

有剪刀撑扣件式钢管模板支架简化计算方法

刘红波¹, 陈志华¹, 王小盾¹, 刘 群²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要:扣件式钢管模板支架的稳定承载力计算理论是工程中亟待解决的一个难题。在分析有剪刀撑扣件式钢管模板支架结构特点的基础上,提出了其稳定承载力的简化计算模型,并推导了简化模型中各参数的计算公式,建立了其简化计算方法。利用两个足尺模型试验研究了有剪刀撑扣件式钢管模板支架的稳定性能,根据试验结果,验证了简化模型的合理性,并将试验结果与简化计算方法得出的结果进行了对比,二者吻合较好,验证了该文的简化计算方法的计算结果能够满足实际工程应用的精度要求,建议考虑将其应用在模板支架规范中。

关键词:模板支架;扣件;稳定性;简化模型;试验

中图分类号:TU375.4 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2011)04-0065-08

Simplified Calculation Method of Steel Tube and Coupler Scaffold with X-Bracing

LIU Hong-bo¹, CHEN Zhi-hua¹, WANG Xiao-dun¹, LIU Qun²

(1. Department of Engineering Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: The calculation theory of stability capacity of steel tube and coupler scaffold is currently an urgent problem to be solved. Based on the analysis of the stability behavior of steel tube and coupler scaffold with X-bracing, a series of simplified model and calculation formulas are put forward. In order to verify the rationality of simplified calculation theory presented, two full-scale tests are carried out. Compared with results from tests, the results from simplified calculation theory is well consistent with it. Therefore, it is concluded that the simplified model and simple formula own a considerable accuracy to forecast the critical load of steel tube and coupler scaffold with X-bracing under uniform load, which offers the reference for relevant researchers and designers.

Key words: scaffolds; coupler; stability; simplified calculation model; experiments

在多种临时支撑结构中,扣件式钢管模板支架凭借其搭设简单、拆卸方便、成本较低等优势,在工程中被广泛应用。但是目前临时支撑的研究主要集中在单双排脚手架,而对模板支架的研究甚少^[1-12],因此由于无配套规范、设计不合理、搭设质量不合格等问题,扣件式钢管模板支架垮塌事故时有发生,给国家造成了极大的经济损失和人员伤亡,如图 1 所示。为弥补目前设计理论的不足,国内学者采用试

验研究和数值模拟的方法(如 ANSYS、ABAQUS 软件等)对扣件式钢管模板支架的结构性能进行了研究^[13-19],对扣件式模板支架的稳定性能有了一定的认识。但是对于普通工程师而言,要求其掌握一定的有限元知识及其软件使用技巧有一定的难度,精确的数值模拟方法很难被实际工程直接采用,因此寻找一种合理的简化计算模型及其相关计算方法成为防止发生模板支架垮塌事故的主要途径。

收稿日期:2010-04-23

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0228)

作者简介:刘红波(1983-),男,博士生,主要从事空间结构的施工技术研究,(E-mail):hb_liu2008@163.com。



图 1 扣件式钢管模板支架垮塌事故

在研究有剪刀撑扣件钢管模板支架结构特点和失稳形式的基础上,提出了有剪刀撑扣件式钢管模板支架的简化计算模型,并对简化计算模型中各参数的计算公式进行了严密推导,得出相关参数的计算公式。利用两个足尺模型试验数据,对该文简化计算方法进行了验证,证明了简化模型和参数计算公式的适用性和有效性。

1 简化计算方法

1.1 简化模型

有剪刀撑扣件式钢管模板支架中沿四周设置的剪刀撑对立杆的侧向约束作用随立杆与剪刀撑的距离的增加而减小,因此均布荷载作用下,与其它立杆和 U 形顶托相比,沿长轴跨中一榀的立杆和 U 形顶托最易失稳。因此设计时,只要此榀立杆的强度得到了保证,整体支架的强度也就得到了保证。所以有剪刀撑扣件式模板支架的设计计算可以用图 2(a) 所示的简化模型,模型中侧向约束刚度系数是由模板支架沿长轴布置的竖向剪刀撑产生的侧向约束。

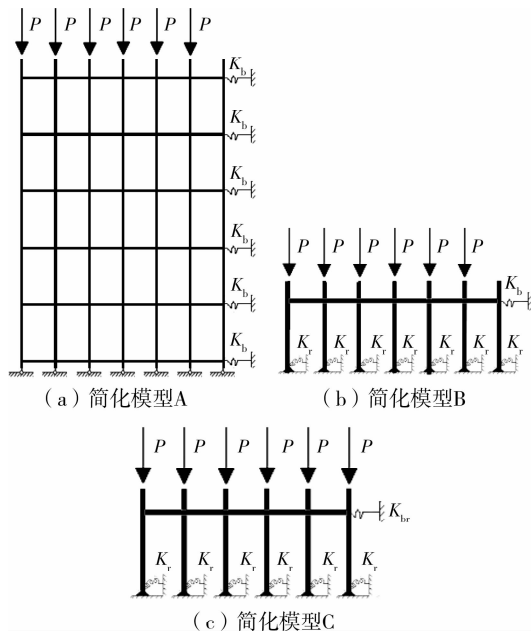


图 2 扣件式钢管模板支架等效模型

对于有剪刀撑的扣件式钢管模板支架而言,其下部由于剪刀撑的存在,通常不会发生模板支架的

侧向整体失稳,因此有剪刀撑的扣件式模板支架通常会在薄弱位置发生杆件的局部失稳。扣件式钢管模板支架的薄弱位置为顶层立杆与 U 形顶托,其原因为上部 U 形顶托相当于悬臂柱,在竖向荷载作用下,由于初始偏差的存在, U 形顶托很容易侧向失稳,且会在 U 形顶托的底部,也就是说在顶层立杆的上端产生明显的弯矩,这样顶层立杆在弯矩和轴向力的作用下也很容易失稳,因此在进行有剪刀撑扣件式钢管模板支架的设计时,一般地,只要能保证顶层立杆和 U 形顶托的稳定性,整体支架将不会发生倒塌。因此图 2 所示的简化模型 A 可继续简化为简化模型 B。在图 2 所示的简化模型 B 中,利用模型底端的弹簧约束来反映有剪刀撑扣件式模板支架下部结构对其底端的转动约束作用。

对于图 2(b) 所示的简化模型,可继续将非加载区域简化为对加载区域的侧向约束,因此可将图 2(b) 继续简化为图 2(c) 所示的不包含非加载区域的、受均布荷载的具有部分侧移约束的半刚性框架结构。考虑到图 2(c) 中各立杆的失稳模态基本相同,因此忽略各立杆之间的相互影响,将图 2(c) 的简化模型继续简化为具有弹簧约束的单杆模型,如图 3 所示。

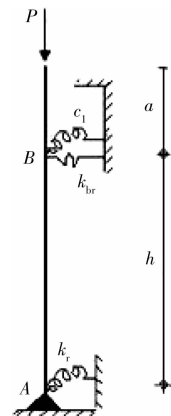


图 3 单杆模型

1.2 模型参数的确定

1.2.1 侧向约束系数 k_{br}

对于图 3 中的侧向约束刚度为竖向剪刀撑提供侧向刚度与增跨提供的侧向刚度之和,即:

$$k_{br} = k_b + \sum k_p / n \quad (1)$$

其中 n 为沿短轴方向加载区域立杆的排数。

图 2(a) 中所示的侧向约束刚度 k_b 主要由模板支架中沿纵向布置竖向剪刀撑产生。有剪刀撑的扣件式钢管模板支架失稳时,布置剪刀撑的平面框架的位移很小,基本可以忽略,因此竖向剪刀撑对加载区域跨中一榀框架的侧向约束刚度 k_b 可由图 4 所示的简支梁模型计算。利用虚功原理可计算得出图

4 受均布荷载的、简支梁的跨中刚度如式(2)所示,则考虑模板支架立杆纵向间距 L_z ,纵向相邻两榧剪刀撑之间的间距为 L_a ,侧向约束刚度 k_b 可由式(3)计算。

$$k_1 = \frac{384EI}{5L_a^4} \quad (2)$$

$$k_b = k_1 L_z = \frac{384EI}{5L_a^4} L_z \quad (3)$$

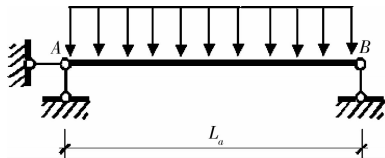


图 4 侧向约束计算模型

图 2(b) 中非受荷立杆对受荷区域侧向约束刚度 k_{br} 可由各个立杆的侧向刚度 k_p 累加得到。单立杆的侧向刚度可由图 5 所示的计算模型推导得出 c_t 。对于图 6 中所示的转动约束刚度,非受荷立杆的边跨(即距受荷立杆最近的立杆和最远的立杆)和非边跨的计算公式有所不同,分别利用公式(15)和(23)计算。下面推导图 6 所示模型的顶端侧移刚度 k_b 。设图 6 中 B 端的转角、B 端的侧移值、A 端的转角分别为 θ_A 、 Δ 、 θ_B 。则由转角位移方程可知:

$$M_{AB} = \frac{4EI}{h}\theta_A + \frac{2EI}{h}\theta_B - \frac{6EI}{h}\frac{\Delta}{h} \quad (4)$$

$$m_{BA} = \frac{4EI}{h}\theta_B + \frac{2EI}{h}\theta_A - \frac{6EI}{h}\frac{\Delta}{h} \quad (5)$$

$$F_{QAB} = F_{QBA} = -\frac{6EI}{h^2}\theta_A - \frac{6EI}{h^2}\theta_B + \frac{12EI}{h^3}\Delta \quad (6)$$

由顶端水平力平衡、顶端弯矩平衡、底端弯矩平衡可得如下方程:

$$H + k_b \Delta - \frac{6EI}{h^2}\theta_A - \frac{6EI}{h^2}\theta_B + \frac{12EI}{h^3}\Delta = 0 \quad (7)$$

$$\frac{4EI}{h}\theta_A + \frac{2EI}{h}\theta_B - \frac{6EI}{h}\frac{\Delta}{h} - k_r \theta_A = 0 \quad (8)$$

$$\frac{4EI}{h}\theta_B + \frac{2EI}{h}\theta_A - \frac{6EI}{h}\frac{\Delta}{h} - c_t \theta_B = 0 \quad (9)$$

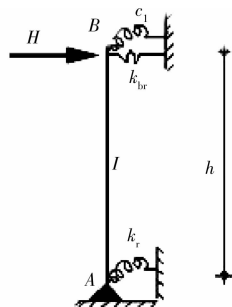


图 5 侧向刚度约束计算简图

联立方程(7)~(9),并令 $\Delta = 1$,即可得到单立

杆的侧移刚度为:

$$k_p = H = \frac{12EI}{h^3} \left[\frac{\frac{EI}{h}(k_r + c_t) + k_r c_t}{12\left(\frac{EI}{h}\right)^2 - \frac{4EI}{h}(k_r + c_t) - k_r c_t} \right] \quad (10)$$

1.2.2 转动约束刚度系数

图 2(b) 所示的立杆底端的转动约束刚度 k_r 可由图 5 所示的简化计算模型计算得出。边跨立杆底端的转动约束与非边跨的不同,边跨立杆底端的转动约束刚度 k_{rs} 可由图 5(a) 所示的计算模型推导得出,非边跨的立杆底端的转动约束刚度 k_{rm} 可由图 5(b) 所示的计算模型推导得出。对于图 5(a) 和图 5(b) 计算模型均可简化为图 5(c),其不同在于图 5(c) 中的上部转动约束刚度 c_t ,转动约束刚度 c_t 的计算可参考公式(15)和(23)计算。对于图 5(c) 而言,可利用转角位移法求得其顶端的转动刚度为:

$$k_r = \frac{4EI}{h} + c_t \quad (11)$$

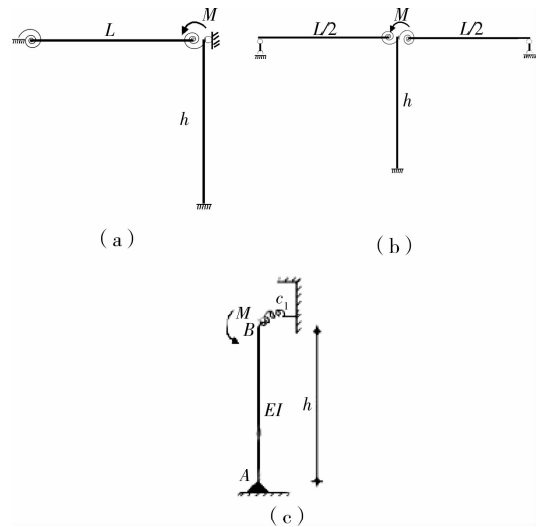


图 6 转动约束刚度计算简图

1.2.3 转动约束刚度系数

对于图 3、图 5(c) 和图 6 中的转动约束刚度 c_t ,其计算模型如图 7 所示,其中图 7(a) 适用于中跨立杆杆端转动约束刚度 k_{mr} 的推导(因为中跨立杆杆端两端均存在水平杆),图 7(b) 适用于边跨立杆杆端转动约束刚度 k_{sr} 的推导(因为边跨立杆杆端仅有一边存在水平杆)。首先利用图 7(a) 所示的计算模型推导中跨立杆杆端的转动约束刚度 k_{mr} 。图 7(a) 中的水平杆杆端的转角 θ 可由公式(12)计算,扣件的转角 ϕ 可由式(13)计算,因此水平杆与立杆之间的转角为两者之和,即可用式(14)计算,因此立杆杆端的转动约束刚度如式(15)所示。

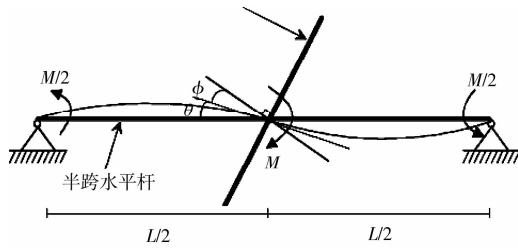
$$\theta = \frac{M}{2} \frac{L}{2} \frac{1}{3EI} = \frac{ML}{12EI} \quad (12)$$

$$\phi = \frac{M}{K_z} \quad (13)$$

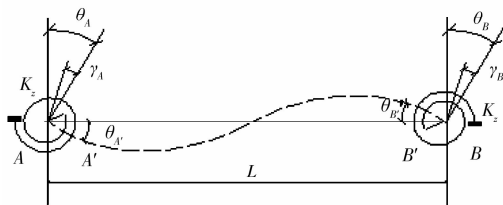
$$\theta + \phi = \frac{ML}{12EI} + \frac{M}{K_z} = M \left(\frac{L}{12EI} + \frac{1}{K_z} \right) \quad (14)$$

$$k_{mr} = \frac{M}{\theta + \phi} = \frac{12EIK_z}{12EI + LK_z} \quad (15)$$

式(14)–(15)中的 K_z 为扣件的转动刚度。



(a) 非边跨立杆



(b) 边跨立杆

图 7 转动约束计算简图

下面利用图 7(b) 所示的计算模型推导边跨立杆杆端的转动约束刚度。利用转角位移方程可知 A 点处的弯矩为：

$$M_{AB} = \frac{2EI}{L} (2\theta_A + \theta_B) \quad (16)$$

由于梁 A 端与 B 端的转角大小相等，方向相反，因此：

$$M_{AB} = \frac{6EI}{L} \theta_A \quad (17)$$

因此杆件 AB 在 A 端的转动刚度可表示为：

$$c_{rA} = \frac{6EI}{L} \quad (18)$$

半刚性连接杆件 AB 近端的转角包括 2 部分，其一是弹簧约束本身的转动，二是杆件 A 端的转角，这 2 部分可以等效为 2 个弹簧来考虑，弹簧的刚度分别为 c_{rA} 和 K_z ，杆件 AB 在 A 端总的转动刚度为 k_{sr} 。总的转角为 2 个等效弹簧转角之和，即：

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_n \quad (19)$$

各个弹簧均有相同的弯矩，因此由式(19)可得：

$$\frac{1}{k_{sr}} = \frac{1}{c_{rA}} + \frac{1}{K_z} \quad (20)$$

因此，半刚性连接杆件 AB 的转动刚度为：

$$k_{sr} = \frac{c_{rA} K_z}{c_{rA} + K_z} = \frac{6EIK_z}{6EI + K_z L} \quad (21)$$

1.3 简化模型的强度计算

对于扣件式钢管模板支架，虽然图 3 所示的简化模型已经非常简单，但是其仍需要借助有限元技术进行求解，也很难被普通工程师所掌握和利用，因此推导了图 3 所示的简化模型的稳定方程。实际应用时仅需要求解此方程即可得到简化模型的线性屈曲荷载。

对于图 3 所示的简化模型，可分段建立其挠度方程，设底段和顶段的挠度方程分别为：

$$EI y_1^m + p y_1^n = 0 \quad (22)$$

$$EI y_2^m + p y_2^n = 0 \quad (23)$$

令 $k^2 = \frac{P}{EI}$ ，则通解和各阶微分分别为

$$y_1 = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 x + C_4$$

$$y_1' = C_1 k \cos kx - C_2 k \sin kx + C_3$$

$$y_1'' = -C_1 k^2 \sin kx - C_2 k^2 \cos kx$$

$$y_1''' = -C_1 k^3 \cos kx + C_2 k^3 \sin kx$$

$$M_{1x} = -EI y_1'' = C_1 P \sin kx + C_2 P \cos kx$$

$$Q_{1x} = -PC_3 \quad (24a)$$

$$y_2 = D_1 \sin kx + D_2 \cos kx + D_3 x + D_4$$

$$y_2' = D_1 k \cos kx - D_2 k \sin kx + D_3$$

$$y_2'' = -D_1 k^2 \sin kx - D_2 k^2 \cos kx$$

$$y_2''' = -D_1 k^3 \cos kx + D_2 k^3 \sin kx$$

$$M_{2x} = -EI y_2'' = D_1 P \sin kx + D_2 P \cos kx$$

$$Q_{2x} = -PD_3 \quad (24b)$$

可根据如下边界条件建立联立方程组求解微分方程的解：

1) A 端挠度为零，即 $y_{1(0)} = 0$ ；

2) A 端弯矩平衡，即 $M_{1(0)} + k_r y_{1(0)}' = 0$ ；

3) B 端的剪力平衡， $Q_{1(h)} + Q_{2(h)} + c_r y_{1(h)} = 0$ ；

4) B 端的弯矩平衡：

$$M_{1(h)} + M_{2(h)} - c_1 y_{1(h)}' = 0$$

5) C 端的弯矩为零，即 $M_{2(h+a)} = 0$ ；

6) C 端的剪力平衡，即 $Q_{2(h+a)} = 0$ ；

7) B 端的挠度协调，即 $y_{1(h)} = y_{2(h)}$ ；

8) B 端的转角协调，即 $y_{1(h)}' = y_{2(h)}'$

根据上述 8 个独立的边界条件可以建立 8 个线性齐次方程，组成线性方程组(25)。若要使结构失稳，则要使上述线性方程组有非零解，必须使得系数行列式等于零，利用此条件可得到一个关于未知数 k 的方程，求解此方程可得未知量 k ，取 k 最小正值进而可得线性稳定承载力 $P = k^2 EI$ 。

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & k_r k & -p & k_r & 0 \\
 c_r \sin kh & c_r \cos kh & c_r h - p & c_r & 0 & 0 & -P & 0 \\
 2EI k_2 \sin kh - c_r k \cos kh & 2EI k_2 \cos kh + c_r k \sin kh & -c_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -k^2 \sin k(h+a) & -k^2 \cos k(h+a) & -P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \sin kh & \cos kh & h & 1 & -\sin kh & -\cos kh & -h & -1 \\
 k \cos kh & -k \sin kh & 1 & 0 & -k \cos kh & k \sin kh & -1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 C_1 \\
 C_2 \\
 C_3 \\
 C_4 \\
 D_1 \\
 D_2 \\
 D_3 \\
 D_4
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (25)$$

此时求得的临界荷载为线性屈曲荷载,其值通常要高于考虑初始缺陷和材料非线性的非线性屈曲临界荷载。为了考虑简化模型的非线性特性,本文引入一非线性系数 η_{nl} 来考虑初始缺陷与材料非线性对有支撑扣件式钢管模板支架的降低作用。非线性系数由公式(26)所示,因此简化模型的非线性稳定承载力可由公式(27)计算得到。

$$\eta_{nl} = \frac{P_L}{P_{NL}} \quad (26)$$

$$P_{NL} = \frac{P_L}{\eta_{nl}} \quad (27)$$

考虑到利用数值方法很难推导此非线性系数的解析解,利用 ANSYS 软件,分析了各参数下非线性

系数的取值范围。工程中立杆间距一般在 0.5 m~2.0 m 之间,因此转动约束刚度 c_i 取值为 14~19 kN/rad;步距一般为 0.5~2.0 m,因此 k_r 取值为 35~140 kN/rad;侧向约束刚度 k_{br} 的取值一般为 15~30 kN·m/rad。顶部悬臂杆高度一般为 0.3~0.8 m。对影响简化计算模型非线性系数的 5 个参数(每个参数取 4 个水平点),利用正交设计法,设计了 16 种模型,对 16 种模型的非线性系数取值进行了分析,得到了非线性系数 η_{nl} 的变化范围为 1.15~1.35,因此在实际工程应用时建议简单的、偏于安全的取 1.35 进行计算。

表 2 非线性系数 η_{nl} 取值分析

$k_r /$ (kN·m ⁻¹ ·rad ⁻¹)	$k_{br} /$ (kN·m ⁻¹ ·rad ⁻¹)	$c_i /$ (kN·m ⁻¹ ·rad ⁻¹)	顶托高度/m	立杆步距/m	线性荷载 P_L /kN	非线性荷载 P_{NL} /kN	η_{nl}
35	15	14	0.3	0.5	53.01	44.54	1.19
35	20	16	0.5	1.0	34.98	30.36	1.15
35	25	18	0.6	1.5	36.28	29.89	1.21
35	30	19	0.8	2.0	32.78	24.53	1.34
70	15	16	0.6	2.0	31.37	26.36	1.19
70	20	14	0.8	1.5	24.79	20.78	1.19
70	25	19	0.3	1.0	58.07	47.97	1.21
70	30	18	0.5	0.5	51.81	40.04	1.29
105	15	18	0.8	1.0	26.58	22.16	1.20
105	20	19	0.6	0.5	46.34	35.23	1.32
105	25	14	0.5	2.0	42.94	34.29	1.25
105	30	16	0.3	1.5	59.14	48.66	1.22
140	15	19	0.5	1.5	37.98	31.80	1.19
140	20	18	0.3	2.0	53.63	45.50	1.18
140	25	16	0.8	0.5	33.33	25.80	1.29
140	30	14	0.6	1.0	36.41	29.32	1.24

2 试验验证

2.1 试验模型

为了验证该文简化模型和简化计算公式的正确性,利用 2 个扣件式钢管模板支架足尺试验对其进行了验证。第 1 个试验模型的的布置图如图 8 所示,四周剪刀撑设置一致;第 2 个试验模型的布置图如图 9 所示,纵向和横向剪刀撑设置有所区别。2 个模型的布置参数如表 3 所示。

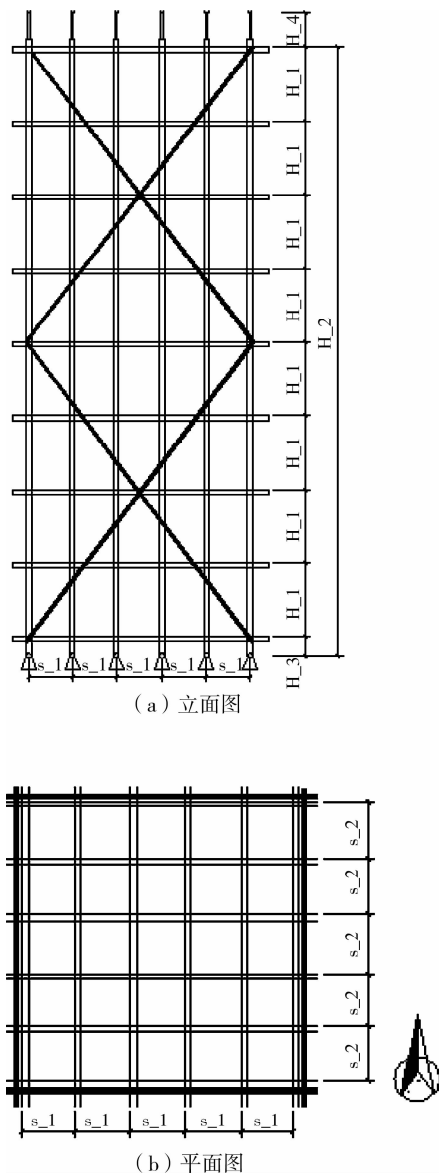


图 8 第 1 个试验模型布置图

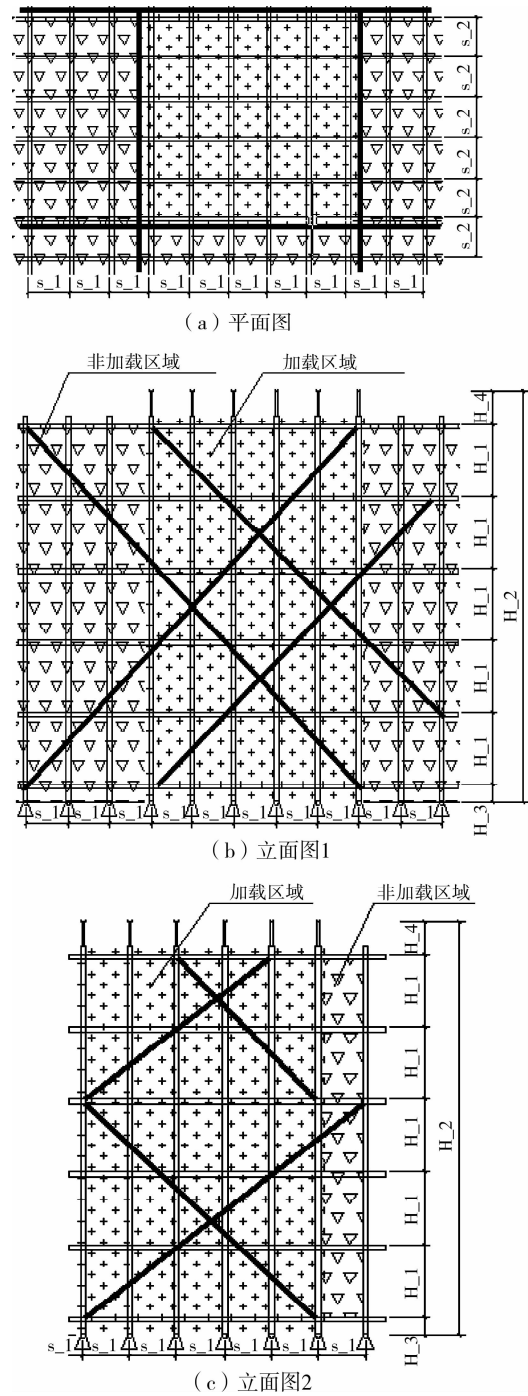


图 9 第 2 个试验模型布置图

表 3 试验模型布置参数

模型编号	H-1/m	H-3/m	H-4/m	S-1×S-2/m
T1	0.9	0.4	0.5	0.6×0.6
T2	1.5	0.2	0.5	0.9×0.94

为给高达 8.15 m 的试验模型进行均匀加载,试验设计了 4 个超高加载反力架,采用 8 个千斤顶通过 2 层分配梁将千斤顶的集中力转化为施加于模板支架立杆顶端的均布集中力。试验加载方案如图 10 所示。试验采用的失稳判别准则为:位移增加过

程中千斤顶出现卸载即认定为结构已失稳。

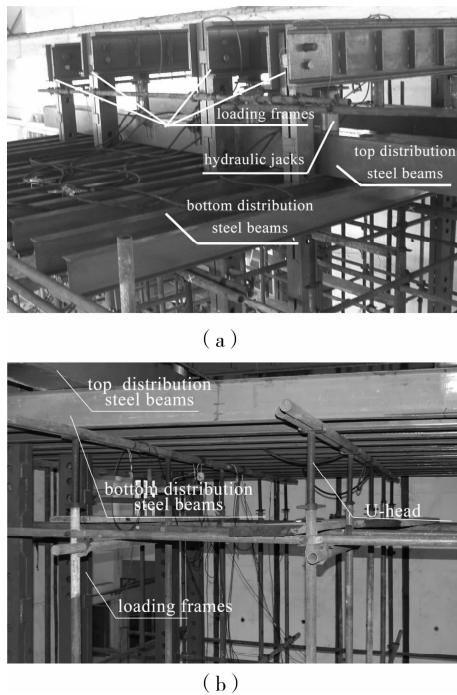


图 10 试验加载装置

2.2 试验结果

2个扣件式模板支架的足尺试验模型的失稳形式如图 11 所示,由此可得到以下结论:1)试验得到的模型 T1 和模型 T2 的失稳形式均为悬臂杆与最上一步立杆局部沿弱轴方向的侧移失稳,且底层杆件变形极小,可忽略不计;2)加载区域所有立杆的失稳形式均相同,但是立杆的失稳时位移并不相等,沿纵向跨中一榀立杆的失稳位移最大,边榀立杆的失稳位移最小。因此该文的简化模型是合理的。由试验得出的 2 个试验模型的稳定承载力分别为 32.5 kN 和 28.38 kN。

2.3 简化计算

为了验证提出的计算有剪刀撑扣件式钢管模板

支架强度的简化方法的正确性,下面利用提出的计算模型和公式来计算 2 个试验模型的强度。由图 8 和图 9 所示的试验模型结构布置图可得到简化计算公式各个参数的数值,如表 4 所示。

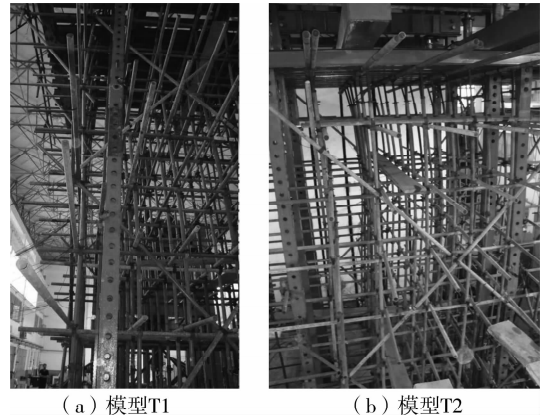


图 11 试验模型的失稳模态

表 4 简化公式中各个参数数值

试验模型	H/m	a/m	La/m	Lz/m	L/m
T1	0.9	0.5	3.0	0.6	0.6
T2	1.5	0.5	4.5	0.9	0.94

利用表 4 的各个参数数值和本文推导的公式可得到各个简化模型的相关参数的数值及其试验模型的非线性稳定承载力,如表 5 所示。由表 5 中的数据可以得到如下结果:

1)边跨立杆较中间立杆更易失稳,因此进行了实际工程应用时,为保证计算结果的安全性,可选择边跨立杆作为简化计算模型。

2)由边跨立杆简化模型得到的试验模型稳定承载力与试验结果相比,误差分别为 8.63% 和 6.19%,可见利用简化计算方法得出的稳定承载力既有一定的精度,有具有一定的安全度,因此简化计算方法可用于实际工程的设计应用。

表 5 简化模型与试验结果比较

模型编号	$k_b/$ ($kN \cdot m^{-1}$)	$k_r/$ ($kN \cdot m^{-1} \cdot rad^{-1}$)	$k_{br}/$ ($kN \cdot m^{-1}$)	$c_i/$ ($kN \cdot m^{-1} \cdot rad^{-1}$)	立杆位置	线性强度/kN	非线性强度/kN	试验结果/kN	误差/%
T1	10.03	96.85	10.03	18.46	边跨	40.31	29.86	32.5	8.13
T1	10.03	97.87	10.03	19.48	中跨	41.30	30.59	32.5	5.86
T2	2.97	64.58	16.16	17.54	边跨	35.94	26.62	28.38	6.19
T2	2.97	66.00	16.46	18.96	中跨	37.29	27.62	28.38	2.67

3 结论

根据有剪刀撑扣件式钢管模板支架的稳定特点,提出了针对其稳定承载力的简化计算模型和简化计

算公式,并对其进行了试验验证,得到以下结论:

1)提出了有支撑扣件式钢管模板支架的简化计算模型,并推导了简化计算模型中各参数的计算公式。

2) 推导了有支撑扣件式钢管模板支架简化模型的稳定方程, 利用此方程可快速计算简化模型的线性稳定承载力; 提出采用非线性系数来修正稳定方程求得的线性稳定承载力; 通过正交设计法设计了 16 中简化模型分析了非线性系数的取值范围, 确定实际工程中非线性系数可统一采用 1.35。

3) 通过足尺试验研究了有剪刀撑扣件式钢管模板支架的稳定承载力, 并与简化计算结果进行了对比, 验证了该文简化模型的合理性以及计算公式的精度。

参考文献:

- [1] BEALE R G, GODLEY M H R. Numerical modeling of tube and fitting access scaffold systems[J]. *Advanced Steel Construction*, 2006, 2:199-223.
- [2] PENG J L, PAN A D E, CHAN S L. Simplified models for analysis and design of modular falsework [J]. *J Construct Steel Res*. 1998, 48:189-209.
- [3] 徐崇宝, 张铁铮, 盘景龙, 等. 双排扣件式钢管脚手架工作性能的理论分析及试验研究[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1989, 22(2):38-55.
XU CHONG-BAO, ZHANG TIE-ZHENG, PAN JING-LONG. Theoretical and experimental research on the structural behavior of tube-and-couple scaffolds [J]. *Journal of Harbin Architectural and Civil Engineering Institute*, 1989, 22(2):38-55.
- [4] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架的极限稳定承载力研究[J]. *力学季刊*, 2004, 25:213-218.
AO HONG-FEI, LI GUO-QIANG. Investigation of overall load-bearing stability capacity of tube-and-couple scaffolds[J]. *Chines Quarterly of Mechanics*, 2004, 25:213-218.
- [5] CHAN S L, ZHOU Z H, CHEN W F, et al. Stability analysis of semi-rigid steel scaffolding[J]. *Engineering Structure*, 1995, 17:568-574.
- [6] 阴可, 黄强. 插销式钢管脚手架节点焊缝裂纹稳定性分析[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(5):80-84
YIN KE, HUANG QIANG. Welded cracks stability analysis of plug-in steel-tube scaffold [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(5):80-84.
- [7] 简斌, 阴可, 卢铁鹰, 等. 插销式钢管脚手架安全性能试验研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2008, 40(4):29-35.
JIAN BIN, YIN KE, LU TIE-YING, et al. Experimental study on safety performance of plug-in steel-tube scaffold system [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2008, 40(4):29-35.
- [8] YUE F, YUAN Y, LI G Q, et al. Wind load on integral-lift scaffolds for tall building[J]. *ASCE J Struct Engng*, 2005, 131:816-24.
- [9] 宗钟凌, 郭正兴. 高空旋转脚手架设计与施工[J]. *施工技术*, 2007, 36(11):38-40.
ZONG ZHONG-LING, GUO ZHENG-XING. Design and construction of high-altitude rotary scaffold [J]. *Construction Technology*, 2007, 36(11):38-40.
- [10] 杜荣军. 科学规范脚手架结构施工支架的设计和计算规定(1)[J]. *施工技术*, 2010, 39(1):120-124.
DU RONG-JUN. Scientizing and standardizing regulations on design and calculation of construction falsework in scaffold structure (1) [J]. *Construction Technology*, 2010, 39(1):120-124.
- [11] 杜荣军. 科学规范脚手架结构施工支架的设计和计算规定(2)[J]. *施工技术*, 2010, 39(2):110-116.
DU RONG-JUN. Scientizing and standardizing regulations on design and calculation of construction falsework in scaffold structure (2) [J]. *Construction Technology*, 2010, 39(2):110-116.
- [12] 杜荣军. 科学规范脚手架结构施工支架的设计和计算规定(3)[J]. *施工技术*, 2010, 39(3):116-125.
DU RONG-JUN. Scientizing and standardizing regulations on design and calculation of construction falsework in scaffold structure (3) [J]. *Construction Technology*, 2010, 39(3):116-125.
- [13] LIU HONG-BO, ZHAO QIU-HONG, WANG XIAO-DUN, et al. Experimental and theoretical study on stability behavior of structural steel tube and coupler scaffold without X-bracing[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32, 4:1003-1015.
- [14] LIU HONG-BO, CHEN ZHI-HUA, WANG XIAO-DUN, et al. Theoretical analysis and experimental research on stability behavior of steel tube and coupler scaffold with X-bracing [J]. *Advanced Steel Construction*, 2010, 6(4):946-962.
- [15] 袁学霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(5):43-50.
YUAN XUE-XIA, JIN WWEI-LIANG, LU ZHENG, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(5):43-50.
- [16] 谢楠, 王勇. 超高模板支架的极限承载力研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(S):148-153.
XIE NAN, WANG YONG. Study on load-carrying capacity of super high supports for formwork [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(S):148-153.
- [17] 蔡雪峰, 周继忠, 庄金平. 钢管扣件节点抗滑性能研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(3):60-64.

- Research and progress of modeling chloride ingress for corrosion risk prediction of marine concrete[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 2004(6):61-64.
- [8] TANG L P, J GULIKERS. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4):589-595.
- [9] TANG L P, L O NILSSON. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993(2):247-253.
- [10] LIANG M T, WANG K L, LIANG C H. Service life prediction of reinforced concrete structures[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9):1411-1418.
- [11] TAKEWAKE K, MASTUMOTO S. Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments [C]//V M MALHOTRA. Proc. 2nd Int. Conf. Concr. Marine Envir, 1988, ACI SP-109:381-400.
- [12] P MANGAT, B MOLLY. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials and Structures, 1994, 27:338-346.
- [13] 李冉, 杨绿峰, 冯庆革. 基于混凝土初始龄期及龄期衰减系数影响的氯离子二维扩散分析[J]. 混凝土, 2008(9):40-44.
LI RAN, YANG LU-FENG, FENG QING-GE. Analysis of chloride diffusion in concrete based on the initial age of concrete and coefficient of attenuation age[J]. Chinese Journal of Concrete, 2008(9):40-44.
- [14] 杨绿峰, 李冉. 混凝土中氯离子二维扩散规律的解析研究[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3):20-23.
YANG LU-FENG, LI RAN. Analytical study of two-dimensional diffusion of chloride ion in concrete [J]. Chinese Journal of Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3):20-23.
- [15] 杨绿峰, 陈正, 王焱, 等. 混凝土中氯离子二维扩散分析的边界元法[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7):1110-1117.
YANG LU-FENG, CHEN ZHENG, WANG YI, et al. Boundary element method for analysis of two-dimensional chloride diffusion in concrete [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2009, 37(7):1110-1117.
- [16] 陈正, 杨绿峰, 冯庆革, 等. 高性能混凝土的氯离子扩散及服役寿命研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2):97-103.
CHEN ZHENG, YANG LU-FENG, FENG QING-GE, et al. Study of chloride diffusion of high-performance concrete and its service life by the boundary element method [J]. Chinese Journal of Building Materials, 2010, 13(2):97-103.
- [17] 刘秉京. 混凝土结构耐久性设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [18] BAMFORTH P. Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chlorides [M]//GJΦRV O, SAKAI K, BANTHIA N. Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading, London: E & FN Spon(1):64-75.
- [19] 姚诗伟, 吴萍. 氯离子扩散方程的解析解[J]. 港工技术与工程, 2006(5):1-7.
YAO SHI-WEI, WU PING. Analytical solution to chloride diffusion equation [J]. Chinese Journal of Harbour Technology and Engineering, 2006(5):1-7.

(编辑 王秀玲)

(上接第72页)

- CAI XUE-FENG, ZHOU JI-ZHONG, ZHUANG JIN-PING. Joint slip resistance performance of fasteners in steel pipe formwork supports [J]. Civil Engineering Journal, 42(3):60-64.
- [18] 张卫红, 刘建民, 朱国卫. 基于整架试验的扣件式钢管脚手架半刚性节点计算方法[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(1):38-42.
ZHANG WEI-HONG, LIU JIAN-MIN, ZHU GUO-WEI. A semi-rigid node calculation method for steel tubular scaffold with complete based on back-analysis of scaffold load-bearing experiments results [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 24(1):38-42.
- [19] 胡长明, 董攀, 沈勤, 等. 扣件式钢管高大模板支架整体稳定性试验研究[J]. 施工技术, 2009, 38(4):70-72.
HU CHANG-MING, DONG PAN, SHEN QIN, et al. Experimental research of global stability of fastener-style steel tubular high-formwork support [J]. Construction Technology, 2009, 38(4):70-72.

(编辑 胡玲)