

「地盤変状メカニズム研究委員会」報告

Report on Technical Committee for the Mechanisms of Earthquake-Induced Ground Deformations

浅 岡 顕 (あさおか あきら)
 (公財)地震予知総合研究振興会 副首席主任研究員

野 田 利 弘 (のだ としひろ)
 名古屋大学 教授

1. はじめに (当研究委員会の背景と目的)

会長特別委員会の下に設置された「地盤変状メカニズム研究委員会」に課せられた命題は、旧来の枠に囚われない新しい地盤力学・地盤工学の展開、つまり「学術の飛躍的発展」であった。委員会ではこのため、次の2点を主たる目的として掲げた。

1) 地震による地盤変状のメカニズムの解明と新しい学理の構築

経験に基づく多くの現行設計指針等は、想定された限定条件での現象を効率よく評価するものではあるが、これを超える現象に対しては概して無力である。常時-地震中-地震後を対象に、様々な土の材料特性のあるがままのモデル化に基づく地盤変状のメカニズムの解明と、将来の地盤挙動を予測する新しい地盤力学の学理の構築を行う。

2) 地盤変状と強震動特性の関係の分析・検討

強震動特性 (卓越周期, 継続時間, 指向性など) とそれによって変状が生じた地盤の特性 (材料特性, 地盤構造, 境界条件, 固有周期など) との関係进行分析する。また, 強震動履歴が地盤変状・変形 (再液化化など) に及ぼす影響についても分析・検討を行う。

研究方針/成果目標には次の3点を掲げた。

- 1) 学術・産産はもちろん産官学共同研究の実を挙げる
- 2) 研究者の世代交代を一気に加速させる
- 3) 国際化の推進

1) は異なる組織に所属する委員間の活発な研究交流を, 2) は40, 50代研究者が牽引する新規研究の開拓と30代研究者との強力な連携による研究促進を, 3) は研究成果として Soils and Foundations への積極的投稿を指す。

委員会は委員長・幹事長の筆者ら, ならびに風間基樹副委員長, 塩見忠彦副委員長を含む47名¹⁾で構成した。委員会活動は, 東日本大震災に係る講演企画, 7つのWGによる研究報告と質疑を行った定例委員会のほか, 震災の現地視察会, 構成モデルの考え方・適用例を検討する「地盤材料の構成モデルワークショップ」(中井照夫座長)を開催した。以下では, これらの概要を示す。なお, 全体のより詳細な内容については, 文献2)を参照されたい。

2. 委員会の体制と研究テーマ

当委員会では, 目的実現のために, 委員会の中に次の7つの項目の研究WGを設置した。各WGの研究成果は後述する。

WG1: 浦安市の埋立地盤の液化化一表層埋立土および深部粘土の物性把握, 埋立履歴/地層構成や入力地震波の影響, 再液化化可能性と将来の地盤変状予測など

WG2: 塑性・非塑性細粒分含有率の影響と構成式による再現一塑性・非塑性細粒分含有率の影響のモデル化

WG3: 地震中・地震後に粘性土地盤に生じる変状一地震中・地震後に粘性土地盤に生じる変状

WG4: 造成宅地一谷埋盛土に生じた変状の把握と再現, 側方流動抑止工法の検討

WG5: 堤防・盛土構造一河川堤防に生じた地震による変形・破壊挙動, ため池の浸透と耐震

WG6: 港湾・海岸構造物一耐津波化委員会 (菊池喜昭委員長) との連携

WG7: 各種地盤改良・地盤補強工法・耐震メカニズム一密度増大工法, 排水工法, ジオテキスタイルの効果

3. 委員会活動状況の概要

3.1 定例委員会

定例委員会は2011年9月20日, 第1回を皮切りに, 2~3か月に1度のペースで合計13回開催した (平均参加者: 20名程度)。主に, 前半の委員会では, 東日本大震災における河川堤防・高速道路盛土・海岸構造物・ため池などの地盤・土構造物の被災状況や地盤改良の有効性に関する7名の講演者による情報提供と質疑応答を通じて, 地盤力学・地盤工学上の課題抽出を行った。後半では, 7つのWGの研究進展状況等の説明と各委員間での共有を図るため, 集中討議・関連研究報告などを継続的に行い, 問題点・課題の整理に役立てた。13回分の議事録は地盤工学会ホームページ²⁾をご覧ください。

3.2 東日本大震災の現地視察会

第47回地盤工学研究発表会 (八戸) の最終日に松島に集合し, 翌日, 松島~石巻市 (瓦礫集積) ~女川町 (津波被害, RC構造物の転倒) ~鳴瀬川堤防の破堤~折立団地 (谷埋め盛土造成地の被害) ~仙台東部道路~仙台空港~JR仙台駅の行程で, 現地を視察した。

3.3 地盤材料の構成モデルワークショップ

定例委員会とは別に、当ワークショップを3回(2012年8月9, 10日, 2013年5月27日, 2014年1月9, 10日)開催した。静的・動的を問わず、様々な地盤材料の構成モデルの考え方を整理し、個々の構成モデルの特徴と地盤の解析への適用性を明確にすることを目的とし、各種構成モデルの紹介、それらによる浦安で採取された試料の実験結果に対する説明の可能性及び各構成モデルによる浦安での液状化のメカニズムなどについて議論した。ここでは、3回のワークショップを通して示された、中井座長の総括の言葉を次に記しておく。

「液状化問題を含め地盤の変形・破壊問題を合理的に予測するためには、鋼構造などの上部構造同様、境界値問題として地盤の変形から破壊までを一貫性をもって解析する必要がある。そこでは、一般的な応力条件下の地盤材料の力学挙動を定量的に記述できる構成式は欠かせない。ある時期までこの分野の研究が日本では非常に活発であり、そこでは年齢を問わず活発な議論がなされていた。しかし、近年、実験による検証を含めて、この分野で活躍する若い人が限られることに正直憂慮していた。しかし、3回のワークショップでは50~80名の若手から熟年までの参加があり、そのような意味では一安心した。

液状化問題はもとより、静的・動的問題の実務の設計は今でも地盤材料の構成式モデルがない時代の Terzaghi 型の理論や経験則に基づいてなされている。今後、研究、実務に拘わらず地盤工学の分野でのブレークスルーは、地盤の挙動を簡単かつ唯一的に記述できる構成モデルに基づいた力学的根拠が明確な解析なしにはなしえないと言える。そのような訳で、ワークショップでは要素試験結果や現場の現象を構成モデルやそれを用いた解析がどれだけ説明できるかだけでなく、その材料パラメータの唯一性や決め方についても議論された。本ワークショップを通して、現在の構成モデルとそれを用いた地盤の変形解析の現状と本当の意味での地盤工学の発展には何が必要なか明確になったと言える。この分野の活発かつ真摯な学術的議論とその発展を心より期待している。産官学を問わず特に若い人たちに。」

4. 各 WG の研究成果報告の概要

紙幅の都合上、各 WG の活動報告は一部を紹介するにとどめる。

4.1 WG1 (浦安市の埋立地盤の液状化)

東北地方太平洋沖地震によって、千葉県浦安市をはじめ、東京湾沿岸の埋立地盤において、広範に液状化が発生した。その特徴としては、①地震動の継続時間は長い、たかだか震度5程度、地表面観測記録で最大加速度200 Gal 以下の揺れであったこと、②採取した噴砂試料から、通常は液状化しにくいとされてきた細粒分を2~6割含む土が液状化したこと、③比較的新しい埋立て地盤で液状化が集中しているが、液状化被害の程度は空間的に非一様でばらつきが大きいことが挙げられる。WG1では、浦安市の埋立て地盤に対し、複数の地震応

答解析・模型実験を通して、液状化発生メカニズムの説明を試みた。基盤波は、複数の候補から、本震・余震記録、浦安市までの距離、土質柱状図の有無などを考慮し、東京都港湾局の品川地震観測所の GL-36 m (N 値50以上)における観測記録を浦安地区の入力地震動とした。

これらを踏まえ、福武らの解析³⁾からは、加速度は大きくないが繰返し回数が多いため、過剰間隙水圧上昇が緩慢となり、主要動が過ぎてゆっくりと上昇して液状化に至ったこと、その後の加振が激しい液状化を引き起こしたことが示された。また、名大の解析⁴⁾からは、沖積砂層下の沖積粘土層が厚くなるほど地震波の長周期成分が増幅され、地表面での大きな揺れに繋がり、表層埋土層が液状化した可能性があること、2次元解析から深部の洪積層の傾斜構造に起因して傾斜基端部から生成された表面波(口絵写真-1, <http://urx.nu/bmG4>, 以下同様)の影響で主要動終了後も後揺れが継続して表層の液状化が拡大し、表層地形の非一様性や本震と余震時の液状化発生の有無に寄与した可能性を示した。

4.2 WG2 (塑性・非塑性細粒分含有率の影響と構成式による再現)

WG2では実験と解析の二つのサブWGで活動した。解析サブWGの活動は、WG1の細粒分を含んだ浦安土の液状化解析と内容が重複するため、ここでは割愛する。

実験サブWGでは、(1)既往研究の体系化、(2)細粒分を含む砂の実験データの蓄積を研究方針とした。この結果、細粒分を含む砂の強度・変形特性を統一的に理解するためには、土の堆積構造を反映した粗密状態を定量評価する合理的な指標の選定が重要であること、一方で地震による繰返しせん断に対し、土の負のダイレイタンシーに起因する圧縮性を評価できれば、液状化による被害程度の簡易推定に繋がる可能性があること、また、きれいな砂に粒子形状が異なる5種類の非塑性細粒分を0~50%混合した実験結果から、細粒分含有率が増加すると沈下量は増加すること、沈下量に影響を及ぼす要因として、限界細粒分含有率・粒子形状があり、細粒分粒子形状が扁平に近いほど圧縮量が増加することなどを明らかにした。

4.3 WG3 (地震中・地震後に粘性土地盤に生じる変状)

地震後の粘土地盤の長期沈下は、古くはメキシコ地震(1957, 1985年)や宮城県沖地震(1978年)の事例があり、近年では阪神・淡路大震災(1995年)におけるポートアイランドの事例がある⁵⁾。いずれも地震後の地盤沈下が示されているが、その現象や沈下メカニズム解明が十分ではない。このため、WG3では東北地方太平洋沖地震に限定することなく既往の沈下事例と対比しつつ活動を進めた。

新潟県中越沖地震(2007年)で観測された柏崎市の沖積粘土層で地震後の広域地盤沈下については、現地採取土の静的及び動的試験に基づく磯部による沈下予測解析⁶⁾から、長期沈下の可能性を示した。

報 告

東北地方太平洋沖地震でも浦安地域では地震発生時の液状化に起因する即時沈下後の地盤沈下が継続している。Nigirikawa and Asuka⁷⁾は浦安の埋立造成地の2測線について長期の地盤沈下計測を実施し、地盤沈下は測線中央付近と海側で沈下量が大きい傾向が見られることを示した。粘土層厚の影響が大きい、陸側で地震後地盤沈下量の小さいことには他の要因も影響している可能性が大きい。多くの研究者による粘土地盤の長期沈下挙動の解析による更なる現象解明と沈下予測精度向上のための継続的な研究が期待される。

4.4 WG4 (造成宅地)

WG4では、東北地方太平洋沖地震で被災した、宮城県仙台市青葉区折立地区の谷埋め盛土造成宅地を対象に、変状の把握と再現、側方変位抑止工法の検討を行った。なお、折立地区は仙台市街地西部の丘陵斜面に位置する谷埋め盛土造成宅地で1965年から造成が行われ、1978年宮城県沖地震では大きな被害を受けていないが、東北地方太平洋沖地震では谷埋め盛土部分全体において地すべりの崩壊が生じた。被害は旧谷筋縦断方向に約230 m、横断方向に約70 mの範囲に及んだ。被害の要因として、盛土の N 値が小さかったこと、粘性土地盤で地下水位が高かったことなどが指摘されている⁸⁾。

解析は複数の解析コードにより実施しているが、線形等方弾性体を用いたX-FEM⁹⁾による地震応答解析では、盛土頭部沈下量に関して定量的に良い一致を示したが沈下が卓越する法尻部分では実測と大きな差異が見られた。土～水～空気連成の不飽和浸透流解析による盛土内水分分布の推定及び有効応力地震応答解析¹⁰⁾からは、実際の推定被害領域を概ね説明できる応力及びひずみ分布を得ることができている(口絵写真—2)。

4.5 WG5 (堤防・盛土構造)

WG5では特に河川堤防の大変状被災事例について、①粘性土基礎地盤上の河川堤防の地震前～地震中～地震後の挙動、②閉封飽和域を有する堤体の地震時挙動、③短冊状の堤体変状に関する亀裂進展解析による検討、④矢板耐震対策工の効果の検証、及び⑤基礎地盤に非対称な液状化域がある場合の堤体変状の5つの課題に着目して検証した。紙幅の都合上、①～④について述べる。

①では、粘性土基礎地盤が地震時に変形しない前提で堤防の変状メカニズムが検証されている現状に対し、粘土地盤への被災堤体のめり込みは地震前の圧密沈下だけではなく、地震時に即時沈下した部分もある可能性を示した¹¹⁾。②では、空気～水～土骨格連成解析¹²⁾から、地震時に形成された不飽和堤体と粘土基礎地盤との間の過剰水圧勾配を解消するために、時間経過とともに粘土基礎地盤から堤体内に間隙水が流入し続け、堤体内の飽和度が長期にわたり高くなった。被災堤防の調査において、堤体内の地下水位の高さがいくつも報告されているが、本事例はその原因の一つと考えられる。③では、基礎地盤や堤体下部が液状化して被災した河川堤防の、堤体が短冊状に分断されて崩壊した多数の事例に着目し、側方流動に伴う盛土底面での引張応力の作用による微小

亀裂の発生を仮定してX-FEMを用いた亀裂進展解析(自重解析)⁹⁾を実施した。地震動だけでは開口型亀裂による進展の可能性が低いことを示した。④では、鋼管矢板による補強工法で、根入れが深いと、堤体前面での変形抑止には多大な効果を得ることができる一方、堤体背面側の水平変位や隆起を促進する危険性を指摘した(口絵写真—3)。

4.6 WG6 (港湾・海岸構造物)

WG6では、地盤構造物耐津波化研究委員会と連携しつつ、東北地方太平洋沖地震における港湾・海岸構造物の被害事例について、要因分析等を行った。

東北地方太平洋沖地震では、地震動作用だけでなく津波作用も影響したと考えられる岸壁被害が見られる。このため、相馬港の鋼矢板式岸壁の被害については、岸壁設計手法に基づいた被災要因の考察を行った¹³⁾。この結果、矢板根入れ長の不足や控え工陸側斜杭の引抜き抵抗の超過が被災状態とはあまり合わないものの、水平震度を考慮しない場合でも背後残留水圧を少し大きくするだけでタイ材張力が破断張力を超過する結果となり、実際の被災状態と対応した。また、この控え組杭式岸壁と隣接する相馬港第一埠頭控え直杭式鋼管矢板式岸壁では、矢板が完全に倒壊する被害は見られないものの、地盤構造物耐津波化研究委員会と合同で有限要素解析を用いた地震動及び津波作用の影響検討を行った。

4.7 WG7 (各種地盤改良・地盤補強工法・耐震メカニズム)

WG7では、主として①密度増大工法、②間隙水圧消散工法及び③補強土工法の有用性を検討した。

①では、東日本大震災において埋立地の締固め改良は液状化に対し有効で、地震後の変状も小さく殆ど被害がなかったという現地調査報告に着目した。サンドコンパクションパイル(SCP)工法による改良地盤を複合地盤としてモデル化した解析¹⁴⁾から、SCP施工によって施される砂杭や杭間の密な砂の正のダイレイタンス特性によって地盤の変形抑止効果が期待できることを示した。②では、パーチカルドレーンの排水による地震時の水圧上昇抑制の結果、締固めに伴う一定の地表面沈下を許容するため、液状化防止の可否と併せて、液状化抑制時の発生沈下量予測も重要な課題の一つとなる。WG7では、このパーチカルドレーン工法の圧密問題に適用されるマクロエレメント法の動的問題への適用を図り¹⁵⁾、ドレーンピッチや地盤の透水係数など、間隙水圧消散工法の諸特性を調べ、水圧上昇抑制効果と液状化発生低減に伴う側方流動抑制効果を確認した。③のジオテキスタイルを用いた補強土工法については、2007年能登半島地震により崩壊後、補強土工法を用いて強化復旧された能登有料道路の道路盛土を取り上げ、耐震性能を検証した。

5. おわりに

「今回の東北地方太平洋沖地震は、我が国、特に東日本の広域にわたり、筆舌に尽くし難い厄難をもたらしました。この地震を機に、これまでの地震学に対する信頼

がかなり揺らいていることは、皆様も周知のとおりです。地震が来ること自身は確実ではあっても、『地震の(大きさや場所と時期の)予知/予測』はどこまで可能なのか、専門の領域に閉じこもらずに、分からないものは分からないと、国民にもっと素直な説明があってもよかったのかも知れません。

しかし皆様、地震学を嗤っていて済む事態では、もちろんありません。我々の地盤力学/工学と、それを支える研究者、技術者も、実は同じように危うい。それはどうしてでしょうか。地震時の地盤変状について、何がわかっていて、何はわかっていないのか、これを正直に国民に知らせることが、まだ出来ていないからです。今回の地震について言えば、この地震ならではの、初めて目にするよく調べられていない地盤変状は、あったのかなかったのか、科学的に、しかも分かりやすく国民に説明できていません。関東では液状化被害が目立ちましたが、液状化ひとつを取り上げても例外ではありません。液状化現象は土質力学の教科書の中でも、皆様も周知の圧密沈下や地盤の支持力などの話題からは一番遠く、長い間、土質力学者の中で共通認識の醸成に著しく欠けていた分野でありました。『ゆるい砂の締め固め計算がまったくできないプログラムを用いて、長く砂の液状化の計算をしていた』と言えば、誇張に過ぎるでしょうか。『砂と粘土の違い』はどこまではっきりと分かっているのでしょうか。『砂は液状化し、粘土は何も起こらない』というのは本当でしょうか。こうして地震時の地盤変状を考えてゆくと、地盤力学/工学が地震学を嗤えるような学問状況にあるなどとは、全くもって考えられないのです。

特別委員会のI『地盤変状メカニズム研究委員会』は、このような事情を背景に発足いたしました。この委員会では、これまでの伝統的な『土質動力学』研究の成果を尊重しつつ、しかしその延長線上の研究だけに陥ることなく、むしろ最新の地盤力学研究を背景にして、新たな学理を構築するくらいの気概で、進めて行きたいと考えています。』

上記は、当委員会に課された「学術の飛躍的発展」という命題を踏まえ、第一回委員会開催に際し、委員長が委員に宛てた委員応募へのお礼の手紙の冒頭である。約2年半を振り返ると、WG報告に見られるようにこの趣旨に沿って進められたところもあれば、例えば噴砂のシミュレーションなどまだできないことも明らかになった。委員会は閉じたが、研究は終わりではない。むしろ始まったばかりで、しかもやってもやってもきりが無いから、各自の職場に戻り、次なる飛躍に向け研究を進めていただきたい。

第47回～第49回地盤工学研究発表会では一般セッションでそれぞれ8編程度の成果報告を行うとともに、「地盤工学学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—」(2014年5月14, 15日)では委員会の活動成果として関連論文18編を発表した。今回紹介した4.の内容は、これらの内容の一部の要約で、研究の全体を紹介

できないのが極めて残念である。今後、委員各自またはグループが研究成果をとりまとめ、Soils and Foundationsに投稿し、世界に発信する予定である。本誌読者の方には、是非これらの研究成果をご覧いただきたい。

最後に、委員会メンバー、ワークショップに参加いただいた方、地盤工学会長をはじめ学会関係者の皆様に大変お世話になりました。心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会ホームページ, 入手先 <https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1294%3A2009-10-02-07-48-17&catid=88%3A2008-09-15-06-45-17&Itemid=12>(参照2014.7.19)
- 2) 地盤工学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」:委員会報告,地盤工学特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.9~20, 2014.
- 3) 福武毅芳・張 至鎬:2011年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の地盤の有効応力解析による検討,土木学会論文集A1, Vol.68, No.4, pp.1_293~1_304, 2012.
- 4) 浅岡 顕・中井健太郎・野田利弘・村瀬恒太郎:不整形な境界から発生した表面波によって拡大した浦安市の液状化被害,地盤工学特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, 2014.
- 5) 松田 博:粘土層の地震後沈下過程の推定,土木学会論文集, No.568/III-39, pp.41~48, 1997.
- 6) Isobe, K., Ohtsuka, S. and Takahara, T., Study on long-term subsidence of soft clay due to 2007 Niigata Prefecture Chuetsu-Oki Earthquake, 18th ICSMGE, pp.1499-1502, 2013.
- 7) Nigorikawa, N. and Asaka, Y., Long-term settlement of holocene clay ground after the 2011 Great East Japan Earthquake, 10thCUEE, 2013.
- 8) 東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会報告書DVD-ROM,第3部門(地盤工学)3.3.2仙台市(宅地保全審議会), 2013.
- 9) 新保泰輝・矢富盟祥:動的拡張有限要素法を用いた複数すべり面を有する斜面の残留変形解析,第47回地盤工学研究発表会, No.817, pp.1625~1626, 2012.
- 10) Mori, T., Uzuoka, R., Chiba, T., Kamiya, K. and Kazama, M.: Numerical prediction of seepage and seismic behavior of unsaturated fill slope, Soils and Foundations, Vol.51, No.6, pp.1075-1090, 2011.
- 11) 小高猛司・野田利弘・吉川高広・高稲敏浩・李 圭太・崔 瑛:粘土基礎地盤上の河川堤防の被災メカニズムに関する一考察,地盤工学学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, 2014.
- 12) 吉川高広・野田利弘・小高猛司・高稲敏浩:粘性土地盤上の不飽和盛土の施工時・地震中・地震後挙動に関する空気~水~土骨格連成解析,地盤工学学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, 2014.
- 13) 小濱英司・菅野高弘・池野勝哉・大矢陽介:2011年東北地方太平洋沖地震において被災した鋼矢板式岸壁の被災要因に関する一考察,第48回地盤工学研究発表会, No.1068, 2013.
- 14) 竹内秀克・野田利弘・酒井崇之・高稲敏浩:日本大震災における締め固め改良地盤の効果の検証,地盤工学学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, 2014.
- 15) 野中俊宏・山田主太郎・野田利弘・矢藤彰徳:間隙水圧工法の液状化対策効果の予測に関する水~土連成解析, 2014.

(原稿受理 2014.7.20)