

## (38) 液状化の早期検知と対策

清水建設(株) 石川 裕 片岡俊一  
同 松井正宏 吉見吉昭

### 1. はじめに

著者らは、「アクティブ排水による液状化対策工法(通称:ALPS)」について現在、研究・開発を実施している<sup>1)~5)</sup>。ALPSは、地震時にのみ地下水を揚水することにより地盤の液状化を防止しようとするもので、揚水に真空を利用することにより急速に地盤内の間隙水圧を低下させるところに特徴がある。今後ALPSを実用化していくためには次の研究課題を解決していく必要がある。

① 短時間の揚水による液状化防止効果を定量的に把握すること。

② 液状化の発生を早期に検知し、迅速かつ確実に揚水を開始すること。

このうち、①はALPSの液状化対策工法としての基本的な問題であり、具体的な設計へ展開するためには、揚水時間や揚水速度と液状化防止効果の関係を定量的に評価しておくことが不可欠である。一方、②はALPSのシステム上の最も重要な課題であり、液状化の検知に関し多少の空振りは許されたとしても、見逃しだけは絶対に避けるような方法を確立する必要がある。本報告ではまず、アクティブ排水による液状化防止効果を把握するために行った繰返し三軸試験の結果を示し、続いて液状化早期検知の考え方ならびに1993年釧路沖地震の地震動記録を用いた検知の試算例について紹介する。

### 2. アクティブ排水を考慮した砂の液状化特性

今回実施した繰返し三軸試験では排水条件を種々変化させるために、間隙水の排水速度ならびに排水圧力勾配を制御できる装置を用いた。排水速度の制御は鋼製パイプの中に砂を詰めたクッション部を排水経路の途中に設けることにより行い、クッション部の透水特性(砂の透水係数×パイプ断面積/パイプ長さ)は $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ に設定した。試験では相対密度を60%に調整した豊浦標準砂を試料として用い、繰返し載荷試験時のセル圧は $3.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、初期間隙水圧は $2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (すなわち、初期有効拘束圧 $1.5 \text{ kgf/cm}^2$ )とした。繰返し荷重は応力比0.21に相当する軸荷重を周波数0.5Hzの正弦波として載荷した。排水条件は、①非排水、②パッシブ排水(自然排水条件)、③アクティブ排水(強制排水条件)の3種類とし、アクティブ排水時の減圧圧力は $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ および $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の2ケースを設定した。なお、試験装置の詳細については文献3)を参照されたい。

図-1は上述の排水条件で実施した繰返し三軸試験結果のうち、過剰間隙水圧 $u_g$ の経時変化を示したものである。同一の繰返し載荷条件でも、非排水、パッシブ排水、アクティブ排水(減圧圧力 $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ )、同(減圧圧力 $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ )の順に過剰間隙水圧の上昇速度が遅くなる。特に減圧圧力を $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ とした場合の結果に見られるように、アクティブ排水の条件下では、排水速度や排水圧力勾配によっては繰返し載荷をしても過剰間隙水圧がほとんど上昇しなくなることがわかる。このことは、原位置でもこのような条件を設定することができれば、アクティブ排水がきわめて有効な液状化対策となりうることを示唆するものである。

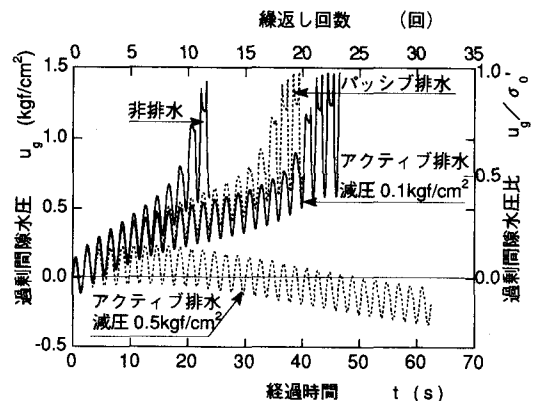


図-1 排水条件の違いによる過剰間隙水圧の上昇過程の比較

### 3. 地震動に基づく液状化の早期検知方法

地震動のモニタリングに基づく液状化早期検知の概念を図-2に示す<sup>4)5)</sup>。このうち、<0>前線検知とは震源近くで検知した地震の情報に基づいてサイトでの液状化の警報を発するものであり、サイトや地震を限定すれば近い将来確立される可能性がある方法である。<1>~<3>はサイトでモニタリングしている地震動の情報に基づき液状化の検知を行おうとするもので、それぞれ以下のような考え方に基づく。ALPSではこれら4つの検知方法のいずれかで液状化が警報された場合に揚水を開始することになる。

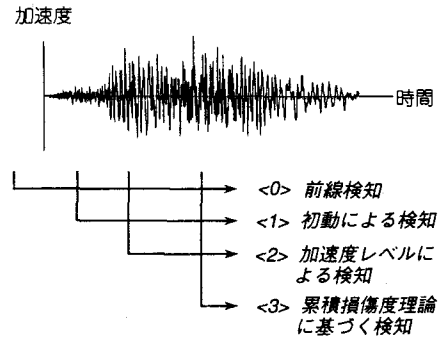


図-2 地震動に基づく液状化早期検知の概念

#### <1> 初動による検知

地震動の初動部分の情報に基づき液状化を検知するもので、初動の情報から地震の規模と震源位置を推定するシステムとしてはJR総研の「ユレダス」<sup>6)</sup>が著名である。液状化の早期検知でもこの考え方が踏襲でき、地盤の液状化強度に基づいてあらかじめ液状化をもたらすような地震の規模と距離の範囲を特定しておくことにより、推定された地震諸元がその範囲に入った場合に液状化の警報を発する。

#### <2> 加速度レベルによる検知

モニタリングしている地震動加速度そのものに基づき液状化を検知するもので、地盤の液状化強度に基づいてあらかじめ設定された加速度レベルを超えた時点で液状化の警報を発する。

#### <3> 累積損傷度理論に基づく検知

モニタリングしている地震動加速度をベースにして、累積損傷度理論に基づく累積損傷度をリアルタイムに算定し、その値が設定値を超えた時点で液状化の警報を発する。

### 4. 1993年釧路沖地震の地震動記録を用いた液状化早期検知の試算例

上述の方法により液状化が早期に検知できるかどうかについて1993年釧路沖地震の地震動記録を用いて検討した。ここでは以下に示すような2種類の液状化強度を有するモデル地盤が浦河および八戸にあると仮定した場合の上記<1>~<3>の検知結果について述べる。なお、<1> 初動による検知の考え方は「ユレダス」<sup>6)</sup>に準拠するものとし、地震動パラメータと地震諸元の諸々の関係式は便宜上伊豆高原での当社の観測記録から評価したものをを用いた。

#### 4.1 解析条件

##### (1) 地盤の液状化強度

今回仮定したモデル地盤の液状化強度曲線を図-3に示す。ここではA、B2種類の地盤を仮定しているが、地盤Aは通常液状化対策を施すような地盤、地盤Bは液状化対策を施すかどうか微妙な地盤である。ちなみに、地盤A、Bの繰返し回数15回に対するせん断応力比  $\tau_d/\sigma'_v$  はそれぞれ0.11、0.16であり、時松・吉見法<sup>7)</sup>により液状化判定を行った場合に  $F_L$  値が1となる最大加速度値（マグニチュードは7.5と仮定）はそれぞれ125Gal、179Galである。

##### (2) 地震動加速度記録

解析に用いた加速度波形は1993年釧路沖地震（M7.8）の観測記録のうち、気象庁で観測された浦河記録（震央距離152km、最大加速度 NS：224Gal、EW：265Gal、

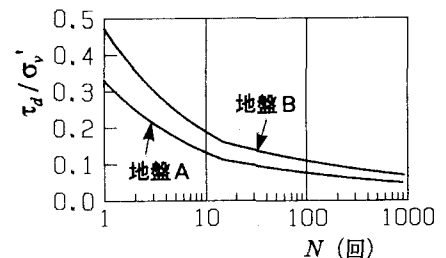


図-3 モデル地盤の液状化強度曲線

UD : 65Gal) ならびに八戸記録 (震央距離351km, 最大加速度NS : 129Gal, EW : 113Gal, UD : 38Gal) である。

### (3) 液状化を警報するための閾値

図-4に地盤A、Bに対し<1>初動による検知に基づき液状化を警報するためのマグニチュードと震源距離の範囲を示す。これは福島・田中<sup>8)</sup>の最大加速度の距離減衰式を用いて時松・吉見法<sup>7)</sup>により算定した $F_L$ 値が1.5以下となる範囲として設定している。

液状化を警報するための加速度レベルの閾値は地盤A、Bに対しそれぞれ65Gal、90Galとした。これは各地盤の $F_L$ 値が2.0となる最大加速度を目安としたものである。また、液状化を警報するための累積損傷度の閾値は0.1とした。

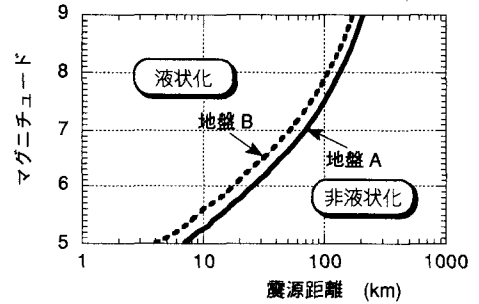


図-4 液状化を警報するマグニチュードと距離の範囲

## 4.2 解析結果と考察

### (1) 浦河での結果

図-5に浦河での加速度記録を用いて解析した結果を示す。図-5は地盤A、Bともにいずれも上から、(a)加速度時刻歴 (NS成分)、(b)加速度レベル (その時刻までの最大加速度)、(c)累積損傷度の経時変化を示している。(a)図には<1>初動による検知で地震諸元を検知した結果についても示している。

(c)図の累積損傷度の結果から見て、地盤Aはこの地震で間違いなく液状化が生じると考えられる。また、地盤Bも累積損傷度がほぼ1に近づいている (ちなみにEW成分に対する結果では1を上回る) ことから、両地盤ともにこの地震に対しては液状化を早期に警報しなければいけない条件である。

これに対し<1>初動による検知では、図-5の時間軸上で6.3sと早い段階で地震諸元の検知ができてきているものの、初動の周期から推定したマグニチュードが6.4と小さ過ぎたため、地盤A、Bともに液状化の警報を出すに至らなかった (いわゆる見逃し)。一方、<2>加速度レベルによる検知では地盤Aで33.7s、地盤Bで34.8sに液状化の警報が出されている。これは<3>累積損傷度による検知よりわずかに早く液状化を警報しているが、累積損傷度はその直後に急激に増加して1に近づいており、この時点での警報で液状化が早期に検知できたと言うには無理がある。

### (2) 八戸での結果

図-6に八戸での加速度記録を用いて解析した結果 (同図はNS成分) を示す。(c)図によれば、地盤Aは累積損傷度が1を上回っており、液状化を早期に警報しなければいけない条件である。また、地盤Bの最終の累積損傷度はほぼ0.6であり、液状化を警報すべき

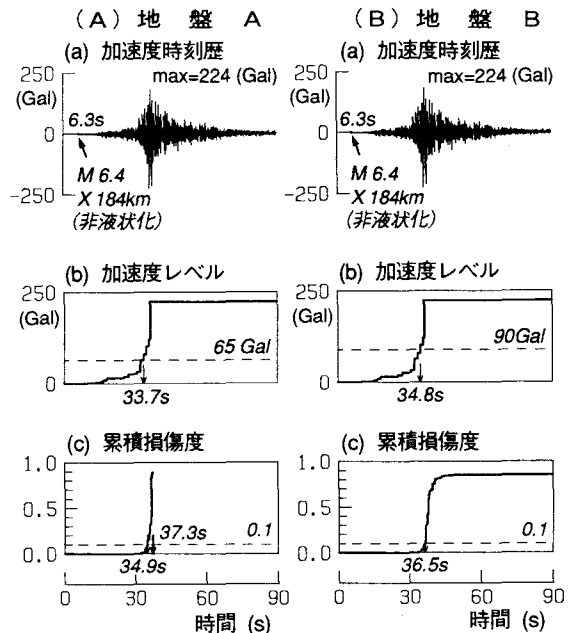


図-5 浦河における液状化早期検知結果

かどうか微妙なところである。

これに対し<1>初動による検知では、上下動と水平動の比に基づくP波の検知ができなかったため、初動の段階では液状化は警報されていない。また、地盤Aに対して、<2>加速度レベルによる検知では41.3s時点で液状化を警報しているが、累積損傷度が1となる(45.8s)までの時間はたかだか4秒程度であり、液状化の早期検知として十分かどうか怪しいところである。

一方、今回の結果では、地盤Bに対しても加速度レベルが90Galを超えた42.8s時点で液状化が警報されている。

### 5. おわりに

本報告ではALPS開発の一環として排水条件を変えて行った繰返し三軸試験の結果を示し、続いて1993年釧路沖地震の加速度記録を用いた液状化早期検知の試算例について紹介した。今回の試算例では液状化の早期検知は必ずしもうまくいったとは言えず、今後多くの課題を残した。特に、<1>初動による検知の段階でうまく液状化を警報することができなかった。今後は<1>初動による検知について、地震諸元の推定誤差を考慮に入れた液状化の検知方法の検討を進めていくとともに、より多点の記録を用いる<0>前線検知の考え方を推進するなどして、液状化早期検知の信頼性を向上させていく必要がある。また、今回紹介した実験結果などに基づき、過剰間隙水圧の経時変化の観点から見てどの時点で液状化の警報が必要になるかについても明らかにしていく必要がある。さらに、加速度記録に基づき累積損傷度を算定する場合に考慮すべき加速度の周期帯域についても検討しておく必要がある。

本報告をまとめるにあたり、液状化早期検知の計算には気象庁で観測され日本気象協会より公開されている釧路沖地震の加速度記録を用いた。また、繰返し三軸試験に関しては清水建設(株)技術研究所・玉置克之主席研究員、高坂信章研究員ならびに(株)東京ソイルリサーチの協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

#### 【参考文献】

- 1) 石川 裕・玉置克之・高坂信章・佐藤正義・吉見吉昭：アクティブ排水による液状化対策工法, 第27回土質工学研究発表会発表講演集, 434, pp.1173-1174, 1992.
- 2) 玉置克之・石川 裕・佐藤正義・吉見吉昭：アクティブ排水による液状化対策工法(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2732, pp.1463-1464, 1992.
- 3) 高坂信章・玉置克之・石川 裕・佐藤正義・吉見吉昭：アクティブ排水を考慮した砂の液状化特性, 第28回土質工学研究発表会発表講演集, 1993 (投稿中).
- 4) 石川 裕・吉見吉昭：液状化早期検知の考え方, 第28回土質工学研究発表会発表講演集, 1993 (投稿中).
- 5) 石川 裕・吉見吉昭：液状化早期検知の考え方(その2), 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 1993 (投稿中).
- 6) 中村 豊：早期地震検知警報システム「エレダス」, 地震ジャーナル, 14, pp.34-39, 1992.
- 7) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 8) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991.

[連絡先: 清水建設(株) 技術研究所 ☎135 東京都江東区越中島3-4-17 ☎03-3820-5521 FAX03-3643-7260]

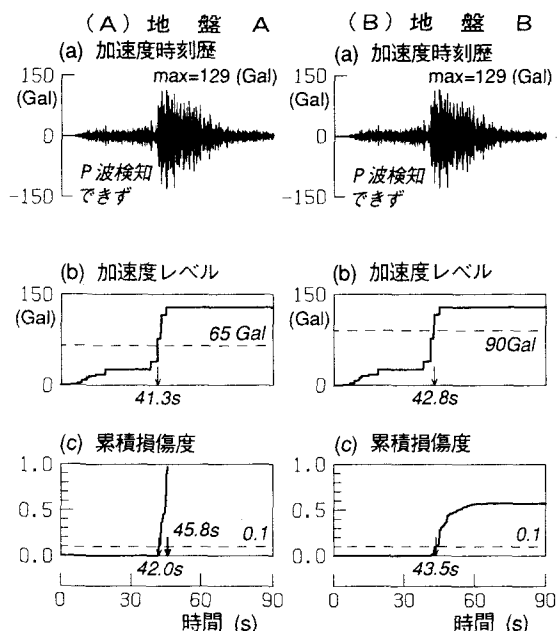


図-6 八戸における液状化早期検知結果