



CRTS II 型水泥乳化沥青砂浆静态力学性能发展的微观分析

刘赞群*, 李湘宁, 田青, 邓德华*, 元强

中南大学土木工程学院, 长沙 410075

* E-mail: zanqun.liu@mail.csu.edu.cn; dl0216@163.com

收稿日期: 2014-03-31; 接受日期: 2014-05-23

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB036201)资助项目

摘要 测试了沪昆高铁江西段现场成型 CRTS II 型 CA 砂浆长期力学性能的发展变化, 并通过沥青抽滤, 水泥热重分析, 压汞法和核磁共振等试验方法分析了沥青组分、砂浆内部微观孔隙结构变化, 水泥水化程度对砂浆长期力学性能的影响. 结果发现: 砂浆 28 d 抗压强度与弹性模量均达到了规范要求, 随着龄期延长, 砂浆力学性能持续升高, 但 42 d 以后砂浆力学性能增长放缓, 水泥的持续水化使得砂浆内部孔隙不断细化, 强度上升; 养护 7 d 后, 砂浆内沥青含量已经固定, 成膜固化过程完成.

关键词

CA 砂浆
龄期发展
静态力学性能
孔隙结构
水泥水化

1 引言

作为我国高速铁路主要轨道结构形式之一, CRTS II 型板式无砟轨道结构已在京沪、石武、沪昆高铁上得到广泛使用. CRTS II 型板式无砟轨道结构受力承载体系中, 采用从轨道板、砂浆、HGT 层、基床表层、基床底层、路基弹性模量递减且逐层分压的传力结构, 水泥乳化沥青砂浆(CA 砂浆)充填层除承受竖向承载力外, 还要依靠砂浆抗剪承受纵横向力, 约束轨道板, 其缓冲功能较 CRTS I 型板式结构中的 CA 砂浆充填层低, 是一种高弹模砂浆. 根据《客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》(科技司[2008]74 号)^[1]中的规定, 砂浆 28 d 抗压强度不小于 15 MPa, 28 d 弹性模量控制在 7000~10000 MPa.

作为板式轨道结构动力学研究的主要参数, CA

砂浆抗压强度与弹性模量通常选用 28 d 龄期设计值. 但在实际工程中, 从 CA 砂浆充填层灌注施工完到高速列车运营, 相隔时间一般都在 1 年以上. 在此期间, CA 砂浆的抗压强度与弹性模量是否发生了增长, 增长的幅度是多少, 现有研究并不多见, 且都主要集中在 CRTS I 型 CA 砂浆力学性能变化的一些实验室研究结果, 如: 影响 CA 砂浆 28 d 强度的主要因素是水泥与乳化沥青含量比, 细砂对砂浆抗压强度影响不大^[2,3], 经过 3 年龄期, 砂浆的抗压强度和弹性模量还有小幅度增长^[4], 还没有关于 CRTS II 型 CA 砂浆现场实际力学性能发展的研究报道. 由于我国高速铁路网中 CRTS II 型板式无砟轨道结构里程长, CA 砂浆用量大, 因此, 急需展开结合实际的相关研究, 为该轨道结构的动态性能演变及服役安全评估提供真实可靠的数据参考.

针对上述问题, 本文利用施工现场成型试件, 研

引用格式: 刘赞群, 李湘宁, 田青, 等. CRTS II 型水泥乳化沥青砂浆静态力学性能发展的微观分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 681–686
Liu Z Q, Li X N, Tian Q, et al. Micro-analyze on development of the static mechanical properties of CRTS I type cement emulsified asphalt mortar (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 681–686, doi: 10.1360/N092014-00101

究 CRTS II 型 CA 砂浆力学性能随龄期的变化规律, 并结合砂浆内部孔隙结构, 沥青含量与水泥水化程度等随龄期变化特点, 从砂浆微观结构和组成材料变化探讨砂浆长期力学性能变化的影响因素。

2 试件制作与试验方法

2.1 试件制作

2013 年 12 月 16 日在沪昆高铁江西段中交股份有限公司标段内现场成型砂浆试件。砂浆用干料与阴离子沥青都由安徽中铁工程材料科技有限公司提供, 两种材料的性能指标均满足科技司[2008]74 号文^[1]中的规定要求; 搅拌设备采用三一重工 SY9300TSJ500 型水泥乳化沥青砂浆搅拌机。砂浆配合比为: 干料: 乳化沥青: 水=1500:250:150。新拌砂浆从搅拌车内取出后, 马上灌入尺寸为 $\Phi 70 \times 110$ mm 的 PVC 管子内, 然后用保鲜膜包裹密封, 放置在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的养护箱中养护 24 h, 再将试件移入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的密封大容器中, 潮湿养护。在龄期为 7, 14, 28, 42 和 63 d 时分别取出 4 个试件, 将其中 3 个切割打磨成尺寸约为 $\Phi 70 \times 100$ mm 棱柱体试件, 将另外一个试件切割成 3 片 $\Phi 70 \times 10$ mm 薄片试件。

2.2 力学性能测试

采用长春试验机研究所生产的 CSS-88100 电子万能试验机, 测量试件的荷载-竖向位移(应力-轴向应变)曲线。竖向位移采用两个轴向引伸计测量, 两引伸计对称分布, 量程 50 mm。测试加载采用位移控制, 加载速率为 1 mm/min(应变率约为 $1.67 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$)。为了排除试件表面不平或缺陷造成的误差, 以 1/3 极限抗压强度值、1.0 mm/min 加载速率预压 3 次再进行正式力学性能测试。试验测试了 7 d, 14 d, 28 d, 42 d 和 63 d 的应力应变曲线。

2.3 沥青抽滤试验

用湿抹布将 3 块 $\Phi 70 \times 10$ mm 切割好薄片试件表面积水擦干, 然后放入温度为 45°C 的烘箱中烘干至恒重, 用精度为 0.01 g 的天平测量其质量, 再将干燥好的试件放入水域加热温度为 30°C 的三氯乙烯溶液中, 停止水化, 将沥青溶解抽滤至恒重, 在 45°C 下烘干, 测量沥青抽滤后砂浆质量, 按照下式计算砂浆内沥青质量含量:

$$S_l = \frac{m_s - m_m}{m_s} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, S_l 为试件沥青质量含量; m_s 为试件干燥后质量, g; m_m 为抽滤沥青后砂浆质量, g。

用净水平天平测量各个沥青砂浆的表观密度 ρ_0 , 沥青固化后密度为 1。根据下式计算出砂浆中沥青体积百分率:

$$V_l = \rho_0 \times S_l \times 100\%. \quad (2)$$

由于沥青抽滤时间长, 只抽滤完 7, 14, 28, 42 d 的试件, 其他试件测试还在继续。

2.4 水泥水化程度分析

采用水泥热重分析来定量评价水泥乳化沥青砂浆内水泥随龄期的水化程度变化。将沥青抽滤干净的砂浆试件磨细后, 用 0.045 mm 的筛子过筛粉末用于测试。仪器采用德国 NETZSCH TG 209 F1 Libra 热重分析仪, 升温范围 $10 \sim 1100^\circ\text{C}$, 试验升温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。最大称量范围 2000 mg, 分辨率 0.1 μg 。

2.5 砂浆内部微观结构分析

用压汞仪和核磁共振测量沥青抽滤完试件内部孔隙结构随龄期的变化规律和总孔隙率(V_g , V_h)。压汞法常用于定量测量多孔材料孔径大小、孔隙体积, 其原理是根据毛细管内液体升降原理, 通过压力降汞压入孔隙, 测量施加压力测量得到毛细孔孔径, 孔径越小压力越大, 通过水银压入量可以得到对应的孔体积。核磁共振技术对多孔介质中水的研究应用已逐步从生命科学、地球物理等领域扩展到建筑材料领域^[5,6], 其原理是利用水分子中氢质子的弛豫特性研究水含量及其分布的变化。通过这两种测量方法得到的试验数据, 共同对比研究沥青抽滤后砂浆内部孔隙结构分布。

采用美国麦克仪器公司生产的 AutoPore IV 9510 型全自动压汞仪进行测试, 孔径测量范围为 3 nm~360 μm 。压汞测孔法通过将汞压入孔隙中所施加的压力来计算进入孔隙的最小半径, 两者之间通常有以下关系:

$$P_r = -2\sigma \cos \theta, \quad (3)$$

式中, P 为施加的汞的压力; r 为孔隙半径; σ 为汞的表面张力; θ 为汞对固体的润湿角。式中 $2\sigma \cos \theta$ 一般取为 750 MPa nm, 通过上式便可以得到试样的孔径分布, 进而可得不同大小孔隙所占孔隙总体积的比例

关系. 并参考文献[7], 计算孔体积分形维数 D , 研究不同龄期砂浆内部微结构的变化.

将沥青抽滤完试件放入 HDXM-21 型沥青混合料真空保水仪中保水 24 h 后, 将试件放入上海纽迈电子科技有限公司生产的 MiniMR-60 核磁共振成像分析系统中进行孔隙率测试, 该设备的主磁场为 0.51 T, H 质子共振频率为 21.7 MHz, 射频脉冲频率为 1.0~49.9 MHz, 磁体控温 25~35°C, 磁体均匀度为 12.0 ppm, 射频功率 300 W.

3 试验结果与讨论

3.1 不同龄期下 CA 砂浆静态力学性能变化

图 1 是 7, 14, 28, 42, 63 d 下不同龄期下 CA 砂浆试件典型的应力-应变曲线, 表 1 是各个龄期下的 3 个试件平均抗压强度与弹性模量数值.

从图 1 和表 1 可见, (1) 砂浆 28 d 抗压强度已达到了 15 MPa 的规范要求, 从 7~28 d 抗压强度增加了 31%, 从 28~42 d 上升了 5%, 从 42~63 d 强度上升了 3.5%; (2) 弹性模量在 42 d 时到达了规范规定上限; 弹性模量从 7~28 d 增加了 15.3%, 从 28~42 d 上升了 17.7%, 从 42~63 d 上升了 6.6%, 63 d 时超过了规范规定上限的 1.1%; (3) 砂浆早期强度迅速增加, 但经过

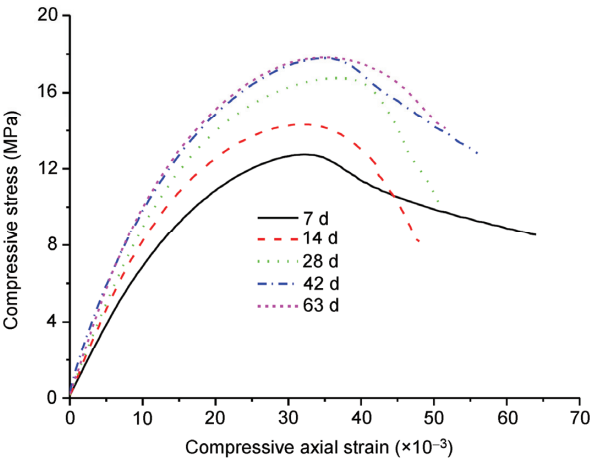


图 1 (网络版彩图)CA 砂浆不同龄期下应力-应变曲线

表 1 不同龄期砂浆的抗压强度与弹性模量

龄期(d)	28 d 规范	7	14	28	42	63
f (MPa)	≥ 15	12.6	14.2	16.5	17.4	18.0
$E(\times 10^3 \text{ MPa})$	7~10	7.8	8.7	9.0	10.6	11.3

42 d 龄期后, 砂浆抗压强度和弹性模量增长显著放缓; (4) 7 d 时, 砂浆表现为较好的弹韧性, 到 14 d 时, 应力峰值后试件破坏较快, 砂浆已经表现出较为明显的硬脆型. 出现这种现象的主要原因是因为 CA 砂浆中水泥含量大于沥青含量, 水泥水化产物形成连续相, 弹韧性的沥青膜分散在无机脆性的水泥水化产物连续相中, 一定程度改善了砂浆的弹韧性. 水泥水化初期, 水泥石强度低, 但乳化沥青破乳成膜已经完成, 砂浆表现出较好的弹韧性, 随着水泥水化进行, 水泥石强度升高, 砂浆硬脆性增大.

3.2 不同龄期 CA 砂浆内孔隙结构变化

表 2 是不同龄期下砂浆中所含沥青的质量分数和体积分数. 从表中可见, 7 d 后砂浆内沥青质量与体积含量已经相对固定, 变化幅度都在 1% 范围内, 说明沥青成膜硬化过程已基本完成.

表 3 是不同龄期下砂浆内孔体积分形维数 D 的变化规律, 图 2 是压汞仪测量得到不同龄期砂浆内不同孔隙分布曲线, 表 4 是分别用压汞法和核磁共振测量得到的沥青抽滤后砂浆的总孔隙率, 图 3 是核磁共振测量得到各个龄期砂浆沥青抽滤完后孔隙变化分布图.

从表 3 可见, 孔体积分形维数幅度变化小, 说明砂浆内部孔隙结构并没有发生大的显著变化. 根据图 2 分析, 从 7~14 d, 砂浆内部孔隙有较明显细化; 14~42 d 孔隙分布曲线呈现窄而高的变化, 表 4 中两种测试方法得到的总孔隙率在 42 d 时也有较明显下降, 都说明砂浆内部孔隙进一步细化. 而根据表 2 的实验结果, 由于 7 d 水化后砂浆内沥青含量已经相对固定, 因此, 孔隙的细化应主要是由于水泥水化所致.

对比表 4 中数据, 核磁共振测量得到的砂浆总孔隙率(V_g)大于压汞方法测定的总孔隙率 V_h , 其原因是

表 2 不同龄期砂浆内沥青质量和体积含量

龄期(d)	7	14	28	42
$S_l(\%)$	8.0	7.4	7.8	7.4
$\rho_b(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.835	1.860	1.860	1.855
$V_l(\%)$	14.68	13.764	14.508	13.727

表 3 不同龄期沥青抽滤后砂浆内部孔体积分形维数 D

龄期(d)	7	14	28	42
D	2.54	2.60	2.56	2.52

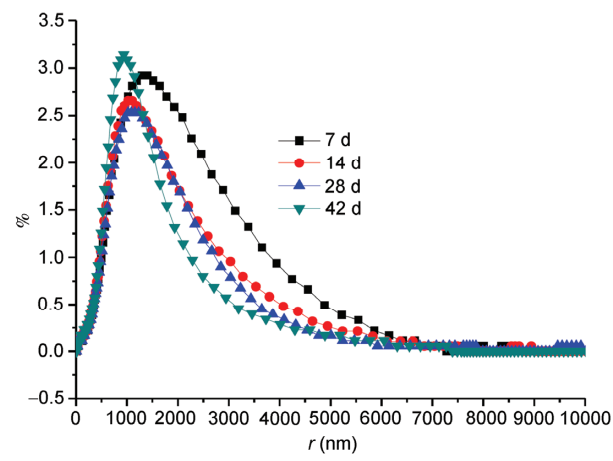


图2 (网络版彩图)压汞仪测试不同孔径分布

表4 不同龄期沥青抽滤后砂浆的孔隙总体积

龄期(d)	7	14	28	42
$V_g(\%)$	58.9	59.5	59.7	54
$V_h(\%)$	44.2	47.3	45.6	42.6

压汞法主要测量得到的是开口孔的体积,但核磁共振测量孔隙还包括砂浆体系中的密闭孔,其测试结果更符合实际。因此,从图3核磁共振测试结果可能更能反映出砂浆内部孔隙的变化情况:从7~14 d,大孔(孔径为10~100 μm , 5~10 μm)比例降低,0.1~5 μm 孔径分布峰往左边偏移,说明该区域小孔径比例增

大;14 d以后,0.1~5 μm 孔隙所占比例继续提高,大孔数量进一步降低;42 d 比较 28 d,0.1~5 μm 孔径分布峰往左边偏移,也说明孔径进一步细化。

3.3 水泥水化产物热重分析

为进一步研究水泥水化对砂浆性能的影响,分别对7,14,28和42 d 龄期下水泥水化产物进行了热重分析,定量研究了不同龄期下钙矾石与氢氧化钙两种水泥水化产物对应的热分解热重损失率。钙矾石分解温度区间在 50~110 $^{\circ}\text{C}$,氢氧化钙分解温度区间在 400~500 $^{\circ}\text{C}$ ^[8,9]狭窄的 410~460 $^{\circ}\text{C}$ 区域^[10],热重损失曲线见图4所示,计算得到各龄期钙矾石与氢氧化钙对应热重损失百分比见表5所示。

从表5可见,从7~42 d,水泥水化产物中的钙矾石与氢氧化钙的含量呈现上升趋势。从7~14 d,含量增长明显,从14~28 d 含量增长放缓。但42 d 时,两种产物含量有所下降,这显然与水泥水化的基本原理不符。CRTS II 砂浆采用的是阴离子乳化沥青,根据其成膜硬化机理^[11]:阴离子乳化剂亲水基中的氧原子因氢键缔合结合了较多的水分子,并且占据了较大的空间,致使乳化剂分子不易直接与集料表面接触并吸附于其上。这样,沥青微珠就失去了跨越过去的桥梁,不能直接靠近集料表面,呈现出集料、吸附水膜、沥青薄膜这样的状态。当乳化沥青与水泥搅

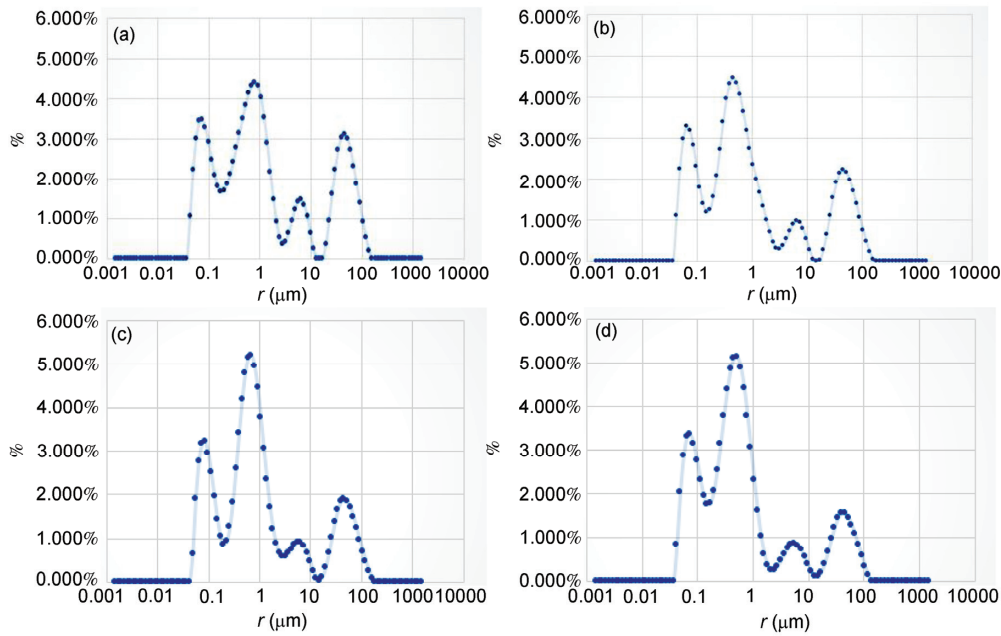


图3 (网络版彩图)核磁共振测量不同龄期砂浆抽滤沥青后孔径分布

(a) 7 d; (b) 14 d; (c) 28 d; (d) 42 d

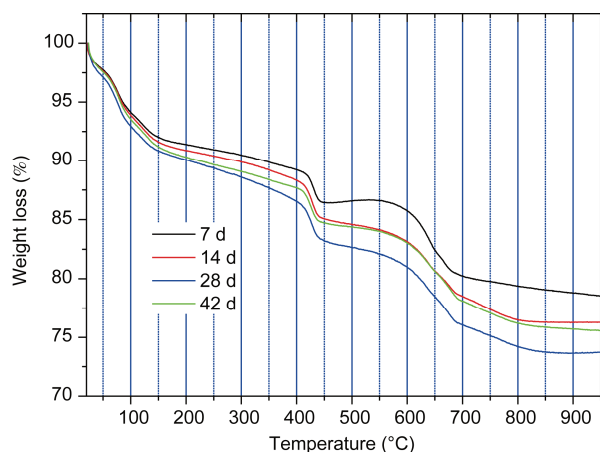


图 4 (网络版彩图)水泥水化产物热重分析

表 5 不同龄期钙矾石与氢氧化钙分解热重损失率(%)

龄期(d)	7	14	28	42
钙矾石	4.08	4.28	4.64	4.57
氢氧化钙	2.59	3.08	3.10	2.84

拌后,由乳化沥青表面乳化剂分子而呈现的水泥颗粒,水膜、沥青薄膜结构类似减水剂的减水原理,应该更有利于水泥颗粒的分散和水泥水化。但研究^[12,13]都显示,阴离子乳化沥青会使水泥水化主放热峰时间明显后移,延缓了水泥水化,这可能与沥青的成膜阻碍有关,阴离子乳化沥青对水泥水化的影响规律和机理分析还并不清晰。表 5 中 42 d 水化产物氢氧化

钙含量会降低,是乳化沥青会对氢氧化钙稳定性产生了影响,还是因为试验操作误差所致,也还需进一步研究。

4 结论

本文研究了高速铁路现场施工制备的 CRTS II 型 CA 砂浆长期力学性能发展规律,并通过微观分析手段从砂浆组成和结构进行了讨论分析,得到以下结论。

1) 现场 CA 砂浆 28 d 力学性能到达了规范要求,抗压强度为 16.5 MPa,弹性模量为 9000 MPa。

2) 从浇注成型到养护 63 d, CA 砂浆力学性能一直在增长,42 d 弹性模量超过了规范规定上限 10000 MPa 的要求,但后期增长速率放缓。

3) CRTS II 型水泥乳化沥青砂浆中沥青经过 7d 龄期后已经固化成膜;经过 28 d 后,由于水泥的持续水化引起砂浆内部毛细孔隙不断细化,砂浆抗压强度与弹性模量继续增长;经过 42 d 后,砂浆抗压强度和弹性模量增长放缓。

4) 根据已有数据增长趋势,建议在对沪昆高铁江西段 CRTS II 型轨道结构进行动力学验算时,CA 砂浆充填层弹性模量选用 10000~12000 MPa,抗压强度值选用 18~20 MPa。

参考文献

- 铁道部科学技术司. 客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件. 北京: 中国铁道出版社, 2008
- 万赞, 洪锦祥, 徐静, 等. 水泥乳化沥青砂浆强度计算模型. 建筑材料学报, 2013, 16: 261-265
- 王强, 阿茹罕, 阎培渝. 砂灰比和砂的级配对 CA 砂浆抗压强度和流动性的影响. 铁道科学与工程学报, 2008, 5: 1-5
- 吴韶亮, 李海燕, 邵丕彦, 等. CRTS I 型水泥乳化沥青砂浆的力学性能试验研究. 铁道建筑, 2012, 12: 129-132
- Korb J P. NMR and nuclear spin relaxation of cement and concrete materials. Curr Opin Colloid In, 2009, 14: 192-202
- Sharma S, Casanova F, Wache W, et al. Analysis of historical porous building materials by the NMR-MOUSE. Magn Reson Imaging, 2003, 21: 249-255
- 傅强, 谢友均, 郑克仁, 等. 水泥乳化沥青砂浆力学性能的龄期效应. 北京工业大学学报, 2013, 39: 1607-1612
- Stepkowska E T, Blanes J M, Franco F, et al. Phase transformation on heating of an aged cement paste. Thermochim Acta, 2004, 420: 79-87
- Liu Z, Deng D, SCHUTTER G D, et al. Chemical sulfate attack performance of partially exposed cement and cement fly ash paste. Constr Build Mater, 2012, 28: 230-237
- Dweck J, Buchler P M, Coelho A C V, et al. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. Thermochim Acta, 2000, 346: 105-113
- 宋哲玉, 徐培华, 陶家朴. 乳化沥青破乳机理研究. 石油沥青, 1999, 9: 23-29
- 翁智财, 谢永江, 郑新国, 等. W/C 和 A/C 对水泥乳化沥青复合胶凝材料水化的影响. 铁道建筑, 2011, 11: 128-131
- Pouliot N, Marchand J, Pigeon M. Hydration mechanisms, microstructure, and mechanical properties of mortars prepared with mixed binder cement slurry-asphalt emulsion. J Mater Civil Eng, 2003, 15: 54-59

Micro-analyze on development of the static mechanical properties of CRTS I type cement emulsified asphalt mortar

LIU ZanQun, LI XiangNing, TIAN Qing, DENG DeHua & YUAN Qiang

School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

The development of static mechanical properties of CRTS II type cement emulsified asphalt (CA) mortar was studied. The specimens were made with the fresh mortar used in Jiangxi section of HU-KUN High Speed railway. The asphalt in mortar was extracted by Trichloroethylene at different age. Then, MIP (Mercury intrusion method) and NMR (Nuclear Magnetic Resonance) were employed to analyze the pore structure of mortar, and the cement hydration was analyzed by means of TGA (Thermogravimetric Analysis). According to the results, at the age of 28 days the compressive strength and elasticity modulus had reached the value offered in standard. The mechanical properties had been increasing with the progress of age due to the cement hydration, causing the pore refinement. However, the increasing rate became quite slow after 42 days. It could found that the film formation of emulsified asphalt was relative quick and reach stable just after 7 days.

CA mortar, age development, static mechanical properties, pore structure, cement hydration

doi: 10.1360/N092014-00101