

新型混合梁桥结构体系及设计参数

苏庆田¹, 秦 飞²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 辽宁省交通规划设计院, 辽宁 沈阳 110005)

摘要: 提出了在纵桥向用预应力混凝土梁和钢-混凝土组合梁相混合的新型混合梁桥结构体系, 并分析比较了这种新型混合梁相对于其他形式梁桥的优势. 推导了用于计算新型混合梁桥结构受力的表达式, 总结了影响新型混合梁桥结构受力的关键因素, 并得到这种混合梁边中跨比例与中跨结合段位置的相关关系. 通过一工程实例的力学性能计算, 表明此计算方法具有足够的计算精度, 可应用于新型混合梁的结构计算.

关键词: 混合梁; 连续梁; 结构体系; 力学性能

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

A New Type Hybrid-beam Bridge Structural System and Its Design Parameters

SU Qingtian¹, QIN Fei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Liaoning Provincial Communication Planning & Design Institute, Shenyang 110005, China)

Abstract: A new type hybrid-beam bridge, consisting of prestressed concrete beam and steel-concrete composite girder in longitudinal, is proposed. A comparative study is made of the advantages of this new hybrid beam and some other forms of beam bridges. Expression for calculating the mechanical behavior of this new type bridge is derived and the key factors that affect the mechanical behavior of the new hybrid beam bridge are summarized. The correlation between the length ratio of side span and mid span and the position of combined segment in the mid span is obtained. The mechanical properties of an actual project are calculated by the proposed method and the calculation results validate that the proposed deduction method is accurate enough to be used in computing and analyzing the structural behavior of the new type mixed-beam bridge.

Key words: hybrid-beam; continuous beam; structural system; mechanical behavior

目前在桥梁工程中主要使用的材料是混凝土与钢材. 除了传统的混凝土梁桥、钢梁桥外, 钢-混凝土组合梁桥近些年也得到了广泛使用^[1-3]. 因此, 从构件截面上的材料组成桥梁可分为混凝土桥、钢桥和钢-混凝土组合桥.

随着桥梁跨度的不断增加, 主梁在长度方向采用单一材料时往往很难在结构的力学性能与经济性能之间寻求一个更好的平衡点. 为解决桥梁结构这一力学性能与经济性能之间的矛盾, 上世纪 70 年代桥梁工程师提出了在主梁长度方向采用钢梁和混凝土梁混合使用的梁结构形式. 目前, 这种混合梁结构形式在不同类型桥梁中已均有使用, 如梁式桥有石板坡大桥复线桥^[4], 斜拉桥有诺曼底大桥^[5]、昂船洲大桥^[6]和鄂东长江大桥^[7], 悬索桥有广东平胜大桥^[8]和宁波甬江庆丰桥^[9], 拱桥有广东佛山东平大桥^[10]等. 这种形式的混合梁结构中, 钢梁通常位于主跨而混凝土梁位于边跨, 由于主跨部分主梁采用钢梁使结构荷载降低, 而边跨采用混凝土梁又起到了良好的压重作用, 在相同主跨情况下混合梁桥的支座处负弯矩 M_z 远小于混凝土梁桥支座负弯矩 M_d , 这样不但使得结构的弯矩图分布更为合理, 并且也避免了边跨边支座上负反力的出现, 如图 1 中所示, 从而达到增加结构的跨越能力和改善结构体系受力性能的目的.

由钢梁和混凝土梁组合的混合梁桥通常应用于一些超大跨径桥梁(主跨大于 200 m)中, 既满足结构受力性能最优, 也保证桥面铺装施工的经济性. 在桥梁跨径小于 200 m 时较少采用钢梁与混凝土梁组合的混合桥梁, 一方面是由于钢梁部分较短导致桥面铺装机械的使用效率较低, 施工复杂, 另一方面钢桥面板的铺装耐久性比混凝土桥面的差. 因此, 目前在 200 m 以下跨径的梁桥多采用预应力混凝土连续梁或连续刚构的结构形式. 然而, 近些年在跨度大于

100 m 的预应力混凝土连续梁中混凝土腹板的开裂问题和梁体跨中长期下挠问题日益突出,影响了预应力混凝土连续梁的使用。

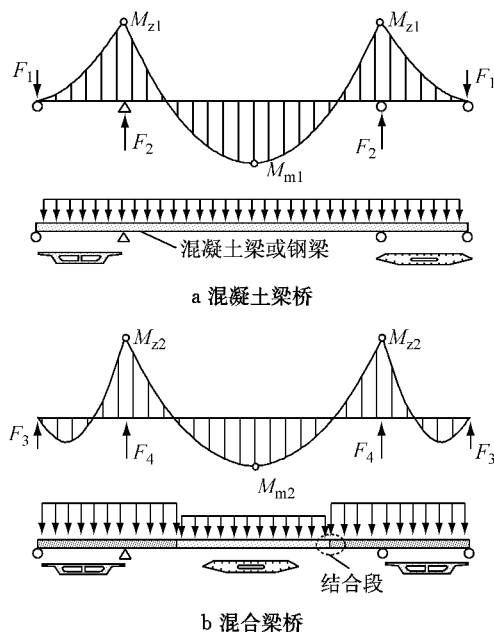


图 1 连续梁桥弯矩示意图

Fig. 1 Bending moment distribution of different continuous beams

本文提出了一种新型的混合梁,即采用混凝土梁与组合截面梁沿桥纵向混合使用的结构形式。通过定性和定量分析比较了新型混合梁结构的优势所在,推导了这种新型混合梁的内力表达式。以一座位于上海的三跨连续梁为例,确定了这种新型桥梁设计的关键控制要点,计算分析了其结构力学性能。

1 新型混合梁的结构形式及特点

1.1 结构形式

新型混合梁,是指在连续梁中跨的部分梁段采用组合梁,其余中跨及边跨梁段采用传统预应力混凝土梁,是组合梁与混凝土梁在纵桥向上的混合使用,如图 2 所示。这一组合梁与混凝土梁的结合方式曾在斜拉桥中得到过成功应用,如主跨 590 m 的上海徐浦大桥^[11]与主跨 430 m 的香港汲水门大桥^[12],但在梁式体系的桥梁中仍罕有尝试。

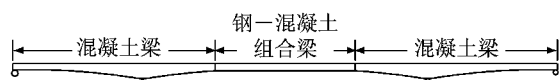


图 2 新型混合梁桥图示

Fig. 2 Sketch of the new type hybrid-beam bridge

1.2 结构优势分析

在国内以往的桥梁建设中,主跨跨径处于 60~200 m 之间的桥梁结构,变截面预应力混凝土连续梁桥往往因其优越的经济性能、成熟的施工工艺等因素而被推为此跨径区间内的首选桥型。但当跨径增大到 100 m 后,预应力混凝土桥梁的经济性能将随着其跨径的增大而有显著的降低。此外,近年来的实桥调查也发现,大跨径预应力混凝土梁桥往往存在着桥体开裂与跨中长期挠度过大等安全隐患^[13-14]。此时,采用传统的混合梁(即钢梁与混凝土梁)虽然可以很好地回避大跨径预应力混凝土梁桥所面临的困难,使其在减小荷载效应时避免梁体开裂,但因需要为主跨内长度较小钢梁段(往往不超过 60 m)特殊配置桥面铺装材料(如环氧沥青铺装等)^[15],进而增加其施工工艺的繁琐程度。

新型混合梁桥部分主跨梁段采用组合梁,其质量相比混凝土梁体较轻,可以较好地降低结构自重荷载占全部荷载的比例,减小结构的受力,进而使新型混合梁桥的跨越能力较预应力混凝土梁桥有较大提高,同样也可以减少边中跨比例及下部结构的尺寸和质量。在施工过程中,主跨内的组合梁段也可以很好地利用交通间歇,采用整体吊装的施工工法,合理降低施工对桥下交通的影响。由于组合梁段采用混凝土桥面板,这样不但使得新型混合梁桥可以在全桥范围内均采取造价较低的沥青混凝土铺装,还很好地规避了钢桥面板的疲劳问题。因而较传统混合梁桥而言,新型混合梁桥不但简化了施工工艺,降低了桥梁总体造价,还使得结构具有更好的耐久性及使用性。

与传统混合梁结构相比,新型混合梁在两种梁体的结合部位,组合梁较钢箱梁更易与混凝土梁间达到刚度的匹配,从而有效地避免了梁体在结合部处出现较大的转角变形,使行车更为平稳舒适。由此可见,新型混合梁桥这一桥型在一定跨度范围内大跨径桥梁中的应用,可以带来显著的社会经济效益,尤其在城市立交和跨线桥梁等交通繁忙路线,更具有独特的优越性。

1.3 结构优势计算

评价一种结构体系的优劣通常采用经济性指标来衡量,结构体系的经济性能是一个综合了桥梁设计、工程施工与后期运营维护等多方面因素的一个综合性指标,对其进行详细深入研究是比较困难的。因此,在本文中,仅通过材料用量与上部结构总重两个指标来考察新型混合梁结构体系的经济性能。

新型混合梁结构体系简图如图3所示,其中 L_1 为混合梁边跨跨径, L_m 为混合梁中跨跨径, L_2 为混合梁1/2中跨内混凝土梁段长度, L_3 为混合梁1/2中跨内组合梁梁段长度.进而推导出新型混合梁材料的用量及上部结构总重.

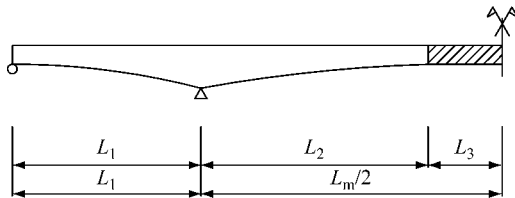


图3 新型混合梁结构图示

Fig.3 Structural arrangement of the new type hybrid-beam bridge

单位面积预应力混凝土梁桥混凝土用量为 w_c ,单位面积钢-混凝土组合梁桥面板混凝土用量为 w_d ,单位面积钢-混凝土组合梁桥钢材用量为 w_s .新型混合梁桥的材料用量以及上部结构总重相较于普通预应力混凝土连续梁桥,可以通过两个指标系数来衡量:新型混合梁每平方米混凝土用量与预应力混凝土梁每平方米混凝土用量的比值, κ ;新型混合梁上部结构总重与预应力混凝土梁上部结构总重的比值, ζ .它们的表达式为

$$\kappa = (w_c L_1 + w_c L_2 + w_d L_3) / [(L_1 + L_2 + L_3) w_c] = 1 - (w_c - w_d) L_3 / [w_c (L_1 + L_2 + L_3)]$$

$$\zeta = (w_c L_1 + w_c L_2 + w_d L_3 + w_s L_3) / [w_c (L_1 + L_2 + L_3)]$$

式中: L_1 为预应力混凝土梁边跨长度.

为简化分析,通过调研实际梁桥工程资料,取组合梁段桥面板单位面积的混凝土用量 w_d 为 0.3 m^3 ,假定 $L_1 = 0.45 L_m$, $L_1^* = 0.6 L_m$, $L_2 = 0.3 L_m$, $L_3 = 0.2 L_m$,进而得到 κ 和 ζ 两个指标系数与桥梁主跨跨径的关系,如图4和5所示.计算所采用的预应力混凝土用量 w_c 是根据表1所示的预应力混凝土连续梁每平方米桥面对应的最佳混凝土用量得到^[16].组合结构梁段中钢材的用量受设计理念和施工方法的

表1 混凝土最佳用量

Tab.1 Optimum amount of the concretes

L_m/m	每平方米混凝土用量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$
60	0.52
80	0.56
100	0.62
120	0.70
140	0.80
160	0.90
180	1.02
200	1.14

影响差别较大,这里取组合梁中用钢量的下限为 $180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,上限为 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

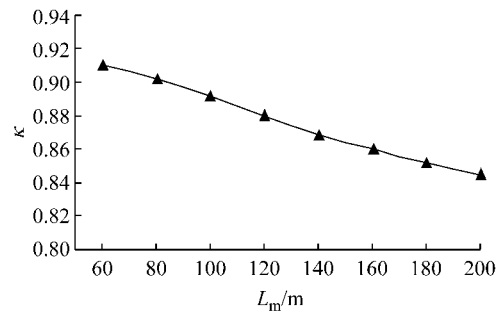


图4 不同桥型混凝土用量比与桥梁中跨跨径的关系

Fig.4 Relationship of the concrete amount ratios of different bridges and the length of mid span

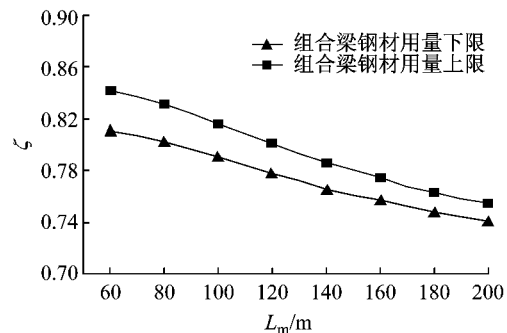


图5 不同桥型上部结构总重比与桥梁中跨跨径的关系

Fig.5 Relationship of the gross weight ratios of different bridges and the lengths of mid span

由图4可知,新型混合梁桥的混凝土用量比预应力混凝土梁桥少,随着桥梁中跨跨度的增大两种桥梁混凝土用量减少的幅度在增加,当中跨跨径由60 m变化到200 m时,混凝土用量减少幅度由8.9%增加到15.5%.

由图5看出,新型混合梁桥的上部结构总重比预应力混凝土梁桥轻很多,组合梁钢材的用量引起上部结构总重的差值在2%~3%左右,影响较少.随着桥梁中跨跨度的增大两种桥梁上部结构总重差值的幅度在增加,当中跨跨径由60 m变化到200 m时,上部结构总重差值幅度可由15.7%增加到24.5%.

由此可见中跨在100~200 m范围时,采用新型混合梁其混凝土用量比预应力混凝土梁节省10%以上,上部结构总重减少约20%,不可否认组合梁增加了近百吨的钢材用量,但总体上新型混合梁的优势是比较明显的.

另外,根据国内最大跨径(中跨跨径为166 m)的预应力混凝土连续梁桥的中支点截面,以该截面

混凝土梁达到极限状态作为控制因素得到,新型混合梁桥的中跨跨径达 186 m,比原预应力混凝土连续梁的中跨跨径增大了约 13%。

2 新型混合梁的内力计算方法

2.1 理论模型假定

为了便于分析新型混合梁的结构受力,采用了如下假定:①所有材料均处于弹性阶段;②施工过程简化为最大悬臂阶段及吊装组合梁中跨合拢阶段;③忽略了局部腹板及顶底板加厚造成的额外荷载。

2.2 简化受力计算

结构施工过程的简化计算模型如图 6 所示,图中 q_c 为中跨内组合梁段自重荷载集度; q_1, q_s, q_m 分别为边支点、中支点及结合段处混凝土梁自重荷载集度。

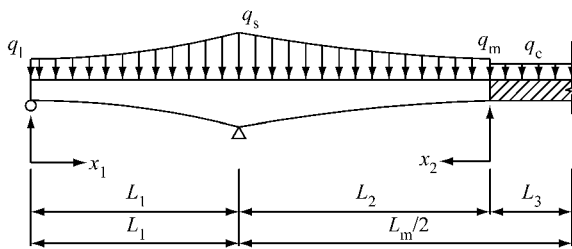


图 6 施工阶段结构受力图示

Fig. 6 Load distribution on new type hybrid-beam bridge in the construction stage

令 $L_1/L_m = \lambda, L_3/L_m = \mu/2, L_2/L_m = 1/2 - \mu/2 = \xi$ 。此时边跨及中跨的自重荷载分布分别为

$$q_1(x) = q_1 + (q_s - q_1)\left(\frac{x_1}{L_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

$$q_2(x) = q_m + (q_s - q_m)\left(\frac{x_2}{L_2}\right)^\alpha \quad (2)$$

式中: α 为混合梁混凝土梁段梁底缘线抛物线变化次数。

(1) 施工阶段一

施工阶段一为最大悬臂阶段,由力矩平衡关系可得到

$$V_1 L_1 + M_m = M_1 \quad (3)$$

$$M_1 = \int_0^{L_1} q_1(x)(L_1 - x_1) dx_1 = \left(\frac{1}{2} - \beta\right) q_1 L_1^2 + \beta q_s L_1^2 \quad (4)$$

$$M_m = \int_0^{L_2} q_2(x)(L_2 - x_2) dx_2 =$$

$$\left(\frac{1}{2} - \beta\right) q_m L_m^2 + \beta q_s L_m^2 \quad (5)$$

式中: V_1 为施工阶段一的边支座反力; M_1 为边跨内荷载对中支点取矩; M_m 为中跨内荷载对中支点取矩; β 为梁底曲线等效系数, $\beta = 1/(\alpha + 1) - 1/(\alpha + 2)$, 进而得到在该施工阶段的边跨支点反力为

$$V_1 L_1 = \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) q_1 + \beta q_s\right] L_1^2 - \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) q_m + \beta q_s\right] L_m^2 \quad (6)$$

第一阶段对应的主梁在边跨的弯矩 M_1^I 和中跨的弯矩 M_m^I 为

$$M_1^I = \frac{1}{2} q_1 x_1^2 + \beta(q_s - q_1) x_1^{\alpha+2} / L_1^\alpha - V_1 x_1 \quad (7)$$

$$M_m^I = \frac{1}{2} q_m x_2^2 + \beta(q_s - q_m) x_2^{\alpha+2} / L_2^\alpha \quad (8)$$

(2) 施工阶段二

施工阶段二为吊装中跨内组合梁段,桥梁即将合拢阶段。在吊装中跨内组合梁时,结合部剪力 V_j 、边支点反力 V_1^II 、梁体对应在边跨的弯矩 M_1^II 和中跨的弯矩 M_m^II 分别为

$$V_j = q_c L_3 \quad (9)$$

$$V_1^II L_1 = V_j L_2 \quad (10)$$

$$M_m^II = V_j x_2 \quad (11)$$

$$M_1^II = V_1 x_1 \quad (12)$$

(3) 桥梁合拢后受力分析

由于成桥阶段的变截面混凝土连续梁为超静定结构,结构的内力分布与截面抗弯刚度的变化规律有关。而对于复杂的箱形截面而言,一方面很难拟定一个简单的惯性矩变化公式来反映实际结构中截面抗弯刚度的变化,另一方面如要准确反映截面刚度的变化,便会使得梁弯曲的微分方程很难求解,甚至得不到解析解。因此,从工程实用角度出发,合理地假定在均布荷载作用时跨中反弯点位置,不但可以获得较为精确的结果,也可使得结构的求解过程得到大大的简化。

通过对中跨 50, 100, 150 m 等多个变截面混凝土连续梁桥的试算,在全桥均布荷载的作用下,中跨弯矩反弯点位置大致处于中跨四分点位置附近。由于新型混合连续梁桥跨中部分为组合梁,相较普通预应力混凝土梁,其抗弯刚度较低,在全桥均布荷载的作用下,中跨内弯矩反弯点位置会向跨中移动,为消除这一因素的影响,需要对预应力混凝土连续梁在均布力作用下跨中反弯点的位置距中支点的距离进行一定的修正,经比较修正系数取 $\rho = 1.2$ 时可较

好地反映新型混合连续梁中跨弯矩反弯点的位置。修正后的结构模型如图7中所示。

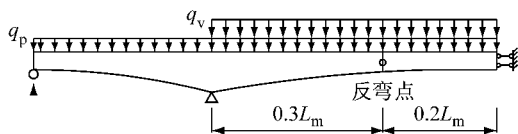


图7 成桥后结构受力简化计算图示

Fig.7 Load distribution on new type hybrid-beam bridge in the service stage

在桥梁二期恒载 q_p 及车道荷载 q_v 作用下,边支点反力计算为

$$V_1^p L_1 = 0.2L_m q_p (0.3L_m) + \frac{1}{2} (0.3L_m)^2 q_p - \frac{1}{2} L_1^2 q_p \quad (13)$$

$$V_1^v L_1 = 0.2L_m q_v (0.3L_m) + \frac{1}{2} (0.3L_m)^2 q_v \quad (14)$$

3 新型混合梁结构设计的关键控制要点

对于传统连续梁体系,影响结构受力的参数主要有两个方面:荷载与结构布置。其中结构的边中跨比、梁体的高跨比以及截面的顶底板厚度与腹板宽度等设计参数都影响着结构的受力。而新型混合连续梁体系又较之多了一个重要设计参数,即中跨内组合梁段的长度。边中跨比例 λ 与中跨组合梁长度比例 μ 两个参数对新型混合梁体系受力的影响最大,其他参数如梁体高跨比及其他截面参数均为随动参数,影响并不明显。

新型混合梁桥的边跨长度和中跨组合梁长度是相互影响的,增大中跨组合梁长度比例就可以一定程度上降低结构的边中跨比例,当然组合梁的长度不能过长,否则会使得组合梁位于受力不利的负弯矩区段。在中跨跨度和组合梁长度固定的情况下,边跨的长度不宜过长,一方面引起中间支座较大负弯矩,另一方面增加相应的工程数量和造价;边跨的长度不能过短,否则会引起边支座出现负反力,需对结构采取压重等特殊处理措施。

为了研究新型混合梁边中跨比例 λ 与中跨组合梁长度比例 μ (或中跨混凝土梁长度比例 ξ) 的关系,这里以桥梁结构在使用运营过程中边跨支点不出现负反力为限制条件,则需要满足

$$V_1^I - V_1^{II} - V_1^p - V_1^v \geq 0 \quad (15)$$

即

$$Q_1 \lambda^2 - Q_m \xi^2 - Q_c \xi (0.5 - \xi) - 0.105 q_p +$$

$$0.5 \lambda^2 q_p - 0.105 q_v \geq 0 \quad (16)$$

式中: Q_1 为边跨等效荷载集度, $Q_1 = (1/2 - \beta) q_1 + \beta q_s$; Q_m 为中跨等效荷载集度, $Q_m = (1/2 - \beta) q_m + \beta q_s$ 。

经整理后得

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{(Q_m - Q_c) \xi^2 + 0.5 Q_c \xi + 0.105 (q_p + q_v)}{Q_1 + 0.5 q_p}} \quad (17)$$

式(17)为以边支点不出现负反力为限制条件下得到的新型混合连续梁桥的最小边中跨比例 λ 与中跨内混凝土梁段长度比例 ξ 之间的限定关系。

4 实例

上海浦东新区某中跨 142 m 河道桥梁拟采用新型混合梁桥结构形式,桥梁的结构布置如图8所示。

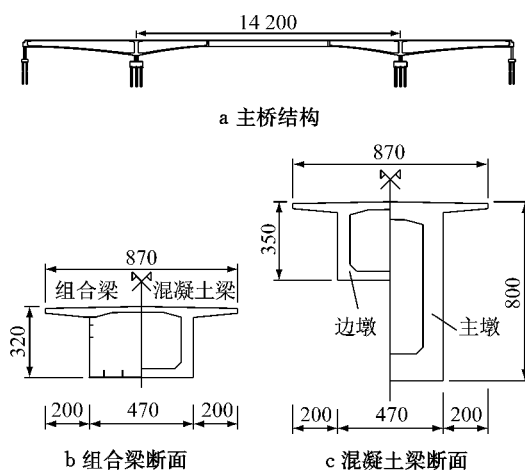


图8 桥梁结构布置(单位:cm)

Fig.8 Layout of the new type hybrid-beam bridge (unit: cm)

该桥桥面宽度为 8.7 m,箱形主梁在中支点处梁高为 8 m,在中跨两种梁交界处的梁高为 3.2 m,中间组合梁为高度 3.2 m 等截面,在边支点的梁高为 3.5 m。边跨和中跨混凝土梁段梁底缘线抛物线变化次数 $\alpha=1.6$ 。除去位于支点附近处的局部加厚,混凝土箱梁的腹板厚度为 550 mm;边跨内其底板厚度从边支点的 400 mm 变化至中支点的 700 mm,而中跨内的底板厚度则从中支点的 700 mm 变化至两种梁交界处的 300 mm;顶板中心位置及悬臂端厚度为 250 mm、靠近腹板位置厚度为 450 mm。混凝土箱梁的腹板、顶板和底板在靠近中支点左右 4 m 局部范围逐渐加厚。组合梁中钢梁底板厚度 16 mm、腹板厚度 12 mm,组合梁中混凝土截面与混凝土梁的顶板完全相同。

取两车道线荷载 $q_v = 21 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 二期恒载 $q_p = 28 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 结合不同截面尺寸确定一期恒载, 由式(17)可以得到 $\xi-\lambda$ 的关系如图 9 所示. 由该图可以得到在中跨混凝土部分比例给定情况下所需的最小边中跨比例 λ , 只要 λ 大于最小界限值就可以保证主梁的边支座不出现负反力.

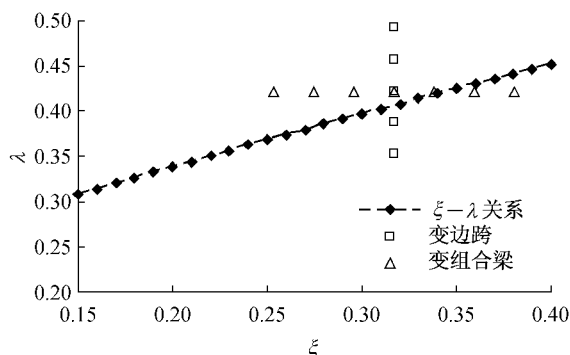


图 9 新型混合连续梁 $\xi-\lambda$ 的关系

Fig. 9 Relationship of ξ and λ for the new type hybrid-beam bridge

为了考察新型混合梁桥的力学性能, 并检验本文所推导的计算方法准确程度, 分别采用本文的方

法(方法 1)和有限元方法(方法 2)计算了中跨 142 m 的混合梁在不同边中跨比例以及不同跨中组合梁长度的力学性能. 有限元方法采用 ANSYS 程序实现, 主梁采用空间梁单元模拟.

在研究不同边中跨比例的混合梁力学性能时, 假定中跨组合梁长度为 52 m, 中支点、边支点及跨中截面形式不变的前提下, 分别选取 50, 55, 60, 65, 70 m 等五种边跨长度, 边跨截面腹板高度相应变化, 使得边跨截面的底板纵桥向线形保持抛物线的指数值为 1.6 不变. 在研究不同中跨组合梁长度的混合梁力学性能时, 假定边跨长度固定为 60 m, 中跨内组合梁长度分别取 34, 40, 46, 52, 58, 64, 70 m 七种情况进行讨论, 中支点、边支点及跨中截面形状不变, 在中跨混凝土梁底板纵桥向线形的抛物线指数值为 1.6 不变.

结构计算时不计预应力和混凝土徐变效应, 根据施工过程计算了一期恒载、二期恒载和中跨满布活载作用下的结构受力情况, 主要的力学参数如表 2 所示.

表 2 混合梁桥的力学性能

Tab. 2 Mechanical characteristics of the new type hybrid-beam bridge

混合梁 长度/m	中支点弯矩/(kN·m)				跨中弯矩/(kN·m)			中支点反力/kN			边支点反力/kN		
	方法 1	方法 2	方法 1/ 方法 2	方法 1	方法 2	方法 1/ 方法 2	方法 1	方法 2	方法 1/ 方法 2	方法 1	方法 2	方法 1/ 方法 2	
边跨 长度	50	—418 974	—419 803	0.998	47 585	46 775	1.017	32 870	32 888	0.999	—1 921	—1 938	0.991
	55	—418 974	—419 557	0.999	47 585	47 021	1.012	32 888	32 900	1.000	—514	—524	0.981
	60	—418 974	—419 345	0.999	47 585	47 723	0.997	33 033	33 041	1.000	767	761	1.007
	65	—418 974	—419 169	1.000	47 585	47 407	1.004	33 276	33 280	1.000	1 950	1 947	1.001
	70	—418 974	—419 034	1.000	47 585	47 543	1.001	33 595	33 597	1.000	3 056	3 055	1.000
中跨 组合 梁长 度	34	—494 553	—494 892	0.999	31 656	31 357	1.010	35 767	35 774	1.000	—493	—495	0.996
	40	—468 896	—469 464	0.999	36 225	35 669	1.016	34 848	34 858	1.000	—65	—74	0.883
	46	—443 703	—444 287	0.999	41 534	40 969	1.014	33 937	33 947	1.000	355	345	1.028
	52	—418 974	—419 345	0.999	47 585	47 723	0.997	33 033	33 041	1.000	767	761	1.007
	58	—394 710	—394 656	1.000	54 376	54 444	0.999	32 138	32 138	1.000	1 171	1 172	0.999
	64	—370 909	—370 251	1.002	61 909	62 583	0.989	31 250	31 240	1.000	1 568	1 579	0.993
	70	—347 573	—346 122	1.004	70 182	72 016	0.975	30 370	30 346	1.001	1 957	1 981	0.988

由表 2 看出本文推导用于分析混合梁内力的计算方法与有限元方法的计算结果大多数情况下非常接近, 仅在中跨组合梁长度为 40 m 时边支点反力的计算结果差别较大, 主要是由于该工况下支点反力接近于零造成的. 这说明本文提出的计算方法用于分析新型混合梁结构的整体受力计算具有足够的精度. 另外, 表 2 中在中跨结构保持不变时, 边跨长度为 50 m 和 55 m 时会使得边支点出现负反力, 同样在边跨长度保持不变时, 中跨组合梁长度为 34 m 和 40 m 时会使得边支点出现负反力, 这与图 9 中 $\xi-\lambda$ 的关系线下方出现的四个点相符. 这表明本文所提

出以限制边支点出现负反力为条件的 $\xi-\lambda$ 关系表达式具有较好的计算精度.

5 结论

(1) 本文提出的新型混合梁桥结构形式能明显减少上部结构的总重, 当桥梁的主跨在 100~200 m 范围时, 其上部结构总重比预应力混凝土梁桥要小 20% 左右.

(2) 推导了三跨连续混合梁结构的内力计算表达式, 具有足够的计算精度, 能满足工程计算要求.

(3)推导了混合梁中边中跨比例 λ 和中跨混凝土梁段长度比例 ξ 的关系,算例分析表明本文提出的 ξ - λ 关系可用于工程设计中。

参考文献:

- [1] 邵长宇. 大跨连续组合箱梁桥的概念设计[J]. 桥梁建设, 2008(1):41.
SHAO Changyu. Conceptual design of long span continuous composite box girder bridge[J]. Bridge Construction, 2008(1):41.
- [2] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LIU Yuqing. Steel-concrete hybrid bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [3] 楼庄鸿, 丁明杰. 钢和混凝土组合桥梁的新结构形式[J]. 国外公路, 2000, 20(4):11.
LOU Zhuanghong, DING Mingjie. New structure of steel and concrete composite bridge[J]. Journal of Foreign Highway, 2000, 20(4):11.
- [4] 邓文中, 代彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2006(6):28
DENG Wenzhong, DAI Tong. Overall design of double-line bridge of Shibapo Changjiang River Bridge in Chongqing [J]. Bridge Construction, 2006(6):28.
- [5] 金增洪. 法国诺曼底大桥简介[J]. 国外公路, 1996, 16(4):26.
JIN Zenghong. Introduction of Normandy Bridge[J]. Journal of Foreign Highway, 1996, 16(4):26.
- [6] Morgenthal G, Sham R, West B. Engineering the tower and main span construction of stonecutters bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(2):144
- [7] 刘明虎, 谭皓, 徐国平, 等. 鄂东大桥混合梁斜拉桥合龙技术[J]. 中国工程科学, 2011, 13(10):99
LIU Minghu, TAN Hao, XU Guoping, et al. Closure technique for the hybrid girder cable-stayed Edong Bridge [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(10):99.
- [8] 胡建华, 陈冠雄, 向建军, 等. 平胜大桥设计构思与创新技术[J]. 桥梁建设, 2006(2):28.
HU Jianhua, CHEN Guanxiong, XIANG Jianjun, et al. Design considerations and innovative techniques of Pingsheng Bridge [J]. Bridge Construction, 2006(2):28.
- [9] 杨士金, 龚仁明, 戴利民. 甬江庆丰大桥设计[J]. 重庆交通大学学报, 2005, 24(2):5.
YANG Shijin, GONG Renmin, DAI Limin. Design of Qingfeng Bridge in Ningbo [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(2):5.
- [10] 占玉林, 赵人达, 毛学明, 等. 东平大桥钢-混凝土结合段模型试验[J]. 桥梁建设, 2011(4):20.
ZHAN Yulin, ZHAO Renda, MAO Xueming, et al. Model test of steel and concrete joint section of Dongping Bridge [J]. Bridge Construction, 2011(4):20.
- [11] 马磊. 徐浦大桥简介[J]. 交通与运输, 1995(6):6.
MA Biao. Introduction of Xupu Cable-stayed Bridge. [J]. Traffic and Transportation, 1995(6):6.
- [12] Ko J M, Sun Z G, Ni Y Q. Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge[J]. Engineering Structures, 2002, 24(7):857.
- [13] SHAO Fei, PAN Darong, LI Feng. Effects analysis of web cracks on long-term deformation of large span pre-stressed concrete continuous box girder bridge [J]. Advanced Materials Research, 2011, 163/167:1207.
- [14] Viktor G, Gintaris K, Donatas C. Investigation of concrete cracking effect in deck slab of continuous bridges[J]. Journal of Road and Bridge Engineering, 2010, 5(2):83.
- [15] CONG Peiliang, CHEN Shanfa, YU Jianying. Investigation of the properties of epoxy resin-modified asphalt mixtures for application to orthotropic bridge decks[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(4):2310.
- [16] 刘效尧, 徐岳. 梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
LIU Xiaorao, XU Yue. Beam bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.