

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

高田至郎¹・尾崎竜三²

¹フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 工修 神戸大学大学院生 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

本研究では地震時に地盤内で発生する過剰間隙水圧を直接測定する間隙水圧計や液状化センサーの代わりに地表面で観測される強震記録より当該地点での液状化の発生状況を把握する手法について検討した。1995年兵庫県南部地震の際ポートアイランドでは液状化の発生に起因すると考えられる非線形特性(長周期化)を含む波形が得られた。液状化地盤におけるこのような波形の長周期化に注目し、地震時に地表面で得られる加速度記録より Arias Intensity を算定し、液状化発生の有無を判別する手法を提案した。また観測地点の地盤情報との関係を考慮して液状化の発生に関して領域分けを行うことができた。液状化の領域分けと Arias Intensity を組み合わせることで液状化の発生をリアルタイムに考慮することが可能となった。

Key Words: liquefaction, Arias Intensity, real-time, prediction, strong ground motion

1. はじめに

地震時、地盤の液状化が発生した場合には液状化が発生しなかった場合に比べて被害がきわめて大きくなると言われており、液状化の発生を早期に把握し、震後の緊急対応に役立てることは非常に有益である。

1995年兵庫県南部地震時に液状化が発生したポートアイランドで得られた観測記録に見られるように液状化が発生すると地盤が軟化するため観測される波形は長周期化する。このような液状化地盤における波形の特徴を用いた研究に関して、Kayen & Mitchell¹⁾、Kayen et al²⁾は地表面波の Arias Intensity^{1), 2), 3)}と SHAKE を用いたパラメータスタディによって算定した低減係数を考慮し、液状化の発生について検討している。また Miyajima et al⁴⁾は液状化地盤の観測波形に見られる振動数特性、振幅特性を考慮し、それらを組み合わせることによって液状化を判別している。しかしながら前者では、液状化地盤の低減係数を算定する際に SHAKE を用いて精度良く推定が行えるのかという疑問が生じ、また後者では、観測地点の地盤特性を考慮していないことが課題であると考えられる。

本研究では、液状化地盤における波形の特徴である長周期化に着目し、最大加速度などの1つの値としてでなく波形全体でエネルギーとして地震動強度を考慮できる Arias Intensity を用いて現在数多く設置されて

いる地震計の観測記録より液状化判別の可能性を検討し、さらに観測地点の地盤情報を考慮することでリアルタイムに液状化の判別を行う手法を提案するものである。

2. 観測波形の振動数特性とエネルギー

1995年兵庫県南部地震時に観測された波形にも見られるように液状化の発生により地盤が軟化するため、地表面で観測される波形は長周期化することが知られた。つまり液状化した地点で観測された波形には長周期(低振動)成分が多く含まれていると言える。そこで本章では観測波形の周期(振動数)特性と波の持つエネルギーについて検討する。

(1) 適用手法

以下のような手順で観測波形を処理する。

- ①ローパスフィルタ(数種類の振動数フィルタを用いる)を用いて観測波形より短周期(高振動数)成分を除去する(図-1)。
- ②①で得られた波形より式(1)に示す Arias Intensity を算定する(実際には式(2)を用いる, 図-2)。
- ③観測波形より得られる Arias Intensity とフィルタ波の Arias Intensity の比をとる。

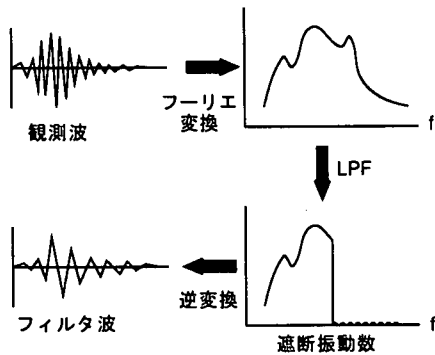


図-1 フィルタ波の算定

$$I_{xx}(v) = \frac{\arccos v}{g\sqrt{1-v^2}} \int_0^{t_0} a_x^2(t) dt \quad (1)$$

$$I_{xx}(0) = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a_x^2(t) dt \quad (2)$$

ここに、 $a_x(t)$: x 方向の時刻 t における加速度、 v : 振動子の減衰比、 g : 重力加速度、 t_0 : 地震動の継続時間。

Arias Intensity とは 1 自由度系振動子によって吸収される単位重量あたりの累積エネルギーで式(1)で表されるが、減衰の要因である $\arccos v / (g\sqrt{1-v^2})$ は 1 自由度系の減衰比の影響を受けないこと、非液状化層の減衰特性は Arias Intensity に大きく関与しないことより $v=0$ として式(2)より得られる³⁾。

ところで 1995 年兵庫県南部地震の際、ポートアイランド(神戸市開発局)で観測された波形からも知られているように、液状化が発生した地点での長周期化した観測波形は、当然長周期(低振動数)が卓越するためにより低い振動数でフィルタをかけてもフィルタ波には変化が小さい。つまりフィルタ波から得られる Arias Intensity はあまり変化しないと言える。一方液状化が発生していない箇所での観測波形は、高振動数フィルタを通したフィルタ波から得られる Arias Intensity にも変化が見られると考えられる。

(2) 適用例

1995 年兵庫県南部地震時の観測波について、フィルタ波の Arias Intensity と観測波の Arias Intensity の比をとったものと遮断振動数との関係を示す。ここで示した Arias Intensity の比は観測記録の主要動を含む長い区間の最終時刻のものである。液状化が発生した、もしくは可能性があると考えられるポートアイランド、六甲アイランド(積水ハウス)、東神戸大橋(建

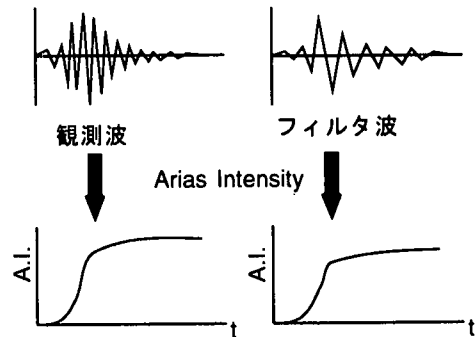


図-2 Arias Intensity の算定

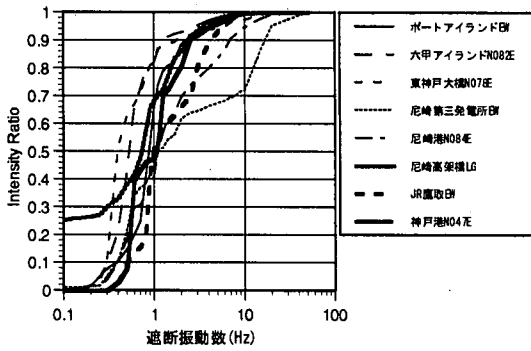
設省)、尼崎第三発電所(関西電力)、尼崎港(港湾技術研究所)、尼崎高架橋(建設省)、JR 鷹取駅(JR)、神戸港工事事務所(港湾技術研究所)について、また液状化の発生はないと考えられる関西電力総合技術研究所(以後、関電総研と略す)、JR 宝塚駅(JR)、新神戸発電所(関西電力)、神戸海洋気象台(気象庁)、猪名川高架橋(建設省)、葦合供給所(大阪ガス)、神戸大学(関西地震観測研究協議会)、海南港発電所(関西電力)、高砂発電所(関西電力)の EW 成分について(EW 方向で得られていないものはそれに近い成分を用いた)、Intensity 比と遮断振動数の関係例を図-3 に示す。これらの図より、1Hz の遮断振動数において Arias Intensity 比 0.5 程度を境界として液状化、非液状化が分けられることが知られる。また NS 成分についても同様の境界が引けることが知られた。

つぎに 1964 年新潟地震に関して同様のことを行った結果を図-4 に示す。新潟地震については、川岸町県営アパートの記録のみが入手できた。本地点は新潟地震時に液状化が発生しており、1Hz の遮断振動数については Intensity 比が 0.6 を越えている。

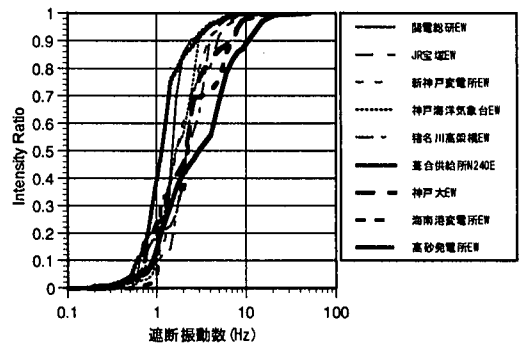
また 1968 年十勝沖地震時の記録としては、宮古-S、室蘭-S、青森-S、八戸事-S におけるものを用いたが、青森-S については液状化が発生したとされており⁴⁾、本検討からも 1Hz 遮断振動数で Intensity 比 0.6 程度となることが知られた。八戸事-S では 0.3 程度であり、他の 2 地点では 0.1 にも満たない結果となった。

1978 年宮城県沖地震に関しては、塩釜工場-S、宮古-S、大船渡防地-S の記録を用いて検討した。結果として Intensity 比は 0.4 以下であったが、これらの観測地点での液状化に関する記述が得られなかった。

1983 年日本海中部地震については、秋田-S、青森-S に関して検討した。青森-S の記録に関して Intensity 比 0.5 を越えていることが知られた。秋田-S、青森-S ともに港内で液状化は発生しているが、観測地点で液状化が発生したという記述は見られなかった⁵⁾。



(1) 液状化発生地点



(2) 液状化非発生地点

図-3 EW 成分の観測記録による遮断振動数と Intensity 比の関係 (兵庫県南部地震)

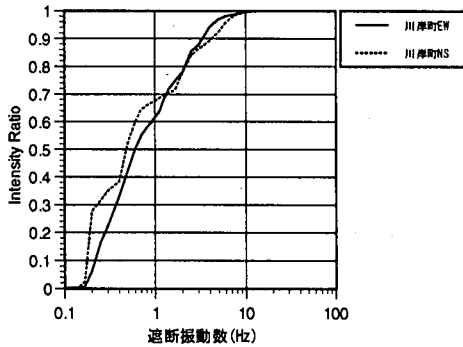


図-4 遮断振動数と Intensity 比の関係 (新潟地震)

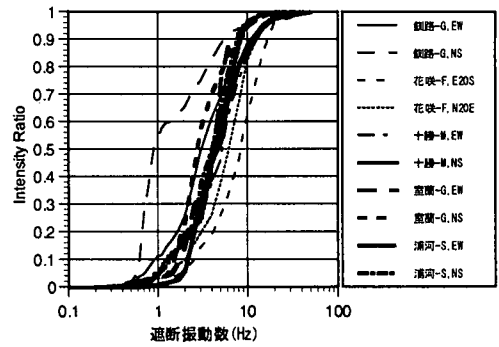


図-5 遮断振動数と Intensity 比の関係 (釧路沖地震)

1993 年釧路沖地震時の観測記録については、釧路-G、花咲-F、十勝-M、浦河-S、室蘭-G で得られたものについて検討した。図-5 より液状化発生の可能性のあった釧路-G の NS 成分についてのみ Intensity 比が 0.5 を越えていることが分かる。

1993 年北海道南西沖地震では、室蘭-G、函館-F、函館-M における観測記録について検討した。本地震時、函館港では噴砂が見られ、液状化が発生した⁶⁾。函館-F、函館-M の記録については Intensity 比が 0.3 以上となった。

続いて 1994 年北海道東方沖地震に関しては、花咲-F、釧路-G、十勝-M での観測記録を検討した。花咲港内、釧路港内に一部液状化が発生しているが観測地点における液状化はなかった⁷⁾。本検討ではどの観測地点で得られている記録についても Intensity 比は 0.25 以下であることが知られた。

1994 年三陸はるか沖地震については、宮古-G、八戸市-G、青森-G での観測記録を検討した。青森-G に関して 1Hz 遮断振動数の Intensity 比が 0.65 以上であり、他の地点は 0.2 以下であることが知られた。本地震に関しては、八戸港の埋立地での液状化が多く発生しているが、観測地点での液状化に関する記述は見られない⁸⁾。また他の観測地点についても液状化が発生

したかどうかは不明である。

上述までの検討により液状化の発生と非発生の境界としては 1Hz 遮断振動数で Intensity 比 0.4 から 0.6 程度であることが知られた。つづいて 1Hz フィルタ波と観測波の Arias Intensity の比を用いて液状化の境界についてより詳細に検討する。上で検討した各観測地点の液状化の発生状況ごとに液状化発生を 1、液状化非発生を 0、地盤特性の連続性、地点近傍での液状化の発生状況より考慮して、液状化発生の可能性ありと考えられるものを 0.5、資料なしを -1 として Intensity 比との関係を図-6 に示す。本図より液状化発生と発生の可能性ありの境界値は Intensity 比 0.6、液状化発生の可能性ありと液状化非発生の境界は 0.3 と見なす。この境界に従うと、数点で液状化の発生状況が正確に評価できていないことが知られる。これら数点は液状化の発生に関して、Intensity 比のみで判断できない地点であると考えられる。次節より観測地点との地盤特性との関係を併せて考慮することで、液状化の発生に関してさらに検討していく。

(3) 地盤特性との関係

前節で検討した波形の観測地点で当該地点のボーリングデータが入手可能であった地点について 1Hz フィ

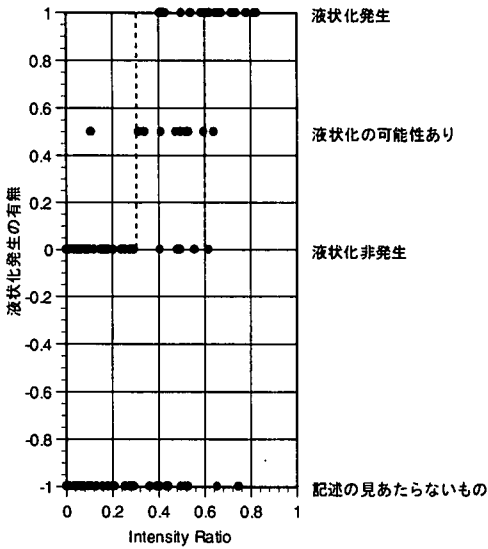


図-6 液状化の発生状況と Intensity 比の関係

ルタ波と観測波の Arias Intensity 比とそれぞれの地点での地盤情報の関係について検討する。観測地点のボーリングデータについては各機関より入手した資料ならびに文献9)から18)をもとにした。本章で考慮した地盤情報はほとんどのボーリングデータから入手可能であり、液状化の発生に関連すると考えられる地表下面10mまでの平均N値と地表下面10mまでの砂質土層厚を選択した。砂質土層厚については兵庫県南部地震など最近の地震では礫質土が液状化した¹⁹⁾ことを考慮し、地表下面10mまでの礫質土層を含む砂質土層厚について検討する。さらに Arias Intensity の比をとった際に加速度振幅に関する情報が消えてしまうため最大加速度値を考慮することとした。

液状化の発生状況の明らかな地点について、N 値、砂層厚、最大加速度と Intensity 比の関係を検討し、液状化の領域分けを行う。さらに2つの成分で異なる判別結果が得られる場合を考慮して、最大加速度、Intensity 比については各成分の平均値を用いて検討したものについて説明する。

図-7 から図-9 に Intensity 比と地盤特性、最大加速度値の関係を示す。これらの図は4つの部分に境界分けされており、①液状化発生、②液状化発生の可能性あり、③液状化非発生、④判断できない領域に分けられる。領域分けに関しては、「液状化発生領域は液状化発生のデータがすべて収まるように、液状化非発生領域は液状化発生データのみならず、液状化の可能性ありのデータも含まないように」線引きを行うことができた。④の判断できない領域については本検討で用いたデータでは決定できない領域であったため、本検討では液状化の可能性ありの領域とする。また①の領

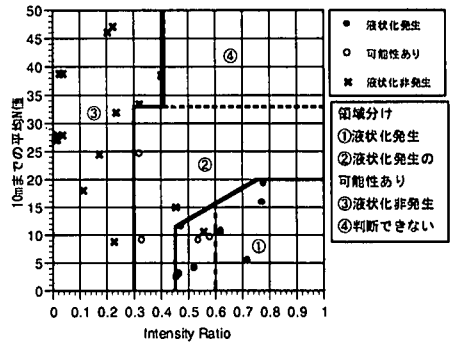


図-7 10mまでの平均N値と Intensity 比の関係

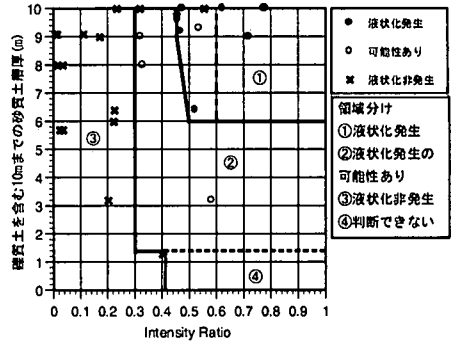


図-8 10mまでの砂質土層厚と Intensity 比の関係 (礫質土層厚を含む)

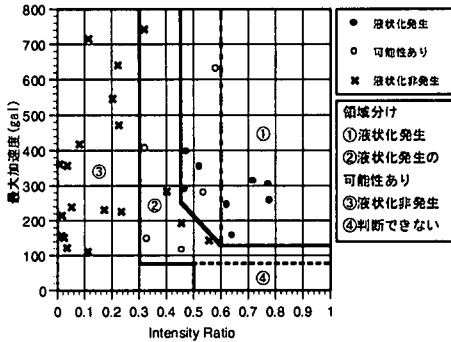


図-9 最大加速度値と Intensity 比の関係

域に関しては当然 Intensity 比が0.6以上になればより液状化が発生していると言える。

これらの図より Intensity 比が大きくなれば、「N 値が小さいほど、砂質土層厚が厚いほど、最大加速度が大きいほど」、液状化が発生している傾向が知られる。なお、最大加速度に関しては液状化発生により地盤が軟化すれば、減幅されて地表面に伝播する特徴からある大きさと上限の境界値が引ける可能性もある。

今後この領域分けに関してはデータを蓄積することでさらに詳細になっていくものと推測できる。これらの図を用いることで地震発生後観測地点の情報のどこに位置するかによって液状化の発生について判断できるものと考えられる。

3. リアルタイム液状化判定への適用

実地震時を想定して記録が得られるごとにフィルタ波を算出し、Arias Intensity を求め、Intensity 比を算定する。図-10 にその概念図を示す。その後前述した地盤特性との関係を用いてリアルタイムに検討を行う。本章では前章で検討した N 値、砂層厚、最大加速度値との関係を用いる。N 値、砂層厚に関しては地震前から明らかになっている情報であるが、最大加速度値については地震中に変動があるために主要動が終わるまでは固定した値にはならない。

ここで 1995 年兵庫県南部地震時のポートアイランド、関電総研での EW 成分の観測記録をもとに Arias Intensity 比を算定したものを観測波形と併せて図-11、図-12 に示す。これらの図より液状化の発生したポートアイランドの Intensity 比は、波形が長周期化し始めると急激に増加し、主要動が終わるころに一定になっていることが分かる。それとは反対に非液状化地点である関電総研に関しては、主要動で少しだけ Intensity 比が上昇するが、その後の変動は少なく 0.2 程度の値で一定値になっていることが知られる。

また前章同様に 1 つの地点について液状化という現象があるために、両成分を合わせて考慮すべきである。そこで Intensity 比と最大加速度については各成分の平均値を取って判別する。各成分の Intensity 比を平均した時刻歴を図-13 に示す。

地盤情報との関係にもとづく領域分けの結果を用いた具体例を以下に示す。ポートアイランドについては N 値は 5 程度、礫質土層を含む砂層厚は 9m、また関電総研では N 値は 10 程度、礫質土層を含む砂層厚は 6.4m となる。最大加速度については時刻歴波形が得られるごとに明らかになっていく。判別結果を図-14 から図-16 に示した。

ポートアイランドの場合、10m までの平均 N 値、また礫質土層を含む 10m までの砂質土層厚での判定はほぼ同じ結果を与え、4.7 秒程度で液状化の可能性ありの領域に入り、6.3 秒程度まで可能性ありの領域を変動したあと液状化の領域に移る。さらに 6.5 秒程度で真に液状化の領域に到達する。最大加速度による判定は今回に記録に関しては N 値などによる判定と同じ結果を与えることになった。

関電総研に関しては時刻歴での検討でも Intensity 比 0.3 を越えず、液状化の領域に入ることはなく、非液状化となった。

このように Intensity 比を時刻歴で算定し、前節で検討した地盤情報との関係にもとづく領域分けの結果を用いることで、液状化の発生をある程度リアルタイム

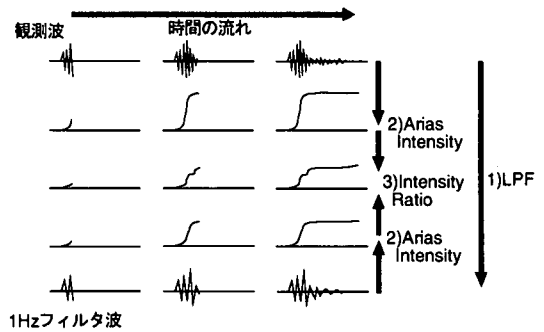


図-10 時刻歴での Arias Intensity 比の算定概念図

にとらえることができるようになった。

4. 地点液状化判定

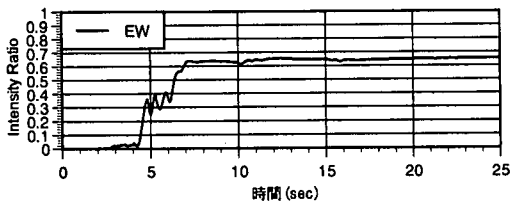
本章では想定地震による地点の液状化判定について検討する。検討する地点としては 1995 年兵庫県南部地震の際に尼崎市において液状化の発生した尼崎-G、尼崎第三発電所、液状化発生の可能性があると考えられる尼崎高架橋、関震協尼崎とする。本研究室で所有する有効応力液状化解析プログラム^{20),21)}を用いて、これらの地点で柱状図をもとに作成した地盤モデルに基盤波入力を行い、地表面で得られる波形から上述した手法に従って液状化判定を行うものである。

本プログラムは、初期有効応力解析、有効応力液状化解析、過剰間隙水圧消散・沈下解析の 3 つの部分で構成されている。繰り返し載荷時の土の非線形応力-ひずみ履歴関係として、Hardin Dmievich モデルを、過剰間隙水圧の上昇量には、西ほか²²⁾が提案したダイレイタンスーによる体積ひずみと繰り返し回数との関係を双曲線表示した算定式を用いている。また地震動停止後、元の静水圧状態に戻ろうとする際の消散・沈下解析には、Biot の圧密沈下理論を用いている。

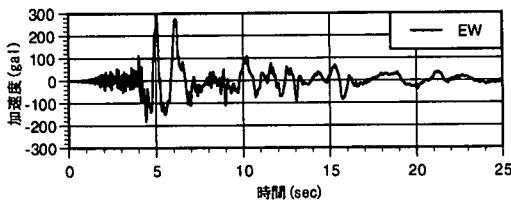
ただし液状化解析に際しては、地下水位の情報が得られなかった地点があることから各地点とも GL0m に地下水位を設定して解析を行った。

考慮した想定地震は 1995 年兵庫県南部地震と文献 23) を参照して有馬高槻構造線地震 (M7.6) とした。

液状化解析時の有馬高槻構造線地震の入力基盤波は、1995 年兵庫県南部地震時に岩盤上である神戸大学 (震源距離 20km 程度) で得られた波形の EW 成分を文献 23) において地表面最大加速度の推定の際に断層から観測地点までの等価震源距離を考慮した距離減衰式^{24),25)}により計算される基盤最大加速度に振幅調整して用いる (表-1)。図-17 に振幅調整する前の波

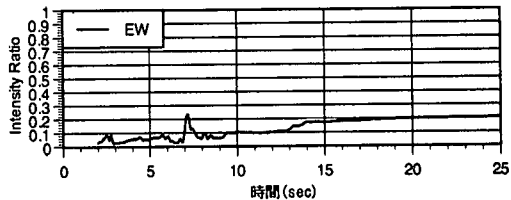


(1) Arias Intensity 比の時刻歴 (EW 成分)

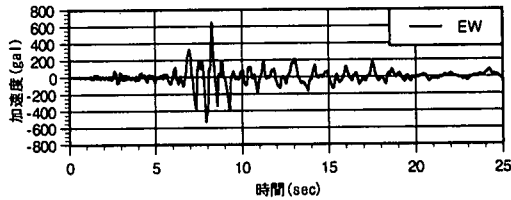


(2) 地表面観測記録 (EW 成分)

図-11 ポートアイランドの Arias Intensity 比と観測記録

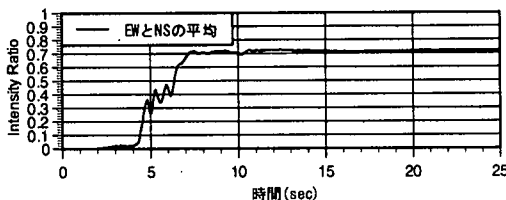


(1) Arias Intensity 比の時刻歴 (EW 成分)

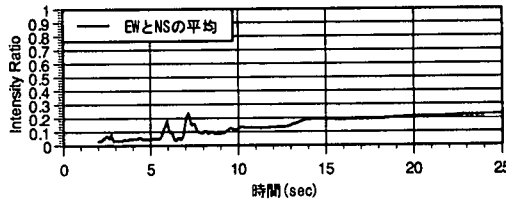


(2) 地表面観測記録 (EW 成分)

図-12 関電総研の Arias Intensity 比と観測記録



(1) ポートアイランド (EW, NS 成分の平均値)



(2) 関電総研 (EW, NS 成分の平均値)

図-13 Arias Intensity 比の時刻歴

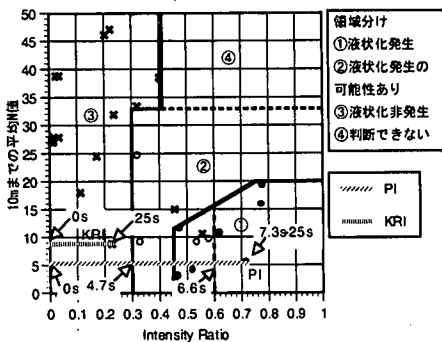


図-14 10m までの平均 N 値による判定結果

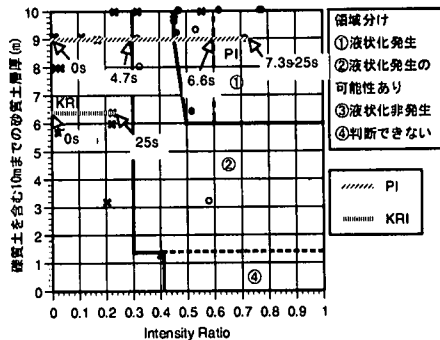
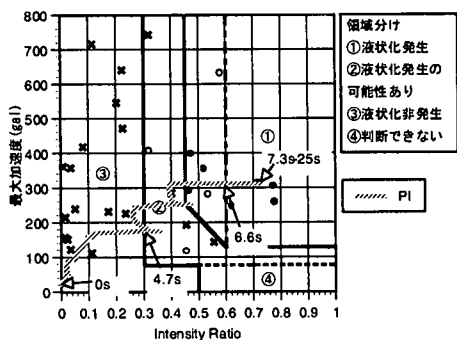
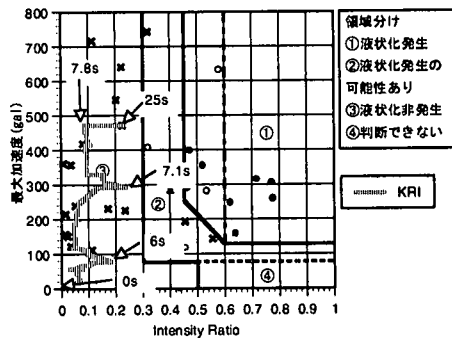


図-15 礫質土層を含む 10m までの砂質土層厚による判定結果



(1) ポートアイランド

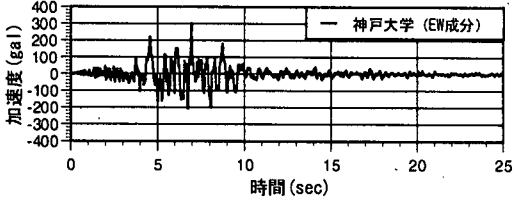


(2) 関電総研

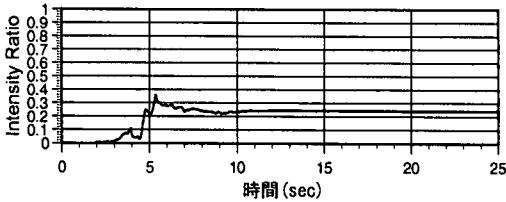
図-16 最大加速度による判定結果

表-1 各地点の基盤最大加速度

観測地点	基盤最大加速度(gal)
尼崎-G	422.5
尼崎第三発電所	401.0
尼崎高架橋	419.1
関震協尼崎	428.0



(1) 観測波形



(2) Arias Intensity 比

図-17 有馬高機構造線地震を想定した際に用いる波形とその Arias Intensity 比

形を示す(併せて Arias Intensity 比の時刻歴も示した)。本章ではそれぞれの地点について比較的入手することが容易であり、文献 23)において広域の液状化判定に用いたニューラルネットワークの要因の1つでもある地下 10m までの平均 N 値との関係を用いて液状化判定を行う。

(1) 1995 年兵庫県南部地震について

1995 年兵庫県南部地震については実際の地表面観測記録を用いて判定を行う。本節では NS 成分およびそれに近い成分を用いている。図-18 から図-21 に各地点の観測記録より算定した Arias Intensity 比の時刻歴を示している。各地点とも Arias Intensity 比は 0.4 から 0.6 程度まで上昇していることが知られる。

各観測地点の 10m までの平均 N 値は尼崎-G : 11.5, 尼崎第三発電所 : 3.0, 尼崎高架橋 : 9.1, 関震協尼崎 : 13.5 である。Arias Intensity 比との関係を図-22 に示す。本図より関震協尼崎を除いて液状化発生の領域に、関震協尼崎は液状化の可能性ありの領域に位置することが知られる。実際に尼崎-G, 尼崎第三発電所では液状化が発生していることから妥当な結果が得られていると言える。また本手法によれば尼崎高架橋, 関震協尼崎についても液状化およびその発生した可能性はあると推察される。

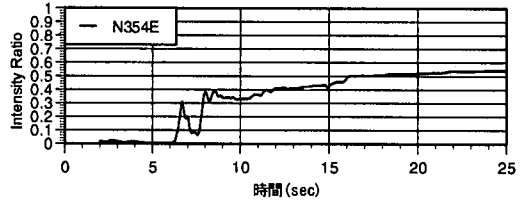


図-18 Arias Intensity 比 (尼崎-G)

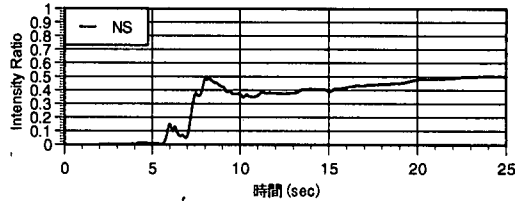


図-19 Arias Intensity 比 (尼崎第三発電所)

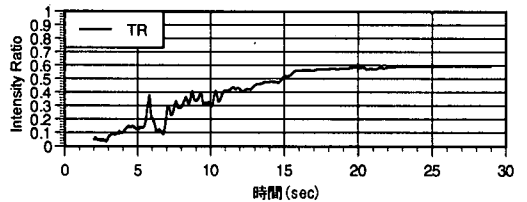


図-20 Arias Intensity 比 (尼崎高架橋)

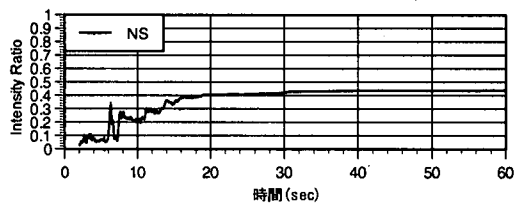


図-21 Arias Intensity 比 (関震協尼崎)

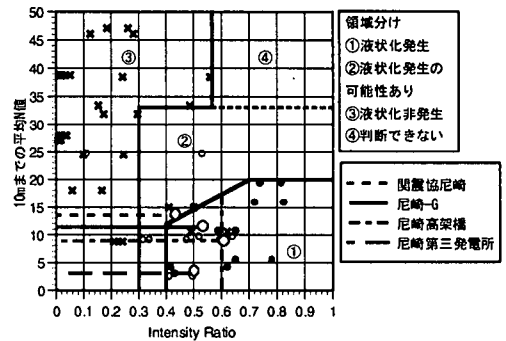
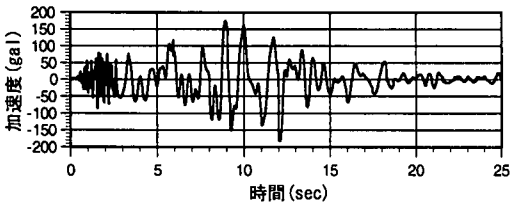


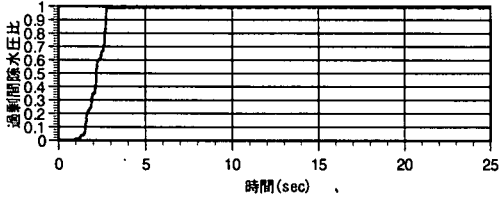
図-22 平均 N 値と Intensity 比の関係

(2) 有馬高機構造線地震について

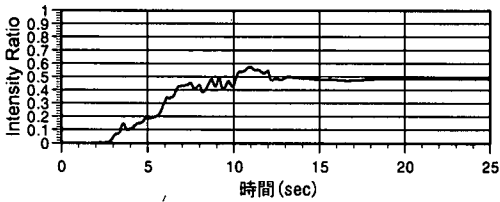
各地点について作成した地盤モデルの基盤に、図-17 に示した波を表-1 に従って振幅調整して入力し、液状化解析を行った。有馬高機構造線地震を想定した際の液状化解析より得られる各地点の地表面加速度、地表面下 2m 程度の地点の地盤内の過剰間隙水圧比 (= 過剰間隙水圧 / 有効応力)、地表面加速度より計算した Intensity 比の時刻歴を図-23 から図-26 に示す。



(1) 地表面加速度

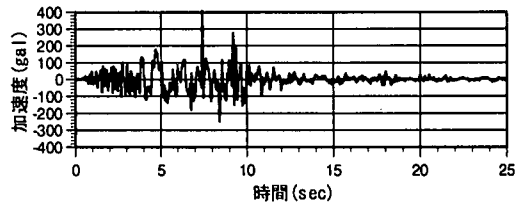


(2) 過剰間隙水圧比

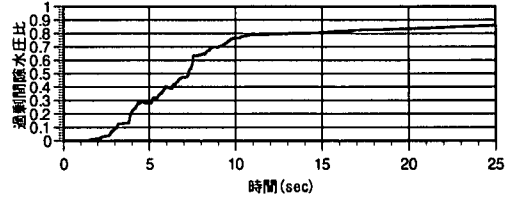


(3) Arias Intensity 比

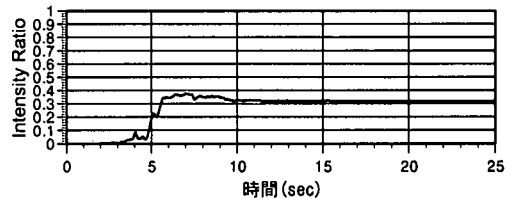
図-23 尼崎-G



(1) 地表面加速度

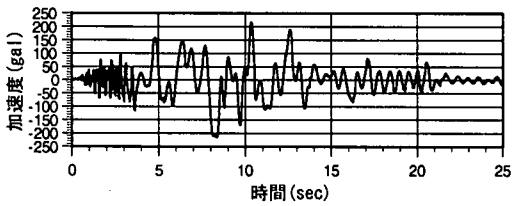


(2) 過剰間隙水圧比

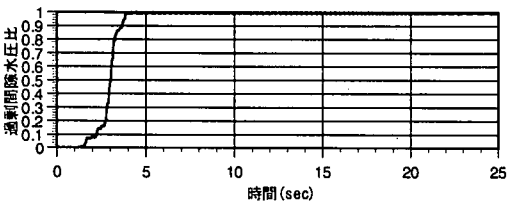


(3) Arias Intensity 比

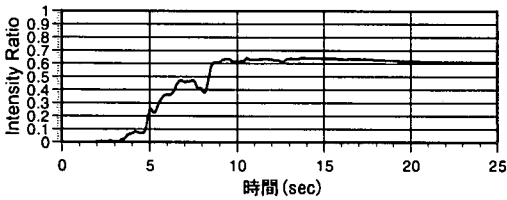
図-25 尼崎高架橋



(1) 地表面加速度

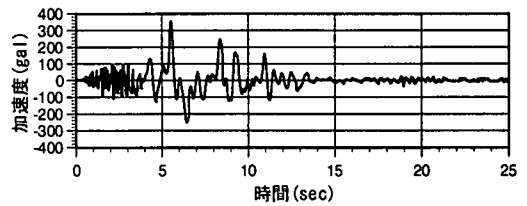


(2) 過剰間隙水圧比

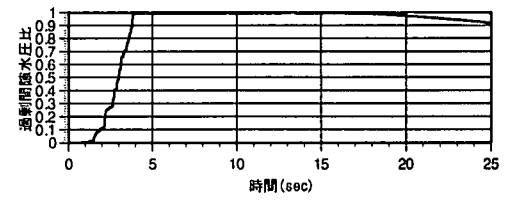


(3) Arias Intensity 比

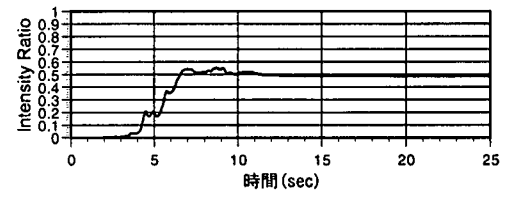
図-24 尼崎第三発電所



(1) 地表面加速度



(2) 過剰間隙水圧比



(3) Arias Intensity 比

図-26 関震協尼崎

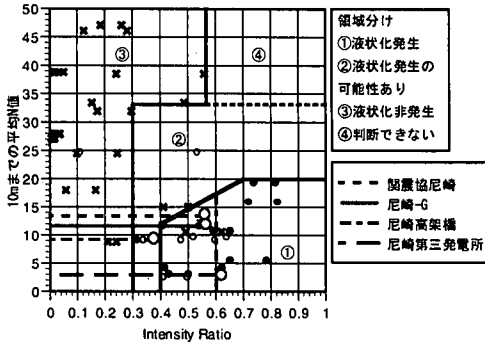


図-27 平均N値とIntensity比の関係

これらの図より尼崎高架橋を除く地点については完全液状化に達しており地表面加速度波形も長周期化していることが分かる。尼崎高架橋についても液状化解析より得られる過剰間隙水圧比は0.9となっていることから完全液状化には達していないものの液状化の可能性のあることが知られる。

各地点について Arias Intensity 比と 10m までの平均 N 値の関係を図-27 に示す。本図からも尼崎高架橋を除く 3 点については液状化の領域に、尼崎高架橋については液状化の可能性ありの領域に位置するから液状化解析結果とも良い対応が見られ、妥当な結果が得られていることが知られた。

6. まとめ

本研究では液状化地盤における波形の特徴である長周期化に着目し、最大加速度などの 1 つの値としてではなく波形全体でエネルギーとして地震動強度を考慮できる Arias Intensity を用いる液状化判別法を検討した。さらに想定地震を考慮し、その特徴に応じた波形を地盤柱状図より作成したモデルに基盤入力し、液状化解析を行って得られた地表面加速度より提案手法を用いて液状化判定を行った。得られた結果をまとめて示す。

- 地震時に観測される地表面加速度記録より算出される Arias Intensity と観測地点の地盤情報を用いて、当該地点での液状化の発生状況を把握する手法を提案した。
- 1Hz フィルタ波と観測波の Arias Intensity 比から判断すれば、液状化発生と液状化の可能性ありの境界は 0.6、また液状化の可能性ありと液状化非発生の境界は 0.3 であることが知られた。
- 平均 N 値、砂質土層厚などの液状化の発生と関連した地盤情報との関係を考慮して、液状化の発

生について領域分けを行うことができた。

- 観測記録から算定される Arias Intensity と観測地点の地盤情報にもとづく液状化の領域分けをもとに、液状化の発生をリアルタイムに考慮できたと考えられる。
- 提案した手法による判定結果と液状化解析より得られる地盤内の過剰間隙水圧比から判断される液状化の発生程度には、かなりの相関が見られることから、本手法による液状化判定は妥当な結果を与えていると考えられる。

謝辞：本研究で使用した強震記録のうち、1964 年新潟地震、1978 年宮城県沖地震、1983 年日本海中部地震の記録は岐阜大学杉戸真太教授より提供いただき使用させていただいた。また 1968 年十勝沖地震、1993 年釧路沖地震、1993 年北海道南西沖地震、1994 年北海道東方沖地震、1994 年三陸はるか沖地震ならびに 1995 年兵庫県南部地震の大阪事-S、和歌山-G での記録は運輸省港湾技術研究所地盤震動研究室より提供いただき使用させていただいた。さらに 1995 年兵庫県南部地震の JR 宝塚駅、鷹取駅の記録は財団法人鉄道総合技術研究所より提供していただいた JR 警報地震計(宝塚駅、鷹取駅、FD シリアル番号 R-051)によるものであり、また六甲アイランドにおける観測記録は積水ハウスによるものである。そして 1995 年兵庫県南部地震の残りの観測記録は各機関より関西地震観測研究協議会に提供されたものを使用させていただいた。各機関ならびに関係者の方々に深く謝意を表す。

参考文献

- Kayen, R. E., Mitchell, J. K.: Assessment of liquefaction potential during earthquakes by arias intensity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, pp.1162-1174, 1997.12.
- Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Holzer, T. L.: Ground motion characteristics and their relation to soil liquefaction at the Wildlife liquefaction array, Imperial Valley, California, *Proceedings from the Fifth U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*, pp.267-283, 1994.11.
- Arias, A.: A measure of earthquake intensity, R.J. Hansen ed., *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, pp.438-483, 1970.
- Miyajima, M., Kitaura, M., Nozu, S.: Detective method of liquefaction using strong ground motion records, *Proceedings of Third China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, pp.133-140, 1998.8.
- 土田肇, 野田節男, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 大根田秀明, 外山進一: 1983 年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技研資料, No.511, 1985.3.
- 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 山崎浩之, 松永康男, 関口信一郎, 水野雄三, 藤本義則: 1993 年

- 北海道南西沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.791, 1994.12.
- 7) 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 田中祐人, 山崎浩之, 宮井真一郎, 野津厚, 宮田正史, 藤本義則: 1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.856, 1997.3.
 - 8) 三陸はるか沖地震災害調査委員会: 1994年三陸はるか沖地震災害調査報告書, 1995.7.
 - 9) 佐藤幸博, 宮田正史, 一井康二, 森田年一, 井合進: 1994年北海道東方沖地震の港湾施設における強震記録, 港湾技研資料, No.853, 1996.12.
 - 10) 宮田正史, 佐藤幸博, 一井康二, 森田年一, 井合進: 1994年港湾地域強震記録年報, 港湾技研資料, No.840, 1996.6.
 - 11) 佐藤幸博, 一井康二, 宮田正史, 森田年一, 井合進: 1994年三陸はるか沖地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No.892, 1997.12.
 - 12) 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 田中祐人, 山崎浩之, 宮井真一郎, 野津厚, 宮田正史, 藤本義則: 1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.856, 1997.3.
 - 13) 港湾施設被害検討委員会編: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察, 港湾技研資料, No.813, 1995.9.
 - 14) 土田肇, 山田通一郎, 倉田栄一: 港湾地域強震観測地点資料(その1), 港湾技研資料, No.34, 1967.11.
 - 15) 倉田栄一, 土田肇, 須藤克子: 港湾地域強震観測地点資料(その2), 港湾技研資料, No.107, 1970.12.
 - 16) 倉田栄一, 石坂徳三: 港湾地域強震観測地点資料(その3), 港湾技研資料, No.156, 1973.3.
 - 17) 横山淑子, 倉田栄一: 港湾地域強震観測地点資料(その4), 港湾技研資料, No.298, 1979.6.
 - 18) 横山淑子, 倉田栄一: 港湾地域強震観測地点資料(その5), 港湾技研資料, No.351, 1980.9.
 - 19) (社)日本道路協会: 道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説, (社)日本道路協会, pp.91-97, 1996.2.
 - 20) 高田至郎, 李勝雁, 上野淳一, 堀喜代造: 兵庫県南部地震における地盤液状化の解析について, 建設工学研究所報告, 第38-B号, pp.57-68, 1996.11.
 - 21) 孫建生: 地盤変状を受ける地中構造物の耐震診断エキスパートシステム構築および対策に関する基礎的研究, 神戸大学博士学位論文, pp.64-89, 1991.3.
 - 22) 西好一, 金谷守, 松井家孝, 当麻純一: 地震時における基礎地盤の安定性評価(その1)動的解析に基づく砂・砂礫地盤の安定性評価手法の開発, 電力中央研究所報告, 1986.9.
 - 23) 尾崎竜三: リアルタイム地震防災における液状化モニタリングと地震対策に関する研究, 神戸大学博士学位論文請求論文, pp.132-164, 1999.3.
 - 24) Fukushima, Y., Tanaka, T.: A new attenuation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.80, pp.757-783, 1990.8.
 - 25) 尼崎市消防局, (財)建設工学研究所: 尼崎市被害想定調査業務委託-想定地震による地震動予測に関する検討一, 1998.1.

(1999. 3. 8 受付)

REAL-TIME PREDICTION OF LIQUEFACTION BASED ON STRONG GROUND MOTION RECORDS

Shiro TAKADA and Ryuzo OZAKI

This paper shows a new methodology of real-time prediction of liquefaction. The methodology is focused on the frequency characteristics at the liquefied ground. In practical approach, Arias Intensity, which is calculated from the observed strong ground motion records at ground surface and the soil properties of the observed point are used. By categorizing the liquefied site and the non-liquefied one of past earthquakes by soil properties and calculating Arias Intensity in every moment after occurrence of earthquake, the methodology can be applied in the real-time prediction of liquefaction. The accuracy of the proposed methodology is verified by the scenario earthquake. It is shown that the results have adequate accuracy.