

文章编号:1671-6833(2021)04-0098-07

考虑风险因素耦合的超高层施工预警方法研究

沈 阳¹, 徐 磊¹, 郑冠雨², 章 超¹, 匡志平³

(1.上海建工一建集团有限公司,上海 200120; 2.上海建工七建集团有限公司,上海 200050; 3.同济大学土木工程学院,上海 200082)

摘 要: 针对超高层建筑施工过程中的施工风险预警问题,按一般状态与极限状态对系统的失效可能性进行研究,以整体钢平台装备的承力构件为关键风险环节,提出一种超高层建筑施工风险预警指标体系与方法。首先,基于风险因素耦合的事故演变路径分析和失效模式分析,结合施工现场监测条件,提出风险预警指标体系的核心指标;然后,提出一种包括人员指标、环境指标、装备指标和熔断指标在内的施工风险预警指标体系,以及各指标的分级确定准则,采用指标折减的方法分析多因素耦合对预警指标的影响,建立风险预警方法;最后,选择超高层实际工程案例进行验证。结果表明:将人员、环境风险因素的耦合影响考虑为对装备指标的折减,可以作为项目风险状态判定的有效依据,建立适用于超高层建筑施工的风险预警方法。该方法充分考虑风险因素的耦合影响,通过有限元模型计算获得指标预警值与折减系数参考表,具有可行性。

关键词: 超高层建筑; 施工风险; 整体钢平台模架装备; 耦合影响

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.04.020

0 引言

近年来,中国超高层建筑建造技术取得了长足发展,成功建造了金茂大厦、环球金融中心、上海中心、白玉兰广场等著名超高层项目^[1-2],这些项目普遍采用了整体钢平台模架装备体系(简称整体钢平台)施工技术^[3]。超高层建筑建造工序复杂,多种风险因素耦合,如果不采取有效风险预警措施,一旦发生人员伤亡、装备损坏、构件倒塌、高空坠物等事故,不仅会造成严重的生命、财产损失,还会造成恶劣的社会影响。因此,有必要考虑风险因素耦合作用的影响,开展超高层建筑施工预警方法研究。

针对诱发施工安全事故的风险因素,路彬等^[4]、张伟等^[5]、李宗坤等^[6]、周红波等^[7-8]分别采用 AHP 层次分析、至因理论、WBS-RBS、复杂网络分析等方法,分析风险因素及各因素之间的关联性,并对风险因素的耦合效应进行量化评估;何光辉等^[9]定量描述了施工风险因素对施工人员

的影响,提出施工人员安全状态的评估方法。针对超高层建筑的施工环境风险,Yue 等^[10]通过风洞试验研究了整体钢平台承受的风力荷载作用;范峰等^[11]、左自波等^[12]、Li 等^[13]围绕整体钢平台装备施工全过程安全监控展开研究,采用案例归纳法,提出装备安全监控参数及部分预警指标。现有研究一般采用最极端指标作为风险预警依据,并未考虑复杂风险因素的耦合作用,且超高层建筑施工的预警方法研究较少,亦缺少结合施工现场监测条件的预警指标确定方法。

鉴于此,笔者拟以超高层建筑核心筒结构施工区域为研究载体,综合考虑风险因素耦合作用关系和现场风险监测技术条件,建立考虑风险因素耦合的施工风险预警方法,实现对重大施工风险的实时预警。形成的预警方法可通过变换风险因素等手段,应用于超高层建筑除核心筒结构施工以外的其他方面及一般建筑工程,为施工风险管理提供理论支撑和有效技术手段。

收稿日期:2021-03-06;修订日期:2021-05-13
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805500);上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1417800);上海建工集团股份有限公司重点科研项目(20JCSF-06)
作者简介:沈阳(1990—),男,江苏宝应人,上海建工一建集团有限公司工程师,博士,主要从事施工技术研究, E-mail: swiftrings@126.com。
通信作者:郑冠雨(1989—),男,山西孝义人,上海建工七建集团有限公司工程师,博士,主要从事施工技术研究, E-mail: 191416714@qq.com。

1 超高层建筑施工风险因素

1.1 整体钢平台模架装备

整体钢平台按结构支撑形式可划分为内筒外架式、临时钢柱式、劲性钢柱式、钢梁筒架式、钢柱筒架式 5 种^[3],其中钢柱筒架式整体钢平台是目前超高层建筑施工中应用较广的装备类型。如图 1 所示。钢柱筒架式整体钢平台采用顶部提升式的轻量化装备结构,具有整体性好、封闭性强、承载力大等特点,其应用情况如图 1(a) 所示。



(a) 装备应用情况



(b) 提升钢柱及液压提升机构

图 1 钢柱筒架式整体钢平台装备

Figure 1 Integrated scaffolding and formwork with steel platform utilizing steel lifting columns

钢柱筒架式整体钢平台主要由顶部钢平台系统、吊脚手架系统、筒架支撑系统、钢柱爬升系统、模板系统组成^[3],其中钢柱爬升系统位于装备顶部,提升钢柱底端固定在核心筒顶端。在装备爬升阶段,采用如图 1(b) 所示的液压提升机构带动整体钢平台装备向上运动,可以在较短时间内实现一个标准层高度的提升。

1.2 超高层建筑施工人-机-环系统

分析超高层建筑施工现场的风险因素,施工过程中涉及的装备主要为大型塔吊机械和整体钢平台等,涉及的人员主要为位于整体钢平台上的

施工人员和位于其他位置的施工人员等,涉及的环境因素包括大风、雨雪、地震、撞击等,这些风险因素既可以作为施工事故的致灾主体,也可以作为致灾客体。从宏观角度看,人员、装备、环境 3 类因素之间存在如图 2 所示的相互影响关系,共同构成超高层建筑施工人-机-环系统。

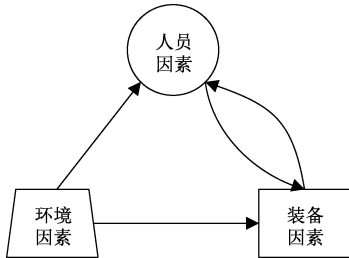


图 2 人员、装备、环境因素的互相影响关系

Figure 2 Interaction relationship of human, equipment and environment risk factors

1.3 超高层建筑施工事故的关键环节

从事故结果的角度看,在超高层建筑施工过程中可能发生施工人员伤亡、装备损伤及破坏两类事故,即人员因素或装备因素可作为失效路径的终点;从事故原因的角度看,导致事故发生的因素可能是人员、装备或环境因素,即人员、装备、环境因素可作为失效路径的起点;从导致事故发生过程的角度看,存在 2 种单因素耦合(人员→人员、装备→装备)作用下的失效演变路径,同时存在 4 种双因素耦合(环境→人员、环境→装备、装备→人员、人员→装备)作用下的失效演变路径,以及 2 种三因素耦合(环境→人员→装备、环境→装备→人员)作用下的失效演变路径。然而,由于图 2 描述的风险因素类型之间的相互关系不足以反映超高层建筑施工人-机-环系统的复杂性特征,且细分风险因素数量众多、关系复杂,因此,需要开展基于考虑底层风险因素耦合作用的网络节点分析。

在现有技术条件下,人员风险因素主要通过管理手段进行干预控制,环境类型风险因素只能观察而无法干预,而装备类型的风险因素可以通过智能监测手段实时自动监测,并可通过自动化手段进行控制,在事故预警和安全控制过程中是最可控的关键环节。因此,对超高层建筑施工人-机-环系统事故演变路径的分析应以装备类型风险因素为决定性因素,并以反映装备结构安全性状物理量为施工安全风险预警的核心指标。

2 考虑风险因素耦合的失效模式

根据 JGJ 459—2019《整体爬升钢平台模架技

术标准》^[14]及文献[3],在核心筒剪力墙结构施工中,整体钢平台包括安装、爬升、工作、拆除4个阶段。如图3(b)所示,在工作阶段,整体钢平台处于静止状态,装备结构支撑形式稳定,人-机-环系统在此状态下面临的安全风险相对较小。如图3(c)所示,在爬升阶段,整体钢平台处于运动状态,完全由提升钢柱提供支撑,人-机-环系统在此状态下面临较大的安全风险。

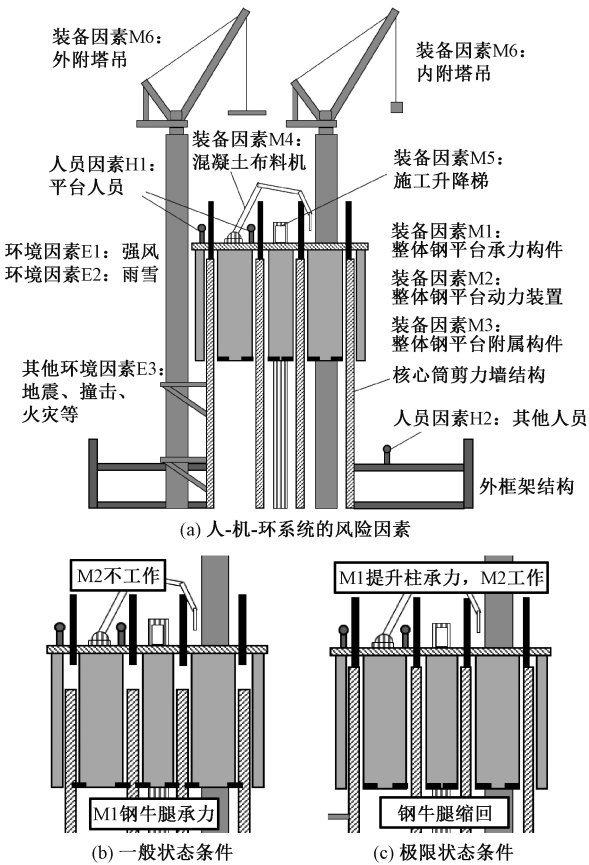


图3 人-机-环系统的风险因素
Figure 3 Risk factors of the human, machine, environment system

将整体钢平台的失效可能性分为一般状态下的失效模式与极限状态下的失效模式。一般状态主要对应工作阶段,一般状态下整体钢平台装备结构完整、处于正常施工荷载和自然环境条件下。极限状态则主要对应爬升阶段,在此状态下整体钢平台装备结构存在失稳隐患,可能处于超标荷载和极端自然环境条件下。

2.1 一般状态条件下的失效模式

在超高层建筑施工过程中涉及的机械装备除了整体钢平台,还包括塔吊、施工升降梯、混凝土布料机等。如图3(a)所示,将超高层建筑施工现场的人员、装备、环境风险因素进一步划分:人员因素可分为钢平台人员 H1、其他人员 H2;装备因

素可分为整体钢平台承力构件 M1、整体钢平台动力装置 M2、整体钢平台附属构件 M3、混凝土布料机 M4、施工升降梯 M5、塔吊等其他装备 M6;环境因素可分为强风 E1、雨雪 E2、其他环境因素 E3 (地震、撞击、火灾等)。

在一般状态条件下整体钢平台承力构件 M1 包括钢平台系统、简架支撑系统、钢柱爬升系统, M1 的简架底部钢牛腿承力;整体钢平台动力装置 M2 包括提升机构和液压泵站, M2 在一般状态条件下不工作;整体钢平台附属构件 M3 包括吊脚手系统、模板系统、安全防护装置等。

图4为超高层建筑施工重大风险的有向无权失效演变路径网络,其中实线表示一般状态条件下的失效路径, E1~E3 一般作为路径起点, H1、H2、M2~M6 多作为路径终点, M1 始终作为事故演变路径的中枢节点。

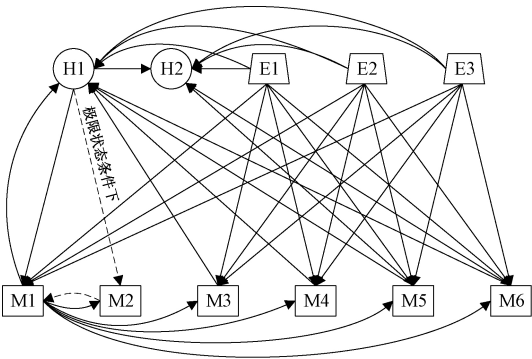


图4 施工风险失效路径网络
Figure 4 Failure evolution path network of construction risk

2.2 极限状态条件下的失效模式

在极限状态条件下, M1 提升柱搁置于剪力墙顶端,整个装备的荷载通过提升柱传递给剪力墙结构,此时 M2 参加工作。极限状态条件下超高层建筑施工重大风险的失效演变路径网络与一般状态条件下类似,图4中虚线标出了极限状态条件的区别失效路径,除 M1 始终作为路径的中枢环节外, M2 也作为重要中间节点出现。

3 施工风险预警指标体系

基于一般状态条件下和极限状态条件下的失效路径分析,简单归纳可发现整体钢平台装备的承力构件 M1 在超高层建筑施工现场起决定性作用,故应选取可以反映承力构件 M1 安全状态的物理量指标作为反映超高层建筑施工安全状态的特征参数及进行风险预警的核心指标。考虑可行性,将整体钢平台的构件变形和受力状态确定为

风险特征参数,并以此为核心建立超高层建筑施工风险预警指标体系和预警方法。

3.1 预警指标分级

超高层建筑施工安全风险采用 4 级定性分级方法:低风险、中风险、高风险、极高风险。对应于 4 级风险设置 4 级预警值:一级预警值、二级预警值、三级预警值、四级预警值。施工事故从绝对安全至事故发生的演变过程可抽象为如图 5 所示的风险累积曲线。其中纵坐标反映了风险累积的程度,随着施工风险的不断累积,施工风险度量值增大,依次突破一级、二级、三级、四级预警值,并相应地触发蓝色、黄色、橙色和红色预警。当某一级预警发布后,如果不进行有效的安全控制,施工风险则会继续累积,直至触发下一级的预警,红色预警发布后,如果不及时采取安全控制措施,最终将会导致事故的发生。

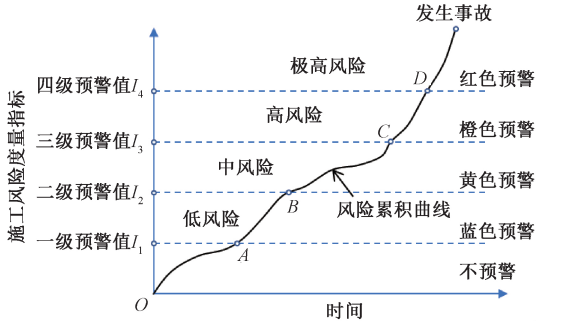


图 5 4 级预警流程示意图

Figure 5 Schematic diagram of four-level early-warning process

3.2 风险预警指标体系

风险预警指标体系的建立依赖于在超高层建筑施工过程中可获取的监测指标。

对于人员风险因素,基于现有技术条件仅可由管理人员采用观察判断或打分等手段定性地获得一些指标,如施工人员素质、人员健康状态等情况。采用单一的人员风险度量指标 R_h 作为人员预警指标,由项目管理人员根据分级准则直接给出红、橙、黄、蓝的判定值。

对于环境风险因素,可获取的指标主要是施工现场监测的风速、温度、雨雪状态等。采用单一的环境风险度量指标 R_e 作为环境预警指标,由项目管理人员根据实测的风速、温度等基于分级准则直接给出红、橙、黄、蓝的判定值。设置环境熔断指标 F_e ,针对突发自然灾害如果发生则直接触发红色预警,采用布尔变量(0/1)表征。

对于装备风险因素,采用自动化监测技术可获得较多指标,表 1 中列出了整体钢平台上的监

测指标及采用的传感器类型。由表 1 可知,整体钢平台装备的监测指标包括变形、受力和运行状态指标。装备运行状态是一票否决式的熔断指标,需设置装备熔断指标 F_m ,如果动力装置存在异常,则直接触发红色预警。由此,建立包含 6 个指标在内的超高层建筑施工预警指标体系,见表 2。

表 1 整体钢平台监测指标及传感器类型

Table 1 Monitoring indexes and sensor selection of integrated steel platform			
监测对象	监测指标	传感器类型	指标类型
钢平台水平度	水平倾角	光纤光栅静力水准仪	变形
筒架应力	应力	光纤光栅应变计	受力
钢平台应力	应力	光纤光栅应变计	受力
爬升钢柱垂直度	竖直倾角	无线倾角传感器	变形
筒架柱垂直度	竖直倾角	光纤光栅倾角计	变形
牛腿压力	压力	压力传感器	受力
牛腿行程	位移	磁致式位移传感器	运行状态
牛腿伸缩状态	伸出/ 缩回状态	监控摄像头	运行状态
液压油缸位移	位移	拉线式位移传感器	运行状态
液压油缸负载	压力	压力传感器	受力

表 2 施工风险预警指标体系

Table 2 Early-warning index system of construction risk		
预警指标	符号	预警区间
人员指标	R_h	红/橙/黄/蓝/不预警
一般环境指标	R_e	红/橙/黄/蓝/不预警
环境熔断指标	F_e	红/不预警
装备变形指标	δ	监测值/mm
装备受力指标	σ	监测值/kPa
装备熔断指标	F_m	红/不预警

4 施工风险预警方法

4.1 人员、环境指标分级准则

人员指标 R_h 的 4 级预警值由项目现场管理人员基于对施工现场所有人员专业素质和身心状态的了解及观察,结合项目管理经验,并根据表 3 中提供的定性评判准则对项目现场的所有人员进行统一打分,直接给出定性判定结果。

表 3 人员状态定性评判准则

Table 3 Qualitative evaluation criteria for personnel status				
评判项目	人员状态定性评判准则			
	优秀	良好	一般	差
职业培训	专业	部分专业	一般	不专业
身体状况	极好	较好, 不影响工作	存在问题, 影响工作	差,不适于 工作
心理状态	极佳	较好, 不影响工作	存在问题, 影响工作	差,不适于 工作
专业能力	极好	良好	一般	不专业
安全意识	极高	重视	了解	无

一般环境指标 R_e 的 4 级预警值应遵循《超高层建筑施工安全风险评估与控制标准》^[15] 的规定,指标分级准则见表 4。取现场监测的风速、温度等指标落入的最恶劣预警区间作为环境风险预警指标值:

$$R_e = \max \{ R_{e, \text{风速}}, R_{e, \text{高温}}, R_{e, \text{低温}} \}。 \quad (1)$$

其中,指标的比较规则为:红>橙>黄>蓝>不预警。

表 4 环境风险指标 4 级预警值划分准则

监测内容	指标预警值			
	蓝	黄	橙	红
风速/级	6	8	10	12
高温/℃		35	37	40
低温/℃	5	0	-5	-15

环境熔断指标 F_e 无须分级,由项目管理人员根据实际情况直接给出取值。

4.2 装备预警指标分级准则

装备变形指标 δ 、受力指标 σ 的 4 级预警值需通过装备结构有限元分析获得。

(1)根据设计强度确定蓝色预警值 $\{\delta_1, \sigma_1\}$ 。未达蓝色预警时,装备结构上任意构件任意位置的应力均未超过材料设计强度,应满足式(2)的强度及稳定条件,可得到变形指标和受力指标的确定准则。

$$\{\delta_1, \sigma_1\} = f \left(\sigma \leq \sigma_d, K = \frac{R}{S} \geq [K] \right)。 \quad (2)$$

式中: σ 为装备结构实际承受的最大内力; σ_d 为设计强度; R 为工作抗力; S 为不同荷载作用; K 为实际稳定安全系数; $[K]$ 为设计容许安全系数。

(2)根据弹性极限强度确定黄色预警值 $\{\delta_2, \sigma_2\}$ 。处于已达蓝色预警且未达黄色预警状态时,装备结构部分构件的最大应力达到或超过材料弹性比例极限,少数构件处于轻微的塑性变形状态,应满足式(3)的强度及稳定条件,可得到指标确定准则。

$$\{\delta_2, \sigma_2\} = f \left(\sigma \leq \sigma_e, K = \frac{R}{S} \geq K_e \right)。 \quad (3)$$

式中: σ_e 为整体钢平台结构的材料弹性极限强度; K_e 为弹性极限状态的容许安全系数。

(3)根据塑性极限强度确定橙色预警值 $\{\delta_3, \sigma_3\}$ 。当处于已达黄色预警且未达橙色预警状态时,装备结构上部分构件发生屈服并出现一定程度的塑性变形,部分构件可能出现轻微裂缝或损伤,应力应变关系呈现非线性特性。取构件最大

塑性应变与塑性极限应变的比值 k_b 作为控制量,应满足式(4)的强度及稳定条件,可得到指标确定准则。

$$\{\delta_3, \sigma_3\} = f(\sigma \leq \sigma_b, \max(k_b) \leq 1, R \geq S)。 \quad (4)$$

式中: σ_b 为整体钢平台结构的材料塑性极限强度。

(4)根据有限元计算获得红色预警值。当处于已达橙色预警状态时,装备结构的变形从构件的塑性变形发展为装备结构的几何非线性变形,整体变形量急剧增大,呈现大变形状态,当荷载增加至破坏极限时,丧失承载力,结构发生失稳破坏。需根据装备承力构件的结构形式,基于导致装备整体失稳的最不利结构形式,通过相应的有限元模型计算获得这一级的变形、受力预警值。

装备熔断指标 F_m 的取值由装备机械动力控制系统自动获得。

4.3 考虑风险因素耦合的指标折减方法

采用对装备定量指标取值进行折减的方法,考虑人员、环境风险因素耦合对整体钢平台装备结构的影响,将人员、环境风险因素归一为折减系数 k ,对装备变形和受力指标预警值进行折减。折减后的整体钢平台装备 4 级变形和受力指标预警表达式为

$$\begin{cases} \delta'_n = \delta_n \cdot k; \\ \sigma'_n = \sigma_n \cdot k。 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n=1,2,3,4$ 表示 4 级预警值。

折减系数 k 的取值通过装备结构有限元分析获得,将不同等级的人员因素和环境因素换算为不同的荷载及边界条件,通过对比不同条件下的计算结果确定折减系数的取值表。将获得的装备变形、受力指标监测值与折减后的预警值进行对比,可获得反映装备整体风险状况的装备指标 R_m 的取值,根据式(6)可获得最终的系统预警指标 R 的取值,以此为预警发布的依据。

$$R = \max \{ R_h, R_m, F_m, R_e, F_e \}。 \quad (6)$$

采用预警指标折减的方法体现多因素耦合对预警指标的影响,风险预警方法流程如图 6 所示。在风险预警过程中采用时间步的形式进行循环,时间步长根据项目情况设定。

5 案例分析

上海市浦东新区张江科学之门东塔超高层项目地上 60 层,建筑高度 320 m。

5.1 整体钢平台装备的极限状态

该项目核心筒南侧剪力墙在第 45~49 层向

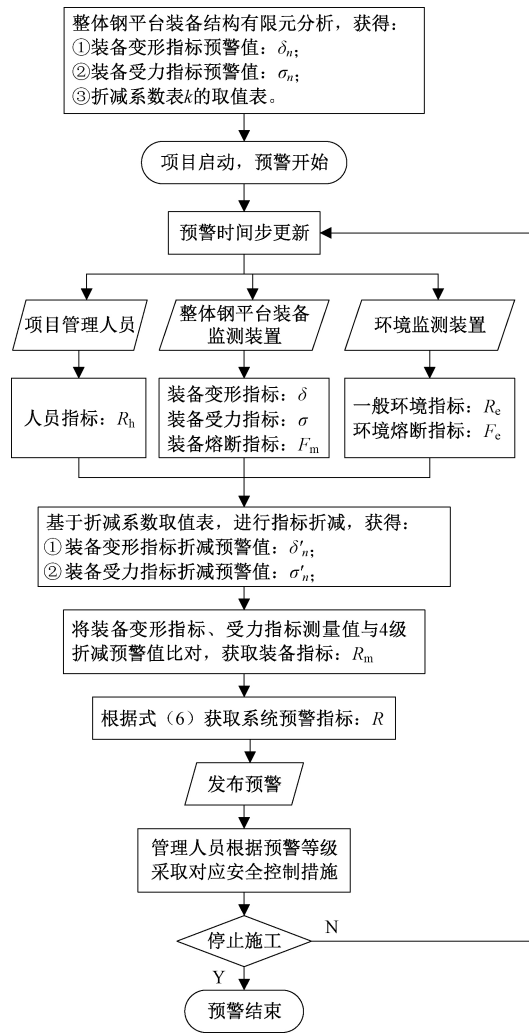


图 6 采用指标折减的施工风险预警方法

Figure 6 Early-warning method with index reduction for construction risk

内侧倾斜,共向内收分约 2.8 m,如图 7 所示。在第 49 层施工完成后,钢平台系统外伸形成 5.75 m 的悬挑段,斜墙段结束后进行动态提升的状态是整体钢平台装备的极限状态。针对极限状态条件下的装备结构特性,建立有限元模型进行分析。

5.2 装备结构变形指标预警值

建立装备结构有限元模型,分析变形与受力状态,在设计恒载、活载组合(共 5 697.3 kN)作用下,最大变形发生在顶部北侧角部,约为 4.59 mm,如图 8 (a) 所示,结构最大应力为 55.94 MPa,如图 8(b) 所示。上述装备变形、受力计算值不能直接取为指标预警值。

由于缺少对装备结构中约束构件的实测信息,本案例仅需确定装备变形预警指标的取值,计算获得装备变形指标预警值: $\delta_1 = 7.5 \text{ mm}$, $\delta_2 = 15.8 \text{ mm}$, $\delta_3 = 36.9 \text{ mm}$, $\delta_4 = 102.3 \text{ mm}$ 。

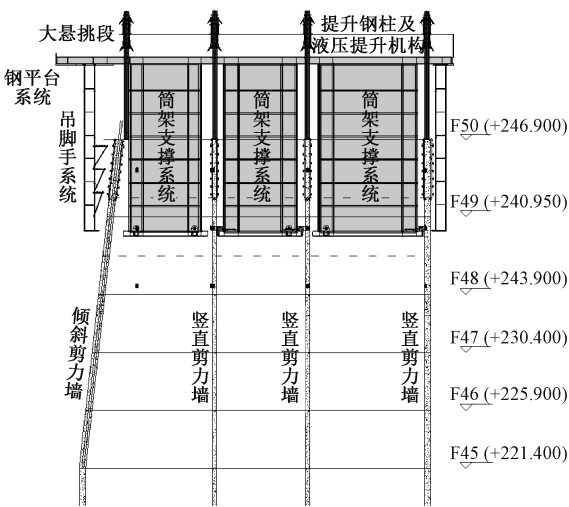


图 7 整体钢平台装备的极限状态 (m)

Figure 7 Limit state of integrated scaffolding and formwork equipment with steel platform (m)

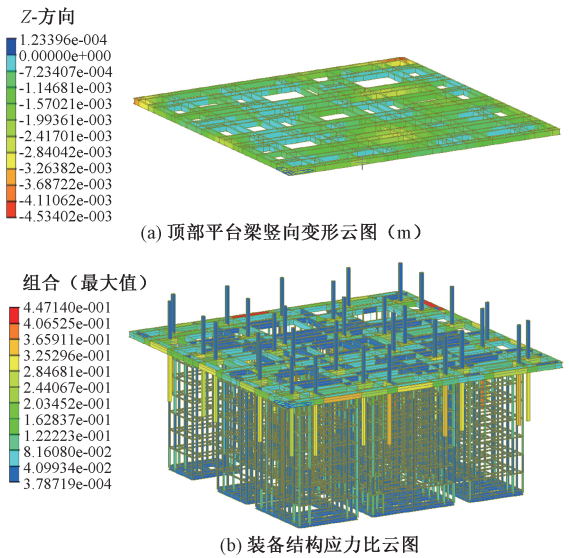


图 8 整体钢平台装备结构分析结果

Figure 8 Structural analysis results of integrated steel platform equipment

5.3 考虑耦合的预警指标折减系数

简化人员因素、环境因素的耦合影响,分别按 4 级人员因素导致的附加荷载 (2、3、4、5 kPa) 和 4 级风力荷载 (0.5、0.83、1.25、2.08 kPa) 考虑,对处于红色预警临界状态下的整体钢平台装备结构模型进行分析。

图 9 为不同组合作用下的装备最大变形量,取变形指标预警值 δ_4 与计算变形量的比值为折减系数 k ,获得考虑耦合的预警指标折减系数,如表 5 所示。

5.4 施工风险预警方法

由图 6 可知,施工风险预警方法:①在每个预警时间步中,人员指标 R_h 、环境指标 R_e 均为定性

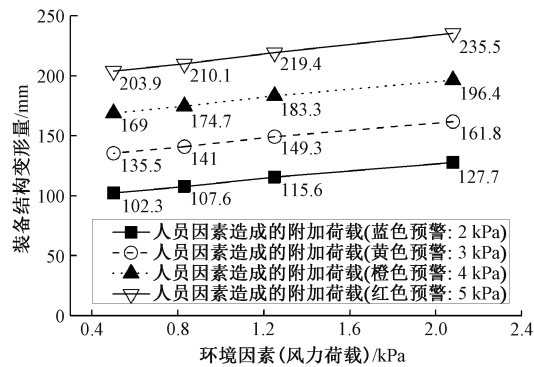


图9 不同人员、风力荷载组合下装备最大变形量

Figure 9 Maximum deformation of equipment under different combinations of human-caused and wind loads

表5 预警指标折减系数

Table 5 Reduction coefficient of early-warning index

指标	k			
	R_e 为蓝	R_e 为黄	R_e 为橙	R_e 为红
R_h 为红	0.502	0.487	0.466	0.434
R_h 为橙	0.605	0.586	0.558	0.521
R_h 为黄	0.755	0.726	0.685	0.632
R_h 为蓝	1.000	0.951	0.885	0.801

获得;②对照表5获得装备变形指标4级预警值的折减值,根据装备变形监测值判定装备指标 R_m 的取值,获得装备指标取值;③根据式(6)获得整个超高层建筑施工人-机-环系统预警指标 R 的取值,并确定项目预警状态;④管理人员制定相应的安全控制措施;⑤预警时间步结束后,开展下一个预警时间步循环。

6 结论

- (1)整体钢平台的承力构件是关键风险环节,整体钢平台的构件变形和受力状态是风险预警指标体系的重要参数。
- (2)建立了包括人员、环境、装备和熔断指标在内的施工风险预警指标体系,提出各指标的分级确定准则。折减系数 k 为装备风险状态的判定依据。
- (3)建立了施工风险预警流程,获得一种施工风险预警方法。通过变换风险因素等手段,将预警方法应用于除核心筒结构施工以外的其他施工风险预警中,该方法具有可行性。

参考文献:

[1] YU-TING E, ZHOU L. The research on the current safety status of high-rise building at home and abroad [J]. Procedia engineering, 2016, 135: 574-577.

[2] 龚剑,房震宸,夏巨伟.我国超高建筑工程施工关键技术发展[J].施工技术,2018,47(6):19-25.

[3] 龚剑.超高结构建造整体钢平台模架装备技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[4] 陆彬,袁金虎,任治兵.基于AHP的超高层建筑施工易发安全事故风险因素研究[J].建筑安全,2020,35(9):59-62.

[5] 张伟,朱双娜,张潇,等.建筑施工安全事故致因系统模型与实证分析[J].中国安全科学学报,2019,29(6):56-62.

[6] 李宗坤,王特,葛巍,等.基于WBS-RBS和AHP的港珠澳大桥人工岛建设风险分析[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(3):62-66.

[7] 周红波,杨奇,杨振国,等.基于复杂网络和N-K模型的塔吊安全风险因素分析与控制[J].安全与环境学报,2020,20(3):816-823.

[8] 周红波,孟柯,黄明耀.基于修正系数法的大型建筑工程施工风险耦合效应研究[J].建筑技术,2014,45(9):829-832.

[9] 何光辉,李鑫奎,沈志勇.考虑多风险源耦合作用的建筑工程施工人员安全状态评价[J].建筑施工,2020,42(1):125-127.

[10] YUE F, YUAN Y, LI G Q, et al. Wind load on integral-lift scaffolds for tall building construction [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(5): 816-824.

[11] 范峰,王化杰,金晓飞,等.超高层施工监测系统的研发与应用[J].建筑结构学报,2011,32(7):50-59.

[12] 左自波,潘曦,黄玉林,等.超高层 ICCP 安全监测与控制的预警指标研究[J].中国安全科学学报,2020,30(1):53-60.

[13] LI Q S, LI X, HE Y C. Monitoring wind characteristics and structural performance of a supertall building during a landfall typhoon [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(11): 04016097.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.整体爬升钢平台模架技术标准:JGJ 459—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[15] 中国工程建设标准化协会.超高层建筑施工安全风险评估与控制标准:T/CECS 671—2020[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.

国国家质量监督检验检疫总局.公共建筑节能设计
标准:GB 50189—2015[S].北京:中国建筑工业出
版社,2015.

[17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.
房间空气调节器能效限定值及能效等级:GB
21455—2019[S].北京:中国标准出版社,2020.

Study on Preparation of Shaped Phase Change Sheet and Thermal Performance of
Phase Change Wall

LIU Ruili, GAO Qiongmin, MA Jing, WANG Wei

(School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Shape stabilized phase change materials board (PCMB) with high performance was prepared. Based on the tested thermal physical parameters of PCMB, phase change wall model was set up. Simulation analysis on the wall heat transfer characteristics in summer in Zhengzhou region was conducted by ANSYS software. Variation of indoor wall temperature and heat load in PCMB were compared with those of traditional wall. The wall thermal resistance, heat storage coefficient, thermal inertia index were analyzed. The results showed that the phase-change plate could significantly improve the thermal insulation performance of the wall, reduce the fluctuation of indoor temperature. Besides, the energy consumption analysis showed that the wall could save electricity for air conditioning.

Key words: shape stabilized phase change materials board; prefabricated energy storage wall; thermal performance; building energy saving

(上接第 104 页)

Research on Early-warning Method for Super High-rise Building Construction
Considering Coupling Effect of Risk Factors

SHEN Yang¹, XU Lei¹, ZHENG Guanyu², ZHANG Chao¹, KUANG Zhiping³

(1.Shanghai Construction No. 1 Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2.Shanghai Construction No. 7 Group Co., Ltd., Shanghai 200050, China; 3.Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China)

Abstract: This paper focused on the early construction risk warning issue in the construction of super high-rise building, the potential failure of the system was studied according to the general state and radical state. Taking the load-bearing components of integral steel platform equipment as the key risk link, a construction risk early warning index system and method for super high-rise building were proposed. Firstly, based on the analysis of accident evolution path and failure mode considering the coupling effect of risk factors, the core indexes were proposed, combined with the monitoring conditions. Then, the early-warning index system including human, environment, equipment and fuse indexes, as well as the classification and determination criteria, are proposed. The way of reducing index was adopt to reflect the impact of multi-factor coupling effects, and applicable early-warning method was established. Finally, a project was chosen to carry out case analysis. The results showed that the method of considering the coupling effects of human and environment risk factors as a reduction of the equipment indexes could be used as effective basis for judging the risk status of the project, to establish a risk early-warning method suitable for the construction of super high-rise buildings. This method fully considered the coupling effects of risk factors, and obtained values of early-warning indexes and reduction coefficient table through finite element model calculations. It was feasible.

Key words: super high-rise building; construction risk; integrated scaffolding and formwork equipment with steel platform; coupling effect