

结构保温一体化墙体加厚免拆模板连接性能分析*

Analysis of Connection Performance of Structural Thermal Insulation Integrated Wall Thickening and Non-Removal Formwork

郭 帅¹, 周占学^{1,2}, 江一博¹, 梁玉国³, 常卫华⁴, 曹玉红¹, 郝 勇¹

- (1. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000;
2. 河北省土木工程诊断改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000;
3. 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227;
4. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘 要: 增加结构保温一体化墙体免拆模板的保温层厚度可实现更高的节能目标, 然而增加保温层厚度后, 现有连接件不能很好满足锚固要求。本文提出适用于较厚保温层免拆模板的连接件, 对其连接性能进行分析, 以实际工程为研究案例, 通过 ANSYS 将增厚墙体中的连接件替换成改良连接件, 对一体化墙体、加厚免拆模板的整体性和改良连接件自身受力及变形情况进行分析。经计算结果分析, 一体化墙体整体锚固与改良前相比效果明显, 免拆模板与现浇墙体协调变形, 改良连接件改进部位符合受力规律, 穿出免拆模板背面产生的应力集中不会对模板造成破坏, 风压增高的情况下锚固效果优于普通连接件。结构保温一体化墙体加厚免拆模板连接性能较好。

关键词: 结构保温一体化; 连接性能; 风载; 应力集中

中图分类号: TU501 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0126-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.022

GUO Shuai¹, ZHOU Zhanxue^{1,2}, JIANG Yibo¹, LIANG Yuguo³,
CHANG Weihua⁴, CAO Yuhong¹, HAO Yong¹

- (1. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China; 3. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050227, China;
4. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Increasing the thickness of the insulation layer of the structural insulation integrated wall removable template can realize higher energy saving targets, however, after increasing the thickness of the insulation layer, the existing connectors can not well meet the anchoring requirements. This paper proposes the connectors applicable to the thicker insulation layer free template, analyzes its connection performance, takes the actual project as a research case, replaces the connectors in the thickened wall with the improved connectors through ANSYS, and analyzes the integrated wall, the integrity of the thickened free template, and the improved connectors' own force and deformation. After calculating the results of the analysis, the integrated wall overall anchorage compared with the improvement of the former effect is obvious, no demolition template and cast-in-place wall coordinated deformation, improved

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078476); 河北省高等学校青年拔尖人才计划 (BJ2020010); 河北省建设科技计划 (2021-2099); 河北建筑工程学院研究生创新基金 (XY2023033)。

作者简介: 郭帅 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 结构防灾减灾。

通信作者: 周占学 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 结构防灾减灾。

收稿日期: 2023-10-29

connectors to improve the part in line with the law of force, wear out the back of the demolition-free template stress concentration will not cause damage to the template, the wind pressure increases in the case of the anchoring effect is better than the ordinary connectors. The connection performance of the structural thermal insulation integrated wall thickening and non-removal formwork is better.

Keywords: structural insulation integration; connection performance; wind load; stress concentration

0 引言

近几年绿色建筑、节能建筑相关政策普及完善，各省正在加快落实。建筑能耗通过建筑类型、建筑围护结构、建筑系统和建筑运营相关的几个参数控制，能否通过合理的建筑设计来降低建筑能耗，减少碳排放是评判绿色建筑、节能建筑的重要准则^[1]。建筑结构保温一体化技术因出色的节能效果，得到了飞速的发展与应用，其中免拆模板与现浇墙体之间的连接性能是进一步提升节能效果的基础和保证墙体寿命的关键。

目前使用 100 mm 厚及小于 100 mm 厚保温模板的一体化复合保温墙体中，采用现行标准下的连接件有着不错的使用表现，在满足正常施工的要求下，相比外贴等方式连接有着非常明显的提升，建筑结构与节能一体化的建筑物在正常使用时，大部分结构构件与一体化外保温模板之间的变形是较小且协调的，满足正常的使用需求和美观要求^[2]。现有连接件采用尼龙、尼龙金属、或者防腐性能好的材质，顶部带有增加与保温层接触面积的圆盘，尾部带有螺栓头或本身带有倒刺，如图 1 所示。混凝土凝固之后，倒刺或者螺栓头可以提供足够的机械咬合力来阻挡外力对保温层的剥离，这也是复合墙体称为一体化技术的重要原因。

随着我国节能发展目标的推进，当前 100 mm 厚保温模板已经难以满足绿色建筑政策中的节能要求，采用一体化免拆模板技术时必定会增加保温层的厚度来满足更高的节能目标。通过课题组前期研究发现，将免拆模板厚度增加至 220 mm 后，免拆模板与楼体的相对位移成倍增加，现有连接件不能很好满足锚固要求，解决变形不协调问题至关重要，增厚的免拆模板与楼体之间的连接性能改进研究意义重大。

通过对免拆模板破坏形式分析，除保温模板自身强度要求外，连接件要有足够的抗剪、抗拉能力以及合适的几何形状来提供足够的机械锚固力。本文对现有尼龙连接件进行改良，提出一种适用于较

厚保温层免拆模板的连接件，并对该连接件性能进行了模拟验证。

1 工程背景

课题组前期对某地上 17 层剪力墙结构中，100 mm 与 220 mm 两种不同厚度的保温结构一体化免拆模板在高层建筑中的使用情况进行对比分析，结果表明 220 mm 厚度在使用传统连接件时，位移最大处发生在顶层侧边，为 39.28 mm，远高于 100 mm 厚度所对应模型的最大位移，本文以前期研究中 220 mm 厚度所对应的模型为基础，将模型中连接件替换成为改良后连接件形成新的模型，风荷载、恒活荷载值与基础模型一致，进行改良连接件使用性能研究。

一体化免拆模板现浇混凝土墙体在其连接件不被破坏且正常工作时的受力状态，应满足风荷载、地震荷载与自重荷载之和小于连接件与现浇墙体之间锚固力的力学平衡条件^[3]。风荷载值、地震荷载以及结构本身恒、活荷载值最不利组合见表 1^[4-5]。

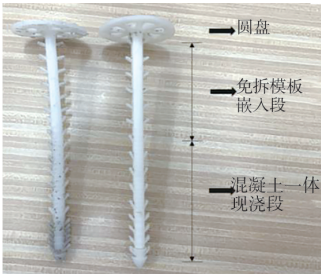
表 1 模型施加荷载汇总表
Table 1 Summary of model applied loads

楼层	风荷载 / (kN/m ²)	水平地震 作用/Pa	等效恒载 /MPa	等效活载 / (N/m)
1	-0.391		1.3000	
2	-0.404		1.21875	
3	-0.417		1.13750	
4	-0.463		1.05625	
5	-0.533		0.9750	
6	-0.600		0.89375	
7	-0.673		0.81250	
8	-0.785		0.73125	
9	-0.848	0.4e ⁻³	0.65000	86
10	-0.936		0.56875	
11	-1.027		0.48750	
12	-1.150		0.40625	
13	-1.295		0.32500	
14	-1.393		0.24375	
15	-1.461		0.16250	
16	-1.561		0.08125	
17	-1.663		—	

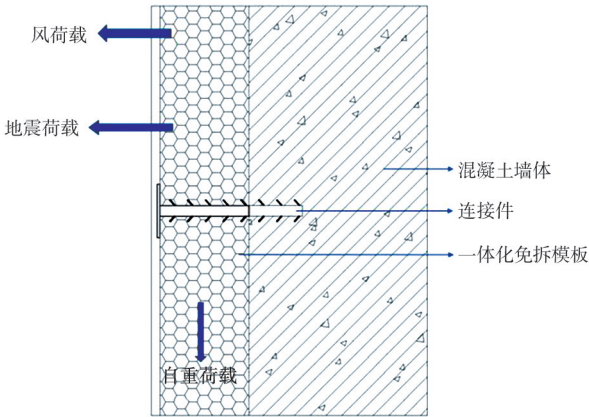
建筑结构

2 连接件改良

参考山东省工程建设标准 DB 37T 5067-2016《FS 外模板现浇混凝土复合保温系统应用技术规程》^[6]中对 60~83 mm 厚一体化免拆模板连接件的規定, 选用尼龙 66 材质的连接件, 如图 1 所示, 并在其几何构造上进一步改良。



(a) 连接件



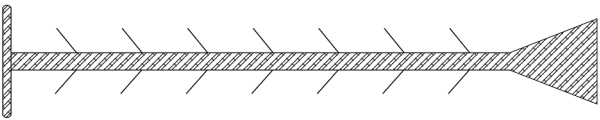
(b) 结构保温一体化墙体

图 1 连接件示意图

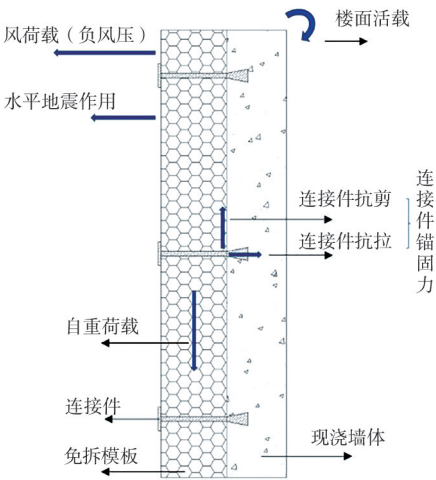
Fig. 1 Schematic diagram of connecting parts

- (1) 对圆盘处进行改良, 采用实心圆盘加螺纹的构造来替代普通镂空圆盘。
- (2) 对杆径进行增大, 将杆径由 8~12 mm 增加到 14 mm。
- (3) 锚固段构造形式改进, 在保留倒刺结构的基础上, 连接件墙体嵌入段采用锥形几何构造。

改良后连接件使用示意图及一体化免拆模板现浇混凝土墙体受力示意图如图 2 所示。



(a) 改良后连接件简化示意图



(b) 一体化免拆模板现浇混凝土墙受力构造

图 2 改良后连接件示意图

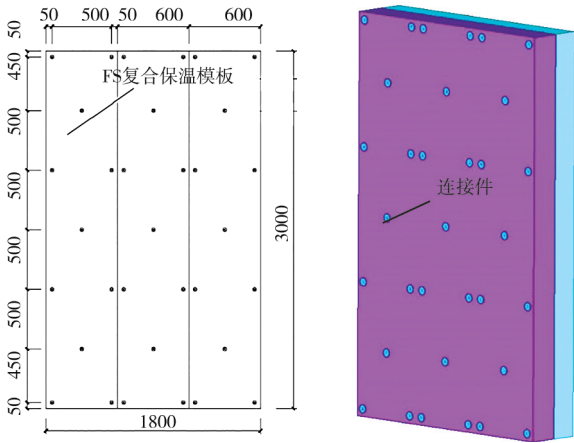
Fig. 2 Schematic diagram of improved connecting parts

3 使用性能有限元分析

3.1 有限元模型

参考 DB 37/T 5067-2016《FS 外模板现浇混凝土复合保温系统应用技术规程》^[6]中对连接件在单位墙体中布置的规定进行建模, 改良后连接件呈梅花状布置, 每平米布置数量不少于 5 个。

细部一体化墙体有限元模型如图 3 所示, 其中免拆模板厚度为 220 mm, 现浇混凝土墙体厚度为 200 mm。连接件圆盘直径 30 mm, 厚度 3 mm, 杆径 $d=16$ mm, 嵌入端直径 $D=32$ mm, 锚固深度 60 mm。



(a) 连接件布置图

(b) 连接件布置模型

图 3 一体化墙体模型

Fig. 3 One-piece wall model

在材料参数的设置上, 墙体采用 C30 钢筋混凝土

土，忽略钢筋与混凝土之间的粘接滑移，使用整体式建模。220 mm 厚保温结构一体化免拆模板参数设置以 XPS 材料为主，忽略面层做法。改良后的新型连接件材料采用尼龙 66。模型各部分材料均采用弹塑性分析模型，默认变形在材料的弹性范围内，不考虑非线性的情况。模型各部分材料参数见表 2。

表 2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(t/mm ³)
C30 混凝土	30000	0.2	2.41e ⁻⁹
连接件	83000	0.28	1.15e ⁻⁹
免拆模板	10	0.3258	3.00e ⁻¹¹

在网格划分方面，为保证连接件的一体性，在建模时采用整体建模，导致使用扫略或映射的方式划分出来的网格不协调，甚至出现划分失败、网格缺失等情况，无法进行计算。故综合考虑采用四面体网格自由化分，在连接件与免拆模板和现浇墙体相接处细化网格分布，提高计算精度，网格划分图如图 4 所示。

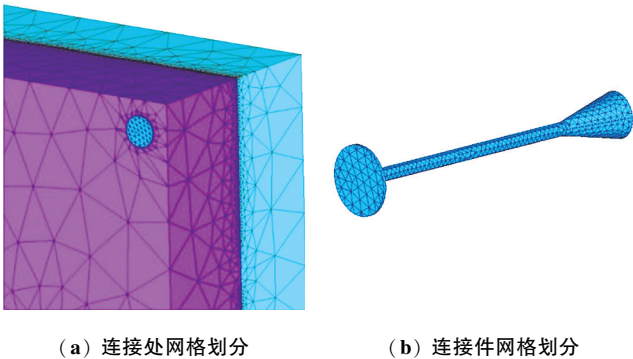


图 4 连接节点网格划分
Fig. 4 Grid division of connected nodes

3.2 计算结果分析

改良后连接件的连接性能体现在连接件的变形上，当连接件变形在可接受范围之内时，则认定其连接效果较好。分析时，通过不同层数连接件状态，来总结受力规律和工作状态，综合判定改良后连接件的可行性^[7]。

(1) 一体化墙体整体分析

第 1 层一体化墙体位移云图和第 17 层墙体位移云图如图 5 所示。当改良后连接件采用梅花状均匀分布时，其对一体化免拆模板的锚固效果较好，第 17 层墙体最大位移约为 0.8 mm，一体化墙体基本处于稳定工作的状态。其最大位移相对于整体分析中 220 mm

厚免拆模板在第 17 层的最大位移大幅减小，锚固效果明显。其中，受楼面活载的影响，墙体上半部分变形较大，下半部分变形相对较小。在上半部分连接件布置较少的墙体边缘位置出现最大变形，其与现浇墙体之间的相对位移为 0.491 mm，两者之间变形处于协调范围内。

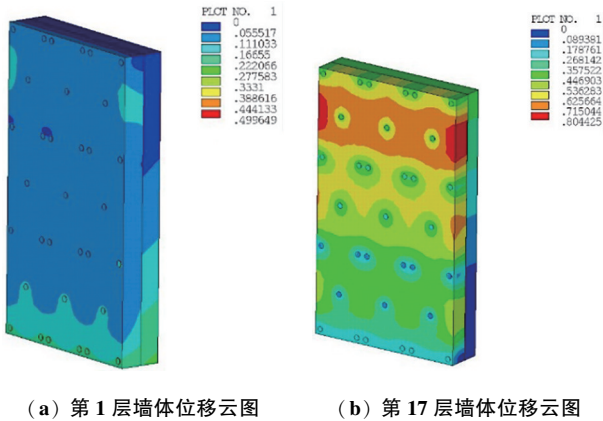


图 5 位移云图
Fig. 5 Displacement cloud

1~17 层一体化墙体的免拆模板部分和现浇墙体部分的最大位移如图 6 所示。在整个楼层增加的过程中，免拆模板与现浇墙体变化趋势大体相同。当层数较低时，免拆模板和现浇墙体的最大位移基本一致，两者之间变形协调性较好。当层数增大时，免拆模板的变形相对于现浇墙体越来越大，外力对免拆模板的剥离作用越来越明显。在 11 层之后，免拆模板与现浇墙体之间的相对变形维持稳定，连接件发挥了良好的限制作用。在第 17 层时，两者之间最大位移相差不到 0.5 mm。

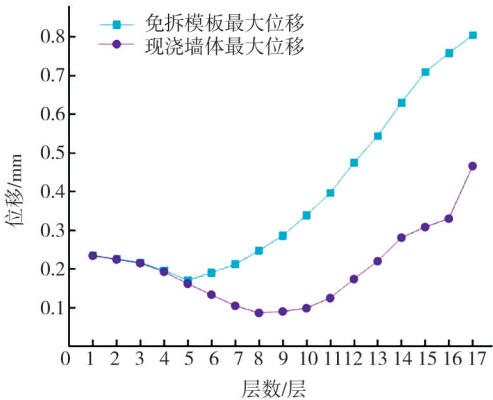


图 6 免拆模板部分和现浇墙体部分最大位移变化图
Fig. 6 Maximum displacement variation diagram of demolition-free formwork part and cast-in-place wall part

建筑结构

总体来看,在一体化墙体中,免拆模板和现浇墙体两者位移在层数增加的过程中,均先减小后增大,其最大位移在下降段与上升段分别受不同类型荷载作用控制。在5层之前,受上部累积自重荷载影响较大,风荷载等作用较小,随着层数的增加,免拆模板与现浇墙体的最大位移均呈减小趋势。5层之后,免拆模板受风荷载影响逐渐增大,变形不断增加。而现浇墙体在10层以后受荷载综合影响,变形开始逐渐增大,发生较大位移。一体化墙体在层数较高时,其变形与层数和风荷载的增加呈正相关,发展到17层达到最大位移值。

(2) 220 mm 厚免拆模板整体分析

第1层和第17层免拆模板位移云图如图7所示,改良后连接件对保温模板与现浇墙体之间的锚固作用非常明显,圆盘的存在使位移变形以单个连接件为中心,向四周均匀扩散增大。第1层保温板在改良连接件的锚固下,整体变形不大,整个免拆模板处于均匀变形状态,最大位移在0.3 mm 以内。而第17层免拆模板上半部分变形相较下半部分比较明显,但整体位移小于1 mm,改良后连接件起到了很好的锚固作用。

第17层免拆模板在X、Y、Z三个方向的位移云图如图8所示,由图可得,免拆模板的位移主要发生

在X、Z两个方向。其中,X方向为垂直于墙面方向,+X指向墙体,-X背离墙体。Z向为竖直方向,Y向为平行宽度方向。X方向位移值为负,免拆模板发生背离墙体的位移,对连接件产生拉拔作用,此部分不利影响由连接件抗拉锚固力承担。Z向位移为正,免拆模板产生竖直向下的变形,对连接件产生剪切作用,此部分不利影响由连接件抗剪锚固力承担,而Y方向位移变形不大,说明不利荷载对连接件的剪切作用主要集中在一个方向,当不利荷载持续增加时,一体化墙体则会发生破坏。

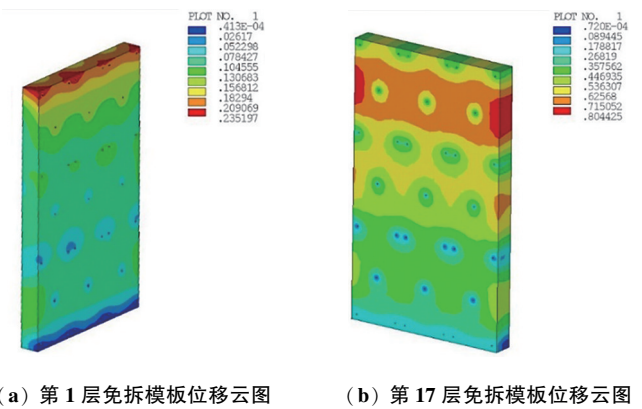


图7 位移云图
Fig. 7 Displacement cloud

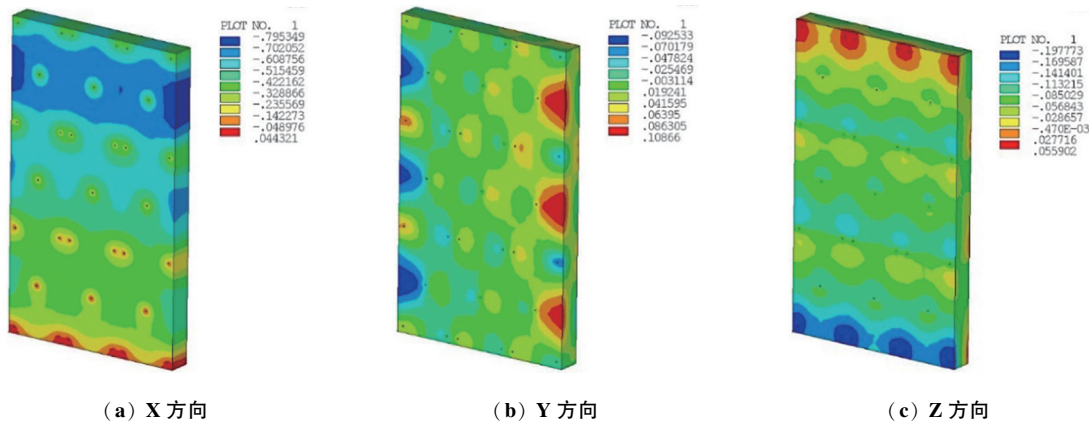


图8 各方向免拆模板位移云图
Fig. 8 Displacement cloud of no-demolition formwork in each direction

改良后连接件对免拆模板与现浇墙体有着良好的锚固能力,其不利荷载的影响在两者接触位置上被连接件吸收,因此免拆模板背面连接件穿出处产生的应力集中并不大,如图9所示一体化免拆模板不会因应力集中出现破坏。

(3) 改良后连接件分析

连接件整体受力趋势与上述分析一致,墙体上半部分受力较大,发生的位移值也大。总体来看,连接件整体处于正常工作状态,位移最大处不超过0.5 mm,采用梅花状布置的改良后连接件有很好的

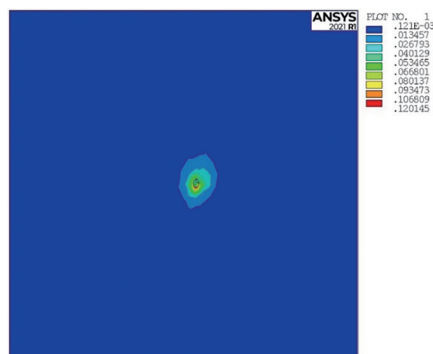


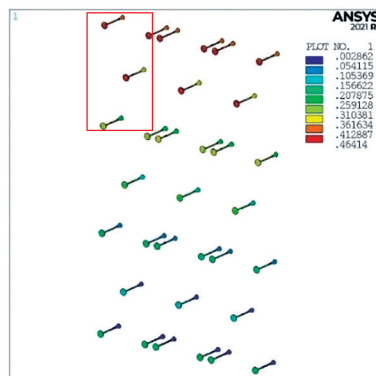
图 9 免拆模板背面穿出处应力云图
Fig. 9 Stress cloud at the back of the non-demolition formwork wear-out

锚固能力，其自身变形也较小，可以保证正常使用，免拆模板与现浇墙体的一体化状态不会受到破坏。

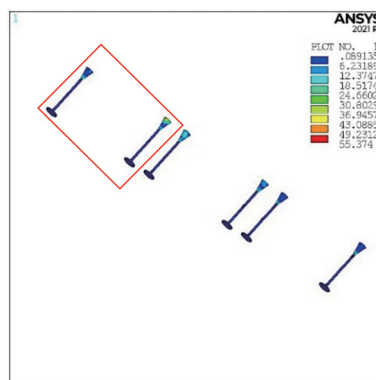
如图 10 (a) 所示，梅花状连接件整体位移云图中红框中所示三行三列重合的部分为一组梅花状连接件，每组 5 个，从顶部横向 3 组 15 个连接件的应力云图中可以看出，墙体边缘的连接件在免拆模板与现浇墙体的交界处受力较大，嵌入在现浇墙体的部分受力较小。而墙体中间的连接件，在免拆模板与现浇墙体的交界处位置和嵌入现浇墙体的位置均受到较大的应力。两处位置出现较大应力说明其是连接件提供锚固力的关键位置，分别提供机械锚固力和抗拉抗剪力。相对于连接件在交界处和嵌入处两个部分，连接件处在免拆模板内侧的部分和圆盘部分所受到的应力较小，不会发生圆盘脱落、连接件断裂等破坏情况。

图 10 (b) 所示应力云图为 17 层一体化墙体顶部横向布置的 3 组连接件中（红框中为一组），位于墙体边缘的 6 个连接件；图 10 (c) 所示，在连接件嵌入现浇墙体的尾部承受最大应力，达到了 132.985 MPa。尼龙 66 材料的拉伸强度在 72.6 ~ 76.5 MPa，说明受力最大的连接件在尾部发生了屈服变形，但连接件锚固端大部分位置在尼龙材料拉伸强度内，且免拆模板与现浇墙体的交界处应力较小，故认为此连接件充分发挥了机械锚固作用，并未发生破坏，也未丧失锚固能力。

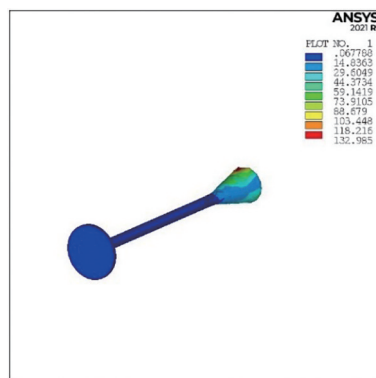
从上述分析可得，改良后连接件的圆盘部分、交界处部分以及嵌入段部分是起到锚固力的关键位置，总结三个位置处的受力变形规律对进一步改良连接件有重要意义。图 11 为 1~17 层细部墙体变形最大的连接件的三个关键位置的位移变化图。从图



(a) 整体连接件位移云图



(b) 横向一排连接件应力云图



(c) 左二连接件应力云图

图 10 连接件位移云图

Fig. 10 Connection displacement cloud

中可得，嵌入段受力要大于圆盘位置和交界处位置，其物理上的机械锚固力是保证免拆模板和现浇墙体一体化的关键。改良后的连接件在嵌入现浇墙体部分的几何构造采用倒圆锥形状，充分提高了物理上的机械锚固力，是非常有效的改良方法。

改良后连接件在圆盘部分和交界处的变形规律

建筑结构

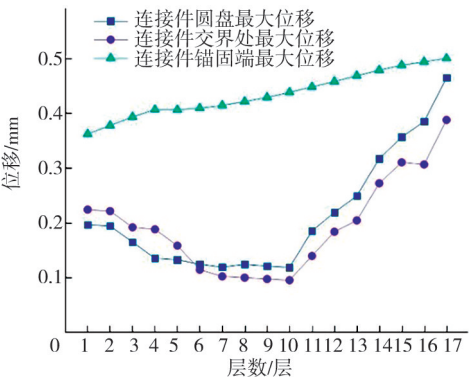


图 11 连接件三个位置最大位移变化图

Fig. 11 The maximum displacement variation of the three positions of the connection

与免拆模板的大致相同。楼层较低时，对连接件的不利荷载主要以外墙和保温板自重荷载为主，连接件交界处受力较大，位移较大。随着楼层的增加，不利荷载主要以负风压为主，连接件在圆盘位置受力增大，位移增加。

4 不同风压条件下改良后连接件使用状态研究

上述计算结果证明，当风荷载以基本风压为 0.55 kN/m^2 计算时，改良后连接件在 220 mm 厚免拆模板与现浇墙体之间有较好的锚固力，一体化墙体可以保证正常使用，连接件变形较小且免拆模板不会发生脱落等破坏。为探究风荷载增加后，改良后连接件是否还具有满足要求的锚固性能，以 17 层细部墙体为基础，采用不同的风荷载数值进行模拟计算。我国北方地区平均基本风压在 0.55 kN/m^2 ，向上可增加至 1.0 kN/m^2 左右，部分地区可达到 1.2 kN/m^2 。故本文以 0.05 kN/m^2 为增量，对细部墙体持续增加风荷载，在整面墙中选取变形最大的连接件进行作用状态分析。

如图 12 所示，从各级风压下，改良后连接件的应力云图中可得，随着风荷载的增加，连接件在现浇墙体嵌入段所受应力逐渐加大，并由尾部逐渐向免拆模板与现浇墙体的交界处扩展。连接件其他位置所受应力相对于现浇墙体内部的部分较小，变形不大。如图 13 所示，当基本风压在 0.55 kN/m^2 至 0.7 kN/m^2 之间时，连接件交界处应力增加较缓。当基本风压大于 0.7 kN/m^2 时，连接件交界处应力增加较快。当基本风压为 0.8 kN/m^2 时，改良后连接件交界处的应力已经超过尼龙 66 材料的拉伸强度，连

接件即将进入屈服阶段，其正常工作失去保证。当风压继续增加时，连接件嵌入在现浇墙体中的部分发生较大变形，如图 14 所示，失去物理锚固作用，连接件将被拔出，进而导致一体化墙体发生破坏，免拆模板脱落。

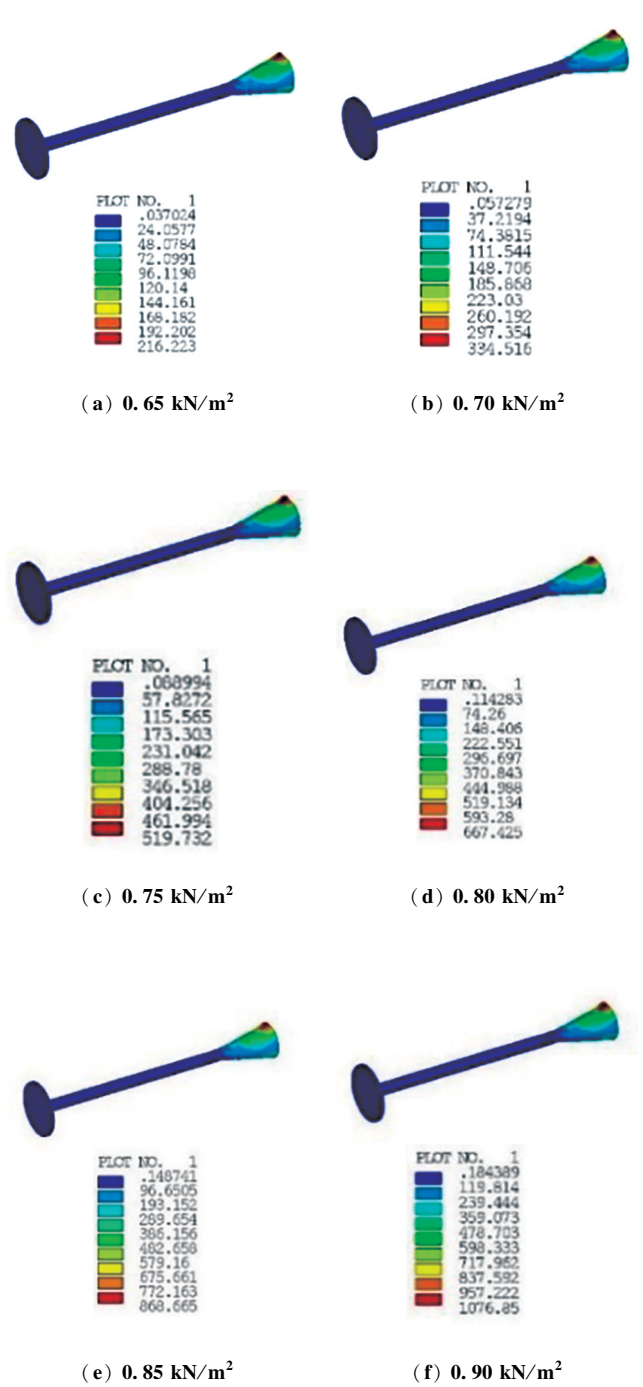


图 12 不同风压下连接件应力云图

Fig. 12 Stress clouds of joints under different wind pressure

建筑结构

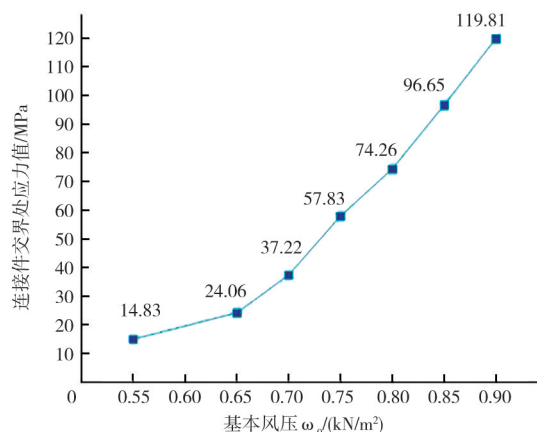


图 13 不同风压下连接件交界处应力变化图

Fig. 13 Stress variation at the junction of joints under different wind pressure



图 14 连接件破坏状态模拟图

Fig. 14 Simulation diagram of the damage state of the connection

5 结论

本文对现有连接件进行改良，并对采用改良连接件的一体化免拆模板现浇混凝土墙体进行细部建模、有限元分析，得出以下结论：

(1) 改良后连接件在 220 mm 厚免拆模板一体化墙体中有足够的锚固力，从第 1 层墙体至 17 层墙体均有良好的表现。220 mm 厚免拆模板在 17 层工况下，在上部边缘位置出现最大变形，其位移约 0.8 mm，且与现浇墙体之间的相对位移为 0.491 mm。使用改良后连接件后免拆模板与现浇墙体之间有良好的变形协调性。

(2) 改良后连接件对免拆模板的约束作用明显，得益于圆盘的设计，免拆模板变形以单个连接件为中心，向四周均匀扩散增大。在各层工况下，免拆

模板主要发生垂直墙面方向和竖直方向的位移。10 层之间每层位移递减，10 层之后受风载作用主导，变形逐渐增大。除此之外，免拆模板背面连接件穿出处产生的应力集中较小，一体化免拆模板不会因为应力集中出现破坏。

(3) 改良后连接件圆盘处、免拆模板与现浇墙体交界处以及嵌入现浇墙体的部分是提供锚固力的关键位置。嵌入段受力要大于圆盘位置和交界处位置，对连接件在嵌入现浇墙体部分的改良是非常有效的。改良后的连接件在嵌入现浇墙体部分的几何构造采用倒圆锥形状，充分提高了物理上的机械锚固力，有较高的参考价值。

(4) 在基本风压增高的情况下，本文所改良的连接件在 220 mm 厚免拆模板的使用中仍有较好的连接锚固能力。当基本风压小于 0.8 kN/m² 时，改良后连接件在免拆模板与现浇墙体的交界处所受应力小于尼龙 66 材料的拉伸强度，具有良好的使用性能。当风压继续增加时，其交界处位置进入屈服变形状态，可能导致保温模板脱落等破坏情况发生。

参 考 文 献

- [1] KAMAL ATHAR, KADAM SAMBHAJI T, HOU DANLIN, et al. Detailed profiling of high-rise building energyconsumption in extremely hot and humid climate [J]. Cleaner Energy Systems, 2023, 4: 100060.
- [2] 江一博, 周占学, 梁玉国, 等. 结构节能一体化墙体变形协调有限元分析 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2022, 40 (4): 21-27, 65.
- [3] ZHIJIA HUANG, YADONG SUN, LIN GAN, GUO LIU, YANG ZHANG, TAO ZHOU. Durability analysis of building exterior thermal insulation system in hot summer and cold winter area based on ANSYS [J]. Sustainability, 2022, 14 (9): 5702.
- [4] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5] 赵西安. JCJ 102-2003《玻璃幕墙工程技术规范》设计部分介绍 [J]. 建筑科学, 2004 (3): 1-7.
- [6] 山东省建设发展研究院. FS 外模板现浇混凝土复合保温系统应用技术规程: DB 37/T 5067-2016 [S]. 济南: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] 王朋, 尤学辉, 史庆轩, 等. 混凝土免拆模板组合构件力学性能研究综述 [J]. 混凝土, 2022, 395 (9): 161-168.