

文章编号：1000-4750(2004)04-0133-06

# 高温后新旧混凝土粘结的剪切性能研究

郭进军<sup>1</sup>，宋玉普<sup>1</sup>，张雷顺<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；2. 郑州大学环水学院，河南 郑州 450002)

**摘 要：**对先粘结后高温与先高温后粘结两种类型的 129 块 Z 形新旧混凝土粘结试件进行了直剪试验，主要考察了温度(常温到 900)、冷却方式、界面粗糙度和界面剂对粘结面剪切性能的影响。在此基础上，得到了粘结面的剪切滑移曲线，给出了相应的统一计算公式，并建立了先高温后粘结类型的神经网络预测模型，较为系统地对高温后新旧混凝土粘结面的剪切性能进行了研究，以供工程参考。

**关键词：**混凝土；剪切性能；高温；新旧混凝土粘结；神经网络

中图分类号：TU37 文献标识码：A

## ON SHEAR BEHAVIOR OF NEW-OLD CONCRETE BONDING AFTER EXPOSURE TO HIGH TEMPERATURE

GUO Jin-jun<sup>1</sup>，SONG Yu-pu<sup>1</sup>，ZHANG Lei-shun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China;

2. Department of Environment & Conservation Engineering, Zhengzhou University, Henan Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** This paper presents the direct shear tests of 129 Z shape new-old concrete bond specimens to study bond shear strength. Two types of specimen are considered: bonding before heating and heating before bonding. The influencing factors such as temperature (25 -900), cooling way, interface roughness and interface adhesive agent on bond shear property are studied. Based on the tests, the paper presents the shear stress ~slipping curves of bonding interface and the corresponding unified calculation formula. In addition, a neural net predication model is established for the heating before bonding type specimens. The present systematic investigation of bond surface behavior of new-old concrete after exposure to high temperature may provide references for engineering application.

**Key words:** concrete; shear property; high temperature; new-old concrete bond; neural net

### 1 引言

利用新旧混凝土粘结对老化病害混凝土结构物进行修补加固具有施工简单、经济有效、维持结构原貌的优点。新旧混凝土粘结面的性能是决定加固后结构能否较好整体工作的关键，从而受到广泛的关注。常温下混凝土粘结面的力学性能及粘结机

理国内外已进行了大量的研究<sup>[1~3]</sup>，而针对高温后新旧混凝土粘结面性能的研究则基本上属于空白。因此，本文针对高温前后混凝土粘结的剪切性能进行了试验研究，考虑两种类型：一是具有粘结面的结构在经历高温后粘结面性能的研究，主要是来模拟具有粘结层的混凝土结构在高温环境下工作，或

收稿日期：2002-12-15；修改日期：2003-02-25

基金项目：国家自然科学基金资助项目(59778045)

作者简介：郭进军(1972)，男，郑州市人，郑州大学讲师，博士生，从事结构工程研究(E-mail: guojinjun@zzu.edu.cn)；

宋玉普(1944)，男，本溪市人，教授，博士生导师，从事结构工程研究；

张雷顺(1950)，男，郑州市人，教授，博士生导师，从事结构工程研究

是遭受火灾的情况,也是对混凝土粘结面力学性能研究的完善;二是结构经历高温后利用混凝土粘结进行加固时粘结面性能的研究,主要是来模拟既有结构遭受火灾后的修补加固。

受剪是新旧混凝土粘结面最为薄弱的环节之一,可以用来表征粘结面的受力性能。本文分先粘结后高温和先高温后粘结两种类型对 129 块 Z 形混凝土试件进行了直剪试验,主要考察了温度、冷却方式、粗糙度和界面剂的影响,给出了相应的统一计算公式,并针对先高温后粘结类型建立了神经网络预测模型,较为系统的对高温后混凝土粘结面的剪切性能进行了研究,供工程参考。

## 2 试验简介

旧混凝土为 2000 年 3 月浇制的一批混凝土试件,采用 525# 普通硅酸盐水泥,设计强度为 C35。根据混凝土结构加固技术规范第 2.2.4 条<sup>[4]</sup>,新混凝土设计强度选用 C40,采用 525# 普通硅酸盐水泥,中粗河砂,细度模数 2.6,粗骨料的粒径为 20mm。考虑到试件形式应尽可能接近加固粘结面剪力的传递模式,两类新老混凝土粘结试件均采用 Z 形抗剪试件<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。为方便起见,将先粘结后高温试件记为 A 类,先高温后粘结试件记为 B 类。

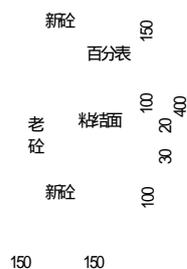


图 1 Z 型试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of Z shape specimen

对于 A 类试件,将旧混凝土切割成  $150 \times 100 \times 75\text{mm}$  的小块,在其  $150 \times 100\text{mm}$  的表面上随机凿毛,然后将处理面沿厚度 100mm 方向置于试模轴线位置,如图 1,新混凝土浇入图中相应位置,试件成型后,24 小时脱模,在 20 左右的气温下养护半个月,然后自然养护。一段时间后,将 Z 形试件放入箱式电阻炉中快速加热,达到设定温度后,恒温一小时后取出。炉内升温曲线与我国《GB9978-88 建筑构件耐火试验方法》中所规定的

标准建筑火灾升温曲线见图 2。为了模拟真实情景,取出的试件一部分放置在空气中自然冷却至室温,另一部分采用喷水方法进行冷却。

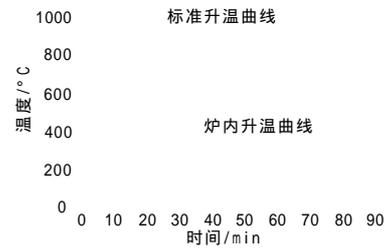


图 2 升温曲线

Fig.2 Heating-up curve

对于 B 类试件,先将切割成  $150 \times 100 \times 75\text{mm}$  的旧混凝土小块放入电阻炉中加热,加热方法及冷却方式和 A 类试件相同,然后对冷却至常温的试件表面进行粗糙处理,凿毛深度较浅,凿毛后露出的仍是火烧层,最后的浇筑方法与 A 类试件相同。

两类试件的粗糙度处理分为 型面、型面、型面。型面为刷毛面,型面为人工轻凿面;型面仍为人工凿毛面,只是粗糙度要大一些。采用无界面剂、同新混凝土相同水灰比的水泥净浆、掺 10%U 型膨胀剂的水泥净浆(以下简称水泥膨浆)三种界面剂情况,涂刷厚度 2~3mm。粘结面的剪应力近似以名义剪应力表示,即  $t = V / A$ ,  $V$  为粘结面剪力(N),  $A$  为粘结面面积( $\text{mm}^2$ )。

## 3 A 类试验结果分析

### 3.1 粘结面剪切强度

所有 A 类 Z 型粘结试件均从粘结面处被剪断,试验结果见表 1,表中试验数据均为每组 3 个试件的平均值。

### 3.2 影响因素分析

#### (1) 温度

根据表 1 中的试验数据,可得到在自然冷却、平均灌砂深度为 1mm、界面剂为水泥膨浆情况下,不同温度对新老混凝土粘结剪切强度的影响图,见图 3。根据图中试验数据点的分布情况,在 25 到 800 范围内,新老混凝土粘结的抗剪强度随温度的变化可用式(1)计算。

$$t = \frac{0.0834}{f_{cu0} + 1 + 4.0853e^{0.0124(T-25)} \times 10^{-4}} \quad (1)$$

其中  $t$  为粘结面的剪应力(MPa),  $f_{cu0}$  为老混凝土立方体抗压强度(MPa),  $T$  为温度( )。拟合公式曲线绘于图 3,与试验结果吻合较好,公式的相关系数

$r=0.878$ ，置信度 1% 的相关系数临界值为 0.834，可见回归公式相当显著。

表 1 A 类新旧混凝土粘结试件剪切试验结果

Table 1 Shear test results of A type specimens

组号	温度( )	试件简况	抗剪强度(MPa)	新砼强度(MPa)
A - 1	常温		3.435	55.5
A - 2	200		3.295	53.6
A - 3	300	自然冷却	3.255	55.5
A - 4	400	型面	3.064	50.2
A - 5	500	水泥膨浆	2.864	48.7
A - 6	600		2.428	50.2
A - 7	700		2.110	53.6
A - 8	800		0.811	53.6
A - 3C	300	喷水冷却	3.340	53.6
A - 5C	500	型面	2.363	53.6
A - 7C	700	水泥膨浆	1.095	53.6
A - 3 <sub>1</sub>	300	无界面剂	2.891	55.5
A - 5 <sub>1</sub>	500	自然冷却	2.507	48.7
A - 3 <sub>2</sub>	300	水泥净浆	3.024	55.5
A - 5 <sub>2</sub>	500	自然冷却	2.994	48.7
A - 1	常温	型面	2.295	50.2
A - 3	300	自然冷却	2.142	55.5
A - 5	500	水泥膨浆	2.097	48.7
A - 1	常温	型面	3.786	50.2
A - 3	300	自然冷却	3.513	55.5
A - 5	500	水泥膨浆	3.117	48.7
AZ - 1	常温		4.748	53.6
AZ - 2	常温	新混凝土	4.476	48.7
AZ - 3	常温	整体试件	4.738	55.5
AZ - 4	常温		4.670	50.2

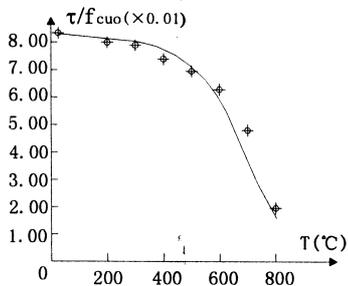


图 3 温度对新旧混凝土粘结剪切强度的影响

Fig.3 The influence of temperature

从图 3 中可以看到，新旧混凝土粘结剪切强度随所受温度的升高而降低，开始下降速度较慢，而

后下降的较快。常温至 400 范围内，剪切强度下降的很少，在 11% 以内；700 比常温下降近 40%，而 800 时下降量达到 80%，强度已基本丧失。

不同温度下粘结面的剪应力~滑移曲线见图 4，随着温度的升高，各曲线的峰值滑移量逐步增加，在 300 以内时，相差量甚小，500 时峰值滑移量比常温时增大了近 30%，而 700 时的峰值滑移量为常温时的 12.7 倍。由于试件在达到破坏荷载后从粘结面脆性断开，故无法测得曲线的下降段。

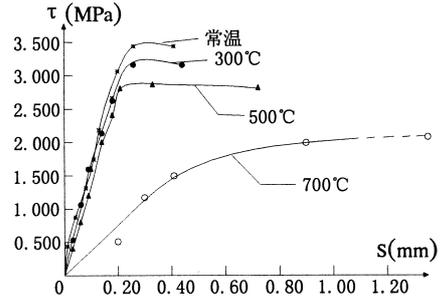


图 4 不同温度时粘结面的剪应力~滑移曲线

Fig.4 Shear stress~slipping curves for different temperatures

(2) 冷却方式

总体上喷水冷却方式使试件的剪切强度下降剧烈。300 时，喷水冷却后的剪切强度比自然冷却的要稍大一些，这是因为在 300 以前，试件主要是失去内部的游离水，当喷水冷却时，相当于高温水蒸气养护一样，促进水泥颗粒的进一步水化，有利于粘结强度的提高。500 后，喷水冷却的剪切强度比自然冷却的降低了约 17.5%；700 后，降幅则达 50% 左右。

(3) 粗糙度

在一定温度下，粘结面的抗剪强度随着粗糙度的增加而提高，但是，当温度升高时，粗糙度对粘结强度的提高幅度在逐渐减缓。从试验数据上看，在平均灌砂深度约为 1.5mm 以下时，粘结强度的提高和粗糙度的增加呈线性关系，但当超过 1.5mm 后，则近似为一水平直线，即剪切强度基本维持不变。这是符合实际情况的，因为粘结面的抗剪强度不可能随粗糙度的提高而无限制的增大。对于随机凿毛面，可以近似的看作有限个圆锥体组成的表面，如果将平均灌砂深度与圆锥体深度相比较，在灌砂深度为 1.5mm 时，相应的圆锥体形坑的深度约为 4.5mm，这基本是和混凝土结构设计规范中对叠合板所规定的最小凹凸深度 4mm 是一致的<sup>[6]</sup>。

(4) 界面剂

从表中数据可知，在高温下采用合适的界面剂

能够较好的提高粘结强度，但是提高的幅度却比常温下的要小的多<sup>[7]</sup>，水泥膨浆的效果也随着温度的升高而减弱，在 500 时，水泥膨浆的提高作用已经低于水泥净浆。

3.3 剪切强度的多因素统一计算公式

考虑到粘结面的破坏主要是由粘结的两相材料中的弱者控制，故用  $I = t / f_{cu0}$  来表示粘结面的相对剪切强度。根据上述试验结果和各种因素对新旧混凝土粘结面剪切强度的影响规律，在自然冷却下，粘结面的剪切强度可以用统一的公式表示。

$$\begin{cases} I = 0.048b - a_1T^2 + (g - a_2T)w \\ w = \begin{cases} h, & h \leq 1.5 \\ 1.5, & h > 1.5 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

其中： $a_1, a_2$  为温度影响系数； $b$  为常温下界面剂的影响系数； $g$  为常温下粗糙度的影响系数； $w$  为界面粗糙度表征系数； $h$  为平均灌砂深度(mm)。

表 2 温度因素的比较

Table 2 Comparison based on temperature

温度	$I_{试}$	$I_{计}$	$d$
25	0.08337	0.08339	0.01%
200	0.07998	0.08169	2.15%
300	0.07900	0.07592	3.90%
400	0.07437	0.07190	3.32%
500	0.06951	0.06782	2.43%
600	0.05893	0.05670	3.78%
700	0.05121	0.05239	2.29%

表 3 粗糙度因素的比较

Table3 Comparison based on roughness

温度	界面类型	$h(mm)$	$I_{试}$	$I_{计}$	$d$
25	型	0	0.0557	0.0555	0.01%
	型	1.012	0.0834	0.0833	0.01%
	型	1.958	0.0929	0.0967	5.24%
300	型	0	0.0520	0.0540	3.82%
	型	1.042	0.0790	0.0759	3.90%
	型	2.101	0.0853	0.0856	0.36%
500	型	0	0.0509	0.0507	0.01%
	型	0.982	0.0695	0.0671	3.48%
	型	1.828	0.0757	0.0756	0.01%

根据试验数据的拟合可得到： $a_1=1.9248 \times 10^{-8}$ ， $a_2=2.2825 \times 10^{-5}$ ， $g=0.0279$ ； $b$  的取值随界

面剂的不同而不同：无界面剂情况下取 1.0；水泥净浆时取 1.15；界面剂为水泥膨浆时取 1.05。

利用(2)式对温度因素和粗糙度因素的计算结果与试验结果比较见表 2 和表 3，其中  $d$  为相对误差。比较表明：拟合公式的计算结果与试验结果吻合良好，具有较高的准确度，可供工程参考。

4 B 类试验结果分析

4.1 破坏形态

B 类 Z 形新旧混凝土粘结试件的破坏形态和旧混凝土所经历的温度有关。第一种破坏形态发生在 600 以下，试件沿粘结面脆性断开；第二种破坏形态发生在 600 以上，破坏面一般发生在旧混凝土内部，约有 1cm~2cm 的旧混凝土被扯断，而新旧混凝土粘结面保持完好。经受 900 高温的旧混凝土试块已破碎，不能再进行试验。

4.2 试验结果

新旧混凝土粘结剪切的试验结果见表 4。

表 4 B 类新老混凝土粘结试件剪切试验结果

Table 4 Shear test results of B type specimens

组号	温度( )	试件简况	抗剪强度(MPa)	新砼强度(MPa)
B - 1	常温		2.965	53.7
B - 2	200		2.952	53.7
B - 3	300		3.098	56.0
B - 4	400	喷水冷却	2.901	53.7
B - 5	500	型面	2.682	51.1
B - 6	600	水泥膨浆	2.698	53.7
B - 7	700		2.569	56.0
B - 8	800		2.823	56.0
B - 5	500	型面	2.393	51.1
B - 5	500	型面	3.522	51.1
B - 5 <sub>1</sub>	500	无界面剂	2.133	51.1
B - 5 <sub>2</sub>	500	水泥净浆	2.527	51.1
B - 3C	300	自然冷却	3.290	56.0
B - 5C	500	型面	2.995	53.7
B - 7C	700	水泥膨浆	2.994	56.0
BZ-1	常温		4.848	56.0
BZ-2	常温	新混凝土	4.419	51.1
BZ-3	常温	整体试件	4.776	53.7

4.3 影响因素分析

(1) 温度

由表 4 中的试验数据,可以得到在喷水冷却、型处理面、水泥膨浆条件下,旧混凝土经历的温度与新旧混凝土粘结剪切强度之间的关系图,见图 5。从图中数据点的分布可以看到,在常温到 400°C,粘结面的剪切强度变化的很小,基本上相同;500°C 后,剪切强度稍有下降,但降低的幅度较小;800°C 时,粘结剪切强度逐步上扬,而这时试件的破坏面发生在旧混凝土内部,用名义剪应力公式来计算不合适,结果偏高。不同温度下的剪切滑移曲线见图 6,可见高温对材料的损伤增加了粘结面的塑性滑动。

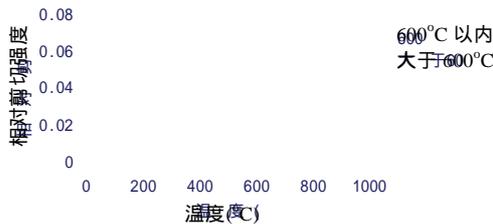


图 5 温度对抗剪强度的影响

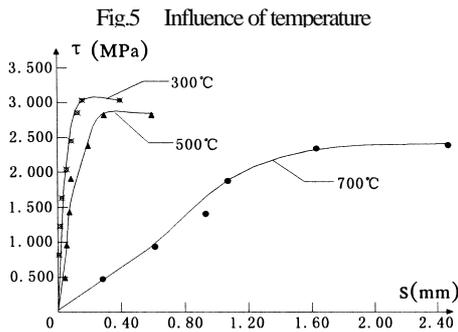


图 6 不同温度时粘结面的剪应力~滑移曲线

Fig.6 Shear stress~slipping curves for different temperature

在实际工程中为了避免旧混凝土本体破坏,当结构所受温度超过 600 时,应先探测火伤深度,然后将火伤层剔除后再进行粘结修补加固,若构件尺寸太小时,则不宜用该法修补。

(2) 冷却方式

表中数据表明,自然冷却对粘结面强度的损害比喷水冷却的要小。两种冷却方式在 300 以内的影响差别不大;500 ~700 时,自然冷却的粘结面剪切强度要比喷水冷却的高约 12%~16.5%。

(3) 粗糙度

试验表明了粘结前对火烧混凝土进行表面凿毛处理是非常必要的,它对保证粘结面的质量和提高粘结面的强度是十分显著的,粗糙度与粘结剪切强度基本呈线性关系。

(4) 界面剂

从表中数据看到,新旧混凝土粘结的剪切强度随着无界面剂,水泥净浆和水泥膨浆依次提高,尤其是相对于无界面剂时的提高更为显著,而水泥膨浆的作用和水泥净浆的相差不大。因此火烧混凝土修补前在旧混凝土表面刷一层界面剂是十分必要的,考虑到施工效果和施工的简便,建议采用与新混凝土水灰比相同的水泥净浆。

4.4 神经网络模型模拟

(1) 参数预报神经网络模型的建立和预报

针对 B 类试验情况,本文尝试利用神经网络对高温后新旧混凝土粘结加固剪切性能进行了计算模拟和预报<sup>[8]</sup>,编制了 BP 神经网络算法程序,主要考察温度(25 ~800)、冷却方式、粗糙度和界面剂对粘结剪切强度的影响。经过调整试算优化后,选择网络结构为 4-8-1,学习率为 0.05,网络误差为 0.0025。

表 5 是利用训练好的网络,对 8 组试验数据进行预测的结果,表中  $t_t$  表示试验值, $t_c$  表示预报值。可见,预报值和试验值吻合的非常好,因此本文建立的神经网络模型程序能够较好的预测粘结面的剪切强度,精度满足工程应用的要求。

表 5 BP 网络预报结果

Table 5 Prediction results of BP net

试件编号	$t_t$	$t_c$	$t_c / t_t$
B - 1 - 3	2.913	3.025	1.0384
B - 2 - 1	3.162	3.011	0.9522
B - 4 - 2	3.099	2.826	0.9119
B - 6 - 2	2.752	2.828	1.0276
B - 5C - 1	3.103	3.008	0.9694
B - 5I <sub>1</sub> - 3	2.200	2.214	1.0064
B - 5I <sub>2</sub> - 2	2.500	2.410	0.9640
B - 5 - 2	3.652	3.343	0.9154

注: $t_c / t_t$  的平均值为 0.973;样本方差为 0.0421;变异系数为 0.0433

(2) 扩展预报

如上所述,本文建立的参数预报神经网络模型可以用来分析各种因素变化对粘结面剪切强度的影响,只需给模型输入相应的参数组合即可。

为考察粗糙度对粘结面剪切强度的影响,设定温度分别为 300、500、600,采用喷水冷却,界面剂为水泥膨浆,平均凿砂深度分别取 0.10mm, 0.75mm, 1.50mm, 2.00mm 时对粘结面剪切强度进行预报,预报值和试验值如图 7 所示。可以看到在

各温度下, 剪切强度随粗糙度的增加而增加, 但是增加斜率随温度升高而逐渐减小, 这同试验数据的规律是一致的。

为了考察界面剂对粘结剪切强度的影响, 可设定温度为 300, 400, 500, 600, 喷水冷却, 平均灌沙深度 0.80mm 时进行预报, 网络预报值见图 8。从图中可看到, 预报值和试验值的基本规律相一致, 高温削弱了界面剂的作用。

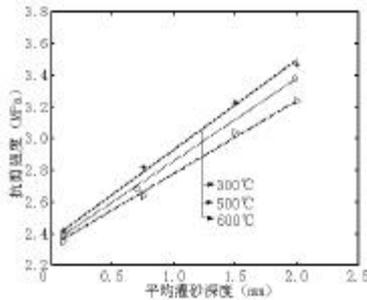


图 7 基于粗糙度因素的预报值

Fig.7 Prediction value based on roughness

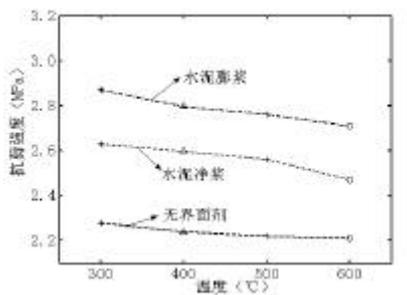


图 8 基于界面剂因素的预报值

Fig.8 Prediction value based on interface agent

## 5 结论

本文通过对 A、B 两类 Z 形新旧混凝土粘结试件的剪切试验, 得到以下结论:

(1) 先粘结后高温试件的剪切强度随温度的升高而迅速降低, 受温度的损伤较大。本文给出了包含多种因素在内的粘结面抗剪强度统一计算公式, 见式(2), 可供工程参考。

(2) 先高温后粘结试件的剪切强度受温度影响较小, 在火烧混凝土的残余强度有保证的情况下, 利用新混凝土对烧伤建筑物进行修补加固是经济可行的。

(3) 针对先高温后粘结试件建立了新旧混凝土粘结加固剪切性能预报的神经网络模型。预报精度较高, 能够满足工程设计和应用的要求。

(4) 对于火烧混凝土构件的粘结修补, 旧混凝土灼伤层的性能是粘结质量的关键。建议在 600

以下时, 不必完全凿除表面的灼伤层, 只需一般凿毛后即可粘结; 在 600 以上时, 则应先探测火伤深度, 然后将火伤层完全剔除后再进行修补。

## 参考文献:

- [1] 赵志方. 新老混凝土的粘结机理和测试方法[D]. 大连: 大连理工大学, 1998.  
Zhao Zhifang. Adherence mechanics and test method for new-old concrete [D]. Dalian: Ph.D Dissertation of Dalian University of Technology, 1998. (in Chinese)
- [2] 刘健. 新老混凝土粘结的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.  
Liu Jian. On mechanical behavior of new-old concrete bonding[D]. Dalian: Ph.D Dissertation of Dalian University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [3] F H Wittman. Adherence of young on old concrete[M]. 1994.
- [4] CECS25:90 混凝土结构加固技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1991.  
CECS25:90, Technical specification for concrete structure reinforcement [S]. Beijing: Chinese Plan Press, 1991. (in Chinese)
- [5] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
Guo Zhenhai. Strength and deformation of concrete: test foundation and constitutive relationship[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [6] GB50010-2002. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
GB50010-2002. Concrete Structure Design Code[S]. Beijing: Chinese Construction Industry Publisher, 2002. (in Chinese)
- [7] 王少波, 郭进军, 等. 界面剂对新老混凝土粘结的剪切性能的影响[J]. 工业建筑, 2001, 11: 35-38.  
Wang Shaobo, Guo Jinjun, et al. Effect of bond agents on the shear property of new-old concrete bonding[J]. Journal of Industrial Construction, 2001, 11: 35-38. (in Chinese)
- [8] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.  
Xing Wenxun, Xie Jinxing. Modern optimization calculation methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)