $\sigma_0 = 200 \text{ kPa}$

图 5 各工况试验结果

Fig.5 Test results for various conditions



图 6 剪切破坏后软岩试样图片

Fig.6 Sample picture after shear failure

3.2 试验结果分析

本文选取法向刚度 $K = 400 \text{ kPa/mm}$, 半波长 $\lambda = 7.5 \text{ mm}$ 与半波长 $\lambda = 10 \text{ mm}$ 的试样剪切荷载-水平位移如图 7 所示. 由图 7 可发现, 从剪切开始到小波长试样破坏前, 半波长的变化对试样抗剪强度影响较小, 二者抗剪强度相近; 但是, 随着剪切位移的进

一步增加, $\lambda = 7.5 \text{ mm}$ 试样达到峰值抗剪强度所需的剪切位移小于 $\lambda = 10 \text{ mm}$ 试样. 在达到峰值强度后, 两组试样都呈现相同的变化趋势, 即抗剪强度迅速降低, 这表明锯齿进入了剪断阶段. 随后, 抗剪强度进一步降低, 直至达到残余抗剪强度并维持在一个固定的水平. 由此可看出, 在相同围岩性质条件下, 提高粗糙面半波长可有效提高嵌岩桩的侧阻力.

本文分别选取 $K = 200 \text{ kPa/mm}$ 和 $K = 400 \text{ kPa/mm}$ 的常法向刚度进行试验, 得到其剪切荷载-剪切位移关系图如图 8 所示. 可以看出, 法向刚度对于剪切峰值荷载的影响较大. 当法向刚度从 200 kPa 提高为 400 kPa 时, 峰值剪切荷载从 44.86 kN 提高至 65.32 kN . 而临界剪切位移从 7.12 mm 减小至 6.39 mm . 可看出, 提高法向刚度, 可极大地提高峰值剪切荷载, 并降低极限剪切位移, 更快达到破坏位移.

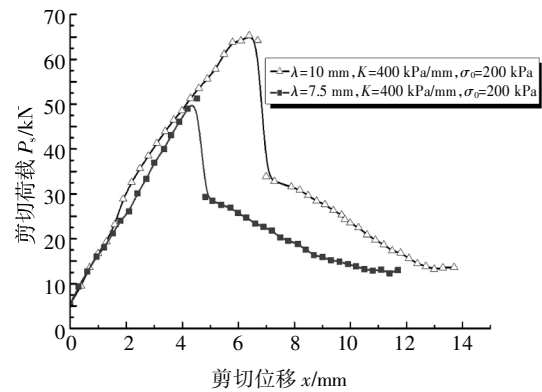


图 7 半波长变化的影响

Fig.7 Effect of half-chord variation

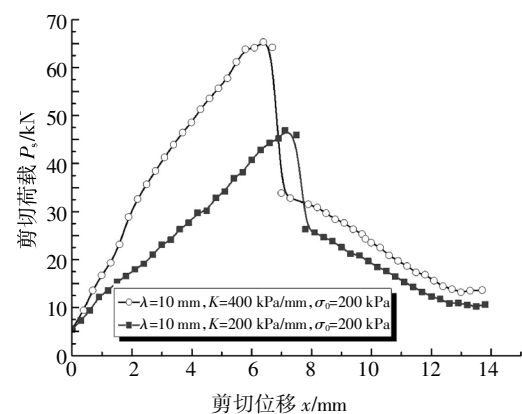


图 8 不同法向刚度下剪切荷载-位移曲线

Fig.8 Curves for shear loads-displacement in different normal stiffness

4 与理论计算对比

以前的学者在研究常法向刚度剪切试验中, 通

常假设法向剪胀位移与水平剪切位移为一个确定的三角函数关系,如图9所示,其关系为:

$$\delta_y' = \delta_x' \cdot \tan \theta. \quad (3)$$

式中: y' 为法向剪胀位移; x' 为水平剪切位移; θ 为粗糙面的剪胀角.

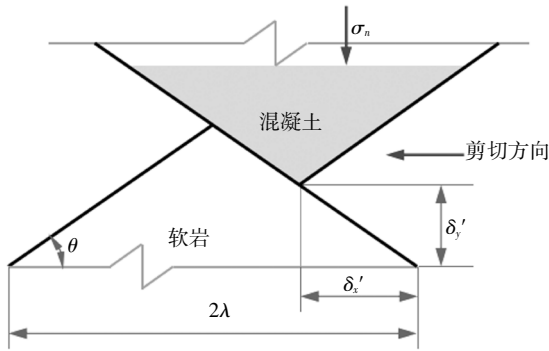


图9 剪切示意图

Fig.9 Shear behavior diagram

上述关系存在的假设为试样是不可压缩的刚性体.然而对于抗压强度明显较弱的软岩而言,在剪胀的过程中,法向应力的增加将导致软岩锯齿被压缩,从而实际测量的剪胀位移 y 要远小于理论剪胀位移.此结果我们通过试验也得到了验证,本文选取了半波长 $\lambda = 10 \text{ mm}$ 、法向刚度 $K = 400 \text{ kPa/mm}$ 工况下实测法向剪胀位移和按式(3)所计算的法向位移,如图10所示.

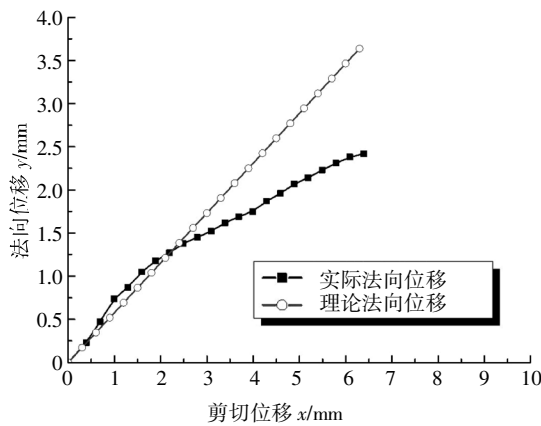


图10 式(3)与试验法向位移对比

Fig.10 Comparison of formula(3) and experimental

根据图5各工况下的水平位移-法向位移曲线,本文拟合出不同工况下剪切破坏前的水平位移与剪切位移的幂指数关系,见表2.

对于桩-岩界面残余摩擦角 ϕ_r ,可通过不同工况下残余阶段剪切荷载 P_s^r ,法向荷载 P_n^r 的实测值进行线性拟合得到,具体方法如下^[13]:

$$\phi_r = \arctan \left(\frac{P_s^r}{P_n^r} \right) = 28.85^\circ. \quad (4)$$

拟合得到的曲线如图11所示.

表2 不同工况下的幂指数拟合关系

Tab.2 Fitted power exponential relation under different conditions

试验工况	幂指数拟合关系
$\lambda = 7.5 \text{ mm}, K = 200 \text{ kPa/mm}, \sigma_0 = 200 \text{ kPa}$	$y = 1.136x^{1/2}$
$\lambda = 10 \text{ mm}, K = 200 \text{ kPa/mm}, \sigma_0 = 200 \text{ kPa}$	$y = 1.106x^{1/2}$
$\lambda = 7.5 \text{ mm}, K = 400 \text{ kPa/mm}, \sigma_0 = 200 \text{ kPa}$	$y = 0.9548x^{1/2}$
$\lambda = 10 \text{ mm}, K = 400 \text{ kPa/mm}, \sigma_0 = 200 \text{ kPa}$	$y = 0.9043x^{1/2}$

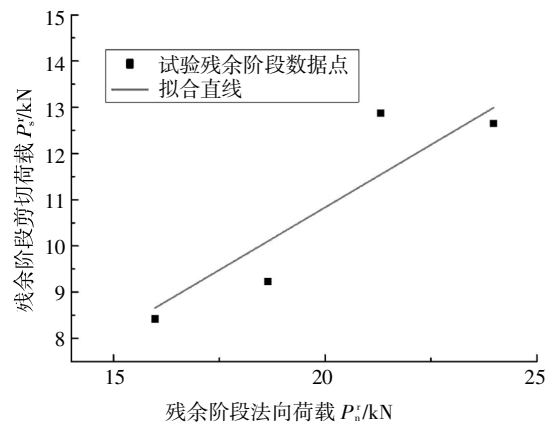


图11 桩岩界面残余摩擦角的线性拟合

Fig.11 Linear fit of concrete-rock interface residual friction angle

根据式(4)得到的法向位移与剪切位移之间的幂指数关系,本文以赵明华理论解^[8]为基础,考虑实际法向位移和初始法向应力对于桩岩界面的影响,得到了改进的剪切函数:

$$\tau = \begin{cases} (K_y + \sigma_0) \tan(\phi_b + \theta), & x \leq x_f; \\ (K_{y_f} + \sigma_0) \tan \phi_r, & x > x_f. \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_f 为剪切破坏时的剪切位移,本文试验中剪切破坏点为 x_f ; y_f 为剪切破坏时的法向位移; ϕ_b 为桩岩结构面摩擦角; ϕ_r 为桩-岩结构面残余摩擦角,由式(4)得到.

本文分别以式(5)的曲线、试验实测曲线、赵明华理论解^[8],采用半波长 $\lambda = 10 \text{ mm}$ 、法向刚度 $K = 400 \text{ kPa/mm}$ 的剪切工况,进行对比,如图12所示.

通过图12可看出,式(5)考虑实际法向位移对常法向刚度试验的影响,与实测曲线更加接近,而赵明华理论解^[8]由于没有考虑剪切过程实际的锯齿压缩,导致其计算峰值剪切荷载远大于实际剪切荷载,因此,软岩试样锯齿的压缩导致的抗剪强度降低不可忽视.

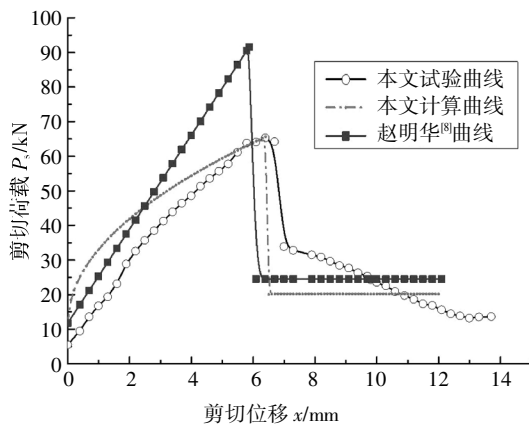


图12 计算方法与试验值对比

Fig.12 Comparison of calculation method and test value

5 结论

1) 本文采用模型试验的方法,以不同半波长的锯齿和法向刚度为变量,研究不同工况下常法向刚度剪切试验的结果,通过试验发现,提高法向刚度以及增加半波长,均能有效地提高桩-岩抗剪强度,对于提升嵌岩桩的承载能力有着重要的意义。

2) 通过试验数据的拟合发现,锯齿剪胀引起的桩岩界面的法向位移与剪切位移之间存在幂指数的相关性。按现有理论模型的估算方法忽略了桩岩界面剪胀角的非线性变化,将高估嵌岩灌注桩侧阻力的发挥,这在实际工程中将偏于不安全。

3) 基于桩岩界面锯齿粗糙体剪切行为的两阶段(剪胀-剪断)破坏机理,提出了一种半经验的剪切模型,该模型能较好地体现剪切过程中剪胀角非线性减小的特点,其结果更加真实地反映了嵌岩桩实际的受荷机理。

参考文献

[1] 史佩栋,梁晋渝. 嵌岩桩竖向承载力的研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 32—39.
SHI P D, LIANG J Y. Vertical bearing capacity of rock-socketed piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 32—39. (In Chinese)

[2] 雷勇. 嵌岩桩竖向承载机理及其承载力计算方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2011: 19—25.
LEI Y. The vertical bearing mechanism and bearing capacity calculation methods of rock-socketed piles [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2011: 19—25. (In Chinese)

[3] 赵明华, 罗卫华, 雷勇, 等. 汨水河特大桥嵌岩桩承载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 1—6.
ZHAO M H, LUO W H, LEI Y, *et al.* In-site load-carrying charac-

teristics test of rock-socketed piles of Mishui River Bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(3): 1—6. (In Chinese)

[4] 赵明华, 何俊翘, 曹文贵, 等. 基桩竖向荷载传递模型及承载力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 37—42.
ZHAO M H, HE J Q, CAO W G, *et al.* Study on the load transfer model and the bearing capacity of vertically loaded piles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2005, 32(1): 37—42. (In Chinese)

[5] 王启云, 熊智彪, 张家生, 等. 红砂岩嵌岩桩桩-岩界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 661—666.
WANG Q Y, XIONG Z B, ZHANG J S, *et al.* Model tests on resistance behaviors of rock-concrete interface of rock-socketed piles in red-sandstone rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 661—666. (In Chinese)

[6] 赵明华, 杨明辉, 曹文贵, 等. 确定嵌岩灌注桩竖向承载力的荷载传递法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1398—1402.
ZHAO M H, YANG M H, CAO W G, *et al.* Load transfer method for determining vertical bearing capacity of rock-socketed filling pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1398—1402. (In Chinese)

[7] 董平, 秦然, 陈乾, 等. 大直径人工挖孔嵌岩桩的承载性状[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2099—2103.
DONG P, QIN R, CHEN Q, *et al.* Bearing behavior of large-diameter rock-socket piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2099—2103. (In Chinese)

[8] 赵明华, 夏润炎, 尹平保, 等. 考虑软岩剪胀效应的嵌岩桩荷载传递机理分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1005—1011.
ZHAO M H, XIA R Y, YIN P B, *et al.* Load transfer mechanism of socketed piles considering shear dilation effects of soft rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1005—1011. (In Chinese)

[9] 朱珍德, 邢福东, 渠文平, 等. 岩石-混凝土两相介质胶结面抗剪强度分形描述 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2910—2917.
ZHU Z D, XING F D, QU W P, *et al.* Fractal description of shear strength of cementation plane between rock and concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2910—2917. (In Chinese)

[10] KODIKARA J K, JOHNSTON I W. Shear behaviour of irregular triangular rock-concrete joints [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(4): 313—322.

[11] GU X F, SEIDEL J P, HABERFIELD C M. Direct shear test of sandstone-concrete joints [J]. International Journal of Geomechanics, 2003, 3(1): 21—33.

[12] JOHNSTON I W, LAM T S K, WILLIAMS A F. Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock [J]. Géotechnique, 1987, 37(1): 83—89.

[13] ASTM D5607—08 Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1999: 1—8.