

會議論文集

第七届全国防震减灾工程学术研讨会
暨纪念汶川地震五周年学术研讨会



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

二〇一三年五月 中国·成都

第七届全国防震减灾工程学术研讨会
暨纪念汶川地震五周年学术研讨会

會議論文集

组织委员会

名誉主席：

郭允冲（中国土木工程学会理事长）

主 席：

张 雁（中国土木工程学会秘书长）

委 员：（按姓氏拼音排序）

何 川 李亚东 李 丹 马建林 潘 毅

蒲黔辉 苏 谦 王 平 姚令侃 赵世春

秘 书：

闻毓民 孙晓丹 林拥军 苏启旺 龙丹冰

张 晶 刘成清 罗 楠 甘 泉 王初翀

责任编辑

潘 毅 龙丹冰

封面设计

潘 毅 龙丹冰

中国·成都·西南交通大学

二〇一三年五月

第七届全国防震减灾工程学术研讨会
暨纪念汶川地震五周年学术研讨会

會議論文集

主办单位

中国土木工程学会
中国工程院土木、水利与建筑工程学部
中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会
西南交通大学
四川省土木建筑学会

承办单位

西南交通大学土木工程学院
陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室

协办单位

西南交通大学建筑勘察设计研究院
中国建筑西南设计研究院有限公司
四川省建筑设计院

学术委员会

顾问：

陈厚群 范立础 林 皋 欧进萍 钱七虎 容柏生
沈祖炎 谢礼立 廖振鹏 王梦恕 龚晓南 王亚勇

主 席：周福霖

副主席：高 波

委 员：（按姓氏拼音排序）

安晓文 白国良 薄景山 蔡 健 蔡克铨（台湾）陈国兴
陈龙珠 陈政清 程绍革 崔 杰 邓志恒 丁海平 杜修力
杜彦良 杜永峰 范 峰 范 重 方秦生 冯 远 高 波
郭 迅 郭彦林 郭院成 郭子雄 韩 淼 黄世敏 金伟良
金 星 李爱群 李春祥 李国强 李宏男 李 惠 李 杰
李丽娟 李龙安 李 乔 李山有 李 霆 李小军 李英民
李忠献 刘品波 刘伟庆 刘文峰 刘文光 娄 宇 陆 鸣
吕西林 苗启松 缪 升 牛荻涛 潘 文 潘 毅 裴星洙
祁皓 瞿伟廉 任伟新 尚守平 史庆轩 束伟农 司马玉洲
宋 波 苏经宇 苏幼坡 隋莉莉 孙柏涛 孙建刚 孙玉平
谭 平 陶夏新 滕 军 佟建国 王翠坤 王新玲 王毅红
温留汉·黑沙 翁大根 吴 斌 吴 波 肖 岩 徐礼华
闫维明 阎 石 杨 军 杨庆山 叶继红 叶燎原 叶列平
叶献国 尹学军 余志武 张文芳 张文福 张 鑫 章一萍
赵成刚 赵世春 赵兴权 郑文忠 周 云 朱大勇 朱宏平

前 言

第七届全国防震减灾工程学术研讨会于2013年5月10日至12日在四川省成都市西南交通大学举行,本次会议由中国土木工程学会、中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会、西南交通大学和四川省土木建筑学会共同主办,西南交通大学土木工程学院、陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室共同承办,西南交通大学建筑勘察设计研究院、中国建筑西南设计研究院有限公司、四川省建筑设计院协办。

时至今日,我们仍无法忘记2008年5月12日汶川8.0级地震带来的重大人员伤亡和财产损失,而最近的4月20日芦山7.0级地震再一次让我们感受到了地震灾害的残酷。因此,本次会议和纪念汶川地震五周年学术研讨会同时举行,届时除了海峡两岸的学者外,将有来自美国、日本的知名学者在大会上报告交流。这有利于促进国内外的防震减灾工程学术的共同进步,有利于推动防震减灾技术的应用推广。

会议内容涉及防震减灾工程的各个方面,专业覆盖面广。参加本次会议的有来自科研单位的代表,也有来自设计单位和生产企业的代表。会议共收到来稿360余篇,收录论文166篇,其中12篇在《土木工程学报》(正刊)上发表,105篇在《土木工程学报》(增刊)上发表,另外49篇论文收录于本论文集。

本次会议得到了与会单位和代表的大力支持,我们谨代表全国防震减灾工程学术会议组织委员会向全体与会者表示衷心的感谢!本次会议也得到了多家赞助单位的支持,在此对他们表示衷心的感谢!

最后,祝第七届全国防震减灾工程学术会议圆满成功!

第七届全国防震减灾工程学术研讨会组织委员会

二〇一三年四月

目 录

第一部分：隔震与振动控制理论和应用

槽接式挫屈束制支撑构件与构架抗震性能研究.....	蔡克銓, 吳安傑, 林保均, 陶其駿 (001)
挫屈束制支撑构架隔板抗震設計.....	林保均, 蔡克銓, 莊明介, 吳安傑 (008)
含减振子结构巨型框架结构减震分析.....	陆新征, 蔣 庆 (015)
摇摆墙-框架结构在 2011 年东日本地震中的地震反应.....	曲 哲, 坂田弘安, 翠川三郎, 和田 章 (020)
高烈度区高层框架-剪力墙结构消能减震研究.....	杨 悦, 何 斌, 刘成清, 王洪涛, 施卫星 (025)
速度型阻尼器和防屈曲支撑在装配式框架结构纵向体系中减震效果研究.....	严俊, 何斌, 庞金来, 施卫星 (031)
铅芯橡胶叠层支座参数对基础隔震结构双向地震反应影响的分析.....	韩徐扬, 潘 毅, 季晨龙 (037)
装配式隔震节点的抗震性能试验研究.....	匡 珍, 谭 平, 卫杰斌, 周福霖 (044)
基于钢管混凝土结构的自隔震技术.....	龙丹冰, 王尔其, 潘常旭 (050)
滑移隔震若干问题研究.....	张光辉 (056)
某办公楼弹簧整体隔振项目的设计.....	朱文海, 罗 勇, 赵彦海 (061)

第二部分：结构设计、加固与改造

新型高层木结构建筑抗震性能分析与设计方法研究.....	裴适齡, John W. van de Lindt, 刘红燕 (066)
古建筑木结构直榫节点力学模型的研究.....	唐丽娜, 潘 毅, 李玲娇, 王 超 (072)
台灣地區學校建築物耐震評估與補強.....	紀茂傑, 張清雲, 黃 然 (080)
台湾地区低矮建筑采用制震阻尼器补强的工程实例.....	耿鹏飞, 潘 毅, 卓建全, 张清云 (086)
屈曲约束支撑在混凝土结构抗震加固中的时程分析.....	王成刚, 郝 星, 柳炳康 (092)
高含钢率型钢混凝土柱抗震性能研究.....	彭 曦, 吕西林, 殷小澈, 蒋欢军 (098)
RC 大偏压框架柱基于偏心距随机特性的抗震可靠度分析.....	蒋友宝, 赵雨来, 廖国宇 (112)
建筑结构防连续倒塌分析与设计方法研究进展.....	王初翀, 潘 毅, 秦 楠 (117)
底商多层砌体结构抗倒塌加固方法研究.....	何雄科, 郭 迅 (123)
地震作用下圈梁构造柱约束砖砌体结构倒塌分析.....	张景太, 刘 葵, 张 夫, 孙 娜 (130)
不同类型楼梯对整体框架结构的影响.....	冉 俣, 邢国华, 寇文飞, 刘伯权 (136)
砌体结构教学楼在窗间墙扶壁柱增强配筋条件下的抗震性能.....	吴 昊, 赵世春, 许 浒, 张蓬勃 (141)
加固改造设计的几种类型及实例探讨.....	刘中华 (146)
汶川地震砌体结构震害及分析.....	谭 皓, 胡格格, 李仁林 (152)

第三部分：桥梁工程抗震分析

- 地震—列车—大跨度斜拉桥耦合振动机理研究... 李永乐, 朱思宇, Steve C. S. Cai, 杨 成, 强士中 (158)
- 新 South Park 桥引桥抗震设计中的抗震体系优化和推覆分析..... 黄国庆, 王浩博, 李志国 (166)
- 某矮塔斜拉桥抗震性能研究..... 谢尚英, 王 路, 郑爱华 (175)
- 桥梁履带式金属屈服阻尼器试验研究..... 邓开来, 潘 鹏, 孙江波 (179)
- 大跨度连续梁桥的地震碰撞模拟分析..... 申爱国 (186)
- 桥梁横向挡块抗震性能试验研究..... 郑万山, 唐光武 (194)
- 减隔震桥梁中非经典阻尼影响及阻尼比分析..... 彭 伟, 唐光武 (202)
- 行波效应对多塔自锚式悬索桥地震响应的影响..... 张 超, 房贞政, 巫生平 (207)
- 套箍法加固石拱桥主拱圈正截面承载力的计算..... 张 晶 (213)
- 地震液化条件下的桥台背地基沉降控制的应用技术研究..... 马立杰, 张晋玉, 王宇亮 (219)
- 基于随机减量法和峰值法的悬索桥模态频率识别..... 巫生平, 房贞政, 张 超, 陈茂霖 (223)
- 固定—滑动支座在多跨连续梁桥中的抗震效果分析..... 马海滨, 上官萍, 卓卫东 (228)

第四部分：隧道工程抗震分析

- 跨越断层破碎带隧道地震响应研究..... 李 林, 何 川, 耿 萍, 张 景 (233)
- 不同地震烈度作用下铁路隧道地震响应特征分析..... 张 景, 何 川, 耿 萍, 李 林 (240)
- 汶川地震隧道震害及其影响因素分析..... 何 悦, 耿 萍, 唐金良, 徐亚军 (246)

第五部分：生命线工程与重大工程抗震

- 立式储罐基础隔震理论、数值及实验研究..... 孙建刚, 崔利富, 王 振 (251)
- 醫院機電設備防震之探討..... 吳德憲, 紀茂傑, 黄 然, 張清雲 (257)
- 电站设备抗地震的两个关键问题..... 谷朝红, 姜正贵, 殷昌宁, 王 涛 (262)

第六部分：灾害评估与减灾决策

- 某典型平面住宅楼抗震检测鉴定及震害分析..... 罗维刚, 韩建平, 刘云帅, 范海波 (267)
- 高层建筑地震风险与保险管理研究..... 王 冬, 欧进萍 (272)
- 基于面向对象特征提取技术建立建筑结构基础信息空间网格数据库——以四川省为例. 邓宏宇, 孙柏涛 (279)
- 基于主成分分析的震区地形成灾因子敏感性分析..... 贾兴利, 许金良, 杨宏志 (286)
- 压埋研究现状与影响压埋率的因素分析..... 杨明儒, 余世舟 (291)
- 地震区地下煤炭开采对建筑的损害影响分析..... 张景太, 刘 葵, 张 夫, 孙 娜 (298)

槽接式挫屈束制支撐構件與構架耐震性能研究

蔡克銓¹ 吳安傑² 林保均² 陶其駿³

(1. 國立台灣大學, 台北台灣 10668; 2. 國家地震工程研究中心, 台北台灣 10668; 內政部建築研究所, 台北台灣 11673)

摘要: 本文介紹國家地震工程研究中心近期所研發之槽接式挫屈束制支撐, 透過三組實尺寸構件試驗驗證其耐震性能; 測試構件包含一組長度為 12.5m, 最大抗壓強度超過 16800kN, 核心消能段應變量達 3.5%。為進一步驗證本構件於構架中的耐震性能, 利用實尺寸三層樓挫屈束制支撐構架擬動態試驗, 以探討構件與端部接合的力學行為。構件與構架試驗結果均顯示, 新研發之槽接式挫屈束制支撐經濟效益極高, 遲滯消能行為良好穩定, 具有優良之耐震性能。構架試體於擬動態試驗中, 各組斜撐與接合耐震性能良好, 各層兩組斜撐在構架中足以承受五成以上的樓層剪力, 消散大部分地震所帶來的能量。此外, 利用數值分析軟體 PISA3D 或 OpenSees 在試驗前對試體反應進行預測與模擬, 均證實能有效預測構件或構架試體之受力與變形反應。

关键词: 挫屈束制支撐; 耐震設計; 阻尼器; 能量消散; 擬動態試驗; 斜撐構架

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A

文章编号: 20121121-04

Seismic investigations on welded end-slot buckling-restrained braces and braced frames

Tsai Keh-Chyuan¹ Wu An-Chien² Lin Pao-Chun² Tao Chi-Juin³

(1. National Taiwan University, Taipei 10668, Taiwan; 2. National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei 10668, Taiwan; 3. Architectural Building Research Institute, Taipei, 11673 Taiwan)

Abstract : In this study, the excellent performance of the welded end-slot buckling-restrained brace (WES-BRB) is illustrated through cyclic tests of three full-scale BRB components. It includes the test results of a 12.5m long jumbo WES-BRB with the peak compressive strength 16800kN and the maximum core strain 0.035. In order to investigate the seismic performance of WES-BRB components and the end connections, a 3-story single-bay full-scale buckling-restrained braced frame (BRBF) was tested using pseudo-dynamic test procedures in the National Center for Research on Earthquake Engineering. In both component and frame tests, all WES-BRB specimens showed satisfactory performance with a very stable hysteretic response. The BRBF test results showed good performance of the BRBs and the end connections. Two sets of BRBs in each story carried more than 50% of the story shear during the test and dissipated most of the earthquake input energy. In addition, the BRB and BRBF responses were satisfactorily predicated by using PISA3D and OpenSees programs.

Keywords : buckling restrained brace; seismic design; hysteretic damper; energy dissipation; hybrid test; braced frame

E-mail: acwu@ncree.narl.org.tw

介紹

挫屈束制支撐構架 (buckling-restrained braced frame, BRBF) 具有如傳統同心斜撐構架的高勁度特性, 但斜撐藉由圍束單元, 改善同心斜撐的挫屈行為, 提供較為飽滿的遲滯反應迴圈和較穩定的力學行為, 在地震力作用下可以達到充分消能的效果^[1-3]。過去習見的單核心挫屈束制支撐 (buckling-restrained brace, BRB) 兩端常以多片連接板配合螺栓進行接合^[4,5]; 或採雙核心挫屈束制支撐利用搭接組合方式與結構接合

^[1,5]。新近在國家地震工程研究中心 (國震中心) 研發之槽接式挫屈束制支撐 (welded end-slot buckling-restrained brace, WES-BRB)^[6,7], 其接合方式可有效的縮短接合段長度, 增加核心段長度達到更好的消能效果, 亦可提高施工之便利性, 有效降低材料與施工成本。為探討 WES-BRB 構件及其在構架中的耐震性能, 分別進行實尺寸構件反覆載重試驗^[6]及實尺寸三層樓單跨 BRBF 擬動態試驗^[7], 並利用數值分析軟體 PISA3D^[8]與 OpenSees^[9]在試驗前對試體反應進行預測。本文介紹這些試驗與分析結果。

1 槽接式挫屈束制支撐構件性能研究

WES-BRB 構件^[6,7]，其主要特點在構件接合段，如圖 1 及圖 2 所示，利用兩片或兩片以上錯開的加勁板，配合核心板端部的開槽，可在安裝時將構件插入隔板，並在開槽側與加勁板側進行銲接接合，因此稱其為槽接式 BRB。核心元件主要包括核心板與兩片或兩片以上的加勁板，核心板面向與隔板面向垂直，加勁板垂直於核心板，分別配置在核心板兩面及其開槽

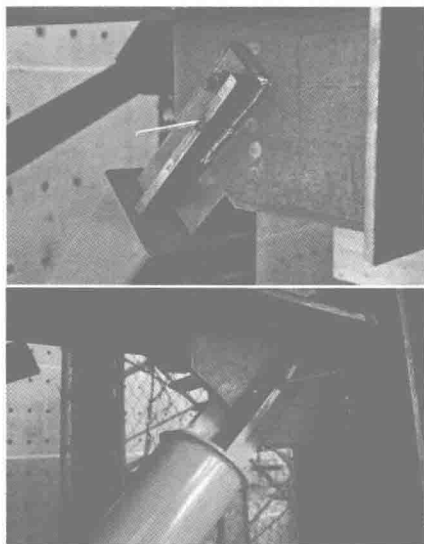


圖 1 WES-BRB 接合細節

Fig. 1 Connection details for WES-BRB

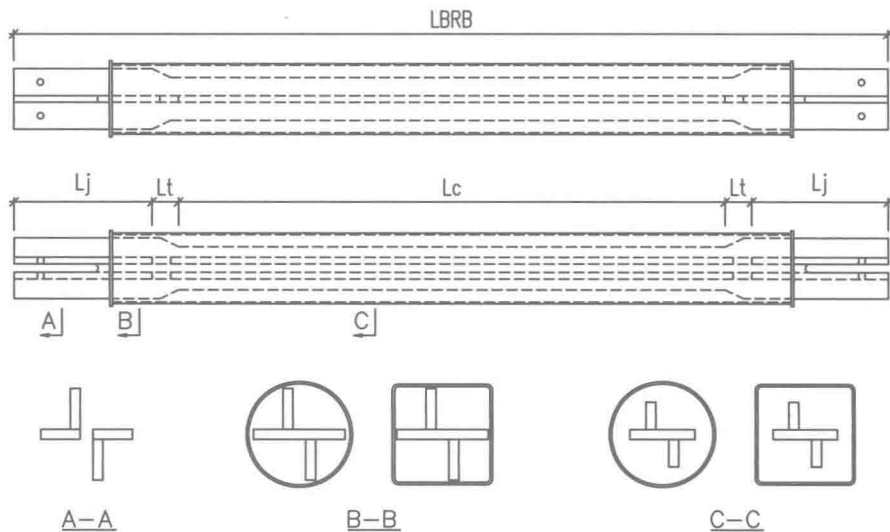


圖 2 WES-BRB 構件性能研究試體尺寸圖

Fig. 2 Profiles of WES-BRB component specimens

1.1 試體設計

三組構件試體細部尺寸詳如表 1 及圖 2 所示，試體核心元件皆採用 CNS SN490B 或 SN490C 鋼材。其中，試體 WES-R 核心元件板厚為 20mm，而試體 WES-C 核心元件板厚採用 25mm，兩組構件試體分別搭配矩形

與圓形鋼管內部充填設計強度為 56MPa 之無收縮水泥砂漿，以構成圍束單元；試體 WES-J 核心元件板厚為 48mm，圍束單元則以圓形鋼管內灌設計強度為 56MPa 之自充填混凝土而成，構件全長達 12.5m，為台灣所測試過尺寸最長軸力強度最大的 BRB 構件試體。

表 1 WES-BRB 構件性能研究試體尺寸表

Table 1 Dimensions for WES-BRB component specimens

Specimen	Material	$A_c (mm^2)$	$L_c (mm)$	$L_l (mm)$	$L_j (mm)$	$L_{BRB} (mm)$	Steel casing (mm)
WES-R	CNS SN490B	4000	1700	200	200	2500	Tube 175×175×4.5
WES-C	CNS SN490B	7525	2060	100	520	3300	Pipe 267.4×6
WES-J	CNS SN490C	26500	9500	286	1214	12500	Pipe 609.6×12

1.2 試驗加載歷時

WES-R 及 WES-C 兩試驗利用在國震中心的 Shimadzu 萬能試驗機進行，而 WES-J 的試驗則利用內政部建築研究所 15m 淨高的 3000 噸試驗機進行。三組試體之試驗加載歷時皆參考 AISC 之建議^[10]，分別包

含標準歷時加載及疲勞加載，詳如表 2 所示。試體 WES-R 於標準歷時進行至 2.20% 核心消能段應變，約對應於 2.0 倍最大設計樓層側位移角 ($2.0\Delta_{bm}$) 後，進行額外加載試驗，分別增加 4 個迴圈 2.75% 核心消能段應變 (對應於 $2.5\Delta_{bm}$) 及 2 個迴圈 3.30% 核心消能

段應變(對應於 $3.0\Delta_{bm}$)，疲勞加載則施以對應於 $1.5\Delta_{bm}$ 之核心消能段應變量 1.65% 至試體破壞為止。試體 WES-C 最大加載至 3.00% 核心消能段應變，對應於 2.0 倍最大設計樓層側位移角 ($2.0\Delta_{bm}$) 後，即施加疲勞荷載至試體破壞為止，其對應於 $1.5\Delta_{bm}$ 之核心消能段應變量 2.25%。試體 WES-J 核心消能段應變量 1.75% 所

對應的最大設計樓層側位移角 Δ_{bm} 為 0.023 弧度，標準加載試驗最大施載至 3.50% 核心消能段應變量 (約對應於 $2.0\Delta_{bm}=0.046$ 弧度)，足以反映絕大多數 BRBF 於強烈地震力作用下，BRB 所須承受的軸向應變需求；最後施以對應於 $1.5\Delta_{bm}$ 應變量之疲勞荷載至試體破壞為止。

表 2 WES-BRB 構件性能研究試驗加載歷時

Table 2 Loading protocols for WES-BRB component specimens

Specimen	Core strains at various deformation targets						
	Standard			Extra			Fatigue
	$0.5\Delta_{bm}$	$1.0\Delta_{bm}$	$1.5\Delta_{bm}$	$2.0\Delta_{bm}$	$2.5\Delta_{bm}$	$3.0\Delta_{bm}$	$1.5\Delta_{bm}$
WES-R	0.55%	1.10%	1.65%	2.20%	2.75%	3.30%	1.65%
WES-C	0.75%	1.50%	2.25%	3.00%	-	-	2.25%
WES-J	0.88%	1.75%	2.63%	3.50%	-	-	2.63%

1.3 試驗結果與討論

試體 WES-R、WES-C 及 WES-J 安裝於試驗構架分別如圖 3 所示，各組試體在標準歷時加載或額外加載過程中，皆無任何破壞情形發生，完成後即施以疲勞加載，分別持續至第 7、第 16 及第 4 個迴圈時，試體核心發生斷裂破壞，故停止試驗，各構件反應分別如圖 4 至圖 6 所示。試驗結果顯示各組試體於標準加載或額外加載試驗皆有穩定的受力變形行為，遲滯迴圈飽滿，沒有強度遽然衰減及勁度束縮的情況發生。圖 4 至圖 6 亦顯示，利用非線性結構分析軟體 PISA3D，可精確地模擬試體反覆受載的彈塑性遲滯反應迴圈。如表 3 所列，各組試體於各應變階段下，各

迴圈最大壓力與最大拉力之比值 (β factor) ^[10] 皆小於 1.2，顯示脫層機制良好穩定。疲勞壽命方面，本研究所測試的構件試體皆考量在大變位時，是否仍具有穩定消能與良好遲滯行為，已使用較一般常見更大的疲勞位移量進行疲勞載重試驗，試體 WES-R、WES-C 與 WES-J 在反覆漸增應變及疲勞加載作用下，所得之累積非線性變形量 (CPD 值) 分別為 640、834 與 406，仍遠超過 AISC 規範的 200 倍降伏位移量之要求^[10]。綜合以上試驗結果，新研發之 WES-BRB，其整體非線性受力與變形關係穩定且具高度可預測性，遲滯迴圈飽滿，可有效消散地震輸入能量。



圖 3 試體 WES-R、WES-C 及 WES-J 之照片

Fig. 3 Experimental setups for WES-R, WES-C and WES-J tests

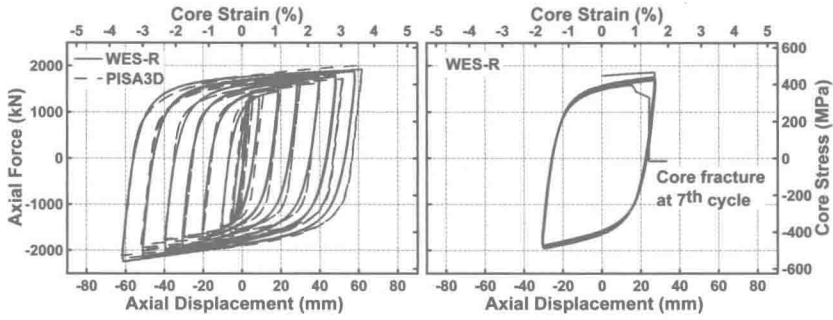


圖 4 試體 WES-R 受力與變形關係圖

Fig. 4 Force vs. deformation responses of WES-R

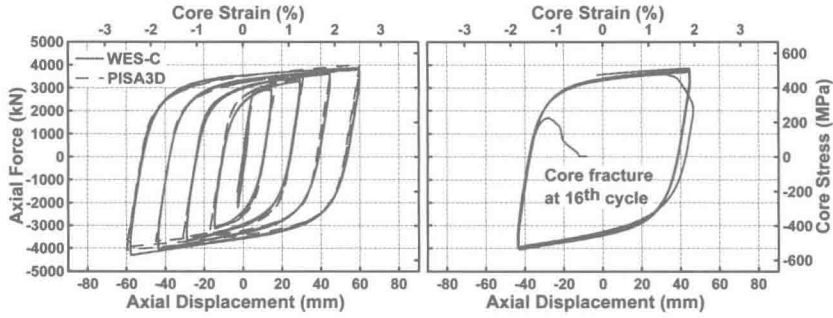


圖 5 試體 WES-C 受力與變形關係圖

Fig. 5 Force vs. deformation responses of WES-C

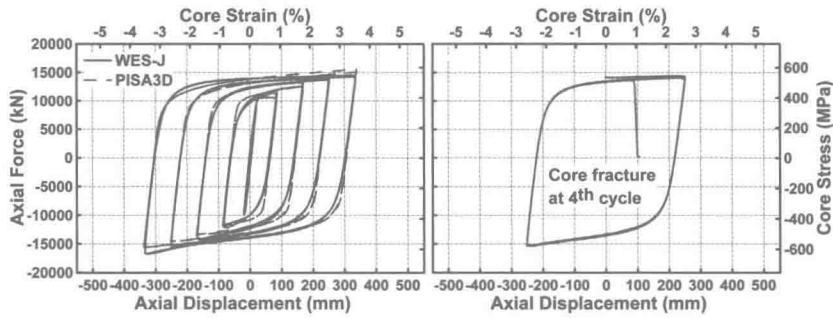


圖 6 試體 WES-J 受力與變形關係圖

Fig. 6 Force vs. deformation responses of WES-J

表 3 WES-BRB 構件性能研究試驗結果

Table 3 β factors and CPD values for WES-BRB component specimens

Specimen	β factors at various deformation targets						CPD
	$0.5\Delta_{bm}$	$1.0\Delta_{bm}$	$1.5\Delta_{bm}$	$2.0\Delta_{bm}$	$2.5\Delta_{bm}$	$3.0\Delta_{bm}$	
WES-R	1.13	1.13	1.14	1.14	1.16	1.18	640
	1.14	1.15	1.15	1.14	1.17		
WES-C	1.02	1.06	1.09	1.11	1.16	-	834
	1.06	1.08	1.09	1.11	-	-	
WES-J	1.01	1.07	1.11	1.16	-	-	406
	1.07	1.07	1.11	1.15	-	-	

2 槽接式挫屈束制支撐構架性能研究

為進一步探討 WES-BRB 在構架中的耐震性能 [6,7]，國震中心也已將 WES-BRB 構件應用於實尺寸三層樓 BRBF (圖 7) 進行擬動態試驗。此外，利用數值

分析軟體 PISA3D^[8]與 OpenSees^[9]在試驗前預測試體反應。擬動態試驗與預測反應已同步在網站播放 (<http://exp.ncree.org/cbf>)。

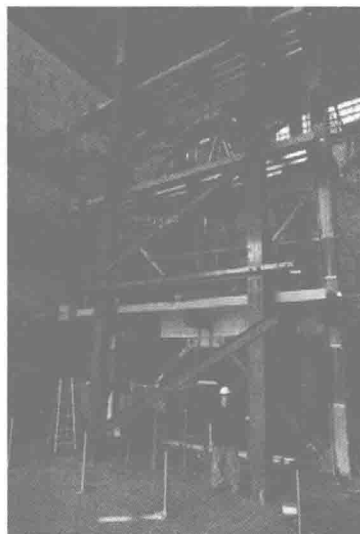
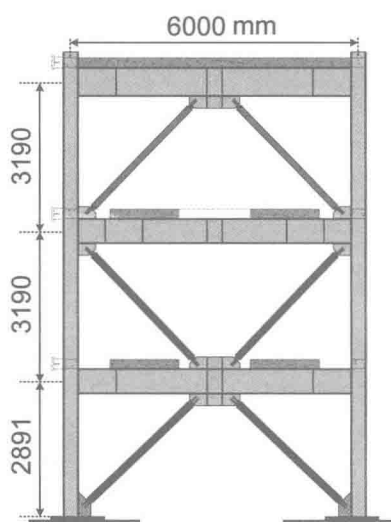


圖 7 擬動態試驗構架立面圖

Fig. 7 Full scale 3-story BRBF elevation and test setup

2.1 試驗構架

假設試驗構架屬於一棟三層樓建築的抗側力系統之一，各樓層的質量與垂直載重皆相同；圖 7 及圖 1 分別為試體構架立面圖及斜撐接合部位照片，試體構架柱間距為 6m，一樓樓層高度為 2.93m，梁柱接頭採用鉸接方式，二樓與三樓樓層高度為 3.19m，梁柱接頭則為抗彎接合，分別搭配圓形與方型外管之

WES-BRB，各構件斷面尺寸如表 4 所示。三層樓建築的設計基底剪力滿足美國洛杉磯地區的耐震設計規範，試體構架簡化為三個側向自由度，構架之基本振動週期為 0.60 秒，而擬動態試驗所使用的 LA03 地震歷時，也調整至 $PGA=530gal$ 以符合對應的設計譜加速度^[7]。

表 4 構件斷面尺寸

Table 4 Dimensions for WES-BRBF specimens

Member	Material	Section
Columns	A992	W12×106
Top girder	A992	W24×94
Middle girder	A992	W21×68
Lower girder	A992	W21×68
Beams	A992	W14×26
Braces	A572 GR50	Core plate 74×15mm
Gusset plates	A572 GR50	Thickness 15mm

2.2 試驗結果與分析

圖 8 為 LA03 擬動態試驗各樓層的位移歷時及層剪力與側位移角關係，以及試驗前利用 PISA3D 與 OpenSees 的預測結果，預測與試驗結果並無太大的差異，而試驗所得之位移量皆略小於預測值；在兩數值分析軟體差異比較方面，PISA3D 的預測結果較為接近試驗結果。預測與試驗結果差異的原因，可能包含了梁柱構件數值模型採簡化的材料特性與實際構件在大

量變形下的性質不盡相同。試驗結果顯示，各組斜撐與接合耐震性能良好，各層兩組斜撐在構架中足以承受約七成以上的樓層剪力，即使進入非線性範圍，仍可抵抗五成左右的樓層剪力，消散大部分地震能量。此外，一樓的層間剪力最大，層間變位最大接近 3%；二樓反應則略小於一樓；三樓反應最小，最大層間剪力僅約 1000kN，而層間變位也都在 1% 以內。各樓層斜撐斷面強度皆相同，但由於三樓與二樓梁與柱為剛

接, 造成三樓勁度高於其他兩個樓層, 反應因而較小。

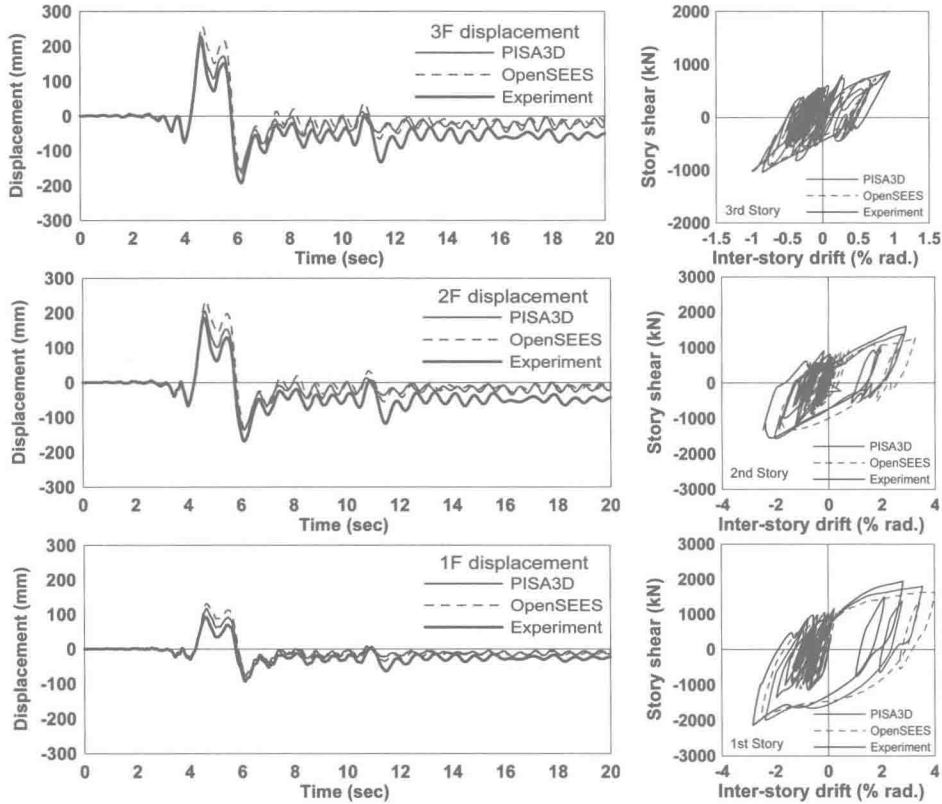


圖 8 擬動態試驗各樓層側位移歷時及層剪力與層間側位移角關係圖

Fig. 8 Floor lateral displacement histories and story shears versus inter-story drifts

3 結論

透過實尺寸構件與構架試體驗證, 試驗結果顯示新研發之 WES-BRB 遲滯消能行為良好穩定, 具有優良之耐震性能。研究顯示 WES-BRB 具有高品質、高性能、高經濟性及供貨時間短等各項優點。本技術的應用能有效地使建築結構具備優越的抗震性能; 自本技術的發表後, 短期內已有超過十件工程案採用 WES-BRB, 且應用案例在迅速增加中。

致 謝

感謝國家實驗研究院與國震中心多年來對於挫屈束制支撐研發與推廣的支持與努力; 同時感謝內政部建築研究所, 在研發期間提供試驗儀器設備的協助, 在此一併致謝。

參 考 文 獻

[1] 蔡克銓, 賴俊維。鋼骨消能支撐構架之耐震研究[J]。結構工程, 2002, 17(2), 3-32
 [2] Tsai KC, Hsiao PC, Wang KJ, et al. Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame-Part I: Specimen design, experiment and analysis [J]. Earthquake Engineering and

Structural Dynamics, 2008, 37(7): 1081-1098
 [3] Tsai KC, Hsiao PC. Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame-Part II: Seismic performance of buckling-restrained braces and connections [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(7): 1099-1115
 [4] Watanabe A, Hitomoi Y, Saeki E, et al. Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube [C]. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, 1988
 [5] Uang CM, Nakashima M, Tsai KC. Research and application of buckling-restrained braced frames [J]. International Journal of Steel Structures, 2004, 4: 301-313
 [6] 蔡克銓, 魏志毓, 吳安傑, 林保均。脫層材料與槽接式挫屈束制支撐之性能研究[J]。建築鋼結構進展, 2012, 已接受。(Tsai KC, Wei CY, Wu AC, Lin PC. Experimental investigations of unbonding layers and welded end-slot connection for buckling restrained braces [J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, accepted (in Chinese))
 [7] Lin PC, Tsai KC, Wang KJ, et al. Seismic design and hybrid tests of a full-scale three-story buckling-restrained braced frame using welded end connections and thin profile [J].

- Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(5): 1001-1020
- [8] Lin BZ, Chuang MC, Tsai KC. Object-oriented development and application of a nonlinear structural analysis framework [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40: 66-82
- [9] McKenna F. Object oriented finite element programming frameworks for analysis, algorithms and parallel computing [D]. California: University of California, 1997
- [10] AISC. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2010

挫屈束制支撐構架隅板耐震設計

林保均¹ 蔡克銓² 莊明介¹ 吳安傑¹

(1. 國家地震工程研究中心, 台北台灣 10668; 2. 國立台灣大學, 台北台灣 10668)

摘要: 挫屈束制支撐為高經濟性與高效能的減震裝置, 採習見均力法(Uniform Force Method) 設計常使隅板形狀受到限制。近來國家地震工程研究中心進行之實尺寸三層樓挫屈束制支撐構架試驗結果顯示, 在樓層側位移超過 0.03 弧度時, 隅板在與柱翼銲道接合角緣發生破裂情形。研究顯示隅板除了承受來自斜撐軸力外, 亦承受梁柱角隅開合效應對隅板所造成之額外應力。有限元素分析結果發現, 梁柱開合效應所產生額外的作用力高於僅考慮斜撐軸力所產生之需求甚多。透過有限元素模型分析結果, 本研究建議採用泛均力法(Generalized Uniform Force Method)設計隅板尺寸, 並採等效拉壓桿計算隅板於梁柱角隅開合效應下所受到的力量, 由斜撐所發展之最大軸力, 以及構架中梁端發生塑鉸之極限狀態所產生之開合力量做為設計隅板以及焊道尺寸的需求, 可使隅板形狀設計更靈活, 力量分布較佳。

关键词: 挫屈束制支撐; 接合隅板; 耐震設計

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A

文章编号: 20121127-07

Seismic Design of Gusset Connections for Buckling-Restrained Braced Frames

Lin Pao-Chun¹ Tsai Keh-Chyuan² Chuang Ming-Chieh¹ Wu An-Chien¹

(1.National Center for Research on Earthquake Engineering,Taipei,Taiwan; 2.National Taiwan University,Taipei,Taiwan)

Abstract : A series of 3-story full scale buckling-restrained braced frame (BRBF) tests were conducted in the National Center for Research on Earthquake Engineering in 2010. The specimen gusset plate designs followed the Uniform Force Method (UFM) commonly adopted by engineers. However, fractures of the gusset welding near column were observed during the tests when the BRBF reached a story drift greater than 0.033 rad. Using the finite element analysis, it can be found that the gusset plates are subjected to the forces from the BRB and frame actions which affect the gusset connection force distribution significantly. A design procedure is proposed in this paper. The Generalized UFM is recommended as it provides more freedoms in configuring the gusset plate shapes. The gusset connection force demands must take into account the maximum BRB force capacity and the maximum beam shear due to the frame ultimate sway effect.

Keywords : buckling-restrained brace; gusset plate connection; seismic design

E-mail: r97521211@ntu.edu.tw

引言

挫屈束制支撐(Buckling Restrained Brace, BRB)核心單元包括核心段、轉接段與接合段^[1,2], 利用核心段發展非線性變形以達到消能的效果, 由於受拉與受壓時皆可發展出超過降伏強度以上的軸力^[3], 具有良好的性能而被廣泛應用於耐震建築結構之中。為符合不同建築形式配置需求, 近年來挫屈束制支撐設計軸力有逐漸提高之趨勢, 而為確保挫屈束制支撐於地震時可以發揮效用, 其與構架相連的隅板必須承受斜撐的最大軸力, 並在構架有大量側位移時仍不得發生破壞。

依性能設計的概念, 斜撐所發展之最大軸力應做為隅板之設計需求, 習見設計隅板時所採用之均佈力法僅考量斜撐軸力, 但當構架發生側向變形時, 梁柱角隅會對隅板產生額外的拉力或壓力, 而此力量需求往往被忽略。過去研究顯示, 梁柱角隅開合對隅板產生之作用力可能與斜撐軸力所產生之力量相當^[4]。過去這些研究亦提出考量梁柱開合效應之隅板設計方式^[4,5]。其中由於均佈力法^[6]設計流程簡易且已被納入設計規範^[7]而受廣為採用, 但依此法設計所得之隅板長度與高度比例常受限, 易造成隅板形狀受限。本研究提出梁柱開合效應之簡化計算方式並採用泛均佈力法設計隅板尺寸, 使隅板形狀的設計得以更加靈活, 另採用等效

拉壓桿模型計算隅板於梁柱開合效應下所受到的力量^[8]，配合斜撐軸力做為隅板尺寸與焊道之設計依據。本研究利用三層樓實尺寸挫屈束制支撐構架擬動態試驗結果以及有限元素模型分析，驗證所提出之設計流程。本研究亦利用有限元素模型，提出隅板端部加勁板之設計方法，除能提高隅板穩定性之外，亦可降低應力高度集中於隅板端部情形，可有效避免隅板在與梁柱接合角緣發生破裂。

1 習見接合板設計方法

1.1 均佈力法與泛均力法

均佈力法^[6]計算方式簡易，且由鋼結構設計規範^[7]所採用，因此常被用於作挫屈束制支撐構架之隅板設計。但常假設隅板僅承受由斜撐所產生之軸力效應，設計時採用 BRB 所能發展出之最大軸力(P_{max})做為設計需求：

$$P_{max} = \beta \times R_y \times \Omega_y \times F_y \times A_c \quad (1)$$

式中 A_c 與 F_y 分別為斜撐核心鋼板斷面積與材料降伏強度， Ω_y (1.3~1.5)與 R_y (1.1~1.2)分別為核心鋼板材料之應變硬化與材料超強因子， β (1.1~1.2)則為 BRB 強度調整因子^[1]。如圖 1 所示，由斜撐最大軸力分布於隅板與梁柱接合面之力量可計算如下：

$$V_{gc} = P_{max} \frac{\beta_g}{r}, \quad H_{gc} = P_{max} \frac{e_c}{r}, \quad V_{gb} = P_{max} \frac{e_b}{r}, \quad H_{gb} = P_{max} \frac{\alpha_g}{r} \quad (2)$$

$$\tan \varphi = (e_b + \beta_g) / (e_c + \alpha_g) \quad (3)$$

利用均力法計算隅板於梁柱接合面上之分力時，隅板長度($2\alpha_g$)與寬度($2\beta_g$)需符合斜撐角度造成之幾何限制(式 3)，因此可能造成隅板形狀受限的情形。為使隅板形狀更適用，並允許設計者能自由選擇隅板長度與高度，本研究建議採用泛均力法^[9]，而使隅板之兩自由邊可以分別定為水平與垂直以利施工與加勁板之安裝。此外，泛均力法將斜撐作用於隅板緣產生之彎矩納入考量而滿足力與彎矩平衡，計算所得之力量能分布得較為合理而可得到較經濟的隅板厚度設計。如圖 2 所示，泛均力法假設隅板與梁柱接合面之力量作用於隅板長度與高度中點，並且與斜撐軸力方向同時交會

於隅板控制點(gusset control point)，此外亦考慮隅板與柱接合面力量之水平分力傳遞至梁，與梁接合面力量之垂直分力傳遞至柱。同時假設隅板與梁接合面合力方向通過梁中心線與柱面交會點(beam control point)。利用上述之幾何與力平衡關係，可以計算隅板於梁柱接合面之力量：

$$H_{uc} = (P_{max} e_c \sin \varphi) / (e_b + \beta_U) \quad (4)$$

$$V_{ub} = P_{max} \left[\frac{e_b [(e_b + \beta_U) \cos \varphi - e_c \sin \varphi]}{\alpha_U (e_b + \beta_U)} \right] \quad (5)$$

$$H_{ub} = P_{max} \cos \varphi - H_{uc} \quad (6)$$

$$V_{uc} = P_{max} \sin \varphi - V_{ub} \quad (7)$$

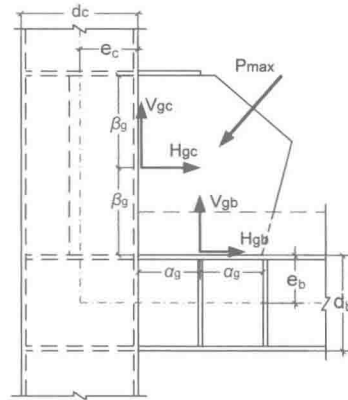


圖 1 均佈力法受力分布示意圖
Fig.1 Force distributions of UFM

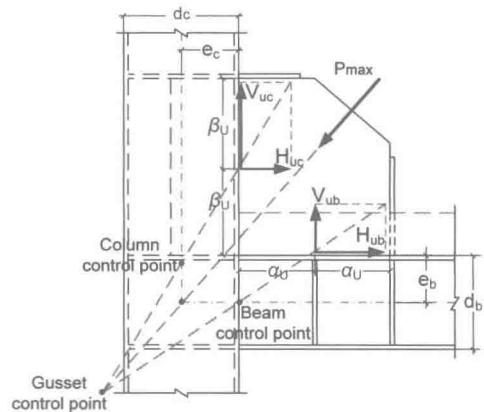


圖 2 泛均佈力法受力分布示意圖
Fig.2 Force distributions of GUFM

1.2 梁柱開合效應

如圖 3 所示，構架發生側位移變形時，隅板除了承受斜撐軸力(P_{max})外，梁柱角隅開合變形亦導至隅板

承受額外之拉力或壓力(P_{FA})。本研究採用一等效拉壓桿(圖 4)以估算隅板在梁柱開合效應下所受到的力量^[8]，拉壓桿兩端分別位於自柱面及梁面算起 0.6 倍之隅板長度($0.6L_h$)與高度($0.6L_v$)處，寬度與隅板厚度(t_g)相同，深度則假設為支撐長度的一半($0.5L_g$)^[5]。構架側向變形時，採梁在隅板端部產生塑性彎矩($M_{p,beam}$)之極限狀態作為設計需求(圖 4)，所對應之梁剪力(V_{beam})導致拉壓桿受軸力，其水平分力為 S ，則拉壓桿承受梁剪力導致之水平方向變形量為 $d_{strut,x}$ 。而梁亦因此撓曲作用下而發生水平變形，於 0.6 倍隅板長度($0.6L_h$)範圍內，計算梁表面之水平變形量 $d_{beam,x}$ ，利用梁表面水平變形量與等效拉壓桿水平變形量相等^[8]，則可計算等效拉壓桿所受到軸力之水平分量(S)與垂直分量(N)^[1]：

$$S = \frac{d_b L_h V_{beam} (0.3L - 0.18L_h)}{4I_b / t_g + d_b L_h (0.3d_b + 0.18L_v)} \quad (8)$$

$$N = \frac{d_b L_v V_{beam} (0.3L - 0.18L_h)}{4I_b / t_g + d_b L_h (0.3d_b + 0.18L_v)} \quad (9)$$

$$V_{beam} = \frac{2(R_{y,b} M_{p,b})}{(L - L_h)} \leq V_{p,b}$$

其中 V_{beam} 為梁產生塑性彎矩所對應之梁剪力， L 為梁跨扣除兩側柱寬與隅板長度之淨長度， I_b 為梁斷面強軸之慣性矩， d_b 為梁深，並考量材料超強效應($R_{y,b}$)但不須大於梁所能發展之塑性剪力強度^[1]。

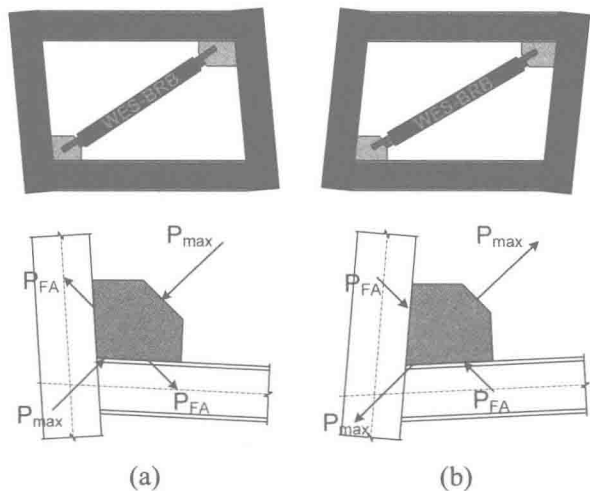


圖 3 挫屈束制支撐構架側位造成角隅開合變形示意圖

Fig.3 Schematics of frame action effects

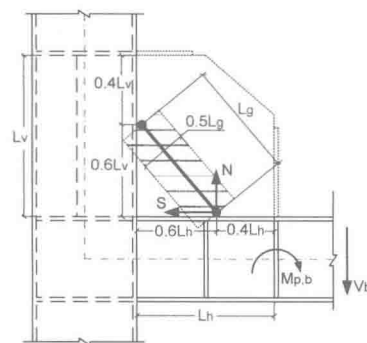


圖 4 隅板等效支撐示意圖

Fig.4 Schematic of the equivalent strut model

2 採泛均力法考慮梁柱開合效應設計方法

2.1 設計邏輯

本研究所提出之隅板耐震設計，考量斜撐軸力與梁柱開合共同造成之效應做為設計依據，設計需求包含(1)BRB 發展出最大軸力(P_{max})時；利用泛均力法計算隅板與梁柱接合面之力量分布(H_{uc} 、 V_{uc} 、 H_{ub} 及 V_{ub})，並同時考量(2)構架層間變形梁柱角隅開合變形；梁於隅板端部產生塑性彎矩($M_{p,beam}$)之極限狀態，所對應之梁剪力(V_{beam})對隅板產生作用力(S 、 N)。進行隅板設計時，首先由斜撐軸力需求設計 BRB 接合段於隅板上之銲接長度，為提高施工便利性，建議隅板之兩自由邊分別垂直於梁面及柱面以利端部加勁板之安裝，依此決定隅板長度(L_h)與高度(L_v)，再依此尺寸計算隅板與梁柱接合面之總力量需求。如圖 5，合效應之下隅板與梁柱接合面力量可計算為：

$$\begin{aligned} H_c &= H_{uc} - S, & V_c &= V_{uc} + N \\ H_b &= H_{ub} + S, & V_b &= V_{ub} - N \end{aligned} \quad (10)$$

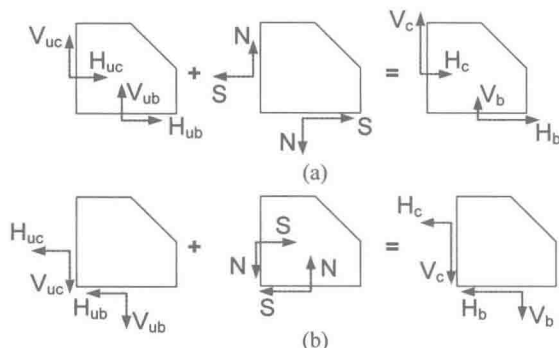


圖 5 泛均力法隅板受斜撐軸力與梁柱開合效應合成結果

Fig.5 Resultant force components computed from GUFM and frame action effects

當斜撐最大軸拉力與壓力差異較大時，應分開計算兩種情況下之力量分布。

2.2 隅板與梁柱接合設計檢核

(1) 合成應力強度檢核

由式 10 計算合效應之作用力，假設作用力平均分佈於隅板與梁柱接合面上，並以合力作為設計需求，隅板與梁柱接合面之銲道可採用填角銲或是全滲透銲，並採用適當之設計規範設計。如圖 5 所示，斜撐軸力與梁柱開合效應同時作用下，隅板與梁柱接合面之剪力方向相同而加成，而正向力方向相反而抵銷，考慮正向力與剪力同時作用下，隅板母材強度與梁柱接合面合力需求容量比(DCRvb, DCRvc)可計算如下：

$$DCRvb = \frac{\sqrt{V_b^2 + 3H_b^2}}{F_{y,g} L_h t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與梁接合面}) \quad (11)$$

$$DCRvc = \frac{\sqrt{H_c^2 + 3V_c^2}}{F_{y,g} L_v t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與柱接合面}) \quad (12)$$

$F_{y,g}$ 為隅板材料拉力降伏應力。

(2) 拉力與剪力斷裂破壞

考量拉力與剪力可造成接合面斷裂，隅板與梁柱接合面之拉力(DCRtb, DCRsb)與剪力斷裂需求容量比(DCRtc 及 DCRsc)可以計算如下：

$$DCRtb = \frac{V_b}{0.75 \times F_{u,g} L_h t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與梁接合面}) \quad (13)$$

$$DCRsb = \frac{H_b}{0.75 \times 0.6 F_{u,g} L_h t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與梁接合面}) \quad (14)$$

$$DCRtc = \frac{H_c}{0.75 \times F_{u,g} L_v t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與柱接合面}) \quad (15)$$

$$DCRsc = \frac{V_c}{0.75 \times 0.6 F_{u,g} L_v t_g} \leq 1.0 \quad (\text{隅板與柱接合面}) \quad (16)$$

$F_{u,g}$ 與 $0.6F_{u,g}$ 分別為隅板材料拉力與剪力斷裂強度。

3 三層樓實尺寸 BRBF 實驗結果檢討

圖 6 所示為實尺寸三層樓挫屈束制支撐構架擬動態與反覆載重試驗試體立面圖^[2]，隅板設計時採均力法

且未考慮梁柱角隅開合效應。擬動態試驗所採用之 LA03 加速度歷時最大地表加速度達 530gal。於第一次擬動態試驗中，構架試體中所有隅板皆未發生破壞，僅一樓薄型 BRB 斜撐發生破壞^[2]，更換破壞之斜撐與隅板後，即進行第二次擬動態試驗，當試體二樓層間位移角達最大變形量 3.27% 弧度時，二樓北側上端隅板與柱接合面銲道發現長約 20mm 的裂縫，於地震加載歷時達 6.4 秒時，二樓南側上端隅板與柱接合面銲道亦發現長 10mm 的裂縫。試驗繼續進行並於擬動態試驗結束後直接進行反覆載重試驗，試驗達 2.0% 頂層側位移角時，一樓層間位移角達 3.20% 弧度，一樓斜撐斷裂而試驗終止。

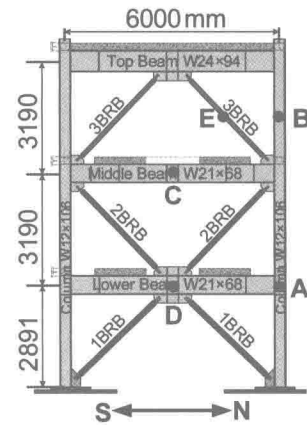


圖 6 實尺寸三層樓挫屈束制支撐構架試驗試體立面圖

Fig.6 Elevation of the 3-story BRBF specimen

試驗結束後發現前述二樓北側與南側隅板銲道裂縫延伸至 85mm(圖 7b)與 30mm，而一樓南側下端隅板與底板接合面，則在試驗結束後發現銲道斷裂，裂縫長度長達約 140mm(圖 7c)。表 1 所示為一樓與二樓隅板與梁柱接合面之各項設計力量需求，對照圖 5a 之力量方向分布，一樓與二樓隅板在斜撐受壓時，梁柱角隅為張開狀態，由於斜撐最大軸力需求相對較小($P_{max} = 603kN$)，隅板所承受的力量大部分都來自於梁柱開合力，隅板與梁柱接合面正向應力仍為受拉的狀態。表 1 亦比較以式 9 計算(V_{beam})以及試驗中所量得之梁剪力($V_{beam,exp}$) (一樓塑性彎矩假展於隅板與柱接合端部，此處 V_{beam} 與 $V_{beam,exp}$ 即採一樓柱剪力)，顯示梁柱開合作用力可以有效地推估。表 2 所示為一樓與二樓隅板