

# 弧形底宽箱梁横向预应力空间作用效应分析

徐科英

(同济大学桥梁工程系 上海市 200092)

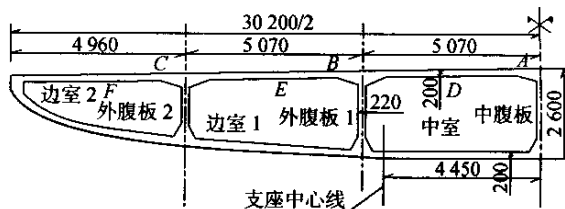
**摘 要:** 以上海中环线工程为工程背景, 讨论了宽跨比较大的弧形底单箱多室箱梁在横向预应力作用下的受力特性。建立空间有限元模型, 分析横向预应力的空间效应, 分别讨论了横梁和顶板中横向预应力对结构的影响, 最后得出箱梁横向应力沿结构纵向和横向的分布规律, 供设计人员参考。

**关键词:** 混凝土箱梁; 弧形底; 单箱多室; 横向预应力; 空间分析

上海市沪闵高架二期工程, 弧形底宽箱梁以其优美的结构造型和桥下视觉空间受到市民的青睐。上海市重点工程中环线也采用弧形底的结构形式, 其中部分标段采用桥宽达 30.2 m 的预应力混凝土单箱多室连续梁结构。

通常在宽的连续箱梁的设计中, 在箱梁顶板中会均匀布置横向预应力束, 以提高横截面的整体刚度并预防顶板中纵向裂缝的产生。但是对于弧形底单箱多室结构, 由于有较强大的横梁, 在横梁中施加横向预应力后是否需要在顶板布置横向预应力束是值得探讨的问题。本文正是基于这个目的, 提出了横向预应力空间作用效应的问题。

设计为 3 跨等高度连续梁, 截面尺寸 (顶、底板和腹板厚度) 沿跨度变化, 本模型中全桥按跨中截面进行等截面布置。考虑结构的对称性, 取纵向 1/2 结构模型进行计算分析。



单位: mm

图 1 跨中截面示意

## 1 工程背景及空间分析模型

### 1.1 工程背景

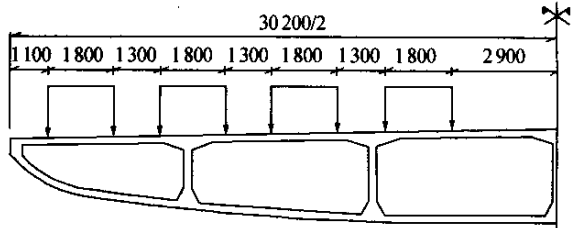
上海市中环线为上海市重点工程, 本工程设计中大量采用弧形底宽箱梁结构, 大致分为整体式和分幅式两种, 其中整体式采用单箱六室的弧形底箱形截面。桥面为双向行驶 8 车道, 宽度达到 30.2 m, 下部结构采用 Y 形桥墩, 与弧形底箱梁结合具有优美的视觉效果。本文以 30.2 m 宽、跨度为 35 m 的三跨连续梁桥为分析模型, 其截面形式见图 1 所示。

### 1.2 空间分析模型

#### 1.2.1 有限元模型

采用实体单元建立空间有限元分析模型, 以线弹性杆单元模拟横向预应力束的作用。为突出研究重点, 本文在实桥建模时进行了一定的简化处理。原

结构上荷载的横向布置如图 2 所示, 采用城—B 车辆荷载。本文计算的活载工况分对称加载和不对称加载 (即偏载)。其中对称加载荷载的布置如图 2 所示的左右对称布置, 不对称布载仅在截面一侧布置荷载。



单位: mm

图 2 车辆荷载沿横向布置示意

## 1.2.2 预应力处理

在空间分析中,利用杆单元模拟预应力钢束的作用。在杆单元的节点处施加初应变用以模拟预应力的作用。预应力束的根数及分布按相关设计布置,预应力损失按规范要求取值。

## 2 横梁横向预应力空间效应分析

### 2.1 横梁截面形式及横向预应力束布置

横梁在支座处为实体段,外轮廓尺寸如图 1 所示,其中简支端横梁厚度为 1 m,连续端横梁厚度为 2 m。横梁横向预应力束的布置如图 3 所示。

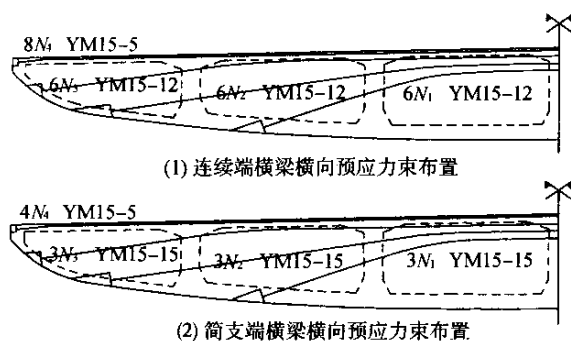


图 3 横梁横向预应力束布置

### 2.2 横梁横向预应力效应在空间中的分布规律

在文献[1]中,对此类单箱多室箱梁,在恒载和活载作用下横截面横向效应已进行了比较详细的分析。由于横截面在横向以剪切变形为主,各腹板加腋处外侧顶板顶(图 1 中 A、B、C 位置)由于剪切变形与横向弯曲效应的叠加将产生很大的横向拉应力;各室中线处顶板底(图 1 中 D、E、F 位置)由于集中荷载的局部效应将产生很大的横向拉应力。

横梁在横向预应力作用下,各腹板加腋处顶板顶和各室中线处顶板底将产生横向预压应力,横向预压应力沿纵向的分布规律如图 4 所示(图中应力以拉应力为正,下同)。

从图 4(1)可知,横梁横向预应力在各腹板加腋外侧顶板顶产生的横向压应力沿纵向的分布规律大致相同,即沿桥纵向从横梁到跨中呈递减趋势,离横梁愈远,所受影响愈弱。以外腹板 1 加腋处外侧顶板顶为例,在连续端横梁附近产生的横向预压应力值可达 6 MPa,而在中跨跨中产生的横向预压应力值仅为 2.37 MPa。

横梁横向预应力对各腹板加腋处外侧顶板顶的

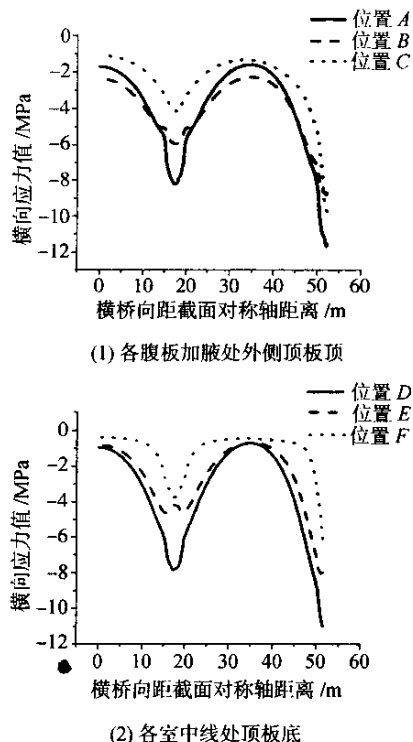


图 4 横梁预应力作用下横向预压应力沿纵向的分布曲线

影响也各不相同,对外腹板 2 的影响最小,对外腹板 1 的影响最大。以中跨跨中截面为例,中腹板处产生的横向预压应力值为 1.70 MPa,外腹板 1 处为 2.37 MPa,而外腹板 2 处仅为 1.09 MPa。

从图 4(2)可知,横梁横向预应力在各室中线处顶板底产生的横向应力沿纵向的分布规律与图 4(1)相同。横梁横向预应力对各室中线处顶板底的预压应力较小,从图 4(2)中可以看到,中室和边室 1 在中跨跨中顶板底的横向预压应力值分别为 0.96 MPa 和 0.83 MPa,边室 2 仅为 0.40 MPa。从边室 2 的变化趋势来看,曲线在离开横梁 4 m 处就突减,在全跨保持较低的应力水平。

为了研究横梁横向预应力大小与其对结构横向应力效应影响的关系,本文计算了 4 种横梁横向预应力单独作用的工况,其中以设计中采用的预应力大小( $F_y$ )为标准(见图 3)。表 1 和表 2 分别列出了在 4 种预应力作用下多室箱梁各腹板加腋处外侧顶板顶以及各室中线处顶板底横向应力在中跨跨中截面处的应力值。

通过计算发现,不同大小的横向预应力产生的横向应力沿纵向的分布规律相同,即离横梁愈远,所受影响愈弱。从表 1 的计算结果可知在中跨跨中截

表 1 各腹板加腋处外侧顶板顶横向预压应力 MPa

纵向位置	横向位置	$0.9F_y$	$F_y$	$1.1F_y$	$1.2F_y$
中跨跨中截面	A	-1.53	-1.70	-1.87	-2.04
	B	-2.14	-2.37	-2.61	-2.85
	C	-0.98	-1.09	-1.20	-1.30
边跨跨中截面	A	-1.42	-1.58	-1.74	-1.90
	B	-2.04	-2.26	-2.49	-2.71
	C	-1.20	-1.33	-1.46	-1.59

表 2 各室中线处顶板底横向预压应力 MPa

纵向位置	横向位置	$0.9F_y$	$F_y$	$1.1F_y$	$1.2F_y$
中跨跨中截面	D	-0.86	-0.96	-1.05	-1.15
	E	-0.75	-0.83	-0.91	-1.00
	F	-0.36	-0.40	-0.44	-0.48
边跨跨中截面	D	-0.64	-0.71	-0.78	-0.85
	E	-0.63	-0.70	-0.77	-0.84
	F	-0.41	-0.46	-0.50	-0.55

面处,当横向预应力从  $0.9F_y$  变化到  $1.2F_y$  时,外腹板 1 处横向预压应力从 2.14 MPa 变化到 2.85 MPa,横向预压力仅增加 0.71 MPa。中腹板处横向预压应力增加 0.51 MPa,外腹板 2 处仅为 0.32 MPa。

从表 2 的计算结果可知在中跨跨中截面处,当横向预应力从  $0.9F_y$  变化到  $1.2F_y$  时,中室 D 处横向预压应力从 0.86 MPa 变化到 1.15 MPa,横向预压力仅增加 0.29 MPa。边室 1 E 处横向预压应力增加 0.25 MPa,边室 2 F 处仅为 0.12 MPa。

由以上计算可见,仅仅增加横梁的横向预应力的大小并不能有效提高中跨跨中截面横向预压应力值的大小,中跨跨中截面处的横向预压应力储备仍然较小。

2.3 影响横梁横向预应力空间效应的参数分析

在文献[1]中,对影响结构横向受力的参数进行了分析,其中支点间距影响较大,随着两支承点之间的横向距离的增大,顶板顶横向应力最大值逐渐减小。在本文讨论了支点间距变化对横梁预应力空间作用效应的影响。表 3 中列出了在各种支点间距条件下,横梁预应力在中跨跨中截面 B、E 各处产生的横向预压应力值。

从表 3 的计算结果可以看到,支座间距的变化对横梁预应力在中跨跨中截面引起的横向预压应力

表 3 各种支承条件下横梁横向预应力产生的横向预压应力 MPa

纵向位置	横向位置	支座间距/m				
		6.9	8.9	10.9	12.9	14.9
中跨跨中截面	B	-2.37	-2.37	-2.38	-2.38	-2.38
	E	-0.96	-0.96	-0.96	-0.96	-0.96

的大小变化不明显。故支座间距的变化对横梁预应力空间作用效应影响不大,但是支座间距的大小对结构横向受力影响仍然较大[1]。

2.4 横梁横向预应力作用下结构的受力分析

从上述分析可知,横梁横向预应力在跨中截面处产生的横向预压应力值较小。为了研究在横梁横向预应力作用下结构的横向应力水平,主要计算了横向最不利布载条件下中跨跨中截面顶板横向应力的分布规律。

图 5 是恒载、活载与横梁预应力组合作用下,中跨跨中截面顶板顶横向应力沿横向的分布曲线。

从图 5 可知,单箱多室截面横向应力沿横向呈波形分布,各室顶板顶在顶板变厚度处有拉应力峰值,向顶板中跨过渡为压应力。这是由于箱梁横向变形主要由剪切变形引起,在各腹板加腋处外侧顶板顶会引起横向拉应力峰值。在各室顶板跨中由于横向弯曲效应和集中荷载作用的影响,在集中荷载作用处顶板底将产生横向拉应力峰值。表 4、表 5 分别列出了各工况作用下中跨跨中截面各腹板加腋处外侧顶板顶横向拉应力峰值和各室顶板底横向拉应力峰值。其中工况 1 为自重+二期恒载;工况 2 为自重+二期恒载+对称活载;工况 3 为自重+二期恒载+偏载。

从表 4 可知,顶板顶横向拉应力峰值出现在偏载作用下的外腹板 1 外侧加腋处,在横梁横向预应力作用下横向拉应力值由 6.34 MPa 降为 4.11 MPa,降低 2.23 MPa,降幅达 35%。虽然端横梁横向预应力作用使各腹板处顶板顶拉应力峰值降低,但是工况 3 在预应力作用下边腹板 2 处的拉应力值为 4.70 MPa,仍远远超过混凝土的抗拉强度。

从表 5 可知,顶板底横向拉应力峰值出现在偏载作用下的边室 1 集中荷载作用处,在横梁横向预应力作用下横向拉应力值由 4.61 MPa 降为 3.43 MPa,降低 1.18 MPa,降幅达 25%,但是拉应力值也超过了混凝土的抗拉强度。

由于混凝土的抗拉强度较低,截面的横向拉应

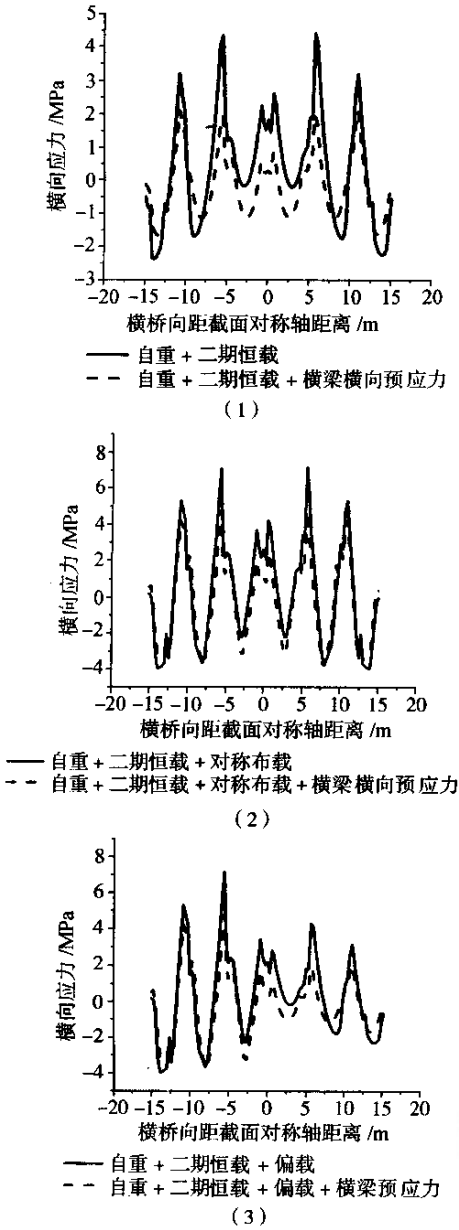


图 5 恒载+活载+横梁预应力作用下中跨跨中  
顶板顶横向应力沿横向分布曲线

表 4 各腹板处顶板顶横向拉应力峰值 MPa

工 况		中腹板	边腹板 1	边腹板 2
工况 1	无预应力	2.36	3.94	3.48
	有预应力	0.63	1.71	2.34
工况 2	无预应力	3.50	6.21	5.79
	有预应力	1.82	3.98	4.64
工况 3	无预应力	3.45	6.34	5.84
	有预应力	1.77	4.11	4.70

表 5 各室顶板底横向拉应力峰值 MPa

工 况		中室	边室 1	边室 2
工况 1	无预应力	1.38	1.83	2.60
	有预应力	0.38	0.94	1.68
工况 2	无预应力	3.10	4.54	3.81
	有预应力	2.00	3.36	2.59
工况 3	无预应力	3.27	4.61	3.86
	有预应力	2.17	3.43	2.95

力最大值达 4.7 MPa,拉应力过大会使构件局部位置开裂,引起纵向裂缝。根据规范规定,考虑混凝土收缩和温度效应以及普通钢筋的影响并计算了裂缝宽度。计算结果表明,裂缝宽度分布在 0.15~0.20 mm 的范围内,基本能满足规范要求。但是从结构的耐久性方面考虑,纵向裂缝的产生会影响结构的使用性能,并降低结构的使用寿命。

3 顶板横向预应力空间效应分析

3.1 顶板横向预应力钢束的布置

顶板横向预应力钢束的布置如图 6 所示,本文中顶板横向预应力钢束在跨中部位纵向间距按 0.5 m 计算。

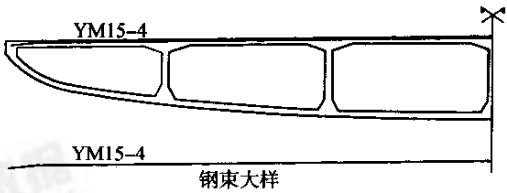


图 6 顶板横向预应力束布置

3.2 顶板横向预应力作用下结构的受力分析

图 7 是恒载、活载与横梁预应力以及顶板横向预应力组合作用下,中跨跨中截面顶板顶横向应力沿截面横向的分布曲线。

从图 7 可知,在顶板横向预应力作用下,各腹板处顶板顶拉应力峰值有所下降。从图 7(3)可知,在边室 2(距截面边缘 1 m)处顶板顶出现横向压应力峰值达 12.79 MPa,这是由于锚下局部应力造成的。

表 7、表 8 分别为在考虑横梁预应力和顶板横向预应力作用下,各工况中跨跨中截面顶板顶和顶板底的横向拉应力峰值。

从表 7 可知,配置顶板横向预应力束后,各腹板处顶板顶横向应力有所下降,从表 5 中的最大值 4.70 MPa 降为 3.66 MPa,降幅达 22%,最大值位于边腹板 2 加腋处顶板顶。

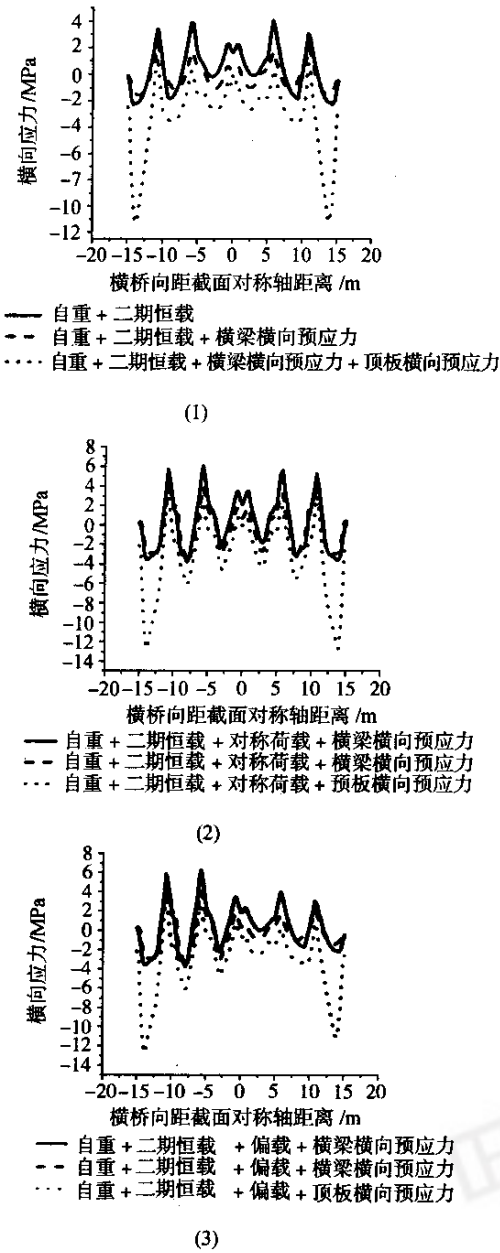


图 7 恒载+活载+横梁预应力+顶板横向预应力作用下中跨跨中顶板顶横向应力沿横向分布曲线

表 7 各腹板处顶板顶横向拉应力峰值 MPa			
工况	中腹板	边腹板 1	边腹板 2
工况 1	-0.34	0.15	1.30
工况 2	0.41	2.42	3.60
工况 3	0.36	2.55	3.66

从表 8 可知,在顶板横向预应力作用下,各室顶板底由于集中荷载引起的横向应力峰值明显下降。在自重和二期恒载作用下,考虑横向预应力后顶板

表 8 各室顶板底横向拉应力峰值 MPa			
工况	中室	边室 1	边室 2
工况 1	-1.25	-1.41	-0.17
工况 2	0.32	1.02	1.04
工况 3	0.49	1.09	1.09

底横向应力由拉应力变为压应力。集中荷载作用处的顶板底拉应力在 1 MPa 左右,应力水平明显降低。边室 1 处顶板底的横向拉应力峰值由表 6 中的最大值 3.43 MPa 降为 1.09 MPa,降幅达 68%。

从上述分析可知,在顶板配置横向预应力束后能降低顶底板横向拉应力的水平,尤其是能有效改善由于集中荷载所引起的横向弯曲而引起的集中效应,但是在边室会引起较大的压应力。

4 结论

本文重点研究了横梁横向预应力空间作用的分布规律。通过以上的计算分析可以得到以下结论。

(1)横梁横向预应力对结构横向应力的影响沿纵向的分布规律为:在端部影响较大,沿纵向向跨中衰减很快。

(2)横梁预应力对各腹板加腋处外侧顶板顶的影响不同,对边腹板 1 的影响最大,中腹板次之,边腹板 2 的影响最小。

(3)横梁预应力对各室中线处顶板底的影响也不同,对中室的影响最大,边室 1 次之,边室 2 的影响最小。其中边室 2 的影响沿纵向变化不大,影响值都很小。

(4)仅仅增大横梁横向预应力的大小不能有效增加中跨跨中截面处的横向预压应力值。

(5)支座间距的变化对横梁预应力在跨中截面处作用效应的影响不大。

(6)顶板横向预应力能有效改善因集中荷载所引起的横向弯曲而引起的集中效应,但是在边室会引起较大的压应力。

参考文献:

[1] 陆光阁,曹中银,徐科英,秘志辉. 城市高架弧形底宽箱梁桥横向效应的有限元分析[J]. 中国市政工程, 2004,(4).

[2] JTJ 021-89. 公路桥涵设计通用规范[S].

[3] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2001.



文章编号: 0451-0712(2005)02-0042-03

中图分类号: U445.551

文献标识码: B

# 桩基偏斜的综合纠偏

洪桂忠

(福建建工集团总公司 福州市 350001)

**摘 要:** 杨家溪 1 号大桥桩基施工完工后受外力作用产生偏斜,文中分析了桩基产生偏斜的原因,并介绍用卸载减负、挖坑止推、抽水减压、强力牵拉和反向加载的综合纠偏方法。

**关键词:** 桩基偏斜; 减压加载; 强力牵拉; 纠正

在桥梁建设施工期间,由于受地形、地质、施工条件等因素的影响,在外力作用下造成桥梁桩基及桥墩偏斜的事故时有发生。如采取有效的方法对偏斜后的桩基及桥墩进行纠正,可减少经济损失和缓解施工工期压力。

## 1 工程概况

同三国道主干线福鼎~宁德高速公路杨家溪 1 号大桥,该桥基础设计为桩基与扩大基础相结合,圆柱式墩。

发生事故的是 15 号墩右幅临近岸边的 16 号墩及岛上 17 号桥台,如图 1 所示。该墩基础为桩径 1.5 m 的冲击钻孔灌注桩,桩长 17 m,嵌入弱风化花岗岩 1.5 m。墩柱直径为 1.3 m,含盖梁高 12.74 m。

该墩桩位处地质自上而下分别为:软~硬塑淤泥,厚 1 m;软塑淤泥,厚 10.5 m;强风化花岗岩,厚 4 m;裂隙较发育的弱风化花岗岩,厚 3.5 m;再下为微风化花岗岩。

## 2 偏斜情况

由于受该桥南侧 16 号墩扩大基础施工围堰及位于桥梁中线栈桥引道填方影响,造成 15 号墩右幅桥墩向北偏斜。在 2001 年 9 月 19 日,该墩柱中心线在盖梁顶向北偏斜 29.7 cm,桩基中心线在系梁顶向北偏斜 17 cm,偏斜角为  $0^{\circ}34'16''$ ,偏斜率 1%,如图 2 所示。

## 3 偏斜成因与状态分析

### 3.1 原因分析

收稿日期: 2004-08-05

# Analysis of Spatial Effect of Transverse Prestress on Wide Box Girder with Curved Bottom

XU Ke-ying

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

**Abstract:** On the basis of the shanghai middle ring road engineering, the mechanic characteristics of single box and multi-cell box girder with curved bottom and a large width to span-length ratio under the transverse prestress force are mainly discussed in this paper. A finite element model is built to analyze the transverse prestress spatial effect. The effects of the transverse prestressed tendons in the cross beam and top plate are discussed respectively and the distribution regularity of transverse stress in transverse and vertical direction of structure is also discussed in this paper. All of this can be used as reference in design.

**Key words:** curved bottom; single box and multi-cell; transverse prestress; spatial analysis