

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0289-06

防连续倒塌高大模板支撑体系的两阶段设计研究

安宇骢, 谢楠, 贾影

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 提出了一种防连续倒塌高大模板支撑体系, 由双功能子体系和单一功能子体系组成, 正常设计状况下两个子体系共同工作(简称第一阶段); 偶然情况下单一功能子体系先失效, 双功能子体系独自工作, 避免整个结构体系连续倒塌(简称第二阶段)。在两个阶段, 考虑支撑体系在结构布置、荷载和功能等方面的差异, 研究和讨论了两阶段设计目标可靠指标的合理取值。从承载能力和用钢量的角度, 给出合理的构造措施和最优的立杆型号, 不但保证正常设计状况下结构的安全性, 而且在事故发生时给施工人员提供逃生机会, 为救援提供通道。

关键词: 高大模板支撑体系; 两阶段设计; 连续倒塌; 目标可靠指标; 极限承载力

中图分类号: TU755.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.S058

RESEARCH ON TWO-STAGE DESIGN OF HIGH FALSEWORK SYSTEM AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE

AN Yu-cong, XIE Nan, JIA Ying

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A high falsework system which is intended to prevent progressive collapse is proposed. It is composed of a single-function subsystem and a dual-function subsystem. The two subsystems work together under normal design situation (first stage). Once the single-function subsystem fails accidentally, the dual-function subsystem can work alone to avoid progressive collapse of the whole system (second stage). Considering the differences of the two stages in the settlement, load and function, the target reliability indexes of the two-stage design are discussed and proposed. Reasonable constructional measures and types of shores are obtained considering both the ultimate capacities and the amount of material. The system not only satisfies the requirement of structural safety in normal design situation, but also provides opportunities for workers to escape and rescue channels for lifesaving when accidents happen.

Key words: high falsework; two-stage design; progressive collapse; target reliability index; ultimate capacity

近年来高大模板支撑体系连续倒塌事故频繁发生, 倒塌发生后施工人员无处避险, 倒塌部位下方无救援通道, 造成群死群伤, 且救援缓慢。尽管国内外对高大模板支撑体系进行过理论研究、现场调查和试验研究^[1-5], 我国颁布了具有更高安全度的新技术标准^[6], 但高大模板支撑体系倒塌事故率依然高居不下, 因此迫切需要用新的思路来构建模板支撑体系, 以提高可靠性与安全性。本文提出一

种具有防连续倒塌功能的高大模板支撑体系, 研究该体系的组成、设计目标可靠指标、构造措施和设计参数, 以实现偶然事件发生时结构仅发生局部破坏, 残余结构可以继续工作的目的。

1 防连续倒塌高大模板支撑体系简介

本文提出的防连续倒塌高大模板支撑体系由如图 1 所示的双功能子体系和单一功能子体系组

收稿日期: 2016-03-30; 修改日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578050)

通讯作者: 谢楠(1965—), 女, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 从事结构设计和可靠度理论研究(E-mail: nxie@bjtu.edu.cn).

作者简介: 安宇骢(1990—), 男, 河北人, 硕士生, 从事结构可靠性分析研究(E-mail: andy23129@163.com);

贾影(1963—), 女, 辽宁人, 教授, 博士, 从事力学分析研究(E-mail: jiaying1963@sina.com).

成。正常设计状况下两个子体系共同工作(简称第一阶段);偶然设计状况下单一功能子体系先失效,双功能子体系独自工作,避免出现连续倒塌(简称第二阶段),使得施工人员有可以避险的地方和逃生的机会,并方便救援。

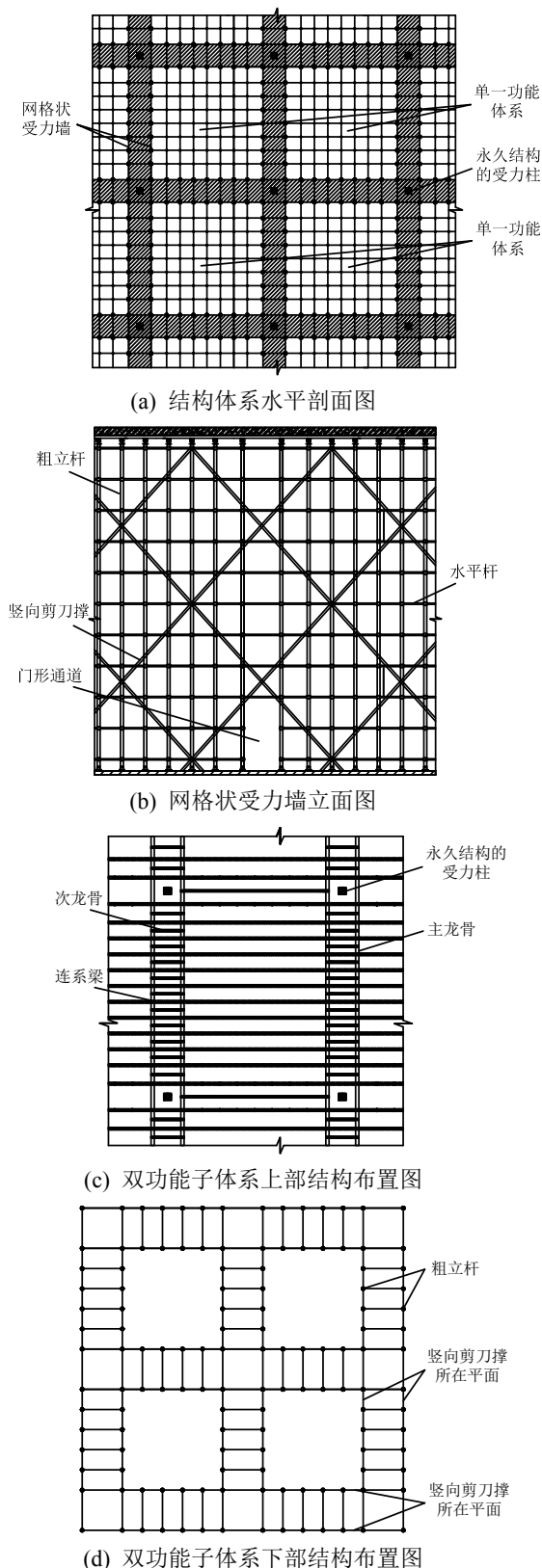


图1 防连续倒塌高大模板支撑体系

Fig.1 High falsework system to avoid progressive collapse

双功能子体系包括作为主要竖向受力结构的呈正交井字布置的网格状受力墙,以及作为水平受力构件的主龙骨、次龙骨和连系梁。各网格状受力墙围绕永久结构的受力柱设立,分别与永久结构的受力柱的定位轴线平行,如图1(a)和图1(d)所示;每片网格状受力墙由两排立杆、双向连接立杆的水平杆和设在每排立杆所在平面的竖向剪刀撑组成,在竖直方向形成多层结构,在网格状受力墙底部沿墙的长度方向设置门形通道,其宽度与网格状受力墙的宽度相同,用于施工运输、铺设泵管和危险救援,如图1(b)所示。

单一功能子体系设置在各网格状受力墙之间,如图1(a)所示,不设剪刀撑,由较细立杆和水平杆组成,交叉处由扣件连接固定;立杆的顶部依次放置带U型托的螺杆、主龙骨和次龙骨;单一功能子体系通过水平杆和扣件与双功能结构的立杆相连。

设如图1(e)所示的水平约束,沿立杆高度方向每三步布置一道。

2 两阶段的设计目标可靠指标

2.1 第一阶段的设计目标可靠指标

《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50513-2008)给出安全等级为三级的脆性破坏构件的目标可靠指标为3.2,但没有给脆性破坏结构的目标可靠指标。通过计算分析,发现防连续倒塌高大模板支撑体系第一阶段的主要破坏模式为整体失稳破坏^[7],出现其它失稳模式的可能性极小,为了简化,本文只考虑整体失稳,取 $\beta=3.2$ 。

2.2 第二阶段的设计目标可靠指标

将第二阶段设计视为偶然事件发生后结构体系残余抵抗能力的设计,第二阶段的设计目标可靠指标通过校准我国规范和美国规范获得。

考虑恒荷载与楼面活荷载的组合,中国规范^[8]和美国规范^[9]的结构体系残余抵抗能力的验算公式分别如式(1)和式(2)所示:

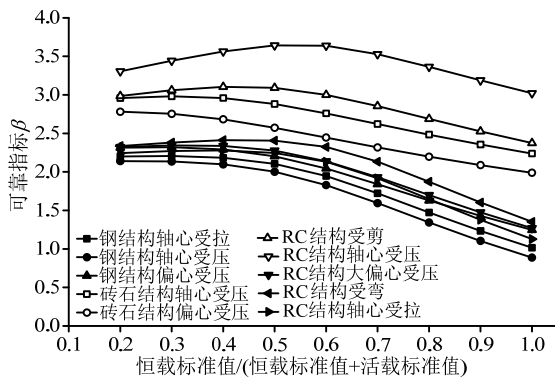
$$\gamma_R (S_{Gk} + 0.5S_{Qk}) \leq R_k \quad (1)$$

$$(1.2S_{Gk} + 0.5S_{Qk}) / \phi \leq R_k \quad (2)$$

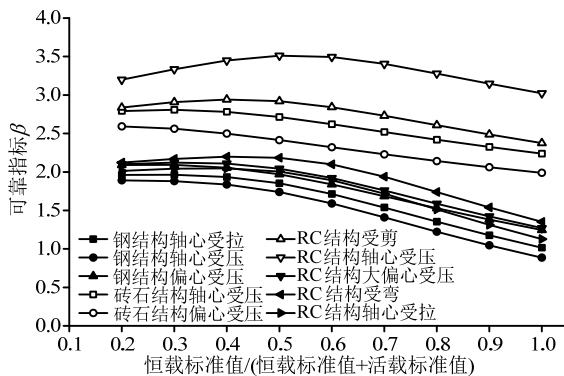
以上两式中: S_{Gk} 为恒荷载效应标准值; S_{Qk} 为楼面活荷载效应标准值; R_k 抗力标准值; γ_R 为抗力分项系数; ϕ 为强度降低系数。

γ_R 和 ϕ 的取值见相应规范。

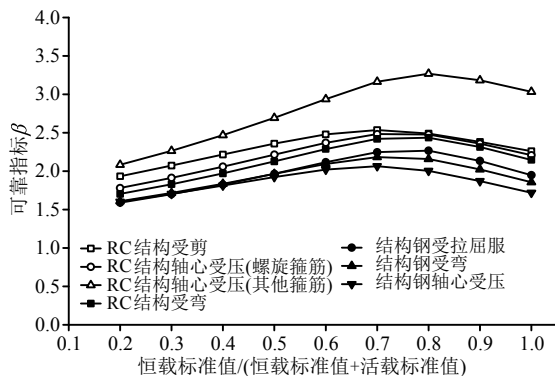
楼面活荷载一般包括持久性活荷载和临时性活荷载, 临时性活荷载在偶然事件发生时出现的概率很小, 在进行可靠性分析时采取文献[10]的方法, 即楼面活荷载只取持久性活荷载的任意时点值。对于恒载标准值与(恒载标准值+活载标准值)之比在 0.2~1.0 的情况, 按中美规范, 分别计算了钢结构、砖石结构和钢筋混凝土结构的各类构件在偶然事件发生后的可靠指标, 见图 2, 计算细节详见文献[7]。



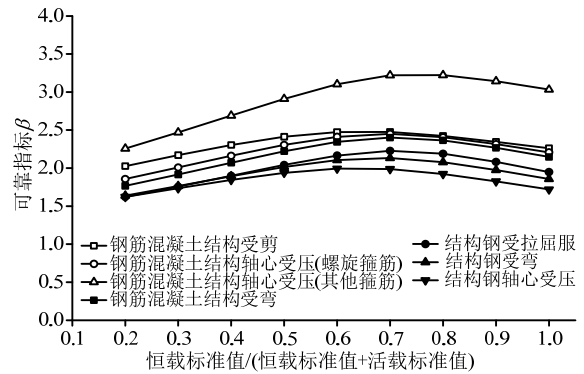
(a) 办公室活荷载(中国规范)



(b) 住宅活荷载(中国规范)



(c) 活荷载影响面积 18.6 m² (美国规范)



(c) 活荷载影响面积 74.3 m² (美国规范)

图 2 中美规范中残余结构构件的目标可靠指标

Fig.2 Target reliability indexes of components in residual structure according to Chinese and American codes

实际情况中不同构件常见的恒载标准值/(恒载标准值+活载标准值)之比为: 钢结构 0.3~0.8、砖石结构 0.6~0.9、钢筋混凝土结构 0.3~0.9^[11]。在此范围内, 对于延性构件, 中国规范的可靠指标平均值为 1.89, 对于脆性构件, 中国规范的可靠指标平均值为 2.75; 美国规范中, 延性构件的可靠指标平均值为 2.04, 脆性构件的可靠指标平均值为 2.52。基于模板支撑体系的安全等级, 对以上计算结果行适当的调整, 建议第二阶段的设计目标可靠指标取为 1.65, 对应的失效概率为 5%。

3 合理构造措施和截面型号研究

3.1 备选钢管型号和备选构造措施

为了利用现有支撑体系中的钢管, 防连续倒塌高大模板支撑体系(简称新体系)中所有水平杆、剪刀撑和单一功能子体系的立杆选用规范^[6]规定的唯一钢管型号: $\Phi 48.3 \times 3.6$; 双功能子体系的立杆型号从《焊接钢管尺寸及单位长度重量》(GB/T 21835-2008)中选取, 初选了表 1 所列的 12 种型号。

表 1 双功能子体系立杆备选型号

Table 1 Steel tubes of dual-function structural system

外径/mm	壁厚/mm			
	3.6	4.0	4.5	5.0
60.3	①	②	③	④
76.1	⑤	⑥	⑦	⑧
88.9	⑨	⑩	⑪	⑫

新体系的构造措施主要是指竖向剪刀撑和水平约束的设置, 备选的构造措施为: 1) 竖向剪刀撑+水平约束; 2) 只含竖向剪刀撑; 3) 只含水平约束; 4) 未设置竖向剪刀撑与水平约束。

3.2 合理的构造措施

选取通常结构柱距的最小值和最大值(6.3 m 柱

距和 9.0 m 柱距)情况进行讨论,相应双功能子体系中立杆和剪刀撑布置分别如图 3(a)和图 3(b)所示。文献[4]的分析结果表明,步距 h 与立杆伸出顶层水平杆长度 a 是影响极限承载力最显著的搭设参数,故本文取 $h=0.9\text{ m}$ 、 1.2 m 和 $a=0.3\text{ m}$ 、 0.5 m 、 0.7 m 进行讨论。

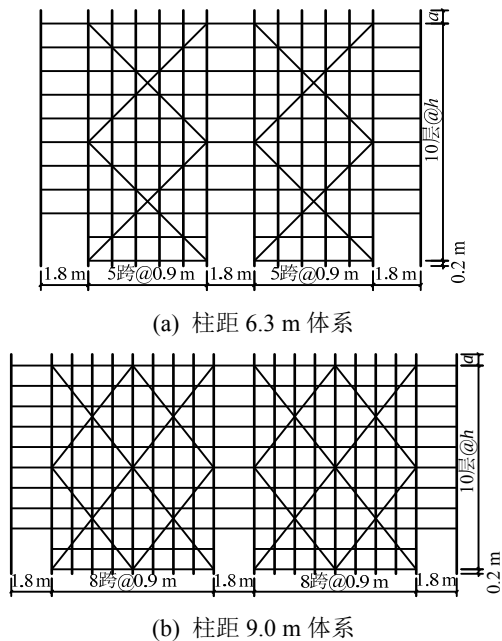


图 3 立杆和剪刀撑布置

Fig.3 Settlement of shores and constructional measures

计算结果表明柱距和双功能子体系立杆型号对失稳模态影响不大,而构造措施对失稳模态和极限承载力的影响较大。图 4 为 6.3 m 柱距、 $h=0.9\text{ m}$ 、 $a=0.5\text{ m}$ 、⑤号粗立杆的完整体系在四种构造措施下体系中的失稳模态。图 5 为体系取不同搭设参数和不同构造措施时的极限承载力。

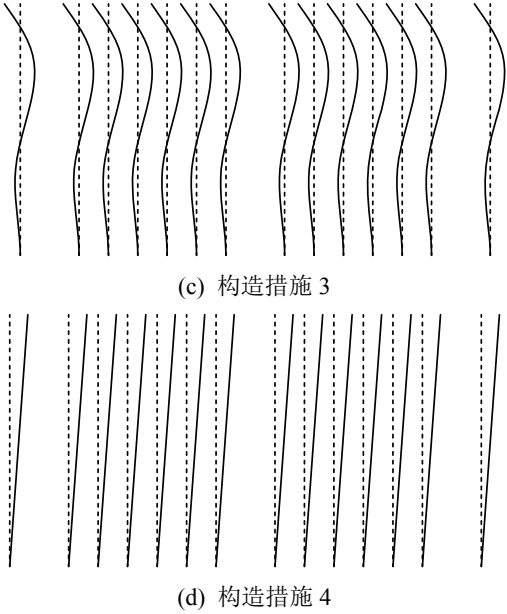
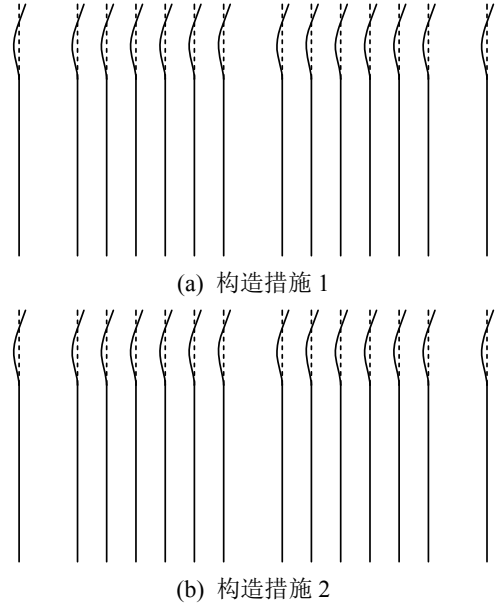


图 4 不同构造措施下体系的失稳模态
Fig.4 Instability modes of falsework with different constructional measures

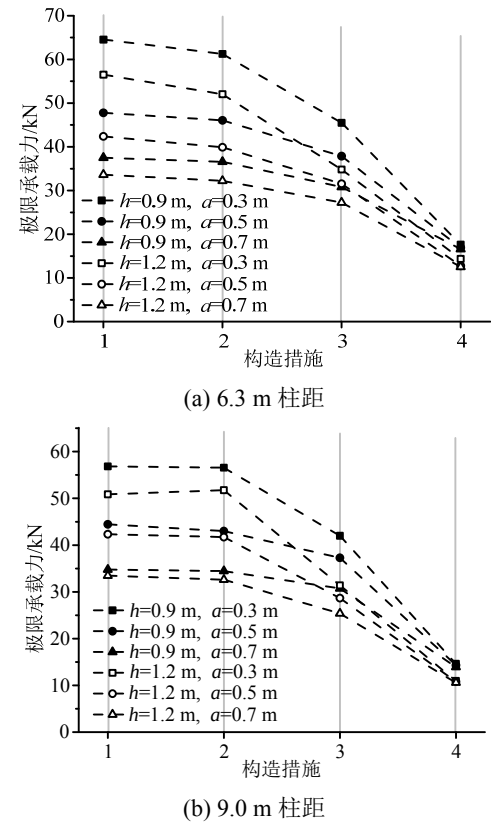


图 5 不同搭设参数和构造措施下的极限承载力
Fig.5 Ultimate capacity of falsework with different design parameters and constructional measures

从图 4 可以看出,和构造措施 4 相比,竖向剪刀撑和水平约束可以明显改变失稳模态,其中竖向剪刀撑还可以减少失稳弯曲的波长;从图 5 可以看出,和构造措施 4 的情况相比,竖向剪刀撑和水平

约束对体系极限承载力均有较大影响,其中竖向剪刀撑的影响尤为明显,设置“竖向剪刀撑+水平约束”对柱距较小的情况,还可以进一步提升承载力。根据以上计算分析的结果,考虑到体系工作时可能会承受水平荷载,本文认为新体系的合理构造措施为“竖向剪刀撑和水平约束”。

3.3 双功能子体系的最优立杆型号

1) 第1阶段

分别计算了图3所示新体系和同样规模的现有体系在取不同 a 和 h 值时的承载力和用钢量,并进行了比较,结果见图6和图7。

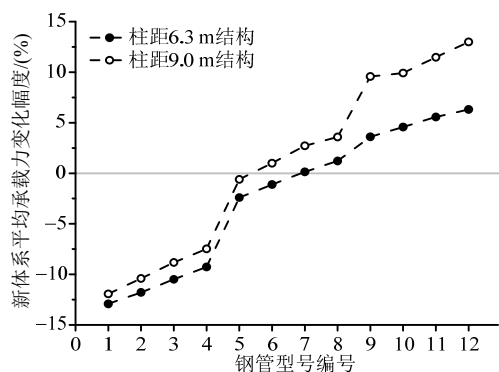


图6 承载力变化与钢管型号的关系图

Fig.6 Relationships between change of ultimate capacity and types of shore

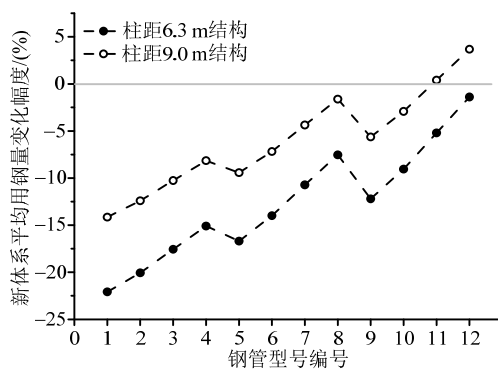


图7 用钢量与钢管型号的关系图

Fig.7 Relationship between change of steel amount and types of shore

当总承载力和总用钢量的变化幅度均在 $\pm 5\%$ 以内时,忽略幅值变化影响。由图6可知,外径为76.1 mm与88.9 mm的钢管都可以满足承载力要求,外径越大承载力增幅越大;由图7可知,当采用表1所列的任何一种钢管时,新体系的用钢量比现有体系的用钢量均有一定幅度的减少,在经济性上有一定优势;从图6和图7可知,立杆外径比壁厚对总承载力的影响更为显著,在相同的外径下,壁厚最薄的⑤号和⑨号立杆(壁厚3.6 mm)更具

优势。

采用⑤号立杆,柱距6.3 m的体系在达到极限承载力时立杆的位移荷载曲线如图8所示。从图8可以看出,当单一功能子体系立杆的荷载-位移曲线出现下降段时,双功能子体系立杆的荷载-位移曲线还处于上升阶段。由此可知,当完整体系达到极限承载力时,单一功能子体系会先发生破坏,而双功能子体系还有继续承载的能力。当柱距为9.0 m时,也可得出相同的结论。

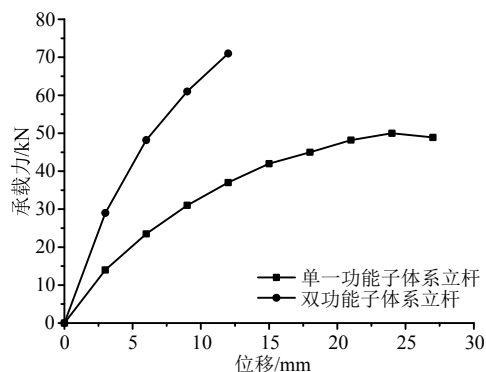


图8 立杆的荷载-位移曲线

Fig.8 Curves of load-displacement of shores

采用⑨号立杆时,上述现象更为明显。因此,推荐采用⑤号和⑨号立杆。

2) 第二阶段

当单一功能子体系失效的条件下,由双功能子体系独自发挥作用。在第二阶段,计算了采用⑤号和⑨号立杆的双功能子体系的承载力,相对第一阶段承载力的变化率如表2所示。

表2 第二阶段体系承载力的相对变化值

Table 2 Relative change of ultimate capacity in second stage

搭设参数			总承载力变化幅度/(%)	
立杆型号	h/m	a/m	柱距 6.3 m 结构	柱距 9.0 m 结构
⑤	0.9	0.3	-17.53	-42.72
		0.5	-3.92	-35.81
	1.2	0.3	-11.70	-39.82
		0.5	2.71	-35.51
⑨	0.9	0.3	-3.12	-37.34
		0.5	15.11	-26.75
	1.2	0.3	1.35	-36.64
		0.5	21.55	-30.69

从表2可以看出,当柱距为6.3 m且采用⑤号立杆时,双功能子体系的承载力相对第一阶段有所降低,最大幅度为17.5%;当柱距为6.3 m且采用⑨号立杆时,除搭设高度最低的体系外,其他双功能子体系的承载力相对第一阶段有所增加,最大幅度为21.5%。当柱距为9.0 m时,无论采用⑤号立杆

还是⑨号立杆,双功能子体系的承载力相对第一阶段均有所降低,其中搭设高度最低体系的降幅最大,为42.7%,其他高度体系的降幅在40%以内。

模板支撑体系最危险工作时期为混凝土浇筑期,在这一时段内,第一阶段总荷载设计值中活荷载标准值所占比例较高。根据文献[7]的估算,在目标可靠指标大幅度降低的第二阶段,总荷载设计值相对第一阶段的降幅在35%以上,采用⑤号立杆和⑨号立杆的体系基本上可以同时满足第一阶段和第二阶段的目标可靠指标。考虑经济性,本文认为⑤号立杆($\Phi 76.1 \times 3.6$)为更为合理的立杆型号。

4 结论

本文提出了一种型高大模板支撑体系,该体系由双功能子体系和单一功能子体系组成,具有防连续倒塌的功能。经过对该体系两阶段设计中遇到的主要问题进行研究,得出以下结论:

(1) 在第一阶段设计中,将其考虑成安全等级为三级的脆性破坏,目标可靠指标取3.2;建议第二阶段的设计目标可靠指标取为1.65,对应失效概率为5%;

(2) 有限元分析结果表明最合理构造措施为同时设置竖向剪刀撑和水平约束;

(3) 推荐单一功能子体系的立杆采用 $\Phi 48.3 \times 3.6$ 的钢管,双功能子体系的立杆采用 $\Phi 76.1 \times 3.6$ 的钢管,其他杆件采用 $\Phi 48.3 \times 3.6$ 的钢管,这样搭设的结构体系在承载能力和用钢量两方面都具有优越性,当达到极限承载力时,单一功能子体系会先发生破坏,双功能子体系还有继续承载的能力,基本可以满足目标可靠指标的要求。

参考文献:

- [1] Zhang H, Chandrangs T, Rasmussen K J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. *Structural Safety*, 2010, 32(6): 393—401.
- [2] Liu Hongbo, Zhao Qihong, Wang Xiaodun, et al. Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(4): 1003—1015.
- [3] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 刘鑫, 陈天民. 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.
- [4] 谢楠. 高大模板支撑体系的安全控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 29—76.
- [5] Xie Nan. Safety control of high falsework system [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 29—76. (in Chinese)
- [6] 姜旭, 张其林, 顾明剑, 等. 新型插盘式脚手架的试验和数值模型研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(7): 55—60.
- [7] Jiang Xu, Zhang Qilin, Gu Mingjian, et al. Study of experiment and numerical model on a new disk-type steel scaffold [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(7): 55—60. (in Chinese)
- [8] JGJ130-2011, 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] JGJ130-2011, Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 安宇骢. 防连续倒塌型高大模板支撑体系的理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [11] An Yucong. Research on high falsework system to resist progressive collapse [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [12] GB50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] GB50009-2012, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [14] ASCE/SEI 7-10, Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2005.
- [15] 陈俊岭, 马人乐. 结构二次防御能力分析的荷载效应组合方法[J]. *结构工程师*, 2005, 21(6): 12—16.
- [16] Chen Junling, Ma Renle. Method of load effect combination for analyzing the alternative defensive ability of structures [J]. *Structural Engineers*, 2005, 21(6): 12—16. (in Chinese)
- [17] 李继华, 林忠民, 李明顺, 马坤贞, 等. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 353—354.
- [18] Li Jihua, Lin Zhongmin, Li Mingshun, Ma Kunzhen, et al. Probabilistic limit states design of building structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990: 353—354. (in Chinese)