

報告番号	乙 第 7213 号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Development of a numerical analysis code for efficient evaluation of pore water pressure dissipation methods and its application to advanced performance design**
(間隙水圧消散工法の効率的評価を可能にする数値解析手法の開発および同手法の高度な性能設計への応用に関する研究)

氏 名 野中 俊宏

論 文 内 容 の 要 旨

「液状化現象」は、1964年新潟地震でのアパート倒壊等に見られるように、近年の大地震において、都市に様々な被害をもたらしてきた。特に兵庫県南部地震では、港湾施設、道路、建築物、ライフライン等の各種施設に著しい被害が発生し、多大な経済的損失をもたらした。また、東北地方太平洋沖地震にて、震源から遠く離れた東京湾沿岸部で広域に渡り液状化被害が観測されたのは記憶に新しい。2012年には、最大規模マグニチュード9クラスの南海トラフ巨大地震の被害予測結果が内閣府より公表されたこともあり、ますます液状化被害に対する懸念が高まっている。今後は、巨大地震に備え多くの場面で液状化対策が普及していくことが望まれる。

そのような状況の中、「間隙水圧消散工法」は、比較的安価で施工性の高い液状化対策として近年注目を集めている。人工ドレーン材による対策を施した東京湾内の木材埠頭では、東日本大震災においても液状化被害を免れた実績もある。しかしながら、間隙水圧消散工法には、数値解析上および設計手法上での未達の課題が存在し、普及の足枷となっている現状がある。これら課題の克服が同工法の利用価値の向上および適用範囲の拡大に繋がるものと考えられる。以下にこれらの課題について説明する。

間隙水圧消散工法に関するこれまでの研究において、数値解析によるアプローチは、実務レベルはもちろんのこと研究レベルにおいてもその数は少ない。それは同工法を扱う数

値解析上の課題が大きく分けて 2 つ存在するためである。まず、同工法は、地震時の水圧上昇を抑制し液状化の発生を食い止める代償として、締固めによる地表面沈下をある程度許容する。従ってこの工法の採否を決定する際に、単に液状化を防げるか否かという点だけでなく、締固めにより発生する変形量が予測できるかという点も重要となる。これが一つ目の課題である。同工法の効果を総合的に判断するためには、併せて地震後の圧密も統一的に扱う必要があるが、これらの要求を満たす解析コードは少ない。もう 1 つは、計算効率の向上である。これは間隙水圧消散工法に限らず、バーチカルドレーンを扱う問題全般に共通する課題である。地中に埋められた無数のバーチカルドレーンを有限要素により厳密に表現する場合、3次元解析と細かなメッシュ分割に伴う莫大な計算コストが生じるため、設計業務で実用するには、バーチカルドレーンの集排水機能を効率よく表現するための何らかの手段を導入することが望まれる。これまでに実地盤を対象とした大規模領域における数値解析が行われてこなかったのは、この課題の克服が困難であることに起因している。

設計についての話題に移る。兵庫県南部地震による土木・建築構造物の大被害を契機に、従来の耐震設計の考え方が見直された。新たな耐震設計法、すなわち「性能設計」が本格的に導入され、安全率を指標とする従来の設計法から、構造物等の設計対象物に要求される性能を照査する、より合理的な設計法への移行が求められている。しかしながら、間隙水圧消散工法の現行設計法では、最大過剰間隙水圧比の許容値が設定され、許容値内に水圧を抑制することのみに焦点が当てられてきた。これは先述した数値解析上の課題とも関係するが、地震中～地震後の変形量を明確に予測する手段が無いため、設計指標として過剰間隙水圧比にのみ頼らざるを得ないことが要因として考えられる。性能設計に対応させるために、変形量を精緻に予測する解析コードの開発がここでも求められることとなる。また、最大過剰間隙水圧比の許容値が設けられた背景として、同工法では改良された地盤であっても、ひとたび過剰間隙水圧比が高い状態となれば液状化抑制効果が得られないのでは無いかという懸念が存在してきた。これに対し、許容過剰水圧比を地震中に超えたとしても液状化や残留変形の抑制には一定の効果を見込めることが既往の研究で報告されている。これらの研究では模型実験による簡易な評価に留まったが、現行設計で用いられる許容値を超える高い過剰間隙水圧比状態となる場合の液状化抑制効果を数値解析により定量的に評価することができれば、同工法のより高度な性能設計が可能となる。

上記課題を克服する間隙水圧消散工法の数値解析的手法の開発、そして同工法の高度な性能設計手法について検討することが本研究の目的である。

数値解析上の 1 つ目の課題は、名古屋大学地盤工学講座で開発された、水～土連成有限変形解析コード *GEOASIA* を用いることで解決を図った。*GEOASIA* は、締固め現象と液状化現象、および地震中に発生し得る締固めによる沈下と液状化後に発生し得る圧密沈下を統一的に扱うことができるため、同工法における地震中～地震後までの変形量の予測が可能である。また 2 つ目の課題に対しては、均質化手法の一種である「マクロエレメント法」

に着目した。マクロエレメント法は各要素にドレーンの排水機能を与えることで、細かなメッシュ分割を伴わずにパーティカルドレーンのシミュレーションを可能にする。マクロエレメント法を用いた数値解析はその多くが準静的な問題に限定されていたため、慣性項を有する **GEOASIA** に実装することで動的問題に対応させた。詳細な研究目的は以下に示す通りである。

- 1) 慣性力対応の水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA** へマクロエレメント法を実装し動的問題に対応させることで、定量的かつ効率的に間隙水圧消散工法のシミュレーションを可能にする数値解析手法を開発する。
- 2) 動的問題に適用したマクロエレメント法の近似精度の検証を行う。
- 3) 大規模領域の実地盤を対象に、新たに開発した数値解析手法を用いた間隙水圧消散工法の効率的かつ高度な性能設計手法を検討する。

以下に各章の概要を示す。

第 2 章では、マクロエレメント法の動的問題への適用法について定式化した。パーティカルドレーンの集水機能を表現するため、新たに水～土～ドレーン連成式を、速度型の運動方程式と併せて支配方程式の一つとして用いている。具体的には、ドレーンを中心軸とする軸対称性を仮定して得られる Barron の解を利用してドレーン周りの水圧分布を仮定することで、土からドレーンへの流入速さを決定するモデルを導出し、慣性項を有する水～土連成有限変形解析手法の水～土連成式に付加した。また、従来のマクロエレメント法では解析条件として与えられていたドレーン内の水圧を、未知数として地盤の運動や間隙水圧と同時に求めることができるように機能拡張を図った。未知数の増加を補うために、ドレーンの連続式を支配方程式に加えることによって、ドレーンの排水機能が同手法に付加されることとなった。この機能拡張によって、ウェルレジスタンスが条件に応じて自動的に発生するようになった。

第 3 章と第 4 章では、マクロエレメント法の近似精度について検証した。第 3 章では、動的問題における精度検証に先立ち、準静的問題におけるマクロエレメント法の精度検証を行った。この検証は、メッシュ分割によりドレーンを厳密に表現した 3 次元解析結果とマクロエレメント法を適用した 2 次元平面ひずみ解析結果を比較することで行った。はじめに、帯状ドレーンが正方形配置された場合を想定し、そのうちの一本のドレーンとその有効集水域を解析対象に近似精度の検証を行った。マクロエレメント法はドレーンを中心軸とする軸対称性を仮定して得られる Barron の解と等しい水圧分布がドレーン周りに発生すると仮定して導出されるが、この解析を通じて軸対称性がない問題においても高い近似精度が得られることを示した。ただし、排水機能も具備するマクロエレメント法が高い近似精度を発揮するためには、帯状ドレーンから円柱状ドレーンへ換算を行う際に、換算によってドレーンの通水能力が変化しないように、ドレーンの透水係数を併せて換算する必要がある。次に、中間砂層が介在する粘土地盤へ真空圧密工法を適用する問題を例に、複数本のドレーンを含む多次元的な問題での近似精度について検証した。解析の結果、ウェ

ルレジスタンスが顕著に発生し、かつ、改良域や各ドレーンの有効集水域を跨ぐ間隙水の流れが顕著に発生するような問題においても提案するマクロエレメント法は高い近似精度を発揮することを示した。

第4章では、盛土直下に間隙水圧消散工法を適用したケースを対象とし、動的問題におけるマクロエレメント法の解析精度を検証した。第3章と同様に、メッシュ分割によりドレーンを厳密に表現した3次元解析結果とマクロエレメント法を適用した2次元平面ひずみ解析結果を比較することで検証した。動的問題においても、マクロエレメント法による解析は、水圧変動から地盤の変形に至るまで精度良く3次元解析結果を近似し、ドレーンピッチに応じた改良効果の違いも精度良く表現できること等を示した。さらには、2次元または3次元メッシュ解析に先立ち、1次元メッシュ解析で有効なドレーンピッチを把握することにより、効率的な間隙水圧消散工法の設計が可能となること等を示した。

第5章では、動的問題に適用したマクロエレメント法を実問題へと適用した。実在する埋立地盤を対象とし、間隙水圧消散工法の改良効果を定量的に把握することを試みた。その際、現行設計法に捉われず、より高度な性能設計を意識した詳細な検討を行った。検討の結果、現行設計法のように最大過剰間隙水圧比を許容値内に抑制することのみに焦点を当てるのではなく、地盤の変形まで適切に評価することで、高度な性能設計が可能となること等を示した。また、提案するマクロエレメント法を用いた数値解析は、地盤の透水係数やドレーンの透水係数が改良効果に及ぼす影響の効率的な把握を可能にする等、同工法の設計の幅を広げること等を示した。

第6章では、間隙水圧消散工法の改良効果をさらに広範に検討するべく、異なる地震動を用いた場合の改良効果を詳細に調べた。第5章と同じ地盤を対象に、直下型地震、短い時間差で発生する海溝型地震動を入力した。いずれの地震動を用いた場合においても、水圧の上昇抑制・消散促進および変形量の抑制が確認され、適切な条件設定の下で、間隙水圧消散工法が十分な改良効果を発揮すること等を示した。

第7章では、第6章までの議論を取りまとめ、本論文の結論を示した。