

建设工程施工新技术典型案例分析丛书

工程抗震、加固、结构与安装工程  
施工新技术典型案例与分析

TYPICAL CASES AND ANALYSIS OF NEW CONSTRUCTION TECHNOLOGIES FOR ENGINEERING  
SEISMIC RESISTANCE, REINFORCEMENT, STRUCTURE AND INSTALLATION ENGINEERING

《施工技术》杂志社 主编

中国建筑工业出版社

建设工程施工新技术典型案例分析丛书

# 工程抗震、加固、结构与安装工程 施工新技术典型案例与分析

《施工技术》杂志社 主编



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程抗震、加固、结构与安装工程施工新技术典型案例与分析 / 《施工技术》杂志社主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 4

(建设工程施工新技术典型案例分析丛书)

ISBN 978-7-112-23345-8

I. ①工… II. ①施… III. ①建筑工程-防震设计-案例②建筑结构-加固-工程施工-案例③建筑安装-工程施工-案例 IV. ①TU352.104②TU746.3③TU758

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 033493 号

责任编辑: 张礼庆

责任校对: 李欣慰

建设工程施工新技术典型案例分析丛书  
工程抗震、加固、结构与安装工程施工新技术典型案例与分析  
《施工技术》杂志社 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)  
各地新华书店、建筑书店经销  
北京佳捷真科技发展有限公司制版  
天津翔远印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$  字数: 412 千字  
2019 年 4 月第一版 2019 年 4 月第一次印刷  
定价: 48.00 元 (含增值服务)

ISBN 978-7-112-23345-8  
(33621)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 《建设工程施工新技术典型案例分析丛书》 编写委员会

主任 毛志兵：中国建筑股份有限公司总工程师

张可文：《施工技术》杂志社社长、主编

副主任（按姓氏笔画排序）

王清勤：中国建筑科学研究院有限公司副总经理

尹伯悦：中国城市科学研究会秘书长助理

叶浩文：中建股份助理总经理、副总工程师，中建科技集团董事长

冯 跃：北京市工程建设质量管理协会会长，北京建工集团有限责任公司总工程师

李清旭：中国施工企业管理协会副会长

杨健康：北京住总集团有限责任公司总工程师

吴 飞：浙江省建设投资集团股份有限公司副总经理

张同波：青建集团股份公司副总裁

张晋勋：北京城建集团有限责任公司总工程师

郝玉柱：山西交通控股集团有限公司总经理

胡德均：天津建工集团原总工程师

郭彦林：清华大学教授

梅 阳：《施工技术》杂志社副社长、执行主编

龚 剑：上海建工集团股份有限公司总工程师

景 万：中国建筑业协会副秘书长

薛永武：陕西省土木建筑学会理事长

委 员（按姓氏笔画排序）

王 军	王 胜	王 伟	王存贵	王海云	王爱勋	王迎春	邓明胜
叶重农	令狐延	曲 慧	曲成平	冯大阔	田万义	刘 杨	刘明生
刘洪亮	刘爱玲	刘新玉	关 军	林 冰	闫永茂	许曙东	安占法
朱建潮	李宏伟	李 娟	李铁良	李晨光	李景芳	杨 煜	杨存成
杨晓毅	肖 星	肖玉明	汪道金	宋伟俊	张文岭	张云富	张太清
张 琨	张 静	张礼庆	张志明	张其林	陈春雷	陈国栋	陈 浩
陈德刚	陈春明	邵凯平	何纯涛	余地华	余 流	邹厚存	范 重
金 振	金 睿	郑 勇	周桂云	赵 林	赵福明	胡正华	郝绍金
段洪涛	侯玉杰	贾 洪	郭正兴	郭海山	钱增志	高秋利	周予启
黄 刚	尉家鑫	蒋立红	蒋金生	彭明祥	焦安亮	葛兴杰	韩宇峰
欧亚明	谭立新	薛 刚	霍文营				

## 本套丛书编写人员名单

主 编：张可文

副主编：梅 阳

参 编：王 露 李松山 焦军灵 王晓彤 徐 颖

# 前 言

随着经济社会的不断发展，建筑行业的整体规模正在不断地扩大。为了更好地提高建筑物的服务功能，需要采取有效的施工技术优化建筑结构，从根本上消除其中的安全隐患，延长建筑物的使用寿命。工程抗震加固技术的有效使用，保证了建筑结构良好的抗震性能，为人们带来了更加安全可靠的居住环境。不同的工程抗震加固技术在实际的应用中产生的作用效果有所区别，技术人员需要结合建筑物实际的功能特性选择最佳的抗震加固技术。

混凝土现场浇筑，虽然条件限制较多，施工工艺较复杂，设施费用较大，但结构的刚度、整体性和抗震性能都比预制装配式的为好，且可适应构件断面形状复杂、管道埋设及留洞较多等情况，并可节约钢材、水泥以及构件预制及运输、吊装费用。因此在建筑施工中有明显的优越性。当前的关键在于采取有效措施使各工序逐步走向定型化和工业化，以提高其经济技术效果。

与混凝土相比，钢结构具有轻质高强、材质均匀、塑性和韧性好、抗震性能优越等优点，而且钢结构符合建筑工业化要求的工厂化生产、装配化施工等特点，是建筑工业化发展的良好载体，也是建筑业现代化程度的直接体现。我国钢结构工程技术在深化设计、焊接技术、安装技术等各方面都取得了长足的进步，并建造了众多在世界范围内极具影响力的大跨度、超高层建筑工程，解决了众多技术难题。随着我国钢结构制造技术，加工、设计技术的不断进步，钢结构的材料性能不断提升，钢结构覆盖的建筑领域也逐步增大；随着数字化、机械化技术的发展，钢结构技术也朝着自动化、智能化的方向发展，钢结构必将在建筑业中占据日益重要的地位。本书介绍了天津高银 117 大厦、上海世茂深坑酒店、新沈阳南站、无锡恒隆广场、广西园林园艺博览会主展馆、宁夏国际会议中心、吉林市人民大剧院等重点工程项目的应用案例。

近年来，BIM 技术无论在软件平台、工程示范、管理模式等方面，还是在标准、政策等方面都取得了长足发展。尤其是 2013 年以来，国家及各级政府、部门先后发布了大量相关政策，互联网、物联网、云计算、人工智能等技术的发展从技术上为 BIM 的发展带来了新的变革，同时，互联网+、大数据、装配式建筑、一带一路等发展规划的提出也为 BIM 的发展提出了新的要求。本书结合深圳平安金融中心，天津周大福金融中心等超高层项目，介绍了 BIM 技术在工程中的应用。

如果阅读相关技术案例后尚不能解决您的疑惑，您可以通过每个案例专家所留 Email 给专家发电子邮件交流，还可以扫描封底二维码加入到“新技术圈”与同行和专家进行交流。进入“新技术圈”后，您可以将其作为一个平台，发布更多新技术，与更多同行交流，期待您的加入，让我们共同打造“新技术圈”。

# 目 录

第一章 概述 .....	1
第二章 工程抗震 .....	5
第一节 高阻尼隔震橡胶支座对桥梁抗震性能的影响分析 .....	5
第二节 某文化中心临地铁隔振技术分析与应用 .....	11
第三章 结构检测·鉴定·加固工程与案例分析 .....	19
第一节 杭州国际博览中心既有结构室内改造拆除施工技术研究 .....	19
第二节 无粘结预应力混凝土楼板开洞改造施工技术 .....	23
第三节 老旧小区住宅楼综合改造技术与管理 .....	27
第四节 既有公共建筑改造中光伏建筑一体化设计研究 .....	31
第五节 某高层建筑钢管混凝土柱检测与数值模拟分析 .....	38
第四章 钢结构 .....	42
第一节 广西园林园艺博览会主展馆钢结构施工技术 .....	42
第二节 宁夏国际会议中心蜂窝状网架施工技术 .....	46
第三节 苏州高新区文体中心体育馆钢屋盖滑移技术 .....	49
第四节 无锡恒隆广场屋面钢结构施工技术 .....	53
第五节 新沈阳南站中央站房大跨度拱形平面钢桁架施工技术 .....	57
第六节 吉林市人民大剧院钢结构工程施工技术 .....	62
第七节 某展览馆异形复杂管桁架钢结构施工关键技术 .....	66
第八节 超高建筑群塔综合体钢结构关键施工技术 .....	71
第九节 迪凯城星国际中心大堂钢结构屋架施工技术 .....	77
第十节 天津周大福金融中心工程钢筋钢结构连接技术 .....	83
第十一节 长沙中国结步行桥钢结构安装施工技术 .....	88
第十二节 超大异型截面钢骨梁施工技术 .....	92
第十三节 某巨型厂房钢网壳结构施工关键技术 .....	96
第十四节 高层建筑钢筋混凝土悬挑叠层混合空腹桁架施工关键技术 .....	100
第十五节 上海世茂深坑酒店异形圆管柱施工技术 .....	107
第五章 安装工程 .....	115
第一节 南京牛首山树状结构安装施工技术 .....	115

第二节	哈尔滨太平机场 T2 航站楼钢网架工程提升架安装空中接力施工技术 .....	120
第三节	高空间大跨度弧形铝板拼装式反吊顶施工技术 .....	125
第四节	苏州现代传媒广场大跨复杂曲面透风防雨幕墙安装技术 .....	130
第五节	某电子洁净厂房大跨度大面积屋面钢桁架安装关键技术 .....	135
第六节	天津高银 117 大厦高空大堂及巨型柱幕墙施工关键技术 .....	139
第七节	光谷国际网球中心弧面菱形点式玻璃幕墙关键施工技术 .....	144
第八节	沈阳文化艺术中心工程非常态无序空间钻石体玻璃幕墙安装定位技术 .....	148
第九节	外立面悬挂装饰清水砖幕墙施工技术 .....	153
第十节	DM 现浇混凝土外墙外模板与保温一体化施工技术 .....	157
第十一节	深圳湾壹号液压爬模施工难点及解决措施研究 .....	162
第十二节	基于凸点顶模的钢板剪力墙施工技术 .....	165
第十三节	折叠开启式索膜结构大门安装关键技术 .....	168
<b>第六章</b>	<b>建筑工业化</b> .....	<b>173</b>
第一节	PCa 内浇外挂技术在住宅工业化体系中的应用与研究 .....	173
第二节	预制组合技术在大型装配式冷库围护结构中的应用 .....	179
<b>第七章</b>	<b>混凝土</b> .....	<b>185</b>
第一节	超高层外包钢管柱薄壳混凝土施工技术 .....	185
第二节	三向有粘结预应力混凝土圆板结构施工技术 .....	191
第三节	超高层劲性混凝土框筒结构施工技术 .....	198
第四节	大截面异形钢管柱混凝土泵送顶升施工技术 .....	204
第五节	巨型型钢混凝土组合柱结构施工技术 .....	210
第六节	合肥恒大中心 C 地块高强大体积混凝土施工技术 .....	217
第七节	云报传媒广场大截面现浇混凝土斜柱施工技术 .....	229
第八节	天津高银 117 大厦混凝土施工关键技术 .....	233
<b>第八章</b>	<b>信息化</b> .....	<b>239</b>
第一节	深圳平安金融中心 BIM 技术综合应用 .....	240
第二节	BIM 与三维激光扫描技术在天津周大福金融中心幕墙工程逆向施工中的应用 .....	247
第三节	信息化在天津周大福金融中心项目施工管理中的应用 .....	251
第四节	BIM 技术在超高层复杂外框巨柱钢结构节点优化设计中的应用 .....	257

# 第一章 概述

## 1. 工程抗震

在对既有建筑进行抗震加固前,应依据其设防烈度、抗震设防类别、后续使用年限和结构类型,按现行国家标准《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)的相应规定进行抗震鉴定。

既有建筑抗震加固的设计原则应符合下列要求:加固方案应根据抗震鉴定结果经综合分析后确定,分别采用房屋整体加固、区段加固或构件加固,以加强整体性、改善构件的受力状况、提高综合抗震能力;加固或新增构件的布置应消除或减少不利因素,防止局部加强导致结构刚度或强度突变;新增构件与原有构件之间应有可靠连接,新增的抗震墙、柱等竖向构件应有可靠的基础;加固所用材料类型与原结构相同时,其强度等级不应低于原结构材料的实际强度等级;对于不符合鉴定要求的女儿墙、门脸、出屋顶烟囱等易倒塌伤人的非结构构件应予以拆除或降低高度,需保持原高度时应加固。

抗震加固的施工应符合下列要求:应采取措施避免或减少损伤原结构构件;发现原结构或相关工程隐蔽部位的构造有严重缺陷时,应会同加固设计单位采取有效措施后方可继续施工;对可能导致的倾斜、开裂或局部倒塌等现象,应预先采取安全措施。

## 2. 结构检测·鉴定·加固工程

结构检测鉴定试验的思路是根据委托鉴定目的及要求,对建筑物或结构实体进行鉴定作业。通过对建筑实体进行现场初步勘查调查和了解的资料进行综合评判,拟定检测试验原则。依据适用标准、规范等进行检测、试验、计算、论证、综合分析等过程。最终对所受委托的建筑物或结构实体的质量及安全性做出准确、公正、严谨、科学的鉴定。

结构构件加固、改造遵守下述原则:方案制定的总体效应原则、材料的强度取值及选用原则、荷载计算原则、承载力验算原则、与抗震设防结合的原则、其他原则。

结构加固改造的方法如下:增大截面法、外包钢加固法、预应力加固法、改变受力体系加固法、粘钢加固法、粘贴碳纤维加固法、阻止钢筋锈蚀法、化学灌浆法、水泥灌浆和喷射修补法、加固地基基础法、建筑物纠偏扶正法、增层改造法。

结构加固改造工作程序:可靠性鉴定→加固改造方案的选择→加固改造设计→施工组织设计→加固施工→工程验收。

## 3. 钢结构工程概述

由于钢结构工程一般都是作为高层建筑的核心部位和受力结构,其质量的好坏直接影响到建筑物的安全性、结构性和耐久性,轻则影响正常使用,重则造成巨大经济损失和重大的人员伤亡。因此建筑钢结构工程被列为专项工程,国家及地方建设部门对钢结构工程质量非常重视,也相应地制定和颁布了多种包括分项工程方面的规范、标准和技术规程。随着高层建筑的日益普及,钢结构工程日益发挥其施工速度快、周期性短、节约模板、强度高、施工快,便于预制安装等优势,所以在工程中应用的越来越广泛。对此,国家针对建筑钢结构的施工特点,编制了《钢结构施工质量及验收规范》《钢结构焊接规程》等。

同时,有些行业的专家学者也编制了钢结构相关的行业和企业标准。

钢结构的加工流程一般是:放样→下料→铣端→钻孔→校正、装配→焊接→校正、打磨→除锈、涂装→堆放等。

#### 4. 模板与脚手架工程概述

工程施工中,模板技术与脚手架技术密不可分。模板的功能是使混凝土构件浇筑成型,脚手架的功能既是支承作用到模板上的荷载,又是作业工人的施工平台架。

21世纪后,新型模板体系突出的发展如下。

1) 模板的面板从单一的木胶合板模板,发展为竹胶合板、木面竹芯胶合板模板、铝合金模板和塑料模板等,并且,因为国家倡导绿色施工,铝合金模板因为周转使用次数多,能够实现百分之百回收,并且拼缝严密不漏浆,混凝土构件成型质量好等得到大量采用。

2) 在模板支架方面,传统的扣件式钢管脚手架持续在现浇混凝土结构施工中普遍采用,轻型门式脚手架(主立杆 $\phi 48$ 管径)在广州、湖南等地部分工程上少量采用;重型门式脚手架(主立杆 $\phi 57$ 管径)在江苏桥梁工程上少量采用;碗扣式钢管脚手架持续在城市高架桥和公路桥的桥梁工程持续普遍采用,该支架特点是按国际惯例其立杆采用了Q345低合金钢管,单立杆可以承受40~50kN荷载并规范化设置斜杆,大幅提升模板支撑架的整体稳固性,到今天已发展成为高支模的主流架体,在桥梁工程上开始推广应用。

3) 在模板体系方面,基于铝合金模板的早拆模板体系真正在公建和高层办公楼工程的梁板楼面结构施工中得到应用,但如同当年“小钢模”的板块面积较小,安装与拆除的用工量偏大的缺点依然存在。在超高层建筑施工中,混凝土核心筒体结构施工的连带模板支撑的整体爬升作业平台技术得到迅速发展,其中代表性有中建的长行程液压千斤顶少支点一个施工层一次顶升到位的顶模技术和上海建工的短行程液压千斤顶多支点一个施工层多次顶升到位的整体爬升钢平台技术。在高度小于250m的高层建筑施工中,分单元爬升的液压爬模技术也在一定数量的工程上得到应用。

4) 在高层建筑施工的外脚手架方面,分段悬挑扣件式钢管脚手架、电动附着升降脚手架依然是主流外脚手架类型。但悄悄变化的是脚手架作业层的竹笆片变为钢网片,外围密目塑料网变为钢板网,单一的扣件式钢管脚手架变为部分开始采用盘扣式钢管脚手架。

现浇混凝土施工中模板脚手架涉及施工人员的作业安全,参与工程建设的业主、施工单位、监理单位和政府的管理部门均对模板脚手架的施工安全给予重点关注。回顾模板脚手架的发展史,不可否认与模板脚手架对应的国家标准、行业标准和产品标准在推广和应用新型模板与脚手架方面起到了关键的支撑作用。

#### 5. 建筑工业化

建筑工业化指通过现代化的制造、运输、安装和科学管理的生产方式,来代替传统建筑业中分散的、低水平的、低效率的手工业生产方式。它的主要标志是建筑设计标准化、构配件生产工厂化,施工机械化和组织管理科学化。

建筑工业化颠覆传统建筑生产方式,最大特点是体现全生命周期的理念,将设计施工环节一体化,设计环节成为关键,该环节不仅是设计蓝图至施工图的过程,而需要将构配件标准、建造阶段的配套技术、建造规范等都纳入设计方案中,从而设计方案作为构配件生产标准及施工装配的指导文件。除此之外,PC构件生产工艺也是关键,在PC构件生产

过程中需要考虑到诸如模具设计及安装、混凝土配比等因素。与传统建筑生产方式相比,建筑工业化具有不可比拟的优势。提升工程建设效率。建筑工业化采取设计施工一体化生产方式,从建筑方案的设计开始,建筑物的设计就遵循一定的标准,如建筑物及其构配件的标准化与材料的定型化等,为大规模重复制造与施工打下基础。遵循工艺设计及深化设计标准,构配件可以实现工厂化的批量生产,及后续短暂的现场装配过程,建造过程大部分时间是在工厂采用机械化手段、一定技术工人操作完成。

建筑工业化首先应从设计开始,从结构入手,建立新型结构体系,包括钢结构体系、预制装配式结构体系,要让大部分的建筑构件,包括成品、半成品,实行工厂化作业。一是要建立新型结构体系,减少施工现场作业。多层建筑应由传统的砖混结构向预制框架结构发展;高层及小高层建筑应由框架向剪力墙或钢结构方向发展;施工上应从现场浇筑向预制构件、装配式方向发展;建筑构件、成品、半成品以后场化、工厂化生产制作为主。二是要加快施工新技术的研发力度,主要是在模板、支撑及脚手架施工方向有所创新,减少施工现场的湿作业。在清水混凝土施工、新型模板支撑和悬挑脚手架有所突破;在新型围护结构体系上,大力发展和应用新型墙体材料。三是要加快“四新”成果的推广应用力度,减少施工现场手工操作。在积极推广建设部十项新技术的基础上,加快这十项新技术的转化和提升力度,其中包括提高部品件的装配化、施工的机械化能力。

## 6. 混凝土概述

普通混凝土是由水泥、粗骨料(碎石或卵石)、细骨料(砂)、外加剂和水拌合,经硬化而成的一种人造石材。砂、石在混凝土中起骨架作用,并抑制水泥的收缩;水泥和水形成水泥浆,包裹在粗细骨料表面并填充骨料间的空隙。水泥浆体在硬化前起润滑作用,使混凝土拌合物具有良好工作性能,硬化后将骨料胶结在一起,形成坚强的整体。

混凝土的性质包括混凝土拌合物的和易性、混凝土强度、变形及耐久性等。

和易性又称工作性,是指混凝土拌合物在一定的施工条件下,便于各种施工工序的操作,以保证获得均匀密实的混凝土的性能。和易性是一项综合技术指标,包括流动性(稠度)、黏聚性和保水性3个主要方面。

强度是混凝土硬化后的主要力学性能,反映混凝土抵抗荷载的量化能力。混凝土强度包括抗压、抗拉、抗剪、抗弯、抗折及握裹强度。其中以抗压强度最大,抗拉强度最小。

混凝土的变形包括非荷载作用下的变形和荷载作用下的变形。非荷载作用下的变形有化学收缩、干湿变形及温度变形等。水泥用量过多,在混凝土的内部易产生化学收缩而引起微细裂缝。

混凝土耐久性是指混凝土在实际使用条件下抵抗各种破坏因素作用,长期保持强度和外观完整性的能力。包括混凝土的抗冻性、抗渗性、抗蚀性及抗碳化能力等。

现代混凝土的发展方向是商品混凝土,其特点是:集中搅拌,能严格在线控制原材料质量和配合比,能保证混凝土的质量要求;要求拌合物具有好的工作性,即高流动性、坍落度损失小,不泌水不离析、可泵性好;经济性,要求成本低,性能价格比高。

## 7. 信息化概述

建筑信息模型 BIM (Building Information Modeling) 是以三维数字技术为基础,集成建筑项目各种相关信息的产品信息模型,是对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达。基于完整 BIM 模型可描述建筑全生命期各阶段建筑实体及其建设、使用过程的所有

数据和信息，各参与方可随时查询、利用、更新和完善 BIM 模型信息，提高工程管理及决策水平。

近年来，BIM 技术无论在软件平台、工程示范、管理模式等方面，还是在标准、政策等方面都取得了长足的发展。尤其是 2013 年以来，国家及各地政府、部门先后发布了大量相关政策，互联网、物联网、云计算、人工智能等技术的发展既从技术上为 BIM 的发展带来了新的变革，互联网+、大数据、装配式建筑、一带一路等国家发展规划的提出也为 BIM 的发展提出了新的要求。因此，有必要为近几年的 BIM 政策制定充分的调研分析，结合我国建筑业发展趋势为未来 BIM 政策的制定提供参考，更好地推动行业信息化变革与产业升级。

## 第二章 工程抗震

### 概述

我国是一个地震多发国家,近年发生的“5·12”四川汶川大地震、“4·14”青海玉树大地震、“4·20”四川芦山地震等,给我们带来了严重的灾害。公路桥梁作为生命线上的重要组成部分,一旦损毁,将严重影响救援和灾后重建。桥梁抗震越来越得到重视,目前已成为桥梁设计的必要内容。

在桥梁抗震方面,目前发展相对成熟,实际应用较为广泛的是减隔震技术。通过在梁体与墩台之间设置减隔震支座,一方面可以延长结构自振周期,减小地震力;另一方面,利用减隔震支座自身的阻尼性能进行滞回耗能,保护桥梁主体结构。

目前,应用较多的减震、隔震支座有普通板式橡胶支座、摩擦摇摆支座、铅芯橡胶支座和高阻尼隔震橡胶支座。高阻尼隔震橡胶支座(简称“HDR 隔震支座”)具有结构合理、外观简洁、阻尼效果好、技术性能稳定、维护成本低、耐久性能好等特点。HDR 隔震支座作为一种新型减隔震支座,经过近年来的研究和应用,逐渐被桥梁工程界所接受。但是,由于设计工程师对高阻尼隔震橡胶支座的抗震性能、适用性、经济性等方面了解不够,且 HDR 隔震支座在抗震分析计算和参数选取上比普通板式橡胶支座复杂,因此在一定程度上阻碍了 HDR 隔震支座的推广应用。

### 第一节 高阻尼隔震橡胶支座对桥梁抗震性能的影响分析

#### (一) 概述

高阻尼隔震橡胶支座是采用特殊配制的橡胶材料(如掺石墨)与钢板等构件硫化而成的一种橡胶支座。其橡胶材料黏性大,自身可吸收能量,在强震作用下,支座变形产生大阻尼,大量消耗进入结构体系的能量,以达到控制结构内力分布及大小的目的。

通过对 HDR 隔震支座进行试验研究,发现其滞回环面积比较饱满,根据《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》JT/T 842—2012,可以采用双线性恢复力模型来模拟,如图 2-1 所示。图中, $K_1$  为屈服前刚度, $K_2$  为屈服后刚度, $K_h$  为水平等效刚度, $X_y$  为屈服位移, $Q_y$  为屈服力, $X$  为  $E_2$  地震作用下的容许剪切位移, $Q$  为对应  $X$  的水平剪力。

HDR 隔震支座的屈服力  $Q_y$  较小,在地震作用下,支座容易屈服,从而发生弹塑性变形,通过快速往返运动大量消耗桥梁结构的振动能量,并将上部结构传递至桥墩、桥台的地震力控制在一定范围内。由于屈服后刚度  $K_2$  远小于屈服前刚度  $K_1$ ,从而水平等效刚度  $K_h$  很小,因此增大了桥梁结构的柔性,延长了自振周期,进而降低了桥梁结构的地震力响应。

与 HDR 隔震支座配套的滑动型支座是在支座本体上方增设了聚四氟乙烯板和不锈钢

板，在滑动摩擦前发生弹性，滑动之后摩擦力恒定，其力学模型如图 2-2 所示。图中， $K_0$  为滑动前水平刚度， $X_y$  为屈服位移， $Q_y$  为滑动摩擦力。滑动型支座的滑动摩擦力  $Q_y$  较小，在地震作用下，支座发生滑动后，通过往返运动、摩擦耗能，同时将上部结构传递至桥墩、桥台的地震力控制在滑动摩擦力  $Q_y$  以下。

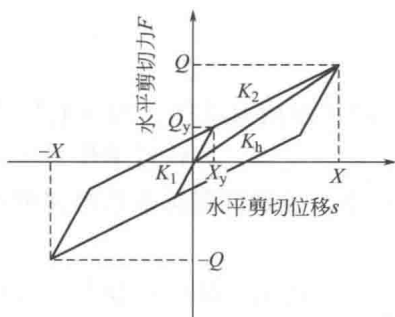


图 2-1 HDR 隔震支座双线性恢复力模型

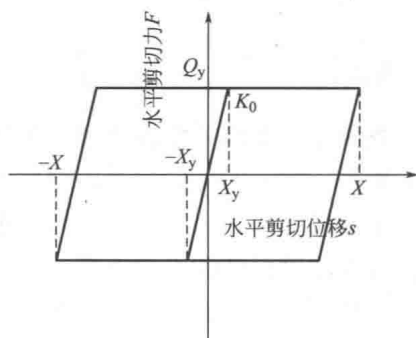


图 2-2 滑动型支座的力学模型

## (二) 典型案例

四川省雅安至康定高速公路青衣江特大桥位于雅安市雨城区，大桥横跨青衣江库区，主桥推荐桥型方案采用  $(42+75+42)$  m 和  $(42+70+42)$  m 预应力混凝土连续梁跨越河堤，江中采用  $4 \times 46.5$  m 预应力混凝土筒支 T 梁，两岸引桥采用多孔 30.5m、30.95m 预应力混凝土筒支 T 梁，全桥长 1421.6m。桥梁结构分幅设置，半幅桥宽为 12.25m。本部分取其中具有代表性一联桥进行分析研究，孔跨布置为  $4 \times 30.95$  m，上部梁体横向由 5 片筒支 T 梁组成，纵向采用桥面连续构造。桥梁结构如图 2-3 所示。

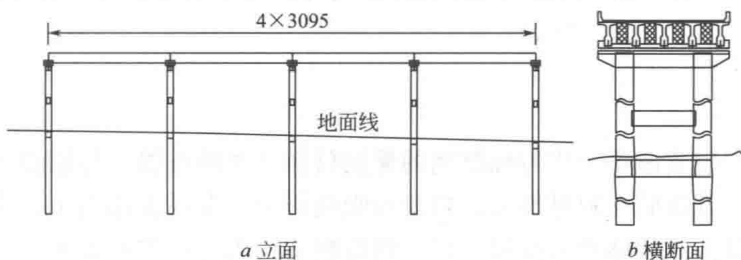


图 2-3 桥梁结构 (单位: cm)

为方便研究，假定各桥墩高度相同、地质条件相同。墩高分别取 15、20、25、30m 四种情况。墩柱直径为 1.6m，桩基直径为 1.8m。

根据本项目两阶段施工图设计文件，中间 3 个桥墩处采用高阻尼隔震橡胶支座，型号为 HDR (II)  $320 \times 420 \times 127$ -G0.8，即 II 型矩形高阻尼隔震橡胶支座，纵桥向尺寸为 370mm，横桥向尺寸为 420mm，高度为 127mm，剪切模量为 0.8MPa；在剪应变为 150% 时，其主要力学参数为： $K_1 = 4170$  kN/m， $K_2 = 1190$  kN/m， $K_h = 1510$  kN/m， $X_y = 10.1$  mm， $Q_y = 42$  kN，容许剪切位移  $X = 126$  mm，竖向承载力  $P = 1360$  kN，竖向压缩刚度  $K_v = 777000$  kN/m，等效阻尼比  $\xi = 12\%$ 。2 个交界墩处采用滑动型支座，型号为

LNR (H) 320×420×137, 即纵桥向尺寸为 370mm, 横桥向尺寸为 420mm, 高度为 137mm; 其主要力学参数为:  $K_0=1710\text{kN/m}$ ,  $X_y=25.1\text{mm}$ ,  $Q_y=43\text{kN}$ , 竖向承载力  $P=1440\text{kN}$ , 竖向压缩刚度  $K_v=735000\text{kN/m}$ 。

为对比研究, 若采用常规静力设计, 根据支反力和支座剪切位移计算结果, 中间 3 个桥墩处普通板式橡胶支座的规格为 GJZ300×450×63; 其主要力学参数为: 竖向承载力  $P=1260\text{kN}$ , 动剪切模量  $G_d=1.2\text{MPa}$ , 水平抗剪刚度  $K_h=3600\text{kN/m}$ , 竖向压缩刚度  $K_v=1464509\text{kN/m}$ 。交界墩处四氟滑板橡胶支座的规格为 GJZF4300×450×65; 其主要力学参数为: 摩擦系数  $\mu=0.06$ , 滑动前水平刚度  $K_0=3600\text{kN/m}$ , 竖向压缩刚度  $K_v=1464509\text{kN/m}$ , 滑动摩擦力  $Q_y$  根据恒荷载作用下的支反力计算。

“5·12”汶川大地震后, 根据 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》第 1 号修改单, 本项目场地地震动峰值加速度为  $0.1g$ , 地震动反应谱特征周期  $0.40\text{s}$ , 场地类型为 II 类, 地震基本烈度为 VII 度。

### 【施工要点】

#### 1. 桥梁抗震性能分析

根据 JTG/TB 02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》, 雅康路青衣江特大桥为 B 类, 并采用两级设防, 即在 E1 地震作用时, 桥梁结构一般不受损坏或不需要修复, 可继续使用; E2 地震作用时应保证不致倒塌或产生严重结构损伤, 经临时加固后可供维持应急交通使用。E1 地震作用时, 采用多振型非弹性反应谱法 (等效线性化分析法) 进行抗震计算。E2 作用时, 采用 3 组人工时程波进行非线性时程分析计算, 取 3 组计算结果的最大值。E1 地震作用 (地震超越概率取 50 年 10%) 时, 本项目的加速度反应谱如图 2-4 所示, 抗震重要性系数取 0.5, 场地系数和阻尼调整系数均为 1.0。E2 地震作用 (地震超越概率取 50 年 2%) 时的人工时程波如图 2-5 所示, 最大加速度峰值为  $1.95\text{m/s}^2$ 。

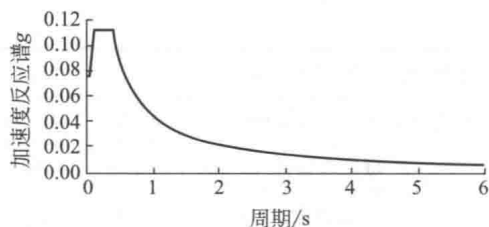


图 2-4 E1 地震作用时加速度反应谱

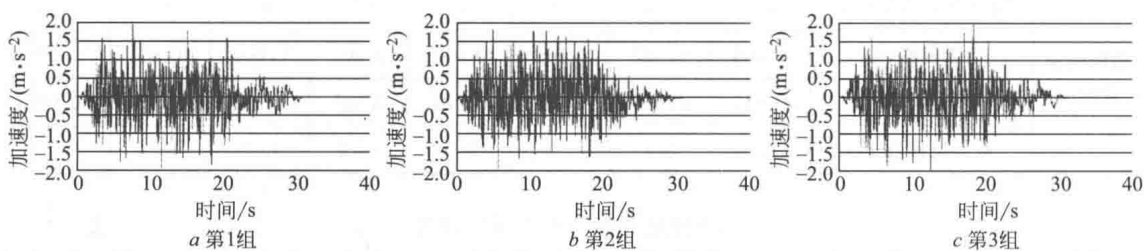


图 2-5 人工时程波

E1 和 E2 地震作用下, 根据不同支座类型、不同墩高, 各计算了 8 种工况。抗震计算采用空间有限元程序 Midas Civil 2015。主梁、桥墩、系梁和桩基均采用梁单元, 计算模型如图 2-6 所示。在进行 E1 地震作用下的多振型非弹性反应谱分析计算时, 普通板式橡胶支座、四氟滑板橡胶支座、HDR 隔震支座以及滑动型支座均采用弹性连接。其中四氟滑板橡胶支座和滑动型支座的水平剪切刚度为 0, HDR 隔震支座的水平剪切刚度取水平等

效刚度。当 HDR 隔震支座的剪应变计算值不等于 150% 时, 需要通过迭代计算确定其水平等效刚度。在进行 E2 地震作用下的非线性时程分析计算时, 普通板式橡胶支座采用弹性连接; 四氟滑板橡胶支座、HDR 隔震支座以及滑动型支座采用一般连接中双线性恢复力模型。

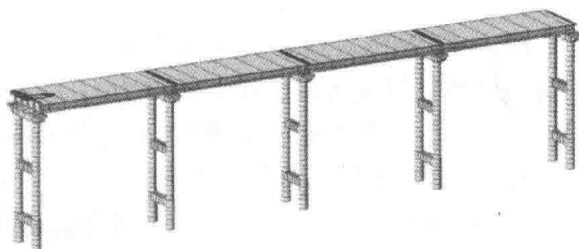


图 2-6 抗震计算模型

E1 地震作用下, 分别采用普通板式橡胶支座 (交界墩处为四氟滑板橡胶支座) 和高阻尼隔震橡胶支座 (交界墩处为滑动型支座), 计算结果如表 2-1 所示。E2 地震作用下, 分别采用普通板式橡胶支座 (交界墩处为四氟滑板橡胶支座) 和高阻尼隔震橡胶支座 (交界墩处为滑动型支座), 计算结果如表 2-2 所示。

E1 地震作用下桥梁结构响应

表 2-1

墩高(m)		设普通板式橡胶支座				设高阻尼隔振橡胶支座			
		15	20	25	30	15	20	25	30
纵桥向振动第 1 阶周期(s)		2.322	2.914	3.586	4.323	2.691	3.282	3.973	4.744
横桥向振动第 1 阶周期(s)		1.223	1.374	1.579	1.835	1.679	1.788	1.943	2.148
纵桥向地震响应	墩底弯矩(kN·m)	1150	1193	1197	1194	1085	1153	1177	1184
	墩顶位移(m)	0.018	0.026	0.035	0.045	0.017	0.026	0.036	0.046
	梁端位移(m)	0.028	0.035	0.043	0.052	0.032	0.039	0.047	0.057
	支座剪切位移(mm)	8.2	6.8	5.8	5.4	13.7	11.5	9.9	8.8
横桥向地震响应	墩底弯矩(kN·m)	728	914	1045	1136	665	880	1018	995
	墩顶位移(m)	0.004	0.007	0.011	0.015	0.004	0.006	0.01	0.013
	梁端位移(m)	0.017	0.019	0.021	0.024	0.021	0.023	0.025	0.027
	剪切位移(mm)	9.6	8.8	7.8	7.1	16.1	15.5	15.1	13.8

E2 地震作用下桥梁结构响应

表 2-2

墩高(m)		设普通板式橡胶支座				设高阻尼隔振橡胶支座			
		15	20	25	30	15	20	25	30
纵桥向地震响应	墩底弯矩(kN·m)	5080	5696	5889	6015	4603	5438	5670	5738
	墩顶位移(m)	0.078	0.124	0.169	0.224	0.072	0.122	0.171	0.226
	梁端位移(m)	0.123	0.16	0.201	0.254	0.129	0.164	0.212	0.26
	支座剪切位移(mm)	39	32	27.2	26.5	52.1	38.6	31.6	30

续表

墩高(m)		设普通板式橡胶支座				设高阻尼隔振橡胶支座			
		15	20	25	30	15	20	25	30
横桥向地震响应	墩底弯矩(kN·m)	3042	3831	4519	4606	2146	2855	3321	3792
	墩顶位移(m)	0.017	0.03	0.048	0.062	0.012	0.022	0.033	0.052
	梁端位移(m)	0.065	0.075	0.09	0.092	0.063	0.084	0.084	0.097
	剪切位移(mm)	42.8	37.1	31.3	30	49.1	57.6	51.1	45.6

从上述分析结果可知,设置高阻尼隔震橡胶支座时与设置普通板式橡胶支座时相比:

1) 能适当延长结构自振周期 0.3~0.45s; 在 E1 地震作用下, HDR 隔震支座的剪切位移略小, 其水平等效刚度  $K_h$  接近弹性刚度  $K_1$ , 隔震效果不明显。

2) 在 E1 地震作用下, 纵桥向墩底弯矩减小 0.8%~5.7%; 横桥向墩底弯矩减小 2.6%~12.4%; 墩高越矮, 隔震效果越好。

3) 在 E1 地震作用下, 墩顶位移影响较小, 但是梁端位移和支座剪切变形稍有增大, 桥梁需要增加限位措施。

4) 在 E2 地震作用下, 纵桥向墩底弯矩减小 3.7%~9.4%; 横桥向墩底弯矩减小 17.7%~29.5%; 墩高越矮, 隔震效果越好。

5) 在 E2 地震作用下, 墩顶位移和梁端位移影响较小, 支座剪切变形量显著增大。

## 2. HDR 隔震支座的适用性分析

根据 8 种工况抗震分析计算, 高阻尼隔震橡胶支座对延长结构自振周期、减小地震作用下桥墩内力有利, 并且墩高不同, 高阻尼隔震橡胶支座的隔震效果也不同, 如图 2-7 所示。

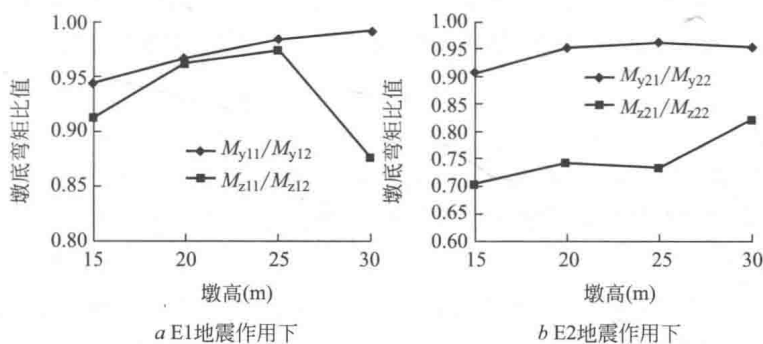


图 2-7 不同地震作用下墩底弯矩比值随墩高变化示意

图 2-7 中,  $M_{y11}$  指 E1 地震作用下, 设置高阻尼隔震橡胶支座时墩底纵桥向弯矩;  $M_{y12}$  指 E1 地震作用下, 设置普通板式橡胶支座时墩底纵桥向弯矩;  $M_{z11}$  指 E1 地震作用下, 设置高阻尼隔震橡胶支座时墩底横桥向弯矩;  $M_{z12}$  指 E1 地震作用下, 设置普通板式橡胶支座时墩底横桥向弯矩;  $M_{y21}$ 、 $M_{y22}$ 、 $M_{z21}$ 、 $M_{z22}$  为 E2 地震作用下相应的墩底弯矩。

从图 2-7 可以看出, 高阻尼隔震橡胶支座对矮墩桥梁的减隔震效果要好于高墩桥梁; 且对横桥向的减隔震效果好于纵桥向, 说明当结构自振周期越小、刚度越大时, 采用高阻

尼隔震橡胶支座时桥梁的抗震性能较好。横桥向个别数据出现偏离,是因为桥墩在横桥向为框架结构,且各桥墩横桥向振动不一致。

同一支座,在同一条地震时程波作用下,墩高分别为 15m、30m 时 HDR 隔震支座的滞回环如图 2-8 所示。从图 2-8 可对比看出,桥墩高度越小,高阻尼隔震橡胶支座的剪切位移越大,滞回环面积越大,耗能作用越大。

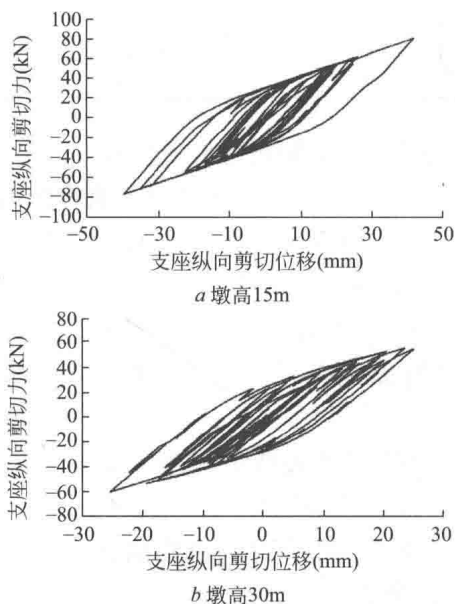


图 2-8 HDR 隔震支座在时程波作用下纵向剪切力-位移曲线

桥梁的跨径、墩高千差万别,不便从结构尺寸上来定量化评判高阻尼隔震橡胶支座的适用性,比较合适的指标是结构的自振周期,从加速度反应谱曲线和分析结果来看,当对结构地震响应起主要贡献的振型对应的自振周期都 $<3s$ 且地震烈度较高时,适宜采用高阻尼隔震橡胶支座。

#### 【专家提示】

★ 高阻尼隔震橡胶支座在近几年逐步得到发展和应用,其水平等效刚度较小,能延长结构自振周期,同时具有双线性恢复力模型特性,在地震反复作用下能形成滞回环进行耗能,减小地震力。

★ 对于公路常规简支梁桥,通过与普通板式橡胶支座进行对比,在墩高较矮、结构自振周期较小时,采用高阻尼隔震橡胶支座可以改善桥梁结构的抗震性能;当墩高较大时,结构自振周期较长,高阻尼隔震橡胶支座的减隔震效果不明显。

★ 设置高阻尼隔震橡胶支座的桥梁,支座剪切位移和梁端位移稍大,需要配套设置纵向、横向限位装置,如挡块、钢拉杆、抗震缓冲橡胶垫等。

★ 当对结构地震响应起主要贡献的振型对应的自振周期都 $<3s$ 且地震烈度较高时,适宜采用高阻尼隔震橡胶支座。

#### 专家简介:

杨艳,攀枝花学院交通与汽车工程学院, E-mail: 37362770@qq.com