

预应力大跨度石梁构件的抗弯试验研究

张兴虎¹, 蔺宝钢², 焦海洲³, 侯 炜¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学艺术学院, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:天然石材的应用赋予了建筑物特有的艺术美感和历史文化底蕴. 但由于石材的塑性差, 抗弯、抗拉强度低, 在大跨度梁和大偏心受压柱中, 很少有人使用. 对石材构件施加预应力, 可以改善石材构件的弹塑性状态, 提高承载力等. 对缩尺比例为 1:2 的石梁施加纵向预应力, 进行静载试验. 试验表明, 对石梁施加纵向预应力, 可以明显提高梁的受弯承载力及抗裂弯曲能力. 预应力技术应用于石材构件中, 拓宽了天然石材在仿古建筑领域中的应用.

关键词:石梁; 预应力技术; 受弯承载力

中图分类号: TU363

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0172-06

石材是最古老的建筑材料之一. 石材因其本身的物理、化学性质及形成条件而坚固耐久, 其永久性造就了许多不朽的建筑物, 如修建于 4000 多年前的吉萨大金字塔和斯芬克斯, 中国古代的石窟、石塔、石碑等. 现代建筑中, 石材仍然是建筑师喜欢的建材之一^[1]. 在许多建筑师的心目中, 用石头雕琢的景观表现的概念和内涵, 是用其他材料难以流露和表达的. 随着钢材、玻璃和混凝土等新材料的出现, 新的轻质高效的结构体系取代了古老沉重的石质结构体系, 石材失去了它作为结构构件的作用. 然而, 人们在采用混凝土和钢结构框架的建筑外表依然贴上一层石质的古典样式, 给人以建筑依然使用传统石质梁柱体系的美感. 由于石材的塑性差, 抗弯、抗拉强度低, 因此, 它在大跨度梁和大偏心受压柱中, 很少有人使用. 随着国民经济的发展, 各种长跨结构的出现使预应力技术得到了广泛应用. 为了解决石材的上述弱点, 使天然石材在仿古建筑中得到更广泛应用, 对其施加预应力, 改变石材构件截面上的应力分布、状态和性质使其满足规范规定的各项安全标准, 并使石材的冷脆性得到一些弹塑性改善. 使用预应力石材做承重构件, 不但可以充分发挥其抗压性能, 还可以发挥石材天然优美的优点, 保留其建筑美学价值. 本文对天然石材制成的石梁施加预应力并对其进行静载试验, 分析施加预应力对石梁受弯承载力、抗裂性能的提高效果及石梁破坏形态等.

1 试验概况

1.1 试验模型

试验石梁的尺寸为实际工程中简支悬臂梁的 1/2: 试验石梁长 4 690 mm, 宽 700 mm, 高 375 mm, 支座宽 450 mm, 支座中心至悬臂端长 482.5 mm, 悬臂净长度为 257.5 mm. 石梁预留孔直径 50 mm. 试验所用预应力钢筋采用 3 根直径为 32 mm, 级别为 PSB830 的螺纹钢筋. 石梁尺寸如图 1 所示.

1.2 试验设备及仪器

数据采集系统为一台日产 TDS-602 型数据自动采集系统, 其分辨率为 0.1×10^{-6} , 采集速度 40 点/秒; 挠度测量采用 8 个量程为 100 mm 的位移计; 应变测试采用型号为 BX120-80AA, 规格为 5 mm × 80 mm 的胶基箔式应变计 24 个; 液压加载系统为 200 t 压力千斤顶一台, BHR-F 型、量程为 500 t 压力传感器一个; 预应力钢筋张拉设备及测力计为 YCW60B-200 型张拉千斤顶一个, 测量、控制张拉力值采用 BLR-1 型、量程为 100 t 的拉压传感器 3 个.

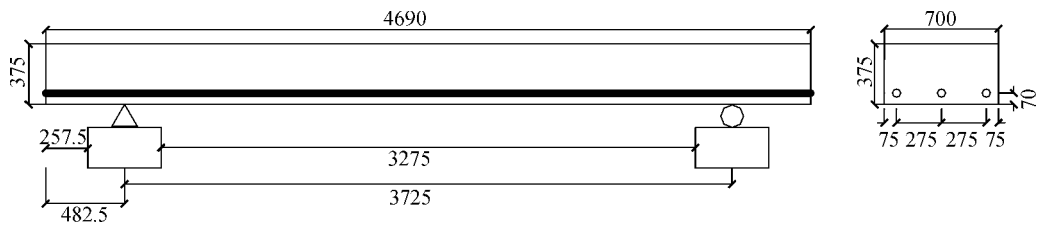


图 1 试验梁尺寸
Fig. 1 Size of experimental stone beam

1.3 测点布置

测试内容包括: 石梁各截面应变及梁的挠度, 施加预应力阶段张拉钢筋轴向拉力值等。
在梁的跨中顶面两边缘及中点处布置 3 个应变测点, 梁跨中底面两边缘处布置 2 个应变测点, 在梁的跨中侧面截面处布置 5 个应变测点, 以测试跨中截面在荷载作用下的应变分布规律. 在梁一端最外侧受力点与支座对应处的连线上布置 3 个应变花测点, 以测试梁端受剪区的应变分布状态. 共 19 个应变测点, 具体位置见图 2 所示. 位移计布置如图 3 所示.

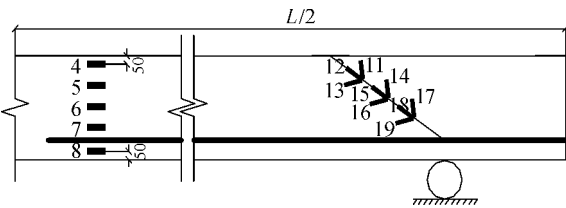


图 2 梁侧面测点 布置图
Fig. 2 Layout drawing of the gage on beam side

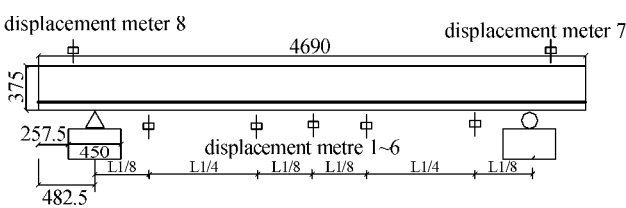


图 3 位移计 布置图
Fig. 3 Layout drawing of deformation displacement

1.4 试验加载方式

因条件限制, 无法完全模拟实际工程中均布荷载的加载方式, 考虑到方便加载等因素, 采用集中荷载方式进行加载^[2-3]. 采用八分点四集中力等效均布荷载, 其修正系数为 0.97. 具体加载方式: 采用分配梁进行两级荷载分配, 最上面中点采用 200 t 压力千斤顶和 500 t 压力传感器进行竖向加载. 加载图如图 4 所示.

试验分三个工况进行:
第一工况: 只对石梁施加竖向荷载, 荷载大小为 $P=375.78\text{ kN}$, 不进行预应力钢筋张拉. 加载分 5 级施加, 每一级施加完毕后, 持荷 10 min, 观测梁跨中位置底面、侧面及梁各集中力作用点处是否出现裂痕, 梁顶面是否出现挤压破碎等现象. 通过数据采集系统观看石梁跨中最大挠度值及最大应变值, 计算得出每级荷载时石梁的截面最大应力值和挠度值, 与计算发生裂缝及弯曲破坏时的最大应力值和挠度值对比, 控制石梁不发生裂缝及弯曲破坏.

第二工况: 只对梁张拉预应力钢筋, 不施加竖向荷载. 张拉钢筋按设计要求施工, 张拉钢筋过程中, 利用钢筋端部的传感器进行拉力控制, 每级张拉一根钢筋后, 都及时对石梁进行观测, 观测重点同工况一, 着重观测石梁预应力钢筋锚垫板处的石材有无局部压碎现象.

第三工况: 维持预应力钢筋张拉状态, 对石梁施加竖向荷载, 荷载大小为 $P=375.78\text{ kN}$, 加载过程仍分 5 级进行, 同工况一. 当荷载值达到最大设计荷载值的 80 % 时, 按每级 5 % 加到设计值, 密切关注数据采集系统上记录的最大应变值及最大挠度值, 同时观测梁受剪区是否出现裂缝, 端部预应力锚垫板处是否出现局部破裂、压碎等现象. 竖向荷载达到 $P=375.78\text{ kN}$ 后, 持载 10 min, 继续对石梁加载, 直至破坏, 密切观察石梁各控制截面的裂缝状态.

1.5 预应力加载

预应力钢筋采用 3 根直径为 32 mm, 级别为 PSB830 的螺纹钢. 采用单端张拉, 单根钢筋张拉控制应力为 498 MPa, 即控制 3 根钢筋张拉完毕后, 所产生的弯矩与只施加竖向荷载产生的弯矩相抵消.

张拉预应力采用分级循环张拉方式,即依次对每根钢筋施加 $N/3 \rightarrow 2N/3 \rightarrow N$ 大小的力.张拉示意图见图 5.

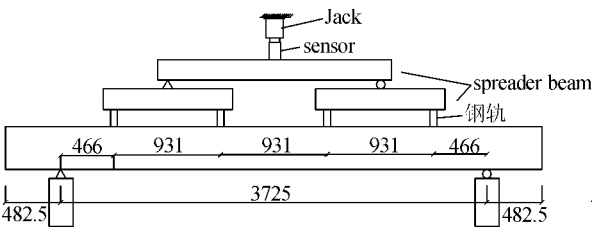


图 4 加载方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the loading method

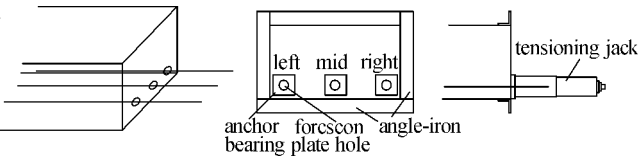


图 5 预应力张拉示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the prestressed bar tensoning equipment

2 试验结果分析

石材抗压强度、抗拉强度、弯曲强度、抗剪强度及弹性模量等材性指标见表 1.由表 1 可知,石梁发生弯曲破坏时,其跨中截面最大拉应变为 $284\mu\epsilon$.由石梁截面尺寸及弯曲强度,可求得石梁跨中最大弯矩 M_f 为 $247.7\text{ kN}\cdot\text{m}$,从而可得跨中最大挠度理论值 $f_{\max}=3.02\text{ mm}$.

表 1 石材材性指标
Tab. 1 Material behavior indicator

compressive strength / MPa	tensile strength / MPa	bending strength / MPa	shear strength / MPa	elastic modulus / MPa
144.2	7.9	15.1	82.2(45°)	5.31×10^4

2.1 石梁应变分析

2.1.1 工况一跨中截面应变

由图 6 可知,石梁跨中最大应变随荷载的增加基本呈线性变化.观察石梁各控制截面,石梁整个梁身未发生任何形式的破坏,没有裂缝出现.图 7 为梁跨中截面高度各点应变关系曲线,梁上部受压,下部受拉,从图中可以看出,应变关系基本呈线性变化.可见,石梁此时处于弹性工作阶段.石梁跨中最大拉应变为 271.67,根据材性报告石梁的弹性模量为 $5.31\times 10^4\text{ MPa}$,可得石梁跨中最大拉应力为 $14.4\text{ MPa}<15.1\text{ MPa}$.

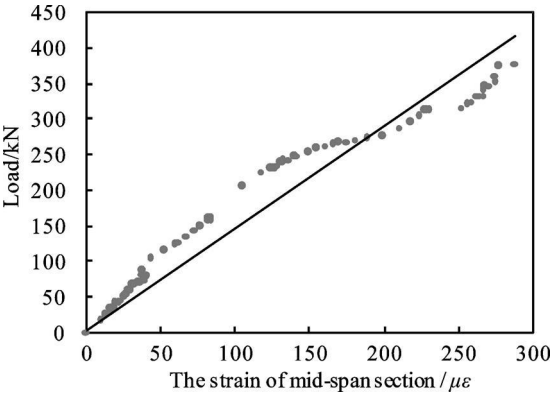


图 6 工况一跨中荷载-应变曲线

Fig. 6 Curve of mid-span load-strain for operating Mode 1

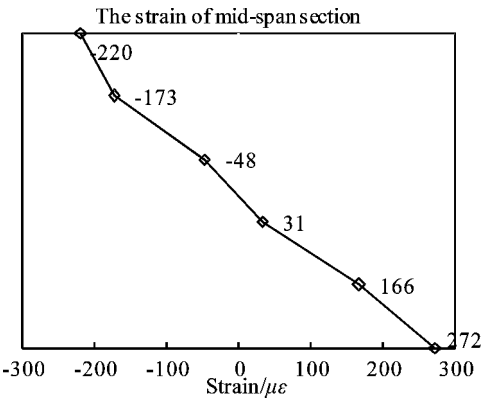


图 7 工况一跨中应变曲线

Fig. 7 Curve of mid-span strain for operating Mode 1

2.1.2 工况二跨中截面应变

工况二下,石梁未承受竖向荷载,预应力钢筋按顺序依次张拉,石梁上部受拉,下部受压.应变随荷载增加亦呈线性增加,如图 8 所示.跨中截面各点应变关系曲线见图 9 所示.预应力钢筋张拉完毕后,石梁跨中截面最大拉应变为 140,即跨中截面最大拉应力为 7.43 MPa ,远小于石梁弯曲受拉强度 15.1 MPa .

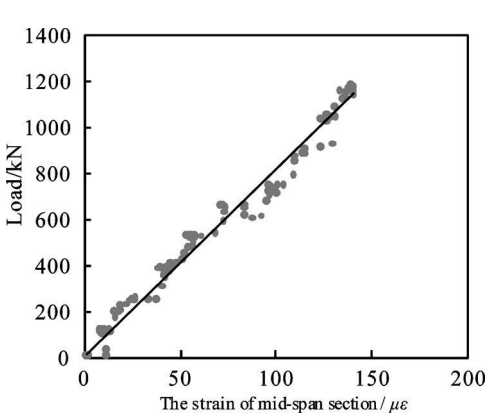


图 8 工况二跨中荷载-应变曲线

Fig. 8 Curve of mid-span load-strain for operating Mode 2

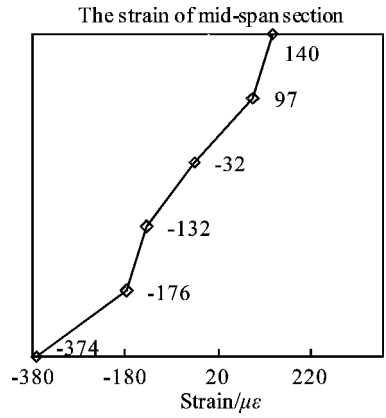


图 9 工况二跨中应变曲线

Fig. 9 Curve of mid-span strain for operating Mode 2

2.1.3 工况三跨中截面应变

随着竖向荷载的增大, 跨中截面各处应变都呈“恢复”状态, 即 1~4 号受拉的应变计拉应变逐渐减小, 当荷载达到设计值 375 kN 时, 呈微微受压的状态. 而 7~10 号明显受压的应变计则压应变逐渐减小, 当荷载达到设计值时, 仍呈很小受压状态. 5~6 号应变计处于中性轴附近, 其应变变化较小. 由于试验过程中的施工条件及其他因素所致, 石梁应变并未完全恢复到“零”状态, 但在荷载作用下 (375 kN) 石梁的受拉区 (下部) 和受压区 (上部) 都处于受压状态, 如图 10 所示, 受拉区不出现拉应力, 更不会出现裂缝, 正截面抗裂验算完全满足抗裂要求及设计要求.

当荷载大于 375 kN 时, 石梁下部应变继续向受拉方向发展, 当荷载大约为 770 时, 应变为 0. 当荷载达到 1 270 kN 时, 石梁破坏, 受拉区 (下部) 应变为 285. 如图 10 所示, 直至石梁断裂前, 其荷载-应变关系基本上是线弹性的. 可见, 预应力技术的应用对石梁抗弯承载力的提高效果是非常明显的.

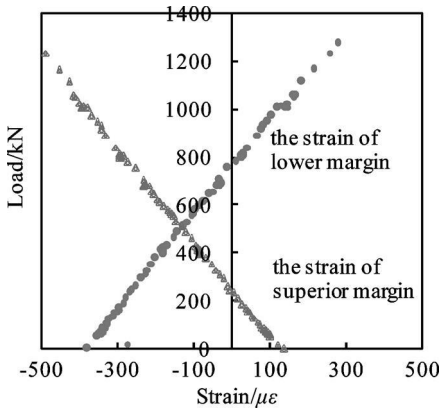


图 10 工况三跨中荷载-应变曲线

Fig. 10 Curves of mid-span load-strain for Mode 3

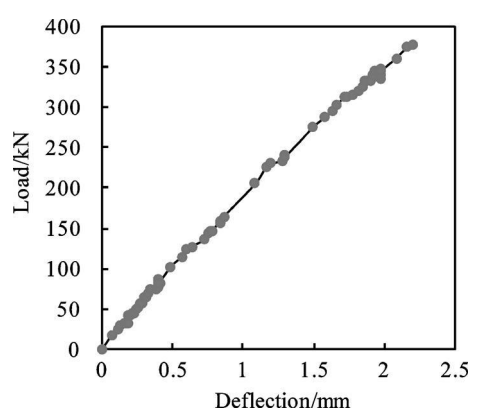


图 11 工况一跨中荷载-挠度曲线

Fig. 11 Curve of mid-span load-deflection for Mode 1

2.2 石梁挠度分析

石梁各工况荷载-挠度曲线如图 11~图 13 所示. 工况一梁最大挠度试验值为 -2.21 mm, 折算为均布荷载作用挠度值为 -2.14 mm. 工况二最大挠度试验值为 2.48 mm, 折算为均布荷载作用挠度值为 2.41 mm. 可见, 在试验荷载作用下, 跨中挠度满足使用要求. 工况三中, 当荷载加至 375 kN 时, 石梁稍稍微拱, 挠度值基本恢复, 符合设计计算要求. 当荷载加至石梁破坏时, 石梁跨中挠度试验值为 -3.39 mm, 折算为均布荷载作用挠度值为 -3.29 mm, 略大于理论计算值 3.02 mm. 从图 12~图 14 中可以看出, 跨中荷载-挠度曲线的加载过程基本呈直线变化, 表明石梁在整个试验过程中都处于弹性阶段工作状态. 各工况挠度曲线见图 14~图 16.

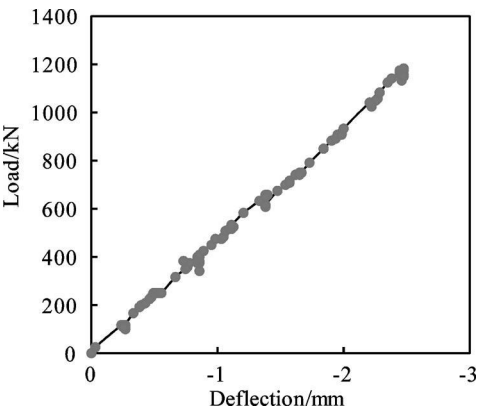


图 12 工况二跨中荷载-挠度曲线
Fig. 12 Curve of mid-span load- deflection for M ode 2

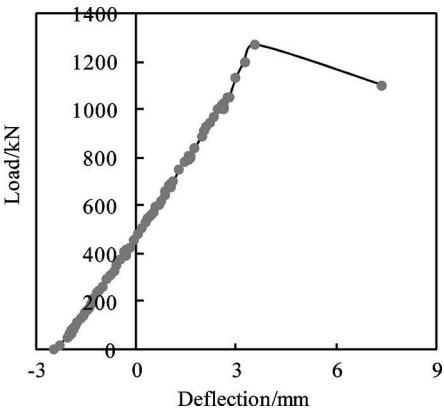


图 13 工况三跨中荷载-挠度曲线
Fig. 13 Curve of mid-span load- deflection for M ode 3

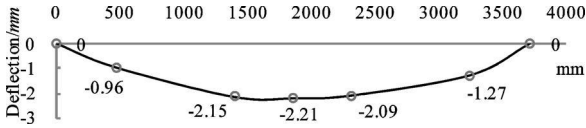


图 14 工况一挠度曲线
Fig. 14 Deflection curve for operating M ode 1

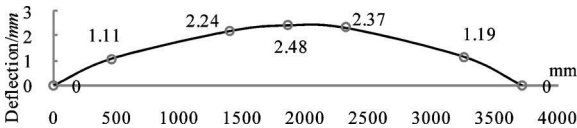


图 15 工况二挠度曲线
Fig. 15 Deflection curve for operating M ode 2

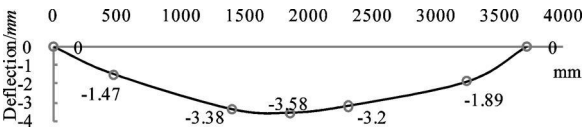


图 16 工况三挠度曲线
Fig. 16 Deflection curve for operating M ode 3

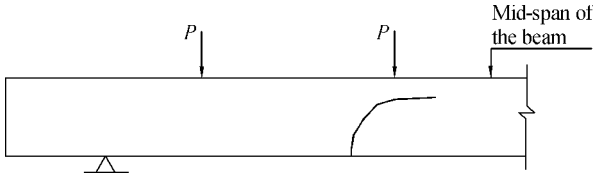


图 17 裂缝位置及形态
Fig. 17 Distribution and shape of crack

2.3 破坏形态分析

当荷载加载至 1 270 kN 时,石梁突然破坏,破坏形态见图 17 所示.石梁出现裂缝即破坏,没有明显屈服阶段,属脆性断裂.裂缝出现在石梁左端第二个集中力作用点下方的弯剪区.石梁荷载通过弯曲形压力线向支座传递,受力状态已是拉杆拱的雏形.其中靠近支座的主拱,因为传力线对截面的偏心距大而在构件角部产生拉应力,从而产生受拉裂缝.石梁在正应力和剪应力的共同作用,出现横向裂缝和破坏区.分析裂缝可能出现的情形为:弯剪段的腹部中间形成 45°的腹剪斜裂缝后,迅速往两个方向发展:裂缝向上发展,倾斜角渐减为 0,在梁顶部形成横向裂缝;裂缝向下发展,倾斜角渐增,到达梁底部呈竖直方向^[4].考虑到只施加此集中力时,石梁的剪跨比($\lambda=3.8$)较大,荷载位置离支座已远,竖向方向正应力 σ_y 对梁腹部的影响很小,造成最终破坏的斜裂缝是主拉应力 σ_x 控制的拉断破坏,为斜拉破坏.

3 结 论

- (1) 将预应力技术应用在石梁构件中,极大的提高了石梁的受弯承载力和抗裂能力,拓宽了石材构件的应用范围.本次试验为斜截面破坏,若石梁横向也施加预应力,则会使承载力进一步提高.宝鸡市政广场石碑楼成功使用了跨度为 7.45 m 的预应力石梁,预应力石梁的使用使得石碑楼的结构形体和材质外露的建筑美感真实地展现出来,结构安全、可靠,如图 18.
- (2) 该梁在正常使用荷载下,各截面的荷载-挠度曲线、荷载-应变曲线基本呈直线变化,处于弹性阶段.试验值与计算值吻合较好.
- (3) 石梁本身属脆性材料,且一旦发生裂缝即失去承载力.试验梁在弯剪区发生斜拉破坏,属剪切破坏形态.

(4) 预应力石梁的受弯承载力和挠度计算均可用弹性理论计算。



图 18 预应力石梁工程实用—石牌楼

Fig. 18 Engineering example of prestressed stone beam—stone decorated archway

参考文献 References

- [1] 陈楠. 谈建筑石材[J]. 南方建筑, 2005(3): 80-82.
CHEN Nan. Talking about Architectural Stone Material[J]. South Architecture, 2005(3): 80-82.
- [2] GB50152-92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
GB50152-92 Standard Methods for Testing of Concrete Structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1992.
- [3] JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ101-96 Specifying of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1997.
- [4] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

Experimental study on flexural resistance of prestressed large-span stone beam

ZHANG Xing-hu¹, LIN Bao-gang², JIAO Hai-zhou³, HOU Wei¹

(1. School of Civil Eng., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Arts, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Arch., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Application of the natural stone material is endowed with the aesthetic feeling and historical cultural implications. Stone material has poor plasticity, low bend strength and tension strength and it is unusually used as span beam and great eccentric pressed member. Prestressed stone beam can improve elastic-plastic state and the bearing capacity. Prestressed stone beam with scale model 1:2 has been tested under static load. The result indicates that prestressed can increase its flexural capacity and anti-crack performance. Prestress technology applied to stone member broadens the applications of stone in ancient buildings.

Key words: stone beam; prestress technology; flexural capacity