

強震記録を用いた液状化検知法に関する基礎的研究

宮島昌克¹・野津 智²・北浦 勝³・山本真樹⁴

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

³フェロー 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)

⁴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 金沢市小立野2-40-20)

本研究は、リアルタイム地震防災の観点から地震直後に液状化の発生範囲を知ることを目標とし、その第1段階として、地表面に置かれた強震計で捉え得る液状化地盤特有の地震動特性を定量的に判定する方法を提案するものである。本論文では、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液状化検知指標を提案するとともに、地盤震動特性が液状化地盤と類似している軟弱地盤における強震記録に本検知指標を適用し、その信頼性を検証した。さらに、100地点の強震記録に本論文で提案した液状化検知指標を適用し、その有効性を確認するとともに、総合的検知法を提案した。

Key Words : monitoring, strong ground motion records, liquefaction, detective method

1. はじめに

ライフラインの地震被害には地盤変状、特に液状化の影響が大きく寄与していることが知られている。従来から地震動の強震観測は各地で行われており、阪神・淡路大震災以降さらに大規模に整備されてきているが、液状化を直接モニタリングしている例は限られている。地震直後に液状化の発生範囲を知ることは、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、実際に地震が起こったときにその地盤震動特性から強震観測点における液状化の発生の有無をリアルタイムで把握し、その結果と地震前に予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1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本論文の目的とする。すなわち、本論文では特に以下の2点に注目する。

(1) 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、上下成分は減衰せず、むしろ微増

する。したがって、上下方向と水平方向の地盤応答加速度の比、上下/水平比は液状化地盤では大きくなるという振幅特性。

(2) 液状化が発生すると地盤が軟化するので、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、液状化地盤の振動数特性。

(2)に示す特徴を捉えて液状化を判定しようとした研究にKayen et al.の研究¹⁾がある。地表面加速度波形のArias IntensityとSHAKEを用いたパラメトリックスタディによって算出した低減係数を用いて、液状化の発生の有無について検討している。また、高田・尾崎もArias Intensityを用いて液状化地盤の加速度波形の長周期化に注目した液状化判定法を提案している²⁾。本研究では、上記の(1)の特性も定量的に把握しようとしている点と、必ずしも観測地点の地盤情報を必要としない点が上記の研究と異なっている。前者は推定精度を高めることにつながり、後者は実用化の上で経済節減につながるものと期待される。

さらに、SIセンサーを用いて液状化を検知しようという研究が東畑らによって行われている³⁾。東畑らによれば、地表面で観測された最大変位とSI値を用いて液状化層の厚さまで推定できる。しかし、SI

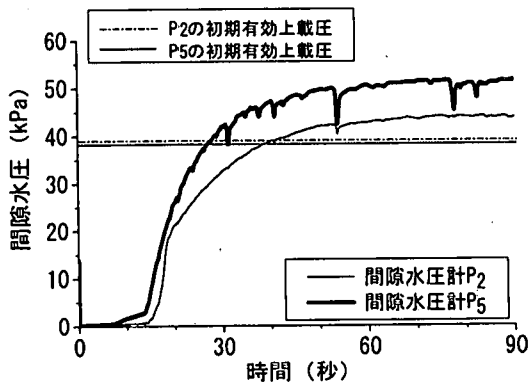


図-1 Wildlifeにおける過剰間隙水圧の時刻歴⁴⁾

センサーは強震計のように全国に配置されているわけではないので、本研究では、強震記録を用いた液状化の検知に注目して研究を行った。

2. 液状化地盤の強震記録の特徴

1987年のアメリカのSuperstition Hills地震においては、カリフォルニア州 Wildlife観測点で地表面の応答加速度と同時に、いくつかの深さで間隙水圧も記録された。この観測点付近が完全液状化に至っていることは、噴砂や地割れ、永久変位などから明らかである⁴⁾。このことから、まずこの観測点における強震記録と間隙水圧記録の比較を中心に考察を進める。

Wildlife観測点における間隙水圧計は地中の6点に設置されている。このうち、地表面にもっとも近く、かつ強震計設置位置に近い2つの間隙水圧計 (P_2 : 地下3.0m, P_5 : 地下2.9m) における過剰間隙水圧の時間変化を図-1に示す。同図には、Matasovicら⁴⁾が、ボーリングデータやその後の室内土質試験などから推定したそれぞれの水圧計に対する初期有効上載圧も記されている。同図より、Wildlife観測点の地中における過剰間隙水圧は約15秒付近で上昇を始め、その後、約20秒まで急激な上昇が続いていることがわかる。また、間隙水圧計 P_2 、 P_5 ではそれぞれ約40秒、約28秒で過剰間隙水圧が初期有効上載圧を上回り、その後、ほぼ一定値に落ち着くので、完全液状化に至っているものと考えられる。間隙水圧計 P_2 、 P_5 は、強震計設置点を挟んでほぼ東西に埋設されている。したがって、強震計設置点直下で液状化が発

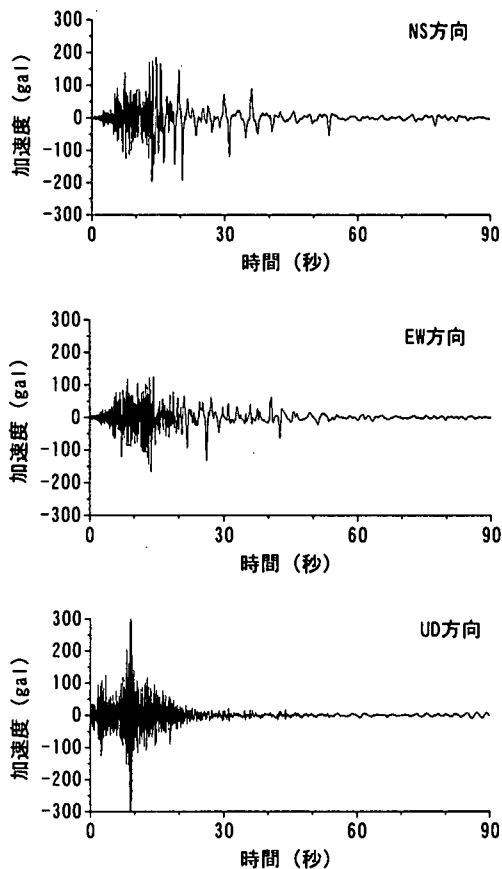


図-2 Wildlifeにおける地表面強震記録⁴⁾

生したのは、図中の約30~40秒付近ではないかと推測される。なお、Matasovicら⁴⁾によれば過剰間隙水圧が初期有効上載圧を上回っているのは、液状化に伴う地盤変形により、有効上載圧が初期の値より減少しているからだと考えられている。

地表面における強震記録を図-2に示す。水平2方向成分に注目すると、約15秒付近で水平方向加速度が急に減衰していることがわかる。一方、上下方向の強震記録には15秒付近ではそのような急激な減衰が見られない。また、約15秒以降では水平方向成分に高振動数の震動が見られなくなっていることがわかる。図-1より、間隙水圧の上昇が始まった時刻が約15秒であり、間隙水圧の上昇に伴って地盤が軟化したため、地盤震動が長周期化したものと考えられる。このような傾向は、強震計設置点のごく近傍で多くの液状化痕跡が確認されている場合に、共通して現れることが既に明らかにされている。

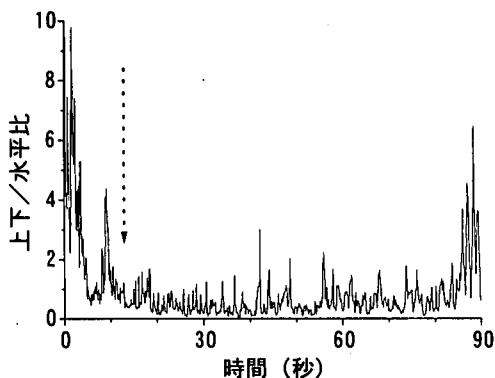


図-3 Wildlifeの強震記録の上下/水平比の時刻歴

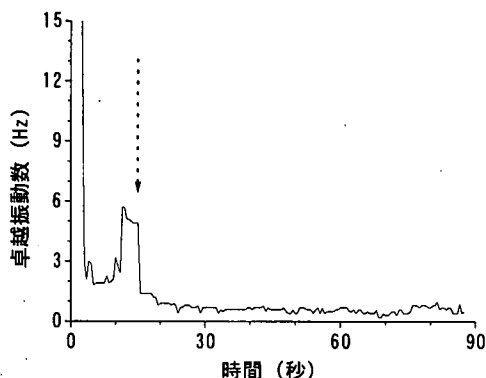


図-4 Wildlifeの強震記録の卓越振動数の時刻歴

3. 液状化検知指標の提案

(1) 振幅特性に関する検知指標

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定量的に表すために，「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，0.3秒間隔でそれぞれ絶対値の最大値を求め，その比（上下方向最大応答加速度/水平方向最大応答加速度）の時刻歴を表したものである。ここでは，0.3秒のウイ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として試行錯誤によっ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のそれとの直接の比を取らなかったのは，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° ）あるため，同時刻における水平2方向の最大応答加速度のベクトル和を新たに最大応答加速度とし，上下/水平比を計算した。Wildlife観測点における強震記録を用いた上下/水平比の図を図-3に示す。同図によると，強震計設置点直下で液状化が発生したと思われる約40秒以降で上下/水平比の値が徐々に大きくなっていることがわかる。また，埋設されている6つの間隙水圧計すべての過剰間隙水圧比が約80秒以降約1.0となっており，対象地盤全体が液状化した時刻であると考えられるが⁴⁾，図-3において80秒から90秒にかけて上下/水平比は非常に大きな値となっている。

以上より，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。しかし，強震記録の初期においては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，上下/水平比のうち，水平動成分が最大値を記録した時刻（図-3において点線矢印で示した時刻）以後の最大上下/水平比に注目することにする。ちなみに，図-3における最大上下/水平比は6.5となる。

(2) 振動数特性に関する検知指標

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定量的に表すために，卓越振動数の時間変化に注目する。本研究では卓越振動数の時間変化を以下のようにして求めた。すなわち，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。上述したように強震記録は水平方向が2成分（方位差 90° ）あるため，時刻 t における2方向の卓越振動数の平均値を，新たに時刻 t の卓越振動数とした。Wildlife観測点における強震記録を用いた卓越振動数の時間変化を図-4に示す。約15秒で卓越振動数が低下し，その後は1.0Hz以下でほぼ一定の値をとっている。このことは，間隙水圧の上昇とともに地盤が軟化し，卓越振動数が低下する傾向を明瞭に表している。

この変化を定量的に表すために，初期微動時と強震時における平均卓越振動数を求め，その比を「卓越振動数変化率（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。ここで，「強震時」とは，水平方向

表-1 解析に用いた阿久根の強震記録の概要

地震名	観測月日	マグニチュード	水平最大加速度(gal)
EQ.1	1997.3.26	6.3	293
EQ.2	1997.4.3	5.5	112
EQ.3	1997.5.13	6.2	156

成分が最大値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の時間と定義した。一方、「初期微動時」とはフーリエスペクトルの最大値が10cm/sを超えた時刻から水平方向成分が最大値を記録する時刻までの時間と定義する。なお本解析では、0.01秒間隔のデータを512個用いてフーリエ変換している。さらに、フーリエスペクトルをウィンドウ幅0.8HzのPerzenのスペクトルウィンドウ⁵⁾を用いて平滑化した。振動数特性の検討においてはフーリエスペクトルをまず求めているので、解析範囲の定義に前述したようなフーリエスペクトルの最大値を用いている。10cm/s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として試行錯誤によって求められたものである。

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。ちなみに図-4における卓越振動数変化率は3.3であり、強震時の平均卓越振動数は0.9Hzである。

4. 強震記録を用いた検知指標の検証

(1) 軟弱な非液状化地盤における検証

軟弱地盤においては強震時に地盤が非線形挙動を呈し、地盤震動が長周期化することが知られている。すなわち、緩詰め砂地盤ではなく、液状化が発生していない場合でも、液状化地盤と類似した挙動を示す。そこで、軟弱地盤における強震記録に前章で提案した液状化検知指標を適用し、液状化地盤と軟弱地盤の判別ができるか否かについて検討する。以下、本文における軟弱地盤とは、緩詰め砂地盤ではなく、液状化しない地盤を指すものとする。

ここでは、解析結果の一例として1997年鹿児島県北西部地震における阿久根の強震記録を用いた結果を示す。表-1に示すように阿久根では3月～5月に3回地震が発生し、いずれも100gal以上の最大水平加速度を記録している。観測地点のボーリング柱状図によれば、N値が5以下の粘土層が地表から

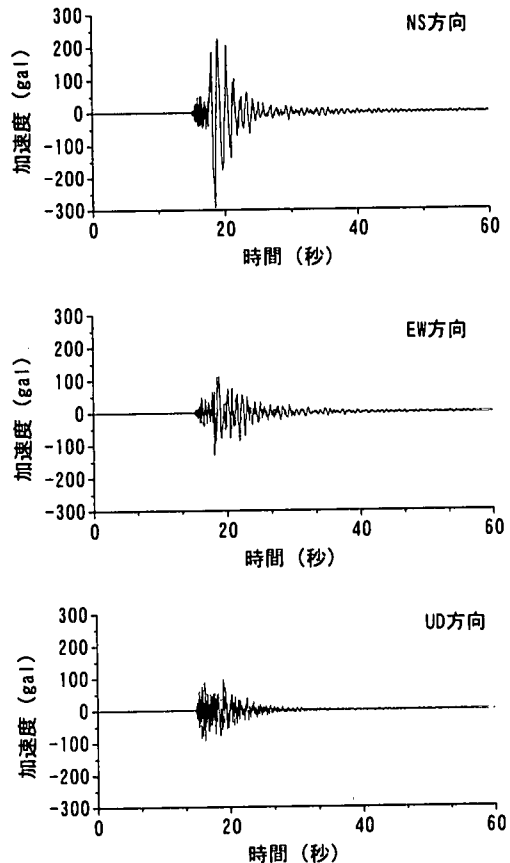


図-5 阿久根における地表面強震記録(EQ.1)

18mまで堆積しており、地下5mから10mあたりにN値が10程度の砂層が見られる。観測地点から約800m離れた阿久根港では3月の地震の際に小規模な噴砂が観察されているが、観測地点の阿久根市役所の敷地内で液状化の痕跡があったという報告はなく⁶⁾、液状化非発生の軟弱地盤であると判断できる。同観測点における3月の地震の強震記録を図-5に、上下/水平比の時刻歴を図-6に、卓越振動数の時刻歴を図-7にそれぞれ示す。図-5によれば、水平方向の加速度が約18秒以降で長周期化していることがわかる。図-6の上下/水平比に注目すると、点線矢印で示した水平方向の加速度が最大値を示した時刻以降では、大きな上下/水平比は見られない。図-7によれば、主要動が到達すると卓越振動数が急に減少していることがわかる。

この地震を初め、表-1に示した3回の地震の阿久根における強震記録をもとに本研究で提案している液状化検知指標を求めたものが表-2である。強震時の平均卓越振動数は1.4～1.9Hzと比較的小さい値を示している。後述するように液状化地盤では1.0 Hzを下回ることが多いので、液状化地盤とある

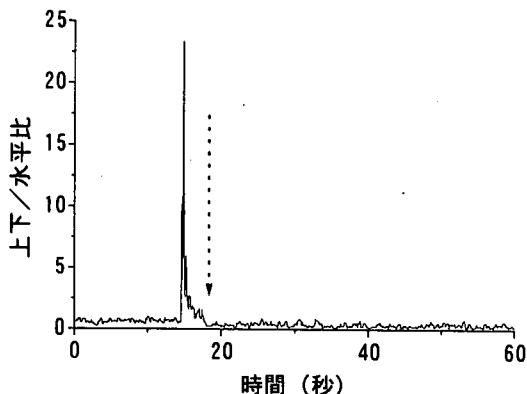


図-6 阿久根の強震記録の上下／水平比の時刻歴

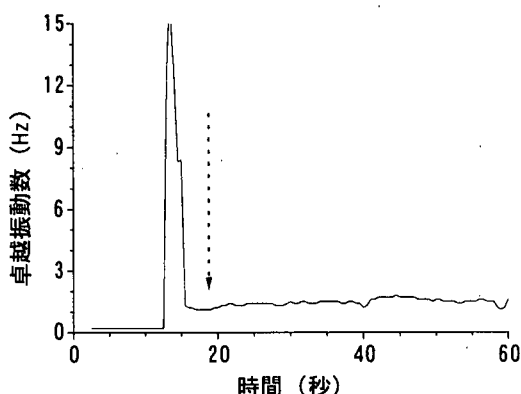


図-7 阿久根の強震記録の卓越振動数の時刻歴

表-2 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	0.9	1.4	2.4
EQ. 2	0.8	1.9	1.1
EQ. 3	1.0	1.7	1.2

程度判別できると考えられる。また、卓越振動数変化率は1.1～2.4となっており、後述する液状化地盤の2.0以上という値と比較しても明確に判別することができない。軟弱地盤における非線形化が顕著に現れているためであると考えられる。一方、最大上下／水平比は1.0前後であり、これは水平応答加速度の顕著な低減が見られないことを示しており、液状化地盤と明確に判別することができる。

このような解析をいくつか行った結果、軟弱地盤が非線形挙動することによる長周期化に対しては卓越振動数変化率だけでは液状化地盤と明確に判別することはできないが、軟弱地盤においても強震時の平均卓越振動数が1.0Hzを下回るような場合には、後述するように卓越振動数変化率の大小によってある程度判別できることがわかった。また、最大上下／水平比は軟弱地盤では大きくはなく、液状化地盤のみに見られる特徴であることが明らかとなった。したがって、本研究で提案している3つの指標を単独で用いるのではなく、組み合わせて用いることにより、精度の良い液状化検知ができるものと考えられる。

(2) 液状化地盤、非液状化地盤における検証

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ればならぬので、水平2方向の地表面最大加速度の

ベクトル和が100gal以上のものとした。表-3、4に、解析に用いた100点の強震記録の一覧を示す。図-8には本研究で用いた強震記録のマグニチュードと震央距離を示す。本研究で用いた強震記録はマグニチュード3.9から8.1までのものであり、震央距離も約2km～200kmと広い範囲に分布していることがわかる。また、図-9に、水平2方向の地表面最大加速度のベクトル和と震央距離を示すが、加速度も約100gal～1,000galと広い範囲に分布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亘る液状化痕跡、すなわち噴砂堆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。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から500m程度離れているものを指している。例えば、1983年日本海中部地震の際の秋田港の観測点では500m離れた岸壁において、1993年釧路沖地震の際の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^{7)・8)}。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⁹⁾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

表-3 解析に用いた100地点の強震記録（その1）

No.	観測点	地震名	震央距離 (km)	水平方向 最大加速度(gal)	総合 ポイント
液状化					
1	Wildlife	1987 Superstition Hills地震	36.0	225.9	3
2	神戸港工事事務所	1995 兵庫県南部地震	17.6	371.0	3
3	ポートアイランド	1995 兵庫県南部地震	16.7	356.3	4
4	東神戸大橋	1995 兵庫県南部地震	25.7	266.3	4
5	六甲アイランド	1995 兵庫県南部地震	23.3	356.4	3
付近液状化					
6	青森港	1968 十勝沖地震	190.0	157.4	3
7	秋田港	1983 日本海中部地震	107.0	297.8	0
8	釧路港	1993 釧路沖地震	16.3	490.1	0
9	函館港	1993 北海道南西沖地震	169.0	298.8	2
10	鷹取駅	1995 兵庫県南部地震	11.3	893.5	2
11	神戸港第8突堤	1995 兵庫県南部地震	18.3	737.4	0
12	尼崎第三発電所	1995 兵庫県南部地震	36.7	396.2	2
13	尼崎	1995 兵庫県南部地震	35.7	397.2	4
非液状化					
14	東大千葉実験所	1987 房総半島九十九里浜沖地震	44.7	376.5	0
15	奥村組筑波研究所	1990 茨城県南西部地震	14.7	114.8	0
16	久野小学校	1990 神奈川県西部地震	8.1	290.8	1
17	小田原コントロールst.	1990 神奈川県西部地震	11.6	269.9	0
18	久野採石場	1990 神奈川県西部地震	8.5	240.3	0
19	西酒匂	1990 神奈川県西部地震	10.2	195.1	0
20	酒匂	1990 神奈川県西部地震	13.6	192.2	0
21	成田	1990 神奈川県西部地震	11.5	171.8	0
22	国府津	1990 神奈川県西部地震	13.7	158.8	0
23	南足柄市西条寺	1990 神奈川県西部地震	63.7	155.6	0
24	久野農協	1990 神奈川県西部地震	7.6	148.4	0
25	南足柄塚原	1990 神奈川県西部地震	10.2	101.3	0
26	室蘭港	1993 北海道南西沖地震	153.0	280.7	0
27	花咲港	1994 北海道東方沖地震	171.0	487.8	0
28	宝塚駅	1995 兵庫県南部地震	37.1	677.1	0
29	猪名川	1995 兵庫県南部地震	43.4	593.1	0
30	総合技術研究所	1995 兵庫県南部地震	39.6	588.0	1
31	神戸本山	1995 兵庫県南部地震	25.5	556.4	1
32	西明石駅	1995 兵庫県南部地震	10.4	552.2	0
33	淀川（枚方）	1995 兵庫県南部地震	60.0	493.3	0
34	堺市	1995 兵庫県南部地震	39.3	460.6	0
35	四つ橋	1995 兵庫県南部地震	41.3	414.7	1
36	加古川駅	1995 兵庫県南部地震	25.8	395.3	0
37	忠岡市	1995 兵庫県南部地震	36.3	301.2	1
38	新大阪駅	1995 兵庫県南部地震	46.8	285.8	0
39	大阪市福島区	1995 兵庫県南部地震	40.5	277.5	0
40	大淀堤防	1995 兵庫県南部地震	42.1	277.1	2
41	大阪市阿倍野区	1995 兵庫県南部地震	43.7	269.0	0
42	高砂発電所	1995 兵庫県南部地震	28.8	266.2	0
43	加古川大堰	1995 兵庫県南部地震	26.3	241.5	1
44	大和川堤防	1995 兵庫県南部地震	50.0	238.6	0
45	東大阪市森河内東	1995 兵庫県南部地震	49.2	214.4	0
46	松の浜	1995 兵庫県南部地震	35.9	199.4	0
47	松の浜	1995 兵庫県南部地震	35.9	197.8	0
48	東大阪市本庄	1995 兵庫県南部地震	52.8	187.5	0
49	八尾変電所	1995 兵庫県南部地震	55.7	185.6	0

表-4 解析に用いた100地点の強震記録(その2)

No.	観測点	地震名	震央距離 (km)	水平方向 最大加速度(gal)	総合 ポイント
非液状化					
50	紀ノ川堤防	1995 兵庫県南部地震	43.4	178.7	0
51	吉野川徳島堤防	1995 兵庫県南部地震	72.9	178.5	0
52	西京都変電所	1995 兵庫県南部地震	69.2	172.1	0
53	海南港変電所	1995 兵庫県南部地震	52.5	161.4	0
54	淀川大堰	1995 兵庫県南部地震	45.2	161.1	0
55	吉野川石井堤防	1995 兵庫県南部地震	79.2	149.9	0
56	南大阪変電所	1995 兵庫県南部地震	46.1	143.4	0
57	千早赤阪村	1995 兵庫県南部地震	59.5	124.2	0
58	伊東	1997 伊豆半島東方沖地震	4.3	624.5	0
59	伊東	1997 静岡県伊豆地方地震	6.9	197.8	0
60	伊東	1997 伊豆半島東方沖地震	9.6	383.5	0
61	伊東	1997 伊豆半島東方沖地震	4.3	324.4	0
62	伊東	1997 伊豆半島東方沖地震	4.3	219.5	0
63	伊東	1997 静岡県伊豆地方地震	6.9	325.1	0
64	作手	1997 愛知県東部地震	10.0	613.3	0
65	稲武	1997 愛知県東部地震	34.7	353.0	0
66	設楽	1997 愛知県東部地震	22.5	298.7	0
67	宮之城	1997 鹿児島県薩摩地方地震	12.5	199.6	0
68	阿久根	1997 鹿児島県薩摩地方地震	10.0	253.3	0
69	川内	1997 鹿児島県薩摩地方地震	21.0	307.5	0
70	宮之城	1997 鹿児島県薩摩地方地震	18.5	584.7	0
71	大口	1997 鹿児島県薩摩地方地震	32.8	272.1	0
72	川内	1997 鹿児島県薩摩地方地震	21.0	195.3	0
73	阿久根	1997 鹿児島県薩摩地方地震	10.0	141.0	0
74	宮之城	1997 鹿児島県薩摩地方地震	12.5	307.0	0
75	白河	1997 福島県沖地震	98.4	282.2	0
76	宮之城	1997 鹿児島県薩摩地方地震	14.5	1,226.4	0
77	川内	1997 鹿児島県薩摩地方地震	9.9	437.4	0
78	阿久根	1997 鹿児島県薩摩地方地震	15.8	199.8	0
79	宮之城	1997 鹿児島県薩摩地方地震	14.5	200.2	0
80	五木	1997 熊本県熊本地方地震	21.3	251.0	0
81	本別	1997 釧路支庁中南部地震	49.0	157.6	0
82	津和野	1997 山口県北部地震	10.0	482.2	0
83	新島	1997 新島・神津島近海地震	4.8	230.8	0
84	厚床	1998 根室半島南東沖地震	41.4	269.4	0
85	浜中	1998 根室半島南東沖地震	35.7	129.6	0
86	小千谷	1998 新潟県中越地方地震	0.7	201.2	0
87	日立	1998 福島県北部地震	46.9	205.6	0
88	伊東	1998 伊豆半島東方沖地震	9.6	258.4	0
89	伊東	1998 伊豆半島東方沖地震	4.3	284.4	0
90	伊東	1998 伊豆半島東方沖地震	4.3	356.8	0
91	国東	1998 伊予灘地震	21.2	192.3	0
92	今市	1998 茨城県南部地震	67.4	124.6	0
93	白河	1998 福島県中通り地方地震	19.5	118.6	0
94	栃尾	1998 長野県中部地震	9.3	129.2	0
95	栃尾	1998 長野県中部地震	9.3	155.5	0
96	白井	1998 東京湾地震	21.9	166.8	0
97	田沢湖	1998 岩手内陸地震	26.5	127.3	0
98	作並	1998 宮城県南部地震	14.2	131.9	0
99	牡鹿	1998 宮城県北部地震	90.1	231.6	0
100	和泉	1998 福井県嶺北地方地震	2.4	204.5	0

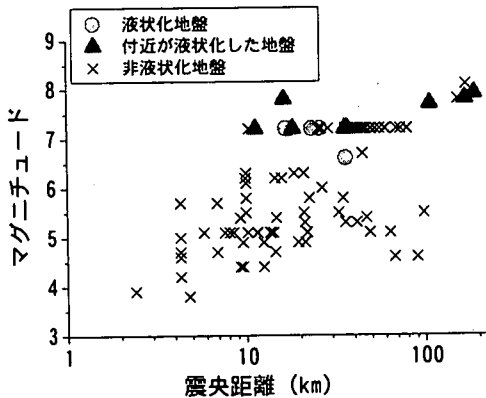


図-8 解析に用いた強震記録のマグニチュードと震央距離

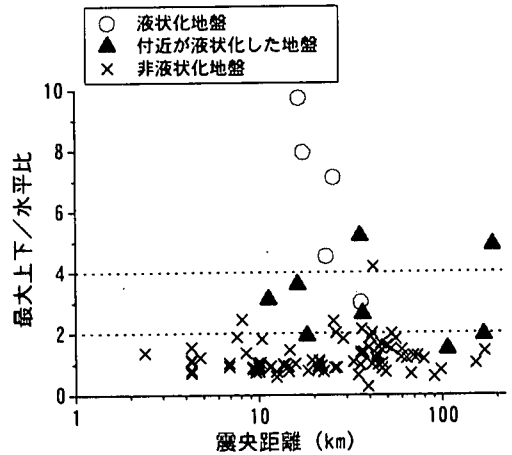


図-10 最大上下/水平比の分布

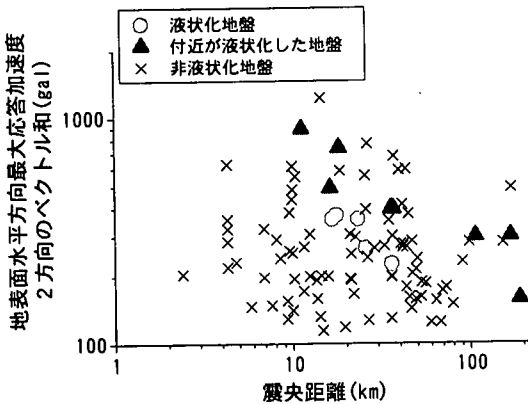


図-9 解析に用いた強震記録の地表面最大加速度の2方向ベクトル和

書などからだけで判断するには問題も残されているが、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。

図-10に強震記録の最大上下/水平比を震央距離との関係で示す。横軸に震央距離をとっているのは図-8、図-9との対応を見るためだけであり、特に意味はない。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、1地点を除いてすべて4.0以上であることがわかる。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値のうち、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る。一方、非液状化地盤の強震記録のうち、値が2.0より大きくなっている強震記録は、埋め立て地や河川付近など、液状化が発生しやすい地盤上で観測されているが、液状化痕跡の報告が不明であるものが多かった。このため実際には液状化が起きていることも考えられる。以上のことから、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言える。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と比べると、その値は小さい。

図-11に強震時の平均卓越振動数を震央距離との関係で示す。液状化地盤における値が1.0Hz以下になっていることがわかる。付近が液状化した地盤の値のうち、液状化痕跡までの距離が遠い場合を除いては1.0Hzより低くなっていることがわかった。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もわかった。そこで、強震時の平均卓越振動数が1.0Hz以下の強震記録に対して卓越振動数変化率を計算すると、液状化地盤の強震記録においては卓越振動数変化率が2.0以上になるのに対して、付近が液状化した地盤では2.0以下の値になることが明かとなった。

5. 液状化検知法の提案

以上より、液状化検知法を次のように提案する。

- 1) 最大上下/水平比が2.0~4.0の場合1ポイント、

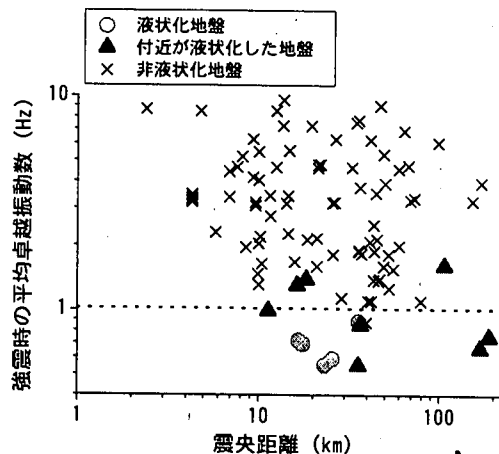


図-11 強震時の平均卓越振動数の分布

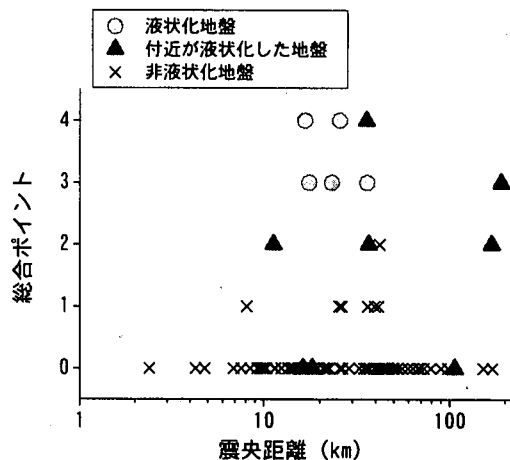


図-12 液状化検知法による総合ポイント

4.0以上の場合2ポイントを加算する。

- 2) 強震時の平均卓越振動数が1.0Hzより低い場合1ポイントを加算する。
- 3) 2)の観測点においては卓越振動数変化率を計算し、2.0より大きい場合1ポイントを加算する。

この方法によれば、強震記録観測点付近の液状化発生確率が0～4ポイントの5段階で表されることになる。この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-12に示す。同図によれば、液状化地盤の強震記録はすべて3ポイント以上になり、非液状化地盤の強震記録と明確に区別できることが確認できる。また、付近が液状化した地盤において0ポイントの記録が3地点ある。これは、1993年日本海中部地震における秋田港の記録と、1993年釧路沖地震における釧路港の記録、1995年兵庫県南部地震における神戸港第8突堤である。秋田港、釧路港については前述した通りであるが、神戸港第8突堤についても液状化痕跡が多く見られた第6突堤までは約500m離れている¹⁰⁾。これらのことは、液状化発生地域から100m程度以上離れると液状化の発生が検知できない可能性を示唆している。前述したように、付近が液状化した地盤では、地表面に液状化の痕跡が現れていないものの深い地点では液状化が生じている場合と、強震観測点直下では全く液状化が生じていない場合とが考えられる。後者の場合においても、強震記録には地盤のある範囲の動特性が反映されているであろうから、強震観測点を除くその付近だけが液状化した場合においても、液状化地盤特有の特性が強震記録に反映される可能性があると考えられている。本手法による検知可能範囲については別途検討を進めているので、別の機会に報

告する予定である。なお、非液状化地盤にもかかわらず2ポイントである地点は、1995年兵庫県南部地震における大淀堤防であり、これについては被害報告書に液状化の記載が見当たらなかったものの、付近で液状化が発生している可能性が十分に考えられる。

以上示したように、被害報告書から液状化発生の判断をしているので、本検知法の精度の厳密な検証はできないが、総合ポイントが3ポイント以上であれば数100m以内で液状化が発生している可能性が高いと判断できる。

6. 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まとめると以下のようである。

- 1) Superstition Hills地震におけるWildlife観測点の強震記録と過剰間隙水圧記録を検討することにより、液状化検知指標を提案した。
- 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」を提案した。この指標を用いることにより、液状化地盤の地盤震動特性と類似した、軟弱地盤の非線形挙動による長周期地盤震動と液状化地盤のそれを判別できることを明らかにした。
- 3) 振動数特性に関する液状化検知指標として「強

震時の平均卓越振動数」と「卓越振動数変化率」を提案した。液状化地盤においては「強震時の平均卓越振動数」が1.0Hzを下回ることが多いが、軟弱地盤と明確に判別できない可能性があることがわかった。その場合、「卓越振動数変化率」に注目することにより、明確に液状化地盤を軟弱地盤と判別できることが明らかとなった。

- 4) 本論文で提案した液状化検知指標を用いて、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3ポイント以上であれば約100m以内で液状化が発生している可能性が高い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行く予定である。

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)鉄道総合技術研究所、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、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頂きました。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頂きました。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) Kayen, R.E. and Mitchell, J.K.: Assessment of Liquefaction Potential during Earthquake by Arias Intensity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, pp. 1162-1174, 1997.
- 2) 高田至郎, 尾崎竜三: 地表面強震記録にもとづくリアルタイム液状化判定手法, 土木学会論文集, No.640, pp.99-108, 2000.
- 3) Towhata, I., Park, J. K., Orense, R. P. and Kano, H.: Use of Spectrum Intensity for Immediate Detection of Subsoil Liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No.2 pp. 29-44, 1996.
- 4) Matasovic, J. and Vucetic, M.: Analysis of Seismic Records from the Wildlife Liquefaction Site, *Proc. of 11WCEE*, Paper No. 209, 1996 (CD-ROM).
- 5) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.93-109, 1994.
- 6) 飛島建設株式会社: 1997年5月13日鹿児島県北西部地震被害調査報告書, pp. 82-83, 1997.
- 7) 松永康男, 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, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No.766, pp. 240-243, 1993.
- 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年日本海中部地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No.511, p. 43, p.222, 1985.
- 9) 安田 進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, p.162, 1988.
- 10) 運輸省港湾技術研究所: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No.857, p. 43, pp.22-23, 1997.

(1999.5.31受付)

STUDY ON LIQUEFACTION DETECTIVE METHOD USING STRONG GROUND MOTION RECORDS

Masakatsu MIYAJIMA, Satoru NOZU, Masaru KITaura and Masaki YAMAMOTO

The present paper focuses on a detective method of liquefaction using strong ground motion records. First, amplitude characteristics of strong ground motion records were investigated. The time histories of ratio of the vertical ground acceleration to the horizontal one were calculated from the strong ground motion records in liquefied and non-liquefied areas. Next, frequency characteristics of the strong ground motion records were studied. The average predominant frequency during strong motion and the decrease rate of predominant frequency were evaluated. Finally, the detective method of liquefaction was proposed by using these indices.