

中越沖地震における宅地地盤の液状化に関する研究

地盤工学研究室 高橋 巧
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

2007年7月16日に新潟県上中越沖を震源に中越沖地震が発生した。中越沖地震では、液状化による宅地及び家屋の被害が多く報告された。特に柏崎市や刈羽村では液状化被害が顕著であった。したがって本研究では、柏崎市の鯖石川周辺や刈羽稲場地区での液状化被害に着目し被害調査を行い、液状化被害の原因について詳細な研究を行う。

2. 研究内容

研究内容は大きく二つあり、一つは旧河道の液状化に着目したものであり、橋場町で現地調査・ヒアリング調査を行い、被害の特徴を明らかにする。また、原位置試験としてスウェーデン式サウンディング試験(以下 SWS 試験)を行い、試験結果を用いて液状化危険度判定を行う。SWS 試験は、荷重による貫入と回転による貫入を併用した原位置試験であり、装置及び操作が容易で迅速に測定ができ簡易なサウンディングのうちでは比較

的貫入能力に優れるという利点を有している。今回は回転を人力で行い、地下水位を試験後ロッドにより測定した。

二つ目として、地盤の液状化メカニズムの追及、土の動的な挙動の予測を目的とし、繰返し一面せん断試験を行い、豊浦砂と比較した。繰返し一面せん断試験は、一次元圧密、平面ひずみ条件下で水平方向に繰返しせん断応力を与えていることから、実地盤における応力・変位状態に近く、試験方法が簡便で試料も少量ですむといった利点を有している。試験方法としての適用性の検討をして、繰返し非排水三軸試験との比較を行った。

中越沖地震では、砂丘末端部で砂丘と沖積層の境界部や旧河道で液状化の被害が顕著であった。現在、平地と斜面での液状化の判定基準に差はない。したがって、初期せん断を与えることにより斜面を想定し、得られる結果の液状化判定について検討する。

Table.1 ヒアリング調査結果

整理番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
地形的分類	旧河道上に建築された家屋									旧河道以外に建築された家屋					
家屋の概要	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
家屋の階数	瓦	瓦, トタン	瓦	瓦	瓦	瓦	セメント瓦	トタン	トタン	トタン	瓦	瓦	瓦	トタン	トタン
屋根の様式	布	布	布	布	布	布	布	べた	布	布	布, 独立	布	布	布	布
基礎の形式	×	×	×	×	×	×	×	RES-P, 耐圧板	湿式柱状	×	×	×	×	×	湿式柱状
地盤改良, 基礎補強の有無	-	×	×	×	下水管	駐車場にクラック	車庫にクラック	液状化(建替え)	不等沈下(建替え)	×	×	×	×	×	×
中越地震での被害															
地盤の被害															
噴砂の有無															
地割れの有無															
地盤沈下・側方流動の有無															
家屋の被害															
家屋の偏心・地盤へのめり込みの有無															
基礎・室内の変状の有無															
屋根・外壁等の被害の有無															
駐車場・塀・家屋附帯設備の被害															
日常生活の問題点	湿度に関する事柄: 床下の湿気が多い, 大雨の時に湿気が多い 水に関する事柄: 水はげが悪い, 豪雨時に道路が浸水しやすい														

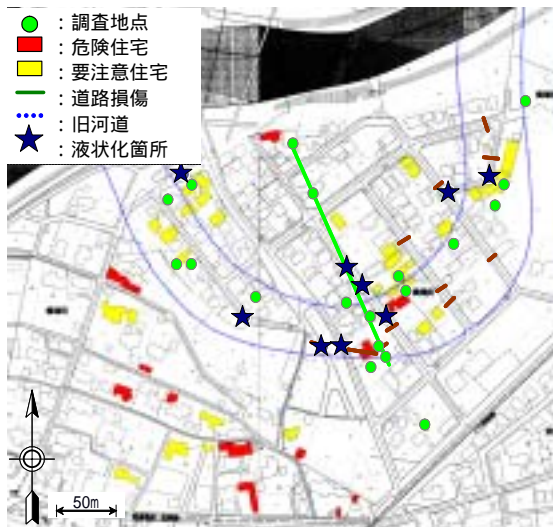


Fig.1 調査地域

換算 N 値(稲田式)

礫・砂・砂質土

$$N = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \text{ (式 1)}$$

粘土・粘性土

$$N = 0.003W_{sw} + 0.050N_{sw} \text{ (式 2)}$$

ここに、

W_{sw} : 1000N 以下で貫入した場合の荷重(N)

N_{sw} : 上記の荷重で貫入が停止した後の、回転により貫入させた時の貫入量 1m 当たりの半回転数(回/m)

3. 旧河道の液状化

調査地区を Fig.1 に示す。Fig.1 を見ると液状化による被害が旧河道とそれ以外の地域で異なっている。旧河道沿いでは応急危険度判定による要注意宅地が多く、地図の南西側で危険宅地が多く見られる。ヒアリング調査の結果 Table.1 に示す。ヒアリング調査結果は、被害が顕著であった 1 番の宅地を基準に相対的に評価したものであり、被害が旧河道周辺に集中していることがわかる。また、旧河道上でも中越地震で被災し、地盤改良を施した宅地では被害が軽微であり、地盤改良の

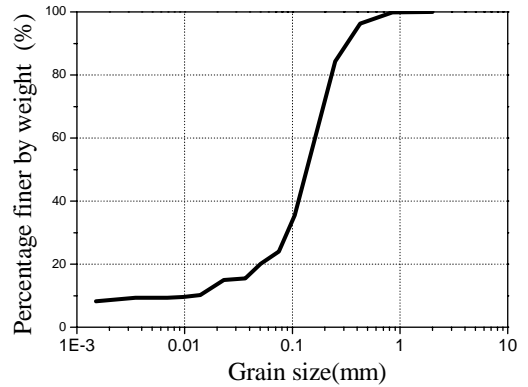


Fig.2 粒径加積曲線(橋場)

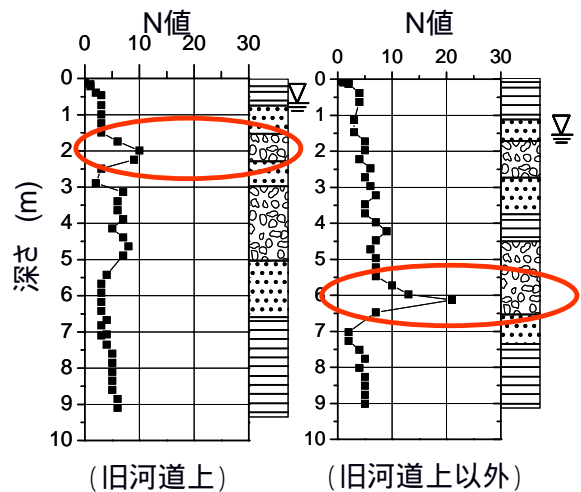


Fig.3 SWS 試験結果を用いた柱状図

影響がでている。また、日常的に湿気が多い、水はけが悪いなどの水に関する問題を抱えていることがヒアリング調査により明らかになった。次に液状化危険度判定として SWS 試験の結果を利用し、道路橋示方書による液状化判定を行った。また、SWS 試験では換算 N 値を算出することができ、上記の式を利用した。噴砂発生箇所では噴砂を試料としてサンプリングした。粒度試験の結果を Fig.2 に示す。Fig.2 より、橋場地区では細粒分を 20%程度含み、細粒分混じり砂に分類される。

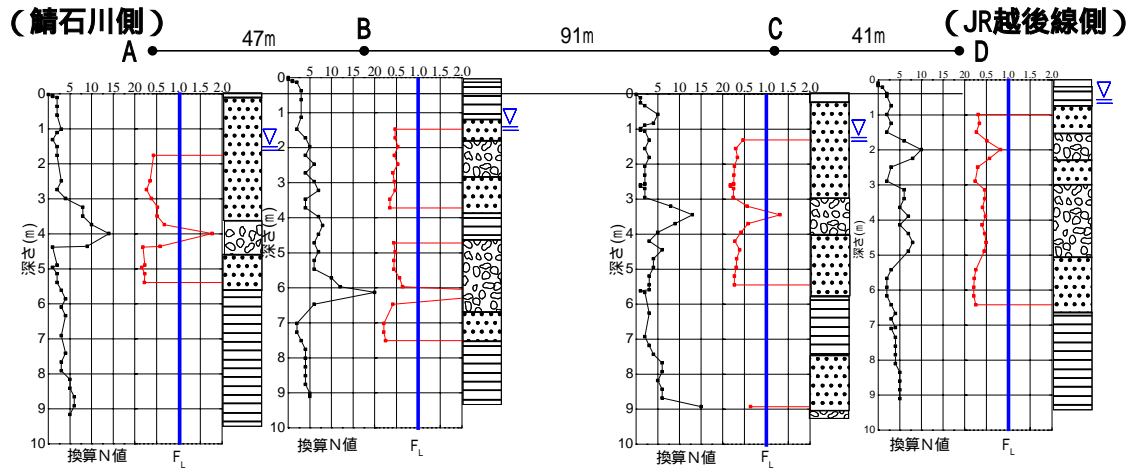


Fig. 4 液状化判定

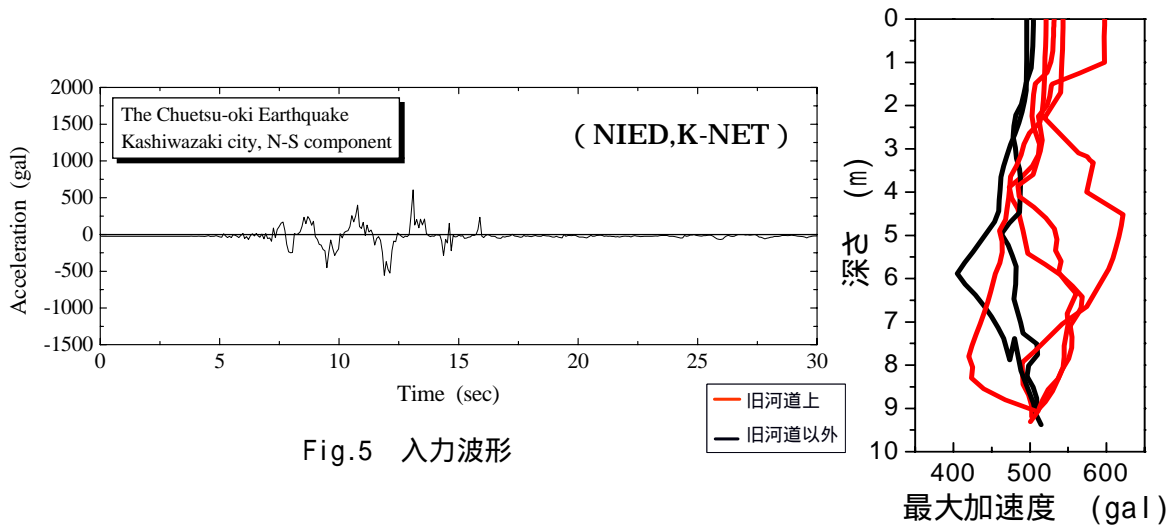
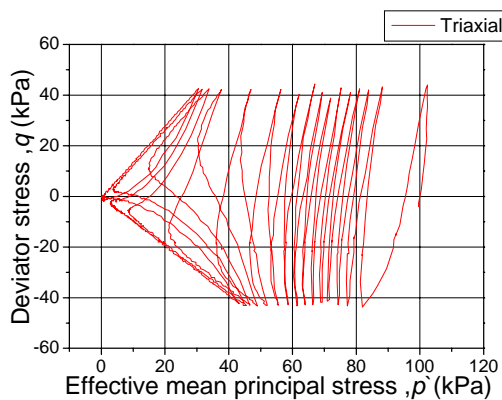


Fig. 5 入力波形

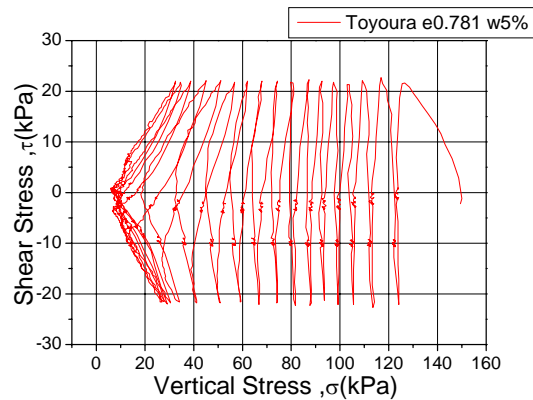
Fig. 6 一次元応答解析

Fig.3 に SWS 試験の結果より求めた柱状図を旧河道とそれ以外のものとで示した。両者ともに地下水位が高く、砂層を多く含むなど液状化に起因する性質が見られた。また旧河道では硬い層が2m 付近にあり、それ以外の地区では、概ね 5~6m 付近に N 値が高くなる層が見られた。液状化判定について Fig.4 に示す。液状化判定断面は Fig.1 の緑の線上の SWS 試験の測定点を利用した。橋場地区では勾配がほぼなかったため道路からの高低差のみを考慮した。道路橋示方書による液状化安全率 FL は 1.0 未満で液状化の発生を示唆するものである。橋場町の判定結果では液状化判定の際、表層の下に砂層があるため非液状化層

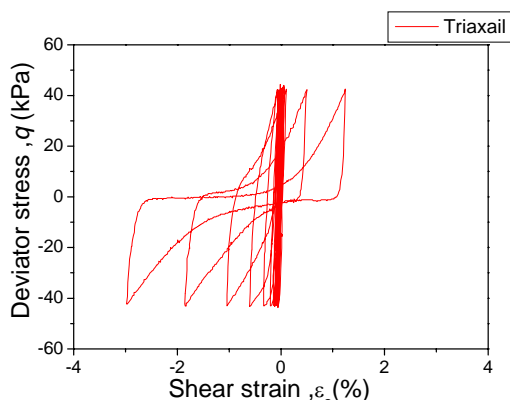
が地下水位で決定されおり、地下水位以下はほぼ液状化するという判定を得た。また被害が顕著であった旧河道上の D 点では、非液状化層が薄く、液状化層が他と比べて厚いため、地震の影響が表面に伝わりやすかったと予想される。そのため、橋場地区の震動特性を把握する目的で一次元震動応答解析を行った。入力地震動は柏崎市で得られた Fig.5 のデータを用いた。これは長周期で軟弱な地盤特性を示している。一次元震動応答解析による検討を Fig.6 に示す。旧河道とそれ以外の地区について比較したものであり、地表面で旧河道のほうが加速度が大きくなる傾向が見られ、旧河道上は地震波を増幅しやすい地盤であった。



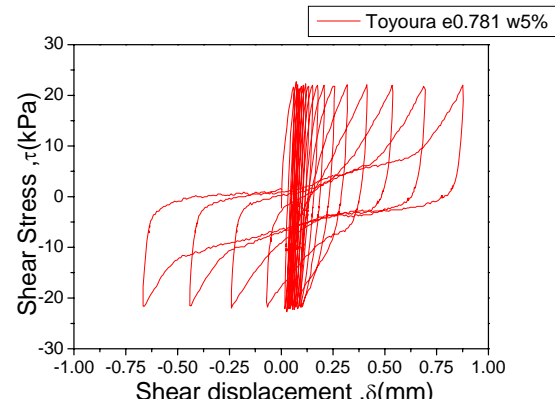
(a) 応力経路



(a) 応力経路



(b) せん断応力-せん断ひずみ関係



(b) せん断応力-せん断変位関係

Fig.7 繰返し非排水三軸試験での試験結果

Fig.8 繰返し一面せん断試験での試験結果

4. 斜面での液状化

刈羽稲葉地区では荒浜砂丘の末端部で砂丘の斜面崩壊に伴う流動による被害が顕著であった。そこで地震時の砂丘斜面を想定し、平地と斜面についての液状化抵抗性を検討した。まず、検討内容として今回、一次元圧密・平面ひずみ条件下で繰返し載荷ができ、実地盤との適合性が高いことから繰返し一面せん断試験を行うこととしたため、液状化試験として一般的な繰返し非排水三軸試験との比較を行った。試験条件として飽和させた豊浦砂を用いた。Fig.7に繰返し非排水三軸試験の試験結果、Fig.8に繰返し一面せん断試験での試験結果を示す。Fig.7とFig.8を比較すると、Fig.7(a)において、繰返し非排水三軸試験では供

試体に圧縮側と引張側が存在するため、破壊線が圧縮側と引張側で異なっていることがわかる。一方Fig.8(a)では、水平方向に繰返しせん断応力を与えているため、プラス側とマイナス側でほぼ一致している。また、繰返しが進むと応力経路の向きが反転し、応力回復がおこるサイクリックモビリティを繰返し一面せん断試験でも確認することが出来た。両者を比較すると形状に多少の差異が見られるがサイクリックモビリティに達するまでの繰返し振幅がほぼ一致した。Fig.7(b)では引張方向にひずみが卓越しているのに対し、Fig.8(b)では両方向に変位が増加しているため、実地盤との適合性が高いといえる。

Table.2 物理特性(刈羽)

	豊浦砂	刈羽
土粒子密度 ρ_s	2.650	2.720
最大間隙比 e_{max}	0.990	1.001
最小間隙比 e_{min}	0.597	0.610
均等係数 U_c	1.55	2.14
曲率係数 U'_c	1.050	0.856
細粒分含有率 F_c	0.0	3.4

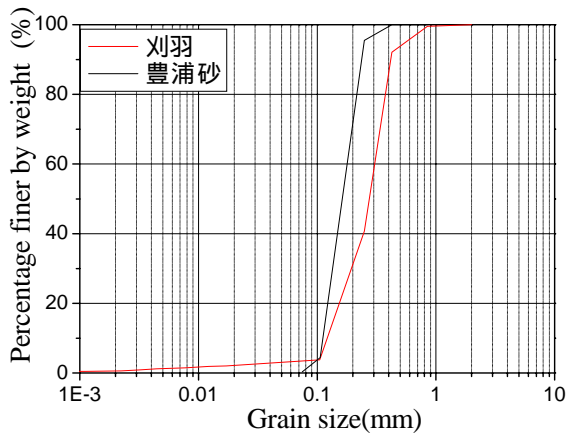
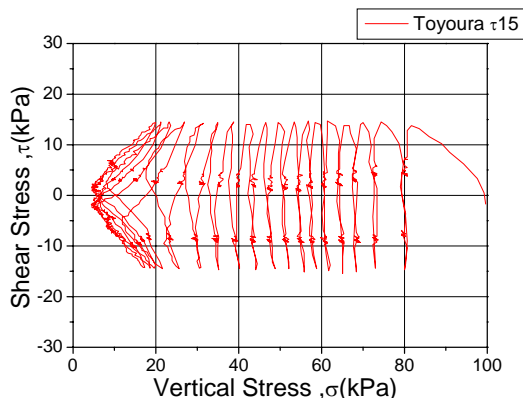
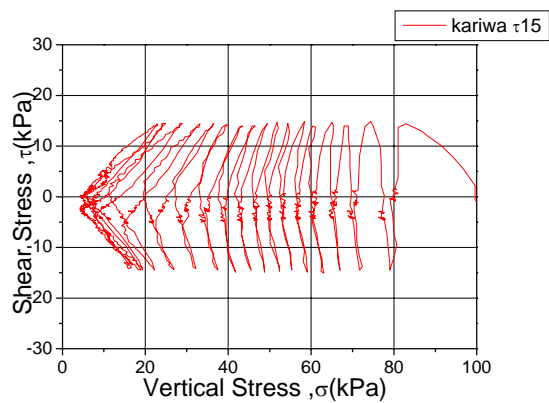


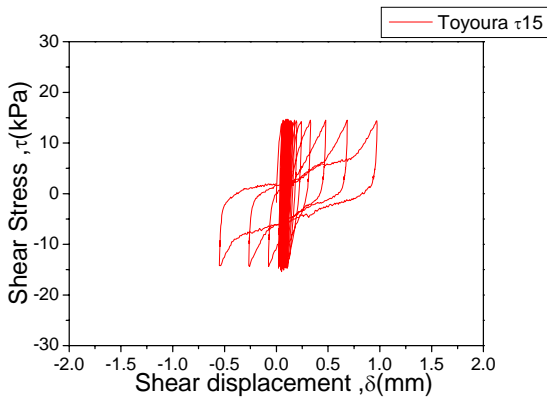
Fig.9 粒径加積曲線(刈羽)



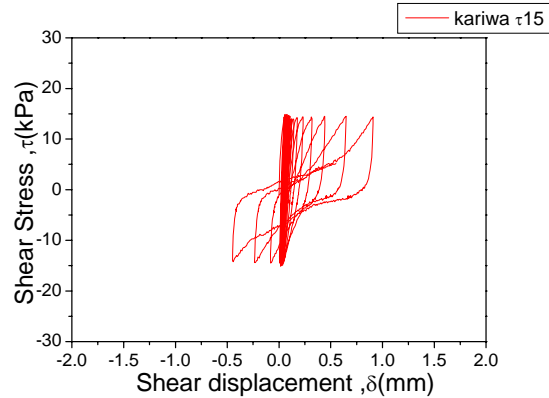
(a) 応力経路



(c) 応力経路



(b) せん断応力-せん断変位関係

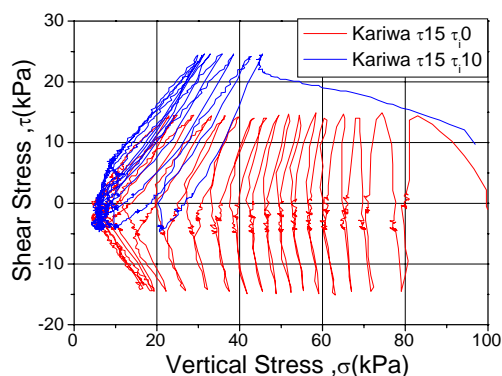


(d) せん断応力-せん断変位関係

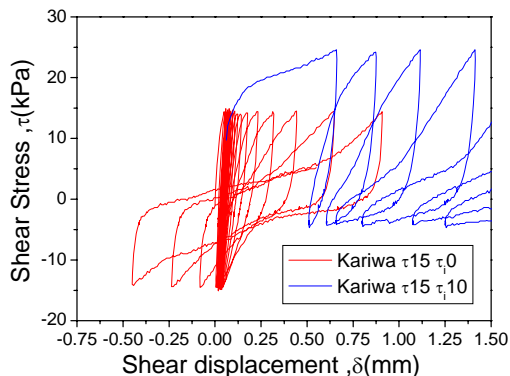
Fig.10 刈羽試料と豊浦砂の結果の比較

Fig.9 に刈羽サンプリング試料と豊浦砂の粒径加積曲線を、Table.2 に物理特性を示す。刈羽試料は、細粒分を 3.4%含むものの、ほぼ中砂と細砂から構成されている。物理特性を見ても、最大間隙比、最小間隙比など豊浦砂に似た物理特性を有している。

Fig.10 に豊浦砂の試験結果と比較したものを示した。サイクリックモビリティに達する繰返し回数がほぼ一致し、変位の増加傾向も豊浦砂に似ていることがわかる。豊浦砂は液状化しやすい砂に分類されるため、同様に刈羽サンプリング試料も液状化しやすい砂である。



(a) 応力経路



(b) せん断応力-せん断変位関係

Fig.11 初期せん断の有無による比較

平地と斜面の液状化抵抗性の評価として、初期せん断を与えたものと初期せん断を与えないものについて比較した(Fig.11)。刈羽サンプリング試料を現地での間隙比($e=0.83$)を用いて比較したものであり、初期せん断を与えないものでは両側にひずみが増加しているのに対し、初期せん断を与えると初期の振幅で変位が大きく増加し、その後初期せん断方向のみに卓越しているのがうかがえる。したがって変位 1mm に達した時を液状化強度曲線の繰返し回数とした。Fig.12 に液状化強度曲線を示す。繰返し応力振幅が大きいと斜面のほうが危険である。一方で繰返し応力振幅が小さくなると平地と斜面で安全性が反転する点があり、繰返し応力振幅が小さい場合では平地の方が危険である。

5. おわりに

以下に本研究により得られた知見をまとめる。

- ・ 旧河道に限らず液状化による地盤変状は発生していた。
- ・ 地下水位が高く、地下水位以下はほぼ液状化するといった判定である。
- ・ 旧河道で 2m より浅い位置で N 値が 10 を超えるのに対し、他の地点では 5~6m 付近に硬い層が見られた
- ・ 旧河道上では、その他の場所に比べ加速度が大きくなる傾向がある。

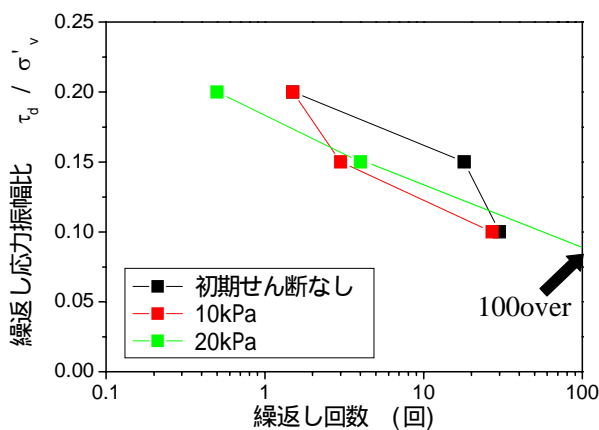


Fig.11 液状化強度曲線

- ・ 刈羽で採取した試料は物理特性・液状化強度ともに豊浦砂に似ており、液状化しやすい地盤といえる。
- ・ 繰返し応力振幅が大きいと斜面のほうが液状化の危険性が高くなる。
- ・ 繰返し応力振幅が小さいと平地の方が液状化の危険性が高くなる。

中越沖地震被害から得られた知見として

- ・ 旧河道上は地震波が増幅されやすい地盤であった
- ・ 地震波が大きいときには斜面のほうが危険であり、これは今回の地震被害とも一致する。