

文章编号:1671-8879(2011)02-0057-06

基于关键块体理论的隧道分部施工时空效应

陈孝湘¹, 夏才初², 缪圆冰³

(1. 福建省电力勘测设计院, 福建 福州 350003; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘 要:分部台阶施工的隧道开挖所形成关键块体因不同工序下临空面的位置、大小及开挖时机的不同而存在时空效应。阐述了关键块体时空效应的概念, 并以福州长乐国际机场高速公路二期双向 8 车道特大跨度连拱隧道为依托, 给出了时空效应概念及其工程应用; 提出了关键块体所产生的时空效应应用的基本原则。结果表明: 在采用双侧壁导坑施工的隧道中, 预留核心部分岩体有利于隧道顶部块体的稳定; 隧道施工时, 减小开挖临空面面积能有效控制关键块体的体积, 及时支护能减小因蠕变而导致的块体节理面力学性质的削弱; 以时空效应应用基本原则为指导, 将其应用于隧道开挖过程可省去部分临时支护, 同时可提高隧道施工的安全性和经济性。

关键词:隧道工程; 岩石隧道; 关键块体; 施工工序; 时空效应

中图分类号:U455; O319.56

文献标志码:A

Time-space effect in fractional steps construction tunnels by key block theory

CHEN Xiao-xiang¹, XIA Cai-chu², MIAO Yuan-bing³

(1. Fujian Electric Power Survey and Design Institute, Fuzhou 350003, Fujian, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Fujian Communications Planning and Design Institute, Fuzhou 350004, Fujian, China)

Abstract: The key block's time-space effect is existed because of the location or the size and the time of the key block when the tunnel was excavated in fractional steps construction. The definition of time-space effect of the key block is described, and then based on the Jinjishan tunnel which is extra-large eight spans multi-arch tunnel in the second stage of the Fuzhou Changle international airport highway project, the definition and the application of the time-space effect is explained in detail. The basic application principle of the time-space effect of key block is put forward. The analysis shows that the stability of the upper blocks in the tunnel could be improved by reservating the core part rock in the two side-wall pilot tunnel, the key block volume could be controlled by limiting the free face area, the mechanic properties of the joints could be weaken caused by creeping because of supported in time, and the temporary support could be reduced by the application of the guiding fundamental principles of key block, so that the safety and the eco-

收稿日期:2010-3-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50579088)

作者简介:陈孝湘(1983-),男,福建尤溪人,工程师,E-mail:chip0912@163.com。

conomic efficiency are raised in the tunnel construction procedure. 4 tabs, 5 figs, 14 refs.

Key words: tunnel engineering; rock tunnel; key block; construction procedure; time-space effect

0 引 言

岩体被各种结构面相互切割,形成形状各异的块体,其中,有些块体类型对于岩体不存在失稳问题,而有些块体类型则是,首先沿着结构面滑移、失稳,进而产生连锁反应,造成整个岩体工程的破坏。从岩体工程稳定性的观点出发,这些首先失稳的块体就称为关键块体^[1]。在高速公路隧道施工过程中,由于隧道开挖,使得岩体天然应力状态遭到破坏,暴露在临空面上的某些块体就可能失去平衡,成为关键块体,进而造成工程岩体的失稳破坏^[2]。

关键块体理论最初是由石根华博士在 20 世纪 70 年代提出的,它已被广泛应用于边坡、基坑、地下洞室、隧道等岩体工程的块体稳定分析中^[3-8]。然而,这些理论只涉及块体的识别及其稳定性分析,并未涉及关键块体时空效应这一概念,更未能将时空效应的原理应用于隧道的设计与施工过程中。

在隧道施工过程中,产生关键块体的时空效应是指,由于开挖临空面产生的先后顺序、临空面大小、支护时机等因素的不同,造成关键块体大小、位置与安全系数也不同;关键块体的几何和力学参数受制于隧道开挖和支护时间、空间这 2 个因素。

本文分别从空间和时间的角度,阐述了关键块体时空效应的成因,并提出了时空效应的概念;以福州金鸡山特大跨度连拱隧道 K22+585 断面的岩体节理精细化采集与描述为基础,以实例说明时空效应的概念及其对关键块体稳定性的影响,并提出如何应用于指导隧道设计与施工;依据时空效应的原理及工程应用特点,提出关键块体时空效应在隧道施工过程中应用的基本原则。

1 隧道施工关键块体的时空效应

1.1 关键块体理论基础

关键块体理论适用于分析坚硬半坚硬岩体中的、为节理切割的块体稳定问题。该理论做如下假设:①结构面为平面;②结构面贯穿所研究的岩体(即结构面假设为无限延伸);③结构体为刚体,不计块体的自身变形和结构面的压缩变形;④岩体的失稳是岩体在各种荷载作用下沿着结构面产生的剪切滑移。

计算关键块体在天然状态或开挖未支护状态下的自稳系数或者加固后的块体安全系数(当块体自稳系数或者安全系数达到一定值时,亦称其为稳定系数),其计算公式为

$$F=f_1/f_2$$

式中: F 为稳定系数(或安全系数); f_1 为抵抗力(包括拉伸力、剪切力和支撑力); f_2 为下滑力(包括自重、地震力和地下水)。

一般认为,当 F 大于 1.5 时,块体是稳定的,不会有任何形式的破坏。

1.2 关键块体的时空效应

关键块体的时空效应是指,在隧道施工过程中,由于开挖临空面的先后顺序、临空面大小、因节理蠕变而带来力学参数降低等因素,造成关键块体大小、位置与安全系数随时空变化而变化的过程。将关键块体的几何和力学参数受制于隧道开挖支护的时间与空间这 2 个因素的情况,统称为关键块体产生的时空效应。

隧道施工的平面如图 1(a)所示。开挖临空面顶部的块体 I,对即将进行施工的整个隧道断面而言,显然是一个体积较大的关键块体。由于隧道施工采取分部、分台阶开挖的双侧壁导坑法施工,在单独开挖左上导坑 3 或中部预留核心土 5 时(单独开挖,即开挖后立刻施工初期支护围岩,使其只在短时间内产生临空面),关键块体并没有形成;而采用 CRD 法施工时,施工左上导坑 3,则关键块体形成。

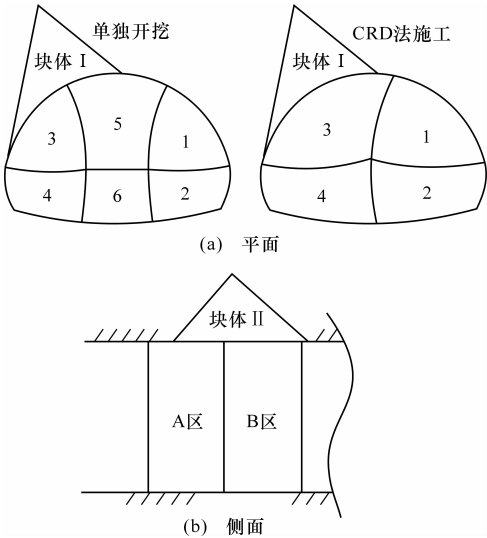


图 1 隧道分部施工所产生关键块体的时空效应

由图 1(b)可见,在隧道施工进尺小于关键块体在隧道临空面跨度时(开挖 A 区后及时支护,而后施工 B 区),“关键块体”Ⅱ也不会成为关键块体。上述 2 种情况就是关键块体因开挖临空面大小而存在的空间性。

节理的蠕变特性影响着节理面的力学性质^[9]。由关键块体自稳系数的计算公式可以看出,形成块体的节理面所提供的剪切力也是抵抗力的重要组成部分,这就使得在某些情况下,块体的安全系数会随着时间的推移而削弱,在逐渐变小的过程中就可能由安全变至需要支护的状态;此时,隧道施工时进行的锚喷支护便可大大提高块体的安全系数。这种块体的安全系数随着临空面暴露时间的长短及支护时机变化而变化的过程,称为关键块体的时间性。

将以上的各种条件及其他能够影响关键块体形成的时间和空间因素统称为关键块体的时空效应。

2 应用块体时空效应指导隧道施工

根据关键块体的时空效应基本原理可知,要提高施工过程中关键块体的安全系数,可减少隧道一次开挖的临空面,使其尽量小于形成该块体所需的临空面积。但采用该措施后,易造成施工操作空间变小,大型机械施工受限,使得工期延长,不利于工程进度控制。为解决这一矛盾,可充分利用隧道施工掌子面的节理信息,结合关键块体的时空效应,指导隧道开挖支护,使得隧道临空面始终处于一个合理的范围。在尽可能不影响施工操作空间的同时,避免形成体积较大的关键块体,从而提高施工的安全性和经济性。

2.1 工程概况

福州机场二期高速公路金鸡山隧道位于福州市晋安区金鸡山山体内,设计长度为 300 m,为双向 8 车道连拱隧道,桩号为 K22+330~K22+630,进口洞底标高 36.7 m,出口洞底标高 30.1 m。隧道场址区属低山丘陵地貌,地形起伏大。线路沿北东向穿越丘陵区,自然斜坡稳定;进口坡度约 20°~25°,出口约 25°~30°,洞身最高点海拔 99.4 m,沟壑纵横交错节理发育,以 NW(北西)及 NE(北东)向为主,地表植被发育。隧道围岩有弱风化花岗岩、花岗斑岩及闪长玢岩脉体分布,强度较高,洞身段围岩级别以Ⅲ、Ⅳ级为主,洞口段节理裂隙发育,围岩较破碎,以Ⅳ、Ⅴ级为主^[10]。

根据隧道设计、地质勘察资料,确定隧道块体稳定分析的相关参数见表 1^[11-12]。

表 1 金鸡山隧道块体稳定分析参数

参数名称	取值
隧道走向/(°)	118
隧道断面(单洞跨度)/m	18.2×11.9
岩体重度/(kN·m ⁻³)	2.7×10 ⁴
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.8
锚杆抗拉强度/kN	150
锚杆抗剪强度/kN	80
混凝土重度/(kN·m ⁻³)	2.6×10 ⁴
混凝土抗剪强度/MPa	2.0

2.2 金鸡山隧道 K22+585 掌子面节理统计

对金鸡山隧道施工过程中出露的岩体节理逐一进行采集编录,记录控制节理面的产状与坐标(以隧道开挖底面为 xy 平面,以所在掌子面为 yz 平面,以掌子面的对称线为 z 轴的坐标系)。根据现场对节理面的几何和力学参数调查统计分析的结果可以确定,隧道区域岩体节理的力学性质由其间的充填物控制。为计算分析时能解决主要问题,可在一个合理的范围内统一确定节理面力学参数,在保证结果合理的同时简化计算,且能凸显主要矛盾的解决过程。K22+585 断面的描述见表 2。

表 2 金鸡山隧道 K22+585 断面掌子面节理精细采集结果

编号	产状		掌子面坐标		节理面力学参数	
	倾角/(°)	走向/(°)	x/m	y/m	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	59	75	-4.5	3.7	0.1	32
2	63	169	2.0	4.1	0.1	32
3	69	245	3.8	5.5	0.1	32
4	56	4	5.2	2.9	0.1	32

2.3 关键块体时空效应在隧道施工中的应用

为了方便搜索正洞施工过程的随机块体,假设结构面相互交切形成的块体为四面体,即由 3 组结构面与开挖临空面组成。在结构面对岩体进行切割组合成块体时,仅考虑组成块体的结构面产状,而忽视结构面的空间位置,允许结构面平移,以形成最大块体为目的。在确定形成块体结构面后,采用矢量法计算块体的顶点坐标、体积等参数。

根据表 1、表 2 的参数,运用关键块体理论进行块体的搜索和分析,得出金鸡山隧道 K22+585 断面掌子面前方正洞施工可能产生最危险关键块体,结果见下页表 3,三维视图如下页图 2 所示。

根据锚喷支护原理,视每个开挖过程的锚杆与喷射混凝土层对关键块体稳定的支护作用是相互独立的^[13-14]。依据这一分析原理,综合隧道的施工工序(隧道施工的分析顺序基于施工顺序,根据隧道施

表 3 金鸡山隧道 K22+585 断面正洞前方
施工过程可能产生的关键块体

节理组合	块体位置	下滑力/kN	体积/m ³	失稳形式	稳定系数
2、3、4	顶部	201.40	74.461	Ⅲ	0.00
1、3、4	顶部	252.90	9.366	Ⅲ	0.00
1、2、4	顶部右侧	1 400.10	212.370	Ⅰ	1.22
	顶部左侧	3.01	0.110	Ⅲ	0.00
1、2、3	顶部左侧	560.81	95.477	Ⅰ	1.14
	顶部右侧	30.41	1.130	Ⅰ	0.00

注:稳定系数小于 1.5 的为关键块体;失稳形式一栏中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示单面滑落、双面滑落和临空脱落。

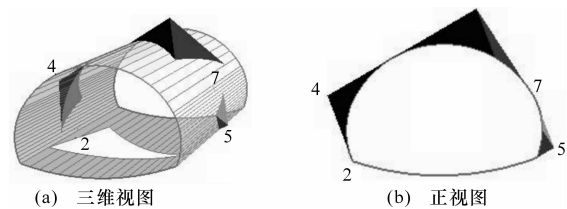


图 2 金鸡山正洞最危险块体三维及正视图

工的基本原理,锚喷支护顺序也与施工工序相同),将隧道开挖过程的锚喷支护作用分为 5 个步骤(分析顺序如图 3 所示,分析顺序 A 的锚杆加固与混凝土加固图如图 4 所示),分别计算锚杆加固与锚杆喷射混凝土层加固后的安全系数,结果见下页表 4。

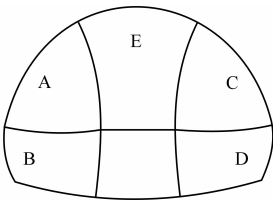


图 3 金鸡山隧道正洞施工工序的分析顺序

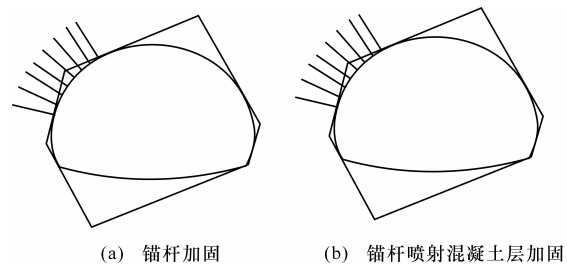


图 4 隧道左侧导坑上台阶支护(分析顺序 A)

由于体积较大的关键块体对隧道围岩稳定性起着决定作用,故对锚喷支护的优化分析也应按块体体积从大到小的顺序进行。表 3 中,在节理 1、2、4 组合下,隧道顶部左侧产生体积为 0.11 m³ 的关键块体;在节理 1、2、3 组合下,隧道顶部右侧产生体积为 1.13 m³ 的关键块体。由于这些块体体积较小,相对于其他大块体而言,分析意义较小,故不作为分析对象。

由表 4 中各步骤单独锚喷支护后的安全系数对比分析可以看出,在采用相同的锚杆及喷射混凝土支护参数时,不同开挖支护顺序对同一关键块体安全系数的提高效果是不同的,即块体稳定系数的变化过程受施工工序的影响。

在节理 1、2、4 组合下,可能产生最危险关键块体的体积达到了 212.37 m³,并且处于隧道顶部右侧,故应首先对该块体的稳定性进行分析。从表 4 的安全系数可以看出,对节理 1、2、4 与开挖临空面相互切割产生的关键块体,无论先施工哪一部分的块体,其安全系数均超过 1.5,即在这几处开挖后施工锚杆与喷射混凝土层均能使块体稳定,故也不将其作为分析对象。对节理 1、2、3 组合产生的关键块体,也以同样方法从分析范围中排除。

对体积稍小的关键块体:节理 2、3、4 组合下产生的关键块体,施工工序 C、E,完成锚喷支护后,其稳定系数得到提高,均能够达到 1.5 的安全值;而分析顺序 A、B、D 对该块体的稳定性影响为 0。对节理 1、3、4 组合下体积为 9.366 m³ 这一关键块体,单独施工分析 A 与 E 顺序,均能使块体自稳系数得到明显提高,而其余三步支护工序则加固效果不明显。金鸡山隧道施工产生的各关键块体的优先加固顺序见表 4 中安全系数字型为粗黑体的部分。

综上所述,由于分析顺序 B、D 的锚喷支护作用对顶部块体基本没有影响,故结合体积越大的块体越需要优先支护这一原则,将最终的优化顺序结合双侧壁导坑法,单个洞室采用上下短台阶,分 6 个施工区域进行分析,最终的优化结果如图 5(2 个洞室相对独立,图中数字表示优化顺序)所示。

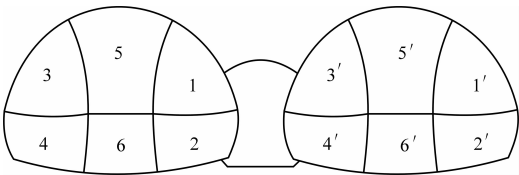


图 5 金鸡山隧道正洞施工工序优化分析结果

在上述分析过程中,由于掌握了隧道施工过程产生关键块体与空间的关系,通过分析空间效应,对隧道施工过程的开挖工序进行优化,所以可以减少施工过程中的块体体积,并且提高块体的安全系数。

此外,在施工过程中,如果不及时进行有效的支护,就会使产生关键块体的节理面蠕变,力学性质变差,节理面能够提供的抵抗力变小,使得原本能够达到稳定的块体变得不稳定或者稳定性变差。

表 4 鸡 金 山 隧 道 K22+585 正 洞 开 挖 各 关 键 块 体 不 同 锚 喷 支 护 顺 序 的 安 全 系 数 及 其 优 化 分 析 结 果

节理组合	关键块体位置	块体体积/m³	支护类别	各步骤单独锚喷支护后的安全系数				
				顺序 A	顺序 B	顺序 C	顺序 D	顺序 E
2、3、4	顶部	74.461	锚杆	0.00	0.00	0.47	0.00	2.30
			喷射层	0.00	0.00	5.42	0.00	19.46
1、3、4	顶部	9.366	锚杆	0.97	0.00	0.00	0.00	3.50
			喷射层	13.73	0.00	0.00	0.00	38.49
1、2、4	顶部右侧	212.370	锚杆	1.51	1.51	2.01	1.52	2.01
			喷射层	1.51	1.51	4.28	2.37	6.96
1、2、3	顶部左侧	95.477	锚杆	2.71	1.76	1.74	1.74	2.14
			喷射层	7.99	2.99	1.74	1.74	8.02
不同分析步骤(顺序)对各最危险块体的稳定性影响顺序				3	4	2	5	1

注:由于分析顺序中的 B 和 D 的锚喷支护作用对顶部块体基本没有影响,故将最终的优化顺序结合双侧壁导坑法,采用双侧壁导坑上下台阶的原理进行分析。

3 关键块体时空效应应用基本原则

根据关键块体时空效应的基本原理,以及将其在鸡 金 山 隧 道 中 应 用 实 例 进 行 分 析 总 结,可 以 得 出 应 用 时 空 效 应 的 基 本 原 则。

- (1)尽可能对影响该块体的几何和力学性质的岩体节理面及临空面进行详尽调查,在隧道施工的过程中尤以掌子面所揭露的结构面为重点。
- (2)分析影响块体稳定的各种因素的主次关系,且应对块体稳定性影响最大的因素进行分析。
- (3)对比时空效应时应优先考虑时间效应对块体的影响,及时支护以节省后续开挖和支护成本。

4 结 语

- (1)在鸡 金 山 连 拱 隧 道 正 洞 单 个 洞 室 施 工 的 过 程 中,开 挖 产 生 的 隧 道 侧 壁 的 块 体 基 本 能 够 自 稳,而 在 隧 道 顶 部 可 能 会 产 生 关 键 块 体,最 危 险 情 况 下 可 能 产 生 的 块 体 体 积 达 到 了 212.37 m³,位 于 隧 道 里 程 为 K22+585 掌 子 面 前 方 正 洞 顶 部 偏 右 部 位。
- (2)采用锚喷支护方法,能迅速有效支护块体,不同的开挖支护顺序,对块体稳定性的影响也有很大差异,应结合隧道区域具体岩体节理的分布进行预测分析,并根据分析结果优化锚喷支护参数。
- (3)结合岩体节理精细化采集描述结果,应用关键块体理论优化分析隧道的施工工序,可有效减小隧道施工过程中产生关键块体的数目及体积;在鸡 金 山 隧 道 区 间 正 洞 施 工 过 程 中,不 同 的 施 工 顺 序 对 最 危 险 块 体 的 稳 定 性 将 产 生 影 响;根 据 鸡 金 山 隧 道 施 工 工 序 的 优 化 结 果,进 行 双 侧 壁 导 坑 的 施 工,能 够 使 施 工 过 程 中 开 挖 临 空 面 与 岩 体 节 理 相 互 切 割 产 生 的 关 键 块 体 数 量 较 少 或 体 积 较 小,并 且 所 产 生 的 关

键块体在左侧导坑先行开挖支护后,自稳系数能够得到更有效地提高。

参考文献:
References:

[1] Jun L,Zhongkui L,Zhuoyuan Z. Stability analysis of block in the surrounding rock mass of a large underground excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2004,19:35-44.

[2] 李德宏.连拱隧道施工监测与分析[J]. 现代隧道技术,2003,40(1):59-64.
LI De-hong. Construction monitoring of multi-arch tunnel and its result analysis[J]. Modern Tunneling Technology,2003,40(1):59-64.

[3] Goodman R E,Shi G H. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliffs:Prentice-Hall,1985.

[4] 毛海和,夏才初,张子新,等. 块体理论赤平解析法在龙滩水电站地下厂房洞室群稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1308-1314.
MAO Hai-he,XIA Cai-chu,ZHANG Zi-xin,et al. Application of stereo-analytical method for block theory to the stability of Longtan hydropower station underground power-house[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(8):1308-1314.

[5] Song J J,Lee C I,Seto M. Stability analysis of rock blocks around a tunnel using a statistical joint modeling technique[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2001,16,341-351.

[6] 杨 庆,杨 钢,王忠昶,等. 块体理论在荒沟抽水蓄能电站地下厂房系统洞室群围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(8):1618-1625.

- [1] 陈政清, 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
 - [2] 张伟, 魏志刚, 杨咏昕, 等. 基于高低雷诺数试验的分离双箱涡振性能对比[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 6-11.
ZHANG Wei, WEI Zhi-gang, YANG Yong-xin, et al. Comparison and analysis of vortex induced vibration for twin-box bridge sections based on experiments in different Reynolds numbers[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(1): 6-11.
 - [3] Larsen A, Schewe G. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge cross section[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1998, 74/76: 829-838.
 - [4] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133: 265-285.
 - [5] 李加武, 林志兴, 金挺. 压力积分法在桥梁断面雷诺 Shock, 2010, 29(1): 73-76.
 - [7] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 修订版. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
 - [9] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用: 风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢黎明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1991.
 - [10] 李加武, 崔欣, 张宏杰, 等. 粗糙度对雷诺数效应的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 56-59.
LI Jia-wu, CUI Xin, ZHANG Hong-jie, et al. Influence of surface roughness on Reynolds number effects[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 56-59.
 - [11] 李加武, 张宏杰, 韩万水. 斜拉桥风致响应的雷诺数效应[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 42-47.
LI Jia-wu, ZHANG Hong-jie, HAN Wan-shui. Wind-induced response of cable-stayed bridge with consideration of Reynolds number effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 42-47.