

常曙光,李文阳,徐强,等.地裂缝活动对城市连续梁桥作用的力学分析[J].地震工程学报,2022,44(4):819-825.DOI:10.20000/j.1000-0844.20201220005

CHANG Shuguang, LI Wenyang, XU Qiang, et al. A mechanical analysis on the effect of ground fissure activity on urban continuous beam bridges[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4): 819-825. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201220005

地裂缝活动对城市连续梁桥作用的力学分析

常曙光¹, 李文阳¹, 徐 强^{1,2}, 白超宇¹, 石玉玲¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 自然资源部地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安 710054)

摘要: 由于城市交通的工程线型特点,其建设与运维无法避免会受到地裂缝活动的影响。基于 MIDAS GTS NX 建立一个三跨连续梁桥正交跨越地裂缝的有限元模型,分析在地裂缝不同沉降量下连续梁桥箱梁及墩台的位移场和应力场变化规律。结果表明,箱梁结构在不同沉降量条件下的主要差异沉降区范围基本相同,且与地裂缝影响带宽度基本等同,即上下盘各 20 m 长,共计 40 m;箱梁的变形可分为三段:抬升区、不均匀沉降区和整体沉降区;地裂缝的上盘箱梁表面受压,而下盘箱梁表面受拉更为明显,处于桥墩位置处的箱梁应力显著增加,箱梁结构的破坏易因拉应力的陡增而发生在地裂缝的下盘桥墩处。地裂缝影响范围内的中跨两侧墩台产生显著的差异位移变化量,而地裂缝影响范围外墩台所受影响较小。研究成果可为已建和规划中的跨地裂缝连续梁桥的致灾机理研究及灾害防治提供重要参考。

关键词: 地裂缝;连续梁桥;有限元;位移场;应力场

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)04-0819-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20201220005

A mechanical analysis on the effect of ground fissure activity on urban continuous beam bridges

CHANG Shuguang¹, LI Wenyang¹, XU Qiang^{1,2}, BAI Chaoyu¹, SHI Yuling¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

(2. Field Scientific Observation and Research Station of Ground Fissures and Land Subsidence,

Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The construction and operation of urban transportation cannot avoid the influence of ground fissure activity due to the linear characteristics. The finite element model of a three-span continuous beam bridge orthogonally crossing ground fissure was established based on MIDAS GTS NX. The variation of displacement fields and stress fields of the continuous beam bridge's box girder and pier under different settlement of ground fissure were analyzed. The results show that under different settlement conditions, the differential settlement areas of the box girder structure remain the same, and the width is basically the same as that of the influence zone of

收稿日期: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(42041006;41807243;41877250);中央高校基金(300102261102;300102261202;300102262910)

第一作者简介: 常曙光(1999—),男,山西长治人,在读硕士,主要从事地质工程及工程抗震研究。E-mail: csg1340463562@163.com。

通信作者: 徐 强(1986—),男,陕西榆林人,博士后,讲师,主要从事结构灾害评估及工程抗震研究。E-mail: 538270385@163.com。

ground fissure; both the length of hanging wall and foot-wall are 20 m, 40 m in total. The deformation of the box girder can be divided into three sections, that is, uplift area, differential settlement area, and overall settlement area. The surface of box girder at hanging wall is mainly subjected to compressive stress, while that at footwall is mainly subjected to tensile stress. The stress of box girder at the position of pier increases significantly, and the failure of box girder structure tends to occur at the footwall pier of ground fissure due to the sudden increase of tensile stress. The differential displacements of bridge piers on both sides of the mid-span within the influence range of ground fissure significantly change, while the piers outside the influence range of ground fissure are less affected. The research results can provide an important reference for the research on the disaster-causing mechanism and disaster prevention of the existing and planned continuous beam bridges.

Keywords: ground fissure; continuous beam bridge; finite element; displacement field; stress field

0 引言

连续梁桥作为城市交通的枢纽工程,在交通中起到至关重要的作用。地裂缝作为一种典型的地质灾害,对各类建筑物均可能产生不同程度的破坏。在地裂缝发育的城市,桥梁作为重要的交通设施,因其工程线型特点不可避免会受到地裂缝的威胁,因此研究地裂缝活动对认识桥梁的变形破坏规律具有非常重要的现实意义。

当前国内外学者对地裂缝进行了大量研究,但主要集中在地裂缝的发育特征、成因机理,以及地裂缝活动对地下结构的影响等方面^[1-5],关于桥梁在地裂缝活动作用下变形破坏机制的研究起步较晚,近年来取得了一定成果。石玉玲等^[6]通过大比例尺模型试验研究简支梁桥和固接桥在地裂缝活动时桥面板的变形情况,并对二者进行了对比。高虎艳等^[7]通过实例论述了西安地裂缝对城市桥梁的破坏方式和破坏程度,提出了使用桥梁结构应对地裂缝活动的总体防治思路。张新广^[8]对西安地铁3号线高架段跨地裂缝进行分析,研究结果表明,当基础产生不均匀沉降时采用简支梁桥和线路调坡方案可降低地裂缝对高架线路的影响。张茵涛等^[9]开展1:20的模型试验,研究了高铁桥梁穿越地裂缝带时地裂缝活动对桥墩应力、轨道变形等的影响。庞旭卿等^[10]开展1:5的桥梁结构跨地裂缝模型试验,分析了地裂缝活动时桥面板及桥墩的应变情况,并对桥梁破坏模式进行了探讨。王利洋^[11]通过物理模型试验,对不同地裂缝位错量下高铁桥梁整体变形、混凝土桩应力、箱梁应变等进行研究,并进行了数值模拟计算对比。刘海东等^[12]通过FLAC^{3D}建立了高铁桥梁跨越地裂缝的数值模型,分析了箱梁的变形和桩基的受力特征。

杨涛^[13]对高速铁路简支梁桥跨隐伏地裂缝进行模拟计算,分析了地裂缝活动时的箱梁变形、桩基沉降及其内力变化规律。赵凯^[14]建立了钢-混凝土组合梁桥跨越地裂缝的数值模型,研究地裂缝活动时钢-混组合梁桥的内力和变形特性。高欢^[15]建立了云轨简支梁桥跨越活动地裂缝的数值模型,研究轨道梁、桥墩及桩基础的位移规律。

目前虽然在桥梁工程跨骑地裂缝的措施方面取得了一定成果,但研究主要集中在通过实例、模型试验或数值模拟分析高铁简支梁桥在地裂缝活动时的变形及内力情况,对于城市连续梁桥的研究则鲜见报道。高铁的路线通常在郊外,而连续梁桥多是在城市内部。西安地裂缝是典型的城市地质灾害,对城市地面沉降的影响尤为显著,因此本文以西安地裂缝活动为例,采用数值模拟的方法研究地裂缝活动对城市连续梁桥的影响作用,以期跨地裂缝连续梁桥的合理设计提供参考。

1 有限元分析模型

西安地裂缝活动表现出三向特征,即同时竖向错动、水平张拉以及水平剪切,其中以竖向错动为主,通常表现为正断式特征,其上盘相对下盘沿地裂缝倾角下滑^[2]。

当前桥梁跨骑地裂缝均采用简支梁结构,利用简支梁支座位移不产生内力的原理,减小地裂缝对桥梁的影响范围。采用这种结构虽然对箱梁的内力无显著影响,但是过大的沉降位移会使得箱梁与垫片的接触面积减小,从而造成梁的横向约束减低,存在安全隐患。如采用多跨连续梁跨骑地裂缝,地裂缝活动的影响范围虽然增大,但能够减小每一跨箱梁的倾斜,因此本文主要研究多跨连续梁跨骑地裂

缝时的受力与变形响应机制。

模型工程原型为文献[14]中提到的雁塔路互通式立交桥中的三跨连续梁桥。利用 MIDAS GTS NX 建立该三跨连续梁桥正交跨骑地裂缝的有限元分析模型,如图 1 所示。模型长 120 m、宽 60 m,土层分为 6 层,厚度 40 m,地裂缝正交于连续梁桥的正中心处,倾角 80°。桥梁跨度均为 32 m,桥墩高 9 m、宽 6 m,用垫板支撑上部箱梁。承台长 10.4 m、宽 7 m、高 2 m,每个承台下设置 4 根 30 m 长的混凝土桩,单桩直径 1 m。使用梁单元模拟混凝土桩,桩土之间的负摩阻力采用桩土接触单元模拟,桥墩、垫板、箱梁以及承台均采用实体单元模拟。混凝土预制箱梁宽 12 m、高 3.13 m,支撑垫板长 1 m、宽 1 m、高 0.3 m。箱梁、桥墩、承台均采用 C50 混凝土。依据上述尺寸划分整体分析模型的网格,为了确保分析的精确度,加密群桩基础周围和地裂缝穿越处两侧网格单元。在模型中, X 为轴向, Y 为宽度方向, Z 为竖向。本文研究内容为连续梁桥,与文献[18]所述不设缝管廊同为线性连续结构,对于地裂缝的模拟,二者采用了相同的方法,所以模型具有

较高的可靠度。

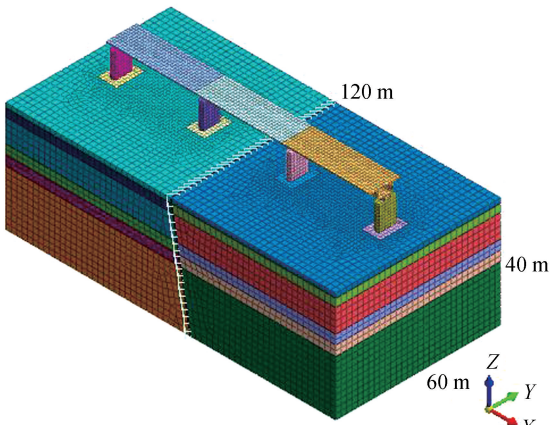


图 1 三跨连续梁桥正交跨越地裂缝分析模型
Fig.1 Analysis model of a three-span continuous beam bridge orthogonally crossing ground fissure

1.1 材料本构模型及参数

土体材料采用莫尔-库仑模型,混凝土梁和钢垫板材料采用弹性模型。以西安实际地层为例,土体与桥梁结构材料的相关物理力学参数列于表 1、表 2^[14]。

表 1 土体材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil materials

名称	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比 ν	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	层底埋深/m	土层厚度/m
①杂填土	17.3	12.0	0.35	16	8	1.7	1.7
②黄土	17.5	11.5	0.35	22	12	4.6	2.9
③黄土	17.5	13.7	0.30	20	10	13.0	8.4
④古土壤	18.6	19.7	0.30	20	8	16.4	3.4
⑤黄土	19.2	19.8	0.30	30	7	20.0	3.6
⑥粉质黏土	19.2	19.8	0.30	30	7	40.0	20.0
地裂缝		2.0	0.35	12	20		

表 2 桥梁结构材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of bridge structural materials

类型	弹性模量 /GPa	泊松比 ν	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
箱梁	34.5	0.2	25
垫板	206	0.25	78.5
桥墩	34.5	0.2	25
承台	34.5	0.2	25
群桩(梁单元)	20	0.2	25
桩土接触单元	极限摩阻力=50 kN/m^2 ,法向刚度 $k_n=80\,000\text{ kPa}$,剪切刚度 $k_s=8\,000\text{ kPa}$		

1.2 边界条件及接触技术处理

在 X 、 Y 方向左右侧面及纵向两端面边界设置法向约束。在 Z 方向上,地层表面为自由面,地裂缝下盘底部设置竖向约束,上盘底部设置强制竖向

位移,模拟地裂缝沉降情况。除地层模型整体边界条件外,考虑到群桩基础在 Z 方向上不能发生转动,还需设置桩单元边界条件。

箱梁与垫板之间、垫板与桥墩之间、桥墩与承台之间均采用 interface 接触单元模拟,设为刚性连接。地裂缝也采用 interface 接触单元模拟,可沿地裂缝倾角错动;地裂缝的接触单元法向刚度 k_n 取 8 000 kPa,切向刚度 k_s 取 800 kPa^[16]。桩土接触单元参数列于表 2。

1.3 计算工况

西安市当前地裂缝年活动速率为 1~5 mm/a,桥梁的设计年限为 100 年,因此使用期限内地裂缝最大沉降量应按 0.5 m 考虑。为更精确地研究桥梁结构在地裂缝上盘不同沉降量下的变化情况,分别

计算地裂缝上盘沉降量为 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 五种工况。

2 计算结果及分析讨论

2.1 箱梁位移和应力场分析

通过计算分别得到地裂缝上盘沉降量 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 五种工况下箱梁的竖向位移场云图。限于篇幅, 仅以沉降量 0.5 m 工况下

的结果来进行分析(图 2)。由图 2 可见, 箱梁的竖向位移从下盘至上盘逐渐增加, 整个竖向位移场云图可以分为 3 段: 下盘边跨的微抬升稳定变形区、地裂缝处中间跨的强差异沉降变形区, 以及上盘边跨的强沉降稳定变形区。两边跨虽然沉降位移的数值相差较大, 且下盘边跨抬升而上盘边跨下沉, 但相邻点的沉降差较小, 均属变形稳定区域; 中间跨相邻点的沉降差较大, 属强差异沉降区域。

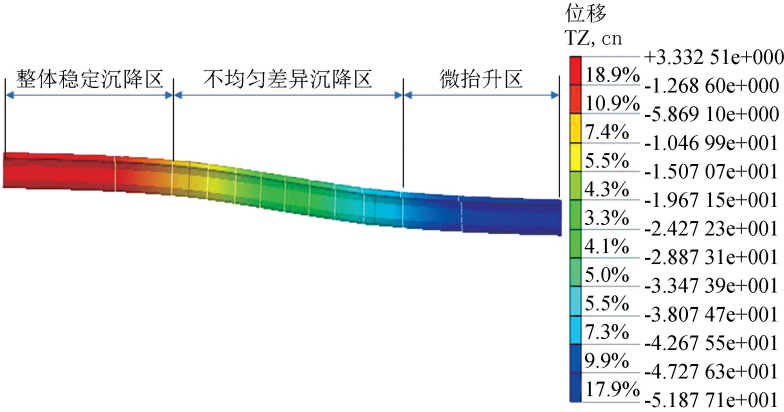


图 2 沉降量为 0.5 m 时箱梁竖向位移场云图

Fig.2 Contour of vertical displacement field of box girder under settlement of 0.5 m

为对比地裂缝不同沉降量下箱梁的竖向与水平位移, 需取同一位置的位移量进行分析。由于箱梁的横向刚度较大, 横截面各点处位移相近, 所以取箱梁结构顶部中轴处的结果来进行分析, 其竖向位移与水平纵向位移曲线变化如图 3 所示。由图 3(a) 可见, 不同地裂缝沉降量影响下, 地裂缝正交桥梁处的中间跨均为箱梁结构竖向位移的主要差异沉降区。不同沉降量下箱梁的主要差异沉降区范围接近, 均在上下盘各 20 m 长、共计 40 m 的区域, 可认

为这是地裂缝的影响带宽度。分析其原因, 地裂缝的沉降使得上盘的桥墩产生向下的竖向位移, 而下盘的桥墩几乎不发生位移, 由于箱梁的刚度较大, 不同的桥墩位移可以看作是不同的支座位移, 使得多跨梁的内力重新分布。箱梁变形主要表现为上盘一侧下沉而下盘边跨轻微抬升, 地裂缝下沉量越大, 抬升变形就越大, 箱梁结构的竖向变形均呈反“S”形。

由图 3(b) 可见, 箱梁结构的水平纵向位移量随着地裂缝沉降量的增加几乎呈等间距增大。当沉降

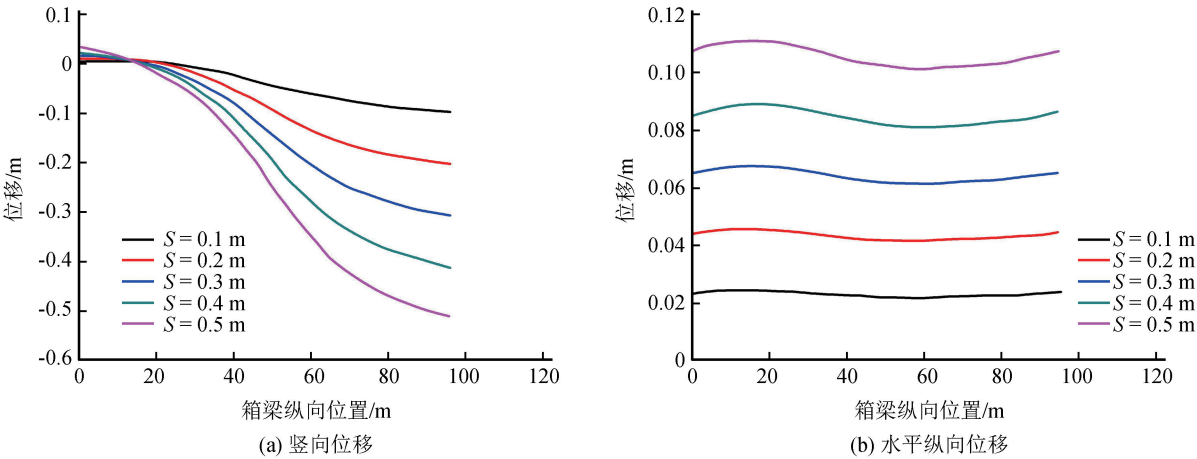


图 3 不同沉降量下箱梁顶部中轴处竖向与水平纵向位移变化曲线

Fig.3 Vertical and horizontal displacement curves at the central axis of the top of box girder under different settlement

量为 0.1 m 时,箱梁最大水平纵向位移为 2.45 cm;当沉降量为 0.5 m 时,箱梁最大水平纵向位移为 11.09 cm。同时,不同地裂缝活动程度下箱梁的水平位移均为正值,表明箱梁整体向上盘方向移动,且沉降量越大,箱梁的水平位移越不均匀。

各跨箱梁在不同竖向沉降量下的倾斜度如图 4 所示。跨越地裂缝的中跨箱梁倾斜度最大,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.97%;右边跨箱梁倾斜度次之,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.42%;左边跨

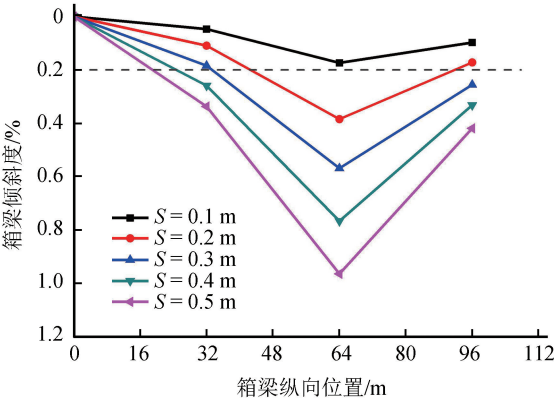


图 4 箱梁在不同沉降量下的倾斜度

Fig.4 Inclination of box girder under different settlement

箱梁倾斜度最小,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.34%。《公路桥涵地基与基础设计规范(JTG D63—2007)》^[17]规定:相邻墩台间的不均匀沉降差值不应使桥面形成大于 0.2%的附加纵坡。当地裂缝竖向沉降量为 0.1 m 时,桥梁各跨均满足规范要求;沉降量达到 0.2 m 时,中跨倾斜度超过规范限值。跨度相同的 32 m 简支梁,0.2%的倾斜角对应的允许最大不均匀沉降量仅为 6.4 cm,可见采用多跨梁一定程度上可以提高梁适应不均匀沉降的能力。

地裂缝活动对箱梁内力的影响主要以弯矩产生的横截面上的纵向应力为主,本文分析了 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 五种沉降量工况,其中沉降量 0.5 m 时的箱梁纵向应力云图如图 5 所示。由图可见,箱梁上下表面纵向应力方向相反,上下盘纵向应力方向呈反对称分布,峰值区域位于靠近地裂缝的两个桥墩处,大致为上盘上表面受压、下表面受拉,下盘上表面受拉、下表面受压。拉力的峰值略大于压力峰值,其原因可能在于地裂缝的倾斜下沉活动存在水平张拉作用,使得箱梁产生附加纵向拉力,与竖向作用下的纵向拉力叠加,最终使得拉力大于压力。



图 5 沉降量为 0.5 m 时箱梁水平纵向应力场云图

Fig.5 Contour of horizontal stress field of box girder under settlement of 0.5 m

不同沉降量下箱梁结构上下中轴处的纵向应力如图 6 所示。随着沉降量的增加,箱梁纵向应力不断增加,且下表面纵向应力的数值均略高于上表面。根据《混凝土结构设计规范(GB50010—2011)》的规定:C50 混凝土极限拉应变 $\epsilon_t=0.0001$,极限压应变 $\epsilon_c=0.0033$,通过公式 $\sigma=E\epsilon$,计算得混凝土极限拉应力为 5 000 kN。可见,当地裂缝活动沉降量大于 0.1 m 时,箱梁混凝土发生受拉破坏。

2.2 墩台位移场分析

墩台结构是桥梁整体性结构的另一个主要组成部分,地裂缝不同沉降量下墩台结构中轴处的竖向位移与水平纵向位移如图 7 所示。可见,随着地裂

缝活动程度的增加,墩台的竖向与水平位移均不断增加,且竖向的不均匀沉降越来越显著。

将墩台从下盘向上盘依次编号,各桥墩在不同沉降量下的倾斜度如图 8 所示。可见位于地裂缝下盘的 2 号桥墩的倾斜度最大,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.69%;位于下盘的 1 号桥墩次之,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.58%;位于上盘的 4 号桥墩,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.48%;位于上盘的 3 号桥墩的倾斜度最小,当沉降量为 0.5 m 时倾斜度为 0.37%。

《公路桥涵地基与基础设计规范(JTG D63—2007)》^[17]规定:墩台倾斜不得超过 0.2%,因此当地

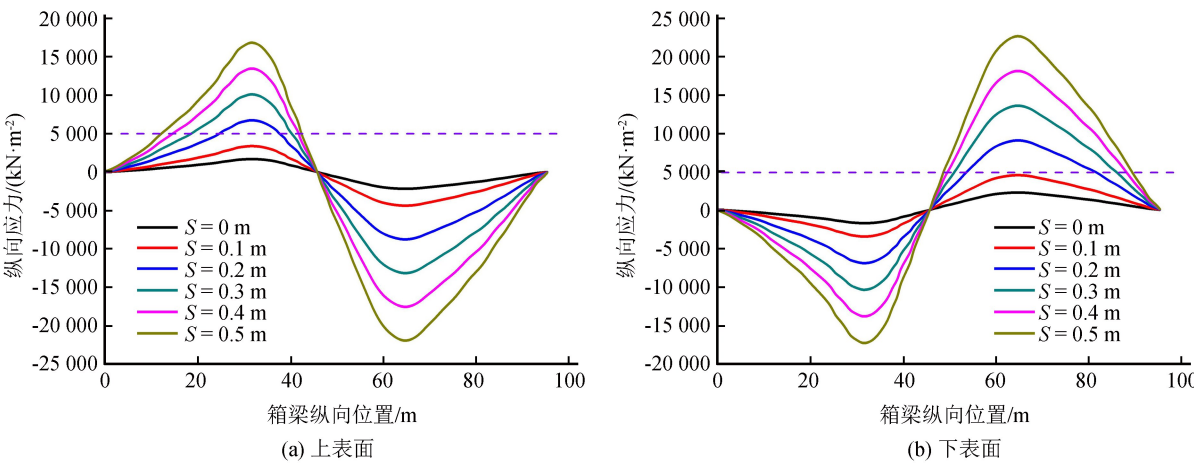


图 6 不同沉降量下箱梁上下表面中轴处纵向应力对比

Fig.6 Comparison between longitudinal stress on the central axis of the upper and lower surfaces of box girder under different settlement

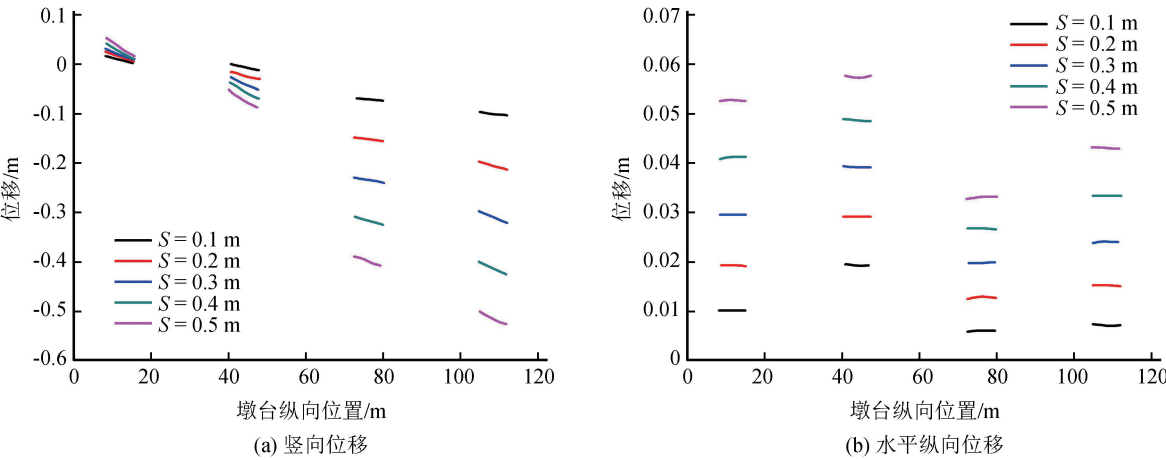


图 7 不同沉降量下墩台表面中轴处竖向与水平纵向位移变化曲线

Fig.7 Vertical and horizontal displacement curves at the central axis of pier surface under different settlement

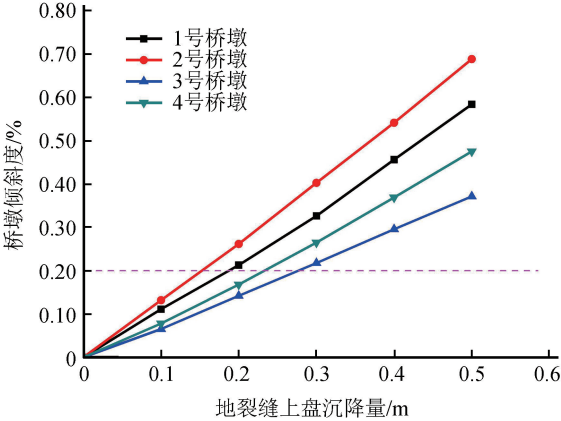


图 8 桥墩在不同沉降量下的倾斜度

Fig.8 The degree of inclination of pier under different settlement

范要求。

综上所述,若采用相同跨度简支梁跨越活动地裂缝,其允许沉降量为 6.4 cm,而采用三跨连续梁,虽然地裂缝活动的影响范围增加,但其适应地裂缝活动的能力得到提高,当地裂缝沉降 0.1 m 时,箱梁的倾角、纵向应力以及墩台的倾斜均能满足规范要求。这表明跨越活动性微弱的地裂缝时,多跨梁可以更好地满足规范要求,对地层不均匀沉降的适应性较好。

3 结论

基于 MIDAS GTS NX 开展了地裂缝活动对三跨连续梁桥作用的力学分析,模拟了地裂缝上盘不同沉降量条件下桥梁结构的变形破坏情况,并分析了地裂缝上盘不同沉降量条件下箱梁及墩台的位移

裂缝竖向沉降超过 0.1 m 时,墩台的倾斜已超过规

场和应力场及其变化曲线,得到以下结论:

(1) 箱梁的变形可以分为三段:微抬升区、不均匀差异沉降区和整体稳定沉降区。跨骑地裂缝的中间跨为三跨连续箱梁结构在不同沉降量条件下的主要差异沉降区,其影响带宽度大致等同,均为上下盘各 20 m 长、共计 40 m 的区域;

(2) 当地裂缝沉降量达到 0.1 m 时,多跨梁的各跨倾斜仍能满足规范要求,其适应变形能力优于单跨梁;

(3) 地裂缝活动下箱梁破坏时的峰值应力出现在箱梁下表面上盘靠近地裂缝的桥墩处,当地裂缝沉降量达到 0.1 m 时,多跨梁的整体轴向应力均能满足规范要求,当地裂缝沉降量超过 0.1 m 时,箱梁可能发生破坏。可以对桥墩沉降量和主梁内力进行监测,并在连续梁桥的墩台位置设置可调节的升降式支座,当监测到桥墩出现较大的沉降量时,可通过调节支座高度减小桥墩之间的相对沉降量,改善梁的受力状态;

(4) 各桥墩在不同沉降量下的倾斜度以位于地裂缝下盘的 2 号桥墩最大,且当地裂缝沉降量未达到 0.1 m 时,所有墩台倾斜均能满足规范要求;

(5) 连续梁桥跨越活动性微弱的地裂缝时,多跨梁对地层不均匀沉降有更好的适应性。

参考文献(References)

- [1] JIA Z J, LU Q Z, PENG J B, et al. Analysis and comparison of two types of ground fissures in Dali County in the Weihe Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 79(1): 1-15.
- [2] 彭建兵, 卢全中, 黄强兵, 等. 汾渭盆地地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
PENG Jianbing, LU Quanzhong, HUANG Qiangbing. The hazard of ground fissures in Fenwei Basin [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [3] LIU N N, HUANG Q B, MA Y J, et al. Experimental study of a segmented metro tunnel in a ground fissure area[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 100: 410-416.
- [4] 胡志平, 张丹, 张亚国, 等. 地下综合管廊结构斜穿活动地裂缝的变形破坏机制室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2550-2560.
HU Zhiping, ZHANG Dan, ZHANG Yaguo, et al. Test study on deformation and failure mechanisms of utility tunnels obliquely crossing ground fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2550-2560.
- [5] 杨龙伟, 杨觅, 门玉明, 等. 地裂缝-隧道-围岩动力相互作用模型试验研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 710-716.
YANG Longwei, YANG Mi, MEN Yuming, et al. Model test on

dynamic interaction among ground fissure, tunnel, and surrounding rock [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 710-716.

- [6] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 地裂缝对不同结构形式桥梁桥面的破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2917-2922.
SHI Yuling, MEN Yuming, PENG Jianbing, et al. Damage test study of different types structures of bridge decks by ground-fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2917-2922.
- [7] 高虎艳, 李忠生. 西安地裂缝对线状工程设施的破坏及其防治措施[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(10): 86-88, 98.
GAO Huyan, LI Zhongsheng. Destruction of ground fissure to linear project of Xi'an metro and prevention measures[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(10): 86-88, 98.
- [8] 张新广. 地铁高架线过地裂缝段应对措施研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(5): 111-114.
ZHANG Xinguang. Countermeasures of subway viaduct passing above the earth surface crack [J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(5): 111-114.
- [9] 张茵涛, 张晨, 黄强兵. 地裂缝对高速铁路桥梁的破坏机理研究[J]. 铁道建筑, 2014, 54(6): 24-26.
ZHANG Yintao, ZHANG Chen, HUANG Qiangbing. Study on failure mechanism of ground fissures on high-speed railway bridges[J]. Railway Engineering, 2014, 54(6): 24-26.
- [10] 庞旭卿, 刘洪佳, 严静平. 地裂缝作用下桥梁灾变机理模型试验研究[J]. 公路, 2017, 62(5): 70-75.
PANG Xuqing, LIU Hongjia, YAN Jingping. Test and research on mechanism of bridge disaster under ground fissure [J]. Highway, 2017, 62(5): 70-75.
- [11] 王利洋. 地裂缝对高速铁路桥梁影响的模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WANG Liyang. Model test of the effect of active ground fissure on high-speed railway bridge [D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [12] 刘海东, 黄强兵, 吴明, 等. 高速铁路桥梁 45°穿越地裂缝地段的数值模拟分析[J]. 铁道建筑技术, 2013(1): 110-113.
LIU Haidong, HUANG Qiangbing, WU Ming, et al. Numerical simulation of the bridge of high-speed railway passing through the active ground fissure with an angle of 45°[J]. Railway Construction Technology, 2013(1): 110-113.
- [13] 杨涛. 高铁简支梁桥跨隐伏地裂缝带影响范围及跨长研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
YANG Tao. Research on region of influence and span length of high-speed railway simple-supported beam-bridge crossing hidden ground fissure [D]. Xi'an: Changan University, 2016.
- [14] 赵凯. 地裂缝对钢-混组合连续梁桥效应的影响分析及对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
ZHAO Kai. Impact analysis and countermeasures study of ground fissures on concrete-steel composite continuous bridge [D]. Xi'an: Changan University, 2018.
- [15] 高欢. 城市轨跨地裂缝带变形力学行为及防治对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.

LIU Yongjian,LI Zhangming.Grey-relation analysis and neural networks model for relationship between physico-mechanical indices and microstructure parameters of soft soils[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(4):1018-1024.

[26] 中华人民共和国建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.

Ministry of Construction of the People’s Republic of China.

Standard for soil test method:GB/T 50123—1999 [S].Beijing:China Planning Press,1999.

[27] 包承纲.土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1735-1744.

BAO Chenggang.Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(9):1735-1744.



(上接第 825 页)

GAO Huan.Study on deformation and mechanical behaviors of urban cloud rail crossing ground fissure zone and its control countermeasures[D].Xi'an:Changan University,2019.

[16] 苟玉轩,黄强兵,王立新,等.地裂缝环境下盾构隧道结构性状及适应性研究[J].铁道标准设计,2020,64(6):117-125.

GOU Yuxuan,HUANG Qiangbing,WANG Lixin,et al.Study on structural behaviors and adaptability of shield tunnel in the ground fissure environment [J].Railway Standard Design,2020,64(6):117-125.

[17] 中华人民共和国交通部.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

Ministry of Transport of the People’s Republic of China.Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts:JTG D63—2007[S].Beijing:China Communications Press,2007.

[18] 徐强,白超宇,李文阳,等.地下综合管廊穿越活动地裂缝变形与内力的响应分析[J].工程地质学报,2021,29(5):1632-1639.

XU Qiang,BAI Chaoyu,LI Wenyang,et al.Response analysis of deformation and internal force of underground utility tunnel crossing active ground fracture[J].Journal of Engineering Geology,2021,29(5):1632-1639.