

《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》 山东省地方标准编制说明 报批稿

一、工作简况

（一）任务来源

本文件的制定任务来源于山东省市场监督管理局《关于印发 2021 年度“山东标准”建设项目计划的通知》（鲁市监标函【2021】261 号），《高速公路拓宽地基强夯加固技术规范》被列入山东省地方标准制修订计划，计划编号附件 2-2021-T-057。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施，由山东省交通运输标准化技术委员会（TC41）归口。

（二）起草单位、主要起草人及任务分工

1. 本文件主要起草单位

山东高速集团有限公司、山东大学、山东高速基础设施建设有限公司、山东省路桥集团有限公司、山东省交通规划设计院、山东建筑大学。

2. 本文件主要起草人

陈成勇 姚占勇 齐辉 陈鲁川 蒋红光 姚凯 毕玉峰
刘晓威 丁喜茂 胡瑶瑶 吴士乾 林彦军 张吉哲 梁明
林琪琪 王勇 周冲 盛兆燕 杨晨君 韩洪涛 鞠成巍
刘浪 李霖 荣玉 张钰赫。

3. 任务分工

山东高速集团有限公司主要负责标准立项需求调研、编制进度把关、编制单位和任务协调、相关方意见征集等工作。山东大学负责编制方案制定，标准文本和编制说明的起草、修改完善、意见征求与归纳处理等工作。其中：陈成勇担任标准起草组组长，全面组织协调标准的编制工作；姚占勇担任标准起草技术负责人，组织制定标准编写方案，负责关键技术条款编写，对标准技术内容进行总体把关；齐辉、陈鲁川、毕玉峰、刘晓威、丁喜茂、胡瑶瑶、吴士乾、林彦军、盛兆燕、韩洪涛等，负责编制单位组织协调、技术资料收集、工程验证，参与施工以及施工质量检验章节的编写工作；蒋红光、姚凯、张吉哲、梁明、林琪琪、王勇、周冲、杨晨君、鞠成巍、刘浪、李霖、荣玉、张钰赫等，参与标准调研、讨论、编写等工作，协助整理标准文档技术归档，参与办理征求意见、研讨会、审查会等工作。

（三）起草过程

1. 技术研究

2014年8月至2024年1月，编制组依托济东高速公路新建工程，以及滨莱高速公路、东青高速公路扩容改建工程，系统开展了黄河冲（淤）积平原地基强夯加固、振动控制理论与工程技术研究，提出了高速公路拼宽地基强夯加固与隔振设计理论、方法与方案，研发了强夯加固、振动控制成套技术和施工方案，编制了山东省地方标准《强夯地基处理技

术规程》DB37/T 5136，为本文件的编制提供了理论和工程技术基础。

2. 前期准备

2021 年 10 月，成立由山东高速集团有限公司牵头的标准起草工作组，起草组讨论了工作进度安排、任务分工及标准编写的初步思路，正式启动标准制定工作，提出了标准草稿提纲。起草组结合现阶段主管部门的发文、要求以及试点实践等进行了深入分析和研究，完成已有标准、文献资料的收集、分析和总结。

基于国内资料调研和相关研究报告分析，制定了标准编写大纲，形成本文件编写方案。

3. 现状调研与实体工程应用经验总结

2021 年 11 月至 2021 年 12 月，对山东省沾临高速公路、济高高速公路、济南绕城西线公路等在建高速公路地基强夯加固工程进行了广泛调研；对滨莱高速公路拼宽地基强夯加固工程振动控制效果、拼宽地基强夯加固沉降控制效果进行了深入分析；对省内乃至全国高速公路拼宽改建工程规模、地基加固工程技术现状进行了全面分析，掌握了拼宽地基强夯加固工程需求、应用场景、关键技术问题等，为本文件草案的撰写奠定了必要基础。

4. 标准起草

2022 年 2 月起，起草组基于“粉土路基强夯与振动控制技术研究”、“基于地基强夯加固的高速公路拼宽路基差异沉

降控制关键技术研究”研究成果，结合国内高速公路地基强夯加固、高速公路拼宽地基加固相关国家、行业、地方标准及其工程应用调研分析，着手编写《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》标准初稿。起草组经过多次内部讨论、相关方调研及专家意见征集等形式，于 2023 年 5 月完成标准草稿的编写工作。山东省交通运输标准化技术委员会在 2023 年 8 月 11 日组织召开了地方标准《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》初稿审查会，会上审查委员会提出了将标准名称调整为《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》的建议，合并整理了专家提出的意见及建议（详见山东省地方标准《高速公路拓宽地基强夯加固技术规范》（初稿）专家审查会议纪要及意见处理表），编制组根据专家的意见进行完善和修改后，形成《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》（征求意见稿）。

5. 工程验证

对标准中涉及到的关键性技术指标进行了重复的测试验证，验证了隔振设计方案的可靠性，确定了强夯夯击能指标、振动控制指标等。

依托《柔性隔振屏障成套施工装备研发及其应用》课题，该课题研究为山东省交通运输厅科技计划项目（2020 B67）。2023 年 12 月起草组依托长深高速公路东营至青州高速公路拼宽改建工程，验证了标准内强夯夯击能指标、振动控制指标等相关技术指标及强夯加固隔振设计方案的可靠性，对标

准的相应内容进行了进一步完善。根本上解决振动敏感区强夯振动控制的技术瓶颈，有效推动我国高速公路拼宽工程的地基加固技术进步，大幅降低工程成本，保障既有高速公路结构、工程以及交通安全，具有重要的经济和社会意义。

6. 意见征求

2024年6月27日，由山东省交通运输标准化技术委员会发布了《关于征求〈高速公路拓宽地基强夯加固技术规程〉（征求意见稿）地方标准意见的通知》，在行业内进行了为期一个月的意见征求。发送“地方标准草案征求意见稿”34家，截至2024年7月31日，收到“地方标准草案征求意见稿”回函的单位有28家，其中有28家单位共反馈意见60条，相似意见3条，0家单位无意见。起草组对意见进行了修改处理，共采纳意见42条，不采纳意见15条。部分专家提出了将标准名称调整为《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》建议，具体修改情况详见山东省地方标准《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》征求意见汇总处理表。

7. 标准报批

山东省交通运输标准化技术委员会在2024年11月19日组织召开了地方标准《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》专家审查会，会上审查委员会一致同意将标准名称调整为《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》，合并整理了专家提出的意见及建议（详见山东省地方标准《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》专家审查会议纪要及意见处理表），编

制组根据专家的意见进行完善和修改后，形成《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》（报批稿）。

二、标准制定的目的和意义

随着我国高速公路交通量的持续增长，高速公路的扩容改建成为我国今后相当长一段时期的重要工程任务。高速公路拼宽改建可以在提升道路通行能力的同时减少土地占用，并有利于资源节约、环境保护，是国内高速公路的主要扩容改建方式，而新、老路基产生差异沉降是高速公路拼宽改建的关键工程问题之一，其中拼宽地基加固是地基软弱、路基高度较大条件下控制新、老路基差异沉降的关键技术措施。目前高速公路拼宽地基加固最常用的工程技术主要为搅拌桩、管桩等复合地基技术，相应技术成本高、工期较长、工艺复杂，导致高速公路拼宽改建的工程费用大大增加。

强夯法作为一种快速、高效、经济、技术成熟的地基加固技术，在新建道路地基以及建筑地基加固工程中广泛应用。由于强夯属于动力加固技术，由此引发的环境振动是制约该技术在振动敏感区域工程应用的关键技术瓶颈。国内外针对强夯振动及其对既有建筑结构的影响问题开展了系统研究，现行《建筑工程容许振动标准》GB 50868、《工程隔振设计标准》GB 50463、《环境振动监测技术规范》HJ 918 等对强夯加固地基对既有建筑结构的振动影响控制标准、隔振设计、检测技术等均做出了具体规定。但国内、外尚缺乏对于既有高速公路对拼宽地基强夯振动的响应研究，拼宽地基强夯对

既有高速公路路基的振动影响、损伤机制等尚不清楚，导致基于既有高速公路振动响应的振动控制标准缺失，振动影响难以评价。基于强夯振动对既有高速公路路基振动、地基侧挤的可能影响，《公路路基设计规范》JTG D30-2015 中 6.4.3 款规定，软弱地基条件下的高速公路拼宽地基，可采用复合地基或轻质路堤等处理措施，**不宜**采用对既有路基产生严重影响的强夯法；《高速公路改扩建设计细则》JTG/T L11-2014 也在 7.6.4 款提出，拼宽软弱地基处理方案选用时，应考虑拼宽方案在拼宽地基处理施工时的挤土、振动对既有路堤的影响。在相关标准的约束下，基于高速公路拼宽地基强夯加固及其振动控制的设计、施工方案以及质量检测与控制标准成为空白。

本文件基于强夯地基加固、强夯隔振技术相关研究、工程应用经验总结，以及国内外研究与工程状况分析，提出高速公路拼宽地基强夯加固、振动控制适用范围，以及设计、施工、质量检测与检验标准，为高速公路拼宽地基工程中强夯加固技术的工程应用和标准化提供依据。

三、标准编制原则、主要内容和依据

（一）标准的编制原则

本文件的编制充分考虑我国、特别是山东省高速公路拼宽改建工程特点、技术水平，充分体现技术进步和我国高速公路建设工程趋势，有效推动行业技术水平提高。本文件依

据 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写规则》的要求进行编制。

本文件规定了高速公路拼宽地基强夯加固的术语和定义、设计与施工，以及施工监测、检测和质量检验。主要内容是对高速公路拼宽地基强夯加固、振动控制的设计、施工、质量检测与检验提出要求。标准的编制主要遵循以下原则。

（1）协调性原则。充分做好相关标准、资料的调研和分析，做好与相关标准、规范的协调和衔接。其中高速公路拼宽路基差异沉降的控制标准按照 JTG D30《公路路基设计规范》中路拱横坡度工后增大值指标进行控制；强夯地基加固设计、施工、质量检测与检验等与 GB 50007《建筑地基基础设计规范》、JTG/T 3610《公路路基施工技术规范》、JGJ 79《建筑地基处理技术规范》、DB 37/T 5136《强夯地基处理技术规程》等相协调；振动控制的设计、施工等与 GB 50463《工程隔振设计标准》、GB 50868《建筑工程容许振动标准》等相协调。

（2）可操作性原则。标准条文明晰、规范，设计方法简便，技术指标明确、便于工程中获取，工程检测可操作性强。

（3）成熟性原则。标准经充分论证和试验验证，具体内容依据充分，理论正确，验证可信，技术成熟、可靠。

（4）指标合理性原则。标准中的技术指标具有明确的适用性、实用性和现实性。

(5) 代表性和先进性原则。标准针对我省高速公路路基高度大、黄泛区平原软弱地基加固工程规模巨大、扩容改建主要采用拼宽改建方式，以及拼宽地基加固工程成本高、工期长的突出特点，通过深入研究、广泛调研和工程验证，提出相应的高速公路拼宽地基强夯加固振动控制标准，以及地基强夯加固与振动控制设计与施工方法，有效控制既有路基的振动损伤，确保既有路基质量，突破我国高速公路拼宽主要采用复合地基加固的技术局限，大大降低高速公路拼宽地基加固费用。

(二) 标准主要内容和依据

本文件的名称为《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》。标准的内容包括高速公路拼宽地基强夯加固的范围、规范性应用文件、术语和定义、设计、施工、施工质量检测 and 检验。

1. 范围

本章说明标准的适用工程类别和主要应用范围。填方路基高、地基相对软弱、拼宽地基加固工程规模大是我省平原区高速公路工程的主要工程特点之一，因此本文件主要适用于高速公路拼宽改建中拼宽地基的强夯加固工程，并规定了拼宽改建地基强夯加固与隔振工程的设计、施工和质量检测与检验。

2. 规范性应用文件

本章主要说明标准编制中引用和参照的现有国家、行业、地方标准名称。

3. 术语和定义

明确的术语和定义，是标准使用者准确理解和实施标准的前提条件。标准对高速公路拼宽地基强夯加固与振动控制的主要术语和定义进行了明确界定。

4. 总体要求

4.1 条款规定了高速公路路基拼宽改建工程强夯加固设计与施工的基本原则。高速公路拼宽地基强夯加固涉及的两个关键问题是强夯加固和环境振动控制方案。在高速公路拼宽地基强夯加固时，不仅要根据拼宽路基差异沉降控制要求合理确定强夯加固方案，还要评价强夯的振动影响并根据评价结果采用合理的方案控制环境振动，在保证拼宽地基加固效果、有效控制拼宽路基差异沉降的同时，确保既有高速公路路基和周边结构的安全、稳定与耐久。

4.2、4.9、4.10 条款规定了强夯减振、隔振设计的基本要求。

在相同的夯击能下，夯锤的直径越小，强夯时的环境振动越小，因此，4.2 条款建议，对振动控制要求较高的拼宽地基加固工程，通过采用直径 1m~2m 的柱式夯锤进行孔内深层强夯，在加大地基处理深度的同时减少强夯振动。

建筑物与强夯作业区之间应保持足够的安全距离，以保证结构安全。因高速公路拼宽地基临近既有高速公路，基于强夯对既有高速公路路基振动、地基侧挤的可能影响，JTG D30《公路路基设计规范》、JTG/T L11《高速公路改扩建设计细则》中均提出了“软弱地基条件下的高速公路拼宽地基，不宜采用对既有路基产生严重影响的强夯法”的技术要求。

为分析拼宽地基强夯加固对既有高速公路路基振动、地基侧挤的影响，编制组开展了黄泛区典型地基条件下高速公路拼宽地基强夯加固数值模拟分析，并通过室内、现场试验验证了分析的可靠性。

以高度 4m 的既有路基拼宽工程为例，拼宽地基分别采用 1000kN·m、1500kN·m 夯击能加固，将导致既有路基坡脚 5m~6m 范围内路基产生塑性损伤。可见，高速公路拼宽地基强夯加固如若直接施工，必将导致既有路基损伤，对既有结构耐久性、车辆行驶安全性等方面造成影响。因此，必须采取隔振措施，严格控制拼宽地基强夯加固对既有路基的不利影响，确保既有路基质量稳定。

高速公路拼宽地基强夯加固同时将导致既有地基一定范围内的土体侧挤。以 4m 高度路基、1000kN·m 夯击能、隔振深度 6m 工况为例，数值模拟、现场试验实测值结果如图 1 所示。图 1 表明，隔振后侧挤的有效影响范围在 2.0m 深度范围内；随深度增加，地基侧挤量呈现先增大后减小的趋势；最大位移量发生在距离地基表面 0.6m~0.8m 范围内，模拟值

与实测值分别为 110mm、100mm，0.2m 深度处位移模拟值与实测值分别为 52mm、45mm。在竖向，隔振后第一级台阶内侧地基表面位置处仅抬升 6mm。由此可见，地基的侧挤只是加密了地基内部土体，这有利于新老路基差异沉降控制；尽管地基略有抬升，由于本文件提出了台阶开挖补压的技术要求，在夯点临近部位不存在建筑设施的情况下，隔振后不需要考虑拼宽地基强夯对既有路基侧挤的不利影响。

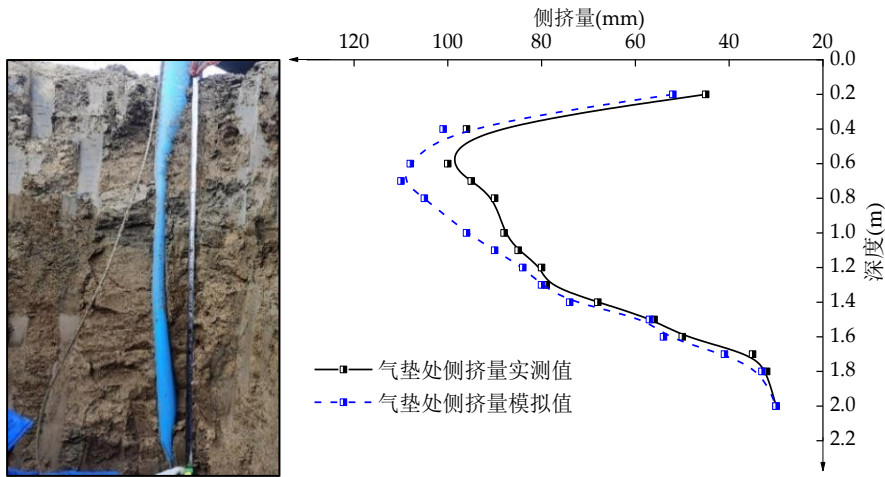


图1 4m 高路基/1000kN·m 夯击能/6m 隔振深度条件下强夯导致的拼宽地基侧向位移图

4.3、4.4 条款规定了高速公路拼宽地基强夯加固适宜的路基高度范围、地下水位及施工降水的要求。

高速公路路基高度越高，拼宽地基强夯加固所需要的夯击能也越大，由此引发的环境振动也越大，将给振动控制带来很大的难度。以典型的黄泛区地基为例，当路基高度达到 7m 时，拼宽地基强夯夯击能达到 2000 kN·m，采用气垫屏障隔振达到既有路基振动控制标准的隔振深度约为 7m，单侧隔振富余长度为 20m。尽管国内强夯的最大能级已经达到 25000~30000kN·m，相应的地基加固深度近 30m，但考虑平

原区高速公路路基平均填土高度一般在 5m 左右、过大的隔振深度工程实施较为困难等因素，本文件规定拼宽地基强夯加固的高速公路路基高度不宜超过 7m，超过 7m 时宜采取浆喷桩等地基加固深度更大地基加固工程措施。

高速公路拼宽地基降水会导致既有高速公路地基一定范围内地下水位降低，引发既有高速公路地基的固结沉降，因此高速公路拼宽地基地下水位过高时不能采取降水措施，因此不应采用强夯加固。当既有路基边坡设置支挡结构时，公路拼宽一般仅拆除路床部分挡墙而保留下部挡墙，由于强夯位置距离挡墙过近，强夯导致的地基侧挤对支挡结构稳定性具有较大影响，因此既有路基边坡设置挡墙时，拼宽地基也不应采用强夯加固。

4.6 条款规定了与桥涵衔接路段拼宽地基强夯加固与振动控制的技术要求。

桥头路基差异沉降控制标准与一般路堤段不同，应根据《高速公路改扩建实施细则》TG/T L11-2014 关于桥头路基差异沉降控制标准单独计算确定拼宽地基夯击能指标。与新建高速公路不同，桥头地基强夯作业时既有桥梁已经存在且临近强夯作业，应根据《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的容许振动值要求合理确定振动安全距离和隔振方案。当既有桥梁准备维修利用且存在较严重病害时，应根据既有桥梁病害情况对容许振动值进行适当折减；强夯作业前拼宽桥涵

构造物已经提前施工作业时，容许振动值应根据混凝土、砂浆强度进行适当折减。

5. 设计

(1) 高速公路拼宽地基强夯夯击能

5.1.4、5.2.1、5.2.2、5.2.5、5.2.6 条款是关于高速公路拼宽地基强夯夯击能等设计的相关规定。强夯夯击能指标对保证地基加固效果、控制新老路基差异沉降具有决定性作用，同时也是引起环境振动的关键要素。

1) 夯击能指标的影响因素

5.1.4、5.2.1 条款规定了高速公路拼宽地基强夯夯击能设计应考虑的因素和控制指标。高速公路拼宽地基强夯夯击能大小取决于高速公路拼宽路基差异沉降控制标准、路基高度、地基条件、施工工期等多种因素。

在山东省，黄泛区面积约占全省面积的 1/3，是最具代表性的软弱地基。因此，本文件以粉质黏土地基典型地基条件提出强夯夯击能指标要求，当地基加固范围内存在较大厚度的黏土层或其它软弱地基条件时，可参照该指标设计并通过现场试验优化相关指标；当既有路基发生较大挖方时，应考虑既有路基卸载影响，通过计算调整夯击能指标。

施工工期按照正常工期考虑，当工期紧张时，应采取适当加大夯击能措施，确保差异沉降满足质量标准。

关于高速公路拼宽路基差异沉降控制标准，JTG D30《公路路基设计规范》与 JTG/T L11《高速公路改扩建设计细则》

规定不同：JTG D30《公路路基设计规范》按照既有路基与拼宽路基的路拱横坡度工后增大值不大于 0.5%控制；JTG/T L11《高速公路改扩建设计细则》考虑到施工期沉降会对既有高速公路路面产生不利影响，提出了按照施工期和工后总的路拱横坡度增大值不大于 0.5%的控制标准，控制得更为严格。现行 JTG D30-2015《公路路基设计规范》为 2015 年发布，JTG/T L11-2014《高速公路改扩建设计细则》为 2014 年发布，且根据十余年的工程经验，路拱横坡度工后增大值不大于 0.5%控制可以满足工程需求，故本文件拼宽地基的路基差异沉降控制标准按照 JTG D30-2015《公路路基设计规范》的规定执行。

2) 夯击能设计与指标

5.2.2、5.2.5、5.2.6 条款规定了高速公路拼宽地基强夯夯击能指标设计与夯击指标。强夯夯击能越大，地基加固深度越深，地基的工后沉降也就越小。对于一个具体的路段，应根据拼宽路基工后差异沉降计算确定设计夯击能指标。由于 JTG D30-2015《公路路基设计规范》中并未明确强夯地基的沉降变形计算方法，工程设计中一般参照 GB 50007《建筑地基基础设计规范》计算确定夯击能，但是由于相关变形计算难以考虑因强夯地基的空间不均匀性，准确确定地基土的压缩模量，因此计算结果往往与实际存在一定差异。

编制组基于典型黄泛区路基、地基条件以及 0.5%路拱横坡度工后增大值控制标准，考虑既有路基不同高度、不同地

下水水位、不同路基拼宽宽度，采用有限差分数值模拟方法，分析了高速公路拼宽地基强夯加固的工后沉降，提出了 5.2.2 条款的高速公路拼宽地基强夯加固夯击能设计指标；通过试验路和相关工程检测，验证了相关指标的可靠性。

图 2 为基于 FLAC 3D 流固耦合有限差分分析的拼宽路基路拱横坡度增大值情况。结果表明，在路基高度 2m~8m、地下水位埋深 3m~11m 范围内，路基的工后路拱横坡度增大值主要受到路基高度的影响，地下水位的影响相对较小。当路基高度达到 4m 以上时，如拼宽地基不进行加固处理，拼宽路基的差异沉降将超过控制标准。结合上述规定拼宽地基强夯加固的高速公路路基高度不宜超过 7m，因此，本文件规定对路基高度 4m~7m 范围内的拼宽地基，应进行强夯加固处置。

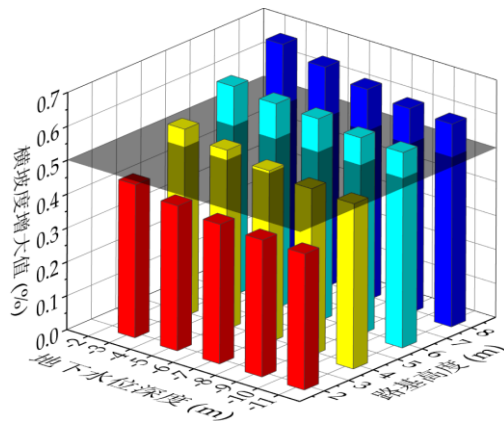


图 2 不同路基高度/地下水位条件下高速公路拼宽路基路拱横坡度增大值

基于拼宽地基多点夯 FLAC 3D 流固耦合有限差分分析结果，提出了不同路基高度、不同地下水位条件下的点夯夯击能指标（表 1）。由表 1 可见，地下水位越深，需要的夯击能越小，但只有在 9m 以上地下水位埋深需要降低夯击能指标。考虑到黄泛区地基一般地下水位较高，从安全的角度出发，

基于较高的地下水位条件，提出了 5.2.2 条款中表 1 的拼宽地基强夯夯击能指标。

表 1 黄泛区高速公路拼宽地基强夯加固夯击能指标/ $\text{kN} \cdot \text{m}$

路基高度 (m)	地下水位 (m)				
	-3	-5	-7	-9	-11
2	—	—	—	—	—
4	1000	1000	1000	—	—
5	1300	1300	1300	1000	1000
6	1500	1500	1500	1300	1300
7	2000	2000	2000	2000	1500

编制组基于模型试验和高速公路强夯地基加固工程的工后沉降监测，验证了上述强夯加固地基沉降分析可靠性。以滨莱高速公路淄博西至莱芜段双向四车道拼宽改建双向八车道工程为例（图 3），拼宽地基加固路段为典型冲积平原地貌单元，土层为粉土、粉质黏土互层，地下水位 4m，路基高度为 4m，基于安全考虑，采用 $1500\text{kN} \cdot \text{m}$ 单击夯击能对拼宽地基进行隔振后强夯加固。

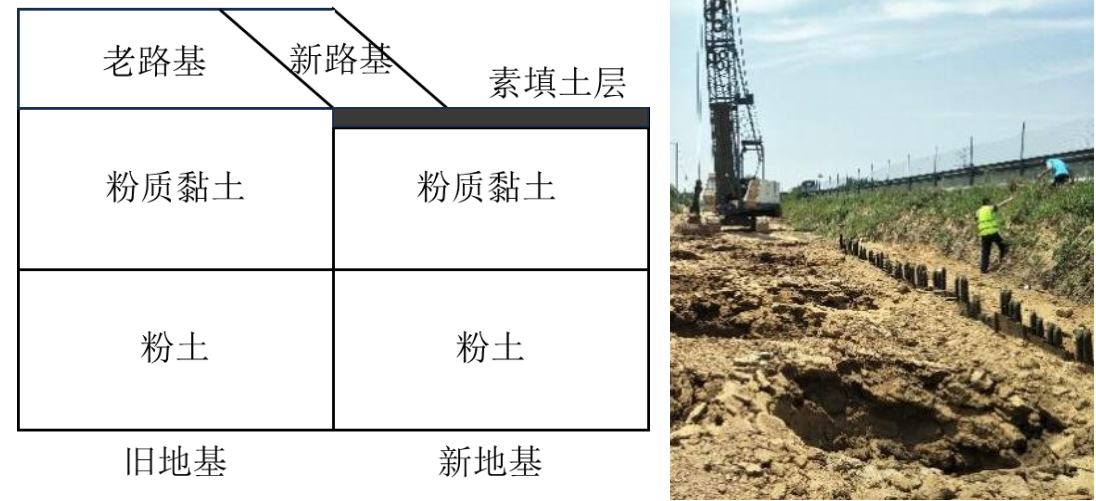


图 3 滨莱高速路基拼宽地基隔振强夯

表 2 路基边缘与中心累计工后差异沉降监测值/cm

加固方式	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月
未加固	3.6	4.7	5.2	5.8	5.9	5.9
强夯	1.8	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6
浆喷桩	1.6	2.0	2.1	2.2	2.2	2.2

表 3 第四车道中心与路基中心累计工后差异沉降监测值/cm

加固方式	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月
未加固	6.7	8.2	9.2	10.1	10.3	10.3
强夯	3.9	4.8	5	5.1	5.1	5.1
浆喷桩	3.8	4.5	4.6	4.7	4.6	4.6

强夯路段于 2019 年 7 月完工通车后，进行了 6 个月的路基工后沉降监测，监测结果如表 2、表 3。结果显示，地基未加固路段的路拱横坡度增大值分别为 0.47%、0.23%，按照第四车道中心控制的路拱横坡度增大值接近 5.0%的控制标准。现场监测结果与模拟结果基本一致。第四车道中心的沉降量大于路基边缘沉降量，拼宽地基采用 $1500\text{kN} \cdot \text{m}$ 强夯加固的效果与浆喷桩处理效果基本相当。采用强夯加固拼宽地基的第四车道中心、路基边缘最大工后差异沉降为 5.9cm、2.6cm，对应的路拱横坡度增大值分别为 0.27%、0.12%，完全满足滨莱高速公路扩容改建工程提出的“既有路基与拼宽路基的路拱横坡度的工后增大值不应大于 0.5%，最大工后沉降不大于 15cm”的双控标准。由此可见，4m 高路基采用 $1500\text{kN} \cdot \text{m}$ 夯击能是偏于保守的。结合工程实测值对比可分析验证数值模拟是可靠的。结合数值模拟结果，优化得到 4m 高路基下的点夯夯击能为 $1000\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

除不适合强夯加固的浅层大厚度黏土地层外，基于黄泛区其它土质条件的沉降和强夯夯击能略有差异，总体按照粉质黏土条件下的分析结果是安全的。因此，基于上述数值模拟和现场试验结果，推荐的夯击能指标能够满足山东省软弱地基条件下高速公路拼宽地基强夯加固的路基差异沉降控制标准。

3) 孔内深层强夯设计

5.2.5 条款是关于孔内深层强夯的设计要求。孔内深层强夯由于采用直径在 1m~2m 之间的小直径夯锤预先成坑后逐层夯填，环境振动较小。因此，当高速公路拼宽地基强夯振动影响较大、振动控制较困难时，可以考虑采用孔内深层强夯，在降低环境振动同时加大地基处置深度。因路基高度不大于 7m，本文件孔内深层强夯的夯击能可以参考普通强夯确定。孔内深层强夯的加固深度可按普通强夯加固深度加上夯坑内起夯面以上的夯坑深度计算。最后两击平均夯沉量应由试夯确定或按照“最后两击的夯沉量平均值不大于 50mm”执行。

4) 置换强夯设计

5.2.6 条款是关于置换强夯的设计要求。常规的置换强夯一般采用 4000kN·m 以上的夯击能，通过较高的夯击能形成密实的置换墩，并对置换墩的长度提出明确要求，以提高地基承载力。对于饱和度较高的软弱地基，因地基支撑能力不足、孔压消散慢，强夯实施较为困难，本文件的置换强夯

主要是为了解决相对湿软地基难以直接强夯加固的问题，同时粗粒料置换墩也为孔压消散提供通道，可以加速土体固结，加快施工进度，因此对夯击能不做过高要求，对置换墩长度也不做具体要求，夯击能指标可以参照普通强夯确定。置换墩间保持一定垫层厚度一方面可以解决桩间土相对软弱问题，同时也可以更好发挥置换墩作用。由于置换墩通常采用粗粒料，且置换墩间一般保持一定厚度的粗粒料垫层，同等夯击能下的置换强夯振动一般小于普通强夯，强夯隔振设计可以参照普通强夯执行。

（2）高速公路拼宽地基强夯振动控制标准和安全距离

5.1.5、5.3.1、5.3.3 条款是关于高速公路拼宽地基强夯振动控制标准要求。

强夯振动波分为体波和面波，其中体波又分为纵波（P 波，压缩波，占总振动能量的 7%）和横波（S 波，剪切波，占总振动能量的 26%），其能量约占总能量的 33%，是实现地基加固的主要能量传递方式；面波分为瑞利波（R 波）、拉夫波（L 波），其沿地基的表层缓慢传播，R 波约占振动能量的 67%，是导致环境振动、结构损伤破坏的主要原因，也是强夯施工振动的主要控制对象；S 波是导致土体内部环境振动的主要原因，但由于 S 波在土体内部传播衰减速度迅速，当不存在地下结构时，一般不作为振动控制的主要对象。

GB 50868《建筑工程容许振动标准》规定了建筑地基强夯加固振动不宜超过的控制标准，本文件对高速公路拼宽地基强夯作业区周边建筑结构的容许振动值参照该标准执行。

高速公路拼宽地基强夯对高速公路既有路基的影响主要体现在既有路基的强夯振动损伤和既有地基的侧挤，相关控标准在本文件中做出了单独规定。

实际上，高速公路拼宽地基强夯振动对既有路基与路面结构、路上附属设施和行车舒适性均会造成不利影响。编制单位基于理论分析、试验研究和现场验证，提出了边坡振动失稳、既有路基塑性损伤、既有路面结构振动破坏、路上附属设施振动破坏、路上行车舒适性五方面的不利振动影响，并构建了表 4 的振动响应指标体系和控制标准；发现高速公路拼宽地基强夯过程中靠近强夯作业区的既有路基塑性损伤是高速公路拼宽地基强夯加固振动损伤的关键控制因素。由于山东省典型软弱地基以黄泛区为主，根据黄泛区典型粉质黏土的体积剪应变门槛值与刚度衰减曲线的关系，提出基于老路基内部塑性损伤的剪应变门槛值为 3.12×10^{-4} 。以最后一击作用下的竖向（Z 方向）的振动速度作为振动评价指标。基于剪应变门槛值与振动速度响应之间的相关关系，提出了土体的竖向振动速度峰值不宜超过 25mm/s 的路基强夯振动损伤控制标准。需要说明的是，不同土质、含水率、密度的土体的竖向容许振动值存在一定差异，工程中应根据实

际情况，基于既有路基不发生过大的密度衰减的原则，合理确定竖向容许振动值。

表 4 高速公路拼宽地基强夯振动控制标准

影响要素	工程问题	分析指标	指标标准
既有路基	路基边坡振动失稳	边坡稳定性	振动速度峰值 $<50\text{mm/s}$
	路基内部塑性损伤，影响路面结构受力，或不均匀沉陷	路基内部塑性变形	竖向振动速度峰值$<25\text{mm/s}$
既有路面	路面结构开裂	路面结构弯拉应力	拉应力 $<$ 容许弯拉应力
	路面结构层间损伤	路面结构层间剪切强度	层间剪应力 $<$ 层间抗剪强度
路上设施	路上交通安全设施损伤	结构振动峰值	振动加速度峰值 $<0.2g$
	道路管网等内部结构损伤		
路上行车	影响驾驶人员舒适性，进而对交通的不利影响	加速度峰值	振动加速度峰值 $<1.78\text{m/s}^2$
		速度峰值	振动速度峰值 $<13\text{mm/s}\sim 19\text{mm/s}$

强夯振动的安全距离与夯击能、建筑结构类型及其新老程度，以及地基的土质、水文、起伏条件等密切相关，从理论上准确的确定该指标较为困难，应该根据振动控制标准现场实测确定。夯击能在 $1000\text{kN}\cdot\text{m}\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 之间，一般建筑结构的安全距离大概在 $10\text{m}\sim 20\text{m}$ 之间。相关研究和工程经验表明，对于一般建筑结构，采用 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $2000\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 的夯击能时，控制距离分别采用 15m 、 20m 、 30m 是基本安全的。

(3) 高速公路拼宽地基强夯隔振设计

5.3.2~5.3.8 条款是高速公路拼宽地基强夯加固隔振设计的有关要求。

1) 既有路基的隔振位置与振动监测位置

5.3.3 条款是关于强夯作业区与既有路基间隔振位置和振动监测位置的规定。为加强新老路基的结合，JTG D30《公路路基设计规范》规定，高速公路拼宽路基边坡应开挖宽度不小于 1 m 的台阶。考虑到第一级台阶的既有路基边坡要清除后重新填筑，将地基强夯作业区与既有路基间的隔振屏障沿既有路基拟开挖第一级台阶内侧边缘布置，可以使隔振屏障尽量远离既有路基边坡坡脚以外的强夯作业区，降低振动、侧挤对屏障的不利影响。

由于隔振位置靠近既有路基第一级台阶内侧，因此，既有路基振动控制测点位置设置于第一级台阶上部 30cm 处的路基边坡部位上，避免监测时屏障对监测拾振器的影响。

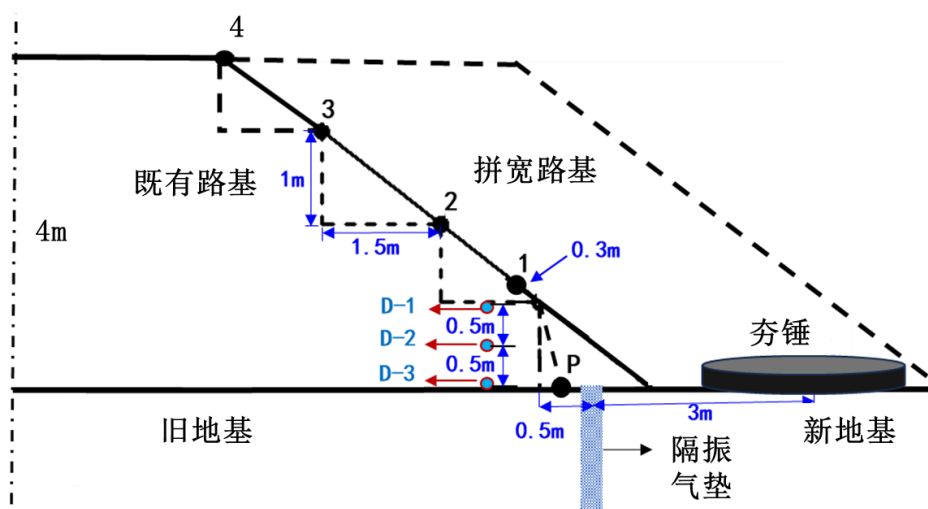


图 4 气垫式隔振屏障设置位置示意图

2) 隔振屏障类型及其选择

5.3.4 条款是对不同隔振屏障类型选择的有关要求。当强夯作业区与环境振动敏感点的距离较近，振动敏感点的环境振动不满足振动控制标准时，应该采取强夯减振、隔振等振动控制措施。由于面波、横波不能通过空气和液体传播，因此空沟具有最佳的隔振效果，但由于过深的空沟需要填充碎石等材料维持边坡稳定，这不仅会降低隔振效果，同时过深碎石沟槽工程规模较大，费用较高，不适宜深部隔振需要。排桩式隔振屏障包括各种刚性、柔性桩，实施相对简单，设计理论和方法相对较成熟，但是工程成本较高。气垫式隔振屏障一般充气后厚度为 10cm 左右，能够很好的阻断面波、横波传播，具有理想的隔振效果。工程设计中，应综合考虑建筑类型、现场条件、隔振技术要求、隔振技术特点等，通过技术经济分析，优选合理的隔振技术。

GB 50463《工程隔振设计标准》对于沟式、排桩式隔振屏障的设计做出了具体规定，强夯隔振设计可按照相关规定执行。GB 50463《工程隔振设计标准》中也提出了采用波阻板式屏障对频率小于 100Hz 的地面人工振源进行下部水平隔振的设计方法，强夯工程中也有采用波阻板式屏障进行竖向隔振的相关案例，但由于其施工复杂，工程费用较高，隔振效率一般不高，本文件不推荐采用。

当采用排桩式屏障隔振时，按照隔振要求设计的排桩对地基具有一定的加固作用，而其加固效果与路基差异沉降控

制要求不一致，且成本较高，特别是打入式排桩施工本身存在振动。因此，高速公路拼宽地基强夯作业区与既有路基间不建议采用排桩式屏障隔振。可根据工程条件选取沟式、气垫式等屏障隔振。

由于杂填土、碎石土地基的粗颗粒易导致气垫损伤，影响重复利用的耐久性，因此此类地基不宜采用气垫式屏障隔振。

3) 气垫式隔振设计参数

5.3.7 条款是关于气垫式屏障隔振的相关设计规定。由于面波、S 波不能通过空气和液体传播，因此，柔性、充气的气垫式隔振屏障具有与空沟接近的隔振效果。长深高速公路东营至青州高速公路拼宽地基强夯加固工程，对路基高度为 4m 的高速公路拼宽地基采用 1000kN•m 夯击能加固，在靠近既有边坡坡脚 P 处设置了深 5m、长 30m（距作业区两端的隔振富余长度为 15m）的气垫式隔振屏障（图 4）。经监测强夯过程中测点的强夯振动满足强夯振动控制标准要求，并验证了数值模拟拼宽地基强夯振动的可靠性。基于数值模拟方法，考虑工程的安全性，提出了表 5 的强夯振动气垫隔振屏障设计参数即 5.3.7 条款中表 2 隔振参数。其中气垫隔振长度应大于强夯作业区长度，超出强夯作业区两端的富余长度应不小于 15m。在作业区两端环绕强夯作业区进行隔振设计时，需要注意其虽然隔振长度相对短，但其存在不能重复利用的问题，因此，需要根据实际工程情况选用。

表 5 不同路基高度气垫式屏障隔振设计参数

既有高速公路路基高度 (m)	地基加固夯击能 (kN·m)	隔振深度 (m)	隔振长度 (m)
4	1000	5	作业区长度+富余长度 2×15
5	1300	6	作业区长度+富余长度 2×15
6	1500	7	作业区长度+富余长度 2×15
7	2000	7	作业区长度+富余长度 2×20

经试验验证，气垫式屏障厚度对于隔振效果影响很小，因此，仅从施工角度提出屏障隔振厚度宜为 10cm~20cm。

采用上述隔振方案，路基坡脚内约 0m~1m 范围内的边坡浅层仍会形成一定塑性损伤，但隔振后塑性损伤范围由 5m~6m 缩减为 0m~1m，可见隔振后对既有路基产生的振动损伤明显降低，在损伤范围内可通过补压消除振动不利影响。

现场测试强夯隔振加固前后路基边坡密度，得到测试点位 0.5m 深度范围内路基密度及压实度变化情况如表 6 所示。由表 6 可见，4m 高路基、1000 kN·m 夯击能、5m 隔振深度、15m 隔振富余长度下既有路基边坡密度强夯前后由 1.84 g/cm³ 变为 1.86 g/cm³，压实度增加了 1.1%，这主要是由于强夯振动微小的振动侧向密实了路基内部，同时，路基边坡密度本身具有一定的离散性，存在一定的误差。考虑路基隔振工程的经济性等因素，不建议进一步加大隔振深度，而是对既有路基第一、二级台阶采取补压措施解决浅层振动塑性损伤问题。

表 6 4m 高路基、1000 kN·m 夯击能、5m 隔振深度不同隔振富余长度下强夯前后压实度

单幅隔振长度 (m)	强夯加固前密度 (g/cm ³)	强夯加固后密度 (g/cm ³)	密度变化 (g/cm ³)	强夯前后压 实度变化
0	1.81	1.72	-0.09	-5.0%
5	1.82	1.76	-0.06	-3.3%
10	1.84	1.80	-0.04	-2.2%
15	1.84	1.86	0.02	1.1%

4) 隔振沟槽填充及浆液制备

为了防止新浇混凝土和砌体砂浆在强度明显低于设计强度的情况下受振损伤,从而降低建筑构件的承载力和耐久性。对普通混凝土和砌体砂浆,在可施工气候环境条件下,浇筑后 1 天~2 天内,应尽量避免遭受较为强烈的振动。

6. 施工

(1) 高速公路拼宽地基强夯振动监测

6.1.3、6.1.4 条款是关于高速公路拼宽地基强夯施工既有路基边坡台阶开挖及振动监测的相关要求。

由于拼宽高速公路既有路基边坡开挖台阶对强夯振动具有一定的放大效应,且开挖后的直立边坡易发生振动损伤,因此,既有路基边坡台阶的开挖宜在强夯作业后进行。

6.1.3 条款规定了既有路基第一级台阶的开挖方式。为了便于隔振施工作业,可以在隔振施工前对高速公路既有路基边坡第一台阶适当进行开挖,但开挖后边坡也不宜过陡,以防强夯作业时边坡失稳。

由于强夯振动传播的复杂性，强夯施工过程中应根据设计要求对振动敏感点进行检测或监测验证，当振动量超过控制标准时，应调整隔振方案。与对既有路基及其地基的侧挤主要是增大了土体密度不同，对既有建筑地基基础部位的侧挤量过大会影响建筑结构安全，因此施工前应通过试夯进行深层水平位移测试或结构计算，分析深层土体侧挤情况，评价侧挤对临近建筑物影响，明确应对技术方案。其中深层土体的水平位移测试可以采用预埋测斜管或夯后开挖等方法进行测试。

（2）试夯区设置

6.2.1 条款是关于试夯的相关要求。

《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610 要求强夯地基的试夯面积不小于 500m^2 ，但高速公路拼宽地基较窄，夯点沿公路方向狭长布置，为控制试夯段长度，本文件规定试夯面积不小于 300m^2 。

（3）施工机具

6.4.1~6.4.4 条款是施工机具的相关要求。

由于普通强夯的夯锤排气孔易向外喷射地基土，为保证既有高速公路通行安全，排气孔上方应设置防喷网，防止地基土通过排气孔喷射到既有路面上。

打入式施工的环境振动较大，因此施工装备的选择要注意评价环境振动，选取振动较小的装备施工；气垫式隔振的

宽度较窄，较大深度开槽植入气垫困难，因此宜采用插入式施工装备进行隔振施工。

6.5.2 条款是关于气垫式屏障隔振沟槽开挖技术的规定。

隔振深度小于 3m 时，开挖后的沟槽一般不会发生坍塌，可采用小型挖掘机、链条式开槽机等小型开槽设备进行施工；对于隔振深度大于 3m 沟槽，开挖后槽壁难以稳定，需要采用专用成槽插板装备将柔性气垫直接插入地下。

7. 施工监测、检测与检验

鉴于隔振材料、结构的复杂、多样性，本文件不对强夯隔振材料的结构提出具体检测要求，其相关性能通过隔振效果检测进行评价控制。

四、与现行相关法律、法规和其它标准的关系

强夯法作为一种快速、高效、经济、技术成熟的地基加固技术，在新建道路地基以及其它建筑地基加固工程中广泛应用。编制组前期编制的 DB37/T 5136-2019《强夯地基处理技术规程》，主要针对强夯地基处理的设计、施工和质量检测与检验等做出了相关规定，适用于工业民用建筑、公路、铁路、市政、港口码头等工程，具有普适性。

多年以来，强夯的环境中振动及其对既有建筑结构的影响问题得到了系统研究，GB 50868《建筑工程容许振动标准》、GB 50463《工程隔振设计标准》、HJ 918《环境振动监测技术规范》等均针对强夯加固对既有建筑结构的振动控制标准、隔振设计与振动检测等做出了具体规定。但国内外缺乏针对

高速公路拼宽地基强夯振动的相关研究，拼宽地基强夯过程中既有高速公路路基的振动响应、损伤机制及其影响规律等尚不清楚，导致基于既有高速公路振动响应的振动控制标准缺失，振动影响难以评价。基于强夯振动对既有高速公路路基振动、地基侧挤的可能影响，从保守的角度出发，JTG D30-2015《公路路基设计规范》中 6.4.3 款规定，软弱地基条件下的高速公路拼宽地基可采用复合地基或轻质路堤等处理措施，不宜采用对既有路基产生严重影响的强夯法；基于同样考虑，《高速公路改扩建设计细则》JTG/T L11-2014 在 7.6.4 款提出，拼宽软弱地基处理方案选用时，应考虑拼宽方案在拼宽地基处理施工时的挤土、振动对既有路堤的影响。尽管上述规范、细则未能给出相关要求的编制依据，国内外也缺乏既有高速公路振动规律、控制标准、隔振设计理论方法等方面的研究，但相关条款严重制约了强夯技术在高速公路拼宽地基加固工程中应用，导致高速公路拼宽地基加固成本大幅度上升，基于高速公路拼宽地基强夯加固及其振动控制的设计、施工方案以及质量检测与控制标准也成为空白。

编制单位山东大学、山东高速集团有限公司针对我国高速公路建设主要任务由新建转向扩容改建，并以拼宽改建为主的新形势，依托山东省典型软弱黄泛区地基条件下的高速公路拼宽改建工程，基于既有路基稳定、路面结构损伤、路基损伤、辅助设施安全、交通舒适性等因素，分析了高速公路拼宽地基强夯加固对于既有高速公路及其运营的影响，指

出路基内部塑性损伤导致的路基密度衰减是拼宽地基强夯振动关键控制因素，并提出了高速公路拼宽地基强夯加固振动控制标准，基于强夯隔振，实现了振动控制和拼宽地基加固目标。试验路表明，通过强夯隔振可以有效控制既有高速公路路基的振动损伤，确保既有高速公路路基安全稳定和可持续利用。在高速公路拼宽地基强夯加固设计理论、方法、工程方案，以及强夯对既有高速公路振动影响规律、振动控制标准、隔振设计理论、方法与工程技术系统研究的基础上，通过工程应用、状况调研与分析，编制了本文件。本文件主要规定了高速公路拼宽软弱地基强夯加固与隔振工程的设计、施工和质量检测与检验的技术要求，专门适用于高速公路改扩建拼宽地基强夯加固工程，其中强夯加固与振动控制的关键技术指标、设计与施工要求独具特色，为国内外空白，是对 JTG D30-2015《公路路基设计规范》、DB37/T 5136-2019《强夯地基处理技术规程》等标准的重要补充和完善。

五、重大分歧意见的处理过程、处理意见及其依据

本文件编制过程中无重大分歧意见。

六、对标准自发布之日起至实施期间的过渡期（以下简称“过渡期”）的建议和理由

建议本文件发布后 1 个月开始实施。

高速公路设计、施工、建设管理单位是本文件实施的主体，为确保其准确理解、掌握和执行标准，本文件发布后将

向标准实施主体进行推广和宣贯，推动本文件的落地实施。
预计此项工作需要 3 个月的时间。

七、其他需要说明的内容

为了更好的规范高速公路改扩建拼宽软弱地基强夯加固与隔振工程设计、施工和质量检测与检验的技术要求，根据初稿、送审稿审查委员会建议，标准名称由《高速公路拓宽地基强夯加固技术规程》修改为《高速公路拼宽地基强夯加固技术规范》。

提出部门：山东省交通运输厅

