東日本大震災の液状化被害に見る液状化研究の課題

風間基樹¹⁾、河井 正²⁾、森 友宏³⁾、金 鍾官⁴⁾、山崎智哉⁵⁾

- 1) 正会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻、教授 博士（工学）
e-mail: motoki.kazama.b2@tohoku.ac.jp
- 2) 正会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻、准教授 博士（工学）
e-mail: tadashi.kawai.b2@tohoku.ac.jp
- 3) 正会員 前橋工科大学 社会環境工学科、准教授 博士（工学）
e-mail: mori@maebashi-it.ac.jp
- 4) 正会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻、助教 博士（工学）
e-mail: jong.kwan.kim.c2@tohoku.ac.jp
- 5) 前 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻、博士課程前期学生
e-mail: yamazaki@soil1.civil.tohoku.ac.jp

要 約

本論文では、東日本大震災で発生した液状化被害から、あるいはその解釈から、読み取れる現状の液状化研究の課題のいくつかを取り上げ、著者らの考えを述べている。具体的には、地盤の液状化予測判定法に関する課題、液状化による地盤の沈下量評価に関する課題、河川堤防の液状化被害に見る課題等を、被害事例や実験結果に基づいて論じている。今次の被害を現状の技術の延長線上でとらえることに限界があることを示し、新たな概念に基づく液状化被害の予測対策技術の開発が必要であることを述べている。

キーワード： 液状化被害、地盤沈下、液状化判定、細粒分含有率、地震動の継続時間、河川堤防

1. はじめに

東日本大震災における地震被害を省みるに、高架橋の柱に代表されるように鉄筋コンクリート系の構造物被害がそれほど大きくなかったのに対し、東京湾岸域の液状化の広域被害は震動の大きさの割に非常に大きかったという印象がある。RC構造物の被害が少なかった原因は、地震動が1995年兵庫県南部地震ほど大きくなかったこともその一つであろうが、阪神・淡路大震災の被害を真摯に受け止め、地道に耐震化を進めてきたことの成果であると評価してもよいと思われる。一方、地震動の強さがそれほどでなかったにも係わらず、液状化の被害が大きかった原因を、巨大地震による長い継続時間の影響として外力だけに帰着させるには無理がある。実際、2011年2月に発生したニュージーランドのカンタベリー地震では、マグニチュードが小さく、短い継続時間の地震動であったが、東日本大震災の東京湾岸と同程度に広域な液状化被害を発生させている。阪神・淡路大震災以降に行われた液状化に関する技術革新が目に見えて被害低減につながらなかったと言えるのではないだろうか。実際、第一著者は、1995年阪神・淡路大震災の直後にも、海洋性のマグニチュードの大きい地震による継続時間の長い揺れが、液状化によるさらに大きな被害をもたらすであろうことが話題に上がっていたことを覚えている。

現在では、建設業やとりわけ地盤工学にかかわる技術者・研究者で液状化現象を知らない人はいない。1964年アラスカ地震・新潟地震を契機に日米の研究者が精力的に研究し、1995年阪神・淡路大震災の頃までには、液状化のメカニズムの理解や予測・対策技術がある程度実務に一通り定着した感がある。しかし、黎明期から何とか実務に対応できるようになったものの、液状化に関してわからないこと

や実務的にも改善すべき点はまだ多く残されている。第一著者は、今次の震災以前に、阪神・淡路大震災以降の液状化研究の展開について述べた¹⁾²⁾。今次の液状化被害に関しても、さらなる技術開発の必要性がある^{3,4)}と思っているが、現状は従来技術の枠組みから抜け出して根本的にやり直そうとする動きが見えない。ここでは、液状化被害の予測や低減技術の展開を図る上で、今次の液状化被害例を示しながら、現状の技術の延長線上では対応できない課題のいくつかを指摘したい。

2. 地盤の液状化判定や残留変形評価についての課題—安全率から抜け出せない液状化判定—

2.1 材料のねばりの評価の必要性

東日本大震災での最大の教訓は、絶対安全なものなどないということである。巨大津波にしても、原子力の安全の問題にしても、絶対安全を求めて構造物を作れない。設計で考慮した外力以上の外力を被る事態がありえることを前提に耐震設計・耐津波設計の枠組みを構築する必要があるということは技術者、研究者の共通認識である。翻って、現状の液状化の予測判定を見てみると、液状化安全率 F_L が1を切るか切らないかで、液状化の発生の有無を判定することに軸足を置いたままである。この方式は、液状化しないものを除く簡易一次スクリーニング以上の意味はなく、時代はその先を求めている。

この認識については、阪神・淡路大震災後にも指摘されており、性能設計という枠組みで対応しているように見える。数値計算等で被害変形量予測を行って、安全性の判断を行っている。この数値計算の精度は、地盤材料のモデル化に大きく依存し、被害変形量は繰返し荷重を受けた土材料の変形特性の設定に依存する。このとき、 N 値や液状化強度 R だけの情報から、初期液状化に至るまで及びその後の土の変形特性を反映した評価ができるだろうか。高度な解析の精度を上げるには、それに見合った材料変形特性の評価が欠かせない。残念ながら、現状の非排水液状化強度は、土材料の液状化に至る過程、その後の変形特性、ねばりをうまく評価できていないので、性能設計は実効的になっていないと言うのが第一の指摘である。

阪神・淡路大震災以降、RC柱の耐震性能の評価では、弾性範囲を大きく越える変形量の繰返し載荷試験によってその構造部材の終局荷重や靱性が評価され、ねばりを付与するための補強方法がいくつも実用化され適用された。しかし、土の液状化抵抗の評価法については、液状化に対するねばりを積極的に評価しようとする改良は、ほとんど実務に反映されなかった。

阪神・淡路大震災後は、強大な地震動によって大きなせん断応力比が作用することを前提に考えれば、土は容易にせん断破壊し、たとえ N 値30の地盤でも液状化してしまう結果になり、地震力が大きくなりすぎて設計できないという事態に陥った。 N 値30などという地盤は、砂質土の締め固めによって実現できる値のほぼ上限である。土のねばりを評価しない限り、地盤はレベル2の地震動の外力に対抗できないことは明らかである。液状化するかしないかではなく、液状化に至っても限定的な変形でとどまるのか、どのくらいねばってくれるのが問題である。このような現状を打破するためには、まず、要素レベルでの液状化の定義として、過剰間隙水圧の上昇ややせん断ひずみ振幅5%程度を破壊の定義とすることから、見直さなければならない。過剰間隙水圧比が100%になったら、すべての土が液状化して一気に破壊に至るわけではなく、密な砂ほど、ねばりのある土ほど少しの変形で有効応力が回復し、剛性を取り戻すからである。数値計算で要素レベルのひずみが数10%~100%を越えるような計算結果が平気で示されているが、その計算結果に妥当性があると主張するなら、材料物性の評価がそのひずみレベルまで担保されているべきであることは、しばしば指摘されていることである⁵⁾。

再びRC柱の耐震性の評価の例で恐縮だが、ねばり（靱性）の評価は、変位制御試験で降伏荷重を発揮するひずみの10倍程度までの繰返し変形を与えたときの耐荷重の包絡線や荷重—変位関係から得られるエネルギー吸収性能で評価している。地盤動力学分野でも、この種のねばりの評価は以前から行われており⁶⁾、土材料の液状化に対するねばりを評価はしようとすれば、できる状況にある^{文献7,8)}など。

2.2 液状化被害予測の目的に合わせて液状化予測判定方法は使い分けが必要

レベル2地震動に対する耐震性能を照査する上で、土の液状化被害に関する評価の中でねばりをどのように考慮するかが重要であることに関連して、今後の検討を要する課題についても言及しておきたい。まずは、図1の原位置試料に関する N_1 値と繰返し三軸強度比の関係についてである。これに関しては次に挙げる2つの大きな課題が潜んでいる。この図中に示された曲線は、道路橋示方書などのように、その目的が、多数の構造物の設計の指針として使用されることを想定し、政策として被害率を低減して国家の財産を保全することにある場合、大変有用である。その背景には、イメージとして図中に“被

害率の評価”として示した矢印の方向でデータを眺めていることが想定され、多種多様な地盤について、被害が生じる・生じないエリアを一定のデータ数の比率で線引きすることが目的となる。すなわち、個別地点の予測可否ではなく、総数として予測が外れる地点数が少なければ良い。この曲線のような評価関数は、被害想定マップやFL法などのように、簡易に広域なエリアの評価する際、または多数のそれほど重要ではない構造物を評価する方法と組み合わせて使用することで効果を発揮する。

しかし、個別の重要な構造物を設計する場合、地盤調査の結果に基づく液状化強度の評価は、図中に“個別評価”と記した方向にデータを見るべきである。そうした場合、より大きな地震に対して詳細な評価が必要となる N_1 値30付近の液状化強度は（ N_1 値が小さい場合は非常に大きな地震に対しては当然被害が出るので詳細な評価よりも対策が必要）、非常に大きくばらついていることが無視できない。そこで問題となるのは、この図は種々の土のデータが混在していることであり、図中の○で囲ったデータは、同じ沖積土の区分であっても、全く性質の異なる土である可能性が高い。すなわち、個別評価においては本来同列に比較すべきデータではない。しかし、重要な構造物の設計においても、コストダウンとして標準貫入試験のみを実施して、室内試験を実施することなしに液状化強度を得る、さらにはその液状化強度を高度な数値解析のパラメータ設定に用いる場合が多いのではないだろうか。したがって、①被害率を低減するために使用するデータと個別構造物の設計に用いるデータは明確に区別して扱う必要がある、② N 値の大きな土に対しては、液状化強度の非常に大きなばらつきが認められるため、砂の種類や状態と液状化強度の関係について、個別にもっと検討すべきことが指摘できる。

図1 換算N値と繰返し三軸強度比の関係（松尾⁹⁾に加筆）

2.3 材料の非排水繰返しせん断特性で説明できない長い継続時間の地震動や余震の影響

今次の地震による首都圏湾岸地域の埋立地の液状化被害では、長い継続時間の地震動や余震の影響が話題となった^{10,11)}。特に、浦安では地震動がそれほど大きくないのに、液状化の被害は甚大であった。

この継続時間の影響や余震の影響を、土の材料特性の面からだけで理解するのは片手落ちである。単純に言えば、長い継続時間の地震動や余震の影響は、繰返しの回数が増えただけの事である。具体的に例示すれば、非排水繰返し強度が R_{L100} （繰返し回数100回を与えた時、破壊に至るせん断応力比）が0.2の土は、0.2以下のせん断応力比が繰返し回数100以下作用した場合には液状化による破壊には至らない。しかし、繰返しせん断中に間隙水が流入し、間隙体積が膨張することを考えれば、非排水繰返し強度が0.2の土でも、せん断応力比0.1で20回の繰返しでも液状化による破壊に至ることがありうる²⁾。長い継続時間の地震動の後半部分や30分たってからの余震の影響が大きくなる事態は、間隙水の流入流出による間隙の再配分が生じることによって説明が可能である。間隙水の再配分の問題は、地盤

構成や液状化時の排水性、液状化時の体積圧縮性などによって決まるから、材料特性に加えて境界値問題として扱わなければならない。材料の非排水繰返しせん断特性だけ考えていたのでは、その影響が正しく理解されないであろう。

3. 液状化による地盤沈下量の評価の課題

3.1 非排水繰返しせん断後の体積収縮は何で決まるか

一旦過剰間隙水圧が上昇した土の液状化の程度は、残留せん断ひずみを生じさせない状態からの排水量（最大体積収縮量）で定量化できる。この量は、土の密度といった材料特性に加えて、変形ひずみ履歴に依存することがわかっている。従前は、応力制御の非排水繰返しせん断試験中に発生した最大せん断ひずみ量に依存すると整理されていた^{12), 13)}が、筆者らの研究では、液状化の程度を変える履歴指標としては累積ひずみ量が最も有力であることがわかっている¹⁴⁾。端的な例が、同じひずみ振幅で数回繰返し変形を与えた場合と数十回与えた場合の排水量の差を最大せん断ひずみでは説明できないからである。重要なことは、土のせん断に伴う体積変化を調べる場合に、荷重を与えて変形を調べる試験（応力制御試験）では、試験条件を一定にしたことにならない点である。土が繰返しせん断を受けて体積変化する材料特性は、同じ変形を与えて初めて比較できる。具体的には、せん断ひずみ履歴が同じなら、乾燥状態の繰返しせん断による体積変化量と飽和状態で非排水繰返しせん断後の排水時の体積変化がほぼ同じになることが実験的に確かめられている¹⁵⁾。このことは、粒状体のダイレイタンスが粒子相互の移動によって生じていることを考えれば理解できる。純粋に材料試験を行なう場合に、ひずみ制御試験が優れている理由でもある。

3.2 シルト分（細粒分）を多く含む砂地盤の沈下予測の課題

(1) 模型実験¹⁶⁾

顕著な液状化被害が観察された浦安市の地盤は、細粒分を50%程度も含んでいた。現在、実務的に使われている液状化時の沈下量予測手法は相対密度から推定するようになっている。しかし、FC>5%の砂はそもそも地盤工学会基準の最大最小間隙比試験法の適用対象外である。このような背景から、細粒分を多く含む砂地盤の液状化時の沈下量について、遠心30G場での振動実験により検討してみた。

図2に模型断面とセンサー配置を示す。実験に用いた試料は、浦安で液状化した砂（浦安砂、FC約50%）、珪砂（珪砂7号、FC=0%）、浦安砂の粒度分布に似せた細粒分混合珪砂（珪砂5,6,7号を各13%、石英粉61%、FC約60%）の3種類である。また、加振は実物換算で200Gal, 2Hzの正弦波を浦安砂の地盤では300秒間、細粒分混合珪砂及び珪砂の地盤では50秒間入力している。

図3に遠心振動実験の沈下量、最小最大間隙比の範囲（※本来FC>5%のものに適用外であるJGSの最大最小密度試験を適用して求めたもの）、静的圧密試験の関係の関係を示す。これを見ると、細粒分混合珪砂は、相対密度100%以上から出発しているが、同じ加振条件の珪砂（Dr約50%）より加振時の沈下が大きくなっている。以上により、細粒分を含む砂にJGSの最小密度試験を拡大適用して求めた相対密度から体積ひずみを評価することは困難であると考えられる。

図2 模型断面とセンサー配置¹⁶⁾

図3 遠心振動実験の沈下量、最小最大間隙比、静的圧密試験の関係

(2) シルト分（細粒分）を多く含む砂の圧縮性^{17)・18)}—相対密度はきれいな砂のみに適用できる指標—

粘性・塑性を持つ細粒分が液状化強度を増加させることはよく知られている。しかし、非塑性細粒分が液状化強度と液状化後の被害に及ぼす影響に関しては、現状では定見がないと思われる。この理由は、材料の違いもあるが、研究者ごとに用いている指標や比較方法が異なるのが一番大きい。(1)で示した、遠心実験の結果は、このことを如実に表わしている。

液状化強度・被害を評価する場合、しばしば相対密度が重要な指標として用いられる。相対密度はある状態の土が最大・最小間隙比の間のどこに位置しているかを示す指標である。現状では、相対密度を用いて、A土で得られた知見をB土に適用するということが平気で行われている。相対密度を求めるためには、最大・最小間隙比を求める必要があるが、最小間隙比は地盤工学会から規定されている方法(JGS 1224)で求めた値を使う。しかし、基準にも解説されているようにこの試験法は土の絶対的な最小間隙比を決定する方法ではない。この方法によって求められる最小間隙比は打撃回数、打撃力、拘束圧、含水比などによって変化するからである。細粒分を多く含む土は、FCが大きくなるほど、これらの影響を受けて、密度が大きく変化する。例えば、細粒分を11.6%含む試料の場合、絶乾状態の試料で1回試験を行った後の含水比が2.3%になり、空中落下させなくなり、最大間隙比を求められない状態になるという報告¹⁹⁾や、最小間隙比が大きく評価されるという報告²⁰⁾もある。

このように、土の最小間隙比は乾燥状態と水浸状態の違い、拘束圧の違い、締め固めエネルギーの与え方などで大きく変化する。特に、細粒分を大きく含んだ土は、間隙水の多少やエネルギーの与え方によって大きく影響を受ける。液状化強度・被害を評価するという観点では、繰返しせん断による体積変化が最も地震荷重に対応していると考えられる。土の繰返しせん断時の圧縮性を室内試験から検討した結果を紹介する。

試験はきれいな砂と細粒分を含んだ材料を用いて、絶乾状態と水を加えた水浸状態で打撃することで最小間隙比に及ぼす間隙水の影響を検討した。さらに、中空ねじりせん断試験により繰返しせん断させた場合の最小間隙比と対比させて検討した。実験方法の詳細は、文献18)を参照していただくことにして結果は、図4のようになった。

水浸状態での最小間隙比は拘束圧が無い条件と1kPaの拘束圧を加えた条件で試験を行った。結果を見ると、飯豊珪砂7号100%の場合は乾燥状態の方が水浸状態より最小間隙比が小さいのに対して、それ以外の細粒分を含有した試料の場合はほぼ同じか、あるいは水浸状態で求めた方が小さいことが分かる。これは、乾燥状態より水浸状態でより密になれることを意味し、細粒分を含んだ材料の場合、JGSの方法は最小間隙比を大きめに評価する。水浸状態での拘束圧の影響も同図から確認できる。DLクレー50%の試料以外は拘束圧の影響がほぼないか、あるいは拘束圧が無い場合の方がより密になることがわかる。さらに、非排水繰返しせん断+その後の排水を繰返した繰返し排水のケースが最も小さい密度を与えており、細粒分含有率FCが大きいほどJGSの方法との乖離が大きい。

現状の JGS で規定されている相対密度の試験法が適用できる土は、実用上きれいな砂に限られているのに対して、適用範囲を超えて援用されていることは大きな問題である。なお、著者らと同様、龍岡ら²¹⁾も、盛土の締固めに関連して、FC が増加するほど盛土締固め管理上の現場での最小間隙比と相対密度を求める際の JGS の最小密度試験法との乖離が大きくなることを指摘している。

図4 試料の状態、試験法の違いによる最小間隙比¹⁸⁾：試料名の後ろの％は飯豊珪砂に混ぜた細粒分％を示している。石英粉30％は飯豊珪砂に石英粉が30％入っている試料を示している。各試料のFCは、飯豊珪砂7号がゼロ、石英粉、DLクレーは100％、荒砥沢土93％、浦安砂53.4％である。

翻って、液状化の検討の対象となる土は、きれいな砂に限らないのは自明であり、繰返しせん断を受ける土質は砂質土～中間土～粘性土まで多様である。きれいな砂にしか定義されない相対密度や土質や拘束圧によってその値の持つ意味の異なる N 値を用いた液状化強度指標は万能でなく、限界があることを認識すべきである。ちなみに、N 値と相対密度の関係に関する研究を行った研究者ら^{22), 23)}も、結果がすべての土一般に適用できるとは言っていない。

3.3 液状化後の体積収縮だけで決まらない沈下量²⁴⁾

一般に、液状化による地表面の沈下量と言えば、液状化後に土粒子骨格が収縮し、絞り出される間隙水の量で決まると理解されてきた。これは、3.1で述べたように、主に室内の要素試験で見る砂供試体の非排水繰返しせん断後の排水量と対応する。しかしながら、間隙水だけ絞り出されるような理想的な圧密現象と異なり、土粒子も間隙水と一緒に噴出するのが液状化現象である。図5左のように、浦安市の宅盤や道路舗装面より上に噴出した砂の量は、これまでに無く大量である。これらの砂は撤去されるから、地盤面の沈下は、当然、間隙水のみが排水される場合より実質的に大きくなる(図5右参照)。

図5左 浦安における噴砂の様子：エイト日本技術開発 <http://www.ejec.ej-hds.co.jp/sinsai/> より
右 噴砂・噴水の模式図：沈下量は間隙水のための排水より噴砂を伴う場合の方が大きい

液状化による地盤面の沈下を予測するためには、噴砂がどのくらい出てくるのかも予測する必要がある。これまで噴砂と言えば、単純に地中で液状化が生じた傍証としての意味しかなかったが、新たな問題である。では、このニーズに応じて噴砂量を予測しようと思っても、これがなかなか難しい。噴砂が生じるための材料的要件、境界条件としての要件が現状では不明確である。仮に、図5右のような実験で、きれいな砂を使って再現しようとしてもうまくいかない。間隙水は、土粒子骨格から容易に排水され、流動状態を保てないし、噴出させるためには噴出させるための押出す外力が必要となる。

このことを考慮すれば、発生した過剰間隙水圧が容易に抜けないという意味でも、透水性が悪い細粒分を多く含む土はきれいな砂より、むしろ性質が悪い。FCの量が増えるほど、一般には液状化抵抗が大きいと言えるが、少なくともポンプ浚渫 (Hydraulic fill) によって埋め立てられた地盤に対しては、FCの多少で液状化抵抗を評価すべきではない。

4. 河川堤防の液状化被害に見る課題

4.1 鳴瀬川下中ノ目地区一薄層の液状化層がもたらした河川堤防の液状化被害²⁵⁾

東日本大震災の液状化被害において、東北地方の液状化被害も多数発生している²⁶⁾。その中で河川堤防の液状化被害として、薄層の液状化層がもたらした特徴的な被害事例がある。ここでは、鳴瀬川左岸、下中ノ目上流地区の被害の調査結果²⁷⁾を紹介する。

本地区は、軟弱粘性土地盤が基礎地盤に厚く堆積している地区である。治水地形分類の微地形は氾濫平野に該当している。基礎地盤である粘性土層の最上部は、盛土荷重による圧密のため、天端下部を中心に凹状を呈していた。堤体は粘性土主体の旧堤を砂質材料で川裏側へ拡張、嵩上げしている。堤体内には堤内地盤高より高い位置まで凸状となる地下水位が確認されたことから、これ以下の飽和した堤体砂質土が液状化したものと考えられた。なお、本地区は1978年宮城県沖、2003年宮城県北部の地震などの既往地震での被災履歴は報告されていない。

(1) 堤防被災概況および開削調査²⁷⁾

図6に、被災写真、開削調査時の断面写真を示す。天端及び川裏側法面に複数の縦断クラックが生じており、天端の沈下及び川裏側へのはらみ出しにより、被災後の堤防はほぼ水平となっていた。

被災原因や被災メカニズムを確認するため、被災堤防の開削調査が実施された。その結果、

- ・基礎地盤は、下部に凹状となっており、粘性土を横切るような亀裂や変形はみられない。
- ・基礎地盤の上部（堤体下部）には液状化したと考えられる砂層が存在し、沈下・陥没した堤体材料が砂層に食い込むような状況を呈していた。そのため液状化したと想定される砂層の厚さは乱れていた。
- ・基礎地盤表層の砂層から上方に伸びる砂脈が多く確認される（図6中）とともに、のり面下部の基礎地盤表層に沿って堤内側に流れる砂脈（図6右）が存在した。川裏側の腹付盛土の底部に存在する砂層で液状化したことが分かった。

図6左：被災写真（右側が堤内地、下流側から上流側を望む）²⁵⁾

中：開削調査により確認された液状化痕跡（マーカー部分は液状化した砂が堤体に貫入した痕跡）²⁵⁾

右：開削調査断面：液状化により絞り出された砂脈が確認できる（上流側から下流側を望む）²⁵⁾

以上の開削調査結果より、堤防被災の主要因は、軟弱粘性土地盤上に砂質系材料を用いて築堤・拡張した堤体下部において、圧密沈下により軟弱地盤表層が凹状となり、その上部で堤体に浸透した水が地下水水面を有する飽和領域を形成し（以下、「閉封飽和域」と称す）、その部分が液状化したことに

よると推定された。その結果、閉封飽和域の剛性・強度が低下し、堤体のクラック、陥没が発生するとともに、裏のり尻部から液状化した砂が噴出し、堤体の側方変動が生じたものと考えられた。図7に想定された被災機構を示す。

図7 閉封飽和域と被災機構の模式図²⁸⁾

(2) 河川堤防の閉封飽和域の液状化による被害対応

軟弱粘性土で構成される基礎地盤直上の堤防砂質土が液状化した痕跡が観察され、堤防の被害につながった事例が沢山あったことが特徴的である。これは、堤体の材料である砂質土が基礎地盤の圧密沈下によって地下水位以下の飽和状態になると同時に、応力緩和によって緩い状態になっていたため、液状化したものと考えられている。このような事例としては、これまで1993年釧路沖地震の際にピート地盤上に構築された堤体砂質土が液状化したことが報告され²⁹⁾、警鐘が發せられていた³⁰⁾が、実務では注視されていなかった。

この被害を省みるに、まず重要なことは、高々50cm～1m程度の薄層の液状化によって大きな被害になることである。この例で分かるように、常時においてせん断抵抗を發揮して堤防の変形に抵抗している法尻基礎部分が液状化によりせん断抵抗を失うと、容易にせん断破壊による大被害をもたらす。液状化の被害としては、液状化層が厚いことがしばしば重要視される（例えばPL値など）。これは、沈下量予測のように積分値が効くような被害予測には有効である。一方、河川堤防盛土のせん断破壊では、常時に期待されているせん断抵抗がどこまで低下するかが問題であり、液状化層の厚さは被害量の予測にあまり関係ない。河川堤防の液状化の被害予測の数値計算では、キーとなる法尻付近の物性の決め方が重要なのである。

4.2 阿武隈川柴田町下名生地区の被害³¹⁾—調査をどこまで網羅的に行うのか—

基礎地盤の砂質土層の液状化によって堤体に被害を生じた事例のうち、液状化層の分布と粘性土の堤体の位置関係によって被災区域が明瞭に分かれた事例を紹介する。

その被害事例は、阿武隈川と白石川の合流地点より約500m南側の阿武隈川左岸側堤防において生じ、基礎地盤の砂質土層の液状化に起因すると思われる堤体の側方変位、およびそれに伴う川裏側での家屋被害、噴砂が確認された。被災箇所は阿武隈川左岸の良く発達した自然堤防上に位置する。堤防周辺に13箇所の噴砂が確認（表のり面（川表）側：3箇所、裏のり面（川裏）側：10箇所）された。堤体の川裏側への側方変位が生じたことにより、川裏側の宅地や道路の変形などの被害が生じた。3点のボーリング調査および25点のスウェーデン式サウンディング試験に基づいて推定された断面図を図8に示す。図のA-A'断面は、被災領域の中央部の推定断面である。

堤防の基礎地盤部では地表面下17mまでに沖積砂質土層が3層、沖積粘性土層が4層確認された。地下水位は基礎地盤の地表面下1.0m付近に存在した。堤体のうち旧堤部は粘性土、新堤部は砂質土で出来ており、堤体自体の液状化の痕跡は見られなかった。このことから、標高5～7mに位置する最も浅い沖積砂質土層（N値=4～6）が液状化したものと推定された。この推定液状化層はA-A'断面においては堤防の表斜面側まで連続しておらず、堤体の下で途切れているのに対し、B-B'断面においては、液状化層は堤体の川表法尻を越えて連続していた。堤体の側方変位が生じている部分では、推定液状化層が堤体の下で途切れていて、噴砂は川裏側でしか発生していない。一方、推定液状化層が堤体の川表側まで連続しているB-B'断面付近では、堤体の側方変位は生じていないが、噴砂は堤体の両端で発生した。

図8 被災箇所の推定断面図 (柴田郡柴田町下名生)³¹⁾

このような被害のコントラストは、薄い液状化層の平面的な存在位置の差、あるいは過剰間隙水圧の消散に係わる水理排水条件の違いによって生じたものと考えられる³²⁾。河川堤防の耐震照査及び対策に関して言えば、このような状況の違いをどこまで正確に把握できるであろうか。耐震照査の効率性から、優先対策区間の設定のためにスクリーニング手法が求められているが、対象区間延長が膨大になるので、的を絞った調査が必要である。過去に蛇行していた自然の河川の河川改修履歴も重要な情報になる。

5. おわりに

本論文では、東日本大震災における液状化被害を省みて、現状の技術に見る課題のいくつかを指摘した。紙面の都合で説明不足の点、書き過ぎの点など多々あると思われる。本拙文が、我が国の液状化予測対策技術の深化に繋がれば幸いである。

参考文献

- 1) 風間基樹: 阪神大震災以降の液状化研究—液状化した土の残留変形特性の評価、電力土木、No.348、2010年、pp.1-6.
- 2) Kazama, M. : Residual deformation property of liquefied soil and related phenomena, the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hong Kong, China, 2011.5, pp.85-97.
- 3) 風間基樹: 2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題、地盤工学ジャーナル、Vol.7、No.1、2012年、pp.1-11.
- 4) 風間基樹: 東日本大震災の液状化被害から—今後の研究技術開発に思うこと—、ACE建設協会、意見・提言、Vol.22、No.2、2013年2月号、pp.24-25.
- 5) 地盤工学会: 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム発表論文、2013年.
- 6) 風間基樹、柳沢栄司、増田昌昭. 定ひずみ繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性、土と基礎、Vol.46、No.4、1998年、pp.21-24.
- 7) 風間基樹、鈴木崇弘、柳沢栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への

- 適用、土木学会論文集、No.631/III-48、1999年、pp.161-177.
- 8) 国生剛治：地震地盤動力学の基礎、エネルギー的視点を含めて、鹿島出版会、2014年。
 - 9) 松尾修：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題、土木学会論文集No.757/III-66、I-20、2004年、pp.1-20.
 - 10) 森河由紀弘、包小華、前田健一、今瀬達也、張鋒：余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性、地盤工学ジャーナル、Vol.7、No.2、2012年、pp.389-397.
 - 11) 地盤工学会震災対応研究委員会、地盤変状メカニズム研究委員会報告、地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集、2014年5月、pp.9-20.
 - 12) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, 1992, pp.173-188.
 - 13) Shamoto, Y. Sato, M. and Zang, J-M. Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.1, 1996, pp.39-50.
 - 14) 仙頭紀明、風間基樹、渦岡良介：非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化、土木会論集、No.764/III-67、2004年、pp.307-317.
 - 15) 海野寿康、風間基樹、渦岡良介、仙頭 紀明：同一繰返しせん断履歴における乾燥砂と飽和砂の体積収縮量の関係、土木会論集C、Vol. 62、No. 4、2006年、pp.757-766.
 - 16) 山崎智哉、風間基樹、河井正、森友宏、金鍾官：遠心力模型実験による細粒分含有率の異なる砂の沈下特性、地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集、2014年5月、pp.156-160.
 - 17) 金鍾官、風間基樹、河井正、森友宏：非塑性細粒分を含む材料の液状化強度・被害の評価に係わる密度指標の再考、地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集、2014年5月、pp.161-167.
 - 18) 金鍾官、河井正、森友宏、風間基樹：細粒分を含んだ土の最小間隙比の現行求め方の問題点について、第49回地盤工学研究発表会、2014年7月、pp.355-356.
 - 19) 陶野郁雄：漏斗を用いた最小密度試験の自動化、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、1981年、pp. 41-42.
 - 20) 社本康広、陶野郁雄：水平打撃による砂の最大密度試験方法の適用性、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム論文集、1981年、pp. 37-38.
 - 21) 龍岡文夫、デュッティン・アントワン、平川大貴、清田隆、澁谷啓、李俊憲、若本達也：連載、地盤工学・技術ノート、第10回盛土の締固め⑩、基礎工、2014年4月号、pp.90-94.
 - 22) Hatanaka, M. and Feng, L.: Estimation of relative density of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, 2006, pp.299-313.
 - 23) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines contents, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, 1983, pp.56-74.
 - 24) 山崎智哉、風間基樹、河井正、森友宏、海野寿康：液状化地盤における噴砂メカニズムの実験的考察、第48回地盤工学研究発表会、No.246、2013年、pp.491-492.
 - 25) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告書、共通編3 地盤災害、第4章液状化の被害と復旧、4.8.2、東北地方の液状化、河川堤防、平成26年4月。
 - 26) Yamaguchi, T., Mori, T., Kazama, M. and Yoshida, N.: Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.5, 2012, pp.811-829.
 - 27) 国土交通省東北地方整備局、北上川等堤防復旧技術検討会報告書、平成23年12月。
 - 28) 国土技術研究センター：河川堤防耐震対策緊急検討会資料、<http://www.jice.or.jp/sinsai/kasen/>、2011年。
 - 29) Y. Sasaki, H. Oshiki, J. Nishikawa: Embankment failure caused by the Kushiro-oki Earthquake of January 15, 1993. Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes, Satellite Conf. of 13th ICSMF, 1994, pp.61-68.
 - 30) 佐々木康：河川堤防の被害事例、地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム、地盤工学会、1998年。
 - 31) 森友宏、飛田善雄、今西肇：東北地方太平洋沖地震による宮城県南部地区における地盤災害、地盤、工学ジャーナル、Vol.7、No.1、2012年、pp.67-78.
 - 32) 河井正、風間基樹、森友宏、野田利弘：種々の条件が地震時の盛土のり先周辺の残留水平変位に及ぼす影響、地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集、2014年5月、pp.232-238.

(受理：2015年8月20日)
(掲載決定：2015年9月1日)

Subjects of the liquefaction research seen to the liquefaction damage of the Great East Japan Earthquake Disaster

KAZAMA Motoki ¹⁾, KAWAI Tadashi ²⁾, MORI Tomohiro ³⁾, KIM Jong kwan ⁴⁾
and YAMAZAKI Tomoya ⁵⁾

1) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate school of Engineering,
Tohoku University, Dr. Eng.

2) Associate Professor, ditto, Dr. Eng.

3) Associate Professor, Maebashi Institute of Technology, Dr. Eng.

4) Assistant Professor, Tohoku University, Dr. Eng.

5) Former master course student, Tohoku University.

ABSTRACT

This paper discuss the new subjects of the liquefaction research seen to liquefaction damage of the Great East Japan Disaster. Specifically, the subject about the liquefaction potential assessment, the subject about the evaluation of ground subsidence caused by liquefaction and the subject seen to the liquefaction damage of a river levee, etc. are discussed based on the damage observed or the experimental result. It was shown that understanding present damage on the extension of the present technology has a limit, and that the prediction and countermeasure technology of the liquefaction damage based on a new concept is necessary.

Keywords: Earthquake, liquefaction damage, ground subsidence, liquefaction potential assessment, fines content, duration of earthquake motion, river levee