

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906016

基于频率变化的混凝土楼板损伤评价研究*

李雨航¹, 邓 扬^{2,3}, 李爱群^{1,2,3}

(1.东南大学土木工程学院,江苏南京210096; 2.北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心,北京100044;
3.北京建筑大学土木与交通工程学院,北京100044)

摘要:提出了基于楼板模态频率变化的楼面板损伤评价方法,采用数值模拟对楼板损伤与频率的关系开展研究。首先,对分层式与整体式两种楼板分别进行线性加载试验与等幅循环加载试验,并对后者进行了模态测试。在此基础上,提出了精细化数值模拟方法,并与线性加载的试件进行对比。最后,采用有限元数值模拟方法计算了基于整体结构频率的结构损伤与基于楼板频率变化的损伤。结果表明:①开裂后的楼板频率低于开裂前的楼板频率,分层式楼板与整体式楼板开裂前后对应的自振频率相近;②精细化有限元数值模拟方法可较为准确地模拟楼板开裂损伤性能与开裂前后的模态变化;③已有基于整体结构频率变化的损伤评价方法无法准确反映楼板的损伤状态;④通过数值模拟计算出的基于楼板频率变化的损伤评价方法,可准确反映楼板开裂的损伤状态,为相应构件的损伤评价提供借鉴。

关键词:楼板;模态频率;模态测试;数值模拟;损伤评价方法

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1028-09

Research on Damage Identification of Concrete Slab based on Frequency Change

LI Yuhang¹, DENG Yang^{2,3}, LI Aiqun^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. School of Civil & Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The damage identification method of slab based on modal frequency variation of slab is proposed. The relationship between slab damage and frequency is studied by numerical simulation. Firstly, the slabs are composed of the layered slab and integral slab, which are applied with the linear and cyclic loading with equal amplitudes, respectively, and the modal test was carried out on slabs which are applied with the cyclic loading with equal amplitudes. On this basis, a refined numerical simulation method is proposed and the results calculated by numerical simulation are compared with those produced by the linear loading test. Finally, the finite element numerical simulation method is used to calculate the existing damage based on the overall structure and the damage based on the slab frequency variation. The results reveal that: 1) the frequency of the slab after cracking is lower than the frequen-

* 收稿日期:2019-06-06;修回日期:2019-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51878027,51438002)资助

作者简介:李雨航(1994—),男,博士研究生。主要从事抗风与监测研究。E-mail:liyuhang@stu.bucea.edu.cn

cy of the slab before the cracking, and the frequencies of layered slabs before and after the cracking are similar to the integral frequency of slabs correspondingly. 2) The cracking damage performance of the slab based on modal variation before and after cracking can be accurately simulated by the refined finite element numerical simulation method. 3) The existing damage identification method based on the frequency variation of the overall structure can not accurately reflect the damage performance of the slab. 4) The damage identification method based on the variation of the floor frequency calculated by numerical simulation can accurately reflect the crack damage performance of the slab. The method can provide a reference for the damage identification of the slab.

Keywords: slab; modal frequency; modal test; numerical simulation; damage identification method

引言

近年来,随着公共交通的不断发展,城市交通枢纽开始逐渐兴起。枢纽内的楼面板在其长期服役过程中,始终承受着站内重载公交车引起的变幅荷载作用,这种作用会导致混凝土楼面板产生损伤,随着服役期的增长,损伤逐步累积,导致楼面板开裂,甚至破坏。因此,混凝土楼面板损伤评估问题一直是国内外工程界的研究热点^[1-4]。通常情况下,混凝土结构的损伤可由刚度来表征^[5-6],但对于在使用建筑,获得其刚度信息较为困难,加之结构楼面板服役期较长,楼面板损伤累积过程受到重载公交车荷载效应与材料性能等因素的影响,使得如何准确评价混凝土构件损伤成为亟待解决的问题。因此,开展混凝土楼面板损伤评价方法的研究十分必要。

国内外的研究学者围绕混凝土损伤评价方法这一课题开展了大量的研究工作,形成了许多损伤评价的方法,包括基于频率振型变化^[7-9]、位移或挠度变化^[10]、阻尼比变化^[11]与加速度变化^[12]的损伤评价方法。同时,也形成了多种新的测试算法,包括基于摄动理论的函数算法^[13-14]、基于迭代重加权L1正则化算法^[15]、梁式检测算法^[16-17]等。这些评价方法与测试算法均是通过外界激励与测量来评价混凝土结构损伤的。但这些方法大都针对于整体结构^[18-20]、竖向构件与梁构件^[21-23],对于楼面板这类高宽比较小的受弯构件是否适用还有待研究。

本文基于楼板模态频率的变化,提出了一种楼面板损伤评价方法。首先开展了楼板线性加载与等幅加载试验,并对等幅加载前后的楼板进行了模态测试。其次提出了精细化的数值模拟方法,计算了楼板两种加载结果,并与试验对比,验证了模拟方法的可靠性。最后采用数值模拟,计算了不同荷载作用下,楼板频率与损伤的变化,在此基础上提出了基于混凝土楼板频率的楼板损伤计算公式与方法。该

方法可为重载楼面板的无损检测提供基础。

1 试验概况

为研究混凝土楼板在不同荷载作用下的刚度变化与损伤规律,设计制作了2种混凝土楼板试件,每种试件各浇筑2块,每个试件均为长为1 800 mm,宽为600 mm,厚为120 mm的单向板。其中S1与S3采用分层浇筑法,即先浇筑厚为80 mm的C40混凝土结构层,待混凝土养护完成后再浇筑厚为40 mm的C25混凝土面层,这与通常的楼板浇筑做法基本相同;S2与S4采用一次性整体浇筑成型做法,即直接浇筑厚为120 mm的C40混凝土,两种楼板的钢筋布置与主要施工工程做法如图1所示。在设计制作混凝土楼板时,预留了混凝土立方体试块与钢筋试样,经过混凝土抗压与钢筋抗拉试验,得到主要的材料特性为:HRB400钢筋屈服强度为435 MPa,极限强度为533 MPa;HPB300钢筋屈服强度为371 MPa,极限强度为458 MPa;C25混凝土立方体极限抗压强度为40.5 MPa;C40混凝土立方体极限抗压强度为49.8 MPa。

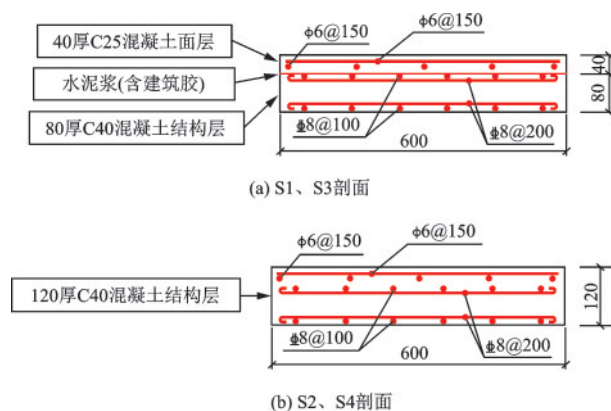


图1 两种试验楼板钢筋横剖面与楼板做法

Fig.1 Rebar cross-section and slab fabricating approach of two test slabs

2 试验方案

2.1 试验加载方案

试验采用2种拟静力加载方案。第1种为线性加载法,按照力荷载等级逐级增加,在超过120 kN时采用位移控制,直至楼板达到极限承载力而破坏。第2种为等幅循环加载法,对楼板施加40 kN荷载10次,模拟楼板受公交车荷载往复作用。4块楼板的具体加载方法为S1与S2采用直接线性加载法;S3与S4在开裂前放置在两块木支撑上,进行模态测试,之后采用等幅循环加载法,在加载试验结束后将开裂后的楼板再次放置在相同位置的木支撑上,进行开裂后的楼板模态测试。

楼板抗弯试验采用四分之一点加载的方式,在四分之一点处设置两根钢棍,并用一根刚度较大的钢梁将作动器荷载分配至两边钢棍上。为实现简支的边界条件,在距试件两端100 mm的下侧位置采用钢棍进行支承。同时楼板上侧分配钢棍处与楼板下侧支撑钢棍处均垫有100 mm宽,10 mm厚的钢板来避免因钢棍接触面积过小而产生的应力集中,试件加载示意如图2所示。

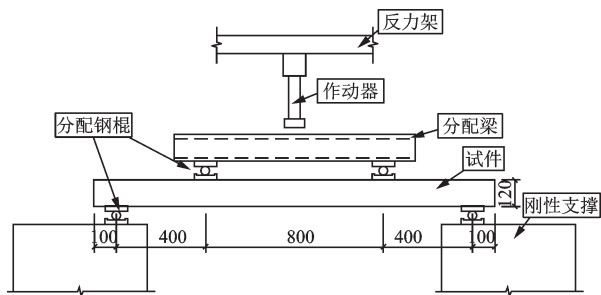


图2 试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the test device

2.2 模态测试

由于本文关注构件受弯方向的结构损伤,故仅采集楼板竖向模态。采用m+p公司的So Analyzer数据采集与分析系统进行模态测试。因楼板受环境影响较小,故采用锤击激励更易获得有效数据。在锤击测试中,为更加简便的获取相关采用移动力锤—固定测点的方式进行测试。在楼板上共选取40个点,X向每200 mm布置一个点,共10个点;Y向每200 mm布置一个点,共4个点。选取16与25号点为测点参考点,并在参考点上安装ICP加速度

传感器。通过依次锤击1~40点来激励楼板,进行楼板模态频率的测试,测点布置、力锤与ICP加速度传感器如图3所示。

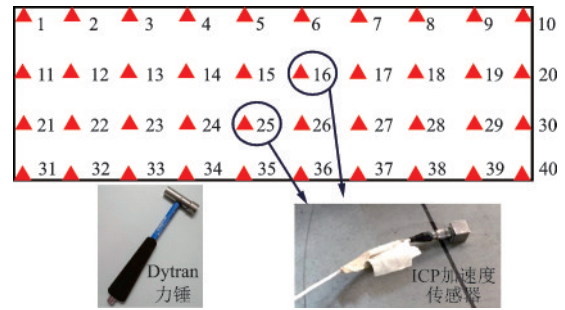


图3 楼板测点布置、力锤与ICP加速度传感器

Fig.3 Arrangement of the slab measuring points, hammer and ICP acceleration sensors

3 模态测试结果

3.1 模态试验采集参数设置

经过预试验,设置数据采样率为1 024 Hz,采样时间为8 s,频率分辨率为0.125 Hz,谱线条数为400。对力信号加力窗,对响应信号加指数窗处理,并且对信号进行了3次平均以消除结构非线性和噪声污染的影响。

3.2 相干性与互易性分析

选取开裂前S4楼板模态测试结果,验证相干性与互易性。相干性反映了试验测试过程中力锤敲击的好坏,对模态分析起着关键作用。图4中表示了几个测点相对于某一参考点的相干函数,从图中可以看出0~400 Hz的相干函数基本都高于0.8,相干性较好,说明传感器测得的响应大都来自于力锤作用,试验结果较为可靠。

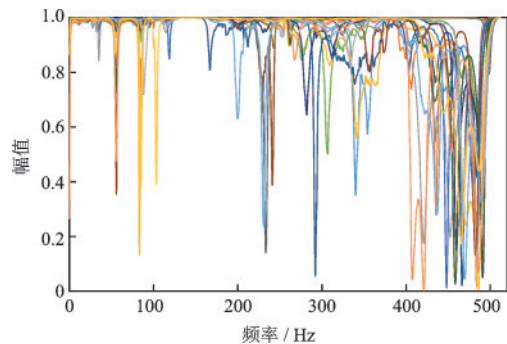


图4 相干函数

Fig.4 Coherence function

为判定系统非线性程度,进行了互易性测试,选取15与26两个点进行试验,分别获得15点相对于26点的传递函数以及26点相对于15点的传递函数如图5所示。从图中可以看出0~520 Hz,两传递函数基本一致,可认为系统具有线性特征。

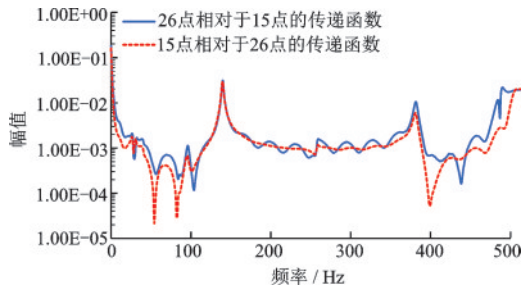


图5 传递函数
Fig.5 Transfer function

3.3 模态参数识别

利用 m+p SmartOffice V4.4 振动模态测试和信号分析软件中 MDOF 模态分析方法进行参数识别, S3 与 S4 楼板开裂前后的稳态图、频响函数以及模态指示函数如图6与图7所示。图中虚线部分表

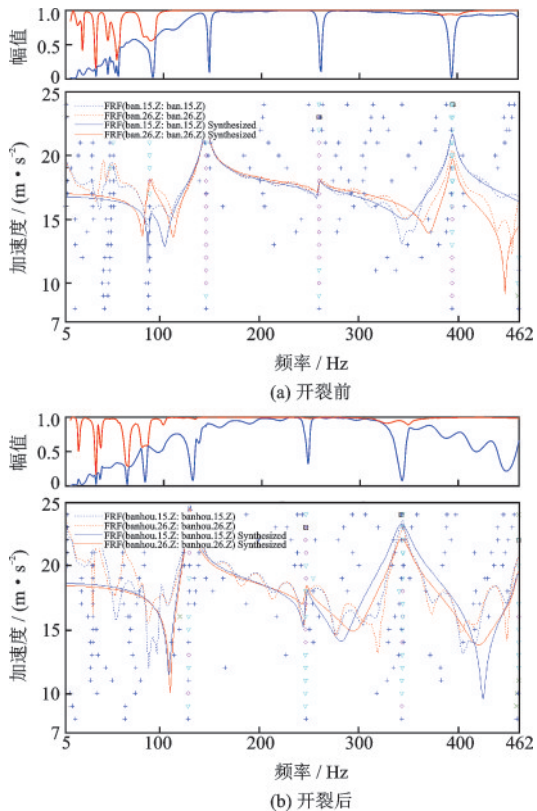


图6 S3稳态、频响函数和模态指示函数
Fig.6 S3 steady state, frequency response function, and modal indication function

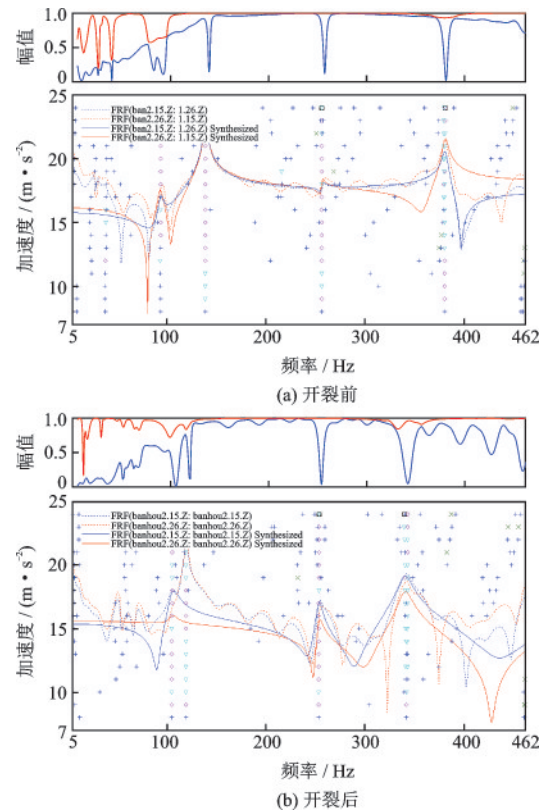


图7 S4稳态、频响函数和模态指示函数

Fig.7 S4 steady state, frequency response function, and modal indication function

示实测所有测点的频响函数,实线表示根据识别的固有频率点拟合得出的频响函数,可以看出,实测频响函数和拟合频响函数的趋势比较一致,误差较小。

通过多参考时域法进行模态参数的识别,识别出了S3与S4开裂前后竖向前3阶频率如图8所示。因各工况前3阶模态振型图相同,仅选取S4开裂前楼板前3阶模态振型图如图9所示。从图中可以看出:(1)随着振型阶数增加,楼板频率数值增大,符合楼板频率的规律特征;(2)开裂后的楼板频率低

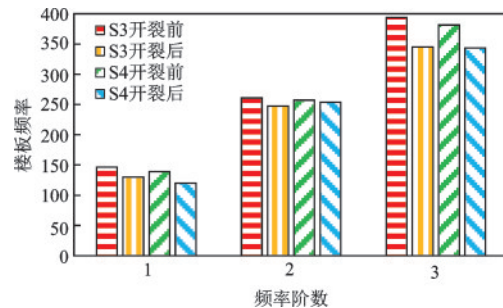


图8 S3与S4开裂前后竖向前3阶频率

Fig.8 Vertical forward 3rd order frequency of S3 and S4 before and after cracking

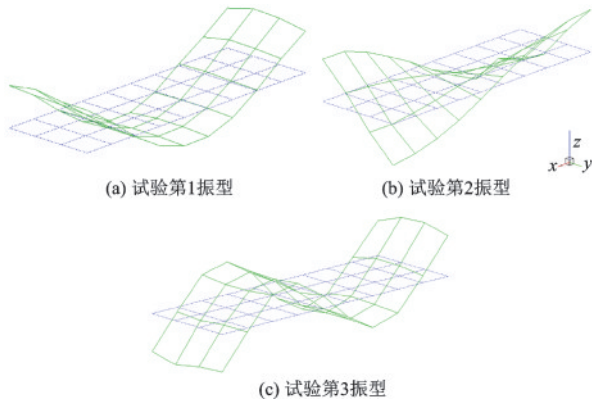


图9 S4楼板开裂前前3阶振型实测

Fig.9 Vertical forward 3rd modes sharp of the S4 slab before cracking

于开裂前的楼板频率,其原因在于开裂后,楼板内产生了裂缝,在楼板自身质量不变的情况下,刚度的下降导致楼板频率的下降;(3)S3楼板自振频率与S4相近,即分层楼板与整体楼板的自振频率差别较小,其原因在于两者混凝土弹性模量相差较小,且分层楼板分层处胶合较好;(4)两块楼板开裂前后前3阶模态振型基本相同,说明混凝土的开裂对于主振型影响较小。

4 数值模拟分析

4.1 有限元模型的选取

由于试验条件有限,且数值模拟较为简便,故提出一种精度较好且可准确反映楼板开裂前后模态变化的精细化数值模拟方法。采用通用有限元软件MSC.MARC中实体单元对楼板进行精细化数值模拟。具体而言:(1)混凝土楼板采用7号实体单元,并采用弥散开裂的混凝土本构模型;(2)钢筋采用9号二维桁架单元,并采取Esmaily-Xiao的钢筋本构模型,使用软件中insert命令,将钢筋嵌入混凝土中实现固定;(3)模型底部支承段采用弹性实体模型模拟,并在底部的一端限制6个自由度的位移,另一端限制5个自由度的位移,以实现板的简支边界条件;(4)针对S1与S3的分层式楼板,采用基于无穿透接触约束方法中的罚函数法,通过施加接触约束来实现两个单位的连接。具体而言,在MSC.MARC中通过施加非线性弹簧来模拟分层处。此方法描述精度较高,在数值计算中较容易实施,且适用于模态计算。构件各部分及其相应单元如图10所示。

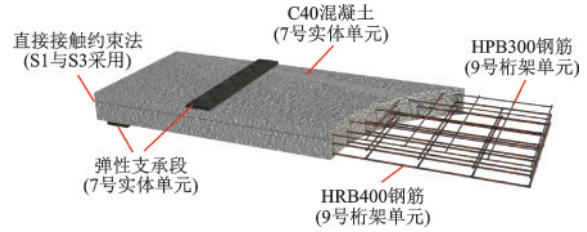


图10 构件模型示意

Fig.10 Drawing of the component model

4.2 试验结果对比

采用上述数值模拟方法,对试验板S1与S2进行建模与有限元分析,计算得到楼板荷载—位移曲线,并与试验曲线进行对比,如图11所示。从图中可以看出,分层楼板与整体楼板的有限元结果与试验结果吻合良好,说明该精细化数值模拟方法可较为准确地反映楼板的受力特性。

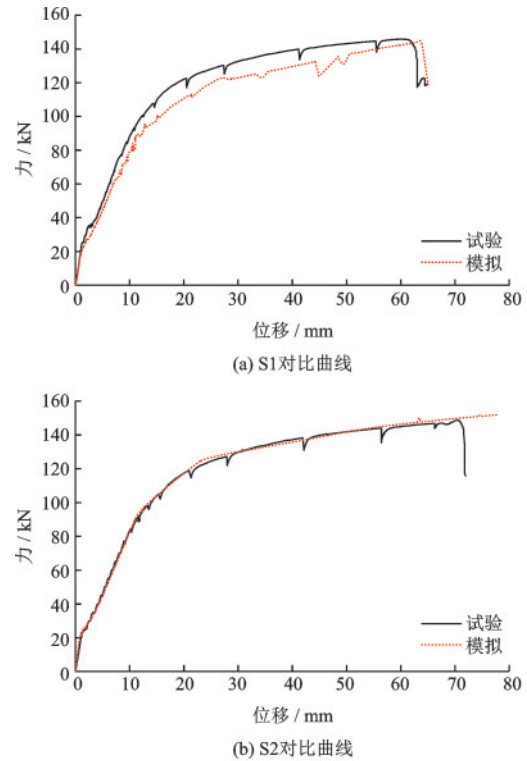


图11 楼板试验与数值模拟的荷载—位移曲线对比

Fig.11 Comparison of load-displacement curves between slab experiment and numerical simulation

建立S3与S4有限元模型,采用Lanczos法计算楼板前20阶模态,之后对楼板进行40 kN等幅加载试验,在此之后再计算其前20阶模态,开裂前后与试验相匹配的3阶模态见表1,由于S3与S4开裂前后楼板前三阶模态形态相同,故选取S4开裂前楼板

前三阶模态如图 12 所示,云图表示为构件竖直位移。从表 1 与图 12 中看出:(1)楼板有限元模态计算结果与试验结果较为接近,前三阶模态形态基本相似,整体楼板第一阶模态结果最大误差不超过 1%,但值得注意的是分层楼板的有限元结果与试验结果相差略大,约为 18%,其主要原因在于楼板

表 1 开裂前后有限元模态与试验的对比

Table 1 Comparison of finite element modes and tests before and after cracking

工况		第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	
S3	开裂前	试验	146.6	261.1	394.2
		模拟	121.4	285.0	330.4
	开裂后	试验	130.1	247.4	344.8
		模拟	107.5	250.5	290.1
S4	开裂前	试验	139.4	257.2	381.6
		模拟	138.2	329.9	377.6
	开裂后	试验	119.6	254.0	343.8
		模拟	117.7	259.1	290.0

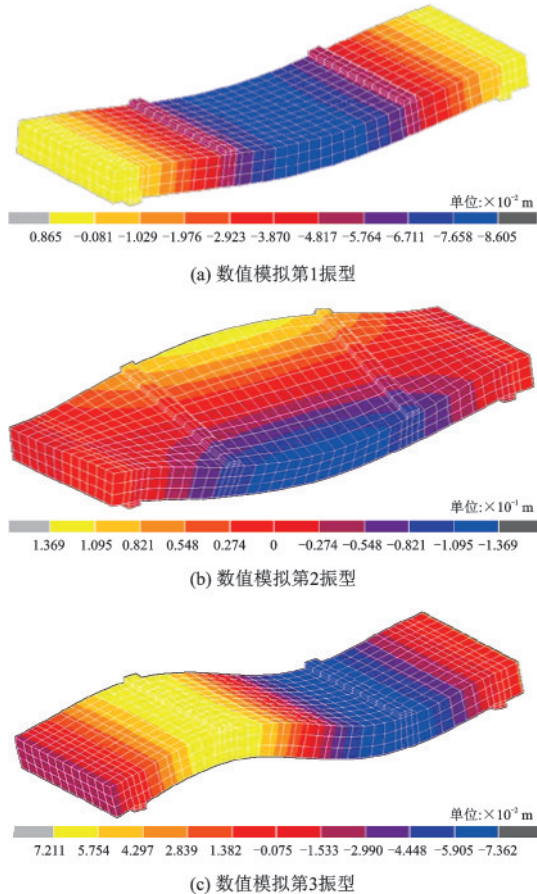


图 12 S4 楼板开裂前前三阶振型数值模拟

Fig.12 Numerical simulation of the first 3 modes of the S4 slab before cracking

混凝土本构与材料试验条件所产生的误差,同时针对楼板分层处的胶合模拟也不能做到准确模拟。(2)在数值模拟中分层楼板分层处的弱化作用,会使频率小于整体楼板频率,这是符合理论的。(3)开裂后楼板频率下降,而该数值模拟方法可较为准确地模拟这一变化。(4)通过精细化数值模拟方法,可较为准确地计算不同荷载作用下楼板模态的变化。

5 楼板损伤评价方法

5.1 基于结构刚度的损伤评价方法

A. Ghobarah 等^[10]提出了基于两次 pushover 分析得到刚度比来定义的损伤指数进行地震损伤评价,其相应结构破坏评价标准见表 2,损伤评价表达式为^[10]:

$$D_k = 1 - \left(\frac{K_{\text{final}}}{K_{\text{initial}}} \right) \quad (1)$$

式中, D_k 为结构损伤参数, K_{initial} 与 K_{final} 分别为构件开裂前后的刚度值。

表 2 结构破坏评价指标

Table 2 Structural damage evaluation indicators

损伤参数 D_k	损伤程度
>0.8	局部或整体失效
$0.3 \sim 0.8$	严重破坏(不可修复)
$0.15 \sim 0.3$	中等破坏(可修复)
$0 \sim 0.15$	轻微破坏

根据图 11 所示的 S1 与 S2 荷载一位移关系,可计算出 S1 与 S2 在不同荷载作用下的刚度及其相应的损伤程度见表 3,表中荷载为 0 kN 表示结构未受到荷载作用的原始状态,对应的刚度为初始刚度 K_{initial} 。

从表 3 中可以看出:(1)随着荷载的增加,开裂后刚度变小,相应的损伤程度增大;(2)S2 楼板在相同荷载作用下的损伤程度比 S1 楼板大,其原因在于楼板混凝土浇筑质量与混凝土强度的差异。

5.2 基于频率的结构损伤指标

基于刚度变化的结构损伤指标 D_k 是通过计算结构刚度的退化来获取的,然而基于楼板荷载一位移曲线获取切线斜率确定刚度的方法,工作量较大且切线的识别易产生误差;同时为识别在使用建筑的楼板损伤,采用加载后计算楼板反力与位移或刚

表3 基于刚度变化计算出的楼板损伤程度

Table 3 The degree of slab damage calculated based on the stiffness change

荷载/ kN	S1		S2	
	刚度/ (kN·m ⁻¹)	损伤程度/ D _k	刚度/ (kN·m ⁻¹)	损伤程度/ D _k
0	9.839	0	9.105	0
20	9.556	0.029	8.827	0.031
40	8.467	0.139	7.749	0.149
60	7.422	0.246	6.753	0.258
80	6.272	0.362	5.559	0.389
100	4.751	0.517	3.719	0.592
120	2.792	0.716	1.080	0.881

度的方法是不可行的。这就需要采用一种新的方法进行楼板损伤的评价。

叶献国等^[6]提出一种以结构基本自振周期为参数的损伤模型,利用地震前和地震后结构周期变化来计算结构损伤程度。损伤指数定义为:

$$D = 1 - \left(\frac{T_{\text{initial}}}{T_{\text{final}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中, T_{initial} 为结构初始自振周期, T_{final} 为结构地震后自振周期。

施卫星等^[7]在此基础上提出基于频率的各阶损伤指数:

$$D_i = 1 - \left(\frac{f_{\text{final}}^i}{f_{\text{initial}}^i} \right)^2 \quad (3)$$

式中, f_{initial}^i 为结构初始第 i 阶频率, f_{final}^i 为结构地震后第 i 阶频率。

以上两类损伤评价方法均是依据整体结构损伤情况提出的。采用式(2)或式(3)计算出楼板 S3 与 S4 开裂后的损伤数值分别为 0.212 与 0.264, 和表

4 采用刚度计算出的损伤数值相差较大,说明基于整体结构的损伤评价方法无法准确预测受弯楼板的损伤程度。

5.3 基于受弯楼板频率的损伤评价方法

为探究基于受弯楼板频率的损伤指标,采用上文中可靠的精细化数值模拟方法建立分层楼板与整体楼板,并对楼板进行不同荷载数值的加载,测得楼板开裂前后的频率数值见表 4。从表中可以看出:(1)随着荷载的增加,楼板加载后频率有所降低;(2)分层楼板频率比相应整体楼板频率小,与理论情况相符;(3)在荷载数值为 100 kN 时,开裂后楼板频率产生突变,其原因是荷载施加过大后,楼板裂缝过大且钢筋屈服,软件无法准确识别楼板模态。

从表 4 中可以计算出 $1 - f_{\text{initial}}/f_{\text{final}}$ 与基于刚度的损伤系数有相关性,在不同荷载下,提取每阶 $1 - f_{\text{initial}}/f_{\text{final}}$ 平均值,并与基于刚度的损伤系数对比如图 13 所示。其中,图例中 D_{k1} 代表基于刚度的 S1 板损伤系数, D_{k2} 代表基于刚度的 S2 板损伤系数, D_{f1} 代表基于频率的 S1 板损伤系数, D_{f2} 代表基于频率的 S2 板损伤系数。从图中可以看出,在楼板承受小于等于 80 kN 荷载时(约为极限承载力的 60%),基于受弯楼板频率的损伤系数与基于刚度的损伤系数吻合良好,故提出基于受弯楼板频率的损伤系数公式如式(4)所示。值得注意的是,为提高楼板频率计算的精确性,采取计算前 3 阶开裂后与开裂前频率之比取平均值的方法获取结构损伤指标。同时由于楼板在大于极限承载力 60% 之后进入大变形阶段,楼板模态反映结构内部变化的能力较差,故该方法可较为准确地预测受弯楼板的开裂损伤程度,不适用于大变形破坏阶段的楼板。

表4 不同荷载作用下楼板频率数值

Table 4 Slab frequency values under different loads

荷载/kN		单位:Hz						
楼板类型	阶数	0	20	40	60	80	100	120
分层楼板	第1阶	121.4	119.7	107.5	88.9	83.4	91.4	78.7
	第2阶	285.0	284.0	250.5	224.3	201.4	193.2	191.1
	第3阶	330.4	327.2	290.1	238.1	218.6	248.7	215.9
整体楼板	第1阶	138.2	138.2	117.7	101.5	81.9	103.1	100.5
	第2阶	329.9	328.9	259.1	253.1	205.2	234.1	212.0
	第3阶	377.6	377.3	330.0	286.3	239.5	287.0	292.0

$$D_f^i = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n f_{initial}^i}{\sum_{i=0}^n f_{final}^i} \quad (4)$$

式中, n 表示模态阶数, 为减小楼板频率的误差, 建议 n 取 3; $f_{initial}^i$ 表示开裂前的第 i 阶模态频率; f_{final}^i 表示开裂后的第 i 阶模态频率。

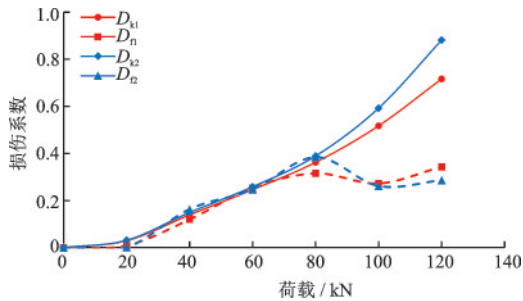


图 13 基于公式 $1-f_{initial}/f_{final}$ 与基于刚度的损伤系数对比
Fig.13 Comparison of damage coefficients based on formula $1-f_{initial}/f_{final}$ and stiffness

6 结 论

本文开展了两种楼板的拟静力抗弯试验与楼板开裂前后模态测试研究, 并采用了可靠的数值模拟方法, 提出了基于频率变化的楼板损伤评价方法。得到以下结论:

(1) 开裂前后, 分层楼板与整体楼板自振频率相近, 而基于 MSC.MARC 的精细化数值模拟方法可较为准确地评价分层与整体楼板抗弯性能与开裂前后的模态变化。

(2) 基于整体结构频率变化的损伤评价方法无法准确评价受弯构件的损伤状态。

(3) 基于可靠的数值模拟方法, 提出了适用于受弯构件频率变化的损伤评价方法, 为相应构件的损伤评价提供借鉴。

参考文献:

[1] 易伟建, 徐丽. 钢筋混凝土板损伤诊断的动测法研究 [J]. 振动与冲击, 2003, 22(2): 23-25.
Yi W J, Xu L. Study on damage diagnosis of reinforced concrete floor using vibration method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(2): 23-25. (in Chinese)

[2] Araujo Dos Santos J V, Katunin A, Lopes H. Vibration-based damage identification using wavelet transform and a numerical model of shearography [J]. International

Journal of Structural Stability and Dynamics, 2019, 19(4): 1950038.

[3] Jamadin A, Ibrahim Z, Jumaat M Z, et al. Effect of high-cyclic loads on dynamic response of reinforced concrete slabs [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 19(3): 1950038.

[4] Patrik F, Peter U. Detecting damage events in concrete using diffuse ultrasound structural health monitoring during strong environmental variations [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(2): 410-419.

[5] 夏樟华, 李嘉维, 夏坚, 等. 基于频率退化的砌体房屋结构抗震性能评价 [J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 92-97.
Xia Zh H, Li J W, Xia J, et al. Seismic performance assessment of brick masonry structures with precast slabs based on deterioration of frequency [J]. Industrial building, 2015, 45(4): 92-97. (in Chinese)

[6] 叶献国, 种迅, 李康宁, 等. Pushover 方法与循环往复加载分析的研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2001, 24(6): 1019-1024.
Ye X G, Zhong X, Li K N, et al. Study of pushover analysis procedure and reversal load pattern [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2001, 24(6): 1019-1024. (in Chinese)

[7] 施卫星, 汪洋, 刘成清. 基于频率测量的高层建筑地震作用损伤分析 [J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4): 389-394.
Shi W X, Wang Y, Liu Ch Q. Damage analysis of high-rise building under seismic load based on frequency measurement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4): 389-394. (in Chinese)

[8] 郭惠勇, 李正良. 基于模态应变能与频率信息修正的结构多损伤识别研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 719-725.
Guo H Y, Li Zh L. An improved information method based on modal strain energy and frequency for structural multiple damage identification [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(5): 719-725. (in Chinese)

[9] 张国伟, 高玉春, 王胜, 等. 基于频率变化的钢管混凝土柱损伤评价 [J]. 结构工程师, 2017(6): 116-122.
Zhang G W, Gao Y Ch, Wang Sh, et al. Damage assessment of concrete-filled steel tube column based on deterioration of frequency [J]. Structural Engineers, 2017(6): 116-122. (in Chinese)

[10] Ghobarah A, Abou-elfath H, Ashraf Biddah. Response-based damage assessment of structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 79-104.

[11] 陈彦江, 钱亚运, 李洪泉, 等. 基于阻尼特性的 RC 简支

- 梁桥损伤识别分析及试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 46(13):208-214.
- Chen Y J, Qian Y Y, Li H Q, et al. Damage detection and tests for a RC simply supported girder bridge based on its damping characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 46(13):208-214. (in Chinese)
- [12] Abdollah B, Mohamad A, Osman E O, et al. Identification of flexural rigidity in bridges with limited structural information[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(8):04018126.
- [13] 施洲, 赵人达. 桥梁结构损伤对其固有振动特性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5):117-123.
Shi Zh, Zhao R D. Effects of bridge damage on its free-vibration characteristics[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(5):117-123. (in Chinese)
- [14] 郭国会, 易伟建. 基于频率进行简支梁损伤评估的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2001, 23(2):17-21.
Guo G H, Yi W J. A Numerical study on the damage assessment of a simply-supported beam on natural frequencies[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(2):17-21. (in Chinese)
- [15] Zhou X Q, Hou R R, Wu Y H. Structural damage detection based on iteratively reweighted l1 regularization algorithm [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(6):1479-1487.
- [16] Muhammad U H, Zainah I, Mohammed J, et al. Simulation-based non-linear vibration model for damage detection in RC beams[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019.
- [17] Norihiko O, Hitoshi Y, Takahiro N, et al. Damage evaluation of an internal concrete in steel-plate bonded slabs with anchor-bolts[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177:247-251.
- [18] 谢峻, 韩大建. 一种改进的基于频率测量的结构损伤识别方法[J]. 工程力学, 2004, 21(1):21-25.
- Xie J, Han D J. An improved method for structure damage detection based on frequency measurement [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1):21-25. (in Chinese)
- [19] 韩建平, 董小军, 周伟. 基于振动台试验的RC框架模型修正及模拟损伤识别[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5):87-92.
Han J P, Dong X J, Zhou W. Model updating for RC frame based on shaking table test and identification of simulated damage [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(5):87-92. (in Chinese)
- [20] Clotaire M, Amin K, Pierino L. Evaluation of the seismic retrofitting of an unreinforced masonry building using numerical modeling and ambient vibration measurements [J]. Engineering Structures, 2018, 158:124-135.
- [21] 艾军, 单岗, 王侠伟, 等. 预应力CFRP布加固损伤RC梁的动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3):119-123.
Ai J, Shan G, Wang X W, et al. Study on dynamic characteristics of damaged RC beam strengthened by prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3):119-123. (in Chinese)
- [22] 王利恒, 周锡元, 阎维明. 用锤击试验反应最大值监测钢筋混凝土简支桥梁结构损伤程度的试验研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1):90-94.
Wang L H, Zhou X Y, Yan W M. Experimental studies on monitoring reinforced concrete beam's damage degree using responses' maximums in impact excitation vibration tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1):90-94. (in Chinese)
- [23] Pu Q H, Hong Y, Chen L J, et al. Model updating - based damage detection of a concrete beam utilizing experimental damped frequency response functions [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(4):935-947.

(本文责编:周小潭)