

戦-1 活断層周辺の地下構造探査手法および地盤モデル作成手法に関する調査（1）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～平 20

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、倉橋稔幸

【要旨】

本課題では、活断層周辺のハザードマップ作成に必要な地下地質構造やS波速度構造をモデル化することを目的として、地形要素判読、S波起震機を利用した反射法地震探査、地盤力学情報データベースの構築を行ったものである。その結果、活断層地形要素判読による確実度判定の目安を示し、調査・解析の標準的仕様を「活断層地形要素判読マニュアル」としてまとめたほか、S波起震機を震源とした反射法地震探査の解析から活断層周辺における深度約500m程度までの二次元の地下地質構造と、S波速度構造モデルを明らかにした。

キーワード：活断層、地形要素判読、反射法地震探査、S波速度構造、地盤力学情報データベース

1. はじめに

兵庫県南部地震や集集地震以降、土木構造物の設計においてL2地震動と断層変位に対処することが懸案となっている。現状では、L2地震動の耐震性照査の指針（案）等¹⁾ではその想定地震の地震動の大きさを予測するにあたり起震断層の位置・長さ・傾斜・幅等を仮定しなければならない。しかし、その詳細は文献調査等に頼るのが現状であり、実際には照査に不足する情報が少なくない。また、地盤の揺れの大きさを左右する地盤物性情報は、調査機関ごとに所有され散逸の危機にある。これらの不足した情報の補完のためには、活断層の位置や地下構造を適確に調査する技術の開発、既存の地盤情報のデータベース構築、理論的なハザードマップ作成技術の確立が求められている。

そこで本課題は、活断層周辺のS波速度構造をモデル化することを目的として、地形要素判読、S波起震機を利用した地下構造調査・解析、地盤力学情報データベースの構築を行ったものである。

2. 研究方法

2.1 地形要素判読のマニュアル作成

活断層が動くと、地表に断層の動いた痕跡やずれを残すので、断層の活動が度重なると、ずれが累積し、空中写真や衛星写真で地形的な線状模様として認識できるようになる。しかし、活断層の活動性が小さいと線状模様は不明瞭となる。そこで活動性の低い活断層を的確に抽出することを目的として、本課題では36本の活断層の線状模様を地形要素判読し、活断層の確実度と線状模様を

構成する地形要素との相関を解析した⁵⁾。地形要素を「①崖地形等の地形要素」、「②屈曲等の地形要素」、「③凹凸等の地形要素」、「④変位不明瞭な地形要素」の四つの地形要素に分類し、特に地形面勾配の異常、地形面・地形線あるいは人工構造物の切断、変形の系統性、変位の累積性などの四点に注目した³⁾。図-1に活断層の主な地形要素を示す。これら地形要素の出現頻度を確実度区分と照らし合わせ、活断層の確実度区分の目安を示し、判読から確実度判定までの調査・解析の標準的仕様を「活断層地形要素判読マニュアル」⁴⁾にまとめた。

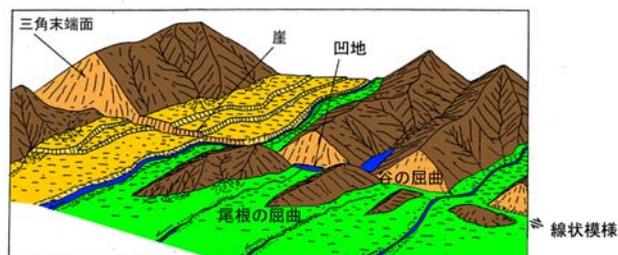


図-1 活断層の主な地形要素（岡田(1979)⁶⁾に加筆）

- ①崖地形等の地形要素：崖、三角末端面
- ②屈曲等の地形要素：尾根の屈曲、谷の屈曲
- ③凹凸等の地形要素：凹地

2.2 S波起震機を利用した地下構造調査と解析

活断層周辺の地下地質構造とS波速度構造を明らかにすることを目的として、これまでに国府津—松田断層、深谷断層、小平尾断層、旭山撓曲の四断層を対象にS波起震機を震源とした反射法地震探査（図-1、図-2、表-1、

戦-1 活断層周辺の地下構造探査手法および地盤モデル作成手法に関する研究(1)

表-2) を実施してきた⁶⁷⁾⁸⁹⁾¹⁰⁾。これらの探査で得た波形記録をCMP重合法により解析し地下地質構造を求めた。また、波形の初動を読み取り回折トモグラフィー解析することで、地下のS波速度構造を求めた。解析フロー図を図-4示す。

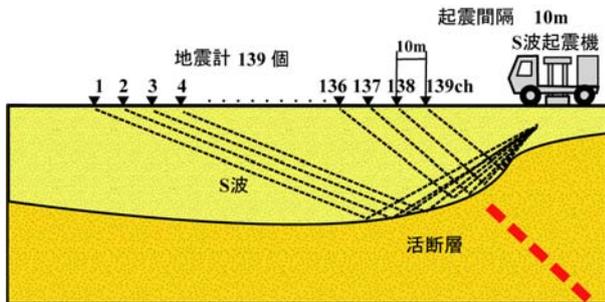


図-2 S波起震機を用いた反射法地震探査の概念図

表-1 反射法地震探査の仕様一覧

項目	内容
起震間隔	10m
地震計設置間隔	10m
チャンネル数	最大 144
サンプル間隔	2ms
レコード長	8s
周波数	10~40Hz

表-2 S波起震機の諸元

車体仕様		起震機仕様	
車体長	9.9m	反動体質量	2.7t
車体幅	2.6m	可動部質量	5.4t
車高	3.2m	最大加震力	133kN
車体質量	26.7t	ピストン断面	64cm ²
エンジン	ディーゼル	実効ストローク	8インチ
排気量	9.1L	設置プレート	610×750×40mm
最高出力	345HP	スイープ周波数	5-100Hz



図-3 S波起震機

反射法地震探査解析 回折トモグラフィー解析

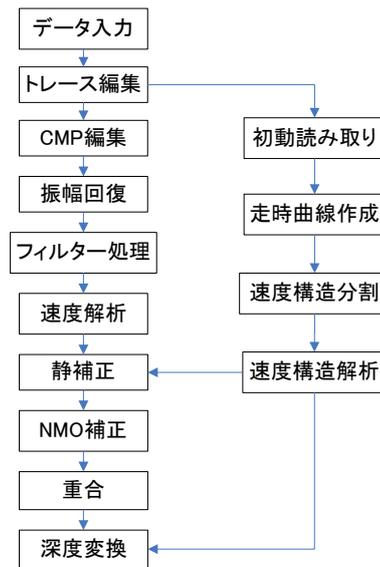


図-4 解析フロー図

2.3 地盤情報を利用した地下構造モデルの検証と高度化

反射法地震探査記録の回折トモグラフィー解析で得たS波速度構造のモデルを、既存のボーリング柱状図と対比させ、地盤モデルの妥当性を検証した。

まず、地盤力学情報データベースを設計し構築した。地盤力学情報データベースは「地質・土質調査成果電子納品要領(案)平成16年6月版」¹¹⁾に収められたXML形式のボーリング交換用データと土質試験結果一覧を検索・閲覧できるデータベースである。さらに電子国土を利用することでボーリング位置を国土基盤地図情報を背景とし表示・検索できるシステムを設計し構築した(図-5)。国土交通省の開発局および地方整備局と連携し、このデータベースにボーリング柱状図を約7万5千件と、土質試験データ約9万件を入力した。なお、構築したデータベースを国土交通省の地理空間情報基本計画やCAL/ECアクションプログラム2005への取り組みの一環として国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」¹²⁾から平成20年3月27日からインターネットで試験提供した¹³⁾¹⁴⁾。次にモデル検証のために活断層周辺の既存ボーリングデータを「国土地盤情報検索サイト」¹²⁾および「かながわ地質情報マップ」¹⁵⁾から合計224本収集した。このうち反射法地震探査測線から300m以内の範囲に分布するボーリング柱状図18本から柱状図対比図を作成した。その柱状図対比図を反射法地震探査の解析結果やS波速度構造解析結果と対比し、断層周辺の地盤モデルを検証した。

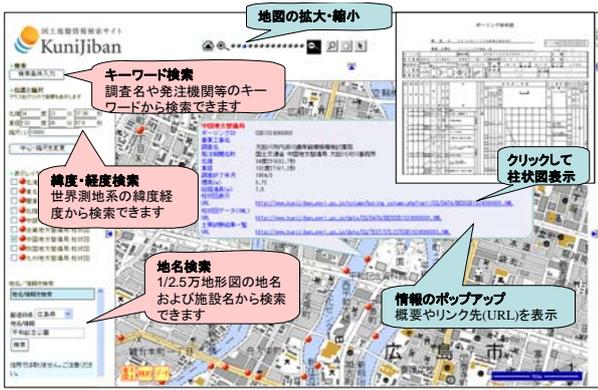


図-5 国土地盤情報検索サイト¹²⁾の検索画面

3. 研究結果

3.1 地形要素判読

これまでに36本の線状模様を地形要素判読し、そこから確実度と線状模様を構成する地形要素との相関を解析し、図-6に示すように活断層の各確実度区分における地形要素の種類と目安を示した。さらに判読から確実度判定までの調査・解析の手順を「活断層地形要素判読マニュアル」⁴⁾としてとりまとめた(図-6)。

1. 総論
1.1 活断層地形要素判読マニュアル
1.2 用語の定義
2. 本マニュアルで対象とする線状模様
3. 判読計画と準備
3.1 活断層地形要素判読の位置づけ
3.2 判読区間と判読範囲の設定
3.3 判読に用意するもの
4. 活断層地形要素判読図の作成
4.1 活断層地形要素判読図作成の流れ
4.2 地形要素および地形面の抽出
4.3 活断層地形要素判読図の記載
4.4 線状模様の位置特定
4.5 地形要素一覧表の作成
4.6 判読成果の照査
5. 判読後の現地補足調査
6. 空中写真判読結果の解釈と評価
6.1 線状模様の確実度判定
6.2 戦況模様の位置と長さ
7. 成果品
8. まとめと今後の課題

図-6 活断層地形要素判読マニュアル⁴⁾の目次

表-3 活断層の確実度区分の目安

確実度	縦ずれ断層					横ずれ断層			
	地形要素分類	①崖地形等の地形要素			③変位不明瞭な地形要素	②屈曲等の地形要素		③変位不明瞭な地形要素	
	地形場	明瞭度	連続性・系統性および周辺地形との位置関係	全地形要素数に占める構成比	鞍部	連続性・系統性および周辺地形との位置関係	地形要素密度	風隙・截頭谷の有無	全地形要素数に占める構成比
L ₁	山地	あまり開析されず、明瞭である。	・線状模様を境として、両側の尾根形状(尾根の幅や尾根線の向きなど)が異なる。 ・尾根上に低崖がある ・崖は崖に連続して配列し、延長部には鞍部等の地形が突出する。 ・低崖は、古い地形面ほど比高が大きく、累積性がある。 ・崖は直線的またはスムーズな弧状に配列する。 ・崖と直交しない斜交する。 ・地形面上に低崖あるいは逆向き崖がある。	7割以上	・鞍部のくびれが著しい。 ・鞍部は、主尾根の延長方向と直交する。 ・接頭直線谷がある。	・複数の尾根・谷が系統的に屈曲する。 ・延長の段丘面上に崖が認められる。 ・段丘面上に逆向き崖が認められる。	2個/km以上 (全要素密度5個/km以上)	有	-
	山地と低地の境界	あまり開析されず、明瞭である。	・崖や鞍部等の間隔が疎に配列する。 ・崖のみ、あるいは鞍部のみ同様な地形が配列し、延長上の尾根には地形要素が判読されない場合もある。 ・崖はやや凹凸して配列する。 ・河川と平行に配列し、河川の蛇行方向に従順に向きを変えている。 ・崖の比高がばらつく。	・(一般に鞍部は少ないが、)一部、平地側へ張り出す丘状の尾根に鞍部がある。					
L ₂	全般	比較的、崖の開析が進み、やや不明瞭である。	・崖は崖に連続して配列する場合もあるが、間隔のあく場合もある。 ・崖は概ね直線的(またはスムーズな弧状)に配列するが、直線はばや凹凸する。 ・河川と直交しない斜交して延長する。	5~7割程度	・鞍部が突出する。 ・鞍部の向きは、線状模様の延長方向にやや斜交する。 ・接頭直線谷があるが、一直線きなさを、ずれる場合がある。	1~2個程度の尾根や谷が屈曲する。	2~1個/km	有	-
L ₃	全般	開析され、不明瞭である。	・崖や鞍部等の間隔が疎に配列する。 ・崖のみ、あるいは鞍部のみ同様な地形が配列し、延長上の尾根には地形要素が判読されない場合もある。 ・崖はやや凹凸して配列する。 ・河川と平行に配列し、河川の蛇行方向に従順に向きを変えている。 ・崖の比高がばらつく。	2~5割程度	接頭直線谷が認められない場合が多い。	1~2個程度の尾根や谷が屈曲する。	1個/km以下	無	3割以上
非活断層	全般	一部に鮮明な崖もあるが、隣接する崖が著しく開析されるなど、開析程度が一様ではなく、不明瞭である。	・鞍部のみなどが配列するなど、同様な地形が配列し、延長上の尾根には地形要素が判読されない場合もある。 ・崖は凹凸し、河川の蛇行に従順に配列する。 ・周囲の山地に線状模様を境とした一様な高度不連続が認定できない。 ・崖の比高がばらつく。 ・河川の両岸で、比高や侵食程度のほぼ等しい崖が判読されることがある。 ・崖は河川と平行に配列し、崖線は河川の蛇行方向に従順に湾曲する。	2割以下	接頭直線谷がほとんど認められない。	屈曲等の地形要素がほとんど認められない。	1個/km以下	無	5割以上

3.2 活断層周辺の地下地質構造とS波速度構造

国府津-松田断層を対象とした反射法地震探査の解析結果を図-8(a)に示す。この解析断面図では標高0~300m

にかけて明瞭な反射波が認められ、その反射波はCMP2070付近でキンク状に反射波が折れ曲がり、CMP2030かけて下方へ傾動している。

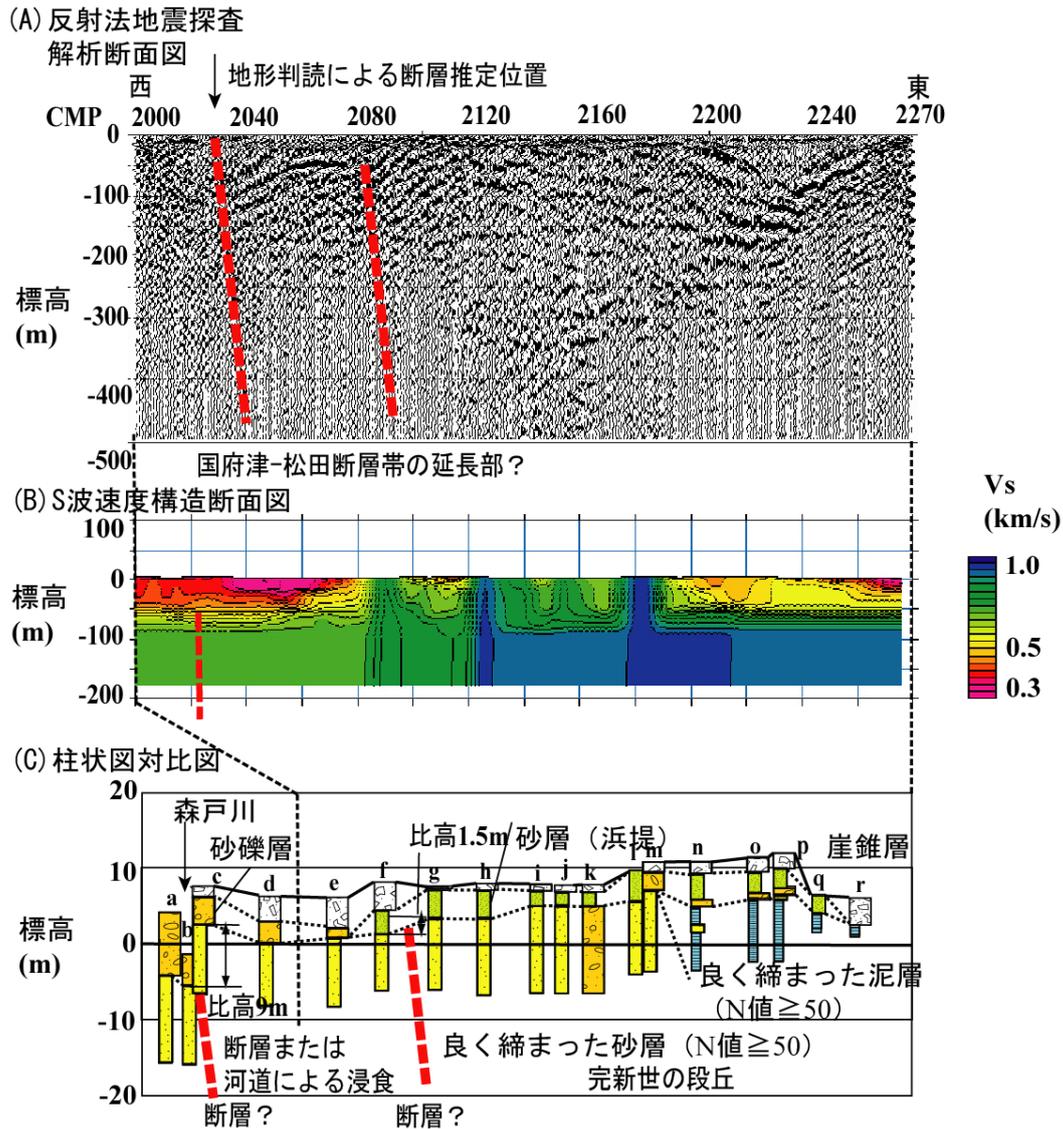


図-7 国府津-松田断層における反射法地震探査の解析断面図

CMP2070 では反射波の鉛直変位は約 50m、CMP2030 の深度-20m 付近でも反射波に比高 10m 程度の段差が認められるなど、この解析結果から深度-500m 程度まで活断層の断層位置や鉛直変位量を読み取ることができた。活断層の断層位置や累積変位量を明らかにし、従来の S 波探査手法に比べて約 5 倍程度の深さまで探査できるようになった。

一方、回折トモグラフィー解析による S 波速度構造断面図を図-8(b)に示す。S 波速度(V_s)は-100m 以浅で 0.3~1.0km/s を示す。CMP2000~2080 の区間と、CMP2180~2270 の区間で速度が 0.3~0.5km/s まで低くなっており、特に断層の西側で顕著に速度が低下していることが分かる。

今後は、このような探査事例をもとに、S 波起震機を

利用した地下構造モデルの構築手順をとりまとめる予定である。

3.3 地盤情報による活断層周辺地下構造モデルの検証と高度化

図-7(c)に国土地盤情報検索サイト¹¹⁾および「かながわ地質情報マップ」¹²⁾から収集した 18 本のボーリング柱状図から作成した地質断面図を示す。柱状図に記載された層相および N 値をもとに地層の区分をおこなった。その結果、上位から崖錐層、砂礫層、砂層、良く締まった砂層、良く締まった泥層に区分できた。これらの地層の分布と S 波速度構造モデルとを対比すると、CMP2030~2070 区間における速度低下の原因は、沖積層や段丘堆積物が厚く堆積していることや基盤岩が軟化していること

戦-1 活断層周辺の地下構造探査手法および地盤モデル作成手法に関する研究(1)

にある。これはCMP2030とCMP2070付近における国府津-松田断層帯の断層運動に伴う沈降によるものと推定される。これら地盤情報を用いることで地下構造モデルの検証や高度化が可能であることが分かった。

ただし、今回、地質解釈しモデルを検証できたのは、ボーリング柱状図が記載されている深度20m程度までの範囲である。反射法地震探査の解析断面に見られる深度100mまでのS波速度構造を地質解釈するには十分ではない。今後、より深部のボーリングデータの追加が必要である。また、二次元における速度構造モデルを活断層周辺の面的に展開するには足柄平野や大磯丘陵にける他のボーリング情報や地表路頭と併せて地質解釈することが必要である。

4. まとめ

本課題では、活断層周辺のハザードマップ作成に必要な地下地質構造や地盤モデルについて検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 活断層地形要素判読による確実度判定の目安を示し、調査・解析の標準的仕様を「活断層地形要素判読マニュアル」としてまとめた。
- 2) S波起震機を震源とした反射法地震探査の解析から活断層周辺における深度約500m程度までの地下地質構造を明らかにし、従来のS波探査手法の5倍程度の深さまで探査できることを明らかにした。
- 3) 活断層周辺における地下のS波速度構造モデルを明らかにした。また、地盤情報のデータベース等を活用することにより、地下速度構造モデルの検証や高度化が可能であることを示した。

地震ハザードマップ作成のためには、周辺ボーリングデータとの対比等により二次元のS波速度構造モデルを面的に展開する必要がある。今後は、これらの成果を、S波起震機による反射法地震探査・解析や地盤情報を用いた地下構造モデル化手法としてとりまとめる予定である。

参考文献

- 1) 片岡正次郎、日下部毅明、村越 潤、田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究、国土技術政策総合研究所報告、No.15、32p、2003年10月。
- 2) 永山功ほか：大規模地震に対するダム耐震性能照査に関する資料、土木研究所資料、第3965号、192p、2005年3月。
- 3) 倉橋稔幸、品川俊介、阿南修司、脇坂安彦：空中写真によ

る第四紀断層の客観的判読の試み、土木技術資料、第45巻、第6号、pp.52-59、2003年6月。

- 4) 佐々木靖人ほか：活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究(4) 活断層地形要素判読マニュアル、土木研究所 共同研究報告書、第338号、48p、2006年3月。
- 5) 佐々木靖人ほか：活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究(3) 確実度の判定と判読能力の分析、土木土木研究所 共同研究報告書、第337号、181p、2006年3月。
- 6) 岡田篤正：愛知県の地質・地盤(その4)(活断層)、愛知県防災会議地震部会、122p、1979年。
- 7) Kurahashi, T and Inazaki, T.: "S-wave seismic reflection survey conducted at the southern part of epicentral area of the 2003 Northern Miyagi earthquake", Proceedings of the 7th SEGJ International Symposium, pp.463-466, 2004.11.
- 8) 倉橋稔幸、稲崎富士：S波起震機を用いた活断層調査、土木技術資料、第48巻、第5号、pp.52-57、2006年5月。
- 9) Kurahashi, T. and Inazaki, T.: Seismic reflection survey for an active fault using shear-wave vibrator, Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, EEGS, CD-ROM, 2007.3.
- 10) 倉橋稔幸：55. 活断層を対象としたS波起震機による反射法地震探査、平成19年度研究発表会講演論文集、日本応用地質学会、pp.109-110、2007年10月。
- 11) 国土交通省大臣官房技術調査課監修：地質・土質調査成果電子納品要領(案)平成16年6月版、財団法人日本建設情報総合センター、2004年9月。
- 12) 国土交通省・独立行政法人土木研究所・独立行政法人港湾空港技術研究所：国土地盤情報検索サイト、<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/>、2008年3月。
- 13) 倉橋稔幸、佐々木靖人、稲崎富士：国土交通省における地盤情報提供の取り組みについて、第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」研究成果の中間報告予稿集、防災科学技術研究所、pp.33-36、2009年3月。
- 14) 倉橋稔幸：最近の地盤情報の整備と活用(1) 一国土地盤情報検索サイト"KuniJiban"による地盤情報の提供一、応用地質、第50巻、第1号、pp.168-169、2009年4月。
- 15) 財団法人神奈川県都市整備技術センター：かながわ地質情報MAP、<http://www.toshiseibi-boring.jp/>、2007。

A STUDY ON EARTHQUAKE HAZARD MAPPING AND A SHEAR WAVE VIBRATORY EXPLORATION TECHNIQUE FOR AN ACTIVE FAULT (1)

Abstract : This paper describes results of geological interpretation and shear wave velocity structure for earthquake motion hazard mapping of active faults. We conducted air-photo interpretation of geomorphic elements, shear wave vibratory exploration, seismic data processing, and geological interpretation using borehole databases. The interpretation and the processing revealed geological structures and shear wave velocity structure up to 500 meters of the depth around active faults.

Key words : active fault, air-photo interpretation of geomorphic elements, shear wave vibratory exploration, shear wave velocity structure, geotechnical property database