

## 第7章

### 結論

本論文は、砂質土層の液状化現象に影響を及ぼす要因について、主に堆積年代の違いと微小変形特性に着目して行った実験により、その留意点をまとめたものである。

以下に本研究によって得られた主な知見をまとめる。

#### 年代効果が微小変形特性に及ぼす影響

凍結試料と、それらと同程度の密度になるように調節した再構成試料の微小変形特性を比較した結果、凍結試料の方が大きな値を示し、その差は沖積試料よりも洪積試料の方が明らかに大きくなる傾向を確認した。また、洪積層による一軸圧縮試験結果より、一軸圧縮強度の高い試料の方が、凍結試料と再構成試料の微小変形特性の差は大きくなった。これは、微小変形特性は密度のみの関数でなく、かつ年代効果の影響も反映している証拠である。また、洪積試料（江戸川砂C試料）では微小変形特性の応力状態依存性が再構成試料より凍結試料の方が小さく、この傾向は特に動的せん断剛性率において明確に現れた。洪積試料では、原位置有効上載圧より低い応力状態でも年代効果に起因する高い剛性が保持されていると考えられる。

また、再構成試料に繰返しせん断履歴を与えたところ、凍結試料と同等の微小変形特性を得ることができた。繰返しせん断履歴による供試体の体積変化は小さなものであり、微小変形特性増加の原因は、土粒子構造の安定化（応力履歴による年代効果）によるものと考えられる。

#### 年代効果が液状化挙動に及ぼす影響

液状化前もしくは液状化中の微小変形特性について、堆積年代の異なる凍結試料の実験結果を比較した。沖積試料では、液状化前の等方圧密時と液状化過程において計測した同じ応力状態における微小変形特性の値は、同等もしくは若干低い値であった。一方、洪積試料でも液状化中の微小変形特性の方が圧密中よりも小さな値となったが、特に低い応力レベルではその差は大きくなった。液状化により試料の有する年代効果が失われていくものと考えると、最初から年代効果の大きい洪積層では、圧密中と液状化中の微小変形特性の差は大きくなるものと推

定される。凍結試料と再構成試料の微小変形特性の比較や一軸圧縮試験により、洪積試料は比較的強い年代効果を有していることを示したが、等方圧密時と液状化中の微小変形特性の比較からも、同様の傾向が確認できる。

また、液状化試験初期段階における有効応力の低下に伴う動的せん断剛性率  $G_d$  の低下傾向は、沖積層では比較的急激に、洪積試料では緩やかに生じた。これは、沖積層には年代効果として土粒子構造の安定化が、洪積層には更にセメンテーション効果が発揮されていたものと考えられるが、液状化により前者については比較的急激に、後者については緩やかに、その効果が失われていくものと考えられる。これは、洪積層は液状化に対する抵抗性が高いといわれる理由の一つであると考えられる。

繰返しせん断履歴を与えられ、凍結試料と同程度の微小変形特性を有する沖積再構成試料を用いた場合には、凍結試料と同程度の液状化強度を得ることができ、液状化中の動的せん断剛性率  $G_d$  の変化傾向も対応した。一方、洪積再構成試料でも凍結試料と同程度の液状化強度と  $G_d$  が得られることを確認したが、液状化中の  $G_d$  の変化については凍結試料と異なる傾向を示した。この結果は、セメンテーション効果の小さい地層（主に沖積層）では、応力履歴を与えることにより再構成試料でも凍結試料の挙動を再現できることを示唆している。

#### 液状化限界ひずみ $\gamma_L^*$

新たに構築した中型中空ねじり試験装置を用いて、豊浦砂と原位置採取試料の大ひずみ液状化試験を行い、従来の試験装置では不可能であった数十～100 %の両せん断ひずみ振幅までの計測を適切に実施することができた。

なお、せん断ひずみ両振幅が 100 %に至るような中空ねじり試験の場合、メンブレン張力の補正は非常に重要となる。しかし、メンブレンの弾性係数を用いた従来の理論値による補正では、実際の挙動を表現できないことから、本研究では、せん断抵抗のない水試料によるメンブレン張力の実測値を用いて、メンブレン張力の補正を実施した。

本研究で実施した一定応力振幅の液状化試験では、試料の違いによらず最終的にせん断ひずみ両振幅は 100 %に達し、途中でひずみが収束することはなかった。しかし、液状化により供試体が一様に変形する領域は、試料の密度や種類により大きく異なった。本研究では液状化中の試料のダイレイタンスー特性に着目し、軸変位固定条件で実施した液状化試験中に軸力が急激に低下した時点を供試体が局所化に至った時点と仮定して、そのときのせん断ひずみ両振幅を液状化限界ひずみ  $\gamma_L^*$  と定義した。この定義による液状化限界ひずみは、繰返し载荷により局所的な変形を引き起こす限界のせん断ひずみレベルと位置づけられ、地震中に液状化した地盤が一様に変形する領域で生じ得るせん断ひずみの最大値に相当すると考えることができる。

空中落下法によって作成した豊浦砂供試体の場合、液状化限界ひずみ  $\gamma_L^*$  は相対密度と非常に良い相関が得られ、過去の地震で被災した地域における側方流動の測量値や、室内試験結果を

もとに外挿された経験式とも対応した。また、 $\gamma^*$ は応力振幅によらず、供試体の密度に依存することを明らかにした。これを踏まえ、 $\gamma^*$ に達するまでの繰返し载荷回数と応力比振幅の関係として、従来の液状化強度曲線と同様の整理を行った。この液状化限界ひずみ曲線を用いることで、ある設計地震動に対して液状化した地盤が一様に変形する限界ひずみに達するか否かを判定することができると考えられる。

### 年代効果と大ひずみ液状化特性の関係

凍結試料と繰返しせん断履歴を受けた再構成試料、および繰返しせん断履歴のない再構成試料の相対密度は同レベルの値であったが、各試料の液状化限界ひずみ $\gamma^*$ はそれぞれ異なる値を示した。相対密度の違いだけでは年代効果の影響を説明できないことを前述したが、 $\gamma^*$ についても同様であった。一方、動的せん断剛性率 $G_d$ と $\gamma^*$ の関係は、全体的に相対密度よりも相関が良かった。しかし、洪積試料の $\gamma^*$ について、凍結試料と繰返しせん断履歴を受けた再構成試料を比較すると、両者の $G_d$ の値は同レベルであったが、再構成試料の方が二～三倍程度大きな $\gamma^*$ の値を示した。これは、凍結試料では土粒子構造の安定とセメンテーションの効果が、再構成試料については繰返しせん断履歴による土粒子構造の安定化が、それぞれ液状化に対する抵抗性を発揮していると考えられるが、同じ $G_d$ が得られたとしてもセメンテーションの効果を有する試料の方が、一様に変形する領域が小さいと考えられる。また、これまで得られた動的せん断剛性率と液状化強度との相関については、液状化強度を規定する変形レベルが比較的小さいため、凍結試料と再構成試料の微視的構造の違いが反映されなかったものと考えられる。

また、液状化限界ひずみに達したときの*cyclic mobility*における応力-ひずみ関係からせん断剛性率を求め、初期動的せん断剛性率の値と比較することで、液状化による剛性低下率を求めた。その結果、再構成試料における応力履歴の有無については有意な傾向は認められなかったが、凍結試料と再構成試料との比較では、再構成試料の方が凍結試料よりも剛性の低下は大きくなった。また、液状化による剛性の低下率は、液状化限界ひずみと非常に良い関係がある。これらの知見は、液状化による大変形挙動を予測する上でセメンテーションの考慮は非常に重要であることを示唆している。

今後、通常～大ひずみ液状化強度特性と年代効果の関係については、どのように原地盤の年代効果を定量的に把握するかが重要となろう。特に洪積層については、セメンテーションの影響を定量的に証明する簡便な手段が構築されていないことから、その力学的挙動は過小評価されることが多い。液状化特性を求めるために随時凍結サンプリングを実施することは現実的ではないため、従来の地盤工学の知見に加え、理化学的なアプローチが必要となる。具体的には化石分析などによる堆積年代の推定が有用であるが、風化作用の履歴を有していれば堆積年代だけでは一概に判断できない場合もある。したがって、堆積前後の環境と微視的構造の把握も必要となろう。

## 凍結採取試料の取り扱い上の留意点

異なる拘束圧において凍結試料を融解させ、微小変形特性を比較した結果、原位置有効上載圧相当の高い拘束圧（本研究では 98 kPa）で融解させた方が、低い拘束圧（30 kPa）の場合よりも大きな微小変形特性の値を示した。この傾向は、沖積試料や再構成試料において顕著であり、洪積試料では融解拘束圧の違いによる微小変形特性の変化は小さかった。また、融解拘束圧の低下により、液状化強度は沖積試料では約 14 %、洪積試料では約 7 %低下した。低い融解拘束圧では、微視的には土粒子構造が急激に開放されるため、セメンテーション効果を持たない沖積試料や再構成試料では土粒子構造に乱れが生じ、微小変形特性と液状化強度が低下した可能性が考えられる。なお、高い拘束圧で融解させた凍結試料の動的せん断剛性率  $G_d$  は、原位置  $PS$  検層による値と概ね一致した。

この結果と凍結・融解過程における供試体の体積変化特性の分析結果より、凍結採取の取り扱いに関する留意点を以下のように取りまとめた。

- ・ 凍結試料採取に伴う地盤凍結時には、間隙水の体積膨張に伴う地盤の乱れを防ぐためにゆっくりと凍結させる配慮が一般的になされているが、地盤内温度が 4℃以下で膨張する領域では、特に慎重に凍結速度を制御する必要がある。
- ・ 凍結試料（特に沖積試料）の乱れは融解拘束圧の低下によって生じ、かつ融解に伴う体積変化は常温では非常に早く生じる。したがって、試料採取時から室内試験において所定の拘束圧をかけるまでの間、供試体周辺温度には常に配慮すべきであり、数分でも常温下に曝すことは避けるべきである。
- ・ 上記と同様の理由により、凍結試料（特に沖積試料）の融解時の拘束圧は、原位置凍結時の応力状態と同じレベルとするべきである。

# 謝辞

本論文は、大学院博士課程に進学した 2004 年 10 月から約 3 年間続けてきた実験結果をまとめたものです。2006 年 4 月からは生産技術研究所の助手として採用していただき、生活上の不安を感じることなく研究を続けられたことに非常に感謝しております。

本論文の主なテーマは、第四紀層を対象とした液状化特性とその年代効果であります。これは大学に入学する以前から、地質調査会社でボーリングの現場監督をしながら疑問に思っていたことでもありました。自然地盤にはそれぞれ固有の歴史があり、地盤の有する履歴はその微視的構造に反映され、強度特性に大きく影響を与えるはずですが、しかし、実務ではその違いはほとんど考慮されていません。近年では、地盤についても詳細な調査に基づく性能設計が行われているといわれていますが、もっと一般的な業務においても年代効果を考慮した設計が行えないか、というのが本研究を始めた単純な理由でした。ここにまとめた研究成果を実務に適應するにはまだ早いかもしれません。しかし、実務でも容易に計測できる微小変形特性と年代効果、そして液状化特性の相互関係を定性的であれまとめることができたことは、進歩に値すると確信しております。

本研究を進めて行くにあたり、多くの先生方に御世話になりました。主査の古関潤一教授には、研究の御指導をいただいただけでなく、公私に渡って親身に相談に乗っていただきました。古関先生の研究や実務問題に対する考察やアドバイスは非常に的確であるため、先生の部屋から聞こえてくる他の学生やお客様との打ち合わせの様子をそれとなく伺うことは、私にとって大切な勉強時間でした。古関先生との思い出は、僅かなスペースでは書き尽くせませんが、先生は研究者としても、また人間的にも、私の大きな目標となっています。

副査を引き受けていただきました龍岡文夫教授、東畑郁生教授、小長井一男教授、桑野玲子准教授にも、お忙しい中貴重な時間を割いて御指導いただきました。龍岡先生には、年代効果と粘性効果の定義の難しさや、動的計測の解釈等について非常に重要な御意見をいただきました。また龍岡先生には、修士論文の際にも主査として御指導いただきました。私が社会人として働いていた時には、まさか私が龍岡先生から直接御指導していただけるなんて考えも及びませんでした。実際に先生とお近づきになり、また今後も一緒に研究をさせていただけることに大きな幸せを感じております。東畑先生には、大ひずみ液状化試験の解釈について有意義な御助言をいただきました。東畑先生には現地調査に同行させていただいたり、i-YGEC の幹事を先生の御指導の下でやらせていただいたりして、研究内容に限らず非常に多くのことを学ば

せていただきました。小長井先生には、室内試験結果を実際問題に適応するにあたり、合理的なビジョンを持つよう御指導いただきました。また、小長井先生には国内外の地震被害調査に際し、重要な情報とアドバイスをいただきました。先生の「国境なき技師団」の活動に私も参加させていただく機会があれば非常に幸いです。桑野先生には、微小変形特性と年代効果の解釈についての矛盾点を御指摘いただきました。また、先生からは、「博士の研究は、論文を完成させることよりも研究を通じて今後何をすべきかを見つけることが重要」という御言葉をいただきました。私も何か見つけられたらと思っております。先生方の御指導をいただき、あらためて深く感謝いたします。

本論文で示した実験結果は、すべて古関研究室の佐藤剛司様の作成した試験機により得られたものであります。「佐藤さんがいてくれて本当に良かった」と思っているのは私だけではないでしょう。佐藤さんに頼れば頼るほど、「このままではいけない」と思っておりましたが、今後は生研の実験を引き継げるよう精進したいと思います。本当にありがとうございました。

古関研究室の鳥光道枝様には、研究室内の煩雑な事務手続きをすべてやっていただきましたが、私が助手になってからもすべてお任せしてしまいました。ご迷惑を謝罪するとともに、深く感謝いたします。堤千花様には、私の研究だけでなく、日常的な仕事まで助けていただきました。ぜひ恩返しできる機会があればと思っています。また、社会基盤事務室の皆様にも、様々な書類・手続き等で大変御世話になりました。深く感謝いたします。

株式会社竹中工務店の本多剛様（元本郷土質研究室・助手）には、修士の時からずっと試験機のプログラムについて多大な御協力をいただきました。本郷の内村太郎准教授には、弾性波速度の計測について貴重な御助言をいただきました。また、本郷技官の周郷啓一様、山田卓助教授には、実験装置や道具、現場調査について大変御世話になりました。神戸高専の並河努准教授には、液状化中の *LDT* 反力によるメンブレンの変形を *FEM* で解くというマニアックな解析をお願いしてしまいました。基礎地盤コンサルタンツ株式会社の金子進様、湯川浩則様には、中空凍結試料の整形という難しい仕事をやっていただきました。株式会社東京ソイルリサーチの飯島正敏様には、凍結採取試料に関する重要なデータを提供していただきました。皆様に深く感謝いたします。

ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État) の Herve Di Benedetto 教授には、フランス訪問の際、公私にわたり面倒を見ていただきました。また、目黒公郎教授には、私が将来の職業について悩んでいた際、励ましのお言葉とともに、JICA 関係の方々との面会の機会を与えていただきました。深く感謝いたします。

本研究は、多くの学生の皆さんの協力も得て行われました。古関研究室博士課程の中島君には、さりげなく重要な助言をもらうことができました。同博士課程の Nalin さん、Ruta さんとは、微小変形特性という共通のテーマを持っていたことから、お互いの結果を共有させてもらいました。彼らを含め、古関研究室の学生の皆さんとは、セミナーを通じて貴重な意見を聞くことができました。また、Tehran University の Mohammad さんには、精力的に大ひずみ中空ね

じり試験を手伝っていただきました。ENTPE の Alan さんとは、パリのホテルで「砂の粘性とは何か」ということを一晩話し合っ、結局結論は出ませんでした。これもすばらしい思い出です。皆さん本当にありがとうございました。

私は 1994 年に高専を卒業後、基礎地盤コンサルタンツ株式会社で 8 年間勤務しておりましたが、その内 3 年間は社会人学生として夜間大学に通っていました。したがって、多くの方面の皆様にご心配とご迷惑をかけ、そして支えていただきました。基礎地盤コンサルタンツ株式会社の細堀建司様をはじめとする中部支社の皆様には、地盤工学の基本と現場を御指導いただいただけでなく、私が夜間大学で勉学に集中できるよう、業務的な配慮をしていただきました。また、地盤工学の面白さと理論を名古屋工業大学の中井照夫教授、松岡元教授、前田健一准教授、檜尾正也助教に御指導いただきました。また、幼い頃から御世話になっている株式会社開発工営社取締役の能登繁幸様（元独立行政法人北海道開発土木研究所・理事）には、公私共に気を掛けていただき、精神的に支えていただきました。皆様に深く感謝いたします。

私が東京大学に来てから既に 5 年と半年が経ちました。その間、大きな自然災害がいくつか発生しました。私が少なからず関わったものは、2004 年新潟県中越地震、2005 年福岡県西方沖地震、2005 年パキスタン地震、2006 年ジャワ島中部地震、2007 年能登半島地震、そして 2007 年新潟県中越沖地震です。その他、2004 年にはスマトラ沖地震、2005 年には USA でハリケーン・カトリーナによる甚大な被害が発生しております。日本の被災例を見ているだけでは分りませんが、全体的な印象として、我が国の災害に対する備えは、ハード・ソフト共に非常に進んでいると感じます。その一方、災害に対する報道と資金の動き、犠牲者の数とその扱いについては、先進国と開発途上国とでは雲泥の差があることも事実です。私はこの差を埋める手段は、国力の差に関わらず、現在の知見で防げるはずの自然災害により、人命を失わせないことであると確信しています。また、それこそが、その他の南北問題を解決する糸口になるだろうと考えます。自然災害と直接かかわりのある地盤工学を専攻する人間として、これまで多くの人に支えていただいた分、私も多くの人に貢献できるようになりたいと願っております。

最後に、これまで影ながら支えていただきました両親と祖母、そして婚約者の育世に感謝いたします。これからも末永くよろしく願いいたします。

2007 年 9 月 18 日

清田 隆