

# 丹江口水库诱发地震监测系统设计与实现

刘文清<sup>1</sup>, 朱建<sup>1</sup>, 王立<sup>2</sup>, 徐新喜<sup>1</sup>, 宋伟<sup>1</sup>

(1. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 武汉 430070; 2. 南水北调中线水源有限责任公司, 湖北 丹江口 442700)

**摘要:** 丹江口水库诱发地震监测系统是丹江口水库续建工程安全监测的重要组成部分, 系统由数字遥测地震台网、地下水动态观测井网和地震分析中心三大部分组成。根据库区的地震地质背景、库区可能诱发的地震区域, 全面阐述了整个技术系统设计思路、系统构成、台网布局、测震学指标、监测能力及实现方法等技术内容。

**关键词:** 丹江口水库; 诱发地震; 地震监测; 震情预警

**中图分类号:** TV 697.24    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0185-04

## Design and implementation of monitoring system of Danjiangkou reservoir induced earthquake

LIU Weir ting<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, XU Xir xi<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>1</sup>

(1. Three Gorges Geotechnical Consultants CO., LTD, Wuhan 4300033, China;

2. The South to North Water Diversion Project Water Limited Liability Company, Danjiangkou 442700, China)

**Abstract:** The monitoring system of Danjiangkou reservoir induced earthquake is an important component of the safety monitoring for the continuous project of Danjiangkou reservoir, which is composed of three major parts: digital telemetric seismic network, center for earthquake analysis, and groundwater observation wells network. In this paper, based on the seismogeological conditions and potential earthquake area in the reservoir, the design idea, system composition, network layout, seismological parameters, monitoring capability, and realization of the entire technical system were demonstrated.

**Key words:** Danjiangkou Reservoir; induced earthquake; seismic surveillance; early warning of earthquake

丹江口水库位于湖北省丹江口市和河南省淅川县毗邻处, 坝址位于丹江口市城区即汉江与丹江汇合口下游 800 m 处。自 1969 年 11 月初期工程建成、蓄水后, 丹江口库区地震活动逐渐加强, 并于 1973 年 11 月诱发地震群活动, 最大震级 M4.3 级, 震中烈度 0 度, 造成严重的经济损失和社会影响。然而作为南水北调中线工程建设的重要组成部分, 丹江口水库还需要进行续建。即坝体高程将从原来的 162 m 加高至 176.6 m, 正常蓄水位从 157 m 提高至 170 m, 库容增加 116 亿 m<sup>3</sup>。由于库区水位升高和库容的增加, 将打破目前库区基础基岩的应力状态, 诱发构造应变能提前释放, 可能再次出现水库诱发地震活动。为了监测库区及水体影响范围内微弱地震活动情况, 进行工程库区及周缘地区地震活动规律和发展趋势研究, 很有必要建设一套一流的水库地震监测系统。

## 1 地震监测系统总体设计方案

### 1.1 设计思路

根据丹江口库区的地质环境、交通状态、通信条件, 地震监测系统设计中遵循以下设计原则。

(1) 突出重点、兼顾一般的原则。台网监测的重点是库首和可能发生较强水库诱发地震的危险区(即重点监测区), 而重点监测区周缘和其它水库区域仅作为一般监视区。在台网重点监测区内, 其监控能力应满足有关规范要求。

(2) 固定台网与流动台网相结合的原则。在台网重点监测区内, 布设固定台网提供一个长期稳定的地震监控能力, 以满足水库诱发地震研究工作的基本要求。一旦出现震情变化, 为了正确判断地震活动趋势和捕获较多的微小地震异常信息, 则在库区增设流动台网进行强化监测, 弥补固定台网监测能力的不足。

(3) 微震观测、强震观测和宽频带观测相结合的原则。微震观测是库区地震监测的基本手段, 其目的是保证库区微震信息的详实搜集; 强震观测的主要目的是完整的记录强震波形, 并确定出地震强度; 宽频带观测的主要目的是捕捉不同频段地震动信息和远震信息, 为水库地震成因研究和远震影响分析提供基础资料。

(4) 先进性原则。台网系统主要仪器和软件的选用必须是目前国内或国际技术先进、性能可靠, 并通过国家正式鉴

收稿日期: 2014-05-23    修回日期: 2014-11-03    网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1127.002.html>

基金项目: 南水北调中线一期工程丹江口水库诱发地震监测系统建设项目(Z439Y10713151)

作者简介: 刘文清(1963-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 主要从事水库诱发地震方面研究。E-mail: 675010621@qq.com

定的定型产品。台站附近有光纤经过或有电信基站的,地震信号传输方式尽量采用有线光纤专用网络传输确保地震数据传输过程中的安全可靠,在保证信号传输质量的前提下,尽量减少信号中继次数,以减少中间环节可能造成的误差,保证台网数据的实时运行率达有关技术指标要求,并节省建设成本。

## 1.2 技术系统总体构成

考虑到水库覆盖面积较大,各库段水库诱发地震地质环境差异较大且对坝区影响不同,结合前期工程水库诱发地震特征,拟定地震监测系统的布设以库首和河南境内的丹江库区为重点,兼顾湖北境内的汉江库区近坝库段,并确定坝址至丹江库区盛湾库段和坝址至汉江库区土台库段为重点监测区。由于较强的水库诱发地震属于构造型诱发地震,与区域乃至全国的构造地震活动背景有关,因此,丹江口水库诱发地震监测系统主要由数字遥测地震台网、地下水动态观测井网和地震分析中心三大部份组成。

(1) 数字遥测地震台网。共布设 11 个固定数字遥测地震台(短周期台 9 个,宽频带台 2 个)和一个强震观测站,丹江库区 8 个,汉江库区 3 个,并备有 4 个台站组成的流动式数字地震台网,用于临时性的地震强化监测,以确保坝址至丹江库区盛湾库段和坝址至汉江库区土台库段的微震监测能力达到  $ML \geq 0.5$  级,速报能力达到  $ML \geq 2.5$  级。数字台网中心设在丹江口市。

(2) 地下水动态观测井网。由 3 口井组成,井深 100~200 m,主要观测项目为水位、水温,辅助测项有气压、气温、降雨量与地表水水位。

(3) 地震分析中心(系统)。中心设在武汉,具备数据的收集、存贮、处理和服务能力。主要任务是对遥测台网中心提交的地震分析结果进行校核处理,定期发布观测报告,并对地下水动态观测数据进行常规分析处理以及对库区地震活动进行实时跟踪分析研究,同时结合地震部门的地震监测成果,对水库区地震活动进行趋势分析和预测判断,还担负着地震应急处理及时并向业主报送各类相关信息等任务。

丹江口水利枢纽水库诱发地震监测系统总体框图见图 1。

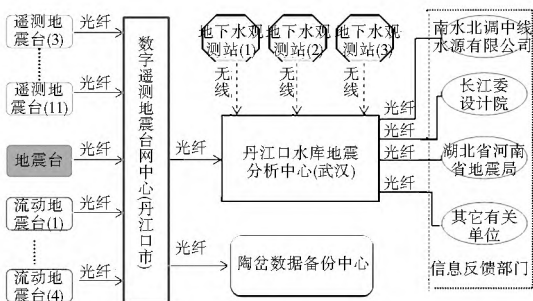


图 1 丹江口水利枢纽水库诱发地震监测系统总体框图

Fig. 1 Diagram of monitoring system of Danjiangkou reservoir induced earthquake

## 1.3 技术系统测震学指标

根据丹江口水库区的地震监测环境和国内外地震观测技术现状,确定测震台网短周期微震观测技术系统的测震学指标如下。

(1) 采用全数字地震观测技术;(2) 三分量观测;(3) 数据

采集器分辨率为  $2^{23}$ ,线性度优于 1%;(4) 微震观测系统响应选用速度平坦型,响应频带选择 1 至 40 Hz;(5) 采用大动态 24 bit 数据采集,动态范围不低于 100 dB;(6) 数字化采样率不低于 100 sps;(7) 时间服务误差不大于 5 ms;(8) 网内发生  $ML \geq 0.5$  级地震后,系统能触发报警和自动测定地震基本参数,并对  $ML \geq 2.5$  级地震能快捷(15 min 以内)地进行地震速报。

## 2 台网布局及监测能力设计与评估

一个地震台网的监测能力一般是指在某一地区四个以上(含四个)地震台都能记录到同等最小地震震级的能力,即通常所说的有效地震监测下限。测震台网的监测能力需要根据库区的重点监测区域来进行综合设计。根据相关规程规范要求,地震监测系统对重点监测区的监测下限应达到  $ML \geq 0.5$  级。为此,整个地震台网的布局应符合此要求。

理论上,一个三分向地震台即可粗略定出地震震中位置,三个台站可以精确定位地震震中,四个以上(含四个)台站能在精确定震中位置( $\varphi, \lambda$ )的同时,还能确定震源深度( $h$ )。台网地震监控能力的大小主要取决于各台站可使用放大率的大小,也就是各台站监测某一震级地震的最大距离。

在传统的地震震级确定中,对于位移平坦型特性地震波记录,可采用里氏震级公式求出各台监测某一震级的最大距离,其垂直向震级公式为

$$ML = \log A_{\mu} + R(\Delta) + 0.17 \quad (1)$$

式中: $A_{\mu}$  为横波 S 波最大地动位移(m); $R(\Delta)$  为短周期地震仪的起算函数; $\Delta$  为震中距离,可通过  $R(\Delta)$  查表得出; $ML$  为体波震级。其中:

$$A_{\mu} = \frac{Y_{\max}}{V}$$

式中: $Y_{\max}$  为在地震记录图上纵波 P 初动可分辨时记录到的 S 波最大振幅; $V$  为 S 波所对应周期的仪器放大率。

根据地震记录图分析经验,当背景干扰振幅平均为 0.2 mm,P 波振幅为 0.5 mm 时,清晰可辨,S 波与 P 波振幅比一般为 3~4 倍。本文取振幅比为 4 倍,即 S 波可分辨的最小振幅为 2.0 mm。因此,可将 S 波振幅( $Y_{\max} = 2.0$  mm)、各台站可使用放大率(假设  $V = 10$  万倍)代入式(2),求出不同震级  $ML$  所对应的起算函数  $R(\Delta)$ ,并查表得到相应的可监测的最大震中距  $\Delta$ 。

$$R(\Delta) = ML - \log \frac{Y_{\max}}{V} - 0.17 \quad (2)$$

前期对丹江口库区的现场勘察台基测试结果表明,丹江口库区各台站地理环境较好,台基地脉动干扰较小,噪声速度都在  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  范围内,大多在  $10^{-8}$  量级,期望的放大倍数可达 10~15 万倍。根据式(2)计算出的各台站监测不同震级地震的最大震中距  $\Delta$ ,绘制出丹江口地震台站布局情况及台网监测能力等震线见图 2,可以看出预测的两个主要水库诱发地震潜在震源区和所确定的重点监测区均在台网  $ML 0.5$  级地震监控范围内。在重点监测区边缘的一般监测区,台网的监测能力为  $ML 0.6 \sim 1.5$  级,满足地震监测设计要求。

## 3 传输信道设计与实现

根据国家地震局编制的《遥测地震台网观测技术规范》

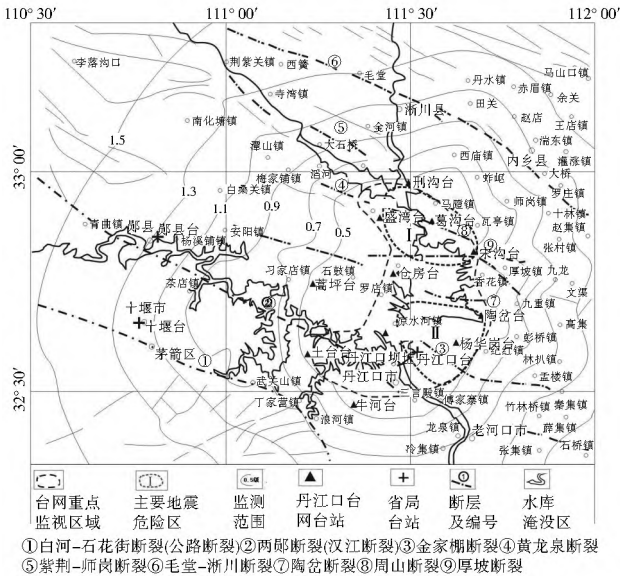


图2 丹江口水库地震台网布局及地震监测能力

Fig. 2 Layout and earthquake monitoring capability of Danjiangkou reservoir seismic network

的各项技术指标要求,结合丹江水库库区的地形地貌等实际情况,丹江口水库数字遥测地震台网的据传输信道采用光纤通信方式。在选择台站时,选择附近有光纤通过的位置,并且台站距通讯基站都不超过3 km。受地下水网的地质条件要求限制,地下水动态观测井网数据传输信道采用电信部门的无线方式实现。图3是丹江口地震监测数据传输网络流程图。地震台站采集的数据在用光纤传输前,先进行过数据压缩,以IP数据包格式流通,由于数据量不大,对于网络的带宽要求不高,因此选用了2 M 光纤网络,足以满足传输所需要的带宽。传输方式可选择PDH 光纤传输或SDH 光纤传输,但相比之下,SDH 光纤传输是严格同步的,从而保证了整个网络稳定可靠,误码少,且便于复用和调整。传输过程中,考虑到网络病毒等因素造成的信息丢失或信息被监听,甚至设备损坏等情况,在各台站设备在接入光纤网络后,不参与公共信息网的信息共享,台网中心和各台站形成星形局域网。地震台站数据通过光纤设备E1口传输,传送至台网中心后,将E1口信号转换为网口信号,以TCP/IP协议接入数据服务器,每一个台站都有唯一的IP地址,中心可以通过IP地址远程访问各个台站的信息。

## 4 地震分析系统设计与实现

### 4.1 地震数据处理流程及要求

地震资料分析处理采用计算机自动处理和人机结合处理两种方式,并且地震分析处理系统还应具备地震事件自动触发报警功能和系统故障报警功能。数据处理流程见图4。数据处理的主要功能与指标要求如下。

- (1) 实时收集各遥测台站传输回台网中心的数据,并将这些数据送入计算机系统进行处理。
- (2) 以计算机系统为核心,分别以连续和事件触发方式记录地震波形数据,供后续实时处理使用。
- (3) 对实时波形数据进行自动事件检测,并对检测出的事件在5 min内自动分析处理出地震参数。

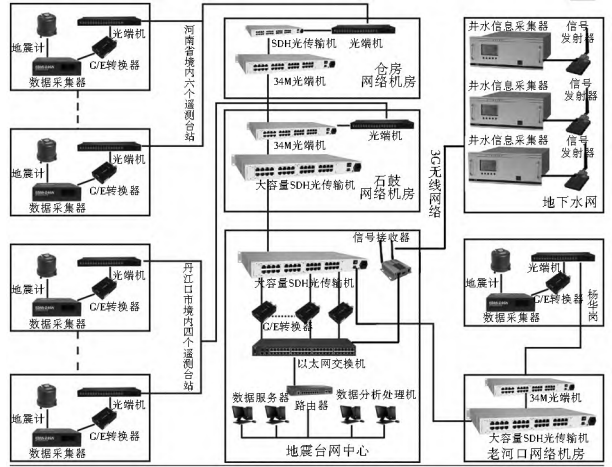


图3 地震监测数据传输网络

Fig. 3 Transmission network of seismic monitoring data

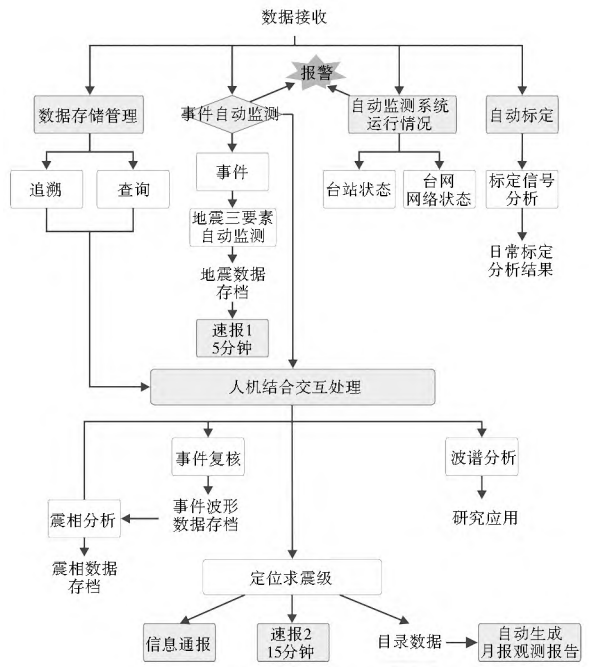


图4 台网中心数据处理流程

Fig. 4 Data processing of network center

(4) 在计算机自动分析处理地震事件结果的基础上,采用人机结合的方式,对地震事件参数进行精确修定。对于发生在重点监测区内  $ML \geq 2.5$  级地震在15 min内向有关单位进行速报。

(5) 每天对前一天记录到的实时记录数据进行浏览,在此过程中,截取计算机误判和漏判事件波形,并进行分析处理。

(6) 对于记录清晰完整的网内和网缘较大地震,采用人机结合方法,进行震源机制解和波谱分析等研究工作。

(7) 自动生成地震观测报告。地震目录和原始地震事件波形建立数据库和刻录成光盘以长期保存,并进行各种数据服务和数据管理工作。

(8) 自动监测系统运行情况,并做出必要的指示或报警。

(9) 采用公用通讯(电话、短信和电子邮件)方式向有关单位通报有关信息。

### 4.2 地震信息发布

地震信息发布是地震数据分析处理过程中的重要环节,

所要发布的地震信息采用与地震分析系统相契合的专用速报发布单元模块来完成。当触发事件经人机交互定位结果达到速报要求的,分析系统会立即启动发布模块经由速报发布单元进行震情信息速报,发布方式可利用手机短信、邮件速报等形式,发布所用时间只需几秒钟,极大提高了速报发布的效率和有关部门启动应急方案的时间。

### 4.3 产出资料处理

台网的产出资料包括地震事件波形和连续波形数据、地震目录和观测报告、地震速报数据、数据完好率统计和误帧数统计、值班日志、仪器维护日志和地震监测月报等。数据文件均连续存盘并进行备份以供分析研究。

## 5 技术创新点

本地震监测系统与国内外其他类似系统比较,有以下几点技术创新。

(1) 采用组合式地震监测技术。监测系统中既有测震专用台网,也有地震前兆监测网站(地下水网)。

(2) 在信道设计中采用有线与无线混合组网方式。相比于使用超短波、3G 无线网络等组网方式,使用光纤进行通信组网能极大提高实时监测数据的安全性和稳定性,能有效规避人为因素造成的通讯干扰和数据中断,有利于台网的不间断观测,并可对子台仪器进行远程操作降低台网运行维护成本。地下水网采用无线方式传输数据,是在满足了监测数据能实时进行传送的情况,在水网建设中是一种新的尝试,目前数据传输稳定可靠。

(3) 采用自动定位(JOPENS)与人工定位相结合。JOPENS 自动定位测试系统是 2008 年汶川地震后兴起的一种用 JBoss+ Tomcat 来实现的虚拟组网定位系统,现已广泛用于许多国家和网络中,我国近期才逐步尝试将其应用在水库诱发地震监测之中,因为水库地震台网相比较于地震局地震台网有布网密、技术更新快、监控区域小、定位精度高、监测能力强等特点,将 JOPENS 应用在本系统并不能一步到位取代人工定位,还需根据监测系统中的具体情况边应用边改进使之完善。

## 6 结语

丹江口水利枢纽续建工程水库诱发地震监测系统采用第四代数字化地震台网观测技术,采用光纤和无线网络方式组网,引进了 JOPENS 自动定位系统和高可靠性的震情发布单元,是目前我国国内规模较大、技术最先进的水库诱发地震监测系统之一,整个系统已建设完成并在蓄水前一年投入运行。目前该系统运行状态良好,已经收集到建网以来库区本底地震活动情况,为研究库区水库诱发地震分析预测、库区地质灾害防治、水库调度运行和大坝抗震设防安全检验提供了第一手资料,确保了丹江口水利枢纽后期续建工程运行安全,提高了库区防震减灾能力。

### 参考文献(References):

[1] 徐礼华,刘素梅.丹江口水库二期工程诱发地震强度评估[J].武汉理工大学学报,2005,27(1):58-61.(XU Li hua,LIU Su mei.Strength evaluation of induced seismicity in the second phase of project of Danjiangkou Reservoir[J].Journal of Wuhan University of Technology.2005,27(1):58-61.(in Chinese))

[2] 孟晓春.地震观测与分析技术[M].北京:地震出版社,1998.(MENG Xiaochun.Earthquake observation and analysis techniques[M].Beijing:Seismological Press,1998.(in Chinese))

[3] 刘文清.三峡工程数字遥测地震台网技术系统[J].地震地磁观测与研究,2002.(LIU Wenqing.Technological system of Yangtze Sanxia Telemetered digital seismic network[J].Seismological and Geomagnetic observation and research,2002.(in Chinese))

[4] 夏其发,李敏,常庭改,等.水库地震评价与预测[M].北京:中国水利水电出版社,2012.(XIA Qifan,LI Min,CHANG Tinggai,et al.Evaluation and prediction of reservoir earthquake[M].Beijing:China Water Power Press,2012.(in Chinese))

[5] 熊利龙,刘明寿.水库诱发地震的工程地质环境及勘测研究方法[J].湖南水利,1998(3).(XIONG Lirong,LIU Mingshou.Reservoir induced earthquake engineering geological environment and survey research methods[J].Hunan Hydropower,1998(3).(in Chinese))

[6] 荣建东,耿爱玲.丹江口水库地震观测 30 年[J].地壳形变与地震,1997,17(4).(RONG Jiandong,GENG Ailing.Thirty years of earthquake observation in Danjiangkou reservoir areas[J].Crustal Deformation and Earthquake.1997,17(4).(in Chinese))

[7] 李珅.三峡、丹江口地区地震地质研究[M].北京:地震出版社,1994.(LI Shun.Study on seismic geology of the three gorges and the Danjiangkou reservoir region[M].Beijing:Seismological Press,1994.(in Chinese))

[8] 黄乃安,张绍波.丹江口水库诱发地震趋势研究[J].华南地震,1991,11(4):67-74.(HUANG Na'an,ZHANG Shaobo.Study on Danjiangkou reservoir induced seismicity tendency[J].South China Journal of Seismology,1991,11(4):67-74.(in Chinese))

[9] 刘素梅.基于丹江口库孔隙水压力计算的水库诱发地震机理研究[J].建筑与环境工程,2012,22(增刊).(LIU Sumei.Study based on pore water pressure calculation of reservoir induced earthquake in Danjiangkou reservoir[J].Journal of Architectural & Environment Engineering.2012,22(sup).(in Chinese))

[10] 蔡耀军.汉江丹江口大坝加高后水库环境地质问题预测[J].人民长江,2007,39(9).(CAI Yaojun.Environmental geological problems in the Hanjiang River after dam heightening of Danjiangkou reservoir prediction[J].Yangtze River.2007,39(9).(in Chinese))

[11] 曾新平,刘文清.汉江丹江口水利枢纽水库诱发地震监测系统总体设计[R].2009.(ZENG Xinping,LIU Wenqing.Integrated design of Danjiangkou reservoir induced earthquake monitoring system in Hanjiang River[R].2009.(in Chinese))

[12] 丹江口水利枢纽大坝加高工程场地地震安全性评价报告[R].中国地震局地球物理研究所等,2003.(Institute of geophysics,Dam heightening of Danjiangkou project report of the evaluation of seismic safety for engineering sites[R].China Seismological Bureau,2003.(in Chinese))

[13] 陈时军,王丽凤,马丽,等.关于震级频度关系的一些讨论[J].地震学报,2002,24(2):176-185.(CHEN Shijun,WANG Lifen,MA Li,et al.Argument on the magnitude frequency relation[J].Acta Seismologica Sinica,2002,24(2):176-185.(in Chinese))

[14] 王翠芳.数字遥测地震台网测震能力图的制作[J].地震地磁观测与研究,2004,25(4):32-37.(WANG Cuifang.Making of the map of monitoring capability of digital telemetry seismic network[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2004,25(4):32-37.(in Chinese))

[15] SL 245-1999,水利水电工程地质观测规程[S].(SL 245-1999,Specification for geological observation of water resources and hydropower engineering[S].(in Chinese))