

過剰間隙水圧の発生に着目した地震動継続時間の定義-1G 場の模型振動実験に基づく検討-

東北大学 学 ○渡邊康平 学 伊藤陸 正 加村晃良 フ 風間基樹

1. 研究背景と目的

液状化が起こるかどうかは、地震によって作用した加速度レベルや対象地点の地盤特性など様々な要因に依存する。その要因の1つに地震動継続時間があるが、この値は、現状で定義に関するコンセンサスがない。本研究では、過剰間隙水圧が発生する加速度レベルに着目し、液状化を予測判定する際の地震動継続時間の決定法について検討した。

2. 実験方法

砂質土の液状化時の過剰間隙水圧挙動を測定するため、3次元振動台を用いて1G場の振動台試験を行った。アルミ製せん断土槽を用い、土槽のせん断方向と加振方向が一致するように振動台に設置した。

土試料には豊浦砂を用い、内寸 600×800×600 (mm) となるように水中落下法によって供試体を作成した。本研究では供試体5個分のデータを使用しており、1つの供試体あたり数十回の加振を行った。加振後に液状化発生に伴い浮き出た水を吸水スポンジで吸い取り、地盤の飽和状態を再現して再加振する手法をとった。土槽中央部には、底面から200, 400 (mm)の位置にそれぞれ加速度計 (東京測器社製, ARF-20A) を水平・鉛直加速度の測定用に2つ、間隙水圧計 (東京測器社製, KPH-50KPA) を1つ設置した。また、地表面には加速度計のみを設置した。入力データ記録は、土槽外部に設置した水平・上下の加速度計 (共和電業製, AS-2GB) の記録と振動台で計測した加速度記録を用いた (図1)。

入力波は規則波として周波数 0.5, 1.0, 2.0 Hz の正弦波3種類で、片振幅を変えて複数回実施した。また、正弦波の試験結果から定義された継続時間を検証するためのケースとして、不規則波 (実地震波) を2方向入力で行った。入力波の詳細を表1および表2に示す。

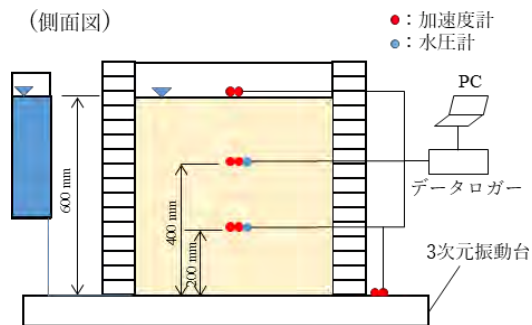


図1 せん断土槽を用いた振動台実験の概要

表1 振動台実験に用いた入力波一覧 (正弦波)

周波数 (Hz)	入力水平変位 (mm)	最大入力加速度 (Gal)	実験数	最大加速度応答 (Gal)
0.5	1.0-75.0	6.0-180.5	86	地表面 8.25-2104.0
				400 (mm) 7.2-1447.0
				200 (mm) 26.2-689.5
1.0	0.5-50.0	6.8-439.1	55	地表面 9.4-2249.0
				400 (mm) 12.5-1158.3
				200 (mm) 11.1-511.8
2.0	0.2-7.0	7.9-197.6	45	地表面 11.2-1849.9
				400 (mm) 23.2-2357.5
				200 (mm) 14.8-250.6

表2 振動台実験に用いた入力波一覧 (実地震波)

地震名	入力倍率	最大入力加速度 (Gal)	実験数	最大加速度応答 (Gal)
2022/3/16	1.0-3.0	403.4-870.8	5	地表面 948.7-1146.7
福島県沖地震				400 (mm) 557.7-871.7
歌津 (宮城)				200 (mm) 383.0-968.2
2021/2/13	0.25-1.75	53.3-454.5	7	地表面 24.3-342.5
福島県沖地震				400 (mm) 37.5-305.5
山元 (宮城)				200 (mm) 53.1-411.7
2021/3/20	0.25-1.75	29.6-288.2	7	地表面 9.8-170.0
宮城県沖地震				400 (mm) 20.1-281.7
南三陸 (宮城)				200 (mm) 32.2-333.6
2022/1/22	0.5-4.0	44.8-473.0	11	地表面 9.7-493.0
日向灘地震				400 (mm) 34.0-560.0
日向 (宮崎)				200 (mm) 66.1-739.5
2016/4/14	0.5-1.5	115.7-336.7	3	地表面 44.3-265.1
熊本地震				400 (mm) 74.5-670.5
菊池 (熊本)				200 (mm) 125.1-397.5

3. 実験結果と考察

実験結果の一例として、表1に示した入力振動周波数 0.5 Hz と 2.0 Hz について、土槽底面から 400 mm の位置における水平方向最大加速度と過剰間隙水圧比の最大値の関係を図2および図3に示す。両ケースともに、加速度が大きい領域では過剰間隙水圧比が1.0に至っており、液状化していることが分かる。過剰間隙水圧の発生のタイミングに着目すると、水平方向最大加速度が8 Gal~25 Gal付近で水圧比が0.1程度に達している。そして、加速度が100 Galを超えると水圧比が有意に上昇していることが確認できる。なお、実地震波 (2022/3/16, 福島県沖地震, 観測地点: 歌津, 実験における最大過剰間隙水圧比 0.9) の入力加速度に対する土槽内の各高さにおける応答スペクトル比を図4に示す。土槽表面に近づくにつれて低周波数成分のスペクトル比が大きくなっていることが分かる。これは過剰間隙水圧の上昇により液状化が発生し、応答が長周期化したことを示している。

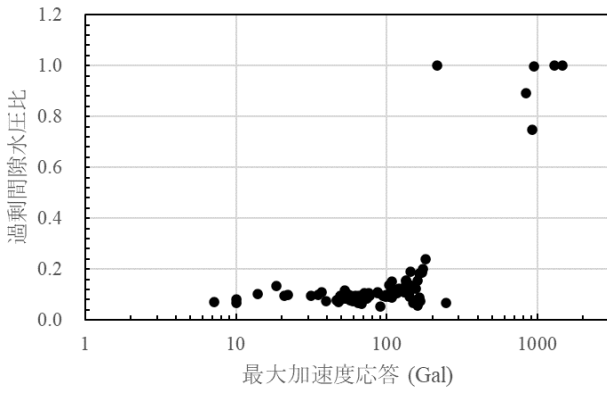


図2 水平最大加速度-過剰間隙水圧比の関係 (0.5 Hz)

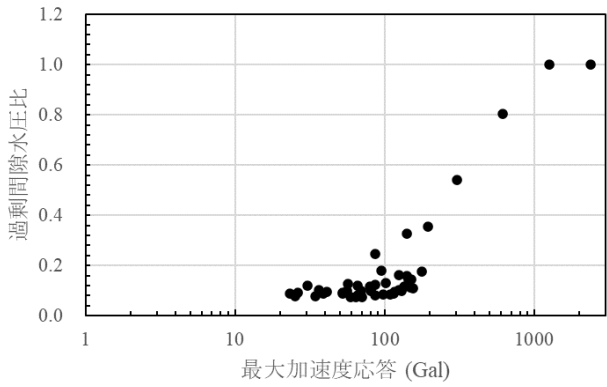


図3 水平最大加速度-過剰間隙水圧比の関係 (2.0 Hz)

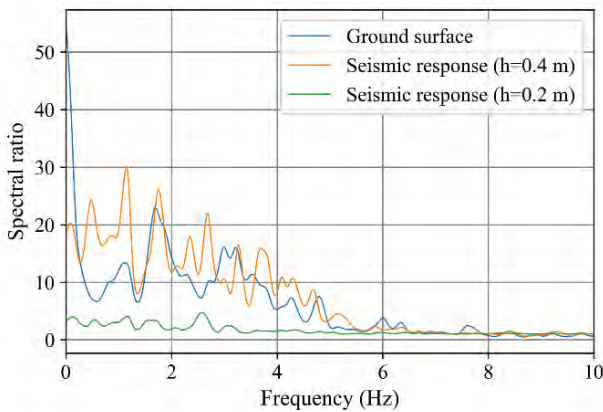


図4 入力加速度に対するスペクトル比 (実地震波)

表3 加速度の閾値を 10 Gal および 25 Gal としたときの地震動継続時間と各指標の相関係数

	過剰間隙水圧比	水平方向最大加速度	水平方向最大速度	飽和密度
地震動継続時間 (閾値 10 Gal)	0.61	0.52	0.43	-0.07
地震動継続時間 (閾値 25 Gal)	0.58	0.66	0.41	-0.03

凡例 1.0 0.5 0.0 -0.5 -1.0

本研究では液状化評価のための狭義の地震動継続時間を定義するため、上記の結果より 10 Gal と 25 Gal を閾値と設定し検討することとした。閾値以上の地中の応答加速度が初めて記録された始発時間と、閾値が最後に記録された振動収束時間の間を地震動継続時間とし、各値について水圧比との上昇の相関性を評価した。

実地震波を対象として土槽底面から 400 mm の位置での水平最大加速度、水平最大速度、飽和密度、過剰間隙水圧比と、閾値をそれぞれ 10 Gal と 25 Gal に設定した時の地震動継続時間の相関係数を表 3 に示す。これらの関係より、地震動継続時間は閾値によらず、過剰間隙水圧比、最大加速度、最大速度と正の相関を有することが分かる。また、飽和密度の大小によって地震動継続時間が変化する可能性を踏まえ、飽和密度を説明変数に組み込んだが、結果より飽和密度と地震動継続時間はほぼ相関を有していないことが分かる。したがって、飽和密度によらず応答加速度レベルによって継続時間を定義することができると言える。以上のことから、過剰間隙水圧比が 0.1 程度に上昇する最低の加速度レベルで、液状化判定に用いる地震動継続時間を定義するのは有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、せん断土槽を用いた模型振動台実験を多数実施し、過剰間隙水圧が発生する加速度レベルに着目した地震動継続時間の決定法について検討した。得られた知見は以下のとおり。

- ・ 振動台実験の結果より、水平方向の最大加速度が 8 Gal~25 Gal 付近で過剰間隙水圧比が 0.1 程度生じた。
- ・ 加速度の閾値を 10 Gal および 25 Gal として、地震動継続時間を設定し相関係数を算定した。その結果、いずれの場合においても、地震動継続時間と過剰間隙水圧は正の相関性を有することが示された。

謝辞 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET, KiK-net)の強震データを使用いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kamura et al.: Exploring the possibility of assessing the damage degree of liquefaction based only on seismic records by artificial neural networks, *S&F*, 61(3), pp.658-674, 2021.
- 2) 鳥屋部ら: 強震観測データのみから地盤の液状化の程度を判定する深層学習技術の妥当性の検討 -東北地方太平洋沖地震を事例として-, *AI・データサイエンス論文集*, 2 巻 J2 号 p. 598-608, 2021