

[討議・回答]

森伸一郎
三輪 滋 共著
沼田淳紀

“1995年兵庫県南部地震におけるまさ土埋立地盤の液状化挙動に関する振動台実験”への討議・回答

(土木学会論文集, 第549号/I-37 1996年10月掲載)

▶ 討議者 (Discussion) ————— 宮島昌克 (金沢大学)・北浦 勝 (金沢大学)・近藤宏樹 (金沢大学)
Masakatsu MIYAJIMA, Masaru KITAURA and Hiroki KONDOH

1995年兵庫県南部地震で新たな課題として認識された、まさ土埋立地盤の液状化に関する振動台実験をいち早く実施され、発表された著者らの論文に興味深く読ませていただいた。本稿ではまさ土地盤の液状化特性とともに、上下動が液状化に及ぼす影響についても論じられている。その結果、蓄積される過剰間隙水圧の発生特性や、液状化による沈下量の発生特性の両方に、鉛直動の影響は認められないと結論付けている。討議者らのグループでも同様の実験を行っており、我々の実験結果と比較していくつかの疑問を持ったので、質問したいと思う。

(1) 図-6, 図-8を用いて、液状化過程を示す蓄積される過剰間隙水圧の発生特性に鉛直動が関与しないと述べているが、このケースは図-6(a)に示されているように、水平動のみでも液状化に至るケースである。このようなケースで、もし鉛直動が液状化に関与するという結論を導くためにはどのような場合があり得るのか。すなわち、水平動だけで液状化に至るのであるから、もし鉛直動が液状化に関与していてもこれ以上過剰間隙水圧は上昇し得ないのではないか。

(2) 水平動のみでは完全液状化まで達しない入力加速度レベルの実験において、新たに鉛直動が加わることによって液状化が起るような場合、鉛直動が過

剰間隙水圧の上昇に寄与していると判断できると討議者らは考えている。図-9によれば、水平動だけで液状化に至る、 220 cm/s^2 以上の入力加速度レベルにおける水平加振と水平・鉛直同時加振においては有意な差は見られないが、 220 cm/s^2 以下においては、水平・鉛直同時加振の場合の方が水平加振よりも最大過剰間隙水圧の大きい場合が散見される。この点についての著者らの見解をお聞かせ願いたい。

(3) 過剰間隙水圧挙動への鉛直動の寄与を理論的に論じている項では、液状化層内での増幅率が1程度であることを仮定して議論を進めているが、液状化層内での増幅率は本稿でも述べられているように1~2である。液状化地盤における鉛直動の増幅に関する著者らの見解をお聞かせ願いたい。

最後に、液状化に鉛直動は影響がないとする著者らの結論は、著者らが行った限られた条件の範囲内で導かれたものであると討議者らは理解している。疑わしきは大いに疑えという立場で、討議者らも鉛直動が液状化に及ぼす影響について実験的、解析的に検討を加えているので、できるだけ早い機会に報告し、議論したいと思う。

(1997.1.13 受付)

▶ 回答者 (Closure) ————— 森伸一郎 (飛鳥建設)・三輪 滋 (飛鳥建設)・沼田淳紀 (飛鳥建設)
Shin'ichiro MORI, Shigeru MIWA and Atsunori NUMATA

1. はじめに

著者らの論文に対し、貴重なご討議をいただき、ありがとうございます。

著者らの論文(以下、討議論文と記す。)は、1997年兵庫県南部地震における臨海埋立地盤の液状化挙動を、相似則を利用した実験的研究により、まさ土地盤の液状化特性、鉛直動の影響、地盤の地震動増幅特性を検討した上で、この地震動の耐震設計上の位置づけ

を明らかにすることを目的としたものである。地震直後、鉛直動の影響が大きく話題になっていたことから、この影響を明らかにすることに重点を置いたものである。

討議者らの提示された3つの質問は、鉛直動の液状化特性に及ぼす影響に関する2つの質問と鉛直動の増幅特性に関する見解を求めるものであると理解した。これら、3つの質問について著者らの回答と見解を述べる前に、問題の対象に関する基本的な事項を明確に

する。

2. 対象とする問題の明確化

著者らの研究は、討議論文の4.でも述べているように、水平成層地盤における完全飽和状態の地盤を議論の対象としている。液状化の定義については、過剰間隙水圧の蓄積に起因して有効応力が低下し、載荷される外力に起因するせん断応力に対して、変形性能が著しく低下する現象であると認識している。その認識の下で、せん断波動場の水平成層地盤においては、過剰間隙水圧が初期有効上載圧に等しくなる状態が液状化状態であると見なすこととすると、液状化に到る過程は、過剰間隙水圧の蓄積過程を対象にして議論すればよいと考えられる。

しかし、液状化現象の本質は、有効応力の低下に起因するものであって、間隙水圧挙動が直接的に関係するものではない。

液状化問題では、静水圧を初期条件とし、せん断応力しか生じない場においては、それを基準にした間隙水圧の増加分を過剰間隙水圧（以降、単に間隙水圧と略す。）と呼んでいる。有効応力原理によれば、全応力一定の条件下では、有効応力の減少量は間隙水圧の増加量に等しい。鉛直入射の平面波せん断波動場では、水平成層で水平方向に無限の広がりをもつとき、地盤内の要素にはせん断応力成分しか変動しない。すなわち、等方成分応力は一定であり、非排水条件であれば、間隙水圧の増加量は有効応力の減少量に等しいため、間隙水圧の蓄積過程が液状化に到る過程の指標としての役目を果たすことになる。

一方、討議論文の4. (1)で述べたように、実際の地盤で観測される鉛直動成分を有する波動としては、P波、SV波、Rayleigh波が考えられる。P波とRayleigh波の入射される場では、地盤内応力には等方成分の変動が生じるため、間隙水圧の変動をそのまま有効応力の変動と見なすことはできない。SV波が斜め入射される場合でも、反射P波が生じるため同様のことがいえる。したがって、鉛直動と液状化現象の関連を議論するためには、間隙水圧挙動を等方応力の変動に起因するものとせん断応力の変動に起因するものに分離する必要がある。また、鉛直動の液状化現象への影響評価は、後者に関して議論される必要がある。

著者らの実験は、P波の鉛直入射場を想定したものであり、討議論文の4. (3)で述べた検討により、理論的に導かれる鉛直動による等方応力に起因する間隙水圧の評価式（式(11), (12), (13)）は、実験で得られた間隙水圧の振動成分を説明できることを示した。

討議論文では、それに基づき、間隙水圧に関して、計測値を振動成分と残留成分に分離して議論を進めた。

討議者らは単に間隙水圧と記述されているので、回答にあたっては、等方応力の変動に起因するもの（ここでは振動成分）、せん断応力の変動に起因するもの（ここでは残留成分）、それらの和のいずれが対象なのかを明確にする。

3. 回答

(1) 質問(1)に対する回答と見解

質問(1)は、つまるところ、「もし鉛直動が液状化に関与するという結論を導くためにはどのような場合があり得るのでしょうか。」という質問である。これに対する回答は、「鉛直動が液状化に関与するという結論を導くためには、水平動の加振波形に関して再現性が良いという条件の下で、水平動単独加振と水平・鉛直同時加振によって得られた間隙水圧時刻歴から圧縮波による影響と考えられる成分（等方成分によるもの）を取り除いた残留間隙水圧時刻歴において、有意な差が現れるという実験事実を得ること」である。

質問(1)では、討議者らは、著者らの示した図-6を「水平動のみでも液状化に至るケース」と捉え、「水平動だけで液状化に至っているのですから、もし鉛直動が液状化に関与してもこれ以上過剰間隙水圧は上昇し得ないのではないのでしょうか。」という見解を示した。

前半の見解に対する回答を述べる。図-6は、過剰間隙水圧蓄積過程の時間が最も長く、地震動が終了するまでによく液状化状態に到達していること、さらに、水平動成分の再現性に優れていることから、最適なケースとして例示したものである。「水平動のみでも液状化に至るケース」という表現は、鉛直動があつて初めて液状化に至るケースの存在を仮定した表現と捉えられる。著者らも、そのようなケースの存在の可能性を考慮して実験を行ったが、無かつたというのが結果であり、それによって導かれた結論を最も良く表現するものとして、図-6のケースを示した。

また、後半の見解については、間隙水圧の捉え方が不明確であるので、場合に分けて回答する。

残留成分を意味しているのであれば、討議者らの見解は妥当ではないと考える。なぜならば、図-6では、0.35秒から上昇し始めた間隙水圧が初期有効上載圧に到達するのは、主要動の大きな振幅の部分がほぼ終了する0.9秒頃であり、残留間隙水圧の蓄積に約0.6秒（実時間で約6秒）を要している。この蓄積過程において、鉛直動の有無が影響していないのが読みとれ

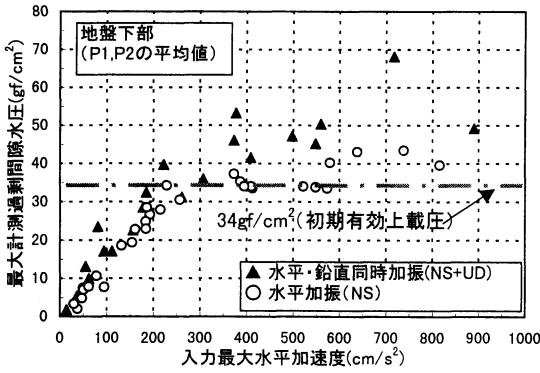


図-22 入力最大水平加速度と地盤最下部での最大計測過剰間隙水圧の関係

る。両者に見られる差異は、実験の再現性の精度に起因するものと考えている。また、さらに明瞭に読みとれるように重ねて描いたものを図-8の上図に示している。液状化に到らないようなケースでも同様な結果が得られているが、この図示したケースにおいても、液状化に到る前に加振を止めたと仮定すれば、液状化には到らず、加振中の蓄積過程に違いはないのである。さらに、液状化に到った以降、大きな水平動が続いても残留間隙水圧は初期有効上載圧以上にはなり得ないのは、現在の液状化に関する知見から考えて自明のことであり、蓄積過程を議論するのに、適切な論点とは考えられない。

計測値そのものを意味しているのであれば、鉛直動で加振すれば、計測される間隙水圧は初期有効上載圧以上になりうることを指摘しなければならない。たとえば、図-6(b)の間隙水圧の応答波形からも読み取ることができる。

このような計測される最大間隙水圧の応答の結果のみを見てみる。図-22に入力最大水平加速度と地盤最下部での最大計測過剰間隙水圧の関係を示す。この図は、図-9に対応するものである。図-22より、水平・鉛直同時加振の場合は、水平加振の場合に比べて、最大計測過剰間隙水圧が大きいこと、最大計測過剰間隙水圧が初期有効上載圧以上になりうるということがわかる。詳細な議論は別の機会に譲りたい。

(2) 質問(2)に対する回答と見解

質問(2)においては、討議者らの考えを述べた後に、図-9について、「220 cm/s²以上の入力レベルにおいては水平加振と水平・鉛直同時加振においては有意な差は見られません」とし、「220 cm/s²以下においては水平・鉛直同時加振の方が水平加振よりも最大過剰間隙水圧の大きい場合が散見され」ることに対する見解を求めている。

図-9は最大「残留」過剰間隙水圧で整理したものであって、最大「計測」過剰間隙水圧ではないという点に注意する必要がある。

前半の図の読み取り結果は著者らと同じであるが、この読みとられた内容から、鉛直動を付加した場合でも、振動成分を除く残留成分で見ると、間隙水圧は初期有効上載圧以上にはなり得ないという事実が指摘できる点が重要である。

後半の指摘は、表-3の最大入力水平加速度が81 cm/s²である水平・鉛直同時加振(ケース1の3回目の加振)と同じく95 cm/s²である水平動単独加振(ケース2の2回目の加振)の違いに最も顕著に現れている差異を指摘したものと判断される。これに対しては、討議論文中の3.(5)の最後の段落に加振方法の詳細と加振精度の問題点を記述したが、指摘の差異は、加振実現波の波形の再現性の悪さ(ばらつき)に起因していると考えている。再現性の悪さは、非線形材料の供試体に対する振動台実験上の困難な問題の一つである。紙面の関係で詳細に論じることができなかったが、指摘された差異は著者らは検討しており、その結果として上記の判断を得た。本研究では、加振波形の再現性が良好であるとの前提で、最大加速度に着目して整理を行った。大局的には、結果の整理と論述に誤りはないと考えているが、厳密な議論には、最大加速度以外に、加振実現波の波形の再現性の悪さ(ばらつき)をカバーできるような波形の指標を導入する必要がある。

(3) 質問(3)に対する見解

質問(3)では、「理論的に論じている項では、液状化層内での増幅率が1程度であることを仮定して議論を進めて」いることと実験における液状化層内での増幅率が1~2であることが矛盾しており、議論に一貫性がない、と捉えられる指摘である。

水平・鉛直同時加振の際に現れる間隙水圧の振動成分に関する実験事実を示すとともに理論的な解釈との整合性を確認することが本研究の目的の1つである。討議論文で述べているように、増幅率が1程度の場合に概ね成立する実験式として式(8)を示した。式(9)~式(15)にわたって理論的な解釈を試みているが、式(9)~式(13)には、増幅率に関する仮定はなく、式(13)における線形補間の仮定のみである。

式(14)で増幅率を1と仮定しているが、この仮定は、式(8)の実験式の解釈のための実験結果に則った仮定である。すなわち、水平・鉛直同時加振の実験における最大鉛直加速度の入力と応答の関係を図-17に示したが、この図によれば、増幅率の範囲は1~2であるが、22ケースの内3ケースを除けば、増幅率は

概ね1である。増幅率が2に近い3ケースは、鉛直動の再現性が悪く、鉛直動について目標波に比べて実現波は高振動数の成分が強調された波形に変質している。

すなわち、理論的な議論の展開では増幅率を仮定しておらず、実験結果の解釈の際に、再現性の悪い一部のデータをはずして増幅率を1と仮定して考察した。したがって、本論文で記述した考察や式（適用条件を含めて）に矛盾はないものとする。

本論文の最終目的は、1995年兵庫県南部地震におけるまさ土埋地盤の液状化挙動に関する理解を相似則を用いた振動台実験により得て、地震動と液状化挙動の相互の関係を把握し、地震動の位置づけに貢献しようとしたものである。そのためには、実証的な観点と理論的な観点からのアプローチが欠かせないと考えたため、地震直後から話題となっていた鉛直動の影響について明確な見解と視点を明らかにする必要があると考えた。本来、実験結果に関する詳細な記述が必要であるが、上記の目的と紙面の都合から、上述の差異に関する記述がなかったことは読者・討議者に不便をかけた。

4. 液状化地盤における鉛直動の増幅に対する見解

最後に、液状化地盤における鉛直動の増幅に関する著者らの見解を述べて回答を閉じる。

液状化地盤における鉛直動の増幅の問題は、言うまでもなく、入力される地震動のスペクトル特性と地盤の増幅特性との関係が重要である。討議論文でも述べたように、入射波動の種別、地盤の境界条件、地盤要素の飽和条件、排水条件、初期応力状態が影響要因と

考えられることから、これらのことを明確にした上でないと、有意義な議論はできないと考えられる。特に、前述の影響要因は、実際の地盤と実験の模型地盤と数値解析モデルの3者で異なっていることが多いにもかかわらず、既往の論文ではこの点が不明確なものも少なくない。有効な議論のためには、これらを明確にする必要がある。

著者らの見解は、改めて別の論文で具体的な論拠を基に述べるつもりであるが、その一部は、既に本回答で述べた。ここでは、追加して基本的な考えを述べる。

討議論文でも、少し触れているが、主要動部分における鉛直動の増幅は、SV波が基盤でP波に変換され、変換されたP波が表層地盤内で重複反射される、というメカニズムを考えている。したがって、圧縮波であるP波の伝播特性には、体積弾性係数が直接的に関係すると考えている。また、体積弾性係数は飽和度と密接に関係すると考えられるが、実際の埋立地盤では、表層ほど飽和度が低くなり、その結果として、体積弾性係数が表層ほど小さく、P波の重複反射による増幅が表層で大きくなる、というメカニズムを想定している。一方、完全飽和状態の実験では、水に近い体積弾性係数の一様な模型地盤であるため、高振動数成分の卓越した入力がないと増幅率は大きくならない。

最後に、討議者らをはじめ今後の研究に大いに期待するものであるが、発表の際には、上述の影響要因に関する考え方を明確にし、鉛直動加振においても水平動の入力と応答を計測され提示されることを切に望むものである。

(1997.7.15 受付)