

后结合预应力组合梁负弯矩区混凝土开裂性能试验

郭 瑞¹, 苏庆田¹, 李晨翔¹, 邓青儿^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 为了研究后结合预应力技术改善混凝土桥面板组合梁在负弯矩作用下的受力性能,特别是混凝土的开裂性能,设计制作了 2 根组合梁(一根是常规混凝土桥面板组合梁,另一根是后结合预应力混凝土桥面板组合梁),进行了 2 根组合梁的静力试验.测试了在不同荷载作用下组合梁的变形、不同截面上构件的应变分布、混凝土的裂缝、钢与混凝土之间的相对滑移以及极限承载力等.试验结果表明:后结合预应力混凝土板连续组合梁的初始开裂荷载和正常使用状态的极限荷载分别是普通连续组合梁的 3.87 倍和 5.38 倍,说明采用后结合预应力混凝土桥面板能够大大提高组合梁负弯矩区混凝土的抗裂性能.

关键词: 组合梁; 负弯矩; 混凝土板; 开裂; 预应力; 试验
中图分类号: TU312 **文献标志码:** A

Experimental Studies on Cracking Behavior of Post-combined Prestressed Concrete Slab in Hogging Zone of Composite Girder

GUO Rui¹, SU Qingtian¹, LI Chenxiang¹, DENG Qing'er^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the improving mechanical behavior of composite girder on the hogging moment zone with post-combined prestressed concrete slab, especially on the concrete cracking property in this range, two composite girders, one being common composite girder and the other composite girder with post-combined prestressed concrete slab, were designed and fabricated, on which static tests were conducted. The main mechanical behaviors including girder deformation, strain distribution, concrete cracks, relative slip between steel and concrete, bearing capacity etc were tested. The testing results show that the load for initial concrete cracking and that for serviceability limit state of composite girder with post-combined prestressed concrete are 3.87

times and 5.38 times of those of common composite girder respectively, which indicates that adopting post-combined prestressed concrete slab for composite girder can significantly improve the resistance cracking ability in the negative zone of composite girder.

Key words: composite girder; negative moment; concrete slab; cracking; prestress; test

在组合梁中合理布置钢与混凝土的位置与尺寸,能够实现结构性能和经济效果更优.在多跨结构桥梁中为了提高行车的舒适性和结构的整体性,经常采用连续梁的形式^[1].然而在连续组合梁中,中间支座处梁体处于负弯矩区受力状态,顶板混凝土受拉易开裂以及钢梁底部受压易屈曲,导致结构的承载力和耐久性降低^[2-3].针对连续组合梁负弯矩区混凝土开裂特点,国内外学者进行了大量研究^[4-5],一方面采用容许混凝土开裂但控制裂缝宽度的方法,另一方面是不容许混凝土开裂的设计方法.为了避免混凝土的开裂,在连续组合梁的负弯矩区施加预应力成为最常采用的一种方法.其中,既有采用预制预应力混凝土桥面板的方法^[6],也有在组合梁中直接施加预应力的方法.对于预制预应力混凝土桥面板往往会受到其吊装质量和数量的影响,增加了其施工工期;对于直接施加预应力的方法,当混凝土在钢梁上达到预定强度后再张拉预应力,不论是体内预应力还是体外预应力均会有部分预应力转移到钢梁上,造成混凝土板的预应力施加效率降低,而且在钢梁上产生了附加的压应力.为此,提出一种后结合预应力混凝土桥面板的组合梁结构型式.

所谓后结合预应力组合梁是指在混凝土板与钢梁没有形成组合截面之前对混凝土施加预应力,然后再通过特殊布置的连接件把预应力混凝土板和钢

收稿日期: 2014-05-23

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303)

第一作者: 郭 瑞(1979—),男,博士生,主要研究方向为钢桥及组合桥梁. E-mail: rui.guo@163.com

通讯作者: 苏庆田(1974—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为钢桥及组合桥梁. E-mail: sqt@tongji.edu.cn

梁结合起来.具体的施工方法是在钢梁上按一定间距焊接一簇一簇的群钉;再在钢梁上安装混凝土模板,同时在每簇群钉周围设置防护措施形成防止混凝土进入到群钉中的预留孔;然后浇筑混凝土并养护;当混凝土达到一定强度后张拉预应力钢筋使得混凝土产生预压力,此时没有连接件把混凝土与钢梁结合起来;再向群钉预留孔中浇筑混凝土或砂浆,把混凝土桥面板与钢梁通过群钉结合为一体形成组合梁.从工艺上看,尽管后结合预应力组合梁的施工工艺比常规的组合梁复杂,但这种组合梁在负弯矩混凝土施加的预应力不会转移到钢梁上,提高了预应力的施加效率.

为了研究这种后结合预应力组合梁负弯矩区的结构性能,本文进行了2根组合箱梁的静力试验,其中一根为常规组合箱梁(编号SP-1),另一根为后结合预应力组合箱梁(编号SP-2),测试了不同荷载作用下组合梁变形性能、混凝土的抗裂性能、钢结构和混凝土的应变和极限承载能力,并对两种不同形式组合梁的结构性能进行比较分析.

1 试验设计

1.1 试验试件及制造

常规组合箱梁试件SP-1和后结合预应力组合箱梁试件SP-2总体上具有相同的截面尺寸和跨径布置,如图1a和1b所示.钢梁顶板、腹板和底板的厚度分别为6 mm,8 mm和10 mm.

SP-1试件的混凝土和钢梁之间均匀布置176个 $\phi 13\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ (直径 $\times$ 长度)的焊钉,如图1c所示.混凝土板内钢筋构造如图1e所示,纵向主筋直径8 mm,箍筋直径6 mm,采用HRB 335带肋钢筋.

SP-2试件的混凝土和钢梁采用了群钉连接,群钉每簇9个 $\phi 13\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的焊钉分成3排3列,在每簇焊钉中单个焊钉在纵、横向的间距为60 mm,群钉间的纵向簇间距为600 mm,焊钉总数为162个,焊钉布置如图1d所示.混凝土板内钢筋构造如图1f所示,纵向主筋直径8 mm,箍筋直径6 mm,采用HRB 335带肋钢筋,含10根 $\phi 15.24$ 预应力钢绞线.试件混凝土达到一定强度后张拉预应力,实测试件混凝土的平均压应力为5.89 MPa,钢梁压应力为0.最后向预留孔内(图2)灌注高强砂浆,形成组合梁.

1.2 加载方式与测点布置

试件加载系统如图1a所示,组合梁两端简支,

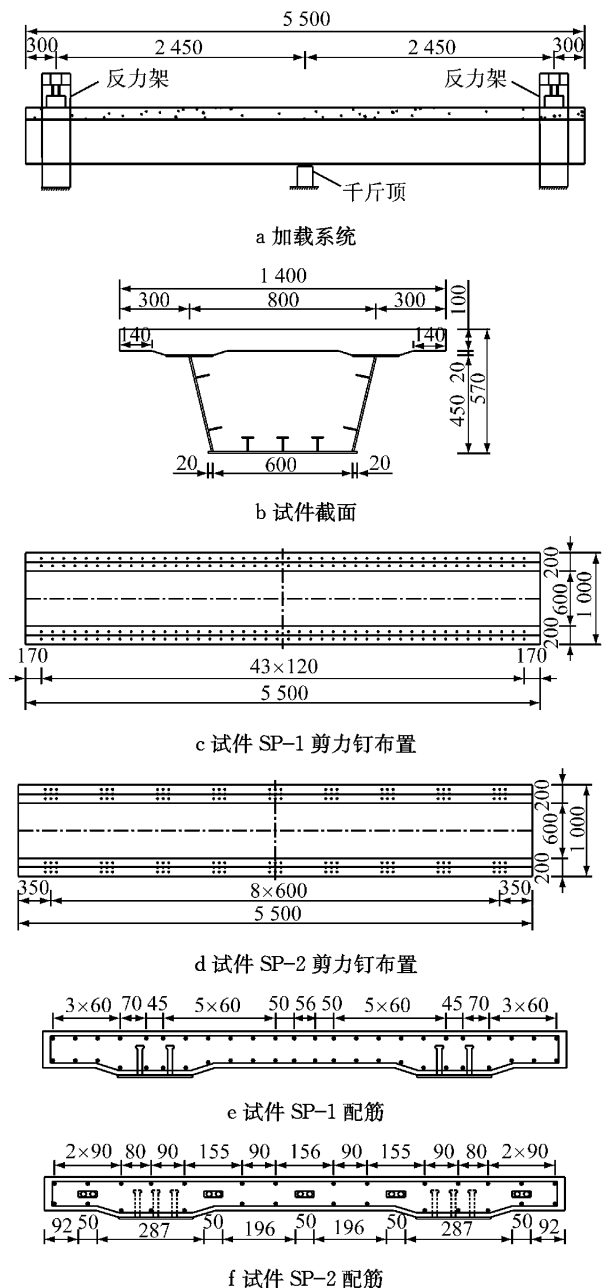


图1 试验试件(单位:mm)

Fig.1 Experiment specimens (unit: mm)

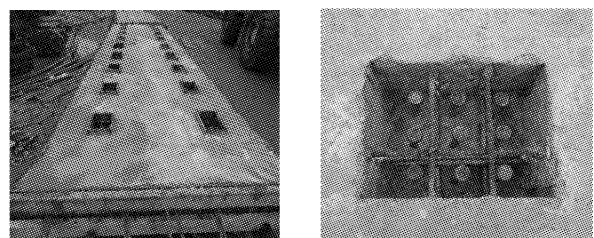


图2 预留焊钉孔洞

Fig.2 Holes reserved around studs

在跨中钢箱梁底板施加向上的集中力,使整个试验梁受力状态接近于连续梁负弯矩区段的实际受力.钢梁的竖向位移以及钢与混凝土之间的相对滑移都

用位移计测得,钢梁和钢筋的应变用电阻式应变计测得,混凝土板顶面的应变用大标距应变计测得,裂缝宽度由电子裂缝观测仪测得。

2 试验结果

2.1 组合梁的破坏现象

SP-1 试验梁在试验加载过程中,当试验荷载达到 100 kN 时,在中支座处附近负弯矩区混凝土板首先出现裂缝。随着荷载的增加,裂缝逐渐向两边扩展,且裂缝宽度不断增加,裂缝宽度继续增大,部分位置形成横向贯通裂缝,负弯矩区混凝土退出工作,钢筋在混凝土板退出工作以后承担拉应力。当荷载达到 1 400 kN 左右时钢筋开始出现屈服,之后随荷载增加,钢梁上翼缘和底板先后屈服,试件跨中荷载位移增长速度明显加快。达到承载能力极限状态(图 3)时,SP-1 试验梁的极限荷载为 1 680 kN。

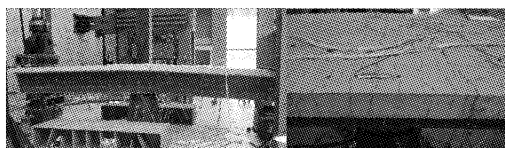


图 3 试件 SP-1 的破坏现象
Fig.3 SP-1 specimen failure

SP-2 试验梁当试验荷载达到 387 kN 时,裂缝首先出现在中支座处砂浆孔的角点处。随着荷载的增加,该砂浆孔的 4 个角点都开始出现向外发散的裂缝,裂缝产生的区域不断扩大,且裂缝在原有区域更加密集,贯通裂缝增多,裂缝宽度也不断增加。当试验荷载增大到 1 800 kN 后,中支点钢梁上翼缘和底板出现屈曲变形。达到最终状态如图 4 所示的极限荷载为 1 915 kN。

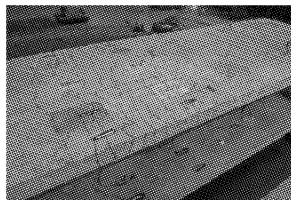


图 4 试件 SP-2 的破坏现象
Fig.4 SP-2 specimen failure

2.2 荷载挠度曲线

整个加载过程中试件 SP-1 和试件 SP-2 的两个跨中截面荷载位移曲线如图 5 所示。由图 5 看出,两个试件经历了典型弹性阶段和塑性阶段,其中试件

SP-1 在荷载达到 1 300 kN 左右时逐渐进入塑性状态,而试件 SP-2 在荷载达到 1 600 kN 时才进入塑性状态。对比两个试件的荷载位移曲线,可以看出在弹性阶段试件 SP-2 的位移比试件 SP-1 的略大。这是因为,一方面 SP-1 试件的焊钉数量比 SP-2 试件的略多;另一方面试件 SP-1 的钢梁和混凝土间除了焊钉外还有初始的黏结力,而试件 SP-2 在张拉预应力时该黏结力就消失了,该黏结力略微增加了钢梁与混凝土间的结合程度。

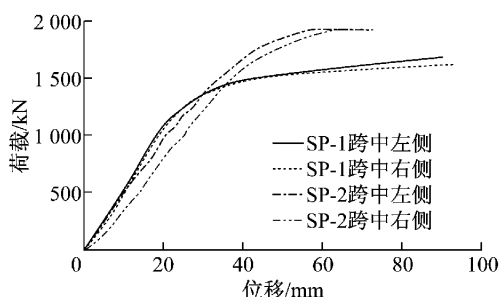


图 5 荷载位移曲线
Fig.5 Load-deformation

2.3 混凝土裂缝

不同荷载作用下组合梁试件 SP-1 和试件 SP-2 混凝土板的裂缝分布如图 6 所示。图中混凝土为中间支座左右各 2 m 范围的混凝土板,这里给出了混凝土板顶面和两个侧面的展开图。试件 SP-1 的裂缝大都起源于混凝土板边缘,而试件 SP-2 的裂缝大都起源于预制板的预留后浇孔的角落处,这可能与矩形现浇预留孔角部有应力集中有关。在相同的荷载作用下试件 SP-1 的混凝土裂缝数量明显比试件 SP-2 的多且裂缝宽度大,而且试件 SP-1 的混凝土裂缝间距比试件 SP-2 的稠密,这是由于试件 SP-1 的普通钢筋的配筋率比试件 SP-2 的高所致。

不同荷载下组合梁试件 SP-1 和试件 SP-2 混凝土板的最大裂缝宽度如图 7 所示。从图 7 中可以看出,在相同荷载作用下试件 SP-1 裂缝宽度明显大于试件 SP-2,这主要是由于预应力作用效果引起的。试件 SP-1 在较低荷载情况下就出现裂缝,在荷载为 260 kN 时混凝土裂缝宽度达到了 0.2 mm(规范^[7]规定正常使用极限状态下的裂缝宽度限值),荷载超过 900 kN 后混凝土裂缝宽度发展加快,达到极限承载力时的裂缝宽度超过了 2 mm。试件 SP-2 混凝土出现裂缝的荷载较试件 SP-1 大,在荷载达到 1 400 kN 时混凝土的裂缝宽度达到了 0.2 mm,比试件 SP-1 的荷载提高了 4.38 倍,达到极限荷载时混凝土的最大裂缝宽度为 0.49 mm。

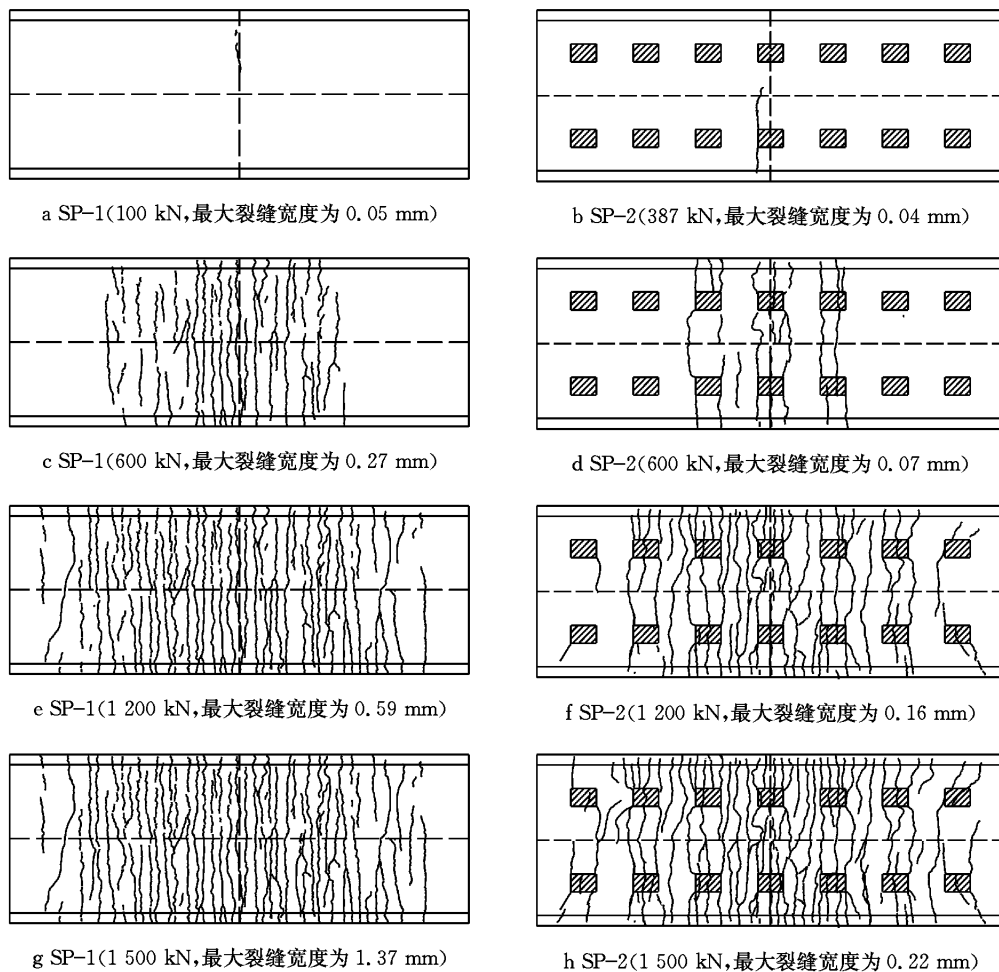


图6 混凝土板裂缝分布

Fig.6 Distribution of concrete cracks

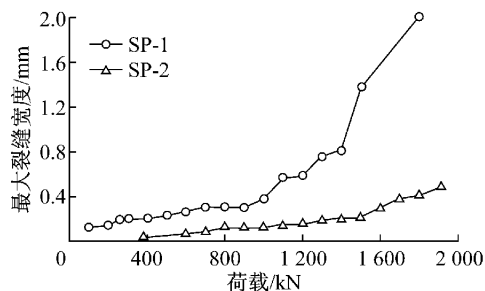


图7 不同荷载时混凝土板的最大裂缝宽度

Fig.7 Maximum crack width at different loads

2.4 钢与混凝土间的相对滑移

在组合梁中定义连接件连接程度^[8]得到试件 SP-1 和试件 SP-2 的连接件连接程度分别为 0.90 和 0.80. 试件 SP-2 的连接程度明显低于试件 SP-1, 但试验过程中两个试件钢梁和混凝土的界面上沿梁长度方向没有发生相对滑移. 本文的后结合预应力混凝土板组合梁中采用群钉连接技术可以满足钢梁和混凝土间的传力要求, 不会引起二者间的相对滑移.

3 组合梁负弯矩受力特性讨论

3.1 负弯矩区的开裂荷载

连续组合梁负弯矩区由于混凝土板承受拉力的作用, 在荷载作用下混凝土较易开裂. 在工程设计中, 开裂荷载一般由基于最大拉应力的线弹性理论计算得到^[9]. 针对混凝土受拉的情形, CEB/FIP—1990 给出了基于最大拉应变的双折线本构模型^[10].

对于基于最大拉应力的线弹性模型, 组合梁的开裂荷载 M_{cr} 可以由下式求得:

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + f_t) W_0 \quad (1)$$

式中: σ_{pc} 为预应力在混凝土板上缘施加的有效预压力; f_t 为混凝土的抗拉强度; W_0 为换算截面的截面模量.

对于基于最大拉应变的混凝土开裂模型, 在混凝土开裂临界状态(混凝土板边缘的最大拉应变达到极限拉应变)组合梁截面沿竖向的应力呈非线性分布, 截面的开裂荷载可以由下式求得:

$$M_{cr} = \int_{y_{bot}}^{y_{top}} \sigma(y - y_{cr}) b_y dy \quad (2)$$

式中: y_{bot} 和 y_{top} 分别为组合梁上下缘的竖向坐标; σ 为截面竖向各点的应力值; y_{cr} 为开裂临界状态的截面中性轴的位置; b_y 为截面各不同高度处的横向宽度。

混凝土开裂荷载的试验值与计算值对比如表 1

表 1 试件开裂荷载
Tab.1 Cracking loads of specimens

试件	初始开裂荷载/kN	开裂弯矩/(kN·m)			(2)与(1)比值	(3)与(1)比值
		(1) 试验	(2) 线弹性模型	(3) 双折线本构模型		
SP-1	100	123	144	251	1.18	2.05
SP-2	387	474	462	569	0.97	1.20

3.2 负弯矩区开裂后的受力性能

试验过程中测得试件 SP-1 和试件 SP-2 的初始开裂荷载分别为 100 kN 和 387 kN, 后者是前者的 3.87 倍。试件 SP-1 和试件 SP-2 在出现 0.2 mm 裂缝宽度对应的荷载分别为 260 kN 和 1 400 kN, 后者是前者的 5.38 倍。尽管试件 SP-1 的普通钢筋的配筋率明显高于试件 SP-2, 但是由于试件 SP-2 中施加了后结合的预应力, 通过试验结果看出: 在连续组合梁的负弯矩区施加预应力可以显著提高结构的使用荷载, 改善结构在正常使用状态的受力性能。

4 结论

(1) 在连续组合梁负弯矩区采用后结合预应力混凝土板后能大幅提高结构的初始开裂荷载和裂缝宽度控制的正常使用荷载, 从而提高结构的正常使用阶段的受力性能。

(2) 采用群钉连接技术的后结合预应力混凝土板连续组合梁, 在正常使用状态下完全剪力连接度的群钉可以满足钢梁和混凝土间的传力要求, 不会引起二者间的相对滑移。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
XIANG Haifan. Advance theory of bridge structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [2] Randl E, Johnson R P. Widths of initial cracks in concrete

所示。由表可见, 计算值与试验值较为接近。对比不同模型的计算值, 基于最大拉应力的线弹性模型能较好地反映组合梁负弯矩区混凝土的初始开裂特性。对于试件 SP-2, 由于后结合预应力的预压作用, 混凝土开裂荷载或弯矩远大于常规组合梁 SP-1。

- tension flanges of composite beams[C]// IABSE Proceedings. Switzerland: IABSE, 1982:69-80.
- [3] Ryu H K, Kim Y J, Chang S P. Crack control of a continuous composite two-girder bridge with prefabricated slabs under static and fatigue loads[J]. Engineering Structures, 2007, 29 (6):851.
- [4] Ryu H K, Chang S P, Kim Y J. Crack control of a steel and concrete composite plate girder with prefabricated slabs under hogging moments[J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1613.
- [5] 周安, 戴航, 刘其伟. 钢箱-预应力混凝土组合梁负弯矩区结构性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12):69.
ZHOU An, DAI Hang, LIU Qiwei. Experimental study of the structural behavior of the negative bending zone of steel box-prestressed concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12):69.
- [6] Dezi L, Leoni G, Tarantino A M. Time-dependent analysis of prestressed composite beams [J]. Journal of Structural Engineering: ASCE, 1995, 121(4): 621.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG D62—2004 公路桥涵钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [8] Ohelers D J, Brandford M A. Elementary behaviour of composite steel & concrete structural members[M]. London: Butterworth Heinemann, 2002.
- [9] Lääne A, Lebet J P. Available rotation capacity of composite bridge plate girders under negative moment and shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(3):305.
- [10] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP model code 1990 [S]. London: Thomas Telford House, 1993.