

砂浆锚杆腐蚀介质扩散模型及拉拔数值试验研究

段光韬

上海市隧道工程轨道交通设计研究院重庆分院, 重庆 400000

[摘要] 目前对地面建筑结构的耐久性研究已经取得丰硕成果, 而地面结构在受力状态和工作环境, 与地下锚固系统均存在较大的差别。于是前人的研究成果不能直接适用于岩土锚固结构工程, 文中以众多物理试验资料为研究基础, 研究了地下环境中腐蚀介质在砂浆锚固体内部非对称扩散结果, 发现腐蚀介质一般沿径向传播, 沿横向传播较少; 并在此基础上修正了腐蚀介质扩散模型。其次验证了砂浆锚杆在只受到拉拔力作用下的物理拉拔试验^[6], 发现有限元计算中, 锚固体长度越长, 越能反应实际工作中的界面粘结力的分布情况。最后通过有限元优化—反分析方法反演出了有限元模型接触面参数法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU, 并拟合出了它们与腐蚀时间的关系公式。

[关键词] 砂浆锚杆; 扩散模型; 数值模拟; 耦合; 优化—反分析

DOI: 10.33142/aem.v1i5.1159

中图分类号: TU476

文献标识码: A

Study on Diffusion Model of Corrosive Medium and Numerical Test of Drawing for Mortar Anchor

DUAN Guangtao

Chongqing Branch of Shanghai Tunnel Engineering Rail Transit Design and Research Institute, Chongqing, 400000, China

Abstract: At present, research on durability of ground structure has achieved fruitful results, while ground structure is quite different from underground anchorage system in stress state and working environment. Therefore, the previous research results can not be applied to geotechnical anchorage structure engineering directly. Based on a lot of physical test data, this paper studies asymmetric diffusion results of corrosive medium in underground environment inside mortar anchorage solid and finds that corrosive medium generally propagates along the radial direction, but less along the transverse direction, on this basis, diffusion model of corrosive medium is modified. Secondly, physical pull-out test of mortar anchor under pull-out force is verified^[6], and it is found that the longer anchor solid length is, the more it can reflect distribution of interfacial bond force in actual work. Finally, normal stiffness factor FKN and interface friction coefficient MU of contact surface parameters of finite element model are backstepped by finite element optimization-back analysis method, and relationship between them and the corrosion time is fitted.

Keywords: mortar anchor; diffusion model; numerical simulation; coupling; optimization-back analysis

1 前言

由于地下腐蚀环境的不可预测性及不确定性, 砂浆锚杆锚固体的腐蚀特性研究一直是土木工程领域的一个难点。重庆大学土木工程学院徐洪博士研究了围岩作用下砂浆锚固体的锈胀开裂过程, 建立了砂浆锚固体在考虑围岩作用下的锈蚀开裂和和裂纹的扩展模型, 得出锚固系统的锈蚀而导致保护层开裂以及后续的开裂过程均与围岩性质密切相关^[1]。同时徐洪博士还研究了砂浆锚固体受腐蚀后的锚固特性, 得出杆体与砂浆界面以及砂浆与基体界面的粘结强度随着腐蚀程度的增加均会发生退化, 而且杆体与砂浆界面的粘结强度要比砂浆与基体的界面粘结强度退化的较快; 水灰比对两者界面之间的粘结强度也有一定的影响^[2]。重庆大学周金飞硕士研究了砂浆锚固体在受到硫酸根离子侵蚀作用下的微观结构分析以及在受外荷载作用下的锚固体的力学性能研究, 得出在同时受到硫酸根离子作用下, 受力的锚固体要比不受力的锚固体的粘结强度下降的趋势要快^[3]。重庆大学韩振华硕士研究了氯离子在砂浆锚固体中扩散规律, 并采用滴定手段定量地分析了不同腐蚀时间下的砂浆锚固体的不同深度下的腐蚀介质浓度, 以及在受外荷载作用和不受外荷载作用下的离子浓度扩散规律的不同^[4]。

2 无外荷载作用下砂浆锚杆腐蚀介质扩散模型研究

2.1 腐蚀介质非对称扩散研究

根据文献[4]所提供的物理实验模型, 取砂浆保护层的直径为 100mm, 钢筋杆体的直径为 12mm, 钢筋杆体长度为 110mm, 锚固长度取 100mm。有限元模型见下图 2.1。

经计算, 扩散系数取 $7.75 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。本论文分析的对象主要是锚固体保护层, 而钢筋杆体随着腐蚀过程的进行也将接触到腐蚀溶液并受到其作用, 因此有必要为钢筋锚杆确定腐蚀介质扩散系数。根据文献[5], 经计算可取砂浆锚固体扩散系数的十分之一, 即 $7.75 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ 。

图 2.2 为腐蚀溶液从砂浆锚固体不同表面积渗透到其内部的有限元扩散结果。渗透面积为 1/4、1/2、3/4 和全面积侵入。腐蚀期限分别为 45d、90d 和 150d。

上图所示为砂浆锚固体表面不同表面积接触腐蚀溶液，腐蚀介质在砂浆锚固体内的弥散深度有限元计算结果云图。从上图可以看出，腐蚀介质的弥散深度与腐蚀时间有关，砂浆锚固体。

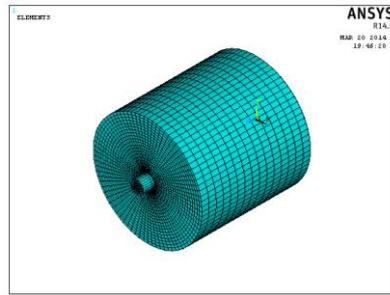


图 2.1 有限元模型

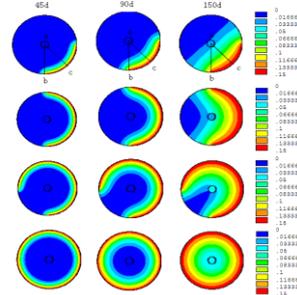


图 2.2 非对称扩散有限元结果对比

随着浸泡在腐蚀溶液的时间的延长，腐蚀介质的弥散深度也随之增加。在同一腐蚀时间内，例如上图中腐蚀时间为 45d(第一列)腐蚀模型，侵蚀面积从上到下由 1/4 表面积变化至全表面积接触，可见，对于腐蚀溶液从不同表面积侵入砂浆锚固体，只对侵蚀面积的边缘产生影响，即就路径 ab 而言，影响较大的是 1/4 面积侵入和全面积侵入，从其他表面积侵入对其影响不大。因此可以说明，对于砂浆锚固体内部某一特定深度，其腐蚀介质浓度只与其附近的腐蚀溶液相关，而与距离其较远处腐蚀溶液无关。即腐蚀介质在砂浆锚固体内的传播路径一般是沿着径向方向弥散，而沿着横向方向弥散深度一般较小。

2.2 有限元计算结果与物理实验结果对比分析

根据文献^[4]，选择砂浆锚固体试件浸泡在 15%浓度的氯化钠溶液中，对其进行验证，分别测定该试件在 45d、90d、150d 的腐蚀时间内的氯离子浓度，其结果见下图：

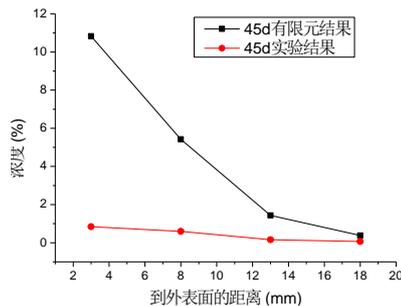


图 2.3 45d 试验结果与有限元结果对比

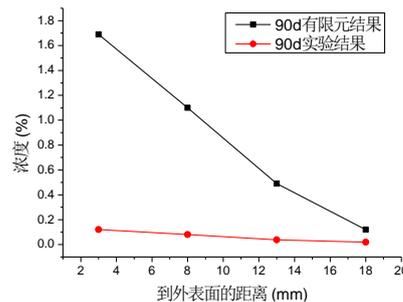


图 2.4 90d 实验结果与有限元结果对比

图 2.3、2.4、2.5 所示试件的试验结果与有限元结果对比说明有限元模拟砂浆锚固体与试验结果有较大的误差，说明经典 Fick 第二定律不适合普遍情况下腐蚀介质在砂浆锚固体内部扩散的规律研究。

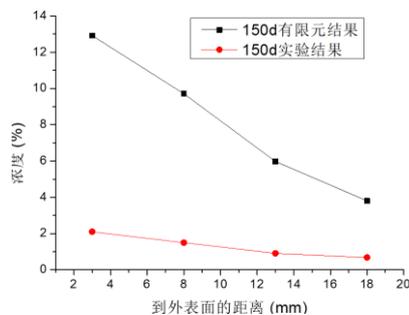


图 2.5 150d 实验结果与有限元结果对比

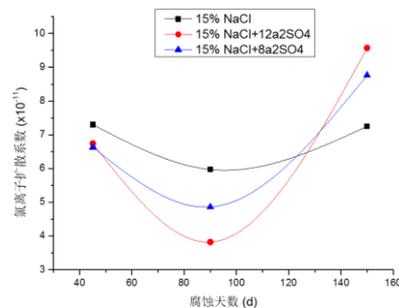


图 2.6 试件在不同腐蚀工况及腐蚀天数下的扩散系数

2.3 腐蚀介质扩散系数修正

从图 2.6 中明显可以看出，单一 15%NaCl 腐蚀溶液作用下，砂浆锚固体的扩散系数有一个下降的趋势，这是因为到后期随着侵入深度的增加，侵入到砂浆锚固体内部的腐蚀介质越来越少，表面浓度也越来越少，同时由于腐蚀溶液与砂浆锚固体内部的某些物质反应，阻塞了扩散通道，故多种因素作用下氯离子的扩散系数总体来呈下降趋势。

根据图 2.6 所示，腐蚀介质的扩散系数不单随着腐蚀进程的变化而变化，其与腐蚀溶液的组成也有很大的关系。鉴于文献^[4]所提供的试验组数和试验条件有限，即试验样本较少，本文提出一个腐蚀介质的扩散强度因子 Q，Q 与外

其中 D^* 为修正后的砂浆锚固体腐蚀介质扩散系数, 单位 mm^2/s , 取式 2-3; k 为砂浆锚固体表面浓度的修正系数, 取式 2-6; x 为距离砂浆表面的距离, 单位 mm ; t 为腐蚀时间, 单位天。

3 耦合因素作用下砂浆锚杆拉拔试验及接触面参数反演

本章借鉴比较成熟的优化—反分析方法^[7], 将 FKN 和 MU 两个对界面影响效果较大的因子作为反演参数, 通过有限的优化模块得出最优解, 并将反演结果代入数值模型进行正分析计算, 将结果与物理试验结果进行对比, 分析反演结果的可靠性。最后得出反演参数与腐蚀时间的变化关系, 用于弥补物理试验的研究分析。

基本思路是: 对于有解析解或者有实验数据的有限元接触问题, 利用 ANSYS 程序内嵌的优化模块, 将法向刚度因子 FKN 和摩擦系数 MU 作为设计变量, 用状态变量控制某些点的拉拔力 (如杆体端部的极限拉拔力) 与解析解或者实验数据相吻合^[8], 通过 ANSYS 优化模块的零阶方法结合随机搜索法来反演分析求解两个设计变量。

3.1 腐蚀介质扩散深度计算

通过第二章修正后的不同深度处的腐蚀介质浓度修正公式计算得腐蚀时间分别为 20d、60d、80d 和 150d 的不同深度处的浓度分布, 计算结果见图 3.1。

从图 3.1 可以看出, 随着距离表面距离的增加, 腐蚀介质的浓度是逐渐减小的。靠近锚固体表面其减小速率较大, 越往锚固体内部渗透, 腐蚀介质减小速率变缓。且从距离表面 35mm 开始, 腐蚀介质浓度值渐趋于零, 即只有极少量腐蚀介质侵入到锚固体内部, 对界面粘结力的影响也是微乎其微的。随着腐蚀的进行, 侵入到锚固体内部的腐蚀介质越来越多, 浓度值越来越大, 对界面粘结力的影响也在逐渐增大。

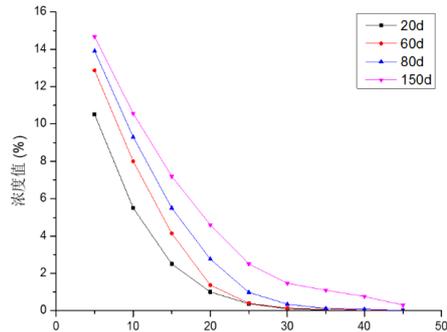


图 3.1 不同腐蚀时间下不同深度处的浓度分布

3.2 荷载—滑移的数值模拟反演

3.2.1 数学模型

在进行参数反分析时, 往往会出现有限元计算位移值与试验数据拟合很好的情况下, 模型的某些应力分布或其他参数可能偏离实际的情况。故在对试件进行一定的室内实验的基础上, 再参考类似工程的一些经验资料来确定反演参数的取值范围, 可以提高反分析的精度和可信度。

根据实验资料及众多学者的经验, 对于自变量、约束函数和目标函数有以下范围限制:

自变量: $FKN \in (0.1 \sim 10)$ $MU \in (0.1 \sim 1)$ 约束函数: 拉拔力 $F \leq 18.92\text{kN}$, 是为了控制施加荷载在极限拉拔力范围内。

目标函数 (OBJ):

$$F(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [u_i - v_i]^2}$$

式中 u_i 为有限元反演值, v_i 为物理实验结果, $F(x)$ 为设计变量的函数。该式为对有限元反演值与试验量测值之间的方差, 该目标函数的计算数值越小越好, 越趋近于零说明反演结果越好, 法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU 更能够反应试验情况。由于在有限元批处理文件中需要指明目标函数具体的精度, 故指定 $F(x) \leq 1.0 \times 10^{-5}$ 。

3.2.2 不同腐蚀时间下的反分析计算

① 腐蚀时间 20d

选取腐蚀时间 20d 的物理试验结果进行反演计算, 根据有限元提供的优化反分析结果, 法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU 大约在 16 次循环计算后趋于稳定, 经过 21 次优化循环, 满足收敛条件而退出, 两设计变量随目标函数 WT 的迭代变化曲线见下图:

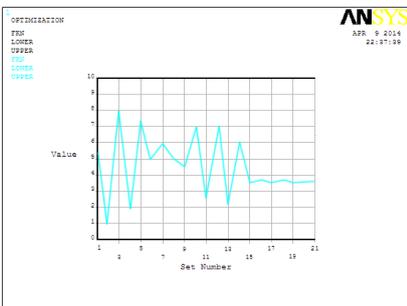


图 3.2 FKN 迭代变化曲线

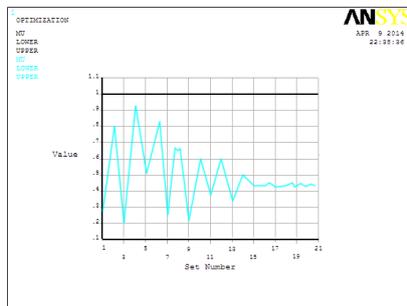


图 3.3 MU 迭代变化曲线

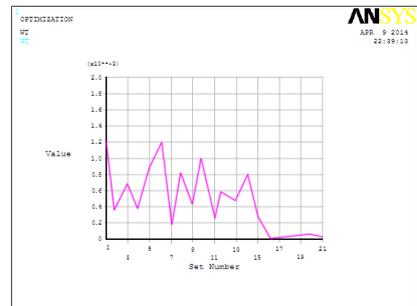


图 3.4 目标函数 WT 迭代变化曲线

②腐蚀时间 60d

同①，法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU 大约在优化循环 21 次后趋于稳定，经过 26 次循环计算，满足收敛条件而退出，两设计变量随目标函数的迭代变化曲线见下图：

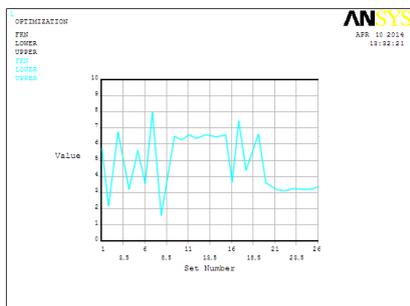


图 3.5 FKN 迭代变化曲线

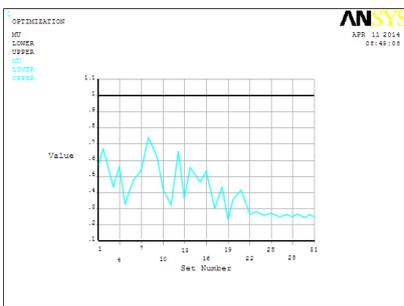


图 3.6 MU 迭代变化曲线

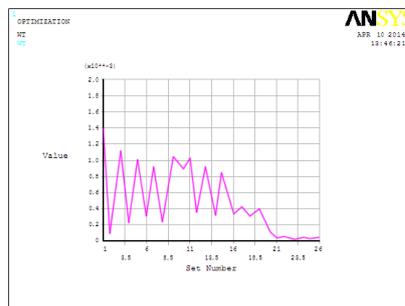


图 3.7 目标函数 WT 迭代变化曲线

③腐蚀时间 80d

同上，法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU 大约在优化循环 23 次后趋于稳定，经过 31 次循环计算，满足收敛条件而退出，两设计变量随目标函数的迭代变化曲线见下图：

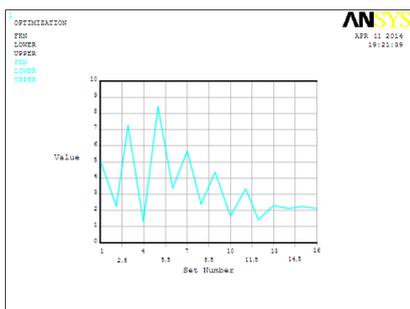


图 3.8 FKN 迭代变化曲线

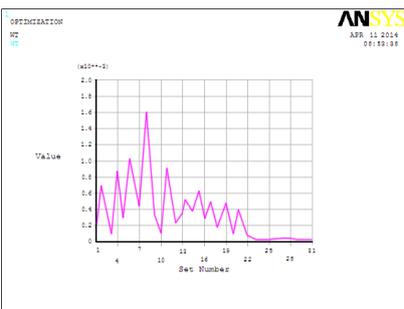


图 3.9 MU 迭代变化曲线

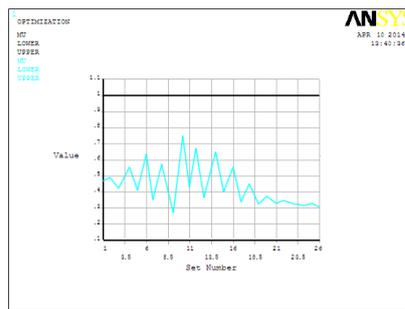


图 3.10 目标函数 WT 迭代变化曲线

④腐蚀时间 150d

同上，法向刚度因子 FKN 和界面摩擦系数 MU 大约在优化循环 13 次后趋于稳定，经过 16 次循环计算，满足收敛条件而退出，两设计变量随目标函数的迭代变化曲线见下图：

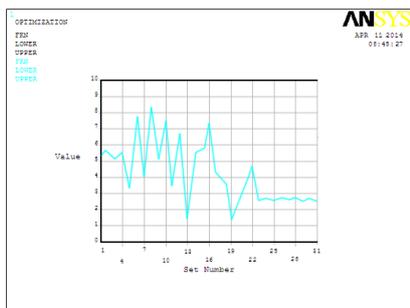


图 3.11 FKN 迭代变化曲线

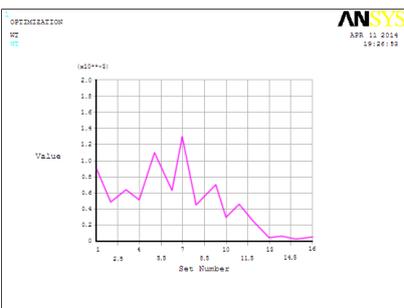


图 3.12 MU 迭代变化曲线

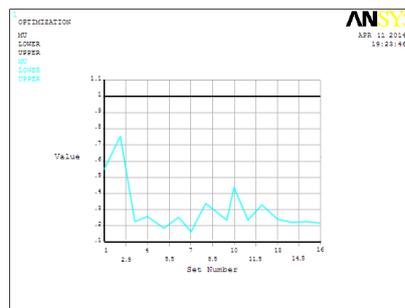


图 3.13 目标函数 WT 迭代变化曲线

⑤正分析计算

将上述计算得到的设计变量反演结果代入到数值模型中进行正分析计算，计算结果与物理试验结果进行比较拟合，发现砂浆锚固体在受到 20d、60d、80d、150d 的腐蚀溶液侵蚀作用下，其有限元反演计算结果与试验结果除个别点外，基本吻合较好。考虑到物理试验中操作误差和读数误差，以及有限元分析中模型简化所带来的问题，我们认为该反演结果能够较好地反应砂浆锚固体在受到腐蚀溶液侵蚀不同时间后的一些力学行为，可以直接代入到数值模型中进行正分析计算，研究砂浆锚固体耦合作用下的力学性能。

3.2.3 接触面反演参数拟合

①法向刚度因子 FKN

首先将接触面法向刚度因子 FKN 列表如下，利用 origin 软件对其进行拟合，采用指数函数 $y = ae^{-x/b} + c$ 。通过

拟合得出各个系数为 $a=2.094$, $b=66.597$, $c=2.06$, 相关系数 $R^2=0.94752$, 说明拟合度较高, 能够反应接触面参数随腐蚀时间的变化关系。故接触面参数法向刚度因子 FKN 与时间 t 的关系为:

$$FKN = 2.094e^{-\frac{t}{66.597}} + 2.06 \quad (3-1)$$

拟合曲线见右图 3.14:

②摩擦系数 MU

将接触面的另一重要参数界面摩擦系数 MU 按照腐蚀时间列表如下, 同样使用 origin 软件对其进行拟合, 寻找两者之间的关系。同样采用指数函数

$$y = ae^{-x/b} + c$$

, 进行拟合后得到的参数 $a=0.365$, $b=67.94$, $c=0.1674$,

相关系数 $R^2=0.9143$, 说明拟合度较高, 可以反映接触面摩擦系数随腐蚀时间的变化关系。故拟合后的摩擦系数与腐蚀时间的关系式为:

$$MU = 0.365e^{-\frac{t}{67.94}} + 0.1674 \quad (3-2)$$

拟合曲线见右图 3.15:

从图 3.14 和 3.15 中可以看出, 接触面参数都是随着腐蚀天数的增加而减小, 且前期减小的较快, 后期减小的较慢, 从图中曲线的走势来看表现为前半段的斜率较陡, 后半段较缓。这是因为腐蚀前期, 锚固体与腐蚀介质能较快的产生反应, 使锚固体破坏, 也会较快的降低杆体与锚固体之间的粘结作用。而后当腐蚀进行到一定程度时, 腐蚀反应趋于平衡, 两者之间的相互作用也趋于稳定。

4 结论

①对比图 2.1 中 ab、ac 两路径浓度变化, 发现侵蚀面积边缘路径 ab, 其只在 1/4 面积侵入和全面积侵入时变化较大; 对比图中第一行, 发现路径 ab 随着腐蚀进程的进行, 其浓度值有不同程度的增大, 说明腐蚀介质一般沿径向传播, 沿横向传播较少。

②提出了腐蚀介质扩散系数的修正公式和初始浓度修正系数公式, 在此基础上拟合出了腐蚀介质浓度与腐蚀时间和腐蚀深度关系的修正模型, 经过与物理试验验证, 证明了该公式可以用于一般腐蚀溶液的浓度计算。

③利用第二章提出的浓度计算公式, 得出腐蚀时间为 20d、60d、80d 和 150d 的不同深度处的腐蚀介质浓度值。发现随着腐蚀进程的进行, 腐蚀介质将越来越多地向砂浆锚固体内部迁移, 因此其对杆体与锚固体界面之间的粘结力影响将越来越大。

④通过有限元的优化反分析计算, 得出数值模型接触面参数法向刚度因子 FKN 和摩擦系数 MU 随腐蚀时间的变化关系, 并拟合出两者与腐蚀时间的关系公式。然后利用该公式计算出腐蚀时间为 40d、100d 和 120d 的接触面参数, 进行极限拉拔力的数值模拟验证, 与物理实验结果比较, 说明该拟合公式可以用于外荷载和腐蚀介质共同作用下的数值模型参数选择。

[参考文献]

[1] 徐洪,张永兴,王桂林. 围岩作用下锚杆砂浆锈胀开裂过程分析[J]. 岩土力学,2010(4):189-194.
 [2] 张永兴,徐洪. 砂浆受腐蚀锚固体的锚固特性试验研究[J]. 岩土力学,2010(10):39-43.
 [3] 周金飞. 砂浆锚固体腐蚀后结构微观分析及力学性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
 [4] 韩振华. 多因素耦合腐蚀条件下砂浆锚固体腐蚀机制试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
 [5] 李富民. 混凝土中钢筋腐蚀速率的理论模型[J]. 华南理工大学学报,2009,37(8):80-89.
 [6] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2011(2):44-51.
 [7] 白润波,曹平周. 基于优化_反分析法的接触刚度因子的确定[J]. 建筑科学,2008,24(1):46-49.
 [8] 张欣. 全长粘结式锚杆受力特性以及数值仿真试验研究[D]. 山东:山东大学,2008.

作者简介: 段光韬, 男, (1988.10-), 毕业院校: 重庆大学; 所学专业: 土木工程, 当前工作单位: 上海市隧道工程轨道交通设计研究院重庆分院, 中级工程师。

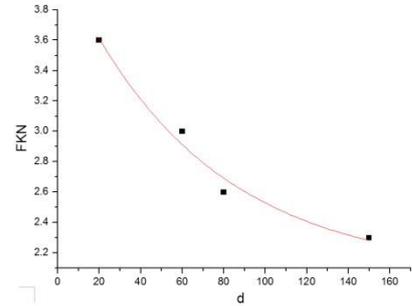


图 3.14 接触面法向刚度因子拟合曲线

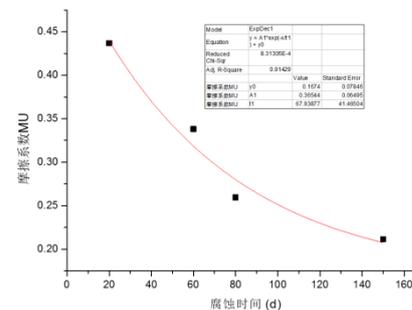


图 3.15 摩擦系数拟合曲线