

文章编号:1671-6833(2017)05-0055-06

钢桥面铺装层粘接强度超声波无损检测技术研究

吕彭民,吴玉文,宋年波

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要: 根据超声波理论,提出利用超声反射法对钢桥面铺装层粘接强度进行无损检测. 根据工程实际中常见的 5 种界面,制作 3 种类型的相关试样,利用 ZBL-520 非金属超声仪进行多次检测试验. 通过对各界面波形和声学参数的研究,发现可将波幅值作为检测粘接强度评判的物理量. 最后选择在同一试样上进行有损、无损界面对比试验. 试验结果表明:各界面波幅值存在差异,其中粘接良好的界面波幅值最小,因此可通过大量测点数据的波幅平均值对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判.

关键词: 钢桥面; 铺装层; 粘接强度; 超声反射法; 无损检测

中图分类号: U446.3 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.023

0 引言

桥面铺装层中的防水粘接层是确保其结构耐久性的重大措施之一,也是保证铺装层与桥面板粘接成一个整体的关键^[1],防水粘接层粘接力不足是造成大跨径桥梁桥面铺装层早期破坏的一个重要原因^[2]. 但是,目前国内外还没有统一的桥面铺装层中防水粘接层粘接强度评价标准.

现有的大跨径桥梁桥面铺装层粘接强度检测主要通过有损检测方法,即对桥面铺装层采用钻芯取样的方法,利用拉拔仪或剪切仪进行测量^[3]. 但是,有损检测会对铺装层结构的整体性造成一定的破坏,影响使用性能. 被测点有限,检测结果往往缺乏代表性,且存在特殊条件下(如高温、工地上不便利等)不易操作等问题.

目前,超声反射法已经成为检测粘结界面粘接强度的最有效的无损检测手段之一,超声波检测已经用于金属—金属、金属—非金属粘接界面的无损检测. 国内外已经在此领域取得了一定的成果,文献[4]将超声检测技术用于检测结构刚度影响较小但存在缺陷的粘接结构很有效. 文献[5]等采用高频超声波研究粘接界面的无损检测,取得了比 Lamb 波法更好的效果. 周伟刚^[6]采用超声纵波和横波反射的方法来单

面检测钢—混凝土界面粘结质量.

由于钢桥桥面铺装层粘结性能无损检测属于金属—非均匀性非金属粘结界面无损检测技术,检测难度较大,目前桥面铺装层粘接强度无损检测技术仍属于盲区. 笔者提出利用超声反射法对钢桥面铺装层与桥面板间粘接强度进行无损检测. 通过试验研究判断可用于无损检测的相关声学参数,并进行有损、无损对比检测试验,探索桥梁桥面防水粘接层粘接强度检测用无损检测技术.

1 桥面铺装层粘接强度无损检测技术研究

1.1 声压反射率和透射率

超声波从一种介质垂直入射到另一种介质,会发生反射和折射. 反射波声压 P' 和入射波声压 P 之比,被称为声压反射率,即 $r = P'/P$. 透射声压 P_2 和入射声压 P 之比,被称为透射率,即 $t = P_2/P$. 当第二种介质较厚时,

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \tag{1}$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \tag{2}$$

式中: Z_1 、 Z_2 为两种介质的声阻抗. $Z = P/u = \rho c$, u 是质点的振动速度; ρ 是介质的密度; c 是波速.

当第二种介质为薄层时,

$$r = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}}; \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}}, \quad (4)$$

式中: ζ 为声阻抗之比, $\zeta = Z_1/Z_2$; λ_2 为第二种介质的波长; d_2 为第二种介质的厚度.

可以看出声压反射率与界面两侧介质的特性阻抗有关,不同界面反射声压不同,即在超声检测仪上显示的波高不同,可以据此初步判断粘结质量的好坏.

1.2 超声检测技术判断依据

目前,混凝土超声无损检测所需测量的物理量是声时、波幅、频率以及接收波波等,主要以声速、波幅和 PSD 判据进行评判. PSD 判据的物理意义为:声时—深度曲线相邻两点的斜率与相邻时差值的乘积,根据 PSD 值在某深度处的突变,结合波幅变化情况,进行异常点判定^[7]. 然而文献[8]研究表明,仅用声速、波幅和 PSD 判据进行评判存在不足,接收波的频率和实测波形等携带的大量信息通常被忽略,因此有必要利用实测波形和频率进行辅助评判,避免误判. 笔者将通过检测数据分析,确定评判桥梁铺装层—钢界面粘结强度的物理量.

1.3 超声脉冲反射法检测试验模型

从桥面铺装层进行检测,即从沥青混凝土一侧进行测试的试验模型如图 1 所示.

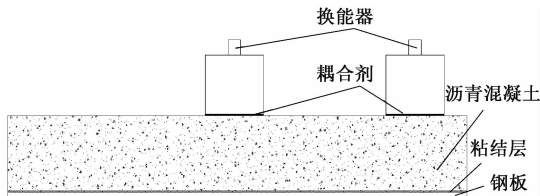


图 1 超声脉冲反射法检测试验模型

Fig.1 Test model for the detection of the ultrasonic pulse echo method

超声波经过换能器—耦合剂界面时会产生能量衰减,为了减少能量的不必要损耗,要尽量使耦合剂紧贴沥青混凝土表面,在保证良好耦合效果的情况下,耦合剂涂层越薄越好^[3],因此在分析中超声波经过耦合剂层可以不予考虑.

2 超声检测试验方法研究

2.1 试验试样的制作

根据工程施工经验,导致桥梁桥面板与铺装层脱粘的工程原因主要有:防水粘接层喷洒不均匀引起的局部粘接强度不足、桥面板表面清理不干净使其无法粘接牢固、阴雨天在桥面板表面有水时施工等. 针对这几种原因以及工程实际中铺装层和桥面板之间常出现的粘结缺陷,结合超声反射法检测粘结界面的理论,拟制定的试验须提供以下几种界面:铺装层与空气界面、铺装层与水界面、铺装层与沙土界面、铺装层与桥梁面板界面(无防水粘结层)、铺装层与桥梁面板界面(有防水粘结层).

为了获取以上 5 种试验界面,笔者借助轮碾成型机制作了 3 种类型试样,试样大小设置为 300 mm × 300 mm × 50 mm. 针对铺装层与空气界面以及铺装层与水缺陷界面,制作了试样 I,如图 2(a)所示. 试样 I 采用 AC-20 沥青混合料碾压成型,为单独的沥青混凝土板,底部无钢板. 针对铺装层与沙土缺陷界面制作了试样 II,如图 2(b)所示. 在钢板左侧 1/2 表面撒布一定量的细沙(细砂粒径为 0.3 mm)模拟缺陷,在钢板右侧 1/2 表面洒布一定量的乳化沥青(防水粘结层),试样一半模拟有沙土界面,另一半模拟粘结良好界面. 针对缺少防水粘结层的铺装层与桥梁面板缺陷界面制作了试样 III,如图 2(c)所示. 为了形成对比,在制

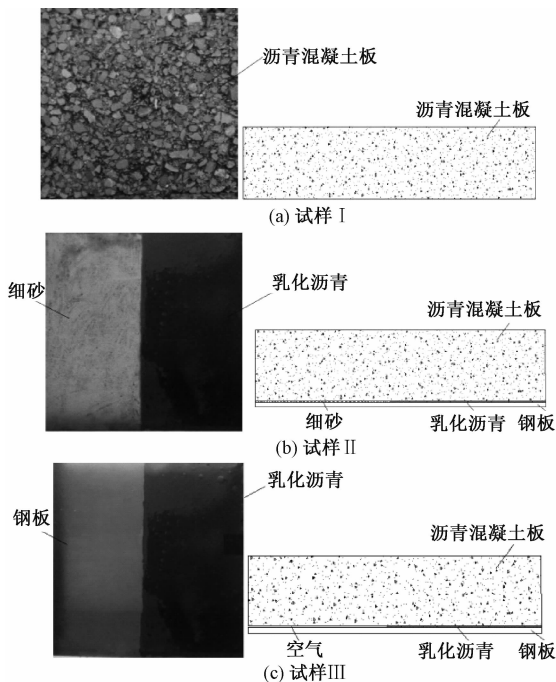


图 2 3 种试样

Fig.2 Three kinds of samples

作试样Ⅲ时,钢板的右侧1/2表面洒布一定量的乳化沥青(防水粘结层),左侧不洒布乳化沥青.

2.2 试验仪器及换能器

笔者从沥青混凝土一侧进行试验检测,使用的仪器是ZBL-U520非金属超声检测仪.试验采用一发一收单面平测的方式,两换能器内边缘距离取为50~100 mm,试样厚度50 mm,相当于测距为118~144 mm,车辙板的横截面积为30×30 cm.根据工程经验及换能器频率表,本试验采用50 kHz的换能器.

2.3 测点布置及各测点测试次数

考虑到试样尺寸的大小,参考超声法检测混凝土缺陷技术规程,将两换能器的边缘距离取为80 cm,每个试样布置28个测点,左右两部分各14个,试样测点布置如图3所示.

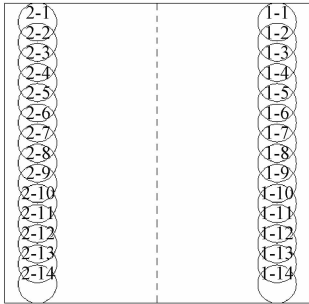


图3 测点布置图
Fig.3 Layout of measuring points

试样Ⅰ测点1-1~1-14和测点2-1~2-14为沥青混凝土—空气或者沥青混凝土—水界面测点;试样Ⅱ测点1-1~1-14为粘结良好的界面,即沥青混凝土—钢板(有防水粘结层)界面,测点2-1~2-14为有沙缺陷的粘结界面,即沥青混凝土—沙界面;试样Ⅲ测点1-1~1-14为粘结良好的界面,测点2-1~2-14为缺少防水粘结层的沥青混凝土—钢板界面.

理论上,同一测点试验次数越多,测得该点的声学参数的统计值越接近实际值,但如果试验次数太多,检测时工作量非常大,检测效率低.为了确定理想的试验次数,笔者取试样Ⅰ和试样Ⅲ进行超声试验检测.每个试样选取了6个测点,试样Ⅰ的1-03~1-08测点,即沥青混凝土—空气界面;试样Ⅲ的1-03~1-08测点,即粘结良好的界面.

以实验次数为横坐标,以测得的各个测点的幅值均值为纵坐标,绘制幅值均值—试验次数折线图,如图4、5所示.声时值和频率的均值—实验次数折线图与图4、5类似,由于篇幅有限,不再列出.

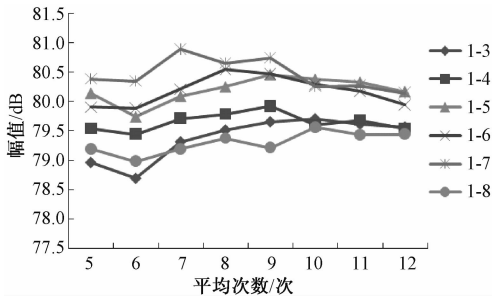


图4 试样Ⅰ6个测点n次实验幅值均值折线图
Fig.4 Line chart of average values of n times of amplitude of six measuring points of sample I

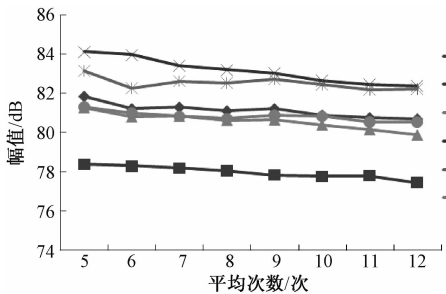


图5 试样Ⅲ6个测点n次实验幅值均值折线图
Fig.5 Line chart of average values of n times of amplitude of six measuring points of sample III

由图4、5可知,当试验次数达到10次以上后,幅值平均值基本趋于稳定,其它试样测试结果规律相同.故在后续试验检测时每个待测点测量10次,取其平均值.

2.4 确定试验检测参数

为了通过试验检测来判别不同的粘接情况,就要获取能够区分不同粘结界面的试验参数,以分析它们之间的差异.为研究各界面声学参数之间的差异,此处对上述5种界面进行大量的试验检测.

(1) 沥青混凝土—空气界面超声检测试验

对试样Ⅰ进行检测,由于试样Ⅰ左右两部分相同,试验时只对右侧部分(测点1-1~1-14)进行检测,将试验结果中参数异常的点剔除掉,剩余测点试验结果特征值见表1.其余各试样不同界面试验结果特征值见表1.从表1中可以看出,空气界面各声学参数的离散性不是很大,说明相同界面各测点的回波特性相近.

(2) 沥青混凝土—水界面超声检测试验

将试样Ⅰ底面置于湿润的毛巾上,模拟沥青混凝土—水缺陷界面,此时对试样Ⅰ(测点1-1~1-14)进行检测,为了更直观地观察空气界面以及水界面相应各测点声时、幅值以及频率等试验结果,现以测点为横坐标,各测点声学参数均值为纵

表 1 各试样不同界面试验结果特征值

Tab.1 The characteristic values of test results of different interfaces of each sample

试样	界面	项目	最小值	最大值	均值	标准差
试样 I	空气	声时	25.72	27.12	26.52	0.431
		波幅	78.83	79.88	79.41	0.272
		频率	46.76	47.73	47.25	0.317
	水	声时	25.20	26.75	26.01	0.550
		波幅	79.10	81.12	80.25	0.643
		频率	46.01	48.30	47.27	0.720
试样 II	粘结良好	声时	24.36	26.67	25.59	0.723
		幅值	77.88	81.93	79.71	1.379
		频率	42.32	47.92	45.02	1.726
	沙缺陷	声时	24.40	27.16	25.99	0.825
		幅值	76.37	81.37	78.09	1.375
		频率	43.56	48.22	45.50	1.479
试样 III	粘结良好	声时	23.72	26.13	25.24	0.774
		幅值	80.07	82.63	81.57	0.719
		频率	42.65	49.10	45.99	2.198
	无防水粘层	声时	23.84	26.08	25.17	0.753
		幅值	78.43	82.38	79.85	1.160
		频率	41.65	49.50	44.97	2.245

注:表中声时为 μs ;波幅单位为 dB ;频率单位为 Hz .
坐标,在同一坐标系中绘制空气界面以及水界面折线图,如图 6 所示.

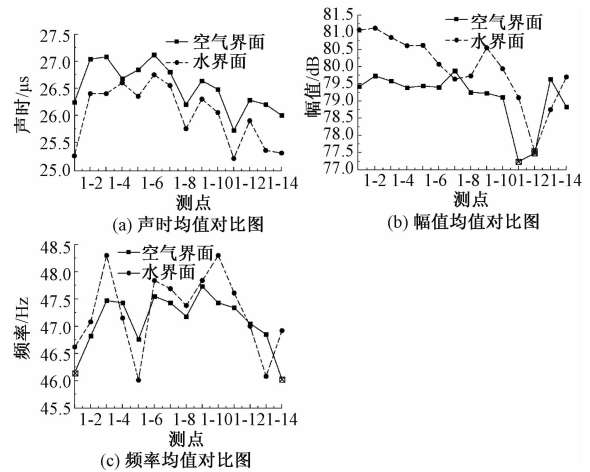


图 6 试样 I 声学参数均值对比图

Fig.6 Comparison chart of average values of acoustic parameters between air and water interface of sample I

由表 1 以及图 6 可以看出:对于同一个测点,空气界面的声时明显比水界面的高,而对于波幅,水界面的要比空气界面的高,空气界面和水界面检测到的频率相差不明显.

(3) 沙土界面和粘接良好界面

对试样 II 进行检测,试样 II 左半部分(2-1 ~ 2-14 测点)为沙土缺陷界面,右半部分(1-1 ~ 1-14 测点)为粘接良好界面.试样 II 沙土缺陷和粘接

良好界面各测点声时、波幅、频率对比,如图 7 所示.

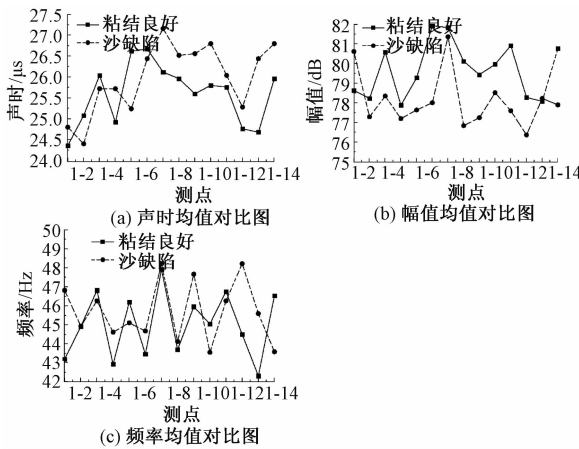


图 7 试样 II 声学参数均值对比图

Fig.7 Comparison chart of average values of acoustic parameters between sand defective and good bonding interface of sample II

由图 7 可以看出,两种界面声时和频率相差 不明显,而对于波幅,有沙缺陷的界面明显 低于粘接良好的界面,但也有个别测点波幅 与粘接良好的界面一样甚至偏高.

(4) 无防水粘接层界面和粘接良好界面

以试样 III 进行检测,试样 III 左半部分(2-1 ~ 2-14 测点)为未洒布防水粘结层的缺陷界面,右半部分(1-1 ~ 1-14 测点)为粘接良好界面.试样 III 粘接良好和无防水粘接层界面各测点声时、波幅、频率对比如图 8 所示.

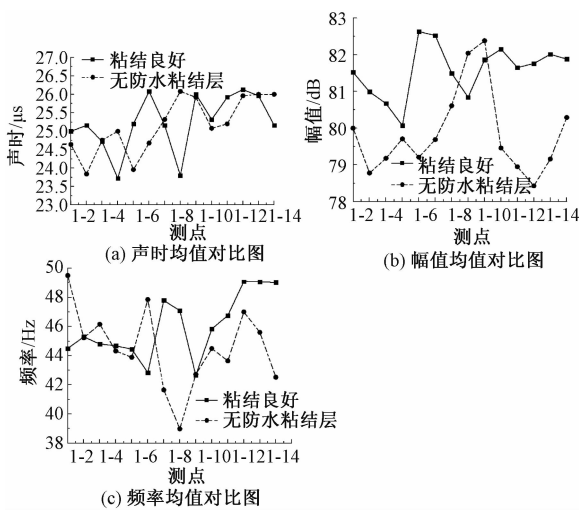


图 8 试样 III 声学参数均值对比图

Fig.8 Comparison chart of average values of acoustic parameters between good bonding interface and interface without waterproof bonding layer of sample III

观察图 8(a),不难发现两种界面声时比较接近,无规律可循;观察图 8(c),可以看出粘接良好

的界面多数测点频率均值比无防水粘结层的数值大,但也没有明显的规律;观察图 8(b),可以明显看出粘结良好的界面除个别测点外,波幅均值要比无防水粘结层的高。

综上,在沥青混凝土相同的情况下,不同粘结界面回声时的影响也不明显,声时只与传播距离以及在沥青混凝土中的传播速度有关,不同界面虽然对频率衰减作用不一样,但也没有明显的规律可循,只有波幅变化比较显著,因此可以通过波幅之间的差异来识别不同的粘结界面。

2.5 有损和无损界面对比试验

为了提高不同界面情况下波幅大小之间的可比性,在同一试样中对工程中铺装层与桥面板常见的几种典型界面进行波幅检测分析.选择试样 II 进行粘接良好、空气、湿沙土、干沙土等几种界面情况进行检测,检测时选择 5 个测点(1-3、1-5、1-7、1-9、1-11).将试样 II 底面的钢板揭掉,即形成沥青混凝土—空气界面;将去掉钢板的试样 II 的 5 个测点底面相应位置涂上湿沙土,涂匀并尽量控制沙土厚度一致,这样便形成了沥青混凝土—湿沙土界面.湿沙土中含有大量水分,而且水蒸发后最终会形成沥青混凝土—干沙土界面,水分对反射回波参数有一定影响,为了观察水对试验的影响,等湿沙土干了后对试样进行干沙土界面试验.4 种界面 5 个测点试验结果见表 2.

表 2 4 种界面试验结果特征值

Tab.2 The characteristic values of test results of four kinds of interface

界面	最小值 /dB	最大值 /dB	均值 /dB	标准差 /dB	95% 可靠度的 置信区间
粘结良好	79.06	81.66	80.07	0.976	78.86 ~ 81.28
空气	81.46	84.22	82.32	1.160	80.88 ~ 83.76
湿沙土	79.82	83.14	80.92	1.300	79.31 ~ 82.53
干沙土	81.03	84.18	82.49	1.187	81.02 ~ 83.96

从表 2 中可以看出,干沙土界面的波幅最大,空气界面次之,湿沙土第三,粘结良好界面的波幅最小,各种界面测点波幅离散性都比较大.主要是因为沥青混凝土材料的高度不均匀,各测点处混凝土的密实度、孔隙以及强度等因素不同,另一方面无法保证每次耦合状况完全相同,试验结果基本符合超声波在两种不同介质界面的传播规律.为方便对这 4 种界面各测点试验结果的对比,图 9 为 4 种界面试验检测结果的波幅对比图。

由图 9 可以看出,空气界面和干沙土界面波幅最大,但相差不大,湿沙土界面次之,粘接良好

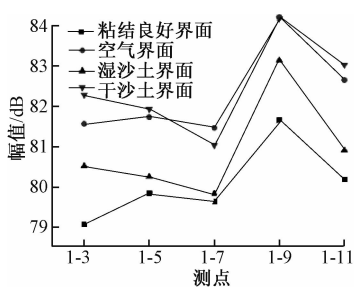


图 9 试样 II 4 种界面波幅对比图

Fig.9 Comparison chart of amplitude of four kinds of interface of sample II

的界面波幅最低;由于各测点波幅值变化较大,很难从一个测点值判断粘结层质量,但由平均值可以看出有明显差异,也就是说通过大量测点数据平均值可以对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判。

3 结论

(1)由于沥青混凝土材料的高度不均匀性,每个测点数据离散性很大,当测量次数达到 10 次左右时,各测量参数的平均值才基本趋于稳定.因此,每个测点数据最好取 10 次测量数据的平均值。

(2)由试验可知,对于沥青混凝土-钢粘结界面,若采用超声波进行检测,应以波幅值作为评判界面粘结强度的物理量。

(3)同一测点,不同粘结质量时波幅值有一定差异,但由于各测点波幅值变化较大,很难从一个测点值判断粘结层质量,但各测点平均值差异明显,也就是说可通过大量测点数据平均值对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判。

参考文献:

[1] 周键炜. 水泥混凝土桥面防水粘结层的试验研究[D]. 南京: 南京林业大学土木工程学院, 2009.

[2] 卢哲安,易贤仁,杨星云. 高速公路桥涵桥面铺装层力学性能的试验研究[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4): 92-95.

[3] 韩延波. 桥梁面板与铺装层间粘结强度无损检测试验研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2014.

[4] AKKER S, ARMAN J. Ultrasonic investigation on plane interfaces between polymers[J]. Ultrasonics, 1997, 35(4): 287-295.

[5] QUAFTOUH M, XU W J, OURAK M, et al. Evaluation of adhesion by means of high-frequency ultrasound[J]. Journal de Physique, 1992(2): 835-838.

[6] 周伟刚. 超声反射法单面检测钢-混凝土粘结界

面质量的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2006.

[7] 邢哲,宛新林,宛传虎,等. 超声波透射法在基桩检测中 PSD 评定的应用研究[J]. 工程与建设,2011, 25 (4): 520 - 521.

[8] 邓桂萍,王强. 基桩超声波检测中的频率和波形分析初探[J]. 公路交通科技, 2009 (9): 72 - 74.

Research on the Ultrasonic Non-destructive Test Technology of Bonding Strength
for the Steel Bridge Deck Pavement Layer

LYU Pengmin, WU Yuwen, SONG Nianbo

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang’ an University, Xi’ an 710064, China)

Abstract: Based on the ultrasonic theory, the ultrasonic reflection method was suggested in the paper as non-destructive testing for steel bridge deck pavement layer bonding strength. According to five kinds of common interfaces in practical engineering, three types of related samples were made, and many detection tests were done by using the ZBL-520 non-metallic ultrasound instrument. By studying the waveform and acoustic parameters of each interface, it was found that the amplitude value could be used as the physical quantity to detect the bonding strength. Finally, the comparative experiments of loss and lossless interfaces were carried out on the same sample. The test results indicated that there were different degrees of differences in the amplitude of each interface, and the good bonding interface’s relative amplitude value was the smallest. The quality of bond layer of a part or the total of a bridge could be judged by the average value of a large number of measured point data.

Key words: steel bridge deck; pavement layer; bonding strength; ultrasonic wave reflection; non destructive test