

ゼロクロス周期を用いた リアルタイム液状化判定手法の提案

川井 修¹・丸山 喜久²・山崎 文雄³

¹千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: 08TM0308@graduate.chiba-u.jp

²千葉大学大学院助教 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

³千葉大学大学院教授 工学研究科建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

本論文では液状化発生地点の早期把握のために、液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点の計112地点を選出し、加速度記録から算出するゼロクロス周期を用いた液状化判定手法を提案する。液状化地点の加速度記録において、水平方向の卓越周期は長周期化する傾向がある一方で、主要動時の上下方向の卓越周期はあまり変化しない傾向がある。この振動数特性を捉えるために、簡易で即時性が高いゼロクロス周期を利用して、周期の時刻歴変化を把握する。得られたゼロクロス周期の水平・上下方向に閾値を設定し液状化を判定するとともに、既往の手法と比較することで本手法の有効性を確認した。

Key Words : *detection of liquefaction, zero crossing period, seismic ground motion, surface wave, vertical component*

1. はじめに

2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震などの大きな地震が発生すると、地域の社会的・経済的な活動に影響するような重大な被害が発生する。ガス・水道管等の埋設管や港湾構造物などの都市インフラの被害は、液状化現象による地盤変状と関係している場合が多い。よって地震発生後、早期に液状化の発生地点を把握することは、地震防災上重要性が高い。

日本には、多数の強震計が設置されており、近年の地震における液状化発生地点の記録も得られている。液状化地点の記録において、水平方向の卓越周期は長くなる傾向があるが、その一方で、上下方向の卓越周期はあまり変化しないことが知られている。地盤におけるせん断波の伝達特性は土の粒子の大きさや形状に支配される構造弾性によって決まる。これに対して、疎密波の伝達特性は構造粒子および間隙水の体積弾性率によって決まるために、液状化によって地盤が軟化したときには、せん断波の伝達特性のみが変化しせん断波速度が小さくなるのに対し、疎密波の伝達特性はほとんど変化しない。その結果、水平方向加速度では、ある時刻を境にやや長周期が卓越するのに対し、その時刻の上下方向加速度には

周期特性の変化がさほど生じないものと考えられる¹⁾。水平方向の加速度記録の周期の変化は、非排水状態での間隙水圧上昇に起因する土の剛性低下によるものであると考えられる。専用の計器で間隙水圧を観測し液状化発生を特定することはコストがかかるが、すでに設置されている地震計で観測される加速度記録を用いた液状化発生の検知は、追加のコストがかからない利点がある。また、地震後すぐに多点で液状化の発生を特定できるものと期待される。

加速度記録を用いた液状化判定の方法は、過去に幾つかの方法が提案されている。鈴木ら²⁾や宮島ら³⁾は、加速度記録から、振幅、振動数やエネルギーパラメータを用いて液状化の発生を判定する方法を提案した。しかし、これらの方法は、主に水平方向の卓越周期の変化を対象としており、上下動の振動数特性について考慮していないため、表面波到来後の震動における長周期化の影響を区別することは難しい。Kostadinov and Yamazaki⁴⁾や清野ら⁵⁾は、水平方向の周期だけではなく上下方向の周期変化も併せて検討した。この上下方向の卓越周期を考慮することで、表面波の到来を液状化発生と誤認することが減ると予想される。

東京ガス(株)のリアルタイム地震防災システム

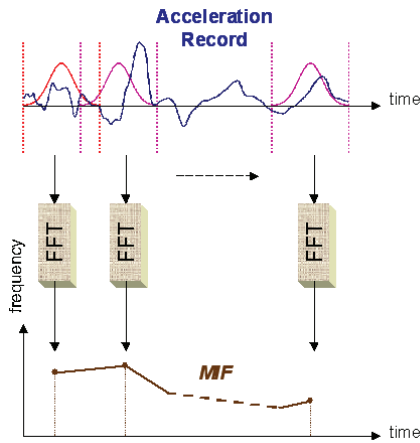


図-1 瞬間平均振動数の計算イメージ

SUPREME⁵⁾では、都市ガス供給エリア内に約4,000箇所配備したSIセンサーによる地震動モニタリングを実施し、その結果は地震直後の緊急対応体制の確立に役立てられている。SIセンサーには、地震防災対策の一環として、加速度記録より液状化発生の有無を判定する機能が搭載されている。これは、鈴木ら¹⁾の方法がベースとなっており、これまで上下動成分は液状化判定に使用されていない。

こうした既往の研究が行われた後、日本では地震計の数が増え、以前より液状化地点も含めて多数の地震記録が得られている。本研究では、近年得られたデータを追加して、液状化判定方法の精度の向上を目指す。加えて、液状化・非液状化地点の記録を含んだデータセットにもとづいて、東京ガス(株)のSUPREMEシステムにおいて、供給エリア内に配備されたSIセンサー内でのリアルタイム液状化判定に使用可能な簡易な方法を提案する。

2. 既往の研究

加速度記録から液状化を判定する研究は前述のように様々あるが、まずKostadinov and Yamazaki⁴⁾の手法を取り上げる。この判定法では、まず、水平2方向・上下方向の加速度記録のうち最初に40cm/s²を越える時刻から最後に40cm/s²を超える時刻までの間について、Hammingウィンドウを用いて平滑化されたフーリエスペクトルをデータ数2.56/dt (dtは時間増分)を一つの区間として求める。それぞれのフーリエスペクトルから、次式に表される瞬間平均振動数(MIF)を計算する。図-1のように、一区間(赤線または紫線)ずつMIFを求め、区間は0.1sずつ移動させる。

$$MIF(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f SP(t, f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} SP(t, f) df} \quad (1)$$

ここで、MIF(t)は瞬間平均振動数、SP(t, f)はHammingウィンドウで平滑化したフーリエスペクトル、fは振動数、tは時間である。

得られた瞬間平均振動数を用いて、最大速度(PGV)が10cm/s以上の場合に液状化の発生を判定する。判定基準は、MIF_H ≤ 2/3HzかつMIF_V ≥ 3Hzが0.1秒以上継続した場合には液状化、MIF_H ≤ 1HzかつMIF_V ≥ 3Hzが0.1秒以上継続した場合には液状化の疑い、いずれにも当てはまらない場合には非液状化とされている。ここで、添字Hは水平成分、Vは上下成分を表す。

東京ガス(株)のSIセンサーでは、SI値(水平8方向最大値)が20cm/s以上の地震動が観測された場合に液状化判定を行っている。SIセンサーでは、水平成分のゼロクロス周期が1.0秒以上(ただし、このときの加速度振幅が100cm/s²以上)、式(2)で表わされる等価変位²⁾Dが10cm以上の条件すべてを満たした場合に、液状化発生と判定される。

$$D \approx \frac{2SI^2}{A_{MAX}} \quad (2)$$

3. 本研究で使用する加速度波形データセット

本研究で使用するデータは、1998年以前の地震については、Kostadinov and Yamazaki⁴⁾で使用した液状化(LIQ)地点12箇所、液状化の可能性のある(SUS)地点5箇所、非液状化(NON)地点66箇所の計83地点のデータを使い、1999年以降の記録については、本研究で新たに追加した。追加データは、液状化地点2箇所、液状化の可能性のある地点7箇所、非液状化地点20箇所の計29地点であり、その一覧を表-1に示す。なお、非液状化地点の加速度記録に関しては、原則として各地震で最大加速度(PGA)が大きいものを選択している。

本研究でLIQ、SUSと判断した計9箇所の根拠を示す。2000年鳥取県西部地震の境港(LIQ)については、2000年鳥取県西部地震災害調査報告⁶⁾で、「地盤が第四紀の地質(沖積層や洪積層など)であり、ボーリングデータから砂でN値が10以下でもある。この周辺では、多くの液状化が確認されており、液状化の可能性が非常に高い」とされており、液状化地点と判断した。

表-1 本研究で追加した地震データ

地点	PGA (cm/s ²)			PGV ベクトル和	報告
	EW	NS	UD		
1999/09/21 台湾・集集地震					
石岡 (TCU068)	501.9	362.2	519.8	284.9	NON
南投 (TCU076)	380.5	420.4	312.7	91.5	NON
員林 (TCU110)	114.1	187.9	116.0	57.7	SUS
霧峰 (TCU065)	774.9	563.7	257.9	146.6	NON
日月潭 (TCU084)	989.8	423.1	311.9	130.7	NON
2000/10/06 鳥取県西部地震					
江府 (TTR007)	573.2	725.4	404.0	46.3	NON
米子 (TTR008)	383.6	314.4	307.7	54.4	SUS
境港	301.6	210.0	99.5	60.7	LIQ
2001/3/24 芸予地震					
呉 (HRS019)	425.3	311.9	203.1	24.7	NON
2003/09/26 十勝沖地震					
直別 (HKD086)	785.0	738.6	271.7	265.9	LIQ
大樹 (HKD098)	345.9	366.1	201.6	102.0	NON
豊頃 (TKCH07)	404.1	367.1	148.1	365.9	SUS
釧路町役場	324.9	480.4	219.0	63.9	SUS
2004/10/23 新潟県中越地震					
小千谷 (NIG019)	1307.9	1147.4	820.2	128.1	NON
長岡支所 (NIG028)	705.9	870.4	435.6	70.3	NON
川口町役場	1675.8	1141.9	869.6	150.7	NON
2007/03/25 能登半島地震					
穴水 (ISK005)	781.7	473.5	555.8	102.4	NON
富来 (ISK006)	849.2	717.5	462.2	60.5	NON
輪島 (ISK003)	396.0	519.0	141.5	44.2	NON
JMA 輪島	438.8	463.6	189.8	98.8	SUS
2007/07/16 新潟県中越沖地震					
柏崎 (NIG018)	513.6	667.0	369.0	128.3	SUS
刈羽村役場	464.9	374.1	400.7	155.6	SUS
柏崎 IC	490.6	388.7	343.0	123.2	NON
電所	437.4	347.2	590.3	126.6	NON
2008/6/14 岩手・宮城内陸地震					
一関西 (IWTH25)	747.9	1036.2	680.8	47.1	NON
東成瀬 (AKTH04)	255.5	173.1	138.4	15.6	NON
一関東 (IWTH26)	210.9	278.5	167.3	39.0	NON
築館 (MYG004)	678.3	739.9	224.3	49.4	NON
鳴子 (MYG005)	521.4	440.3	665.8	69.5	NON



図-2 刈羽村役場地震計位置の地震3日後の様子

2003年十勝沖地震のK-NET直別 (HKD086, LIQ) は、液状化の影響で地震計が傾いていた⁷⁾。2007年新潟県中越沖地震の刈羽村役場に関しては、地震発生後3日経過した著者らによる刈羽村役場の現地調査の写真 (図-2) より、役場敷地内の地震計が設置されている盛土に著しい変形が生じているが、地上に明確な水分が見られなかったためSUSとした。

1999年台湾・集集地震の員林 (TCU110, SUS) は、図-3にあるように、Tsosui川の厚い沖積層の上

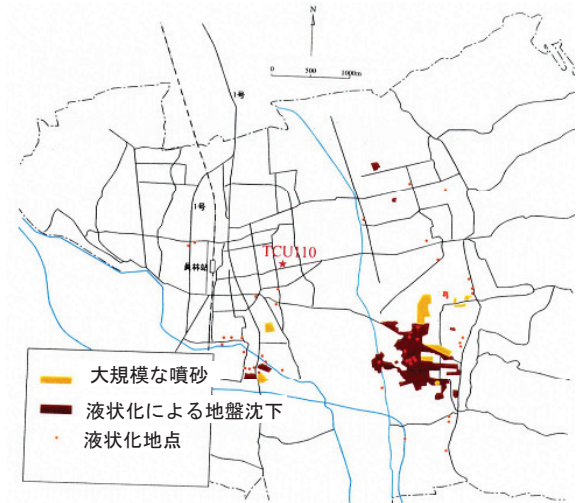


図-3 員林鎮における液状化地点⁸⁾



図-4 釧路町役場の被害写真¹³⁾

にある⁸⁾。基盤は東から西へ行くにつれて深くなり、深さ200m以上に達する。N値が2程度の非常に緩い砂層が見られ、地下水位は一般に地表から0.5～4.0mの深さである。員林の西部には砂層より厚い粘性土層があり、東に行くにつれてそれは薄くなっている。液状化する可能性がある砂層の上に厚い粘性土層がある地域では噴砂はほとんど見られず、大きな被害は粘性土層が薄いまたは全くないところで生じている。この粘土層が厚い地域では、その下の砂層の液状化によるものと考えられる地盤沈下や建物の傾斜が生じていること⁸⁾などから、TCU110では粘土層下5～10m程度の砂層が液状化したと考えることもでき、SUSと判断した⁸⁾。

2000年鳥取県西部地震のK-NET米子 (TTR008) では、ボーリングデータにおいて表層より5m以下にN値が小さい砂質土が存在する⁹⁾。K-NET米子地震計が設置されている公園の敷地内では噴砂の痕跡は見られなかったが、近くの米子駅で液状化の影響と思われる地盤沈下が生じていること¹⁰⁾、K-NET米子と米子駅は約600m離れているが、同じような地層が続いている¹¹⁾ことなどをふまえて、SUSと判断した。2003年十勝沖地震のKiK-net豊頃 (TKCH07) に関しては、周辺に多数のマンホールの浮き上がりや道路の陥没が報告されている¹²⁾。しかし、主に埋め戻し土の液状化と考えられ、地震計設置位置に噴砂などの明確な液状化の痕跡が確認さ

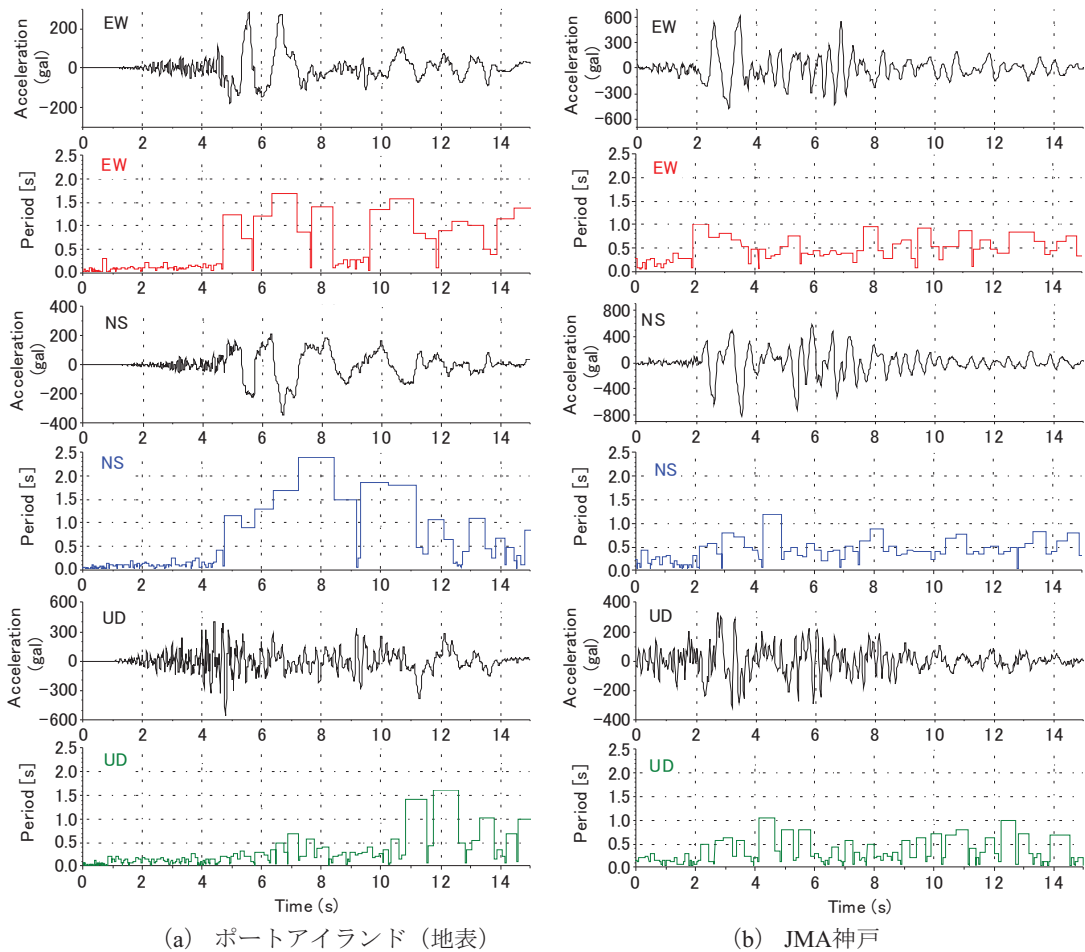


図-5 1995年兵庫県南部地震における液状化・非液状化地点の加速度記録とゼロクロス周期

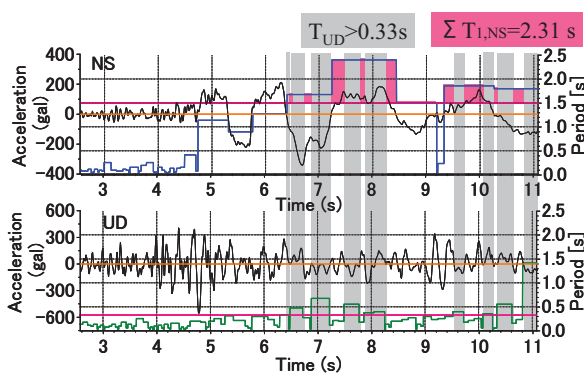


図-6 兵庫県南部地震ポートアイランド記録（地表面）でのゼロクロス周期の累積

れなかったのでSUSとした。2003年十勝沖地震の釧路町役場では、図-4のように、釧路町役場の建物周辺で地盤が沈下し、建物との間に隙間が生じているが¹³⁾、そこで確認された砂が噴砂かどうか不明なのでSUSとした。

2007年能登半島地震のJMA 輪島に関しては、深さ24m程度まで粘性土と砂質土が互層をなしており¹⁴⁾、地下の浅い部分は軟弱であると考えられる。さらにJMA輪島地震計が設置されている輪島地方合同

庁舎の付近で噴砂が確認されている¹⁵⁾ことをふまえてSUSと判断した。2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎（NIG018）に関しては、噴砂などの液状化の痕跡は確認されなかったが、サイクリックモビリティを示す波形が観測された¹⁶⁾。一方で、防災科学技術研究所¹⁷⁾は観測波形に現れた非線形性状は液状化などの影響ではなく、ある程度のエリアを代表する地震動特性であるとしていることをふまえて、SUSとすることにした。

4. ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法

液状化により水平方向の加速度記録が長周期化する様子を捉えるために、ゼロクロス周期による時刻歴の周期変動を考える。本研究では、地動加速度がゼロ線を通った時間幅を震動の半周期と定義し、その時間間隔を2倍することでゼロクロス周期を定義した。

図-5に、1995年兵庫県南部地震における液状化地点記録のポートアイランド（地表）と非液状化地点記録のJMA神戸の加速度波形とゼロクロスによる時刻歴の周期変化を示す。フーリエ変換などの周波数領域での計算を行わない本手法であるが、地動加速

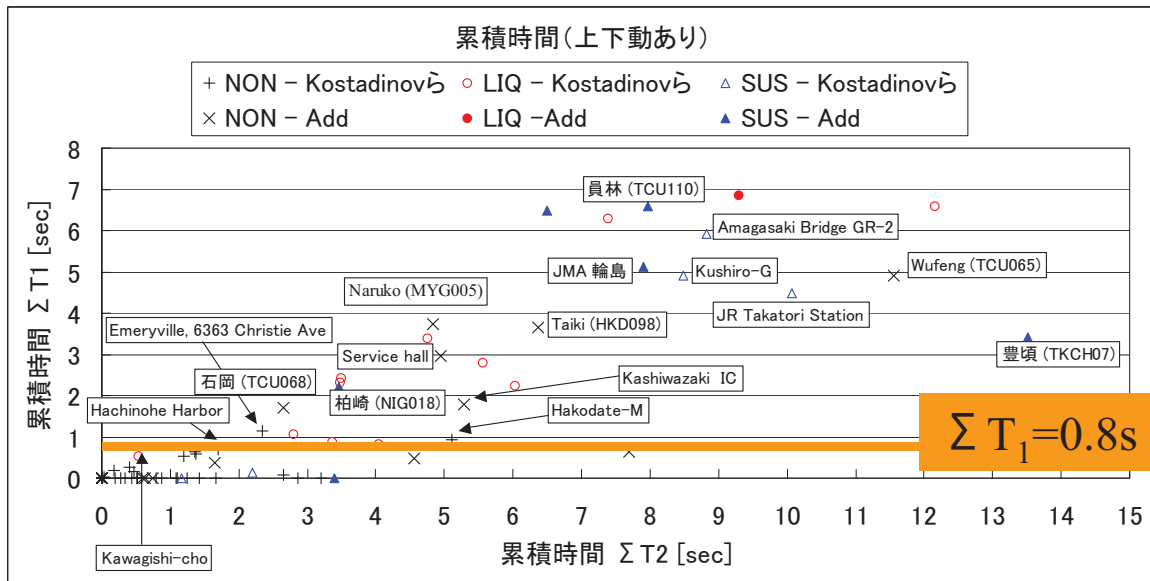


図-7 各地震記録の ΣT_1 , ΣT_2 の結果

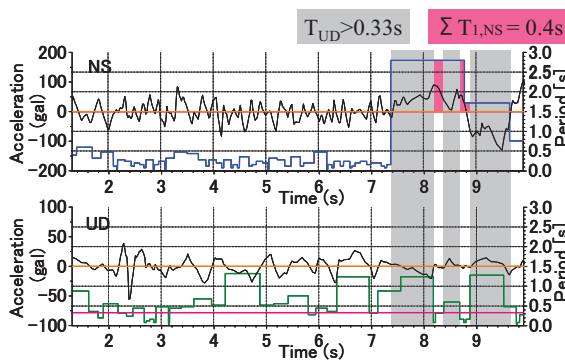


図-8 1964年新潟地震の川岸町記録でのゼロクロス周期の累積

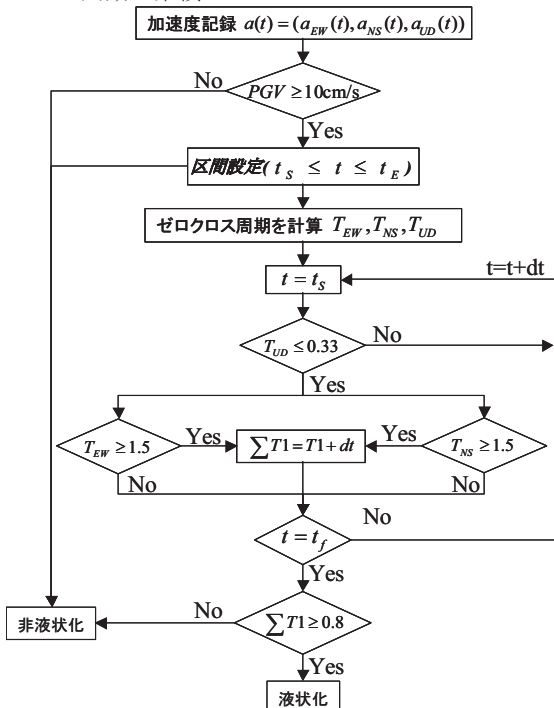


図-9 ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法のフロー

規模な噴砂を生じ、地中でも粘性土が非線形応答を示したポートアイランドでは、水平動の卓越周期が長周期化していることが分かる。

そこで、ゼロクロス周期を用いて、液状化発生の有無を判定する。液状化を判定するための特徴量は Kostadinov and Yamazaki⁴⁾が用いているものと等価なもの、すなわち水平方向に対してはゼロクロス周期1.5秒以上と1.0秒以上、上下方向に対しては周期0.33秒以下とした。継続時間を評価するために、水平・上下方向に対して条件を満たしている時間を累積加算していくこととした。上下方向の周期が0.33秒以下で水平方向の周期1.5秒を越えている累積時間を ΣT_1 とし、同様に周期1.0秒を超えている累積時間を ΣT_2 とした。なお、水平方向は2成分（東西、南北方向）あるので、両成分別々に累積時間を取りその和を ΣT_1 , ΣT_2 とする。また、ゼロクロス周期を計算する区間については、水平2方向の加速度記録において、どちらかの成分が最初に 40cm/s^2 を超える時刻を判定開始時刻 t_s 、最大振幅発現後に加速度振幅が 100cm/s^2 以下になってから5秒後を判定終了時刻 t_e とする。判定開始振幅は Kostadinov and Yamazaki⁴⁾と等しくし、判定区間が主要動時となるように判定終了振幅を設定した。

図-6に1995年兵庫県南部地震のポートアイランド記録（地表面、NS成分）を用いて、ゼロクロス周期の累積（ ΣT_1 ）の様子を示す。図中の赤線が水平方向の周期1.5秒、上下方向の周期0.33秒を示している。グレーの部分は、水平成分の周期は1.5秒以上であるが、上下成分の周期が0.33秒より長いため ΣT_1 として累積されない部分である。図中の赤色の部分が累積されて、ポートアイランド記録のNS成分では ΣT_1 が2.31秒となる。

図-7に各地震記録の ΣT_1 , ΣT_2 の結果を示す。液状化地点、非液状化地点の ΣT_1 , ΣT_2 の関係性や判定精度をふまえて、液状化判別のための累積時間の

度の周期変化が捉えられている。また、地表面に大

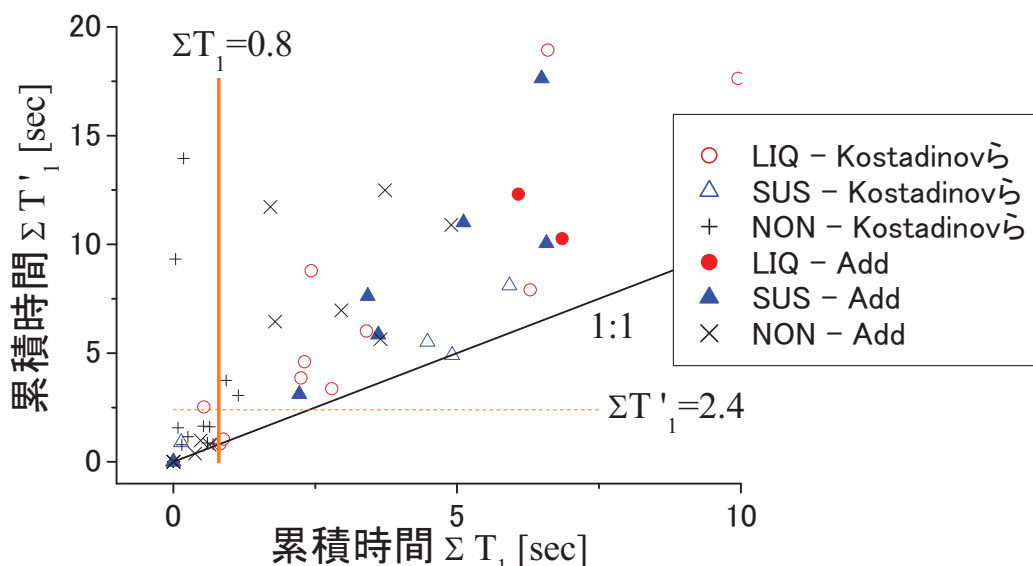


図-10 各地震記録の ΣT_1 と $\Sigma T'_1$ の比較

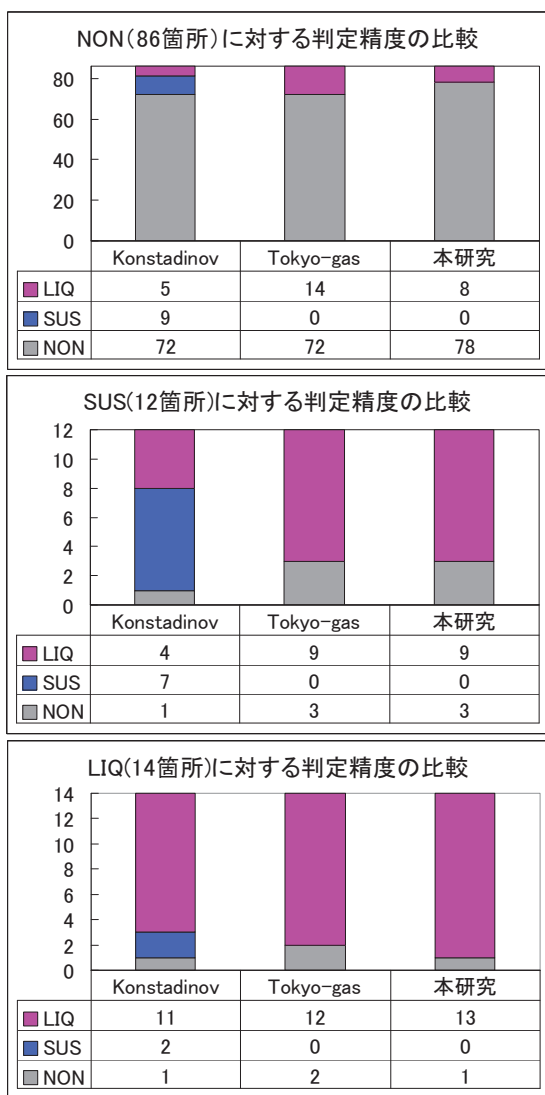


図-11 提案手法,Kostadinov and Yamazaki⁴⁾と東京ガスによる判定結果の比較

閾値を $\Sigma T_1=0.8s$ とする. このように閾値を定める

と, 液状化 (LIQ) 地点が1点境界線の下方にある. これは1964年新潟地震の川岸町での記録である. 図-8に川岸町記録のゼロクロス周期の累積の様子を示す. 水平成分のゼロクロス周期が1.5秒以上のときのほとんどの区間で, 上下成分も周期が0.33秒より長くなっていることが分かる. この地点は, 地震計が建物内に設置されており高振動数成分の震動が観測されにくいこと, 液状化の影響で地震計が設置されている建物が傾いていることなどが原因となり, 水平方向の加速度記録の長周期化と同時に上下方向の加速度記録も周期が比較的長いため, 累積時間が短くなったものと思われる.

非液状化地点 (NON) のいくつかは, ΣT_1 が0.8s以上を示している. このような地点は, 強い揺れに見舞われて強非線形性を示した地点や, 上下動の周期特性を考慮しても表面波の影響が除去しきれなかった地点であると考えられる. 強非線形性を示した地点の例として, 2007年中越沖地震時の柏崎刈羽原子力発電所サービスホールが挙げられる. 表層数十mが砂層であるが, 地下水位が45m¹⁸⁾と深いために液状化しない. この地点のゼロクロス周期の累積時間は, ΣT_1 が約3秒, ΣT_2 が5秒弱である. また, 表面波の影響が除去できなかった地点として2008年岩手・宮城内陸地震における鳴子(MYG005)が挙げられる. この地点も三成分とも大きな加速度を記録したことに加え, 深部構造 (地震基盤までの深さ数百m) が, 地震動の長周期成分に大きな影響を与えているために除去しきれなかった¹⁹⁾. このような地点を加速度波形の周期特性のみから液状化地点と区別することは難しい. 実用的にはボーリングデータなどの地盤データを予め参照し, 液状化発生が懸念される地点かどうかを事前に精査した上で, 本手法を適用することが望ましいと考えられる.

以上までの検討をふまえて, ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法を図-9のように提案する. まず, 地震動のPGV (水平2方向合成値) が10cm/s未満で

表-2 提案手法の液状化判定精度（上下動なし）

報告 解析	NON	SUS	LIQ	ユーザ精度(%)
NON	76	3	2	93.8
LIQ	10	9	12	66.7
プロデューサ 精度(%)	88.4	75.0	85.7	総合精度(%) 86.6%

表-3 提案手法の液状化判定精度（上下動あり）

報告 解析	NON	SUS	LIQ	ユーザ精度(%)
NON	78	3	1	95.1
LIQ	8	9	13	73.3
プロデューサ 精度(%)	90.7	75.0	92.9	総合精度(%) 89.3%

あれば地震動が小さいため液状化は発生しない²⁰⁾として、ゼロクロス周期の判定を行わない。液状化判定を行う区間である $t = t_S \sim t_E$ についてゼロクロス周期の閾値の判定とその継続時間を集計し、得られた ΣT_1 が0.8秒以上かどうかで液状化の判定を行う。

5. 液状化判定精度の検証

本研究の提案手法では、表面波が到来することによる地動の長周期化が影響した誤判別を少なくする目的で、上下方向の加速度波形に関してもゼロクロス周期を算出し、考慮に入れている。その効果を明らかにする。図-9に示したフローのうち上下方向のゼロクロス周期を考慮しなかった場合における周期1.5秒以上の累積時間を $\Sigma T'_1$ とし、 ΣT_1 と比較した（図-10）。上下動を考慮しないときの判定基準値を $\Sigma T'_1 = 2.4$ sとすると、非液状化地点のうち2地点が液状化と判定され、液状化地点のうち1地点が非液状化と判定される（表-2）ようになる。ここで、ユーザ精度は、判定結果が正しい報告であった比率、プロデューサ精度は、報告結果を正しく判定した比率、総合精度は、全体として正しく判定できた比率である。したがって、今回のデータセットでは、上下動を考慮することで液状化地点の判定精度は期待したほど大きく向上しなかったといえる。今後パラメータを変えるなどの検討が必要である。

上下動を考慮に入れた液状化判定手法であるKostadinov and Yamazaki⁴⁾による判定結果と本研究の手法、加えて東京ガス（株）の液状化アルゴリズム（上下動考慮せず）の3つの手法について比較する。図-11に液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点ごとに両手法の判定結果を比較する。液状化が疑わしい地点の判定結果に関しては、判定

区分にSUSを設けていない手法もあるので、比較が難しい。液状化地点、非液状化地点に関しては、上下成分の周期変化を考慮しているKostadinov and Yamazaki⁴⁾及び本研究の手法の方が、上下動を判定に利用していない東京ガス（株）の手法よりも精度が高い。このことから、上下動の時刻歴の周期変化を考慮することは、加速度波形から液状化の発生を判定するには重要であると考えられる。

Kostadinov and Yamazaki⁴⁾は、地動加速度の周期変化を把握するために、周波数領域での計算（フーリエ変換）を使用している。この周波数領域の計算は、ウィンドを動かしながらSTFTを利用し周期特性を時刻歴で精度よく把握することができるが、リアルタイムに解析を行うにはあまり適当な手法とはいえない。本研究の提案手法は、周波数領域での計算を必要としない手法であり、リアルタイムの液状化判別に適したものであるといえる。両者の判定精度はほぼ同程度であるとみなせるので、提案手法は地震記録を用いた液状化のリアルタイム判定に妥当なものと考えられる。

表-3に、本提案手法の推定精度をまとめる。全体的には、液状化地点はほぼすべて抽出できてきているが、非液状化地点の一部を誤抽出する傾向にあり、やや安全側の判定結果が得られていることが分かる。

6. 結論

本研究では、地震記録を用いた液状化発生地点の早期把握を目指し、加速度波形の長周期化する特徴をゼロクロス周期を用いて時刻歴で把握することで、液状化判定を行った。Kostadinov and Yamazaki⁴⁾が使用していた地震データに加えて、1999年以降の地震記録から液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点を文献、現地調査等をもとに精査し、計112記録のデータセットを作成し、液状化判定手法の検討に使用した。

上下動の周期の時間変化を考慮することで、表面波による長周期化が原因となった誤判定がある程度回避できていることが確認された。本提案手法と周波数領域の計算を用いた既往の手法で判定精度を比較したところ、ほぼ同程度の判定精度が得られていることが明らかとなった。しかしながら、非液状化地点の一部が液状化と誤判定されることもあり、やや安全側の判定結果が得られる傾向にある。

このような誤判定を生じた地点は、上下動の周期特性を考慮しても表面波の影響が除去しきれなかった地点や、強い揺れに見舞われて強非線形性を示した地点であると考えられる。これらの地点を加速度波形の周期特性のみから液状化地点と区別することは難しい。実用的にはボーリングデータなどの地盤データを予め参照し、液状化発生が懸念される地点かどうかを事前に精査した上で、本手法を適用することが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 清野純史, 土岐憲三, 森下昌浩: 地表面観測波形を用いた液状化発生の判別法について, 地域安全学会論文集 No.1, pp.35-42, 1999.
- 2) 鈴木崇伸, 清水善久, 中山渉: 液状化地盤における強震記録の特徴について, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 1223-1228, 1998.
- 3) 宮島昌克, 野津智, 北浦勝, 山本真樹: 強震記録を用いた液状化検知法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.647, pp.405-414, 2000.
- 4) Kostadinov, M., Yamazaki, F: Detection of Soil Liquefaction from Strong Motion Records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 2, 173-193, 2001.
- 5) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K. and Nakayama, W.: Development of Real-Time Safety Control System for Urban Gas Supply Network, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 6) 日本建築学会: 2000年鳥取県西部地震災害調査報告, 2001.
- 7) 地盤工学会: 2003年十勝沖地震地盤災害調査報告書, 2004.
- 8) Ueng, T.S., Chen, M.H. and Li, I.Y.: Preliminary study of soil properties in Yuen-Lin liquefaction areas, *International workshop on annual commemoration of Chi-Chi earthquake, Taipei*, Vol.III-Geotechnical Aspect, pp.131-139, 2000.
- 9) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク Kyoshin Net, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 10) 日本技術開発(株): 鳥取県西部地震写真集, <http://www.jecc.co.jp/topics/kb/tottori/shasin/html/yo-JRyonago.html>
- 11) 日本建築学会: 2000年鳥取県西部地震災害調査報告・2001年芸予地震災害調査報告, 2001
- 12) 境有紀: <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/tkr.htm>
- 13) 飛島建設: 2003年十勝沖地震被害調査報告書, 2004.
- 14) 国土交通省国土技術政策総合研究所HP, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0415pdf/ks041506.pdf>
- 15) 日本技術開発(株): 2007年能登半島地震被害調査報告(速報), http://www.jecc.co.jp/topics/kb/20070325eq/reconnaissance/20070325_Noto_report0405.pdf
- 16) 吉田望, 後藤浩之, 若松加寿江, 福本俊一, 三上武子: 2007年新潟県中越沖地震におけるK-NET柏崎の観測波形について, <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/inform/chuetsuoki/k-net.pdf>
- 17) 防災科学技術研究所強震観測管理室: K-NET柏崎(NIG018)に関して, http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/K-NET_Kashiwazaki.pdf
- 18) 経済産業省, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g71023b03j.pdf>
- 19) 山中浩明, 元木健太郎, 鈴木晴彦, 福元俊一, 江藤公信, 瀬尾和夫: 2008年岩手・宮城内陸地震による鬼首カルデラの地震動特性と微動探査について, 日本地震工学大会 - 2008梗概集, pp.322-323, 2008.
- 20) Midorikawa S, Wakamatsu K. Intensity of earthquake motion at liquefied sites. *Soils and Foundations*, 1988; 28(2): 73-84.

(原稿受理 2009年6月28日)

DETECTION OF LIQUEFIED SITES USING ZERO-CROSSING PERIOD OF ACCELERATION RECORDS

Osamu KAWAI, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

This paper proposes a method to detect soil liquefaction using the zero-crossing period calculated from acceleration records based on the dataset of 112 sites including records at liquefied, liquefaction-suspicious and non-liquefied sites to understand the occurrence of liquefied sites at an early stage. As for the records at liquefied sites, the predominant period of the horizontal components tends to be longer. On the other hand, the predominant period of the vertical component is not lengthened even at a liquefied site. To reveal these frequency characteristics, the change of the period over the time was calculated from the zero-crossing period. The occurrence of liquefaction was judged by setting threshold values for the horizontal and vertical components. This method is considered to be suitable for liquefaction detection on site within an accelerometer.