

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14022

研究課題名(和文) 最大速度空間変化率による地震時地盤ひずみ評価法の理論的解釈

研究課題名(英文) Theoretical interpretation of evaluation method for seismic ground strain using the spatial gradient of peak ground velocity

研究代表者

鎌田 泰子 (Kuwata, Yasuko)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50379335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：地震時における地中管路の挙動は周辺地盤の挙動に追随するため、それらの耐震性を検討するには地震時の地盤ひずみを精度良く評価することが重要となる。酒井らの研究により、地表最大速度(PGV)よりも、約250m間隔の地表最大速度の空間的な変化率であるPGV gradientが管路被害程度を良く説明できることを統計分析から経験的に示された。そこで本研究では、新たな指標であるPGV gradientと地盤ひずみとの関係についての理論的根拠を明らかにするとともに、入力波の周波数特性や不整形地盤でのPGV gradientと地盤ひずみの空間的分布形状の類似性を数値解析によって明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Buried pipelined is affected by the deformation of surrounding ground at an earthquake. When considering the seismic performance of buried pipeline, it is important to evaluate ground strain appropriately. In a case study of the past earthquake in Japan, Sakai et al. demonstrated that a new index called PGV gradient could explain well the damage to a water-supply pipeline. PGV gradient is defined as the spatial gradient of PGV at approximately 250 m intervals. This study aims to clarify the relationship of spatial distribution between PGV gradient and ground strain using theoretical and numerical approaches. This study analyzed the ground responses of several sediment-filled valleys due to the input waves with different frequency characteristics using FEM analysis as a numerical approach.

研究分野：地震工学

キーワード：地盤ひずみ 最大速度 不整形地盤 応答解析

1. 研究開始当初の背景

地震時における上下水道やガス等の地中管路の挙動は周辺地盤の挙動に追随するため、それらの耐震性を検討するには地震時の地盤変状や地盤ひずみを精度良く評価することが重要となる。耐震設計では水平成層地盤を仮定した上で地盤ひずみを算定するが、実際の地中管路の地震被害は、表層地盤が軟弱な地盤で発生する他、地形・地質境界部など局所的に地盤環境が変化する箇所でも集中発生する。基盤面が傾斜した不整形地盤上の地震ひずみは、地中管路に限らず道路や鉄道などの線状構造物に影響を与えるため、地盤震動の観測や不整形地盤の応答解析などを用いて地震時の地盤ひずみの調査研究が以前から盛んに行われてきた。

そのような中、酒井ら(2010)¹⁾は、新潟県中越地震の地中管路被害分析から、地表最大速度(Peak ground velocity, PGV)よりも、約250m間隔の地表最大速度の空間的な変化率であるPGV gradientが管路被害程度を良く説明できることを統計分析から経験的に示している。また、研究代表者ら(2012)²⁾の兵庫県南部地震の事例分析においてもPGV gradientが管路被害と良い相関があることが確認できた。PGV gradientは地盤ひずみに替わる新たな指標として期待できるが、ある時刻における最大ひずみを示す地盤ひずみと、2地点での時間領域における速度の最大値であるPGVの空間変化率を意味するPGV gradientは物理量でも全く異なるものであり、PGV gradientと地盤ひずみとの関係についての理論的根拠は明確に示されていない。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 鎌田泰子, 渡部龍正, 兵庫県南部地震における地震外力指標とライフライン被害との関係, 建設工学研究所論文報告集, 第54号, pp.55-66, 2012.

2. 研究の目的

本研究では、新たな指標であるPGV gradientと地盤ひずみとの関係についての理論的根拠を明らかにするとともに、入力波の周波数特性に応じたPGV gradientと地盤ひずみの空間的分布形状の類似性を数値解析によって明らかにする。さらに、基盤面が不整形な地盤モデルに対してもこれらの関係が成立することを確かめ、不整形地盤に対してPGV gradientと地盤ひずみの空間的分布形状の関係に一般性があることを示すことを目的としている。PGV gradientの空間分布特性に一般性を持たせることの意義は極めて大きく、PGV gradientは現在の耐震設計で算出される地盤ひずみや地中管路の被害予測の

外力指標である地表最大速度に代替できる可能性があり、地中構造物の地震対策を飛躍的に進歩させる。

3. 研究の方法

地盤ひずみとPGV gradientとの関係を理論解から論証するとともに、複雑な入力波や様々な不整形地盤モデルに対しては数値解析によってそれらの空間分布特性の類似性を確認し、地盤ひずみとPGV gradientとの空間分布の類似性を理論的・解析的に明らかにする。その証明にあたっては、以下の3課題を順に進めていく。

(1) 地盤ひずみとPGV gradientとの類似性の理論的論証

不整形地盤に生じる地表面の地盤ひずみとPGV gradientが関連していると検討している酒井らの提案を、理論的に論証することを試みる。ここでは複雑な地盤条件を与えて数値解析的に議論するのは避け、単純な成層構造の地盤を想定して議論を進める。地盤ひずみとPGV gradientは、それぞれ地盤応答関数を導入することで表記できる。しかし、地盤ひずみは地盤応答関数の空間微分であるのに対し、PGV gradientは時間域の最大値の空間微分であるため、PGV gradientを地盤応答関数と直接対応させることは容易ではない。そこで、仮定的な解釈に基づいてPGV gradientを地盤応答関数に関連づけることにする。

(2) 数値解析によるPGV gradient空間分布の理論解の補完

(1)の理論定式化では、ある周波数をもつ単純な正弦波入力、剛基盤と表層地盤との間に鉛直境界面を有する単純成層地盤モデルに限った場合の数式展開を行うが、ある周波数帯域の入力波やパルス波、基盤面が不整形な地盤モデルなど、理論解ではフォローできない入力・地盤条件の場合は、有限要素法を用いて二次元地盤モデルの数値計算を行い、解析結果からPGV gradientの空間分布の特性を得る。地盤の応答解析には、研究分担者の後藤らが開発したプログラムを用いる。数値解析においては、理論解の論証で扱ったモデルや入力波に対して解析でも同じ解が得られることを確認するとともに、周波数や周波数帯域などを変化させて入力波によるPGV gradient空間分布の特性への影響もみる。不整形地盤モデルによる影響もみる。

(3) 非線形地盤応答解析によるPGV gradientの特性

理論解として誘導される地盤ひずみとPGV gradientは弾性地盤の解であるが、地中埋設管が被害を受けるような強震動時の地盤ひずみでは地盤は塑性領域にある。本研究では、(2)の解析プログラムの改良を行い、非線形地盤応答解析を実施する。そして、入力

地震動レベルに応じて PGV gradient と地盤ひずみとの関係が線形応答の時に比べて空間分布の類似性が維持されるのかについて検証する。

4. 研究成果

(1) 地盤ひずみと PGV gradient との類似性の理論的論証

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 を関連付けることにより、これらの指標を関連づける。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解が得られ、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。

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

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

それぞれ式(2)を代入すると式(5)、(6)のように表すことができる。

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

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

さらに以下の二つの仮定を置くことで式(5)、(6)をそれぞれ PGV gradient は $\partial H / \partial x$ は、地盤ひずみは $|\partial H / \partial x|$ のように表すことができる。

仮定 1: 地盤応答関数が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。

仮定 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ではなく、2 次、3 次モードについて参照する。

$$|\varepsilon_x| = \left| \frac{H(x, \omega)}{x} u_0(\omega) \right| \quad (7)$$

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

ある角周波数 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、前者は地盤ひずみ、後者は PGV gradient 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 に示している基盤(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。表層のせん断剛性は μ 、密度は ρ 、厚さは一様に h であるとする。剛基盤が面外方向に $u_0(\omega)$ で一様に振動した場合の表層の応答 $u(x, z, \omega)$ は、境界値問題を解くことにより以下のように導くことができる。

$$u(\xi, \zeta, \varpi) = \frac{u_0 \cos \varpi \zeta}{\cos \varpi} + u_0 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \left[\frac{(2n-1)\pi}{2} \zeta \right] e^{-ik_n \xi} \quad (9)$$

ここに ξ, ζ, ϖ は無次元化した x, z, ω に対応し、具体的には次式で関係付けられる。

$$\xi = \frac{x}{h}, \quad \zeta = \frac{z}{h}, \quad \varpi = \frac{\omega h}{\beta} \quad (10)$$

β は表層の S 波速度を表す。 $\varpi = \pi/2$ は 1/4 波長則に対応する周波数である。実用上はこの周波数を地盤の固有周波数とすることが多いため、 ϖ の値として余りにも大きな値を想定する必要はないと考えられる。ただし、 $\varpi = \pi/2, 3\pi/2, \dots$ のとき、式(9)の第 1 項が無限大となり、有限解が得られない。

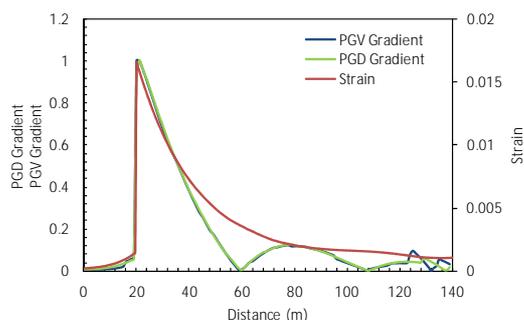


図-1 単純鉛直矩形地盤モデル

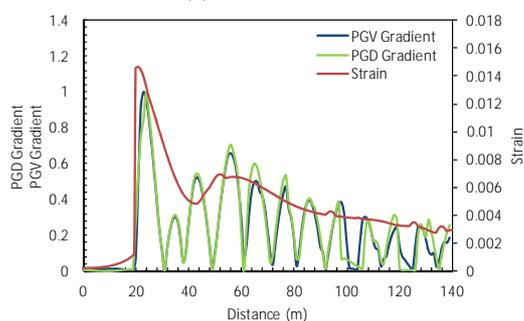
そこで、入力周波数が表層の固有周波数に漸近するという条件で、 $\partial H / \partial x$ と $|\partial H / \partial x|$ に漸近解を求めると、これら二つの指標はほぼ同じ分布形状を示すことを確認した。

(2) 数値解析による PGV gradient 空間分布の理論解の補完

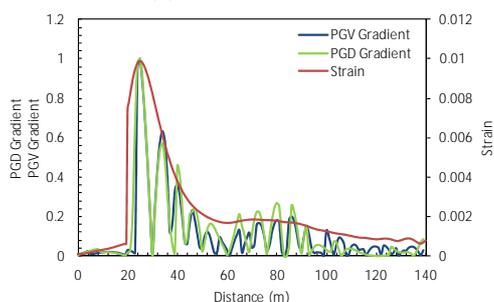
単純な矩形成層地盤の表層における地盤応答関数 $H(x, \omega)$ は、入力周波数が地盤の固有周波数に漸近するにつれて大きくなるが、それらが同じ場合には有限解が得られない。そこで、図-1 のモデルに対して 2 次元 SH 波動場による地盤応答の線形 FEM 解析を行った。また、仮定 2 が言及する式(6)の $i\omega$ が不要な PGD gradient であれば仮定 2 を用いることなく地盤ひずみと符合すると考えられる。PGV gradient とあわせて PGD gradient についても検討した。



(a) $\omega = \pi / 2$



(b) $\omega = 3\pi / 2$



(c) $\omega = 5\pi / 2$

図-2 鉛直基盤モデルにおいて 1,2,3 次の地盤の固有周波数の入力波を与えた場合の地盤ひずみと PGV gradient, PGD gradient の関係 (両 gradient は最大値で正規化表示)

FEM 解析によって、地盤の固有周波数に等しい入力周波数を与えた場合、PGV gradient を包絡する形状に地盤ひずみが分布することが確認できた (図-2)。さらに、地盤の固有周波数に等しい入力周波数を与えた場合、PGD gradient と PGV gradient は同様の分布を示す指標であることが確認できた。地盤ひず

みは を包絡するような形状となることを確認できた。したがって、地盤の固有周波数に等しい入力周波数を与えた場合には、両 gradient と地盤ひずみは、地盤応答関数 H を空間微分した指標として見なせることがわかった。

さらに入射波の周波数特性が及ぼす影響を明らかにするために加速度、速度、変位の振幅一定のピンクノイズを入射した場合の解析と、地盤の不整形性が及ぼす影響について明らかにするために図-1 の鉛直矩形基盤が傾斜している複数の不整形地盤モデルの解析を行った (図-3 は一例)。

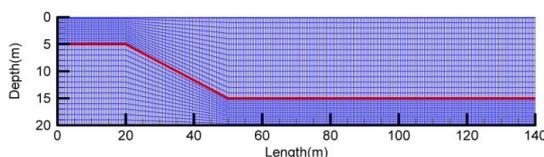


図-3 基礎面が傾斜した不整形地盤モデルの一例

以下はそれらの結果をまとめたものである。

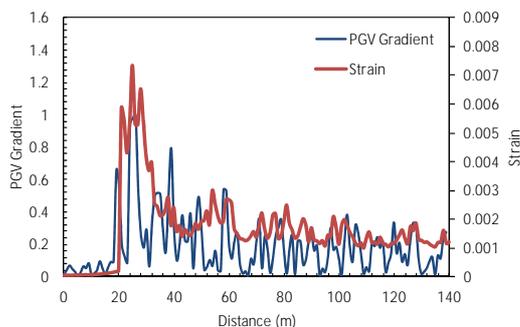
- 1) 地盤の固有周波数に局在しない入力波が与えられた場合においても、地盤ひずみや PGV gradient, PGD gradient は地盤応答関数 H を空間微分した指標としてみなせることがわかった。ただし、両 gradient が参照する地盤応答関数モードはそれぞれ異なり、さらに地盤ひずみについては、入力波に含まれる全ての固有周波数モードを参照する必要がある。
- 2) 入力波の周波数特性を変えると、両 gradient が参照する地盤応答関数モードも変化することがわかった。高周波数側 (高次モード) が優勢な入力波が与えられた場合には、両 gradient が参照するモードも高次側に移行する。低周波数側 (低次モード) が優勢な入力波が与えられた場合に、PGV gradient の方が PGD gradient より、地盤ひずみの分布形状との相関が良いことがわかった。
- 3) 基礎の傾斜が緩くなればなるほど、両 gradient と地盤ひずみとの分布形状の相関性は悪くなることがわかった。ただし、傾斜が 1 : 5 程度までの地盤モデルであれば分布の相関性は保たれる傾向にある。なお、傾斜基盤から励起された波による影響は、法尻境界付近の両 gradient 分布図に表れることも確認できた。

(3) 非線形地盤応答解析による PGV gradient の特性

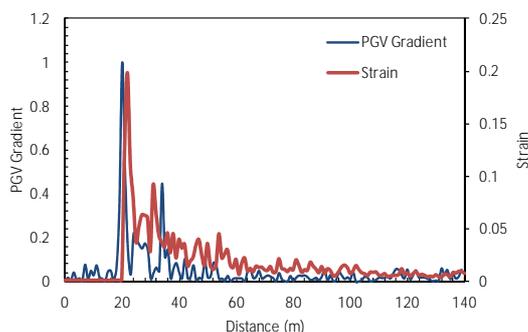
上述した解析による検討は全て線形地盤であるため、実際に地中埋設管に被害をもたらすような地盤ひずみが発生する場合、地盤の固有周波数は低くなり、これまで線形地盤における固有周波数で検討していた関係は成立しない可能性がある。そこで、地盤の非線形挙動を考慮した解析を行い、地盤ひずみ

と PGV gradient, PGD gradient との関係性を検証した。以下が、研究で得られた知見である。

- 1) 地盤の塑性化によって、地表の応答の卓越周期が長周期化し、特に高次モードの振幅が減少することを確認した。しかし、線形時と同様に、両 gradient が、卓越周期における地盤応答関数 H の空間微分として見なせる指標であることを確認した（図-4 参照）。
- 2) 地盤の塑性化が進むと、地盤ひずみと両 gradient の分布形状は、PGD gradient の方が良い関係となることがわかった。その要因は、地盤の塑性化によって地表の応答が長周期化し（低次モードが優勢になる）、低次モードを参照する PGD gradient が地盤ひずみの分布形状と近くなるためと考えられる。それによって、線形時には分布形状の相関が悪かった緩い傾斜を持つ地盤においても、非線形時には分布形状が類似しやすくなる。
- 3) 地盤の塑性化の影響は、基盤の鉛直境界や傾斜部分での地盤ひずみや両 gradient の分布形状に大きく表れることがわかった。ただし、傾斜 1:10 程度の場合には傾斜の影響が解析結果に表れにくく、塑性化の影響も判断しにくいことを確認した。



(a) 0.1m/s の入射波ケース



(b) 1m/s の入射波ケース

図-4 鉛直境界地盤モデルにおける入力波による地盤ひずみと PGV gradient の空間分布関係（PGV gradient は最大値で正規化）

(4) まとめ

本研究では、PGV gradient と PGD gradient

に着目し、地盤ひずみの分布形状との関係性を検証した。1:5 程度までの基盤傾斜を有する地盤においては、地盤ひずみと PGV gradient, PGD gradient の空間分布形状は類似し、低周波数側が優勢な入力波であれば、特に PGV gradient が地盤ひずみの分布形状との関係性が良い。しかし、地盤の塑性化が進むと、PGD gradient が地盤ひずみの分布形状との相関がよくなることがわかった。なお、本研究は空間分布形状に着目したが、管路の被害推定などに応用するにはより詳細な値の関係についても明らかにする必要があること、また SH 波のみを考慮し地盤のせん断ひずみに着目したが、軸ひずみも管路被害には大きく影響することなど、今後も検討する余地がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

H. Sakai, N. Pulido, K. Hasegawa, Y. Kuwata, A new approach for estimating seismic damage of buried water supply pipelines, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 査読有, 2017.1, DOI: 10.1002/eqe.2869

〔学会発表〕(計 2 件)

黒田泰介, 鎌田泰子, 後藤浩之, 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, 土木学会第 36 回地震工学研究発表会, 2016.10.17, 金沢歌劇座 (石川県)

黒田泰介, 鎌田泰子, 微動記録を用いた不整形地盤のひずみ評価の試行, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016.6.11, 立命館大学 (滋賀県)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌田 泰子 (KUWATA, Yasuko)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 5 0 3 7 9 3 3 5

(2) 研究分担者

澤田 純男 (SAWADA, Sumio)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 7 0 1 8 7 2 9 3

後藤 浩之 (GOTO, Hiroyuki)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 7 0 4 5 2 3 2 3