

常時微動を用いた不整形地盤上の 地盤ひずみ分布評価の試み

黒田 泰介¹・楢田 泰子²・後藤 浩之³

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)

E-mail: 162t105t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院 工学研究科 准教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

³正会員 京都大学 防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

地震時における上下水道やガス等の埋設管路の被害は、周辺地盤の変状に追従するため地盤ひずみに支配されるが、地盤ひずみを地震前に推定・観測するのは困難である。最大速度の空間変化率である PGV gradient は管路被害率と良いことが経験的に示されている。そこで本研究では、基盤層が傾斜している不整形地盤において複数点で同時に常時微動観測を行い、観測値の空間変化率から地盤ひずみの分布形状を評価することを試行した。観測値の空間変化率の高い箇所と解析結果とは整合的であることを確認したが、微動計の設置間隔や評価指標の値の意味合いなどについては、さらに検討が必要である。

Key Words: PGV gradient, ground strain, irregular ground, microtremor

1. はじめに

地震時における上下水道やガス等の埋設管路の挙動は、周辺地盤の変状に追従するため地盤ひずみに支配される。そのため、埋設管路の耐震設計を行う際には、地盤ひずみを精度よく評価することが重要となる。埋設管路の耐震設計指針では、表層地盤は水平成層地盤であると想定しているが、実際の埋設管路の被害は、地形・地質境界部のように地盤応答が変化する場所で集中しており^{1,2)}、水平成層地盤の想定で不整形地盤上の地盤ひずみを評価できないことは明らかである。不整形地盤では盛土地盤の地震動が著しく増幅されることによって生じる不均一な応答により、不整形地盤を横断するように埋設された線状構造物は、盛土地盤側の境界付近に大きな地盤ひずみを生じると松原・安藤³⁾は報告している。これらの研究成果に基づき、耐震設計指針では水平成層地盤で推定した地盤ひずみに地盤の不均一な応答の影響として係数を乗じて地盤ひずみを算出するようにしている。

表層面が水平で基盤面が傾斜した不整形地盤の地震応答は、埋設管路に限らず道路や鉄道などの線状構造物の地震応答に影響を与えるため、以前からさかんに調査研究が行われてきた⁴⁾。埋設管路を対象にしたものでは、

実際の地震被害状況に基づいた不整形地盤による影響についての地盤の地震応答解析による検討^{5,6)}や、不整形地盤モデルのパラメトリック計算から地盤ひずみの簡易推定式の構築⁷⁾などが行われている。これらの分析から、基盤層の不整形箇所の周辺上の表層では地盤ひずみが大きくなりやすい傾向があることが示されている。

一方、不整形地盤における地盤ひずみを代替的に評価する方法として、酒井ら⁸⁾は最大速度の空間変化率である PGV gradient と管路被害が良いことを経験的に示している。水道やガスなどの埋設管路が地盤の軸ひずみやせん断ひずみにより被害を受けるため、地盤の相対的な応答と関係の深い PGV gradient は管路被害と相関が強くなると考察している。確かに、PGV は地震直後に地震記録からすぐに算出できるため、将来的にはリアルタイムの地震被害推定などの利用価値が高い指標といえる。しかし、地震時の地盤ひずみはある同一時刻における 2 地点間のひずみの最大値を示すものであるが、PGV gradient は空間微分する 2 地点で必ずしも同時刻に最大速度を持っているとは限らず、PGV gradient と地盤ひずみとの関係については必ずしも明確になっていない。

そこで、本研究ではまず、これらの指標が理論的に関連づけられることを示す。次に、不整形地盤と考えられ

る2箇所において複数点で同時に常時微動観測を行い、観測値において理論的關係が成り立つことを確認する。

後述で微動観測手法とそのデータ処理方法は説明するが、複数の微動計を直線上に配置して同時観測する点では本研究の観測もある種の常時微動アレー観測といえる。常時微動アレー観測では、古くから微動計を円の中心と円周上に等間隔に設置して観測を行い、微動の位相速度から地盤のS波速度構造を推定する空間自己相関法（SPAC法）が利用されてきた。SPAC法では地盤の深さ方向の地盤構造の推定を行っているが、本観測では地表面水平方向の地盤構造の情報を得ようとするものである。

2. PGV gradient の理論的解釈

酒井ら⁹⁾は、PGV gradient を評価するにあたり、250mメッシュで算出されるPGVの空間変化率を算出している。研究では指標が統計的に処理されているが、算出単位の妥当性やその根拠については十分な解説はされていない。そこで、本研究では地盤ひずみとPGV gradientとの関係について理論的に整理し、後述の微動観測値の処理方法について説明する。

(1) 地盤ひずみとPGV gradient との関係

前述したように地盤ひずみとPGV gradientは物理量もその値の意味も異なる。そこで、地盤応答関数 H を関連づけることにより、これらの指標の関係を示す。まず、1次元の水平成層構造の地盤にSH波が鉛直入射する場合を考える。重複反射理論の下では周波数領域で地盤応答の解が得られる。角周波数 ω に対して入射波を $u_0(\omega)$ 、地表での応答を $u(\omega)$ とすれば、その比である地盤応答関数 $H(\omega)$ は式(1)のように表わせる。

$$H(\omega) = \frac{u(\omega)}{u_0(\omega)} \quad (1)$$

単純な地盤モデルに対して、1次元水平成層構造と同様な形式で周波数領域の地盤応答関数 H が求められた場合を考える。このとき、地盤応答関数 H は水平方向（ x 方向とする）に一定値を取る保証はないので $H(x, \omega)$ とし、地表における変位 $u(x, t)$ は次のようにフーリエ逆変換の形で表記できる。

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(x, \omega) u_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

地盤ひずみとPGV gradientは数式上直接比較することが困難であるため、地盤応答関数 H を関連付けることにより、比較を行う。まず、地盤ひずみとPGV gradientは式(3)、(4)のように表すことができる。

$$|\varepsilon_x| = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

$$dPGV = \frac{\partial}{\partial x} \left[\max_t |\dot{u}| \right] \quad (4)$$

それぞれに式(2)を代入すると式(5)、(6)のように表すことができる。

$$|\varepsilon_x| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial H(x, \omega)}{\partial x} u_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right| \quad (5)$$

$$dPGV = \frac{\partial}{\partial x} \left[\max_t \left| \int_{-\infty}^{\infty} i\omega H(x, \omega) u_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right| \right] \quad (6)$$

さらに以下の二つの仮定を置くことで、式(5)、(6)は式(7)、(8)として表わせる。

1. 地盤応答関数にある種の周波数フィルタと見なす。入射波は地盤応答関数によってフィルタリングされ、地盤の固有周波数に高い振幅レベルが局在するような周波数特性となる。
2. 速度を表現するために設けた $i\omega$ は、参照する固有周波数を少し高次側にシフトさせる、という意味に捉える。具体的に低周波数側のモードについてのみ議論するのはなく、2次、3次モードについて参照する。

$$dPGV = \frac{\partial}{\partial x} |H(x, \omega) u_0(\omega)| \quad (7)$$

$$|\varepsilon_x| = \left| \frac{\partial H(x, \omega)}{\partial x} u_0(\omega) \right| \quad (8)$$

ある角周波数 ω に対して一様な入力を与えられる場合、式(7)、(8)はそれぞれ $\partial|H|/\partial x$ 、 $|\partial H/\partial x|$ と表記することができ、前者はPGV gradient、後者は地盤ひずみに対応する物理量である。

これらの関係について理論的に整理するため、剛基盤の上に矩形の表層が存在するような地盤にSH波が鉛直入射する場合について考えた。図-1中に示した基盤(basement)は剛であると仮定し、変形は表層(sediment)内でのみ生じるとする。この時、入力周波数が表層の固有周波数に漸近するという条件で、地盤応答関数 H を $\partial|H|/\partial x$ と $|\partial H/\partial x|$ に数式展開を行うと、これら二つの指標はほぼ同じ分布形状を示すことを著者らは確認している。

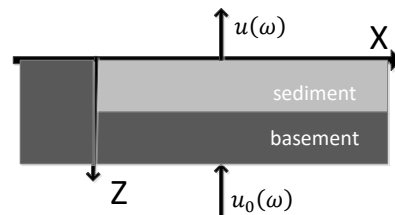


図-1 単純地盤モデル

また、表層の固有周波数では理論解が得られないために、FEMで同様な地盤モデルを作成して解析したところ、解析によっても $\partial H/\partial x$ と $|\partial H/\partial x|$ 、ならびにPGV gradientと地盤ひずみの空間的な分布形状が類似していることを確認している。これらの分析については、紙面の関係から省くが別文献を参照されたい。

(2) 微動観測の方法と処理

前述で示した図-1の単純地盤モデルは極端な不整形地盤の例であるが、一般的に基盤層が傾斜している不整形地盤では、上昇波により起因する表層地盤の空間変化率は非常に小さく、地盤の硬軟境界から励起される表面波による変化率によって地盤ひずみやPGV gradientの値は左右される。そこで、常時微動観測によってこれらの分布形状の特徴を捉えられる可能性がある。

そこで、不整形地盤であると考えられる地盤構造の地表に一定間隔に常時微動計を設置して観測を行い、 $\partial H/\partial x$ とPGV gradientの関係が観測によって評価することを試みる。なお、常時微動観測によって地盤ひずみを評価するのは困難であるため、地盤ひずみとの比較は数値解析による結果を参照することとする。

また、常時微動では特定の入射波を観測することが難しいため、速度観測の微動計においてPGVで評価するのではなく、複数サンプル v_i の実効値であるRMSV (Root Mean Square Velocity)をPGVの代替値として用いる。

$$RMSV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n}} \quad (9)$$

さらに、地盤応答関数 H と表層地盤の周波数特性を評価するにあたり、各観測点の水平微動のスペクトルを剛基盤が路頭している観測点の水平微動のスペクトルで除した H/H 比を当該地点の地盤応答関数 H とみなし、参照する周波数は測線上の単点微動観測の H/V スペクトル比から最も低次の卓越周波数を表層地盤の1次固有周波数として、その周波数の H/H 比を1次モードの地盤応答関数 H として扱った。

したがって、PGV gradientと $\partial H/\partial x$ は常時微動のRMSVと水平スペクトル比による地盤応答関数 H の $\partial H/\partial x$ に読み替えて比較を行う。

3. 切り盛り地盤断面による観測（適用例1）

(1) 観測場所

不整形地盤となる地盤構造の観測適用例として、神戸大学国際文化学部グラウンドで常時微動観測を行った。観測日は2015年10月30日である。神戸大学の六甲台キ

ャンパスは山の斜面を造成して建設されたため、所々で切り盛り地盤となっている。1995年の兵庫県南部地震では、当該グラウンドの切り盛り境界で明瞭な亀裂が入った（図-2）。地震後、亀裂は復旧されたが、人工的に造成しているために地盤構造は異なっていると考えられる。

そこで、図-3に示すようにグラウンドの南部（海側）から北（山側）方向にかけて測線長90m、微動計設置間隔は10mで観測を行った。微動計には物探サービス社製の速度計を4台同時使用し、30m測線の4点同時観測を1シリーズとして、30m測線端部の観測点を重複観測しながら3シリーズを行った。図-4には観測シリーズと観測点の位置を示している。

観測のサンプリング周波数は100Hzである。観測シリーズ間のデータ処理については、30m測線端部の重複観測点の振幅や周波数特性にシリーズ間で顕著な違いが無いことを確認した上で、前観測シリーズに対する次観測シリーズのフーリエ振幅比をシリーズ間の伝達関数として、次シリーズの全観測点の観測記録にこの伝達関数を乗じて補正を行った。



図-2 兵庫県南部地震時にグラウンドに現れた亀裂



図-3 観測場所（Yahoo!mapを加工）

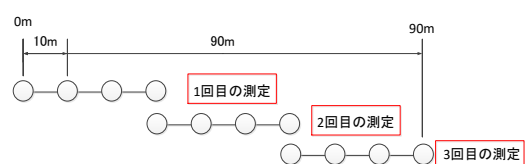


図-4 観測シリーズと微動観測点の配置図

(2) RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ の比較

PGV gradient と $\partial H/\partial x$ を常時微動によって関連づけるために、前述の方法にしたがって微動の RMSV と水平スペクトル比による地盤応答関数 H の $\partial H/\partial x$ で評価した。微動記録には観測点によって 1Hz 以下に風等によるノイズが入っていたため、微動計の精度が担保される 0.5Hz のローカットフィルタで処理をした。微動の RMSV は振幅が安定している 1024 データを 10 波の抽出し、実効値を算出した。この方法で算出した RMSV を図-5 に示す。図の横軸は、グラント盛土の南側端部からの距離である。0m に近い盛土側から切土側に向けて、RMSV の振幅は若干ではあるが減少傾向にある。

地盤応答関数 H は、測線の切土側の端部 (90m 地点) で観測された微動を入力微動と見なして、その H/H 比を算出した。さらに、盛土地盤の H/V スペクトルの卓越周波数を 1 次固有周波数とし、それと同様の周波数の H/H 比を測線上に並べて評価した。理論上は 2 次、3 次も評価すべきであるが、現地状況から表層地盤が浅く、微動によってその精度まで評価するのは難しいため 1 次のみで検討する。ここで得た RMSV と地盤応答関数 H を、微動計設置間隔 10m で空間微分することによって RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ を算出して比較したものを図-6 に示す。RMSV gradient の縦軸は観測点中の最大値で基準化している。

RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ は、いずれも 10-20m と 60-80m 付近で 2 つのピークをもつ結果となった。観測波形からは 60m 地点の観測波形にノイズが多く見られ、その記録を用いて 60m 地点以降の観測点の記録を補正している

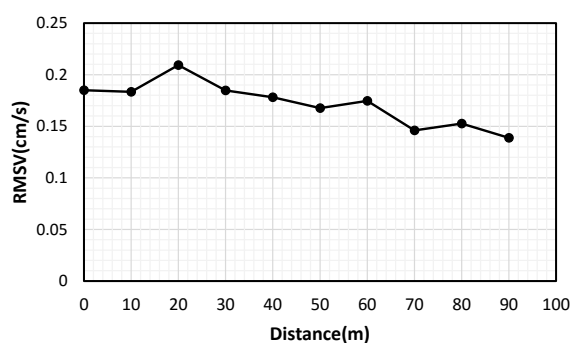


図-5 切り盛り地盤の表層 RMSV

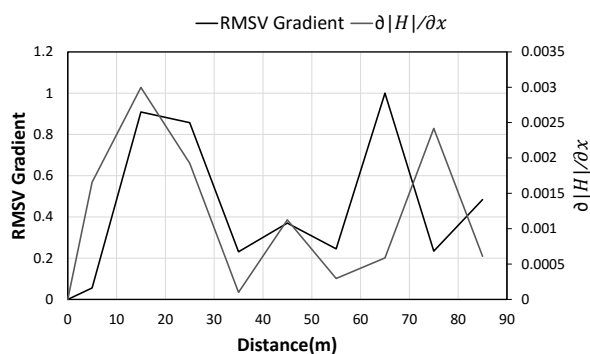


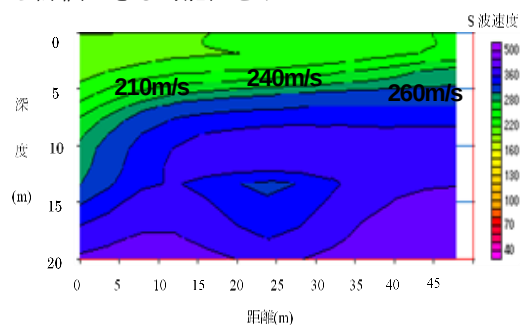
図-6 RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ の関係

ため、60m 以降の観測点結果は過大もしくは過小に評価をしている可能性がある。しかし、それぞれの絶対値については今後吟味する必要があるが、全体的な分布形状が類似することが確認できた。

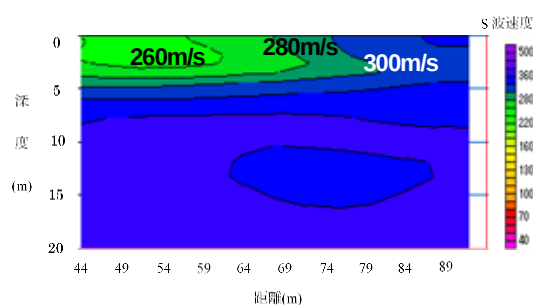
(3) 表面波探査による地盤構造の確認

次に、RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ 大きな値を示した地点と地盤の不整形構造との関係を確認するため、微動観測場所と同じ測線で表面波探査を行い、S 波速度構造を推定した。48m 測線長の表面波探査を 2 回 (1 回目は微動観測長の 0-48m, 2 回目は 44-92m) 実施した。表面波探査結果を図-7 に示す。最も遅い S 波速度は海側の表層で 200m/s で山側に行くにつれて 300m/s に変化している。測線 90m の地点では 310m/s となった。また、これら S 波速度構造が顕著に変化しているのは 5m 程度の表層で、それ以深では 300m/s 以上の層が堆積している。海側の盛土擁壁の高さは 5m 程度あり現地の地形とも整合する。また、表層 5m は風化岩でそれ以深では岩盤となっていることが考えられる。地震時の地盤亀裂は図-2 の写真の撮影位置からみて測線 15-20m の場所に現れたとみられ、図-7 における S 波速度 210m/s の等速度線の周辺に切り盛り境界面が存在したのではないかと考えられる。

この S 波速度構造と RMSV gradient や $\partial H/\partial x$ の分布とを比較すると、測線 15m 程度で高い RMSV gradient や $\partial H/\partial x$ が現れた場所と推定される切り盛り境界面の場所が近いことがわかる。微動観測では 10m 間隔で、表面波探査では 2m 間隔でしか観測精度がないため、ピンポイントでの評価は難しいが、地盤の硬軟境界を微動記録から評価できる可能性を示せた。



(a) 測線 0-48m



(b) 測線 44-92m

図-7 切り盛り地盤断面の表面波探査結果

(4) FEM 解析による地盤ひずみと微動 RMSV gradient の関係

微動観測や表面波探査の評価精度よりもより詳細に評価することと、冒頭で示した PGV gradient との関係について明らかにするため、表面波探査から得られた地盤 S 波速度構造を用いて図-8 に示すように地盤モデルを設定して、2 次元波動場の線形 FEM 解析を行った⁹⁾。地盤モデルでは L 字の地層が表層から S 波速度 200, 230, 250, 270, 290, 310m/s までの 6 層で設定し、5.5~16Hz までの減衰が 3% になるような Rayleigh 減衰を与えた。地盤モデル下部からの入力波には 0.1-1.0Hz において速度振幅一定のピンクノイズを設定した。

解析結果から算出した PGV gradient と地盤応答関数 H (微動の処理と異なり、式(1)に相当する入力に対する出力のスペクトル比) の空間微分を比較したものを図-9 に示す。なお、地盤応答関数 H の参照する周波数は、表層 0m 地点の 1 次固有周波数とした。図-9 は 1m 間隔で PGV gradient と $\partial|H|/\partial x$ を評価している。2.で数式展開したよう

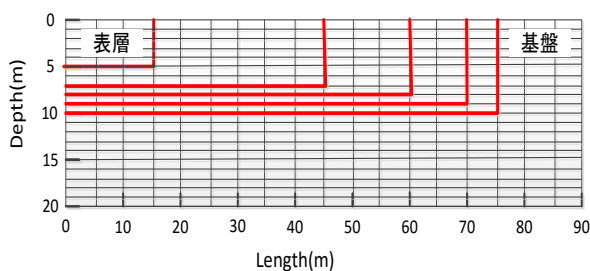


図-8 地盤モデル

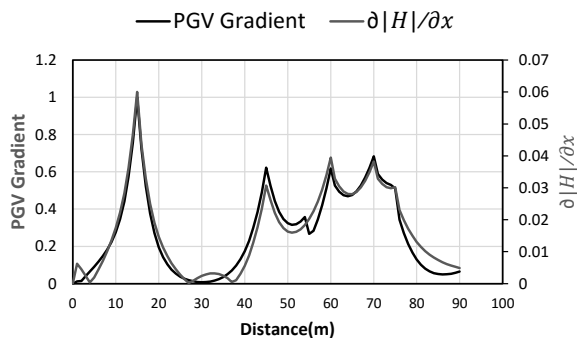


図-9 解析による PGV gradient と $\partial|H|/\partial x$ の関係

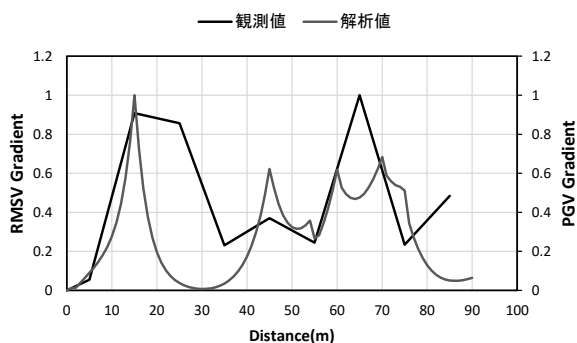


図-10 RMSV gradient (観測) と PGV gradient (解析) の比較

に、PGV gradient と $\partial|H|/\partial x$ との関係はほぼ同じ分布形状を示すことが確認できる。仮定条件として 2 次, 3 次の周波数の $\partial|H|/\partial x$ も参照することとしていたが、本解析の入力波のバンド幅に 2 次, 3 次の周波数が含まれていなかったため、これらの $\partial|H|/\partial x$ が評価できないが、1 次のみ $\partial|H|/\partial x$ だけで PGV gradient の分布を良く評価することができた。これらの指標では、S 波速度の異なる地盤の境界で値が高くなる。地盤境界が鉛直方向に入っているため、境界の場所で高くなる。さらに硬軟の S 波速度の差が大きい 15m 付近が最も高い値を示すことがわかる。現実には図-8 のような鉛直方向に境界面がある地盤は想定しにくく、境界面が傾斜していると指標のピークが軟地盤側にシフトしてくるものと考えられる。

さらに、微動観測による RMSV gradient と FEM 解析による PGV gradient を比較したものを図-10 に示す。FEM 解析の地盤モデルの精度にもよるが、観測によるピークとほぼ対応する場所で解析の PGV gradient も高くなることが示された。常時微動の観測間隔と推定している地盤モデルの精度には、それぞれ課題や不確定性を含んでいるが、本研究で対象とした切り盛り地盤を想定した場合、15m 付近に周辺と比べて明確な高い値が観測で得られ、解析の分布形状とも整合することが確認できたことより、地震時の不整形地盤における地盤ひずみの推定にも発展する可能性がある。ただし、現状では基準化した分布で議論しており、PGV gradient や RMSV gradient の値そのものについてはまだ十分な検討に至っていない。また、微動計の設置間隔についても今後検討する必要がある。

4. 谷埋め盛土断面による観測 (適用例 2)

(1) 観測場所

3.の切り盛り地盤での適用例では、地震時に地盤境界部で亀裂があったために、境界部がその周辺にあるのではないかという想定もとで表面波探査を合わせて常時微動観測を行った。しかし、地盤構造が既知な場所でも確認の方がよいので、新たな場所でも観測を行った。

本観測は、地盤構造が明らかで周辺で PS 検層が行われている水資源機構の香川用水の一部である A サイホン周辺で観測を行った。サイホンは谷筋を横断する場合にその谷の基盤の形状に沿った線形で地中に敷設されており、サイホン上部やその周辺には谷を埋めて道路盛土が建設されている。図-11 は、道路盛土建設前のサイホン周辺の地図と測線の場所を示す。周辺のボーリング調査や PS 検層の結果、図-12 に示す断面が得られている。サイホンは S 波速度 430m/s の基盤面に沿って建設されている。谷埋め盛土には地盤改良が行われているため、一般の盛土よりも速い S 波速度が得られている。

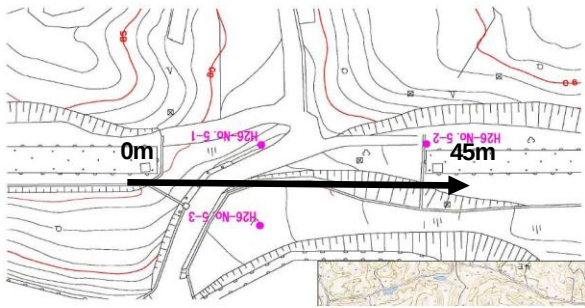


図-11 観測場所

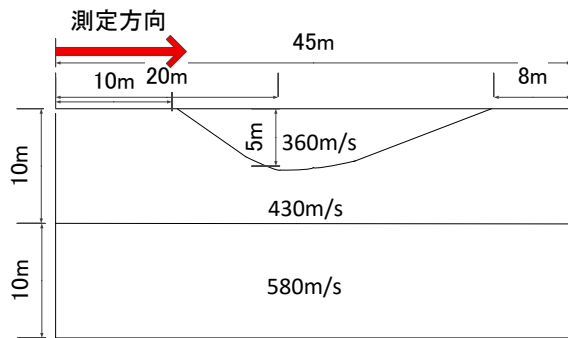


図-12 観測場所断面図

常時微動の観測日は2016年5月9, 10日で、観測の測線長は45m、微動計設置間隔は5mである。観測のサンプリング周波数は100Hzである。微動計には物探サービス社製の速度計を4台使用し、神戸大学の観測と同様に観測シリーズの端部観測点を重複して観測するようにした。

(2) RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ の比較

RMSV の算出は神戸大学における観測の時と同様の方法で行った。算出したRMSVを図-13に示す。測線10mと40m付近で周辺観測点のRMSVより低く、また谷の最深部である測線20m付近で最も高いRMSVが観測された。40mという短い延長においても、谷埋め盛土の不整形地盤においては微動の振幅に差異があることが確認できた。

神戸大学の切り盛り地盤での観測との比較のために0.5Hzのローカットフィルタで処理を行った。地盤応答関数 H は、測線の原土である0m、45m地点の微動を入力微動と見なして、その H/H 比を算出した。2地点の入力微動のスペクトルに差がなかったため、今回は45m地点を入力微動とした場合の地盤応答関数 H を採用する。神戸大学での観測と同様に、盛土地盤の H/V スペクトルの卓越周波数を盛土地盤の1次固有周波数とし、それと同様の周波数の H/H 比を測線上に並べて評価した。

谷埋め盛土地盤におけるRMSV gradient と $\partial H/\partial x$ を比較したものを図-14に示す。RMSV gradient は測線上の最大値で基準化して表記している。その結果、RMSV gradient と $\partial H/\partial x$ の分布形状において山、谷となる位置が

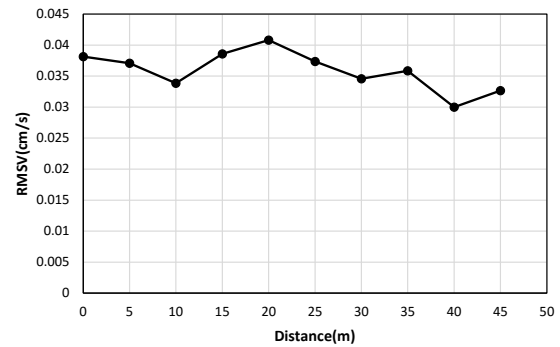


図-13 谷埋め盛土断面のRMSV

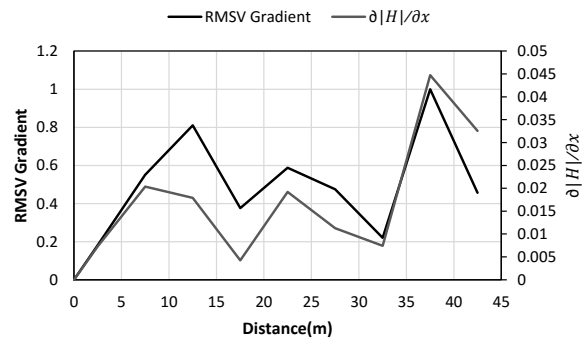


図-14 RMSV Gradient と $\partial H/\partial x$ の関係

同じになることが確認できる。RMSV gradient の分布形状が山となるのは、10-15m、20-25m、35-40mの間である。10-15m、35-40mの位置は、盛土地盤と原土地盤との地表面での境界もしくは、境界よりも盛土地盤よりなる。また20-25mの位置にも低い卓越が見られるが、谷の最深部に相当する。これらの分布形状については、3.と同様に解析を実施して同様の分布形状をもつ結果が得られるのか確認が必要である。

5. 結論

本研究では、地震時に不整形地盤において地盤ひずみを代替的に評価する方法としてPGV gradientが有効な指標になると考え、地盤ひずみとPGV gradientの関係について地盤応答関数を介して整理するとともに、微動観測によってそれらの有効性を確認することを示した。

切り盛り地盤と谷埋め盛土地盤の2つの不整形地盤において複数点で同時に微動観測することによってPGV gradientに相当するRMSV gradientを算出した。その結果、切り盛り境界周辺や谷埋め盛土の境界周辺でこれらの値が周辺の値よりも高くなることが確認でき、さらに地盤応答関数から算出される $\partial H/\partial x$ との関係についても良いことが確認できた。微動観測によるこれら指標と理論的・解析的な指標との分布形状が整合したことより、PGV gradient または RMSV gradient が地震時の不

整形地盤における地盤ひずみの推定指標に発展する可能性があるといえる。

その一方で、指標そのものや観測における課題はある。微動計の設置間隔によって分布のピークの範囲が制限されるため、不整形箇所を予測するにはその間隔について吟味する必要がある。また、本研究の二カ所の観測ではRMSV gradientの絶対値については値についての検討をしておらず、設置間隔が変わると絶対値も変化すると考えられるため、今後は値についての検討もしなければならない。

参考文献

- 1) 鋤田泰子, 高田至郎, 勤息義弘, Javanbarg, M. B : 斜面地形による水道管路被害への影響評価～2004年新潟県中越地震の管路被害分析～, 日本地震工学会論文集5巻, 4号, pp.1-14, 2005.
- 2) (社) 地盤工学会 : 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書, pp.591-599, 2009.
- 3) 松原勝己, 安藤博和 : 不整形地盤に発生する地震時のひずみについて, 応用地質 35 巻 6 号, pp.41-43, 1995.
- 4) 田村敬一, 千葉光, 本田利器, 中尾吉宏 : 不整形地盤における地震動増幅特性の簡易評価法, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 10, No.1, pp.869-874, 1998.
- 5) 清野純史, 井上佳樹, 清水謙司 : 地震時における埋設管に及ぼす不整形地盤の影響について, 土木学会地震工学論文集, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp.214-221, 2009.
- 6) 渡部龍正, 鋤田泰子, 後藤浩之 : 北海道浦河町の泥炭地盤震動特性と管路被害, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 4, pp. I_244-I_252, 2012.
- 7) 古川愛子, 大塚久哲, 内海寿紀 : エネルギー保存を仮定した不整形地盤の地震時最大軸ひずみの簡易推定に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp.137-148, 2009.
- 8) 酒井久和, 長谷川浩一, Pulido Nelson : 広域水道管路に対する震害予測手法の提案～2004年新潟県中越地震への適用～, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.561-567, 2010.

(2016. 9. 2 受付)

EVALUATION OF GROUND STRAIN ON IRREGULAR GROUND USING MICROTRMER OBSERVATION

Taisuke KURODA, Yasuko KUWATA and Hiroyuki GOTO

Damage to buried pipelines such as gas and water-supply pipeline during an earthquake depend on ground strain. However, the ground strain cannot be easy to estimate before the event and to observe. A new measure, PGV gradient is shown to have a good relation with pipeline damage by past earthquakes. This study attempts to observe the microtremor on the irregular ground at several points at the same time and evaluate the spatial distribution of ground strain from the gradient of observed velocity. We confirmed the good relation between observed velocity gradient and theoretical and numerical measures.