

文章编号:0451-0712(2007)02-0011-06

中图分类号:U418.8;U449.82

文献标识码:B

# 冲击压实破碎旧水泥混凝土路面施工对盖板涵影响的研究

胡昌斌, 孙晓亮

(福州大学土木工程学院 福州市 350002)

**摘要:** 冲击压实施工时产生巨大的冲击波,会对改建线路桥涵产生严重影响。结合冲击压实技术在316国道福州段旧水泥混凝土路面改建工程中的应用,运用有限元采用拟静力法模拟冲击压实的动力作用,计算分析了由冲击压实荷载引起的附加应力在土基中的分布性状。并根据有限元计算结果,分析计算了冲击压实荷载作用下不同埋深盖板涵顶面的受力情况,进一步通过构造配筋比和冲击压实工作区两个概念,探讨了冲击压实施工时不同埋深盖板涵竖直和水平方向的安全控制距离。研究结论可为冲击压实安全施工控制提供参考。

**关键词:** 冲击压实; 涵洞; 施工; 有限元; 安全

近年来,采用冲击压路机冲击压实旧水泥混凝土路面,对旧水泥混凝土路面进行快速修复,因其良好的实用性,引起了公路养护部门的注意。该项技术采用冲击压路机冲击压实旧水泥混凝土路面,不仅可以快速破碎并压实稳固旧水泥混凝土路面,有效减少和缓解反射裂缝,而且能够形成嵌锁稳固的新路面底基层,提高路面改造质量,展现出良好的应用前景。

冲击压路机是一种具有高冲击能量的压实机械,单击能量在20~30 kJ之间,冲击荷载可达2 500~3 000 kN,冲压施工过程中产生巨大的冲击波,会对沿线设施产生影响,甚至具破坏作用。冲击破碎旧水泥混凝土路面时,涵洞变位、挡土墙垮塌的事件时有发生,给该项技术的安全使用带来了难题。如何界定其施工影响范围和程度,避免对公路沿线构造物的不利影响,是安全顺利使用该项技术需要重点解决的一个问题。

涵洞是公路工程中常用的排水构造物,按涵洞断面形式,涵洞可分为管涵、盖板涵、箱涵、拱涵。一般而言,管涵受力性能及对基础的适应性好,不需要墩台,圬工数量少,造价低,适用于有足够高度的涵顶填土且跨径比较小的暗涵;盖板涵构造简单,维修容易,过水面积大;拱涵跨径较大,承载潜力大,但自重引起的恒载也较大,施工工序繁多,一般适合置于跨越深沟或路堤的地方;箱涵整体性强,但用钢量

大,造价高,施工较困难,适用于软土地基。

综合工程实践、各类涵洞埋深及构造特点来看,冲击压实施工对于盖板涵洞较为不利。因此,本文以钢筋混凝土正交盖板涵为例,结合有限元计算结果,重点对冲击压实荷载作用下盖板涵的力学工作性状及安全状况进行研究分析,并进一步提出冲击压实施工时对涵洞的安全施工标准,以期为冲击压实施工提供指导。

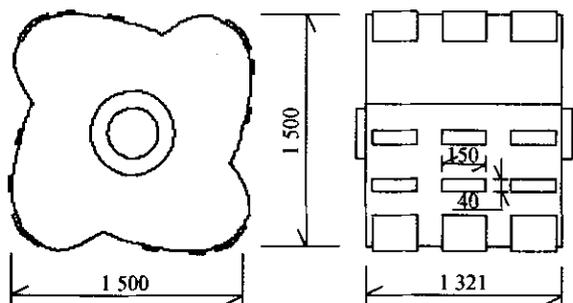
## 1 冲击荷载作用下土基中的应力分布

### 1.1 冲击荷载作用的有限元分析

冲击压实荷载下,涵洞附近的土压力分布规律计算是问题研究的前提。本文首先基于拟静力原理模拟冲击压路机的动力作用,采用有限元方法对冲击压路机冲击荷载作用下土基中的应力进行分析。冲击压路机冲击轮目前常见有三楞、四楞、五楞3种。实际上,四楞冲击压路机的稳定性和灵活性均优于冲击轮置于拖架两侧的三楞或五楞冲击压路机,其冲击荷载大,在旧水泥混凝土路面改建工程中得到广泛应用。

本文结合316国道福州段冲击压实处理旧水泥混凝土路面现场试验,采用三维有限元方法,对四楞冲击压路机冲击荷载作用下土基的应力分布进行计算,再根据有限元计算结果就冲击压实荷载对涵洞的影响进行分析。在试验路段施工时,采用美国

Impactor2000 四楞冲击压路机。该型冲击压路机的主要技术指标如下:高度为 1.956 m,宽度为 2.565 m,长度为 5.842 m,机重为 12.7 t,冲击轮重为 8.6 t;最高冲压频率为 2 遍/s;正常工作速度为 11~13 km/h;压实功率为 30 kJ。在实际工程应用中,为加强破碎效果,冲击轮上局部焊有钢趾,具体分布见图 1。



单位:mm

图 1 Impactor2000 冲击轮几何尺寸

有限元分析时假设:水泥混凝土路面各结构层为均质、连续、各向同性的线弹性材料;结构层之间完全连续接触;不计接缝的传荷能力,仅按单块路面板作受力分析。计算模型的有限元网格划分及坐标系如图 2 所示。

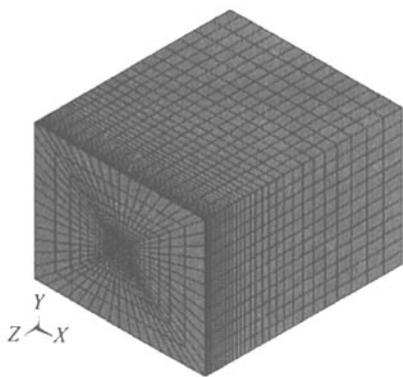


图 2 有限元计算模型及网格

### 1.1.1 模型尺寸及约束条件

依据有效影响范围,结合现场实测与有限元试算,确定模型尺寸和边界条件等。

(1) 路面板尺寸:长(路线方向)×宽×厚=5 m×4 m×0.25 m。

(2) 基层及土基范围:长×宽×深=35 m×28 m×(0.2+40)m,其中基层厚度为 0.2 m,长、宽简化为与土基等同。该选取范围之长、宽分别为单块路面板尺寸的 7 倍,路面板置于其顶部中央位置。试算表明,满足距离荷载作用位置较远处位移很小的要求。

(3) 约束条件:不考虑接缝的传荷作用,路面板

四周为自由边界;基层及土基四周水平方向约束,土基底部竖直方向约束。

### 1.1.2 冲压荷载及力学参数

冲击压路机工作时的冲击载荷计算,可通过冲量定理法、依据实测值反算法或转动惯量法等 3 种方法确定。本文采用冲量定理法反算冲击载荷:

$$F = (mv_0 - mv_t) / t \tag{1}$$

式中:  $F$  为冲击作用力, N;  $m$  为冲击轮质量, kg;  $t$  为冲击作用持续时间, s;  $v_0, v_t$  分别对应冲击前后,冲击轮外缘的转动线速度, m/s。

根据 Impactor2000 四楞冲击压路机自身参数与现场动土压力测试实验,测得冲击作用时间,代入式(1),可得冲击力为  $1.32 \times 10^6$  N。依据钢轮上钢趾的分布(图 1),钢轮与路面的接触面积取为  $2A = 2 \times (\text{长} \times \text{宽}) = 2 \times (133.3 \text{ cm} \times 31.2 \text{ cm})$ 。按均布荷载考虑,则均布荷载集度  $p = 1.6 \text{ MPa}$ 。为考虑冲击压实荷载对挡土墙的最不利影响,假设水泥混凝土路面板被充分破碎,故水泥混凝土力学参数取较小值。计算模型中所涉及的各项物理力学参数见表 1。

表 1 结构层材料的物理力学参数

结构层	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\frac{\gamma}{\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}}$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$R_{\text{压}}/\text{MPa}$	$R_{\text{拉}}/\text{MPa}$
水泥混凝土面板	1 500	0.20	0.025	4.56	40	30	4.5
基层	1 250	0.25	0.023	—	—	—	—
土基	25	0.35	0.017 5	—	—	—	—

### 1.1.3 轮压位置工况

依据冲击压路机沿面板纵向中线及板边两种行驶路线,拟定 4 种典型的轮压位置,以模拟冲压过程中不同工况时的结构受力,探讨轮压位置不同时土基中附加应力分布(图 3)。

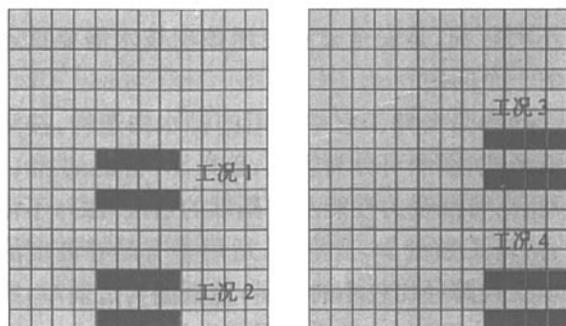


图 3 轮压位置工况示意

### 1.2 土基应力分布有限元计算分析

图 4 为 4 种工况冲击作用点下,冲击附加应力随土基深度变化曲线。从图 4 可以看出:同一土基深度

时,工况1 附加应力最小,工况4 附加应力最大;工况4 时集中应力最大值达0.341 MPa,是4种工况中最大的情况;各种工况冲击附加应力在土基中沿深度的分布规律基本一致;各工况冲击附加应力在土基中呈指数形式衰减,在3 m(工况1)~4 m(工况4)以浅,土基中冲击附加应力随深度衰减较快,而在4 m以深,土基中冲击附加应力随深度衰减较慢。以正常交通荷载面板底最大应力(0.05 MPa)为标准,来比较各种工况中冲击附加应力的分布,可知各种工况不尽相同,当冲击轮载作用于板中央(工况1)时,深度大约为2.0 m,当冲击轮载作用于板角(工况4)时,深度大约为4.0 m。

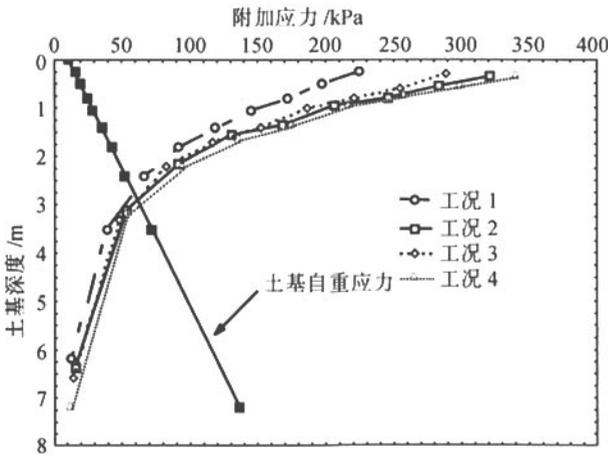


图4 各种工况竖直方向冲击附加应力随深度变化

在4种工况中,工况4 影响深度最深。图5为工况4 时土基表面冲击附加应力垂直分量分布。由图5可以发现:冲击载荷引起的附加应力在土基表面的分布,近似以冲击载荷作用点为圆心向四周递减;在土基表面的部分地方(板边角、板边缘下方),由于尺寸效应,土基表面的部分地方应力分布不均。面板在工况4 作用时,在过冲击荷载作用点的竖直剖面内,土基中由冲压荷载产生的垂直冲击附加应力分布见图6。

综合以上计算与分析,在冲击荷载作用于路面板不同位置的各种工况中,作用在板角时,土基中的集中应力最大值最大,且相对于其他工况,此种工况影响深度最深。故以该种工况时冲击附加应力在土基中的分布为准,进行钢筋混凝土正交盖板涵的安全验算。

## 2 正交盖板涵计算假定及方案

设计规范中对常规钢筋混凝土盖板涵洞进行的结构验算,包括钢筋混凝土盖板的验算、涵台的验算以及其他附属结构的验算。这里仅对冲击荷载作用

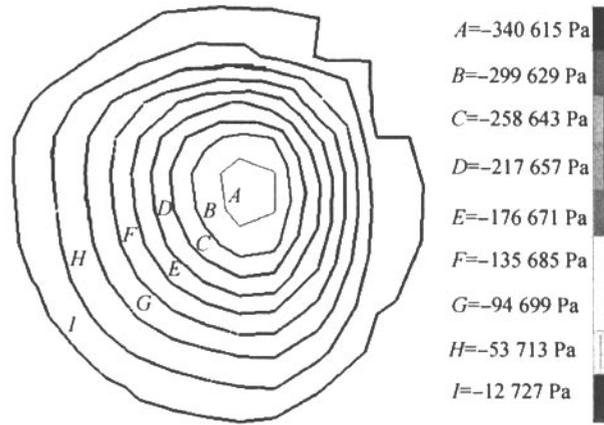


图5 工况4 土基表面冲击附加应力垂直分量分布

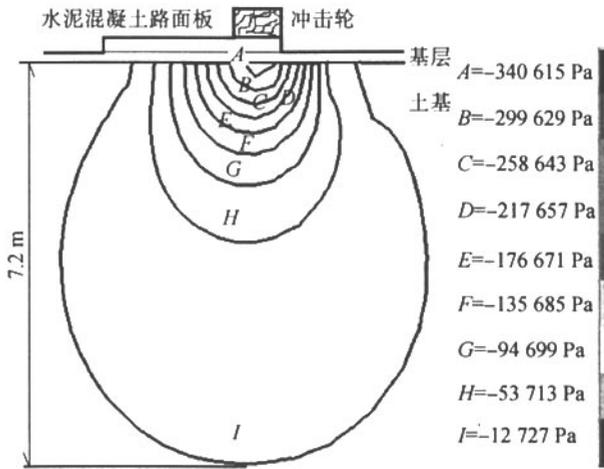


图6 工况4 竖直平面内冲击附加应力垂直分量分布

下钢筋混凝土盖板进行验算。

### 2.1 基本假定

(1)盖板的两端简支在台身上端,台身下端与基础固结,盖板的内力计算不考虑涵台传来的水平力。

(2)板的长度与宽度的比值等于或大于2时,可按简支单向板计算。

(3)同一深度冲击附加应力均匀分布,按最不利情况取该深度处最大计算应力。

(4)当水泥混凝土路面板被充分破碎后,此时冲击作用影响最深。考虑最不利情况,本文采用路面板被充分破坏后的冲击附加应力,来计算对盖板涵的影响。

### 2.2 计算截面尺寸与配筋

有限元计算结果表明,随着土基深度增加,由冲击荷载引起的附加应力逐渐衰减,冲击压实对路基存在一定的影响深度。公路桥涵设计手册中规定,当路堤填土高度在0.5 m 以上时,填土减弱了车辆荷载对涵洞的动力影响,故不计冲击力。设板涵上覆土

高度为  $h$ 。按照一般设计,盖板涵洞净跨径大于 2.0 m 时,一般要增设墩或支撑梁,故本文重点对跨径为 2.0 m 的盖板涵进行讨论分析。盖板涵断面标准尺寸见图 7,工程数量见表 2。

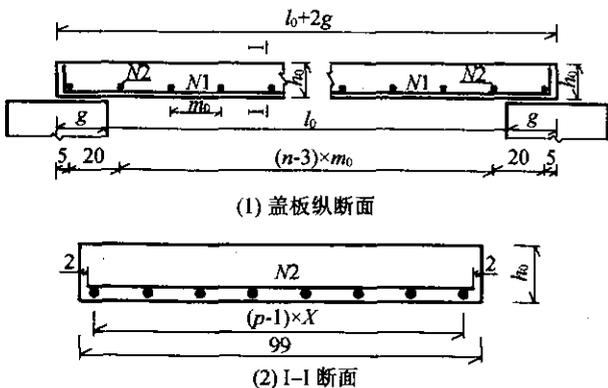


图 7 盖板涵的盖板断面尺寸

表 2 盖板截面尺寸及配筋

跨径 $L/m$	板上覆 填土高度/m	$g$ cm	$l_0$ cm	I 级钢筋		分布钢筋	
				$p$ /根	$X/cm$	$n$ /根	$m_0/cm$
2.0	<3.0	20	160	8	13	9	25
	3.0~4.0	20	160	10	10	9	25
	4.0~5.0	20	160	13	7.5	9	25
	5.0~6.0	20	160	12	8	9	25
	6.0~8.0	20	160	13	7.5	9	25

分别取上覆填土高度  $h$  为 6.0 m、5.0 m、4.5 m、4.0 m、3.5 m、3.0 m、2.5 m、2.0 m, 然后进行冲击压实载荷对盖板涵的安全性影响结构验算。

### 3 影响验算分析

#### 3.1 安全深度

针对特定的涵洞在冲击载荷作用下受力情况, 定义参数配筋面积比  $n$  为:

$$n = \frac{A_c}{A_y} \quad (2)$$

式中:  $A_c$  为冲击载荷作用下盖板配筋面积;  $A_y$  为设计规范中盖板配筋面积。

本文定义, 当冲击载荷作用下盖板配筋面积大于设计规范中盖板配筋面积时, 即配筋面积比  $n > 1$  时, 涵洞盖板在冲击载荷作用下不安全。

设盖板上部填土容重为  $17.5 \text{ kN/m}^3$ ; 水泥混凝土路面板板厚为 25 cm, 水泥混凝土容重为  $25 \text{ kN/m}^3$ ; 基层厚为 20 cm, 基层容重为  $23 \text{ kN/m}^3$ 。涵洞盖板截面面积一定, 按照简支板等代梁法编制通用计算程序, 以工况 4 为最不利情况, 分别计算不同深度处盖板

的配筋面积, 然后分别与规范推荐的配筋面积进行对比计算, 得到配筋面积比, 结果见图 8。

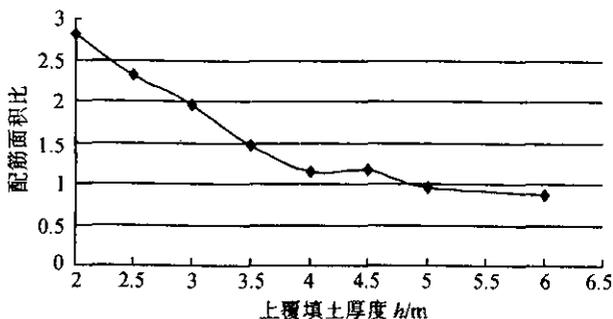


图 8 配筋面积比与上覆填土厚度关系曲线

由图 8 可以看出, 在冲击载荷作用下, 对于跨径 2.0 m 的钢筋混凝土盖板涵, 当上覆填土厚度小于 4.8 m (包含路面结构厚度) 时, 配筋面积比  $n > 1$ , 因而正常设计的盖板涵会因冲击载荷的影响而不安全。实际上, 这反映了附加应力的量级足够大, 超过了涵洞的设计标准。

#### 3.2 基于路基有效工作区的竖直和水平安全距离

实际施工中, 对于竖直安全距离不满足要求的涵洞, 施工人员往往还关心冲击荷载作用位置水平距涵洞多远时, 冲击荷载不会对涵洞造成影响。以下结合有限元计算结果, 采用路基工作区的概念对此问题进行探讨。

##### 3.2.1 路基的工作区

路基工作区的定义为在某一深度, 轮重所引起的竖向附加应力  $\sigma_z$  与路基自重引起的应力  $\sigma_B$  的比值 ( $1/m$ ) 很小时 ( $1/m = 1/10 \sim 1/5$ ),  $\sigma_z$  的影响可以忽略, 此时这一深度即为路基的工作区深度。轴载不同, 路基的工作区也不相同。

##### 3.2.2 冲击压实载荷影响区

根据有限元计算结果, 在冲击压实荷载作用下, 土基表面的冲击附加应力垂直分量分布见图 5; 在过冲击荷载作用点的竖直剖面内, 冲击附加应力垂直分量分布见图 6。

参考公路路基的工作区定义, 这里定义冲击压实荷载作用下的影响区, 即在土基的某一深度, 沿土基的水平方向的某一点, 由冲击压实载荷引起的冲击附加应力与土的自重应力的比值 ( $1/m$ ) 很小 ( $1/m = 1/10 \sim 1/5$ , 本文取  $1/5$ ), 可以认为对涵顶无影响。由这一系列应力比为 0.2 的点连成的区域, 就是冲击压实荷载作用的影响区域。

根据计算结果, 首先将工况 4 影响最大位置的

竖向冲击附加应力与土基自重应力比随土基深度变化曲线绘于图9。由图9可以看出,曲线存在一个拐点,在拐点之前,应力比随着土基深度的增加减小迅速,在拐点之后,应力比随着土基深度的增加减小缓慢。当土基深度为6.7 m时,应力比为0.2。如果以应力比0.2为路基工作区安全标准,涵洞的竖直安全深度为6.7 m。考虑1.2的设计安全系数,安全深度在5.6 m左右。与配筋率计算结果略有不同,安全深度更大一些。

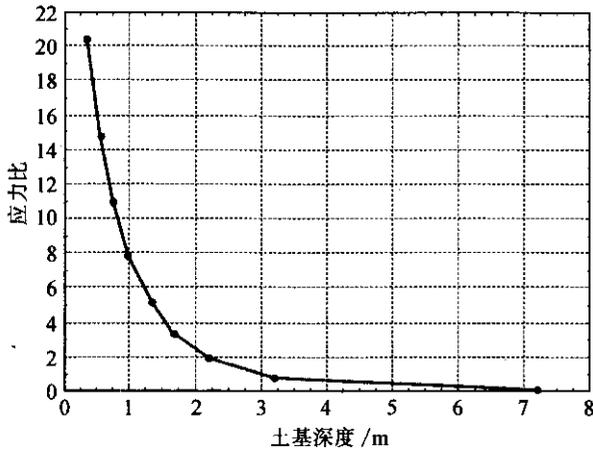


图9 工况4 应力比随土基深度变化曲线

将不同深度的应力比沿水平方向的变化绘于图10。为了更好地观察应力比的变化,将深度在板下0.75~2.45 m(土基表面下0.3~2.0 m)的应力比变化绘于图10(1),将深度在板下2.95~4.95 m(土基表面下2.5~4.5 m)的应力比变化绘于图10(2)。

由图10可以看出,在路面板下某一深度,冲击荷载引起的附加应力与自重应力的比值,随着距板边缘(冲击荷载作用位置)水平距离的增加近似呈线性递减。而且,随着深度的增加,应力比的分布也趋于平缓,最后都趋于0,这说明随着距离荷载作用点距离的增加,冲击荷载的影响也逐渐减小。由图10(2)可以看出:随着土基深度的增加,达到某一标准应力比值的水平距离将减小;在各种深度情况下,水平距离在2.2~2.6 m时,应力比值在0.1~0.2之间;随着深度减小,同一应力比值对应的水平距离将有所增大,但幅度不大。

综合以上结果可以得出,对于上覆填土高度大于3.0 m的涵洞,冲击荷载作用在距涵洞水平距离2.5 m以外时,涵洞是安全的。对于上覆填土高度小于3.0 m的涵洞,应酌情增加水平距离,但在3.5 m以外时,涵洞不会受到影响。

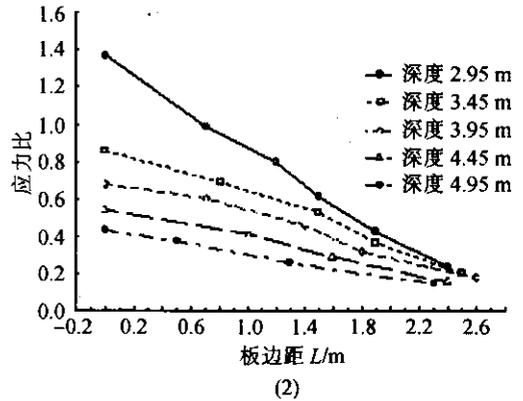
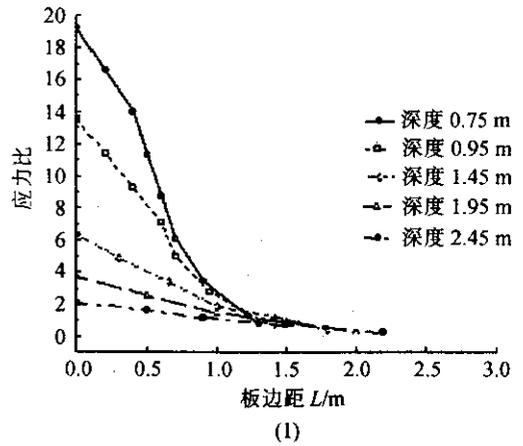


图10 不同埋深涵洞应力比与水平距离关系曲线

#### 4 结语

(1)采用拟静力法,运用有限元模拟分析了冲击压实动力作用下,旧水泥混凝土路面土基中附加应力的分布性状。并依据有限元计算结果,分析计算了冲击压实荷载作用下不同埋深盖板涵顶面的受力情况。进一步通过构造配筋比和冲击压实工作区两个概念,探讨了冲击压实施工时不同埋深盖板涵的竖直和水平安全控制距离,得出了一些有益的结论。研究结论可为冲击压实安全施工控制提供参考。

(2)将冲击压实施工分为4种工况,分析发现同一土基深度时,工况1(板中)附加应力最小,工况4(板角)时集中应力最大值达0.341 MPa,是4种工况中最大的情况。各种工况冲击附加应力在土基中沿深度的分布基本一致;各工况冲击附加应力在土基中呈指数形式衰减,在3 m(工况1)~4 m(工况4)以浅,土基中冲击附加应力随深度衰减较快;而在4 m以深,土基中冲击附加应力随深度衰减较慢。以正常交通荷载面板底最大应力(0.05 MPa)为标准来比较各种工况中冲击附加应力的分布,当冲击轮载作

用于板中央(工况 1)时,深度大约为 2.0 m,当冲击轮载作用于板角(工况 4)时,深度大约为 4.0 m。

分析发现:冲击载荷引起的附加应力在土基表面的分布,近似以冲击载荷作用点为圆心向四周递减;在土基表面的部分地方(板边角、板边缘下方),由于尺寸效应,土基表面的部分地方应力分布不均。在冲击载荷作用于路面板不同位置的各种工况中,作用在板角时,土基中的集中应力最大值最大。

(3)分析表明,在路面板下某一深度,冲击荷载引起的附加应力与自重应力的比值,随着冲击荷载作用位置距板边缘水平距离的增加近似呈线性递减。而且,随着深度的增加,应力比的分布也趋于平缓,最后都趋于 0。这说明随着距离荷载作用点距离的增加,冲击荷载的影响也逐渐减小。

(4)根据有限元计算结果,依据配筋面积比指标判断,在冲击载荷作用下,对于跨径为 2.0 m 的钢筋混凝土盖板涵,当上覆填土厚度小于 4.8 m(包含路面结构厚度)时,正常设计的盖板涵会因冲击载荷的影响而不安全。依据路基工作区的概念,在冲击载荷作用下,对于钢筋混凝土正交盖板涵,当上覆填土高度大于 5.6 m 时,可以直接在上面进行冲击压实施工;对于上覆填土高度大于 3.0 m 而小于 5.6 m 的情况,冲击压实施工时要对涵洞留有至少 2.5 m 的安全距离;当上覆填土高度小于 3.0 m 时,对涵洞的安全距离取为 3.0~3.5 m(上覆填土高度大时取小

值,反之取大值)。

(5)笔者在本地区冲击压实施工中对涵洞进行了观测,发现深度大于 3 m 的无病害盖板涵洞未发现垮塌现象,但这并不能排除施工造成涵洞隐蔽损伤情况的发生。因此,结合以上计算分析,本文推荐在涵洞上覆填土厚度大于 4.8 m 的情况下,可以正常施工。由于本文针对的是特定冲击压路机型,因此对于其他机型和其他形式的涵洞,可根据实际土质情况适当调整冲击压实施工作业时的安全距离。也可根据涵洞具体情况和当地工程经验,对涵洞进行现场观测,视情况适当调整安全距离。

#### 参考文献:

- [1] 唐学军,苏卫国. 冲击压实旧混凝土路面路基的力学行为研究[J]. 岩土工程学报,2004,(6).
- [2] 交通部第一公路工程局. 公路施工手册(桥涵)[M]. 北京:人民交通出版社,1985.
- [3] 殷有泉. 固体力学非线性有限元引论[M]. 北京:北京大学出版社,1985.
- [4] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册(路基)[M]. 北京:人民交通出版社,1996.
- [5] Braja M D. 吴世明,译. 土动力原理[M]. 浙江:浙江大学出版社,1984.
- [6] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.

## Research on Influence of Impact Compaction Technology In Rehabilitating Engineering on Orthogonal Slab Culvert

HU Chang-bin, SUN Xiao-liang

(College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The shock waves caused impacting compaction with huge energy will damage the culverts along rehabilitating road. According to the application of impacting compaction technology in the rehabilitating engineering of 316 national road near by Fuzhou City, the distribution of impacting additional stress in the soil base caused compaction is analyzed by three dimensional FEM with pseudo-static instead of dynamics. On the basis of the analysis results of FEM, taking reinforced concrete orthogonal slab culvert for example, the mechanical characteristics of slab culvert under the compaction load is studied in this paper, safe distance to the slab culvert during impacting compaction working is suggested both in vertical and horizontal directions. The results of this paper are helpful to impacting compaction construction.

**Key words:** impact compaction; culvert; construction; FEM; safe