

后张法孔道压浆工艺若干问题探讨

徐向锋, 叶见曙, 钱培舒

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 简要介绍真空压浆法和冲击回波法的原理、适用范围以及优缺点, 叙述了国外著名大学通过改进压浆材料和工艺提高普通压浆工艺质量的研究方法及其成果. 指出由于普通压浆工艺在国内桥梁界还将长期使用, 所以从改进压浆材料和施工工艺着手提高孔道压浆质量的方法在工程中具有实际的应用价值.

关键词: 预应力混凝土梁; 后张法; 孔道压浆; 冲击回波法; 压浆工艺; 压浆材料

中图分类号: TU378

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)05-0064-04

Discussion on some problems development of duct grouting with post-tensioning method//XU Xiang-feng, YE Jian-shu, QIAN Pei-shu (Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An introduction was given to the principle, scope of application, and characteristics of the vacuum grouting method and impact-echo method. Some research works and achievement about improvement of the common grouting technology by adoption of better grouting materials and techniques in famous universities abroad were presented. In consideration of the fact that the common grouting technology will be widely used in domestic bridge construction, it is concluded that the improvement of grouting materials and techniques is of applicable value in practical projects.

Key words: prestressed concrete beam; post-tensioning method; duct grouting; impact-echo method; grouting technique; grouting material

近年来,我国公路桥梁建设发展迅速,大跨径预应力混凝土桥梁的设计与施工成为流行的趋势.后张法预应力混凝土技术以其能够使用高强材料、促使结构轻型化、跨越能力大、可有效避免混凝土开裂,以及方便采用曲线配筋、不需配备庞大张拉台座等优点在工程中得到广泛的应用.但是,后张法预应力混凝土梁依然存在着一些问题.1985年12月,位于英国南威尔士的 Ynys-Gwas 桥突然倒塌^[1],随后英国运输与道路研究实验室 (TRRL) 对倒塌原因进行了深入调查,发现预应力混凝土梁的孔道压浆存在着严重的不密实现象,给氯化物、水分及氧气侵蚀预应力钢索提供了条件,以至某些截面钢索锈蚀严重,当钢索截面减小到无法承受外加荷载时桥梁突然倒塌.这一事件引起了桥梁界对后张法预应力混凝土梁中孔道压浆问题的普遍关注.

在后张法预应力混凝土梁中如果采用无黏结预应力筋则不需孔道压浆,避免了压浆不密实带来的一系列问题.Ynys-Gwas 桥突然倒塌后英国也一度做出了暂停使用有黏结后张法预应力混凝土的决定.

但是,有黏结后张法预应力混凝土结构预应力筋和混凝土的协同工作能力强,变形一致,与配筋相同的无黏结受弯构件相比,在受弯构件开裂后相同荷载下挠度较小,极限承载能力也能提高 10% ~ 30%.因此有黏结预应力混凝土结构仍将是后张法预应力混凝土桥梁发展的主流.

有黏结预应力混凝土的所有优势都是建立在预应力筋与混凝土黏结完好的基础之上的.孔道压浆的主要作用是为预应力筋和周围混凝土之间提供可靠的黏结力,确保混凝土与预应力筋协同工作,传递预应力及保护预应力筋免受腐蚀.所以,孔道压浆是后张法预应力混凝土结构的关键工序,其质量的好坏直接影响到结构的安全性和耐久性,因此,对后张法预应力混凝土孔道压浆问题进行研究在工程中具有实际的应用价值.

目前工程界进行的提高孔道压浆的质量、确保压浆密实性的研究有 3 个主要方面:①真空压浆工艺的研究与应用;②如何对孔道压浆的质量进行检查评估及发现缺陷后如何补救;③通过改进压浆材

料和工艺来提高孔道压浆的质量。

1 真空压浆法

真空压浆法的基本原理是^[2]：采用真空泵抽取预应力孔道中的空气，使孔道达到负压 0.1 MPa 左右的真空度，然后在孔道的另一端用压浆机以不小于 0.7 MPa 的正压力将水泥浆压入预应力孔道。

真空压浆法和传统的普通压浆法相比，灌浆过程连续、迅速，减小了曲线孔道中浆体自身引起的压力差，特别是对于一些异形管道的关键部位，提高了孔道压浆的密实性，在钢束曲率半径较小、钢束过长以及常规压浆法不好施工的结构中应用，均能取得良好的效果。但是真空压浆工艺复杂，需要特定的设备，造价高，对施工人员的技术要求较之普通压浆工艺要高，所以目前在实际工程中，特别是对大、中跨径预应力混凝土箱形截面梁不好推广。另外在江苏润扬长江公路大桥南北锚碇孔道压浆仿真试验中，真空压浆工艺的模拟试验效果不如普通压浆工艺好，这说明在实际桥梁具体施工环境下如何把握真空压浆工艺还有待进一步研究。

2 压浆检查及补救措施

孔道压浆为结构隐蔽工程，一旦灌注后即成为“暗箱”，质量不易检查。通常在正式灌浆前做模拟试验，不但耗费巨资，而且费时费力，给工程带来了极大的不便。

鉴定孔道压浆质量的研究以美国 Cornell 大学为代表，提出了利用冲击回波法来检查和研究孔道压浆的密实性。

2.1 冲击回波法原理

冲击回波法是基于瞬时应力(声)波的利用^[3]，用小钢球敲击混凝土表面产生的短暂机械冲击来发生低频应力波，传至结构内部，遇到缺陷或者外表面时被反射。来自冲击面、缺陷及其他表面间的多重反射会产生瞬间共振，以此测定结构的完整性或缺陷的位置，记录下来的信号(时间-频率曲线)可以提供有关缺陷存在及其位置的进一步信息。

2.2 冲击回波反应的特点

Cornell 大学研究表明，冲击回波法对鉴定板式结构(主要是 T 形梁、工形梁腹板)中的孔道很有效，图 1^[3]所示为利用冲击回波仪分别对实心混凝土板(a)和含有灌浆完满孔道的混凝土板(b)及含有灌浆不密实孔道的混凝土板(c)进行检测得到的反应波形。

2.2.1 实心板

图 1(a)所示为实心混凝土板的反应波形。冲击波沿板的厚度传播，当遇到对面边界时返回。设置在

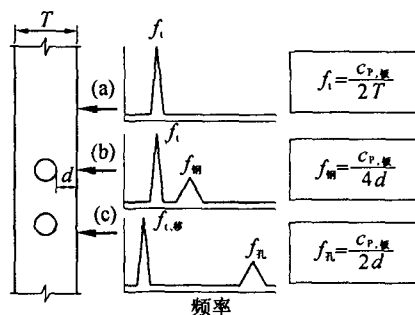


图 1 混凝土板冲击回波法反应波形

受冲击表面附近的接收器监测到反射波到达所产生的表面位移。

最大的位移由 P 波(疏密波)引起。P 波在板前、后表面反射时发生共振，产生的高峰振幅在图中标为 f_1 。当在混凝土内部 P 波波速已知时，板的厚度可按式(1)进行计算：

$$T = \frac{c_{P,板}}{2f_1} \quad (1)$$

式中： $c_{P,板}$ 为 P 波在混凝土板内的传播速度。

当混凝土板的底(背)表面与软质地材料如空气、水或土壤接触时公式(1)有效。

由上可知，由实心板所得的反应特征是振幅谱包含一个明显的峰值，对应于板厚频率为 f_1 。

2.2.2 孔道灌浆完满的板

因为混凝土和其他硬质材料比如钢材之间界面的波反射形式是不同的，所以图 1(b)中所示的孔道灌浆完满的板的反应波形除了有一个与实心板相同的板厚度响应 f_1 外，由于后张预应力束的存在，还出现了一个较低的幅值 f_2 。

控制混凝土和钢材界面反射的公式为

$$d = \frac{c_{P,板}}{4f_2} \quad (2)$$

式中： d 为钢界面的保护层厚度； f_2 为钢材中波的反射频率。

2.2.3 含灌浆不密实孔道的板

图 1(c)所示振幅谱中有一个大的振幅峰值，但由于此时应力波要绕过灌浆不密实孔道中的气孔传播，所以比实心板的厚度频率略有偏移。由于在预应力孔道中含气孔洞的反射作用，还形成了一个较低的振幅峰值，其频率约为图 1(b)中预应力束反射作用相应峰值频率的 2 倍。如果已知孔道保护层厚度以及 P 波波速，孔道的灌浆段以及未灌浆段的绝对频率可按公式(1)和(2)计算。

综上所述，3 种反应波形特征明显，容易鉴定孔道灌浆的实际情况。对于检查复杂结构孔道压浆的有效性还有待进一步的研究。

冲击回波法作为无损检测的手段，在肋板式梁施工现场使用有一定的效果，对箱梁孔道压浆质量

的检查仍没有实践证明.但是,即便使用这种先进的方法,不但现场工作量大而且发现问题后很难补救.现行的补救方法就是对灌浆不密实的孔道进行补浆处理^[4],补浆的主要材料有水泥浆和树脂浆.水泥浆是悬浊液,压水能通过的孔道压浆不一定能通过,而先压进的水往往为钢束进一步锈蚀提供了条件;如果直接压浆,则水泥浆内的水分被混凝土壁吸收,造成浆液堵塞孔道.如果采用树脂浆,补浆的效果比水泥浆好得多,但是造价会大幅度提高.

3 改进压浆材料及压浆工艺

鉴于真空压浆工艺目前存在的局限性,国内桥梁工程中广泛使用普通波纹管并采用常规压浆方法的技术状况还将持续相当长的一段时期.通过改善压浆材料和压浆工艺改进普通压浆法、提高灌浆质量的研究势在必行.

3.1 压浆材料

美国 Pennsylvania 大学和 Texas 大学的研究者对改进水泥浆性能做了大量的研究工作.他们使用波特兰水泥,对 30 多种不同配合比的水泥浆做了一系列的新特性试验、加速腐蚀试验和大比例尺的模拟管道试验来评价其设计的合理性.

一般认为^[5],灌浆用水泥浆应当具有良好的流动性,能够填满钢束之间及钢束与套管之间的间隙;应当能够尽快地达到一定的抗压强度及黏结强度;要有足够的抗泌水性,特别是对于高程有变化的管道.通常可以通过使用一种外加剂来获得某种性能,如更好的流动性、触变性、较小的透水性,但是这种外加剂可能会对其他的性能产生不利影响,比如 Pennsylvania 大学和 Texas 大学所做的水泥浆流动性和标准泌水试验的结果表明:使用高效塑化剂将增加其泌水性.各种外加剂之间是否会相互作用而对水泥浆产生不利的影响是难以预知的,所以尽量少用外加剂以达到最佳的压浆效果是国内外水泥浆研究的方向.

对于具有恰当新特性的水泥浆,根据流动性和抗泌水性, Pennsylvania 大学和 Texas 大学选择了 3 种加速腐蚀试验.试验利用阳极极化作用,在试件上施加电势形成电势梯度,驱使氯离子透过水泥浆到达钢束表面加速腐蚀的发生,结果表明掺入粉煤灰的水泥浆抗腐蚀能力最强.如果添加抗泌水外加剂则降低了水泥浆的抗腐蚀性能,但是当水灰比为 0.33 时其性能仍然取得了令人满意的效果.加速腐蚀试验同时证明:低泌水性、加入最少量化学外加剂的水泥浆具有最佳的抗腐蚀性能.对掺入粉煤灰和抗泌水外加剂的两种水泥浆做大比例尺管道试验与标准的 TxDOT 水泥浆进行比较,结果表明在新特性试验

和加速腐蚀试验中表现良好的这两种水泥浆注入孔道后,可保证孔道密实无孔隙.

通过实验筛选, Pennsylvania 大学和 Texas 大学最后推荐的两种在实验中性能表现最好的水泥浆为:①水灰比 0.35,粉煤灰(C 级)等质量置换 30% 的水泥,另加 4 mL/kg 的高效塑化剂.这种水泥浆适用于高抗腐蚀性并且无极度泌水(管道竖向上小于 1 m)的情况.②水灰比 0.33,加 2% 的抗泌水外加剂.这种水泥浆适用于高抗泌水性(管道竖向上高达 38 m)及良好抗腐蚀性的情况.

3.2 管道材料

管道材料的选择是很重要的.比如采用金属管道,如果搁置过久会因为锈蚀而在管道表面产生孔洞,浇筑梁体期间水泥浆由孔洞渗入而堵塞孔道.所以孔道材料应由耐腐蚀材料制成,以保证在结构设计年限内其性能不退化.此外,管材还必须具有一定的强度,防止在真空压浆过程中当管道抽空时管壁瘪凹.1992 年英国对后张法预应力混凝土桥梁防护技术进行了深入研究后提出,要选择合适的管道材料以形成多层保护体系,建议采用聚丙烯和高度聚乙烯管道.

3.3 压浆工艺

严格正确的施工方法是提高灌浆密实性的重要因素.水泥浆是混合液体,必须充满预应力钢束与管道之间留下的复杂空间.合理地布置排气口,正确的排气和压浆顺序可排除滞留在水泥浆中的空气,提高灌浆质量,避免在管道内留下孔隙.在孔道最高点及其附近、锚具处、最低点均应设置排气孔,其间距不宜大于 12 m.灌浆一般从最低点开始,有多层孔道的则先灌下层再灌上层.从管道灌浆口到出浆口逐个封闭排气口.对于拱顶位置的排气口,要将其下游的排气口封闭,当稳定的水泥浆从排气口持续喷出并且喷出量大于相邻两个排气口之间的管道体积时封闭该排气口.

压浆完成后,灌浆口、出浆口、排气口、阀门等在封闭后不应拆除或打开,直至水泥浆凝固.24 h 之内孔道不能受振,以免影响灌浆质量.

另外,经验丰富的灌浆工作人员对整个灌浆过程操作娴熟,控制得当,将大大增加优质灌浆的可能性.

4 结 语

孔道压浆是后张法预应力混凝土桥梁防止预应力筋锈蚀的最后一道防线,要确保该类桥梁的安全性和耐久性,孔道压浆的质量是一个不容忽视的问题.

真空压浆工艺在具体施工环境下其效果尚不好把握,应用范围目前也有一定的局限性;各种检测方法可以鉴定一些桥梁孔道压浆质量的好坏,但是这

和补浆处理一起作为一种被动的补救措施不可能成为保证后张法预应力混凝土桥梁孔道压浆质量的有力手段。所以,普通压浆工艺在国内桥梁界还将长期使用,而从改进压浆材料和施工工艺着手提高普通压浆质量的工程研究具有实际应用价值。

当有新的灌浆材料拟使用时,必须先经过试验,确定其具有满足要求的新特性,估计外加剂在抗腐蚀方面的特性以及外加剂之间可能存在的副作用后方可用于实际结构。

参考文献:

[1] Woodward R J. Collapse of a segmental post-tensioned concrete

(上接第8页)

e. 病险水库风险指数的计算。按式(3)计算病险水库风险指数 R

$$R = P_f L \quad (3)$$

式中: P_f 为溃坝概率。由于溃坝概率 P_f 往往比较小,而 L 在 0.1~1 之间,两者的乘积更小。为直观起见,将其放大 1 000 倍,则式(3)变为

$$R = 1000 P_f L \quad (4)$$

f. 按上述方法计算诸多病险水库的风险指数,然后依风险指数大小排序,决定除险加固顺序。

6.2 计算实例

以沙河集水库为例,按上述方法计算得水库除险加固前后风险指数 R 分别为 0.7180 和 0.0285^①,说明加固后比加固前风险指数降低了 96%。

如果多座大坝作类似分析,则可以得到各坝的风险指数,即可排出风险的大小顺序,供排序决策参考。

7 结 语

本研究在常规的大坝安全鉴定(评价)的基础上,引入和采用目前国际上先进的大坝风险分析概念和技术,首次建立了我国病险水库风险判别标准体系。应用表明,该体系所研究和建议的方法基本可行,并可首先用于病险水库除险加固排序;然而它又是初步的,鉴于大坝安全的重要性及其影响因素众多,以及风险评价仍处于发展阶段,还需对体系中的一些环节做专门的深入调查研究,使该体系得到完善和提高。

参考文献:

- [1] Guidelines on Risk Assessment[S]. Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD), 2003.
- [2] Vick S G. Degrees of belief-subjective probability and engineer-

bridge[R]. Concrete Bridge Design and Maintenance: Steel Corrosion in Concrete, 1989. 38—60.

- [2] 朱方容. 后张法中的灌浆技术——真空吸浆法[J]. 湖南交通科技, 2002, 28(2): 54—55.
- [3] 冯大斌, 栾贵臣. 后张法预应力混凝土施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 89—92.
- [4] 夏涛. 我省大型桥梁若干典型病害处治技术探讨[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(3): 56—59.
- [5] Schokker A J, Breen J E, Kreger M E. Simulate field testing of high performance grouts for post-tensioning[J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(2): 127—133.

(收稿日期: 2004-07-17 编辑: 高建群)

ing judgment[M]. Reston: ASCE Press, 2002.

- [3] Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams[S]. Queensland Government Natural Resources and Mines, 2002.
- [4] Dekay M L, McClelland G H. Predicting loss of life in case of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis, 1993(2): 193—205.
- [5] Graham W J. A simple procedure for estimating loss of life from dam failure[R]. D-8540, Bureau of Reclamation, USA, 1999.
- [6] 朱淮宁. 溃坝经济分析研究[D]. 南京: 河海大学, 1997.

(收稿日期: 2004-11-30 编辑: 熊水斌)

(上接第11页)差别最大可达30%。河道型水库的洪水调度应该考虑动库容的影响。

b. 对于河道型水库,采用静库容推算入库流量过程较采用动库容推算入库流量过程滞后,峰值较小,峰值相差可达2%。

c. 对于河道型水库的洪水调度,可以采用入库站洪水预报和库区的旁侧人流预报作为边界条件,应用水力学洪水演进模型,通过控制坝上水位过程,直接模拟计算出库流量,进行水库洪水调洪演算。

d. 对于河道型水库的历史洪水整编,采用动库容方法推算入库流量过程比较符合实际,建议采用动库容方法推算入库流量。

参考文献:

- [1] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值-解析解法[J]. 水利学报, 2002(3): 69—73.
- [2] 许海军, 陈守煜. 基于实测资料的水库动库容调洪数值解法[J]. 大连理工大学学报, 2003(6): 837—840.
- [3] 李光炽. 流域洪水演进模型及其参数反问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [4] 阿包特 M B. 计算水力学[M]. 王绍文, 魏启宇译. 北京: 海洋出版社, 1985. 46—79.
- [5] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 152—157.

(收稿日期: 2004-01-06 编辑: 高建群)

①王仁钟, 李雷, 王昭升, 等. 病险水库除险加固排序实用方法研究. 南京水利科学研究院, 2004.