

先装拔出法检测配筋 RPC 抗压强度试验研究

卜良桃, 宋扬逸

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 本试验采用先装拔出法检测配筋活性粉末混凝土(RPC)强度。试件分为 RPC120, RPC150, RPC180 三种强度等级, 每个强度等级包含 4 组配有纵筋和箍筋的 RPC 试件(每组 RPC 试件的纵筋间距不相同, 分别为 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm)和 1 组无配筋的素 RPC 试件以及相应的立方体抗压试块, 箍筋间距一致。采用圆环支承式的拔出仪进行试验, 并利用最小二乘法进行试验数据拟合以及回归分析。试验表明, 拔出力与 RPC 试件的强度呈良好的线性关系。当纵筋间距小于 50 mm 时其拔出力明显大于素 RPC 试件的拔出力; 当纵筋间距大于 75 mm, 其拔出力与素 RPC 试件的拔出力几乎相当。本文还从破坏机理的角度分析了钢筋对拔出力的影响, 为今后的试验研究和工程实践提供参考依据。

关键词: 先装拔出法; 配筋 RPC 柱; 最小二乘法; 回归分析; 破坏机理

中图分类号: TU 192

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0192-06

Experiment of technical specification for test of reinforced RPC column strength by cast-in-place pull-out method

BU Liangtao, SONG Yangyi

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: An experiment using cast-in-place pull-out method is conducted to test the strength of reinforced reactive powder concrete (RPC) columns. The components are divided into 3 strength grades: RPC120, RPC150, and RPC180. Each strength grade level consists of 4 RPC columns installed with longitudinal reinforcements and stirrups and 1 plain RPC column without steers which contain a corresponding number of test cubes. All components have the same stirrup spacing. A circle bracing device was used in this experiment. The least square method is used to fit the experimental data and do regression analysis. Text results have indicated that there is significant liner correlation between the pull-out force and the compressive strength of reinforced RPC columns. The pull-out force of the reinforced RPC column is greater than the plain RPC column when the longitudinal reinforcement spacing is less than 50mm. But when the longitudinal reinforcement spacing is more than 75mm, the pull-out force of them is the same. This paper has analysed the influence of steels on the pull-out force from the angle of failure mechanism, and also provides reference for experimental investigations and filed applications.

Key words: cast-in-place pull-out method; reinforced RPC columns; the least square method; regression analysis; failure mechanism

活性粉末混凝土(简称 RPC)是一种超高强度的水泥复合基材料^[1]。较之传统的高强混凝土, RPC 剔除了其中的粗骨料, 添加了硅粉、矿灰等活性粉末, 具有强度高、韧性好、自重轻、耐久性极佳等优点^[2]。由于 RPC 具有优异的物理力学性能和耐久性能, 自问世以来该材料越来越受到各国工程界的青睐, 并逐渐应用于高耸建筑、大跨桥梁、综合管网、国防设施等领域^[3-4]。

虽然现今 RPC 的应用愈发广泛, 但是对其现场检测方法的研究目前还很少, 故选择一种有效

的 RPC 强度现场检测方法成为了亟需解决的问题。因此, 笔者尝试将普通混凝土的无损检测技术运用于 RPC 强度的现场检测。目前, 我国工程界常用的普通混凝土无损检测方法有 5 种^[5], 拔出法是其中的一种, 即通过拔出仪检测混凝土中锚固件拔出力来推定混凝土强度的方法。较之回弹法、钻芯法等等其余几种检测技术, 该法具有费用低廉、测试方便、对结构损伤低等优点; 较之预留立方体抗压试块, 此法是针对结构本身进行检测, 被测之处与结构处于完全相同的环境和受荷状况,

收稿日期: 2018-03-15

修改稿日期: 2019-03-13

基金项目: 国家火炬计划(2013GH561393); 国家自然科学基金项目(51278187)

第一作者: 卜良桃(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构检测与加固研究。E-mail: plt63@126.com

更加合理。大量试验研究证明, 此法误差小, 可靠度较高^[6]。故本文采取先装拔出法对 RPC 的强度检测进行试验研究, 探索此法对 RPC 的适用性及其规律。

国家既有拔出法规范适用范围只涵盖抗压强度 80 MPa 以下的素混凝土^[7], 在超高强度混凝土领域还缺乏进一步的研究。过去的拔出法研究为了追求准确性, 一般都选择远离钢筋。然而实际工程中很多构件的配筋都是很密集的, 无法简单地回避。因此, 笔者选用超高强度配筋 RPC 试件为试验对象, 力求与实际工程更吻合, 在探究拔出法对 RPC 适用性的同时, 考虑构件中纵筋间距对拔出力的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料及仪器设备

试验材料: 木模板、模板夹、直径 25 mm 的 HRB335 级钢筋(试件纵筋用)、直径 10 mm 的 HRB335 级钢筋(试件箍筋用)、RPC 干混料(湖南固力工程新材料有限责任公司提供)、自来水。(不同强度等级的 RPC 干混料与水的质量比分别为: RPC120: 9.5%; RPC150: 8.5%; RPC180: 8.0%)

试验仪器和设备: 强制式混凝土搅拌机、压力试验机、ZH-60 型多功能后锚固拔出仪(圆环支撑式, 拉杆直径 14 mm, 锚盘直径 25 mm, 反力支承内径 55 mm)、电锤及直径为 15 mm 的钻头、

锚固件(8.8 级外六角型高强螺栓, 如图 1 所示)、三角固定架^[8]。(RPC 试件的保护层厚度取 25 mm, 锚固件的埋深 30 mm)

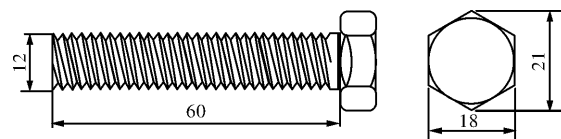


图 1 锚固件(单位: mm)

Fig. 1 The anchor/mm

1.2 试验分组

制作的试验试件分为 RPC180、RPC150、RPC120 三组强度等级。每组由 5 个尺寸为 300 mm × 300 mm × 700 mm 的 RPC 试件及 3 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 的标准立方体抗压试块组成。每组中 4 个试件的纵筋间距(钢筋净间距)分别设为 25 mm、50 mm、75 mm、100 mm, 另外一个试件为无配筋的空白对照。所有测点之间箍筋间距一致, 取 100 mm。

1.3 试件制作

绑扎钢筋笼, 将木模板钻孔并支好模板(钻孔位置见图 2 布置点), 用三角固定架将锚固件固定在模板上, 然后将 RPC 干混料与自来水按配比混合, 使用强制式混凝土搅拌机搅拌并浇筑 RPC。浇筑完成后用塑料薄膜覆盖于试件表面静置 24 h, 再转移至 90℃ 的恒温水槽中进行热水养护 72 h^[9]。养护结束后拆除模板, 将试件静置于自然条件下 28 d, 期间定期洒水保持试件表面湿润^[10]。

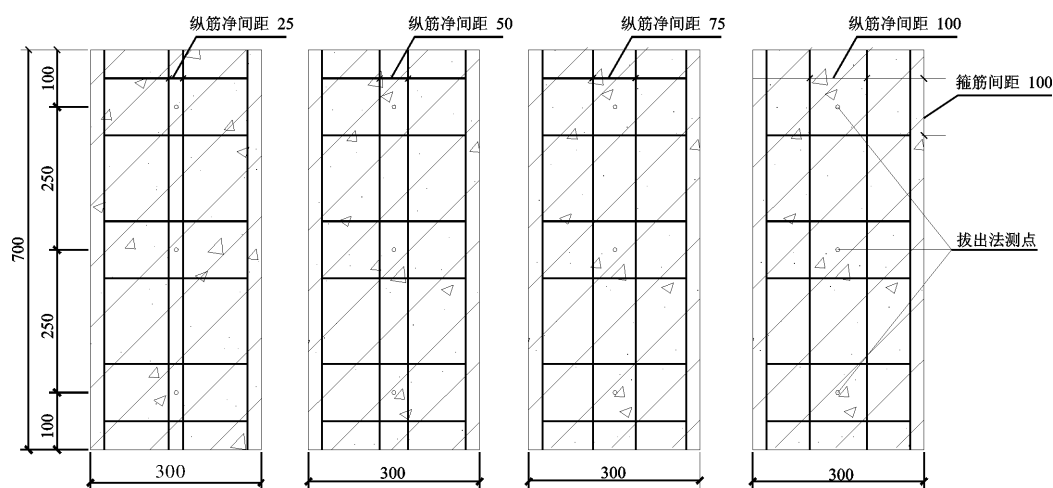


图 2 RPC 试件先装拔出测点布置

Fig. 2 The arrangement of RPC column's cast-in-place pullout points

1.4 试验过程

(1) 各试拔出测点的布置见图 2(保证相邻两测点的间距不小于 250 mm 且测点距构件边沿距离不

小于 100 mm^[7]), 锚固件的锚入深度为 30 mm;

(2) 逆时针旋转拔出仪把手, 使其退到最远。将拔出仪拉杆上的螺帽与锚固件上的螺纹杆连接、

拧紧, 安装拔出仪, 调节固定螺栓使拔出仪的支撑环与 RPC 表面贴紧;

(3) 将拔出仪与读数表连接, 打开数据记录开关并清零;

(4) 缓慢、均匀地摇动摇杆, 使拔出仪给锚固件增加拔出力(如图 3 所示), 速度控制在 $0.5 \sim 1.0 \text{ kN/s}$, 待读数表显示的拔出力不再增大时停止摇动, 记录此时的数据即极限拔出力;

(5) 用压力机对预留试块进行立方体抗压强度试验^[11], 并记录抗压强度值。



图 3 先装拔出试验

Fig. 3 Experiment of cast-in-place pullout method

1.5 试验现象

拔出试验的破坏形态与普通混凝土类似, 均为近似椎体的喇叭状^[12], 故可认为 RPC 的破坏机理与普通混凝土破坏机理相同。在达到极限拔出力后, 人为地继续施加拉拔力, 大部分的测点锚固部分能与原试件分离。小部分的测点锚固部分难以或无法与原试件分离, 且此情况多发生于拔出力位于 $75 \sim 95 \text{ kN}$ 之间。试验表明, 随着试件的强度等级的提高以及纵筋间距的减小, 极限拔出力提高, 锚固部分与原试件分离的难度越来越大。试件部分破坏形态见图 4。



图 4 先装拔出法的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of cast-in-place pullout method

与普通混凝土的拔出试验相比, RPC 拔出试件的测点多为规则破坏(截面不完整破坏、锚固件变形或拉断的现象很少), 试验效果理想。这是因为 RPC 材料的主要成分是粒径很细的活性粉末混凝土, 不含对拔出力测定影响很大的粗骨料成分^[13]。

2 无筋素 RPC 试件的试验数据及分析

2.1 试验数据

根据规范^[7]计算可得各组试件的拔出力代表值 F 和立方体抗压强度代表值 f , 汇总后的数据如表 1 所示。

2.2 试验数据回归分析

参照相关规范^[7]使用最小二乘法将 RPC 试件的立方体抗压强度与拔出力进行线性拟合, 回归方程式如下:

$$f_{cu}^c = A \times F + B \quad (1)$$

表 1 无筋素 RPC 试件试验数据

Tab. 1 Experimental data of plain RPC column

强度等级	拔出力代表值 F/kN	立方体抗压强度代表值 f/MPa
RPC120	55.93	117.90
	57.46	
	60.66	
	59.35	
RPC150	69.14	142.23
	71.31	
	67.79	
	66.31	
RPC180	76.02	176.56
	80.43	
	79.36	
	78.67	

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n f_j F_{1i} - \frac{1}{n} \times (\sum_{i=1}^n F_{1i}) (\sum_{i=1}^n f_j)}{\sum_{i=1}^n F_{1i}^2 - \frac{1}{n} \times (\sum_{i=1}^n F_{1i})^2} \quad (2)$$

$$B = \bar{f} - A\bar{F} \quad (3)$$

式中: f_{cu}^c 为混凝土强度推定值(MPa); F 为拔出力代表值(kN); A 、 B 为测强公式回归系数; n 为先装拔出法测点数; F_{1i} 为第 i 个先装拔出测点的拔出力(kN); f_j 为第 j 组该强度等级立方体试块的抗压

强度(MPa); \bar{F} 为先装法拔出力平均值(kN); \bar{f} 为立方体试块抗压强度平均值(MPa).

将试验所得的立方体抗压强度与拔出力数据代入式(2)~(3)得: $A=2.766$, $B=-44.031$. 回归分析得到的无筋素 RPC 试件的拟合直线见图 5.

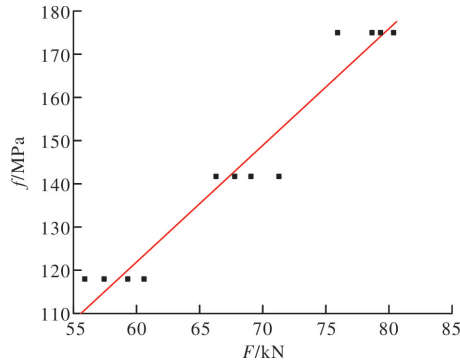


图 5 无筋素 RPC 试件拟合直线
Fig. 5 Plain RPC column's fitting line

2.3 回归方程的评价

回归方程精度的评价指标包括: 相关系数 R^2 、相对标准差 e_R 、平均相对误差 δ 、变异系数 C_v 等, 相关评价指标的计算方法参照文献^[13].

相关系数 R^2 表示 RPC 试件的强度推定值 f_{cu}^c 和拔出力 F 线性关系的强弱, R^2 的值越接近 1 说明两者之间的线性相关性越好, 拟合方程式的准确度越高. 代入试验数据可算得: $R^2=0.973$, 相关系数大于 0.8 表明 RPC 的抗压强度与拔出力之间有良好的线性相关性.

相对标准差 e_R 是衡量回归方程的规律性强弱的参数, 计算可得: $e_R=4.11\%$, 小于规范^[7]规定的 12%, 符合要求.

平均相对误差 δ 是反映方程值偏离实际值范围的参数, 将数据代入相关计算公式可得: $\delta=3.23\%$, 相对误差值很小, 说明拟合公式的精确度很高.

变异系数 C_v 是揭示数据离散程度的参数, 通过计算可得 $C_v=3.77\%$, 这说明变异系数很小, 数据的离散程度不高.

拟合回归方程各指标分析可表明: 无筋素 RPC 试件的抗压强度推定值和拔出力 F 之间线性相关性显著, 先装拔出法适用于 RPC 的强度检测.

3 配筋 RPC 试件的试验数据及分析

3.1 试验数据

配筋 RPC 试件相关拔出力数据如表 2.

3.2 试验数据回归分析及评价

测强方程式及精度评价参数如表 3 所示. 四组数据的平均相对误差小于 10%, 相对标准差均小于 12%, 符合规范^[7]的要求, 说明该组拟合直线方程的误差在允许范围之内.

表 2 不同纵筋间距配筋 RPC 试件试验数据

Tab. 2 Experimental data of plain RPC column

强度等级	不同纵筋间距 拔出力 F/kN				立方体抗压强度 代表值 f/MPa
	25mm	50mm	75mm	100mm	
RPC120	68.37	66.64	61.28	57.62	117.90
	64.64	62.86	59.33	55.45	
	63.15	64.60	60.48	61.34	
	67.81	61.08	60.55	59.67	
RPC150	78.76	75.28	72.67	72.77	142.23
	76.43	71.45	69.66	68.43	
	80.22	74.67	71.22	67.68	
	75.76	73.05	69.05	70.24	
RPC180	95.35	82.17	82.33	77.49	176.56
	89.87	87.33	79.05	75.78	
	90.65	85.56	80.66	80.24	
	93.79	83.43	79.78	75.06	

表 3 不同纵筋间距配筋 RPC 试件的测强曲线及回归分析评价参数

Tab. 3 Strength curve and parameter in regression analysis between RPC columns of different distance longitudinal tendons

纵筋间距/mm	回归方程	相关系数 R	相对标准差 $e_R/\%$	平均相对误差 $\delta/\%$	变异系数 $C_v/\%$
25	$f_{cu}^c = 2.146F - 23.384$	0.981	3.42	3.00	3.13
50	$f_{cu}^c = 2.694F - 53.801$	0.975	3.99	3.27	3.65
75	$f_{cu}^c = 2.866F - 56.485$	0.984	2.95	2.23	2.70
100	$f_{cu}^c = 2.861F - 50.371$	0.943	5.74	4.67	5.26

3.3 纵筋间距的影响分析

对比无筋素 RPC 试件和配筋 RPC 试件, 得到拟合直线如图 6. 由图 6 可以看出, 在一定范围

内, RPC 试件的拔出力在受到其抗压强度影响的同时, 还受到纵筋间距的影响. 当纵筋间距为 100 mm 的时候, 试件的拔出力几乎与无筋素 RPC

试件相当,其拟合直线非常接近;随着纵筋间距的减小,拔出力有一定程度的提高.当纵筋间距分别为25 mm、50 mm、75 mm时,其提高幅度的平均值为:14.9%、8.0%、2.9%.从试验数据可以看出,当纵筋间距小于50 mm时,其对拔出力的影响是比较显著的;当纵筋间距大于75 mm时,其对拔出力的影响已经很微弱了.

从试验结果来看,钢筋间距对拔出力的影响应该与其破坏机理有着密不可分的关系.现阶段国内学者们普遍认为混凝土的破坏是由拉应力(或压应力)与剪应力组合而成的复合应力所导致的^[15].混凝土在拔出荷载的作用下,始终处于一个三向应力状态,混凝土的拔出破坏主要由剪应力 t 与压应力 s 共同作用下形成的拉应力作用造成的.拔出过程中,锚头圆盘顶面外缘混凝土由于应力集中受到很大的竖向压应力,压应力沿锚固部分高度的变化改变,引起了剪应力集中,在剪应力集中的作用下,锚头圆盘外围边缘最先产生环向的竖向裂缝,裂缝发展到一定范围,混凝土开始在压应力和剪应力形成的主拉应力下产生斜裂缝,伴随着拔出力的增大斜裂缝逐渐发展并最终导致破坏.为了便于表述,把锚固件的端部边缘至反力支承圆环内缘的锥面定义为拔出区域.考虑到破坏形态不是严格的椎体,而是边界有一定弧度的喇叭状,故拔出区域的边界线应该是弧线而不是直线,如图7所示.当纵筋间距为100 mm时,其已经远大于圆环支撑的内径,离拔出区域的位置很远,故纵筋对拔出力的影响消失,此时试件拔出力与素RPC试件相当.

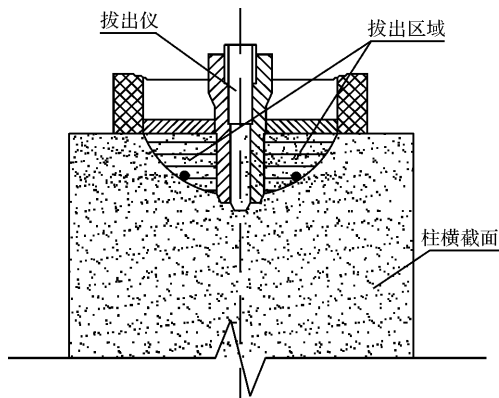


图6 RPC试件各拟合直线的对比
Comparison between all RPC columns' fitting line

4 检测应用可行性分析

由于先装拔出法得到的RPC试件的拔出力与其抗压强度之间存在着良好的线性关系,故采用此

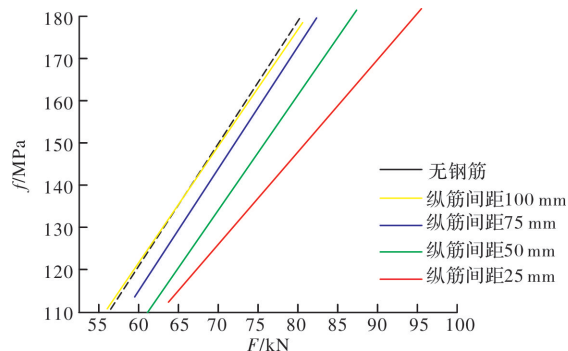


图7 拔出区域

Fig. 7 The pull out area

方法检测RPC构件的抗压强度是可行的.但当RPC构件中存在钢筋时,应综合考虑构件中钢筋的位置、锚固件的锚入深度、以及拔出仪的圆环支撑内径对拔出力的影响.在进行拔出试验时,确保钢筋远离拔出区域,能提高试验的准确度.如若钢筋落在拔出区域内或附近,极限拔出力会有一定程度的提高,则应排除钢筋对拔出力的影响.详细具体的影响效应,还有待后人进一步的研究和发掘.

5 结论

- (1)本次试验先装拔出法得到的RPC试件的抗压强度与拔出力之间存在着良好的线性关系.
- (2)本次试验先装拔出法得到的RPC试件的破坏形态均与普通混凝土的破坏形态相似,说明RPC的破坏机理与普通混凝土的破坏机理相同.
- (3)RPC试件中的纵筋间距对拔出力的大小有影响,在同等强度条件下,当纵筋的间距小于50 mm时,拔出力随着纵筋间距的减小而增大,纵筋对拔出力的影响显著;当纵筋的间距大于75 mm时,纵筋对拔出力的影响逐渐减弱;当纵筋的间距为100 mm时,纵筋对拔出力大小没有影响.

参考文献 References

- [1] 陶毅,张海镇,史庆轩,等.活性粉末混凝土配合比研究综述[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(6):839-845.
TAO Yi, ZHANG Haizhen, SHI Qingxuan, et al. State of art of mix design theory of reactive powder concrete[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(6): 839-845.
- [2] 郑文忠,吕雪源.活性粉末混凝土研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(10):44-58.
ZHENG Wenzhong, LV Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of Building

- Structures, 2015, 36(10):44-58.
- [3] 白泓,高日. 活性粉末混凝土(RPC)在工程结构中的应用[J]. 建筑科学, 2003, 19(4):51-54, 42.
BAI Hong, GAO Ri. The application of reactive powder concrete in engineering construction[J]. Building Science, 2003, 19(4):51-54, 42.
- [4] 耿春雷,许零,陈红岩,等. 活性粉末混凝土的研究与工程应用进展[J]. 材料导报, 2012, 26(3):70-73.
GENG Chunlei, XU Ling, CHEN Hongyan, et al. On research progress and application of reactive powder concrete[J]. Materials Review, 2012, 26(3):70-73.
- [5] 周安,张杰. 混凝土强度无损检测的取值方法[J]. 合肥工业大学学报, 1999, 22(S1):144-146.
ZHOU An, ZHANG Jie. Discussion on the evaluation of concrete strength with non-damage testing method[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1999, 22(S1):144-146.
- [6] 严武庆. 拔出法检测混凝土强度[J]. 西北水科学与工程, 1996, 7(2):57-63.
YANG Wuqing. Using pull out method in testing concrete strength[J]. Water Resources & Water Engineering, 1996, 7(2):57-63.
- [7] 中国建筑科学研究院,哈尔滨工业大学. 拔出法检测混凝土强度技术规程:CECS 69:2011[S]. 北京:中国计划出版社, 2011.
China Academy of Building Research, Harbin Institute of Technology. Technical specification for test of concrete strength by pullout method:CECS69:2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [8] 卜良桃. 用于砂浆面层强度检测的锚固装置[P]. 中国:CN204 008280U, 2014-12-10.
BU Liangtao. An anchorage device for testing the strength of cement mortar[P]. China: CN204008280U, 2014-12-10.
- [9] 何峰,黄政宇. 养护制度对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响研究[J]. 混凝土, 2000(2):31-34.
HE Feng, HUANG Zhengyu. Study on effect of curing schedule on the strength of RPC[J]. Concrete, 2000(2):31-34.
- [10] 清华大学,北京交通大学,湖南大学,等. 活性粉末混凝土:GB/T 31387-2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
Tsinghua University, Beijing Jiaotong University, Hunan University, et al. Reactive powder concrete:GB/T31387-2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [11] 中国建筑科学研究院,清华大学,同济大学,等. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T50081-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
China Academy of Building Research, Tsinghua University, Tongji University, et al. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete:GB/T50081-2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] 金南国,金贤玉. 胶粘拔出法检测混凝土强度新技术研究[J]. 建筑技术, 2003, 34(1):58-59.
JIN Nanguo, JIN Xianyu. Study on gluing-pulling method for concrete strength test[J]. Architecture Technology, 2003, 34(1):58-59.
- [13] 于天来,耿立伟,张宏祥,等. 粗骨料粒径对后装拔出法测试混凝土强度精度的影响[J]. 中外公路, 2010, 30(1):238-241.
YU Tianlai, GENG Liwei, ZHANG Hongxiang, et al. Effect of coarse aggregate particle size on precision of concrete strength testing by post-install pullout method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(1):238-241.
- [14] 张欢. 后装拔出法检测纤维水泥砂浆抗压强度试验方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
ZHANG Huan. The test method research of detected fiber cement mortar compressive strength based on post-install pullout method[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [15] 金南国,乐进发,宣纪明. 拔出法检测混凝土强度研究进展[J]. 混凝土, 2005(3):24-26, 38.
JIN Nanguo, LE Jinfa, XUAN Jiming. Researching progress of pull-out method checking concrete strength[J]. Concrete, 2005(3):24-26, 38.

(编辑 沈 波)