

# 基于云计算的工程结构地震响应数值模拟

陆新征, 陈磊, 曾翔, 吕晚晴

(清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 目的 为提高超大规模工程结构地震响应分析的计算效率, 提出利用云服务器开展地震响应数值模拟的方案. 方法 基于腾讯云等云计算环境, 介绍云计算用于结构地震响应分析的可行性, 并对云计算环境的搭建进行说明. 利用 OpenSees 等软件, 具体分析比较不同自由度数、不同规模的算例在云平台及本地计算环境中的计算效率. 结果 云平台的计算性能与本地计算环境的性能相当, 可以代替本地计算环境进行地震响应分析; 利用云平台并行处理计算任务, 可以大大提高计算效率. 结论 云服务器在工程结构地震响应数值模拟中呈现出计算效率高、设置灵活、成本低的特点, 具有良好的发展前景.

**关键词** 云计算; 高性能计算; 结构地震响应分析; 区域建筑震害分析

中图分类号 TU311.41

文献标志码 A

## Numerical Simulation for Seismic Responses of Engineering Structures Based on Cloud Computing

LU Xinzheng, CHEN Lei, ZENG Xiang, Lü Wanqing

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

**Abstract:** To enhance the computational efficiency of large-scale structural seismic response analysis, the cloud server was introduced to perform the numerical simulation. Based on a commercial cloud computing platform (e. g. Tencent Cloud), the feasibility of applying cloud computing to structural seismic response analysis was explored, and configuration of the cloud environment illustrated. Furthermore, computational efficiencies of cloud computing and the local computing environment were benchmarked by performing a series of non-linear time-history analyses using the seismic damage simulation software OpenSees. Results show that cloud computing has nearly the same performance as the local computing environment, but it has very significant computing efficiency, indicating that the local computing environment can be substituted by cloud computing for seismic response analyses of buildings. Conclusion is that the numerical simulation for seismic structural response based on cloud computing has high efficiency and low cost.

**Key words:** cloud computing; high performance computing; structural seismic response analysis; re-

收稿日期: 2015-04-10

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAJ08B02); 国家自然科学基金项目(51378299)

作者简介: 陆新征(1978—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事防灾减灾方面的研究.

gional building seismic damage analysis.

近年来,地震灾害频繁发生,地震工程的重要性愈发突出.通过计算机模拟预测工程结构的地震响应,是地震工程研究的重要内容<sup>[1]</sup>.计算机技术的发展为结构地震响应分析构建精细化模型、进行大规模数值计算提供了可能性<sup>[2]</sup>.尽管如此,由于精细模型的自由度可以达到百万数量级,且灾变破坏全过程非线性模拟算法非常复杂,计算量非常大,一般性能的计算机难以在短时间内得到结果<sup>[3]</sup>.因此,如何提高结构地震响应的计算效率、突破硬件与软件能力的限制,无疑是地震工程中一个亟待解决的问题.

超级计算机的飞速发展为此问题提供了一个解决方案.东京大学 Integrated Earthquake Simulation(IES)项目利用超级计算机“京”进行超大规模的工程数值计算<sup>[4-5]</sup>.超级计算机“京”拥有处理器 88 128 颗,核心 705 024 个,峰值计算性能高 11.28 PFlops,能够大幅提高模型的计算效率<sup>[6]</sup>.然而,尽管超级计算机某种程度上解决了结构地震响应分析中的大规模数值计算的问题,但其昂贵的造价与使用成本使其难以普遍应用于工程实际<sup>[7]</sup>.因此,需要寻找一种适合工程应用的高性能计算方案,既能满足地震工程中巨大的计算需求,又不致产生昂贵的投入成本.

云计算则是符合上述特点的解决方案之一.根据美国国家标准与技术研究院(NIST)的定义,云计算是一种利用互联网实现随时随地、按需、便捷地访问共享资源池(计算设施、存储设备、应用程序等)的计算模式<sup>[8]</sup>.用户(科研人员、设计单位)可以根据自己的需要,利用云计算运营商提供的云产品,灵活租用所需规模的计算资源,避免购买昂贵的硬件设备,从而充分利用云计算配置灵活、计算成本低等突出优点<sup>[9-10]</sup>,极大地突破目前土木工程计算机模拟在硬件和软件资源上的

制约.

在土木工程领域,一些科研项目也提出了结合云计算进行进一步研究的展望.如 HAZ-China 提出了建设基于云计算平台的地震灾害损失评估系统的初步设想<sup>[11]</sup>;文献<sup>[12]</sup>尝试建设基于云计算平台的结构健康监测系统.但总体来说,云计算在土木工程领域的应用尚不广泛,且主要集中在理论层面.然而,云计算实质上是一种可“像公共设施一样被使用”的计算资源<sup>[13-14]</sup>,其优势就在于为用户提供灵活丰富而低成本的计算服务<sup>[15]</sup>,且由于云计算服务商已经提供了不少较成熟的产品<sup>[16-18]</sup>,因此,直接利用这类云计算产品相比从理论层面搭建云计算平台更适于工程应用.

为了从实践上探索利用云计算进行结构地震响应分析计算的可行性,笔者结合腾讯云(Tencent Cloud)等主流商用云服务器,对工程结构云计算进行了研究.通过在不同云计算平台下租用不同规模的云计算资源,运行弹性静力往复推覆分析和地震动力时程分析算例,比较计算时间消耗与计算成本,探讨了云计算的参数配置方法.最后通过运行高层建筑和城市区域算例,测试了云计算在大型单体结构地震响应分析和区域震害分析中的性能,为将云计算技术引入地震工程研究提供了相应的参考.

## 1 测试软件与算例模型设定

云计算包括三种服务模式,分别为“基础设施即服务”(IaaS)、“平台即服务”(PaaS)与“软件即服务”(SaaS)<sup>[19]</sup>.其中 IaaS 通过网络为用户提供了服务器、操作系统、磁盘存储、数据库和信息资源<sup>[19]</sup>.用户通过 IaaS 对云服务器进行远程操作,从而完成计算任务并实现云端-本地数据传输.由于结构的地震响应分析会产生巨大的计算量,

并需要与本地传输数据文件(如结构模型文件、计算结果文件等),因此选择 IaaS 中云服务器这一服务应用于工程结构计算机模拟。

由于云计算在结构的地震响应分析方面尚缺乏丰富的研究与应用,因此需要对云计算环境的配置方法和计算性能进行测试。具体测试方法为:将计算软件与算例模型上传至云服务器进行计算,评估其分析时间与费用(见图 1)。

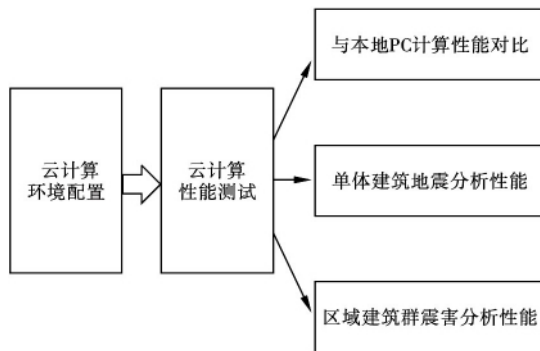


图 1 云计算的环境配置和性能测试

Fig. 1 Environment configuration and performance benchmark of cloud computing

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 是一个开源的结构震害有限元分析软件<sup>[20]</sup>,被广泛运用于结构、构件的抗震性能研究<sup>[21-23]</sup>。因此笔者选择 OpenSees 软件,测试云服务器的单体结构地震响应分析能力。使用的算例模型采用非线性纤维梁和分层壳单元,不同算例的编号和规模如表 1 所示,其中算例⑨是 142 m 高、42 层的高层建筑<sup>[24]</sup>(见图 2)。算例①~③的测试工况均为弹性静力往复推覆分析;算例④~⑨的测试工况均为弹塑性时程分析,选用 El-Centro 地震波作为输入,峰值加速度 (PGA) 设为 0.4 g,分析时长为 40 s,初始分析步长 0.01 s。输出参数为所有节点的位移时程。

对云服务器的区域建筑震害分析能力,则采用课题组编写的区域地震分析软件 UrbanSeismicSim 进行测试。采用层模型模拟结构在地震作用下的弹塑性响应。其具体模

表 1 OpenSees 算例模型列表

Table 1 Example models in the software OpenSees

编号	自由度数	模型类型	备注
①	330	剪力墙	分层壳模型
②	828	剪力墙	分层壳模型
③	1 026	剪力墙	分层壳模型
④	14 094	框架核心筒	纤维梁+分层壳
⑤	17 466	框架核心筒	纤维梁+分层壳
⑥	24 210	框架核心筒	纤维梁+分层壳
⑦	30 954	框架核心筒	纤维梁+分层壳
⑧	47 814	框架核心筒	纤维梁+分层壳
⑨	68 046	框架核心筒	纤维梁+分层壳

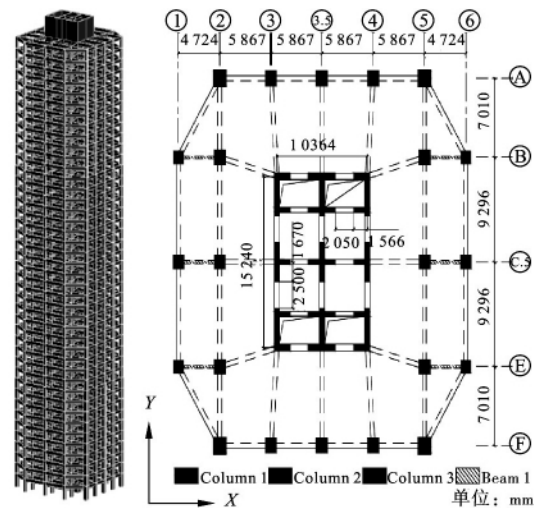


图 2 算例⑨概况

Fig. 2 Overview of model 9

型及参数确定方法见文献[25]。测试区域为我国西部某中心城市的建筑数据,包含 67 325 栋建筑,其中 99.8% 是不高于 10 层的中低层建筑。

## 2 云计算环境配置

目前比较成熟的云计算平台有阿里云、腾讯云、盛大云、微软云等,它们都允许用户指定云服务器的软件、硬件配置参数。其中,软件参数主要包括操作系统类型和版本、计算软件类型;硬件参数主要包括中央处理器 (CPU) 型号与核心数、内存大小、数据盘大小、公网带宽等。由于工程结构地震响应数值模拟问题通常仅能在特定操作系统(如微软

公司的 Microsoft Windows) 下求解,因此笔者仅讨论云服务器的硬件参数的配置.为了选择性能最优越的云计算平台,并给出合适的云服务器硬件参数配置,使用 OpenSees 软件

和算例①~⑨,对云计算环境硬件配置方案进行了对比分析.主要对比指标为模型计算时间、结果文件的传输时间、服务价格等.云计算环境配置流程如图3所示.

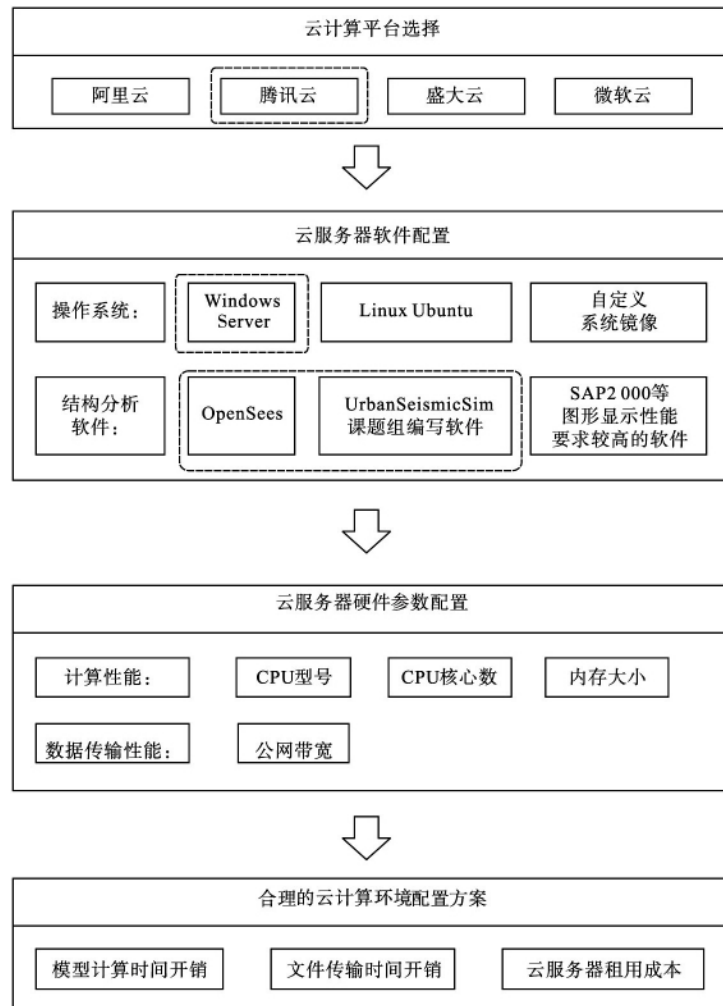


图3 云计算环境配置流程

Fig. 3 Flowchart of environment configuration for cloud computing

### 2.1 云计算平台选择

在不同云计算平台上运行算例①、②、③,对比其计算时间.其中,各平台云服务器的软件配置相同,而硬件均采用1核CPU、1G内存的配置,1 Mb/s 公网带宽,并保证充足的数据盘空间.分析结果如图4所示.腾讯云的计算效率大大优于盛大云和微软云平台,略微优于阿里云平台.各云计算平台计算效率不同的主要原因之一是它们所使用的

CPU 型号不同,在此次测试中,所选用的腾讯云和阿里云的CPU为Intel Core E5-2650 @ 2 GHz,盛大云CPU为AMD Opteron(tm) Processor 6172 @ 2100 MHz,微软云的CPU具体型号未给出,主频为1.6 GHz.目前盛大云和微软云提供的CPU性能相对较弱,其云服务器面向的主要客户可能是需要使用云主机运行网站的企业或个人,并不适合科学计算.因此,笔者选择腾讯云对云服务器的配置

参数进行进一步分析测试.

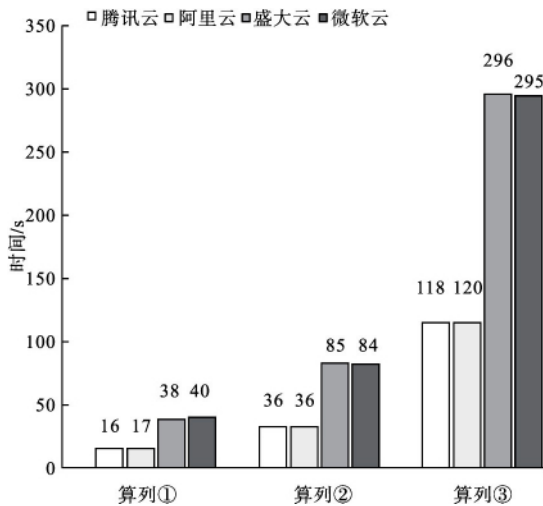


图 4 各大云计算平台上的算例计算时间

Fig. 4 Computing times of example models on different cloud platforms

### 2.2 云服务器软件配置

云服务器是搭建在供应商硬件上的虚拟机,使用方法与本地个人计算机(PC)上搭建的虚拟机相似,只是本地 PC 上通过 VMStation、VMPlay 等软件开启并操作虚拟机,而云服务器则通过远程桌面操作虚拟机.但是,由于供应商没有提供显卡,所以云服务器的图形显示性能很弱,经过测试,云服务器可以运行 OpenSees、UrbanSeismicSim 等命令行界面的软件,但无法运行 SAP2000 等图形显示性能要求较高的软件.

目前,腾讯云内置了一些基本的操作系统镜像供用户选择,例如 Windows Server 2008、Linux Ubuntu Server 14.04 LTS 等.此外,腾讯云还提供了自定义镜像的安装选项,允许用户使用并分享自己制作的操作系统镜像.这种机制的作用主要有两点:①节省逐一设置操作系统环境的时间,为大批量租用云服务器提供便利;②将各云服务器的内部操作系统环境统一,为大批量控制云服务器、修改系统环境提供便利.笔者所有云服务器均选用 Windows Server 2008 操作系统.

操作系统指定完毕后,需要为结构分析

软件配置使用环境,并安装软件.例如使用 OpenSees 软件进行地震响应分析时,需要安装 OpenSees 主程序和 ActiveTel 开发环境.这些安装文件可以通过 FileZilla 等 FTP 软件传输到云端,安装步骤与本地 PC 相同.

### 2.3 云服务器硬件参数配置

结构建筑震害分析的时间开销主要包括模型计算时间和结果文件的传输时间.云服务器的各项硬件配置参数中,影响模型计算时间的主要有 CPU 型号、CPU 核心数、内存大小;影响数据传输时间的主要是公网带宽.

目前腾讯云只提供一种型号的 CPU (Core E5-2650),分别指定云服务器的 CPU 核心数为 1、2、4、8、16,用算例①、②、③分别进行测试.结果显示,CPU 核心数对计算时间没有影响(见图 5).这说明 OpenSees 在运行时仅调用单核进行计算,即使指定了多颗 CPU 核心,OpenSees 也仅能利用其中一颗,其他 CPU 核心事实上处于闲置状态,并未参与计算.因此,对于本次测试,单核 CPU 在计算效率上与多核没有区别,为了节省成本、避免浪费资源,将云服务器 CPU 数量设置为单核即可.但对于其他具有多核并行计算能力的分析软件,则还需要进行进一步测试.

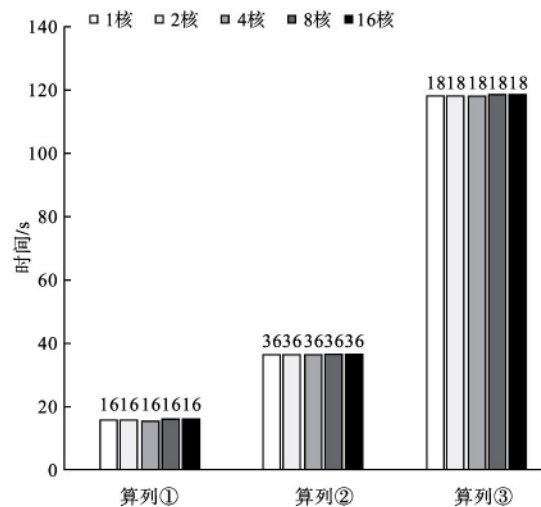


图 5 不同 CPU 核心数下 腾讯云的计算时间

Fig. 5 Computing times of example models with different numbers of CPU cores on the Tencent cloud

内存用于暂时存储软件运行时产生的大量临时数据. 在单核 CPU 的配置下, 用算例①、②、③分别测试内存大小为 1 GB、2 GB、4 GB、8 GB 时的计算时间. 结果显示, 不同内存配置下, 计算时间基本不变(见图 6). 因此内存的配置只需满足分析模型所需占用的最小内存大小即可, 例如算例⑨运行时占用内存 1.1 GB, 此时可将云服务器的内存大小设置为 2 GB.

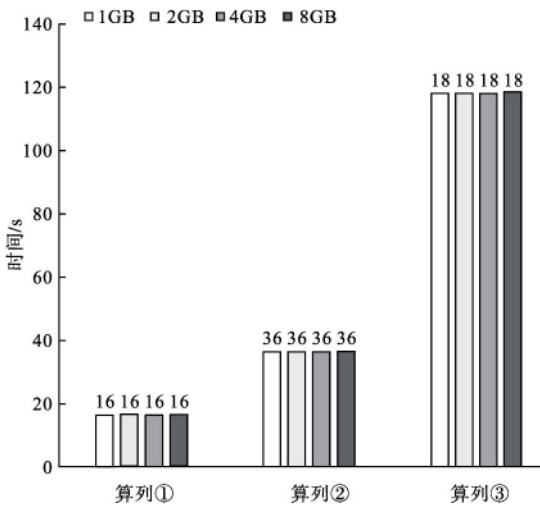


图 6 不同内存大小下 腾讯云的计算时间

Fig. 6 Computing times of example models with different rams on the Tencent cloud

公网将云服务器与广域网连接, 可完成远程控制、数据上传下载等工作. 腾讯云提供 1 Mb/s 以上的公网峰值带宽. 以峰值带宽 7 Mb/s 为例, 算例④~⑨计算结果文件的下载时间如图 7 所示. 其中, 算例⑨产生的结果文件大小为 1.5 GB, 数据传输时间约 0.5 h. 相对本地服务器, 这是使用云服务器产生的额外时间开销, 但它仅相当于计算时间(约 42 h)的 1.3% 左右, 且可以通过调整计算模型的输出设置, 减小结果文件大小(例如仅输出部分关键节点的计算结果)加以优化.

此外, 笔者测试了不同带宽下的公网传输速度, 测试带宽为 1~7 Mb/s, 测试方式为上传、下载 500 MB 大小的数据文件. 结果显示(见图 8), 上传速度受带宽影响不大, 维持在较高的水平, 下载速度与带宽大致呈线性

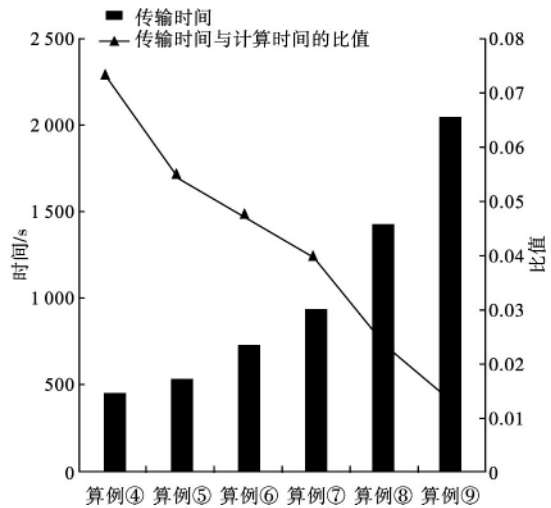


图 7 带宽 7Mb/s 下的算例数据传输时间

Fig. 7 Download times of model data with the bandwidth of 7Mb/s

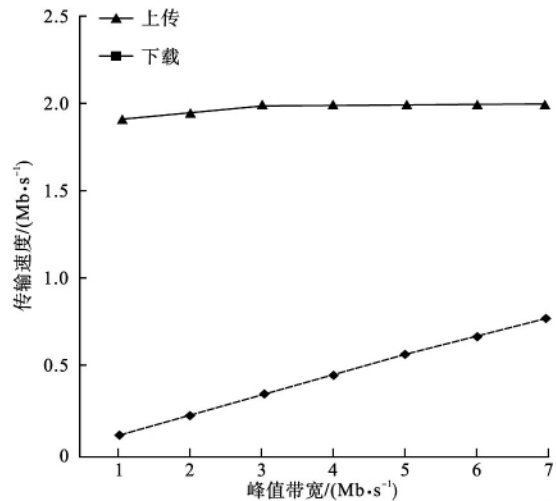


图 8 不同带宽下的传输速度

Fig. 8 Transmission speeds of model data with different bandwidths

关系, 较上传速度较慢. 结合图 7 的结果分析, 当结果文件较大时, 可以适当增大带宽以提高效率.

2.4 云服务器租用方式经济性比较

利用云计算环境开展结构建筑震害分析的开销主要包括设备租用费用和数据文件传输的流量费用. 腾讯云提供包年包月的计费方式, 阿里云提供包年包月或按量计费的计费方式. 以租用 1 核 CPU、1 GB 内存、40 G 数据盘、峰值带宽 7 Mb/s 为例, 并根据算例⑨

的测试结果假定每 42.5 h 产生 1.5 GB 数据流量, 则按量付费方式产生的月总费用最低 (见表 2)。

表 2 计费标准  
Table 2 Rate of charges

计费方式	设备租用费	流量费	月总费用/元
按量付费(阿里云)	0.28 元 / h	0.8 元 / GB	222
包年包月(阿里云)	45 元/月	285 元/月	330
包年包月(腾讯云)	45 元/月	295 元/月	340

注: 数据来源: <https://buy.aliyun.com/#/postpay> <http://manage.qcloud.com/shoppingcart/shop.php?tab=cvm>

### 3 云计算性能测试

云服务器可以认为是云端虚拟机, 因此只要其配置参数合理(如内存足够大), 在本地 PC 上可以计算的模型都能在云服务器上进行计算, 并且计算精度不变。通过运行算例①、②、③, 测试云服务器、本地 PC 以及在本地 PC 上建立的虚拟机的性能表现, 结果如图 9 所示(具体配置见表 3), 云服务器的计算时间略高于本地 PC, 这主要还是云端服务器采用的 CPU 为 Core E5-2650 (主频 2 GHz), 其浮点计算能力不及本地 PC 的 i5-3360 m CPU (主频 2.8 GHz 到 3.5 GHz)。但是其性能和本地 PC 相比没有本质差别。

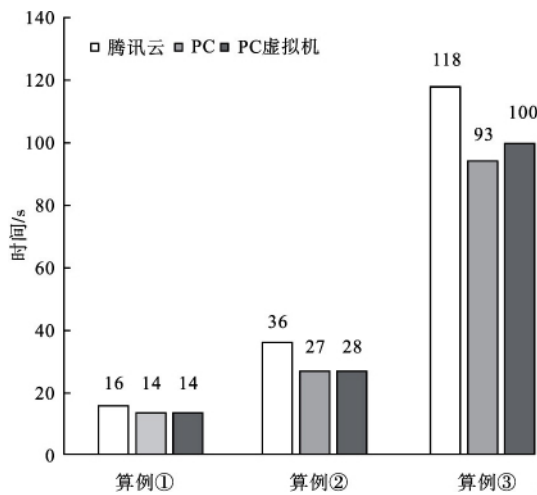


图 9 Computing times by different computation environments

表 3 不同计算环境配置表

Table 3 Configuration table by different computing environments

计算环境	CPU	内存/GB
腾讯云	1 核 CPU	8
本地 PC	i5-3360m CPU(2 核心)	8
本地 PC 虚拟机	i5-3360m CPU(2 核心)	2

#### 3.1 单体结构地震响应计算性能测试

在腾讯云分别运行算例④~⑨, 得到计算时间与自由度数的关系(见图 10)。对于算例⑨(142 m 高层建筑), 计算时间约 42 h, 这说明云服务器的单体结构地震响应计算性能基本可以满足要求。但随着自由度数的增加, 计算时间呈幂级增长。因此, 开发适用于云计算环境的多核并行计算程序对于大规模结构分析将非常重要。

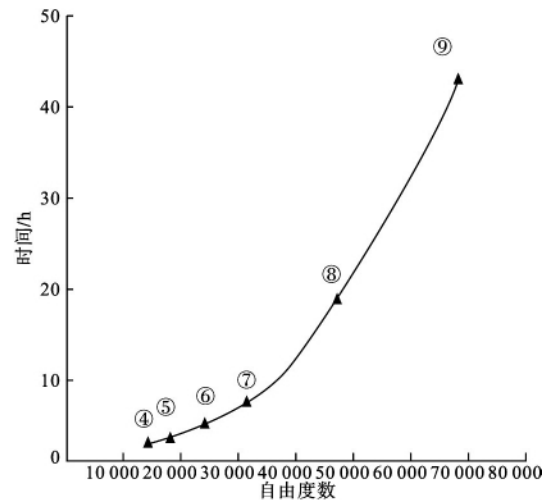


图 10 不同规模单体建筑模型计算时间

Fig. 10 Computing times of single building models with different sizes

#### 3.2 区域建筑震害计算性能

云计算的一大优势是能在短时间内使用大量服务器进行并行计算。将第 2 节所述的包含 67 325 栋建筑的城市区域模型用课题组编写的 UrbanSemsicSim 软件进行计算, 选用 El-Centro 地震波<sup>[26]</sup>与 FEMA695 提供的 22 条远场地震动记录<sup>[27]</sup>作为输入。在 1 核 CPU 云服务器上串行运行这 23 个地震动记录, 其计算时间为  $8.03 \times 10^4$  s (约 22.3 h)。

如果同时使用 23 台云服务器,每台服务器并行运行其中一个地震动记录,由于多台云服务器的计算是同时(并行)进行的,则实际用时仅  $3.45 \times 10^3$  s(约 0.96 h),大大缩减了计算时间.这充分体现出了云计算的效率优势.需要说明的是,虽然理论上可以通过购置大型计算机或者购置集群来达到类似的效果,但是其一次成本投入较高.如果不是经常有这样的计算任务,则实际上是一个较大的负担.而云计算则可以根据任务量的多少来灵活租用,从而可以达到低投入高效率的目标.

## 4 结 论

(1) 由于 OpenSees 仅调用单核进行计算,因此云服务器的 CPU 核心数对计算时间影响不大;此外,内存大小也不影响计算时间.因此,对于非并行计算任务,选择 1 核心 CPU 以及能使算例正常运行的最小内存即可.

(2) 对于 68 046 自由度、总高 142 m 的高层建筑的地震时程分析,云计算耗时约 42 h,且随自由度数的增加,计算时间呈幂级增长.因此云计算基本能满足高层建筑的地震响应分析,但对于更大规模问题,则应采用支持并行计算的软件,发挥云计算的多核优势.

(3) 通过租用多台云服务器,并行处理区域震害分析的多地震动输入问题,可大大缩减计算时间,具有很高的效率优势.

由于基于云计算的工程结构地震分析目前才刚刚起步,笔者做了一些探索性研究,论证了其可行性.后续研究还要进一步开发适合云计算的计算程序和任务调度算法,以充分发挥云计算的效能.

## 参考文献

[1] 陆新征,卢啸,许镇,等.基于高性能计算的工程抗震与防灾:从单体到城市[C].第六届结构工程新进展国际论坛文集.北京:中国建筑工业出版社,2014.

(Lu Xinzheng, Lu Xiao, Xu Zhen, et al. Seismic design and disaster mitigation based on high performance computing: from single structure to urban area [C]. Proc. 6th International Forum on Advances in Structural Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)

[2] Wijerathne M L L, Hori M, Kabeyazawa T, et al. Strengthening of parallel computation performance of integrated earthquake simulation [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 27(5): 570 - 573.

[3] Ayoub A, Filippou F C. Mixed formulation of nonlinear steel-concrete composite beam element [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3): 371 - 381.

[4] Yamashita T, Muneo H, Kajiwara K. Petascale computation for earthquake engineering [J]. Computing in Science & Engineering, 2011, 13(4): 44 - 49.

[5] Hori M, Ichimura T. Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster [J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 307 - 321.

[6] Helias M, Kunkel S, Masumoto G, et al. Supercomputers ready for use as discovery machines for neuroscience [J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2012, 6(26): 1 - 12.

[7] Lu X Z, Han B, Hori M, et al. A coarse-grained parallel approach for seismic damage simulations of urban areas based on refined models and GPU/CPU cooperative computing [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 70: 90 - 103.

[8] Mell P, Grance T. The NIST definition of cloud computing [R]. [S. L.]: National Institute of Standards and Technology, 2011.

[9] Vaquero L M, Rodero-Merino L, Caceres J, et al. A break in the clouds: towards a cloud definition [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 39(1): 50 - 55.

[10] 李乔, 郑啸. 云计算研究现状综述 [J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 32 - 37.  
(Li Qiao, Zheng Xiao. Research survey of cloud computing [J]. Computer Science, 2011, 38(4): 32 - 37.)

[11] 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆, 等. 基于云计算的中国地震灾害损失评估系统研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 198 - 203.  
(Chen Hongfu, Sun Baitao, Chen Xiangzhao, et al. Research on China earthquake loss estimation system based on cloud computing [J].



- Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2013 33(1): 198–203.)
- [12] 涂成力. 结构健康监测的物联网特征与云计算的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2012.  
(Tu Chengli. Research on IOT's characteristics of SHM and application of cloud computing in SHM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2012.)
- [13] Foster I ,Zhao Y ,Raicu I ,et al. Cloud computing and grid computing 360-degree compared [C]//Grid Computing Environments Workshop 2008. GCE08: IEEE 2008: 1–10.
- [14] Armbrust M ,Fox O ,Griffith R ,et al. M: Above the clouds: a Berkeley view of cloud computing [R]. [S. L.]: Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley 2009.
- [15] Armbrust M ,Fox A ,Griffith R ,et al. A view of cloud computing [J]. Communications of the ACM 2010 53(4): 50–58.
- [16] Zhang Q ,Cheng L ,Boutaba R. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges [J]. Journal of Internet Services and Applications 2010 1(1): 7–18.
- [17] 陈康 郑纬民. 云计算: 系统实例与研究现状 [J]. 软件学报 2009 20(5): 1337–1348.  
(Chen Kang ,Zheng Weimin. Cloud Computing: System instances and current research [J]. Journal of Software 2009 20(5): 1337–1348.)
- [18] Buyya R ,Yeo C S ,Venugopal S ,et al. Cloud computing and emerging IT platforms: vision ,hype ,and reality for delivering computing as the 5th utility [J]. Future Generation Computer Systems 2009 25(6): 599–616.
- [19] 罗军舟 金嘉晖 宋爱波 等. 云计算: 体系架构与关键技术 [J]. 通信学报 2011 7: 3–21.  
(Luo Junzhou ,Jin Jiahui ,Song Aibo ,et al. Cloud computing: architecture and key technologies [J]. Journal of Communications 2011 32(7): 3–21.)
- [20] Mazzoni S ,McKenna F ,Scott M H ,et al. OpenSees command language manual [EB/OL]. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center ,<http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/OpenSeesCommandLanguageManual.pdf> 2006.
- [21] Schellenberg A ,Mahin S. Integration of hybrid simulation within the general-purpose computational framework OpenSees [C]. Eighth US National Conference on Earthquake Engineering 2006.
- [22] 李帼昌 马晓龙 李文明. 基于 OpenSees 的屈曲约束支撑混凝土框架静力弹塑性分析 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版 2015 31(3): 401–407.  
(Li Guochang ,Ma Xiaolong ,Li Wenming. Nonlinear static push-over analysis on BRB frame structure based on OpenSees [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science 2015 31(3): 401–407.)
- [23] 潘志宏 李爱群 孙义刚. 基于纤维模型的外包钢加固混凝土框架结构静力弹塑性分析 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版 2010 26(1): 68–74.  
(Pan Zhihong ,Li Aiqun ,Sun Yigang. Nonlinear static analysis on RC frame strengthened with externally bonded steel frame based on fiber model [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University : Natural Science 2010 26(1): 68–74.)
- [24] Lu X Z ,Xie L L ,Guan H ,et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees [J]. Finite Elements in Analysis and Design 2015 98: 14–25.
- [25] Xu Z ,Lu X Z ,Guan H ,et al. Seismic damage simulation in urban areas based on a high-fidelity structural model and a physics engine [J]. Natural Hazards 2014 71: 1679–1693.
- [26] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Prentice Hall ,Upper Saddle River ,New Jersey 2007.
- [27] FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors [R]. Federal Emergency Management Agency ,Washington ,USA 2009.