

(別紙1)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書概要版

- (1) 課題番号：第6号
- (2) 研究課題名：基礎地盤不飽和化による液状化対策工法の実証的研究
- (3) 研究期間：平成23年度-平成24年度
- (4) 代表者（所属機関・職名）：畑中宗憲（千葉工業大学・教授）
- (5) 研究代表者（所属機関・職名）：畑中宗憲（千葉工業大学・教授）
- (6) 分担研究者（所属機関・職名）：吉田正（㈱東京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部部長）、田部井哲夫（㈱東京ソイルリサーチ・東京支店統括部長）、乾一幸（㈱東京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部課長）、安浩輝（㈱京ソイルリサーチ・東京支店技術調査部係長）
- (7) 補助金交付総額（円）：18,000,000円

(8) 研究・技術開発の目的

更地地盤を対象とした基礎地盤の液状化対策工法は各種開発され、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震でも、それらの工法の有効性が検証されています。しかし、既存建物がある基礎地盤の液状化対策工法は現在に至るもまだ有効な方法が開発されていない。本研究は、既存建物がある基礎地盤の液状化対策工法の開発を目的とした。具体的には、基礎地盤にマイクロバブル水（MB水）あるいは空気を地盤に注入して、基礎地盤を不飽和化し、地盤の液状化強度を増加させ、液状化による被害の低減を目指すものである。不飽和化工法は、低コストで環境に優しく、戸建住宅の様な狭小な敷地でも施工が可能などの利点があります。

(9) 研究・技術開発の内容と成果

代表研究者および研究担当者達の本工法に関連する既往の研究結果を踏まえて、本研究での開発目標と課題は、設計法的目標と施工法的目標に分けて、下記のように設定した。

**開発目標1：飽和度設計法の確立**

課題①：実大規模での液状化被害低減効果の評価

課題②：不飽和砂地盤の液状化強度の評価

**開発目標2：施工計画の検討法の確立**

課題③：不飽和化システムの確立

課題④：不飽和領域の評価法の確立

以下に、各課題で実施した研究内容および成果について述べる。

### 課題①：実大規模での液状化被害低減効果の評価

実地盤実験で、地震動による不飽和地盤の液状化被害低減効果を把握するのは困難なので、遠心載荷装置を利用して縮小模型で実大規模地盤を再現し、振動実験により不飽和地盤の液状化被害低減効果について確認した。飽和地盤の液状化による沈下性状については既往の研究成果<sup>4) 5)</sup>が示されているが、不飽和地盤の沈下特性については十分な成果が得られていない。本工法が有用であるためには、液状化強度の増加だけではなく、地盤沈下の特性をも定量的に把握する必要がある。そこで、遠心載荷装置を用いた地震動を模した振動実験を行い、不飽和地盤の過剰間隙水圧の上昇・蓄積、地盤の加速度応答および振動による地盤の沈下量について評価した。模型地盤は7号珪砂を用いて作成し、実地盤換算で厚さ10mの砂層を対象とした。地下水位は東京湾岸の埋め立て地の代表的な深さとして、GL-1mとした。入力加振は一定振幅の正弦波で主要動が15回とした。地盤不飽和化の効果を検討するため、飽和地盤と飽和度が約90%の不飽和地盤を作成して比較検討した。なお、住宅模型も設置し、住宅と地盤の沈下性状についても考察した。

### 課題②：不飽和砂地盤の液状化強度の評価

既往の研究では、再調整試料を用いた室内要素試験により、飽和度の低下による液状化強度の増加を確認している。しかし、実地盤の不飽和化試料の液状化強度の評価については研究代表者の結果を含めても実施例が少なく十分とは言えない<sup>9)</sup>。本研究では、不飽和化した実地盤から凍結サンプリングにより不攪乱試料を採取し、液状化強度を求めて地盤不飽和化の効果を確認し、飽和度と液状化強度の関係を確認した。

### 課題③：不飽和化システムの確立

既往研究では、模型砂地盤を用いた砂地盤の不飽和化システムの検討がなされてきた。しかし、実地盤における施工実験事例<sup>6~8)</sup>は少なく、不飽和化の設計・施工法の確立には不十分である。本研究では、東北地方太平洋沖地震で液状化した地盤において、戸建て住宅規模の敷地（平面形：12m×10m）について、深さ3mから6.5mの埋立砂層を対象に、不飽和化システムの適用性（MB水あるいは空気の注入量、注入圧、無人の継続運転の可否など）の確認を行った。

### 課題④：不飽和領域の評価法の確立

本工法では不飽和化領域を3次的に把握する必要がある。そこで、現場実験において、注入井戸のほかに観測井戸を設置し、不飽和化領域把握のため、地盤の飽和度を測定した。本工法の液状化被害低減効果は確実に飽和度を低下させることで保証される。その為、飽和度を確認する手法は必要不可欠である。そこで、P波速度による方法<sup>9) 10)</sup>および電気比抵抗による方法を検討するとともに、凍結サンプリングにより採取した不攪乱試料を用いて飽和度を直接測定し、測定精度、簡易さ、現場での適用性などの観点から地盤飽和度測定方法の評価を行った。

上記の研究により得られた成果を下記にまとめた。

#### (1) 動的遠心載荷実験による不飽和化工法の液状化被害低減効果の確認

動的遠心載荷装置を用いて、実大規模の不飽和地盤の液状化被害低減効果を評価した。実験により得られた成果は以下の通りである。

①マイクロバブル水の注入により、飽和度を 10%低下させた模型砂地盤は、飽和地盤に比べて、過剰間隙水圧の上昇速度がかなり小さくなり、かつ、最終的な上昇量も大幅に低下させることができた。その結果、不飽和地盤は液状化しなかった。

②不飽和地盤でも、過剰間隙水圧の上昇により、地盤の沈下はみられた。しかし、地盤の沈下量は飽和地盤の 1/2 から 1/3 に低下した。

上記の実験結果より、地盤不飽和化工法は液状化による被害の低減に有効であることが実地盤応力のもとでの振動実験結果で示された。

#### (2) 不飽和砂地盤の液状化強度の評価

原位置の不飽和化後地盤から凍結サンプリング法で採取した不攪乱試料を用いて、液状化実験を行った。得られた成果は以下の通りである。

①飽和度が 10%低下した試料は飽和試料に比べて、15 回の繰り返しせん断での液状化強度は 1.4~1.8 倍程度の強度増加を確認できた。この結果は、既往<sup>9)</sup>の再調整試料および同様な原位置から採取した不攪乱試料の試験結果と概ね対応している。

②P 波速度の低下に伴う、液状化強度の増加を確認した。この結果は、ばらつきはあるものの、既往<sup>9)</sup>の再調整試料および同様な原位置から採取した不攪乱試料の試験結果と概ね対応している。よって、P 波速度は液状化強度を評価する方法として有用であると考えられる。

#### (3) 不飽和化システムの確立

原位置の地盤調査と井戸設置および不飽和化実験により、不飽和化システムとして必要な項目を整理した。得られた知見は以下の通りである。

①不飽和化を行う対象層を決定するためには、地盤調査や情報収集を行い、地盤特性を正確に把握する必要がある。②効率的に地盤不飽和化するには、井戸の材質や性能を適切に設定する必要がある。③MB 水および空気のどちらの注入方法でも、地盤を不飽和化できる可能性を確認した。なお、今回の実験では、MB 水は深い層でより注入効果が表れやすく、空気注入では浅い層でより注入効果を表れやすい傾向があった。これは地盤条件や改良条件などにより適切な注入方法を選択する必要があることを示すものである。④MB 水の注入の場合、注入に伴い注入量が徐々に低下し、注入を継続すると注入可能量が少なくなる。地盤中の土粒子間にトラップされた気泡が、地盤の透水性を低下させている。

#### (4) 不飽和領域の評価法の確立

P 波速度の変化測定と、井戸内の気泡確認、および地盤の電気抵抗を測定することで地盤の飽和度の変化を測定した。また、凍結サンプリング試料により直接地盤の飽

和度を測定し、比較を行った。得られた知見は以下の通りである。

①P波速度の変化により、飽和度が低下している可能性を確認した。なお、今回は部分的な測定のため、不飽和領域を把握するためには、測定精度を含めた測定方法の検討が必要である。②測井への気泡到達状況を井戸内カメラで直接目視することができた。なお、今回確認した気泡は、比較的浅い深度に限定されており、かつ一部の井戸では未確認であった。気泡到達の確認のより不飽和領域の概要を把握できるが、飽和度を定量的に評価することは困難である。③不飽和実験に伴い地盤の電気抵抗を三次元的な経時変化を計測することで、注入範囲や飽和度を概ね把握することができた。ただし、注入水の比抵抗などが影響する可能性があり、測定精度を上げるには、これらの影響を補正する方法の検討が必要である。④凍結サンプリング試料を用いて、原地盤の飽和度を測定することができた。今後はより経済的な飽和度測定法の検討が必要である。

(10) 研究成果の刊行に関する一覧表

研究期間中に発表した成果はありませんが、成果の速報版として、今年度の日本建築学会大会（2013年8月30日～9月1日、北海道大学）に下記2編の論文を投稿した。

① 基礎地盤不飽和化の実証的研究 その1 原位置実験

安浩輝、吉田正、乾一幸、松田裕樹、畑中宗憲、鶴田壮広、内田明彦

② 基礎地盤不飽和化の実証的研究 その2 液状化強度特性

畑中宗憲、松田裕樹、村田健司、安浩輝

(11) 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

なし

(12) 成果の実用化の見通し

砂地盤不飽和化による液状化対策工法の実用化のためには、今後下記の課題を解決する必要があります。

(1) 設計法について

- ・地盤特性に応じた、適切な注入井戸間隔および深さの設定法の開発
- ・本工法の適応地盤条件の検討

(2) 施工法について

- ・地盤条件と改良条件に応じた適切な注入方法と注入量の検討
- ・地盤の飽和度の測定精度の向上

上記の課題については、今回の研究によっていずれも、解決するための基本情報を取得しており、引き続き1ないし2年の実験および不飽和浸透解析による原位置実験のシュミュレーション解析により、解決できるものと考えております。

(13) その他