

文章编号:1671-6833(2004)01-0006-05

纤维增强塑料筋锚杆锚固性能的数值分析

朱海堂¹, 谢晶晶², 高丹盈¹

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 上海市市政工程设计研究院, 上海 200092)

摘 要: 将纤维聚合物筋锚杆与锚固体之间的粘结层简化为粘结界面, 以纤维聚合物筋锚杆、锚固体的应力应变本构关系以及纤维聚合物筋锚杆与锚固体的非线性粘结滑移本构关系为基础, 利用数值叠代和递推计算方法实现了纤维聚合物筋锚杆与锚固体锚固性能的计算机模拟试验, 并以纤维聚合物筋与混凝土的粘结锚固问题为例进行了数值分析, 得到了纤维增强塑料筋与混凝土的加载端拔出力与滑移的关系。

关键词: 纤维增强塑料筋; 粘结; 锚固; 滑移; 数值分析

中图分类号: TU 378

文献标识码: A

0 引言

锚固技术广泛应用于水利水电工程的坝基及坝体加固、深基础和地下结构支护、边坡稳固、结构抗倾覆、现有结构物补强与加固以及对水坝下游冲击区和排洪隧道冲击区实施锚固保护等。锚固工程中, 锚杆的使用寿命取决于锚具和杆体的耐久性, 而影响其耐久性的最直接、最主要的因素是腐蚀。影响锚杆杆体腐蚀的因素除自身的物理化学性质、地下水和地层的水化和电学性质外, 地层的化学成分对腐蚀的形成和发展具有重大的影响。特别当地层中存在钠盐、钙盐和镁盐(一般酸性的碳酸盐、硫酸盐、氯盐)时, 由于这些盐的可溶性高, 易于被地层中的水分解, 于是为锚固工程中应用的钢锚杆(如钢绞线、高强钢丝或高强螺纹钢)与周围介质之间提供了极有利于电化学反应的环境, 使传统的钢锚杆易于腐蚀。所以, 对锚固工程中应用的钢锚杆, 特别是永久性钢锚杆, 必须进行防腐设计, 并采取适当的防腐措施。例如, 对腐蚀环境中的永久性钢锚杆, 其锚固段内的杆体宜用波纹管外套, 管内空隙用环氧树脂、水泥浆或水泥砂浆充填, 管套周围保护层厚度一般在 10mm 以上; 自由段内杆体表面宜涂润滑油或防腐漆, 然后包裹塑料布, 在塑料布上再涂润滑油或防腐漆, 最后装入塑料套管中, 形成双层防腐。由此可

见, 钢锚杆的防腐保护使锚固工程工作量大、耗材多、施工复杂。另外, 钢锚杆重量大, 制造、运输和安装困难。因此, 研究和开发轻质高强、耐腐蚀、低松弛的新型锚杆代替钢锚杆将具有重要的理论意义、实用价值和经济效益。

纤维增强塑料筋是以纤维(如玻璃纤维、碳纤维、聚芳基酰胺纤维等)为增强材料, 以合成树脂(如不饱和聚酯树脂、环氧树脂、乙烯基酯树脂)为基体材料, 并掺入适量辅助剂(如交联单体、引发剂、促进剂、蚀变剂、阻燃剂、阴聚剂、填料、颜料等)经拉挤工艺和特殊的表面处理所形成的一种新型复合材料。其优点是耐腐蚀、强度高、重量轻(一般地, 纤维增强塑料筋的重量只有钢筋重量的 1/4, 其拉伸强度是钢筋的 1.2~1.4 倍)、低松弛、耐电磁。因此, 用纤维增强塑料筋制作锚杆代替钢锚杆具有不需要防腐保护、结构简单、重量轻且易于制造、运输和安装、预应力损失小等优点。

本文以纤维增强塑料筋锚杆与锚固体之间的粘结滑移本构关系及材料的应力应变本构关系为基础, 建立粘结型纤维增强塑料筋锚杆受力性能的基本理论方程, 采用应力调整的叠代计算方法编制数值计算程序, 并以纤维增强塑料筋与混凝土的拔出问题的受力状态为例, 进行了计算机模拟, 以推动纤维增强塑料筋及其混凝土结构在我国工程结构等领域的应用。

收稿日期: 2003-10-30; **修订日期:** 2003-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50079028)

作者简介: 朱海堂(1964-), 男, 河南省虞城县人, 郑州大学副教授, 博士研究生, 主要从事新型复合材料的理论与应

1 粘结锚固基本方程及边界条件

受力的纤维聚合物筋锚杆通过界面粘结层在锚固体中引起的应力状态十分复杂. 考虑到锚固

受力主要与纵向(X 轴方向) 应力、应变及界面上的相互作用有关, 可利用轴对称性近似简化为一维问题考虑. 粘结锚固基本变量及其相互关系如图 1 所示.

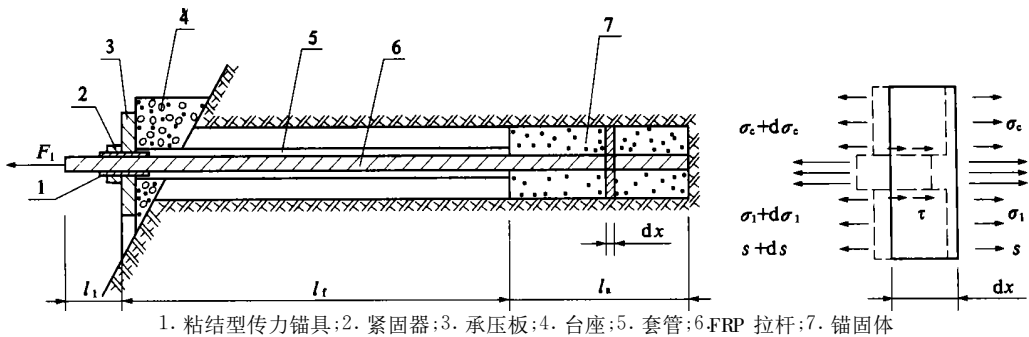


图 1 粘结锚固基本变量及相互关系

Fig. 1 Basic variables and their relationship of the bond

拉拔力 F_t 引起纤维增强塑料筋锚杆的应力 $q(x)$ 和应变 $\xi(x)$, 通过界面粘结应力 $\tau(x)$ 传力于锚固体产生应力 $q_c(x)$ 和应变 $\xi_c(x)$, 纤维增强塑料筋锚杆与锚固体之间的应变差产生相对滑移 $s(x)$, 基本变量共 6 个. 取微段 dx 分析受力变形. 根据平衡、变形和材料本构条件, 得到粘结锚固基本方程如下.

平衡方程

$$\tau(x) + \frac{d}{4} \cdot \frac{d q(x)}{dx} = 0 \tag{1}$$

$$A_f d q(x) + A_c d q_c(x) = 0 \tag{2}$$

变形方程:

$$ds(x) = [\xi(x) - \xi_c(x)] dx \tag{3}$$

本构方程:

$$q(x) = E_f \xi(x) \tag{4}$$

$$q_c(x) = f[\xi_c(x)] \tag{5}$$

$$\tau(x) = \phi[s(x)] \tag{6}$$

边界条件:

加载端锚杆应力

$$q(0) = q^* = \frac{F_t}{A_f} \tag{7}$$

自由端锚杆应力

$$q(l_a) = 0 \tag{8}$$

式中: A_f 是纤维增强塑料筋横面面积; l_a 是埋入锚固体中的纤维增强塑料筋长度; A_f, A_c 分别是纤维增强塑料筋和其周围一定范围内的锚固体的截面积; q, q_c 分别是纤维增强塑料筋和锚固体的应力; q^* 是锚固体加载端部纤维增强塑料筋的应力; ξ, ξ_c 分别是纤维增强塑料筋和锚固体的应变; F_t 是锚固体加载端部的拔出力.

为了简化计算, 不考虑岩土体与锚固体的相

互作用, 假定锚固体的拉应力在横截面上均匀分布, 并将纤维增强塑料筋与锚固体之间的粘结层简化为粘结界面, 粘结应力 $\tau(x)$ 定义为作用于纤维增强塑料筋与锚固体粘结界面上的剪应力. 式 (3) 表达了微段 dx 上纤维增强塑料筋与锚固体之间的滑移量, 反映了两种材料变形不协调的程度.

2 材料本构关系

在利用式 (1) ~ (8) 进行数值模拟之前, 必须确定材料的本构关系. 根据我们进行的纤维增强塑料筋拉伸应力应变关系的试验结果, 纤维增强塑料筋的本构关系如图 2, 其表达式为

$$q(x) = E_f \xi(x) \tag{9}$$

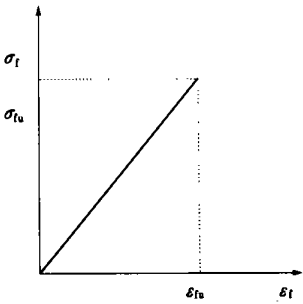


图 2 FRP 筋本构关系

Fig. 2 Constitutive models of FRP rebars

若以混凝土材料作为锚固体, 混凝土的本构关系如图 3 所示.

采用 Hognestad 建议的分段式应力应变全过程曲线, 混凝土本构关系的表达式为
上升段:

$$y = 2x - x^2, (0 \leq x \leq 1) \tag{10a}$$

下降段:

$$y=1-0.15\left[\frac{x-1}{x_u-1}\right],(x\geqslant 1) \tag{1b}$$

式中, $x=\varepsilon/\varepsilon_p, y=\sigma/f_c$.

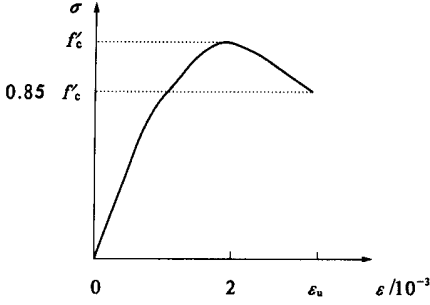


图3 混凝土的本构关系

Fig.3 Constitutive models of concrete

目前,纤维增强塑料筋与混凝土粘结滑移本构模型主要有:BPE 模型、改进的 BPE 模型、CMR 模型和 Malvar 模型.分析表明^[1],这些模型均不能同时满足物理概念明确、光滑连续等要求.例如,BPE 模型、改进的 BPE 模型和 CMR 模型的初始斜率($s=0$ 时的斜率)为无穷大,这与粘结的物理现象相吻合,但 BPE 模型和改进的 BPE 模型在峰值点不是光滑连续,CMR 模型没有下降段.Malvar 模型的初始斜率等于 $F\cdot\tau_m/s_m$,而不是无穷大.本文把纤维聚合物筋混凝土的粘结滑移关系简化为图 4 所示的数学模型.该模型有 3 个关键点 O, C 和 E ,纤维增强塑料筋与混凝土粘结滑移本构模型的解析曲线必须包含这些点的物理参数,即

- (1) 在 $s=0$ 处,有 $\tau=0$ 和 $\frac{d\tau}{ds}=\infty$;
- (2) 在 $s=s_0$ 处,有 $\tau=\tau_0$ 和 $\frac{d\tau}{ds}=0$;
- (3) 在 $s=s_u$ 处,有 $\tau=\tau_u$ 和 $\frac{d\tau}{ds}=0$.

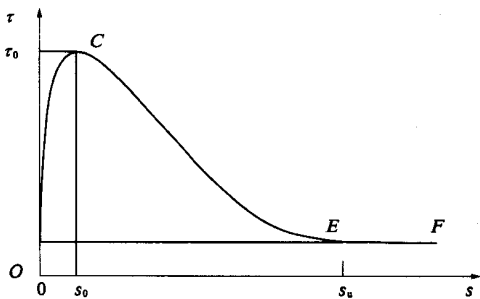


图4 粘结滑移本构关系

Fig.4 Constitutive models of bending slip

满足上述条件的纤维增强塑料筋与混凝土粘结滑移本构模型的表达式可取为

上升段 $OC(0\leqslant s\leqslant s_0)$:

$$\frac{\tau}{\tau_1}=2\sqrt{\frac{s}{s_0}-\frac{s}{s_0}} \tag{1a}$$

下降段 $CE(s_0\leqslant s\leqslant s_u)$:

$$\tau=\tau_0\frac{(s_u-s)^2(2s+s_u-3s_0)}{(s_u-s_0)^3}+\tau_u\frac{(s-s_0)^2(3s_u-2s-s_0)}{(s_u-s_0)^3} \tag{1b}$$

残余段 $EF(s>s_u)$:

$$\tau=\tau_3=\beta\tau_1,(0\leqslant\beta\leqslant 1) \tag{1c}$$

式(11)表示的模型物理概念明确、光滑连续,并与试验结果吻合良好^[1],见图 5.

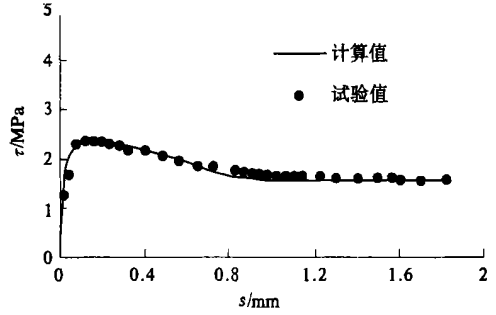


图5 试验曲线与连续曲线模型对比

Fig.5 Comparison of test and smooth curve

3 数值计算方法

如图 6 所示,将纤维增强塑料筋锚杆埋入锚固体的锚固长度 l 划分成 n 个单元,每个单元长度为 $\Delta x=\frac{l}{n}$.在加载端施加滑移 s (位移加载对应单值函数)引起埋长范围内各单元基本变量的变化.利用基本方程进行应力应变递推计算.由式(1)、式(2)得第 i 个单元的平衡方程为

$$q(i+1)=q(i)-4\tau(i)\cdot\Delta x/d \tag{12}$$

$$q(i+1)=q(i)-[q(i)-q(i+1)]\cdot\frac{A_f}{A_c} \tag{13}$$

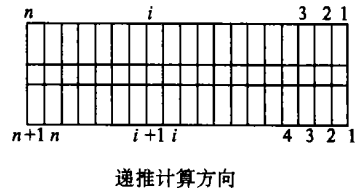


图6 单元划分和递推计算

Fig.6 Units partition and recurrence

由本构关系式(4)、式(10)、式(11)计算应变 $\xi(i)$ 和 $\xi(i)$,并由式(3)的应变差递推下一单元的滑移 $s(i+1)$.

$$s(i+1)=s(i)-\left[\frac{\xi(i)+\xi(i+1)}{2}-\frac{\xi(i)+\xi(i+1)}{2}\right]\Delta x \tag{14}$$

由 $s(i+1)$ 按 $\tau-s$ 本构关系计算下一单元的应力 $\tau(i+1)$.依次递推,直至最后一个单元

(第 n 个单元) 满足埋入端 (或自由段) 边界条件. 具体计算时采用应力调整的迭代计算方法. 即设递推计算的起点为加载端单元, 其应力 $q(1) = q^*$, 通过对计算结果的分析加以调整, 至调整后的 $q(1)$ 值在允许误差 $\Delta\sigma$ 范围内满足收敛条件为止. 调整的方向(增大或减小所设 $q(1)$ 值) 按下列原则判定:

- (1) 递推算至 i 结点($i < n + 1$) 时, 如 $q(i) < \Delta\sigma$, $\tau(i) < \Delta\tau$, 则递推计算结束, 纤维增强塑料筋锚杆有效锚长为 $i \cdot \Delta x$.
- (2) 若 $q(i) < \Delta\sigma$ 但 $\tau(i) > \Delta\tau$, 则意味着纤维增强塑料筋锚杆应力已衰减为零而 τ 不为零, 继续向内递推计算可得 q 为相反值, 这不可能. 应提高 $q(1)$ 值, 向增大方向调整.
- (3) 若 $q(i) > \Delta\sigma$ 但 $\tau(i) < \Delta\tau$, 情况与 (2) 相反, 应向减小方向调整.
- (4) 若递推至 $n + 1$ 结点(埋入端), 表明受力区已涉及埋入纤维增强塑料筋锚杆全长. 如递推计算结果 $q(n + 1) < \Delta\sigma$, 表明有效锚长恰好达到纤维增强塑料筋锚杆埋入端. 埋入端纤维增强塑料筋锚杆应力为零, 迭代结束.
- (5) 若 $q(n + 1) > \Delta\sigma$, 表明埋入端纤维增强塑料筋锚杆还有应力存在, 与边界条件不符. 应向减小方向调整, 降低所设 $q(1)$ 值.

用对分法调整应力, 逼近满足边界条件的解, 即设:

$$q(1) = A + (B - A) / 2 \tag{15}$$

式中: A 和 B 分别为迭代下限值、上限值. 初始计算时 $A = 0$, $B = f_{ty}$, 根据计算结果, 确定调整方向, 不断以计算所得的当前值作为迭代计算的下限值或上限值分别代入 A 和 B , 并逐次调整迭代方向, 直至满足收敛条件($q < \Delta\sigma$, $\tau < \Delta\tau$). 这种方法收敛速度不快, 但比较稳定, 很少出现异常情况. 对于解决粘结锚固问题, 尤其当应力向内渗透过程中有多种情况需要判断时, 该方法是有用的.

4 计算程序及算例

按照上述求解粘结锚固问题数值方法的计算过程编制计算机程序, 框图如图 7 所示. 利用作图程序可形象地反映粘结锚固受力破坏全过程, 初步实现了计算机模拟粘结锚固受力破坏全过程试验. 用上述数值方法模拟文献 [5] 的试验结果, 其试验所用的玻璃纤维增强塑料筋是由意大利的 Soc. Rurmec of Milan 公司提供的, 由拉挤工艺制

成. 直径为 8 mm 和 12 mm, 表面形状分光滑和粗糙两种, 玻璃纤维的重量百分比为 70%, 玻璃纤维增强塑料筋的比重为 1.9 g/cm^3 . 试验采用抗压强度为 39.5 N/mm^2 的混凝土和尺寸为 200 mm 的混凝土立方体试件.

以文献 [5] 的试验结果为基础, 在数值算法中输入纤维增强塑料筋混凝土粘结锚固试件的有关参数 ($n, E_f, l, s_0, s_u, \beta, f_c, r, d_c, f_y, \tau_0$). 在加载端逐级输入位移加载值, 计算机可形象地显示出纤维增强塑料筋与混凝土的粘结力与滑移的关系, 计算机数值模拟与试验结果的比较见图 8, 二者吻合较好.

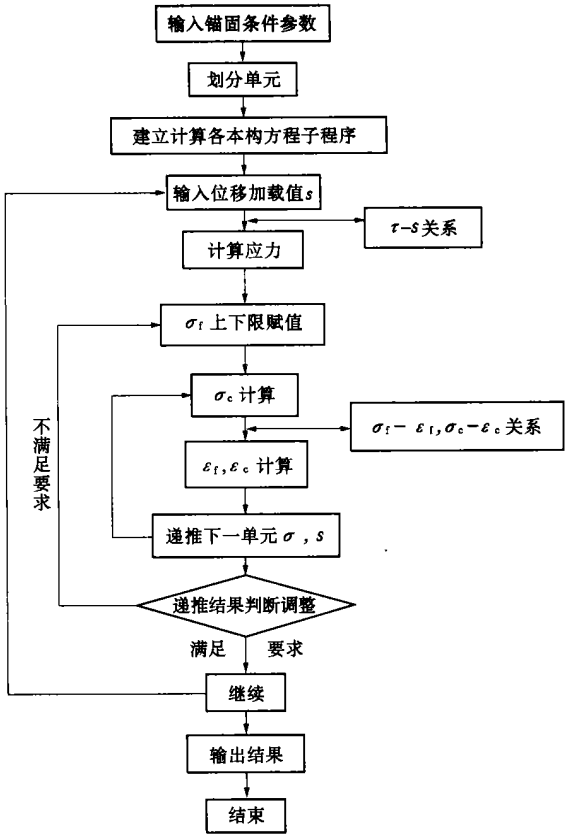


图 7 粘结锚固计算程序框图

Fig. 7 How chart of calculating program on bond

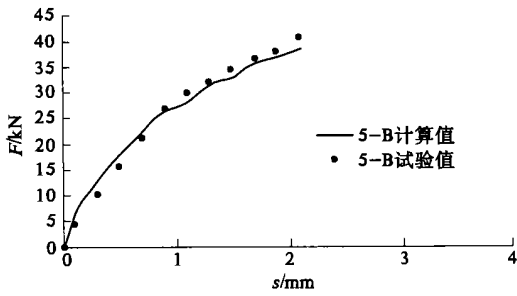


图 8 加载端力与滑移关系图

Fig. 8 Force slip curve in the loading end

5 结论

(1) 提出了纤维增强塑料筋与混凝土粘结滑移的连续曲线本构模型.该模型物理概念明确、光滑连续,并与试验结果吻合良好.

(2) 把纤维增强塑料筋锚杆与锚固体之间的粘结层简化为粘结界面,并以纤维增强塑料筋与混凝土的粘结锚固问题为例进行了数值分析,得到了纤维增强塑料筋与混凝土的粘结力与滑移的关系.

参考文献:

[1] 高丹盈,谢晶晶,李趁趁.纤维聚合物筋混凝土粘结

性能的基本问题[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(1):1~5.

[2] 高丹盈.钢纤维混凝土基本理论[M].北京:科学技术文献出版社,1994.

[3] 中国建筑科学研究院.混凝土结构研究报告选集(第3集)[C].北京:中国建筑工业出版社,1994.156~161.

[4] ALUNNO Rossetti V,GALEOTA D,GIAMMATTEO M M. Local bond stress slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete[J].Materials and Structures,1995,28:340~344.

[5] EHSAN M R,SAADATMANESH H,TAO S.Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete[J].Journal of Structural Engineering,1996,(2):247~254.

Numerical Analysis on Bond Behaviour of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Tendon

ZHU Hai-tang¹, XIE Jing-jing², GAO Dan-ying¹

(1.College of Environmental & Hydraulic Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002, China ; 2.Shanghai Municipal Engineering Design Institute ,Shanghai 200092,China)

Abstract : The bond layer between the tendon and the fixed anchor length is simplified into the bond interface in this paper .On the basis of the constitutive models for FRP tendon fixed anchor length and bond slip relationship between the tendon and the fixed anchor length the nonlinear and whole process numerical analytical method is used to study the behavior of bond between the tendon and the fixed anchor length .The bond of FRP rebar to concrete is used to simulate the bond of the tendon and the fixed anchor length and the force slip curve in the loading end is gained .

Key words : fiber reinforce plastic(FRP) bar ; bond ; anchorage ; slip ; numerical analysis