

# 薄壁空心板纵向裂缝的畸变分析与试验研究

邵旭东, 周里鸣, 李立峰

(湖南大学桥梁工程研究所 长沙市 410082)

**摘 要:** 针对某跨海大桥空心板板底出现有规律的纵向裂缝, 运用薄壁结构理论对薄壁空心板进行畸变分析, 结合能量法和有限条法计算活载作用下薄壁空心板的畸变应力, 并对现行空心板标准图的畸变进行了验算, 同时进行了现场荷载试验, 理论分析结果和试验结果证明薄壁结构的畸变效应是导致空心板板底出现纵向裂缝的主要原因。

**关键词:** 薄壁空心板; 畸变; 能量法; 弹性地基梁; 有限条法

钢筋混凝土和预应力混凝土板式结构构造简单、受力明确, 是公路桥梁中量大、面广的常用桥型。预应力空心板往往在预制场中形成规模施工, 因而在一般公路、高等级公路和城市道路桥梁中, 尤其是建筑高度受到限制和平原区高速公路上的中、小跨径桥梁中得到广泛应用。然而, 由于 20 世纪 90 年代强调结构轻型化, 空心板的壁厚被过度削减, 薄壁结构畸变效应引起的横向应力不容忽视。本文以某跨海大桥实桥出现的病害为例, 通过能量法并结合有限元法和有限条法, 计算实桥薄壁空心板的畸变应力, 与采用现行标准断面的空心板的计算结果进行了比较, 并进行现场荷载试验予以验证, 找到了病害的原因。

## 1 某跨海大桥桥梁结构及病害简介

某跨海大桥全长 2 898.02 m, 共 113 跨分 9 联。其中 50 m 跨径有 1 联、30 m 跨径有 4 联、20 m 跨径有 4 联, 除第 3 联(50 m 跨)为 3 跨简支体系(桥面连续)外, 其余各联均为刚构—连续结构体系, 均为先简支后结构连续体系。20 m、30 m 跨最长联分别为 15 跨和 14 跨, 见图 1 所示。20 m、30 m 跨均为宽幅预应力混凝土空心板, 顶板、腹板及底板板厚均为 12 cm, 宽厚比仅为 1/11.5, 属于薄壁结构。单幅 20 m、30 m 跨径空心板的横断面见图 2 所示。

该桥通车不到一年, 板底出现了大量纵向裂缝。表 1 为出现纵向裂缝的空心板板数的统计结果。

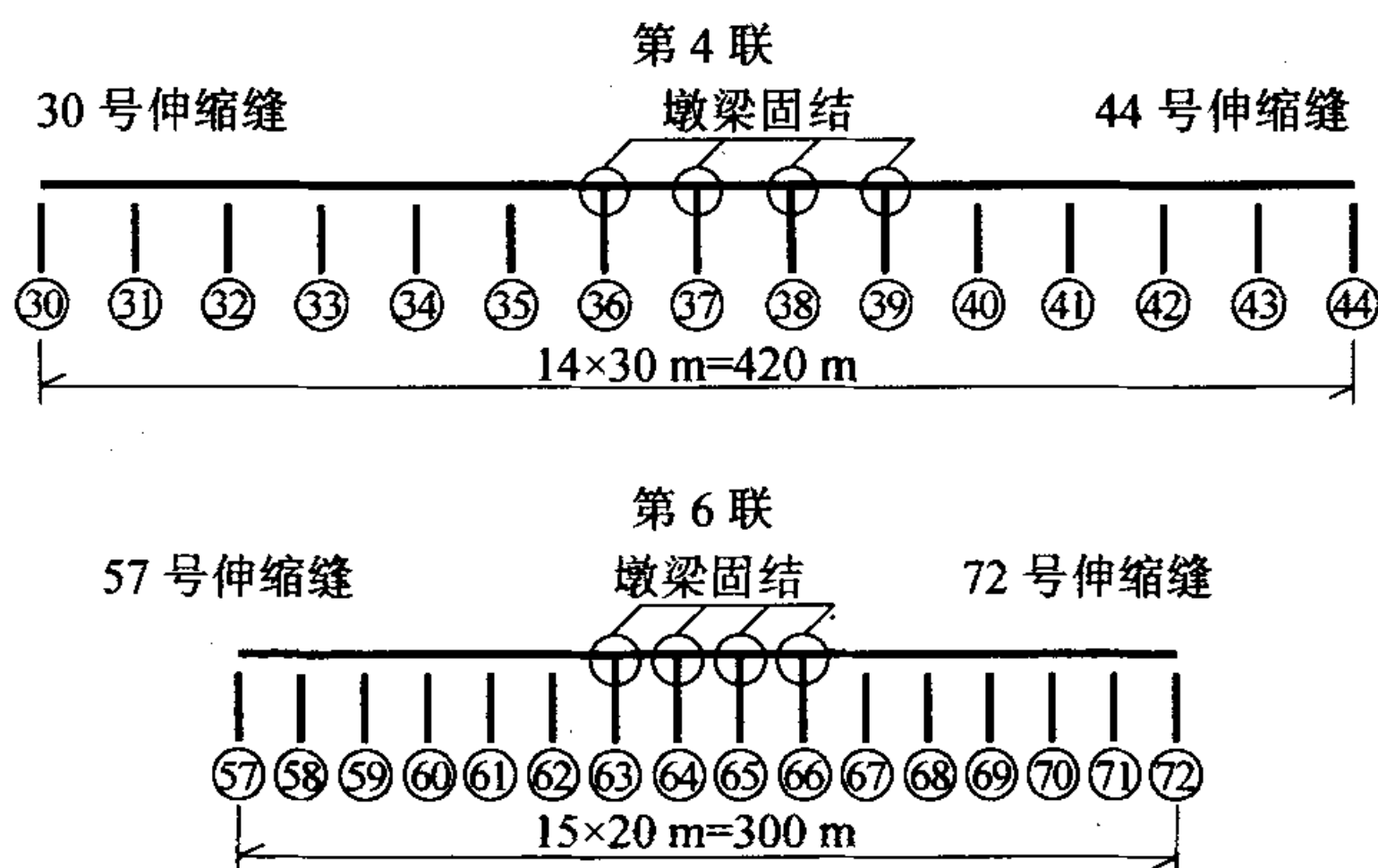


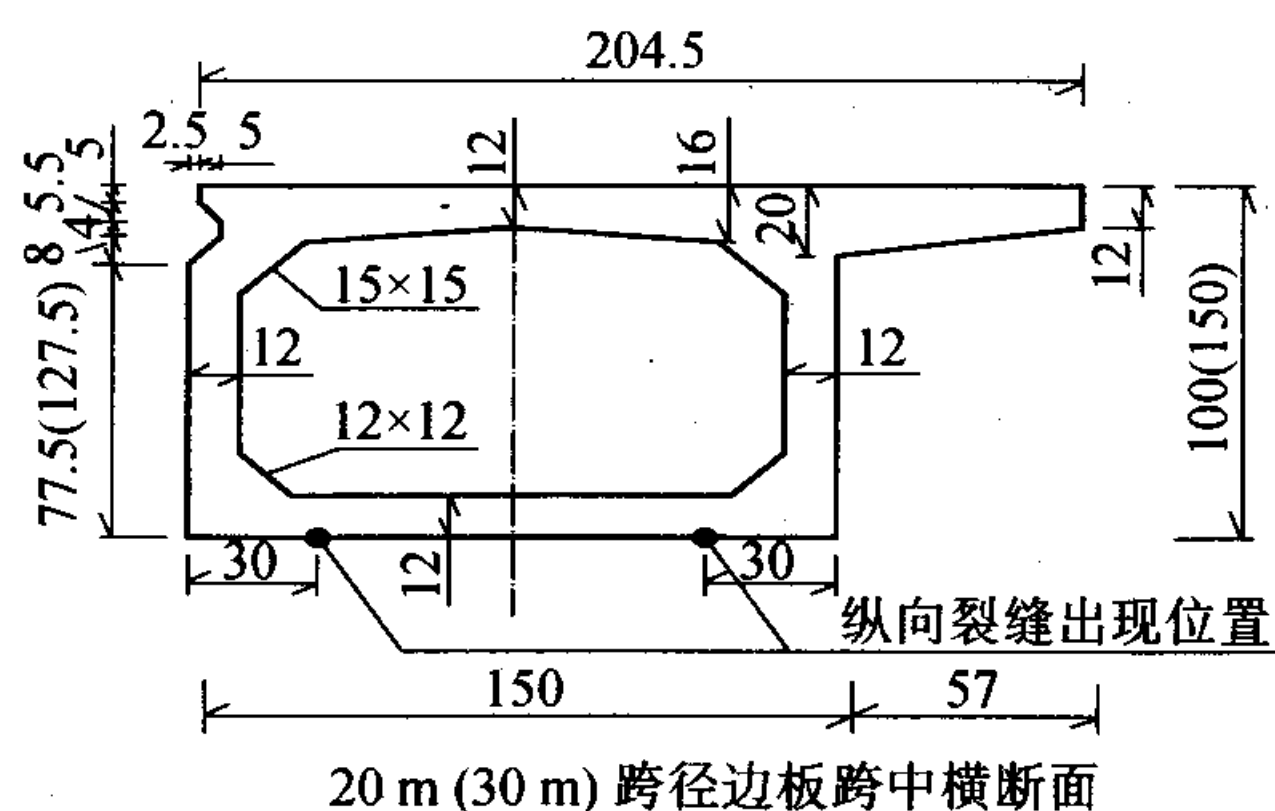
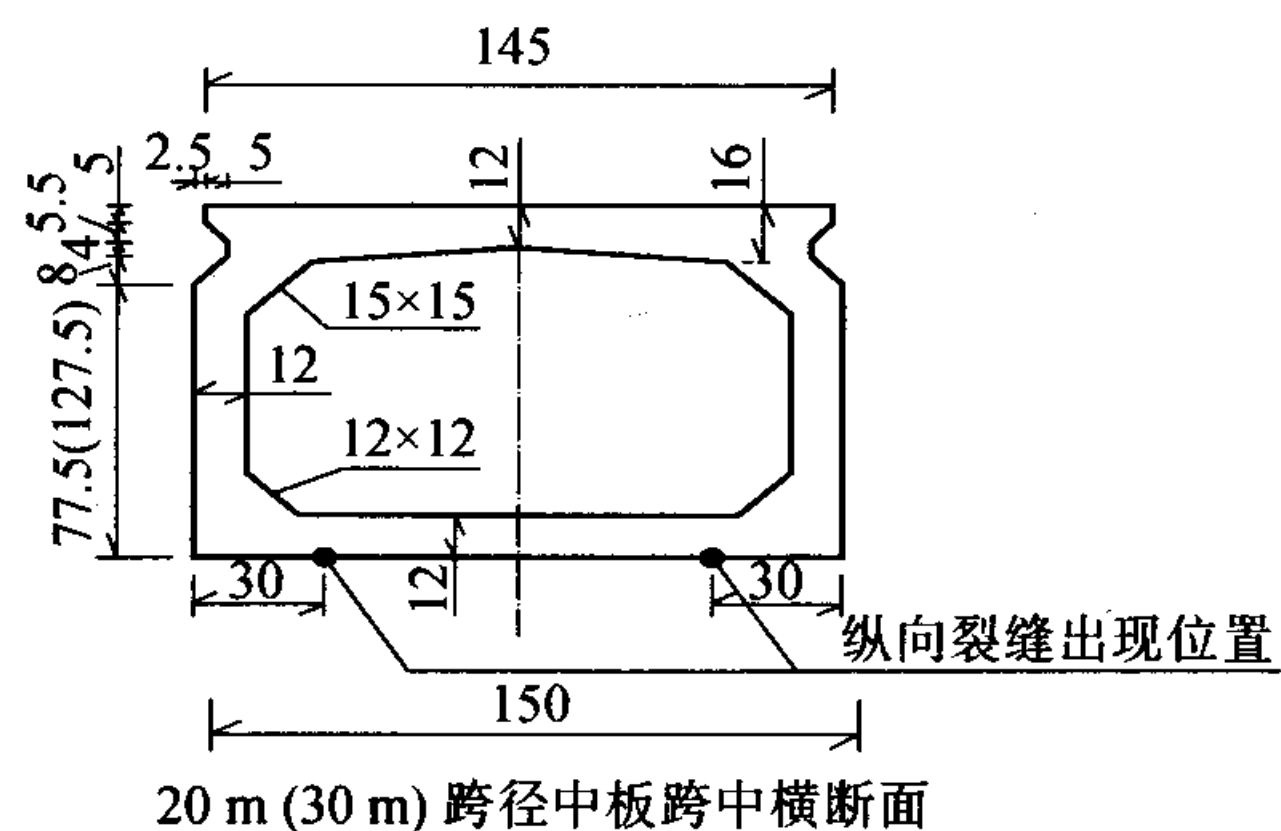
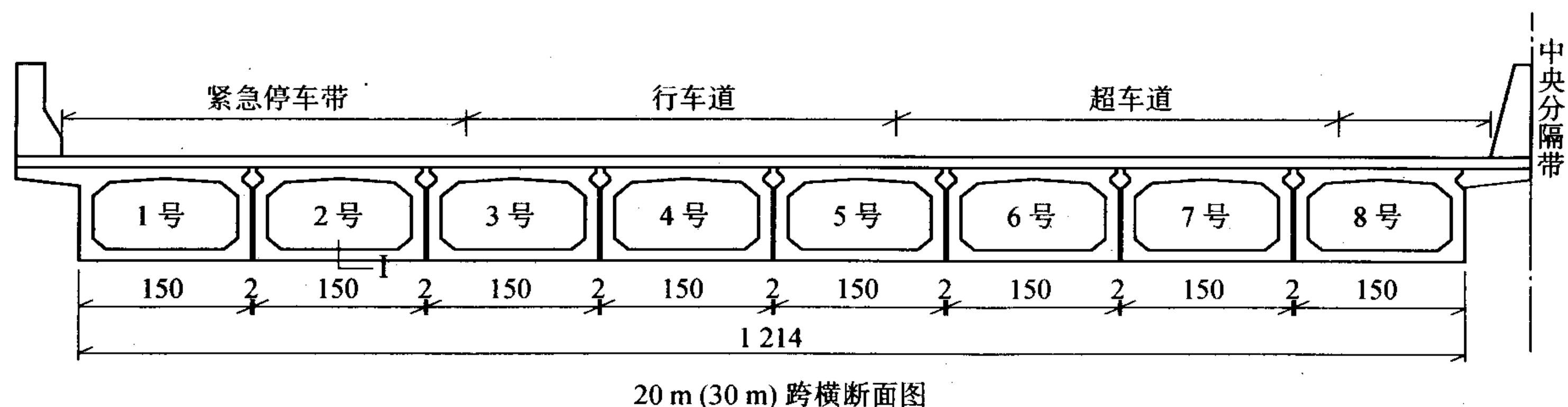
图 1 20 m、30 m 跨径最长联示意

统计结果表明: 出现纵向裂缝的板号主要集中在 3~5 号板, 尤以 4 号板数量居多, 裂缝宽度从 0.02 mm 到 0.2 mm 不等。这些空心板主要位于行车道位置, 频繁受到荷载的作用。这些裂缝顺桥向位置多位于跨中附近, 有的甚至贯穿整跨, 横向位置则多发生在离梁边缘约 30 cm 左右(梗腋位置附近), 这与由畸变所产生的病害相吻合, 初步判断是由于空心板板件较薄, 在荷载作用下出现了较大的畸变(横向)应力引起的。

## 2 畸变的基本概念

畸变是伴随扭转产生的, 扭矩作用下的分解示意, 见图 3 所示。畸变位移包括畸变横向挠曲和畸变纵向翘曲, 前者导致出现横向弯矩。从图 3 中畸变引





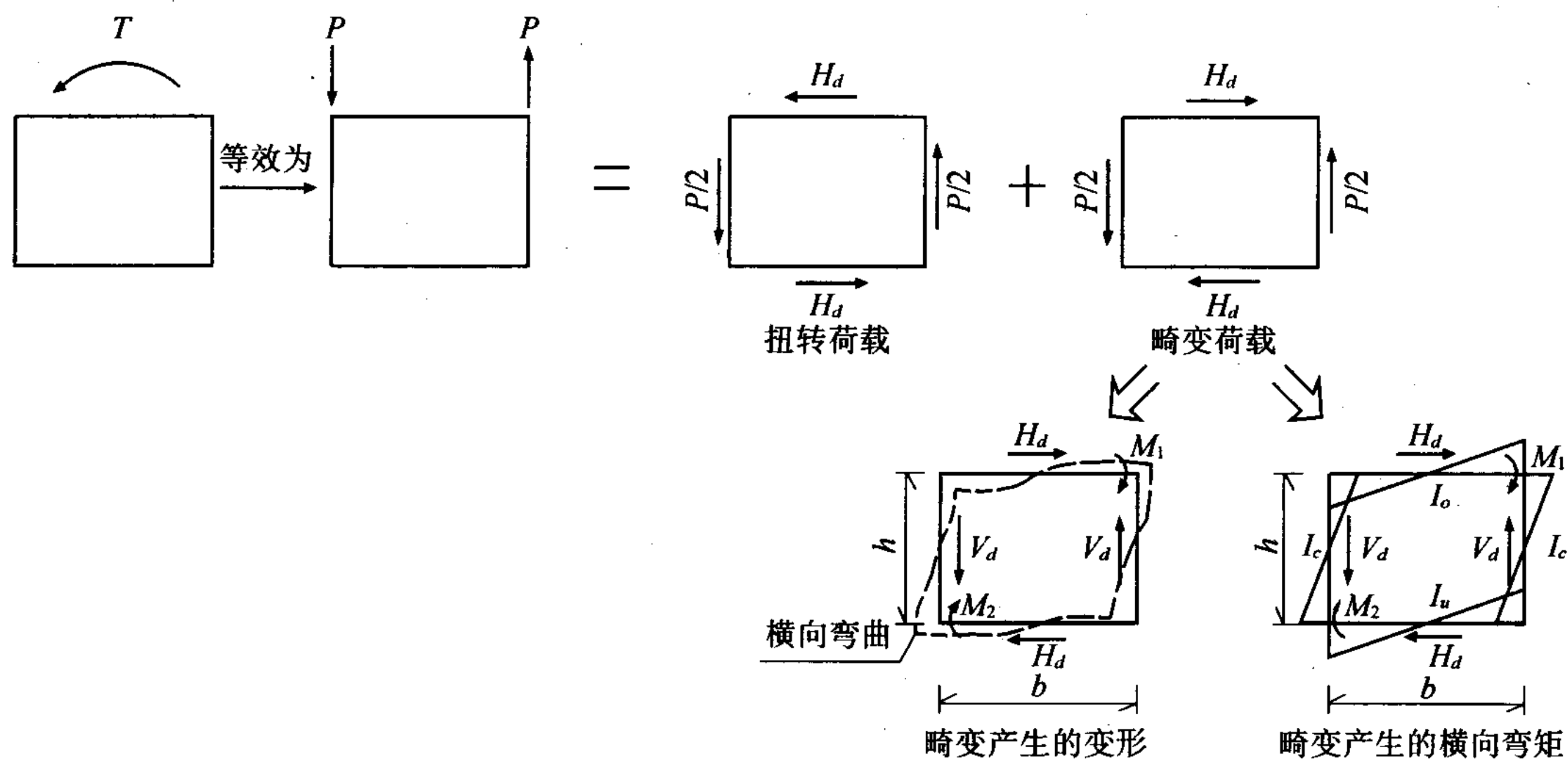
单位: cm

图2 20 m (30 m) 跨横断面

表1 实测出现纵向裂缝的板数统计

板号		1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	块数合计
20 m 跨	左幅	7	6	20	29	23	15	14	5	119
	右幅	7	14	23	18	20	13	13	3	111
30 m 跨	左幅	2	3	5	5	2	3	2	2	24
	右幅	0	2	1	2	0	1	3	1	10

起的横向弯矩图中很容易看出,越靠近拐角的地方横向弯矩越大,因此工程设计中常在箱梁的拐角处设计梗腋。若梗腋尺寸不足,同时板厚又太薄,在倒角和底板的截面突变处就很有可能由于横向拉应力过大而出现纵向裂缝。



### 3 实桥薄壁空心板的畸变计算

以跨径 20 m 的 4 号板为例,首先采用铰接板法计算扭矩的横向分布,然后分别采用能量法结合有限元法和有限条法计算各关键截面的畸变应力值。

#### 3.1 单片空心板扭转荷载的计算

采用铰接板法计算荷载横向分布系数,等效简支跨长度取为  $0.7L$ 。其中 1~4 号板的扭矩横向分布影响线示于图 4 中。

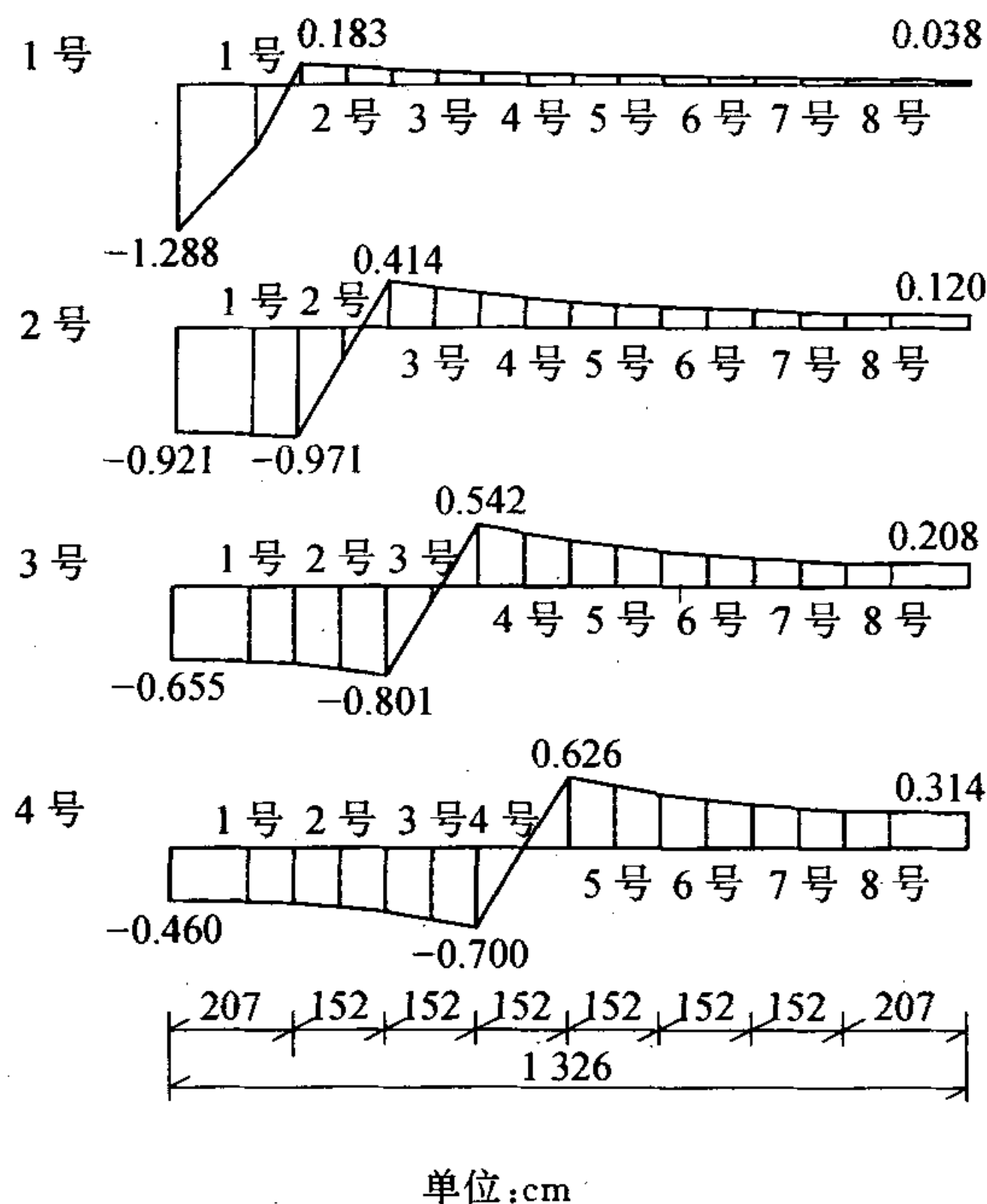


图4 1~4号板的扭矩横向分布影响线

对横向影响线进行加载计算,计算结果表明:在挂车-120荷载作用下,20 m、30 m跨均以3号空心板扭矩横向分布系数最大,在汽车-超20级荷载

作用下则4号空心板最大。其中20 m跨的计算结果列于表2。按照桥梁检测规范的规定,荷载试验按汽车荷载进行,因而选取4号板进行挂车-120荷载作用下的畸变计算,并通过实桥试验加以验证。

表2 1~4号空心板扭矩横向分布系数

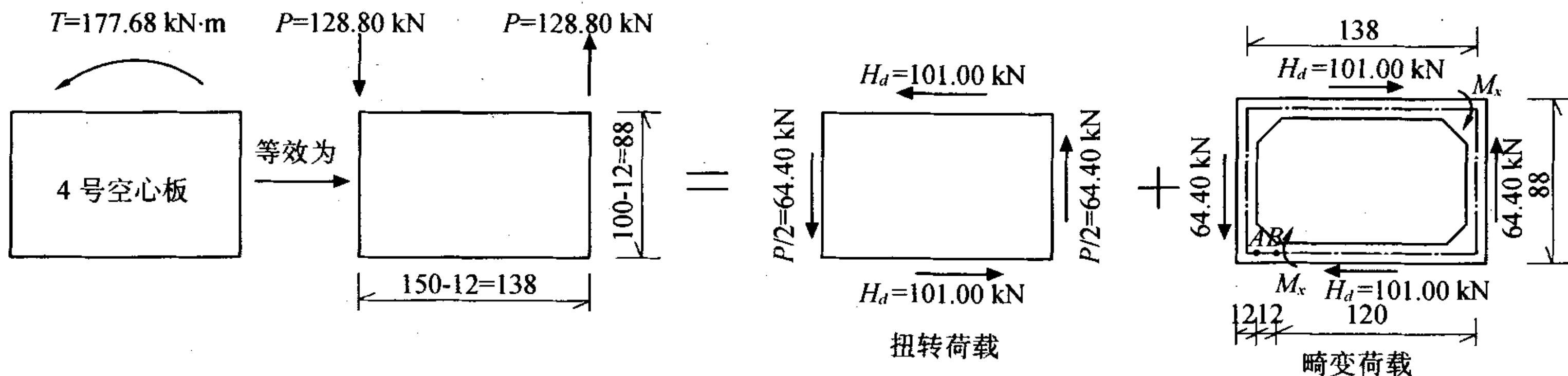
荷载等级	1号板	2号板	3号板	4号板
汽车-超20级	0.246	0.555	0.655	0.799
挂车-120	0.143	0.322	0.612	0.592

### 3.2 能量法结合有限元法

畸变微分方程的一般表达式与弹性地基梁控制微分方程具有相似的形式,见表3,因此求解十分简单,在许多设计手册或专著中都列出了现成的解答,利用两者之间的相似性,便能直接得到畸变结果。详细内容可参阅文献[1]、文献[2]。对于扭矩最大的4号空心板,最不利的畸变荷载如图5所示。

表3 弹性地基梁的弯曲与箱梁畸变的相似关系

弹性地基梁的弯曲	箱梁的畸变	
$EI_{yy}'''' + EI_{xy}'' = q$	$EI_{11}\gamma'''' + EI_{22}\gamma'' = V_{db}$	$EI_b W'''' + KW = V_d$



单位:cm

图5 空心板畸变荷载示意

(1)按以下步骤计算弹性地基梁各相关参数:

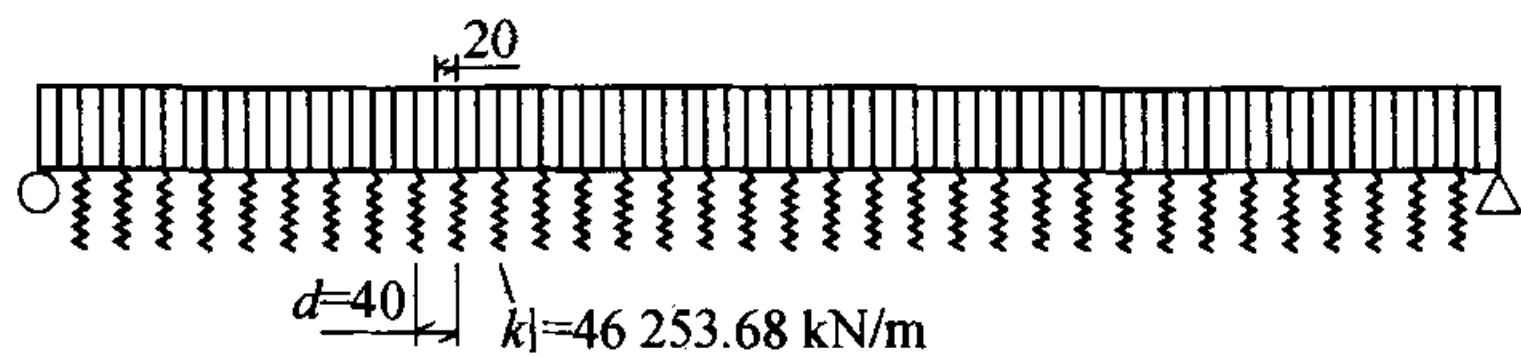
- ①顶板、底板、腹板的横向抗弯惯矩  $I_0, I_u, I_c$ ;
- ②腹板平面内的抗弯惯矩  $J_c$ ;
- ③抗畸变翘曲惯矩  $I_b = 0.01027 \text{ m}^4$ ;
- ④抗畸变框架惯矩  $K = 115634.2 \text{ kN/m}^2$ 。

(2)根据弹性地基梁的弯曲与箱梁畸变的相似关系,可以确定弹性地基梁的抗弯惯矩为  $I_b$ 、地基模量  $k = K$ 。由表2得知,弹性地基梁在梁端为简支情况下的挠度  $y$ ,它所对应的物理量是箱梁的畸变挠度  $W$ 。也就是说求解箱梁的畸变挠度  $W$ ,转化成求解梁端为简支的弹性地基梁的挠度  $y$ 。

(3)弹性地基梁的挠度计算。

如图6建立平面有限元模型,计算跨径14 m,共划分71个节点,70个单元,每个单元长0.2 m。梁两端支承为简支,中间支承为弹性支承,支承刚度为:

$$k_1 = k \times d = 115634.2 \times 0.4 = 46253.68 \text{ kN/m}$$

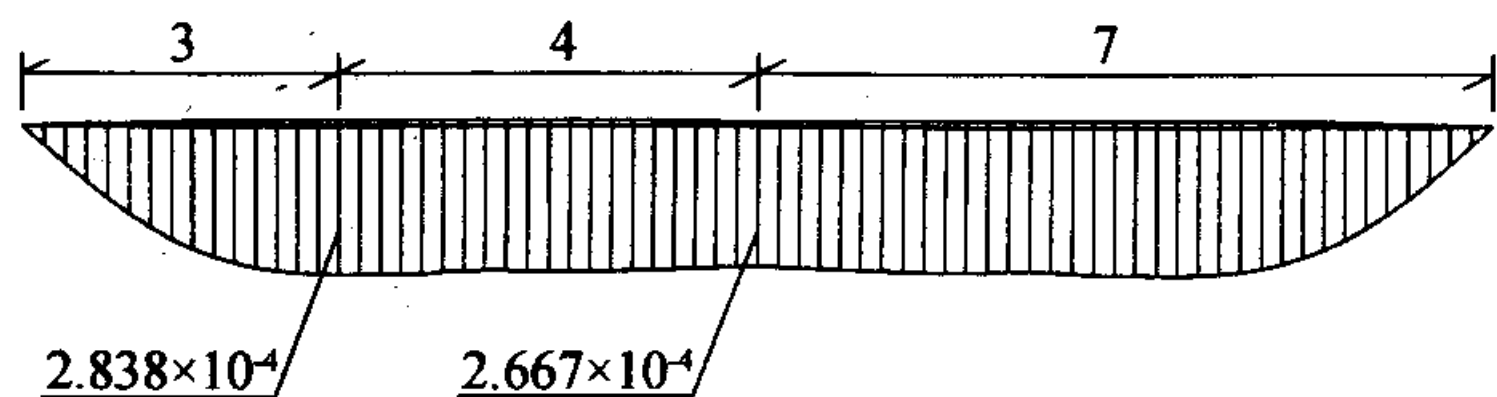


单位:cm

图6 14 m弹性地基梁有限元法计算模式

在挂车-120作用下,14 m跨径畸变位移包络图见图7所示。





单位: m

图 7 挂车-120 作用下 14 m 跨畸变位移包络图

由图 7 可知,最大位移在  $y=3.0$  m 处,相应的畸变挠度  $W$  为 0.283 8 mm,跨中的畸变挠度  $W$  为 0.266 7 mm。

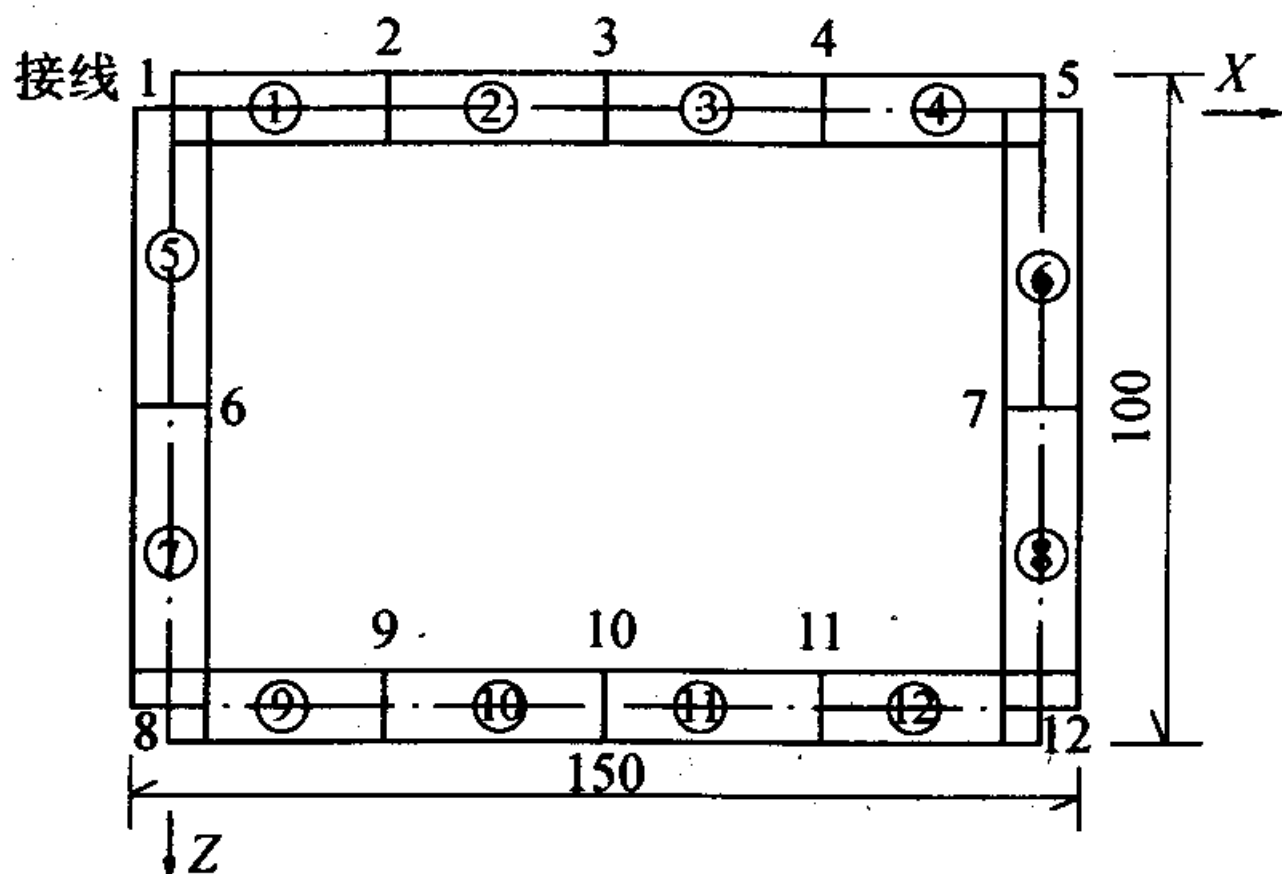
(4) 求解  $A$ 、 $B$  点(位置见图 5)的横向弯矩及畸变应力。

根据畸变横向弯矩的计算公式计算  $M_A$ ,并经线性内插计算  $M_B$ 。

$$M_A = \frac{24E \frac{I_0}{b^2} (1 + 3 \times \frac{h}{b} \times \frac{I_u}{I_b})}{1 + 2 \frac{h}{b} \times \frac{I_0 + I_u}{I_c} + 3 \frac{I_u \times I_0}{I_c^2} \times \frac{h^2}{b^2}} W \quad (1)$$

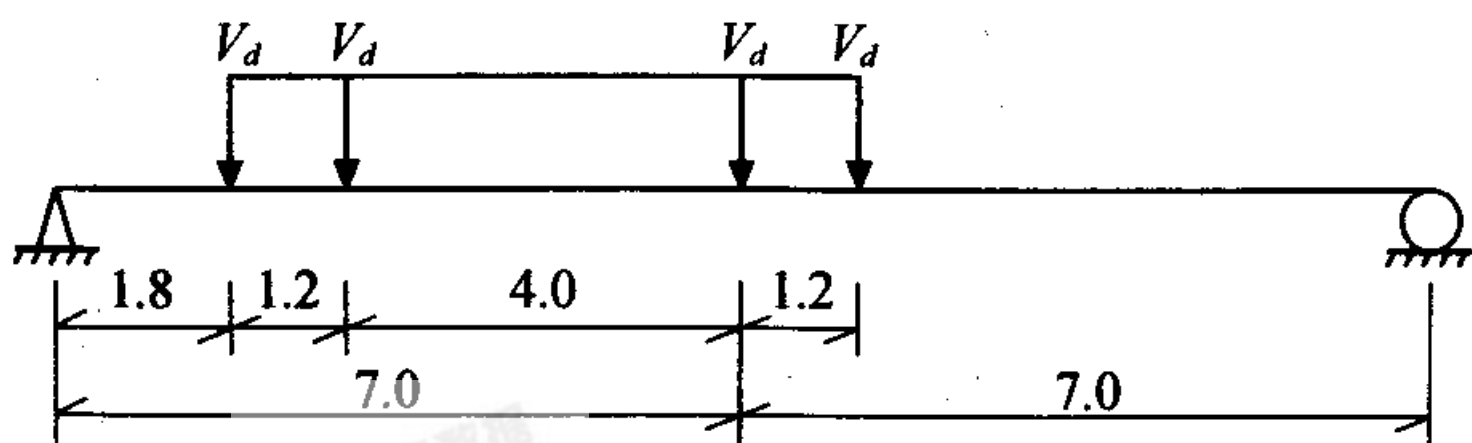
### 3.3 有限条法

由于全跨为等截面,使用有限条法计算畸变应力比能量法要更为简便快捷。如图 8 所示,将空心板划分为 12 个单元,共有 12 根结线,以 20 m 跨为例,计算跨径仍取为 14 m,按挂车-120 进行布载,布载方式见图 9 所示。



单位:cm

图 8 有限条法计算模型



单位:m

图 9 挂车-120 的计算模式

### 3.4 计算结果及分析

现将能量法和有限条法的计算结果见表 4。

表 4 挂车-120 作用下 20 m 跨横向受力计算结果

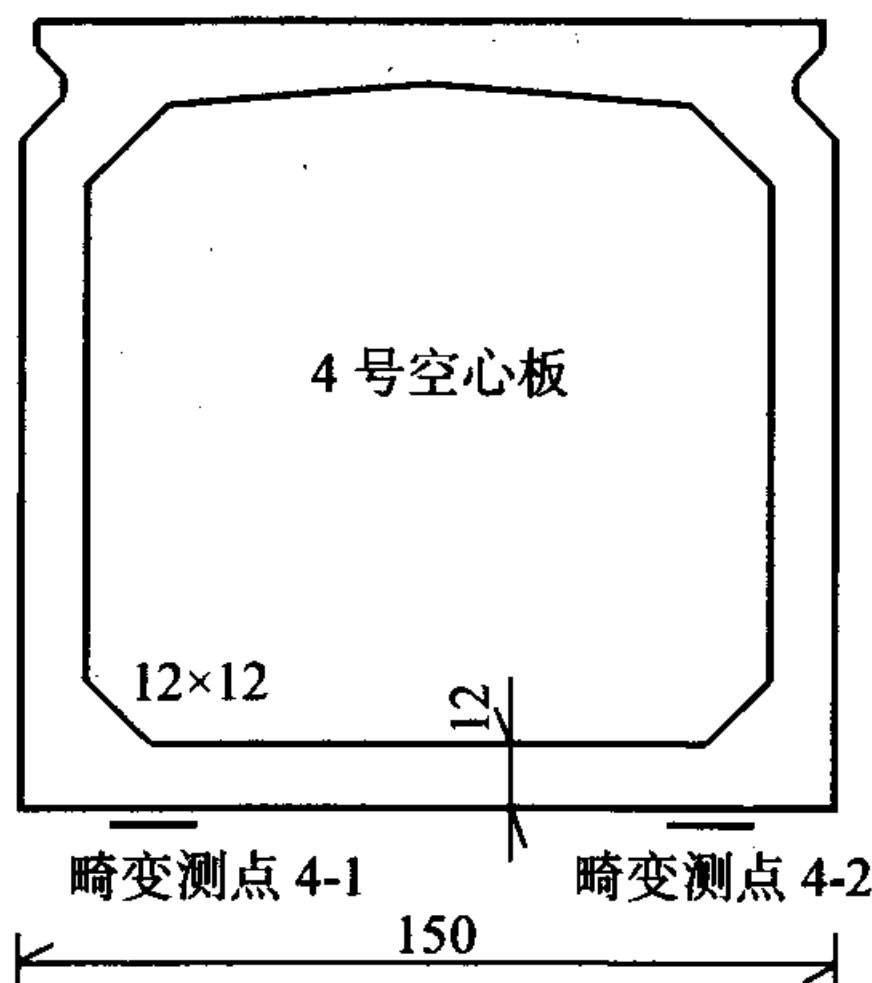
计算方法	项目	距跨中 4 m		跨中	
		A	B	A	B
能量法	弯矩/(kN·m)	11.32	8.368	10.64	7.860
	应力/MPa	-1.19	-3.49	-1.11	-3.30
	裂缝宽度/mm		0.411		0.386
有限条法	弯矩/(kN·m)	11.46	8.465	11.21	8.280
	应力/MPa	-1.20	-3.53	-1.17	-3.50
	裂缝宽度/mm		0.416		0.407

注:(1)压应力为+,拉应力为-;(2) $A$ 、 $B$  点位置参见图 5。

计算结果表明:采用能量法结合有限元法和有限条法计算,20 m 跨空心板角隅处(图 5 中的  $B$  点)在最不利荷载作用下,产生的最大畸变拉应力为 3.49 MPa 和 3.53 MPa,已经超出了 C50 混凝土的抗拉设计强度,验算其相应裂缝宽度达到了 0.416 mm,开裂不可避免。同样计算 30 m 跨空心板角隅处的畸变拉应力为 3.2 MPa,也超出了 C50 混凝土的抗拉设计强度,计算裂缝宽度为 0.405 mm。实际裂缝出现的位置与应力计算结果相一致。

## 4 现场荷载试验验证分析

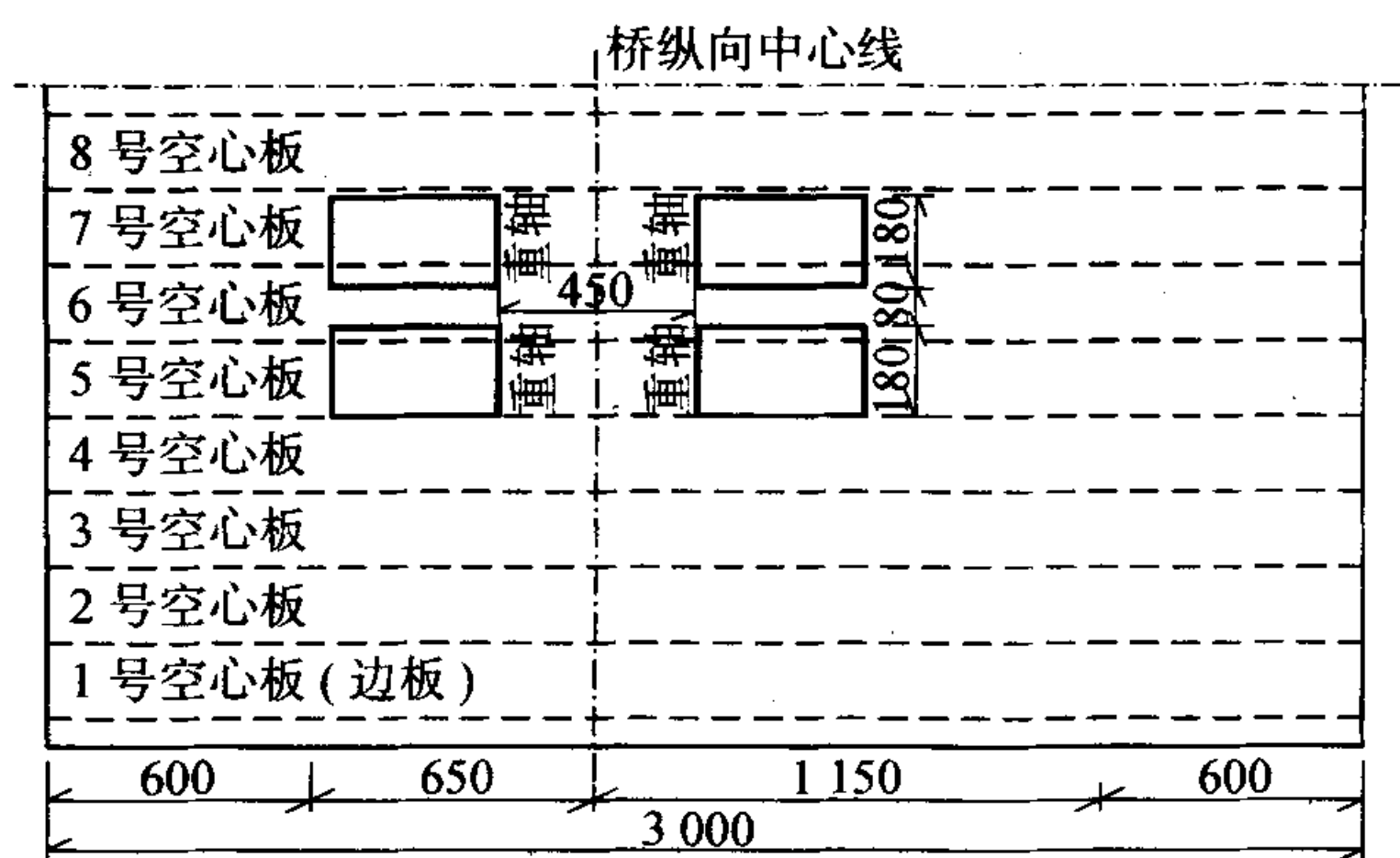
为了检验实桥薄壁空心板结构的扭转受力性能,进行了扭转静载试验。选取第 4 联的边跨(跨长为 30 m)作为试验跨。如图 10 所示位置布置横向应变片,通过测试混凝土横向应变得到横向畸变应力。采用 4 台 235 kN 标准重车,主梁扭转荷载效率系数为 0.66。两个试验工况的加载示意如图 11 所示,试验结果见表 5。



单位:cm

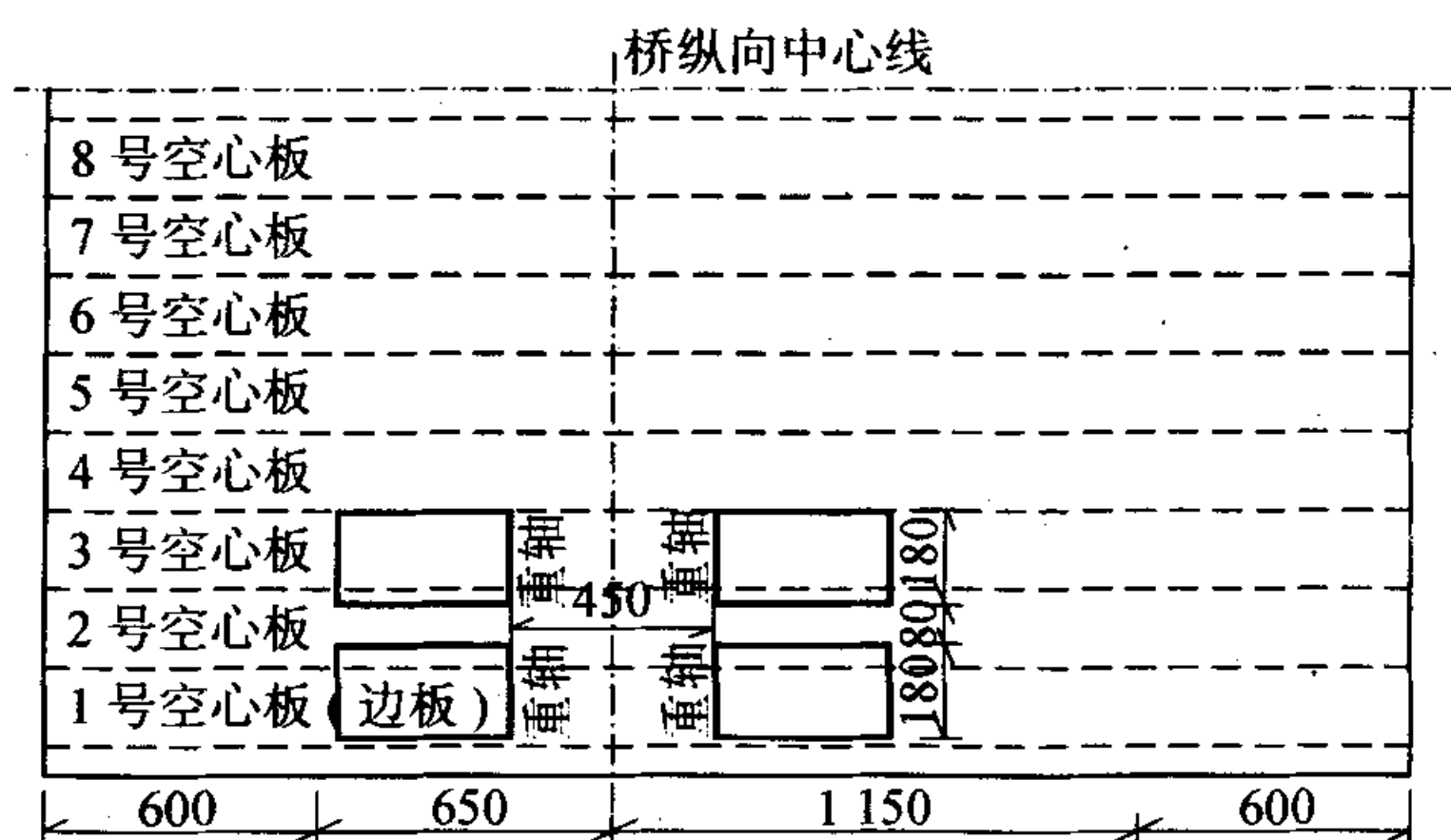
图 10 空心板跨中截面的横向测点布置示意





单位:cm

工况 1:边跨畸变加载的车辆布置示意



单位:cm

工况 2:边跨畸变加载的车辆布置示意

图 11 加载示意

表5 空心板板底的横向应力结果 MPa

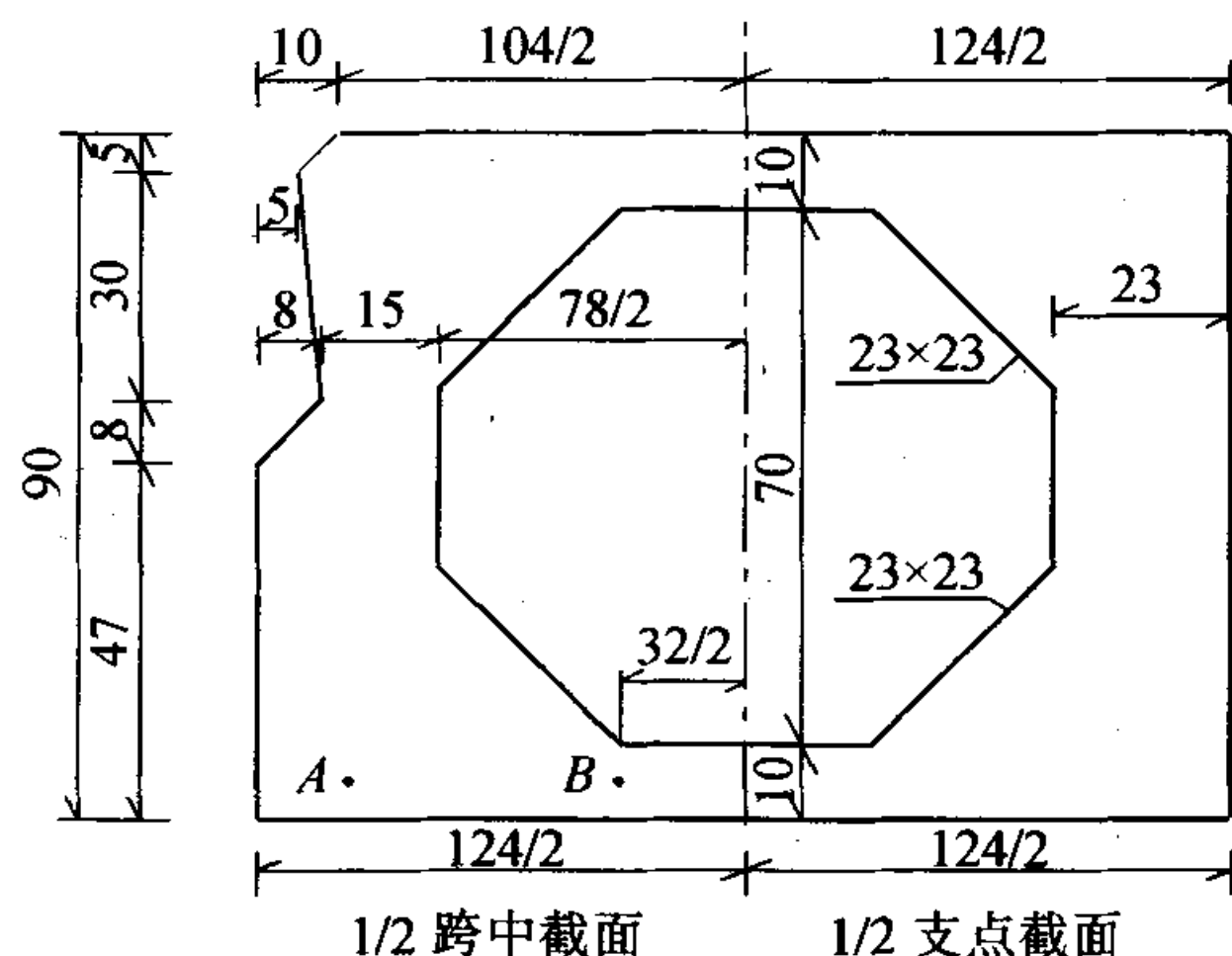
畸变 测点	工况 1			工况 2		
	实测值 ①	计算值 ②	应力校验 系数①/②	实测值 ①	计算值 ②	应力校验 系数①/②
4—1	1.40	2.10	0.667	-1.26	-2.10	0.600
4—2	-1.23	-2.10	0.583	1.75	2.10	0.833

注:受拉为正。

按桥梁检测规程,对于预应力混凝土桥,应力校验系数在0.6~0.9之间属正常范围。表5结果表明,最大畸变应力达到1.75 MPa。显然,按照设计荷载的车辆布载,畸变应力还将增大。现场的试验结果表明:实桥薄壁空心板结构在活载作用下产生了较大的畸变拉应力,与计算结果一致。

## 5 标准图空心板的畸变计算



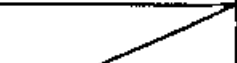

图12为交通部1999年颁布的20 m跨径预应力混凝土空心板标准图的横断面,现同样采取以上两种方法,计算在同样荷载条件下该断面的畸变拉应力,计算结果见表6。



单位:cm

图 12 20 m 跨径预应力混凝土空心板标准图横断面

**表 6 挂车—120 作用下 20 m 跨标准断面  
横向受力计算结果**

计算方法	项目	距跨中 4 m		跨中	
		A	B	A	B
能量法	弯矩/(kN·m)	9.26	2.94	8.53	2.70
	应力/MPa	-0.51	-1.76	-0.47	-1.62
	裂缝宽度/mm		0.244		0.224
有限条法	弯矩/(kN·m)	9.43	2.99	9.26	2.94
	应力/MPa	-0.52	-1.79	-0.51	-1.76
	裂缝宽度/mm		0.248		0.244

注:(1)压应力为+,拉应力为-;(2)A、B点位置参见图5。

由表 6 计算结果表明:无论采用能量法结合有限元法或是有限条法计算,20 m 跨标准断面空心板角隅处(图 5 中的  $B$  点)在最不利荷载作用下,产生的畸变拉应力均小于 1.8 MPa,仅为实桥薄壁结构的 50%左右。按 1985 年规范第 4.2.6 条规定,裂缝宽度正好满足要求。

## 6 结论和建议

(1) 两种方法计算并结合实桥荷载试验结果表明,畸变效应是引起薄壁空心板板底纵向开裂的主要原因。畸变拉应力过大并引起开裂的主要原因有两点:一是空心板各板太薄,导致板间刚度较低,畸变应力偏大;二是钢筋的横向布置太少,横向抗力不足。因此应避免使用薄壁空心板(目前预应力空心板标准图已经不再使用)。

(2) 本文使用的两种畸变计算方法(能量法和有限条法)结果相差不大,小于10%。其中有限条法计算较简单快捷,对于等截面结构,使用该算法能快速准确地得到设计值。



## 参考文献:

- [1] 程翔云. 梁桥理论与计算[M]. 北京:人民交通出版社,1990.
- [2] 张元海. 桥梁结构理论分析[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [3] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 卢耀梓,卡申斯,著. 罗崧发,陈锡华,等译. 桥梁工程中的有限条法[M]. 北京:人民交通出版社,1985.
- [5] 王建华,孙胜江. 桥涵工程试验检测技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

## Distortion Analysis and Experimental Research on Longitudinal Cracks of Thin-Walled Hollow Slab

SHAO Xu-dong, ZHOU Li-ming, LI Li-feng

(Institute of Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The thin-walled structural theory is employed to investigate the regular longitudinal cracks of the thin-walled hollow slab of a sea-crossing bridge. The energy method and finite strip method are conducted to calculate the distortion stress of the hollow slab under live load, and the distortion analysis of the current standard hollow slab is also presented. The theoretical analysis and the field load tests verify that the distortion effect is the dominant reason causing the longitudinal cracks of the hollow slab bottom.

**Key words:** thin-walled hollow slab; distortion; energy method; beam on elastic foundation; finite strip method

### 投 稿 须 知

《公路》月刊于1956年创刊,由中华人民共和国交通部主管,是中国公路行业出版最早的中央级技术类科学技术期刊,是公路运输类中文核心期刊,是交通部和全国优秀科技期刊。

1. 本刊刊登的内容以实用科学、实用技术为主,兼顾理论研究、科学实验与标准规范,还包括方针、政策、管理等内容,对技术水平领先、有创造性、适用推广价值较高的文章优先刊登。

2. 投寄本刊的稿件,可以是原稿,也可以是打印稿或E-mail文稿(作者必须与原稿核对无误),具体格式请参照本刊近期出版的《公路》杂志。稿件请作、译者自留备份,本刊概不退稿。若文章被采用,本刊即行寄样刊和稿酬,不再另发“用稿通知”。

3. 文稿应有“摘要”和“关键词”。“摘要”为全文的浓缩,以提供文章内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文章重要内容。“关键词”为“摘要”的浓缩,可选3~8个。

4. 文章中科技术语和名词,请用规定的通用词语。文章内容应符合国家标准和各种行业标准要求,应使用法定计量单位。公式、图表应清晰准确,符合国家标准要求。各级标题应明确、清晰。

5. 文章中摘编、引用他人作品,请遵守《著作权法》规定在参考文献中写出。

6. 文章著作权,除《著作权法》另有规定外,属于作者。署名作者的人数和顺序由作者自定。

7. 文章题目、摘要及关键词、作者的姓名和工作单位名称,要求作者翻译成英文。

8. 来稿请注明作者的真实姓名、作者本人的详细信息、工作单位和详细地址、电话。作者本人的详细信息,包括:学历、简历、身份证号码。请作、译者注意:来稿作者信息不详者,稿件一律不采用。

9. 所有来稿文责自负。

10. 投稿方式:

您可直接将稿件寄给本刊,地址见本刊“目次”页;您还可通过E-mail:paper@chn-highway.com投稿。通过E-mail投稿的作者请注意留下详细联系地址及电话,否则本刊不接受投稿。

《公路》杂志社