

論文の内容の要旨

論文題目 Study of site effects and its applications to understanding seismic damage
(サイト効果とその地震被害解釈への応用の研究)

氏 名 バッタライ ムクンダ

地震はヒマラヤにおいてもっとも破壊的な地質現象である。地上の破壊を引き起こす地震波は震源効果、伝播効果、そしてサイト効果に拠っているが、それらの中でもサイト効果がもっとも重要である。従って、堆積盆地のローカルな地質や地形の条件による地震波の増幅は地震ハザード評価の不可欠な構成要素である。ネパールは、ユーラシアプレートとインドプレートの境界に位置して、1255年から約20の破壊的な地震の長い歴史があり、2015年のゴルカ地震が最新のものである。ネパールの首都が位置するカトマンズ盆地は、ネパール中央部の低ヒマラヤ山脈にあり、平らなテラスが特徴である。その北部は粘土、シルト、砂、砂利が多く、南部は主に粘土とシルトが豊富である。露出した基盤岩は、周囲の山や丘の斜面にのみ多く見られる。盆地内の堆積物はこれら斜面から運ばれ、基盤岩の上うねったパターンを形成した。この盆地はまた、複雑な地下構造および湖成起源の第四紀堆積物の存在により、地震災害を起こしやすい。この盆地の未固結堆積物は主に河川と湖成の地層で構成され、地震動に大きな局所的変動を引き起こす。従って、サイト効果が最も重要であり、地震ハザードの評価のためには基盤までのS波速度構造の研究が必要である。

カトマンズ盆地では、2009年から加速度計ネットワークを設置することにより、さまざまなサイト条件での地震動の変動に関する研究が開始された。最初の加速度計はカトマンズ盆地の中央部(DMG)に、もう一点(KKA)は盆地の中心から北西に10 kmの距離のロックサイトに設置された。このネットワークは、盆地の堆積物によって引き

起こされるサイト効果を、ロックサイトに対して相対的に評価するために使用され、また既存の短周期地震計ネットワークを補完して飽和していない記録を得るために使用される。初期の記録の結果によれば、KKAにおいて加速度計とともに配備された速度計では、低ゲインチャンネルの記録が、飽和状態になったときの高ゲインチャンネルの記録を完全に補完することが示された。2010年10月17日中国チベットの地震 (M_L 5.7) の記録のスペクトル比は、4 Hzより低い周波数で高い増幅を示す一方で、4~10 Hzの周波数範囲で明確な落ち込みを示している。これらの現象は、前述の周波数範囲でサイト増幅を誤って評価する可能性がある。また、DMGの上下成分にS波がよく見えないことも堆積層によるサイト効果を疑わせる。

同じ方法を M_L 5クラスの9つの地震の記録に適用して、前述の周波数範囲でのKKAに対するDMGのサイト効果を確認した。0.5~4 HzではKKAに対するDMGのスペクトル比は、すべての地震で1~10の間にあることが示されており、4~10 Hzでは1未満になっていて、上の結果と同じであった。DMGのサイト増幅をより正確に推定するために、盆地の中心から約15 km南東に位置する別のロックサイトPKINがKKAのかわりに使用して、同じ解析を行った。PKINを基準としたDMGのスペクトル比は、周波数範囲内のどの周波数でも1倍から最大10倍の増幅を示していた。こうした比較から、PKINはカトマンズ盆地でのサイト効果研究のためのより信頼できる参照サイトと考えるべきであると提案した。このことは、ゴルカ地震後にPKINの近くに加速度計PKIを設置して確認された。カトマンズ盆地の厚い堆積層による長周期のサイト応答は、2011年9月18日のタプレジュン-シッキム地震 (M_L 6.8) のスペクトル比によって証明され、ゴルカ地震の余震の解析によってもサポートされている。

カトマンズ盆地内のサイト効果を、DMGで記録されたゴルカ地震の本震といくつかの余震を使用して解析した。100秒間の本震記録の解析の結果は、0.25 Hz付近での水平成分の高い増幅を明らかにした。この水平成分増幅の継続時間は約42秒であった。Boore and Atkinson (2008)の地震動予測式 (GMPE) から考えて、PGAは小さいものの、本震の加速度スペクトルは予測値に比較して長周期の増幅を示していた。ただし、Abrahamson and Silva (2008)のGMPEを用いて盆地効果を考慮すれば、増幅の度合いは抑えられる。南北成分に見られるスパイク上のパルスは、液状化の効果や震源効果と疑われが、現地調査や近隣のNQ.KATNP観測点の記録との比較で確認されているわけではない。最大余震の記録は合計で70秒間あり、水平成分の顕著な部分は約32秒間ある。0.3 Hz付近で高い増幅が見られるとともに、本震や他の余震では見られない偏光特性が明らかになった。最大余震の地震動はBoore and Atkinson (2008)のGMPEに整合する。カトマンズ盆地の東で起きた余震の記録は、本震や最大余震と同じ傾向のフーリエ振幅スペクトルやH/Vスペクトル比になっているが、カトマンズ盆地内で発生した小さな余震は別の傾向を示している。

これらの基本的な観測に加えて、ゴルカ地震で約0.25 Hzの長周期増幅が観測された

カトマンズ盆地において、深い堆積層の S 波速度 (V_S) 構造を探索した。使用した 4 つの地震観測システムは広帯域地震計 CMG40T とデータロガー LS8800 で構成されている。盆地の中央部の 3 つの探査サイトは、SPatial Auto Correlation (SPAC) 法を適用するためのパイロットサイトとして選択された。アレイ形状は正三角形のものがほとんどなく、主に不規則な形状 (2ST-SPAC) で構成されている。後者の適切性は、サイト 1 の規則的な形状配列の記録を使用してチェックされたコヒーレンス関数の等方性特性によってサポートされている。解析の周波数範囲は 0.2 Hz から 1.0 Hz 付近である。特に、サイト 2 と 3 の場合、分散曲線は 0.25~0.35 Hz の周波数範囲で曲がりくねった部分があり、パワースペクトルと H/V スペクトル比の両方に明確なピークが現れている。この曲がりくねった部分はコヒーレンス関数のたるみによるが、これはレイリー波の高次モードの影響では説明できず、原因の究明には至らなかった。インバージョンの結果は、 V_S が 2,000 m/s を超える部分は 3 つのサイトとも 600 m よりも深く決まっている。 V_S は最も浅い層で約 200 m/s 以下で、その後徐々に増加する。 V_S 400 m/s の層は 160~180 m の深さに現れる。 V_S は 260~300 m の間で 550 m/s を超える。サイト 1 では、750 m を超える基盤の深さが得られる。ただし、サイト 2 および 3 では、より深い部分とその上の層の構造パラメータに不確実性がある。

広い周波数範囲で分散曲線を把握するために、同じデータ、一部の追加データ、その他既存データを、センターレス円形アレイ (CCA) 法と L 字型 SPAC 法で再解析した。CCA 法を適用すると、サイト 2 および 3 のコヒーレンス関数のサグの乱れは抑制されたが、検出はできた。次に、3 つのサイトで 0.2 Hz から 5 Hz より高い周波数までの広帯域分散曲線を取得した。低い周波数範囲で SPAC 法と CCA 法の間で良好な整合性が確認された。地震波干渉法の性能は、位相速度および群速度のジョイントインバージョンを適用することによりテストされ、より高い周波数範囲での速度構造のより良い精度が示された。0.2 Hz 未満の低周波数範囲で分散曲線を得るために、2018 年以降、一時的な連続観測システムがカトマンズ盆地の 4 つの場所に設置され、4.0 を超えるさまざまなマグニチュードの地域地震と遠地地震が観測された。記録の表面波成分は、より低い周波数範囲でのレイリー波の位相速度の推定に使用された。それは、0.01~0.13 Hz の周波数範囲で分散性を示していた。高周波数側 (> 2.0 Hz) の微動から得られた位相速度は、低周波数側の地震の記録から得られた位相速度に関連している。ただし、分散曲線のギャップが 0.1~0.2 Hz にある。推定された V_S は、ネパールの新たに提案された地震波速度構造モデルの V_S と同等であることが確認できる。ただし、その V_S は浅い深度では既存の速度構造モデルよりも小さいが、10~30 km 以深では大きくなる。微動アレイ探査は、トリブバン国際空港 (TIA)、科学技術アカデミー (NAST)、露出した石灰岩サイト Chobhar (CHB)、その他の多くのサイトでも実施された。TIA と NAST で微動から得られた基盤は、サイト 1 で以前に取得した深度よりも深い深度になっている。TIA での重力探査の結果は基盤が深さ約 400 m あることを示していて、それは反射

法探査で得られた高インピーダンスコントラストによってサポートされている。

ここまでの結果に基づいて地震動を再現し、それを建物の損傷評価に適用する。ロックサイト KKA, KTP, および PKI における記録の水平成分をベースにしたサイト 2 における地震動を作成し、1, 2, 3, 6, 18, および 40 階建ての RC 造建物モデルの強度及び変形性能と被害程度の間係を検討した。併せて、サイト 1, 3 における地震動も作成して用いた。検討したすべての建物に対して、構造性能係数 $K = 1, 2, 3$, および 4 を用いた。また、比較のために中国チベットの地震による 1 階建て建物の損傷、タプレジューン-シッキム地震による 1 階建て、2 階建て、3 階建て建物の損傷を、サイト 2 における KKA ベースの地震動を用いて分析した。その結果、水平 2 成分のどちらを用いても倒壊と損傷の状態は生ぜず、この結果は地震後の調査結果と一致している。全壊の状態は、ゴルカ地震本震の DMG 観測記録の両成分を用いて 40 階建て建物の損傷評価を行えば生じることも確認した。サイト 2 における PKI ベースの最大余震地震動を用いると、18 階建て建物はすべて倒壊に至った。ただし、6 階建て建物は、特に $K = 1$ の場合、地震動の東西成分を用いたときのみ倒壊した。この地震動の南北成分は、中程度および最小の損傷しか生じさせなかった。サイト 2 における KTP ベースの最大余震地震動の場合は、倒壊の被害は発生しなかった。サイト 2 における KTP ベースの本震地震動は、主に $K = 1$ および 2 の 18 階建て建物に対して、倒壊状態と大破の損傷レベルとなった。ただし、地震動の南北成分のみを用いた場合、 $K = 1$ の 3 階建て建物で倒壊に至った。サイト 1 および 3 の地震動の両方の成分を用いた場合、主に $K = 1$ および 2 を用いた 18 階建て建物では、倒壊に至った。しかし、その他の建物階数や K 値では、軽微～中破程度の損傷しか生じない。ゴルカ地震本震は、サイト 2 の地震動の両成分により低層建物と高層建物に深刻な影響を与えることが確認された。ただし、サイト 1 および 3 の地震動では 18 階建て建物に大きな損傷を与える。同様に、最大余震では東西成分のみが $K = 1$ の 6 階建て建物と K のすべての値の 18 階建て建物に対して甚大な被害を生じさせた。ここでは、地震動の記録はないが S 波速度構造が求められている特定の領域では建物の損傷評価ができる可能性を示している。

この研究で得られた結果は、ネパール、特にカトマンズ盆地の地震ハザードを再検討するための基礎を提供した。ゴルカ地震の際の建物被害に関する予測と現実の不一致に対しては、加速度応答の 3 次元性状や盆地構造を考慮して対処する必要があることを本研究は示唆している。