

# 渗透型表面防护剂对水泥砼性能影响研究

张玉山<sup>1</sup>, 王静<sup>2</sup>

(1.开封市杞县水利局, 河南 杞县 475000; 2.河南工业与信息化职业学院, 河南 焦作 454150)

**摘要:** 通过表面渗透试验、吸水率试验、抗渗试验与抗冻性试验, 分析不同渗透型表面防护剂、不同处理工艺下水泥砼的性能。结果显示, 渗透型表面防护材料能有效渗透砼表面 5~12 mm, 显著改善砼表面密实程度和防水性能, 采用涂刷工艺处理后砼表面稳定性优于浸渍处理工艺; 防护材料对水泥砼性能的改善效果随持续时间的延长而逐渐劣化, 随砼强度等级的提高而提高; 防护材料均能提高水泥砼的性能, 辛基三乙氧基硅烷乳液的改善效果优于聚乙烯三乙氧基硅烷, 砼等级越高, 性能越优异; 抗冻性指标随冻融循环次数的增加呈下降趋势, 辛基三乙氧基硅烷乳液对低等级砼的改善效果更显著。建议增加吸水率指标评价渗透型表面防护材料的性能, 并结合砼性能结果对其进行优选, 推荐采用辛基三乙氧基硅烷乳液、以涂刷工艺用于砼防腐。

**关键词:** 桥梁; 水泥砼; 渗透型表面防护剂; 吸水率

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)01-0156-05

目前, 水泥砼结构在服役期间由于所处环境影响、荷载长期作用等出现了各类质量问题, 如开裂变形、表层剥落、钢筋锈蚀等, 不仅影响结构物的美观, 甚至进一步导致结构劣化, 降低其使用寿命。研究发现水和其他有害离子通过砼表面毛细孔渗入结构内部是造成砼出现上述现象的主要因素, 可通过控制水分子隔绝表面移动提高水泥砼的耐久性。众多研究指出采用硅烷处理技术能降低砼结构的病害发生频率, 提高其耐久性。例如: 文献[3]提出水泥砼有害离子侵蚀防护主要分为基本措施和附加措施, 附加措施旨在通过表面防护减少水载有害离子侵蚀; 文献[4]分析了 2 种硅烷单体对砼性能的影响, 指出硅烷单体的掺加可提高砼防水、抗渗效果, 但会在一定程度上降低砼抗压强度; 文献[6]分析了不同类型砼表面处理材料的研究进展和未来发展趋势。但对渗透型表面防护剂与水泥砼性能的研究鲜有涉及, 对其在工程中的应用有待进一步研究。该文通

过表面渗透试验、吸水率试验、抗渗和抗冻性能试验分析渗透型表面防护材料类型、表面处理工艺、砼强度等级等对水泥砼性能的影响, 为实体工程应用提供技术支持。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 原材料

结合文献[5]、[6]的研究结论, 选择憎水性强、渗透性能优良且能与水泥基材料反应生成结晶防水物质的有机硅类材料辛基三乙氧基硅烷乳液(以下简称 OTES)和聚乙烯三乙氧基硅烷(以下简称 VTEO)作为表面防护材料, 2 种材料均由德国申德欧(Sto)公司生产。水泥选择双龙水泥集团生产的 P.O32.5 和 P.O42.5 普通硅酸盐水泥(见表 1)。细集料为河砂, 细度模数为 2.7。粗集料为 5~25 mm 连续级配碎石。外加剂为上海麦斯特建材有限公司生产的高效减水剂 SP1。拌和用水为自来水。

表 1 水泥的基本性能

类型	标准稠度 用水量/%	初凝时间/ min	终凝时间/ min	比表面积/ (kg·m <sup>-2</sup> )	安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
						3 d	28 d	3 d	28 d
P.O32.5	23.2	136	217	371	合格	3.8	5.3	21.2	32.8
P.O42.5	24.2	155	221	389	合格	5.6	6.4	30.5	41.7

### 1.2 试验方案

(1) 配合比设计。为分析渗透型表面防护剂与不同结构部位砼之间的适应性, 选择 C20、C30、C40

3 种等级砼, 其中 C20 采用 P.O32.5 普通硅酸盐水泥, C30、C40 采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 配合比设计见表 2。依据 JTG E30-2005《公路工程水泥

及水泥混凝土试验规程》成型试件,养护 1 d 后脱模,放入标准养护室(温度为 20℃±2℃,相对湿度为 95%以上)中养护 28 d。为防止脱模剂对试验结果的干扰,试模成型均采用聚乙烯塑料薄膜覆盖。

表 2 水泥砼配合比设计

砼强度等级	水泥	砂	碎石	水	减水剂
C20	398	548	1 164	203	—
C30	449	526	1 271	187	—
C40	451	504	1 244	171	314

(2) 渗透型表面防护剂处理工艺。分别采用表面涂刷和浸渍两种处理方法。将养护 28 d 的试件在 40℃烘箱中烘干 48 h 后冷却至室温。用毛刷蘸取适量防护剂(OTES 和 VTEO)均匀涂刷在试件表面,用量为 500 g/m<sup>2</sup>,以 2 遍/面工艺为基础;浸渍为材料液面高于砼试件表面 2~3 cm,浸泡 5~8 min 后取出试件,使表面自然形成成膜镜面。

(3) 渗透和吸水率试验。采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件进行渗透试验和吸水率试验。渗透试验检测有效深度,将表面用防护剂处

理的砼试件中间劈裂,用游标卡尺测量有效深度,以 5 个测点的渗入深度平均值作为渗透深度。吸水率试验采用吸水质量和吸水高度指标进行分析,选择试件任意表面作为水的接触面,其余各面用油蜡密封、称重,将未密封表面与水接触,液面高于试件接触面 1~2 mm,分别在 20、40、60、80、100 和 120 min 时取出试样并称重。为便于分析,采用换算后吸水高度为最终指标进行分析。

(4) 抗氯离子渗透试验。按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》中的电通量指标进行分析,研究不同类型防护材料对砼抗氯离子渗透性能的影响。

(5) 抗冻性试验。对渗透型防护材料处理后的砼试件进行冻融循环试验,测试 50、100、150、200 次冻融循环后的质量损失,并计算其质量损失率。

2 渗透型防护材料对水泥砼性能的影响

2.1 砼表面渗透防护效果分析

OTES 和 VTEO 防护材料在不同工艺条件下对砼表面的渗透效果见图 1。

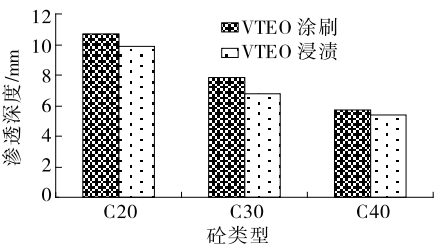
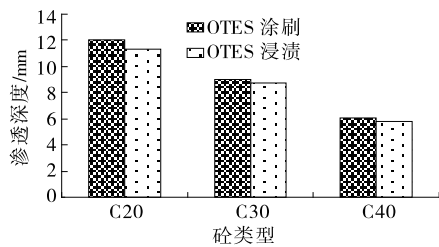


图 1 砼表面渗透深度试验结果

由图 1 可知:1) 渗透型表面防护剂 OTES 和 VTEO 能渗入水泥砼表面 5~12 mm,渗透深度与砼强度等级、防护材料类型及表面处理工艺等密切相关。OTES 和 VTEO 能通过水泥凝胶结构孔隙渗入结构内部,并与其发生一系列反应,形成一层憎水性保护膜,且材料处理工艺对渗入效果有较大影

响,采用表面均匀涂刷处理工艺时的渗入深度大于浸渍处理工艺,表面防护材料采用涂刷工艺的稳定性优于浸渍工艺。2) 在相同实施环境下,OTES 对砼的渗入深度远大于 VTEO(见图 2),OTES 对砼的渗透效果优于 VTEO,更易与水泥基材料相互融入,这与材料的物理、化学指标有关,如粘度、表面张

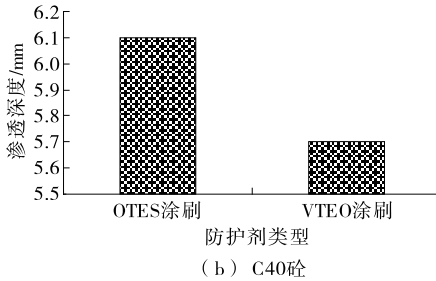
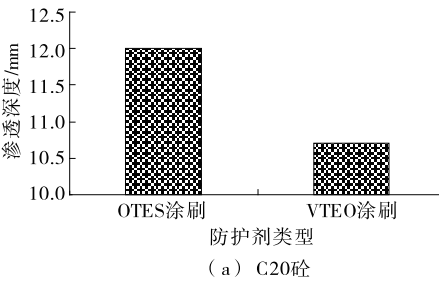


图 2 OTES 与 VTEO 材料渗透效果对比

力及分子量大小等。文献[7]指出低粘度、液体接触角大于 $100^\circ$ 或低表面张力的材料对砼的渗透防护改善效果更显著。以C20砼为例,OTES对砼的渗入深度为VTEO的1.12倍,提高约11%。

图3为涂刷和浸渍工艺下OTES与VTEO材料渗透效果差异分析。从中可见,OTES材料无论

采用哪种表面处理工艺,其对砼的渗入效果均优于VTEO,且二者之间的差异随砼强度等级的提高而降低。这是因为C40砼强度高,内部结构密实,水泥凝胶结构间微孔隙直径远低于C20砼,OTES材料在C40砼中的渗入深度低于C20砼,且与VTEO材料间的差异降低。

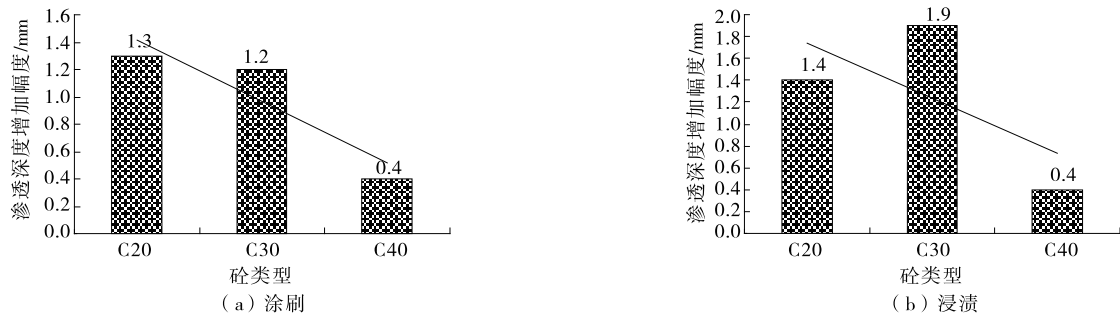


图3 OTES与VTEO材料渗透效果差异分析

## 2.2 砼吸水率影响分析

采用吸水高度评价材料的憎水能力,其值越大

材料的防水效果越差,反之效果越显著。吸水率试验结果见图4。

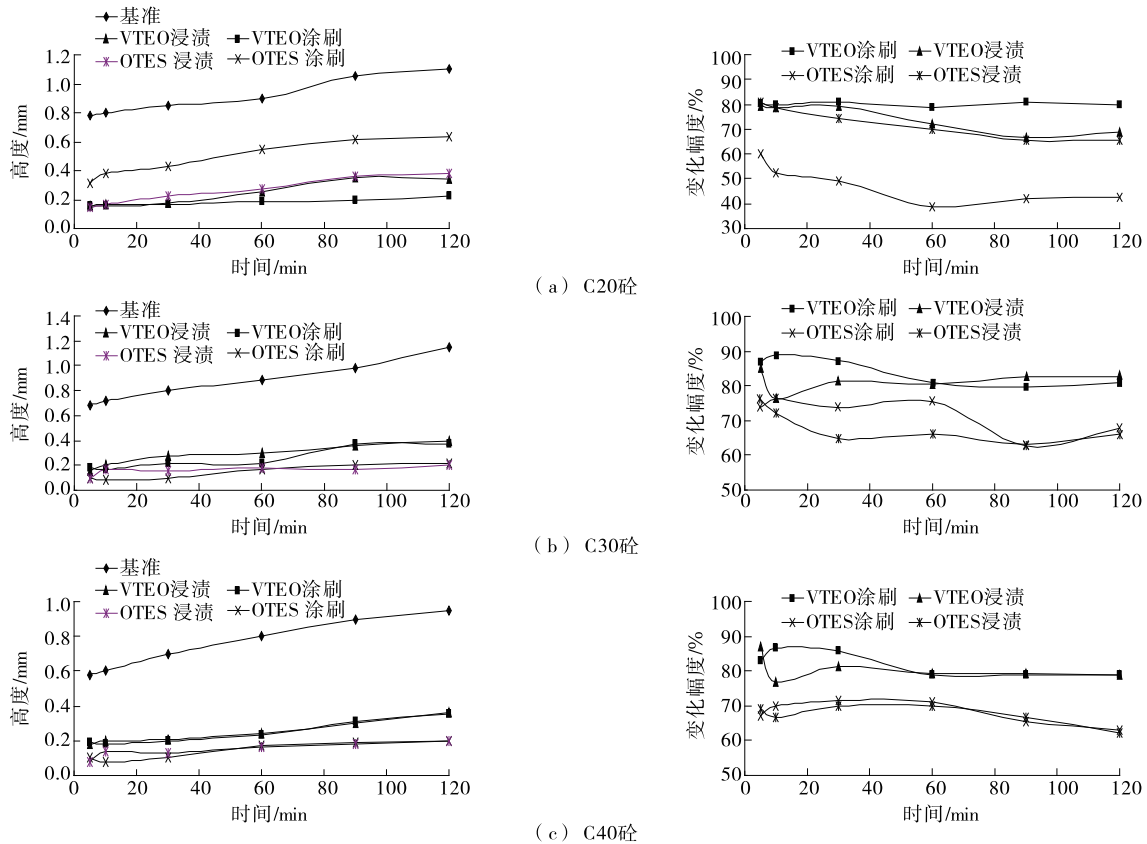


图4 OTES与VTEO材料对水泥砼吸水率的影响

由图4可知:1) 渗透型防护剂能显著降低砼吸水率,对砼吸水效果的改善幅度与防护剂类型、表面处理工艺、作用时间及砼强度等级有关。整体而言,

VTEO表面防护材料对砼吸水率的改善效果优于OTES,即对砼表面憎水、防水效果更好。以C20砼为例,VTEO涂刷工艺处理砼后,随作用时间的增

加,吸水高度降低约 80%(120 min),而 OTES 降低 42.73%。2) 砼表面防护剂处理工艺对吸水率也有一定影响,但规律不一致,且与材料类型、试验作用时间存在一定关联。以 C20 砼为例,砼表面涂刷 VTEO 后的吸水率降低效果优于浸渍工艺,而 OTES 则完全相反。对于 C30、C40 砼,随着持续时间的延长,涂刷工艺对吸水率的改善幅度逐渐下降,尤其在 80~120 min,两种处理工艺对吸水率的影响一致。如 C40 砼,120 min 时,VTEO 采用涂刷与浸渍处理后吸水率降低幅度均为 78.95%,OTES 分别为 63.16%和 62.11%;而在 50 min 时,VTEO 的改善幅度分别为 86.67%和 76.67%,OTES 分别为 70.0%和 66.67%。3) 作用时间对砼吸水率存在一定影响,随持续时间的延长而逐渐增加,尤其是未

采用防护剂处理的砼(基准组砼),说明渗透型防护剂对砼吸水率的改善效果一定程度上受作用时间的限制。OTES 和 VTEO 对砼防水性能的改善幅度受浸水长期作用而产生劣化,C20 砼对浸水时间敏感性最显著,C30、C40 影响较小;VTEO 受时间的影响低于 OTES。如对于 C20、C40 砼,OTES 采用涂刷工艺处理后,5~120 min 分别劣化 29.1%和 6.1%,VTEO 则分别劣化 13.1%和 4.6%。4) 吸水率随砼强度等级增加而逐渐下降,且砼结构强度等级越高,VTEO 防护剂对其改善效果越显著(见图 5)。这是因为砼结构强度越大,其内部较为致密,水分难以向内部渗透。对于 VTEO,无论是低等级砼还是高强砼,其均具有良好的憎水、防水效果。

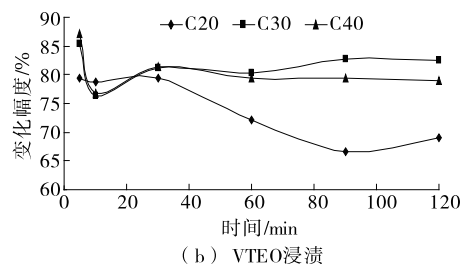
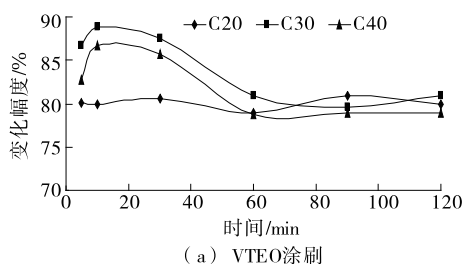


图 5 砼强度等级对吸水率的影响

### 2.3 砼抗渗性能分析

砼抗渗能力是否优良严重影响结构物的使用寿命。依据 GB/T 50082—2009 电通量法对试件进行测试,结果见图 6。

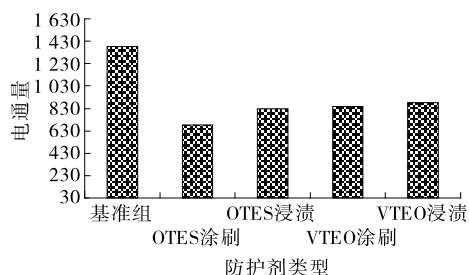


图 6 OTES 与 VTEO 材料对 C20 砼抗渗性的影响

从图 6 可知:1) 利用防护剂对砼表面处理后其电通量显著降低,通过渗透防护增强了砼抗氯离子渗透性能。OTES 涂刷砼的电通量最小,VTEO 处理的砼的电通量偏大,说明 OTES 对砼氯离子抗渗性的改善效果优于 VTEO,这与上述砼吸水率影响结果存在一定偏差。防护剂对氯离子抗渗性能的提高幅度见图 7。

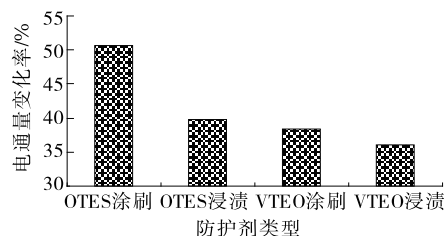


图 7 OTES 与 VTEO 材料对 C20 砼抗渗性的改善效果

如图 8 所示,砼电通量随砼强度等级的提高而显著下降,且采用涂刷处理的电通量改善效果优于浸渍处理工艺。如采用 OTES 分别以涂刷和浸渍

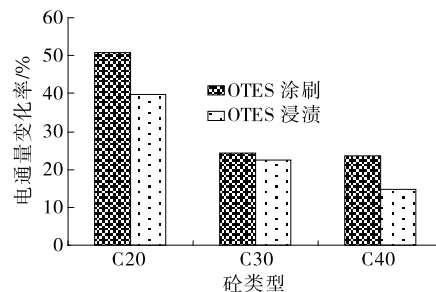


图 8 砼强度等级对抗渗性的影响

工艺处理砼表面后,C20、C40 砼的电通量提高幅度分别为 50.7%和 23.5%、39.9%和 14.7%,说明高等级砼强度高,结构较致密,在防护材料渗透 3~5 mm 后进一步提高了其表面密实、防水性能,外部水分子和氯离子渗透砼内部的可能性大大降低,也直接反映了 OTES 材料对任意强度等级砼的抗氯离子渗透性能均有明显的改善效果。

#### 2.4 砼抗冻性能分析

采用 GB/T 50082—2009 快冻法对 100 mm×100 mm×400 mm 试件进行试验,通过试件质量损失率评价渗透型防护剂对砼抗冻性能的影响。C20 砼经受 200 次冻融循环后的质量损失见图 9。

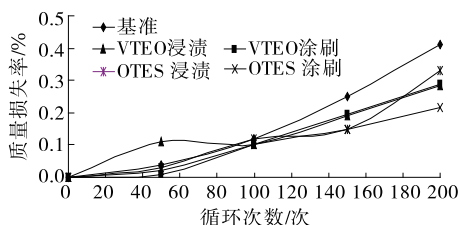


图 9 OTES 与 VTEO 材料对 C20 砼抗冻性的影响

由图 9 可知:1) 渗透型防护剂显著改善了砼抗冻性能,且随冻融循环次数的增加,改善效果愈显著,尤其是 OTES(涂刷工艺),经过 200 次冻融循环后,质量损失率提高 47.6%(与基准组对比);VTEO 的质量损失率提高约 30.0%。这是因为渗透型防护剂具有优异的防水效果,能在砼中形成 Si—O—Si 长链,阻碍水分渗透和转移。由于乳液 OTES 的分子结构较复杂、分子量大,与聚合物相比具有一定优势。2) 冻融循环显著劣化了砼性能,随冻融循环次数的增加,质量损失率大幅提高。说明经数次冻融后砼内部微裂缝出现扩展,内部损伤逐渐积累,在冰冻膨胀应力作用下,砼出现部分脱落,同时引发毛细现象,促使试件不断从外部吸水,如此循环造成质量不断损失,抗压强度不断下降。

如图 10 所示,质量损失率随砼等级的提高而显著下降,OTES 对抗冻性的改善幅度降低。说明砼内部结构密实度、强度及内部孔隙结构对抗冻性起主导作用。通过渗透型表面防护剂处理,与水泥基材料发生化学反应,生成一定成膜效应的结晶层,改善砼表面密实度,在表面主要起到排水、防水作用,对低强度等级砼(C20 类型)的改善效果更显著,对于高强度等级砼抗冻性的改善效果稍弱。采用涂刷工艺对砼表面的成膜效果更优,对其抗冻性能的改

善更好,与上述结果一致。

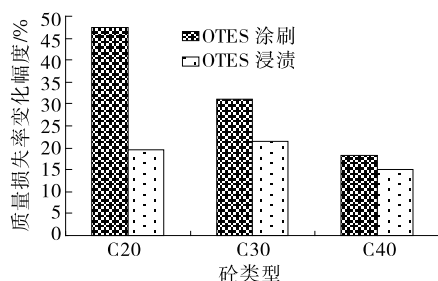


图 10 砼强度等级对抗冻性的影响(200 次冻融循环后)

### 3 结论

(1) 渗透型防护剂能有效作用于砼表面 5~12 mm,渗透深度与材料类型、表面处理工艺、砼强度等级等有关;采用涂刷工艺处理砼表面的稳定性优于浸渍工艺,渗透深度随砼强度等级提高而显著下降;乳液 OTES 的渗透效果优于聚合物 VTEO。

(2) 渗透型防护剂通过作用于砼表面与其发生偶联反应形成憎水性保护膜,大幅度降低砼吸水率;聚合物 VTEO 对吸水率的改善幅度优于乳液 OTES,其改善效果随持续时间的延长而逐渐劣化,随砼强度等级的提高而提高。

(3) 采用渗透型防护剂处理后,砼的抗渗和抗冻性能得到显著提高,乳液 OTES 的改善效果优于聚合物 VTEO,砼等级越高,其性能越优异;抗冻性指标随冻融循环次数的增加呈下降趋势;OTES 对低等级砼(C20)抗冻性的改善幅度更优异。

#### 参考文献:

- [1] 赵铁军.渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 章岩,王起才,江林.水泥基材料表面渗透防护材料技术研究进展[J].材料导报,2014,28(15).
- [3] 朱杨荣,张继德,杨欢,等.室温自交联杂化硅丙乳液的制备及表征[J].材料科学与工程学报,2006,24(2).
- [4] 赵陈超,蔡文玉,俞剑峰.高渗透型有机硅防水剂[J].上海涂料,2007,45(12).
- [5] 吴平,Heinz Geich.硅烷膏体浸渍剂在保护混凝土中的实际应用[J].混凝土,2003,12(10).
- [6] 李化建,易忠来,谢永江.混凝土结构表面硅烷浸渍处理技术研究进展[J].材料导报,2012,26(3).
- [7] 夏小丹,张雄,张永娟.建筑用水性有机硅憎水剂的制备及性能研究[J].新型建筑材料,2010,37(11).
- [8] JTGE30—2005,公路工程水泥及水泥混凝土试验规

(下转第 164 页)

这与试验结果相违背(试验结果表明界面剪应力在胶层厚度为4 mm时达到最小值,胶层厚度大于4 mm时界面剪应力又开始增大)。所以式(4)只适用于加固砼梁粘结胶层厚度不大于4 mm时的界面剪应力计算。

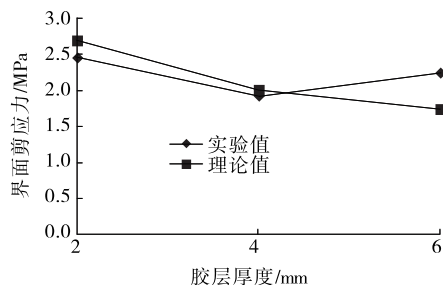


图7 界面剪应力与胶层厚度的关系

通过对实测数据的拟合,引入粘结胶层厚度综合系数 $\alpha$ 的概念,使公式适用于胶层厚度大于4 mm的情况:

$$\tau_1(x) = \alpha \tau(x)$$

$$\alpha = \left(\frac{t_a}{4}\right)^{0.628}$$

式中: $\alpha$ 为胶层厚度综合参数; $t_a \geq 4$  mm。

#### 4 结论

(1) 随着碳纤维板初始预应力水平的增加,加固梁板端界面剪应力增加,界面剪应力与初始预应力大小成正相关关系。

(2) 粘结胶层厚度对加固梁板端界面剪应力有显著影响,胶层厚度从2 mm增加到4 mm时,界面剪应力减小,相应的有效传递长度减小;胶层厚度增加到6 mm时,界面剪应力反而增加,传递长度也相应增加。

(3) 根据试验数据对比分析了现有界面剪应力理论计算公式的缺陷,论证了式(4)在胶层厚度为2和4 mm时计算结果的准确性,根据试验结果拟合了胶层厚度为6 mm时的界面剪应力理论计算公式。

#### 参考文献:

- [1] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3).
- [2] Al-Emrani M, Kliger R. Analysis of interfacial shear stresses in beams strengthened with bonded prestressed laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(4-5).
- [3] Woo S K, Nam J W, Kim J H, et al. Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12).
- [4] Zhishen Wu, Hedong Niu. Shear transfer along FRP-concrete interface in flexural members[J]. Journal of Material, Concrete Structures and Pavements, JSCE, 2010, 49(662).
- [5] Wu Z, Yin J, Niu H. Some Recent achievements in FRP bonding techniques[A]. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering[C]. 2001.
- [6] 郭馨艳, 黄培彦, 郑小红. 预应力FRP加固RC梁的受力分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7).
- [7] 岳清瑞, 李庆伟, 杨勇新. 预应力碳纤维布放张时受力性能分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(4).
- [8] Triantafillou T C, Deskovic N. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(7).
- [9] 牛赫东, 吴智深. 预应力FRP纤维布粘结补强技术中的界面剪切应力传递[A]. 全国土木工程用纤维增强复合材料[C]. 2002.
- [10] Mazumdar S K, Mallick P K. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites[J]. Polymer Composites, 1998, 19(2).

收稿日期: 2017-04-12

(上接第160页)

程[S].

[9] GB/T 50082-2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].

[10] Lapin J, Gabalcova Z. Solidification behaviour of TiAl-based alloys studied by directional solidification technique[J]. Intermetallics, 2011, 19(6).

[11] 张鹏, 赵铁军, 戴建国, 等. 硅烷改性混凝土防水与抗氯离子性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3).

[12] 李兵, 陈双庆. 株洲建宁大桥砼防腐涂装设计与施工[J]. 公路与汽运, 2008(4).

收稿日期: 2017-03-21