

开元寺—天王殿抗震设计分析*

Analysis on Seismic Design of Kaiyuan Temple Tianwang Hall

何叶¹, 马江萍¹, 郝茸¹, 杨锦¹, 张奎², 周禹²

- 西安培华学院建筑与艺术设计学院, 陕西 西安 710100;
- 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 开元寺—天王殿是我国传统建筑中典型的单檐歇山唐式建筑, 通过屋架体系设托梁—立柱的传统结构模型 1 与横向折梁受力的结构模型 2, 分析两个模型的周期比、最大层间位移角、配筋值等指标, 结果表明按照模型 2 来设计能满足现行规范要求, 给今后类似设计提供了新的可能性; 考虑到屋面弦梁、枋梁空间交错, 处于不同标高, 使用 YJK 软件对结构进行了弹性时程分析与动力弹塑性时程分析, 结果表明结构满足抗震设计规范的要求, 能够达到“三水准”抗震设防性能的能力, 不需要采用地震力放大系数; 通过在动力弹塑性下的损伤分析, 提出结构易损伤的部位。对天王殿结构在实际中存在的抗震不利部位, 如场地抗震不利、室内外大高差、屋面交错节点、收分柱等, 提出了有效的加强措施。

关键词: 传统建筑; 时程分析; 损伤分析; 节点构造措施

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0001-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.001

HE Ye¹, MA Jiangping¹, XI Rong¹, YANG Jin¹, ZHANG Kui², ZHOU Yu²

- College of Architecture and Art Design, Xi'an Peihua University, Xi'an 710100, China;
- Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Tianwang Hall in Kaiyuan Temple is a typical one eaved building in traditional Chinese architecture. By comparing the traditional structural model 1 of joist-column with the structural model 2 of transverse bending beams, analysis the period ratio, the maximum inter story displacement angle and the reinforcement value of the two models shows that the design according to the model 2 can meet the requirements of the current code, which provides a new possibility for similar design in the future; considering that the roof beams are staggered in space and at different elevations, the elastic time history analysis and dynamic elastoplastic time history analysis of the structure are carried out by using the finite element software of YJK, the results show that the structure can meet the requirements of the seismic design code, and can achieve the "three levels" of seismic performance without the use of seismic force amplification factor; based on the damage analysis under dynamic elastoplasticity, the vulnerable parts of the structure are proposed. The effective strengthening measures are put forward for the disadvantageous seismic parts of the Tianwang Hall structure, such as site seismic disadvantage, large height difference between indoor and outdoor, roof staggered node, scoring column.

Keywords: traditional architecture; time-history analysis; damage analysis; node construction measures

* 基金项目: 陕西省社会科学基金项目 (2020J018)。

作者简介: 何叶 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事土木工程方面的教学与研究工作。

收稿日期: 2022-08-01

建筑结构

0 引言

开元寺-天王殿位于河南省郑州市城管区,单体位于开元寺建筑群落中轴线上,是我国传统建筑中典型的单檐歇山唐式建筑。天王殿外观气势磅礴,威严庄重,造型华美,姿态灵动,是唐代经济和文化高度繁荣的时代标志。本建筑单体的设计使用年限为 50 年,采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构形式,基础采用柱下条形基础,结构安全等级为二级,重要性安全系数 1.0,场地特征周期 0.55 s,抗震设防类别为标准设防类,建筑物的抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.15 g,场地类别为 III 类,剪力墙的抗震等级为三级,框架的抗震等级为四级,抗震构造措施的抗震等级应提高一级采用^[1]。

1 建筑特点与结构布置

本单体面阔九间进深五间,平面布置为规整的矩形,除室外台阶外建筑构件采用双轴对称布置,平面尺寸为 40.5 m×24.6 m,建筑檐口高度为 8.850 m,屋脊高度为 15.200 m,建筑体量庞大且屋面四周均有大跨度屋面挑檐,最大外挑长度为 3.51 m。歇山建筑造型优美,坡屋面结构构成复杂,出挑深远,柱头及额枋斗拱数量可观、品类繁多,廊柱、金柱收分精细,种种细节突显了中国传统建筑元素,充分体现了唐式建筑规模宏大,气势磅礴,形体俊美,庄重大方的特点^[2]。

本工程坡屋面形式复杂,高低错落,额枋斗拱繁多,梁体空间交错,与传统普通现建计算方法不同,单体不仅需要不同工程软件进行校核,同时需要采用三维空间模型对结构内力进行更为准确的计算与分析。天王殿一层平面图、屋顶平面图、立面图分别如图 1、图 2、图 3 所示。

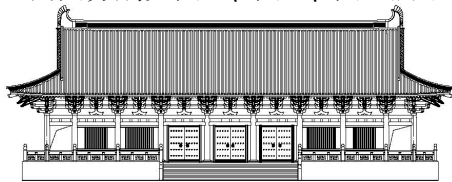


图 1 天王殿一层平面图
Fig. 1 First floor plan of Tianwang Hall



图 2 天王殿屋顶平面图
Fig. 2 Roof plan of Tianwang Hall

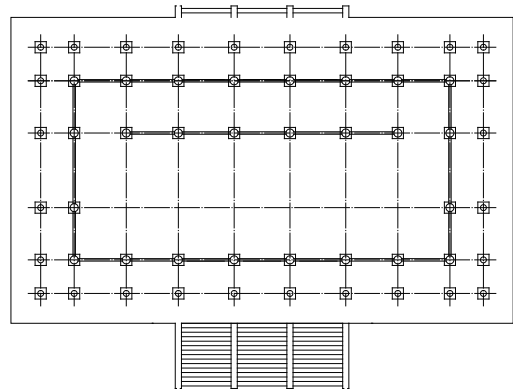


图 3 天王殿立面图
Fig. 3 Elevation of Tianwang Hall

2 模型计算结果与分析

歇山顶部建筑屋面形式复杂,剪力墙、框架柱、框架梁、坊梁、梁标高各异,坡屋面自身刚度也比较大,抗震不利的因素较多。通过屋架体系设立柱、架梁的传统结构模型 1 (托梁-立柱) 与横向折梁受力的结构模型 2,分析两个模型的周期比、最大层间位移角、配筋值等指标,结果表明模型也能很好的满足设计要求,并能满足建筑要求的内部大空间。建筑坡屋面空间结构复杂,局部错层明显,通过有限元软件 SATWE 及 PMSAP 对模型的最大层间位移角、周期、最大层间位移比等参数进行校核;采用 YJK 软件弹性时程分析对结构的楼层地震剪力进行补充计算;通过塑性时程分析对结构抗倒塌能力进行验证,并进行了罕遇地震作用下结构的抗震性能评估。

2.1 屋面无立柱,无下弦梁计算结果分析

取消屋面下弦梁抬柱传统做法,在模型中去

掉下弦梁与梁上立柱，横向屋面梁采用折梁受力来计算。正常梁上柱体系屋面模型如图 4 所示；取消下弦梁与梁上立柱模型如图 5 所示，屋面横向折梁跨度水平投影为 10.2 m，同时在 YJK 对模型 2 做出以下修改：在前处理与计算中，特殊梁定义中将屋面脊梁上正脊梁修改为两端铰接。传统做法屋面梁柱体系模型 1 与取消下弦梁与梁上立柱模型 2，计算结果比较如表 1 所示。

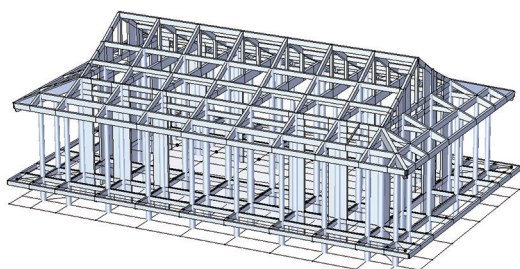


图 4 天王殿结构托梁-立柱模型
Fig. 4 Joist column model of Tianwang Hall

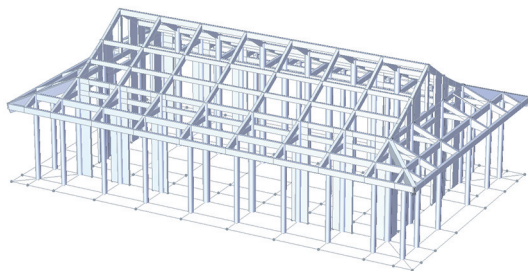


图 5 天王殿结构横向折梁受力模型
Fig. 5 Force model of transverse folded beam of Tianwang Hall

表 1 模型 1 与模型 2 计算结果比较
Table 1 Comparison of calculation results between model 1 and model 2

模型	周期/s		周期比	最大层间位移比/mm		最大层间位移角		层间位移角限值
	X 向	Y 向		X 向	Y 向	X 向	Y 向	
	模型 1	0.60		0.47	0.70	1.07	1.04	
模型 2	0.59	0.46	0.70	1.07	1.04	1/1026	1/1789	1/800

由表 1 的计算结果分析可知，两个模型在屋架受力体系改变的时候，整体指标并没有大的改变，变化在 5% 以内，即工程精度范围内。模型 2 的墙柱配筋变化较小，屋面横向折梁的配筋率控制在 2.2% 以内，且其挠度及裂缝均可满足规范限值的要求，这表明使用屋面横向折梁受力体系可以满足承载力极限状态和正常使用极限状态的设计要求，并且很好的满足建设方提出的屋内大空间要求，对今后类似跨度的传统建筑做法提出了

新的可能性。

2.2 不同工程软件计算及整体指标对比

本工程框剪结构双向抗侧力体系受力复杂，建筑坊梁和歇山屋面梁纵横交错，形成多个短柱及错层，竖向构件存在局部转换，属于复杂结构，参考高层建筑混凝土结构技术规程^[3]第 5.1.12 条，应采用至少两个不同力学模型的结构分析软件进行整体计算。因此本工程采用 PKPM 系列软件中的 SATWE 模块与工程有限元软件 PMSAP 对模型进行了多遇地震下的结构对比计算，周期及位移等整体控制参数如表 2 所示。

表 2 不同软件的计算结果比较分析
Table 2 Comparison and analysis of calculation results of different software

结构形式	周期/s		周期比	最大层间位移比/mm		最大层间位移角		层间位移角限值
	X 向	Y 向		X 向	Y 向	X 向	Y 向	
	设计模型	0.60		0.48	0.70	1.07	1.04	
SATWE	0.61	0.51	0.75	1.06	1.12	1/1216	1/1641	1/800
PMSAP	0.51	0.49	0.85	1.05	1.13	1/1307	1/1259	1/800

由表 2 计算结果可知，三种不同程序计算显示的结构在小震下的动力特性基本一致，且周期、位移等控制指标均可满足建筑抗震设计规范的限值要求，即原设计模型的计算结果安全可靠。

2.3 弹性时程分析及动力弹塑性时程分析

本工程歇山屋面结构复杂，斜梁水平梁交错，柱高各异，为了保证多遇地震下结构设计的安全可靠，采用 YJK 结构设计软件对结构进行了弹性时程分析，选取了 7 条地震波，包括 2 条人工波 (ArtWave-RH2TG055, ArtWave-RH3TG055)，5 条天然波 (Big Bear-01_NO_906, Chi-Chi, Taiwan-06_NO_3262, Coalinga-01_NO_326, Morgan Hill_NO_467, TH2TG055)，单条地震波及多条地震波时程分析得到的结构底部剪力均满足《建筑抗震设计规范》5.1.2 条的要求，故计算结果可取七组时程法的平均值和阵型分解反应谱法的较大值，分析结果如表 3 所示。

表 3 7 组地震波平均值与 CQC 法计算结果比较
Table 3 Comparison between the average value of 7 groups of seismic waves and the calculated results of CQC method

地震方向	楼层	时程法剪力/kN	CQC 法剪力/kN	比值	放大系数
X 向	2	2986	3467	0.861	1.000
Y 向	2	2959	3465	0.854	1.000

建筑结构

由表 3 计算结果可得：全楼地震力作用放大系数建议值为 1.0，即原结构地震力作用不需要放大。

为了验证结构在罕遇地震下的防倒塌能力，采用 YJK 优选 3 组地震波对结构进行弹塑性时程分析，包含 1 条人工波 (ArtWave-RH2TG065)，2 条天然波 (Chi-Chi, Taiwan-06_NO_3268、Morgan Hill_NO_472)。地震波的选取满足规范要求，对比结果见表 4。三组地震波作用下的结构的弹塑性层间位移角结果见表 5。

表 4 弹性时程剪力与反应谱的剪力对比
Table 4 Comparison of shear force between elastic time history shear force and response spectrum

波名称	X 向 剪力/kN	比值 /%	Y 向 剪力 /kN	比值 /%	是否满足 规范
ArtWave-RH2TG065	16869	81	17661	84	是
Chi-Chi, Taiwan-06_NO_3268	20977	101	21040	101	是
Morgan Hill_NO_472	16259	78	19799	95	是
多波平均	18035	87	19500	93	是
振型分解法	20680	-	20789	-	-

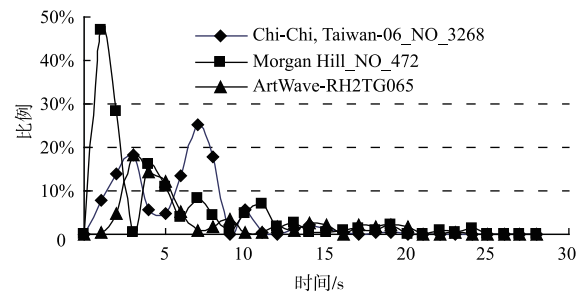
表 5 弹塑性层间位移角计算结果
Table 5 Calculation results of elastic-plastic displacement angle between layers

波名称	X 向	Y 向	层间位 移角限值	是否满足 规范
ArtWave-RH2TG065	1/124	1/245	1/100	是
Chi-Chi, Taiwan-06_NO_3268	1/154	1/304	1/100	是
Morgan Hill_NO_472	1/118	1/248	1/100	是
层间位移角包络值	1/118	1/245	1/100	是

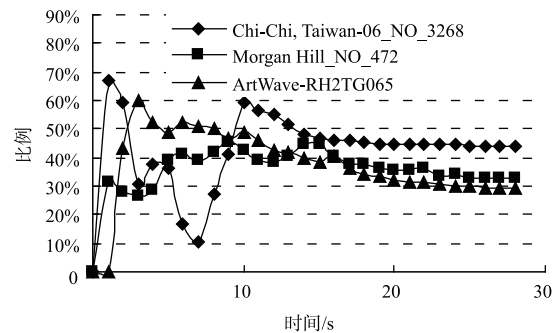
由表 5 结果分析可知，三种地震波作用下，结构两个方向的弹塑性层间位移角包络值为 1/74 小于 1/100，即满足规范对框架剪力墙结构弹塑性层间位移角限值的要求，能够实现三水准设防目标中“大震不倒”的目标要求。

罕遇地震作用下结构被源源不断的输入能量，其中动能和弹性应变能在结构中保存一部分，而剩下的能力主要由结构的阻尼和构件本身的塑性变形内能消耗（滞回耗能），当阻尼耗能和滞回耗能之和与总的输入能相平衡，结构就不会因为地震作用而发生倒塌^[4]。本工程的动能耗能、内能

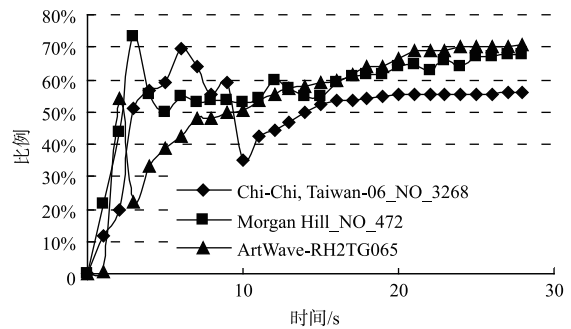
耗能和阻尼耗能所占地震动总输入能量的比例见图 6。由图 6 可以看出，结构在弹塑性状态下吸收的地震能量主要由阻尼耗能消散，约占地震动总输入能量的 65%，其次是结构的内能（变形能），约占地震动总输入能量的 30%，且结构进入塑性后应变能和动能在能量耗散过程中比例逐渐减小。上述能量分析可以表明阻尼耗能和内能耗能占比较大，说明结构材料选择及结构布置合理有效，在大震情况下拥有较好的延性和耗能能力。



(a) 动能耗能占比时程



(b) 结构内能耗能占比时程



(c) 阻尼耗能占比时程

图 6 弹塑性状态动能、内能、阻尼耗能比例分析
Fig. 6 Analysis of kinetic energy in elastoplastic state, internal energy, damping energy consumption ratio

2.4 动力弹塑性下的损伤分析

本工程为典型的单层中部开大洞，屋顶为歇山形式的框剪结构，以往设计中，屋面梁下柱的设计是我们关注的重点。本文利用有限元软件进行动力弹塑性分析，模型为拉伸显示模型，取三条地震波的包络值，受压损伤云图如图 7 所示。

框剪结构中，剪力墙为主要的抗侧力构件，并且是第一道抗震防线，这与图中各构件的损伤比例也相符，剪力墙在地震波作用下损伤较明显，尤其结构下部 1/6 高度处及与上部坊梁相接处，剪力墙的损伤值达到 0.9；另一个需要注意的地方为坊梁，传统建筑设计中，一般设计人员将坊梁按照构造来配筋，这样做是有风险的，损伤云图中坊梁的损伤因子最大值接近 0.8，屋架梁损伤因子接近 0.5，设计中应重视这几个损伤比较严重的构件。

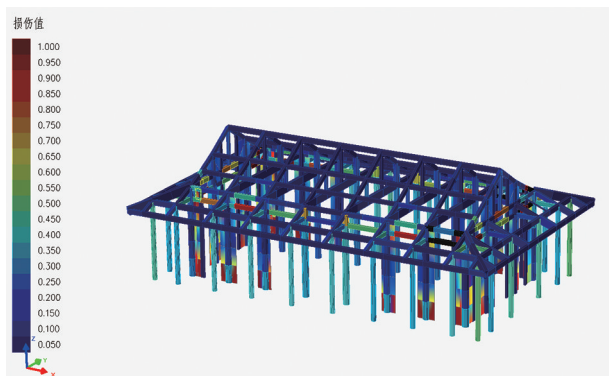


图 7 弹性状态下受压损伤云图

Fig. 7 Compression damage nephogram in elastoplastic state

3 结构设计抗震构造措施

3.1 抗震构造措施的抗震等级提高

历次大地震的经验表明，同样或相近的建筑，建造于 I 类场地时震害较轻，建造于 III、IV 类场地震害较重。根据《开元寺一期岩土工程勘察报告》（详勘）可知：拟建场地抗震设防烈度 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15 g，建筑场地类别为 III 类。根据《建筑抗震设计规范》第 3.3.3 条，设计基本地震加速度 0.15 g 的地区，宜按抗震设防烈度 8 度（0.2 g）抗震设防建筑的要求采取抗震构造措施，即建筑物的抗震构造措施等级提高一级。

3.2 室内外高差处加强措施

建筑室内外高差达到 1.8 m，考虑室外地面对于结构嵌固作用，设计中将基础埋深位于 -3.2 m 处，既有效的利用了室外地面对结构的嵌固作用，也满足规范对结构的埋深要求。

3.3 屋面节点构造加强措施

考虑到地震中屋架位置的枋梁与柱相连接的地方容易破坏，设计中利用构造钢筋将柱顶部梁底斗拱造型构造节点连接成一个大节点，起到了较好的强节点弱构件作用。枋梁交柱的配筋做法详见图 8、图 9 所示。

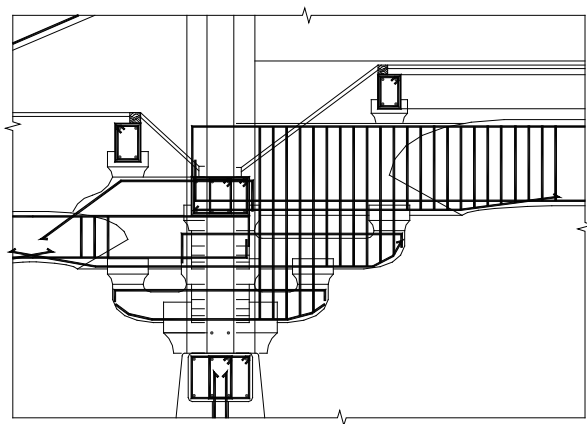


图 8 不同标高、位置枋梁配筋做法立面图

Fig. 8 Elevation drawing of beam reinforcement at different elevation and position



图 9 不同标高、位置枋梁配筋做法剖面图

Fig. 9 Cross section of beam reinforcement at different elevation and position

3.4 外廊柱收分加强措施

根据建筑需求，外圈廊柱为外截面均匀收分柱，结构设计将柱子按照实际变截面在模型中输入，并在施工图设计中将柱子箍筋全高加密，来抵消不等高的建筑构件对柱子的抗剪不利与柱收分导致的建筑‘头重脚轻’的影响。

建筑结构

4 结论

(1) 本结构在设计中考虑了建筑对于室内大空间的要求,去掉下弦梁,采用横向折梁承受屋面荷载的受力方式,并与传统屋架模型进行了对比,利用横向折梁受力体系能够满足受力要求,尽可能的利用屋面三角形空间,为今后类似的仿古设计提供了计算依据,为建筑设计提供了更加开阔的想象空间。

(2) 通过分析结构在弹塑性状态下的层间位移角以及动能、内能、阻尼耗能比例特点,验证了结构在大震情况下拥有良好的延性和耗能能力和抗倒塌能力。

(3) 通过有限元动力弹塑性分析,对结构的受压损伤云图进行了分析,提出设计中容易忽视的损伤因子较大的部位,找到设计易忽视的薄弱点,为结构安全性提供了保障。

(4) 通过提高抗震构造措施的抗震等级、加强室内外高差较大的部位、加强屋面梁柱节点以及外廊柱箍筋等措施有效提高结构实际的抗震性能。为今后类似的中国传统建筑的结构设计提供了可借鉴的经验。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 田永复. 中国仿古建筑构造精解 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 徐广洋. 多高层钢筋混凝土建筑结构地震能量分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.

欢迎订阅 2024 年《砖瓦》杂志

——砌块、墙板、绿色装配式建筑

《砖瓦》杂志 1971 年创刊,是国内外公开发行的、面向我国墙体屋面材料行业的核心优秀科技期刊,中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)统计源期刊、中国期刊全文数据库(CJFD)全文收录期刊,“万方数据-数字化期刊群”核心期刊。《砖瓦》杂志权威报道以烧结砖瓦为主的墙体屋面材料行业发展动态、最新科研成果、新产品、新技术、节能环保、废弃物利用、砖瓦文化及绿色节能建筑,以及古建筑、园林设计、砖瓦历史文化、现代建筑应用、节能减排、废弃物综合利用、墙材机械装备及相关配套产品的应用。2020 年起,新增“规划设计”“工程设计”“工程管理”“施工技术”“工程教学”等栏目。《砖瓦》杂志是中国砖瓦界与国际交流的重要窗口,是广大读者获取行业最新信息和技术的重要渠道,也是科技人员进行学术探讨、技术交流的重要平台。每年由《砖瓦》杂志社主办的技术交流行业博览会得到了业内的极大关注。《砖瓦》为月刊,国际刊号:ISSN 1001-6945,国内刊号:CN61-1145/TU,全年 12 期,每期 180 页,大 16 开本,封面和插页均采用铜版纸四色胶印,邮局订阅(邮发代号:52-37)或编辑部邮购订阅均可。全年定价 180 元(含邮费)。欢迎订阅,欢迎各企业刊登广告,欢迎投稿。

地 址:陕西省西安市长安南路 6 号

电 话:(029) 85221486 85221476

邮件地址(E-mail): qiangcai@vip.sina.com

邮 编:710061

传 真:(029)85221476

网 址:www.brick-tile.com