

強震記録に基づく液状化発生の 判別手法について

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 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²学生会員 工修 神戸大学大学院博士後期課程 自然科学研究科(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

地震時、地盤の液状化が発生した場合は発生しなかった場合に比べて、数 10 倍もの被害があると言われており、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といえる。

本研究では、液状化発生の早期把握として、まず地震時に地表面および地中で得られる加速度記録より液状化発生を判別する手法について検討する。1995 年兵庫県南部地震時に鉛直方向の異なる深度で観測記録の得られたポートアイランドおよび海南港変電所での強震記録を用いて評価を行う。提案手法を適用した結果液状化が発生したとされるポートアイランドで良好な結果を得ている。

Key Words : Liquefaction, Strong ground motion records, Predominant Period, Amplitude

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震時、ポートアイランド、六甲アイランドなどの阪神地域の埋立地盤では広範囲に渡って液状化の発生による噴砂、噴水が見られた。その中でもポートアイランドでは、今後の液状化現象の解明に非常に有益であると考えられる鉛直アレーでの強震動記録が得られた。また関西電力のいくつかの発電所、変電所などにおいても鉛直アレー記録が得られている。

本文では、地震時に観測される強震記録をもとに液状化の発生を判別することを目的とする。まず上述の鉛直アレー観測記録をもとに液状化の発生について検討する。さらに液状化時の強震記録に見られる長周期化および振幅の減衰を考慮して地表面での観測記録を用いて液状化発生を判別する基礎的な手法を提案する。

2. 鉛直アレー観測記録を用いた液状化発生の検討

(1)手法

本文では式(1)で算定される強震動記録(加速度)の 2 乗の積分値に比例する量(Arias Intensity¹⁾)を算定し、さらに式(2)で示される低減パラメータ r_b を考慮して液状化の発生について判断する。式(1)は各時刻までに含まれる地震波のエネルギー量を算出する意味を有している。

$$I_h = I_{xx} + I_{yy} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a_x^2(t) dt + \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a_y^2(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ は時刻 t における強震動記録である。

$$r_b = \frac{I_{xx}(\text{depth})}{I_{xx}(\text{surface})} \quad (2)$$

式(1)は水平 1 方向でも適用可能である、地中深部で液状化発生度合が低く、地表面で液状化が顕著な場合には式(2)の値は 1.0 より十分に大きな値となることが見込まれる、液状化が発生した際には、液状化層の減衰特性の変化にあまり影響を受けない、加速度記録全体を地震動強度の算定に導入できるという利点を持っている。

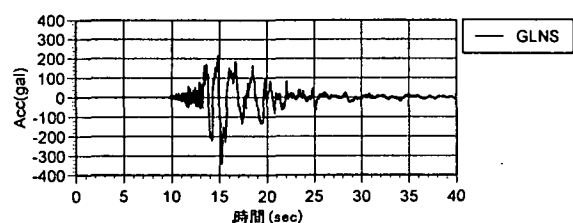
(2)1995 年兵庫県南部地震時の観測記録への適用

上述の式(1), (2)を兵庫県南部地震時にポートアイランド(神戸市開発局), 海南港変電所(関西電力)で鉛直方向に異なる深さで観測された強震記録に適用し, 液状化発生との関連について検討する. 本文では, 液状化層(砂層)の深度を考えて, ポートアイランドでは地表面(GL)と GL-16m, 海南港変電所では GL と GL-25m での観測記録を用いた. 図-1, 2 にポートアイランド, 海南港変電所の観測記録波形, 算定した Arias Intensity および深さの低減係数を NS 成分について示している.

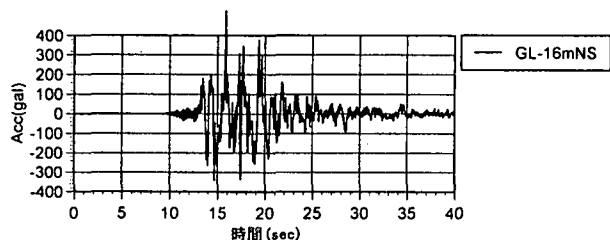
ポートアイランドについて言えば, 加速度記録に GL と GL-16m の間で液状化が発生したためと考えられる長周期化と振幅の減衰が見られる. そのために Arias Intensity は地表面の値の方が地中の値よりも小さくなっている. また低減係数 r_b については P 波が終わると考えられる 13 秒あたりから大きく変

動している. 文献 1)によれば, この大きな変動は液状化発生によるひずみ軟化挙動の始まりと間に挟まれた液状化層がエネルギーを吸収するためであると考えられる. 一方, 海南港変電所については加速度記録に目立って大きな変化は見られず, Arias Intensity は GL での値の方が大きくなった. また低減係数 r_b については, P 波支配の部分ではよく変動しているが, それ以後の S 波支配の主要動部分に関しては, 変動はあるがレベル的には小さいといえる. r_b は非液状化状態では, 1.0 よりも小さく時間的に変動しない傾向にあると言える.

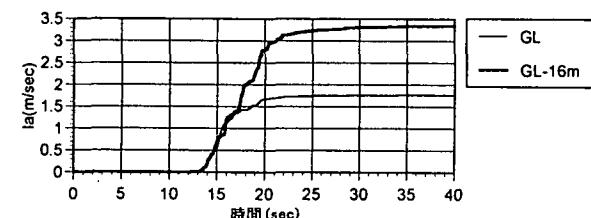
ポートアイランドおよび海南港変電所での強震記録解析から判断すると鉛直方向にアレー記録が得られる場合には, 低減係数 r_b の変動状況から液状化判定が可能と考えられる. 他の強震記録への適用結果については発表にゆずる.



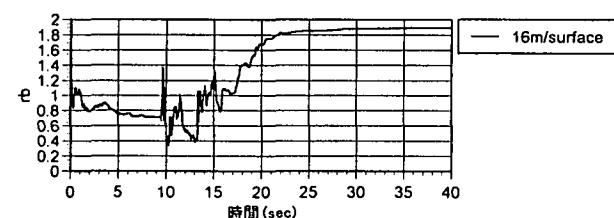
(1)加速度時刻歴 (GL)



(2)加速度時刻歴 (GL-16m)

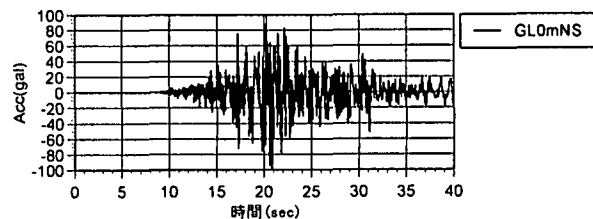


(3)Arias Intensity

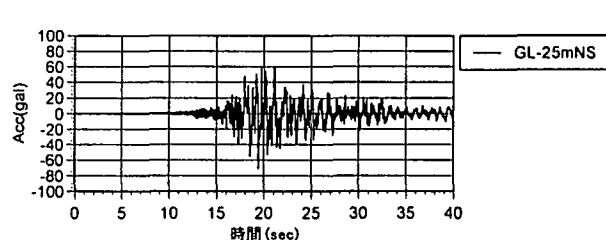


(4)低減係数

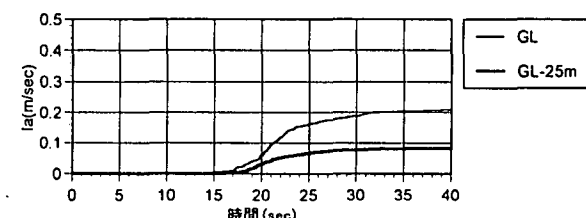
図-1 ポートアイランド NS 成分



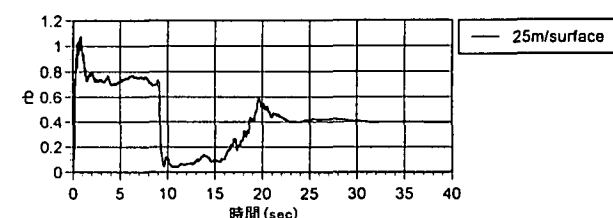
(1)加速度時刻歴 (GL)



(2)加速度時刻歴 (GL-25m)



(3)Arias Intensity



(4)低減係数

図-2 海南港変電所 NS 成分

3. 地表面観測記録を用いた液状化判別の一手法の提案

(1)概説

前章の手法は主に強震動記録の振幅エネルギーをもとに得られる指標を用いた判別法であった。ポートアイランドにおいて観測された記録から明らかなように液状化が発生した箇所では観測された記録には、長周期化、減衰（非増幅）などの特徴が見られる。そこで本章では観測記録波形に見られる周期特性、振幅特性の変化に着目した液状化の判別手法について検討する。

(2)適用手法

まず観測波形の主要動部分について時間幅を区切り時間軸 t での移動平均を用いたランニングスペクトルを求める。本文では時間幅を 5.12 秒、また移動時間間隔を 0.01 秒とした。次に得られたスペクトル毎に卓越周期 T_p を抽出し、卓越周期の時間変化に着目する。

$$X(T_p)_{t_{j+1}} = \text{Max} \left\{ \int_{t_j}^{t_{j+1}} x(t) e^{i \frac{2\pi}{T} t} dt \right\}, 0.02 \leq T \leq 5.12 \quad (3)$$

本ランニングスペクトルによれば、途中で波の性格が著しく変化したかを検討することができる²⁾ので、長周期化を捉えられるものとする。

あわせて上下動（疎密波）に比較して液体中では波動が伝わりにくくなる水平動（せん断波）の特性より水平、上下方向の加速度振幅の 2 乗の比を考慮することで、液状化の発生について検討する。

(3)結果と考察

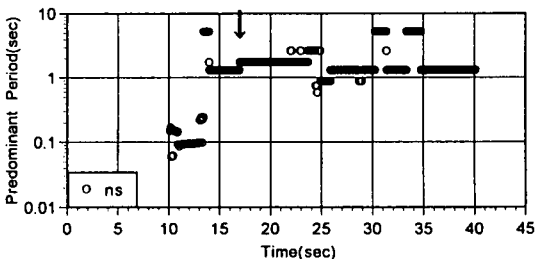
本文では液状化が発生したとされるポートアイランド、六甲アイランドおよび液状化の発生はなかったであろう海南港変電所の地表面観測波形を用いた。ポートアイランド、六甲アイランド、海南港変電所の主要動での卓越周期の時刻歴、水平、上下動の振幅の 2 乗の比の時刻歴（移動平均法で平滑化している）をそれぞれ図-3 から図-5 に示す。

ポートアイランド波形について、NS 成分では 13 秒程度までは、初期の P 波のため卓越周期はかなり短周期でよく揺れる。その後、S 波の支配領域に入り、液状化による長周期化の影響が見られる。15 ～ 20 秒では、1.0 ～ 2.0 秒の卓越周期を持っており、1.0 から 2.0 へ移動する時刻で液状化現象が顕著と思われる。その区間での UD 成分は依然として 0.2 ～ 0.3 秒程度の卓越周期で、かなり短周期である。

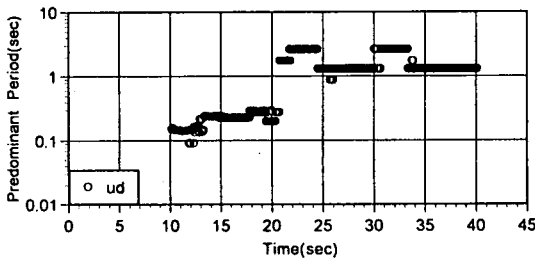
さらに二乗振幅比から主要動の部分ではほぼ 1.0 を下まわっており、水平動は減衰して地表面まで伝わった、すなわち液状化が発生したと考えられる。

次に六甲アイランド波形について、水平動での卓越周期の変動は、ポートアイランドより段階的で、P 波から S 波への移行、さらに液状化の発生と思われる長周期化が顕著に見られる。また上下動に関しては、10 ～ 25 秒の主要動部分で 0.1 秒前後の短周期で卓越している。以後振幅が小さくなると長周期となっている。さらに二乗振幅比は主要動では 1.0 前後で揺れており、水平動に際だった増幅がないことから液状化が発生したものと考えられる。

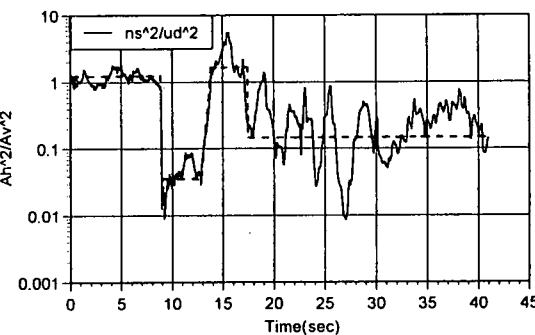
最後に海南港波形では、卓越周期の変動はレベルが少し異なるが、ほぼ同じような傾向を示している。また長周期への移行もほぼ同時刻に見られることから、液状化の影響はないものと推測できる。また二乗振幅の比から主要動部分に関しては 1.0 以下になることがなく、せん断波である水平動が増幅しており、液状化はなかったものと考えられる。



(1)卓越周期 (NS 成分)

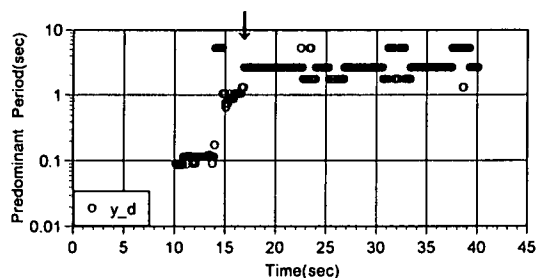


(2)卓越周期 (UD 成分)

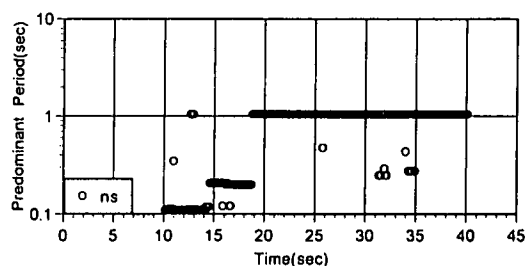


(3)二乗振幅比

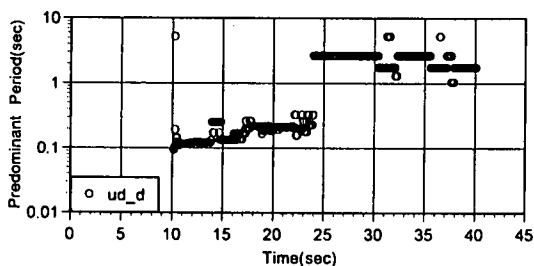
図-3 ポートアイランド



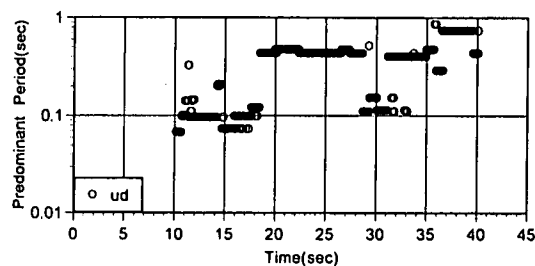
(1)卓越周期 (N3S2E 成分)



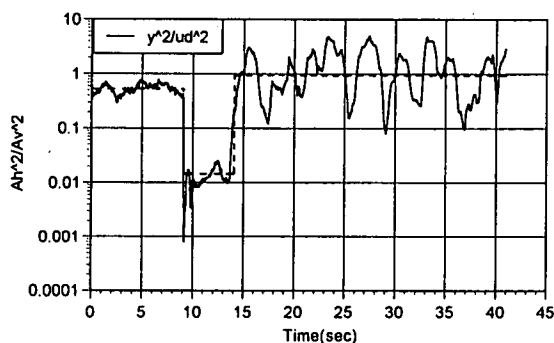
(1)卓越周期 (NS 成分)



(2)卓越周期 (UD 成分)

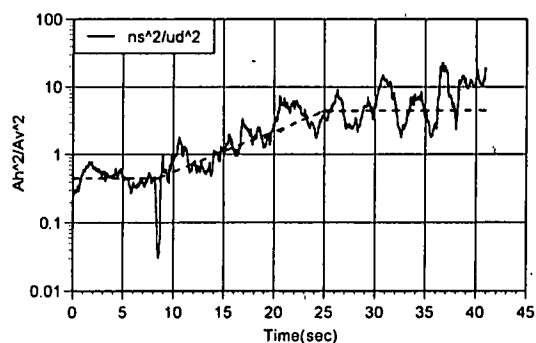


(2)卓越周期 (UD 成分)



(3)二乗振幅比

図-4 六甲アイランド



(3)二乗振幅比

図-5 海南港変電所

4. まとめ

本文では、地震時に観測される強震記録から液状化の発生の有無を判別する手法について検討した。以下にまとめて示す。

- 1) 加速度記録の振幅を指標とする Arias Intensity を鉛直に異なる深度で算定し、そこから低減係数を求め、その変動を考慮すると、実地震時の液状化の発生の有無に対応する結果が得られた。
- 2) ランニングスペクトルより抽出した卓越周期の時刻歴と加速度記録の二乗振幅比より地表面のみで観測された記録より液状化を判別する手法について検討した結果、実際の液状化の発生に合致すると考えられる結果を得た。

また以下のような課題の解決が必要である。

- 1) Arias Intensity を用いれば、現段階では液状化の判別に 2 つの深度での観測機器を要することになるために今後の検討が必要である。
- 2) ランニングスペクトルは切り出した時間幅以上の周期の波は、抽出することができないために最適な時間幅を選択する必要がある。
- 3) 提案手法の精度の向上のために、液状化非液状化地域での多くのデータ分析が必要である。

参考文献

- 1) Kayen, R.E., Mitchell, J.K., and Holzer, T.L.: Ground Motion Characteristics and their Relation to Soil Liquefaction at the Wildlife Liquefaction Array, Imperial Valley, California., Proceedings from the 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, pp.267-283, 1994
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994。