

水泥基复合路面材料微观热应力分析^{*}

李国强 黄 卫 邓学钧 杨树才

(东南大学交通学院, 南京, 210096)

提 要 乳化橡胶沥青水泥混凝土(ERACC)是以水泥砂浆为连续相,以裹覆乳化橡胶沥青的粗集料为分散相的水泥基复合路面材料。根据 ERACC 路面结构特点和 ERACC 的微观结构特点,建立了 ERACC 微观热应力分析的三层嵌套模型,推导了计算公式,讨论了提高 ERACC 抗温缩开裂能力的途径。

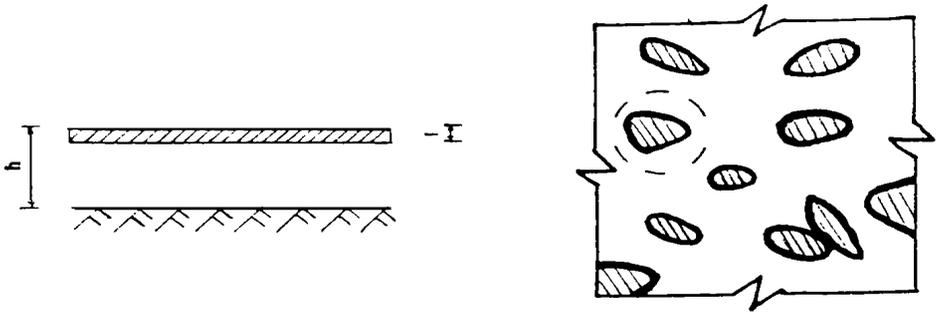
关键词 水泥基, 复合材料, 路面, 热应力, 温缩开裂, 相, 界面应力

高温稳定性和低温抗裂性是路面材料重要的使用性能。作为水泥基复合材料,ERACC 不存在高温稳定性不足问题,但是由于各相材料之间弹性模量和线胀系数的差异将导致变温过程中产生热应力,而在低温条件下各相材料趋于变硬变脆,所以低温条件下的热应力逐渐增大,易于导致 ERACC 产生低温破坏,造成路面产生低温开裂,影响路面的使用性能。因此正确分析 ERACC 的热应力,是评估其低温抗裂能力和改善其低温抗裂性的前提。

一、ERACC 微观热应力分析模型

根据路面结构力学分析的基本假定,当把 ERACC 作为路面结构面层使用时,该面层可视为厚度有限,水平方向无限的实体层,如图 1(a)所示。由于温度收缩引起的路面开裂一般起自路表而向下发展,所以可在 ERACC 面层表面取出一单位厚的无限大薄片,如图 1(a)所示。该无限大薄片 ERACC 的微结构示意图如图 1(b)所示。如果假定变温在平面上是均衡的,则该无限大薄片为平面应力体。

^{*} 本文收稿日期: 1996 年 9 月



(a) 路面结构示意图

(b) 微观结构示意图

图 1 ERACC 路面结构与微观结构示意图

选定图 1(b) 中任一裹覆橡胶沥青的粗集料颗粒及其周围的水泥砂浆基体作为研究对象 (如图 1(b) 中虚线圆所包围部分), 不难发现它处于由其它裹覆橡胶沥青的粗集料颗粒及其周围的水泥砂浆基体组成的 ERACC 等效复合材料当中。作为近似分析和研究具有复杂形状粗集料的基础, 可以把该研究对象的粗集料颗粒视为圆形的, 在该圆形颗粒外面均匀包裹着一层水泥砂浆, 即形成由圆形粗集料颗粒、橡胶沥青层及水泥砂浆层构成的三层圆。为考虑其它裹覆橡胶沥青粗集料颗粒及其周围的水泥砂浆

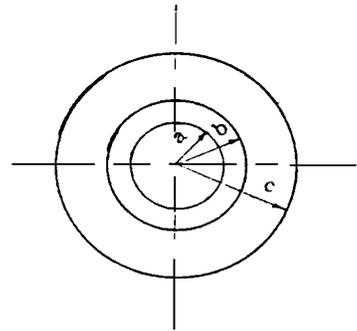


图 2 ERACC 微观热应力分析的三层嵌套模型

基体对该研究对象的作用, 可以把该三层圆嵌入 ERACC 等效复合材料当中, 即嵌入图 1(b) 无限大薄片之中, 从而形成 ERACC 微观热应力分析的三层嵌套模型, 如图 2 所示。

图 2 中 a 表示无应力时所选定粗集料颗粒半径; b 表示无应力时橡胶沥青空心增韧圆的外半径; c 表示无应力时水泥砂浆空心基体圆的外半径; c 之外的区域为 ERACC 等效复合材料。

二、ERACC 微观热应力计算公式

在图 2 的三层嵌套模型中, 令 E_0, E_1, E_2, E_3 分别为 ERACC 等效复合材料、水泥砂浆、橡胶沥青及粗集料的弹性模量, $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ 分别为相应材料的泊松比, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为相应材料的线胀系数, P_0, P_1, P_2 分别为 $r = c, r = b, r = a$ 处的径向正应力, r 为从粗集料圆心向外的半径。 U_{0c}, U_{1c} 分别为 $r = c$ 处 ERACC 等效复合材料及水泥砂浆基体的径向位移; U_{1b}, U_{2b} 分别表示 $r = b$ 处水泥砂浆基体及橡胶沥青夹层的径向位移; U_{2a}, U_{3a} 分别表示 $r = a$ 处橡胶沥青夹层及粗集料的径向位移。 ΔT 为变温数值, $\Delta T > 0$ 表示升温,

$\Delta T < 0$ 表示降温。

如果对 ERACC 等效复合材料及各相材料采用均质的、连续的、各向同性的线性弹性体假定, 并且假定 ΔT 与坐标无关, 则根据热弹性力学理论^[1,2] 可以解得径向位移为

$$U_{0c} = \alpha_0 \Delta T c - \frac{(1 + \mu_0)}{E_0} P_0 c \quad (1)$$

$$U_{1c} = \alpha_1 \Delta T c + \frac{1}{E_1} \left[(1 + \mu_1) \frac{b^2 c^2 (P_0 - P_1)}{(c^2 - b^2) c} + (1 - \mu_1) \frac{P_0 c^2 - P_1 b^2}{c^2 - b^2} c \right] \quad (2)$$

$$U_{1b} = \alpha_1 \Delta T b + \frac{1}{E_1} \left[(1 + \mu_1) \frac{b^2 c^2 (P_0 - P_1)}{(c^2 - b^2) b} + (1 - \mu_1) \frac{P_0 c^2 - P_1 b^2}{c^2 - b^2} b \right] \quad (3)$$

$$U_{2b} = \alpha_2 \Delta T b + \frac{1}{E_2} \left[(1 + \mu_2) \frac{a^2 b^2 (P_1 - P_2)}{(b^2 - a^2) b} + (1 - \mu_2) \frac{P_1 b^2 - P_2 a^2}{b^2 - a^2} b \right] \quad (4)$$

$$U_{2a} = \alpha_2 \Delta T a + \frac{1}{E_2} \left[(1 + \mu_2) \frac{a^2 b^2 (P_1 - P_2)}{(b^2 - a^2) a} + (1 - \mu_2) \frac{P_1 b^2 - P_2 a^2}{b^2 - a^2} a \right] \quad (5)$$

$$U_{3a} = \alpha_3 \Delta T a + \frac{1 - \mu_3}{E_3} P_2 a \quad (6)$$

根据位移连续条件有

$$U_{0c} = U_{1c} \quad (7)$$

$$U_{1b} = U_{2b} \quad (8)$$

$$U_{2a} = U_{3a} \quad (9)$$

联立(1)~(9)式得

$$P_1 = \frac{[y_8 + y_9 + 2E_2(1 - k)y_2y_3] \Delta T}{y_5 + y_6 + y_7} \quad (10)$$

$$P_2 = (y_1 \Delta T + 2E_3 P_1) / y_2 \quad (11)$$

$$P_0 = (y_3 \Delta T + 2E_0 n P_1) / y_4 \quad (12)$$

式中

$$y_1 = E_2 E_3 (\alpha_2 - \alpha_3) (1 - k); \quad y_2 = E_2 (1 - \mu_3) (1 - k) + E_3 x_4$$

$$y_3 = E_0 E_1 (\alpha_0 - \alpha_1) (1 - n); \quad y_4 = E_1 (1 - n) x_1 + E_0 x_3$$

$$y_5 = [E_1 (1 - n) x_5 + E_2 (1 - k) x_2] y_2 y_4; \quad y_6 = -4E_1 E_3 (1 - n) k y_4$$

$$y_7 = -4E_0 E_2 (1 - k) n y_2; \quad y_8 = (\alpha_1 - \alpha_2) E_1 E_2 (1 - n) (1 - k) y_2 y_4$$

$$y_9 = 2k E_1 (1 - n) y_1 y_4; \quad n = b^2 / c^2; \quad k = a^2 / b^2; \quad x_1 = (1 + \mu_0)$$

$$x_2 = (1 + \mu_1) + n(1 - \mu_1); \quad x_3 = (1 + \mu_1) n + (1 - \mu_1);$$

$$x_4 = (1 + \mu_2) + k(1 - \mu_2); \quad x_5 = (1 + \mu_2) k + (1 - \mu_2)$$

式(10)~(12)即为 ERACC 界面径向正应力计算公式。把 P_0 、 P_1 、 P_2 代入弹性力学平面应力问题的有关公式^[1,2], 即可求出 ERACC 各相材料的热应力和应变, 限于篇幅, 不再列出具体表达式。

三、ERACC 微观热应力计算结果与讨论

1. 计算参数确定

(1) 物理力学参数确定

除非另有注明, 计算 ERACC 微观热应力时各物理力学参数取值如下:

$E_1 = 16000 \text{ MPa}$, $E_2 = 1000 \text{ MPa}$, $E_3 = 56000 \text{ MPa}$, $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.3$, $\alpha_1 = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 14.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_3 = 0.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

对 ERACC 等效复合材料的弹性模量 E_0 , 提出下述计算公式

$$E_0 = 0.265 E_1 f_1 + \frac{[0.735 f_1 + 0.662(f_2 + f_3)]^2 E_1 E_2 E_3}{0.735 f_1 E_2 E_3 + 0.662(f_2 E_1 E_3 + f_3 E_1 E_2)} + \frac{0.338(f_2 + f_3)^2 E_2 E_3}{f_2 E_3 + f_3 E_2} \quad (13)$$

式中, f_1, f_2, f_3 分别为 ERACC 中水泥砂浆、橡胶沥青以及粗集料的体积份数, 余同前。

(13) 式的精度可由下述退化分析进行初步论证。在 ERACC 中取消橡胶沥青夹层, 即令 $f_2 = 0$, 则 ERACC 退化为普通水泥混凝土(PCC), Zhou 等提出了具有足够精度的 PCC 弹性模量简化计算公式^[3]

$$E_0 = E_1 \left(\frac{E_3}{E_1} \right)^{f_3} \quad (14)$$

图 3 为按 (13)、(14) 式计算的 PCC 弹性模量结果, 可见在较大的参数取值范围内二者比较接近, 最大相对误差为 8.7%, 初步证实了(13)式的精度足够, 可用于计算 ERACC 等效复合材料的弹性模量 E_0 。

表 1 为由(13)式预测的 ERACC 弹性模量 E_0 值与实测 E_0 值的比较。由表 1 可以看出, 预测值与实测值比较接近, 最大相对误差为 9.6%, 从实测角度初步证实(13)式可以用于下面的计算。

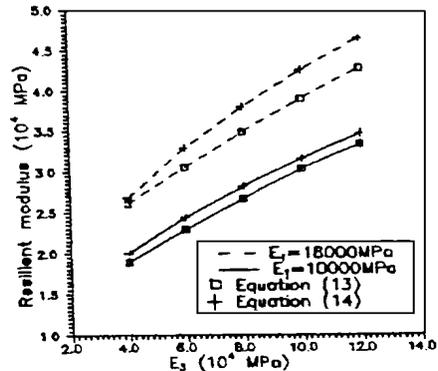


图 3 PCC 弹性模量计算结果

表 1 E_0 的预测值与实测值比较

预测值 (MPa)	实测值 (MPa)	相对误差 (%)
(1)	(2)	$[(1) - (2)] / (1)$
1658	1728	- 4.2
2021	1886	6.7
2366	2139	9.6
2628	2552	2.9

对于 ERACC 等效复合材料的线胀系数 α_0 , 可以采用著名的 Turner 公式进行计算^[4]

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 f_i \alpha_i E_i}{\sum_{i=1}^3 f_i E_i} \quad (15)$$

(2) 几何参数的确定

由图 2 可以看出, ERACC 各相材料在平面上为圆形, 则在空间上应为球形, 根据球形的体积与半径之间的关系得

$$f_3 = a^3/c^3 \quad (16)$$

$$f_2 = b^3/c^3 - a^3/c^3 \quad (17)$$

$$f_1 = 1 - b^3/c^3 \quad (18)$$

式中, a, b, c 的意义如图 2 所示, f_1, f_2, f_3 如式(13)所示。

在(10)~(12)式中, 注意到 $n = b^2/c^2, k = a^2/b^2$, 则 n, k 与(16)~(18)式联立得

$$n = (1 - f_1)^{2/3} \quad (19)$$

$$k = [f_3/(f_2 + f_3)]^{2/3} \quad (20)$$

对于组成一定的 ERACC, f_1, f_2, f_3 即为确定值, 从而由(19)、(20)式即可确定 n, k 之值, 代入(10)~(12)式, 即可计算径向热应力 P_0, P_1, P_2 的数值。

除非另有注明, 下面计算时取 $f_1 = 0.5, f_2 = 0.1, f_3 = 0.4$ 。

2. 计算结果分析与讨论

在图 2 中, P_1, P_2 所对应的界面($r = b, r = a$)为实际的物理界面, P_0 所对应的界面($r = c$)为力学分析所引入的界面, 并非真正的物理界面, 联系图 1(b)可以更清楚地表明这一点。由于 P_1, P_2 可以引起 ERACC 发生界面脱粘损坏, 从而引起 ERACC 路面产生裂缝, 所以下面分析时以 P_1, P_2 作为对象。

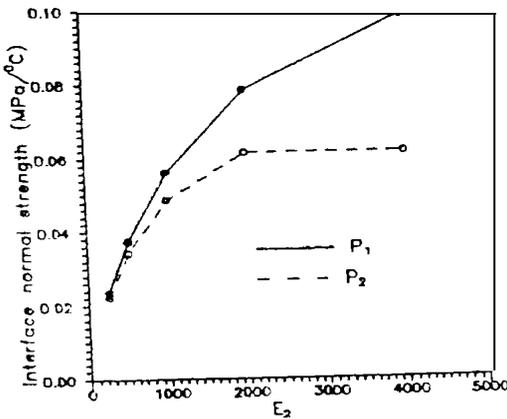


图 4 P_1, P_2 随 E_2 变化

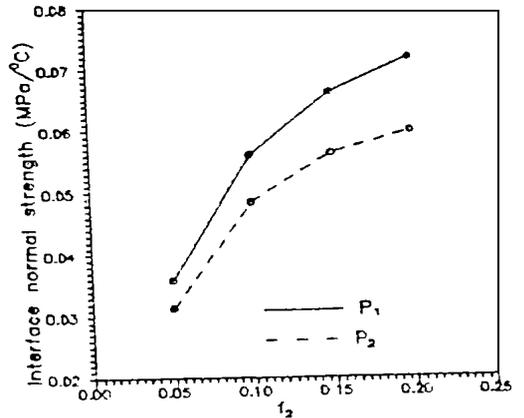


图 5 P_1, P_2 随 f_2 变化

图 4~ 图 6 分别为 P_1, P_2 随橡胶沥青弹性模量 E_2 、体积份数 f_2 以及橡胶沥青与水泥砂浆线胀系数之差 ($\alpha_2 - \alpha_1$) 变化的计算结果 ($\Delta T = -1^\circ\text{C}$)。

由图4可以看出,随 E_2 增加, P_1 、 P_2 增加,从而ERACC路面发生温缩开裂的可能性增加。为提高ERACC路面的抗温缩开裂能力,实践中以采用弹性模量较小的橡胶沥青为宜。选用感温性较小的软橡胶沥青可以满足该要求。

由图5看出,随橡胶沥青含量增加(f_2 增加),橡胶沥青夹层变厚,由于橡胶沥青的线胀系数较大,所以导致收缩引起的热应力增加,因此从低温抗裂性角度考虑,过厚的橡胶沥青夹层无益。但是,如果橡胶沥青用量过少,不但不能达到均匀裹覆粗集料的目的,而且会使ERACC刚度增加,车辆荷载引起的荷载应力提高,致使ERACC路面发生荷载应力破坏。所以确定ERACC中橡胶沥青含量时应结合多种因素进行综合权衡。

由图6看出,随 $(\alpha_2 - \alpha_1)$ 的减小,界面热应力随之减小,抗温缩开裂能力提高。实践中采取措施减小橡胶沥青与水泥砂浆线胀系数之间的差异,对提高ERACC路面的抗温缩开裂能力是有利的。

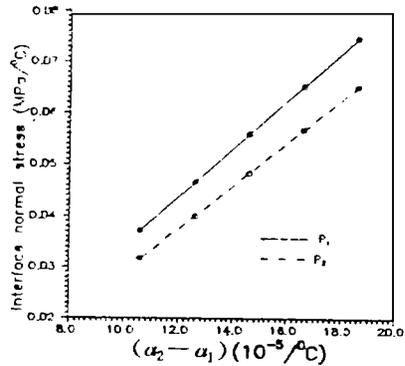


图6 P_1 、 P_2 随 $(\alpha_2 - \alpha_1)$ 的变化

四、结 论

(1) 建立了ERACC微观热应力分析的三层嵌套模型,可以考虑裹覆橡胶沥青的粗集料颗粒之间的相互作用,与ERACC的真实情况比较接近。

(2) 为提高ERACC的抗温缩开裂能力,提高各个界面的粘结强度肯定有利。此外,采用感温性较小的软橡胶沥青,适当限制橡胶沥青用量不致过高,采取措施缩小橡胶沥青与水泥砂浆线胀系数的差异也是有利的。

(3) 已经铺筑了ERACC试验路面,经过近一年运行实践考验,未发现温缩裂缝,初步证实ERACC具有较强的抗温缩开裂能力,从实践角度初步肯定了本文的分析结果。

参 考 文 献

- 1 徐芝纶编. 弹性力学(上册). 北京:人民教育出版社,1978
- 2 徐秉业,黄炎,刘信声等编. 弹塑性力学及其应用. 北京:机械工业出版社,1984
- 3 F P Zhou, et al. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. Cement and Concrete Research, 1995;25(1): 177- 186
- 4 王震鸣编著. 复合材料力学和复合材料结构力学. 北京:机械工业出版社,1991

MICROSCOPIC THERMAL STRESS ANALYSIS OF CEMENT BASED PAVEMENT COMPOSITE

Li Guoqiang Huang Wei Deng Xuejun
(Southeast University)

Abstract Rubberized asphalt emulsion modified cement concrete (ERACC) is a kind of cement based pavement composite which is made of cement mortar as matrix, and rubberized asphalt emulsion coated coarse aggregates as dispersed phase. According to the features of ERACC pavement structure and the characteristics of ERACC microstructures, a three-layer built-in model was proposed for microscopic thermal stress analysis of ERACC, and the thermal stress formulas were developed. The way to increase the ability of resisting temperature cracking was discussed.

Key words cement based, composite, pavement, thermal stress, temperature cracking, phase, interface stress