



隋唐·安得广厦千万间

冯 锐

Sui-Tang Dynasties: Earthquake resistant buildings

Feng Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[安徽铜陵农村民居抗震性能普查与研究](#)

Investigation on seismic performance of rural residential buildings in Tongling, Anhui

地震科学进展. 2020(1): 20–26

[山东临沂农村民居抗震设防调查与对策研究](#)

Investigation and countermeasure research on seismic fortification of rural residential buildings in Linyi, Shandong

地震科学进展. 2023(4): 171–178

[河北临城 \$M\_S\$ 3.7地震震例分析](#)

Analysis of the  $M_S$ 3.7 earthquake of in Lincheng, Hebei Province

地震科学进展. 2019(9): 7–13

[唐山古冶5.1级地震北京地区建筑结构地震反应观测记录初步分析](#)

Preliminary analysis of the structural seismic response observation data in Beijing recorded in Guye earthquake with magnitude 5.1

地震科学进展. 2020(7): 20–25

[区域与城市地震风险评估与监测技术研究项目及研究进展](#)

Project plan and research progress on regional and urban earthquake risk assessment and monitoring technology

地震科学进展. 2020(3): 1–19

[海域地震区划关键技术研究项目及研究进展](#)

Project plan and research progress on key technologies of seismic zoning in sea areas

地震科学进展. 2020(1): 2–19



关注微信公众号，获得更多资讯信息

冯锐. 隋唐·安得广厦千万间——漫步地震五千年(9)[J]. 地震科学进展, 2024, 54(7): 483-496. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-047  
Feng R. Sui-Tang Dynasties: Earthquake resistant buildings[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(7): 483-496. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-047



## 隋唐·安得广厦千万间 ——漫步地震五千年(9)

冯 锐\*

(中国地震台网中心, 北京 100045)

**摘要** 隋唐时期的史载地震主要在关中地区, 显现了秦岭南侧存在一条北西向的石泉—房县活动断裂带。地震活动和房屋抗震一直是社会关注的大事, 以蓟县独乐寺为典型代表, 重点介绍了唐代木结构建筑的抗震技术: 地基坚固和均匀、木结构的隔震机制、筒体结构的强抗震性能、斗拱构件的阻尼系统, 都对后世的技术发展产生了深刻影响。在现代建筑方面, 介绍了地震区划的基本原则, 分析了农村藏式民居的弱点和改进措施, 讨论了城市建筑的 3 种抗震结构及今后的发展方向。

**关键词** 抗震建筑; 唐代木结构建筑; 地震区划; 农村的藏式民居; 城市的 3 种抗震结构

**中图分类号:** P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)07-0483-14

**doi:** 10.19987/j.dzcxjz.2024-047

### Sui-Tang Dynasties: Earthquake resistant buildings

Feng Rui

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

**Abstract** The historical earthquakes during the Sui-Tang Dynasties occurred mainly in Guanzhong region, revealing the existence of a northwesterly Shiquan-Fangxian active fault zone on the south side of the Qinling Mountains. Seismic activity and the resistance of houses to earthquakes has always been a major concern of the community. Taking the Dule Temple in Jixian County as a typical representative, it focuses on the earthquake-resistant technology of wooden structure buildings in the Tang Dynasty: strong and homogeneous foundations, seismic isolation mechanisms for timber structures, strong seismic performance of cylinder structures, and damping systems for arch members and so on, which have had a profound impact on the development of technology in later generations. In the area of modern architecture, the basic principles of seismic zoning are introduced, the weaknesses of rural Tibetan houses and improvement measures are analyzed, and three types of seismic-resistant structures for urban buildings and the future direction of development are discussed.

**Keywords** earthquake-resistant buildings; wood-framed buildings of the Tang Dynasty; seismic zoning; Tibetan-style houses in rural areas; three types of seismic-resistant structures in urban areas

收稿日期: 2024-03-18; 采用日期: 2024-04-10。

\* 通信作者: 冯锐(1941-), 男, 研究员, 主要从事地球物理学的研究。E-mail: fr97214@sina.com。



### 0 引言

唐朝开元二十二年(公元 734 年)天水的麦积山发生 7.5 级地震,石窟中部在地崩山摧中崩塌,被整体分割成东西两部,史载“坏庐舍殆尽,压死四千人,陵迁为谷”。唐玄宗只得派人员赴灾区祭奠山川,赈济事宜持续了两三年……

杜甫(712—770)(图 1)于 759 年造访了麦积山,面对震后房倒屋塌的萧瑟景象,他唏嘘落笔话凄凉:

野寺残僧少, 山园细路高。  
麝香眠石竹, 鹦鹉啄金桃。  
乱水通人过, 悬崖置屋牢。  
上方重阁晚, 百里见纤毫。

杜甫 760 年回到成都后,自己竟也同样地处于屋破风寒的困境,满腔悲怆的怒火终于大爆发:

安得广厦千万间,  
大庇天下寒士俱欢颜!  
风雨不动安如山。

寥寥几句,痛彻心扉地倾述了世事的艰辛和生活的期望。

看来,天灾和广厦即便在唐朝也是两件不可漠视的大事,我们需要坐下来好好谈一谈。

### 1 隋唐地震活动

南北朝的混乱过后,历史地震的记载量逐渐增多,不过仍以关中地区为主。

安史之乱(755—763)前的地震多在河西走廊一



图 1 杜甫(蒋兆和, 1980)

Fig. 1 Du Fu (Jiang Zhaohe, 1980)

带,特别是 734 年天水麦积山和 756 年张掖高台的两次 7 级地震<sup>[1-2]</sup>,震中烈度分别为 X 度和 IX 度,石窟破坏明显。

763 年后,唐朝走入下坡。人口从 4810 万陡降至 1690 万,又与吐蕃持续了百余年的战争,845 年的甘露之变由宦官当政后,社会更糟糕(图 2)。此期间最严重的地震有两次:849 年的包头 7 级地震和 788 年的安康—竹山 6.5 级地震,后者距长安仅 100 km 左右,是南秦岭地区自公元前 143 年 5 级地震以来的最大事件。

这次地震的两个特点值得注意:

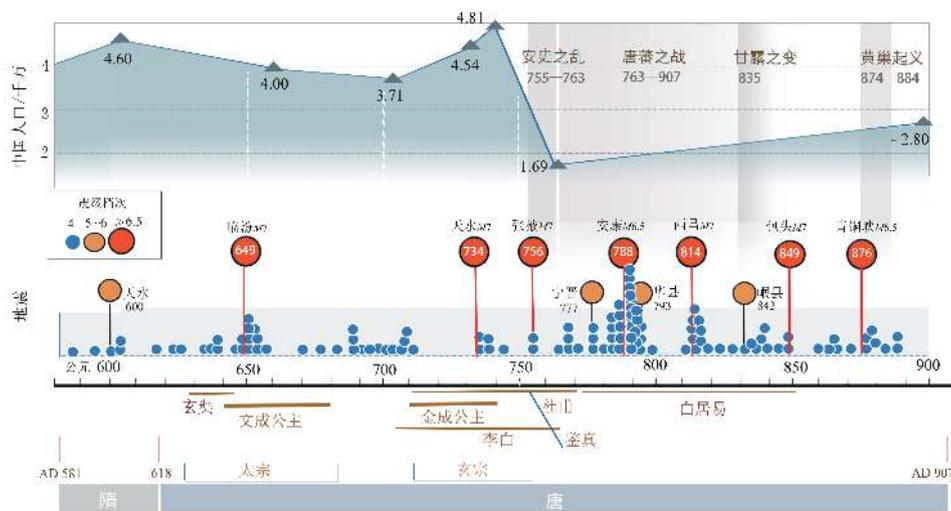


图 2 隋唐时期的地震序列和重大历史事件

Fig. 2 Seismic sequences and major historical events in the Sui-Tang Dynasties

其一, 788 年地震的活动期较长。

有感地震在 671 年已经出现, 从 736 年后逐渐增强到 788 年, 余震从当年的 2 月持续到 10 月, 直到 860 年左右才慢慢平静下来。这期间, 还在北秦岭的华县—永济地区发生 793 年的 6 级地震, 也引起了“京师关辅有声如雷, 环城壁庐舍, 地裂水涌”(《旧唐书·本纪》)。

构造背景上, 北西走向的石泉—安康—房县断裂是它的发震构造(图 3)<sup>[3-4]</sup>。明清时代的 1569 年安康、1632 年竹溪、1742 年房县, 甚至 1868 年和 1959 年的 5 级地震都发生在这个构造带上。这条断裂位于湖北武当山和四川大巴山之间, 东南端终止于神农架, 西北端与北秦岭东西走向的地震带呈“八字开岔

式”相连(图 4)。由于关中地区处于华北地块、华南地块和青藏东北缘接壤部位, 外围的大型活动断层交汇于此, 多种走向、多种类型的活动系列并存, 故而地质构造十分破碎和复杂, 是个大震很少、小震不停的地方。

其二, 社会观念开始变化。

788 年的地震发生在大年初一, 德宗正陶醉在百官朝贺之际, 未料大灾降临, 江溢山裂, 庐舍多坏, 居人露处(《新唐书》), 虽然他也因循下罪己诏、搞大赦、用贤良、放赈济等等。毕竟, 唐朝的社会观念已经不同于魏晋, 在佛教盛行之下, 早自唐高宗就已经从新的角度来为 650 年地震自责了: 朕政教不

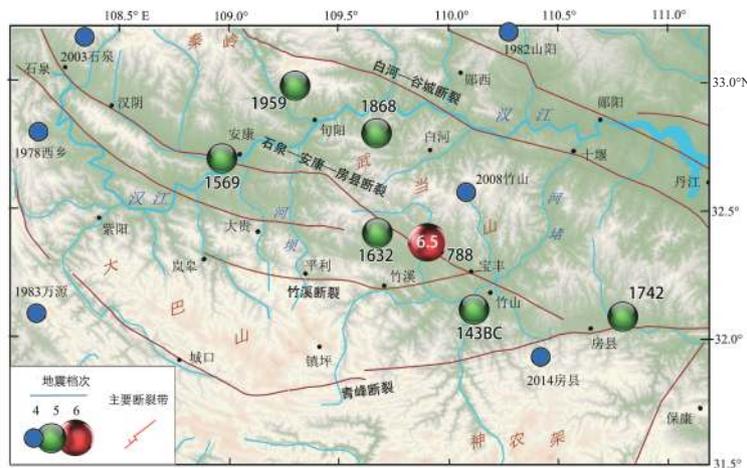


图 3 安康—房县地区较强的地震分布(刘珠妹, 2024)

Fig. 3 Distribution of stronger earthquakes in the Ankang-Fangxian area (Liu Zhumei, 2024)

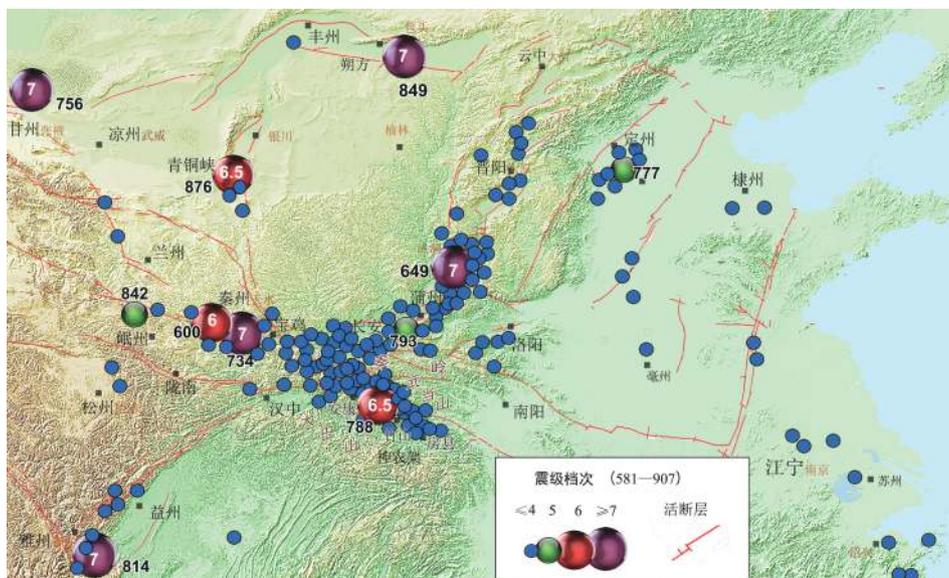


图 4 隋唐时期的地震分布(4 级以下震中仅供参考)

Fig. 4 Earthquakes in the Sui-Tang Dynasties (epicenters of earthquakes with magnitude below 4 are for reference only)

明,使晋州之地,屡有震动(《旧唐书·五行志》)。627年的益州(今成都)地震、636年山西蒲州地震、699年洛阳地震都发生在做法事、念佛经之际,据说都是“如来降迹”(《大方广佛华严经感应传》)……

总之,自从如来佛来到东土大唐,地震究竟是什么,越来越说不清楚了。

## 2 唐代木结构建筑

### 2.1 独乐寺

645年玄奘从西天取经回来以后,佛教发达,建于652年慈恩寺的大雁塔、707年荐福寺的小雁塔,重修于782年的五台山南禅寺和佛光寺已经香火不断了,传承唐朝遗风的后世木结构建筑遍及全国。

其中,河北蓟县的独乐寺最具代表性(图5)。

独乐寺在建筑领域的崇高地位不是其他建筑能望其项背的<sup>[5]</sup>:它是我国现存的最早木结构高层楼阁式建筑,是最早的庑(wǔ)殿顶(屋顶的斜坡呈四面状),坐拥最大的菩萨塑像之一。而且,它的历史最早可以追溯至唐朝贞观十年(公元636年),毁后,重建于辽984年,梁架和墙一直没有更动过。高23m的观音阁外观两层、内部三层,匾额“观音之阁”4个大字是李白52岁北游幽州时所写,山门匾额“独乐寺”出自明代严嵩的手笔,书法上都很具特色。

1931年“九一八”事变爆发,华北处于日军侵占

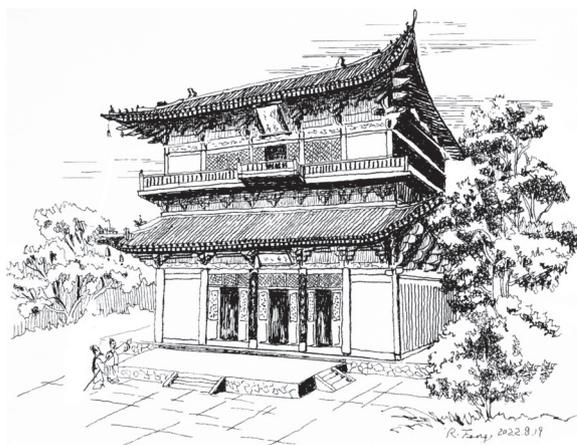


图5 蓟县独乐寺

Fig. 5 Dule Temple in Jixian

之际,梁思成(1901—1972)等人不顾个人安危,率先对独乐寺进行了实地测量研究,撰写了数十万字的详尽报告《蓟县独乐寺观音阁山门考》,开创了中国古代建筑研究的先河,成为中国建筑学术史上的一个里程碑。

木结构建筑容易燃烧和腐朽,木材的变形和垮塌更会降低它的稳定性。但是独乐寺的表现却令地震学和建筑学界诧异(图6),抗震能力之强超乎了专业的想象力<sup>[5]</sup>:

●1057年宝坻发生7.5级大震<sup>[6]</sup>,大坏城郭,覆死者数万人(《续资治通鉴长编》),Ⅷ区的北京

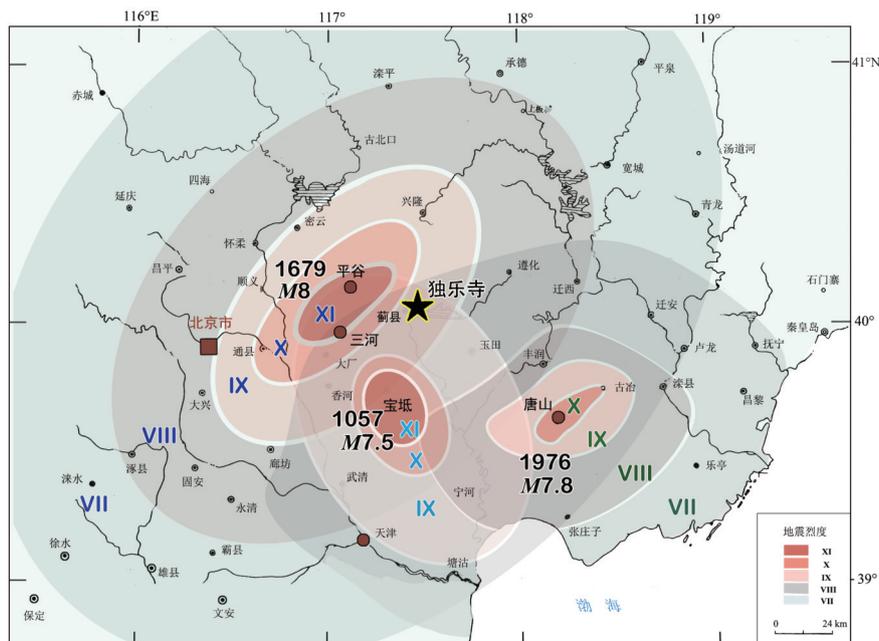


图6 独乐寺经受的3次大地震

Fig. 6 Three major earthquakes that Dule Temple has endured

悯忠寺被毁，而IX区里的独乐寺屹立未倒，次年做的大修。

●1679年三河—平谷8级大震<sup>[7]</sup>，IX度区的蓟县城内官廨民舍无一幸存，独阁不圯(pi)(《周易录》)。直到1730年北京圆明园6.5级地震后，才于1753年对它做了一次修缮。

●1976年唐山7.8级大震<sup>[8]</sup>，独乐寺处VII度区，除墙皮部分脱落外，未见梁架歪闪。

在中国现存的千年抑或数百年的古建筑里，能经历过3次如此高强度的地震冲击而巍然屹立的，唯独乐寺的观音阁一件，非同寻常。

研究它的文章已然汗牛充栋，珍贵的学术价值深深影响了后世。梁思成先生的调查报告和几篇基础性的科学论文<sup>[5,9-12]</sup>，如果视而不读、瞎发议论，恐怕是不行的。

起码，它的几项独到之处需要铭记在心：

#### (1) 地基处理技术。

探测证实，独乐寺在唐辽时期的地坪是在今日的2m多深处，即观音阁的最初建设是立在高耸的台基上<sup>[11]</sup>，地基的总厚度可能已经达到5m左右(图7左图)，故而多次地震后的地基没有发生过哪怕是局部的沉陷。

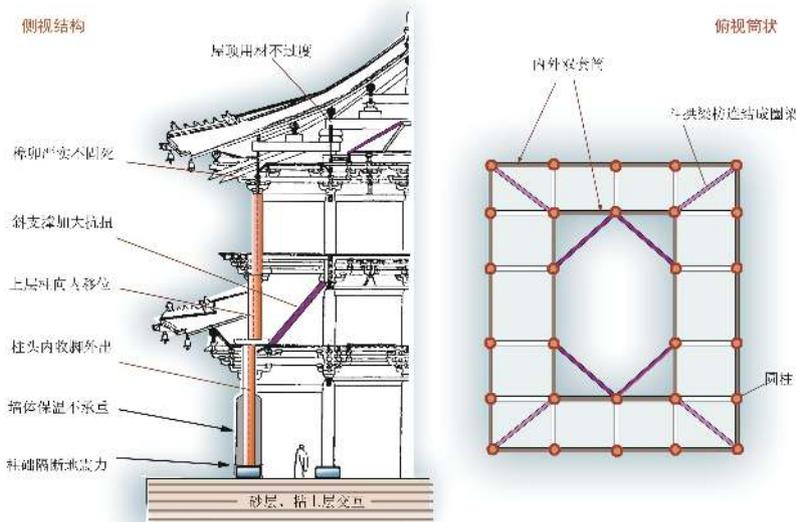


图7 独乐寺的木结构

Fig. 7 Wooden structure of Dule Temple

日本学者指出<sup>[13]</sup>，中国人在隋唐朝之际发明了一种优秀的减震地基：将砂层和粘土层交互叠压、交替组合而成。粘土层的承载力很大，砂层在水平方向易于流动，这种交替组合的地基非常匀称，可以阻挠地震剪切力的上传。技术传到日本后被称作“版筑构法”，认为是现代减震隔震技术的思想原型。对于国内学界常说的“独乐寺地基坚实而匀称”，是否属于这种类型，有待勘探证实。

#### (2) 木结构存在隔震机制。

中国传统木结构的柱子是简单地置于础石上的，二者间并没有固定的连接措施(图7和图8)。这样做法的初衷，说不清，但在地震中却有着意想不到的隔震效果<sup>[10]</sup>：柱子很容易通过在础石面上的滑移

错位而消耗地震能量，使得上部建筑体免遭破坏，与现代科学的“隔震”原则毫无区别！

我们在地震现场的工作中也注意到：1976年唐山地震时，故宫交泰殿的内柱就滑移2cm；2008年汶川地震时，映秀镇某仓库和都江堰二王庙的柱子也在础石面上出现了cm级的相对滑移，客观上都良好地保护了建筑物的整体安全。

再者，独乐寺木柱与墙体的功能是完全独立的——房柱只承重不围护、墙体只围护不承重，中上层的墙体由非常轻软的荆芭抹泥而成。其效果真如谚语所说：

鲁班盖房，墙倒屋不塌，地动房不摇。

#### (3) 常言：抗震不抗震，关键看结构。



图8 独乐寺剖析图(李乾朗, 2017)

Fig. 8 Anatomy of Dule Temple (Li Qianlang, 2017)

独乐寺与唐朝在长安修建的大雁塔(652年,高

64 m)、小雁塔(707年,高43 m)以及辽代的应县木塔(1056年,高67 m)均为筒体结构(silo construction)。建筑物的中心是置放佛像的空芯筒体,内部设有木构式楼层(图9),外围是双层或多层套筒的网状结构,都抵御了多次地震的袭击。

原因在于地震波的震动是存在方向性的,筒状结构能避免各方向应力的局部集中、抗御地震水平推力和扭曲应力的冲击,即便有垂直颠簸也不易受损。古代剧院和运动场等许多大型建筑也多采取筒体或“面包圈”式的结构,福建一带的土楼也属这类抗震结构。

现代科技说明<sup>[10]</sup>,筒体结构的空芯筒体,空间整体刚度大,抗震能力很强,中心筒体可以用来布设电梯间、楼梯间和管道间,遂构成了一个核心筒体,能够充分发挥出空间结构的整体作用。它是高层建筑中最具发展前途的一种结构类型,世界各地已大量采用。在钢结构和钢筋混凝土结构产生之前,中国的唐朝已经能够用短木料建造起这样高大抗震的建筑,不能不令人折服。

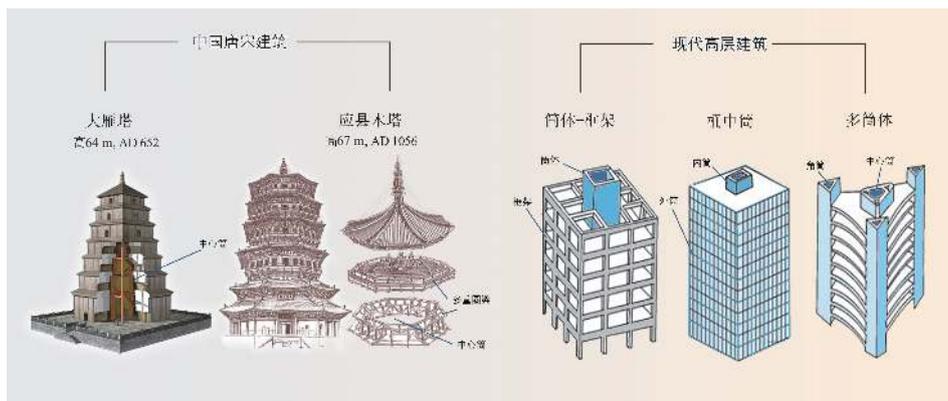


图9 古今建筑的筒体结构

Fig. 9 Silo construction in ancient and modern buildings

#### (4) 斗拱构件中的阻尼系统。

连接构件的斗拱构成了一种巨大的耗能系统,是避震的一个重要设计。柱头上的斗拱作为梁柱的节点,不但容纳着梁头,还经榫卯关系把梁柱所受的作用力化整为零,变成由数百个小构件来传递重量(图10)。特别是,所有木构件的榫卯结合件,严实但不固死,有伸缩余地。

在地震的水平往复振动时,存在斗底与拱端的滑移,全结构便处于一种韧性状态,建筑物会随地震波而摆动(摆幅甚至可达到 $15^\circ$ ),从而吸收了绝大部分地震能量,使得整个古建筑不至于倾倒。它类似于

现代建筑中所采用的阻尼耗能系统。

简而言之,独乐寺和应县木塔等作为我国古代高层楼阁式建筑的杰作和精品,所蕴含的减震抗震设计思想和实践经验,都是宝贵的遗产。

## 2.2 推广

隋唐时代在建筑上积累的实践经验,为宋朝李诫编著《营造法式》奠定了基础——中国古建筑的技术规范。其后,各地涌现了许多抗震的优秀建筑<sup>[12]</sup>,既适合当地环境和民俗,又有独特的发展(图11)。

这个时期的中日文化交流相当紧密,特别是鉴真和尚(688—763)于754年东渡日本,带去了中国

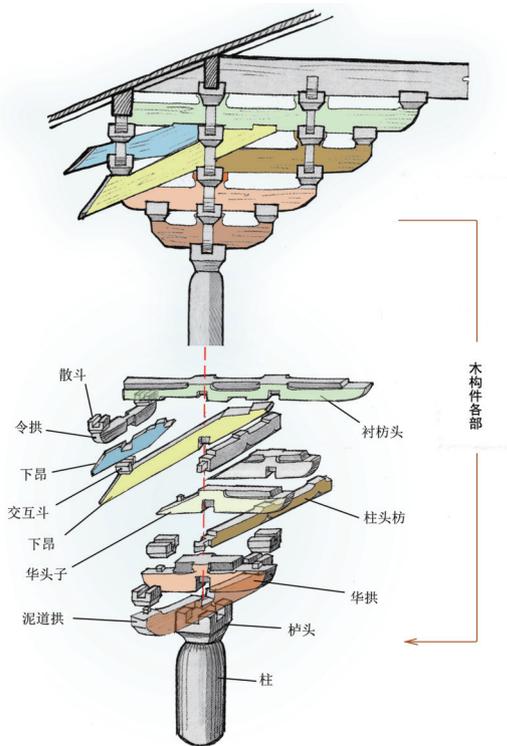


图 10 斗拱结构

Fig. 10 Chinese arch construction

建筑、塑像、壁画、医药等方面的成果，为日本文化高潮的形成增添了异彩。多地震的日本积极地引入了先进建筑经验和工艺，发展起自己的设计。他们至今还保留着 30 多座隋唐时代的古代木结构建筑，远

比我们的要多。

值得一提的是，奈良法隆寺内的五重塔和唐招提寺。

五重塔建于鉴真东渡之前的公元 607 年，高 32.45 m，是日本现存最古老的唐代木结构佛教建筑之一。中心有一个通心柱直插地下(图 12)，侧柱简单地置于础石上以保持滑动功能，各层侧柱的位置也是逐渐内收的，和独乐寺、应县木塔的处理一样。构件的结合是利用嵌入方式进行连接，即把一构件上的榫头嵌入另一构件的凹凿处，地震时通过构件的歪扭和缓缓摇晃来耗能，实现整体的柔性抗震；地震时，塔各层的倾斜方向相互交错，下层向左，上层向右，再上层又是向左……以交错摇晃来维系平衡。通心柱纵贯五重塔内部，使得整个结构像插在地上的一把伞，即使某一层的构筑体要飞出去，通心柱会把它拽住，通心柱也会像钟摆一样摇动，起着抵消震力的作用。

1995 年的大阪—神户  $M_s7.3$  地震，5520 人丧生(根据 ISC, Engdahl, NOAA)，大量钢筋混凝土建筑和高架桥倒塌。五重塔和唐招提寺就位于震中区但没有损坏，维修后仍然保持完好。

### 3 现代建筑

#### 3.1 地震区划

研究表明，建筑物的受损程度与两个基本参数



图 11 中国古代抗震建筑典型

Fig. 11 Typical earthquake resistant buildings in ancient China

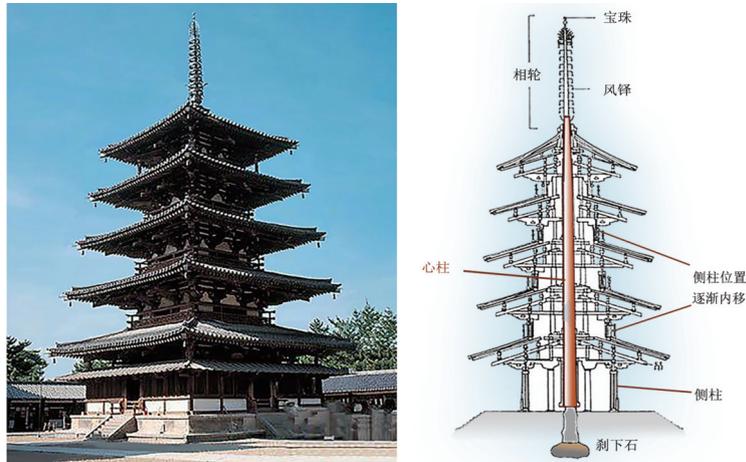


图 12 日本奈良五重塔的抗震结构

Fig. 12 Structure of five-storied pagoda in Nara, Japan

有关——地面震动的水平加速度、地面震动的频段范围。当然，也与建筑物本身的结构有关，因为它们各自的自振周期不同，对地面震动的响应是有区别的：在外部条件完全相同的情况下，高楼惧怕低频长周期的摇晃；平房遭受破坏的主要因素是高频震动。

图 13 是一个典型的地面震动反应谱，呈倒梯形

分布：中段的平台部分是峰值加速度值，记成 PGA (peak ground acceleration)；长周期部分属于尾段，地面加速度迅速变小，人员的感受是眩晕状；高频部分是前段，平房和一二层小楼遭冲击最大。在各区地质构造不同的情况下，一条反应谱的曲线当然不能适用于全国。

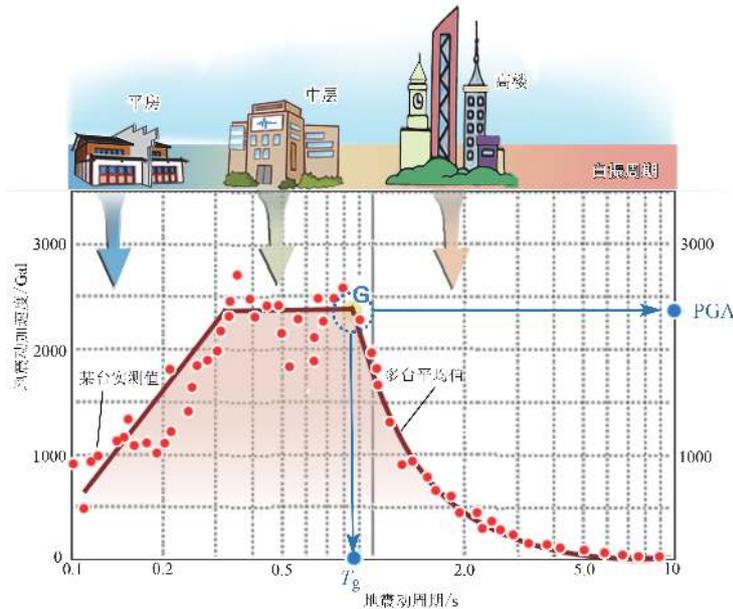


图 13 地面震动的加速度反应频谱

Fig. 13 Acceleration response spectra of ground shaking

为此，需要编制全国的地震危险性区划图，指导各地的建筑抗震设计。

我国最新的区划图是 2015 年编制的<sup>[14]</sup>：根据历史地震资料和地质构造信息，编制了两张参数分布图(图 14)：一幅是特征周期  $T_g$ (图 13 中反应谱右侧开

始下降的拐点 G 的周期)；另一幅是峰值加速度 PGA。国际上还有更细致的做法：对一系列的反应周期，编制一系列的全国峰值加速度、峰值速度的分布图集。

各地区的建筑工作，就要按照所在地区的  $T_g$  和 PGA 值、建筑设计规范完成实施。这样的建筑物才

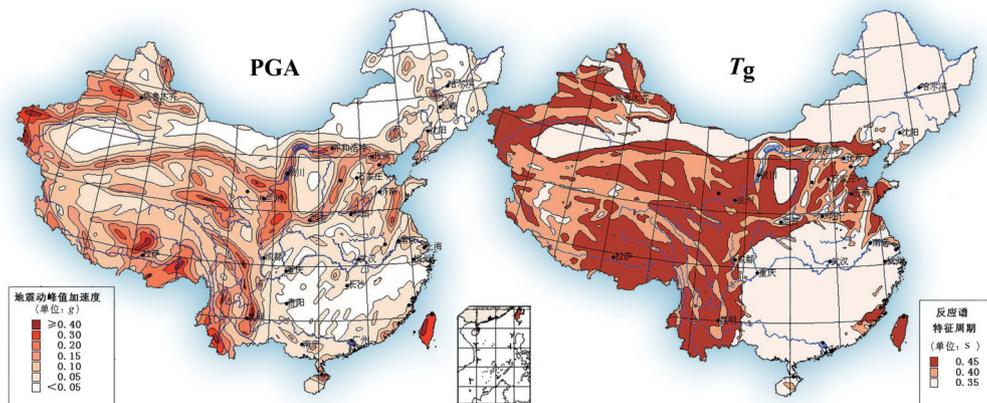


图 14 中国的地震区划图

Fig. 14 Seismic zoning map of China

是合规、抗震、安全的。

### 3.2 农村——藏式民居

#### 3.2.1 两个基本情况

问题来了：国家发布了地震区划和建筑规范，管得了城市管得了农村吗？

管不了。

我国目前绝大多数农村的房屋都是自建自用的，建设尚处于小农经济阶段，初步脱贫的农村几乎考虑不到什么抗震的问题，既无法与国家抗震设防标准对接，也还没有建立起像新西兰和日本那样的完善的地震保险制度。

所以，没灾没人管、有灾临时管，管也不追责。

于是，受灾返贫就免不了，尤以西部（特别是青藏地区）的民居问题最突出。据悉，国家在 2011 年以后已经在新疆累计建成 267 万套抗震安居房，在 2024 年乌什 7.1 级地震中发挥了有效作用。今后如何推广到整个西部地区，还不清楚。

有两个情况值得关注：

一是西部的地震形势，愈发紧迫。

自 2001 年以来，青藏高原及邻区的地震活动已经明显加剧。截止 2023 年的统计，我国大陆地区 7~8 级大地震全部发生在西部，而不是在中东部地区。具体来讲：新疆 2 次，其余的 6 次都在青藏高原的巴颜喀拉地块四周——2001 年昆仑西山口和 2008 年汶川的 8 级地震，以及 2010 年玉树、2013 年芦山、2017 年九寨沟、2021 年玛多的 7 级以上地震。与此同时，还有近 50 次的 6 级地震也基本发生在这些地区。如果说，严峻形势已经高于 20 世纪六七十年代的中部、东部地区，并非言过其实。按该地区的

地震活跃期大约 350 年来估算，在可预见的 50 年内，再发生三四次的 8 级地震、十余次的 7 级地震是不会令人吃惊的。

问题是：准备好了吗？

仅靠应急救援能应对这样广袤又贫弱的地域吗？

二是以藏式民居为主要形式的房屋抗震水平很低、受损程度严重，远超出预想。

不只一份的现场调查报告摆在面前<sup>[15-18]</sup>，在地震烈度为 VI 度时，我国中部、东部地区的绝大多数建筑都属于“无需设防”的水平，约 95% 的钢筋混凝土结构都是“基本完好的”，人员跑不跑到户外关系不大。但对西部地区不然，在这样一个非紧要、非严重的 VI 度震动水平下，藏式民居能保持基本完好的竟然只占 64%，即是说接近一半的房屋已经遭到了损毁，这是很难让人理解的。

而在地震烈度为 VIII 度的强烈震动区域里，一般的钢混结构完全可以有一半以上的保持基本完好，但藏式民居中的 98% 都要倒塌毁掉（图 15）。一些地震现场的情况只会更严重，不会更乐观。

应该指出一点：对青藏高原地区的不少人口集中的城镇而言，本应达到的抗御地震的基本烈度并不是 VIII 度，而是水平加速度还要高一倍的 IX 度！

这个残酷的现实大大超乎了人们的预想，只因发生在人烟稀少的西部地区，没能引起社会的足够重视。

国内外学者对砖混结构的抗震研究相当丰富，而针对频遭地震袭扰的藏式民居就十分缺乏调查和研究，这个漏洞正在成为援建工作中的一个亟待弥



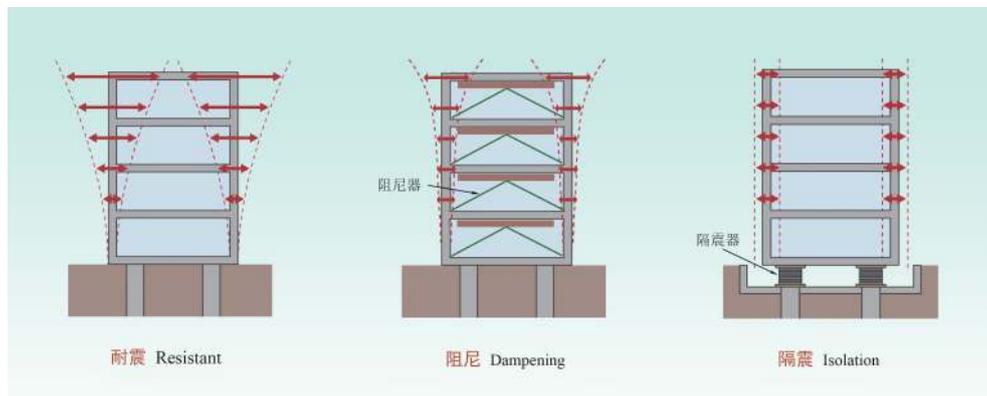


图 17 3 种抗震结构示意图

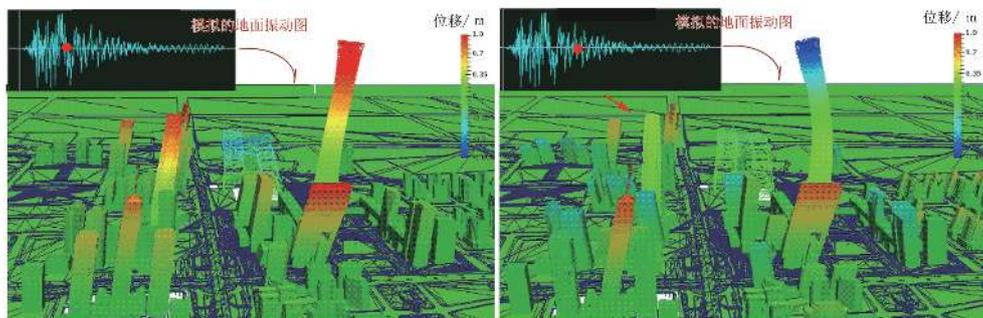
Fig. 17 Schematic diagrams of the three types of earthquake resistant structures

因素。原因在于：盆地内相对松软的物质与外部基岩之间具有较强的波阻抗差，盆地内部会存在多重反射、面波震荡和聚焦效应。目前，北京地区 32 层以下建筑占 89.1%，自振周期 2.7~3.6 s，超过 40 层的商务楼仅占 2.1%，其中最高为 80 层，自振周期长达 9.0 s。对今后的建设，应该尽量避免建造自振周期在 3 s 左右的高层建筑。

一些研究还分析了未来发震断层附近的地面强地震动分布，以 1679 年三河—平谷 8 级地震的重复发生为标杆，开展了数值模拟，确认了近断层效应和

盆地效应是比较明显的<sup>[20]</sup>：

三河—平谷和大厂地区的 PGA(峰值地面加速度)最高可达 0.37g 和 0.32g，北京中心城区 PGA 和 PGV(峰值地面速度)分别达到 0.12g 和 1.0 m/s，为城市发展提供了重要参考。陆新征课题组还对上述结果绘制了场景模拟<sup>[21]</sup>(图 18)：CBD 的地面运动强度大致在 8 度(设防地震)到 8+ 度(罕遇地震)之间。他们的模拟确认：该区的建筑物目前都已经具有较强的抗震能力，预计可能受到的破坏基本在轻度至中度之间。

图 18 模拟的平谷 8 级地震在北京 CBD 区的震动场景<sup>[21]</sup>Fig. 18 Simulated scenes of a Pinggu M8 earthquake shaking Beijing's CBD area<sup>[21]</sup>

### 3.3.2 阻尼结构

阻尼器的采用可以在不承载建筑物重量的情况下减震。它只通过钢和铅的金属变形，或者类似糖浆和油一类的流体阻尼(图 19)，甚至会利用摩擦阻力来吸收地震能量，以换得房屋和结构物的安全。

现代阻尼器的功能远不是古代榫卯结构可以相比的，它的应用更加方便和有效。可以置于地基处，也可以设置在高楼的中间部位抑或特定部位。比如北京长安街的银泰中心 62 层楼，采用了 73 个液体

粘滞阻尼器；南京长江大桥引桥设置了 54 个阻尼器；郑州会展中心设置了 36 套；江阴大桥设置了 4 个特大型阻尼器等，都发挥了很好的抗震作用。

台北 101 大楼高 508 m，设计了很有特色的减震阻尼(图 20)。在 88~92 层的内部悬挂了一个单摆，摆锤是 660 t 的巨型钢球阻尼器，直径 5.5 m。在 2015 年 13 级强台风和 2024 年花莲 7.3 级大震的袭击中，单摆的惯性和四周的阻尼器有效地抗御了外部的冲击，维持了高楼的稳定。



## 参考文献

- [1] 雷中生, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 734年天水7级地震考证与发震构造分析[J]. 地震地质, 2007, 29(1): 51-62  
Lei Z S, Yuan D Y, Ge W P, et al. Textual research on the Tianshui M7 earthquake in 734 AD and analysis of its causative structure[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 51-62
- [2] 雷中生, 袁道阳, 郑文俊, 等. 756年张掖—酒泉地震考[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 72-77  
Lei Z S, Yuan D Y, Zheng W J, et al. Textural research of Zhangye-Jiuquan earthquake in 756 A. D.[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(1): 72-77
- [3] 廉超, 陈新强, 乔岳强, 等. 788年湖北房县西北地震核查[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(4): 758-766  
Lian C, Chen X Q, Qiao Y Q, et al. Research on the historical documents of the A.D.788 earthquake in Northwestern Fangxian County of Hubei Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(4): 758-766
- [4] 丁忠孝, 刘锁旺, 许光炳. 房县至安康一线北西(北西西)向构造带地震地质特征的初步认识[J]. 地壳形变与地震, 1982(4): 107-116  
Ding Z X, Liu S W, Xu G B. Preliminary study on the seismological and geological feature of Fangxian-Ankang northwestern tectonic belt[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1982(4): 107-116
- [5] 韩嘉谷. 独乐寺史迹考[J]. 北方文物, 1986(2): 50-56  
Han J G. Examination of the historic sites of Dule Temple[J]. *Northern Cultural Relics*, 1986(2): 50-56
- [6] 王健. 京津唐地区地震密集与历史强震[M]. 北京: 地震出版社, 2011  
Wang J. Earthquake convergence and historical strong earthquakes in the Beijing-Tianjin-Tangshan region[M]. Beijing: Seismology Press, 2011
- [7] 国家地震局震害防御司. 中国强地震目录[M]. 北京: 地震出版社, 2005  
Department of Earthquake Disaster Prevention of China Earthquake Administration. China strong earthquake catalog[M]. Beijing: Seismology Press, 2005
- [8] 罗哲文. 谈独乐寺观音阁建筑的抗震性能问题[J]. 文物, 1976(10): 71-73, 99  
Luo Z W. Talking about the seismic performance of the Guanyin Pavilion building in Dule Temple[J]. *Cultural Relics*, 1976(10): 71-73, 99
- [9] 赵炳时, 林爱梅. 寻踪中国古建筑[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013  
Zhao B S, Lin A M. Study on the Chinese ancient architecture[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013
- [10] 郭黛姮. 抗震性能优异的中国古代木构楼阁建筑[C]//中国建筑学会建筑史学分会. 建筑历史与理论(第五辑). 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 24-28  
Guo D H. Ancient Chinese wooden pavilion buildings with excellent seismic performance[C]//Architectural History Branch of the Architectural Society of China. Architectural history and theory (Series V). Beijing: China Construction Industry Press, 1993: 24-28
- [11] 丁焱. 发现独乐寺[J]. 建筑学报, 2013(5): 1-9  
Ding Y. Discovering the Dule-si[J]. *Architectural Journal*, 2013(5): 1-9
- [12] 陈福季. 中国名胜古迹中的十大抗震建筑[J]. 文物春秋, 1993(3): 81-83  
Chen F J. Top 10 earthquake resistant buildings in China's famous monuments and sites[J]. *Cultural Relics History*, 1993(3): 81-83
- [13] 日本免震构造协会. 免震建筑[M]. 王晶, 译. 北京: 中国电力出版社, 2010  
Japan Association for Earthquake-Proof Construct. Earthquake-proof construction[M]. Wang J, Trans. Beijing: China Electric Power Press, 2010
- [14] 北京市地震局. 话说第五代地震区划图[M]. 北京: 地震出版社, 2016  
Beijing Earthquake Agency. On the fifth generation of seismic zoning maps[M]. Beijing: Seismology Press, 2011
- [15] 李碧雄, 王甜恬, 赵开鹏, 等. 传统藏式民居的典型震害及易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊1): 165-173  
Li B X, Wang T T, Zhao K P, et al. Typical earthquake damage of traditional Tibetan dwellings and its vulnerability[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(S1): 165-173
- [16] 成斌, 肖玉, 高明, 等. 川西藏羌石砌碉房民居抗震构造更新设计研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(9): 44-47  
Cheng B, Xiao Y, Gao M, et al. Study on seismic construction design of traditional Tibetan and Qiang's stone dwellings in western region of Sichuan Province[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2017, 39(9): 44-47
- [17] 丛宇, 谭森龙, 王佳豪. 藏式建筑震害分析及加固方法研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(24): 24-28, 51

- Cong Y, Tan S L, Wang J H. Research on seismic damage analysis and strengthening methods for Tibetan buildings[J]. *Shanxi Architecture*, 2022, 48(24): 24-28, 51
- [18] 李桦, 宋兵, 张文丽, 等. 藏式民居灾后重建设计研究: 以青海省玉树州结古镇新寨村实施方案为例 [J]. *建筑学报*, 2011(4): 1-6
- Li H, Song B, Zhang W L, et al. Study on the design for post-disaster reconstruction of Tibet-typed folk house: Taking the implementation plan for Xinzhai Village of Jiegu Town in Qinghai Yushu as example[J]. *Architectural Journal*, 2011(4): 1-6
- [19] 付长华, 高孟潭, 俞言祥. 用数值模拟方法研究北京盆地对3~10 s地震动的放大效应 [J]. *地震研究*, 2015, 38(3): 448-460
- Fu C H, Gao M T, Yu Y X. Studying on amplification effect of Beijing basin on 3~10 s ground motion by numerical simulation method[J]. *Journal of Seismological Research*, 2015, 38(3): 448-460
- [20] 巴振宁, 赵靖轩, 梁建文, 等. 基于有限断层震源模型的北京地区强地震动模拟: 以1679年三河—平谷8级地震为例 [J]. *地震研究*, 2022, 45(3): 479-488
- Ba Z N, Zhao J X, Liang J W, et al. Simulation of strong ground motion in Beijing area based on finite fault source model: Taking the 1679 Sanhe-Pinggu M8 earthquake as an example[J]. *Journal of Seismological Research*, 2022, 45(3): 479-488
- [21] 陆新征, 岳清瑞, 许镇, 等. 城市密集建筑区新型地震次生灾害研究进展 [J]. *工业建筑*, 2024, 54(2): 25-34
- Lu X Z, Yue Q R, Xu Z, et al. A review on novel seismic secondary disasters in urban dense building areas[J]. *Industrial Construction*, 2024, 54(2): 25-34