

文章编号: 1674—8247(2019)04—0061—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.013

## 强震区跨断层隧道局部接触注浆抗震效果研究

李鹏宇<sup>1</sup> 崔光耀<sup>1</sup> 王明胜<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中国中铁隧道集团有限公司, 广州 511458)

**摘要:**为进一步提高高烈度地震区跨断层隧道的抗震性能,文章依托中义隧道冲江河断层段,利用有限差分数值计算软件对跨断层隧道强震动力响应特性和围岩局部接触注浆抗震效果进行了研究。研究结果表明:(1)中义隧道冲江河断层段强震影响范围约为20 m;(2)采取局部间隔注浆抗震措施后,二衬竖向最大位移抗震效果为1.74%,横向最大位移抗震效果为1.62%,最大主应力极值抗震效果为15.09%,最小主应力极值抗震效果为0.1%,可通过施設抗震缝或减震层予以解决;(3)采取局部间隔注浆抗震措施后,断层破碎带段最小安全系数明显提高,监测断面5最小安全系数为3.120,抗震效果达60.91%,监测断面6最小安全系数为2.807,抗震效果达50.27%。

**关键词:**强震区;跨断层隧道;局部接触注浆;抗震

**中图分类号:**U455.91 **文献标志码:**A

61

## Study on the Effect of Local Contact Grouting in Cross-fault Tunnel in Strong Earthquake Area

LI Pengyu<sup>1</sup> CUI Guangyao<sup>1</sup> WANG Mingsheng<sup>2</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;  
2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** In order to further improve the seismic performance of cross-fault tunnels in seismic zones of intensity, the dynamic response characteristics of cross-fault tunnels under strong earthquakes and the seismic effect of local contact grouting in surrounding rocks are studied by using finite difference numerical calculation software based on the middle fault section of Zhongyi tunnel. The results show that: (1) the influence range of strong earthquakes in the middle fault section of Zhongyi tunnel is about 20 m. (2) After adopting local interval grouting seismic measures, the seismic effect of the vertical maximum displacement of the secondary lining is 1.74%, the seismic effect of the lateral maximum displacement is 1.62%, the seismic effect of the maximum principal stress extreme value is 15.09%, and the seismic effect of the minimum principal stress extreme value is 0.1%. (3) After adopting the seismic measures of local interval grouting, the minimum safety coefficient of the section of fault fracture zone is significantly increased. The minimum safety coefficient of the measured section 5 is 3.120, the seismic effect is 60.91%, the minimum safety coefficient of the monitored section 6 is 2.807, and the seismic effect is 50.27%.

收稿日期:2019-02-19

作者简介:李鹏宇(1996-),男,在读研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51408008);北京市青年拔尖人才培养计划项目资助(CIT&TCD201704013);昆明铁路局科技项目重点课题(K17G43)

引文格式:李鹏宇,崔光耀,王明胜. 强震区跨断层隧道局部接触注浆抗震效果研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(4):61-65.

LI Pengyu, CUI Guangyao, WANG Mingsheng. Study on the Effect of Local Contact Grouting in Cross-fault Tunnel in Strong Earthquake Area[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 61-65.

**Key words:** strong earthquake area; cross-fault tunnel; local contact grouting; anti-seismic

随着我国西部交通建设的持续发展,跨断层隧道工程不断涌现,而断层破碎带往往处于高烈度地区<sup>[1-2]</sup>。因此,为保证强震区跨断层隧道的震时安全性和稳定性,对跨断层破碎带隧道采取一定抗震设防措施是极为必要的<sup>[3]</sup>。

目前,国内外专家学者对强震区跨断层隧道的抗震技术进行了部分研究,主要有强震区减震层隧道的力学行为研究<sup>[4-6]</sup>、隧道断层注浆加固机制研究<sup>[7-8]</sup>、隧道不同围岩加固范围下减震作用研究<sup>[9-11]</sup>等。以上研究主要围绕注浆加固机制及作用与隧道设施减震层的减震原理,但对于高烈度地震区跨断层隧道围岩范围注浆抗震效果的研究相对较少。因此,本文依托丽香线中义隧道冲江河断层段,利用有限差分数值计算软件,对采用区域注浆加固方式的抗震效果进行研究。研究成果可为高烈度地震区跨断层隧道抗震设防设计提供参考。

1 中义隧道冲江河断层段概况

1.1 地质条件

断层位于丽香铁路虎跳峡至新尚区间内,逆断层,为一区域性活动大断裂,位于龙蟠-乔后断裂西侧,呈弧形,沿金沙江、冲江河分布,长度大于50 km,走向N20°W~N20°E,倾向西,倾角77°。上盘和下盘分别为砂岩夹页岩(T<sub>1</sub>l)、玄武岩(P<sub>β</sub>)和偏离化玄武岩夹砂质板岩(T<sub>β</sub>),砂岩(T<sub>1</sub>)均为IV级围岩,破碎带为V级围岩,材质为灰岩质断层角砾,密实~半胶结状。

1.2 衬砌结构设计

冲江河断层段隧道采用复合式衬砌,结构型式为曲墙带仰拱。初支采用C25喷射混凝土,厚度为25 cm,二次衬砌采用C25模注混凝土,厚度为45 cm。

2 研究情况

2.1 计算模型

以中义隧道冲江河断层为研究背景,建立计算模型,采用摩尔-库伦屈服强度准则,本构模型为弹塑性模型。隧道洞径约为8 m,左右开挖深度取5~8倍洞宽,约50 m,纵向开挖深度为200 m,埋深50 m,断层倾角77°,底部基岩厚20 m。计算模型的边界条件为上边界无约束,下边界与四周边界全约束。计算模型如图1所示。

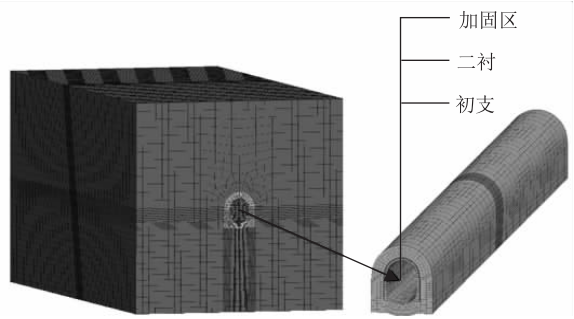


图1 计算模型

2.2 计算参数

依据实际地勘资料,模型的计算参数,如表1所示。

表1 计算模型参数表

参数	重度 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
II级围岩	25	20	0.2	50	1.5
IV级围岩	22	5.0	0.3	35	0.5
V级围岩	20	2.0	0.4	25	0.2
初支	25	28	0.2	-	-
二衬	25	28	0.2	-	-
加固区	23	7	0.35	-	-

2.3 计算工况

以常用注浆厚度3 m为例进行研究,计算工况如表2所示。

表2 计算工况表

工况	注浆厚度/m	加固范围/m
1	0	0
2	3	根据工况1计算结果确定

2.4 动力参数

计算模型采用理想弹塑性本构模型、自由场边界和局部阻尼,局部阻尼系数为0.157 1。

地震波选取汶川地震卧龙测站所测的加速度波,按9度地震烈度标准化,持续时间为15 s。利用滤波软件进行滤波和基线校正,经过处理的地震波加速度时程曲线,如图2所示。

2.5 测点布置

沿隧道断层两侧上下盘每隔10 m设置一个检测断面,选取各断面二衬结构的拱顶、右拱肩、右边墙、右拱脚、左拱肩、左边墙、左拱脚、仰拱等8个测点进行监测,监测点布置,如图3所示。

3 冲江河断层段地震安全性评价

结构位移、主应力云图,如图4、图5所示。

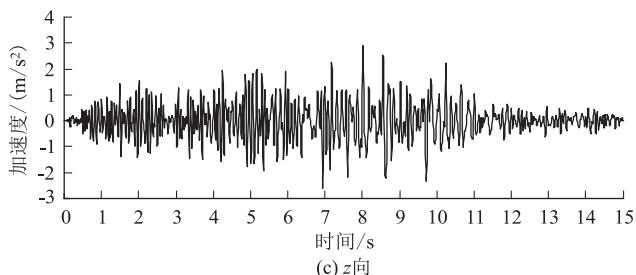
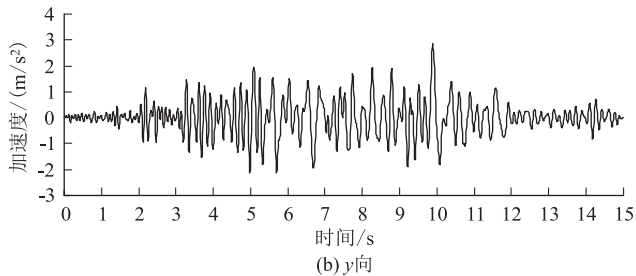
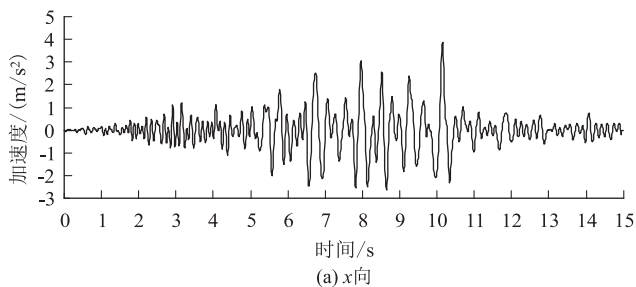


图2 加速度时程曲线图

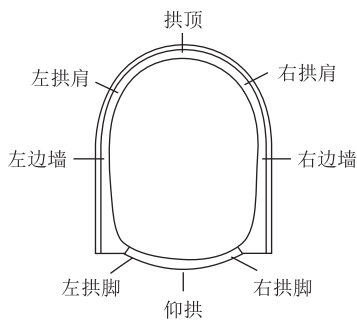


图3 测点布置示意图

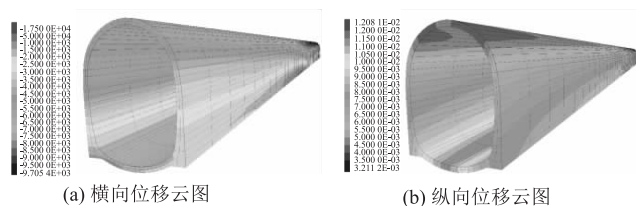


图4 工况1结构位移云图

由图4和图5提取各监测断面各监测点计算结果,由公式(1)~(2)计算工况1的二衬结构安全系数,提取各监测断面(其中S5、S6为面破碎带段内断面)的二衬最小安全系数<sup>[12]</sup>。

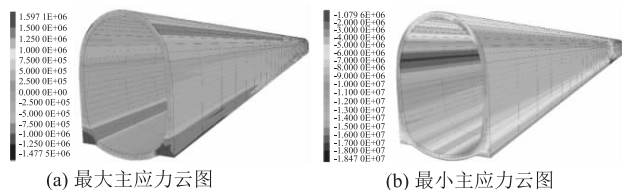


图5 工况1结构主应力云图

二衬结构安全系数:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \quad (1)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 b h}{6 e_0 / h - 1} \quad (2)$$

式中:  $N$ ——轴力;

$b$ ——截面宽度,取1 m;

$h$ ——截面厚度;

$R_2$ ——混凝土抗压极限强度;

$R_1$ ——混凝土抗拉极限强度;

$K$ ——安全系数;

$\varphi$ ——构件纵向弯曲系数;

$\alpha$ ——轴向力偏心影响系数。

二衬结构断面最小安全系数如图6所示。

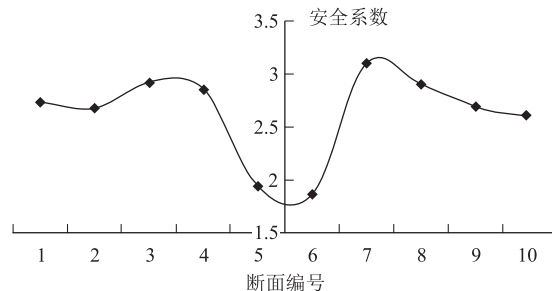


图6 二衬结构断面最小安全系数图

由图6可知,文献[11]规定隧道结构抗震最小安全系数为2.4,故取安全系数2.4以下区域为注浆范围,其范围为二衬纵向  $y$  轴距离90~110 m处,局部接触注浆布置,如图7所示。

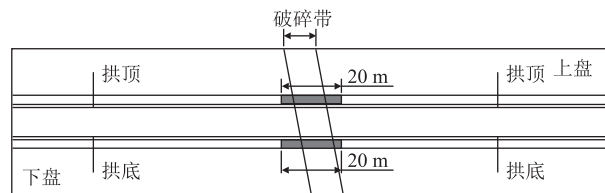


图7 注浆范围示意图

## 4 局部注浆抗震措施作用效果

### 4.1 结构位移

提取工况2隧道跨断层破碎带段的位移云图,如

图8所示。依据图4和图8,提取二衬拱顶的位移最大值,并由公式(3)计算工况2的最大位移抗震效果(与工况1对比),如表3所示。

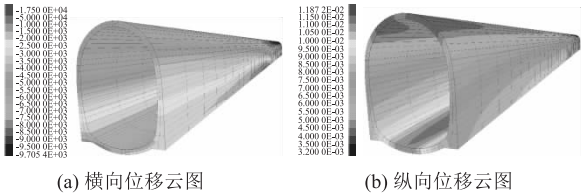


图8 工况2结构位移云图

最大位移抗震作用效果:

$$\rho_D = \frac{D_{前} - D_{后}}{D_{前}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\rho_D$ ——最大位移抗震作用效果;

$D_{前}$ ——加固前最大位移;

$D_{后}$ ——加固后最大位移。

表3 二衬结构的最大位移及控制效果表

工况类型	横向		竖向	
	位移/mm	抗震效果/%	位移/mm	抗震效果/%
工况1	9.87	—	12.08	—
工况2	9.71	1.62	11.87	1.74

由表3可知,采用范围接触注浆后,二衬横向最大位移由9.87 mm降至9.71 mm,抗震效果为1.62%;二衬竖向最大位移由12.08 mm降至11.87 mm,抗震效果为1.74%。

4.2 主应力

提取工况二断层破碎带段隧道结构的主应力云图,如图9所示。依据图5和图9,提取二衬结构的主应力最大值与最小值,并由公式(4)计算工况2的主应力极值抗震效果(与工况1对比),如表4所示。

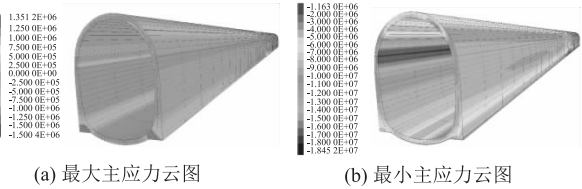


图9 工况2结构最大最小主应力云图

主应力抗震作用效果:

$$\rho_\sigma = \frac{\sigma_{前} - \sigma_{后}}{\sigma_{前}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\rho_\sigma$ ——主应力极值抗震作用效果;

$\sigma_{前}$ ——加固前主应力极值;

$\sigma_{后}$ ——加固后主应力极值。

表4 最大最小主应力极值及抗震作用效果表

工况类型	最大主应力极值		最小主应力极值	
	极值/MPa	抗震作用效果/%	极值/MPa	抗震作用效果/%
工况1	1.59	—	-18.47	—
工况2	1.35	15.09	-18.45	0.1

由表4可知,采用范围接触注浆后,二衬最大主应力极值由1.59 MPa降至1.35 MPa,抗震效果为15.09%;最小主应力极值由-18.47 MPa增至-18.45 MPa,抗震效果为0.1%。范围注浆对于控制最大主应力效果明显。

4.3 安全系数

提取各断面(S5、S6断面位于断层破碎带)各监测点的数据,计算得到工况2下各断面二衬结构的最小安全系数,并结合工况1得出最小安全系数,如图10所示。

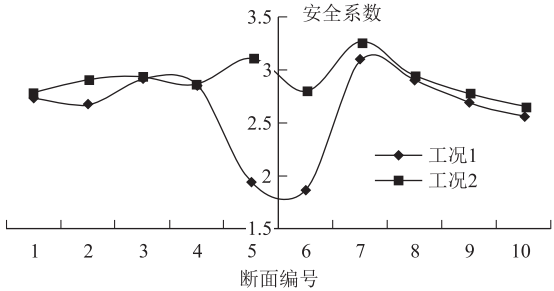


图10 最小安全系数图

提取各工况二衬结构的最小安全系数,并计算其抗震效果(以工况1为对比),如表5所示。

表5 工况最小安全系数及抗震效果

断面编号	工况1	工况2	抗震效果/(相对工况1)
S1	2.732	2.796	2.34(↑)
S2	2.673	2.915	9.05(↑)
S3	2.917	2.940	0.79(↑)
S4	2.859	2.870	0.38(↑)
S5	1.939	3.120	60.91(↑)
S6	1.868	2.807	50.27(↑)
S7	3.096	3.271	5.65(↑)
S8	2.902	2.948	1.59(↑)
S9	2.690	2.780	3.35(↑)
S10	2.571	2.659	3.42(↑)

由图10及表5可知,采用范围接触注浆后,隧道断层处结构安全系数明显提高,监测断面S5的最小安全系数由1.939提高至3.120,抗震效果达60.91%;监测断面S6的最小安全系数由1.868提高至2.807,抗震效果达50.27%。

5 结论

(1)七达里隧道中义断层段强震影响范围约为20 m。

(2)采取局部接触注浆抗震措施后,二衬竖向最大位移抗震效果为1.74%,二衬横向最大位移抗震效果为1.62%。

(3)采取局部间隔注浆抗震措施后,二衬最大主应力极值抗震效果为15.09%,二衬最小主应力减震效果不明显,可通过施設抗震缝或减震层予以解决。

(4)采取局部接触注浆抗震措施后,断层破碎带段监测断面处的最小安全系数明显提高,监测断面S5最小安全系数抗震效果为60.91%,监测断面S6最小安全系数抗震效果为50.27%。

## 参考文献:

- [1] 耿萍,何悦,何川,等. 穿越断层破碎带隧道合理抗震设防长度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 358-365.  
GENG Ping, HE Yue, HE Chuan, et al. Research on Reasonable Aseismic Fortified Length for Tunnel Through Fault Fracture Zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 358-365.
- [2] 耿萍,吴川,唐金良,等. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1406-1413.  
GENG Ping, WU Chuan, TANG Jinliang, et al. Analysis of Dynamic Response Properties for Tunnels Through Fault Fracture Zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1406-1413.
- [3] 孟令瀚,安栋,荆鸿飞. 强震区跨断层隧道纤维混凝土衬砌抗震性能研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 14-19.  
MENG Linghan, AN Dong, JING Hongfei. Study on Seismic Performance of Fiber Reinforced Concrete Lining of Fault-crossing Tunnels in Meizoseismal Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 14-19.
- [4] 崔光耀,王明年,于丽,等. 穿越黏滑错动断层隧道减震层减震技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1753-1758.  
CUI Guangyao, WANG Mingnian, YU Li, et al. Model Tests on Damping Shake Technology of Shock Absorption Layer of Tunnels Crossing Stick-slip Faults [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1753-1758.
- [5] 王明年,崔光耀. 高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(6): 1884-1890.  
WANG Mingnian, CUI Guangyao. Establishment of Tunnel Damping Model in High-intensity Seismic Zone and Model Test Study on Its Damping Effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(6): 1884-1890.
- [6] 崔光耀,伍修刚,王明年,等. 高烈度地震区黏滑断层隧道减震层减震模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2125-2131.  
CUI Guangyao, WU Xiugang, WANG Mingnian, et al. Damping Model Test Study of the Shock Absorption Layer of Stick-slip Fracture Tunnel in Highly Seismic Area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2125-2131.
- [7] 高峰,胡蓉,谭绪凯. 隧道注浆加固模型试验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2014, 55(4): 44-46.  
GAO Feng, HU Rong, TAN Xukai. Model Test of Tunnel Grouting Reinforcement [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2014, 55(4): 44-46.
- [8] 张庆松,李鹏,张霄,等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 924-934.  
ZHANG Qingsong, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model Test of Grouting Strengthening Mechanism for Fault Gouge of Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 924-934.
- [9] 来弘鹏,康佐,谢永利,等. 地铁区间隧道黄土地层注浆预加固技术研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 47-54.  
LAI Hongpeng, KANG Zuo, XIE Yongli, et al. Study on Grouting Pre-reinforcement Technology of Loess Layer in Metro Tunnel [J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 47-54.
- [10] 李伟,乔卫国,张宇,等. 地铁双线隧道超前预注浆加固与分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 77-82.  
LI Wei, QIAO Weiguo, ZHANG Yu, et al. Reinforcement and Analysis of Advance Pre-grouting in Metro Double-track Tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 77-82.
- [11] 王安华,贺斗,郭廷喜,等. 注浆加固围岩对公路隧道的减震作用研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(S1): 17-21.  
WANG Anhua, HE Dou, GUO Tingxi, et al. Study on Shock Absorption of Cementing Rock for Highway Tunnel [J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(S1): 17-21.
- [12] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].  
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel [S].

(编辑:苏玲梅 白雪)

(上接第60页)

- [6] JGJ/T 23-2001 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].  
JGJ/T 23-2001 Technical Specifications for Inspection of Concrete Compressive Strength by Rebound Method [S].
- [7] 吉林铁路线桥检测设计所. 哈尔滨市长江路三标火灾后承载力试验评估报告[R]. 吉林: 吉林铁路线桥检测设计所, 2011.  
Jilin Railway Line and Bridge Inspection Design Institute. Assessment Report of Bearing Strength Test on the Third Tenders of Burned Underpass in Cangjiang Road in Harbin [R]. Jilin: Jilin Railway Line and Bridge Inspection Design Institute, 2011.
- [8] GB/T 50344-2004 建筑结构检测技术标准[S].  
GB/T 50344-2004 Technical Standard for Inspection of Building

Structure [S].

- [9] CECS 252:2009 火灾后建筑结构鉴定标准[S].  
CECS 252:2009 Standard for Building Structural Assessment after Fire [S].
- [10] 铁运[2010]38号, 铁路桥隧建筑物修理规则[S].  
Tie Yun [2010] No. 38, Rule of Building Repair for Railway Bridges and Tunnels [S].
- [11] 铁运函[2004]120号, 铁路桥梁检定规范[S].  
Tie Yun Han [2004] No. 120, Code for Rating Existing Railway Bridges [S].

(编辑:刘会娟 白雪)