

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.02.004

## 土工离心模型试验研究土石混合填料的沉降变形特性

孙静<sup>1</sup>, 孙琳<sup>2\*</sup>

(1.重庆能源职业学院 土木工程系, 重庆市 402260; 2.河北交通职业技术学院 土木工程系)

**摘要:**以龙井沟高填方路堤作为原型,采用土工离心模型试验研究了土石混合填料在不同土石比、不同填筑高度和不同填筑工艺时填筑路基体内的沉降变形规律。研究表明:土石混合填料填筑体内的沉降变形随着填筑高度的递增,其沉降变形逐渐增大,分层沉降规律显著;土石比 100:0 的土石混合填料填筑体最大沉降值出现在 2/3 填筑高度以上范围内。土石比 30:70 的土石混合填料填筑体的沉降规律与土石比 70:30 的一致,填筑体最大沉降值出现在 1/3 填筑高度以上范围内;填筑体沉降变形随着混合填料中石料含量的增加而减小;为满足土工离心模型试验的要求,土石混合填料的土石比应控制在 70:30~30:70 之间。填筑高度 20 m 以下的土石混合填料建议不采用强夯工艺,以降低造价。土石混合填料填筑采用分层强夯工艺的沉降变形是分层碾压工艺的 1/2,效果明显。

**关键词:**道路工程;高填方路基;离心模型试验;土石混合填料;沉降变形

在中国西部山区高速公路建设中,由于地形起伏较大,高填方路堤逐步成为山区公路路基的重要结构形式。与一般路堤相比,高填方路堤具有填筑高度大、施工时间长、累积沉降大等特点。高填方路堤的变形

破坏是路基工程质量的通病之一,表现为路堤填土开裂、路基滑动、边坡坍塌和与之有关的路基结构破坏、路基整体下沉或局部沉降,为确保高填方路堤的施工质量和长期稳定性,非常有必要开展填筑材料沉降变

动法则及非线性系数引入水平地震力及地面超载作用下的主动土压力系数计算分析中,推导了外力功率与内能耗散率,并建立了能量极限平衡方程。通过求解方程得到了主动土压力系数显式解,并借助 Matlab 编制的优化程序,得到目标函数的最优上限解。

(2)在非关联流动法则退化为关联流动法则的情况下,该文获得的土压力结果与现有的研究结果较为接近,验证了该文所采用的土压力求解过程与优化程序的正确性。

(3)通过参数分析研究了土体剪胀性及土体强度非线性等因素对主动土压力系数的影响。结果表明, $k_a$ 随非线性系数  $m$ 、水平地震力系数  $k_h$ 和地面超载  $q$ 的增大而增大,随初始黏聚力  $c_0$ 和剪胀系数  $\eta$ 的增大而减小。在挡土墙设计中,需要对非线性系数  $m$ 及剪胀系数  $\eta$ 予以重视,同时还要考虑水平地震力、地面超载  $q$ 及初始黏聚力  $c_0$ 带来的影响。

## 参考文献:

- [1] Chen, W. F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [2] 林松.非线性破坏准则下被动土压力的计算[J].铁道科学与工程学报, 2008(4).
- [3] 张国祥,曹鑫.非线性破坏准则对主动土压力的影响[J].岩土力学, 2007(12).
- [4] 王作伟,杨小礼.水平地震力对非线性主动土压力上限解的影响[J].矿业工程研究, 2009(3).
- [5] 吕绍文.非关联流动法则对双线平行隧道上限解的影响分析[J].公路工程, 2014(3).
- [6] 姚聪,杨小礼.基于非关联流动法则的盾构隧道掌子面稳定性上限分析[J].矿冶工程, 2016(4).
- [7] 张培文,陈祖煜.剪胀角对求解边坡稳定的安全系数的影响[J].岩土力学, 2004(11).
- [8] 邓国瑞,芮勇勤,陈文胜.非关联流动法则下锚杆加固边坡稳定性研究[J].中外公路 2014(3).

收稿日期:2018-06-10(修改稿)

基金项目:河北省高等学校科学技术研究重点项目(编号:ZD2017226);河北省科技计划项目(编号:16211249)

作者简介:孙静,女,硕士,讲师.E-mail:757809546@qq.com

\*通信作者:孙琳,女,大学本科,讲师.E-mail:22653170@qq.com

形特性的相关研究。

重庆江津至四川合江段高速公路,地形起伏相对较大,路线跨越沟谷较多,高填深挖频繁。龙井沟高填方路堤位于江合高速公路二期工程 D7 合同段,采用高填方路堤替代高架桥的设计方案,以消化大量的挖方等。龙井沟高填路堤区采用土石混合填料填筑,最大填筑高度达 38.6 m。土石混合填料是一种常用的路基填筑材料,具有成分复杂、粒径变化较大、颗粒形状不规则等特点。土工离心模型试验是岩土工程领域最佳的物理模型试验,可以有效解决工程实际问题。A.G.I. Hjortnas—Pedersen 和 H. Broers 利用大型离心机模型试验和 PLAXIS 有限元软件分析了路堤不同施工过程中软土地基的力学特性和变形特性。冯研等采用离心模型试验预测复合地基沉降的精度。目前,采用离心模型试验研究不同路堤沉降的研究较多,但针对土石混合填料高填方路堤鲜有报道。为了保证龙井沟土石混合填料高路堤沉降变形满足设计要求,文中采用土工离心模型试验研究土石混合料在不同土石比、填筑高度、填筑工艺下高路堤填方的沉降变形特性,为山区公路建设土石混填高填方路基提供参考。

## 1 土工离心模型试验原理

土工离心模型试验是研究高填方路基沉降变形的重要方法。在室内采用小比例尺物理模型试验模拟现场原型结构在重力场作用下的应力应变,从而再现原型特性。其过程是将原型构造物按  $1/n$  比例制成的土工模型置于离心机中,以  $ng$  离心加速度进行高速旋转,以离心力模拟重力,补偿因模型缩尺所产生的自重损失,从而使土工模型保持与原型构造物相同的力学状态。

## 2 离心模型试验方案

### 2.1 试验设计

采用土工离心模型试验模拟土石混合填料高填方路基,研究在不同土石比、不同填筑高度、不同填筑工艺条件下的沉降变形规律。以龙井沟高填方路堤为原型,该填方长宽分别为 200 和 300 m,中心线最大填方高度为 38.6 m,填料粒径不超过 90 cm,以 4.75 mm 为标准定义土石,即填料小于 4.75 mm 的为土,反之则为石。设计了 3 种土石混填料土石比即 100 : 0、70 : 30、30 : 70; 3 种填筑高度即 20、30、40 m; 两种填筑工艺即分层强夯、分层碾压。同时要求模型土料与原型相同。

型相同。

### 2.2 模型试验参数

模型率  $n$  是土工离心模型试验中最重要的参数。土工离心模型试验原则上要求土工模型尽可能地接近原型,进而更加准确地量测应力和应变,更方便地安装量测仪器。模型率  $n$  的计算公式如下:

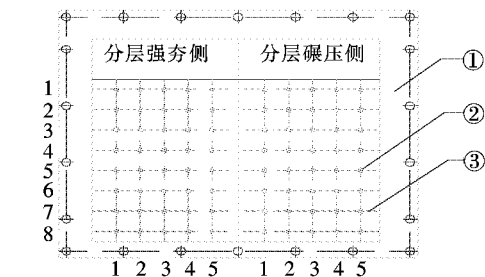
$$n = \frac{H_p}{H_m} \quad (1)$$

式中:  $H_p$ 、 $H_m$  分别为原型、模型的高度(m)。

由于土工离心机模型箱的尺寸固定,某些大型结构物按式(1)计算的模型率  $n$ ,可能会超过离心机所容许的最大值。该试验采用 25g-t 的土工离心机,模型箱尺寸为 600 mm×350 mm×500 mm。龙井沟高填方路堤原型几何尺寸较大,若采用按式(1)计算得到的模型率  $n$ ,其离心加速度  $ng$  超过了离心机的最大容许加速度,故为了满足试验要求,采用线弹性小比尺模型来确定模型率,试样最大粒径设计为 9.5 mm。

### 2.3 模型制作

土工离心模型制作断面形式如图 1 所示。为了更好地对比不同填筑工艺对土石混合填料沉降变形的影响,试验模型制作时采用在模型箱中部垂直放置一块与模型箱宽度相等的硬质木板,厚度为 2 cm,从而按不同填筑工艺一次成型两个模型,除填筑工艺外,其模型的高度、填料、边界条件等均相同。



注:① 模型箱断面;② 分层沉降观测点;③ 强夯和碾压的填筑分层线;⊕ 为测点。

图 1 模型制作示意图

为了研究土石混合填料高填方路基的沉降变形规律,该文设计了 3 组土工离心模型试验,其设计参数如表 1 所示。其分层碾压的代号分别为 A、B、C;分层强夯的代号分别为 AQ、BQ、CQ。

### 2.4 模型加载

考虑实际模型制作存在的困难,文中采用一次性加载模拟分层填筑的施工过程。每个模型加载过程约为 100 min,其中固定转速持续加载 60 min。模型加载历程如图 2 所示。

表 1 不同模型的设计参数

项目名称	填料土 石比例	重型击实		压实 度/%	设计试 样含水 率/%	设计试样最 大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	设计试样 湿密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
		最佳含 水率/%	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )				
模型 1	分层碾压(A)	100 : 0	9.5	2.110	78	9.5	1.646
	分层强夯(AQ)						
模型 2	分层碾压(B)	70 : 30	8.0	2.300	78	8.0	1.794
	分层强夯(BQ)						
模型 3	分层碾压(C)	30 : 70	6.2	2.270	78	6.2	1.771
	分层强夯(CQ)						

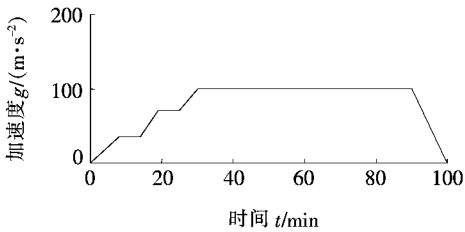


图 2 离心机加载历程示意图

3 离心模型试验结果分析

在模型箱有机玻璃一侧的模型断面上按矩阵式布

设位移观测点,以加载前后的坐标变化计算各点的水平和垂直位移。该试验的重心坐标: $X=30\text{ cm}$ 、 $Y=22\text{ cm}$ 。图 1 中,模型箱左边数字为分层观测点的行数,模型箱下面的数字为分层观测点的列数。为了避免边界条件对数据采集的影响,文中以 2、3、4 列观测数据的算术平均值作为试验结果。不同土石比的土石混合填料模型在不同加速度试验时的位移观测点布置图如图 3 所示。图中: $0g-100:0$  为例,表示离心加速度—土石比。

3.1 3 种不同土石比填料的试验结果

3 种不同土石比( $100:0$ 、 $70:30$ 、 $30:70$ )在不同

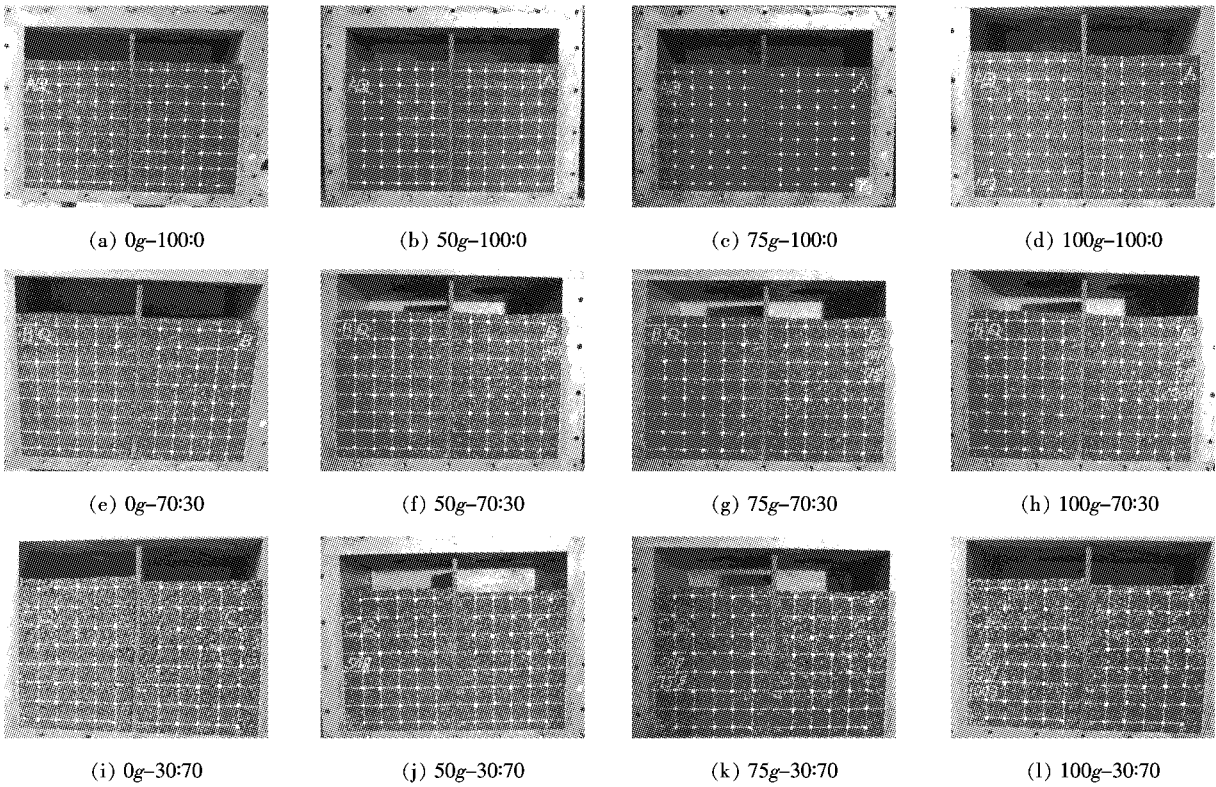


图 3 不同土石比的土石混合填料模型在不同加速度试验时的位移观测点布置照片

填筑工艺、不同填筑高度的土石混合填料填筑体内的沉降变形对比曲线如图4所示。图中A-50g-100:0表示填筑工艺—离心加速度—土石比。

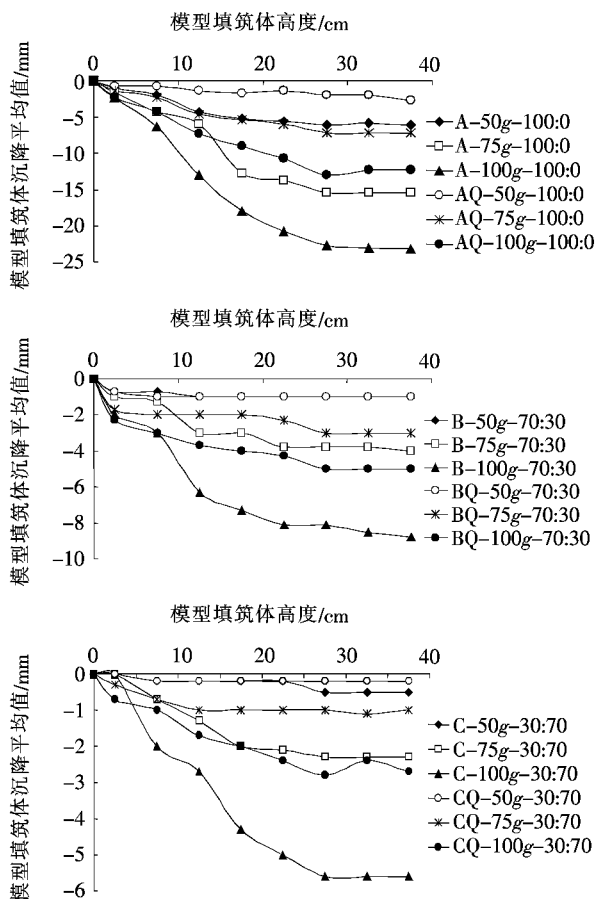


图4 不同土石配合比的土石混合填料填筑体内的沉降变形对比曲线

由图4可知:

(1) 3种不同土石比的土石混合填料填筑体均随着填筑高度的递增,其沉降变形逐渐增大。填筑体均在1/3填筑高度范围内沉降变形较小。但土石比100:0的土石混合填料在(1/3~2/3)填筑高度范围内,沉降变形逐渐增大,超过2/3填筑高度,沉降变形继续增大。填筑体最大沉降值出现在2/3填筑高度以上范围内。土石比70:30的土石混合填料填筑体最大沉降值出现在1/3填筑高度以上范围内。土石比30:70的土石混合填料填筑体的沉降规律与土石比70:30的一致。

(2) 填筑混合料中的石含量是填筑体沉降变化重要的影响因素。填筑体沉降值随着混合填料中石的含量增加而减小。土石比70:30的填筑体的沉降值比土石比100:0的填筑体减小1/2左右。土石比30:

70的填筑体沉降值较土石比100:0的填筑体减小2/3左右。在该试验中,土石比为30:70的模型试验值已经接近读数误差,因为石含量较大对填筑体容易形成大空隙的骨架结构,从而导致采用离心模型试验研究其沉降规律的效果并不明显,因此建议采用土工离心模型试验研究的土石混合填料填筑路基沉降变形的土石比控制在70:30~30:70之间。

### 3.2 不同填筑高度时的试验结果分析

3种不同填筑高度(20、30、40 m)在不同土石比、不同填筑工艺的土石混合填料填筑体内的沉降变形对比曲线如图5所示。图中A-50g-20 m表示碾压方式—离心加速度—填筑高度。

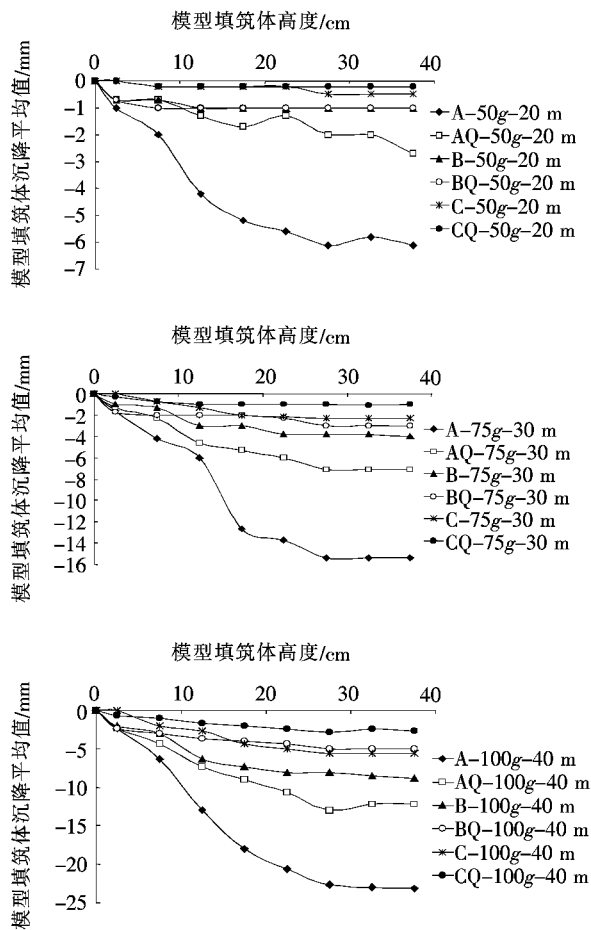


图5 不同填筑高度的土石混合填料填筑体内的沉降变形对比曲线

由图5可知:

(1) 土石混合填料填筑体的沉降变形与填筑高度密切相关。随着填筑高度的增大,填筑体的沉降变形逐渐增大。75g-30 m的填筑体沉降变形是50g-20 m的3倍左右;100g-40 m的填筑体沉降变形是50g-20 m的4倍左右。

(2) 土石混合填料填筑体在不同填筑高度 20、30、40 m 下,其填筑体内沉降规律一致,显示出区域性分层沉降的规律,其最大沉降值出现在上部区域。

### 3.3 不同填筑工艺时的试验结果分析

两种不同填筑工艺(分层碾压、分层强夯)在不同土石比、不同填筑高度的土石混合填料填筑体内的沉降变形对比曲线如图 6、7 所示。

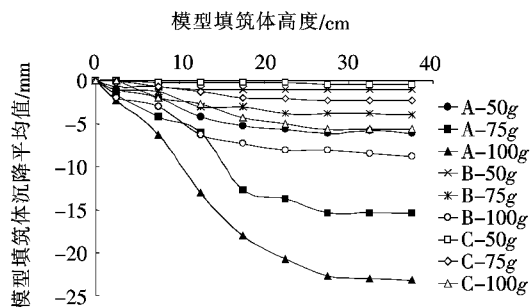


图 6 分层碾压工艺成型的填筑体内沉降对比曲线

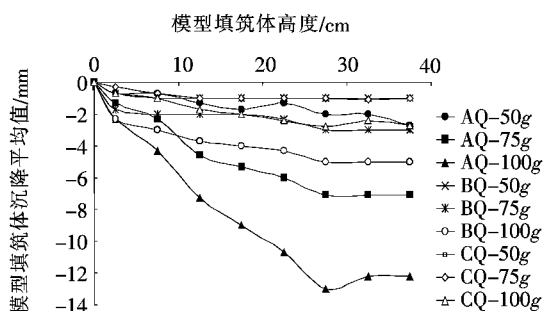


图 7 分层强夯工艺成型的填筑体内沉降对比曲线

由图 6、7 可知:

(1) 采用分层强夯工艺的土石混合填料填筑体内的沉降变形比分层碾压工艺下要小,约能降低 1/2,但沉降分布规律一致。结合图 5 可知:强夯工艺对降低土石混合填料沉降变形的效果明显,且填筑高度越大,效果愈显著,但其造价较高,当填筑高度为 20 m 以下时,建议不考虑强夯工艺,反之,可采用。

(2) 不同填筑工艺对土石混合填料填筑体的沉降分布规律几乎没有影响,其沉降变形均表现为 3 个沉降变化区域。其中分层强夯工艺的填筑体下部区域的沉降与分层碾压的基本一致,中、上部区域的沉降值明显减小。在填筑高度为 30~40 m、土石比为 70:30~30:70 时,分层强夯工艺对降低填筑体沉降变形的效果达到最佳。

## 4 结 论

依托龙井沟高路堤区施工项目,通过土工离心模型试验,开展土石混合填料填筑体在不同土石比、不同填筑工艺、不同填筑高度的沉降变形,得出如下结论:

(1) 土石混合填料填筑体随着填筑高度的递增,其沉降变形逐渐增大,分层沉降规律显著。土石比为 100:0 的填筑体最大沉降值出现在 2/3 填筑高度以上范围内。土石比为 30:70 的土石混合填料填筑体的沉降规律与土石比 70:30 的一致,最大沉降值出现在 1/3 填筑高度以上范围内。

(2) 石含量是影响土石混合填料填筑体沉降变形的重要因素。填筑体沉降值随着混合填料中石的含量增加而减小。同时,土石比为 70:30~30:70 的土石混合填料方可采用土工离心模型试验,否则将会出现严重误差。

(3) 不同填筑高度的土石混合填料填筑体的沉降变形分布规律基本一致。建议填筑高度 20 m 以内采用分层碾压工艺,有利于降低造价,反之则采用强夯工艺。

(4) 不同填筑工艺的土石混合填料填筑体的沉降变形分布规律基本一致。但土石混合填料填筑采用分层强夯工艺的沉降变形比分层碾压工艺下约能降低 1/2,效果明显。

### 参考文献:

- [1] 张军辉,黄湘宁,郑健龙,等.河池机场填石高填方土工后沉降离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2013(4).
- [2] 胡庆贺,陈亮,缪存雀,等.雁楠公路高填方路基设计方案稳定性评价[J].中外公路,2014(6).
- [3] 周禹.高填方路基沉降预测与控制沉降施工技术的研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [4] A. G. I. Hjortnas - Pedersen, H. Broers. The Behaviors of Soft Subsoil during Construction of an Embankment and its Widening[J]. Proc. Centrifuge Balkema, 1994, 32(1): 567-574.
- [5] 冯振,殷跃平.我国土工离心模型试验技术发展综述[J].工程地质学报,2011(3).
- [6] 邢义川,金松丽,赵卫全,等.基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究[J].岩土工程学报,2017(3).
- [7] 孙书平.山区土石混填高路堤施工与沉降控制研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.