

基于胶粘拔出法的桥梁结构混凝土强度测试

吕毅刚, 彭晖, 唐腾, 黄浩, 许康

长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙 410004

摘要 在进行桥梁结构检测时,采用胶粘拔出法进行混凝土强度测试,不但可以避免破损检测法对结构造成的严重破损,还能够弥补常规非破损法,如回弹法等测试精度不高等缺点。为了便于实际操作,通过对比试验,将一种有机植筋胶作为胶粘拔出法的锚固胶,并设计出了一套可重复利用的钢质锚固件的拉拔系统。比较结果表明,该方法可取得较好效果。在对一批双向钢筋混凝土板的拔出力及其对应的混凝土立方体试块抗压强度进行统计分析的基础上,运用最小二乘法,绘制出胶粘拔出法的桥梁结构混凝土强度与拔出力的测强曲线,曲线相关性较好,且相对标准差较小。最后,运用测强曲线,对野外暴露试验站的2片预应力混凝土梁进行胶粘拔出法试验研究,计算值与试验值吻合较好,为胶粘拔出法在桥梁结构混凝土强度测试工程实践中的应用奠定了基础。

关键词 胶粘拔出法;桥梁结构;混凝土强度

中图分类号 U445.73

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.010

Test of Concrete Strength of the Bridge Structure Based on the Gluing Pull-out Method

LU Yigang, PENG Hui, TANG Teng, HUANG Hao, XU Kang

School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

Abstract In the inspection of bridge structures, the use of the gluing pull-out method for the concrete strength can avoid not only the serious damage to the structures as would occur by using the structural damage detection method, but also the disadvantages of the conventional nondestructive methods, such as the rebound law, such as poor precision. In order to use the gluing pull-out method in the real structures more conveniently, an organic anchorage is employed as the anchoring gum and through comparison, a reusable tensile steel anchoring pull system is designed. The results show that better precision results can be obtained by using this method. Using the statistical analysis method and the least squares method for the pulling forces for a number of two-way reinforced concrete slab and for the corresponding compressive strength of concrete test cubes, the curves of strength against pulling force for the bridge structure are obtained. The results show that better correlations and smaller relative standard deviations can be achieved. The gluing pull-out method is also used in the field exposure tests of two prestressed concrete beams by using the strength curves. The results show that the calculated values are in good agreement with the experimental values.

Keywords gluing pull-out method; bridge structure; concrete strength

0 引言

随着国家经济的迅速发展,中国公路桥梁的建设得到了长足发展。中国桥梁数量虽然众多,但总体技术状况不容乐

观,已有一大批桥梁早已出现各种“病害”,常年带“病”运营^[1-3],已进入长期性能不足阶段。混凝土强度是桥梁结构长期性能的一个重要力学指标。多年以来,各国均采用混凝土标准试

收稿日期:2010-12-15;修回日期:2011-05-11

基金项目:长沙理工大学桥梁工程重点实验室开放基金项目(10KA10);交通部西部交通建设科技项目(200631822302_08)

作者简介:吕毅刚,讲师,研究方向为桥梁结构可靠性及耐久性,电子信箱:37237308@qq.com

件的抗压强度值作为其量化指标。由于试件的成型及养护等条件不能与实际结构完全吻合,其抗压强度值不能代表桥梁结构混凝土的真实强度^[4],非破损检测技术的研发和应用已日益引起重视。拔出法是一种具有操作方便、构件损伤小等优点的微破损检测方法,适用性很强^[5]。

1944年,美国的 Tremper 进行了大量的预埋拔出试验,通过回归分析,导出了拔出力与混凝土抗压强度的关联式^[6]。1959年,丹麦的 Kiekegaard-Hansen^[7]做了著名的 LOK 试验。在此基础上,丹麦 Petersen 提出了 CAPO 试验,即后装拔出试验^[5]。在中国,拔出法研究起步较晚。于天来等^[8]通过试验,得出粗骨料粒径对后装拔出法的混凝土强度有影响,提出采用综合系数修正。卜良桃等^[9]采用后装拔出法对聚乙烯醇纤维水泥复合砂浆进行强度检测,拟合了测强回归方程。

在拔出法试验中,国内外研究的对象多数是混凝土标准试块,且在许多后装拔出试验中,切割出的环形沟槽完整性差,试验数据离散性大。金南国等^[10]对后装拔出法进行改进,采用胶粘拔出法测试混凝土强度,即选用快速固化高强胶作为拔出法的锚固胶。本文基于胶粘拔出法试验,对桥梁结构混凝土强度测试进行探索性研究。

1 测试原理和方法

在胶粘拔出法测试混凝土强度试验中,混凝土的破坏和混凝土立方体(或圆柱体)试件在承压面上有约束条件的破坏,机制基本一致。但拔出试验须在开裂进行到一定程度才能到达极限状态,且混凝土抗压强度与极限拔出力存在一定联系。通过某种关系式,可由极限拔出力推出混凝土抗压强度。在整个试验过程中,位于拉拔位置周围的混凝土从开裂直至破坏,始终处于复杂的三向应力状态。在拔出力的作用下,由压应力和剪应力组合而成的主拉应力引起了混凝土的破坏。为操作方便,设计出了一种可重复利用的钢质锚固件,它由钢质底座和钢质锚固件组成。其中,钢质底座的高度为33mm,圆形底面的直径为25mm,圆形顶面的直径为20mm;钢质拉杆通过螺栓与钢质底座相连,钢质锚固件如图1。经过多次对比试验,发现有机植筋胶能使钢质锚固件与混凝土联结较好。通过有机植筋胶把钢质锚固件垂直埋设并凝固后,在混凝土表面放置一块钢垫板及承力传感器,采用夹片把钢质拉杆锚固,然后进行拉拔,整个拉拔系统见图2。



图1 钢质锚固件
Fig. 1 Steel anchor

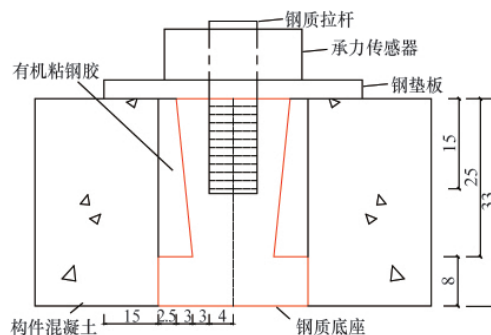


图2 胶粘拔出法构造(单位:mm)

Fig. 2 Structure of gluing pull-out method (unit: mm)

具体试验步骤如下。

(1) 测点布置及钻孔

在结构表面上,选取距边缘一定距离、避开钢筋网的位置作为测点。用钻头直径为2.8cm的冲击电锤,在测点位置钻取深度约4.5cm的孔。钻孔完后,用酒精、棉花等将孔内的灰尘擦洗干净。

(2) 钢质锚固件埋设

用酒精把锚固件擦洗干净。在锚固件端头及孔壁涂抹有机植筋胶,将锚固件植入孔壁中,并使锚固件顶端与结构的混凝土表面平齐。选用聚乙烯塑料瓶,保证凝固之前的锚固件的埋置深度及垂直度,见图3。



图3 钢质锚固件埋设

Fig. 3 Installation of steel anchor

(3) 实施拉拔

对混凝土表面进行清理及整平,放置钢垫板及承力传感器,施加连续均匀的拔出力,直至混凝土开裂,记录测点的拔出力,见图4。

采用此拉拔系统可避免使用切槽机在已钻的孔内壁切槽而引起的混凝土损伤、尺寸偏差大等不足,从而保证了检测结果离散性小以及精度较高。采用的有机植筋胶使钢质锚固件与混凝土粘结很好,拔出效果较好。在拉拔过程中,混凝土周围没有出现破碎情况,被拔出的混凝土块体呈喇叭状,且其表面没有明显的环向裂缝。拔出的混凝土块体和孔穴周边的混凝土表面均完整且彼此吻合,见图5。

2 测强曲线拟合

为建立混凝土强度与拉拔力之间的相关关系,制作了一批强度等级为C30、C40、C55的双向钢筋混凝土板,板内采用



图4 实施拉拔
Fig. 4 Implementation of pull-out



图5 有机植筋胶拔出效果
Fig. 5 Effect of pull-out by using organic anchorage

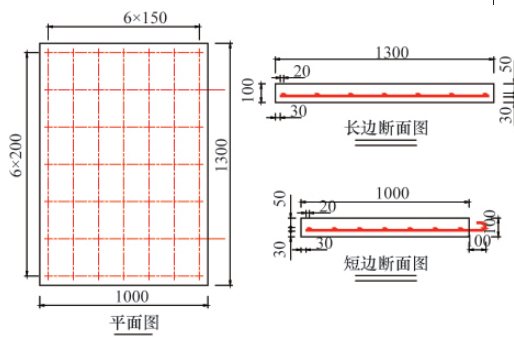


图6 钢筋混凝土板试件(单位:mm)

Fig. 6 The specimens of reinforced concrete slab (unit: mm)

表1 板的拔出力及立方体抗压强度

Table 1 Pull-out force and cube compressive strength of slabs

强度等级	拔出法测值						立方体抗压强度	
	各测点拔出力/kN						平均值/kN	平均值/MPa
C30-1	38.81	33.42	38.13	38.58	35.66	36.34	35.49	33.0
	35.66	31.53	38.6	30.78	32.69	35.72		
C30-2	32.3	35.21	34.54	32.74	36.56	39.56	36.20	36.5
	37.12	39.06	38.87	35.98	34.43	38.06		
C40-1	46.03	40.88	50.19	48.48	43.08	43.82	46.48	45.7
	48.48	47.5	50.19	48.48	47.25	43.33		
C40-2	50.93	43.57	46.27	46.76	49.46	48.97	46.97	51.1
	48.97	45.78	47.25	47.74	43.33	44.56		
C55-1	48.73	52.16	49.96	43.83	50.2	50.69	48.71	52.5
	47.51	48.24	51.43	45.3	49.47	47.02		
C55-2	48.73	46.52	54.37	50.94	58.54	47.51	49.65	60.2
	49.22	51.67	41.38	51.92	50.45	44.56		

分别测强公式的回归系数。

一般采用相关系数 r 和相对标准差 e 检验曲线回归质量,其中:

$$r = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (T_i \cdot f_{cu,i}) - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n T_i \right) \left(\sum_{i=1}^n f_{cu,i} \right) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n f_{cu,i} \right)^2 \right]}} \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}}{f_{cu,i}^c} - 1 \right)^2} \times 100\%$$

纵横向相互焊接的直径 10mm 的 R235 钢筋网。经调查,目前桥梁结构的粗骨料一般选用碎石,在此,选用 4cm 以下粒径的碎石作为粗骨料,在板上植入了钢质锚固件进行拔出试验,具体尺寸见图 6。同时制作了一批 150mm×150mm×150mm 的立方体试块进行抗压强度试验,测试结果见表 1。

国内外研究表明,混凝土抗压强度和拔出力之间存在着近似线性的相关关系。运用最小二乘法^[1],采用直线方程进行曲线回归:

$$f_{cu}^c = a_1 \times T + a_2 \quad (1)$$

式中 f_{cu}^c 为混凝土强度换算值 (MPa); T 为拔出力 (kN); a_1 、 a_2



式中, T_i 为第 i ($i=1,2,\dots,n$) 组拔出力平均值 (kN); $f_{cu,i}$ 为第 i ($i=1,2,\dots,n$) 组混凝土立方体抗压强度平均值 (MPa); $f_{cu,i}^c$ 为第 i ($i=1,2,\dots,n$) 组混凝土强度换算值 (MPa)。

对表 1 中实验的数据进行直线回归,拟合曲线见图 7,得到的胶粘拔出法检测混凝土强度方程为:

$$f_{cu}^c = 1.534T - 20.87 \quad (3)$$

拟合曲线的相关系数 $r=0.950$, 相对标准差 e 为 6.45%, 满足拔出法建立测强曲线的允许误差 $[e]=12\%$ 的要求,回归精度较高。

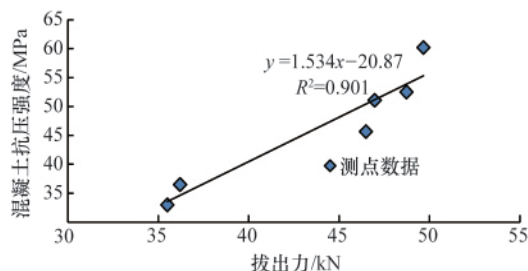


图 7 胶粘拔出法曲线

Fig. 7 Curve of gluing pull-out method

3 试验研究

为进行混凝土长期力学性能的胶粘拔出法观测技术研究,在野外建立暴露试验站,制作了2片试验梁(1片长20m 预应力混凝土空心板及1片长20m 预应力混凝土箱梁)和一



图 8 胶粘拔出法暴露试验

Fig. 8 Exposure experiment of gluing pull-out method

批 150mm×150mm×150mm 立方体试块,主梁采用 C50 混凝土。在浇筑后的 280 天对它们进行了胶粘拔出法试验及立方体抗压强度测试,见图 8。测试结果见表 2。

据表 2 知,对暴露试验站的空心板及箱梁分别进行胶粘拔出法测试,测试结果误差分别为 3.85% 和 1.73%,测试效果较好。

表 2 试验梁的拔出力及立方体抗压强度

Table 2 Pull-out force and cube compressive strength of experimental beams

位置	拔出法测值			混凝土强度 换算值/MPa	立方体抗压强度 平均值/MPa	误差/%
	各测点拔出力/kN		平均值/kN			
空心板	41.87	50.32	46.73	49.9	51.9	3.85
	49.68	47.48	40.65			
箱梁	45.29	47.48	51.14	52.8		1.73
	48.30	46.77	49.32			

4 结论

(1) 混凝土强度是桥梁结构长期力学性能的一个重要参数,采用胶粘拔出法检测桥梁结构的混凝土强度时,混凝土抗压强度和拔出力之间存在着近似线性的相关关系。在对一批双向钢筋混凝土板的拔出力及对应的混凝土立方体试块抗压强度的统计研究中,采用最小二乘法对桥梁结构混凝土强度与拔出力之间的关系进行线性回归,建立了胶粘拔出法的测强曲线,效果较好。

(2) 在野外建立暴露试验站,并浇筑 2 片预应力混凝土试验梁。对这 2 片梁进行了胶粘拔出法试验测试,结果表明,测试误差较小,建立的测强曲线正确有效,可应用于指导工程实践。

(3) 采用胶粘拔出法测试桥梁结构混凝土强度,操作方便且构件损伤小。但要使该技术在混凝土长期性能检测中得以广泛推广应用,还需进一步扩大测试范围,以修正回归方程,确保测试的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 张建仁, 彭晖, 张克波, 等. 锈蚀钢筋混凝土旧桥超限及极限荷载作用的现场破坏试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 213-224.
Zhang Jianren, Peng Hui, Zhang Kebo, *et al.* *Engineering Mechanics*, 2009, 26(2): 213-224.
- [2] 金伟良, 夏晋, 王伟力. 锈蚀钢筋混凝土桥梁力学性能研究综述 (I)[J]. 长沙理工大学学报, 2007, 4(2): 1-12.
Jin Weiliang, Xia Jin, Wang Weili. *Journal of Changsha University of Science & Technology*, 2007, 4(2): 1-12.

- [3] Berto L, Simioni P, Saetta A. Numerical modelling of bond behavior in RC structures affected by reinforcement corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(5): 1375–1385.
- [4] Lee S C. Prediction of concrete strength using artificial neural networks [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(7): 849–857.
- [5] 马铭彬. 拔出法在工程结构检测中的应用 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2004, 29(1): 47–49.
Ma Mingbin. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2004, 29(1): 47–49.
- [6] Hansen T C. Thermal and electrical conductivity and modulus of elasticity of two-phase composite materials [J]. *Rilem Ball*, 1966, 31: 353–356.
- [7] 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(1): 24–26.
Jin Nanguo, Le Jinfa, Xuan Jiming. *Concrete*, 2005, 3(1): 24–26.
- [8] 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. *Journal of China & Foreign Highway*, 2010, 30(1): 238–241.
- [9] 卜良桃, 李静媛. 后装拔出法检测聚乙烯醇纤维水泥复合砂浆抗压强度的试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2010, 26(2): 211–214.
Bu Liangtao, Li Jingyuan. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition*, 2010, 26(2): 211–214.
- [10] 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. *Architecture Technology*, 2003, 34(1): 58–59.
- [11] 张耀平, 曹平, 董晓军. 岩石抗剪强度计算的稳健回归模型及其应用 [J]. 科技导报, 2010, 28(7): 91–95.
Zhang Yaoping, Cao Ping, Dong Longjun. *Science & Technology Review*, 2010, 28(7): 91–95.

(責任編輯 岳臣)