

Finite Element Stress Analysis of Main Cables of Long Span Heavy Load Flexible Temporary Cable Bridge in Mountain Areas

Jian SONG Feng LIANG Caiwen YU Xianshang MA Lei CHENG

China Jiaotong No. 1 Public Bureau Second Engineering Co., Ltd. (Five Tender Project of Banyan)

Abstract

In mountainous area construction, construction sidewalk is an important life passage for transporters, machines and materials. The cable-way bridge is a relatively simple temporary transport channel between large-span mountains. In this paper, the main cables of long-span and heavy-load flexible cable-way bridges in mountainous areas are analyzed by finite element method. The design indexes and parameters of finite element analysis are elaborated, and the static analysis of main cables is carried out by Midas/civil. In order to provide a reference for the design of long-span temporary cable-way bridges in mountainous areas under similar conditions.

Key Words

Mountain, Long Span, Flexible Temporary Cable Bridge, Finite Element and Force Analysis

DOI:10.18686/glgc.v1i2.489

山区大跨径重载柔性临时索道桥主索有限元受力分析

宋俭 梁锋 余财文 马贤尚 程磊

中交一公局第二工程有限公司（剑榕五标项目）

摘要

山区施工中，施工便道作为运输人、机、料的重要生命通道。而索道桥更是作为大跨度山体间较为简捷的临时输通通道。论文主要对山区大跨径重载柔性索道桥主索进行有限元受力分析，阐述了有限元分析的设计指标、设计参数，利用 Midas/civil 对主索进行静力分析。以便为后续类似工况山区大跨度临时索道桥设计提供参考。

关键字

山区；大跨径；柔性临时索道桥；有限元；受力分析

1. 工程概况

随着国家大力发展基础设施建设，山区高速公路项目日益增多。为更快的稳步开展项目施工，施工便道的修筑就显得尤为重要。特别对于高山深壑，人、机、料的运输更为艰难。近年来，索道桥因其施工简便，工期短等优势，被大量的用于山区跨河跨江的临时便道。但是，对索道桥的研究仍不够成熟。故本文通过 Midas/civil 对主索进行有限元静力分析。以此为后续类似工况山区大跨度临时索道桥设计提供参考。

贵州省剑榕高速公路南哨河特大桥为 TJ5 标控制性工程之一，索道桥主要功能为沟通剑榕五标南哀 II 隧道施工区、南哨河特大桥两岸施工区场内交通与地方公

路之间的交通运输，索道桥两岸需要新建施工便道与地方既有公路连接。

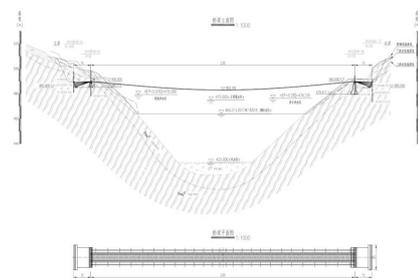


图 1-1 桥型总体布置图

2. 计算目的和要求

(1)、计算目的：根据拟定的设计参数，计算分析其

安全性和可靠性。

(2)、计算要求：采用解析法及有限元法分别计算，并对比复核计算结果的合理性。



图 1-2 原始地貌布置图

3.主要技术指标

- (1) 设计荷载：单车 60t（不叠加人群荷载）；
- (2) 设计使用年限：5 年；
- (3) 设计速度：15km/h；
- (4) 桥型：无塔平拉索道桥；
- (5) 桥面净宽：净-4.5m+2×0.75m；

(6) 桥跨布置：230m。

3.1 索道桥组成

整个索道桥由基础工程、钢索及调节系统、桥面等部分组成。

其中索道桥承重钢索 56 根，钢索型号为 52NAT6×37+FC-1770，钢索出厂前应在工厂进行 800kN 预张拉处理后方能使用。

钢索分配：稳定索 6×2 根，防险索 3×2 根，人行道面索 3×2 根，车行道桥面索 32 根。钢索与松紧调节器、连接器采用绳夹连接，每根钢索与松紧调节器连接处用 9 个绳夹。

钢索矢度变化用松紧调节器调整，松紧调节器设计拉力值为 800kN，全桥共 56 套松紧调节器。

钢索张拉完毕后，桥台与锚碇之间钢索及松紧调节器、连接器应涂上防护油并用剪刀布等防护材料包扎好，采用砂石回填。

3.2 主要材料特性

材料	52NAT6×37+FC-1770
截面积 (m ²)	0.00089232
弹性模量 (MPa)	1.0×10 ⁵
抗压强度 (MPa)	-
抗拉强度 (MPa)	1770

3.3 横载

结构恒载包括钢横梁、桥面钢构件、木桥面板、钢丝绳及其它附属构件等的重量。结构恒载计算结果如表 3.3 -1 所示。

表 3.3-1 桥梁结构自重计算表

项目	总重 (kg)	总计 (kg)
钢横梁	47019.86	-
桥面系	210552.41	393120.27
钢丝绳	135548	-

因此，本桥上部结构恒载集度为 17.1kN/m，上部结构除主索以外的恒载为恒载集度 11.2kN/m，桥面系恒载（二期恒载）为集度为 9.2kN/m。

根据《公路桥涵设计通用规范》，本桥的人群荷载标准值为 2.5 kN/m²，由于其荷载影响线与简支梁类似，因此本桥按全桥人行道满布加载。

3.4 人群荷载

3.5 单车 60t 荷载

根据运行要求,可知汽车荷载作用时该桥最不利活载布置如图 3-1 所示。

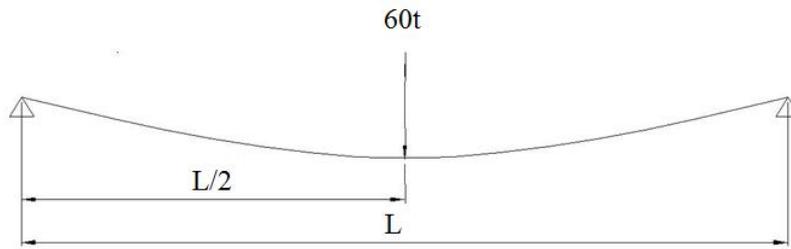


图 3.5-1 单车 60t 荷载最不利布置图

根据本桥运行规定,参照《厂矿道路设计规范》(GBJ22-87)汽车-60 级荷载布置,本桥单车 60t 轴载布置如下所示。在计算模型中,将车辆轴重分配给相邻

横梁,在横梁上加集中力实现荷载的施加。本桥行车道较窄,车辆运行时偏载的距离很小,因此分析计算时仅计算对称加载情况。

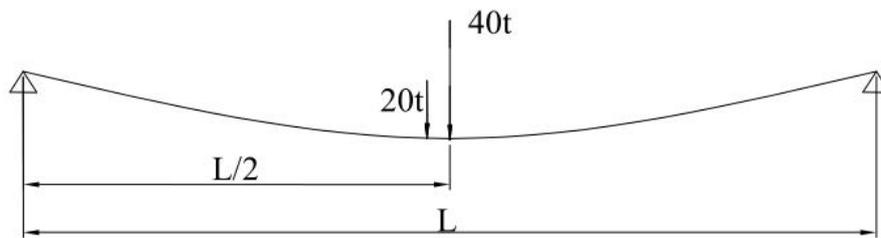


图 3.5-2 单车 60t 轴载纵向分布图

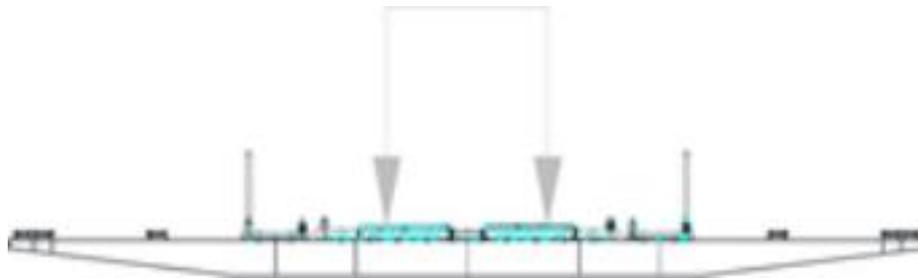


图 3.5-3 单车 60t 荷载横向分布图

3.6 横向风载

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004),当风荷载参与汽车荷载组合时,桥面高度处的风速 V_Z 可取为 25m/s。计算过程中考虑桥面系按主梁的公式计算,由于桥面是密闭式的,因此只考

虑在最外侧稳定索施加主索的横向风载,且其值按主缆上的风荷载计算公式计算。按相应公式计算得到的各构件的风荷载,其中表 3.6-1 为极限横向风荷载,表 3.6-2 给出了各构件的有车横向风荷载。建立模型时,将计算得到的横向风载按节点荷载施加于横梁节点上。

表 3.6-1 各构件极限横向风荷载

构件	阻力系数	静阵风系数	静阵风风 (m/s)	横向风载 (N/m)
桥面系	1.3	1.461	60.44	890.29
横梁	1.3	1.461	60.44	1246.40
稳定索	1	1.461	60.44	118.71

3.6-2 各构件有车风荷载

构件	阻力系数	静阵风系数	静阵风风速 (m/s)	横向风载 (N/m)
桥面系	1.3	1.461	36.53	325.18
横梁	1.3	1.461	36.53	650.36
稳定索	1	1.461	36.53	43.36

4.主索静力分析

4.1 计算方法

4.1.1 解析方法介绍

索道桥桥面纵坡坡度不宜过大,主索矢度一般取跨度的 1/30~1/40,属于小垂度索。图 4-1 为小垂度索受分布荷载 q 和一系列集中荷载作用,其水平拉力为 H , 支座垂直反力为 V_1 、 V_2 。由于索为柔性结构,不能抵抗弯矩,故索上任一点(其矢度为 y)上的弯矩均为 0,即:

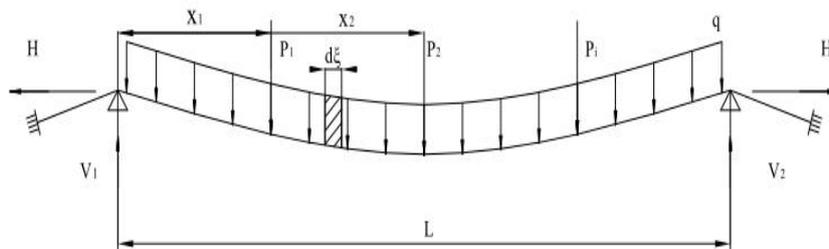


图 4.1-1 小垂度索受力简图

$$V_1 x - \sum P_i (x - x_i) - \int_0^x q(\xi)(x - \xi) d\xi - Hy = M(x) - Hy = 0$$

该式为索的平衡方程,采用该式求解同等荷载同跨径简支梁弯矩就可以求得索不同位置的矢度。同时,悬索的弛度为定值,根据该特性可建立空索、静载状态、受荷状态之间的关系式,及小垂度公式。

$$\frac{1}{2H_1^2} \int_0^l Q_1^2 dx - L_0 \frac{H_1}{EF} = \frac{1}{2H_2^2} \int_0^l Q_2^2 dx - L_0 \frac{H_2}{EF}$$

式中: H_1 、 Q_1 ——空索状态的悬索拉力及简支梁剪力
 H_2 、 Q_2 ——静载状态的悬索拉力及简支梁剪力
 H_3 、 Q_3 ——受荷状态的悬索拉力及简支梁剪力
 E 、 F 、 L_0 ——索的弹性模量、断面面积及悬索

$\int_0^l Q_1^2 dx$, $\int_0^l Q_2^2 dx$, $\int_0^l Q_3^2 dx$ 采用图乘法计算得到

4.1.2 有限元计算

采用解析结果建立空间有限元模型。利用 MIDAS 2015 建立得到全桥有限元模型,并计算不同工况下索道桥各主要构件的受力情况,采用最不利受力状况进行设计、验算。

4.2 结构模拟

4.2.1 单元类型

MIDAS/Civil 2015 的单元类型包括:桁架单元、只受拉/钩/索单元、一般梁/变截面梁单元、板单元、平面应力单元、平面应变单元、轴对称单元、实体单元等。索道桥采用 Midas/civil 2015 建立全桥三维有限元模型,其中主索采用只受拉索单元模拟,横梁为梁单元。

4.2.2 边界条件

全桥模型的边界条件通过以下方式模拟:

横梁与主索之间通过主从节点来模拟两者之间的约束关系。该主从节点仅对三个方向力进行约束,而不约束其弯矩;

主索在锚固点位置约束节点的所有自由度。

4.2.3 计算模型

建立主索时,采用 Midas 悬索桥建模助手建立以确保主索单元的初始几何刚度的精度,以手算结果中的

静载主索矢量来基准建立成桥模型。建立的模型如图

4-2~4-3 所示。车行道索、人行道索与实际一一对应建立, 防险索、稳定索分别合并之后建立。



图 4.2-1 有限元模型 (整体)

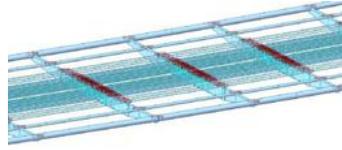


图 4.2-2 有限元模型 (细部)

4.3 解析计算

4.3.1 单车 60t 荷载作用下主索索力

桥梁自重: 钢横梁、桥面钢构件、木桥面板、钢丝

绳等的重量。

根据前述计算结构, 桥梁的自重集度为 17.092kN/m。

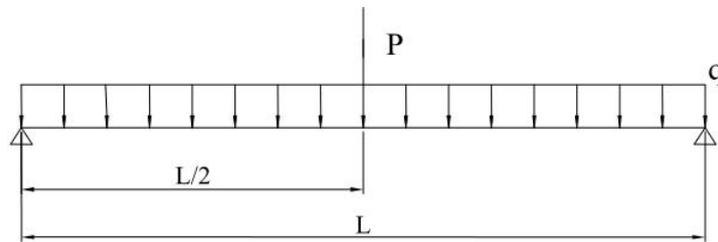


图 4.3-1 等跨径简支梁布载简图 (单位: m)

由于桥梁的矢跨比较小, 钢索中的索力和水平力比较接近, 故以索的水平力代替钢索的索力, 其值由下式计算得到。

$$H = M / f$$

式中: M——最不利荷载布置下, 相同跨径简支梁的跨中弯矩。

f——最不利荷载布置下的跨中矢度。

$$H = M/F = (17.092 \times 230^2 / 8 + 600 \times 100 / 4) / 230 \times 30 = 21380.1 \text{ kN}$$

根据各种索型的技术特性, 并考虑到经济性及便于施工操作, 主索选用钢索型号为 52NAT6×37+FC-1770, 直径 52mm, 公称抗拉强度不小于 1770Mpa 的钢丝绳, 选择纤维钢丝绳的原因在于纤维钢丝绳的自重轻,

柔韧度好, 具有较高弹性, 在使用过程中, 便于施工操作, 更有利于钢丝绳矢度的调整。承重钢索共 56 根。

每根钢索拉力: $H_2 = H / n = 21380.1 / 56 = 381.8 \text{ kN}$

根据《重要用途钢丝绳》(GB8918-2006) 查得选用的钢丝绳的破断力为 1580kN。

每根钢索的安全系数:

$$K = [H] / H_2 = 1580 / 381.8 = 4.138$$

因此满足规范对于钢丝绳安全系数不小于 2.5 的要求, 选用的钢丝绳是安全的。

4.4 有限元计算结果

4.4.1 恒载作用

恒载作用下主索索力及位移如下图所示, 主索最大索力为 375.5kN。

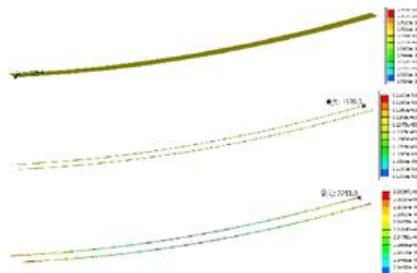


图 4.4-1 恒载作用下主索索力图 (单位: kN)

注：分别对应车人行道索、防险索、稳定索索力，后续所有索力图均按该次序排布，不再赘述。

4.4.2 单车 60t 荷载作用

单车 60t 荷载作用下主索索力及位移如下图所示，主索最大索力为 424.9kN，主索竖向位移为 1.026m。

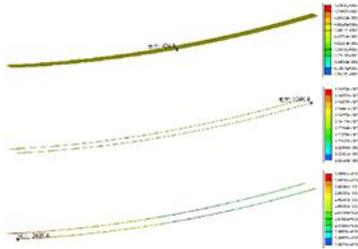


图 4.4-2 单车 60t 荷载作用下主索索力图（单位：KN）



图 4.4-3 单车 60t 作用下主索位移图（单位：m）

4.4.3 单辆 80t 挂车荷载作用

单辆 80t 挂车荷载作用下主索索力及位移如下图

所示，主索最大索力为 443.6kN，主索竖向位移为 1.349m。



图 4.4-4 单辆 80t 挂车作用下主索索力图（单位：KN）



图 4.4-5 单辆 80t 挂车作用下主索位移图（单位：m）

4.4.4 人群荷载作用

人群荷载作用下主索索力及位移如下图所示，主索最大索力为 414.6kN，主索竖向位移为 0.661m。

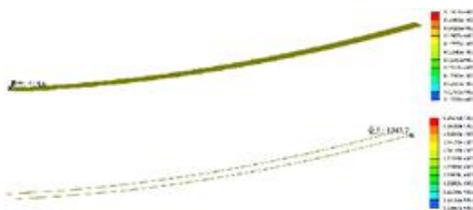


图 4.4-6 人群荷载作用下主索索力图（单位：KN）

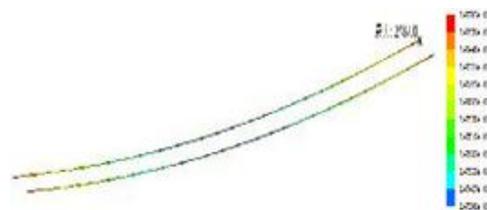




图 4.4-7 人群荷载作用下主索位移图 (单位: m)

4.4.5 极限风载作用

极限风载作用下主索索力及位移如下图所示, 主索最大索力为 380.5kN, 主索横向位移为 0.327m。

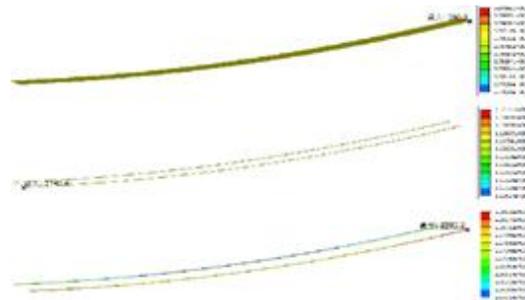


图 4-8 极限风载作用下主索索力图 (单位: KN)

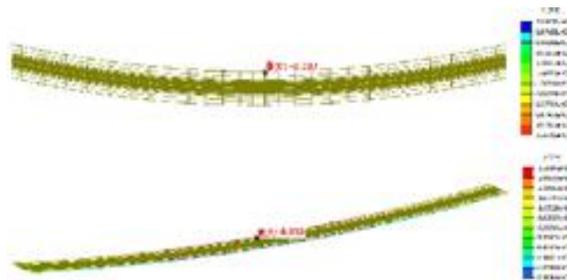


图 4-9 极限风载作用下主索位移图 (单位: m)

注: 两张图分别对应主索横桥向、竖向位移, 单张图纸的为竖向位移, 两张图纸的均按该次序排布, 不再赘述。

4.4.6 作用组合效应

本次设计计算共考虑下表所示几种基本组合, 对应的主索索力及位移列于表后:

序号	作用组合
1	恒载+单车 60t
2	恒载+单辆 80t 挂车
3	恒载+人群荷载
4	恒载+单车 60t+风载
5	恒载+单辆 80t 挂车+风载
6	恒载+人群荷载+风载

采用有限元计算得到的主索索力及位移结果汇总 如下表:

表 4-2 有限元计算索力及位移结果汇总

序号	荷载工况	最大索力(KN)	最大位移 (m)	
			横桥向	竖向
1	恒载	375.5	/	/
2	单车 60t	424.9		-1.026
3	单辆 80 挂车	443.6		-1.349
4	人群荷载	414.6		-0.661
5	极限风载	380.5	0.327	0.032
6	恒载+单车 60t	514.7		-2.592
7	恒载+单辆 80t 挂车	540.3		-3.094
8	恒载+人群荷载	494.5		-1.942
9	恒载+单车 60t+有车风载	503.9	0.107	-2.789
10	恒载+单辆 80t 挂车+有车风载	529.6	0.124	-3.288
11	恒载+人群荷载+有车风载	483.1	0.089	-2.129
12	恒载+单车 60t+有车风载	523.6	0.106	-2.453
13	恒载+单辆 80t 挂车+有车风载	549	0.124	2.956
14	恒载+人群荷载+有车风载	503.3	0.085	-1.816
	汇总结果	549	0.327	-3.288

根据计算结果可知,在恒载+单辆 80t 挂车+有车风载作用时主索索力最大,为 549.0kN,此时主索的安全系数为 $1580/549.0=2.878$,能够满足设计要求。在恒载+单辆 80t 挂车+有车风载作用时主索竖向位移达到最大,为 3.288m;在极限风载作用时主索横向位移最大,为 0.327m。

5.总结

通过采用相同跨径简支梁集中荷载作用跨中弯矩的影响线确定索道桥的最不利荷载布置,运用 Midas/civil 对索道桥建立三维有限元模型,得到不同荷载组合下的最大索力。结果表明设计的索道桥主索是安全合理的。但是为了保证索道桥的安全,当出现大风天气时,应对桥梁实行封闭措施。

索道桥作为南哨河两岸的运输生命通道,其建设为

剑榕五标南哨河特大桥主体工程施工提供了有利保障,也为剑榕高速公路全线赢得宝贵时间。

参考文献

- [1]黄绍金.刘陌生.现代索道桥[M].北京:人民交通出版社,2004
- [2]《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)
- [3]《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004)
- [4]《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004);
- [5]《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81-2006);
- [6]《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015);
- [7]《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370-2007);
- [8]《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1-2004);
- [9]《桥梁用结构钢》(GB/T 714-2008)。