

3

14-23

# 预应力抗震砖墙构造柱中的钢筋应变问题\*

骆万康  
(重庆建筑大学)

王天贤  
(西北建筑工程学院) TU398.5

**摘 要** 通过预应力与非预应力墙体在水平荷载往复作用下的对比试验,研究了预应力对构造柱中非预应力筋应变分布的有利影响,即减少其根部的最大应变值,并使应变沿柱高度分布均匀。同时,随着水平荷载之增大,预应力钢筋的应变非但未减小,反而有所增大,于是可求得预应力钢筋在抗裂及极限承载力两个阶段的预应力提高系数。这样,无论预应力或非预应力钢筋均能充分发挥其承载的潜力,并提高墙体的抗震性能。

**关键词** 预应力, 应变分布, 预应力提高系数, 承载潜力, 抗震性能  
**中图法分类号** TU398.5

为提高砖墙的抗震性能,抗震规范要求砖混结构房屋砖墙中设置钢筋混凝土构造柱,以改善墙体的脆性性质,提高其变形及耗能的能力。然而构造柱却不能显著提高墙的抗侧力能力(仅比无构造柱墙提高10~20%)<sup>[1,2]</sup>。由于砖砌体仍然是墙体承载的主体,其抗剪强度低,材性脆是抗震能力低下的根本原因,故采用施加预应力的方法来提高其抗剪强度,发掘材料承载的潜力,这确实是一件很有意义的事。

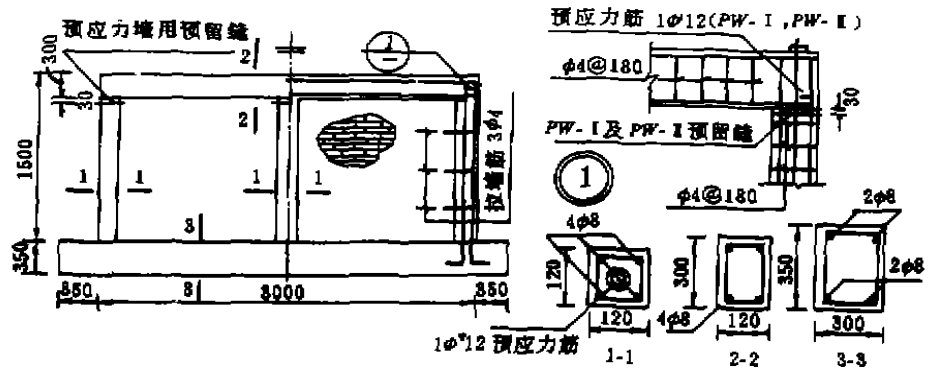


图1 试件构造及配筋图

图1~3分别表示预应力与非预应力砖墙抗震性能对比试验的模型与加载装置。通过千斤顶施加的竖向荷载(120 kN),产生了平均压应力  $\sigma_0 = 0.333 \text{ N/mm}^2$ , 并采用后张法对每根柱内预应力筋张拉 10 kN, 使墙体获得平均预压应力  $\sigma_{\sigma} = 0.0852 \text{ N/mm}^2$ 。当施加水平往复

\* 收稿日期,1994-10-12  
骆万康,男,1936年生,副教授,重庆建筑大学建筑工程学院(630045)

荷载后,预应力墙(代号 PW-I 及 PW-II)之抗裂荷载  $Q_c^p$  及极限荷载  $Q_u^p$ , 分别较非预应力墙(代号为 W-I 及 W-II)提高 30% 及 25% 左右,并分别为无构造柱墙的 2.4 及 3.18 倍。当扣除中柱(本试验为三根柱)的影响后,亦达到 1.85 倍及 2.37 倍(详见文献[2])。预应力墙在抗裂及承载能力大为提高的同时,延性及耗能能力也得到了可靠的保证。这一切都应归功于构造柱中的钢筋,特别是预应力钢筋的作用,因此在整个加荷过程中,这两种钢筋的应变与应力的变化规律是值得重视和研究的。

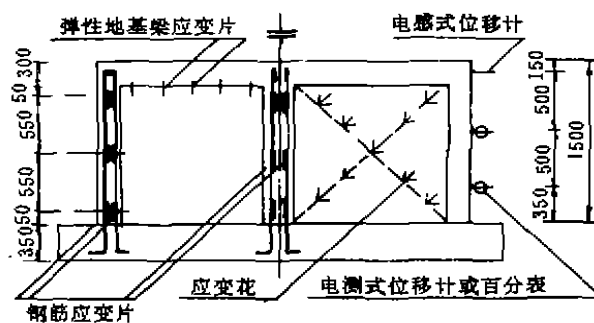


图 2 位移计与电阻片布置图

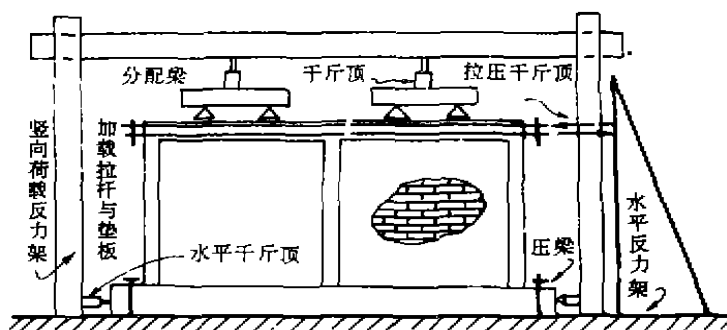


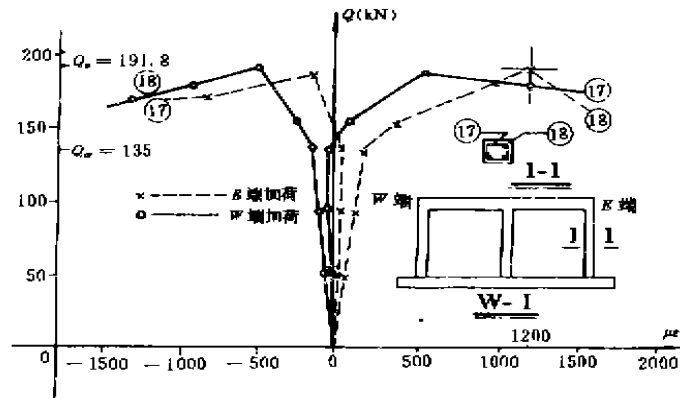
图 3 加荷装置图

## 1 非预应力筋的应变

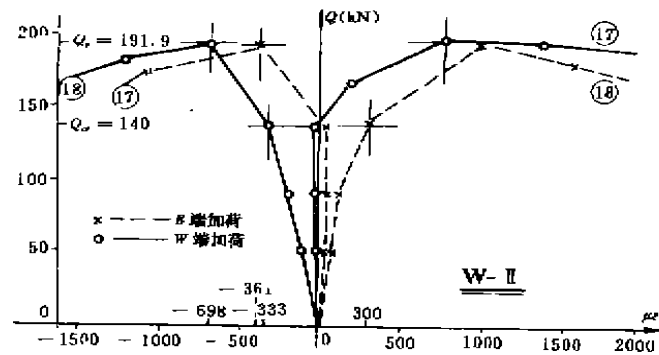
### 1.1 非预应力墙边柱的非预应力筋应变

在水平荷载往复作用下,墙片两边柱根部纵筋的应变如图 4 所示。该应变是由整体弯曲及侧移和交叉裂缝分割成的三角形块体对边柱挤压力所引起局部弯曲所致。墙体开裂前,主要是墙体整体弯曲作用,两边柱分别呈现出拉、压状态。但也由于局部弯矩的作用,外侧钢筋⑧无论拉应变或压应变总是大于内侧钢筋⑦。总之边柱钢筋应变之变化规律基本相同,表现出线性特征。直至墙体开裂后,荷载达到  $Q_c$ , 钢筋应变只有  $300 \mu\epsilon \sim (-370) \mu\epsilon$ , 对应钢筋应

力  $\sigma_s = 63 \text{ N/mm}^2 \sim (-78) \text{ N/mm}^2$  左右,此时,钢筋  $Q-\mu\epsilon$  曲线出现转折。表明在整体截面抗弯中,砌体部分因开裂而逐渐退出工作,墙柱间整体工作削弱,于是柱中纵筋应变增长加快。在增大的局部弯矩作用下,受力端内侧钢筋⑰由拉应变逐步变为压应变;非受力端内侧⑰由压应变逐步变为拉应变。而两边柱的外侧⑱拉或压应变则继续增大。于是每根柱的内外侧钢筋均向纵坐标轴左右两侧分叉延伸,墙体裂缝进一步加宽并逐渐伸入边柱之上下端及中柱之中部截面。



a) W-I



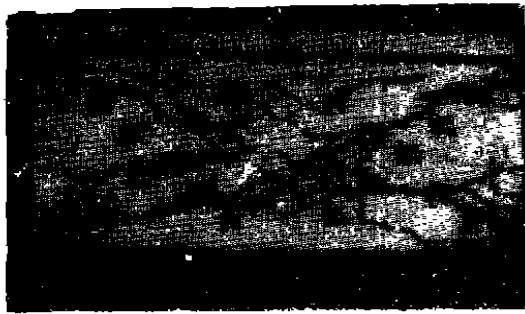
b) W-II

图 4 非预应力墙纵筋应变图

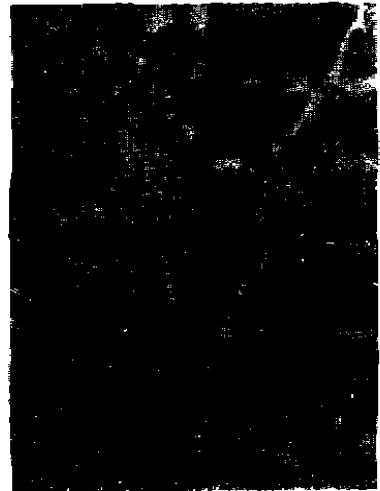
当墙体达到极限荷载  $Q_u$  时,受力端外侧钢筋  $\sigma_s$  接近甚至超过屈服强度  $f_y$ ,内侧钢筋应变仍较小。同时非受力端无论内侧受拉,外侧受压,均未达到屈服,除非力的方向反号。由此可知两边柱外侧钢筋之受拉屈服是在交替作为受力端的情况下才产生。在水平荷载往复作用下,柱端所出现的塑性铰也会交替转开和闭合。此时,墙体水平位移大增,裂缝大开,直至砌底破坏,其状态如图 5 所示。

### 1.2 预应力墙边柱非预应力筋的应变

由于预压应力是通过张拉前暂时与柱尚未浇筑成整体的圈梁,对墙体的弹性地基梁作用来实现的,故对三根构造柱的预压应力总计不超过全部预应力之 10%,特别是本研究所施加的预应力较低,故对构造柱中非预应力筋影响较小。预应力墙中的非预应力筋应变分布规律与非预应力墙无甚差别。特别是开裂前,两种墙体  $Q-\mu$  曲线斜率几乎相同。唯有因预应力墙开裂荷载  $Q_k > Q_0$ , 对应之应变  $\mu_k > \mu_0$ 。同理,极限荷载  $Q_k > Q_0$ , 相应之应变  $\mu_k > \mu_0$  (试比较图 6 与图 4 即可知)。但柱上下端仍出现塑性铰。



a)



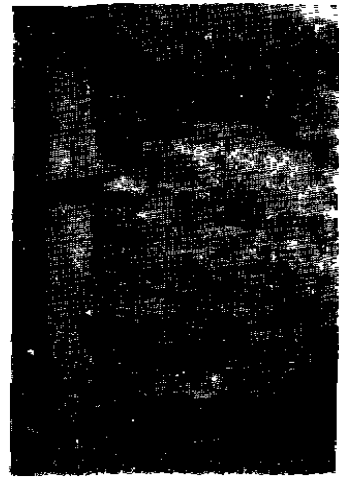
b)

### 1.3 两种墙体中间柱非预应力筋的应变

中柱所承担的水平荷载,引起整体弯矩而产生的轴力几乎为零,却有少量侧移局部弯矩和墙体上、下端对中柱两端引起附加侧压力影响。但其钢筋无论拉压应变都很小,以至除 PW-11 (图 7) 之外的所有墙体中柱根部均未开裂,而中部则全部出现交叉斜裂缝。图 8 所示为中柱产生的典型剪切位移状况。

### 1.4 两种墙体边柱非预应力筋应变值之比

两种墙体边柱非预应力钢筋在开裂和极限荷载下的应变(应力)实测值列于表 1 中。通过比较可知,由于预应力推迟了墙体开裂及破坏,故预应力墙体中的边柱下端钢筋应变(应力)较大,内外侧钢筋均在同时达到屈服并都在该截面出现塑性铰。而非预应力墙边柱仅有外侧钢筋能屈服并在该截面出现塑性铰。



c)

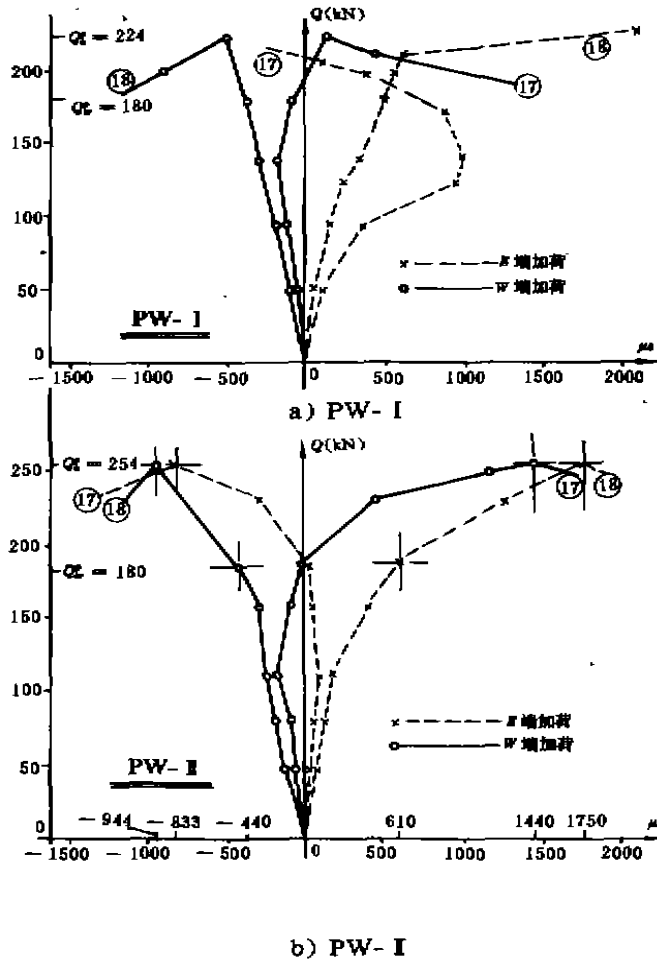


图 6 预应力墙纵筋应变图



图 7 PW-I 中柱裂缝图

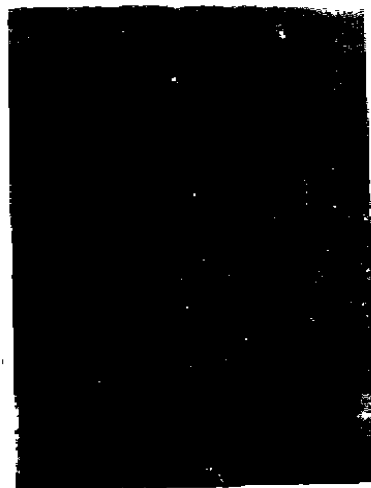


图 8 典型的中柱剪切变位

表 1 两种墙体边柱非预应力最大应变值

墙体类别	钢筋	边柱类别	$Q_0$ 时 $\mu\epsilon$ 值	$Q_0$ 时 $\sigma_s$ 值	$Q_0$ 时 $\mu\epsilon$ 值	$Q_0$ 时 $\sigma_s$ 值	备注
非预应力 W-I 及 W-II	⑰	受荷端柱	—	—	-361	-76	
		非受荷端柱	—	—	778	163	
	⑱	受荷端柱	300	63	1200	252	$>f_{ps}=235$ $<f_{ps}=470$
		非受荷端柱	-333	-70	-698	-147	
预应力 PW-I 及 PW-II	⑰	受荷端柱	—	—	-833	-175	
		非受荷端柱	—	—	1440	303	$>f_{ps}=235$ $<f_{ps}=470$
	⑱	受荷端柱	610	128	1750	368	$>f_{ps}=235$ $<f_{ps}=470$
		非受荷端柱	-440	-92	-944	-198	

注: 1.  $\sigma_s$  及  $f_{ps}$ 、 $f_{ps}$  单位为  $N/mm^2$ ;

2. (-) 号为受压。

1.5 极限承载力时非受力端边柱非预应力筋的应变

图 9 示墙体达到极限荷载  $Q_0(Q_0)$  时非受力端边柱的内外侧钢筋(⑰⑱)沿高度应变分布。从中可看出,之所以形成如此相异的分布状态,原因就在于该曲线反映了墙体在水平荷载作用下,总体弯曲引起的轴力、水平侧移局部弯矩,以及图 10 所示交叉裂缝开展后,左右两侧三角形块体挤压边柱所产生的局部弯矩等综合作用下,由于预应力的存在而使柱下端截面非预应力筋应变大为减小,且沿高度分布趋于均匀。这既能充分发挥材料的承载潜力,又利于墙体抗震。

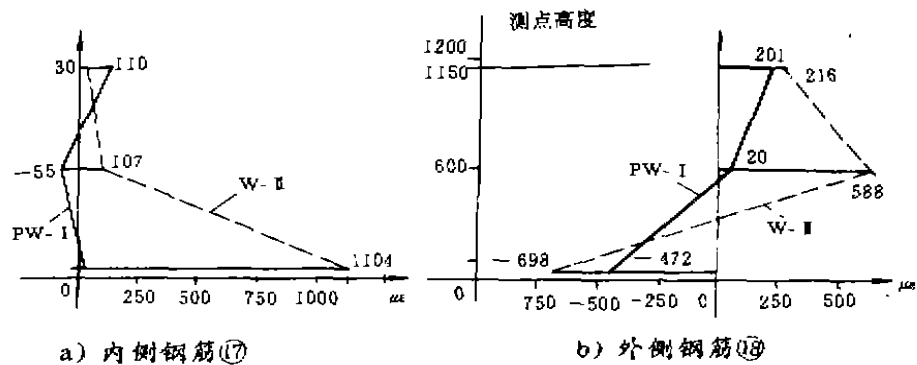


图 9 非受力端边柱钢筋应变分布图

2 预应力筋的应变、应力及预应力提高系数

2.1 预应力筋应变与应力

图 11 及图 12 表示了预应力墙 PW-I 及 PW-II 在水平荷载往复作用下,边柱与中柱

下端预应力筋的应变变化曲线。现分别介绍于后。

### 2.1.1 边柱

图 11 所示受荷端(如 E 端)边柱预应力筋①在墙体总体弯矩引起的拉力、预应力以及相邻的三角形块体对柱的侧压力共同作用下,拉应变  $\mu_e$  将随水平荷载之增加而增加,特别是在墙体开裂后,刚度的降低更使之迅速发展,曲线向横座标方向弯曲。非受荷端(如 W 端),预应力筋在墙体开裂前由于主要承受了总体弯曲引起的轴压力,因而引起预拉应变之降低。然而在墙体开裂并延伸至柱上下端截面之后,局部弯曲效应越更显著,剪切变位增大,都将使预应力筋复又伸长,于是  $\mu_e$  值迅速增加。这种变化在 PW-I 曲线图中已经明示。而图中所示之 PW-II 曲线,在 E 端加荷时,该端边柱预应力筋①的  $\mu_e$  变化规律与 PW-I 相同。而当 W 端加荷时,则预应力筋①除在开裂前具有相同的变化规律外,开裂后则拉应变渐渐消失为零,并随水平荷载之增大而变为越来越大的压应变。导致这种特殊现象有如下多方面原因:



图 10 三角形砌体挤压边柱情况

- 1) 中柱偏 W 端一侧柱墙界面附近产生竖向裂缝,严重削弱抗震墙整体刚度(详图 7)。
- 2) 中柱除中央区域出现交叉斜裂缝外,尚在下端出现横向裂缝。(这是所有墙片中唯一一例),因此,柱的抗弯及抗侧刚度大为降低(详图 7)。
- 3) 在水平荷载往复作用下,与 E 端边柱相邻的三角形块体对柱产生的侧压力固然能使柱受弯,但对于截面中央的预应力筋①应变增加极少。相反却因块体向外位移越来越大(有相对位移的积累),上下裂缝越更加宽,再考虑第 2) 条原因,使得交叉裂缝以上块体在水平荷载作用下,沿交叉裂缝中心作一定程度的顺时针旋转,从而造成 E 端边柱的压缩变形,预应力筋拉应力(应变)下降,并经过“消拉”之后进入受压状态。

当然, PW-II 的破坏与预应力钢筋的应变虽有其特殊性,但从中也可找出它发生的原因和发展的规律。

### 2.1.2 中柱

图 12 a)、b) 分别示 PW-I 及 PW-II 中柱预应力钢筋拉应变分布曲线。在墙体开裂前,曲线基本保持原有建立的预应力值,  $\mu_e$  极少变化,开裂后,侧移弯矩及柱上下端的相对剪切变形使预应力筋②略有伸长。特别是图 7 所示之水平裂缝与斜裂缝将引起②号筋之进一步伸长。故 E 端加荷时  $\mu_e$  的增量相对较大。

## 2.2 预应力提高系数 $\beta_p$

### 2.2.1 预应力提高系数之实测值

由图 11 及图 12 所示之预应力筋在达到开裂荷载及极限荷载时,张拉力非但不降低,反而有不同程度增长。正由于这种原因,预应力墙体抗震性能才得以有效改善。这种改善完全不是竖向压应力由  $\sigma_0$  增至  $(\sigma_0 + \sigma_{0p})$  的数量概念,因为实际的  $Q_1$  及  $Q_2$  对于  $Q_0$  及  $Q_0$  的增长比

例要大得多,特别是极限荷载  $Q_u$ 。于是可用  $Q_s$  及  $Q_u$  状态下的预应力钢筋实测应变值与零载时的应变值之比作为预应力提高系数  $\beta_p$ ,这完全是墙体承受水平往复荷载后开裂和变形的结果。 $\beta_p$  的实测值如表 2 所示。

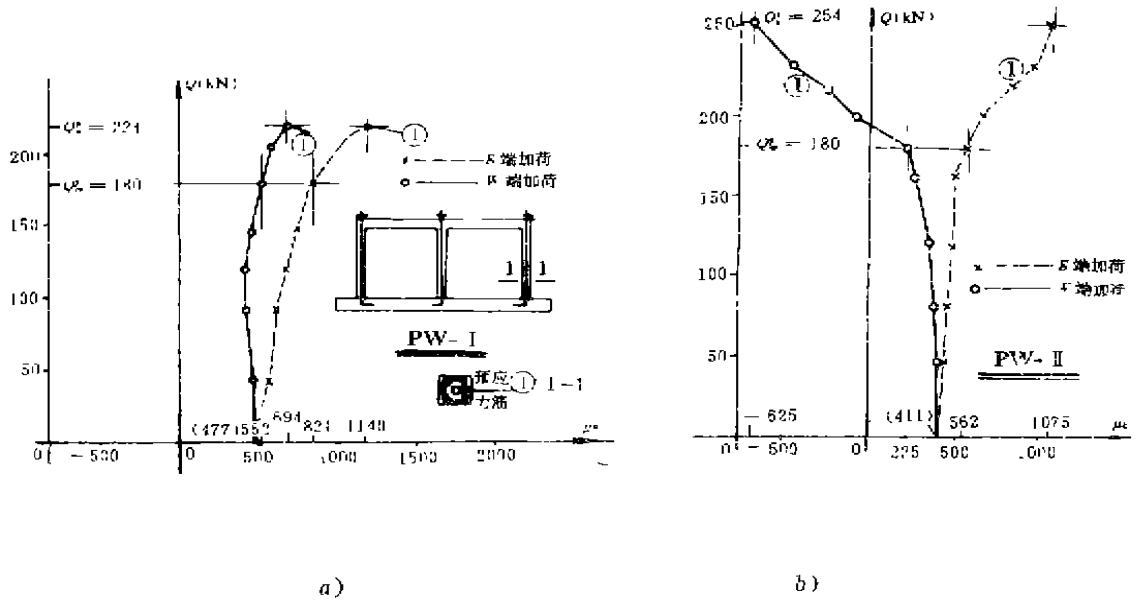


图 11 边柱预应力筋应变分布图

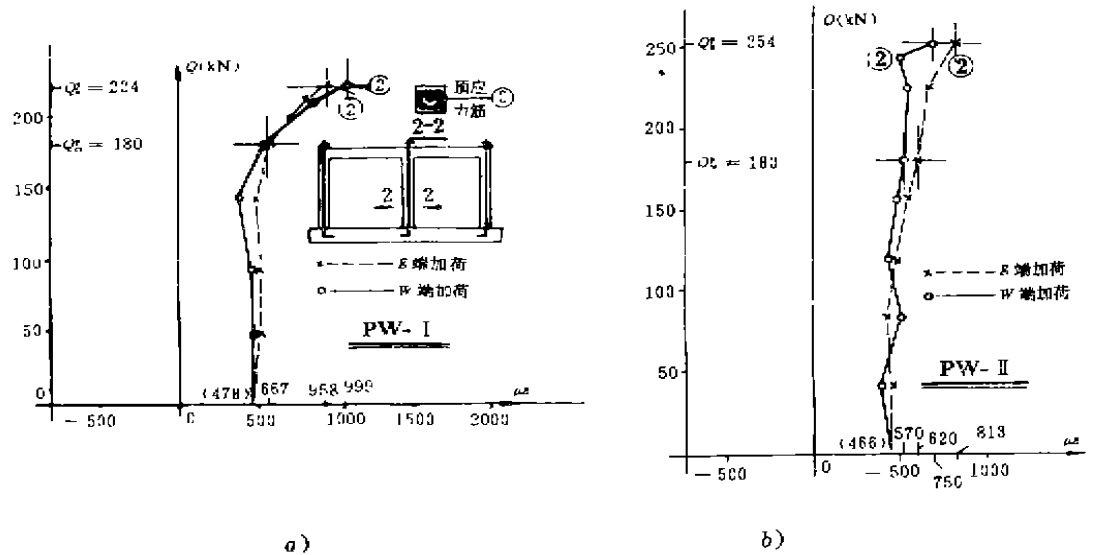


图 12 中柱预应力筋应变分布图

2.2.2  $\beta_p$  的统计结果

1) 当开裂荷载时:由表 2 中选出与  $Q_s$  相应的  $\beta_p$  值,其中带有 \* 号的一项考虑属意外之例,故仅按 7 个观测值进行统计,得出算术平均值  $\mu_\beta = 1.373$ ,标准差  $\sigma_\beta = 0.1634$ 。于是  $\beta_p = 1.373 - 1.645 \times 0.1634 = 1.104$ ,故取 1.1 作为抗震计算时预应力提高系数。



2) 当极限荷载时: 仅按中柱考虑,  $\mu_p = 1.862$ ,  $\sigma_p = 0.1934$ . 得  $\beta_p = 1.862 - 1.645 \times 0.1934 = 1.544$ .

按全部构造柱考虑, 同理应去掉受压应变一项, 则  $n = 7$ ,  $\mu_p = 1.987$ ,  $\sigma_p = 0.388$ , 得  $\beta_p = 1.349$ . 综合两种方法取  $\beta_p = 1.30$  作为承载能力的提高系数。

上述  $\beta_p$  值在文献[2]中已成功地应用了,  $Q_{L1}$  及  $Q_{L2}$  的计算结果与实测值计算十分接近。

表 2 预应力提高系数  $\beta_p$  的实测值

墙体类型	初始拉应变	预应力筋(%)	边 柱				初始拉应变	中 柱				备 注
			E 端加荷		W 端加荷			E 端加荷		W 端加荷		
			$\mu$	$\beta_p$	$\mu$	$\beta_p$		$\mu$	$\beta_p$	$\mu$	$\beta_p$	
PW-I	477	Q <sub>2</sub>	821	1.722	560	1.174	478	667	1.305	667	1.395	
			Q <sub>1</sub>	1140	2.389	694		1.455	958	2.005	999	2.090
PW-I	411	Q <sub>2</sub>	562	1.369	*225	0.548	466	620	1.330	570	1.223	* 表示不计入统计
			Q <sub>1</sub>	1075	2.616	*-625		-1.52	813	1.744	750	1.690

### 3 结 论

1) 墙体开裂前, 构造柱根部非预应力筋应变与应力都很小。此外尚可依据受荷端及非受荷端来判定边柱纵筋是分别处于受拉及受压状态。所有外侧钢筋无论受拉或受压, 其应变值之绝对值均高于内侧钢筋。这是由墙体总体弯矩为主, 侧移及三角形块体挤压边柱引起局部弯矩为辅的综合效应所致。中柱主要取决于较小的侧移弯矩, 故其钢筋应变很小。

2) 墙体开裂后, 钢筋应变速度加快, 边柱内外侧钢筋应变不再同向(即在同一截面中, 必定有拉、压应变同时出现)。直至极限荷载时, 拉、压应变曲线方才开始下降, 承载力将随墙体裂缝的急剧开展, 变形过大而逐渐卸荷, 但钢筋应变却继续增长。

3) 由于预应力的影响, 墙体推迟开裂, 提高极限承载力。无论处于开裂或极限荷载情况, 边柱根部纵筋应变均大于非预应力墙边柱根部纵筋应变, 且内外侧钢筋均能交替屈服, 产生塑性铰。而非预应力墙边柱仅受荷端之外侧钢筋屈服。可知预应力墙体中钢筋能更充分地发挥承载潜力。

4) 通过对预应力筋在不同受力阶段的应变分析, 可知受荷后张拉力非但不降低, 反而有所提高, 于是以预应力提高系数  $\beta_p$  来反映这一特点。其值对抗裂及承载力计算分别取 1.1 和 1.3。提高系数是符合墙体受力实际的, 同时该取值具有 95% 以上的保证率。

5) 本研究系预应力与非预应力墙的对比试验, 力求说明预应力在提高砌体材料抗剪能力及墙体的抗震性能方面有其明显的效果。至于预应力度要保持在何种水准, 预应力砖石结构房屋的抗震性能研究等, 都有待继续进行工作。相信预应力技术在砖石结构房屋抗震工程中必有其辉煌的前景, 其经济效益和社会效益是不可低估的。

## 参 考 文 献

- 1 刘锡荃,张鸿熙等 用钢筋混凝土构造柱加强砖房抗震性能的研究. 建筑结构学报, 1981, (6)
- 2 骆万康,王天贤. 关于预应力砖墙在低周反复荷载下抗裂及承载能力的试验研究. 重庆建筑工程学院学报, 1994, 16(4)
- 3 骆万康,王天贤. 关于预应力砖墙的变形、延性与耗能问题的试验研究. 第二届全国砌体结构学术交流会论文—2, 1994. 10 成都
- 4 朱君道,陈源华译. 砖石结构设计手册. 上海:同济大学出版社, 1989. 5
- 5 Curtin W. G., Shaw G., Beck, J. K. & F. ward J. Design of prestressed Brickwork. Brick Development Association, 1986
- 6 梁国晃. 建筑部件的变形与裂缝. 广州:广东高等教育出版社, 1988. 7
- 7 建筑抗震设计规范(GBJ11—89). 北京:中国建筑工业出版社, 1988
- 8 多层砖房设置钢筋混凝土构造柱抗震设计与施工规程(JGJ 13—82). 北京:中国建筑工业出版社, 1982
- 9 张海峰等. 高 2.8 m 宽 2.6 m 带构造柱原型墙片抗震性能试验研究. 四川省建筑科学研究院, 1982. 2

(编辑:刘家凯)

## THE STRAIN OF THE BARS IN THE STRUCTURAL COLUMNS OF THE PRESTRESSED EARTHQUAKE-RESISTANT BRICK-WALLS

*Luo Wankang*

(Chongqing Jianzhu University)

*Wang Tianxian*

(North-West University of Architecture, Xian, Shanxi)

**ABSTRACT** Through the comparative tests of prestressed and non-prestressed brick-walls under the repeated lateral loading, the effect of the prestress-force to the strain distribution in the non-prestressed bars of the structural columns has been investigated. This effect is beneficial; the prestress-force will reduce the value of strain in the bars of the lower part in the columns and uniformize the strain distribution along the whole height of the columns. Furthermore, instead of a strain reduction, the strain of prestressed bars will increase along with the increasing of the lateral load. Thus, the coefficient of prestress-force-increase could be calculated in the two stages of the crack-resistance and ultimate bearing capacity. As a result, both the prestressed and non-prestressed bars are able to give the potential of their bearing capacity a full play, and improve the earthquake-resistant property.

**KEY WORDS** prestress force, strain distribution, coefficient of prestress-force-increase, potential of bearing capacity, earthquake-resistant property