

文章编号: 1674—8247(2024)06—0084—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.014

考虑支座温度的隔震结构地震响应分析

黎蔚诗 申允 杨可 石川清

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:为评估采用橡胶支座的隔震结构在不同温度下的抗震性能,采用力学性能试验分析橡胶支座力学参数随温度变化规律,建立隔震结构的有限元模型分析支座温度相关性对其抗震性能的影响。结果表明:(1)温度从20℃降低到-25℃,LRB500滞回曲线峰值荷载显著增大;屈服后刚度、等效刚度、屈服荷载和等效阻尼比分别增大21.1%、32%、42.7%和11.1%;LNR500的滞回曲线变化幅度较小,等效刚度增大19.0%;(2)环境温度变低导致隔震层的总刚度和总屈服荷载变大,导致隔震体系的减震效率降低,上部结构的底部剪力、最大层间位移角和结构顶部加速度均较大幅度增加;(3)低温条件下,隔震支座的最大剪力、最大位移、轴向最大面压和最小面压均产生较大幅度变化,甚至会进入极限状态,危及隔震体系的安全性;(4)环境温度对橡胶支座力学性能以及隔震结构抗震性能的影响非常显著,隔震结构设计时必须通过试验或有限元法,结合场地气象条件进行温度效应分析。

关键词:橡胶隔震支座;压剪试验;温度相关性;隔震结构;地震响应

中图分类号:TU352.12

文献标志码:A

84

Seismic Response Analysis of Base-isolated Structures Considering Bearing Temperature

LI Weishi SHEN Yun YANG Ke SHI Chuanqing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To evaluate the seismic performance of base-isolated structures with rubber bearings at different temperatures, mechanical property tests were conducted to analyze the variation of mechanical parameters of rubber bearings with temperature. Finite element models of the base-isolated structures were established to analyze the influence of temperature-dependency of bearings on their seismic performance. The results indicate that: (1) As the temperature decreases from 20°C to -25°C, the peak load of the hysteresis curve of LRB500 significantly increases; the post-yield stiffness, equivalent stiffness, yield load, and equivalent damping ratio increase by 21.1%, 32%, 42.7%, and 11.1%, respectively. For LNR500, the hysteresis curve changes less significantly, with an increase in equivalent stiffness by 19.0%. (2) Lower ambient temperatures lead to an increase in the total stiffness and total yield load of the isolation layer, resulting in a reduction in the damping efficiency of the base-isolated system. The base shear force, maximum interlayer displacement angle, and acceleration at the top of the superstructure all increase significantly. (3) Under low-temperature conditions, the maximum shear force, maximum displacement, maximum axial surface compression, and minimum surface compression of the isolation bearing undergo significant changes and may even reach

收稿日期:2024-03-27

作者简介:黎蔚诗(1992-),女,工程师。

引文格式:黎蔚诗,申允,杨可,等.考虑支座温度的隔震结构地震响应分析[J].高速铁路技术,2024,15(6):84-90.

LI Weishi, SHEN Yun, YANG Ke, et al. Seismic Response Analysis of Base-isolated Structures Considering Bearing Temperature[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):84-90.

limit states, jeopardizing the safety of the base-isolated system. (4) The influence of ambient temperature on the mechanical properties of rubber bearings and the seismic performance of base-isolated structures is very significant. Therefore, temperature effect analysis must be conducted during the design of base-isolated structures through experiments or finite element methods, combined with site meteorological conditions.

Key words: rubber isolation bearing; compression shear test; temperature dependency; base-isolated structures; seismic response

随着国内铁路建设蓬勃发展,我国铁路沿线需要建设大量的车站、库房、配套生产生活用房,其中负责指挥调度的信号用房、职工宿舍对行车安全起着至关重要的作用。高烈度区的铁路用房,地震风险已成为铁路房屋建设的控制因素。隔震技术是半个世纪以来地震工程与结构工程领域最具创新性的研究成果之一,极大提高了高烈度地区结构的抗震性能。减隔震设计原则是通过引入减隔震装置来延长结构的自振周期,以避免地震能量集中的周期范围,从而降低结构的地震响应^[1]。然而,某些高原地区冬季最低温度可达 $-20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,昼夜温差大,须考虑气温变化对橡胶隔震支座的影响。

隔震技术是从“减少输入到上部结构的地震能量”的角度来保证结构在地震中的安全性和可靠性,目前已广泛应用于工程结构,大量采用该技术的建筑成功地经受住了强震的考验。经过多年发展,已研发出多种类型的隔震装置,其中叠层橡胶支座以其构造简单、性能稳定的优点,成为隔震体系的主流。叠层橡胶支座是由橡胶与薄钢板交替叠合而成,具有较大竖向承载力和水平变形能力。支座的性能极大地影响着隔震体系的安全性和可靠性。为全面掌握支座的力学行为、准确预测隔震结构的响应,众多学者开展了大量的研究,提出了多种数值模型,如双线性模型^[2]、Bouc-Wen模型和Koh-Kelly模型^[3]等。尽管对叠层橡胶支座力学性能的研究已相对全面,但加载速率、环境温度和自热效应等诸多因素的影响还需要进一步研究。其中环境温度的影响最为突出。

为了探索橡胶支座在低温环境中的表现,Pinarbasi^[4]等对矩形支座进行了低温剪切试验,研究了支座在不同温度和应变水平下的剪切性能。结果表明:支座在低温下的刚度几乎是室温下的2倍。沈朝勇^[5]等对高阻尼橡胶支座进行了温度相关性、老化相关性等试验,发现温度对高阻尼橡胶支座的阻尼特性影响较显著。A RJZ^[6]对缩尺铅芯橡胶支座进行了温度相关性试验,发现支座的等效刚度、屈服力及屈服后刚度会受到温度的显著影响。Kalpakidis^[7-8]对铅的温度相关性进行了试验研究,发现铅芯自热会引起支座内部温度变化,进而影响支座的力学性能。刘文

光^[9]等对天然橡胶支座进行了 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下的性能试验,并提出了支座水平刚度的温度修正方程。李黎^[10]等对 $\phi 400$ 型和 $\phi 600$ 型铅芯橡胶隔震支座在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下进行试验研究,通过非线性回归分析提出了反映温度变化对支座力学性能影响的近似公式。

我国地震活跃区域分布辽阔,气候条件迥异。寒冷地区不可避免地地震带重叠,如中国的西南地区、东北地区和西北地区。虽然隔震技术在这些地区得到了非常广泛的应用,但橡胶支座隔震体系的设计较少考虑气温变化的影响,这可能导致设计失误甚至出现严重事故。此外,关于隔震体系地震响应的研究,有限的文献大多集中于考虑铅芯自热的隔震桥梁^[11-12],而考虑环境温度和温度动态变化对隔震结构影响的研究成果甚少。因此,研究高温、低温环境对橡胶支座力学性能及隔震结构的动力响应的影响具有重要的工程意义。

为获得不同温度下橡胶支座的力学特性,本文首先对两组 $\phi 500\text{ mm}$ 的橡胶隔震支座开展了在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的压缩剪切试验;随后,对一座采用上述支座的5层钢筋混凝土框架隔震结构开展有限元分析,对不同温度下的支座位移、基底剪力、上部结构加速度、上部结构层间位移角等进行评估,以获得支座温度对隔震结构地震响应的影响规律。

1 橡胶支座的温度相关性试验

1.1 试验概况

为研究橡胶隔震支座在不同温度下的力学性能,试验采用 $\phi 500\text{ mm}$ 的铅芯橡胶支座和天然橡胶支座二组试件,分别用LRB500和LNR500表示,试件的规格参数如表1所示。支座所用橡胶的剪切模量均为 0.4 N/mm^2 ,LRB500的铅芯 $\phi 100\text{ mm}$,LNR500无铅芯,支座内部设有热电偶以监控温度。加载装置采用电液伺服压剪试验系统,采用RPT-1000型程式温度控制箱来调节支座的试验温度,可控温度范围为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 。该试验系统可提供 $30\text{ }000\text{ kN}$ 的竖向力和 $3\text{ }000\text{ kN}$ 的水平力。

表 1 支座参数表

编号	支座 ϕ /mm	铅芯 ϕ /mm	橡胶层厚度 /mm	橡胶总厚度 /mm	橡胶剪切模量 /(N/mm ²)
LRB500	600	100	3.8	95	0.3
LNR500	600	—	3.8	95	0.3

1.2 加载工况

试验中所考虑的支座水平剪应变为 $\pm 100\%$, 竖向压应力为 10 MPa, 温度工况分别为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加载曲线采用 0.02 Hz 的正弦波, 每次试验循环 3 次, 如表 2 所示。同一试件进行多种温度条件的试验时, 为避免橡胶结晶造成的弹性力不可恢复的问题, 从室温到低温的顺序进行。对于每一级温度工况, 首先将橡胶支座放入温度控制箱, 调整到指定温度, 在恒定温度环境下保温 48 h; 随后, 读取支座内部热电偶温度值, 以确保支座温度达到指定值, 将其快速安装于压剪试验机上进行试验。

表 2 温度相关性研究的试验工况表

试验工况	剪应变 γ /%	竖向应力 /MPa	循环次数 /次	试验温度 / $^{\circ}\text{C}$
具体数值	$\pm 100\text{ mm}(\pm 95\text{ mm})$	10	3	$-25, 0, 20$

1.3 试验结果

两种隔震支座在不同温度下的滞回曲线如图 1 所示。由图 1(a)可知, 试件 LRB500 在不同温度下滞回曲线有明显不同, 温度区间 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 支座的滞回曲线差异较小; 温度区间 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 支座的滞回曲线有显著差异, 滞回曲线的面积随温度降低而增大, 且有明显上翘趋势。由图 1(b)可知, $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LNR500 的滞回曲线差异较小; $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LNR500 的滞回曲线差异较大。对滞回曲线进行参数识别, 获得了不同温度下支座的屈服后刚度、屈服荷载、等效刚度和等效阻尼比等力学参数试验值, 如图 2、图 3 所示。

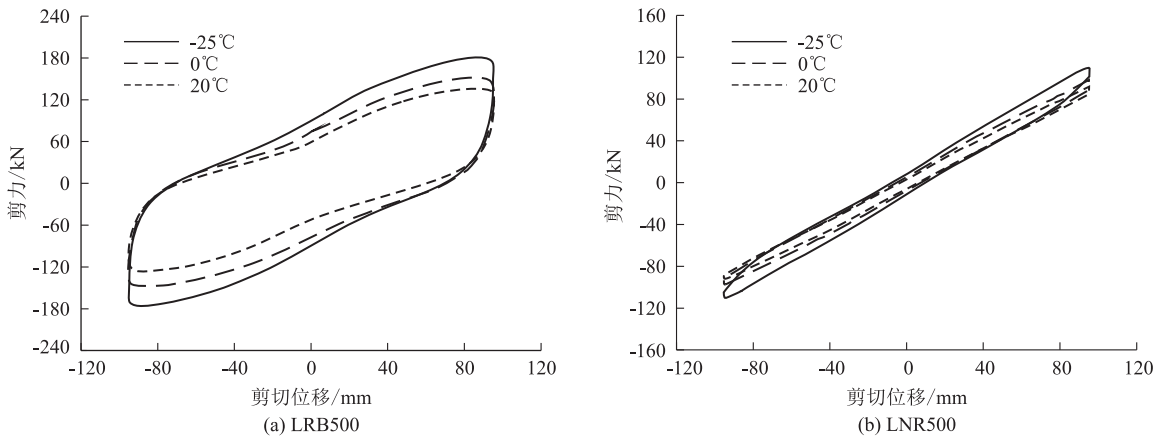


图 1 不同温度环境下 LRB500 和 LNR500 的滞回曲线图

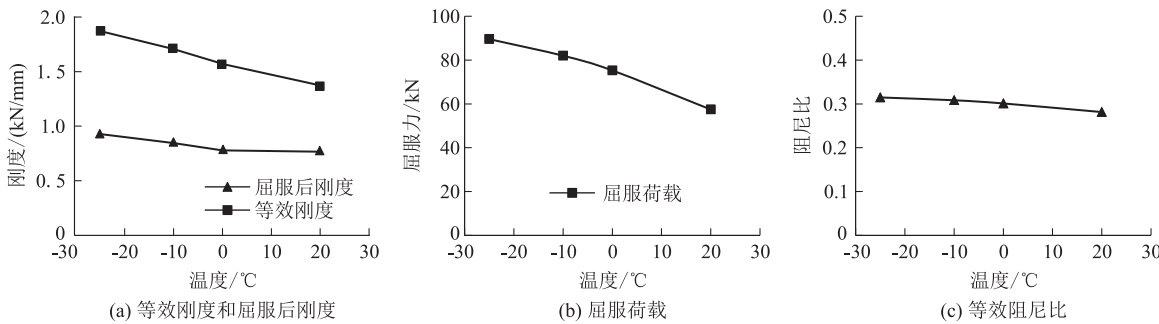


图 2 不同温度下 LRB500 的力学特性图

由图 2 可知, 温度对铅芯橡胶支座的屈服后刚度、等效刚度和屈服荷载影响显著。在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下, LRB500 的屈服后刚度与 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的值相比增加了 20.0%, 等效刚度与 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的值相比提高了 19.5%, 屈服荷载增加了 19.0%, 等效阻尼比增加了 4.6%。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LRB500 的屈服后刚度、等效刚度、屈服荷载

和等效阻尼比与 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的值相比分别降低了 1.1%、12.5%、23.7% 和 6.5%。

由图 3 可知, LNR500 的等效刚度随着温度的变化曲线近似为一条直线, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的刚度值之比为 1.19。温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LNR500 的等效阻尼比较小, 且随温度变化也较小; 但温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

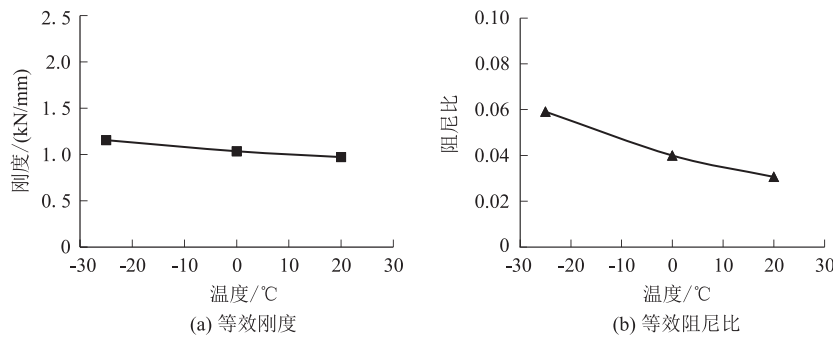


图3 不同温度下 LNR500 的力学特性图

LNR500 的等效阻尼比陡增。

2 考虑支座温度相关性的隔震结构的地震响应分析

从支座的温度相关性试验可知,橡胶支座的力学特性受温度的影响不容忽视。支座的滞回曲线丰满,具有较大的等效阻尼系数,曲线规则,重复性好,能达到设计要求的屈后刚度^[13]。作为隔震结构的核心部件,隔震支座的力学性能与隔震结构的地震响应息息相关,因此研究橡胶支座温度相关性对隔震结构地震响应的影响具有十分重要的工程意义。为此,本节以某基础隔震框架结构为研究对象,分析考虑支座温度相关性后,地震作用下基础隔震结构响应的变化规律。

2.1 隔震结构概况

对一座5层钢筋混凝土框架隔震结构开展研究,如图4所示。上部结构平面尺寸30 m×15 m,层高3.6 m。在X方向5跨,每跨6 m,Y方向3跨。恒荷载5.2 kN/m²(含自重),活荷载2.0 kN/m²,混凝土抗压强度28 MPa,钢筋的屈服应力400 MPa,楼板厚度120 mm,所有框架柱尺寸600 mm×600 mm,梁300 mm×600 mm,结构的总重量2 737.2 t。该结构按照GB 50011-2010《建筑抗震设计标准》^[14]进行抗震设计,建筑场地类别为Ⅱ类,抗震设防烈度8度,设计基本地震加速度0.2 g,地震分组为第1组。隔震支座采用LRB500和LNR500。支座的力学模型如图4(b)、图4(c)所示。

2.2 地震动参数

根据结构原型所处场地条件,并结合ATC-63(2008版)^[15]所给出的选波原则,从太平洋地震中心数据库中选取20条地震动记录,地震动信息如表3所示。对所有地震动记录进行归一化处理,以匹配目标反应谱。20条地震动的加速度反应谱(5%阻尼比)如图5所示。

2.3 高温低温对隔震结构响应的影响

为研究橡胶支座温度相关性对隔震结构地震响应

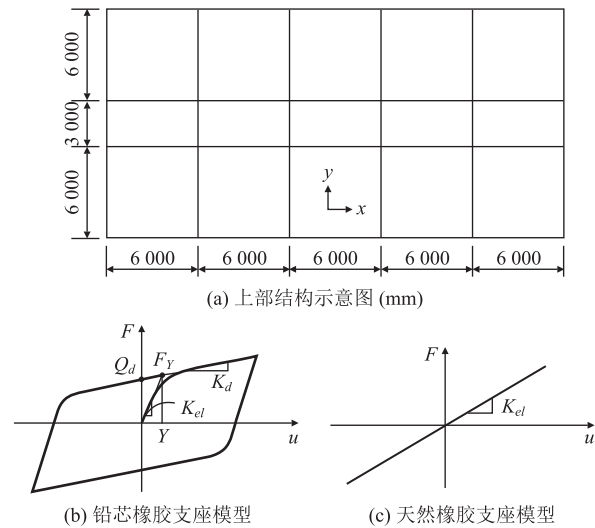


图4 结构模型概述图

表3 地震动记录信息表

序号	地震名称	测站	震级/M _s	年份
1	San Fernando	Isabella Dam (Aux Abut)	6. 61	1971
2	San Fernando	Castaic-Old Ridge Route	6. 61	1971
3	Point Mugu	Port Hueneme	5. 65	1973
4	Coyote La	Gilroy Array 4	5. 74	1979
5	Imperial Valley-06	Bonds Corner	6. 53	1979
6	Imperial Valley-06	Brawley Airport	6. 53	1979
7	Livermore-02	APEEL 3E Hayward CSUH	5. 42	1980
8	Irpinia_ Italy-01	Auletta	6. 90	1980
9	Coalinga-01	Parkfield-Fault Zone 11	6. 36	1983
10	Coalinga-01	Parkfield-Gold Hill 5W	6. 36	1983
11	Whittier Narrows-02	LA- Baldwin Hills	5. 27	1987
12	Loma Prieta	Bear Valley 10_ Webb Residence	6. 93	1989
13	Erzican_ Turkey	Erzincan	6. 69	1992
14	Big Bear-01	San Jacinto-Valley Cemetary	6. 46	1992
15	Northridge-01	Arleta-Nordhoff Fire Sta	6. 69	1994
16	Kobe_ Japan	HIK	6. 90	1995
17	Kocaeli_ Turkey	Tekirdag	7. 51	1999
18	Gilroy	Golden Gate Bridge	4. 90	2002
19	Chi-Chi_ Taiwan-02	CHY071	5. 90	1999
20	Chi-Chi_ Taiwan-06	CHY062	6. 30	1999

的影响,对不同温度下的支座位移、基底剪力、上部结构加速度、上部结构层间位移角等进行评估。对结构在设防烈度下的响应进行分析,每条地震动记录同时

作用于结构的 X 向和 Y 向,分别考虑结构构件在2个方向上的响应,以构件在控制方向上的响应为研究对象。模态分析结果显示, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时结构的第一振型周期分别为 1.95 s 和 2.17 s 。

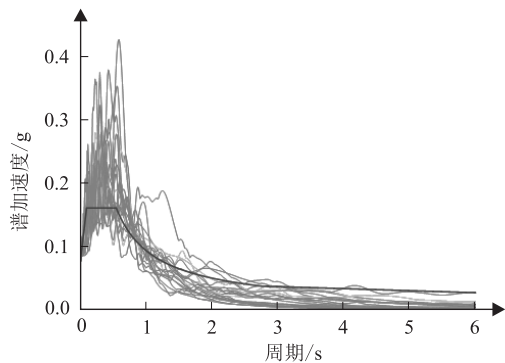
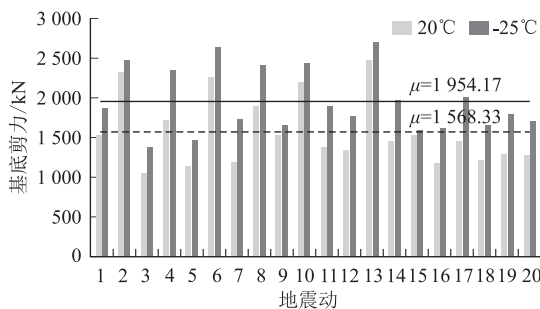


图5 所选地震波的加速度谱图

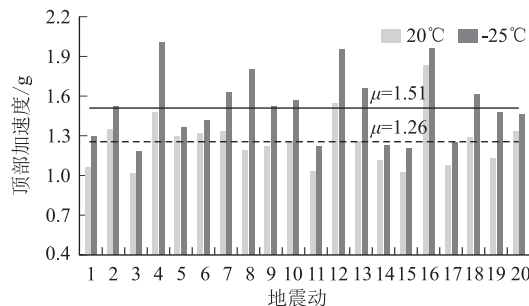
2.3.1 上部结构的响应

隔震技术的功能是减少地震能量向上部结构输入,使上部结构的地震响应如底部剪力、最大层间位移角、顶部最大加速度等大幅度减小。然而不同的环境温度,导致隔震支座的瞬时力学特性存在较大差异,从而改变了隔震的功效。

20条地震动记录作用下上部结构底部剪力随温度变化的情况如图6(a)所示。可以观察到 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时上部结构的底部剪力明显大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,底部剪力的均值增大 24.6% 。其中在ID-7波作用下,这个增幅可达到 46.1% ;受温度变化影响最小的是2号波作用下的底部剪力,但温度降低所造成的增幅也高达 6.5% 。



(a) 基底剪力



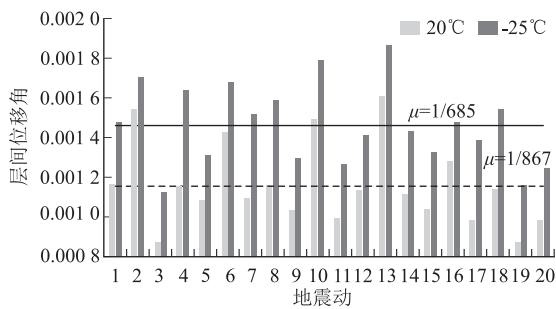
(c) 顶层加速度

绝大多数中、高抗震设防地区的气温会随季节变化而产生高温、低温的交替变化,如果在隔震结构设计时不考虑温度的影响,将导致上部结构关键构件的配筋不足。

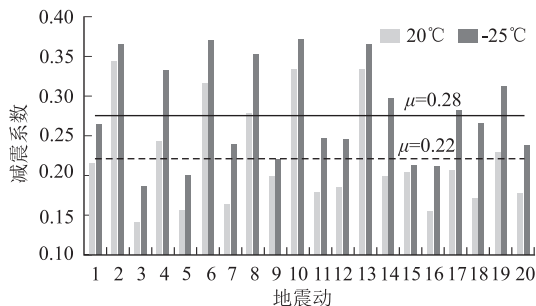
高温和低温环境下上部结构的最大层间位移角对比如图6(b)所示。低温环境下上部结构的最大层间位移角均值比常温下的值增长 26.7% 。其中受温度影响最大的是3号波, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大层间位移角是 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 1.44 倍;尤其是对于13号波, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时层间位移角最大值为 $1/623$,而 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,层间位移角最大值为 $1/537$,根据GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》,这意味着上部结构从弹性状态进入了弹塑性状态。按照中国的规范体系,结构的最大层间位移角是结构设计的核心控制指标,由以上分析可知,按照常温设计的结构,很可能在低温的冬季变成危险建筑。

上部结构顶部最大加速度的对比如图6(c)所示。对每条地震动记录,低温下上部结构顶部最大加速度均大于相应的常温下的值, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下上部结构的顶部最大加速度均值比 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的均值增大 19.9% 。其中,温度变低导致加速度增加幅度最大的是8号波,增大 51.5% ,增加幅值为 0.61 g ;加速度增加幅度最小的是5号波,增大 5.1% 。

20条地震动记录的作用下隔震体系的水平向减震系数随温度变化的情况如图6(d)所示。由图6(d)可知, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时20条波的减震系数平均值比 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的平均值增大 24.6% 。其中,7号波在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的减震系数比 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的减震系数增大 45.6% ,隔震体系



(b) 最大层间位移角



(d) 水平向减震系数

图6 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下上部结构的地震响应对比图

的减震效率大幅度降低。

综上所述,对同一个隔震结构在不同地震动的作用下,环境温度变低导致隔震层的总刚度和总屈服荷载变大,从而导致隔震体系的减震效率降低,上部结构的底部剪力、最大层间位移角和结构顶部加速度均较大幅度增加,支座温度相关性对结构地震响应的影响不可忽视。

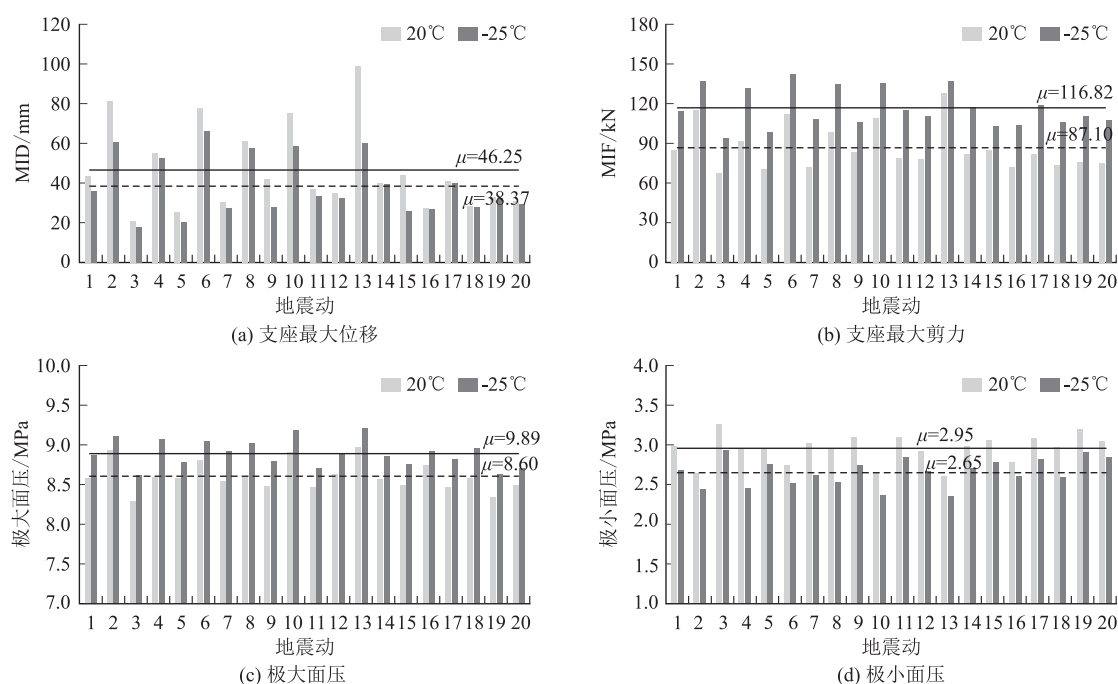


图7 20℃和-25℃下隔震支座的地震响应对比图

在隔震设计环节,MID是决定支座选型以及隔震缝宽度的关键参数。不同温度下的最大支座位移对比如图7(a)所示,可见低温下的支座位移最大值均小于常温下的支座位移最大值,且低温下(-25℃)的支座最大位移平均值比常温下(20℃)的支座最大位移平均值减小17.0%。对于13号波,低温下的支座最大位移值比常温下的值减小41.9%,变化幅度剧烈。

不同温度下的支座最大剪力的对比如图7(b)所示。在不同的地震波作用下,支座最大剪力值均随温度的降低而增大,低温下支座最大剪力的平均值比常温下支座最大剪力的平均值增大34.1%。其中,19号波作用下,温度降低导致的支座最大剪力增长比例为45.5%。

根据抗震规范,支座的最大拉应力不得大于1 MPa,支座的设计压应力不超过12 MPa。支座轴向应力随温度的变化情况如图7(c)、图7(d)所示。由图可知,支座最大压应力均随温度的降低而增大,-25℃时的最大压应力平均值比20℃时的值增加3.4%,变化幅度较小。两种温度工况、20条地震波作

2.3.2 隔震支座响应变化

隔震支座为隔震结构最核心的部件,在隔震结构体系设计过程中,Maximum Isolator Force (MIF)、Maximum Isolator Displacement (MID)、轴向最大面压和最小面压是判断隔震结构是否进入极限状态的重要指标。20条地震波作用下支座响应随温度变化的情况如图7所示。

用下,支座的极大面压均未超过设计限值,支座也均未产生拉应力。-25℃时支座的极小面压平均值比20℃时降低10%。

结构角部LRB500支座分别在2号波和10号波作用下温度对滞回曲线的影响如图8所示。由图8可知,在低温下,支座的屈服力、刚度及滞回环面积均大幅度增大。同时这些力学参数的变化,导致低温下支座的位移减小、剪力增大,这无疑会削弱隔震体系的有效性。

3 结论

本文采用不同温度下的室内试验研究了足尺橡胶隔震支座力学性能的温度相关性,借助数值模拟研究了支座的温度相关性对隔震结构体系抗震性能的影响,得出主要结论如下:

(1) 温度从20℃降低到-25℃,LRB500的滞回曲线变得饱满,峰值荷载显著增大;屈服后刚度、等效刚度、屈服荷载和等效阻尼比分别增大21.1%、32%、42.7%和11.1%。LNR500的滞回曲线变化幅度较

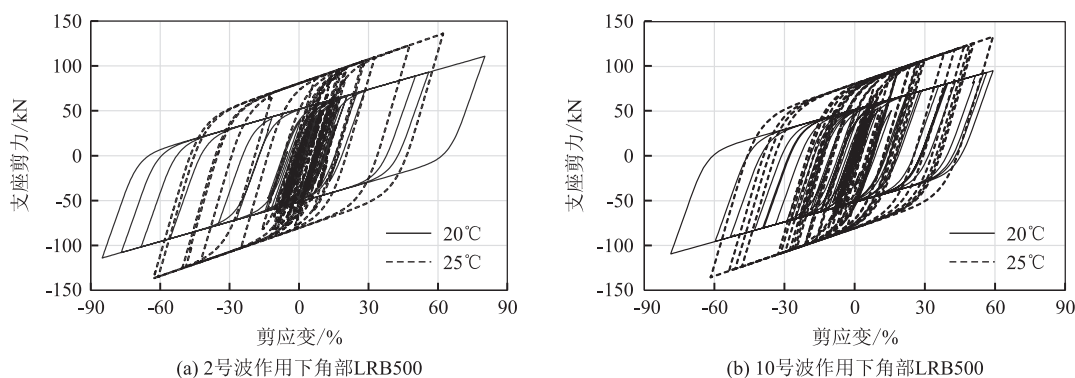


图8 20℃和-25℃下支座滞回曲线对比图

小,等效刚度增大19.0%。温度对橡胶支座力学性能的影响非常显著。

(2)环境温度变低导致隔震层的总刚度和总屈服荷载变大,导致隔震体系的减震效率降低,上部结构的底部剪力、最大层间位移角和结构顶部加速度均较大幅度增加。

(3)与常温条件相比,低温条件下,隔震支座的最大剪力、最大位移、轴向最大面压和最小面压均产生较大幅度变化,甚至会进入极限状态,危及隔震体系的安全性。

(4)环境温度对橡胶支座力学性能以及隔震结构抗震性能的影响非常显著,在隔震结构设计时必须通过试验或有限元法,结合场地气象条件进行温度效应分析。

参考文献:

- [1] 李晓波. 减隔震支座及黏滞阻尼器减震效果分析研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 34-38.
LI Xiaobo. Analysis of the Damping Effect of Seismic Mitigation and Isolation Bearings and Fluid Viscous Dampers [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 34-38.
- [2] Nagarajaiah S, Reinhorn A M, Constantinou M C. Nonlinear Dynamic Analysis of 3D-Base-Isolated Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(7): 2035-2054.
- [3] Koh C G, Kelly J M. A Simple Mechanical Model for Elastomeric Bearings Used in Base Isolation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30(12): 933-943.
- [4] Pinarbasi, S, Akyuz, U, Ozdemir, G. An Experimental Study on Low Temperature Behavior of Elastomeric Bridge Bearings. [C]// 10th World Conference On Seismic Isolation Energy Dissipation and Active Vibrations Control Of Structures. Turkey: 2007.
- [5] 沈朝勇, 周福霖, 崔杰, 等. 高阻尼隔震橡胶支座的相关性试验研究及其参数取值分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 95-103.
SHEN Chaoyong, ZHOU Fulin, CUI Jie, et al. Dependency Test

Research of Mechanical Performance of HDR and Its Parametric Value Analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(6): 95-103.

- [6] A RJZ, B AQLA. Experimental Study on Temperature Dependence of Mechanical Properties of Scaled High-performance Rubber Bearings-ScienceDirect [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 190: 107932.
- [7] Kalpakidis IV, Constantinou MC. Effects of Heating on the Behavior of Lead-rubber Bearings. I: Theory [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(12): 1440-1449.
- [8] Kalpakidis IV, Constantinou M C. Effects of Heating on the Behavior of Lead-rubber Bearings. II: Verification of Theory [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(12): 1450-1461.
- [9] 刘文光, 杨巧荣, 周福霖. 建筑用铅芯橡胶隔震支座温度性能研究[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2): 39-44.
LIU Wenguang, YANG Qiaorong, ZHOU Fulin. Temperature Properties of Lead Rubber Bearings for Building [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 39-44.
- [10] 李黎, 叶昆, 江宜城. 橡胶铅芯隔震支座力学性能的温度效应研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(3): 1-3.
LI Li, YE Kun, JIANG Yicheng. Thermal Effect on the Mechanical Behavior of Lead-rubber Bearing [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2009, 26(3): 1-3.
- [11] Ozdemir G, Avsar O, Bayhan B. Change in Response of Bridges Isolated with LRBs due to Lead Core Heating [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 921-929.
- [12] Bruce, R, Ellingwood, et al. Fragility Assessment of Building Structural Systems in Mid-America [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1935-1952.
- [13] 罗登发, 郭占元, 戴胜勇, 等. 双曲面球型减隔震支座在铁路桥梁上的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 53-55, 89.
LUO Dengfa, GUO Zhanyuan, DAI Shengyong, et al. Application of Hyperboloid Spherical Isolation Bearing on Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 53-55, 89.
- [14] GB 50011-2010 建筑抗震设计标准 [S].
GB 50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [15] ATC-63 Quantification of Building Seismic Performance Factors [S].