

リアルタイム地震防災のための 強震記録を用いた液状化の早期検知

宮島昌克¹・渡辺海奈都²・北浦勝³

¹正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

²名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程 1年 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

本研究は、強震記録を用いて液状化の発生をリアルタイムで検知し、リアルタイム地震防災に寄与しようとするものである。液状化が発生すると地表面における加速度記録は長周期化するとともに、水平動の振幅が減少することが知られている。本研究ではまず、これらの特性を振幅特性と振動数特性に分けて、それぞれについて検知指標を提案する。つぎに、これらの指標を強震記録から経時的に逐次計算できるように改良し、液状化の発生を早期に検知する手法を提案する。

さらに、これまでに得られている液状化地盤と非液状化地盤における強震記録を本手法に適用し、本手法の精度について考察する。

Key Words :real-time earthquake disaster mitigation, liquefaction, strong ground motion records, early detective method

1. はじめに

地盤の液状化は、一般にライフライン施設の地震被害における大きな要因の1つであることが知られている。したがって、地震発生後に液状化の発生状況をリアルタイムに把握できれば、緊急を要するガスシステムなどへの対応が早期にでき、2次災害を防止するとともにその後の復旧活動に役立てることができる。そのため、地震発生直後に液状化の発生状況を把握することは、リアルタイム地震防災にとって極めて重要なことと考えられる。そこで、本研究では、強震記録をもとに観測点における液状化の発生の有無をリアルタイムに判定する手法の開発について検討する。

本研究では、実際に地震が発生した直後から、強震記録に現れる液状化地盤特有の地盤震動特性をリアルタイムに捉え、その結果と地震前にあらかじめ得られている液状化マップなどを連動させることにより、精度の高い液状化範囲の推定をリアルタイムに行い、緊急対応や早期復旧に寄与することを考えている。そこで、その第一段階として、地表面付近に置かれた強震計で捉え得る、液状化地盤特有の地盤震動特性を、定量的に評価することを目的とし、著者らはこれまでに「最大上下/水平比」、「強震動の平均卓越振動数」、「卓越振動数変化率」の各検知指標を提案してきた¹⁾。本論文ではこれらを、リアルタイムな検知指標にするための検討を行った。なお、ここでいうリアルタイム検知指標とは、地震発生直後から指標の逐次計算を行い、地震が終わるのを待たずに液状化の発生の有無を判断できる指標のことである。

2. これまでに提案した検知指標

液状化地盤の地盤震動特性には振幅特性と振動数特性の2つがある。振幅特性とは、液状化地盤においては、応答加速度の水平成分は減少するが、上下成分は減少せず、むしろ微増するといった特性である。また、振動数特性とは、液状化が発生すると地盤が軟化するため、地表面における応答加速度は長周期化する、すなわち卓越振動数が低下するといった特性である。図-1に1995年兵庫県南部地震において得られた液状化地盤であるポートアイランド(地表面)の強震記録を示す。図-1を見ると、約10秒あたりに液状化地盤特有の振幅特性と振動数特性が現れていることがわかる。

そこで、著者らはこの2つの地盤震動特性に注目した液状化検知指標として、「最大上下/水平比」、「強震動の平均卓越振動数」、「卓越振動数変化率」をこれまでに提案した¹⁾。

「最大上下/水平比」とは液状化地盤における振幅特性に注目した指標である。ここでは、上下・水平方向の加速度記録の比を求め、強震記録全体より水平方向最大加速度を記録した時刻を探し、その時刻以降で上下/水平比の最大値を求めている。

「強震動の平均卓越振動数」、「卓越振動数変化率」は液状化地盤における振動数特性に注目した指標である。ここでは卓越振動数の変化を見るために、水平方向最大加速度を記録した時刻を強震記録全体から求め、その前後における平均卓越振動数をそれぞれ計算している。

以上より、これまでに提案した検知指標では水平方向最大加速度を記録した時刻を用いて解析を行っ

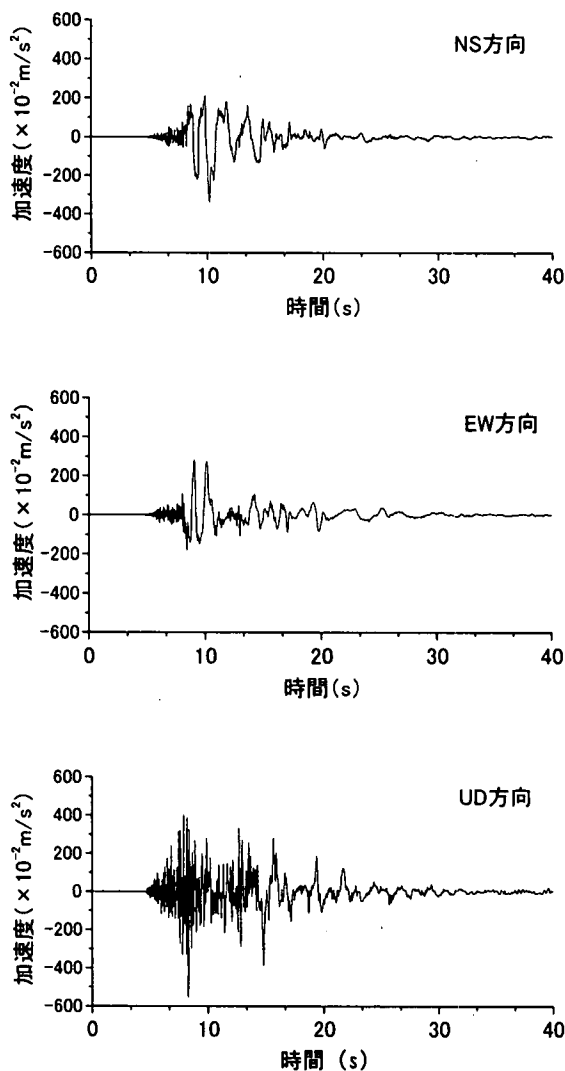


図-1 ポートアイランドにおける地表面強震記録

ている。しかし、水平方向最大加速度を記録した時刻は強震記録が全て示されないと求めることができない。そこで、これまでに著者らが提案してきた検知指標をリアルタイムな検知指標とするには、強震記録より水平方向最大加速度を記録した時刻をリアルタイムに求められるようにすることが重要になってくる。

3. 水平方向最大加速度を記録した時刻

これまでに著者らが提案した各検知指標は、上述したように、加速度記録を全て用いて水平方向最大加速度を記録した時刻を求め、検知指標の計算を行うときに使用していた。そのため、地震発生直後から検知指標の計算を始めることができず、リアルタイムな検知指標とはいえない。そこで、水平方向最大加速度を記録した時刻をリアルタイムに探す方法として、平均振幅の時間変化を提案する。

平均振幅の算出方法としては、まず、ゼロ-クロ

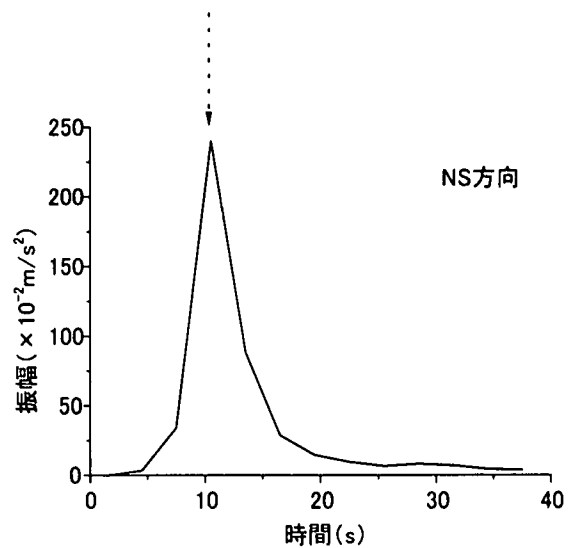
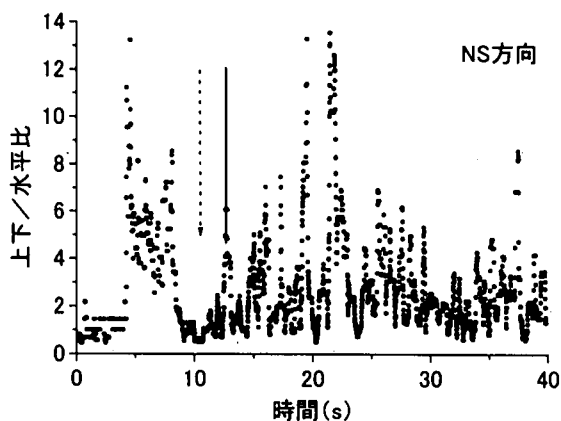


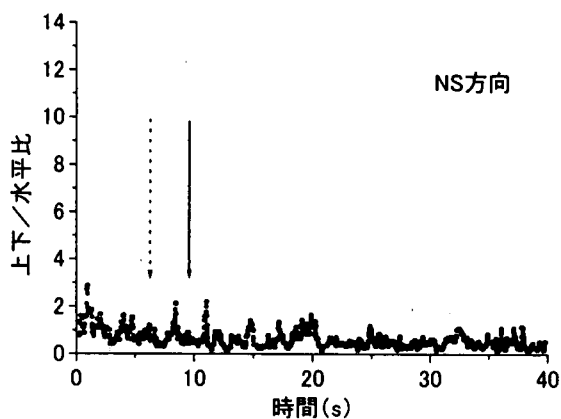
図-2 ポートアイランドの加速度記録における平均振幅の時間変化

ッシング法により水平方向の加速度記録の周期を算出する。ゼロ-クロッシング法とは、強震記録がゼロ線をクロスする点の時間間隔を測り、それを2倍することによって周期を見いだす方法²⁾であり、地震発生直後からリアルタイムに計算を始めることができる。つぎに、求められた各周期において最大振幅の絶対値をとる。そして、3秒間隔で最大振幅の平均値をとり、その時刻歴を平均振幅の時間変化とする。3秒という時間間隔はいろいろな値で計算し、水平方向最大加速度を記録した時刻を求めるのに最も適した値であるとして、試行錯誤によって決定された。また、時刻は平均振幅をとった時間間隔の中間の値とし、0.01秒から3.00秒の平均振幅の時刻は $t_1=1.5$ (秒)とし、3.01秒から6.00秒の平均振幅の時刻は $t_2=4.5$ (秒)とした。なお、水平方向2方向(方位差 90°)の加速度記録のそれぞれについて、ゼロ-クロッシング法を用いて解析を行った。

図-2にポートアイランド(地表面)の、水平方向(NS方向)加速度記録の平均振幅の時間変化を示す。図中の点線矢印は水平方向最大加速度を記録した時刻を示している。図-2を見ると、水平方向最大加速度を記録した時刻と平均振幅が最大値を記録した時刻が対応していることがわかる。そこで、平均振幅の時間変化において、平均振幅の値が下降し始めた時刻を水平方向最大加速度を記録した時刻とし、その時刻から検知指標の計算を始めることとする。平均振幅が最大値を記録した時刻は、3秒間隔で求められた平均振幅において前後の値の差をとり、差が負になった時刻を平均振幅が最大値を記録した時刻であるとする。このとき、一般には80gal程度の揺れで液状化が発生すると言われていること³⁾を考慮し、振幅の値が80galよりも大きくなった時刻以降の平均振幅を用いて、上述したように平均振幅の差をとるものとする。



(a)ポートアイランド(液状化地盤)



(b)加古川駅(非液状化地盤)

図-3 上下/水平比の時間変化

4. リアルタイム液状化検知指標の提案

(1) 振幅特性に注目した検知指標の提案

前述したような液状化地盤における振幅特性，すなわち，液状化の発生に伴う水平方向加速度振幅の減衰をリアルタイムに，そして定量的に表すために，これまでに提案した上下/水平比を改良したものを提案する。これまでに提案した上下/水平比は逐次計算が可能のため，その本質は変えずに，計算方法を少し改良した。上下/水平比の解析手法は，上下・水平方向の応答加速度記録において，0.3秒間隔でそれぞれの絶対値の最大値を求め，その比（水平方向最大加速度/上下方向最大加速度）の時刻歴で表したものである。ここでは，0.3秒のウィンドウをデータの刻み時間ごとに移動させて時刻歴を求めている。なお，0.3秒という値は，長周期成分が卓越している軟弱地盤における強震記録などについても検討した結果，それらと液状化地盤とを判別するために最も適当である値であるとして求められたものである。また，同時刻における上下方向加速度と水平方向加速度との直接の比をとらなかつたのは，分母である水平方向加速度が振動の途中でゼロに近い値をとることによってその比が大きくなることを避けるためである。なお，実際に観測された強震記録は水平方向が2成分（方位差90°）あるが，平均振

幅が最大値を記録した時刻は水平成分を2方向に分けて求められているため，ここでも，水平成分の合成は行わず，2方向分けて上下/水平比の値を求めた。

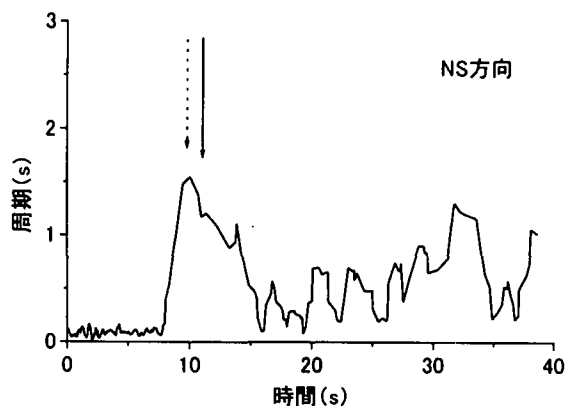
図-3(a)に液状化地盤であるポートアイランドの上下/水平比の時間変化，図-3(b)に非液状化地盤である1995年兵庫県南部地震における加古川駅（地表面）の上下/水平比の時間変化を示す。図中の点線矢印は実際に水平方向最大加速度を記録した時刻，実線矢印は平均振幅が最大値を記録した時刻である。なお，上下/水平比の変化をわかりやすくするため，強震記録全ての上下/水平比の時間変化を示している。図-3(a)，(b)を見ると，液状化地盤であるポートアイランドの上下/水平比が非常に大きくなっていることがわかる。また，水平方向最大加速度を記録した時刻と平均振幅が最大値を記録した時刻を比較すると，平均振幅が最大値を記録した時刻の方が遅い目に出ていることがわかる。しかし，ポートアイランドの上下/水平比を見てわかるように，約10秒あたりまで初期微動の影響が現れているため，この部分の影響を完全に取り除くことを考えると，平均振幅が最大値を記録した時刻の方が水平方向最大加速度を記録した時刻よりも，遅い目に出ている方が良いと考えられる。

そこで，この上下/水平比をリアルタイムに求めることを考える。解析手法としては，地震発生後，平均振幅が最大値を記録した時刻より上下/水平比の計算を始め，上下/水平比の値がある境界値を越えたら，そこで計算を止め，その値を「最大上下/水平比」とし，その地盤は液状化が発生したと判断することにする。なお，境界値の具体的な値は多くの実際の強震記録で検討を行い決定するため，詳しくは後の5章で述べるが，5.0と設定した。ちなみに，図-3のポートアイランドにおけるリアルタイムに求めた最大上下/水平比の値は，地震発生から9.63秒後に記録した5.1である。なお，本論文では地震発生を地震動の揺れが10gal以上になった時刻とする。

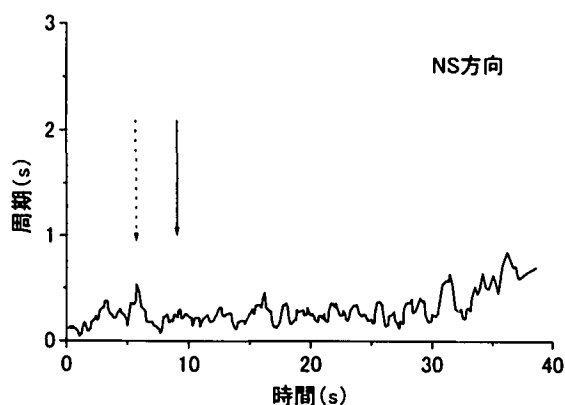
(2) 振動数特性に注目した検知指標の提案

液状化地盤における振動数特性，すなわち，液状化の発生に伴う水平方向成分の長周期化をリアルタイムに，そして定量的に表すために，新たにゼロ・クロッシング法を用いた周期の時間変化に注目する。それは，著者らがこれまでに提案してきた「強震時の平均卓越振動数」，「卓越振動数変化率」は，水平方向最大加速度を記録した時刻以降と以前の卓越振動数を，フーリエスペクトルを用いて求め，その平均値をとって計算を行うものであるため，地震動が終わってからしか計算を行うことができない検知指標であったからである。

平均周期の時間変化の解析手法は，ゼロ・クロッシング法で求めた周期を5個ずつ平均していき，その時刻歴を求めるというものである。ここでは，5個ずつの平均を1周期ごとに移動させて計算し，時



(a)ポートアイランド (液状化地盤)



(b)加古川駅 (非液状化地盤)

図-4 平均周期の時間変化

刻歴を求めている。周期を求める際に平均をしたのは、周期の急激な変動をなくし、突発的に周期が長くなるのを抑さえ、より定量的に捉えるためである。また、平均する際にデータ数を5個にしたのは、多すぎると液状化の特性が把握しづらく、少なすぎると急激な変動が多すぎて、液状化の特性を把握しづらくするためである。なお、実際に観測された強震記録は水平方向が2成分(方位差 90°)あるが、平均振幅が最大値を記録した時刻は水平成分を2方向に分けて求められているため、ここでも、水平成分の合成は行わず、2方向分けて周期の時間変化の値を求めた。

図-4(a)に液状化地盤であるポートアイランドの平均周期の時間変化、図-4(b)に非液状化地盤である加古川駅の平均周期の時間変化を示す。図中の点線矢印は実際に水平方向最大加速度を記録した時刻、実線矢印は平均振幅が最大値を記録した時刻である。図-4(a)、(b)を見ると、液状化地盤であるポートアイランドの周期が長周期化していることがわかる。また、一般に、液状化の発生に伴う水平方向加速度記録における長周期化は、水平方向最大加速度を記録した時刻以降に生ずるため、上下/水平比と同様に平均振幅が最大値を記録した時刻以降で平均周期による液状化発生の判断を始めるものとする。

そこで、上述したことを踏まえて、上下/水平比

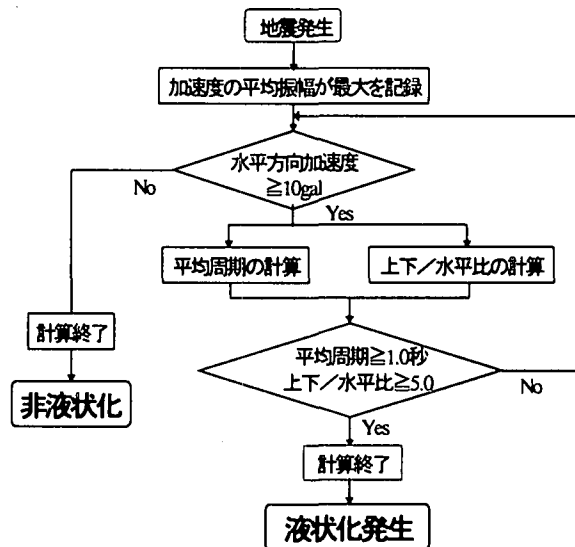


図-5 リアルタイム液状化検知指標の解析の流れ

と同様に平均周期をリアルタイムに求めることを考える。解析手法としては、地震発生後、平均振幅が最大値を記録した時刻より平均周期の計算を始め、平均周期の値がある境界値を越えたら、そこで計算を止め、その地盤は液状化が発生したと判断することにする。なお、境界値の具体的な値は多くの実際の強震記録で検討を行い決定するため、詳しくは後の5章で述べるが、1.0秒と設定した。ちなみに、図-4のポートアイランドにおけるリアルタイムに求めた平均周期の値は、地震発生から8.46秒後に記録した1.1秒である。

(3)リアルタイム液状化検知指標の解析の流れ

(1)、(2)に示した上下/水平比と周期の時間変化という、2つのリアルタイム液状化検知指標について解析の流れを図-5に示す。

図-5のフローチャートをもとに解析の流れについて説明する。まず、地震発生後、平均振幅を逐次計算し、平均振幅が最大値を記録したら、その時刻より上下/水平比と平均周期の計算を始める。そして、上下/水平比が5.0以上かつ平均周期が1.0秒以上になったら計算を終了し、液状化地盤であると判断する。また、上下/水平比が5.0以上、周期が1.0秒以上にならない場合は水平方向加速度が10gal以下になったら計算を終了し、非液状化地盤であると判断する。ここで計算終了の判断に用いる水平方向加速度は、上下/水平比を求める際に0.3秒のウィンドウを移動させて求めた加速度の絶対値の最大値である。

5. 強震記録を用いたリアルタイム液状化検知指標の検証

これまでに収集した100点の強震記録を用いて上述した液状化検知指標を計算する。用いる強震記録は、液状化が発生する可能性のある大きさでなけ

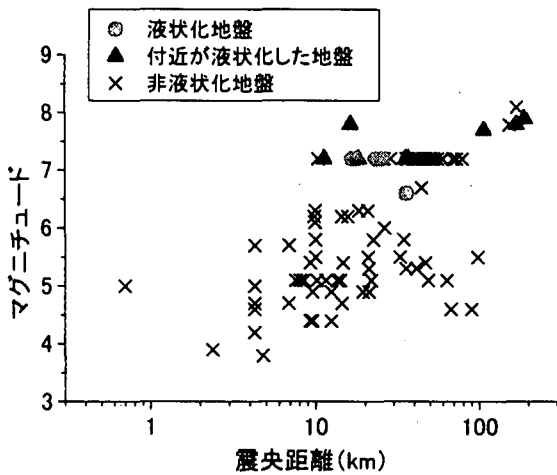


図-6 解析に用いた強震記録のマグニチュードと震央距離の関係

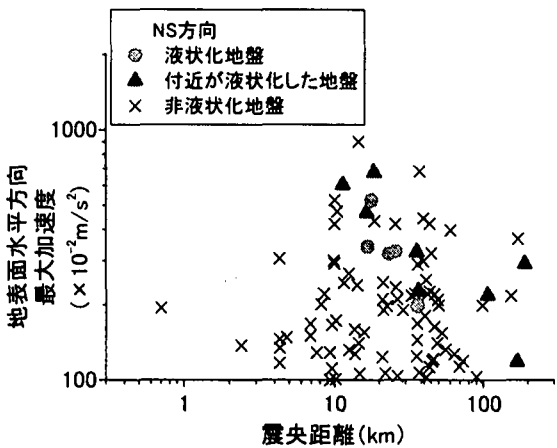
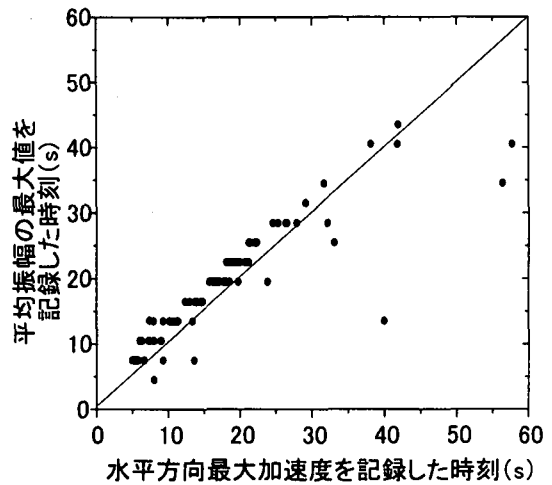
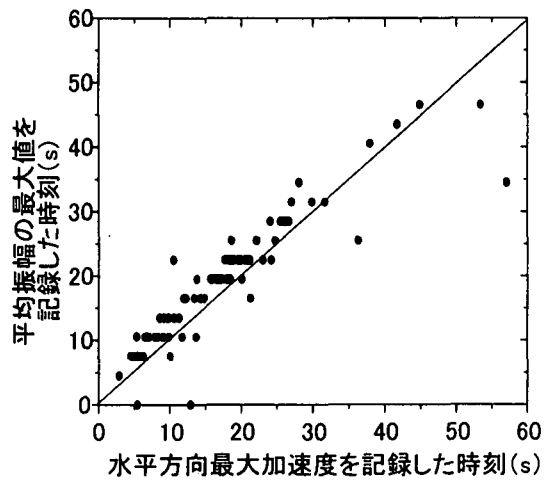


図-7 解析に用いた強震記録の地表面水平方向最大加速度と震央距離の関係

ればならないので、水平2方向のうち、どちらか1方向の地表面最大加速度が80gal以上のものとした。図-6に本研究で用いた100点の強震記録のマグニチュードと震央距離の関係を示す。本研究で用いた強震記録はマグニチュードが3.9~8.1までのものであり、震央距離も約0.7~200kmと広い範囲に分布しており、偏りのないことがわかる。また、図-7に水平方向(NS方向)の地表面最大加速度と震央距離を示すが、加速度も比較的分散していることがわかる。なお、図中の●印は強震計設置点の直下やごく近傍で広範囲にわたる液状化痕跡、すなわち噴砂や液状化に伴う地盤流動などが確認された強震記録であり、図中の▲印は強震計設置点の付近で液状化が確認された強震記録、図中の×印は強震計設置点の付近で液状化痕跡が確認されていない強震記録である。ここで、強震計設置点の付近というのは、被害報告書などに液状化痕跡や液状化に起因する構造物被害が記載されており、それが強震計設置点から100m~



(a)NS方向



(b)EW方向

図-8 平均振幅が最大値を記録した時刻と水平方向最大加速度を記録した時刻の関係

500m程度離れているものを指している。例えば、1983年日本海中部地震における秋田港の観測点では500m離れた岸壁において、1993年釧路沖地震における釧路港の観測点では100m離れた岸壁において、それぞれ液状化による被害が生じていることが報告されている^{4) 5)}。また、表層に2~3m以上の非液状化層があると下層が液状化しても地表に噴砂・噴水は生じないという報告³⁾もあり、強震計設置点で液状化が発生したか否かを被害報告書などからだけで判断するには問題が残されているが、ここでは上述のような区分に従って液状化検知指標の精度を検証する。

(1) 平均振幅が最大値を記録した時刻の検証

リアルタイムに求めた検知指標について考察する前に、まず、平均振幅が最大値を記録した時刻が水平方向最大加速度を記録した時刻に対応しているのかを検証する。図-8(a),(b)に平均振幅が最大値を記録

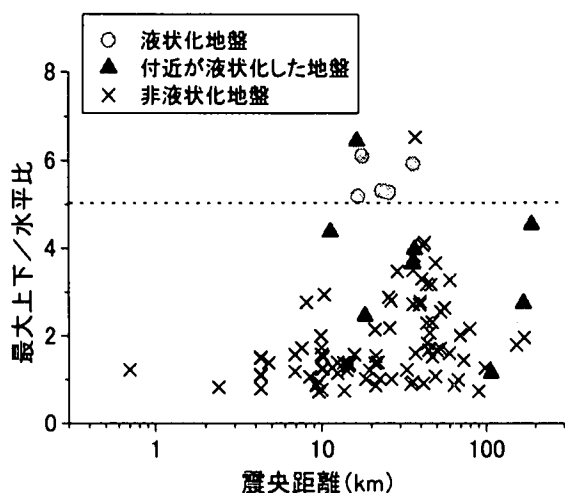


図-9 最大上下/水平比と震央距離の関係

した時刻と、水平方向最大加速度を記録した時刻の関係図を示す。図-8を見ると、約90%の観測点において、平均振幅の最大値を記録した時刻の方が、水平方向最大加速度を記録した時刻より少し遅い目になっている。上述したように初期微動の影響を取り除くために水平方向最大加速度を記録した時刻以降で検知指標を計算することを考えると、平均振幅が最大値を記録した時刻が遅い目に出た方が良く考えられる。また、平均振幅が最大値を記録した時刻が、水平方向最大加速度を記録した時刻よりも極端に遅いという観測点はない。しかし、残りの10%の観測点では水平方向が最大値を記録した時刻よりも早い時刻に平均振幅の最大値が出ている。これについて考察すると、その観測点に特に偏りはなく、特定の地震においてそのような結果が出ているわけではない。しかし、水平方向最大加速度を記録した時刻よりも早い値が出ている場合、初期微動の影響を受けやすいと考えられる。そのため、その点に注目して水平方向最大加速度を記録した時刻よりも早い値の出た10%の観測点についてみたところ、この影響により、水平方向最大加速度を記録した時刻よりも、早い時刻で上下/水平比と周期が境界値を迎え、計算を終了しているという観測点はなかった。そのため、このことが今回の解析結果に影響を及ぼしている可能性は低いということがわかった。

(2) リアルタイムに求めた最大上下/水平比の検証

最大上下/水平比を求めるにあたって、液状化地盤と非液状化地盤の境界値を様々な値に設定し、解析を行った。その結果、境界値を5.0に設定した場合がリアルタイムに、そしてより明確に液状化地盤を非液状化地盤と区別して判断することができた。そのため、最大上下/水平比の液状化地盤と非液状化地盤の境界値を5.0とする。図-9にリアルタイムに求めた最大上下/水平比を震央距離との関係で示す。ここでは、水平2方向で分けて求めた最大上下/水平比の大きい方の値を、その観測点の最大上下

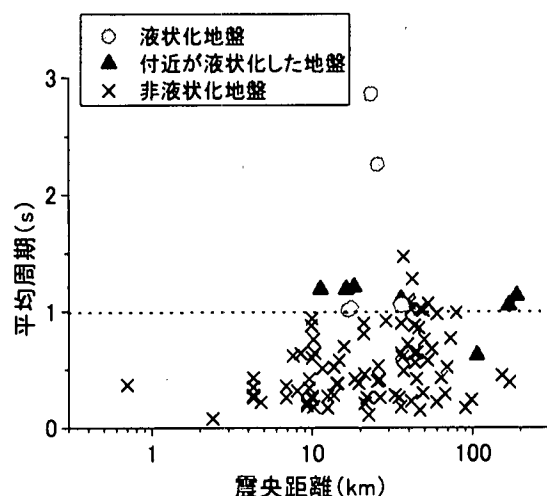


図-10 平均周期と震央距離の関係

/水平比とした。それは、水平2方向の各値に少しばらつきが見られるため、検知指標は安全側であった方がよいと考えたからである。なお、図-9において5.0以上の値を取っている点は、逐次計算において最初に5.0を超えたときの値を示しており、計算はその時点で終了している。

図-9において、非液状化地盤で5.0以上の最大上下/水平比をとった観測点について考察する。この観測点は1995年兵庫県南部地震における南港発電所である。南港発電所は、大阪南港の人工島である砂州の一角に位置している。人工島は埋め立てられた地盤であるため、地下水位が高いと考えられ、付近で液状化や軟化が起きていることは十分に考えられる。したがって、南港発電所は液状化が発生したという報告はないが、地盤が軟化したか付近で液状化が発生したのではないかと考えられる。

また、各液状化地盤において最大上下/水平比を検知した時刻の平均は、地震発生から約9.0秒後であった。これより、地震が終わるのを待ってから解析を始め、液状化の判断をするよりも早期に液状化を検知できることがわかった。なお、先に述べたとおり、ここでは地震発生を地震動の揺れが10gal以上になった時刻としている。

(3) リアルタイムに求めた平均周期の検証

平均周期を求めるにあたって、液状化地盤と非液状化地盤の境界値を様々な値に設定し、解析を行った。その結果、境界値を1.0秒に設定した場合がリアルタイムに、そしてより明確に液状化地盤を非液状化地盤と区別して判断することができた。そのため、平均周期の液状化地盤と非液状化地盤の境界値を1.0秒とする。図-10にリアルタイムに求めた平均周期を震央距離との関係で示す。ここでは、最大上下/水平比と同様に、水平2方向で分けて求めた平均周期の大きい方の値を、その観測点の平均周期とし、また、図-10において1.0秒以上の値をとっている点は、逐次計算において最初に1.0秒を超え

たときの値を示している。図-10を見ると、付近が液状化した地盤において、液状化地盤と同様に1.0秒以上となっているものが多く、そのため、最大上下／水平比よりも平均周期の方が広範囲の液状化の発生を検知できるのではないかと考えられる。

図-10において、非液状化地盤で1.0秒以上という平均周期の値をとった観測点について考察する。これらの観測点は四つ橋、福島区、淀川、森河内、本庄、南港発電所である。そのうち四つ橋、福島区、淀川、森河内、本庄は1995年兵庫県南部地震において大阪平野で観測されたものである。大阪平野は周りを山に囲まれ、平野内で地震波が非常に反射しやすいという特徴がある。そのため、S波の到達以降に多くの回折波、反射波などを含み、これらの波が地震動の継続時間を増大させているものと考えられる。このような地震波はまとめて後続波と呼ばれる。したがって、大阪平野内の観測点の強震記録には後続波が含まれていることが考えられ、そのために、平均周期が少し高めとなったのではないかと考えられる。また、南港発電所については、前項で述べたとおり、軟弱地盤であった可能性が高いため、平均周期の値が大きくなったと考えられる。

以上のことより、軟弱地盤や後続波の影響を検知指標で捉えてしまう可能性があるため、その影響を遮断する工夫がさらに必要であると思われる。

また、各液状化地盤において平均周期を検知した時刻の平均は、地震発生から約15.0秒後であった。これより、最大上下／水平比よりは少し遅めであるが、地震が終わるのを待ってから解析を始め、液状化の判断をするよりも早期に液状化を検知できることがわかった。

6. 総合的液状化検知法の提案

前章までに、2つのリアルタイム液状化検知指標について多くの強震記録を用いて解析を行い、境界値を設定し、液状化地盤と非液状化地盤を判別した。そこで、振幅特性と振動数特性それぞれに注目して提案した2つのリアルタイム液状化検知指標を、総合する方法を考える。振幅特性に注目した最大上下／水平比と、振動数特性に注目した平均周期の解析結果をそれぞれ比較すると、どちらも同じように液状化地盤を検知できていることがわかった。そのため、この2つの液状化検知指標は同じ重みの指標であると考えることができ。したがって、どちらか一方の特性が現れた場合にも液状化の可能性があると判断できる。このような観点から、総合的な液状化検知法を次のように提案する。

各観測点の強震計により得られた強震記録を用いて、2つのリアルタイムな検知指標を計算し、得られた値に対して、次のようにポイントを加算する。

- 1) 最大上下／水平比が5.0以上になった場合、1ポイント加算する。
- 2) 周期が1.0秒以上になった場合、1ポイント加算する。

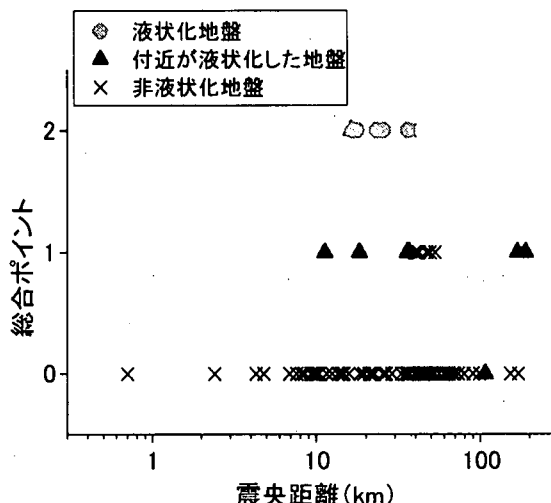


図-11 総合ポイントと震央距離の関係

この総合的液状化検知法により、強震計設置点付近の液状化発生確率が0～2ポイントの3段階で表されることになる。この総合的液状化検知法を、上で用いた強震記録に適用した結果を図-11に示す。図-11を見ると、液状化地盤の強震記録における総合ポイントは、少し重なっているため見づらいが、すべて2ポイントになっていることがわかる。また、その他に総合ポイントが2ポイントになっているのは、付近が液状化した地盤である釧路港のものと、非液状化地盤である南港発電所のものである。釧路港は、先にも述べたとおり強震計設置点から約100m離れた地点で大きな液状化被害が生じていることがわかっており、また、強震計設置点直下も完全液状化には至っていないが地盤の軟化が起きているのではないかと考えられている。そのため、総合ポイントが2ポイントになったと考えられる。また、南港発電所についても、前章で述べたように、軟弱地盤であるため液状化が発生しやすいことが予想され、液状化発生の報告はないが、総合ポイントが2ポイントであることを考えると、地盤が軟化しているだけでなく、液状化が発生している可能性があると考えられる。

つぎに、総合ポイントが1ポイントの観測点について見てみる。総合ポイントが1ポイントであるのは、付近が液状化した地盤である5観測点と、いくつかの非液状化地盤における観測点のものである。付近が液状化した地盤の多くで総合ポイントが1ポイントとなっているのは、平均周期がより広範囲の液状化の発生を捉えたためであると考えられる。また、非液状化地盤で1ポイントとなっている観測点については、前章で述べたように軟弱地盤や後続波の影響を受けたものであると考えられる。

最後に総合ポイントが0ポイントの観測点について見る。総合ポイントが0ポイントであるのは、大

多数の非液状化地盤と、付近が液状化した地盤の1観測点である。付近が液状化した地盤で総合ポイントが0ポイントなのは秋田港のもので、先に述べたとおり、秋田港は500m離れた岸壁で液状化痕跡が発生された場所である。このことより考えると秋田港観測点の強震計では、液状化が発生した地点が強震計設置点よりも離れすぎていたため、液状化地盤特有の地震動特性が捉えられなかったのではないかと考えられる。

以上より、各検知指標の場合には2段階評価で、液状化地盤と非液状化地盤を明確に分けてきたが、総合ポイントの結果の考察と、2つの検知指標の重みが同じであるということを検討すると、総合ポイントによって、地盤は次の3段階に分類するのが良いのではないかと考えられる。

- ・ 総合ポイントが2ポイントの地盤は「液状化地盤」
- ・ 総合ポイントが1ポイントの地盤は「液状化の可能性のある地盤」
- ・ 総合ポイントが0ポイントの地盤は「非液状化地盤」

また、ここで提案した本検知法は、被害報告書から液状化の発生を判断し、検討を行っているため、精度の厳密な検証はできないが、液状化地盤との相関は高いものであると考えられる。

7. 結論

本研究は、液状化地盤における地盤震動特性として、振幅特性と振動数特性のそれぞれに注目してリアルタイムな液状化検知指標を提案するとともに、これまでに得られている強震記録を用いて本検知指標の信頼性を検証し、液状化検知法を提案したものである。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) リアルタイムに液状化の発生を捉えるために、水平方向最大加速度を記録した時刻を、平均振幅により求めることができた。
- 2) 振幅特性に関する液状化検知指標として「最大上下/水平比」を提案し、液状化地盤と非液状化地盤の境界値を設定し、その信頼性を確かめた。
- 3) 振動数特性に関する液状化検知指標として「平均周期」を提案した。振幅特性に注目した検知指標よりも、広範囲の液状化の発生を捉えることができることがわかった。

- 4) 本論文で提案したリアルタイム液状化検知指標を用いて、総合的液状化検知法を提案した。この方法を100地点の強震記録に適用したところ、総合ポイントが2ポイントであれば、「液状化地盤」、1ポイントであれば「液状化の可能性のある地盤」、0ポイントであれば「非液状化地盤」であるということが明らかとなった。

今後は、さらに多くの液状化地盤における強震記録を収集し、本手法の信頼性を検証するとともに、本手法で検知が可能な範囲についても検討していく予定である。

謝辞：本研究では、強震記録として運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所、(財)鉄道総合研究所、関西電力(株)、積水ハウス(株)から提供されたもの、各機関から関西地震観測研究協議会を通じて提供されたもの、(財)震災予防協会に強振動アレー観測記録データベースとして公開されたもの、科学技術庁防災科学研究所よりK-NETで公開されているものなどを使わせていただきました。また、液状化地盤における強震記録の一部は佐藤工業(株)の吉田望博士から提供していただきました。各機関の関係各位に深謝します。また、本研究が文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(No.11555122, 研究代表者宮島昌克)によって行われたことを記し、感謝します。

参考文献

- 1) 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(掲載確定)。
- 2) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.17-25, 1978。
- 3) 安田進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, p.17, pp.161-162, 1995。
- 4) 松永康夫, 桜井博孝, 森田年一, 井合進: 1993年釧路沖地震による港湾施設被害報告書, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No.766, pp.240-243, 1993。
- 5) 土田肇, 野田節夫, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 大根田秀明, 外山進一: 1983年日本海中部地震による港湾施設被害報告書, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No.511, p.43, p.222, 1985。