

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.004

基于拔出法的超高强混凝土强度检测试验

卜良桃,刘婵娟

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 为了验证拔出法在超高强混凝土强度检测上的适用性,采用先装拔出法及后装拔出法对超高强度混凝土进行强度检测试验。试验用超高强混凝土分 C120、C150、C180 共 3 个强度等级,每个等级设置 6 组试件及相应数量的立方体试块。利用最小二乘法对试验数据进行拟合,并计算回归方程的各类参数,结果表明,各类参数都在合理的范围内,因此得出拔出法适用于检测超高强混凝土强度的结论。通过对比,得出同种材料下先装拔出法精确度更高、超高强混凝土的测强曲线与钢纤维砂浆趋势相近、后装拔出法的检测范围较先装拔出法更广的结论。

关键词: 混凝土强度检测;先装拔出法;后装拔出法;超高强混凝土;最小二乘法;回归方程

中图分类号: TU192;TU528.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)04-0304-05

Strength testing of ultra-high strength concrete using pull-out method

BU Liangtao, LIU Chanjuan

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

Abstract: To verify the applicability of the pull-out method in strength testing of ultra-high strength concrete, the cast-in-place pull-out method and post-install pull-out method were used to test the strength of ultra-high strength concrete. The strength of test pieces was graded at three levels, C120, C150, and C180, and six groups of test pieces and a certain number of test cubes were selected for each strength level. Through experimental data fitting with the least square method and calculation of various parameters of the regression equation, some conclusions are drawn: all kinds of parameters are within reasonable ranges, and the pull-out method is suitable for testing the strength of ultra-high strength concrete. Comparison of data from different pull-out methods shows that, for the same kind of material, the cast-in-place pull-out method has higher accuracy, the strength curve of ultra-high strength concrete has a similar trend to that of steel fiber cement mortar, and the strength detection range of the post-install pull-out test is wider than that of the cast-in-place pull-out test.

Key words: concrete strength testing; cast-in-place pull-out method; post-install pull-out method; ultra-high strength concrete; least square method; regression equation

超高强度混凝土是一种超高强度的水泥基复合材料^[1],具有高强度、高韧性、高耐久性及自重轻的优点。自 1997 年第一座超高强混凝土人行天桥在加拿大建造以来,该材料的应用已从桥梁拓展到结构工程的各个领域。随着时间的推移和技术的成熟,超高强混凝土在高层建筑、地下综合管廊、国防设施等领域都有广泛的应用^[2]。目前高铁电井管道、工业构筑物等构件已经实现了工厂化预制,超高强混凝土产品已实现了高性能和经济性的良好平衡。

然而,超高强混凝土结构的现场检测还处于空白。目前常用的回弹法只适用于 C50 及以下强度的混凝土检测,钻芯法也存在若取样部位不当容易削弱构件承载力或损伤主筋等问题^[3-4],且超高强混凝土结构在实际应用中设计更为轻薄,每个构件的作用更为关键,现行钻芯法的取样办法对超高强混凝土结构的受损影

响更大。由此得出,目前工程现场并没有有效可行的办法检测超高强混凝土的实际强度。

为此,笔者借鉴混凝土强度的另一常用检测方法——拔出法,及其在高强混凝土及水泥砂浆强度检测上的应用,对拔出法检测超高强混凝土的可行性进行试验研究,并参考规范^[5-6]方法对试验数据进行拟合。拔出法高效便捷、经济可靠^[7],若能应用于超高强混凝土的强度检测,在超高强度构件工厂化预制的发展趋势下,将给实际工程应用带来更多便捷。

1 试验方案

1.1 试验材料及仪器

试验需超高强度混凝土试件及标准立方体抗压强度试块,材料有木模板、锚固胶、RPC 干混料(长沙固力实业有限公司生产)及洁净自来水。各混凝土强度等级试件采用的配合比为:C120 所采用的单位用水量为 9.5%(水与干混料质量比),C150 采用的单位用水量为 8.5%,C180 采用的单位用水量为 8.0%。

试验需要的仪器如下:压力机、ZH-60 型多功能后锚固强度检测仪(圆环支承)、钻孔机、锚固件及固定架。锚固件的埋置深度 $h=25\text{ mm}$,拉杆直径 $d_1=14\text{ mm}$,锚盘直径 $d_2=25\text{ mm}$,拔出仪反力支承内径 $d_3=55\text{ mm}$ 。

1.2 试验分组

制作的试件与试块设计为 3 个强度等级,每个强度等级分为 6 组,每组由 1 个 $200\text{ mm}\times200\text{ mm}\times600\text{ mm}$ 的超高强混凝土试件及 3 个 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 的标准立方体试块组成。不考虑钢筋网间距对拔出力的影响^[8-9]。

1.3 试件制作

支模板(先装拔出法需预埋锚固件),将活性粉末混凝土干混料及洁净自来水按比例混合,并用强制式搅拌机搅拌。浇筑混凝土,并用薄膜覆盖混凝土表面,静停 24 h。将试件放入水槽中进行恒温 80°C 热水养护 72 h(初始升温速度不大于 $12^\circ\text{C}/\text{h}$,养护结束降温速度不大于 $15^\circ\text{C}/\text{h}$)^[10-11]。之后拆除模板,保持混凝土表面湿润,自然养护 28 d。

1.4 先装拔出法试验

(a)在模板上布置测点,保证测点距构件边缘不小于 100 mm,相邻两测点间距不小于 250 mm^[5];(b)在测点对应位置钻孔,并用固定架将锚固件固定在模板测点处,使其保持与模板表面垂直且锚固深度为 25 mm;(c)采用 1.3 节方法制作不同强度等级的试件及试块,并在相同条件下养护;(d)将锚固件与拔出仪的螺纹套筒及拉杆连接,安装反力支承圆环使其紧贴混凝土表面,以保持拉杆与操作面垂直,安装拔出仪至拉杆上,并使用紧固螺丝拧紧;(e)缓慢旋转摇杆,施加拔出力,控制其速度在 $0.5\sim1.0\text{ kN/s}$,待显示器读数不再增加时停止摇动,记录极限拔出力^[5]。

1.5 后装拔出法试验

(a)拆模后,在混凝土表面布置测点;(b)用钻孔机在测点处钻孔,钻头直径为 25 mm,钻入深度为 25 mm;(c)用毛刷清理孔洞,将灰尘清除,并用乙醇溶液擦拭孔洞内壁以保证锚固胶与混凝土更好地黏结;(d)向孔洞内注入锚固胶,并安放锚固件,用特制的固定架将锚固件固定在孔洞位置,使其与混凝土表面垂直,并保持锚固深度在 25 mm;(e)安装拔出仪,旋转摇杆,缓慢施加拔出力,待显示器读数不再增加时停止摇动,记录极限拔出力。

1.6 立方体抗压强度试验

用压力机对预留的立方体试块进行立方体抗压强度试验,并记录得出的抗压强度值。

1.7 试验现象

试验得到的破坏形态同普通混凝土,均为椎体破坏(偶有锚固胶被拔出的情况)。但先装拔出法的破坏形态与后装拔出法相比更规整,椎体破坏形态更理想,后装拔出法结果则为近似的椎体破坏。随着混凝土强度的提高,拉拔之后锚固部分并不与原试件分离,而是受钢纤维黏结力的影响牢固地继续黏结在原试件上;在达到极限拔出力后人为对仪器施加拉拔力,拔出锚固部分的难度也随强度的提高而增大。部分破坏形态见图 1、图 2。



图1 先装拔出法破坏形态(C120)

Fig.1 Failure mode after tests using cast-in-place pull-out method (C120)



图2 后装拔出法破坏形态(C180)

Fig.2 Failure mode after tests using post-install pull-out method (C180)

2 试验数据及分析

2.1 试验数据

根据规范^[5]的计算方法求得每组试验的拔出力代表值和立方体抗压强度代表值,见表1。

2.2 数据分析

根据相关规范^[5],采用的回归方程式如下:

$$f_{cu} = AF + B \tag{1}$$

式中: f_{cu} ——混凝土强度换算值,精确至0.1 MPa; F ——拔出力代表值,精确至0.1 kN; A 、 B ——测强公式回归系数。

用最小二乘法原理计算 A 、 B 值^[12],并将试验数据代入相应公式,解得先装拔出法 $A = 3.149 \times 10^3 / \text{m}^2$, $B = -7.956 \text{ MPa}$;后装拔出法 $A = 3.805 \times 10^3 / \text{m}^2$, $B = -29.417 \text{ MPa}$ 。

2.3 一元回归方程的评价

主要采用相关系数 r 、相对标准差 e_r 、平均相对误差 δ 、变异系数 C_v 等参数及显著性检验对拟合得到的回归方程进行评价。

先装拔出法的 $r = 0.953 > 0.9$,表示拔出力与混凝土抗压强度间有极好的相关性; $e_r = 5.22\% < 12\%$,符合规范要求^[4]; $\delta = 0.047$,误差值较小,表明该测强公式的准确度很高; $C_v = 5.48\%$,变异系数小,数据的离散程度不高。根据文献[13-14]中的方法对回归方程进行显著性检验,得到回归方程在 $\alpha = 0.01$ 下具有统计意义,即超高强混凝土先装拔出力与混凝土抗压强度间的线性关系显著。先装拔出法测强曲线见图3中的虚线。

后装拔出法中计算得到的 $r > 0.8$, $e_r < 12\%$,均符合规范要求; δ 及 C_v 均较小;显著性检验拒绝零假设,回归方程在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下具有统计意义。该结果表明后装拔出力与超高强度混凝土标准立方体抗压强度具有良好的线性相关性,

表1 试验数据

Table 1 Experimental data

混凝土试件 强度等级	先装拔出法			后装拔出法		
	分组	F/kN	f/MPa	分组	F/kN	f/MPa
C120	H-1	38.60	110.22	Y-1	39.89	110.22
	H-2	41.19	120.65	Y-2	40.06	120.65
	H-3	43.30	122.01	Y-3	37.89	122.01
	H-4	42.43	118.27	Y-4	41.44	118.27
	H-5	39.19	117.90	Y-5	36.79	117.90
	H-6	35.60	115.70	Y-6	38.35	115.70
C150	H-1	49.86	147.42	Y-1	43.24	147.42
	H-2	46.50	141.54	Y-2	44.07	141.54
	H-3	52.13	145.35	Y-3	45.39	145.35
	H-4	50.09	139.80	Y-4	47.36	139.80
	H-5	47.18	150.26	Y-5	47.52	150.26
	H-6	52.43	149.85	Y-6	50.18	149.85
C180	H-1	56.75	173.76	Y-1	53.16	173.76
	H-2	55.49	175.30	Y-2	53.13	175.30
	H-3	59.21	170.33	Y-3	50.73	170.33
	H-4	58.36	183.10	Y-4	54.42	183.10
	H-5	58.10	176.56	Y-5	52.55	176.56
	H-6	56.40	179.03	Y-6	56.05	179.03

注: F 为拔出力代表值, f 为立方体抗压强度代表值。

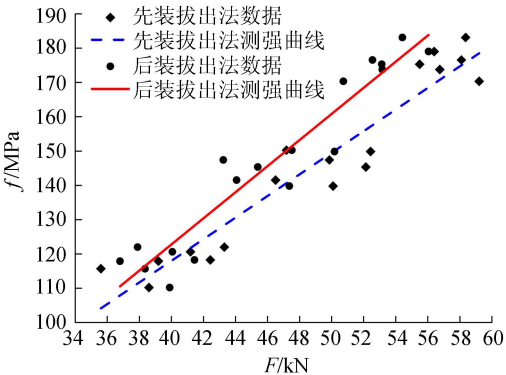


图3 拔出法测强曲线

Fig.3 Strength curve obtained with pull-out method

且拟合得到的测强公式精度高。后装拔出法测强曲线见图 3 中的实线。

试验时严格控制锚固件的埋置深度及垂直度,保证了清孔质量及锚固胶密实度,因此得到的破坏形态均为较理想的椎体破坏(偶有锚固胶被拔出的情况,在原构件上实施了补测)。虽有研究表明,随着混凝土强度的提高,试验数据的离散性有增大的趋势^[15-16],但经过计算,表明试验得到的各项参数都在允许的范围内。因此,根据试验现象及试验结果分析,得到拔出法同样适用于超高强混凝土强度检测的结论。

3 对 比

对比 2 种拔出法的参数计算结果可得如下结论:先装拔出法及后装拔出法的测强公式拟合度都较好;先装拔出法的准确度更高,后装拔出法数据的离散性较大。从图 3 还可看出,同等强度的构件,先装拔出法的拔出力代表值略大于后装拔出法拔出力代表值。

将试验得到的回归曲线与《拔出法检测混凝土强度技术规程》^[5]、《拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程》^[6]中提供的测强曲线进行对比,见图 4、图 5。

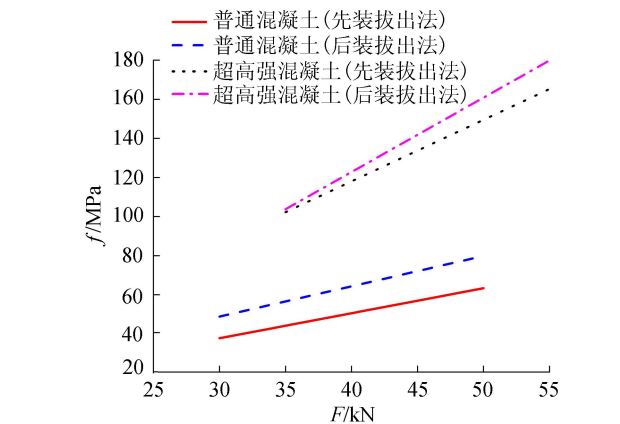


图 4 试验超高强混凝土与普通混凝土回归曲线对比
Fig. 4 Comparison of strength regression curves of ultra-high strength concrete and normal concrete

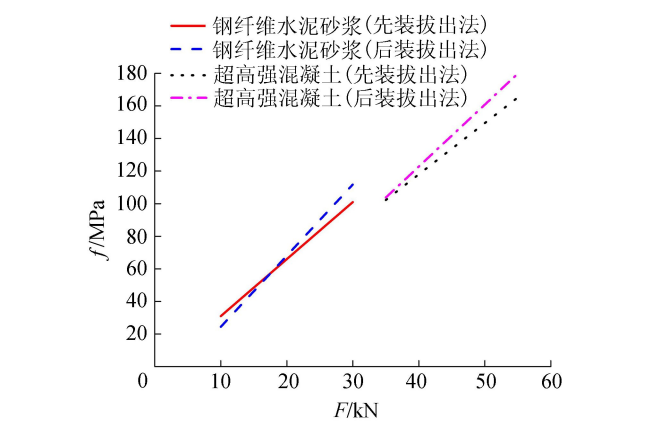


图 5 试验超高强混凝土与钢纤维水泥砂浆回归曲线对比
Fig. 5 Comparison of strength regression curves of ultra-high strength concrete and steel fiber cement mortar

从图 4、图 5 可以看出,在强度范围内,同种材料的先装法与后装法测强曲线的斜率都较接近;超高强混凝土的回归曲线斜率更接近钢纤维水泥砂浆,这是因为超高强混凝土的干混料中也掺有大量的钢纤维。在图 4 中,普通混凝土的后装测强曲线也在先装曲线的上方,说明在同等强度下,普通混凝土的先装拔出力也要略大于后装拔出力,则在实际应用中后装拔出法的检测范围要稍大于先装法。图 5 中钢纤维水泥砂浆的曲线也具有同样的特性。

对比 3 种纤维(聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维、钢纤维)水泥砂浆的先装、后装拔出试验^[17-18],得到的回归曲线见图 6。从图 6 可以看出:聚乙烯醇纤维及聚丙烯纤维的测强曲线变化趋势相似,与钢纤维相反;同等强度的聚乙烯醇纤维水泥砂浆与聚丙烯纤维水泥砂浆,后装拔出力均明显大于先装拔出力。

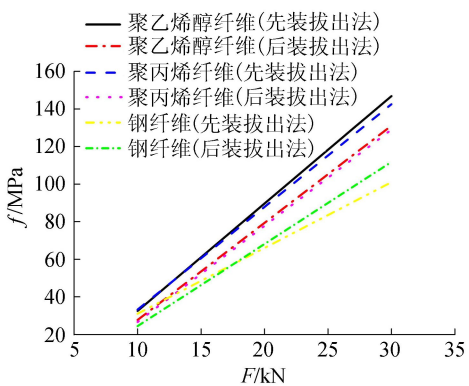


图 6 纤维水泥砂浆拔出法回归曲线对比
Fig. 6 Comparison of strength regression curves of different kinds of fiber cement mortar obtained with pull-out method

4 结 论

- a. 对试验数据回归分析,结果表明,回归方程的各项参数都符合规程要求。 F 检验的结果表明,回归方程在显著性水平 $\alpha=0.01$ 下具有统计意义。
- b. 试验得到的破坏形态均为较理想的椎体破坏。结合试验现象及数据分析结果,可得如下结论:先装拔出法和后装拔出法都适用于超高强混凝土的强度检测。
- c. 对比结果表明:超高强混凝土先装拔出法的测强公式较后装拔出法拟合度更好,数据离散性也更小;

超高强混凝土的测强曲线与钢纤维水泥砂浆的测强曲线有相似的变化趋势;后装拔出法在超高强混凝土、普通混凝土及钢纤维水泥砂浆的强度检测上具有比先装拔出法更广的应用范围。

参考文献:

- [1] YAZICI H, AYDIN S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Construction and Building Materials, 2009(23):1223-1231.
- [2] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24. (CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014,31(3):1-24. (in Chinese))
- [3] 向洪,袁铜森.钻芯法检测桥梁混凝土强度的评定方法探讨[J].公路工程,2013,38(3):180-183. (XIANG Hong, YUAN Tongsen. Discussion on evaluation method of testing bridge concrete strength by drilled core[J]. Highway Engineering, 2013,38(3):180-183. (in Chinese))
- [4] 王宇新.后装拔出法检测混凝土强度的试验及应用研究[D].太原:太原理工大学,2010.
- [5] 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.
- [6] 中国工程建设标准化协会. CECS 389:2014 拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [7] 陈海彬,胡寿康,冯少波.预拌混凝土后装拔出法地区测强曲线的研究[J].混凝土,2012(2):114-116. (CHEN Haibin, HU Shoukang, FENG Shaobo. Research on local curve of pull-out post-insert method for premixed concrete[J]. Concrete, 2012(2):114-116. (in Chinese))
- [8] 卜良桃,王宇晗,侯琦,等.钢筋网间距对拔出法检测纤维砂浆加固薄层强度影响的试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):326-330. (BU Liangtao, WANG Yuhan, HOU Qi, et al. Experimental study of influence of steel mesh spacing on strength of fiber mortar-reinforced thin layer detected by post-install pull-out method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013,41(4):326-330. (in Chinese))
- [9] 王千辉.钢筋网对后植筋拔出法检测混凝土板强度影响的技术研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S].北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2015.
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 曾金平.数值计算方法[M].长沙:湖南大学出版社,2004:155-161.
- [13] 卜良桃,侯琦.先装拔出法检测水泥砂浆薄层强度现场试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):53-57. (BU Liangtao, HOU Qi. Field test research on strength of cement mortar thin layer detected by cast-in-place pullout method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015,42(5):53-57. (in Chinese))
- [14] 罗汉,杨湘豫.大学数学4[M].2版.北京:高等教育出版社,2009:256-259.
- [15] 崔双双.基于拔出法的商品混凝土强度检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [16] 边智慧,商冬凡,付素娟,等.后装拔出法检测高强混凝土强度试验研究[J].建筑科学,2011,27(7):38-41. (BIAN Zhihui, SHANG Dongfan, FU Sujuan, et al. Experimental study on testing strength of high-strength concrete by pull-out post-insert method[J]. Building Science, 2011, 27(7):38-41. (in Chinese))
- [17] 卜良桃,刘德成.纤维水泥砂浆用先装拔出法检测强度的制订标准研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(7):56-61. (BU Liangtao, LIU Decheng. Research on formulating standards for inspection of fiber reinforced cement mortar strength by cast-in-place pullout method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015,42(7):56-61. (in Chinese))
- [18] 卜良桃,张欢.基于纤维水泥砂浆加固的后装拔出试验[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):139-143. (BU Liangtao, ZHANG Huan. Post-install pullout test based on fiber cement mortar reinforcement[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015,43(2):139-143. (in Chinese))