

装配式基层沥青路面接缝温度应力分析

陈明¹, 肖杰^{2*}, 杨和平², 王宝辉¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为探究装配式基层沥青路面接缝应力在路表温度变化时的情况,应用 Abaqus 软件建立路面结构的三维有限元模型,使用稳态热分析获得路表温度变化对接缝应力的影响,同时通过顺序热力耦合方法实现温度与荷载的耦合,分析接缝的力学响应。结果表明:温度场是非线性的传热过程;降温比升温对基层接缝应力的影响更大;接缝温度应力随面层厚度的增大而减小,受基层尺寸影响小;温度对接缝应力的影响远大于车辆轴载;超载重载对道路结构有严重危害。

关键词: 道路工程; 装配式基层; 接缝; 温度应力; 温度与荷载耦合

装配式基层道路是一种新型道路基层结构,用装配混凝土预制基块或板代替传统的水泥或二灰碎石等作为基层,板块间通过填缝材料对接缝处灌浆填充连接,是一种水泥混凝土基层+沥青面层的新型路面结构。

现实中路面常受持续变化气温的影响,内部温度并随之变化,因此结构层内存在温度梯度时,产生翘曲变形,其受限制而产生翘曲应力。严作人对层状路面体系的温度场进行了分析;吴赣昌提出了二维层状路面结构温度应力的计算方法;谈至明研究了分离式和结合式双层板在路表温度日较变条件下的温度应力;杨斌对旧水泥混凝土路面沥青加铺层温度应力及耦合应力进行了计算分析;郭寅川对甘肃地区半刚性基层沥青路面温度场以及温度应力进行分析。以上学者均是在旧混凝土加铺沥青层或混凝土层的结构基础上进行计算分析,装配式基层路面作为一种新型的路面结构,目前尚缺乏关于温度变化对装配式基层路面结构的影响研究。另外,在传统的“白加黑”路面结构中接缝存在隐患源,这种情况在刚性基层结构中依旧存在。

因此,该文应用 Abaqus 软件,建立装配式基层路面结构的三维有限元分析模型,考虑空气温度以及太阳辐射等温度变化对路面结构接缝薄弱部位应力的影响,并耦合荷载条件,研究装配式基层路面结构接缝在温度耦合荷载情况下的力学响应。

1 路面结构及参数的确定

1.1 路面结构层及温度场分析参数拟定

假定路面结构为:4 cm SMA-13 沥青玛蹄脂碎石(上面层)+6 cm AC-20 中粒式沥青混凝土(中面层)+8 cm AC-25 粗粒式沥青混凝土(下面层)+30 cm 装配式基层(C30 预制混凝土板 and 水泥砂浆填缝料),如表 1 所示。

表 1 路面结构方案

| 结构层 | 厚度/cm |
|---------|-------|
| 沥青面层 | 4+6+8 |
| 混凝土基层 | 30 |
| 水泥砂浆填缝料 | 30 |

运用传热学原理计算装配式基层路面结构温度应力时,需要确定以下几种热分析参数,即弹性模量、泊松比、线膨胀系数(温缩系数)、热传导率、热容量、密度、太阳辐射吸收率以及路面发射率等。其中,热传导率和热容量受温度以及材料的属性影响较大。此外,直接暴露在大气环境中的沥青面层受环境温度影响较大,而沥青层以下部分由于结构层的覆盖而受外界环境温度的影响逐渐变小。参考严作人、申爱琴、郭寅川和冯德成等的研究,拟定的材料热分析参数如表 2 所示。

收稿日期:2020-08-12(修改稿)

基金项目:上海城市建设设计研究总院(集团)有限公司科技项目(编号:201704)

作者简介:陈明,男,硕士。E-mail:971815140@qq.com

* 通信作者:肖杰,男,博士,副教授。E-mail: xiaojie324@csust.edu.cn

表 2 材料热物理参数

| 路面结构 | 温度/ ℃ | 弹性 模量 E/MPa | 泊松比 ν | 热传导率 $k/[\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$ | 密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 热容量 $C/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$ | 线膨胀 系数/ [$\times 10^{-6}$ ($^\circ\text{C})^{-1}$] | 太阳辐 射吸收 率 α_s | 路面 发射 率 ε | 绝对 零度 $T_z/^\circ\text{C}$ | Stefan— Boltzmann 常数 $\alpha/$ [$\text{J} \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$] |
|-------------|----------|----------------------------|--------------|--|---|---|--|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| 沥青 面层 | −20 | 7 400 | 0.12 | 6 732 | 2 300 | 840 | 28.1 | 0.9 | 0.81 | −273 | 2.041×10^{-4} |
| | −10 | 5 200 | 0.16 | 5 040 | | 860 | 30.8 | | | | |
| | 0 | 3 500 | 0.21 | 4 392 | | 900 | 32.2 | | | | |
| | 10 | 2 200 | 0.26 | 4 860 | | 920 | 33.2 | | | | |
| | 20 | 1 400 | 0.30 | 5 148 | | 930 | 38.2 | | | | |
| 混凝土 基层 | — | 30 000 | 0.20 | 6 264 | 2 500 | 920 | 10.0 | | | | |
| 水泥砂浆 填缝料 | — | 32 000 | 0.15 | 3 348 | 1 860 | 1 050 | 15.0 | | | | |

1.2 路面结构有限元模型的建立

应用 Abaqus 软件,利用顺序热力耦合方法计算荷载应力与温度应力,模型采用 C3D8T 单元(8 节点热耦合六面体结构单元),各层接触条件为完全连续,用 TIE 功能绑定模拟。各结构层作如下假定:① 各层为均匀、连续、各向同性的线弹性体,层间不考虑热阻问题;② 预制混凝土板板长取 3 m,宽取 2 m,装配式基层由 4 块板组成,板间缝宽为 5 cm(接缝由水泥砂浆进行填缝,黏结能力强,可将接缝材料与板间设置为完全连续);③ 基层以下等效为无限地基,土基回弹模量为 50 MPa,边界条件按接触功能模块中的 Elastic Foundation 进行模拟;④ 设置基层底部为恒温边界(0℃),侧面为绝热边界。模型图如图 1 所示。

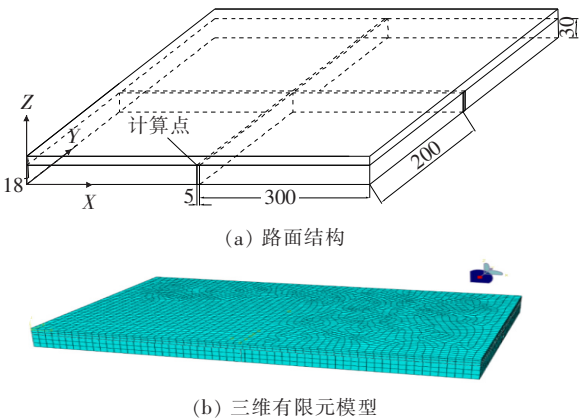


图 1 路面结构有限元模型(单位:cm)

2 装配式基层接缝温度应力分析

2.1 路面温度场计算基本理论

在温度未达到完全平衡的物体内会发生热流,如

果热量仅仅通过热传导来传播,则在均质各向同性的物体里,某一给定瞬间的这种热流,可用温度场来表示。如果物体内的各质点用直角坐标系确定,则在某一确定时刻,物体中各点的温度值可用温度场表示:

$$T = (x, y, z, t)$$

则温度梯度可以表示为:

$$\nabla T = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z}$$

为能统一反映装配式基层水泥混凝土板顶的温度变化,定义水泥混凝土板的温度梯度表达式为:

$$T_g = \frac{T(0, t) - T(h_c, t)}{h_c}$$

式中: T_g 为温度梯度($^\circ\text{C}/\text{m}$); $T(0, t)$ 为路表面的温度($^\circ\text{C}$); $T(h_c, t)$ 为路面下深度为 h_c 的温度($^\circ\text{C}$); h_c 为路面某点沿深度方向与路表面的距离(m)。

2.2 不同温差对装配式基层接缝温度应力的影响

气温的日变化一般呈现类似于正弦曲线的变化规律,对于路面结构而言,在气温达到曲线的“峰值”或“谷值”时变形最大从而温度应力也最大。考虑到中国各地区最大日温差一般不超过 20℃。因此计算路面结构温度应力时,起始赋予路面结构 0℃ 的温度域,通过改变路表温度值来进行升温及降温处理。路面结构顶面温度变化 ΔT 分别为 10、20℃(升温)及 −10、−20℃(降温),装配式基层路面结构接缝的温度应力如表 3 所示。

从表 3 可知:当路表温度分别为 −20、−10、10 和 20℃ 时,基层顶面温度分别为 −1.467、−0.630、0.611 和 1.254℃,与路表面的温度梯度分别为 102.96、52.06、52.16 和 104.14℃/m,由此可见温度

表 3 接缝温度应力

| 路表温 度/℃ | 基层顶部 温度/℃ | 温度应力/MPa | | | | | | | | | |
|------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|---------------|
| | | σ_x | σ_y | σ_z | τ_{xy} | τ_{yz} | τ_{zx} | σ_e | σ_1 | σ_3 | τ_{\max} |
| -20 | -1.467 | 0.348 | -1.099 | 1.419 | 0.090 | -0.119 | 0.126 | 2.214 | 1.438 | -1.111 | 1.274 |
| -10 | -0.630 | 0.155 | -0.493 | 0.652 | 0.039 | -0.066 | 0.058 | 1.009 | 0.662 | -0.500 | 0.581 |
| 10 | 0.611 | -0.141 | 0.438 | -0.561 | -0.035 | 0.056 | -0.046 | 0.88 | 0.443 | -0.569 | 0.506 |
| 20 | 1.254 | -0.281 | 0.874 | -1.106 | -0.072 | 0.109 | -0.089 | 1.745 | 0.885 | -1.121 | 1.003 |

场是非线性的传热过程;无论升温降温,基层顶面接缝温度应力均是显著增大,并随着温度差增大而增大;在降温过程中,基层板块产生“凹形”翘曲变形,行车方向接缝处承受拉应力,在升温过程中则产生“凸形”拱起变形,行车方向接缝处承受压应力;当路表温度下降-20℃时,接缝最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 分别为1.438、2.214和1.274MPa,而当路表温度上升20℃时,接缝最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 分别为0.885、1.745和1.003MPa,由此可以发现降温过程对于基层接缝的危害远大于升

温过程。

2.3 基层尺寸对装配式基层接缝温度应力的影响

当路表面温度降低时,路面结构发生膨胀及混凝土板产生“凹形”翘曲变形,接缝处沥青层层底面受拉,这种情况下加铺层底部极易产生反射裂缝。只考虑降温情况,并结合实际情况在计算温度应力时取 $\Delta T=-10℃$ 。

单独的荷载作用对路面结构影响尺寸较小,但温度辐射范围较大,需从尺寸效应去考虑对接缝温度应力的影响,几种基层尺寸如图2所示。

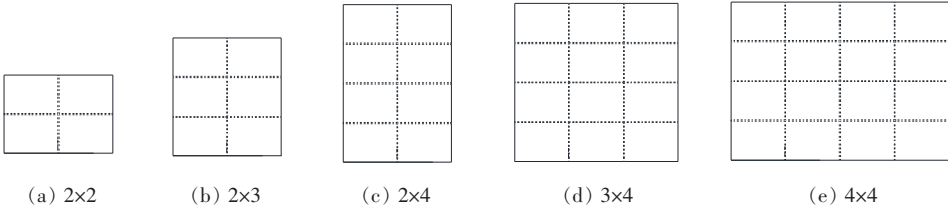


图 2 基层尺寸

经过初步计算,基层最大应力值都是在基层边界的板角边隅处,远大于内部板块,因此统一对5种尺寸

左下角板块处接缝进行对比分析,路表温度为-10℃时接缝的温度应力如表4所示。

表 4 接缝温度应力

| 板块数量 | 基层顶部 温度/℃ | 温度应力/MPa | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|---------------|
| | | σ_x | σ_y | σ_z | τ_{xy} | τ_{yz} | τ_{zx} | σ_e | σ_1 | σ_3 | τ_{\max} |
| 2×2 | -0.630 | 0.155 | -0.493 | 0.652 | 0.039 | -0.066 | 0.058 | 1.009 | 0.662 | -0.500 | 0.581 |
| 2×3 | -0.622 | 0.120 | -0.496 | 0.648 | 0.042 | -0.065 | 0.065 | 1.007 | 0.659 | -0.503 | 0.581 |
| 2×4 | -0.604 | 0.068 | -0.495 | 0.648 | 0.044 | -0.065 | 0.063 | 1.005 | 0.658 | -0.502 | 0.580 |
| 3×4 | -0.604 | 0.087 | -0.482 | 0.653 | 0.060 | -0.067 | 0.087 | 1.006 | 0.669 | -0.493 | 0.581 |
| 4×4 | -0.604 | 0.104 | -0.462 | 0.622 | 0.047 | -0.060 | 0.064 | 0.955 | 0.633 | -0.470 | 0.552 |
| 方差/(×10 ⁻⁵) | 12.692 | 88.056 | 16.424 | 13.184 | 5.304 | 0.584 | 10.184 | 43.024 | 14.936 | 15.144 | 13.704 |

由表4可知:在5种基层尺寸板块情况下,受温度场影响时,基层接缝的水平方向压应力 σ_x 差别较大,方差达到了 88.056×10^{-5} ,其余应力差距较小。基层顶部温度基本保持不变,分别为-0.630、-0.622、-0.604、-0.604和-0.604℃,其方差为 $12.256\times$

10^{-5} 。在保持基层长度不变增大宽度时,基层接缝温度应力随宽度增大有极小的减小趋势,而在保持宽度不变增大长度时没有特别明显的规律,3×4板块数量的基层尺寸相比2×4板块数量的基层尺寸,最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 分别比增大了

1.67%、0.10%和 0.17%，4×4 板块数量的基层尺寸相比 2×4 板块数量的基层尺寸，最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 分别减小了 3.80%、4.98% 和 4.83%。

2.4 面层厚度对装配式基层接缝温度应力的影响

考虑 6、8、10、12、15 和 18 cm 6 种面层厚度进行计算分析，当路表温度为 -10℃ 时接缝的温度应力如表 5 所示。

表 5 接缝温度应力

| 面层厚度/cm | 基层顶部温度/℃ | 温度应力/MPa | | | | | | | | | |
|---------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|------------|------------|---------------|
| | | σ_x | σ_y | σ_z | τ_{xy} | τ_{yz} | τ_{zx} | $\sigma_{effective}$ | σ_1 | σ_3 | τ_{\max} |
| 6 | -5.226 | 1.067 | -1.01 | 0.524 | 0.113 | 0.314 | -0.073 | 1.958 | 1.079 | -1.079 | 1.080 |
| 8 | -4.058 | 0.836 | -1.021 | 0.622 | 0.084 | 0.254 | -0.051 | 1.822 | 0.847 | -1.064 | 0.956 |
| 10 | -2.747 | 0.492 | -0.793 | 0.661 | 0.104 | 0.111 | 0.011 | 1.402 | 0.671 | -0.810 | 0.741 |
| 12 | -2.010 | 0.376 | -0.762 | 0.696 | 0.085 | 0.064 | 0.029 | 1.341 | 0.703 | -0.771 | 0.737 |
| 15 | -1.080 | 0.222 | -0.582 | 0.675 | 0.055 | -0.027 | 0.049 | 1.112 | 0.681 | -0.587 | 0.634 |
| 18 | -0.630 | 0.155 | -0.493 | 0.652 | 0.039 | -0.066 | 0.058 | 1.009 | 0.662 | -0.500 | 0.581 |

从表 5 可知：当沥青面层厚度分别为 6、8、10、12、15 和 18 cm 时，路面结构基层顶部温度分别为 -5.226、-4.058、-2.741、-2.010、-1.080 和 -0.630℃，与路表面的温度梯度分别为 79.57、74.28、72.59、66.58、59.47 和 52.06℃/m，无论是基层顶部温度还是基层与路表的温度梯度，都是随着面层厚度的增大而显著减小；在面层厚度为 6 cm 时水平方向应力 σ_x 为 1.067MPa，在 18 cm 时为 0.155 MPa，减小了 85.47%，说明基层接缝行车道方向应力为拉应力，并随着厚度的增大而减小。当厚度增大到 18 cm 时，接缝最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 分别为 0.662、1.009 和 0.581 MPa，与 6 cm 相比最大主应力分别减小了 38.65%、48.47% 和 46.20%，说明随着沥青面层厚度增加，接缝温度应力整体呈减小趋势。

3 温度与荷载耦合应力分析

3.1 装配式基层接缝温度与荷载耦合应力分析

路面结构除了路表面升降温产生的温度应力，在日常使用中还承受着路用荷载（其中以行车荷载为主）所产生的荷载应力。

为了分析温度与荷载耦合作用对装配式基层路面结构接缝的力学响应，在前面温度应力的研究基础上叠加车载，即在之前的 Abaqus 有限元模型上利用 Load 模块功能施加轴载：采用单侧双轮荷载，轴重为 100 kN，轮压为 0.7 MPa。将双圆均布荷载换算为矩形荷载，单轮接地面积为 19.2 cm×18.6 cm，单侧双轮中心距为 31.4 cm，作用于临界荷位处。荷载作用

位置如图 3 所示。

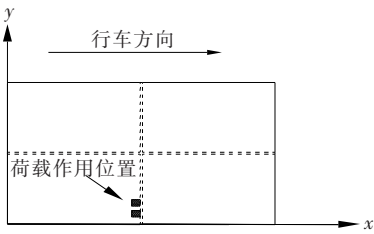


图 3 荷载作用位置

对路面结构进行温度与荷载耦合应力计算时，路面结构顶面温度变化 ΔT 分别为 10、20℃（升温）及 -10、-20℃（降温），装配式基层路面结构接缝应力如表 6 所示。

由表 6 可知： ΔT 为 -20、-10、10 和 20℃ 时，施加荷载后与单独温度场相比，接缝最大主应力 σ_1 分别增加了 1.53%、4.38%、7.00% 和 3.62%，等效应力 σ_e 分别增加了 0.14%、6.44%、20.23% 和 7.39%，最大剪应力 τ_{\max} 分别增加了 0.00%、0.86%、14.43% 和 2.89%。由此可知：在路表存在温度差时，荷载与温度耦合作用下比单独温度场作用有明显的应力提升，当路表为升温时应力提升幅度大于降温过程，主要原因在于降温过程中路面结构产生“凹形”翘曲变形，路载产生的变形使二者叠加。无论升温降温，随着温差增大，施加荷载对其影响变小。

从施加 100 kN 荷载后叠加温度场的情况考虑，当 $\Delta T = -20、-10、10$ 和 20℃ 时与 0℃ 相比，接缝最大主应力 σ_1 分别增加了 1 872.97%、833.78%、540.54% 和 1 139.19%，等效应力 σ_e 分别增加了 359.01%、122.36%、119.05% 和 287.99%，最大剪应

表6 接缝应力

| 温度/ ℃ | 荷载/ kN | 基层顶部 温度/℃ | 应力/MPa | | | | | | | | | |
|----------|-----------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|---------------|
| | | | σ_x | σ_y | σ_z | τ_{xy} | τ_{yz} | τ_{zx} | σ_e | σ_1 | σ_3 | τ_{\max} |
| -20 | 100 | -1.467 | -0.039 | -1.068 | 1.448 | 0.098 | -0.156 | 0.064 | 2.217 | 1.460 | -1.088 | 1.274 |
| | 0 | | 0.348 | -1.099 | 1.419 | 0.090 | -0.119 | 0.126 | 2.214 | 1.438 | -1.111 | 1.274 |
| -10 | 100 | -0.630 | -0.257 | -0.461 | 0.682 | 0.047 | -0.103 | -0.008 | 1.074 | 0.691 | -0.480 | 0.586 |
| | 0 | | 0.155 | -0.493 | 0.652 | 0.039 | -0.066 | 0.058 | 1.009 | 0.662 | -0.500 | 0.581 |
| 0 | 100 | 0 | -0.432 | 0.034 | 0.028 | 0.008 | -0.037 | -0.069 | 0.483 | 0.074 | -0.442 | 0.258 |
| 10 | 100 | 0.611 | -0.589 | 0.473 | -0.534 | -0.028 | 0.019 | -0.118 | 1.058 | 0.474 | -0.683 | 0.579 |
| | 0 | | -0.141 | 0.438 | -0.561 | -0.035 | 0.056 | -0.046 | 0.880 | 0.443 | -0.569 | 0.506 |
| 20 | 100 | 1.254 | -0.739 | 0.911 | -1.080 | -0.064 | 0.072 | -0.162 | 1.874 | 0.917 | -1.146 | 1.032 |
| | 0 | | -0.281 | 0.874 | -1.106 | -0.072 | 0.109 | -0.089 | 1.745 | 0.885 | -1.121 | 1.003 |

力 τ_{\max} 分别增加了393.80%、127.13%、124.42%和300.00%,降温对基层接缝应力的影响远大于升温。

3.2 超载作用下装配式基层接缝温度与荷载耦合应力分析

由于中国道路重载、超载现象十分严重,路面结构在重载作用下会产生加速破坏,为研究不同车辆荷载对装配式基层路面结构造成的不利影响,选取100~240 kN(按20 kN逐步递增)共8种轴载作用下温度与荷载耦合的受力状况进行力学分析。

根据材料强度理论,对路面结构接缝进行应力计算分析时主要考察最大主应力 σ_1 、等效应力 σ_e 及最大剪应力 τ_{\max} 3个值,结果如图4所示。

从图4可知: ΔT 为-20、-10、0、10和20℃时,车辆轴载由100 kN增大到240 kN后,接缝最大主应力 σ_1 分别增加了3.29%、8.68%、140.54%、10.55%和5.13%,等效应力 σ_e 分别增加了6.50%、33.61%、139.96%、47.64%和19.74%,最大剪应力 τ_{\max} 分别增加了1.02%、36.29%、140.12%、55.83%和20.75%,无论路表温差为多少,在超载作用下接缝应力均是显著增长,超载重载对路面有严重危害,但随着温度差的增大,增长的幅度逐渐减小,并且正温差比负温差更易受超载影响。另外,相比增大轴载而言,增大温度差时接缝应力增长幅度更大,温度对路面的影响远大于车辆轴载。

4 结论

(1) 温度场是非线性的传热过程;存在温度差时,基层顶面接缝温度应力均是显著增大,并随着温度差增大而增大,但降温比升温对于基层接缝更有危害性;

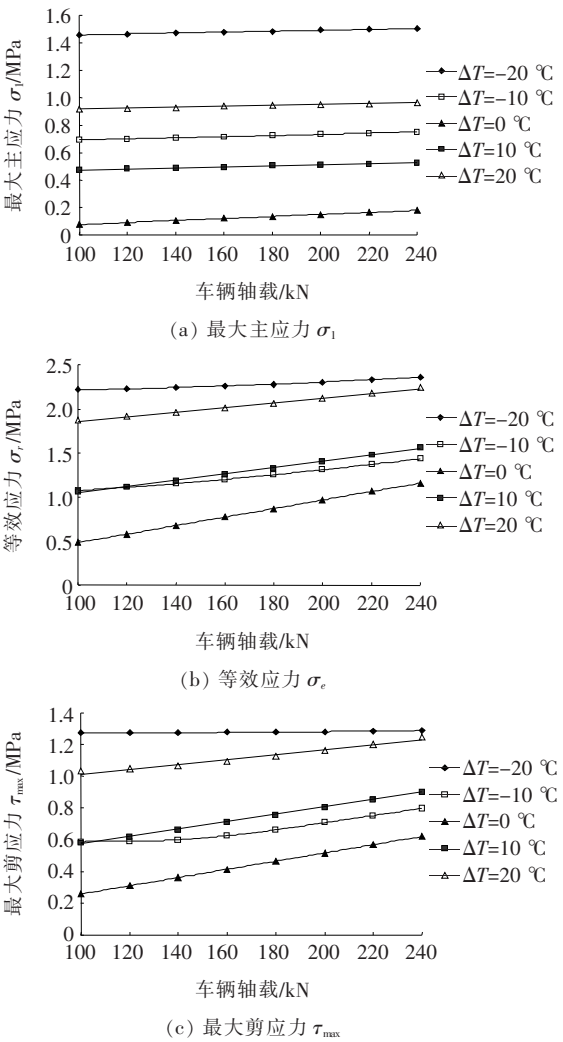


图4 接缝应力

在降温过程中路面结构产生“凹形”翘曲,在升温过程中则产生“凸形”拱起,可以采取一些有效措施尽量减小路面的温度变化,避免路面过早破坏。

(2) 基层尺寸变化时,其顶部温度梯度与接缝温