

文章编号: 1000-4750(2015)10-0001-08

# 震后功能可快速恢复联肢剪力墙研究

纪晓东, 钱稼茹

(清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 震后功能可快速恢复成为地震工程领域的研究前沿。该文基于损伤控制的思想, 提出一种震后功能可快速恢复的联肢剪力墙, 由低损伤墙肢和可更换连梁组成。在强烈地震作用下, 低损伤墙肢无损坏或轻微损坏, 可更换连梁耗散地震能量, 震后可通过更换连梁中的消能梁段(或阻尼器)而实现快速修复。试验研究表明, 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙的承载力高, 压弯破坏时极限变形能力达 1/33, 远大于钢筋混凝土剪力墙的变形能力; 在 1/100 位移角时, 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙轻微损坏, 可作为低损伤墙肢。该文中可更换钢连梁由中部的消能梁段和两端的非消能梁段组成, 大尺寸试件的拟静力试验表明, 往复剪切作用下连梁的塑性变形和损伤集中在中部的消能梁段, 可更换钢连梁的塑性转角可达 0.06 rad, 滞回曲线饱满、稳定, 通过合理设计连接节点可实现强震后方便更换消能梁段。

**关键词:** 震后功能可快速恢复; 联肢剪力墙; 低损伤墙肢; 可更换连梁; 抗震性能

中图分类号: TU973.16 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.07.ST07

## STUDY OF EARTHQUAKE-RESILIENT COUPLED SHEAR WALLS

JI Xiao-dong, QIAN Jia-ru

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Earthquake resilience has emerged as one of the frontiers of earthquake engineering. Based on the concept of damage control, this paper proposes a type of earthquake-resilient coupled shear wall, which is composed of low-damage wall piers and replaceable coupling beams. When subjected to strong motions, the low-damage wall piers experience limited damage or even are damage free. The replaceable coupling beams are able to dissipate seismic energy during earthquake event and recover quickly by replacing the damaged 'fuse' shear links or dampers. Experimental testing results indicate that the steel tube-double steel plate-concrete composite wall has high strength capacity. The ultimate drift ratio of the slender composite wall reaches 1/33, significantly larger than the deformation capacity of reinforced concrete (RC) walls. At the drift ratio of 1/100, the composite wall has limited damage and, therefore, it can be used as a type of low-damage wall piers. The replaceable steel coupling beam presented in this paper consists of a central 'fuse' shear link, connecting to normal steel segments at its two ends. The quasi-static test on a large-scale specimen indicates that inelastic deformation and damage are concentrated in the 'fuse' shear link when the coupling beam is subjected to shear reversals. The replaceable coupling beam shows large deformation and energy dissipation capacity, with the ultimate inelastic rotation of 0.06 rad. With the reasonable design for the connection between the shear link and normal beam segments, the 'fuse' shear link can be replaced readily after being damaged during severe earthquakes.

收稿日期: 2014-07-07; 修改日期: 2015-04-16

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2014DFA70950); 清华大学自主科研项目(2012THZ02-1); 国家自然科学基金项目(91315301)

通讯作者: 纪晓东(1979-), 男, 山西人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震减震、结构健康监测研究(E-mail: jixd@mail.tsinghua.edu.cn).

作者简介: 钱稼茹(1946-), 男, 江苏人, 教授, 主要从事结构抗震减震研究(E-mail: qianjr@mail.tsinghua.edu.cn).

**Key words:** earthquake resilience; coupled shear wall; low-damage wall pier; replaceable coupling beam; seismic behavior

现代社会高度发达的经济和可持续发展的需求,给地震工程界提出了新的挑战:如何在保证地震安全的基础上,实现工程设施、城市乃至整个社会的震后功能可快速恢复(Earthquake Resilience)。震后功能可快速恢复是指通过综合的防灾减灾措施,尽可能降低工程设施、生命线系统、城市、社会等在遭遇强震后的灾害损失和影响,保证其功能不中断或尽快恢复<sup>[1]</sup>。图 1 所示为震后功能可快速恢复的概念示意图。假设对象为某一系统,  $t_0$  时刻前该系统的功能为 100%;  $t_0$  时刻地震发生,地震损伤导致该系统丧失部分功能;经过震后修复,该系统功能逐步恢复,在  $t_1$  时刻达到 100%。图 1 中阴影区面积即可表征该系统的功能可恢复的能力,阴影区面积越小,该系统的功能可恢复能力越强。可以看出,提高一个系统的震后功能可快速恢复能力包含两个方面:一是提高该系统的抗震能力和鲁棒性(Robustness),减小地震损伤及由此造成的功能损失;二是提高该系统功能恢复的快速性(Rapidness),减小损伤修复及功能恢复的时间。

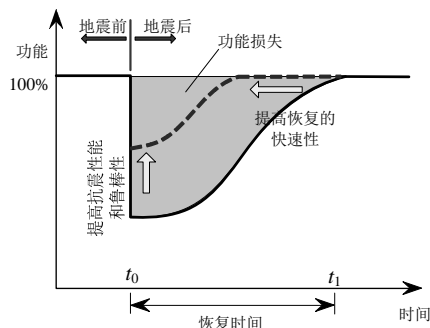


图 1 震后功能可快速恢复概念<sup>[1]</sup>

Fig.1 Concept of earthquake resilience

近年来,震后功能可快速恢复成为地震工程领域的研究热点和前沿。2009 年美日 NEES/E-Defense 会议将“震后功能可快速恢复城市(Resilient City)”作为未来合作研究的方向<sup>[2]</sup>;同年美国旧金山规划和城市研究协会提出了旧金山市震后功能可快速恢复的计划<sup>[3]</sup>;2011 年美国国家研究委员会发表了研究报告<sup>[4]</sup>,提出了实现“国家震后可恢复”的目标,并规划了未来 20 年的研究路线图;2011 年日本东北大地震和新西兰坎特伯雷(Canterbury)地震后,提高城市和社会的震后功能可快速恢复能力成为了国际工程界的共识。

工程结构的震后功能可快速恢复是实现城市和社会震后功能可快速恢复的基础。现代城市中的高层和超高层公共建筑及住宅建筑,使用人口众多、预期使用寿命长,一旦发生地震损伤,将导致建筑终止使用、大量用户迁出,对社会经济恢复和人民群众生活造成严重影响。由于高层建筑体量大、结构体系复杂,震后修复加固的经济成本和时间成本会明显高于中低层建筑。有些用作商业和金融的高层建筑,其震后停业导致的经济损失可能超过建筑结构本身的经济价值。因此,一些功能重要的高层建筑应具有震后功能可快速恢复能力。建筑结构震后功能可快速恢复的要求具体体现为:1) 主要结构构件无损伤或轻微损伤;2) 预先设定的耗能构件可能遭受较严重损伤,但震后可快速修复或更换;3) 整体结构的残余变形小,无须采取措施使整体结构恢复原位。

## 1 震后功能可快速恢复联肢剪力墙

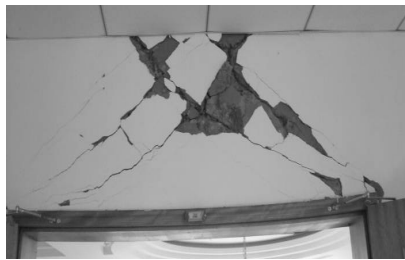
我国的钢筋混凝土(RC)高层建筑大部分采用剪力墙结构体系、框架-剪力墙结构体系、框架-核心筒结构体系,其中联肢剪力墙是最主要的抗侧力单元,联肢墙和由联肢墙组成的核心筒往往承担了高层建筑结构的绝大部分基底剪力和大部分地震倾覆弯矩。目前使用最广泛的仍是 RC 联肢墙,在地震往复作用下,RC 连梁首先屈服,耗散地震能量,然后墙肢底部屈服形成塑性铰。2008 年汶川地震中,按 GB50011-2001《建筑抗震设计规范》设计的联肢墙表现出较好的抗震性能,但也有 RC 墙肢边缘构件混凝土压碎和纵筋压屈、RC 连梁发生剪切破坏的震害,如图 2 所示<sup>[5]</sup>。高层建筑中底部楼层的墙肢承受的压力大,边缘构件的震损修复困难,消除其残余变形更是几乎不可能;RC 连梁剪切破坏后,须对整根连梁修复,施工困难。

美国和加拿大等国家尝试采用钢连梁代替 RC 连梁,由钢连梁和 RC 墙肢组成混合联肢墙<sup>[6]</sup>,如图 3 所示。钢连梁与 RC 墙肢的节点连接采用将钢连梁埋入 RC 墙肢的方式,若为钢骨(或钢管)混凝土墙肢,钢连梁可与钢骨(或钢管)采用焊接连接。研究表明,合理设计的钢连梁能实现腹板剪切屈服,极限塑性转角可达到 0.08 rad 以上,变形能力

和耗能能力显著优于 RC 连梁；混合联肢墙承载力高、耗能能力强，特别适用于高烈度地震区的高层建筑结构<sup>[6]</sup>。但试验表明，除钢连梁腹板发生剪切屈服外，损伤还出现在钢连梁与 RC 墙肢的连接部位<sup>[7]</sup>，如图 4 所示。由于高层建筑中整根钢连梁的重量大、且其两端埋入在 RC 墙肢内，震后很难直接更换，连梁和墙肢连接部位地震损伤的修复也费时费力。



(a) RC 墙肢地震损伤



(b) RC 连梁地震损伤

图 2 RC 墙肢和连梁的地震损伤<sup>[5]</sup>

Fig.2 Seismic damage of RC wall pier and coupling beam

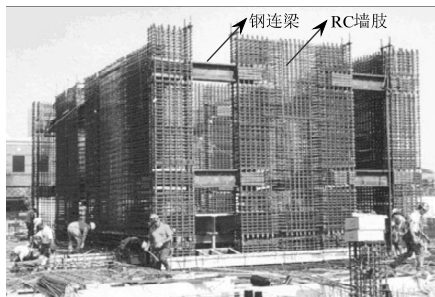


图 3 混合联肢剪力墙照片<sup>[6]</sup>

Fig.3 Photograph of hybrid coupled shear walls

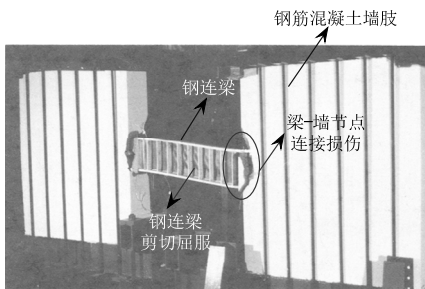
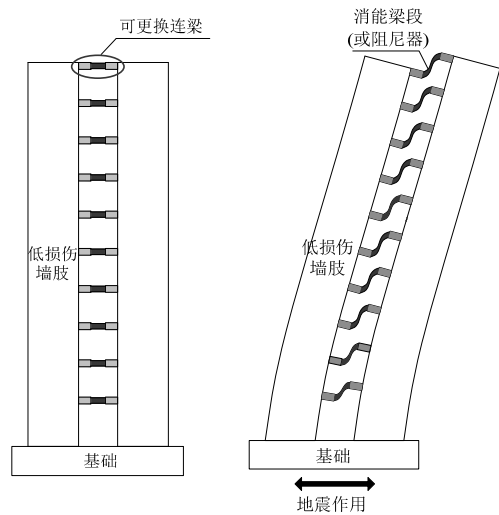


图 4 混合联肢剪力墙试件损伤照片<sup>[7]</sup>

Fig.4 Damage of hybrid coupled shear wall specimen

本文基于损伤控制(Damage control)的思想<sup>[8]</sup>，提出一种震后功能可快速恢复联肢墙，包括低损伤墙肢和可更换连梁，如图 5(a)所示。可更换连梁由两端的非耗能梁段和跨中的耗能梁段(或阻尼器)组成。如图 5(b)所示为地震作用下联肢墙变形模式，墙肢以弯曲变形为主，连梁产生反弯和剪切变形。基于能力设计法，通过合理设计各构件和连接节点的承载力比，将连梁的损伤控制在跨中耗能梁段(或阻尼器)内。低损伤墙肢具有高承载能力和大变形能力，地震作用下不屈服或轻微屈服。地震后，墙肢残余位移小，损伤轻，一般不需修复，可通过更换连梁的耗能梁段(或阻尼器)实现连梁快速修复。下文具体介绍低损伤墙肢和可更换连梁的形式及性能。



(a) 构成 (b) 地震作用下变形图

图 5 震后功能可快速恢复联肢剪力墙

Fig.5 Earthquake-resilient coupled shear wall

## 2 低损伤组合剪力墙

### 2.1 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙

近年来，钢-混凝土组合剪力墙被提出和研究，并在超高层建筑中得到了越来越多的应用。组合剪力墙包括钢骨(或钢管)混凝土剪力墙<sup>[9]</sup>、钢板混凝土剪力墙<sup>[10-11]</sup>和配置钢暗支撑的组合剪力墙<sup>[12]</sup>等型式。由于有效结合了钢材和混凝土材料的特点，组合剪力墙承载力高、变形能力大、抗震性能优异。超高层建筑进行性能化抗震设计时，组合剪力墙在设防烈度地震或预估的罕遇地震作用下为弹性或不屈服，从而控制地震作用下剪力墙的变形和损伤程度。

图 6 所示为一种新型组合剪力墙的截面图，称

为“钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙”，墙端部的矩形钢管混凝土(可内置圆钢管)为约束边缘构件；墙中部腹板采用双层钢板作为两侧外皮，双层钢板通过螺栓对拉或加劲肋-缀板连接，内部浇注混凝土。双层钢板相当于 RC 剪力墙的水平 and 竖向分布钢筋，与内部混凝土一起形成剪力墙的腹板，主要承担剪力；钢管相当于约束边缘构件的纵筋和箍筋，与管内的混凝土一起形成钢管混凝土暗柱，主要承担倾覆弯矩。双层钢板可极大地提高墙的抗剪承载力，避免其剪切破坏；由于端部钢管含钢量较大，且钢管能有效约束核心混凝土，提高混凝土的轴心抗压强度、峰值压应变和极限压应变，从而提高了墙截面的屈服曲率和极限曲率，增大墙的弯曲变形能力，减小对应于一定位移角时的损伤程度，实现在较大变形时的低损伤性。

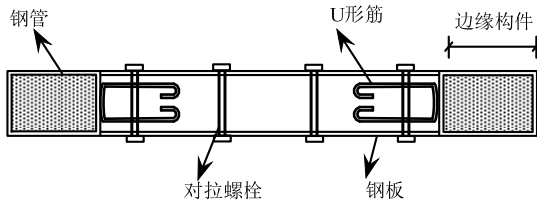


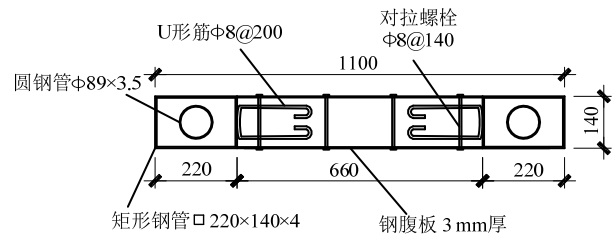
图6 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙截面  
Fig.6 S steel tube-double steel plate-concrete composite wall section

## 2.2 组合剪力墙抗震性能

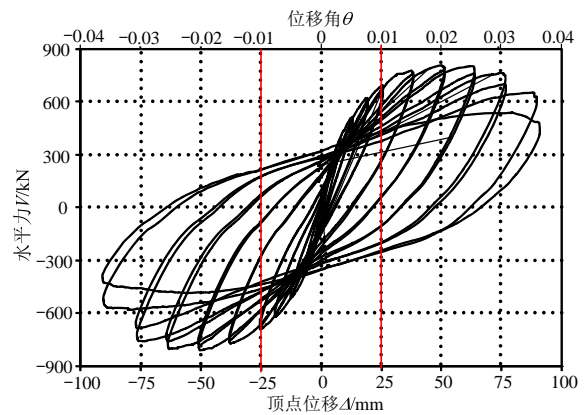
文献[13-14]完成了 5 个钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙试件的拟静力试验，研究其抗震性能。图 7(a)所示为一个典型的钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙试件的截面，墙截面高度为 1100 mm，厚度为 140 mm，墙高为 2600 mm，试件剪跨比为 2.5。混凝土强度等级为 C40，钢管和钢板均采用 Q235 级钢材。试件的设计轴压比为 0.45，矩形钢管混凝土约束边缘构件沿墙肢的长度按规范 GB50011-2010 中关于二级 RC 剪力墙的规定。边缘矩形钢管钢板的宽厚比为 60，边缘构件中钢管(包括矩形钢管和圆钢管)的含钢率为 11.2%，腹板中钢板的含钢率为 4.2%。

图 7(b)所示为该组合墙试件的水平力-位移滞回曲线，屈服位移角为 1/156，水平力达到峰值荷载时对应的位移角约为 1/50，极限位移角为 1/33。试件的滞回曲线饱满，变形能力大。1/100 位移角(即罕遇地震作用下，RC 框架-剪力墙或框架-核心筒结构的弹塑性位移角限值)时，组合剪力墙已屈服，但尚未达到峰值荷载。图 7(c)所示为 1/100 位移角时

的试件照片，矩形钢管端部轻微局部屈曲，这与试件缩尺导致钢管钢板较薄、焊接残余变形较大有一定关系，工程实际中可以通过设置加劲肋等措施减小矩形钢管的宽厚比，推迟矩形钢管边缘局部屈曲。



(a) 试件截面



(b) 水平力-位移滞回曲线



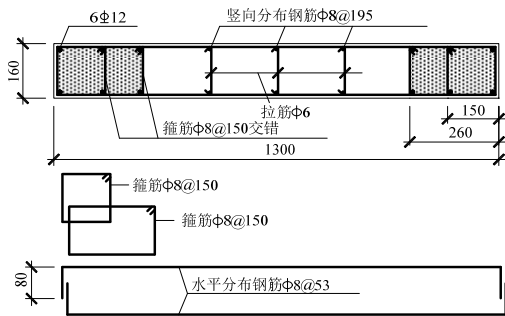
(c) 1/100 位移角时试件照片

图7 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙试件

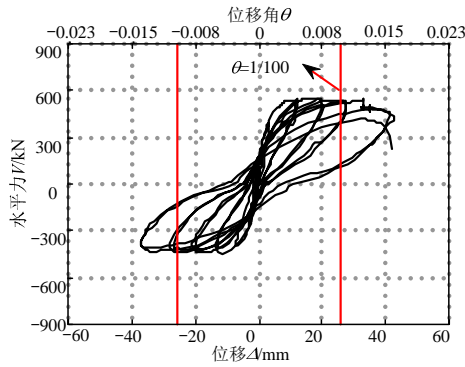
Fig.7 Steel tube-double steel plate-concrete composite wall specimen

作为对比，给出了一个典型的 RC 剪力墙试件的性能。图 8(a)所示为 RC 剪力墙试件的截面<sup>[15]</sup>，墙截面高度为 1300 mm，墙厚为 160 mm，墙高 2600 mm，试件剪跨比为 2.1。混凝土强度等级为 C40，纵筋采用 HRB335 级钢筋，分布钢筋和箍筋

采用 HPB235 级钢筋。试件的设计轴压比为 0.55，按二级剪力墙进行抗震构造设计，约束边缘构件沿墙肢截面长度和配箍特征值均满足规范 GB50011-2010 的要求。图 8(b)所示为该试件的水平力-位移滞回曲线，屈服位移角约为 1/500，极限位移角能达到 1/100。但 1/100 位移角时，RC 剪力墙试件约束边缘构件底部纵筋压屈、端部混凝土压碎，损伤严重，修复困难，如图 8(c)所示。钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙试件的屈服位移角和极限位移角均为 RC 剪力墙试件的 3 倍，在 1/100 位移角时，表现出明显的低损伤性。



(a) 试件截面



(b) 水平力-位移滞回曲线



(c) 1/100 位移角时试件照片

图 8 RC 剪力墙试件

Fig.8 RC shear wall specimen

### 3 可更换钢连梁

#### 3.1 可更换连梁的型式

连梁是联肢剪力墙的耗能构件，为实现连梁震后快速修复，近年来提出和发展了多种型的可更换连梁。Fortney 等<sup>[16]</sup>提出了将钢连梁分为三个梁段，中间为耗能梁段，与两端的非耗能梁段通过连接板和螺栓连接；Chung 等<sup>[17]</sup>提出在钢连梁中部设置摩擦阻尼器；熊谷仁志等<sup>[18]</sup>提出在 RC 连梁中部设置金属剪切阻尼器；Christopoulos 等<sup>[19]</sup>提出一种粘弹性连梁阻尼器；滕军等<sup>[20]</sup>提出一种带缝钢连梁阻尼器，吕西林等<sup>[21-22]</sup>提出了 3 种用于可更换连梁的耗能部件，分别为腹板开菱形孔的工字钢梁、双层腹板内部灌铅的工字型钢梁和内部灌铅的平行钢管。

本文作者<sup>[23]</sup>进一步发展了可更换钢连梁(见图 9)，通过减小耗能梁段的截面高度和使用低屈服钢，确保塑性变形和损伤集中于跨中的耗能梁段，并提出了耗能梁段和非耗能梁段之间的端板-抗剪键新型连接方式<sup>[24]</sup>。通过合理设计非耗能梁段与耗能梁段的承载力之比，使得强震作用下可更换耗能梁段剪切屈服，而非耗能梁段保持弹性的抗震性能目标。试验研究表明，极端型钢耗能梁段(长度比小于 1.0)具有很大的塑性变形能力和稳定的滞回耗能能力，极限塑性转角可以达到 0.15 rad，累积塑性转角可达 2.5 rad 以上<sup>[23]</sup>。由于耗能梁段和非耗能梁段采用可拆卸式连接，强震后可通过更换耗能梁段实现连梁快速修复。

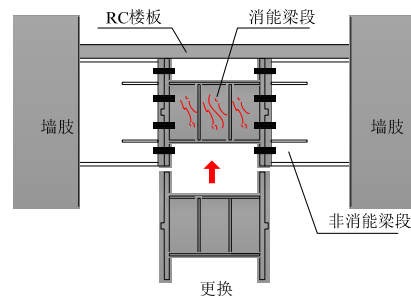


图 9 可更换钢连梁

Fig.9 Replaceable steel coupling beam

#### 3.2 震后可更换钢连梁性能

文献[25]对震后可更换钢连梁的抗震性能进行了系统的试验研究，图 10 所示为一个典型的可更换钢连梁试验试件。试件原型为一幢高层建筑框架-剪力墙结构的连梁，试件缩尺比例为 5/6。试件的非耗能梁段截面为 H630×170×16×20(截面高度×

翼缘宽度×腹板厚度×翼缘厚度), 消能梁段截面为 H350×170×10×12。连梁试件的总跨度为 1950 mm, 两端非消能梁段长度为 685 mm, 中部消能梁段长度为 580 mm。非消能梁段采用 Q345 钢材, 消能梁段的翼缘采用 Q345 钢材、腹板采用低屈服钢 LY225。各梁段翼缘和腹板的宽厚比均满足规范 GB 50011-2010 的规定, 消能梁段设置单面加劲肋, 加劲肋间距满足规范 GB 50011-2010 关于钢偏心支撑消能梁段加劲肋的规定。消能梁段和非消能梁段之间采用端板-抗剪键连接, 连接的剪力由抗剪键承担, 连接的弯矩由高强螺栓承担。为保证连接处弯矩的有效传递, 非消能梁段设置水平加劲肋, 其位置与消能梁段翼缘相对应。

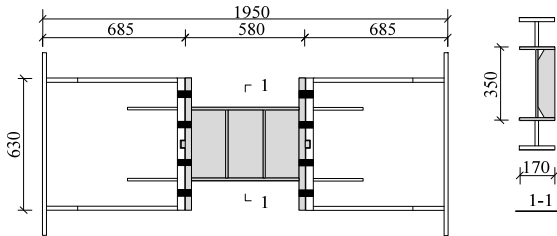


图 10 可更换钢连梁试件

Fig.10 Replaceable steel coupling beam specimen

图 11 所示为可更换钢连梁试件的试验照片。为研究可更换性, 设计了专门的加载制度, 如图 12 所示。试验分为两个阶段, 阶段 I 加载至连梁转角 0.02 rad(对应于原型结构在罕遇地震作用下的连梁转角), 然后进行消能梁段的拆除和更换, 更换时保持连梁有一定的残余转角; 阶段 II 对更换消能梁段后的钢连梁进行重新加载, 直至试件出现破坏现象且承载力明显下降。加载时, 屈服前采用力控制, 加载等级分别为  $0.5V_p$  和  $V_p$ ,  $V_p$  为试件的剪力屈服值, 每级加载 2 圈; 屈服后采用位移控制, 连梁转角按照 0.005 rad 的增量递增至 0.02 rad, 然后按照 0.01 rad 的增量递增, 直至试件破坏, 每级加载 1 圈。



图 11 可更换钢连梁试验照片

Fig.11 Photograph of testing on replaceable steel coupling beam

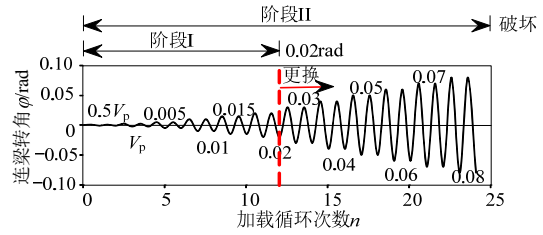
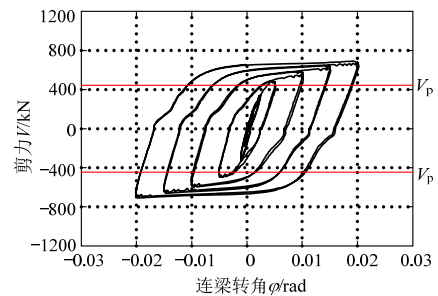


图 12 可更换钢连梁试件试验加载制度

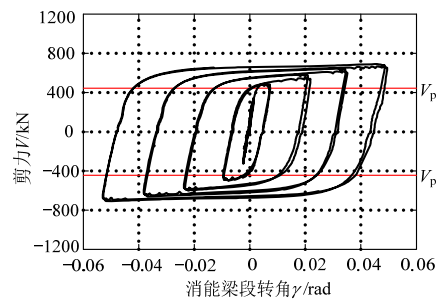
Fig.12 Loading protocol for replaceable steel coupling beam

阶段 I 加载时, 除消能梁段腹板屈服外连梁试件无其他损伤。由 2 名工人更换消能梁段, 消能梁段的拆除和新消能梁段的安装共花费约 20 min, 施工方便、速度快。阶段 II 加载时, 消能梁段的腹板屈曲, 在连梁转角达到 0.06 rad 时, 消能梁段的翼缘和端板之间焊缝断裂, 但非消能梁段和连接处无损伤。

图 13 和图 14 所示分别为阶段 I 和阶段 II 加载时钢连梁及消能梁段的剪力-转角滞回曲线。滞回曲线饱满, 加载至 0.02 rad 连梁转角时, 消能梁段的塑性转角为 0.05 rad 左右; 钢连梁的极限转角为 0.06 rad, 此时消能梁段的塑性转角为 0.16 rad。消能梁段集中了绝大部分的塑性变形, 应变数据量表明非消能梁段在加载过程中始终保持弹性。大量试验数据统计表明, 剪切破坏的 RC 连梁的极限转角平均值约为 0.02 rad<sup>[26]</sup>, 可更换钢连梁的变形能力约为 RC 连梁的 3 倍。



(a) 钢连梁



(b) 消能梁段

图 13 阶段 I 加载剪力-转角滞回曲线

Fig.13 Hysteretic loops of shear force versus plastic rotation angle relation for Phase I loading

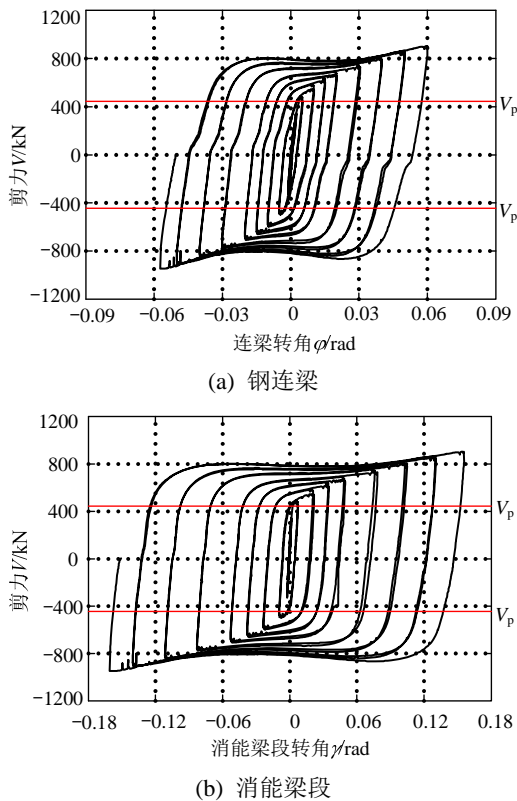


图 14 阶段 II 加载剪力-塑性转角滞回曲线

Fig.14 Hysteretic loops of shear force versus plastic rotation angle relation for Phase II loading

## 4 结论

震后功能可快速恢复成为地震工程领域的一个重要研究方向。基于损伤控制的设计思想,有效组合低损伤构件和可更换构件,是实现高层建筑结构震后功能可快速恢复的一种途径。本文以联肢剪力墙为例,简述了 RC 联肢墙和混合联肢墙的地震损伤,提出了一种震后功能可快速恢复的联肢墙,由低损伤墙肢和可更换连梁组成。通过试验研究,得到如下结论:

(1) 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙承载力高、变形能力大,矩形钢管混凝土约束边缘构件沿墙肢长度为 0.2 倍墙截面高度、设计轴压比为 0.45 时,组合墙高墙试件的极限位移角可达 1/33,约为 RC 剪力墙的 3 倍;在 1/100 位移角时,损伤轻微,可以作为一种低损伤墙肢。

(2) 可更换钢连梁在往复剪切作用下,塑性变形和损伤仅发生在连梁跨度中部的消能梁段;可更换钢连梁具有很大的塑性变形能力和稳定的滞回耗能能力,极限塑性转角达 0.06 rad,约为剪切破坏的 RC 连梁极限转角的 3 倍;通过合理设计连接节点可实现强震后方便更换消能梁段。

## 参考文献:

- [1] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, Lee G C, O'Rourke T D, Reinhorn A M, Shinozuka M, Tierney K, Wallace W A, von Winterfeldt D. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra* 2003, 19(4): 733—752.
- [2] Report of the seventh joint planning meeting of NEES/E-defense collaborative research on earthquake engineering (Rep.No.PEER 2010/109) [R]. Berkeley: UC Berkeley, 2010: 1—4.
- [3] San Francisco Planning and Urban Renewal Association (SPUR). The resilient city: Creating a new framework for disaster planning [EB]. <http://www.spur.org/featured-project/resilient-city>, 2009.
- [4] National Research Council. National earthquake resilience: Research, implementation and outreach [R]. Washington, DC: the National Academies Press, 2011.
- [5] 清华大学, 西南交通大学, 重庆大学, 等. 汶川地震建筑震害分析及设计对策[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2009: 191—212.  
Tsinghua University, Southwest Jiaotong University, Chongqing University, et al. Wenchuan earthquake disaster reconnaissance of buildings and design countermeasures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 191—212. (in Chinese)
- [6] El-Tawil S, Harries K A, Fortney P J, Shahrooz B M, Kurama Y. Seismic design of hybrid coupled wall systems: State of the art [J]. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 2010, 136(7): 755—769.
- [7] Harries K A, Mitchell D, Cook W D, Redwood R G. Seismic response of steel beams coupling concrete walls [J]. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 1993, 119(12): 3611—3629.
- [8] Connor J J, Wada A, Iwata M, Huang Y H. Damage-controlled structures. 1. Preliminary design methodology for seismically active regions [J]. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123(4): 423—431.
- [9] Ji X, Sun Y, Jian J, Lu X. Seismic behavior and modeling of steel reinforced concrete (SRC) walls [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015, 44(6): 955—972.
- [10] 孙建超, 徐培福, 肖从真, 孙慧中, 王翠坤. 钢板-混凝土组合剪力墙受剪性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2008, 38(6): 1—5,10.  
Sun Jianchao, Xu Peifu, Xiao Congzhen, Sun Huizhong, Wang Cuikun. Experimental study on shear behavior of steel plate-concrete composite wall [J]. *Building Structure*, 2008, 38(6): 1—5, 10. (in Chinese)
- [11] 聂建国, 陶慕轩, 樊建生, 卜凡民, 胡红松, 马晓伟, 李盛勇, 刘付钧. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. *建筑结构*, 2011, 41(12): 52—60.  
Nie Jianguo, Tao Muxuan, Fan Jiansheng, Bu Fanmin, Hu

- Hongsong, Ma Xiaowei, Li Shengyong, Liu Fujun. Research advances of composite shear walls with double steel plates and filled concrete [J]. *Building Structure*, 2011, 41(12): 52—60. (in Chinese)
- [12] 张建伟, 曹万林, 王志惠, 杨亚彬. 高轴压比下内藏桁架的混凝土组合中高剪力墙抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(增刊 II): 158—163, 203.
- Zhang Jianwei, Cao Wanlin, Wang Zhihui, Yang Yabin. Study on seismic behavior of mid-rise RC composite shear walls with concealed truss under high axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(Suppl II): 158—163, 203. (in Chinese)
- [13] Ji X, Jiang F, Qian J. Seismic behavior of steel tube-double steel plate-concrete composite walls: Experimental tests [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 86(7): 17—30.
- [14] 纪晓东, 蒋飞明, 钱稼茹, 杨懿, 施正捷. 钢管-双层钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(6): 75—83.
- Ji Xiaodong, Jiang Feiming, Qian Jiaru, Yang Yi, Shi Zhengjie. Experimental study on seismic behavior of steel tube-double steel plate-concrete composite shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(6): 75—83. (in Chinese)
- [15] Qian J, Jiang Z, Ji X. Behavior of steel tube-reinforced concrete composite walls subjected to high axial force and cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2012, 36(3): 173—184.
- [16] Fortney P J, Shahrooz B M, Rassati G A. Large-scale testing of a replaceable steel coupling beam [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2007, 133(12): 1801—1807.
- [17] Chung H S, Moon B W, Lee S K, Park J H, Min K W. Seismic performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009, 18(7): 807—822.
- [18] 熊谷仁志, 林静雄, 岛崎和司. 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁に関する実験的研究[J]. *日本建築学会構造系論文集*, 2009, 74(638): 755—763.
- Kumagai H, Hayashi S, Shimazaki K. Experimental study on coupling beams with steel dampers in mid-span [J]. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AII)*, 2009, 74(638): 755—763. (in Japanese)
- [19] Christopoulos C, Montgomery M S. Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(15): 2217—2233.
- [20] 滕军, 马伯涛, 李卫华, 张浩, 曹冬雪. 联肢剪力墙连梁阻尼器伪静力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(12): 92—100.
- Teng Jun, Ma Botao, Li Weihua, Zhang Hao, Cao Dongxue. Pseudo-static test for coupling beam damper of coupled shear wall structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(12): 92—100. (in Chinese)
- [21] 吕西林, 陈云, 蒋欢军. 新型可更换连梁研究进展[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(1): 8—15.
- Lü Xilin, Chen Yun, Jiang Huanjun. Research progress in new replaceable coupling beams [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(1): 8—15. (in Chinese)
- [22] 吕西林, 陈云, 蒋欢军. 可更换连梁保险丝抗震性能试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9): 1318—1325, 1332.
- Lü Xilin, Chen Yun, Jiang Huanjun. Experimental study on seismic behavior of “fuse” of replaceable coupling beam [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(9): 1318—1325, 1332. (in Chinese)
- [23] 纪晓东, 马琦峰, 王彦栋, 钱稼茹. 钢连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6): 10—20.
- Ji Xiaodong, Ma Qifeng, Wang Yandong, Qian Jiaru. Cyclic tests of the replaceable shear links in steel coupling beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6): 10—20. (in Chinese)
- [24] 纪晓东, 王彦栋, 马琦峰, 钱稼茹. 一种可更换钢连梁的连接结构[P]. 中国: ZL 2014 2 0348438.4, 2014.12.24.
- Ji Xiaodong, Wang Yandong, Ma Qifeng, Qian Jiaru. A type of connection used in replaceable coupling beam [P]. China: ZL 2014 2 0348438.4, 2014.12.24. (in Chinese)
- [25] 马琦峰. 震后可更换钢连梁抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2014.
- Ma Qifeng. Study on seismic behavior of the replaceable steel coupling beam [D]: Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [26] 胡好. 高烈度地区 RC 框架-核心筒结构抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2014.
- Hu Yu. Study on seismic performance of RC frame-core tube structures on high seismicity zones [D]: Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2014. (in Chinese)

注: 该文在第 23 届结构工程学术会议(2014 兰州)应邀作特邀报告