

体外索钢箱—混凝土组合连续梁 非线性结构性能试验研究

张南¹ 周奇¹ 洪英维²

(1 南京工业大学 江苏南京 210009 2 江西省交通设计院 江西南昌 330002)

摘 要: 钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区混凝土的开裂问题影响了这类组合结构向更大跨度的发展。针对这一问题, 提出在钢箱-混凝土组合连续梁中施加体外索的新技术, 研究施加体外索对增强钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区混凝土的抗裂能力, 提高钢箱-混凝土组合连续梁弹塑性结构性能的有利作用。经对比试验表明, 施加体外索后, 钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区混凝土的开裂荷载提高2.8倍, 组合连续梁的弹塑性抗弯刚度提高29.35%, 承载力提高34.67%, 结构性能显著提高。在试验研究基础上, 分析钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区局部力学性能与整体非线性结构性能的关系, 揭示体外索提高钢箱-混凝土组合连续梁弹塑性结构性能的力学实质, 给出承载力计算建议。研究结果可作为体外索钢箱-混凝土组合连续梁工程应用和理论分析的参考。

关键词: 体外索 钢箱-混凝土组合连续梁 非线性结构性能

引言

钢-混凝土组合梁桥以其突出的优点, 如抗弯、抗扭性能好, 减轻结构自重, 增大跨度, 施工快捷, 不中断交通, 具有综合的经济效益等, 在城市大跨桥梁结构中已得到较广泛的应用^[1-8]。其中连续组合梁桥具有更大的跨越能力和应用前景。

然而钢-混凝土组合连续梁桥中支座负弯矩区的混凝土翼板在不大的荷载下就会开裂, 这严重影响了此类组合连续梁桥的跨越能力、承载力、刚度以及耐久性等。因此, 研究钢-混凝土组合连续梁桥中支座负弯矩区的混凝土翼板开裂及其控制, 是桥梁工程实际中亟待解决的重要问题。

目前在桥梁工程实践中, 对于钢-混凝土组合连续桥梁中支座负弯矩区混凝土翼板开裂控制问题, 采用的主要方法有: 分段浇筑混凝土、结构体系转换、墩顶强迫位移、体内预应力、高普通钢筋配筋率、现浇微膨胀混凝土等措施^[9-11], 收到了良好的效果。但是, 研究钢箱-混凝土组合连续桥梁的文献较少。而且, 随着钢箱-混凝土组合连续桥梁跨度进一步的增大, 这些措施对于裂缝的控制能力仍然是有限

的, 且当组合连续桥梁运营后再发生裂缝时, 这些措施一般是无能为力的。

可是, 如果将体外预应力技术应用到钢箱-混凝土组合连续桥梁中, 这种状况会有很大的改善。首先, 施加体外索基本上不受截面尺寸的影响, 灵活方便。而且, 当组合连续桥梁运营后再发生裂缝时, 可以再次张拉体外索, 实现对裂缝的进一步主动控制。体外索的这些优点是现有的一些措施所不能做到的。

针对这种情况, 作者在江苏省普通高校自然科学基金计划资助下, 以及江苏省结构工程重点实验室研究项目资助下, 开展了体外索钢箱-混凝土组合梁的系列探索研究, 已经完成了简支梁的试验研究^[12]。本文着重探讨研究体外索对提高钢箱-混凝土组合连续梁非线性结构性能的作用, 为体外预应力技术合理经济地应用到大跨连续组合桥梁中提供科学试验依据。

1 试验模型

1.1 试验梁尺寸

试验梁模型尺寸参照钢箱-混凝土组合连续桥梁实际尺寸, 按一定比例缩小, 设计为变截面组合连续梁。试验梁具体尺寸见图1。钢箱上下翼缘板厚度为6mm, 腹板厚度为5mm, 横隔板厚度为10mm。体外索用 $\phi 5$ 高强钢丝制作, 中支座

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《土木工程学报》2007, No. 11)

负弯矩区布置一段直线体外索, 4根 $\phi 5$ 钢丝, 长2m。沿全长布置折线体外索, 4根 $\phi 5$ 钢丝, 如图2所示。负弯矩区设10根 $\phi 8$ 普通钢筋, 正弯矩区设6根 $\phi 8$ 普通钢筋。

1.2 试验梁材料性能

试验梁混凝土和钢材的材性见表1和表2。

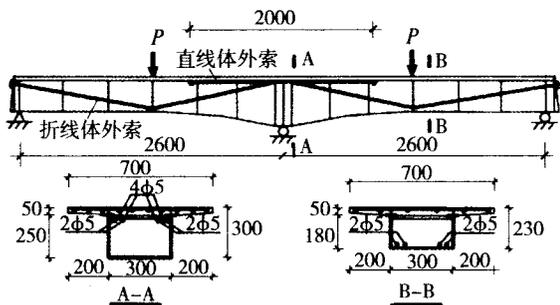


图1 试验梁示意图

表1 混凝土力学性能

试验梁	立方体抗压强度 f_{cu} (MPa)	轴心抗压强度 f_c (MPa)	弹性模量 E_c ($\times 10^4$ MPa)
SBC-4	63.29	48.10	3.64

表2 钢材力学性能

钢材类型	屈服强度 f_y (MPa)	极限强度 f_u (MPa)	弹性模量 E_s ($\times 10^5$ MPa)
5mm钢板	406.9	503.1	1.93
6mm钢板	314.1	418.5	1.92
10mm钢板	303.3	413.3	1.91
$\phi 8$ 钢筋	258.6	445.6	1.88
$\phi 5$ 钢筋	1256.9	1694.3	1.97

2 试验方案

为了研究体外索对钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区抗裂能力及结构整体性能的提高作用, 进行了对比试验。先在负弯矩区浇注一段混凝土板, 待此段混凝土达到设计强度后, 张拉直线体外索, 对负弯矩区混凝土施加预应力, 再浇注两边跨的混凝土板, 边跨混凝土待浇状况见图2。待边跨混凝土达设计强度后, 进行加载试验, 试验荷载先加载到150kN, 测出加载过程中主要控制截面的应变及边跨跨中的位移。此加载过程中负弯矩区混凝土开裂, 卸载后裂缝没有完全闭合, 用以模拟钢箱-混凝土组合连续梁桥运营后的开裂损伤状态。再张拉通长折线体外索, 测得

控制截面的应变及反拱。张拉通长折线体外索后, 混凝土裂缝完全闭合。这可以证实体外索具有对钢箱-混凝土组合连续梁开裂损伤的修复作用, 并可再承受较大的外荷载。最后再施加荷载直到试验梁破坏, 见图3, 得到体外索施加后对组合连续梁结构性能的改善提高作用, 以及极限状态下的力学性能。



图2 试验梁负弯矩区制作状况



图3 试验梁破坏

3 试验结果及分析

3.1 对比试验结果分析

由对比试验结果可见, 施加体外索后钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区的开裂荷载提高了2.8倍。试验梁的荷载-边跨跨中位移曲线如图4所示。

由图4的位移曲线可见, 施加体外索后, 钢箱-混凝土组合连续梁的挠度减少, 在相同荷载150kN下对比, 抗弯刚度提高了29.35%; 在相同位移5.03mm下对比, 承载力提高了34.67%。可见体外索对钢箱-混凝土组合连续梁结构性能的提高作用是较大的。从受力机理上分析, 由于体外索力随组合连续梁变形的增大而增加, 随着位移的增大, 体外索对结构性能的提高作用也随之增大, 这是很有利的一种结构特性。

图5给出了边跨跨中截面混凝土翼板上缘压应变增长情况(对比到150kN), 这说明体外索

提供的反向力减少了截面应变的增长,从而提高了钢箱-混凝土组合连续梁的刚度和强度。

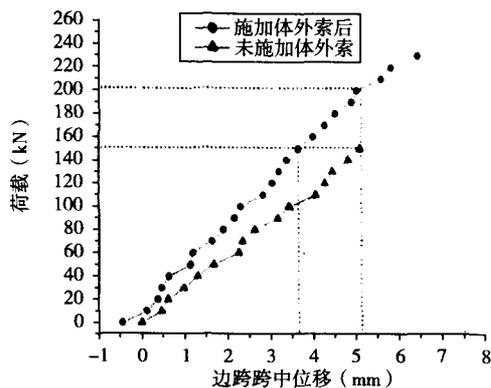


图4 荷载-跨中位移曲线对比

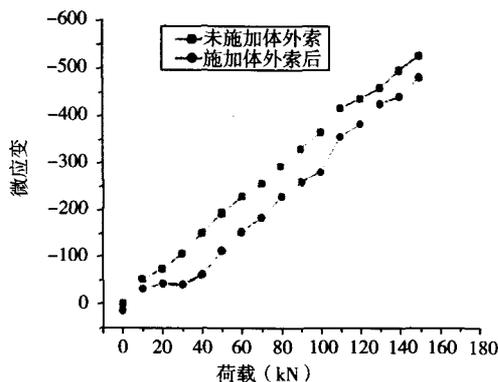


图5 混凝土翼板上缘压应变增长对比

3.2 负弯矩区混凝土裂缝及界面滑移

图6为负弯矩区混凝土翼板最大受拉裂缝随荷载增加的扩展情况。

图7为极限状态下负弯矩区混凝土翼板的裂缝分布情况。图中可见,由于体外索的作用,裂缝宽度较小,出现了多条裂缝,裂缝扩展也较缓慢,弹塑性区较宽。这对于提高预应力组合结构的抗裂能力和位移延性,增强钢箱-混凝土组合连续梁的耐久性有重要的意义。

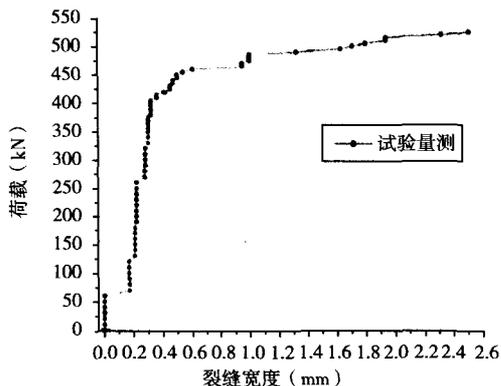


图6 混凝土翼板受拉裂缝增长



图7 负弯矩区混凝土翼板裂缝分布

试验中测得负弯矩区混凝土翼板与钢箱界面的滑移曲线见图8。当混凝土翼板与钢箱界面开始出现滑移时,混凝土翼板受拉裂缝也开始扩展,可知界面滑移与裂缝扩展有密切关系。

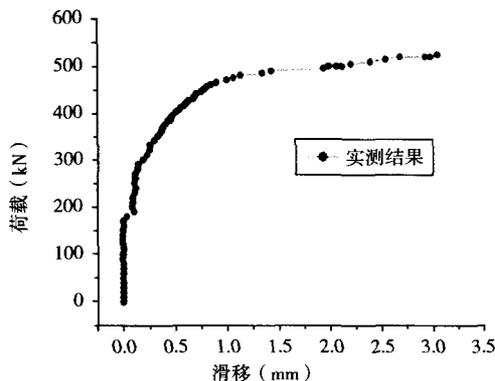


图8 界面滑移

3.3 体外索试验结果分析

由试验中得知,负弯矩区直线型体外索在极限状态下的应力增量较小,因此在极限强度计算中不计其应力增量。在施加体外索阶段,可以施加较大的预应力。建议对负弯矩区直线型体外索,可取张拉控制应力 $\sigma_{con} = (0.5-0.6)f_{pk}$ 。

对于沿组合连续梁通长布置的折线体外索,极限状态下4根通长折线体外索的平均极限应力为1252.36MPa。图9给出了钢箱-混凝土组合连续梁中通长折线体外索应力增长的典型曲线。从图中可见,正弯矩区和负弯矩区体外索的应力增长是基本一致的,其应力增量都比较大。极限状态下,体外索的极限应力能达到屈服应力,强度可得到充分发挥。试验证实了将体外预应力技术引入到钢箱-混凝土组合连续梁中是合理科学的。由于钢箱-混凝土组合连续梁中设置的通长折线体外索应力增量比较大(本试验测得应力增量大于600MPa),因此,对其张拉控制应力不宜过

大。建议对通长型折线体外索,可取张拉控制应力 $\sigma_{con} = (0.4-0.5)f_{pk}$ 。

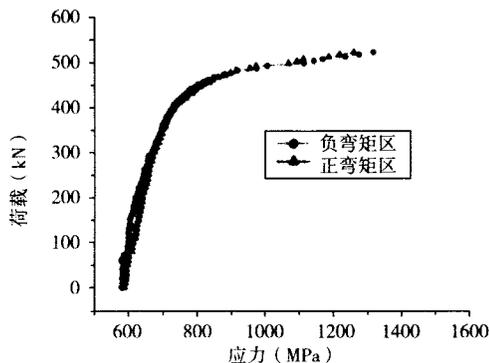


图9 体外索应力增长典型曲线

图10为体外索钢箱-混凝土组合连续梁边跨的跨中荷载-位移全曲线。有意义的是,图6、图8、图9的曲线发展趋势与图10的曲线发展趋势很相似。这说明负弯矩区混凝土翼板的受拉裂缝,负弯矩区混凝土翼板与钢箱界面的滑移,体外索应力的增长,及边跨的跨中位移等力学参数与荷载之间有相似的非线性关系。这揭示了负弯矩区普通钢筋配筋率,剪力连接件刚度,体外索应力,混凝土和钢箱的材料特性等力学参数,在体外索钢箱-混凝土组合连续梁非线性问题中有着密切的关联作用。

3.4 负弯矩区钢筋应变

试验中观测到,对应荷载405kN处,负弯矩区混凝土翼板中的钢筋开始屈服,如图11所示。同时可见,在荷载405kN以后,负弯矩区混凝土翼板中的裂缝扩展速度加快(见图6),以及荷载-位移曲线中位移的加快(见图10)。这证实了负弯矩区混凝土翼板中的钢筋应力增长与裂缝扩展有很密切的关系。可推知,控制钢筋应力的增长能够减缓混凝土翼板中的裂缝扩展及减少位移的增长。

在钢箱-混凝土组合连续梁中施加体外索,以及体外索力随荷载增加而增加的特点,对于钢箱-混凝土组合连续梁负弯矩区混凝土翼板中的钢筋应力增长有一定的抑制作用。

图12给出了施加体外索前后,负弯矩区混凝土翼板中的钢筋平均应变增长的对比试验结果(对比到150kN),从中可以看到上述这个特征。体外索的作用减少了钢筋应变的增长,实际

上对混凝土翼板中的裂缝扩展起到了抑制的作用,对提高钢箱-混凝土组合连续梁的弹性刚度 and 耐久性有积极的有利作用。

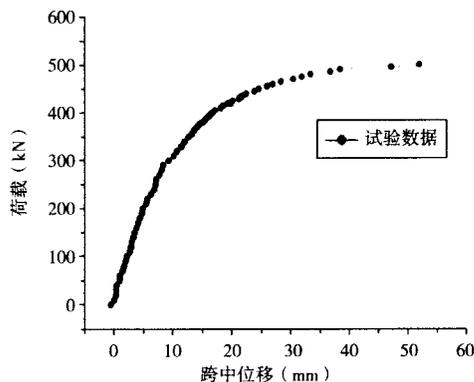


图10 荷载-跨中位移曲线

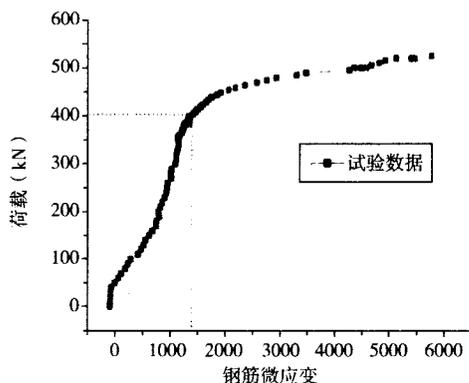


图11 荷载-钢筋应变曲线

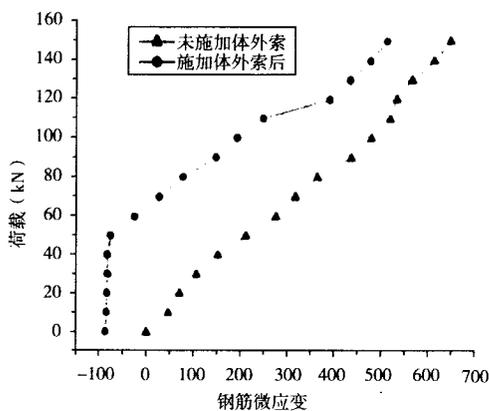


图12 负弯矩区钢筋应变增长对比

3.5 负弯矩区钢箱腹板应变

试验梁中支座处钢箱腹板在荷载作用下的应变分布见图13,可以看到钢箱腹板应变的发展情况。在加载初期,应变沿钢箱高度呈直线分布,即平截面假定成立。在荷载300kN时,钢箱腹板中最大压应变达到屈服应变,平截面假定不再成立。随着荷载进一步增加,钢箱腹板中的受压屈

服区增大, 屈服区向上发展。已屈服区域的应变值出现了降低现象。观察钢箱腹板的变形情况, 发现此时钢箱腹板出现了屈曲现象, 见图14。随后屈曲区继续向上发展, 直至试验梁破坏。由试验结果还可见, 当钢箱腹板出现屈曲时(在荷载300kN), 对应着界面滑移非线性增长(图8), 体外索应力非线性增长(图9), 以及荷载-位移曲线非线性增长(图10)的加快。可认为, 钢箱腹板的屈曲, 导致中支座截面产生塑性转动, 直接影响着钢箱-混凝土组合连续梁的非线性结构性能, 是一个重要的力学参数。同时也观察到, 钢箱腹板屈曲区向上发展比较大, 这意味着钢箱腹板局部屈曲的出现, 并没有导致组合连续梁的立即破坏, 还可继续承载。这主要是因为施加了体外索的有利作用。

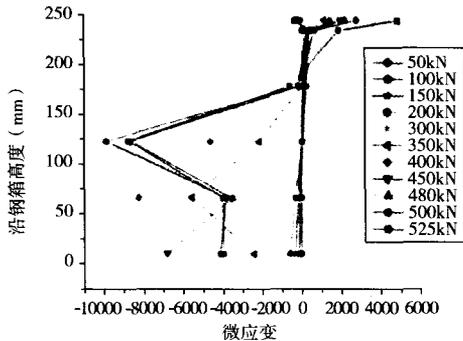


图13 负弯矩区钢箱腹板应变分布



图14 负弯矩区钢箱腹板屈曲

从钢箱腹板应变沿钢箱高度的分布情况来看, 中性轴进入了钢箱腹板, 这使得钢箱上部处于受拉区, 这是有利的。对于钢箱上翼板, 拉应变也较大, 极限状态时达到屈服应变。因此, 钢箱上翼板对于中支座的截面强度是有重要作用的, 应该重视其设计。

4 截面承载力计算

对体外索钢箱-混凝土组合连续梁正、负弯

矩截面的承载力计算, 可参照普通钢箱-混凝土组合连续梁的计算, 采用简化塑性分析法, 再增加一项体外索应力变量进行计算。

从图9体外索应力增长曲线可知, 正、负弯矩区体外索的应力增长趋势和数值都基本一致。在计算中可对正、负弯矩区的体外索应力采用一个相同的变量 σ_p , 以简化计算。正、负弯矩截面承载力计算模型见图15和图16。

4.1 正弯矩截面抗弯强度计算

正弯矩截面分析模型见图15。由于正弯矩截面受拉区布设了体外索, 极限状态下混凝土全截面受压, 塑性中和轴一般在钢箱腹板中(本试验也证实这点)。

截面静力平衡条件为:

$$F_c + F_s' + F_f' = F_w + F_b + F_t \quad (1)$$

式中: $F_c = b_e h_c f_{cm}$ 为混凝土的总压力, b_e 为混凝土翼板的有效宽度, 可通过剪力滞效应分析得到, h_c 为混凝土翼板的厚度, f_{cm} 为混凝土弯曲抗压强度设计值; $F_s' = A_s' f_s'$ 为受压钢筋总压力, A_s' 为受压钢筋面积, f_s' 为受压钢筋的强度设计值; $F_f' = A_f' f_{sp}'$ 为钢箱受压区的总压力, A_f' 为钢箱受压区的面积; f_{sp}' , f_{sp} 分别为钢箱梁塑性计算时的受压、受拉强度设计值, 可按钢结构设计规范规定取值; $F_w = A_w f_{sp}$ 为钢箱腹板的总拉力, A_w 为钢箱腹板受拉区的面积; $F_b = A_b f_{sp}$ 为钢箱底板的总拉力, A_b 为钢箱底板面积; $F_t = A_p \sigma_{pu}$ 为体外索的总拉力, A_p 为体外索的面积, σ_{pu} 为体外索的极限应力。

体外索的极限应力是一个重要的计算参数, 目前还没有统一的计算公式。可用文献[12]的方法, 建立体外索极限应力与混凝土翼板最大压应变的 ε_c 关系:

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta \sigma_p (\varepsilon_c) \quad (2)$$

式中: σ_{pe} 为体外索的有效应力; $\Delta \sigma_p$ 为极限状态下体外索的应力增量。

由式(2)得到体外索的极限应力, 代入式(1), 可求得塑性中和轴的高度, 进而确定钢箱拉、压区的面积。

正截面抵抗弯矩可由截面内力对塑性中和轴取矩得到:

$$M_u^p = F_c z_c + F_s' z_s' + F_{sp}' z_f' + F_w z_w + F_b z_b + F_p z_p \quad (3)$$

式中: z_c 、 z_s' 、 z_f' 、 z_w 、 z_b 、 z_p 分别为各力到塑性中和轴的距离, 当塑性中和轴位置确定后很容易得到, 如图15所示。

4.2 负弯矩截面抗弯强度计算

负弯矩截面分析模型见图16。极限状态下塑性中和轴在钢箱腹板中, 不计开裂混凝土的抗拉强度。

截面静力平衡条件为:

$$F_s + F_p + F_f = F_w' + F_b' \quad (4)$$

式中: $F_s = A_s f_s$ 为受拉钢筋总拉力, A_s 为受拉钢筋面积, f_s 为受拉钢筋的强度设计值; $F_t = A_p \sigma_{pu}$ 为体外索的总拉力, A_p 为体外索的面积, σ_{pu} 为体外索的极限应力, 可采用正弯矩截面的计算式(2); $F_f = A_f f_{sp}$ 为钢箱受拉区的总拉力, A_f 为钢箱受拉区的面积, f_{sp}' 、 f_{sp} 分别为钢箱梁塑性计算时的受压、受拉强度设计值, 可按钢结构设计规范规定取值; $F_w' = A_w' f_{sp}'$ 为钢箱腹板的总压力, A_w' 为钢箱腹板受压区的面积; $F_b' = A_b f_{sp}'$ 为钢箱底板的总压力, A_b 为钢箱底板面积。

负弯矩截面抵抗弯矩可由截面内力对塑性中和轴取矩得到:

$$M_u^p = F_s z_s + F_p z_p + F_f z_f + F_w' z_w' + F_b' z_b' \quad (5)$$

式中: z_s 、 z_p 、 z_f 、 z_w' 、 z_b' 分别为各力到塑性中和轴的距离。可先由式(4)求得塑性中和轴的位置, 再求出各力之矩, 最后由式(5)可得负弯矩截面抵抗弯矩。

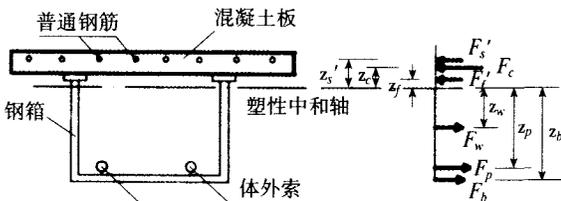


图15 正弯矩截面强度计算模型

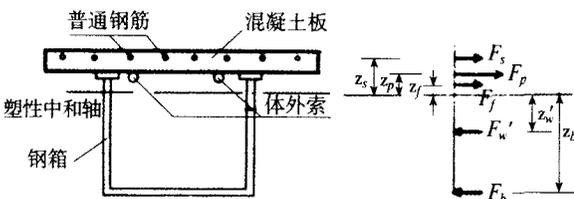


图16 负弯矩截面强度计算模型

5 结论

本文研究了体外索对钢箱-混凝土组合连续梁结构性能的提高作用, 获得了宝贵的第一手试验资料。试验证实了体外预应力技术应用到钢箱-混凝土组合连续梁中是合理可行的。并给出了设计建议。

所得主要结论为:

(1) 施加体外索后, 钢箱-混凝土组合连续梁的抗弯刚度和承载力都有较大的提高。在150kN对比荷载下, 抗弯刚度提高了29.35%, 承载力提高了34.67%。

(2) 体外索提供的反向力, 减少了边跨跨中正弯矩截面混凝土翼板上缘压应变的增长, 减缓了负弯矩区受拉钢筋的屈服过程, 对中支座负弯矩区混凝土的裂缝扩展起了抑制作用, 这对提高钢箱-混凝土组合连续梁的弹塑性刚度和耐久性有积极的有利作用。

(3) 负弯矩区混凝土翼板与钢箱界面的滑移与混凝土裂缝扩展有密切关系。在负弯矩区剪力连接件的设计中, 需综合考虑混凝土裂缝控制要求。

(4) 负弯矩区直线型体外索在极限状态下的应力增量较小, 在极限强度计算中可以不计其应力增量, 在施加体外索阶段, 可以施加较大的预应力。

(5) 经合理设计, 通长折线体外索在极限状态下的应力可以达到屈服应力, 极限强度计算中应考虑其应力增量, 张拉控制应力不宜过大。

(6) 负弯矩区钢箱腹板的屈曲, 是钢箱-混凝土组合连续梁破坏的一个特征, 影响到钢箱-混凝土组合连续梁的非线性结构性能。腹板中屈曲区域的发展, 增大了中支座截面的塑性转动, 有利的方面是增大了结构的位移延性, 不利的方面是降低了结构的刚度。在实际设计中应予以重视, 控制其在合理的范围内。

(7) 可采用简化塑性分析法计算体外索钢箱-混凝土组合连续梁正、负弯矩截面的抗弯强度。对正、负弯矩区的体外索应力可采用一个相同的变量来进行简化计算, 对体外索极限应力的计算还需深入研究。

(下转第21页)

(3) 碳纤维带预应力加固试验结果表明通过对碳纤维布进行预张拉, 能够大幅度提高碳纤维布的强度利用率, 取得较好的加固效果。

(4) 尽管加固构件的碳纤维带与板底混凝土表面有较大的空隙, 但由于锚具的锚固作用以及预应力的作用, 碳纤维带仍然能够发挥较大的作用。这表明采用体外锚固碳纤维带预应力加固时, 可以不进行碳纤维带与混凝土表面的粘贴工作, 这将更进一步地简化加固工艺, 减少施工工作量, 降低原材料的使用量。

(5) 需要再强调一下的是, 碳纤维布预拉力的计算是预应力加固计算的重要内容之一。本文未能解决这个问题, 如何测试和计算碳纤维布中的预拉力, 需要进一步研究。建议在以后的试验中, 可以将碳纤维带的部分长度预先浸胶固化并贴上应变片, 然后进行体外锚固预应力加固时就可以测试其预拉阶段和加载阶段的应变变化; 或者建议在碳纤维带中混杂光纤传感器, 运用更先进的技术进行测试。

(6) 采用体外锚固碳纤维布并施加预应力加固的构件, 出现了很多现行加固规程无法解决的新问题, 如何解决这些问题, 将在后续工作中进行仔细的研究。

(上接第15页)

致谢

本文的研究工作得到江苏省普通高校自然科学研究计划资助(02KJB560001), 以及江苏省结构工程重点实验室研究项目资助(KJSS0212)。南京工业大学结构工程试验中心对论文的试验给予了大力支持, 作者在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Sennah K M, Kennedy J B. Load distribution factors for composite multicell box girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 1999, 4(1): 71-78
- [2] Okeil A M, El-Tawil S. Warping stresses in curved box girder bridges: case study [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 487-496
- [3] Sennah K M, Zhang Xuesheng, Kennedy J B. Impact factors for horizontally curved composite box girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(6): 512-520
- [4] Samaan M, Sennah K, Kennedy J B. Distribution factors for curved continuous composite box-girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(6): 678-692
- [5] 王拥军. 北京市西四环复兴路立交变截面连续钢组合梁设计[C]//第十四届全国桥梁学术会议论文集. 南京:2000: 877-879
- [6] 方志禾, 陈桂英. 预应力钢与混凝土组合连续梁的设计实践—44m+64m+44m 阜成路立交主桥[J]. 北京建筑工程学院学报, 1995, 11(3): 67-78 (Fang Zhihe, Chen Guiying. Design and practice of continuous box girder bridge of prestressed steel and concrete composite—an intersection bridge of Fucheng Road with 44m+64m+44m [J]. Journal of Beijing Institute of

参考文献

- [1] Wu Zhishen, Tanabe K, Matsuzaki T, et al. A retrofitting method for concrete structures with externally prestressed carbon fiber sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 1998 44A:299-1308
- Stocklin I, Meier U. Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips [C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Fiber-reinforced Plastics for reinforced concrete Structures (FRPRCS-5). Cambridge, UK:2001:291-296
- Triantafillou T C, Deskovic N, Deuring M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(3):235-244
- 吴智深, 岩下健太郎, 牛赫东. PBO纤维片材预应力外粘结加固集成新技术 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(9):18-24 (Wu Zhishen, Iwashita Kentaro, Niu Hedong. Study on strengthening technique with prestressed PBO Fiber Sheet [J]. Engineering Science, 2005, 7(9):18-24 (in Chinese))
- [4] Zhuo Jing, Li Tangning. An innovative WSGG anchor of FRP sheet [C]//ACMBS-IV. 2004, 8:86
- 卓静. 高强度复合材料波形齿夹具锚-中国, ZI02244587.0 [P]. 2002 (Zhuo Jing. Wave-shaped-gear-grip of high strength composite: China, ZI02244587.0 [P]. 2002 (in Chinese))
- [5] 卓静, 李唐宁. FRP片材波形齿夹具锚的原理 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(10):48-53
- (Zhuo Jing, Li Tangning. The mechanics of an innovative wave-shaped-teeth-grip anchor of FRP laminations or sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10):48-53 (in Chinese))
- [6] Zhuo Jing, Li Tangning. The mechanism of an innovative WSGG anchor of FRP laminations [C]//ISSEYE-8. 2004, 7: 805-811
- 卓静, 李唐宁, 章庆学等. 波形齿夹具锚固碳纤维布加固混凝土梁试验研究 [J]. 建筑结构, 2005, 35(7):63-66 (Zhuo Jing, Li Tangning, Zhang Qingxue, et al. Test on beams strengthened with carbon fiber sheets and anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage [J]. Building Structure, 2005, 35(7):63-66 (in Chinese))
- Civil Engineering and Architecture, 1995, 11(3): 67-78 (in Chinese))
- [7] 李余华. 石家庄南环大桥大跨度钢箱梁架设[J]. 铁道建筑技术, 2000, (3): 4-7 (Li Yuhua. Erection of long-span steel box girder of Shijiazhuang Nanhuan Bridge [J]. Railway Construction Technology, 2000, (3): 4-7 (in Chinese))
- [8] 张俊平, 黄道沸. 大跨度异形结合梁设计与分析计算[J]. 桥梁建设, 2000, (4): 29-31 (Zhang Junping, Huang Daofei. The design and analysis of large span steel-concrete composite beam [J]. Bridge Construction, 2000, (4): 29-31 (in Chinese))
- [9] 侯文崎, 叶梅新. 连续结合梁桥负弯矩区混凝土板裂缝宽度控制方法研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 109-112 (Hou Wenqi, Ye Meixin. Methods for controlling crack width of concrete slab in negative moment area of continuous composite bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 109-112 (in Chinese))
- [10] 马少杰, 史志强, 白玲. 连续组合梁桥负弯矩区混凝土板开裂机理的研究[J]. 桥梁建设, 2003, (4): 15-18 (Ma Shaojie, Shi Zhiqiang, Bai Ling. Study of cracking mechanism of concrete slab in continuous composite girder bridge negative moment area [J]. Bridge Construction, 2003, (4): 15-18 (in Chinese))
- [11] 高勇. 北京地铁八通线三跨连续结合梁桥设计构思[J]. 山西建筑, 2003, 29(15): 109-110 (Gao Yong. Design of three-span continuous steel-concrete composite beam bridge in Beijing metro 8-pass line [J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(15): 109-110 (in Chinese))
- [12] 张南, 洪英维. 体外索钢箱-混凝土组合梁力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 60-66 (Zhang Nan, Hong Yingwei. Mechanical performance of steel-concrete composite box beams with external tendons [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 60-66 (in Chinese))