

文章编号:1672-9331(2021)03-0032-06

加固后现浇钢筋混凝土楼板静载试验分析

叶李斌¹, 张宾锋²

(1. 福建省永正工程质量检测有限公司, 福建 福州 350012; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为了提高加固后现浇钢筋混凝土楼板结构安全性评估的准确性, 通过 ANSYS 软件模拟得到楼板挠度、应变值及开裂状况, 并与静载试验结果进行比对。分析了某住宅楼现浇钢筋混凝土楼板加固后的变形、开裂及承载能力情况。结果表明: 静载试验所得楼板裂缝的发展情况与 ANSYS 软件模拟结果基本一致, 楼板挠度、应变的理论计算值与实测值基本吻合; 当处于弹性阶段时, 楼板在自重荷载作用下的挠度可由荷载和挠度数据经拟合方程计算得出。本案例可为今后的相关试验分析提供一定的参考。

关键词: 钢筋混凝土楼板; 静载试验; 挠度; 应变; 裂缝

中图分类号: TU317⁺.2, TU375.2

文献标志码: A

Static load test analysis of in-situ reinforced concrete floor after reinforcement

YE Li-bin¹, ZHANG Bin-feng²

(1. Fujian Yongzheng Construction Quality Inspection Co., Ltd., Fuzhou 350012, China;

2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of safety assessment of structure of in-situ reinforced concrete floor after reinforcement, the deflection, strain and crack of the floor were simulated by ANSYS software, and compared with the static load test results. The deformation, crack and bearing capacity of in-situ reinforced concrete floor after reinforcement of a residential building were analyzed. The results show that the crack development of the floor obtained from the static load test is basically consistent with the ANSYS software simulation results, and the theoretical calculation values of the floor deflection and strain are basically consistent with the measured values; when the floor is in the elastic stage, the deflection of the floor under the self weight load can be calculated by the fitting equation with the load and deflection data. This study can provide some reference for the relevant test analysis in the future.

Key words: reinforced concrete floor; static load test; deflection; strain; crack

钢筋混凝土楼板作为传递面荷载的重要构件,其受弯挠度、裂缝、承载力、耐久性等正常使用时的各项指标均应满足规范要求^[1]。当楼板开裂

后需对裂缝进行加固处理,以增加结构的整体性、刚度和抗裂度^[2]。若加固方式导致原楼板结构传力路径发生改变,需对楼板的承载力进行验算,以

收稿日期:2021-01-23

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2020-K-55);福州市科技计划项目(2020-PT-142)

通讯作者:叶李斌(1988—),男,工程师,主要从事工程检测、鉴定与加固等方面的研究。E-mail:yelbcjt@163.com

防超出楼板承载力的范围^[3]。钢筋混凝土板在外荷载作用下,一个方向的弯矩必定会导致其正交方向的变形,即曲率变化,故若套用梁挠度计算公式计算板挠度,误差将比较大^[4]。

在楼板静载试验分析中,王季青等^[2]结合 ANSYS 软件对试验结果进行了模拟;滕建芝^[5]、张浩等^[6]通过加载试验得出楼板挠度与裂缝的变化情况,并评估了楼板的安全状况,但在对楼板进行加载试验的过程中,未考虑楼板、加载设备自重对楼板挠度、应变、裂缝的影响。因此,本研究在前人研究的基础上,分析了楼板处于弹性阶段时楼板及加载设备自重对试验结果的影响,以期提高楼板结构安全性评估的准确性。

由于钢筋混凝土楼板的弯曲变形具有双向性,采用 ANSYS 软件在四边固支约束条件下计算板构件挠度是合理的^[7]。因此,本研究结合 ANSYS 有限元软件对加载数值进行模拟分析,得到楼板挠度的理论值,并与实测值进行对比分析,以确保楼板静载试验的准确性,为今后类似的工程实践提供一定的借鉴。

1 案例概况

我国东南沿海某住宅楼的结构为 20 层现浇钢筋混凝土框架—剪力墙结构。在养护过程中发现该楼某单元客厅的钢筋混凝土楼板存在非结构性裂缝,加固前主要裂缝的分布如图 1 所示。经注浆加固后检验其承载力是否满足设计荷载及正常使用要求。该楼板尺寸为 2 900 mm×3 000 mm,设计板厚为 90 mm。板底钢筋为双层双向 $\phi 6@150$,

板面负筋 $\phi 8@200$ 。混凝土设计强度等级为 C30。该工程抗震设防类别、场地类别、设计地震分组分别为丙类、Ⅱ类、第三组;抗震设防烈度、设计基本地震加速度分别为 7 度、0.10 g。

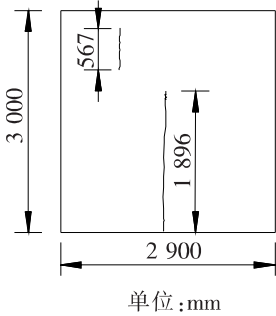


图 1 加固前主要裂缝示意图
Fig. 1 Schematic diagram of main cracks before reinforcement

2 楼板静载试验及理论计算

2.1 试验荷载

根据文献[8],客厅板面设计活荷载的标准值为 2.0 kN/m²,恒荷载的标准值为 1.5 kN/m²。试验荷载 Q_d 应满足如下规定^[9]:

$$Q_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k \tag{1}$$

式中: γ_G 为永久荷载分项系数,取值为 1.2; γ_Q 为可变荷载分项系数,取值为 1.4; G_k 为永久荷载标准值; Q_k 为可变荷载标准值。

试验采用流体(水)对楼板进行均布加载。由式(1)可知,扣除楼板自重后的安全性检验荷载值为 5.05 kN/m²。试验过程按 5 级加载、5 级卸载进行。各测点各级加载、卸载及对应的挠度检测数据的汇总见表 1~2。

表 1 加载及检测数据汇总
Table 1 Summary of loading and detecting data

加载等级	各级荷载/ (kN·m ⁻²)	累计加载/ (kN·m ⁻²)	各测点的挠度增量/mm					跨中挠度/mm	
			测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	与 x 轴平行	与 y 轴平行
初始值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.13
1	1.05	1.05	-0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.18	0.16
2	1.00	2.05	-0.01	0.00	0.11	0.00	0.01	0.26	0.23
3	1.00	3.05	-0.01	0.00	0.20	0.00	0.02	0.34	0.32
4	1.00	4.05	-0.01	0.01	0.26	0.00	0.04	0.40	0.37
5	1.00	5.05	0.00	0.01	0.34	0.00	0.06	0.48	0.44

表2 卸载及检测数据汇总

Table 2 Summary of unloading and detecting data

卸载等级	各级荷载/ (kN · m ⁻²)	累计加载/ (kN · m ⁻²)	各测点的挠度增量/mm					跨中挠度/mm	
			测点①	测点②	测点③	测点④	测点⑤	与x轴平行	与y轴平行
初始值	0.00	0.00	0.00	0.01	0.34	0.00	0.06	0.48	0.44
1	1.00	1.00	0.00	0.01	0.29	0.00	0.05	0.43	0.40
2	1.00	2.00	-0.02	0.00	0.23	-0.02	0.03	0.38	0.36
3	1.00	3.00	-0.03	-0.01	0.17	-0.03	0.02	0.34	0.30
4	1.00	4.00	-0.04	-0.02	0.10	-0.03	0.02	0.28	0.24
5	1.05	5.05	-0.04	-0.03	0.04	-0.04	0.01	0.22	0.18

2.2 测点布置

在板底支座及跨中共布置5个测点进行挠度及应变的测量,其布置如图2所示。采用挠度法测量挠度。在测点③处沿x,y轴方向各布置一个电阻式应变片,采用静态应变仪测量应变^[10]。

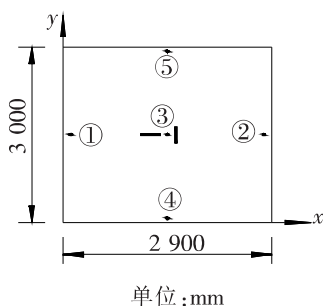


图2 挠度、应变测点布置

Fig. 2 Layout of deflection and strain measuring points

2.3 加载方式

在前4级每级加载或卸载后,持荷15 min;在第5级加载后,持荷1 h;在全部卸载后,静置1 h。在各级加载或卸载达到持荷(静置)时间时,对挠度及裂缝进行观测、记录。

2.4 挠度数据整理

在扣除支座的沉降影响后,由挠度法实测得到的跨中最大挠度 $a_{q,0}$ 为:

$$a_{q,0} = u_{m,0} - \frac{(u_{l,0} - u_{r,0})}{2} \quad (2)$$

式中: $u_{m,0}$ 为实测的未扣除支座沉降时的跨中最大挠度; $u_{l,0}$ 、 $u_{r,0}$ 分别为左、右两端实测的支座沉降位移值。

由构件、加载设备自重引起的跨中挠度 $a_{g,c}$ 可表示为:

$$a_{g,c} = \frac{M_g}{M_b} a_{b,0} \quad (3)$$

式中: M_b 、 $a_{b,0}$ 分别为加载到弯矩—挠度曲线产生拐点的前一级试验荷载所引起的跨中弯矩值及相应挠度的实测值; M_g 为由构件、加载设备自重引起的跨中弯矩值。

在用构件、加载设备自重等进行修正后,在跨中产生的最大挠度 $a_{s,0}$ 为:

$$a_{s,0} = \Psi(a_{q,0} + a_{g,c}) \quad (4)$$

式中: Ψ 为用等效集中荷载加载时的挠度修正系数,当采用均布荷载时, Ψ 取1.0; $a_{g,c}$ 为由构件、加载设备自重引起的跨中挠度。

构件在使用状态下,由加载产生的挠度检验实测值不应大于其允许值,即:

$$a_{s,0} \leq [a_s] \quad (5)$$

构件挠度检验的允许值需符合下式要求:

$$[a_s] = [a_f]/\theta \quad (6)$$

式中: θ 为考虑荷载长期效应组合对挠度增大的影响系数,当不考虑受压钢筋的影响时,取值为2.0; $[a_f]$ 为构件挠度设计限值,根据文献[1]取值。

采用挠度法测试楼板挠度时,支座沉降对楼板跨中挠度会产生一定的影响。因此,按现行国家标准^[1]规定的挠度允许值试验时,需用式(2)~(4)对楼板挠度数据进行整理^[9],且挠度实测值和允许值还应满足式(5)~(6)的要求^[10]。

2.5 有限元分析

采用ANSYS有限元软件中的SOLID65单元模拟双向板构件^[11],并采用四边固支计算模式,分析楼板在自重及各级荷载作用下的挠度、应变及开裂状况。

将混凝土材料的裂缝张开传递系数设定为0.35,裂缝闭合传递系数设定为1.00,关闭压碎开关^[12]。通过模拟计算,得到楼板自重挠度及满载

挠度分别为 0.14, 0.46 mm, 如图 3~4 所示; 楼板满载应变为 2.24×10^{-5} , 如图 5 所示; 楼板开裂的分布情况, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 楼板未出现明显裂缝。

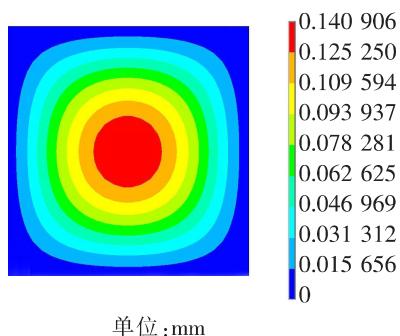


图 3 楼板自重挠度云图

Fig. 3 Floor deflection nephogram with self weight

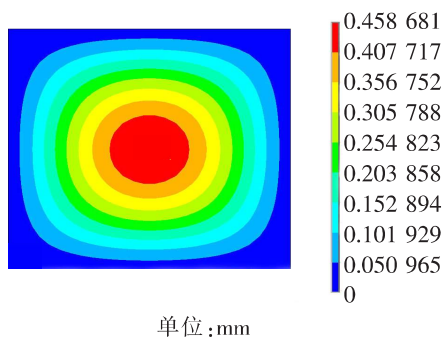


图 4 楼板满载挠度云图

Fig. 4 Floor deflection nephogram with full load

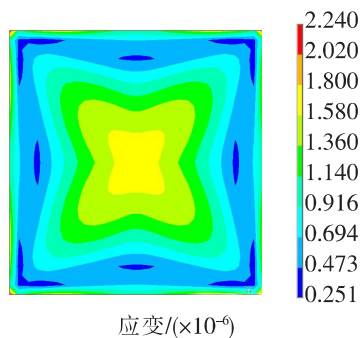


图 5 楼板满载应变云图

Fig. 5 Floor strain nephogram with full load

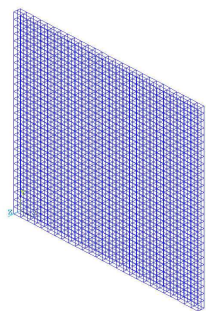


图 6 楼板裂缝分布

Fig. 6 Distribution of floor cracks

3 检测结果与分析

3.1 裂缝

采用裂缝宽度观测仪和读数放大镜观测裂缝。经观测, 楼板板底原有裂缝在加载前已修复。在各级加载、卸载过程中, 通过观测发现楼板板底未见明显新增裂缝, 与 ANSYS 有限元软件模拟结果基本一致, 说明对该楼板进行注浆加固是有效和可靠的。

3.2 挠度及应变

在正常使用过程的检测中, 当板楼板底未发现裂缝或已出现裂缝但裂缝宽度满足规范要求时, 静载试验荷载与挠度的关系基本呈线性变化^[5-6], 此时, 楼板一般处于弹性阶段。在量测过程中, 楼板开裂容易造成混凝土应变片的测量偏差^[13], 但本次试验过程中未见板底新增裂缝, 应变测量值较为准确。

各级加载的挠度、应变的理论值与实测值见图 7~8。图 7 中挠度的实测值为经式(2)修正后的值。

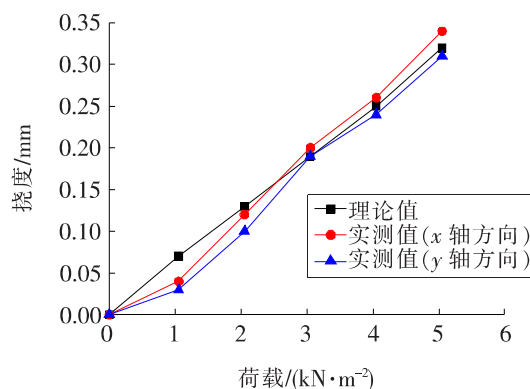


图 7 楼板挠度实测值与理论值

Fig. 7 Measured and theoretical values of floor deflection

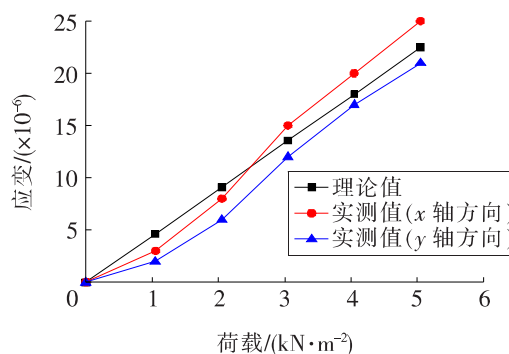


图 8 楼板应变实测值与理论值

Fig. 8 Measured and theoretical values of floor strain

从图7~8可以看出,楼板实测应变与荷载基本呈线性关系,说明注浆加固后楼板的整体性较好。在前两级荷载作用下,楼板挠度、应变实测值与理论值相差较大,挠度实测值(均值)分别为理论值的50.0%,84.6%,应变实测值(均值)分别为理论值的54.3%,76.9%;在后三级荷载作用下,挠度、应变实测值(均值)与理论值十分接近,挠度实测值分别为理论值的102.6%,100.0%,109.3%,应变实测值分别为理论值的99.3%,102.8%,102.2%。综上所述,楼板实测挠度与荷载之间基本保持线性关系,说明该楼板处于弹性阶段。用MATLAB将各级荷载及对应的挠度进行拟合,得到 x 轴和 y 轴方向的荷载—挠度方程,分别为:

$$a_{g,c} = 0.064G_k, R^2 = 0.986 \quad (7)$$

$$a_{g,c} = 0.059G_k, R^2 = 0.977 \quad (8)$$

式中: R^2 为可决系数。

将楼板自重等效成荷载带入式(7)~(8),得到由自重引起的自重挠度,分别为0.14,0.13 mm,这与ANSYS有限元软件模拟所得到的自重挠度一致。

将楼板的自重挠度及各级试验荷载所引起的挠度汇总于表1~2。从这些数据可以分析出,在所检楼板自重及试验荷载作用下,平行于 x 轴和 y 轴方向的最大挠度分别为0.48,0.44 mm,均小于楼板构件挠度检测允许值7.25,7.50 mm;卸载后,所检楼板平行于 x 轴及 y 轴方向的残余挠度分别为0.08,0.05 mm,均小于残余挠度允许值0.10,0.09 mm(表3)。平行于 x 轴和 y 轴方向的最大残余应变分别为 2×10^{-6} , 1×10^{-6} 。卸载挠度、应变曲线如图9~10所示。

综上所述,所检楼板的挠度、应变恢复良好,本次加载试验未出现塑性变形,且楼板整体性较好,能满足正常使用要求。

表3 楼板原位加载试验结果汇总

Table 3 Results summary of floor in-situ loading test

方向	总挠度	mm		
		总挠度 允许值	残余挠度	残余挠度 允许值
与 x 轴平行	0.48	≤ 7.25	0.08	≤ 0.10
与 y 轴平行	0.44	≤ 7.50	0.05	≤ 0.09

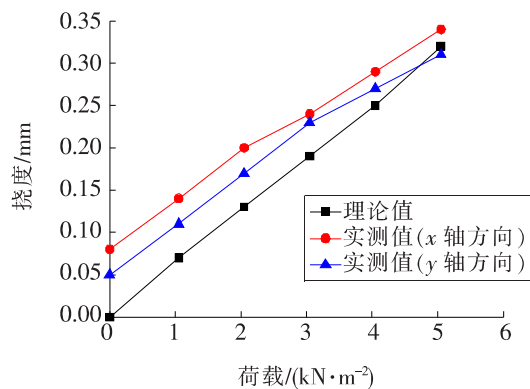


图9 楼板卸载挠度曲线

Fig. 9 Curves of unloading deflection of floor

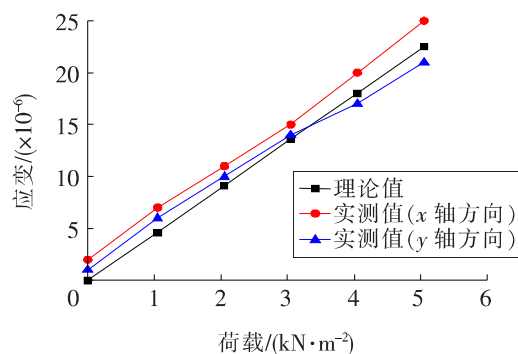


图10 楼板卸载应变曲线

Fig. 10 Curves of unloading strain of floor

4 结论

1) 经注浆加固后,所检楼板的整体性有所增强,能满足正常使用要求,楼面使用活荷载的标准值为 2.0 kN/m^2 。

2) 在加载初期,楼板挠度及应变实测值与理论值相差较大,其原因有待进一步的研究。

3) 在正常使用检测中,楼板在自重荷载作用下的挠度可由弹性阶段荷载—挠度数据经拟合方程计算得出。

4) 在进行楼板原位加载试验检测时,通过ANSYS软件模拟分析所得的构件挠度、应变理论值与实测值相吻合,裂缝实际发展情况与软件模拟结果也基本一致。

〔参考文献〕

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of

- concrete structures; GB 50010—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [2] 王季青, 胡春兰. 现浇混凝土楼板裂缝检测与静载试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010(7): 46-50.
WANG Ji-qing, HU Chun-lan. Cracks detection of an in-situ concrete floor and study of static load tests [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2010(7): 46-50.
- [3] 白伟亮. 某现浇混凝土楼板裂缝检测评定与加固[J]. 建筑结构, 2020(13): 24-29.
BAI Wei-liang. Detection assessment and reinforcement of cast-in-place concrete floor cracks[J]. Building Structure, 2020(13): 24-29.
- [4] 姜磊. 钢筋混凝土板弯曲的双向性及试验研究[J]. 混凝土, 2016(8): 126-129.
JIANG Lei. Experimental research on two-way bending for reinforced concrete slab[J]. Concrete, 2016(8): 126-129.
- [5] 滕建芝. 现浇混凝土楼板荷载试验分析[J]. 福建建筑, 2020(2): 35-38.
TENG Jian-zhi. Load test of reinforced concrete floor [J]. Fujian Architecture, 2020(2): 35-38.
- [6] 张浩, 房士杰, 徐海涛, 等. 某多层框架结构原位加载试验实例分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(S1): 993-995.
ZHANG Hao, FANG Shi-jie, XU Hai-tao, et al. Analysis of a multi-storey frame structure in-situ loading test[J]. Building Structure, 2017, 47(S1): 993-995.
- [7] 谢中敏, 胡超, 沈朝萍, 等. 基于 ANSYS 软件均布荷载作用下方板挠度分析[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(9): 40-41.
XIE Zhong-min, HU Chao, SHEN Chao-ping, et al. Deflection analysis of slab under uniformly distributed load based on ANSYS software[J]. Digital Technology & Application, 2018, 36(9): 40-41.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures; GB 50009—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构现场检测技术标准: GB/T 50784—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for in-situ inspection of concrete structure; GB/T 50784—2013[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures; GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [11] 杨海斌, 梁兴文. 钢筋混凝土双向板挠度计算探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2016(3): 12-16.
YANG Hai-bin, LIANG Xing-wen. Calculation method for deflection of reinforced concrete two-way slab[J]. Sichuan Building Science Research, 2016(3): 12-16.
- [12] 李围. ANSYS 土木工程应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
LI Wei. Application of ANSYS in civil engineering [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007.
- [13] 黄良红, 杨忠, 徐芸. 钢筋混凝土结构楼板静载试验研究[J]. 广州建筑, 2019(4): 22-27.
HUANG Liang-hong, YANG Zhong, XU Yun. Research on static load test of reinforced concrete structure floor [J]. Guangzhou Architecture, 2019(4): 22-27.