

(様式第9 別紙1:公開版)

養成技術者の研究・研修成果等

1. 養成技術者氏名: 小林 泰三 印/署名

2. 養成カリキュラム名: 産学連携による省エネ化・省資源化に向けた建設・資源開発機械システムの開発

3. 養成カリキュラムの達成状況

本カリキュラムでは、遠心力を利用したスラリー脱水機の開発と脱水性能の評価に関する研究開発、省エネ化・省資源化に向けた建設材料の生産技術開発および産業廃棄物の有効利用に関する研究開発、最適な掘削機械システムの構築、情報化施工機械の技術開発および実用化と題した4項目のテーマに関する研究を行ってきた。本事業では、当初3カ年の実施計画を提案したが、1)から3)のテーマについては1カ年の期間で基礎的研究として有為な成果を得ることができた。したがって、これらのカリキュラムの達成状況としては、実用化の点で更なる検討を必要とする部分もあるが、当初の計画をほぼ達成しているものと考えている。ただし、4)のテーマについては、第2四半期終了時点で提出した報告書に記したようにスケジュールの変更が生じたため、当該期間では実用化に向けた実質的な検討は進めていない。ただし、情報化施工に応用したいと考えていた知的情報処理系(例えばファジー理論やニューラルネットワークなど)の基本概念の習得やその応用に関する具体的な着想を得ることができたので、本テーマについても有意義な研修期間となった。

4. 成果(A4版3枚程度)

上述の4つの各テーマについて得られた成果は次の通りである。

遠心力を利用したスラリー脱水機の開発と脱水性能の評価に関する研究開発

本テーマでは、粘土粒子が負に帯電していることを利用して、遠心力や磁力、電圧を利用した新しいスラリー遠心脱水機の開発に向けた基礎的研究に取り組んだ。第1・2四半期には、簡易な模型実験装置を作製し、遠心力による脱水特性の基礎的な評価・検討を行った。その結果、遠心力による脱水は、多くのスラリーに対して有効であるが、ベントナイトを多く含む場合にはその効果が低減することや、磁力を併用した場合、カオリン泥水では脱水効果の向上がみられたが、ベントナイト泥水には顕著な効果がみられないことなどが明らかとなった。建設発生土には、施工上、安定液として添加されたベントナイトが含まれていることが多く、現地の土砂とベントナイトを分離して回収することができれば利用価値の高いベントナイトの再利用の観点からも有為であると考えられる。そこで、ベントナイトが強い電気的性質を有していることに着目し、泥水中に電圧を作用させてベントナイト粒子を泳動・凝集させることによって分離・回収するアイデアを提案した。第3・4四半期ではその基礎的研究として、ベントナイト泥水中に陰と陽のそれぞれの電極を持つカーボン棒(直径13mm)を設置し、3~12Vの電圧(電流は1.0A以下)を通電し、その影響で陽極に凝集・付着するベントナイトの質量を計測する実験を行った。その結果、付着したベントナイトの量は、電圧や通電時間、溶液濃度のそれぞれに比例して増加することが確認された。また、陰極の配置を工夫することによって、付着量を増大させること

ができることも判明した。このことは、従来型の遠心脱水機やフィルタープレスなどの脱水機とは別に、電気力を用いた新たな脱水方法としての新技術の提案に繋がるものとして興味深い結果である。

また、本研究を通じて、建設発生土や浚渫土の処理問題に係わる諸問題の現状やその技術的な対策法、法的処理などの幅広い知識・知見を習得することができた。

省エネ化・省資源化に向けた建設材料の生産技術開発および産業副産物の有効利用に関する研究開発

本テーマでは、碎石副産物であるシルト系碎石粉脱水ケーキの再利用方法について検討を進めてきた。本研究では、文献調査をはじめ、多くの情報収集を行い、1) 溶融処理によってスラグ化し、人工骨材として再資源化する試みと、2) 劣化コンクリートのひび割れ補修材の混和材として利用する試みの二つのアプローチに着目することにした。

前者の溶融処理技術案に関しては、国内外の文献調査をはじめ、滋賀県および同県下水道公社の所有する汚泥溶融処理施設の見学を企画するなどしてその適用技術に関する最新の知識を習得することができた。しかし、現実問題として、技術的な側面以上に設備投資などのコスト面で実現化が困難となることが予想されたため、本案件については技術動向の調査・事例研究のみに留め、実験等の研究は行っていない。

後者のひび割れ補修材の混和材として利用する案に関しては、アクリル樹脂に注目し、その混和材としての利用価値について検討するため種々の実験を行った。実施した試験は、硬化時間 (JHS 416) 厚塗り製 (JHS 416) 外観 (JHS 416) 硬化圧縮性 (JHS 416) 熱膨張性 (JHS 416) コンクリートの付着性 (JHS 416) 圧縮強度および曲げ強度 (JHS 416) 粘度 (JIS K 6833) ひび割れ含浸深さ (JH 試験研究所)、チキソトロピック係数 (JIS K 6833) 可使時間 (JIS K 6833) 収縮性 (JIS A 6024) 伸び率および引張強度試験 (JIS K 7113) モルタル付着強さ (JIS A 6024) 付着耐久保持率 (JIS A 6024) 圧縮強度試験 (JIS A 6024) などである。これらの結果より、断面修復材としての利用に関しては、1) 碎石粉脱水ケーキの混和率が 100% を超えると圧縮強度は 30 ~ 35 N/mm² となり、それ以上混和率を変化させても影響は見られないことや、2) 曲げ強度に関しては混和率の影響は見られないことなどが分かった。また、ひび割れ注入材 (アクリル樹脂の物性) に関する検討結果として、3) フィラーの混和率を増大させるとひび割れに含浸しにくくなり、その結果、付着面積の低減で曲げ強度も低くなることや、4) モルタルの付着強さに関しては、アクリルとエポキシに大差はなく、6 N/mm² 程度の強度を発揮すること、さらに 5) 圧縮耐力に関しては、従来から多用されているエポキシ樹脂がアクリル樹脂を大きく上回ることなどが分かった。ただし、その際の応力 - ひずみ曲線をみると、エポキシ樹脂とは違って、アクリル樹脂の場合には明瞭な降伏点や破壊点がみられないことや、伸び率が大きいことから延性に優れることが分かった。このことは、ひび割れ幅の追従性の観点からエポキシ樹脂に比べて優位な点として認めることができた。しかしながら、断面補修材への適用を考え場合、6) 脱水ケーキを混和したアクリル樹脂の厚塗り性が規格を下回る結果となり、断面形成のためには別途検討が必要であることが判明した。ただし、碎石粉の混和量を増大させても固化後の強度に関して問題はないと考えられるので、さらなる混和量の増加や増粘剤の添加で流動性を低下させることによって問題が解決できる可能性が十分に見出せるものである。これらのことから、本カリキュラムでは、碎石生産時に大量に算出される副産物の有為な再利用法として将来性のある方法を新たに提案することができたと考えている。

また、本カリキュラムは、碎石事業所とコンクリート補修業者、立命館大学理工学部環境材料研究室 (高木宣章教授) との共同研究で進めてきたものである。本研究で得られた結果をもとに、上記企業および研究組織においては施工の実用化に向けて更なる検

討が引き続き進められる予定である。また、これらの産学連携研究を通して、そのプランニング能力やコーディネート能力の向上を図ることができたことも成果の一つであると考えている。

最適な掘削機械システムの構築

本テーマでは、地盤掘削の基本的な問題として、平刃による地表層部の水平掘削メカニズムに着目した研究を行ってきた。第 1・2 四半期には主に掘削抵抗力を予測するための理論の基礎知識の習得と模型実験の作製に取り組んだ。また第 3・4 四半期には、それまでに学んだ理論の実践的応用と模型装置を用いた実験を行った。これらの研究を通して得られた成果の概要は次の通りである。

理論的研究では、京都大学農学研究科中嶋洋助教授の指導のもと、個別要素法(Distinct Element Method, DEM)の概念や計算手法のノウハウを習得した。現在では、地盤材料を構成する要素を球と仮定した 3 次元の掘削シミュレーションのコーディングを完了することができた。この解析手法を用いることによって、地盤内の変形メカニズムを数値実験によって明らかにすることができると考えられる。なお、平面ひずみ条件を仮定した場合の 2 次元解析についてはテラメカニクス研究会において「DEM simulation for deformation mechanism of soil cutting」と題してそのシミュレーション結果を既に発表している。

また、DEM と並行して剛塑性理論の一種である特性曲線法や極限解析、極限平衡法を用いた理論的研究を進めてきた。ここでは、まず、特性曲線法と上界法を組み合わせることにより、従来の極限解析に比べてより簡便に精度の良い掘削抵抗力を予測するための計算手法を考案した。この内容については、国際地盤車両系学会ヨーロッパ会議で論文集に掲載された。また、特性曲線法を応力場だけでなく速度場についても適用することによって、掘削刃(剛体)の移動パターンの違いによる地盤の変形メカニズムを明らかにするための解析を行った。また、このとき地盤内に応力および速度の不連続場が発生するような場合についても考慮できるようにした。これらの解析を通して、地盤の強度定数や掘削条件から掘削力を理論的に予測することのできる解析方法を提案することができた。また、この解析モデルから地盤定数や掘削条件の掘削力に及ぼす影響メカニズムを理論的に明らかにすることができた。

実験的研究では、熊本大学大学院地盤工学研究室(大谷順教授)との共同研究として、X 線 CT スキャン技術を用いて掘削時の地盤内破壊領域の可視化実験を行った。その結果、地盤のダイレイタンス挙動によって現れたすべり面の 3 次元的な構造を明らかにすることができた。この実験を通して、密に詰まった砂地盤では、すくい角が大きいほど刃の端部から発生するすべり面は側方へと広がりやすくなるが、前方への破壊領域は小さくなることなどが判明した。ここに得られた知見は、理論的に想定される変形機構の妥当性を確認する上でも極めて重要な情報を含んだものであり、土の変形メカニズムを解明する上でも貴重な研究成果といえる。また、掘削の模型実験では、標準的な砂試料(豊浦砂)に加え、将来の月面探査を視野に入れた月面模擬土(清水建設(株)提供)を用いた実験を行い、多くの有意なデータを得ることができた。本実験で得られたデータと特性曲線法で得られた計算値および極限平衡法に基づく計算値とを比較すると、特性曲線法で得られた計算値は実測値に比較的近い値を与えるのに対して、従来の極限平衡法のモデルは、特に地盤が締まっている場合には実測値を大きく上回る値を与えることが分かった。すなわち、本研究を通して提案することのできた特性曲線法にも基づく理論的解析は比較的妥当性の高いものであることが証明された。これらの研究成果については国際地盤車両系学会アジア・パシフィック会議や土木学会全国大会などで公表する予定である。また、本研究で得られた知見は、土-機械系の問題だけでなく、土木工学

における支持力問題の解法としても新たな知見を与えるものとして大いに期待できるものである。

本研究は、A社とB社との産学連携で行ってきた。A社は、掘削機構を有する建設機械の専門メーカーであり、最新の建設機械や工法についての技術動向や専門知識の習得に努めることができた。またB社の技術者らとの共同研究により精緻な実験技術や実験データの情報処理方法など実践的な能力強化を図ることができた。

情報化施工機械の技術開発および実用化

前述したように、研究の実実施計画の変更が生じたため、当該期間では実用化に向けた実質的な検討は進めていない。ただし、この期間中には指導教員（立命館大学理工学部土木工学科深川良一教授）やC社の技術者を通じて、情報化施工を基盤とする無人化施工、ジオメカトロニクス技術などの技術トレンドや市場動向に対する幅広い知識を習得することができた。また、自主的な独習を進め、知的情報処理系（例えばファジー理論やニューラルネットワークなど）の基本概念を習得することができた。さらに、これらの基本概念を応用するために、逆解析理論を建設施工に適用した論文などの事例調査を行った。これらの研究を踏まえ、バックホウやドーザなどの土工機械、あるいはせん孔機械やトンネル掘削機の駆動力（掘削・切削抵抗や牽引力など）から地盤の強度定数などの地盤情報を逆解析するという着想を得ることができた。

5. 成果の対外的発表等

(1) 論文発表（論文掲載済、または査読済を対象。コピーを添付。）

- R. Fukagawa, T. Kobayashi, K. Tateyama and H. Takahashi : Three dimensional visualization of the excavation mechanism for dry sandy ground by a CT-scan technique, *Proc. of 9th European Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*, pp.128-135, Harper Adams, UK, 2003.
- T. Kobayashi and R. Fukagawa : A theoretical study of the soil cutting resistance based on the upper and lower bound theorems, *Proc. of 9th European Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*, pp.224-232, Harper Adams, UK, 2003.

(2) 口頭発表（発表済を対象。予稿集のコピーを添付。）

- 江副 哲，大谷 順，深川良一，小林泰三：X線CT法を用いた三次元掘削機構の可視化，第38回地盤工学研究発表会，秋田，E-06, pp.1009-1001, 2003.
- 田茂井憲，小林泰三，深川良一，青木 滋，金森洋史：月面模擬土壌における平刃の切削抵抗に関する実験的研究，第24回テラメカニクス研究会，福岡，2003.
- BUI Ha Hong，小林泰三，深川良一，田茂井憲：DEM simulation for deformation mechanism of soil cutting，第24回テラメカニクス研究会，福岡，2003.

(3) 特許等（出願番号を記載）

なし