

自适应锚碇悬索桥经济性能研究

姜海西

[上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海市 200336]

摘要: 自适应锚碇悬索桥作为一种创新性的悬索桥体系,具有可以主动调节锚碇与主梁内力分配的“自适应”特点。为研究自适应锚碇悬索桥的经济性能,建立了简化的自适应锚碇悬索桥造价模型,分别推导了主缆、主梁、吊杆、桥塔、锚碇、基础6个主要部分的材料用量和造价计算公式。对自适应锚碇悬索桥的经济性能分析结果表明:跨径在300 m以下时,该桥型与自锚式悬索桥经济性能相当,建议锚碇承担主缆水平力比例在20%以内;跨径在300~800 m时,锚碇承担主缆水平力80%的自适应锚碇悬索桥具有明显的经济优势,可节省造价20%。

关键词: 悬索桥;自适应锚碇;造价模型;主缆水平力;经济性能

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0384-06

Study on Economic Performance of Adaptive Anchored Suspension Bridge

JIANG Haixi

[Shanghai Chengtou Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200336, China]

Abstract: The adaptive anchored suspension bridge is an innovative suspension bridge, and has the "adaptive" feature that can actively adjust the internal force distribution between the anchorage and the girder. In order to study the economic performance of the adaptive anchored suspension bridge, a simplified cost model of adaptive anchored suspension bridge is established to deduce the computational formulas of material consumption and cost for six main parts of main cable, girder, suspender, bridge pylon, anchorages and foundation, respectively. The results of the economic performance analysis on the adaptive anchored suspension bridge indicate that the economic performance of this bridge type is equivalent to that of the self-anchored suspension bridge when the span is below 300 m. It is recommended that the proportion of the horizontal force borne by the anchor to the main cable be within 20%. When the span is between 300 m and 800 m, the adaptive anchored suspension bridge which the anchorages bear 80% of the horizontal force caused by main cables has an obvious economic advantage, and the cost can be saved by 20%.

Keywords: suspension bridge; adaptive anchor; cost model; horizontal force of main cable; economic performance

0 引言

在传统的锚碇式悬索桥建设中,修建大体积锚碇产生的费用在总造价中占比较高,且在软土地区和水下设置锚碇相对困难,从而造成经济性上的不利;传统的自锚式悬索桥,其主缆传来的水平压力由主梁承受,使得该桥型的经济跨径范围受到了限制,且在施工时必须按照先梁后缆的施工顺序,导致造

价提升。可见,传统的地锚式和自锚式悬索桥在经济性能上均存在一定的局限性,与二者相比,自适应锚碇悬索桥这一新桥型在这方面有着相当大的优势。该桥型以传统自锚式悬索桥为基础,在结构上增设小体量的锚碇,同时用锚索连接锚碇和梁端,其中锚索拉力的大小可以根据不同地质条件和施工需求进行调节,体现了“自适应锚碇”的特点。结构型式如图1至图3所示。

杨乐^[1]通过研究发现,自适应锚碇悬索桥的锚碇拉力应由施工阶段的受力情况来控制,可以在不增加锚碇成本的情况下,优化结构刚度和主梁截面尺寸。肖汝诚等^[2]通过研究发现,自适应锚碇悬索桥在施工阶段和使用阶段的锚索索力均可调节,通过利用锚碇前侧土体提供的被动土压力,可以减少

收稿日期: 2024-09-05

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”社会发展领域科技项目(21DZ1202900)

作者简介: 姜海西(1981—),男,博士,正高级工程师,从事上海市重大交通基础设施投资、建设、运营及更新管理与技术开发工作。

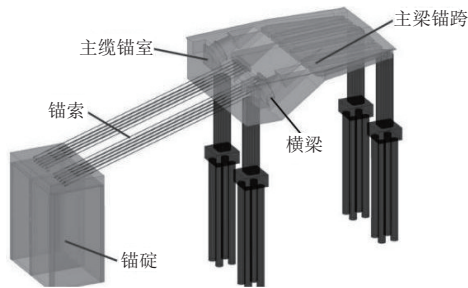


图1 主梁端部的连接构造示意图

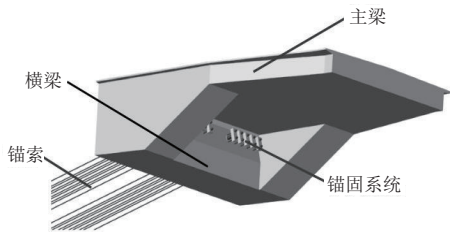


图2 梁端锚索的锚固情况示意图

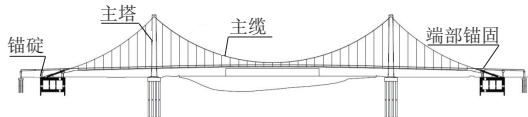


图3 自适应锚碇悬索桥结构型式

锚碇体积,从而降低造价。逯东洋等^[3]统计了国内外部分已建成的自锚式悬索桥材料用量,并研究了三塔自锚式悬索桥的经济性能,分析了主跨材料、结构等参数对造价的影响。

综上所述,目前对于自适应锚碇悬索桥经济性能的研究较少,文献仅从定性角度分析了自适应锚碇悬索桥相较于传统地锚式或自锚式悬索桥所具有的经济性能上的优势,尚缺少工程造价以及经济性能参数影响等方面的研究和定量分析。

本研究从构件内力、施工方法等角度出发,对自适应锚碇悬索桥的主缆、主梁、吊杆、主塔、锚碇、基础6个主要部分的材料用量以及造价进行详细公式推导,并研究了自适应锚碇悬索桥的经济性能,从定量角度分析自适应锚碇悬索桥的经济性能优势,以此来为该桥型的实际工程应用提供更充分的理论基础。

1 材料用量及造价公式推导

1.1 基本假设及简化计算模型

建立简化的双塔三跨自适应锚碇悬索桥造价模型(见图4),其中, l_m 为主跨跨度、 l_s 为边跨跨度、 h_b 为桥面以上桥塔高度、 h_t 为桥塔总高度、 f_m 为主跨主缆垂度、 f_s 为边跨主缆垂度、 λ_r 为相邻吊杆之间的间距、 l_{rm} 为跨中吊杆长度。

为简化力学体系和公式推导过程,本文作出一

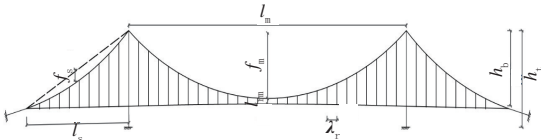


图4 全桥简化模型图

些合理的基本假设:

- (1)只考虑自重和均匀分布的活荷载引起的结构响应;
- (2)由应力水平等于材料强度计算各构件的材料用量,即材料强度完全利用;
- (3)力的计算不考虑结构的二阶效应;
- (4)将结构可能存在的附加弯矩等影响因素考虑到安全系数中。

1.2 材料用量及造价公式

1.2.1 吊杆

如图5所示,对于主跨部分吊杆,假设吊杆的自重 λ_r 区域上均匀分布且大小为 g_r ,主梁自重沿跨径方向均匀分布且大小为 g_b ,活载视为均布活载且大小为 p ,则可以得到一根吊杆的材料用量。

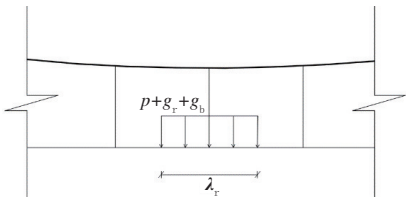


图5 主跨缆索系统示意图

$$q_r = A_r l_r \gamma_r = \frac{(g_r + g_b + p) \lambda_r}{[\sigma_r]} l_r \gamma_r \tag{1}$$

式中: l_r 为吊杆长度; γ_r 为吊杆容重; A_r 为吊杆横截面积; $[\sigma_r]$ 为计入了安全系数的吊杆容许应力。

将吊杆等效为连续薄膜,假设主缆线形为二次抛物线,可得到主跨吊杆材料用量:

$$Q_{rm} = 2 \int_0^{\frac{l_m}{2}} q_r dx = \frac{\gamma_r (g_b + p + g_r) \left(l_{rm} + \frac{f_m}{3} \right) l_m}{[\sigma_r]} \tag{2}$$

假设吊杆平均长度为 l_{rm} ,可以导出吊杆等效均布恒载 g_r 表达式为:

$$g_r = \frac{\gamma_r (g_b + p) \left(l_{rm} + \frac{f_m}{3} \right)}{[\sigma_r] - \left(l_{rm} + \frac{f_m}{3} \right) \gamma_r} \tag{3}$$

在边跨部分吊杆问题上,可将边跨主缆线形假定为抛物线,由于边跨与中跨的吊杆均布恒载差、边跨主缆面积差远小于加劲梁均布荷载,因此可通过主缆塔顶恒载水平力相等来近似求得边跨主缆垂

度 f_s ,计算公式如下:

$$f_s \approx \left(\frac{l_s}{l_m}\right)^2 f_m \quad (4)$$

而对于边跨吊杆材料用量、吊杆等效均布恒载,也可通过与中跨类似的方法由式(5)计算:

$$Q_{rs} = \frac{(g_{sr} + g_{sb} + p)}{2[\sigma_r]} \gamma_r l_s \left(h_b - \frac{4}{3} f_s\right) \quad (5)$$

式中: g_{sr} 为边跨吊杆等效均布恒载; g_{sb} 为边跨主梁恒载集度。吊杆等效均布恒载为:

$$g_{sr} = \frac{\gamma_r}{[\sigma_r] - \left(\frac{h_b}{2} - \frac{2f_s}{3}\right) \gamma_r} (g_{sb} + p) \left(\frac{h_b}{2} - \frac{2}{3} f_s\right) \quad (6)$$

1.2.2 主缆

中跨主缆的材料量 Q_{mc} 由其截面面积 A_{mc} 、曲线长度 S_{mc} 和材料密度 γ_c 相乘得到:

$$\begin{cases} Q_{mc} = S_{mc} \gamma_c A_{mc} \\ S_{mc} = \frac{l_m}{2} \left\{ \left[1 + 16 \left(\frac{f_m}{l_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\ln \left[\frac{4f_m}{l_m} + \left[1 + 16 \left(\frac{f_m}{l_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]}{\frac{4f_m}{l_m}} \right\} \\ A_{mc} = \frac{(g_b + p + g_r) l_m \sqrt{l_m^2 + 16f_m^2}}{[8[\sigma_c] f_m - \gamma_c l_m \sqrt{l_m^2 + 16f_m^2}]} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $[\sigma_c]$ 为计入了安全系数的主缆容许力。

边跨主缆的曲线长度 S_{sc} 可以通过二次抛物线的曲线积分计算得到,材料量 Q_{sc} 仍然可以用上述公式计算:

$$\begin{cases} Q_{sc} = 2\gamma_c A_{mc} S_{sc} \\ S_{sc} = \frac{l_s}{4n_s} \left\{ a \sqrt{a^2 + 1} - b \sqrt{b^2 + 1} + \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + 1}}{b + \sqrt{b^2 + 1}} \right\} \\ n_s = 4f_s/l_s, a = (h_b + 4f_s)/l_s, b = (h_b - 4f_s)/l_s \end{cases} \quad (8)$$

地锚段拉索可假定为直线,材料用量 Q_c 为:

$$Q_c = (h_t - h_b) \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \cdot 1 \quad (9)$$

式中: α 为锚索倾角。

假设主缆和吊杆的单位成本分别为 μ_c 和 μ_r ,则可以得到缆索系统的造价公式:

$$C_{sus} = \mu_c (Q_{mc} + Q_{sc} + Q_{bc}) + \mu_r (Q_{rs} + Q_{rm}) \quad (10)$$

1.2.3 桥塔

桥塔的加载状态如图6所示,其中 N_{t1} 和 N_{t2} 分别为塔顶和塔底所受轴压力, h_t 为桥塔在桥面以下的高度, ξ 为塔顶到计算截面的距离, $N_t(\xi)$ 为计算截面的轴压力, Q_t 为桥塔的材料用量。

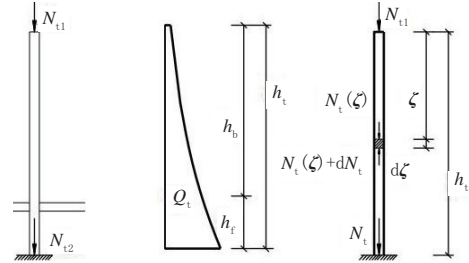


图6 桥塔的荷载状态

可以列出如下平衡方程:

$$\begin{cases} N_t(\xi) + A_t(\xi) \gamma_t d\xi = N_t(\xi) + dN_t(\xi) \\ A_t(\xi) = N_t(\xi) / k_t [\sigma_t] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A_t(\xi)$ 为计算截面的截面积; γ_t 为桥塔容重; $[\sigma_t]$ 为桥塔的容许抗压强度; k_t 为材料强度折减系数($k_t < 1$),引入 k_t 是为了模拟实际情况下弯矩等因素对桥塔的影响。求解上述方程可以计算截面上的轴压力 $N_t(\xi)$,表达式为:

$$N_t(\xi) = N_{t1} \exp \left(\frac{\gamma_t}{k_t [\sigma_t]} \xi \right) \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可得截面积 $A_t(\xi)$ 。桥塔的材料用量可以通过在高度上对 $A_t(\xi)$ 积分计算得到:

$$Q_t = \int_0^{h_t} N_t(\xi) \frac{\gamma_t}{\sigma_t} d\xi = N_{t1} \left\{ \exp \left[\frac{\gamma_t}{k_t [\sigma_t]} h_t \right] - 1 \right\} \quad (13)$$

N_{t1} 为边跨主缆力竖直分量与中跨主缆力竖直分量之和,即:

$$N_{t1} = H_m \left(\frac{4f_m}{l_m} + \frac{h_b + 4f_s}{l_s} \right) \quad (14)$$

式中 H_m 为主缆的水平力,大小为:

$$H_m = \frac{(p + g_r + g_b + A_{mc} \gamma_c) l_m^2}{8f_m} \quad (15)$$

若桥塔的单位成本为 μ_t ,则两座桥塔的造价公式为:

$$C_{tow} = 2\mu_t Q_t \quad (16)$$

1.2.4 主梁

悬索桥主梁存在变截面情况,控制因素包括主缆对主梁的压力、局部构造、外部风荷载的影响等。这些控制因素对主梁截面情况的影响程度会随着主梁跨径的不同、是否存在锚碇等条件而发生改变,尤

其对于既有锚碇又存在主梁轴向压力的自适应锚碇悬索桥,很难能够用具体的公式从受力角度计算主梁的材料用量和造价。因此,假定主梁截面延跨径恒定不变,将主梁自重集度取一个合适的定值,通过将主梁长度与主梁自重集度相乘来求得主梁材料用量,即:

$$Q_{\text{gir}} = Lg_b \quad (17)$$

式中: Q_{gir} 为主梁材料用量; L 为主梁长度。

若主梁的单位成本为 μ_g , 则主梁的造价公式为:

$$C_{\text{gir}} = \mu_g Lg_b \quad (18)$$

对于地锚式或自锚式悬索桥,为了能够确定出不同跨径下合适的主梁自重集度值,对于采用整体钢箱梁的常规 6 车道公路或城市桥梁,通过搜集部分不同跨径的地锚式和自锚式悬索桥的主梁材料用量,代入公式(17),求得主梁自重集度进行拟合推导,并结合贾丽君等^[4]对不同跨径地锚式悬索桥钢箱梁用钢量的研究(见图 7),发现随跨径变化,地锚式悬索桥主梁自重集度变化较小,可取定值 90 kN/m,而自锚式悬索桥主梁自重集度 g_{b1} 与跨度呈线性关系,关系式如下:

$$g_{b1} = 0.6543 l_m + 17.238 \quad (19)$$

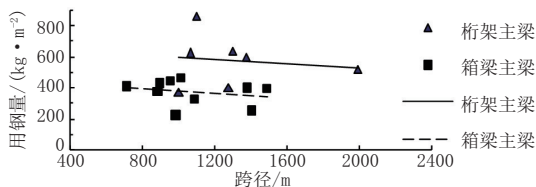


图 7 地锚式悬索桥主梁用钢量统计图

定义自适应锚碇悬索桥中主缆水平力在主梁中的分配比例系数 η , 有:

$$\eta = H_{\text{ms}} / (H_{\text{ms}} + H_{\text{mg}}) \quad (20)$$

式中: H_{ms} 为主梁所受主缆水平拉力; H_{mg} 为锚碇所受主缆水平拉力。

分配比例系数 η 下自适应锚碇悬索桥的主梁自重集度 g_b , 可由式(21)求得:

$$g_b = g_{b0} + \eta(g_{b1} - g_{b0}) \quad (21)$$

式中: g_{b0} 为地锚式悬索桥($\eta=0$)主梁自重集度, 全跨径均取值 90 kN/m。

1.2.5 锚碇

对于自适应锚碇悬索桥,其主缆力的一部分通过锚索传递给锚碇,如图 8 所示。

根据规范要求,锚碇的抗滑移和抗倾覆稳定性系数均可取 2, 从而建立锚固材料用量与主缆力的关

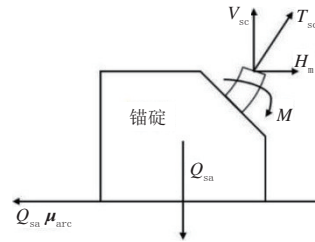


图 8 锚碇的荷载状态

系方程:

$$\frac{(Q_{\text{sa}} - V_{\text{sc}})\mu_{\text{arc}}}{H_m} = 2 \quad (22)$$

式中: V_{sc} 为边跨主缆在锚碇处的缆力竖直分量; Q_{sa} 为锚碇的材料用量; μ_{arc} 为锚碇与锚碇底面土层的摩擦系数。

对锚碇在水平和竖直方向上列平衡方程, 可得:

$$\begin{cases} V_{\text{sc}} = H_m \tan \alpha \\ \tan \alpha = (h_b + 4f_s) / l_s \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22), 得:

$$Q_{\text{sa}} = H_m (2\mu_{\text{arc}} + \tan \alpha) \quad (24)$$

肖汝诚等^[2]在对锚碇被动土压力的研究中指出: 在不同的分配比例系数、不同的地质条件下, 自适应锚碇悬索桥通过锚索张拉调整产生的被动土压力, 可在抗滑动性能满足要求的前提下使锚碇的重力减少 59%~15%, 这里取代表性数值为 40%, 即锚碇材料用量折减 40%。若锚碇的单位成本为 μ_{sa} , 则两侧锚碇的总造价公式为:

$$C_{\text{arc}} = 1.2\mu_{\text{sa}} Q_{\text{sa}} \quad (25)$$

1.2.6 基础

桥塔基础反力由式(12)确定, 即:

$$N_{t2} = N_{t1} \exp\left(\frac{\gamma_t}{[\sigma_t]} h_t\right) \quad (26)$$

引入基础材料用量与基础反力的比例系数 k_e , 可得到全桥基础材料用量为:

$$Q_{\text{ba}} = 2k_e N_{t2} \quad (27)$$

若基础的单位成本为 μ_{ba} , 则基础的造价公式为:

$$C_{\text{ba}} = \mu_{\text{ba}} Q_{\text{ba}} \quad (28)$$

相较于主塔基础, 边墩基础造价较低, 研究中忽略不计。

1.3 材料用量及造价公式验证

以某公路越江大桥作为研究对象, 桥梁结构如图 9 所示, 结构参数见表 1。将其导入上述材料用量及造价公式, 得到该桥梁各部分结构材料用量计算值, 并与实际值进行比对, 以此来验证上述公式的合理性和准确性。

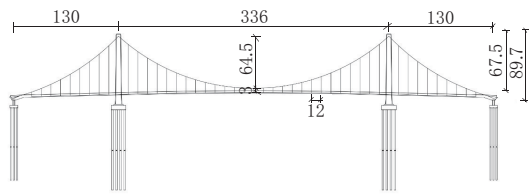


图9 桥梁结构简图(单位:m)

表1 桥梁各部分结构参数

序号	主桥结构分项	数量
1	主缆容重/(kN·m ⁻³)	80
2	主缆容许应力/MPa	1 860/5.3
3	主梁自重集度/(kN·m ⁻¹)	237
4	吊杆容重/(kN·m ⁻³)	80
5	吊杆许用应力/MPa	1 770/2.5
6	桥塔容重/(kN·m ⁻³)	25
7	桥塔许用应力/MPa	14.5
8	平均活载/(kN·m ⁻¹)	42.0
9	锚碇底面摩擦系数	0.58
10	锚索倾角/(°)	20
11	基础比例系数	2.3

该桥梁各部分结构造价实际值与计算值比较情况见表2,各项最大对应误差仅10%左右。可见,本次研究所提出的造价公式具有一定的合理性和准确性。

表2 桥梁各部分结构单价(包含施工费在内)

跨径/m	主缆/(元·kN ⁻¹)	主梁/(元·kN ⁻¹)	吊杆/(元·kN ⁻¹)	桥塔/(元·kN ⁻¹)	锚碇/(元·kN ⁻¹)	基础/(元·kN ⁻¹)
100~1 400	3 676.6	2 100+52.5× η /0.2	2 743.8	162.3	2 800+70× l_m /50	80.1

注:1. 自锚式悬索桥($\eta=1$)主梁单价在表3基础上增加15%;2. 自适应锚碇悬索桥($0<\eta<1$)锚碇单价在表3基础上减少40%。

此外,由于自适应锚碇悬索桥($0<\eta<1$)受到锚碇前侧被动土压力的有利影响,因此锚碇单价可在表3基础上折减40%。对于自锚式悬索桥($\eta=1$),由于在施工顺序上存在先梁后缆的限制,因此主梁单价要在表3的基础上增大15%。

2.2 不同分配比例下总造价与跨径关系

自适应锚碇悬索桥可将主缆水平力在锚碇与主梁之间灵活分配,为研究该特性对结构经济性能的影响,取分配比例系数 η 为0、0.2、0.4、0.6、0.8、1。其中, $\eta=0$ 时代表传统地锚式悬索桥, $\eta=1$ 时代表传统自锚式悬索桥,在主跨跨径100~1 400 m范围进行自适应锚碇悬索桥经济性能的对比。

如图10、11、12所示,观察不同分配比例下自适应锚碇悬索桥的总造价与跨径关系,可以发现:

在0~300 m跨径间,锚碇承担主缆水平力小于20%($\eta=0.8$)时,自适应锚碇悬索桥与纯自锚式悬索桥经济性能基本持平。主要原因是增加锚碇所需增加的造价,与由于减小主梁截面带来的造价减少基本相当。当锚碇承担主缆水平力超过20%($\eta<0.8$)

表2 桥梁结构材料用量比较情况

序号	主桥结构分项	材料类型	材料用量 计算值/kN	材料用量实 际值/kN	误差/ %
1	主缆	$\phi 5.5$ mm的镀锌 铝镁合金钢丝	12 423.8	11 508.5	8.0
2	主梁	Q345qD	141 252.0	149 061.4	-5.2
3	吊杆	$\phi 7.0$ mm的镀锌 铝高强度钢丝	3 915.5	3 547.3	10.3
4	主塔	C50	178 017.0	184 410.0	-3.5
5	基础	C50	524 344.6	576 871.2	-9.1

2 自适应锚定悬索桥的经济性能

2.1 结构单价

为进一步开展部分地锚悬索桥的经济性能研究,同样根据背景工程调研得到了桥梁各部分结构单价(包含施工费在内)。由表3可知,锚碇部分由于体积越大施工费用越高,因此跨径每增加50 m,锚碇单价增多2.5%;同理,主梁施工费用也会随着内部轴力增大而升高,因此分配比例系数 η 每增大0.2,主梁单价增多2.5%。

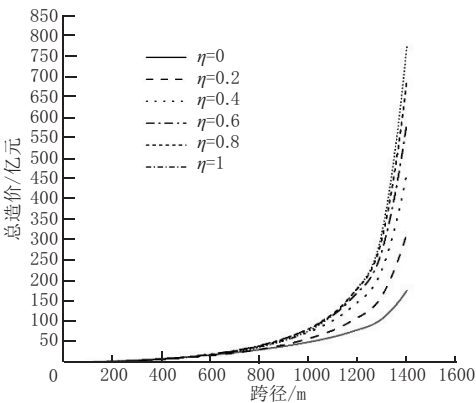


图10 不同分配比例下总造价与跨径关系(100~1 400 m)

时,锚碇造价高于主梁节约的造价,不建议使用。

在300~800 m跨径间,锚碇承担主缆水平力80%($\eta=0.2$)的自适应锚碇悬索桥经济性能最优。与地锚式悬索桥进行比较,最高可节省20%的造价(跨径为300 m时),经济优势随跨径增长逐渐减小;与自锚式悬索桥进行比较,经济优势随跨径增长逐渐增大,最高可节省13%的造价(跨径为800 m时)。锚碇承担主缆水平力为其他分配比例下的造价要超出自锚式悬索桥和地锚式悬索桥造价的5%~20%,不建

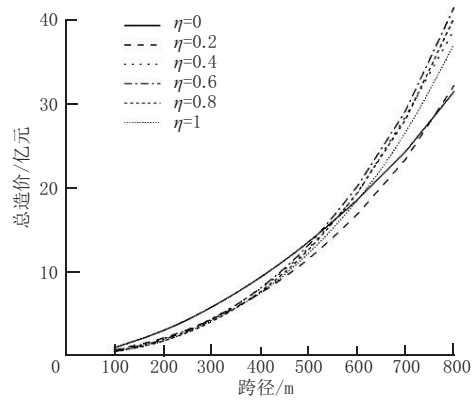


图 11 不同分配比例下总造价与跨径关系 (100~800 m)

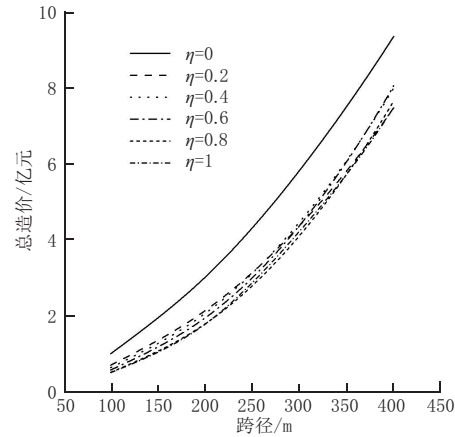


图 12 不同分配比例下总造价与跨径关系 (100~400 m)

议采用。

3 结 语

本次研究推导了自适应锚碇悬索桥各部分结构材料用量以及造价公式,并研究了自适应锚碇悬索桥的经济性能,得到的主要结论如下:

(1)本文推导的结构材料用量计算公式与实际工程对比具有较好的适应性;

(2)在跨径 300 m 以内,自适应锚碇悬索桥与自锚式悬索桥经济性能相当,建议锚碇承担主缆水平力比例在 20% 以内;

(3)在跨径 300~800 m 之间,锚碇承担主缆水平力 80% 的自适应锚碇悬索桥具有更优的经济性能,相较地锚式和自锚式悬索桥可节省约 13%~20% 的造价。

参考文献:

[1] 杨乐.部分地锚式悬索桥结构体系研究[D].上海:同济大学,2019.
[2] 肖汝诚,庄冬利,杨乐,等.部分地锚式悬索桥的基本结构性能[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(11):1545-1551.
[3] 逯东洋,肖汝诚,孙斌,等.三塔自锚式悬索桥经济性能研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(2):49-52.
[4] 贾丽君,石坚,曹赞干.大跨度单跨悬索桥经济性能研究[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册).上海:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会,上海市城乡建设和交通委员会,同济大学,2010.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

