

垂直振动成型方法在大粒径沥青  
混合料中的应用研究

张玉山<sup>1</sup>, 栗威<sup>2</sup>

(1.开封市杞县水利局, 河南 杞县 475000;2.河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006)

**摘要:**为解决大粒径沥青混合料不易压实、空隙率过大等问题,优化其路用性能,采用垂直振动成型方法(VVTM)和常规马歇尔方法(MS)进行大粒径沥青混合料体积参数试验、单轴抗压强度试验、劈裂试验、高温抗剪试验及水稳定性试验,通过改变振动时间、油石比及试验温度等分析大粒径沥青混合料的各项性能。结果显示,VVTM方法能显著提高大粒径沥青混合料的密度、稳定度等,降低其空隙率和矿料间隙率;采用VVTM方法有助于改善大粒径沥青混合料的路用性能,提高其抗压强度、劈裂强度、单轴贯入强度及冻融劈裂强度比,且能降低最佳油石比0.2%~0.3%;对抗压强度的改善幅度随温度的增加呈下降趋势,劈裂强度对中温区域(0~20℃)的依赖性略高于低温环境(-20~0℃);在大粒径沥青混合料配合比设计中推荐采用VVTM100方法。

**关键词:**公路;大粒径沥青混合料;垂直振动成型方法(VVTM);体积参数;路用性能

**中图分类号:**U416.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2018)06-0057-05

目前,中国对大粒径沥青混合料的应用大多局限于路面基层,在路面面层中的研究和应用相对较少,这与大粒径沥青混合料自身特点和施工工艺特性有关,如常规配合比设计方法与路面实际碾压过程差异大、不易压实、容易离析、路面空隙率不易控制等。马歇尔设计方法是一种经验性较强的设计方法,应用于特殊沥青混合料设计存在局限性,有研究明确指出该方法不适用于间断级配和开级配沥青混合料。针对大粒径沥青混合料在路面结构层中的应用,张肖宁等提出粗集料真实孔隙分级填充的概念,提出了沥青混合料体积设计方法;沙爱民等分析了振动参数对大粒径沥青混合料密度、强度的影响,提出了最佳配合比设计技术参数;解晓光等分析了常规马歇尔法和振动成型法对沥青混合料体积参数、力学指标的影响及粗集料含量对两种成型方法压实效果的差异性影响。但针对垂直振动成型方法应用于大粒径沥青混合料设计的研究较少。该文通过常规马歇尔方法和垂直振动成型方法的对比分析,研究垂直振动成型方法对大粒径沥青混合料路用性能的影响,为实体工程应用提供技术支持。

1 试验材料及方案

1.1 原材料选择及级配设计

选择壳牌 70# 基质沥青,其性能指标(见表 1)

均符合 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求。集料选择河南贾峪生产的石灰岩,矿粉由石灰岩研磨而成,其性能指标见表 2。

表 1 70# 沥青性能检测结果

检测项目		检测结果	规范要求
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	延度(5 cm/min,15℃)/cm	62.0	60~80
	软化点(环球法)/℃	>200	≥150
	闪点(COC)/℃	45.6	45~54
	含蜡量(蒸馏法)/%	284	≥230
	密度(15℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.6	≤2
	溶解度(三氯乙烯)/%	1.010	实测
	质量损失/%	99.9	≥99.0
	针入度比/%	0.12	≤1.0
(163℃,5 h)	延度(15℃)/cm	57.9	≥50
		>200	≥100

表 2 矿粉性能检测结果

检测项目	检测结果	规范要求
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.727	≥2.5
塑性指数/%	2.6	<4
亲水系数	0.52	<0.8

选择公称最大粒径为 37.5 mm 的集料,采用 ATB-30 级配类型,其矿料级配范围见表 3。

1.2 试验方案

有研究指出沥青混合料采用不同碾压成型方式

表3 ATB-30 矿料级配范围

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%													
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	90	72	66	59	49	33	23	16	13	9	8	6
下限	100	92	82	63	57	49	39	25	15	10	7	5	4	3
合成级配	100	97.2	86.3	67.2	62.4	56.2	43.1	29.6	19.6	14.2	10.8	7.5	6.2	4.5

会直接影响混合料的颗粒排列方式,进而影响其路用性能。为此,采用垂直振动成型方法(VVTM)和常规马歇尔方法(MS)成型试件进行对比分析,试验方案如下:

(1) 分别以 VVTM 方法和 MS 方法成型大粒径沥青混合料试件,其中 VVTM 方法模拟沥青混合料现场碾压实际情况,振动时间分别取 45、100 s,频率为 35 Hz,振幅为 1.2 mm,压力为 3 kN。试件分别编号 VVTM45、VVTM100、MS。

(2) 选择 3.0%、3.3%、3.6%、3.9%、4.2% 5 个油石比,分析 VVTM 方法和 MS 方法对大粒径沥青混合料密度、空隙率、矿料间隙率等的影响。

(3) 按照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行单轴压缩试验、单轴贯入试验和冻融劈裂试验,分析碾压成型方式对大粒径沥青混合料高温抗剪、抗车辙、低温抗裂及水稳定性的影响。

## 2 试验结果分析

### 2.1 体积参数影响分析

沥青混合料体积参数确定是配合比设计的重要内容,实际工程中因体积参数造成混合料最佳沥青用量不当的现象时有发生,影响路面设计和施工质量。分别以 VVTM 方法和 MS 方法成型大粒径沥青混合料试件,分析不同油石比下试件密度、空隙率、矿料间隙率等的变化情况,试验结果见图 1。

由图 1 可知:不同成型方式对大粒径沥青混合料体积参数有显著影响。1) VVTM100 试件的密度远高于 MS 试件,提高 1.8%~3.0%;VVTM45 试件的密度略高于 MS 试件;3 种试件的密度在设计油石比范围内均出现峰值,其中 VVTM100 最大密度对应的油石比为 3.3%,VVTM45 和 MS 最大密度对应的油石比为 3.6%。2) VVTM100 试件的空隙率远低于 MS 和 VVTM45 试件,在设计油石

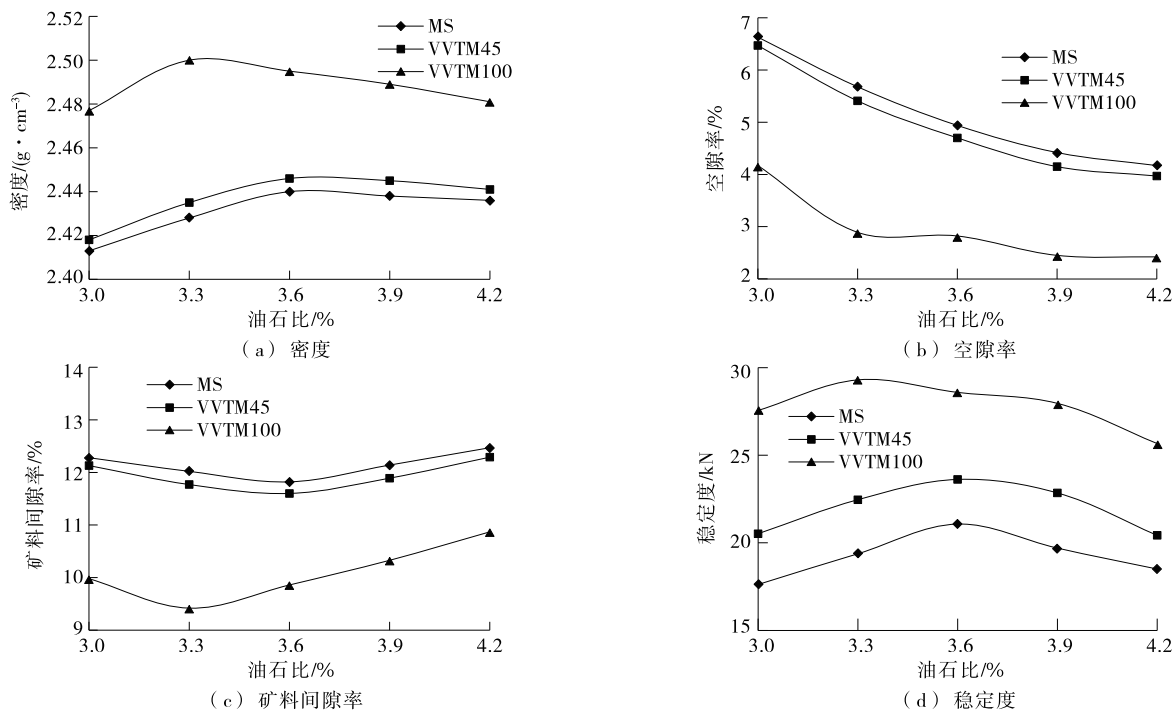


图1 不同油石比下成型方式对大粒径沥青混合料体积参数的影响

比范围内,VVTM100的空隙率为2.4%~4.2%,MS为4.1%~6.6%,VVTM方法能有效降低沥青混合料空隙率,提高其密实程度;随油石比增加,3种试件的空隙率均逐渐降低,VVTM100在油石比3.0%~3.3%时下降较显著,3.3%~4.2%时变化幅度较小,而VVTM45和MS在整个设计油石比范围内变化幅度均较大,说明采用VVTM100方法(其中100为振动时间)成型试件,空隙率受油石比的影响较弱。3) VVTM100试件的矿料间隙率远低于VVTM45和MS试件,降低12.8%~22%;VVTM100试件矿料间隙率最小值对应的油石比为3.3%,VVTM45和MS对应的油石比为3.6%,与密度分析结果相同。4) 与MS试件相比,VVTM100试件的稳定度提高约32%(油石比3.3%),其稳定度最大值对应的油石比为3.3%~

3.4%,MS和VVTM45稳定度最大值对应的油石比约3.6%。

综上,不同方法成型的大粒径沥青混合料的体积参数存在显著差异,采用VVTM100方法成型试件,能保证矿料颗粒紧密接触,级配良好,在降低沥青用量的条件下,沥青混合料能获取优异的润滑度,密实度、稳定度提高,空隙率、矿料间隙率降低。

## 2.2 抗压强度影响分析

抗压强度能反映沥青混合料压实过程中级配结构特性和力学性能,而沥青混合料高温稳定性的强弱与沥青胶结料的粘聚力和矿料级配的嵌挤作用密切相关。按JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对3种试件进行单轴压缩试验,试验温度为20、40和60℃,加载速率为2 mm/min,试验结果见图2、图3。

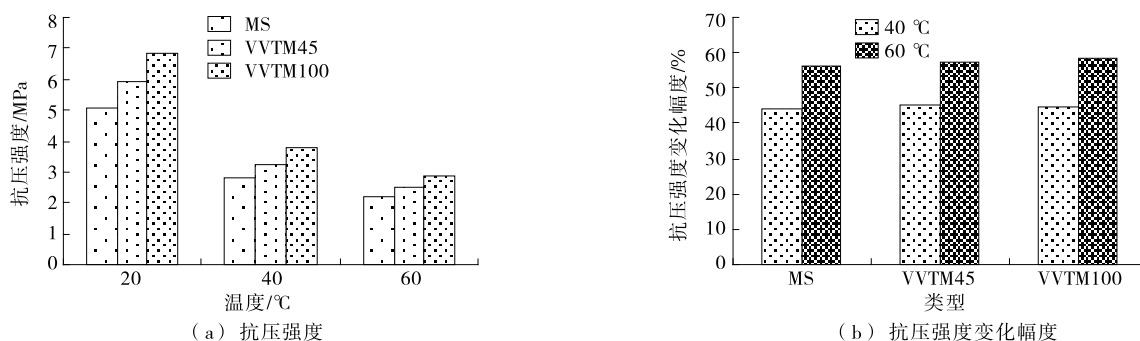


图2 不同成型方式对大粒径沥青混合料抗压强度的影响

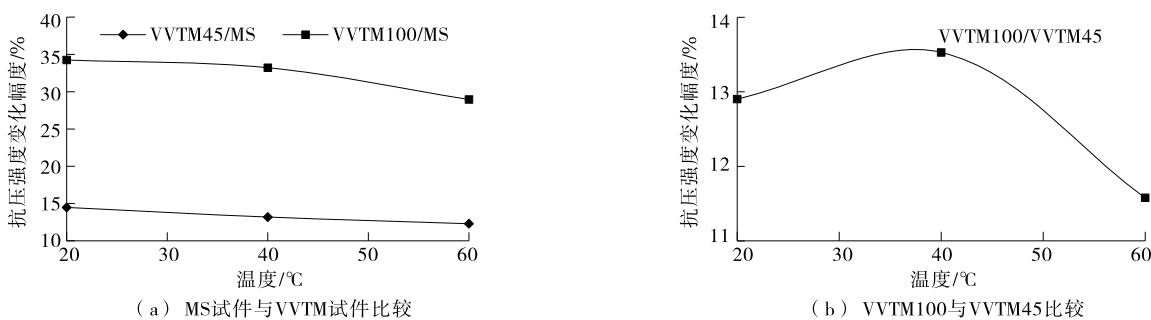


图3 不同成型方式下温度对大粒径沥青混合料抗压强度的影响

由图2可知:1) 在最佳油石比条件下,试验温度和成型方法对大粒径沥青混合料抗压强度的影响显著,抗压强度随着温度的增加而显著降低。其中VVTM100试件的抗压强度最大,VVTM45次之,MS最小。如20℃时,与MS相比,VVTM100的抗压强度提高约34.2%,VVTM45提高约14.5%。2) 温度增加,3种试件的抗压强度降低,且随温度

上升变化幅度更显著,与20℃时相比,60℃时3种试件的抗压强度均降低约56%,40℃时降低约45%。说明温度对大粒径混合料力学强度的影响显著,这与沥青混合料的粘弹性质有关。

由图3可知:与MS试件相比,VVTM100和VVTM45试件的抗压强度均提高,但改善幅度随温度升高而下降,尤其对于VVTM100,20和60℃的

改善幅度分别为 34.2%、29.0%，相差 5.2%。说明 VVTM100 对大粒径沥青混合料抗压强度的改善效果存在一定的温度敏感性。

总体而言，VVTM100 试件的抗压强度优于 MS 试件，VVTM 的压实机理更符合沥青混合料碾压过程，VVTM 试件内部集料排列更合理，结构稳定性更好。

### 2.3 劈裂强度影响分析

依据 JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对 3 种试件进行劈裂强度试验，试验温度  $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，间隔  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压条为 19 mm，加载速率为 1 mm/min，试验结果见图 4、图 5。

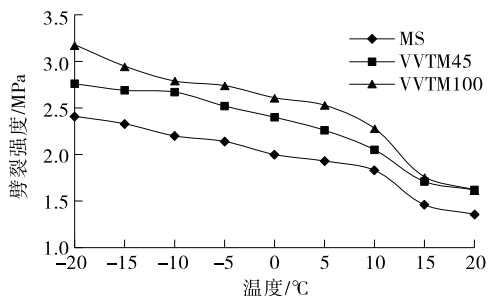


图4 不同成型方式下大粒径沥青混合料劈裂强度随温度的变化

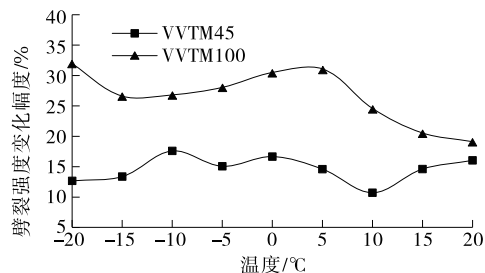


图5 振动时间对大粒径沥青混合料劈裂强度的影响

由图 4 可知：1) 大粒径沥青混合料试件成型方法对劈裂强度有显著影响，尤其在低温条件下， $-20$

$^{\circ}\text{C}$  时 VVTM100 和 VVTM45 的劈裂强度分别提高 31.9% 和 12.7%。说明 VVTM 成型方法对大粒径沥青混合料低温抗裂的改善效果显著。2) 随着试验温度的增加，3 种试件的劈裂强度逐渐降低，且在  $5\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时下降幅度显著，在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近出现拐点。

由图 5 可知：振动时间的延长有助于提高试件的密实程度，改善矿料嵌挤效果。VVTM100 对劈裂强度的改善效果随温度的升高而逐渐下降， $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的改善效果最佳，与 VVTM45 试件的劈裂强度相差较大， $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时与 VVTM45 相接近。

表 4 为不同温度区间 3 种试件劈裂强度与温度的相关性。从中可见， $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时二者的斜率高于  $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，此时劈裂强度下降幅度较大，说明劈裂强度对中温区域的依赖性略高于低温环境。

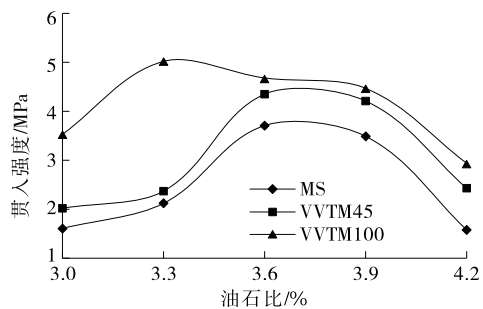
表4 劈裂强度与试验温度的相关性分析

成型方式	劈裂强度与试验温度( $^{\circ}\text{C}$ )的相关性		
	$-20\sim 20$	$-20\sim 0$	$0\sim 20$
MS	0.025 9	0.020 2	0.035 0
VVTM45	0.030 0	0.017 8	0.042 2
VVTM100	0.036 8	0.027 0	0.055 0

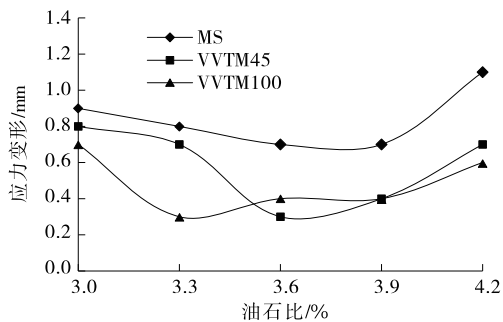
综上，VVTM100 试件的劈裂强度优于 MS 试件。大粒径沥青混合料的力学强度主要由粗骨料形成的嵌挤骨架作用、细集料填充孔隙形成的内摩阻力及沥青与矿料间的粘结力和沥青自身的内聚力所构成，采用 VVTM 方法可促使大粒径沥青混合料在较少沥青用量条件下获得良好的工作性能，减少试件中的自由沥青，同时保证大粒径混合料间适宜的结构沥青。

### 2.4 高温抗剪性能分析

采用单轴贯入试验模拟沥青路面在行车荷载作用下的剪应力分布状态，试验温度  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压头直径为 42 mm，加载速率为 1 mm/min，结果见图 6。



(a) 贯入强度



(b) 应力变形

图6 成型方式对大粒径沥青混合料抗剪强度的影响

由图 6 可知:1) 成型方法、油石比等对大粒径沥青混合料贯入强度均有较大影响,随着油石比的增加,贯入强度呈先增加后降低的趋势,VVTM100 试件的贯入强度高于 MS 和 VVTM45 试件;不同成型方法试件的贯入强度最大值对应的油石比不相同,在设计油石比范围内,VVTM100 试件贯入强度最大值为 5.02 MPa,对应油石比为 3.3%,而 MS 试件的最大值为 3.71 MPa,对应油石比为 3.6%,VVTM100 试件的贯入强度提高约 26.1%,沥青含量却降低 0.3%。2) 随油石比增加,应力变形呈先下降后增加的趋势,VVTM100 试件的应力变形远低于 MS 试件,在最佳油石比 3.3%时 VVTM100 的应力变形为 0.3 mm,MS 试件在油石比 3.6%时的应力变形为 0.7 mm。采用 VVTM 成型方法不仅可提高大粒径沥青混合料的高温抗剪能力,还能进一步降低破坏变形。

文献[2]、[3]指出采用 VVTM 方法既可使大

粒径沥青混合料内部形成单粒径石—石接触嵌挤结构,还能兼顾沥青胶结料的粘聚力,进一步形成更有效而紧密的嵌挤密实结构,发挥大粒径沥青混合料内部内摩擦力与嵌挤力起主要作用的优势,结构强度受沥青胶结料的性质和物理状态的影响降低,高温抗剪能力得到提高。

## 2.5 水稳定性分析

沥青路面的空隙率、沥青胶结料性质是影响水损害的主要因素之一。有研究指出路面空隙率在 8%以下时,水在荷载作用下几乎不产生动水压力,不易造成破坏,而沥青路面目标空隙率一般要求控制在 4%左右。同时,沥青用量对混合料水稳定性存在一定影响,选择沥青用量上限可适度改善其水稳定性,但会与沥青混合料高温稳定性及抗滑性能产生矛盾,需结合实际情况综合考虑。通过冻融劈裂试验对大粒径沥青混合料水稳定性能进行评价,试验结果见图 7。

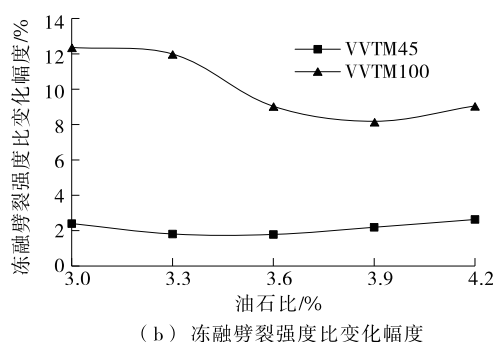
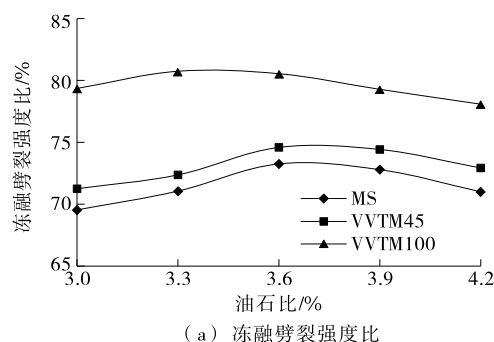


图 7 成型方式对大粒径沥青混合料冻融劈裂强度的影响

由图 7 可知:1) 冻融劈裂强度比随油石比的增加呈先增加后降低的趋势,且不同成型方法试件的劈裂强度比存在显著差异,VVTM100 试件的劈裂强度比最大,VVTM45 次之,MS 最小。VVTM100 试件的劈裂强度比比 MS 试件提高约 12%。2) 随油石比增加,不同成型方法试件的冻融劈裂强度比峰值对应的油石比不尽相同,VVTM100 冻融劈裂强度峰值对应的油石比在 3.3%左右,MS 对应的油石比为 3.6~3.8%,且 VVTM100 对冻融劈裂强度比的改善效果随油石比的增加逐渐下降。

## 3 结论

(1) 与常规马歇尔试验方法相比,采用垂直振动成型方法 VVTM100 可提高大粒径沥青混合料的密实度和稳定度,降低其空隙率和矿料间隙率,弥

补常规方法对大粒径沥青混合料应用的缺陷。

(2) VVTM100 成型方法可提高大粒径沥青混合料的抗压强度、劈裂强度、单轴贯入强度及冻融劈裂强度比,振动时间的延长有助于提高混合料的性能指标,其对抗压强度的改善幅度随温度的增加呈下降趋势,劈裂强度对中温区域(0~20℃)的依赖性略高于低温环境(-20~0℃)。

(3) 油石比对大粒径沥青混合料的性能指标有较大影响,成型方法不同,大粒径沥青混合料各指标最大值对应的油石比也不尽相同,与马歇尔方法相比,采用 VVTM100 成型方法能降低油石比 0.2%~0.3%,尤其是力学强度提高约 34.2%。

(4) 推荐采用 VVTM100 方法进行大粒径沥青混合料配合比设计。

(下转第 134 页)

平截面假定。

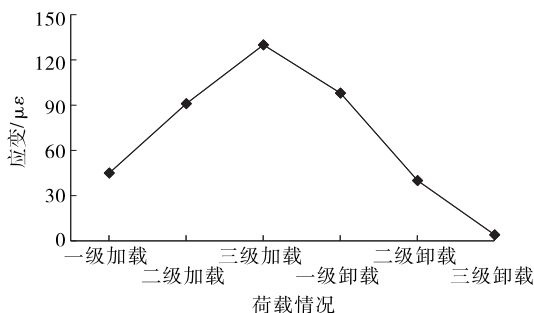


图 11 控制截面各级加/卸载下梁底应变实测值(N7 测点)

表 4 控制截面沿梁高的实测应变与计算值(N1~N6 测点)

测点	应变/ $\mu\epsilon$			校验系数	残余度/%
	理论值	实测值	残余值		
N1	-55.1	-35	0	0.63	0
N2	-4.9	0	0	—	—
N3	45.4	30	0	0.66	0
N4	95.7	60	0	0.63	0
N5	146.0	90	0	0.62	0
N6	196.3	125	5	0.64	4

(3) 裂缝情况。加载过程中梁体无裂缝产生，砼无破损现象。

## 6 结语

该文运用 MIDAS/Civil 2012 建立该桥 4—7<sup>#</sup> 梁成桥后的连续梁模型分析结构内力确定控制截面,采用钢绞线线圈堆载方式进行现场加载试验,结论如下:各测点挠度校验系数为 0.64~0.68,应变校

验系数为 0.62~0.66,符合 JTG/T J21—2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》的要求,该片梁刚度、强度均满足设计要求;加载过程中梁体无裂缝、砼无破损现象,试验梁的实际承载力满足公路—I 级荷载要求,工作性能良好,安全性满足要求。

## 参考文献:

- [1] 朱小青,陈代海,陈淮.先简支后连续 T 梁桥全过程力学行为及极限承载力分析[J].铁道科学与工程学报,2016,31(1).
- [2] 贾兰星.20 m 跨径简支钢筋混凝土 T 梁桥检测及承载能力评定方法[D].长春:吉林大学,2015.
- [3] 夏叶飞.预应力混凝土简支 T 梁桥的承载能力实桥试验分析研究[D].南京:东南大学,2006.
- [4] 陈安洋.多地区重载交通下装配式简支 T 梁桥响应特征研究及安全评价[D].西安:长安大学,2014.
- [5] 李民.重庆市高速公路简支连续梁桥建设后评估方法与体系研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [6] 邵鹏磊.公路桥梁现场检测与技术状况评定[D].郑州:郑州大学,2016.
- [7] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [8] 安燃.简支 T 梁桥荷载试验方法研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [9] 唐平建.在役预应力混凝土梁桥安全状况评估技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [10] 杨敏,周勇军,邓旭东.简支 T 梁桥冲击系数计算公式研究[J].公路交通科技:应用技术版,2015(2).

收稿日期:2018-06-30

\*\*\*\*\*  
(上接第 61 页)

## 参考文献:

- [1] 张慧鲜.基于抗剪强度的沥青混合料高温性能影响因素分析及改善措施研究[D].西安:长安大学,2010.
- [2] 沙爱民,王玲娟,耿超.大粒径碎石沥青混合料振动压实方法[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(2).
- [3] 解晓光,马松林,王哲人.沥青混合料马歇尔击实法与振动击实法成型工艺的比较研究[J].中国公路学报,2001,14(1).
- [4] 张肖宁,郭祖辛,吴旷怀,等.按体积法设计沥青混合料[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,28(2).
- [5] 李闯民.沥青混合料体积参数研究[D].南京:东南大学,2005.
- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规

程[S].

- [7] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].
- [8] 刘红瑛,戴经梁.不同级配对沥青混合料车辙性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(9).
- [9] 袁峻,孙立军.沥青混合料抗剪强度影响因素评价指标研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6).
- [10] 毕玉峰,孙立军.沥青混合料抗剪试验方法研究[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(8).
- [11] 刘德卫,张德欧,刘德鹏.浅谈 SMA 粗集料骨架嵌挤结构的判别标准[A].2015 年 2 月建筑科技与管理学术交流会论文集[C].2015.
- [12] 周扬江,乔鹏.振动成型法在 320 国道某标段施工中的应用及改进[J].公路与汽运,2013(6).

收稿日期:2017-04-21