

ゼロクロス周期を用いた液状化判定法の検知精度

鈴木崇伸¹・清水善久²・小金丸健一³・中山渉⁴

1 正会員 博(工) 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 川崎市鯨井 2100)

2 正会員 博(工) 東京ガス株式会社 防災・供給センター (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)

3 正会員 工修 東京ガス株式会社 防災・供給センター (同上)

4 正会員 理修 東京ガス株式会社 防災・供給センター (同上)

本研究は地震発生直後に、多点の強震記録から、液状化の発生地区を推定して防災対策に活用する方策を検討している。地震計に演算機能を組み込んだ新 SI センサーに簡易な液状化の検知ロジックを実装して、センサーから直接に液状化の有無の情報を発信する新しい方式を取り入れている。簡易な検知指標として、ゼロクロス周期の最大値と最大変位、さらに最大加速度と SI 値の条件を組み合わせて判定を行っている。液状化の影響を受けた記録を含む多くの加速度記録に適用したところ、特に大振幅の表面波や断層変位の影響を含む記録では誤った判定結果となることがあるものの、実用上十分な精度で液状化の検知ができることが示された。この検知ロジックを実際に地震計に組み込んで実用化をしている。

Key Words: detection for liquefaction, strong motion record, real-time disaster prevention system, zero-crossing period, SI value

1. はじめに

液状化した地盤で観測された地震動は、加速度が小さく、また長周期成分を多く含む点が特徴的である。これらの特徴を適当な物理量で定式化し、観測データに当てはめて、判別する方法がいくつか提案されている。本研究は地震発生直後に、多点の強震記録から、液状化の発生地区を推定して防災対策に活用する方策を検討している。地震計に演算機能を組み込んだ新 SI センサーに簡易な液状化の検知ロジックを実装して、センサーから直接に液状化の有無の情報を発信する新しい方式を取り入れている。簡易な検知指標として、ゼロクロス周期の最大値と最大変位、さらに最大加速度と SI 値の条件を組み合わせて判定を行っている。液状化の影響を受けた記録を含む多くの加速度記録に適用したところ、特に大振幅の表面波や断層変位の影響を含む記録では誤った判定結果となることがあるものの、実用上十分な精度で液状化の検知ができることが示された。この検知ロジックを実際に新 SI センサーに組み込んで実用化をしている。

Towhata et. al によって提案されている SI 値と最大加速度から推定した変位 (Dmax) を採用している。多くの地震記録について Tz と Dmax を計算したところ、 $Tz > 2\text{sec}$ 、 $Dmax > 10\text{cm}$ が液状化の発生を判別する閾値となることが明らかになり、すでに報告している。補足的な条件として $SI > 20\text{kine}$ 、 $PGA > 100\text{Gal}$ の条件もあげている。図-1 に応力とひずみの関係で見た判定条件の概念図を示している。SI 値、最大加速度は地震動が一定レベルを超えており、液状化するに足るレベルに達しているかどうかの条件である。Dmax は地盤ひずみがある程度大きくなり、液状化が進行したことを確認する指標である。また Tz は地盤剛性が十分低下して液状化が進行したことを確認する指標である。

新 SI センサーの CPU に実装するにあたり、ピックの方向の影響と、4つの条件の同時性の検討を行った。水平 2 方向の取り方によって判定結果が異なることが、いくつかの波形でみられた。そこで加速度波形を $\pi/8$ 刻みで 8

2. 検知方法

地震記録を取り込むと同時に液状化を検知するためには、計算が簡単で安定した値が得られる指標が必要である。既往の研究では、ある程度の計算量を要するスペクトル解析により、周期の伸びを検知しているが、本研究では波形のリアルタイム処理に重きをおき、最大ゼロクロス周期 (Tz) を用いている。また振幅の指標として

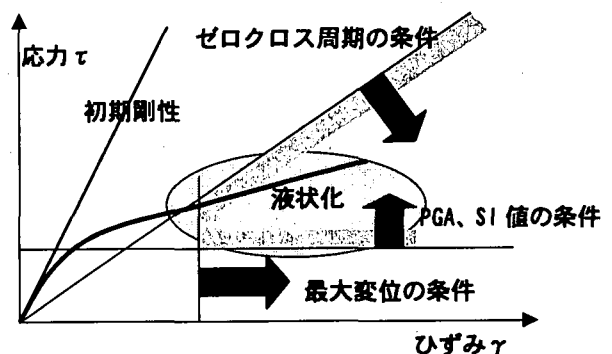


図-1 判定条件の物理的な意味の概念

方向に投影して、8とおりの波形で T_z , D_{max} の計算を行い、いずれか1方向でも条件を満足する場合液状化と判定することとした。次に加速度が最大となってある程度時間が経過してから到達する表面波の影響をなくするために、ゼロクロス周期 T_z が条件をみたす1波では100Gal以上になる条件を設定した。以上述べた計算フローを図-2に示す。

3. 検知計算結果

(1) 液状化波形の選別

数多くの公開された強震記録の中から液状化の影響のある記録を選別する。これまでに発表されている液状化検知に関する、宮島他、高田・尾崎、清野他、Kostadinov and Yamazaki の論文で取り上げられている強震データを表-1に示す。表中の○は液状化の影響があるとされた記録であり、△は可能性があるとされた記録である。また×は液状化とは関係なしとされた記録であり、-は分析の対象とされていない記録である。液状化の痕跡の記録と観測点の場所の関係により液状化ありと可能性ありの判定はばらついているが、○もしくは△のいずれかの判定結果は概ね一致している。ただし、日本海中部地震の秋田港は宮島他が可能性を指摘しているのに対して、高田・尾崎と Kostadinov and Yamazaki は液状化なしとしている。また北海道南西沖地震の函館港に関しては

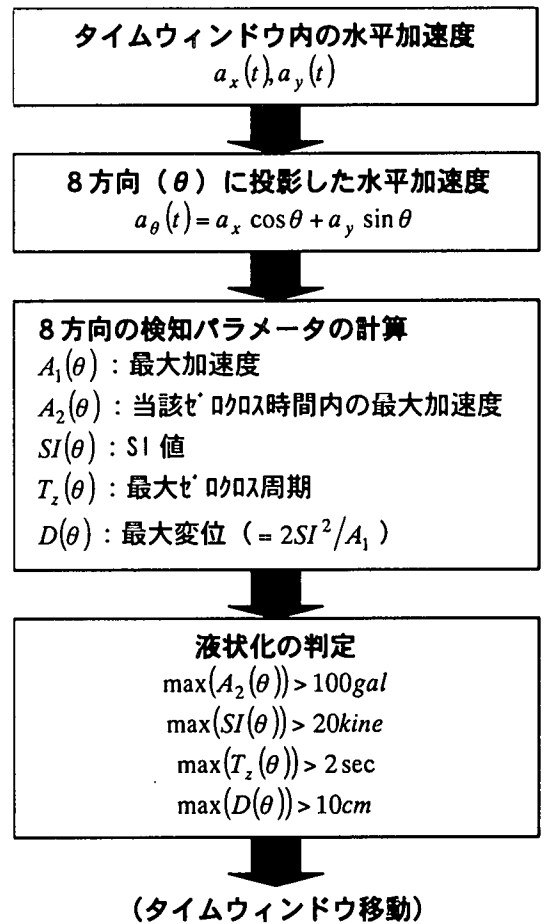


図-2 リアルタイム検知ロジックのフロー

表-1 液状化の影響を受けた強震データ

発生日	地震名	観測点	宮島他	尾崎他	清野他	Kostadinov	本研究
1964	新潟	川岸町	-	○	-	○	○
1968	十勝沖	青森港	△	○	○	○	○
1983	日本海中部	八郎潟	-	-	-	○	○
1983	日本海中部	津軽大橋	-	-	-	-	△
1983	日本海中部	秋田港	△	×	-	×	△
1987	Superstition H	Wildlife	○	-	○	○	○
1989	Loma Prieta	Treasure Island	-	-	-	△	○
1993	釧路沖	釧路港	△	△	○	△	○
1994	北海道南西沖	函館港	△	○	○	×	△
1995	兵庫県南部	関電尼崎	△	○	-	○	○
1995	兵庫県南部	土研尼崎	-	○	-	△	○
1995	兵庫県南部	尼崎港	△	○	△	○	○
1995	兵庫県南部	六甲アイランド	○	○	-	△	○
1995	兵庫県南部	神戸港工事事務所	○	○	-	○	○
1995	兵庫県南部	東神戸大橋	○	○	○	○	○
1995	兵庫県南部	JR鷹取駅	△	○	△	△	○
1995	兵庫県南部	神戸港第8突堤	△	-	-	○	-
1995	兵庫県南部	ポートアイランド	○	○	○	○	○
1999	台湾集集地震	員林					△
2000	鳥取県西部	境港					△

○液状化 ×非液状化
△液状化(参考) -未検計

Kostadinov and Yamazaki の研究だけが、液状化なしとしている。

本研究の目的は液状化の発生を簡易に検知する指標をみつけることにある。これまでの研究でとりあげられてきた観測記録は程度の差はあれ、いずれも周辺で液状化の被害があった地点である。リアルタイムに液状化の発生を検知して、防災対策に役立てる目的から、基本的に、既往の研究で取り上げられた記録をすべて判定の対象とし、簡易な判断指標をみつけることとする。ただし筆者らの資料調査により、日本海中部地震の津軽大橋でも周辺で液状化の痕跡があったことから、参考データとして判定の対象に追加する¹³⁾。また日本海中部地震の秋田港、北海道南西沖地震の函館港は見解が分かれていることから参考データと考える。表-1 中に本研究で液状化の影響を受けていると考える記録のリストを示している。なお、本研究では地盤での記録を主体に考えており、神戸港第8突堤は堤防の振動が主体であると判断し、検討対象からは外すこととする。

表-1、下段の2記録は、今回提案する判定方法の検証中に入手した記録である。台湾集集地震の員林小学校では明確な液状化の痕跡は報告されていないが、付近では液状化の報告がある。鳥取県西部地震の境港市の観測点も臨海部で液状化が起こっている。これらの2記録を参考データと考えると、本研究のリアルタイム判定ロジックを適用して手法を検証してみる。なお、観測点周辺の痕跡調査などにより、これら△のついた観測点の判定結果を明確にしていく必要がある。

(2) 液状化判定結果

図-3 はリアルタイム検知法で計算した(T_z, D_{max})のプロット図である。液状化の痕跡の有無の判断は、これまでに発表されている液状化検知に関する、宮島他、高田・

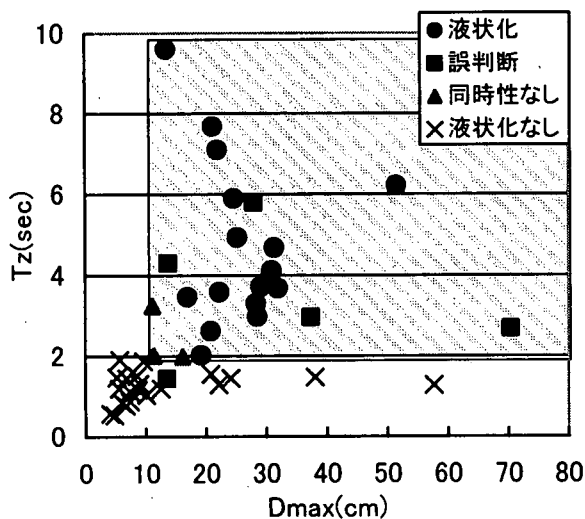


図-3 リアルタイム検知法による計算結果

尾崎、清野他、Kostadinov and Yamazaki の研究における判定結果を用いており、いずれかの研究で液状化と判定されている記録は液状化としている。ただし日本海中部地震の津軽大橋を液状化記録として追加している。同図中の判例の「液状化」は液状化の影響のある記録を液状化と判定した結果を表している。「誤判断」は液状化の影響のあった記録をなしと判定するまたは液状化の影響のないデータをありと判定した記録を表している。「同時性なし」はタイムウィンドウ内の最大値の条件は上回るものの、ゼロクロス時間内での最大加速度が100Galを下回る記録を表している。「液状化なし」は液状化の影響のない記録をなしと判定した記録を表している。誤判断となった5つの記録であった。JR 鷹取は最大値は閾値を上回るものの、同時性の条件から液状化なしとなっている。研究者によって液状化の有無の判断が分かっている秋田港と函館港は、液状化なしの判定結果となっている。液状化の影響のない波形では、Michoacan 地震のSC&T が液状化の判定結果となっているが、前述のように大振幅の表面波の影響である。さらに台湾集集地震の石岡の記録も断層運動の影響を受けた長周期の波形であるために誤判断となっている。なお、十勝沖地震の八戸港、伊豆大島近海地震の三島、日本海中部地震の青森港は判定閾値に近い記録であるが、最大値は閾値を越すものの、同時性の条件から液状化なしの判定になり、同時性の条件が有効に作用している。

今回の解析は液状化記録を含む過去のSI値20kine以上、PGA100Gal以上の45記録を対象としている。研究者によって判断が分かれるような液状化を含めれば、検知精度は40/45となり、また研究者によって判断が分かれる記録を除けば、40/43となる。強震記録から実用上十分な精度で液状化検知が可能であると考えられる。

(3) 鳥取県西部地震の検討

次に2000年10月の鳥取県西部地震の判定結果を表-2に示す。米子市と境港市の4観測点に注目したが、境港市の2つは液状化あり、米子市内の2つは液状化なしの判定結果となった。米子市では臨海部で液状化が起こっているが観測点は海岸から遠く、液状化の影響は受けていないと考えられる。一方、境港市の港湾局が設置している観測点は脇の道路で噴砂の跡を観測している。気象庁の観測点は境水道からやや内陸に位置するが、聞き込

表-2 鳥取県西部地震の検知結果

観測機関	観測地点	液状化判定結果	実際の状況
気象庁	米子市	なし	痕跡なし
Knet	米子市	なし	痕跡なし
気象庁	境港市	あり	痕跡不明瞭
港湾局	境港市	あり	近くで噴砂あり

みの結果では噴砂、噴水はなかった模様である。気象庁の境港測候所についてより検討する必要があるが、今回提案する研地方の有効性が確認できたと考える。

4 振動台実験

検知ロジックを実装した新 SI センサーを用いて液状化計算アルゴリズムの動作確認および、8 方向計算の妥当性を確認するために実験を行った。実験は東京ガス(株)基礎技術研究所の 3 軸加振台を用いて 3 成分の加速度記録で加振して、実際の設置環境を再現している。液状化判定ロジックは、サーボタイプの基準センサーで測定された加速度波形をオフラインでパソコンを用いて計算した液状化判定結果を正とし、新 SI センサーから直接出力される液状化判定結果を比較することにより確認した。計算角度の妥当性については、加振台の X 方向に対し、 0° (2 台)、 11.25° 、 45° 方向に 4 台のセンサーを設置しそれぞれの出力を比較して確認した。

液状化の影響のない記録を含めて、37 地震の波形を計測した。基準センサーに比して異なった出力をしたセンサーはなく、センサーに組み込んだアルゴリズムが正しいことが確認された。またセンサーの内部では 22.5° 刻みで計算を行っているため、 22.5° の倍数分設置角度がずれても出力結果は全く同じになるが、 11.25° 方向は計算していないにも関わらず、 0° 、 45° 設置のセンサーの出力と同じ結果になったため、 22.5° より小さい角度で計算しても精度はあまり変わらないことが明らかになった。

振動台実験結果より、小型センサー内に組み込んだ加速度ピックアップ～演算部～情報発信部は安定して液状化検知情報を送り出すことが確認された。

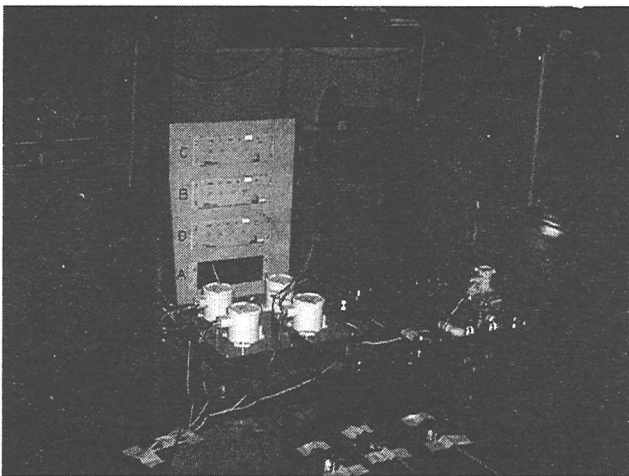


図-4 実地震加振実験状況

5. おわりに

本研究では地震時の加速度波形の特徴からリアルタイムに、かつ簡易に液状化を判定する方法について検討を行った。まず過去に観測された液状化地震での強震記録の波形分析を行い、振動周期が長くなることと最大変位が大きいことが液状化時の強震記録の特徴であることを確認した。具体的な判定指標を検討する際に、実用化を念頭に本研究では波形のリアルタイム処理に重きを置いた。周期では加速度の最大ゼロクロス周期 T_z 、変位は東畑らが提案した最大推定変位を採用することとした。液状化地盤と非液状化地盤での強震記録、計約 50 波形を分析し、 $T_z > 2 \text{ sec}$ 、 $D_{\text{max}} > 10 \text{ cm}$ かつ $\text{PGA} > 100 \text{ Gal}$ 、 $\text{SI} > 20 \text{ kine}$ を液状化を検知する条件とした。さらに新 SI センサーに実装する為のリアルタイム演算アルゴリズムとして、タイムウィンドウを移動しながら常時監視する方式を考案し、また検知結果を安定させるために、同時性の条件と、方向性の条件を加えた。この方法を過去の強震記録に適用した結果、満足のいく精度で、液状化の発生の有無を検知することができた。さらに振動台実験にて液状化波形を再現し新 SI センサーに実装したアルゴリズムで液状化を検知できることを確認している。

今回の研究で、断層近傍の波形や表面波が特に卓越する場合など、液状化以外にも長周期、大振幅の条件を満たす波形があることが確認された。また地表の痕跡が明確でない液状化をどのように判断するかも重要な課題と考える。今後、より液状化発生の推定の高精度化を目指し研究を進めていく予定でいる。

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論文集, pp. 1223-1228, 1998
- 2) 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, I-51, pp. 405-414, 2000
- 3) 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, 地域安全学会論文集 No. 1, pp. 35-42, 1999
- 4) 高田至郎, 尾崎竜三: 地表面強震記録にもとづくリアルタイム液状化判別手法, 土木学会論文集 No. 640, I-50, pp. 99-108, 2000
- 5) Kostadinov, M.V., Yamazaki, F.: Detection of soil liquefaction from strong motion records, Earthquake Engng Struct. Dyn., 30, pp.173-193, 2001
- 6) 鈴木崇伸, 清水善久, 小金丸健一, 中山渉: ゼロクロス周期を用いた液状化のリアルタイム検知手法, 土木学会論文集 I 部門投稿中