

文章编号:1672-9331(2017)02-0055-06

波浪条件下植物对边界层内流速的影响

蒋 傲¹, 宋静贤¹, 胡旭跃^{1,2}, 周 灿¹

(1.长沙理工大学 水利学院,湖南 长沙 410004; 2.湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室,湖南 长沙 410004)

摘 要: 为了研究植物对边界层内流速的影响,利用波浪水槽进行了物理模型试验。在入射波为规则波、波周期一定时,不同植物密度、来波波高对植物模型近底处边界层流速分布有不同的影响。试验结果表明,植物带长度范围内的前中后3条测线流速分布规律符合理论计算的流速分布规律,但流速值更小;在波周期和植物宽度不变的情况下,随着植物密度的增加,近底流速最大值的衰减系数增加;在植物密度不变的情况下,不同波高作用下近底边界层流速最大值的衰减程度不同,波高值越大,衰减效果越明显。

关键词: 消浪; 概化模型; 边界层; 流速结构; 流速分布; 衰减系数

中图分类号: TV139.2

文献标识码: A

Effects of plants on flow velocity in boundary layer under wave condition

JIANG Ao¹, SONG Jing-xian¹, HU Xu-yue^{1,2}, ZHOU Can¹

(1.School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2.Key Laboratory of Water-Sediment Flood and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China)

Abstract: The change of flow velocity in boundary layer caused by vegetation through physical model experiment in wave flume was studied. As the incident wave was regular and the wave period was constant, different vegetation densities and wave heights had different effects on flow velocity in bottom boundary layer of vegetation model. The experiment draws some conclusions. First, the measured flow velocity is slower than the theoretical value but velocity distribution regularities of three measuring lines along the length of vegetation correspond with the theoretical velocity distribution regularities. Second, as the wave period and width of vegetation are constant, the maximum near-bed velocity increase with the increasing of vegetation density. Third, as the vegetation density is constant, the attenuation effects become more obvious with the increase of wave height.

Key words: wave attenuation; generalized model; boundary layer; velocity structure; velocity distribution; attenuation coefficient

海岸岸滩植物不仅能够缓流、消浪、促进粘性泥沙沉积,为海岸水生生物提供栖息地,而且还能

稳定淤泥海岸的泥沙。近年来,海岸植物在海岸防护、防洪以及促淤、减污、优化海滨环境等方面

收稿日期: 2017-03-12

基金项目: 交通部科技计划资助项目(20113280001570)

作者简介: 蒋 傲(1992-),男,湖南长沙人,长沙理工大学硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

受到人们的重视。

波浪边界层存在于海底床面附近,其水流运动特性与波浪的传播和变形、泥沙起动以及床面形态的变化密切相关。而海洋岸滩种植植物不仅能够起到消波缓流、促使岸滩淤积的作用,而且还有助于岸滩生态系统的保护。国内外学者通过试验^[1-4]和理论推导^[5],研究了植物对流速垂向分布的影响,并得出了流速垂向分布公式,植物密度对植物流速垂向分布的影响较大;另外一些国内外学者^[6-15]研究了植物对波浪的影响,得到不同波况条件下的消浪效果。

现有研究^[6-13]大多集中于海岸岸滩植物护岸的水流结构形态以及波浪条件下植被的消浪特性等方面,而岸滩植物对波浪边界层内水流特性影响的研究还比较少。因此,作者着重研究在波浪作用下具有树根和树冠的刚性植物在同周期不同来波波高的条件下,各断面垂线的流速分布规律以及边界层内最大流速衰减系数的特性。

1 试验概况

试验在长沙理工大学港航中心实验室波浪水槽内进行。水槽总长 40 m,宽 0.5 m,高 0.8 m。

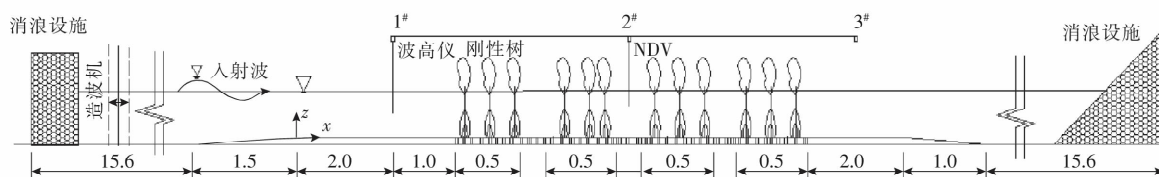


图 1 模型布置图(单位:m)

Fig. 1 Model layout(Unit:m)



图 2 植物布置模型

Fig. 2 Plant layout model

试验采用挪威 Nortek 公司生产的高级小威龙(Vectrino)测速仪进行三维流场的测量。由于侧重研究近底边界层的流速分布,所以只测量了

波浪水槽的一端装有推板式造波机,另一端设有直立式消能网,以减小造波过程中波浪反射的影响。试验水深保持在 25 cm 不变,试验采用规则波,波周期 T 取 1.0 s,波高 H 采用 5, 6, 8 cm 三种试验总体工况设计见表 1;纯植物带宽 b 为 2 m。试验模型布置如图 1 所示,其中,1# 断面位于植物前方 1 m 处;2# 断面位于第二第三块植物中央,距前后各 0.05 m;3# 断面位于植物后方 1 m 处,4 块植物之间间隔均为 0.1 m。植物模型采用广东和广西等地海滩防浪林典型树种——红树林进行概化模型试验,植物模型树干采用 PVC 管,树冠采用柔性的仿真树,树根采用漆包铁丝,模型长 40 cm,植物模型固定在尺寸为 50 cm×50 cm 的硬度 PVC 板上,种植密度 ρ 为 164, 100, 60 株/ m^2 三种。植物模型布置如图 2 所示。

表 1 试验组次编号表

Table 1 Experimental group number

编号	波要素	植物密度/(株· m^{-2})		测线编号
		编号	数值	
R ₁	H=5.0 cm T=1.0 s	a ₁	164	1#
R ₂	H=6.0 cm T=1.0 s	a ₂	100	2#
R ₃	H=8.0 cm T=1.0 s	a ₃	60	3#

靠近底部的流场。

试验过程中为保证数据的稳定性,波浪试验每组进行 3 次,剔除结果中的异常值后取平均值。流速测量时间持续 30 s,取流速过程线中每个周期最大值的平均值进行分析。

为了分析植物对波浪边界层流速的影响,引入近底边界层最大流速消减系数 k' ,定义 $k' = \frac{u_1 - u_{2/3}}{u_1} \times 100\%$,其中, u_1 表示 1# 断面测线最大近底流速; $u_{2/3}$ 表示 2# 或者 3# 断面测线最大近底流速。近底边界层最大流速消减系数 k' 越大,表明植物对近底流速的消减作用越大。

2 波浪边界层流速结构

在浅水波中,波浪在水底产生了波动的边界层,目前对此研究比较成熟。建立垂向二维模型, x 坐标为波浪传播方向, z 坐标为垂直方向。取试验水槽底壁为 $z=0$, u 为流体水平速度,将近底的边界层波浪运动分为2个区域来研究(见图3),即势流区: $Z>\delta$,其中 δ 为边界层厚度;边界层区: $K_s<Z<\delta$,其中 K_s 为水底壁面粗糙凸起高度。

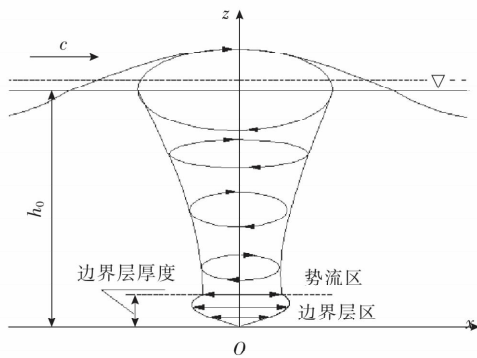


图3 边界层内外流速分布

Fig. 3 Flow velocity distribution inside and outside the boundary layer

在短周期的波浪水流中,水质点在波浪运动上做周期性的往返振荡运动,水流在短时间内正负交变,边界层得不到充分发育,只有床面附近很薄的一层受到床面影响而存在剪切应力,形成近底边界层。边界层外剪切应力接近于零,可以作为无粘无旋运动来处理,流速场可以用势函数来描述。但在边界层内的流动是粘性有旋运动,流速受到剪切应力的影响,并受床面上流速等于

零的边界条件控制。因此,可通过方程(1)得到波浪边界层内任一点的流速,边界层外势流区满足二阶斯托克斯流速分布(如方程(2)所示)。

边界层区: $K_s<Z<\delta$;

$$\text{流速分布 } u = u_m [\cos(kx - \sigma t) - e^{-\beta z} \cos(kx - \sigma t + \beta z)] \quad (1)$$

势流区: $Z>\delta$;

$$\text{流速分布 } u = u_m \left[\cos h[k(-z + h)] \cos \theta + \frac{3}{4} A k \frac{\cos h[2k(-z + h)]}{\sin h(kh)^3} \cos(2\theta) \right] \quad (2)$$

式中: $\sigma = \frac{2\pi}{T}$; $k = \frac{2\pi}{L}$; $\beta = \sqrt{\frac{\sigma}{2\nu}}$; T 为波周期; L 为波长; A 为波浪振幅; ν 为流体运动粘性系数。

3 试验结果与讨论

3.1 沿程近底边界层流速分布

流速是研究边界层的一个重要参数,试验对规则波作用下通过植物带的前、中、后3条测线床面上的近底层流速分布进行了量测。图4~6为线性波波高 H 为5,6,8 cm 时通过3种植物密度后的床面近底处的水平流速分布结果和理论值分布图,其中,理论近底边界层流速分布为无植物状态下,结合方程式(1),(2)绘出。

3条垂线的实测流速分布规律和计算理论流速分布的规律变化趋势相同。由于1#垂线位于植物带前,受植物带的阻水作用,流速略有减小;2#和3#垂线位于植物带中部和后侧,由于植物带的消浪作用波浪衰减,流速相应减小。

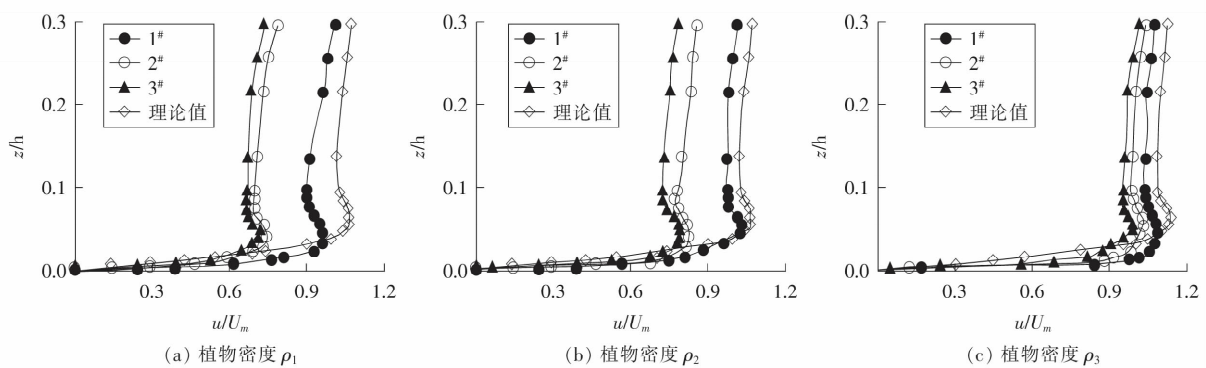
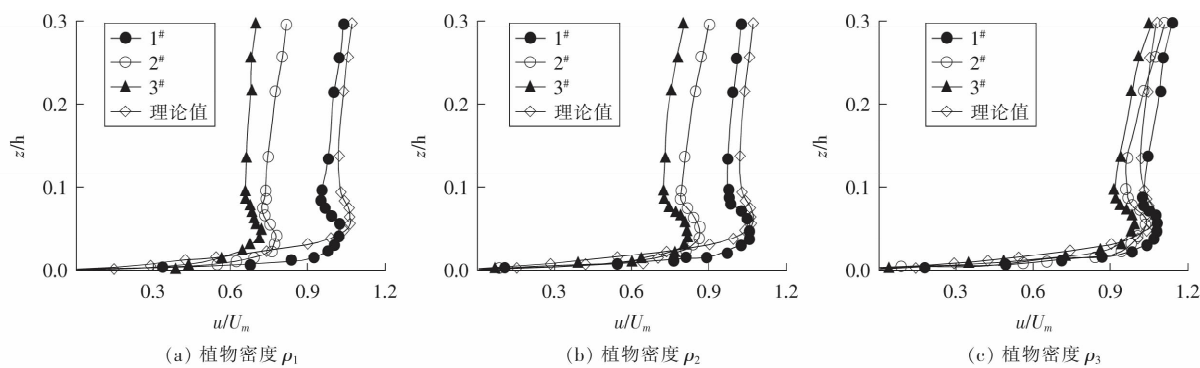
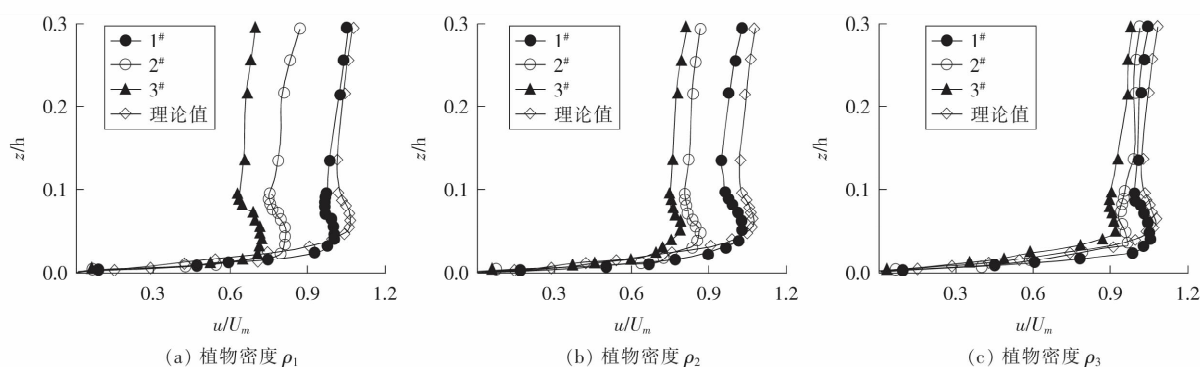


图4 不同植物密度沿程流速分布图($H=5$ cm, $T=1.0$ s)

Fig. 4 Distribution of plant density along flow velocity ($H=5$ cm, $T=1.0$ s)

图5 不同植物密度沿程流速分布图 ($H = 6 \text{ cm}, T = 1.0 \text{ s}$)Fig. 5 Distribution of plant density along flow velocity ($H = 6 \text{ cm}, T = 1.0 \text{ s}$)图6 不同植物密度沿程流速分布图 ($H = 8 \text{ cm}, T = 1.0 \text{ s}$)Fig. 6 Distribution of plant density along flow velocity ($H = 8 \text{ cm}, T = 1.0 \text{ s}$)

3.2 波浪近底流速最大值

在近底边界层内流速存在流速由小变大、然后由大变小的突变点,将该突变点定义为边界层内最大近底流速。表2为不同工况下各测线近底

流速最大值。表2反映出,同一植物密度时,植物带内沿波传播方向近底流速最大值减小;同一波要素时,密度越大,波浪衰减越大,近底流速最大值越小。

表2 不同工况各测线近底流速最大值

Table 2 The maximum value of near-bottom flow velocity in different working conditions ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

植物密度/ (株 $\cdot \text{m}^{-2}$)	5 cm			6 cm			8 cm		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#
$\rho_1 = 264$	11.21	8.98	8.61	14.14	10.98	10.12	17.45	14.13	12.46
$\rho_2 = 100$	11.89	9.69	9.38	14.54	12.05	11.40	17.75	14.89	13.65
$\rho_3 = 60$	11.90	11.31	10.90	14.85	14.25	13.49	18.08	16.6	15.86

研究了来波波高对近底边界层最大流速的影响。在同一条测线上,近底边界层最大流速随波高的增大而增大;1#垂线位于植物带前,只受到植物带的阻水作用,植物密度对近底边界层流速影响不大;2#,3#垂线位于植物带中和植物带后,主要受到植物带的消浪作用,近底边界层最大流速随植物密度的增大而减小。从图7可以看出,在本次试验研究条件下,同一测线近底边界层最大流速与来波波高近似呈现线性关系。

3.3 波浪近底流速衰减系数

研究了不同植物密度和不同来波波高对近底流速的影响。试验中植物带宽不变($b = 2 \text{ m}$),采用1种波周期 $T = 1.0 \text{ s}$,波高选取3种5,6,8 cm,改变植物密度,分别取 $\rho_1 = 264 \text{ 株}/\text{m}^2$, $\rho_2 = 100 \text{ 株}/\text{m}^2$, $\rho_3 = 60 \text{ 株}/\text{m}^2$ 进行试验。根据表2不同工况各测线近底流速最大值,计算出1#与3#测线之间近底最大流速的衰减率系数,结果如表3所示。

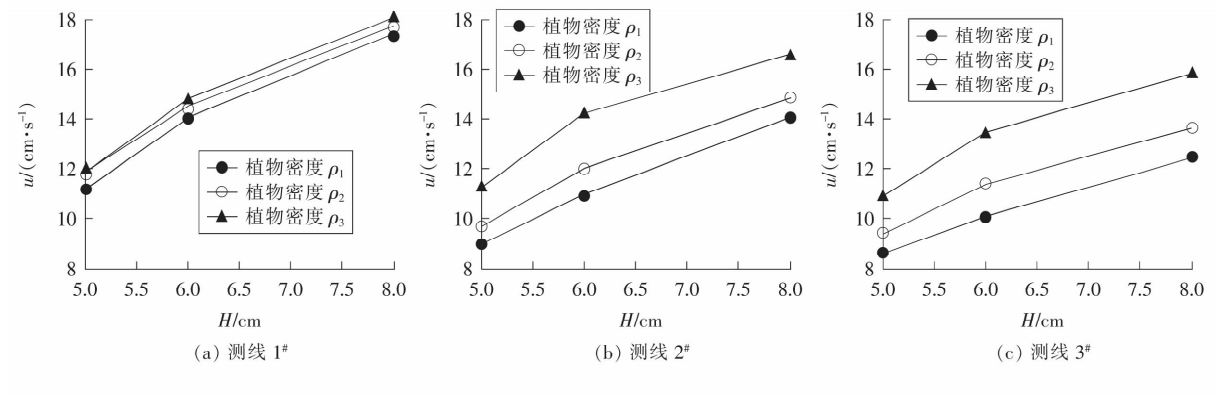


图 7 近底最大流速与来波波高的关系

Fig. 7 The relationship between near-bottom maximum velocity and incoming wave height

表 3 不同工况近底最大流速的衰减率系数

Table 3 Attenuation coefficient of maximum velocity of near bottom in different working conditions

植物密度/(株·m ⁻²)	5 cm	6 cm	8 cm
$\rho_1 = 264$	0.231 9	0.285 0	0.292 8
$\rho_2 = 100$	0.201 0	0.223 9	0.231 0
$\rho_3 = 60$	0.083 9	0.085 6	0.122 9

表 3 说明了不同植物密度和不同来波波高对波浪近底流速分布的影响规律。对于来波波高、周期、植物宽度不变的情况,近底流速衰减系数随植物密度的增加而增加,植物密度越密,流速的消减效果越好;对于同一植物密度、波周期、植物宽度不变的情况,来波浪高增加,植物对波浪近底处的流速消减越明显。

综合分析表明,在来波周期和植物宽度一致的情况下,植物密度为 $\rho_1 = 264$ 株/m² 对近底流速衰减的效果最好。

4 结论

作者通过物理模型试验,研究了规则波作用下刚性植物对波浪近底层流速分布的影响,得到如下结论。

1) 植物区内波浪近底层的流速分布与通过理论分析得到的流速分布有相似的规律,但植物区的流速值小于理论分析值。

2) 在来波周期和植物宽度一致的情况下,随着植物密度的增加,近底流速最大值的衰减系数增加。

3) 在来波周期和植物宽度不变的情况下,同

一植物密度对不同波高作用下近底边界层流速最大值的衰减程度不同,波高值大的衰减效果比波高值小的衰减效果更明显。

〔参考文献〕

- [1] 沈小雄,陈家贵,胡旭跃,等.波浪作用下柔性植物带内流速分布特性研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2017(1):96-101.
SHEN Xiao-xiong, CHEN Jia-gui, HU Xu-yue, et al. Research on the characteristics of flow velocity distribution in the flexible vegetation zone under wave action[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: Series A, 2017(1):96-101.
- [2] 李诚,张弛,隋倜倜.浅化波浪层流边界层流速分布特性的数值分析[J].海洋学报,2016(5):141-149.
LI Cheng, ZHANG Chi, SUI Ti-ti. Numerical investigation on velocity distribution in the shoaling laminar wave bottom boundary layer[J]. Haiyang Xuebao, 2016(5):141-149.
- [3] Yagci O, Tschiesche U, Kabdasli M S. The role of different forms of natural riparian vegetation on turbulence and kinetic energy characteristics[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(5):601-614.
- [4] 王文雍,刘昭伟.刚性沉水植被水流的流速垂向分布[J].四川大学学报:工程科学版,2012(S2):253-257.
WANG Wen-yong, LIU Zhao-wei. Vertical profile of horizontal velocity in the flow with submerged vegetation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012(S2):253-257.
- [5] Chen Y C, Kao S P. Velocity distribution in open channels with submerged aquatic plant[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(13):2009-2017.

- [6] 吕臻,韩安帝.刚性植物对波浪特性影响的试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(4):89-93.
LU Zhen, HAN An-di. Experimental study on the influence of rigid plants on wave characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(4): 89-93.
- [7] 冯卫兵,汪涛,邓伟.柔性植物消波特性试验研究[J].科学技术与工程,2012(26):6687-6690.
FENG Wei-bing, WANG Tao, DENG Wei. A study of the effect of the flexible vegetation on wave absorbing[J]. Science Technology and Engineering, 2012(26):6687-6690.
- [8] 曹海锦,冯卫兵.人工柔性植被场中波浪衰减特性研究[J].海洋工程,2014(3):36-44.
CAO Hai-jin, FENG Wei-bing. Study on the characteristic of wave dissipation by artificial flexible vegetation field[J]. The Ocean Engineering, 2014(3): 36-44.
- [9] 吴迪,冯卫兵,石麒麟.柔性植物消浪及沿程阻流特性试验研究[J].人民黄河,2014(12):79-81,84.
WU Di, FENG Wei-bing, SHI Qi-lin. A physical model study of the effect of the flexible vegetation on wave height attenuation and along the way of flow structure[J]. Yellow River, 2014(12): 79-81, 84.
- [10] 谭超,黄本胜,刘达,等.不同刚度植物杆群对规则波传播及紊动特性影响研究[J].海洋工程,2016(6):38-45.
TAN Chao, HUANG Ben-sheng, LIU Da, et al. Preliminary study on effect of rod groups of different stiffness on regular wave propagation and turbulence characteristics[J]. The Ocean Engineering, 2016(6):38-45.
- [11] Hashim A M, Catherine S M P. A laboratory study on wave reduction by mangrove forests[J]. APCBEE Procedia, 2013(5): 27-32.
- [12] Horstman E M, Dohmen-Janssen C M, Bouma T J, et al. Tidal-scale flow routing and sedimentation in mangrove forests: combining field data and numerical modeling[J]. Geomorphology, 2015(228): 244-262.
- [13] Horstman E M, Dohmen-Janssen C M, Narra P M F, et al. Wave attenuation in mangroves: a quantitative approach to field observations[J]. Coastal Engineering, 2014(94): 47-62.

(上接第19页)

- [7] 延西利,雍黎明,延梦璐,等. ACMP 温拌沥青性能的黏温曲线分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 1-7.
YAN Xi-li, YONG Li-ming, YAN Meng-lu, et al. Analysis of viscosity-temperature curve about warm mix property of ACMP bitumen[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 1-7.
- [8] Sargand S, Nazzal M D, Al-Rawashdeh A, et al. Field evaluation of warm-mix asphalt technologies[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(11): 1343-1349.
- [9] Xiao F P, Punith V S, Putman B J. Effect of compaction temperature on rutting and moisture resistance of warm-mix-asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1344-1352.
- [10] Ali M, Nejad F M. Comparative study on performance of wax-modified and typical SMA mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(3): 419-427.
- [11] Hossain Z, Lewis S, Zaman M, et al. Evaluation for warm-mix additive-modified asphalt binders using spectroscopy techniques[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(2): 149-159.
- [12] Liu J Y, Li P, Connor B, et al. Laboratory evaluation of sasobit-modified warm-mix asphalt for alaskan conditions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(11): 1498-1505.