

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.003



刚性连体位置对非对称双塔连体结构动力可靠度的影响

李春锋^{1,2}, 杜永峰^{2,3}, 李慧^{2,3}

(1. 河西学院 土木工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 兰州 730050;
3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘要:考虑地震动的非平稳性, 变化连体位置, 对非对称双塔连体结构运用虚拟激励法进行非平稳随机激励下的动力可靠度研究。采用刚度退化的 Bouc-Wen 模型模拟塔楼各楼层的滞变特性, 建立非线性化动力方程。运用混合精细积分法对每一时刻的响应进行求解, 得到连体位置变化时非对称连体结构在非平稳随机激励下的时变方差。基于首次超越破坏准则与 Markov 假定, 研究非平稳随机地震激励下连体结构的动力可靠度。运用上述理论, 在 8 度罕遇地震作用下对某非对称双塔连体结构进行随机地震响应与动力可靠度分析。研究表明, 地震作用下结构的层间位移响应呈现强烈的非平稳性, 变化连体位置对连体结构的随机地震响应与动力可靠度将产生显著影响。

关键词:高层建筑; 非对称双塔连体结构; Bouc-Wen 模型; 虚拟激励法; 非平稳随机响应; 动力可靠度

中图分类号: TU352.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)04-0019-09

Influence of rigid-connection position on dynamic reliability of asymmetric double-tower connected tall building

Li Chunfeng^{1, 2}, Du Yongfeng^{2, 3}, Li Hui^{2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, Gansu, P. R. China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China; 3. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou, 730050, P. R. China)

Abstract: The earthquake ground motion is non-stationary, and the dynamic reliability of the connected structure with different locations of connector is investigated using pseudo excitation method. The stiffness degradation of Bouc-Wen model is used to simulate the hysteresis of the tower structure, and the nonlinear

收稿日期: 2014-03-01

基金项目: 甘肃省科技计划 (145RJZG032); 甘肃省建设科技攻关项目 (JK2013-14); 甘肃省高等学校科学研究项目 (2013B-82)

作者简介: 李春锋 (1978-) 男, 副教授, 博士生, 主要从事结构工程与结构减震控制研究, (E-mail) lichunfeng05@sina.com。

Received: 2014-03-01

Foundation item: GanSu Science and Technology Plan Projects (No. 145RJZG032); The Construction of Science and Technology Research in GanSu Project (No. JK2013-14); Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Gansu Province (No. 2013B-82)

Author brief: Li Chunfeng (1978-), associate professor, doctoral candidate, main research interests: structural engineering and structural damping control, (E-mail) lichunfeng05@sina.com.

motion equation of the connected structure is established. The system response for each moment is calculated by mixed precise integration method and the time-history variance of the structure under non-stationary earthquake excitation is obtained. Based on the first passage criterion and Markov assumption, the connected structure reliability are calculated. As a result, the random earthquake response and dynamic reliability of tall double-tower linked with strong connected structure subjected to 8 degree rare earthquakes are analyzed on base of those theories. The results show that the tower displacement responses are non-stationary under the earthquakes, and the change of connector location has a significant impact on the random seismic response and dynamic reliability of the strong connected structure.

Key words: tall building; asymmetric double-tower connected structure; Bouc-Wen model; pseudo excitation method; non-stationary random response; dynamic reliability

刚性连接是连体与塔楼常见连接方式之一^[1-2], 采用这种连接方式的目的是充分利用连体协调塔楼的振动, 保证连体在地震作用下的可靠性, 工程应用与研究已取得了丰硕的成果, 杜永峰等^[3-4]对确定性地震作用下连体位置对连体结构地震响应影响进行了研究。现有研究较普遍的特征是: 分析结果依赖于所选择的确定的地震动特性, 设计者难以对高层连体结构的性态进行较全面有效的把握与控制, 其主要原因在于确定性的地震动输入不能充分体现地震动自身的随机性。为考虑实际地震动加速度的非平稳随机性, 孙臻等^[5]将精细积分方法与虚拟激励法相结合, 对高层隔震结构进行了动力可靠度分析和非平稳随机地震响应分析, Katafygiotis 等^[6-8]给出了线性动力系统可靠度计算的频域分解法和楔模拟法。为全面有效把握高层连体结构的动力特性与抗震性能, 进行刚性连体位置变化对高层连体结构动力可靠度影响研究甚有必要。

在已有研究基础上, 首先建立不同刚性连体位置下高层连体结构动力计算模型, 罕遇地震作用下进行随机等效线性化; 其次考虑地震作用非平稳性, 将虚拟激励法与精细积分法结合运用^[9], 计算连体位置变化时连体结构在非平稳随机激励下各楼层时变方差, 最后基于首次穿越破坏准则, 分析非平稳随机地震激励下连体位置变化对高层连体结构的非平稳随机响应与动力可靠度的影响, 为高层连体结构的设计与分析方法提供参考。

1 振动方程的建立及等效线性化

对双塔楼高层连体结构, 当地震作用沿其对称轴方向输入时, 假定相邻建筑遭遇相同加速度, 考虑楼层内平面刚度无限大的假定, 质量被集中在楼层处并且刚度由墙或柱子提供, 阻尼采用瑞利阻尼, 从

而可将连体结构等效成多自由度串并联质点系层模型, 如图 1 所示。小震下线性振动方程表达式建立方法的经典性见参考文献[3], 本文列出强震下非线性振动方程建立与其等效线性化思路。

1.1 振动方程的建立

建筑结构在强震作用下表现出较强的非线性特性, 其非线性形式主要表现在结构刚度项和阻尼项或两者的组合, 依据本文讨论, 建立非线性动力微分方程

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} + [K_z]\{z(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ 分别为连体结构的质量、刚度和阻尼矩阵; $[K_z]$ 为滞变刚度矩阵; $\{I\}$ 为单位列向量; $\ddot{u}_g(t)$ 为地震动输入的加速度; $\{\ddot{u}(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 、 $\{u(t)\}$ 分别为连体结构各楼层的相对加速度、相对速度和相对位移响应量; $\{z(t)\}$ 为结构的滞变位移向量。

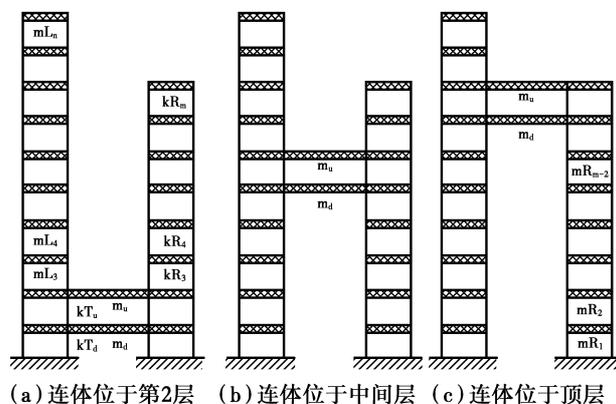


图 1 连体结构计算模型

Fig. 1 calculation mode on connection structures

为考虑连体位置对连体结构的影响, 设置 1 层连体, 质量为 m_T , 连体质量分解为上下两层 $m_u = m_d = m_T/2$, 假定左塔楼层数为 n , 右塔楼层数为 m ,

$$\eta(t) = \frac{1 - \exp[-\sqrt{\frac{\pi}{2}} q(t) \frac{b}{\sigma_u(t)}]}{1 - \exp[-\frac{b}{2\sigma_u^2(t)}]} \quad (20)$$

$$q(t) = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2(t)}{\lambda_0(t)\lambda_2(t)}} \quad (21)$$

$$\lambda_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^j S_{uu}(\omega, t) d\omega \quad (22)$$

$j = 0, 1, 2。$

3 地震地面运动的加速度功率谱模型

合理选择地震动模型参数对于随机反应分析结果的准确性起着至关重要的作用。为使随机分析结果与规范的反应谱法结果相一致,随机分析的模型参数均依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)进行取值。地面加速度功率谱密度函数采用文献[12]建议的 Clough 和 Penzien 修正过滤白噪声模型:

$$S_x(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} S_0 \quad (23)$$

式中: ζ_f 、 ω_f 为低频过滤器参数; ζ_g 、 ω_g 为地基土阻尼比和卓越频率; S_0 为谱强度因子。

非平稳随机地震模型的时间包络函数 $g(t)$ 选用工程中常用的三段式时间包络函数

$$g(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t \geq t_2 \end{cases} \quad (24)$$

式中: c 为衰减系数; t_1 和 t_2 分别为主振平稳段的首末时间。

4 数值算例与分析

4.1 算例及参数设计

某工程为左塔 16 层,右塔 14 层的混凝土框架核心筒连体结构(图 2),层高均为 3.0 m,左塔总高度为 48 m,右塔总高 42 m,地震设防烈度 8 度,设计地震分组为第 2 组,场地土类别为 II 类。单塔结构体型为 18 m×18 m,角柱截面为 900 mm×900 mm,中柱截面为 600 mm×600 mm,主梁为 200 mm×700 mm,剪力墙厚 200 mm,楼板厚 180 mm。连体层为钢桁架结构,体型为 15 m×6 m,连体上、下弦杆为 H600×300×18×20 mm,腹杆为 H400 mm×400 mm×13 mm×21 mm,钢材采用 Q345B。在 PKPM 中获得单塔楼楼层的质量为 376.80 t,楼面质量为 328.20 t,连体质量为 154.33 t,单塔沿连体方向层抗侧刚度为 9.1797×10^6 kN/m,混

凝土强度采用 C40。分析 8 度多遇、罕遇地震作用下,刚性连体结构的非平稳随机地震响应与动力可靠度。塔楼结构考虑刚度退化的 Bouc-Wen 光滑滞回模型,各塔楼楼层的参数取值^[5]: $n=1, A_l=1, \beta=0.8, \delta_A=\delta_b=0, \gamma=0.2, \alpha_{L1} \sim \alpha_{Li}=0.2, \alpha_{R1} \sim \alpha_{Rj}=0.2, \delta_\eta=0.0001$,位移限值 $b=H/100$,其中 H 为楼层高度。

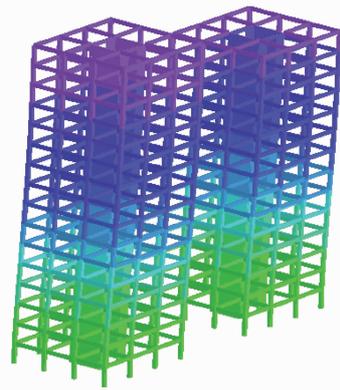


图 2 连体结构三维透视图

Fig. 2 3D Perspective of connected structures

地震动模型参数取值^[12]: $\omega_g=15.71, \omega_f=0.15\omega_g, \zeta_f=\zeta_g=0.72$ 。根据该模型,推算多遇、罕遇地震作用下单边功率谱强度,罕遇地震作用时谱强度为 $S_0=2.33 \times 10^2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$,其输入的功率谱密度曲线见图 3,地震动持时取 $t=20 \text{ s}$ 。时间包络函数 $g(t)$ 参数取值为: $c=0.35$ 为衰减系数, $t_1=0.8 \text{ s}$ 和 $t_2=7.0 \text{ s}$ 。

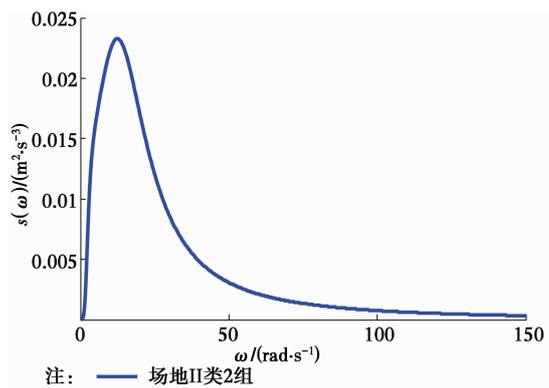


图 3 加速度功率谱密度函数

Fig. 3 power spectrum density function on acceleration

4.2 非平稳随机地震响应分析

采用上述理论对给定算例进行 8 度罕遇地震下连体结构非平稳随机地震响应分析。得到连体位于 2 层、5 层、8 层、11 层及 14 层(右塔顶层)时左右塔楼各层最大层间位移方差曲线如图 4 所示,当连体位于 2 层、8 层及 14 层时,连体层及毗邻楼层、底层及顶层各楼层时变方差曲线如图 5~7 所示,由图形可以看出:

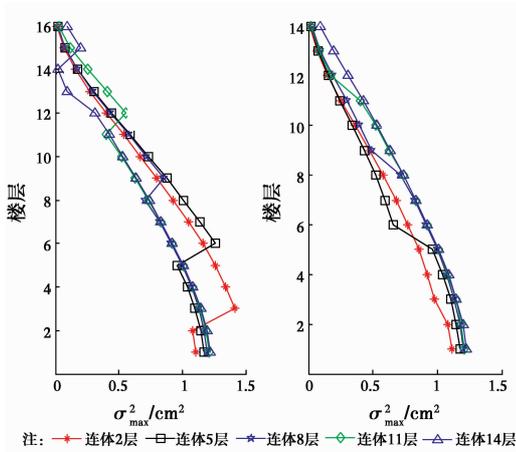


图 4 层间位移方差最大值比较

Fig. 4 The comparison of maximum inter-story displacement variance

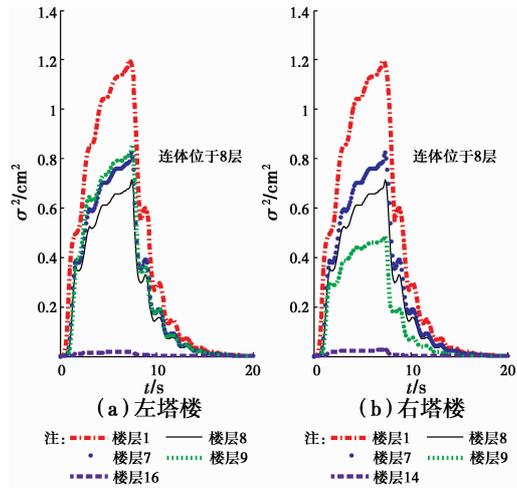


图 6 连体位于 8 层时塔楼层间位移时变方差曲线对比

Fig. 6 Inter-story displacement time-history variance while connection in 8st story

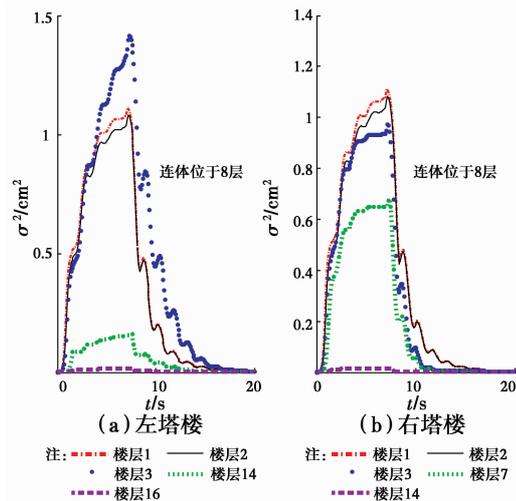


图 5 连体位于 2 层时塔楼层间位移时变方差曲线对比

Fig. 5 Inter-story displacement time-history variance while connection in 2st story

1) 连体结构在非平稳随机激励下,塔楼层间位移响应呈现强烈非平稳性,时滞现象较明显。

2) 在连体设置楼层的相邻楼层处,位移时变方差曲线出现突变,说明相邻楼层为结构的薄弱楼层,对比左右塔楼,左塔楼(16 层)突变程度较右塔楼(14 层)明显,结构设计时应该作为薄弱层予以处理和加强。

3) 随着连体位置上升,对左塔楼:随着连体上移,楼层位移时变方差最大值呈现先增大后减小的趋势,即连体位于中间楼层位置时时变方差最大,当位于连体位移顶层时各楼层位移时变方差最小,但此时连体以上 2 层的响应呈现放大趋势,为结构设计中应予以加强楼层;对右塔楼:当连体位于顶层时位移时变方差值最大,当连体位于中间楼层时时变方差最小。

时塔楼层间位移时变方差曲线对比
ory displacement time-history
le connection in 14st story

4) 实际连体结构设计时应综合考虑左右塔楼的地震响应影响,由图形变化规律可以看出,当连体位于非对称塔楼的中间楼层时,结构在其相邻楼层会产生位移突变,时变位移方差变化比较明显,即产生刚度突变。

4.3 动力可靠度分析

根据所得非平稳随机地震响应分析统计量,基于首次超越破坏准则,依据公式(19)~(22)计算 8 度罕遇地震下连体位于不同楼层时连体结构的动力可靠度,图 8 为分塔楼楼层动力可靠度。层间位移限值取建筑抗震规范规定的位移角限值,即满足结构在大震不倒要求,罕遇地震下弹塑性位移角取 1/100,由图 8 可以看出:

1) 连体的设置使得左塔楼结构毗邻楼层结构的可靠度降低很多,实际结构设计时宜予以加强,对右塔楼可靠度虽在毗邻楼层有一定影响,但影响不明显。

2) 针对连体结构,无论左右塔楼,以连体为分界,各楼层可靠度随楼层位置上升而逐渐增大,连体设置使得体系可靠度降低很多的原因是连体的设置使得连体楼层成为整个结构的刚度突变部位,实际结构设计时宜在相邻楼层设置转换层,尤其应注意高塔或刚度较小塔楼的设计问题。

3) 由图 8 可进一步看出,当连体位于 11 层到 14 层时,结构可靠度突变不再明显,且体系可靠度均较高,证明在实际结构设计中宜将连体设置在双塔楼的上

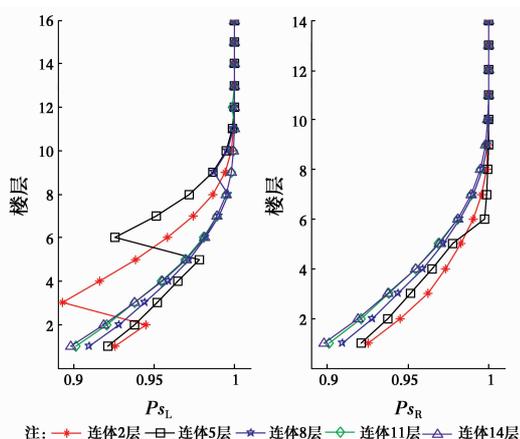


图8 塔楼楼层动力可靠度

Fig. 8 Reliability of each floor on the tower building

部,这也与已有的实际工程设计结论相一致,从而证明了本文分析的正确性。

5 结论

1)将虚拟激励法与混合精细积分法结合用于弱连体结构的非平稳随机地震响应分析,方法简单,计算效率高,适用性广。

2)基于非平稳随机地震激励下弱连体结构随机地震响应和动力可靠度分析,可较方便地对连体结构薄弱部位进行识别,使得对于连体结构的设计和具有一定的指导意义。

3)刚性连体位置变化对连体结构在非平稳随机地震激励项的可靠度影响显著,从概率意义上论证了连体常设置在塔楼中上部的实际工程现象。

4)对非对称双塔连体结构,连体位置的变化对高塔楼或相对弱刚度塔楼的影响较低塔楼更加明显,实际工程设计中应予以重点关注。

参考文献:

- [1] 谭希平. 某高层双塔连体结构设计[J]. 建筑结构, 2014, 44(22): 17-20.
Tan X P. Structural design of a high-rise twin-tower connected building [J]. Building Structure, 2014, 44(22): 17-20. (in Chinese)
- [2] 龙辉元, 张晓宇, 王福安, 等. 西安迈科商业中心连体超高层结构设计[J]. 建筑结构, 2014, 44(13): 92-96.
Long H Y, Zhang X Y, Wang F A, et al. Structural design of connected super high-rise building of Xi'an Maike Business Center [J]. Building Structure, 2014, 44(13): 92-96. (in Chinese)
- [3] 杜永峰, 李春锋. 连廊位置对高层连体结构地震响应的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(3): 60-63.
Du Y F, Li C F. Influence of the connection position on seismic response of the connected high-building [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(3): 60-63. (in Chinese)
- [4] 杜永峰, 李春锋. 阻尼连廊位置对高层连体结构地震响应的影响[J]. 建筑科学, 2008, 24(11): 31-35.
Du Y F, Li C F. Influence of damper corridors position on seismic response of the connected high-rise building [J]. Building Science, 2008, 24(11): 31-35. (in Chinese)
- [5] 孙臻, 王曙光, 王玉, 等. 高层隔震结构非平稳随机地震响应与动力可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 210-216.
Sun Z, Wang S G, Wang Y, et al. Non-stationary random response and dynamic reliability of high-rise seismic isolated structure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 210-216. (in Chinese)
- [6] Kafatygiotis L, Cheung S H. Wedge simulation method for calculating the reliability of linear dynamical systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19: 229-238.
- [7] Kafatygiotis L, Cheung S H. Domain decomposition method for calculating the failure probability of linear dynamic systems subjected to Gaussian stochastic loads [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(5): 475-486.
- [8] Barbato M, Tubaldi E. A probabilistic performance-based approach for mitigating the seismic pounding risk between adjacent buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2013, 42: 1203-1219.
- [9] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 270-277.
Lin J H, Zhang Y H. Random vibration of pseudo excitation method [M]. Beijing: Science Press, 2004: 270-277. (in Chinese)

- [10] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社,1998:295-312.
Ou J P, Wang G Y. Random vibration of structures [M]. Beijing: High Education Press, 1998: 295-312. (in Chinese)
- [11] 钟万勰. 结构动力方程的精细时程积分法[J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(2): 131-136.
Zhong W X. On precise time-integration method for structural dynamic [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1994, 34(2): 131-136. (in Chinese)
- [12] 薛素铎,王雪生,曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 5-10.
Xue S D, Wang X S, Cao Z. Parameters study on seismic random model based on the new seismic code [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 5-10. (in Chinese)
- [13] 吴昊,张洵安. 非平稳地震激励下结构随机响应及动力可靠度研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 35-40.
Wu H, Zhang X A. The random response and dynamic reliability analysis of structure subjected to non-stationary seismic excitation [J]. Industrial Construction, 2012, 42(12): 35-40. (in Chinese)
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)