

无筋预应力砂浆的抗折强度与预应力验证

梁翱飞, 王振地, 王 玲

(中国建筑材料科学研究总院有限公司, 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 基于钢化玻璃的原理, 提出了一种在不需要钢筋的条件下, 利用基层约束面层膨胀的方法在砂浆内建立预压应力的增强方法。研究以硫铝酸钙类膨胀剂为膨胀源, 系统探讨了基层和面层截面高度比(1.7~4.0)、面层膨胀剂掺量(2%~10%)以及界面粘结状态对砂浆抗折强度的影响规律, 采用切割法和实时应变监测, 对预应力的存在进行了验证。结果表明: 抗折强度随着截面高度比的增加而增大, 面层掺入 6% 膨胀剂, 且截面高度比为 4 时, 抗折强度达到了 11.24 MPa; 面层膨胀率增大, 无筋预应力砂浆的抗折强度增加, 面层掺入 10% 膨胀剂, 28 d 抗折强度增幅可达 45%; 采用非连续浇筑法, 界面经粗糙处理并使用界面剂的无筋预应力砂浆抗折强度可达到 12.33 MPa, 最大折压比接近 1:3, 界面粘结状态越好, 对无筋预应力砂浆抗折强度的提升效果越好; 对无筋预应力砂浆进行切割, 监测到了最大 1.68 MPa 应力的释放过程, 双重验证了砂浆中预应力的存在。研究提供了一种全新的砂浆增强和增韧方法, 为无筋预应力技术在薄壁结构、修复工程中的应用提供了理论依据。

关键词: 无筋预应力砂浆; 预应力; 抗折强度; 截面高度比; 膨胀剂; 界面粘结状态

中图分类号: TU 528.571 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3206-08

网络出版时间: 2025-09-28



预应力混凝土被认为是 20 世纪结构工程领域的重要创新之一, 为提升混凝土结构的强度与耐久性提供了高效可靠的技术方法。预应力混凝土的应用不仅优化了混凝土的受力性能, 还带来了诸多工程优势, 如减小构件截面、降低自重、提高抗裂性及抑制变形, 在高层建筑、大跨度结构、重载工程中广泛应用, 为现代建筑与土木工程建设提供了重要技术支撑^[1-2]。预应力混凝土的设计目的是在混凝土内部引入预压应力, 以抵消部分外荷载产生的拉应力, 提高结构承载能力。预应力混凝土可分为传统预应力混凝土(TPC)与化学预应力混凝土(CPC), 两者均依赖钢筋的约束来实现预应力^[3-4]。TPC 从工艺上又可分为先张法和后张法^[5], 无论先张法还是后张法, TPC 均是通过在预应力筋施加拉力, 由此产生的预压应力来减小或抵消外荷载所引起的拉应力, 即借助于混凝土较高的抗压强度来弥补其抗拉强度的不足, 达到迟滞混凝土开裂的目的。而 CPC 则利用自应力水泥, 依靠钢筋与混凝土间良

好的粘结与约束, 混凝土体积膨胀激发钢筋拉应力, 从而在混凝土内部形成预压应力^[6-10]。可以看出, 无论是 TPC 还是 CPC 都离不开钢筋的约束作用, 在传统认知中没有钢筋是无法制备出预应力混凝土的。

钢化玻璃也是一类预应力增强的材料。制备钢化玻璃时, 将玻璃加热至接近软化温度后迅速冷却, 在急冷时表面首先冷却硬化, 而玻璃基体还来不及完全冷却, 硬化的表层阻止了玻璃基体的体积收缩, 最终在玻璃表面形成压应力^[11-14]。钢化玻璃服役时, 外力首先要抵消玻璃表层压应力, 其次才能破坏玻璃基体, 相应地, 玻璃的承载能力提高了。钢化玻璃目前已广泛应用于汽车、高铁、建筑、消费电子和家具等多个领域。相比于 TPC 和 CPC, 钢化玻璃没有钢筋的约束, 仅依靠表层和基层的变形差异就实现了预应力, 具有简单方便的特点。

基于钢化玻璃的原理, 本团队发明了无需钢筋即可实现预应力的无筋预应力混凝土^[15]。通过基层

收稿日期: 2025-03-31。 修订日期: 2025-04-15。

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFB3708701)。

第一作者: 梁翱飞(1997), 男, 硕士研究生。

通信作者: 王振地(1984), 男, 博士, 教授级高级工程师。

Received date: 2025-03-31. Revised date: 2025-04-15.

First author: LIANG Aofei (1997-), male, Master candidate.

E-mail: laf1060699513@163.com

Correspondent author: WANG Zhendi (1984-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wzhenidi@163.com

收缩限制面层膨胀，使面层内形成预压应力，从而在无钢筋的情况下引入预应力，显著提升混凝土的力学性能。相比混凝土，砂浆具有更精细的材料组成，膨胀与约束也更容易控制，为探索无筋预应力方法对水泥基材料的提升效果并验证预应力的存在，测试了无筋预应力砂浆(UPM)的抗折强度，探讨了影响抗折强度的因素，并采用锯切的方法，监测了切割过程释放的应力，多重验证了预应力的存在。

1 实验

1.1 原材料

水泥采用 P·I 42.5 硅酸盐水泥以消除矿物掺合料对试验结果的影响，其化学成分及矿物组成结果

见表 1，物理性能见表 2。膨胀剂为硫铝酸钙(CSA)类膨胀剂，主要化学组成和物理性能分别见表 3 和表 4。砂为细度模数为 2.37 的天然河砂，含泥量小于 1%。使用减水率为 23%的聚羧酸系高性能减水剂来调节砂浆的流动性。

1.2 无筋预应力砂浆的制备

砂浆的配合比如表 5 所示，成型尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的独立砂浆试件 M0、S2、S6 和 S10 作为基准试件，其中 M0 未掺入 CSA，整体是收缩的。S2、S6 和 S10 通过调整 CSA 的掺量(2%，6%和 10%)来实现不同的膨胀效果。基于钢化玻璃原理，采用 M0 为基层，S2、S6 和 S10 作为面层，按照类似叠合梁的组合形式，将基层和面层组合在一起形成尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的 UPM。

表 1 P·I 42.5 硅酸盐水泥化学组成及熟料矿物组成

Table 1 Chemical composition of P·I 42.5 cement and mineral composition of its clinker											w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq	f-CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20.94	4.31	3.28	63.46	2.76	2.23	0.56	0.80	59.83	16.69	6.41	10.49

w is mass fraction

表 2 P·I 42.5 硅酸盐水泥物理性能

Table 2 Physical properties of P·I 42.5 cement									
Fineness (80 μm sieve)/%	Density/ (g·cm ⁻³)	Specific Surface/ (m ² ·kg ⁻¹)	Water for standard consistency/%	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
				Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	3.16	358	26.60	142	206	5.4	8.3	29.7	51.0

表 3 膨胀剂的主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of expansion agent							w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss	
1.50	15.61	1.37	50.60	2.08	27.50	1.19	

表 4 膨胀剂的物理性能

Table 4 Physical properties of expansion agent						
Fineness		Setting time/ min		Restrained expansion rate/%		Compressive strength/MPa
Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)		1.18 mm Sieve residue/%		In water (7 d)		7 d
303		0		157 225		0.057 25.9

表 5 砂浆的配合比和物理性能

Sample No.	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					Fluidity/ mm	Compressive strength/ MPa
	Cement	CSA	Sand	Water	Superplasticizer		
M0	605.9	0.0	1298.2	242.4	3.5	210	45.2
S2	593.8	12.1	1298.2	242.4	3.5	215	43.7
S6	569.5	36.4	1298.2	242.4	3.5	225	42.8
S10	545.3	60.6	1298.2	242.4	3.5	235	37.4

1.2.1 不同截面高度比的 UPM 试件制备 32 mm、30 mm、25 mm 3 种截面高度的基层 M0 浇筑 3 h 后，

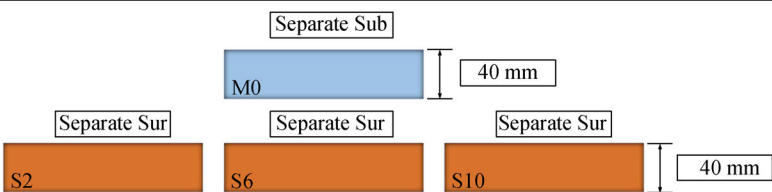
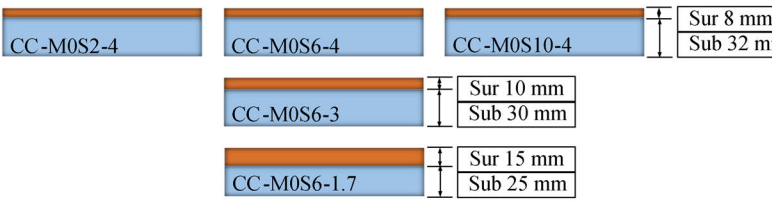
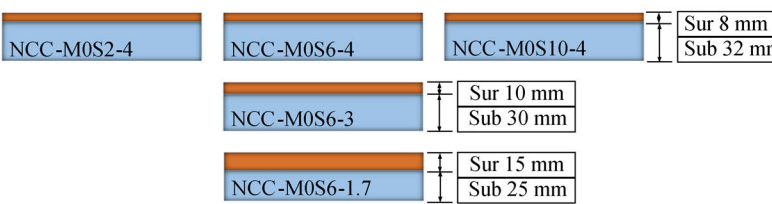
用硬毛刷对基层表面进行拉毛处理，24 h 后，在拉毛后的表面上均匀涂抹双组分环氧树脂乳液界面

剂,随即浇筑 8、10 mm 和 15 mm 截面高度的面层,成型截面为 40 mm×40 mm,长度为 160 mm 的砂浆试件,最终形成基层与面层截面高度比为 4(32 mm/8 mm)、3(30 mm/10 mm)和 1.7(25 mm/15 mm)的 UPM 试件。

1.2.2 不同膨胀率的 UPM 试件制备 采用截面高度比为 4 的试件尺寸,先浇筑截面高度为 32 mm 的基层 M0,按照前述方法处理界面,然后浇筑截面高度为 8 mm 的面层 S2、S6 和 S10,通过 S2、S6

和 S10 中 CSA 的掺量(2%, 6%和 10%)来实现不同的面层膨胀率。

1.2.3 不同界面结合状态的 UPM 试件制备 采用连续浇筑方法(记为 CC)成型,在完成 32 mm、30 mm、25 mm3 种厚度的基层浇筑后,立即进行厚度为 8 mm、10 mm 和 15 mm 的面层浇筑,不使用界面剂,基层和面层的浇筑没有时间间隔。同时与采用表面拉毛和使用界面剂的非连续浇筑成型的试件(记为 NCC)进行对比。

Mortar type	Specimens	Remarks
Reference		RE
Consecutive casting		CC-UPM
Nonconsecutive casting		NCC-UPM

* Sub and Sur referenceto substrate and surface-layer respectively.

图 1 不同试件的制备方式及说明

Fig. 1 Preparation method and description of different specimens

如图 1 所示,考虑了面层和基层粘结状态、面层和基层厚度比例(截面高度比)以及面层膨胀率对预应力增强效果的影响,共制备了 10 组 UPM 试件,每组 3 个试件。以编号 CC-M0S2-4 为例,CC 代表连续浇筑无筋预应力砂浆,M0 表示基层未掺入 CSA,S2 表示面层掺入 2%CSA,基层与面层的截面高度比为 32 mm/8 mm=4。成型后的 UPM 尺寸仍为 40 mm×40 mm×160 mm。最终的试件在成型 24 h 后脱模,并移入标准养护室进一步养护至规定龄期。

1.3 抗折强度试验与切割法验证预应力

在第 7 d 及 28 d 龄期,采用三点弯曲法对基准试

件和 UPM 试件施加弯曲荷载,测试跨距为 100 mm,加载速率为 1 mm/min。如果有预压应力存在于面层时,与钢化玻璃一样,外部弯曲荷载需要先抵消预压应力,然后才导致试件的开裂破坏,也即是抗折强度得到了加强,且抗折强度大小应高于独立的基层 M0 以及对应的独立面层,当上述结果出现时,则证明了有预压应力存在。为进一步验证预应力,基于预应力混凝土中残余应力的测试方法^[16],切割试件会释放预应力,当监测到被切割试件应变产生变化时,也能直接证明预应力的存在。在 UPM 试件表面粘贴应变片,应变片敏感栅尺寸为 50 mm×3 mm,标准阻值为(120±1) Ω,灵敏度为(2.0±1.0)%。从试

件中心截面 2 cm 处, 沿试件的长度方向切割。在切割过程中, 采用分辨率为 0.01×10^{-6} 、每秒采样 5 次的应变测试分析系统, 实时监测试件的应变变化。

2 结果与讨论

2.1 截面高度比对抗折强度的影响

图 2 是 NCC-UPM 和基准试件在第 28 d 的抗折强度, 独立的基准试件 M0 和 S6 抗折强度分别达到了 8.93 MPa 和 8.77 MPa, 可见掺入一定量的 CSA 有可能对砂浆抗折强度不利, 这种现象在其他研究中已被证实^[17-20]。可很明显的看出, 所有 NCC-UPM 的抗折强度均高于 M0 和 S6, 当截面高度比为 1.7 时, 抗折强度为 10.44 MPa, 当截面高度比增大到 4 时, 抗折强度达到了 11.24 MPa, 抗折强度随着截面高度比的增加而增大, 这表明面层越薄对抗折强度的提升效果越好。值得注意的是, NCC-M0S6-4 试件的抗折强度与独立的基层 M0 相比提高了 2.31 MPa; 与独立的面层 S6 相比提高了 2.47 MPa。这意味着收缩基层和膨胀面层的组合显著提高了砂浆的抗折强度。如 1.3 节预测的一样, 基层收缩限制了面层的膨胀, 在面层中形成了类似于钢化玻璃原理的预压应力, 因此收缩基层和膨胀面层形成的 UPM 抗折强度比任一独立基准试件的抗折强度都要高。考虑到基准试件最大抗压强度为 45.2 MPa, 对于 NCC-M0S6-4 试件, 在未掺加纤维和增韧材料的情况下, 砂浆的折压比达到了 1:4, 通常砂浆的折压比为 1:8~1:10 左右, 1:4 的折压比证明 UPM 试件不仅抗折强度提高了, 韧性也得到了增强。

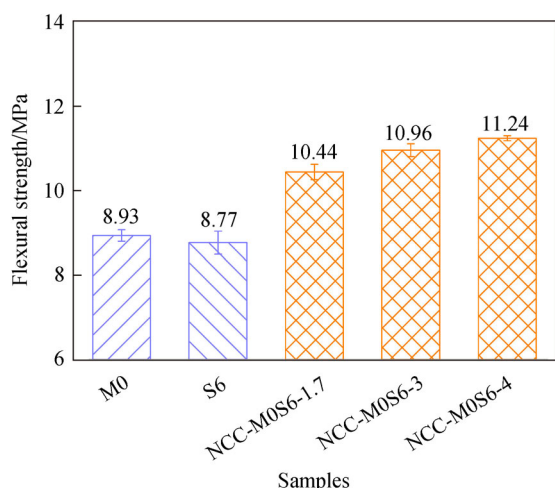


图 2 NCC-UPM 和基准试件 28 d 的抗折强度

Fig. 2 Flexural strength of NCC-UPM and RE at 28 days

2.2 膨胀率对抗折强度的影响

图 3a 是独立基准试件抗折强度随膨胀剂掺量

变化的发展规律, 不掺膨胀剂时, 试件 7 d 和 28 d 的最高强度分别为 7.10 MPa 和 8.93 MPa, 随着膨胀剂掺量的逐渐增加, 抗折强度稳步下降。其中, S10 的 7 d 抗折强度为 5.88 MPa, 相较于 M0 降低了 1.22 MPa, 减少了 17%。有文献报道, 在没有约束的条件下掺入 CSA 会降低砂浆强度, 这主要是由于掺入的膨胀剂使砂浆过度膨胀产生微裂纹导致的^[17-20]。

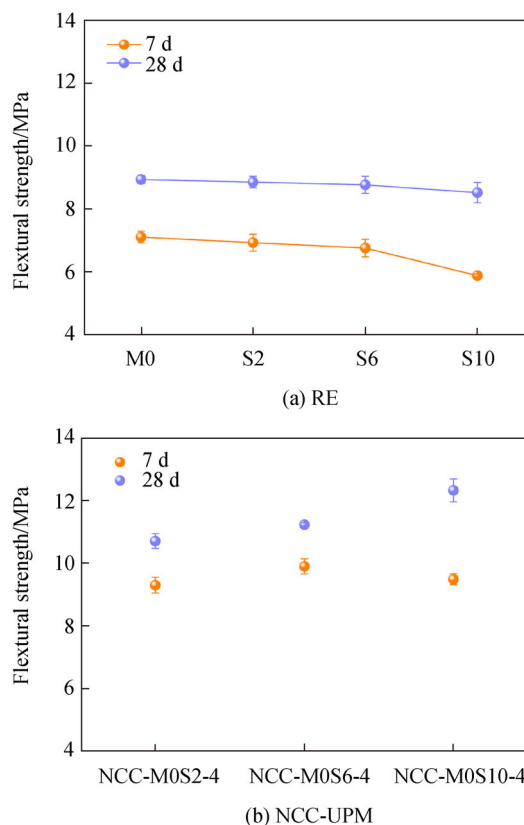


图 3 膨胀剂掺量对试件抗折强度的影响

Fig. 3 Influence of expansion agent dosage on the flexural strength of the specimens

图 3b 是 NCC-UPM 的抗折强度随龄期的发展规律, 在掺有水泥质量 2% 膨胀剂的条件下, NCC-M0S2-4 的 7 d 抗折强度达到了 9.32 MPa, 比独立的基准试件 M0 和 S2 分别高了 2.22 MPa 和 2.39 MPa, 28 d 抗折强度比独立的基准试件 M0 和 S2 分别高了 1.79 MPa 和 1.87 MPa。另外, 从 NCC-M0S10-4 的 7 d 抗折强度可以发现, 当砂浆没有足够强度时, 增大膨胀剂的掺量反而会破坏砂浆微结构, 导致 UPM 强度下降, 这表明不能无限增大膨胀剂掺量以实现 UPM 抗折强度的增大, 实际应用中还应考虑砂浆的承受能力。当继续水化至 28 d 龄期时, NCC-M0S10-4 的抗折强度比独立的基准试件 M0 和 S10 分别高了 3.40 MPa 和 3.81 MPa。

图 4 统计了 NCC-UPM 的抗折强度增长率,

NCC-M0S2-4 的 7 d 抗折强度分别比独立的基准试件 M0 和 S2 增长了 31% 和 35%，28 d 抗折强度分别比独立的基准试件 M0 和 S2 增长了 20% 和 21%。其中，NCC-M0S10-4 的抗折强度提升最显著。按照

钢化玻璃原理，基层收缩限制面层的膨胀，使得面层产生预压应力，提高了承载力，通过图 3 和图 4 的结果证明了 UPM 的面层产生了预压应力，增强了试件的抗折强度。

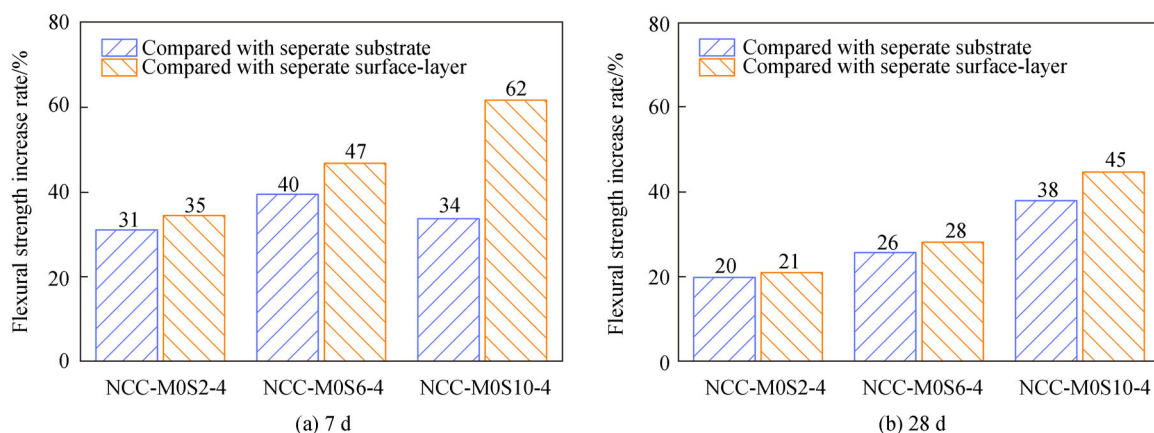


图 4 NCC-UPM 相较于基准试件的抗折强度提升比例

Fig. 4 Flexural strength increase rate of NCC-UPM compared with that of RE

2.3 界面粘结状态对抗折强度的影响

图 5 是界面粘结状态对 UPM 28 d 抗折强度的影响，CC-M0S2-4 和 NCC-M0S2-4 的抗折强度分别达到了 9.22 MPa 和 10.72 MPa。同样，对于 M0S6-1.7、M0S6-3、M0S6-4 和 M0S10-4 试件，非连续浇筑法抗折强度的提升率分别为 11.4%，11.7%，18.1% 和 17.3%。与连续浇筑法相比，非连续浇筑法制备的 UPM 获得了更高的抗折强度，其中 M0S10 试件的抗折强度达到 12.33 MPa，最大折压比接近 1:3。总体上，NCC-UPM 相较于 CC-UPM 抗折强度增幅范围为 11.4%~18.1%。2 种成型方法的一个关键区别在于基层与面层之间的界面粘结状态。对于连续浇筑的 UPM 而言，基层砂浆处于流动态时，尽管面层砂浆浇筑后两者界面产生了融合。但随着龄期的增长，面层产生膨胀，基层则持续收缩，基层和面层的变形方向完全相反，在界面处产生了剪应力，界面是传递预应力的媒介，剪应力的存在使得应力可能在界面处损失，因此面层的预压应力下降。当采用非连续浇筑时，UPM 界面拉毛处理和界面剂的使用，一方面增大了面层和基层的摩擦和机械咬合作用力，另一方面提高了界面滑移的粘滞阻力，减小了界面滑移和应力损失。因此，实际应用时，应提高界面的结合强度，减小界面处的应力损失，才能高效发挥膨胀剂的作用。

2.4 预应力测量与验证

图 6 是 UPM 试件在切割过程中的应变变化，

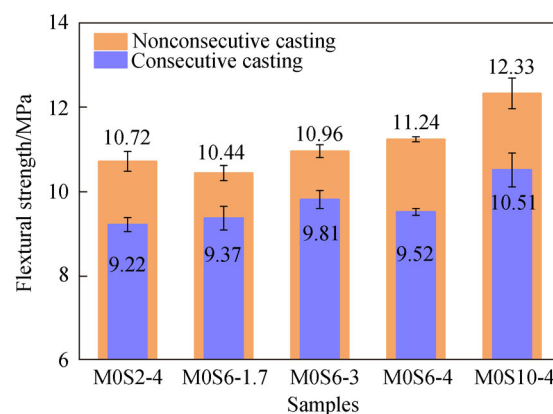


图 5 NCC-UPM 和 CC-UPM 28 d 抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of NCC-UPM and CC-UPM at 28 d

在切割的初始阶段，不同 UPM 试件的应变在 0 附近小幅度波动，随着切割的进行，应变在 200~300 s 的时间内出现急剧下降。基于切割法测量预应力混凝土中残余应力的原理，应变的下降是由于释放了基层的受拉状态，基层回缩导致的。从受力角度分析，粘贴有应变片的收缩基层在切割后与膨胀面层相互分离，从而失去了面层的约束作用。此时，拉应力得以释放，失去约束的基层发生收缩变形，进而最终产生负的应变值。根据力的相互作用关系，释放的拉应力也即是所产生预压应力的一部分，图 6 中的试验结果与理论分析一致，证明了砂浆中基层存在拉应力。相应地，UPM 的面层内则存在预压应力。

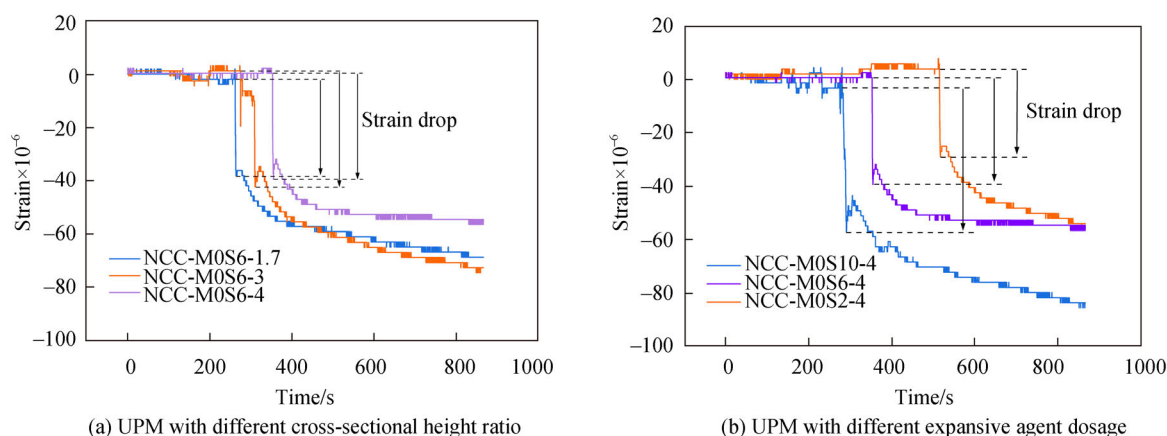


图 6 UPM 在切割过程中的应变变化

Fig. 6 Strain evolution of UPM during the cutting process

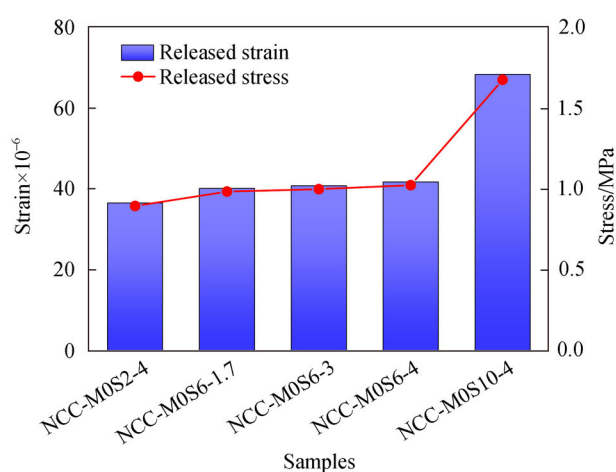


图 7 NCC-UPM 应力释放产生的应变和应力

Fig. 7 Strain and stress generated by stress release in NCC-UPM

依据胡克定律, 应变与弹性模量的乘积即为应力。图 7 是 NCC-UPM 应力释放产生的应变和应力。可以看出, NCC-M0S2-4 在切割过程中释放的应变为 $36.62 \mu\epsilon$, 释放的应力值为 0.90 MPa 。NCC-M0S10-4 释放的应力最大, 达到 1.68 MPa , 这与图

5 中 NCC-M0S10-4 产生最大抗折强度的结果是能相互印证的。通过图 6 和图 7 的结果可以推测出, UPM 自身由于基层限制了面层的膨胀, 基层产生了拉应力, 面层产生了压应力(见图 8a), 需要指出的是, 当面层厚度较大时, 预压应力在界面法线方向的分布应是递减的; 当对 UPM 施加外荷载时, 面层的压应力可以抵消部分外荷载产生的拉应力, 降低了峰值应力(见图 8b); 当外荷载达到极限时, UPM 的面层因达到抗拉强度极限而破坏(见图 8c)。正是由于 UPM 自身存在预应力, 可以抵消部分外荷载, 提高了 UPM 的抗折强度。与钢化玻璃预应力分布规律类似, UPM 边缘区域的预压应力应低于中心位置, 是薄弱部位。此外, 需要注意的是, 切割法只是使部分基层应力得到释放, 证明了预应力的存在, 考虑到仍有一部分基层的预应力没有释放, 实际 UPM 产生的应力值应高于该释放应力值。也即是说切割法获得的不是所施加预应力的绝对值, 释放应力值与抗折强度的增加值有对应关系, 但不能等同, 在实际应用时应以抗折强度的最终增强效果对 UPM 进行选材。

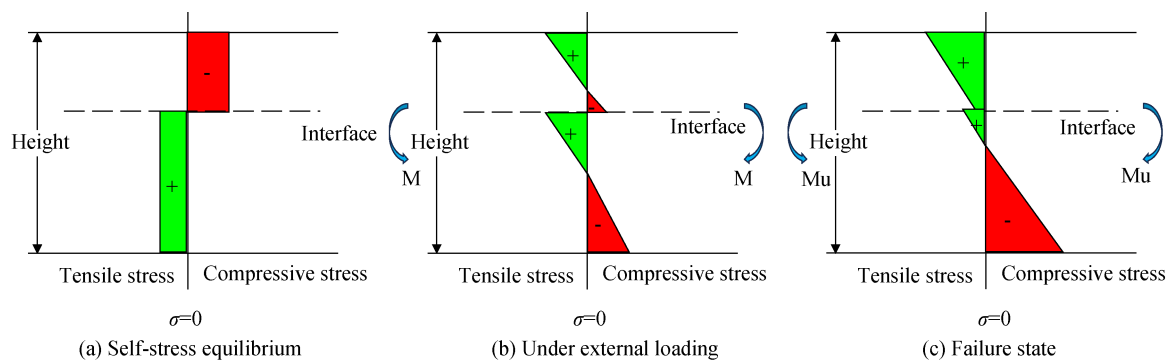


图 8 UPM 不同状态下的应力分布

Fig. 8 Stress distribution of UPM under different states

3 结论

1) 在无筋预应力砂浆面层中掺入6%的CSA膨胀剂,随着截面高度比由1.7增加至4,试件的抗折强度显著提升,最高达11.24 MPa。

2) 面层膨胀率增大,无筋预应力砂浆的抗折强度增加,面层掺入10%膨胀剂,28 d抗折强度增幅可达45%,考虑到砂浆的承受能力,不能无限增大膨胀剂掺量以追求无筋预应力砂浆抗折强度的提高。

3) 采用非连续浇筑法,界面经粗糙处理并使用界面剂的无筋预应力砂浆抗折强度可达到12.33 MPa,最大折压比接近1:3,界面良好结合是实现高抗折强度无筋预应力砂浆的基础。

4) 对无筋预应力砂浆进行切割,监测到了最大1.68 MPa应力的释放过程,验证了砂浆中预应力的存在。

参考文献:

- [1] NAWY E G. Prestressed concrete: a fundamental approach[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [2] ABDEL-JABER H, GLISIC B. Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—an overview[J]. Struct Control Health Monit, 2019, 26(8): e2374.
- [3] DHAHIR M K, MARX S, ZDANOWICZ K. Chemical prestressing of concrete structures; state of the art review[J]. Struct Concr, 2024, 25(2): 1450–1464.
- [4] BILLINGTON D P. Historical perspective on prestressed concrete[J]. PCI J, 1976, 21(5): 48–71.
- [5] NILSON A H, DARWIN D. Design of concrete structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [6] KAWAKAMI M, GAMSKE K, TOKUDA H, et al. Chemical prestress and strengths of reinforced concrete pipes using expansive concrete[J]. Mater Struct, 1989, 22(2): 83–90.
- [7] TAZAWA E, KAWAI K, MIYAGUCHI K. Expansive concrete cured in pressurized water at high temperature[J]. Cem Concr Compos, 2000, 22(2): 121–126.
- [8] ZDANOWICZ K, MARX S. Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing[J]. Eng Struct, 2022, 256: 113946.
- [9] KLEIN A, KARBY T, POLIVKA M. Properties of an expansive cement for chemical prestressing[J]. J Proc, 1961, 58(7): 59–62.
- [10] LIN T Y, KLEIN A. Chemical prestressing of concrete elements using expanding cements[J]. Journal Proceedings, 1963, 60(9): 1187–1218.
- [11] GREEN D J, TANDON R, SGLAVO V M. Crack arrest and multiple cracking in glass through the use of designed residual stress profiles[J]. Science, 1999, 283(5406): 1295–1297.
- [12] WONDRACZEK L, MAURO J C, ECKERT J, et al. Towards ultrastrong glasses[J]. Adv Mater, 2011, 23(39): 4578–4586.
- [13] MAURO J C, PHILIP C S, VAUGHN D J, et al. Glass science in the United States: current status and future directions[J]. Int J Appl Glass Sci, 2014, 5(1): 2–15.
- [14] POURMOGHADDAM N, KRAUS M A, SCHNEIDER J, et al. Relationship between strain energy and fracture pattern morphology of thermally tempered glass for the prediction of the 2D macro-scale fragmentation of glass[J]. Glass Struct Eng, 2019, 4(2): 257–275.
- [15] 王振地, 王玲. 无钢筋预应力混凝土及其成型方法[P]. CN Patent, 202210481648.X. 2023-04-07.
- [16] KRAJOVANEC J, BAHLEDA F, PROKOP J, et al. Verification of actual prestressing in existing pre-tensioned members[J]. Appl Sci, 2021, 11(13): 5971.
- [17] JIA L li, WU J, ZHU J long, et al. Preparation and expansion properties analysis of C60 expansive self-compacting concrete[J]. MATEC Web Conf, 2016, 67: 7032.
- [18] WYRZYKOWSKI M, TERRASI G, LURA P. Expansive high-performance concrete for chemical-prestress applications[J]. Cem Concr Res, 2018, 107: 275–283.
- [19] 陈波, 丁建彤, 蔡跃波, 等. 内养护与膨胀剂复合作用对混凝土综合抗裂性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(02):189–195.
- [20] 刘路明, 方志, 黄政宇, 等. 膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11):1706–1715.

Flexural Strength and Prestress Verification of Unreinforced Prestressed Mortar

LIANG Aofei, WANG Zhendi, WANG Ling

(China Building Materials Academy, State Key Laboratory of Green Building Materials, Beijing 100024, China)

Extended Abstract

Prestressed concrete, a pivotal 20th-century structural engineering innovation, enhances concrete structure strength and durability by introducing internal compressive stress to counteract external load-induced tensile stresses. Classified by prestress generation methods, it includes traditional prestressed concrete (TPC) and chemically prestressed concrete (CPC), both relying on steel reinforcement. TPC uses pretensioned or post-tensioned steel tendons to induce compressive stress in concrete, while CPC employs expansive cement, constrained by steel, to generate concrete compression via steel tension. That means steel reinforcement remains indispensable in conventional prestressed systems for stress generation.

However, there are successful examples in materials engineering where prestress is achieved without the involvement of steel

reinforcement. Tempered glass serves as a typical case. During its fabrication, the glass is heated to near its softening point and then rapidly cooled. The surface solidifies faster than the interior, which remains at a higher temperature, and this differential cooling restricts the contraction of the inner core, ultimately inducing compressive stress on the surface layer. Under mechanical loading, external forces must first overcome the surface compressive stress before any damage occurs, thereby significantly enhancing the mechanical strength and resistance to fracture. Today, tempered glass is widely used across various sectors including automotive, high-speed rail, construction, consumer electronics, and furniture. Compared with TPC and CPC, tempered glass achieves prestressing without relying on steel reinforcement. Instead, the prestress arises from the mismatch in thermal deformation between the surface and the core, offering a simpler and more efficient method for introducing internal stress.

Summary and Prospects Inspired by the prestressing principle of tempered glass, this study proposes a novel strengthening method for mortar that establishes internal compressive stress without the use of steel reinforcement. This is achieved by restraining the expansion of an expansive surface layer through a shrinking substrate. The resulting pre-compressive stress significantly enhances the flexural performance of the mortar. Experimental results demonstrate that the flexural strength of unreinforced prestressed mortar (UPM) increases with the cross-sectional height ratio. When 6% expansive agent is incorporated into the surface layer and the height ratio reaches 4, the flexural strength improves to 11.24 MPa. As the expansion rate of the surface layer increases, the flexural strength of UPM continues to rise. For instance, with a 10% expansive agent, the 28 d flexural strength increases by up to 45%. Furthermore, by employing the casting method with time interval combined with surface roughening and the use of an interfacial adhesive, the flexural strength of UPM can reach 12.33 MPa. The maximum flexural-to-compressive strength ratio approaches 1 : 3. These findings highlight the critical role of interfacial bonding quality in enhancing flexural performance—stronger bonding leads to greater strength gains. The existence of internal prestress is further verified through stress release monitoring during specimen cutting, where a maximum released stress of 1.68 MPa is recorded. However, it is important to note that the cutting method only releases a portion of the internal stress. As some prestress remains unreleased, the actual prestress present in UPM is likely higher than the measured value. Therefore, the released stress should not be regarded as the absolute value of the applied prestress. Although a correlation exists between stress relief and flexural strength improvement, the two are not equivalent. In practical applications, UPM should be evaluated and selected based on the overall enhancement in flexural strength rather than the measured released stress alone. Mechanistically, the expansion of the surface layer induces tensile stress in the substrate and compressive stress in the surface layer. When the surface layer is relatively thick, the compressive prestress decreases with depth along the normal direction of the interface. This stress gradient resembles that observed in tempered glass, where compressive stress is lower at the edges than at the center, rendering edge regions structurally more vulnerable. To better understand and optimize the internal stress distribution, stress redistribution, and failure mechanisms under external loading, finite element simulations are recommended. These analyses can offer theoretical insights that support the practical design and application of UPM in engineering practice. Overall, this study introduces a new approach for mortar toughening and strength enhancement, providing a foundation for the development and application of unreinforced prestressing technology in thin-walled structures and structural repair projects.

Keywords unreinforced prestressed mortar; prestress; flexural strength; cross-sectional height ratio; expansion agent; interfacial bonding state