

京都大学	博士 (工学)	氏名	Bidhya Subedi
論文題目	Estimation of S-Wave Velocity Structure using Microtremor Observations for Earthquake Response Analysis of the Bangkok Basin, Thailand (タイ・バンコク堆積盆地の地震応答解析のための微動観測によるS波速度構造の推定に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>バンコクの都市部はタイ中央のチャオプラヤ盆地（バンコク盆地とも呼ばれる）に位置している。その地域では地震活動は活発ではないが、タイの北部や東部で地震が発生すると、その長周期・長継続時間の揺れは、都市部の高層ビルや高架鉄道などの大規模長大構造物に大きな影響を及ぼしている。この盆地の厚く軟らかい沖積堆積物によって長周期地震動が励起されるものと考えられる。本研究は、このような背景に鑑み、微動観測とボーリングデータによる盆地の深い構造の解明とそのモデル化、このバンコク堆積盆地のモデル化に基づく数値シミュレーションによる振動特性の検討、盆地内の限られた数の地震観測データを基に想定された長周期地震動予測手法の提案から構成されている。</p> <p>本研究は以下に示す6つの章から成る。</p> <p>第1章では、バンコク盆地の地震発生状況と地質学的設定について述べている。地震によってバンコク堆積盆地で生じる揺れと、利用可能な地震記録について検討を行った。この盆地では特に長周期成分の増幅があり、これを解明するためには地下の速度構造モデルを作成する必要がある。地震探査から得られる既存のデータは限られているため、新たに微動探査を用いた地下の探査を行った。</p> <p>第2章では、微動探査技術を用いて、バンコク市内の5つの地点で行った物理探査について述べている。地盤の卓越周期を見つけるために水平上下スペクトル比（HVSr）分析を用い、また5つの地点でせん断波速度データ群を得るために微動アレー探査を行った。使用した加速度計の長周期成分の精度は、速度計の結果と比較して検証した。アレー記録から、深層部の位相速度分散曲線を抽出し、インバージョンを行った。その結果、深さ11~14.3mでは、表層の粘土層のせん断波速度は82~120m/sとなり、かなり軟弱な層が存在することが確認された。地震データのHVSrには低周波のピークがあり、せん断波速度の小さい堆積層があることから、バンコクは長周期地震波の増幅の危険性があると考えられる。</p> <p>第3章では、観測による分散曲線のインバージョンにおける事前情報の重要性と、インバージョン時に別途得られている地層情報を使用して、少数のアレー記録から3次元の現実的な堆積地盤モデルを得るための新しい手法について述べている。アレー観測を行った5つの地点でのインバージョンVsデータ群を補間すれば、3次元の速度構造モデルの概略は作成することができる。しかし、バンコク盆地は広く、不整形な深層地下構造を有するものと推定できるが、このようなモデルは正確さに問題が残る。次章の3次元有限差分法（3D-FDM）による地震動予測は、当然のことながら地盤モデルのモデル化の精度が上がるにつれて向上する。そこで、インバージョンの際に、地盤境界層の存在を事前情報として利用する方法を提案した。この方法は、アレー観測による逆問題の非一意性に対して、ボーリングデータから事前に地下情報を入れて、任意性をできるだけ排除する具体的な手法を与えるものとなっている。この方法では、1つの地下層が1つの特性を持っていると仮定して、インバージョン層の境界を地質ごとの地盤境界に重ねることで、インバージョン層の厚さを一元的に変化させている。このプロセスでは、</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Bidhya Subedi
<p>地質層の全深度をランダムに探索する必要がない。層の可能な組み合わせごとにサンプルモデルを作成し、各地点でフォワード計算を行った。誤差は、その地点の最小誤差で正規化され、各層の組み合わせについてはすべての地点の正規化誤差が合計される。最適な層の組み合わせは、正規化誤差の合計が最小となるものを最適なモデルとした。広く複雑なバンコク盆地に対し、4つの観測曲線を用いて提案した方法を適用し、3次元S波速度構造モデルを作成した。事前情報としての地層モデルに関しては、ボーリングデータにクリギング手法を適用し、バンコク盆地の17層の3次元地層モデルを構築した。これにより、任意地点下の各層や層境界の情報が得られることになる。こうして得られた地震基盤までの深層3次元モデルは、その地点固有の地震リスク分析に加え、鉱物探査、地下水脈、地盤沈下の研究にも利用できるものと考えられる。</p>			
<p>第4章では、3次元有限差分法を用いた長周期地震動(LPGM)のシミュレーションについて述べている。ここでは第3章で作成した4層構造の3次元S波速度構造モデルを使用している。最上層のV_sは400m/s、基盤のV_sは3200m/sである。バンコクの北西190kmの地点で実際に発生した地震($M_s=5.9$)を点震源として使用し、オープンソースのGMSプログラムを用いてシミュレーションを行った。周波数の上限を1Hzとして格子点間隔を定めた。5つの地点すべてにおいて、地表、地下の最下層、第2~第4層に想定した観測点のNS、EW、UD方向のシミュレーション結果を提示した。速度の時刻歴を0.1~1Hzのバンドパスフィルターで処理し、フーリエスペクトルを算出したところ、2秒付近にピークが見られた。岩盤でのスペクトルに対する4層の観測点でのフーリエスペクトルの比は、周期2.5~3秒で高い増幅を示している。スペクトル比を比較すると、下層から上層に向かって地震動の長周期成分が徐々に増幅していることが確認された。地表の長周期成分は最下層に比べて100倍以上の増幅を示すこともある。1秒付近の相対的に短い周期の地震動も地表では同様に増幅されている。</p>			
<p>第5章では、最小限の情報しか必要としない長周期地震動を対象に、その地震早期警報を念頭に置いた2つの予測モデルについて述べている。バンコクは主な地震発生域から離れているため、地震の記録数は限られたものとなっている。したがって絶対速度応答スペクトル(AVRS)に対する地震動予測式(GMPE)を作成するための回帰分析は、バンコクのデータだけでは不可能である。そこで、日本国内の観測地点の記録を用いて0.1~10秒の周期を対象に、AVRS、相対速度応答スペクトル(RVRS)、地表面相対速度のピーク速度(PGV)の地震動予測式を作成した。マグニチュードと震央距離をパラメータとして、2段階の回帰分析を行った。そしてこの推定AVRS(T)、RVRS(T)、PGVのデータを用いて、係数$\alpha_1(T)$を算出した。1つ目の手法として、この$\alpha_1(T)$を用いて、RVRSとPGVからバンコクのAVRSを推定することを試みた。RVRSとPGVは、これまでの研究でタイに適しているとされたGMPEがあればそれを用いて推定することを念頭に置いている。2つ目の手法では、日本のAVRS(T)とRVRS(T)を用いて係数$\alpha_2(T)$を算出した。これは、RVRSのみからAVRSを推定する方法で、これもタイに適しているとされたGMPEがあれば簡便に利用できる。バンコクで入手可能な観測データを用いて提案されたモデルを検証したところ、いくつかの固有周期では過小評価される可能性があることが確認できた。しかし、バンコクでは観測データの数が限られているため、本研究の考え方は非常に有用であると考えられる。</p>			
<p>第6章は、今後の課題を含め、本研究の成果をまとめた結論である。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、長周期地震動の発生しやすいタイ・バンコク堆積盆地を対象に、地盤調査結果を基にバンコク堆積盆地のモデル化を行うとともに、長周期地震動の予測式を提案し、長周期地震動の影響を受けやすい構造物、特に高層ビルや超高層ビルに対する地震被害リスク低減のための検討を行ったものである。

本研究で行ったこと、および得られた成果を以下に示す。

(1) バンコク堆積盆地の地震活動度と地質構造について包括的な検討を行った。この盆地では長周期の地震動が増幅する傾向があり、この解明には地盤構造モデルの構築が必要である。構造推定のための微動観測を行うとともに、バンコク地盤に関する数多くの資料収集を行った。

(2) バンコク市内の5地点で微動観測を行い、アレー観測データからレーリー波の分散曲線を求め、逆解析により微動観測のみによるバンコク堆積盆地のせん断波速度(V_s)構造を推定した。H/Vスペクトル比(HVSR)解析により地盤の卓越周期を求めた結果、深さ11~14.3mの表層の軟弱粘土層のせん断波速度が82~120m/sと低い値を取ることがわかった。

(3) 限られた観測点だけの微動アレー観測だけでは200km四方にも及ぶ広大なバンコク盆地の不規則性の高い深部構造を正確にモデル化するには限界があった。そのため、深部構造の正確な推定のために帯水層探査のための深部ボーリングデータを援用し、この層モデルと微動探査による分散曲線を併用することで、任意のサイトの V_s 構造モデルを作成できる新しい手法を提案した。この方法によって、バンコク堆積盆地の3次元構造モデルを提案した。

(4) 3次元有限差分法(3D-FDM)を用いてバンコク堆積盆地の長周期地震動のシミュレーションを行った。提案した3次元速度構造モデルを利用して、実際に発生した $M_s=5.9$ の地震動を模擬した。速度時刻歴は2秒付近にピークを示し、深い基盤を有する盆地表面では大きな増幅が見られることが分かった。

(5) 限られた距離減衰式から絶対応答速度を推定できる2つの予測モデルを提案した。これまでの研究でタイに適しているとされている既存の距離減衰式から長周期地震動推定に必要な絶対応答速度を推定できるため、観測データの数が限られるバンコクの今後の早期地震警報の構築に、有用な情報を与えるものと考えられる。

以上より、本論文はこれまでその概形しかわかっていなかったバンコク堆積盆地の3次元形状を明らかにするとともに、盆地内で励起される長周期地震動の特徴と、バンコクの早期地震警報に資する一連の推定式を提案することに関して、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。