

氏名（本籍）	加 藤 満（岐阜県）
学 位 の 種 類	博 士（工学）
学 位 記 番 号	甲 第 5 号
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	多次元液状化解析法とその応用に関する研究
学位論文審査委員	（主査）教 授 岡 二三生 （副査）教 授 宇 野 尚 雄 教 授 六 郷 恵 哲 助教授 八 嶋 厚

論文内容の要旨

阪神大震災に見られるように、人口および資産が集中する都市部や沿岸開発地域などに壊滅的な打撃を与える液状化現象への対策は不可欠なものとなっている。一般に、液状化とは、地震による動的せん断力に起因するものを指すが、動的・静的条件を含めた広義の液状化を発生させる外力には、地震による動的せん断力、波浪による海面の急激な水位変動、そして浸透流が存在する。

液状化災害を未然に防ぐ責を負う、計画・設計・施工の実務では、それぞれの外力が作用した場合における地盤の挙動を詳細にかつ精度良く予測でき、種々の複雑な条件下での検討も可能な数値解析法の開発が望まれていた。このような防災面からの需要や要請に対し、本論文では、広義の液状化問題に対応可能な数値解析法として、有限要素法(FEM)や精緻な砂の非線形構成式を用いた有効応力解析法を提案し、地盤の初期状態から最終破壊状態に至るまで時々刻々と変化する地盤の変形や間隙水圧の蓄積などを数値解析的に表現できる解析プログラム(プログラムコード名“LIQCA”)を開発している。この方法は、地震、波浪、浸透にかかわらず、広義の液状化問題すべてに対して対応可能である。本研究では、地震による砂地盤の液状化問題、波浪による海底砂地盤の液状化問題、そして砂地盤の浸透破壊問題を統一的に取り扱うことができる多次元液状化解析法を提案し、実際問題への適用性を明確にして基礎的研究を展開している、また、解析法を応用して実務レベルへの拡張する方法を明らかにしている。以下に、本研究で得られた主な結論を示す。

- ①. 多次元液状化解析法の開発・提案を行っている。
 - (1) Biot の二相混合体理論に基づき、未知数を固相の変位と間隙水圧とした定式化(u-p formulation)を行っている。
 - (2) 本解析法による数値解と既往の解析解との比較によって解析スキームの精度の検証を行い、良好な精度を有することを確認している。
 - (3) 固有値の概念を用いて解析スキームの安定性の検討を行い、解析スキームが安定するための条件を導いている。
 - (4) 非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式を新たに提案した。本提案式は、足立・岡の繰返し弾塑性構成式と同様に入力パラメータが少ない特長に加え、従来のもより応用しやすいという特長を有している。
 - (5) 新たに提案した構成式による解析結果と既往の試験結果との比較によって構成式の精度の検証を行い、本提案式が試験結果を精度良く再現できることを明らかにしている。

第6章においては、極圧添加剤の作用機構に関して述べた。しごき加工時の摩擦面での現象と、各極圧添加剤の摩擦係数の低減効果の発現挙動から、リン系極圧添加剤の作用の本質は新生面での吸着であり、硫黄系の効果の発現にはその後の硫化反応が必要不可欠であることを明らかにした。

論文審査の結果の要旨

工具表面と材料が相対すべりをするばかりではなく、材料が一般に大きな塑性変形をし、表面拡大（新生面の出現）が生ずるという点で、塑性加工における摩擦・潤滑の問題は、通常の剛体どうしの場合に比して大変困難なものである。トライボロジーの名の下で近時盛んな表面工学の研究においても、ひとときユニークな部分を占めている。その系統的研究はまだ緒に付いたばかりと言ってよい。本研究は、特に冷間塑性加工に限定して、種々開発されている塑性加工用潤滑剤と、その性能を高めるために用いられる極圧添加剤の効果及び作用機構について実験的に詳細に検討したものである。まず、潤滑剤の流入速度と工具－試片の表面の相対すべり速度を種々変えられる圧延形摩擦試験機を開発・試作し、その他種々の既製摩擦試験機を併用しつつ、特に摩擦係数 μ の測定を通して潤滑剤及び極圧添加剤の特性評価を行っている。その結果、相対すべり速度の増加による μ の減少は油膜の均一分布及び界面温度上昇による粘性抵抗の減少によるものと結論している。極圧添加剤としては塩素系、硫黄系及びリン系を対象に検討を加えている。鉄系材料の加工におけるそれらの μ 低減効果特性を評価し、また各種亜鉛メッキ鋼板の成形に際しての同様の特性評価を行っている。特にリン系がどの鋼板にも同様の効果のあること、硫黄系では適性に選択性のあることなどを明らかにしている。アルミニウム合金のしごき加工において、亜リン酸系添加剤は炭素数にも依存して μ 低減効果が変わるほか、合金種に対して選択性を示す場合のあることを示している。極圧添加剤の作用機構を、X線光電子分光法（XPS：装置名ESCA）による表面分析により考察している。亜リン酸ジエステルとトリエステルの作用機構の差異や、硫黄系ジテルトドデシルポリサルファイドの作用機構が、ケモメカニカル効果と吸着分子層の効果の相乗作用であろうとしている。その他、現時点のこの分野の研究としては、相当踏み込んだものとなっており、さらに今後の研究の展開に大いに期待させるものを多く含んでいる。以上より、本論文は博士学位に十分値すると判断された。

- ②. 多次元液状化解析法の応用として、液状化対策工による改良地盤の地震時液状化解析、波浪による海底砂地盤の液状化解析、砂地盤の浸透破壊解析を行っている。
- (1) グラベルドレーンが施工された改良地盤で、間隙水圧の蓄積および消散傾向が明確な地震時観測記録を初めて得た。そしてその記録により、グラベルドレーンによる間隙水圧の消散および抑制効果を実証している。
 - (2) グラベルドレーンまわりの水の流れを考慮した有効応力解析法を提案して解析法の実証を試み、本解析法がグラベルドレーンによる改良地盤の加速度および間隙水圧の観測記録を定量的に再現できることを明らかにしている。
 - (3) 改良地盤と非改良地盤の間隙水圧の対比、そして地盤改良しなかった場合の解析を実施し、グラベルドレーンの間隙水圧消散・抑制効果および地盤安定効果を数値解析的に明らかにしている。
 - (4) 本解析法が非改良地盤および壁状の固化改良体を配置した改良地盤の振動台実験結果を精度良く再現できることを明らかにしている。
 - (5) 波浪による海底地盤の液状化問題に対する有効応力解析法を新たに提案したが、本解析法では、変動間隙水圧と残留間隙水圧を重ね合わせた全間隙水圧発生量を表現可能であり、そのことは数値シミュレーションによっても確認できた。
 - (6) 波浪時における海底地盤の液状化現象、なかでも間隙水圧発生量に対する種々のパラメータの依存性を検討し、弾塑性解析の重要性や加速度成分考慮の必要性などを明確にしている。
 - (7) 既往の室内試験結果や Terzaghi の限界動水勾配を用いて本解析法の検証を行った。その結果、本解析法の浸透破壊問題に対する適用性が明確になった。
 - (8) 浸透破壊問題において、限界動水勾配が水位上昇速度や間隙水の飽和度に依存することを数値解析的に明らかにしている。
 - (9) 浸透破壊問題において、塑性成分を考慮することが重要であることを明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、地震による砂地盤の液状化問題、波浪による海底砂地盤の液状化問題、そして砂地盤の浸透破壊問題を統一的に取り扱うことができる多次元液状化解析法を提案し、実際問題への適用性を明確にする事である。

本論文では、広義の液状化問題に対応可能な数値解析法として、有限要素法(FEM)や精緻な砂の非線形構成式を用いた有効応力解析法を提案している。有効応力解析法では、液状化現象の理論的で厳密な詳細検討が可能な解析法であり、これまでに多くの研究者によって数々の提案がなされている。本研究では、非線形移動硬化則と有限要素法および差分法を用いて行う新たな解析法を提案し、地盤の初期状態から最終破壊状態に至るまで時々刻々と変化する地盤の変形や間隙水圧の蓄積などを数値解析的に表現することのできるプログラム(プログラムコード名 "LIQCA")の開発に成功している。これにより、地震、波浪、浸透にかかわらず、広義の液状化問題すべてを解析する事が可能としている。

本研究の成果は以下の通りである。

- ①. 多次元液状化解析法の開発・提案を行っている。
 - (1) Biot の二相混合体理論に基づき、未知数を固相の変位と間隙水圧とした定式化 ($u-p$ formulation)を行い、本解析法による数値解と既往の解析解との比較によって解析スキームの精度の検証を行い、良好な精度を有することを確認した。
 - (2) 非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式を新たに提案した。本提案式は、足立・岡の繰返し弾塑性構成式と同様に入力パラメータが少ない特長に加え、従来のもより応用しやすいという特長を有している。この新たに提案した構成式による解析結果と既往の試験結果との比較によって構成式の精度の検証を行い、本提案式が試験結果を精度良く再現できることを明らかにした。
- ②. 多次元液状化解析法の応用として、液状化対策工による改良地盤の地震時液状化解析、波浪による海底砂地盤の液状化解析、砂地盤の浸透破壊解析を行っている。

第6章においては、極圧添加剤の作用機構に関して述べた。しごき加工時の摩擦面での現象と、各極圧添加剤の摩擦係数の低減効果の発現挙動から、リン系極圧添加剤の作用の本質は新生面での吸着であり、硫黄系の効果の発現にはその後の硫化反応が必要不可欠であることを明らかにした。

論文審査の結果の要旨

工具表面と材料が相対すべりをするばかりではなく、材料が一般に大きな塑性変形をし、表面拡大（新生面の出現）が生ずるという点で、塑性加工における摩擦・潤滑の問題は、通常の剛体どうしの場合に比して大変困難なものである。トライボロジーの名の下で近時盛んな表面工学の研究においても、ひとときユニークな部分を占めている。その系統的研究はまだ緒に付いたばかりと言ってよい。本研究は、特に冷間塑性加工に限定して、種々開発されている塑性加工用潤滑剤と、その性能を高めるために用いられる極圧添加剤の効果及び作用機構について実験的に詳細に検討したものである。まず、潤滑剤の流入速度と工具－試片の表面の相対すべり速度を種々変えられる圧延形摩擦試験機を開発・試作し、その他種々の既製摩擦試験機を併用しつつ、特に摩擦係数 μ の測定を通して潤滑剤及び極圧添加剤の特性評価を行っている。その結果、相対すべり速度の増加による μ の減少は油膜の均一分布及び界面温度上昇による粘性抵抗の減少によるものと結論している。極圧添加剤としては塩素系、硫黄系及びリン系を対象に検討を加えている。鉄系材料の加工におけるそれらの μ 低減効果特性を評価し、また各種亜鉛メッキ鋼板の成形に際しての同様の特性評価を行っている。特にリン系がどの鋼板にも同様の効果のあること、硫黄系では適性に選択性のあることなどを明らかにしている。アルミニウム合金のしごき加工において、亜リン酸系添加剤は炭素数にも依存して μ 低減効果が変わるほか、合金種に対して選択性を示す場合のあることを示している。極圧添加剤の作用機構を、X線光電子分光法（XPS：装置名ESCA）による表面分析により考察している。亜リン酸ジエステルとトリエステルの作用機構の差異や、硫黄系ジテルトドデシルポリサルファイドの作用機構が、ケモメカニカル効果と吸着分子層の効果の相乗作用であろうとしている。その他、現時点のこの分野の研究としては、相当踏み込んだものとなっており、さらに今後の研究の展開に大いに期待させるものを多く含んでいる。以上より、本論文は博士学位に十分値すると判断された。

- ②. 多次元液状化解析法の応用として、液状化対策工による改良地盤の地震時液状化解析、波浪による海底砂地盤の液状化解析、砂地盤の浸透破壊解析を行っている。
- (1) グラベルドレーンが施工された改良地盤で、間隙水圧の蓄積および消散傾向が明確な地震時観測記録を初めて得た。そしてその記録により、グラベルドレーンによる間隙水圧の消散および抑制効果を実証している。
 - (2) グラベルドレーンまわりの水の流れを考慮した有効応力解析法を提案して解析法の実証を試み、本解析法がグラベルドレーンによる改良地盤の加速度および間隙水圧の観測記録を定量的に再現できることを明らかにしている。
 - (3) 改良地盤と非改良地盤の間隙水圧の対比、そして地盤改良しなかった場合の解析を実施し、グラベルドレーンの間隙水圧消散・抑制効果および地盤安定効果を数値解析的に明らかにしている。
 - (4) 本解析法が非改良地盤および壁状の固化改良体を配置した改良地盤の振動台実験結果を精度良く再現できることを明らかにしている。
 - (5) 波浪による海底地盤の液状化問題に対する有効応力解析法を新たに提案したが、本解析法では、変動間隙水圧と残留間隙水圧を重ね合わせた全間隙水圧発生量を表現可能であり、そのことは数値シミュレーションによっても確認できた。
 - (6) 波浪時における海底地盤の液状化現象、なかでも間隙水圧発生量に対する種々のパラメータの依存性を検討し、弾塑性解析の重要性や加速度成分考慮の必要性などを明確にしている。
 - (7) 既往の室内試験結果や Terzaghi の限界動水勾配を用いて本解析法の検証を行った。その結果、本解析法の浸透破壊問題に対する適用性が明確になった。
 - (8) 浸透破壊問題において、限界動水勾配が水位上昇速度や間隙水の飽和度に依存することを数値解析的に明らかにしている。
 - (9) 浸透破壊問題において、塑性成分を考慮することが重要であることを明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、地震による砂地盤の液状化問題、波浪による海底砂地盤の液状化問題、そして砂地盤の浸透破壊問題を統一的に取り扱うことができる多次元液状化解析法を提案し、実際問題への適用性を明確にする事である。

本論文では、広義の液状化問題に対応可能な数値解析法として、有限要素法(FEM)や精緻な砂の非線形構成式を用いた有効応力解析法を提案している。有効応力解析法では、液状化現象の理論的で厳密な詳細検討が可能な解析法であり、これまでに多くの研究者によって数々の提案がなされている。本研究では、非線形移動硬化則と有限要素法および差分法を用いて行う新たな解析法を提案し、地盤の初期状態から最終破壊状態に至るまで時々刻々と変化する地盤の変形や間隙水圧の蓄積などを数値解析的に表現することのできるプログラム(プログラムコード名 "LIQCA")の開発に成功している。これにより、地震、波浪、浸透にかかわらず、広義の液状化問題すべてを解析する事が可能としている。

本研究の成果は以下の通りである。

- ①. 多次元液状化解析法の開発・提案を行っている。
 - (1) Biot の二相混合体理論に基づき、未知数を固相の変位と間隙水圧とした定式化 ($u-p$ formulation)を行い、本解析法による数値解と既往の解析解との比較によって解析スキームの精度の検証を行い、良好な精度を有することを確認した。
 - (2) 非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性構成式を新たに提案した。本提案式は、足立・岡の繰返し弾塑性構成式と同様に入力パラメータが少ない特長に加え、従来のもより応用しやすいという特長を有している。この新たに提案した構成式による解析結果と既往の試験結果との比較によって構成式の精度の検証を行い、本提案式が試験結果を精度良く再現できることを明らかにした。
- ②. 多次元液状化解析法の応用として、液状化対策工による改良地盤の地震時液状化解析、波浪による海底砂地盤の液状化解析、砂地盤の浸透破壊解析を行っている。

- (1)グラベルドレーンが施工された改良地盤で、間隙水圧の蓄積および消散傾向が明確な地震時観測記録を初めて得た。そしてその記録により、グラベルドレーンによる間隙水圧の消散および抑制効果を実証した。
- (2)改良地盤と非改良地盤の間隙水圧の対比、そして地盤改良しなかった場合の解析を実施し、グラベルドレーンの間隙水圧消散・抑制効果および地盤安定効果を数値解析的に明らかにした。
- (3)本解析法が非改良地盤および壁状の固化改良体を配置した改良地盤の振動台実験結果を精度良く再現できることを明らかにしている。
- (4)波浪による海底地盤の液状化問題に対する有効応力解析法を新たに提案したが、
本解析法では、変動間隙水圧と残留間隙水圧を重ね合わせた全間隙水圧発生量を表現可能であり、そのことは数値シミュレーションによっても確認できた。
- (5)既往の室内試験結果や Terzaghi の限界動水勾配を用いて本解析法の検証を行った。その結果、本解析法の浸透破壊問題に対する適用性が明確になった。
- (6)浸透破壊問題において、限界動水勾配が水位上昇速度や間隙水の飽和度に依存することを数値解析的に明らかにしている。

このような本研究での成果は 近年、人口および資産が集中する都市部や沿岸開発地域などに壊滅的な打撃を与える液状化現象の解明に不可欠なものとなっている。一般に、液状化とは、地震による動的せん断力に起因するものを指すが、動的・静的条件を含めた広義の液状化を発生させる外力には、地震による動的せん断力、波浪による海面の急激な水位変動、そして浸透流が存在する。これらは、それぞれ、落橋、海底パイプラインの破壊、立坑掘削時の底盤破壊というように、多様な被害をもたらす。本研究の内容は、地盤災害を未然に防ぐ責を負う、計画・設計・施工の実務での予測法として開発が望まれていたものである。