T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	初期温度が粘弾性ダンパーの動的特性に及ぼす影響の簡易 1 次元解析的検討
Title(English)	Analytical Investigation on the Effect of Initial Temperature on the Viscoelastic Damper Behavior using Simplified 1D model
著者(和文)	梁其峻, 佐藤大樹, Osabel Dave M.
Authors(English)	LIANG Qijun, Daiki Sato, Dave M Osabel
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集， I， ，pp. 301-304
Citation(English)	， I， ，pp. 301-304
発行日 / Pub. date	2026，3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2022

2025年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2026年3月

初期温度が粘弾性ダンパーの動的特性に及ぼす影響の簡易1次元解析的検討

構造ー振動　　正会員 ○ 梁　其峻[*1]　同　佐藤 大樹[*2]
同　OSABEL Dave M.[*3]

初期温度　実大複層粘弾性ダンパー　初期温度
簡易1次元モデル　温度・振動数・歪レベル依存性　熱伝導解析

1　はじめに

1.1　粘弾性ダンパー

粘弾性ダンパー（VE damper, Fig. 1a）は、地震動および風荷重による構造物の振動エネルギーを効果的に吸収できる制振装置として、高層建築物の耐震・耐風設計において広く用いられている。VE材料はせん断変形に対して反力を生じ、振動エネルギーを熱へ変換して吸収する。その動的特性の貯蔵剛性 K'_d は、Fig. 1b に示すように変位 u_d - 反力 F_d の履歴曲線の傾きによって評価される。

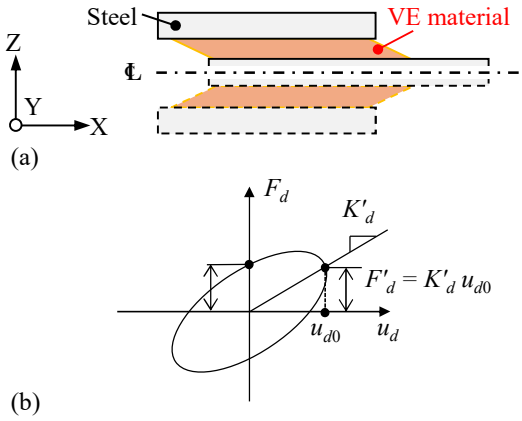


Figure 1. (a) Example of a plate type VE damper and (b) a force–deformation hysteresis curve

VEダンパーの性能は、温度、振動数、および歪レベルに依存する複雑な非線形特性を有している[1]。特に温度依存性は顕著であり、環境温度の変化に伴い貯蔵剛性 K'_d は大きく変動する。低温環境ではVE材料の剛性が増加し、高温環境では減少する傾向が知られている。しかしVEダンパーの加振実験は主に初期温度 20～30℃の範囲に集中しており、季節変動による極端な低温条件での挙動データが不足しているのが現状である。そのため、2025年12月に発生した青森県東方沖地震のような冬季の大地震において、VEダンパーが設計通りの制振性能を発揮できるかについては、まだ不明である。

1.2　研究背景

文献2)では、初期温度 5℃での実大複層VEダンパーの正弦波加振実験が報告されている。VEダンパーの初期剛性は相対的に高いものの、加振に伴うエネルギー吸収により VE 材料の内部温度が激しく上昇し、それに伴い貯蔵剛性 K'_d が加振初期から急速に減少する。この結果は、低温での高い初期剛性は短時間しか保持されずことを示している。

しかし加振実験は実際の季節変動や環境条件に制限されるため、広い温度範囲における VE ダンパーの動的特性を検討することは難しい。一方、動的特性変化を評価できる解析手法に、温度・振動数・歪レベル依存性を考慮した1次元時刻歴解析手法[3,4]が提案されている。著者らは先行研究として、複層 VE ダンパーを解析するための簡易的な1次元モデル化手法を提案した[5]。この手法は詳細なモデルと比較して計算時間を大幅に削減しながらも、良好な精度をでき、実験では困難な広い温度範囲で VE ダンパーの動的特性変化を検討することが可能になる。

1.3　本報の目的と概要

本研究では、先行研究で提案された 1 次元モデル化手法（以降、解析手法と呼ぶ）により、文献 2)で示された初期温度 5℃での実大複層 VE ダンパーの正弦波加振実験を対象として、解析手法の低温条件下における精度を検証する。その後、解析手法を活用して、初期温度および振動数をパラメーターとして様々な加振条件を設定し、ダンパーの発熱と熱伝導に伴う動的特性変化を把握するために解析的検討を行う。以下に、本報の構成を示す。

2 章では、低温条件下においてのダンパー加振実験を説明する。3 章では、簡易一次元モデル化手法の概要を述べる。4 章では解析結果と実験の比較を行い提案手法の妥当性を検証し、初期温度・振動数が異なる解析結果の検討を行い、VE ダンパーの動的特性に及ぼす初期温度の影響を定量的に明らかにする。

2　低温条件下においてのダンパー加振実験[2]

本章では、文献 2)で示された実大 6 層 VE ダンパーの正弦波加振実験を説明する。Fig. 2a のように、ダンパーは 6 層アクリル系 VE 体（住友 3M 製 ISD111 材）を鋼材の間に挟んだせん断型である。VE 体の厚さ・総せん断面積は、それぞれ $d_v = 8$ mm、$A_s = 9120$ mm^2 である。

載荷では、ダンパー一端を固定して、ほかの一端に加振周期 $T = 2$ s、振幅 10 mm の変位 $u_d(t) = 10 \sin(2\pi t / 2)$を与える。正弦波加振を時刻 $t = 10800$ s（5400 サイクル）ま

で行う。Fig. 2a のように、実験では動的アクチュエーター（Dynamic actuator）により入力した正弦変位 u_{act} が、増幅機構（Amplification mechanism）を通じて増幅され、ダンパー変位 u_d となることである。機械性能の制限により、実験初期の振幅は 5 mm から始まり、徐々に 10 mm に増加させる段階的加振が行われた。

VE 体の温度計測は Fig. 2b に示すように、VE 体長さの中央断面に 6 個の熱電対を設置し、表面・内部温度の変化を測定する。ダンパー初期温度は周辺温度と一致させて 5℃とした。

実験の詳細な結果は第 4 章で解析結果と併せて示す。

3　簡易 1 次元モデル化手法

複層 VE ダンパーの動的特性を効率的に評価するため、本研究では先行研究で提案された解析手法を採用する。

Fig. 3a に示すように、解析手法では複数の VE 層を有するダンパーを単一の VE 層を持つ等価モデルで代表させる。具体的には、ダンパーの総せん断面積 A_s を保持しながら、VE 要素を 1 つに削減することで、計算効率を大幅に向上させている。この簡略化により、詳細モデルと比較して計算時間を大幅に削減できる。

等価モデルでは VE 層とせん断方向に接する鋼板面の 2 つのを VE 節点 j_a と j_b で番号付ける。このモデルを用いた 1 次元時刻歴解析法では、VE 材料の温度依存性、振動数依存性、および歪レベル依存性を考慮した構成則[1]を実装する。Fig. 3b に解析手法のフローチャートを示す。

VE 材料の分数微分構成則では次式で成り立つ。

$$\tau_v^{(n)}+a_v^{(n)}D^{\alpha}\tau_v^{(n)}=G^{(n)}\left[\gamma_d^{(n)}+b_v^{(n)}D^{\alpha}\gamma_d^{(n)}\right] \tag{1}$$

応力$\tau_v^{(n)}$は式(1)を数値積分し、以下の式が得られる。

$$\tau_v^{(n)}+a_v^{(n)}\sum_{i=0}^{N}w^{(n)}\tau_v^{(n)}=G^{(n)}\left[\gamma_d^{(n)}+b_v^{(n)}\sum_{i=0}^{N}w^{(n)}\gamma_d^{(n-i)}\right] \tag{2}$$

ここで、n= 時間ステップ、w= 重み係数、N= 数値積分点の数である。振動数、温度、および歪レベル依存性を考慮するため、パラメータ$a_v^{(n)}$、$b_v^{(n)}$、および$G^{(n)}$はシフトファクター$\lambda_0^{(n)}$、$\lambda_1^{(n)}$、$\lambda_2^{(n)}$に基づいて決定される。

$$a_v^{(n)}=a_{ref}(\lambda_0^{(n)})^{\alpha},\ b_v^{(n)}=b_{ref}(\lambda_0^{(n)})^{\alpha}\lambda_1^{(n)},\ G^{(n)}=G\lambda_2^{(n)} \tag{3a - c}$$

温度依存性を考慮する$\lambda_0^{(n)}$は VE 節点温度から得られる加重平均温度$\bar{\theta}_v^{(n)}$により計算し、以下の式で表される。

$$\lambda_0^{(n)}=exp\left[-p_1\left(\bar{\theta}_v^{(n)}-\theta_{ref}\right)/\left(p_2+\bar{\theta}_v^{(n)}-\theta_{ref}\right)\right]$$
$$\bar{\theta}_v^{(n)}=\frac{1}{2d_v}\left(\theta_{j_a}^{(n)}d_v+\theta_{j_b}^{(n)}d_v\right) \tag{4a, b}$$

ここで、θ_{ref} は基準温度、a_{ref}、b_{ref} は基準温度での値とする。パラメータp_1、p_2は温度依存の程度を表す。

歪レベル依存性を考慮する$\lambda_1^{(n)}$と$\lambda_2^{(n)}$は次式で定義される。

$$\lambda_1^{(n)}=1+C_1(\gamma_{\max}^{(n)}-1)\geq 1,\ \lambda_2^{(n)}=1+C_2(\gamma_{\max}^{(n)}-1)\geq 1 \tag{5a, b}$$

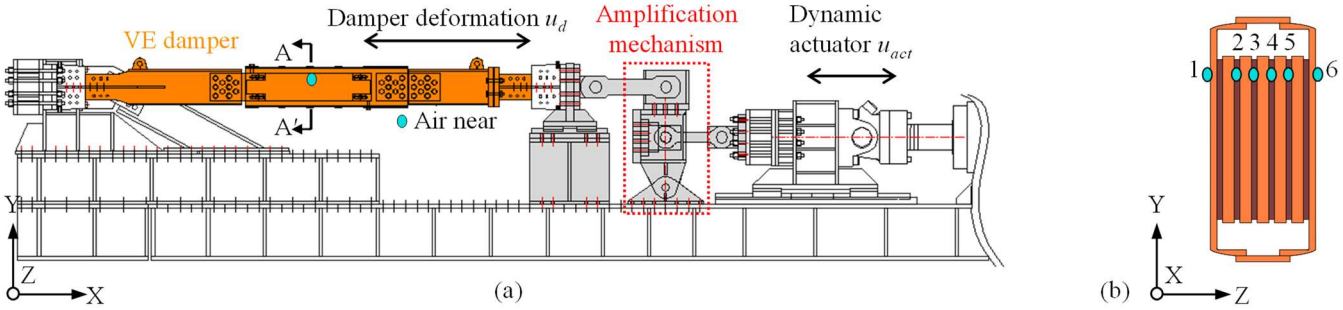


Figure 2. (a) Test setup of the full-scale six-layered VE damper and (b) locations of thermocouples in Section A-A'.

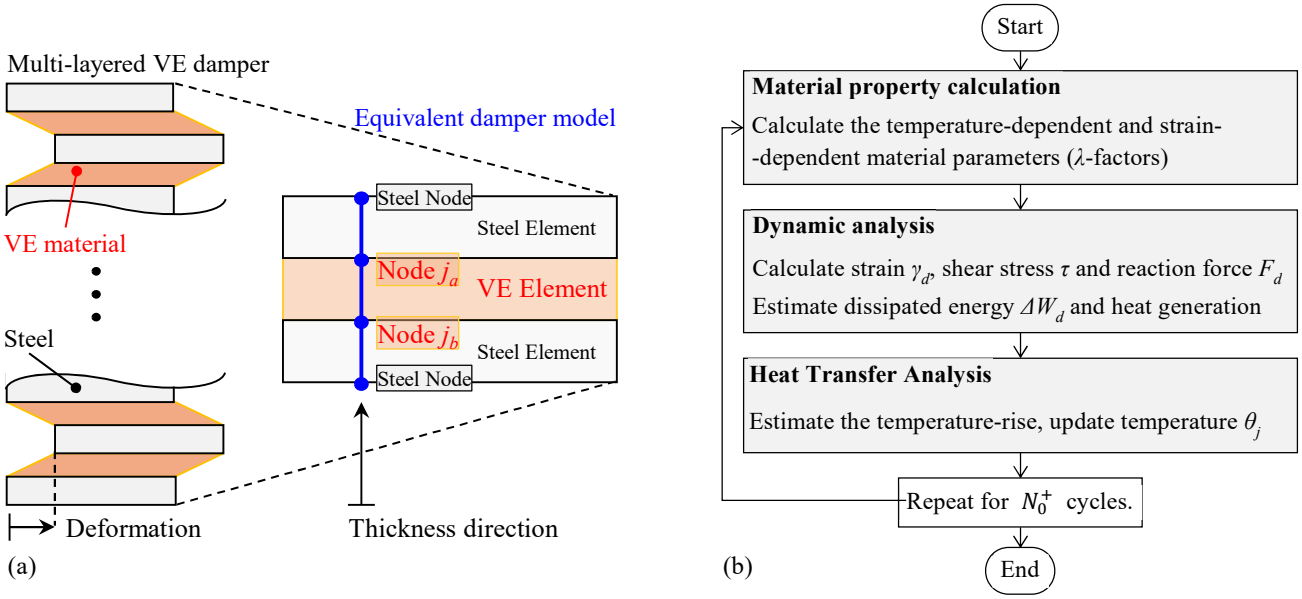


Figure 3. (a) The equivalent model of multi-layered VE dampers and (b) flowchart of the 1D time-history analysis method[5].

ここで、C_1 および C_2 は実験に基づいて得られた係数であり、$\gamma_{\max}^{(n)}$ は時間ステップ 1 から n までの歪レベル $\gamma_d^{(n)}=(u_d^{(n)}/d_v)$の最大値（絶対値）である。

動的解析では、式(3)で求めたパラメータと既知のせん断歪$\gamma_d^{(n)}$を用いて、式(2)の応力$\tau_v^{(n)}$を以下のように求める。

$$\tau_v^{(n)}=\left.G^{(n)}\gamma_d^{(n)}[(\Delta t)^{\alpha}+b_v^{(n)}w^{(0)}]\right/[(\Delta t)^{\alpha}+a_v^{(n)}w^{(0)}] + \left.G^{(n)}b_v^{(n)}\sum_{i=1}^{N}w^{(i)}\gamma_d^{(n-i)}\right/[(\Delta t)^{\alpha}+a_v^{(n)}w^{(0)}] - \left.a_v^{(n)}\sum_{i=1}^{N}w^{(i)}\tau_v^{(n-i)}\right/[(\Delta t)^{\alpha}+a_v^{(n)}w^{(0)}] \quad (6)$$

ダンパー全体の反力$F_d^{(n)}$は総せん断面積A_sと応力$\tau_v^{(n)}$の積で求められる。

$$F_d^{(n)}=A_s\tau_v^{(n)} \quad (7)$$

計算した応力$\tau_v^{(n)}$と歪 $\gamma_d^{(n)}$ を用いて、吸収したエネルギー密度$\Delta W_d^{(n)}$は以下のように計算される。

$$\Delta W_d^{(n)}=\left.(\tau_v^{(n)}+\tau_v^{(n-1)})(\gamma_d^{(n)}-\gamma_d^{(n-1)})\right/2 \quad (8)$$

時間ステップ n の終了時において、$\Delta W_d^{(n)}$に伴う節点の温度上昇量$\Delta\hat{\theta}_j^{(n)}$は VE 層内で以下のように計算される。

$$\hat{\theta}_j^{(n)}=\frac{1}{2}\left(\left.\Delta W_d^{(n)}\right/s\rho\right),\quad \text{for } j=j_a \text{ and } j_b \quad (9)$$

ここで、$s\rho$は VE 要素の比熱と密度の積である。

次の時間ステップ n+1 の節点温度$\theta_j^{(n+1)}$は、$\Delta\hat{\theta}_j^{(n)}$と熱伝導解析から得られた節点温度$\hat{\theta}_j^{(n)}$から次式で求められる。

$$\theta_j^{(n+1)}=\begin{cases}\hat{\theta}_j^{(n)}+\Delta\hat{\theta}_j^{(n)}, & \text{for VE nodes } (j=j_a \text{ and } j_b)\\ \hat{\theta}_j^{(n)}, & \text{for steel nodes}\end{cases} \quad (10)$$

以上の操作は加振終了まで繰り返す。

4　解析結果

本章では、実験と同じ条件での解析を実施し、実験結果との比較を通じて解析手法の低温条件下における精度を検証する。その後、初期温度および振動数をパラメーターとして複数の解析ケースを行う。

本章の解析において使用した VE 材料（ISD111）のパラメーター値は、$G=3.92$ N/cm^2、$\alpha=0.558$、$a_{ref}=0.000056$、$b_{ref}=2.10$、$p_1=14.06$、$p_2=97.32$、$C_1=0.124$、$C_2=-0.182$ である。また、解析では、熱伝達係数が $\alpha_c=0$ とした。

4.1　解析結果と実験の比較

等価モデルを用いて、実験と同じ加振条件で解析を実施した。Fig. 4 は解析結果と実験結果を合わせて示す。

Fig. 4a は解析で得られた加重平均温度$\bar{\theta}_v^{(n)}$の時刻歴結果を、実験で測定された熱電対による温度測定データ（ダンパー表面、内部、および外部）と合わせて示す。Fig. 4b は貯蔵剛性 K'_d の時刻歴結果である。ここで、貯蔵剛性 K'_d は各サイクルで履歴曲線から最小二乗法により、次式で n 個のデータ点での変位$u_d^{(i)}$と反力$F_d^{(i)}$から求められる。

$$K'_d=\frac{n\sum\left(u_d^{(i)}\cdot F_d^{(i)}\right)-\sum u_d^{(i)}\sum F_d^{(i)}}{n\sum\left(u_d^{(i)}\right)^2-\left(\sum u_d^{(i)}\right)^2} \quad (11)$$

Fig. 4c は履歴曲線を示し、1st、10th、100th、および 1500th サイクルでの解析値（破線）と実験値（実線）を比較する。

解析値は一部で実験値より高い温度を示すが、これは 1 次元モデルが大幅に簡略化されているためであり、特定の計測点での温度応答のような局所応答に誤差が生じやすいためと考えられる。しかし、貯蔵剛性 K'_d の解析値は実験値とよく一致している。また、履歴曲線についても、解析値は実験値をよく再現していることが確認できる。

以上により、解析手法は低温環境下におけるダンパーの動的特性の変化を精度良く再現できることが確認された。

4.2　初期温度・振動数が異なる解析結果の検討

本節は等価モデルを用いて、振幅 10 mm、振動数 $f_r=0.1$、0.5、1.0、3.0 Hz、初期温度 $\theta_{\text{initial}}=-10$℃、0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃の条件下で解析を実施する。

Fig. 5 は各サイクルの貯蔵剛性 $K'_d{}^{[n]}$と第 1 サイクルの貯蔵剛性 $K'_d{}^{[1]}$の比`を示している。初期温度が低いほど K'_d の減少が急速であることが確認できる。K'_d の大量減少は加振開始直後の 500 s 以内に生じており、特に Fig. 5c と Fig. 5d で顕著である。一方、Fig. 5a では初期温度が 30℃以上の場合、K'_d の減少は極めて緩やかであり、特に初期温度 50℃では減少がほとんど見られない。

また、Fig. 5a と 5d を比較すると、振動数が高いほど K'_d の減少がより顕著であることが明らかである。Table 1 に最終サイクルでの K'_d の減少率$\left(1-\left(K'_d{}^{[\text{final}]}/K'_d{}^{[1]}\right)\right)$を示す。初期温度が 10℃以下の場合、振動数に関わらず K'_d は 62%以上減少しており、特に初期温度-10℃では 95%以上の減少が見られる。一方、振動数 3 Hz の場合、K'_d は 67%以上の減少が見られる。

また、振動数 0.1 Hz では異なる初期温度間でも最終的な

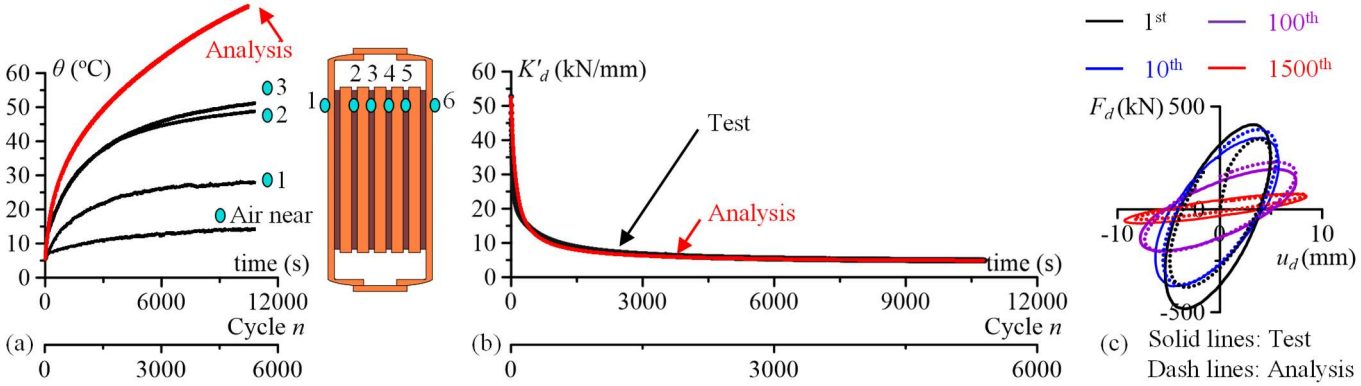


Figure 4. Analysis vs. Test: (a) time-history results of temperature, (b) storage stiffness and (c) hysteresis curves.

$K'_d{}^{[final]}$の値に差異が見られるが、振動数 1.0 Hz では $K'_d{}^{[final]}$ がほぼ安定化している。これは同一の加振期間内において、高い振動数が K'_d をより急速に低下させ、定常状態に到達させることを示している。そのため、初期温度に基づいて計算された K'_d よりも、加振期間全体を通じた VE ダンパーの制振性能をより適切に表現できるものと考えられる。

5 まとめ

本報では、実大複層 VE ダンパーにおいて、初期温度・振動数がもたらす性能の変化の影響を把握するために解析的検討を行った。以下に得られた知見を示す。

解析手法が実験データとよく一致することが確認された。低温条件下においてもダンパー性能評価に有効である。

様々な初期温度での解析により、低温時、特に氷点下では、VE ダンパーの初期剛性は非常に高いものの、加振開始とともに急激に低下し、その後は約初期剛性の 0.1 倍の低い剛性値を維持することが明らかになった。

低温時の高い初期剛性は長く続くことなく、低下後の剛性値こそがダンパーの主要な制振性能となる。本研究で用いた簡易 1 次元解析手法は、この低下後の剛性を予測する有効な手法として活用できる。

参考文献

1) 笠井和彦，所健：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則（その 2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化），日本建築学会構造系論文集，第 561 号，pp.55-63，2002.11

2) Osabel DM，Numerical Modeling Methods for Full-Scale Viscoelastic Dampers subjected to Long-Duration Loading considering Heat Generation and Transfer, 東京工業大学 博士論文，2022.3

3) Kasai K, Osabel DM, Sato D. Dynamic response characterization and simplified analysis methods for viscoelastic dampers considering heat transfer. Earthquake Engng Struct Dyn. 2023; 52: 27–50.

4) Sato D, Liang Q and Osabel DM. Three-Dimensional Finite Element Analysis and Simplified One-Dimensional Analysis Methods for Full-Scale Viscoelastic Damper Considering Strain Sensitivity. Earthquake Engng Struct Dyn. 2024; 0098-8847.

5) 梁其峻，佐藤大樹，Osabel DM：熱伝導・伝達の影響を考慮した複層粘弾性ダンパーの簡易一次元モデル化手法．日本建築学会大会（九州）学術講演会，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，九州大学，2025.09.

Table 1. The changes of K'_d in different initial temperatures and frequencies.

		f_r = 0.1 Hz		f_r = 0.5 Hz		f_r = 1.0 Hz		f_r = 3.0 Hz	
$\theta_{initial}$ (℃)	$K'_d{}^{[1]}$ (kN/mm)	$K'_d{}^{[final]}$ (kN/mm)	$1-\frac{K'_d{}^{[final]}}{K'_d{}^{[1]}}$	$K'_d{}^{[final]}$ (kN/mm)	$1-\frac{K'_d{}^{[final]}}{K'_d{}^{[1]}}$	$K'_d{}^{[final]}$ (kN/mm)	$1-\frac{K'_d{}^{[final]}}{K'_d{}^{[1]}}$	$K'_d{}^{[final]}$ (kN/mm)	$1-\frac{K'_d{}^{[final]}}{K'_d{}^{[1]}}$
-10.00	395.82	5.91	0.95	5.02	0.98	4.83	0.99	3.54	0.99
0.00	192.97	5.89	0.84	5.01	0.94	4.83	0.96	3.54	0.99
10.00	85.47	5.83	0.62	5.01	0.84	4.83	0.90	3.54	0.96
20.00	40.61	5.69	0.37	5.01	0.69	4.83	0.78	3.54	0.92
30.00	22.37	5.48	0.18	4.99	0.50	4.82	0.63	3.54	0.85
40.00	14.30	5.24	0.08	4.97	0.34	4.82	0.48	3.53	0.77
50.00	55.98	5.03	0.03	4.94	0.22	4.81	0.34	3.53	0.67

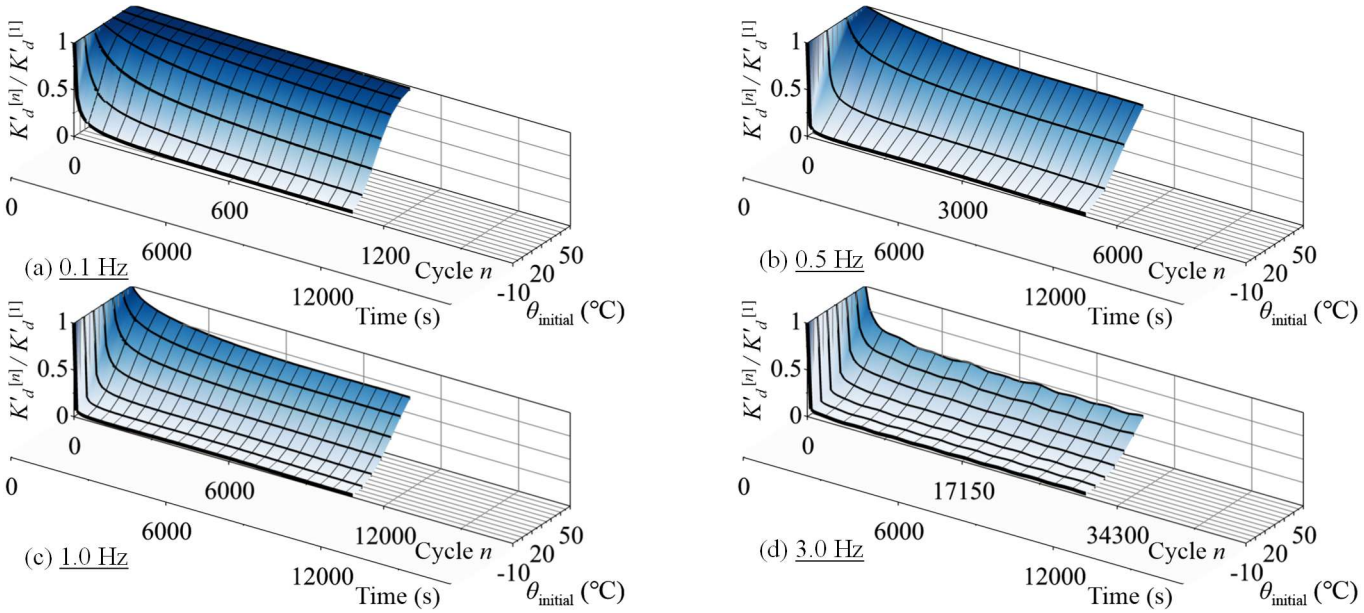


Figure 5. K'_d ratio under different initial temperatures using frequency = (a) 0.1 Hz, (b) 0.5 Hz, (c) 1.0 Hz and (d) 3.0 Hz.

*1 東京科学大学　博士課程

*2 東京科学大学　准教授・博士（工学）

*3 チョンナム大学　韓国　博士研究員

* PhD. Student, Institute of Science Tokyo *1

* Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.*2

* Postdoctoral Researcher, Chonnam National University, South Korea, PhD.*3