

沥青混合料嵌锁状态测定法
马歇尔击实法

(征求意见稿)

编制说明

标准起草组

二〇二五年二月

目 录

一、任务来源，起草单位，协作单位，主要起草人	1
二、制定标准的必要性和意义	3
三、主要工作过程	5
四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系	8
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述	8
六、重大意见分歧的处理依据和结果	10
七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况	10
八、贯彻标准的措施建议	11
九、其他应说明的事项	11

一、任务来源，起草单位，协作单位，主要起草人

（一）任务来源

沥青混合料压实贯穿室内配合比设计阶段、现场摊铺压实阶段以及路面开放交通运营阶段。在室内和现场不同压实设备的揉搓、冲击或振动作用下，集料颗粒嵌挤在一起形成集料骨架，并逐步达到稳定状态，从而满足不同阶段的材料强度要求。即压实是一个外部击实功与混合料内部抗力（如集料咬合力，摩擦力和沥青胶体粘结力）达到平衡的过程。沥青混合料配合比设计的目的是确定各原材料合理比例，从而使混合料的各项路用性能达到设计需要。压实方式和压实标准对配合比设计结果具有显著影响。目前，美国广泛采用的 Superpave 设计方法定义了设计压实次数、初始压实次数与最大压实次数。测定不同压实次数下试件空隙率，通过控制压实次数来达到控制整个压实过程的目的。国内常用的马歇尔设计方法仅规定了试件成型的压实次数（即总的压实功，如双面 75 或 50 次）。然而，这一仅基于压实次数的设计规定容易造成混合料的过度压实（过压）或者压实不足（欠压）。在规定压实功下，易于压实的混合料容易过压，这会对粗骨料造成损伤；根据调研，在不合理的空隙率范围内，每增加 1% 的空隙率将会导致路面寿命降低约 10%。在规定压实功下，不易压实的混合料容易欠压，使混合料无法达到密实状态。“过压”或者“欠压”都会导致沥青混合料的路用性能不佳。过低的压实功将使沥青混合料密度降低、空隙率增大、强度降低，从而导致沥青路面更加容易遭受水损害以及其他病害的影响。然而，现场路面摊铺压实的目的是使沥青混合料达到合理的受力结构，从而发挥最大的路用性能。因此，有必要对压实过程进行量化分析。

本评价方法在充分调研国内外既有压实方法的基础上，结合对沥青混合料压实过程的结构演化、沥青混合料结构稳定性、成型与测试方法、滤波与评价方法等方面分析，提出标准、详实、可行的技术要求，对现行规范形成有效支撑，优化沥青混合料配合比设计及现场摊铺压实质量控制，保障路面使用寿命的延长。

（二）编制工作方案概述

为顺利推进本标准的编制，对本项目工作做出合理的时间安排，以及对项目人员进行适当的调度安排，特制定本工作方案。

（1）编制单位和编制人

本标准由牵头上海公路桥梁（集团）有限公司，参编单位为中交（广州）建设有限公司、上海城建道路工程有限公司、上海浦东路桥（集团）有限公司、上海诺徕科技发展有限公司、同济大学、上海城投公路投资(集团)有限公司、广州市北二环交通科技有限公司、四川省交通建设集团有限责任公司、上海市市政工程

设计研究总院（集团）有限公司、北京交通大学。

上海公路桥梁（集团）有限公司为国家一级施工企业，拥有市政公用工程施工、公路工程施工、机电安装工程施工总承包一级、房屋建筑工程施工总承包一级、水利水电工程总承包二级；机场场道工程、公路路面工程、公路路基工程专业承包一级以及城市轨道交通工程专业承包资质、地基与基础工程专业承包二级、桥梁工程专业承包二级和境外工程等施工资质。主持或参与了各类标准的制修订，近年来主编或参与制修订的相关标准规范包括《旧沥青及新旧混合沥青的性能登记预测技术规范》、《公路水泥路面加铺高粘弹沥青超薄罩面技术规程》、DG/TJ 08-2395-2022《固化水泥稳定类材料道路应用技术标准》、《桥面防水工程技术标准》、《沥青气体排放检测与评价方法》、《净味沥青混合料施工工法》、《液态土台背回填施工工法》、《城市智慧道路设计标准》、《公路水泥路面加铺高粘弹沥青超薄罩面技术规程》、《抗凝冰沥青混合料技术规程》、《灌浆复合抗车辙路面应用技术指南》、《公路服务区彩色透水水泥混凝土路面技术指南》、DB62/T 4690-2023《超高性能混凝土应用规范》、DG/TJ08-2083-2011《温拌沥青混合料路面技术规程》等，具备完成标准编制的人员基础和技术力量。标准参编单位均为行业能长期从事公路养护技术管理、施工与研究单位。

主编人员：程志强，上海绿色路面材料工程技术研究中心副主任（主持工作），同济大学工学博士，高级工程师，注册土木工程师（道路工程）。近五年，主持沥青路面材料及智能压实方向课题或子课题 5 项，发表相关论文 28 篇，其中 SCI 论文 15 篇，EI 论文 4 篇；申请授权专利 20 余项，其中发明专利 8 项；参编中国交通运输协会团体标准《旧沥青及新旧混合沥青的性能等级预测技术规范》（排名 3）和住建部行业标准《复配岩改性沥青混凝土添加剂》（建司局函标（2022）159 号），申报中国交通运输协会团标《沥青混合料嵌锁状态测定法 马歇尔击实法》（主编，排名 1）。获 2022 年上海市科技进步奖二等奖、2023 年中国交通运输协会科技进步奖二等奖 2 项、上海市交通工程学会科学技术奖特等奖 1 项，一等奖 2 项，二等奖 1 项，三等奖 1 项。

（2）编制管理机制

标准编写组将严格贯彻执行主编单位《上海公路桥梁（集团）有限公司质量管理办法》，实行项目组自审、部门审核和集团审查的三级质量审查管理体系。初审一般由项目组长负责；部门审核在部门主管领导的安排下由主任工程师具体负责；集团审查在分管领导及标准质量处组织实施。

项目技术文件质量的技术校审执行“两校三审”的基本程序，具体步骤为：项目文件起草人自校、项目组成员互校、项目负责人初审、部门组织审核、标准质量处组织审查，具体内容如下：

- 1.自校由项目组成员对本人起草的技术文件进行校核。

2.互校一般由项目组内专业技术人员担任，全面校核技术文件，保证语言通顺，格式规范、资料使用合理和技术文件的正确性。

3.初审一般由项目负责人担任，重点对验收文件完整性、严密性进行细节审核。项目负责人起草的文件应由同等资历的技术人员进行初审。完成初审，填写“技术文件审查表”后报中心部门负责人。

4.部门审核由部门负责人安排主任工程师或指定相关专家承担，提交书面审核意见。根据审核意见，编写组进行相应的修改，填写“技术文件审查意见采纳情况汇总表”。中心部门负责人在“技术文件审查意见采纳情况汇总表”上签署意见后报送集团标准质量处。

5.技术质量审查：由公司标准质量处安排相关专家对以公司名义报出的项目的技术文件的结论做把关性审查，对部门审核的正确性作出判断，对结论的正确性负责，并提交书面审核意见。标准质量处将技术审核意见反馈给规程编制组，编写组进行修改和完善，并填写“技术文件审查意见采纳情况汇总表”。

6.标准主编在完成以上工作后，将技术文件、审查表和意见采纳汇总表报标准质量处，并交公司领导签署意见后按规定报出。同时标准质量处应将技术文件、审查表和意见采纳汇总表存档。

（3）编制时间

本标准的编制周期为 2023 年 12 月至 2025 年 8 月。

（4）计划控制法实施推进

拟采用文献调研法、实地检测法、现场验证比对法、数据分析法等方法进行技术规程的主要内容编制。

二、制定标准的必要性和意义

（一）项目的意义和必要性

围绕国家“碳达峰”与“碳中和”绿色发展战略目标，低碳环保沥青新材料以及材料再利用技术不断涌现。然而，国内沥青混合料马歇尔设计方法仍基于经验与传统材料对象，滞后于新材料新技术发展。前期有研究表明，传统的马歇尔击实成型设计击实次数可能引起试件本身的过压或欠压问题，从而影响沥青混合料压实质量。室内马歇尔成型试验中，沥青混合料易出现过压现象，从而使集料破碎。这不仅影响设计级配，而且也增加了无效破坏性的击实次数。本研究基于加速度计传感器，记录分析击实过程“激励-响应”特征，提出用“嵌锁状态”来确定击实次数，并改进过程测试装置。针对不同沥青混合料，提出更为合理的击实成型方法与标准。该标准方法在室内试验的推广应用，油石比不变前提下，

可减少配合比设计过程的工作量以及资源消耗，达到高效低碳减排目标；设计击实次数不变前提下，原则上可降低油石比达到嵌锁状态，达到节约原材料的减排目标。

为了将“嵌锁点”这一评价沥青混合料压实状态的概念融入我国普遍采用的马歇尔设计方法中，需要采用适用于锤击成型特点的“嵌锁点”判别方法——基于“激励-响应”特性的沥青混合料压实过程“嵌锁点”表征方法。沥青混合料在压实过程中的“激励”主要是指在压实过程中外界压实功的动态输入，与之对应的“响应”为压实体系的动力学反馈，研究中采用“加速度”表征。采用“激励-响应”特性能够较好地反应压实过程中沥青混合料的结构特性的主要原因：1) 锤击成型的压实功输入模式为冲击式输入，外界条件恒定的情况下，落锤的动态响应仅与被压实沥青混合料的劲度模量有关，采用基于“激励-响应”特性的变量可以较好地表征压实过程中沥青混合料劲度特性的变化情况；2) 通过分析沥青混合料劲度模量预估公式中的参数可知，除了温度与加载频率，模量的主要影响因素为沥青混合料体积特性参数、沥青性能、级配等。

改善后的沥青混合料马歇尔击实成型嵌锁点评价方法，将以嵌锁点为主要控制指标，获取具有更优空隙率的沥青混合料试件，有效降低可能的过压造成对骨架的破坏，优化沥青混合料配比设计，提升沥青路面使用寿命，节约沥青路面养护资金，提升施工压实作业质量，提高经济社会发展效益，并发挥最大的路用性能。

因此，评价方法的编制具有时效性、必要性、重要工程意义以及实用价值。

（二）标准编制意义

围绕国家“碳达峰”与“碳中和”绿色发展战略目标，低碳环保沥青新材料以及材料再利用技术不断涌现。然而，国内沥青混合料马歇尔设计方法仍基于经验与传统材料对象，滞后于新材料新技术发展。前期有研究表明，传统的马歇尔击实成型设计击实次数可能引起试件本身的过压或欠压问题，从而影响沥青混合料压实质量。室内马歇尔成型试验中，沥青混合料易出现过压现象，从而使集料破碎。这不仅影响设计级配，而且也增加了无效破坏性的击实次数。本研究基于加速度计传感器，记录分析击实过程“激励-响应”特征，提出用“嵌锁状态”来确定击实次数，并改进过程测试装置。针对不同沥青混合料，提出更为合理的击实成型方法与标准。该标准方法在室内试验的推广应用，油石比不变前提下，可减少配合比设计过程的工作量以及资源消耗，达到高效低碳减排目标；设计击实次数不变前提下，原则上可降低油石比达到嵌锁状态，达到节约原材料的减排目标。

为了将“嵌锁点”这一评价沥青混合料压实状态的概念融入我国普遍采用的马歇尔设计方法中，需要采用适用于锤击成型特点的“嵌锁点”判别方法——基于

“激励-响应”特性的沥青混合料压实过程“嵌锁点”表征方法。沥青混合料在压实过程中的“激励”主要是指在压实过程中外界压实功的动态输入，与之对应的“响应”为压实体系的动力学反馈，研究中采用“加速度”表征。采用“激励-响应”特性能够较好地反应压实过程中沥青混合料的结构特性的主要原因：1) 锤击成型的压实功输入模式为冲击式输入，外界条件恒定的情况下，落锤的动态响应仅与被压实沥青混合料的劲度模量有关，采用基于“激励-响应”特性的变量可以较好地表征压实过程中沥青混合料劲度特性的变化情况；2) 通过分析沥青混合料劲度模量预估公式中的参数可知，除了温度与加载频率，模量的主要影响因素为沥青混合料体积特性参数、沥青性能、级配等。

改善后的沥青混合料马歇尔击实成型嵌锁点评价方法，将以嵌锁点为主要控制指标，获取具有更优空隙率的沥青混合料试件，有效降低可能的过压造成对骨架的破坏，优化沥青混合料配比设计，提升沥青路面使用寿命，节约沥青路面养护资金，提升施工压实作业质量，提高经济社会发展效益，并发挥最大的路用性能。

因此，评价方法的编制具有时效性、必要性、重要工程意义以及实用价值。

三、主要工作过程

(一) 标准编制过程

(1) 起草工作阶段

根据要求，中国交通运输协会交通工程设施分会于2023年上半年开始着手成立标准编制工作起草小组，组织标准编制的相关工作。作为主要起草单位，上海公路桥梁（集团）有限公司积极收集有关本标准的各类信息，并组织相关的调研和试验验证工作，联络合作单位，最终明确了标准起草工作组的成员单位，成立了标准起草工作组。

随后，标准起草工作组开始了标准编制立项申请、计划大纲编写，明确任务分工及各阶段进度时间，工作组成员认真学习了GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》，结合标准制定工作程序的各个环节，进行了探讨和研究。

标准起草工作组经过技术调研、咨询，收集、理解有关资料，并结合当前沥青混合料压实评价方法，再充分总结国内外评价体系研究与应用基础上，于2023年6月编写完成了团体标准的立项申请材料。7月31日，协会组织行业专家在北京召开立项审查会议，对标准立项报告进行审核，通过了标准项目的编制申请。

立项申请获批后，起草小组加快标准编制工作节奏，着手编制标准工作大纲

和编制意见草稿的相关工作。编制工作大纲草稿通过邮件等方式提交给参编单位和协会专家分别审核，综合了多方意见，确定了标准起草编制的总体计划内容，形成了正式的标准工作大纲文件。

标准起草工作组按照立项审查会议内容，结合编制工作大纲进行认真分析、理解和总结，迅速开展标准的征求意见稿的编制以及试验项目的实施工作，于2024年2月底完成了国内外调研和试验验证工作，4月下旬编写完成了团体标准《沥青混合料马歇尔击实成型嵌锁状态评价方法》的工作大纲征求意见初稿。

（2）征求意见阶段

2025年2月~2025年3月，将标准编制说明和征求意见稿通过行业协会组织专家征求意见，同时将标准编制说明和征求意见稿向各起草单位发出征求意见。

预计2025年4月底，将各意见汇总修改后形成完整的标准编制说明和征求意见稿。

（二）标准编制路线

本评价方法面向沥青混合料实验室压实以及现场压实施工均可有效使用，从应用范围、规范性引用文件、术语和定义、仪器与材料技术要求、成型与试验方法、滤波与评价方法等环节编写一部实用性强、可靠性高、先进性好的标准，充分吸收借鉴国内外现有的科研成果和工程实践经验，并适用我国交通条件和气候环境，使得技术人员依照本规程，能够对沥青路面施工以及室内沥青混合料成型试验进行有效指导，确保工程质量和耐久性，确保试验数据的可靠性。

具体通过以下工作思路开展标准编制工作：**成果总结**：全面总结现有研究成果和科技服务成果，梳理标准构架、体系，明确关键内容，分析本规程与现行标准的关联性、先进性；**技术调研**：对关键概念、关键材料、关键指标进行综合调研，包括但不限于：资料搜集、现场调研、文献调研、国内外同行技术会议交流等，为标准编制提供必要的技术支撑；**试验验证**：对专用的试验检测方法、材料等进行试验验证，明确是否满足标准化作业的使用需求，并提升相关的方法和技术要求；**标准编制**：拟通过大纲编制阶段、标准编制阶段、标准征求意见阶段、送审稿审核阶段、报批稿审核阶段五个阶段开展标准的编制工作，广泛征求专家意见，汇总不同机构、部门的使用需求，完善标准内容。

（1）成果总结

本评价方法依托技术为主编单位及国内合作单位历年持续研究与应用

工作的集成成果，成果主要来源于中华人民共和国科学技术部研发项目：《基于AI赋能的“感知-定位-引导”一体化智能道路（2023YFE0202400）》、上海市科委优秀技术带头人项目：《基于探地雷达的沥青路面智能压实关键技术研究（23XD1431400）》、上海市科委“科技创新行动计划”项目：《基于多元数字技

术的路桥智能快速建造及运维研究与应用（20dz1202100）》、上海市科委启明星计划项目：《基于无人驾驶施工的沥青路面智能压实控制指标研究（23QB1401500）》、山西省交通厅科技项目：《沥青路面智能化压实应用技术研究》、田纳西州交通运输部、联邦公路管理局的研究发展和技术项目：《田纳西州沥青路面工中智能压实评估（RES2013-42）》、田纳西州交通运输部、联邦公路管理局的研究发展和技术项目：《基于旋转压实仪的沥青混合料设计及性能研究。（RES2016-02）》、上海公路桥梁（集团）有限公司企业研发项目：《路面智能化施工技术（2016-KY-14）》、上海公路桥梁（集团）有限公司企业研发项目：《沥青混合料压实过程“嵌锁状态”的评价方法研究（2019-KY-18）》等。

该成果已在上海虹桥机场飞行区（绕滑道、联络道）沥青道面建设项目、北横通道新建一期（西段）、二期工程、S7公路（月罗公路-宝钱公路）新建工程主线路面及附属工程、虹梅南路-金海路通道路面工程、G15高速嘉浏段拓宽改建工程设计、勘察、施工一体化工程、山西省新国道太克线路面新建工程、广州市北二环高速公路路面养护专项工程、Tennessee CNM194 Crockett Co. resurfacing project 等项目推广应用，经济、社会与环境效益显著。

（2）技术调研

为了顺利完成本评价方法的编制任务，客观全面地了解国内外智能压实的研究进展，拟从以下几个方面开展调研：

1. 沥青混合料压实方式调研

拟调研国内外现场压实与室内实验室压实的主要方法、技术指标、主要原理、主要机械设备等关键性参数展开调研。检索近十年来国内外基于压实方式的相关文献，充分归纳与总结关键参数，了解最新研究和工程技术动态，在分析或验证的基础上，在本评价方法的编制过程中予以借鉴和吸收。

调研方法：资料搜集、现场调研、文献调研、国内外同行技术会议交流等。

2. 压实特性参数调研

压实参数对该评价方法具有关键作用。拟对不同压实参数进行分析总结，选择适合的压实指标与参数对该评价方法进行全面深入的讨论。

调研方法：文献调研、国内外同行技术会议交流等。

（3）试验验证

组织实施相关重要的试验项目进行验证，具体详见 5.2。

（4）标准编制

逐步进行大纲编制、标准编制、标准征求意见稿编制、标准征求意见、送审稿审核和报批稿审核。

四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

（一）编制原则

（1）先进性

本规程所涉及到检测技术和检测设备均为国际或国内领先，并满足最新的相关标准。另外，本规程经过严密审查和广泛调查研究，对相关设备进行了进步验证试验，并认真总结相关经验，参考国内外有关技术标准，结合我国实际情况，针对性地进行编写，以此引领整个检测行业的规范发展。

（2）准确性

本规程制定过程中，对规程中涉及到的参数指标，在既有标准基础上，进行了科学验证试验，追求务必准确可靠。

（3）实用性

本规程针对检测对象的特殊性，制定了相应的检测方法，对数据采集和处理、报告要求、结果评判和处理等都给出了明文规定或说明，可操作性强，具有极强的实用性。

（4）规范性

本规程按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的起草规定编写。

（二）编制依据

依据编制原则，本规程制定过程中参照的主要标准及依据见表1。

表1 参考标准及依据

序号	标准编号	标准名称
1	JTG E20-2011	公路工程沥青及沥青混合料试验规程
2	DB63/T 2216-2023	振动压实法密级配沥青混合料施工技术规范
3	DB44/T 2518-2024	旋转压实剪切试验法沥青混合料设计与施工技术规范
4	DB41/T 1538-2018	垂直振动压实试验法沥青混合料设计与施工技术规范
5	DB42/T 1950-2023	路基填筑智能压实施工规范

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

（一）主要编制内容

本项目为相关标准制定项目，因此主要以文字编辑规范性陈述条款研究、相关设备测试验证研究为主，主要研究内容有：

(1) 以文献综合研究法调研相关文献，对本项目需要编辑的规范性陈述条款进行描述；

(2) 对测试和检测用器具展开相关参数、性能的调研；

(3) 采用比对法对现场检测工作流程做最低要求规定；

(4) 采用数据分析法对检测数据进行综合性研究探讨；

(5) 其他研究内容。

(二) 试验验证

以某面层沥青混合料为例，集料为普通石灰岩，沥青选用 PG 64-22，沥青混合料在 $154.4 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行拌合，并在 $143.3 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行压实以消除温度影响。矿料级配见表 2。沥青混合料设计要求见表 3。

表 2 矿料级配范围

筛孔孔径 (mm)	16.0	12.7	9.5	3.75	1.87	0.5	0.3	0.15	0.075
质量通过百分率 (%)	100	97	86	65	46	23	14	7	4

表 3 沥青混合料设计要求

混合料类型	最佳沥青含量 (%)	空隙率 (%)	矿料间隙率 (%)	有效沥青饱和度 (%)
D	5.5	4.0	15.6	74

试验采用大型马歇尔击实仪，试件模具直径为 152.4mm，先击实单面 75 次，而后翻面，再根据击实锤动力响应判别击实次数，具体过程如下：

(1) 由击实锤加速度传感器采集每次击实加速度时程曲线，例如第一面第 71 次击实时，其加速度峰值为 567G，持续时间约为 0.003 秒，如图 1 中黑色标记点所示。为了消除信号奇异值，对信号进行 5 点均值平滑处理，如图 1 中红色曲线所示。

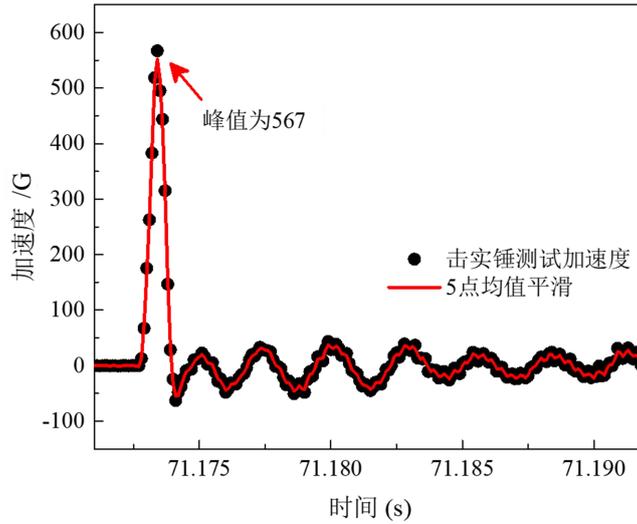


图 1 混合料第一面第 71 次击实加速度时程曲线

(2) 根据每次击实时提取加速度峰值，通过 3 点均值方法拟合峰值密实曲线，可由曲线趋势进入平稳期，如图 2 所示。示。

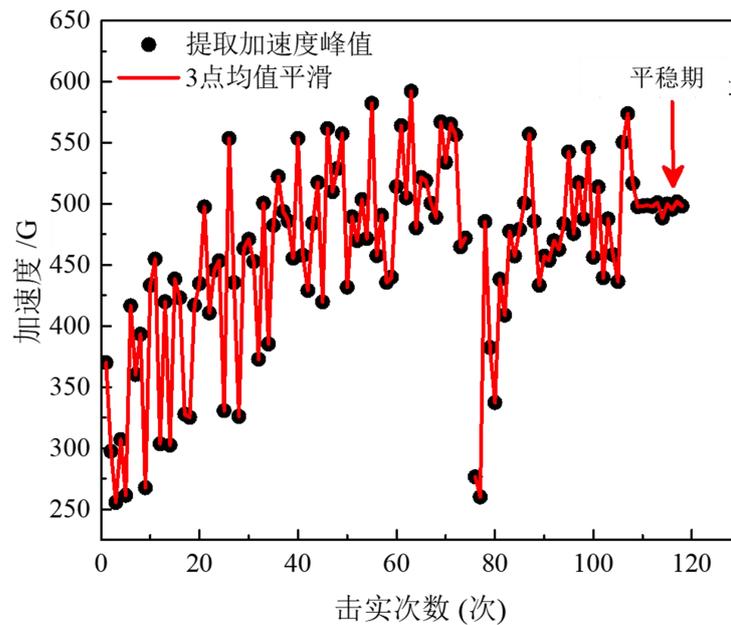


图 2 混合料动力响应峰值密实曲线

由图 2 看出由第 109 次开始加速度峰值密实曲线即开始进入平台期，当第 113 次至第 118 次击实所计算连续 5 次击实加速度的差值均小于 25G，因此击实仪判断停止次数为第 118 次，即完成击实。

六、重大意见分歧的处理依据和结果

无。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本标准“嵌锁点”评价方法没有涉及到相关国际与国内标准。
本标准的总体技术水平属于国际领先水平。

八、贯彻标准的措施建议

无。

九、其他应说明的事项

（一）社会经济效益

压实对沥青路面施工质量起关键作用，直接影响到沥青路面耐久性及其使用寿命。传统施工技术存在管控粗放、检测滞后和智能评价缺失等问题。基于沥青混合料马歇尔击实成型嵌锁状态评价方法，可以改变目前主要依赖既有经验的管理模式，实时监控压实质量，减少施工机械能耗，提高生产效率。此标准有助于优化沥青混合料配合比设计，提高路面路用性能与使用寿命，节约施工和维修成本。在社会性、经济性方面具有十分重要的理论意义和极其广阔的应用前景。

（二）经费安排

本标准由上海市公路桥梁（集团）有限公司主编，标准编制资金为自筹。

标准起草工作组

2025年02月