

文章编号: 1003-651X(2001)01-0028-06

悬臂施工混凝土桥基于可靠度的分项安全系数

摘要:在混凝土桥梁平衡悬臂法施工过程中,最重要的一个方面是由倾覆引起失稳的极限状态。文中首先提出在这类桥梁施工中所包含的主要假设、荷载以及方法体系。基于可靠度的校准过程,就是确定一组分项安全系数,将其用在构件的设计中,以确保桥梁在施工过程中的稳定性。最后举例比较主跨为120 m桥梁在分别采用建议的分项安全系数和整体安全系数为1.5时所使用的稳定构件的设计值。

关键词:混凝土桥梁;悬臂施工;可靠度;分项安全系数*

1 引言

AASHTO出版的第一版关于荷载和结构抗力系数设计规范中,相应的混凝土结构部分包含各种荷载(不仅仅是自重)的公称值,用来评定倾覆稳定性。不过,有些规范只是对悬臂桥在施工过程中为防止倾覆而加一个整体安全系数(1.5)。正如所述,整体安全系数不如分项安全系数令人满意,因为不同荷载(如:自重、风压)的变化和影响水平各不相同,结果,整体安全系数会导致过于保守,不经济的稳定安全度,这比所需要的值要高得多。所以本文力求得到悬臂施工法中各种作用力大小和分项安全系数,以获取80~140 m跨度范围内桥梁的相似安全度水平。施工过程中所假定的目标安全度水平与新桥在寿命周期内所需安全度相似。

2 施工顺序和各种荷载

在诺瓦克(Nowak)和格罗尼(Groni)著作中,施工过程中的稳定性是通过设在墩中的轴线旁边竖向预应力筋腱来保证的。当墩有足够强度来抵抗施工过程中出现的巨大不平

衡弯矩时,可以推荐采用这种体系。但是,当墩没有足够强度或墩较矮时,一般可以采用如图1所示的体系。桥面通过预应力筋(其力为 P)联结在设置于离永久墩距离为 D 的临时墩上。采用悬臂平衡法施工过程中所涉及的荷载将在下面讨论(见图1)。

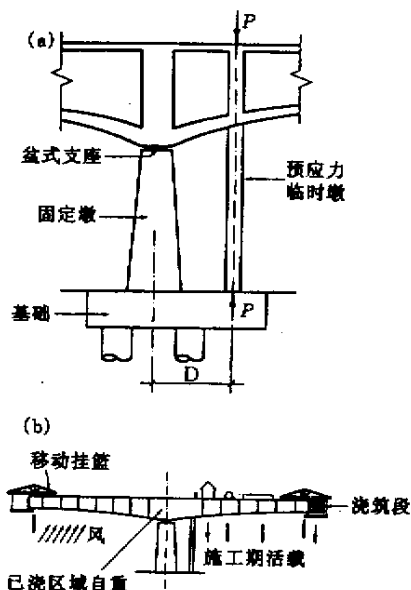


图1 悬臂施工过程
(a)保持稳定性的预应力临时墩;
(b)施工期间的一般荷载

2.1 一般荷载

1) 自重;

2) 挂篮重量 ;

3) 施工过程中的活荷载 : 材料、车辆、机械在桥面上的移动。一般来说, 这些作用可看作表面均布荷载加上悬臂端的一个集中荷载 ;

4) 施工过程中预期最大风压。

荷载 1) 和 2) 在设计和施工过程中可以非常准确地预测并采用可靠的数值。然而正如后面所述, 精确数值对桥梁整体稳定性并非很重要。

2.2 偶然荷载

这些荷载是由于挂篮从浇灌混凝土位置移到另一位置时可能塌落引起的。

2.3 完全失稳

考虑在施工过程中(排除偶然荷载) 的最不利情形来确定由于倾覆引起的失稳承载力极限状态, 其极限状态函数式可表示为稳定弯矩和倾覆弯矩之差 :

$$F = M_s - M_0 \quad (1)$$

式中 : M_s —— 稳定弯矩 ;

M_0 —— 倾覆弯矩。

相应的失效概率和可靠性指标分别为 :

$$P_f = \text{prob}(F \leq 0) \quad \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2)$$

式中 : Φ 为正态累积概率函数, 即正态随机变量小于某一给定的值的概率。

M_s 和 M_0 的计算式是根据在临时墩和永久墩两种不同情况下进入倾覆极限状态时推导出来的。

1) 临时墩处倾覆承载力根限状态 : 一定要考虑这种状态来求得最小值 D 。根据图 2(a) 稳定弯矩和倾覆弯矩分别用下列两式表示 :

$$M_s = M_2 + V_2 D + G \frac{D}{2} + M + GT \left(\frac{l}{2} - s + D \right) \quad (3)$$

$$M_0 = M_1 + GT \left(\frac{l}{2} - s - D \right) + G_{seg} \left(\frac{l}{2} - s - D + \frac{l_p}{2} \right) + \alpha \left(\frac{l}{2} - s - D \right) + \frac{q}{2} \left(\frac{l}{2} - s - D \right)^2 + \frac{w}{2} \left(\frac{l}{2} - s + D \right)^2 \quad (4)$$

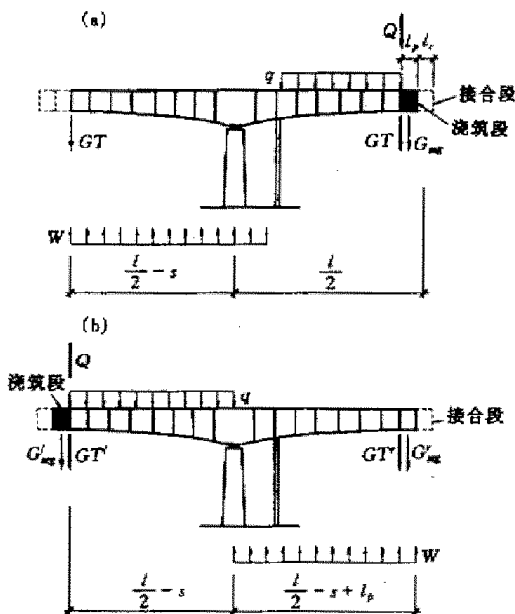


图 2 极限状态函数式中荷载组合

(a) D 值 ; (b) P 值

2) 永久墩处倾覆承载力极限状态 : 一定要考虑这种状态来求得在桥面与永久墩之间连杆的最小预加力, 根据图 2(b) 稳定弯矩和倾覆弯矩可分别用以下两式表示 :

$$M_s = M_2 + PD + GT \left(\frac{l}{2} - s \right) + G_{seg} \left(\frac{l}{2} - s + \frac{l_p}{2} \right) \quad (5)$$

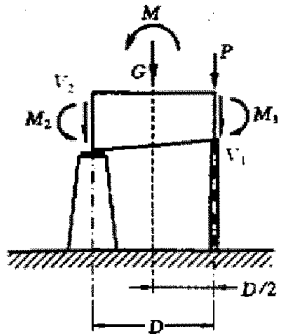
$$M_0 = M_2 + GT \left(\frac{l}{2} - s \right) + G_{seg} \left(\frac{l}{2} - s + \frac{l_p}{2} \right) + \alpha \left(\frac{l}{2} - s \right) + \frac{q}{2} \left(\frac{l}{2} - s \right)^2 + \frac{w}{2} \left(\frac{l}{2} - s + \frac{l_p}{2} \right)^2 \quad (6)$$

符号上标 r 和 l 分别表示右悬臂和左悬臂的荷载, 如图 2 和 3 所示。影响 M_s 的基本随机变量为 :

M_2 —— 由桥梁施工段自重在地墩顶横截面引起的弯矩 (包括最后浇筑部分自重 G_{seg}) ;

V_2 —— 求解 M_2 截面处由自重引起的剪力 ;

G —— 临时墩和永久墩间浇筑段的重量 ;



与自重和预应力相关的随机变量

M ——相应于 G 的弯矩(若为等高度梁, M 值为 0);

GT^r ——引起失稳边的挂篮重量;

P ——临时墩上的预加力。

影响 M_0 的基本随机变量为:

M_1 ——由桥梁施工段自重临时墩墩顶截面引起的弯矩;

GT^d ——引起失稳边的挂篮重量;

G_{seg}^l ——浇筑节段的重量;

Q ——施工过程中的集中活荷载;

q ——施工过程中悬臂桥面两侧悬臂部分均布活载差值;

w ——相应于风速为 v 条件下有效风荷载集度, 可以认为是左右悬臂风荷载集度差(不平衡风力)。

在极限状态表达式中也需要下列确定性决策参数:

D ——永久墩和临时墩间距;

l_p ——浇筑段长度;

l_c ——两悬臂梁之间的连接部分长度(= 2 m);

s ——跨中到最后浇筑段远端长度(= $l_p + l_c/2$)。

3 基于可靠度的校准

卡萨斯(Casas)推导出必要的设计变量

D 和 P , 以求得主跨为 120 m, 采用悬臂施工桥梁所需要的安全度水平, 并与一种采用确定性方法求出的值相比较。以卡萨斯对于特定的一座桥梁所提出的方法体系为基础, 本文的目标就是将概率设计准则表达为一个简单的决策极限状态设计方程式(用规范格式)。相应地, 所得到的分项安全系数当用于规定范围内的悬臂桥梁稳定性设计中时, 应该有与目标值 β_0 几乎相同的失效概率。

因此, 就需要一套分项安全系数 γ_i 来满足方程式:

$$F(\gamma_i X_{ik}, c_i) = M_{sd} - M_{od} = 0 \tag{7}$$

式中:

X_{ik} ——基本变量 X_i 的特征值;

c_i ——极限状态函数的确定值;

M_{sd} ——稳定弯矩设计值;

M_{od} ——倾覆弯矩设计值。

$$\text{条件: } \text{prob}\{F(X_i, c_i) \leq 0\} = \Phi(-\beta_0) \tag{8}$$

本文所涉及到的桥梁是主跨在 80 ~ 140 m 之间, 边跨为主跨一半的类型。这就包含了大多数用平衡悬臂法的现场浇筑混凝土桥梁。截面采用单室箱梁, 宽度为 14 m, 变高度, 主要尺寸取决于跨度, 如图 4 所示。横截面高度按二次抛物线从墩顶处截面最大值到

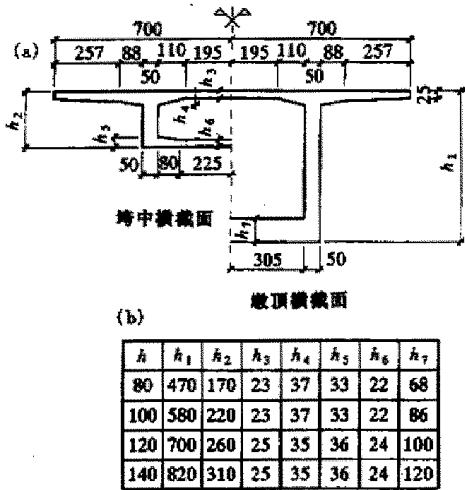


图 4 桥梁分析的横截面尺寸(单位: cm)

跨中截面最小连续变化,底板厚度 h_6 从跨中到离墩 $0.2l$ (l = 跨径) 处截面保持不变,在此截面以外 h_6 按线性变化增加到永久墩顶截面 h_7 处。沿桥跨横截面的变化可以在校准过程中根据与自重相关的变量公称(平均)值来考虑。

目标可靠性指标的选取对于新结构设计规范校准有非常重要的经济性影响。事实上,在这种情况下,所推导出的目标可靠性指标应使结构在其使用寿命内费用最低。总费用包括施工费,使用期内的养护、维修费,与失效概率相关的费用。如果可靠性指标增大,施工费就增加,而维修费降低。最小总造价决定最优可靠性指标。然而,我们所讨论的是施工期间和较短使用期内所用临时构件的设计情况,只有稳定性构件的施工费用是比较重要的。因此,最经济的方案就是施工费用最小的方案(材料总量)。然而很明显,在施工期间要保证最低的安全度水平,这种最低安全度与现在正使用一般结构体系的安全度持平。以 3.5 作为目标可靠性指标应用在 OHBD 规范和 AASHTO 规范正使用桥梁的校准中。但是,系数 3.5 只是用在结构构件设计中,桥梁总体安全度要高于 3.5 (在 4~5 之间)。在桥梁稳定性分析中并不存在超静定性,因为超静定性只对桥梁整体特性而言,而不涉及单个构件的稳定性。另外在施工过程中,桥梁倒塌不仅在生命财产方面造成损失,在社会方面也有损失(例如,对工程施工完美性丧失信心)。同时大多数欧洲规范将安全度校定在 4~5 之间。因此,公称目标安全性指标 β_0 选取 5 是合适的。

由于 M_2 和 V_2 是由相同荷载(即:自重)引起的,所以,第一步就是求得变量的相关系数(ρ)和与自重相关的变量(M_1 、 M_2 、 V_2)的变异系数(COV)。这可以通过一组主跨为 80、120 和 140 m 的桥梁的 Monte Carlo 模拟试验来求得。模拟横截面尺寸平均(公称)值可以由“悬臂”程序来确定,这种程序是一种用

来设计由平衡悬臂法建造的预应力混凝土箱梁桥的计算机规范。如图 4 所示,不同部分(横隔板、翼缘等)的横截面水平和竖向尺寸可以看作正态变量,其标准差是根据几座箱形梁和其他现存混凝土桥梁几何调查计算出来的。模拟的结果 M_1 、 M_2 、 V_2 的变异系数为 1.5%, $\rho = 0.8$ (M_2 和 V_2 相关系数)。这些值是永久墩顶截面处由自重引起的随机变量弯矩和剪力的变异系数相关系数,而不是自重本身。事实上,作为模拟过程的一项中间结果,“横截面面积”随机变量的变异系数为 5%,在这种情况下直接与自重相关。横截面面积变异系数为 5% 与现浇混凝土构件规范校准中的一般值 8%~10% 相比较小,原因是现在所统计的是具体桥梁真实尺寸数据,而不是就总的混凝土结构而言。桥梁质量控制要优于一般结构质量控制,因此,尺寸可以得到较好的控制,由于人为原因造成的误差较小,混凝土箱梁桥尤其如此。另外,在平衡悬臂施工过程中要严格控制自重,因为悬臂挠度(主要由于自重)是连续的。要严格监控以确保当悬臂在中跨合龙时,获得合适的纵向线形。

4 校准结论

前面已经分析了跨径在 80~140 m 之间桥梁的可靠度,用于不同设计参数 D 和 P 的可靠性指标 β 可按“FORM”法进行计算。对于 $\beta = 5$ 的 D 和 P 值是最优的。

在表 1 中列出了分项安全系数,这些值比 1 大或比 1 小,它们是从推导在临时墩上所加预应力的事例分析中得到的。上标 r 和 l 分别代表右边和左边荷载,以这些值为基础,可以推荐表 2 中的数值。荷载安全系数四舍五入到小数点后两位。表 2 中所建议的安全系数与由自重引起的内力(即随机变量 M_1 、 M_2 、 V_2)的 $COV = 1.5\%$ 相关。如果 COV 值设为 5%,则可以认为是适当进行施

表 1 关于 P 的校准过程中的分项安全系数

l/m	D/m	$q/\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	$\gamma_{M_2}^I$	$\gamma_{M_2}^I$	$\gamma_{G_{seg}}^I$	$\gamma_{G_{seg}}^I$	γ_q	γ_v	γ_p
80	2.9	0.5	0.96	1.04	0.96	1.04	1.07	1.20	0.91
	3.1	1.0	0.96	1.04	0.96	1.04	1.12	1.16	0.89
	3.5	2.0	0.97	1.03	0.97	1.03	1.21	1.11	0.87
100	3.2	0.5	0.95	1.05	0.97	1.03	1.07	1.16	0.90
120	3.4	0.5	0.95	1.05	0.97	1.03	1.06	1.14	0.91
140	3.7	0.5	0.95	1.05	0.97	1.03	1.06	1.10	0.91
140	4.1	1.0	0.96	1.05	0.98	1.03	1.11	1.10	0.90
140	4.8	2.0	0.96	1.04	0.98	1.02	1.20	1.07	0.88

表 2 现浇悬臂施工稳定性安全系数推荐值

荷 载	γ_i
合适自重	0.95
不合适自重	1.04
预应力	0.90
分布活载 $q \leq 1.5 \text{ kN/m}^2$	1.15
$1.5 < q \leq 2.5 \text{ kN/m}^2$	1.25
风压	1.35
其他变量	1.00

工控制的极限值。影响可靠度的变量就是与自重相关的变量。这就产生了 $\gamma_1 = 0.8$ 对应于合适的自重, $\gamma_2 = 1.15$ 对应于不合适的自重, 安全系数为 1 的其他变量可假设其设计值与平均值相等。

为了检验所求出的分项安全系数对变量 M_2 和 V_2 之间的相关系数 ρ 的灵敏度, 对其他不同相关水平的事例亦作了分析。结果显示, 对应于 $COV = 1.5\%$, 这种影响可以忽略不计。

5 应用实例

设有一座主跨为 120 m 的桥梁, 挂篮的重量(GT)是 589 kN, Q 期望值为 49 kN, 施工过程中不平衡风压期望公称值为 184 N/m^2 , 施工过程中的分布活荷载值(q)没有可靠的值可以利用, 因此 $0.5 \sim 1 \text{ kN/m}^2$ 范围内值都

可行。首先, 计算出临时墩处防止倾覆的 D 值。在 $M_s = M_0$ 的条件下, 根据表 2 的分项安全系数采用公式(3)和(4)(式中变量用公称值), 可以求得表 3 中的 D 值, 这两个分布活荷载的 D 值可以作为期望变化范围。因为 G , M 和 M_1 的公称值取决于 D 值, 所以求解需要进行试算, 通过使永久墩处达到倾覆的承载能力极限状态来求得 P 值。因此, 类似地, 表 3 中的 P 值也根据公式(5)和(6)求得, 分项安全系数列于表 2。对于这些 D , P 值, 可靠性指标与目标值 $\beta_0 = 5$ 很接近。与变量公称值相对应的 M_s 和 M_0 以及所求得的 D 和 P 值按两种极限状态列于表 3。在临时墩和永久墩处防倾覆整体安全系数 γ_G^I 和 γ_G^2 , 在第一种荷载作用下为 1.09, 在第二种荷载作用下为 1.10。这些值与整体安全系数 1.5 截然不同。另外, 采用表 3 中的值, 保证整体安全系数为 1.5 的预应力值比保证目标可靠性指标 $\beta = 5$ 所需预应力值大三倍, 这就保证了有足够安全度。很有趣的是, 活荷载加倍, D , P 值只稍微变化, 而整体安全系数几乎不变。因此, 对荷载作用进行非常精确的估计看来并不是很重要。这一结果是恰当的, 因为活荷载变化幅度太大, 所以在施工过程中很难对活荷载作出准确的估计。

表 3 采用分项安全系数推荐值与整体安全系数为 1.5 求得的预应力值比较

$q/\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	D/m	P/kN	$M_s^I/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_0^I/\text{kN}\cdot\text{m}$	γ_G^I	$M_s^2/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_0^2/\text{kN}\cdot\text{m}$	γ_G^2	P^*/kN
0.5	3.4	17 658	434 550	397 365	1.09	494 240	452 925	1.09	72 113
1.0	4.8	19 424	441 245	401 245	1.10	510 508	464 098	1.10	68 933

6 结束语

本文提出了一套明确的分项安全系数,并用于预应力混凝土桥梁悬臂施工防止失稳构件的设计中。这些安全系数在目标可靠性指数 $\beta_0 = 5$ 条件下的校准过程中得到的。将它们用于大多数平衡悬臂法预应力混凝土桥梁(主跨在 80 ~ 140 m 范围内)中,可以得到充足的整体安全度(失效概率)。从所做的这些工作可以得出以下结论:

文中所建议的分项安全系数和提出的方法体系可以帮助桥梁设计人员避免由于在许多结构规范中都缺少关于稳定性承载能力极限状态资料所带来的麻烦。

由于大跨度桥梁一般都用悬臂法施工,由活载和风载引起的倾覆弯矩要比由自重引起的倾覆弯矩小。对可靠性指标影响最大的是自重变量。因此在施工过程中对横截面尺寸做严格的控制要比用一种非常精确和熟练的方法来推导风载和活荷载更重要,这是一条很重要的结论,因为在施工过程中风载和活荷载最难控制。一般来说,都由设计人员根据结构规范来处理。

正如本例所示,由可靠度分析所获得的结果清楚地显示用整体安全系数 1.5 作为防倾覆系数会导致过分保守和不经济的设计。整体安全系数 1.5 可以用于施工期间质量保证水平低于混凝土桥梁平衡悬臂施工的其他混凝土结构的倾覆承载能力极限状态的检验场合。

整体安全系数 1.5 相当于合适自重状态下分项安全系数 0.8,不适合自重状态下分项安全系数 1.15。正如前面提到的,这些值可能与一些变量(即内力)的 COV 有关,而这些变量与变异系数为 5% 的自重(M_1, M_2, V_2)相关。将 5% 用于挂篮施工方法,其值偏大。事实上,本文指出,变量 M_1, M_2 以及 V_2 的 1.5% 的变异系数与横截面积 $COV = 5\%$ 对应。考虑到这类桥梁施工过程中几何尺寸一般得到较严格控制,自重对应的 5% 的 COV 值可以认为是上界。

——摘译自《Journal of Structural Engineering》, 1997(3)。

译:许福友(长沙交通学院)

校:张建仁(长沙交通学院)