

# 体外预应力锚固横梁拉应力域法配筋

徐 栋, 孙 远

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:** 针对体外预应力混凝土桥端锚固横梁内侧承受较大拉应力且传统配筋方法有所欠缺的现状, 提出一种新方法——“拉应力域法”配筋: 对于承受主拉、压应力, 存在有规律的二维“拉应力域”实体结构, 可连续划分二维“拉应力域切片”, 通过对各切片网格配筋的方式以承担混凝土拉应力的正交分量, 并以“拉应力域深度”控制网格的纵向布置区域. 以某体外预应力端锚固横梁为例, 建立有限元模型, 并考虑锚固端横、竖向预应力的影响. 应用拉应力域法配筋的分析结果表明, 锚固端横、竖向预应力对于配筋量有较大影响, 原设计竖向钢筋过多, 横向钢筋分布不尽合理, 而拉应力域法可根据实际应力分布来配筋, 结果更准确.

**关键词:** 端锚固横梁; 拉应力域法; 拉应力域切片; 拉应力域深度; 有限元; 配筋

中图分类号: TU 318

文献标识码: A

## Reinforcement Design for Anchorage Beams of Externally Prestressed Bridges Based on Tensile Stress Region Method

XU Dong, SUN Yuan

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on well-regulated two dimension tensile stress regions at the back of anchorage structures of prestressed concrete bridges, a new method on reinforcement design named “tensile stress region method” is advanced for the lack of reinforcement theories. The blocks can be divided into several tensile stress region slices, then the web reinforcement is raised up to bear the tensile stress orthonormal value for each, and the notion “tensile stress region slice depth” is advanced to control the longitudinal length of reinforcement. An example of external prestressed anchorage reinforcement is analyzed by means of tensile stress region method, thus a finite element model is built up. In addition, the influences of transverse, vertical prestressing are

also taken into consideration. The results show that the reinforcement amount is affected obviously by the transverse, vertical prestressing at the anchorages when the tensile stress region method is used, this method can set steel bars according to the stress state, and more exact reinforcement results can be obtained.

**Key words:** end anchorage beam; tensile stress region method; tensile stress region slice; tensile stress region slice depth; finite element; reinforcement

体外预应力桥梁一般由部分预应力拉索通过端锚固横梁来锚固, 因此, 锚固横梁内侧会出现较大拉应力. 由于预应力束布置在梁截面外部, 体外束完全依靠锚固系统提供预加力, 一旦锚固结构出现问题, 将导致体系崩溃. 锚固结构因为几何和受力都比较复杂, 难以用传统设计方法计算. 近年来, 拉压杆模型方法<sup>[1-2]</sup>由于可以让设计者认清构造和受力区域的传力机制, 在构造区域的配筋设计上得到广泛应用, 并被美国、加拿大等国写进规范<sup>[3]</sup>. 拉压杆模型通常可以提供配筋总量, 但在处理配筋的分布形式上仅限于构造<sup>[4]</sup>, 并且在确认力的传递形式上有较高要求: 需要将实体结构的上下、左右分块以模拟拉杆和压杆. 对于规则实体结构, 该方法计算比较准确, 但是对于不规则实体结构, 则有局限性. 如有过人洞的锚固横梁, 左右方向难以准确分块, 再加上某些桥梁横、竖向预应力对其内侧应力分布的影响, 配置普通钢筋在准确性和实用性上都有待商榷.

笔者针对类似结构, 提出混凝土“拉应力域法”配筋理论<sup>[5-6]</sup>. 该设计理论不需要依赖结构的规则性, 而以应力为基础, 强调网格钢筋的抗主拉应力作用, 通过网格配筋方式以承担混凝土拉应力的正交分量. 该设计理论的特点是: 在使用阶段, 控制参数为限制混凝土裂缝宽度的钢筋拉应力; 在极限阶段,

收稿日期: 2009-04-04

作者简介: 徐 栋(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土桥梁结构分析. E-mail: xu\_dong@tongji.edu.cn  
孙 远(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为大跨度混凝土桥梁结构分析. E-mail: sunxiao\_1981@sohu.com

控制参数为纵横向钢筋的面积. 下面结合该理论, 对某体外预应力端锚固横梁内侧分析应力和计算配筋, 提出配筋设计的新概念和方法.

## 1 拉应力域配筋理论

### 1.1 板式结构的拉应力域

一般来说, 混凝土的腹板是承受主拉应力和主压应力的二维主应力区域, 而且是有规律的, 即混凝土板厚度方向的应力分布是均匀的. 这样, 在混凝土构件中可以定义具有相似(主)拉应力分布规律的区域为“拉应力域”. 箱梁的顶、底板也具有类似规律. 因此, 可认为所有组成箱梁断面的板式结构的内纵、横向配筋都是需要设计计算的抗主拉应力钢筋. 也就是说, 箱梁整体受力反映到各个“板”上, 均是面内受力, 箱梁顶板、底板和腹板均是同时承受正应力和剪应力, 二者合成主压应力和拉应力, 是二维的主应力区域. 特别是对于近似纯弯的受弯简支箱梁跨中腹板部分, 该区域的主要特点是:

(1) 面外剪应力相对面内主应力来说非常小, 使主应力偏离出板面的程度非常小, 同时, 板厚方向

面外剪应力差也非常小. 根据应力传递规则, 在板的厚度方向, 主应力分布均匀.

(2) 面内剪应力相对面内纵向正应力来说较小, 使主应力在面内偏离纵向的程度较小, 同时, 在垂直于主应力的腹板高度方向上面内剪应力差也较小, 进而主应力沿该方向变化比较均匀, 可沿该方向分层, 并在各层配置纵向筋抵抗主拉应力.

### 1.2 块体结构的拉应力域及其切片的划分依据

对于块体结构来说, 同样存在拉应力域. 体外预应力端头锚固横梁在承受锚固力时, 其内侧横截面的受拉区域主要承受面外双向梁式弯矩, 且其横向切面的面内二维应力分布, 沿纵向具有一致的规律性. 等厚切片可从横梁内侧往端头方向考察到. 从切片中取出微元体(如图 1a 所示), 在切片面内一定范围受到近似双向纯弯曲的状态下, 该区域内  $S_y, S_z$  近似为“切面内主应力”,  $Oxy, Oxz$  平面可类比于箱梁腹板面. 不妨以本工程模型为例(划分方式如 3.1), 考察不同切面横、竖向应力最大点的剪应力与近似主应力的相对大小. 由表 1 可知, 对该结构不管是否考虑孔洞, 靠近锚固横梁 5 个切面的应力比值均不超过 10%.

表 1 剪应力的影响比例

Tab.1 Impact proportion of shear stress

%

切面编号	有孔洞应力比				无孔洞应力比			
	$ S_{xy} / S_y $	$ S_{xz} / S_z $	$ S_{yz} / S_y $	$ S_{zy} / S_z $	$ S_{xy} / S_y $	$ S_{xz} / S_z $	$ S_{yz} / S_y $	$ S_{zy} / S_z $
1#	0.16	1.24	0	2.86	0.17	0.21	0	2.39
2#	2.70	2.61	0	3.46	0.62	2.53	0	3.14
3#	5.52	6.50	0	3.03	1.70	3.48	0	3.76
4#	7.49	7.47	0	3.47	6.04	6.98	0	3.46
5#	9.52	4.96	0	3.45	7.17	5.18	0	3.06

根据 1.1 的分析, 表 1 基本满足以下条件:

(1)  $Oxy$  和  $Oxz$  平面外剪应力  $S_{zy}$  和  $S_{yz}$ , 相对主应力  $S_y$  和  $S_z$  很小, 因此, 主应力  $S_y$  和  $S_z$  偏出  $Oxy$  和  $Oxz$  的程度很小, 并且在切片面内的一定区域内分布比较均匀.

(2)  $Oxy$  和  $Oxz$  平面内剪应力  $S_{xy}$  和  $S_{xz}$  相对主应力  $S_y$  和  $S_z$  较小, 故  $S_y$  和  $S_z$  分别在  $Oxy$  和  $Oxz$  内偏离的程度较小, 切片在厚度方向有均匀的二维主应力分布. 这也是切片沿厚度方向能划分的依据.

在图 1a 中一定区域内的点均具有类似规律, 因此, 在内侧切片面内一定区域和纵向一定“深度”范围内, 块体切片存在类似于纯弯腹板结构的拉应力域. 该区域即作为端锚固横梁内侧配筋设计的主要

区域. 图中,  $Oxy$  和  $Oxz$  面内剪应力、 $Oxy$  和  $Oxz$  面外剪应力、块体结构拉应力域, 类比于箱梁纯弯腹板的应力分层.

判定了拉应力域切片之后, 可在该二维主应力区域内用面内正交钢筋网抵抗横、竖向拉应力. 假设横梁内侧受拉钢筋布置间距为 10 cm, 以该钢筋网纵向位置为中心, 前后各 5 cm 即截取 10 cm 厚的横梁切片——偏安全起见, 认为各切片横、竖向截面上的最大拉应力在该截面拉应力区域均匀分布——就可以很方便地得出各层切片在箱梁横向和竖向的拉力, 再依据此拉力可以得出钢筋的配置面积. 拉应力域法的应用如图 1b, c, d 所示(图中 A 表示截面积).

在拉应力域的配筋法中, 将薄片结构中的应力

分布看成是最大应力的均匀分布.这和实际情况相比明显是偏大的,特别对于面积大的横梁更加明显.所以在实际设计中,可以按应力的大小情况分区域设计配筋,使配筋结果更为准确.当混凝土中拉应力

小于 1 MPa 时,不再配置受拉钢筋,可按构造要求配筋.这种配筋方法直接利用实体单元的应力分析结果,过程较简单;配筋结果就是每层需要配置的钢筋数量,从某种程度上也简化了钢筋的布置工作.

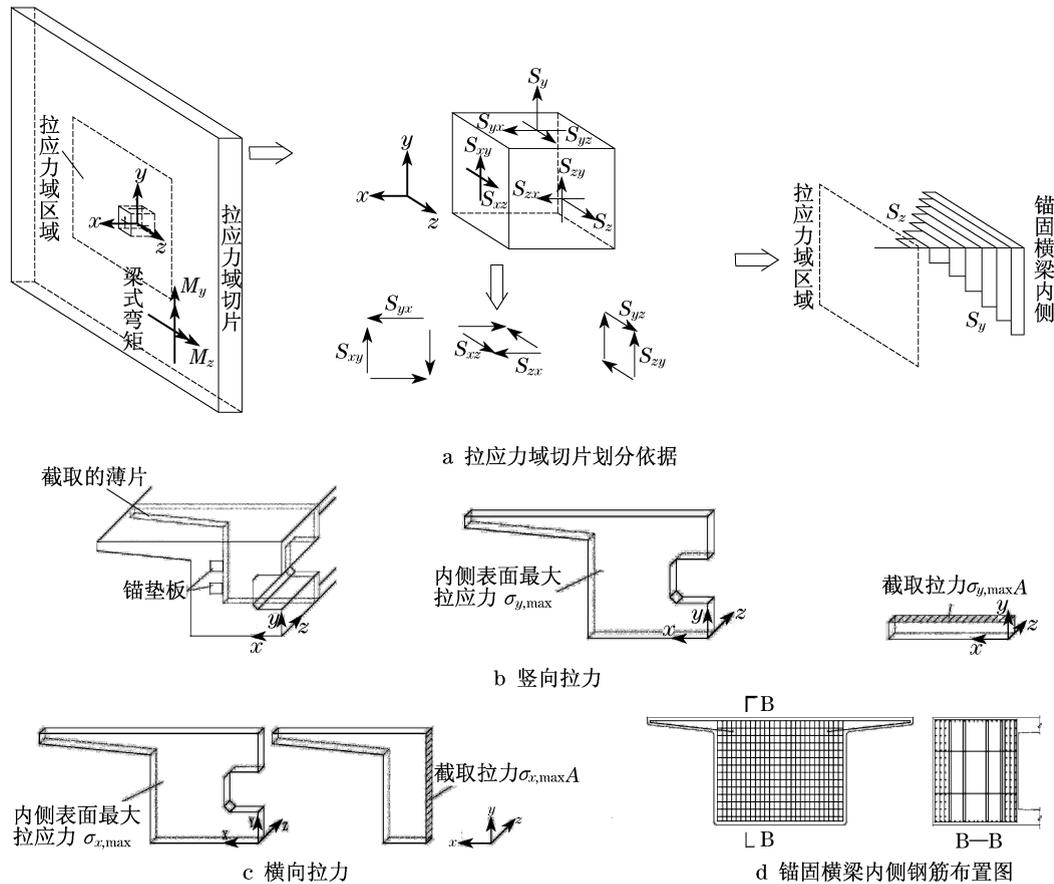


图 1 拉应力域法配筋

Fig.1 Tensile stress method reinforcement

### 1.3 实体结构的拉应力域深度

根据拉应力域的分布规律可以定义实体结构“拉应力域深度”的概念,如图 2 所示.从锚固横梁内侧往外侧方向,存在拉应力域连续横向切片延伸的总长度  $L$ ,概念上类似于受弯混凝土梁的受拉区高度,并定义直到横向切片中最大拉应力小于 1 MPa 时,拉应力域终止.因此,拉应力域深度  $L$  决定了设计中需要计算的横向切片的数量以及钢筋网布置的纵向区域.若将锚固横梁在承受锚固力时的状态看作是由顶、底板和边腹板四边弹性支撑的梁体,则内侧截面的面内双向受拉是由于锚固力作用产生的双向弯曲引起的,由于一般横向弯矩和竖向弯矩不同,故竖向拉应力域深度  $L_2$  一般不等于横向拉应力域深度  $L_1$ .对于特定的锚固横梁,其拉应力域深度主要受端头锚固力、锚固形式、局部横向以及竖向预应力筋的影响.

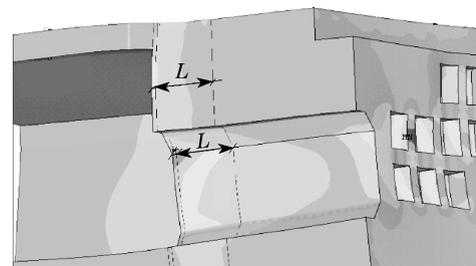


图 2 拉应力域深度图示

Fig.2 Tensile stress region depth

在计算配筋时,对于可连续划分拉应力域切片的任意实体结构,在拉应力域深度范围内,平行于切片的任何相邻截面的最大拉应力应是连续的.如以垂直于拉应力域切片的轴作为横轴  $x$ ,最大拉应力截面位置作为起始零点,则对于  $x_i$ ,当  $0 \leq x_i \leq L_k (k=1,2)$  时,最大拉应力为函数  $p(x)$ .见图 3.

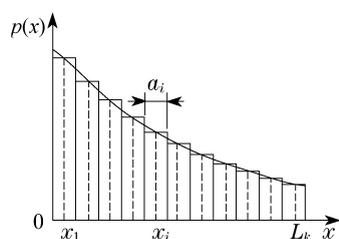


图3 拉应力域深度函数

Fig.3 Tensile stress region depth function

设拉应力域深度范围内,总的横、竖向拉力为  $N_1, N_2$ , 则有

$$N_k = \int_{L_k} p(x) dx \approx \sum_i a_i p(x_i), \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

式中,  $a_i$  为  $x_i$  处的切片厚度. 设配置的横、竖向钢筋使用阶段最大应力为 150 MPa, 在拉应力域深度范围内的横、竖向钢筋根数分别为  $n_1, n_2$ , 单根钢筋面积为  $s$ , 则

$$n_k = \text{Int}[N_k/150s] + 1, \quad k = 1, 2 \quad (2)$$

式中, 下标  $k = 1, 2$ , 分别表示横、竖向.

因此, 在应用拉应力域法为实体结构配筋时, 求解拉应力域深度对配筋过程具有指导意义.

## 2 有限元分析模型

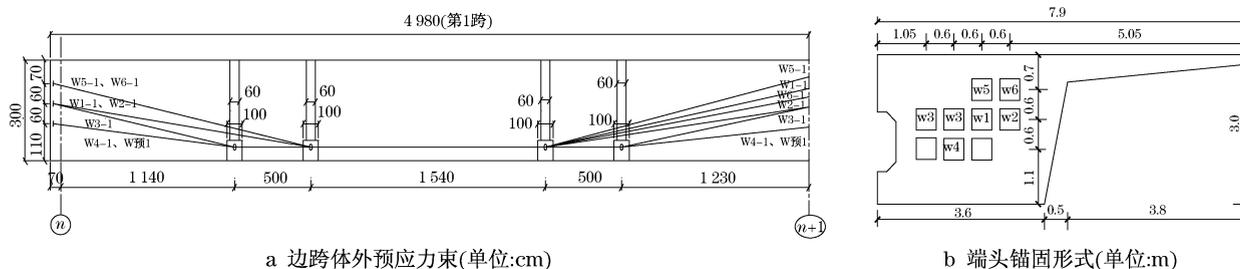
### 2.1 工程概况

某  $50\text{ m} \times 5$  的 5 跨体外预应力连续梁桥, 端头横梁梁高 0.3 m, 纵向厚度为 2.4 m, 混凝土等级 C55, 端头锚固对象均为体外预应力钢绞线  $27\phi^{s15.2}$ , 控制张拉应力为 1 209 MPa. 端头横向预应力采用预应力钢绞线, 竖向预应力采用精轧螺纹钢. 设计时考虑两种锚固形式: 锚固开式 1 为全部锚板锚固, 形式 2 为去掉未编号锚板. 如图 4 所示. 建立局部模型, 使锚固端面垂直于箱梁模型的底

板, 并将锚固端有效张拉力平行于底板的荷载等效成均匀面力, 反向, 垂直作用在锚垫板位置, 锚垫板面积为  $430\text{ mm} \times 430\text{ mm}$ , 设计等效荷载分别取  $4\,537\cos 8^\circ, 4\,537\cos 6^\circ, 4\,537\cos 3^\circ$ , 单位均为 kN. 端头锚固横梁还设置了横向预应力和竖向预应力, 顶板的横向预应力束每束为  $3\phi^{s15.2}$ , 单根面积为  $140.0\text{ mm}^2$ , 控制张拉应力为 1 339.2 MPa, 控制张拉力为 562.5 kN; 竖向预应力采用  $\phi 32$  精轧螺纹钢, 面积为  $804.2\text{ mm}^2$ , 标准张拉应力为 930 MPa, 弹性模量  $E_s = 2.0 \times 10^5\text{ MPa}$ ; 横向预应力在顶缘按照纵向间距 40~45 cm 布置, 并在端头伸缩缝处竖向集中布置 3 束; 竖向预应力筋分别在距离锚固横梁内侧 15.0 cm 和 28.2 cm 处纵向布置 2 排, 每排 10 根. 竖向预应力因为损失较大, 根据经验, 其效应乘以折减系数 0.5. 由于在各种最不利活载作用下, 体外预应力束的应力变幅在 30 MPa 以内, 相对较小, 在计算主预应力筋的配筋时, 以设计荷载计算.

### 2.2 有限元模型的建立

根据对称性和圣维南原理, 横向取 1/2 桥宽, 纵向取 6m 箱梁锚固结构, 建立有限元模型. 整体坐标系  $X, Y, Z$  轴, 分别代表纵向、竖向和横向, 按照理想弹性材料计算应力分布. 建模要点: ① 按照端头锚固横梁的锚固形式和截面过渡形式, 建立 6 m 等高悬臂梁模型, 采用单元为 SOLID45, 对规则梁体部分扫略划分, 不规则部分自由划分, 形成单元实体. 单元划分长度为 0.1 m. 在不考虑横、竖向预应力情况下, 共有节点 65 515 个, 单元 197 669 个. ② 悬臂梁根部为固结形式, 对称面上采用对称约束. ③ 横、竖向预应力均采用 link8 杆单元与块体单元共节点来模拟, 预应力钢筋的位置通过切分实体来确定, 单元划分长度为 0.2 m, 预应力以张拉控制应力换算的初应变形式施加在钢束上. 如图 5 所示.



a 边跨体外预应力束(单位:cm)

b 端头锚固形式(单位:m)

图4 锚固形式

Fig.4 Anchorage forms

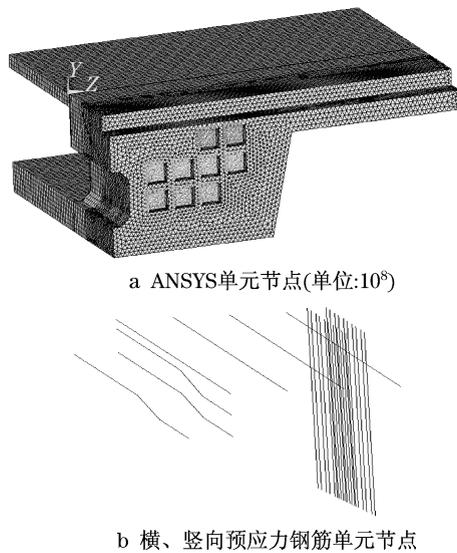


图5 锚固结构有限元模型

Fig.5 Anchorage finite element model

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 切片应力云图

从距离锚固横梁内侧端面 5 cm 的横截面开始,每隔 10 cm“切片”,考察距离内侧端面 5,15,25,35,45,55,65,75 cm 处截面的横、竖向正应力( $S_x, S_y$ )分布,并依次编号为 1#,2#,3#,4#,5#,6#,7#,8# 截面;考虑四种计算工况:不考虑横、竖向预应力,考虑竖向预应力,考虑横向预应力,考虑横向预应力+竖向预应力.限于篇幅,仅列出锚固形式1在工况

一、四状态下,前 1#~3# 截面的横、竖向应力分布,如图 6,7 所示.

#### 3.2 数据分析

根据两种锚固形式的计算结果,在不考虑尖角处引起的应力集中(一般可以通过导角的方式解决)、边腹板和底板处表层拉应力或是极个别拉应力点的情况,各锚固形式在不同工况下的截面横、竖向拉应力最大区域均值,以及对应切片的拉应力域配筋面积,分别见表 2,3.限于篇幅,仅列出工况一、四的配筋结果.拉应力域面积主要考虑全截面箱内 2 m(高) $\times$ 6 m(宽)区域.为便于分析比较,应用拉应力域法,所配钢筋为二级,直径为 20 mm,钢筋使用阶段最大应力取 150 MPa;原设计全部采用二级钢筋,对比时选取拉应力域面积内的设计钢筋数量.

根据拉应力域法所统计的横、竖向钢筋总面积见表 4 所示.

从表 2~4 可以看出,原设计配筋总面积与拉应力域法考虑实际横向+竖向预应力时的配筋总面积相比偏大,最大超过 418.6%,钢筋网的配置过于安全.其中,在考虑横、竖向预应力时,竖向钢筋在各个截面配置数量均偏多,不考虑横、竖向预应力时,竖向钢筋在 1# 断面数量偏少,特别是锚固形式 1 时,在 1#,2# 均偏少;而在其他截面又配筋过多,不符合应力分布规律,造成不合理和浪费.而横向钢筋则在靠近锚固横梁内侧断面(0~40 cm)范围内布置偏多,而在较远处(40~80 cm)布置略少,但基本满足要求.

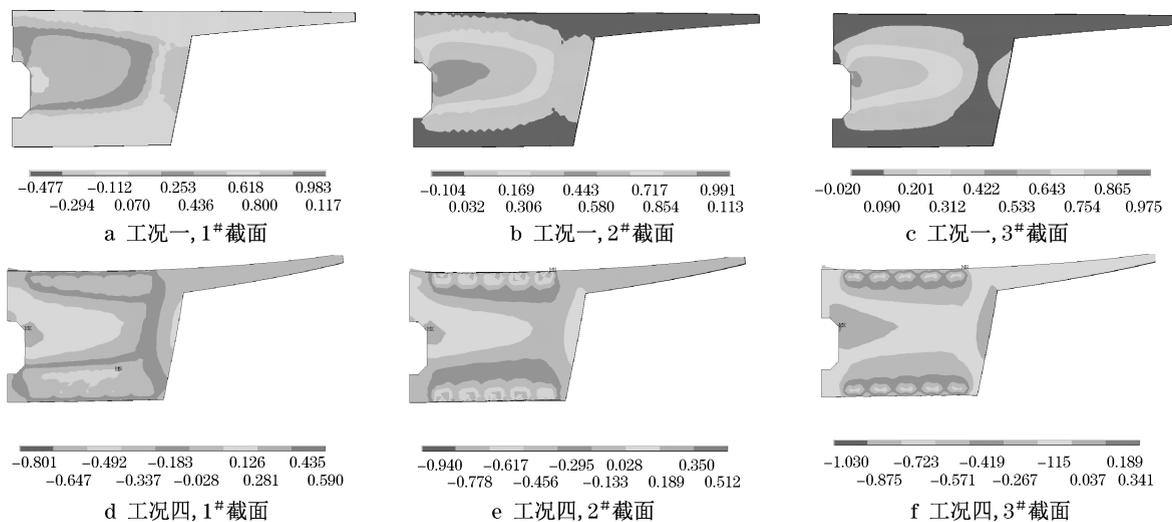


图6 工况一、四的各截面竖向应力分布(单位: $10^7$  Pa)

Fig.6 Vertical stress distribution of Condition 1 and Condition 4(unit: $10^7$  Pa)

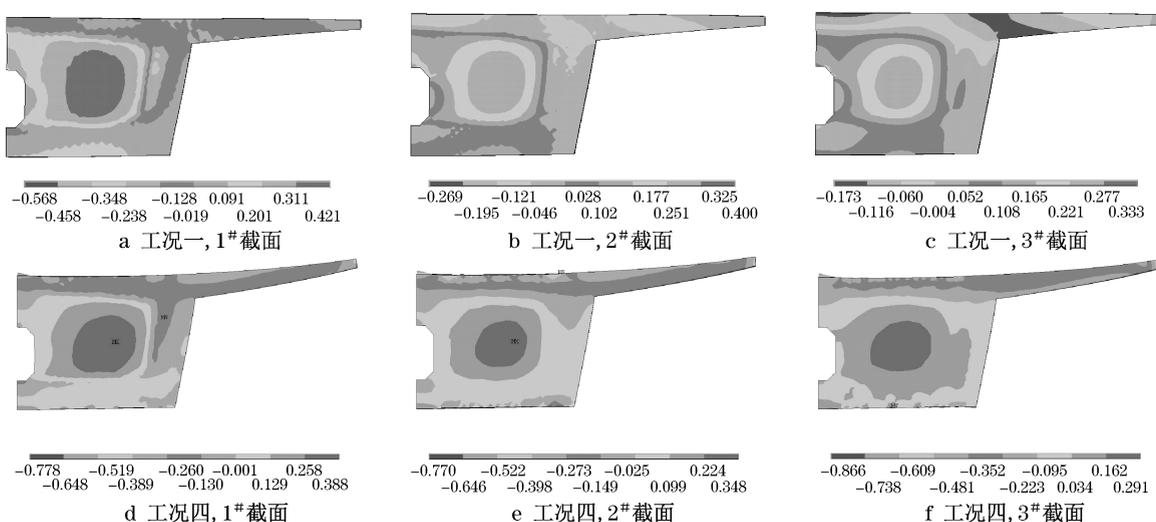


图7 工况一、四的各截面横向应力分布(单位:10<sup>7</sup> Pa)

Fig.7 Transverse stress distribution of Condition 1 and Condition 4(unit:10<sup>7</sup> Pa)

表2 不考虑横、竖向预应力的工况

Tab.2 No vertical, transverse prestressing condition

方向	位置	最大拉应力均值/MPa		拉力/kN		配筋面积/mm <sup>2</sup>		钢筋 φ20/根		原设计配筋面积/mm <sup>2</sup>	原设计配筋/根
		锚固1	锚固2	锚固1	锚固2	锚固1	锚固2	锚固1	锚固2		
竖向	1#	7.09	6.76	4 254	4 053	28 360	27 020	91	86	23 071	47 φ25
	2#	6.49	5.05	3 891	3 027	25 940	20 180	83	65	23 071	47 φ25
	3#	4.78	3.67	2 865	2 199	19 100	14 660	61	47	23 071	47 φ25
	4#	3.94	3.01	2 361	1 806	15 740	12 040	51	39	23 071	47 φ25
	5#	3.08	2.33	1 845	1 398	12 300	9 320	40	30	0	0
	6#	2.33	1.77	1 398	1 062	9 320	7 080	30	23	0	0
	7#	1.71	1.33	1 023	795	6 820	5 300	22	17	23 071	47 φ25
	8#	1.58	1.26	948	756	6 320	5 040	21	17	0	0
横向	1#	3.66	2.97	732	594	4 880	3 960	16	13	10 468	17 φ28
	2#	2.89	2.26	577	452	3 847	3 013	13	10	10 468	17 φ28
	3#	2.49	1.86	498	372	3 320	2 480	11	8	10 468	17 φ28
	4#	2.06	1.55	412	310	2 747	2 067	9	7	10 468	17 φ28
	5#	1.55	1.48	310	296	2 067	1 973	7	7	201	1 φ16
	6#	1.30	1.13	259	225	1 727	1 500	6	5	201	1 φ16
	7#	1.11	0.86	221	171	1 473	1 140	5	4	1 005	5 φ16
	8#	0.85	0.65	169	129	1 127	860	4	3	201	1 φ16

表3 考虑横向+竖向预应力的工况

Tab.3 Vertical plus transverse prestressing condition

方向	位置	最大拉应力均值/MPa		拉力/kN		配筋面积/mm <sup>2</sup>		钢筋根数 φ20/根		原设计配筋面积/mm <sup>2</sup>	原设计配筋/根
		锚固1	锚固2	锚固1	锚固2	锚固1	锚固2	锚固1	锚固2		
竖向	1#	3.58	1.53	2 148	918	14 320	6 120	46	20	23 071	47 φ25
	2#	2.70	1.31	1 617	786	10 780	5 240	35	17	23 071	47 φ25
	3#	1.13	1.14	678	684	4 520	4 560	15	15	23 071	47 φ25
	4#	0.84	受压	504	0	3 360	0	11	1	23 071	47 φ25
	5#	受压	受压	0	0	0	0	1	0	0	0
	6#	受压	受压	0	0	0	0	1	0	0	0
	7#	受压	受压	0	0	0	0	0	0	23 071	47 φ25
	8#	受压	受压	0	0	0	0	0	0	0	0
横向	1#	3.23	2.56	646	511	4 307	3 407	14	11	10 468	17 φ28
	2#	2.86	2.18	572	435	3 813	2 900	13	10	10 468	17 φ28
	3#	2.45	1.87	490	374	3 267	2 493	11	8	10 468	17 φ28
	4#	1.94	1.45	387	289	2 580	1 927	9	7	10 468	17 φ28
	5#	1.47	1.11	294	221	1 960	1 473	7	5	201	1 φ16
	6#	1.14	0.83	228	166	1 520	1 107	5	4	201	1 φ16
	7#	0.85	0.61	169	122	1 127	813	4	3	1 005	5 φ16
	8#	0.61	0.44	122	88	813	587	3	2	201	1 φ16

表4 锚固形式1,2的钢筋总量对比  
Tab.4 Reinforcement amount contrast of anchorage form 1 and 2

工况	横、竖向钢筋总面积/mm <sup>2</sup>		减少率/%
	锚固1	锚固2	
无横、竖向预应力	145 087	117 633	18.9
横向预应力	140 707	121 533	13.6
竖向预应力	51 427	28 953	43.7
横向预应力+竖向预应力	52 367	30 627	41.5
原设计	158 835	158 835	

根据表3还可知所需普通钢筋面积的相互关系:横向预应力>横向预应力+竖向预应力>竖向预应力.说明设置竖向预应力可明显降低普通钢筋用量.这是因为竖向预应力对竖向拉应力具有抵抗作用,此外,竖、横向预应力会在过人洞附近和腹板外边缘或底缘产生拉应力,但多数仅体现为表层应力,最大值仅是极个别点.若只比较无预应力钢筋和只设置竖向预应力两种工况,锚固形式1和2的普通钢筋用量分别减少64.6%和75.4%,而原设计的横向预应力设置对配筋量影响较小;若只比较无预应力钢筋和只设置横向预应力两种工况,锚固形式1和2的普通钢筋用量分别变化-3.0%和3.3%.

以考察截面编号为横坐标,最大竖、横向拉应力均值为纵坐标,比较各工况下最大应力变化,见图8.

横向最大拉应力在各个工况下的大小和分布比较一致,而竖向最大拉应力则会因为加入了竖向预应力之后有明显降低.在两种锚固形式下,各截面中的竖向预应力分别使最大竖向拉应力均值最多下降3.71,5.43 MPa.在同种竖向预应力下,竖向应力的分布也比较一致.由图8得知的各个工况的竖、横向拉应力域深度近似值见表5.

由表4可知,竖向拉应力域深度 $L_2$ 受到竖向预应力的影响最大,因为锚固形式的变化,平均减少10 cm.而横向拉应力域深度 $L_1$ 几乎不受工况影响,只会因为锚固形式平均减少20 cm.因此,可根据不同工况的拉应力域深度,确定横、竖向钢筋的纵向分布区域,即横、竖向钢筋均应该在拉应力域深度范围内,按照各切片所需要的配筋量来配筋.

### 4 结论

(1) 原设计配筋量与拉应力法配筋量比较,在考虑横向预应力+竖向预应力时,横、竖向配筋均过于安全,尤其是在已经配置竖向预应力筋的情况下,

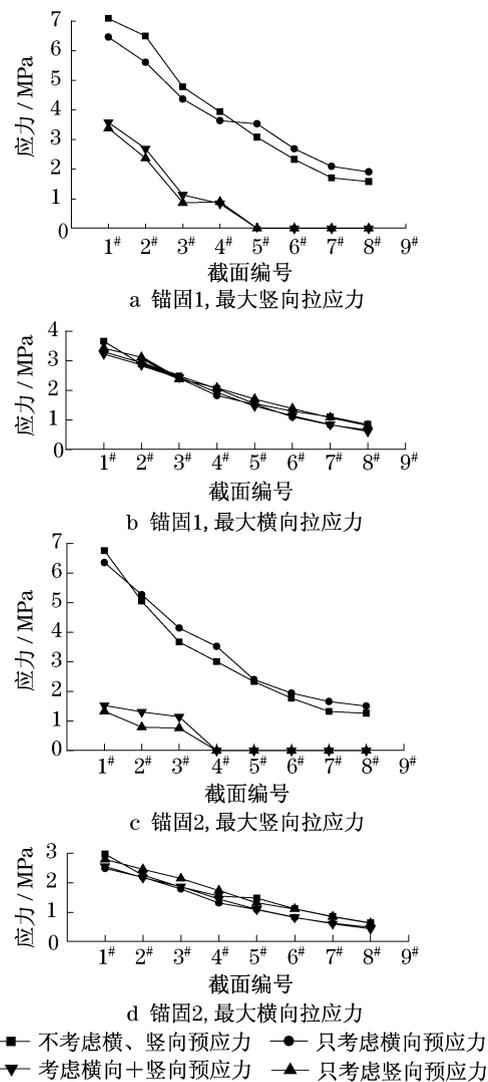


图8 截面最大拉应力沿纵向分布

Fig.8 Most section tensile stress distribution lengthways

表5 拉应力域深度 $L_k$ 近似值  
Tab.5 Approximations of tensile stress region depth

锚固形式	$L_k$	cm			
		工况一	工况二	工况三	工况四
锚固1	$L_2$	85	90	25	35
	$L_1$	75	75	75	75
锚固2	$L_2$	75	80	15	25
	$L_1$	55	55	55	55

大量配置竖向普通钢筋,造成浪费.建议减少竖向钢筋,并且在拉应力域深度范围内适当调整横向钢筋的分布与数量.需要注意的是,本方法立足于局部区域的整体分析,如端锚固横梁内侧的配筋,而对于锚头局部承压配筋,还需要局部分析.此外,所有配筋都还需要满足构造要求.

(2) 竖向预应力对横向最大拉应力、横向预应

力对竖向最大应力的影响均不大,拉应力域法分析对象为锚固横梁“箱内”位置的钢筋网,但实际中,竖向预应力会在过人洞附近和相当于腹板外边缘产生表层拉应力,可以通过加强筋、分布斜筋解决;横向预应力会产生相对较大的横向拉应力,除了在截面中部分布比较连续之外,顶、底缘部分也会产生个别点或者局部的最大应力,可根据实际情况和构造要求,在顶、底缘布置加强筋。

“拉应力域法”配筋理论可以推广适用于任何存在“拉应力域”的构造区域的实体配筋,根据应力切片和拉应力域深度控制钢筋网分布,达到抗主拉应力的目的。本方法可供桥梁设计和施工参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈晓宝. 结构混凝土拉压杆模型法配筋设计[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2001(4):160.  
CHEN Xiaobao. Design for reinforcement of structural concrete with strut-and-tie model method[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2001(4):160.
- [2] 徐栋,魏华. 体外预应力转向结构分析及配筋研究[J]. 同济大  
学学报:自然科学版,2005,33(6):722.  
XU Dong, WEI Hua. Spatial analysis and reinforcement calculation by strut-and-tie model of deviators of external prestressing structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005,33(6):722.
- [3] 卢春玲,李传习. 体外预应力桥转向块配筋设计分析[J]. 中外公路,2008,28(6):122.  
LU Chunling, LI Chuanxi. Analysis of reinforcement design for deviations of external prestressed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008,28(6):122.
- [4] 杨美良,李传习,张建仁,等. 体外预应力桥梁锚固结构的受力性能与配筋研究[J]. 工程力学,2008,25(6):159.  
YANG Meiliang, LI Chuanxi, ZHANG Jianren, et al. Loading behavior and reinforcement design of anchorages of external prestressed bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (6):159.
- [5] 徐栋. 桥梁体外预应力设计技术[M]. 北京:人民交通出版社,2008.  
XU Dong. Design technology for external prestressed bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [6] 邓锦平. 体外预应力混凝土桥梁关键部位设计方法[D]. 上海:同济大学桥梁工程系,2008.  
DENG Jinping. Design methods for key parts of external prestressed concrete bridges[D]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2008.
- [1] 陈晓宝. 结构混凝土拉压杆模型法配筋设计[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2001(4):160.  
CHEN Xiaobao. Design for reinforcement of structural concrete with strut-and-tie model method[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2001(4):160.
- [2] 徐栋,魏华. 体外预应力转向结构分析及配筋研究[J]. 同济大  
学学报:自然科学版,2005,33(6):722.  
XU Dong, WEI Hua. Spatial analysis and reinforcement calculation by strut-and-tie model of deviators of external prestressing structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005,33(6):722.
- [3] 卢春玲,李传习. 体外预应力桥转向块配筋设计分析[J]. 中外公路,2008,28(6):122.  
LU Chunling, LI Chuanxi. Analysis of reinforcement design for deviations of external prestressed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008,28(6):122.
- [4] 杨美良,李传习,张建仁,等. 体外预应力桥梁锚固结构的受力性能与配筋研究[J]. 工程力学,2008,25(6):159.  
YANG Meiliang, LI Chuanxi, ZHANG Jianren, et al. Loading behavior and reinforcement design of anchorages of external prestressed bridges [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (6):159.
- [5] 徐栋. 桥梁体外预应力设计技术[M]. 北京:人民交通出版社,2008.  
XU Dong. Design technology for external prestressed bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [6] 邓锦平. 体外预应力混凝土桥梁关键部位设计方法[D]. 上海:同济大学桥梁工程系,2008.  
DENG Jinping. Design methods for key parts of external prestressed concrete bridges[D]. Shanghai: Tongji University. Department of Bridge Engineering, 2008.

#### (上接第960页)

- WANG Duxue. Effect of temperature on the concrete [J]. Foreign Architectural Science, 1997, 15(1):23.
- [4] Kunitake T, Hirakawa K, Aihara K, et al. Concrete reinforcement steel bars for low temperature services [J]. Sumitomo Search, 1979, 22(11):45.
- [5] Whiteley J D, Armstrong B M, Welburn R W. Reinforcing and prestressing steels for cryogenic applications [C]// Cryogenic Concrete Proceedings of the 1st International Conference. London: Concrete Society/Construction Press, 1982: 252-279.
- [6] Sleigh G. The behaviour of steel at low temperatures [C]// Cryogenic Concrete Proceedings of the 1st International Conference of the Concrete Society. London: Concrete Society/Construction Press, 1982:167-179.
- [7] Elites M, Comes H, Planas J. Behavior at cryogenic temperatures of steel for concrete reinforcement [J]. Journal Proceedings, 1986, 83(5):405.
- [8] Miura T, Murano S. Required impact resistance of reinforcing bars at very low temperatures [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1985, 7:369.
- [9] DanieLou A, Rivat J, Robillard M, et al. Fatigue mechanics in an interstitial free steel: analysis through the behavior of UHP iron doped with C and Mn [J]. Material Science and Engineering, 2001, 319(12):550.
- [10] 王元清,武延民,石永久,等. 低温对结构钢材主要力学性能影响的试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(1):1.  
WANG Yuanqing, WU Yanmin, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on the main mechanical parameters of building steel under low temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(1):1.
- [11] 刘爽,顾祥林,黄庆华. 超低温下钢筋力学性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(增刊):47.  
LIU Shuang, GU Xianglin, HUANG Qinghua. Experimental study on mechanical properties of steel bars at super-low temperature [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (suppl):47.
- [12] 中华人民共和国国家标准. 金属材料室温拉伸试验方法 (GB/T228—2002) [S].  
The People's Republic of China National Standard. GB/T228—2002 Metallic materials—tensile testing at ambient temperature [S].
- [13] 中华人民共和国国家标准. 金属材料低温拉伸试验方法 (GB/T13239—2006) [S].  
The People's Republic of China National Standard. GB/T228—2006 Metallic materials—tensile testing at low temperature [S].
- [14] 顾祥林. 混凝土结构基本原理 [M]. 上海:同济大学出版社, 2004.  
GU Xianglin. Basic principles for concrete structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.