

論文審査の結果の要旨

氏名：太 田 宏

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：液状化被害の損失評価法に関する基礎的研究

—東北地方太平洋沖地震による浦安市の液状化地盤の被害に基づく事例研究—

審査委員：（主査） 教授 安 達 俊 夫

（副査） 教授 岡 田 章

特任教授 神 田 順

工学院大学教授 宮 村 正 光

本研究は、建築基礎構造と地盤工学の耐震問題に関わる研究領域に属し、液状化による地盤被害の地震リスク評価に焦点をあてたものである。

1964年の新潟地震において新潟市内で発生した砂地盤の液状化は、落橋、鉄筋コンクリート建物の転倒、地中埋設物の浮上など甚大な被害の原因となった。新潟地震を契機として、我が国において建築物の基礎構造の耐震設計として液状化が中心的な課題を占めている。その後、1995年の兵庫県南部地震、2000年の鳥取県西部地震、2007年の新潟県中越沖地震などで埋立地や旧河道を中心に大規模な液状化が発生し、各種構造物やライフラインに大きな被害が生じた。さらに、2011年の東北地方太平洋沖地震では、震央から遠く離れた関東地方の臨海部や河川流域の埋立地などにおいて世界最大級の広い範囲で液状化が発生した。特に、千葉県浦安市では深刻な液状化被害が生じ、公共施設だけでも復旧事業費の総額は約300億円に達した。

現在、液状化や被害の程度を表す既往の指標として、液状化判定に基づく液状化指数 P_L と地表面動的水平変位 D_{cy} がある。 P_L については岩崎・龍岡らの論文において、 $P_L=0$ から $P_L>15$ まで P_L の値を4区分し、液状化の危険度を「かなり低い、低い、高い、極めて高い」の4段階に分類している。また、 D_{cy} については日本建築学会「建築基礎構造設計指針（2001）」において、 $D_{cy}=0\text{cm}$ から $D_{cy}>40\text{cm}$ まで D_{cy} の変位量を6区分し、被害の程度を「なし、軽微、小、中、大、甚大」の6段階に分類している。なお、 D_{cy} は液状化による沈下量に相当するとされている。

一方、実際の液状化の被害は、建物や工作物などの沈下や傾斜、マンホールや浄化槽などの地中埋設物の浮上、建物周辺の地盤の沈下による段差、地表面の地割れや噴砂、さらに側方流動など被害の様相は多種多様であり、それらが複合的に発生する。そのため前述の P_L や D_{cy} と言った液状化に対する地盤挙動を推定する指標のみでは、液状化による多様な被害の定量的な評価に直ちにつながらず、現在、合理的な地震リスク評価法の構築が望まれている。

このような背景のもとで、申請者は、建物の耐震性能を表す予測指標の1つである予想最大損失 PML に着目し、液状化による被害の定量的な評価法について検討している。PML は「予想される最大規模の地震（50年間で10%を超える確率）に対する最大規模の物的損失額（90%非超過確率）の再調達費に対する割合」と定義されている。本来、PML の概念は使用期間中に予想される最大規模の地震を想定して、建物の耐震設計に役立てようとするものである。この考えを液状化地盤の被害に展開した研究は今までほとんど見られず、申請者の取り組みは、新規性の高い斬新な試みとして高く評価できる。

本論文では、まず既往の研究を概観し、対象施設の地震リスク評価を行う際、ほとんどの研究が、被害の程度を直接目視により評価できる上部構造の損傷評価に限定され、地盤被害の損失を定量的に評価したものがないことを指摘している。そのうえで、地盤被害の中でも被害が顕著となる液状化被害に着目して、液状化指数 P_L や地表面動的水平変位 D_{cy} などの液状化や被害の程度を表す既往の指標について言及している。その結果、液状化によりもたらされる被害は、建物や工作物などの沈下、傾斜、転倒だけでなく、地中埋設物の浮上や建物周辺の外構の被害など多様な様相を示すため、その損失量を既往の指標だけで表現することは不十分であることを指摘している。

そこで本論文では、このような複合的な被害を総合的に表現する方法の提案を試みている。具体的には地震後、補修に要する費用を地震時に失われる損失費用とみなし、既往の液状化の指標 D_{cy} の活用と、液

状化にもたらされる被害の大半が、建物周辺の外構の被害によることを念頭に置いて、被害の程度に応じた補修費用の最適な確率分布モデルを構築して、液状化による地盤被害の新たな損失評価手法を提案している。

本論文は全5章で構成されている。

第1章「序論」では、既往の研究を概観し本研究の背景と目的、本論文で提案する液状化地盤の損失評価法の概要および本論文の構成を示している。

第2章「液状化判定法の概要」では、通常の地盤調査による N 値に基づく簡易な液状化判定の指標である液状化安全率 F_L 、液状化指数 P_L および地表面動的水平変位 D_{ey} の考え方と算出方法について論じている。これらの3つの指標のうち、液状化や被害の程度を予測する指標は P_L と D_{ey} である。前者については岩崎・龍岡らの論文、後者については日本建築学会「建築基礎構造設計指針(2001)」による分類と考え方を示している。なお、現行の液状化判定はマグニチュードが5.5から8.5の範囲の地震動を対象としている。一方、2011年の東北地方太平洋沖地震はマグニチュードが9であり適用範囲外であるという指摘がある。この指摘に対して、東北地方太平洋沖地震後の既往の研究からマグニチュード9の巨大地震にも現行の液状化判定が適用できることを示している。

第3章「液状化被害における損失評価法の提案」は、本論文の中核をなす章である。本章では、最初に2011年東北地方太平洋沖地震により甚大な液状化被害を受けた千葉県浦安市における主として教育施設の被害状況と補修費用に関する資料調査およびヒアリング調査について論じている。なお、前述したように本研究では、液状化被害の原状復旧を目指す補修費用を損失費用と見なしている。調査結果から液状化による建物の構造躯体の被害は比較的少なく、補修費用の大部分が校庭の舗装であり、他に植栽、砂場、遊具、側溝などの外構の補修に要していることを示している。さらに、各施設の総補修費用の約8割が外構の補修費用であること、各施設の実測沈下量と外構の補修費用に正の相関がみられることを示している。

次いで、地盤調査結果(土質柱状図)の N 値に基づく液状化判定を行い、各施設における液状化指数 P_L および地表面動的水平変位 D_{ey} (沈下量に相当する)を求めている。なお、液状化判定には、マグニチュード9、地表面最大加速度はK-NET浦安で計測された174galを用いている。実測沈下量および判定結果の P_L 、 D_{ey} をそれぞれ3分類に区分し、各分類の補修費用について対数正規分布およびガンマ分布による確率分布モデルについて検討している。検討結果から、補修費用の累積相対度数分布について次の2点の知見を得ている。

- ① 対数正規分布がガンマ分布に比べ適合性が高い。
- ② D_{ey} による分類が、 P_L による分類に比べ実測沈下量による分類に良く対応している。

最後に、現行の液状化判定法による予測指標である地表面動的水平変位 D_{ey} (沈下量に相当)の3分類に基づく累積相対度数分布を用いた液状化による地盤被害の損失評価法を提案している。

第4章「液状化被害における損失評価法の適用性の検討」では、第3章で提案した液状化被害の損失評価法の適用性について、千葉県浦安市入船および東京都江東区辰巳の教育施設を想定した液状化対策の地盤改良に関する検討を行っている。地震時において未改良の場合の損失評価法による外構の補修費用と地盤改良の工費を比較し考察している。その結果、本論文で提案する損失評価法が液状化対策の費用対効果を判断するうえで有用な情報を与えてくれることを示している。さらに、浦安市内を埋立ての有無と埋立ての年代により3地域に分類し、液状化による地盤被害の損失評価法の適用性について検討している。

第5章「結論」では、本研究の総括を行い、今後の課題を示している。

本研究は、一つの事例研究ではあるが、東北地方太平洋沖地震における千葉県浦安市で液状化した地域を対象に、補修に要した実際の費用と液状化や被害の程度を表す既往の指標との関係について詳細に分析、整理し、提案する手法の適用性について検討を行っている。対象施設が公共の教育施設という限定されたものであることや、地震動特性などの影響も含まれ、一般化については課題も残されているが、今後異なる地震や他の地域での検証が進めば、地盤と建物を含めた総合的な地震リスク評価手法の構築につながる可能性を有している。本論文の内容は、現行の液状化判定による指標から液状化がもたらす地盤被害の損失額を直接推定できる手法を提案した新規性の高い研究として評価できる。

本論文の研究成果は、地震リスク評価に関する研究分野の進歩に貢献し、建築基礎構造と地盤工学の耐震問題の発展に寄与するものと認められる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。

以 上

平成26年2月13日