

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 2日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656103

研究課題名（和文） 地震時に液状化地盤中を伝播する重力波による構造物への影響について

研究課題名（英文） Structure damages due to gravity wave propagation through liquefied ground

研究代表者

澤田 純男 (SAWADA SUMIO)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70187293

研究成果の概要（和文）：固体である地盤を伝播する地震波は重力の作用を無視するが、流体に近い性質を持つと考えられる液状化地盤では重力の作用を無視することができるとは限らない。重力の作用を考慮した数値解析手法によって、液状化地盤を伝播する波をシミュレートしたところ、せん断剛性の低下に対応して表面波が流体中の重力波に似た性質をもつようになること、またスロッシング現象が顕著になることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Gravity effect on propagation waves in a solid medium is not considered, whereas the effect may be important to discuss the propagation waves in a liquefied ground. We simulate wave propagation in a liquefied ground introducing the gravity effect. The wave exhibits the similar property with the gravity wave in a fluid medium as decreasing the shear modulus, and sloshing behavior is excited in the medium.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	0	700,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,100,000	720,000	3,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：重力波，液状化，スロッシング，低せん断剛性

## 1. 研究開始当初の背景

固体を伝播する弾性波は、せん断力が復元力となって作用することで、波として伝播する。一方、流体を伝播する波は、重力が復元力となって作用することで伝播する重力波である。地震工学において地盤を伝播する波を取り扱う場合、地盤は固体であるという根拠から通常は重力の影響を考慮することはない。

しかし、液状化地盤は地盤材料が流体的な性質を示すものとして知られている。このため、液状化地盤を伝播する波が存在していた

とするならば、その波の性質を議論する上で重力の作用を無視してよいとは限らないのではないかと考えた。

Lomnitz(1970)など、液状化地盤とは限らないが、目視できる程度で伝播速度が遅く、振幅の大きな表面波についての証言がある。この事実は観測によって捉えられていないため科学的な根拠とはならない。このため、液状化地盤における重力波の議論は、存在していたとするならばどのような性質を持つかを理論的に予測することである、と研究開始当初考えていた。

2011年東北地方太平洋沖地震において関東地方を中心に発生した液状化被害によって、液状化地盤の動的な挙動が数多く撮影された。このうちいくつかの動画は液状化地盤が水平に長い周期で揺動する現象を捉えており、これは流体に生じるスロッシング現象と似ている。流体のスロッシング現象は、重力が復元力として作用して生じる液面揺動であって、広義の意味で重力波である。すなわち、液状化地盤の動的な応答に重力の影響が示唆される事例が観察されたことになる。

## 2. 研究の目的

本研究は、従来考慮されていなかった重力の影響を考慮して、液状化地盤を伝播する地震波の特徴について理論的に考察することが目的である。

固体の表面を伝播する Rayleigh 波は、波の伝播方向に対して後ろ向きに回転する粒子軌跡を描く特徴があるが、流体の表面を伝播する重力波は、伝播方向に対して前向きに回転する粒子軌跡を描く。液状化地盤をせん断剛性の低い固体として簡便に特徴付けると、適切に重力の影響を考慮した場合にはせん断剛性の減少に伴って、粒子軌跡の回転方向が変化するはずである。そこで、粒子軌跡の回転方向や伝播速度に着目して、その特徴の変化を考察する。

また、流体のスロッシング現象は、水平に与えた振動によって自由表面が上下に揺動する現象が認められる。一方、固体では水平動により励起される上下動の振幅は小さいと考えられる。そこで、自由表面の上下振幅とその形状に着目して、考察をする。

## 3. 研究の方法

図1に示すように Rayleigh 波は波の伝播方向に対して後ろ向きに回転する粒子軌跡を描く特徴があるが、重力波は伝播方向に対して前向きに回転する粒子軌跡を描く。

流体の基礎方程式は一般にオイラー座標系で記述され、固体の基礎方程式はラグランジュ座標系で記述されることから、その取り扱いの違いにも留意する必要がある。その上で重力の影響を考慮するためには、支配方程式に適切に重力の項を導入する必要がある。

そこで、自由表面の境界条件を適切に導入できるラグランジュ座標系の基礎方程式を採用して、重力項を導入することとした。そして、基礎方程式と境界条件とからなる境界値問題に対応する有限要素法を構成して、数値的にシミュレーションをして考察した。

## 4. 研究成果

液状化地盤を模した低せん断剛性媒質を伝播する表面波の問題について紹介する。ラグランジュ座標系の運動方程式に対して、有

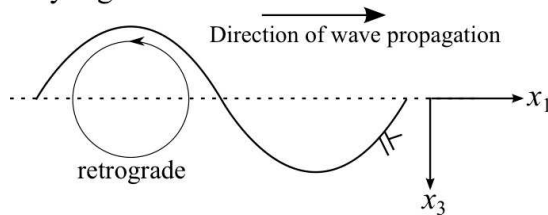
限変形を仮定するのではなく、微小変形でありながらも近似的に重力の作用のみ考慮できるような項を導入して定式化する。具体的には、Biot(1965)により提案された重力項を採用する。

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}_i = \sigma_{ij,j} + \rho g u_{z,j}$$

上式の右辺第2項が重力項であって、上下変位の空間微分に比例する項が作用する。この項は、有限変形を仮定した運動方程式から2次の項を無視して導くことができ、かつ流体中の深水波に相当する場合の重力波の理論界を満たすことが示される。

半無限媒質をモデル化した解析領域を対象として数値シミュレーションを実施した。なお、ここでは一例として均質媒質からなる場合について紹介する(図2)。自由表面の1点を上下に加振することで表面波を生成して、その伝播の様子を考察する。物理量は全て無次元量として表示している。特に、重力加速度の無次元量  $G$  は、重力加速度  $g$ 、媒質の  $S$  波速度  $V_s$ 、加振の中心周波数  $f$  によって  $g/V_s f$  で表す。すなわち、 $G$  の増加に従って、相対的にせん断力の作用よりも重力の作用の方が大きくなることを意味している。

### Rayleigh Wave



### Gravity Wave

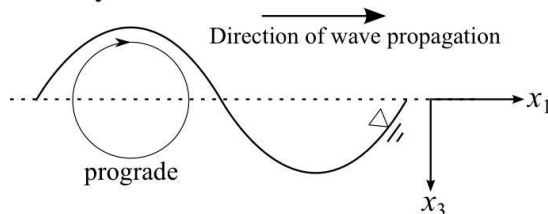


図1 Rayleigh波と重力波の粒子軌跡の方向

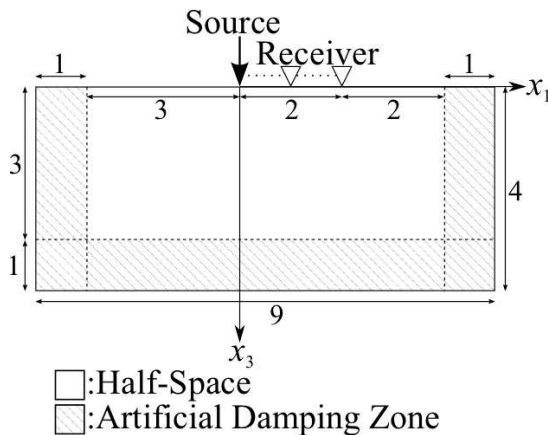


図2 解析モデル

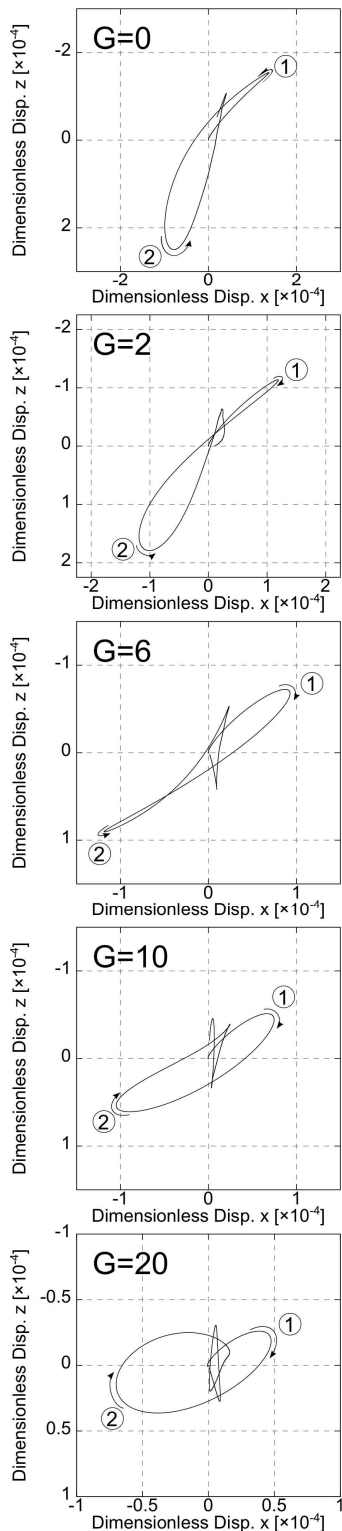


図3 重力項の変化に伴う粒子軌跡の変化

重力の作用が大きくなるにつれて、加振点から離れた地点における粒子軌跡は変化する(図3)。重力の作用がない場合( $G=0$ )には、進行方向に対して逆向きに回転するフェーズの振幅が目立つが、重力の作用が増加するにつれて先に観察される前向きのフェー

ズが目立つようになる。これは Gilbert(1967)によって理論的に予測されていた現象と整合する。また、表層と基盤とからなる2層系の場合や、媒質が粘性を持つ場合においても、やや挙動は複雑になるものの同様の傾向が認められた。

フェーズの伝播速度に着目すると、図3のフェーズ2は Raileigh 波の速度で伝播しており、フェーズ1はそれより速く伝播する。このため、フェーズ2は Raileigh 波であり、先行するフェーズ1が前向きに回転する粒子軌跡を持ち、かつ重力の作用によって重力波に成長する成分であると考えられる。実際に重力の影響が十分大きい場合には、このフェーズは重力波の速度で伝播する。

以上の考察をより現実の液状化地盤に対して行うため、2相混合体理論に基づいた有効応力解析と砂の繰り返し弾塑性モデルを採用した有限要素法による数値実験を進めている。2相系における重力項の与え方や、表面波の発生方法について工夫が必要である。いくつかの結果は得られているが、その結果の妥当性を現時点では確認できないことから、実験と比較するなど妥当性を今後引き続き検討する必要があると考えている。

続いて、低剛性媒質に水平に振動を加えた場合の揺動現象の数値解析について紹介する。背景でも述べたように、東北地方太平洋沖地震において、液状化地盤が4-5秒程度の周期で大きく揺動する現象が確認されている(安田・萩谷, 2012)。流体の揺動現象はスロッシング現象と呼ばれ、その振動周期は容器サイズと重力加速度によって定まる(Housner,1963)。流体のスロッシング現象と似た現象が液状化地盤の揺動現象であるならば、重力の作用によって液状化地盤が振動している、すなわち広義の意味で定常な重力波が生じていると考えることが出来る。

Wilson and Khalvati(1983)は、ラグランジュ座標系で流体の支配方程式を記述してスロッシング現象を解析している。その特徴は、1)重力項としてポテンシャルから導出される表面力の導入、2)次数低減積分の採用、そして3)アワーグラスモード抑制のための回転剛性の付与、である。微小変形下の流体に対しては以上の仮定は妥当であって、水平振動に対して生じる自由表面の鉛直変位は Housner(1963)の解に整合する。

しかし、この数値解析手法は流体にのみ妥当性が検証されているため、固体に対しても同様に適用可能であるかは不明である。そこで、様々な条件下で数値実験を実施して、固体への適用可能性を調べた。図4に示すように、対象とする媒質を剛な容器に納め、容器を水平に振動させることで自由表面を上下に揺動させる。この解析では流体時にも適切な体積弾性係数(2GPa)を与えて、体積弾性

係数が一定となるようにしてポアソン比を流体時の 0.5 から変化させて、挙動の変化を調べた。

ポアソン比が小さい範囲では通常の固体に対する有限要素法による解を参照し、ポアソン比が 0.5 では Housner(1963)の解を参照する。Wilson and Khalvati(1983)で提案されている方法そのままでは、図 5 に示しているようにポアソン比が小さい範囲で過小評価されてしまう。数値解析の条件を変えて調べると、この原因が回転剛性の大きさにあることが確認できた。すなわち、回転剛性を Wilson and Khalvati で推奨されている値より小さく与えることで、流体から固体までの全ての範囲で妥当な結果を与えることができる。元々、回転剛性はアワーグラスモードを回避する目的で付与されていたため、アワーグラスモードを理論的に避けることが出来る程度の小さい回転剛性を与えればよいことを意味している。

鉛直変位の大きさに着目すると、ポアソン比が 0.5 に近づくにつれて増加することが認められる。例えば、ポアソン比 0.499995 の場合の鉛直変位は流体時のおよそ 0.1 倍であり、固体と考えられるポアソン比 0.45 の場合のおよそ 1000 倍である。このことは、揺動現象によって生じる上下変動は流体時に最大ではあるが、液状化地盤のように非常にせん断剛性の低い媒質であっても上下変動が生じることを意味している。

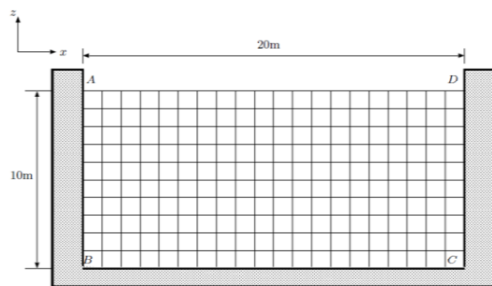


図 4 解析モデル (揺動現象)

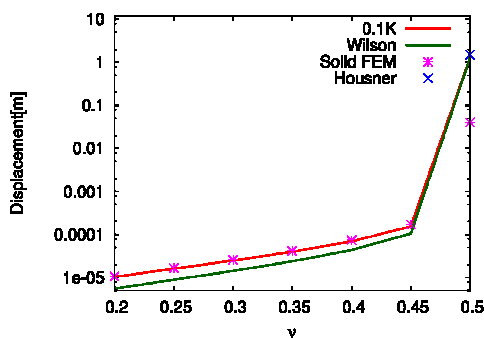


図 5 ポアソン比の違いによる自由表面端の鉛直変位

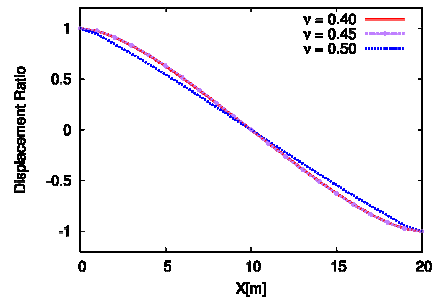


図 6 最大鉛直変位時の自由表面形状の比較

また、ポアソン比の違いによる自由表面形状の変化について図 6 に示している。自由表面端の鉛直変位が最大となる時刻において、縦軸の最大値を正規化して示している。固体時には容器端から曲線形の自由表面形状を示しているが、流体時には直線形の形状を示している点が特徴的である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- 1) Hiroyuki Goto, Yuichi Kawamura, Sumio Sawada and Takashi Akazawa, Direct estimation of near-surface damping based on normalized energy density, *Geophys. J. Int.*, 査読有, 印刷中.  
DOI:10.1093/gji/ggt104
- 2) 稲谷昌之, 後藤浩之, 盛川仁, 小倉祐美子, 徳江聡, Xin-rui Zhang, 岩崎政浩, 荒木正之, 澤田純男, Aspasia Zerva, 大崎市古川高密度地震観測を利用した表層地盤構造の推定, *土木学会論文集 A1 (地震工学論文集)*, 査読有, 印刷中.
- 3) Hiroyuki Goto and Hitoshi Morikawa, Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, 査読有, Vol.52, No.5, pp.769-779, 2012.  
DOI:10.1016/j.sandf.2012.11.002
- 4) 王寺秀介, 澤田純男, 後藤浩之, 特性化グリーン関数に基づく地震動の応答スペクトル予測手法, *日本地震工学会論文集*, 査読有, Vol.12, No.7, pp.46-61, 2012.  
DOI:10.5610/jaee.12.7\_46
- 5) Hiroyuki Goto, Hitoshi Morikawa, Masayuki Inatani, Yumiko Ogura, Satoshi Tokue, Xin-Rui Zhang, Masahiro Iwasaki, Masayuki Araki, Sumio Sawada and Aspasia Zerva, Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seismological Research Letters*, 査読有, Vol.83, No.5,

pp.765-774, 2012.

DOI:10.1785/0220120044

- 6) 後藤浩之, 盛川仁, 鋤田泰子, 2011年東北地方太平洋沖地震における古川ガス本震記録の推定, 土木学会論文集 A1, 査読有, Vol.68, No.4(地震工学論文集 Vol.31-b), pp.I\_111-118, 2012.  
DOI:10.2208/jscejsee.68.I\_111
- 7) 福島康宏, 山田真澄, 後藤浩之, 臨時余震観測記録を用いた東北地方太平洋沖地震における登米市迫町佐沼の地震動推定, 土木学会論文集 A1, 査読有, Vol.68, No.4(地震工学論文集 Vol.31-b), pp.I\_119-125, 2012.  
DOI:10.2208/jscejsee.68.I\_119
- 8) 渡部龍正, 鋤田泰子, 後藤浩之, 北海道浦河町における泥炭地盤の地震応答解析と管路被害, 土木学会論文集 A1, 査読有, Vol.68, No.4(地震工学論文集 Vol.31-b), pp.I\_244-252, 2012.  
DOI:10.2208/jscejsee.68.I\_244
- 9) Hiroyuki Goto, Sumio Sawada and Toshiyuki Hirai: Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -Normalized Energy Density-, Wave Motion, 査読有, Vol.48, No.7, pp.602-612, 2011.  
DOI:10.1016/j.wavemoti.2011.04.011
- 10) 新垣芳一, 澤田純男, 後藤浩之, 液状化地盤内を水平方向に伝播する波に及ぼす重力の影響に関する数値解析的検討, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 査読無, pp.2067-2071, 2010.

[学会発表] (計5件)

- 1) 後藤浩之, 地盤伝達関数のクロスターム, 第62回理論応用力学講演会, 2013年3月6日. 東京工業大学(東京).
- 2) 稲谷昌之, 後藤浩之, 盛川仁, 小倉祐美子, 徳江聡, Xin-rui Zhang, 岩崎政浩, 荒木正之, 澤田純男, Aspasia Zerva, 宮城県大崎市古川地区における超高密度地震観測, 第62回理論応用力学講演会, 2013年3月6日. 東京工業大学(東京).
- 3) Hiroyuki Goto, Fundamental property of cross terms of ground transfer function, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013年3月1日, 東京工業大学(東京).
- 4) 新垣芳一, 澤田純男, 後藤浩之, 液状化地盤内を水平方向に伝播する波に及ぼす重力の影響に関する数値解析的検討, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010年11月19日, つくば国際会議場(つくば市).
- 5) 新垣芳一, 澤田純男, 後藤浩之, 液状化地盤内を水平方向に伝播する波に及ぼす重力の影響に関する数値解析的検討, 平

成 22年度土木学会全国大会, 2010年9月1日, 北海道大学(札幌市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澤田 純男 (SAWADA SUMIO)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号: 70187293

### (2) 研究分担者

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)  
京都大学・その他の研究科・准教授  
研究者番号: 00380585  
中村 晋 (NAKAMURA SUSUMU)  
日本大学・工学部・教授  
研究者番号: 40307806  
鋤田 泰子 (KUWATA YASUKO)  
神戸大学・工学(系)研究科・准教授  
研究者番号: 50379335  
後藤 浩之 (GOTO HIROYUKI)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 70452323