

受压构件外包玻璃钢补强 加固计算方法探讨*

罗建群 张慧娟 赵治广

山 东 工 业 大 学
一九九四年九月

*国家自然科学基金和山东省自然科学基金联合资助

受压构件外包玻璃钢补强加固计算方法探讨*

罗建群 张慧娟 赵治广

(山东工业大学)

[摘要]对已产生顺筋裂缝等破损现象的轴心或偏心受压砼或钢筋砼构件,可以采用外包玻璃钢的方法进行补强加固。笔者试验结果表明:由于在构件外面包覆了抗拉性能高的表层玻璃钢后,补强层将约束砼的横向变位。其结果将较大幅度地提高构件的承载能力,本文通过理论分析,分别探讨了轴心受压和偏心受压外包玻璃钢构件的补强加固计算方法,推导了有关计算公式,经与试验对比及部分工程中使用,证明是基本合理的,可供补强设计参考使用。

关键词:玻璃钢; 受压构件; 补强加固; 计算方法。

一、引言

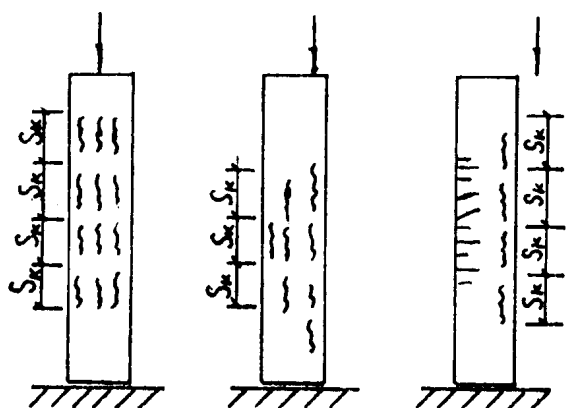
砼或钢筋砼受压杆柱最常见的破坏形式是在纵向产生顺筋裂缝,严重的顺筋裂缝也是受压杆柱的破坏先兆。对于大偏心受压杆柱尚可能在受拉区最大弯矩附近出现横向裂缝。其原因是多方面的。有的是因设计不当,配筋不足或砼标号设计过低,在正常受力条件下即产生顺筋裂缝;有的系因施工质量不佳,材料性能不良而引起裂缝;有的则系因碳化、冻融、氯离子侵入等自然老

* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金联合资助

化而引起裂缝等。本文重点讨论正常受压条件下产生的裂缝破坏形式及其采用外包玻璃钢的补强加固计算方法。

(一) 钢筋砼受压杆柱的破坏形式

钢筋砼受压杆柱在正常受力条件下产生裂缝的主要形式如下:



中心受压柱 小偏心受压柱 大偏心受压柱

图1 杆柱在正常荷载作用下的裂缝

1、轴心受压杆柱的裂缝:当杆柱内砼的压应力达到棱柱体抗压强度后,开始出现短的纵向裂缝。其长度一般约为箍筋的间距 S_k , 有的纵向裂缝也可贯通全杆柱。

2、小偏心受压破坏杆柱的裂缝:纵向裂缝首先在受压侧出现,当其砼的压应力达到极限抗压强度时,该侧裂缝逐渐增多,而另一侧则数量较少。再后,数量较少的一侧也逐渐增加,当构件破

坏时，两侧数量大致相等。

3、大偏心受压破坏杆柱的裂缝：其受力状况与受弯构件相同。当偏心压力达到一定程度后，首先在受拉侧出现横向裂缝，且随荷载的增加不断的发展和加宽，在更大的荷载下形成一条明显的主裂缝并向受压侧延伸，砼截面缩小，受压区出现纵向裂缝，砼被压碎而导致构件破坏。其破坏形式与受弯构件破坏情况相似。

(二)结构的检测、验算与评估

对于已产生顺筋裂缝的钢筋砼杆柱，应通过现场检测和结构验算以及对其结构可靠程度进行评估。当经专家评定认为，结构强度已明显不足，但尚余强度和刚度仍可资利用时，即可采用外包玻璃钢内灌树脂基液的方法或其他方法进行补强加固。

1、构件现状检测：主要包括

a) 构件截面尺寸：测量该构件在去除剥落、酥松、缺角、掉棱、蜂窝、麻面等严重缺陷后的各部实际尺寸，作为补强时仍保留的原构件尺寸。另外，还要通过实测其保护层厚度。

b) 构件砼的强度：通过砼回弹仪或采用超声——回弹综合法测定原构件砼的实际强度。

c) 裂缝检测：利用刻度放大镜等实测该构件的裂缝宽度，深度、长度、走向及裂缝分布等。

d) 钢筋锈蚀检测：通过GXY—1型钢筋锈蚀测量仪或其他方法检测钢筋锈蚀可能性。有条件时，还应对原有钢材的材质进行检验。据此，可对砼内钢筋当前尚存的承载能力作为恰当的评估。

2、结构验算

根据上述检测数据和该构件的受力条件，对其结构强度进行

验算。若该构件的承载能力不能满足要求时，则必须及时进行补强加固。如果经检测，按实际的砼及钢筋现状，进行结构计算，其承载能力尚能满足要求时，也应采取钢筋除锈、裂缝修复或保护层修补等方法处理，以保证其耐久性。

3、工程老化病害程度的评估

对于砼或钢筋砼受压杆柱工程老化病害程度的评估，目前国内尚无统一的评估标准，对于常见的中小型水工建筑物，也可根据影响这类构件安全性和耐久性的主要因素，如砼的强度，裂缝情况和钢筋锈蚀程度等进行分项评级，然后采用记分加权的综合评估方法，对该构件进行总体评定。一般可评定为下面四种状态

a) 第一类，属基本完好的构件。其可靠性应满足国家现行规范要求。对此种构件，只需正常维护，而无需修理。

b) 第二类，属轻微破坏的构件。其可靠性略低于国家现行规范要求，但尚不影响正常使用。对此类构件，一般可在个别部位或表面采取适当措施，并加强维修保养。

c) 第三类，属破坏较严重的构件。其可靠性不满足国家现行规范要求，已明显影响结构的安全性、适用性和耐久性。对此类构件，应及时采用补强加固措施，以恢复其正常运用功能。延长工程寿命。

d) 第四类。属破坏严重的构件。其可靠性已严重不满足现行规范要求。对这类构件，必须立即采取可靠的补强加固措施，否则应报废重修。在修补加固前，一般不宜继续按原设计标准运行以策安全。

显然，经检测、验算和评估，确认属第三类和第四类的构件

则必须进行补强加固。

(三) 砼或钢筋砼杆柱常见的补强加固方式

对于此类病害，过去国内最常采用外包砼加固法和外包钢加固方法。也有的采用托梁拔柱法。近年来，我们对某些外露的杆柱，也尝试了采用外包玻璃钢的加固方法。

1、外包砼加固法：此类系在原杆柱上外包砼或钢筋砼，即加大其截面，进行加固。如对轴心受压构件四周采用等厚的钢筋砼围套加固；对小偏压构件可采用不等厚度的钢筋砼围套加固；对大偏压构件也可采用双面钢筋砼围套加固等。这类加固方法要求必须具有扩大截面的空间；且有可能地进行扩大钢筋砼杆柱断面的施工可能性；另外，还必须切实做好新旧砼的结合措施，避免新砼收缩时，在结合面处产生脱裂现象。

2、外包钢加固：此法是在构件四周包以型钢（角钢、槽钢、钢板等）加固。如在构件四周沿构件全长或某一段设置角钢，横向用缀板或螺旋套箍将角钢连成整体，成为外包于构件的钢构架，以期完全替代或部分替代原构件工作。外包钢加固可分为干式和湿式两种。干式外包法是将角钢直接外包于被加固构件四周；湿式外包法则在角钢和被加固构件之间留有一定间距，中间浇注砼，实际上是一种外包钢和外包砼相结合的复合加固方法。此法适用于使用上不允许多增截面尺寸，而又需要大幅度地提高承载力的砼结构的加固。当采用化学灌浆外包钢加固时，型钢表面温度不应高于60℃，当环境具有腐蚀介质时，应具有可靠的表面防护措施。

3、托梁拔柱法：此法是在不拆或少拆上部结构的情况下拆除、

更换、接长柱子的一种加固方法。按其施工方法的不同，又可分为有支撑托梁拔柱、无支撑托梁拔柱和双托梁反牛腿托梁拔柱等。适用于要求改变使用功能、增大空间的结构加固。一般施工中较为麻烦。

4、外包玻璃钢加固：对于四面凌空的杆柱，在不允许扩大截面或在外包砼、外包钢加固施工不便时，可采用表面包覆轻质高强、粘结力大、易于施工的玻璃钢。同时在杆柱裂缝处予留灌浆孔，在表面用玻璃钢封闭后再用同类树脂基液进行低压灌浆，以恢复结构的整体性和提高其承载能力。采用外包玻璃钢的方式，除为裂缝灌浆时起封闭作用外，更重要的是可利用抗弯、抗拉性能高的表面玻璃钢补强层来限制受压钢筋砼杆柱的横向变形，从而达到提高承载能力的补强加固目的。此法施工方便，尤其适用于野外凌空高度较大，以及断面形状复杂的杆柱处理。

二、外包玻璃钢加固的受压构件试验研究

为探讨受压砼或钢筋砼外包玻璃钢后的受力特性和破坏机理，我们在室内进行了砼及钢筋砼受压试件在外包玻璃钢前后的对比试验。

(一) 试验方法

1、试件制作：按不同的砼配比，先后制作了 C_{10} 和 C_{20} 级的 $cm: 15 \times 15 \times 30$ 砼及钢筋砼试件分别为17块和6块， $cm: 15 \times 15 \times 30$ 砼及钢筋砼试件分别为6块和12块，在钢筋砼试件中，分别配有4根 $\phi 8$ ($15 \times 15 \times 15$ 试件)或4 $\phi 12$ ($15 \times 15 \times 30$ 试件)的纵向钢筋和3—5根 $\phi 4$ 的钢箍(间距为7cm)，各试件均采用人工浇筑成型并经

常规养护而成。其中，18个不同类型的试件都先进行抗压试验，并在其破坏后选取尚可修复的6块，经修补后再包玻璃钢，其余20块则为直接包覆玻璃钢。另外，还有三块(I-1, I-2, I-3)为劈裂试验后的立方体试件，将每个试件的两半部分对接后，用树脂腻子封闭表面再糊制玻璃钢，固化后通过预留的灌浆嘴进行环氧树脂灌浆。糊制玻璃钢中，又分为环氧树脂及聚酯树脂两种，补强层中又有2—5层之分。玻璃丝布均采用无碱无捻无蜡的方格布。除表面层为EWR-200者外，其余各层均为EWR-400。

2、试验方法：各试件均在竖向贴有两个应变片，以测定其纵向应变，部分试件还在横向贴有两个应变片，以测定其横向变形。试验是在YW-2000型液压式试验机上进行的，其最大量程为2000KN，最小读数为2KN。试验中采用YJR-5型静态数字电阻应变仪，每隔10KN测读一个应变值，各试件均在200KN范围内进行两次加、卸载测试，第三次仍按上述方法加载，逐点测读直至破坏。

3、试验结果：试验的主要结果如表1。包覆玻璃钢后纵向应变与横向应变的关系如图2，各试件受压过程中的应力—应变曲线如图3。

4、成果分析：试验结果表明

1、外包玻璃钢后，试件的极限承载力都较同类的未包件为高，但提高的幅度不尽相同，一般随包覆层数增加而加大。如包覆二层时，约提高28—50%，而包覆五层时可提高72—94%，如有补强要求时，对素砼构件宜在3层以上，对钢筋砼构件，宜在4—5层以上。

表1、试验结果汇总表

设计标号	试件种类	编号	砼试件试验结果			外包玻璃钢后试件试验结果					
			极限荷载 R_m (KN)	极限强度 σ_m (MPa)	平均值 $\bar{\sigma}_m$ (MPa)	种类	布层	试件状况	极限荷载 F_m (KN)		
C10	15×15×15 素砼	I-1				聚 酯	2	劈裂试件包后灌浆	272		
		I-2							232		
		I-3							350		
		I-4			9.76	聚 酯	2	直接包	336		
		I-5							308		
		I-6							344		
		I-7	208	9.24							
		I-8	233	10.36							
		I-9	218	9.69							
	15×15×30 素砼	II-1				环 氧	3	直接包	432		
		II-2							498		
		II-3	228	10.15	10.41						
		II-4	264	11.73							
		II-5	277	12.31							
		II-6	168	7.47							
C20	15×15×15 素砼	III-1				环 氧	4	直接包	782		
		III-2							716		
		III-3							590		
		III-4			0.4	环 氧	2	直接包	440		
		III-5							607		
		III-6							601		
		III-7	338	15.02	17.25						
		III-8	438	19.47							
	15×15×15 微膨胀	IV-1				环 氧	2	直接包	950		
		IV-2							796		
		IV-3							914		
		IV-4	664	29.51	30.78	聚 酯	5	压碎后包	1120		
		IV-5	710	31.56					1252		
		IV-6	704	31.28					1204		
	15×15×30 微膨胀	V-1			18.05	聚 酯	3	直接包	580		
		V-2					5		814		
		V-3							880		
		V-4							754		
		V-5							736		
		V-6							744		
		V-7	382	16.98			压碎后包		792		
		V-8	350	15.56					718		
		V-9	324	14.40					838		
		V-10	396	17.60							
		V-11	472	20.98							
		V-12	514	22.80							

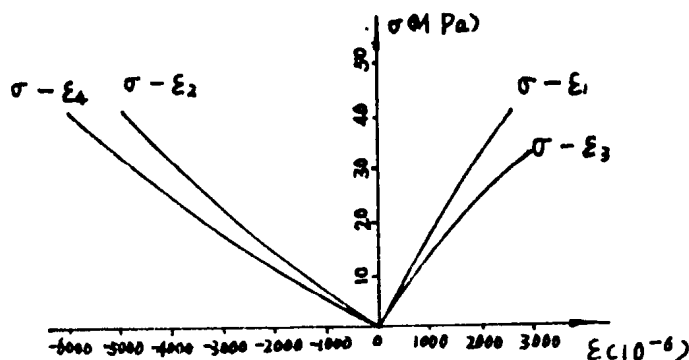


图2 包覆玻璃以后柱应力—应变曲线
(注: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为横向应变, $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ 为纵向应变)

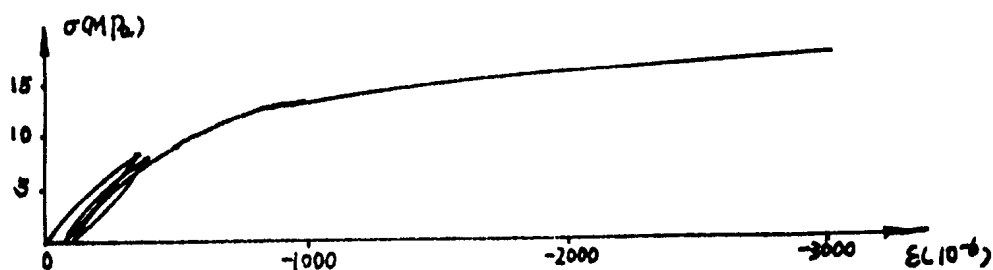


图3 II-1试件竖向应变片所测应力—应变曲线

2、在同样包覆条件下, 长方体 $\text{cm: } 15 \times 15 \times 30$ 的试件, 提高幅度较立方体 $\text{cm: } 15 \times 15 \times 15$ 为大; 同标号的素砼件提高的幅度较钢筋砼构件为大; 低标号砼的提高幅度较高标号砼的提高幅度为大。

3、条件相同的情况下, 无论在直接包覆或是已经破损, 但经修补并包覆后进行环氧灌浆处理的各类试件, 其增强效果都相接近。

4、应变实测试验结果表明：其横向拉应变(ε_1 和 ε_3)为纵向应变(ε_2 和 ε_4)的一半左右。在加载过程中，随着荷载增加，试件的压应力增大，而表面玻璃钢的横向拉应力也随之增加。这一事实充分证明其承载能力的提高，是来自外包抗拉性能高的表层玻璃钢补强层对砼横向变位约束的结果。

三、外包玻璃钢加固轴向受压构件的计算方法探讨

(一) 计算依据

根据上述试验结果，外包玻璃钢后砼或钢筋砼构件在轴向受压情况下的应力应变特性与未包前试件不尽相同。当随轴向压力加大而使砼应力接近其抗压强度时，砼内部裂缝将引起体积膨胀而挤压玻璃钢，此时，约束砼横向变形的玻璃钢层将产生拉应力，且随纵向压力增大而增加。当该拉应力达到玻璃钢的极限抗拉强度时，玻璃钢将开裂，原构件砼同时被压碎，随之破坏。显然，加固后由于外包的玻璃钢层约束了构件的横向变形，必将提高其承载能力，并明显地提高了延性。

试验结果表明，加固构件在极限状态时，其抗力主要来自玻璃钢补强层在约束横向变形中产生的拉力。

(二)、计算公式推导

1、截面上的力平衡关系

对矩形截面的轴心受压杆柱，取其单位长 $l_0=1$ 时的截面，外包玻璃钢补强层的受力图形如图4。

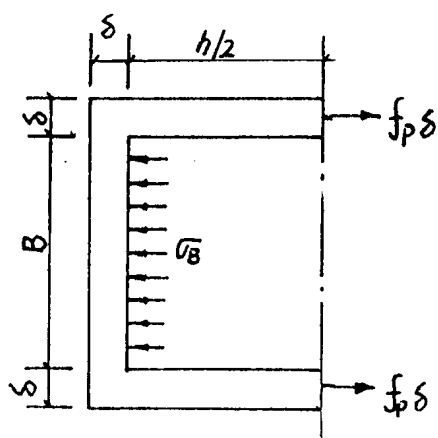


图4 计算截面受力图

图中

δ ——玻璃钢补强层的厚度；

f_{pk} ——玻璃钢的抗拉强度标准值；

B ——加固前杆柱的实际截面宽度；

h ——加固前杆柱的实际截面高度；

σ_B ——外包玻璃钢与砼间的侧向约束压力强度。即为当外包玻璃钢的压应力达到设计抗拉强度时，原砼构件受到的侧向压应力值。

根据该受力图的平衡条件，由 $\sum x=0$ 得：

$$-\sigma_B \cdot B + 2f_{pk} \cdot \delta = 0$$

$$\text{则, } \sigma_B = \frac{2f_{pk} \delta}{B} \quad (1)$$

2、对侧向约束压力的分析

据实验与增强机理分析，外包玻璃钢后杆柱的承载能力将增

大。设杆柱的轴向抗压强度将由未包前的 f_h 增大至 f_{hr} ，其增加值又与上述外包玻璃钢层对原构件施加的约束力强度 σ_s 的大小有关。假设两者间为线性相关。

$$\text{则有: } f_{hr} = f_h + \alpha \cdot \sigma_s \quad (2)$$

即

$$\alpha = \frac{f_{hr} - f_h}{\sigma_s} \quad (3)$$

式中， α ——侧向应力相关系数；

f_{hr} ——外包玻璃钢后的轴心抗压强度；

f_h ——未包玻璃钢前的轴心抗压强度；

将(1)式代入(3)式，得：

$$\alpha = (f_{hr} - f_h) \cdot \frac{B}{2f_{hr} \cdot \delta}$$

如果原杆柱砼的极限荷载为 P_m ，而外包玻璃钢加固后杆柱的极限荷载为 P_{mr} 的话，则上式可表达为：

$$\alpha = \frac{P_{mr} - P_m}{2h \cdot f_{hr} \cdot \delta} \quad (4)$$

不难看出， α 值可由试验并由上式计算获得。

3、侧向应力相关系数 α 值

根据上述外包玻璃钢加固前后的受压构件试验结果(表1)，并取

试件截面高度 $h = 150\text{mm}$ ；

玻璃钢的抗拉强度，取极限破坏抗拉强度 $f_{tr} = 200\text{MPa}$

玻璃钢的包层厚度平均值，按1.4倍的布层厚度计时，当包层数分别为2，3，4，5层时，其包层厚度 δ 分别为0.84，1.40，1.96和2.52mm。据此，可按(4)式求得极限破坏时实测的 α 值如表2。

表中 h 值是试验室实测值， δ 值则系根据玻璃包覆时所用玻璃丝布规格及层数，按照统计值计算求得的玻璃钢层厚度， f_{yk} 值是以往多次实测结果。在本次试验中，也进行了抽样测试认定。

表2中每个数据，原则是由三个以上试件测试结果的平均值。

根据上述实测结果的分析表明：侧向应力系数 α 值主要取决于原构件截面高度 h 和玻璃钢补强层的抗拉强度 f_{yk} ，而玻璃钢包覆层厚度 δ 以及试件内是否加筋等影响不大。柱高30cm的试件较柱高15cm的试件，其试验实测数据的离散程度较小。

综上所述，本试验实测的 α 值是基本合理的，可供补强设计中参考。为安全计，可取 $\alpha = 2.0 \sim 2.5$ 。短柱可取较小值，长柱可取较大值。对于长柱有望获得更好的补强效果。

(三) 轴向受压构件补强截面强度计算

由杆柱的纵向平衡条件得(图5)：

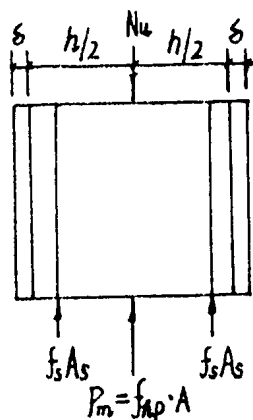


图5 轴压构件的受力状态

表2 实测 α 值

砧 标 号	C10		C20		C20		
	15×15×15	15×15×30	15×15×15	15×15×30	15×15×15	15×15×15	15×15×30
试件尺寸(mm)	15×15×15	15×15×30	15×15×15	15×15×30	15×15×15	15×15×15	15×15×30
配 筋	/	/	/	/	纵筋4 ϕ 8k, 箍筋3 ϕ 4	纵筋4 ϕ 12, 箍筋5 ϕ 4	
包裹层数	2	3	2	4	2	3	5
玻璃铝层厚度 δ (mm)	0.84	1.40	0.84	1.96	0.84	1.40	2.52
未包前的破坏荷载 P_m (KN)	219.7	234.5	388.0	388.0	692.7	692.7	406.3
包裹后的破坏荷载 P_{mp} (KN)	307	465	559.5	749.0	886.7	1192	784.2
α ($P_{mp}-P_m$)/ $2hf_p k \delta$	1.732	2.744	3.403	3.070	3.849	2.068	2.499

$$N_u = f_{fr} \cdot A \cdot f_s \cdot A_s \quad (5)$$

将(1)和(2)式代入(5)后得

$$\begin{aligned} N_u &= (f_c + \alpha \frac{2f_r \cdot \delta}{B}) B \cdot h + f_s A_s \\ &= f_c \cdot A + 2\alpha \cdot f_r \cdot \delta \cdot h + f_s \cdot A_s \end{aligned}$$

承载力极限状态方程为:

$$N \leq N_u = f_c \cdot A + 2\alpha \cdot f_r \cdot \delta \cdot h + f_s \cdot A_s \quad (6)$$

如果考虑杆柱的纵向弯曲时

$$N \leq \phi (f_c \cdot A + 2\alpha \cdot f_r \cdot \delta \cdot h + f_s \cdot A_s) \quad (7)$$

式中:

f_{fr} ——外包玻璃钢后柱的抗压强度设计值;

N ——结构荷载效应(轴向压力);

N_u ——结构截面抗力;

f_c ——砼抗压强度设计值;

f_s ——钢筋抗压强度设计值;

f_r ——玻璃钢抗拉强度设计值;设计时,为安全计,可取 f_p

$= 50 \sim 100 \text{MPa}$

δ ——钢筋的包覆层厚度;

h ——杆柱砼截面长度;

B ——杆柱砼截面宽度;

A ——杆柱砼截面面积;

A_s ——杆柱砼截面内钢筋面积;

α ——侧向应力系数;

ϕ ——杆柱的纵向弯曲系数。

[示例]

已知某轴向受压的钢筋砼柱，柱长 $L=6\text{m}$ ，横截面为 $h \times b=30 \times 30\text{cm}$ 。原设计承受轴向压力 $N_0=1000\text{KN}$ 。采用 C_{20} 钢筋砼结构，实配受压钢筋面积为 $A_{s0}=19.64\text{cm}^2$ ($4\phi 25$)，砼保护层厚度 $a=2.5\text{cm}$ 。砼抗压强度设计值 $f_c=10\text{N/mm}^2$ ，采用I级钢筋，其抗压强度设计值 $f_s=210\text{N/mm}^2$ 。由于实际运用中要求提高其承载能力。按可靠度设计求得其荷载效应为 $N=1500\text{KN}$ 。如果选用玻璃钢补强加固设计方案，试确定其包层厚度。

解：(一) 计算校核：

1、计算长度 $l_0=0.7L=0.7 \times 6.0=4.2\text{m}$

2、纵向弯曲系数 ϕ ：

由 $l_0/b=420/30=14$ ，查得 $\phi=0.92$

3、求所需的纵向钢筋面积 A_s ：

$$\begin{aligned} A &= b \cdot h = 30 \times 30 = 900\text{cm}^2 = 9 \times 10^4\text{mm}^2 \\ A_s &= \frac{N/\phi - f_c \cdot A}{f_s} = \frac{1.5 \times 10^6 / 0.92 - 10 \times 9 \times 10^4}{210} \\ &= 3478\text{mm}^2 = 34.78\text{cm}^2 \\ &> 19.64\text{cm}^2 \end{aligned}$$

4、按原配筋面积求所能承受的轴向力：

$$\begin{aligned} N_0 &= \phi (A_{s0} f_s + f_c \cdot A) = 0.92 \times (1964 \times 210 + 10 \times 90000) \\ &= 1207445\text{N} = 1207\text{KN} < 1500\text{KN} \end{aligned}$$

经校核，现有配筋不足，需补强加固。

(二) 确定玻璃钢的包覆厚度