

## 微動観測に基づく台南市の地盤震動特性について

京都大学地球環境学堂 清野 純史・奥村与志弘  
台湾国立成功大学 李 徳河・呉 建宏  
京都大学工学部 三木 拓人  
京都大学大学院 土肥 裕史・大道 一步

### *Ground Motion Characteristics of Tainan City Based on Microtremor Observations*

*Junji Kiyono\**, *Yoshihiro Okumura\**, *Der-Her Lee\*\**, *Jian-Hong Wu\*\**,  
*Takuto Miki\**, *Yuji Dohi\** and *Kazuho Ohmichi\**  
\*: Kyoto University, \*\*: National Cheng Kung University,

#### Abstract

An earthquake of ML6.6 occurred in south Taiwan on February 6, 2016. The epicenter was located in Kaohsiung. The earthquake caused damage to buildings in Tainan city. Soil liquefaction, landslide of embankment and the displacement of bridges also occurred in the city. According to the reports of the Central Weather Bureau, Taiwan, Tainan City had a seismic intensity of level V. After the earthquake, we conducted microtremor observations to make clear the underground information and investigate the cause of damage to the collapsed building. The boring data and earthquake observation data were used to verify the distribution of natural periods obtained from microtremor observation data. This paper discusses the distribution of natural periods of the ground through the changes of sedimentary environment in Tainan.

#### 1. はじめに

台湾南西部に位置する台南市では海側のフィリピン海プレートの下に大陸側のユーラシアプレートが沈み込んでおり、度々大きな地震に襲われている。近年では、1999年に台湾中部の南投県集集鎮付近を震源としてモーメントマグニチュード  $M_w$ 7.6 とされるプレート境界型の巨大地震が発生している。

また、2016年2月6日には台湾南部の高雄市美濃区を震央とする  $M_w$ 6.4の地震が発生し、台南市新化区で最大震度7が観測され、死者117名という大きな被害を引き起こした。台南市永康区では、16階建てのビルが横倒しに倒壊し、地震全体の死者の9割以上に当たる115名の死亡が確認された。写真1a,1bは倒壊したビルの様子である。

周知のように、地震による被害は、地震そのものの規模だけでなく、震源から地震基盤面に至る伝播経路特性や地震あるいは工学的基盤面から地表面に至る堆積層のサイト特性に強く影響される。このサイト特性を知ることは、地震防災を考える上で極めて重要な課題である。

台南市内の93か所において深さ30m程度までのボーリング柱状図<sup>1)</sup>が存在する。しかし、ボーリング調査は多額の費用と労力が必要となるため、広範囲の地盤構造を知ろうとする場合には非効率的である。そこで、近年よく用いられている手法が常時微動観測による地盤構造の推定である。



(a)

(b)

写真1 倒壊した16階建てのビルの様子（ロイターおよびAFP通信より引用）

本研究では、2016年台湾南部地震における台南市内の地震計のデータ<sup>1)</sup>や周辺地域のボーリング調査の記録がある地点を対象に常時微動観測を行った。観測で得られた微動の $H/V$ スペクトル比<sup>2)</sup>を算出し、固有周期を求める。得られた固有周期を地震計のデータやボーリング調査の記録と比較することにより、台南市の地盤震動特性を主に固有周期の観点から検討する。

## 2. $H/V$ スペクトルによる地盤震動特性の評価

### 2.1 台南市の地盤<sup>3)</sup>

台南市は嘉南平原に位置するため地勢は平坦であり、遠く東部には山地が連なるものの、市全域で海拔10~30mの間、最高でも海拔約40mという丘陵地が殆ど見られない特徴を有している。その域内は安平平原、台南台地、大湾低地、桜丘砂丘と分類することができる。安平平原は台南市西部の沿海部に位置し、地殻変動により隆起した海岸平原である。平原の標高は海拔2~3mであり、曾文溪三角州の一部を形成している。この地域ではオランダ統治時代は台江内海潟湖であり、外側は砂嘴を形成していた。時代と共に干拓開発が進み、現在では台南市の新中心部となっている。安平平原の東側はなだらかな傾斜で台南台地へと繋がっている。台南台地は台南市東部に位置し、孤立した楕円形の台地である。稜線の海拔は25~30m程度であり、台南市最高の海拔40mの地点もこの台地にある。東側は崖で大湾低地と接している。大湾低地の大部分は標高10m以下の地勢を成している。古くから集落が形成されていたこの地域では台南台地との境界が開発により曖昧になりつつある。桜丘砂丘は台南市南部に位置している砂丘である。

### 2.2 常時微動の単点観測

観測にはミットヨ社製の三成分加速度計とデータロガーが一体となったGPL-6A3Pを使用した。観測は日中に、自動車の通行や工事中などのノイズ源から離れ、微動計を安定して設置できるコンクリートやアスファルト上のスペースで行い、サンプリング周波数は100Hzまたは500Hzで、観測時間は10~15分とした。ボーリングデータのある地点92点と、2016年2月の台南地震の地震記録のある地点17点の合計109地点にて観測を行っている。台湾の地図を図1に、観測地点の全体図を図2に示す。図2では、黒い点で示している地点がボーリングデータのある地点の近くの観測点、赤い点で示している地点が地震記録のある地点の近くの観測点である。



図1 台南市の位置 (Google マップより)

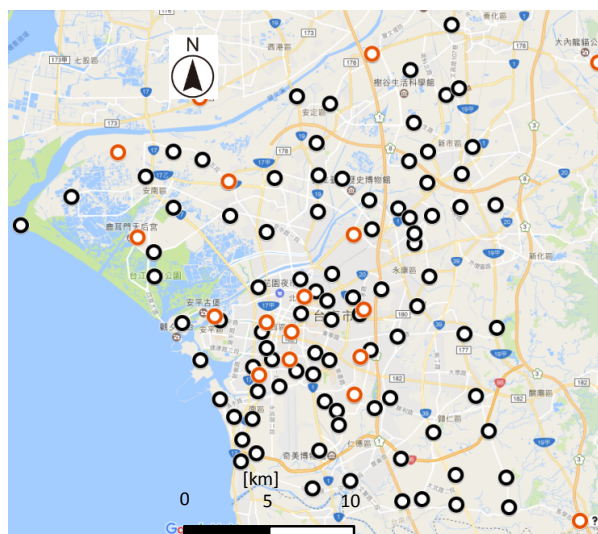


図2 常時微動調査の観測点

### 2.3 H/V による固有周期の算出と空間補間

本研究では、 $H/V$  スペクトルの算出に  $BIDO2.0^4)$  を用いた。 $H/V$  スペクトル比は次式より算出している。

$$H/V(\omega) = \frac{\sqrt{(F_{NS}(\omega))^2 + (F_{EW}(\omega))^2}}{F_{UD}(\omega)^2} \quad (1)$$

ここに、 $F_{NS}(\omega)$ ,  $F_{EW}(\omega)$ ,  $F_{UD}(\omega)$  はそれぞれセグメント長を 10.24 秒とした微動時刻歴の NS, EW, UD 成分のフーリエスペクトルである。算出した  $H/V$  スペクトル比の例を図 3 に示す。赤実線は 10 区間を対象とした平均値を、青実線は平均値±標準偏差を示している。 $H/V$  スペクトルは、その形状について以下の 3 つに大別することができる。

- 1 箇所にも明瞭なピークをもつもの
- 数箇所にも明瞭なピークをもつもの
- 明瞭なピークをもたないもの

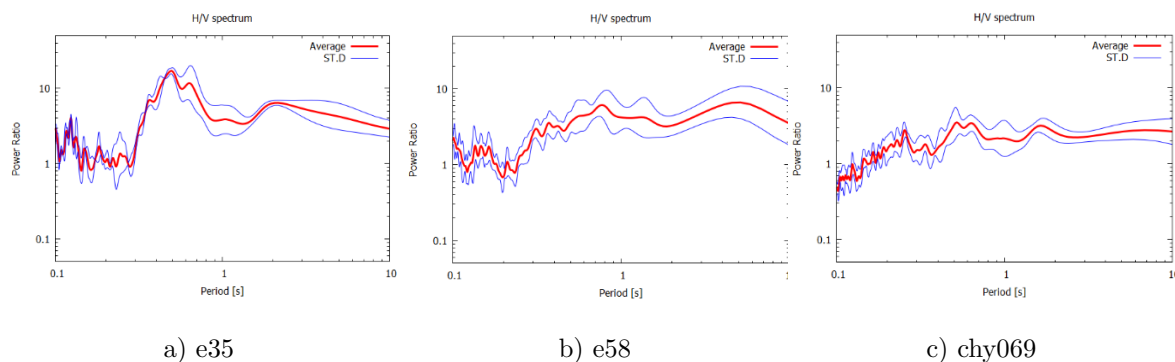


図3 H/V の算出例

また、固有周期の読み取りは以下の方法に従い行う。

- 0.1 秒以下の範囲は、ノイズが多く含まれると考えられるので除外する。また、微動計の特性から 3 ～ 4 秒以上の周期のピークも除外する。
- 最大ピークを示す周期を固有周期とし、明瞭なピークが数箇所ある場合は最も長周期側にあるピークの周期を一次の固有周期として読み取る。
- 明瞭なピークをもたないがなだらかなピークをもつものは、そのなだらかなピークの中心の周期を固有周期とする。

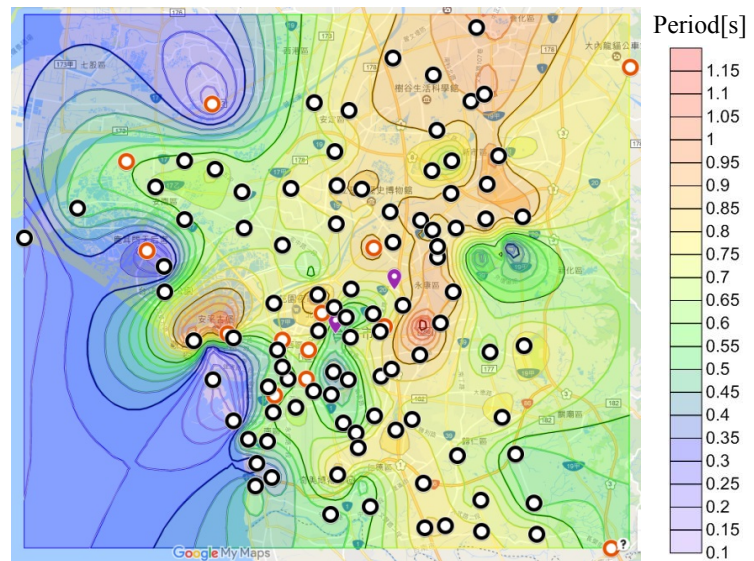


図 4 常時微動観測による台南市の地盤の固有周期のコンター図

固有周期における空間変動を表現するため、本研究では通常クリギング法<sup>4)</sup>を用いた。得られた  $H/V$  スペクトルの固有周期は観測された地点のみの点情報である。ここでは、この点情報からクリギングによる空間補間を行い、空間変動を求める。クリギング法とは、本研究では固有周期の既知点(確率場からの実現値とみなす)から、ある地点における値を推定する地盤統計学でよく用いられてきた手法である。ここではオーディナリークリギング法と呼ばれる推定法で任意の点の推定値を求め、コンターを描いた。

## 2.4 結果と考察

各観測点における  $H/V$  スペクトルの固有周期の空間分布を図 4 に示す。図中のはボーリングデータのある地点、赤丸は地震計による地震記録のある地点の近くの微動観測地点である。

固有周期の空間分布の図より、台南市の東側の大湾低地では 1 秒前後、西側へ行き成功大学の位置する台南台地では 0.5 秒前後、安平平原では、地点によって変動はあるが、0.3 秒前後となっており、内陸部から海岸部に近づくにつれて、固有周期が小さくなっていることがわかる。このことから内陸部から海岸部に近づくにつれ、地盤が硬くなっていることがわかる。

また、成功大学の位置する台南台地は周囲に比べて固有周期が小さく、ここも地盤が硬いことがわかる。つまり、相対的に見て、台南市の東部、大湾低地は地盤が弱く、中部の台南台地は地盤が強くなっていて、台南台地の西部の安平平原もまた地盤が弱くなっていることがわかる。また安平平原からさらに海岸部に近づくとも固有周期がとて小さく地盤がとて硬いところと、反対に固有周期が大きく地盤弱いと思われるところがあることがわかる。

既往の研究<sup>3)</sup>より、台南市の地形の推移について以下のことがわかる。まず海岸線の推移については、数千年から数百年前までは台南市西部の海岸線は現在よりも東側、すなわち現在の内陸部に広がっていた。台南市西部の沿海部に位置する安平平原は、地殻変動により隆起した海岸平野である。台南市の海岸線の推移を図 5 に示す。この図より、台南台地は数千年から数百年前から陸地として存在し、台南台地の周辺の大湾低地や安平平原は海の中にあつたことがわかる。このことが、台南台地が周囲よりも固有周期が小さく、地盤が強くなっていることの一理由の一つとして考えられる。

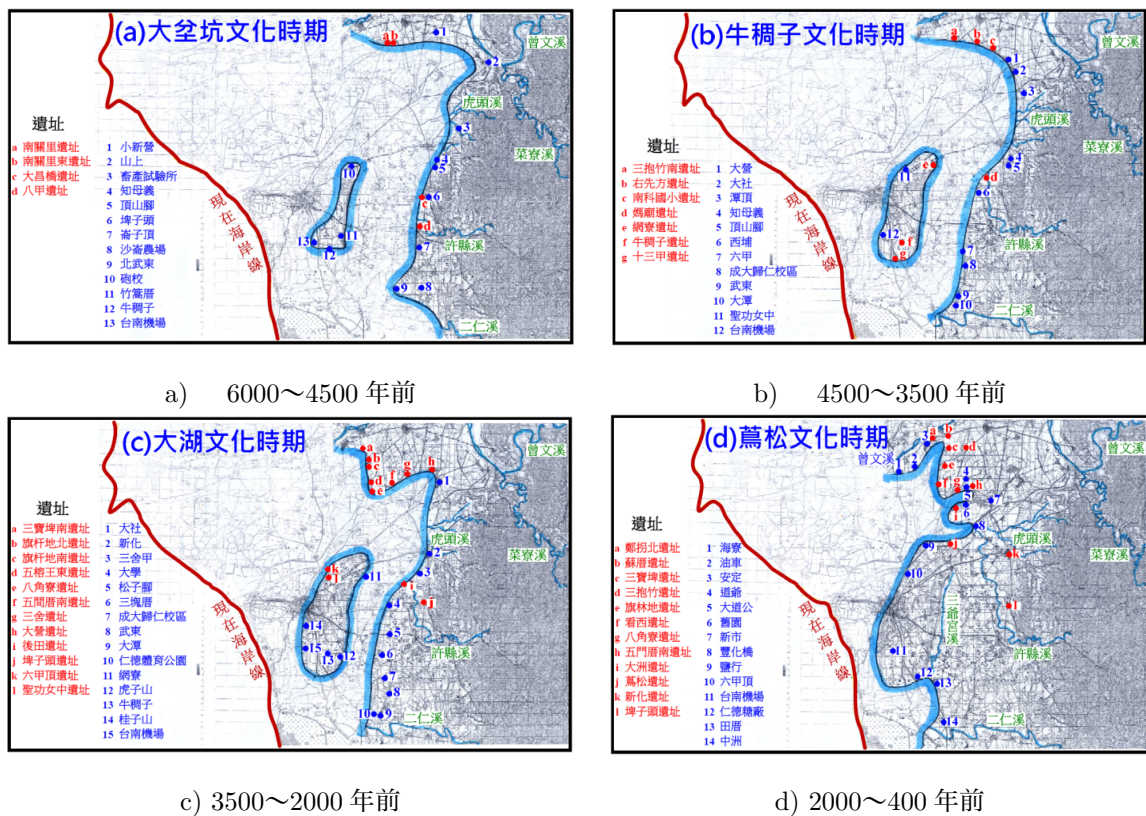


図5 台南市の過去の地形<sup>3)</sup>

また、台南市西部の沿岸部についてであるが、17世紀頃のこの地域の地図を図6に示す。この図から、この地域には17世紀頃に砂州が存在していたことがわかる。すなわち、17世紀頃、台南市西部の沿岸部は陸地と海が入り乱れていたことがわかる。このことが、台南市西部沿岸の砂州部分で固有周期が小さく地盤が硬いところと、その内海の埋め立て地で固有周期が大きく地盤が弱いところが入り乱れていることの原因の一つとして考えられる。

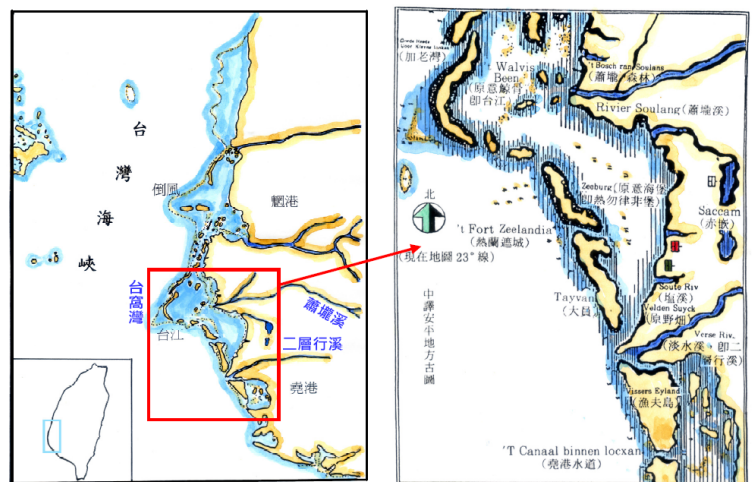


図6 17世紀の台南市西部の地図<sup>3)</sup>

### 3. ボーリングデータとの比較による常時微動観測の妥当性の検討

対象地域である台南市のボーリング調査は93箇所で行われている<sup>1)</sup>。ボーリング調査に代わる安価でコストのかからない代替法として常時微動観測を用いるためには、ボーリング調査の結果と常時微動観測によって得られる結果が近似的であることが望ましい。そこで、ここでは2節で得られた微動観測の固有周期の空間変動のボーリング調査のデータがある付近の92地点での結果と、重複反射理論によって

得られるボーリング調査による地盤の固有周期の空間変動の結果とを比較し、固有周期に関する常時微動観測結果の妥当性の検討を行う。

### 3.1 ボーリングデータに基づく情報の抽出

得られたボーリングデータからわかる物性値には層厚、 $N$  値、密度、土質区分などがある。ボーリングデータから得られた地盤の柱状図のモデル化を行った。また、 $S$  波速度については、既往の  $S$  波速度と  $N$  値の関係式を使って  $S$  波速度を設定することとした。今回のボーリングデータは粘土、砂、礫の区別はできるが、時代区分はできない。このようなことから、ここでは、以下の太田・後藤の式<sup>6)</sup>を用いて  $S$  波速度を設定した。

$$V_s = 62.48N^{0.218}H^{0.228}F \quad (2)$$

ここに、 $V_s$  は  $S$  波速度、 $N$  は  $N$  値、 $H$  は深度 (m)、 $F$  は土質区分係数で粘土に対しては  $F=1.000$ 、砂に対しては  $F=1.037$ 、礫に対しては  $F=1.199$  である。

### 3.2 ボーリングデータに基づく地盤の固有周期の算定

ボーリングデータから得られた物性値と重複反射理論を用いて、入射波の各振動数における地盤の増幅倍率を求め、その 1 次の固有周期をもってボーリングデータに基づく地盤の固有周期とした。

ボーリングデータから得られた密度、 $S$  波速度、層厚などの物性値と 5% の減衰定数を用いて、重複反射理論により周期と増幅倍率との関係を、ボーリングデータのある地点 93 点それぞれについて求めた。重複反射理論で用いるそれぞれの地点での地盤の層構造は、30m のボーリングデータを  $N$  値や土質区分などの違いによって 9 層以内に分けて、それ以深の地盤を基盤として  $V_s = 400\text{m/s}$  と設定し、計 10 層以内の層構造を各地点で作成した。

得られた周期と増幅倍率のグラフからピークの周期を各地点で求め、常時微動観測における  $H/V$  スペクトルから推定した固有周期の空間変動と同様に、得られた固有周期の空間分布を求めた。これを示したものが図 7 である。

この固有周期の空間分布の図をみると、台南市の東側の大湾低地では 0.7~0.8 秒前後、西側へ行き成功大学の位置する台南台地では 0.5 秒前後、安平平原では、地点によって変動はあるが、0.3~0.6 秒前後となっており、内陸部から海岸部に近づくにつれて、固有周期が小さくなっていくことがわかる。すなわち、内陸部から海岸部に近づくにつれ、地盤が硬くなっていることがわかる。また、台南台地も周囲より固有周期が小さく、地盤が硬くなっていることがわかる。

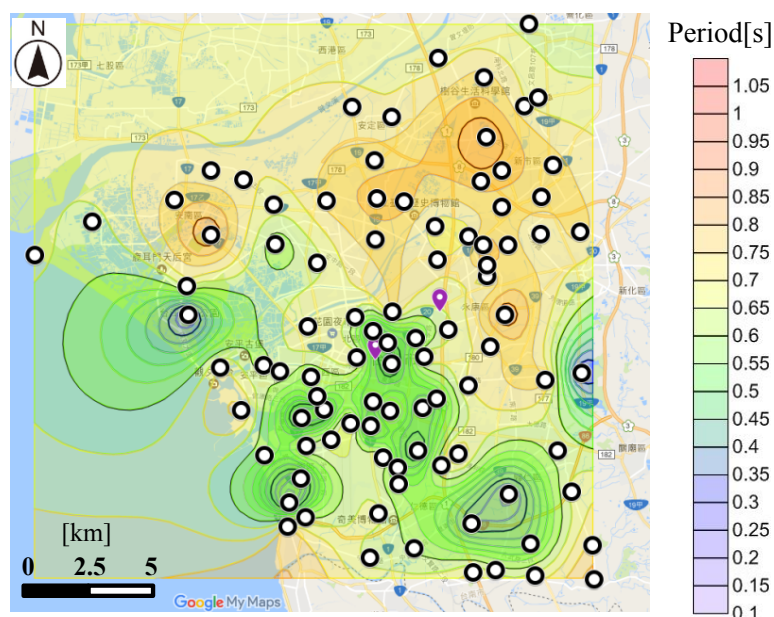


図 7 ボーリングデータに基づく台南市の地盤の固有周期のコンター図

### 3.3 ボーリングデータと常時微動観測による空間分布の比較

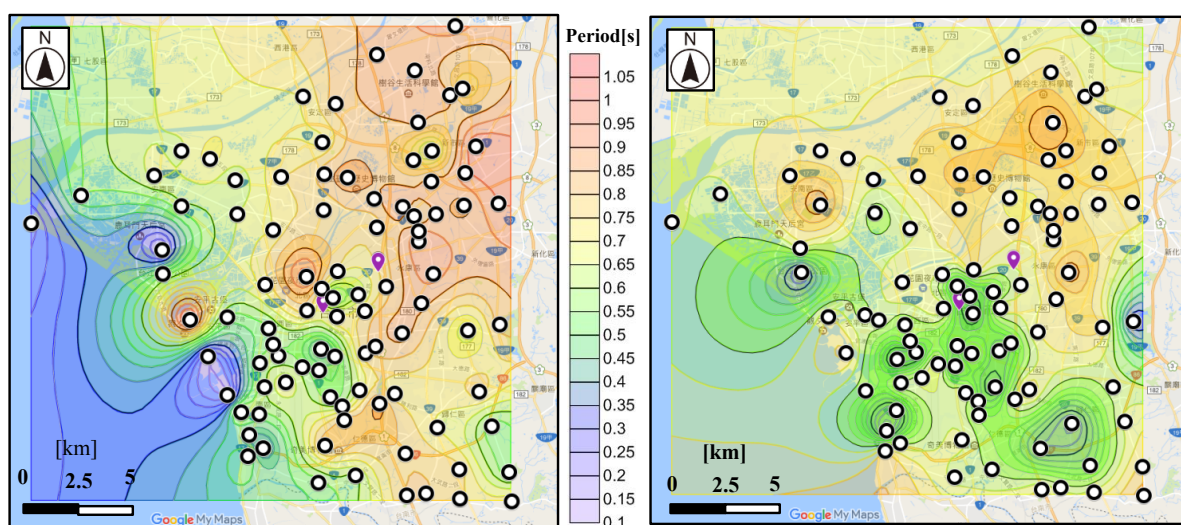
常時微動観測による地盤の固有周期の空間分布と、ここで得られたボーリングデータによる地盤の固有周期の空間分布を、同じスケールの固有周期のコンター図で比較したものが図8である。

全体的に 0.2 秒前後の違いは見られるが、内陸部から海岸部に近づくにつれ、地盤が硬くなっていることや、台南台地が周囲より固有周期が小さく、地盤が硬くなっていることなどの共通点があることがわかる。このことから、常時微動観測で地盤の固有周期の詳細の判断はまだ議論の余地があるが、地盤の硬軟や地域的な地盤の硬軟の分布などはボーリング調査から得られた結果と整合性がとれていることがわかる。ボーリングデータから得られた固有周期について、ボーリングデータが地下 30m 以浅のデータしかなく、地下 30m の層を工学的基盤面として解析を行っている。この基盤面の設定も双方の地盤の固有周期の違いの一因となっている可能性もある。

また、横倒しに倒壊した 16 階建てのビルの周辺での常時微動観測における固有周期は 0.77[s] で、ボーリングデータを解析して得られた固有周期は 0.63[s] となっている。値に違いは見られるがどちらも 1[s] より小さい値となっている。一般に、建物の固有周期は (建物の高さ [m] × 0.02 ~ 0.03) [s] とされている。倒壊したビルが 16 階建てで高さ 16 × 3~4 でおよそ 50m とすると、固有周期は 1.0~1.5[s] 程度になるはずで、一見関係ないように見える。しかし、図3に例示した H/V スペクトルのうち、倒壊したビルに最も近い (b) の e58 を見ると、確かに固有周期が 0.77[s] と推定できるが、この地点の H/V スペクトルはピークが平坦なパターンである。1.0~1.5[s] あたりのスペクトル比も 0.77[s] のときのスペクトル比と同様にのピークが見られることがわかる。すなわち、ビルが倒壊した要因として、ビルの耐震構造が適切でなかったからという理由だけではなく、ビルの固有周期とビルが建っている地盤の固有周期が一致して共振を起こしたからという理由も考えられる。

## 4 地震記録との比較による常時微動観測の妥当性の検討

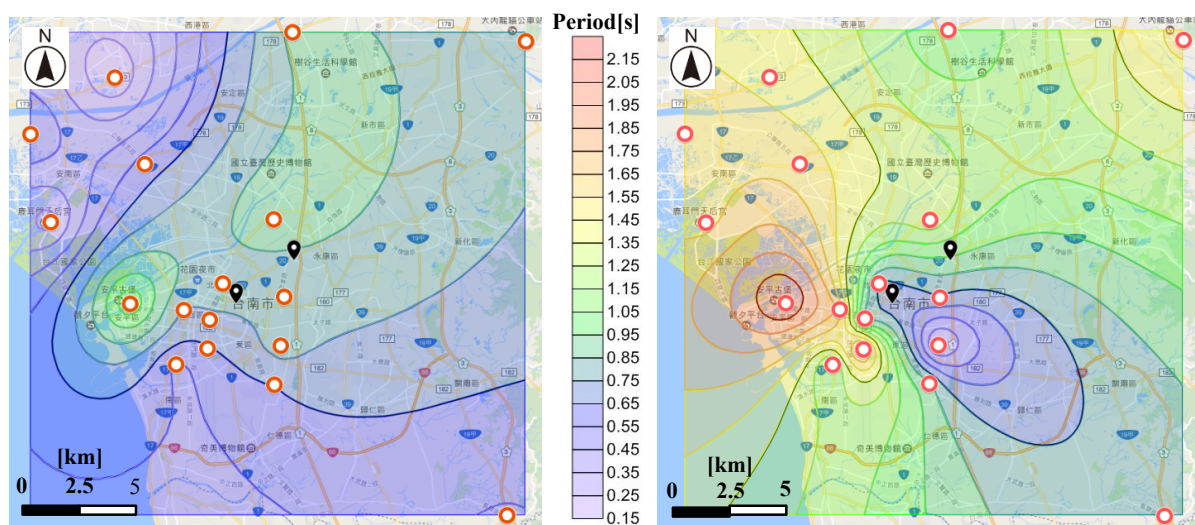
対象地域である台南市の 2016 年の台湾南部地震での地震記録は 45 箇所得られている。時間などの関係で、地震記録のある付近での常時微動観測は 17 箇所で行った。ここでは地震記録から得られる各地点での地盤の固有周期と、地震記録のある地点の周辺 17 箇所で行った常時微動観測によって得られた地盤の固有周期とを比べる。



a) 常時微動観測に基づく分布

b) ボーリングデータに基づく分布

図8 ボーリングデータと常時微動観測による固有周期の空間分布の比較



a) 常時微動観測に基づく分布

b) 地震観測に基づく分布

図9 地震観測と常時微動観測による固有周期の空間分布の比較

#### 4.1 地震記録の解析手法

地震記録のある17地点すべての加速度波形，フーリエスペクトルと応答スペクトルを算出し，フーリエスペクトルのピークを示すときの周期の値をその地震に対するその地点の地盤の固有周期として読み取る．フーリエスペクトルはNS, EW, UDの3成分算出されるが，その3成分の中でも振幅の値が一番大きい所をピークとして読み取った．

#### 4.2 地震記録と常時微動観測による空間分布の比較

3.3のボーリングデータの場合と同様に，ここでは地震記録で得られた台南市の地盤の固有周期と，地震観測の行われた17点のデータのみを用いた常時微動観測による台南市の地盤の固有周期を比較する．それぞれのコンター図を示したものが図9である．

ボーリングデータや常時微動観測では平常時の地盤のサイト特性がわかる．それに対して，地震記録は，サイト特性だけでなく，震源や経路の影響も含んだ形で現れることになる．

地震記録と常時微動観測の結果を比べてみると，東北と台南台地の西側の沿岸部に相対的に周期の長い地域があり，両分布とも似た傾向を示しているが，広範囲において固有周期が1秒以上異なっていることがわかる．地震記録から得られる固有周期の方が大きい値となっている．前述のように，常時微動観測では，表層地盤の微動を測定することにより，H/Vスペクトルから地盤の固有周期を推定し，当該地盤のサイト特性に着目している．それに対して，地震記録から得られるデータでは，地震の発生する震源での震源特性や，震源から地震基盤面や工学的基盤面に至るまでの地盤の伝播経路特性，さらには工学的基盤面から地表面に至るまでの表層地盤のサイト増幅特性などを含んでいるため，今後は地震記録のサイト特性を抽出した結果との比較が必要である．



## 5 まとめ

本研究では、台湾の台南市を対象とした常時微動単点観測を行い、その観測記録とボーリングデータや地震記録を解析することにより、台南市の地盤震動特性について検討を行った。本研究で行った事、および得られた知見を以下に示す。

1. 109地点で常時微動単点観測を行い、その観測記録から得られた  $H/V$  スペクトルの固有周期をそれぞれの地点で推定し、その地点の地盤の固有周期を算出した。
2. クリギング法を援用して求めた固有周期の空間分布から、固有周期は台南市の東側の大湾低地では1秒前後、その西側で成功大学の位置する台南台地では0.5秒前後、安平平原では、地点によって変動はあるものの、0.3秒前後となっており、内陸部から海岸部に近づくにつれて、固有周期が小さくなっていることがわかった。
3. 台南台地が周囲よりも固有周期が小さく、地盤が硬くなっていることの原因の一つとして考えられるのは、台南台地が数千年から数百年前からずっと陸地として存在し、台南台地の周辺の大湾低地や安平平原は海の中にあつたことである。また、台南市西部の沿岸部で固有周期が小さく地盤が硬いところと、固有周期が長く地盤が相対的に緩い所が点在していることの原因の一つとしては、この地域には17世紀頃に砂州が存在しており、この影響で西部の沿岸部には固有周期の長い所（海の埋立地）と比較的短い所（昔の砂州）が存在するためであると推測できる。
4. 常時微動観測とボーリングデータによる地盤の固有周期の空間分布を比較すると、内陸部から海岸部に近づくにつれ、地盤が硬くなっていることや、台南台地が周囲より固有周期が小さく、地盤が硬くなっていることなどの共通点があるが、全体的に0.2秒前後の違いが見られることがわかった。ボーリングデータから得られた固有周期について、ボーリングデータが地下30m以浅のデータしかなく、地下30mの層を工学的基盤面として解析を行っている。この基盤面の設定が双方の地盤の固有周期の違いの一因となっている可能性が考えられる。
5. 地震記録と常時微動観測による地盤の固有周期の空間分布を比べてみると、広範囲において地震記録から得られる固有周期の方が1秒以上大きい値となっていることがわかる。常時微動観測では、地震動のサイト増幅特性に着目しているが、地震記録から得られるデータは、地震の震源特性や、震源から地震基盤面や工学的基盤面に至るまでの伝播経路特性、さらには工学的基盤面から地表面に至るまでの表層地盤のサイト増幅特性など全てを含んでいる。全体的な周期分布の特徴は似ているものの、今後の課題として地震動の震源特性や伝播経路特性を取り除いた形での比較が必要となる。

### 参考文献

1. ボーリングデータおよび地震記録：台湾国立成功大学の李徳河教授と吳建宏教授との私信による
2. 中村 豊： $H/V$  スペクトル比の基本構造，2008.
3. 李 徳河，吳 建宏，蔡 百祥，林 宏明，清野純史：美濃地震台南震害區之大地環境特性，*土工技術*，No.148/2016.6，pp.45-57，2016.
4. *BIDO Version 2.0*: <https://staff.aist.go.jp/ikuochou/BIDO/2.0/bidodl.html>，2010.
5. 佐藤 篤：インドネシアパダンを対象とした常時微動観測に基づく地盤構造の推定，京都大学修士論文，pp.6-10，2011.
6. 太田 裕・後藤典俊：横波速度を推定するための実験式とその物理的背景，*物理探鉱*，第31巻，1号，pp.8-17，1978.