

高速公路拼宽地基强夯加固技术规范

Technical specifications for dynamic compaction of expressway widening foundation

2025 - 02 - 14 发布

2025 - 03 - 14 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 2

5 设计 2

 5.1 通用要求 2

 5.2 强夯设计 3

 5.3 强夯隔振设计 4

6 施工 5

 6.1 通用要求 5

 6.2 试夯 6

 6.3 施工准备 6

 6.4 施工设备 6

 6.5 施工工艺 7

7 施工监测、检测与检验 7

 7.1 施工监测与检测 7

 7.2 施工质量检验 8

前 言

本文件按照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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

高速公路拼宽地基强夯加固技术规范

1 范围

本文件规定了高速公路改扩建拼宽地基强夯加固与隔振工程的设计、施工以及施工监测、检测与检验的技术要求。

本文件适用于高速公路改扩建拼宽地基强夯加固工程，其他公路工程参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 10070—1988 城市区域环境振动标准
GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范
GB 50463—2019 工程隔振设计标准
GB 50868—2013 建筑工程容许振动标准
HJ 918 环境振动监测技术规范
JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范
JGJ 340 建筑地基检测技术规范
JTG D30—2015 公路路基设计规范
JTG/T D31-02—2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则
JTG/T L11—2014 高速公路改扩建设计细则
DB37/T 5136—2019 强夯地基处理技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

置换强夯法 `dynamic replacement`

采用砂石或建筑粒料对夯点反复填夯，使其形成一定深度密实墩体的地基强夯法。

[来源：DB37/T 5136—2019，2.1.3，有修改]

3.2

孔内深层强夯法 `deep dynamic compaction in pit`

用柱型锤先在地面夯出较深的夯坑，然后逐层填料、夯实至地表的地基强夯法。

3.3

容许振动值 `allowable vibration value`

受振对象的最大容许振动位移、速度、加速度。

[来源：GB 50463—2019，2.1.8，有修改]

3.4

屏障隔振 `barrier vibration isolation`

在振动传递路径中设置连续或非连续屏障的控制振动措施。

[来源：GB 50463—2019，2.1.4，有修改]

3.5

气垫式屏障 air cushion barrier

由充满空气的柔性密封气垫拼接而成的隔振屏障。

4 总体要求

- 4.1 应根据新老路基变形协调、老路基安全稳定的原则，进行拼宽地基强夯加固与隔振的设计和施工。
- 4.2 高速公路拼宽地基强夯加固技术适用于处理砂土、粉土、低饱和度粉质黏土、湿陷性黄土地基，黄河冲（淤）积成因的饱和粉土与黏土互层地基，以及杂填土、素填土等地基；置换强夯法适用于处理饱和度较高的软黏土、粉质黏土、粉土，以及淤泥质土等拼宽地基；孔内深层强夯法适用于处理深度较大、振动控制要求较高的拼宽地基。
- 4.3 采用强夯加固拼宽地基的高速公路既有路基高度不宜大于 7 m，拼宽地基地下水位埋深不宜小于 3 m。
- 4.4 高速公路拼宽地基加固不应采取降水强夯；当拼宽侧既有路基边坡设置支挡结构时，不应采用强夯加固拼宽地基。
- 4.5 高速公路拼宽地基强夯加固方案应根据新老路基高度、地基土质、周边环境条件等明确以下技术要求：
 - a) 地基夯后新、老路基差异沉降及其技术标准；
 - b) 地基加固处理范围；
 - c) 有效加固深度与单击夯击能；
 - d) 夯后地基加固效果检测评价方法等。
- 4.6 桥梁、涵洞与路堤相邻路段的拼宽地基强夯加固方案，应按照 JTG/T D31-02—2013 中 4.3.11 规定的容许工后沉降控制要求与 JTG/T L11—2014 中 7.6.2 规定的拼宽路基沉降控制要求单独设计，并按照 GB 50868—2013 中确定的容许振动值合理确定安全距离和隔振设计方案。
- 4.7 地表土软弱时，宜铺填一定厚度的粗颗粒材料垫层强夯或采用低能量预夯。无工程经验时，垫层厚度、预夯夯击能应通过试夯确定。
- 4.8 隔振技术方案应经现场试验确认隔振效果后方可使用。
- 4.9 应通过试夯验证并优化地基强夯、减隔振方案及其工艺参数等。
- 4.10 高速公路拼宽地基强夯施工应评估强夯振动、土体侧挤对既有高速公路、邻近建（构）筑物以及在建工程结构等的影响，确保既有高速公路及周边建（构）筑物结构安全。当土体侧挤对临近结构影响较大时应进行振动监测、地基土体侧挤检测，并根据强夯影响评价优化相关方案。
- 4.11 强夯加固与隔振作业区应设置临时排水设施。
- 4.12 拼宽路基边坡开挖第一级台阶后，应对台阶开挖处地表进行补压处理；在第一级台阶拼宽路基填筑压实后，应对第二级台阶及新老路基结合部采用大吨位压路机等进行补压处理。
- 4.13 拼宽路基填筑过程中，应按照 JTG/T L11—2014 中 7.6.5 规定的技术要求对路基变形进行监测。

5 设计

5.1 通用要求

- 5.1.1 高速公路拼宽地基强夯加固和隔振设计应具备以下资料：

- a) 场地的地质与水文地质资料；
- b) 场地及周边既有地上、地下建（构）筑物等资料；
- c) 高速公路既有路基设计、检测与评价资料；
- d) 高速公路新老路基差异沉降控制标准、计算分析与设计资料。

5.1.2 高速公路拼宽地基强夯加固和隔振宜按照图 1 的流程进行设计。

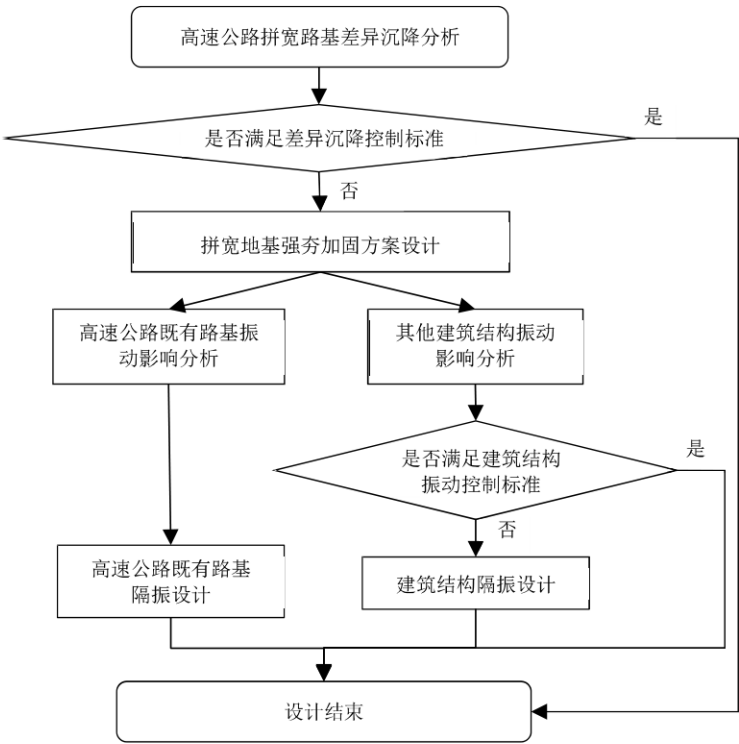


图1 高速公路拼宽地基强夯加固和隔振设计流程图

5.1.3 高速公路拼宽地基强夯加固和隔振设计应综合强夯加固效果、隔振效率、工程经济、施工效率以及实施条件等因素合理确定，隔振后被保护对象的最大振动值不宜大于相应的容许振动值。

5.1.4 应根据拼宽路基差异沉降控制标准、新老路基高度、加固地基土质和地下水位条件等，通过沉降计算分析，确定高速公路拼宽地基强夯加固设计方案。

5.1.5 应根据既有高速公路路基、邻近建筑结构振动安全控制标准等，确定强夯作业的振动控制方案。当强夯作业区与被保护对象之间的距离不满足最小安全距离要求时，应采取减振、隔振等振动控制措施。

5.2 强夯设计

5.2.1 高速公路拼宽路基与既有路基的差异沉降应满足 JTG D30—2015 中 6.4.3 的要求。

5.2.2 高速公路拼宽地基强夯加固的单击夯击能，应综合既有路基高度、拼宽地基水文地质条件、施工工期等条件，结合地基承载力和加固深度要求，根据新、老路基差异沉降控制要求计算确定，或根据工程经验确定。缺少基础资料和经验时，一般路段的点夯夯击能确定见表 1。满夯能量宜为点夯能量的 1/2~1/3。

表1 高速公路拼宽地基强夯加固夯击能

既有高速公路路基高度 m	拼宽地基强夯加固夯击能 kN · m
4	1 000
5	1 300
6	1 500
7	2 000
本推荐值适用于黄泛平原区典型地基条件，地基影响范围内存在较厚的黏土层或其他软弱地基时通过试验确定拼宽地基强夯夯击能；当既有路基发生较大挖方时，通过计算确定拼宽地基强夯夯击能。	

- 5.2.3 夯点的夯击次数应根据现场试夯确定，并应符合最后两击的夯沉量平均值不大于 50 mm、夯坑周围地面不发生过大隆起的技术要求。
- 5.2.4 高速公路拼宽地基强夯的夯点间距宜为夯锤直径的 1.5 倍~2.0 倍。
- 5.2.5 当强夯振动影响较大、振动控制要求较严或隔振较困难时，可采用孔内深层强夯法进行地基加固。孔内深层强夯法的夯击能可参照表 1 通过试验确定；夯点间距宜为夯锤直径的 2.5 倍；单个夯点的孔内夯填次数一般不宜低于 15 击；墩的计算直径宜为夯锤直径的 1.1 倍~1.2 倍。
- 5.2.6 当地基含水量较高时，宜采用置换强夯法加固地基。置换强夯可采用点式置换法或垫层置换法，其单击夯击能可参照表 1 并通过试夯确定。
- 5.2.7 靠近既有路基一侧的夯点应沿既有路基边坡坡脚布置；外侧夯点应超出路基坡脚，超出拼宽路基坡脚外的宽度不宜小于 3 m。
- 5.2.8 强夯的有效加固深度应根据试夯和区域经验确定；夯后地基承载力特征值应通过现场静荷载试验确定。高速公路拼宽地基的承载力特征值、加固深度应符合设计要求。
- 5.2.9 强夯地基的变形应按照 GB 50007—2011 中 5.3 的规定进行计算。夯后地基有效加固深度内土的压缩模量，应通过原位测试或土工试验确定。当受力层范围内存在软弱下卧层时，尚应验算下卧层的地基承载力和变形。可根据置换墩材料的压力扩散角计算传至墩下土层的附加应力，并计算置换强夯墩下土体的变形。
- 5.2.10 拼宽路基高度、地基土质和地下水位埋深等差别较大时，应采用不同的强夯加固方案。
- 5.2.11 高速公路拼宽地基强夯的其他设计应符合 DB37/T 5136—2019 和 JGJ 79—2012 中 6.3.3 的要求。

5.3 强夯隔振设计

- 5.3.1 强夯作业区周边存在建（构）筑物、地下设施时，应评估强夯振动、侧向挤压对建（构）筑物、地下设施的影响程度，并确定合理的安全距离与隔振方案。建（构）筑物容许振动标准应符合 GB 50868—2013 中 8.0.2 的要求，强夯振动安全距离和隔振方案应根据建（构）筑物容许振动标准，通过现场实测或按照工程经验确定。
- 5.3.2 当沿线建（构）筑物振动安全距离不满足振动控制标准时，可采取沟式、排桩式、气垫式等屏障隔振措施，并在施工中进行强夯振动监测。应综合建筑类型、现场条件、隔振技术特点与要求等因素，通过技术经济分析确定隔振屏障类型。
- 5.3.3 高速公路拼宽地基强夯作业区与既有高速公路路基间应设置隔振屏障，隔振屏障应靠近既有路基拟开挖的第一级台阶内侧边缘布置。强夯作业时隔振屏障后 30 cm 处的既有路基边坡上监测点位的最大竖向振动速度峰值不宜超过 25 mm/s。
- 5.3.4 高速公路既有路基的隔振可根据工程条件选取沟式、气垫式等屏障隔振，不宜采用排桩式屏障隔振。杂填土、碎石土等含有粗颗粒的地基不宜采用气垫式屏障隔振。

- 5.3.5 隔振屏障应稳定、可靠，满足强夯临时隔振要求，可重复利用的隔振屏障应满足耐久性等性能要求。
- 5.3.6 沟式屏障隔振的相关技术要求和设计应符合 GB 50463—2019 中 6.2 的规定。
- 5.3.7 高速公路拼宽路基采用气垫式屏障进行强夯隔振时，按照以下规定进行隔振设计：
- a) 隔振气垫充气压力不宜小于 0.1MPa，具体充气压力应根据隔振深度通过现场试验确定；
 - b) 相邻气垫间充气后应拼接连续；
 - c) 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，或在作业区两端环绕强夯作业区进行隔振；
 - d) 气垫式屏障厚度宜为 10 cm～20 cm；
 - e) 气垫式屏障隔振参数可参照表 2 确定。

表2 气垫式屏障隔振参数

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	1 000	5	富余长度 15+作业区长度+富余长度 15
5	1 300	6	富余长度 15+作业区长度+富余长度 15
6	1 500	7	富余长度 15+作业区长度+富余长度 15
7	2 000	7	富余长度 20+作业区长度+富余长度 20

- 5.3.8 采用可重复利用的气垫式屏障隔振时，在场地夯后取出时，应及时对沟槽进行填充处理。按照以下要求进行沟槽填充及浆液制备：
- a) 深度 3m 以内的较宽沟槽可采用砂砾等粗粒料填充；
 - b) 深度大于 3m 或狭窄难以填充的沟槽宜采用水泥土浆填充；
 - c) 水泥土浆中水泥土的水泥剂量宜为 3%～4%，水泥土浆的水胶比宜取 0.6:1～1.5:1，土料宜采用有机质含量不超过 5%的细粒土；
 - d) 水泥土浆注浆填充可根据现场情况采用直接灌注或压力灌注充填，注浆充填孔沿沟槽纵向的布设间距宜取 2m～3m。
- 5.3.9 水泥土浆的制备宜采用先将固化剂与一定量的水拌合成浆液，再将固化剂浆液与土进行拌合的工艺；浆液应使用专门机械搅拌并搅拌均匀，搅拌时间不少于 2min。

6 施工

6.1 通用要求

- 6.1.1 施工前应取得以下资料：
- a) 高速公路拼宽地基处理与路基设计资料；
 - b) 强夯作业区地基工程地质与地下水位资料；
 - c) 主要施工机具及其配套设备的技术性能资料；
 - d) 强夯及隔振试验资料，以及当地有关施工经验资料；
 - e) 强夯作业区既有路基、周边及地下建（构）筑物资料。
- 6.1.2 施工前应完成以下工作：
- a) 强夯地基处理与隔振施工组织方案；
 - b) 开展地基土颗粒分析、击实等必要试验，了解地基土类别和参数，为强夯施工质量控制提供依据；

- c) 对黏性土地基、湿陷性黄土地基，必要时检测地基处理深度范围内土的含水量；
 - d) 设置测量控制网，建立现场坐标平面控制点和高程控制点；
 - e) 检查夯锤类型、重量和落距；
 - f) 检查隔振屏障材料、结构以及施工装备质量；
 - g) 向施工人员进行技术、质量、安全交底。
- 6.1.3 高速公路既有路基边坡第1级台阶应在隔振施工前开挖。
- 6.1.4 当强夯施工对既有建(构)筑物产生不利振动影响时，应进行振动检测；当强夯作业临近建(构)筑物时，应进行深层水平位移检测评价土体侧挤情况，明确振动安全距离与隔振方案。
- 6.1.5 强夯施工夯击次数、最后两击夯沉量平均值应满足设计要求。当夯击次数达到设计要求而夯点的最后2击平均夯沉量不满足控制标准时，应适当增加2击~3击的夯击次数。采用柱型夯锤施工时，应以夯击次数控制为主。
- 6.1.6 饱和度较高的黏性土、地下水位较高的粉土地基，强夯施工过程中因地基孔隙水压力过高发生过大隆起时，应及时停夯，达到遍间隔时间后方可继续强夯作业。
- 6.1.7 饱和度较高的黏性土地基，强夯后应防止轮式车辆碾压产生“橡皮土”；雨期施工时，地基应加强场地排水；冬期地基夯后路基暂不填筑施工时，宜铺填一定厚度的虚土或覆盖防冻。

6.2 试夯

6.2.1 按照以下要求进行试夯：

- a) 试夯区设置的数量应根据工程场地的复杂程度、工程规模等确定，试夯区应具有代表性，其面积不宜少于300 m²；
- b) 试夯应根据土质、地质和地下水位等条件采用不同的施工工艺参数；
- c) 对于高地下水位、高饱和度地基，宜进行孔隙水压力、土体变形等原位监测；
- d) 夯前与夯后的检测内容、方法及数量宜对应；
- e) 试夯应进行振动检测，验证隔振效果、振动安全距离等。

6.2.2 试夯应对夯后地基土承载力特征值、有效加固深度、土体变形指标，场地的平均夯沉量、隆起量，以及强夯施工对既有路基、附属结构物和周边建(构)筑物和环境的振动影响进行检测或监测，验证、优化设计方案和相关工艺参数，经试夯满足设计要求后方可进行施工。

6.3 施工准备

- 6.3.1 施工前应对强夯场地和周边环境进行调(探)查，查明场地内及周边地上、地下建(构)筑物和各种地下管线的位置及埋深等，并予以清除或采取必要的保护措施。
- 6.3.2 施工前应核查施工便道条件，施工便道应满足施工设备通行与机械作业条件。
- 6.3.3 当地表土较松散不能承受强夯机械的重量时，宜铺设一定厚度的粗粒料垫层，或采取预压、低能量预夯等处理措施。
- 6.3.4 宜根据经验预估或通过试夯确定场地平均夯沉量，按设计基底高程和预留平均夯沉量进行土方平整作业；施工场地平整前应清除地表的耕植土、污染土、有机物质等；平整后场地承载能力应满足机械作业要求。
- 6.3.5 按照网格测量夯前场地标高。
- 6.3.6 应根据场地排水条件和施工需要设置临时排水系统。
- 6.3.7 应根据隔振设计要求，进行场地清理、整平，并放线标注隔振施工作业位置。

6.4 施工设备

- 6.4.1 强夯锤应采用铸钢制造，重量不宜小于10 t；普通强夯锤直径宜为2.5 m，应设置排气孔，排气

- 孔上方应设置防喷网；置换强夯、孔内深层强夯的夯锤直径一般为 1 m~2 m 的柱式锤，不设排气孔。
- 6.4.2 强夯施工应采用履带式起重机或其他专用设备；应根据所需夯击能选用合适的起重机，其有效起吊高度和回转半径应满足施工要求。
- 6.4.3 应根据工程规模，配备相应型号与数量的整平设备；置换强夯或孔内深层强夯应配备装载机填料。
- 6.4.4 隔振施工应根据采用的隔振类型选取施工机具。

6.5 施工工艺

6.5.1 隔振与强夯作业施工工艺流程见图 2。

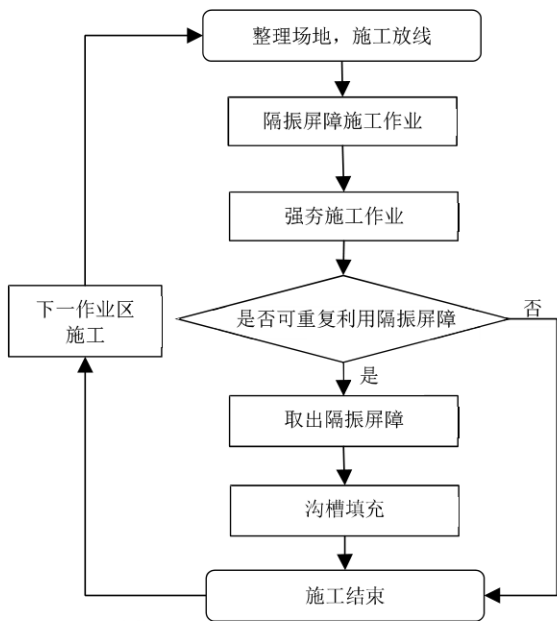


图2 强夯隔振施工工艺流程图

- 6.5.2 气垫式屏障隔振沟槽开挖宜根据隔振深度确定，当隔振深度小于 3 m 时，可采用小型挖掘机、链条式开槽机等开槽；当隔振深度超过 3 m 时，宜采用深部成槽设备，或采用专用成槽插板设备直接将气垫插入地下。
- 6.5.3 应根据场地条件选择点式置换强夯或垫层置换强夯。
- 6.5.4 孔内深层强夯，夯击成孔的锤击次数根据成孔深度确定；成孔后每次向夯孔内填充的填料高度宜为 2 倍夯锤直径，每层填料夯击次数宜为 3 击~5 击，反复夯填至设计高程；最后推平场地，换用普通夯锤进行低能量满夯。

7 施工监测、检测与检验

7.1 施工监测与检测

- 7.1.1 地基强夯施工前应检查锤重、落距与锤径，施工过程中应监测夯点位置、夯击击数、夯击遍数与遍间隔时间、夯坑夯沉量以及地基隆起量等，必要时监测孔隙水压力；地基置换强夯、孔内深层强夯施工应按照设计要求控制置换材料质量。
- 7.1.2 隔振屏障的布置应符合设计要求。

- 7.1.3 高速公路拼宽地基强夯施工过程中应对既有路基进行振动监测；当邻近建筑结构距离强夯作业区较近时，宜对邻近建筑结构等进行振动监测。监测的振动峰值不宜超过本文件规定的容许振动值。
- 7.1.4 对相同地基条件、强夯夯击能和隔振方案的既有路基边坡振动不做重复监测。
- 7.1.5 其他拟保护的建筑结构的振动监测测点应置于建（构）筑物受强夯影响相对较大的位置，地上建筑测点与被监测建筑物的距离应按照 GB 10070—1988 中 4.1 的规定控制，环境监测要求应符合 HJ 918 的规定。
- 7.1.6 高速公路拼宽地基强夯加固应按照 JGJ 340、DB37/T 5136—2019 确定的方法进行检测和质量控制。

7.2 施工质量检验

- 7.2.1 应采用静荷载试验，以及标准贯入或静力触探、动力触探（置换强夯、孔内深层强夯）等原位测试方法检验高速公路拼宽地基强夯加固效果。当夯后地基承载力和加固深度不满足设计要求时，应采取补夯等措施。
- 7.2.2 强夯加固高速公路拼宽地基的静荷载试验的压板面积应不小于 2.0 m²，最大加载量应不小于设计要求承载力特征值的 2 倍。
- 7.2.3 强夯加固高速公路拼宽地基质量检验标准见表 3。

表3 强夯地基质量标准

序号	检查项目	允许值或允许偏差	检查方法
1	地基承载力	不小于设计值	静载试验
2	处理后地基土的强度	不小于设计值	原位测试
3	加固范围	设计要求	用钢尺量
4	场地平整度	±100 mm	水准测量