朱冰彦,李启才.核心筒-竖向错位桁架组成的扭转结构体系结构影响系数分析[J].地震工程学报,2026,48(6):1358-1368.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250225002

Zhu Bingyan,Li Qicai.Structural influence coefficient of a twisted structural system comprising a core tube and vertically staggered trusses[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(6):1358-1368.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250225002

核心筒-竖向错位桁架组成的扭转结构体系结构影响系数分析

朱冰彦,李启才

(苏州科技大学 江苏省结构工程重点实验室,江苏 苏州 215009)

摘要:探讨一种新型结构体系——核心筒-竖向错位桁架组成的扭转结构体系。该体系因竖向构件数量有限,且需补偿扭转造型对竖向承载力的削弱,导致构件截面尺寸显著大于常规结构,从而具有更大的整体刚度。尽管该结构体系已在工程实践中得到应用,但其结构影响系数R尚未得到充分研究。以扭转角度为变量,依据我国规范设计5个结构算例,考虑高阶振型的影响,采用分布侧向力调整法对各算例进行Pushover分析,基于改进的能力谱法计算各算例的结构影响系数。研究分析扭转角度对结构影响系数的影响,发现结构影响系数R与扭转角度呈反比关系。特别指出,该结构体系可参考扭转6°算例的结构影响系数建议值(4.270),《建筑工程抗震性态设计通则》对一般框架-核心筒体系的建议值高出15.3%。对于已建结构,若按非扭转结构的传统结构影响系数取值,地震作用的计算值可能被高估,导致结构设计偏于保守,经济性不足。

关键词:扭转结构体系;竖向错位桁架;结构影响系数;分布侧向力调整法;改进的能力谱法

中图分类号:TU393.2;TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1358-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250225002

Structural influence coefficient of a twisted structural system comprising a core tube and vertically staggered trusses

Zhu Bingyan, Li Qicai

(*Jiangsu Key Laboratory of Structural Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China*)

Abstract: This paper investigates a novel structural system comprising a core tube and vertically staggered trusses. Owing to the limited number of vertical components and the need to compensate for the reduced vertical load-bearing capacity caused by the twisted elevation, the member cross-sectional dimensions are considerably larger than those of conventional structures, resulting in greater overall stiffness. Although this twisted structural system has been applied in practical engineering, its struc-

收稿日期:2025-02-25

基金项目:江苏省中外合作办学平台联合科研项目

第一作者简介:朱冰彦(1999-),男,硕士研究生,主要从事钢结构的新型结构体系和抗震设计研究。E-mail:1043124285@qq.com。

通信作者:李启才(1969-),男,博士,副教授,主要从事钢结构的新型结构体系和抗震设计研究。E-mail:ustsgjg@163.com。

tural influence coefficient R has not been adequately studied. Using the twist angle as a variable, five structural examples were designed in accordance with Chinese codes. Considering the influence of higher-order modes, Pushover analysis was performed on each example using the stepwise lateral force adjustment method, and the structural influence coefficient was calculated based on the improved capacity spectrum method. The results indicate that R is inversely proportional to the twist angle. In particular, the twisted structural system can adopt the structural influence coefficient of the 6° twist example, which is 4.270, a value 15.3% higher than the recommended value for conventional frame-core tube systems in the *General Rule for Performance-based Seismic Design of Buildings*. For existing structures designed using the traditional structural influence coefficient intended for non-twisted structural systems, the calculated seismic action may be overestimated, leading to uneconomical designs.

Keywords: twisted structural system; vertically staggered truss; structural influence coefficient; stepwise lateral force adjustment method; improved capacity spectrum method

0　引言

扭转体结构因其结构造型优美，逐渐受到更多关注。近年来，已有学者对框架-核心筒扭转体结构展开系统研究，建立了框架-核心筒扭转体结构整体模型，并对结构进行了双向水平和竖向地震作用分析[1-3]。由核心筒与竖向错位桁架组成的扭转体结构是一种新型结构体系，其采用与层高相同高度的桁架代替框架，更有利于主体结构沿楼层高度逐层有序错位，以实现建筑所需的扭转效果。在实际工程中，该结构体系已得到应用，如2018年建成的中国台湾陶朱隐园。张敬礼等[4]介绍了陶朱隐园的结构形式，分析了扭转体结构各系统的受力特点。Grosman[5]建立了陶朱隐园的有限元模型并进行倒塌分析，研究了巨型柱在不同局部损坏情况下对结构响应的影响。尽管已有学者关注此类新型结构，但由核心筒与竖向错位桁架组成的扭转体结构在受力特性上与普通结构存在差异，仍需对其在地震作用下的安全性开展进一步研究。

我国现行的《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》[6](以下简称《抗震规范》)采用基于规律折减的方法确定设计反应谱，未充分考虑具体结构自身特性的影响，所有结构均采用统一结构影响系数(2.812 5)进行小震弹性设计，导致不同结构在相同烈度地震作用下的地震力计算值相同。依据现行方法进行结构设计，未必能准确反映实际地震作用的影响。吕西林等[7]建议针对不同结构形式，在抗震设计中引入相应的结构影响系数。童根树等[8]对比了中、日、欧、美四国规范，总结了地震作用计算中结构影响系数的相关方法。结构影响系数R的确定很大程度上基于各种结构体系在历次地震中的抗震表现，文献[9-14]依次对钢框架、各类支撑框架、交错桁架、框架-剪力墙等钢结构体系的结构影响系数进行研究，深入分析了结构影响系数与结构特性、场地条件及地震作用之间的关系，明确指出结构刚度与延性是影响结构影响系数的关键因素。然而，核心筒-竖向错位桁架组成的扭转体结构造型独特，为弥补扭转造型引起的竖向承载力削弱，其整体刚度远高于常规结构。若参照既有结构的地震作用取值进行此类结构的抗震设计，其适用性值得深入探讨。

结构影响系数R在抗震设计中具有双重意义：既是基于强度的结构抗震设计中确定地震作用的关键依据，也是基于性能设计中的重要参数。研究其取值，对于理解已经出现的核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的抗震安全性具有重要意义。为此，本文考虑不同扭转角度的影响，计算结构影响系数R并提出建议值，旨在为该类核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的抗震设计提供合理依据。

1　有限元模型建立

本文按照《高层民用建筑钢结构技术规程(JGJ 99—2015)》[15](以下简称《高钢规》)，对某住宅楼的核心筒-竖向错位桁架扭转体结构进行设计。使用ETABS软件建立结构模型，建筑标准层平面尺寸为62 m(长)×22.6 m(宽)，核心筒直径为20 m。结构标准层平面布置如图1所示。

为研究不同扭转角度对结构影响系数的影响，

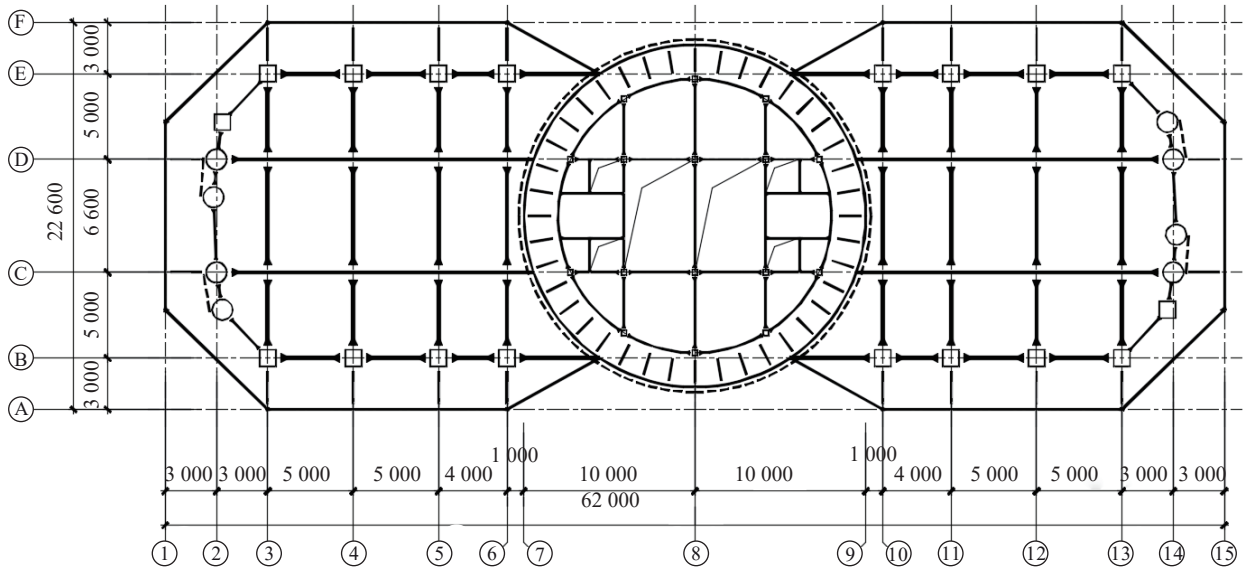
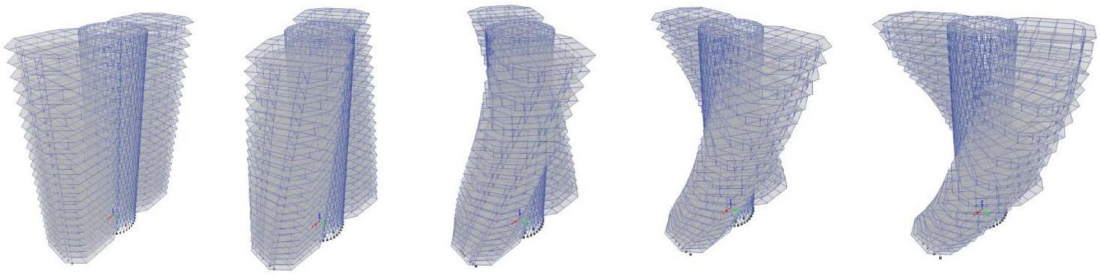


图 1 结构标准层平面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Standard floor plan layout of the structure (unit: mm)

建立了5个22层模型(图2),层高均为3.6 m,分别设置每层扭转角度0°(算例22-0)、1.5°(算例22-1.5)、3°(算例22-3)、4.5°(算例22-4.5)和6°(算例22-6)。



(a) 算例22-0 (b) 算例22-1.5 (c) 算例22-3 (d) 算例22-4.5 (e) 算例22-6

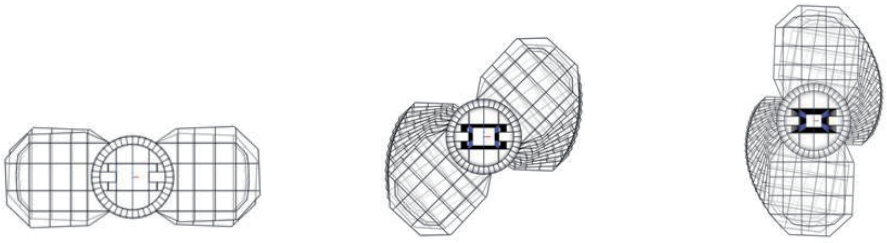
图 2 各算例结构模型的空间造型图

Fig. 2 Spatial views of structural models for each example

结构通过每两层楼板共用一组桁架并沿建筑高度逐渐扭转的方式实现整体扭转,其中央钢核心筒保持不扭转。以22层、每层扭转4.5°的模型(算例22-4.5)为例,相邻楼板之间的相对旋转角度为4.5°,而每组桁架的相对旋转角度为9°,结构整体累计扭转99°。分别选取结构的第2层、第10层及第20层楼面位置绘制鸟瞰图,如图3(a)、(b)和(c)所示。

图4为结构中钢核心筒与一侧巨型柱、空腹桁架的位置关系示意图。钢核心筒作为结构的主要抗侧力构件,为适应建筑平面两侧楼板的旋转需求,并提供足够的抗扭刚度,被设计为圆形斜交网格筒体,其内部设置框架结构以满足建筑功能需要。在建筑两端布置了由配合楼板旋转的连续竖向杆件构成的巨型柱,与钢核心筒共同形成双重抗侧力体系。空腹桁架沿竖向隔层布置,使其上、下楼层都形成无柱大空间。在结构分析中,可将整层桁架系统视为连接核心筒与两侧巨型柱的深梁,其中桁架弦杆与巨型柱连接的一端为刚接,与核心筒连接的一端为铰接。

结构拟建于云南省昆明市,抗震设防烈度为8度(0.2g),Ⅱ类场地,设计地震分组为第三组,特征周期为0.45 s。结构荷载由ETABS程序自动计算构件及楼板自重,荷载标准值取值如下:楼面附加恒荷载1.5 kN/m^2,活荷载2.0 kN/m^2;屋顶恒荷载3.5 kN/m^2,活荷载0.5 kN/m^2;屋顶电梯井活荷载



(a) 结构第 2 层（扭转 9°）　(b) 结构第 10 层（扭转 45°）　(c) 结构第 20 层（扭转 90°）

图 3　结构鸟瞰示意图

Fig. 3　Bird's-eye view of the structure

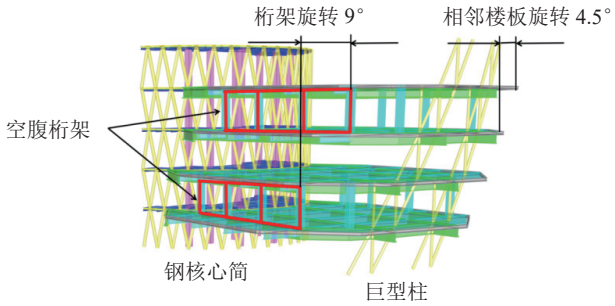


图 4　钢核心筒与一侧巨型柱、空腹桁架的位置关系示意图

Fig. 4　Schematic diagram showing the spatial relationship among the steel core tube, a giant column, and vierendeel trusses

8.0 kN/m²；基本风压为 0.40 kN/m²。所有钢结构构件均采用 Q355 钢材；楼板采用厚度为 200 mm 的现浇 C30 混凝土。各桁架杆件、梁、柱均采用 Beam 单元；楼面采用壳单元，并采用刚性隔板假定（楼板平面内刚度无限大，平面外刚度为 0）。截面设计需保证结构在多遇地震下保持弹性。本文 5 个算例的构件尺寸设计采用统一的层间位移角控制，即所有算例均按我国《抗震规范》要求，使多遇地震作用下的层间位移角趋近于 1/250，并以此作为截面尺寸设计的统一控制指标。结构内力分析和设计均采用 ETABS 软件完成，主要构件截面尺寸列于表 1。

相比常规结构体系，本文研究的扭转体结构所用竖向构件数量显著减少。为防止底层巨型柱和钢核心筒中构件过早进入塑性而引发稳定问题，需不断增大构件截面，最终导致结构整体刚度显著提高。

2　结构影响系数及其研究方法

2.1　结构影响系数

结构影响系数 R 可以定义为：结构在设防地震作用下保持完全弹性状态时，其基底剪力 V_e 与规范规定的地震作用标准值 V_d 的比值。该系数通常用于对结构设计反应谱进行折减，其原理是当结构进入屈服或发生塑性变形时，结构的有效周期延长，从而导致地震作用减小。

图 5 为结构性能曲线[16]，其中，Δ 为顶点位移，V 为基底剪力。图中 OA 段代表结构在设防地震作用下保持完全弹性反应，$ODCFE$ 段为结构实际反应线，$ODCBE$ 段为结构理想弹塑性反应线；A 点横坐标 Δ_e 由改进能力谱法确定，纵坐标 V_e 可通过结构初始弹性刚度 K_0 与 Δ_e 相乘得到，其中初始刚度 K_0 为 OA 段斜率；B 点为结构显著屈服点，V_y 为实际结构显著屈服时对应的底部剪力；V_d 表示结构设计基底剪力，可根据振型分解反应谱法计算得出。

结构影响系数 R 的计算公式如下：

$$R=\frac{V_e}{V_d}=\frac{V_e}{V_y}\cdot\frac{V_y}{V_d}=R_\Omega\cdot R_\mu \tag{1}$$

式中：R_Ω 为结构超强系数；R_μ 为结构的延性折减系数。

2.2　地震波选取

根据我国《抗震规范》的要求，从太平洋地震工程中心地震动数据库中初选 101 条Ⅱ类场地天然地震波，并按以下准则筛选：

（1）频谱特性匹配：所选 3 条波的地震影响系数曲线在结构前 3 阶振型周期点与规范谱的偏差不超过 20%；

（2）基底剪力验证：单条波弹性时程分析所得基底剪力不小于反应谱法结果的 65%，3 条波均值不小于反应谱法结果的 80%；

（3）持续时间要求：地震动持时不小于 15 s。

各算例依据结构周期及多遇地震下的基底剪力要求进行地震波选取，对初选地震波记录进行峰值加速度（Peak Ground Acceleration，PGA）调幅，最终选取的地震记录列于表 2。所选地震波特性满足规范对频谱特性、有效峰值及持续时间的各项要求。

表 1 各算例模型主要构件截面尺寸

Table 1 Section dimensions of main components for each example model

	构件	楼层	算例 22-0	算例 22-1.5	算例 22-3	算例 22-4.5	算例 22-6
			截面尺寸/mm	截面尺寸/mm	截面尺寸/mm	截面尺寸/mm	截面尺寸/mm
核心筒	网筒斜柱（外径×壁厚）	1～4	Φ250×20	Φ450×25	Φ500×30	Φ520×30	Φ600×30
		5～8	Φ250×20	Φ400×20	Φ450×30	Φ500×30	Φ550×30
		9～12	Φ200×18	Φ350×20	Φ400×20	Φ450×25	Φ500×30
		13～16	Φ200×18	Φ300×20	Φ350×20	Φ400×20	Φ450×25
		17～22	Φ150×16	Φ250×20	Φ300×20	Φ300×20	Φ400×20
	框架柱（外廓尺寸×壁厚）	1～11	□480×480×20×20	□480×480×20×20	□480×480×20×20	□480×480×20×20	□480×480×20×20
		12～22	□450×450×18×18	□450×450×18×18	□450×450×18×18	□450×450×18×18	□450×450×18×18
	框架梁（高度×翼缘宽度×腹板厚度×翼缘厚度）	1～22	HN280×125×6×9	HN280×125×6×9	HN280×125×6×9	HN280×125×6×9	HN280×125×6×9
巨型柱	斜柱（外径×壁厚）	1～4	Φ800×30	Φ800×30	Φ1200×35	Φ1200×35	Φ1200×35
		5～10	Φ600×20	Φ600×30	Φ800×25	Φ800×30	Φ1000×30
		11～16	Φ400×20	Φ400×20	Φ450×25	Φ450×25	Φ800×25
		17～22	Φ200×18	Φ200×18	Φ250×20	Φ250×20	Φ600×20
桁架	腹杆（外廓尺寸×壁厚）	1～22	□600×600×25×25	□600×600×25×25	□850×850×35×35	□850×850×35×35	□850×850×35×35
	弦杆（高度×翼缘宽度×腹板厚度×翼缘厚度）	1～22	HN850×300×17×31	HN850×300×17×31	HN900×300×18×34	HN900×300×18×34	HN900×300×18×34
楼面	主梁（高度×翼缘宽度×腹板厚度×翼缘厚度）	1～22	HN850×300×17×31	HN850×300×17×31	HN900×300×18×34	HN900×300×18×34	HN900×300×18×34
	次梁（高度×翼缘宽度×腹板厚度×翼缘厚度）	1～22	HN650×300×12×20	HN650×300×12×20	HN650×300×12×20	HN650×300×12×20	HN750×300×16×28

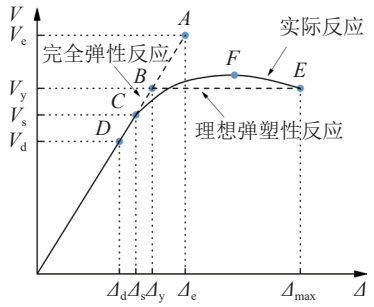


图 5 结构性能曲线

Fig. 5 Structural performance curves

2.3 Pushover 分析

由于扭转结构体系无法简化为平面结构进行分析，本文采用整体结构进行计算，并对结构主振型方向进行 Pushover 分析。分析时采用倒三角分布和分布侧向力[17]两种侧向加载方式；竖向荷载取 1 倍恒荷载＋0.5 倍活荷载，并以此作为初始条件。其中，侧向力加载方式通过选取 3 条天然地震波进行时程分析，分别得出结构在小震、中震和大震作用下的层侧向力分布及顶点位移，在推覆过程中不断调整侧向力分布模式，将结构顶点推至目标位移。该方法所得结构性能曲线更加接近实际状态，并能够有效考虑高阶振型的影响。所有算例在不同水准地震作用下的层侧向力分布如图 6 所示。

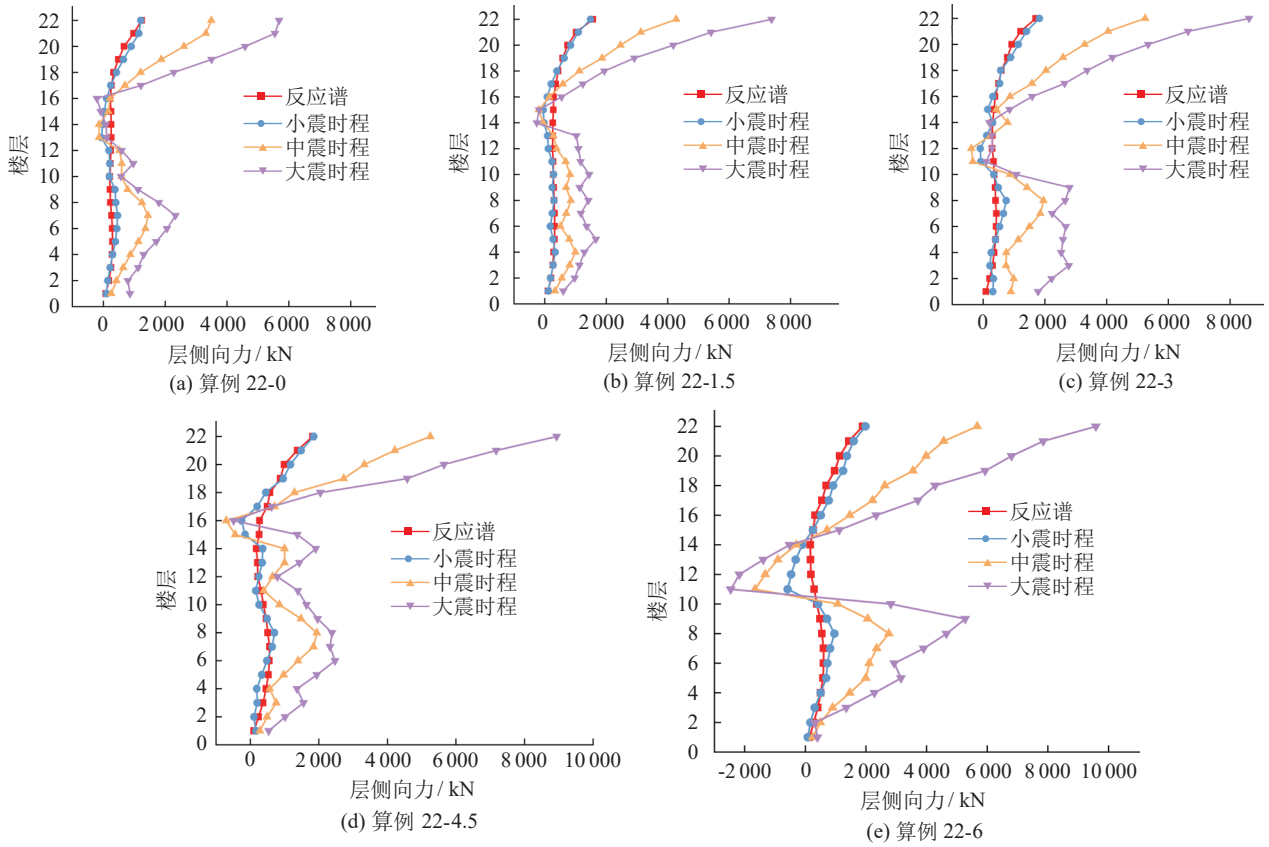
2.4 增量动力分析

进行非线性动力时程分析，首先对 2.2 节所选地震波进行 PGA 调幅，调幅方式采用等步长递增。目标 PGA 依次为 70 cm/s^2（8 度多遇）、200 cm/s^2（8 度设防）、400 cm/s^2（8 度罕遇）、596 cm/s^2、792 cm/s^2、1 184 cm/s^2、1 380 cm/s^2、1 478 cm/s^2、1 576 cm/s^2、1 674 cm/s^2、1 772 cm/s^2，共 12 个地震工况。其中，前 8 个工况的步长取 0.2g，后 4 个工况的步长取 0.1g。对各算例在 3 条地震波作用下的弹塑性时程分析结果进行统计分析，并采用 Boltzmann 函数对所得结构底部剪力与顶点位移进行曲线拟合，得到

表 2　结构所选地震记录

Table 2　Selected seismic records for the structure

算例	编号	测站名称	地震波名称	持时/s	*PGA*/*g*
22-0	RSN20	Ferndale City Hall	Northern Calif-03	39.98	0.352 3
	RSN26	Hollister City Hall	Hollister-01	40.44	1.228 6
	RSN28	Cholame-Shandon Array #12	Parkfield	44.28	1.194 8
22-1.5	RSN9	El-Centro Array #9	Borrego	49.98	1.125 9
	RSN26	Hollister City Hall	Hollister-01	40.44	1.228 6
	RSN44	Colton-So Cal Edison	Lytle Creek	39.98	9.151 3
22-3	RSN6	El-Centro Array #9	Imperial Valley-02	53.7	0.256 0
	RSN44	Colton-So Cal Edison	Lytle Creek	39.98	9.151 3
	RSN54	Borrego Springs Fire Sta	San Fernando	25.6	7.675 3
22-4.5	RSN15	Taft Lincoln School	Kern County	54.32	0.158 8
	RSN76	Maricopa Array #3	San Fernando	26.22	7.138 0
	RSN95	Managua_ESSO	Managua_Nicaragua-02	45.66	0.219 9
22-6	RSN40	San Onofre-So Cal Edison	Borrego Mtn	45.18	1.535 6
	RSN55	Buena Vista-Taft	San Fernando	26.26	6.033 8
	RSN95	Managua_ESSO	Managua_Nicaragua-02	45.66	0.219 9



(a) 算例 22-0　(b) 算例 22-1.5　(c) 算例 22-3

(d) 算例 22-4.5　(e) 算例 22-6

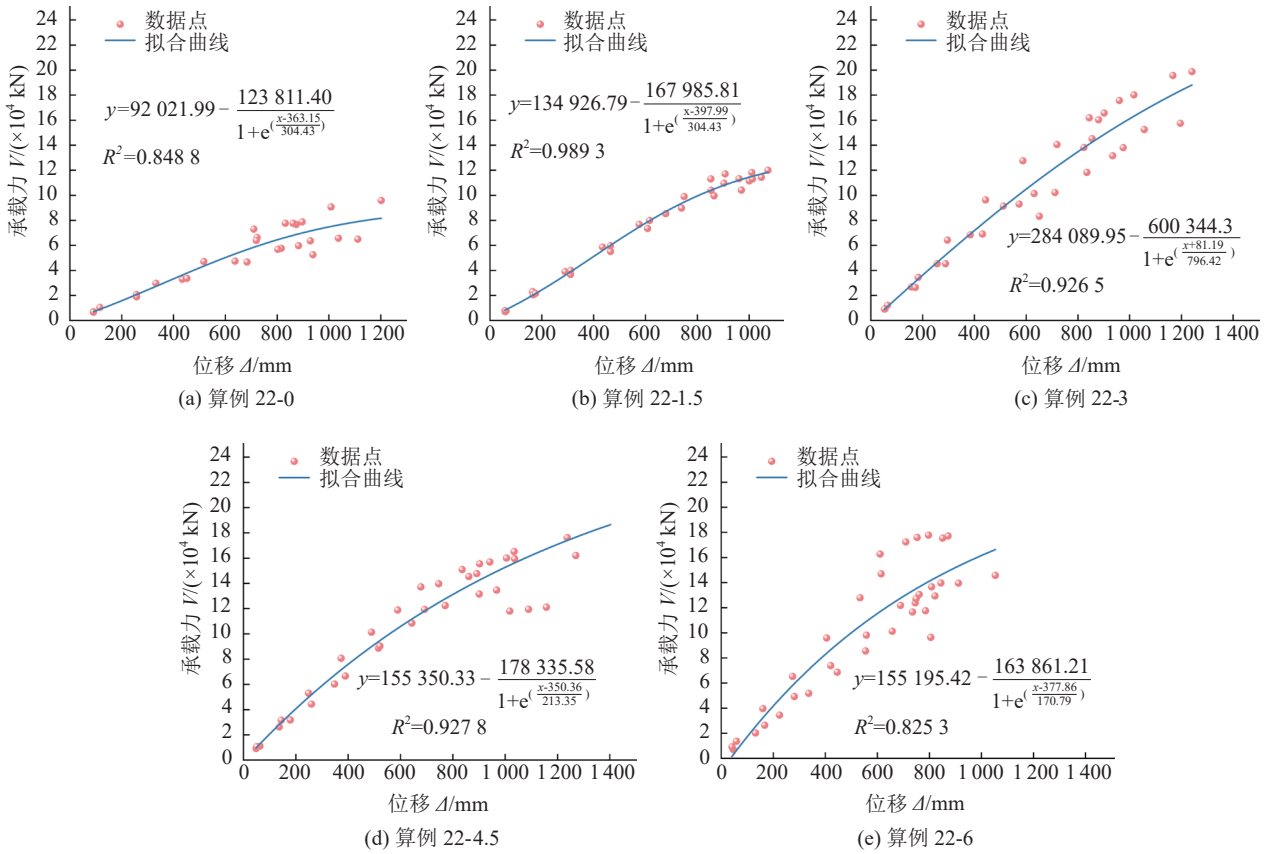
图 6　所有算例层侧向力分布

Fig. 6　Lateral force distribution of all example models

增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis，IDA)性能曲线(图 7)。

2.5　结构性能曲线分析

为验证分布侧向力加载模式下 Pushover 分析的合理性，将分布侧向力加载模式的 Pushover 曲线、倒三角加载模式的 Pushover 曲线及 IDA 曲线绘制于图 8 中。可见，两种 Pushover 分析曲线与 IDA 曲线的整体发展趋势较为一致。IDA 分析通过直



(a) 算例 22-0 (b) 算例 22-1.5 (c) 算例 22-3

(d) 算例 22-4.5 (e) 算例 22-6

图 7 所有算例对应 IDA 曲线

Fig. 7 IDA curves corresponding to all examples

接选取天然强震记录作为地震动输入，能够较为真实地模拟结构的抗震性能，所得性能曲线与结构在实际地震作用下的反应最为接近。倒三角分布荷载的合力作用点位于结构高度的 2/3 处，相较于本文采用的其他两种方法，该荷载分布方式将产生更大的倾覆力矩，从而导致结构顶点位移相应增加。因此，采用倒三角荷载的 Pushover 分析通常用于获取结构性能曲线的下限值。

本文 5 个算例的计算结果表明：分布侧向力调整法得到的 Pushover 曲线介于 IDA 曲线和倒三角分布荷载模式得到的 Pushover 曲线之间。与倒三角荷载模式相比，分步侧向力调整法的分析结果与 IDA 分析结果更为接近，表明其具有更高的精度。在计算效率方面，与 IDA 分析相比，采用分布侧向力调整法的 Pushover 分析大大缩短了计算时间，提高了计算效率。

结构性能曲线的准确性是求解结构影响系数的决定性因素。考虑到加载模式对推覆分析结果准确性的影响，针对核心筒-竖向错位桁架组成的扭转体结构，传统倒三角加载模式所得结果与 IDA 分析结果之间存在较大误差。因此，本文采用分布侧向力调整法进行 Pushover 分析，在保证结构性能曲线准确性的同时，兼顾计算效率。

3 结构影响系数的计算

3.1 确定结构显著屈服点

首先，基于分布侧向力调整法的 Pushover 分析，得出各算例的性能曲线，如图 9 所示。通过对比图 9 中不同扭转角度结构算例的性能曲线可知：结构的初始刚度 K_0 随扭转角度的增加而增大。这是因为随扭转角度增加，结构受到的扭转效应增强，需要更大的刚度来抵抗水平荷载作用。为确保结构具备足够的抗侧刚度，设计中需不断增大核心筒和巨型柱的截面尺寸。然而，对于扭转角度为 3°、4.5°、6°的 3 个算例，随着扭转角度的进一步增加，初始刚度 K_0 的增幅并不显著。其原因是：当整体扭转达到一定程度后，结构刚度在扭转协调作用下逐渐趋于极限，此时仅通过增大截面尺寸所带来的刚度提升效果并不明显，而结构破坏时的极限位移则相应减小。

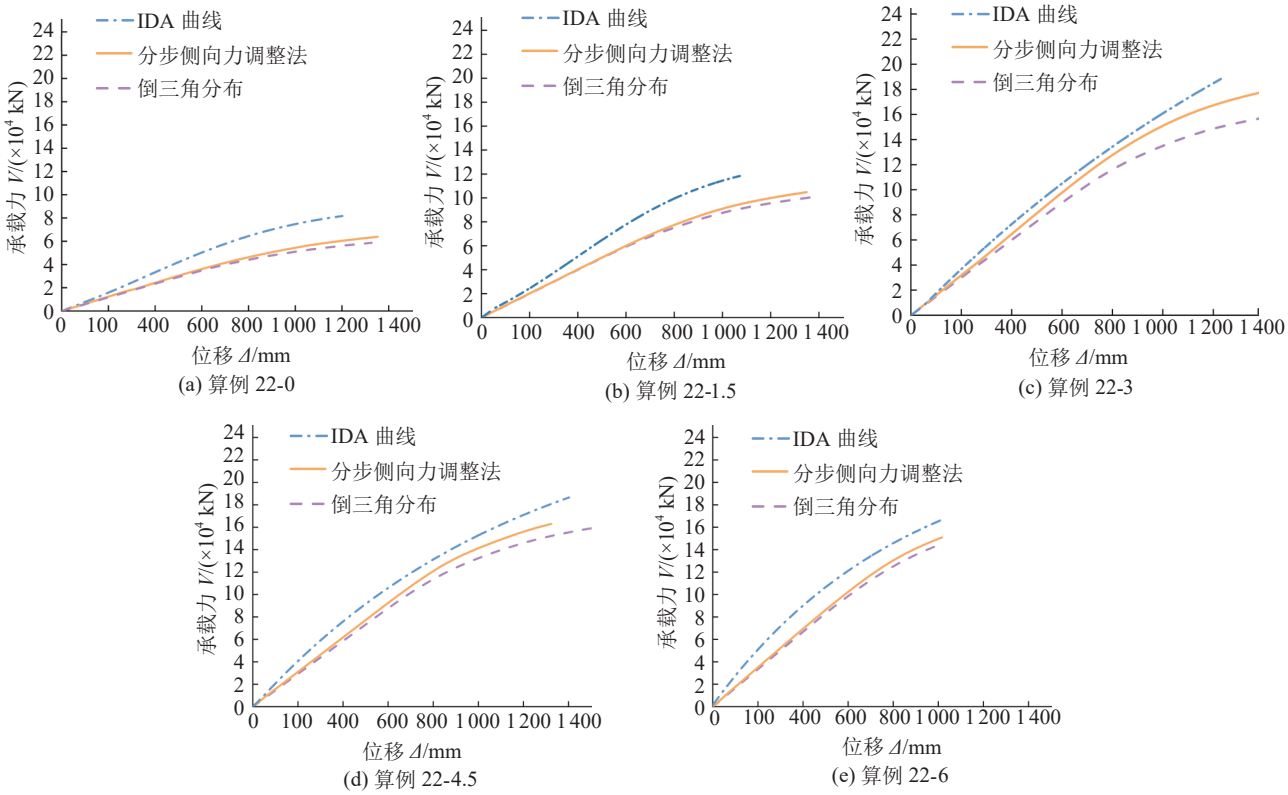


图 8　所有算例静力和动力性能曲线对比

Fig. 8　Comparison of static and dynamic performance curves for all examples

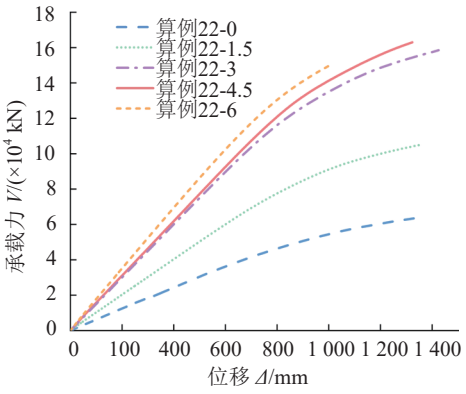


图 9　各算例的性能曲线

Fig. 9　Performance curves of each example

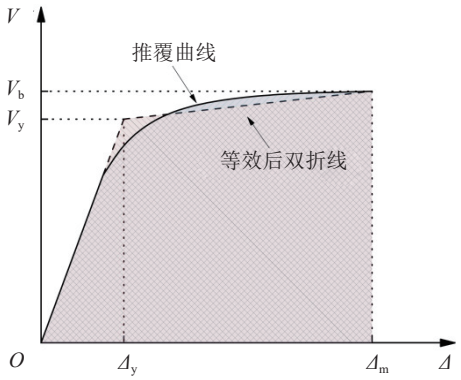


图 10　推覆曲线双折线化

Fig. 10　Bilinearization of pushover curves

计算各相关系数需确定结构的显著屈服点。首先，根据等能量原则将原始推覆曲线转换为双折线模型，如图 10 所示。

简化原则是使推覆曲线与双折线所围面积相等。实际推覆曲线所围面积由 Origin 软件直接计算得出，双折线所围面积 S 按下式计算：

$$S=\frac{\Delta_y V_y}{2}+\frac{(V_b+V_y)(\Delta_m-\Delta_y)}{2} \tag{2}$$

式中：S 为面积；V_y、Δ_y 分别为结构屈服力和屈服位移；V_b、Δ_m 分别为结构推覆至破坏时的基底剪力和顶点位移。

结构初始抗侧刚度 K_0：

$$K_0=\frac{V_y}{\Delta_y} \tag{3}$$

结构屈服位移 Δ_y 和屈服力 V_y：

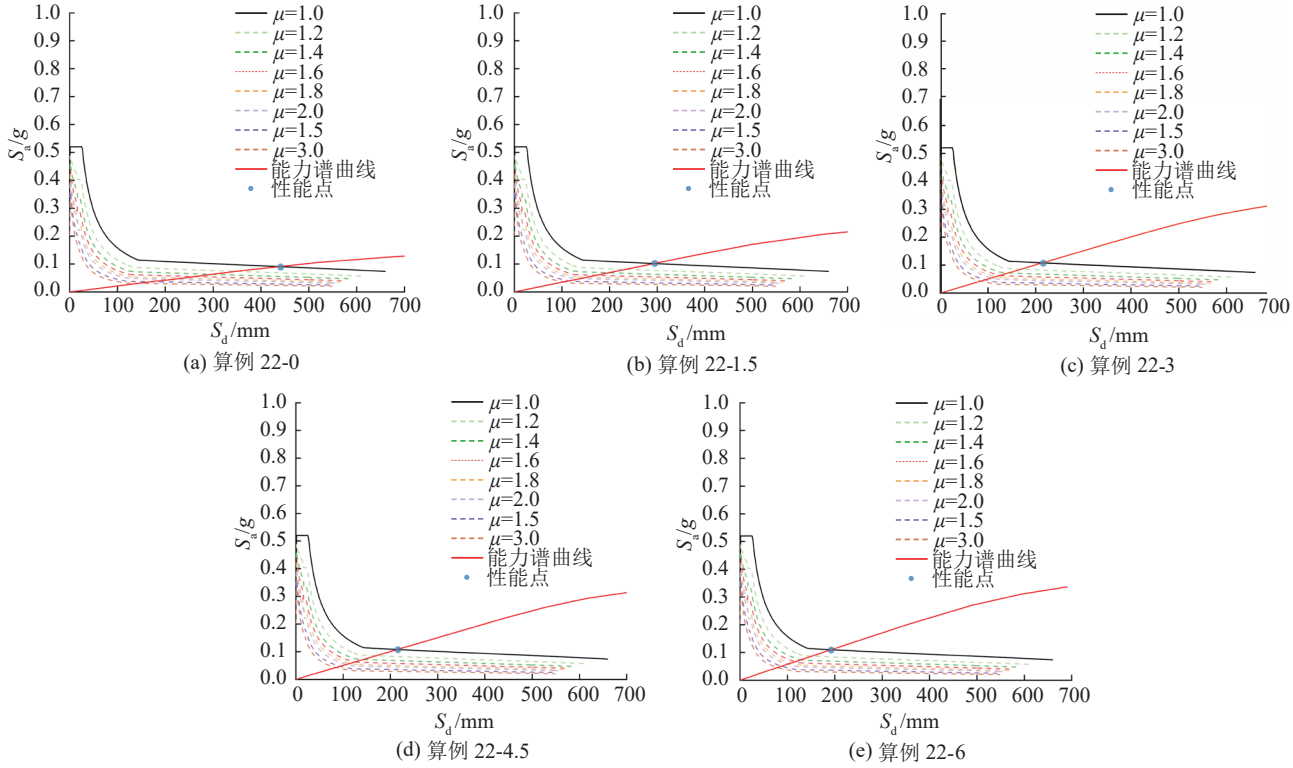
$$\Delta_y=\frac{2S-V_b\Delta_m}{K_0\Delta_m-V_b} \tag{4}$$

$$V_y=\frac{K_0(2S-V_b\Delta_m)}{K_0\Delta_m-V_b} \tag{5}$$

3.2 确定结构性能点

为充分考虑高阶振型的影响，本文采用改进的能力谱法求解结构影响系数R。首先将原始推覆曲线转化为能力谱曲线，然后将各结构算例的能力谱曲线与弹塑性需求谱曲线置于同一坐标系中，两者的交点即为结构的性能点。

在求解结构性能点时，能力谱曲线可能与需求谱曲线存在多个交点。应迭代调整延性系数μ，使两侧μ相互逼近至收敛，方可认为满足要求。各结构的能力谱曲线与中震需求谱的对应关系如图11所示。



(a) 算例 22-0　(b) 算例 22-1.5　(c) 算例 22-3

(d) 算例 22-4.5　(e) 算例 22-6

图11 所有算例的能力谱曲线与需求谱对应关系及性能点

Fig. 11 Correspondence between capacity spectrum curves and demand spectra, and performance points for all examples

确定结构性能点后，由于能力谱与需求谱的交点位于弹性段，取延性系数μ=1，即采用弹性需求谱求解各结构算例的影响系数及其他性能系数，结果列于表3。

表3 结构性能系数

Table 3 Structural performance factors

结构算例	V_d/kN	Δ_d/mm	V_y/kN	Δ_y/mm	V_e/mm	Δ_e/mm	R_Ω	R_μ	R
22-0	7 768.980	125.354	45 366.429	731.993	42 146.577	680.041	5.839	0.929	5.425
22-1.5	9 019.014	87.539	77 336.611	750.636	45 786.523	444.408	8.575	0.592	5.077
22-3	11 086.784	69.312	107 485.036	671.974	51 330.566	320.908	9.695	0.478	4.630
22-4.5	11 746.912	72.375	109 927.184	677.279	53 203.065	327.792	9.358	0.484	4.529
22-6	12 556.256	70.289	102 267.812	572.486	53 613.047	300.121	8.145	0.524	4.270

4 结构影响系数计算结果分析

不同扭转角度对结构影响系数R的影响如图12所示。随着扭转角度增大，R呈减小趋势。根据计算公式[式(1)]可知，R与结构的设计基底剪力V_d、中震性能点对应的弹性基底剪力V_e相关。随着每层扭转角度的增加，结构的设计基底剪力V_d增大，中震性能点对应的位移有所减小。尽管结构初始抗侧刚度的提高使弹性基底剪力V_e随扭转角度增加而增加，但其增幅小于基底剪力V_d的增幅，因此R相应减小。综上可知，在结构层数相同的情况下，结构影响系数与每层扭转角度之间呈反比

关系。

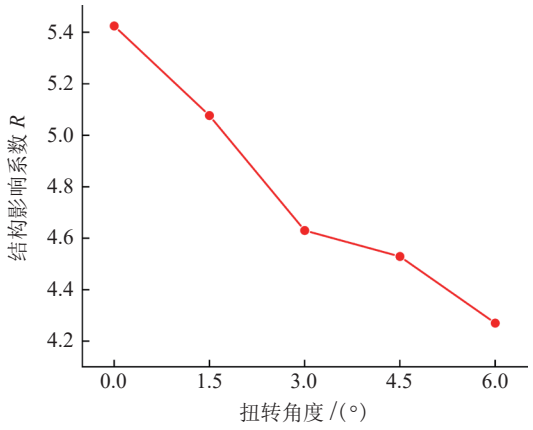


图 12　扭转角度对结构影响系数的影响

Fig. 12　Effect of twist angle on the structural influence coefficient

进一步分析表 3 中核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的超强系数和延性系数。结构超强效应与整体刚度密切相关，其中由构件截面选型所引入的构造超强是主要影响因素。由于结构扭转造型要求巨型柱倾斜布置，削弱了其竖向承载能力；同时，扭转角度的增大会使结构所受扭转效应增强。为弥补竖向承载能力的削弱并保证结构具有足够刚度抵抗增大的扭转效应，必须不断增大核心筒等构件的截面尺寸。核心筒作为主要抗侧力构件，显著提高了结构整体刚度。巨大的整体刚度提升了结构超强，使其实际屈服水准大大提高，相应的屈服荷载 V_y 也随之增大，最终导致结构超强系数 R_Ω 的计算值偏大。对比非扭转结构（扭转 0°算例 22-0）和其他扭转结构算例的结构延性系数 R_μ，发现其他扭转结构算例的 R_μ 均有明显降低，最大降幅达 48.5%。这表明扭转对结构延性十分不利。尽管结构主要构件均采用钢材，材料本身延性良好，但由于结构竖向构件数量较少，且钢材在大变形下易失稳，核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的整体延性系数远低于常规结构。

本文研究的核心筒-竖向错位桁架扭转体结构具有极高的屈服点，计算所得结构影响系数 R 显著高于《抗震规范》所采用的统一设计值 2.812 5，说明现行抗震设计方法过于保守。研究发现，该体系在满足规范要求后表现出显著的承载能力冗余，其延性耗能潜力未得到充分利用。为提高材料利用效率并确保结构安全，本文提出的 R 值优化方法参照文献[18-19]的保守取值原则，将扭转角 6°工况（算例 22-6）的 R=4.270 作为建议值。

结构影响系数 R 是反映结构抗震能力的经验性系数，是结构超强与结构延性的综合体现。我国《建筑工程抗震性态设计通则（CECS 160—2004）》[20]（以下简称《通则》）对不同钢结构体系给出了具体的结构影响系数建议值（表 4）。其中，框架-核心筒的结构影响系数建议取 3.704。框架-核心筒体系主要由框架承担重力荷载，侧向抗力主要由核心筒提供，框架则提供赘余的侧向抗力。本文研究的结构体系与框架-核心筒具有相似的工作原理：空腹桁架承担重力荷载，核心筒是主要抗侧力构件，巨型柱和桁架腹杆提供赘余侧向抗力。但由于承担重力荷载的空腹桁架为隔层布置，导致结构竖向不连续；同时，巨型柱因扭转而倾斜布置，削弱了其竖向承载能力。为了弥补竖向承载力缺失和刚度削弱，本文通过增大核心筒及相关构件截面尺寸提高了结构赘余度。上述设计差异使得本文提出的核心筒-竖向错位桁架扭转体结构体系的结构影响系数建议值（4.270）较常规框架-核心筒体系提高 15.3%。

表 4　《通则》建议的钢结构影响系数

Table 4　Structural influence coefficients for steel structures recommended by the *General Rule for Performance-based Seismic Design of Buildings*

结构材料	结构体系	结构影响系数 R
钢	框架	4.000
	框架-核心筒	3.704
	框架-中心支撑	2.857
	框架-偏心支撑	4.000
	筒体和巨型框架	3.333

5　结论

本文设计了 5 个不同扭转角度的核心筒-竖向错位桁架扭转体结构模型，采用分布侧向力调整法的 Pushover 分析及改进能力谱法，求解了各结构算例的结构影响系数 R，得到以下结论：

（1）核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的竖向构件数量较少，且巨型柱因扭转而倾斜。为保障结构安全，需增大核心筒斜柱等构件的截面尺寸，从而显著提高结构整体刚度。

（2）核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的影响

系数R值介于4.270～5.425之间。随着扭转角度增大,该结构体系的R值减小。基于安全考虑,最终建议取扭转6°算例22-6的R=4.270作为设计取值。

(3) 由于核心筒-竖向错位桁架扭转体结构的R值大于现行的《抗震规范》所采用的2.812 5,表明若按传统非扭转结构的影响系数取值进行设计,其地震作用计算值可能被高估,导致结构设计偏于保守,经济性不足。

(4) 核心筒-竖向错位桁架扭转体结构体系在满足现行规范设计要求后,仍表现出显著的承载能力冗余,因此,其R值计算结果高于《通则》对一般钢结构体系的建议取值。设计中应统筹抗侧刚度与延性需求,实现抗震安全性与经济性的平衡,避免陷入"强而不经济"的设计困境。本研究为该类结构在抗震设计中的应用提供了理论依据和实践参考。

参考文献(References)

[1] 倪鑫珂. 扭转体建筑结构中核心筒与框架的相互作用分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021:24-59.
Ni Xinke. Analysis of the interaction between core tube and frame in twisting-shaped building structure [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021:24-59.

[2] 陈勇. 扭转体建筑结构在水平地震作用下的扭转耦联效应分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2023:27-45.
Chen Yong. Analysis of torsional coupling effect of torsional building structure under horizontal earthquake [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2023:27-45.

[3] 姚立. 扭转体结构的竖向地震作用分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2023:23-36.
Yao Li. Analysis of vertical seismic action of torsion structure [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2023:23-36.

[4] 张敬礼, 叶秀信. 台北陶朱隐园住宅大楼结构工程设计[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(1): 55-65.
Chang Kingle, Yeh Hsiuhsin. Structural design of Tao Zhu Yin Yuan residential building[J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(1): 55-65.

[5] Grosman S. Critical local damage scenarios for obustness assessment of irregular structures [D]. London : Imperial College London, 2019.

[6] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].

[7] 吕西林, 章红梅. 对《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》的评述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 180-186.
Lü Xilin, Zhang Hongmei. Comments on *General rule for performance-based seismic design of buildings*[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 180-186.

[8] 童根树, 赵永峰. 中日欧美抗震规范结构影响系数的构成及其对塑性变形需求的影响[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(5): 53-62.
Tong Genshu, Zhao Yongfeng. Composition of structural behavior factors in codes of China, Japan, Europe and USA for earthquake-resistance and their corresponding ductility demands [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(5): 53-62.

[9] 陈全. 钢框架结构影响系数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012:18-45.
Chen Quan. Study on steel frame structural influencing coefficient[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012:18-45.

[10] 杨俊芬, 顾强, 何涛, 等. 用增量动力分析方法求解人字形中心支撑钢框架的结构影响系数和位移放大系数(Ⅰ): 方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 86-95.
Yang Junfen, Gu Qiang, He Tao, et al. Response modification factor and displacement amplification factor for inverted V-CBSFs based on IDA (Ⅰ): method[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 86-95.

[11] 杨俊芬, 顾强, 万红, 等. 用增量动力分析方法确定人字形中心支撑钢框架的结构影响系数和位移放大系数(Ⅱ): 算例[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 64-71.
Yang Junfen, Gu Qiang, Wan Hong, et al. Response modification factor and displacement amplification factor for inverted V-CBSFs based on IDA (Ⅱ): examples[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(3): 64-71.

[12] 李慎, 王泽宇, 田建勃, 等. 高强钢组合K形偏心支撑结构的结构影响系数和位移放大系数研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(1): 31-40.
Li Shen, Wang Zeyu, Tian Jianbo, et al. A study on the structural influence coefficient and displacement amplification coefficient of high-strength steel composite K-type eccentrically braced structure [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(1): 31-40.

[13] 郑亮, 秦成, 郭宏, 等. 交错桁架体系结构影响系数研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(13): 84-88.
Zheng Liang, Qin Cheng, Guo Hong, et al. Study on structural influencing coefficient of staggered truss steel framing system [J]. Building Structure, 2020, 50(13): 84-88.

[14] 王蓉. 联肢钢板剪力墙的结构影响系数和位移放大系数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022:61-95.
Wang Rong. Research on response modification factor and deflection amplification factor of coupled steel plate shear wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022:61-95.

[15] JGJ 99—2015 高层民用建筑钢结构技术规程[S].
JGJ 99—2015 Technical specification for steel structure of tall building[S].

(下转第 1446 页)