

文章编号:1007-9629(2023)04-0403-09

基于疲劳内聚力模型的瓷砖-砂浆界面 温度疲劳特性分析

吴 楷¹, 张艳荣^{1,*}, 孔祥明², 邹志龙¹, 张朝阳²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:建立了疲劳损伤演化与内聚力耦合模型,模拟了不同温度循环作用下瓷砖-砂浆的界面损伤行为,并分析了温度变化幅值、作用次数和砂浆厚度对损伤的影响规律。结果表明:疲劳内聚力模型可较好地模拟温度循环作用下瓷砖-砂浆的界面损伤行为;瓷砖-砂浆的界面损伤主要源于二者在界面处的剪切变形,且降温的影响远大于升温;随着温度作用次数的增加,界面损伤从瓷砖边缘处萌生并逐渐向中心扩展,但损伤增长速率逐渐降低;温度变化幅值增加和砂浆厚度突变均会加剧界面损伤及其发展速率,且砂浆厚度突变导致的界面损伤主要集中在较厚侧。

关键词:瓷砖-砂浆界面;温度疲劳特性;疲劳内聚力模型;数值模拟;有限元法

中图分类号:TU767.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.010

Temperature Fatigue Characteristics of Tile-Mortar Interface Based on Fatigue Cohesive Zone Model

WU Kai¹, ZHANG Yanrong^{1,*}, KONG Xiangming², ZOU Zhilong¹, ZHANG Chaoyang²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A coupling model of fatigue damage evolution and cohesive zone equations was developed to simulate the damage behaviors of tile-mortar interface under various temperature loadings. The effects of temperature variation amplitudes, cyclic times and mortar thickness on the interface damage were analyzed. Results show that the proposed fatigue cohesive zone model is feasible for the simulation of damage behaviors of tile-mortar interface under temperature cycles. The interface damage is mainly caused by the shear movements between the tile and mortar. The effect of cooling is much greater than that of heating on the interface damage. With increasing temperature cycles, the interface damage initiates at the edge of tile, and extends to the middle of tile in a decreasing growth rate. Increases of temperature variation amplitudes and a sudden thickening of mortar will accelerate the initiation and evolution of interface damage. The damage generating by the sudden thickening of mortar mainly appears in the thicker side.

Key words: tile-mortar interface; temperature fatigue characteristic; fatigue cohesive zone model; numerical simulation; finite element method

瓷砖具有美观、防水、耐用性强等优点,被广泛应用于室内外的墙面及地面的精装修工程中^[1-2]。然而在服役过程中,瓷砖空鼓的频繁出现不仅极大降

低了装修质量,还带来潜在的安全风险。如何减少和避免瓷砖空鼓现象成为业内学者们重点关注的问题。

收稿日期:2022-04-14; 修订日期:2022-06-29

基金项目:中央高校基本科研业务费科技领军人才团队项目(2022JBXT010);高等学校学科创新引智计划项目(B20040)

第一作者:吴 楷(1996—),男,安徽六安人,北京交通大学博士生。E-mail: 20115060@bjtu.edu.cn

通讯作者:张艳荣(1985—),女,河北廊坊人,北京交通大学副教授,博士生导师,博士。E-mail: yr.zhang@bjtu.edu.cn

瓷砖空鼓的萌生、发展与环境温湿度、砂浆配比和施工工艺等众多因素有关^[2-4]. 其中环境温度作为最重要的影响因素之一,对瓷砖-砂浆界面损伤乃至脱黏(即空鼓)的影响已被广泛报道. Rumbayan等^[5]实测了墙砖结构的温度分布,并结合解析方法计算了瓷砖-砂浆界面的热应力. Zurbruggen等^[6]实测了瓷砖-砂浆-混凝土结构温度,模拟分析了加热及冷却场景时的结构热应力. Feldfogel等^[7]建立了瓷砖-砂浆-混凝土二维模型,模拟了极端高温时瓷砖-砂浆界面的脱黏行为. 然而,既有研究多集中于单次温度加载,极少研究温度循环加载条件下瓷砖-砂浆的界面损伤萌生及扩展规律.

内聚力模型在模拟损伤萌生和裂纹扩展方面具有独特优势^[8-10],被广泛用于结构疲劳损伤研究中. Nguyen等^[11]和 Maiti等^[12]将不同损伤演化模型耦合到线性内聚力模型中,分别研究了铝合金面板和聚合物材料的疲劳裂纹扩展过程. Roe等^[13]开发了基于指数型内聚力模型的疲劳内聚力模型,仿真分析了双悬臂梁试件、端部加载劈裂试件和混合模式弯曲梁试件的界面疲劳裂纹扩展. Ural等^[14]提出了考虑裂纹扩展迟滞效应的疲劳内聚力模型,对比验证了铝合金和韧性钢的疲劳试验结果. Jin等^[15]在双线性内聚力模型的基础上引入了与最大应力水平、当前应力水平和位移增量相关的损伤因子,定义了刚度增量的退化,以模拟沥青混凝土的疲劳损伤. 与上述模型相比,该模型不仅考虑了耐疲劳极限及以当前荷载水平为权重的变形增量,还可用于模拟Ⅰ型、Ⅱ型及混合模式的脆性开裂. 此外,其采用的损伤外推技术能够大幅度提高高周疲劳的模拟效率. 然而,迄今为止,鲜有文献报道采用疲劳内聚力模型来研究瓷砖-砂浆界面的疲劳损伤.

本文建立了疲劳损伤演化与内聚力耦合模型,用于研究温度循环作用下瓷砖-砂浆界面的疲劳特性. 首先,通过编制 UMAT 子程序,在 Abaqus 软件中建立瓷砖-砂浆-混凝土三维疲劳内聚力模型;然后,模拟不同温度循环作用下的界面损伤行为,并分析了温度变化幅值、作用次数和砂浆厚度对界面损伤的影响规律;最后,揭示了温度循环作用下瓷砖-砂浆界面损伤的萌生与演化机理.

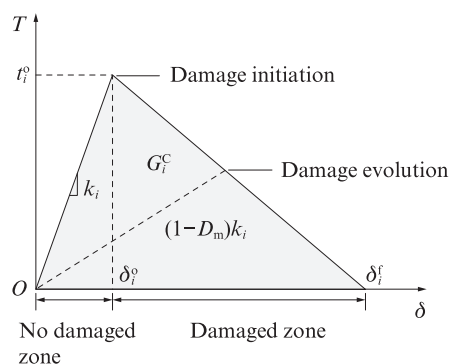
1 基本理论

1.1 双线性内聚力模型

内聚力模型是一种描述界面力学行为的模型,广泛用于模拟分析结构的损伤萌生和裂纹扩展^[16-19].

瓷砖-砂浆界面的脱黏破坏属于脆性破坏,其在静力荷载作用下的界面力学行为可用双线性内聚力模型描述,其牵引力(T)-相对位移(δ)本构关系如图1所示. 在该模型中,损伤萌生判定条件采用二次名义应力准则,脱黏失效判定条件选择幂定律断裂准则^[17]. 上述2个准则分别用于计算损伤萌生时的有效位移(δ_m^o)和断裂失效时的有效位移(δ_m^f),推导过程详见文献[18]. 结合当前加载过程中的最大有效位移($\delta_m^{\max}$),可计算得到静力加载所致的损伤程度(D_m),其计算式为:

$$D_m = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^o)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^o)} \quad (1)$$



Symbol description:

k_i represents the cohesive stiffness, Pa/m;

t_i^o represents the cohesive strength, Pa;

G_f^c represents the critical fracture energy, J/m²;

δ_i^o represents the relative displacement at damage initiation, m;

δ_f^f represents the relative displacement at complete failure, m;

$i=n, s, t$, corresponding to the normal and two local shear directions.

图1 双线性内聚力模型的牵引力-相对位移关系

Fig. 1 Traction-relative displacement behavior of bi-linear cohesive zone model

1.2 疲劳损伤演化模型

在疲劳荷载作用下,瓷砖-砂浆界面的本构关系须先耦合损伤演化模型,修正之后方可用于描述界面内聚力层的性能劣化过程. 本研究所采用的损伤演化模型如式(2)所示. 其涵盖了连续介质的2个损伤演化特征:损伤增量与以当前荷载水平为权重的变形增量有关;存在1个耐疲劳极限值,当应力水平低于该值时循环加载不发生损伤^[13]. 研究表明^[15],该模型可准确反映循环荷载下裂纹的扩展过程.

$$\begin{cases} \dot{D}_c = a \cdot \left(\frac{t_m^{\max}}{t_m^o} - b \right)^c \cdot \frac{t_m}{t_m^{\max o}} \cdot \dot{\delta}_m, & \dot{\delta}_m > 0 \\ D_c = 0, & \dot{\delta}_m \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

界面摩擦系数取为 0.35. 砂浆与混凝土间设置绑定约束,混凝土底部设置垂向位移约束. 复合试件的顶面和侧面施加如图 3(b)所示的温度循环荷载. 疲劳内聚力模型的材料参数如表 1 所示.

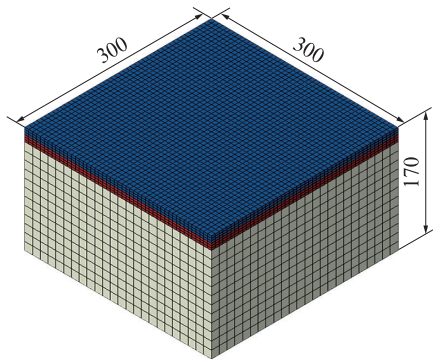


图 4 复合试件的疲劳内聚力模型
Fig. 4 Fatigue cohesive zone model of composite specimen(size:mm)

2.3 模型与试验结果对比

图 5 为界面损伤程度与温度循环次数的关系. 由图 5(a)可见,采用模型预测的界面损伤程度变化趋势与试验结果基本一致,不同温度循环次数的损伤程度最大相差 8.83%. 由于温度循环次数从几百到几千次不等,为提高计算效率,通常采用缩放系数(γ)对参数 a 进行线性放大,从而减少计算次数^[14]. 由图 5(b)可见,当 γ 取 1 或 10 时,界面损伤程度随温度循环

次数的变化曲线较为接近;采用线性插值法计算 γ 取 10 时不同温度循环次数下的界面损伤程度,发现模型与试验结果最大相差 9.80%. 上述两点均表明,缩放系数 γ 取为 10 较合理.

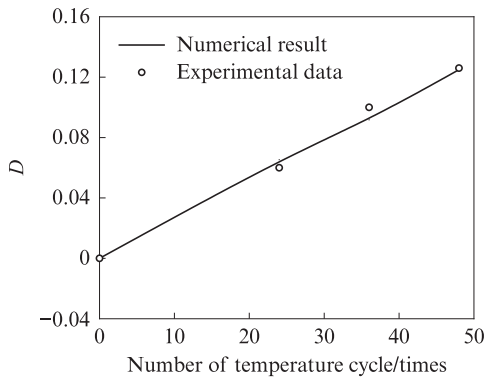
3 多块瓷砖-砂浆-混凝土疲劳内聚力模型

图 6 为多块瓷砖-砂浆-混凝土疲劳内聚力模型. 砂浆厚度考虑均匀和突变 2 种情况:均匀时,砂浆厚度为 10 mm;突变时,砂浆厚度较薄侧为 10 mm、较厚侧为 25 mm. 为减小边界条件的影响,将模型中心的瓷砖作为研究对象. 该瓷砖与砂浆之间嵌入内聚力层,用于模拟界面黏结;当黏结失效后,以“硬”接触和“罚”接触来模拟瓷砖与砂浆之间的相互作用. 其余瓷砖、砂浆和混凝土之间不考虑脱空,建立绑定约束. 混凝土周围设置对称约束,底部设置固结约束. 瓷砖、砂浆和混凝土均采用 8 节点热力耦合单元 C3D8T 模拟. 整个模型共 98 266 个节点、56 475 个单元.

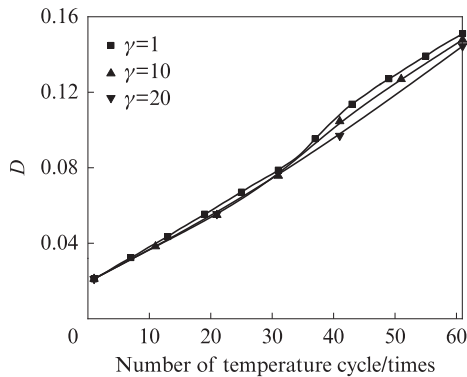
计算时,先施加重力荷载于整个模型上,再对瓷砖表面施加温度循环荷载(图 6(c)). 图 6(c)显示,温度循环包括升温 and 降温 2 种情况,以及 10、20、30 $^{\circ}\text{C}$ 这 3 个幅值. 计算后,分别提取节点损伤程度 (SDV5)、界面损伤程度、损伤面积和脱黏面积 4 个指

表 1 疲劳内聚力模型的材料参数
Table 1 Material parameters of fatigue cohesive zone model

Material	Elastic modulus/ GPa	Poisson's ratio	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Thermal expansion coefficient/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Specific heat capacity/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Cohesive zone parameter
Tile	68.9	0.200	2 400	6.5×10^{-6}	2.09	1 070	$k_n=2\times 10^{12}\text{ Pa/m}$, $t_n^0=5.4\times 10^5\text{ Pa}$, $G_n^C=10\text{ J/m}^2$, $k_{s,t}=5\times 10^7\text{ Pa/m}$, $t_{s,t}^0=2.5\times 10^4\text{ Pa}$, $G_{s,t}^C=35\text{ J/m}^2$, $a=290$, $b=0.18$, $c=1$
Mortar	21.6	0.212	1 950	1.2×10^{-5}	1.73	1 050	
Concrete	32.5	0.200	2 300	1.0×10^{-5}	2.94	960	



(a) Numerical result vs experimental data($\gamma=1$)



(b) Degree of interface damage vs number of temperature cycles($\gamma=1,10,20$)

图 5 界面损伤程度与温度循环次数的关系
Fig. 5 Relationship between degree of interface damage and number of temperature cycles

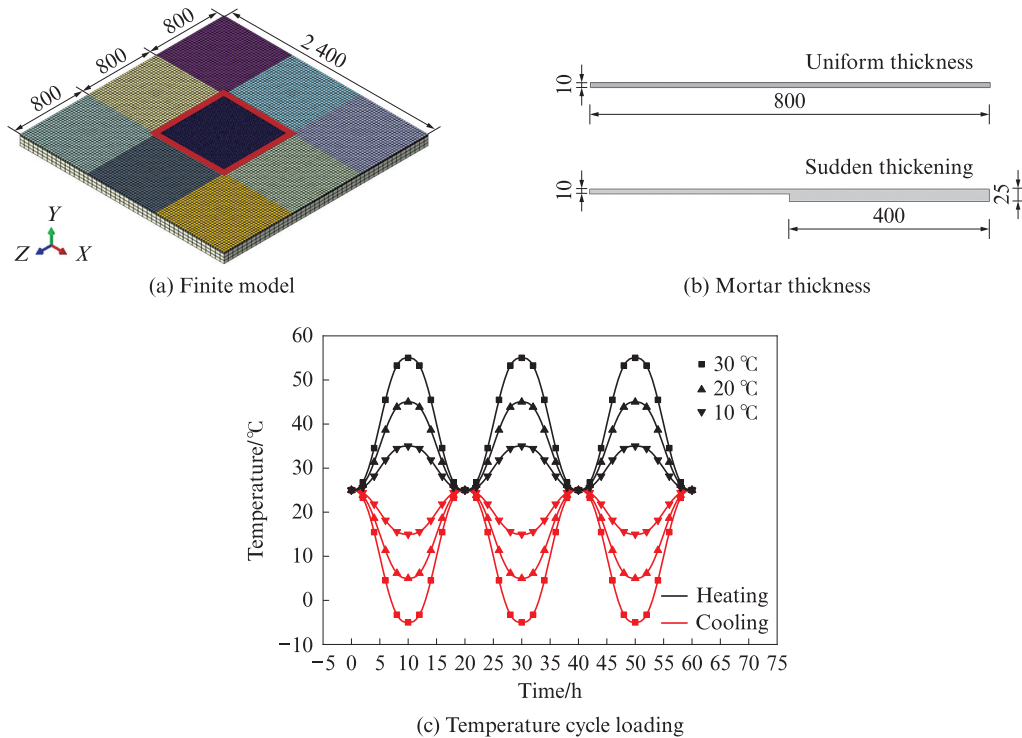


图6 多块瓷砖-砂浆-混凝土疲劳内聚力模型

Fig. 6 Fatigue cohesive zone model of multiple tiles-mortar-concrete (size:mm)

标分析瓷砖-砂浆界面损伤萌生和演化规律. 其中, $SDV5=D$; 界面损伤程度为界面上所有节点损伤程度 ($SDV5$) 的平均值; 损伤面积为界面中 $SDV5$ 大于 0 的区域; 脱黏面积为界面中 $SDV5$ 大于 1 的区域.

4 结果与讨论

4.1 温度变化幅值

图 7 为温度变化幅值对瓷砖和砂浆平均温度及最大温度梯度的影响. 由图 7(a) 可见: 瓷砖和砂浆的平均温度随时间的变化趋势几乎一致; 温度变化幅值越高, 二者的平均温度越高, 砂浆的温度变化略微

滞后于瓷砖. 由于砂浆的热膨胀系数 ($1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 大于瓷砖的热膨胀系数 ($6.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 因此在相同温度变化幅值条件下, 砂浆的膨胀和收缩变形明显大于瓷砖; 且温度变化幅值越高, 二者的相对变形越显著. 因此, 尽管砂浆温度变化的滞后会轻微减小砂浆的变形, 缩小与瓷砖变形的差距, 但是瓷砖与砂浆的相对变形依然随温度变化幅值的增加而不断增大. 由图 7(b) 可见: 砂浆的最大温度梯度较大, 且其热膨胀系数较大, 导致砂浆的上拱变形和翘曲变形大于瓷砖; 随着温度变化幅值的增加, 瓷砖和砂浆的最大温度梯度均呈线性变化, 砂浆的最大温度梯度变化斜率略大于瓷砖, 即瓷砖和砂浆的相对

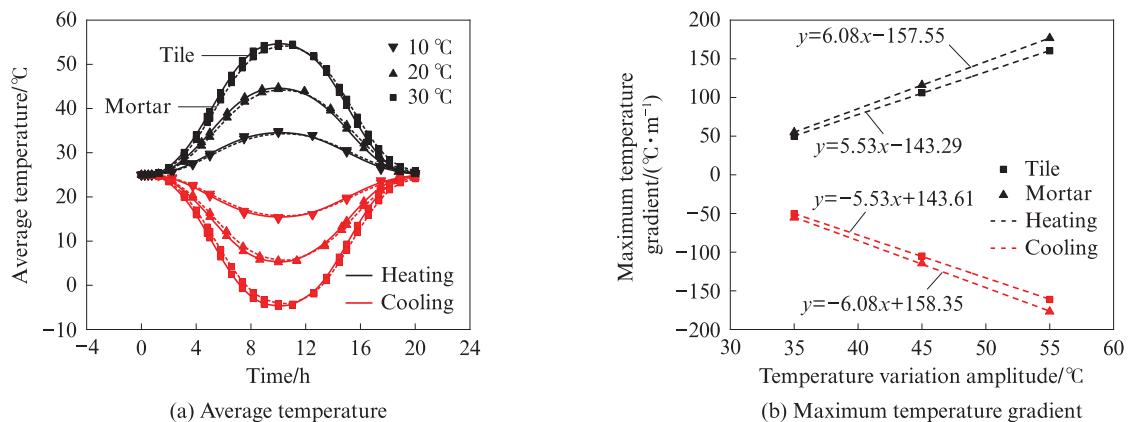


图7 温度变化幅值对瓷砖和砂浆平均温度及最大温度梯度的影响

Fig. 7 Effect of temperature variation amplitudes on average temperatures and maximum temperature gradients of tile and mortar

上拱变形(升温)和翘曲变形(降温)均随温度变化幅值的提高而增大. 砂浆与瓷砖的相对膨胀、收缩变形, 以及相对上拱、翘曲变形的增大均会加速界面损伤的萌生和发展.

图8为温度变化幅值对瓷砖-砂浆界面损伤的影响. 由图8可见: 即使升温幅值高达30℃, 瓷砖-砂浆界面依然未出现损伤(图8(a)); 当降温幅值为10℃时, 仅在瓷砖边缘出现界面损伤, 但尚未脱黏(图8(b)); 当降温幅值增至20、30℃时, 界面损伤加剧, 直至出现脱黏(图8(c)、(d)). 这表明降温对界面损伤

的影响远大于升温. 提取不同降温幅值下的界面损伤程度、损伤面积和脱黏面积, 来研究降温幅值对界面损伤指标的影响, 结果如图9所示. 由图9可见: 当降温幅值从10℃增至30℃时, 界面损伤程度从0.007增至0.139, 损伤面积从0.041 m²增至0.151 m², 脱黏面积从0 m²增至0.042 m². 这表明降温幅值的增加主要增大了界面损伤程度和损伤面积, 对脱黏面积的影响则较小. 也就是说, 增加降温幅值主要加剧了界面损伤的发展, 当界面损伤积累到一定程度后才开始脱黏.

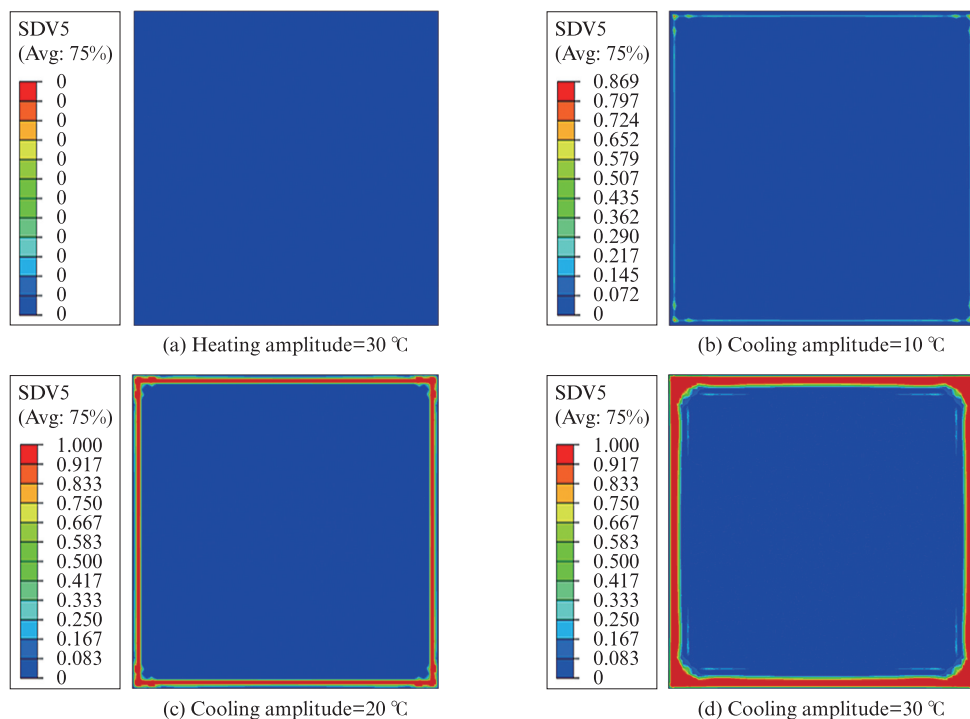


图8 温度变化幅值对瓷砖-砂浆界面损伤的影响

Fig. 8 Effect of temperature variation amplitudes on tile-mortar interface damage (1 000 cycles)

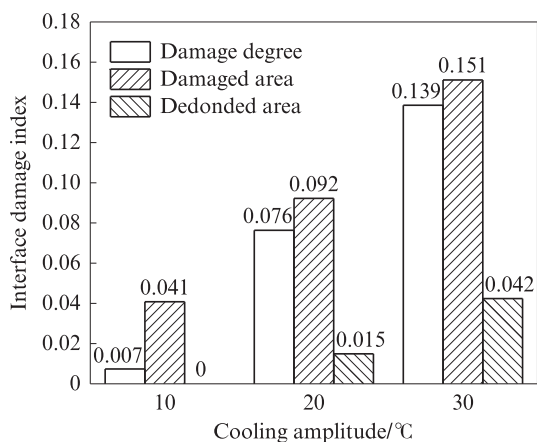


图9 降温幅值对界面损伤指标的影响

Fig. 9 Effect of cooling amplitudes on interface damage indices

4.2 温度作用次数

受限于篇幅, 本文仅选取降温30℃这一最不利

工况来研究温度作用次数对界面损伤的影响. 图10为降温30℃时瓷砖-砂浆界面沿横向中心路径的变形. 由图10可见: 二者横向位移差值自中心向边缘处逐渐增大, 最大为0.074 00 mm; 而垂向位移仅在边缘处略微不同, 相差仅0.000 37 mm, 其余位置基本一致. 这表明降温过程中, 相对收缩(横向位移差)导致的剪切变形对瓷砖-砂浆的界面损伤影响更大, 相对翘曲(垂向位移差)引起的拉伸变形的影响较小, 即界面损伤主要源于降温过程中瓷砖-砂浆界面的剪切变形.

图11为降温30℃时温度作用次数对瓷砖-砂浆界面损伤分布和损伤指标的影响. 由图11(a)~(c)可见: 当温度作用次数从1次增加到1 000次时, 瓷砖-砂浆的界面损伤先在边缘处萌生, 而后逐渐向中心扩展. 由图11(d)可见, 瓷砖-砂浆界

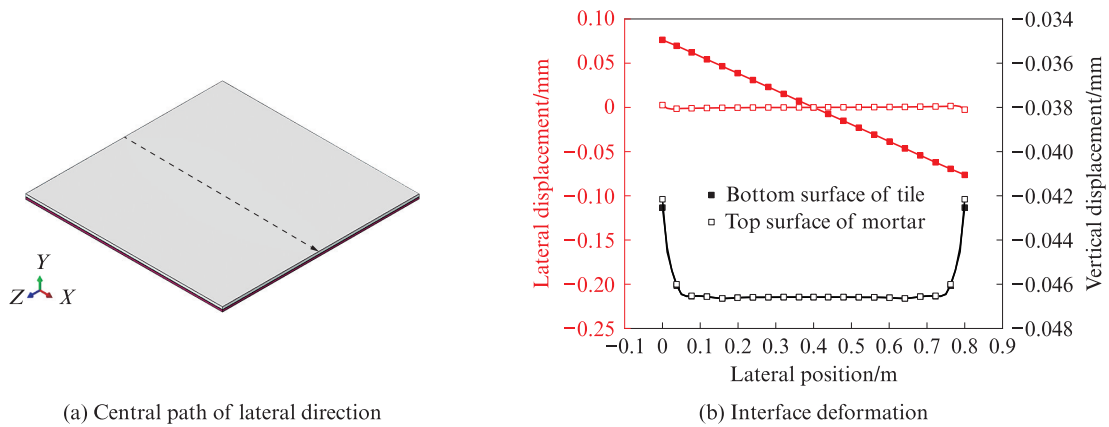


图 10 降温 30 °C 时瓷砖-砂浆界面沿横向中心路径的变形

Fig. 10 Deformation of tile-mortar interface along central path of lateral direction when cooling 30 °C

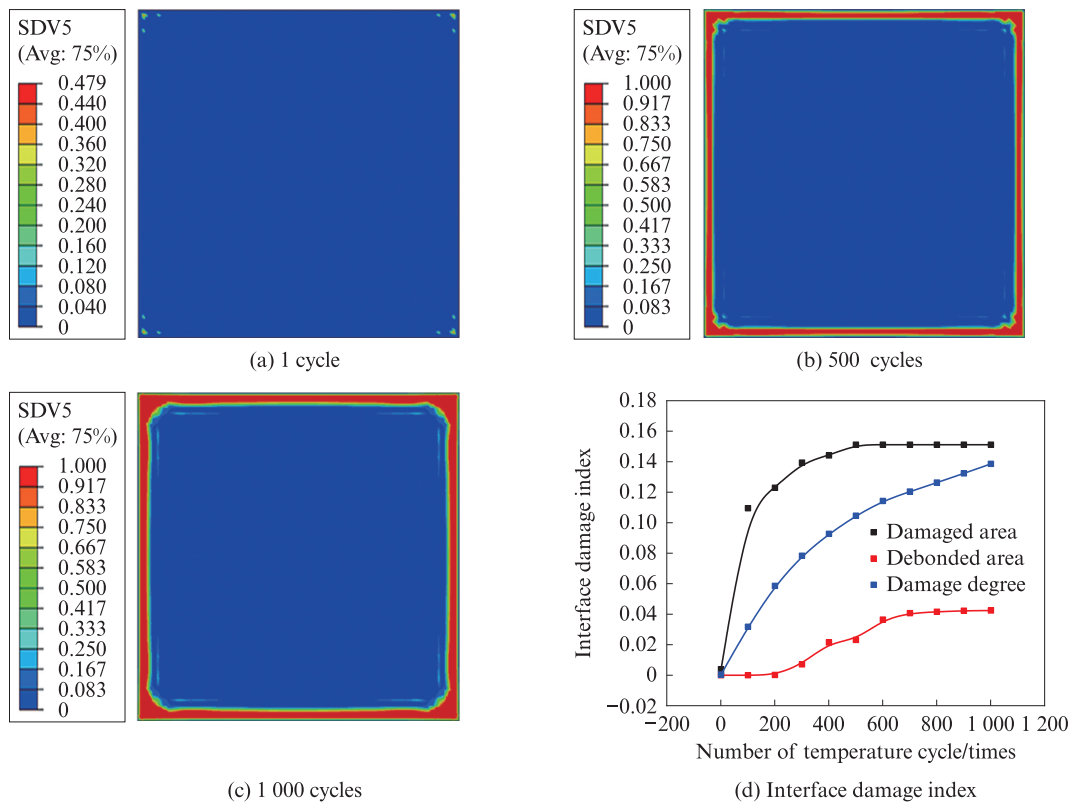


图 11 降温 30 °C 时温度作用次数对瓷砖-砂浆界面损伤分布和损伤指标的影响

Fig. 11 Effect of number of temperature cycles on tile-mortar interface damage distribution and damage indices when cooling 30 °C

面损伤程度随着温度作用次数的增加而增大,但增速逐渐减小;损伤面积增加、稳定、再增加后继续保持不变;脱黏面积先保持为 0,之后不断增加,最终保持稳定.图 10 显示:瓷砖边缘处界面的相对变形较大,界面损伤易在边缘处萌生,并逐渐向瓷砖中心扩展;而瓷砖中心处界面的相对变形较小,不利于损伤的累积和进一步扩展,从而导致界面损伤程度的增速下降.当温度变化幅值较高时,界面损伤除了在原节点处累积之外,还会向瓷砖中心扩展,进而导致损伤面积在稳定之后进一步扩大.界面在损伤累积到一定程度后(即 $SDV5 > 1$)

才会出现脱黏,因此脱黏面积先稳定为 0,增加后又保持稳定.

4.3 砂浆厚度突变

提取沿横向边缘路径的界面相对变形,来分析降温 30 °C 时砂浆厚度突变对瓷砖-砂浆界面相对变形的影响,结果如图 12 所示.由图 12 可见:砂浆厚度突变对相对横向位移的影响不大,但是显著增大了端部的相对垂向位移,且砂浆较厚侧的增幅(0.94×10^{-3} mm)明显大于较薄侧的增幅(0.43×10^{-3} mm.)这主要是因为砂浆厚度增加导致砂浆层的温度梯度增大,从而加剧了翘曲变形.

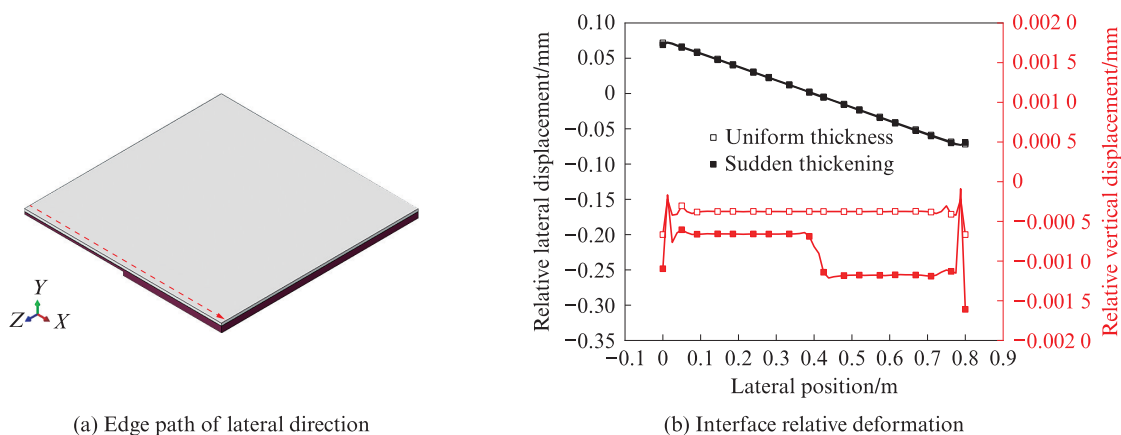


图12 降温30℃时砂浆厚度突变对瓷砖-砂浆界面相对变形的影响
Fig. 12 Effect of sudden thickening of mortar on relative deformation of tile-mortar interface when cooling 30℃

图13为降温30℃时砂浆厚度突变对界面损伤分布和损伤指标的影响.对比11(c)和图13(a)可知,砂浆厚度突变明显改变了界面损伤分布,较厚侧的损伤面积和脱黏面积均大于较薄侧.由图13(b)~(d)可见:砂浆厚度突变显著增大了界面损伤程度及其增长速率,进而加速界面损伤面积和脱黏面积的

增长.与砂浆厚度均匀时相比,砂浆厚度突变时的界面损伤程度、损伤面积和脱黏面积分别增加了41.01%、17.33%和104.76%,即砂浆厚度突变对脱黏面积的影响最大,对损伤面积的影响最小.这是因为砂浆厚度突变主要增大了砂浆端部的相对垂向变形,从而加速该处损伤的累积直至脱黏.

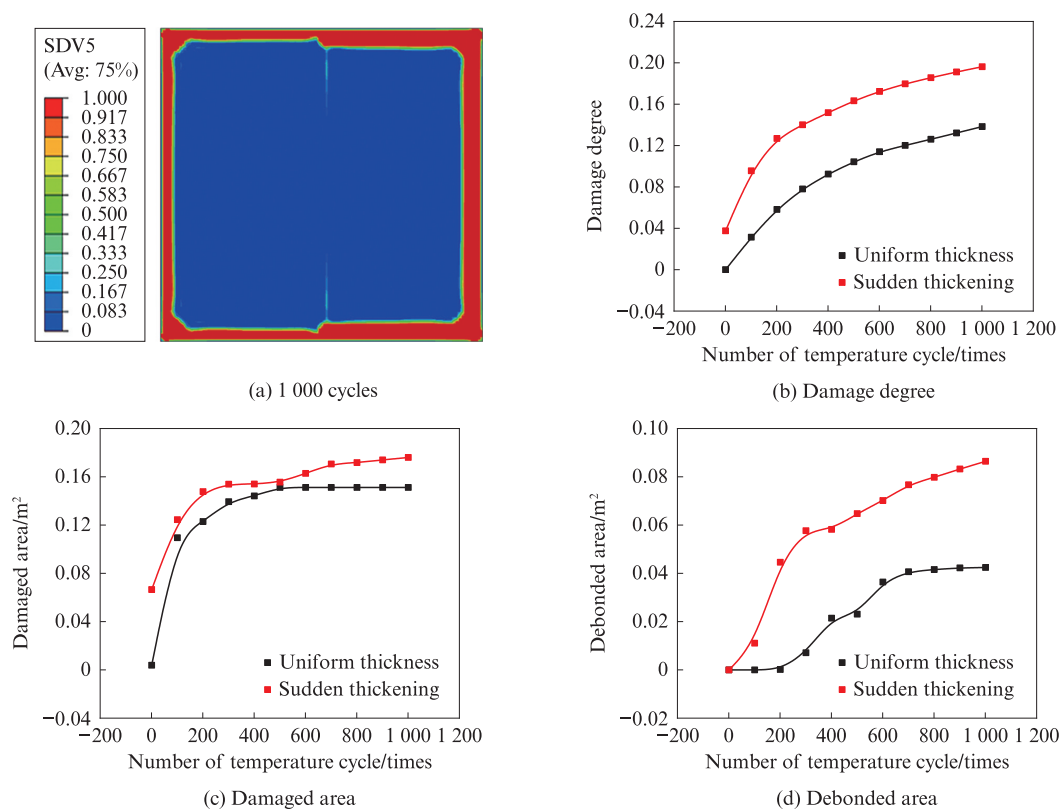


图13 降温30℃时砂浆厚度突变对界面损伤分布和损伤指标的影响
Fig. 13 Effect of sudden thickening of mortar on the interface damage distribution and damage indices when cooling 30℃

5 结论

(1)瓷砖-砂浆复合试件的界面损伤模拟结果与试验结果最大相差8.83%,表明本研究所建立的疲

劳内聚力模型可较准确地模拟瓷砖-砂浆界面的温度疲劳特性.

(2)降温过程中产生的界面损伤远高于升温过程.在降温过程中,瓷砖与砂浆收缩引起的横向变形

相差较大,而翘曲导致的垂向变形基本一致,表明降温引起的瓷砖-砂浆界面损伤主要源于剪切变形。

(3)温度变化幅值的增加导致瓷砖和砂浆的平均温度,以及二者的最大温度梯度差距不断增大,从而加剧瓷砖与砂浆的相对变形,加速了界面损伤的萌生和扩展。

(4)随着温度作用次数的增加,界面损伤从瓷砖边缘逐渐向中心扩展,界面损伤程度不断增大,但损伤增长速率逐渐降低。

(5)砂浆厚度突变增大砂浆的翘曲变形,进而加速界面损伤萌生和扩展。当砂浆厚度由10 mm增加到25 mm时,降温循环1 000次后的界面损伤程度、损伤面积和脱黏面积分别增加了41.01%、17.33%和104.76%。

致谢:本研究工作得到北京交通大学高性能计算校级平台支持,在此表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 李永鑫,朱海霞,杨福成,等.玻化砖-瓷砖胶粘剂界面应力模型及玻化砖空鼓脱落机理[C]//第8届中国国际预拌砂浆生产应用技术研讨会.北京:中国硅酸盐学会,2018:28-37.
LI Yongxin, ZHU Haixia, YANG Fucheng, et al. Interface stress model of porcelain tile-tile adhesive and mechanism of tiling hollowing and tiling failure[C]//The 8th China International Seminar on Production & Application Techniques of Ready-Mixed Mortar. Beijing: The Chinese Ceramic Society, 2018: 28-37. (in Chinese)
- [2] 白战英,刘可春.瓷砖“空鼓脱落”的原因及解决方法[J].陶瓷,2007(4):45-46,49.
BAI Zhanying, LIU Kechun. Reasons and solutions of tile delamination and detachment[J]. Ceramics, 2007(4): 45-46, 49. (in Chinese)
- [3] 管学茂,罗树琼,杨雷,等.聚合物干粉对加气混凝土用抹灰砂浆性能的影响[J].建筑材料学报,2007,10(3):302-306.
GUAN Xuemao, LUO Shuqiong, YANG Lei, et al. Influence of polymer powders on the performance of plaster for aerated concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(3): 302-306. (in Chinese)
- [4] HO D C W, LO S M, YIU C Y. The causes of external wall tiling defects in Hong Kong[J]. Structural Survey, 2005, 23(5): 386-402.
- [5] RUMBAYAN R, MAHABOONPACHAI T, MATSUMOTO T. Thermographic measurement and thermal stress analysis at the interface of external wall tile structure[J]. Journal of Applied Mechanics, 2006, 9: 1069-1076.
- [6] ZURBRIGGEN R, HERWEGH M. Daily and seasonal thermal stresses in tilings: A field survey combined with numeric modeling[J]. Materials and Structures, 2016, 49(5): 1917-1933.
- [7] FELDFOGEL S, RABINOVITCH O. Two dimensional debonding failure in adhesively bonded tiles[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 148: 94-109.
- [8] BARENBLATT G I. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses: Axially-symmetric cracks[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959, 23(3): 622-636.
- [9] BARENBLATT G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [10] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [11] NGUYEN O, REPETTO E A, RADOVITZKY M, et al. A cohesive model of fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture, 2001, 110(4): 351-369.
- [12] MAITI S, GEUBELLE P H. A cohesive model for fatigue failure of polymers[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(5): 691-708.
- [13] ROE K L, SIEGMUND T. An irreversible cohesive zone model for interface fatigue crack growth simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(2): 209-232.
- [14] URAL A, KRISHNAN V R, PAPOULIA K D. A cohesive zone model for fatigue crack growth allowing for crack retardation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(11/12): 2453-2462.
- [15] JIN G L, HUANG X M, ZHANG S L, et al. Numerical study of fatigue damage of asphalt concrete using cohesive zone model[J]. Journal of Southeast University, 2013, 29(4): 431-435.
- [16] 杜健欢,任东亚,艾长发,等.沥青混合料低温裂纹扩展演化行为分析[J].建筑材料学报,2022,25(3):300-306.
DU Jianhuan, REN Dongya, AI Changfa, et al. Low temperature crack propagation and evolution of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3): 300-306. (in Chinese)
- [17] 钟阳龙,高亮,王璞,等.温度荷载下CRTS II型轨道板与CA砂浆界面剪切破坏机理[J].工程力学,2018,35(2):230-238.
ZHONG Yanglong, GAO Liang, WANG Pu, et al. Mechanism of interfacial shear failure between CRTS II slab and CA mortar under temperature loading[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 230-238. (in Chinese)
- [18] JIANG W G, HALLETT S R, GREEN B G, et al. A concise interface constitutive law for analysis of delamination and splitting in composite materials and its application to scaled notched tensile specimens[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(9): 1982-1995.
- [19] 郭鹏成,姚波,李木子.环氧树脂混合料断裂特性与数值模拟[J].建筑材料学报,2020,23(5):1160-1166,1176.
GUO Pengcheng, YAO Bo, LI Muzi. Fracture characteristics and numerical simulation of epoxy resin mixture[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1160-1166, 1176. (in Chinese)
- [20] PENG H, ZHANG Y R, WANG J, et al. Interfacial bonding strength between cement asphalt mortar and concrete in slab track[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7): 04019107.