

氏名	モリ カワ ユキヒロ 森 河 由紀弘
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第895号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	再液状化を含めた地盤液状化メカニズムの解明および 種々地盤耐震補強工法の評価への応用 (Clarification of the mechanism of re-liquefaction and its application to evaluate seismic enhancement effect of various kinds of ground improvement)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 前田 健一 准教授 Hossain Md. Shahin 教授 中野 正樹(名古屋大学)

## 論文内容の要旨

日本は地震、台風、豪雨、土石流、噴火など数多くの災害が発生する災害大国である。このような災害大国日本において、我々は「治水と利水」により文明を築き、安定した領土の確保や社会基盤整備を行ってきた。そして現在では土木技術も飛躍的に向上し、特に日本の耐震技術は世界一だと言われるほどであり、以前に比べれば自然災害による被害も少なくなってきたように思える。しかし、地震などの地球規模で起こる天災は予測が困難な上に、大地をも穿つ圧倒的なエネルギーの前には、依然として我々になす術はない。実際に構造物の被害としては最大規模である1995年1月17日（火）に発生した兵庫県南部地震における多大なる犠牲を代償に、構造物における耐震補強技術はそれ以前に比べ遥かに向上した。しかし、我々の記憶に新しい2011年3月11日（金）に発生した東北地方太平洋沖地震では構造物の倒壊等の被害さえ小さかったと考えられるが、観測史上最大の津波被害や液状化被害が生じており、死者・行方不明者は最大規模のものであった。このように、依然として人類が解決すべき問題は依然として山積みである。

このような背景の中、本論文では地震災害に着目して防災と減災の2つの視点から、損傷による被害を最小限に抑えるための既設杭基礎構造物の耐震補強、液状化や再液状化による被害の把握とメカニズムの解明、有事の際における構造物の機能（性能）保持を目的とした、地盤に対する効果的・簡易的な補強方法について検討を行った。

既設構造物の耐震補強については、杭基礎構造物を対象に振動台実験、及び土水連成弾塑性有限要素動的解析により耐震補強効果の検証を行った。また、液状化、再液状化、及び液状化対策についても耐震補強と同様に振動台実験、及び土水連成弾塑性有限要素動的解析による検証を行った。

解析は Zhang et al.(2007)による回転硬化型弾塑性構成式 Cyclic mobility model による土水連成有限要素解析プログラム「DBLEAVES」を用いた。Cyclic mobility model は土の力学挙動に大きな影響を与える土の密度や過圧密比、自然堆積過程に形成された構造、および各種応力履歴を受けることで発生した土の応力誘導異方性を一つのモデルでパラメータを変えことなく表現することを目的に開発された構成式である。このモデルの特徴の一つは限界状態線（以下 C.S.L.）の勾配が異方性の発展によらず一定となり、楕円形の降伏曲面の扁平率が一定ではなく、サイクリックモビリティを示すような状態では異方性の大きさに依存して楕円の扁平率が変化する。すなわち応力誘導異方性が大きくなるほど、楕円の扁平率が大きくなることを特徴とする。

#### 1) 既設杭基礎構造物を対象にした耐震補強について

供用中である既設構造物基礎の損傷は、構造物として要求される性能を著しく低下させ、また、補修には莫大な施工コストや工期等を要する。本研究では、施工制限や経済性、工期に対して有用な耐震対策であると考えられる「杭基礎周辺地盤の部分固化」について、IG 場での振動台実験と土水連成弾塑性有限要素動的解析によりその補強効果を検証した。

はじめに、有用性を確認した振動台実験装置を用いて、杭基礎構造物を対象とした乾燥状態の豊浦標準砂を用いた振動台実験を実施し、加振時における力学挙動を把握した。次に実際の地盤改良と同様のセメント改良土（砂、粘土、セメント、水）による「ブロック状改良」、ブロック状改良の改良厚さを薄くし多段式に改良することにより改良土量を増大させることなく改良範囲を広範囲化した「多段式改良方法」等において耐震補強効果を確認した。特に「多段式改良方法」は杭を広範囲に拘束することに成功し、一点集中型の「ブロック状改良」よりも改良効果が高いことを実験・解析の双方より確認した。実験や解析の結果、改良パターンに因らず耐震補強が無い場合に発生していた杭頭部での大きな曲げモーメントが、耐震補強を行うことにより大幅に抑制できることが明らかになり、部分固化による効率的な補強効果を確認した。

#### 2) 液状化、及び再液状化の再現解析について

通常設計では余震による被害は検討されていない。しかし実際は東日本大震災でも明らかとなったように、本震により地盤がダメージを受けた状態では、その後に発生する複数回の余震を受けることにより、本震以上の被害となることが確認されている。そこで土水連成弾塑性有限要素動的解析を用いて、実際の土層断面や地盤調査結果等を基に

した再現解析を行い、液状化・および再液状化による被害についての検討を行った。

また、振動台実験装置を用いて 1G 場での液状化、及び再液状化の実験を行い、構成式の妥当性を検証するとともに、再液状化現象の確認を行った。

### 3) 液状化対策について

液状化、及び再液状化現象を対象に一般的な砂より透水係数の高く排水効果の高い「砕石を模擬したアルミナボール」やリサイクル材料として注目されている「破碎瓦」等を用いた人工的な透水層による液状化防止、あるいは沈下等に代表される液状化被害の低減に着目して、1G 場での振動台実験と土水連成弾塑性有限要素動的解析を用いて防災・減災を目的とした対策工法を検証した。検証の結果、液状化を引き起こす過剰間隙水圧比の上昇を低減したり、上昇後の過剰間隙水圧の消散を早めることに成功した。また、その結果として沈下量を抑制することにも成功した。

### 4) 支持力増加工法について

東日本大震災では液状化等の影響により防潮堤などの構造物が沈下、あるいは転倒破壊する被害状況が数多くみられた。しかし、構造物の躯体そのものは健全なままであり、防波堤や防潮堤は許容支持力の低下により、その機能を失ったと考えられる。そこで地震や豪雨時等において、可能な限り土木構造物がその機能を維持できるように、ある程度地盤の許容支持力が低下したとしても、地盤に作用する最大地盤反力度の低減を図ることにより構造物の安定性を確保できるように、ジオシンセティックスを用いた地盤補強方法の検証を行った。実験は遠心載荷試験装置を用いて、乾燥状態の豊浦標準砂を対象に 50G の条件下で支持力の確認を行った。

## 論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの地震災害が多発している中、人命、インフラ、経済、自然環境は大きな非常に被害を受けている。その中で、地震発生後に迅速な救援活動や支援を行うためには幹線道路や高速道路の機能確保が必要不可欠であり、既設建造物の耐震補強は急務な課題となっている。また、浦安市をはじめとする砂質土地盤の液状化による被害も甚大であり、液状化メカニズムの解明や液状化対策は我々の生活を守るために非常に重要な位置づけとなっており、世間の関心も非常に高い。近年、地震による液状化メカニズムに関する研究は多くなされてきたが、液状化後の圧密沈下減少や再液状化現象に関する研究については十分であるとは言えない。しかし、現実には複数回の地震動により引き起こされる再液状化現象は被害の拡大につながり、液状化対策が行われている住宅はほとんど皆無であると言える。

本論文の目的は防災・減災を特に意識し、既設建造物の効率的・効果的な耐震補強方法や再液状化を含めた液状化現象の被害予測、また安価で有りながら環境への影響も少ない液状化対策の提案である。

種々の地盤災害発生メカニズムを解明し、最適な対策を提案するためには、地質調査や室内試験による地盤特性値の把握は言うまでもなく重要であるが、現時点から未来を予測するためには適切な数値解析手法を用いた理論計算も非常に重要である。よって、過圧密・構造・応力誘導異方性を適切に考慮できる移動硬化型弾塑性モデルに基づいて、液状化を含めた地震災害問題をシミュレートし、その適応性を検証した。本研究により得られた研究成果は以下のとおりである：

既設杭基礎建造物の耐震性能を高めるために、一般的な工法による部分的な地盤改良による耐震補強効果について振動台実験や有限要素解析を用いて検証した。既往の研究により、静的有限要素解析を用いて地盤改良のサイズや位置をパラメータとした補強効果の検証が行われていたため、それらを参考に改良効果や改良土量において最適と考えられる補強パターンを基本パターン（改良は1点集中型となるブロック状改良）とし、また、基本パターンをベースに、改良体に作用する慣性力を低減しつつ、さらに杭全体を拘束することが可能な多段式改良方法（1層辺りの改良厚はブロック状改良の3割であり、改良箇所は3深度）を提案し、1G場での振動台実験を実施した。さらに、振動台実験と同条件の動的有限要素解析、及び静的有限要素解析を行うことにより、補強効果の妥当性の確認と定量的な検証・比較も行った。ここで、数値解析はモデル実験結果を概ねある程度表現できており、補強ありのケースにおいては改良下端部で曲げモーメントが大きくなる傾向にあるものの、地盤改良部にある杭頭部で曲げモーメントが抑制され、また杭全体での最大曲げモーメントは2割以上低減させることに成功した。ただし、発生曲げモーメントについて、実験結果と比べ解析結果は6倍程度大きな値となっており、実験精度を向上させるのが今後の課題となる。

被災事例を基にした再液状化を含めた液状化解析については、ボーリングデータや土質試験結果をもとにした再現解析を行い、1自由度、2次元、3次元解析において再液状化現象をよく表現できている。また、再液状化現象のみならず、粘性土が水圧を保持することによる長期圧密沈下減少や多層への水圧供給や間隙水圧消散の阻害など、粘性土層がもたらす危険性についても問題提起を行っている。特に、今まで地震に伴う地震災害については液状化のみが議論されており、粘性土層についてはあまり議論が行われておらず、新規性のある研究内容であると言える。また、液状化対策として実際の都市を想定し、恒久的に地下水位低下させた場合についての液状化被害低減等にも言及しており、模型実験とは異なり実現象と比較するのは困難であるが、信頼性のある計算内容であると言える。

液状化対策として破碎瓦を用いた液状化対策を提案している。実際には①破碎瓦を埋設物の埋戻し材料として使用した埋設物の浮上り対策、②既設建造物（住居等）を対象とした破碎瓦を用いた排水壁による液状化後の早期支持力回復である。これらは振動台実験や有限要素解析を用いて検証されており、その効果は確実であり、NHKや日経新聞に記載されるほど世間的には関心高いものであった。実際に埋設物の浮上り対策では、模型実験で浮上り量が1/3程度と押えられ、また排水壁についても排水壁内部においては過剰間隙水圧の消散速度が大きく向上しており、工学的にも十分に価値のある検証であった。

以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は工学的応用価値が大であり、博士（工学）論文として十分価値あると認める。