

基于等价线性化法和底部剪力法的消能减震结构设计

潘鹏¹, 叶列平²

5 (1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点试验室, 北京, 100084;
2. 清华大学土木工程系, 北京, 100084)

摘要: 消能减震结构通过在主体结构中增设专门用于耗散地震能量的阻尼器以达到减小主体结构地震响应, 提高结构抗震性能的目的, 近年来在我国得到了迅速发展。本文借鉴日本工程设计经验, 并结合中国规范, 提出了基于等价线性化法和底部剪力法的消能减震结构设计方法。此方法的基本步骤如下: (1) 根据工程经验和结构设计目标设定结构基本参数, 并设置合适的阻尼器; (2) 采用等价线性化方法求阻尼器等效刚度和阻尼; (3) 根据地震反应谱和底部剪力法, 求解等价线性结构的地震响应; (4) 重复步骤(1) - (3), 至结构满足设计目标; (5) 采用时程分析法对设计结果进行检验。本文给出了该设计方法的基本原理和实现过程, 并结合工程实例证明了该设计方法的有效性。

15 关键词: 消能减震; 结构设计; 等价线性化; 底部剪力法; 滞回型阻尼器; 粘弹性阻尼器
中图分类号: TU36

Design methodology of energy dissipation structures based on equivalent linearization and base-shear methods

panpeng¹, yelieping²

20 (1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration, Ministry of Education, Beijing 100084;
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Energy dissipation structures, which have been developed rapidly in recent years, reduce the seismic response of the main structure and improve the seismic performance by adding energy dissipation devices. This paper proposes an energy dissipation structure design methodology based on equivalent linearization and equivalent base-shear methods in reference to Japanese design practice and Chinese design codes. Schematic procedure of the methodology is as follows: (1) Set basic parameters of the structure according to the structural performance targets and design experiences, and choose appropriate dampers; (2) Calculate the equivalent stiffness and damping of the dampers using equivalent linearization method; (3) Calculate the seismic responses of the equivalent linearization structure using equivalent base-shear method; (4) Repeat step (1) to (3) until the structure meets the performance targets; (5) Use time history method to finally verify the design results. This paper proposes the basic principles and implementation of the energy dissipation structure design methodology, and its effectiveness is proved through a specific engineering example.

30 35 Key words: Energy dissipation; Structure design; Equivalent linearization method; Equivalent base-shear method; hysteresis damper; viscoelastic damper

1 概述

40 消能减震结构通过在主体结构中增设专门用于耗散地震能量的阻尼器来达到减小主体结构地震响应, 提高结构抗震性能的目的。与传统抗震结构体系比较, 被动耗能减震结构体系具有以下特点和优势:

基金项目: 国家自然科学基金项目面上项目(51178250); 清华大学自主科研项目(2010Z01001); 高等学校博士学科点专项科研基金(200800030001)

作者简介: 潘鹏(1976年), 男, 副教授, 土木工程结构

通信联系人: 叶列平(1960年), 男, 教授, 土木工程结构. E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn

45 (1) 消能减震结构体系更为安全。从耗能的角度来看, 传统抗震结构体系的耗能构件就是主体承重构件。由于地震的随机性和结构体系的设计计算误差, 结构在地震中的破坏程度和破坏位置难以人为控制。特别在罕遇地震下, 难以保障承重结构的安全。消能减震结构体系特设的非承重耗能构件或耗能装置可以大量消耗地震能量, 减小结构地震反应, 从而保护了主体承重构件。

50 (2) 消能减震结构体系更为经济。按照传统抗震措施, 通过加大构件截面或者增加配筋来提高结构抗震性能, 导致结构造价增高。消能减震结构的承重和耗能部分分工比较明确, 整体上能够减少抗侧力构件的设置, 减小构件断面, 减少配筋, 同时提高结构抗震安全度。如果采用被动耗能减震结构体系, 通常情况下对于新建建筑可以节省结构 5%—10% 的造价; 对于旧有建筑加固可以节省 10%—60% 的造价^[2]。

55 日本是消能减震结构研究最多, 应用最为广泛的国家。截至到 2000 年, 已建成 300 多栋消能减震结构, 其中大多数是高层建筑结构^[3]。近年来消能减震结构在我国得到了迅速发展, 在北京, 上海和广州等地都有高层消能减震结构的工程应用实例^[4]。本文借鉴日本的工程设计经验, 并结合中国规范, 提出了基于等价线性化法和地震反应谱法的消能减震结构的设计方法, 旨在简化消能减震结构的计算和设计过程, 推广消能减震结构的工程应用。

60

2 消能减震装置

消能减震结构利用消能减震装置吸收地震中输入到结构中的能量, 因此所采用的消能减震装置的性能, 数目以及配置方法对消能减震结构的抗震性能影响很大。常见的消能减震装置(常被称为阻尼器)可大致可以分为以下三类: 滞回型阻尼器, 粘性阻尼器和粘弹性阻尼器。其中常见的滞回型阻尼器包括金属屈服型阻尼器和摩擦型阻尼器。粘性阻尼器包括液体粘性阻尼器和高分子化合物粘性阻尼器。粘弹性阻尼器主要采用如丙烯酸酯等化合物作为阻尼材料。阻尼器通常设置在单一建筑结构的层与层之间, 但对于大型复杂结构系统, 也可以设置在不同的建筑结构间。阻尼器通常通过墙体或支撑和主体结构相连, 也可以采用放到梁间, 柱间以及梁柱节点处。

70

3 单自由度体系的等价线性化法

消能减震结构的设计实际上是反复尝试的过程, 简单的地震响应预测方法是简化设计方法和缩短设计耗时的关键。本文采用等价线性化法预测结构的地震响应。

75 等价线性化方法是将非线性结构等价于等效线性结构(通常以等效刚度和等效阻尼表示), 利用该线性结构预测原结构的动力响应的方法。

常用阻尼器等价线性化方法如下^{[3][5]}:

(1) 滞回型阻尼器

主结构各层抗侧刚度为 K_f , 各层内阻尼器的抗侧刚度为 K_d , 延性系数为 μ_d 。

等价层刚度: $K_{eq} = [1 + p(\mu - 1)]K / \mu$

80

(1)

其中: $K = K_f + K_d$, $\mu = \mu_d$, $p = 1/(1 + K_d / K_f)$

等价阻尼比: $\zeta_{eq} = \zeta_0 + [2/(\pi p \mu)] \ln[1 + p(\mu - 1) / \mu^p]$

(2)

其中： ζ_0 为固有阻尼比

85 (2) 粘弹性阻尼器

等价层刚度： $K_{eq} = K_f + K_d$

(3)

等价阻尼比： $\zeta_{eq} = \zeta_0 + \eta_{eq} / 2$ ， $\eta_{eq} = \eta_d (1 + K_f / K_d)$ (4)

90 其中： ζ_0 为固有阻尼比。 η_d 是粘弹性阻尼器中峰值粘性力和峰值弹性力的比值，通常被称为损失刚度系数。峰值粘性力和峰值弹性力出现在不同的时刻（存在 90 度的相位差）。较大的损失刚度系数表明阻尼器有较强的耗能能力。

4 地震响应预测

本文中地震反应预测采用图 2 所示，该图为日本工程界根据大量计算结果统计所得。针对每一种阻尼器，均有与其相应的图表，图 2 给出了滞回型阻尼器和粘弹性阻尼器的图表^[5]。

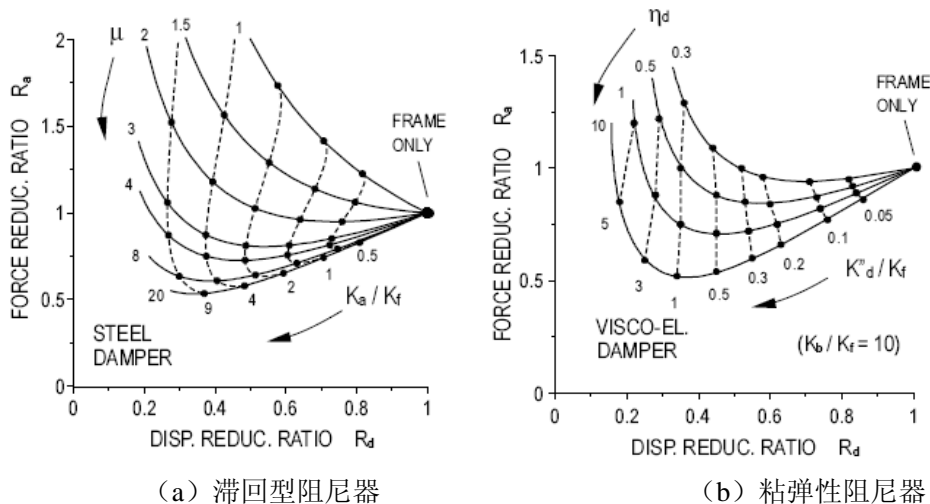


图 2 反应降低率

100 该图中，纵轴为力的降低率，即安装阻尼器前后结构的力响应的比值，横轴为位移降低率，即安装阻尼器前后结构的位移响应的比值。图 2 (a) 适用于滞回型阻尼器，其中，延性系数 μ 相同的各点以实线连接， K_a / K_f (阻尼器与框架的刚度之比) 相同的各点以虚线连接。图 2 (b) 适用于粘弹性阻尼器，其中， η_d (损失系数) 相同的各点以实线连接， K_d / K_f (不含支撑的阻尼器刚度与框架刚度的比值) 相同的各点以虚线连接。

105

5 底部剪力法和等价线性化法结合

反应谱底部剪力法是我国现阶段结构抗震设计所采用的主要方法之一，本文将上述方法与日本规范所采用的基于等价线性化方法的反应预测设计方法相结合，提出一套与中国规范相匹配的耗能减震结构设计方法。

110

由于阻尼器的配置比较自由，消能减震结构也可以作为形状不规则，受力复杂建筑的结构方案。但本文提出的设计方法主要针对符合以下条件的结构：(1) 采用框架结构体系；(2) 平面和立面形状规则；(3) X 和 Y 方向基本正交；(4) 地基条件较好。在这些结构

中，假定阻尼器在各层通常是中均匀布置的，并地震中具有相近的延性系数。具体可以考察下面的参数在各层中是否接近，假定 i 表示第 i 层。

- 115 (1) 滞回型阻尼器：阻尼器和框架的刚度比 (K_{di}/K_{fi})，阻尼器和框架的屈服力比 (Q_{di}/Q_{fi})；
- (2) 粘性阻尼器：阻尼器的附件阻尼系数和框架的刚度比 (C_{di}/K_{fi})；
- (3) 粘弹性阻尼器：阻尼器和框架的刚度比 (K_{di}/K_{fi})，损失刚度和储存刚度比 (K_{di}''/K_{di}' ，其中 $K_{di}'' = \omega C_d(\omega)$ ， $K_{di}' = K_d(\omega)$)。
- 120 该方法具体的设计流程如下图所示。

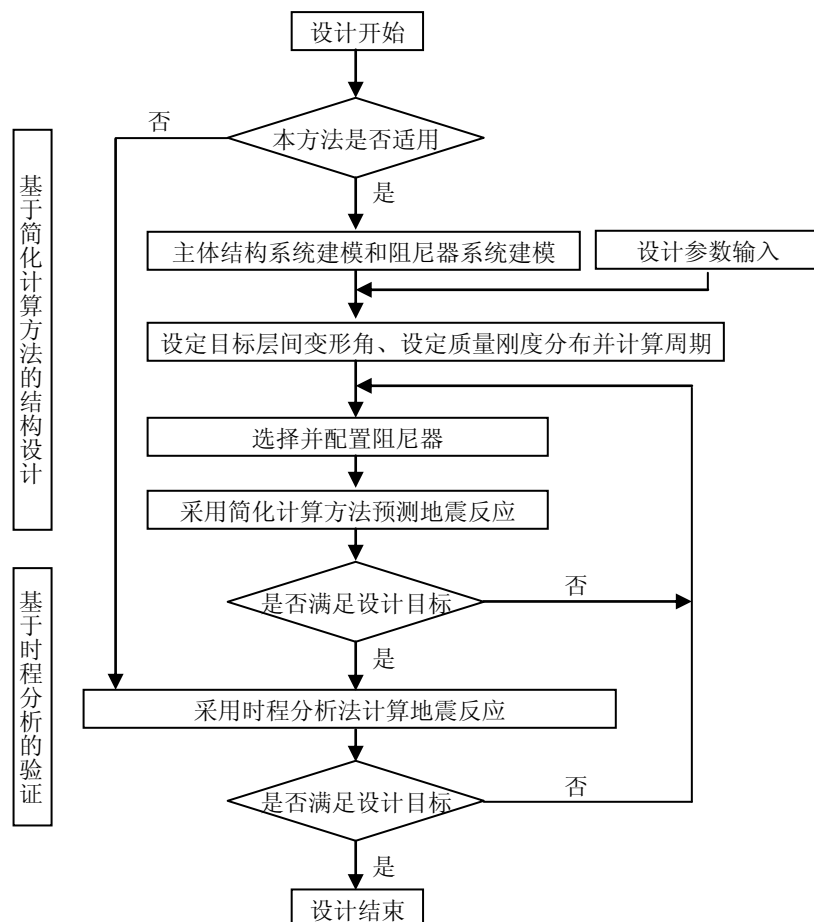


图 3 设计方法流程图

具体步骤如下：

- 125 (1) 判断本方法是否适用，如不适用，则采用时程计算方法进行设计；
- (2) 完成主体结构系统和阻尼器系统建模，以及设计参数的输入；
- (3) 设定目标层间变形角、设定质量刚度分布并计算周期；
- (4) 选择并配置阻尼器；
- (5) 由我国《抗震规范》反应谱及等价线性化方法预测底部剪力系数与结构地震响应，如果不满足设计要求，则返回 4，调整阻尼器参数，重新计算；
- 130 (6) 利用时程分析对设计结果进行检验，如果不满足设计要求，则返回 (4)，调整阻尼器参数，重新计算。

6 工程设计实例

135 本文针对一座 10 层钢框架结构，使用滞回型阻尼器采用上述方法进行设计，以说明该

方法的设计流程及设计结果。

6.1 场地类别

设计实例中，选取八度设防地区，IV类场地，设计地震分组为第二组，特征周期
140 $T_g = 0.75s$ ，阻尼比取 0.02，设计用反应谱如图 4 所示。

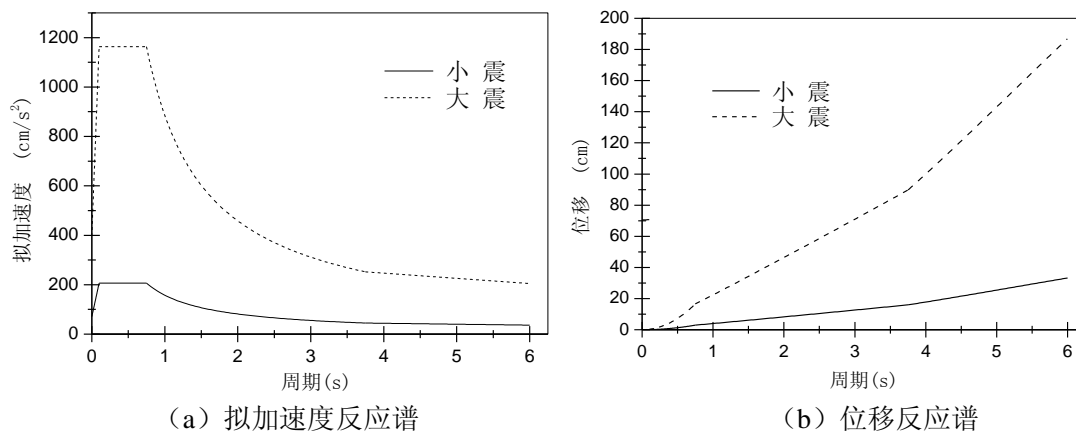


图 4 设计反应谱

145 6.2 设计目标:

设计中，针对滞回型阻尼器，需满足以下设计目标：

- (1) 小震下，主体结构保持弹性，阻尼器不发生屈服，仅利用其刚度；
- (2) 大震下，主体结构基本保持弹性，阻尼器发生屈服。

150 6.3 初步设计

实例中采用的主结构形式为 10 层钢框架结构，每层层高均为 4m，阻尼器采用滞回型阻尼器，根据经验初步估计每层重力荷载代表值及层刚度，结果见表 1。

表 1 主结构基本参数

楼层	高度 (M)	重力荷载代表值 (kN)	抗侧刚度 (kN/cm)
10	40	8836	3957
9	36	6695	4272
8	32	6731	4643
7	28	6731	5043
6	24	6830	6490
5	20	6868	6768
4	16	6926	6992
3	12	6942	7845
2	8	6959	8121
1	4	7085	7270

155

未设置阻尼器主框架的基本周期为 $T_0 = 1.379s$

阻尼器屈服强度: $\sigma_y = 150N/mm^2$

每层内, 阻尼器与主框架刚度比: $K_{di} / K_{fi} = 2.0$

设阻尼器与梁夹角为 45° , 当层间位移角为 θ 时, 阻尼器应变 $\varepsilon = \theta \times \sin 45^\circ \cos 45^\circ$

160 屈服层间位移角: $\theta_y = \sigma_y / (E \times \sin 45^\circ \cos 45^\circ) = 2 \times 150 / 210000 = 0.00143rad(1/700)$

设置阻尼器后的基本周期 (阻尼器不屈服情况下) $T_1 = 0.796s$

6.4 反应预测

165 进行反应预测时, 认为结构质量集中在 2/3 高度处, 将结构等效为单自由度体系进行计算^[3]。

6.4.1 小震反应预测

该阶段, 阻尼器的设计目标为不发生屈服, 结构固有周期取设置阻尼器后的周期 $T_1 = 0.796$ 。

170 图 4 (b) 中, $S_{d0} = 31mm$, $\theta_0 = 31 / (40000 \times 2/3) = 0.0012(1/833) < 0.00143(1/700)$, 阻尼器不发生屈服。

图 4 (a) 中, $S_{a0} = 1.95m/s^2$

水平地震影响系数 $\alpha_1 = 1.95 / 9.8 = 0.2$

采用底部剪力法计算层间位移, 计算结果见表 2

175

表 2 小震下层间位移计算表

楼层	高度 M	重力荷载代 表值 kN	抗侧刚度 kN/cm	水平地震作用 标准值 kN	层剪力 kN	层间位移角
10	40	8836	11871	2675	2675	0.00056
9	36	6695	12816	1824	4500	0.00088
8	32	6731	13929	1630	6130	0.00110
7	28	6731	15129	1427	7557	0.00125
6	24	6830	19470	1241	8797	0.00113
5	20	6868	20304	1040	9837	0.00121
4	16	6926	20976	839	10676	0.00127
3	12	6942	23535	631	11306	0.00120
2	8	6959	24363	421	11728	0.00120
1	4	7085	21810	215	11942	0.00137

注: 抗侧刚度取框架结构和阻尼器刚度之和, $K_i = K_{di} + K_{fi} = 3K_{fi}$

最大层间位移角 $\theta_{max} = 0.00137(1/730) < 0.00143(1/700)$, 阻尼器不发生屈服, 并且层间位移角小于我国抗震规范 1/300 的要求。

180

6.4.2 大震反应预测

本设计中, 消能减震结构在大震作用下, 主体框架基本保持弹性, 阻尼器的屈服程度应在可接受范围内。消能阻尼器是发挥主要耗能作用的构件^[6]。设计时, 主体结构固有周期取

纯框架弹性分析结果 $T_0 = 1.379s$ 。

185 图 4 (b) 中, $S_{d0} = 314mm$, 层间位移角 $\theta_0 = 314 / (40000 \times 2 / 3) = 0.012(1/83)$

$$\text{延性系数 } \mu_0 = 0.012 / 0.00143 = 8.4$$

第一次迭代: $K_{di} / K_{fi} = 2.0$, $\mu_0 = 8.4$

查图 2 (a): $R_{d1} = 0.52$

$$\theta_1 = R_{d1} \times \theta_0 = 0.52 \times 0.012 = 0.0062rad(1/160)$$

190 第二次迭代: $K_{di} / K_{fi} = 2.0$, $\mu_1 = 0.0062 / 0.00143 = 4.3$

查图 2 (a): $R_{d2} = 0.48$

$$\theta_2 = R_{d2} \times \theta_1 = 0.48 \times 0.0062 = 0.0030rad(1/33)$$

再次迭代可发现 R_d 收敛于 0.48, μ 收敛于 4.3, 查图 2 (a) 得: $R_a = 0.72$ 。

图 4 (a) 中, $S_{a0} = 6.52m/s^2$, 故水平地震影响系数 $\alpha_1 = 6.52 / 9.8 = 0.665$ 。

195 采用底部剪力法计算层间位移, 计算结果见表 3

表 3 大震下层间位移计算表

楼层	高度 m	重力荷载代 表值 kN	等效抗侧 刚度 kN/cm	水平地震 作用标准 值 kN	层剪力 kN	层间位 移角	折减后 层剪力 kN	折减后 层间位 移角
10	40	8836	5698	11737	11737	0.00742	8451	0.00247
9	36	6695	6152	5546	17283	0.01011	12444	0.00337
8	32	6731	6686	4956	22239	0.01197	16012	0.00399
7	28	6731	7262	4337	26576	0.01317	19135	0.00439
6	24	6830	9346	3772	30347	0.01169	21850	0.00390
5	20	6868	9746	3160	33508	0.01238	24126	0.00413
4	16	6926	10068	2550	36058	0.01289	25961	0.00430
3	12	6942	11297	1917	37975	0.01210	27342	0.00403
2	8	6959	11694	1281	39255	0.01208	28264	0.00403
1	4	7085	10469	652	39908	0.01372	28733	0.00457

注:

1) 等效抗侧刚度根据公式 (1) 计算;

2) 折减后层剪力 = $R_a \times$ 层剪力;

200 3) 折减后层间位移角 = $R_d \times$ 层间位移角。

最大层间位移角 $\theta_{max} = 0.00659(1/152) < 1/80$, 层间位移角满足我国《抗震规范》关于消能减震结构中的框架结构, 层间弹塑性位移角限值宜采用 1/80 的要求^[1]。

6.5 设计结果

205 根据上文计算结果配置阻尼器, 其设计结果如表 4 所示。

表 4 各层阻尼器配置参数

楼层	角度	计算		实配		
		$K_d(kN/cm)$	面积(cm^2)	面积(cm^2)	$K_d(kN/cm)$	K_d/K_f

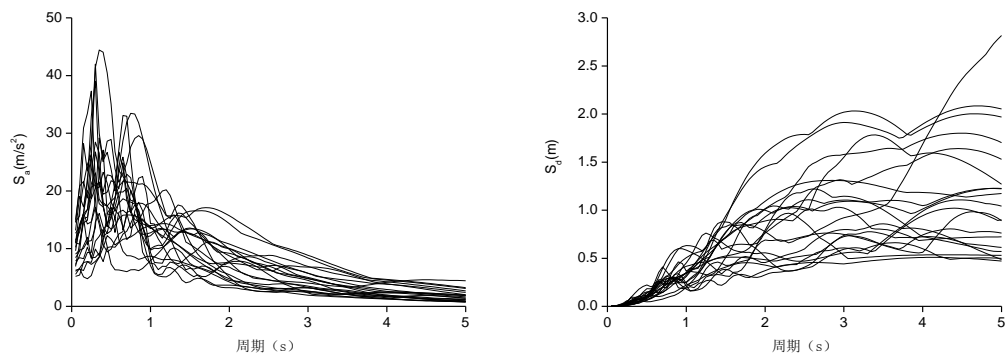
10	45°	7914	213	200	7426	1.9
9	45°	8543	230	250	9282	2.2
8	45°	9286	250	250	9282	2.0
7	45°	10085	272	300	11139	2.2
6	45°	12981	350	350	12995	2.0
5	45°	13535	365	350	12995	1.9
4	45°	13983	377	350	12995	1.9
3	45°	15691	423	400	14851	1.9
2	45°	16242	437	450	16708	2.1
1	45°	14540	392	400	14851	2.0

6.6 时程分析检验

210 上文的计算中，已经得到结构的底部剪力系数。由式（1）、（2）计算结构各层的等价刚度与结构等价阻尼比，将结构转化为弹性结构，利用底部剪力法计算各层层剪力及位移值。

以下通过时程分析检验上述结果对层剪力及层间位移预测的准确性。

时程分析采用来自美国加州洛杉矶地区的一组地震波（共 20 条）^[7] 进行，该组地震波与 2% 阻尼比对应的弹性反应谱如下图所示。



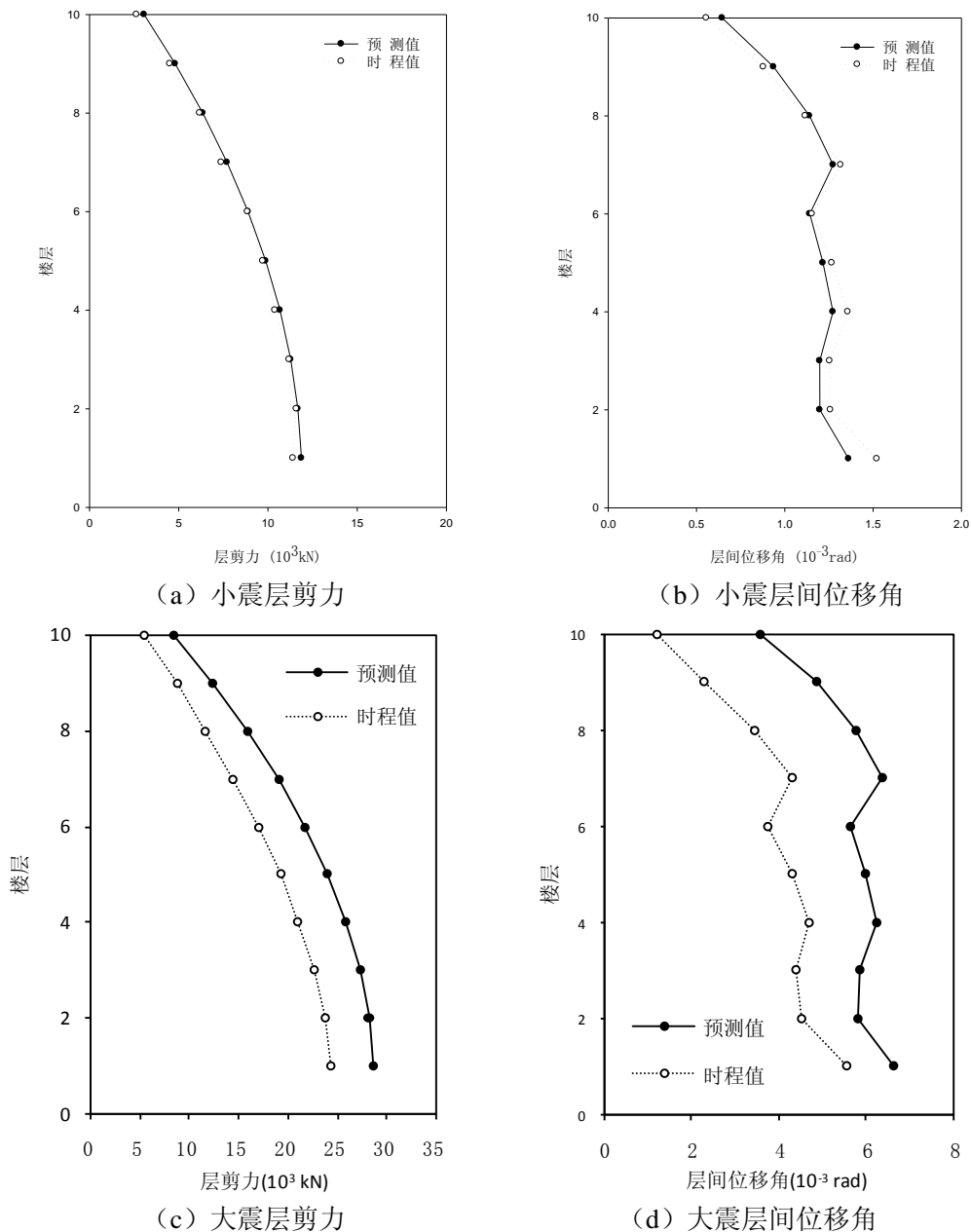
215

(a) 加速度反应谱

(b) 位移反应谱

图 5 所选地震波弹性反应谱

220 分析中将该组地震波加速度峰值调至 70cm/s²（小震）、400 cm/s²（大震）进行计算，采用刚度比例型阻尼，第一振型对应的阻尼比由 2%。所得结果如图 6 所示，其中时程值代表 20 条记录计算结果的平均值。



225

图 6 预测值与时程结果的对比

由图 6 可见，在小震及大震作用下，本文所用方法对层剪力和层间位移角的预测基本准确，偏差属于偏于安全的范围。对于大震作用下，结构层间位移角满足我国《抗震规范》关于消能减震结构中的框架结构，层间弹塑性位移角限值宜采用 1/80 的要求。

230

至此，该消能减震加固结构的设计过程结束。

7 结论

本文将日本所采用的等价线性化设计方法与我国《抗震规范》所采用的反应谱底部剪力法结合，使用粘滞型阻尼器对一座 10 层钢框架结构进行了设计。本文得到的主要结论如下：

235

- 1、基于规范反应谱的等价线性化方法简单易行，便于工程人员掌握；
- 2、该方法对力与位移的预测较为准确。

[参考文献] (References)

- 240 [1] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S], 2002
[2] 瞿伟廉.高层建筑和高耸结构的振动控制设计[M].武汉测绘科技大学出版社, 1991
[3] 彰国社.应答制衡构造设计法[M].日本建筑构造技术者协会, 2000
[4] 林新阳,周福霖.消能减震的基本原理和实际应用[J].世界地震工程, 2002, 18(3):48-51
[5] 蒋通译, 冯德民校.被动减震结构设计施工手册[M].日本隔震结构学会编, 中国建筑工业出版社, 2008
- 245 [6] 叶列平,程光煜,齐玉军.体系能力设计法在消能减震结构设计中的应用[J].工程抗震与加固改造,2000,30(2):1-4
[7] Somerville P et al.Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project.SAC Background Document.Report No.SAC/BD-99-03,SAC Joint Venture,555 University Ave,Sacramento,1997