

# 富水山岭隧道开挖工法对围岩稳定性的影响研究

郝洪兴

(中铁十一局集团第四工程有限公司,湖北武汉430200)

**摘要:**为了探究富水山岭隧道施工工法对周围岩稳定性的影响,基于数值分析研究手段模拟了全断面法、两台阶法以及CD法三种施工开挖过程,重点研究了围岩变形、应力分布特征以及沉降规律。结果表明:CD法施工引起的拱顶沉降为5.66 mm,拱部隆起为4.59 mm,对于洞周变形的控制优于全断面法和台阶法。特别是在围岩富水后力学强度降低的条件下,CD法可充分发挥初期支护的支挡作用,有效控制隧道整体变形。天然条件下,三种工法引起的上部沉降差异较小,但在富水条件下,CD法对于控制上部沉降的效果更加显著。

**关键词:**山岭隧道;施工工法;围岩变形;强度劣化

中图分类号:P642

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2020)03-0150-05

## The Influence of Excavation Method on the Stability of Surrounding Rock in Mountain Tunnel with Rich Water

HAO Hongxing

(China Railway 11th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430200, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the construction method on the stability of surrounding rock, numerical analysis is used to simulate the whole section excavation, the two-step method and the CD method. The deformation, stress distribution and settlement law of surrounding rock are deeply analyzed. The results show that under natural conditions, the difference of upper settlement caused by the three methods is small. But in water-rich conditions, the settlement of the arch caused by the construction of CD method is 5.66 mm, the arch part uplift is 4.59 mm, and the control of the deformation around the hole is better than the whole section method and the step method. Especially under the condition that the mechanical strength decreases after the surrounding rock is rich in water, CD method can take full advantage of the supporting and retaining function of the initial support and effectively control the overall deformation of the tunnel.

**Keywords:** mountain tunnel; construction method; surrounding rock deformation; strength degradation

当山岭隧道穿越富水断层或富水区时,隧址区围岩往往会受到地下水往复运移及长期浸泡的影响,引起岩体强度及完整性的显著下降。尤其是对于易产生水岩作用的泥岩、粉砂质泥岩等软岩地质条件,围岩稳定性较差,工程问题较为突出<sup>[1-4]</sup>。目前针对富水软岩隧道的研究主要集中于注浆堵漏,应力-渗流耦合、支护结构选型<sup>[5-6]</sup>等。杨果岳等<sup>[7]</sup>采用数值模拟手段研究了隧道开挖时渗流参数与围岩状态的相互关系。黄震<sup>[8]</sup>通过流固耦合

理论,采用试验及数值模拟手段得到了富水围岩的突水机理和渗流演化特征。范建国等<sup>[9]</sup>对富水岩溶公路隧道的支护结构受力特性进行分析,并采用现场实测与数值计算结果进行了对比验证。徐凡献<sup>[10]</sup>以郑万高铁向家湾隧道作为研究对象,采用UDEC离散元模拟了全断面开挖施工对隧道稳定性的影响。崔庆龙等<sup>[11]</sup>对比分析了台阶法、CD法和环形开挖预留核心土模拟施工状态下对软弱围岩的影响。薛大全<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究了CD法和

CRD 法对偏压松散围岩开挖造成的施工力学特性差异,并给出合理的支护建议。实际上,对于富水山岭隧道,除了必要的防排水设计及构造措施外,岩体前期浸水引起的强度衰减以及相应的开挖工法在目前的设计中缺乏相关可供参考的依据和标准,这对于施工安全保障和工程经济性优化有着重要的影响<sup>[13-16]</sup>。

因此,针对以上问题,本文以某富水山岭隧道为工程依托,基于现场围岩特征参数及设计情况,采用数值模拟手段深入研究了全断面开挖、上下台阶法开挖以及 CD 法开挖三种工况条件下围岩变形,拱顶沉降及应力分布特征等研究,通过对比分析拱顶、左右边墙、拱底等特征位置的位移及受力情况,总结了不同工法对于隧道开挖稳定性的影响,为相似工程的修建提供一些理论支撑及参考。

表 1 材料物理力学特征值

材料状态	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	渗透系数 /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
天然状态	24.5	0.25	2.1	1.2	36	$4.6 \times 10^{-5}$
饱水状态	25.3	0.27	0.9	0.5	31	—
初期支护	25.0	0.20	8.5	—	—	—
临时钢支撑	75.0	0.30	158.5	—	—	—

## 2 施工方案及模型建立

### 2.1 数值模型建立

为了充分考虑水岩作用对隧道开挖的稳定性影响,选取大埋深、地下水位较高且开挖前岩体长期浸水的区段作为研究对象。为了对比研究水岩作用前后隧道在结构受力方面存在的差异,通过有限元计算软件建立了不同围岩参数、不同工法条件下的隧道开挖模型与支护模型。本文以初期支护结构作为主要研究对象。隧道宽 16.75 m,高 13.69 m。计算模型中隧道围岩为 V 级,隧道埋深 51 m。为了消除边界效应,数值模型两侧宽度取 3.5 倍洞径约 56 m,下部边界范围内围岩厚度设置为 31.5 m,模型沿隧道开挖方向取 15 m,单元长度为 0.5 m。

围岩及支护结构均采用四边形平面应变单元,计算单元采用 Solid 45。模型共计 5 184 个单元和 7 188 个节点。采用弹塑性本构模型,假定围岩及支护材料符合摩尔-库仑破坏准则,模型中参数取值见表 1。计算前,模型的前后左右边界及底部边界进行固定约束,仅上部岩土体为自由无约束状态。为了更好的对比隧道开挖前后围岩稳定性及支护结

## 1 工程概况

某在建隧道位于云南省大理市境内为单洞铁路隧道,全长小于 3 km,最大埋深 73 m,隧道净宽为 16.75 m,洞内纵坡 1.7%,初期支护设计为 25 cm。其中 DK448 + 288—DK448 + 472 段穿越富水段岩层,地层岩性主要为侏罗系上统粉砂岩有泥岩夹层。层理发育且有少量砂泥岩互层分布。隧址区雨量充沛,洞身段地表出现了较多冲沟,地下水则以基岩裂隙水及孔隙潜水为主,大气降雨补给通道顺畅,岩层透水性及富水性不均一。隧道临近位置坡角处有一平形向河流,岩体地下水位部分区段较高,围岩长期受地下水运移的扰动。针对围岩特征参数,现场钻心取样并开展了相应饱水条件下的岩体强度室内试验,测得岩体的基本物理力学参数见表 1。

构受力特性差异,共设置了 9 个监测点(A-G),分别位于隧道的拱顶(A)、左右边墙(C、D)、拱底(B)、拱顶上部 3.6 m(E),拱顶上部 7.2 m(F)和拱顶上部 17.5 m(G),如图 1 所示。

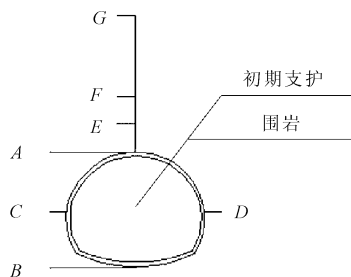


图 1 隧道变形及上部沉降监测点布置

### 2.2 开挖方法

开挖工况主要设置全断面法、两台阶法和 CD 法三种方式。其中全断面法主要为将洞室一次开挖成形,然后施作支护的施工方法(①—②)。两台阶法为将开挖断面大致分为上下两部分分部开挖,并且采取开挖后即施作支护衬砌的一种由上而下的开挖支护方式(①—④)。CD 法为左右分布开挖方式。左侧断面开挖后及时施作初期支护及中部临时

支撑,待变形稳定后再开挖右侧围岩(①—⑤)。三种施工方法的数值模型及开挖示意图见图 2。

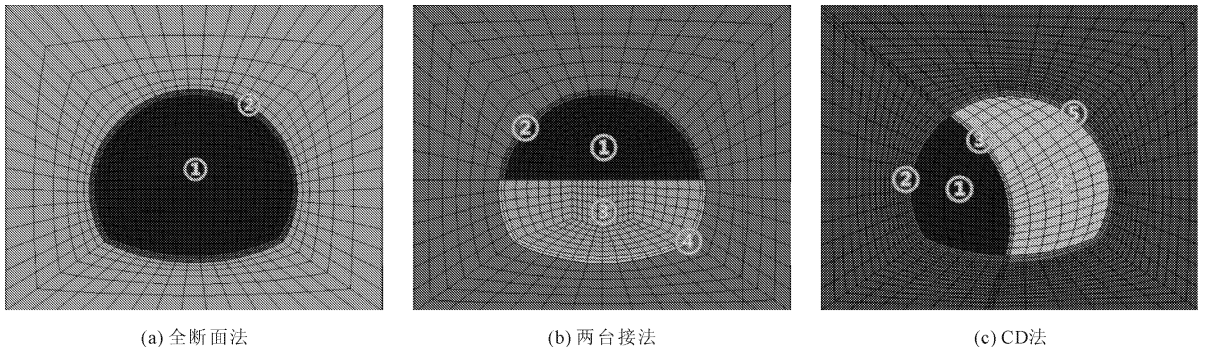


图 2 不同施工工法开挖数值模型示意图

### 3 结果分析及讨论

#### 3.1 位移分析

对比不同开挖工法条件下隧道洞周变形量可以看出,拱顶位置一般为沉降量最大处,洞底隆起变形量次之,但是不同工况条件下变形量大小有所差异,但变形趋势具有一定的相似性。其中,在完全饱水条件下(见图 3),全断面开挖时拱顶最大沉降量为 6.10 mm,拱底隆起 5.87 mm;台阶法开挖时拱顶最

大沉降量为 6.30 mm,拱底隆起 5.61 mm,CD 法开挖时拱顶最大沉降量为 5.66 mm,拱底隆起 4.59 mm。通过对比分析可以得到,CD 法开挖隧道时对洞周变形和位移控制相对较好,而全断面法和台阶法施工造成的洞周变形比较相近。从边墙位置处的变形可以得出,全断面法、两台接法和 CD 法施工时左右边墙的变形量均较为接近,其中两台阶法的边墙竖向位移最小。

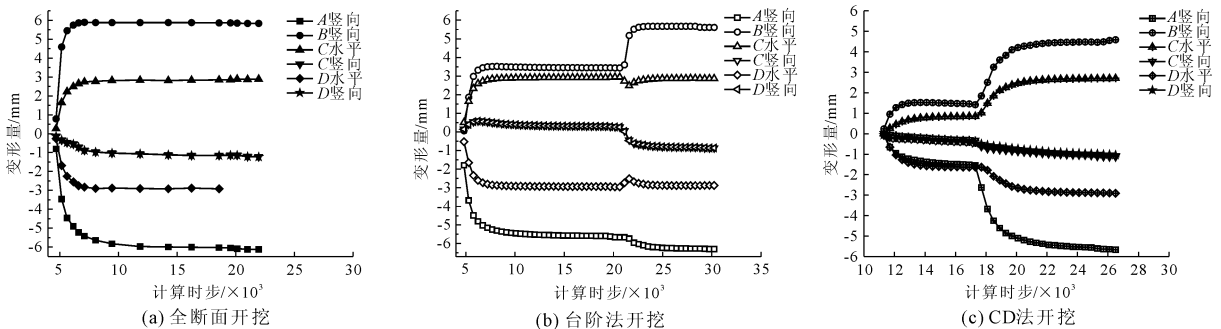


图 3 饱水岩体不同开挖工法条件下洞周变形对比

然而,当围岩在天然状态下进行开挖时(见图 4),洞周变形量出现了明显的降低,其中边墙变形量平均降低了 48%,相对拱顶、底变形受工法影响较小。在全断面工法条件下,拱顶位移量降幅为 49.1%,拱底隆起量降幅为 51.8%;在台阶法条件下,拱顶位移量降幅为 49.2%,拱底隆起量降幅为 49.7%;在 CD 法条件下,拱顶位移量降幅为 48.6%,拱底隆起量降幅为 47.5%。通过分析可以得出,降幅越大,表明施工工法对围岩条件的要求越高。因此,在富水条件下采用 CD 法进行隧道开挖,对于拱顶沉降和拱底隆起的控制相对更为有效。

#### 3.2 应力分析

由图 5 可以得出,不同工法以及不同围岩条件

下开挖隧道引起的竖向应力分布有较大差异。首先,在天然条件下,全断面开挖会引起拱顶和拱底较大的竖向应力,应力大小约为 0.25 MPa ~ 0.50 MPa,分布范围上下延伸较大,边墙处则相对较小。台阶法开挖时,上台阶拱顶两侧竖向压应力较小,而拉应力较为集中,特别是在拱顶处应力有进一步增大的趋势。CD 法开挖时,洞周竖向应力集中现象不明显,仅仅两侧边墙处的竖向应力较大约为 3.50 MPa ~ 3.60 MPa。但临时支撑的连接处出现了应力集中,拱底处受到的影响较小。与围岩饱水条件下的隧道开挖相比,竖向应力分布趋势比较接近,但竖向应力大小减小了约 3% ~ 12%。其中两台阶法和全断面法应力变化率较小,CD 施工法引起的应力变

化率较大,表明在支护体系能够充分发挥支挡作用的前提下,CD 法施工可以使得初期支护更好的承受开

挖后产生的围岩压力,特别是在围岩饱水,力学强度降低的情况下。对于控制隧道的整体变形效果较好。

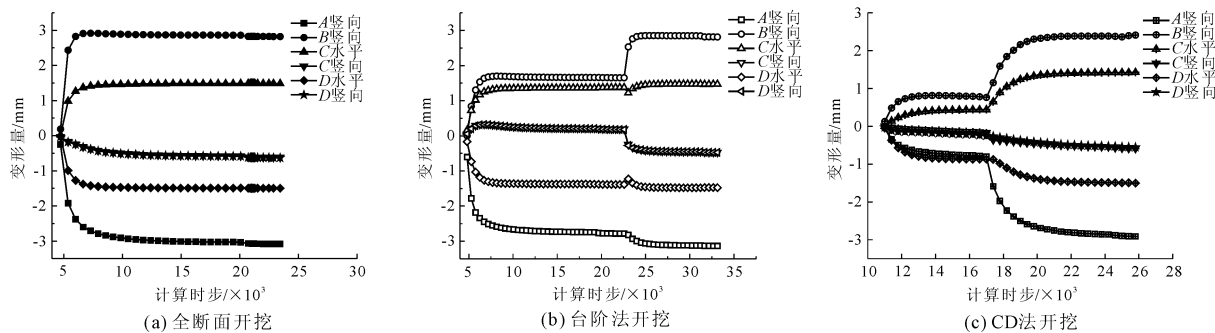


图 4 天然岩体不同开挖工法条件下洞周变形对比

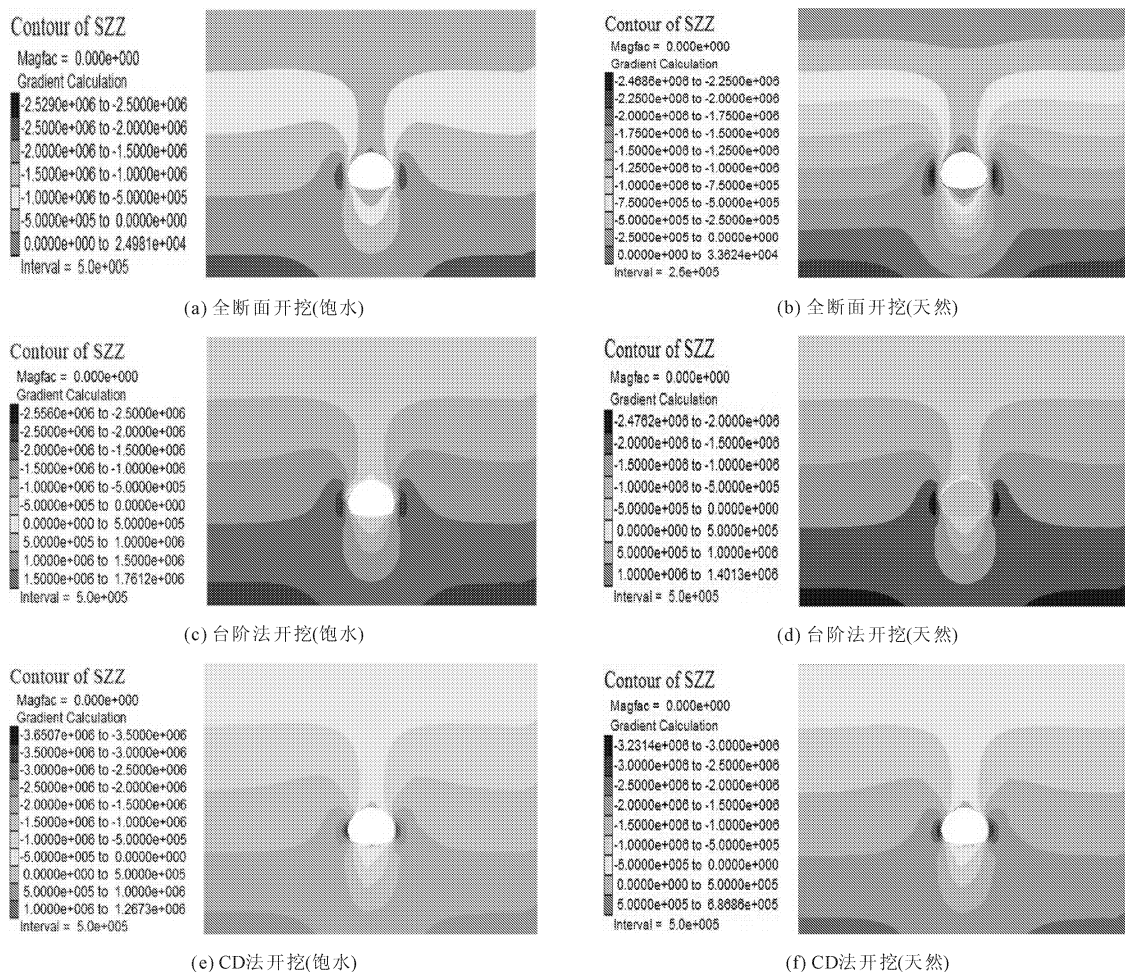


图 5 饱水与天然岩体在不同开挖工法条件下竖向应力对比

### 3.3 沉降分析

为了进一步评价不同工法及围岩条件下隧道开挖对于上部沉降的影响,通过将拱顶上部 3 个监测点的竖向位移进行统计分析,结果见图 6、图 7。研究表明,不同施工方法引起的上部沉降量大小有所差异,但均满足随着与拱顶位置的距离逐渐增大,施工引起的沉降效果逐渐减弱的特征。在天然

条件下,三种工法引起的上部沉降量数值上比较接近。两台阶法引起的拱顶 10 m 范围内的沉降量最大,约为 2.58 mm。CD 法施工引起的最大沉降量略小于其他两种工法,其差值约为两台阶法引起沉降量的 5.4%。随着距离地面越近,CD 法施工与台阶法施工引起的沉降量差异逐步攀升至 9.1%,引起的沉降量约为 1.2 mm。而在饱水围岩条件下的隧

道开挖时,拱顶上部沉降量明显增大,台阶法施工引起的最大沉降约为 5.23 mm,CD 法施工引起的最大沉降约为 4.77 mm,全断面法引起的沉降仅次于台阶法施工。然而 CD 法施工和台阶法施工引起的沉

降量差异随远离拱顶方向由 8.8% 增加至 12%。表明在富水围岩条件下,CD 法施工对于控制拱顶上部沉降的效果更好,相比于天然围岩条件下,优势也更为突出。

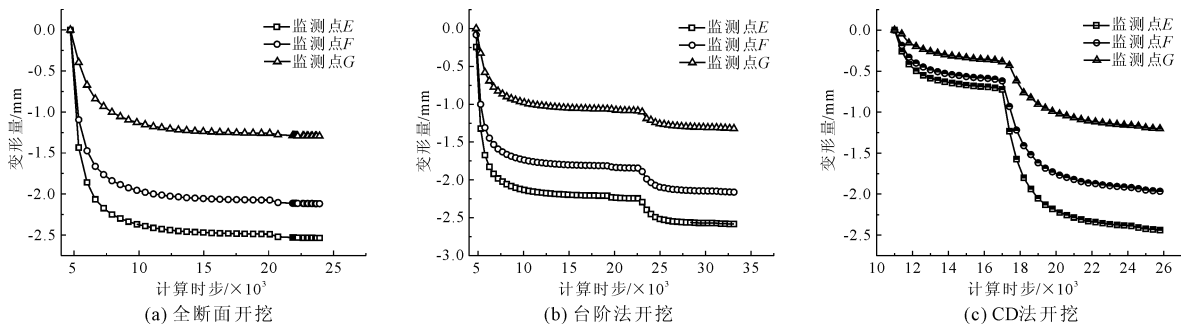


图 6 天然岩体不同开挖工法条件下竖向沉降对比

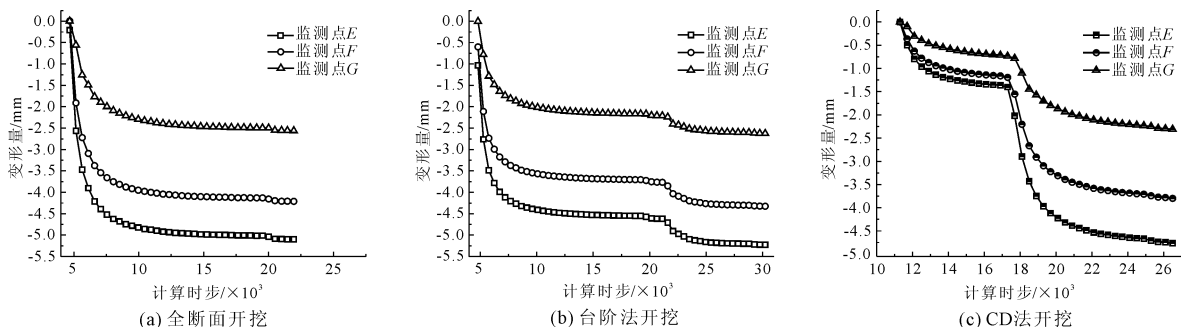


图 7 饱水岩体不同开挖工法条件下竖向沉降对比

## 4 结 论

本文基于天然和饱水岩体力学强度试验结果,采用有限元模拟手段,针对全断面法、台阶法和 CD 法三种施工工法进行隧道开挖后的围岩稳定性展开研究,对比分析了不同工法、不同围岩参数条件下隧道开挖后的洞周变形、应力分布及沉降特征,得到如下结论:

(1) 考虑了水岩效应的隧道开挖引起的变形较大。在三种工法条件下开挖隧道时,拱顶沉降及拱底隆起问题较为突出。台阶法开挖引起最大拱顶沉降量为 6.30 mm,全断面开挖引起最大拱底隆起为 5.87 mm;而 CD 法对于拱顶沉降和拱底隆起的控制相对更为有效。

(2) 对比分析天然及富水条件下的隧道开挖应力分布特征得出,不同工法条件下竖向应力分布趋势及规律比较接近,但竖向应力大小减少了约 3%~12%。CD 法在富水软弱围岩中起到的支护作用更强,可有效控制隧道整体变形。

(3) 围岩饱水条件下开挖引起的隧道上部沉降量也较大。在天然条件下,三种工法引起的上部沉

降量数值上比较接近;在富水条件下,CD 法施工和台阶法施工引起的沉降量差异随远离拱顶方向距离的增大由 8.8% 增加至 12%。因此,CD 法施工对于控制上部沉降较另外两工法更为有效。

## 参考文献:

- [1] 钟明文,喻自祥,汪红武,等.富水公路隧道地质灾害探测反演与防治研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):221-225.
- [2] 申玉生,廖雄,陈爱国,等.高压富水区山岭隧道施工注浆堵水技术研究[J].公路交通科技,2019,36(6):65-72.
- [3] 杨南辉.青山山特长隧道 F<sub>9</sub> 断层带涌水治理方案研究[J].铁道工程学报,2018,35(4):87-91.
- [4] 张民庆,何志军,肖广智,等.第三系富水砂层隧道工程特性与施工技术研究[J].铁道工程学报,2016,33(9):76-81.
- [5] 张德华,雷可,谭忠盛,等.软岩大变形隧道双层初期支护承载性能对比试验研究[J].土木工程学报,2017,50(S2):86-92.
- [6] 王波.高压富水软岩隧道开挖方法及支护体系研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.