



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Applied Geophysics—Article

## 土石坝 SH 波地震反射成像

Edward W. Woolery

Department of Earth and Environmental Sciences, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0053, USA

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 8 April 2017

Revised 31 March 2018

Accepted 27 August 2018

Available online 5 September 2018

#### 关键词

地球物理

地震反射

剪切波

近地表

坝体安全

### 摘要

评价地下物性和地质特征成像（如断层、空洞、低速层等）是近地表地球物理学中的经典问题，这些问题通常会危害岩土工程，尤其对大型土石防洪坝这类高危结构物危害更大。在美国，由于大部分重要的基础设施在 20 世纪初至 20 世纪中叶设计建成，目前这些堤坝已处于设计寿命的末期，之前被人忽略的或者在设计建造过程中被认为无关紧要的细微缺陷将会对堤坝安全造成严重威胁。这些构造在高水动力条件下会加速薄弱区域的恶化，并破坏其长期完整性。仅用传统钻探技术解决大坝的相关问题通常存在不足（缺乏横向分辨率），过高的成本同样限制了钻探技术的发展。然而，有选择的岩土钻探技术与近地表地球物理相结合，尤其是对堤坝内部细小结构和地质基础条件成像方面的剪切波（shear-wave, SH 波）地震反射技术，可以有效地降低堤坝修复工程所需的成本。为支持上述观点，本文以美国中部两个防洪坝为例，对其原位组分和工程建设组分进行 SH 波地震反射成像。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

由于防洪、水资源和国内/工业能源的社会需求，美国在 20 世纪初至 20 世纪中叶设计并建造了大量堤坝 [1]。当时为了保证施工效率和经济效益，在民用工程特别是堤坝中，人们使用原地土料（即黏土、沙子和砾石）建造隔水墙、滤水管及其他重要结构设施。直到 1971 年南加州圣费尔南多地震引发了近乎灾难性的大坝坍塌，人们才开始反思使用原生材料作为大坝组成部分的做法是否合适 [1]。之后，大部分监管机构要求在高危险性的堤坝设计和施工中，需要将未压实的天然材料挖出并使用工程填料进行替代。然而，之前建设中使用的原位天然材料仍有可能存在未发现的不良岩土工程区

域（如地震低速带等），并有可能掩盖基岩下伏的有害地质构造（如断层、岩溶等）。由于地域条件不同，由这些未知的岩土工程缺陷造成的问题可能几十年后才会被发现。

任何项目在施工阶段都经常会发生方案或设计的变更，对于防洪大坝这样的大型复杂结构，可能会有很多重要的改动 [2]。虽然现代数字跟踪系统和数据库保存并记录了较完整的工程档案，但是许多堤坝早期的建造变动记录可能会丢失，或由于大量的修改以及当时的记录保存方法缺陷导致其留存较少。由于之前施工标准的差异，在评价堤坝内部原位地质特征或建筑工程特征时会出现不确定的地质情况。

大型堤坝和其他高危结构物都应特别关注这些问

\* Corresponding author.

E-mail address: [woolery@uky.edu](mailto:woolery@uky.edu)

题, 因为这种基础设施大部分正在进入设计寿命的末期, 其中在原始设计中或者施工阶段被认为不重要的细微缺陷将会对堤坝安全造成严重威胁。此外, 对于防洪坝, 高水动力环境会造成结构的加速恶化, 并破坏长期完整性, 因此岩土工程质量就更为重要。

传统上, 解决堤坝岩土问题时很大程度上依赖钻井得到的信息[1], 但可能无法取得较好的效果(比如横向分辨率不足), 在这种尺寸和规模下使用钻井技术经济成本也会过高。此外, 由于钻孔通常是按计划均匀地分布, 因此存在问题的异常区域很容易被忽略。联合使用无损近地表地球物理方法, 可以使基于目标的钻井方法在技术和经济上更加有效。如上所述, 选择的地球物理方法必须能达到在物理上解决岩土问题的目标和任务。通过对美国中部的两个填土防洪坝进行勘探, 剪切波(shear-wave, SH)水平极化横波地震反射技术在对大型堤坝的工程结构特征和原位地质基础条件进行勘探时, 能够达到所需的分辨率和最佳成像效果。尽管两座大坝都存在较大的噪声干扰, 但SH波地震反射法成功地对堤坝内低阻抗边界进行了成像, 识别出了原位地质沉积物与压实等效材料填筑物(即防渗墙), 以及埋置的混凝土构件(即隔水墙和泄水管道)。这次勘探结果说明在大型土木工程中, 经济有效的无损地球物理方法可以作为传统钻探的补充。

## 2. 背景

本文通过美国中部的两个土石坝的SH地震反射波剖面, 对其成像及定位效果进行评价: ①组成土石坝防渗墙和排水过滤器的工程填土与原位地质材料的低阻抗分界面; ②土石坝功能相对较少的基础设施(即内部混凝土出水管), 以及在坝肩挖槽发现的为了降低地基危

险而在建造期间增添的设施(即混凝土隔水墙)。

坝1位于印第安纳州北部, 建于20世纪60年代早期[图1(a)], 为压实的填土路堤, 长约2.4 km, 最高处约位于基岩上53 m, 整体建立在上覆于志留系灰岩上约25 m厚的冰川冲积物上。沿坝顶下游边缘(轴心线下游约12 m), 采集了长788 m的SH波地震反射剖面, 起点为右坝肩, 终点位于中心泄水口的开始处。这些地震反射数据的初步解释反映了在堤坝下面存在地质灾害与成熟的喀斯特发育情况, 这些在土石坝设计和施工期间也曾遇到过[3]。以前的研究成功地应用了高分辨率的SH波地震反射对土石坝下的基岩层面进行勘探, 预估了基岩深度, 并识别了与不良地质基础条件(即喀斯特)有关的信号。通过SH波地震反射方法对获得的数据进行成像, 评价该方法区分坝内工程填土(压实的外来冰碛物)、原位冰碛物、冲击砂体(用于建造防渗墙和水平排水过滤器)的效果, 这些数据也被用来评估该方法分辨坝体内部与泄水口有关的混凝土管道的地球物理探测能力。

坝2位于肯塔基州南部, 建于20世纪60年代中后期, 由堆石坝、土堤、闸控泄洪口和堤坝之间的明渠溢洪道组成。此次研究的主要结构是堤防[图1(b)]。它是一个附属蓄水坝, 长595 m, 高约31 m, 直接建在密西西比州的石灰岩上。SH波地震反射剖面垂直于中心线, 位于右坝肩挖槽近乎竖直的回填区域之上[图1(b)]。勘探结果用于评估地球物理在混凝土隔水墙、挖槽岩石表面和工程材料回填区域成像方面的效果。

## 3. 技术方法

由于各种锤击震源、爆炸震源和可控震源提供的高频特性和控制机制, 先前对近地表高分辨率地震反射成

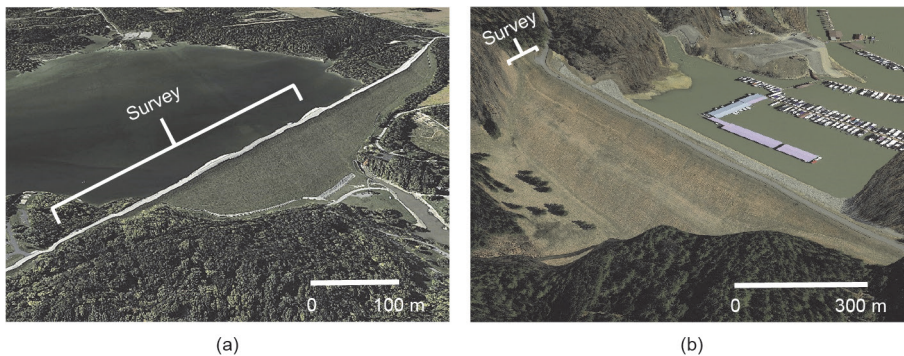


图1. 用SH波地震反射技术对美国中部的两座土石坝进行成像, 以评估该方法区分较小的、高阻抗工程特征(即混凝土管道和隔水墙)以及较大的、低阻抗边界(如原位地质沉积物与压实等效本地材料工程回填边界)的能力。(a)坝1和(b)坝2分别位于印第安纳州北部和肯塔基州南部。(来源: 谷歌地球, 2016)



像的研究主要集中在纵波（P波）或压缩波以及能量方面[4–8]。然而，当P波被用于对具有相对低速的地质介质和其弹性阻抗是水饱和性的地下固态介质（如存在于活动河流和冲积环境近地表处的未成岩沉积物）成像时，地下水体的屏蔽效应会影响P波的能量和成像效果。因此在对低速、水饱和、近地表（ $\ll 100$  m）等环境进行成像时，水平偏振SH波共中心点（common-midpoint, CMP）方法是更好的选择[2,9–18]。由于SH波是“骨架波”（即不受水体屏蔽效应影响），相对液体敏感的P波更易在固体介质中传播。同时由于在理想阻抗边界处缺少模式转换，SH波的相位比垂直偏振SH波（SV模式）更容易识别[19]。与P波能量相比，速度较低的SH波在偏移较小时不仅存在最佳空间窗口，还能增大反射边界处的时间间隔[20]。增大的时间窗口能够更清晰准确地识别出由于有效信号和相干噪声间隔较大产生的反射边界，同时，使用较小偏移最佳记录窗口也能减小不利的广角反射效应。然而更重要的是，虽然SH波的频率通常只有P波的1/3~1/2，但P波的速度比SH波的速度高5~10倍，因此SH波分辨率比P波高2~3倍[14,20]，这对于探测地下相对较小的目标物是十分重要的。例如，当主要反射层平均速度为 $220\sim 400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、主频约为50 Hz时，其时间分辨极限（即1/4波长[19]）为1.1~2.0 m，分辨极限被认为更小（即 $\lambda/20\sim\lambda/8$ ）。根据第一菲涅尔带半径理论，反射层的空间分辨率为2~4个炮点距离[19]。

因为两个土石坝勘探目标不同，需要用不同的参数进行采集，又因为两地数据采集工作相隔数年，所以在勘探中采用了不同的观测系统。坝1勘探使用了Geometrics StrataView<sup>®</sup>48通道地震仪，内置频率为24 Hz和30 Hz，并使用尾椎为7.5 cm的水平偏振Mark Products<sup>®</sup>地震检波器。该地震仪为24位系统，瞬时动态范围为115 dB，采样间隔为0.5 ms，采集低频截止25 Hz，高频截止250 Hz。由于附近存在电源影响，因此采用了60 Hz陷波滤波器压制潜在的未屏蔽噪声。使用4.5 kg锤

子水平敲击H型钢（约11 kg）表面产生SH波，锤子敲击时产生的总重量为70~80 kg。H型桩凸缘和锤子振动方向需垂直于检波器排列以产生SH波。同时需要将H型钢凸缘埋进地面凹槽中，以防H型钢在敲击时移动，使其与地面耦合获得最大能量。两个检波器之间的距离为2 m，总排列长度为96 m，最小炮检距保持为2 m。图2为地震叠前数据处理示例，地震记录由测线起点附近连续3道数据和终点附近连续3道数据组成，主要反射同相轴的双程旅行时（two-way travel time, TWTT）为70~300 ms。

坝2使用两台24通道Geometrics Geode<sup>®</sup>地震仪，检波器排列与坝1类似，但道间距为1 m。该仪器保真度与坝1处使用的地震仪相同，但计算机控制与坝1地震仪不同。坝2数据采样间隔为0.25 ms，使用了15 Hz高通滤波器和60 Hz陷波滤波器。SH波震源也与坝1处使用的震源相似，只是使用了相对较小的H型钢（3 kg）和锤子（0.9 kg）。图3是在测线前、中、后不同位置采集的单道数据的叠前处理流程示例。

两次SH波勘探都会使用仪器的极性反转，并在每个震源两侧使用相关的反向锤击，以保证准确识别SH波能量和减少P波干扰。另外，每个震源锤击都会叠加（或线性叠加）4~6次。虽然要保证最小的停工时间，但当持续强风以及车辆经过时，采集工作仍会暂时停止。

文中两个地点的数据采集参数如表1所示。尽管在一般情况下不会使用采集滤波器，但是这两个地点的本地条件为局部使用采集滤波器提供了正当理由。两个地点的数据都是使用同一台计算机上的商用VISTA地震数据处理软件（版本7.0和13.0）进行处理，并使用传统的浅层CMP处理流程。主要的处理步骤集中在相干噪声消除、数字滤波、地震道编辑、适当道平衡和相关静校正上，以提高原始波场资料的叠前数据质量，这是一个简单但有效的处理浅层地震反射剖面的方法[21,22]。这些标准的近地表数据处理流程与石油工业的类似，但应用

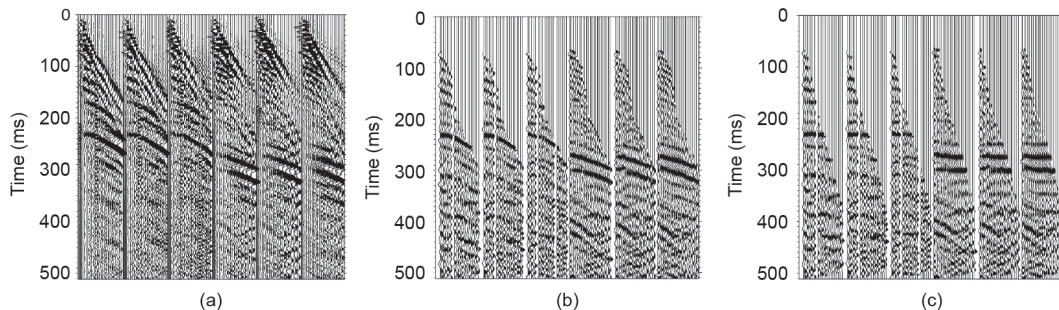


图2. 坝1地震数据示例：测线起点附近连续3道数据和终点附近连续3道数据。(a) 原始/球面增益校正数据；(b) 去噪/滤波数据；(c) 动校正数据。

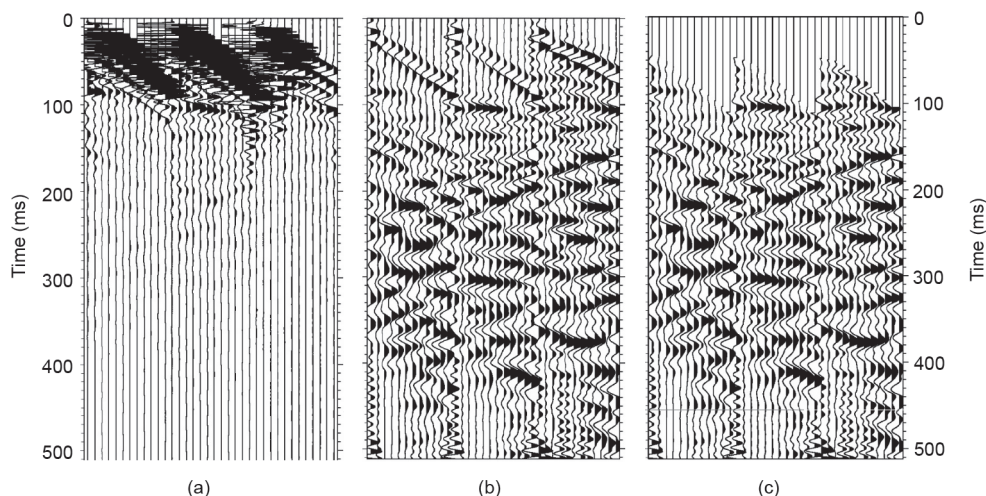


图3. 坝2地震数据示例：测线前、中、后不同位置采集的数据。(a) 原始数据；(b) 滤波/平衡数据；(c) 顶部去噪校正数据。值得注意的是正常时差 (a) 和逆时差 (c) TWTT 小于 200 ms，可能与挖槽或堤坝上、下游的自由界面引起的噪声有关。

表1 地点1和地点2的CMP地震反射勘探采集参数和一般信号处理流程

Field parameters	Site 1	Site 2
Source	4.5 kg hammer with 11 kg H-pile	0.9 kg hammer with 3 kg H-pile
Acquisition low-cut	25 Hz	15 Hz
Acquisition high-cut	250 Hz	Out
Geophone	30 Hz	30 Hz
Near offset	2 m	1 m
Group/shot interval	2 m	1 m
Sample interval	0.5 ms	0.25 ms
Fold	12	6
Vertical stack	4	4

时适当缩放。由于提高了微弱信号的质量，本次处理没有使用其他的浅层反射处理方法（即反褶积、偏移等）。

## 4. 工程应用结果

### 4.1. 坝 1

该处SH波地震反射图像使用12次覆盖，测线长788 m，沿东西方向与坝中心线平行布置，在坝顶边缘向下游方向延伸（图4）。本次剖面提供了坝体右半部（即右坝肩与泄水口之间）的地下信息。图5展示了提供辅助信息的钻孔地质剖面资料、已解释的地震图像和未解释的地震图像。反射剖面上部的道编号间隔为100 m。出乎意料的是，剖面的数据质量整体较高，明显的噪声与下游泄水口的水库排水有关。相对高频的SH波检波

器起到了作用，使地震记录的干扰最小化。在整个剖面上TWTT为150~300 ms（即24~53 m深），连续、相对相干、大振幅反射（双峰）是由于基岩顶部的不整合现象造成的[3]。这一反射同相轴提供了清晰的河流阶地和古河道图像。之前对两个“亮”基岩反射界面处相干性突然中断（图5）的现象解释为岩溶节理和（或）空洞塌陷[3]。由相关的地震数据得出的基岩深度与地质剖面中基岩深度的误差小于5%。根据一个钻孔资料可知，岩溶发育位置大概位于410 m处，比地质剖面资料预计的基岩顶部深度低6.5 m。通过钻孔可以发现预期的基岩顶部下方6.5 m内是由较软的坝基材料（即 $N < 5$ ）组成，这些岩溶填充物的特征就像堤坝的“管道”一样。另外，开挖建于灰岩基底和低层页岩上的最终补救防渗墙时，在初始解释的两个异常区内都发现了成熟的岩溶特征。<sup>†</sup>

许多坝内反射界面在地震图像中也很明显，这些区域与钻孔资料剖面（图5）中描述的工程填土和原位基土的面积和高度吻合较好。值得注意的是，在225 m和600 m之间（TWTT为70~150 ms）的陡倾斜反射界面，与在钻孔剖面中解释的工程填土和冰碛物的边界有关，在250 m附近（TWTT为0~100 ms）的原位冰碛物边界正上方的浅层坝内反射的“超覆”特征被解释为毗邻原位冰碛物的工程回填。虽然钻孔日志中提到在浅层冰碛物中可以观察到风化现象，但在最终的地质剖面中并没有被明确解释为冰碛物风化带。在界面正下方的一个稍陡倾斜反射界面被解释为风化带基底，表明此处可

<sup>†</sup> Kenneth Henn, United States Army Corps of Engineers, 2010, personal communications.



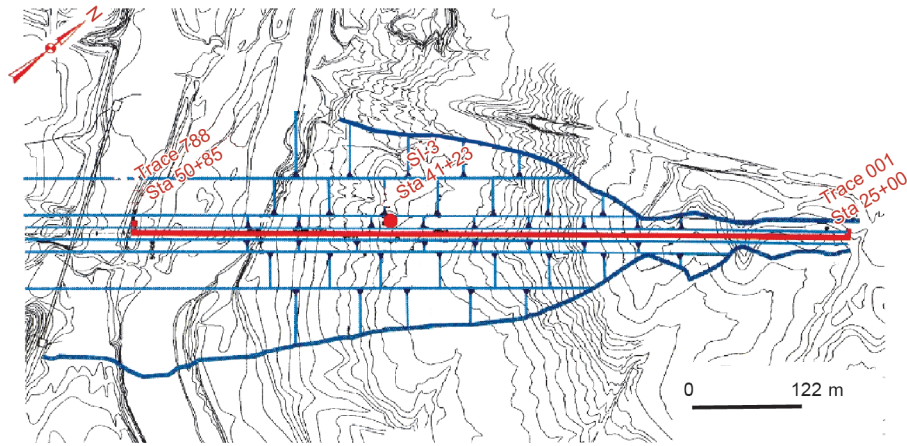


图4. 坝1位置示意图（原始地形图来自文献[3]，有修改）。在站点编号25+00和50+85之间的北东-南西向的粗线指示了反射剖面在坝顶的位置，正好位于坝中心线的下游。图上还显示出了测线开始和结束的位置。SI-3是Woolery[3]用来做井下地震试验的仪器。注意剖面西南端下方的古河道，出水管位于古河道的西南边缘位置。Sta: 站点。

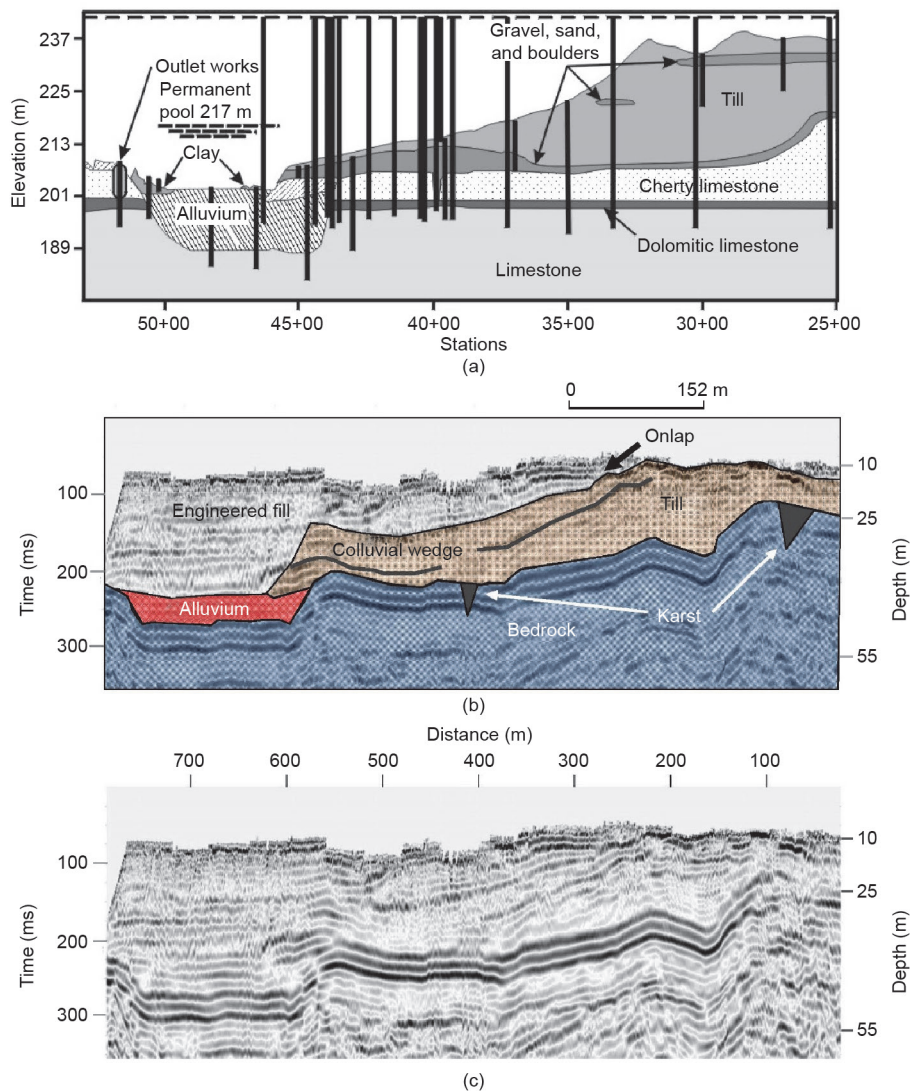


图5. (a) 由设计的和已施工的钻孔信息得到的地质剖面图；(b) 已解释的SH波地震反射图像；(c) 未解释的SH波地震反射图像。（根据参考文献[3]，有修改）

能是崩积楔。地震图像中其他的不连续反射界面可能是地质剖面中描述的散乱砂砾体，但这只是推测，需要进一步的证据来证实。古河道中的反射界面被解释为水平排水形成的原位冲击层。在河道的远西侧有一个急剧上升的反射界面，这与竣工报告中提到的泄水口有关。在TWTT为80~90 ms时出现一个相对较强的浅层不连续反射界面，可能是由于地震图像顶部的去噪导致的，该水平反射界面可能与建在坝顶下游边上的垂直“烟囱”排水设施顶部有关（图6）。为了更好地对该特征进行成像（即缩小浅层去噪范围）以及验证解释结果，需要减少观测系统的偏移孔径。尽管如此，该工程建造所用的原始地质剖面资料与解释结果吻合较好，也是后续许多补救设计的可靠地质详情来源。

#### 4.2. 坝 2

该处观测系统为6次覆盖，测线长37 m，SH波地震反射图像与坝中心线垂直，大概位于坝2右侧坝肩10 m内。该处地表平均海拔大约为229 m，地震图像上第一点位于坝堤中心线上游14 m处，最后一点位于坝堤中心线下游23 m处（图7）。此处是为了防止在右坝肩发现的一个大型溶洞通道出现潜在的渗漏而修筑的混凝土隔水墙的位置（图7），隔水墙位置有过改变，相比原计划大概比挖槽后移了15 m。根据已施工的钻探项目得到的顶部岩石剖面不仅显示出该层位的不规则性，还能得出隔水墙的原计划位置（图7）。值得注意的是，灰岩的高度不规则性或顶部“尖塔”代表着成熟的喀斯特环境，更重要的是，在设计钻探勘查中发现并在工程建造挖掘时确认的大型近水平溶蚀管道，有可能成为水库水通过蓄水结构时的不可控渗漏通道。建造的隔水墙起到了很好的隔水效果，但是由于在原计划的建造地点岩石被高度

风化，故隔水墙的实际建造位置与坝肩挖槽有一定距离。图8是在开挖的坝肩挖槽区域进行工程回填的简化设计示意图。挖槽底部、隔水墙顶部以及坝肩地表（在勘探位置）的海拔高度分别是214 m、217 m和229 m。图9为坝2最终已解释和未解释的反射剖面图，剖面有74道，道距为0.5 m。在7~61地震道以及63~135 ms的TWTT下，挖槽形成了一个典型的反射同相轴。在25道和35道之间、TWTT为135 ms的6条振幅相对较大的水平反射小波代表挖槽基底。使用波速为 $220 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的SH波可以得知挖槽的基底大概在地表下15 m，验证了建造时的高度（即TWTT为214 ms）。挖槽外部的基岩表面凹凸不平但相对连贯。在23~33道以及TWTT为100 ms处，工程回填材料和挖槽内部出现了一个明显的“亮”反射（即相对较高的频率和较大的振幅），这是由混凝土隔水墙的顶部反射造成的。使用速度为 $220 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的SH波可以得出该反射点深度为11 m，大概相当于建成时记录的高度（即海拔217 m）。这种不需要使用打钻的方法可以无伤验证建成位置记录，最大限度地降低了对隔水墙完整性造成的损害。然而，同样需要注意的是，在黏土心墙、砂滤和岩壳之间没有明显的信号变化。地震记录的TWTT低于200 ms，这可能是与填充物及岩石界面有关的随机多次绕射波（即“鸣震”）造成的。

## 5. 结论

在高危堤坝填土中，传统的岩土工程勘察方法（即钻探）解决岩土工程问题时是低效的，通常难以完全解决[16]，然而，通过近地表地球物理勘探手段，即SH波地震反射法可以对钻探结果进行补充，进而完善对美国中部的两个防洪坝的岩土工程评价。通过使用经

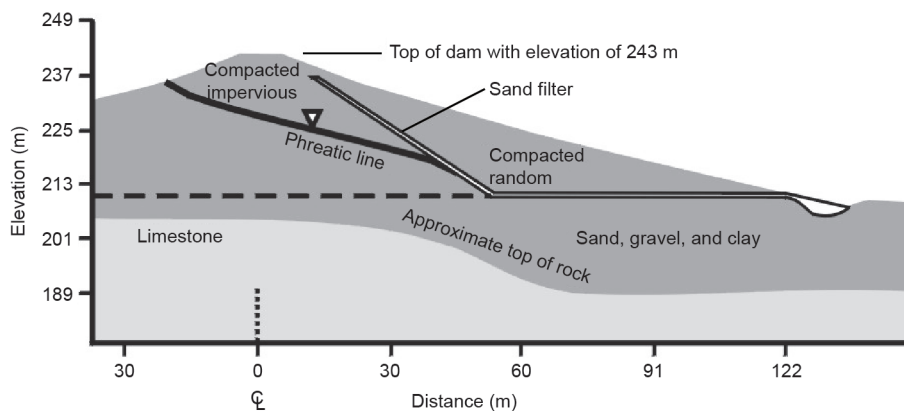


图6. 站点41+00处堤坝（图5）横截面图。从图中可以看出潜水面的大致位置及其与垂直“烟囱”排水设施相交处。控制渗流通过减压井沿着坝脚流向下游。

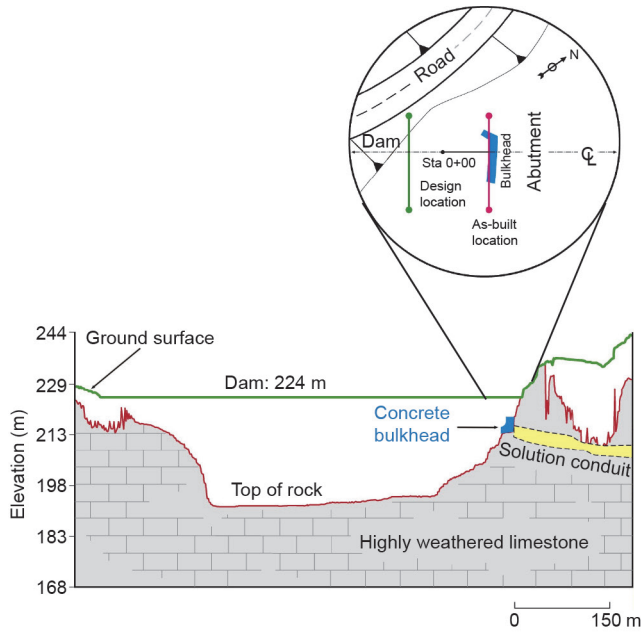


图7. 混凝土隔水墙的设计与建成位置示意图(上部)。绿色线为隔水墙原计划位置,红色线显示了隔水墙的后退位置和SH波地震反射剖面位置。顶部岩石剖面(底部)显示了变化较大的岩石表面,表明了该处有成熟的喀斯特环境。混凝土隔水墙的原计划位置是溶蚀通道与岩石堤坝边界相交处,在建设中隔水墙位置退至岩石条件更适合的地方。

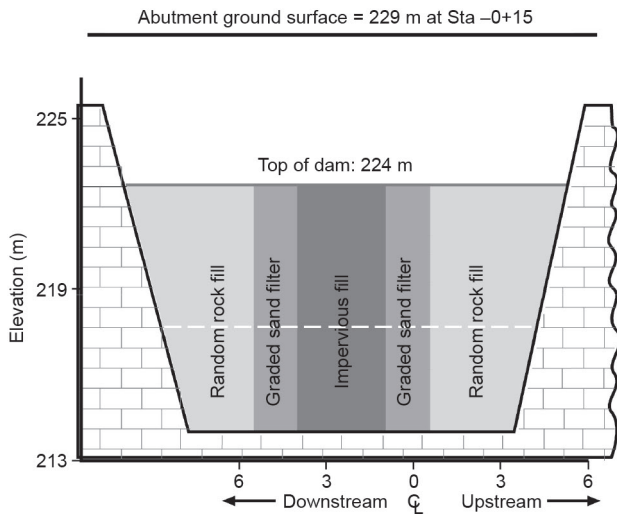


图8. 挖槽和回填的理想设计横截面图。白色虚线为建成的隔水墙顶部,海拔为217 m;挖槽底部的海拔为214 m。SH波地震反射剖面在已建成位置的上方,在站点-0+15处。地表海拔大约为229 m。

济有效、无损的SH波地震反射勘探方法,查清了两个防洪坝的基岩组成及其主要内部结构特征。由于堤坝回填时使用经压实的原地冰碛物,因此在对坝1进行勘探之前并不能确定地震反射方法是否能区分防渗墙中的工程回填物与原处地质沉积物(及冰碛物),然而勘探结果表明,在原处冰碛物与压实回填物之间存在足够的阻抗差,从而能够产生相干反射信号。在回填-冰碛物边

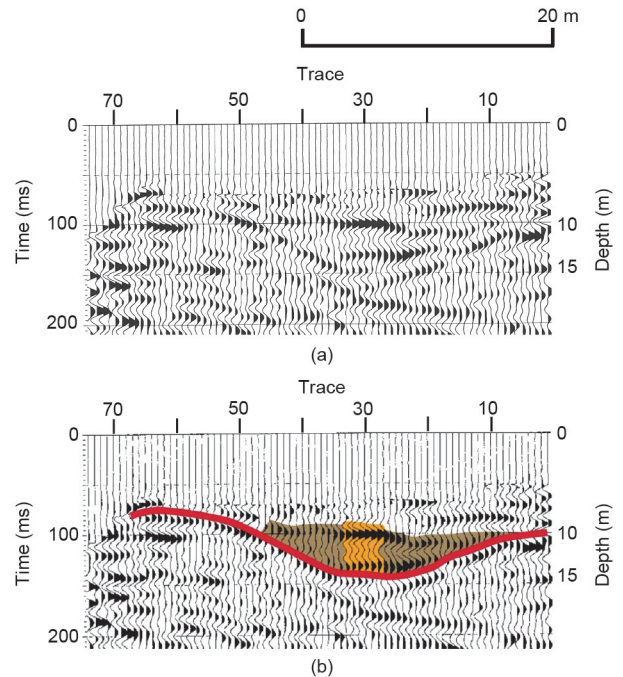


图9. 右坝肩回填挖槽上方SH波地震反射剖面未解释(a)及已解释(b)图。道号代表着地下采样点,道间距为0.5 m。红线代表挖槽边界,在TWT为100 ms处的强振幅反射是混凝土隔水墙顶部。根据地震资料计算出的挖槽基底高度和隔水墙顶部高度与建成报告较为一致。

界之下也存在细微的阻抗差,指示原处冰碛物中的风化边界或崩积楔。此外古河道中的原位冲积层也会产生可测的弹性差异。在坝2处,能够得到清晰的坝肩基岩上挖槽地震图像,但却未能对挖槽的工程回填进行垂直分区。此外,由于SH波地震反射方法的分辨率较高,包括坝2处的混凝土隔水墙和坝1处的部分泄水口在内相对较小的工程特征均能成像。这些勘探结果说明,高分辨率SH波反射勘探是进行堤坝安全性评价以及解决其他堤坝岩土工程问题的一个切实可行的工具。

## References

- [1] Federal Emergency Management Agency. Federal guidelines for dam safety risk management Report. New York: Federal Emergency Management Agency; 2015.
- [2] Nunnally SW. Construction methods and management. 8th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2011.
- [3] Woolery EW. SH-wave reflection images of anomalous foundation conditions at the Mississinewa dam, Indiana. *J Environ Eng Geophys* 2002;7(4):161-8.
- [4] Steeples DW, Knapp RW. Reflections from 25 feet or less [expanded abstract]. In: The 52nd Annual International Meeting and Exposition, Society of Exploration Geophysicists; 1982 Oct 17-21; Dallas, TX, USA; 1982. p. 469-71.
- [5] Hunter JA, Pullan SE, Burns RA, Gagne RM, Good RL. Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph—some simple techniques. *Geophysics* 1984;49(8):1381-5.
- [6] Pullan SE, Hunter JA. Seismic model studies of the overburden-bedrock reflection. *Geophysics* 1985;50(11):1684-8.
- [7] Knapp RW, Steeples DW. High-resolution common depth point seismic reflection profiling, instrumentation. *Geophysics* 1986;51(2):276-82.
- [8] Knapp RW, Steeples DW. High-resolution common depth point seismic reflection profiling, field acquisition parameter design. *Geophysics* 1986;51(2):283-94.



- [9] Goforth T, Hayward C. Seismic reflection investigations of a bedrock surface buried under alluvium. *Geophysics* 1992;57(9):1217–27.
- [10] Woolery EW, Street RL, Wang Z, Harris JB. Near-surface deformation in the New Madrid seismic zone as imaged by high resolution SH-wave seismic methods. *Geophys Res Lett* 1993;20(15):1615–8.
- [11] Woolery EW, Wang Z, Street RL, Harris JB. AP- and SH-wave seismic reflection investigation of the Kentucky Bend scarp in the New Madrid seismic zone. *Seismol Res Lett* 1996;66(2):67–74.
- [12] Woolery EW, Street RL, Harris JB, Wang Z, McIntyre J. Neotectonic structure in the central New Madrid seismic zone: evidence from multi-mode seismic-reflection data. *Seismol Res Lett* 1999;70(5):554–76.
- [13] Woolery EW, Baldwin J, Kelson K, Hampson S, Givler R, Sundermann S. Sitespecific fault assessment in the fluorspar area fault complex western Kentucky. *Seismol Res Lett* 2009;80(6):1035–44.
- [14] Harris JB. Shear-wave splitting in Quaternary sediments: neotectonic implications in the central New Madrid seismic zone. *Geophysics* 1996;61 (6):1871–82.
- [15] Deidda GP, Balia R. An ultrashallow SH-wave seismic reflection experiment on a subsurface ground model. *Geophysics* 2001;66(4):1097–104.
- [16] Woolery E, Street R. Quaternary fault reactivation in the fluorspar area fault complex of western Kentucky: evidence from shallow SH-wave reflection profiles. *Seismol Res Lett* 2002;73(5):628–39.
- [17] Benjumea B, Hunter JA, Aylsworth JM, Pullan SE. Application of high-resolution seismic techniques in the evaluation of earthquake site response, Ottawa Valley, Canada. *Tectonophy* 2003;368(1–4):193–209.
- [18] Pugin AJM, Pullan SE, Hunter JA, Oldenborger GA. Hydrogeological prospecting using P- and S-wave landstreamer seismic reflection methods. *Near Surf Geophys* 2009;7:315–27.
- [19] Sheriff RE, Geldart LP. *Exploration seismology* [dissertation]. New York: Cambridge University; 1995.
- [20] Woolery EW, Almayahi A. Shear-wave birefringence measurements in faulted near-surface sediment. *Bull Seismol Soc Am* 2014;104(3):1540–9.
- [21] Steeples DW, Miller RD. Seismic-reflection methods applied to engineering, environmental, and ground-water problems. In: *Proceedings of the 1st Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*; 1988; Denver, CO, USA. Denver: Environment and Engineering Geophysical Society; 1988.
- [22] Baker GS, Young R, editors. *Processing near-surface seismic-reflection data: a primer*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists; 1999.