

孔道压浆质量对预应力砼梁的影响研究

江茂盛^{1,2}, 钟建国^{1,2}, 范立朋^{1,2}

(1.广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507;
2.广东盛翔交通工程检测有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 基于孔道压浆密实度的分级标准和实际工程调查结果, 分析了预应力钢筋锈蚀后的力学性能, 推导了预应力钢筋锈蚀后砼梁的抗弯承载能力计算式, 并分析了预应力钢筋与砼的整体性降低对砼梁抗弯性能的影响; 利用有限元软件 ANSYS 模拟不同压浆质量下的预应力砼梁, 计算了结构频率和在外力作用下跨中截面的应变和挠度, 结果表明提高孔道压浆质量能提高预应力砼梁的刚度, 梁的受力也更合理。

关键词: 桥梁; 预应力砼梁; 压浆质量; 承载能力; 有限元模拟

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0171-04

后张法预应力梁是先预制梁体后张拉预应力筋, 在桥梁工程中应用广泛。后张法施工在张拉预应力钢筋后要进行孔道压浆, 压浆质量将影响预应力梁的力学性能。由于工艺和材料等原因, 预应力筋孔道容易出现压浆不密实或空洞等现象。大量调查表明, 中国很多早期建设和部分近年建设的桥梁, 孔道压浆质量问题非常严重。该文分析孔道压浆质量对预应力砼梁的影响。

1 压浆不密实的危害与分级

孔道压浆质量是保证预应力钢绞线在桥梁长期运营过程中发挥作用的重要因素。压浆不密实给预应力砼梁带来的影响主要表现在以下两方面: 一是水和空气的进入使钢绞线更容易发生锈蚀, 锈蚀严重时钢绞线甚至会断裂, 极大地影响桥梁的耐久性和安全性; 二是降低预应力与周围砼的整体性, 使预应力筋上的力不能均匀传到结构物中, 从而增加锚具的受力, 影响梁的承载能力、抗裂性能和使用寿命。参考国内外相关经验和分级标准, 张武毅等对孔道压浆密实度进行了分级(见表 1)。其中 D 级又

可分为 D1、D2 和 D3 级, 分别对应于大半空、接近全空和全空的孔道(见图 1)。C 级和 D 级密实度对钢绞线的危害很大。

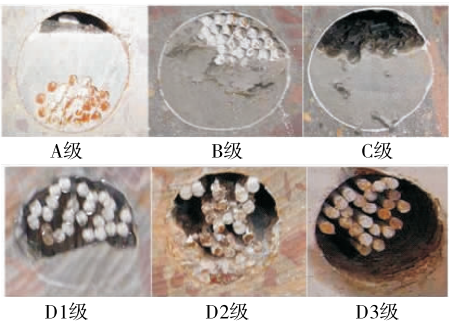


图 1 压浆密实度分级

2 孔道压浆密实度的调查

东南大学交通学院桥梁与隧道研究所对沪宁(上海—南京)高速公路扩建工程中锡澄运河大桥、北兴塘大桥和锡北运河大桥的孔道压浆密实度进行调查, 调查结果见表 2。其中: A 级为密实; B 级为

表 2 孔道压浆密实度调查结果

表 1 孔道压浆密实度分级标准	
评价等级	孔道状态描述
A 级	注浆饱满或波纹管上部有小蜂窝状气泡, 与钢绞线不接触
B 级	波纹管上部有空隙, 与钢绞线不接触
C 级	波纹管上部有空隙, 与钢绞线相接触
D 级	波纹管上部无砂浆, 与钢绞线相接触并严重缺少砂浆

桥名	调查点 数量/个	各密实度等级所占比例/%				
		A	B	C	D1~D2	D3
锡澄运河大桥	3 117	42	15	9	19	15
北兴塘大桥	3 689	40	28	13	10	9
锡北运河大桥	1 519	29	25	15	14	17
合计	8 325	39	23	12	14	12

1/5空; C级为2/5空; D1~D2级为3/5~4/5空; D3级为全空。这3座桥大都是在20世纪八九十年代竣工,采用支架现浇砼、节段悬臂现浇砼等施工方法建造。

从表2可看出:在9000多个调查点中,完全密实的比例仅39%,而全空(未压浆)的比例高达12%;对钢绞线锈蚀有严重影响的C、D级占调查总数的38%,基本等于压浆完全密实的比例。

为深入了解广东省预应力砼桥梁孔道压浆质量状况,对广东某大桥进行调查,调查结果见图2和图3。结果显示对钢绞线锈蚀有严重影响的D级占调查总数的28%。

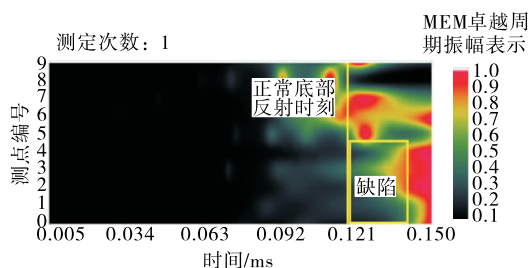


图2 某大桥测试孔道等值线图



图3 预应力砼桥梁孔道压浆现场钻孔验证

3 压浆不密实对预应力砼梁的影响

3.1 压浆不密实对预应力钢绞线的影响

后张法施工的预应力砼梁预留孔道直径大于预应力筋的直径,张拉预应力钢筋后要要进行孔道压浆,排除孔道内的空气和水,避免预应力筋受到空气和水的影响而锈蚀。如果压浆质量太差,管道存在空洞,水和空气进入,会导致预应力钢绞线锈蚀概率增加、锈蚀时间提前。

3.1.1 锈蚀预应力钢绞线的有效截面面积

钢绞线锈蚀会导致其有效截面面积减小,导致其力学性能下降。预应力钢绞线锈蚀率计算式为:

$$\eta = 4\Delta D / D_0 \quad (1)$$

式中: ΔD 为钢绞线的锈蚀量; D_0 为没有锈蚀前钢绞线的直径。

预应力钢绞线有效截面面积的计算式为:

$$A(\eta) = (1 - \eta)A_0 \quad (2)$$

式中: A_0 为没有锈蚀前钢绞线的截面面积。

3.1.2 锈蚀预应力钢绞线的屈服强度

根据预应力钢束锈蚀后强度与钢绞线锈蚀率之间关系的研究结果,预应力钢绞线的名义强度随锈蚀率的增加而线性退化。罗小勇等的锈蚀试验表明,随着锈蚀率的增加,钢绞线的名义屈服强度降低,并通过大量实验数据统计回归给出了名义屈服强度与锈蚀率的关系式:

$$f(\eta) = 1668.67 - 13.816\eta \quad (0 < \eta < 6.4) \quad (3)$$

式中: $f(\eta)$ 为不同钢绞线锈蚀率下的名义屈服强度(MPa)。

3.1.3 锈蚀预应力砼梁的抗弯承载力

预应力钢束锈蚀所引起的钢绞线有效截面面积减小和强度降低是导致锈蚀预应力砼梁抗弯承载力降低的主要原因。在不考虑锚具锈蚀对抗弯承载力影响的前提下,对于锈蚀的预应力砼梁,预应力钢绞线面积、抗拉强度可分别采用锈蚀预应力钢绞线有效截面面积和抗拉强度代替。参考 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》第5.2.2条规定,推导出锈蚀预应力砼梁抗弯承载力计算公式为:

$$M_p = f_{cd}bx(h_0 - x/2) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd}(\eta) - \sigma'_{p0})A'_p(\eta)(h_0 - a'_p) \quad (4)$$

$$f_{cd}bx + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd}(\eta) - \sigma'_{p0})A'_p(\eta) = f_{sd}A_s + f_{pd}(\eta)A_p(\eta) \quad (5)$$

式(4)、式(5)中参数含义见 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》。

3.2 压浆不密实对预应力砼梁受弯性能的影响

3.2.1 压浆不密实对裂缝开展和跨中挠度的影响

压浆不密实区域钢绞线与砼之间的粘结退化或失效会影响预应力砼梁的裂缝开展。砼开裂会引起砼受拉应变能损失,而有效粘结能减少能量损失。若粘结力退化或失效,则砼开裂导致的砼受拉应变能损失较大,砼剩余拉应变减小,裂缝周边不易出现新裂缝,导致梁裂缝数量减少、裂缝间距增大。

在预应力砼梁开裂之前,梁承受的荷载较小,梁的刚度基本由砼截面控制,压浆质量缺陷导致的截面削弱影响很小,压浆不密实对跨中挠度的影响不大;荷载增加引起砼开裂后,预应力梁的刚度退化,压浆空洞或不密实区域越大,结构的刚度退化越明显,承受相同荷载时跨中挠度也就越大。

3.2.2 压浆不密实对受压区高度和承载力的影响

压浆不密实或空洞导致的预应力砼梁截面面积减小对其抗弯承载力的影响很小。主要原因在于压浆质量变差会导致预应力钢束和砼的变形不协调,从而引起预应力砼梁抗弯性能降低。由于预应力钢束与砼间的不协调变形会降低跨中预应力钢绞线的拉力,根据规范中抗弯承载能力计算公式,预应力钢绞线拉力变小,则需要更长的力臂来平衡截面弯矩,使砼受压区的合力作用点往上移,受压区高度变小,从而降低预应力砼梁的抗弯承载力。压浆空洞或不密实段越长,跨中截面处钢绞线拉力减少越大,预应力砼梁抗弯承载力降低也就越明显。

4 预应力砼梁的有限元分析

有限元分析软件 ANSYS 能采用合适的单元模拟预应力砼梁的静动力性能。下面利用 ANSYS 模拟不同压浆质量下的预应力砼梁,分别计算结构频率及外力作用下跨中截面的应变和挠度并作对比分析。

4.1 ANSYS 模拟计算过程

4.1.1 有限元模型的建立

某梁场 30 m 简支预应力砼 T 梁,其预制长度为 29.96 m,计算跨径 29.20 m,梁高 1.60 m,预制梁宽 1.20 m,砼强度等级为 C50,其中钢绞线强度标准值为 1 860 MPa,各束预应力筋的张拉控制应力为 1 395 MPa。砼用 Solid65 单元模拟,预应力钢筋用 Link8 单元模拟,利用 ANSYS 建立的模型见图 4。

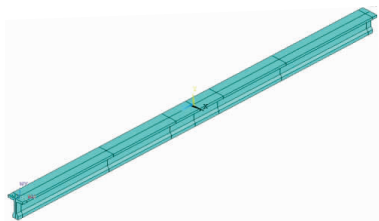
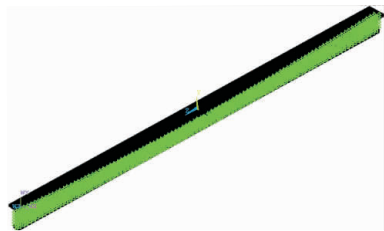


图 4 预应力砼梁的几何模型

4.1.2 施加约束

采用节点耦合法模拟预应力砼梁,即将预应力钢筋和砼分别建模并划分网格。如果孔道压浆密实,则耦合预应力筋与砼的 3 个方向位移,而对于孔道无压浆的梁,只将预应力筋和砼在预应力筋的法线方向上耦合,切线方向上可自由滑动,用来模拟钢筋与砼间无粘结的特点。预应力钢绞线与砼之间的粘结效果用 Combin14 单元模拟,通过调节 Combin14 单元的弹性系数模拟预应力筋和砼之间的粘结效果,从而模拟压浆质量对 T 梁的影响(见图 5)。



灰色部分代表预应力筋与砼之间的粘结作用。

图 5 预应力筋与砼之间粘结模型

4.1.3 求解设置

采用 ANSYS 中的 APDL 命令设置静力分析求解,对预应力筋采用初应变法施加预应力,计算得到 T 梁在重力作用下的变形(见图 6)。

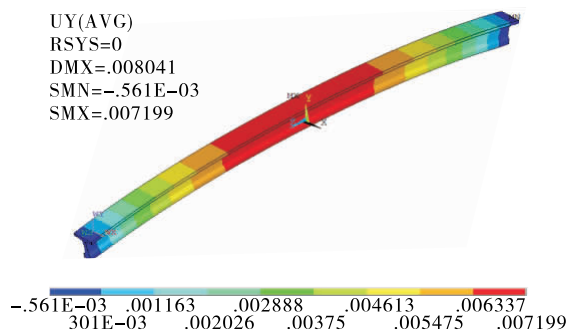


图 6 简支梁变形云图(单位:mm)

4.2 数值模拟结果分析

4.2.1 压浆质量对预应力砼梁频率的影响

不同压浆质量的预应力砼梁,结构频率会有所不同。模型分无粘结,Combin14 单元的弹性常数为 10^8 、 10^{10} 、 10^{12} ,有粘结 5 种类型,模拟 5 种不同压浆质量。进入 ANSYS 求解器,分析类型设置为模态分析,计算结构的前三阶固有频率,结果见图 7。

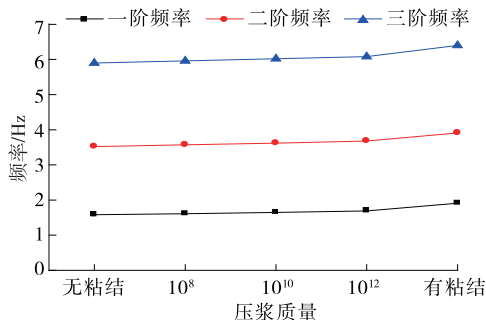


图 7 不同压浆质量预应力砼梁的频率

从图 7 可看出:随着压浆质量的提高,预应力砼梁的前三阶频率增加,说明压浆质量差异会导致预应力砼梁的自振频率不同。

4.2.2 压浆质量对跨中砼应力分布的影响

不同压浆质量的预应力砼梁,在相同荷载作用

下的结构响应也会有所不同。取预应力筋与砼有粘结和无粘结(即压浆密实和未压浆)两种极端情况进行分析。在跨中分五级加载,一至五级加载力分别为98.4、193.1、290.2、386.0、470.1 kN;卸载分两级进行,先卸载到238.9 kN,再卸载到零。有限元模型计算得到的T梁在各级荷载作用下跨中截面梁顶和梁底砼的应变见表3、表4。应力以受拉为正、受压为负。

表3 压浆密实时跨中砼应变

荷载/kN	梁顶应力/MPa	梁底应力/MPa	受压区高度/m
自重	-4.5	-7.7	1.60
98.4	-6.5	-4.9	1.60
193.1	-8.5	-2.2	1.60
加载 290.2	-10.4	0.5	1.53
386.0	-12.4	3.2	1.27
470.1	-14.4	5.9	1.13
238.9	-9.3	-1.1	1.60
卸载 0.0	-4.5	-7.7	1.60

表4 未压浆时跨中砼应变

荷载/kN	梁顶应力/MPa	梁底应力/MPa	受压区高度/m
自重	-4.6	-6.8	1.60
98.4	-6.6	-4.0	1.60
193.1	-8.6	-1.3	1.60
加载 290.2	-10.6	1.5	1.40
386.0	-12.6	4.3	1.20
470.1	-14.6	7.0	1.08
238.9	-9.5	0.4	1.53
卸载 0.0	-4.6	-6.8	1.60

由表3、表4可看出:对于两种压浆质量完全不同的预应力砼梁模型,当加载荷载较小时,由于预应力的作用,跨中截面全部受压;随着荷载的增大,跨中梁顶压应力两者基本相等,但跨中梁底开始受拉,压浆密实的梁出现拉应力的时间比未进行压浆的梁晚,在同级荷载作用下,压浆密实的梁的拉应力比未进行压浆的梁小,说明压浆密实的预应力砼梁比未进行压浆的梁更不容易开裂。而且在加载过程中,压浆密实的梁的受压区高度大于未进行压浆的梁的受压区高度,说明提高压浆质量对预应力砼梁的受

力有利。

4.2.3 压浆质量对预应力砼梁跨中挠度的影响

有限元模型计算得到的各级荷载作用下不同压浆质量预应力砼梁的跨中挠度曲线见图8,位移取向下为正。

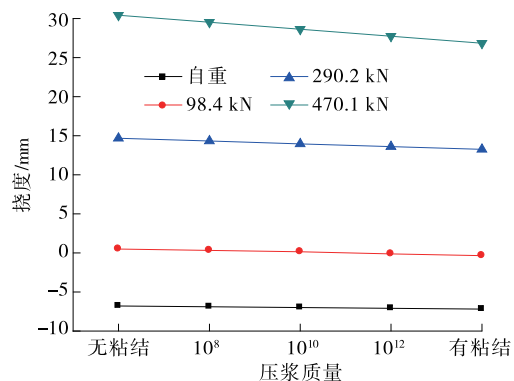


图8 各级荷载作用下预应力砼梁的跨中挠度

从图8可看出:随着压浆质量逐渐提高,在不同荷载作用下,预应力砼梁跨中截面挠度逐渐变小,说明提高压浆质量可提高预应力砼梁的刚度。

5 结论

(1) 基于孔道压浆密实度分级标准,实际工程调查发现孔道压浆密实度C、D两级(2/5空~全空)占比较高。

(2) 预应力砼梁压浆质量差会导致预应力钢绞线锈蚀概率增加,锈蚀造成钢绞线有效截面面积减小、强度降低,影响预应力砼梁的抗弯承载力。

(3) 预应力钢筋与砼的粘结性能退化,影响梁体裂缝开展;预应力钢筋与砼的变形不协调,影响预应力砼梁的刚度和受压区高度,进而影响承载能力。

(4) 随着压浆质量的提高,预应力砼梁频率增大,跨中应力更加合理,跨中挠度减小,说明提高压浆质量能提高预应力砼梁的刚度,对受力有利。

参考文献:

- [1] 张武毅.预应力孔道灌浆密实度检测评价技术体系的研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2015,28(1).
- [2] 叶见曙,张峰.预应力混凝土连续箱梁调查研究报告[R].南京:东南大学,2004.
- [3] 陈淮,李杰,陆慧琳.腐蚀预应力混凝土梁桥抗弯承载能力计算方法研究[J].世界桥梁,2015(1).
- [4] 罗小勇,李政.无粘结预应力钢绞线锈蚀后力学性能研究[J].铁道学报,2008,30(2).

(下转第187页)

- of RC beam[J]. Engineering Structures, 2013, 48(3).
- [32] Zhu W, François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51(2).
- [33] Azad A K, Ahmad S, Azher S A. Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(1).
- [34] Yang S-Y, Liu X-L, Leng Y-B. Prediction of flexural deformation of a corroded RC beam with a polynomial tension-stiffening model[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(6).
- [35] Zhong J, Gardoni P, Rosowsky D. Stiffness degradation and time to cracking of cover concrete in reinforced concrete structures subject to corrosion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 136(2).
- [36] 吴庆, 袁迎曙. 基于钢筋锈蚀的混凝土梁承载能力退化预计模型[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(4).
- [37] Ballim Y, Reid J. Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams: an experimental critique of current test methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6).
- [38] Almusallam A A, Al-Gahtani A S, Aziz A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on flexural behavior of concrete slabs[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3).
- [39] Yoon S, Wang K, Weiss W J, et al. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(6).
- [40] Zila Rinaldi, Stefania Imperatore, Claudio Valente. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11).
- [41] 李富民, 袁迎曙, 王波, 等. 锈蚀钢绞线预应力混凝土梁受弯承载力评估[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2).
- [42] 朱尔玉, 刘椿, 何立. 预应力混凝土桥梁锈蚀后的受力性能分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2).

收稿日期: 2016-04-25

(上接第 151 页)

势非常明显, 其钢束用量少, 且拆除简单, 若采用环氧涂层成品索, 还可解决钢绞线的防腐问题, 更便于后期拆除。

6 结语

中国于 2005 年建成国内第一座波形钢腹板箱梁桥浈河大桥, 经过 10 余年的研究, 已逐步向大跨径组合结构发展。但在波形钢腹板组合结构体系的理论研究、试验论证和创新优化等方面仍有待研究, 还需通过大量工程实践不断丰富和完善这种新型结构理论体系, 从而推动钢-砼组合结构实现跨越式发展, 为化解国内钢铁产能过剩、环保形势严峻等重大问题探索新的出路。

参考文献:

- [1] 李淑琴, 万水, 陈建兵. 一种新型抗剪连接件试验研究[J]. 桥梁建设, 2009(4).
- [2] 苏立超. 波形钢腹板箱梁桥剪力键形式的优化设计[J]. 交通标准化, 2012(1).
- [3] 钟豪, 徐君兰, 顾安邦, 等. 波纹钢腹板 PC 组合箱梁的抗剪连接键分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(3).
- [4] 杜斌, 包太, 黄春晖, 等. 大跨径悬臂浇筑连续箱梁墩顶临时固结结构设计研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2013, 30(4).
- [5] 苏立超. 大跨度波形钢腹板组合箱梁桥关键技术研究[J]. 公路与汽运, 2014(2).

收稿日期: 2016-05-09

(上接第 174 页)

- [5] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 王磊, 张旭辉, 张建仁. 局部无压浆 PC 构件抗弯性能试验及计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10).
- [7] 王兴奎. MIDAS 与 ANSYS 在桥梁检测中的应用实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 白杨. 灌浆与张拉力对预应力砼梁的性能影响分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [9] 徐向锋, 叶见曙, 钱培舒. 后张法预应力混凝土梁的孔道压浆研究[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2004 年全国桥梁学术会议论文集[C]. 2004.
- [10] 周明伟. 预应力混凝土箱梁后张法施工孔道压浆质量控制[J]. 山西建筑, 2012, 38(17).

收稿日期: 2016-08-04