

2003 年三陸南地震時における築館地すべり地点の地震動推定 一強震計・震度計データを利用した波形再現と室内試験による確認一

福元俊一¹⁾,海野寿康²⁾,仙頭紀明³⁾,渦岡良介⁴⁾,風間基樹⁵⁾

1) 正会員 ㈱東京ソイルリサーチ 技術本部,室長 博士(工学)

e-mail:fukumoto.shunichi@tokyosoil.co.jp

2) 正会員 (独)農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所,特別研究員 博士 (工学)

e-mail:tunno@affrc.go.jp

3) 正会員 東北大学大学院工学研究科, 助手 博士(工学)

e-mail:nsentoh@civil.tohoku.ac.jp

 4) 正会員 東北大学大学院工学研究科,助教授 工博 e-mail:uzuoka@civil.tohoku.ac.jp

5) 正会員 東北大学大学院工学研究科,教授 工博 e-mail:kazama motoki@civil.tohoku.ac.jp

要約

三陸南地震(2003)が発生した際,旧築館町舘下地区において谷沿いに堆積していた火山 灰質砂質土が崩壊し流動性土砂となって斜面下をすべり落ちた.この時,築館周辺におい て地震動が記録されていなかったことから,不飽和火山灰質砂質土の流動化による崩落メ カニズムを震度や強震記録との関連性から議論することができなかった.そこで本研究で は,K-NET 築館地点の余震記録と周辺の強震記録,震度情報をもとに地すべり地点の波 形の再現を行った.また,火山灰質土の要素試験結果と地震応答解析から求められる累積 損失エネルギーの比較を行い,有効応力減少によって土塊が流動化し,流動性の地すべり が発生するメカニズムを概ね推定することができ,流動化が発生する大まかな強震動のレ ベルを把握することができた.

キーワード: 地すべり, 不飽和火山灰質土, 強震動, 震度計, 強震計, 経験的グリーン 関数法, 流動化

1. はじめに

(1) 研究の背景と現状

2003 年 5 月 26 日に発生した三陸南地震(Mj=7.1)の際,宮城県北部の旧築館町舘下地区(現在は栗 駒市築館舘下と改称,以降,築館舘下と略称)において,沢部を埋め立てた盛土が崩壊し泥流状の流動 性土砂となって斜面下の水田まで流出した.崩壊した土砂は丘陵地沢部に盛土されていた火山灰質砂質 土である¹⁾.このような火山屑砕物の堆積する斜面の崩壊は過去に,1994 年三陸はるか沖地震時におけ る青森県三戸郡新郷村²⁾や,2003 年 9 月の十勝沖地震における北海道端野町³⁾でも発生し,いずれも火 山灰質砂質土の盛土及び自然斜面が地震の激しい震動によって泥流状の流動化土砂となって崩落したと 考えられている.これらの崩壊事例に共通するのは,傾斜角度 30°未満の緩斜面であること,崩壊した 土砂が地下水位面より上にある不飽和状態であった可能性があること,軽石等が混入する火山灰質土の 土粒子は多孔質で保水性が高く,降雨が少なくても常時水を含んでいる特徴等があげられる².

このような土質は、明らかに不飽和状態であるにもかかわらず振動を加えると土が流動化状態を呈す ることから¹⁾、単に地震動による盛土の崩壊として片付けられない特徴がある.筆者らは、地震時にお ける強い震動によって、保水されていた間隙水が浸出し流動化状態になり斜面を流下したと考えている が、地下水位面下に位置するすべり面が粒子破砕を伴って液状化し流出したという考えもある⁴⁾.これ まで、Unno et al.⁵⁾、風間ら⁶⁾は築館舘下におけるすべりの発生現場から火山灰質砂質土の試料を採取し て、振動時のサクション低下と繰り返しせん断による有効応力の低下現象を確認し、不飽和土の液状化 のメカニズムを要素試験の結果から報告している.特に、この土質は非火山灰質の砂質土に比較して高 い保水性を示すこと、飽和度 75%程度の不飽和土でも緩い土粒子骨格構造を持てば飽和砂質土と同様な 液状化現象が生じることなどを示した.

不飽和土の液状化強度については、社本・後藤^{7).8)}や Tsukamoto et al.⁹⁾の研究がある.社本・後藤によると豊浦砂の繰り返し液状化試験の結果から、飽和度 *Sr*=100%の試料に対して *Sr*=95.5%で約 2 倍, *Sr*=90.5%の試料で約 2.6 倍の強い値を示すという結果を報告している.また、Tsukamoto et al.は飽和度の 指標として P 波速度を計測しながら実験を行い、液状化強度の増加率は飽和度 100%の試料に対して、 約 90%の飽和度で 2 倍程度の液状化強度増加率を示すと報告している.しかし、これらの実験に供され た試料は、新潟砂や豊浦砂に代表される均質な砂であることから、不飽和火山灰質砂質土の液状化強度 を推定する上では不十分である.さらに、地震後の築館舘下の不撹乱試料を用いた液状化強度試験も実 施されているが¹⁾、完全飽和状態の条件下(B 値 0.95)での試験となっており、築館舘下の不撹乱土が およそ 50~90%の飽和度であった(Uzuoka et al.¹⁰⁾)ことを考慮すると、このような飽和状態での液状化 強度に関する考察は十分とは言えない.従って、不飽和火山灰質土が強い震動によって液状化や流動化 したメカニズムを、強震記録との関連性において言及した研究は本稿の内容を含む一部の発表^{11),12)}を除 き殆どないのが現状である.

(2) 地すべり地点の強震記録再現の目的

不飽和の火山灰質砂質土の液状化メカニズムに迫る要素試験は既に風間ら⁶によって行われ,おおよ そ定量的に解明されている.さらに崩壊に至る地盤の挙動を知るためには強震動との関連性を調べる必 要がある.すなわち,どの程度の強震動で流動化し崩壊に至ったかを知ることによって,今後の火山灰 質砂質土の盛土等が施されている箇所の地震防災や防災対策を考慮する上で有効であるからである.地 すべり地点の近傍で強震記録が存在すれば評価可能であるが,残念ながら地すべりと関連できるような 地震記録や既往の研究報告事例は殆どない.三陸南地震時において地すべりの発生した築館舘下地点に 近い位置で,本震記録があればその因果関係の一つが解明できると考えられる.しかし,現地に最も近 い防災科学技術研究所の強震観測網(以降,K-NETと略称)の築館観測点(MYG004)では,余震は多 く記録されているが本震の記録は欠落している.さらに,旧築館町役場における計測震度の情報も公開 されていないため,築館地点(旧築館町役場,K-NET 築館,築館舘下を総称する)では強震記録や震度 情報がない状況となっている.

本論文では、地すべりが発生した築館舘下の本震波形を経験的グリーン関数法(例えば, Irikura¹³) と一次元の応答解析により推定を行い、その地震動と要素試験の結果を踏まえて不飽和火山灰質土の液 状化を確認し、盛土土砂が流下したメカニズムの因果的な関連性を把握するとともに、不飽和土が液状 化する場合のその強震動レベルを知ることを目的としている.

2. 三陸南地震時における築館周辺の強震記録と震度情報

2003 年三陸南地震の本震やその余震の震源位置は図1に示す通りである.本震記録は K-NET 築館を

含め旧築館町内には現存していないが、旧築館町以外の強震観測点では K-NET の古川観測点 (MYG006) と旧栗駒町岩ヶ崎地点(当時町役場;岩ヶ崎と略称)において記録されている.

K-NET 古川は本震との震源距離が 97km であり,インターネットの公開情報(20mのボーリング, PS 検層結果)によると,GL-17m までおよそ Vs=130m/s と軟弱であることから,本震記録はやや非線形化 している可能性があり比較・検討するには適切でないと判断した.一方,岩ヶ崎の震源距離は 92km と K-NET 築館の 91km とほぼ同じような距離に位置することが分かった.岩ヶ崎における表層地盤の情報 がなかったことから,震度計設置付近において常時微動を測定し,水平鉛直スペクトル比(以降,H/V スペクトルと略称)を求めた(後述図 3(b)参照).同図より,H/V スペクトルのピーク周期は約 0.1~0.3 秒にあり,本震の疑似速度応答スペクトルのピークが周期 0.15~0.5 秒にある(後述図 12(a)参照)こと からやや地盤の非線形化が認められるが,概ね比較・検討が可能な強震波形であると考えた.

築館周辺(旧築館町周辺の旧町役場までのおよそ図2の範囲を総称する)の計測震度の情報は気象庁 のインターネットから引用し図2に示した. 築館周辺の計測震度は,一迫町5.3,志波姫町5.4,高清水 町5.6,そして瀬峰町5.2となっている. 震源からの方向性を考慮すると,築館地点は一迫町と志波姫町 とほぼ同じ方角で距離的に両者のほぼ中間に位置し,震源距離は高清水町(93km),瀬峰町(90km), 岩ヶ崎(92km)がやや近い(築館舘下92km). 従って,築館地点で推定される平均的な震度はおおまか に5.2~5.6の間にあるのではないかと考えられる.



3. 築館周辺の震度計測地点及び築館舘下地点における常時微動の測定

3.1 築館周辺の震度計測地点における常時微動の測定

K-NET 築館と築館舘下地点で推定する波形の振幅等の信頼性を考慮するにあたり, 築館周辺の本震の 計測震度情報とのおおよその比較も必要であると考える.しかし,比較する計測震度は同じ地域の中で も地盤条件の違いから大きく異なって計測されることがあるため,震度情報の値を利用する際は注意が 必要である.そこで,計測震度が明らかになっている旧町役場の表層地盤構造がよく分からないことか ら,地盤の周期特性を調べるために単点微動の測定を行った. 築館地点と築館周辺の計測震度を比較す る上で,地盤の H/V スペクトルのピーク周期がほぼ同じであれば,それぞれ同じような地盤条件である と推定でき,築館地点において合成する波形の計測震度が,定性的ではあるが近接する震度計測地点と 照合できる可能性があるという観点で実施したものである.

微動の測定は東京測振社製の Moving Coil 型地震計 SE21, SE22 (0.02~5 秒の感度を有する) と, 24bit のデータロガーSAMTAC-TSR026 を用い, サンプリング間隔 0.01 秒で測定時間 15 分間とした. 15 分 間の測定結果から 16,384 点をそれぞれ 50%オーバーラップしてサンプリングして振幅スペクトルを求 め, 0.05Hz の Parzen Window を施してスムージングを行った. それぞれの水平成分から 2 乗和平均を 求め, UD 成分で除して H/V スペクトルを求めた. H/V スペクトルは地震計の感度より, 周期 5 秒以 上については計測精度が低いものとして判断している.

微動の H/V スペクトルは物理的にはレイリー波の水平・鉛直スペクトル比, すなわち楕円率(扁平率)に相当するものとして解釈され多く活用されている. 若松・安井¹⁴⁾によれば, 微動の H/V スペクトルに強く認められるピークは, ある程度のコントラストを有する境界から上位層の S 波増幅特性の 1 次におよそ調和的であると報告している. 従って, 短周期に卓越周期が顕著に表れる場合, 表層付近で増幅するある境界からの1 次に相当すると考えられる.

微動の測定は、旧町役場の栗駒町岩ヶ崎、高清水町及び K-NET 築館において行った.各地点の測定 結果から計算した微動の H/V スペクトルを図 3 に示す. K-NET 築館の地盤構造はインターネットで公 開され、表層 1m が Vs=100m/s, 4m まで Vs=240m/s,それ以深は Vs=550m/s と固い地盤となっている.



(c)

図3 K-NET 築館と築館周辺の震度計測地点における微動の H/V スペクトル (a) K-NET 築館 (レイリー波の理論曲線を加筆),(b) 栗駒町岩ヶ崎,(c) 高清水町(町名は旧町役場表示)

PS 検層結果と深い地盤構造を併せて K-NET 築館地点のレイリー波基本モードの理論 H/V スペクト ルを計算し図 3(a)に示した.理論カーブは微動の 0.1~0.3 秒付近を除き,0.07 秒や 1,3 秒付近のピー ク周期を概ねよく説明できている. PS 検層結果と同様,微動の結果も固い地層を反映した周期特性を 示していると考えられる.周期 0.1~0.3 秒は理論に乗らないピークであるが,おそらくラブ波かレイ リー波高次モードの影響ではないかと考えられる¹⁵⁾.なお,1 秒以上の周期については,岩ヶ崎や高 清水町の結果からは明瞭なピークは表れていない.

レイリー波の理論計算に使用した深い地盤構造について, 築館舘下の表層を含む S 波速度構造とし て図 4 に示した. 深い地盤構造は筆者らが過去に実施した微動のアレー観測から求めたものである. 旧築館町下宮野桜町付近(図 2 参照)を中心として, 半径 2km, 0.8km, 0.3km の 3 アレー(10 点同時 測定)を実施して位相速度を計算し(図 5 参照),その後の逆解析により求めたものである. 深い地盤 構造を設定したのは,地表から地震基盤までの S 波速度構造を用いて理論的に計算したレイリー波の H/V スペクトルは, 微動 H/V スペクトルのピーク周期をほぼ説明できるとした佐藤ら¹⁶⁾の研究になら い,1 秒以下の短周期側のスペクトルも深部地盤の高次の影響を受けることを考慮したからである.

岩ヶ崎,高清水町の2地点のH/Vスペクトルは,それぞれ0.1~0.3 秒付近にピーク周期が見られ概 ね似かよったスペクトル形状を示しているが,K-NET 築館に見られる短周期側のピーク(0.07秒)は 認められない.従って,2地点の表層地盤は固い岩盤が浅く出現するK-NET 築館とはやや異なる地盤 ではないかと想定される.



3.2 築館舘下地点における常時微動の測定

地すべりの発生した築館舘下地点でも常時微動の測定を行った.なお、測定日は2005年8月である ことから、地すべりが発生した時点から約2年経過しており、現場では既に対策工として B.No5 付近 において集水井が設置されている.文献 1)より引用加筆して地すべり地点の平面図、断面図を図6に 示した.微動の測定は同図(a)に示す2箇所において行った.地すべりが発生した後の周辺地形は断面 図(図6(b))に示すように、B-No.5より下流側では盛土が既に大部分無くなっていたことから、微動 測定 No.1、No.2地点は火山灰質土の盛土が未だ堆積している地点を選定した.なお、上流側は平坦地 となっているが、図6の断面図より火山灰質盛土の層厚が薄くなっていると考えられる.

地すべりが発生した築館舘下の代表地盤として設定した No.5 地点の,表層から深い地盤構造(図4参照)を用いてレイリー波基本モードの理論 H/V スペクトルを計算し,微動 No.1,2 の H/V スペクトル に重ね書きして示した(図7参照).築館舘下地点は,地すべり発生後の調査としてボーリングや PS 検層(B.No.5, B.No.8; 図6(a)参照)が実施され,文献1)にその詳細がまとめられている.同文献から

表層に火山灰質土の盛土が分布することから No.5 地点を代表地盤と設定したが,水位より上に位置する 4m の Vs, Vp が求められていなかった.そこで,地すべり前の地盤は流下せずに残った B.No.5 地 点の盛土と同等もしくはより軟弱な地層が分布している可能性を考慮し,表層盛土の GL-4m 以浅をそれより以深の Vs (160m/s)を参考に Vs=100m/s と設定し, Vp はポアソン比 0.3 と仮定して表層地盤の 定数とした.

微動を測定した地点は斜面で盛土層も一定層厚ではないことに対し,理論レイリー波の楕円率は水平 成層を仮定している.また B.No.5 地点下流側の盛土が少ないこともあり,微動 No.1 のピーク周期(0.15 ~0.3 秒)は理論 H/V スペクトルのピーク(0.37 秒)をうまく説明できていない.しかし,微動 No.2 は 周辺に盛土が少し残っており,周期 0.15~0.4 秒と幅があるがやや理論カーブに近い傾向を示している. なお,微動測定時は地震後の対策工等(集水井)の工事による影響も含めて地震時よりやや固くなり短 周期側にシフトしている可能性もある.

築館周辺と築館舘下との H/V スペクトルの特徴を総合すると、約1秒以下の短周期側では岩ヶ崎、高 清水町の H/V スペクトルは概ね 0.1~0.3 秒付近に存在し、K-NET 築館とは異なる特徴を示した.また、 岩ヶ崎、高清水町と築館舘下の微動測定 No.1,2 を周期 0.1~0.7 秒の間で比較すると、ピークは大まかに 同じ周期帯にあることが分かった.なお、理論レイリー波の楕円率は K-NET 築館に比べて短周期側(約 0.7 秒以下)が異なる傾向を示しているが、これは工学的基盤の深度に起因するものと考えられる.



図6 築館舘下地点における常時微動の測定位置と断面図(文献1)より引用,加筆)



図7 築館舘下地点の微動の H/V スペクトルとレイリー波の理論 H/V スペクトル (a) 舘下 No. 1, (b) 舘下 No. 2

4. 経験的グリーン関数法を用いた岩ヶ崎と K-NET 築館地点の波形再現

4.1 経験的グリーン関数法による岩ヶ崎の波形再現

2003 年三陸南地震は宮城県沖で発生した,震源深さ約 72km の逆断層型のスラブ内地震である.震源 メカニズムは防災科技研の F-net で解析され,経験的グリーン関数法を用いた強震動シミュレーション が浅野ほか¹⁷⁾により報告されている.本震と経験的グリーン関数として用いた余震の位置及び各観測点 は既に図 1,2 に示した.本震と経験的グリーン関数として用いた余震のメカニズムを表1 に示した.浅 野らのモデルは,図8 に示したように本震の震源メカニズムを3 種類の Asperity (A,B,C) を同じ余震① によって表現しているが,K-NET,KiK-netのそれぞれの観測波形を良く再現している.

本論文では、Asperity の震源パラメータなど浅野らの文献と同じ定数と手法を用い、同文献に記載されている KiK-net の MYGH11(河北)地点の基盤波形を概ね良く再現できることを確認した(図9参照). なお、浅野らの河北の再現波形は速度で紹介されているので同波形のみの記載とした.

本震や余震が記録されている岩ヶ崎は築館地点と同じような震源距離に位置することから,浅野らが 比較を行っていない岩ヶ崎の観測波をうまく再現することで,K-NET 築館の波形再現の精度を高めるこ とができると考え,同地点の余震記録を使用して波形合成を行った.

岩ヶ崎では浅野らが解析に用いた余震記録①が収録されていないため、余震②を用いて比較を行う. 図8で示した分割数は余震①を単独使用した場合であり、余震①とは異なるモーメントを有する余震② を使用する場合、分割数を求めるとAが4×4、Bが5×5、そしてCが7×7となる.

岩ヶ崎の観測波と合成波の加速度波形を図 10 に、速度波形を図 11 に示す.そして、減衰 5%の疑似 速度応答スペクトルを図 12 に示した.合成波形は加速度の振幅や EW 成分の位相を若干説明できてい ないが、それ以外は概ね良く再現できていると考えられる.図 12 より、合成波では 0.1~0.4 秒付近にピ ーク周期が見られるのに対し、観測波形のそれは周期 0.15~0.5 秒付近にピークが認められる.これは、 概ね地盤の非線形化が進んでいない余震の記録(例えば、余震②の NS, EW で 34, 39cm/s²)を用いて経 験的グリーン関数法により合成を行っていることから、合成波は地盤の線形時の挙動を反映しているも のと考えられる.観測波の方はピーク周期が少し長周期側にシフトしていることから、地盤の非線形化 が進んだことを反映する記録ではないかと考えられる.さらに、合成波は微動の H/V スペクトル(前述 図 3(b)参照)のピーク周期(0.1~0.3 秒)と似たような傾向を示しており、両者が線形レベルの地盤挙 動を反映した波動であることで、ピーク周期が概ね一致した傾向になっているのではないかと考えられ る.本震観測波の計測震度は 5.5(5.54)、合成波のそれは 5.6(5.56)とほぼ同じ値になった(後述表 4 参照).

| 本震/余震 | Origin Time | 緯度 | 経度 | Mjma | 地震モーメント Mo(Nm) | 走向 | 傾斜角 | すべり角 |
|-----------|--------------------|------------|-------------|------|-----------------------|--------|-----------------------|------|
| 本震 | 2003/5/26 18:24:33 | 38°49.08'N | 141°39.25'E | 7.1 | 4.39×10 ¹⁹ | N190°E | 上面(9km) 90° /下面69° | 97° |
| E.G.F.余震① | 2003/5/27 0:44:18 | 38°56.86'N | 141°39.92'E | 5.0 | 1.43×10 ¹⁶ | N207°E | 66° | 78° |
| E.G.F.余震② | 2003/5/26 22:34:18 | 38°53.09'N | 141°36.04'E | 4.9 | 8.21×10 ¹⁵ | N209°E | 71° | 87° |

表1 本震と経験的グリーン関数として用いた余震の震源情報



図8 波形合成に使用した 2003 年三陸南地震の震源モデル(浅野ほか¹⁴⁾より引用,一部加筆)



図9 KiK-net 河北(MYGH11)の本震基盤波形の観測波と合成波の比較







図 11 旧栗駒町岩ヶ崎の震度計の本震観測波と合成波(速度)



4.2 経験的グリーン関数法による K-NET 築館地点の波形再現

余震①と余震②は両方ともK-NET築館地点で観測されている.従って,図8に示したAsperityのうち, 余震①②をそれぞれの Asperity A,B,C の種地震として使用することができる. すなわち, 浅野らが岩盤 サイトの波形再現に使用した余震①と、築館地点と震源距離や方向が概ね近い岩ヶ崎の本震波形再現に 使用した余震②の2つの余震を使用することで、1種類の種地震による合成誤差を解消し精度の高い合 成波形が作成可能であると考えた.







図 14 K-NET 築館地点の地表合成波形の疑似速度応答スペクトル(h=0.05)

いくつかの組合せのなかから A,B を余震②, C を余震①とした場合, 岩ヶ崎と同じような位相や振幅 を最もよく表現できているのが確認された. なお, 波形合成にはそれぞれ, KiK-net 河北と岩ヶ崎のシ ミュレーションで用いた定数を参考に実施した.

余震①②を経験的グリーン関数として用い, K-NET 築館地点における波形合成を行った.水平成分の 加速度時刻歴及び速度時刻歴を図 13 に示すとともに,減衰 5%の疑似速度応答スペクトルを図 14 に示 した. なお,図 13 に示した波形は水平成分のみであるが,計測震度の計算のために UD 成分を含めた 3 成分を求めている.その結果,3 成分の波形から求められる計測震度は 5.4 と計算された.

5. 築館舘下地点の波形再現と室内試験結果に基づく有効応力減少について

5.1 波形再現手法及び比較する既往要素試験の概要

本章では、1次元地盤の地震応答解析(等価線形)を行い築館舘下の地表付近の波形を再現する(5.2 節)ほか、その応答解析によって得られたひずみ時刻歴により求められる対象土の損失エネルギーと既 往要素試験^{5,6}の損失エネルギーの比較により不飽和土の液状化の可能性を検討する(5.3節).さらに求 められた合成波や応答解析結果の計測震度や築館周辺の本震時の計測震度をまとめて示す(5.4節).

この節では,解析と比較を行った火山灰質砂質土の特徴や要素試験の結果などについて基本的な説明 を行う.表2に火山灰質不飽和土に関する文献の試験条件を示した.

築館舘下地点から現地で採取した不飽和火山灰質砂質土は、図15に示すような粒径加積曲線を描き、 豊浦砂などと異なって比較的細粒分の含有が多い粒度分布の良い特性を示す.不撹乱土の物理試験結果 によると、飽和度は概ね *Sr*=50~90%を示し表面的にはサクションを伴っていることから自立している が、乾燥密度は概ね *od*=1.1 g/cm³と小さい(例えば、Uzuoka *et al*¹⁰). なお、飽和度毎の定ひずみ繰返 しせん断試験結果は引用文献 5),6)に記されているのでここでは省略する.

5.3 節で計算する累積損失エネルギーは文献 18)に詳細に記されているが、ここで簡単な説明を行う. 定ひずみ繰返しせん断試験結果が、せん断応カーせん断ひずみの関係に整理されているとすると、繰返 し載荷試験結果はほぼ原点を中心にループを描く.その描く曲線の1サイクル間に費やされた損失エネ ルギーはループで囲まれた面積になり、ある時刻までに地盤に蓄積された累積損失エネルギーはその時 間までに描いたループの面積の和に相当する.ひずみが小さい間は応カーひずみ関係はほぼ線形の直線 ループを描くが、ひずみが少し大きくなると履歴ループは次第に大きく膨らんでいく.さらにひずみが 増加すると履歴ループは概ね偏平になり、この場合ループの損失エネルギーはほぼ0に近い値となる. 靭性のある土では履歴ループが常に存在するので,損失エネルギーは一定の傾きで増加する.しかし液 状化するような土の場合,土が蓄積できる塑性ひずみエネルギーは上限値を持つ(図 16 参照).

また,建築物に対する地震入力エネルギーの検討¹⁹によれば,入力エネルギーは同じ地震動のもとで は,建物の復元力特性に鈍感であることが知られており,建築物と同様地盤に入力する地震エネルギー は地盤の履歴変形特性に鈍感であるのではないかと風間らは指摘している²⁰⁾.従って,地震応答解析で 求めた応力-ひずみ関係から累積損失エネルギーを計算する際,より詳細な有効応力解析まで考慮する までもなく,等価線形で求められる累積損失エネルギーで実験結果と比較できると考えた.なお,正規 化累積損失エネルギーは異なる条件の比較のために初期拘束圧で除したもので表わされている.



表2不飽和火山灰質土の定数と既往要素試験の条件

試験結果より、文献 20)より引用抜粋)

5.2 築館舘下地すべり地点の波形再現

4.2 で求めた K-NET 築館の波形は地盤の非線形が進んでいない微小地震波形を用いて合成しているの で線形レベルのものである. K-NET 築館の PS 検層結果を用いて地表から工学的基盤に線形で引き戻し (deconvolution) して波形を求めた後,さらに同波形を舘下地点の工学的基盤に入力し,非線形性を考 慮した1次元の応答解析により築館舘下の地すべり面直下の波形を求める.

K-NET 築館の Vs, Vp を用いて合成波を線形で引き戻し,解放工学的基盤(Vs=550m/s)の3成分波形 を求めた.解析ツールは DYNEQ²¹⁾を用い,周波数依存の散乱減衰を考慮した解析を行った.また,上 下動は通常 P 波が初動部の数秒に表れ主要動は Sv 波が占めることが多いが,ここでは計測震度の計算 のみ使用することから Vp を用いた応答解析により簡易的に評価した.

K-NET 築館の解放工学的基盤の加速度・速度時刻歴を図 17 に,減衰 5%の疑似速度応答スペクトルを 図 18 に示した. なお,同図には建設省告示(建告平第 12 号)に基づく解放工学的基盤の応答スペクト ル(極めて稀に発生する地震動)を参考までに併せてプロットした.加速度はほぼ告示と同程度かやや 上回っているが,速度は周期0.1~1.0秒の間で約半分程度のオーダーとなっている.

築館舘下における地震応答解析モデル(表3参照)は、文献1)よりB.No5とB.No.8のPS検層結果のVsを参考に設定した.すなわち、B.No.5地点の最下層の17,18層(Vs=480m/s)は、実際は380~480m/sとVs400m/s以下の部分もある更新世細粒凝灰岩であることから、B.No8地点で確認された第三紀鮮新世の砂岩・凝灰岩(小野田層上部:ss/ft層)のVs=750m/sが工学基盤に相応しいと判断し、B.No.5地点の最下層に付加して舘下地点の入力基盤とした.地盤の非線形性を考慮した解析は、引き戻し作業と同様DYNEQを用いた.DYNEQはマニュアル²¹⁾や論文²²⁾にもあるように周波数毎の有効ひずみを考慮する等価線形手法が選択できるが、今回各層の有効ひずみの計算周波数上限を10Hzと設定した.



図 18 応答解析で求めた K-NET 築館地点の解放工学的基盤の疑似速度応答スペクトル(h=0.05)

動的変形特性は、表層の火山灰質盛土のデータがないので、多くの資料から整理した文献23)から平 均的な砂質土の特性を、粘性土は同文献の平均的な粘性土の特性を引用して用いた(図19参照).

築館舘下における地すべり地点を想定した地盤の応答解析は B.No.5 の調査結果を参考にモデル化しているが、B.No5 地点のすぐ下流の表層盛土が強い震動で液状化状態になり流下したと考えると、全応力解析により地表の波形を算出すると加速度等を過大評価する恐れがある.ここでは、地すべりした地点のモデルを 3.2 で述べたように表層 4m (*Vs*100m/s) を地すべり層とし、全応力解析で評価できる境界(GL-4m)位置における波形を求め、参考までに地表波形の大まかなオーダーを知るために加速度最大値と計測震度のみ算出することにした.GL-4mの位置における加速度と速度の時刻歴を図 20 に示すとともに、疑似速度応答スペクトルを図 21 に示した.なお、この波形から求めた計測震度は 5.4 となり、参考までに地表の計測震度は 5.7 であった(加速度最大値は表 4 参照).

| | | 1 | | | | | | | | r |
|-------------|-------|---------------------|------------------|----------|-----------|-------------------|--------|-------|----------|------------|
| 層 番号 地層名 | | | 涩 宦 | 屋亘 | S波速度 | D油油庫 | 湿潤臿量 | 線形解析 | | 等価線形 解析 |
| | 土質名 | (m) | /百/子 (m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | $\rho t (g/cm^3)$ | 初期減衰定数 | | G/Go,h∼γ | |
| | | | | | | | | hs | h p | 曲線 |
| 1 | | - 1 2-1 | $0.0 \sim 1.0$ | 1.0 | 100 | 300 | 1.78 | 0.075 | 0.025 | |
| 2 | п | 盛土 | $1.0 \sim 2.0$ | 1.0 | | | | | | 1 |
| 3 | В | (八山八員 砂質十) | $2.0 \sim 3.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 4 | | 砂貨工) | $3.0 \sim 4.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 5 | | | $4.0 \sim 5.0$ | 1.0 | 160 | 1180 | 1.78 | 0.047 | 0.006 | Ð |
| 6 | | 武士 | $5.0 \sim 6.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 7 | В | 盛工 (火山灰質 砂質土) | $6.0 \sim 7.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 8 | | | $7.0 \sim 8.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 9 | | | $8.0 \sim 9.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 10 | | | $9.0 \sim 10.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 11 | Sil | 右機質シルト | $10.0 \sim 11.0$ | 1.0 | 160 | 1310 | 1.78 | 0.047 | 0.006 | Ø |
| 12 | 511 | 伯成員シルド | $11.0 \sim 12.0$ | 1.0 | | | | | | 2 |
| 13 | | | $12.0 \sim 13.0$ | 1.0 | 380 | 1810 | 1.78 | 0.020 | 0.004 | 2 |
| 14 | ft | 細粒腐匹岩 | $13.0 \sim 14.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 15 | It | 和拉姆的石 | $14.0 \sim 15.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 16 | | | $15.0 \sim 16.0$ | 1.0 | | | | | | |
| 17 | ft | 細粒燈匠岩 | $16.0 \sim 18.5$ | 2.5 | 480 | 1810 | 1.90 | 0.016 | 0.004 | 須 取 |
| 18 | IU | THE BENCH | $18.5 \sim 21.0$ | 2.5 | 100 | | | | 0.001 | ハットハン |
| 19 | ss/ft | 砂岩・凝灰岩 | $21.0~\sim~-$ | _ | 750 | 2130 | 2.00 | 0.010 | 0.004 | 基盤 |

表3 築館舘下地点での線形・等価線形解析に用いた地盤定数

注)初期減衰定数,GL-4m以浅の定数以外は文献1)を引用.G/Go,h~γ曲線記号は図19の①,②に対応.





図 21 等価線形により求めた築館舘下(GL-4m)の波形の疑似速度応答スペクトル(h=0.05)

5.3 要素試験と応答解析結果からの地盤の有効応力減少

5.2 節で示した応答解析の結果から、飽和していない GL-4m 以浅の盛土層の第3層(2.5m)における 地盤の累積損失エネルギーを算定した.実際の累積損傷エネルギーは、簡易的にせん断ひずみの時刻歴 と収束した等価剛性、減衰を用いて履歴ループ面積を換算して算出している.その後、上載圧で除し正 規化累積損失エネルギーを計算しており、NS 成分で 0.020, EW 成分で 0.035 と求められた.図 22 の応 カーひずみ関係は DYNEQ²¹⁾で算出した複素剛性部分を考慮した第3層の履歴曲線であり、参考までに 示した.ループ面積の和は EW 成分の方が明らかに大きいことが分かる.次に得られた値に対し風間ら



図 22 応答解析結果から算出した第3層(GL-2.5m)の応カーひずみ関係(複素剛性を考慮)

の手法¹⁸⁾を用いて室内試験²⁴⁾における正規化累積損失エネルギーと対比し,地盤内の有効応力減少比を 算定し同図に併記した(図 23 参照).さらに,解析より得られた有効応力減少比と土の飽和度の関係を 図 24 に示すが,EW 成分の波形で飽和度約 80%以上が有効応力減少比=1 に近い値を示しており,地盤 が不飽和状態であっても液状化のような著しくせん断抵抗が低い状態になることを示唆している.

なお、現場で採取した不撹乱試料の乾燥密度はおおよそ $\rho_{a}=1.1 \text{ g/cm}^3$ と言われているが、要素試験に 使用している供試体の乾燥密度は $\rho_{a}=1.3 \text{ g/cm}^3$ である.これは、風間らの試験結果⁶によると、三軸セ ルに供試体を設置しサクションを用いて飽和度を調整しながら圧密させ、できるだけ乾燥密度 1.1 g/cm³ を目指して行っても、なかなか試料の自立が困難なため平均的に 1.3 g/cm³(1.26~1.32g/cm³)になり現 実的にはやや固めの試料になっている. 第3層のひずみ波形を用いて試算した累積損失エネルギーの結 果からは、飽和度 78~79%の NS 成分で有効応力減少比が約 0.8 になっているが、飽和度 62%の試料で は有効応力減少比は 0.4 程度になっている.

実際の現場の土質はさらに密度が小さいことから、同じ波形・エネルギーでは、実際の有効応力はさらに減少すると考えられる.従って、再現した築館舘下地点の波形が現実に近いものであると仮定すれば、現場の飽和度に近い土はほぼ液状化に近い有効応力低下が生じていたのではないかと推察される.

また, 5.2 節で示した波形と要素試験の結果を比較すると,加速度は 400~500cm/s² 程度,速度は 20 ~30cm/s 程度で有効応力が減少し,不飽和土でも液状化に至ることを示している.しかし,要素試験の 試料の密度が大きいことから,この値より小さな地震動レベルでも液状化に達した可能性もある.



図 23 室内試験による崩落土の正規化累積損失エネルギーと有効応力減少比との関係



図 24 累積損失エネルギーに基づく飽和度と有効応力減少比との関係

5.4 合成波と築館周辺の計測震度

本節では、今まで示した岩ヶ崎、K-NET 築館や築館舘下の合成波の計測震度と築館周辺で計測され ている本震の震度をまとめ、最大加速度と計測震度を併せて表4に示した.

K-NET 築館(地表)の合成波の計測震度は 5.4 であり,築館舘下の地すべり地点の再現波形による 計測震度は地表下 4m で 5.4 と求められ,地表は参考までに 5.7 であった. なお,地表の計測震度 5.7 は全応力解析による応答解析結果であるので,過大評価されている可能性もある.

既に2章で述べたように,ほぼ同様な震源距離と方向に位置する周辺の計測震度5.2~5.6と比較し, 築館地点の計測震度は概ね似たような値となった.なお,計測震度の比較や数値の利用にあたっては 表層地盤構造の情報をもっと正確に把握する必要であるので,今後の課題としたい.

| 本震波形の種 | 観測/合成 | 観測波形と解析 | 観測地点 | きょう | 最大加速度(cm/s ²) | | | |
|-------------|--------------|------------|-----------------------|---------|---------------------------|---|-------|-------|
| (観測波/解析 | r) | 位置 | に使用した波形 | (旧地名) | 計測晨度 | NS | EW | UD |
| | 地表 | 本震・余震②あり | 栗駒町岩ヶ崎 | 5.5 | 439.9 | 350.0 | 193.8 | |
| | | 無し | 金成町沢辺 | 5.5 | 280.7 | 358.8 | 263.3 | |
| | | 11 | 鶯沢町南郷 | 5.0 | 323.1 | 270.3 | 135.6 | |
| 観測波 | | 11 | 志波姫町沼崎 | 5.4 | 741.8 | 414.7 | 458.7 | |
| | | 11 | 一迫町真坂 | 5.3 | 422.5 | 362.7 | 164.8 | |
| | | 11 | 高清水町中町 | 5.6 | 329.5 | 458.6 | 240.6 | |
| | | 11 | 瀬峰町藤沢 | 5.2 | 463.6 | 305.6 | 150.3 | |
| 経験的グリーン関数法に | 線形 | 地表 | 余震②使用 | 栗駒町岩ヶ崎 | 5.6 | 621.4 | 850.7 | 233.9 |
| よる波形合成解析 | 線形 | 地表 | 余震①②使用 | K-NET築館 | 5.4 | 最大加速度(c) NS EW 439.9 350.0 280.7 358.8 323.1 270.3 741.8 414.7 422.5 362.7 329.5 458.6 463.6 305.6 621.4 850.7 386.0 599.5 321.6 454.6 399.6 511.3 484.5 647.4 | 188.0 | |
| | 線形 | 工学的基盤 | K-NET築館地点の 地表波形 | K-NET築館 | 5.3 | 321.6 | 454.6 | 181.6 |
| 地盤応答解析 | 等価線形 | GL-4m | K-NET築館地点の 工学的基盤波形 | 築館町舘下 | 5.4 | 399.6 | 511.3 | 194.0 |
| | 等価線形 (参考) | 地表 (参考) | K-NET築館地点の 工学的基盤波形 | 築館町舘下 | 5.7 | 484.5 | 647.4 | 307.7 |

表4 本震の計測震度と解析から求められた震度

6. まとめ及び考察

2003 年三陸南地震時に発生した際,築館舘下の地すべり地点で火山灰質砂質土が流動性崩壊を伴って流下した現象に対して,本震の波形再現や室内実験結果との比較から以下のことが判明した.

- 1) 築館舘下と同じ旧築館町内にある強震観測網の K-NET 築館の本震波形が採れていなかったが, 余震や周辺の強震記録を参考にして K-NET 築館の本震波形をうまく再現することができた.
- 2) K-NET 築館の波形再現結果から,解放工学的基盤の加速度(水平)はおよそ 320~450cm/s²であ り,計測震度は5.3 であった.この強震動のレベルは,建告平第12号の告示波(極めて稀)の応 答スペクトルと比較すると加速度はほぼ同等,速度は約半分程度のオーダーを示した.
- 3) K-NET 築館の解放工学基盤波形を用いて, 築館舘下地点の1次元応答解析により地すべり面直下の波形を推定した.その時の最大加速度は400~500cm/s²,最大速度は20~30cm/s程度で,計測 震度 5.4 であった.さらに崩落した盛土位置とされる地層のひずみ時刻歴より累積損失エネルギーを算定し不飽和土の要素試験結果と比較した結果,有効応力が大きく減少し液状化によって流下した現象を説明できる可能性が高いことが分かった.
- 4) 以上の結果,不飽和土の火山灰質砂質土が地震時に液状化し斜面を流下した現象について,おお まかな強震レベルとそのメカニズムに迫ることができた.しかし,要素試験の乾燥密度が現場の 不撹乱土よりやや小さいことから,ここで推定した波形よりも小さな強震動のレベルでも液状化 状態になり流下した可能性もある.

本論文において実施した応答解析は、築館舘下地点の斜面を1次元の全応力解析モデルとしたこと、 その際盛土部の Vs, Vp を推定したこと、さらに強震記録が収録されている岩ヶ崎をはじめ、計測震度 が明らかになっている旧町役場の表層地盤構造が分かっていないことなど多くの課題が残っている.ま た、三軸圧縮試験機による要素試験が現場の乾燥密度を再現できなかったことも含め、以上の改良点を 踏まえて、さらに精度の高い強震記録の再現と流動化メカニズムに迫りたいと考える.

今後は、さらにこのような不飽和火山灰質土の盛土が分布するような地域で、強震記録が蓄積されれば、その強震レベルや地すべりの発生メカニズムが詳細に解明されるとともに、ここで報告した記録との比較・検証も可能ではないかと期待される.

謝辞

防災科研のWebサイトで公開されておりますK-NET,KiK-netのデータと気象庁の震度・波形データを使用させて頂きました.匿名査読者には多くの有益な意見,助言を頂き論文が大きく改善されました. ここに、関係諸氏に感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 2003 年三陸南地震および宮城県北部地震災害調査委員会: 2003 年三陸南地震・宮城県北部地震災害 調査報告書 CD-ROM, 地盤工学会, 2003.
- 2) 海野寿康・仙頭紀明・渦岡良介・風間基樹:火山灰質砂質土の自然斜面および盛土の地震時泥流状 崩壊事例について,東北地域災害科学研究,第41巻,自然災害研究協議会東北部会,2005年,pp.111-116.
- 3) 2003年十勝沖地震災害調査委員会: 2003年十勝沖地震災害調査報告書, 地盤工学会, 2004年, pp.36-44.
- 4) Fukuoka, H., Wang, G., Sassa, K., Wang, and F., Matsumoto. : Earthquake-induced rapid long- traveling flow phenomenon: May 2003 Tsukidate landslide in Japan, *Landslides*, 2,2004, pp.151-155.
- 5) Toshiyasu UNNO, Motoki KAZAMA, Noriaki SENTO, and Ryosuke UZUOKA: Cyclic shear behavior of unsaturated volcanic sandy soil under various suction conditions, The 4th International Conference on Unsaturated Soils, ASCE, 2006, pp.1133-1144.

- 6) 風間基樹・高村浩之・海野寿康・仙頭紀明・渦岡良介:不飽和火山灰質砂質土の流動化機構について、土木学会論文集 C, Vol.62, No.2, 2006 年, pp.546-561.
- 7) 社本康広・後藤茂:不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その1)-繰り返しせん断履歴効果を考慮した液状化抵抗の評価法-,第37回地盤工学研究発表会,2002年,pp.1985-1986.
- 8) 社本康広・後藤茂:不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その2)-繰り返しせん断履歴効果を考慮した液状化抵抗の評価法-,第37回地盤工学研究発表会,2002年,pp.1987-1988.
- 9) Tsukamoto Y., Ishihara, K. Nakazawa, H., Kamada, K. and Huang, Y. : Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 6, 2002, pp. 93-104.
- 10) Ryosuke UZUOKA, Noriaki SENTO, Motoki KAZAMA and Toshiyasu UNNO : Landslides during the earthquakes on May 26 and July 26, 2003 in Miyagi, *Soils and Foundations*, The Japanese Geotechnical Society, Vol.45, 2005, pp.149-164.
- 11) 福元俊一・海野寿康・仙頭紀明・渦岡良介・山田悦子: 2003年三陸南地震時の築館町地すべり地 周辺の地震動推定,第40回地盤工学研究発表会, 2005年, pp.2315-2316.
- 12) 福元俊一・海野寿康・仙頭紀明・渦岡良介:三陸南地震時(2003)時における築館地すべり地周 辺の地震動推定-K-NET 及び震度計情報を活用した推定-,日本地震工学会大会-2005 梗概集, 2005 年, pp.32-33.
- Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 1986, pp.151-156.
- 14) 若松邦夫・安井譲: 短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅度特性評価の可能性に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 471 号,1995, pp.61-70.
- 15) 時松孝次・新井洋:レイリー波とラブ波の振幅比が水平鉛直スペクトル比に与える影響,日本建築 学会構造系論文集,第511号,1998, pp.69-75.
- 16) 佐藤智美・川瀬博・松島信一: 微動とS波, P波, coda から求められる地盤特性の違いとその理論 的解釈, 地震2, 第51巻, 1998年, pp.291-318.
- 17) 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎: 2003 年 5 月 26 日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 地震 2, 57-2, 2004 年, pp.171-185.
- 18) 風間基樹・鈴木崇弘・柳澤栄司:地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への 適用,土木学会論文集, No.631, /Ⅲ-48, 1999年, pp.161-177.
- 19) 加藤勉・秋山宏:強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷,日本建築学会論文報告集, 第 235 号, 1975 年, pp.9-19.
- 20) Motoki Kazama, Akira Yamaguchi and Eiji Yanagisawa: Liquefaction resistance from a ductility viewpoint, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 6, 2000, pp. 47-60.
- 21) 吉田望・末富岩雄:等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム,佐藤工業㈱技術 研究所報, 1996 年
- 22) Nozomu Yoshida, Satoshi Kobayashi, Iwao Suetomi and Kinya Miura: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol22, 2002, pp.205-222.
- 23) 古山田耕司:土の非線形モデルが地盤の応答評価に与える影響,第32回地盤震動シンポジウム, 2005年, pp.97-104.
- 24) 海野寿康・高村浩之・仙頭紀明・渦岡良介・風間基樹:不飽和砂質土の繰返しせん断変形挙動,平成 16 年度土木学会東北支部技術研究発表会,仙台,2005年,pp.448-449.

(受理:2006年4月5日)

(掲載決定:2007年2月13日)

Estimation of Strong Ground Motions at Tsukidate Landslide Site during the 2003 Sanriku-Minami Earthquake —Realization of Ground Motion Waveforms using the data of Strong Motion Seismometers and Seismic Intensity and Its Fluidization Mechanism using Laboratory Testing—

FUKUMOTO Shun'ichi¹⁾, UNNO Toshiyasu²⁾, SENTO Noriaki³⁾, UZUOKA Ryosuke⁴⁾ and KAZAMA Motoki⁵⁾

1) Member, Manager, Engineering Quarter of Tokyo Soil Research Co., Ltd., Dr. Eng.

2) Member, Researcher, National Institute for Rural Eng., National Agric. and Food Research Org., Dr. Eng.

3) Member, Research Associate, Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

4) Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

5) Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Mudflow type failure with gentle slope occurred at Dateshita in Tsukidate town during the 2003 Sanriku-Minami earthquake in Japan. The fluid soil was consisted pyroclastic sediment material which classified as a volcanic sandy soil with pumice. This failure phenomenon was due to loose volcanic sandy soil material with fluidization type flow by the trigger of strong ground motion of the earthquake, against of its material unsaturated condition. Unfortunately, when the main shock occurred, strong ground motion record was failed to observe at Tsukidate K-NET station, the closest observatory to Dateshita landside site. Therefore, we conducted to estimate strong ground motion records and mudflow failure site, because of few study regarding the relationship between ground motion waveforms using empirical Green's function method using two after shocks comparing several seismic intensities surrounding the Tsukidate town. Therefore, we recognized both dissipation energy, one is computed by 1-D geotechnical response analysis and the other one is obtained by conducting laboratory testing, would be good relationship, then, we proposed new method for estimating liquefaction potential of unsaturated pyroclastic material. We finally realized mudflow type failure with gentle slope at Tukidate town is due to fluidization and liquefaction type soil collapse by the trigger of strong ground motion.

Key Words: landslide, unsaturated volcanic soil, strong ground motion, seismic intensity seismometer, strong motion seismometer, empirical Green's function method, fluidization