

# 中越・中越沖地震における宅地地盤の繰り返し液状化に関する現地調査

長岡技術科学大学 教授 大塚 悟

## 1. はじめに

新潟県中越地域では 2004 年の新潟県中越地震と 2007 年の中越沖地震により甚大な被害を生じた。短期間に同一地域でマグニチュード 6.8 もの地震を 2 回も経験する事例は過去にもあまり例がない。震源断層は異なるものの、2 つの地震で繰り返し被害を受けた地域が存在する。新潟県柏崎市及び刈羽村は海岸沿いに砂丘が広範囲に分布する特徴があり、地下水位の高い個所で繰り返し液状化被害を受けた。同地域は中越地震の震源からは比較的距離があるものの、液状化が発生して宅地地盤の支持力の喪失や不同沈下を引き起こして建物に大きな被害を及ぼした。この経験は液状化の素因を有する地域では震源からの距離があっても被害を受けやすい構造的特徴があることを示し、液状化ポテンシャルの高い地域に対する防災対策の必要性を示唆している。砂質地盤の液状化現象は地震により地盤が体積圧縮を起こす際に地盤中の水圧が上昇して発生する現象であり、液状化の発生後は地盤の圧縮により地盤の液状化耐力が上昇することが期待される。しかし、中越地震の液状化を経験後も中越沖地震で再び液状化が発生したことから、地震による砂質地盤の液状化耐力の変化に対する調査の必要性が生じた。本研究では中越地震後の地盤調査結果を利用して、今回新たに中越沖地震後の地盤調査を実施することにより地震前後の地盤の状況変化に関する検討を実施した。また、現地より地盤を乱さずに採取する不かく乱試料をサンプリングして室内試験を実施した。同一試料を用いた不かく乱試料との力学特性の比較を通して現在の地盤の液状化耐力について考察する。

## 2. 刈羽村稲場地区の現地地盤調査

刈羽村稲場地区では中越地震で液状化による被害を経験し、中越沖地震では中越地震後に改築や再築した多数の住宅が再び地盤の液状化や砂丘の斜面崩壊によって甚大な被害を受けた。稲場地区は荒浜砂丘のふもとに位置し、砂丘から砂丘間低地に変化する地形を構成している。地質は砂丘堆積物であり、比較的堅固に締まった古砂丘の上に、厚さ数 m にわたり新砂丘が堆積している。また、砂丘間低地では厚い粘性土地盤が体積する。この地区は (1) ゆるく堆積した新砂丘上に家屋のあること、(2) 砂丘を構成する砂質土は液状化を起こしやすい粒径範囲にあること、(3) 地下水位が地表面 -40~70 cm の比較的高い位置にあること、から潜在的に液状化被害を受けやすい地域であった。

中越地震で液状化による被害を受けた家屋の多くは液状化対策を実施した上で、新築あるいは改築が行われた。主な対策工法は、鋼管杭基礎の打設、暗渠による地下水位低下、アンダーピニング工法、柱状改良工法であった。中越沖地震後に測量した家屋の不同沈下量（不同沈下量と傾斜角）を表-1 に示している。同地区では中越地震によって被災した建物が再建後も繰り返し被害を受けたことが分かる。不同沈下による傾斜角は 6/1000 が居住性に関する閾値であり、様々なレベルの液状化対策が行われたが、対策にも関わらず、多くの家屋が被害を受けていることが分かる。

本研究では砂質地盤の繰り返し液状化による地盤構造の変化をとらえるために、中越地震後に地盤調査が実施された地点で現地調査を実施し、中越沖地震により発生した液状化の影響を調査した。現地調査では、標準貫入試験、3 成分コーン貫入試験、孔内水平載荷試験を実施した。図-1 に中越地震後に実施した表面波探査試験の結果を示す。地表面から 4m 付近までは S 波速度が  $160\text{m/s}^2$  以下あり、砂質土であれば N 値が約 15 以下の軟弱地盤が広がることを示す。地下 4m より深い場所では S 波速度が  $220\text{m/s}^2$

表-1 中越沖地震による建物の不同沈下および傾斜角

|   | 不同沈下量(mm) | 傾斜角      | 中越地震 | 中越沖地震 | 中越地震後の対策工    |
|---|-----------|----------|------|-------|--------------|
| A | 1133      | 161/1000 | 全壊   | 全壊    | 新築(在来工法)     |
| B | 278       | 30/1000  | 全壊   | 全壊    | -            |
| C | 263       | 18/1000  | 全壊   | 全壊    | 新築(柱状工法)     |
| D | -         | -        | 全壊   | 全壊    | 改築(在来工法)     |
| E | 62        | 5/1000   | 全壊   | 全壊    | 新築(在来工法)     |
| F | 88        | 6/1000   | 半壊   | 半壊    | 改築(アンダーピニング) |
| G | 251       | 12/1000  | -    | -     | 無対策          |
| H | -         | -        | 全壊   | 全壊    | 新築(鋼管杭)      |
| I | 175       | 18/1000  | 全壊   | 全壊    | 改築(アンダーピニング) |
| J | 72        | 6/1000   | -    | -     | 無対策          |
| K | 129       | 7/1000   | 全壊   | 調査済   | 新築(鋼管杭+暗渠)   |
| L | -         | -        | 全壊   | 要注意   | -            |
| M | 187       | 10/1000  | 要注意  | 調査済   | 無対策          |
| N | -         | -        | 要注意  | 要注意   | -            |

程度と大きくなっており、4m 前後を境に新砂丘から古砂丘に変化することが分かる。図-2 に中越沖地震前後の標準貫入試験の結果を示す。また、図-3 にコーン貫入試験による換算 N 値の結果を示した。図-2 では中越沖地震で激しい液状化が発生したにもかかわらず、液状化の発生した深度の浅い部分での N 値は中越沖地震の前後でほとんど変化が見られない。表層に N 値で 10 前後の地盤が分布し、4m 以深にて次第に N 値が増加する傾向を示しており、図-1 の表面波探査試験と同様の結果を示している。この傾向は併せて実施した 3 成分コーン貫入試験による換算 N 値の分布でも同様である。地盤の液状化は砂質地盤の圧縮挙動に伴って発生することから、液状化の発生と収束により、砂質地盤の高密度化による地盤強度の増加、言い換えると N 値の上昇が期待されたが、現地調査の結果では液状化の発生による N 値の変化が見られないことが分かった。この事実は同地点では将来にも地震による液状化の可能性を有することを示しており、中越、中越沖地震と同様の地震動が生じた際には同様の被害が予測される。しかし、地下水位は中越地震後に地表面から-0.4m と比較的高い位置にあるが、中越沖地震後は地表面から-1.3m と地下水位の低下がみられる。この地下水位の低下は中越沖地震後に行われた対策工事により、被災地域一帯に暗渠が設置された効果による。したがって、地下水位の低下により地表面付近の液状化は抑制

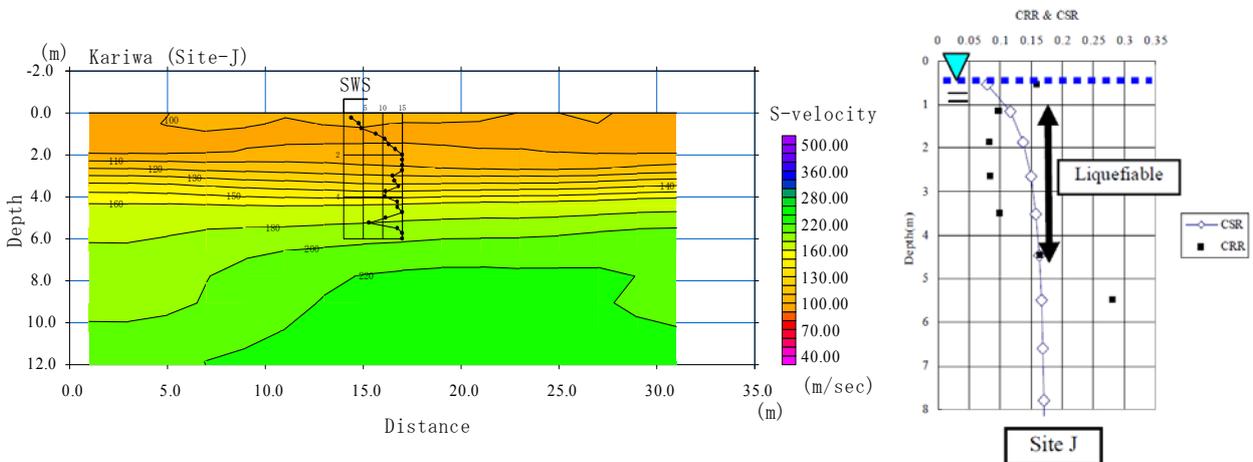


図-1 中越地震後に実施した表面波探査試験

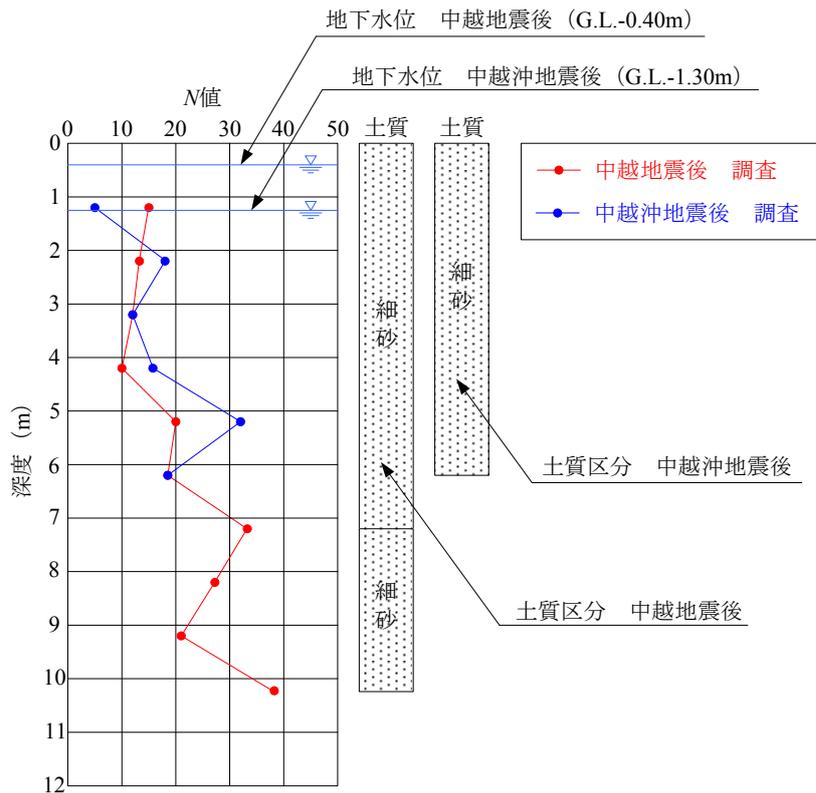


図-2 標準貫入試験結果

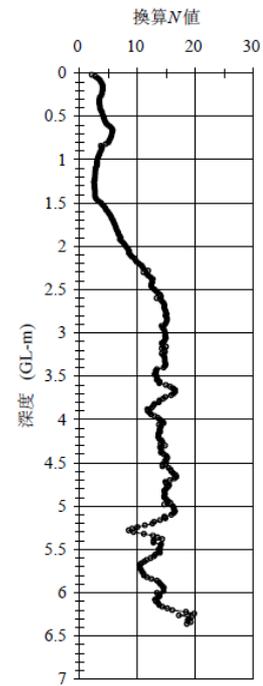


図-3 コーン貫入試験結果

されることから、被害の軽減が期待される。しかし、深度 1.3~4m までの新砂丘の液状化が予測されることから注意が必要である。

### 3. 現地採取土の繰返しせん断試験

羽村稲場地区で実施したボーリングにより、不かく乱試料を採取した。不かく乱試料は試料採取後直ぐに凍結して現地の状況を保存して実験を実施した。表-2 に試料の物理的性質を示す。サンプリング深度付近の砂質土の静止土圧や変形特性を把握するために、深度 3.5m にて孔内水平載荷試験を実施した。その結果、静止土圧は 39.6kPa、降伏応力 211kPa、変形係数 4.08Mpa が得られた。砂質土の湿潤密度を 18kN/m<sup>3</sup> とすると、静止土圧は有効土被り圧とほぼ等しい結果となった。したがって、試験では 50kPa の等方応力状態を中心に実験を実施した。砂質土のせん断抵抗角は 35.9° が得られた。現地より採取した不攪乱試料のほかに、同一の試料を用いた再構成試料（乾燥堆積法を用いて相対密度  $D_r=40\%$  で作製）の試験を実施したが、34.6° とほぼ同様のせん断抵抗角が得られ、現地地盤の特異な強度定数は得られな

表-2 稲場地区の砂質地盤の物理的性質

|                      |                         |            |         |
|----------------------|-------------------------|------------|---------|
| 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ | 1.688 g/cm <sup>3</sup> | 最大粒径       | 2.00 mm |
| 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$ | 1.373 g/cm <sup>3</sup> | 60% 粒径 D60 | 0.45 mm |
| 土粒子密度 $\rho_s$       | 2.770 g/cm <sup>3</sup> | 50% 粒径 D50 | 0.40 mm |
| 最大間隙比 $e_{max}$      | 1.018                   | 30% 粒径 D30 | 0.30 mm |
| 最小間隙比 $e_{min}$      | 0.641                   | 10% 粒径 D10 | 0.25 mm |
|                      |                         | 均等係数 $U_c$ | 1.80    |
|                      |                         | 曲率係数 $U'c$ | 0.80    |

った。

刈羽村稲場地区の現地採取試料を用いて、有効拘束圧 100kPa、周波数 0.1Hz のもとで繰返し非排水三軸圧縮試験を行った。繰返し応力振幅比  $\sigma_d/2\sigma'_0$  を変化させた際の軸ひずみ 5% に達する繰返し回数との関係（液状化強度曲線）を図-4 に示す。図には軸ひずみ 1%, 2%, 5% の関係及び、過剰間隙水圧比の関係についても示した。図より液状化強度は  $\sigma_d/2\sigma'_0=0.191$  が得られたが、ほぼ完全液状化に達している。同様に、同一試料を用いた再構成試料についても繰返し非排水三軸圧縮試験を行った。試料は乾燥堆積法を用いて相対密度  $Dr=40\%$  に作製した。試験結果を図-5 に示すが、液状化強度は  $\sigma_d/2\sigma'_0=0.166$  と現地採取土よりも小さくなった。過剰間隙水圧比から判断すると、5% ひずみに到達する時点での過剰間隙水圧はやや小さい結果となった。両試験より得られた液状化強度を図-6 に示す。図では相対密度と液状

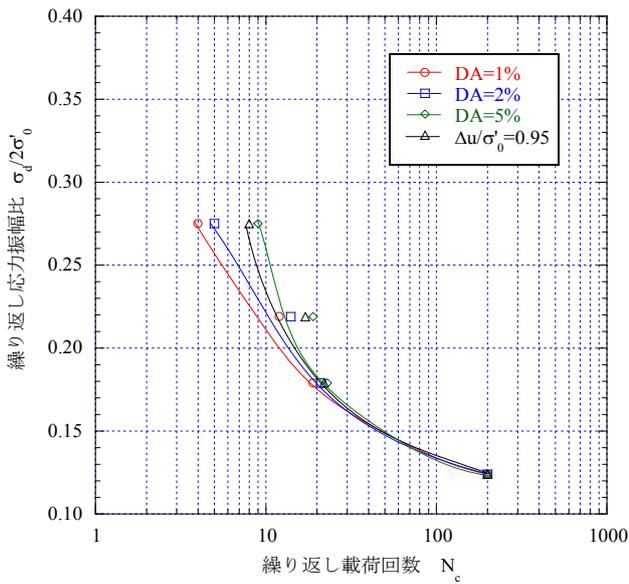


図-4 不攪乱試料の液状化強度曲線 ( $\sigma_d/2\sigma'_0=0.191$ )

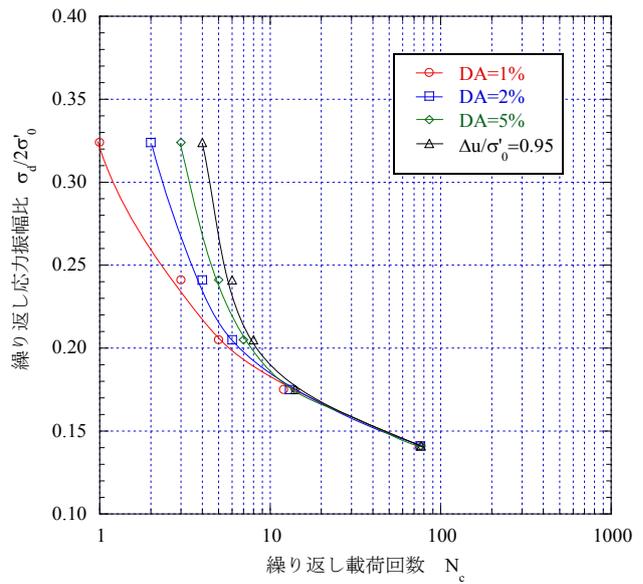


図-5 攪乱試料の液状化強度曲線 ( $\sigma_d/2\sigma'_0=0.166$ )

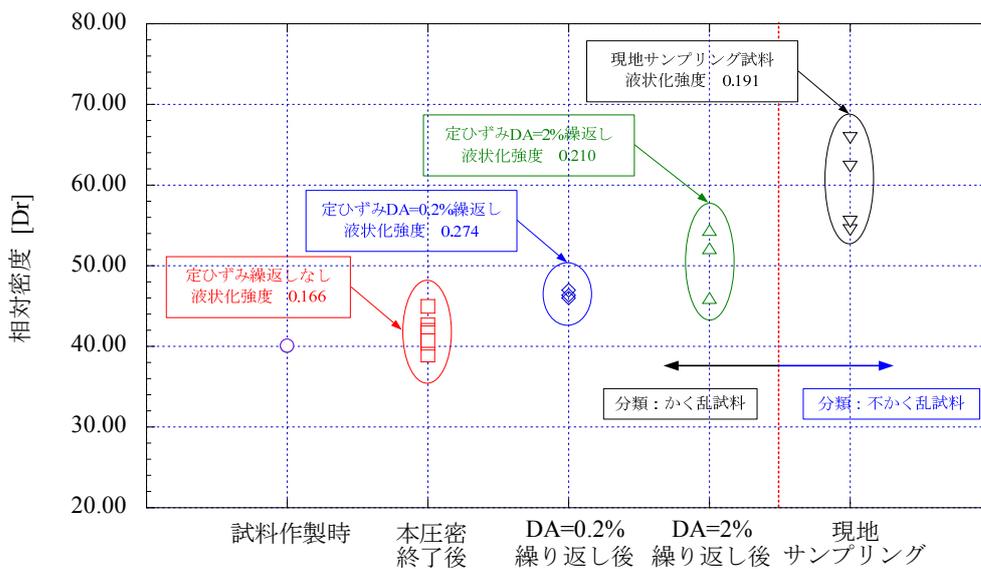


図-6 現地砂質土の相対密度と液状化強度

化強度との関係を示した。現地採取土の相対密度はサンプリング位置によってばらつきがあるが、60%前後で比較的砂質土は締まった状態にある。一方、再構成試料は相対密度が40%前後で緩い状態である。両者の相対密度を反映して液状化強度は現地採取土の方が大きな結果となったが、その差異はそれほど大きくはない。

同一試料の再構成試料を用いて相対密度と液状化強度の関係について表-3の試行試験を実施した。試料は乾燥堆積法を用いて相対密度  $D_r=40\%$  で作製し、有効拘束圧 100kPa、周波数 0.1Hz のもとで、(1) 軸ひずみ  $DA=0.2\%$  の定ひずみ繰返し非排水試験を 200 回行う試験と、(2)  $DA=2\%$  の定ひずみ繰返し非排水試験を 20 回行う試験、を実施して、過剰間隙水圧を消散した後に繰返しせん断試験を行った。得られた液状化抵抗曲線を図-7 に示す。 $DA=2\%$  の定ひずみ繰返しを与えた場合に液状化強度は  $\sigma_d/2\sigma'_0=0.210$ 、 $DA=0.2\%$  の場合に  $\sigma_d/2\sigma'_0=0.274$  が得られた。両者を比較すると、小さな繰返しひずみ履歴を数多く加えた方が液状化強度は大きい結果となった。得られた液状化強度を検討するために図-6 (前掲) の相対密度と液状化用度の関係図に整理した。試行試験で繰返しひずみ履歴を与えた試料は相対密度が 50%前後であり、現地から採取した不攪乱試料の相対密度 60%前後と比較すると、締め固め度合いはいずれも小

表-3 せん断履歴を与えた砂質土の繰返しせん断試験概要

| 試料名                         | 間隙比 $e$ | 有効拘束圧 $p'$<br>(kPa) | BP (kPa) | 繰返し定ひずみ | 回数  | 周波数<br>(Hz) | 繰返し応力振幅比 |
|-----------------------------|---------|---------------------|----------|---------|-----|-------------|----------|
| 刈羽砂② (かく乱試料)<br>[小ひずみ履歴供試体] | 0.866   | 100                 | 100      | DA=0.2% | 200 | 0.1         | 0.221    |
|                             |         |                     |          |         |     |             | 0.265    |
|                             |         |                     |          |         |     |             | 0.309    |
| 刈羽砂② (かく乱試料)<br>[大ひずみ履歴供試体] | 0.866   | 100                 | 100      | DA=2%   | 20  | 0.1         | 0.121    |
|                             |         |                     |          |         |     |             | 0.172    |
|                             |         |                     |          |         |     |             | 0.235    |
|                             |         |                     |          |         |     |             | 0.277    |

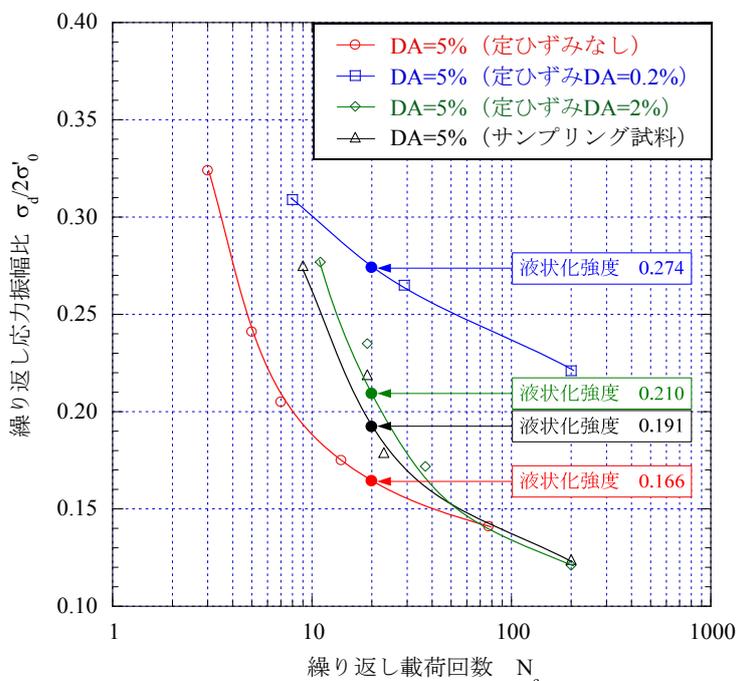


図-7 せん断履歴の異なる砂質土の液状化抵抗曲線

さいが、液状化強度は大きいことが示された。現地の地盤は中越沖地震前後の相対密度の変化が明らか

でないことから、地震による液状化による地盤変化の詳細は不明であるが、試験結果より、現地地盤の相対密度の大きさに対して液状化強度の低いことが指摘される。原位置で実施した標準貫入試験によるN値の地震前後の差異のないことから、刈羽村稲場地区の砂質地盤は地震による液状化を経験したにもかかわらず、地盤の液状化強度に変化は見られず、従前と同様の液状化ポテンシャルを有すると推定される。現地と同じ試料による再構成土では地震による液状化と同様の効果を見込む試験において相対密度の上昇と液状化強度の増加が生じたのに対して、現地の不攪乱試料で同様の効果が確認できない理由は今回の試験では明らかにされなかった。今後の検討課題と言える。

#### 4. おわりに

本研究で得られた知見について箇条書きにする。

- (1) 中越・中越沖地震で繰り返し液状化による被害を受けた、刈羽村稲場地区において地盤の現状に関する現地調査を実施した。標準貫入試験、3成分コーン貫入試験、孔内水平載荷試験を実施した。その結果、中越沖地震前のN値分布との比較から、液状化した新砂丘では地震前後でN値に差異のないことを明らかにした。3成分コーン貫入試験は連続的に地盤の調査を実施できる特徴があるが、ほぼN値と同様の調査結果を示した。これより、当該地区の地盤の液状化ポテンシャルは中越沖地震以前と相違のないことが分かった。しかし、現地は液状化対策で地下水位を下げているため、液状化は生じにくくなっている。孔内水平載荷試験より静止土圧を調査したが、現時点はほぼ等方応力状態であることを示した。
- (2) 現地より不攪乱試料をサンプリングし、静的せん断試験および繰り返しせん断試験を実施し、せん断抵抗角、液状化強度を求めた。同一試料を用いた再構成土の試験より、現地地盤の相対密度が大きい割には液状化強度の小さいことを明らかにした。試験では繰り返しひずみ履歴を与えた試料の液状化強度についても調査した。
- (3) (1)、(2)より現地地盤の液状化ポテンシャルは中越沖地震後も高いことが分かった。地震後の砂質地盤の相対密度は比較的高いが液状化強度が増加しない傾向を明らかにした。液状化終了後に相対密度に対して液状化強度が大きくなる理由は現在不明であるが、過去の文献にも同様の報告があり、メカニズムの解明は今後の課題に残された。

#### 謝辞

本研究の実施に当たり、長岡技術科学大学の磯部公一助教、同大学院の布川博一氏に多大なるご協力を頂きました。特に、布川氏は精力的に実験に取り組み、多くの貴重な成果を得ることができました。現地調査では(株)興和の中野義仁氏にご協力を頂きました。心からの謝意を表します。最後に、研究助成を頂きました、「北陸地域の活性化に関する研究助成事業」に感謝申し上げます。