

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：82113

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20474

研究課題名（和文）遠心実験に用いるメチルセルロースの温度依存性による液状化地盤挙動への影響の解明

研究課題名（英文）Temperature Dependence of Methylcellulose Used in Centrifugal Tests of Liquefied Soil

研究代表者

的場 萌子（Matoba, Moeko）

国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・研究員

研究者番号：30913579

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、上部構造物・杭基礎 - 飽和地盤系の縮小模型を用いた遠心力載荷実験結果に基づき、飽和地盤の地震時挙動に及ぼすメチルセルロース溶液の粘性の温度依存性による影響を検討した。具体的な知見として、まず乾燥砂の堆積手法（空中落下法）、間隙水の通水手法（炭酸ガス・真空置換法）を同一とした場合での飽和地盤模型作成時のデータを整理し、メチルセルロース溶液の濃度と水温、粘度の関係を表す回帰式を構築した。次に遠心力載荷実験を行い、メチルセルロース溶液の濃度が異なる試験体では過剰間隙水圧比応答の上昇過程に違いが見られ、濃度の大きい試験体ほど液状化過程の開始時刻および液状化時刻が遅れる傾向があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤の液状化挙動の解明を目的とした遠心力載荷実験では、間隙水圧の時間に関する相似則を合わせるために、粘性を調整したメチルセルロース溶液が用いられる。メチルセルロース溶液は、製作手法や管理が比較的容易で安全であることから、代替間隙水として一般的に広く利用されるが、一方で溶液の粘性が温度に非常に敏感であることが指摘されている。本研究では遠心載荷実験を行い、飽和地盤の地震時挙動に及ぼすメチルセルロース溶液の粘性の温度依存性による影響を示した。本研究により得られた知見は、地震時の構造物・杭基礎 - 液状化地盤系の動的相互作用を精緻に検討できる縮小模型実験手法の確立に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the temperature dependence on the viscosity of methylcellulose solution and its influence on the seismic behavior of the saturated sand layer. This was achieved through centrifugal loading tests using a small-scale model of a superstructure-pile foundation and saturated soil system. This study gathered data on creating a saturated sand model and proposed the regression equation to show the relationship between the methylcellulose solution concentration, water temperature, and viscosity. Subsequently, centrifugal loading experiments were carried out to investigate how the excess pore water pressure response varied with different concentrations of methylcellulose solution. It was observed that higher concentrations tended to increase the time delay for soil liquefaction.

研究分野：地震工学

キーワード：飽和地盤 遠心載荷実験

### 1. 研究開始当初の背景

既往の研究<sup>1)</sup>では上部構造物・鋼管杭基礎-飽和地盤系の縮小模型を用いた遠心力載荷実験により、一回の大地震により地盤が液状化した際に、鋼管杭が崩壊して上部構造物が倒壊するときの杭の終局メカニズムが明らかにされている。一方、複数回の大地震により杭基礎が損傷する場合には液状化時の地盤性状が刻一刻と変化していることから、杭の終局メカニズムの検討において構造物と地盤の動的相互作用の変化を考慮する必要がある。

既往の杭基礎を対象とした遠心載荷実験では、間隙水圧についての時間に関する相似則を合わせるために粘性を調整したメチルセルロース溶液が用いられているが、代替間隙水の粘性の温度依存性が及ぼす地盤の地震時挙動への影響はほとんど考慮されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、複数回の地震動を受けて液状化する地盤-構造物系の動的相互作用効果を精緻に検討できる実験手法の開発のため、遠心力載荷実験装置を利用した実験を行い、飽和地盤の地震時挙動に及ぼすメチルセルロース溶液の粘性の温度依存性による影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 飽和地盤の作成過程におけるメチルセルロース溶液の粘性の温度依存性による影響の把握

本研究では飽和地盤-上部構造物・杭基礎系の縮小模型を作成し、遠心力載荷試験装置を利用して動的実験を行う。本項ではその前準備として、地盤の飽和過程におけるメチルセルロース溶液の調整時の条件と模型地盤の飽和度に関するデータを整理する。

表1に作成した模型地盤一覧を示す。模型作成に使用した土槽は、文献<sup>2)</sup>と同一の剛土槽(内寸幅45 cm×高さ30 cm×奥行15 cm)である。模型地盤の作成方法について述べると、地盤相対密度60%を目標として乾燥した土岐珪砂7号を空中落下法で堆積させた後、水の約60倍の粘度(60 mPa s程度)に調整したメチルセルロース溶液を炭酸ガス・真空置換法により剛土槽内に注入した。メチルセルロース溶液の作成時の条件は、Case 1では水温20.1℃、粘度59.4 mPa s、溶液の濃度1.67%、Case 2では水温35.0℃、粘度58.0 mPa s、溶液の濃度1.97%、Case 3では水温26.0℃、粘度58.2 mPa s、溶液の濃度1.57%であった。Case 2のメチルセルロース溶液の濃度がCase 1よりも大きくなった理由は、Case 1の粘性調整時よりも水温が高かったためであると考えられる。一方、Case 3では調整時の水温が26.0℃とCase 1(20.1℃)より高いものの、溶液の濃度は小さくなっており、Case 2とは逆の傾向を示している。

図1に、メチルセルロース溶液の粘性調整時に計測された溶液の粘度と水温の関係を示す。図中には本検討の準備段階で作成した溶液の結果(Test 1, Test 2)を併せて示している。メチルセ

表1 模型地盤の飽和過程における実験条件と飽和度

試験体 No.	気温[°C] (脱気槽内)	湿度[%] (脱気槽内)	メチルセルロース溶液			地盤 飽和度[%]
			水温[°C]	濃度[%]	粘度[mPa s]	
Case 1	- (16.5-20.3)	60 (30-88)	20.1	1.67	59.4	97.0
Case 2	19.8 (19.7-20.8)	58 (28-92)	35.0	1.97	58.0	94.3
Case 3	22.0 (20.6-25.0)	68 (77-99)	26.1	1.57	58.2	91.2

ルローズ溶液の粘度と水温の関係は、水温が高くなるとメチルセルローズ溶液の粘度が低くなることから、文献 3)と同様の傾向を示しているといえる。したがって、実験時の水温が模型作成時の水温と大きく異なる場合、模型作成時のメチルセルローズ溶液の粘度は、遠心場での動的実験における間隙水圧に対する相似側を満たさない可能性がある 4)。

次に、表 1 に示した調整時のメチルセルローズ溶液の濃度と水温、粘度との関係を考察する。図中では濃度 1.7%程度の結果 (Test 1, Case 1, Case 3)を黒プロット、濃度 2.0%程度の結果 (Test 2, Case 2)を青プロットで示している。図 1 より、Case 1 の結果は Test 1 (濃度 1.7%)、Case 2 の結果は Test 2 (濃度 2.0%) と概ね対応しており、粘度と水温の関係にはメチルセルローズ溶液の濃度も関係することが分かる。なお先述したように、Case 3 は Test 1 や Case 1 よりもやや溶液の濃度が小さい (1.57%) が、粘度と水温の関係は Test 1 や Case 1 (濃度 1.7%) と概ね対応するといえる。

以上を踏まえ、粘度と水温の関係にメチルセルローズ溶液の濃度を考慮した式を、次のように構築する。

$$\mu = \frac{250c^3}{T} \quad (1)$$

ここで、 $\mu$ : 粘度[mPa s],  $T$ : 水温[°C],  $c$ : メチルセルローズ溶液の濃度[%]である。図中には溶液の濃度 1.7%と 2.0%の回帰式 ((1)式)をそれぞれ黒実線と青実線で示している。回帰式 ((1)式)は実験結果を概ね捉えており、模型地盤作成時のメチルセルローズ溶液の濃度と実験時の水温を得ることで、実験時のメチルセルローズ溶液の粘度を推定できると考えられる。

## (2) メチルセルローズ溶液の粘性の温度依存性が飽和地盤の液状化性状に及ぼす影響の把握

本項では飽和地盤—上部構造物・杭基礎系の縮小模型を用いて遠心力载荷実験を行い、メチルセルローズ溶液の粘性の温度依存性が飽和地盤の液状化性状に及ぼす影響を明らかにする。

図 2 に遠心力载荷実験用の縮小模型試験体及び計測位置を示す。試験体は飽和地盤—上部構造物・杭基礎系の 40 分の 1 縮小模型である。地盤の作成方法について述べると、せん断土槽は文献 1)と同一のものを使用し、前項と同様に地盤相対密度  $D_r=60\%$  を目標として乾燥豊浦硅砂を空中落下法により堆積させた。遠心場の相似則に基づき粘性を水の約 40 倍 (40 mPa s) に調整したメトロース溶液を、真空槽内で炭酸ガス・真空置換法を用いて注入することで飽和地盤を作成した。地盤中には図中に示すように地表面から 8.5, 14.5, 20.5 cm の位置に間隙水圧計、加速度計を設置している。なお、土槽底部、基礎部、上部構造物頂部にも加速度計を設置している。本実験は、京都大学防災研究所の遠心载荷装置

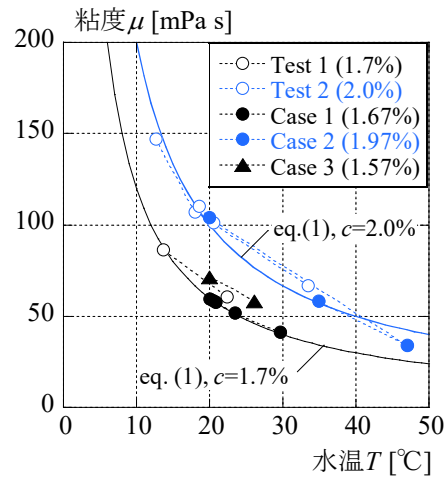


図 1 メチルセルローズ溶液の粘度と調整時の水温の関係

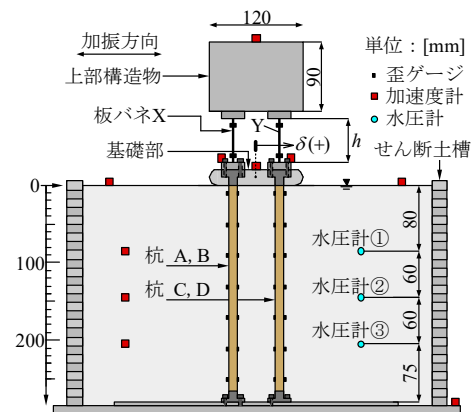


図 2 遠心载荷実験試験体及び計測位置

表 2 遠心载荷実験に用いた縮小模型試験体一覧

試験体名	平均気温[°C] (最低, 最大)	平均湿度 [%]	メチルセルロース溶液		
			水温[°C]	粘度[mPa s]	推定濃度[%] ((1)式による)
Case A	2.6 (-0.5, 7.5)	71	(2.6)	40.0	0.7
Case B	15.0 (8.2, 23.3)	56	11.0	40.0	1.2
Case C	21.8 (13.3, 29.6)	38	22.1	38.2	1.5

を用いて 40g 場で行った。以下、実大スケールに換算した値で示す。

表 3 に本項で実施した試験体一覧を示す。本項では模型地盤作成時の水温が異なる試験体、すなわちメチルセルロース溶液の濃度が異なる試験体 3 体を対象とする。ただし、本試験内ではメチルセルロース溶液の濃度を計測できなかったため、溶液の濃度については(1)式により推定するものとした。また、Case A の調整時の水温についても未計測のため、算定時には当日の平均気温を参照した。

図 3 に土槽底面に設置した加速度計から得た入力波の加速度時刻歴を示す。入力波には、東北地方太平洋沖地震における浦安市の K-net 強震記録（浦安波）の最大加速度を  $4.5 \text{ m/s}^2$  に基準化したものを用いた。

図 4(a)~(c)に各試験体の地盤中に配置した 3 箇所の水圧計から得られた過剰間隙水圧比応答時刻歴を示す。本研究では過剰間隙水圧比  $r_u$  を液状化の指標として用いる。 $r_u$  が急激に増大し  $r_u=1$  となったときを液状化発生時刻と定義し、 $r_u$  が 0.1 を超えて上昇する過程を液状化過程と呼ぶものとする。図中の青網掛け部は各試験体の液状化過程の範囲を示している。なお  $r_u$  は、過剰間隙水圧（間隙水圧と静水圧の差）と初期有効応力（初期全応力と静水圧の差）の比である。

図 4(a)より、Case A（推定濃度 0.7%）の過剰間隙水圧比  $r_u$  は加振開始から 30 s 経過後に上昇し始め、77 s 付近で概ね 1 に達し、地盤が液状化した。図 4(b)より Case B（推定濃度 1.2%）では、過剰間隙水圧比は 47 s 付近より上昇して 92 s 付近で概ね  $r_u=1$  に達した。また、図 4(c)より Case C（推定濃度 1.5%）では、過剰間隙水圧比は 70 s 付近より上昇して 96 s 付近で概ね  $r_u=1$  に達した。Case A~Case C は遠心場の相似則条件としては同一と見なせるものの、間隙水であるメチルセルロース溶液の濃度が大きい試験体ほど液状化過程の開始時刻および液状化時刻が遅れる傾向が見られた。

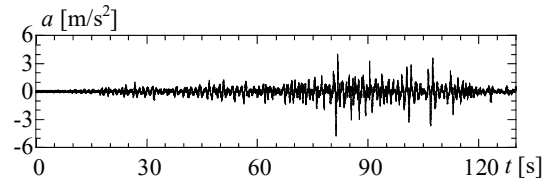
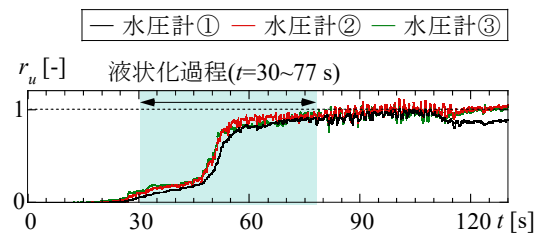
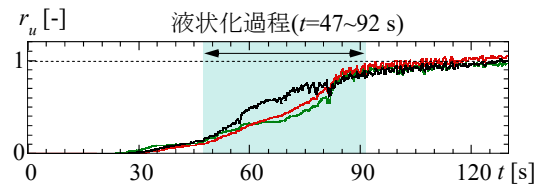


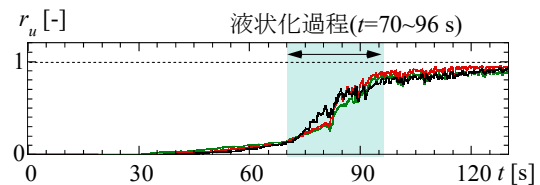
図 3 入力波（浦安波）加速度時刻歴



(a) Case A（推定濃度 0.7%）



(b) Case B（推定濃度 1.2%）



(c) Case C（推定濃度 1.5%）

図 4 地盤内の過剰間隙水圧比応答時刻歴

#### 4. 研究成果

本研究では、上部構造物・杭基礎－飽和地盤系の縮小模型を用いて実施した遠心力載荷実験結果に基づき、飽和地盤の地震時挙動に及ぼすメチルセルロース溶液の粘性の温度依存性による影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

1) 遠心力載荷実験の前準備として、飽和地盤の作成段階におけるメチルセルロース溶液の粘性調整時の条件と模型地盤の飽和度に関するデータを整理し、メチルセルロース溶液の濃度と水温、粘度の関係を示した。また、実験結果に基づき回帰式 ((1)式) を構築した。本研究で提示した(1)式は、模型作成時のメチルセルロース溶液の濃度と水温のパラメータから、遠心載荷実験時の粘度を推測する際に有用であると考えられる。

2) 飽和地盤－上部構造物・杭基礎系の縮小模型を用いた遠心力載荷実験結果より、メチルセルロース溶液の濃度が異なる試験体では過剰間隙水圧比応答の上昇過程に違いが見られ、濃度の大きい試験体ほど液状化過程の開始時刻および液状化時刻が遅れる傾向があることを示した。

本研究の成果は限られた試験体数に基づくものであることから、今後も試験体数を増やし検討を深めていくものとする。

#### 参考文献

- 1) 木村祥裕, 的場萌子, 田村修次: 塔状比の大きい上部構造物・杭基礎－地盤系の遠心載荷実験に基づく液状化地盤における鋼管杭の終局メカニズム, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 779 号, pp. 53-63, 2021.1
- 2) 上田恭平, 芦野貴之, 井合進: 圧密履歴を有する粘性土地盤上の盛土の地震時挙動に関する遠心模型実験, 土木学会論文集 C, Vol. 75, No. 2, pp. 234-247, 2019.
- 3) Dewoolkar, M. M., Ko, H.-Y., Stadler, A. T., and Astaneh, S. M. F. (1999): A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 22(3), 196-210
- 4) 飛田哲男, 井合進, 仲山賢司, 原哲郎: 杭・地盤系の動的挙動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, 2004.4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 MATOBA Moeko, GOTO Hiroki, ENDO Satoshi, KIMURA Yoshihiro	4. 巻 87
2. 論文標題 EVALUATION FOR ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE PILE COLLAPSES WITH DYNAMIC BUCKLING IN LIQUIFIED SOIL BASED ON CENTRIFUGAL TEST	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1036 ~ 1046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 的場萌子, 古川秀, 木村祥裕	4. 巻 29
2. 論文標題 液状化地盤において杭頭局所変形を生じる鋼管杭の終局挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 328 ~ 333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MATOBA Moeko, KIMURA Yoshihiro, TAMURA Shuji	4. 巻 86
2. 論文標題 CUMULATIVE DAMAGE EVALUATION FOR COLLAPSE OF STEEL PILE IN LIQUEFIED SOIL SUBJECTED TO MULTIPLE EARTHQUAKES BASED ON CENTRIFUGAL TESTS OF SUPERSTRUCTURE-PILE FOUNDATION AND LIQUEFIED SOIL SYSTEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 749 ~ 760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 遠藤聡志, 柳田竜星, 的場萌子, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 上部構造物・鋼管杭基礎・液状化地盤系において杭頭局部座屈を生じる杭の塑性変形履歴 その1 遠心載荷実験試験体の概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳田竜星, 遠藤聡志, 的場萌子, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 上部構造物・鋼管杭基礎 - 液状化地盤系において杭頭局部座屈を生じる杭の塑性変形履歴 その2 径厚比の異なる杭の塑性変形倍率
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川秀, 的場萌子, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 杭頭局所変形を生じる鋼管杭・上部構造物 - 液状化地盤系の遠心載荷実験 その1 遠心載荷実験試験体の概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 的場萌子, 古川秀, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 杭頭局所変形を生じる鋼管杭・上部構造物 - 液状化地盤系の遠心載荷実験 その2 液状化地盤における鋼管杭の終局メカニズム
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川秀, 的場萌子, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 地盤液状化時において杭頭局所変形を生じる鋼管杭の終局耐力 その1 上部構造物・鋼管杭基礎 - 地盤系の遠心載荷実験試験体概要
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 的場萌子, 古川秀, 木村祥裕, 濱田純次, 奥村豪悠, 安達夏紀
2. 発表標題 地盤液状化時において杭頭局所変形を生じる鋼管杭の終局耐力 その2 液状化地盤における鋼管杭の終局耐力評価
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 的場萌子, 古川秀, 木村祥裕
2. 発表標題 液状化地盤において杭頭局所変形を生じる鋼管杭の終局メカニズムの把握
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------