

面板堆石坝挤压式边墙与面板接触面力学特性研究

侯文峻, 张 嘎, 张建民

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用试验方法研究了不同的挤压式边墙表面处理措施对挤压式边墙与面板接触面力学特性的影响规律。针对挤压墙表面的不同措施进行了大型接触面剪切试验, 测量了接触面的应力应变关系, 分析了主要影响因素。结果表明: 采用填料可以减小接触面的峰值剪应力, 其中乳化沥青、乳化沥青与砂聚合物、PE膜的效果接近, 沥青油毡的减小摩擦效果更为显著。不采用填料或者采用乳化沥青、乳化沥青与砂聚合物、沥青油毡等填料时, 接触面的力学特性都表现出类似于理想弹塑性的特性, 采用PE膜填料的接触面表现出较明显的应变软化。Clough-Duncan模型能较好地模拟接触面的起始剪切段, 但当剪应力较大并接近峰值时模型预测与试验结果表现出一定差距。建议了一个模拟该类接触面主要力学特性的修正理想弹塑性模型, 其参数少且易于确定, 模型的模拟结果与试验结果也较为符合。

关键词: 接触面; 剪切试验; 本构模型; 面板堆石坝; 挤压式边墙; 乳化沥青

中图分类号: O343.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1356-05

作者简介: 侯文峻(1981-), 男, 博士, 主要从事岩土工程理论、数值分析等方面的研究。E-mail: hwj02@mails.tsinghua.edu.cn。

Behavior of interface between extrusion-sidewall and slab face of CFRD

HOU Wen-jun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The characteristics of interface between the extrusion-sidewall and slab face of CFRD were investigated by carrying out a series of large scale shear tests of the interface with different surface treatment on the extrusion-sidewall. The relationship between the shear stress and the strain of the interface was analyzed considering the influence of treatment. It was shown that the friction between the extrusion-sidewall and the concrete slab decreased if filling materials were used in the tests. The effect of friction reduction was similar if mixture of emulsified asphalt and sand, or emulsified asphalt and PE membrane, was used while the effect of asphalt felt was more significant. Strain softening occurred when the PE membrane was used as interface filling materials, while it did not occur with the other filling materials or without filling materials. The Clough-Duncan model was capable of simulating the starting of the stress-strain relationship but it deviated a little with the test results when the shear stress was close to its peak. A modified ideal elasto-plastic model was suggested to characterize the stress-strain relationship of the interface with fewer parameters and a good coincidence.

Key words: interface; shear test; constitutive model; CFRD; extrusion-sidewall; emulsified asphalt

0 引 言

挤压式边墙(简称作挤压墙)施工技术是一种新型的面板堆石坝施工方法。由于具有能够提高垫层料的碾压质量、加快施工进度、保护垫层料表面在施工期间不会因雨水冲刷等原因破坏等优点, 该项技术已经被水布垭、公伯峡、积石峡以及马来西亚巴贡等高面板堆石坝工程所采用^[1-2]。

为了减小挤压墙对面板的约束, 并防止面板混凝土在施工过程中水泥浆渗入挤压墙从而导致挤压墙混凝土的强度和弹性模量进一步升高, 在面板混凝土施工前, 需要对挤压墙混凝土的上游表面做一定处理。

目前可选用的处理措施包括: ①喷涂一定厚度的乳化沥青; ②喷涂乳化沥青与砂的聚合物; ③铺设一层塑料薄膜; ④铺设沥青油毡。为了论证这些措施的效果, 需要研究不同填料对挤压墙与面板接触面力学特性的影响, 探讨描述该类接触面力学特性的本构模型。这对于合理模拟面板堆石坝的应力变形特性、研究有效的挤压墙表面的处理措施均具有重要意义。

本文通过大型接触面试验研究了使用不同填料的

基金项目: 国家 973 计划项目课题 (2007CB714108); 国家自然科学基金基金项目 (50679034)

收稿日期: 2007-09-28

挤压墙与面板接触面的力学特性, 分析了不同处理措施对该类接触面力学特性的影响。基于试验结果, 探讨了合理描述该类接触面力学特性的本构模型。

1 试验概况

1.1 试验方案

试验针对以下 5 种工况进行: ①面板与挤压墙间无填料(直接接触); ②面板与挤压墙间填纯乳化沥青; ③面板与挤压墙间填乳化沥青与砂的聚合物; ④面板与挤压墙间填沥青油毡; ⑤面板与挤压墙间填 PE 膜。每组试验分别采用 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa 四个法向应力, 各进行 3 组平行试验。

1.2 试验设备

试验采用清华大学的 TH-20t 大型土与结构接触面循环加载剪切仪^[3]进行。由于乳化沥青的力学性能与其温度有很大关系, 根据设计单位提供的资料, 试验选择在 45℃ 条件下进行。为了在试验过程中控制接触面填料的温度在 45℃, 研制了与接触面试验设备相配套的加热保温系统, 包括以下措施: ①在将面板混凝土板放入试验位置前进行烘烤加热, 使其温度达到 45℃; ②将面板混凝土板安放到位后进行电热吹风加热, 使得挤压墙混凝土板上的填料得以加热并达到 45℃; ③在试验过程时持续使用两个电热吹风设备对接触面进行吹风以保持试样的温度。实际试验表明该加热保温系统能够有效地保持试样的温度, 满足试验要求。

1.3 试验材料

试验采用两种不同强度混凝土来分别模拟面板和挤压墙。面板混凝土和挤压墙混凝土的 28 d 抗压强度分别为 35 MPa 和 5 MPa。面板混凝土板的尺寸为 30 cm×50 cm, 挤压墙混凝土板的尺寸为 25 cm×25 cm, 剪切过程中接触面的尺寸保持为 25 cm×25 cm, 较大的接触面尺寸保证了剪切过程中接触面受力分布均匀。试验中采用沥青的方案剪切后会有沥青黏到面板混凝土板上, 因此每次试验都更换新的面板, 以保证试验条件的一致性和可重复性。

试验所用乳化沥青为某沥青厂根据工程现场需要选定配方并加工生产的。表 1 给出了所用乳化沥青的基本性能指标。乳化沥青与砂的聚合物所采用的砂为人工砂, 最大粒径≤0.25 mm, 含泥量<1%。沥青油毡采用北京奥克兰建筑防水材料有限公司的产品, 产品型号 XK23-016-0001, 符合国家标准 GB326—89。PE 膜采用山东泰峰塑料土工材料有限公司的产品, 厚度为 0.2 mm。

1.4 试验方法

喷涂乳化沥青方案的制样过程为在挤压墙混凝土板上喷涂 1 mm 厚乳化沥青, 然后进行放置待凝, 放

置时间超过 48 h, 保证乳化沥青已充分破乳凝固之后再进行试验。

表 1 乳化沥青基本性能

Table 1 Specifications of emulsified asphalt				
蒸发残留物			黏度	稳定性
针入度	软化点	延度(15℃)	C _{25.10}	(1 d)
87 (0.1 mm)	45.5℃	180 cm	8 s	0.2%

对于喷涂乳化沥青与砂的聚合物填料试验, 制样过程为在挤压墙混凝土板上喷涂 1 mm 厚乳化沥青, 然后进行放置待凝, 放置时间超过 48 h, 保证乳化沥青已充分破乳凝固。再喷射一层乳化沥青, 喷射厚度为 0.5 mm, 喷射完毕后在试块表面均匀洒一层砂层, 放置待凝, 放置时间超过 48 h, 如图 1 (a) 所示。用刷子扫去表面浮砂, 再喷射一层乳化沥青, 喷射厚度为 1.5 mm, 放置待凝, 放置时间超过 48 h, 保证乳化沥青充分破乳凝固。喷涂沥青完成后试样表面如图 1 (b) 所示。

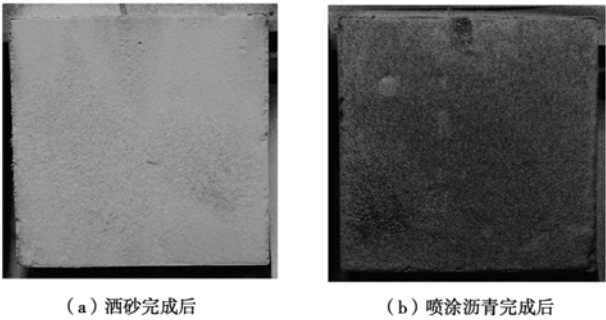


图 1 乳化沥青与砂聚合物方案挤压墙表面照片

Fig. 1 Surface of the extrusion-sidewall using mixture of emulsified asphalt and sand

对于 PE 膜试验, 在面板混凝土板与挤压墙混凝土板之间放置一层 PE 膜, 然后进行剪切试验, 如图 2 所示。

对于铺设沥青油毡试验, 在挤压墙混凝土板表面均匀喷射一层乳化沥青, 在乳化沥青凝固前, 铺设沥青油毡, 用手轻轻按压, 使粘贴紧密, 放置待凝, 放置时间超过 96 h, 如图 3 所示。

进行剪切试验, 剪切速率为 0.1 mm/min。试验过程中保持试样的温度为 45℃。

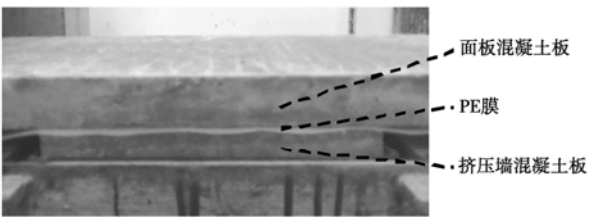


图 2 PE 膜放置图

Fig. 2 The placement of PE membrane



图3 沥青油毡放置图

Fig. 3 The placement of asphalt felt

2 试验结果及分析

2.1 界面间无接缝材料方案

图4给出了面板与挤压墙间无填料(直接接触)的接触面剪切试验结果,包括不同法向应力 σ 条件下的相对切向位移 u 和剪应力 τ 的关系曲线。可以看出,在法向应力不变的条件下,面板与挤压墙接触面的剪应力随着相对切向位移的增加而增大,到达峰值后基本保持不变。接触面的峰值剪应力随着法向应力的增大而增大。试验表明面板与挤压墙接触面的相对法向位移很小,本文不再给出。

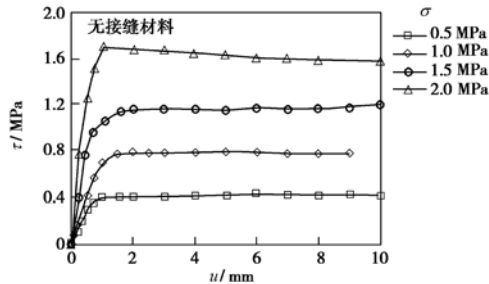


图4 无接缝材料试验结果

Fig. 4 Shear stress-strain relationship of interface without filling material

2.2 乳化沥青

图5给出了面板与挤压墙间喷涂1 mm厚乳化沥青时接触面剪切试验结果。可以看出,接触面的剪应力随着相对切向位移的增加而增大,达到峰值后剪应力基本保持不变,剪应力峰值小于无填料时的剪应力峰值。接触面的剪切模量在初始剪切段最大,随着剪切的发生模量逐渐降低。剪应力达到峰值时的相对切向位移为2~3 mm,比无填料时大。

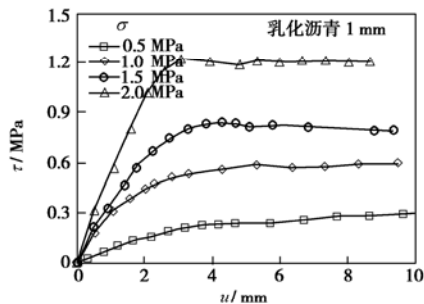


图5 乳化沥青试验结果

Fig. 5 Shear stress-strain relationship of interface with emulsified asphalt

2.3 乳化沥青与砂聚合物、PE膜、沥青油毡方案

图6给出了不同法向应力下,面板与挤压墙间填充乳化沥青与砂聚合物时接触面剪切试验结果。可以看出,随着相对切向位移的增大,接触面的剪应力逐渐增加,在达到峰值后基本保持不变。剪应力峰值小于无接缝材料时的剪应力峰值。剪应力达到峰值时的相对剪切位移为3~5 mm,大于无接缝材料和填充乳化沥青方案,且随着法向应力的增加而增大

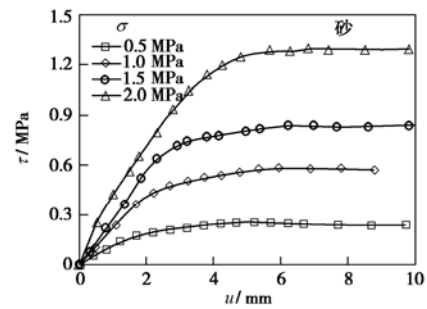


图6 乳化沥青与砂聚合物方案的代表性试验结果

Fig. 6 Shear stress-strain relationship of interface with mixture of emulsified asphalt and sand

图7给出了不同法向应力条件下,面板与挤压墙间放置PE膜时的接触面剪切试验结果。随着剪切的发生,剪应力逐渐增大,达到峰值后,接触面剪应力不断减小,发生较明显的应变软化,在剪切的最终段,剪应力基本达到一个稳定值。不同法向应力下,接触面的峰值剪应力均小于相应条件下无接缝材料的峰值剪应力。剪应力达到峰值时的相对剪切位移为2~3 mm,随法向应力的增加而有所减小。图8给出了不同法向应力条件下剪切完毕后PE膜的形态,试验时挤压墙板从左向右运动剪切。可以明显的看出,面板与挤压墙直接的相对剪切引起了PE膜的褶皱、破损,而且随着法向应力的增大,褶皱破损的程度增加。

图9给出了不同法向应力下,面板与挤压墙间放置沥青油毡时接触面剪切试验结果。随着相对切向位移增大,剪应力逐渐增大,达到峰值后,剪应力基本保持不变。峰值剪应力远远小于相应法向应力下的无接缝材料情况。剪应力达到峰值所需要的相对切向位移约为1 mm。

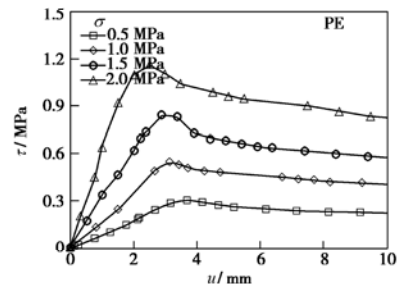


图7 PE膜方案的代表性试验结果

Fig. 7 Shear stress-strain relationship of interface with PE membrane

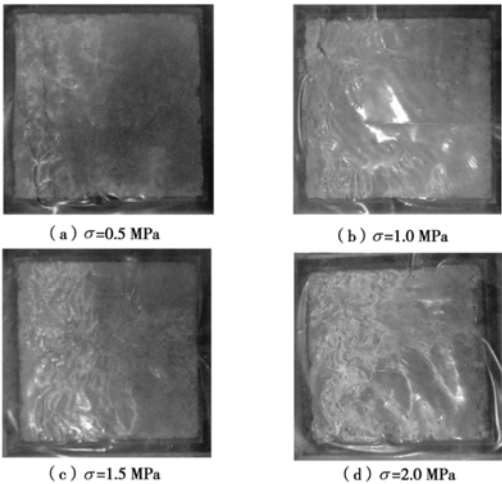


图 8 PE 膜方案试验后的试样表面 (挤压墙从左向右剪切)
Fig. 8 The PE membrane after shear under different normal stresses

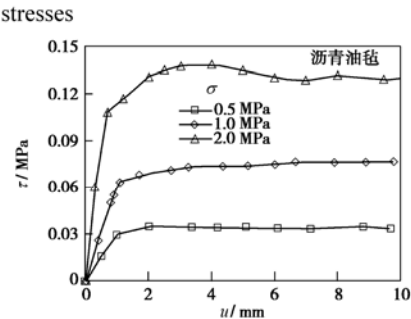


图 9 沥青油毡方案的代表性试验结果
Fig. 9 Shear stress-strain relationship of interface with asphalt felt

3 本构模型

以往关于沥青与结构间的力学特性研究主要集中在剪切强度方面^[5-7]。对于模拟接触面的剪切特性,多采用 Clough-Duncan 模型^[4]。本节将根据试验结果,首先探讨 Clough-Duncan 模型的有效性,并根据试验结果建议了一个新的模型。

3.1 Clough-Duncan 模型

Clough-Duncan 模型共有 k_0 , n , R_f , 黏聚力 c 和摩擦角 φ 5 个参数,接触面的切向剪切劲度 k_{st} 按式(1)确定,卸载时切向剪切劲度 $k_{st,u}$ 按式(2)计算,以考虑剪切引起的塑性剪应变。

$$k_{st} = k_0 \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma}{p_a} \right)^n \cdot \left(1 - \frac{R_f \tau}{\sigma \tan \varphi} \right)^2, \tag{1}$$

$$k_{st,u} = k_0 \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma}{p_a} \right)^n, \tag{2}$$

式中, γ_w 是水重度。根据试验结果,确定了不同填料时面板与挤压墙接触面的 Clough-Duncan 模型参数(表 2)。图 10 分别采用虚线和点线给出了不同法向应力条件下模型计算结果与试验结果的对比。可以看出,模型对于不同接缝材料相对切向位移 u 和剪应力 τ 的关系曲线的起始段模拟效果比较好,但当剪应力较大接近峰值时模型与试验结果表现出一定差距。

表 2 挤压墙与面板接触面的 Clough-Duncan 模型参数

Table 2 Parameters of Clough-Duncan model					
接触面	K_0	n	R_f	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
无填料	140000	1.20	1.0	0	41
乳化沥青与砂的聚合物	20000	1.15	0.84	1.5	31.5
乳化沥青	21000	1.25	0.80	2.0	32
沥青油毡	15000	1.20	0.99	1.0	4
土工膜	21000	1.21	0.83	0	29

3.2 理想弹塑性模型

根据试验结果,本文建议了一个修正理想弹塑性模型以描述该类接触面的力学特性。为了考虑法向应力的影响,本文建议弹性剪切劲度按下式计算:

$$\begin{cases} k_{st} = k_0 \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma}{p_a} \right)^n, & \tau < c + \sigma \tan \varphi, \\ k_{st} = 0, & \tau = c + \sigma \tan \varphi, \end{cases} \tag{3}$$

该模型共有 k_0 , n , 黏聚力 c 和摩擦角 φ 4 个参数,根据试验确定的各类接触面参数值如表 3 所示。图 11 分别采用虚线和点线给出了模型计算结果与试验结果对比。可以看出,模型对于相对切向位移 u 和剪应力 τ 的关系曲线的起始段模拟效果比较好。模型在达到峰值之后,剪应力保持不变,这与大部分填料的试验结果比较接近,表明该模型能够较合理的描述该类接触面的力学特性。

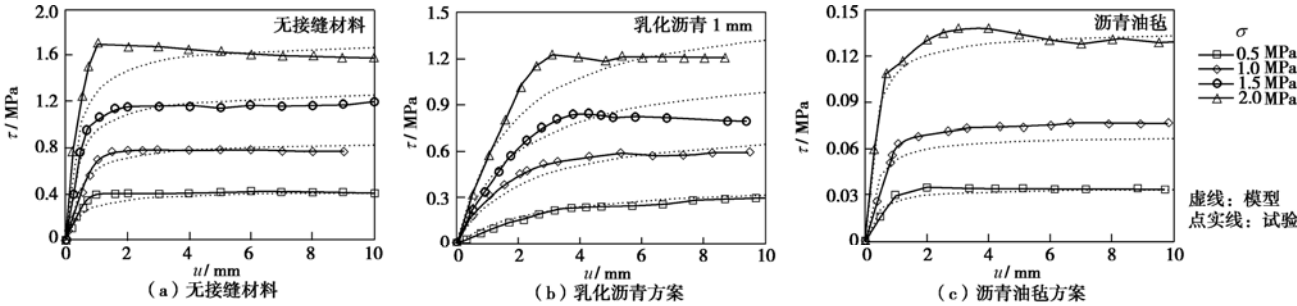


图 10 面板与挤压墙接触面 Clough-Duncan 模型拟合与试验结果
Fig. 10 Comparison between the Clough-Duncan model and the test results

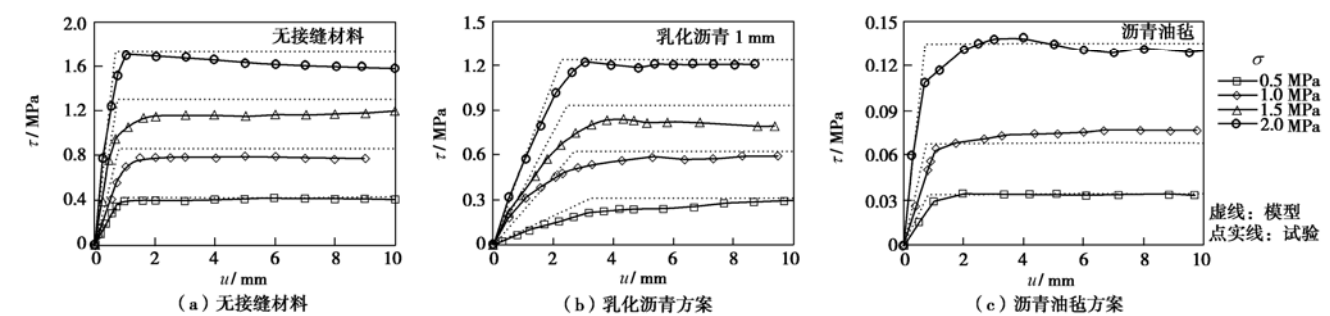


图 11 面板与挤压墙接触面修正理想弹塑性模型拟合与试验结果

Fig. 11 Comparison between the ideal elasto-plastic model and the test results

表 3 挤压墙与面板接触面修正理想弹塑性模型参数

Table 3 Parameters of ideal elasto-plastic model

接触面	k_0	n	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$
无填料	70000	1.20	0	41
乳化沥青与砂	12000	1.17	1.5	31.5
的聚合物				
乳化沥青	13000	1.25	2.0	32
沥青油毡	7000	1.10	1.0	4
土工膜	18000	1.13	0	29

4 结 论

(1) 采用填缝材料可以减小接触面的峰值剪应力。其中, 乳化沥青、乳化沥青与砂聚合物、PE 膜的效果接近, 沥青油毡的减小摩擦效果更为显著。

(2) 不采用填料或者采用乳化沥青、乳化沥青与砂聚合物、沥青油毡等填料时, 接触面的力学特性都表现出类似于理想弹塑性的特性, 在达到剪应力峰值后剪应力基本保持不变。而采用 PE 膜填料则接触面表现出较明显的应变软化。

(3) 采用不同填缝材料时, 接触面达到峰值剪应力所需的相对剪切位移有所不同。

(4) Clough-Duncan 模型能较好的模拟接触面的起始剪切段, 但当剪应力较大接近峰值时模型预测与试验结果表现出一定差距。本文建议的修正理想弹塑性模型概念简单, 参数少且易于确定, 与试验结果也较为符合。

参考文献:

[1] GALVAO D, MATERON B, RESENDE F, et al. Itá update: a new technology for CFRDs[J]. International Water Power & Dam Construction, 1999, 51(3): 28 - 31.
[2] 孙玉军, 洪 镐, 武选正. 公伯峡面板堆石坝混凝土挤压

式边墙技术的应用[J]. 水力发电, 2002(8): 45 - 47. (SUN Yu-jun, HONG Di, WU Xuan-zheng. Application of the concrete crushing-type sidewall technology in Gongboxia Concrete Face Rockfill Dam[J]. Water Power, 2002(8): 45 - 47. (in Chinese))
[3] 张 嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149 - 153. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149 - 153. (in Chinese))
[4] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(SM12): 1657 - 1672.
[5] 延西利, 梁春雨. 沥青与石料间的剪切黏附性研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 25 - 32. (YAN Xi-li, LIANG Chun-yu. Study of the shear adhesiveness between bitumen and rock[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 25 - 32. (in Chinese))
[6] 高金岐, 罗晓辉, 徐世法, 等. 沥青黏结层抗剪强度试验分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2003, 19(1): 66 - 71. (GAO Jin-qi, LUO Xiao-hui, XU Shi-fa, et al. Test and analysis of shearing strength of bituminous membrane[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2003, 19(1): 66 - 71. (in Chinese))
[7] 黄云涌, 肖桂彰, 姚佳良, 等. 水泥 - 沥青混凝土高温抗剪试验研究[J]. 石油沥青, 2002, 16(2): 17 - 21. (HUANG Yun-yong, XIAO Gui-zhang, YAO Jia-liang, et al. Research on shear test of cement-asphalt concrete at high temperature[J]. Petroleum Asphalt, 2002, 16(2): 17 - 21. (in Chinese))