



下穿既有铁路线箱涵顶出施工数值分析研究

金省华¹ 陈伟华¹ 方宇¹ 开永旺^{2*}

(1. 浙江铁道建设工程有限公司 浙江杭州 310016; 2. 浙江交通职业技术学院 浙江杭州 311112)

摘要: 为了研究既有下穿式箱涵顶出过程中箱涵自身及土体应力变化规律, 本文采用 ABAQUS 有限元软件建立依托工程箱涵与土体的三维模型并进行了数值分析研究。根据实际施工中箱涵与两侧路基的减阻情况, 模拟了 0m、2m、4m 减阻高度的三种箱涵顶出工况。研究结果表明, 三种工况的顶推力-位移曲线均可以分成两个阶段, 在第一阶段末尾静摩擦力转为滑动摩擦力的一瞬间, 顶推力到达最大值; 顶出过程中箱涵底部的应力随减阻高度的增大而减小; 减阻高度的增大可以降低箱涵侧面的土压力, 有效减小路基在顶推过程中的变形。

关键词: 既有箱涵, 顶出施工, 减阻高度, 顶推力

1. 引言

随着我国经济社会的快速发展, 且部分交通基础设施建设年代久远, 很多老旧道路、桥涵已不能满足日益增长的交通需求, 对既有的桥梁进行加固或改扩建较为常见, 如何安全可靠地进行桥梁拆除成为需要解决的重点问题^[1]。以往桥梁拆除较多为机械暴力拆除, 即采取机械破碎、绳锯等方式将桥梁结构拆解后吊装, 部分大桥或特大桥采取爆破拆除等方法。机械破碎和爆破拆除方法危险性大、对环境污染、居民生活等影响较大, 在城区等安全、环保要求较高的地区往往不适用。绳锯法虽然可以避免以上问题, 但往往会因为机器未放平、钢丝绳生锈、接头型号不匹配等问题引起短绳现象, 施工安全也难以得到保证^[2-4]。

基金项目: 上海铁路局科研项目(项目号: 2022209)顶推技术在下穿铁路箱形框架桥拆除施工中的应用研究

作者简介: 金省华(1981-), 男, 工程师, 主要从事铁路桥涵施工技术的研究, [hilun123@163.com](mailto:hulun123@163.com)

2790-5446 /© Shuangqing Academic Publishing House Limited All rights reserved.

Article history: Received April 13, 2023 Accepted May 4, 2023 Available online May 6, 2023

To cite this paper: 金省华, 陈伟华, 方宇, 开永旺(2023). 下穿既有铁路线箱涵顶出施工数值分析研究. 工程科学与技术研究, 第1卷, 第2期, 10-17.

Doi: <https://doi.org/10.55375/estr.2023.2.2>

本文参考新建箱涵的顶进施工方法,提出一种适用于老箱涵的拆除方法——顶出施工方法。箱涵顶进方法^[5-7]是在既有线路下方顶进预制箱涵,形成不同的地下交通通道,以便车辆通行。随着有限元软件的发展,箱涵顶进的施工技术也大幅提升,该技术是将复杂的顶进施工过程利用有限元法进行数值分析,可以更方便的进行参数优化及方案比选,预测土体施工变形。然而,既有箱涵承受着与新箱涵完全不同的荷载、地质、水文等工程现场情况,并且随着时间的推移,箱涵结构本身可能会产生不均匀下沉、开裂、材料老化等一系列问题^[8],故在箱涵结构顶出施工之前对箱涵结构进行分析是十分有必要的。

2. 工程概况

本文以绍兴市越城区正平村萧甬铁路既有 73#桥改扩建工程为研究背景,结合数值分析方法开展不同工况下的旧箱涵在顶出过程中其本身与周围土体受力及变形的研究。73#桥既有箱涵为单箱单室箱涵,建成于上世纪 90 年代,箱体由南北两个长度分别为 5m 和 5.5m 箱涵组成,箱涵宽度为 9.2m,高度为 6.2m,箱身侧板厚度 60cm,顶板厚度 55cm,底板厚度 65cm,顶底板主筋为 $\Phi 25$ 的 HRB335 级钢筋,箱涵主体采用 C30 混凝土,截面尺寸如图 1 所示。由于该桥段已不能满足防洪排涝的要求,需对既有的箱涵进行拆除并扩建。同时为了保证上部铁路的正常运营,需在顶出老箱涵的同时架设施工便梁。但由于既有箱涵在顶出时会使得周围土体产生应力和变形,从而间接改变便梁的支撑情况,在上部列车荷载的作用下将会使便梁产生较大的变形导致工程事故的发生,所以有必要对既有箱涵进出预先进行有限元分析。经工程地质初步勘察得知既有箱涵边侧路基土体为粉质黏土,底部土体为黏土,详细的物理力学性质可参见表 1。

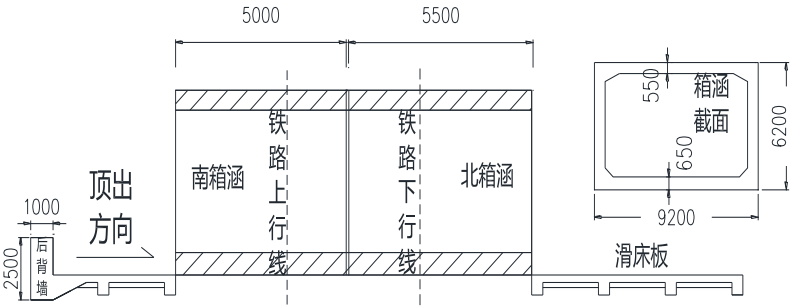


图 1 箱涵尺寸

表 1 材料参数表

名称	容重 $r/\text{kg} \cdot \text{m}^3$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 c/kPa
混凝土	2405	34500	0.23	30	/
侧边土体 (粘质粉土)	1990	32000	0.31	15.2	10.0
底部土体 (黏土)	1700	24000	0.30	8	25.0

3. 有限元模型建立

本文采用 ABAQUS 有限元软件对箱涵顶出施工进行数值分析, 通过对箱涵结构形式与周围土体参数的汇总建立其顶出施工的初步三维模型, 见图 2(a)^[9]。通过程序后处理功能进行土体受力、土体变形、箱涵结构受力等内容的分析工作, 得到相应的变化规律, 为实际的箱涵顶出施工提供理论支撑。

考虑到箱涵顶出施工中涵身结构和周边土受力与变形性状已不属于简单的平面问题, 故选用三维模型进行有限元模拟分析。假定计算模型近似为半空间无限体, 模型比例为 1:1, 选用八节点等参实体单元, 具体网格划分参见图 2(b)。模型路基部分的底面、侧面及垂直于顶出方向的两个端面分别施加相应的固定约束。有限元分析中主要考虑的是土体与既有箱涵周边土体的接触分析, 两者主要通过接触对来传递切向和法向应力。因而两者之间的接触采用通用接触, 切向采用罚函数计算, 摩擦系数根据现场勘测报告提供的数据, 箱涵底部与土体的摩擦系数取 0.36, 箱涵侧面与土体的摩擦系数取 0.24; 为了不允箱涵与土体之间产生穿透行为, 法向采用硬接触。

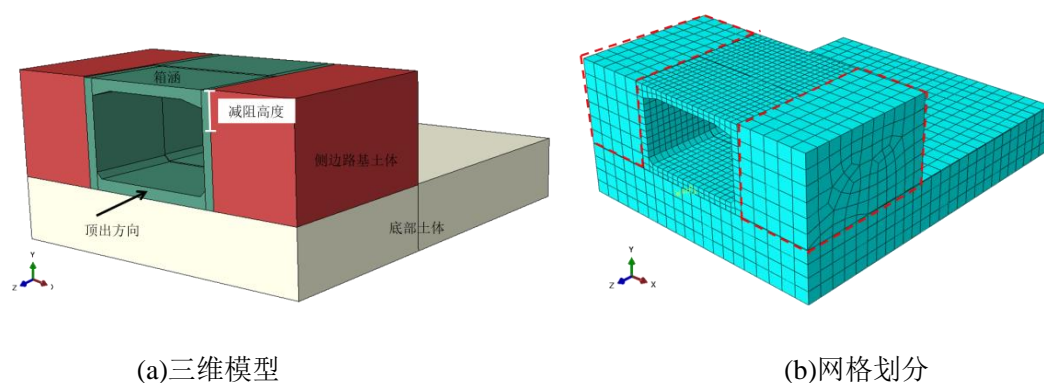


图 2 有限元三维模型及网格划分

混凝土本构模型采用 ABAQUS 中提供的混凝土塑性损伤模型 (Concrete damage plasticity) 进行模拟, 通过单轴拉伸和压缩的应力-应变曲线以及损伤参数定义。混凝土强度则采用实际钻心取样试件的抗压试验结果, 其他参数的选取则参考了《混凝土结构设计规范》

(GB50010—2010)^[10]；由于土体在变形过程中，应力与应变关系呈非线性，为跟踪加载历史求位移、应变和应力的全量，本构关系采用了比较适用于岩土分析的 Mohr-Coulomb 屈服准则^[11-12]，其他参数则根据工程地质初步勘察报告选取，见表 1。

箱涵顶出数值分析只要分成两步：(1)箱涵自重对下部土体的挤压，在模拟中通过指定钢筋混凝土的密度、定义静力加载步并施加重力加速度的方式来施加；(2)顶出箱涵，在模拟中通过在箱涵底板施加顶出方向 10.5m 的边界条件来实现。有限元分析时考虑现场减阻情况(箱涵表面与侧边土体分离，箱涵顶部至未分离点的距离即为减阻高度，参见图 2(a))，分别考虑了三种不同的工况，工况 1 为箱涵与两侧土体之间不减阻，工况 2 为减阻高度 2m，工况 3 为减阻高度 4m。

4. 有限元分析结果

三种工况的顶推力-位移曲线的走势大致相同，整个顶出过程分成两个阶段，第一阶段为顶推力开始施加到箱涵即将移动，第二阶段为箱涵开始移动到箱涵顶出完毕，见图 3。在第一阶段初期，随着顶推力的增大，箱涵并没有出现明显的位移，而较小的位移可能是在施加力的过程中，箱涵混凝土产生的弹性变形所致。直到第一阶段的末尾，顶推力-位移曲线出现峰值，随之顶推力又出现急剧下降段，但下降幅度不是很大，参见图 3。这种现象发生的原因是在箱涵顶推之初，其表面与混凝土之间只存在静摩擦力，当顶推力克服静摩擦力后，静摩擦力转变成了滑动摩擦力，箱涵便突然往前移动，而由于滑动摩擦力比静摩擦力小，顶推力值随之下降，箱涵前移速度也将随之减慢。选取三种工况的顶推力峰值点进行对比，发现工况 1 的顶推力值(2811.81kN)大于工况 2(2577.51kN)，工况 2 的顶推力值大于工况 3(2361.03kN)，表明减阻高度越大，所需的顶推力值越小。在第二阶段，顶推力值的变化基本趋于稳定，顶推力所需克服的滑动摩擦力包括两个部分，分别为箱涵与底部土体和侧边土体的滑动摩擦力。出现少量下降的原因可能是随着箱涵的顶出，其侧边与混凝土的接触面积逐渐减小，因而滑动摩擦力也出现少量的削减，所需的顶推力也随之降低。

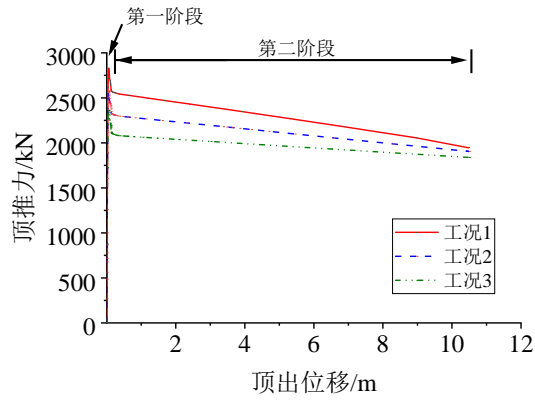


图3 顶推力-位移关系

图4为三种不同工况在第一阶段末尾箱涵的Mises应力云图。从图中可以看出，在考虑重力和顶推力共同作用的情况下，箱涵顶底板的应力很明显大于侧板，但在此时箱涵混凝土应力最大值都没有超过4MPa，远小于混凝土的实测强度值，混凝土不会发生破坏。另外，由图4可知箱涵顶底板的应力都呈现出中间大两侧小的现象，且由于顶推力施加在底板上，此现象在底板上尤为明显。且工况2、工况3中箱涵底板的应力都略小于工况1，这表明随着箱涵两侧减阻高度的增大，在顶推力达到峰值点时箱涵底板的应力将有所减小，混凝土更不容易发生开裂。

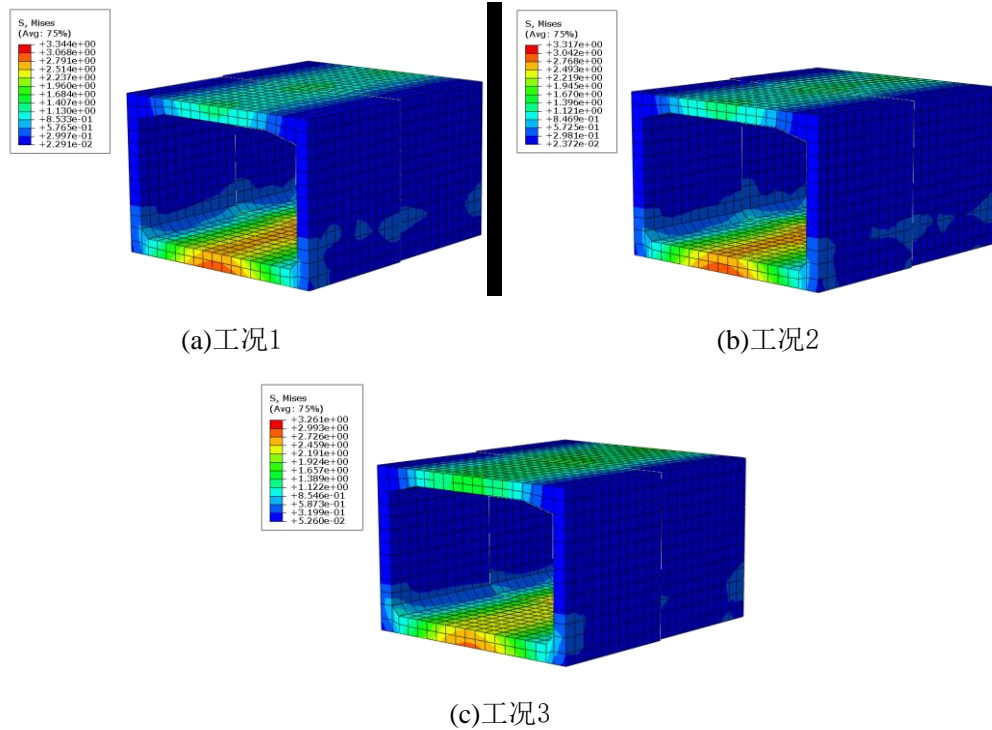


图4 箱涵应力云图

在顶出过程中，土体的应力变化不是很大，因此选取箱涵顶至路基中部时的土体应力云

图(见图 5)进行分析。由于箱涵底板与下部土体之间存在较大的滑动摩擦力，使得下部土体的应力也随之增大，往下则又有所减小；两侧路基土体应力比较大，呈现出自上而下的递进式变化，路基尾部偏下位置出现了最大值。在顶出方向上选取路基宽度方向上端部、中部、尾部三个位置的土体，并在相应位置的箱涵与路基土体接触面上，沿土体高度从底部至顶部选取 0、1、2、3、4、5、6m 高度的点，见图 6。图 7 为三种工况土体在三个位置处选取的采样点的应力情况，可以看出，三种工况中侧边路基土体应力均随着高度的增大而逐渐较小，且随着减阻高度的增大，三个部位同一高度点的应力均有所减小。由此可以得知，减阻高度增大可以有效减小箱涵侧面的土压力，相应地在顶出过程中，箱涵侧面与土体的摩擦力也随之减小。

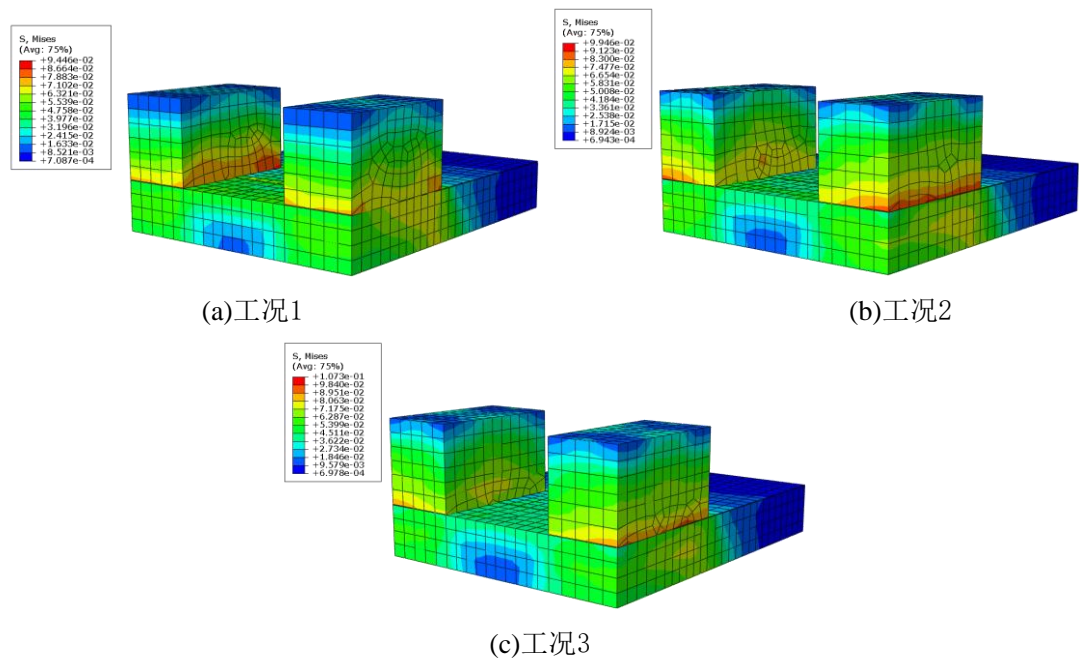


图 5 土体应力云图

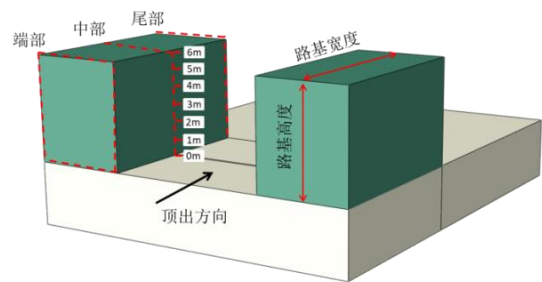


图 6 采样点的位置

由计算结果得知路基土体在箱涵顶出至末尾出现了最大变形量，为此提取此时刻土体在端部、中部、尾部的变形量，参见图 8。由三个部位的变形图可看出，上部土体的变形要大于下部土体，土体可能在上部先发生坍塌，应对上部土体进行加固处理。对比三种工况的土

体变形情况,可以发现工况 1 的最大变形达到了 119.22mm,明显大于其他两种工况,这说明箱涵与侧边土体的减阻措施可以大幅度减小路基在顶推过程中的变形。

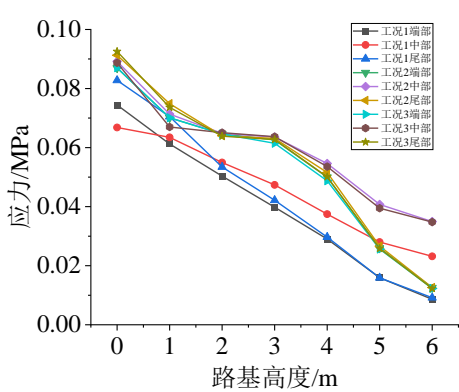


图 7 土体应力

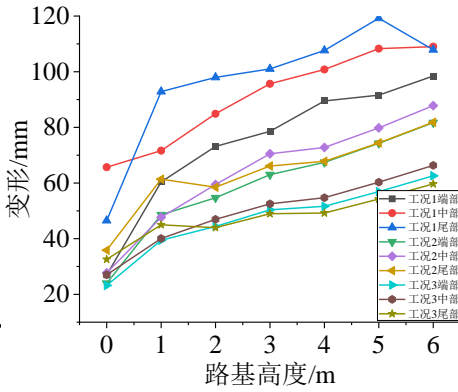


图 8 土体变形

5. 结束语

本文基于 ABAQUS 建立了土体和箱涵的三维有限元模型,将实际地质勘测和材料试验结果运用到有限元接触对和材料属性定义中,确保了有限元模拟的可行性和合理性。通过对有限元分析得到顶推力-位移关系曲线、箱涵应力云图及土体应力云图等,加以分析得到以下结论:

- (1)三种顶出工况的顶推力-位移曲线的走势大致相同,整个顶出过程分成两个阶段,在静摩擦力转变成滑动摩擦力的一瞬间,顶推力出现最大值。
- (2)在整个顶出过程中,箱涵底部的应力随着箱涵两侧减阻高度的增大而减小,且在顶推力达到峰值点时,箱涵底板上的应力也有所减小,混凝土开裂的可能性降低。
- (3)三种工况下侧边路基土体应力均随着高度的增大而逐渐较小,且随着减阻高度的增大,三个部位同一高度的应力和变形均有所减小。

参考文献:

[1] 王广群,丁小虎 & 谢宝(2022). 繁忙干线下既有连续箱涵保护性拆除技术——以临洮路下穿铁路立交工程为例. 工程技术研究(06), 76-80.

[2] 谢国华 & 陈伟仁(2020). 旧桥桩基础水下切割技术. 公路(08), 180-184.

[3] 刘治军,雷斌 & 叶坤(2018). 绳锯法模块式拆除大型钢筋混凝土墙体. 施工技术

(S4), 1145-1149.

[4] 谢石龙 & 马占飞(2018). 大跨度连续梁桥临时固结体系施工与绳锯拆除技术. 公路工程 (03), 131-135.

[5] 谢石龙 & 马占飞(2018). 大跨度连续梁桥临时固结体系施工与绳锯拆除技术. 公路工程 (03), 131-135.

[6] 尚培培(2021). 双孔框构桥下穿重载铁路顶进施工条件下线路加固技术研究. 铁道建筑 (04), 39-43.

[7] Zhang Bolin & Li Fangyuan(2022). Numerical Analysis of the Structural Properties of Girdling Beam for a Square Column Used in Bridge Jacking Construction. Mathematical Problems in Engineering.

[8] Gong Jianwu, Zhang Kang & Qi Peilin(2021). Numerical analysis on surface settlement in parallel rectangular pipe jacking construction. Journal of Physics: Conference Series(1).

[9] 王飞球(2018). 下穿式箱涵顶进施工过程中土体受力规律研究. 防灾减灾工程学报 (04), 738-744.

[10] 中国建筑科学研究院 (2016). 混凝土结构设计规范 GB50010-2010(2015 年版). 中国建筑工业出版社.

[11] 司海宝 & 蔡正银(2011). 基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究. 岩土力学 (02), 599-603.

[12] 刘世涛 & 程培峰(2010). 基于 ABAQUS 土体数值分析的本构模型. 低温建筑技术 (02), 90-92.