

強震記録を用いた液状化検知法に関する検討

宮島 昌克¹・野津 智²・北浦 勝³

¹正会員 工博 金沢大学大学院助教授 自然科学研究科 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

²金沢大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

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

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早期に判定し、地震直後の復旧・救援活動に寄与することのできる手法の開発を目的としている。

まず、周波数特性に注目し、ランニングスペクトルをもとに、液状化の発生に伴う地盤の固有振動数の低下の度合いを定量的に把握し、液状化を検知する方法について検討した。次に、液状化地盤では水平加速度が減衰するが、上下加速度は減衰せず、むしろ増幅することに注目し、強震記録の上下／水平比を用いた液状化検知法についても検討した。

Key Words : strong ground motion record、liquefaction、early detection、
ratio of maximum vertical ground acceleration to horizontal one

1. はじめに

液状化の発生が構造物や地中埋設管に多大な影響を及ぼすことはよく知られている。したがって、地震発生後の構造物やガス管、水道管などのライフラインの早期復旧を目指すに当たって、地盤が液状化しているかどうかを迅速に知ることは、重要な課題である。しかしながら、地盤中で起こる液状化を早期に把握することは難しい。そこで本研究では、地盤の液状化時に地盤応答加速度記録に見られる (1) 振動数特性、(2) 振幅特性の 2 点に注目して、強震計の波形記録から液状化を早期に検知する方法について考案する。

2. 卓越振動数の時間変化

1995 年兵庫県南部地震では、海岸部の埋立地などにおいて多くの液状化被害が報告された。特にポートアイランドでは、ほぼ全島で液状化現象が確認された。ポートアイランドでは図-1 のような強震記録が得られており、液状化の影響を受けていると考えられる。この強震記録を見ると最大加速度を記録する直前まで (前半部) とその後 (後半部) とでは明らかに振動数特性が違ってくる。そこで兵庫県南部地震の主な観測点における強震記録において、5 秒ごとにフーリエスペクトルを求めて、卓越振動数の時間変化を図-2 に示した。埋立地であり、観測点のほぼ直下で液状化が起きていると思われるポートアイランドや東神戸大橋では、前半部では

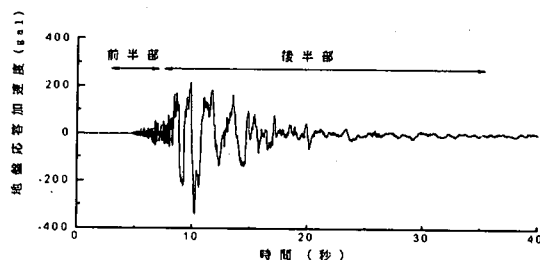


図-1 液状化地盤の強震記録の例
(兵庫県南部地震、ポートアイランド、地表面、NS 方向)

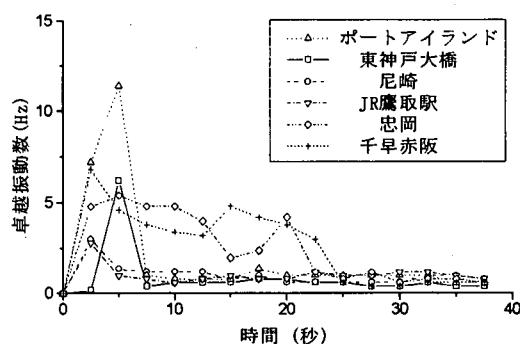


図-2 兵庫県南部地震における主な観測点の卓越振動数の時間変化

卓越振動数が高く、6,7 秒あたりで急激に変化して、後半部では低くなる。この急激な変化が液状化地盤の特性であると思われる。また観測点付近で液状化被害のあった尼崎や JR 鷹取駅では、前半部はそれほど卓越振動数が高くないが、後半部では低い値を示している。その他の液状化被害が報告されていない 2 点 (忠岡、千早赤阪) の卓越振動数は前後半とも全般的に高く、変化は見られなかった。

3. 振動数特性に関する解析方法

上記の方法よりもさらに詳しく、より定量的に液状化を検知する方法として次のような方法を用いた。

液状化現象においては、地盤が軟化するため、地震波の高振動成分が少なくなり、低振動成分が増幅することが知られている。その高振動数成分の減少と低振動成分の増幅を検知できればその地盤の液状化の有無が検知できると考えられる。

強震記録から振動数特性を導くためには、フーリエスペクトルを求める方法が一般的であり、本研究ではランニングスペクトルを用いる。図-3 は兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地表面での強震記録のランニングスペクトルを、3次元の図(x軸は時間(s)、y軸は振動数(Hz)、z軸はフーリエスペクトル比)で表したものである。ただし、フーリエスペクトルは地震によってその最大値に大きな違いがあるので、他のものと比較しやすいように各記録におけるフーリエスペクトルの最大値で基準化した。したがってフーリエスペクトルの最大値は、どのランニングスペクトルの解析結果においても 1.0 となっている。図-4 はそのランニングスペクトルを等高線で表したものである。なお、大きな地震動の方が地盤動特性に及ぼす影響も大きく、ランニングスペクトルの特性を把握しやすいという観点から、本研究では水平方向の強震記録が 2 方向ある場合、最大加速度を記録した方向の強震記録を使用した。

4. 液状化地盤における振動数特性の分析

図-5 はポートアイランドの地下-83m における強震記録のランニングスペクトルである。前述の図-4 と比較すると、地表面の方が地震波の高振動数成分が相対的に減少していることがわかる。したがって、基盤面に比べて地表面の強震記録の高振動数成分が相対的に減少していれば、その地盤は液状化しているといえるのではないかと考えられる。付近で噴砂などの液状化の痕跡が生じた観測点における強震記録の解析結果を図-6~8 に示す。用いた強震記録は次の通りである。それぞれ図-6 は釧路沖地震(1993/1/15)における釧路港、図-7 は兵庫県南部地震における JR 鷹取駅、図-8 は兵庫県南部地震における東神戸大橋の地盤である。この 3 図について共通して言えることは、高振動成分が全体に比べて小さいことである。したがって、ランニングスペクトルの高振動成分が全体に比べて小さいことが液状化地盤の特性であると考えられる。そこで地表面の強震記録の高振動数成分が相対的に少なければ、その

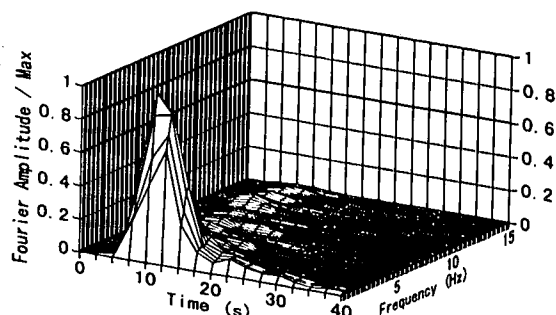


図-3 ランニングスペクトル
(兵庫県南部地震、ポートアイランド、地表面、NS 方向)

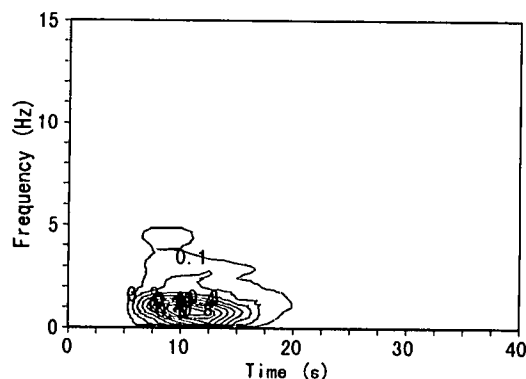


図-4 ポートアイランド(兵庫県南部地震、地表面)の振動数分布の時間変化

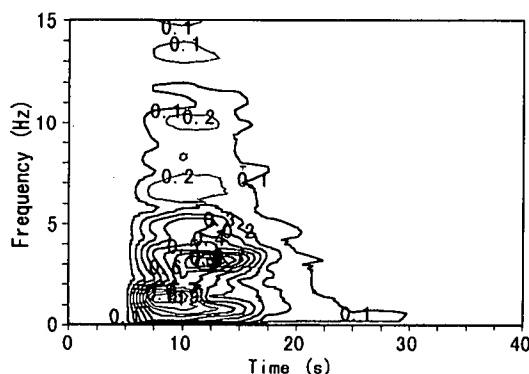


図-5 ポートアイランド(兵庫県南部地震、地下-83m)の振動数分布の時間変化

地盤は液状化しているといえるのかどうか確かめるため、非液状化地点における強震記録のランニングスペクトルと比較をした。

本研究においては 100 ケース以上の強震記録に関して同様な解析を行った。そのほとんどは液状化の起きていない地盤の強震記録である。非液状化地盤のランニングスペクトルは、どれもほぼ図-9 のような振動数特性を示した。すなわち、どの非液状化地盤のランニングスペクトルも 10Hz 以上の高振動数成分が確認できた。なお同図は、茨城県南西地震(1993/5/21)における筑波調査研究所のものである。以上より、地表面の強震記録の高振動数成分が低振動成分に比べて相対的に少なければ、その地盤は液状化している可能性が極めて高いと思われる。

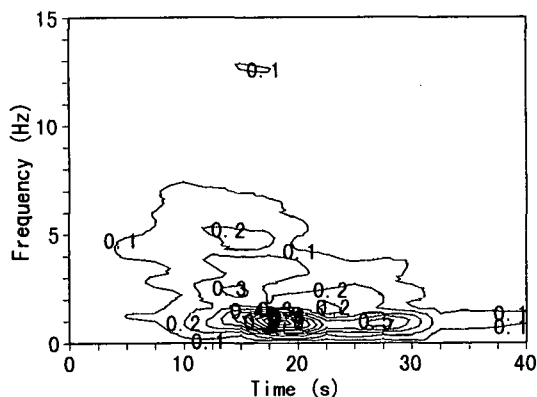


図-6 釧路港（釧路沖地震、地表面）の振動数分布の時間変化

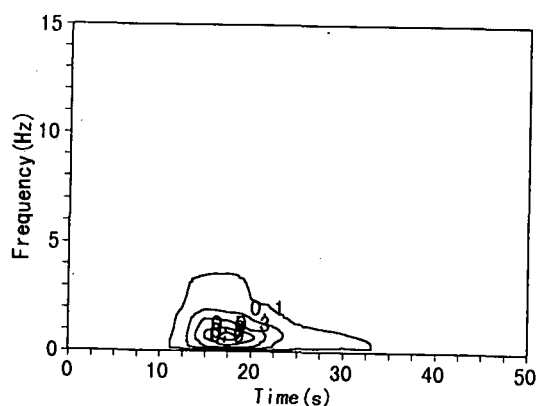


図-8 東神戸大橋（兵庫県南部地震、地盤上）の振動数分布の変化

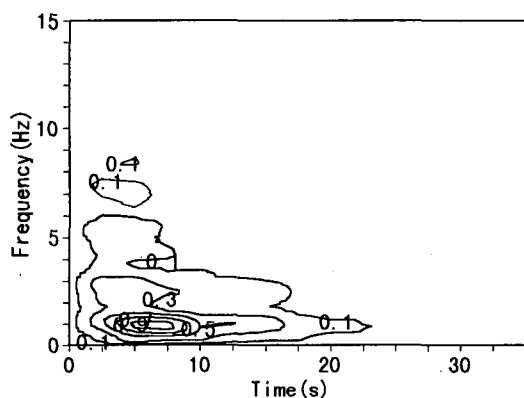


図-7 JR鷹取駅（兵庫県南部地震、地表面）の振動数分布の時間変化

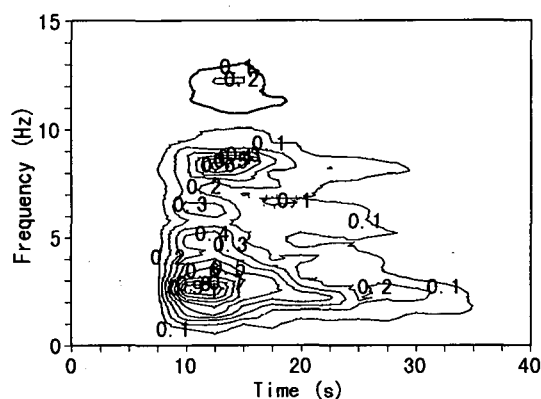


図-9 筑波調査研究所（茨城県南西地震、地表面）の振動数分布の時間変化

5. 振幅特性に関する解析方法

液状化地盤においては、地盤応答加速度の水平成分が減少し、上下成分が増幅することが知られている。したがって、上下方向と水平方向の地盤応答加速度の最大値の比を、上下／水平比（上下方向地盤応答加速度の最大値／水平方向地盤応答加速度の最大値）と表すと、液状化地盤において、上下／水平比は大きくなると思われる。しかし、強震記録全体の最大加速度の比では、液状化とあまりよい相関を示さなかった。そこで本研究では、強震記録において 0.2 秒間隔で上下方向、水平方向それぞれの地盤応答加速度の最大値を求めて、上下／水平比を算出した。

6. 液状化地盤における上下／水平比

図-10 はポートアイランドの地表面における強震記録の上下／水平比の解析結果であり、全般的に大きな値を示していることが分かる。したがって、

液状化が起こると上下／水平比が大きくなる傾向があることが分かる。一方、液状化が起こっていないポートアイランドの地下-83m における強震記録の解析結果（図-11）では、初期段階で上下／水平比が大きくなっている。一般的に地震動は初期段階で上下動の方が大きい傾向があり、その結果、この初期段階の上下／水平比は液状化と関係なく現れるものと考えられる。そこで、本研究では水平方向地盤応答加速度の最大値を記録した時間を矢印点線で表し、その時間以前の上下／水平比の大きさは考察の対象外とすることにした。同様に他の液状化地盤の解析結果を図-12～14 に示す。用いた強震記録は図-6～8 と同様である。このように液状化地盤では上下／水平比が矢印点線より右側で大きくなる傾向があることが分かった。そこで、矢印点線よりも右側で上下／水平比が大きくなればその地盤は液状化しているといえるのかどうか、非液状化地盤の強震記録を用いて上下／水平比を求め、検証したところ非液状化地盤では図-11 のように上下／水平比は全般的に小さくなった。

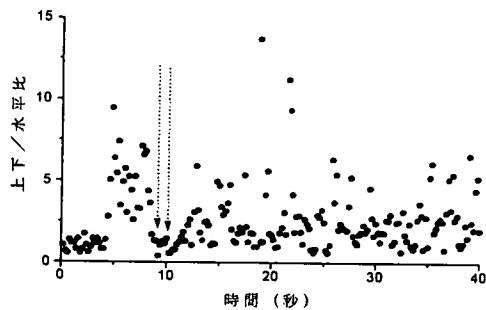


図-10 ポートアイランド（兵庫県南部地震、地表面）の上下/水平比の時間変化

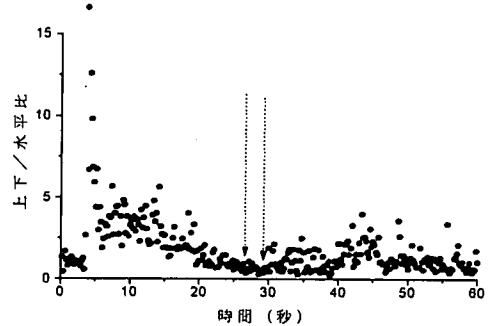


図-12 釧路港（釧路沖地震、地表面）の上下/水平比の時間変化

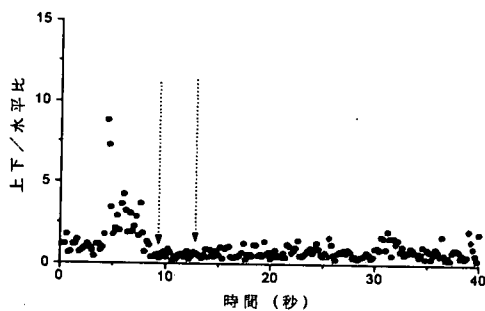


図-11 ポートアイランド（兵庫県南部地震、地下-83m）の上下/水平比の時間変化

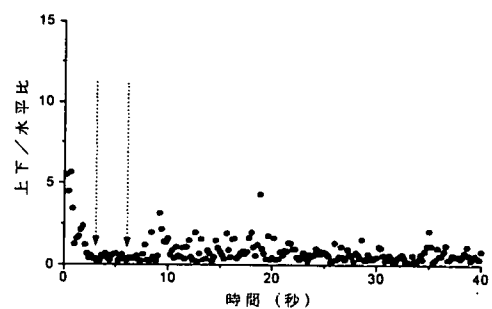


図-13 JR 鷹取駅（兵庫県南部地震、地表面）の上下/水平比の時間変化

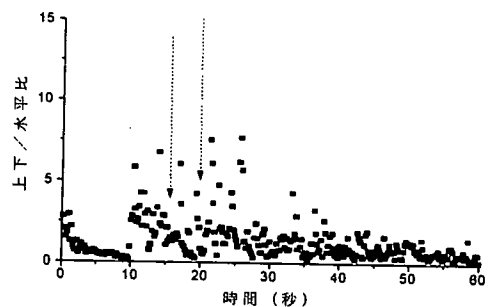


図-14 東神戸大橋（兵庫県南部地震、地盤上）の上下/水平比の時間変化

7. おわりに

本研究では次のようなことが明らかになった。

- (1)液状化地盤において卓越振動数は揺れはじめは高いが、途中で変化が生じ低くなる傾向が強い。
- (2)地表面の強震記録のランニングスペクトルにおいて高振動数成分が全体に比べ少ない場合、その地盤は液状化している可能性が高い。
- (3)水平地盤応答加速度が最大値を生じた後に上下/水平比が大きい値を示した場合、その地盤は液状化している可能性が高い。

なお、本解析においてはサンプル数が少なく、信頼性が十分ではないと思われる。したがって、今後さらに多くの強震記録について同様の考察を進め、信頼性を高める必要がある。また、今後は振幅特性と振動数特性を組み合わせ、定量的な検知法を提案することを目指していく予定である。

謝辞：本研究の一部が文部省科学研究費（基盤研究(A) 代表 京都大学 入倉孝次郎教授，基盤研究(C) 代表 宮島昌克）の補助によって行われたことを記し、深謝します。また、強震記録を提供していただいた神戸市開発局、運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所はじめ、関係各位に感謝します。

参考文献

- 1)建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録（No. 21），土木研究所彙報第 21 号，1996。