

轻型复合结构抗震性能分析 (I)

——墙板开裂过程及裂缝发展规律分析 *

李升才¹, 江见鲸²

(1 华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021;
2 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 轻型复合结构是近年来研制和开发的一种轻型、节能、抗震、经济、适于多层及中高层的全新结构。作为轻型复合结构抗震性能分析的第一部分, 旨在指导该结构的抗震设计。对该结构 1/2 模型进行了拟动力和拟静力试验研究, 并对该模型进行了空间有限元弹塑性地震反应分析。对模型的墙板开裂过程及裂缝发展规律的试验结果进行了分析并与理论分析结果进行了比较。分析和比较表明, 理论分析结果与试验结果吻合较好, 空间有限元弹塑性地震反应分析可用于该结构的抗震设计; 该结构的抗震承载力很高, 可在设防烈度为 8 度地区使用且有足够的强度储备; 复合墙板的两侧复合层以及复合墙和边框都能够很好地共同工作; 装配式复合墙板应改销键连接为装配整体式连接。

关键词: 轻型复合结构; 抗震性能; 开裂过程; 裂缝发展规律

中图分类号: TU399 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 05-0133-06

轻型复合结构的研究旨在适应我国墙体改革的需要^[1], 利用新型复合墙板代替传统的粘土砖, 以此提出一种轻质、高强、节能、抗震的住宅新结构。

轻型复合结构是针对应用广泛的多层粘土砖砌体结构研制开发的, 并可向中高层结构发展其研制开发的基础是各种夹心板材^[2-8]。研究表明^[9], 轻型复合结构体系的综合经济指标优于砌体结构, 且其保温隔音性能明显优于砌体结构 (170 mm 的复合墙板比 370 mm 的砖墙的保温隔音性能还好)。

轻型复合结构用复合墙板作外承重墙, 多孔墙板作内承重墙, 预应力混凝土轻质墙板作隔墙, 预应力混凝土大跨度装配整体式多孔板作楼板或现浇钢筋混凝土楼板, 承重墙板交接处设暗柱, 门窗边缘设加强肋, 承重墙板和楼板交接处设暗梁, 整个结构可全部现浇或通过暗柱和暗梁将预制墙板连接装配成整体结构, 形成带边框的轻型复合剪力墙或短肢墙结构。如图 1 所示。

复合墙板作为该结构的核心, 是一种新的具有良好的保温隔音效果的承重剪力墙或短肢剪力墙。该墙板是由斜拉筋连接的两层钢丝网架, 中间夹以聚苯乙烯板, 内外两侧浇筑混凝土板而形成的, 如图 2。

对轻型复合结构进行抗震性能试验研究和弹塑性地震反应分析, 从而提出合理的设计计算方法,

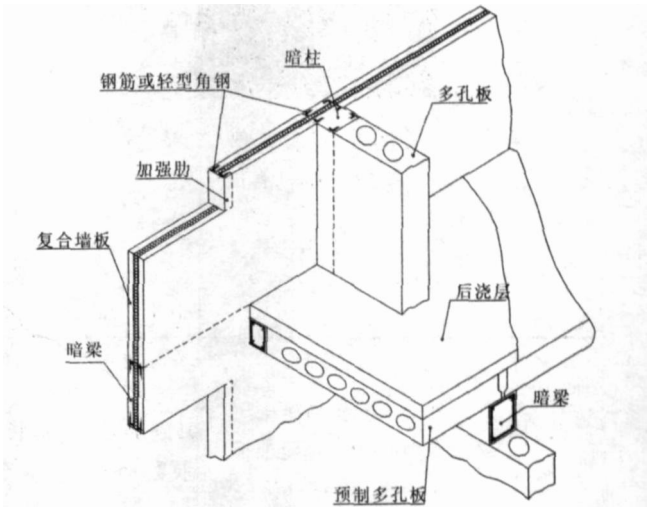


图 1 轻型复合结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of light composite structure

对该结构的应用和推广, 将具有重大的现实意义。

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

1.1.1 模型设计 建筑原型总高 18.9 m, 共 7 层, 层高 2.7 m。

按 1:2 的比例选取原型中的两个开间的结构进行试验研究, 受荷面积为三个开间。模型现场照片如图 3 所示。

* 收稿日期: 2006-01-10

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目 (01-20212)

作者简介: 李升才 (1960 年生), 男, 教授, 博士; E-mail: lsc50605@hqu.edu.cn

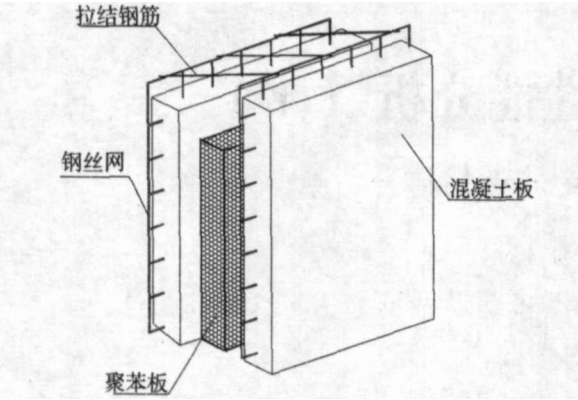


图 2 复合墙板构造
Fig.2 Construction of composite wall panels



图 3 试验模型
Fig.3 Testmodel

1.1.2 模型制做 模型底部 1~3 层采用全现浇式；上部 4~7 层采用装配式，即墙板预制，然后，通过现浇梁柱及楼板将墙板连接成整体（本次试验采用普通现浇楼板），墙板底部与梁之间采用销键连接。

模型各构件情况如表 1。

1.2 试验方法

在不同试验阶段，采用不同加载控制方法。第一阶段为非周期反复加载，即拟动力加载。拟动力试验就是将计算机与加载作动器联机求解结构动力方程的方法。试验中，结构质量仍按 100% 输入，地震波采用 EL-Centro 波（N-S 方向），按最大加速度的大小分为 50 gal 100 gal 200 gal 400 gal 800 gal 输入，至结构屈服为止。

从结构屈服开始进入第二阶段，即低周反复加载——拟静力试验。拟静力试验采用位移控制，按 1 倍屈服位移、2 倍屈服位移……，每次循环 3 次（个别循环 1 次），至循环荷载峰值下降到极限荷载的 85% 以下为止。

1.3 材料的力学性能

模型所用钢筋及混凝土的材料力学性能见表 2、表 3。

表 1 模型各构件情况
Tab.1 Various member condition of the model

项目	夹心板	边框柱	边框梁	楼板
截面或组成	外侧 45mm 混凝土层 +中间 25mm 聚苯板 +内侧 15mm 砂浆层	L 或 T 形，柱肢长 250mm，柱肢宽 85mm	85mm×200mm 矩形，	厚 50mm
配筋	内、外侧冷拔钢丝网 均为 φ2 2@50 并用 斜拉钢丝连接	Z-1~Z-5 内配 7φ10 纵向钢筋，箍筋为 φ4@100 Z-6~Z-9 内配 8φ10 纵向钢筋，箍筋为 φ4@100 柱端箍筋加密 φ4@50	横向中间梁内上配 2φ12 纵筋，下配 2φ14 纵筋，箍筋为 φ4@100 其它梁上、下各配 2φ10 纵筋，箍筋为 φ4@100 梁端箍筋加密 φ4@50	纵横向配筋均为 φ4@100

表 2 钢筋或钢丝的力学性能

Tab.2 Mechanical property of the steelbar or wire

钢筋种类	屈服强度 MPa	极限强度 MPa	伸长率
φ14	349.9	429.7	—
φ12	390.8	583.6	20.0%
φ10	410.4	471.2	21.6%
φ6	523.5	573.0	21.7%
φ4	—	440.9	46.3%
φ2.2	—	509.6	—

表 3 混凝土抗压强度平均值

Tab.3 Mean value of compressive strength of the concrete

楼层	中柱 MPa	边柱、墙 MPa	梁板 MPa
1 层	32.5	24.4	24.0
2 层	19.0	19.0	22.0
3 层	17.9	17.9	16.3
4 层	19.2	19.2	21.4
5 层	19.0	19.0	—
6 层	30.0	—	23.0
7 层	20.3	—	24.1

2 试验结果分析

2.1 墙板开裂过程及裂缝发展规律分析

2.1.1 墙板开裂过程 当输入最大加速度为 50 gal 的地震波时，结构处于完全弹性状态，没有出现可见裂缝。

当输入最大加速度为 100 gal 的地震波，基底剪力达 351 kN 时，在南、北墙一层门上角出现第一批竖向裂缝，接着，二层门上、下角相继出现斜向裂缝，这些裂缝都是由于应力集中造成的，只要结构的构造措施合理，就可避免出现这些裂缝；基底剪力达 375 kN（基底弯矩为 2 683 kNm）时，在东墙一层南窗下角、西墙一层窗下角外侧出现水平裂缝，这些裂缝是由于结构整体弯曲产生的。

本阶段试验结束后，由于结构基本对称，所以东西墙裂缝基本一致，南北墙裂缝基本一致。东、南墙裂缝图如图 4（左）。

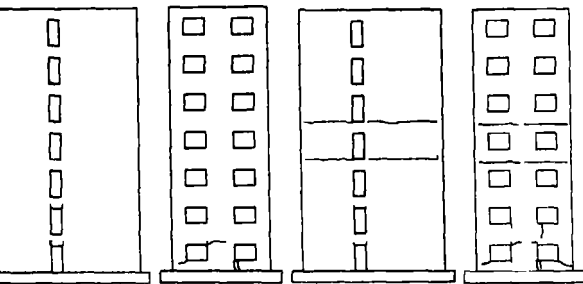


图 4 100 200 gal地震作用后结构裂缝图
Fig 4 Distribution rules of cracks after 100 200 gal seismic wave

当输入最大加速度为 200 gal 的地震波时，已有的裂缝略有扩展；基底剪力达 608 kN 时，四、五层墙板底部出现水平裂缝并延伸到柱边缘，这是因为结构下部三层为全现浇式，上部四层为装配整体式，墙板底部与梁采用不尽合理的销键连接造成的，但是直至此时，所有裂缝都很细微。

本阶段试验结束后，东面纵墙、南面横墙裂缝图见图 4（右）。

当输入最大加速度为 400 gal 的地震波时，基底剪力分别达 +703 kN、-560 kN 时，南、北墙一层出现第一批剪切斜裂缝，同时，南、北墙二、三层下角部亦出现剪切斜裂缝。另外，在东墙一层北窗下角外侧出现水平裂缝并延伸至柱边缘。直至此时，所有裂缝仍都很细微。

本阶段试验结束后，东、南墙裂缝图见图 5。

当输入最大加速度为 800 gal 的地震波时，基底剪力达 +1 191 kN、-983 kN（基底弯矩为 +8 521 kNm、-7 033 kNm）时，南、北墙一层斜裂缝延伸至梁底并沿水平方向扩展，裂缝不断加宽；东、西两侧柱均出现数条水平细微裂缝；南、北墙

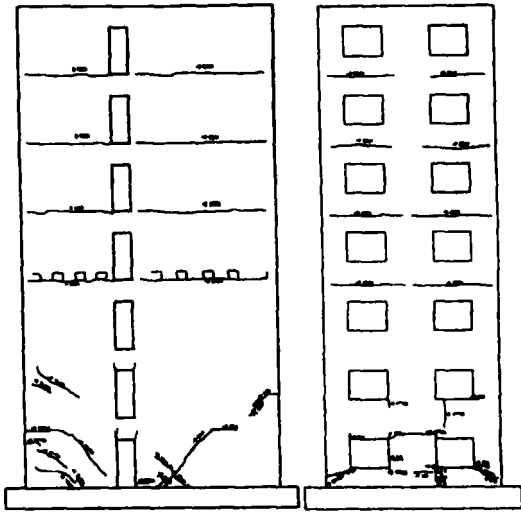


图 5 400 gal地震作用后结构裂缝图
Fig 5 Distribution rules of cracks after 400 gal seismic wave

1-6层门上短梁出现交叉斜裂缝并贯通，这也是短梁的不合理的构造造成的，只要采取合理的构造措施就可避免；东、西墙一层窗下外侧水平裂缝贯通柱断面，延伸至南、北墙并形成主裂缝，窗间水平裂缝贯通；柱底处裂缝达 10 mm 宽，窗间墙裂缝亦达 10 mm 宽，主裂缝处墙内钢丝被拉断，柱钢筋屈服或屈曲，结构屈服。

本阶段试验结束后，东、南墙裂缝图见图 6。

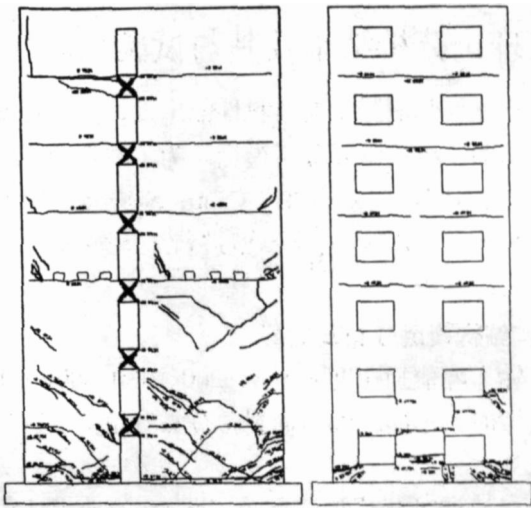


图 6 800 gal地震作用后结构裂缝图
Fig 6 Distribution rules of cracks after 800 gal seismic wave

由裂缝图还可以看出，除了底层裂缝在柱底处水平贯通外，其它裂缝均限制在各层的梁、柱中间——装配式墙板底部的水平裂缝仅发展到柱侧，然后沿柱向上发展；现浇墙板的交叉斜裂缝仅发展到梁底，继而沿梁底面在水平方向发展。这说明：

边框对墙板的约束作用很强，使得墙板的抗剪强度大大提高。事实上，轻型复合结构的承载力之

所以如此高，在很大程度依赖于复合墙和边框能够协同作用。

2.1.2 复合墙板内外侧裂缝的比较、分析 图 7 为结构底层南墙东跨的内侧和外侧的最终破坏时的裂缝图。

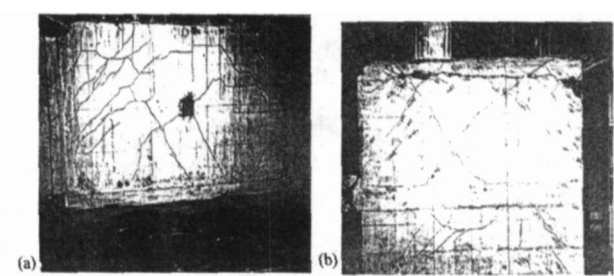


图 7 墙板内、外侧裂缝情况图
Fig.7 Distribution rules of cracks inside and outside of the panels
(a) 内侧 (b) 外侧

由图可见：虽然复合墙板的两侧复合层能够很好地共同工作，但是，两侧复合层仍然存在水平力的分配问题，并且水平力在两侧的分配取决于两侧复合层的刚度。

本次试验中，由于内侧砂浆的刚度高于外侧混凝土的刚度，导致内侧的砂浆层受力反而偏大，裂缝开展较密也较均匀。

3 理论分析结果及其与试验结果比较

从钢筋和混凝土的材料性能出发，建立轻型复合结构的三维有限元分析模型。为了与拟动力试验结果进行比较，输入 EL-Centro 地震波，用大型商业程序 MARC 对试验模型进行了有限元弹塑性地震反应分析^[10]。

3.1 结构裂缝分布及发展

输入峰值加速度为 100、200、400、800 gal 的地震波时，不同时刻结构裂缝分布如图 8-11。由图可知：

(1) 受到峰值加速度为 100 gal 的地震波作用后，主裂应变均为零，说明结构没有裂缝产生。这阶段拟动力试验时只有应力集中产生的裂缝和一条细微的整体弯曲裂缝，所以计算结果与试验结果并不矛盾。

(2) 受到峰值加速度为 200 gal 的地震波作用时，在第 81 步（2.16 s），结构大部分的主裂应变为 $-5.331 \times 10^{-6} \sim -6.917 \times 10^{-7}$ ；只有 2、3 层门上角和南、北墙 1 层下角部的主裂应变达 $1.323 \times 10^{-5} \sim 1.787 \times 10^{-5}$ ，所以这些部位会产生裂缝。在第 83 步（2.213 s），结构大部分的主裂应变为

-4.934×10^{-7} ；只有 1 层下角部的主裂应变达 $8.674 \times 10^{-6} \sim 1.326 \times 10^{-5}$ ，所以这些部位也会产生裂缝。这阶段拟动力试验时的裂缝出现情况，除 4、5 层底部的水平裂缝外，也基本上与计算结果吻合，而 4、5 层底部的水平裂缝是由于装配不合理造成的。

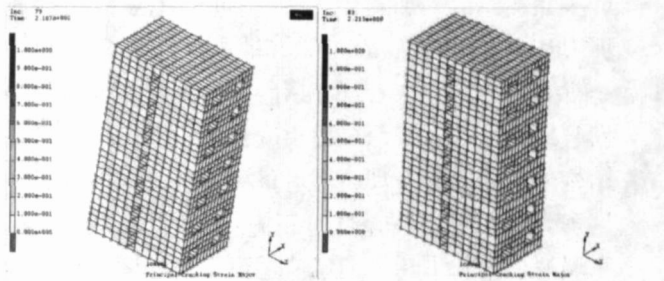


图 8 100 gal 不同时刻结构裂缝分布
Fig.8 Distribution rules of cracks after 100 gal seismic wave in various times

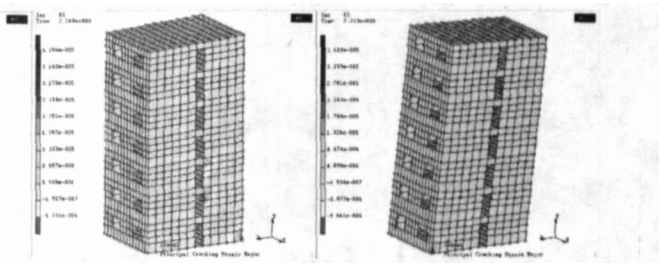


图 9 200 gal 不同时刻结构裂缝分布
Fig.9 Distribution rules of cracks after 200 gal seismic wave in various times

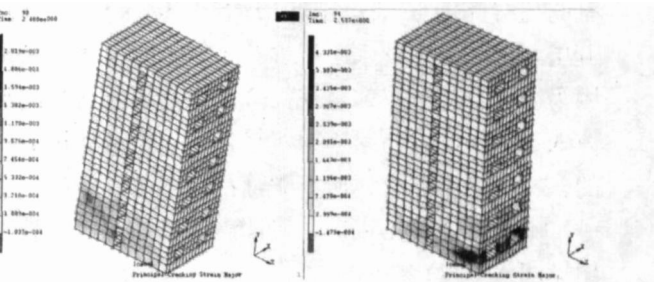


图 10 400 gal 不同时刻结构裂缝分布
Fig.10 Distribution rules of cracks after 400 gal seismic wave in various times

(3) 受到峰值加速度为 400 gal 的地震波作用时，在第 90 步（2.40 s），结构大部分的主裂应变为 -1.033×10^{-4} ；只有 1、2 层南、北墙对角线方向的主裂应变达 $9.576 \times 10^{-4} \sim 1.17 \times 10^{-3}$ ，所以这些部位会产生裂缝。在第 94 步（2.507 s），结构大部分的主裂应变为 -1.479×10^{-4} ；只有 1 层中下部的主裂应变达 $2.539 \times 10^{-3} \sim 2.987 \times 10^{-3}$ 以及 2 层中下部的主裂应变达 $1.196 \times 10^{-3} \sim 1.643 \times$

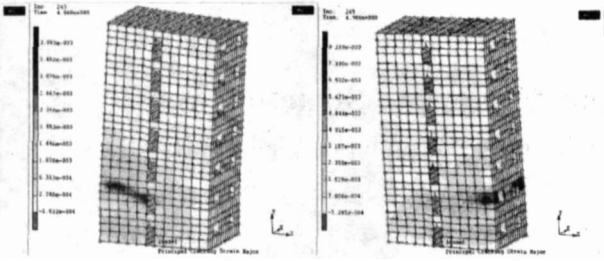


图 11 800 gal 不同时刻结构裂缝分布

Fig. 11 Distribution rules of cracks after 800 gal seismic wave in various times

10^{-3} ，所以这些部位也会产生裂缝。这阶段拟动力试验时的裂缝出现情况，除 4、5、6、7 层底部的水平裂缝外，也基本上与计算结果吻合，而 4、5、6、7 层底部的水平裂缝也是由于装配不合理造成的。

(4) 受到峰值加速度为 800 gal 的地震波作用时，在第 243 步（4.86 s），结构大部分的主裂应变变为 -1.832×10^{-4} ；只有 2 层南、北墙对角线方向的主裂应变达 $1.853 \times 10^{-3} \sim 2.260 \times 10^{-3}$ 以及 1、3 层南、北墙对角线方向的主裂应变达 $1.446 \times 10^{-3} \sim 1.853 \times 10^{-3}$ ，所以这些部位会继续产生裂缝。在第 249 步（4.98 s），结构大部分的主裂应变变为 -1.281×10^{-4} ；只有 1 层中下部的主裂应变达 $2.358 \times 10^{-3} \sim 3.187 \times 10^{-3}$ 、2 层中下部的主裂应变达 $4.844 \times 10^{-3} \sim 5.673 \times 10^{-3}$ 以及 3、4 层南北墙对角线方向的主裂应变达 7.006×10^{-4} ，所以这些部位也会产生裂缝。这阶段拟动力试验时的裂缝出现情况，除门洞上的连梁的交叉斜裂缝以及顶层的竖向裂缝外，也基本上与计算结果吻合，而连梁的交叉斜裂缝和顶层的竖向裂缝都是由于配筋构造不合理造成的。

4 结 论

通过对结构模型的墙板开裂过程及裂缝发展规律的试验结果分析与理论分析结果的比较，可得如下结论供设计参考。

(1) 结构模型的墙板开裂过程及裂缝发展规律的理论分析结果与试验结果吻合较好，说明这种空间有限元弹塑性地震反应分析可以应用于该结构的抗震设计。

(2) 结构一直到最大加速度为 400 gal 的地震

作用，所有裂缝都仍很细微，整个结构处于弹性状态；结构受到最大加速度为 800 gal 的地震作用时，裂缝充分发展，结构屈服，进入塑性状态。说明该结构的抗震承载力很高，可在设防烈度为 8 度地区使用且有足够的强度储备。

(3) 复合墙板的两侧复合层能够很好地共同工作，但是，两侧复合层仍然存在水平力的分配问题，并且水平力在两侧的分配取决于两侧复合层的刚度。

(4) 复合墙和边框能够很好地协同工作，这也是该结构承载力高的一个原因。

(5) 墙板底部与梁采用销键连接不尽合理，4-7 层底部的水平裂缝已充分说明这一点。对于这一不合理连接的改进建议采用装配整体式连接^[11]。

参考文献：

[1] 王忠礼, 于庆荣, 张同亿, 等. 介绍一种新型抗震节能住宅结构体系—CL 结构体系 [J]. 基建优化, 2001 22(1): 8-10

[2] 张德. GRC 复合保温板外墙保温的结构与应用 [J]. 新型建筑材料, 1998 1: 34-36

[3] 徐鹏, 易成, 隋成飞. 节能夹层保温板的研制和应用 [J]. 新型建筑材料, 1997 10: 37-38

[4] 王笃学. 俄罗斯“聚苯乙烯泡沫塑料夹芯三层复合楼板”研制 [J]. 国外建筑科学, 1996 14(3): 16-18

[5] 胡胜钢. 钢丝夹芯岩棉复合板力学性能分析和结构优化 [J]. 新型建筑材料, 1998 2: 17-19

[6] SALMON D C, ENEA A, TADORS M K, et al. Full scale testing of precast concrete sandwich panels [J]. ACI Structure Journal, 1997 94(4): 354-362

[7] 苏幼坡, 徐悦, 苏静萍. 混凝土夹芯板内力与变形分析 [J]. 工程力学, 1997 2(增刊): 302-306

[8] BUSH T D, WU Z Q. Flexural analysis of prestressed concrete sandwich panels with truss connectors [J]. PCI Journal, 1998 43(5): 78-98

[9] 张洪波. 新型建筑体系发展研究 [D]. 天津: 天津大学, 1999

[10] 李升才. 轻型复合结构受力性能及计算方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002

[11] LI Shengcai, JIANG Jianjing, YU Qingrong. Research on light composite structure system [C]. Proceedings of the seventh international symposium on structural engineering for young experts, Tianjin China, 2002 958-962

Analysis on Seismic Behavior of Light Composite Structure (I)

— Analysis on Cracking Process and Law of Crack Propagation of Wall Panels

LI Sheng-cai¹, JIANG Jian-jing²

(1. College of Civil Engineering Huaqiao University Quanzhou 362021 China

2. Department of Civil Engineering Tsinghua University Beijing 100084 China)

Abstract Light composite structure is a complete new economic light-weight energy-saving seismic and multistored and middle high-rise building structure developed in recent year. As the part I of analysis on seismic behavior of light composite structure, it is aimed at directing seismic design of the structure. A model of light composite structure with ratio 1:2 is studied through the pseudo-dynamic and pseudo-static test and elasto-plastic earthquake response analysis with 3D finite element method from commercial software MARC. Test results of cracking process and law of crack propagation of wall panels of the model are analyzed and compared with those of elasto-plastic earthquake response analysis. It shows that the results coincide with test results fairly; elasto-plastic earthquake response analysis with finite element method can be used in seismic design of the structure; seismic bearing capacity of the structure is so high that it can be used in earthquake region where seismic fortification intensity is 8 and strength reserve is enough. Two pieces of concrete plates in the sandwich panel can work in coordination; sandwich panel and hidden frame can constrain each other and work as a whole. The assembled composite wall panel should be designed as an assembled monolithic structure not assembled using reinforced concrete pins.

Key words light composite structure; seismic performance; cracking process; law of crack propagation