

西部交通建设科技项目

交通编号:

合同号: 2006 318 000 42

单位编号:

密 级:

分 类 号: U444, U445, TU528

路用基层专用水泥与水泥类稳定基层 综合防裂技术研究 研究报告简本

内蒙古自治区交通厅赤通鲁公路建设监督管理办公室

武 汉 理 工 大 学

长 安 大 学

2009 年 11 月

目 录

1. 引 言.....	1
2. 项目完成的主要研究内容及取得的成果.....	2
3. 项目在依托工程中的推广应用与效益.....	6
4. 项目的技术创新点.....	7

1. 引言

水泥稳定粒料基层强度高、承载力强、稳定性好、施工灵活机动，是我国高等级公路的主要基层类型，占半刚性基层的 80% 以上，但是水泥稳定类基层极易产生密集的收缩裂缝，近年来随着水泥新标准的实施，其收缩开裂更为严重，路面基层的开裂引起了严重的反射裂缝，反射裂缝的存在也诱发了系列的路面病害特别是路面的早期病害，严重影响了道路的服役寿命，给国民经济带来巨大的损失。内蒙古地区气候干燥、温差大、湿度变化大、冻融严重，是我国水泥稳定类路面基层收缩开裂最为严重的地区之一。

目前国内外关于水泥稳定类路面基层的防裂技术以及裂缝处理措施主要存在以下问题：

(1) 针对新标准的通用水泥稳定类路面基层容易开裂，有一些地方采用强度低于现有标准的水泥（如老标准 325 水泥）稳定粒料，这样虽然能在一定程度上减低基层的开裂情况，但效果并不明显，水泥稳定类基层开裂现象依然十分严重。低标号水泥的应用往往会降低基层的抗压强度，严重影响工程质量。

(2) 通过采用膨胀水泥、加入少量阻裂剂等方法对基层进行防裂。但存在造价高、施工工艺复杂且难以混合均匀等问题，故很少采用。

(3) 通过调整水泥生料配方进行优化水泥的矿物组成来降低水泥收缩率、延长水泥的凝结时间，但会使水泥生产工艺复杂化，且产品用途单一，增加水泥成本。

(4) 通过调整集料级配，增加集料中粗颗粒含量从而抑制基层开裂。但会严重影响水泥稳定粒料力学性能、疲劳性能等其它路用性能，同时在施工过程中增加了离析出现的几率，基层均质性明显恶化。

(5) 通过掺入粉煤灰，形成水泥粉煤灰稳定碎石来防止开裂。但由于该类材料的组成设计方法不完善，从而导致应用效果并不理想，甚至出现收缩开裂加剧、施工性能恶化的现象。

(6) 施工设备以及施工工艺存在较多缺陷，如计量设备精度不够、标定技术急需改进、施工设备参数设定不合理、施工过程中离析严重、检测技术不够完善等，从而导致了混合料均匀性较差，开裂现象进一步加剧。

(7) 裂缝处理措施通常达不到防裂和阻裂的效果。一些地方采用切缝法来释放收缩应力：在尚未开裂的基层上切割一些裂缝，但基层是一种半刚性材料，切缝后板体

的中央依然会有新的裂缝产生，因此人工切缝难以凑效，还会诱发新的反射裂缝。还有采用预裂法处理水泥稳定基层的开裂以防止反射裂缝的发生：先将成型的基层经过长时间的放置，基层充分开裂破坏后进行彻底处理，以防止面层反射裂缝的发生，但实施的结果是大大增加了基层裂缝的产生几率，极大地影响了基层材料的长期性能，并制约了工程进度。当基层裂缝出现后，采用土工布、土工格栅或玻纤格栅进行搭接无法真正阻止反射裂缝的出现，却大大提高了工程造价与施工复杂程度。

水泥稳定基层的收缩开裂和防裂是十分复杂问题，在开展水泥稳定类路面基层材料开裂机理研究的基础上，开发水泥稳定类路面基层的综合防裂技术，是提高水泥稳定类基层及半刚性基层沥青路面质量的关键。本课题是 2006 年立项的西部交通建设科技项目，由内蒙古自治区交通厅赤通鲁公路建设监督管理办公室、武汉理工大学和长安大学共同承担。

根据可行性研究报告和合同的要求，本项目的总体目标是：以赤通（赤峰-通辽）高速公路为依托，通过路面基层专用水泥——缓凝微膨胀水泥的研究、高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石组成设计、施工设备的改进、施工工艺和质量控制技术的优化，形成一整套水泥稳定类基层的防裂关键技术，并编制《水泥类稳定基层综合防裂施工技术指南》，为有效防止水泥稳定类基层收缩开裂提供有力的技术支撑。

2. 项目完成的主要研究内容及取得的成果

2.1 探讨了水泥稳定类基层的收缩开裂机理并构建了基层开裂模型，并以此为基础提出了水泥稳定基层防裂途径以及综合技术措施

(1) 在充分分析基层收缩开裂机理的基础上提出了一种路面基层收缩开裂的静态力学模型，该模型反映了非荷载的环境变化作用下，下承层均匀约束下路面基层收缩开裂的机理与规律。

(2) 当收缩应变产生的收缩应力大于材料的许用应力，就会产生第一次收缩开裂，收缩应变继续增加，当增加到一定的值后就会产生第二次收缩开裂，当裂缝间距较短，基层和底层之间的粘结力和摩擦力不足以抵抗其收缩应力而产生滑移后，裂缝的间距达到最小，不会进一步产生裂缝。

(3) 影响基层抗裂性能的关键因素主要有材料的模量、强度以及收缩系数等。基于

材料自身改性来提高基层的抗裂性能，主要可以通过改善模量、提高材料强度以及降低收缩系数来实现。据此提出了5种抗裂技术途径，并由此派生出三种综合防裂技术：路面基层稳定专用水泥，高抗裂水泥粉煤灰路面基层材料和水泥稳定类基层抗裂施工工艺。

2.2 研制了基层专用水泥并对其性能、水化过程以及补偿收缩机理进行了研究

具有缓凝微膨胀特性的路面基层稳定专用水泥是基于补偿收缩、改善水化产物组成、调控水化产物数量与增长速度而提出的，旨在通过专用水泥自身的微膨胀特性来补偿收缩、抑制开裂，通过专用水泥的缓凝特性在一定程度上延长延迟成型时间、满足施工需要。基层专用水泥主要由粉煤灰、水泥熟料、石膏（天然石膏或工业废石膏）以及固化素按一定比例制备而成，具有缓凝微膨胀的特性，且在相同水泥剂量时，稳定粒料基层具有更高的强度。该类水泥生产工艺和使用工艺和通用水泥相同，便于其大规模的推广应用。

(1) 在分析了基层专用水泥设计原理的基础上，探讨了粉煤灰、石膏掺量对基层专用水泥以及其稳定粒料各项性能的影响规律，对基层专用水泥的材料组成进行了优化。

(2) 通过与普通矿渣水泥的对比，系统研究了基层专用水泥及其稳定粒料的相关性能。路面基层专用水泥具有缓凝特性，凝结时间较通用水泥一般推迟3小时以上，终凝时间在6小时以上，大大延长了基层材料的延迟成型时间，有利于现场施工以及应对施工现场的非正常停机；路面基层专用水泥具有微膨胀特性，其28天膨胀率在3~6‰之间，具有补偿材料收缩作用，能够提高基层材料的抗裂性能，抗裂系数提高80%。

(3) 采用路面基层专用水泥稳定基层，水泥剂量相同时，基层材料强度提高15%左右；在达到相同强度等级时，水泥剂量与通用水泥相比可降低12%左右。专用水泥稳定基层的干缩率和通用水泥相比有显著降低。

(4) 通过一系列微观测试，探讨了基层专用水泥的水化过程并分析了其抗裂机理。路面基层专用水泥早期水化率低，水化热低于通用水泥，水化过程平缓且持续，通过后期的水化使得水泥稳定基层的内应力松弛。水化产物主要是C-S-H凝胶和针棒状AFt晶体，AFt穿插于凝胶之间并产生体积膨胀，有利于补偿稳定粒料的自收缩和部

分干缩。正是由于基层专用水泥早期水化率低、水化热低，水化过程持续且平缓，水化产物型貌与性能优良，所以其具有较高的抗裂性能。

2.3 对高抗裂水泥粉煤灰路面基层材料进行了组成设计以及性能研究

在充分分析现有水泥粉煤灰稳定碎石材料组成设计方法所存在问题的基础上，采用体积法设计了高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石基层，并对其力学、收缩与抗裂进行了系统研究，且就其抗裂机理进行了合理分析。具此，提出了该类材料组成设计方法的关键参数。

(1) 水泥粉煤灰稳定碎石的力学性能随养生龄期的延长而提高，180d龄期时各项力学性能均达到360d的75%水平,可作为该类材料的设计龄期。

(2) 粉煤灰掺量通过改变结合料填充系数而影响水泥粉煤灰稳定碎石的各项性能。当结合料填充系数在1.0—1.2之间时，水泥粉煤灰稳定碎石具有良好的力学性能、干缩性能。结合料填充系数为1.0时材料的干缩能抗裂系数较结合料填充系数为0时提高200%，抗裂性能显著提高。

(3) 集料级配则通过改变材料结构而影响水泥粉煤灰稳定碎石的各项性能。集料级配为骨架型时，水泥粉煤灰稳定碎石具有良好的力学性能、收缩性能。

(4) 提出了以结合料填充系数、集料级配为关键设计参数，基于体积分析的水泥粉煤灰稳定碎石的配合比设计方法，并优选出合适结合料填充系数为1.0—1.2，合适集料级配应为骨架型。

(5) 微膨胀源 (SO_3)含量对材料抗干缩开裂性能具有显著影响，当 SO_3 含量由1.8%提高到5.8%，材料的干缩能抗裂系数提高了416%。且不使材料结构破坏和性能恶化的最大 SO_3 含量为5.8%。

(6) 粉煤灰品质对水泥粉煤灰稳定碎石的强度性能有一定影响，参照二灰中对粉煤灰品质的要求对其进行要求过于严苛，不利于等外粉煤灰的应用，建议采用粉煤灰活度指标进行评定，7d活度大于0.5即可采用。

(7) 高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石的抗裂性能通过力学性能及收缩性能的改善得以实现。其中粉煤灰通过改善材料“点焊”接触形式、增加水化产物数量、弱化粘粒对材料性能影响、“柔化”材料刚性等方面对其力学性能进行改善；同时由于粉煤灰的掺入以及集料骨架对收缩的抑制使材料的干缩性能也得到了改善。另外，水泥中的微膨胀源 (SO_3)通过增强材料胶凝性以及改善材料孔结构达到改善其力学性能的目的，

通过微膨胀来补偿材料的收缩，进而提高材料的抗裂性能。

2.4 研究了水泥稳定粒料均匀性改善技术

在广泛调研水泥稳定类基层施工设备与施工工艺所存在的问题的基础上，针对改善混合料均匀性技术进行了系统研究。

(1) 设计开发了水泥计量在线标定系统，该系统具有操作简便、计量精度高、波动范围小、水泥供给均匀、标定连续在线化等特点；同时研究了搅拌系统的静态标定和物料标定过程，得出连续式计量秤动态物料标定值是否收敛是判别稳定土搅拌设备使用性能的重要指标，只有稳定收敛于规定范围内，才能保证集料、水泥供给的总体准确性的结论，从原材料计量源头保证了混合料的均匀性。

(2) 通过理论推导得出混合料的拌和均匀性、充盈率、搅拌器长宽比及桨叶安装角度四者之间的关系，建立了数学模型，并通过试验进行了验证，为搅拌设备参数的改进提供了理论依据，在搅拌过程中保证了混合料的均匀性。

(3) 设计开发了输送皮带抛料防离析装置、车载式运输车卸料防离析装置、湿排粉煤灰机械式破拱装置，在施工过程中保证了混合料的均匀性。

(4) 研究了混合料级配对水泥滴定结果的影响，得出了修正系数定量计算公式，改进了混合料中水泥剂量的检测手段，确保了混合料均匀性检测的准确性。

2.5 对水泥类基层综合防裂措施进行了工程试验研究

在充分分析依托工程基本情况的基础上，对水泥类基层综合防裂措施进行了工程试验研究。

(1) 针对依托工程施工方面存在的问题，通过设备选型与改造、有针对性编制了《水泥类基层综合防裂施工技术指南》，从原材料到碾压全过程对混合料的配比、均匀性进行控制，大幅度降低施工所带来的变异。

(2) 基层专用水泥在喂料过程中流动通畅、计量准确稳定；稳定粒料强度较通用水泥提高 15% 左右；延迟碾压成型时间明显长于通用水泥，满足基层施工的要求；微膨胀补偿收缩作用表现明显，沥青面层在经过两年半后出现 6 条反射裂缝（裂缝间距 140 米），裂缝发生率降低 82%，抗裂效果明显；与通用水泥相比，专用水泥稳定基层材料每公里降低造价 5.67 万元，经济效益明显。各项性能指标达到了考核指标。

(3) 采用体积分析法设计的高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石基层施工工艺简便、外观平整、未见离析；强度较通用水泥稳定基层提高 30%；且经济效益明显，与水泥稳定

碎石相比，每公里节约成本 5.7 万元。

(4) 采用体积分析法设计的高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石基层抗裂效果明显，单层采用水泥粉煤灰稳定碎石的路面，反射裂缝发生率降低了 63%，而基层、底基层均采用水泥粉煤灰稳定碎石的路面，没有出现任何反射裂缝，裂缝发生率降低了 100%。

2.6 总结提出了水泥稳定类基层综合防裂技术

在对一系列抗裂型水泥稳定类基层材料以及施工设备与工艺研究的基础上，提出了一套水泥稳定类基层综合防裂技术，形成了水泥稳定类基层抗裂施工工艺，编制了《水泥类稳定基层综合防裂施工技术指南》。

(1) 在材料层面，提出采用基层专用水泥稳定粒料替代通用水泥稳定粒料；采用高抗裂水泥粉煤灰稳定粒料替代通用水泥稳定粒料、二灰稳定粒料；采用体积分析法替代普通方法设计水泥粉煤灰稳定粒料的技术措施。

(2) 在施工设备与工艺层面，提出通过设备选型与改造、有针对性的《技术指南》的编制，从原材料到碾压全过程对混合料的配比、均匀性进行控制，大幅度降低施工所带来的变异，进而提高基层的抗裂性的技术措施。

3. 项目在依托工程中的推广应用与效益

赤通鲁公路主线长 513.233 公里，连接线 126 公里，其中赤峰至通辽段 350 多公里为高速公路，通辽至鲁北段 160 多公里为一级公路，项目开工于 2005 年 3 月，计划于 2007 年底竣工，总投资 118 亿元左右。由于内蒙古地区气候干燥、温差大，湿度变化大，依托工程不可避免的会出现路面基层开裂问题严重、反射裂缝密集等问题。进行路面基层专用水泥与水泥类稳定基层综合防裂技术的研究，能很好的解决水泥类稳定基层材料的开裂问题，提高公路路面的建设质量。

应用本项目研究成果，对赤通高速公路赤-撒段全线进行施工设备改进与施工工艺优化应用研究，铺筑了 1 公里的基层专用水泥稳定基层试验路段，铺筑了 60 公里水泥粉煤灰稳定碎石基层。

(1) 在工程实践中探讨施工设备改进措施以及最优化的施工工艺与质量控制手段，基层混合料均匀性明显改善，抗裂现象显著降低；

(2) 对比研究基层专用水泥与通用水泥稳定基层的施工特性、使用效果特别是防裂效果。结果表明，较通用水泥而言，路面基层专用水泥稳定粒料强度提高 15%，公

里造价降低 5.64 万元，延迟成型时间大大延长，收缩性能大大改善，抗裂效果显著突现，具有很好的技术经济效益。

(3) 高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石力学性能优良，较通用水泥稳定碎石而言，强度可提高 30%；抗裂性能突出，试验路段反射裂缝发生率降低 63%~100%；施工性能优秀，干密度对含水量敏感性显著降低，抗离析性能明显增强，试验路段外观平整、未见离析；经济性能良好，公里造价节约 5.7 万元。

4. 项目的技术创新点

(1) 分析了水泥类基层收缩开裂的机理，建立路面基层收缩开裂的静态力学模型，并基于基层开裂模型提出了五种抗裂性能改善途径：补偿收缩、结构改善、水化产物组成改善、水化产物数量与增长速度调控、匀质性提高；并派生出三种综合防裂技术：路面基层稳定专用水泥、高抗裂水泥粉煤灰路面基层材料和水泥稳定类基层抗裂施工工艺。

(2) 研制了具有缓凝微膨胀特性的熟料-粉煤灰-石膏-固化素体系的路面基层稳定专用水泥，探讨了材料组成对该类水泥及其稳定粒料相关性能的影响规律，提出了具有凝微膨胀特性的基层专用水泥的配方组成原则。

(3) 通过体积分析法设计了高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石基层材料，建立了结合料填充系数、集料级配与材料力学、收缩与抗裂的关系。据此，提出了基于体积分析的水泥粉煤灰稳定碎石的配合比设计方法，并确定了主要设计参数。

(4) 通过水泥计量在线标定系统的研制、各种计量设备的标定与改进、搅拌器相关参数的合理设定、施工过程中各项防离析装置的设计与加装、过程中混合料均匀性检测手段的改善，有效改善混合料的均匀性，进而减少施工过程中的变异性，提高水泥基材料的抗裂性能。

(5) 编制了包括基于补偿收缩的缓凝微膨胀型路面基层专用水泥的研制、高抗裂水泥粉煤灰稳定碎石基层的设计，以及基于设备与施工工艺改进的各项相关技术的《水泥类基层综合防裂技术施工指南》，为水泥类基层施工提供了技术支撑。研究成果成功应用于内蒙古赤通高速公路基层建设中，取得了显著的社会经济效益，并能有效缓解当地的粉煤灰污染，社会效益显著。本项目形成的水泥稳定类基层综合防裂技术成果在内蒙古地区的应用将具有很好的典型性和示范性，在我国的高等级公路建设中具有广阔的推广应用前景。