

Research on Internal Dynamic Water Pressure in Concrete Crack of Ballastless Track under Cyclic Dynamic Load

Guihong Xu

School of Civil Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang Guizhou
Email: smileanne@163.com

Received: Mar. 6th, 2017; accepted: Mar. 25th, 2017; published: Mar. 28th, 2017

Abstract

The ballastless track is the main structure of the high-speed railway in China. According to the disease survey, cracks of base plate and the CA mortar bonding layer are widespread, and its damage in pluvial region is more serious, with the mud pumping in phenomenon. Under cyclic dynamic load, with the assumption that the crack is wedge-shape and that the velocity of crack edge accords with sine rule, a calculation formula is derived to calculate the internal water pressure in cracks under dynamic load due to compression of seam water. The effect of crack edge's velocity (loading velocity), and crack edge's initial width (load size) on the additional water pressure and stress intensity factor is analyzed by test. The study shows that load frequency is an important factor to influence water pressure inside the crack. When loading at constant amplitude, with the increase of loading frequency, the internal pressure will increase. When loading at constant frequency, load amplitude has important effect on crack internal water pressure. When loading at constant frequency, crack within a point of stress will increase with the increase of load amplitude, and the two can be fitting for a polynomial.

Keywords

Ballastless Track, Concrete Crack, Dynamic Water Pressure, Cyclic Dynamic Load

循环动载作用下无砟轨道混凝土裂缝内动水压力研究

徐桂弘

贵州理工学院土木工程学院, 贵州 贵阳

Email: smileanne@163.com

收稿日期: 2017年3月6日; 录用日期: 2017年3月25日; 发布日期: 2017年3月28日

摘要

无砟轨道是我国高速铁路主要结构形式, 根据现场病害调查, 底座板与CA砂浆粘结层的裂缝较为普遍, 多雨地区其伤损更为严重, 出现翻浆冒泥现象。在循环动载作用下, 假定裂缝形状为楔形, 裂缝边缘张开闭合速度呈正弦规律变化, 推导出裂缝在动力荷载作用下因水压缩产生的缝内水压计算式。通过试验验证, 分析了裂缝边缘张开闭合速度(加载速度)、裂缝初始张开宽度(荷载大小)对缝内最大附加水压的影响规律。研究表明, 加载频率是影响裂纹内部水压力的重要因素。当加载幅值不变时, 随着加载频率的增加, 裂纹内水压力增大。当加载频率不变时, 荷载幅值对裂纹内部水压力有重要的影响。当加载频率不变时, 裂纹内部某一点的压力, 随着荷载幅值的增加而增大, 二者可拟合为一个多项式关系。

关键词

无砟轨道, 混凝土裂缝, 动水压力, 循环动载

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

CRTS II 型板式(纵连板式)、CRTS I 型板式(单元板式)和双块式无砟轨道是目前我国高速铁路上的主要无砟轨道结构型式, 通过对全国各地的无砟轨道服役情况调查发现, 各型无砟轨道均出现了不同程度的伤损, 其中以轨道板或道床板开裂、层间连接破坏和填充层破损等伤损最为普遍。另外, 在降雨量丰富的地区或排水不畅地段, 无砟轨道破损速率较干燥地区快得多。

无砟轨道的水致伤损问题实质上是高频动载与水耦合作用下的层间裂纹扩展及混凝土伤损问题。

水泥混凝土路面与无砟轨道的工作条件类似, 在交通荷载和水的共同作用下, 水泥混凝土路面普遍出现挤浆、板底脱空等现象, 进一步引起路面板的断板、裂缝扩展等早期损坏严重的现象[1] [2]。20 世纪 80~90 年代, 美国的研究人员采用现场试验的方法, 对脱空区滞留水的水压力进行了一定的研究[3] [4]。水对混凝土的伤损有较大的影响, Rossi 等[5] [6] [7]通过对三点加载弯曲梁的试验得到加载速率对混凝土断裂韧度的影响; Brühwiler 等[8] [9]利用混凝土的劈裂试验和水压力的施加和测量设备, 对混凝土裂缝和水的相互作用进行了试验研究, 量测了水压力在裂缝中的分布情况; Shinmura 等[10]研究了钢筋混凝土压力容器中的流体与混凝土裂缝的相互作用; Slowik 等[11] [12]将有限元计算和试验研究相结合, 根据水端速度和开裂时缝端速度的相对关系研究了裂缝中的水压力分布规律, 对含水裂缝的突然闭合给混凝土结构带来的危害进行了分析。目前, 我国对水泥混凝土路面动水压力的形成和数值计算开展了一定的理论研究工作[13] [14]; 王海龙、李庆斌[15]分析了静动力荷载作用下孔隙及裂纹中自由水的有害及有益作用, 得到了混凝土的静动力强度的变化机理。同时, 关增智、沙爱民等展开了对基层材料性能和动水压力的研究[16] [17]。

以上对缝内水压的研究大多是在静荷载作用下进行的, 没有考虑列车荷载大、速度快、频率高的特点。本文通过假定裂缝形状、裂缝边缘张开闭合速度和排水情况, 把缝内流体视为可压缩体, 研究裂缝在循环交变动力作用下的不断张开、闭合情况下缝内水压的变化规律, 以便为循环荷载作用下无砟轨道裂纹水力劈裂分析奠定基础。

2. 循环荷载作用下裂缝内水压

2.1. 水的可压缩性

保持温度不变时, 密闭容器内的物质满足 $pV = \text{常数}$ [18][19], 液体的体积会随压强的增加而缩小。该性质称为液体的压缩性, 一般用体积压缩系数 $\beta(\text{m}^2/\text{N})$ 和体积弹性模量 $E(\text{Pa})$ 来度量。体积压缩系数 β 表示等温时增加单位压力所引起的液体体积的相对变化量, 即

$$\beta = -\frac{dV/V}{dP} \quad (1)$$

式中: V 为液体体积; dP 为压力变化量; dV 为液体体积变化量。 E 为 β 的倒数, 即

$$E = \frac{1}{\beta} = -\frac{dP}{dV/V} \quad (2)$$

常温下水的体积弹性模量 $E = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ [19], 压缩性很小。在循环荷载的作用下, 含水裂缝的张开闭合非常迅速, 缝内的水来不及排出, 因而将引起水体的压力急剧增大。设密闭容器的体积为 V , 初始水体所受的压力 $p_1 = 0$, 当水体的体积经压缩变为 V_2 时, 则产生的压力 p_2 为:

$$p_2 = -\frac{EdV}{V} + p_1 = \frac{E(V_1 - V_2)}{V_2} \quad (3)$$

可见, 即使水体体积变化很小, 也会产生很大的压力。

2.2. 水压力计算式

假设坝体上游面存在一条含水裂缝, 设其为半无限大体内的楔形裂缝, 处于稳定状态(如图 1 所示), 裂缝的形状方程为:

$$y = ax + b \quad (4)$$

式中: a, b 分别为裂缝的 x 、 y 轴截距。在图 1 中 w_0 为 b 。

裂缝的初始体积为:

$$v_0 = \frac{1}{2}aw_0 \quad (5)$$

假设在动力荷载的作用下, 裂缝开口宽度的张开速度为:

$$v = A \sin \omega t \quad (6)$$

式中: A 为振幅; ω 为频率; v 取使裂缝张开的方向为正向(如图 2)

设 t 时刻裂缝开口宽度为 w_t , 则

$$w_t = \frac{A(1 - \cos \omega t)}{\omega} + w_0 \quad (7)$$

那么 t 时刻裂缝的体积为:

$$V_t = \frac{1}{2}a \left[\frac{A(1 - \cos \omega t)}{\omega} + w_0 \right] \quad (8)$$

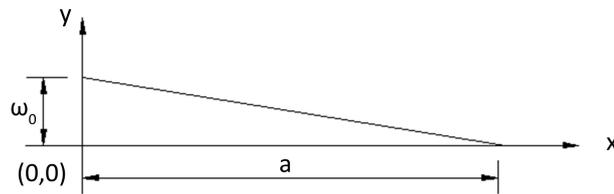


Figure 1. The shape of crack

图 1. 裂缝形状

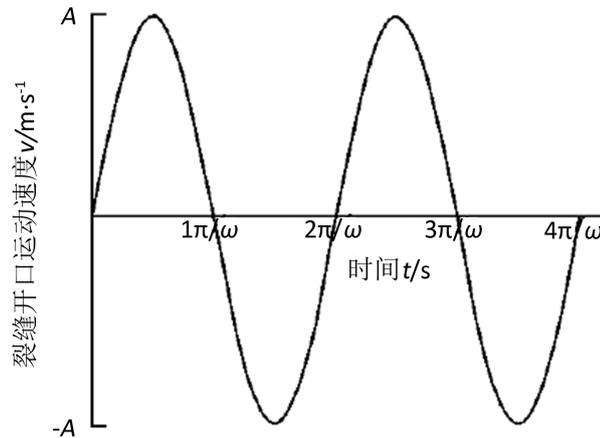


Figure 2. Velocity of crack edge

图 2. 裂缝开口运动速度

设 i 时刻末裂缝体积为 V ，经过 1 个微小 Δt 后，在 $i+1$ 时段末，体积为 V_{i+1} ，

$$V_i = \frac{1}{2}a \left[\frac{A(1 - \cos \omega t)}{\omega} + w_0 \right] \quad (9)$$

$$V_{i+1} = \frac{1}{2}a \left\{ \frac{A[1 - \cos \omega(t + \Delta t)]}{\omega} + w_0 \right\} \quad (10)$$

体积变化量为 dV 为：

$$dV = V_{i+1} - V_i \quad (11)$$

若 $dV > 0$ ，则裂缝处于张开状态；若 $dV < 0$ ，则裂缝处于压缩状态。

裂缝压缩，缝内水压大于缝外水压时，由于水力梯度的存在，裂缝内将有部分水体排出，但由于闭合时间极其短暂，水不可能充分排出，因而导致缝内水压增大。相反，裂缝快速张开时，裂缝的体积增大，将导致缝内水压的下降，同时缝内将有水浸入。由于裂缝表面存在粗糙度，加之张开宽度较小，裂缝张开时水的浸入量很难计算，又因本文重点研究裂缝水受到压缩引起的附加压力，故在此假设裂缝处于张开状态时，瞬间无水浸入，且不考虑毛细管力。同时，若缝内水压小于外界水压，裂缝增大的那部分体积能被外界水不完全填充；若裂缝张开时缝内水压大于外界水压时，缝外水不能进入裂缝，此时水的体积变化量为裂缝膨胀体积，则 $dp < 0$ 。裂缝压缩时，设在 Δt 时段内排出水的体积占体积压缩量 dV 的比值为 α ，则裂缝内水的排出量为

$$V_{\text{排}} = -\alpha dV \quad (12)$$

α 的取值与裂缝张开速度、裂缝几何形状有关，因裂缝在动力荷载作用下的实际排水情况尚无定论，

因此本文中关于 α 的取值均为假定, 只是为了研究动力荷载作用下缝内水压的变化规律。由此可得水体积有效压缩量 dV 水为:

$$V_{\text{水}} = -(1-\alpha)dV \quad (13)$$

根据式(3), 则从 i 时段到 $i+1$ 时段内水的压强增量为:

$$dp = \frac{EdV_{\text{水}}}{V_i - V_{\text{排}}} \quad (14)$$

将式(11), (12)和(13)代入式(14)得:

$$dp = \frac{E(\alpha-1)(V_{i+1} - V_i)}{(1-\alpha)V_i + \alpha V_{i+1}} \quad (15)$$

结合(9)和(10)

$$\begin{aligned} dp &= AE(\alpha-1) \times \cos \omega t - \cos \omega(t + \Delta t) \\ &\div \left[(1-\alpha)A(1 - \cos \omega t) + w_0(1-\alpha)\omega \right. \\ &\quad \left. + \alpha A[1 - \cos \omega(t + \Delta t)] + \alpha \omega w_0 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

该式即为裂缝边缘张开速度式(6)时, 在微小时段内由于裂缝水体积变化产生的水压增量。该式即为裂缝边缘张开速度为式(6)时, 在微小时段内由于缝内水体积变化产生的水压增量。设裂缝内初始的水压为 p_0 , 则根据式(16), 就能得到任意时刻缝内的水压增量。具体分析步骤如下:

- (1) 将时间分为若干个微小时段, 根据式(8)计算每个时段末的裂缝体积;
- (2) 根据式(11)计算 i 时段到 $i+1$ 时段的 dV , 判断 dV 的正负, 计算这个时段的 dp_i ;
- (3) 任意时段 n 的缝内水压为 $p_n = p_0 + p_{n-1} + dp_{n-1}$ ($p_n \geq 0$), 附加水压为 $\Delta p = p_{n-1} + dp_{n-1}$ 。

3. 试验验证

试验目的是在循环荷载作用下, 测定混凝土裂缝内部水压力。试验地点在“西南交通大学高速铁路工程教育部重点实验室”万能伺服液压疲劳试验机上进行。

3.1. 试件准备

试件制作步骤如下:

- (1) 试验中不考虑 CA 砂浆层, 轨道板的长和宽度分别缩小为原尺寸的 1/5 倍, 轨道板底座板的厚度缩小为原尺寸的 1/2.5 倍。试件相关参数如表 1 所列。
- (2) 浇筑底座板混凝土, 混凝土拌合水为自来水。
- (3) 形成裂纹。当底座板混凝土浇筑完毕后, 在试件的一侧放置一块 $500 \times 400 \times 3$ mm 的钢板, 钢板的搁置深度为 300 mm, 如图 3 所示。为了形成裂纹, 混凝土硬化后能顺利的拔出钢板, 钢板的一侧钻两个孔, 在钢板上粘上透明胶后抹润滑油。钢板放置后, 浇筑轨道板混凝土。
- (4) 当浇筑混凝土达到初凝后, 活动钢板, 防止混凝土与钢板粘结, 当混凝土终凝之前, 抽出钢板, 形成混凝土裂纹。

3.2. 试验操作

试验系统主要由四部分组成: 试验装置、疲劳加载控制系统、计算机控制和采集系统、水压力传感器及数据采集系统。循环荷载由人工设置正弦曲线, 计算机自动控制加载, 并可实时图像显示。试验机

Table 1. Specimen related parameters
表 1. 试件相关参数

部件	项目	单位	大小
轨道板	长度	mm	1290
	宽度 h	mm	510
	厚度	mm	80
底座板	长度	mm	1290
	宽度	mm	590
	厚度	mm	140
水	水槽用自来水	℃	20
	混凝土拌和用自来水	℃	20
	深度	mm	300
裂纹尺寸	宽度	mm	500
	开口量	mm	3
材料	混凝土	C60	MPa



Figure 3. Model (placing steel plate)

图 3. 模型(放置钢板)

的循环荷载由加载头传递到试件上。

试件周围制作玻璃槽注水,采用高精度数字压力传感器(如图 4 所示)测量混凝土裂纹内的水压力,压力传感器一侧接塑料导管,导管的长度根据实际测点截取。另一侧通过数据线、采集卡、USB 接口连接电脑。电脑上安装 SmartSensor 软件接收数据,由此可直接得到试件裂纹内水压力-时间关系曲线。

试验的操作步骤如下:

- (1) 安置玻璃槽,把试件放置在水槽中,如图 5 所示。注水,水位以漫过裂纹为宜。
- (2) 安置传感器。把传感器用塑料薄膜包好,防止被水浸湿后影响数据。传感器一侧接导管,放置在预留裂纹的孔洞中,导管的长度根据测点的位置确定。一侧通过数据线、USB 接口连接电脑。
- (3) 按照预先设定荷载曲线,施加循环荷载。按照表 2 所列的工况,分别进行试验。



Figure 4. High precision digital pressure sensor
图 4. 高精度数字压力传感器



Figure 5. Sink in the process of test
图 5. 试验水槽

Table 2. Operating mode Settings and loading conditions
表 2. 工况设置及加载情况

试验工况	裂纹开口量(mm)	加载频率(HZ)	疲劳加载(kN) (正弦)平均值±幅值	测量目的
1	3	3、5、7、9、 11、13、15	60 ± 35	测试加载频率对裂纹内水压力的影响
2	3	5	45 ± 20; 50 ± 25; 55 ± 30; 60 ± 35; 65 ± 40; 70 ± 45	分析荷载大小对裂纹内水压力的影响

4. 试验结果与理论结果对比分析

4.1. 计算工况

试验工况和计算工况如表 2 所示。

4.2. 加载频率影响

通过试验工况 2~8，得到加载频率对水压力的影响如图 6 所示。试验结果与计算结果的比较如表 3 所列。

由图 6、图 7 可知，随着加载频率的增加，裂纹内水压力增大，加载频率是影响裂纹内部水压力的重要因素。根据试验结果，可得到疲劳加载频率与水压力的拟合关系为：

$$P = -0.009n^2 + 0.306n - 0.494$$

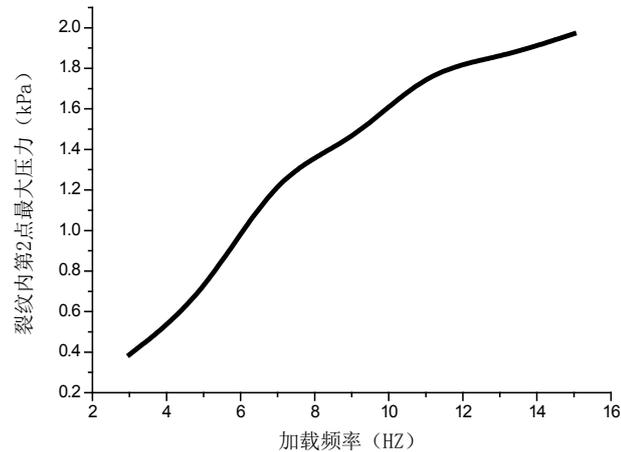


Figure 6. The test results

图 6. 试验结果

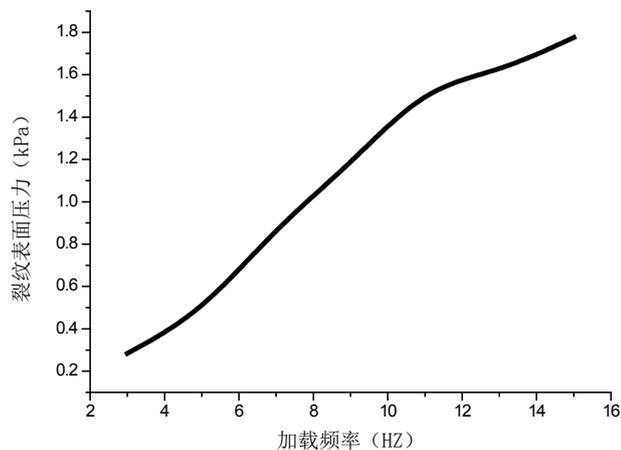


Figure 7. The calculation results

图 7. 计算结果

Table 3. Comparison of calculation results and test data loading at constant frequency

表 3. 加载频率变化时计算结果与试验数据对比

加载频率(HZ)	3	5	7	9	11	13	15
试验数据(kPa)	0.386	0.67	1.29	1.43	1.79	1.85	1.97
计算结果(kPa)	0.28	0.477	0.88	1.17	1.54	1.61	1.77

式中：P 为裂纹内第 2 点压力，kPa；n 为加载频率，HZ。

由表 3 结果对比可知，计算值与试验值存在偏差，但偏差较为均匀，基本上在 0.2 kPa 左右。

4.3. 荷载大小的影响

根据工况 2，水压力随幅值变化试验结果如图 8 所示，计算结果如图 9 所示。试验结果与计算结果的比较如表 4 所列。

由表 4、图 8 与图 9 对比可知，荷载大小是影响裂纹内水压力值的重要因素，随着加载频率的增加裂纹内部水压力增大。

由图 8 可知，当加载幅值为 20 kN 时，水压力为 0.281 kPa，当加载幅值为 30 kN 时，水压力为 0.543 kPa；

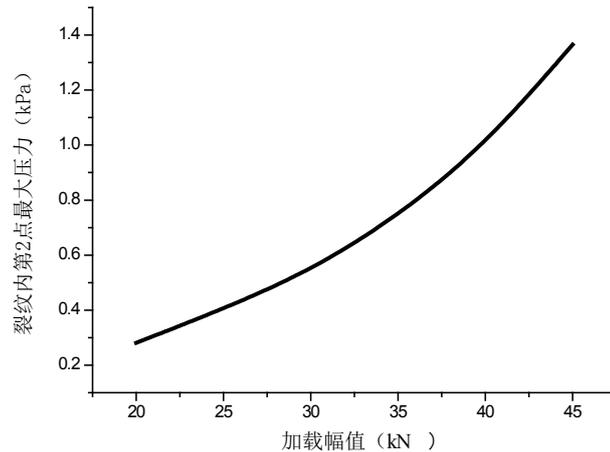


Figure 8. The test results of compression with load amplitude changed

图 8. 压力随加载幅值变化试验结果

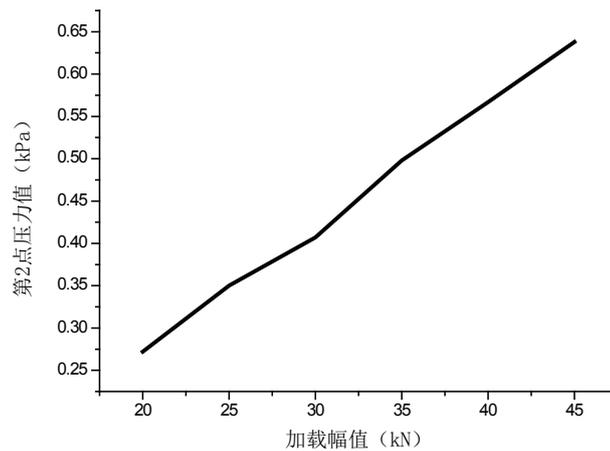


Figure 9. The calculation results of compression with load amplitude changed

图 9. 压力随加载幅值变化计算结果

Table 4. Comparison of calculation results and test data

表 4. 计算结果与试验结果对比

加载幅值	20	25	30	35	40	45
试验结果(kPa)	0.28	0.40	0.54	0.74	1.00	1.36
计算结果(kPa)	0.27	0.35	0.41	0.49	0.56	0.63

当加载幅值为 40 kN 时，水压力值为 1 kPa；当加载值为 45 kN 时，压力值为 1.365 kPa。两者之间的拟合关系曲线为：

$$P = 0.001f^2 - 0.035f + 0.531$$

式中： P 为裂纹内水压力，kPa； f 为疲劳加载幅值，kN。

总体上来看，计算结果可以反映试验的变化规律。但计算结果与试验结果存在误差。从理论上讲，不论是什么工件，总是不能完全符合理论尺寸的要求。本次试验产生误差可能有以下几方面原因引起的：(1) 检测仪器；高精度压力传感器的最大量程是 500 kPa，误差为 1%。(2) 材料误差。试件在 28 天的强

度,不可能完全与理论值相同。(3) 试件底部支座。试件的底部放置了橡胶垫作为缓冲,而实际计算采用的是完全固定支座。(4) 操作不当引起的误差,尽管试验过程中,已经尽量按照仪器的操作规程执行,但难免会有不当引起的误差。(5) 仪器受到环境温度乃至气候等因素的影响,存在误差。

5. 结论

假设裂缝形状为楔形,推导了在动力作用下裂缝闭合张开任意时刻考虑水压缩引起的缝内水压的理论计算式,计算了特定裂缝在循环交替变动位移 1 个周期内的缝内水压力,并与试验结果对比分析得到如下结论:

(1) 理论推导中采用正弦裂缝张开闭合速度,随着裂缝闭合速度的增大,排水率的减小,缝内水压逐渐增大,

(2) 当循环荷载作用于轨道板上时,轨道板受到冲击,板中裂纹内部的水产生水压力。加载频率是影响裂纹内部水压力的重要因素。当加载幅值不变时(60 ± 35)随着加载频率的增加,裂纹内水压力增大。

(3) 当加载频率不变时,荷载幅值对裂纹内部水压力有重要的影响。当加载频率不变时,裂纹内部某一点的压力,随着荷载幅值的增加而增大,二者可拟合为一个多项式关系。

基金项目

国家自然科学基金(51508121),贵州省科技厅基金项目(黔科合 LH 字[2014]7374,黔科合 J 字[2015]2063)。

参考文献 (References)

- [1] 徐庆元,张旭久. 高速铁路博格纵连板桥上无砟轨道纵向力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 526-532.
- [2] 卿启湘,胡萍,王永和,尹汉锋,张春顺. 高速铁路双块式无砟轨道计算模型约束方程的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1360-1368.
- [3] Van Wijk, A.J., Larralde, J., Lvelle, W., *et al.* (1989) Pumping Prediction Model for Highway Concrete Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, **115**, 161-175.
- [4] Hansen, E.C. and Jhannesenr, A.J.M. (1991) Field Effects of Water Pumping Beneath Concrete Pavement Slabs. *Journal of Transportation Engineering*, **117**, 679-696.
- [5] Rossi, P. (1989) Coupling between the Crack Propagation Velocity and the Vapour Diffusion in Concrete. *Material and Structure*, **22**, 91-97. <https://doi.org/10.1007/BF02472279>
- [6] Rossi, P. (1991) Influence of Cracking in Presence of Free Water on the Mechanical Behaviour of Concrete. *Magazine of Concrete Research*, **43**, 53-57. <https://doi.org/10.1680/macrcr.1991.43.154.53>
- [7] Rossi, P. and Boulay, C. (1990) Influence of Free Water in Concrete on the Cracking Process. *Magazine of Concrete Research*, **42**, 143-146. <https://doi.org/10.1680/macrcr.1990.42.152.143>
- [8] Brühwiler, E. and Saouma, V.C. (1995) Water Fracture Interaction in Concrete—Part I: Fracture Properties. *ACI Materials Journal*, **92**, 296-303.
- [9] Brühwiler, E. and Saouma, V.C. (1995) Water Fracture Interaction in Concrete—Part II: Hydrostatic Pressure in Cracks. *ACI Materials Journal*, **92**, 383-390.
- [10] Shinmura, A. and Saouma, V. (1997) Fluid Fracture Interaction in Pressurized Reinforced Concrete Vessels. *Materials and Structures*, **30**, 72-80. <https://doi.org/10.1007/BF02486307>
- [11] Slowik, V. and Saouma, V.E. (2000) Water Pressure in Propagating Concrete Cracks. *Journal of Structural Engineering*, **126**, 235-242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:2\(235\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:2(235))
- [12] Bary, B., Bournazel, J.-P. and Bourdarot, E. (2000) Poro-Damage Approach Applied to Hydro-Fracture Analysis of Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, **126**, 937-943. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:9\(937\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(937))
- [13] 谈至明,谭福平. 水泥混凝土路面板底脱空区水运动规律的分析模型[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(3): 281-

286.

- [14] 李少波, 张宏超, 孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 915-918.
- [15] 王海龙, 李庆斌. 湿态混凝土抗压强度与本构关系的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1531-1536.
- [16] 关增智. 半刚性基层材料抗冲刷性能的研究[J]. 混凝土, 2008(03): 48-50.
- [17] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
- [18] 郑志芳, 李宗利, 孙丽丽, 等. 动力荷载作用下裂缝水力劈裂效应研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 45-49.
- [19] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 6-7.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org