

引用本文:雷拓,刘宜,李坤,等.剪力墙结构置换加固应力重分布[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):132-141.

LEI Tuo, LIU Yi, LI Kun, et al. Stress Redistribution of Shear Wall Structure with Replacement Reinforcement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 132-141.

DOI:10.19815/j.jace.2020.05026

## 剪力墙结构置换加固应力重分布

雷拓<sup>1</sup>, 刘宜<sup>1</sup>, 李坤<sup>1</sup>, 蒋冬启<sup>2</sup>, 董军锋<sup>3</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 南京理工大学 土木工程系, 江苏 南京 210094;  
3. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:**为深入揭示无支撑置换混凝土加固过程中剪力墙的受力变化规律,对某剪力墙住宅结构无支撑置换加固施工进行全过程监测。基于 ABAQUS 有限元分析软件,采用生死单元、等效升温以及添加场变量的方法实现剪力墙施工全过程模拟。结合施工监测数据及有限元模拟结果分析了置换剪力墙及与置换剪力墙相连的梁、楼板受力变化过程;最后给出了考虑应力重分布后,无支撑分段置换墙体正截面受压承载力计算方法。结果表明:有限元模拟方法能有效模拟混凝土无支撑置换加固施工过程;由于剪力墙分段拆除和置换,墙体出现了应力重分布现象,且应力重分布程度与墙体分段施工顺序有关;应力重分布会引起墙体洞口处出现应力集中,但应力集中对加固效果的影响较小,同时还会影响与置换剪力墙相邻的连梁、楼板结构的受力,导致该处应力增加;建议对剪力墙结构进行无支撑置换加固时,有必要通过分段优化设计和受压承载力复核控制应力重分布的影响。

**关键词:**剪力墙;置换加固;施工监测;生死单元法;应力重分布;受压承载力

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0132-10

## Stress Redistribution of Shear Wall Structure with Replacement Reinforcement

LEI Tuo<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, LI Kun<sup>1</sup>, JIANG Dong-qi<sup>2</sup>, DONG Jun-feng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;  
3. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to reveal the stress variation law of shear wall during the reinforcement process of unsupported replacement concrete, the whole process monitoring of a shear wall residential building without support replacement reinforcement was carried out. Based on ABAQUS finite element analysis software, the whole process of shear wall construction was simulated by using life and death element, equivalent temperature rise and field variables. Combined with construction monitoring data and finite element simulation results, the stress change process of replacement shear wall, beam and floor connected with replacement shear wall was analyzed. Finally, the calculation method of the normal section bearing capacity of the unsupported segmental replacement wall was given after considering the stress redistribution. The results

收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808292); 江苏省自然科学基金项目(BK20180487)

作者简介: 雷拓(1973-), 男, 陕西岐山人, 副教授, 工学博士, E-mail: Leituo616@163.com.

show that the finite element simulation method can effectively simulate the construction process of concrete without support replacement reinforcement. Due to the sectional demolition and replacement of shear wall, stress redistribution occurs in the wall, and the degree of stress redistribution is related to the construction sequence of wall segments. Stress redistribution will cause stress concentration at the wall opening, but the stress concentration has little effect on the reinforcement effect. At the same time, it will also affect the stress of coupling beam and floor structure adjacent to the replacement shear wall, resulting in the increase of stress. It is suggested that it is necessary to control the influence of stress redistribution through sectional optimization design and compression bearing capacity recheck when strengthening shear wall structure without support.

**Key words:** shear wall; replacement reinforcement; construction monitoring; life and death element method; stress redistribution; compression bearing capacity

## 0 引 言

随着中国城镇化进程的不断推进,越来越多的既有建筑结构因设计、施工及结构老龄化等问题需进行加固改造。混凝土置换加固法是针对土木工程结构中混凝土材料强度不足而提出的一种新兴的加固方法<sup>[1]</sup>。通过采用较高强度混凝土置换原结构中强度较低或存在严重质量缺陷的混凝土,在不改变原有结构构件截面尺寸的情况下,可快速提升结构功能并达到理想的加固效果。

目前,混凝土置换加固已在不少剪力墙工程中得到应用<sup>[2-7]</sup>。已有研究详细阐述了加支撑方式的剪力墙置换加固设计、施工流程、施工工艺中的难点问题以及施工监测等主要内容,并主要给出了针对加支撑置换加固的建议施工方案<sup>[2-5]</sup>。针对无支撑置换加固方式,虽已有工程应用案例,但现有研究大多停留在施工技术分析的层面<sup>[6-7]</sup>,尚未对无支撑置换加固过程结构的受力状态进行系统分析。既有建筑的加固改造将会引起结构的应力重分布现象。对于无支撑置换加固而言,置换剪力墙的卸载(拆除)和再加载(重新浇筑)过程使得应力重分布问题更为突出,加之考虑到施工过程中结构时变及材料时变效应的影响,导致结构的受力状态变化过程更加复杂。另外,对于无支撑置换加固存在的一些关键问题,如置换加固设计、剪力墙的合理分段数、置换材料的选取以及置换加固效果等问题也缺乏足够的认识。

基于此,本文依托某剪力墙住宅结构无支撑置换加固工程,结合现场实测应变数据和有限元施工模拟,对置换加固过程中结构的受力过程进行深入分析,着重讨论剪力墙无支撑分段置换所造成的应

力分布规律及其影响,以期为剪力墙结构无支撑置换加固设计和施工过程提供参考依据。

## 1 工程概况与加固方案

洛阳某 34 层混凝土剪力墙住宅楼工程竣工验收时发现 18,19 层部分剪力墙混凝土实际强度仅为 C15,未达到设计的 C30 强度要求;此外,按实测强度对结构进行复核,结果表明,部分剪力墙的轴压比及与之相邻梁的裂缝宽度也不能满足《混凝土结构设计规范》限值要求。为此,采用无支撑混凝土置换方法对不合格剪力墙进行加固,即需置换剪力墙在拆除及后续浇筑过程中不进行支撑卸荷。置换材料采用强度等级为 C35 的微膨胀水泥基灌浆料<sup>[8-9]</sup>(以下简称灌浆料)。

依据《混凝土结构加固设计规范》并结合 PK-PM 初步计算,设计了分段置换的加固方案。加固楼层的平面布置如图 1 所示。

该方案将 6 片不合格剪力墙(图 1 中 1~6 号剪力墙)拆分成 36 个墙段依次进行置换,由于采用无支撑方式施工,严格控制每次拆除的墙段长度以保证结构施工期安全。墙段编号及对应的拆除长度如图 2 所示,各墙段拆除、浇筑时间及拆除顺序如表 1 所示。

为研究剪力墙置换加固各阶段的受力情况,布置了应变监测系统<sup>[10]</sup>。共布置表面式应变传感器 144 个,监测置换墙段及与置换墙体相连的梁、楼板在施工过程中的应变变化;梁上的传感器布置在所有与置换剪力墙相连的梁跨中及靠近置换剪力墙梁的一侧跨中位置,如图 3(a)所示;楼板传感器布置在距离置换墙体约 1 m 左右位置,如图 3(b)所示;置换墙段上的应变传感器布置在每个需要拆除的墙

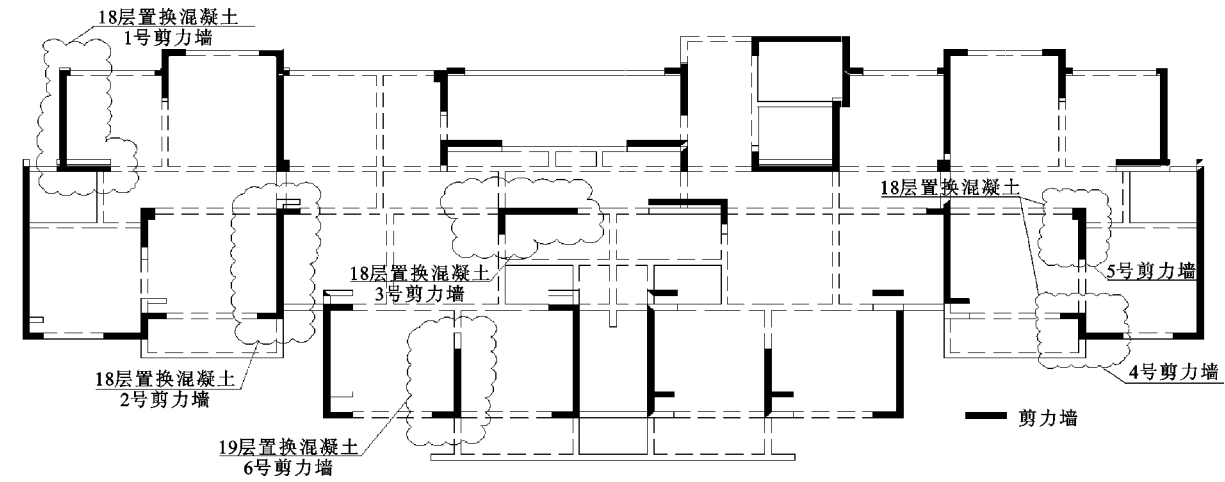


图 1 结构平面布置及需置换的剪力墙

Fig. 1 Structure Floor Plan and Shear Walls to Be Replaced

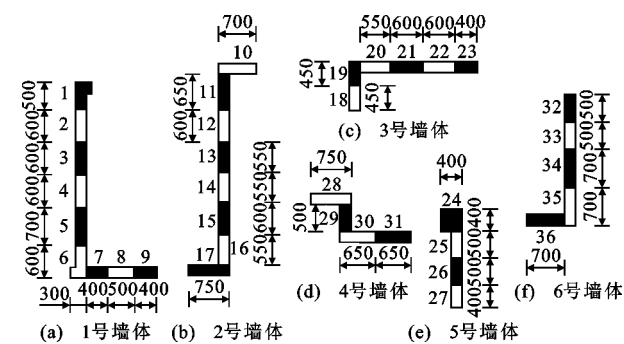


图 2 墙段编号及拆除长度(单位:mm)  
Fig. 2 Wall Section Number and Demolition Length (Unit:mm)

表 1 墙段拆除与浇筑时间

Tab. 1 Demolition and Pouring Time of Wall Sections

墙段编号	拆除时间	浇筑时间	墙段编号	拆除时间	浇筑时间
13	4月19日	4月21日	29,1	5月6日	5月7日
25	4月19日	4月21日	14,33	5月7日	5月8日
34	4月20日	4月22日	21	5月8日	5月9日
22,5	4月22日	4月24日	24	5月8日	5月10日
30	4月23日	4月24日	9,35	5月10日	5月11日
11,15	4月24日	4月26日	10,31	5月12日	5月13日
27,32	4月26日	4月27日	4	5月12日	5月14日
20	4月27日	4月27日	18	5月13日	5月15日
8	4月27日	4月29日	16	5月14日	5月16日
28	4月28日	4月30日	7	5月15日	5月17日
17,3	4月30日	5月2日	2	5月15日	5月18日
36,12	5月2日	5月4日	19	5月18日	5月19日
23,26	5月3日	5月5日	6	5月19日	5月20日

段中间位置,如图 3(c)所示。另外,还布置埋入式应变传感器 36 个,埋入式传感器绑扎在拆除不合格混凝土裸露出的钢筋表面,用于监测由灌浆料浇筑而成的墙段受力情况,灌浆料浇筑与加固后墙段形

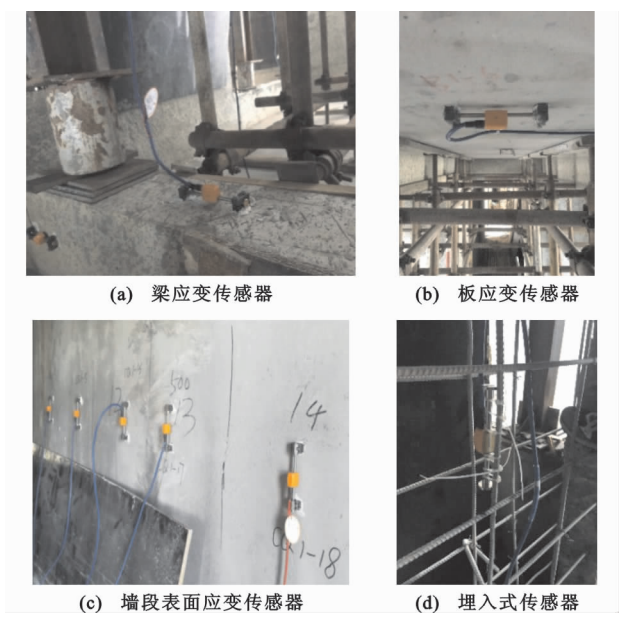


图 3 传感器布置  
Fig. 3 Sensor Layout

成整体,如图 3(d)所示。所有传感器数据均通过综合采集模块进行自动采集。

## 2 有限元模型建立

为了深入了解置换墙体的应力变化过程及其影响,采用有限元软件 ABAQUS 对该剪力墙结构无支撑置换加固的施工全过程进行了模拟。已有研究表明,结构在置换过程中会出现应力重分布过程并主要发生在置换层及相邻的上下层之间<sup>[11-15]</sup>。因此本文仅建立包括 18,19 层在内的共 5 层结构模型以节约计算成本,有限元模型如图 4 所示,其中 18 层位于中间层。混凝土剪力墙、连梁和楼板均采用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元并嵌入

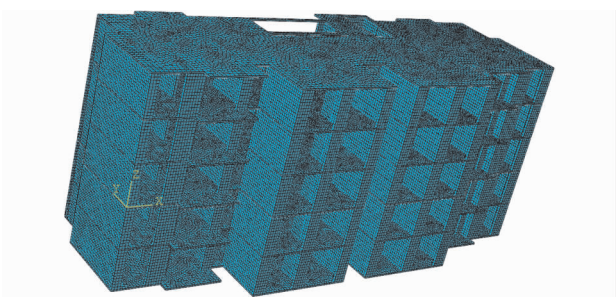


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model

混凝土中,实体单元的网格尺寸为 150 mm×150 mm,桁架单元的网格尺寸为 50 mm×50 mm,忽略钢筋与混凝土两者之间的黏结滑移。由于该工程处于竣工验收阶段,荷载仅需考虑自重荷载和施工层的施工荷载。

为了模拟无支撑置换加固过程可能造成的结构损坏,强度达标的 C30 混凝土材料本构采用 ABAQUS 提供的塑性损伤模型<sup>[16]</sup>,基本参数取值见表 2,其中,Ψ 为膨胀角,ϵ为流动势偏移值,α<sub>f</sub> 为双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比,K<sub>c</sub> 为拉伸子午面和压缩子午面的第二应力不变量之比,μ 为黏性系数。

表 2 基本参数  
Tab. 2 Basic Parameters

弹性模量/MPa	Ψ/(°)	ϵ	α <sub>f</sub>	K <sub>c</sub>	μ
31 500	30	0.1	0.667	1.116	0.001

由于 ABAQUS 对损伤因子没有详细说明,因此按照《混凝土结构设计规范》中所给的损伤演化参数进行换算得到,换算公式为

$$d=1-\sqrt{1-D}$$
 (1)

式中:D 为损伤演化参数,按规范提供的计算方法和公式进行计算;d 为 ABAQUS 中的损伤因子。

由于不合格的混凝土在置换施工中会逐渐拆除,对计算结果影响较小,因此材料参数按照《混凝土结构设计规范》中 C15 的混凝土强度设计值选取,并在有限元模型中将其设置为弹性材料。

为准确模拟结构置换全过程,如何描述置换墙体灌浆料的强度增长特性是关键问题之一。本文采用根据多组灌浆料试件的试验数据提出的弹性模量及抗压强度计算公式来模拟灌浆料强度增长<sup>[17]</sup>,计算公式见式(2),(3)。

$$f_{cu}=4.5\ln(\frac{n}{28})+f_{gc,28}$$
 (2)

$$E_c=1\times10^5/(1.8+\frac{55.6}{f_{cu}})$$
 (3)

式中:E<sub>c</sub> 为灌浆料弹性模量;f<sub>cu</sub> 和 f<sub>gc,28</sub> 分别为标准立方体抗压强度和龄期为 28 d 时灌浆料的立方体抗压强度;n 为龄期。

由于在置换阶段对重新浇筑的墙段进行了充分养护,因此认为灌浆料在置换施工阶段处于微膨胀状态,不考虑灌浆料收缩的影响。为在有限元模型中准确描述灌浆料的膨胀特性,本文采用等效升温法实现了灌浆料的微膨胀效应<sup>[18]</sup>,即将浇筑后的灌浆料膨胀过程考虑成结构的等效升温,通过在灌浆料本构关系中赋予材料的膨胀系数,然后对该灌浆料施加温度场,使得灌浆料由于温度的升高而产生等效膨胀,等效升温法中施加的温度 ΔT 按式(4)确定。

$$\Delta T=\epsilon_{sh}/\alpha$$
 (4)

式中:ε<sub>sh</sub> 为总膨胀应变;α 为灌浆料的线膨胀系数。

由于灌浆料强度会随龄期改变,为了实现灌浆料强度的时变效应,首先在材料属性模块设置材料的场属性,场属性中的弹性模量取值根据分析步对应的时间按式(3)确定。然后对材料属性需要改变的墙段单元建立集合,通过在 ABAQUS 的 inp 文件中修改关键字的方式对重新浇筑灌浆料的剪力墙段集合进行赋值,使得材料属性得到修改,实现施工过程中灌浆料的时变特性。剪力墙中 HPB400 钢筋的弹性模量及泊松比按《混凝土结构设计规范》中规定的设计值选取。

最后,利用 ABAQUS 的“生死单元”来“钝化”或“激活”相关元素来实现剪力墙墙段的拆除和重新浇筑过程。采用生死单元法进行非线性分析时,施工步骤的划分如表 3 所示。

表 3 有限元模拟施工分析步  
Tab. 3 Division of Construction Steps of Finite Element Simulation

施工分析步	施工时间	施工设置
Step1	第 1 天	“钝化”需拆除墙段 1
Step2	第 2 天	重新激活墙段 1,“钝化”墙段 2
Step3	第 3 天	重新激活墙段 2,“钝化”墙段 3

注:依次进行直至全部墙段拆除置换完成。

3 应力重分布现象及其影响

3.1 墙段监测数据与模拟结果对比

因置换加固墙段较多,且不同墙段的应力重分布现象具有一定相似性,限于篇幅,本文选取具有代表性的 2 号、3 号剪力墙进行详细分析。按照墙段的拆除顺序,2 号和 3 号剪力墙各墙段置换加固完



成后实测应变与有限元模拟结果对比如表 4 所示。应变实测值取墙段中间位置的平均竖向应变,实测应变由埋入式传感器测得。可见,数据相对误差均未超过 15%,表明有限元应变模拟值与实测应变值吻合较好,验证了有限元模型的准确性。

由表 4 可知,置换加固完成后各墙段的应变增长幅度出现显著差异,其特征为先置换的墙段应变

大,后置换的墙段应变变小。如 13,22 号墙段分别是 2 号、3 号剪力墙最先置换的墙段,应变增长分别为  $262\times10^{-6}$  和  $217\times10^{-6}$ ,而最后置换的 16 号、19 号墙段应变增长仅为  $29\times10^{-6}$ ,  $39\times10^{-6}$ ,应变差值较大;16 号和 19 号墙段加固后基本不承受上部荷载作用。由此可知置换加固后墙体受力并不是均匀分布于各墙段上,出现明显的应力重分布。

表 4 实测应变值与有限元数据对比

Tab. 4 Comparison of Measured Strains and Finite Element Data

剪力墙编号	2 号								3 号					
墙段编号	13	11	15	17	12	14	10	16	22	20	23	21	18	19
应变实测值/ $10^{-6}$	262	226	210	165	134	108	41	29	217	244	138	125	143	39
应变模拟值/ $10^{-6}$	238	210	215	143	140	97	44	26	204	228	128	116	134	34
相对误差/%	9.2	7.0	2.4	13.3	4.5	10.2	7.3	10.3	6.0	6.6	7.2	7.2	6.3	12.8

图 5 为 2 号、3 号剪力墙在置换加固全过程中实测应变值与有限元应变模拟值对比。由图 5 可知,伴随施工进度,各墙段应变均出现增长,根据墙段的应变曲线增长规律可分为大幅增长段和平缓增长段。结合表 1 进一步分析表明,各墙段应变的大幅增长过程受到相邻墙段拆除的直接影响,如 15 号墙段有 2 个明显的应变大幅增长段,出现时间分别为该墙段重新浇筑灌浆料后的 10 d 和 18 d,而与其相邻的 14 号、16 号墙段的拆除时间为 15 号墙段加固后的 10 d 和 18 d。同理,对于 22 号墙段也有 2 个较为明显的应力增长段,出现时间为该墙段重新浇筑灌浆料后的 8 d 和 14 d,而与其相邻的 23 号、21 号墙段的拆除时间为 22 号墙段加固后的 8 d 和 14 d。15 号、22 号墙段应变大幅增长时间段的应变

增长幅值分别约占其墙段总应变量的 55.7% 和 62.7%。墙段上应变平缓增长段在灌浆料强度增长而相邻墙段未进行施工时出现。综上可知,先后置换的墙段由于应力重分布导致各墙段出现明显的应力不均匀现象,表现为先浇筑的墙段应力大,后置换的墙段应力小。另外,墙段之间的应力重分布过程受墙段拆除顺序影响较大,墙段置换顺序很大程度上决定该墙段加固后的应力状态。

3.2 未置换墙段受力变化规律

由于墙体进行逐步拆除和置换施工,布置于墙段表面的应变传感器也会逐步拆除,因此选取拆除时间较晚的 2 号、3 号剪力墙 16,19 号墙段应变传感器数据进行分析。图 6 为 16,19 号墙段的实测应变曲线。

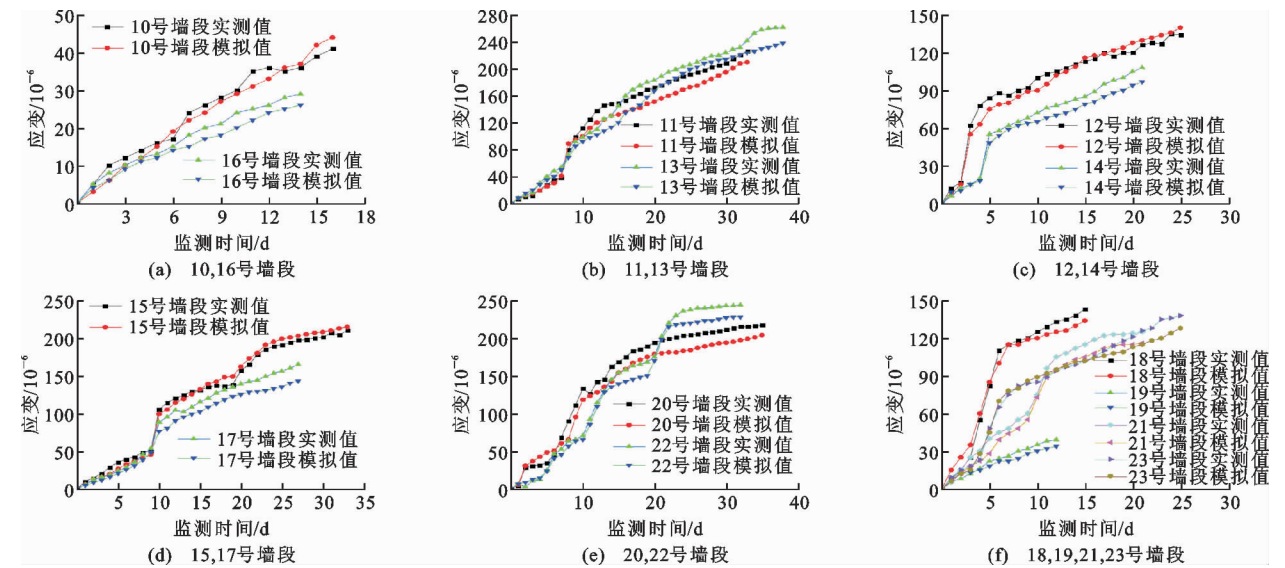


图 5 2 号和 3 号剪力墙实测应变与有限元模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of Measured Strains and Finite Element Simulation Results of Shear Walls No. 2 and No. 3

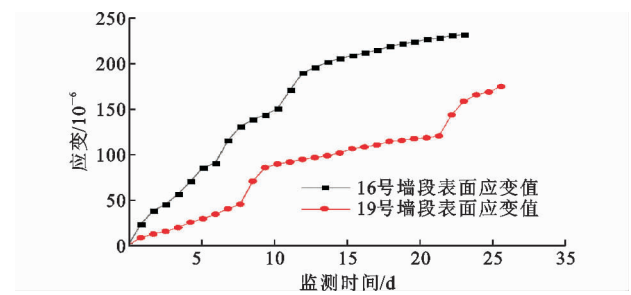


图 6 16,19 号墙段传感器数据

Fig. 6 Sensor Data of Wall Sections No. 16 and No. 19

由图 6 可知,这 2 个墙段在还未进行拆除前应变均持续增长,与此同时,传感器数据曲线上也有大幅增长阶段。结合表 1 可知,该增长阶段同样出现在与之相邻墙段进行拆除施工期间,说明新浇筑的墙段与还未进行拆除的墙段由于荷载的转移在置换施工期间持续发生应力重分布现象,表现为墙段应变的持续增长。在相邻墙段未进行置换施工期间,16,19 号墙段应变也有所增长,但应变增长较小,说明拆除同一剪力墙其余部位墙段后也有部分荷载转移到该墙段上。值得注意的是,该墙段应变的增长会和墙段已承受的上部荷载作用下产生的应变相叠加,因此当应变增长过大时,可能导致墙段在还未置换前发生破坏。

### 3.3 与置换墙段相连的梁、楼板应变变化规律

结合监测数据分析应力重分布对与置换剪力墙相连的楼板、梁的影响。2 号、3 号剪力墙的梁、板传感器布置示意如图 7 所示(L 表示梁传感器,B 表示板传感器)。由于梁板传感器布置较多,图 8 仅给出 2 号、3 号剪力墙部分梁板传感器监测数据,2 号、3 号剪力墙全部梁板传感器最终应变监测值汇总见表 5。

由图 8 可知,梁板应变在置换加固期间出现明显的阶段性增长与下降趋势。结合表 1 可知,当进行墙段拆除施工时,荷载向梁板转移,应变增长,随

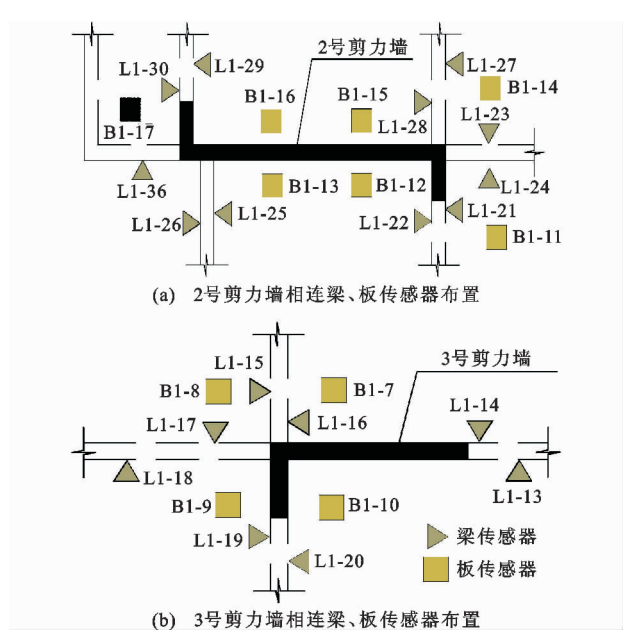


图 7 2 号、3 号剪力墙相连梁、板传感器布置

Fig. 7 Layout of Beams and Slabs Sensors Related to No. 2 and No. 3 Shear Walls

着墙段浇筑后灌浆料的强度增长,荷载又开始向浇筑后的墙段转移,传感器应变下降。同一墙体上各梁、楼板的应变变化规律基本一致,表明监测方案的正确性。

由表 5 可知,大部分梁板应变在加固完成后均有所增长,说明荷载并未完全转移到加固后的剪力墙上,而是存在累积效应,梁和楼板上仅两处出现负应变值,表现为受拉,且大部分梁上的应变增长大于楼板,说明置换加固对梁的影响大于楼板。

综上可知,当剪力墙进行置换加固时,与之相连的梁、楼板也会出现应力重分布,整体上应变呈增长趋势,但增长量较为有限,大部分构件应变增长在  $100 \times 10^{-6}$  以内,仅与 3 号墙体相连的楼板上有一处应变增长超过  $100 \times 10^{-6}$ ,通过对现场梁、楼板裂缝观察,均未发现新增裂缝出现。

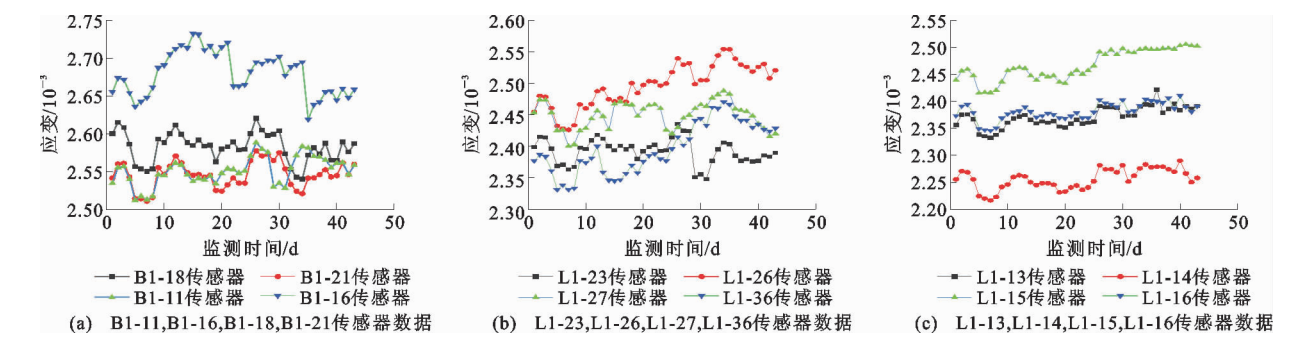


图 8 2 号、3 号剪力墙相连梁、板应变变化

Fig. 8 Strain Changes of Beams and Slabs Related to No. 2 and No. 3 Shear Walls

表 5 各传感器应变  
Tab. 5 Strain of Each Sensor

传感器编号	L1-21	L1-22	L1-23	L1-24	L1-25	L1-26	L1-27	L1-28	L1-29	L1-30
应变增长量/ $10^{-6}$	79.6	74.8	-9.6	22.9	45.4	66.1	-33.7	26.4	20.7	3.0
传感器编号	L1-36	B1-11	B1-12	B1-13	B1-14	B1-15	B1-16	B1-17	L1-13	L1-14
应变增长量/ $10^{-6}$	51.8	23.3	38.1	-10.1	7.1	25.2	3.0	-43.1	34.6	2.6
传感器编号	L1-15	L1-16	L1-17	L1-18	L1-19	L1-20	B1-7	B1-8	B1-9	B1-10
应变增长量/ $10^{-6}$	63.3	17.7	31.5	64.2	34.2	39.8	162.9	56.3	19.9	31.2

4 有限元计算结果分析与讨论

图 9 为 2 号剪力墙置换加固阶段包括上下层共 3 层剪力墙的部分应力云图及 3 号剪力墙加固完成后的应力云图。图 9(a)为 2 号剪力墙置换加固前的初始应力状态,初始平均应力为 4.62 MPa,应力分布均匀。图 9(b)为 13 号墙段拆除但未浇筑灌浆料前的应力状态,墙段洞口处出现了明显的应力集中现象<sup>[19-21]</sup>,洞口处的最大压应力为 6.62 MPa,与初始状态相比应力增长了 43.3%。图 9(c)为浇筑 13 号墙段后,同时拆除 11,15 号墙段时的应力状态,此时墙肢转角处出现应力集中且最大应力为 9.82 MPa,其与图 9(b)相比,应力集中现象更为明显。究其原因,是由于同时拆除 11,15 号墙段引起应力重分布的累积效应所致。图 9(d)为 17 号墙段拆除后的应力云图。由于 17 号墙段仅与 16 号墙段相连,所以拆除 17 号墙段后,应力重分布导致荷载

大部分向 16 号墙段转移,使得该应力集中处的应力达到了 10.3 MPa。

图 9(e),(f)分别为 2 号、3 号剪力墙加固完成后的应力云图。剪力墙上均出现明显的应力滞后及应力集中现象,但应力集中的影响范围较小,同时考虑到剪力墙长期承受上部荷载作用,由于混凝土收缩徐变效应,应力集中的影响将会得到一定程度的缓解。加固完成后剪力墙上下层应变也有所增长,但影响范围有限,说明应力重分布对上下层结构的影响较小。

5 剪力墙加固效果评估

由以上分析可知,剪力墙无支撑分段置换引起了结构的应力重分布,并直接导致置换墙体的应力滞后。应力滞后是否会严重影响结构的安全性是值得考虑的重要问题。本文根据传感器实测应变数据,按照《混凝土结构加固设计规范》计算剪力墙处

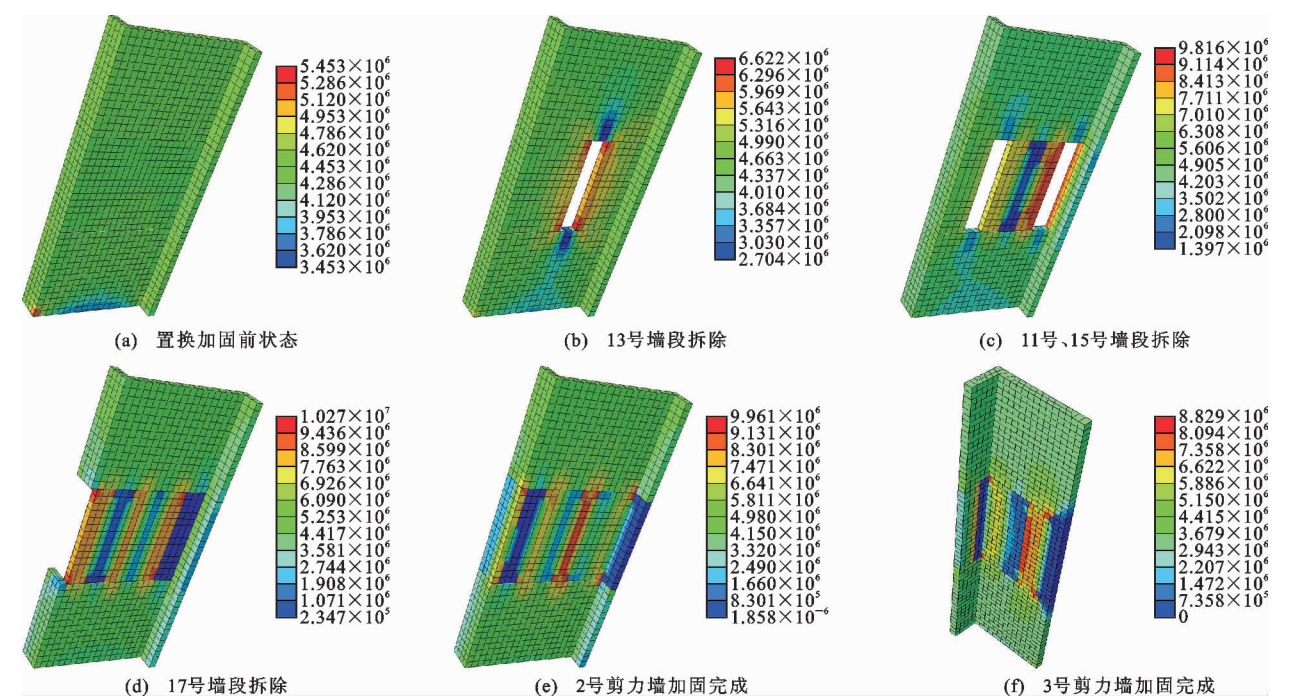


图 9 施工模拟过程应力分布(单位:Pa)

Fig. 9 Stress Distribution During Construction Simulation (Unit:Pa)



于正常受力状态下的正截面受压承载力,即

$$N\leqslant 0.9\varphi(f_{c0}A_{c0}+\alpha_cf_cA_c+f'_{y0}A'_{s0})\tag{5}$$

式中: $N$  为构件加固后的轴向压力设计值; $\varphi$  为受压构件的稳定系数; $f_{c0}$  为原构件混凝土抗压强度设计值; $A_{c0}$  为原构件截面扣去置换部分后的剩余截面面积; $\alpha_c$  为置换部分新增混凝土的强度利用系数,由于本工程未进行支顶卸载,取 0.8; $f_c$  为置换部分新混凝土的抗压强度设计值; $A_c$  为置换部分的截面面积; $f'_{y0}$  为原构件纵向受压钢筋的抗压强度设计值; $A'_{s0}$  为受压区纵向钢筋的截面面积。

同时考虑到将不合格混凝土全部置换,因此采用无支撑置换加固后的承载力计算不需考虑未置换

混凝土强度。

分段置换之后剪力墙受压承载力是以应力最大墙段达到正截面受压承载力时对应的上部荷载为准,计算结果见表 6。由于置换加固不影响钢筋承载力,因此表 6 中未体现钢筋受压承载力。以 2 号剪力墙加固后承载力计算为例对表 6 计算结果进行说明。C35 灌浆料弹性模量取 31 500 MPa,抗压强度设计值为 16.7 MPa。2 号剪力墙加固后 13 号墙段应变最大,为  $262\times 10^{-6}$ ,13 号墙段应力计算结果为 8.25 MPa,则 2 号剪力墙各墙段加固后承载力富余  $N_i$  均按公式(6)计算,即认为由于应力滞后 13 号墙段达到正截面承载力时,2号剪力墙达到全截面

表 6 受压承载力

Tab. 6 Compression Bearing Capacity

剪力墙编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
加固前承载力/kN	12 295	11 861	7 431	7 068	5 551	7 479
加固后承载力/kN	11 865	10 966	7 193	6 835	5 442	7 321

受压承载力。

$$N_i=(16.7-8.25)A_i\tag{6}$$

式中: $A_i$  为受压墙段面积。

10 号墙段受压面积按照图 2 计算为 140 000 mm<sup>2</sup>,根据式(6),则 10 号墙段的承载力富余为 1 183 kN。2 号剪力墙未加固前承受的上部荷载已通过 PKPM 建模计算得到,汇总各墙段承载力富余及原来的上部荷载值便可得 2 号剪力墙混凝土的受压承载力。

由表 6 可知,分段加固后的剪力墙受压承载力略小于原结构正常使用状态下的受压承载力,承载力减少最多的为 2 号剪力墙,与原设计剪力墙相比减少了 7.5%。表明采用本文无支撑置换加固方案进行加固后,剪力墙受压承载力有所下降,但降低幅度不大。

因此,对高层结构剪力墙特别是轴压比较大的墙体进行无支撑置换加固,考虑施工分段引起的应力重分布现象并进行方案优化,通过墙体受压承载力复核来控制应力重分布的影响是完全可行的。

6 结 语

(1)有限元模拟数据与现场实测数据吻合较好,表明通过 ABAQUS 有限元分析软件,采用生死单元、等效升温以及添加场变量的方法来考虑材料和结构时变效应,可实现混凝土无支撑置换加固的全过程模拟。

(2)剪力墙无支撑分段置换不可避免会导致结

构的应力重分布,使得置换墙段时应力向与该墙段相连的墙段、梁、楼板上进行转移,导致与其相邻的墙体、梁、楼板应力增大,但梁板上应变增长程度有限。拆除墙段后会使得拆除墙段上出现应力集中,但应力集中对加固效果影响较小。

(3)由于墙体分段施工顺序的差异将导致剪力墙出现不同程度的应力滞后现象,先置换的墙段应力增大较多,最大值可达原墙段应力的 2 倍甚至更多。因此,在方案设计阶段应进行优化设计,控制墙体应力不均匀水平。

(4)为了量化无支撑分段置换施工对剪力墙加固效果的影响,特别是对于高层剪力墙或轴压比较大的墙体,按照本文方法进行正截面受压承载力复核是完全有必要的。

参考文献:

References:

[1] 张 可,熊进刚,胡华章. 高性能灌浆料置换加固混凝土柱轴心受压性能分析[J]. 南昌大学学报:工科版, 2016,38(4):340-346.  
ZHANG Ke,XIONG Jin-gang,HU Hua-zhang. Analysis on Property of Reinforced Concrete Column Strengthened by Replacing Section with High Performance CGM[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology,2016,38(4):340-346.  
[2] 郑文杰,舒 杰,贺子倬. 某旧城改造工程混凝土剪力墙置换处理[J]. 施工技术,2015,44(4):53-56.  
ZHENG Wen-jie,SHU Jie,HE Zi-zhuo. Replacement



- of RC Shear Wall in an Old City Transformation Project[J]. Construction Technology, 2015, 44(4): 53-56.
- [3] 谢洪阳, 陈 斌, 王诗祥. 置换混凝土加固施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(16): 39-41.  
XIE Hong-yang, CHEN Bin, WANG Shi-xiang. Strengthening Technique of Replacing Concrete[J]. Construction Technology, 2015, 44(16): 39-41.
- [4] 温 斌, 徐 芳. 高层建筑层间剪力墙混凝土置换加固施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(16): 111-113.  
WEN Bin, XU Fang. Construction Technology of Reinforced Concrete Replacement for High-rise Building Interlayer Shear Wall[J]. Construction Technology, 2018, 47(16): 111-113.
- [5] 李春涛, 张 力, 栗增欣, 等. 分段置换混凝土在某高层住宅加固中的应用[J]. 建筑科学, 2018, 34(3): 111-117.  
LI Chun-tao, ZHANG Li, LI Zeng-xin, et al. Application of Concrete-replacing Method in Reinforcement of a High Rise Residential Building[J]. Building Science, 2018, 34(3): 111-117.
- [6] 胡克旭, 赵志鹏. 混凝土置换法在某短肢剪力墙高层住宅加固中的应用[J]. 结构工程师, 2015, 31(5): 172-177.  
HU Ke-xu, ZHAO Zhi-peng. Application of Concrete-replacing Method in Reinforcement of a High-rise Short-leg Shear Wall Residential Building[J]. Structural Engineers, 2015, 31(5): 172-177.
- [7] 张吉柱, 李 荻, 杨燕艳. 置换混凝土技术在高层剪力墙结构加固中的应用[J]. 建筑科学, 2019, 35(11): 126-132.  
ZHANG Ji-zhu, LI Di, YANG Yan-yan. Application of Concrete Replacement Technology in Reinforcement of High-rise Shear Wall Structures[J]. Building Science, 2019, 35(11): 126-132.
- [8] 柯 杨, 李天水, 谷 倩, 等. 高性能水泥基灌浆料配合比设计的实践与验证[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(10): 3154-3160, 3172.  
KE Yang, LI Tian-shui, GU Qian, et al. Practice and Verification of Mix Proportion Design of High Performance Cement-based Grouting Material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(10): 3154-3160, 3172.
- [9] 李向民, 高润东, 许清风, 等. 装配整体式混凝土结构套筒不同位置修复灌浆缺陷的试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(24): 93-97.  
LI Xiang-min, GAO Run-dong, XU Qing-feng, et al. Experimental Study on Repairing Grouting Defects at Different Positions of Sleeve of Monolithic Precast Concrete Structure[J]. Building Structure, 2019, 49(24): 93-97.
- [10] 钱稼茹, 张微敬, 赵作周, 等. 北京大学体育馆钢屋盖施工模拟与监测[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 13-20.  
QIAN Jia-ru, ZHANG Wei-jing, ZHAO Zuo-zhou, et al. Simulation and Monitoring for the Construction of the Steel Roof of the Peking University Gymnasium[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 13-20.
- [11] POPESCU C, SAS G, SABAU C, et al. Effect of Cut-out Openings on the Axial Strength of Concrete Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(11): 4016100.
- [12] NAO-AKI N, YUNONG S, REI T, et al. Relationship Between Strain Rate Concentration Factor and Stress Concentration Factor[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 90: 218-227.
- [13] SHAN C L, YI Y H. Stress Concentration Analysis of an Orthotropic Sandwich Bridge Deck Under Wheel Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 488-494.
- [14] STAZI F, SERPILLI M, MARACCHINI G, et al. An Experimental and Numerical Study on CLT Panels Used as Infill Shear Walls for RC Buildings Retrofit[J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 605-616.
- [15] SABAU C, POPESCU C, BAGGE N, et al. Local and Global Behavior of Walls with Cut-out Openings in Multi-story Reinforced Concrete Buildings[J]. Engineering Structures, 2019, 187: 57-72.
- [16] 田连波, 侯建国. ABAQUS 中混凝土塑性损伤因子的合理取值研究[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2015, 37(4): 340-345, 358.  
TIAN Lian-bo, HOU Jian-guo. Reasonable Plastic Damaged Factor of Concrete Damaged Plastic Model of ABAQUS[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2015, 37(4): 340-345, 358.
- [17] 吴 元, 王 凯, 杨晓婧, 等. 水泥基灌浆料基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(19): 95-98, 6.  
WU Yuan, WANG Kai, YANG Xiao-jing, et al. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Cementitious Grout[J]. Building Structure, 2014, 44(19): 95-98, 6.
- [18] 李承铭, 马俊杰, 刘智龙. 基于 ANSYS 的混凝土壳体结构的收缩徐变研究分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(增 1): 516-520.  
LI Cheng-ming, MA Jun-jie, LIU Zhi-long. Analysis

and Research on the Shrinkage and Creep of Concrete Shell Structure Based on ANSYS[J]. Building Structure,2015,45(S1):516-520.

[19] 赵更歧,肖 水,鲁 渊,等. 剪力墙开洞结构受力性能的研究[J]. 世界地震工程,2014,30(3):24-27.  
ZHAO Geng-qi,XIAO Shui,LU Yuan,et al. Study on Structure Performance of the Hole on Shear Wall[J]. World Earthquake Engineering,2014,30(3):24-27.

[20] 谭 林,郭 原. 开孔有限平板应力集中问题的有限元分析[J]. 重庆理工大学学报:自然科学,2015,29(7):35-39.

TAN Lin,GUO Yuan. Finite Element Analysis of Finite Plates for Stress Concentration of Holes [J]. Journal of Chongqing University of Technology; Natural Science,2015,29(7):35-39.

[21] 宋天舒,吴林志,杜善义,等. 圆柱壳非圆大开孔的应力集中研究[J]. 工程力学,2000,17(6):47-52.  
SONG Tian-shu, WU Lin-zhi, DU Shan-yi, et al. Stress Concentration on Thin Cylindrical Shells with Large Non-circular Openings [J]. Engineering Mechanics,2000,17(6):47-52.