

地盤の不整形性と地表面の不規則性を考慮した 台北盆地の地盤震動解析

Seismic Ground Motion Considering Complex Topography and Irregular Boundary between Soil Layers

清野純史*, 篠原大介**, Charles Scawthorn***
Junji Kiyono, Daisuke Shinohara, Charles Scawthorn

*工博, 京都大学助教授, 都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**京都大学大学院工学研究科修士課程, 都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***工博, 京都大学教授, 都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

In order to construct a seismically safe and trusty society, an understanding of how seismic motion varies by local topography is one of the most crucial issues. Seismic wave particularly can be amplified in some regions because of the local irregularity of the layered media. The Finite-Difference Method has rarely been applied to an irregular free surface. In this study, an FDM-based numerical simulation program that can deal with the effects of subsurface irregular boundary and surface topography simultaneously was introduced. Using the program, case studies for various ground models such as mountain, valley, were analyzed. Lastly, the FDM method was applied to the Taipei basin.

Key Words: finite-difference, irregular interface, topography, Taipei basin

キーワード: 有限差分, 不整形境界, 地形, 台北盆地

1. はじめに

1985 年メキシコ地震では, 盆地という地盤の不整形性の影響も大きく作用して, メキシコ市内の軟弱層上の揺れが近隣の丘陵地に比べて最大加速度で約 10 倍もの増幅を受けた。一方, 1993 年釧路沖地震では高台にある測候所の地震計が大振幅を記録し, 2004 年新潟中越地震では, 山岳地域において地滑りや斜面崩壊による被害が多数発生した。このように, 地震動に対しては, 地下構造だけでなく, 地表面地形もその震動特性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

地下の地震動伝播を数値的に扱う手法としては, 有限差分法 (Finite-Difference Method, FDM) や, 有限要素法 (Finite-Element Method, FEM) が一般的に広く用いられてきた。有限差分法においては, その簡潔さから頻繁に適用されてきたが, 従来の方法では, 主にフラットな地表面を有する地盤を対象にしたり, あるいは地表面をフラットであると仮定した上での解析が多く行われてきた。しかし, 地表面に不規則性を持つ地域, 例えば周囲を山に囲まれた堆積盆地などに対して, これをフラットとして解析することは現実的ではなく, 本来の地盤震動特性を十分に評価できていないと考えられる。ここで本研究では, 地表面下の地盤構造が水平な成層構造でないことを「不整形性」を有する地盤, 地表面がフラットでないことを「不規則性」を有する地盤と定義する。

本研究では, 地表面の不規則性と地盤の不整形性を同時に評価できる 3 次元プログラムを構築し, まず山型や谷型など地

表面に不規則形状を持つ地盤の基礎的な震動性状を 2 次元問題として把握する。そして, 台湾の台北盆地の 3 次元地盤構造モデルを基にして震動解析を行い, 地盤の不整形性や山地地形が台北市の地震動特性に与える影響について考察を行う。

2. 解析手法

(1) 支配方程式の差分化

媒質中の波動伝播を弾性波動として扱う場合, 支配方程式は以下に示す運動方程式 (1) と応力-ひずみ関係式 (2) の二式である。

$$\rho u_{i,t} = \tau_{ij,j} + f_i \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \lambda u_{k,k} \delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

ここに, t は時間を表し, δ_{ij} はクロネッカーのデルタ関数,

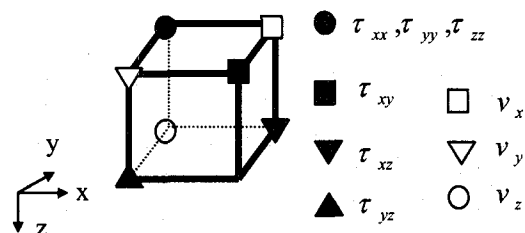


図-1 スタッガードグリッド

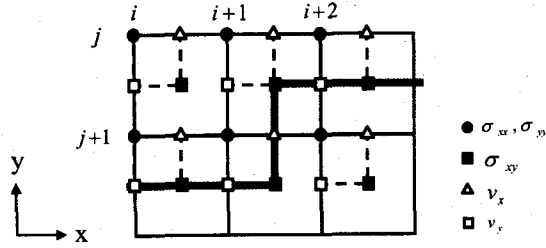


図-2 自由表面の取り扱い

u は変位, ρ は媒質の密度, λ, μ はLameの定数, f は体積力である。また、一つ目の添え字は方向を表し、コンマ以下の二つ目の添え字はそれで微分することを示す。すなわち、 $u_{i,j}$ は変位 u_i に関する2回微分 $\partial^2 u_i / \partial t^2$ を表す。本研究では地盤を等方性として扱い、このときLameの定数 λ, μ は、S波速度 V_s 、P波速度 V_p を用いてそれぞれ以下のように表わせる。

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \quad (3)$$

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (4)$$

式(1), (2)を差分展開するためには、以下のように共通の物理量として速度-応力の関係に定式化した方が便利である。

$$\rho v_{i,j} = \tau_{ij,j} + f_i \quad (5)$$

$$\tau_{ij,i} = \lambda v_{k,k} \delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (6)$$

ただし v は速度 $v_i = u_{i,t}$ である。式(5), (6)はともに一階の連立差分方程式であり、本研究ではこれらの方程式をスタaggerドグリッドを用いて離散化²⁾し、解析を行う。本研究において用いたスタaggerドグリッドを図-1に示す。ここではGraves²⁾に従い、差分の近似精度を、空間方向に4次、時間方向に2次とした。

(2) 地表面における境界条件

実地盤における地表面は通常フラットではなく、多かれ少なかれ何らかの不規則性を有している。強震動観測点は一般的に地表部分に設置されているため、この不規則性が大きくなる場合、地表面地形は観測記録に大きな影響を与える可能性がある。

地表面に不規則性を導入する手法としては、いくつかの手法が提唱されているが、本研究ではVacuum Method と呼ばれる手法を採用した。この手法は、地表面をP・S波速度が0である気相と地層の2媒質間の境界として扱う手法である。すなわちこの手法においては、気相におけるP・S波速度を0とすることで、地表面での境界条件を満足させる。Pitarka and Irikura³⁾は、Vacuum Method を用い、地表面を半グリッドずらして評価することで地表面のシンプルな取り扱いが可能になることを示した。

自由表面において満たすべき条件としては、以下に示すような自由表面の応力が0になるという応力フリー条件である。

$$\begin{aligned} \tau_{xx} = \tau_{xy} = \tau_{xz} &= 0 \quad \left| \text{free surface } (x=x_0) \right. \\ \tau_{yx} = \tau_{yy} = \tau_{yz} &= 0 \quad \left| \text{free surface } (y=y_0) \right. \\ \tau_{zx} = \tau_{zy} = \tau_{zz} &= 0 \quad \left| \text{free surface } (z=z_0) \right. \end{aligned} \quad (7)$$

本研究では地表面に不規則性を持つモデルに対してこの応力フリー条件を満足させるために、自由表面の評価方法として前述のVacuum Method を採用した。自由表面を x, y, z 全方向に対してマイナス方向に半グリッドずらした面上において評価する。図-2に2次元における同定義による自由表面の取り扱いを示す。この定義により、全ての垂直応力を表すグリッドが気相もしくは地層内で表現されるのに対し、全ての自由表面に垂直な成分のせん断応力を現すグリッドは自由表面上で表現される。よって、気相内におけるP波速度、及び気相内・自由表面上におけるS波速度を0に設定することで、せん断応力に関する応力フリー条件は自動的に満足される。

垂直応力に関しては、自由表面上で評価されていないため、自由表面外側の気相領域の垂直応力として、地層内の対応する垂直応力のマイナスの値を与えることにより、垂直応力に関する応力フリー条件を満足させる。

本研究における解析に際し、非物理的境界としては、C. Cerjan等によるNonreflecting boundary³⁾を用いた。これは計算領域外に20グリッドの減衰領域を付加して、Gaussian function W を

$$W = \exp[-0.015(20-j)]^2 \quad (8)$$

のように定義し、これを減衰領域内の各変数に乗ずることで非物理的境界からの反射を抑えるという手法である。式(8)中の j は、非物理的境界面からのグリッド数である。

$$v_p^{n+1/2} = W v_p^{n+1/2} \quad (9)$$

$$\tau_{pq}^n = W \tau_{pq}^n \quad (10)$$

また減衰については、無次元量 Q 値を用いて表現した。

3. 地表面に不規則性を有する地盤の解析

まず基本的特性を把握するために、2次元問題としてsin関数型の谷型および山型地形に対する震動解析を行う。

(1) 谷型地形の2次元挙動解析

図-3に示す谷型モデルに対して解析を行った。媒質の物性値は、S波速度2.0km, P波速度4.0kmとした。このモデルに対して谷の幅4kmを固定とし、谷の深さ h をパラメータとして解析を行う。入射波は中心振動数0.5HzのRicker Waveletとし、地表面の不規則性の指標といえる、谷の深さ h をパラメータに比較を行う。入射波は図-5に示すように、モデル底面の減衰領域の1グリッド上の線震源より鉛直上方にSV波として速度入力した。

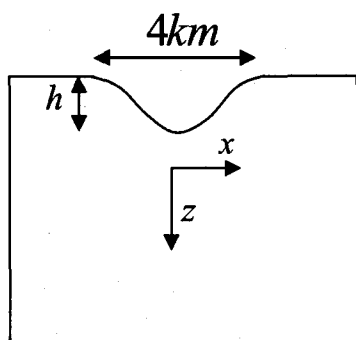


図-3 谷型モデル

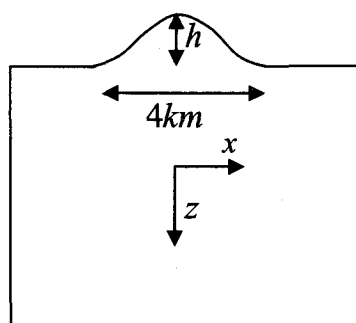


図-4 山型モデル

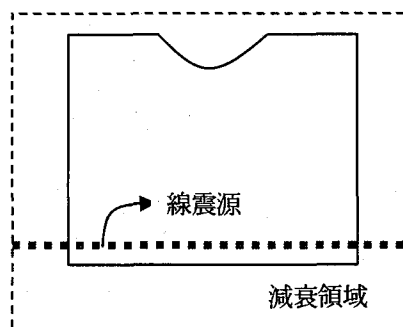


図-5 地震動入力

図-6にそれぞれの h での、地表面における速度応答倍率を示した。図中の横軸 $-2.5\text{km} \sim +2.5\text{km}$ は谷部分を表す。フラットな地表面の場合に得られる、入射振幅に対する応答倍率2.0と比較すると、谷型地形の震動特性としては、以下のような特徴が挙げられる。

- ・ 谷の両端外側において地震動が増幅される。
- ・ 谷の内側では、地震動が他に比べて低減される。

また、 x 方向と z 方向の振幅を比較すると以下のことがわかる。

- ・ 入力方向と垂直な成分(z 方向)の波は、谷の両端付近で大きな速度を示す。

また、これらの特徴は地表面の不規則性の指標 h が大きくなるにつれて顕著に現れている。

(2) 山型地形の2次元挙動解析

図-4に示す山型モデルに対して解析を行った。媒質の物性値、入射波は谷型の場合と同じに設定し、地表面の不規則性の指標である山の高さ h をパラメータとして解析を行った。

それぞれの h に対する地表面における速度応答倍率を図-7に示す。山型地形の震動特性としては、(1)と同じく2.0を基準としてみると以下のような特徴が挙げられる。

- ・ 山の頂上付近において地震動が大きく増幅される。
- ・ 山の麓付近においては地震動が大きく低減される。

山型地形においても、 h が大きくなるにつれ、これらの特徴は顕著になる。また、入力方向に垂直な成分(z 方向)の応答は、 h が大きくなるにつれて増幅の割合が顕著になる。

4. 台北盆地の地盤震動解析

(1) 台北盆地の地質と地形

台北盆地は台湾の北部に位置する面積 240km^2 の堆積層であり、その地質構造は、図-8に示す断面図のように第三期の岩盤を基盤とする四層構造から形成されている。基盤構造は東側からなだらかに深くなっていき、最深部の西側が急激に浅くなる形となっている。

また、台北盆地周辺の地表面地形を図-9に示す。台北盆地は周囲を山岳地帯に囲まれており、中でも北東と南部に急峻な山地が存在する。すなわち、台北盆地周辺は西に地下の強い不整形性を持ち、北東・南部に地上の強い不整形性を持った地域であるといえる。

(2) 台北盆地周辺のモデル化及び震動解析

本研究では、台北盆地の地下構造を軟弱層である松山層、それ以外の堆積層、基盤の三層構造と仮定してモデル化し、震動解析を行った。

解析に用いた地下構造における、第一層と第二層の境界面、及び第二層と基盤の境界面の形状及びコンターをそれぞれ図-10、図-11に示す。これらのデータ、及び図-9の地形面データから、台北盆地周辺地盤をモデル化し、地盤震動解析を行う。各層における物理定数は王乾盈⁴による資料及び台湾中央気象庁の強震動観測点の地質データを参考として、表-1のように決定した。

表-1 堆積層及び基盤岩の物理定数

	質量密度 g / cm^3	P波速度 m / sec	S波速度 m / sec	Q値 ($f_0 = 1.0\text{Hz}$)
第一層	1.8	1000	300	60
第二層	2.0	1400	700	140
基盤岩	2.3	3000	1500	300

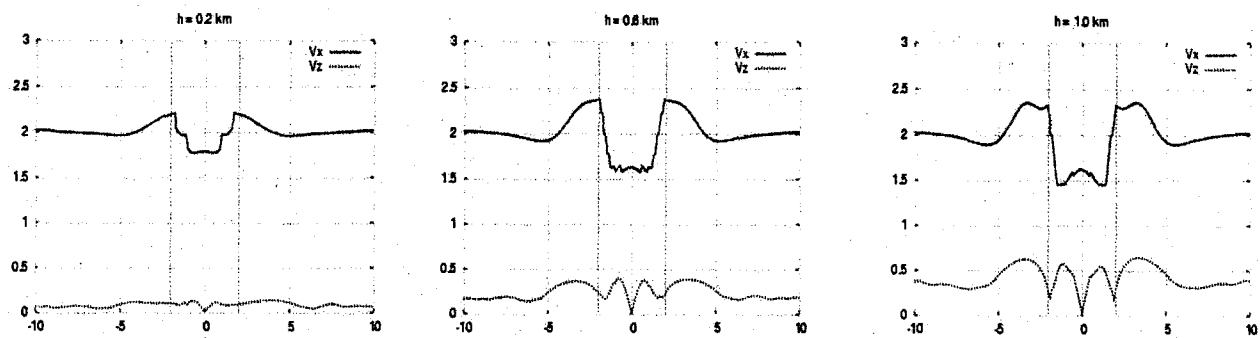


図-6 地表面における応答倍率 (谷型モデル)
左:h=0.2km、中央:h=0.6km、右:h=1.0km

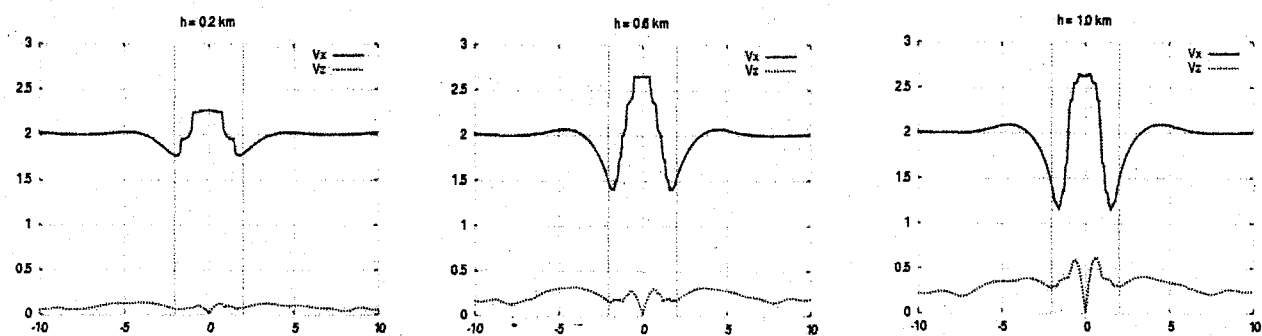


図-7 地表面における応答倍率 (山型モデル)
左:h=0.2km、中央:h=0.6km、右:h=1.0km

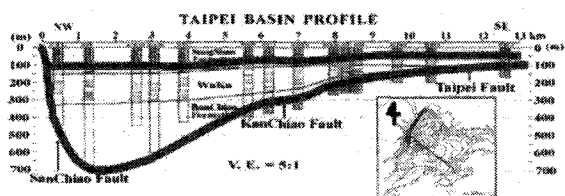


図-8 台北盆地の地下構造⁴⁾

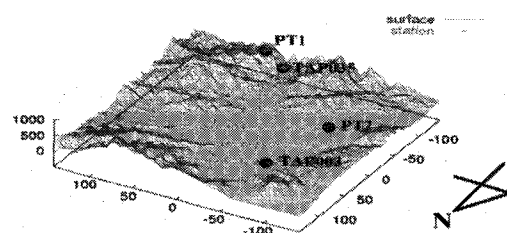


図-9 台北盆地周辺の標高データ及び観測点

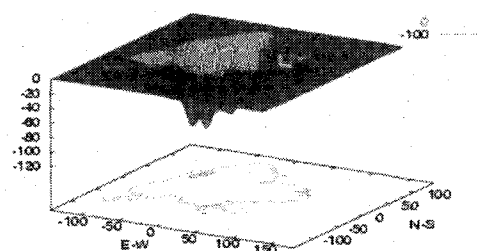


図-10 第一層・第二層間の境界面

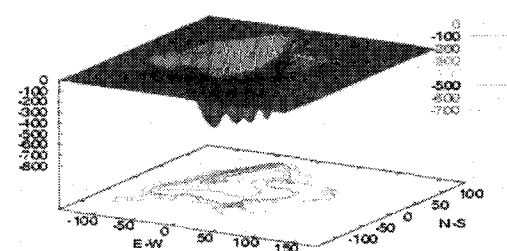


図-11 第二層・基盤間の境界面

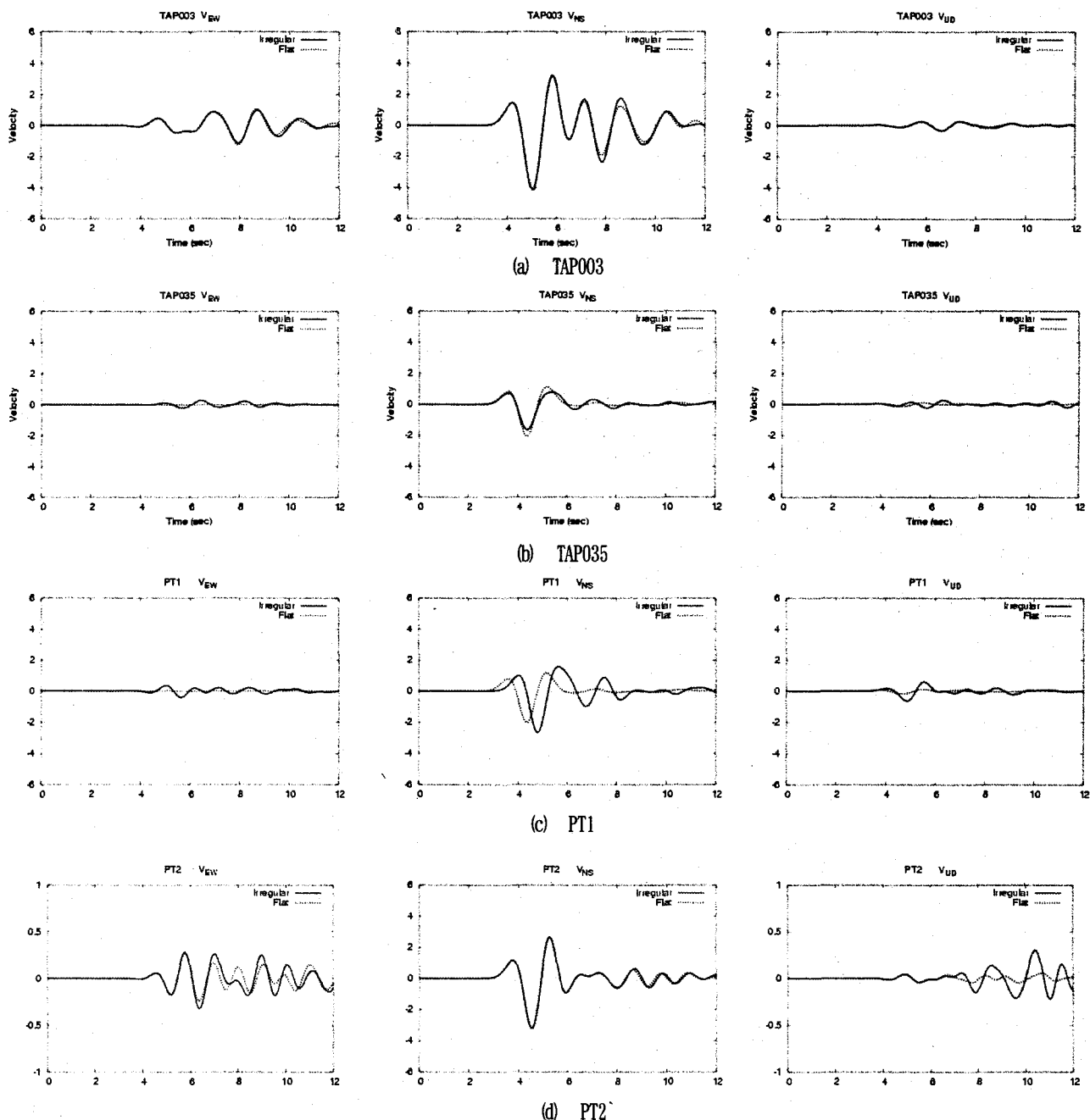


図-12 各観測点における速度時刻歴波形
(左:EW成分、中央:NS成分、右:UD成分)

入力モデル底面から中心振動数 0.5Hz の *Ricker Wavelet* をNS方向の速度として鉛直上方へ一様に入射した。また、その入射振動方向と、地盤の応答の振動方向の関連を明確にするために、一成分入射とした。

地盤震動を包括的に検討するためには、地震動として有意な周波数帯の範囲内でできるだけ高周波の成分まで含める必要があるが、グリッド間隔と波長や周波数の関係から、本解析では 1Hz 程度が上限である。そのため、ここでは 0.5Hz を中心周波数に持つ *Ricker Wavelet* を入力として用いた。

本研究では、図-9に示す4観測点（基盤面が最深部である観測点TAP003、山地の麓に位置するTAP035、盆地部で山地の近隣であるPT2、山頂に位置するPT1）に着目する。

図-12にそれぞれの地点で計算された速度波形を示した。同図内において、実線で示されたものが地表面地形を考慮に入れた場合の地表面速度波形、破線で示されたものが地表面をフラットと仮定した場合の地表面速度波形であり、左からそれぞれEW成分、NS成分、UD成分を表わしている。

各観測点における観測波の特徴を以下に列挙する。

TAP003

- ・ 厚い堆積盆地の影響で、NS方向においては入射振幅の4倍程度の大きな振幅を持つ速度波形が得られるとともに、地震動の継続時間の伸長が見られた。
- ・ 盆地内の不整形境界からの反射等の影響により、入力方向と垂直なEW方向に対しても、大きな応答が観測された。
- ・ 実線と破線の差、すなわち地表面地形が応答へ与える影響はほとんど見られなかった。

TAP035

- ・ 山岳地帯の存在により、入射波と同じ振動方向成分(NS方向)で速度応答が20%程度減少している。
- ・ 入力方向に直交する方向に対しても、比較的大きな地表面応答が得られた。

PT1

- ・ 山岳地帯の存在により、入射波と同じ振動成分(NS方向)の地震動が25%程度増加した。このような山麓に位置する場所では、地震動の継続時間の伸長や位相のずれなど特徴的な傾向が多く見られた。
- ・ 入力方向と垂直な方向に対しても、比較的大きな地表面応答が得られた。

PT2

- ・ 入射波の振動方向と同じNS方向に関しては、地震動の増幅が観測されたが、地表面地形の考慮による観測波への影響は微小であった。
- ・ 地表面地形の影響を考慮したことにより、入力方向と直交するEW方向やUD方向への影響が大きく表れた。特にUD方向では、地形の影響のないフラットな地表面を有するモデルに比べて最大振幅で5倍近くの波形が観測された。

5. まとめ

本研究では、地盤の不整形性と地表面の不規則性を同時に評価できるプログラムを構築し、これを用いて谷型や山型地形の基本的な震動特性を検討するとともに、これを台北盆地の震動解析に適用してその地震動評価を行った。

まず、2次元モデルを用いた不規則地盤の震動解析により、

谷型地形では、谷の両端外側において地震動が増幅され、内部において比較的低減されること、そして山型地形では、山頂付近において地震動が大きく増幅され、麓付近で低減されることなどがわかった。

次に、周辺地域も含む台北市の地盤をモデル化し、台北盆地の地盤震動解析を行った。この結果、地点TAP003に代表されるような厚い堆積盆地では、インピーダンスの違いによる増幅だけでなく不整形地盤に起因する波動の影響により、他地点に比べて大きな振幅が得られること、地点PT1に代表されるような山岳地帯では、例え今回モデル化したようにその直下が一層地盤であっても、地表面に不規則性がある場合にはフラットな地表面を有する地盤に比べ振幅や位相の変化が顕著になること、地点TAP035のように特に山地の近隣に位置する堆積地盤上においては、入力方向に直交する方向の地震動が、地表面の不規則性により大きく増幅されることがあることなどがわかった。

謝辞：著者の一人が台湾留学に、ご助力をいただきました蔡克銓教授、適切な助言を頂きました羅俊雄教授、台北地域の地盤構造についてご助言を頂いた柴駿甫先生、台北盆地地価構造のデータを頂きました李憲忠先生にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Pitarka, A. and K. Irikura: Modeling 3D surface topography by finite-difference method, Kobe-JMA station site, Japan, case study, Geophys. Res. Lett. 23, pp 2729-2732, 1996
- 2) R. W. Graves: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences Bull. Seism. Soc. Am. 86, pp 1091-1106 1996
- 3) C. Cerjan, D. Kosloff and M. Reshef: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equation, Geophysics, 50, pp 705-708, 1985
- 4) 王乾盈, 陳怡伶: 台北盆地構造及震波速度分析, 国立中央大学碩士論文

(2005年9月10日受付)