

強震記録を用いた液状化検知指標の提案とその検証

山本 真樹¹、野津 智²、宮島 昌克³、北浦 勝⁴

¹学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程1年(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

²正会員 修士(工) 日本中央競馬会施設部(〒105-0003 東京都港区新橋1-1-19)

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

⁴フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科(〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

地震発生直後に、強震記録にもとづいて強震観測点直下の液状化現象を遠隔地から簡易的、定量的かつ迅速に検知できれば、その付近での被害を予測しライフラインなどの復旧活動を速やかに、より効率的に進めることができる。その検知を可能にするため、液状化地盤において得られた強震記録に共通して見られる振幅特性と振動数特性を考察し、それらの特性を液状化検知指標として定量化した。振幅特性として、強震記録の上下方向と水平方向の比をとった最大上下/水平比、振動数特性として強震時の平均卓越振動数などを提案した。また、強震記録の特性が液状化地盤の特性と類似する軟弱地盤などでも検討を行い、各指標の信頼性を検証した。

Key Words: liquefaction, strong grand motion records, detective method

1. はじめに

一般に、地盤に液状化が発生すると、ライフライン施設などの被害は非常に大きくなることが知られている。そこで、強震記録を用いることで地震発生直後に、直接現地調査を行わずに簡易的、定量的、かつ迅速に液状化現象を検知することを本研究の目的とする。

液状化地盤における強震記録に共通して見られる振幅特性として、間隙水圧が上昇し地盤の有効応力が減少すると、水平方向の地盤応答加速度が極端に減衰する傾向がある。一方、上下方向の地盤応答加速度には、液状化が発生してもその振幅に減衰は見られない。また液状化地盤の振動数特性として、液状化が発生すると高振動数成分は伝わりにくく、低振動数成分が増幅し、相対的に低振動数成分が多くなる。すなわち振動周期が長周期化することが挙げられる。

2. 液状化検知指標の提案

(1) 振幅特性に関する液状化検知指標

水平方向応答加速度振幅の減衰を検知する方法として、「上下/水平比」を提案する。上下/水平比とは、水平、上下方向の応答加速度記録において、時間間隔 δ_t での上下方向と水平方向の最大値を求

め、それぞれを $A_{v_{max}}$ 、 $A_{h_{max}}$ とし、 $A_{v_{max}}/A_{h_{max}}$ を時間間隔 δ_t の上下/水平比としたものである。強震記録の初めの頃は P 波の影響により水平動に比べて上下動が大きくなる特徴があるため、液状化の有無に関わらず上下/水平比が大きくなる。したがって、最大応答加速度を記録した時刻以後の上下/水平比の最大値を「最大上下/水平比」とし、液状化検知指標として提案する。

(2) 振動数特性に関する液状化検知指標

液状化の発生に伴う水平方向応答加速度の長周期化を検知する方法として、「卓越振動数の時間変化」を考える。

卓越振動数の時間変化とは、水平方向応答加速度記録において、ある時刻 t を中心とした5秒間における応答加速度のフーリエスペクトルを求め、その最大値を示す振動数を時刻 t における卓越振動数とし、その0.5秒ごとの時間変化を求めたものである。

まず、強震時における卓越振動数の平均値を「強震時の平均卓越振動数」とし、液状化検知指標として提案する。「強震時」の定義は、水平方向最大応答加速度を記録した時刻からフーリエスペクトルの最大値が10cm/s以下になる時刻までとした。また、「初期微動時」を、フーリエスペクトルの最大値が10cm/s以上になる時刻から水平方向最大応答加速度を記録する時刻までと定義し、その比を「卓越振

表-1 後揺れ波を含む強震記録を用いた解析結果

観測点名	最大上下／水平比 (時間間隔 $\delta t: 0.2$)	最大上下／水平比 (時間間隔 $\delta t: 0.3$)	強震時の 平均卓越振動数(Hz)	卓越振動数変化率
森河内	3.33	1.55	1.31	1.36
福島区	3.49	1.47	0.97	1.37
淀川大堰	1.86	1.27	1.40	2.08
枚方堤防	1.71	1.71	2.00	2.13
阿倍野	1.36	0.94	1.26	2.90

表-2 液状化地盤の強震記録を用いた解析結果

観測点名	最大上下／水平比 (時間間隔 $\delta t: 0.2$)	最大上下／水平比 (時間間隔 $\delta t: 0.3$)	強震時の 平均卓越振動数(Hz)	卓越振動数変化率
ポートアイランド	9.62	8.49	0.72	3.85
六甲アイランド	5.44	6.53	0.55	1.91
東神戸大橋	7.12	4.52	0.59	6.90
神戸港工事事務所	9.60	8.03	0.69	1.52

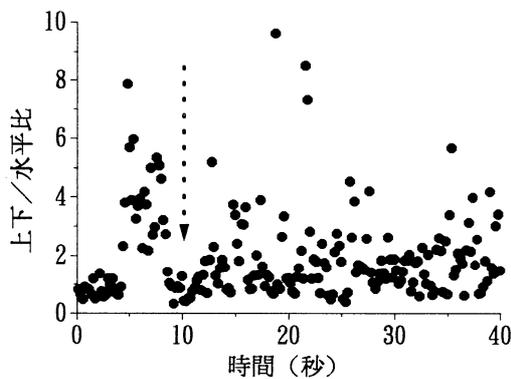


図-1 ポートアイランドの上下／水平比
(時間間隔 $\delta t: 0.2$ 秒)

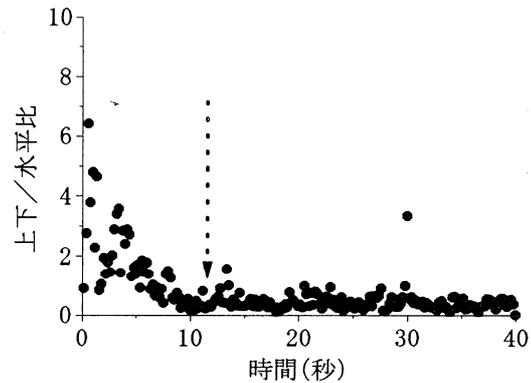


図-2 森河内の上下／水平比 (時間間隔 $\delta t: 0.2$ 秒)

動数変化率 (初期微動時の平均卓越振動数／強震時の平均卓越振動数)」とし、液状化検知指標として提案する。

3. 検知指標の信頼性に関する検討

液状化地盤の強震記録では低振動数成分が卓越することは既に述べた。低振動数成分が卓越する場合としては、液状化以外に軟弱地盤において液状化が発生しない場合や大阪平野でよく見られる後揺れ波などもある。そこで非液状化地盤の強震記録のうち、後揺れ波を含む強震記録と軟弱地盤での強震記録について、提案した液状化検知指標がどのような値を示すかを検討し、本検知指標の信頼性を検証する。本研究では主に 1995 年兵庫県南部地震の強震記録を用いた。

(1) 後揺れ波に関する考察

後揺れ波を含む強震記録の特徴は、水平方向強震記録の後半部に振幅の大きい長周期の揺れが現れることである。このような強震記録を用いて計算した上下／水平比と強震時卓越振動数の解析結果を表-1 に、液状化地盤の解析結果を表-2 に示す。まず、時間間隔 $\delta t=0.2$ 秒の場合について考える。最大上下／水平比に関しては、福島区、森河内の 2 点の値が 3.0 以上と大きな値となっている。しかし、液状化地盤であるポートアイランドの上下／水平比を示した図-1 では、水平方向応答加速度が最大値を記録した時刻を示す点線矢印以降で、加速度振幅の減衰が起こると共に、全体的に値が大きくなるのに対して、森河内などの上下／水平比は、図-2 に示すように、1つの値だけが突発的に大きくなっている。したがって、この突発的に大きくなる値は、液状化

表-3 阿久根の強震記録による各検知指標

地震名	最大上下／水平比	強震時の平均卓越振動数 (Hz)	卓越振動数変化率
EQ. 1	1.29	1.36	2.42
EQ. 2	0.81	1.92	1.14
EQ. 3	1.24	1.67	1.22

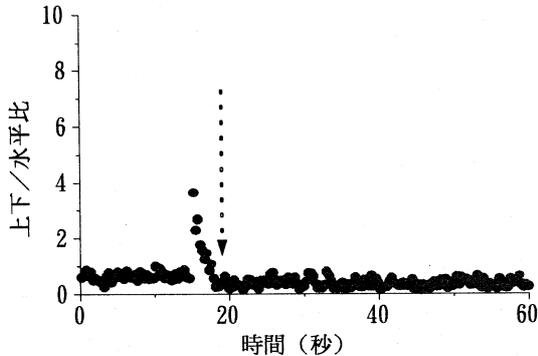


図-3 阿久根の強震記録の上下／水平比 (地震: EQ. 1)

の影響ではなく、後揺れ波の影響によるのではないかと考えられる。このことから時間間隔 δ_t に関して次のように考察した。

液状化地盤の強震記録においては、全体的に水平方向の加速度振幅が減衰するのに対して、後揺れ波を含む強震記録は振幅が大きいため、時間間隔 δ_t を大きくすることにより、上下／水平比が突発的に大きくなるようなことはなくなると考えられる。時間間隔 δ_t を 0.3 秒とし最大上下／水平比を計算した結果も表-1 に示している。値が 3.0 以上をとっていた福島区、森河内の 2 点が 1.5 前後の値となった。また、図は省略するが、上下／水平比の経時変化を見ても時間間隔が 0.3 秒以上であれば、1 つの値だけが突発的に大きくなる現象は起こらなくなり、後揺れ波が最大上下／水平比の値に及ぼす影響を遮断できることが分かった。また、表-2 に示す液状化地盤での結果は、時間間隔 δ_t を大きくすることによって、最大上下／水平比が小さくなる観測点があるが、表-1 の値に比べて十分大きい値である。しかし、時間間隔があまりに大きいと、液状化地盤の強震記録の特徴も消してしまうため、後揺れ波の影響を遮断するのは、0.3 秒という時間間隔が最適であると言える。

つぎに強震時の平均卓越振動数の解析結果について考える。表-1 を見ると、福島区の値が 1.0Hz より低くなっているが、それ以外の観測点では、1.0Hz よりも大きくなっている。一方、表-2 に示すよう

に液状化地盤の計算結果はすべて 1.0Hz 以下であるので、ある程度区別できると思われる。卓越振動数変化率に関しては、液状化地盤と後揺れ波を含む強震記録とで、あまり差がなく、明確な区別はつけにくい。

(2) 軟弱時地盤に関する考察

1997 年前半に鹿児島県北西部を震源とした加速度が比較的大きい地震が 3 回発生した。その際に、鹿児島県内の阿久根観測点で観測された強震記録を用いる。阿久根においては強震計設置点から約 1km 離れたところで液状化の発生が確認されている。しかし、地震計が敷地内に設置されている阿久根市役所では液状化の発生は見られなかった¹⁾。観測点表層付近は N 値の小さい粘土層からなる軟弱な地盤である。以上より、この観測点で記録された強震記録は、液状化の影響を受けていない軟弱地盤と考えられる。

上下／水平比の時刻歴を図-3 に示す。この図を見ると、水平方向最大応答加速度を記録した時刻以降では、大きな値を示していない。

3 回の地震についての結果を表-3 に示す。最大上下／水平比の値は、0.8~1.3 であり、表-2 の液状化地盤での値に比べかなり小さい値であるため、最大上下／水平比の値は、液状化が発生していなければ軟弱地盤では大きくなると考えられる。

強震時の平均卓越振動数の値は 1.4~2.0 Hz であり、1.0Hz よりも大きくなっている。液状化地盤の計算結果は 1.0Hz 以下であるので、ある程度区別できると考えられる。また、卓越振動数変化率については 1.1~2.4 となっており、液状化地盤の値と比較して明確に判別することはできない。

このように、軟弱地盤で観測された強震記録においては、強震時の平均卓越振動数、卓越振動数変化率では区別が明確ではないが、最大上下／水平比を用いることで液状化地盤との区別ができることがわかった。

4. 実際の強震記録を用いた検討

本研究では、100 点の強震記録を用い、上述した

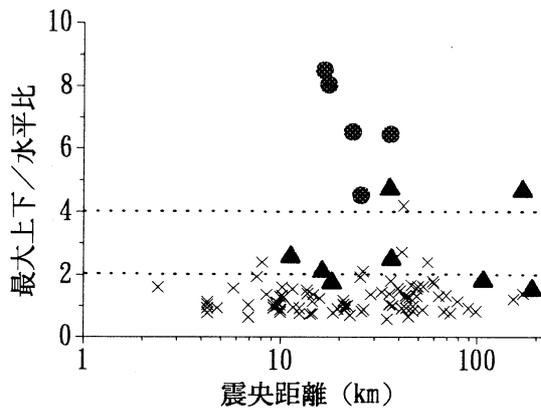


図-4 最大上下/水平比と震央距離の関係

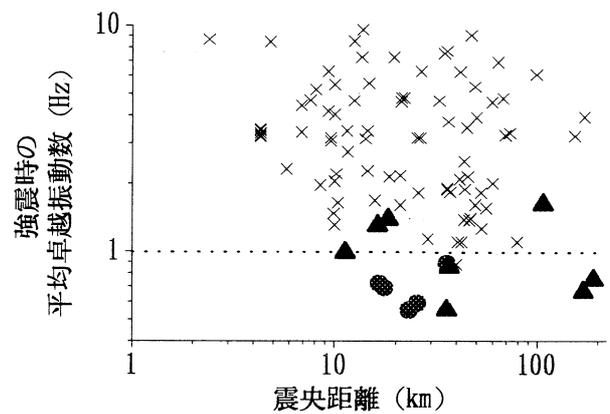


図-5 強震時の平均卓越振動数と震央距離の関係

液状化検知指標を計算した。

図-4に強震記録の震央距離と最大上下/水平比の関係を示す。図中の●印は強震計設置点の直下やごく近傍で広範囲の液状化痕跡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痕跡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。液状化地盤の強震記録は他のものに比べて非常に大きくなっており、すべて4.0以上であることが分かる。また、非液状化地盤の多くは2.0以下の値であり、付近が液状化した地盤の値の多くはそれよりも大きくなっている。付近が液状化した地盤のうち、値が2.0より小さい観測点は、付近の液状化痕跡までの距離が遠いと報告されている観測点のものであった。したがって、強震計設置点直下で液状化が発生すると、最大上下/水平比が大きくなるとほぼ断定できる。また、付近で液状化が発生している場合にも値は大きくなるが、直下が液状化している場合に比べると、値は小さいと言える。

図-5に強震時の平均卓越振動数と震央距離の関係を示す。図より、液状化地盤における値はすべて1.0Hz以下になっていることが分かる。また、非液状化地盤において強震時の平均卓越振動数が1.0Hzより低くなっている観測点は、軟弱地盤であることが分かった。その観測点に関して卓越振動数変化率を計算した結果、2.0以下の値となったので、液状化地盤の2.0以上と区別できると思われる。

5. 結論

本研究は、液状化地盤において得られた強震記録に共通して見られる振幅特性と振動数特性を考察し、それらの特性を液状化検知指標として定量化するとともに、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たものである。

軟弱地盤、後揺れ波について、各液状化検知指標を計算した結果、強震時の平均卓越振動数では1.0Hz以上、卓越振動数変化率ではおおよそ2.0以下の値をとっているが、液状化地盤との区別が明確にはつかなかった。そこで、時間間隔 δt を0.3秒とした最大上下/水平比を用いることにより、液状化地盤と区別が明確となることが分かった。

つぎに100点の強震記録を用いて各液状化検知指標を計算した。最大上下/水平比の計算結果から、液状化地盤の強震記録は他のものに比べて4.0以上と非常に大きく、強震計設置点直下で液状化が発生すると、最大上下/水平比が大きくなることがほぼ断定できた。また、強震時の平均卓越振動数の計算結果から、液状化地盤における値は1.0Hz以下であること、非液状化地盤で1.0Hzより低くなっている観測点に関しては、卓越振動数変化率を計算することで液状化地盤と区別がつくことが分かった。

謝辞：本研究では、強震記録として運輸省港湾技術所から提供されたもの、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、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)震災予防協会の強震動アレー観測記録データベースとして公開されたものなどを使わせて頂きました。各機関の関係者各位に深謝します。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) 飛鳥建設株式会社：1997年5月13日鹿児島県北西部地震被害調査報告書, p. 92, 1997.