

動土質に求められる技術革新 — 次世代技術とそのロードマップ —

澤田俊一*

Technical Innovation for Soil-Dynamics - Next-Generation Technologies & Their Roadmap -

Shun-ichi SAWADA*

Abstract

The Soil Dynamic Laboratory was established in 1979 at the Earthquake Engineering Department of the Urawa Research Institute. We began work on earthquake disaster prevention and mitigation from an engineering point of view. In order to clarify ground behavior when an earthquake occurs, we have been carrying out technical works based on three elements for seismic design: "In-situ tests," "Laboratory tests" and "Dynamic analyses." This report explains past technologies developed from these three elements and from among them, identifies technologies required for the next generation, together with their roadmap, for a total of 100 years, 50 years before and after, centered on the current generation. The report also introduces the specific next-generation technology that is required for each element. For in-situ tests, system construction using automation and robotization with ICT to improve the reliability of ground information is proposed. For laboratory tests, an improved version of the loading method, the strain level and the drainage condition in the existing test method is proposed by focusing on the behavior of the original ground when an earthquake occurs. Regarding the technology required for seismic design using dynamic analysis, a way to construct a new ground model for the analysis that utilizes dense ground information as "big data" as well as advanced analysis methods and modeling, are proposed. To verify the actual phenomenon of ground disaster due to an earthquake, it is necessary to identify, from an engineer's viewpoint, the differences between microscopic in-situ test results and laboratory test results as "soil elements" and the macroscopic entire behavior of "ground" as collective entities in dynamic analyses, in addition to translating these test results. The report concludes with the words of my predecessors and my words of encouragement for the next generation of soil dynamics engineers.

Key words: Investigation, In-situ test, Laboratory test, Seismic design, Dynamic analysis

要 旨

1979年に、浦和研究所地震工学部に動土質研究室が設置された。同研究室では“原位置試験”，“室内土質試験”および“動的解析”を3つの要素技術として、工学的側面から地震防災・減災技術に着手している。本報では、動土質研究室で始動した要素技術を振り返り、次世代に求められる技術を抽出して紹介する。採り挙げた技術については、現世代を折り返し点とした前後50年、計100年間のロードマップとして紹介している。また、求められる次世代技術については、要素技術毎に新しい技術内容を具体的に列挙して示している。原位置試験では地盤情報の信頼度向上のためにICTを活用した自動化・ロボット化技術、室内土質試験では現行の試験方法における載荷方法、ひずみレベルおよび排水条件等の技術改善点、さらに動的解析では、構成則の高度化と共に高密度化された地盤情報を活用する新しい地盤モデル構築技術である。一方、動土質技術者として地震による地盤災害を検証するためには、微視的な“土要素”としての調査・試験結果と、集積体となる“地盤”としての巨視的な挙動の違いを見極めることの重要性を指摘している。そして、先人の言葉と共に次世代の動土質技術者への期待を記した。

キーワード：地盤調査，原位置試験，室内土質試験，耐震設計，動的解析

*応用地質（株）技術本部

*OYO Corporation Engineering Headquarters

1. はじめに

1978年に我が国では、伊豆大島近海地震、島根県中部地震、宮城県沖地震と死傷者を伴う地震災害が立て続けに発生した。地震防災・減災への関心の高まりを受け、国土庁はその翌年に、近い将来発生が予測される東海地震による被害想定調査¹⁾を開始している。この動きに同調し、応用地質株式会社では浦和研究所地震工学部に、応用地震、動土質、地震地理の3つの研究室を設置して地震防災さらには減災の取り組みに着手している²⁾。

3研究室は、地震の“作用力”を求める応用地震、地盤の“耐力”を求める動土質、そして“作用力”と“耐力”を比較して被害予測・対応をマッピングする地震地理と役割を担っていた。現在、応用地震は東京支社地震工学センター、動土質は技術本部コアラボ試験センターと東京支社技術部、そして地震地理は社会システム事業部地震防災部に技術が継承されている。

本報では、3つの研究室の中の動土質研究室の技術に着目する。地盤の地震時耐力を求めるための3つの要素技術となる“原位置試験”、“室内土質試験”および“動的解析”について、“これまで”を振り返り、“これから”に求められる技術を紹介すると共にそのロードマップを示す。

2. “これまで”と“これから”のロードマップ

図1に“これまで”の動土質で取り組んできた開発技術を抽出して紹介し、現時点で考え得る“これから”に求められる技術とそのロードマップを示す。なお、地盤

工学全般に渡る技術とそのロードマップに関しては別途、地盤工学会のアカデミックロードマップ「先人の功績と地盤工学の未来」³⁾を参照頂ければ幸いである。

2.1 “これまで”の動土質

1976年に“ツイストサンプラー”が(株)応用地質調査事務所(現 応用地質株式会社)で開発され、液状化が懸念される緩い砂質土の乱れの少ない試料採取(当時は“不攪乱試料”と呼んでいた)が可能となる。翌1977年には、建設省土木研究所で試作された振動三軸試験機を実務用に4連とした装置が、誠研舎との共同製作により浦和研究所に導入される。このことにより、原位置で採取した乱れの少ない試料を用いて土の液状化強度を求めることが、社内で可能となる。続く1979年には、共振法試験機、動的ねじり試験機さらには動的単純せん断試験機が配備され、土の液状化強度に加え、応力-ひずみ関係から土の動的変形特性を求めることも可能となり、動土質研究室が本格始動する。

導入された試験装置は、いずれも高精度な油圧アクチュエータを採用した動的試験装置である。動土質研究室では、地盤工学会(当時は“土質工学会”)等に多くの試験結果を発表して高い評価を得ている。

動的試験導入期となる1970年代は、動土質の第1世代である。続く1980年代、動的解析導入期となる動土質の第2世代を迎える。

室内土質試験から得られた動的な地盤物性を用いて地盤の地震時応答を求める2次元有限要素法の汎用プログラムSIGNAS⁴⁾が導入される。導入当初は社外の計算機の端末利用であったが、1984年に地盤工学研究所(旧浦和研究所)に集積計算機VAX11/780⁵⁾が導入され、イン

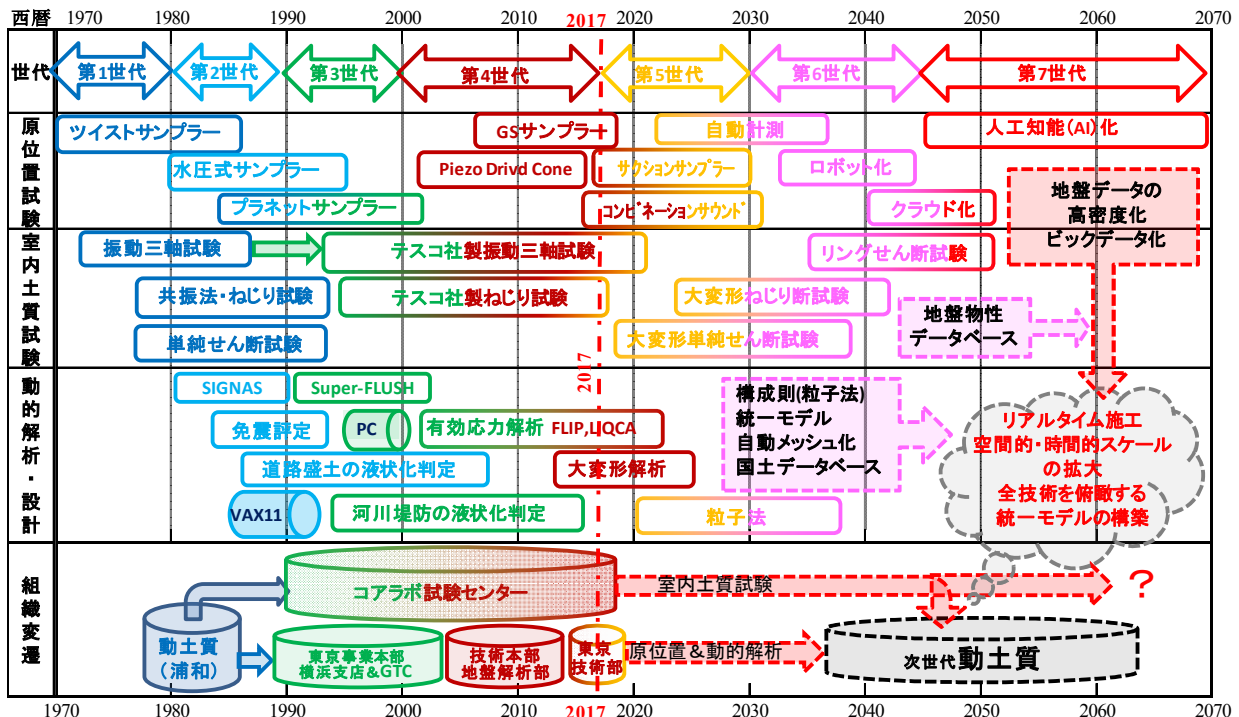


図1 動土質の要素技術とロードマップ

ハウスでの解析が可能となる。同時に、採取した試料を用いた土質試験によって得られた地盤定数を用いた動的解析を行う一連の耐震設計が遂行されるようになる。当時社内で開発された解析法には、重複反射理論に基づく1次元地震応答解析(Namazu:後にSHAKE⁶⁾に置き換わって行く)や複素応答法等の周波数領域での2次元有限要素法(SIGNAS, FLUSH⁷⁾)の他、地震時円弧滑り計算(ANT85)等がある。インハウスの計算機の導入によりFortran言語を用いた各種のデータ整理が可能となり、動的解析結果や耐震設計結果を図化して視覚的に提示する技術も進化を遂げる。

原位置試験においては、“水圧式サンプラー⁸⁾”や“プランネットサンプラー⁹⁾”が開発され、採取が困難であった比較的密な砂質土も、乱れの少ない良質な試料が室内試験室に搬入できるようになる。

兵庫県南部地震を経験する1990年代は、動的試験のリニューアルと共に、有効応力解析導入期となる動土質の第3世代である。

1992年コアラが試験センターの開設に伴い、動的試験関係は現宮原の試験センターに統合される。同時に、原位置試験と動的解析は、東京事業本部(茗荷谷)の土質技術部、横浜事業部を経由して技術本部地盤解析部耐震グループとして別々の道を歩み始める。

室内土質試験では、A/D変換に伴うデジタル収録や高精度化したセンサー技術の採用により、試験機も油圧から空圧式やDCモーターへとリニューアルされ、制御の高精度化ともに自動化が進んだ。試験機の高精度化・自動化に伴い、振動三軸試験や動的ねじり試験のみで微小ひずみ領域の計測が可能となり、共振法試験は用いられなくなる。

動的解析を行う環境は、計算機の高速度化、小型化、大容量化に伴い、空調設備を必要とする大型の集積計算機は姿を消し、デスクトップのパソコンでの計算が主流となる。コンピュータの性能の向上に伴い、従来の周波数領域での解析が、時間領域でも行われるようになる。1995年に発生した兵庫県南部地震では、神戸港ポートアイランド岸壁や淀川河川堤防での液状化に伴う流動化現象による被害を、有効応力解析¹⁰⁾による逐時時刻歴解析によって初めて変形量照査が行われる。これらを契機に、土木構造物耐震設計に於いては変形解析(FLIP¹¹⁾, LIQCA¹²⁾, ALID¹³⁾, 東畑モデル¹⁴⁾)を用いる変形量照査が標準化される。

21世紀を迎え、2004年に液状化ポテンシャルサウンディング、商標名Piezo Drive Cone (PDC)¹⁵⁾が開発される。調査ボーリングの補間となる、安価で簡易な動的サウンディングPDCの出現により、空間的分解能の高い地盤モデルを用いた動的解析が行われるようになる。地震時の構造物の被害程度を示す変形量照査を採用する事により、性能を規定した設計が可能となる。

2000年代から現在は、サウンディング手法を用いて安価により信頼度の高い耐震設計を行う性能設計が導入される動土質の第4世代である。

2.2 “これから”に求められる技術

1990年代の第3世代までは、“壊れる/壊れない”を判定する安全率を用いた設計が標準となっていた。

1995年兵庫県南部地震を契機に、耐震設計にレベル1・2と称した段階設計¹⁶⁾の概念が土木構造物の耐震設計に導入される。このことにより、2000年代から現在の第4世代では、これまでの安全率とは異なる、使用限界、修復限界さらには終局限界等の限界状態を定量的に評価する限界状態設計法が導入される転換点(turning point)を迎える。

1995年の兵庫県南部地震以降も、2011年に発生したマグニチュード9の東北地方太平洋沖地震、震度7を2回観測した2016年の熊本地震等、想定外や未曾有と表現される地震被害が近年頻発し続けている。

動土質にとっても、未だ嘗てない現象への技術対応が求められる現世代の第4世代となっている。

来るべき2020年代の第5世代では、計算機の更なる容量・速度の向上に伴う新技術到来が期待される。

計算性能向上の技術革新により、これまでの有限要素とする土塊を連続体とする地盤のモデル解釈から、より精緻に本来の土粒子(粒状体)としての地盤の挙動に迫る自由度を持った解析¹⁷⁾が新しい技術として登場する。計算機の大容量化に伴い、時間のみならず空間スケールの拡大により、土としての粒状体をより実現象に近い挙動として表現することが可能となりつつある。このため地盤調査・試験に於いても、これまでの微小ひずみ・微小変形理論から脱却した、大変形理論¹⁸⁾に適用可能な新しい地盤物性を計測する調査・試験方法の開発が求められる。具体的には、原位置試験ではPDCを凌ぐ分解能を有する新たな非破壊原位置試験、室内土質試験では土要素としても破壊後の挙動を求める新たな発想の試験法の開発が求められる。さらに、動的解析では、これまでの2次元断面(平面)でモデル化から、3次元空間(立体)をモデル化した解析が期待される。

2020年代には昨今、Construction Information modeling (CIM)¹⁹⁾やi-Construction²⁰⁾として示される地盤の3次元モデル構築が求められる第5世代が到来する。

次の2030年代から2040年代半ばとなる第6世代には、高度化したセンサーとデジタル化した制御アクチュエータの進化を期待する。

地盤調査の自動化、ロボット化である。特に、原位置試験に於いては載荷・除荷を自動化する制御システムの導入が期待される。これによって、オペレータ等の人為的な誤差の介入を排除した、信頼度の高い地盤情報の取得が可能となる。さらに、地盤情報のデジタル化に伴ってクラウドを経由したデータベースがビッグデータとし

て構築される。このビックデータを用いた人工知能 (AI) による 3 次元の地盤モデリングが、これまでの技術を一刷新する。当然、動的解析を伴う耐震設計では、3D の地盤モデルは自動メッシュ (3 次元ではキュービック) で、サイバー (cyber; 仮想) 空間内に生成する技術を扱う世代となる。

さらに先の、2040 年代半ばから 2060 年代の第 7 世代は、信頼性設計²¹⁾の導入期となる。

AI にサポートされた原位置試験・室内土質試験のロボット化が進む。信頼度が高く、さらに空間分解能の高い地盤情報が得られる。この信頼度の高い地盤情報に基づき、必要とされる要求性能実現に最適なコストの算出が可能となる。例え、一部で空間的分解能が不足する地盤情報であっても、ビックデータおよび AI のサポートにより、不確定要因を確率論²²⁾によって補う部分最適かつ全体調和となる設計法が技術として認められる。地震動の発生確率と規模と共に、必要でかつ十分な性能を担保するコストの算出がサイバー空間内で可能となる。

その先の、現在から 50 年以上先の 2070 年代以降となる第 8 世代に求められる技術とそのロードマップについては、次世代の動土質技術者の熱意に委ねることとしたい。空想するに、鉄腕アトムや鉄人 28 号の後輩達が原位置や室内土質試験さらにはサイバー空間で活躍する時代になっているのかもしれない。

現代の第 4 世代を折り返しとして、過去 50 年と今後の 50 年の計 100 年間の動土質に求められる技術とそのロードマップを描いてみた。我々は、地盤調査業としての生業を得るためにも、確実に技術革新は起こして行かなければならない。地球という自然を相手にするが故に、既知よりも未知が多い我が動土質にこそ、技術によって革新する余地が多く存在する。どんなに自動化・ロボット化されても、人が造る多くの構築物は人が決める要求性能と費用 (cost) のバランスから成り立っている。また、得られる計算結果 (output) は、人が解釈して初めて成果 (outcome) となる。このことは、過去も、現在も、未来も何ら変わらない。我々動土質に係る地盤技術者が担う場面は output を outcome にする技術にあり、決して output 算出が技術の目的ではない事を肝に銘じておく必要がある。

3. “土要素” から “地盤” への解釈

地盤力学を考える上で、大事になるのが “地盤” の空間的分解能である。“地盤” は “土要素” の集積体である。設計では、原位置試験や室内土質試験から “土要素” の特性として得られる限られた情報から、“地盤” としての全体挙動を予測しなければならない。

“土要素” の情報から “地盤” を評価する間には、不確定要因 (unknown) が 3 つ存在する²³⁾。

それは、①地盤の不均質性と②地盤調査方法の不確実性、そして設計断面とする場合のグルーピングのための③地盤のモデル化誤差である。

採取した試料を用いて “土要素” の挙動を求めたとしても、地盤に潜在する unknown によって、集積体としての “地盤” の挙動はそのままでは評価できない。地盤力学を扱う技術者は、“土要素” としての試験結果や特性を理解することは当然のことであるが、その上で unknown の部分を埋めた集積体としての “地盤” としての挙動を評価しなければならない。この “土要素” から “地盤” への解釈の必要性は、地盤技術者に求められる最も大切な観点のひとつである。

4. 次世代に求められる技術

本章では、動土質の 3 つの要素技術、原位置試験、室内土質試験および動的解析について、次世代に求められる新しい技術を具体的に列挙して示す。

4.1 原位置試験

原位置試験に求められる技術として “自動化とロボット化” と “原位置試験のためのプラットフォーム” を挙げる。さらに、地盤調査において Geotechnical approach と Geophysical approach の融合²⁴⁾と掲げられている、硬さと強さの関係についても新しい解釈の一例を紹介する。

4.1.1 自動化とロボット化

原位置試験に求められる技術革新は、地盤調査における人為的誤差の最小化が掲げられる。いわゆる、オペレータによる操作手順の違い、目視、感覚等の個人差の最小化である。ロードマップの第 6 世代に紹介した、計測の自動化・ロボット化である。核となる技術には、センサー技術とアクチュエータ技術がある。昨今の ICT の躍進によって、いずれの技術分野においても技術革新が推し進められている。原位置試験においても例外ではない。

原位置試験の実情としては、オペレータの高齢化と共に後継者不足が問題となっている。これらの問題解決のためにも、早急に着手すべきは、熟練工で無くとも高い信頼度が保持できる試験方法の採用、さらには、人為的誤差が介入し難い自動化・ロボット化した計測技術の導入である。また、本報では触れないが、原位置試験の前工程 (Pre-process) となる安全で確実な地下埋設物検知掘削機 (試掘マシーン) の開発も、我が業界に早急に求められる根本的な重要技術としてここに記しておく。

ここでは、原位置試験で得る計測値について、ICT を活用するより合理的な調査方法への変革を提案する。例えば、標準貫入試験 (SPT) の N 値や、スウェーデンサウンディング (SWS) の半回転数 N_{sw} 等、回数を記帳する調査方法が未だに主流となっている。設計に求められる地盤定数は、何回と言う数えた回数では無く、硬さと強さに代表される荷重と変形量もしくは応力とひずみの

関係である。本来の力学の原点に立ち戻った物理量を計測値とすることが望ましいことは当然である。自動化・ロボット化を推し進める上では、力学関係を直接表す物理量を新たに計測値とすることを、次世代の課題とする。

4.1.2 原位置試験のためのプラットフォーム構築

2016年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画²⁵⁾には、超スマート社会 (Society5.0²⁶⁾) の実現が掲げられている。ここでは、ICT の進化を念頭に置いたサイバー技術が紹介されている。図2は、原位置試験に当てはめたプラットフォームのイメージ図である。調査現場 (In-situ) の情報をセンサー (Sensor) 技術で取り込み、サイバー空間 (Cyber System) の情報として蓄積する。蓄積された情報を基に、ネットワークを介してクラウドを構築する。クラウドを信頼度の高いビックデータとした人工知能 (AI) 技術によって、今度はサイバー空間からアクチュエータ (Actuator) を使って調査現場にフィードバックする。これが、高品質で精度の高い原位置試験プラットフォームの構築となる。同時に、情報は調査現場からのネットワークにより転送される手続きにより、データ偽装・捏造を防止するタイムスタンプともなる。信頼度が高く、高品質な情報を搭載する原位置試験プラットフォーム上に情報を共有することで、高い精度を有した地盤調査を可能にすることが出来る。

現在、PDC コンソーシアムでは原位置試験のデータを、インターネットを介してクラウドに蓄積している。この方法の採用により、データの偽装・捏造を防止すると共に、データ品質を確認して保障するシステムをプラットフォーム化して運用している。今後は集積されたビックデータを基に、最適な補正係数の設定サポート等を、AI 技術を活用して現場にフィードバックするシステムを構築する予定である。PDC プラットフォームを原位置試験プラットフォームのプロトタイプとして、活用していくつもりである。

4.1.3 硬さと強さ

原位置試験の試験解釈で良く議論される問題に、硬さ

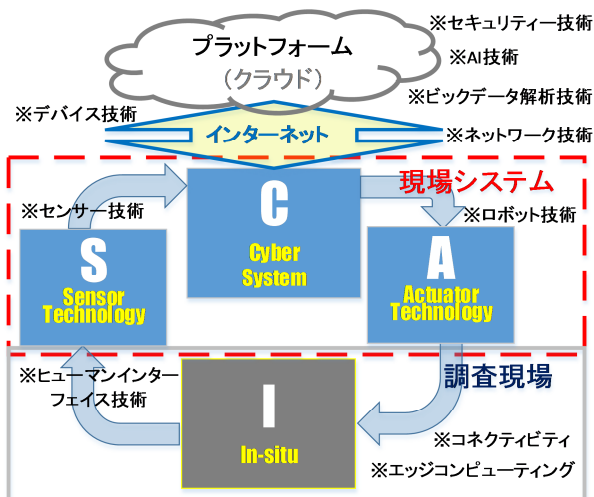


図2 原位置試験のためのプラットフォーム

と強さの違いがある。式(1)に 1982 年に今井・殿内²⁷⁾によって示された硬さと強さを関係付けた一般式を示す。

$$V_s = \alpha N^\beta \quad (1)$$

ここに、 $\alpha: 80 \sim 100$

$$\beta: 0.33 (=1/3)$$

良く用いられる関係式ではあるが、地盤の異なる特性、硬さと強さを等号で結んだ式となっていることから、批判も受ける提案式でもある。図3に、硬さ (G_0 : 初期せん断剛性 ($=\rho V_s^2$)) と強さ (τ_{max} : 破壊強度 (N 値)) の違いの概念図を示す。物理量としての G_0 と τ_{max} の両者は表す次元も意味合いも本来異なることが理解できる。

図4には、軟弱な地盤における強さ (N 値) と硬さ (V_s) 関係を示す。同図を観察する限り両者には正の相関は認められない。

式(1)において、 β は土質によらず $\beta=1/3$ とみなされている²⁷⁾。しかし、 α は、砂質土層の場合 $\alpha=80$ 、粘性土層の場合に $\alpha=100$ と土質材料毎に変化することが知られている²⁸⁾。そこで、図5には $\beta=1/3$ は固定したまま、細粒分含有率 F_c による係数 α の近似式を求めている。ここでは、有効上載圧 98kN/m^2 相当に換算した N_1 値 (換算 N 値) により、(2)式で各試料の係数 α を算出している。

$$\alpha = V_s / N_1^{1/3} \quad (2)$$

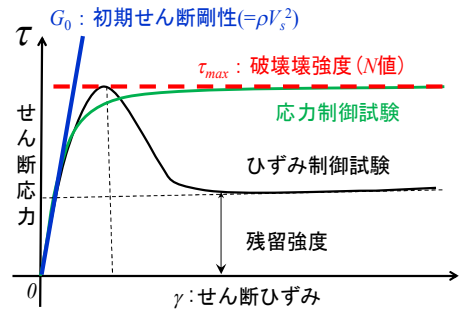


図3 硬さと強さの違い

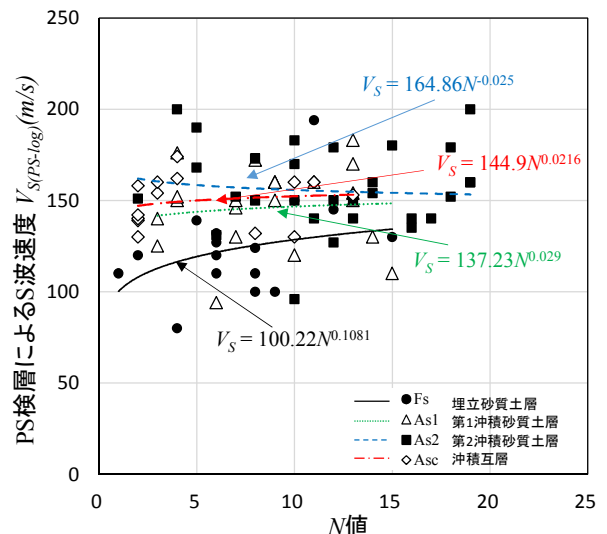


図4 強さ (N 値) と硬さ (V_s) の相関²⁹⁾

図 6 には F_C による係数 α と N_1 値で補正したせん断波速度 V_S^* ($V_S^* = \alpha N_1^{1/3}$) と PS 検層結果のせん断波速度 $V_{S(PS-log)}$ の関係を示す. 同様に, 図 7 には, $V_{S(PS-log)}$ と補正係数 α から逆算した換算 N 値 N_1^* と N_1 値の関係を示している. 両図から, 係数 α ($\alpha = 0.9F_C + 40$) を採用すれば強さ (N_1 値) と硬さ (V_S) の間には正の相関が形成できる. つまり, 土質材料を F_C による変数として識別できれば, 硬さと強さの間には正の相関が認められること²⁹⁾が判ってきている. 次世代に求められる技術として, 貴重な相関関係の発見でもある.

4.2 室内土質試験

動土質としての室内土質試験には, 土の液状化強度を求めるための繰返し非排水三軸試験 (以降, “液状化強度試験” と呼ぶ)³⁰⁾と, ひずみレベルによって変化する変形係数 (剛性) を求めるための繰返し試験 (以降 “動的変形特性試験” と呼ぶ)³¹⁾の 2 つがある. これらの試験は, 円柱状に成形した供試体をセル内で等方に圧力を加えた後に, 軸荷重によって軸荷と除荷を繰返し, その時の軸荷重と軸変位量を計測している. 本節では, 原地盤と室内土質試験の差異に着目して, ①軸荷方法, ②ひずみレベル③排水条件の 3 項目を採り挙げ, 次世代に改良を

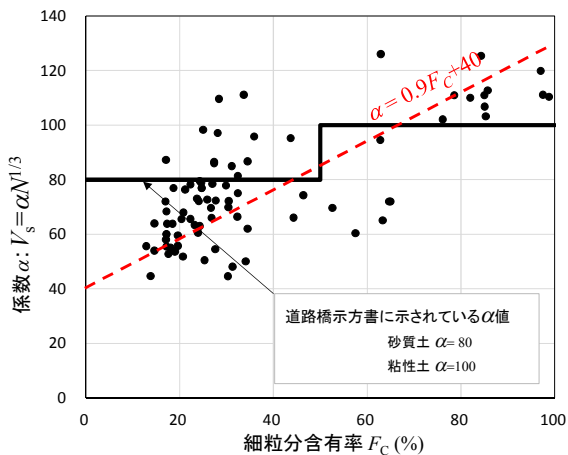


図 5 細粒含有率 F_C と係数 α の関係²⁹⁾

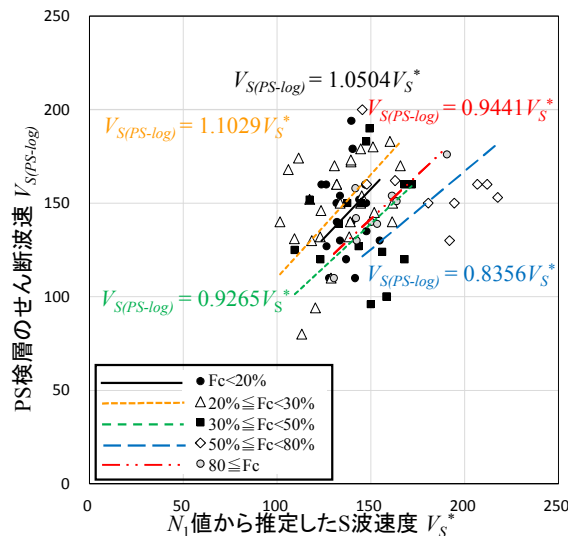


図 6 F_C の違いに着目した V_S^* と $V_{S(PS-log)}$ の相関²⁹⁾

期待する技術の一例を紹介する.

4.2.1 軸荷方法

表 1 に, 室内試験時と地震時に地盤で作用する応力状況を, モールの応力円で表している. 原地盤で地震力は, 図 8 に示すとおり, 水平面に作用するせん断応力 τ_d として作用する. その結果, 全応力での平均主応力は変化せず一定を保つ. 一方, 室内土質試験での軸荷荷による液状化強度試験では, 応力状態は表中のモールの応力円に示すとおり, 等方に掛けたセル圧 (側圧 σ_c) を中心として, 軸荷・除荷を繰返すと平均主応力が変動する. モールの応力円でみる限り, 原地盤とは明らかに異なる挙動となっている. 応力-ひずみ関係に於いても, 軸荷荷条件では, 圧縮時と伸張時に平均主応力が異なることから, 圧縮時よりも伸長時にひずみが増大する. この状況も, 地震時に作用する原地盤での応力条件と同じとは解釈し難い. 原地盤に作用する地震力に合わせた繰返し軸荷荷応力を室内土質試験で再現するためには, 供試体の繰返し軸荷荷時の平均主応力を一定に保つ必要がある. この条件を満たす軸荷荷方法に, 繰返しねじり試験があることが同表から判る. 原地盤と室内土質試験での軸荷荷応力条件を整合する上で, 次世代には繰返し軸荷荷中に平均主応力が変化しない, 単純せん断やねじりせん断試験を用いた地盤物性を求める試験方法を採用して行くことが望ましい³²⁾.

4.2.2 ひずみレベル

液状化が対象となる砂質土は, 凍結サンプリング以外のチューブ試料では, 採取時, 運搬時および供試体成形時の乱れや応力解放の影響により, 原位置の動的せん断応力比を適切に評価できないとの指摘³³⁾がある. 採取試料の微小ひずみ領域での乱れ具合を評価する目的で, 原位置での PS 検層で計測された S 波速度 $V_{S(PS-log)}$ と室内土質試験でバンダーエレメント³⁴⁾によって計測した S 波速度 $V_{S(BE)}$ を比較する方法が用いられる. 図 9 に, 高品質サンプリング³⁵⁾で採取した試料における, 原位置と室内土質試験での計測事例³⁶⁾を示す. 同図では, $V_{S(PS-log)}$ の分布幅に対し $V_{S(BE)}$ の幅は狭くなっている. また, 原位置で S

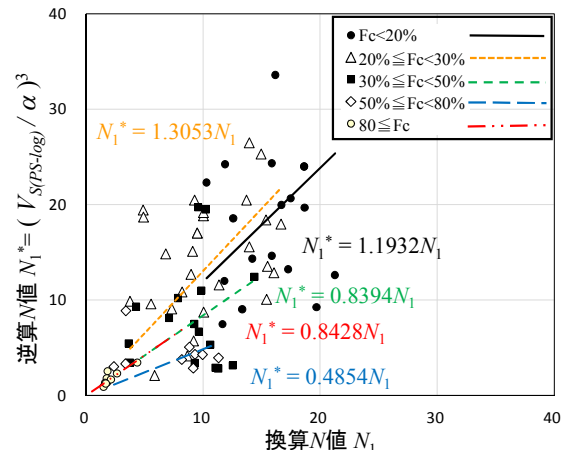


図 7 N_1 値と係数 α から逆算した N_1^* 値の相関²⁹⁾

表1 試験条件と原位置での応力作用状況の比較

条件	応力条件	モールの応力円	圧密&せん断変形条件
原地盤			異方圧密条件 (K_0条件) & 単純せん断変形 (平均主応力一定条件)
繰返し三軸試験			等方圧密条件 & 軸対象変形 (平均主応力変動条件)
繰返しねじり試験			等方および異方圧密条件 & 単純せん断変形 (平均主応力一定条件)

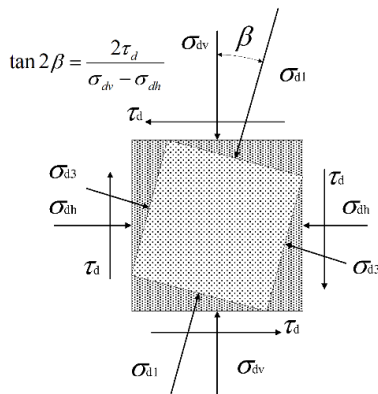


図8 作用応力状況

波速度が速い試料は室内では遅めに、原位置で遅い試料は速めに計測されている。このことは、原地盤から室内土質試験までの間に、微小ひずみ領域に於いて乱れが生じた可能性があることを示している。初期せん断剛性 G_0 は、S波速度 V_s と地盤の密度 ρ を用いて(3)式で表される。このことから、初期せん断剛性 G_0 にも影響を与えることが指摘できる。

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

図10には、採取された高品質サンプリングの試料の液状化強度比 R と N 値と細粒分含有率 F_c を用いて建築基礎構造設計指針³⁷⁾から算出した R を比較して示している。図中の色判別は、原位置と繰返しせん断試験直前でのS波速度比 ($V_{s(BE)}/V_{s(PS-log)}$) である。結果はS波速度比に関係なく両者は良く一致している。このことは、高品質サンプリングでの試料は V_s を評価する微小ひずみ領域では差異は認められても、せん断ひずみ $\gamma=5\%$ となる破壊ひずみ領域では採取時の乱れの影響は小さいことが読み取れる。液状化強度試験としては、高品質サンプリングを採用すれば、概ね正しい液状化強度が計測可能な

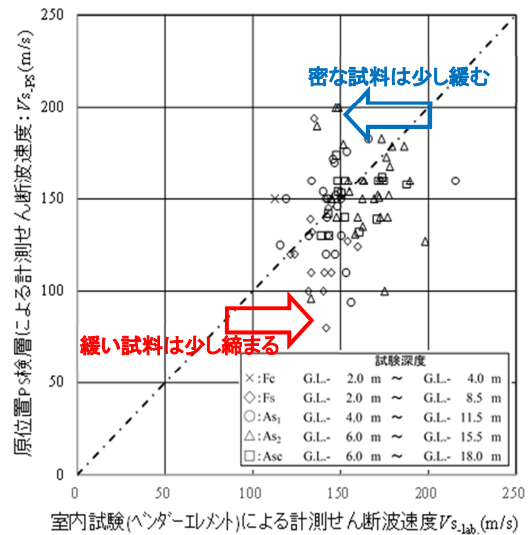


図9 PS 検層と室内ベンダー-エレメントによる S 波速度

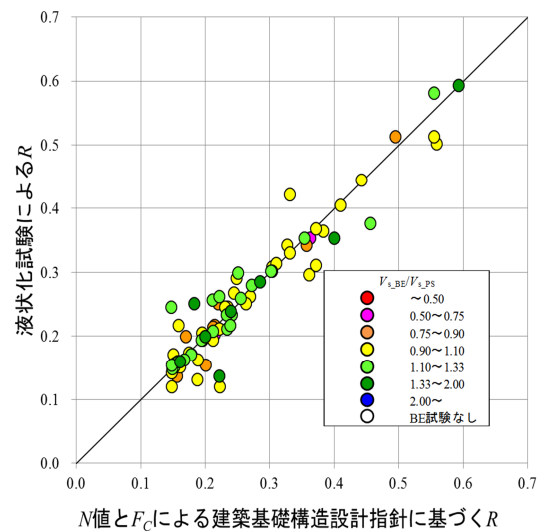


図10 液状化試験と N 値と F_c より建築基礎構造設計指針に基づいて算出した液状化強度 R

ことを示している。

一方、動的変形特性試験では、試験結果の全ひずみ領域でのせん断剛性 G を、初期せん断剛性 G_0 で正規化して G/G_0 として整理する。そして、PS 検層で測定された V_S を基に、(3)式で算出した G_{PS} を G_0 に読み替えて G/G_{PS} として設計に採用している。このことは、微小ひずみ領域での乱れを全ひずみ領域に割り当てていることになる。 G/G_{PS} を設計に採用する現行試験法の是非に関しては、次世代への動土質技術者への課題として挙げ、その解決に期待する。

4.2.3 排水条件

動的変形特性試験は1つの供試体で多くのひずみレベルでの載荷を繰返すステージ試験である。載荷ステージ内では非排水条件としているものの、ステージ終了後には、供試体内の過剰間隙水圧を消散させるため排水している。この条件では、ステージ毎の排水量により土要素の密度が徐々に増加してしまう。従って、初動から大きなせん断応力が発生する地震の場合には、室内試験とは異なる密度の挙動を示す可能性がある。現行規準により得られた試験結果を用いて直下型地震等の地盤挙動を求める時には、注意が必要である。

一方、液状化現象を起こす要因には、せん断応力の作用によって生じる体積変化（ダイレタンシー特性）がある。図 11 に、ねじりせん断試験の代表的応力経路図を示す。非排水条件にある緩詰の砂質土では、せん断応力の作用初期に負のダイレタンシー（収縮）に伴って間隙水圧が上昇し、排水状態よりも有効応力が減少する。その後、せん断応力の増大に伴い、正のダイレタンシー（膨張）が生じることにより有効応力は回復する。密詰めを試料では、せん断応力の載荷初期から正のダイレタンシー（膨張）が生じて、応力の増加と共に有効応力は増加する。負のダイレタンシーが生じるのは数パーセントと言う微小ひずみ領域のみの現象であり、大変形時には正のダイレタンシー特性の評価が、地盤挙動の予測にとって重要となることが判る。

さらに、せん断応力の増加を続けると背圧を超える負圧となり、供試体内に真空泡の発生が起きる空洞

(Cavitation) 現象が生じる。但し、室内土質試験では供試体に負荷する背圧 (Back Pressure) の大きさによっても発生圧がコントロールされる。計測される Cavitation 現象は、設定した動的試験条件に基づく現象であることを認識する必要があることも指摘しておく。

なお、地盤は不均質な堆積構造を有している場合が多く、隣接する土質材料や密度が異なる土層間ではダイレタンシー特性が異なり、発生する間隙水圧も土層間で干渉しあうこともあり、土要素とは別に地盤としての解釈が求められる。

また、地震時には、数十パーセントを越えるひずみが生じた破壊が観察されている。しかし、室内土質試験では、10パーセントを越えると供試体が樽状やネッキング変形を示し、要素試験とは解釈し難い結果となる。

地震時の被害を説明する大ひずみ領域での動的試験方法は未だ規格規準が無く、次世代に期待される技術となっている。

その他、泥土化による塑性流動現象や透水係数の異なる土層境界に形成される水膜現象³⁸⁾により大変形に至る等、室内土質試験では再現が厳しい変状現象もある。地盤挙動の予測には、土要素としての試験結果を基に、地盤としての解釈が重要になる。

4.3 動的解析

動的解析に求められる次世代技術として、第 6 世代 (2030 年代～2040 年代半ば) のロードマップに記した地盤のモデル化を挙げる。ICT の進化に伴い、ビッグデータ化する地盤情報を活用し、構造物の種類や材料に依存しない統一した 3 次元地盤モデルの作成技術が望まれる。このためには、“4.1.2 原位置試験のためのプラットフォーム”にも示した様に、高密度化された信頼度の高い地盤情報を共有する統一的な国土データベースの構築も必要となる。

解析ソルバー自体に求められる次世代技術には、第 5 世代 (2020 年代) に示した地盤材料の基本とも言える土粒子をモデル化できる粒状体と同じ自由度を持つ新しい構成則の開発^{39), 40), 41)}である。有限要素法等では、土塊を連続体としてモデル化するが故に、構成則上でのパラメータが複雑化している。液状化現象をトレースする有限要素法^{11), 12)}では 1 つの土要素のパラメータに 20~40 ものパラメータが必要になっている。土粒子としての挙動を本来の粒子運動レベルで考えれば、多くのパラメータは必要なくなる。より、シンプルに地盤としての挙動を再現するためにも、動的解析には新しい力学モデル (塑性論で言う“構成則”) の開発が不可欠な技術となる。さらに、粒状体とは異なる、岩盤や人工材料となる金属やコンクリート等の固結材料も相互作用も表現可能な統一モデル、また、弾、粘、塑性、熱作用に関しても、共通のフォーマットでの入力条件 (input) と計算結果 (output) を収納して活用できる地盤情報プラットフォームの構築

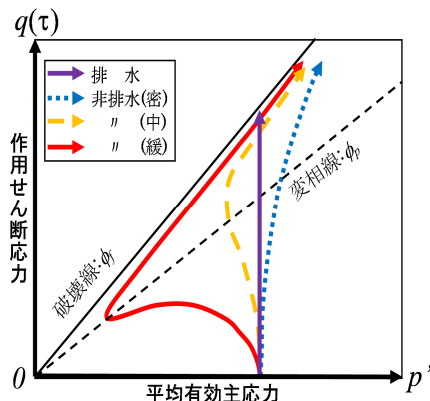


図 11 ねじりせん断試験の応力経路 (ストレスパス)

も望まれる。地盤解析分野では、既に次世代を担う若手研究者・技術者が多く活躍しロードマップも示されているのでそちらを参照³⁾されたい。

5. おわりに

1979年に設立され工学的側面から地震防災・減災を担ってきた動土質の技術を基に、次世代に求められる技術とそのロードマップを示した。本報告に“まとめ”はない。個人的な動土質に求められる技術革新について次世代技術を紹介したものと位置付けている。次世代に求められる技術とそのロードマップを示すことで、本報が動土質に興味を抱く若手技術者に、次に今何をすべきかのヒントにでもなれば幸いである。動土質に求められてきた“これまで”の技術を振り返ると、まだまだ克服しなければならぬ技術が山積されていることに気付く。逆に言えば、“これから”もまだまだ動土質の分野では地盤技術者が活躍しなければならない領域が多く残されていることを意味している。地震に対するレジリエントな防災・減災⁴²⁾を目指す耐震設計に於いて、“未だ嘗て在らず”と言われる災害が生じる度に、新たな技術革新が繰返し求められている。地震と言う非日常の自然現象を、予め想定して必要にしてかつ十分な設計を行う技術が動土質の醍醐味でもある。

“これから”の動土質技術者も我々同様に、日々業務に追われる環境下にあるのかもしれない。しかし、日常に業務で遭遇する技術課題に対して、机上の空論と成らぬ様に現場を良く観察し熟知した上で、自然現象の“何故?”、“如何して?”と言う探究心を忘れること無く防災・減災対応に接して欲しい。そのためには、日々自分の技術を研鑽し技術革新に挑んで貰いたい。

故大矢暁社長の年報No.16 (1994年(23年前))の巻頭言⁴³⁾には次の様な言葉が書かれている。“イノベーションを生み出すには、個人が自分の能力の限界に挑戦するという爆発的な巨大なエネルギーを必要とします。研究開発費も必要でありましょうが、もっとも必要なのは、狂ったように、とりつかれたように、イノベーションに立ち向かう爆発的な若さと持続力であろうかと思えます。”今思えばこの言葉が、これまで私の背中を押してくれていた様な気がする。

欧米が自国の利益に執着し、粗悪製品で荒稼ぎしていた時代、日本の先人技術者はMade in Japanを築き上げ世界を凌駕した。その根源は、日本人の真面目さと謙虚さに裏付けられた柔軟な物創りの姿勢とイノベーションに立ち向かう爆発的な若さと持続力であったと言われている。我が国を始め、地球規模で地震活動が活発期に入ったと言われる今こそ、多様な価値観を受け止めることができる日本的な技術革新を動土質にも再構築することを期待している。本報が、次世代動土質技術者にとって、次の

一步を踏み出す“勇氣”と“志”の切っ掛け(trigger)になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 内閣府. 大規模地震対策特別措置法. 1978, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/houritsu/taishin/contents.htm>, (参照 2017-02-13).
- 2) 応用地質株式会社 社史編纂室. 応用地質 50 年史: OYO 技術年表. 地震防災技術. 2008, p. 214-219.
- 3) (公社)地盤工学会. 「アカデミックロードマップと発展史・人物史」の委員会. https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1818/, (参照 2017-04-04).
- 4) 銭高組 SIGNAS 利用化グループ. 総合地盤解析システム"SIGNAS"の機能と問題点. 銭高組技報. 通号 7, 1983, p.224-227.
- 5) VAX11/780. <http://www.old-computers.com/history/detail.asp?n=20&t=3>, (参照 2017-04-26).
- 6) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 7) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. Seed, H. B., FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 8) 伊藤義行, 菅原紀明. 貫入量測定器を持つ高出力水圧式ピストンサンプラー. 第 30 回土質工学研究発表会. 1995, p. 265-266.
- 9) 伊藤義行, 米森博喜. 遊星歯車を使用した大口径サンプラー. 第 31 回地盤工学研究発表会. 1996, p. 409-410.
- 10) Sawada, S. Takeshima, Y. Ozutsumi, O. Sugiyama, W. Iai, S., Analysis of Liquefaction-Induced Deformation for Damaged Dikes in the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, *Proceeding of 10th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Philadelphia, 2001.
- 11) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T., Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, 1992, Vol.32, No.2, p. 1-15.
- 12) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., Yamashita, S., A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 1999, Vol.49, No.5, Oct., p. 661-680.
- 13) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾,

- 増田民夫. 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集. No. 638, III-49, 1999, p. 71-89.
- 14) 東畑郁生. 液状化した地盤の側方流動現象と解析. 土と基礎. 1999, Vol. 47, No. 5, p. 13-16.
- 15) Sawada, S., Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone, *Proceeding of 17th International Conference on Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 2009, p. 1064-1067.
- 16) (社) 土木学会, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会. 土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説. 2000.
- 17) 松島亘志. 粒子法を用いた広域長期間地形変動解析. 第50回地盤工学研究発表会. 2015, 2p, CD-ROM.
- 18) Holzapfel, G. A., *Nonlinear Solid Mechanics*, John Wiley & Sons, 2000.
- 19) 国土交通省. 国土交通省における CIM (Construction Information Modeling) の取り組み. http://www.jaic.or.jp/movie/jseminar/pdf/movie20130906_sirato.pdf, (参照 2017-02-01).
- 20) 国土交通省. i-Construction. 技術調査. http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html, (参照 2017-02-01).
- 21) 星谷勝, 石井清. 構造物の信頼性設計法. 鹿島出版. 1986.
- 22) 岩波書店. 数学辞典 (第4版), 484 (XX-9) “乱数とモンテカルロ法”. 2007, p. 1589-1591.
- 23) 澤田俊一. 4.性能設計に向けたサウンディングの役割. 性能設計に向けた原位置試験の役割に関する研究委員会報告書. 2009, p. 19-32.
- 24) 陶山国男. 巻頭言「再び「専門家」について」. 応用地質年報. 1990, No. 12, p1-2.
- 25) 内閣府. 科学技術政策. 第5期科学技術基本計画の概要. <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5gaiyo.pdf>, (参照 2017-02-01).
- 26) 紅林徹也. Society5.0の実現に向けたプラットフォームのあり方. 図2超スマート社会サービスプラットフォームの技術とシステムのイメージ. オペレーションズ・リサーチ, 2016, p. 568-574.
- 27) Imai, T., Tonouchi, K., Correlation of N-value with S-wave Velocity and Shear Modulus, *Proceedings of the 2nd ESPT*, 1982.
- 28) (社) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説. V 耐震設計編, 2012, p.33.
- 29) Sawada, S., Hamada, Y., Ishii, I., Hiradate, R., Nakai, S., Sekiguchi, T., Towhata, I., Liquefaction-induced damage to houses and site characterization in Urayasu City during the 2011 Tohoku Earthquake, Japan, *Proceeding of 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Vancouver, 2017.
- 30) (公社) 地盤工学会. 第6章土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験. 地盤材料試験の方法と解説. 2009, p. 730-749.
- 31) (公社) 地盤工学会. 第7章 変形特性を求めるための繰返し試験. 地盤材料試験の方法と解説. 2009, p. 750-789.
- 32) Sawada, S., Takeshima, Y., Mikami, T., Effect of K_0 on Pre/Post-Liquefaction Deformation Characteristics in Saturated Sand, *Proceeding of 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Lyon, 2002, p. 511-517.
- 33) (社) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説. V 耐震設計編, 2002, p.361.
- 34) (公社) 地盤工学会. ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法 (JGS 0544:2011), 新規制定地盤工学会基準・同解説 (2013年度版). 2014, p. 1-34.
- 35) 株式会社アテック吉村. GS サンプルング. http://www.atec-y.co.jp/g_sampling/index.html, (参照 2017-02-08).
- 36) 石井一郎, 平舘亮一, 東畑郁生, 中井正一, 関口徹, 澤田俊一, 濱田義弘. 2011年東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた浦安市の地盤特性. 地盤工学ジャーナル. 2017, Vol. 12, No. 1, p. 91-107.
- 37) (社) 日本建築学会. 建築基礎構造設計指針. 2001, p. 61-65.
- 38) 國生剛治, 故島哲朗. 液状化地盤の流動メカニズムに与える水膜現象 (WFE) の影響に関する模型実験. 地盤工学会. 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集, 1998, p. 313-316.
- 39) 前田健一, 地盤工学における粒子ベースの数値解析の可能性—地盤を科学し工学するために—, 数式のない土木の数値解析セミナー第4回. 土木学会誌, 2017, Vol.102, No.4, p. 44-45.
- 40) 前田健一. 粒子を要素とする数値解析法への期待と課題, 地盤工学会誌. 2014, Vol. 62, No. 11&12 合併号, p. 6-9.
- 41) 早川尚男. 散逸粒子系の力学. 岩波書店. 2003.
- 42) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), レジリエントな防災・減災機能の強化 (リアルタイムな災害情報の共有と利活用) 研究開発計画. 2016年10月20日, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/8_bousai.pdf, (参照 2017-04-12).
- 43) 大矢暁. 巻頭言「斬新で自由なアイデアで技術開発を」. 応用地質年報. 1994, No.16, p.1-3.