

# 不整形地盤における動揺地震動特性が 構造物応答に及ぼす影響

村田 晶<sup>1</sup>・定免 徹<sup>2</sup>・北浦 勝<sup>3</sup>・宮島昌克<sup>3</sup>

<sup>1</sup>金沢大学大学院自然科学研究科 助手 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: murata@t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup>静岡市役所 (〒420-8602 静岡市追手町5-1)

E-mail: jomen@pbousa9.ce.t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>金沢大学大学院自然科学研究科 教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: kitaura@t.kanazawa-u.ac.jp, miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

現行の耐震設計は上下および水平2方向に対して記録された観測記録に基づいているが、構造物の地表面に対する広がり程度の範囲内に2箇所以上の地震計が設置されていることはまずないから、構造物基礎に入射するすべての波形を観測することはできない。ところが地盤の不均一性や波の伝播特性により、構造物には回転成分、動揺成分のような複雑な震動が入力される。そこで本研究では、そのような回転・動揺成分を動揺地震動と呼び、不整形地盤上で発生した動揺地震動が構造物にどのような影響を及ぼすかを実験、解析によって検討した。その結果、動揺地震動が構造物頂部における水平応答の増幅、減少に大きく影響すること、また構造物の軸力、せん断力の増加に寄与することを明らかにした。

**Key Words :** Irregular form ground, Rocking earthquake motion

## 1. はじめに

盆地地形や埋土地盤など地盤条件が急激に変化したり、または地盤の層構造が複雑であったりする、いわゆる不整形地盤上に建設される構造物に対しては、地震動により種々の被害を生じることが明らかにされてきた。このような地形の地表面では複雑な震動によって、近い2点間においても上下応答差が発生する。また、構造物の基礎が剛な場合、構造物は上下応答差に起因した回転成分の振動が入力されたかのような動きを示す。そのような挙動により構造物頂部には負荷がかかることから、転倒などの被害をもたらされる危険性がある。また、このような回転成分入力は構造部材に対し軸力、せん断力を増加させることから、柱の座屈等につながる危険性が考えられる。例えば、1999年台湾・集集地震における中寮地区では、不均一な地盤上に建てられた高压鉄塔が、座屈により多数被害を受けていることから、このような回転成分入力が被害原因の一つであったと推測することができる。

地盤の不均一性に起因する地震動については、多数の研究が行われている。土岐、新田<sup>1)</sup>は地盤構成の急変部における短周期表面波の挙動に関して考察し、地盤条件が急変する場合、特に軟らかい地盤側で大きな増幅作用が発生することを明らかにしてい

る。秋山、中村<sup>2)</sup>は傾斜層を含む地盤の波動伝播解析を行い、傾斜層付近で発生した散乱波が側方に伝播する様子を表している。また、不整形地盤域の構造物の振動特性に関する研究としては、崖近傍の構造物の地震応答を評価した研究<sup>3)</sup>や、半円筒形谷近傍に位置する構造物の振動応答に及ぼす谷の影響を調べた研究<sup>4)</sup>、半円筒形沖積地盤の中央に位置する半円筒形基礎の動特性を解析した研究<sup>5)</sup>などがなされている。

しかしながら、こうした地盤構造に注目した研究のほとんどは、地盤の不均一性の影響を地震波の増幅特性や伝播特性という観点から捉えているものであり、地盤応答の位相差に注目して考察した例はこれまでに示されていない。そのため、地盤の不均一性と地表面の応答の位相差の関係は未だ明確にされておらず、また、そうした位相差によって生じる入力が、構造物に及ぼす影響について検討した研究もほとんど見られない。

そこで、本研究では地表面に傾斜を生み出し、構造物の転倒などを誘発するような上下方向に位相差を伴った地震動を動揺地震動と定義し、動揺地震動が構造物に及ぼす影響について探る。すなわち本研究では、不整形地盤上で発生した動揺地震動が構造物にどのような影響を及ぼすかを実験的、解析的に検証する。

## 2. 不整形地盤における動揺地震動が構造物に及ぼす影響

### (1) 実験概要

図 2.1 に実験概要図を示す。油圧式の振動台 (1.5m×1.5m) 上に鋼とアクリル板で製作された砂箱 (長さ 1.8m×幅 0.6m×高さ 0.8m) を設置し、砂箱内部に 5 号珪砂と粘性土で不整形地盤を形成し、層厚 50cm の模型地盤を作成した。珪砂と粘性土の土質定数を表 2.1 に示す。構造物モデルは、5 階建て S 造構造物を 1/50 スケールの 1 質点系モデルで表現した。構造物底部を固定したときの構造物パラメータを表 2.2 に示す。また、地盤上に構造物を設置させる場合には構造物を底部から 5cm 埋めることで構造物と地盤を固定し、振動させたときに構造物と地盤が別々に振動しないようにした。図 2.2 に構造物のみ加振した場合の実験概要図を示す。構造物は振動台上にボルト結合で固定してある。ここで構造物のみ加振した場合の構造物応答を求める理由は、動揺成分が入力されていない状態を知るためであり、このときに得られる構造物の応答を基準とする。

計測項目は図 2.1 の A～D 点においての上下方向と水平方向の応答加速度である。入力波は正弦波とし、入力方向は、水平単独方向、上下水平同時の 2 ケースを行った。入力波の最大振幅は構造物の底部で 50gal、100gal、振動数は 2Hz から 10Hz まで 1Hz 刻みである。したがって地盤上に構造物を設置した実験(図 2.1)では、構造物の底部で 50、100gal となるように振動台の加速度振幅を調整している。加振時間は 20 秒間であり、動揺加速度は 2 点間の上下応答加速度差を 2 点間距離 (構造物の幅) で割った値とする。

### (2) 実験結果及び考察

#### (a) 水平加速度応答比と動揺加速度の比較

表 2.2 のパラメータを用いて作成した構造物モデルに対し、不整形地盤上における構造物頂部と構造物のみ加振したときの構造物頂部との最大水平加速度の比及び最大動揺加速度を図 2.3 に示す。(a) 水平単独入力 50gal と (b) 水平単独入力 100gal 及び (c) 同時入力 (上下、水平入力とも) 100gal を比較すると、高振動数領域で同時入力のほうが最大動揺加速度の増幅が大きい。したがって既往の研究<sup>6)</sup>により上下入力が動揺成分の増幅要因であるとされているが、加えて入力振動数に依存するという要因がわかった。その原因は以下のように考えられる。粘性土地盤と砂地盤とではせん断波速度が異なる。せん断波速度一定のとき、振動数と波長は反比例関係となることから、振動数が増加するに従い波長が短くなる。波長が短いほど地盤の不均一性が波長に対し大きく影響を及ぼすことから、両地盤の地表面応答の位相差が大きくなる。その結果動揺加速度が大きく発生したと考えられる。

また、構造物頂部の水平加速度応答比は構造物 1 次固有振動数が 2.3Hz のため、水平単独、同時入力ともに 2Hz では 1.0 を超えるが、3Hz 以上では 1.0 付近かそれ以下となっていることが多い。このことから動揺加速度は入力振動数によって構造物頂部の水平応答を増幅させたり、または低減させたりする効果のあることがわかる。しかし、同図に示すように動揺加速度の増加が必ずしも水平応答の増加につ

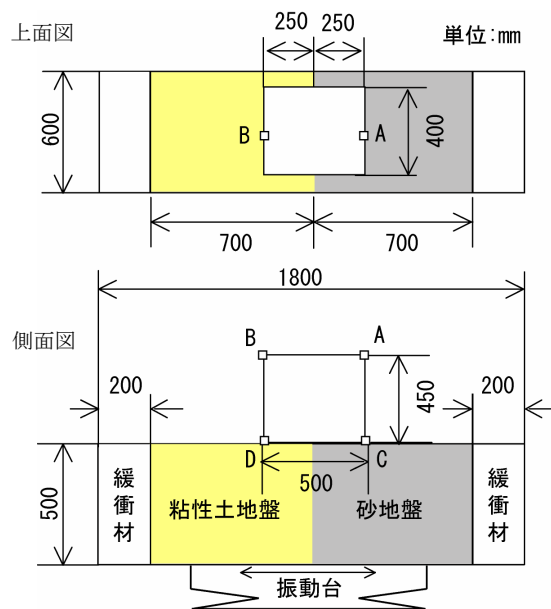


図 2.1 実験概要図

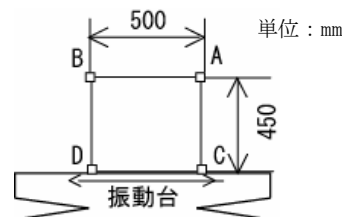


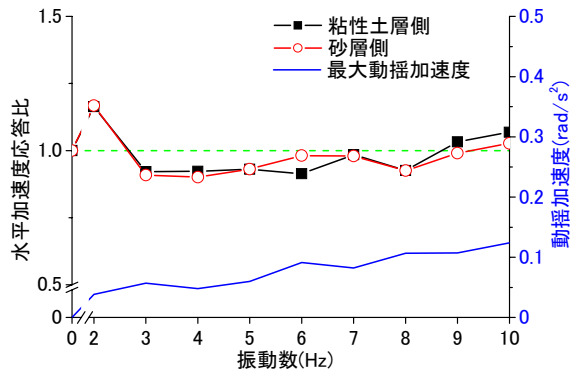
図 2.2 構造物のみ加振した場合の実験概要図

表 2.1 粘性土地盤と砂地盤における土質パラメータ

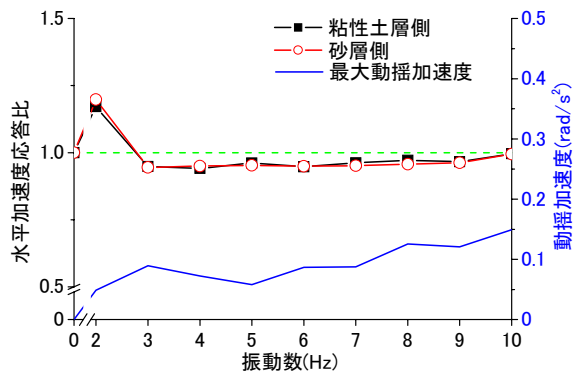
|                                        | 粘性土  | 珪砂5号 |
|----------------------------------------|------|------|
| せん断波速度 $V_s$ (m/s)                     | 112  | 154  |
| 単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 16.2 | 13.5 |
| 含水比 $\omega$ (%)                       | 33.2 |      |

表2.2 実験時の構造物モデルパラメータ

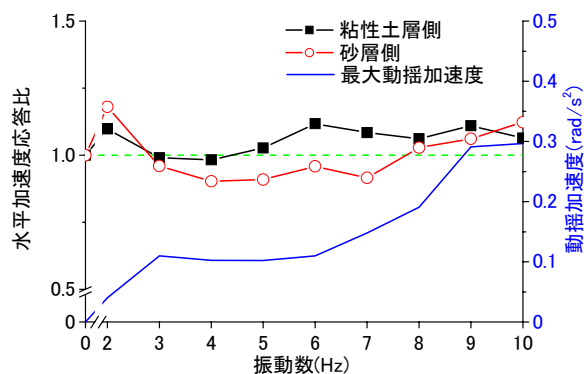
|                 |      |
|-----------------|------|
| 柱の幅 $b$ (mm)    | 100  |
| 柱の厚さ $t$ (mm)   | 2.25 |
| 柱の高さ $H$ (mm)   | 450  |
| 構造物の重量 $W$ (N)  | 223  |
| ばね定数 $k$ (N/cm) | 490  |
| 固有振動数 $f$ (Hz)  | 2.3  |



(a) 水平単独入力 50gal



(b) 水平単独入力 100gal



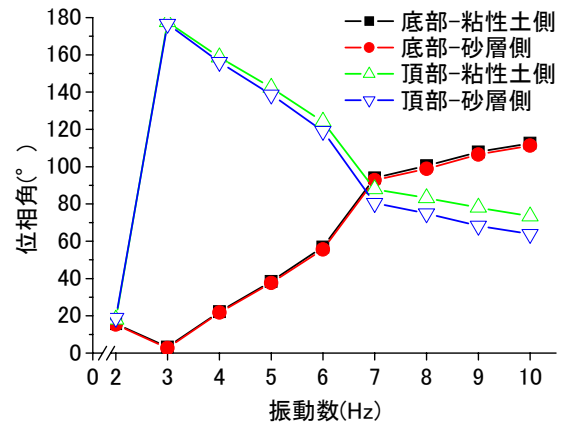
(c) 同時入力 100gal

図 2.3 水平加速度比及び動揺加速度の比較

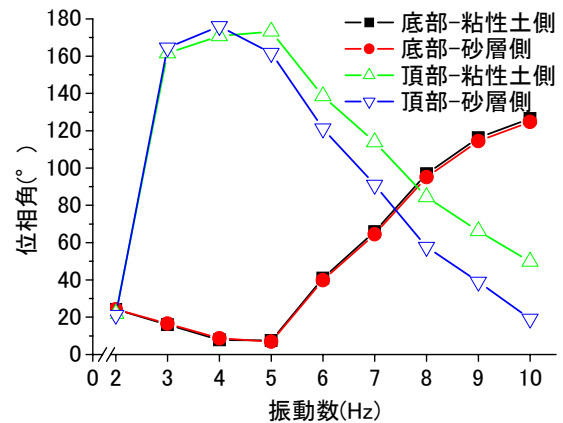
ながっていない。このことから、構造物頂部の水平応答を増幅、低減させる要因が他にもあると考えられる。要因の一つとして、水平応答と動揺応答の位相差が考えられることから、以下に位相角による考察を行う。

#### (b) 水平応答加速度と動揺加速度の間との位相角の比較

図 2.4 に構造物頂部、または底部の水平応答加速度と動揺加速度との間の位相角を示す。位相角は対象とする波形の位相差に  $360^\circ$  を掛け、周期で割った値で算出する。なお位相角が負の場合、図には正側にプロットしている。2Hz では底部、頂部の位相



(a) 水平単独入力 100gal



(b) 同時入力 100gal

図 2.4 構造物頂部・底部の水平応答と動揺加速度の位相角の比較

角がほぼ  $20^\circ$  であり、比較的ゼロに近いため、水平加速度応答と動揺加速度応答が重なり合い、その結果、図 2.3 の水平加速度応答比は 1 より大きくなっている。

図 2.4(a) の水平単独入力では、3Hz から 10Hz にかけて底部と頂部の位相角の差はほぼ  $180^\circ$  になっている。このことは減衰定数の小さい構造物においては 1 次固有振動数 ( $2.3\text{Hz}$ ) を超えると入力（底部）と応答（頂部）の位相が  $180^\circ$  ずれることと対応している。以上のことは構造物がせん断振動、すなわち主として水平応答に関する事象であるが、構造物は動揺振動もしており、水平応答加速度と動揺加速度との間に位相角があることから、両加速度は一部打ち消し合い、その結果、図 2.3(b) の水平加速度応答比は 1 より小さくなっている。

一方、図 2.4(b) の同時入力においても振動数の変化に対する位相角の動きは同図(a)と似ているが、頂部の粘性土層側と砂層側とでは位相角の大きさがやや異なっている。このことは、粘性土は砂と比較して軟らかいこと、そのために上下動により構造物が粘性土に比較的深く入り込む形で振動することから、構造物の動揺振動の回転中心軸が砂層側にずれ

る。したがって、粘性土層側の頂部隅までの回転半径が大きくなり、図 2.3(c)の水平加速度応答比も粘性土層側で 1 より大きくなったと考えられる。以上のことから、動揺成分の大きさと、頂部の水平加速度応答と動揺成分との間の位相角によって、動揺成分が構造物頂部の水平応答を増幅させるか低減させるかを決定すると考えられる。

### 3. 不整形地盤における動揺地震動に対する構造物応答解析

#### (1) 解析概要

実験で用いた構造物モデルを対象として解析を行う。解析に当たっては、構造物モデルを梁部材と柱部材から成るとした。また、解析モデルは水平動と動揺成分からなる 2 自由度系モデルとして検討を行う。

表 2.2 に示したパラメータを基に求めた梁部材、柱部材の解析パラメータを表 3.1 に示す。なお、実際の部材は非線形性を有しているのですが、解析においてもその特性を取り込むことが求められるが、本研究では動揺成分が構造物に及ぼす影響を把握することに主眼を置いており、部材の破壊を目的としていないことから、部材の特性を線形として扱い、現象を単純化する。

構造物に作用する入力、実験時に計測された水平単独、上下水平同時の 50gal 及び 100gal である。また、構造物の固有振動数近くの振動数に着目するため、入力振動数は 2Hz から 5Hz の 1Hz 刻みとする。

#### (2) 解析結果及び考察

##### (a) 加速度応答

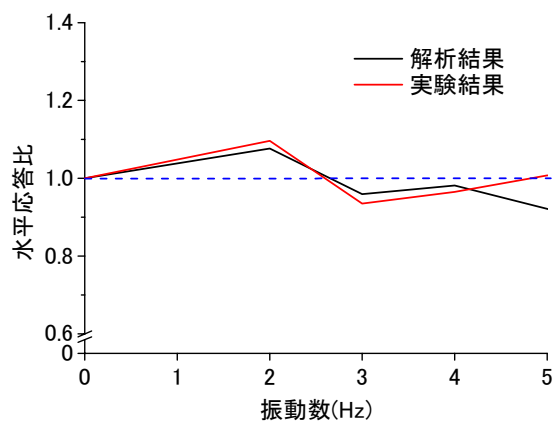
図 3.1 に同時入力における構造物頂部の水平加速度応答比について、実験結果と解析結果を比較したものを示す。ただし、実験結果、解析結果ともに同時入力による不整形地盤上の構造物頂部における最大水平応答を同時入力による構造物のみ加振した時の構造物頂部における最大水平応答で除した値である。図に示すように、入力振動数 4Hz 付近までは実験結果と解析結果は概ね一致している。動揺成分が構造物に影響を及ぼす振動数は前章で示した実験結果から構造物の 1 次固有振動数(2.3Hz)付近であると考えられる。この振動数付近では解析結果と実験結果は概ね一致していることから、構造物の 1 次固有振動数に近い振動数の動揺加速度が構造物応答により影響を及ぼすことを解析的にも明らかにした。

##### (b) 振動数特性

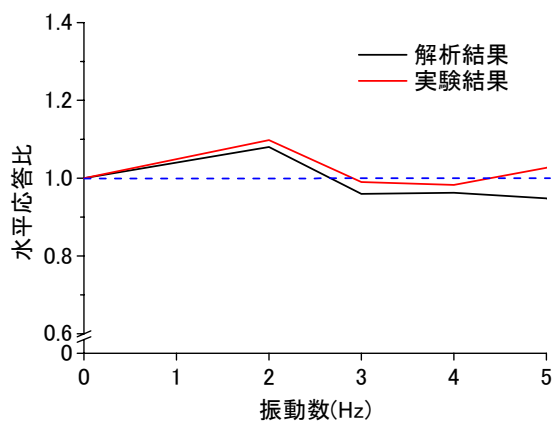
図 3.2 に上下・水平同時入力における(a)入力加速度 50gal、(b)入力加速度 100gal における構造物頂部の水平応答と動揺加速度との間の位相角、および水平加速度応答比を示す。ただし、水平加速度応答比は同時入力に対する加速度応答を水平単独入力に

表 3.1 解析時の構造物モデルパラメータ

|                                           | 梁                 | 柱                 |
|-------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 単位体積重量 $\gamma_t$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 68.7              | 51.4              |
| 弾性係数 $E$<br>(N/cm <sup>2</sup> )          | $2.1 \times 10^7$ | $1.7 \times 10^7$ |
| 断面2次モーメント $I$<br>(cm <sup>4</sup> )       | 4.52              | 0.01              |
| 断面積 $A$<br>(cm <sup>2</sup> )             | 53                | 2.25              |
| 減衰定数 $h$                                  | 0.05              |                   |



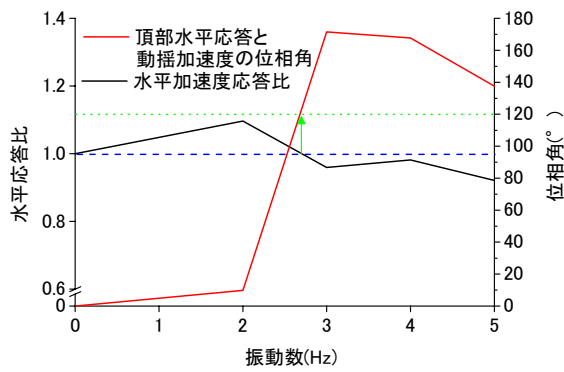
(a) 入力加速度 50gal



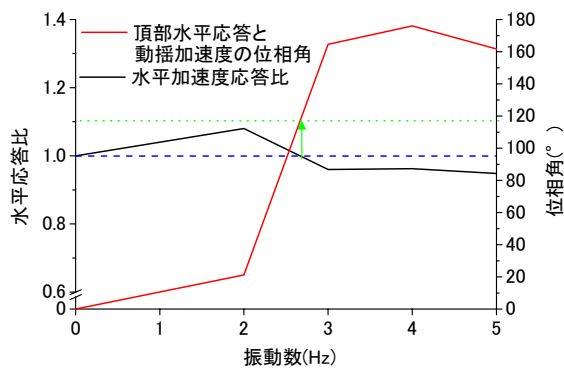
(a) 入力加速度 100gal

図 3.1 構造物頂部における水平加速度応答比

対する加速度応答で除した値である。ここで、減衰定数が小さいモデルにおける線形 1 自由度系の水平入力に対する応答については、理論上位相角  $90^\circ$  を前後に構造物頂部の変位応答は増幅または低減する。(a), (b) 両図に示すように、動揺成分が同時に入力されると 2~3Hz の間が水平加速度応答が増幅、低減する境界線（以下、境界角と表記）になること、



(a) 入力加速度 50gal

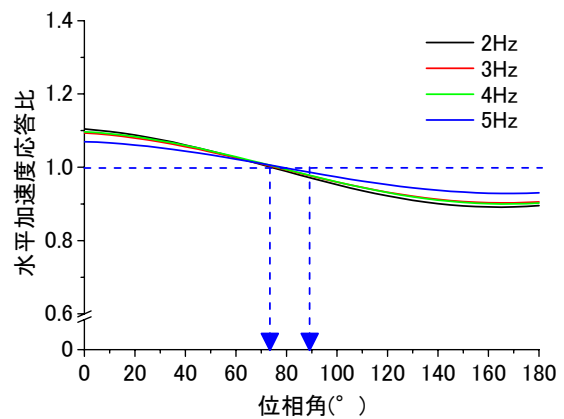


(b) 入力加速度 100gal

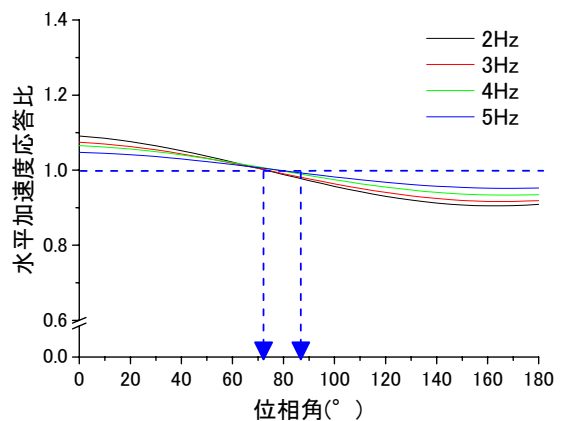
図 3.2 水平加速度応答比および頂部における水平応答加速度と動揺加速度の位相角

図に示すように境界角は  $90^\circ$  より大きくなる傾向にあること、が分かる。以上のことから、動揺成分が入力されることで境界角が変化することを明らかにした。しかしながら、構造物に入力する動揺成分は地盤形状、地盤特性により種々に変化するため、水平成分と動揺成分の加速度による位相角がどのような関係となる場合、水平加速度応答が増幅するのかさらに検討を行う。

図 3.3 に (a) 同時入力による加速度 50gal、(b) 同時入力による加速度 100gal における構造物頂部での水平応答加速度と動揺加速度との位相角と水平応答加速度応答比の関係について解析した結果を、入力振動数 2Hz から 5Hz まで 1Hz 刻みで示す。本来、位相角が変化する要因として地盤形状、地震波の伝播特性などが挙げられるが、本解析においてはそれらの要因を無視し、水平応答加速度と動揺加速度に位相差が発生すると仮定し進める。図に示すように、同位相（位相角が  $0^\circ$ ）では水平応答に動揺加速度による水平力が加わり水平加速度応答比が最大値をとっている。また位相角が大きくなるにつれて、徐々に水平加速度応答比が小さくなり、逆位



(a) 入力加速度 50gal



(b) 入力加速度 100gal

図 3.3 構造物頂部と動揺加速度の位相角と振動数の関係

相側（位相角が  $180^\circ$ ）では水平加速度応答比が最小値をとっている。また、入力加速度の大きさによらずどの入力振動数においても位相角が概ね  $70^\circ$  を境に水平加速度応答比が増幅、もしくは低減する。すなわち、構造物頂部の水平応答と動揺加速度の位相角が  $70^\circ$  以下となる条件では動揺加速度は確実に危険側に作用すると結論付けることができる。

### (C) 断面力

同時入力と水平入力による入力加速度 50gal、100gal における柱部材の軸力比、せん断力比と頂部水平加速度と動揺加速度による位相角の関係は本構造モデルが線形系であることから、図 3.2 と同様となる。すなわち断面力の増加、低減に対しても加速度の結果と同様に水平成分と動揺成分の位相差が大きく関係していると考えられる。ゆえに、動揺成分は構造物頂部に新たに水平力として加わることで、部材断面力にも影響を及ぼしていること、特に構造物の 1 次固有周期付近では動揺成分入力による断面力の増加が見られることから、不均一な地盤上に構造物を建設する場合には、現行の耐震設計に動揺成

分を考慮する必要があることを示唆している。

#### 4. まとめ

本研究の実験及び解析により得られた知見を示す。

1. 実験では動揺成分の大きさと構造物頂部と動揺成分との位相角によって動揺成分が構造物頂部の水平応答を増幅させるか低減させるかが決定されることがわかった。
2. 動揺加速度は高振動数領域において卓越する傾向にあり、位相角が小さいと構造物に過大な影響を及ぼし得ることを明らかにした。
3. 解析においては、構造物頂部における水平応答と動揺加速度の位相角と、水平加速度応答比の関係を調べた結果、構造物頂部の水平応答と動揺加速度の位相角が  $70^\circ$  以下ならば動揺加速度は確実に危険側に作用することを明らかにした。

今後、より一般性のある結論を求めるためには、構造物パラメータを変えて動揺地震動が構造物に及ぼす影響を詳細に調べる必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、実験にご協力頂いた

元学部学生の高見佳宏氏（現：姫路市役所）に記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土岐憲三・新田篤志：表面波に対する表層地盤の不規則応答，第 13 回地震工学研究発表会，pp.21-24，1974.
- 2) 秋山伸一・中村晋：傾斜層を含む多層地盤の面内波動伝播解析，日本建築学会学術講演概要集，pp.735-736，1988.
- 3) 古本吉倫・杉戸真太・八島厚：周波数依存型等価線形化法による不整形地盤の震動特性について，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.201，2004.
- 4) 神山眞・福地桂一・松川忠司：擬似スペクトル法による不整形地盤の非線形地震応答解析，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.156，2004.
- 5) 多賀尚恒・富樫豊・今岡克也：丘陵地における埋土地盤及びその上に建つ構造物の振動性状，日本建築学会構造系論文報告集，No.400，pp.149-158，1989.
- 6) 河村暁：不整形地盤境界における動揺地震動特性に関する実験的研究，金沢大学学士学位論文，2001.

(2005. 3. 14受付)

## Rocking Component of Earthquake Induced by Horizontal Motion in Irregular Form Ground

Akira Murata, Tohru Jomen, Masaru Kitaura and Masakatsu Miyajima

Two horizontal components and a vertical component are usually employed in seismic observations. Therefore, only those components are used as the input ground motions in seismic design code. Seismographs are generally installed more than several hundred meters apart from each other even in arrayed observations. Since two or more seismographs are hardly installed in the width about the foundation of a structure, no waveforms which carry out incidence to the foundation can be observed. However, with the variation characteristic of the foundation or the propagation characteristic of a wave, complicated earthquake motions like rotational or rocking component is inputted into a structure. Such component may have an impact on some rigid structures as well as flexible structures. It is indispensable to examine the effects of this component on structural response. In this study, experiments using the model ground excited by a shaking table and simulations of structure motion using FEM are carried out, in which existence of rocking components are examined in earthquake motion generated at various grounds such as the ground with irregular form ground. As a result, it is clarified that rocking earthquake motion contributes to the amplification of the horizontal response, axial force and shear force of a structure.