

西安地铁 2 号线通过地裂缝的结构及防水设计

雷永生

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘 要: 首建南北走向的地铁 2 号线是西安市规划轨道交通线网中一条重要的南北干线, 其建设中的难题和关键技术就是跨越地裂缝的问题。文中结合西安市地铁 2 号线地裂缝段工程措施的研究课题, 对地裂缝的特点进行了说明, 对地铁区间结构穿过地裂缝处的所采取的结构设计措施和防水设计方案进行了论述。针对地裂缝的活动性, 提出了过地裂缝段采取的防治措施是: “防”与“放”相结合, 结构适应地裂缝的变形为主; 结构断面扩大, 预留变形空间, 结构分段增设变形缝以便适应变形、接头采用柔性连接, 加强结构强度以适当抵抗变形对结构的破坏; 同时在地裂缝处理段采取可调式框架板轨道适应地裂缝处变形, 来保证运营安全; 在防水措施上采取特殊方法, 设计了具有大应变特性的新型独特的防水方案。

关 键 词: 地铁; 地裂缝; 防水; 结构措施

中图分类号: U 23

文献标识码: A

Structural and waterproof design of Xi'an Metro Line No.2 crossing earth crevasse

LEI Yong-sheng

(City buliding Depatment, China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Xi'an Metro Line No.2 is an a important track traffic network south-north main stem of Xi'an city. For its construction, the key problem is crossing the earth crevasse. In light of the problem mentioned above, the structural design measures and waterproof project of metro section crossing earth crevasse, are described in detail. For the activity of earth crevasse, The structural measure is: "Prevention" and "release" the combination, The structure adapts The deformation of the earth crevasse primarily; The structure cross section expands, reservation distortion space, The structure cross section expansion reservation distortion space, the structure partition addition distortion seam adaptation distorts, the attachment to use the flexible connection, Strengthen the structural strength to resist deformation due to structural damage; Simultaneously adopts Frame plank structure being adjusted, assures the operation security; Waterproofing measures taken in the special way, using a large-strain properties of the new unique Design project of waterproof.

Key words: metro; earth crevasse; waterproof; structural measure

1 概 述

西安地裂缝是一种地区性的地质灾害现象, 目前发现的地裂缝共有 14 条, 自北向南编号依次为 f1~f14, 其活动时间之长和规模之大, 在国内尚属罕见。地裂缝所到之处, 致使不少地面建筑物和地下设施遭到破坏, 迄今为止已造成数亿元的直接经济损失^[1]。不仅如此, 由于地裂缝还在不断发展中, 并出现新的地裂缝带, 严重地制约了城市建设用地的有效利用和城市建设规划发展, 为城市工程建筑留下了重大的灾害隐患。在以往地表工业与民用建筑物设计时对地裂缝带均采用避让的方法^[2], 但地

铁工程不同于工业与民用建筑, 无法避让, 必须穿越这些地裂缝带, 并且不允许建成后出现影响运营安全的事事故^[3-4]。因此, 西安市地铁工程的关键问题是如何解决地铁穿越地裂缝带的问题。解决也就解决了西安市地铁建设的难题。

首建的西安市地铁 2 号线工程(南北线)从北到南穿越了 11 条地裂缝和 2 条次级裂缝 f6'、f9', 图 1 为西安地铁 2 号线沿线地裂缝分布图^[4], 也穿越了西安市长安区的几条地裂缝, 从地裂缝分布图上看, f1、f4、f13 地裂缝没有穿越地铁 2 号线, 其余均与地铁 2 号线相交, 而这些地裂缝有的工程致灾状况十分严重, 其中 f9、f6、f5 地裂缝地表出露

长,连续性好,活动强烈,致灾严重地段占出露长度的 70 %以上,其他地裂缝致灾段占整个长度的 50 %以上,这在当前世界地铁建设工程中是极为罕见。在地裂缝地段进行轨道交通建设,尚无规范、规程可循,国内外也无在此类场地建设的先例。针对西安地铁所遇地裂缝的严重性,如果不能很好的解决地裂缝的处理问题,将直接影响西安地铁 2 号线的付诸实施,只有做有针对性的设计,预防地裂缝的危害,确保地铁运营运营安全。

2 西安地裂缝的特征

西安地裂缝包括已出露地表的地裂缝和未在地表出露的隐伏地裂缝,目前已发现 14 条,均分布在黄土梁洼地貌范围内,面积约为 150 km²,地裂缝出露总长度 72 km,延伸长约 103 km,单条地裂缝地表出露最长 14.5 km,最短 2 km。地裂缝向东西两侧延伸,东过灞河,西过皂河。西安地裂缝已构成城市建设的主要地质灾害^[5-7]。其主要特征为^[6]:

①西安地裂缝由主裂缝、次生地裂缝和分支地裂缝

组成。②地裂缝总体走向 NE—NEE,近似平行于临潼—长安断裂;倾向 SE—SSE,与临潼—长安断裂倾向相反,倾角约 80°,平面形态呈不等间距平行排列。③地裂缝的延伸具有很好的连续性,每条地裂缝的延伸长度达数公里至数十公里。④地裂缝都发育在特定的构造地貌部位,即“梁岗”地貌的南侧陡坡上(梁间洼地的北侧边缘)。⑤地裂缝的活动方式是蠕动,主要表现为主地裂缝的南侧下降,北侧相对上升。其中 f6'和 f9'次生地裂缝表现为北侧下降,南侧相对上升。⑥地裂缝的垂直位移具有单向累积的特征,断距随深度的增大而增大。⑦地裂缝活动速率与抽取深层承压水有很好的相关性。

地裂缝带基本具有统一的三维空间运动变形特征^[8],即南倾南降的垂直位移、水平引张和水平扭动,其中以垂直位移量为最大,南北拉张量次之,而水平错动量则很小。地裂缝垂直活动速率以 5~30 mm/a 者居多,最大者愈 50 mm/a;水平引张位移中等,引张速率为 2~10 mm/a;扭动量最小,速率为 1~3 mm/a。

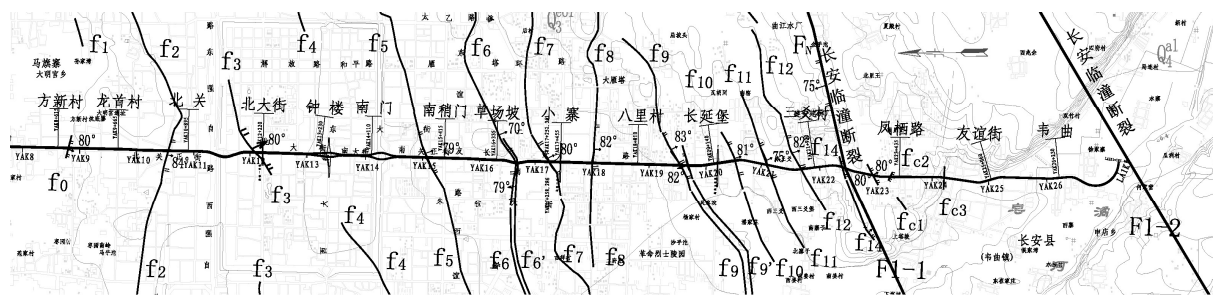


图 1 西安地铁二号线沿线地裂缝分布图
Fig.1 Distribution of No.2 subway crossing earth crevasse

3 结构处理的技术方案

3.1 各地裂缝最大可能垂直位移量估算

考虑到地铁 2 号线与各条地裂缝的交汇点不在该条地裂缝活动最强烈的地段,并且在未来 30~50 年或更长一段时间内,西安市供水由地下水改为地表水(黑河水源供水),西安地裂缝活动速率会逐步降低,重新快速活动的可能性极小或者最多保持现今活动水平发展。因此,采用最近几年(2001—2005 年)各地裂缝活动速率来估算未来 100 年最大垂直位移量^[9-11](表 1)。

考虑到各条地裂缝变形的可能先后不一致,在地裂缝处理中对各条地裂缝的百年变形量统一按预留 500 mm 考虑。

表 1 地铁 2 号线与地裂缝交汇点处地铁设计用地裂缝最大垂直位移量

Table 1 Design maximal vertical displacement of cross in No.2 subway and earth crevasse

编号	预估极限值 Amax'/m	编号	预估极限值 Amax'/m
f2	278	f8	462
f3	141	f9/f9'	275
f5	500	f10	223
f6/f6'	500	f11	500
f7	500	f12	500

3.2 不同结构措施适应地裂缝的变形分析

地铁结构在设计中将车站避开地裂缝影响范围内,以区间结构穿过地裂缝影响带。

依据区间结构的常用施工方法在处理地裂缝时

可供采用的方法有明挖法、浅埋暗挖法、盾构法。

在实施各种结构措施方案之前，需要对各种结构措施适应地裂缝变形的能力进行分析。

通过结构计算和数值模拟分析^[9-11]，可以得出以下结论：①不论采用有限元，还是离散元，当用连续结构穿过地裂缝段时在地裂缝发生变形后，结构的变形和应力均不满足规范的要求。②只要跨越地裂缝段，盾构管片结构方案基本失效，不管分段还是不分段；采用盾构法无法适应地裂缝段的变形。③采用明挖法或浅埋暗挖法的扩大断面，预留必要的变形量，局部加强确保衬砌结构强度。采取分段处理，通过适当的设置变形缝可以适应地裂缝未来百年的变形；④1:5大比例尺大型结构模型试验结果表明，当地裂缝位错量达到4 cm时整体式闭合框架结构就产生了开裂，从试验结束后开挖的情况来看，有柔性接头的分段式结构基本完好无损。与整体式结构相比，有柔性接头的分段式结构对地裂缝的错动具有较好的适应性，进一步论证了跨地裂缝地段地铁结构必须采用分段结构形式进行设计，采用柔性接头进行处理。

3.3 2号线区间结构工法确定

(1) 明挖法的结构处理方案

明挖法结构适应变形能力强。还具有施工作业面多、速度快、易于控制施工质量、对于适应地裂缝的结构措施易于实施等优点。单层整体式闭合框架结构的优点是截面简单，缺点是上部的回填土方量大，结构设计内力较大，不合理。而2层或3层整体闭合框架结构刚度大，回填土方小，地层压力小。但明挖结构在城市繁忙地段，因为地面建筑物密集，交通繁忙，其施工往往受到限制。

(2) 浅埋暗挖法的结构处理方案

在不适于明挖法施工的地段，可采用浅埋暗挖法扩大马蹄形隧道结构处理，隧道截面需扩大，预留净空（500 mm），同时扩大断面，加强衬砌。

针对地裂缝的活动性，处理地裂缝的主导思想是结构设计要适应地裂缝的变形，在地裂缝位置处设置变形缝，在处理段内的衬砌结构预留必要的空间，以便在地裂缝发生变形后地铁能够正常运营，在结构的防水上采取特殊方法，防水材料能够适应在大变形的情况下的防水要求。同时在地裂缝处理段要采取可调高度的轨道结构类型适应地裂缝处产生的变形，保证运营安全。

结合全线的工程筹划，穿过地裂缝处的区间结构有的段落采用的是浅埋暗挖法，有的段落采用的是盾构法、有的段落采用的是明挖法（表2）。但通

过有限元计算结合地裂缝100年的变形量，盾构法隧道因为适应大变形的能力有限，所以地铁区间隧道在穿过地裂缝影响带时采用浅埋暗挖法和明挖法，因此在盾构法施工段采用浅埋暗挖法先行处理地裂缝，再采用盾构机直接通过的方法。

表2 地铁2号线与地裂缝交汇点处工法
Table 2 Construction method of cross in No.2 subway and earth crevasse

序号	地裂缝名称	2号线通过地裂缝的区间	施工工法及断面形式	净空控制因素
1	f2	龙首村—北关	暗挖马蹄形	盾构通过
2	f3	北关—北大街	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
3	f5	南门—南稍门	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
4	f6/f6'	草场坡—小寨	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
5	f7	草场坡—小寨	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
6	f8	小寨—八里村	暗挖马蹄形	盾构通过
7	f9/f9'	八里村—长延堡	暗挖马蹄形	盾构通过
8	f10/f10-1	长延堡站后配线	明挖矩形	地裂缝沉降
9	f11	长延堡—三爻	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
10	f12	长延堡—三爻	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
11	f14	三爻—凤栖路	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
12	fc1	三爻—凤栖路	暗挖马蹄形	地裂缝沉降
13	fc2	三爻—凤栖路	暗挖马蹄形	地裂缝沉降

3.4 地铁2号线跨地裂缝处纵向设防长度的确定

根据已有资料、野外调查以及离散元和有限元的计算结果，从中可看出，地裂缝主变形区为10 m，主微变形区之和为32 m，在此基础上，考虑地裂缝宽度提出基本的设防长度（表3），这应该是轨道交通必须的设防段。

表3 地铁2号线与地裂缝交汇点处的地铁基本设防宽度
Table 3 Basic fortified breadth of cross in No.2 subway and earth crevasse Amax

编号	地铁设防长度（m）	编号	地铁设防长度（m）
f2	38.8	f8	62.0
f3	52.3	f9/f9'	52.0（41.5）
f5	49.0	f10	39.0
f6/f6'	47.0（40.0）	f11	44.0
f7	47.0	f12	42.0

考虑地铁结构纵向超长结构的特点和工程的特别重要性，加之地铁隧道属于浅埋地下工程，故参照地裂缝设计规程^[2]（DBJ61—6—2006）中一类建（构筑物）的避让距离，地裂缝主变形区范围上盘为40 m，下盘为24.0 m。取地裂缝地段65 m为设防长度。进行隧道设防长度确定时，尚需根据调坡进行调整来确定。

3.5 线路调坡

考虑地裂缝的时空活动强度变化特点,确定地裂缝带段(约65 m)、调线调坡段均要预留空间来确定地裂缝地裂缝处纵向设防长度。设计时地裂缝均避开车站,在跨越地裂缝前后应尽量加大纵向坡度,以防止在地裂缝发生变形后形成积水坑。并在裂缝前后预留足够的坡段长度,以防止断缝处发生沉降之后形成新的变坡点(图2地裂缝地段线路调坡)。地裂缝距离站台端部距离均不小于120 m,从地裂缝处开始调坡,调整的长度为^[9-10]

$$L = A_{\max} / (i_1 - i_0) \quad (1)$$

式中: L 为地裂缝调坡长度; $A_{\max}$ 为地裂缝垂直位错量; i_1 为调整后轨顶纵坡; i_0 为原设计轨顶纵坡。

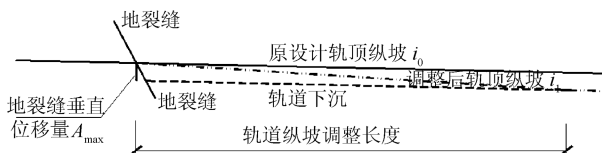


图2 地裂缝地段线路调坡

Fig.2 Adjust gradient of subway during earth crevasse extent

3.6 设防段分区

地裂缝影响段65 m设变形缝,地裂缝主变形区为10 m,为地裂缝的破裂区,该区通常占地裂缝总垂直位移量的80%~90%,主变形区是目前工程措施上难以对抗的地裂缝区段,是主要的设防区,故建议按10 m进行隧道分段,微变形区虽然存在地裂缝沉降变形的影响,但其垂直形变仅占总变形量的10%~20%,微变形段按10~15 m进行分段。主变形区按10 m,微变形区为10~15 m,将变形缝直接设在地裂缝带的正上方。

3.7 地铁2号线跨地裂缝处结构处理措施

①地裂缝条件下的结构防治措施的原则是“防”与“放”相结合;以结构适应地裂缝的变形为主,采取了“分段处理、柔性接头、预留净空、局部加强、先结构后防水”的工程措施。

②结构扩大断面、预留净空:在地裂缝处理段均需依据预测的地裂缝百年变形量预留必要的变形空间,在地裂缝处理段结构扩大断面(图3地裂缝处理段横断面结构图),预留净空(500 mm),以便在地铁使用期内,地裂缝错动后仍能通过线路调坡来保证行车。

③在地裂缝影响段必须采用分段结构进行设计,采用柔性接头进行处理(图4地裂缝处理段横断面结构图),预留变形缝适应地裂缝的变形。

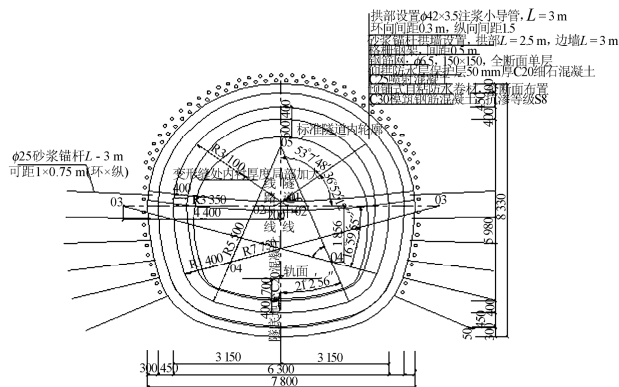


图3 地裂缝处理段横断面结构图(单位: mm)

Fig.3 Structural horizontal surface cross earth crevasse(unit: mm)

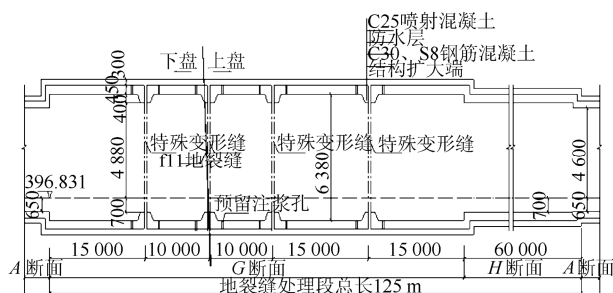


图4 区间通过地裂缝段结构纵断面图

Fig.4 Structural vertical surface cross earth crevasse

取地裂缝地段65 m为设防长度,主变形区是主要的设防区,故按10 m进行地铁隧道结构分段,微变形按10~15 m进行分段来设置特殊变形缝,释放错动产生的变形,并预埋可多次注浆的注浆管,预备紧急情况时进行应急堵漏处理。

④地裂缝段地断面进行专门设计,加强结构配筋,以适当抵抗变形对结构的破坏。

⑤适应大变形的结构接缝防水方案:变形缝处必须采取特殊的处理方式,在结构发生变形时能够保持防水的效果。

⑥道床可调原则:轨道要满足地裂缝变形调整的要求。地裂缝处轨道结构方案:采用可调式框架板轨道(图5可调式框架板轨道),可调高框架板必须满足500 mm的调高要求;

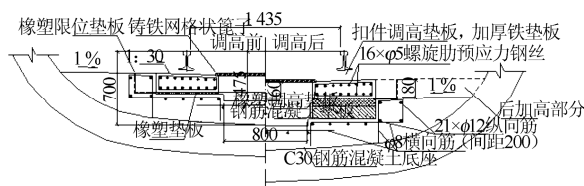


图5 可调式框架板轨道(单位: mm)

Fig.5 Frame plank structure being adjusted(unit: mm)

地裂缝垂直位错 $s \leq 50$ mm时,由扣件来调整;当地裂缝垂直位错 $s > 50$ mm时,由采取抬升框架

板轨道的方式来调整。

⑦加强监控量测, 及时进行地基加固处理。

⑧加强法规建设, 限制开采地下水, 降低地裂缝的活动性, 控制裂缝的发展趋势。

西安地裂缝的剧烈活动主要与过量抽取地下水有关, 建议相关部门进行立法, 以法律的形式禁止或限制开采地下水, 可有效消除地裂缝活动对地铁运营安全的影响。

4 地铁区间隧道穿过地裂缝的防水措施

4.1 防水等级及原则

根据《地铁设计规范》^[12]、《地下工程防水技术规范》^[13]地铁通过地裂缝带的防水等级为 2 级。由于地裂缝活动位移较大、机制复杂, 所以必须考虑到今后的维修问题。

地铁区间隧道穿过地裂缝带的结构及防水应该具有下面的特征: ①地裂缝活动时结构本身不能出现破坏; ②防水措施失效后要能够在较短时间进行修补, 施工要方便; ③修补的时间间隔要尽可能的长, 并且要经济、有效。

西安地铁通过地裂缝段的结构防水设计原则在遵循《地下工程防水技术规范》^[13]1.0.3 基本原则的基础上, 确定为“以防为主, 防排结合, 多道设防, 可修便修, 综合治理”的原则。

4.2 结构自防水

根据专题研究, 地裂缝作用下地铁隧道结构加强了结构的强度, 通过增设变形缝来控制 and 适应地裂缝的活动。所以, 在区间隧道穿越地裂缝段结构采取分段处理, 每段隧道结构接头采用柔性接头, 同时局部扩大隧道断面预留净空, 局部加强确保衬砌结构强度。

根据专题研究, 将变形缝设置在地裂缝正上方, 可保证结构安全可靠, 但要求较好的防水措施。

防水的关键在于结构本身的自防水和变形缝的防水处理。结构自身防水主要采取的措施是: 优先采用补偿收缩防水混凝土; 适当提高结构水平纵向构造钢筋; 注意施工质量, 混凝土浇筑时要振捣密实, 加强养护; 对防水层要选好材料和精心施工。

4.3 特殊变形缝的防水设计

特殊变形缝间距为 10~15 m, 在地裂缝处及两侧共设 4 处特殊变形缝, 特殊变形缝宽度为 100 mm, 特殊变形缝所在的环面与隧道中心轴线垂直。特殊变形缝处除附加外包防水层外设置 3 道防水

线, 具体方案如图 6、图 7 所示。

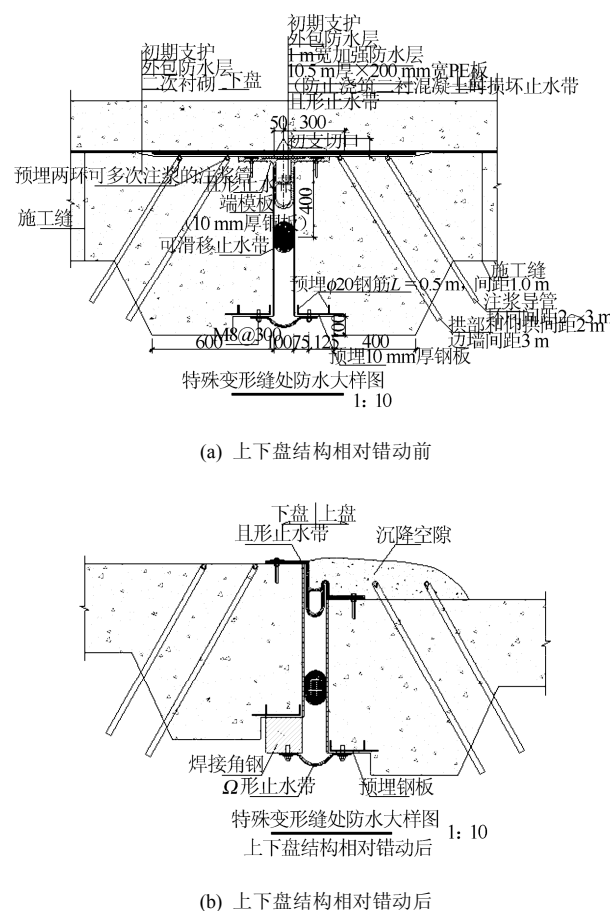


图 6 特殊变形缝处防水大样图

Fig.6 Sketch plan of waterproof of special distortion slot

(1) 特殊变形缝外侧设置且形止水带, 形成一道封闭的防水线; 第 1 道且形橡胶带: 一方面能起到挡结构外侧泥土的作用, 主要是能适应地裂缝处上下盘主体结构之间 500 mm 的垂直错动和 50 mm 的水平错动, 同时在使用 100 年的使用过程中可阻挡 0.3 MPa 的水压; 地裂缝活动时, 结构将沿着滑动面下沉及扭转变形, 此时第一道且型止水带沿着缝隙被拉伸, 继续发挥止水功能。

(2) 特殊变形缝中部设置可滑移止水带, 形成第 2 道封闭的防水线; 第 2 道中空压力防水带: 预先压缩的一道中空压力止水带 (可滑移止水带) 应具有可在上下盘主体结构间滑移的功能, 可适应地裂缝处上下盘主体结构之间一定量的垂直错动和水平错动, 同时在使用 100 年的使用过程中可阻挡 0.3 MPa 的水压; 且在使用期内可拆卸、维修或更换。

变形缝端模板为可滑移止水带提供光滑的滑动面, 端模板采用 5 mm 厚 Q235 钢板, 靠近变形缝侧涂环氧沥青漆 2 度。为防止端模板外缘损坏且型止水带, 需将端模板外缘棱角进行处理。

(3) 特殊变形缝内侧在拱顶和边墙部位设置

