

4. 地盤挙動 圧密沈下①

片 桐 雅 明

日建設計シビル

1. はじめに

本セッションでは、No.375～383 までの 9 編が報告された。鉄道盛土、道路盛土、泥炭地盤、埋立地盤が対象であり、遠心模型実験を用いた研究が 4 編、小型模型実験が 1 編、試験施工を含む現場の動態観測結果を評価したものが 3 編、圧密沈下している地盤に対して行った地盤調査結果を示したものが 1 編であった。これら報告に対して、ここでは、原位置の地盤調査を介して埋立地盤の特性を検討した研究を紹介する。さらに、対策工法の有効性を評価するために行われた遠心模型実験を紹介する。これらを踏まえて、模型実験の結果を利用する際の留意事項について私見を述べる。

2. 埋立地の地盤調査事例

海面埋立地は、海底面上に土砂が積み重なり上載荷重が増加するため、粘性土の海底地盤では、圧密沈下が生じる。投入される地盤材料が粘性土の場合には、堆積した粘性土はその上に積み重なる粘性土の重量が上載荷重となり、その粘性土の透水係数が低い場合には、応力増分に対する変形は瞬時に生じず、過剰間隙水圧が蓄積されていく。そのため、計画予定の地盤高さまで粘性土を投入した後に発生する沈下量は大きく、長期に及ぶ。

本セッションで発表された論文は、鉛直排水工法を施した浚渫粘土の堆積層に、地下水位低下工法を併用して減容化した地盤の特性を、旧海底地盤の沖積粘土層まで連続サンプリングして評価したものである。地盤調査の時期は、浚渫土砂が投入されてから放置期間を経た後、2.6m 程度の盛土が盛り立てられた状態であった。目的は、堆積している浚渫粘土層の圧密降伏応力が、有効土被り圧に達していないこと、すなわち未圧密状態／圧密途中にあることを示すことと思われる。このことから、有効上載圧と圧密降伏応力の差を過剰間隙水圧とし、それが消散することにより圧密沈下が生じることから、今後の沈下は、過剰水圧の分布と圧縮指数等、これまでの地盤工学の知見から、ある程度の精度で予測できるのである。

軟弱粘土層からなる埋立地の沈下予測は、地盤モデルの設定と上載圧から求められる。問題は、圧密定数と荷重が載る地盤の性状をどのように設定するかである。その方法として地盤調査があり、未圧密地盤であったとしても、圧密試験を行い、未圧密量を把握することによって、その分の沈下を算定することを示したものである。ただし、浚渫粘土を投入した際に生じる分級作用によっ

て、砂と細粒分が分離され、不均質な地盤となることに留意する必要がある。

3. 模型実験による検討事例

軟弱地盤に盛土する際、地盤は沈下するだけでなく、場合によっては崩壊する。その対策として様々な工夫が施されるが、それらをどのように評価するかが大きな課題となる。その手法の一つが模型実験手法で、実物大実験、小型実験、さらには小型模型を遠心場において応力条件を実際の地盤と同じとする遠心模型実験手法がある。

模型実験で対策工を評価する場合には、対象とする地盤に対して、対策工を施したものと施さないものを比較することが直接的である。これを是とするためには、対策を施す地盤と対策しない地盤とが同じ特性であること、すなわち、基本となる模型地盤の作製方法とそれと同じだと評価する方法が重要となる。

今回報告された論文は、軟弱粘土地盤上の既設盛土を拡張する際の対策工法を評価することが目的であった。そのため、部分的に盛土されて安定している地盤を作製し、盛土幅を広げる際に地盤が変形して場合によっては破壊するような地盤を構築することが目的であった。しかも、遠心応力場においてそれらを再現しようというものであった。そのため、いくつかの工夫を加え、準備時間の短縮を図っている。

模型実験は、生じた現象を視覚で確認できることが最大の利点であり、いろいろな対策によって、変形や崩壊を抑えられることを直接比較できる点が採用される点であろう。そのためには、対策部分だけが異なることが要求される。それを保証するための評価方法が必要となる（準備方法が同じでも地盤は同じとは限らない）。

工夫を加えて作製した模型地盤は、あくまでも模型地盤であり、実地盤とは異なる。模型地盤での成果を実際に活かすにはこの違いを把握し、模型実験の成果に何らかの補正を加えるなどの工夫が必要と考える。

4. まとめ

軟弱粘土地盤の沈下や変形問題では、構成している地盤のばらつきや偏った応力や施工速度などの違いが影響する。これを解決するためには、まず地盤特性（その時の状態と地盤定数）をしっかりと把握することが重要で、そのための手段や評価方法の検討が重要になる。また、模型実験等で求めた結果を実地盤に反映させる際にも、実地盤の特性を踏まえた検討が必要と思われる。

4. 地盤挙動 圧密沈下②

森 脇 武 夫

呉工業高等専門学校 環境都市工学分野

1. はじめに

本報告では、地盤挙動①（圧密沈下②）のセッションについて総括する。本セッションでは、9編の報告があり、いずれも真空圧密工法に関連のあるものであった。

2. 研究及び技術動向

真空圧密工法においてはバーチカルドレーンを打設するため、打設地盤の圧密は三次元的に生じる。しかし、通常の解析では煩雑さなどから、二次元平面ひずみ条件で解析されることが多い。二次元平面ひずみ条件において、バーチカルドレーンの三次元圧密を考慮する方法としてはマクロエレメント法があり、従来の方法ではドレーンの透水性を無限大として取り扱っていたが、ドレーンの透水性を考慮できる新しいマクロエレメント法が開発され、この手法を用いて対象地盤内にある中間砂層の影響が検討された。その結果、中間砂層が存在すると負圧の作用が地盤改良対象域外にも広がり、広範囲に沈下が起こることなどが実測値とともに報告された。

真空圧密工法においては、バーチカルドレーンとして使用されるプラスチックボードドレーン（PBD）の透水性が圧密促進効果と直結している。このPBDは圧密沈下の進行とともに湾曲または折れ曲がるため、圧密中のPBDの変形と透水性の関係については十分な知見が必要である。これに関して、室内模型実験やFEM解析が行われ、PBDは折れたり、振れたりすることなく、滑らかに曲がっていたこと、PBDの透水性が圧密途中で低下した場合の圧密遅れを定量的に評価する方法などが報告された。また、PBDに接続する排水ホースの直径の影響についても室内模型実験が行われ、従来のものより直径の小さなものでも圧密速度に悪影響を及ぼさないことが分かったが、実施工においては現場データを十分考慮する必

要が指摘された。

地盤改良工法の改良効果を精度よく予測するためには、現場で観測されたデータの活用が重要である。真空圧密工法が適用された地盤で、真空圧打切り後に地盤調査が行われ、真空圧密された地盤ではドレーンの打設間隔による圧密度に対応した圧密降伏応力分布になっていたこと、真空圧は等方的に作用していたことなどが、報告された。また、真空圧密工法が適用された施工事例や試験盛土工事の動態観測事例が紹介され、周辺地盤への影響を避けるために改良範囲外周に鋼矢板を打設した場合には縁切り効果が確認されたこと、および気水分離方式の真空圧密工法では沈下が大きくなっても作用負圧の減少が抑えられたことなどが報告された。

地盤の挙動予測を行う場合には地盤パラメータの設定が必要であり、施工途中においては観測データを用いて逆解析によって地盤パラメータを同定することができる。その際、観測されたデータに欠測値がある場合について、真空圧密工法とプレロード工法が併用された施工事例を対象として検討され、EMアルゴリズムによって欠測値を補完し、分散値Rfを最尤推定することで適切なパラメータを同定でき、それ以後の予測を精度よく行えることが報告された。

3. まとめ

真空圧密工法は等方圧を荷重として与える工法であり、上載荷重による破壊が起こらないため非常に軟弱な地盤にも適用でき、なおかつ土砂等の荷重を必要としないため、非常に有効な地盤改良工法である。この工法を適用した場合の改良効果については様々な面から調査・研究が行われているが、地盤中の水圧や空気圧の挙動など不明な点も残されているので、今後の更なる研究が期待される。

4. 地盤挙動 地盤改良①

足立 雅樹

みらい建設工業(株)

1. はじめに

本報告では、地盤挙動（地盤改良①）のセッションについて総括する。本セッションは、地盤改良工法のうちドレーン工法2編、締固め工法7編の計9編である。

2. 研究及び技術動向

ドレーン工法については、材料として砕石や人工材が用いられている。本セッションでは2編の発表があり、いずれも砕石が用いられている。さらに狭小地でも施工可能な小型地盤改良機を開発し、透水性の改善効果の確認を行っている。長期間の健全性（透水性の低下）や地震時の目詰まりなどドレーン工法共通の課題はあるものの、これまでドレーン工法は大型の機械が用いられていたことから、小型機械を用いる本工法の今後の発展が期待される。

締固め工法については、近年、市街地での民家等に近接した場所や既設構造物周辺での施工が増えていることから、従来の振動式ばかりではなく、低騒音で低振動の非振動式の静的な締固め工法が広く用いられるようになってきている。本セッションでは、7編中5編が静的な締固め工法に関する発表である。

2編の発表については、従来の振動式の締固め工法を民家近くで施工を行うため、施工時の周辺への影響（敷地境界での変位、振動）を確認するもので、民家や既設構造物周辺での施工が増えていることがうかがえる。

5編の静的な締固め工法のうち、1編は静的締固め砂杭工法(以下、SAVEコンポーザー)で、残り4編は最近開発された砂圧入式静的締固め工法（以下、SAVE-SP工法）に関する発表である。

SAVEコンポーザーについては、河川堤防での改良効果を既往のSCP工法の結果と合わせて発表している。

最も発表件数の多かったSAVE-SP工法は、砂に流動化

剤を添加して混合し、ポンプ圧送可能な状態の砂を地盤内に圧入して緩い砂地盤を締固める工法である。一連の発表論文は、実質改良率に着目して設計法の精度向上を目的とした研究、現地（河川堤防、空港）での施工事例とその改良効果に関する研究の発表である。河川堤防の施工事例では、河川浚渫土の再利用についても報告されており、適用性の拡大とともに本工法の今後のさらなる発展が期待される。

3. まとめ

本セッションは、従来の工法および新しい工法についての発表がなされ、どの工法とも、民家に近接した場所や既設構造物周辺での施工の効果に関するものであった。今後、ますます制約条件の厳しい場所での施工が増加すると思われるが、各工法の特徴を最大限に生かした施工性ならびに効果が必要とされるであろう。

最後に、工法別の発表内容を示す。

表-1 工法別の発表内容（9編）

工法	件数	内容
砕石 ドレーン工法	2	透水性(393), 試験と設計の比較(394)
砂圧入式 静的締固め 工法	4	河川堤防での効果(圧力, N値)(395), 設計法の適用性検証(398), 空港で改良効果(399), 河川堤防での効果(K値,液状化強度)(401)
SCP工法	2	施工時の振動の距離減衰(396), 変位緩衝領域での効果(400)
静的締固め 砂杭工法	1	河川堤防での改良効果(397)

4. 地盤挙動 地盤改良②

御手洗 義夫

東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター

1. はじめに

本報告では、地盤挙動（地盤改良②）のセッションについて総括する。

本セッションの報告内容は、軟弱地盤の沈下・安定対策や液状化対策に対する地盤改良方法（工法）に関するものであり、計9編（No.402~No.410）の発表が行われた。

2. 研究及び技術動向

本セッションのそれらは、研究対象や目的には、大きく次の3種類の分野に分けられるものであった。

- 1) 土砂処分場の延命化を目的とした論文(2編:No.402, 404)。
 - 2) 高含水比の浚渫土砂や廃棄物で埋め立てられた地盤などの沈下対策や地盤補強を目的とした内容の論文(4編:No.403, 405, 408, 410)。
 - 3) 砂地盤の液状化対策を目的とした締固めや杭体による補強効果に関する論文(3編:No.406, 407, 409)。
- また、それらは研究手法別でみると次の大きく次の3種類の分野に分けられるものであった。

- 1) 遠心力載荷実験や1g場における模型実験を実施し、解析やX線CTスキャナによる観察を行ったものが4編(No.402, 403, 406, 409)。
- 2) 現場で施工した改良体に対する大型現場載荷試験と解析を行った論文1編(No.410)
- 3) 現場の実施工事例やその品質や効果に関する現場調査結果の報告を行った論文4編(No.405, 404, 407, 408)。

液状化対策や軟弱地盤対策などの地盤改良技術は、防災や土砂処分場の延命化などに今後さらに期待されている技術であり、実用化されていく段階ではコストダウンも必須の要求事項にもなっている。そのような観点で見て今後期待される研究といえる2つの発表内容に関して以下に述べる。

論文No.406は、木杭打設による砂地盤の締固め効果に関する研究である。本技術は、間伐材などを有効利用することで、カーボンストックの役割（効果）も担ってお

り、宅地などを対象とした『液状化対策技術としては低コストであることから期待されている技術のひとつである。杭の直径や打設感覚による定量的な評価は、これまでに現場スケールの実験や実施工の結果からなされてきたものの、定量的かつ理論的なアプローチは十分になされてきていない。そのような観点から今後さらなる研究の進展が期待される。

論文No.403は、軟弱地盤上に盛土を行う場合の地盤補強に深層混合処理による低改良率の地盤改良杭を行う工法に関する研究である。発表内容は、地盤改良率を低減するとともに、支持地盤にまで到達しない“浮き型”の地盤改良を行うことで、従来と比較して大きなコストダウンを見込める工法に関する研究である。

本技術は、杭間および杭上部の土砂のアーチ効果に期待した技術である点がポイントである。しかし、最近の深層混合処理機は、大口径化によるコストダウンを図る傾向があり、かつ低改良率となると、改良杭間隔がより広くなる傾向となり、上記の仮定がどこまで有効であるかが大きな課題となってくる。したがって、本発表のような実験及び解析事例が非常に有効になると期待される。

3. まとめ

本章では、実務レベルに近い発表に関してのコメントを述べたが、一方では、その他の基礎的な研究や現場実績の報告も重要であることは言うまでもない。

最後にいくつかの発表では、論文に記述されている内容と当日の発表内容に大きな乖離がある発表が散見された点について一言述べておきたい。言い換えると、十分なデータ整理や評価、検証がなされていない段階で論文化されていると感じられ、座長の準備段階で非常に頭を悩まされたものの、当日の発表を聞いて、かなり納得（安心）したようなことがあった。できる限り、論文としての形になったものを投稿していただくことと、さらには当日発表された内容で再度発表されることを期待している。

4. 地盤挙動 地盤改良③

藤 崎 勝 利

鹿島建設株式会社土木管理本部

1. はじめに

本報告では、地盤挙動（地盤改良③）のセッションについて総括する。本セッションは、地盤改良技術のうち薬液注入工法（4件）、機械攪拌式深層混合処理工法（2件）、高圧噴射攪拌工法（2件）に関する合計8件の論文が発表された。地盤改良では様々な工法が実用化されているが、本セッションでの研究の対象である3工法はいずれも代表的な地盤改良工法である。

2. 研究及び技術動向

2.1 薬液注入工法

薬液注入工法に関する4件の研究は、注入材料の礫質地盤への適用性に関する室内実験（No.411）、室内実験による薬液ホモゲルおよび薬液注入供試体の体積変化に関する検討（No.414）、特殊シリカ系グラウト材料の現場注入実験結果と改良効果の評価（No.413）、薬液注入地盤の品質管理方法に関する検討（No.415）である。

No.414では薬液固結砂の強度のバラツキの要因として薬液ホモゲルの体積変化に着目しており、これについてX線CTスキャンなどを用いた基礎的な室内実験結果について発表があった。薬液注入工法では注入地盤の強度のバラツキが根源的な問題である。本研究ではバラツキの要因を対象としたものであり、今後の研究に期待したい。

No.413およびNo.415は、現場における薬液注入効果の判定および評価に関する発表であった。No.415では音響トモグラフィによる注入効果の評価などを試みており、No.413では現場における薬液注入状況とグラウト浸透解析結果の比較などを行っている。薬液注入地盤では強度のバラツキも包含したマスとしての品質評価方法の確立が必要であると考えられる。両研究は、これに繋がるものとして今後に期待したい。

2.2 機械攪拌式深層混合処理工法

機械攪拌式深層混合処理工法に関する2件の研究は、セメント系深層混合処理工法（CDM工法）における特殊添加剤の効果（No.412）、粉体噴射攪拌工法（DJM工法）における地盤変位低減方法の検討（No.416）である。

No.412では、CDM工法のさらなる施工性の向上を目指して、セメントスラリーへの特殊添加剤の添加による流動性の向上と改良体の強度向上について室内実験で検討している。また、No.416ではDJM工法施工時の地盤

変位低減を目的として、粉体吐出管の配置や攪拌翼の改造などを行い、従来機よりも空気回収の効率化を図った事例が発表された。

CDM工法ならびにDJM工法は、“固結”を基本原理とする地盤改良工法では最も一般的といえる工法であるが、現状に満足せずに今回の発表のように改善を試みることは重要であると考ええる。

2.3 高圧噴射攪拌工法

高圧噴射攪拌工法に関する2件の研究は、実施工での地盤改良体の品質（No.417）、台湾都市部における施工実績（No.418）である。

No.417では格子状改良地盤を対象に、ボーリングコアを対象とした一軸圧縮試験結果およびボーリング孔を用いた速度検層結果などを詳細に分析している。また、施工後7ヶ月という長期材齢での調査、試験も行っており、貴重な実施工データであると考ええる。

No.418では台湾における施工実績が発表された。地盤改良技術は、日本が世界に誇れる土木技術のひとつであると考ええる。No.418では施工ならびにボーリングコアの採取は現地スタッフで行ったとのコメントがあった。地盤改良技術の海外展開を考えたとき、施工体制や現地スタッフの確保と技量などは大きな問題であり、この解決方法について具体的な取り組みが必要であると感じた。

近年では高圧噴射攪拌工法は本設の地盤改良に適用される事例も増加しているが、改良地盤の強度のバラツキとその評価方法、各種物性値の評価などについて、今後の研究に期待したい。

3. まとめ

東北地方太平洋沖地震を契機として、地盤改良工法は既設構造物の耐震補強や液状化対策の有力な施工技術として注目されている。従来は仮設物として施工されることが多かった地盤改良工法であるが、近年は構造物基礎への適用や地中構造物の耐震補強など本設物として適用される事例も増加している。

一方、地盤改良体を“地盤”、または“構造物”と捉えるかという点については、コンセンサスが得られているとは言い難い。この地盤改良体の捉え方は、地盤改良の設計や施工における品質管理の考え方に大きく影響するものである。

今後も地盤改良の設計および施工、品質管理など関するソフト、ハード両面からの研究を期待したい。

4. 地盤挙動 凍結・凍上

大野進太郎
鹿島建設(株)

1. はじめに

本報告では、地盤挙動(凍結・凍上)のセッションについて総括する。本セッションでは、全7編の発表があった。表-1に凍結・凍上のセッションにおける発表の一覧を示す。

表-1 凍結・凍上のセッションにおける発表一覧

講演番号	発表者(敬称略)	タイトル	キーワード
425	安達隆征(寒地土研)	グラウンドアンカー・地山補強土工に作用する凍上力の実測事例	凍上力, グラウンドアンカー, 地山補強土工
426	佐藤厚子(寒地土研)	冬期土工による盛土の性状	冬期, 土工, 凍結・凍上
427	高橋優紀(北海道大)	砂質土凍土壁の遮水性に及ぼす凍結条件の影響	凍土, 凍結工法, 浸透
428	久門義史(精研)	地下水流が凍土壁造成に及ぼす影響把握のための二次元差分解析法	地下水流, 凍結工法, 差分解析
429	石川達也(北海道大)	低土被り圧におけるサクシオンを考慮した修正高志の式の提案	凍上, サクシオン, 表層地盤
430	小林 歩(北見工業大)	凍結融解によるコンシステンシー限界の変化	凍結融解, コンシステンシー限界, 細粒土
431	京川裕之(鹿島建設)	土-水-氷三相混合体理論に基づく地盤の凍結現象のシミュレーション	凍土, 凍上, 数値解析

2. 研究及び技術動向

本セッションでの発表を大まかに分類すると、1)土工における地盤凍上影響、2)凍結工法における地下水流影響、3)凍土の材料・要素試験やそれに基づくモデル化、という3つのカテゴリーに分けられる。ここでは、このカテゴリー毎に発表の内容を概観することとする。

1) 土工における地盤凍上影響(講演番号; 425, 426)

グラウンドアンカー等に作用する凍上力の計測結果の報告(425)や、実物大の冬期盛土の試験施工結果の報告(426)があった。これらの成果は、寒冷地での補強土工の設計や最適な盛土施工方法の選定に寄与することが期待できる。

2) 凍結工法における地下水流影響(講演番号; 427, 428)

地下水流下での凍結工法による凍土壁の成立性に関する研究発表であった。427は実験的検討であり、1)非常に速い地下水流がある場合に、凍土壁が閉合できないことと、2)凍土壁が閉合した後であれば、速い地下水流下でも凍土成長が可能であることが示された。今後は水頭制御による実験により、凍土壁が閉合する限界の地下水流速についての検討が望まれる。

また、428は二次元差分による解析的検討であった。凍土壁が閉合する限界の地下水流速の理論式から導いた限界流速下であっても、二次元差分解析を用いれば、凍土壁が閉合する結果が得られることが示された。本解析手法により、今後はより精度の高い凍結工法の成立性検討や凍結管の配置検討が可能となると考える。

3) 凍土の材料・要素試験やそれに基づくモデル化(講演番号; 429, 430, 431)

429は凍上量の予測式である「高志の式」を不飽和土の力学における有効応力の概念を用いて、低土被り状態にも適用できるよう修正した成果の発表であった。当日の質疑では「高志の式」で用いられる地盤の応力状態が、そもそも有効応力と全応力のどちらなのか、という議論があった。今後コンセンサスを得る必要がある課題であると考えられる。

430は塑性・液性限界試験を通じて、凍結融解履歴の影響を検討した成果の発表であった。粘土鉱物の組成分析(アロフェン含有量など)などもあわせ、さらに精緻な影響検討結果の報告が期待される。

431は地盤を土骨格と水、氷の三相連成と捉え、それぞれを精緻に数理モデル化した上で、一次元凍上解析により、その典型的な挙動をデモンストレーションするものであった。今後は、現状では線形弾性としている地盤の構成則を、強度・剛性の温度依存や凍上の拘束圧依存などを考慮できるよう改良することで、より精度の高い予測を実現することが期待される。

3. まとめ

凍結・凍上のセッションでは、従来からの重要なテーマである寒冷地における地盤凍上はもとより、福島第一原子力発電所の遮水壁や、首都圏のビッグプロジェクトに適用が検討されている「凍結工法」に関する研究発表も増加している。上述のような国家的プロジェクトを成功に導くために、本分野の研究者・技術者から今後も重要な知見が示されていくことが望まれる。