

预应力混凝土连续箱梁桥腹板斜裂缝研究

顾凯锋¹, 彭卫²

(1. 浙江省公路管理局 杭州市 310009; 2. 浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310032)

摘 要: 根据空间应力理论, 结合实桥的现场观测与有限元分析, 研究了大跨径变截面预应力混凝土连续箱梁桥在边跨现浇段和支座附近腹板的斜裂缝问题, 针对敏感性因素如纵向预应力筋布置方式和竖向预应力大小等进行了计算比较, 提出了防治腹板斜裂缝的设计建议和构造措施。

关键词: 连续箱梁; 预应力混凝土; 斜裂缝; 抗裂

近十几年来, 预应力混凝土大跨径连续箱梁桥, 在施工阶段或使用阶段, 普遍出现各种不同性质的裂缝问题。典型裂缝是在边跨现浇段和支座附近至 $1/4$ 跨范围的腹板斜裂缝。本文即从实桥观测、数值计算与理论分析 3 个方面对这一问题进行研究。

1 实桥观测

所观测的实桥分别为: $56\text{ m}+80\text{ m}+56\text{ m}$ (桥 1) 三跨变截面单箱双室连续箱梁桥, 支点箱高 5 m , 跨中箱高 2.4 m , 桥宽 16.25 m , 设计荷载为汽车—超 20 级, 挂车—120; $52\text{ m}+3\times 80\text{ m}+52\text{ m}$ (桥 2) 五跨变截面单箱单室连续箱梁桥, 腹板厚度由支点 0.60 m 渐变至跨中 0.35 m , 桥宽 16 m , 设计荷载为汽车—20 级, 挂车—100。

两座桥的裂缝基本相似, 主要表现为边跨现浇段腹板和支座附近 $1/4$ 跨范围腹板 45° 斜向裂缝。桥 1 是在运营一段时间之后出现裂缝, 而桥 2 在竣工质量验收时就发现桥梁主跨箱梁的部分腹板上出现了较多的裂缝, 主要分布在跨中箱梁腹板以及在与边跨桥墩相接的现浇段箱梁腹板上, 裂缝在上下游

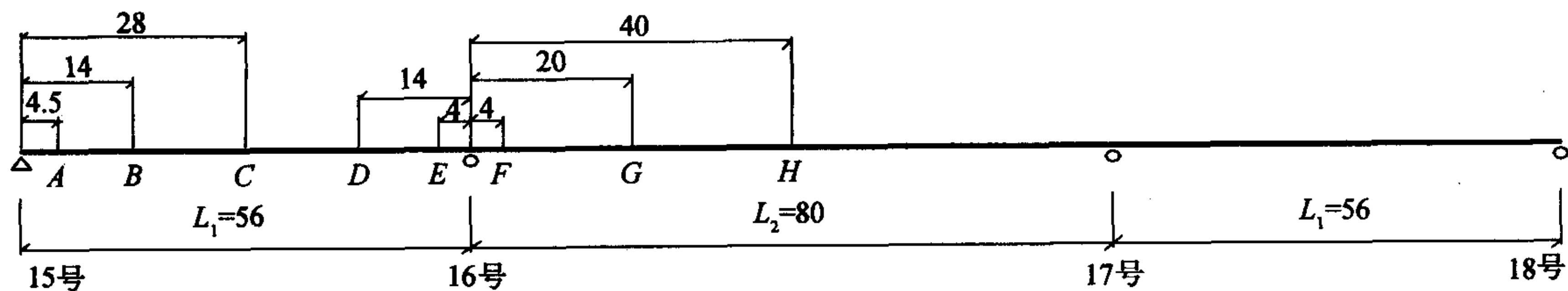
的两侧基本对称, 与桥纵轴线成 45° 左右方向。从裂缝分布与方向来看, 这些裂缝属于结构性裂缝, 是由于主跨箱梁承受了较大剪应力, 因而在腹板上出现了斜裂缝。

2 数值计算

为了深入探讨腹板斜裂缝产生的原因, 本文用平面有限元与空间有限元分别对两座实桥进行计算, 本文只列出桥 1 的计算结果。

2.1 平面有限元分析

采用桥梁结构平面杆系有限元软件进行结构分析, 全桥划分为 86 个节点, 85 个单元, 单元划分根据施工图中的连续箱梁一般构造图的分块方案, 平面分析计算简图见图 1。成桥阶段计算按两种不同的竖向预应力大小进行计算: 预应力 1 (竖向预应力按设计张拉控制力的 50% 考虑); 预应力 2 (竖向预应力按设计张拉控制力的 30% 计入)。每一种情况均分 8 种工况、6 种组合进行计算。表 1 列出了两种预应力条件下组合 6 (一恒+二恒+支座沉降+顶底板温差 10°C +汽车—超 20 级) 第一主应力的计算结果。



单位: m

图 1 平面分析计算简图

表 1 平面有限元计算组合 6 第一主应力 MPa

	A	B	C	D	E	F	G	H
①预应力 1	-1.88	-1.52	-1.26	-1.04	-0.96	-1.29	-1.05	-1.32
②预应力 2	-1.34	-0.91	-0.76	-0.60	-0.57	-0.76	-0.62	-0.80
(①-②)/①	0.29	0.40	0.40	0.42	0.42	0.40	0.41	0.39

2.2 空间有限元分析

箱形梁桥可以作为典型的折板结构来分析,有限单元采用平面应力与弯曲复合的板壳元,每个节点 6 个自由度。全桥划分为 5 893 个节点,6 112 个单元。预应力效应用等效荷载计入,汽车荷载利用影响线动态加载。全桥纵向单元划分见图 2。

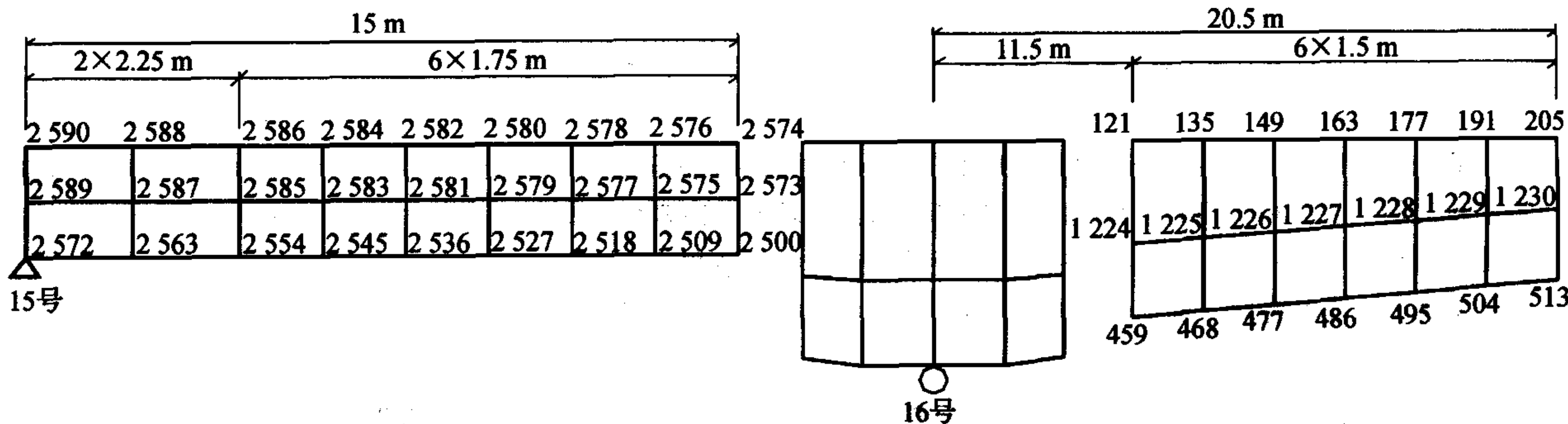


图 2 纵向单元划分及部分腹板节点

为了分析腹板上的纵向预应力布置方式和竖向预应力大小对腹板主拉应力的影响,分 3 种预应力情况进行计算。每一种预应力条件下进行 7 种工况计算,5 种工况组合。表 2 列出组合 5(一恒+二恒+支座沉降+顶底板温差 10℃+汽车一超 20)在 16 号墩附近 1/4 跨范围腹板的剪应力与主拉应力值,表 3 列出边跨现浇段腹板的剪应力与主拉应力值。

预应力 1:腹板纵向预应力按弯束布置,竖向预应力按 50%设计张拉力考虑;

预应力 2:腹板纵向预应力按直束布置,竖向预应力按 50%设计张拉力考虑;

预应力 3:腹板纵向预应力按直束布置,不考虑竖向预应力作用。

表 2 16 号墩附近腹板在不同预应力条件下的应力

MPa

节点号	预应力 1		预应力 2		预应力 3		(4)-(2)	(6)-(4)
	(1) τ_{yz}	(2) S_1	(3) τ_{yz}	(4) S_1	(5) τ_{yz}	(6) S_1	(2)	(4)
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
121	-2.74	0.29	-3.14	1.00	-3.15	1.78	245	0.78
135	-2.88	0.25	-3.26	0.92	-3.27	1.75	268	0.90
149	-2.97	0.48	-3.38	0.80	-3.39	1.65	67	1.06
163	-3.06	0.31	-3.49	0.78	-3.49	1.65	152	1.12
177	-3.10	0.50	-3.53	0.73	-3.53	1.54	46	1.11
191	-3.04	0.33	-3.46	0.75	-3.46	1.23	127	0.64
205	-2.77	0.51	-3.22	0.68	-3.22	1.19	33	0.75
459	-3.01	0.00	-2.97	0.13	-2.98	0.86	130	5.62
468	-3.15	0.30	-3.11	0.22	-3.12	1.04	27	3.73
477	-3.31	0.37	-3.23	0.53	-3.24	1.34	43	1.53
486	-3.40	0.84	-3.28	0.76	-3.29	1.59	9	1.09
495	-3.43	0.58	-3.29	0.85	-3.30	1.73	47	1.04
504	-3.33	1.02	-3.15	0.87	-3.16	1.74	15	1.00
513	-3.09	0.46	-2.96	0.74	-2.96	1.61	61	1.18
1224	-2.85	0.08	-3.03	0.31	-3.04	1.12	288	2.61
1225	-3.02	0.23	-3.20	0.43	-3.21	1.30	87	2.02
1226	-3.16	0.37	-3.33	0.62	-3.34	1.50	68	1.42
1227	-3.23	0.55	-3.39	0.77	-3.39	1.65	40	1.14
1228	-3.27	0.59	-3.42	0.82	-3.43	1.69	39	1.06
1229	-3.14	0.54	-3.32	0.76	-3.32	1.53	41	1.01
1230	-2.89	0.45	-3.08	0.69	-3.08	1.31	53	0.90

表 3 边跨现浇段腹板在不同预应力条件下的应力

MPa

节点号	预应力 1		预应力 2		预应力 3		$\frac{(6)-(4)}{(4)}$ ⑦
	(1) τ_{yz}	(2) S_1	(3) τ_{yz}	(4) S_1	(5) τ_{yz}	(6) S_1	
	①	②	③	④	⑤	⑥	
2500	-0.63	2.00	-0.65	2.14	-0.65	2.49	0.16
2509	-1.44	2.49	-1.47	2.62	-1.46	3.08	0.18
2518	-2.12	2.71	-2.14	2.81	-2.14	3.40	0.21
2527	-2.45	2.62	-2.47	2.71	-2.47	3.38	0.25
2536	-2.73	2.53	-2.75	2.61	-2.76	3.36	0.29
2545	-3.29	2.45	-3.32	2.51	-3.34	3.32	0.32
2554	-3.90	1.78	-3.92	1.82	-3.89	3.00	0.65
2563	-5.00	1.12	-5.02	1.15	-5.00	3.51	2.05
2573	-0.54	0.00	-0.56	0.00	-0.56	0.46	
2574	-0.45	0.81	-0.48	0.80	-0.47	1.56	0.95
2575	-1.43	0.19	-1.45	0.22	-1.45	0.79	2.59
2576	-1.41	0.88	-1.44	0.88	-1.44	1.62	0.84
2577	-2.12	0.62	-2.14	0.64	-2.14	1.49	1.33
2578	-2.12	1.08	-2.14	1.07	-2.14	1.80	0.68
2579	-2.45	0.75	-2.47	0.79	-2.47	1.82	1.30
2580	-2.45	1.02	-2.47	1.02	-2.47	1.73	0.70
2581	-2.76	0.96	-2.79	1.00	-2.79	2.04	1.04
2582	-2.80	0.98	-2.83	0.99	-2.82	1.68	0.70
2583	-3.38	1.28	-3.41	1.32	-3.41	2.31	0.75
2584	-3.46	0.99	-3.49	1.00	-3.47	1.58	0.58
2585	-4.25	1.38	-4.27	1.42	-4.26	2.76	0.94
2586	-4.60	1.36	-4.63	1.38	-4.62	2.84	1.06
2587	-5.08	1.67	-5.11	1.79	-5.10	3.67	1.05
2588	-5.16	2.18	-5.19	2.20	-5.19	3.97	0.80

2.3 计算结果分析

(1)腹板剪应力受中间支座负弯矩区段预应力筋布置方式(直线束或弯起束)影响不大。从表 2 的第 1 栏和第 3 栏数据看,只在负弯矩区段腹板上部有 14%左右的影响。而表 3 的第 1 栏和第 3 栏数据显示,边墩现浇段范围腹板剪应力几乎不受影响。

(2)表 2 与表 3 的第 3 栏和第 5 栏的计算结果明确表示,竖向预应力大小对腹板剪应力没有影响。

(3)中间支座负弯矩区预应力筋布置方式对该预应力筋作用范围内的腹板主拉应力影响很大。从表 2 的第 7 栏可以看出,直线布束与弯起布束相比,腹板主拉应力增大 33%~268%。但布束方式对边墩现浇段腹板主拉应力影响不大,表 3 的第 2 栏和第 7 栏的数据也说明了这一点。

(4)竖向预应力大小对全桥范围内腹板主拉应力均有影响。表 2 的第 8 栏显示了中间支座 1/4 跨附近腹板主拉应力受竖向预应力大小影响的程度;表 3 的第 7 栏则表示边墩现浇段箱梁腹板受竖向预应力影响的大小。两组数据表明:不计竖向预应力作用与计入 50%设计张拉控制力相比,腹板主拉应力相差 1 倍左右。表 1 的平面分析结果也说明了同样的问题。表 1 的数据表示,当腹板竖向有效预应力由 50%设计张拉控制力减小为 30%时,第一主应力(压应力)减小 40%。

3 理论分析与规范比较

(1)箱梁为空间结构,受力复杂。但箱梁腹板仍可简化为平面应力状态,主要应力为腹板平面内的

纵向正应力 σ_y 、竖向正应力 σ_z 、剪应力 τ_{yz} ，而横向正应力 σ_x 以及剪应力 τ_{xx} 、 τ_{xy} 数值极小，可以忽略不计，空间有限元分析的结果也验证了这一点。在二向应力作用下，主应力计算公式为：

$$\sigma_2^1 = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2} \quad (1)$$

从式(1)看出，纵向预压应力使主拉应力大为减小，如果再在竖向施加足够大的压应力，则可以全部消除主拉应力，使第一主应力和第二主应力均为压应力。从表 2 和表 3 的预应力 1 的计算结果看，当剪应力很大时，主拉应力并不大。而一旦 σ_y 与 σ_z 压应

力减小甚至为零，则主拉应力增大甚至与剪应力数值大小相等。

(2)我国的大跨径预应力混凝土连续箱梁经常出现裂缝，分析其原因有 2 个方面：一是设计时没有充分考虑斜截面抗剪，非预应力钢筋特别是腹板中的箍筋和弯起钢筋设置过少，一旦竖向预应力损失过大，斜截面抗剪承载力将严重不足，从而导致腹板出现斜裂缝；另一方面，与国外设计规范相比，我国桥梁规定偏于不安全。从表 4 可以看出，对全预应力结构的容许主拉应力值，日本和德国的规定比较接近，都明显低于我国公路规范和铁路规范。

表 4 使用状态容许主拉应力的比较

MPa

混凝土等级	铁路规范 TB1 0002.3-99	公路规范 JTJ 023-85		日本规范 (1988 年)	德国规范 DIN4227
		荷载组合 1	组合 2 或组合 3		
C37				1.08	
C40	2.68	2.08	2.34		
C50	3.08	2.40	2.70	1.27	
C60	3.48	2.72	3.06	1.47	
B35					0.9
B45					0.9
B55					1.0

4 结论与建议

(1)腹板斜裂缝是预应力混凝土连续箱梁桥常见的裂缝形式，是结构性裂缝，受腹板纵向预应力布置方式和竖向预应力大小的影响。

(2)中间支座负弯矩区预应力筋布置方式对支座附近 1/4 跨范围内腹板主拉应力影响很大，但对边跨现浇段腹板主拉应力影响不大。

(3)竖向预应力大小对全桥范围腹板主拉应力影响较大。当竖向有效预应力按张拉控制力的 30% 和 0 考虑时，与按 50% 考虑相比，腹板主拉应力分别增大 40% 和 100%。

(4)为防治腹板斜裂缝，一方面预应力布束要合理，使腹板剪应力在纵向和竖向预压力作用下产生的主拉应力不致过大；另一方面要保证施工质量，使长度较短的竖向预应力有效值与设计值一致。

(5)为提高腹板斜截面抗裂性，除预应力配束合理外，还要配置一定数量的箍筋与弯起钢筋，如双肢箍筋。并且腹板厚度不宜太薄，对于大跨径箱梁可设计为 60 cm。

(6)设计人员在确定结构安全性时，使用状态容许主拉应力值可适当参考日本和德国规范。

参考文献：

- [1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] V. 克里斯特克, 著. 何福照, 吴德心, 译. 箱梁理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [3] 丁大钧. 钢筋混凝土结构学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1985.
- [4] 袁国干. 配筋混凝土结构设计原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [5] 罗旗帜, 俞建立. 钢筋混凝土连续箱梁桥翼板横向裂缝问题[J]. 桥梁建设, 1997, (1).
- [6] 徐龙高. 关于预应力混凝土结构剪力设计有关规定的讨论[J]. 桥梁建设, 2001, (1).
- [7] 周履, 蔡登山. 关于 PC 桥梁的混凝土应力限值的讨论[J]. 桥梁建设, 2001, (2).
- [8] JTJ 023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].