

地震動記録を用いたゼロクロス周期による液状化判定手法の提案

Detection of Liquefied Sites using Zero-Crossing Period of Ground Motion Records

08TM0308 川井 修
Osamu Kawai

指導教員 山崎 文雄

SYNOPSIS

This study proposes a method to detect soil liquefaction at an early stage after the occurrence of an earthquake, using the zero-crossing period calculated from acceleration records. To determine the criteria of liquefaction occurrence, the database from 112 observation sites including liquefied, liquefaction-suspicious and non-liquefied sites is used. As for the records at liquefied sites, the predominant period of the horizontal components tends to be longer. On the contrary, the predominant period for the vertical component is not lengthened. 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. Furthermore, one-dimensional soil response analyses were performed to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

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。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、地震後すぐに多数の地点において、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。例えば、鈴木ら¹⁾は、加速度記録から、振幅、振動数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、表面波到来後の地震動における長周期化の影響と区別することは難しい。そこで、Kostadinov and Yamazaki²⁾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 SUPREME 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かった。

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

前述した加速度記録から液状化を判定する研究のうち、まずKostadinov and Yamazaki²⁾の手法を取り上げる。この判定法では、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。一区間ずつMIFを求め、区間を0.1secずつ移動させる。

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

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、 $MIF_H \leq 2/3Hz$ かつ $MIF_V \leq 3Hz$ が0.1秒以上継続した場合には液状化、 $MIF_H \leq 1Hz$ かつ $MIF_V \leq 3Hz$ 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。

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

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 (IWITH25)	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 (IWITH26)	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

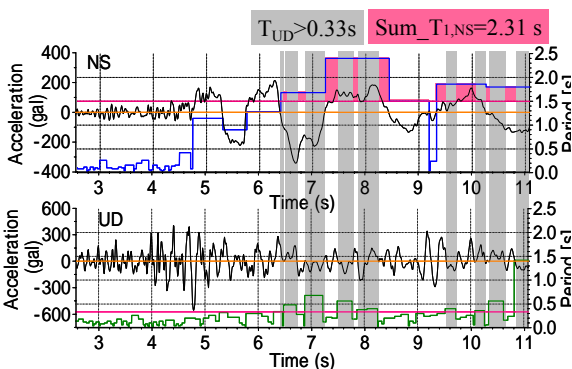


図-1 兵庫県南部地震ポートアイランド記録（地表面）でのゼロクロス周期の累積

次に、鈴木ら¹⁾の方法が使用されている東京ガス（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¹⁾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。なお、A_{MAX}は最大加速度である。

3. ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法

本研究で使用するデータは、1998年以前の地震(Pre)については、Kostadinov and Yamazaki²⁾で使用した液状化(LIQ)地点12箇所、液状化の可能性ある(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(Add)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。

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。

液状化を判定するための特徴量はKostadinov and Yamazaki²⁾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、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計算していくことにし、この累積時間をSum_T₁とした。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/s²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/s²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 Yamazaki²⁾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-1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(Sum_T₁)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秒より長い場合Sum_T₁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Sum_T₁が2.31秒となる。地表面に大規模な噴砂を生じ、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。

図-2に各地震記録のSum_T₁の結果とともに、上下動を考慮しない累積時間(Sum_T'₁)の結果も併せて示す。液状化地点、非液状化地点の累積時間の関係性や判定精度をふまえて、液状化判定の累積時間の閾値をSum_T₁=0.8s、Sum_T'₁=2.4secとする。上下動を考慮した場合、液状化地点が1点(川岸町)誤判定される。なお、上下動を考慮しないと、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ようになる。

図-3に1964年新潟地震の川岸町での加速度記録と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た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くなったため、累積時間が短くなったものと思われる。

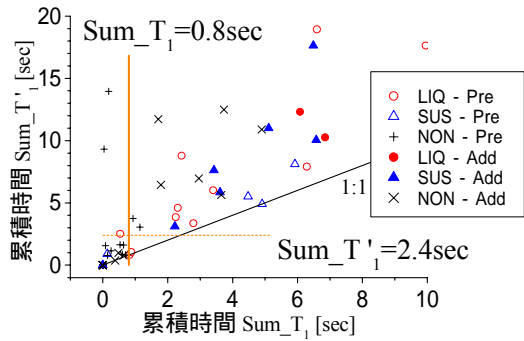


図-2 各地震記録のSum_T₁とSum_T'₁の比較

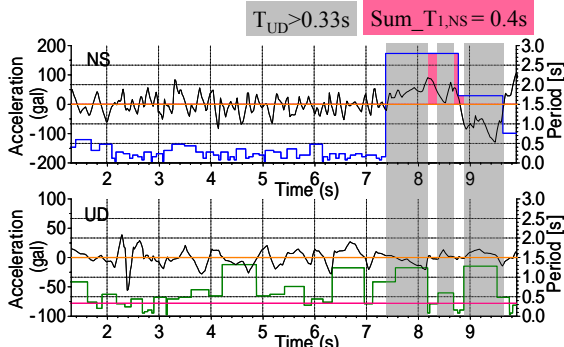


図-3 1964年新潟地震川岸町でのゼロクロス周期の累積

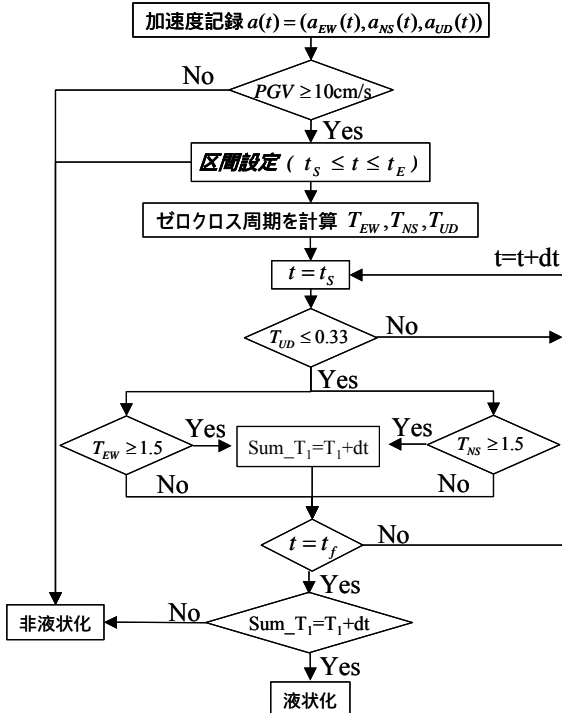


図-4 ゼロクロス周期を用いた液化化判定手法のフロー

る。

非液化化地点 (NON) のいくつかは、Sum_T₁ が 0.8sec 以上を示している。このような地点は、強い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。

以上までの検討をふまえて、ゼロクロス周期を用いた液化化判定手法を図-4 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 未満であれば液化化は発生しないと見做し、ゼロクロス周期の判定を行わない。液化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

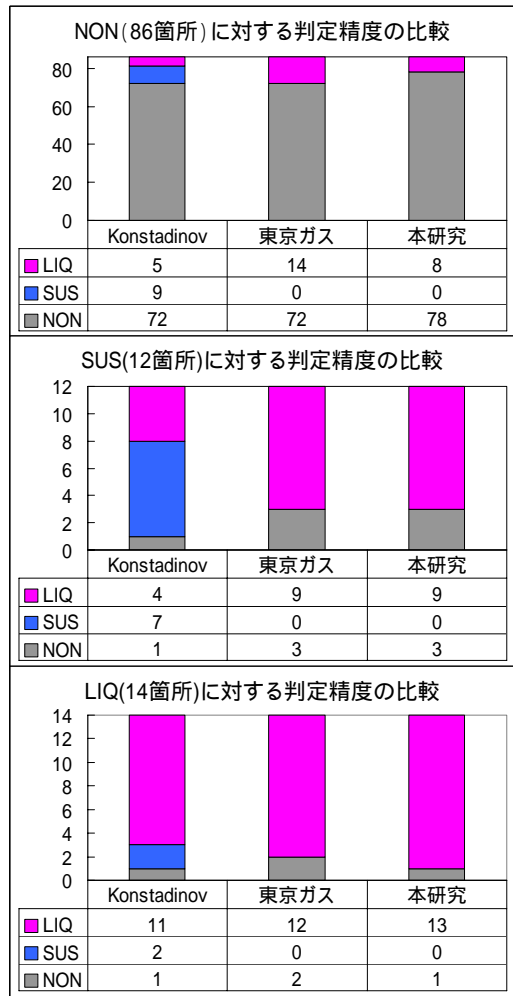


図-5 提案手法, Kostadinov²⁾と東京ガス¹⁾の比較

Sum_T₁ が 0.8 秒以上かどうかで液化化の判定を行う。

4. 液化化判定精度の検証

上下動を考慮に入れた液化化判定手法である Kostadinov and Yamazaki²⁾による判定結果と本研究の手法、加えて東京ガス (株) の液化化アルゴリズム (上下動考慮せず) の 3 つの手法について比較する。図-5 に液化化地点、液化化が疑わしい地点、非液化化地点ごとに両手法の判定結果を比較する。液化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。液化化地点、非液化化地点に関しては、上下成分の周期変化を考慮して Kostadinov and Yamazaki²⁾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、加速度波形から液化化の発生を判定するには重要であると考えられる。

Kostadinov and Yamazaki²⁾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、ウィンドウを動かしながら FFT 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、リアルタイムの液化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化化のリアルタイム判定に妥当なものであると考えられる。

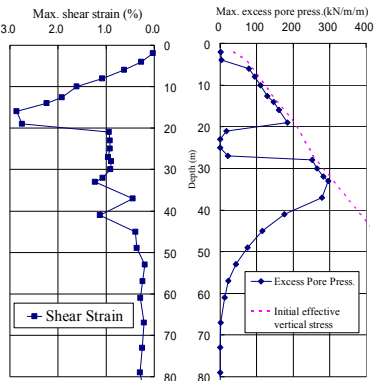


図-6 最大せん断歪(左)と最大過剰間隙水圧(右)分布

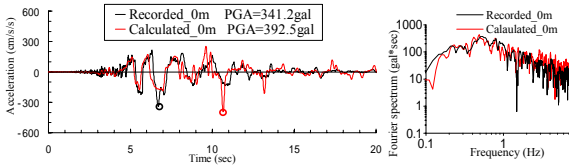


図-7 加速度時刻歴とフーリエスペクトルの比較

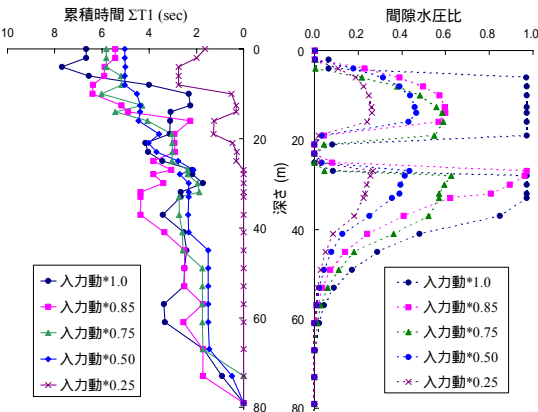


図-8 累積時間 ΣT_1 と過剰間隙水圧比の分布

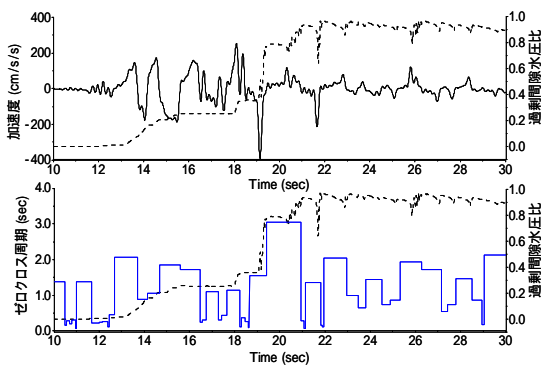


図-9 地表面における加速度波形、ゼロクロス周期と GL-6m での過剰間隙水圧比

5. 有効応力解析による過剰間隙水圧比とゼロクロス周期の関係の評価

前述の累積時間の閾値 0.8 秒は液状化・非液状化地点の計 112 地点の実記録から得られたものであるが、実際の液状化地点の地震記録は限られているので、YUSAYUSA³⁾を用いて次元の有効応力解析を行い、閾値の妥当性を評価する。ここでは、液状化被害の代表的な地点のポートアイランドを取り上げる。間隙水圧の上昇に対する累積時間 ΣT_1 の変化や、入力動の大小による累積時間 ΣT_1 の推移の様子などを評価する。

解析に際して、地盤の剛性低下及び減衰増大関係を規定する基準歪と最大減衰定数、液状化強度を規定する各種の定数は、Yamazaki ら⁴⁾や吉田⁵⁾、足立・龍岡⁶⁾を参考に最も妥当と思われる値を設定した。なお、地下水位は Yamazaki ら⁴⁾と同じ GL-4m とした。入力波は、ポートアイランドの GL-83m での観測波 (NS) を使用し、入力波形はこの観測加速度記録に 0.1Hz ~ 5Hz の周波数フィルターを作用させたものとした⁷⁾。

図-6 に、最大せん断歪分布と最大過剰間隙水圧分布を示す。地下 10 ~ 20m と 30m 前後が液状化していることがわかる。図-7 に、地表面における解析で得られた加速度波形と観測波形を重ねて示すとともに互いのフーリエスペクトルも示す。解析結果において加速度振幅が大きく出ているが、位相特性に関してよく一致している。

図-8 に深さを共通項とし、入力動を変化させた累積時間 ΣT_1 と過剰間隙水圧比の分布を示す。この過剰間隙水圧比が 1.0 になれば完全に液状化したことを意味する。入力観測波が小さくなると、当然ながら、累積時間 ΣT_1 も小さくなっており、また、地中内部において、過剰間隙水圧比が高いからといって、単純に累積時間 ΣT_1 も大きくなるわけではないことも分かった。

図-9 に、地中での観測波を入力した時の地表面における加速度記録、ゼロクロス周期と GL-6m における時刻歴の間隙水圧比を示す。加速度が長周期すると、時刻 13 秒ころに過剰間隙水圧比が上昇し始めることがわかる。

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により時刻歴で把握することで、液状化判定を行った。上下動の周期の時間変化を考慮することで、誤判定がある程度回避できた。本提案手法と周波数領域の計算を用いた既往の手法では、ほぼ同程度の判定精度が得られた。しかし、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、これらの地点を加速度波形の周期特性のみから液状化判定することは難しい。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。

また、ゼロクロス周期による液状化判定の閾値の再設定に役立てようと次元の有効応力解析を行った。解析波形は振幅に違いが観られたが、位相特性はよく一致していた。この解析から、加速度波形が長周期化すると過剰間隙水圧比が上昇し始める傾向は確認された。ゼロクロス周期の閾値と液状化発生の関係について定量的に評価するには、さらに多数の地点で同様の解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Kostadinov, M., Yamazaki, F.: Detection of Soil Liquefaction from Strong Motion Records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 2, 173-193, 2001.
- 3) 吉田望, 東畑郁生: YUSAYUSA - 2 理論と使用法, 1991.
- 4) Yamazaki, F., Ansary, M.A., Towhata, I.: Application of a Dynamic Effective Stress Model at a Reclaimed Site During the Great Hanshin Earthquake, 1995, Proc. of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1, 591-597, 1995.
- 5) 吉田望: 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, Vol. 43, No. 10, pp. 49-54, 1995.
- 6) 足立紀尚, 龍岡文夫: 新体系土工学 18土の力学 (III), 技報堂出版, 1981.
- 7) 川瀬博, 佐藤智美, 福武毅芳, 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, No.502, 181 - 182, 1997.