

文章编号: 1002-0268 (2008) 01-0092-06

后张预应力混凝土结构灌浆空洞 X 射线无损检测的试验研究

安 琳, 郑亚明

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 利用国内现有的钢结构 X 射线探伤设备, 对后张预应力混凝土结构中灌浆空洞和预应力筋束的断丝进行无损检测的试验研究。基于混凝土内空洞的 X 射线透照原理, 提出了波纹管内部灌浆空洞的透照方法及技术指标, 包括管电压、曝光时间、焦距和灵敏度等。不同强度和不同厚度混凝土试块的透照试验表明: 在相同的照片黑度范围内, 透照同标号混凝土的管电压和曝光时间随着混凝土厚度的增加而明显增加; 在相同的透照参数下, 同厚度不同标号混凝土的照片黑度差异较小; 混凝土-钢材的厚度等效系数可近似取为 0.2。最后, 在对大量底片分析研究的基础上, 给出了判别金属波纹管和 PVC 波纹管 (包括圆形和扁形两种形式) 内灌浆空洞及预应力筋束断丝的方法和步骤。

关键词: 桥梁工程; 后张预应力混凝土结构; X 射线透照法; 混凝土-钢材厚度等效系数; 波纹管

中图分类号: U446.3; TG115.28

文献标识码: A

Experimental Study of Grouting Voids of Post-tensioned Prestressing Concrete Structure by X-ray Penetration Method

AN Lin, ZHENG Ya-ming

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Utilizing the current X-ray facilities dedicated for nondestructive testing of steel structures, nondestructive tests were carried out to investigate the grouting voids and tendon rupture in post-tensioned prestressing concrete structures. The testing procedure and technical parameters, namely tube voltage, exposure time, focal distance and sensitivity, for detecting grouting voids in sheath were proposed based on the principle of X-ray penetration. The experiments on concrete specimen with different strength and thickness reveal that a rapid increase in the tube voltage and exposure time with the increase of concrete thickness for the same density range of radiograph; however, for same penetration factors, the density of radiograph is almost independent of the concrete strengths. The concrete-steel thickness equivalent factor can be about 0.2. Finally, from a systematical study on a large quantity of radiographs, the approach and procedure to detect the grouting voids within metal or PVC sheath (including both round and elliptic shaped ones) and rupture of tendons were presented.

Key words: bridge engineering; post-tensioned prestressing concrete structure; X-ray penetration method; concrete-steel thickness equivalent factor; sheath

0 引言

后张法施工的预应力混凝土结构中, 管道压浆的

作用主要有两点: 一是确保预应力筋与混凝土的粘结而共同工作, 二是防止预应力筋受空气、水和其他腐蚀性物质侵入而锈蚀。由于泌水和残留空气的存在,

收稿日期: 2006-08-21

基金项目: 江苏省交通厅科学研究资助项目 (04Y003G)

作者简介: 安琳 (1967-), 女, 江苏南京人, 博士, 副教授, 从事桥梁结构检测和评估。(lin_an@seu.edu.cn)

使得压浆管道的入口、出口、曲线管道的上凸段和排气孔附近容易出现大片空洞, 给预应力筋的腐蚀甚至锈断埋下隐患^[1-3]。管道压浆工艺是预应力施工中的隐蔽工程。灌浆前, 管道外的混凝土已浇注完毕并达到规定的强度要求。在给预留管道中压注水泥浆体过程中, 当有较多较稠的浆体从出口溢出后即认为压浆饱满并封口。管道内浆体硬化后是否有空洞存在, 至今仍无有效的检测方法。

目前, 用于混凝土的无损检测技术主要有超声波法、电磁波法和射线法等三类^[4-8]。超声波法是由混凝土表面发射超声波, 从接受到的波形和波速中判断混凝土的质量。由于灌浆空洞位于波纹管内, 而非直接处于混凝土中, 反射波受到多个界面的综合影响, 因此很难从中明确判定空洞的情况。电磁波法是由混凝土表面发射电磁波, 从具有不同电磁特性的反射波中预测混凝土质量。因为波纹管 and 管外钢筋的影响, 无法用于检测灌浆空洞。射线法是用 X 射线或 γ 射线透照混凝土, 穿过混凝土中钢筋或空洞后的射线强度与穿过混凝土本身后的不同, 可以从底片上的黑度差判断混凝土的质量。由于混凝土、管道 (金属波纹管或 PVC 波纹管)、预应力筋和水泥浆体等不同材料的性质, 用于钢结构和素混凝土的各项透照参数和方法不能直接用于预应力混凝土结构灌浆空洞的检测中。

本文利用我国现有的钢结构 X 射线探伤设备开展了灌浆空洞无损检测的试验, 提出了 X 射线透照波纹管内灌浆空洞的原理, 技术指标和方法, 并获得了混凝土材料的曝光参数表和混凝土-钢材厚度等效系数等重要参数。

1 波纹管内灌浆空洞透照方法

1.1 透照混凝土内空洞的原理

透照有空洞混凝土试件的底片上, 有空洞的那部分混凝土比无空洞的混凝土本体部分要黑。这是因为空洞部位所含空气使该部分对射线的吸收能力低于不含空洞的部分, 透过空洞部位的射线强度高于无空洞部位, 所以在 X 射线感光胶片上对应于空洞部位将接受较多的射线光粒子, 形成黑度较大的空洞影像^[9]。

底片上成像是那些透照过程中没有与物体内原子或电子发生作用的一次射线使胶片感光后产生的, 而且由于射线源和胶片之间的距离 (焦距) 不是无限远, 所以空洞在底片上的成像为实际空洞放大后的投影像 (图 1)。且实际用射线源不是点源, 而是有一

定大小的线源, 所以空洞轮廓上会有一些半影 U_g 出现, 即几何不清晰度。散射线是射线与物体相互作用中产生的次级射线, 其能量低于一次射线 (沿直线穿透物体的透射射线) 且方向散乱。散射线会使底片增加黑度, 降低明暗度, 因而降低了底片的灵敏度^[10]。

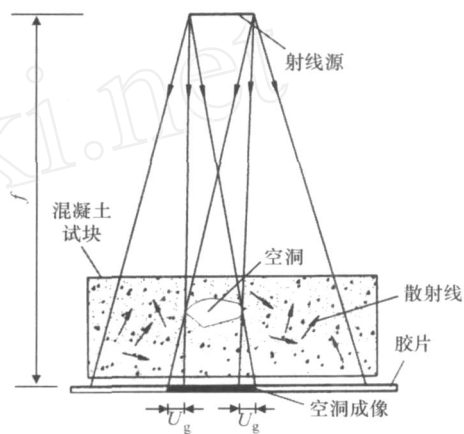


图 1 放射线透照空洞原理图

Fig. 1 Principle of detecting voids in concrete by X-ray

从图 1 中还可可见, 空洞在垂直于射线方向上的大小和位置从底片上可由肉眼判断。但空洞在平行于射线方向上, 即试件厚度方向上的大小和位置无法直接用肉眼识别, 一般需采用设置人工梯形沟或二次摄像等方法进行测定分析^[11]。

1.2 透照波纹管内灌浆空洞的方法

透照波纹管内空洞的原理与上述透照混凝土中空洞原理相似, 但此时未被水泥浆体填充的空洞并非在混凝土中, 而是与钢绞线一同存于波纹管内。图 2 是透照灌浆空洞的两种摄像方式。

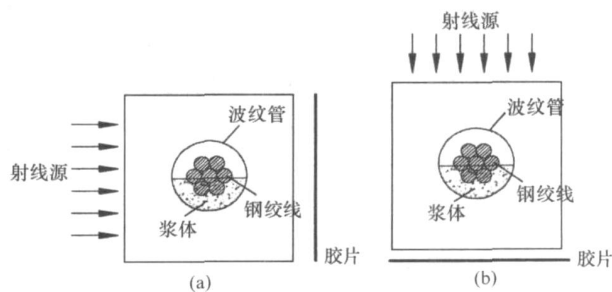


图 2 灌浆空洞检测方法

Fig. 2 Detecting methods of grouting void in sheath by X-ray

理论上, 从图 2 所示两个方向透照构件, 皆可由测定底片上波纹管内外黑度值来判定空洞, 但考虑到沿射线方向上空洞的大小和位置无法直接从底片上用肉眼辨别, 且采取的一些措施 (1.1 节) 在实桥检测中不可行, 以及钢材与混凝土厚度等效系数约为 0.2

(3.1节),即混凝土厚度在射线方向上的微小变化引起的能量变化不如钢材敏感等原因,作者建议采取图2(a)的摄像方式,不宜用图2(b)。

2 透照技术指标的选择

为了获得混凝土中波纹管内灌浆空洞的成像,并取得较高的照相灵敏度,必须对影响灵敏度的各项技术性能指标进行分析和选择,包括射线源、管电压和曝光量(管电流×曝光时间)、焦距、胶片和增感屏、暗室处理等。本试验的灵敏度确定采用底片黑度范围值和像质计来控制。

2.1 线源的选择

混凝土厚度与透过混凝土后射线强度之间的关系^[11]表明:管电压为300 kV的便携式X射线机透照450 mm厚混凝土的射线强度已衰减得很低,应该选用γ射线。当然,450 mm以下的混凝土也可用γ射线透照,但因γ射线底片的灵敏度比X射线的底片低,且透照时间较X射线长数十倍,所以对450 mm以下混凝土选择X射线更合适^[11]。

2.2 管电压、曝光量的选择

国内钢结构探伤中常用的低能量便携机管电压极值为300 kV,管电流为固定值5 mA,只能通过改变管电压和曝光时间来改变射线能量,以满足透照不同厚度混凝土的要求。本文使用Radio flex-300EGS3X射线机,输出管电压为160~300 kV。曝光试验结果表明,管电压300 kV、曝光量200 mA·min时混凝土透照厚度达400 mm。

2.3 焦距的确定

焦距即射线源至胶片的距离。为了减少几何不清晰度,除了选择射线源外,主要是通过改变焦距来实现。几何不清晰度 U_g (图3)的计算公式如下:

$$U_g = \frac{dT}{f - T}, \quad (1)$$

式中, d 为射线源焦点尺寸; f 为焦距,即射线源至胶片的距离; T 为工件射线源侧表面与胶片的距离,通常取为工件本身的厚度。

焦点尺寸越小、焦距越大、工件厚度越小则几何不清晰度也越小。通过对底片画像中像质计清晰度不断改善的试验,建议透照厚度为100~400 mm混凝土时,焦距取600~1 000 mm。

2.4 胶片、增感屏和散乱线的屏蔽

X射线探伤胶片是在片基两面涂有较厚的乳剂层,以便吸收更多的射线能量。工业射线照相中使用的胶片分为增感型胶片和非增感型胶片,我们采用的

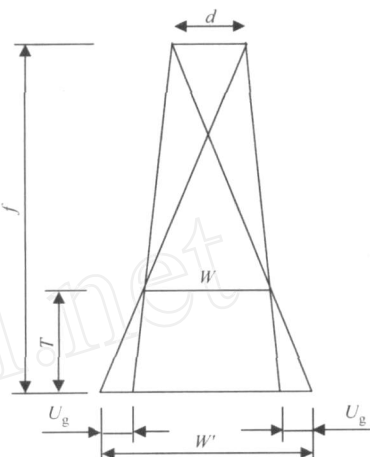


图3 几何不清晰度形成示意图

Fig.3 Formation of geometry unsharpness

是增感型胶片(AGFA C7工业用X射线胶片(100 FW)),并与金属增感屏一起使用,以增加胶片感光速度,减少射线透照时间。暗室处理的药水配方和程序采用自动化操作,洗片采用HQ-430XT型X射线胶片冲洗机,显影液温度28℃,烘干温度50℃,洗片时间22 min/张。为提高透照质量,透照前在胶片前后屏各加入厚0.03 mm铅箔增感屏。

2.5 射线照相灵敏度

本试验研究中采用丝质像质计来测定射线照相灵敏度,以照片上可识别像质计的最小细节尺寸(最小丝径2.5 mm),即绝对灵敏度表示射线照相灵敏度。透照中,像质计被放置在有效透照区内灵敏度预计最差的位置,这样,只要此处的灵敏度达到要求,其他部位可达到要求。本试验以最小丝径的那根丝被识别,且其黑度值在1.0~3.0之间为达到灵敏度标准^[12]。

3 室内试验

3.1 混凝土材料的曝光试验

为了获得不同强度和不同厚度混凝土材料的曝光参数,试验选用常见材料浇注了3种强度:C25、C40和C80,5种高度:20、40、60、80、100 mm的混凝土试块,通过这些基本试块的组合叠加得到不同的总厚度。在透照过程中,始终以肉眼可以分辨的黑度值(1.0~2.05)作为调节透照参数的主要依据。混凝土曝光试验的结果列于表1中。从表1中可见,同一厚度,不同标号的混凝土在相同的透照条件下得到的X射线透照照片黑度差异较小,高强度混凝土射线透照后得到的照片黑度略低于低强度混凝土。这是因为高标号混凝土的密实度高于低标号混凝土,对射线的吸

收能力较强。同标号混凝土随着厚度的增加，管电压和曝光时间则明显增加，以便获得更强的透照能量。

表 1 混凝土曝光试验结果表

Tab. 1 Results of concrete exposure test

编号	混凝土 标号	厚度/ mm	管电压/ kV	曝光量/ (mA·min)	黑度	编号	混凝土 标号	厚度/ mm	管电压/ kV	曝光量/ (mA·min)	黑度
1	C25	100	160	1×5	1.93	8	C25	240	280	10×5	2.05
	C40				1.93		C40				2.01
	C80				1.6		C80				1.75
2	C25	120	160	2×5	2.0	9	C25	260	290	10×5	1.98
	C40				2.0		C40				1.95
	C80				1.65		C80				1.70
3	C25	140	170	2×5	0.8	10	C25	280	290	10×5	1.60
	C40				0.75		C40				1.60
	C80				0.65		C80				1.50
4	C25	1.60	180	3×5	1.25	11	C25	300	300	20×5	1.80
	C40				1.2		C40				1.70
	C80				1.0		C80				1.60
5	C25	180	240	5×5	1.95	12	C25	320	300	20×5	1.70
	C40				1.95		C40				1.70
	C80				1.6		C80				1.65
6	C25	200	260	6×5	1.90	13	C25	340	300	30×5	1.2
	C40				1.90		C40				1.15
	C80				1.70		C80				1.2
7	C25	220	260	8×5	1.80	14	C25	400	300	40×5	1.1
	C40				1.80		C40				1.1
	C80				1.60		C80				1.0

注：本次混凝土曝光试验的焦距统一为 800 mm，第 3 组曝光得到的黑度与其他组差别较大，可以舍弃。

在上述试验同时，我们还分别选用透照 100、200、300 mm 厚的混凝土试块时的曝光参数对阶梯状钢试块进行透照，获得对应的钢材厚度。在相同透照参数和相同底片黑度范围条件下，透照 100 mm 厚度的混凝土相当于透照 18 mm 厚度的钢材，透照 200 mm 厚度的混凝土相当于透照 45 mm 厚度的钢材，透照 300 mm 厚度的混凝土相当于透照 65 mm 厚度的钢材，3 种厚度的等效透照系数分别为 0.18、0.23、0.22。因此，在实际使用中，可近似取 0.2 作为厚度等效系数，利用钢材的曝光曲线初步选择混凝土的透照参数。

3.2 金属和 PVC 波纹管透照试验

后张预应力混凝土桥梁中常用的灌浆孔道由金属或 PVC 波纹管形成，波纹管的截面有圆形和扁形两种。本节即针对不同形式的波纹管进行透照试验。

3.2.1 试验简介

金属圆波纹管的混凝土试件如图 4 所示，钢绞线一端成捆置于波纹管正中心，另一端紧密贴于波纹管底部。灌浆分两个步骤进行：首先是沿试件纵向一部分全部灌满（图 4 右侧部分），另一部分全空（图 4 左侧部分）；然后在全空部分灌下半部分，上部仍为空隙。每一步灌浆结束，浆体硬化后进行透照，并调换试件的透照方向，对试件的两种厚度（100 mm 和

200 mm）进行透照。

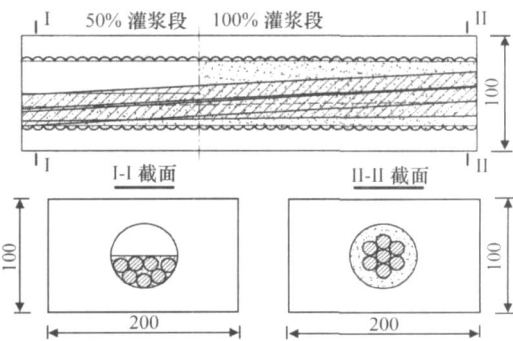


图 4 金属圆波纹管的混凝土试件

Fig. 4 Concrete specimen of round metal sheath

从物理原理上讲，由于 PVC 材料对射线的吸收能力远小于钢材的吸收能力，所以 PVC 管内的灌浆空洞应该比铁皮管内的空洞更易辨别。为了比较其成像与铁皮波纹管成像之间的不同，作者设计了截面为 150 mm×200 mm 的 PVC 圆波纹管的混凝土试件，钢绞线布置、灌浆位置和试验方法同金属圆波纹管。金属和 PVC 波纹管的内径分别是 70 mm 和 90 mm。

金属和 PVC 扁波纹管混凝土试件尺寸均为 150 mm×180 mm×400 mm，正中设置 20×90 mm 的扁波纹管，其中布置 5 束 7 ϕ 15.2 钢绞线。沿管纵向一部分灌满浆，剩余部分全空。参照工程中扁管的布置情

况,射线透照沿波纹管的 20 mm 厚度方向进行。为了解 X 射线对锈断钢绞线的检测情况,在扁管中还放入了 1 根断裂的钢绞线。

3.2.2 试验结果

透照厚度为 100 mm 的射线照片如图 5 所示(第 1 步灌浆结束时)。从图 5 中可以看出,波纹管内灌浆区段与未灌浆区段之间黑度差异明显,未灌浆区段黑度较大,钢绞线之间空隙有较明显的黑度;而灌浆区段的黑度较小,钢绞线之间空隙不明显。铁皮波纹管旋转肋的纹理清晰可见。

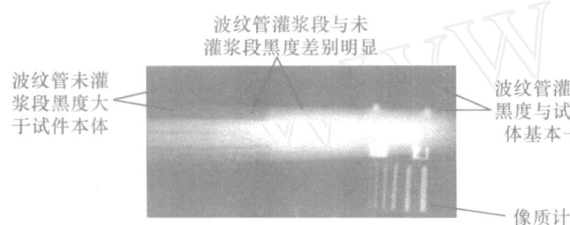


图 5 透照厚度为 100 mm 的铁皮圆管照片

Fig. 5 Radiograph of round metal sheath in concrete specimen with 100 mm thick

透照厚度为 200 mm 的射线照片如图 6 所示(第 2 步灌浆结束时)。从图 6 中可以看出,波纹管灌浆区段与未灌浆区段之间黑度差别明显,未灌浆区段黑度较大,其黑度大于试件本体,灌浆区段黑度与试件本体基本一致。

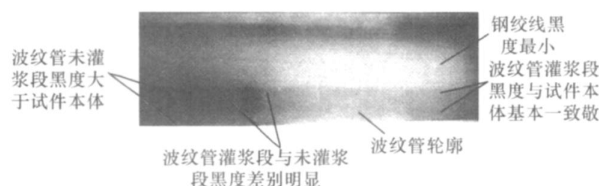


图 6 透照厚度为 200 mm 的铁皮圆管照片

Fig. 6 Radiograph of round metal sheath in concrete specimen with 200 mm thick

图 5 与图 6 的透照结果与实际灌浆形态是一致的。值得一提的是:若在灌浆第 2 步完成后沿 100 mm 厚度方向上透照,将很难在底片上找到未灌浆部分。这时,未灌浆部分的形态如图 4 的 I-I 截面,从顶部照射 I-I 截面后的底片黑度将大于照射 II-II 截面后的底片黑度,但无法判别空洞的位置和大小,只有从侧面沿 200 mm 厚度透照,才能有效找到空洞。正如 1.2 中所述,透照方向的选定十分重要,对于混凝土 T 梁或箱梁,应从梁体侧面照射。

图 7 为 PVC 圆波纹管中只有钢绞线,尚未灌浆时的射线照片。从图 7 中可以看出,因波纹管内未灌浆,其黑度大于试件本体,钢绞线之间空隙有较明显

的黑度,波纹管内预设的断裂钢绞线的断裂位置清晰可见。PVC 波纹管没有铁皮波纹管的旋转肋,但 PVC 管轮廓上的凸出部分很明显地反映在底片上。

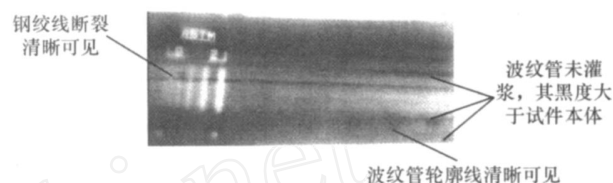


图 7 PVC 圆波纹管全空时照片

Fig. 7 Radiograph of round PVC sheath in concrete specimen without grouting

图 8 为 PVC 圆波纹管内部分灌浆后的照片,从图 8 可以看出,灌浆段与未灌浆段黑度差别明显,灌浆段中的波纹管空隙处黑度与试件本体基本一致,波纹管未灌浆段黑度大于试件本体。说明 X 射线照片可以准确反映 PVC 波纹管中的灌浆情况。

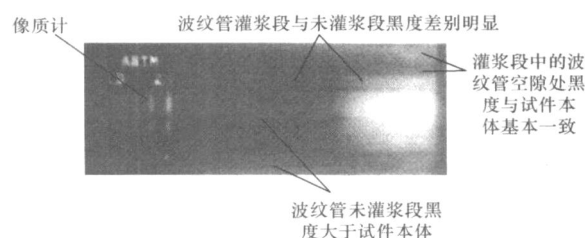


图 8 PVC 圆波纹管部分区段灌浆时照片

Fig. 8 Radiograph of round PVC sheath in concrete specimen grouted partially

PVC 扁管全空的试件透照照片如图 9 所示。从图 9 中可见,波纹管中的空隙黑度大于试件本体黑度,波纹管中的钢绞线断裂清晰可见,波纹管边缘的凸出部明显可见。PVC 扁管部分灌浆照片如图 10 所示,灌浆段与未灌浆段黑度差别明显,灌浆段中的波纹管空隙处黑度与试件本体基本一致,波纹管未灌浆段黑度大于试件本体。金属扁波纹管的透照结果与 PVC 扁管相似,不再赘述。

需要注意的是:在预应力混凝土连续梁中,扁管

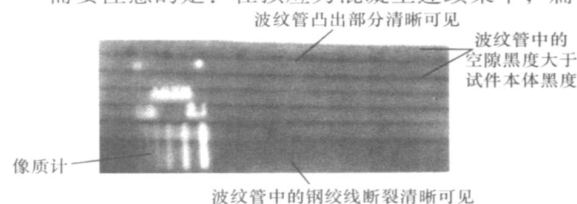


图 9 PVC 扁波纹管全空时照片

Fig. 9 Radiograph of elliptic PVC sheath in concrete specimen without grouting

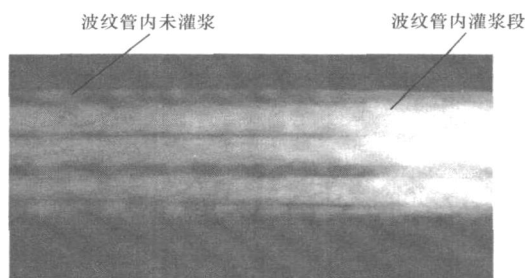


图10 PVC扁波纹管部分灌浆时照片

Fig. 10 Radiograph of elliptical PVC sheath in concrete specimen grouted partially

通常布置在靠近桥面的负弯矩区段,且扁管断面的高度很低(太扁),从梁体侧面(扁管的侧面)透照是不可能的,只能从扁管正上方,即从桥面向梁体透照。因此透照结果只能辨清全空和全满,无法分辨部分填满的情况。

4 结语

(1) 采用国内钢结构探伤中常用的低能量便携机管(管电压为160~300 kV,曝光量200 mA·min),透照混凝土的最大厚度为400 mm。

(2) 透照100~400 mm厚混凝土时的焦距范围在600~1 000 mm。胶片上下底面应加入增感屏,用以增加感光程度,遮蔽散乱射线。

(3) 透照灵敏度以像质计中直径最小的金属丝($\phi 2.5$ mm)的清晰可见为准。

(4) 混凝土材料与钢材的厚度等效系数约为0.2,由该值和钢材的曝光曲线可初步选择透照参数。

(5) 判别波纹管内灌浆空洞和钢绞线断丝的步骤如下:

a. 首先辨出波纹管的轮廓线。金属波纹管的轮廓为白色的旋转肋纹理线,PVC波纹管轮廓为黑色的一块块半月形凸起。

b. 找出波纹管内最亮的白色条带,确定钢绞线的位置,仔细沿条带纵向检查有无锈断处。

c. 将管内除钢绞线以外空隙部分的黑度与波纹管外的混凝土本体黑度对比,若空隙部位的黑度大于管外混凝土本体黑度,则说明灌浆不饱满或存在灌浆空洞;若两者黑度相近,则说明灌浆饱满。在黑度有效范围内,若波纹管内的一部分黑度大于另一部分黑度,则黑度较深部分极有可能存在灌浆空洞。

参考文献:

References:

[1] MUTSUYOSHI H. Present Situation of Durability of Post-tensioned PC Bridges in Japan [C]. Durability of post-tensioning tendons. Switzerland: Fib, 2001: 75 - 88.

[2] PIELSTICK B H. Grouting of Segmental Post-tensioned Bridges in America [C]. Proceedings of the First Fib Congress. Japan: Fib, 2002: 267 - 274.

[3] HAMADA Y, ISHIKAWA Y, MIZOE M, *et al.* Maintenance of Prestressed Concrete Bridges [C]. Durability of Post-tensioning Tendons. Switzerland: Fib, 2001: 109 - 120.

[4] 李颖, 刘小明, 潘冬子. 混凝土梁无损检测新技术及其进展 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (7): 83 - 87.

LI Ying, LIU Xiao-ming, PAN Dong-zi. New Nondestructive Test Technique and Their Developing Trend in Concrete Beam Detection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (7): 83 - 87.

[5] MATT P. Non-destructive Evaluation and Monitoring of Post-tensioning Tendons [C]. Durability of Post-tensioning Tendons. Switzerland: Fib, 2001: 103 - 108.

[6] DEROBERT X, AUBAGNAC C, ABRAHAM O. Comparison of NDT Techniques on a Post-tensioned Beam Before Its Autopsy [J]. NDT&E International, 2002, 35: 541 - 548.

[7] MARTIN J, BROUGHTON KJ, GIANNPOLOUS A, *et al.* Ultrasonic Tomography of Grouted Duct Post-tensioned Reinforced Concrete Bridge Beams [J]. NDT&E International, 2001, 34: 107 - 113.

[8] KAMDA T, WAKAYAMA T, KITAZONO H, *et al.* Evaluation of Grouting Condition in Tendon Ducts of Prestressed Concrete Members by Impact Elastic-wave Methods [C]. Proceedings of the First Fib Congress. Japan: Fib, 2002: 93 - 100.

[9] 小林健人. 混凝土构造物耐久性诊断系列之五: 混凝土结构物的非破坏检查 [M]. 东京: 森北出版株式会社, 1990: 82 - 90. (日文版)

KOBAYASHI K Series 5 of Durability of Concrete Structures: Non-destructive Testing of Concrete Structures [M]. Tokyo: Ohmsha, 1990: 82 - 90.

[10] 中国机械工程学会无损检测分会. 射线检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 64 - 68.

China Mechanic Engineering Institute, Radio Branch. Testing by Radio [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2004: 64 - 68.

[11] 笠井芳夫. 混凝土结构物的非破坏检查 [M]. 东京: 森北出版株式会社, 1990: 55 - 57.

KASAYI Y. Non-destructive Testing of Concrete Structures [M]. Tokyo: Ohmsha, 1990: 55 - 57.

[12] British Standard, Testing Concrete [S]. British Standard Institution.