

玻璃钢钢筋混凝土界面粘结性能的细观力学分析

杨锐¹, 晏石林², 张炎²

(1. 华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学工程结构与力学系, 武汉 430070)

摘要: 采用细观力学的方法建立力学模型对玻璃钢与混凝土的界面粘结性能进行了分析研究, 并且还采用了拔出试验的方法测试了玻璃钢与呋喃混凝土及普通水泥混凝土之间的粘结性能, 比较了对玻璃钢表面进行不同方法处理后的拔出强度。最后将理论分析结果与实验结果进行比较和研究之后, 得出了一些有意义的结论, 为以后开展这方面的研究工作打下了一定的理论基础。

关键词: 玻璃钢; 粘结性能; 细观力学; 拔出试验

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2005)06-0011-05

1 前言

在现代工业和民用建筑施工中玻璃钢材料正得到越来越广泛的应用和研究, 同传统的材料相比这种复合材料具有高拉伸强度, 高阻尼, 低重量, 高抗疲劳强度, 耐腐蚀性和电磁中性等特性^[1]。在过去的几年中出现了许多新兴的玻璃钢建筑构件, 如玻璃钢(GFRP筋)增强混凝土等已广泛地用于房屋、桥梁和其他一些建筑中的下部基础组织等^[2], 并取得了良好的效果。目前国内外对钢筋混凝土结构的维修检测中发现了大量钢筋混凝土结构严重腐蚀和锈蚀而过早失效^[3], 造成了巨大的浪费。玻璃钢具有普通玻璃钢材料的特性, 还有非常高的抗拉强度(600~1100MPa)^[4], 因此在工程建筑上尤其在各种较强腐蚀性的环境中使用玻璃钢替代普通钢筋具有广阔的应用前景。玻璃钢的生产工艺为挤拉成型工艺, 基体材料为树脂, 因此它的缺点是表面光滑, 粘结强度低, 不易与混凝土粘结; 弹性模量和剪切强度较小, 导致变形较大和不易锚固。因此, 如何解决这些问题是GFRP筋实际应用的技术关键。本文使用细观力学的方法对玻璃钢钢筋混凝土结构建立力学模型进行理论分析, 找出粘结强度与筋材及混凝土的各种参数之间的对应关系, 以达到提高玻璃钢粘结强度的目的; 同时使用拔出实验的方法对表面进行不同处理的玻璃钢、普通钢筋和螺纹钢与呋喃树脂混凝土及普通混凝土之间的粘结强度进行了测试, 比较了各种筋材与不同的

混凝土之间的粘结强度, 并对照实验结果来检验该理论方法的可行性。

2 理论推导

2.1 建立模型分析

玻璃钢增强混凝土结构受到外力作用时, 也就是混凝土中的玻璃钢筋受外力作用而拔出时(如图1所示), 经常选择一个典型的体积单元模型。本文选取如图2所示的圆柱体模型进行研究, 在文献[5]设立的模型及假设的基础上对玻璃钢的拔出强度进行理论分析, 认为文献[5]中的计算过程和结果存在一些问题, 对此进行了一些补充和修正。

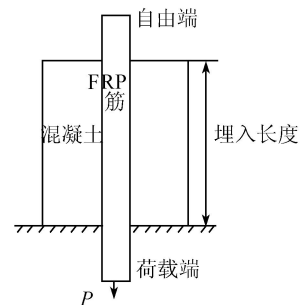


图1 拔出钢筋示意

如图2所示模型单元由直径为 d 的玻璃钢筋和它周围的直径为 D 的混凝土组成。假设混凝土材料为各向同性, 玻璃钢筋为横向和纵向各向同性的材料, 将此模型放入到柱坐标 (r, z) 中进行弹性分析, 由空间轴对称问题的平衡微分方程、几何微分方

收稿日期: 2005-02-22

作者简介: 杨锐 (1978-), 女, 硕士生。

程及物理微分方程可得到如下方程:

$$\frac{\partial r}{\partial r} + \frac{r}{r} + \frac{\partial r}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial r} + \frac{r}{r} + \frac{\partial z}{\partial z} = 0$$

$$r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad u = \frac{u}{r}, \quad z = \frac{\partial v}{\partial z}, \quad v = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} r \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & 0 \\ k_{12} & k_{11} & k_{13} & 0 \\ k_{13} & k_{13} & k_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r \\ z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

在这里 u 和 w 分别代表 r 和 z 方向的位移, 因为材料为各向同性的, 可得:

$$k_{11} = k_{33} = E(1 - \nu) / ((1 + \nu)(1 - 2\nu)), \quad k_{12} = k_{13} = \nu E / ((1 + \nu)(1 - 2\nu))$$

$G_r = E / (2(1 + \nu))$, E 为材料的杨氏模量; ν 为泊松比。

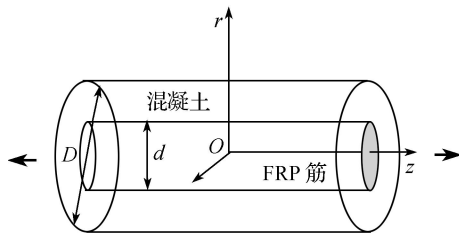


图 2 钢筋混凝土模型

因此由 Lamé 方程解出在平面应变情况下在 r 和 z 方向的位移变量, 对玻璃钢部分为公式 (4), 对混凝土部分为公式 (5):

$$u^f = D_{1f} r \quad w^f = D_{3f} z \quad (4)$$

$$u^c = D_{1c} r + D_{2c} \frac{d^2}{4r} \quad w^c = D_{3c} z \quad (5)$$

其中 $D_{1f}, D_{3f}, D_{ic} (i=1, 2, 3)$ 为积分常数, 下缀 f 和 c 分别代表 FRP 筋和混凝土覆盖层, 一旦它们在随后的推导中被确定后就可以计算出筋材和混凝土的受力情况。

2.2 基本假设及推导结果

取出该模型的横截面, 对该模型的受力及混凝土产生裂纹的情况进行如下几点假设:

(1) 将玻璃钢钢筋混凝土的横截面分为 a、b、c 三个部分, 如图 3 所示。其中 a 部分为玻璃钢筋, b 部分为混凝土中的破裂部分, c 部分为混凝土中的弹性部分。FRP 筋拔出时, b 部分的混凝土主要受到径向和圆周方向应力而产生裂纹失效。

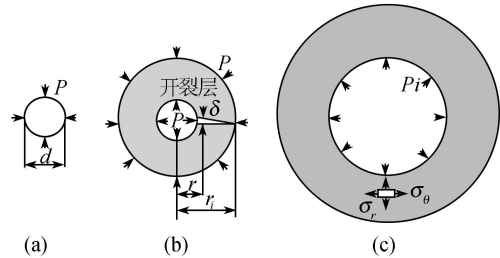


图 3 横截面示意

(2) 对于 a、b 部分来说, 在它们的横截面上 z 始终为一固定常数。

(3) 在断裂部分中 r 方向 (圆周方向) 的总伸长是由 n 个裂纹张开位移 δ 和弹性伸长组成, 是一个常数, 其值为 $2 r_i \epsilon_c$ 。 ϵ_c 为混凝土的极限拉伸应变, 如式 (6) 示, 其中 ϵ^i 是断裂部分圆周方向的弹性应变, 表达式为 (7)。

$$2 r_i \epsilon_c = n \delta + 2 r \epsilon^i \quad (6)$$

$$\epsilon^i = \frac{1}{E} [\sigma_r^i - \nu (\sigma_r^i + \sigma_z^i)] \quad (7)$$

(4) 对于 b 部分中出现的裂纹来说, 可以假设裂纹的宽度存在如下的关系式:

$$\delta = f_c \left(1 - \frac{r}{r_i} \right) \quad (8)$$

其中 f_c 为混凝土的拉伸强度; r_i 是由混凝土的拉伸断裂能计算出的临界长度。

根据这些基本方程和假设可以最终得出如下的矩阵表达式。在该矩阵表达式中一旦确定了矩阵 D , 所有的应力及应变都可以确定。钢筋拔出时可根据这些内部的应力确定在玻璃钢筋荷载端所施加的拉力 P 。

$$A\{D\} = \{F\} \quad (9)$$

$$\text{其中: } \{D\} = \{D_{1f} \quad D_{3f} \quad D_{1c} \quad D_{2c} \quad D_{3c} \quad \delta / f_c \quad P / f_{ct}\}^T; \{F\} = \{F_1 \quad F_2 \quad F_3 \quad (1 - \nu)(1 - 2\nu) \epsilon_c \quad (1 - \nu) \epsilon_c \quad 0 \quad P / E\}^T。$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{2r_i}{d} & -\frac{d}{2r_i} & 0 & A_{16} & \frac{2r_i}{c} \ln \frac{2r_i}{d} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & A_{26} & -V \frac{2r_i}{c} \\ \frac{k_{11} + k_{12}}{E} & \frac{k_{13}}{E} & 0 & 0 & 0 & A_{36} & -\frac{2r_i}{c} \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 2V & 0 & -(1-V)(1-2V) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d^2}{2r_i^2} & 0 & 0 & (1-V) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & - & V \\ 0 & 0 & 1 & -(1-2V)d^2/D^2 & V & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_1 = -\frac{2c}{V} \frac{(r_i - r_c)}{d} \left[\ln \frac{2r_i}{d} - \frac{2r_i}{d} \left(\frac{r_i/d - r_c/d}{r/2 - r_c/d} \right)^V \frac{d}{r} \right]$$

$$F_2 = \frac{2c}{d} (r_i - r_c) \left[1 - \left(\frac{r_i - r_c}{d/2 - r_j} \right)^V \right]$$

$$F_3 = \frac{2c}{Vd} (r_i - r_c) \left[1 - \left(\frac{r_i - r_c}{d/2 - r_j} \right)^V \right]$$

$$A_{16} = \frac{Vc}{1-V} \left[V \left(\frac{1-2r_i}{d} \right) - \frac{2r_i}{d} \ln \frac{2r_i}{d} \right] + \frac{V}{1-V} F_1$$

$$A_{26} = \left[1 + \frac{V^2}{1-V} \left(\frac{2r_i}{d} - 1 \right) \right] + \frac{V}{1-V} F_2$$

$$A_{36} = \frac{Vc}{1-V} \left(\frac{2r_i}{d} - 1 \right) + \frac{V}{1-V} F_3$$

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ \delta \\ \delta \\ \delta \\ \delta \\ \delta \\ \delta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{12} & k_{13} \\ k_{11} + k_{12} & k_{13} \\ 2k_{13} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_{1f} \\ D_{3f} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

将上面材料的参数带入上式可以解出矩阵 D 为：
 $\{D\} = \{D_{1f} \ D_{3f} \ D_{1o} \ D_{2o} \ D_{3o} \ \delta_z/f_{ct} \ P_i/f_{ct}\}^T$
 $= [0.000775 \quad -0.00248 \quad 0.000476$
 $0.000298 \quad -0.00238 \quad -6.534 \quad -0.987]^T$

所以可以得出在 FRP 筋中,当 FRP 筋被拔出时 Z 方向的受力 δ_z 为：

$$\delta_z = 2 \times k_{13} \times D_{1f} + k_{33} \times D_{3f} = 115.26 \text{MPa} \quad (11)$$

当钢筋拔出时施加在钢筋荷载端的力 P 为：

$$p = \delta_z^2 \times \delta_z / 4 = 5.8 \text{kN} \quad (12)$$

(2)然后选择 FRP 筋普通混凝土试件进行数值计算,各种材料参数为：

$$d = 8 \text{mm}, D = 100 \text{mm}, E_c = 30000 \text{MPa}, V_c = 0.15, f_{ct} = 6 \text{MPa}, \delta_0 = 0 \text{MPa},$$

$$G_{rc} = 4830 \text{MPa}, E_f = 5 \times 10^4 \text{MPa}, V_f = 0.3$$

解得矩阵 D 为：

$$\{D\} = \{D_{1f} \ D_{3f} \ D_{1o} \ D_{2o} \ D_{3o} \ \delta_z/f_{ct} \ P_i/f_{ct}\}^T$$

$$= [0.00052 \quad -0.00135 \quad 0.000204$$
 $0.000317 \quad -0.00135 \quad -3.7504 \quad -0.987]^T$

所以可得：

$$\delta_z = 2 \times k_{13} \times D_{1f} + k_{33} \times D_{3f} = 60.88 \text{MPa} \quad (13)$$

$$p = \delta_z^2 \times \delta_z / 4 = 3.06 \text{kN} \quad (14)$$

3 实验研究

树脂混凝土用的树脂主要有不饱和聚酯树脂、环氧树脂、乙烯基酯树脂和呋喃树脂等。其中呋喃树脂具有耐腐蚀性极强及价格低廉,但粘结性能较差。本文着重对 GFRP 筋加强呋喃树脂混凝土及加强水泥混凝土进行研究。试验的目的是对不同表面

其中 $\delta_0 = f_{ct}/E_c$ 为圆柱体外表面受力,一般为零;V 为筋材泊松比; f_{ct} 为混凝土强度; r_i 在图 3 中所示; d 为筋材直径; $r_c = nE_c/(2 f_{ct})$ 。

2.3 数值结果和分析

对 FRP 筋混凝土进行数值计算时,在上述模型的基础上对 FRP 筋混凝土结构进行进一步的假设。即在模型的横截面上只分为两部分,中间为 FRP 筋,外部为混凝土的弹性部分。也就是说,此时 FRP 筋周围的混凝土刚刚界于临界拉伸强度和出现第一条裂纹,但裂纹还几乎未形成时钢筋将会被拔出,这时仍认为周围混凝土还是为弹性状态下的。此时在 2.2 节中的一些系数可以取为: $r_i = d/2, n = 1$ 。

(1)首先对 FRP 筋呋喃树脂混凝土的试件进行数值计算,各种材料参数为：

$$d = 8 \text{mm}, D = 100 \text{mm}, E_c = 16000 \text{MPa}, V_c = 0.2,$$

$$f_{ct} = 6 \text{MPa}, \delta_0 = 0 \text{MPa},$$

$$G_{rc} = 4830 \text{MPa}, E_f = 5 \times 10^4 \text{MPa}, V_f = 0.3$$

对于 FRP 筋来说,由于它为弹性部分,所以根据式 (2) ~ (4)可以得到：

处理的 GFRP筋及普通钢筋与呋喃树脂混凝土和普通水泥混凝土之间的粘结强度进行测试。实验中试件共分为 10组,每组 3个试件,试件的尺寸为 100

$\times 100 \times 100\text{mm}$ 。实验结果及不同试件之间的对比情况由表 1和图 4所示。

表 1 各组拔出试验^[6]的拔出荷载及平均粘结强度

试件组编号	混凝土类型	加强筋及表面处理	钢筋直径/mm	平均拔出荷载/kN	粘结强度/MPa
1	呋喃树脂混凝土	表面缠绕纤维 GFRP筋	8	18.8	7.48
2	呋喃树脂混凝土	表面涂沙 GFRP筋	8	10.8	4.30
3	呋喃树脂混凝土	表面打毛 GFRP筋	8	15.71	6.26
4	呋喃树脂混凝土	光面钢筋	5	7.41	4.72
5	呋喃树脂混凝土	螺纹钢	5	7.56	4.82
6	普通水泥混凝土	表面缠绕纤维 GFRP筋	8	17.8	7.09
7	普通水泥混凝土	表面涂沙 GFRP筋	8	16.43	6.54
8	普通水泥混凝土	表面打毛 GFRP筋	8	7.58	3.02
9	普通水泥混凝土	光面钢筋	5	11.2	7.13
10	普通水泥混凝土	螺纹钢	5	13kN时钢筋屈服	>8.28

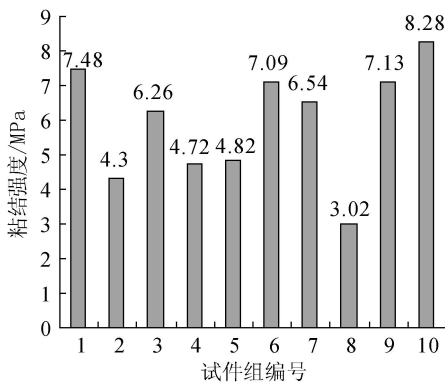


图 4 各组试件的粘结强度对比

由表 1及图 4可知,螺纹钢和普通混凝土之间的粘结强度最大,大于 8.28MPa。这是因为在螺纹钢自由端还没有发生滑动位移之前,钢筋已在荷载为 13kN时发生屈服失效。对于 GFRP筋来说,无论在呋喃树脂还是在混凝土中,表面缠绕纤维的玻璃钢的粘结性能最好,达 7.48MPa和 7.09MPa。表面打毛玻璃钢与呋喃树脂混凝土的粘结强度(试件组 3)远大于打毛玻璃钢与普通混凝土的粘结强度(试件组 8),说明前者优于后者的粘结性能。对于光面钢筋和螺纹钢来说,它们与呋喃树脂的粘结强度低于与普通混凝土的粘结强度,因为钢筋和树脂混凝土的刚度相差较大,界面的剪切应力集中而造成平均粘结强度低。

4 结 论

由实验和理论推导可以得出如下结论:

(1)无论是实验测试还是数值计算,GFRP筋与呋喃树脂混凝土的粘结性能明显优于与普通水泥混

凝土之间的粘结性能;

(2)虽然该理论方法与实验结果具有一定的差距,但该计算结果仍能较好地反映不同筋材和混凝土之间的粘结强度的比例关系,结果表明筋材的弹性模量越大,粘结强度越高;

(3)采用 GFRP筋加强树脂混凝土和水泥混凝土时,筋的表面进行缠绕玻璃纤维处理,其效果优于不处理或表面涂砂及表面打毛处理,可获得较高的粘结强度。

参考文献

- [1] Clarke JL. Non-ferrous reinforcement[J]. Mag Concr Res, 1998, 50 (1) 1-3.
- [2] Cosenza E, Manfredi G, Realfonzo R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. J Compos Construction, 1997, 1 (2) 40-51.
- [3] 钱锐,茅卫兵. 国外对混凝土结构中新型材料 FRP筋的研究及应用[J]. 江苏建筑, 2001, (1).
- [4] Vickil Brown, Charles L Bartholmew. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90 (1).
- [5] J Q Ye, Z J Wu. Micro-mechanical analysis of splitting failure in concrete reinforced with fiber reinforced plastic rods[J]. Cement & Concrete Composites, 2000, 22 243-251.
- [6] 纪午生,陈伟,张应立,梁锡斌等. 常用建筑材料实验手册[M]. 中国建筑材料工业出版社.
- [7] Brahim Bemokrane, Haixue Xu, Eric Bellavance. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. Rock Mech Min Sci & Geomech, 1996, 33(5) 455-465.
- [8] Vickil Brown, Charles L Bartholmew. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1).

(下转第 23页)

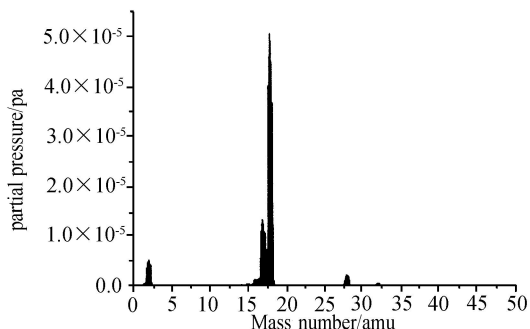


图7 VPI工艺玻璃钢测试的残余气体谱图

由两次 QMS 残余气体谱图看,绝缘子用玻璃钢材料与超导线圈绝缘层用 VPI 工艺的玻璃钢材料在常温抽气时释放的气体成分有很大差别。前者以氢气为主峰,后者以水蒸气为主要谱峰。但相同的是样品材料的表面和体内解吸出氢气、炭氢化合物和炭氧化合物,而 VPI 材料在残余气体中含有少量 O_2 ($m/e = 32$)。经计算,绝缘子用玻璃钢材料各组分依次为: H_2 H_2O ($CO + CO_2$) $C_nH_m = 51\%$ 34% 12% 3% , VPI 工艺玻璃钢材料各组分依次为: H_2O H_2 ($CO + CO_2$) C_nH_m $O_2 = 84\%$ 7% 5% 3% 1% 。

3 结论

玻璃钢材料经上述真空性能评价试验后可以得到如下结论:

(1) 从出气率上看,这两种材料经约 20h 抽气后都可以达到稳定值,其中绝缘子用玻璃钢材料的放气率略大,主要原因在于两种玻璃钢材料的成型

工艺不同,VPI 工艺玻璃钢在成型时经真空处理,因其出气率较小,其稳定后材料出气率约为 $5.6 \times 10^{-6} Pa \cdot L/s \cdot g$,而绝缘子用玻璃钢成型时没有经过真空处理,稳定后材料出气率约为 $1.4 \times 10^{-5} Pa \cdot L/s \cdot g$

(2) 从残余气体的质谱分析看,绝缘子用玻璃钢和 VPI 工艺的玻璃钢也有较大的差别,存在着大量的氢气,这主要是由于所使用的低温胶含游离成分。后者含有大量的水蒸气且所含气体质谱比较集中。从质谱看,这种材料的真空性能较好,由于其水蒸气含量最高,因此在低温下可使真空系统的真空度提高较多;

(3) 本次实验从真空技术的角度分析了两种玻璃钢材料的相关真空性能,其结果可为 EAST 装置的真空估计提供数据,同时为制作全玻璃钢杜瓦提供设计依据。

参考文献

- [1] 高本辉,崔素言. 真空物理 [M]. 科学技术出版社.
- [2] 达道安主编. 真空设计手册 [M]. 国防工业出版社. 1991 1040-1084.
- [3] 徐烈,周淑亮等. 玻璃钢等材料的真空性能 [J]. 低温与超导, 1994, 22(4) 4-9.
- [4] 徐烈,周淑亮,曹庆等. 玻璃钢的放气性能研究 [A]. 第六届全国低温测试会议论文集 [C]. 1993.
- [5] 高本辉,戴善述. 真空材料常温出气率的简捷测量 [J]. 科学仪器, 1964, (2) 93.
- [6] 王小明,陈俊凌等. 新型掺杂石墨及其 SiC 涂层材料真空性能评价研究 [J]. 真空电子技术. 2002, (1) 8-12.

VACUUM PERFORMANCE EVALUATION OF GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES

LU Yi-fan, PAN Wan-jiang, WU Song-tao, Wang Xiao-ming

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031, China)

Abstract: Two kinds of glass fiber reinforced composites developed by ASIPP were tested at room temperature for evaluating their vacuum performance. The pressure and outgassing composition of the vacuum chamber were detected by vacuum gauge and quadrupole mass spectrometer (QMS).

Key words: glass fiber reinforced composites; vacuum performance; test

(上接第 14 页)

MICRO-MECHANICAL INVESTIGATION OF INTERFACE BONDING PROPERTIES BETWEEN CONCRETE AND GFRP BARS

YANG Rui¹, YAN Shi-Lin², ZHANG Yan²

(1. School of Engineering Technology, HZAU, Wuhan 430070, China; 2. School of Science, WHUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper adopts micro-mechanical methods and pull-out tests to investigate the bonding properties between GFRP bars and concrete. By comparing the theoretical and experimental results, it gets some significant conclusion and lays the theory foundations for the future investigation work.

Key words: GFRP bars; bonding properties; micro-mechanics; pullout test