

文章编号:1007-6492(1999) 01-0007-05

GRC 加固砖砌墙体受剪性能的研究

刘立新, 向 忠, 王 菁, 杜晓伟

(郑州工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 提出了一种采用 GRC(玻璃纤维增强水泥) 加固砖砌墙体以提高其抗剪强度的新技术. 通过 76 个采用 GRC 加固的小试件和 17 个对照试件的试验结果, 分析了采用 GRC 加固墙体受剪破坏的形态、影响加固效果的主要因素, 提出了计算 GRC 加固砖砌墙体抗剪强度的公式. 通过三片足尺寸采用 GRC 加固墙体和对照墙体的试验, 进一步验证了理论分析结果, 在可靠度分析的基础上提出了可供工程实践应用的采用 GRC 加固砖砌墙体受剪承载力的计算方法.

关键词: GRC(玻纤增强水泥); 剪切强度; 砌体

中图分类号: TU 317 **文献标识码:** A

0 引言

墙体开裂是砖混结构常见的病害之一, 当房屋地基发出不均匀沉降、温度变化使墙体发生不均匀膨胀或收缩、以及在地震荷载作用下都可能使墙体产生裂缝. 当墙体裂缝宽度达到一定程度时, 不仅影响房屋的正常使用, 而且有可能引起建筑物的不安全. 墙体开裂的原因主要是因为砖砌体的抗剪强度不足, 尤其是灰缝的抗剪强度不足. 由于砖砌墙体开裂的现象比较普遍, 如何提高墙体的抗剪强度以及对已开裂的墙体如何加固修复是急待解决的课题之一. 目前已采用的加固修复墙体的方法有水泥砂浆层或钢筋网水泥砂浆层加固以及化学灌浆修复等, 这些方法有一定的加固作用, 但也不同程度地存在着施工较复杂, 造价偏高或加固效果不理想等缺点. GRC(Glassfiber Reinforced Cement 玻璃纤维增强水泥) 是近年来迅速发展的新型水泥复合材料. 其原理是将一定数量的耐碱玻纤维短丝按照一定的工艺(喷射或拌和) 分散到水泥浆或水泥砂浆中, 耐碱玻纤维具有很高的抗拉强度和韧性, 可显著提高水泥浆或水泥砂浆的抗拉强度增强阻裂性能, 具有明显的优点. 我国自 70 年代末由中国建筑材料研究院从国外引进 GRC 技术以来, 结合中国国情研制出了耐碱性能更好的优质玻纤维, 使 GRC 制品在我

国有了广泛应用^[1]. 目前北京、广东、河北和河南等省市已较多地采用 GRC 材料生产墙板、装饰板、网架板、永久性模板等. 本项研究的目的是充分利用 GRC 材料抗拉强度高、阻裂性能好等优点提高砖砌墙体的抗剪、抗裂强度; 提出一种效果好, 施工方便, 价格低廉的墙体加固技术.

1 标准试件受剪试验分析

标准试件按照国标《砌体基本力学性能试验方法标准》GBJ 129-90 的规定制做, 尺寸及加载方法如图 1 所示. 试件分 3 组, 第 1 组为对照试件, 主要测定未采用 GRC 加固的普通砖砌体的抗剪强度, 砌 筑 砂 浆 强 度 $f_2 = 0.576 \sim 16.2 \text{ N/mm}^2$, 共 17 个. 第 2 组为正交设计, 采用四因素四水平, 主要测定砌筑砂浆强度 f_2 、GRC 加固层厚度 t 、耐碱玻纤维掺量以及砖和 GRC 加固层之间所涂水泥浆中粘结剂掺量的影响, 其因素和变化水平见表 1, 共 22 个. 第 3 组为在正交试验的基础上选择合理的耐碱玻纤维和粘结剂掺量后进行的补充试验, 主要变化参数为砌筑砂浆强度 f_2 和 GRC 加固层厚度 t , 共 3 类 44 个(表 2).

图 2 是第 1 组对照试件的抗剪强度 f_{v0} 随砌筑砂浆强度 f_2 的变化, 试件均为砂浆缝的剪切破坏, $f_{v0} = F/2ah$. 据文献[2], 砌体沿通缝抗剪强度均值为(当 $f_2 > 10 \text{ N/mm}^2$ 时取 $f_2 > 10 \text{ N/mm}^2$)

收稿日期:1998-06-28; 修订日期:1998-11-02

基金项目: 河南省科技攻关项目(971190110)

作者简介: 刘立新(1947-), 男, 湖北省汉川县人, 郑州工业大学教授, 硕士, 主要从事混凝土、砌体结构基本理论及工程应用方面的研究.

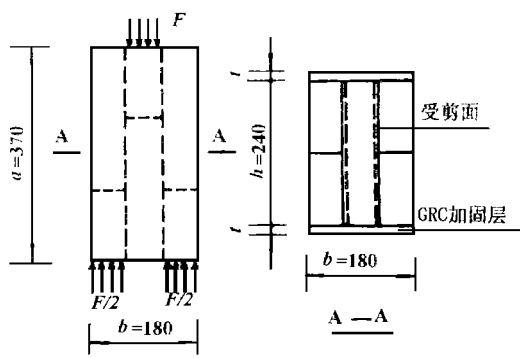


图 1 试件尺寸及加载方法

表 1 正交试验因素水平

水 平	因 素			
	砌筑砂浆 等级 f_2	GRC 加固 层厚度 t	耐纤玻纤 掺量	粘结剂 掺量
	$/(N/mm^2)$	$/mm$	$/\%$	$/\%$
1	5.28	10	0	0
2	7.3	15	1.46	10
3	14.5	20	2.4	15
4	15.8	25	3.2	20

表 2 第 3 组试件参数变化表

试件 类别	砌筑砂浆 等级 f_2	GRC 加固 层厚度 t	耐碱玻 纤掺量	试件 个数
	$/(N/mm^2)$	$/mm$	$/\%$	
A 类	1.58	5~24	0.75	14
B 类	2.65	4.5~24.5	1.5	16
C 类	0.576	4~25	1.5	14

说明:3 组试件砖的强度等级均为 MU7.5

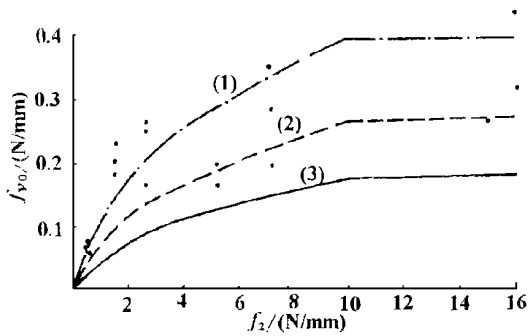


图 2 试件抗剪强度

$$f_{v0,m} = 0.125 \sqrt{f_2} \quad (N/mm^2), \quad (1)$$

式(1)中 f_2 的单位为 N/mm^2 ,式(1)的变异系数 $\delta = 0.2$.砌体沿通缝抗剪强度的标准值应具有95%的保证率,其表达式为

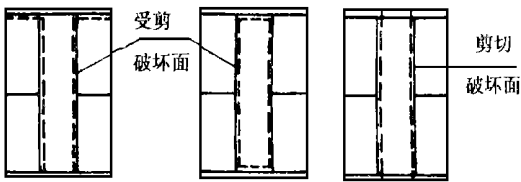
$$f_{v0,k} = f_{v0,m} (1 - 1.645 \delta) = 0.084 \sqrt{f_2} \quad (N/mm^2), \quad (2)$$

砌体沿通缝抗剪强度为其标准值 $f_{v0,k}$ 除以其材料分项系数 γ_c (取1.5),其表达式为

$$f_{v0} = f_{v0,k} / \gamma_c = 0.056 \sqrt{f_2} \quad (N/mm^2). \quad (3)$$

从图2中可见,对照试件的试验结果是符合上述公式的要求的,因此可采用式(1)来计算未采用GRC加固墙体的抗剪强度平均值.

试验表明:采用GRC砂浆层加固的试件的剪切破坏有两种破坏形态.当GRC加固层的厚度较大、粘结面的粘结强度相对较弱时,将发生粘结面的剪切破坏,破坏时砌体的灰缝剪坏,同时GRC加固层加砖之间的粘结面剪坏,加固层剥落如图3(a)所示;当GRC加固层的厚度较小,粘结面的粘结强度相对较强时,将发生加固层的剪切破坏.破坏时砌体的灰缝剪坏,同时GRC加固层也被剪坏,加固层未发生剥落而出现裂缝,如图3(b)所示.此外当加固层厚度不很大,或加固层虽然较薄但粘结面的粘结强度也相对较弱时,也会发生粘结面和加固层同时被剪坏的现象.



(a) 粘结面剪坏 (b) 加固层剪坏
图 3 破坏形态

对粘结面的剪切破坏形态,影响砌体抗剪强度的主要因素有GRC加固层和砖之间的粘结强度 $f_{v,m}^*$ 以及砌体的砌筑砂浆强度 f_2 .参见图1,设发生粘结面剪切破坏时,GRC加固层和砖之间的粘结面积为 A ,砖砌体的受剪面积为 $2ah$,砌体沿通缝的抗剪强度为 $f_{v0,m}$,则有

$$F = 2ah \cdot f_{v0,m} + Af_{v,m}^*, \quad (4)$$

即

$$\tau_u = \frac{F}{2ah} = f_{v0,m} + \frac{A}{2ah} f_{v,m}^* = f_{v0,m} + \alpha f_{v,m}^*, \quad (5)$$

式中: τ_u 为采用GRC加固后砖砌体的极限抗剪强度; $f_{v0,m}$ 为按式(1)计算的未采用GRC加固墙体的抗剪强度平均值; $f_{v,m}^*$ 为GRC加固层与砖之间的平均粘结强度,根据所涂水泥浆中粘结剂掺量的不同,其值为 $0.47 \sim 0.72 N/mm^2$; α 为反映加固层和砖之间粘结面积与砌体受剪面积之比的影响系数,由试验结果回归分析得到

$$\alpha = 0.293 + 0.002 f_2 - 0.009 f_2, \quad (6)$$

式中: t 为 GRC 加固层的厚度, 以 mm 计; f_2 为墙体砌筑砂浆的强度, 以 N/mm^2 计. 按式 (5) 和式 (6) 计算粘结面剪切破坏试件的极限抗剪强度 (包括部分粘结面和加固层同时被剪坏的试件), $n = 44$, 试验值与计算值之比的平均值 $\mu = 1.00$, 变异系数 $\delta = 0.146$, 符合程度是较好的.

对加固层的剪切破坏形态, 影响其抗剪强度的因素, 主要是加固层的厚度 t 和加固层的抗剪强度 τ_v . GRC 加固层的抗剪强度 τ_v 目前尚无标准的试验方法, 可利用混凝土类材料在双向应力状态下的强度理论推定. 本文采用 Lin-Slate 的简化模型^[3], 双向应力状态的强度关系如图 4 所示, 图中 f_c 为 GRC 材料的抗压强度, f_t 为 GRC 材料的抗拉强度, 均可由试验确定. 当 GRC 水泥砂浆层发生剪切破坏时其抗剪强度为 τ_v , 由纯剪应力状态可推导出此时的主压应力 σ_a 和主拉应力 σ_l 分别为

$$\sigma_a = \tau_v \quad \sigma_l = -\tau_v, \tag{7}$$

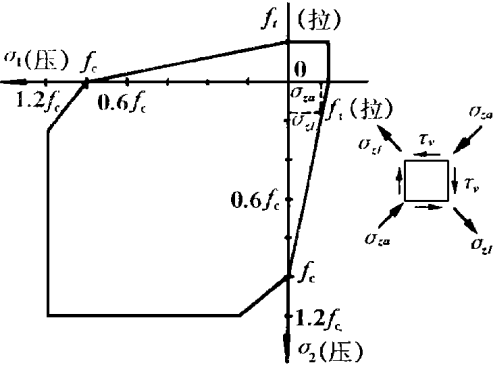


图 4 双向应力状态强度关系

式 (7) 中取压应力为正, 拉应力为负. 由图 4 中拉压状态的强度关系可推导出

$$\frac{\tau_v}{f_t} = \frac{f_c - \tau_v}{f_c}, \tag{8}$$

则
$$\tau_v = \frac{f_t f_c}{f_c + f_t}, \tag{9}$$

参见图 1, 可推导出当发生加固层剪坏时

$$F = 2ah \cdot f_{v0,m} + 4at \tau_v, \tag{10}$$

即
$$\tau_v = \frac{F}{2ah} = f_{v0,m} + 2 \frac{t}{h} \cdot \tau_v, \tag{11}$$

式中 h 为墙体厚度. 试验结果表明: 当 GRC 加固层厚度 t 增大时, 加固层受力不均匀程度增大, τ_v 的试验值有所下降, 因此将式 (11) 改写为

$$\tau_v = f_{v0,m} + \beta \cdot \frac{t}{h} \cdot \tau_v. \tag{12}$$

从图 5 中可见, 随着 t 的增大 β 值下降. 由回归分析可得

$$\beta = \frac{1}{0.0762t - 0.136}, \tag{13}$$

式中 t 的单位为 mm. 按式 (12) 和式 (13) 计算 GRC 加固层剪切破坏试件的极限抗剪强度 (包括部分粘结面和加固层同时破坏的试件), $n = 54$, 试验值与计算值之比的平均值 $\mu = 1.049$, 变异系数 $\delta = 0.151$, 符合程度也很好.

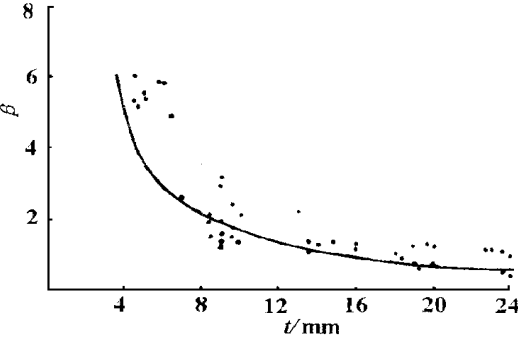


图 5 砂浆抗剪强度变化规律

2 整片墙受剪试验分析

实际房屋建筑的砖砌墙体在水平荷载作用下不仅存在剪应力也存在垂直正压应力 σ_v , 这与标准试件的受剪状态是有区别的. 为检验采用 GRC 加固墙体的实际效果, 又进行了 3 片接近足尺寸的墙体在垂直正压应力和水平力作用下受剪性能的试验, 试件尺寸和加载装置如图 6 所示. 垂直正压应力 σ_v 采用 4 个同步液压千斤顶加荷, $\sigma_v = 0.4 \sim 0.5 \text{ N}/\text{mm}^2$, 在试验过程中基本保持不变, 水平力 F_x 从零开始逐渐增加, 直到最大值; 竖向集中力 F_y 是为保墙体在 F_x 作用下的平衡与 F_x 同步增加的; 试验中在墙的另一端安装百分表用以量测墙体的剪切变形. 墙体试验参数见表 3, 其中 WN-1 为未采用 GRC 加固的墙体, WN-2 为在 WN-1 加载剪切破坏后再用 GRC 加固后重新进行试验的墙, 以检验采用 GRC 修复已开裂墙体的效果.

图 7 是水平推力和墙端剪切变形的关系曲线. 从图中可看出: 未采用 GRC 加固的 WN-1 抗剪承载力较低, 采用 GRC 加固后墙体 WS-1, WS-2 的抗剪承载力大大提高, 在未加固的墙体 WN-1 发生剪切破坏开裂后再采用 GRC 加固的 WN-1 抗剪承载力也显著提高, 其抗剪性能与未发生剪切破坏而采用 GRC 加固的墙体十分接近, 可见用 GRC 修补已开裂墙体的效果也是很好的. 未采用 GRC 加固的墙体 WN-1 受剪破坏时产生沿灰缝阶梯形的裂缝, 采用 GRC 加固的墙体 WS-

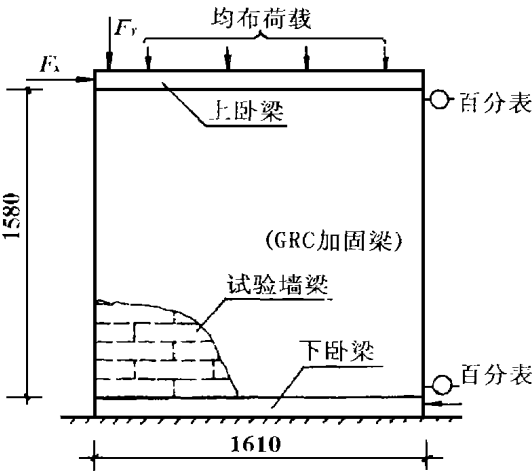


图 6 整片墙加载图

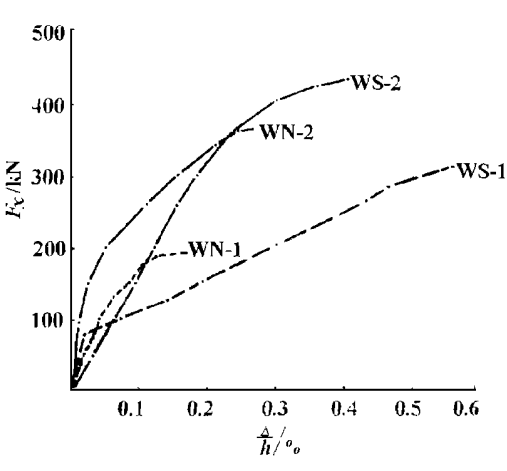


图 7 剪切变形曲线

表 3 整片墙体受剪试验表

试件 编号	砖强度 等级	砌筑砂浆 强度 f_2 /(N/mm ²)	GRC 加固 层厚度 t /mm	预加垂直 压应力 q_0 /(N/mm ²)	最大水平 推力 F_x /kN	最大竖向 平衡力 F_y /kN	最大剪切 变形 Δ/h /‰	计算最大 水平推力 F_x^c /kN
WS-1	MU 7.5	1.79	15	0.418	305	307.2	0.562	262.8
WS-2	MU 7.5	3.43	25	0.417	428.3	449.7	0.408	289.0
WN-1	MU 7.5	1.83	0	0.411	190	194.25	0.17	160.7
WN-2	MU 7.5	1.83	25	0.444	380	382.8	0.247	210.2 (275.5)

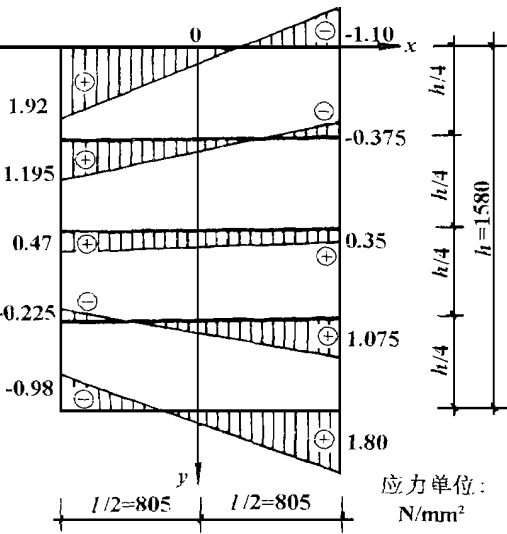


图 8 整片墙垂直压应力分布

1, WS-2 及 WN-2 从加载到破坏 GRC 加固层始终未开裂, 临近破坏时可听到加固层内砖墙开裂的声音, 水平推力达到最大值后缓慢下降, 表现出较好的延性. 墙体受剪破坏后敲击加固层, 局部有空洞声, 说明发生了局部粘结面的破坏, 这与标准试件的试验现象是一致的. 采用 GRC 加固的墙体受剪破坏后, 由于 GRC 加固层始终未开裂, 从

外观上看不到有破坏的迹象. 上述现象表明: 采用 GRC 加固的墙体有很好的受力性能和使用性能.

试验墙体从加载到破坏过程中应力和变形均较小, 可近似采用弹性理论分析其应力状态, 参见图 6 并采用图 8 所示的坐标系可求得墙体内任一点的垂直压应力 q_y 为

$$q_y = q_0 + \frac{F_x \cdot y - F_y \cdot L/2}{I} x. \quad (14)$$

式中: q_0 为由同步千斤顶施加的垂直均布压应力; I 为墙体截面沿 x 轴方向的惯性矩, 取压应力为正, 拉应力为负. 图 8 还绘出了沿 y 轴方向按式 (14) 求得垂直压应力 q_y 的变化情况. 砌体在垂直压应力 q_y 作用下的抗剪强度可表示为^[4]

$$f_v = f_{v0} + k q_y, \quad (15)$$

式中: f_{v0} 为无垂直压应力的砌体沿通缝抗剪强度; k 是与摩擦系数和砖的类型有关的系数, 英国规范 BS 5628 取 $k=0.6$, 我国规范偏安全取 $k=0.4$. 由于采用 GRC 加固的墙体剪切破坏时发生粘结面剪坏(加固层厚度较大), 参照式 (5)、(6) 并考虑试验墙体的加固层的粘结面积和标准试件的差异, 可将采用 GRC 加固墙体的抗剪强度的计算公式表示为

$$f_v = f_{v0} + 1.33 f_v^* + 0.6 q. \quad (16)$$

按式 (14) 计算沿图 8 中 y 轴各截面的 q , 并按式 (16) 计算 f_v , 从而可求出各截面所能承受的水平推力 F_x , 其最小值即为理论计算的墙体所能承受的最大水平推力计算值 F_x^c . 表 3 还列出了按上述方法计算的 F_x^c , 从表中可见计算值 F_x^c 均小于试验值 F_y , 这是因为墙体在水平推力的作用下发生沿齿缝的阶梯形剪切破坏, 竖向灰缝参与抗剪的作用. 但国内外有关规范考虑施工时竖向灰缝不易做到饱满, 均忽略了竖向灰缝的抗剪作用, 偏安全以沿通缝的抗剪强度 f_{v0} 代替沿齿缝的抗剪强度, 因此按式 (16) 计算 GRC 加固砖墙的抗剪强度的计算值偏低是合理的, 也是偏于安全的. 表 3 中 WN-2 试验墙 F_x^c 的计算中因原有墙体已开裂, 在式 (16) 中取 $f_{v0}=0$; 若仍取 f_{v0} 等于原有墙体沿通缝的抗剪强度, 其 F_x^c 的计算值为相应括号的值, 括号内外的计算值均小于试验结果, 这说明如果认真施工, 采用 GRC 修补已开裂的墙体, 其抗剪承载力仍可达到用 GRC 加固的未开裂墙体的抗剪承载力.

3 加固设计建议

在上述试验研究的基础上通过可靠度分析并进行简化, 考虑到在实际工程中 GRC 加固层的厚度 $t=20\sim 25\text{ mm}$, 均发生粘结面剪坏的破坏形态, 提出在实际工程中采用 GRC 加固砖墙的抗剪强度可按下式计算.

$$f_v = f_{v0} + 0.4 f_v^* + 0.4 q, \quad (17)$$

式中 f_{v0} 为砖砌体沿通缝抗剪强度的设计值, 按

《砌体结构设计规范》GBJ 3-88 取用; q 为按荷载标准值计算的垂直压应力; f_v^* 为 GRC 加固层和砖之间的粘结强度, 根据水泥砂浆涂层中粘结剂的掺量取值.

4 结论

- (1) 在水泥砂浆中掺入少量的耐碱玻璃纤维形成 GRC 材料的抗拉强度大大提高, 具有良好的阻裂性能. 用 GRC 加固砖砌墙体可显著提高其抗剪强度, 改善受力性能.
- (2) 用 GRC 加固的墙体在水平力作用下根据加固层厚度的不同可发生粘结面剪坏和加固层剪坏两种破坏形态, 在工程应用的范围内加固层厚度大于 20 mm 时均能发生粘结剪坏的破坏形态.
- (3) 在实际工程应用中采用 GRC 加固墙体的抗剪强度可按式 (17) 计算.
- (4) GRC 材料既可用于加固未开裂墙体, 又可用于修复已开裂墙体, 施工方便、价格低廉.

参考文献

[1] 高惠崇. 玻纤增强水泥——钢筋砼组合梁正载面工作性能及抗弯承载力研究 [D]. 郑州: 郑州工业大学, 1987.

[2] GBJ 3-88, 砌体结构设计规范 [S].

[3] 王传志, 滕智明. 钢筋混凝土结构理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

[4] 施楚贤. 砌体结构理论与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

Study on Shear Capacity for Brick Wall Strenthened with Glassfiber Reinforced Cement

LI U Li -xin , XI ANG Zhong , WANG Jing , DU Xiao -wei

(College of Civil & Building Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract In this paper , a new technique used in strentehning brick wall with glassfiber reinforced cement is proposed . Based on the test results under shear force of 76 standardized samples of brick work strentehned with glassfiber reinforced cement , the behaviour and failure modes of such brick wall are discussed in detail , and the for mulas used for calculating the brick wall strentehned with glassfiber reinforced cement are given . These for mulas show a good agreeement with test results , and are proved by the test results of three brick wall strentehned with glassfiber reinforced cement of large size under vertical and horizontal loads . By the reliability analysis the design method of such strentehned brick wall for practical use is also proposed .

Key words glassfiber reinforced cement (GRC) ; shear strength ; brick work