

引用本文:谢永利,刘毅鑫,王 东. 路桥过渡段填料中动荷载传递特性[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):78-86.

XIE Yong-li, LIU Yi-xin, WANG Dong. Characteristics of Dynamic Load Transfer in Packing at Bridge-subgrade Transition Sections[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 78-86.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11043

路桥过渡段填料中动荷载传递特性

谢永利¹, 刘毅鑫¹, 王 东²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交二公局东萌工程有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要:为研究动荷载在路桥过渡段级配碎石填料中的传递规律,在路桥过渡段填筑过程中分别布设了 3 层土压力盒,各层均按梅花形布设,对压路机往返压实过程与液压夯夯击过程中各点应力进行实时监测,分析了压路机的振动荷载与液压夯的冲击荷载在同一填筑平面的传递特征;进一步将竖直方向的各层测点元件拟定为对应的荷载传递路径,以此分析了各条路径中动荷载竖向传递规律。结果表明:填料的压实或夯击遍数直接影响动荷载的传递特性,随着压实或夯击遍数的增加,压力盒测得的应力值逐渐增大;随着夯击遍数的增加,同一深度处填料的相对应力增加量均呈台阶状递增;压路机与液压夯产生的动荷载在填料中的荷载衰减量随着深度增加逐步递减;填料经过压路机与液压夯的 6 遍压实与夯击后,同一深度处的冲击荷载增加量为振动荷载增加量的 4 倍左右,液压夯处理路基填料的效果尤为显著;试验结果为今后级配碎石填筑路桥过渡段提供了现场测试方案,为后续施工提供了理论指导,使现场测试环节更加完善。

关键词:路桥过渡段;级配碎石;动荷载;夯击遍数;传递特性

中图分类号:U413

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0078-09

Characteristics of Dynamic Load Transfer in Packing at Bridge-subgrade Transition Sections

XIE Yong-li¹, LIU Yi-xin¹, WANG Dong²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. CCCC-SHEC Dongmeng Engineering Co., Ltd., Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the rules of dynamic load transfer in graded gravel packing at bridge-subgrade transition sections, 3 layers of earth-pressure cells during the filling process at the bridge-subgrade transition section were set up, each layer was arranged according to quincunx type. Through real-time monitoring of the stress at different points during the road roller compacting process and the hydraulic rammer tamping process, the transfer characteristics of vibrating load and impact load of the road roller were analyzed on the same filling plane. By further fixing the cells on each layer in the vertical direction as the corresponding path of load transfer, the rules of vertical transfer of dynamic load in each path were also studied. The results show that the compaction degree of filler or the number of tamping directly affect the transmission characteristics of the dynamic loads. The stress value measured from the pressure

收稿日期:2019-11-14

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219110)

作者简介:谢永利(1961-),男,山西芮城人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:xieyl@263.net。

cell increases with the compaction degree or the tamping number increasing. The increments of relative stress make a stepladder like increase with the number of tamping increasing at the same depth of the filler. The load attenuation of dynamic load generated by roller and hydraulic rammer in the filling decreases with the depth. After six times of compaction by roller and hydraulic rammer, the increase of impact load at the same depth is about four times of the increase of vibration load, and the effect of hydraulic ramming on subgrade filling is particularly significant. The experiment provides an on-site test plan for future bridge-subgrade transition sections filled with graded gravel, and a theoretical guide for subsequent construction, it will further complete on-site testing.

Key words: bridge-subgrade transition section; graded gravel; dynamic load; number of tamping; characteristic of transfer

0 引言

近年来,随着中国公路交通事业的蓬勃发展,对公路质量的要求逐渐提高,然而目前公路桥涵过渡段仍旧存在大量的桥台跳车现象。桥台跳车现象是由于路桥过渡段处于刚性桥台与柔性路堤的衔接处,桥台与路堤间刚度不同,两者之间产生的差异沉降而造成的,所以减少甚至消除路桥过渡段的不均匀沉降是当下公路工程亟需解决的工程问题。

大量学者对路桥过渡段不均匀沉降成因机理进行了研究^[1-5],其中蒋关鲁等^[1]对路桥过渡段进行了三维数值模拟,指出在进行不同程度的地基处理后均存在不均匀沉降现象。涂仁盼等^[2-3]利用由现场监测数据得出的对数模型研究了路桥过渡段沉降规律。陈虎^[4]揭示了路桥过渡段沉降最大处服从指数衰减的函数关系。牛富俊等^[5]通过现场勘测,指出坡向与过渡段沉降相关性最大。部分学者研究了解决此问题的处置方法,通过将 Netlon 土工网、土工格室柔性搭板、路基加筋处理、EPS 轻质填料、复合地基等运用到工程实际中,很好地减弱了过渡段差异沉降产生的不利影响^[6-14]。目前处理差异沉降问题多采用强夯法加固地基,强夯法施工是由法国的 Menard 公司首创的一种处理地基的方法^[15]。许多研究工作者对强夯法加固机理和夯击参数等进行了研究,其中龚福初等^[16-19]研究了各项夯击参数对于强夯有效加固效果的影响。Tarawneh 等^[20]采用液压夯技术处理沙漠地质公路,发现试验过后土体自身抗液化系数明显提高,处理土层厚度可达 4~5 m,显著提高了地基承载力。Allouzi 等^[21]利用有限元模型模拟了液压夯处理砂土地基的过程,认为该地基经过 30 次夯击作用后,若继续夯击 10 次,地基仅获得 1% 的改善效果。

本文针对级配碎石填筑的路桥过渡段,结合土中测试元件,对压路机与液压夯施工时产生的动荷载进行实时监测,分析了振动荷载与冲击荷载下同一测试层中的应力分布特征,研究了振动荷载与冲击荷载沿竖直方向的传递规律。

1 测试方法

1.1 元件介绍

本次试验采用 BX-7 型电阻式压力盒(图 1),其具有灵敏度高、体积小、结构简单等特点,适用于路基、挡土墙、隧道等工程动、静态的测试。

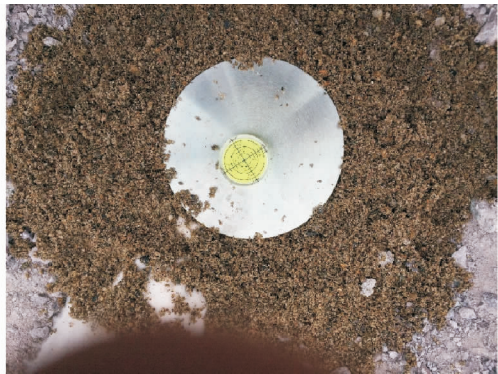


图 1 土压力盒安装

Fig. 1 Installation of Earth-pressure Cell

电阻应变片是电阻应变测试中将应变转换为电阻变化的传感元件。应变片测取应变的工作原理是基于金属丝的应变电阻效应,即金属丝的电阻 R 随其机械变形而变化的一种物理特性。设金属丝长度为 L ,横截面面积为 F ,电阻率为 P ,根据电阻公式(1),电阻式压力盒将电阻应变片用一定特性黏结剂胶黏在受力膜上,当受力膜受力变形时,黏结在受力膜上的电阻应变片也随之变形,并产生相应的电阻变化,其表达式为

$$R = PL/F \quad (1)$$

$$\Delta R/R=\Delta L/L \tag{2}$$

式中： ΔR 为电阻应变片的电阻变化； ΔL 为弹性元件表面电阻应变片的长度变化。

1.2 设备参数

本次路桥过渡段现场监测试验使用的机械为压

路机和液压夯,性能参数如表 1,2 所示,压路机往返过程中碾压宽度为 2.17 m,整个桥背填料的碾压需分 3 次完成;液压夯锤锤脚的直径为 1 m,夯击面积约为 $0.25\pi\text{ m}^2$,锤击冲程可调,在 0~1.2 m 之间,最大冲击能为 36 kJ。

表 1 振动压路机性能参数

Tab. 1 Performance Parameters of Vibratory Roller

型号	工作质量/kg	名义振幅/mm	振动频率/Hz	外形尺寸	激振力/kN	碾压宽度/mm
XS263J	26 000	1.9(0.95)	27(32)	6 530 mm×2 470 mm×3 260 mm	405(290)	2 170

注:由于压路机工作时存在强振模式与弱振模式,“1.9(0.95)”中 1.9 为强振模式下的名义振幅,0.95 为弱振模式下的名义振幅,其余同。

表 2 液压夯性能参数

Tab. 2 Performance Parameters of Hydraulic Tammer

型号	锤芯质量/kg	锤击冲程/mm	最大冲击能/kJ	冲击频率/Hz	整机质量/kg	外形尺寸	锤脚直径/mm
THC36	3 000	0~1 200	36	0.5~1.4	6 200	1 080 mm×1 520 mm×3 650 mm	1 000

1.3 元件埋设

针对本次级配碎石填筑的路桥过渡段,采用分层埋设电阻式压力盒的方式(图 2),实时监测液压夯、压路机工作时的荷载值。本次试验选取桥背中间区域,为了研究填料深层处的荷载传递情况,共埋设 3 层测试元件,每层间距为 45 cm,其中第 1 分层处上覆填料厚度为 120 cm,填料顶面标高为 0 cm,第 1 分层的标高为-120 cm,第 2 分层的标高为-165 cm,第 3 分层的标高为-210 cm。同一层压力盒按照梅花形分层布设,其间距为 1.0 m,同一层中电阻式压力盒编号分别为 I~V,具体布设方式如图 3 所示。在本文中出现的电阻式压力盒编号均以层数结合平面编号的形式表示,如 1-IV 号电阻式压力盒为第 1 分层土中 IV 号电阻式压力盒。同时为了下文清晰表达出荷载随深度变化的规律,将 3 层土之间相互对应的 3 个电阻式压力盒分为一组,本次试验共有 5 组,沿深度走向的每一组电阻式压力盒命名为第 n 路径,如 1-I 号、2-I 号、3-I 号依次向下为第①路径,以此类推,其余 4 条路径皆以此方式进行组合。

电阻式压力盒的埋设分为 4 个步骤(图 3):①精确定位,在填料碾压、夯击密实后,通过台背中心参照点,找出 5 个压力盒位置点;②埋设元件,在整平的填料表面,利用挖槽工具,在已标记好的压力盒位置点挖出直径为 0.15 m、高为 0.1 m 的坑槽,在坑槽底部放上细料后整平,之后将略大于压力盒直径的铁片放在细料上方,最后将压力盒置于铁片上,利用水平泡将其调平,调平后用细砂覆盖住整个坑槽,并将每个压力盒标记好;③整理测线,压力盒接口处测线用 2 m 长的土工布将其围绕裹好,并使用

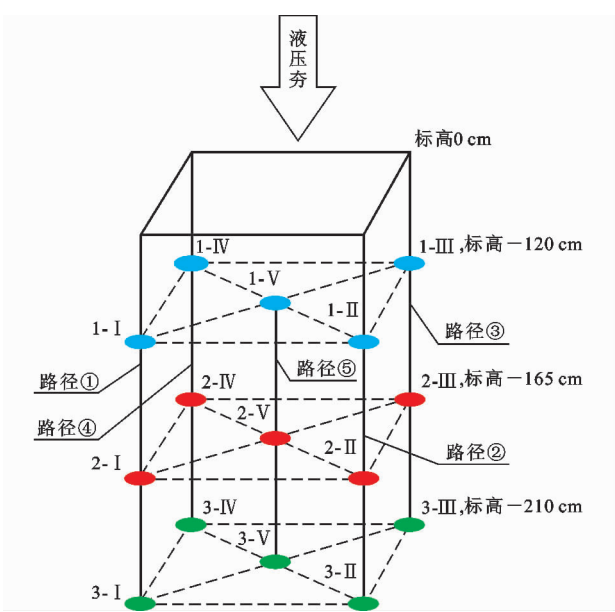


图 2 测试元件空间布设

Fig. 2 Space Layouts of Test Components

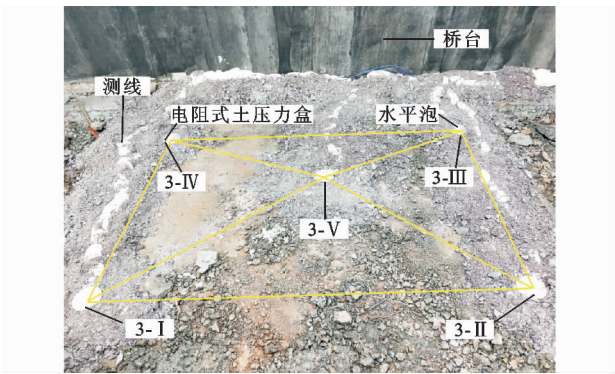


图 3 测试元件平面布设图

Fig. 3 Plane Layouts of Test Component

绑扎带系好系牢,防止夯击时将其剪断,待压力盒埋设完毕后,挖出坑道,将测线沿坑道、台背、台耳依次

顺延至桥台背面,并将其裹好以防雨水浸湿;④覆盖保护,最后一步使用细料将压力盒与坑道测线进行覆盖,并使用工具将细料填土整平压实,以达到保护作用。

2 填筑方法与材料

2.1 填筑方法

级配碎石填筑之前需使用挖掘机与整平机将台背底面整平,之后采用分层填筑结合分层碾压的方法

表 3 级配碎石的颗粒粒径范围

Tab. 3 Particle Size Range of Graded Gravel

筛孔孔径/mm	75	37.5	31.5	16	9.5	4.75	2.0	0.5	0.075
通过筛孔的质量分数/%	100	95~100	90~98	65~85	45~73	30~55	15~35	10~20	4~10

3 动荷载传递规律

3.1 振动荷载下同一测试层中的应力分布特征

由压路机施工示意图与压路机前进过程中(图 4)第 1 分层平面振动荷载特征(图 5)可知,1-I 号与 1-IV 号压力盒最先受到压路机振动碾压作用,实时监测到 1-I 与 1-IV 号压力盒最先达到峰值荷载,分别为 98.3、68.5 kPa,之后压路机碾压到 1-V 号中心点压力盒上,峰值荷载达到 68.5 kPa,最后受到压路机振动碾压的为 1-II 与 1-III 号压力盒,峰值荷载分别为 65.2、109.6 kPa。

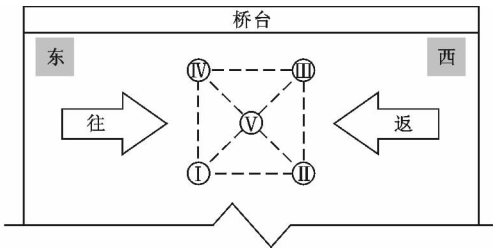


图 4 压路机行进示意图

Fig. 4 Moving Schematic of Road Roller

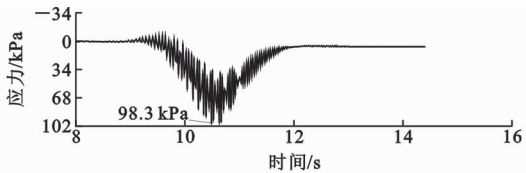
压路机在前进过程中,5 个压力盒在达到峰值点前的振动幅度均比达到峰值点后的振动幅度大,最先受到碾压振动作用的 1-I 与 1-IV 号压力盒反映出的振动幅度特征最为明显,比其余 3 个压力盒反映出的这一规律都要显著。这说明压路机在靠近压力盒的过程中,振动荷载的振动幅度变化规律分为 2 个阶段:第一阶段为压路机在靠近压力盒的过程中,振动荷载的振动幅度不断增大,直至到达压力盒正上方时振动幅度达到最大值;第二阶段为压路机在远离压力盒的过程中,振动荷载的振动幅度不断衰减直至消散。

图 6 为压路机返回过程中第 1 分层平面振动荷

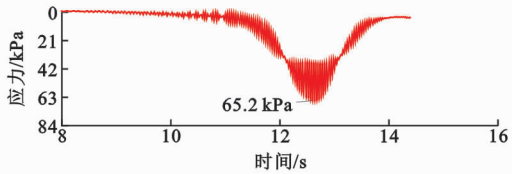
式对台背进行回填,按照标准施工章程,台背每 15 cm 填筑 1 次,共填筑 3 层,填筑到 45 cm 时,压路机先碾压密实,之后液压夯会进一步以 15 击数进行满夯,最后填筑下一层级配碎石填料。

2.2 填筑材料

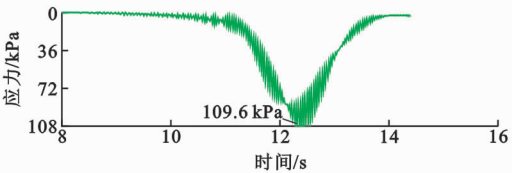
本次路桥过渡段使用级配碎石填料,其级配如表 3 所示,台背碾压顺序为自台前向台后分层碾压,并严格控制分层厚度与密实度,锥坡填土与台背填土同时进行,并按照设计宽度一次填足。



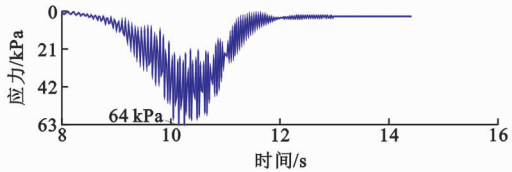
(a) 1-I 号所测应力值



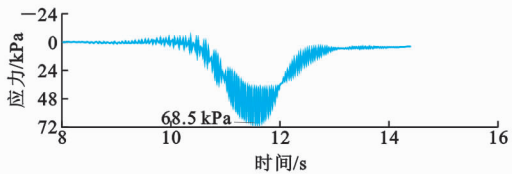
(b) 1-II 号所测应力值



(c) 1-III 号所测应力值



(d) 1-IV 号所测应力值



(e) 1-V 号所测应力值

图 5 压路机前进过程中振动荷载特征

Fig. 5 Vibration Load Characteristics of Road Roller in Forward Process

载特征。由压路机施工示意图(图 4)可知,在返回过程中 1-II 与 1-III 号压力盒最先受到压路机振动碾压作用,实时监测到 1-II 与 1-III 号压力盒最先达

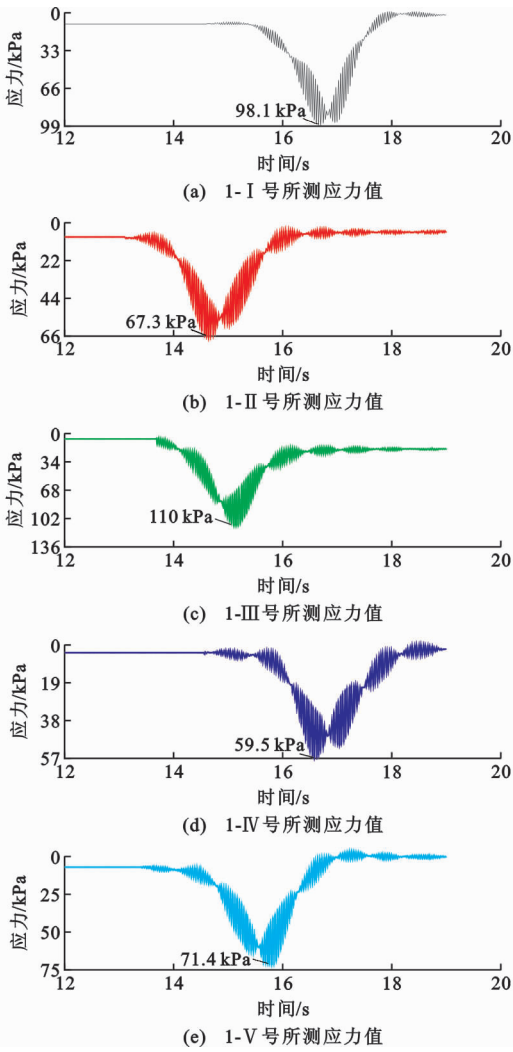


图 6 压路机返回过程中振动荷载特征
Fig. 6 Vibration Load Characteristics of Road Roller During Retracting Process

到峰值点,分别为 67.3、110 kPa;紧接着压路机碾压到中心点处 1-V 压力盒,峰值荷载达到 71.4 kPa;1-I 号与 1-IV 号压力盒最后受到碾压,峰值荷载分别为 98.1、59.5 kPa。

压路机在返回过程中,荷载值达到峰值点前的振动幅度明显大于峰值点后的振动幅度,通过对比压路机往返过程的振动荷载响应特征(图 5、6)可知,压路机在靠近压力盒的过程中,振动频率持续增大直至最大值,之后在远离压力盒的过程中,振动幅度逐渐衰减。压力盒经过压路机行进过程中的碾压作用后,返回过程中压力盒所测荷载值有小幅度的提高,如 1-II 号土压力盒所测荷载值由 65.2 kPa 增长为 67.3 kPa,可以发现,随着压路机碾压遍数的增多,桥背填土逐渐密实,同一平面中传递的振动荷载逐渐增大。此外,可以看出,填料在振动荷载作用下,同一填筑平面内 5 个测试元件测得的振动荷载

存在差异性,其中 I 号与 IV 号土压力盒测得的振动荷载的波形曲线较为一致,但 II 号与 III 号土压力盒测得的振动荷载波形曲线明显不同,这表明测试元件周围填料的密实度存在差异性,从而造成现场数据具有一定的离散性。加上压路机行进过程中若存在轻微偏移,也会导致每个测试元件测得的振动荷载具有差异性。

3.2 冲击荷载下同一测试层中的应力分布特征

本次试验为填料经过连续 4 次夯击作用后,监测同一水平层中各压力盒测得的应力情况。图 7 为液压夯夯击第 1 层级配碎石上覆填料中心区域时,第 1 层水平向 5 个压力盒测得的冲击荷载随夯击数持续增长的变化曲线。每次夯击作用前,测试元件测得的应力取为相对应力。随着夯击遍数的增加,填料同一深度处测得的相对应力均呈台阶状递增,这是由于夯击后填料体积减小,堆积密度变大导致的。液压夯第 1 击与第 4 击之间的相对应力增量由横向虚线间距表示(图 7),分别为 13.43、4.83、24.94、10.78、27.21 kPa。由于夯击点位于上覆填料中心区域,1-V 号压力盒随击数增加产生的附加应力最大,最大值为图 7(e)中所示的第 4 击,峰值荷载为 257 kPa,其余压力盒测得的最大峰值荷载同样在第 4 击,1-I 到 1-IV 号测得的峰值荷载分别为 87.5、92.1、242.8、75.2 kPa。当夯击点位于路径⑤正上方时,冲击荷载累计变化量达到最大,即第 1 击与第 4 击之间的冲击荷载差值最大,为 65.5 kPa。

液压夯夯击周期为 3.3 s,5 个压力盒在同一时刻出现峰值,每组数据在同一时刻相互对应,由图 7 中竖向虚线表示。夯击产生的荷载值远大于压路机振动荷载值,1-V 压力盒上第 1 遍夯击荷载值与压路机前进过程测得振动荷载值相差 123 kPa,说明液压夯对于填料的夯实效果远大于压路机振动碾压作用。

3.3 压路机振动荷载竖向传递规律

图 8 为压路机靠近桥台内侧碾压时,第 1 遍振动荷载竖向传递规律,可以发现,振动荷载由第 1 层传递到第 2 层时,其荷载衰减量明显大于第 2 层向第 3 层传递的荷载衰减量,第 1 层振动荷载传递到第 2 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 50、38.2、72.3、34.4、22.91 kPa;第 2 层振动荷载传递到第 3 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 29.8、2、16.3、9.9、39.88 kPa,可以得出,振动荷载衰减量随着深度递减,与附加应力沿深度消散

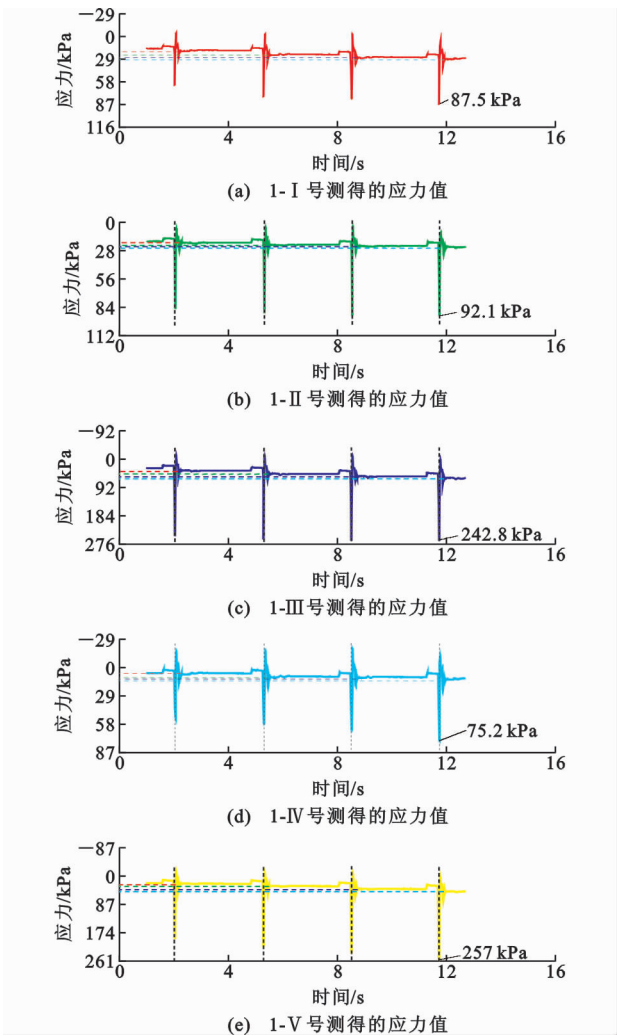


图 7 冲击荷载下同一平面内应力分布特征
Fig. 7 Characteristics of Stress Distribution on the Same Plane Under Impact Load

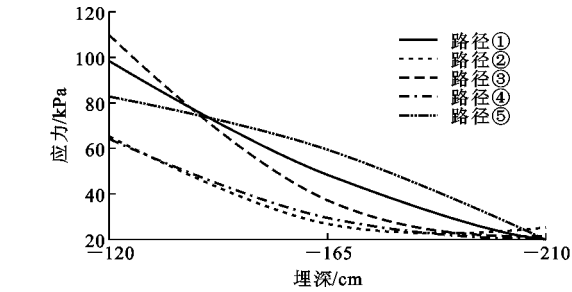


图 8 压路机第 1 遍振动荷载竖向传递规律
Fig. 8 Transfer of the First Vibration Load of Road Roller in Vertical Direction

规律一致。1-Ⅲ号压力盒上振动荷载传递到 2-Ⅲ号压力盒上时,下降斜率为 -1.61 ;2-Ⅲ号压力盒上振动荷载传递到 3-Ⅲ号压力盒上时,下降斜率为 -0.36 。5 条路径上振动荷载在第 1 层处相差较大,1-Ⅲ号土压力盒上振动荷载值最大,为 109.6 kPa ,这是由于此时压路机振动钢轮靠近桥台内侧

碾压,1-Ⅲ号压力盒处于压路机重心处。随着深度的增长,5 条路径上的振动荷载最终传递到第 3 层时,荷载值均处于 21 kPa 附近。

图 9 为压路机靠近桥台内侧碾压时,第 6 遍振动荷载竖向传递规律,与压路机第 1 遍碾压规律类似(图 8),由第 1 层传递到第 3 层的振动荷载其第 1 层到第 2 层的荷载衰减量大于第 2 层到第 3 层的荷载衰减量,第 1 土层振动荷载传递到第 2 土层处,Ⅰ号到Ⅴ号压力盒上荷载衰减量分别为 $41,37,93.6,25,52.27\text{ kPa}$;第 2 土层振动荷载传递到第 3 土层处,Ⅰ号到Ⅴ号压力盒上荷载衰减量分别为 $18.4,1.8,17.7,3.3,39.7\text{ kPa}$ 。可以发现,路径③中振动荷载衰减量最为明显,1-Ⅲ号振动荷载传递到 2-Ⅲ号压力盒时,荷载的下降斜率为 -2.08 ,2-Ⅲ号振动荷载传递到 3-Ⅲ号压力盒时,荷载的下降斜率为 -0.39 。5 条路径上的振动荷载值在第 1 层中相差较大,最大振动荷载为 1-Ⅲ号压力盒所测值,其值为 136 kPa ,振动荷载沿着深度方向最终传递到第 3 层时,荷载值均处于 29.84 kPa 附近。

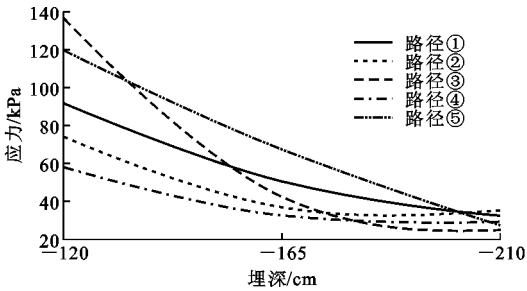


图 9 压路机第 6 遍振动荷载竖向传递规律
Fig. 9 Transfer law of the Sixth Vibration Load of Roller in Vertical Direction

由压路机第 1 遍与第 6 遍振动荷载竖向传递规律曲线(图 8,9)可知,随着压路机碾压遍数的增加,第 6 遍压路机碾压振动产生的荷载相较于第 1 遍有明显的增大,如Ⅰ-Ⅲ号压力盒受到第 1 遍碾压时,产生的振动荷载为 109.6 kPa ,到第 6 遍时增加至 136 kPa ,提高了 26.4 kPa 。这是由于路桥过渡段填料为透水性强的级配碎石,随着压路机振动碾压遍数的增多,孔隙体积逐渐缩小,土体受到压缩,变得更加密实,振动荷载更易传递到土体内部,但由于压路机产生的振动荷载能级有限,并且荷载在土体内的传递是消散过程,故两者的振动荷载沿深度方向的规律相同,均为第 1 层与第 2 层之间振动荷载衰减量远大于第 2 层与第 3 层之间的振动荷载衰减量,这是由于填料阻尼作用,使振动荷载沿深度方向不仅振动荷载值逐渐减小,其荷载衰减量也有所减

小。此外,可以发现第 1 层中 I 号、Ⅲ号、V 号测试元件测得的振动荷载大于 II 号、IV 号测试元件测得的振动荷载,与第 3.1 节中原因一致,压力盒周围填料的密实度有差异、压路机行进过程中有轻微偏移,所以导致同一水平面中监测到的数据有较大差异。

3.4 液压夯冲击荷载竖向传递规律

本次夯击点位于测试元件上覆填料中心区域,图 10 为液压夯第 1 遍夯击时 5 条路径中的冲击荷载竖向传递规律,由于夯击点位于中心区域,所以⑤号路径中的冲击荷载均大于同一土层的其他压力盒所测冲击荷载,第⑤条路径中 1-V 号、2-V 号、3-V 号荷载值分别为 163.9、131.9、61.9 kPa,可以发现,第①、②、④条路径上压力盒在第 1 遍夯击时冲击荷载随着深度的增大没有明显变化,其中第②条路径中每一层压力盒所测冲击荷载值分别为 62.8、58.6、54.2 kPa,最多相差 4.4 kPa,这说明液压夯在第 1 遍夯击时,对于夯击点下方作用效果最为显著,这是由于冲击荷载沿竖向传递时荷载传递效率最高,土体自身抵消的荷载值相较于其他路径会小很多。

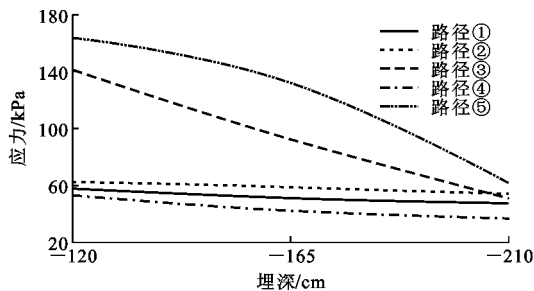


图 10 液压夯第 1 遍冲击荷载竖向传递规律

Fig. 10 Transfer Law of the First Impact Load of Hydraulic Tamping in Vertical Direction

通过对比 5 条路径随着深度增大冲击荷载的变化幅度(图 10)可以发现,当夯点位于中心区域时,第⑤条路径中 2-⑤号压力盒上冲击荷载传递到 3-V 号压力盒上时下降幅度最大,斜率为-1.56,第②条路径中 1-II 号压力盒所测冲击荷载传递到 2-II 号压力盒上时下降幅度最小,斜率为-0.09。除第⑤条路径外,其余 4 条路径冲击荷载随着深度的增大最终传递到第 3 层时,均衰减到 47.32 kPa 附近。第 1 层冲击荷载传递到第 2 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 7.4、2.48、6.11、2.32 kPa;第 2 层冲击荷载传递到第 3 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 3.5、4.4、41.3、5.3、70 kPa,第⑤路径中冲击荷载沿第 1 层向第 2 层传递时,其荷载衰减值小于第 2 层向第 3 层传递的荷载衰减量,相差 38 kPa。

图 11 为液压夯第 6 遍夯击测试元件上覆填料中心区域时,5 条路径的冲击荷载竖向传递规律,第③、⑤条路径中的冲击荷载随着深度的增大呈现明显的递减趋势,由于冲击点位于中心区域,⑤号路径中的冲击荷载均大于同一土层的其他冲击荷载,测得的第⑤条路径中 1-V 号、2-V 号、3-V 号压力盒上荷载值分别为 314.5、251.7、146.2 kPa。冲击荷载由第 1 层传递到第 2 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 11.7、8.94、47.7、85.62、8 kPa;冲击荷载由第 2 层传递到第 3 层处, I 号到 V 号压力盒上荷载衰减量分别为 12.4、9.1、57.43、12.5、105.5 kPa,可以发现位于夯击点下方的第⑤路径中,第 2 层与第 3 层之间的冲击荷载衰减量略大于第 1 层与第 2 层之间荷载衰减量,相差 42.7 kPa,这是由于夯击点正下方填料孔隙比沿深度逐渐增大,使得阻尼呈递增状态,导致荷载衰减量递增。此外,可以发现第 1 层中Ⅲ号与 V 号测试元件测得冲击荷载大于 I 号、II 号、IV 号测试元件测得冲击荷载,产生这种现象主要有两点原因,原因一为第 1 层测试元件上覆填料厚度达到 1.2 m,不能严格保证夯击点位于中心位置,由图 10 与图 11 可知,夯点处于路径⑤与路径③的中间位置。原因二为每个压力盒周围填料的密实度有差异,动荷载的传递规律是不同的。

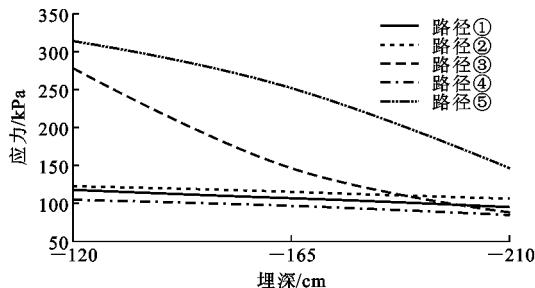


图 11 液压夯第 6 遍冲击荷载竖向传递规律

Fig. 11 Transfer Law of the Sixth Impact Load of Hydraulic Tamping in Vertical Direction

通过对比 5 条路径冲击荷载随深度增大的变化幅度(图 11)可以发现,第⑤条路径中 2-V 号压力盒上冲击荷载传递到 3-V 号压力盒上时下降幅度最大,斜率为-2.34,第②、④条路径上第 1 层冲击荷载传递到第 2 层时下降幅度最小,斜率皆为-0.17 左右。除第⑤条路径外,其余 4 条路径冲击荷载随着深度的增大传递到第 3 层时,最终冲击荷载都衰减到 104 kPa 附近。

根据液压夯第 1 遍与第 6 遍的冲击荷载沿竖向传递规律(图 10,11)可知,当夯点位于中心区域时,

第⑤路径中每一层冲击荷载值均大于同一层其余4个压力盒所测冲击荷载值。此外,第⑤条路径中的冲击荷载值衰减量最大,第1遍夯击时,2-V号压力盒上冲击荷载传递到3-V号压力盒上时下降斜率为-1.56,第6遍夯击时,2-V号压力盒上冲击荷载传递到3-V号压力盒上时下降斜率为-2.34,可以得出,虽然夯击遍数在不断提高,但冲击荷载值沿深度传递的衰减量较为类似。

由于夯击点位于中心区域,路径⑤中压力盒测得的冲击荷载最大,第1遍夯击时,1-V号压力盒测得的冲击荷载为163.9 kPa,第6遍夯击时,1-V号压力盒测得的冲击荷载为314.5 kPa,增加量为150.6 kPa;1-V号压力盒在压路机第1遍与第6遍碾压下,振动荷载值分别为82.49,119.47 kPa,增加量为36.98 kPa,这是由于填料的压实或夯击遍数直接影响动荷载的传递规律,即随着压实或夯击遍数的增加,压力盒测得的应力值越大。液压夯产生的冲击荷载增加量约为压路机产生的振动荷载增加量的4倍左右,液压夯能级显著高于压路机能级。

4 结 语

(1)填料的压实或夯击遍数直接影响动荷载的传递规律,随着压实或夯击遍数的增加,压力盒测得的应力值越大。

(2)由于填料阻尼作用,动荷载沿深度方向不仅逐渐减小,而且其荷载衰减量也有所减小。

(3)随着夯击遍数的增加,同一深度处填料的相对应力增量均呈台阶状递增,这是由于夯击后填料体积减小,堆积密度变大导致的。相比其他路径,夯击点位于测试元件上覆填料中心区域时,第⑤路径测得的冲击荷载累计变化量达到最大,即第1击与第4击之间的冲击荷载差值为最大。

(4)填料经过压路机与液压夯的6遍压实与夯击后,同一深度处动荷载的增加量相差较大,具体表现为冲击荷载增加量为振动荷载增加量的4倍左右。

参考文献:

References:

- [1] 蒋关鲁,王力伟,杭红星.基于离心模型试验的路桥变形耦合特性数值模拟研究[J].土木工程学报,2012,45(8):148-157.
- JIANG Guan-lu, WANG Li-wei, HANG Hong-xing. Numerical Simulation of Centrifuge Model Test on the Coupling Characteristics of Bridge Approach[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 148-

157.

- [2] 涂仁盼,冷伍明,聂如松,等.朔黄重载铁路某路桥过渡段沉降监测及预测[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1412-1419.
- TU Ren-pan, LENG Wu-ming, NIE Ru-song, et al. Monitoring and Prediction for a Bridge-subgrade Transition Zone Settlement of Shuo-huang Heavy Haul Railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1412-1419.
- [3] 贾亮,梁荣,姚凯.路桥过渡段路基工后沉降监测试验研究[J].铁道工程学报,2017(9):18-21,82.
- JIA Liang, LIANG Rong, YAO Kai. Research on the In-situ Monitoring of Post-construction Settlement of Bridge-subgrade Transition Section [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(9): 18-21, 82.
- [4] 陈虎.高速铁路无砟轨道路堤地基差异沉降传递规律及过渡段动力学试验研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- CHEN Hu. Study on Transfer Behavior of Embankment Foundation Differential Settlement and Bridge/Approach Location Dynamic Experiment of High-speed Railway Ballastless Track[D]. Chengdu: South-west Jiaotong University, 2013.
- [5] 牛富俊,林战举,鲁嘉濠,等.青藏铁路路桥过渡段沉降变形影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(增2):372-377.
- NIU Fu-jun, LIN Zhan-ju, LU Jia-hao, et al. Study of the Influencing Factors of Roadbed Settlement in Embankment-bridge Transition Section Along Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 372-377.
- [6] 陈永福,高燕希,张起森. Netlon土工网在高等级公路桥头跳车处理中的试验研究[J].土木工程学报,1996,29(1):41-47.
- CHEN Yong-fu, GAO Yan-xi, ZHANG Qi-sen. Experimental Study on Treatment of Jump at Bridge Abutment Using Netlon Geotextile in Highway[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(1): 41-47.
- [7] 张军,郑俊杰,马强,等.路桥过渡段路堤加筋现场试验和数值模拟分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(9):87-90.
- ZHANG Jun, ZHENG Jun-jie, MA Qiang, et al. Experimental and Numerical Simulation Analysis on Geosynthetic Reinforced Embankment at Bridge Approaches[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(9): 87-90.
- [8] 俞永华,谢永利,杨晓华,等.土工格室柔性搭板处治

- 的路桥过渡段差异沉降三维数值分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 12-18.
- YU Yong-hua, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Three Dimensional Numerical Analysis of Geocell Flexible Approach Slab for Treating Differential Settlement at Bridge Subgrade Transition Section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 12-18.
- [9] MOHAJERANI A, ASHDOWN M, ABDIHASHI L, et al. Expanded Polystyrene Geofoam in Pavement Construction[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 438-448.
- [10] PUPPALA A J, RUTTANAPORAMAKUL P, CONGRESS S S C. Design and Construction of Lightweight EPS Geofoam Embedded Geomaterial Embankment System for Control of Settlements[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(3): 295-305.
- [11] 王楚发. 高速铁路路桥过渡段地基加固技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WANG Chu-fa. A Study on Foundation Reinforcement Technology of the Bridge-subgrade Transition Section of High-speed Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] JAMSAWANG P, YOOPANPOT N, THANASISATHIT N, et al. Three-dimensional Numerical Analysis of a DCM Column-supported Highway Embankment[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 72: 42-56.
- [13] BASACK S, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Modeling the Stone Column Behavior in Soft Ground with Special Emphasis on Lateral Deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(6): 04017016.
- [14] 丛嘉坤. 重载铁路路桥过渡段湿陷性黄土特性及路基沉降控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- CONG Jia-shen. Research on Collapsible Loess Characteristics and Subgrade Settlement Control in Transitional Section of Heavy Haul Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [15] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3-18.
- [16] 龚福初. 强夯法在地基加固中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- GONG Fu-chu. Study on Dynamic Consolidation Method in Foundation Improvement[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [17] 苏晓江. 强夯法在地基加固中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- SU Xiao-jiang. Research on the Solidified Mechanism and Quality Resting by Dynamic Compaction[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [18] 宋乾坤. 强夯地基加固的物理模拟试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- SONG Qian-kun. Physical Simulation Experiment Research on Dynamic Compaction of Soil Mass[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [19] 吕秀杰, 龚晓南, 李建国. 强夯法施工参数的分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1628-1632.
- LÜ Xiu-jie, GONG Xiao-nan, LI Jian-guo. Research on Parameters of Construction with Dynamic Compaction Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1628-1632.
- [20] TARAWNEH B, BODOUR W A L. Liquefaction Mitigation of Desert Sand Using Rapid Impact Compaction[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(12): 1-10.
- [21] ALLOUZI R, BODOUR W A L, ALKLOUB A, et al. Finite-element Model to Simulate Ground-improvement Technique of Rapid Impact Compaction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-ground Improvement, 2019, 172(1): 44-52.