

## 钢-混凝土组合箱梁底板局部屈曲失稳分析

谭燕秋,马立荣

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**针对钢-混凝土组合箱梁负弯矩区底板在受压状态下的力学性能,建立箱梁底板在受压作用下的局部稳定性计算模型。通过对一般箱梁底板在受压作用下的局部稳定性计算和对箱梁底板焊接栓钉并浇筑一定厚度的混凝土板的局部稳定性的计算进行对比分析。结果表明:在受压状态下现浇混凝土板可以有效防止发生局部屈曲失稳,降低箱梁底板的应力,提高弯矩区混凝土梁的极限承载能力。

**关键词:**钢-混凝土组合箱梁;负弯矩区;局部稳定性

**中图分类号:**TU398

**文献标识码:**A

## Analysis on local buckling instability at the bottom of steel-concrete composite box beams

TAN Yan-qiu, MA Li-rong

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

**Abstract:** Tests have been carried out to study the mechanical property when the negative bending region of combination of steel-concrete composite box beams is under compression. This paper emphasizes the discussion of the computation model of the local stability when box beams is under compression. By comparing the local stability of box beams when under compression with the box beams which is welding studs, pouring concrete slab of certain thickness, this paper is to provide the reference for the optimization design of the bottom slabs of the negative bending region of combination of steel-concrete composite box beams. Results showed that cast-in-place concrete slab in compression state can effectively prevent the occurrence of local buckling instability; it can reduce the stress of the concrete slab and improve the negative bending region of concrete beams of the ultimate bearing capacity.

**Key words:** combination of steel-concrete box composite box beams; negative bending regions; local stability

钢-混凝土组合箱梁是在钢结构和钢筋混凝土结构以及薄壁箱梁结构的基础上发展起来的一种新型结构<sup>[1-3]</sup>。关于钢-混凝土箱梁理论,国内外学者提出的具有代表性的方法有梁格系理论<sup>[4]</sup>,板梁结合理论<sup>[5]</sup>,正交异性板理论<sup>[6]</sup>等。钢-混凝土组合箱梁的研究基于有限元理论的数值分析法,采用了空间梁元模型,空间薄壁箱梁元模型,空间梁格模型,实体、板壳模型等建模方法。聂建国<sup>[7]</sup>等在大量实验结果基础上提出了采用弹

性薄板理论建立基于弹性扭转约束边界的组合板局部稳定分析模型。在此基础上,本文采用弹性板理论建立钢-混凝土组合箱梁局部稳定分析模型,研究钢-混凝土组合箱梁底板局部屈曲失稳。

### 1 计算模型

组合受弯构件中箱梁在一定荷载条件下,在构件尚未整体失稳时,个别板件可能不能保持其平面平衡状态而发生平面外的波形凸曲现象,这

种现象称为组合梁的局部板件丧失稳定,简称局部失稳。受弯构件的底板局部失稳,可能导致构件的整体失稳提前发生,因此,在钢-混凝土组合箱梁的设计时,必须保证箱梁底板的局部稳定。

研究钢-混凝土组合箱梁单向受压的稳定性,假定长边沿横向受到扭转刚度为  $K_r$  的弹性扭转约束,组合板局部失稳分析模型简化为两边弹性约束,并引入嵌固系数  $\beta$  考虑理论模型与实际情况的偏差。

组合箱梁底板区域,单位宽度钢板屈曲变形函数为

$$w(x) = A \sin \left| \frac{\pi x}{S} \right| + B \left| 1 - \cos \left| \frac{2\pi x}{S} \right| \right| \quad (1)$$

式中:  $A$  - 待定系数;  $B$  - 待定系数;  $S$  - 栓钉间距。

变形函数  $w(x)$  需满足几何、物理边界条件

$$\begin{cases} w(0) = w(S) = 0 \\ EIw''(0) = -K_r w'(0) \\ EIw''(S) = K_r w'(S) \end{cases} \quad (2)$$

体系的应变能为

$$U = \int_0^S \frac{EI}{2} (w'')^2 dx + \frac{1}{2} K_r (w'(0))^2 + \frac{1}{2} K_r (w'(S))^2 \quad (3)$$

外力势能为

$$V = -W = -\frac{P}{2} \int_0^S (w')^2 dx \quad (4)$$

根据势能驻值原理得

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{\partial (U+V)}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial B} = \frac{\partial (U+V)}{\partial B} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将式(1-4)代入式(5)有非零解得

$$P_{cr} = \kappa \frac{\pi^2 \bar{E}_s I}{S^2} = \frac{\pi^2 \bar{E}_s I}{S^2} \left| \frac{12\pi^2 \lambda^2 + 80\lambda + 12}{12\pi^2 \lambda^2 + 32\lambda + 3} \right|$$

$$P'_{cr} = \beta P_{cr} = \beta \frac{\pi^2 \bar{E}_s I}{S^2} \left| \frac{12\pi^2 \lambda^2 + 80\lambda + 12}{12\pi^2 \lambda^2 + 32\lambda + 3} \right|$$

式中:  $\beta$  - 嵌固系数,  $\beta = 1.3$ ;  $\kappa$  - 屈曲系数;  $\lambda$  - 考虑转动约束影响系数,  $\lambda = \bar{E}_s I / (SK_r)$ ;  $I$  - 单位宽度板抗扭惯性矩,  $I = t^3 / 12$ ;  $T$  - 钢板厚度。

假定钢-混凝土组合箱梁在轴向荷载作用下,钢板发生局部屈曲之前,混凝土板与钢板变形协调,既两者轴向变形始终相等,由此可以得到组合梁在单向受压状态下局部失稳临界屈曲荷载  $P_{cr\Pi}$  为

$$P_{cr\Pi} = \beta P_{cr} = \beta \frac{P_{cr}}{t} \left| \frac{A_c}{a_E} + A_s \right|$$

## 2 结构模型

建立三维空间模型,并利用 Midas 有限元进行分析,对二种箱梁底板布置形式不同的箱梁进行对比。结构采用钢-混凝土组合箱梁形式,钢-混凝土组合箱梁全高 3.360 m,宽度为 9.200 m,混凝土板最厚为 400 mm,最薄为 320 mm,混凝土翼缘板为 C50 现浇混凝土板,钢箱梁由钢板焊接而成,钢材为 Q345,焊接钢箱梁的钢板厚度为 32 mm,与混凝土板连接处的钢板厚度为 36 mm,剪力连接件采用  $\Phi 22$  圆柱头栓钉。构造简图如图 1 所示。

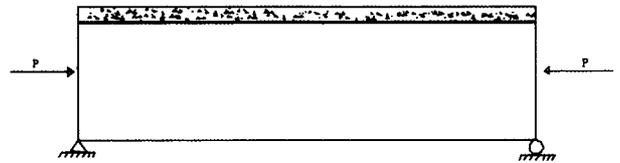
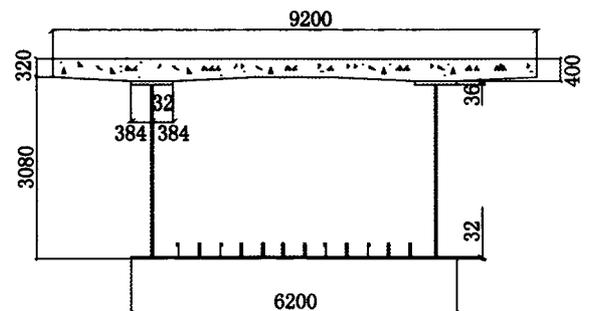


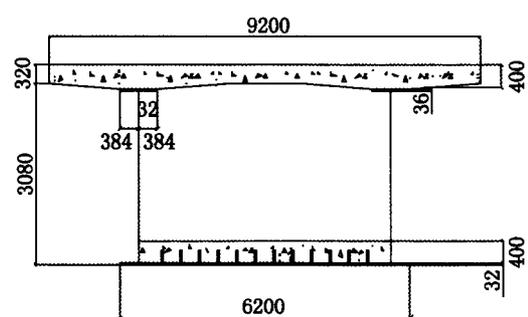
图1 钢-混凝土组合箱梁结构简图

Fig.1 Combination of steel-concrete box composite box beams structure diagram

方案一:钢-混凝土组合箱梁的基本形式,钢-混凝土组合箱梁的截面形式如图 2(a) 所示。



(a) 方案一截面形式



(b) 方案二截面形式

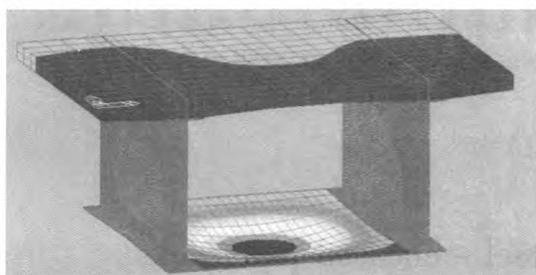
图2 钢-混凝土组合箱梁截面形式

Fig.2 The scheme section form of combination of steel-concrete box composite box beams

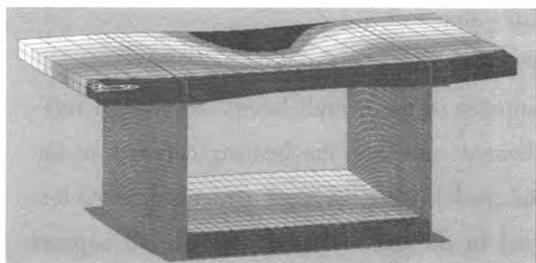
方案二:在方案一钢-混凝土组合箱梁基本

形式的基础上箱梁底板面浇筑一层厚度为 400 mm 的混凝土板,其截面形式如图 2(b)所示。

建立了三维空间模型,并利用 Midas 有限元分析软件对两种方案的钢-混凝土组合箱梁进行分析。为使计算结构更接近实际情况,钢-混凝土组合箱梁中的混凝土及钢板均采用实体单元模拟,混凝土翼缘板和钢板之间为栓钉连接,现浇混凝土板与钢板之间也为栓钉连接,在进行局部稳定分析时,假定刚度为常数。



(a) 方案一位移变形图



(b) 方案二位移变形图

图3 钢-混凝土组合箱梁位移变形图

Fig.3 The displacement deformation diagram of combination of steel-concrete box composite box beams

钢-混凝土组合箱梁结构由上部钢筋混凝土板或预应力混凝土板和下部的钢箱梁组成。混凝土板和钢箱梁之间通过剪力连接件进行连接。钢-混凝土组合箱梁结构抗扭刚度大,稳定性良好,能有效地抵抗负弯矩。承重结构和传力结构相结合,使混凝土板承担梁体的压应力,钢梁承担拉应力,充分发挥混凝土和钢材优越的性能,达到经济节约的效果。

局部失稳的位移结果对比,见表1。可知方案二比方案一的位移有一定的减小,其中钢箱底板的位移由图3可以看出,方案一中的钢箱底板中心处位移最大,对比方案二同一位置处,位移减小的幅度较大。由此可见现浇的混凝土板与钢箱底板通过栓钉连接可以减小钢箱底板的位移。

整理计算结果,比较两个方案的应力,分析结果数据如表2所示。

表1 局部失稳位移结果对比

Tab.1 Local buckling displacement results compared

编号	方案一	方案二
1	0.000 00e+000	0.000 00e+000
2	5.928 48e-004	7.849 91e-005
3	1.185 70e-003	1.569 98e-004
4	2.371 39e-003	3.139 96e-004
5	2.964 24e-003	3.924 95e-004
6	3.557 09e-003	4.709 95e-004
7	4.149 93e-003	5.494 94e-004
8	4.742 78e-003	6.279 93e-004
9	5.335 63e-003	7.064 92e-004
10	5.928 48e-003	7.849 91e-004
11	6.521 32e-003	8.634 90e-004
系数	7.538 E+001	5.327 2E+002
最大值单元号	23 564	849
最小值单元号	1	1

表2 局部失稳应力结果对比

Tab.2 Local buckling stress results compared

编号	方案一	方案二
1	1.894 78e+005	1.707 02e+005
2	1.493 20e+005	1.336 82e+005
3	1.091 63e+005	9.666 24e+004
4	6.900 59e+005	5.964 24e+004
5	2.884 67e+004	2.262 24e+004
6	0.000 00e+000	0.000 00e+000
7	-5.146 57e+004	-8.843 75e+004
8	-9.162 29e+004	-1.254 57e+005
9	-1.317 80e+005	-1.624 77e+005
10	-2.120 95e+005	-1.994 97e+005
11	-2.522 52e+005	-2.365 17e+005
系数	7.053 8E+001	5.327 2E+002
最大值单元号	23 564	849
最小值单元号	1	1

由表2中的数据知,方案二在相同作用下的应力比方案一的小,由图4可看出两种方案的应力效果,且方案一中应力最大的23 564单元位于钢箱底板中央的位置,方案二中应力最大的849单元位于混凝土翼缘板上。方案二的现浇混凝土板对减小钢箱底板的应力有明显的控制效果,方案二同方案一相比同一处应力最大值降低36.84%。

### 3 结论

对比两种 Midas 模型在相同作用下的应力分析,负弯矩区钢-混凝土组合箱梁下翼缘受压,在箱梁底板顶面按焊接栓钉浇筑一层厚度为 400 mm 的混凝土板,可以防止箱梁底(下转第 41 页)

现着从总体到细节的不断完善<sup>[8]</sup>,这些造就了中华民族清静淡泊、自然无为以及追求人与自然的民族性格。正是由于地理环境的优越性和丰富的自然资源,为造园提供了广阔的发展空间,使自然成为审美的对象而非斗争的对象,从而奠定了“师法自然”造园思想的基础。而西方自然环境相对较差,土地贫瘠,自然资源匮乏,生存成为最主要的问题,从而造就了人们的冒险与开拓精神,改造自然、与自然抗争便成为造园初期的主流,如埃及尼罗河流域经常泛滥促进了数学几何学的发展,西亚干旱缺水使人们对水资源的格外珍惜等,这些都在西方古典园林中得到体现,同时“人定胜天”的观念也深深地渗透在西方古典园林中。

### 3 结语

造成中西方古典园林在园林类型、造园手法、设计语言等方面差异的本质原因主要是自然环境的差异,自然环境决定了人们的造园思想,并将这种思想反映在园林实践中,形成不同的园林风格和体系。随着中西方文化的广泛交流和碰撞,深入研究中西方古典园林的差异,对于更好地实现

对古典园林的继承创新具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 许丽,许颖. 中西传统自然观和园林艺术形式差异的比较研究[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2011,42(1):135-138.
- [2] 邵君. 浅议中西古典园林的起源与差异[J]. 甘肃水利水电技术,2003,39(2):141-142.
- [3] 高峰. 中西古典园林之差异[J]. 山西建筑,2004,30(8):7-8.
- [4] 陈展川. 诗意与理性-中西古典园林风格比较[J]. 华南热带农业大学学报,2007,13(1):50-54.
- [5] 薛芸,王树栋. 中西方园林植物造景之比较[J]. 北京农学院学报,2009,24(4):51-53.
- [6] 王向荣,林菁. 西方现代景观设计的理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [7] 周武忠. 中西古典园林艺术风格比较[J]. 东南大学学报:哲学社会科学版,2003,5(6):90-94.
- [8] 周维权. 中国古典园林史[M]. 北京:清华大学出版社,1999.

(责任编辑 刘存英)

(上接第11页)

板在受压状态下发生局部屈曲失稳,现浇的混凝土板与组合梁上翼缘混凝土板形成双重组合作用,对降低箱梁底板的应力有明显的控制的效果。

#### 参考文献:

- [1] 于海丰,连尉安. ST12 材质焊接工字形钢支撑滞回性能数值模拟[J]. 河北科技大学学报,2011,32(6):628-634.
- [2] 王海军,贾艳敏. 横隔梁对异型连续箱梁整体受力影响[J]. 黑龙江科技学院学报,2008,18(5):355-358.
- [3] 李长风,杜文学,周莉. 钢筋混凝土曲线箱梁的双重

非线性耦合[J]. 黑龙江科技学院学报,2008,18(5):350-354.

- [4] 钱寅泉,倪元增. 薄壁箱形大曲率梁桥理论分析[J]. 土木工程学报,1993,26(5):22-30.
- [5] 赖远明,王荣辉. 拆板结构计算理论及应用[M]. 兰州:兰州大学出版社,1996.
- [6] 姚玲森,李新平. 曲线梁桥的实用计算方法(比拟正交异性曲板法)[J]. 土木工程学报,1986,19(3):43-45.
- [7] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):110-122.

(责任编辑 马立)