| 第38卷 第4期(785~798) | 中 国 地 震                      | Vol. 38 No. 4 |
|-------------------|------------------------------|---------------|
| 2022 年 12 月       | EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA | Dec. 2022     |

孙锐,张佳琳,于东杰,2022. 高层医疗建筑消能减震技术应用研究. 中国地震,38(4):785~798.

# 高层医疗建筑消能减震技术应用研究

孙锐1) 张佳琳2) 于东杰1)

1)中航天建设工程集团有限公司,北京 100070
2)中建科技集团有限公司,北京 100070

摘要 医疗类建筑是抗震救灾的重要场地,如何保证医疗建筑在发生地震时实现"大震不倒"甚至"功能不中断",成为值得研究的关键问题。对于位于发震断层附近的医疗类建筑,本文以实际项目为例,采用粘滞阻尼器作为一种消能减震的手段,将减震结构与非减震结构在多遇地震和罕遇地震工况下的地震响应进行对比。结果表明:多遇地震工况下,粘滞消能器发生轴向拉压变形开始耗能,能够提供 3% 的附加阻尼比,主体结构地震力减小,结构构件尺寸较非减震结构能够更好地满足医疗建筑的使用要求; 罕遇地震工况下,设置粘滞消能器的结构 X 与 Y 向最大层间位移角分别为1/214 和 1/230,结构塑性铰分布满足"强柱弱梁"的设计准则,整体结构基本满足"大震下功能不中断"的性能要求。

关键词: 发震断层 医疗建筑 粘滞消能器 弹塑性分析

[文章编号] 1001-4683(2022)04-0785-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

СМҮК

对于医疗类建筑,由于活动群体在地震中的逃生能力较差,抗震设计中将其定义为重点 设防类。除此之外,当地震发生后,医疗类建筑是抗震救灾的重要场地,如何提高其抗震能 力,保证其在发生地震时实现"大震不倒"甚至"功能不中断",成为值得研究的关键问题。 我国地震带分布较广,断层地震带附近区域的城市群若发生地震,相比于非断层区域,其所 造成损失要大很多,如2010年青海省玉树7.1级地震发生于甘孜一玉树断裂带,震中位于 玉树城区约44km处(张勇等,2010)。近断层地震动包含了速度脉冲效应,相比远场地震 动,其对城市的损害程度要大很多。《建筑抗震设计规范》中通过放大地震力来评价近场地 震动对建筑物抗震设计的影响(张冰,2007;中华人民共和国住房和城乡建设部等,2016)。 对于高烈度区医疗类建筑,当建筑物位于发震断层两侧10km以内,在进行结构构件设计时, 将抗震等级提高一级的同时,地震力仍要放大1.25~1.5倍。当层数较高时,剪力墙墙体较 厚,当平面不规则时扭转效应更加明显,甚至在多遇地震工况下墙体底部即出现较大拉应

[项目类别]"十三五"科技部科技支撑计划子课题"装配式钢筋混凝土车站技术经济与相关政策研究" (2017YFB1201104)资助

<sup>[</sup>收稿日期] 2022-05-22 [修定日期] 2022-08-18

<sup>[</sup>作者简介] 孙锐,男,1984年生,高级工程师,主要从事工程施工管理。E-mail:1367778559@qq.com 张佳琳,通讯作者,女,1984年生,高级工程师,主要从事新型建筑工业化设计与施工。 E-mail:idou2012@126.com

力,连梁截面超筋现象严重。而仅通过增加构件截面尺寸的单一抗震手段往往难以达到理 想效果,对建筑的使用功能影响较大,同时工程成本也相应增加(张孝荣等,2020)。

近些年,随着消能减震技术的迅速发展,高烈度区高层建筑中减震器的使用也越来越 多。作为一种新型抗震设计手段,其以一种典型的"主动以柔克刚"设计思路,代替了传统结 构中使用的"被动硬抗"。具体表现为,在主体结构变形较大区域设置消能器,当地震来临 时,消能器由于屈服点或耗能起始点较低,相比于主体结构率先进入屈服阶段(闫新等, 2021;裴星洙等,2013)。由于消能器延性要求较高,屈服后平台段较长,故在地震工况下耗 能效果较为明显。消能器为结构增添了一道防线,保证了主体结构免遭破坏,提高了结构的 安全性(王子龙,2020)。

随着国内外学者对消能器产品的研究越来越深入,研发产品种类也越来越丰富。目前 市场上应用较为成熟的消能器产品主要为金属类耗能及高分子新材料耗能。金属类耗能产 品主要为屈曲约束支撑、金属剪切型消能器等;高分子新材料产品主要为粘滞消能器、粘弹 性消能器及摩擦消能等;从受力机理上分为位移型(F=Kx)和速度型(F=CV<sup>e</sup>)消能器(周 云等,2019)。历次地震经验表明,尽管按现行抗震设计规范设计施工的结构在遭遇设防标 准的罕遇地震作用时基本不倒塌,但其震害现象与通过弹塑性分析得到的震害结果却相差 甚远。相比位移型消能器,速度型消能器由于刚度较小,对于主体结构周期基本无影响,因 此得到广大设计人员的青睐。

自 2014 年开始,国家及省级建设部门相继发布了一系列关于减隔震技术在房屋建筑工 程中的应用指导性文件,特别是对于高烈度区的学校、医院等重点设防类建筑,从国家政策 引导及法律法规层面均明确指出需要优先考虑采用隔震减震技术(付光磊等,2020),进一步 推动了减隔震技术的发展。代表性的工程有北京大兴新机场航站楼项目、云南省保山市人 民医院及甘肃省妇女儿童医疗综合体等,如图1所示。



(a) 北京新机场航站楼

(b) 云南省保山市人民医院

(c) 甘肃省妇女儿童医疗综合体

图1 速度型消能器应用工程

粘滞消能器作为一种典型的速度型消能器,由缸体、活塞、阻尼通道、阻尼介质和活塞杆等部分组成,如图2所示。消能器通过活塞杆的轴向拉压,油缸内的阻尼介质通过活塞上的阻尼孔产生阻尼力,将运动的动能转化为其他形式能量,从而减小结构构件因地震作用而产生的损伤,达到消能减震的目的(胡庆生,2019)。在地震作用下,粘滞消能器典型的荷载-位移曲线如图3所示。工程中常用的布置方式为埋置于墙内的销轴连接及人字形钢支撑销轴连接(图4、图5)。

786

**CMY**K



图2 粘滞消能器构造



图4 销轴墙式



图3 荷载位移曲线



图5 销轴人字形

# 1 工程概况及常规结构方案问题

本项目位于云南省某医院住院部,属于重点设防类建筑,地上共计 11 层,地下 1 层,建 筑结构高度 46.2m,面积约 26600m<sup>2</sup>。基本结构设计参数如下:八度(0.3g)设防,第二组,Ⅱ 类场地,*T*g=0.4s。根据项目的场地勘察报告,场地本身距离发震断层小于 10km,需要考虑 近场增大系数 1.25。结构初步方案比对后,对结构模型进行了试算,结果见表1,其中结构周 期折减系数为 0.8。建筑平面图如图6 所示,盈建科(YJK)模型如图7 所示。

| 表1  |               | 方到                                   | 案比选  |
|-----|---------------|--------------------------------------|--|
| 项目  | 结构体系          | 结构设计参数                               | 不利因素   |
| 方案一 | 框架体系          | 框架一级                                 | 超出规范建筑适用高度;若采用需要进行超限审查   |
| 方案二 | 剪力墙           | 一级,墙厚 400mm                          | 建筑一层门厅需求大空间,一层较多剪力墙需要转换,结构<br>受力不利;平面墙体较多、较厚,室内空间影响较大;小震<br>下剪力墙出现拉应力,墙体内需设置型钢 |
| 方案三 | 框架-剪力墙        | 框架一级,剪力墙一级墙厚<br>350mm,柱子 750mm×750mm | 墙体较厚,梁柱截面较大; 连梁超筋严重  |
| 方案四 | 隔震,<br>框架-剪力墙 | 上部结构设防烈度减小<br>一度,墙厚 300mm            | 设置隔震层,建筑地下埋深加高;大震下隔震垫拉应力超限   |

4 期



#### 图6 建筑平面图



图 7 YJK 模型

考虑地震近场增大系数为1.25,上部结构实际地震作用设防烈度为IX度。当采用传统 设计方法时,结构受力较大,较多墙体墙肢厚度为350~400mm。墙体对于建筑布置方案影 响较大,建筑的使用功能受到影响,同时多遇地震下剪力墙及连梁出现多处抗剪截面不足; 在墙体内设置型钢时施工难度加大。当采用隔震方案时,角部柱下隔震垫拉应力超限,隔震 支座大震下易出现橡胶拉脱或者倾覆,结构安全无法保证。

### 2 消能减震方案

由于建筑内部隔墙较多,支撑式金属消能器对建筑的门窗洞口有影响,同时考虑消能器 需提供较高附加阻尼比,本工程最终选用墙式连接粘滞消能器。由于粘滞消能器基本不提 供静刚度,优先将消能器布置在结构平面变形较大部位。当发生层间变形时,消能器两端变 形越大,耗能效果越好。根据本工程的结构布置及建筑功能,消能器的布置参数见表2。根 据规范的相关要求,标准层消能器布置如图8所示,图中红色阴影即为消能器布置位置。

采用大型有限元分析软件 SAP2000 进行建模,模型如图9 所示。通过将 SAP2000 与 YJK 模型进行无消能器模型的模态及反应谱分析,将结构质量、周期及楼层剪力主要动力特 性结果汇总,见表3。通过对比可知,两个模型差异均小于 5%,SAP2000 模型可用于时程分 析。

788

СМҮК

38 卷



图8 消能器平面布置图



注:图中红色部分为减震器,非减震模型无此部分。 图9 SAP2000 计算模型

| 表 3 SAP2000-YJK 结果指标参数比较 |       |       |       |       |         |          |   |  |  |  |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|----------|---|--|--|--|
| 比较项                      | 正日/.  |       | 周期/s  |       | 地震剪力/kN |          |   |  |  |  |
|                          | 比较坝   | 庾重/t  | 第一周期  | 第二周期  | 第三周期    | X        | Y |  |  |  |
| YJK                      | 81660 | 1.338 | 1.314 | 1.174 | 42996.3 | 42623.50 |   |  |  |  |
| SAP2000                  | 81928 | 1.319 | 1.293 | 1.163 | 44672.1 | 43892.40 |   |  |  |  |
| 差值/%                     | 0.33  | 1.450 | 1.610 | 0.890 | -3.9    | -2.98    |   |  |  |  |

中国地震

根据《建筑抗震设计规范》5.1.2条的相关要求,当采用时程分析时需要进行地震波的选取(中华人民共和国住房和城乡建设部等,2016)。根据本项目场地条件,选取5条天然地震 波及2条拟合人工波。5条天然波的名称分别为:Big Bear -01\_NO\_907,Chi-Chi-Taiwan-04\_NO\_2697,Chi-Chi-Taiwan-04\_NO\_2717,Coyote Lake\_NO\_151,Chi-Chi-Taiwan-04\_NO\_2960, 天然波基本信息及简称如表4所示。分析7条地震波的加速度反应谱与标准反应谱,通过 对比可以发现,在特征周期下对应的反应谱插值分别为-3.70%、-1.05%及-8.31%,所有差 值均小于 20%,与统计意义相符(图10)。

| _  |   |
|----|---|
| Ŧ. | 1 |
| x  | - |

790

地震波信息

| 时程<br>简称 | 时称全称                      | 地点       | 地震<br>年份 | 峰值加速度<br>/(cm・s <sup>-2</sup> ) | 采集间隔<br>/s | 布点<br>数量 |
|----------|---------------------------|----------|----------|---------------------------------|------------|----------|
| T1       | Big Bear-01_NO_907        | 美国加利福尼亚州 | 1992     | 60.5                            | 0.010      | 5902     |
| T2       | Chi-Chi-Taiwan-04_NO_2697 | 中国台湾     | 1999     | 31.2                            | 0.004      | 11752    |
| Т3       | Chi-Chi-Taiwan-04_NO_2717 | 中国台湾     | 1999     | 59.2                            | 0.004      | 12502    |
| T4       | Coyote Lake_NO_151        | 美国加利福尼亚州 | 1979     | 37.4                            | 0.005      | 8001     |
| Т5       | Chi-Chi-Taiwan-04_NO_2960 | 中国台湾     | 1999     | 49.6                            | 0.005      | 14000    |



注:图例中 R1、R2 分别为人工波 1 及人工波 2 的时程简称。 图 10 加速度反应谱对比曲线

各条地震波作用下结构的底部剪力与反应谱对比如表5所示。从表中可知,7条地震波时程分析所得的最大底部剪力均满足反应谱计算结果的65%~135%,且平均值大于反应谱计算结果的80%,符合规范的相关规定,故可用于结构时程分析。

利用 SAP2000 中连接单元 Damper 模拟粘滞消能器,模型中设置参数如图11 所示。分别对上述所选 7 条波进行多遇地震工况下的时程分析,结构层间地震剪力及位移角曲线如图 12~15 所示。

从图中可以看出,所有波地震剪力及位移角平均值曲线均小于反应谱工况下对应的曲 线数值,故结构设计可以选用反应谱值(反应谱附加阻尼比为 3%,即结构阻尼比为 8%)作 为设计依据。

СМҮК

38 卷

表 5

4 期

#### 各地震波与反应谱计算的基底剪力对比

| 工况    |   | 反应谱   | R1    | R2    | T1    | T2    | Т3    | T4    | Т5    | 时程平均值 |
|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 剪力/kN | X | 40549 | 41446 | 36769 | 35560 | 37780 | 40968 | 38866 | 46615 | 39572 |
|       | Y | 40444 | 43288 | 38795 | 35370 | 40828 | 39953 | 37593 | 44925 | 40107 |
| 比例/%  | X | 100   | 102   | 91    | 88    | 93    | 101   | 96    | 112   | 98    |
|       | Y | 100   | 107   | 96    | 87    | 101   | 99    | 93    | 111   | 99    |

| <b>F##</b>  | et.       | Dampar - Ev       | -                       | -             | () #1.    | ~       |               |
|-------------|-----------|-------------------|-------------------------|---------------|-----------|---------|---------------|
| B# 5        | #<br>#    | VERV              |                         | 0121 A        | 5 非线性连接器性 |         |               |
| RUA         | **        | VPUY              |                         | 5 M 32        |           |         |               |
| 汪祥          |           |                   |                         | 際款/量          | 连接属性      | [Langer |               |
| 总质量和结       |           |                   |                         |               | 名称        | IVIUY   |               |
| 质量          |           | 0,                |                         | 转动作           | 分童        | lua     |               |
| 重量          |           | 0.                |                         | 转动专           | 类型        | Dampe   | r - Exponenti |
|             |           |                   |                         | 转动作           | 非线性       | 是       |               |
| 112甲腈和3     |           |                   |                         |               | 线性分析      |         |               |
| 线弹簧!        | 的从属于      | 长度                |                         |               | 有效刚度      | 0.      |               |
| 面弹簧         | 的从属       | 后积                |                         |               | 有效阻尼 60.  |         |               |
| 连接属性        |           |                   |                         |               | 剪切位置      |         |               |
| 分量          | 固定        | 非线性               | 属性                      | 分量            | 始于J端的距离   | l.      | 250.          |
| 01          |           |                   | 續改/還示                   | 81            | 非线性分析     |         |               |
| U2          |           |                   | 修改/显示                   | 92            | 同度        |         | 1200          |
| 🖾 na        |           |                   | 修改/显示                   | R3            | 阻尼系數      |         | 60.           |
|             |           |                   | 全选                      |               | 阻尼指数      |         | 0.25          |
| Stiffness C | ptions    |                   |                         |               |           |         |               |
| Stiffnes    | s Used fo | r Linear and Mode | I Load Cases            | 5             |           | E       | 取消            |
| Stiffnes    | s Used fo | r Stiffness-propo | tional Viscous Damping  | , i           | -         |         |               |
| Stiffnes    | s-proport | ional Viscous Dan | ping Coefficient Modifi | cation Factor |           | 1.      |               |

#### 图11 消能器模型参数

多遇地震工况下,将非减震结构和减震结构进行时程分析,将所有波的楼层剪力及层间 位移角均值汇总,如表6所示。从表中可以看出,通过布置粘滞消能器,X及Y向最大层间 位移角分别为1/989 和1/1035,均满足规范1/800 的要求,且留有一定的余量。同时,通过 减震前后的层间位移及楼层剪力的对比结果可知,结构在布置消能器后,楼层基底剪力X向 与Y向分别减小了14%和15%;最大层间位移角减小了30%左右。表7给出了对应楼层的 加速度对比数值,各楼层的峰值加速度减小近20%。由此可知,通过增设粘滞消能器,主体 结构地震力得到削弱,结构的整体稳定性有所提升,粘滞消能器有吸收地震能量的作用,达 到减震的效果。

天然波1在X及Y向多遇地震工况下粘滞消能器滞回曲线如图16、17所示,结构在小 震作用下,粘滞消能器滞回耗能,滞回曲线饱满,也进一步验证了消能器分担了一部分地震 能量,从而保护了主体结构的安全。

根据《建筑抗震设计规范》12.3.4条相关规定,在建筑结构体系中增设消能减震装置后, 结构的附加阻尼比计算可以参照以下公式进行

СМҮК

791

792



中国地震

图 12 多遇地震工况下减震结构 X 向层间剪力



图 14 多遇地震工况下减震结构 X 向层间位移角

图13 多遇地震工况下减震结构 Y 向层间剪力



图15 多遇地震工况下减震结构 Y 向层间位移角

MYK

| 表 6 |
|-----|
|-----|

#### 多遇地震工况下减震与非减震结构地震时程分析剪力及位移角结果均值对比

| X 向层间剪力均值 |            | 勾值        | Y向层间剪力均值/kN |            |           | X 向层间位移角 |                           |                          | Y 向层间位移角 |                           |                          |      |
|-----------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|----------|---------------------------|--------------------------|----------|---------------------------|--------------------------|------|
| 楼层        | 非减震<br>/kN | 减震<br>/kN | 减震率         | 非减震<br>/kN | 减震<br>/kN | 减震率      | 非减震<br>/rad <sup>-1</sup> | 减震<br>⁄rad <sup>-1</sup> | 减震率      | 非减震<br>⁄rad <sup>-1</sup> | 减震<br>⁄rad <sup>-1</sup> | 减震率  |
| 12        | 1811       | 999       | 0.45        | 2170       | 971       | 0.55     | 1881                      | 3418                     | 0.45     | 1746                      | 2974                     | 0.41 |
| 11        | 7834       | 4618      | 0.41        | 8135       | 4488      | 0.45     | 979                       | 2021                     | 0.52     | 917                       | 1576                     | 0.42 |
| 10        | 10651      | 7916      | 0.26        | 11991      | 7691      | 0.36     | 792                       | 1603                     | 0.51     | 811                       | 1381                     | 0.41 |
| 9         | 15496      | 11214     | 0.28        | 16032      | 10895     | 0.32     | 732                       | 1395                     | 0.48     | 782                       | 1290                     | 0.39 |
| 8         | 19565      | 14525     | 0.26        | 19755      | 14111     | 0.29     | 758                       | 1329                     | 0.43     | 771                       | 1211                     | 0.36 |
| 7         | 23171      | 17842     | 0.23        | 23855      | 17332     | 0.27     | 748                       | 1201                     | 0.38     | 783                       | 1148                     | 0.32 |
| 6         | 27865      | 21159     | 0.24        | 27086      | 20553     | 0.24     | 785                       | 1164                     | 0.33     | 825                       | 1122                     | 0.26 |
| 5         | 32394      | 25122     | 0.22        | 31612      | 24404     | 0.23     | 709                       | 989                      | 0.28     | 784                       | 1035                     | 0.24 |
| 4         | 35872      | 28793     | 0.20        | 35221      | 27968     | 0.21     | 796                       | 1098                     | 0.28     | 921                       | 1222                     | 0.25 |
| 3         | 39060      | 32403     | 0.17        | 38180      | 31474     | 0.18     | 766                       | 1035                     | 0.26     | 982                       | 1304                     | 0.25 |
| 2         | 42109      | 36199     | 0.14        | 41259      | 35160     | 0.15     | 908                       | 1223                     | 0.26     | 1199                      | 1561                     | 0.23 |
| 1         | 43371      | 37582     | 0.13        | 42614      | 37022     | 0.13     | 5614                      | 5889                     | 0.05     | 11500                     | 12645                    | 0.09 |

注:减震率=(非减震-减震)/非减震。

#### 多遇地震工况下各层加速度结果均值对比

| 株巨 | X向屋                      | 层峰值加速度均值                |      | Y 向层峰值加速度均值              |                          |      |  |
|----|--------------------------|-------------------------|------|--------------------------|--------------------------|------|--|
| 安云 | 非减震/(m·s <sup>-2</sup> ) | 减震/(m·s <sup>-2</sup> ) | 减震率  | 非减震/(m·s <sup>-2</sup> ) | 减震/(m ·s <sup>-2</sup> ) | 减震率  |  |
| 12 | 2.25                     | 1.62                    | 0.28 | 1.80                     | 1.34                     | 0.25 |  |
| 11 | 2.51                     | 1.86                    | 0.26 | 2.01                     | 1.55                     | 0.23 |  |
| 10 | 2.10                     | 1.62                    | 0.23 | 1.88                     | 1.50                     | 0.20 |  |
| 9  | 1.88                     | 1.49                    | 0.21 | 1.62                     | 1.34                     | 0.17 |  |
| 8  | 1.66                     | 1.34                    | 0.19 | 1.37                     | 1.09                     | 0.20 |  |
| 7  | 1.45                     | 1.20                    | 0.17 | 1.14                     | 0.89                     | 0.22 |  |
| 6  | 1.25                     | 1.00                    | 0.20 | 1.02                     | 0.83                     | 0.18 |  |
| 5  | 1.11                     | 0.85                    | 0.23 | 0.72                     | 0.58                     | 0.19 |  |
| 4  | 0.97                     | 0.74                    | 0.24 | 0.51                     | 0.40                     | 0.22 |  |
| 3  | 0.70                     | 0.57                    | 0.19 | 0.32                     | 0.24                     | 0.24 |  |
| 2  | 0.49                     | 0.41                    | 0.17 | 0.15                     | 0.12                     | 0.18 |  |
| 1  | 0.15                     | 0.13                    | 0.15 | 0.08                     | 0.07                     | 0.12 |  |

$$\xi_a = \sum W_{cj} / (4\pi W_s) \tag{1}$$

式中: $\zeta_a$ 为结构的附加有效阻尼比, $W_{ij}$ 为第j个消能部件往复循环一周所消耗的能量, $W_{j}$ 为结构的总应变能(董苏媛等,2017)。

通过式(1)进行小震下结构的附加阻尼比计算,如表8所示,*X*与*Y*向附加阻尼比分别为3.99%及3.79%,满足YJK模型中附加阻尼比3.0%(即总阻尼比8.0%)的设计要求。

对于减震结构,由于设置了消能器,受到的地震力减小,上部结构梁柱截面可以根据建

794



图 16 X 向粘滞消能器荷载-位移曲线



图 17 Y 向消能消能器荷载-位移曲线

| 表 8 | 结构附加阻尼比                           |                                     |                             |           |                                   |                                     |                                  |           |  |  |
|-----|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------|--|--|
|     |                                   | X 方向                                |                             |           |                                   | Y方向                                 |                                  |           |  |  |
| 地震波 | 结构总应变能<br>W <sub>s</sub> /(kN・mm) | 消能器总耗能<br>W <sub>cjx</sub> /(kN・mm) | 附加阻尼比<br>ζ <sub>ax</sub> /% | 平均值<br>/% | 结构总应变能<br>W <sub>s</sub> /(kN・mm) | 消能器总耗能<br>W <sub>cjx</sub> /(kN・mm) | 附加阻尼比<br><i>ζ<sub>ax</sub>/%</i> | 平均值<br>/% |  |  |
| R1  | 410605.0                          | 179745.0                            | 3.48                        |           | 351909.0                          | 165276                              | 3.74                             |           |  |  |
| R2  | 464094.0                          | 242920.0                            | 4.17                        |           | 403590.0                          | 200634                              | 3.96                             |           |  |  |
| T1  | 508869.6                          | 246154.0                            | 3.85                        |           | 478972.2                          | 221100                              | 3.67                             |           |  |  |
| T2  | 474031.6                          | 279030.0                            | 4.68                        | 3.99      | 457840.0                          | 233328                              | 4.06                             | 3.79      |  |  |
| Т3  | 449971.2                          | 239030.0                            | 4.23                        |           | 408183.0                          | 190186                              | 3.71                             |           |  |  |
| T4  | 435531.5                          | 210721.6                            | 3.85                        |           | 425307.4                          | 203879                              | 3.81                             |           |  |  |
| Т5  | 449805.4                          | 208670.0                            | 3.69                        |           | 413400.0                          | 187029                              | 3.60                             |           |  |  |

筑要求进行调整,剪力墙厚度由非减震方案下的350mm减小至300mm;同时柱、梁截面分 别由无减震方案下的 750mm × 750mm 及 400mm × 900mm 减小至 600mm × 700mm 及 400mm×750mm。构件截面得到优化,满足了建筑对于部分医疗用房的净高使用要求。粘滞 消能器布置于地上1~10层,共计140组。现场实际安装照片如图18所示,从图中可以看 出,墙式连接粘滞消能器通过消能器两侧预埋件布置于建筑内部隔墙内,后期填筑轻质材料 后,不会对建筑使用功能产生不利影响。

#### 3 消能减震方案的大震性能分析

根据《建筑抗震设计规范》5.5.2条规定:采用隔震和消能减震设计的结构,应进行弹塑 性变形验算。结合 SAP2000 软件进行罕遇地震工况下的弹塑性时程分析,选用多遇地震工 况下的7条地震波,加速度峰值根据规范调整为510cm/s<sup>2</sup>。分析模型假定如表9所示(何熹 等,2017)。

图19、20 给出了罕遇地震下 X 与 Y 向层间位移角,通过查询数据, X 向最大为 1/214, Y 方向为 1/230,相比于规范限值 1/100,满足规范要求且富余量较大,同时非减震结构与减震 结构的层间位移角的比值为  $0.37(X \cap)$  和  $0.40(Y \cap)$ 。在结构中增设消能器后,结构抗震

38卷

СМҮК



图18 粘滞消能器现场安装



性能得到明显提高,更易实现"大震不倒"甚至"功能不中断"的设计性能指标。

除位移角指标外,还需要关注在罕遇地震下结构塑性铰出现的位置及塑性铰对应的屈服状态,进而判断结构所对应的损伤程度。通过塑性铰极限转角能力的大小,SAP2000将其

分为 B、IO、LS、CP、C、D 及 E 共 7 种铰状态,其中 B 为出现塑性铰,C 为倒塌点,D 为残余强度,E 为完全失效。而分析中一般出现较多的 IO、LS 及 CP 则分别对应塑性铰扩展(立即使用)、生命安全及防止倒塌状态。

图21、图22给出了减震结构在人工波1作用下的塑性铰分布情况,从图中可以看出,在 结构中增设消能器后,大部分框架梁和较少部分框架柱出现了塑性铰,梁端已经开始形成屈服,结构形成梁端塑性铰耗能。竖向构件基本处于弹性状态,同时梁端塑性铰也处于 LS 水 平以下,开展程度较低,整体结构接近"大震可修甚至小修后仍可继续使用"的设防目标。



图 21 人工波 1 下结构的塑性铰分布(X 向)



图 22 人工波 1 下结构的塑性铰分布(Y向)

在弹塑性分析中,图23、图24 给出了消能器的荷载-位移曲线。从分析结果可以看出, 本项目选用的粘滞消能在地震作用下滞回曲线饱满,耗能效果显著,进一步说明了增设了粘 滞消能器的结构在罕遇地震作用下表现出较好的减震能力。

### 4 结论

本文以实际项目为例,通过在非减震结构中增设粘滞阻尼器,进而对减震结构及非减震

796



结构在多遇和罕遇地震工况下的地震响应进行对比,得出如下结论:

(1)对于位于发震断层附近的高烈度区医疗类建筑,考虑近场增大系数1.25后,主体结构所收到的地震作用接近IX度设防。传统设计方法下结构构件尺寸较大,建筑使用功能及品质均受到影响;墙体内需设置型钢,设计及施工难度加大。

(2)消能减震技术的应用能够提高结构的整体抗震性能,为发震断层附近高烈度区医疗 类建筑提供了一种可行且有效的设计思路。

(3)多遇地震作用下,结构主体弹性,粘滞消能器在小震下开始耗能,能够提供3%的附加阻尼比; *X*及*Y*向最大层间位移角分别为1/989和1/1035,均满足规范1/800的要求,且留有一定的余量。

(4)多遇地震工况下行进时程分析,相比于非减震结构,增设消能器后楼层 X 与 Y 向基 底剪力分别减小 14%和 15%;最大层间位移角减小 30%左右。主体结构地震力得到削弱, 结构的整体稳定性有所提升,粘滞消能器有吸收地震能量的作用,达到减震的效果。

(5)在罕遇地震下,设置粘滞消能器的结构最大层间位移角分别为1/214(X向)和1/230 (Y向)。竖向构件基本处于弹性状态,同时梁端塑性铰也处于 LS 水平以下,开展程度较低, 整体结构接近"大震可修甚至小修后仍可继续使用"的设防目标。

#### 参考文献

董苏媛,陈亮,2017. 某学校框架结构办公楼消能减震设计研究. 价值工程,36(27):104~107. 付光磊,孙锐,宋妍,2020. 金属阻尼器在高烈度区学校建筑的应用研究. 中国地震,36(1):162~172. 何熹,黄俊,杨剑维,等,2017. 喀什地区某医院儿科业务用房的消能减震设计. 工程抗震与加固改造,39(1):116~121. 胡庆生,2019. 粘滞阻尼器在高烈度区框架结构中的应用. 硕士学位论文. 苏州:苏州科技大学. 裴星洙,贺方倩,2013. 消能减震结构设计方法研究. 建筑结构,43(4):60~65. 王子龙,2020. 粘滞阻尼器减震结构简化设计方法与优化研究. 硕士学位论文. 天津:河北工业大学. 闫新,孟磊,2021. 某检测中心的减震抗震分析. 安徽建筑,28(8):89~91. 张冰,2007. 近场地震作用下框架与桥梁结构抗震分析. 硕士学位论文. 长沙:湖南大学. 张孝荣,叶丽影,曹辉林,2020. 隔震技术在高烈度区剪力墙结构中的应用研究. 震灾防御技术,15(2):305~316.

798

张勇,许力生,陈运泰,2010.2010年青海玉树地震震源过程.中国科学:地球科学,40(7):819~821.

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,2016. GB 50011-2010 建筑抗震设计规 范. 北京:中国建筑工业出版社.

周云, 商城豪, 张超, 2019. 消能减震技术研究与应用进展. 建筑结构, 49(19): 33~48.

# Application of Energy Dissipation and Vibration Reduction Technology in Near-fault High Medical Building

Sun Rui<sup>1)</sup>, Zhang Jialin<sup>2)</sup>, Yu Dongjie<sup>1)</sup>

1) China Aviation Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China

2) China Construction Technology Group Co., Ltd., Beijing 100070, China

**Abstract** As an important site for earthquake prevention and disaster reduction, how to ensure medical buildings in the event of an earthquake to achieve no collapse or even uninterrupted function has become a key issue worthy of study. For the study of near-fault medical buildings, in this paper we take the actual project as an example, using viscous dampers as a means of energy dissipation and vibration reduction, to compare the seismic response of the damping structure and the non-damping structure under frequent and rare earthquakes. The results show that the axial tension and compression deformation of viscous dampers begins to dissipate energy, which can provide 3% additional damping ratio under frequent earthquake to decrease the seismic force of the main structure. The size of structural components can better meet the requirements of medical buildings than that of non-damping structures. Under rare earthquakes, the maximum inter laminar displacement angles in X and Y directions of the structure with viscous dampers are set to be 1/214 and 1/230 respectively. The distribution of plastic hinges of the structure meets the design criterion of "strong column and weak beam". The overall structure basically meets the performance requirement of uninterrupted function under large earthquakes.

Keywords: Causality Fault; Medical buildings; Viscous damper; Elastic-plastic analysis