

带厚板转换层的高层框剪结构地震易损性分析*

赵立财^{1,2,3,4}, 王丽萍^{1,5}, 谢亮³

(1.重庆致锐远交通工程技术咨询有限公司 重庆,401331)

(2.中铁十九局集团第三工程有限公司 沈阳,110136)

(3.西藏职业技术学院建筑工程学院 拉萨,850000)

(4.中铁十九局集团有限公司 北京,100176)

(5.重庆科技大学土木与水利工程学院 重庆,401331)

摘要 以某典型带厚板转换的高层框剪结构为研究对象,基于增量动力分析(incremental dynamic analysis,简称IDA)方法进行地震易损性分析,得到结构转换层以上及以下结构在不同极限状态下的地震易损性曲线及易损性矩阵。结果表明:在同一峰值地面加速度(peak ground acceleration,简称PGA)下,结构转换层以上的最大层间位移角均小于转换层以下的相应值;在 $PGA < 0.2g$ 时,结构转换层以下框架部分的轻微破坏状态超越概率明显大于转换层以上框剪部分;当 $PGA > 0.4g$ 时,框架部分的严重破坏状态超越概率迅速增大,表明其倒塌风险迅速增加;在7度罕遇及以下地震作用下,结构整体较高概率处于轻微破坏状态;当遭遇7度极罕遇地震作用时,结构转换层以下更趋于发生中等破坏,而转换层以上依然以轻微破坏状态为主;同时,结构转换层以下及以上的倒塌概率分别为0.91%和0.38%,可见该结构的破坏及倒塌风险由转换层以下的框架部分引起。总体而言,结构整体表现出良好的抗震性能,可满足“大震及巨震不倒”的抗震要求。

关键词 高层建筑;厚板转换;框剪结构;增量动力分析方法;地震易损性分析

中图分类号 TU375.4;TH121

1 问题的引出

随着现代高层建筑向功能多样化的方向发展,转换层高层建筑结构应用越来越广泛。在同一建筑中,建筑的低层往往用于商业和娱乐,表现为大空间;中高层多用于办公和住宿等,表现为中小空间。因此,较复杂的高层建筑往往存在上下柱网不对齐的情况,使得上下结构构件无法连续布置。为实现上下结构形式和柱网的转换,结构中应采用带水平转换构件的转换楼层,该类建筑即为如图1所示的转换层结构。

转换层建筑结构一般为底部布置框架柱,上部布置框架-剪力墙或仅布置剪力墙。从受力角度分析,结构的刚度上大小,这与传统的建筑结构上柔下刚的要求相矛盾,但出于对建筑功能灵活使用的需求,该类建筑应用逐渐广泛。常用的转换层结构形式有梁式、桁架式、空腹桁架式、箱式和板式等^[1-2]。对于板式转换层,由于转换厚板的自重与刚度较大,转换层的上下层竖向刚度变化,结构中易产生薄弱处,不利于

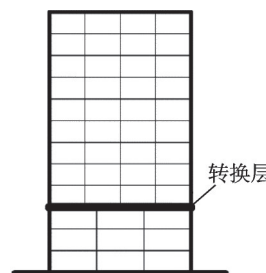


图1 转换层结构

Fig.1 Structure of transfer floor

结构抗震,因此不如梁式和桁架式等应用广泛。

我国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[3]对厚板转换高层建筑结构的应用范围作出明确限制:厚板转换层结构不宜用于7度及以上抗震设防区,否则将被定义为超限工程。尽管如此,目前我国在7度区已建成数十栋带厚板转换的高层建筑结构。文宏昌等^[4]针对深圳福田彩虹城大厦(带厚板转换的框支剪力墙结构)和福州新同达广场(带

* 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146);中国铁建股份有限公司科技研究开发计划资助项目(2020-C20)

收稿日期:2023-03-18;修回日期:2023-07-20

厚板转换的框架-筒体结构)开展了结构动力响应试验研究。

诸多学者针对带厚板转换的高层建筑结构的抗震性能进行研究。李祥秀等^[5]以实际工程为例,分析了转换板厚度对高层建筑结构抗震性能的影响,发现增大转换板厚可提高结构的侧向刚度,而增强转换层对上部结构的约束可增大地震作用下结构转换层的地震反应力、底部弯矩和剪力。李芳等^[6]基于楼层位移及层间位移角等结构抗震性能指标,研究了厚板转换层设置高度对结构抗震性能的影响,发现随着厚板转换层设置高度的增加,楼层位移与层间位移角变大,结构整体抗震性能下降。

杨伟等^[7]基于 midas Gen 系统对厚板转换层高层建筑模型进行了抗震性能分析,发现转换厚板结构在中、大震作用下各向应力均在上下剪力墙位置及洞口附近产生较大的应力集中,且超出了材料拉压应力强度值,总体上厚板转换层可满足“中震弹性、大震不屈服”的抗震性能要求。周帆^[8]采用 Etabs 软件研究了转换板厚、转换层所在位置与结构总高度对厚板转换结构在大震作用下的动力响应影响,并建立了 1/5 相似比的缩尺模型,对厚板转换结构进行 8 度大震的加载,研究发现厚板并未被破坏。严志帆^[9]针对带转换厚板的大底盘多塔结构进行抗震性能分析,通过建立单塔、双塔、三塔、四塔、五塔共 5 种不同塔楼数目的算例模型,并进行反应谱分析,得出从单塔模型到五塔模型的周期、位移、地震响应应力等变化规律。

目前,基于 IDA 方法的结构地震易损性分析已成为抗震性能研究的重要方向之一^[10]。相比传统抗震设计,该方法可评估结构在不同地震强度下各级破坏状态的发生概率,因而在震害预测与损失评估中具有重要意义,对结构抗震安全性判定及防震减灾措施制定具有重要指导作用^[11]。然而,针对带厚板转换的高层结构,并基于概率的抗震性能研究仍较薄弱。随着此类结构在高烈度区的广泛应用,开展地震易损性分析以预测此类结构在强震甚至巨震作用下的损伤概率,评估整体抗震安全性,研究结果具有重要的工程与科学意义。

2 结构算例

2.1 工程概述

本研究选取某典型带厚板转换的高层框剪结构工程实例进行研究。该结构基本信息为:结构底部 1~3 层为框架,层高均为 5 m;转换层厚板位于 3 层

与 4 层之间,厚度为 1.1 m;转换层以上为框架剪力墙,第 4、5 层的层高分别为 4.3、3.7 m,第 6~11 层的层高均为 3.3 m,结构总高为 43.9 m。1~3 层框架柱的混凝土等级为 C50,转换厚板为 C45,转换层以上剪力墙和框架柱均为 C35,其余框架梁和楼板均采用 C30 等级。各构件钢筋均为 HRB400 等级。该结构抗震设计参数为:抗震设防烈度 7 度,设计基本地震加速度值为 0.1g,设计地震分组为第 1 组,所在场地类别为 II 类,框架和剪力墙抗震等级均为二级;基本风压为 0.45 kN/m²,地面粗糙度为 B 类,结构周期折减系数取 0.8。根据以上设计参数,通过盈建科(简称 YJK)软件建立了弹性结构模型。YJK 构建的结构三维模型如图 2 所示。

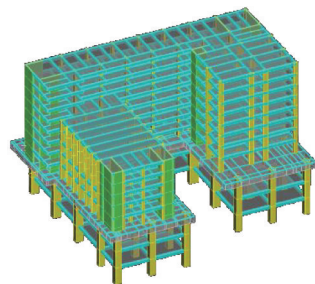


图2 YJK 构建的结构三维模型

Fig.2 3D model of structure by YJK

2.2 PERFORM-3D 弹塑性模型

基于 YJK 模型几何信息、材料参数及载荷等,进一步采用 PERFORM-3D 软件建立结构的弹塑性数值模型。PERFORM-3D 构建的结构三维模型如图 3 所示。此模型中该带厚板转换的高层框剪结构各类构件均采用纤维截面模型模拟。与塑性铰模型直接给出截面内力-变形关系相比,纤维截面模型通过材料积分获得截面的内力-变形关系,在描述截面压弯耦合非线性行为方面更具优势^[12]。模型中混凝土材料的单轴本构采用修正 Kent-Park 模型^[13],考虑约束混凝土和非约束混凝土的应力-应变关系;钢筋材料的单轴

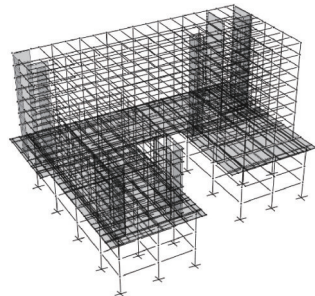


图3 PERFORM-3D 构建的结构三维模型

Fig.3 3D model of structure by PERFORM-3D

本构采用随动强化的双线性弹塑性模型,参数取值依据相关规范^[14]。

基于 PERFORM-3D 的 YULRX 五折线型骨架曲线,对上述 2 种材料的本构进行简化,再通过 Compound 模块组装纤维截面形成构件。在转换层建立 100 mm×100 mm 截面的虚梁(不考虑自重),以连接上部框架-剪力墙和下部的框架柱,并以虚梁节点为连接基础,建立板单元。为提高非线性计算效率,除转换层外,其余楼层不建立板单元,仅通过定义从动约束来实现刚性楼板假定。

在工况定义中,按照规范^[3]取重力荷载代表值为 1 倍恒载加 0.5 倍活载;模型采用 Rayleigh 阻尼,

阻尼比取 5%。PERFORM-3D 与 YJK 的对比如表 1 所示。模型前 3 阶振型如图 4 所示。2 个模型的总质量和自振周期的相对误差在 5% 以内,由此验证 PERFORM-3D 模型动力特性的准确性较好,数据可用于后续的计算分析。

表 1 PERFORM-3D 与 YJK 的对比				
Tab.1 Comparison between PERFORM-3D and YJK				
项目	总质量/t	自振周期/s		
		第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
YJK	32 765.3	1.12	0.99	0.81
PERFORM-3D	32 884.1	1.14	1.03	0.84
相对误差/%	0.4	1.8	4.0	3.7

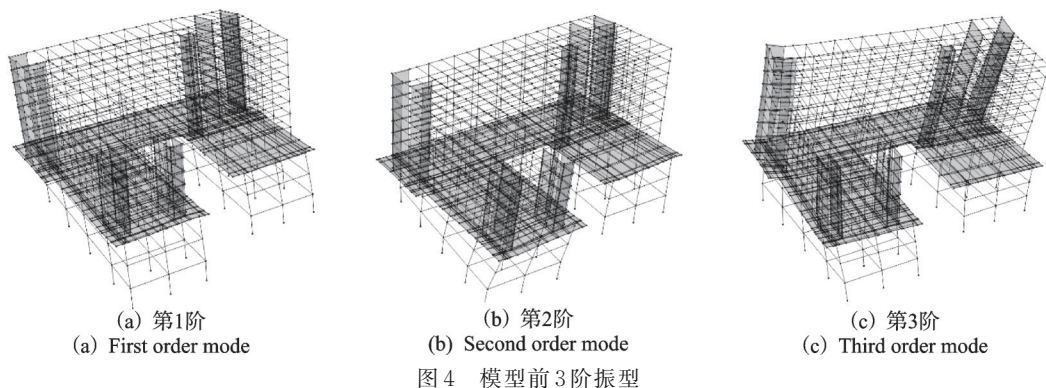


图 4 模型前 3 阶振型

Fig.4 The first 3 vibration modes of model

3 IDA 分析

3.1 地震波选取

根据某典型带厚板转换高层框剪结构所在地的场地类别与设计地震分组,并基于 PERFORM-3D 模型结构的前 3 阶自振周期,从太平洋地震工程中心

地震动数据库中选取 10 条地震波作为 IDA 分析的地震波输入。10 条地震波的基本信息如表 2 所示。地震波加速度反应谱与规范谱对比如图 5 所示(阻尼比为 0.05)。地震波均与规范反应谱在对应结构的前 3 阶周期点上相差不大于 20%,满足规范^[3]中关于所选地震波与规范谱在统计意义上相符的规定。

表 2 10 条地震波基本信息

Tab.2 Basic information of 10 seismic waves

编号	地震事件	地震波分量	发生年份	震级	断层距/km
GM-1	Superstition Hills-01	RSN718_SUPER.A_A-IVW090.AT2	1987	6.22	17.59
GM-2	Northridge-01	RSN1037_NORTHR_MJO000.AT2	1994	6.69	75.64
GM-3	Northridge-01	RSN1078_NORTHR_SSU000.AT2	1994	6.69	1.69
GM-4	Chi-Chi_Taiwan-04	RSN2721_CHICHI.04_CHY057N.AT2	1999	6.20	61.90
GM-5	Chi-Chi_Taiwan-04	RSN2760_CHICHI.04_HWA005N.AT2	1999	6.20	57.08
GM-6	Chi-Chi_Taiwan-04	RSN2793_CHICHI.04_HWA048N.AT2	1999	6.20	89.12
GM-7	Chi-Chi_Taiwan-06	RSN3258_CHICHI.06_CHY014N.AT2	1999	6.30	59.14
GM-8	Chi-Chi_Taiwan-06	RSN3291_CHICHI.06_CHY061N.AT2	1999	6.30	83.99
GM-9	Chi-Chi_Taiwan-06	RSN3487_CHICHI.06_TCU098N.AT2	1999	6.30	82.35
GM-10	Niigata_Japan	RSN4183_NIIGATA_NGN001NS.AT2	2004	6.63	54.50

GM 为 Ground Motion 的标准缩写;1~10 表示 10 条不同的地震动时程记录

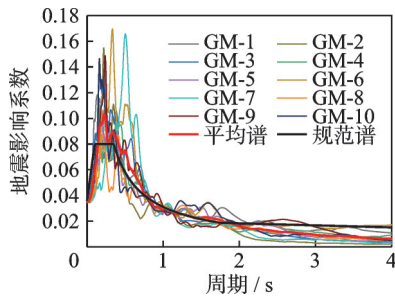


图5 地震波加速度反应谱与规范谱对比

Fig.5 Comparison of seismic waves acceleration response spectra and the design response spectra

3.2 IDA 分析结果

IDA 分析中以 PGA 为地震动强度,以最大层间位移角 θ_{\max} 作为结构性能水准参数。逐一对 10 条地震波的 PGA 进行调幅,调幅等级为:0.1~1.0g 以内以间隔 0.1g 递增,后续以 0.2g 递增,最终调幅至 2.0g。以结构 y 向为主方向(y 向为弱侧),x 向为次方向。根据规范^[3]中 5.1.2 节条文,将各地震波按 y、x 方向峰值比例为 1:0.85 进行调整,双向输入结构弹塑性模型中进行动力弹塑性时程分析,分别记录结构转换层以下及以上的 θ_{\max} ,以此得到该带厚板转换的高层框剪结构的数据。图 6 为 IDA 曲线簇。

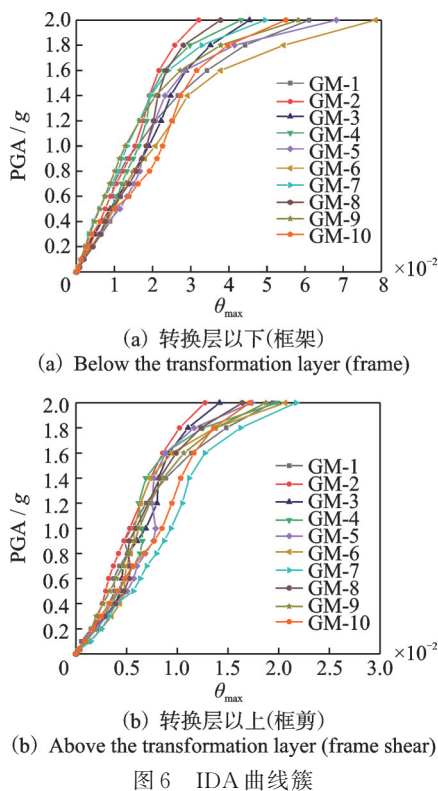


图6 IDA 曲线簇

Fig.6 IDA curve clusters

分析图 6 可知,结构模型的 IDA 曲线簇整体收敛性较好,表明所选取的地震波较为合理。对比转换层以下的框架结构可知,转换层以上的框剪结构 IDA 曲线簇收敛性更好,且在同一 PGA 下,转换层以上的 θ_{\max} 均小于转换层以下。随着地震动强度的增加,结构模型从初始弹性状态转换为刚度和承载力逐渐退化的状态;在各地震波作用下,当 PGA 超过 1.4g 后,结构转换层以下的 θ_{\max} 逐渐分化,且曲线总体有趋向平滑的趋势。

按分位值分别为 16%、50% 和 84% 进行计算^[15],得到对应的 IDA 分位曲线如图 7 所示。从图中可以看出,转换层以上框剪结构的 IDA 分位曲线收敛性较好。整体上来看,2 条 IDA 分位曲线均表现平滑,并无明显波浪形状,因而可称之为具有“软化”模式的 IDA 曲线。

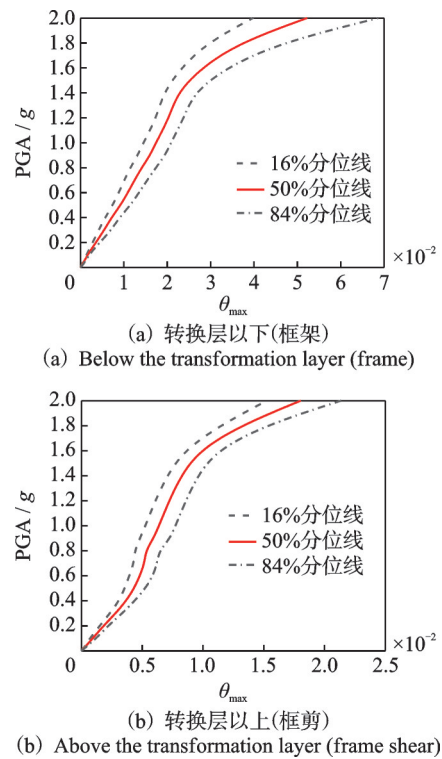


图7 IDA 分位曲线

Fig.7 IDA quantile curves

4 结构地震易损性分析

4.1 分析基本原理

通常假定在一定地震动强度 PGA 下结构的最大层间位移角 θ_{\max} 服从对数正态分布^[16],两者满足

$$\theta_{\max} = \alpha(\text{PGA})^\beta \quad (1)$$

对式(1)两边分别取对数,有

$$\ln \theta_{\max} = (a+b) \ln \text{PGA} \quad (2)$$

其中: $a=\ln\alpha;b=\beta$ 。

a 、 b 值均为常数,可通过对 IDA 分析数据进行回归统计计算得出,进而得到 α 和 β 值。结构处于某种极限状态下超越概率 P_i 的计算式^[15]为

$$P_i=\Phi\left(-\frac{\ln(\theta_c/\theta_{\max})}{\sqrt{\sigma_{\theta_c}^2+\sigma_{\theta_{\max}}^2}}\right)=\Phi\left(\frac{\ln(\theta_{\max}/\theta_c)}{\sqrt{\sigma_{\theta_c}^2+\sigma_{\theta_{\max}}^2}}\right)=$$
$$\Phi\left(\frac{\ln(\alpha(\text{PGA})^b/\theta_c)}{\sqrt{\sigma_{\theta_c}^2+\sigma_{\theta_{\max}}^2}}\right)\tag{3}$$

表 3 结构极限状态^[17]

位置	极限状态				
	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
转换层以下(框架)	0~1/550	1/550~1/250	1/250~1/120	1/120~1/50	>1/50
转换层以上(框剪)	0~1/700	1/700~1/350	1/350~1/175	1/175~1/90	>1/90

4.2 概率地震需求函数与易损性曲线

通过对 IDA 分析结果中不同 PGA 及对应的 θ_{\max} 取对数,并进行概率地震需求分析(probabilistic seismic demand analysis,简称 PSDA)线性回归拟合,得到地震需求值与地震动参数的概率函数。图 8 为概率函数。

由图 8 得到线性回归系数 a 、 b 之后,通过式(3)进一步得到厚板转换层以下(框架)及以上(框剪)在

其中: θ_c 为结构抗震能力中位值(即某极限状态对应的层间位移角限值);当易损性曲线以 PGA 为自变量, $\sqrt{\sigma_{\theta_c}^2+\sigma_{\theta_{\max}}^2}=0.4$; Φ 为正态分布函数。

在本研究结构模型中,厚板转换层以下及以上的 结构类型不同,即框架结构和框剪结构的类型不同。因此,为准确对该结构进行易损性分析,针对转换层以下及以上不同结构类型,文献[17]给出了基于层间位移角的 2 类极限状态,即结构抗震性能评价指标。根据层间位移角限值,结构极限状态如表 3 所示。

各极限状态下的超越概率曲线(即易损性曲线),图 9 为结构转换层极限状态超越概率曲线。由图可知,结构转换层以下框架部分在各极限状态下的超越概率均大于转换层以上框剪部分,这表明在发生地震时,结构转换层以下的破坏程度更为显著;且随着破坏状态的递增,两者超越概率曲线逐渐分化。在 $\text{PGA}<0.2g$ 时,结构转换层以下的框架部分会有较大概率超越轻微破坏状态,而转换层以上的框剪部分轻微破坏状态的超越概率较小;当 $\text{PGA}>0.4g$ 时,框架部分的严重破坏状态超越概率开始迅速增大,表明其倒塌的风险迅速增加。

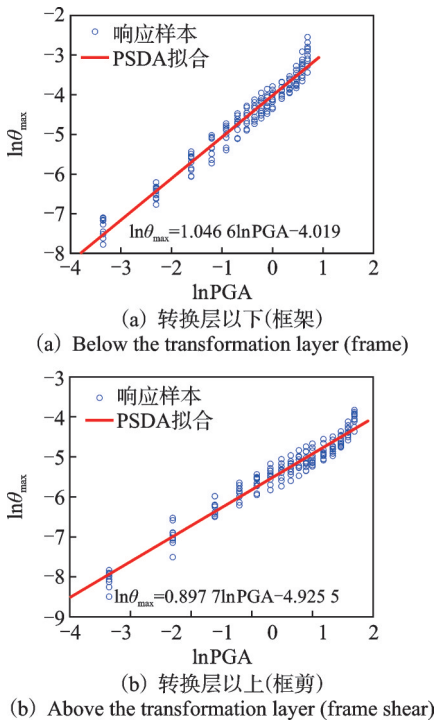


图 8 概率函数
Fig.8 Probability function

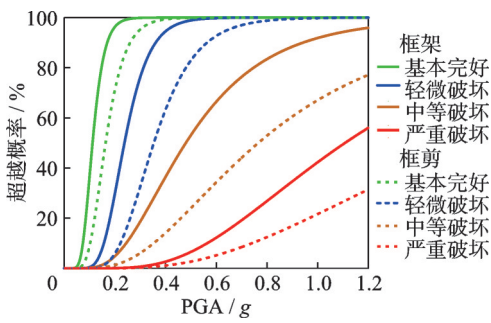


图 9 结构转换层极限状态超越概率曲线
Fig.9 Exceedance probability curves under limit states of structure

由图 9 可得,结构在各极限状态下的超越概率如表 4 所示。共划分 4 个地震水准,包括 7 度设防烈度的多遇地震(0.035g)、设防地震(0.1g)、罕遇地震(0.22g),以及极罕遇地震(0.32g)(数据由文献[18]对罕遇地震下的 PGA 乘以系数取得)。

表 4 结构在各极限状态下的超越概率					
Tab.4 Exceedance probability under each limit states of structure %					
位置	地震水准	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
转换层以下 (框架)	多遇	0.02	0	0	0
	设防	36.28	0.38	0.14	0
	罕遇	98.10	40.41	6.90	0.11
	极罕遇	99.94	81.86	22.04	0.91
转换层以上 (框剪)	多遇	0	0	0	0
	设防	8.80	0.06	0.02	0
	罕遇	79.29	9.54	1.94	0.05
	极罕遇	96.77	39.08	7.42	0.38

4.3 结构易损性矩阵

表 5 为结构在各极限状态下的易损性矩阵,由表 4 的数据计算得出。计算方法为:以某一地震水准为例,各极限状态的发生概率采用超越概率递减法确定。具体为:①基本完好:概率=100%—轻微破坏概率,表示结构保持基本完好状态的概率;②轻微破坏:概率=轻微破坏超越概率—中等破坏超越概率,表示仅发生轻微破坏的概率;③中等破坏:概率=中等破坏超越概率—严重破坏概率,表示仅发生中等破坏的概率;④严重破坏:概率=严重破坏超越概率—倒塌超越概率,表示仅发生严重破坏的概率;⑤倒塌:概率=倒塌超越概率,表示发生倒塌的概率。

表 5 结构在各极限状态下的易损性矩阵						
Tab.5 Fragility matrix of each limit states of structure						
位置	地震水准	各极限状态下的概率/%				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
转换层以下 (框架)	多遇	99.98	0.02	0	0	0
	设防	63.72	35.90	0.24	0.14	0
	罕遇	1.90	57.69	33.51	6.79	0.11
	极罕遇	0.06	18.08	59.82	21.13	0.91
转换层以上 (框剪)	多遇	100	0	0	0	0
	设防	91.20	8.74	0.04	0.02	0
	罕遇	20.71	69.75	7.60	1.89	0.05
	极罕遇	3.23	57.69	31.66	7.04	0.38

由表 5 可知,在 7 度多遇地震作用下,带厚板转换框剪结构基本处于基本完好状态;在 7 度设防地震作用下,结构转换层以下达到轻微破坏状态的概

率为 35.90%,而转换层以上达到轻微破坏状态的概率仅有 8.74%;在 7 度罕遇地震作用下,结构整体上处于轻微破坏状态的概率高于其他极限状态,其中转换层以下的概率为 57.69%,转换层以上的概率为 69.75%;在 7 度极罕遇地震作用下,结构转换层以下处于中等破坏状态的概率高于其他极限状态(即更趋向发生中等破坏),而转换层以上依然以轻微破坏状态为主;极罕遇地震作用下结构转换层以下达到严重破坏状态的概率为 21.13%,倒塌的概率为 0.91%,而转换层以上达到严重破坏状态的概率为 7.04%,倒塌的概率仅为 0.38%。由此可见,该带厚板转换的高层框剪结构的破坏及倒塌风险主要由转换层以下的框架部分引起。

5 结 论

- 1) 对比结构转换层以下的框架部分,转换层以上的框剪部分 IDA 曲线簇收敛性更好,且在同一 PGA 下,结构转换层以上的最大层间位移角均小于转换层以下。
- 2) 在 $PGA < 0.2g$ 时,结构转换层以下框架部分的轻微破坏状态超越概率明显大于转换层以上框剪部分的概率;当 $PGA > 0.4g$ 时,框架部分的严重破坏状态超越概率开始迅速增大,表明其倒塌的风险迅速增加。
- 3) 在 7 度罕遇及以下地震作用下,结构整体有较高概率处于轻微破坏状态;在 7 度极罕遇地震作用下,结构转换层以下有较高概率处于中等破坏状态,而转换层以上依然以轻微破坏状态为主;同时,结构转换层以下及以上达到倒塌的概率分别为 0.91% 和 0.38%;该结构的破坏及倒塌风险由转换层以下的框架部分引起,结构整体能够满足“大震及巨震不倒”的抗震要求,表现出良好的抗震性能。

参 考 文 献

[1] 常静. 某厚板转换层结构的分析与设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 87-90.
CHANG Jing. Analysis and design of thick slab transfer layer structure in a building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 87-90. (in Chinese)

[2] 简斌, 李东泽, 林元, 等. 一级抗震预应力型钢混凝土空腹桁架转换层框架结构三道防线抗震设防设计方法[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 57-66.
JIAN Bin, LI Dongze, LIN Yuan, et al. Three-line de-

- fense seismic fortification design method for first seismic grade frame with prestressed steel reinforced concrete vi-
erendeel truss transfer storey [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 57-66. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 文宏昌, 农兴中, 周颖, 等. 广州赤沙车辆段盖板装配式全框支剪力墙结构缩尺振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(suppl): 43-52.
- WEN Hongchang, NONG Xingzhong, ZHOU Ying, et al. Shaking table test of prefabricated cover plane frame supporting shear wall structure in Chisha, Guangzhou[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(suppl): 43-52. (in Chinese)
- [5] 李祥秀, 王瑶, 谭平, 等. 地震速度脉冲下巨-子结构体系动力性能研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 856-863.
- LI Xiangxiu, WANG Yao, TAN Ping, et al. Research on the dynamic performance of giant-substructure systems under seismic velocity impulses[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 856-863. (in Chinese)
- [6] 李芳, 李苗苗. 厚板转换层设置高度对结构抗震性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(suppl): 62-65.
- LI Fang, LI Miaomiao. Influence of the setting height of the conversion floor of thick slabs on the seismic performance of structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, 35(suppl): 62-65. (in Chinese)
- [7] 杨伟, 陈俊民, 刘祥民, 等. 某高层建筑厚板转换层抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(6): 123-128.
- YANG Wei, CHEN Junmin, LIU Xiangmin, et al. Seismic performance analysis of the thick plate transition layer of a high-rise building[J]. Structural Engineers, 2019, 35(6): 123-128. (in Chinese)
- [8] 周帆. 带厚板转换的地铁上盖高层结构的抗震性能分析[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- [9] 严志帆. 带转换厚板的大底盘多塔高层结构抗震性能分析[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- [10] 贺少锋, 邓宗才, 李永梅. 高强钢筋超高性能混凝土框架结构易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(3): 572-580.
- HE Shaofeng, DENG Zongcai, LI Yongmei. Vulnerability analysis of high-strength steel-reinforced UHPC frame structures[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(3): 572-580. (in Chinese)
- [11] 黄忠凯, 张冬梅. 地下结构地震易损性研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 49-59, 115.
- HUANG Zhongkai, ZHANG Dongmei. Recent advance in seismic fragility research of underground structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 49-59, 115. (in Chinese)
- [12] 崔济东, 沈雪龙. PERFORM-3D原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 55-68.
- [13] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79(1): 13-27.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 张令心, 李孟达, 刘洁平, 等. 考虑结构不确定性的框剪结构地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 112-118.
- ZHANG Lingxin, LI Mengda, LIU Jieping, et al. Seismic fragility analysis of frame-shear wall structures considering structural parameter uncertainty [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 112-118. (in Chinese)
- [16] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [17] 路沙沙, 徐红, 张亚楠, 等. 基于IDA方法的加固震损RC框架结构地震易损性分析[J]. 地震研究, 2021, 44(4): 673-681.
- LU Shasha, XU Hong, ZHANG Yanan, et al. Seismic fragility analysis of reinforced RC frame structure with seismic damage based on incremental dynamic analysis [J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(4): 673-681. (in Chinese)
- [18] 周敏. BRB框架结构罕遇、极罕遇地震下倒塌性能研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2017.



第一作者简介:赵立财,男,1985年11月生,博士、正高级工程师。主要研究方向为岩土与结构相互作用机制、混凝土结构损伤力学等。曾发表《基于荷载等效理论的柱体结构剪切变形解析》(《振动、测试与诊断》2024年第44卷第5期)等论文。

E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com