

碳纤维布加固某开裂现浇楼板效果分析

何夕平¹, 杨波¹, 张运帅¹, 王彪²

(1. 安徽建筑工业学院, 安徽 合肥 230022; 2. 安徽四惠大成有限责任公司, 安徽 合肥 230011)

摘 要:某建材大市场 C1 楼现浇楼板普遍产生贯穿性裂缝, 部分裂缝宽度达到 0.35 mm, 严重影响到了建筑物的使用功能. 结合工程实际使用材料, 通过计算说明了由于混凝土收缩变形过大而产生裂缝的必然性. 在对裂缝进行检测和原因分析的基础上, 确定采用碳纤维布进行加固. 选取二层顶板(4-1/4)/(A-B)轴的楼板裂缝作为研究对象, 先理论计算出碳纤维布加固该开裂楼板的抗弯刚度, 从而计算出板的跨中挠度. 最后利用 ANSYS 有限元软件, 建立满足正常使用功能的楼板模型并施加荷载, 得到板跨中挠度的模拟值. 并与理论计算值、规范值对比分析, 说明加固后的楼板变形满足正常使用要求.

关键词:碳纤维布; 现浇楼板; 裂缝; 挠度; ANSYS

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)01-0051-07

混凝土结构裂缝是个很难克服的问题, 由于混凝土材料的自身原因, 其构件一般都是带裂缝工作的. 而裂缝的宽度过大, 又会影响到建筑物使用寿命和结构安全^[1]. 混凝土结构裂缝大体可分为荷载裂缝和变形(收缩、温度、沉降等)裂缝两种, 其中 80% 以上都是由于收缩变形所引起^[2]. 收缩是一个包含多种因素的复杂物理化学过程, 收缩裂缝主要是混凝土的温缩、干缩变形受到约束作用而产生^[3-4]. 由于商品混凝土的收缩系数较大^[5], 同时使用量大, 使得在现浇钢筋混凝土结构中裂缝时有发生, 处理不当会引起众多工程质量纠纷. 本文通过对某县城建材大市场现浇板裂缝的成因分析, 提出了碳纤维布加固处理的措施, 并对加固后的楼板变形进行了定量分析.

1 工程概况与现场检测

1.1 工程概况

某县城建材大市场 C1 楼为 3 层框架结构, 建筑横向 22 000 mm, 纵向 58 800 mm, 建筑面积 3 762 m². 三层结构(二层顶)现浇板设计厚为 100 mm, 混凝土强度等级 C25, 板底配筋纵向 $\phi 10@200$, 横向 $\phi 8@200$. 工程三层结构楼板拆模后约 2 个月, 发现三层结构现浇楼板有面积开裂现象, 多数为贯穿性裂缝, 浇雨后有水迹. 该裂纹呈现如下几个特点: (1) 绝大多数裂纹成网格状, 形态横平竖直. (2) 裂纹均是在楼板自重下产生, 开裂前未施加任何荷载. (3) 整个三层结构楼板普遍开裂, 开裂楼板面积约占楼层面积的 80%. C1 楼三层结构平面布置图如图 1 所示.

1.2 现场检测方法与检测结果

1.2.1 现场检测方法

经法定单位在现场对三层结构随机抽取了三块板进行了检测, 分别利用回弹法和钻芯法检测混凝土强度, 使用楼板厚度测定仪检测楼板厚度, 钢筋位置测定仪检测板底钢筋间距, 裂缝测宽仪检测裂缝宽度, 结构局部凿除后用游标卡尺量测钢筋直径. 使用的相关检测仪器如图 2、图 3 所示.

1.2.2 检测结果

现以三层结构 4-1/4 轴交 A-B 轴楼板作为本文的研究对象, 该板长 6 500 mm, 宽 4 200 mm, 该楼板开裂如图 4, 裂缝宽度如图 5.

收稿日期: 2012-08-01 修改稿日期: 2013-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2011BAJ03B04); 安徽建筑工业学院自然科学基金资助项目(KF2009.10)

作者简介: 何夕平(1963-), 男, 安徽无为, 副教授, 硕士生导师, 主要从事现代工程施工技术研究.

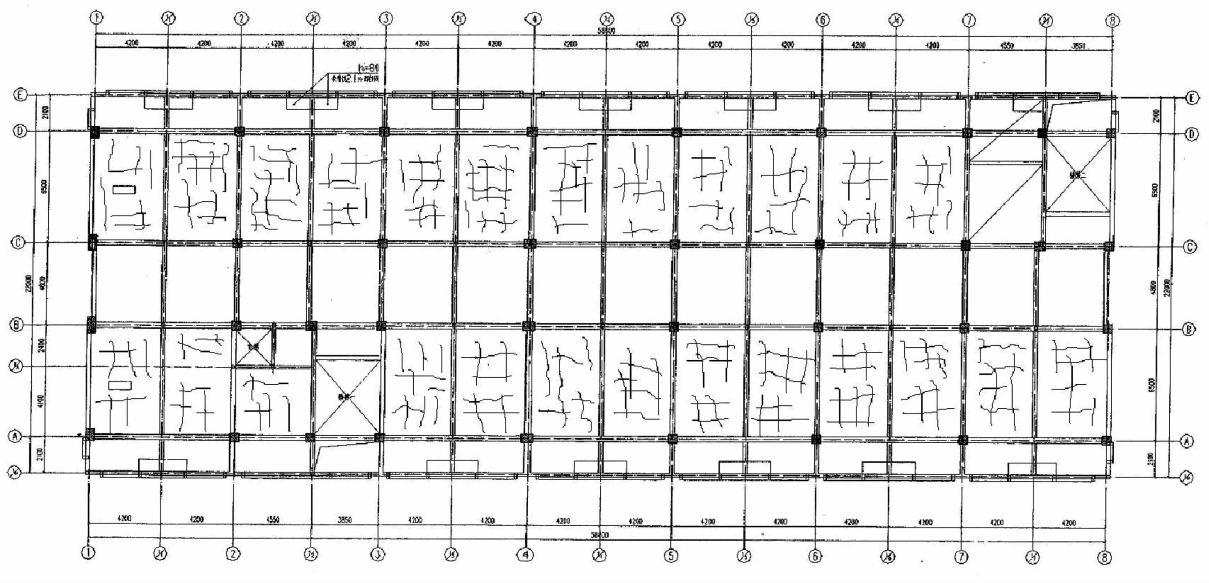


图1 C1楼三层结构平面布置图

Fig. 1 Floor plan of the three-layer structure of C1 building



图2 楼板厚度检测仪

Fig. 2 Floor slab thickness detector



图3 裂缝宽度测试仪

Fig. 3 Crack width tester



图4 楼板开裂示意图

Fig. 4 The cracking floor schematic diagram

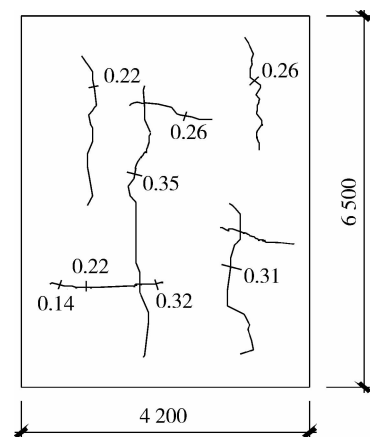


图5 裂缝宽度示意图(单位:mm)

Fig. 5 The schematic diagram of cracks width

现场检测中发现该板裂缝位置处有白色物质,板底有渗水痕迹,部分裂缝贯通,裂缝最大宽度达 0.35 mm.其他检测结果见表 1、表 2、表 3 所示.

根据现行混凝土结构工程施工质量验收规范,现浇板截面尺寸允许偏差为 +8~−5 mm,钢筋间距允许偏差为 ±10 mm,钢筋保护层厚度允许偏差为 ±3 mm,由检测结果可看出,混凝土强度、板厚、钢筋直径及间距、钢筋保护层厚度等均符合图纸设计和规范要求.

表 1 混凝土强度检测结果

Tab. 1 The detection result of concrete strength

检测部位		混凝土抗压强度换算值/MPa			现龄期混凝土强度推定值/MPa	设计强度等级
构件	轴线	平均值	标准差	最小值		
二层顶板	4-1/4 交 A-B	29.2	1.33	28.8	28.2	C25

表 2 板厚检测结果

Tab. 2 The detection result of floor thickness

检测部位		设计板厚	实际板厚/mm			
构件	轴线	/mm	1#测点	2#测点	3#测点	4#测点
二层顶板	4-1/4 交 A-B	100	98	96	107	104

表 3 板底钢筋检测结果

Tab. 3 The detection result of bottom reinforcing bar of the floor

检测部位			板底钢筋直径及平均间距			钢筋保护层厚度	
			/mm			/mm	
构件	轴线	方向	设计	实测		设计	实测值
				直径	间距		
二层顶板	4-1/4 交 A-B	纵向	φ10@200	10.0	190~208	100	97~102
		横向	φ8@200	8.0	192~209		

2 裂缝形成原因分析

2.1 裂缝的形成原因

根据检测结果,同时从裂缝的分布区域、裂缝形态、裂缝宽度、施工环境、成品保护等综合因素考虑,经相关权威部门和专家的系统分析,该楼板裂缝的形成并非结构或施工的原因造成,主要是由混凝土塑性收缩引起,可能存在以下几个原因:

- (1)实际混凝土配合比中粉煤灰使用过多;
- (2)实际使用的混凝土水灰比过大;
- (3)混凝土提供商是当地的一个小企业,生产不规范,可能有水泥混用的情况;
- (4)该工程使用的是江砂,砂的含泥量较大且颗粒较细.

2.2 混凝土收缩应力的计算

混凝土收缩应力的计算,采用王铁梦教授多年在实践中摸索出的公式来估算混凝土的收缩应力^[6].

$$\epsilon_y(t) = 3.24 \times 10^{-4} \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n (1 - e^{bt}) \tag{1}$$

$$\sigma_{\max} = -E(t)\epsilon'_y (1 - 1/ch(\beta L/2))H(t) \tag{2}$$

$\epsilon_y(t)$ 为任意时间的收缩应变, t 以天为单位,根据本工程实际施工情况,从三层结构结束至结构检测,可取 t 为 90 d; b 为经验系数,一般可取为 0.01,养护较差时取 0.03,本工程取 0.01. M_1 、 $M_2 \cdots M_n$ 为各种非标准条件下修正系数^[6]. 结合工程实际使用材料,水泥为普通硅酸盐水泥, M_1 取 1.0;水泥细度为 3 000, M_2 取 1.0;粗骨料为碎石,细骨料为含泥量较大中细砂, M_3 取 1.0;本工程水灰比为 0.6, M_4 取 1.42;结合工程实际,水泥浆量为 0.33, M_5 取 1.65;自然养护 7 d, M_6 取 1;施工环境湿度约为 30%, M_7 取 1.18;对板,水力半径倒数 r 为 0.204 cm⁻¹, M_8 取 1,对框架梁, r 为 0.15 cm⁻¹, M_8 取 0.941;现场采用机械振捣, M_9 取 1.0;板配筋率的修正系数 M_{10} 为 0.936,框架梁的配筋率修正系数 M_{10} 为 0.852.

将各数值代入(1)式得:

$$\epsilon'_y = \epsilon_{y\text{板}}(90\text{ d}) - \epsilon_{y\text{框架梁}}(90\text{ d}) = 1.752 \times 10^{-4}$$

综合考虑框架梁与板间约束,取水平阻力系数 C_x 为 1.0 N/mm². 该工程有 14 跨,每跨 4 200 mm,整个楼层混凝土板长 $L = 4\,200 \times 14 = 58\,800$ mm,沿长度方向中部设置一后浇带.因该建筑的横向 B_1

$= 2B + L_1$, 其中 B 为板宽, L_1 为走廊宽度. 且横向两侧形式、约束均对称, 取一侧的长度 B 为板宽, 又因 $B = 6\,500 < 2 \times 0.2L = 23\,520\text{ mm}$, 则取该楼板的换算宽度 $B' = 6\,500\text{ mm}$, C25 弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4\text{ MPa}$.

$$\text{则 } \beta = \sqrt{2C_x/B'E} = 1.05 \times 10^{-4}$$

由徐变引起的内力松弛系数 $H(t)$ 平均取 0.5, 把 ϵ'_y 与 β 值带入(2)式, 求出板的最大拉应力 $\sigma_x = 2.23\text{ MPa} > \text{C25 的抗拉强度标准值 } f_{tk} = 1.78\text{ MPa}$. 故该楼层楼板由于混凝土收缩变形过大而产生开裂.

3 碳纤维布加固处理分析

3.1 碳纤维布加固

考虑到所需加固的面积较大, 工期较紧. 为了节约投资, 采用技术难度较小, 施工工艺较为简单的粘贴碳纤维布法进行加固. 首先采用环氧树脂浆液对裂缝进行压力灌浆, 灌浆后使用环氧树脂胶泥对灌浆嘴处抹平封口, 封口后进行表面处理并涂刷底层树脂, 然后对粘贴面找平并涂刷浸渍树脂, 最后粘贴碳纤维布并进行表面防护. 根据规程^[7]要求, 碳纤维布在加固时, 应多条正交密布的铺贴在板上, 本工程楼板板底双向均粘贴一层厚为 0.167 mm 的碳纤维布, 其中碳纤维布宽为 100 mm, 中心间距为 600 mm. 如图 6 所示.



图6 碳纤维布加固楼板效果图

Fig. 6 The figure of CFRP sheets strengthening floor slab

3.2 开裂板加固后的变形计算

3.2.1 开裂板加固后抗弯刚度的计算

该现浇板裂缝绝大多数为贯穿性裂缝, 且裂缝多, 并呈纵横网格状, 可认为混凝土在受压区基本不参与工作. 仅有钢筋承受拉力作用, 碳纤维布加固后, 可以替代受力钢筋起到加固补强, 增强楼板刚度的作用^[8]. 在一定弯矩作用下, 双向板的某一板带和单向受弯构件变形规律是类似的^[9], 可利用碳纤维布加固已损伤梁的刚度公式来换算碳纤维布加固开裂板的抗弯刚度^[10]. 具体公式如下.

$$B_{st} = \frac{B_{cr}}{l} \quad (3)$$

$$B_{cr} = E_c I_{cr} \quad (4)$$

式中: I_{cr} 为换算截面的惯性矩

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b x_{cr}^3 + n A_s (h_0 - x_{cr})^2 + (n_2 - 1) A_{s1} (x_{cr} - a)^2 + n_3 A_f (h - x_{cr})^2 \quad (5)$$

其中:

$$x_{cr} = h_0 \left\{ \sqrt{[(n_2 - 1)\rho_2 + n_1\rho_1 + n_3\rho_3]^2 + 2[(n_2 - 1)\rho_2 a + n_1\rho_1 h_0 + n_3\rho_3 h]/h_0} - [(n_2 - 1)\rho_2 + n_1\rho_1 + n_3\rho_3] \right\} \quad (6)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{bh_0}; \quad \rho_2 = \frac{A_{s1}}{bh_0}; \quad \rho_3 = \frac{A_f}{bh_0}.$$

(3)~(6)式中 E_c 、 E_s 、 E_f 分别为混凝土、受拉钢筋和碳纤维布的弹性模量, l 、 b 、 h 分别为板的长、宽和高, h_0 为截面有效高度, a 为受拉钢筋合力点至截面受拉边缘的距离, A_s 为受拉区钢筋面积, A_{s1} 为受压区钢筋面积, A_f 为碳纤维布面积, x_{cr} 为裂缝截面受压区高度.

本文中 $E_c = 2.8 \times 10^4\text{ MPa}$; $E_s = 2.0 \times 10^5\text{ MPa}$; $E_f = 2.1 \times 10^5\text{ MPa}$; $n_1 = 2.0/2.8$, $n_2 = 0$, $n_3 = 2.1/2.8$; $h_0 = 75\text{ mm}$; $b \times h = 4\,200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$; $A_s = 1\,648.5\text{ mm}^2$; $A_f = 520\,595.3\text{ mm}^2$; 代入(5)、(6)两式求出: $x_{cr} = 87.15$; $I_{cr} = 8.29 \times 10^8$; 将 I_{cr} 代入(4)式, 求得刚度 $B_{cr} = E_c I_{cr} = 2.32 \times 1\,013$

$\text{N} \cdot \text{mm}^2$;再带入(3)式即可求出开裂板的抗弯刚度 $B_{\text{st}} = 3.57 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{mm}$.

3.2.2 开裂板加固后挠度的计算

利用文献[11]中挠度公式 $y = w \frac{q(x)b^4}{B_{\text{st}}}$,即可求得板的最大挠度值^[11].其中 $q(x)$ 为恒载与活载的组合值.如《建筑结构荷载规范》^[12] 规定民用建筑楼面活荷载标准值一般取 2 kN/m^2 ,可算出最大挠度值为 1.536 mm .

3.3 理论计算值与数值模拟值的比较

为了比较挠度计算值与设计值的差异,利用 ANSYS 有限元软件,按设计要求建立 $4-1/4$ 轴交 A—B 轴的双向板有限元模型,其中混凝土取 Solid65 单元,钢筋取 Link8 单元,钢筋与混凝土之间采用分离式模型处理,不考虑钢筋与混凝土之间的粘结和滑移,网格划分后合并节点,四边采用固定约束.如图 7 所示.在模型加载时将恒荷载与活荷载按规范要求叠加后施加.根据规范,楼屋面活荷载标准值的变化基本在 7 kN/m^2 以内,综合考虑各种环境类别,将活荷载在 1 kN/m^2 到 7 kN/m^2 的范围内,每级以 1 kN/m^2 的形式逐级递增加载.共加载 7 次.均以面荷载的形式施加.

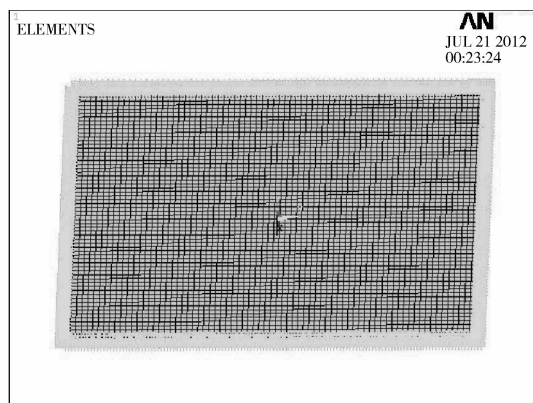


图7 楼板有限元模型

Fig. 7 The finite element model of floor slab

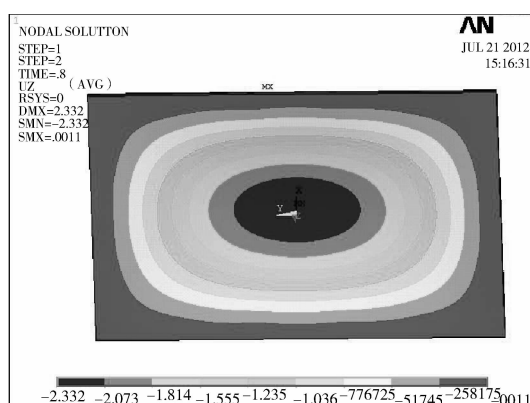


图8 楼板在活载 2 kN/m^2 时跨中挠度云图

Fig. 8 The mid-span deflection nephogram of floor slab under live load 2 kN/m^2

软件经过 7 次计算,得到了 7 组板跨中挠度(最大挠度)的数值模拟值,当取活荷载为 2 kN/m^2 时,挠度云图如图 8 所示,数值模拟时板跨中挠度值为 2.332 mm ,大于楼板加固后的理论计算值 1.536 mm . 7 组数值模拟与理论计算值的比较如图 9.

由图 9 可以看出,板跨中挠度值随活荷载的增加而增大,且最大挠度值为 4.408 mm ,远小于按《混凝土结构设计规范》^[13] 算出的限值, $\frac{b}{250} = 16.8 \text{ mm}$. 满足限制要求. 各级活荷载作用下跨中挠度的理论计算值均小于数值模拟值,且两组数据之间差距也在增大.说明该开裂板在加固后刚度变大,变形减小,且小于设计值.可认为加固后板的变形满足正常使用要求.

4 结论与建议

根据对开裂现浇楼板裂缝的成因分析和碳纤维布加固效果的评判,可以得到以下主要结论,并提出施工和加固的建议:

(1)利用碳纤维布对现浇开裂楼板加固时,可以有效增强加固构件的抗弯刚度,提高抗弯承载力和减小变形.

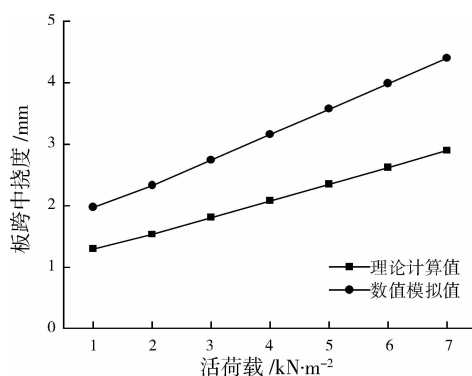


图9 理论计算值与数值模拟值对比
Fig. 9 Comparisons between theoretical calculation value and the numerical simulation value

(2)本文通过对现浇开裂楼板的现场检测、理论计算及有限元软件分析,整理出一套评判碳纤维布加固开裂楼板效果的方法,并可以为施工中类似加固问题提供借鉴。

(3)通过对某工程中现浇楼板裂缝的具体分析,说明混凝土原材料使用不当可能会发生混凝土收缩开裂,但对该工程楼板裂缝进行灌浆封闭后,利用碳纤维布进行双向网格状粘贴加固处理,经过精心的组织施工,工程正常使用一年多来,没有再次发生裂缝。根据以上分析,建议施工单位在施工过程中,应首先尽量避免裂缝的出现。当出现影响结构使用功能的裂缝时,应先选择具有相应资质的检测单位进行检测,判别原因后选择合理的加固处理方案,处理得当,也能取得满意的加固效果。

参考文献 References

- [1] 罗国强,罗刚,罗成.混凝土与砌体结构裂缝控制技术[M].北京:中国建材工业出版社,2006.7.
LUO Guo-qiang, LUO Gang, LUO Cheng. Crack control technology of concrete and masonry structure [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006. 7.
- [2] 徐荣年,徐欣磊.工程结构裂缝控制——“王铁梦法”应用实例集[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
XU Rong-nian, XU Xin-Lei. Control of cracking in engineering structure-examples of “WANG tie-meng method” [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [3] 陈肇元,崔京浩,朱金铨.钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J].工程力学,2006(增刊):.
CHEN Zhao-yang, CUI Jing-hao, ZHU Jin-quan. Analysis and control of cracking in reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2006(sup. I).
- [4] 富文权,韩素芳.混凝土工程裂缝预防与控制[J].混凝土,2003(5):3-4.
FU Wen-quan, HAN Su-fang. The prevention and control of cracking in concrete structures[J]. Concrete, 2003 (5):3-4.
- [5] 陈萌,刘立新.商品混凝土收缩变形的试验[J].工业建筑,2007(6):70-71.
CHEN Meng, LIU Li-xin. An experimental study on shrinkage deformation for commercial concrete[J]. Industrial Construction, 2007(6):70-71.
- [6] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
WANG Tie-meng. Crack controls for engineering structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [7] CECS146.碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S].2003:10-15.
Technical Specification for Strengthening Concrete Structure with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate[S]. CECS146:2003:10-15.
- [8] 陈雪峰,黄凤霞.某开裂现浇板碳纤维布加固后正常使用性能的评定分析[J].工程抗震与加固改造,2008(5):96-100.
CHEN Xue-feng, HUANG Feng-xia. Analysis of the serviceable performance of a cracking Cast-in-place floor strengthened by CFRP sheets[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008(5):96-100.
- [9] 曹光荣.现浇钢筋混凝土双向板挠度的实验研究[D].南京:东南大学,2005.
CAO Guang-rong. Experimental researches on deflection of cast-in-situ RC two-way slab [D]. Nanjing: Southeast University. 2005.
- [10] 周戟,赵少伟,孙吉书.碳纤维布加固已损伤混凝土梁抗弯刚度研究[J].河北工业大学学报,2010(3):115-118.
ZHOU Ji, ZHAO Shao-wei, SUN Ji-shu. Study of bending stiffness on damage concrete beam strengthened by CFRP [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2010(3):115-118.
- [11] 东南大学,同济大学,天津大学.混凝土结构与砌体结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Southeast University, Tongji University, Tianjing University. Concrete and Masonry Structural Design [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [12] GB50009-2001,建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
GB50009-2001, Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [13] GB50010-2010,混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB 50010 - 2010, Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

Effect analysis of a cracking cast-in-place floor strengthened by CFRP sheets

HE Xi-ping¹, YANG Bo¹, ZHANG Yun-shuai¹, WANG Biao²

(1. Anhui University of Architecture, Hefei 230022, P. R. China;

2. Anhui Sihui Dacheng Company Limited, Hefei 230011, P. R. China)

Abstract: A variety of penetrating cracks occurred in cast-in-place floor of C1 building in a building material market. Some crack mouth opening displacements have reached 0.35mm especially. The application of the building has been seriously affected by these cracks. In order to explain how these cracks come about by, combining the engineering materials actually used in this project, this article analyzes the reason of cracks by computing the shrinkage deformation of concrete and explains how they are caused by shrinkage of concrete. Based on the cracks inspection and cause analysis, an alternative scheme that CFRP sheets can be used to strengthen the floor. Besides, taking the second floor ((4-1/4) / (A-B) axis) strengthened by CFRP sheets of C1 building as the research object, is proposed the values of flexural rigidity and mid-span deflection are calculated. Finally, applying the finite element software ANSYS to model building of the floor achieving a function of natural service, the numerical simulation values of mid-span deflections are obtained. Meanwhile, the theoretical calculation values are compared with the numerical simulation values and the code values. The comparison results show that theoretical calculation values are smaller than theoretical calculation values and code values. A conclusion is drawn to indicate that the floor deformation can meet the normal demands of application.

Key words: carbon fiber-reinforced polymer sheets; cast-in-place floor; crack; deflection; ANSYS

Biography: HE Xi-ping, Associate Professor, Hefei 230022, P. R. China, Tel:0086-13905698543, E-mail:1047080558@qq.com

(上接第 30 页)

Structure design of hefei xinqiao international terminal

DING Da-yi^{1,2}, ZHENG Yan², MA Dong-xia², WANG Yuan-qing³, LUO Yong-feng⁴,
JIANG Xiang-min², WANG Jian², LIU Wei², SHAO Qing-liang², SHU Chang²

(1. Hefei University of Technology Civil and Irrigation Engineering School, Anhui Hefei 230009, China;

2. Wuzhou Engineering Design and Research Institute, Beijing 100053, China;

3. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Tongji University Building Engineering School, Shanghai 200092, China)

Abstract: Hefei Xinqiao International Terminal structure is complex and long. The paper introduces the key point of technology of the structure design of the project, which include the choice of structure system, analysis of load and seismic design, temperature influence of over length structure, research of over sized steel box section wallboard stable and research of switching node, etc. Many problems, over solved such as, the transfer between box section and partial truss, the connection of prestressed reinforced concrete and steel framework column. The single layer cable-net glass curtain wall is working together with main body structure, all that methods made the construction of complex building body simple, which enhanced structure integrity. The connection between structure system and node construction is a good example for some large size public buildings.

Key words: structure system; long span steel structure; box section wallboard stable; switching node

Biography: DING Da-yi, Engineer, Hefei 230009, P. R. China, Tel:0086-15801015801 E-mail: dingdayi@wuzhou.com.cn