

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.029

美国 ASCE 施工设计荷载规范的理念与启示

周 威^{1,2}, 胡亚辉^{1,2}

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2.结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨)

摘要: 为对施工阶段的未完整结构进行设计和分析, 保证施工安全, 应明确施工过程中结构可能受到的各类外部作用(荷载)及其效应。通过介绍美国 ASCE 施工设计荷载规范在施工阶段的荷载种类、设计值及荷载组合等内容, 着重分析了其施工荷载及荷载系数的取用方法, 施工荷载与恒载、活载、环境荷载及侧向土压力组合方法等, 对比分析了中国现行标准的相关内容。建议应吸收 ASCE 施工规范理念, 充分考察施工阶段荷载的不确定性, 引入施工荷载取值、荷载分项系数建议值, 编制自成体系的中国施工荷载标准。

关键词: ASCE; 施工设计荷载规范; 施工荷载; 荷载系数; 环境荷载

中图分类号: TU711

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0185-04

The understanding of SEI/ASCE37-02: design loads on structures during construction

ZHOU Wei^{1,2}, HU Yahui^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2.Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control(Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, 150090 Harbin, China)

Abstract: To design and analyze the incomplete structure during construction and ensure construction safety, it is necessary to clarify all kinds of external actions (loads) and their effects during construction. This paper presented the load types, design values of the loads and load combinations in the Design Loads on Structures During Construction in the construction stage, and emphatically focused on the determining procedure of construction loads and load factor, the combination method of construction load and dead load, live load, environmental load and lateral earth pressure, then compared them with Chinese current standards. It is proposed to compile the codes for construction loads in China systematically using the concept of ASCE construction specification, investigating the uncertainty of load in the construction stage, and introducing the proposed values of construction load and load factors.

Keywords: ASCE; design loads on structures during construction; construction loads; load factors; environmental loads

结构服役期内所承受的建筑荷载及其作用效应的确定是建筑结构设计和分析的重要前提, 以往国内外对建筑结构使用阶段的荷载十分重视, 其取值及荷载组合等在相关规范中具有明确规定。由于建筑结构的施工阶段是结构混凝土强度由无到有发展的过程, 也是整体结构逐步形成与完善的过程, 而且施工阶段还存在着施工结构与支撑体系的相互作用, 相比施工完成后形成整体的建筑结构, 施工阶段

结构受力更为复杂, 尤其是所承担的施工阶段荷载及其作用效应的不确定性较服役期的建筑结构更为明显^[1-4]。由于施工阶段荷载、荷载组合及其对施工结构的作用效应的不确定性和复杂性, 造成施工阶段未完成结构的安全性和风险性预测问题更为突出, 相应的设计和分析方法也还在完善和发展中^[5-8]。事实上, 发生在建筑结构施工阶段的大量工程事故, 常与施工荷载取值的不合理及其作用效应的复杂性直接相关。

美国多项规范对结构施工已有相应规定, OSHA 与 ANSI 规定了脚手架的设计要求, AASHTO 与 FHWA 对临时桥梁的荷载组合和荷载系数提供了附加指导。其中, 美国土木工程师学会(ASCE)自 2002 年即颁布了《结构施工设计荷载 ASCE37-02》^[9](简

收稿日期: 2015-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金(51108124); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.KISTP.201428); 黑龙江省应用技术研究与开发计划项目(2013G0763)。

作者简介: 周 威(1977—), 男, 副教授, 博士生导师。

通信作者: 周 威, zhouwei-hit@163.com.

称 ASCE 施工荷载规范),使结构施工阶段荷载取值与荷载组合有据可依,也为施工结构的分析与相应支撑体系、模板体系的设计提供了有效支持.中国虽在《混凝土结构工程施工规范》^[10]中对模板荷载的取用等做出了具体规定,并在《建筑结构荷载规范》^[11]相关条文中部分体现了结构施工荷载的问题,但目前中国尚未颁布专门的施工荷载规范,不利于施工结构的分析与施工设计验算的进行.为此,介绍了美国结构施工设计荷载规范 ASCE37-02 的基本构架与荷载种类、设计值及组合情况,并与中国现行标准的相关内容进行比较分析,发现了 ASCE 施工荷载规范中施工荷载的取用与服役阶段的使用荷载在理念上的相似性和独特性.为中国未来施工阶段荷载标准的制定或相关标准的修订提供参考.

1 施工阶段荷载

ASCE 施工荷载规范中结构施工阶段主要包含 5 类荷载:恒载 D 、活载 L 、侧向土压力 C_{EH} 、环境荷载和施工荷载.

在结构施工阶段,已建永久结构的自重称为恒载;施工阶段活载是在施工过程中由于结构使用而产生的荷载,与正常使用阶段的活载有所不同.

1.1 环境荷载

环境荷载包括风荷载 W 、雪荷载 S 、地震作用 E 、雨荷载 R 、冰荷载 I 、温度荷载 T .

雪荷载按 $P_s = 0.7C_e C_t C_s I_p g$ 计算, I 为结构重要性系数,雪荷载系数由反映建筑采暖情况的热力系数 C_t 、周围环境对建筑遮挡效应的遮挡系数 C_e 和屋面坡度的倾斜系数 C_s 共同决定^[9].冬季施工时应考虑雪荷载,但要根据工期长短对雪荷载进行折减.当工期为 5 a 和小于 5 a 时,雪荷载折减系数为 0.8,大于 5 a 时为 1.0.相对而言,中国荷载规范中的雪荷载计算公式为 $S_k = \mu_r S_0$,只有一个反映屋面坡度影响的积雪分布系数(相当于美国规范里的倾斜系数),难以全面反映雪荷载的影响因素,实际上雪荷载受屋面温度、地形地势、风速风向、建筑朝向等因素的影响不容忽视,需要综合考虑多方面因素才能确定雪荷载大小.

风荷载速度风压按公式 $q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2$ 计算, K_z 代表风速压力暴露系数、 K_{zt} 代表风压高度变化系数、 K_d 代表风向系数^[9].结构风荷载的计算考虑了加速风区的影响,并规定对非封闭框架内部每一构件内力计算都要考虑风荷载.考虑到施工阶段设计风速出现的可能性较按 50 a 重现期的设计风速小,根据施工工期长短将基本风速乘以 0.75~0.9 的折减系数得到施工阶段设计风速.中国《建筑结构荷

载规范》规定风荷载作用面上同一高度上风荷载大小相等,没有考虑局部风速增强的影响,对内部构件的设计也并未计入风荷载的作用.对于建筑形体不规则的建筑,将风荷载平均分布确有不合理之处,势必将导致风压加强部位考虑不足;而且结构在施工时,结构形体与完成结构存在差异,多数结构外围还并未形成封闭式结构,有必要考虑风荷载在施工阶段与使用阶段的差异性以及风荷载对内部构件的作用.

当结构施工期需要考虑地震作用时,应对地震重现期进行折减,ASCE7-95 规定的有效峰值加速度系数 A_a 和有效峰值速度系数 A_v 应乘以 0.2~1.0 之间的系数;对于临时支撑体系的反应修正系数 R 不应小于 2.5.对雨荷载、冰荷载、温度荷载等环境荷载还分别规定了相应的使用限制条件.

1.2 施工荷载

施工荷载包括施工恒载 C_D 、固定材料荷载 C_{FML} 、可变材料荷载 C_{VML} 、人员和设备荷载 C_P 、水平施工荷载 C_H 、安装和装配荷载 C_F 、设备反力 C_R 、混凝土侧压力 C_C 以及其它可能出现的施工荷载.

需要指出的是,ASCE 规范考虑到施工过程中材料自重和状态的多变性,将材料荷载分为固定材料荷载和可变材料荷载,并在荷载系数上和荷载组合时对它们区别对待.给出了人员和设备最小集中荷载的具体数值以及水平施工荷载的取值方法,人员和设备最小集中荷载值应按规定的分布面积布置,并在保证安全性的前提下等效为合理的均布荷载.普通混凝土浇筑对模板的侧压力 C_{CS1} 按水压水头进行计算 $C_{CS1} = 23.5h_{s1}$, h_{s1} 是浇筑深度;当浇筑有特定限制的混凝土时,分别针对柱、不同浇筑速率的墙、及滑模施工规定了不同的侧压力计算公式,考虑了坍落度、内部振捣深度、混凝土容重、温度 T_{s1} 、浇筑速率 R_{s1} 等因素,例如对 $R_{s1} < 2m/h$ 的墙, $C_{CS1} = 7.2 + \frac{785R_{s1}}{T_{s1} + 17.8}$,且 C_{CS1} 不得大于 $23.5h_{s1}$.中国《混凝土结构工程施工规范》的模板荷载确定,与 ASCE 规范理念相同,也考虑了混凝土内温度、坍落度、浇筑速率等因素,但计算表达式上有差异,相对简化,模板荷载直接取 $F = 0.43\gamma_c t_0 BV^{\frac{1}{4}}$ 和 $F = \gamma_c H$ 计算结果的最小值,这一点与 ASCE 规范规定的有限制混凝土侧压力值不得大于 $23.5h_{s1}$ 含义相同,都是把按水压水头计算的混凝土压力视为侧压力上限值.

2 荷载系数与荷载组合

2.1 荷载系数

为反映施工荷载的不确定性,ASCE 施工荷载

规范基于 ASCE7-95 的基础上, 对施工荷载也规定了如表 1 所示的荷载系数. 全部施工荷载均有其荷载系数, 取值时考虑了随时间的变异性, 施工荷载出现的可能性, 以及施工荷载下结构安全性等问题. 考虑到全部可变荷载同时出现最大值的可能性较小,

提出了 APT 荷载值; APT 荷载值等于荷载标准值乘以小于 1.0 的 APT 荷载系数. ASCE 施工荷载规范中的荷载系数相当于中国相应规范规定的荷载分项系数, 相对而言, ASCE 施工荷载规范给出的系数值较中国荷载分项系数总体偏大^[9, 12].

表 1 荷载系数

荷载	美国荷载系数	中国荷载分项系数
	0.9(当考虑风和地震作用时)	
恒载 D	1.4(当仅有施工荷载和材料荷载组合时) 1.2(其他组合)	
活载 L	1.6	
	0.9(考虑风和地震作用)	
施工恒载 C_D	1.4(当仅有施工荷载和材料荷载组合时) 1.2(其他组合)	
固定材料荷载 C_{FML}	1.2	永久荷载的分项系数在永久荷载效应对结构不利时, 对应可变荷载效应起控制的组合和永久荷载效应起控制的组合分别取 1.2 和 1.35.
可变材料荷载 C_{VML}	1.4	永久荷载分项系数在永久荷载的效应对结构有利时不应大于 1.0.
人员和设备荷载 C_P	1.6	可变荷载的分项系数对于标准值大于 $4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工业房屋楼面结构活荷载的分项系数取 1.3, 其他情况取 1.4.
流态混凝土侧压力 C_C	1.3(全水头) 1.5(其他)	
侧向土压力 C_{EH}	1.6	
水平施工荷载 C_H	1.6	
安装和装配荷载 C_F	2.0	
	2.0(非定额) 1.6(定额)	
设备反力 C_R		
风荷载 W	1.3	
温度荷载 T	1.4	
雪荷载 S	1.6	
地震作用 E	1.0	
雨荷载 R	1.6	
冰荷载 I	1.6	

注: 活载 L 、人员和设备荷载 C_P 、水平施工荷载 C_H 、风荷载 W 、雪荷载 S 的 APT 荷载系数为 0.5, 可变材料荷载 C_{VML} 、安装和装配荷载 C_F 的 APT 荷载系数通过分析确定.

2.2 荷载基本组合

ASCE 规范考虑了恒载、活载、环境荷载与施工荷载共同作用的 5 种情况, 给出了如表 2 所示的施

工阶段荷载组合的两种形式, 分别适用于按极限状态设计法和容许应力设计法.

表 2 给出的荷载组合是基于—阶受力分析, 将荷载效应叠加并取最不利效应组合进行设计.

表 2 荷载基本组合

适用于极限状态设计法	适用于容许应力设计法
$1.4D+1.4C_D+1.2C_{FML}+1.4C_{VML}$	$D+C_D+C_{FML}+C_{VML}$
$1.2D+1.2C_D+1.2C_{FML}+1.4C_{VML}+1.6C_P+1.6C_H+0.5L$	$D+C_D+C_{FML}+C_{VML}+C_P+C_H+L$
$1.2D+1.2C_D+1.2C_{FML}+1.3W+1.4C_{VML}+0.5C_P+0.5L$	$D+C_D+C_{FML}+W+C_{VML}+C_P+L$
$1.2D+1.2C_D+1.2C_{FML}+1.0E+1.4C_{VML}+0.5C_P+0.5L$	$D+C_D+C_{FML}+C_{VML}+0.7E+C_P+L$
$0.9D+0.9C_D+(1.3W \text{ 或 } 1.0E)$	$D+C_D+(W \text{ 或 } 0.7E)$

对于极限状态设计法的荷载基本组合, 施工阶段施工恒载 C_D 存在时间相对较长, 与结构恒载 D 作用性质相似, 因此, 二者荷载系数取值相同, 当考虑风和地震作用时取 0.9, 当仅有施工荷载和材料荷载组合时取 1.4, 其他组合取 1.2. 在考虑最不利荷载效应组合时, 适当考虑了施工阶段荷载的排斥性, 相关性及小概率性, 合理摒弃了一些不影响结构安全性的荷载与荷载组合. 对于施工工期较短的工程, 合理忽略了部分施工荷载和环境荷载; 考虑到对施工环境的要求, 有雪荷载时不能正常施工, 因此雪荷载一

般不参与组合; 当风与地震参与组合时, 人员和设备荷载以及活荷载达到最大值的可能性很小, 采用 APT 荷载值, 且明确指出风和地震作用可不同时考虑, 仅需要考虑最不利效应即可; 同样, 水平荷载也不与风荷载和地震作用同时考虑. 中国规范规定与此类似, 在考虑地震荷载的组合时, 风荷载的组合值系数对于一般结构取 0, 对于风荷载起控制作用的建筑(如 60 m 以上的高层混凝土结构)采用 0.2. 两者规定均是考虑到了风与地震同时出现的概率很小这一因素.

对于容许应力设计法的荷载基本组合,组合时应采用荷载标准值,同时也考虑了反号荷载效应的抵消作用以及组合时的荷载折减。

3 作业面的支撑结构

在设计承受施工荷载的模板平台等作业面的支撑结构时,需按照材料荷载、人员荷载、设备荷载和其他可能出现的施工荷载的组合来确定最不利效应。对于在建结构,施工方法和施工阶段不同,施工荷载通常也不相同,导致支撑结构的计算较为复杂。由于施工荷载考虑不当所引起的工程施工事故较为常见,如某体育活动中心施工阶段,由于箱梁混凝土浇筑时一侧大量布设流态混凝土导致局部施工荷载效应大于模板支架体系的承载能力,造成其整体垮塌,见图 1。ASCE 施工荷载规范根据工作面的施工情况,把施工工艺综合统一起来,将工作面划分为 4 个等级(见表 3),并将施工荷载组合值等效为均布荷载,设计者仅需要根据施工作业情况对应相应的操作等级,采用规定的均布荷载值计算支撑体系的内力。中国《混凝土结构施工规范》中模板与支架仍是根据荷载效应组合进行设计的,其中模板及支架自重、新浇筑混凝土自重、钢筋自重需要根据施工图确定、新浇筑混凝土对模板侧面的压力、施工人员及施工设备荷载、泵送混凝土及倾倒混凝土等因素产生的荷载、风荷载需要通过计算确定。通过施工等级确定工作面的均布荷载值,大大简化了设计过程,但需要设计者对施工过程要有精确把握,对各种可能出现的施工荷载种类与大小分析到位,精确判定施工等级。



图 1 某体育活动中心施工事故现场

表 3 工作平台等级与组合均布荷载

操作等级	均布荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)
极轻负荷:人员稀少,手工具,非常少的材料荷载。	0.96
轻负荷:人员稀少,手工操作设备,轻质材料。	1.20
中等负荷:人员集中,一般施工材料。	2.40
重度负荷:通过机动车放置材料,重型施工材料。	3.59

4 启示与建议

1) 施工阶段结构安全性评价和支架模板等施工措施设计时,应全面考虑施工阶段荷载的不确定性,细化荷载取值和荷载分项系数,并应有针对性地进行施工阶段荷载效应分析与效应组合。

2) 应重视施工阶段的环境荷载及其取用方法,尤其是与施工阶段天气条件相关的雨、雪、风、冰荷载以及地震作用等。

3) 在整合和集成现有相关标准中涉及施工阶段荷载取值的基础上,宜编制自成体系的中国施工荷载标准。

参考文献

- [1] KARSHENAS S, AYOUB H. Analysis of concrete construction live loads on newly poured slabs[J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 120(5):1525-1542.
- [2] LIU X, CHEN W, BOWMAN M D. Construction load analysis for concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 111(5):1019-1036.
- [3] 张传敏,方东平,耿川东,等. 钢筋混凝土结构施工活荷载现场调查与统计分析[J]. 工程力学, 2002(5):62-66.
- [4] EL-SHAHHAT A M, ROSOWSKY D V, CHEN W F. Partial factor design for R/C buildings during construction[M]. West Lafayette: School of Civil Engineering, Purdue University, 1993.
- [5] SONG X, GU X, ZHANG W. Structural analysis of high-rise reinforced concrete building structures during construction[J]. Structural Engineering and Mechanics. DOI: 10.12989/sem.2010.36.4.513, 513-527.
- [6] CALDERÓN P A, ALVARADO Y A, ADAM J M. A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings[J]. Engineering Structures, 2011, 33(5):1565-1575.
- [7] EPAARACHCHI D C, STEWART M G, ROSOW S. Structural reliability of multistorey buildings during construction[J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 128(2):205-213.
- [8] ZHANG H, RASMUSSEN K, ELLINGWOOD B. Reliability assessment of steel scaffold shoring structures for concrete formwork[J]. Engineering Structures. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.11.027, 81-89.
- [9] Design loads on structures during construction: ASCE37-02[S]. Reston, Va: American Society of Civil Engineers, 2002.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工规范: GB 50666—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国建设部. 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

(编辑 赵丽莹)