

某公路 4 号桥桩基础地震勘探报告

1 概况

1.1 工程概况

某公路 4 号桥,桥梁修筑起点为 K15+530.000,桥梁修筑终点为 K16+010.000,桥梁全长 480m 左右。在施工中多处桩基础发生漏浆坍塌事故,现场初步试验,推断地下存在隐伏采空区。为确保工程质量,消除工程隐患,需要对 4 号桥基础的地质条件进行物探勘查,查清引起工程病害的地质原因及其影响范围,以便对工程进行有效处治。

山西省煤炭地质局 114 勘察院受委托承担某公路 4 号桥基础的工程物探勘查工作,查清桩基场地的工程地质条件,引起工程病害的地质原因及影响范围,并提出治理建议。

1.2 工程地质概况

某公路 4 号桥属于大桥,场地复杂程度属 II 类中等复杂场地。场地为浊漳河河谷地貌,河流平缓,河床宽度为 30 米左右。河床两侧为堆积地带,桥址处浊漳河由西北向东流动。地面标高介于 875.90~893.70 米之间。

中国市政工程华北设计研究总院承担了桥梁的设计与工程勘察工序。完成工程钻孔 34 个,左右分 2 排,每排 17 个钻孔,两排间距为 30m。纵向分 17 排,每排 2 个钻孔。钻探深度 15-37m。根据本次勘察揭露地质资料,结合区域地质资料综合分析,勘察深度范围内地基土沉积时代成因类型自上而下依次为:第四系全新统地层 (Q_4);第四系上更新统冲洪积层 (Q_3^{al+pl});第四系中更新统冲洪积层 (Q_2^{al+pl});石炭系上统 (C) 的灰岩与泥岩;及奥陶系灰岩 (O)。勘探结果表明第四系松散层较薄,最厚 18m,最薄 1m,平均厚度 10m。下伏的石炭系灰岩残留厚度变化较大,大部分钻孔中缺失,泥岩分布较稳定。

2 工程物探方法选择

山西长治地区地质构造复杂,含煤地层发育,采空区广泛分布。为确保交通工程建设质量与安全,多年来开展了工程场地条件与采空区探测工作。

目前国内采空区的探测技术主要以高密度电法、瞬变电磁等电磁方法和地震散射方法为主。本次勘探选择地震散射方法。

地震散射技术 (SSP) 是在地震反射的基础上发展起来的地震散射勘探新方法。它以非均匀地质模型为基础,利用广角逆散射波场信息研究地下三维地质结构。地震散射理论将非均匀地质

体的波速表示成如下分布形式：

$$\alpha(x) = \frac{V_p^2(x) - V_0^2}{V_p^2(x)} \quad \frac{1}{V_p^2(x)} = \frac{1 - \alpha(x)}{V_0^2}$$

其中 α 表示波速异常强度，也就是散射强度。它是介质非均匀程度的度量，介质均匀部位 α 为零，波速增高的部位为正，波速降低的部位为负。 α 的分布反映了地质结构的主要特征。散射波满足如下弹性波动方程：

$$\nabla^2 U_s - \frac{\partial^2 U_s}{V_0^2 \partial t^2} = -\frac{\alpha(x) \partial^2 U_i}{V_0^2 \partial t^2}$$

该方程右端的非齐次项的作用是震源力，它与非均匀强度 α 及入射波激励成正比。该式表明，在外来入射弹性波的激励下，介质非均匀部位相当于被动震源，向周围介质发射地震波。这就是散射波的物理本质。通过对地震散射波场的接收与反演，可以确定地下介质非均匀性 α 的分布，借此实现对地质构造的精细成像。这就是地震散射勘探技术的基本原理。

地震散射勘探具有勘探深度大、界面分辨率高、速度结构精细等优点，特别适合地形、地质条件复杂山区的地质结构精细成像。SSP技术依据地震偏移图像中界面的断续形态与波速结构中的低速区的分布两项特征判定断裂、岩溶以及采空区的位置，为复杂地下构造的研究提供了一种新的有效手段。

3 勘查方案及工作布置

3.1 探测方案

本次物探选择 SSP 地震散射勘探技术。SSP 数据采集时采用大排列观测方式，检波器插地，间距 2m，炮点间距 4m，使用 5 万焦耳的电火花震源。为查清区内地质条件，按委托技术要求每排桩基布置 1 条剖面，每条剖面长度 200m，设计勘探深度 200m。勘查使用 24 道记录器，检波器间距 2m，震源间距 4m。观测方法示意图 1。

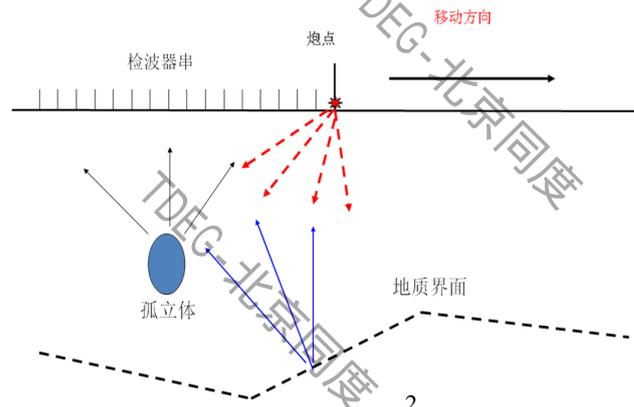


图 1、SSP 观测布置示意图

3.2 测线布置

测线垂直桥梁走向布置，通过桥桩基位置，每排桩基 1 条剖面，剖面长 200m，桩基为中心线位于剖面正中间 100m 处，探测深度 200m。4 号桥有 8 排桩，共布置 8 条剖面。剖面位置见图 2。

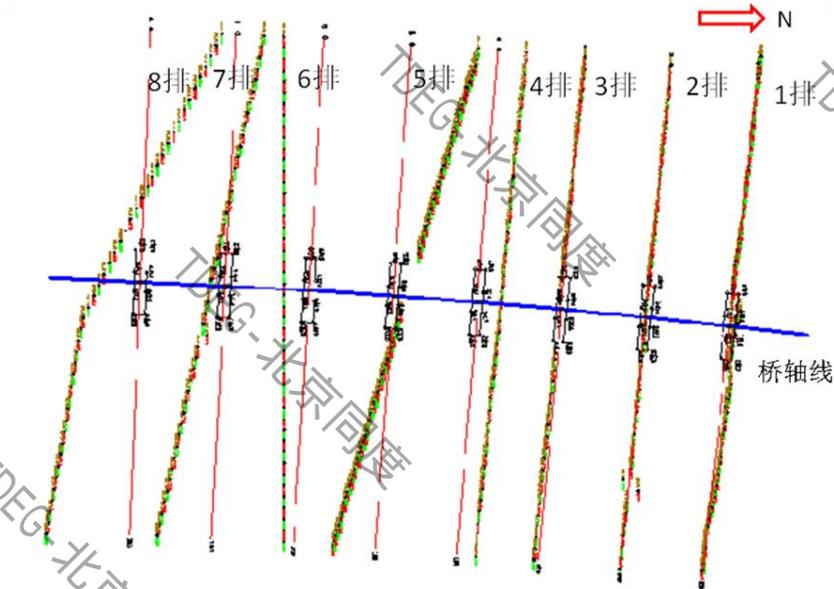


图 2、桥址地震勘查剖面布置图

4 地震散射数据处理与解释原理

4.1 地震数据处理流程

本次勘探共完成 8 条地震剖面。每条剖面激发点间距 4m，对于第 1 与第 5 排剖面加密到 2m。资料处理经过触发延时校正、方向滤波、速度扫描、合成孔径成像等步骤，最终获得地震偏移图像。典型地震记录如图 3。其中图 3a 为原始记录，图 3b 为方向滤波后数据。比较滤波前后的记录可以发现面波与声波完全被清除了。同时可以看出 400ms 处的地震信号依然很清楚，信噪比很高，说明 5 万焦耳电火花震源的有效勘探深度可达 400m。

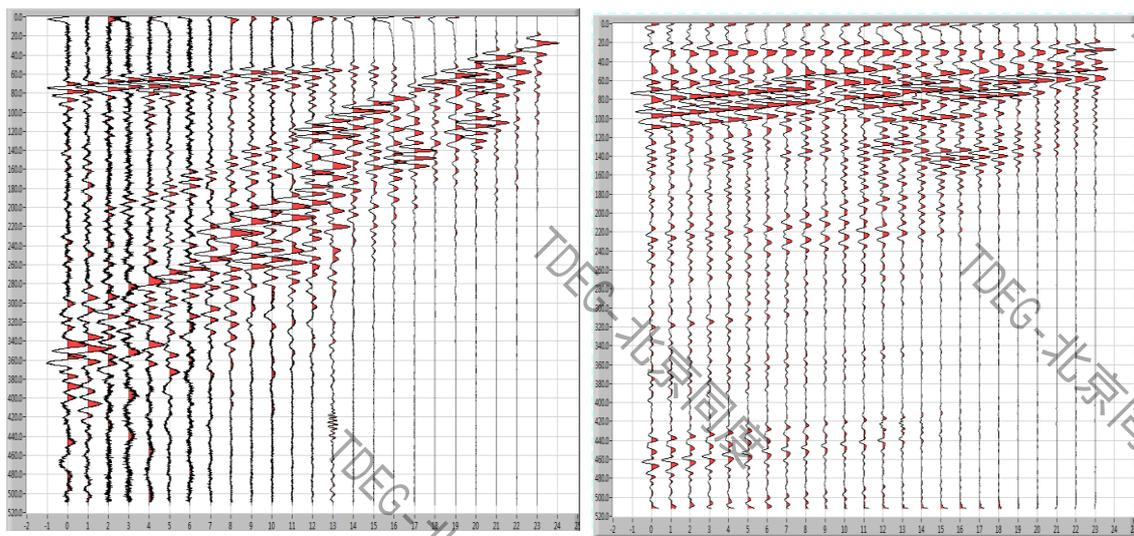


图 3a 原始地震记录

图 3b 滤波后地震记录

4.2 地震偏移图像与解释原理

地震偏移图像横坐标是剖面里程，纵坐标是深度。图中成像的物理量是散射强度 α ，红色表征 α 为正，地质界面波速增高，界面下方岩体弹性模量和波速增高，岩体刚度增大。 α 为负时图中用蓝色，表示界面下方岩体弹性模量和波速变小，变得松散。对于地震偏移图像的地质解释是通过地震散射勘探研究地质结构的基础。地质解释遵从如下基本原则：

(1) 岩层界面的解释与判别

岩层界面的形态特征一是具有一定的横向连续性，形成一个界面。物理特征界面两侧岩层间的弹性模量、密度、波速有明显的变化。在界面位置上散射强度 α 有较大的数值，而离开界面 α 变为零。这两个特征决定在散射地震图像中，界面为一个连续的强烈的红色或蓝色线条。红色表示界面下方岩层变得坚硬，蓝色表征下方岩层变得松软。

(2) 岩溶与采空区的解释与判别

岩溶与采空区的形态都具有局部性、孤立性，不同于连续界面。其主要物理特征是低速区，岩溶于采空区部位的岩体具有低波速特征，对应界面位置在图像中为蓝色，两者具有类似的特征。寻找采空区和岩溶区就是寻找孤立的蓝色低速区。一般情况下，采空区具有一定的联片性，同时对上覆岩体与界面形态的影响会更大些。通过大量系统的勘探与对比可以将两者区分开来。单一的、少量的试验很难准确鉴别。

(3) 断裂的解释与判别

断层是地震勘探最重要的研究对象。断层的形态特点是两侧地层界面的错断，不连续，地层界面的距离就是断裂的断距。这一特征适合规模较小的断裂，对于规模较大的断裂，地层界面会受到严重破坏，断裂影响带内岩体破碎，反射/散射波缺失，表现为一个低速带。这是规模较大断裂的特征。

遵从上述 3 条基本原理，可以对地震散射偏移图像做出合理解释。

5 地震散射勘探主要结果

5.1 地震散射勘探的主要结果

通过地震数据得到 8 条剖面的地震偏移图像。遵从地震散射图像解释原理，可将勘探成果的汇总为如下三方面内容。

(1) 桥址场地内为双层地质结构，分层界面为奥陶系古风化层，形成全区的低速层

根据地震散射剖面图像特点，从地表到 200m 深度内，可分为上下两部分。两部分的界面位置多数在 50m 左右，中间剖面深到 60m，靠近桥两端界面的位置变浅到 20m 或 40m。该分界面主要特点有三，其一是形态上全区内强度大，连续性最好，很少中断，产状平缓；其二是该界面的低速层特点明显，一致性好；其三是该层位以上和以下地层的状常常不一致。这些特点表明，该界面应该是一个地质不整合面。结合地质资料分析，这个层位对应奥陶系地层顶部的古风化层，它与中石炭统就是不整合接触，由于奥陶系顶部峰峰组为强岩溶化地层，风化形成低速层。该层位如果占位较浅，或与断裂相伴，将对桥基稳定性产生不利影响。如 1 排桥基发生的漏浆与坍塌就与此有关。

(2) 上部低速层--中石炭统泥岩风化层

在大部分地震剖面中，特别是桥中间的剖面，如 4、5、6 剖面，上部地层中常常发育有几米厚的低速层。该层为连续性好，界面起伏变化，应该是泥岩风化形成的低速层。介质松软，强度低，埋深浅，如果与断裂相伴将会对桥基稳定性有不利影响。如 5 排桩基发生的漏浆与坍塌就与此有关。

(3) 下部低速层—岩溶发育区

在地震散射剖面中深部低速区发育，这些低速层往往对应深部岩溶，可能对应上、下马家沟组岩溶，它们通常比峰峰组岩溶还强烈。这些岩溶发育部位往往与断裂有关。深度较浅、发育强烈的岩溶，如果与断裂相伴，则会对桥基的稳定造成一定的影

响。尤其是桥梁中部的 3、5、6 排的几个剖面，应该引起重视。

(4) 隐伏断裂的分布

在 6 个地震剖面中不同程度地有断裂发育。断裂的发育深度主要集中在不整合层面以下。断裂两侧地层界面出现不连续，一般断距在 3-5m 左右，多数属于小规模断裂。断裂对岩溶、岩体风化与破碎有重要影响，对岩体稳定不利。第 1 排剖面中的 F1、F2 两条断裂是规模较大者，影响宽度达 70m。它使浅部岩体的风化程度加大，深部的岩体破碎、岩溶发育，形成从浅到深得强烈的低速异常区。各剖面的断裂有可能是相关的，图 4 中的断裂的分布位置 FL1、FL2、FL3、FL4 是根据各剖面中断裂的位置推断连通的，只能作为参考。其断裂的走向主要以北东向为主，反映了区域构造的主要特征。

5.2 桥址场区的主要工程地质问题分析

本次勘查发现有 4 处桩基存在工程地质问题，分别为第 1 排、第 3 排、第 5 排与第 6 排桩基。

桥基施工中第 1 排桩、第 5 排桩出现了漏浆与坍塌问题。第 1 排桩的工程事故与断裂带有关。该断裂带影响带宽、岩体破碎，加之深部可能伴有岩溶，地下水深浅沟通等因素造成的。

第 5 排桩基的工程问题是由于浅部泥岩风化严重、不整合面岩溶发育，并与断裂相伴，地下水上下导通等综合原因造成的。

除上述两排桩基的问题之外，在 3 排和 6 排桩剖面中，也发现了一些工程地质隐患，这些隐患主要是隐伏岩溶与断裂带相伴的问题。

第 3 排桩基深部 80m 以下发育有断裂和强烈岩溶，岩溶强度大，范围广，这会对桩基的稳定有不利的影 响。虽然施工中未发生问题，但对桥基的长期稳定是一个隐患。

第 6 排桩剖面中也存在类 似的问题。该剖面岩溶发育强度大、范围广，距地面浅约 70m，并 有两条断裂伴生，对桥基的长期稳定构成威胁。

地震勘探发现的岩溶与断裂的平面位置汇总到图 4 中。其中虚线表示推断的断裂，剖面接露的位置推断连接；虚圈表示岩溶发育区。从图中可以发现场地的构造和岩溶是比较发育的。断裂以北东向为主，规模不大；岩溶多为层状发育，少数发育强烈的部位越层、落水现象。

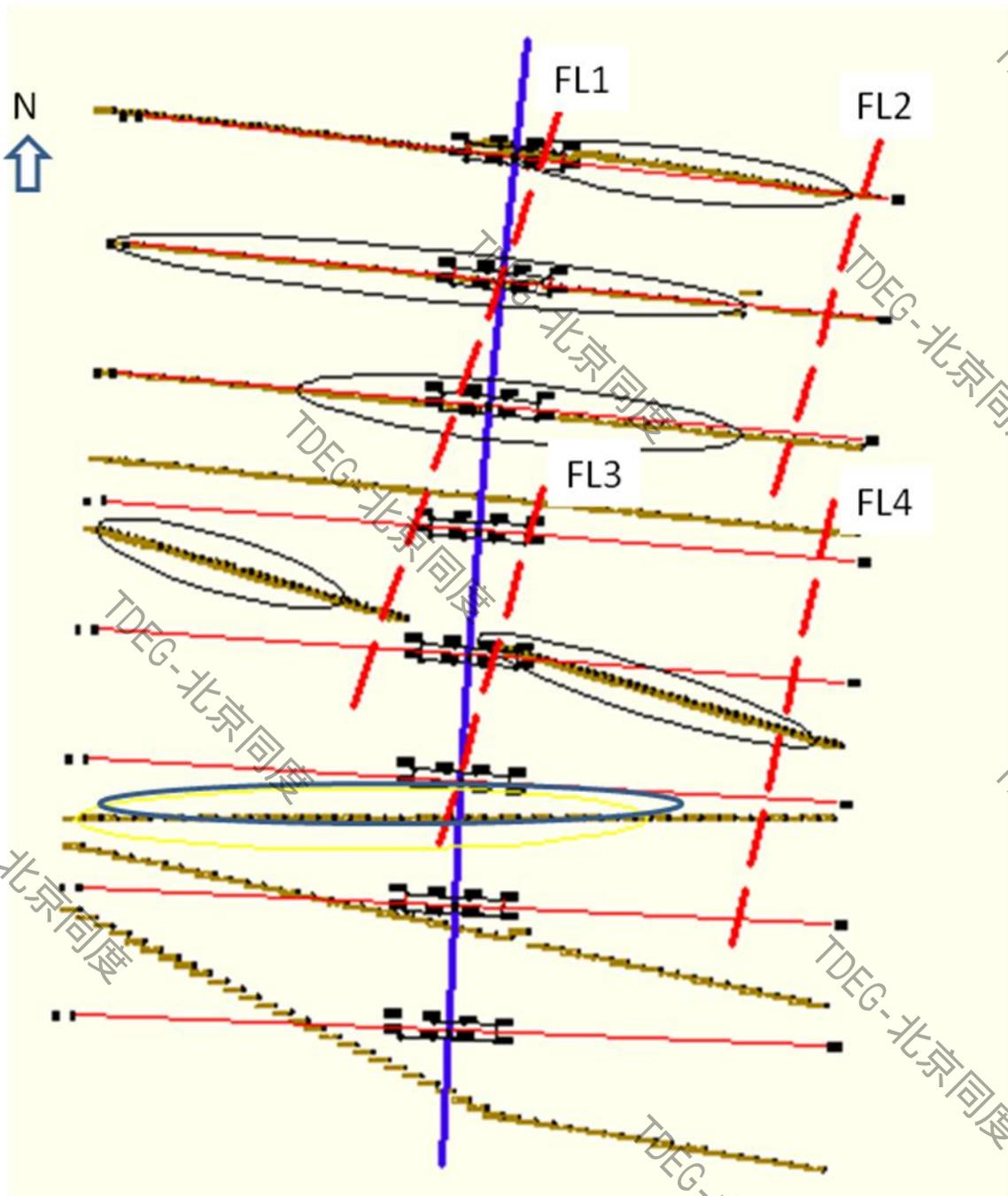


图 4 桥址内断裂与岩溶发育平面图

5.3 地震散射剖面与解释

现对 8 条地震散射剖面的图像特征与地质解释分别详述如下。

(1) 第 1 剖面 1 及地质解释

地震剖面 1 的偏移图像列于图 5.1，偏移图像特征及地质解释如下。剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内有 2 个断裂带，110m 到 180m 之间为断裂影响带。地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二层段，分界深度在 20m 处。20m 以上为松散层，产状平缓。在 110m 到 180m 的 70m 宽度上存在低速异常区，推定为断裂影响带，为松散破碎，稳定性较差。

20m 深度以下地层近乎水平，略向西倾。在 110 到 18m 的范围内由浅到深蓝色低速异常明显，岩体破碎，或伴有岩溶发育，特别是深度 140m 以下尤为明显。

剖面发育有 2 条断层，位置在 120m、170m 处，从浅到深，延伸超过 200m。断裂影响带宽达 70m，岩体破碎低速。

该断裂对第 1 排桥基的稳定性有较大影响，施工中发生的漏浆坍塌就是由该断裂带引起的。

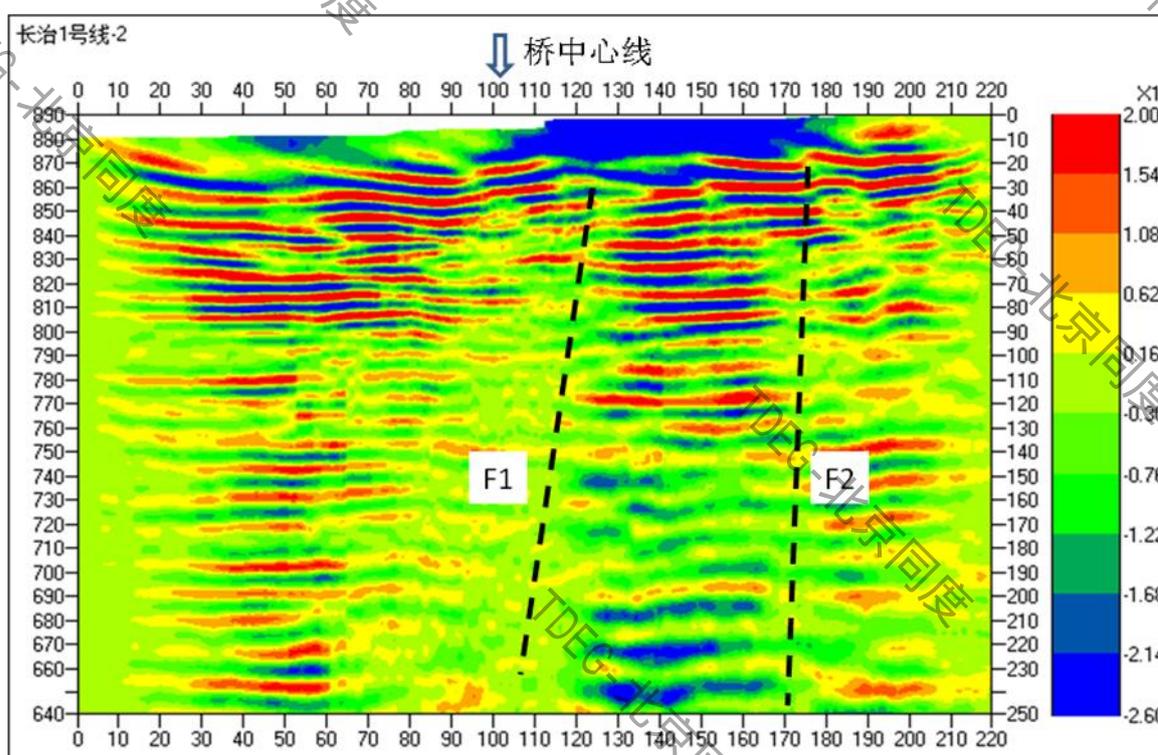


图 5.1 第 1 排桩地震偏移剖面

(2) 地震剖面 2 及地质解释

地震剖面 2 的偏移图像列于图 5.2，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 250m，100m 处为桥桩中心线。剖面内没有低速区发育，发育 1 条断裂，编号 F3。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二段，分界深度在 50m 处。50m 深度为一个近水平的界面，应该是不整合面，奥陶系的古风化面。50m 以上地层的产状向西倾，倾角较大，包括残留的石炭中上统泥岩与砂岩，以及松散沉积。50m 以下地层略向西倾，倾角较缓，近乎水平，为奥陶系地层。地下 150m 以下发育有低速层，推断有深部岩溶，用虚线圈表示。地层产状的变化反映了这些地层的不同时代的形成环境与后期构造变形历程。

断裂发育在剖面中 170m 位置，从 50m 深度开始向下延伸超过 200m。断裂两侧层位不连续，断距不大。距桩基位置 50m 以远，埋藏较深，对第 2 排桥基稳定性无影响。

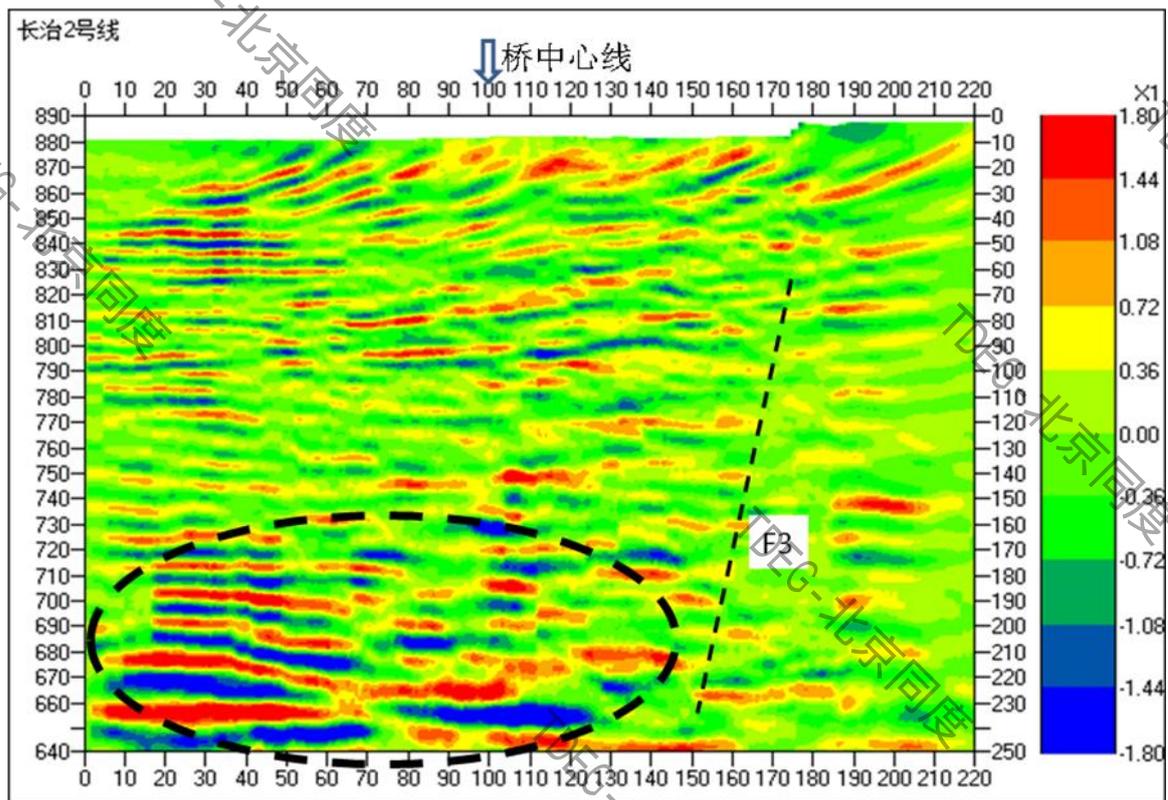


图 5.2 第 2 排地震偏移剖面

(3) 地震剖面 3 及地质解释

地震剖面 3 的偏移图像示于图 5.3，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内没有低速区发育，并有 2 条断裂，编号 F4、F5。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二段，分界深度在 50m。50m 深度有一个近水平的界面，应该是不整合面。50m 以上地层的产状向东倾，倾角约 10° ；浅部没有规模加大的低速岩体；50m 一下深度内地层近水平。在中部 80-150m 位置的深部 80m 以下发育有明显的蓝色低速区，推测为岩溶发育区。

在剖面 100m 和 150m 位置，发育有 2 条断层，埋深从 70m 开始向下延伸。断层两侧地层错断，受断裂影响两侧发育低速层，推测为深部岩溶发育区。

剖内 40m 以内岩体稳定性好，80m 以下深度的低速岩溶区对桥基的稳定性有不利影响；

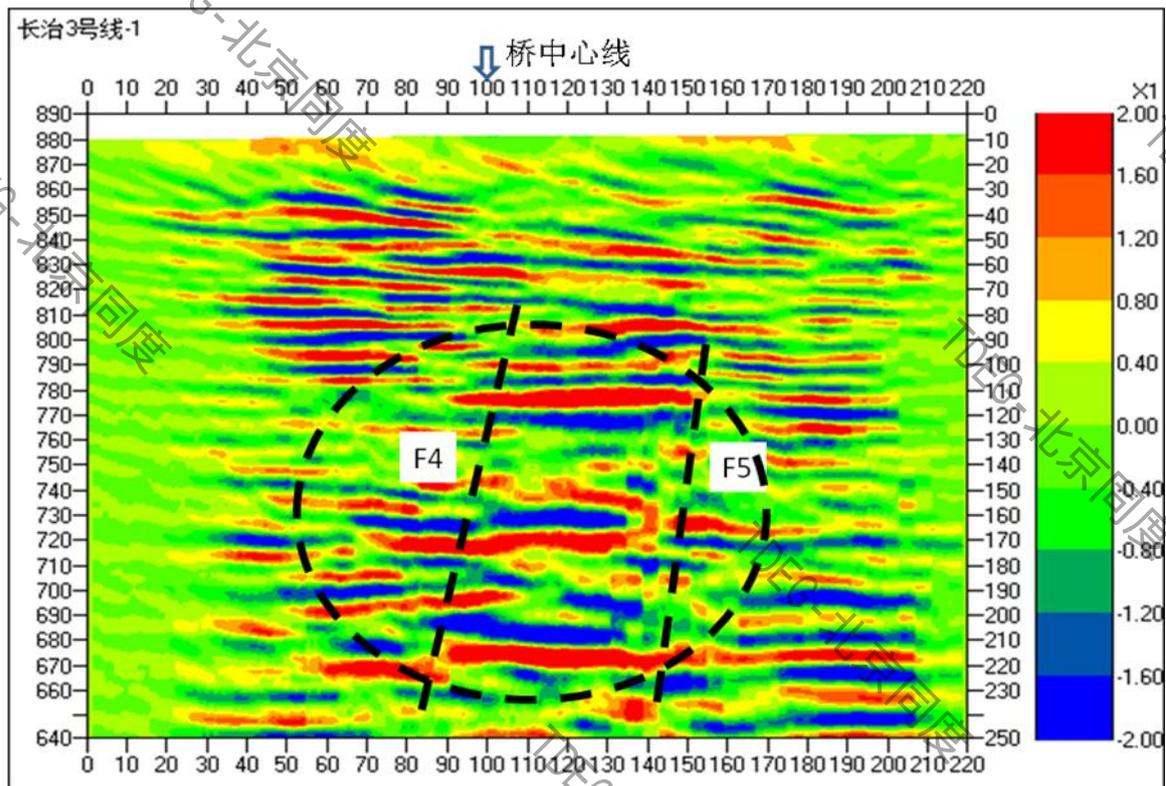


图 5.3 第 3 排地震偏移剖面

(4) 地震剖面 4 及地质解释

地震剖面 4 的偏移图像示于图 5.4，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内没有规模较大的低速区，但发育有 3 条断裂，编号 F6、F7、F8。主要地质特点如下。

剖面内地层特点由浅到深可分为二段，分界深度在 60m。60m 以上地层的产状向西倾，倾角约 10° ，没有规模加大的低速岩体；60m 以下深度内地层近水平，下伏为奥陶系基岩。

剖面内发育有 3 条断裂带，分别命名 F6、F7、F8，地层界面错断，断距不大。断裂从深度 60m 处开始向下发展，直到 200m 深度。断裂带两侧有低速层发育，推断有层状岩溶。断裂带对浅部岩体影响不大，对桥基工程稳定性无影响。

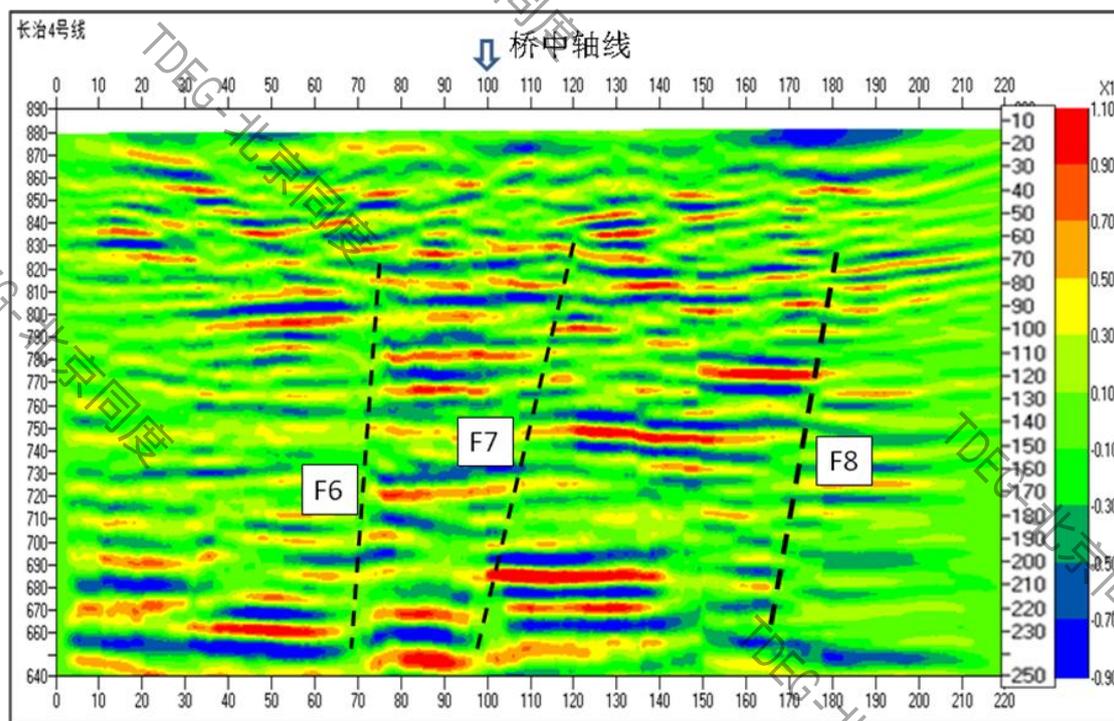


图 5.4 第 4 排地震偏移剖面

(5) 地震剖面 5 及地质解释

地震剖面 5 的偏移图像示于图 5.5，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内有规模较大的低速区，并发育有 2 条断裂，编号 F9、F10。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二段，分界深度在 60m 处。在深 60m 的位置有一近水平的低速层，应该是奥陶系顶面的风化、破碎岩体，形成的不整合面。60m 以上地层的产状西倾，倾角约 20°，地层结构复杂，层面断续多变。60m 以下深度地层近水平，连续性较好。

剖面内在 110m、130m 位置发育有 2 条小规模断裂。受断裂带影响，岩体破碎低速。在剖面 80-130m 宽 50m 的范围内，20m 到 60m 的深度内发育有 3 个低速层。

低速层构造破碎岩体与断裂带是引起桩基漏浆坍塌的主要原因。

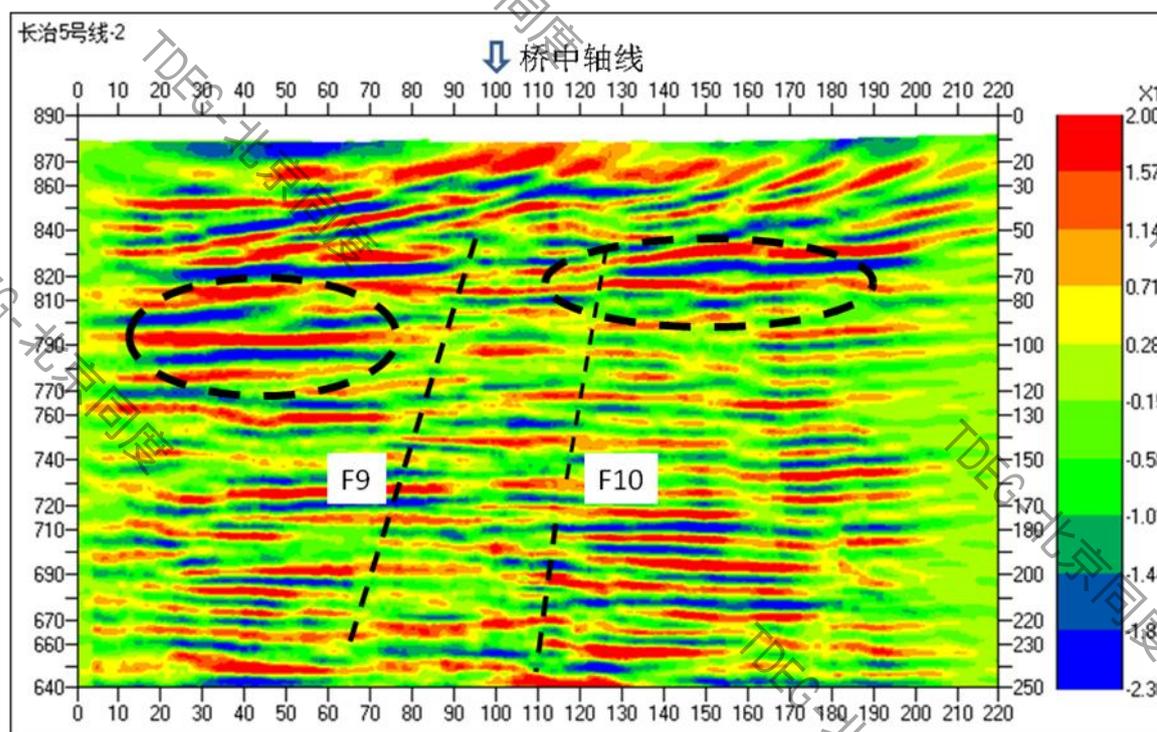


图 5.5 第 5 排地震偏移剖面

(6) 地震剖面 6 及地质解释

地震剖面 6 的偏移图像示于图 3.6，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面 40m 以内没有低速区，但 50m 深度以下低速层很发育，有 2 条隐伏断裂，编号 F11、F12。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二段，分界深度在 30-40m。30-40m 处应该是不整合面，略向东倾，对应位置发育低速层。40m 以上地层的产状略向东倾，地层结构断续多变，没有低速层。40m 以下地层产状近乎水平，蓝色的低速层较发育，特别是 50m 以下低速层尤其发育，推测深部有层状岩溶。

剖面内发现 2 条断裂，位置在 100m 处的命名 F11，从 90m 深度向下发育，应该是石炭纪以前发育的。位置在 160m 处的命名 F12，从 50m 深度开始向下延伸。断距不大，两侧岩层错断。

剖面内 40m 以内岩体稳定，50m 以下岩溶低速层发育，对岩体稳定性存在不利影响。

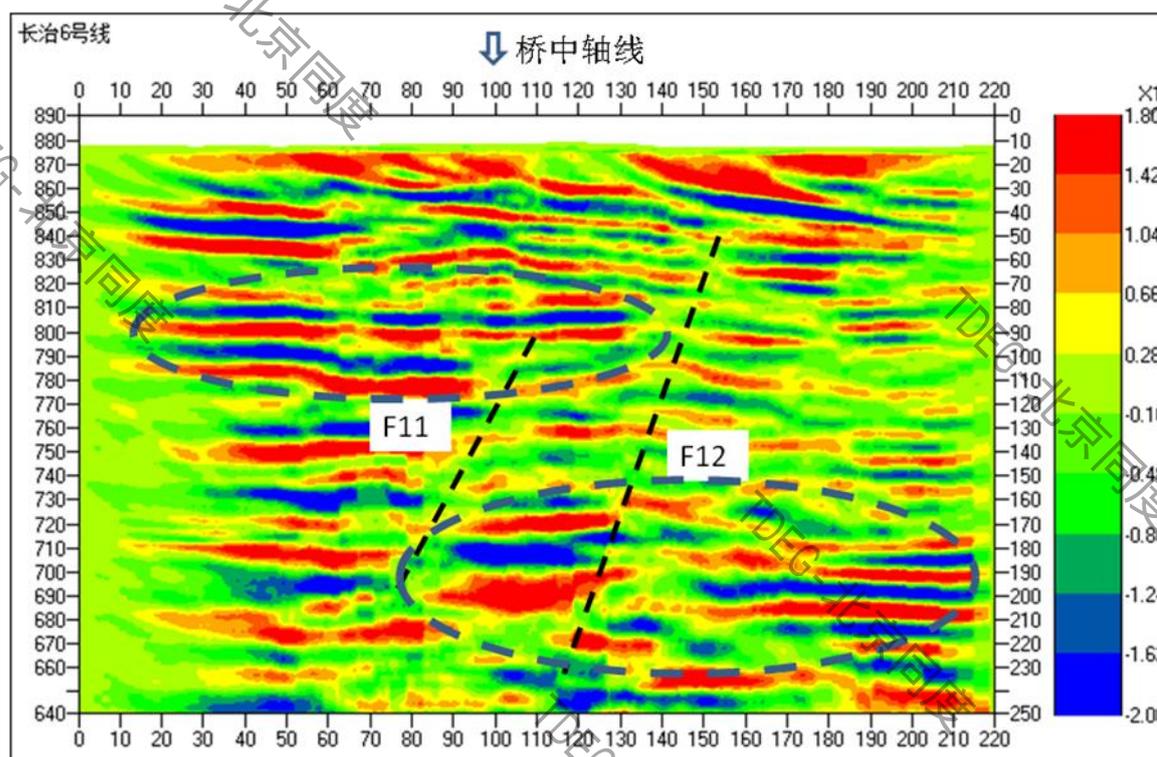


图 5.6 第 6 排地震偏移剖面

(7) 地震剖面 7 及地质解释

地震剖面 7 的偏移图像示于图 5.7，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内低速层不发育，有 2 条隐伏断裂，编号 F13、F14。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二层，分界深度在 40m，40m 处发育低速带，应该是不整合面。40m 以上地层的产状略向东倾，倾角不大，地层结构断续多变；40m 以下深度地层近乎水平，连续性较好。

两条隐伏断裂位于 90m 与 170m 的位置，从 40m 深度开始向下发展，延伸超过 200m。断距 5m 左右，破碎带不发育。

在桩基附近没有明显的低速区，隐伏断裂规模较小，对桥基工程地质条件的稳定性无影响。

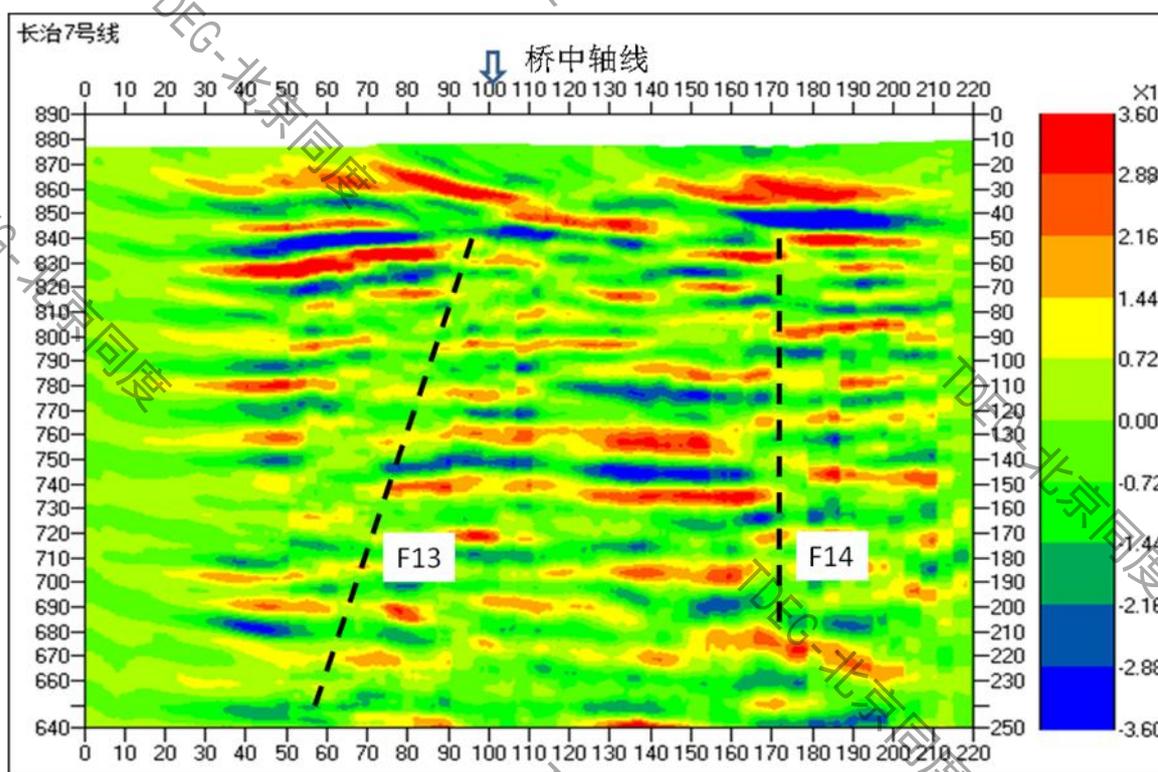


图 5.7 第 7 排地震偏移剖面

(8) 地震剖面 8 及地质解释

地震剖面 8 的偏移图像示于图 8.8，偏移图像特征及地质解释如下。

剖面方向由西向东，长 200m，深度 200m，100m 处为桥桩中心线。剖面内低速层不发育，未发现断裂与不利地质条件。主要地质特点如下。

地层特点由浅到深可分为二层，分界深度在 40m。40m 处发育低速带，应该是不整合面。40m 以上地层的产状略向东倾，倾角不大。40m 以下深度地层近乎水平，连续性较好。桩基附近低速层不发育，岩体稳定性较好。

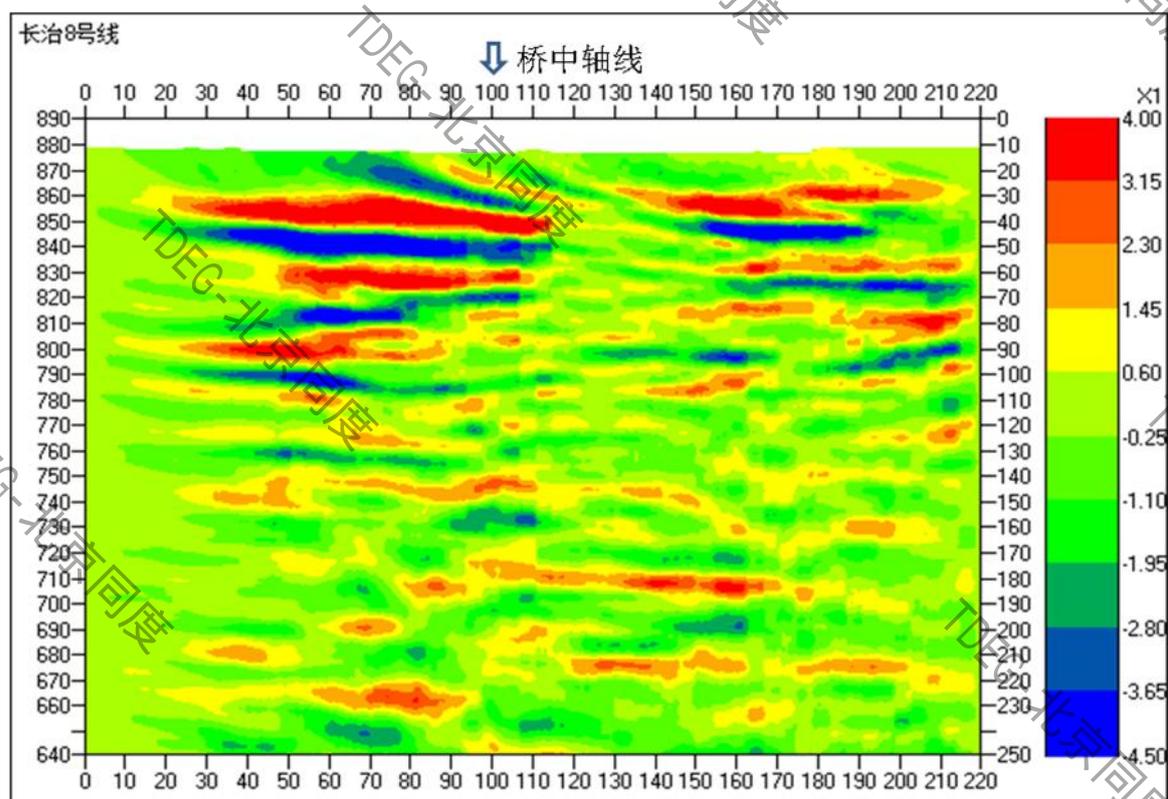


图 5.8 第 8 排地震偏移剖面

6 结论与建议

6.1 勘查的主要结论

本次地震勘探查清了桥址场地内主要不利的工程地质问题，包括低速松散岩土的分布与成因，断裂带的分布、岩溶的发育及其它们对工程场地稳定性的影响。特别是对泥岩风化层、奥陶系风化面、断裂带以及岩溶的分布与发育程度进行了详细的分析。

勘查发现有 4 排桩存在不利的地质条件，它们存在于第 1、3、5、6 排桩位置。其中第 1、5 排桩已经发生了问题，另两排桩虽然施工中未发生问题，但从长期稳定考虑，存在隐患，应该一

并加以处理，防患于未然。

这些不利的地质条件最主要的是断裂带的影响与深部岩溶的相伴作用。断裂带使岩体破碎，岩溶使地下水导通形成越流，联合作用使地基失稳，这是产生病害的主要条件。

6.2 病害治理建议

鉴于勘查发现 4 处不利的工程地质地段，分别在第 1、3、5、6 排桩，建议对这四段一并进行治理；

工程治理的主要出发点是阻断桥基下部奥陶系顶部峰峰组灰岩岩溶的渗流通道。峰峰组灰岩风化层是浅层地下水最活跃的层位，当断裂存在时很容易形成上下导通越流。特别是河床内附近地下水充沛，存在地下河。地下水流动及水位涨跌都会在带走松散物质，使基础失稳。

治理方案可以考虑从上部注入混凝土与防水材料，封堵灰岩风化层顶部 1-2m 深，形成以桩基为中心半径 5m 范围平台，一方面阻断地下水，另一方面充填风化裂隙，有效保护桩基基础稳定。

对于已经发生塌陷的桩基，应该先治理，后施工。