

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 小林義和

地震時にゆる詰め砂地盤が液状化を起こす現象は、1960年代以来、重大な地震災害の一つとして研究と対策が進められて来た。砂地盤が液状化した結果、浅い基礎に支持された建物や液体貯蔵タンクなどは沈下・傾斜し、軽い埋設構造物は逆に浮き上がる。また河川堤防や港湾の護岸は大幅に変形し、機能を果たせなくなる。これらの既往の被害事例を通覧すると、液状化災害の本質は震動の強さではなく、地震後に過大な地盤変位・変形が残ることにあることが判る。そのような大変形を避けるために、1960年代から80年代にかけては、液状化の危険性を予測する方法、そして液状化の危険を減らすための地盤改良の方法が、盛んに研究された。ところがそのような状況は、80年代の半ばを境に一変した。それはライフラインの液状化抵抗が重要な課題となってきたからである。ライフライン網は広大な領域に敷設されており、たとえ地域の液状化危険度が高くても広い地盤を改良しきれものではない。それどころか、ライフラインの運営管理者と地盤の管理者とが別々であることが常態であって、地盤の強化が課題にすらならない。そのような状況では液状化の危険性を予測するだけでは全く不十分であり、液状化の結果として地盤がどのくらい変位変形するのか、そしてライフラインなどの施設はその地盤変形に耐えるのか、耐久性が不足しないとすればどのような対策を講ずれば良いのか、という方向に、研究の中心が移って来たのである。以上のような社会的な状況に基づき、本論文では液状化によって発生する地盤永久変形を量的に予測する手法を開発した。その特長として、次点を挙げることができる。まず第一に、広がりを持つ地域の地盤変位量分布を三次元的に計算していることがある。従来の地盤の解析は鉛直断面の二次元解析にとどまっており、本研究のような三次元解析を行なうことは稀であった。しかし本論文では地域に広がるライフライン網の液状化抵抗を念頭において、三次元解析の実現に踏み切ったのである。第二の特長として、三次元解析に付き物の過大な計算量の問題を、既往の模型実験成果を利用して大幅に削減したことがある。具体的には、東西南北の水平方向変位が鉛直軸に沿って正弦曲線分布すると見なし、この正弦曲線の振幅だけを未知量としたことである。この変位内挿のおかげで鉛直方向には有限要素解析のような節点を配置せずに済み、解くべき方程式の未知数の数が大幅に減少した。三番目の特長は、計算に必要な入力データの数が極めて少ないことである。地形、液状化層の厚さ、地表の不飽和層の厚さと堅さ、液状化砂の粘性、そして土の重さだけを準備すれば、計算が可能である。他の多くの地盤解析のように、不攪乱試料の採取と精密な実験、そして土の非線形応力ひずみパラメータの決定を要求することがなく、通常の液状化危険度調査で行なわれているボーリングと標準貫入試験だけで、必要な情報を揃えることができる。そして最後の特長は、地盤の大変形を考慮した解析である。液状化地盤の変形量には上限があり、たとえば斜面が水平になれば変位は停止するし、基礎の沈下は重量と浮力とが平衡する位置で完了する。このような性質は、地盤変形を駆動する荷重が地盤の大変形に応じて減少することが、原因であり、解析においてもこれを考慮しなければならない。従来の有限要素法の範疇では大変形を考慮するには非線形解析が必要であり、計算量の増大に繋がっていた。しかし本研究では特に複雑な計算を行なうこと無く、大変形の影響を考慮できる。

次に論文の内容を紹介する。第一章は序論であり、既往の地震被害事例を紹介するとともに、本数値解析手法のもとになった研究成果を紹介している。

本研究では最終的に三次元解析を実現したが、その予備段階として二次元解析法を開発した。

その理論的側面を記述しているのが第二章である。地盤の側方流動を二種類の鉛直内挿関数すなわち正弦曲線の四分の一周期と二分の一周期との重ね合わせで表現し、前者をFモード、後者をJモードと名付けた。それぞれのモードの大きさが、解くべき未知数である。これらを体積一定（非排水条件）の式に代入することによって、鉛直変位も表現できる。そして重力エネルギー、地盤ひずみのエネルギー、運動エネルギーがすべてFとJモードによって記述された。FとJモードの大きさは水平方向に変化する未知量であり、離散化された。節点における両モードの大きさは解析力学において一般化変位と呼ばれるものであり、上述の3つのエネルギー成分をラグランジュの運動方程式に代入することにより、一般化変位を求めるための連立方程式が導きだされた。地盤変位の進行速度を支配しているのは液状化砂の持つ粘性係数である。その値は他の研究で実験的に調べられている。

以上のような二次元解析の実際の性向を調べたのが第三章である。そして第四章では、1990年のフィリピン・ルソン地震において大規模な液状化が発生したダグパン市を題材にして、建物の沈下を解析した。

第五章において、本解析手法を三次元化した。本研究では実用性を考慮して、解析的に計算できる事項は、極力数式を使って解析的に計算し、数値計算の量を削減している。その結果、三次元化においては膨大な数式展開が発生した。その具体的な内容は論文末尾の付録に掲載し、第五章では要点だけを説明した。また、斜面の上端に発生する開口亀裂、建物が地盤にめり込む条件、港湾の重力式護岸などを計算で考慮するための境界条件式も、本章において導きだした。

三次元解析の基本的な性向を第六章で説明した後、事例解析を第七章で行なった。ここで取り上げたのは、液状化地盤上に設けられた盛土の沈下に関する模型実験2例、1983年日本海中部地震において大規模な変形を起こした能代市前山丘陵の例、そして1995年の兵庫県南部地震における神戸港ポートアイランドの被害である。

解析の現状では、既往の模型実験結果を参考にして、強い震動が終息した時点で地盤の変形も停止する、と考えている。具体的には、震動加速度のレベルが50ガルを下回った時点までが地盤変形の継続時間であり、そこで変位は停止する、と考えている。そして、この限られた時間内に発生する変位の大小は、計算に入力される液状化砂の粘性係数に依存するところが大きい。粘性係数の値に関しては現在、別の実験的研究で測定を試みているところであり、本研究では特定の値を利用することはできなかった。そこで実現を再現するには粘性係数としてどのような値が最適であるか、という逆解析的な立場から、事例解析を行なった。それによれば、常時の拘束圧の高い実地盤では、小規模な模型実験よりも、2桁程度大きな粘性係数が必要とされることがわかった。これらの値は、同時に進行している実験的研究が示している粘性係数と、矛盾していない。したがって、今後の地盤変形解析においても、同程度の粘性係数を入力することにより、妥当な結果が得られるものと考えられる。

第八章は全体の総括と結論および今後に残された課題の指摘である。

以上をまとめると本論文は、液状化地盤の流動大変形の予測という問題に対して、数値解析手法の開発という立場から研究したものである。その成果はライフラインに代表される重要施設の耐震性向上のために有用であり、地盤工学と耐震工学上の業績は大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。